

1 Kd 值的定义

$$K_d = \frac{\text{沉积物单位质量中所含的核素浓度 (Bq/kg)}}{\text{水体单位体积中核素浓度 (Bq/L)}}$$

其中推荐的放射性核素河床沉积物评价模式计算放射性核素在河床中的沉积量：为

$$S = \rho d K_d C_w (1 - e^{-\lambda T_e}) / \lambda T_e$$

S: 放射性核素在沉积层中的有效沉积量, Bq/m²;

K_d: 放射性核素在河床沉积物中的分配系数, L/kg;

C_w: 放射性核素在水中的浓度, Bq/L;

ρ: 沉积物密度, kg/m³;

λ: 放射性核素的衰变常数, s⁻¹;

T_e: 有效累积时间, s; (推荐值: 3.15×10⁷s);

d: 放射性核素底部有效沉积厚度, (推荐值: d=5cm)。

2 放射性核素在内陆水体中吸附实验研究

2.1 吸附实验基本原理和方法

2.2.1 核素在地表水中的吸附机理

核素迁移是吸着过程和水力传输过程两种作用相结合的结果，因此研究包括介质对核素的吸着作用与水力传输作用引起的核素迁移两个方面。核素在水中以离子、络离子、分子、胶体等形态随水的流动而迁移，当流经土壤时，发生复杂的物理化学反应，产生吸附、形成沉淀等过程，从而使核素的迁移受到阻滞，使其迁移速度远远小于水流速度。由于核素与土壤—水体系的相互作用十分复杂，作用机理也不止一种。一般普遍认为的反应机理包括：离子交换吸附、电性吸附、分子吸附、过滤、沉淀、表面络合和矿化等。

传统上认为吸附反应平衡常数是由状态函数（吸附密度与溶质浓度之比）定义的，因此任何一个吸附反应在一定条件下（温度、压力、pH、离子强度等）达到平衡时，都有一个唯一确定的平衡常数值。通常用平衡分配系数 K_d 来表示放射性核素被吸附的程度。由于存在沉淀-溶解、水解作用、配合作用和吸附-解吸作用，一般情况下放射性核素的迁移要比地表水迁移的速度慢。这些延迟作用也可以用分配系数 K_d 来表示。

“Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001)”的规定进行 K_d 值的计算，其中对 K_d 的定义如下：

$$K_d = \frac{\text{沉积物单位质量中所含的核素浓度 (Bq/kg)}}{\text{水体单位体积中核素浓度 (Bq/L)}}$$

由于核素迁移的反应机理复杂多样，多种因素对放射性核素在河流-沉积物中吸附规律的影响是国内外相关研究的主要内容之一。排入河流的放射性核素发生复杂的物理化学行为，最终以3种形态存在：离子态、胶态和颗粒态。水溶液pH值改变，核素的物理化学形态和沉积物表面形态可能会发生改变，其 K_d 值也可能变化。河流沉积物质量浓度不同，核素的 K_d 值也不同， K_d 值与现场的实际情况密切相关。河流和沉积物中有机物的含量及种类与 K_d 值密切相关，皆影响核素的 K_d 值。其他影响因素包括沉积物粒径、水体温度、水中离子强度等，多种因素的影响作用是 K_d 值测定方法学必须要考虑的内容。

2.2.2 核素吸附实验方法

20 世纪 80 年代, 国外就已关注河流中放射性核素的行为, 美国核管会(NRC)就放射性核素在水体中的吸附和解吸进行了详细研究^[4-7], 内容包括方法学、多种因素的影响作用、渗透实验等。NRC 提出实验室测定河流中核素 K_d 值的方法包括: (1) 薄层技术 (Thin-layer technique), 该方法中水的扰动影响沉积物的吸附, 而且沉积物吸附在滤纸上的效果不佳, 该方法的重现性差; (2) 沉积技术 (Sedimentation technique), 需定时补充沉积物, 该方法适用于粒径大的沉积物; (3) 渗透法, 该法使用渗透膜装置, 主要用于对核素不同化学形态吸附的鉴别, 操作较为繁琐; (4) 静态法 (Batch sorption method), 准确度高, 重现性好, 此方法是实验室测定 K_d 的首选方法。

美国材料实验协会 (ASTM) 2003 年出版了标准 D4646-03 《土壤和沉积物对污染物吸附 24 小时批式测量法》, 2008 年进行了重新修订。美国塞纳河实验是在对 VC SUMMER 核电站的附近流域的沉积物对放射性核素吸附分配系数测量时采用了该标准方法^[8,9]。

美国北太平洋实验室 2003 年出版的 PNNL-13895 报告《Hanford 污染物分配系数数据库和使用手册》^[10]中给出了一些核素分配系数的范围以及如何根据样品的类型 (沉积物, 岩石, 沙等)、粒径和现场条件 (如 pH, 地下水迁移、地表水沉积) 选取分配系数。

我国尚未存在分配系数 K_d 的标准测量方法, 我国核安全导则 HAD101-05 《核电厂厂址选择中的放射性物质水力弥散问题》的附录 II 介绍了沉积物平衡沉积分布系数的测量方法。放射性核素在沉积物和水相之间的平衡分布系数 K_d 定义为:

$$K_d = C_s / C$$

式中: C_s ——沉积物中的放射性核素浓度, 以单位干重的沉积物中的放射性浓度表示;

C ——水中的放射性核素浓度, 以单位体积水中的放射性核素浓度表示。

分布系数 K_d 的量纲是体积/质量。

具体方法如下:

取量 M 的沉积物与体积 V 的表层水在烧杯内混合, 烧杯置于电磁搅拌器上, 在零时刻, 加已知量的放射性核素于烧杯内, 然后, 在各个特定的时刻, 从烧杯中取出水样, 通过 $0.45 \mu m$ 微孔滤纸过滤, 并测量其放射性核素浓度。分配系数

Kd 由下式计算

$$K_d = \frac{V}{M} \left(\frac{C_0}{C_\infty} - 1 \right)$$

式中： C_0 ：零时刻水中的核素浓度；

C_∞ ：达到平衡后水中的核素浓度。

必须注意，保证有足够长的接触时间来使它达到平衡。对所研究的每种核素，应重复进行这种测量。

研究放射性核素在地表水中迁移时，目前常用的测定分配系数的方法有实验室静态批式法和现场示踪实验法，另外在研究核素在地下水迁移时还用到实验室土柱实验法。

1) 实验室静态批式法的基本操作是先将样品进行预处理和分选，将含有放射性核素的溶液与一定粒径的岩土混合，其固液比一般介于 1:10~1:20 g/ml，在振荡下长时间混合，直到水溶液中核素浓度稳定为止，然后通过离心使固液相分离取液体、固体样，经过物理和化学处理后测量各自的比活度。达到吸附平衡后，固体吸附核素的比活度与液体的比活度之比为吸附平衡条件下的分配系数 K_d 。实验应取现场水样和岩土样，注意样品保存。利用静态批式法还可以分析岩土样粒径、水样 pH 值、溶液中放射性核素化学浓度等条件对放射性核素分配系数的影响。这种方法相对简单，实验周期较短，适用于大量岩土样品或多种核素的分配系数测量。

2) 现场示踪实验的基本操作是在现场钻孔（包括示踪剂投放孔和多个取样监测孔），在示踪剂投放孔中同时或先后瞬时投入测量地下水流速示踪剂（如 Cl、Br 和 I 的化合物，或氡化水）和待研究的一种或几种核素，在监测孔定时取水样分析水流流速示踪剂和核素浓度，从而确定水流和核素迁移速度，进而通过计算得出该核素的滞留因子和分配系数，合理布置钻孔位置及数量还可以得出弥散系数。与实验室批式法和土柱法比较，现场示踪实验尺度大，更能真实的代表实际条件。现场示踪实验前需要比较清楚地了解实验区内岩土特性和地下水流场，对待测核素在现场岩土的吸附滞留能力要有初步估计，并配备满足现场需要的各类示踪剂的测量仪器，对实验结果进行计算预测，以便指导钻孔布置、确定最低合理的水流速示踪剂和核素的投放量、预计各监测孔的开始采样时间和采样时间间隔。实验设备复杂，人力和物力投入高，还要避免钻孔对地质介质和地下水流

场的扰动，特别是对于受到强烈吸附滞留的核素实验周期长，花费很大，要有充分的野外作业后勤保障，并且开展野外现场放射性核素示踪实验还需要得到当地环保部门批准。

2) 实验室土柱实验法可采用无扰动的原状土柱，或针对特定岩土的研究而采用回填土柱。基本操作是首先在土柱建立稳定流场，然后瞬时加入、或以恒定速率加入含有放射性核素的溶液，或在土柱上部填埋放射性核素。根据土柱下端流出液中核素浓度与时间的关系（成为穿透曲线），或根据测定土柱中的核素浓度分布（土柱外直接测量，或解体土柱取样测量），即可求得水流流速与核素迁移速度之比，即核素在土柱介质中的延迟因子，进而有延迟因子与分配系数的关系求得分配系数。土柱实验法与批式法相比，可以较好的模拟现场的水流条件，同时不仅可以获得分配系数，还可以获得另外一个核素迁移的重要参数——弥散系数。但土柱实验不适于大量岩土样品或多种核素的分配系数测量，实验设备较复杂，对于吸附滞留能力较强的核素其实验周期长。

中国辐射防护研究院的王志明，李书绅等用实验室土柱实验法对 ^{85}Sr 在黄土包气带和非饱和黄土中的迁移规律进行研究。测量 ^{85}Sr 在黄土中迁移的延迟系数 R_d ^[11, 12]。

中国辐射防护研究院与日本原子力研究所的郭择德，田中忠夫等人用放射性核素现场示踪法在 1998 年在野外试验场开展了为期二年的包气带中 ^3H 、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr 和 ^{134}Cs 的迁移试验^[13]。

方法的选取需要综合分析这三种方法的优缺点并结合工程进度的需求。表 2.1-1 给出了 3 种测量 K_d 值方法的比较。静态批式法是被广泛使用的一种方法，它的实验条件比较简单，可同时进行大量的平行实验，且实验周期较短。本次实验需要对多种土壤矿物对不同放射性核素的吸附特性进行研究，需要控制在一定的条件，做不同核素之间的竞争吸附实验需要对化学浓度进行控制，做大量的平行样和不同化学浓度的比较，样品量大，而且实验周期受一定限制，静态批式法比较适合，因此本研究核素吸附特性模拟实验采用静态批式法进行。

我国尚未存在分配系数 K_d 的标准测量方法，本研究实验方法在大量的实验经验的基础上，同时参考国外的测量方法后综合得出的，包括：美国材料与试验协会（ASTM）颁布的 C1733^[14]与 D4646^[8]标准，以及核电站的测量报告^[9, 15]。

表 2.1-1 分配系数 K_d 测量方法比较

方法	实验室静态批式法	实验室土柱实验法	现场示踪实验
适用条件	样品量大，测量条件控制	模拟核素现场迁移条件	特定场地核素迁移研究
优点	周期短，方法简单，实验条件容易控制，可作不同粒径，pH 值等不同条件的实验。	可较好模拟现场条件，可得到核素在岩土中迁移的延迟系数 R_d	可以准确反映核素在现场条件下的迁移规律
缺点	无法完全模拟现场条件	实验周期长，实验设备复杂	周期长，花费大，需得到环保部门批准。
应用	沉积物和地下岩土等多种介质的 K_d 测量，核素在地表水和地下水迁移吸附特性研究	核素在地下水迁移研究	现场核素在地下水和地表水迁移研究

2.2 典型厂址实验研究

2.2.1 河南南阳

2.2.1.1 流域概况

核电厂位于鸭河口水库岸边，循环水系统拟采用带自然通风冷却塔的循环冷却水系统，在水库取水，排水口设置在水库水电站下的尾水渠处。

鸭河口水库为是一座以防洪灌溉为主，兼有发电、养殖、城市供水效益的综合利用大型水库，发电为结合灌溉进行，利用灌溉放水及多余弃水进行发电，不设专用发电库容，无保证率，电站机组满发流量为 $70\text{m}^3/\text{s}$ ，右岸电厂汛期发电最小流量约为 $3.2\text{m}^3/\text{s}$ 。

放射性液态流出物由专门管道输送至水库大坝下游的尾水渠处排放，即排入白河。鸭河口水库建成后，其下游河段的径流受水库调度影响，以水库引水灌溉为主。

2.2.1.2 样品的采集

为了使分配系数 K_d 的测定条件更接近现场实际情况，直接采用水库下游的水作为吸附实验的水样。根据现场实际情况，土壤样品则收集了两种，一种为淤泥，一种为沙土，分别测其分配系数。取样点位置见图 2.2.1-2。

2008 年 6 月 2 日，进行了土壤样品和水样的采集。采样位置分别在水库下游 2km 处和南阳市区白河边上。采样图见图 2.2.1-3~2.2.1-5。

白河河水清澈，悬沙很少（见图 2.2.1-4）。河床表层覆盖有卵石，卵石粒径较大（见图 2.2.1-3、图 2.2.1-4），主要是粒径 5cm 以上的卵石。在少数低洼处（主要为采砂坑等人为活动造成的）的淤泥较厚（见图 2.2.1-5），淤泥样在采砂坑中采集。沙土则采集卵石下面的沙子，沙子粒径较大。沙样代表白河河床，白河河水浅，淤泥区域很少。南阳市区河道中没有大面积的淤泥，和水库坝下一样，仅有一些分布不均的淤泥区。

为尽量避免水样的化学性质发生变化，采集后用塑料桶密封盛装水样，运输回实验室在 4°C 下进行冷藏保存。

2.2.1.3 核素吸附特性模拟实验

核素吸附特性模拟实验采用批式法，其操作过程是先将样品进行预处理和分选，再将其与含有某种核素的水溶液（已知浓度）在振荡下长时间混合，直到水溶液中核素浓度稳定为止，然后进行离心使固液相分离，最后分别测定固相和液

相中的核素浓度。通过计算固、液相中的核素浓度之比即可得出分配系数 K_d 。

测定分配系数实验中的影响因素很多，核素形态、固相介质、水的成分、固液比、PH 值等都可能影响分配系数 K_d 。对上述因素进行综合考虑后，并结合以往的一些研究成果，初步拟定实验中选取固液比 1:10g/ml，PH=7~8。在此基础上进行了不同的粒径对四种核素分配系数的影响实验及水相 PH 值的变化对分配系数的影响实验。所有实验均在室温下进行。

根据放射性废液排放源项，并综合考虑核素的半衰期、毒性等，确定了四种有代表性的放射性核素 Ru、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr ，用静态批试法进行核素吸附特性的模拟实验。

1) 粒径分布

对泥和沙两种样品分别进行筛分预处理，得到两种样品的粒径分布见表 2.2.1-1。

由上表可以看出，沙中以粗砂、中砂为主，而泥中主要为细砂和粉粘粒。

实验时每个试验管所用沙子和泥均为 1g，按照各个粒径所占质量的组分称重，并将其混合均匀。沙和泥的实验组成如表 2.2.1-2。

2) 土样的化学成分分析及矿物组成

土壤矿物质是岩石经物理风化作用和化学风化作用形成的，占土壤固相部分总重量 90% 以上。土壤粘粒矿物是土壤矿物质中最活跃的部分，它的类型决定了土壤对放射性核素吸附能力的大小。由于土壤的物质组成和化学成分等条件都会影响土壤介质对核素的吸附性能，进而影响到分配系数，因而在进行吸附实验前，需要对土样的理化性质进行测试和分析。

土壤的矿物组成由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心河南省岩石矿物测试中心进行测定，化学成分分析由国土资源部太原矿产资源监督检测中心进行分析，测得的矿物组成和化学成分结果列于表 2.2.1-3 和 2.2.1-4。

由此可见，这两种样品主要化学成分均以 SiO_2 为主，含量分别为沙中 71.04% 和泥中 55.80%。 Al_2O_3 含量约为 13%。其余还有少量的 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 等。

因此，沙和泥中主要含氧化物矿物，如石英、长石，其中石英占了很大的比重，为 25%。次生粘土矿物有云母(伊利石)、绿泥石等，其中云母约 15% 左右，绿泥石约 5%。南阳市区和水库坝下河道的沙样的矿物组分接近，泥中有少量的

铁泥有机质。

3) 水样的化学成分分析

同样, 水样的化学性质(如 PH 值)也会影响分配系数的大小, 且水样中无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响, 因此用 ICP-MS 对水样的 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 和 ^{88}Sr 本底进行了测量, 结果见表 2.2.1-5。

水库取样点附近的水外观清澈、无沉淀, PH 呈弱碱性。水中在 ICP-MS 检测限内没有检出钴和铯, 说明水的本底中基本没有钴和铯或者钴和铯的含量极低。而锶的含量为 $1.004 \times 10^{-6} \text{mol/L}$, 即说明现场水库的水中锶的含量较高。

4) 吸附实验过程

取 15ml 的聚乙烯塑料离心管, 洗净后晾干, 向每个离心管中加入 9.2ml 的溶液, 溶液为现场所取的水库水样, 再称取 (1 ± 0.002) 克的泥/沙放入管中, 盖紧盖子, 摇匀, 静置七天。吸附实验开始后向盛有泥/沙和水的离心管中加入 0.8ml 含放射性核素的溶液, 溶液中四种核素 (^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 Ru) 的投放量按照仪器的最低检测限来定, 具体四种核素在每个离心管中的投放量见表 2.2.1-6。立即将之振荡使固液充分混合, 并且在实验时间内每天都要放入振荡器中振荡两次(上午下午各一次, 每次不少于 60 分钟)。间隔不同时间取样测量, 直至吸附平衡为止, 计算分配系数 K_d 。

5) 吸附实验结果

吸附实验共进行了近两个月, 实验条件及测量方法见表 2.2.1-7。

(1) ^{60}Co 吸附实验结果

在加入 ^{60}Co 后的第 1、3、6、10、50 天进行取样, 每次取三个平行样(最后一位数字-1、-2、-3 为平行样编号)。先将试管离心三十分钟, 然后分别取出管中的液体和固体。液体直接测量活度, 然后计算其比活度, 固体则先烘干, 在烘箱中自然降温后称重测量其活度, 将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度, 再算得固相的比活度; 最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数 K_d 。 σ_{K_d} 为测量的统计误差。

^{60}Co 的吸附实验结果见表 2.2.1-8。

^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.1-6。

由图表可以看出, ^{60}Co 在沙中的分配系数很小, 只有 3.3L/kg , 而且基本在加入 ^{60}Co 后第 1 天就达到吸附平衡。在泥中分配系数接近 2300L/kg , 在加入 ^{60}Co

后第 3 天也基本达到吸附平衡。

(2) ^{137}Cs 吸附实验结果

在加入 ^{137}Cs 后的第 1、3、6、10、50 天进行取样，取样过程同上。

^{137}Cs 的吸附实验结果见表 2.2.1-9。

^{137}Cs 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.1-7。

由图表可以看出， ^{137}Cs 在沙中的分配系数有 700~800L/kg，基本在加入 ^{137}Cs 后第 2~3 天达到吸附平衡。在泥中分配系数接近 5400L/kg，基本在加入 ^{137}Cs 后第 5~6 天就达到吸附平衡

(3) ^{90}Sr 吸附实验结果

在加入 ^{90}Sr 后的第 15、31、45、50 天进行取样，取样过程同上。 ^{90}Sr 的吸附实验结果见表 2.2.1-10。 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.1-8。

由图表可以看出， ^{90}Sr 在沙中的分配系数很小，约为 6L/kg，在泥中分配系数有 12L/kg，这可能与前面测得的水中锶本底值很高有关。由于现场锶本底值很高，减少了 ^{90}Sr 的吸附。

(4) Ru 吸附实验结果

在加入 Ru 后的第 12、28、43、50 天进行取样，取样过程同上。

Ru 的吸附实验结果见表 2.2.1-11。

Ru 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.1-9。

由图表可以看出，Ru 在沙中的分配系数有 40~50L/kg，在泥中分配系数接近 1000L/kg。

6) 解吸实验结果

将吸附实验平衡以后的最后两组试样离心分离，取出沙和泥烘干后称重，按 1:10 的固液比加入河水，然后进行解吸实验，其过程与吸附实验相同。在第 25 天和第 50 天分别测量和计算出固相和液相的比活度，再计算固、液相中的核素浓度之比即为解吸分配系数 K_d 。

(1) ^{60}Co 解吸实验结果

^{60}Co 的解吸实验结果见表 2.2.1-12。

^{60}Co 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 110L/kg，在泥中的平均值为 3900L/kg。与吸附实验结果相比， ^{60}Co 在沙中吸附分配系数的平均值为 3.3L/kg，

在泥中的平均值为 2300L/kg，解吸实验分配系数要大于吸附实验分配系数。

(2) ^{137}Cs 解吸实验结果

^{137}Cs 的解吸实验结果见表 2.2.1-13。

^{137}Cs 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 13000L/kg，在泥中的平均值为 47000L/kg。与吸附实验结果相比， ^{137}Cs 在沙中吸附分配系数的平均值为 780L/kg，在泥中的平均值为 5400L/kg，解吸实验分配系数要大于吸附实验分配系数。

(3) ^{90}Sr 解吸实验结果

^{90}Sr 的解吸实验结果见表 2.2.1-14。

^{90}Sr 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 36L/kg，在泥中的平均值为 27L/kg。与吸附实验结果相比， ^{90}Sr 在沙中吸附分配系数的平均值仅为 6.0L/kg，在泥中的平均值为 12L/kg，表明解吸实验分配系数值略大于吸附实验分配系数。

(4) Ru 解吸实验结果

Ru 的解吸实验结果见表 2.2.1-15。

Ru 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 980L/kg，在泥中的平均值为 350L/kg。与吸附实验结果相比，Ru 在沙中吸附分配系数的平均值仅为 44L/kg，在泥中的平均值为 1000L/kg，表明解吸实验分配系数值大于吸附实验分配系数。

四种核素解吸过程的分配系数大于吸附过程的分配系数说明解吸过程比吸附过程缓慢。因此，在考虑沉积物的吸附和解吸两种作用的影响时仅考虑吸附作用是比较合理的。

四种核素的解吸实验结果见图 2.2.1-10。

2.2.1.4 PH 实验结果

加入盐酸改变 Ru 溶液 PH 值，其它条件不变，测量其分配系数。水相 PH 值的变化对分配系数的影响见表 2.2.1-16。PH 值对 Ru 分配系数的影响见图 2.2.1-11。

由图表可见，水相 PH 值的变化对 Ru 在泥和沙中分配系数的影响是很大的，在 PH=4~8 范围内，Ru 在泥和沙中分配系数随水相 PH 值的升高而增大，且水相 PH 值对沙中分配系数的影响较为明显，对泥中分配系数的影响则要小一些。

2.2.1.5 不同粒径实验结果

将沙子和泥分成不同的粒径，测量不同的粒径对分配系数的影响。沙子共做了三组，粒径分别为 0.2~0.3mm、0.125~0.15mm 和 0.125mm 以下；同样泥也

做了三组，分别为 0.08~0.095mm、0.075~0.08mm 及 0.075mm 以下。每种样品做两个平行样，固体样品均加入 1g 左右，放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 及 Ru 各约 0.8ml，固液比 1:10。在实验时间内将实验管每天放入振荡器中振荡，放置 30 天后进行取样。实验结果见表 2.2.1-17~表 2.2.1-20。不同核素分配系数随粒径的变化曲线见图 2.2.1-12~2.2.1-13。

可以看出，核素在沙中的分配系数随着颗粒粒径的减小而增大，其变化很明显，这主要是由于随着颗粒粒径减小，颗粒比表面积增大，表面吸附能力增强，有利于各种核素的吸附，从而使分配系数增大；而在泥中的分配系数变化不大，基本变化趋势不太明显，主要因为不同泥的粒径差别不大，比表面积也差别不大，其吸附性能基本相同。

表 2.2.1-1 样品中各粒径的质量组分

分子筛(目)	粒径(mm)	泥(%)	沙(%)
20~40	0.45~0.9		29.16
40~60	0.3~0.45		27.87
60~80	0.2~0.3		20.56
80~100	0.15~0.2		10.83
100~120	0.125~0.15		5.00
120~140	0.105~0.125		0.60
140~160	0.095~0.105	37.18	3.67
160~180	0.08~0.095	0.15	0.12
180~200	0.075~0.08	16.82	0.98
>200	<0.075	45.85	1.22

表 2.2.1-2 样品中各粒径的质量组分(%)

1g 沙	粒径(目)	20~40	40~60	60~80	80~100	100~200
	粒径(mm)	0.45~0.9	0.3~0.45	0.2~0.3	0.15~0.2	0.075~0.15
	质量组分	29	28	20	11	12
1g 泥	粒径(目)	140~160		160~200		>200
	粒径(mm)	0.095~0.105		0.075~0.095		<0.075
	质量组分	37		17		46

表 2.2.1-3 土壤中各主要化学成分的质量组分(%)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
沙	71.04	13.92	4.24	0.32	2.92	1.36	3.05	3.69
泥	55.80	13.27	5.49	8.60	7.68	2.15	2.10	2.57

表 2.2.1-4 土壤中各矿物质的质量组分(%)

样品	石英	斜长石	钾长石	伊利石	蒙脱石	角闪石	绿泥石	高岭石	方解石	蛇纹石	有机质
沙 1	25	20	20	10~15	10	5~10	5	少量	-	-	-
沙 2	30~35	20	25	10~15	2~3	2~3	2~3	-	-	2~3	-
泥	25	13	7	15	5	5	5	-	10	5~10	5~10

注：沙 1 取样位置为水库坝下，沙 2 的取样位置在南阳市区。

表 2.2.1-5 水样 pH 值和 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 、 ^{88}Sr 的含量(mol/L)

分析项目	外观描述	pH	本底值		
			^{59}Co	^{133}Cs	^{88}Sr
水样	澄清, 无沉淀	7.76	$\leq 1.697 \times 10^{-8}$	$\leq 7.524 \times 10^{-9}$	1.004×10^{-6}

表 2.2.1-6 每个试样吸附实验中各核素的投放量

核素	Co	^{137}Cs	^{90}Sr	Ru
化学浓度(mol/l)	8.50×10^{-8}	2.27×10^{-9}	3.30×10^{-9}	4.54×10^{-5}
投放量	$8.47 \times 10^3 \text{Bq}$	$8.02 \times 10^3 \text{Bq}$	$1.17 \times 10^4 \text{Bq}$	$3.18 \times 10^{-8} \text{mol}$

表 2.2.1-7 吸附实验条件及测量方法

实验条件	水	土	运输及储存	实验温度
		白河水样	沉积物样品	低温密封, 冷藏
测量方法	Ru	^{137}Cs	^{60}Co	^{90}Sr
	ICP-MS	γ 谱	γ 谱	放化分析(液闪) / γ 谱

表 2.2.1-8 ^{60}Co 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
沙	Co-1-1	1	6.16×10^5	2.24×10^6	3.6×10^0	7.3×10^{-1}
	Co-1-2	1	6.40×10^5	2.29×10^6	3.6×10^0	6.9×10^{-1}
	Co-1-3	1	6.03×10^5	2.14×10^6	3.6×10^0	8.2×10^{-1}
	Co-2-1	3	6.49×10^5	2.03×10^6	3.1×10^0	6.7×10^{-1}
	Co-2-2	3	6.54×10^5	2.00×10^6	3.1×10^0	6.7×10^{-1}
	Co-2-3	3	6.94×10^5	2.22×10^6	3.2×10^0	6.5×10^{-1}
	Co-3-1	6	6.54×10^5	2.04×10^6	3.1×10^0	6.2×10^{-1}
	Co-3-2	6	5.96×10^5	2.02×10^6	3.4×10^0	7.6×10^{-1}
	Co-3-3	6	6.05×10^5	2.12×10^6	3.5×10^0	7.5×10^{-1}
	Co-4-1	10	6.12×10^5	1.96×10^6	3.2×10^0	6.9×10^{-1}
	Co-4-2	10	6.32×10^5	2.13×10^6	3.4×10^0	6.3×10^{-1}
	Co-4-3	10	6.19×10^5	1.97×10^6	3.2×10^0	6.3×10^{-1}
	Co-5-1	50	6.24×10^5	2.05×10^6	3.3×10^0	7.8×10^{-1}
	Co-5-2	50	6.30×10^5	2.19×10^6	3.5×10^0	6.6×10^{-1}
	Co-5-3	50	6.16×10^5	1.91×10^6	3.1×10^0	6.6×10^{-1}
泥	Co-9-1	1	1.73×10^4	8.57×10^6	5.0×10^2	1.0×10^2
	Co-9-2	1	1.67×10^4	8.67×10^6	5.2×10^2	1.2×10^2
	Co-9-3	1	1.65×10^4	8.58×10^6	5.2×10^2	7.5×10^1
	Co-10-1	3	3.19×10^3	8.83×10^6	2.8×10^3	8.0×10^2
	Co-10-2	3	3.13×10^3	8.72×10^6	2.8×10^3	7.4×10^2
	Co-10-3	3	3.41×10^3	8.75×10^6	2.6×10^3	6.5×10^2
	Co-11-1	6	2.48×10^3	8.59×10^6	3.5×10^3	1.3×10^3
	Co-11-2	6	2.97×10^3	8.35×10^6	2.8×10^3	8.2×10^2
	Co-11-3	6	3.08×10^3	8.37×10^6	2.7×10^3	7.5×10^2
	Co-12-1	10	3.47×10^3	8.59×10^6	2.5×10^3	6.8×10^2
	Co-12-2	10	3.69×10^3	8.76×10^6	2.4×10^3	6.2×10^2
	Co-12-3	10	3.42×10^3	8.68×10^6	2.5×10^3	7.9×10^2
	Co-13-1	50	4.18×10^3	9.08×10^6	2.2×10^3	5.4×10^2
	Co-13-2	50	4.04×10^3	9.19×10^6	2.3×10^3	5.3×10^2
	Co-13-3	50	4.13×10^3	8.82×10^6	2.1×10^3	4.9×10^2

表 2.2.1-9 ^{137}Cs 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	Cs-1-1	1	1.53×10^4	7.96×10^6	5.2×10^2	3.9×10^1
	Cs-1-2	1	1.41×10^4	7.47×10^6	5.3×10^2	4.2×10^1
	Cs-1-3	1	1.42×10^4	7.78×10^6	5.5×10^2	4.0×10^1
	Cs-2-1	3	1.03×10^4	7.63×10^6	7.4×10^2	6.8×10^1
	Cs-2-2	3	1.05×10^4	7.63×10^6	7.3×10^2	6.1×10^1
	Cs-2-3	3	1.01×10^4	7.42×10^6	7.4×10^2	5.6×10^1
	Cs-3-1	6	9.62×10^4	8.02×10^6	8.3×10^2	8.1×10^1
	Cs-3-2	6	1.00×10^4	7.89×10^6	7.9×10^2	7.7×10^1
	Cs-3-3	6	9.87×10^3	8.05×10^6	8.2×10^2	6.8×10^1
	Cs-4-1	10	9.91×10^3	7.78×10^6	7.8×10^2	6.5×10^1
	Cs-4-2	10	1.09×10^4	8.01×10^6	7.3×10^2	6.0×10^1
	Cs-4-3	10	1.04×10^4	7.63×10^6	7.4×10^2	5.8×10^1
	Cs-5-1	50	1.00×10^4	7.70×10^6	7.7×10^2	6.0×10^1
	Cs-5-2	50	1.08×10^4	8.17×10^6	7.6×10^2	6.5×10^1
	Cs-5-3	50	1.05×10^4	7.55×10^6	7.2×10^2	5.8×10^1
泥	Cs-9-1	1	5.19×10^3	9.12×10^6	1.8×10^3	1.5×10^2
	Cs-9-2	1	5.20×10^3	9.20×10^6	1.8×10^3	1.4×10^2
	Cs-9-3	1	5.02×10^3	9.16×10^6	1.8×10^3	1.6×10^2
	Cs-10-1	3	3.13×10^3	9.29×10^6	3.0×10^3	3.9×10^2
	Cs-10-2	3	3.57×10^3	9.78×10^6	2.7×10^3	3.1×10^2
	Cs-10-3	3	2.76×10^3	9.44×10^6	3.4×10^3	4.0×10^2
	Cs-11-1	6	1.71×10^3	9.54×10^6	5.6×10^3	9.3×10^2
	Cs-11-2	6	1.57×10^3	9.19×10^6	5.8×10^3	1.2×10^3
	Cs-11-3	6	1.97×10^3	9.17×10^6	4.7×10^3	7.5×10^2
	Cs-12-1	10	1.71×10^3	9.05×10^6	5.3×10^3	9.5×10^2
	Cs-12-2	10	1.77×10^3	9.88×10^6	5.6×10^3	9.9×10^2
	Cs-12-3	10	1.74×10^3	9.18×10^6	5.3×10^3	9.8×10^2
	Cs-13-1	50	1.73×10^3	8.96×10^6	5.2×10^3	9.9×10^2
	Cs-13-2	50	1.75×10^3	1.01×10^7	5.8×10^3	9.5×10^2
	Cs-13-3	50	1.76×10^3	9.09×10^6	5.2×10^3	9.8×10^2

表 2.2.1-10 ^{90}Sr 吸附分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}
沙	Sr-1-1	15	7.89×10^5	4.27×10^6	5.4×10^0	2.6×10^{-1}
	Sr-1-2	15	7.80×10^5	4.37×10^6	5.6×10^0	2.7×10^{-1}
	Sr-1-3	15	8.11×10^5	4.26×10^6	5.3×10^0	2.7×10^{-1}
	Sr-2-1	31	5.95×10^5	4.42×10^6	7.4×10^0	3.7×10^{-1}
	Sr-2-2	31	6.20×10^5	4.56×10^6	7.4×10^0	3.7×10^{-1}
	Sr-2-3	31	6.28×10^5	4.26×10^6	6.8×10^0	3.4×10^{-1}
	Sr-3-1	45	7.77×10^5	4.45×10^6	5.7×10^0	2.7×10^{-1}
	Sr-3-2	45	7.89×10^5	4.78×10^6	6.1×10^0	2.8×10^{-1}
	Sr-3-3	45	7.56×10^5	4.78×10^6	6.3×10^0	3.0×10^{-1}
	Sr-4-1	50	7.67×10^5	4.66×10^6	6.1×10^0	2.9×10^{-1}
	Sr-4-2	50	7.76×10^5	4.31×10^6	5.6×10^0	2.6×10^{-1}
	Sr-4-3	50	7.63×10^5	4.33×10^6	5.7×10^0	2.7×10^{-1}
泥	Sr-9-1	15	6.77×10^5	9.13×10^6	1.3×10^1	6.3×10^{-1}
	Sr-9-2	15	6.60×10^5	9.49×10^6	1.4×10^1	6.5×10^{-1}
	Sr-9-3	15	7.01×10^5	9.57×10^6	1.4×10^1	6.1×10^{-1}
	Sr-10-1	31	4.99×10^5	1.04×10^7	2.1×10^1	1.0×10^0
	Sr-10-2	31	5.42×10^5	1.06×10^7	2.0×10^1	9.6×10^{-1}
	Sr-10-3	31	4.81×10^5	1.01×10^7	2.1×10^1	1.0×10^0
	Sr-11-1	45	7.69×10^5	8.36×10^6	1.1×10^1	5.3×10^{-1}
	Sr-11-2	45	6.37×10^5	6.45×10^6	1.0×10^1	5.6×10^{-1}
	Sr-11-3	45	7.04×10^5	8.75×10^6	1.2×10^1	6.1×10^{-1}
	Sr-12-1	50	7.24×10^5	8.62×10^6	1.2×10^1	6.0×10^{-1}
	Sr-12-2	50	7.34×10^5	8.55×10^6	1.2×10^1	5.9×10^{-1}
	Sr-12-3	50	6.83×10^5	8.68×10^6	1.3×10^1	6.3×10^{-1}

表 2.2.1-11 Ru 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液体浓度 (mol/L)	固体浓度 (mol/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	Ru-1-1	12	1.24×10^{-6}	2.00×10^{-5}	1.6×10^1	2.1×10^0
	Ru-1-2	12	1.28×10^{-6}	1.90×10^{-5}	1.5×10^1	1.9×10^0
	Ru-1-3	12	1.14×10^{-6}	2.05×10^{-5}	1.8×10^1	2.3×10^0
	Ru-2-1	28	1.04×10^{-6}	2.40×10^{-5}	2.3×10^1	3.0×10^0
	Ru-2-2	28	7.01×10^{-7}	2.44×10^{-5}	3.5×10^1	4.5×10^0
	Ru-2-3	28	7.49×10^{-7}	2.44×10^{-5}	3.3×10^1	4.2×10^0
	Ru-3-1	43	1.06×10^{-6}	2.39×10^{-5}	2.2×10^1	2.9×10^0
	Ru-3-2	43	5.48×10^{-7}	2.63×10^{-5}	4.8×10^1	1.3×10^1
	Ru-3-3	43	5.99×10^{-7}	2.57×10^{-5}	4.3×10^1	1.2×10^1
	Ru-4-1	50	5.63×10^{-7}	2.60×10^{-5}	4.6×10^1	1.3×10^1
	Ru-4-2	50	5.59×10^{-7}	2.62×10^{-5}	4.7×10^1	1.3×10^1
	Ru-4-3	50	4.91×10^{-7}	2.71×10^{-5}	5.5×10^1	1.5×10^1
泥	Ru-9-1	12	3.39×10^{-8}	3.10×10^{-5}	9.2×10^2	7.1×10^2
	Ru-9-2	12	3.06×10^{-8}	3.10×10^{-5}	1.0×10^3	7.8×10^2
	Ru-9-3	12	2.63×10^{-8}	3.12×10^{-5}	1.2×10^3	9.1×10^2
	Ru-10-1	28	3.53×10^{-8}	3.17×10^{-5}	9.0×10^2	6.9×10^2
	Ru-10-2	28	3.47×10^{-8}	3.15×10^{-5}	9.1×10^2	7.0×10^2
	Ru-10-3	28	3.04×10^{-8}	3.15×10^{-5}	1.0×10^3	8.0×10^2
	Ru-11-1	43	3.57×10^{-8}	3.18×10^{-5}	8.9×10^2	6.9×10^2
	Ru-11-2	43	3.28×10^{-8}	3.12×10^{-5}	9.5×10^2	7.3×10^2
	Ru-11-3	43	3.48×10^{-8}	3.17×10^{-5}	9.1×10^2	7.0×10^2
	Ru-12-1	50	2.03×10^{-8}	3.16×10^{-5}	1.6×10^3	1.2×10^3
	Ru-12-2	50	3.25×10^{-8}	3.10×10^{-5}	9.5×10^2	7.3×10^2
	Ru-12-3	50	3.41×10^{-8}	3.22×10^{-5}	9.5×10^2	7.3×10^2

表 2.2.1-12 ^{60}Co 解吸分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	JCo-1-1	25	1.90×10^4	1.81×10^6	9.5×10^1	2.2×10^1
	JCo-1-2	25	1.69×10^4	1.92×10^6	1.1×10^2	3.2×10^1
	JCo-1-3	25	2.41×10^4	1.91×10^6	7.9×10^1	1.8×10^1
	JCo-2-1	50	1.16×10^4	1.64×10^6	1.4×10^2	3.5×10^1
	JCo-2-2	50	2.09×10^4	1.80×10^6	8.6×10^1	1.8×10^1
	JCo-2-3	50	1.29×10^4	1.82×10^6	1.4×10^2	3.0×10^1
泥	JCo-11-1	25	1.69×10^3	6.64×10^6	3.9×10^3	2.5×10^3
	JCo-11-2	25	1.72×10^3	6.58×10^6	3.8×10^3	2.1×10^3
	JCo-11-3	25	1.51×10^3	7.44×10^6	4.9×10^3	3.7×10^3
	JCo-12-1	50	2.45×10^3	9.01×10^6	3.7×10^3	1.4×10^3
	JCo-12-2	50	3.01×10^3	8.28×10^6	2.7×10^3	1.0×10^3
	JCo-12-3	50	1.91×10^3	8.59×10^6	4.5×10^3	2.4×10^3

表 2.2.1-13 ^{137}Cs 解吸分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	JCs-1-1	25	1.44×10^3	8.13×10^6	5.6×10^3	1.4×10^3
	JCs-1-2	25	4.79×10^2	7.98×10^6	1.7×10^4	1.2×10^4
	JCs-1-3	25	6.77×10^2	7.88×10^6	1.2×10^4	5.1×10^3
	JCs-2-1	50	3.76×10^2	7.82×10^6	2.1×10^4	1.9×10^4
	JCs-2-2	50	5.70×10^2	7.71×10^6	1.4×10^4	7.7×10^3
	JCs-2-3	50	9.23×10^2	7.14×10^6	7.7×10^3	3.0×10^3
泥	JCs-11-1	25	1.40×10^2	9.84×10^6	7.1×10^4	1.0×10^5
	JCs-11-2	25	3.01×10^2	9.70×10^6	3.2×10^4	3.1×10^4
	JCs-11-3	25	1.45×10^2	9.65×10^6	6.7×10^4	1.0×10^5
	JCs-12-1	50	2.73×10^2	9.67×10^6	3.5×10^4	4.0×10^4
	JCs-12-2	50	2.35×10^2	1.01×10^7	4.3×10^4	4.3×10^4
	JCs-12-3	50	2.97×10^2	9.87×10^6	3.3×10^4	3.4×10^4

表 2.2.1-14 ⁹⁰Sr 解吸分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (L/kg)	σ _{K_d}	
沙	JSr-1-1	25	1.20×10 ⁵	3.99×10 ⁶	3.3×10 ¹	3.2×10 ⁰
	JSr-1-2	25	1.20×10 ⁵	4.17×10 ⁶	3.5×10 ¹	3.3×10 ⁰
	JSr-1-3	25	1.12×10 ⁵	4.27×10 ⁶	3.8×10 ¹	3.6×10 ⁰
	JSr-2-1	50	1.22×10 ⁵	4.12×10 ⁶	3.4×10 ¹	3.2×10 ⁰
	JSr-2-2	50	1.00×10 ⁵	4.12×10 ⁶	4.1×10 ¹	4.1×10 ⁰
	JSr-2-3	50	1.14×10 ⁵	3.73×10 ⁶	3.3×10 ¹	3.2×10 ⁰
泥	JSr-11-1	25	3.80×10 ⁵	8.97×10 ⁶	2.4×10 ¹	1.7×10 ⁰
	JSr-11-2	25	3.93×10 ⁵	8.54×10 ⁶	2.2×10 ¹	1.5×10 ⁰
	JSr-11-3	25	3.32×10 ⁵	9.06×10 ⁶	2.7×10 ¹	1.9×10 ⁰
	JSr-12-1	50	3.30×10 ⁵	9.37×10 ⁶	2.8×10 ¹	1.8×10 ⁰
	JSr-12-2	50	2.95×10 ⁵	9.67×10 ⁶	3.3×10 ¹	2.1×10 ⁰
	JSr-12-3	50	3.22×10 ⁵	9.74×10 ⁶	3.0×10 ¹	2.0×10 ⁰

表 2.2.1-15 Ru 解吸分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相浓度 (mol/L)	固相浓度 (mol/kg)	k _d (L/kg)	σ _{K_d}	
沙	JRu-1-1	25	2.74×10 ⁻⁸	2.58×10 ⁻⁵	9.4×10 ²	7.2×10 ²
	JRu-1-2	25	2.37×10 ⁻⁸	2.60×10 ⁻⁵	1.1×10 ³	8.5×10 ²
	JRu-1-3	25	2.19×10 ⁻⁸	2.69×10 ⁻⁵	1.2×10 ³	9.2×10 ²
	JRu-2-1	50	3.03×10 ⁻⁸	2.48×10 ⁻⁵	8.2×10 ²	6.3×10 ²
	JRu-2-2	50	4.32×10 ⁻⁸	2.20×10 ⁻⁵	5.1×10 ²	3.9×10 ²
	JRu-2-3	50	1.96×10 ⁻⁸	2.60×10 ⁻⁵	1.3×10 ³	1.0×10 ³
泥	JRu-11-1	25	9.09×10 ⁻⁸	3.09×10 ⁻⁵	3.4×10 ²	2.6×10 ²
	JRu-11-2	25	8.31×10 ⁻⁸	3.04×10 ⁻⁵	3.7×10 ²	2.9×10 ²
	JRu-11-3	25	9.34×10 ⁻⁸	3.15×10 ⁻⁵	3.4×10 ²	2.6×10 ²
	JRu-12-1	50	7.19×10 ⁻⁸	3.05×10 ⁻⁵	4.2×10 ²	3.2×10 ²
	JRu-12-2	50	8.76×10 ⁻⁸	3.10×10 ⁻⁵	3.5×10 ²	2.7×10 ²
	JRu-12-3	50	1.04×10 ⁻⁷	3.04×10 ⁻⁵	2.9×10 ²	1.6×10 ²

表 2.2.1-16 pH 值对 Ru 分配系数的影响

试验管编号	pH	取样时间(d)	液相浓度 (mol/L)	固相浓度 (mol/kg)	K _d (L/kg)	
沙	Ru-17-A	4~5	30	9.20×10 ⁻⁸	1.11×10 ⁻⁶	1.2×10 ¹
	Ru-18-A	4~5	40	8.17×10 ⁻⁸	1.19×10 ⁻⁶	1.5×10 ¹
	Ru-19-A	4~5	50	9.94×10 ⁻⁸	1.15×10 ⁻⁶	1.2×10 ¹
	Ru-17-B	6~7	30	7.37×10 ⁻⁸	2.53×10 ⁻⁶	3.4×10 ¹
	Ru-18-B	6~7	40	5.61×10 ⁻⁸	2.61×10 ⁻⁶	4.7×10 ¹
	Ru-19-B	6~7	50	7.26×10 ⁻⁸	2.45×10 ⁻⁶	3.4×10 ¹
	Ru-17-C	7~8	30	2.77×10 ⁻⁸	3.18×10 ⁻⁶	1.1×10 ²
	Ru-18-C	7~8	40	3.21×10 ⁻⁸	3.23×10 ⁻⁶	1.0×10 ²
	Ru-19-C	7~8	50	1.45×10 ⁻⁸	3.21×10 ⁻⁶	2.2×10 ²
泥	Ru-21-A	4~5	30	7.39×10 ⁻⁹	3.11×10 ⁻⁶	4.2×10 ²
	Ru-22-A	4~5	40	6.31×10 ⁻⁹	3.12×10 ⁻⁶	5.0×10 ²
	Ru-23-A	4~5	50	1.13×10 ⁻⁸	3.16×10 ⁻⁶	2.8×10 ²
	Ru-21-B	6~7	30	4.86×10 ⁻⁹	3.45×10 ⁻⁶	7.1×10 ²
	Ru-22-B	6~7	40	4.14×10 ⁻⁹	3.59×10 ⁻⁶	8.7×10 ²
	Ru-23-B	6~7	50	4.78×10 ⁻⁹	3.28×10 ⁻⁶	6.9×10 ²
	Ru-21-C	7~8	30	3.44×10 ⁻⁹	3.15×10 ⁻⁶	9.2×10 ²
	Ru-22-C	7~8	40	3.33×10 ⁻⁹	3.16×10 ⁻⁶	9.5×10 ²
	Ru-23-C	7~8	50	3.30×10 ⁻⁹	3.14×10 ⁻⁶	9.6×10 ²

注：-A、-B、-C 均为三个平行样的平均值。

表 2.2.1-17 不同粒径对 ⁶⁰Co 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (L/kg)	σ _{K_d}	
沙	Co-50-1	0.2~0.3	7.49×10 ⁵	2.81×10 ⁶	3.8×10 ⁰	1.3×10 ²
	Co-50-2	0.2~0.3	9.16×10 ⁵	2.54×10 ⁶	2.8×10 ⁰	1.6×10 ²
	Co-51-1	0.125~0.15	7.91×10 ⁵	2.74×10 ⁶	3.5×10 ⁰	4.6×10 ²
	Co-51-2	0.125~0.15	7.56×10 ⁵	2.37×10 ⁶	3.1×10 ⁰	5.1×10 ²
	Co-52-1	<0.125	6.10×10 ⁵	2.45×10 ⁶	4.0×10 ⁰	1.8×10 ²
	Co-52-2	<0.125	7.58×10 ⁵	2.37×10 ⁶	3.1×10 ⁰	1.1×10 ³
泥	Co-54-1	0.08~0.095	3.43×10 ³	8.60×10 ⁶	2.5×10 ³	5.0×10 ²
	Co-54-2	0.08~0.095	4.35×10 ³	8.05×10 ⁶	1.9×10 ³	3.5×10 ²
	Co-55-1	0.075~0.08	3.64×10 ³	7.76×10 ⁶	2.1×10 ³	1.4×10 ²
	Co-55-2	0.075~0.08	4.45×10 ³	8.59×10 ⁶	1.9×10 ³	3.9×10 ²
	Co-56-1	<0.075	3.19×10 ³	8.14×10 ⁶	2.6×10 ³	3.6×10 ²
	Co-56-2	<0.075	4.34×10 ³	8.63×10 ⁶	2.0×10 ³	4.3×10 ²

表 2.2.1-18 不同粒径对 ^{137}Cs 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	Cs-50-1	0.2~0.3	1.42×10^4	7.64×10^6	5.4×10^2	1.9×10^2
	Cs-50-2	0.2~0.3	1.88×10^4	7.47×10^6	4.0×10^2	3.3×10^2
	Cs-51-1	0.125~0.15	1.15×10^4	7.66×10^6	6.7×10^2	9.8×10^2
	Cs-51-2	0.125~0.15	1.24×10^4	7.48×10^6	6.1×10^2	7.3×10^2
	Cs-52-1	<0.125	6.62×10^3	7.31×10^6	1.1×10^3	2.2×10^3
	Cs-52-2	<0.125	9.37×10^3	8.04×10^6	8.6×10^2	1.7×10^3
泥	Cs-54-1	0.08~0.095	1.66×10^3	9.27×10^6	5.6×10^3	3.5×10^3
	Cs-54-2	0.08~0.095	1.85×10^3	9.62×10^6	5.2×10^3	5.9×10^3
	Cs-55-1	0.075~0.08	2.07×10^3	9.95×10^6	4.8×10^3	3.3×10^2
	Cs-55-2	0.075~0.08	2.01×10^3	9.49×10^6	4.7×10^3	3.9×10^3
	Cs-56-1	<0.075	1.82×10^3	9.85×10^6	5.4×10^3	1.2×10^3
	Cs-56-2	<0.075	2.17×10^3	1.02×10^7	4.7×10^3	4.6×10^3

表 2.2.1-19 不同粒径对 ^{90}Sr 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	Sr-50-1	0.2~0.3	6.97×10^5	4.01×10^6	5.8×10^0	6.3×10^{-1}
	Sr-50-2	0.2~0.3	1.11×10^6	4.72×10^6	4.3×10^0	5.3×10^{-1}
	Sr-51-1	0.125~0.15	7.30×10^5	4.60×10^6	6.3×10^0	7.5×10^{-1}
	Sr-51-2	0.125~0.15	8.51×10^5	4.85×10^6	5.7×10^0	6.5×10^{-1}
	Sr-52-1	<0.125	7.20×10^5	5.67×10^6	7.9×10^0	7.2×10^{-1}
	Sr-52-2	<0.125	6.38×10^5	3.91×10^6	6.1×10^0	8.8×10^{-1}
泥	Sr-54-1	0.08~0.095	7.76×10^5	9.82×10^6	1.3×10^1	1.2×10^0
	Sr-54-2	0.08~0.095	1.07×10^6	1.00×10^7	9.4×10^0	1.2×10^0
	Sr-55-1	0.075~0.08	6.76×10^5	9.93×10^6	1.5×10^1	1.3×10^0
	Sr-55-2	0.075~0.08	7.59×10^5	1.01×10^7	1.3×10^1	1.3×10^0
	Sr-56-1	<0.075	7.76×10^5	8.73×10^6	1.1×10^1	9.8×10^{-1}
	Sr-56-2	<0.075	1.04×10^6	9.06×10^6	8.8×10^0	9.9×10^{-1}

表 2.2.1-20 不同粒径对 Ru 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相浓度 (mol/L)	固相浓度 (mol/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}	
沙	Ru-50-1	0.2~0.3	8.54×10^{-8}	2.16×10^{-6}	2.5×10^1	2.8×10^0
	Ru-50-2	0.2~0.3	1.19×10^{-7}	2.23×10^{-6}	1.9×10^1	3.3×10^0
	Ru-51-1	0.125~0.15	8.34×10^{-8}	2.19×10^{-6}	2.6×10^1	3.0×10^0
	Ru-51-2	0.125~0.15	9.85×10^{-8}	2.34×10^{-6}	2.4×10^1	3.8×10^0
	Ru-52-1	<0.125	4.01×10^{-8}	2.75×10^{-6}	6.9×10^1	1.7×10^1
	Ru-52-2	<0.125	5.13×10^{-8}	2.74×10^{-6}	5.3×10^1	1.8×10^1
泥	Ru-54-1	0.08~0.095	3.12×10^{-9}	3.10×10^{-6}	9.9×10^2	1.7×10^2
	Ru-54-2	0.08~0.095	4.33×10^{-9}	3.18×10^{-6}	7.4×10^2	1.3×10^2
	Ru-55-1	0.075~0.08	3.40×10^{-9}	3.03×10^{-6}	8.9×10^2	1.4×10^2
	Ru-55-2	0.075~0.08	3.82×10^{-9}	3.08×10^{-6}	8.1×10^2	1.5×10^2
	Ru-56-1	<0.075	3.81×10^{-9}	3.16×10^{-6}	8.3×10^2	1.2×10^2
	Ru-56-2	<0.075	4.75×10^{-9}	3.06×10^{-6}	6.5×10^2	1.5×10^2



图 2.2.1-3 河床概貌（以卵石为主）



图 2.2.1-4 河底概貌（河水清澈、以粗沙为主）



图 2.2.1-5 河边低洼处的淤泥

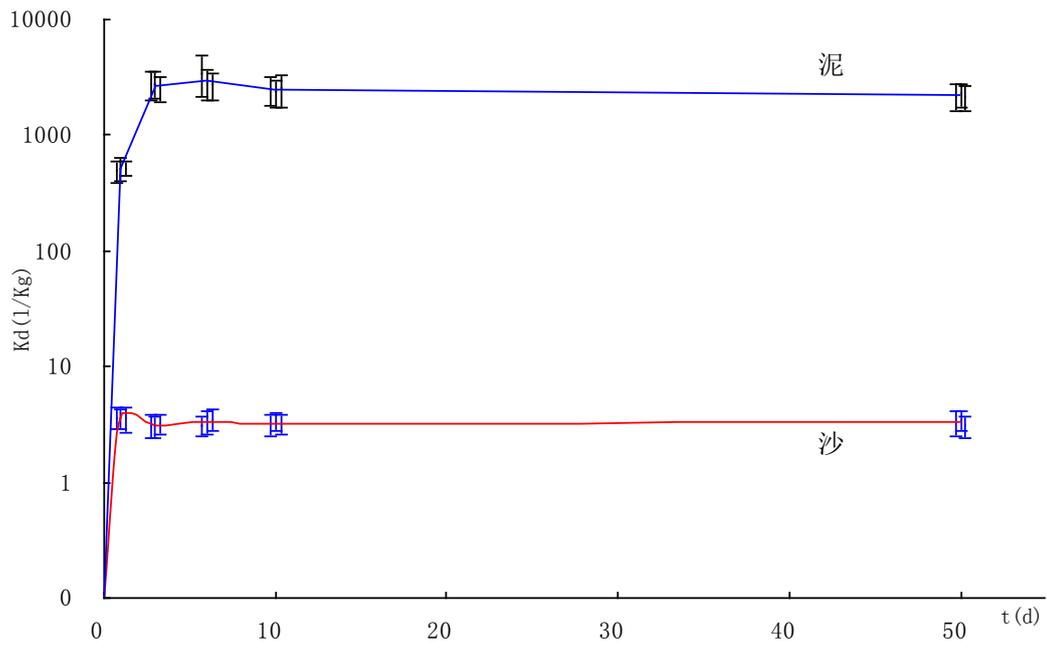


图 2.2.1-6 ^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

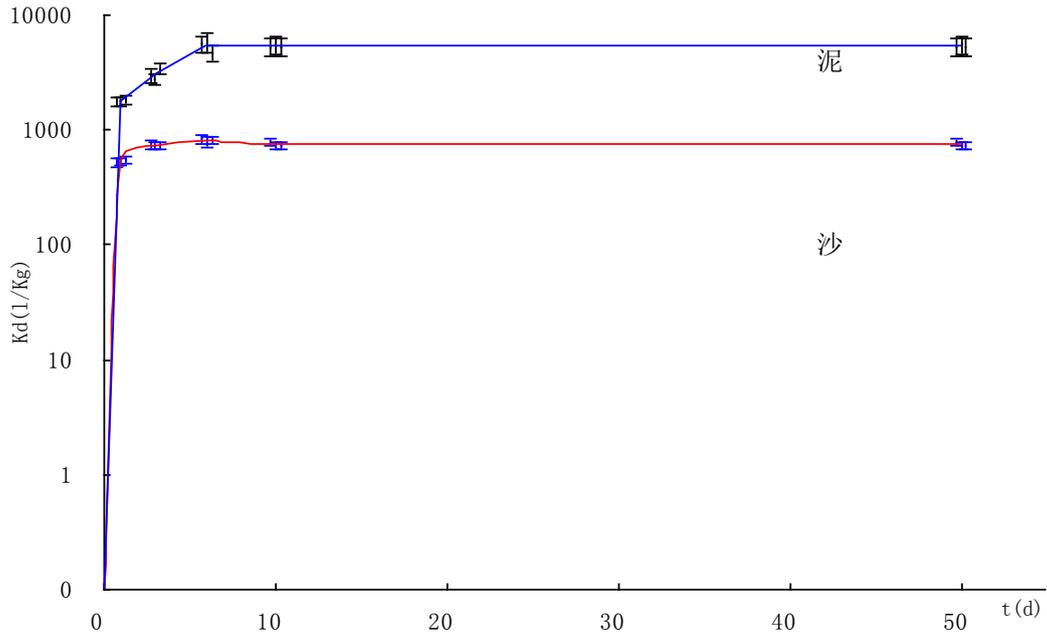


图 2.2.1-7 ^{137}Cs 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

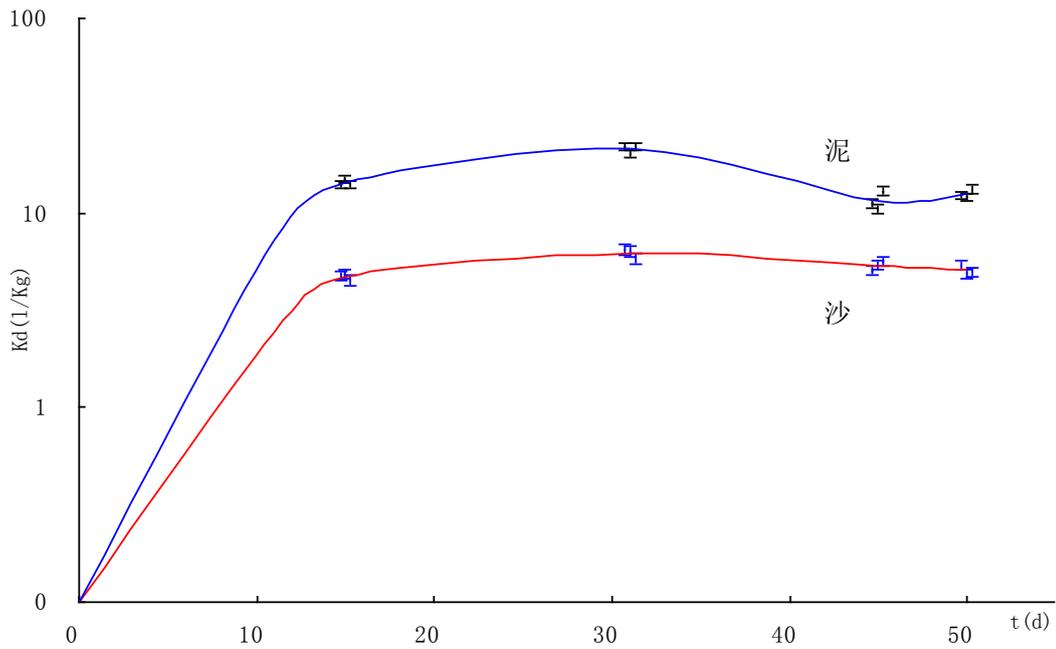


图 2.2.1-8 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

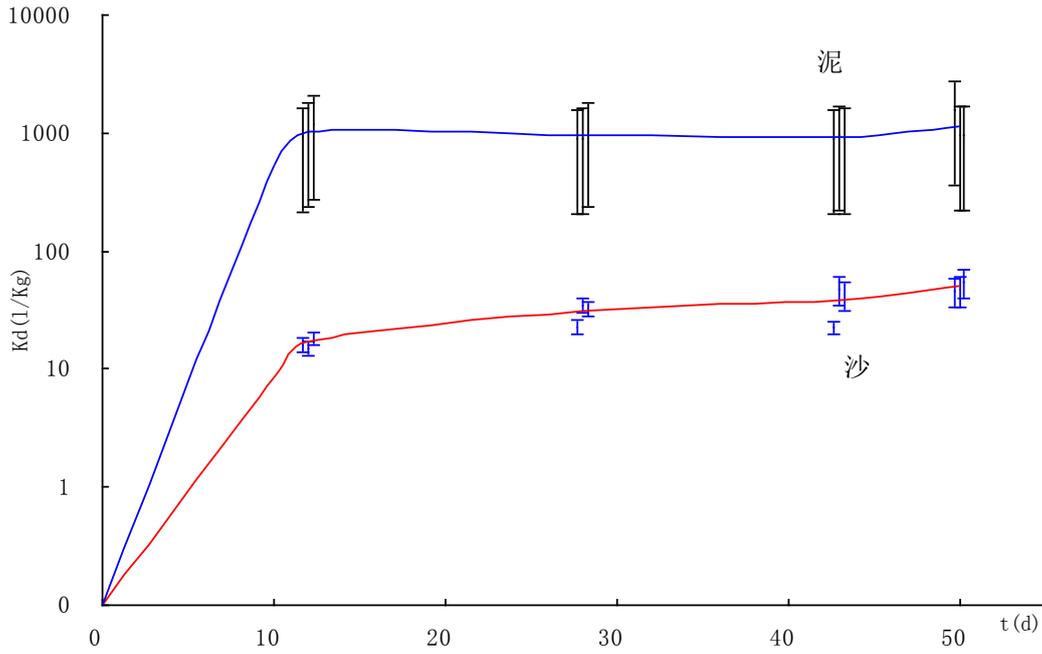


图 2.2.1-9 Ru 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

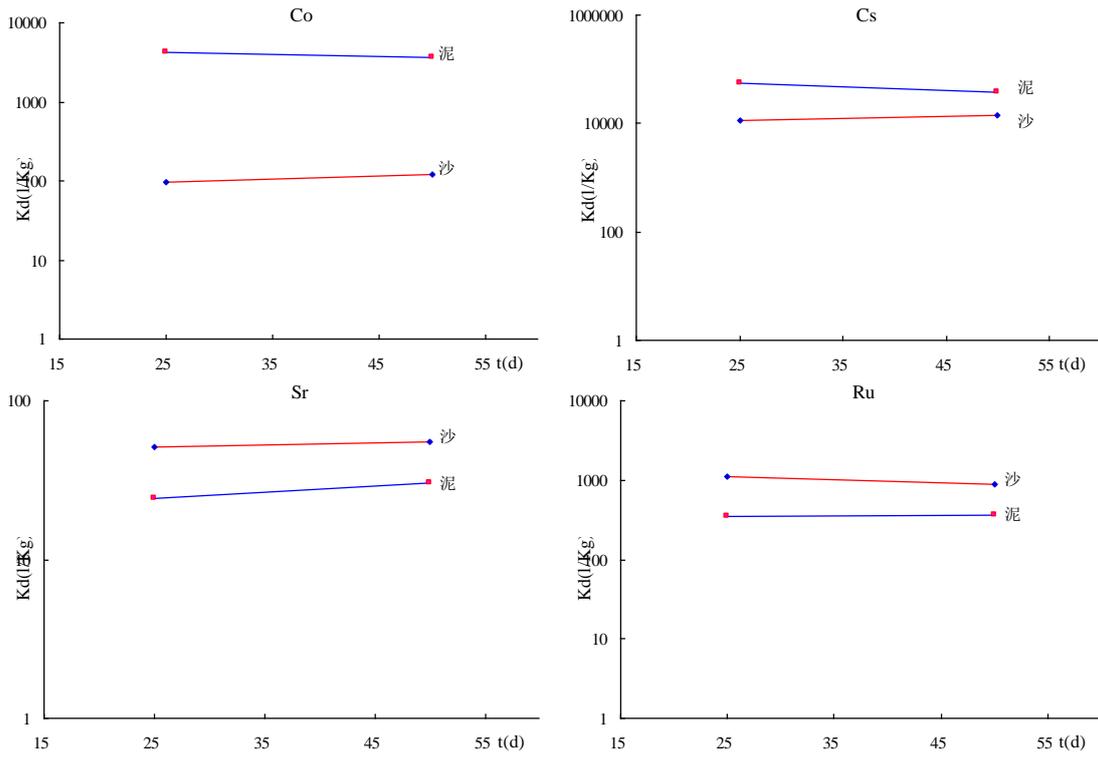


图 2.2.1-10 ⁶⁰Co、¹³⁷Cs、⁹⁰Sr 和 Ru 解吸实验结果

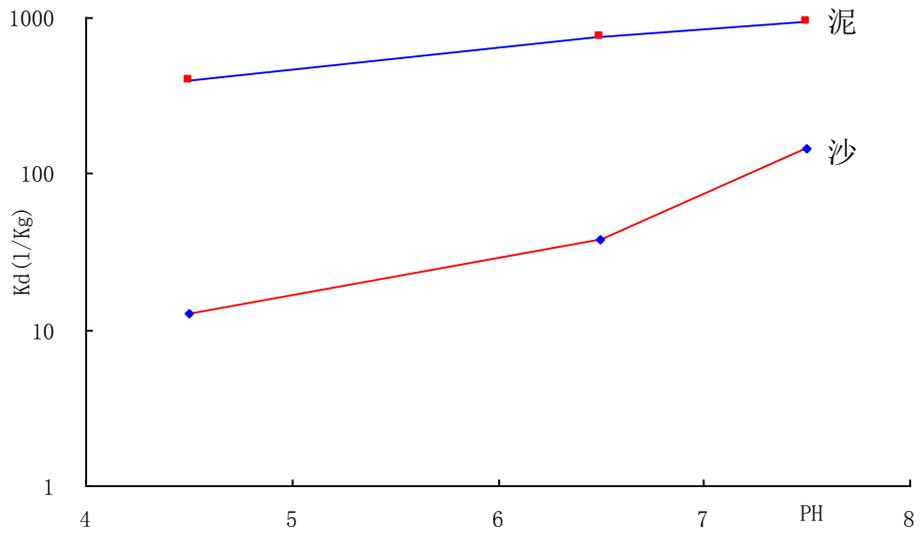


图 2.2.1-11 pH 值对 Ru 分配系数的影响

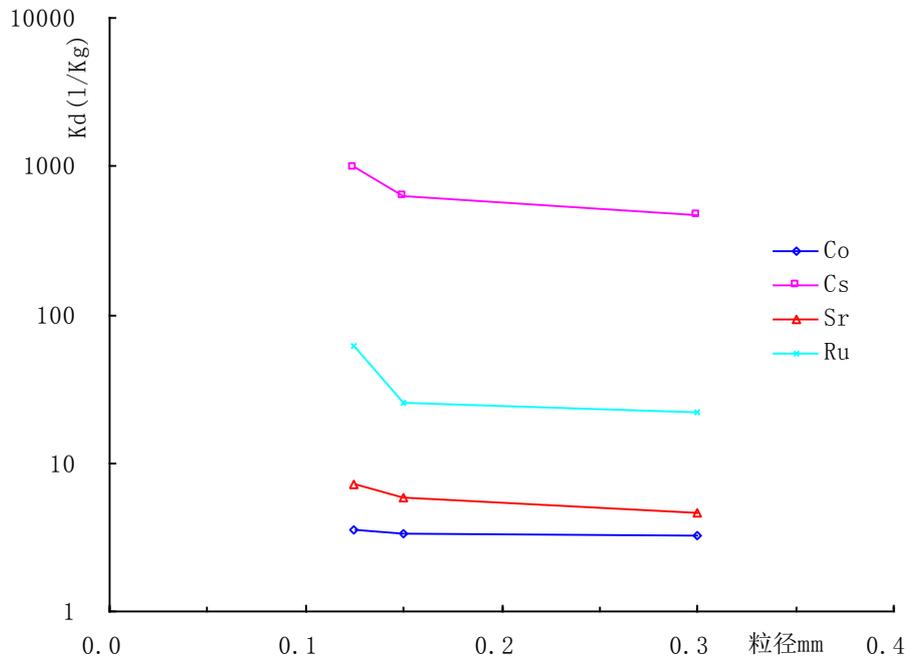


图 2.2.1-12 沙中各核素分配系数随粒径的变化

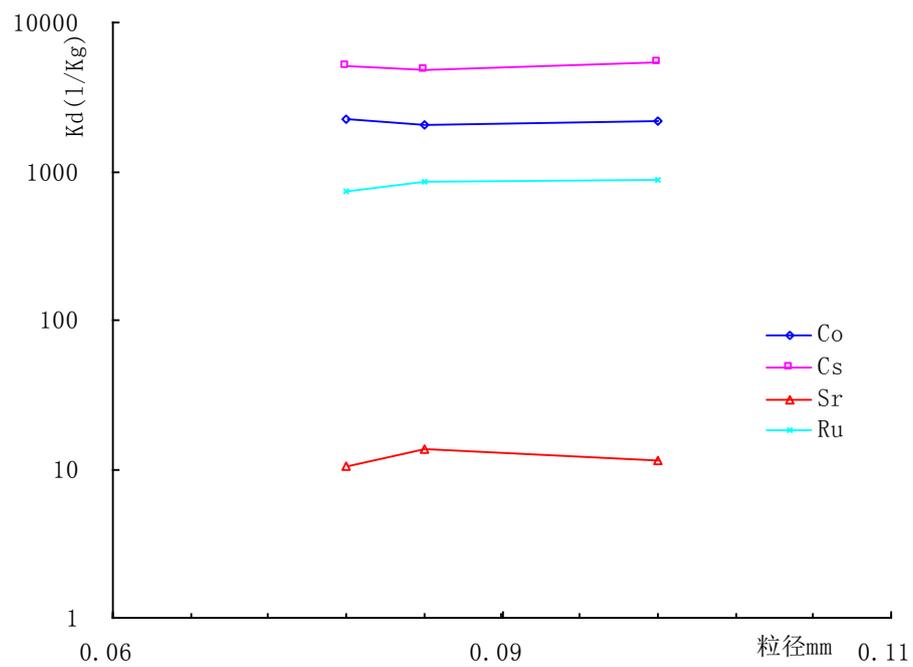


图 2.2.1-13 泥中各核素分配系数随粒径的变化

2.2.2 吉林靖宇

吉林靖宇核电厂厂址位于吉林省东南部白山市靖宇县赤松乡岗顶村南侧，头道松花江白山水库左岸的台地上。其西南距靖宇县城约 28km，东南距抚松县城约 34km，东北距白山镇约 23km，吉林靖宇核电工程规划建设容量按 4×1000MW 级压水堆核电机组设计，一次规划布置，分期实施。

吉林靖宇核电厂的循环水系统及厂用水系统均从白山水库取水。循环水系统采用带有自然通风冷却塔的二次循环冷却方案，核电厂用水水源取水口位于第二松花江上游支流头道松花江左岸台地上，处于白山水库库区，在距岸边 440m 处设置第一级升压泵房。冷却塔排污水和放射性液态流出物通过管道输送到厂址附近白山水库周边的河流中，排入相邻河道。白山水库没有向下游供水的任务，上游用水量不大，完全可满足本工程 4×1000MW 级核电机组二次循环补给水和电厂生产生活用水的要求。

2.2.2.1 流域概况

赤松河河底为卵石，河道较顺直，坡降大，水深小，流速较大，流量随季节变化大，雨季（7~9）和 4 月份较大，冬季流量较小。赤松河 50% 保证率月均流量为 0.464m³/s，道水河为 0.594m³/s。

2006 年 10 月到 2007 年 10 月测验期间，全年最高水位 415.93m，最低水位 396.63m，水位年变幅 19.30m；设计蓄水为 413m。实测最大流量 880m³/s，实测最小流量 1.27m³/s。平均流量约 200m³/s。

断面含沙量较小，全年实测单样含沙量在 0g/m³~9.0g/m³ 之间。实测泥沙颗粒中数粒径为 0.003~0.243mm。

2.2.2.2 样品的采集

为了使分配系数 K_d 的测定条件更接近现场实际情况，直接采用赤松河河水作为吸附实验的水样。根据现场实际情况，土壤样品则收集了两种，一种为淤泥，一种为沙土，分别测其分配系数。取样点位置见图 2.2.2-2。

2008 年 8 月 4 日，进行了土壤样品和水样的采集。土壤样品采用赤松河河床的沉积物样品，水样则用赤松河水。赤松河水流、泥沙情况见图 2.2.2-3~图 2.2.2-5。

河床表层覆盖有卵石，卵石粒径较大，主要是粒径 1cm 以上的卵石，在少数低洼处有淤泥沉积。河水清澈，悬沙很少。

沙样代表赤松河河床，赤松河水浅流急，淤泥区域很少。泥样代表水库库区的底泥，水库已运行多年，库区底部大部分区域覆盖有淤泥。

为尽量避免水样的化学性质发生变化，采集后用塑料桶密封盛装水样，运输回实验室在 4℃ 下进行冷藏保存。

2.2.2.3 核素吸附特性模拟实验

根据放射性废液排放源项，并综合考虑核素的半衰期、毒性等，确定了四种有代表性的放射性核素 Ru 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr ，用静态批试法进行核素吸附特性的模拟实验。

1) 粒径分析

对泥和沙两种样品分别进行筛分预处理，得到两种样品的粒径分布见表 2.2.2-1。由上表可以看出，沙中以粗砂、中砂为主，而泥中主要为细砂和粉粘粒。

实验时每个试验管所用沙子和泥均为 1g，按照各个粒径所占质量的组分称重，并将其混合均匀。沙和泥的实验组成如表 2.2.2-2。

2) 土样的化学成分分析及矿物组成

土壤矿物质是岩石经物理风化作用和化学风化作用形成的，占土壤固相部分总重量 90% 以上。土壤粘粒矿物是土壤矿物质中最活跃的部分，它的类型决定了土壤对放射性核素吸附能力的大小。由于土壤的物质组成和化学成分等条件都会影响土壤介质对核素的吸附性能，进而影响到分配系数，因而在进行吸附实验前，需要对土样的理化性质进行测试和分析。

土壤的矿物组成由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心河南省岩石矿物测试中心进行测定，化学成分分析由国土资源部太原矿产资源监督检测中心进行分析，测得的矿物组成和化学成分结果列于表 2.2.2-3 和表 2.2.2-4。

由此可见，这两种样品主要化学成分均以 SiO_2 为主，含量分别为沙中 74.99% 和泥中 58.68%。 Al_2O_3 含量约为 13%。其余还有少量的 Fe_2O 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 等。沙和泥中主要含氧化物矿物，如石英、长石，其中石英的比重很大。次生粘土矿物有云母(伊利石)、绿泥石等，其中云母约 20% 左右，绿泥石约 5%。泥中还有少量的铁泥有机质。

3) 水样的化学成分分析

同样，水样的化学性质（如 PH 值）也会影响分配系数的大小，且水样中有

无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响,因此用 ICP-MS 对水样的 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 和 ^{88}Sr 本底进行了测量,结果见表 2.2.2-5。

取样点附近的水外观清澈、无沉淀,PH 呈弱碱性。水中在 ICP-MS 检测限内没有检出钴和铯,说明水的本底中基本没有钴和铯,或者说钴和铯含量极低。而锶的含量为 $1.038\times 10^{-6}\text{mol/l}$,即说明现场水中锶的含量较高。

4) 吸附实验过程

取 15ml 的聚乙烯塑料离心管,洗净后晾干,向每个离心管中加入 9.2ml 的溶液,溶液为现场所取的水样,再称取(1 ± 0.002)克的泥/沙放入管中,盖紧盖子,摇匀,静置七天。吸附实验开始后向盛有泥/沙和水的离心管中加入 0.8ml 含放射性核素的溶液,溶液中四种核素 (^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 Ru) 的投放量按照仪器的最低检测限来定,具体四种核素在每个离心管中的投放量见表 2.2.2-6。立即将之振荡使固液充分混合,并且在实验时间内每天都要放入振荡器中振荡两次(上午下午各一次,每次不少于 60 分钟)。间隔不同时间取样测量,直至吸附平衡为止,计算分配系数 K_d 。

吸附实验共进行了近两个月,实验条件及测量方法见下表 2.2.2-7。

(1) ^{60}Co 吸附实验结果

在加入 ^{60}Co 后的第 2、3、6、10、21、38 天进行取样,每次取三个平行样(最后一位数字-1、-2、-3 为平行样编号)。先将试管离心三十分钟,然后分别取出管中的液体和固体。液体直接测量活度,然后计算其比活度,固体则先烘干,在烘箱中自然降温后称重测量其活度,将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度,再算得固相的比活度;最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数 K_d 。 σ_{K_d} 为测量的统计误差。 ^{60}Co 的吸附实验结果见表 2.2.2-8。 ^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.2-6。

由图表可以看出, ^{60}Co 在沙中的分配系数约为 260l/kg,而且基本在加入 ^{60}Co 后第 10 天达到吸附平衡。在泥中分配系数约为 2800l/kg,在加入 ^{60}Co 后第 10 天也基本达到吸附平衡。

(2) ^{137}Cs 吸附实验结果

在加入 ^{137}Cs 后的第 3、7、11、35 天进行取样,取样过程同上。 ^{137}Cs 的吸附实验结果见表 2.2.2-9。 ^{137}Cs 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.2-7。

由图表可以看出， ^{137}Cs 在沙中的分配系数接近 2600 l/kg，基本在加入 ^{137}Cs 的 7 天前达到吸附平衡。在泥中分配系数接近 6200 l/kg，在加入 ^{137}Cs 后第 7 天也达到了吸附平衡。

(3) ^{90}Sr 吸附实验结果

在加入 ^{90}Sr 后的第 12、25、40、50、60 天进行取样，取样过程同上。 ^{90}Sr 的吸附实验结果见表 2.2.2-10。 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.2-8。

由图表可以看出， ^{90}Sr 在沙中的分配系数很小，约为 17 l/kg，在泥中分配系数有 62 l/kg，这可能与前面测得的水中锶本底值很高有关。由于现场锶本底值很高，减少了所加入的 ^{90}Sr 的吸附。

(4) Ru 吸附实验结果

在加入 Ru 后的第 2、4、7、11、32 天进行取样，取样过程同上。Ru 的吸附实验结果见表 2.2.2-11。Ru 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.2-9。

由图表可以看出，Ru 在沙中的分配系数约有 450 l/kg，在泥中分配系数约 3150 l/kg，基本在加入 Ru 后的 11 天达到吸附平衡。

5) 解吸实验结果

将吸附实验平衡以后的最后两组试样离心分离，取出沙和泥烘干后称重，按 1:10 的固液比加入河水，然后进行解吸实验，其过程与吸附实验相同。在第 20 天和第 40 天分别测量和计算出固相和液相的比活度，再计算固、液相中的核素浓度之比即为解吸分配系数 K_d 。

(1) ^{60}Co 解吸实验

^{60}Co 的解吸实验结果见表 2.2.2-12。

^{60}Co 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 6000 L/kg，在泥中的平均值为 4600 L/kg。与吸附实验结果相比， ^{60}Co 在沙中吸附分配系数值为 260 L/kg，在泥中为 2800 L/kg，解吸实验分配系数要大于吸附实验分配系数。

(2) ^{137}Cs 解吸实验

^{137}Cs 的解吸实验结果见表 2.2.2-13。

^{137}Cs 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 17000L/kg，在泥中的平均值为 28700L/kg。与吸附实验结果相比， ^{137}Cs 在沙中吸附分配系数的平均值为 2600L/kg，在泥中的平均值为 6200 L/kg，解吸实验分配系数要大于吸附实验分配系数。

(3) ^{90}Sr 解吸实验

^{90}Sr 的解吸实验结果见表 2.2.2-14。

^{90}Sr 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 36 L/kg，在泥中的平均值为 107 L/kg。与吸附实验结果相比， ^{90}Sr 在沙中吸附分配系数的平均值仅为 17 L/kg，在泥中的平均值为 62 L/kg，表明解吸实验分配系数值略大于吸附实验分配系数。

(4) Ru 解吸实验

Ru 的解吸实验结果见表 2.2.2-15。

Ru 在沙中解吸实验分配系数的平均值为 4476 L/kg，在泥中的平均值为 1820 L/kg。与吸附实验结果相比，Ru 在沙中吸附分配系数的平均值仅为 450 L/kg，在泥中的平均值约为 3150 L/kg，表明沙的解吸实验分配系数值大于吸附实验分配系数，而泥则是解吸实验分配系数值小于吸附实验分配系数。

四种核素解吸过程的分配系数大于吸附过程的分配系数说明解析过程比吸附过程缓慢。因此，在考虑沉积物的吸附和解吸两种作用的影响时仅考虑吸附作用是比较合理的。除本节区分了吸附过程和解吸过程的分配系数外，本报告其它处的分配系数均指吸附过程的分配系数。

四种核素的解吸实验结果见图 2.2.2-10。

2.2.2.4 PH 实验结果

加入盐酸改变 Ru 溶液 PH 值，其它条件不变，测量其分配系数。水相 PH 值的变化对分配系数的影响见表 2.2.2-16。

PH 值对 Ru 分配系数的影响见图 2.2.2-11。

由图表可见，水相 PH 值的变化对 Ru 在泥和沙中分配系数的影响是很大的，在 PH=4~8 范围内，Ru 在泥和沙中分配系数随水相 PH 值的升高而增大，且水相 PH 值对沙中分配系数的影响较为明显，对泥中分配系数的影响则小一些。

2.2.2.5 不同粒径实验结果

将沙子和泥分成不同的粒径，测量不同的粒径对分配系数的影响。沙子共做了三组，粒径分别为 0.2~0.3mm、0.125~0.15mm 和 0.125mm 以下；同样泥也做了三组，分别为 0.08~0.095mm、0.075~0.08mm 及 0.075mm 以下。每种样品做两个平行样，固体样品均加入 1g 左右，放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 及 Ru 各约 0.8mL，固液比 1:10。在实验时间内将实验管每天放入振荡器中振荡，放置 30 天后进行取样。实验结果见表 2.2.2-17~表 2.2.2-20。

不同核素分配系数随粒径的变化曲线见图 2.2.2-12~2.2.2-13。

可以看出，核素在沙中的分配系数随着颗粒粒径的减小而增大，其变化很明显，这主要是由于随着颗粒粒径减小，颗粒比表面积增大，表面吸附能力增强，有利于各种核素的吸附，从而使分配系数增大；而在泥中的分配系数变化不大，基本变化趋势不太明显，主要因为不同泥的粒径差别不大，比表面积也差别不大，其吸附性能基本相同。

表 2.2.2-1 样品中各粒径的质量组分

分子筛(目)	粒径(mm)	泥(%)	沙(%)
20~40	0.45~0.9		73.75
40~60	0.3~0.45		17.23
60~80	0.2~0.3		3.29
80~100	0.15~0.2		1.96
100~120	0.125~0.15		0.85
120~140	0.105~0.125		0.19
140~160	0.095~0.105	63.76	0.83
160~180	0.08~0.095	0.26	0.11
180~200	0.075~0.08	13.38	0.46
>200	<0.075	22.60	1.33

表 2.2.2-2 样品中各粒径的质量组分(%)

沙	粒径(目)	20~40	40~60	60~140	140~200
	粒径(mm)	0.45~0.9	0.3~0.45	0.105~0.3	0.075~0.105
	质量组分	74	17	6	3
泥	粒径(目)	140~160	160~200	>200	
	粒径(mm)	0.095~0.105	0.075~0.095	<0.075	
	质量组分	64	14	22	

表 2.2.2-3 土壤中各主要化学成分的质量组分(%)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
沙	74.99	13.16	2.98	0.50	2.67	0.80	2.28	4.22
泥	58.68	15.09	8.47	6.23	2.39	1.96	2.70	2.62

表 2.2.2-4 土壤中各矿物质的质量组分(%)

样品	石英	斜长石	钾长石	伊利石	蒙脱石	角闪石	绿泥石	高岭石	长石	蛇纹石	有机质
沙	25~30	20	20	15~20	5	5	少量	-	-	5	-
泥	20	-	-	20~25	20	-	5	5	20	-	5~10

表 2.2.2-5 水样 pH 值和 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 、 ^{88}Sr 的含量(mol/l)

分析项目	外观描述	pH	本底值		
			^{59}Co	^{133}Cs	^{88}Sr
水样	澄清, 无沉淀	7.58	$\leq 1.697 \times 10^{-8}$	$\leq 7.524 \times 10^{-9}$	1.038×10^{-6}

表 2.2.2-6 每个试样吸附实验中各核素的投放量

核素	Co	^{137}Cs	^{90}Sr	Ru
化学浓度(mol/l)	7.87×10^{-8}	2.17×10^{-9}	3.75×10^{-9}	4.54×10^{-5}
投放量	$7.84 \times 10^3 \text{Bq}$	$7.65 \times 10^3 \text{Bq}$	$1.33 \times 10^4 \text{Bq}$	$3.18 \times 10^{-8} \text{mol}$

表 2.2.2-7 吸附实验条件及测量方法

实验条件	水	土	运输及储存	实验温度
		河水	沉积物样品	低温密封, 冷藏
测量方法	Ru	^{137}Cs	^{60}Co	^{90}Sr
	ICP-MS	γ 谱	γ 谱	放化分析 (液闪) / γ 谱

表 2.2.2-8 ^{60}Co 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}	
沙	Co-1-1	2	2.32×10^5	5.11×10^6	2.2×10^1	3.2×10^0
	Co-1-2	2	2.36×10^5	4.80×10^6	2.0×10^1	3.1×10^0
	Co-1-3	2	2.36×10^5	5.06×10^6	2.1×10^1	3.2×10^0
	Co-2-1	3	1.23×10^5	5.95×10^6	4.8×10^1	6.1×10^0
	Co-2-2	3	1.45×10^5	5.15×10^6	3.5×10^1	5.0×10^0
	Co-2-3	3	1.42×10^5	5.54×10^6	3.9×10^1	5.1×10^0
	Co-3-1	6	6.15×10^4	6.42×10^6	1.0×10^2	1.2×10^1
	Co-3-2	6	7.23×10^4	6.42×10^6	8.9×10^1	1.1×10^1
	Co-3-3	6	8.67×10^4	6.02×10^6	6.9×10^1	8.9×10^0
	Co-4-1	10	2.94×10^4	6.52×10^6	2.2×10^2	3.2×10^1
	Co-4-2	10	3.23×10^4	6.19×10^6	1.9×10^2	2.7×10^1
	Co-4-3	10	2.92×10^4	6.47×10^6	2.2×10^2	3.2×10^1
	Co-5-1	21	2.75×10^4	7.51×10^6	2.7×10^2	3.0×10^1
	Co-5-2	21	2.50×10^4	6.61×10^6	2.6×10^2	3.2×10^1
	Co-5-3	21	2.73×10^4	6.55×10^6	2.4×10^2	3.0×10^1
	Co-6-1	38	2.08×10^4	5.82×10^6	2.8×10^2	3.5×10^1
	Co-6-2	38	2.13×10^4	5.25×10^6	2.5×10^2	3.4×10^1
	Co-6-3	38	2.05×10^4	5.13×10^6	2.5×10^2	8.5×10^1
泥	Co-10-1	2	2.15×10^4	7.29×10^6	3.4×10^2	5.8×10^1
	Co-10-2	2	2.61×10^4	7.63×10^6	2.9×10^2	6.5×10^1
	Co-10-3	2	2.59×10^4	8.09×10^6	3.1×10^2	7.8×10^1
	Co-11-1	3	1.56×10^4	7.44×10^6	4.8×10^2	7.6×10^1
	Co-11-2	3	1.69×10^4	7.94×10^6	4.7×10^2	8.2×10^1
	Co-11-3	3	1.52×10^4	7.59×10^6	5.0×10^2	1.0×10^2
	Co-12-1	6	1.30×10^4	7.66×10^6	5.9×10^2	1.1×10^2
	Co-12-2	6	1.23×10^4	7.67×10^6	6.2×10^2	1.1×10^2
	Co-12-3	6	1.27×10^4	7.59×10^6	6.0×10^2	7.4×10^2
	Co-13-1	10	4.07×10^3	7.39×10^6	1.8×10^3	1.1×10^3
	Co-13-2	10	3.37×10^3	7.09×10^6	2.1×10^3	1.4×10^3
	Co-13-3	10	3.05×10^3	7.14×10^6	2.3×10^3	1.5×10^3
	Co-14-1	21	2.77×10^3	7.61×10^6	2.8×10^3	1.5×10^3
	Co-14-2	21	2.67×10^3	7.76×10^6	2.9×10^3	1.5×10^3
	Co-14-3	21	2.73×10^3	7.64×10^6	2.8×10^3	9.7×10^2
	Co-15-1	38	2.67×10^3	6.43×10^6	2.4×10^3	1.6×10^3
	Co-15-2	38	2.04×10^3	6.74×10^6	3.3×10^3	1.1×10^3
	Co-15-3	38	2.46×10^3	6.64×10^6	2.7×10^3	8.5×10^1

表 2.2.2-9 ^{137}Cs 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}	
沙	Cs-1-1	3	1.77×10^4	7.66×10^6	4.3×10^2	3.1×10^1
	Cs-1-2	3	1.68×10^4	8.07×10^6	4.8×10^2	3.3×10^1
	Cs-1-3	3	2.23×10^4	7.64×10^6	3.4×10^2	2.1×10^1
	Cs-2-1	7	3.75×10^3	7.64×10^6	2.0×10^3	1.8×10^2
	Cs-2-2	7	3.09×10^3	7.52×10^6	2.4×10^3	2.6×10^2
	Cs-2-3	7	2.31×10^3	7.34×10^6	3.2×10^3	4.0×10^2
	Cs-3-1	11	2.97×10^3	7.73×10^6	2.6×10^3	2.6×10^2
	Cs-3-2	11	3.06×10^3	7.68×10^6	2.5×10^3	2.4×10^2
	Cs-3-3	11	2.89×10^3	7.57×10^6	2.6×10^3	2.8×10^2
	Cs-4-1	35	3.09×10^3	8.01×10^6	2.6×10^3	2.3×10^2
	Cs-4-2	35	2.97×10^3	7.96×10^6	2.7×10^3	2.4×10^2
	Cs-4-3	35	3.11×10^3	7.83×10^6	2.5×10^3	2.1×10^2
泥	Cs-10-1	3	3.81×10^3	9.97×10^6	2.6×10^3	2.6×10^2
	Cs-10-2	3	3.16×10^3	9.95×10^6	3.1×10^3	3.5×10^2
	Cs-10-3	3	3.30×10^3	9.65×10^6	2.9×10^3	3.1×10^2
	Cs-11-1	7	1.78×10^3	9.87×10^6	5.5×10^3	1.1×10^3
	Cs-11-2	7	1.40×10^3	9.64×10^6	6.9×10^3	1.7×10^3
	Cs-11-3	7	1.77×10^3	1.01×10^7	5.7×10^3	1.2×10^3
	Cs-12-1	11	1.61×10^3	1.00×10^7	6.2×10^3	1.3×10^3
	Cs-12-2	11	1.45×10^3	9.44×10^6	6.5×10^3	1.4×10^3
	Cs-12-3	11	1.68×10^3	9.87×10^6	5.9×10^3	1.2×10^3
	Cs-13-1	35	1.58×10^3	9.99×10^6	6.3×10^3	1.2×10^3
	Cs-13-2	35	1.59×10^3	1.01×10^7	6.4×10^3	1.2×10^3
	Cs-13-3	35	1.69×10^3	1.00×10^7	5.9×10^3	1.1×10^3

表 2.2.2-10 ^{90}Sr 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}	
沙	Sr-1-1	12	5.13×10^5	6.19×10^6	1.2×10^1	5.5×10^{-1}
	Sr-1-2	12	5.57×10^5	6.57×10^6	1.2×10^1	5.2×10^{-1}
	Sr-1-3	12	4.92×10^5	5.87×10^6	1.2×10^1	5.6×10^{-1}
	Sr-2-1	25	6.58×10^5	7.63×10^6	1.2×10^1	4.0×10^{-1}
	Sr-2-2	25	6.46×10^5	7.45×10^6	1.2×10^1	4.8×10^{-1}
	Sr-2-3	25	5.80×10^5	7.60×10^6	1.3×10^1	5.5×10^{-1}
	Sr-3-1	40	5.76×10^5	7.74×10^6	1.3×10^1	5.7×10^{-1}
	Sr-3-2	40	5.21×10^5	7.83×10^6	1.5×10^1	6.4×10^{-1}
	Sr-3-3	40	5.04×10^5	7.52×10^6	1.5×10^1	6.6×10^{-1}
	Sr-4-1	50	5.45×10^5	9.68×10^6	1.8×10^1	7.3×10^{-1}
	Sr-4-2	50	5.98×10^5	8.39×10^6	1.4×10^1	6.0×10^{-1}
	Sr-4-3	50	4.60×10^5	8.97×10^6	2.0×10^1	8.4×10^{-1}
	Sr-5-1	60	6.55×10^5	8.20×10^6	1.3×10^1	5.2×10^{-1}
	Sr-5-2	60	5.30×10^5	8.39×10^6	1.6×10^1	6.9×10^{-1}
	Sr-5-3	60	3.47×10^5	8.32×10^6	2.4×10^1	9.7×10^{-1}
泥	Sr-10-1	12	2.54×10^5	1.15×10^7	4.5×10^1	2.3×10^0
	Sr-10-2	12	2.57×10^5	1.17×10^7	4.6×10^1	2.3×10^0
	Sr-10-3	12	2.67×10^5	1.12×10^7	4.2×10^1	2.1×10^0
	Sr-11-1	25	2.29×10^5	1.05×10^7	4.6×10^1	2.4×10^0
	Sr-11-2	25	2.50×10^5	1.07×10^7	4.3×10^1	2.2×10^0
	Sr-11-3	25	2.49×10^5	1.13×10^7	4.5×10^1	2.3×10^0
	Sr-12-1	40	1.88×10^5	1.13×10^7	6.0×10^1	3.2×10^0
	Sr-12-2	40	2.23×10^5	1.13×10^7	5.1×10^1	2.6×10^0
	Sr-12-3	40	2.16×10^5	1.11×10^7	5.2×10^1	2.7×10^0
	Sr-12-1	50	1.72×10^5	1.09×10^7	6.4×10^1	3.4×10^0
	Sr-12-2	50	1.80×10^5	1.08×10^7	6.0×10^1	3.3×10^0
	Sr-12-3	50	1.79×10^5	1.15×10^7	6.4×10^1	3.5×10^0
	Sr-13-1	60	1.93×10^5	1.14×10^7	5.9×10^1	3.2×10^0
	Sr-13-2	60	1.74×10^5	1.11×10^7	6.4×10^1	3.5×10^0
	Sr-13-3	60	1.93×10^5	1.25×10^7	6.5×10^1	3.4×10^0

表 2.2.2-11 Ru 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液体浓度 (mol/l)	固体浓度 (mol/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}	
沙	Ru-1-1	2	2.78×10^{-7}	2.94×10^{-5}	1.1×10^2	5.9×10^1
	Ru-1-2	2	7.61×10^{-7}	2.46×10^{-5}	3.2×10^1	9.2×10^0
	Ru-1-3	2	6.38×10^{-7}	2.60×10^{-5}	4.1×10^1	1.2×10^1
	Ru-2-1	4	2.43×10^{-7}	2.96×10^{-5}	1.2×10^2	1.6×10^1
	Ru-2-2	4	3.03×10^{-7}	2.90×10^{-5}	9.6×10^1	2.7×10^1
	Ru-2-3	4	5.60×10^{-7}	2.65×10^{-5}	4.7×10^1	1.2×10^1
	Ru-3-1	7	1.11×10^{-7}	3.07×10^{-5}	2.8×10^2	1.6×10^2
	Ru-3-2	7	4.04×10^{-7}	2.78×10^{-5}	6.9×10^1	1.9×10^1
	Ru-3-3	7	2.05×10^{-7}	2.99×10^{-5}	1.5×10^2	8.2×10^1
	Ru-4-1	11	7.21×10^{-8}	3.18×10^{-5}	4.4×10^2	2.9×10^2
	Ru-4-2	11	7.47×10^{-8}	3.13×10^{-5}	4.2×10^2	1.0×10^2
	Ru-4-3	11	6.80×10^{-8}	3.15×10^{-5}	4.6×10^2	1.8×10^2
	Ru-5-1	32	6.69×10^{-8}	3.10×10^{-5}	4.6×10^2	1.4×10^2
	Ru-5-2	32	6.87×10^{-8}	3.12×10^{-5}	4.5×10^2	1.1×10^2
	Ru-5-3	32	7.09×10^{-8}	3.13×10^{-5}	4.4×10^2	1.7×10^2
泥	Ru-10-1	2	1.95×10^{-8}	3.13×10^{-5}	1.6×10^3	1.6×10^3
	Ru-10-2	2	3.22×10^{-8}	3.16×10^{-5}	9.8×10^2	7.5×10^2
	Ru-10-3	2	2.06×10^{-8}	3.15×10^{-5}	1.5×10^3	1.5×10^3
	Ru-11-1	4	3.79×10^{-8}	3.15×10^{-5}	8.3×10^2	6.4×10^2
	Ru-11-2	4	2.36×10^{-8}	3.17×10^{-5}	1.3×10^3	1.0×10^3
	Ru-11-3	4	6.52×10^{-9}	3.18×10^{-5}	4.9×10^3	4.8×10^3
	Ru-12-1	7	9.28×10^{-9}	3.19×10^{-5}	3.4×10^3	3.4×10^3
	Ru-12-2	7	1.22×10^{-8}	3.16×10^{-5}	2.6×10^3	2.5×10^3
	Ru-12-3	7	8.70×10^{-9}	3.21×10^{-5}	3.7×10^3	1.0×10^3
	Ru-13-1	11	1.08×10^{-8}	3.16×10^{-5}	2.9×10^3	5.2×10^2
	Ru-13-2	11	9.32×10^{-9}	3.18×10^{-5}	3.4×10^3	1.7×10^3
	Ru-13-3	11	1.01×10^{-8}	3.16×10^{-5}	3.1×10^3	1.1×10^3
	Ru-14-1	32	1.01×10^{-8}	3.17×10^{-5}	3.1×10^3	1.4×10^3
	Ru-14-2	32	9.84×10^{-9}	3.17×10^{-5}	3.2×10^3	1.5×10^3
	Ru-14-3	32	9.84×10^{-9}	3.18×10^{-5}	3.2×10^3	1.3×10^3

表 2.2.2-12 ^{60}Co 解吸分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
沙	JCo-1-1	20	9.57×10^2	4.41×10^6	4.6×10^3	8.3×10^2
	JCo-1-2	20	5.78×10^2	5.20×10^6	9.0×10^3	2.2×10^3
	JCo-1-3	20	1.15×10^3	5.71×10^6	4.9×10^3	7.9×10^2
	JCo-2-1	40	9.20×10^2	5.39×10^6	5.9×10^3	1.6×10^3
	JCo-2-2	40	7.97×10^2	4.94×10^6	6.2×10^3	1.1×10^3
	JCo-2-3	40	8.94×10^2	5.15×10^6	5.8×10^3	1.1×10^3
泥	JCo-11-1	20	1.86×10^3	7.66×10^6	4.1×10^3	6.0×10^2
	JCo-11-2	20	1.37×10^3	7.60×10^6	5.5×10^3	1.0×10^3
	JCo-11-3	20	1.77×10^3	7.65×10^6	4.3×10^3	6.6×10^2
	JCo-12-1	40	1.23×10^3	5.70×10^6	4.6×10^3	1.0×10^3
	JCo-12-2	40	1.41×10^3	6.40×10^6	4.5×10^3	8.1×10^2
	JCo-12-3	40	1.21×10^3	5.68×10^6	4.7×10^3	9.5×10^2

表 2.2.2-13 ^{137}Cs 解吸分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
沙	JCs-1-1	20	3.50×10^2	7.08×10^6	2.0×10^4	4.4×10^3
	JCs-1-2	20	5.81×10^2	7.05×10^6	1.2×10^4	1.9×10^3
	JCs-1-3	20	4.91×10^2	7.45×10^6	1.5×10^4	2.7×10^3
	JCs-2-1	40	4.60×10^2	7.85×10^6	1.7×10^4	3.7×10^3
	JCs-2-2	40	4.26×10^2	7.69×10^6	1.8×10^4	3.4×10^3
	JCs-2-3	40	3.89×10^2	7.75×10^6	2.0×10^4	3.9×10^3
泥	JCs-11-1	20	3.33×10^2	9.06×10^6	2.7×10^4	8.7×10^3
	JCs-11-2	20	3.37×10^2	8.77×10^6	2.6×10^4	8.0×10^3
	JCs-11-3	20	3.61×10^2	8.73×10^6	2.4×10^4	6.9×10^3
	JCs-12-1	40	2.87×10^2	8.99×10^6	3.1×10^4	1.0×10^4
	JCs-12-2	40	2.55×10^2	8.57×10^6	3.4×10^4	9.5×10^3
	JCs-12-3	40	3.01×10^2	8.97×10^6	3.0×10^4	9.1×10^3

表 2.2.2-14 ⁹⁰Sr 解吸分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{Kd}
沙	JSr-1-1	20	2.06×10 ⁵	5.67×10 ⁶	2.8×10 ¹	1.7×10 ⁰
	JSr-1-2	20	1.89×10 ⁵	6.43×10 ⁶	3.4×10 ¹	2.1×10 ⁰
	JSr-1-3	20	2.19×10 ⁵	5.96×10 ⁶	2.7×10 ¹	1.7×10 ⁰
	JSr-2-1	40	1.45×10 ⁵	6.67×10 ⁶	4.6×10 ¹	2.9×10 ⁰
	JSr-2-2	40	1.67×10 ⁵	6.32×10 ⁶	3.8×10 ¹	2.3×10 ⁰
	JSr-2-3	40	1.39×10 ⁵	6.67×10 ⁶	4.8×10 ¹	2.9×10 ⁰
泥	JSr-11-1	20	1.16×10 ⁵	1.10×10 ⁷	9.4×10 ¹	5.4×10 ⁰
	JSr-11-2	20	1.30×10 ⁵	1.18×10 ⁷	9.1×10 ¹	5.1×10 ⁰
	JSr-11-3	20	1.13×10 ⁵	1.17×10 ⁷	1.0×10 ²	5.9×10 ⁰
	JSr-12-1	40	1.16×10 ⁵	1.26×10 ⁷	1.1×10 ²	6.1×10 ⁰
	JSr-12-2	40	9.18×10 ⁴	1.10×10 ⁷	1.2×10 ²	6.6×10 ⁰
	JSr-12-3	40	9.04×10 ⁴	1.14×10 ⁷	1.3×10 ²	6.9×10 ⁰

表 2.2.2-15 Ru 解吸分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相浓度 (mol/l)	固相浓度 (mol/kg)	K _d (l/kg)	σ _{Kd}
沙	JRu-1-1	20	6.90×10 ⁻⁶	3.17×10 ⁻²	4.6×10 ³	4.6×10 ³
	JRu-1-2	20	6.90×10 ⁻⁶	3.20×10 ⁻²	4.6×10 ³	4.6×10 ³
	JRu-1-3	20	6.76×10 ⁻⁶	3.17×10 ⁻²	4.7×10 ³	4.7×10 ³
	JRu-2-1	40	8.76×10 ⁻⁶	3.15×10 ⁻²	3.6×10 ³	3.6×10 ³
	JRu-2-2	40	7.28×10 ⁻⁶	3.20×10 ⁻²	4.4×10 ³	4.4×10 ³
	JRu-2-3	40	6.87×10 ⁻⁶	3.16×10 ⁻²	4.6×10 ³	4.6×10 ³
泥	JRu-11-1	20	2.42×10 ⁻⁵	3.16×10 ⁻²	1.3×10 ³	1.0×10 ³
	JRu-11-2	20	1.64×10 ⁻⁵	3.18×10 ⁻²	1.9×10 ³	1.5×10 ³
	JRu-11-3	20	1.63×10 ⁻⁵	3.19×10 ⁻²	2.0×10 ³	1.5×10 ³
	JRu-12-1	40	1.78×10 ⁻⁵	3.23×10 ⁻²	1.8×10 ³	1.8×10 ³
	JRu-12-2	40	2.04×10 ⁻⁵	3.18×10 ⁻²	1.6×10 ³	1.6×10 ³
	JRu-12-3	40	1.59×10 ⁻⁵	3.18×10 ⁻²	2.0×10 ³	2.0×10 ³

表 2.2.2-16 pH 值对 Ru 分配系数的影响

试验管编号	pH	取样时间 (d)	液相浓度 (mol/l)	固相浓度 (mol/kg)	K_d (l/kg)	
沙	Ru-17-A	4~5	30	9.00×10^{-7}	2.36×10^{-5}	2.6×10^1
	Ru-18-A	4~5	40	8.66×10^{-7}	2.41×10^{-5}	2.8×10^1
	Ru-19-A	4~5	50	9.18×10^{-7}	2.38×10^{-5}	2.6×10^1
	Ru-17-B	6~7	30	2.50×10^{-7}	2.32×10^{-5}	9.3×10^1
	Ru-18-B	6~7	40	2.38×10^{-7}	2.29×10^{-5}	9.6×10^1
	Ru-19-B	6~7	50	2.47×10^{-7}	2.22×10^{-5}	9.0×10^1
	Ru-17-C	7~8	30	6.89×10^{-8}	3.12×10^{-5}	4.5×10^2
	Ru-18-C	7~8	40	7.16×10^{-8}	3.15×10^{-5}	4.4×10^2
	Ru-19-C	7~8	50	6.40×10^{-8}	2.80×10^{-5}	4.4×10^2
泥	Ru-21-A	4~5	30	3.42×10^{-8}	3.17×10^{-5}	9.3×10^2
	Ru-22-A	4~5	40	3.73×10^{-8}	3.15×10^{-5}	8.4×10^2
	Ru-23-A	4~5	50	3.41×10^{-8}	3.17×10^{-5}	9.3×10^2
	Ru-21-B	6~7	30	1.21×10^{-8}	2.32×10^{-5}	1.9×10^3
	Ru-22-B	6~7	40	1.12×10^{-8}	2.33×10^{-5}	2.1×10^3
	Ru-23-B	6~7	50	1.20×10^{-8}	2.34×10^{-5}	1.9×10^3
	Ru-21-C	7~8	30	8.83×10^{-9}	2.79×10^{-5}	3.2×10^3
	Ru-22-C	7~8	40	8.75×10^{-9}	2.80×10^{-5}	3.2×10^3
	Ru-23-C	7~8	50	8.99×10^{-9}	2.79×10^{-5}	3.1×10^3

注：-A、-B、-C 均为三个平行样的平均值。

表 2.2.2-17 不同粒径对 ^{60}Co 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}	
沙	Co-50-1	0.2~0.3	1.01×10^4	1.56×10^6	1.5×10^2	2.7×10^1
	Co-50-2	0.2~0.3	8.83×10^3	1.51×10^6	1.7×10^2	3.3×10^1
	Co-51-1	0.125~0.15	4.38×10^3	1.01×10^6	2.3×10^2	5.9×10^1
	Co-51-2	0.125~0.15	3.78×10^3	9.59×10^5	2.5×10^2	6.7×10^1
	Co-52-1	<0.125	1.19×10^4	1.88×10^6	1.6×10^2	2.3×10^1
	Co-52-2	<0.125	2.30×10^3	9.59×10^5	4.2×10^2	1.4×10^2
泥	Co-54-1	0.08~0.095	5.00×10^3	1.38×10^7	2.8×10^3	8.0×10^2
	Co-54-2	0.08~0.095	5.54×10^3	1.29×10^7	2.3×10^3	5.6×10^2
	Co-55-1	0.075~0.08	1.10×10^4	1.44×10^7	1.3×10^3	2.7×10^2
	Co-55-2	0.075~0.08	5.52×10^3	1.59×10^7	2.9×10^3	7.0×10^2
	Co-56-1	<0.075	5.57×10^3	1.30×10^7	2.3×10^3	5.7×10^2
	Co-56-2	<0.075	5.13×10^3	1.38×10^7	2.7×10^3	6.8×10^2

表 2.2.2-18 不同粒径对 ^{137}Cs 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}	
沙	Cs-50-1	0.2~0.3	1.15×10^4	1.22×10^7	1.1×10^3	3.0×10^2

	Cs-50-2	0.2~0.3	8.58×10^3	1.20×10^7	1.4×10^3	5.3×10^2
	Cs-51-1	0.125~0.15	5.00×10^3	1.23×10^7	2.5×10^3	7.9×10^2
	Cs-51-2	0.125~0.15	5.58×10^3	1.20×10^7	2.1×10^3	5.8×10^2
	Cs-52-1	<0.125	3.30×10^3	9.51×10^6	2.9×10^3	1.8×10^3
	Cs-52-2	<0.125	3.74×10^3	1.05×10^7	2.8×10^3	1.4×10^3
泥	Cs-54-1	0.08~0.095	3.12×10^3	1.58×10^7	5.1×10^3	2.8×10^3
	Cs-54-2	0.08~0.095	2.39×10^3	1.64×10^7	6.8×10^3	4.7×10^3
	Cs-55-1	0.075~0.08	1.01×10^4	2.28×10^7	2.3×10^3	3.0×10^2
	Cs-55-2	0.075~0.08	2.95×10^3	2.39×10^7	8.1×10^3	3.5×10^3
	Cs-56-1	<0.075	5.14×10^3	1.97×10^7	3.8×10^3	1.1×10^3
	Cs-56-2	<0.075	2.78×10^3	2.04×10^7	7.3×10^3	4.2×10^3

表 2.2.2-19 不同粒径对 ^{90}Sr 分配系数的影响

试验管编号		粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
沙	Sr-50-1	0.2~0.3	5.27×10^5	7.55×10^6	1.4×10^1	1.3×10^{-1}
	Sr-50-2	0.2~0.3	6.49×10^5	8.26×10^6	1.3×10^1	1.1×10^{-1}
	Sr-51-1	0.125~0.15	4.78×10^5	8.14×10^6	1.7×10^1	1.5×10^{-1}
	Sr-51-2	0.125~0.15	5.71×10^5	8.38×10^6	1.5×10^1	1.3×10^{-1}
	Sr-52-1	<0.125	5.57×10^5	9.20×10^6	1.7×10^1	1.4×10^{-1}
	Sr-52-2	<0.125	4.62×10^5	9.18×10^6	2.0×10^1	1.8×10^{-1}
泥	Sr-54-1	0.08~0.095	4.38×10^5	2.51×10^7	5.7×10^1	3.1×10^0
	Sr-54-2	0.08~0.095	4.25×10^5	2.56×10^7	6.0×10^1	3.3×10^0
	Sr-55-1	0.075~0.08	3.94×10^5	2.54×10^7	6.4×10^1	3.6×10^0
	Sr-55-2	0.075~0.08	3.96×10^5	2.58×10^7	6.5×10^1	3.5×10^0
	Sr-56-1	<0.075	4.74×10^5	2.21×10^7	4.7×10^1	2.7×10^0
	Sr-56-2	<0.075	4.81×10^5	2.30×10^7	4.8×10^1	2.7×10^0

表 2.2.2-20 不同粒径对 Ru 分配系数的影响

试验管编号		粒径 (mm)	液相浓度 (mol/l)	固相浓度 (mol/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
沙	Ru-50-1	0.2~0.3	1.07×10^{-6}	3.39×10^{-4}	3.2×10^2	2.8×10^1
	Ru-50-2	0.2~0.3	9.38×10^{-7}	3.59×10^{-4}	3.8×10^2	3.3×10^1
	Ru-51-1	0.125~0.15	9.88×10^{-7}	3.44×10^{-4}	3.5×10^2	3.0×10^1
	Ru-51-2	0.125~0.15	8.30×10^{-7}	3.69×10^{-4}	4.4×10^2	3.8×10^1
	Ru-52-1	<0.125	4.57×10^{-7}	2.54×10^{-4}	5.6×10^2	1.7×10^2
	Ru-52-2	<0.125	4.45×10^{-7}	2.56×10^{-4}	5.8×10^2	1.8×10^2
泥	Ru-54-1	0.08~0.095	1.05×10^{-7}	4.28×10^{-4}	4.1×10^3	1.5×10^2
	Ru-54-2	0.08~0.095	1.36×10^{-7}	4.41×10^{-4}	3.3×10^3	1.2×10^2
	Ru-55-1	0.075~0.08	1.25×10^{-7}	4.29×10^{-4}	3.4×10^3	1.2×10^2
	Ru-55-2	0.075~0.08	1.20×10^{-7}	4.35×10^{-4}	3.6×10^3	1.3×10^2
	Ru-56-1	<0.075	1.46×10^{-7}	4.48×10^{-4}	3.1×10^3	1.1×10^2
	Ru-56-2	<0.075	1.18×10^{-7}	4.33×10^{-4}	3.7×10^3	1.3×10^2



图 2.2.2-5 河边淤泥

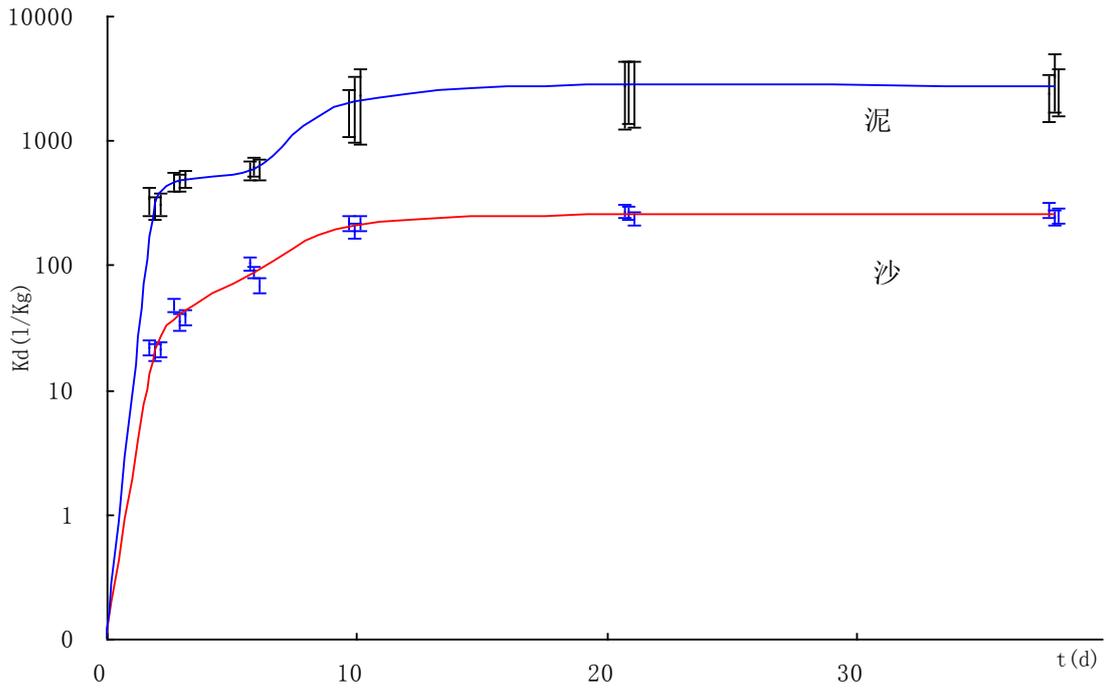


图 2.2.2-6 ^{60}Co 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

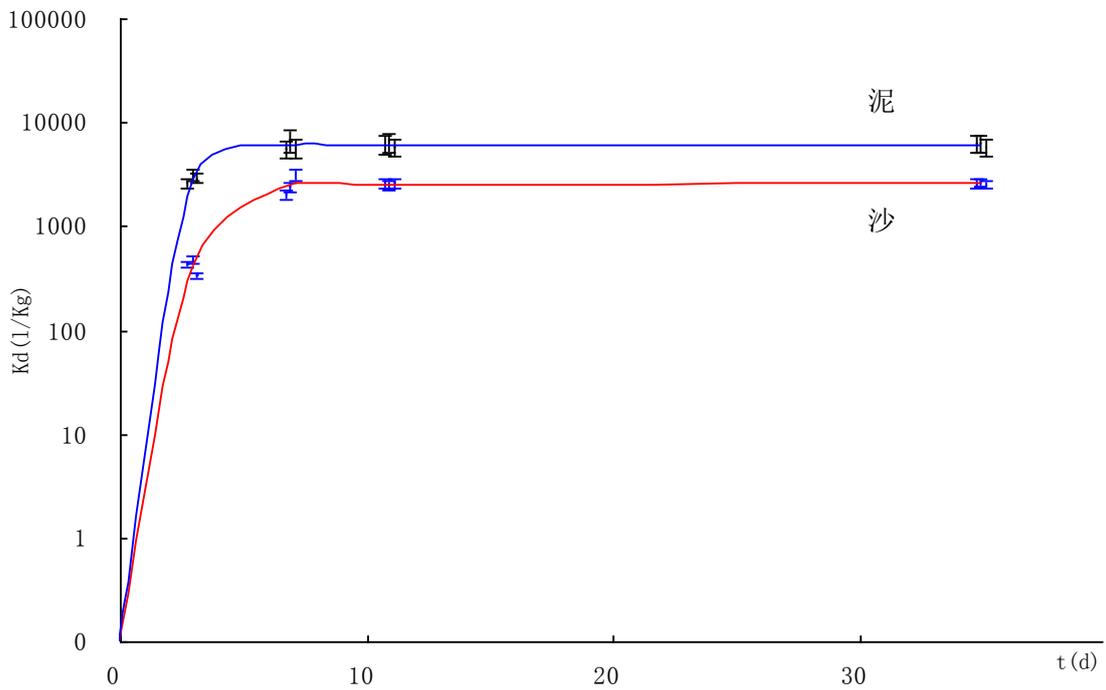


图 2.2.2-7 ^{137}Cs 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

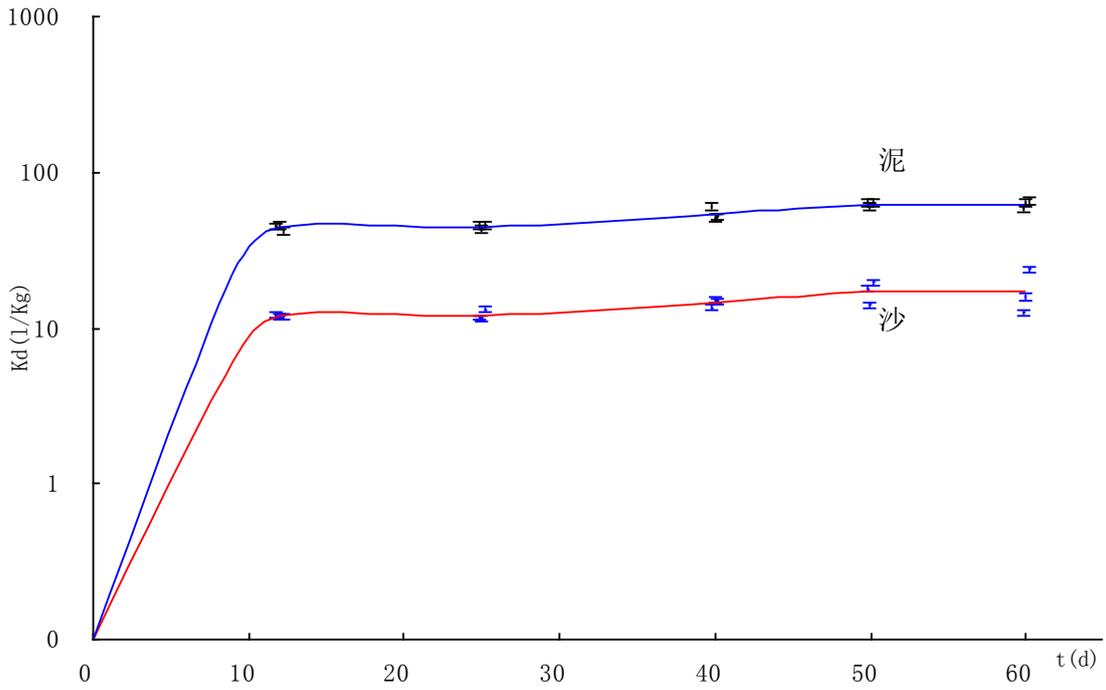


图 2.2.2-8 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

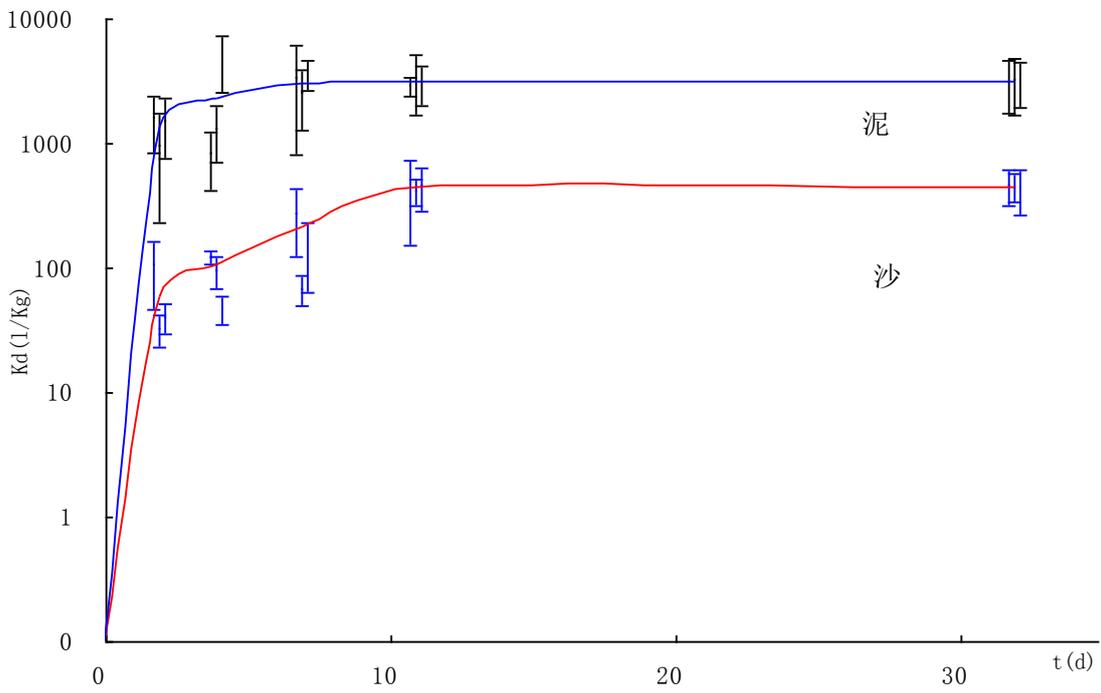


图 2.2.2-9 Ru 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

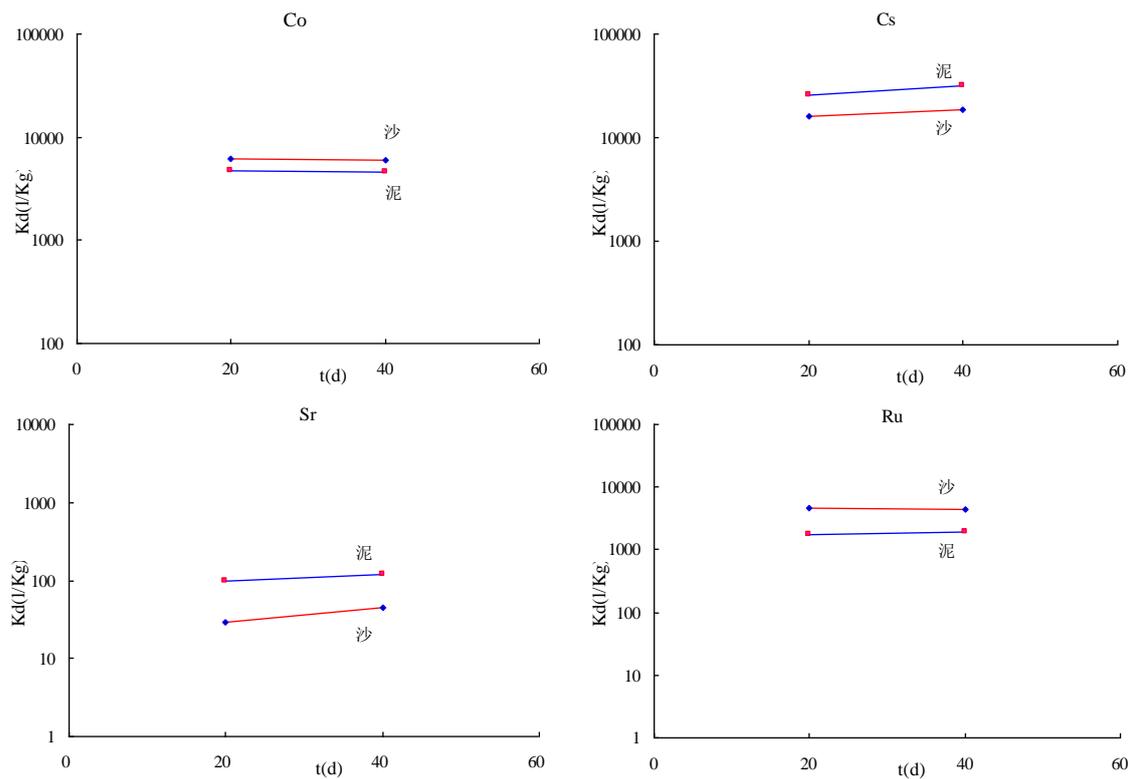


图 2.2.2-10 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 Ru 解吸实验结果

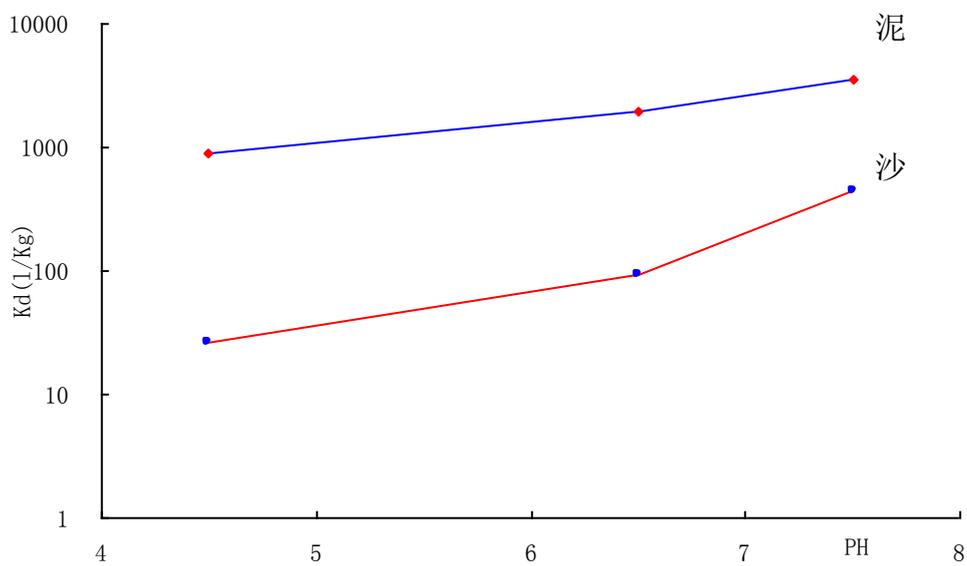


图 2.2.2-11 pH 值对 Ru 分配系数的影响

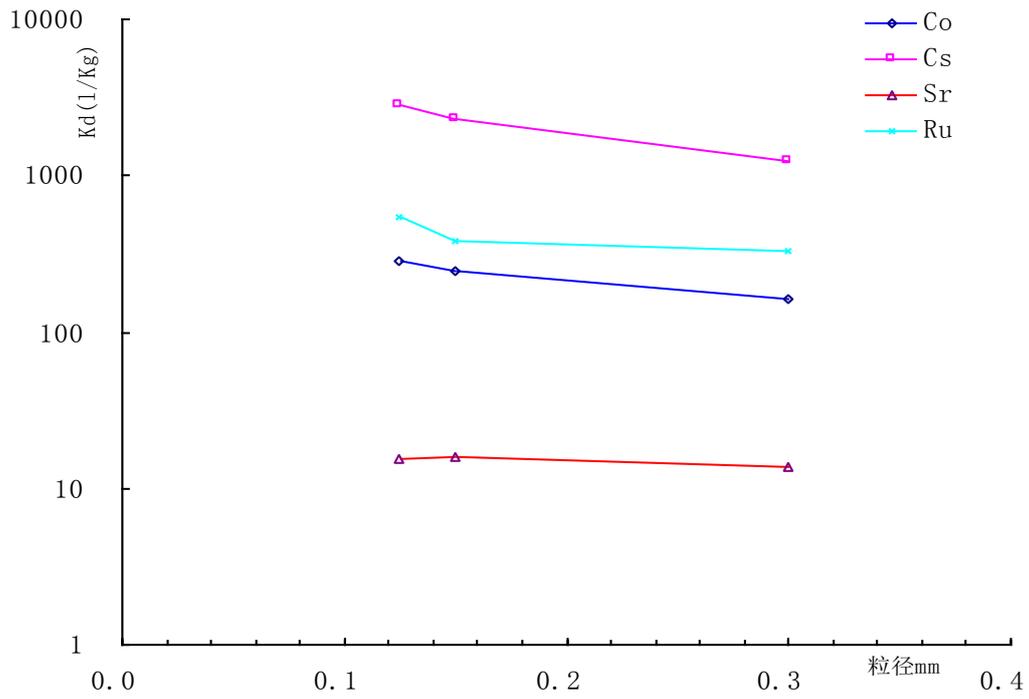


图 2.2.2-12 沙中各核素分配系数随粒径的变化

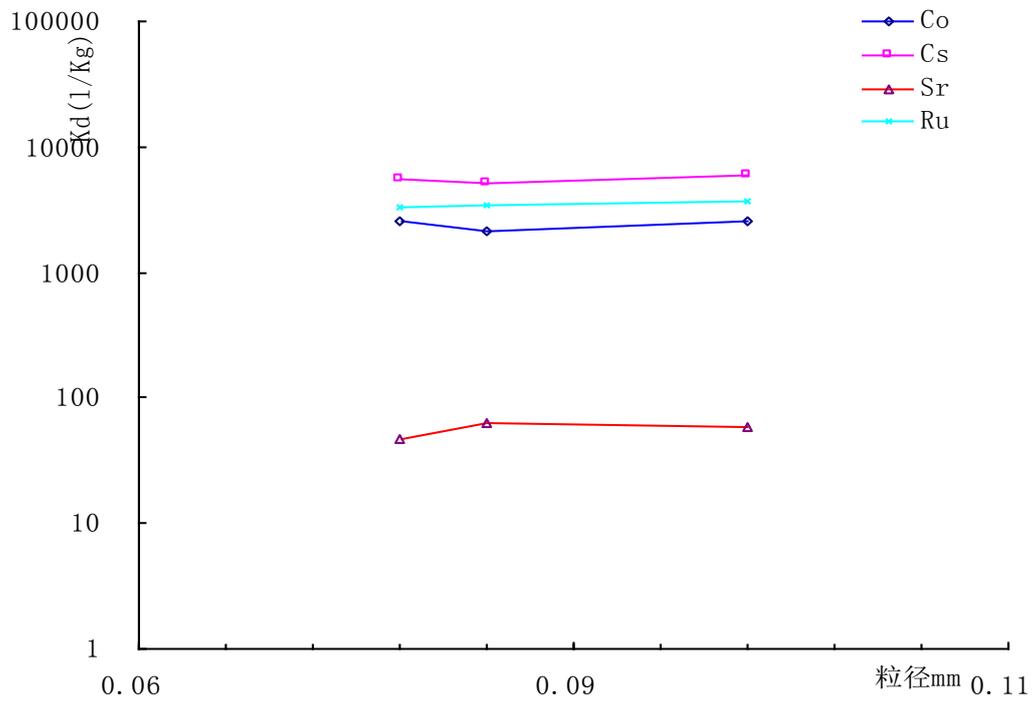


图 2.2.2-13 泥中各核素分配系数随粒径的变化

2.2.3 广西平南

广西平南核电厂厂址位于平南县丹竹镇龙石面村，地理位置为东经 $110^{\circ}34'28''$ ，北纬 $23^{\circ}27'06''$ ，距平南县县政府驻地平南镇约20km，距贵港市约100km，距南宁市约230km。广西平南核电厂地理位置见图2.2.3-1。平南厂址地处浔江北岸，电厂规划建设4台AP1000压水堆核电机组，四台机组一次性规划，分期建设。

广西平南核电厂循环水系统和厂用水系统补给水取自浔江。循环水系统采用带有自然通风冷却塔的二次循环冷却方案，在厂址南侧设置取水口和升压泵站，可满足循环冷却用水补给水的要求。核电厂取水口拟设置在核电厂区南侧的龙石山岬角处。该处河岸岸线为礁石，岸滩稳定，不存在崩岸现象。河道深泓靠岸较近，约140m，平面摆动较小且深泓高程较低；主流靠近河岸，不受上下游浅滩发育影响，无回流等不利流态产生，具备优良的取水条件，四台机组夏季所需冷却水补给水量约为 $6.0\text{m}^3/\text{s}$ 。排水口拟设置在取水口下游约1km处，该河段岸线顺直，岸滩稳定。核电厂在运行过程中，经处理合格并达到排放标准后的低放废水，将与冷却塔排污水混合后一起排入浔江，排水口位于厂址下游已建成的长洲水利枢纽回水区。

2.2.3.1 流域概况

厂址位于西江干流浔江河段、大湟江口水文站的下游，其间没有大的来水加入。该河段主要控制站大湟江口站集水面积 288544km^2 ，多年平均径流量 $5620\text{m}^3/\text{s}$ ；保证率97%月平均流量 $825\text{m}^3/\text{s}$ 。径流量年际变化相对较小，但径流年内分配不均匀，5月~10月径流量占全年的80.91%。下游长洲水利枢纽工程建成后，厂址位于水库回水区，厂址的水位约18.72~24m，平均水深约18m。

厂址下游河道原来的河床多为沙质河床，个别河滩或深潭中夹有砾石，长洲水利枢纽于2007年建成后，沿江河水水位平均抬高了约10m，岸边河床大部分地区均为原来河边的滩地、淤泥。由于枢纽上游水库的拦截，长洲枢纽的入库推移质产沙面积不大，入库推移质泥沙数量极少，因此长洲水利枢纽的水库泥沙淤积主要是悬移质泥沙淤积。对每一个水文年，非汛期水库以淤积为主，很少发生冲刷；汛期的冲淤趋势为大流量发生冲刷，中小流量发生淤积。厂址所在河道总体上呈轻微淤积状态。

2.2.3.2 样品的采集

根据现场实地勘察，选取能代表大多数水域情况的采样地点进行采样，在以下三个地点进行了取样，一处位于排水口下游约4公里处，一处位于排水口下游约19公里处的濠江镇附近，一处位于排水口下游约43公里处的藤县县城附近。取样点位置见图2.2.3-2。在三处地点均收集了两种样品（泥和沙），并将这三个地点的泥或沙分别保存，运回实验室进行预处理。

2009年6月12日，进行了土壤样品和水样的采集。土壤样品采用浔江河床的沉积物样品，水样用浔江水，悬浮物样品则采集浔江河水中的悬浮物。采样点水沙情况见图2.2.3-3、图2.2.3-4。

由于长洲水利枢纽的建成，沿江河水水位平均抬高了10m以上，河床大部分地区均为原来河边的滩地、淤泥，岸边的植被较好，只在部分小溪汇入处有很少量的沙子，因而用泥样代表浔江大部分的河床。由于沙子的量很少，难以进行筛分以得到沙子的粒径分布，因此实验时将沙子进行研磨，粉碎成粒径200目以下进行实验。河水清澈，悬沙很少。

为尽量避免水样的化学性质发生变化，采集后用塑料桶密封盛装水样，运输回实验室在4°C下进行冷藏保存。

2.2.3.3 核素吸附特性模拟实验

根据放射性废液排放源项，并综合考虑核素的半衰期、毒性等，确定了四种有代表性的放射性核素Ru、¹³⁷Cs、⁶⁰Co、⁹⁰Sr，用静态批试法进行核素吸附特性的模拟实验。

1) 粒径分布

对沙子进行研磨预处理，全部粉碎成粒径200目以下。对泥样进行筛分预处理，得到粒径分布。实验时每个试验管所用沙子和泥均为1g，实验用泥按照各个粒径所占质量的组分称重，并将其混合均匀。沙子则直接称取1g的量进行实验。泥的实验组成见表2.2.3-1。

2) 土样的化学成分分析及矿物组成

土壤矿物质是岩石经物理风化作用和化学风化作用形成的，占土壤固相部分总重量90%以上。土壤粘粒矿物是土壤矿物质中最活跃的部分，它的类型决定了土壤对放射性核素吸附能力的大小。由于土壤的物质组成和化学成分等条件都会影响土壤介质对核素的吸附性能，进而影响到分配系数，因而在进行吸附实验前，需要对土样的理化性质进行测试和分析。

土壤的矿物组成和化学成分分析由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心河南省岩石矿物测试中心进行测定，测得的矿物组成和化学成分结果列于表2.2.3-2和表2.2.3-3。由此可见，样品中主要化学成分以SiO₂为主，泥中含量占了65.11%。其次为Al₂O₃，含量约为13%。其余还有少量的Fe₂O₃、CaO、K₂O、MgO等。

泥中主要矿物成份为含氧化物矿物，如石英、长石，其中石英的比重最大，接近60%。次生粘土矿物有云母(伊利石)、绿泥石等，其中黑云母约占20%，绿泥石约10%，泥中还有约1~2%的磁铁矿。

3) 水样的化学成分分析

同样，水样的化学性质（如PH值）也会影响分配系数的大小，且水样中有无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响，因此用ICP-MS对水样的⁵⁹Co、¹³³Cs、⁸⁸Sr 和¹⁰¹Ru 的本底进行了测量，结果见表2.2.3-4。

取样点附近的水外观清澈、无沉淀，PH呈弱碱性。水中在ICP-MS检测限内没有检出钴和铯，说明水的本底中基本没有钴和铯，或者说钴和铯含量极低。钐的含量为 6.931×10^{-10} mol/L，水中钐的含量也很低。而锶的含量为 1.030×10^{-6} mol/L，现场水中锶的含量较高，可能会对锶的吸附实验产生影响。

4) 吸附实验过程

取15ml的聚乙烯塑料离心管，洗净后晾干，向每个离心管中加入9.2ml的溶液，溶液为现场所取的水样，再称取(1±0.002)克的泥/沙放入管中，盖紧盖子，摇匀，静置七天。吸附实验开始后向盛有泥/沙和水的离心管中加入0.8ml 含放射性核素的溶液，溶液中四种核素（¹³⁷Cs、⁶⁰Co、⁹⁰Sr、Ru）的投放量按照仪器的最低检测限来定，具体四种核素在每个离心管中的投放量见表2.2.3-5。立即将之振荡使固液充分混合，并且在实验时间内每天都要放入振荡器中振荡两次（上午下午各一次，每次不少于60分钟）。间隔不同时间取样测量，直至吸附平衡为止，计算分配系数*K_d*。

吸附实验共进行了近两个月，实验条件及测量方法见表2.2.3-6。

(1) ⁶⁰Co 吸附实验结果

在加入⁶⁰Co后的第2、10、25、40、55天进行取样，每次取三个平行样(最后一位数字-1、-2、-3为平行样编号)。先将试验管离心三十分钟，然后分别取出管中的液体和固体。液体直接测量活度，然后计算其比活度，固体则先烘干，在烘

箱中自然降温后称重测量其活度，将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度，再算得固相比活度；最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数 K_d 。 σ_{K_d} 为测量的统计误差。 ^{60}Co 的吸附实验结果见表2.2.3-7。

^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.3-5。由图表可以看出， ^{60}Co 在沙和泥中的平衡均较快，平衡时间很短，在加入 ^{60}Co 后2天就基本达到吸附平衡。 ^{60}Co 在沙的分配系数约为 $2.2\text{E}+03\text{L/kg}$ ，在泥中分配系数约为 $9.2\text{E}+03\text{L/kg}$ 。

(2) ^{137}Cs 吸附实验结果

在加入 ^{137}Cs 后的第2、6、20、30、50天进行取样，取样过程同上。 ^{137}Cs 的吸附实验结果见表2.2.3-8。 ^{137}Cs 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.3-6。由图表可以看出， ^{137}Cs 在沙和泥中的平衡时间均较短。 ^{137}Cs 在沙中的分配系数接近 $4.0\text{E}+03\text{L/kg}$ ，基本在加入 ^{137}Cs 的6天前达到吸附平衡。在泥中分配系数接近 $1.1\text{E}+04\text{L/kg}$ ，且吸附速度很快，平衡时间很短，在加入 ^{137}Cs 后第2天就达到了吸附平衡。

(3) ^{90}Sr 吸附实验结果

在加入 ^{90}Sr 后的第2、10、25、40、55天进行取样，取样过程同上。 ^{90}Sr 的吸附实验结果见表2.2.3-9。 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.3-7。由图表可以看出， ^{90}Sr 在沙中的分配系数很小，约为 $1.3\text{E}+01\text{L/kg}$ ，在泥中分配系数有 $4.2\text{E}+01\text{L/kg}$ ，吸附平衡时间均很短，在加入 ^{90}Sr 后第2天就达到了吸附平衡。 ^{90}Sr 在这两种土壤样品中的吸附分配系数均很小，这可能与前面测得的水中锶本底值很高有关。由于现场锶本底值很高，减少了所加入的 ^{90}Sr 的吸附。

(4) Ru 吸附实验结果

在加入 Ru 后的第5、10、20、35、50天进行取样，取样过程同上。 Ru 的吸附实验结果见表2.2.3-10。 Ru 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.3-8。由图表可以看出， Ru 在沙和泥中的分配系数相近，约为 $5.0\text{E}+03\text{L/kg}$ 。平衡时间都较长，泥约在加入 Ru 后20天左右基本达到吸附平衡，而沙的平衡时间约为30天左右。

(5) 悬浮物实验结果及讨论

采集河水中的悬浮物样品，晒干后称取 1g 的重量放入试验瓶中，分别按固液比 $1:500\text{g/ml}$ 加入河水，盖紧盖子，摇匀，静置七天。吸附实验开始后向盛有

悬浮物和河水的试验瓶中各加入15ml含四种放射性核素(^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 Ru)的溶液, 立即将之振荡使固液充分混合, 并且在实验时间内每天都要振荡两次。在实验进行40天后取样测量, 计算分配系数 K_d 。悬浮物实验结果见表2.2.3-11。

四种核素的悬浮物实验结果并与固液比为1: 10g/ml 的泥的实验值相比较所得结果见图2.2.3-9。

由图表可以看出, 三种核素(^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 Ru)的分配系数均随着固液比的减小, K_d 值稍有增大, 而 ^{60}Co 的实验结果正好相反, 其分配系数均随着固液比的减小而略有减小, 但变化范围都不大, 表明不同固液比对 K_d 值的影响不明显。

5) 不同粒径实验结果

将泥分成不同的粒径, 测量不同的粒径对分配系数的影响。共做了三组, 粒径分别为0.08~0.095mm、0.075~0.08mm 及0.075mm 以下。每种样品做两个平行样, 固体样品均加入1g 左右, 放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 及 Ru 各约0.8ml, 固液比1:10g/ml。在实验时间内将实验管每天放入振荡器中振荡, 放置40 天后进行取样。实验结果见表2.2.3-12~表2.2.3-15。不同核素分配系数随粒径的变化曲线见图2.2.3-10。可以看出, 四种核素在泥中的分配系数变化不大, 基本变化趋势不太明显, 主要因为不同泥的粒径差别不大, 比表面积也差别不大, 其吸附性能基本相同。

表 2.2.3-1 沙样中各粒径的质量组分(%)

沙	粒径(目)	160~180	180~200	>200
	粒径(mm)	0.08~0.095	0.075~0.08	<0.075
	质量组分	68	24	8

表 2.2.3-2 泥样中主要化学成分的质量组分(%)

化学成份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
质量组分	65.11	12.97	7.79	1.96	1.39	1.78	0.66

表 2.2.3-3 泥样中主要矿物质的质量组分(%)

矿物成份	石英	斜长石	绿泥石	高岭石	方解石	黑云母	磁铁矿
质量组分	56~58	3~5	10~12	3~5	3~5	15~20	1~2

表 2.2.3-4 水样 pH 值和 ⁵⁹Co、¹³³Cs、⁸⁸Sr 和 ¹⁰¹Ru 的含量(mol/l)

分析项目	外观描述	pH	本底值			
			⁵⁹ Co	¹³³ Cs	⁸⁸ Sr	¹⁰¹ Ru
水样	澄清, 无沉淀	7.74	≤1.697×10 ⁻⁸	≤7.524×10 ⁻⁹	1.030×10 ⁻⁶	7.524×10 ⁻¹⁰

表 2.2.3-5 每个试样吸附实验中各核素的投放量

核素	Co	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	Ru
化学浓度(mol/l)	6.32×10 ⁻⁷	1.62×10 ⁻⁸	1.41×10 ⁻⁸	4.53×10 ⁻⁵
投放量	6.3×10 ⁴ Bq	5.71×10 ⁴ Bq	4.99×10 ⁴ Bq	4.09×10 ⁸ mol

表 2.2.3-6 吸附实验条件及测量方法

实验条件	水	土	运输及储存	实验温度
	河水	沉积物样品	低温密封, 冷藏	室温
测量方法	Ru	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	⁹⁰ Sr
	ICP-MS	γ 谱	γ 谱	放化分析(液闪)/γ 谱

表 2.2.3-⁷⁶⁰Co 吸附分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{Kd}
泥	Co-1-1	2	7.96E+00	7.26E+04	9.1E+03	4.4E+02
	Co-1-2	2	6.44E+00	5.90E+04	9.1E+03	4.1E+02
	Co-1-3	2	6.59E+00	5.99E+04	9.1E+03	4.4E+02
	Co-2-1	10	7.05E+00	6.51E+04	9.2E+03	4.4E+02
	Co-2-2	10	7.10E+00	6.43E+04	9.1E+03	4.2E+02
	Co-2-3	10	6.94E+00	6.43E+04	9.3E+03	4.3E+02
	Co-3-1	25	7.24E+00	6.66E+04	9.2E+03	4.1E+02
	Co-3-2	25	6.76E+00	6.20E+04	9.2E+03	4.2E+02
	Co-3-3	25	6.63E+00	6.11E+04	9.2E+03	4.1E+02
	Co-4-1	40	6.64E+00	6.20E+04	9.3E+03	4.2E+02
	Co-4-2	40	6.48E+00	5.95E+04	9.2E+03	4.2E+02
	Co-4-3	40	6.94E+00	6.24E+04	9.0E+03	4.1E+02
	Co-5-1	55	6.84E+00	6.27E+04	9.2E+03	4.2E+02
	Co-5-2	55	6.27E+00	5.65E+04	9.0E+03	4.1E+02
	Co-5-3	55	6.78E+00	6.34E+04	9.3E+03	4.5E+02
沙	Co-10-1	2	3.33E+01	6.62E+04	2.0E+03	1.2E+02
	Co-10-2	2	4.33E+01	8.71E+04	2.0E+03	1.2E+02
	Co-10-3	2	4.37E+01	9.16E+04	2.1E+03	1.2E+02
	Co-11-1	10	3.03E+01	6.73E+04	2.2E+03	1.3E+02
	Co-11-2	10	3.06E+01	7.14E+04	2.3E+03	1.2E+02
	Co-11-3	10	3.05E+01	6.72E+04	2.2E+03	1.3E+02
	Co-12-1	25	3.18E+01	7.28E+04	2.3E+03	1.2E+02
	Co-12-2	25	3.40E+01	6.90E+04	2.0E+03	1.1E+02
	Co-12-3	25	3.01E+01	6.65E+04	2.2E+03	1.4E+02
	Co-13-1	40	3.33E+01	6.90E+04	2.1E+03	1.0E+02
	Co-13-2	40	2.94E+01	6.87E+04	2.3E+03	1.1E+02
	Co-13-3	40	3.00E+01	6.65E+04	2.2E+03	1.1E+02
	Co-14-1	55	3.40E+01	7.72E+04	2.3E+03	1.1E+02
	Co-14-2	55	3.21E+01	6.92E+04	2.2E+03	1.1E+02
	Co-14-3	55	2.97E+01	6.31E+04	2.1E+03	1.3E+02

表 2.2.3-8¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}
泥	Cs-1-1	2	5.34E+00	5.54E+04	1.0E+04	3.8E+02
	Cs-1-2	2	5.23E+00	5.28E+04	1.0E+04	3.8E+02
	Cs-1-3	2	4.44E+00	4.88E+04	1.1E+04	4.1E+02
	Cs-2-1	6	5.04E+00	5.40E+04	1.1E+04	4.1E+02
	Cs-2-2	6	4.59E+00	5.19E+04	1.1E+04	4.2E+02
	Cs-2-3	6	5.05E+00	5.35E+04	1.1E+04	4.0E+02
	Cs-3-1	20	5.69E+00	5.64E+04	9.9E+03	3.6E+02
	Cs-3-2	20	4.87E+00	5.41E+04	1.1E+04	4.0E+02
	Cs-3-3	20	5.00E+00	5.58E+04	1.1E+04	4.0E+02
	Cs-4-1	30	4.60E+00	5.38E+04	1.2E+04	4.4E+02
	Cs-4-2	30	4.87E+00	5.23E+04	1.1E+04	4.0E+02
	Cs-4-3	30	5.04E+00	5.44E+04	1.1E+04	4.0E+02
	Cs-5-1	50	5.81E+00	5.38E+04	9.3E+03	3.4E+02
	Cs-5-2	50	4.45E+00	5.29E+04	1.2E+04	4.4E+02
	Cs-5-3	50	4.81E+00	5.45E+04	1.1E+04	4.2E+02
沙	Cs-10-1	2	1.92E+01	5.92E+04	3.1E+03	1.8E+02
	Cs-10-2	2	2.24E+01	7.23E+04	3.2E+03	1.7E+02
	Cs-10-3	2	1.98E+01	6.32E+04	3.2E+03	1.7E+02
	Cs-11-1	6	1.51E+01	5.73E+04	3.8E+03	1.8E+02
	Cs-11-2	6	1.64E+01	6.42E+04	3.9E+03	2.1E+02
	Cs-11-3	6	1.69E+01	6.54E+04	3.9E+03	2.0E+02
	Cs-12-1	20	1.60E+01	6.91E+04	4.3E+03	2.4E+02
	Cs-12-2	20	1.68E+01	6.65E+04	4.0E+03	1.6E+02
	Cs-12-3	20	1.74E+01	6.37E+04	3.7E+03	1.7E+02
	Cs-13-1	30	2.02E+01	8.70E+04	4.3E+03	2.1E+02
	Cs-13-2	30	1.98E+01	6.92E+04	3.5E+03	1.8E+02
	Cs-13-3	30	1.72E+01	7.07E+04	4.1E+03	2.0E+02
	Cs-14-1	50	1.41E+01	6.36E+04	4.5E+03	2.4E+02
	Cs-14-2	50	1.54E+01	6.10E+04	4.0E+03	2.1E+02
	Cs-14-3	50	1.46E+01	5.07E+04	3.5E+03	1.9E+02

表 2.2.3-9¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}
泥	Sr-1-1	2	1.24E+03	5.04E+04	4.1E+01	1.3E+00
	Sr-1-2	2	1.14E+03	4.68E+04	4.1E+01	1.3E+00
	Sr-1-3	2	1.12E+03	4.67E+04	4.2E+01	1.3E+00
	Sr-2-1	10	1.14E+03	5.11E+04	4.5E+01	1.4E+00
	Sr-2-2	10	1.28E+03	4.94E+04	3.8E+01	1.2E+00
	Sr-2-3	10	1.15E+03	4.78E+04	4.1E+01	1.4E+00
	Sr-3-1	25	1.16E+03	5.13E+04	4.4E+01	1.5E+00
	Sr-3-2	25	1.18E+03	4.91E+04	4.2E+01	1.4E+00
	Sr-3-3	25	1.18E+03	4.93E+04	4.2E+01	1.3E+00
	Sr-4-1	40	1.22E+03	4.98E+04	4.1E+01	1.3E+00
	Sr-4-2	40	1.16E+03	4.89E+04	4.2E+01	1.4E+00
	Sr-4-3	40	1.15E+03	4.64E+04	4.0E+01	1.3E+00
	Sr-5-1	55	1.19E+03	4.92E+04	4.1E+01	1.4E+00
	Sr-5-2	55	1.14E+03	4.73E+04	4.1E+01	1.4E+00
	Sr-5-3	55	1.17E+03	4.70E+04	4.0E+01	1.3E+00
沙	Sr-10-1	2	3.34E+03	4.77E+04	1.4E+01	8.4E-01
	Sr-10-2	2	3.51E+03	3.91E+04	1.1E+01	1.2E+00
	Sr-10-3	2	2.90E+03	4.05E+04	1.4E+01	1.3E+00
	Sr-11-1	10	2.87E+03	3.61E+04	1.3E+01	9.3E-01
	Sr-11-2	10	2.43E+03	3.60E+04	1.5E+01	9.0E-01
	Sr-11-3	10	3.24E+03	4.49E+04	1.4E+01	9.6E-01
	Sr-12-1	25	3.36E+03	4.67E+04	1.4E+01	1.2E+00
	Sr-12-2	25	2.89E+03	3.76E+04	1.3E+01	7.3E-01
	Sr-12-3	25	2.83E+03	3.62E+04	1.3E+01	9.6E-01
	Sr-13-1	40	3.99E+03	5.68E+04	1.4E+01	9.8E-01
	Sr-13-2	40	2.69E+03	3.43E+04	1.3E+01	9.9E-01
	Sr-13-3	40	3.21E+03	4.33E+04	1.3E+01	7.9E-01
	Sr-14-1	55	2.62E+03	3.59E+04	1.4E+01	1.1E+00
	Sr-14-2	55	2.90E+03	3.97E+04	1.4E+01	1.4E+00
Sr-14-3	55	3.26E+03	4.14E+04	1.3E+01	8.5E-01	

表 2.2.3-10¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号	取样时间	液相比活度	固相比活度	K _d	σ _{K_d}
-------	------	-------	-------	----------------	----------------------------

		(d)	(Bq/l)	(Bq/kg)	(l/kg)	
泥	Ru-1-1	5	1.58E-07	4.53E-04	2.9E+03	8.8E+00
	Ru-1-2	5	1.66E-07	4.54E-04	2.7E+03	9.3E+00
	Ru-1-3	5	1.79E-07	4.55E-04	2.5E+03	9.3E+00
	Ru-2-1	10	1.09E-07	4.53E-04	4.2E+03	6.0E+00
	Ru-2-2	10	1.22E-07	4.61E-04	3.8E+03	5.5E+00
	Ru-2-3	10	1.31E-07	4.54E-04	3.5E+03	7.3E+00
	Ru-3-1	20	9.55E-08	4.53E-04	4.7E+03	7.6E+00
	Ru-3-2	20	8.85E-08	4.54E-04	5.1E+03	6.6E+00
	Ru-3-3	20	9.25E-08	4.52E-04	4.9E+03	1.0E+01
	Ru-4-1	35	8.84E-08	4.53E-04	5.1E+03	7.2E+00
	Ru-4-2	35	9.56E-08	4.54E-04	4.7E+03	1.1E+01
	Ru-4-3	35	9.13E-08	4.55E-04	5.0E+03	7.8E+00
	Ru-5-1	50	8.99E-08	4.54E-04	5.0E+03	6.2E+00
	Ru-5-2	50	9.30E-08	4.52E-04	4.9E+03	6.6E+00
	Ru-5-3	50	9.12E-08	4.52E-04	5.0E+03	6.9E+00
沙	Ru-10-1	5	1.99E-07	4.56E-04	2.3E+03	1.1E+01
	Ru-10-2	5	2.58E-07	4.55E-04	1.8E+03	1.1E+01
	Ru-10-3	5	2.02E-07	4.51E-04	2.2E+03	1.0E+01
	Ru-11-1	10	1.45E-07	4.54E-04	3.1E+03	8.7E+00
	Ru-11-2	10	1.49E-07	4.52E-04	3.0E+03	8.1E+00
	Ru-11-3	10	1.67E-07	4.63E-04	2.8E+03	1.1E+01
	Ru-12-1	20	1.18E-07	4.53E-04	3.8E+03	1.1E+01
	Ru-12-2	20	1.28E-07	4.48E-04	3.5E+03	8.9E+00
	Ru-12-3	20	1.23E-07	4.51E-04	3.7E+03	9.0E+00
	Ru-13-1	35	9.47E-08	4.52E-04	4.8E+03	1.1E+01
	Ru-13-2	35	9.04E-08	4.55E-04	5.0E+03	1.1E+01
	Ru-13-3	35	9.04E-08	4.63E-04	5.1E+03	1.1E+01
	Ru-14-1	50	9.56E-08	4.52E-04	4.7E+03	6.3E+00
	Ru-14-2	50	8.96E-08	4.52E-04	5.0E+03	5.9E+00
	Ru-14-3	50	8.83E-08	4.52E-04	5.1E+03	7.2E+00

表 2.2.3-11 悬浮物实验结果

	液相比活 (Bq/L) 或(mol/L)	固相比活度(Bq/kg)或 (mol/kg)	K_d (L/kg)
^{60}Co	2.12E+01	1.88E+05	8.9E+03
^{137}Cs	1.38E+01	1.70E+05	1.2E+04
^{90}Sr	8.16E+02	4.56E+04	5.6E+01
Ru	1.19E-07	6.72E-03	5.7E+03

表 2.2.3-12 不同粒径对 ^{60}Co 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}
Co-50-1	0.08~0.095	7.14E+00	6.35E+04	8.90E+03	4.10E+02

Co-50-2	0.08~0.095	7.25E+00	6.10E+04	8.40E+03	3.80E+02
Co-50-3	0.08~0.095	6.90E+00	5.90E+04	8.60E+03	4.00E+02
Co-51-1	0.075~0.08	7.38E+00	6.12E+04	8.30E+03	3.80E+02
Co-51-2	0.075~0.08	6.58E+00	6.07E+04	9.20E+03	4.10E+02
Co-51-3	0.075~0.08	6.36E+00	5.76E+04	9.10E+03	4.10E+02
Co-52-1	<0.075	6.71E+00	6.14E+04	9.10E+03	4.10E+02
Co-52-2	<0.075	8.98E+00	8.32E+04	9.30E+03	4.30E+02
Co-52-3	<0.075	7.05E+00	6.09E+04	8.60E+03	4.00E+02

表 2.2.3-13 不同粒径对 ^{137}Cs 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
Cs-50-1	0.08~0.095	5.59E+00	5.74E+04	1.03E+04	4.20E+02
Cs-50-2	0.08~0.095	5.84E+00	5.42E+04	9.28E+03	4.40E+02
Cs-50-3	0.08~0.095	5.10E+00	5.16E+04	1.01E+04	4.10E+02
Cs-51-1	0.075~0.08	5.60E+00	5.58E+04	9.96E+03	4.30E+02
Cs-51-2	0.075~0.08	5.07E+00	5.03E+04	9.92E+03	3.50E+02
Cs-51-3	0.075~0.08	5.35E+00	5.35E+04	1.00E+04	4.80E+02
Cs-52-1	<0.075	5.61E+00	5.40E+04	9.63E+03	4.30E+02
Cs-52-2	<0.075	4.54E+00	5.19E+04	1.14E+04	3.60E+02
Cs-52-3	<0.075	4.88E+00	5.05E+04	1.03E+04	4.20E+02

表 2.2.3-14 不同粒径对 ^{90}Sr 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}
Sr-50-1	0.08~0.095	1.23E+03	5.04E+04	4.10E+01	1.40E+00
Sr-50-2	0.08~0.095	1.22E+03	4.89E+04	4.00E+01	1.30E+00
Sr-50-3	0.08~0.095	1.20E+03	4.53E+04	3.80E+01	1.30E+00
Sr-51-1	0.075~0.08	1.14E+03	5.15E+04	4.50E+01	1.40E+00
Sr-51-2	0.075~0.08	1.26E+03	4.98E+04	4.00E+01	1.30E+00
Sr-51-3	0.075~0.08	1.18E+03	4.91E+04	4.20E+01	1.40E+00
Sr-52-1	<0.075	1.11E+03	4.92E+04	4.40E+01	1.40E+00
Sr-52-2	<0.075	1.18E+03	4.94E+04	4.20E+01	1.30E+00
Sr-52-3	<0.075	1.16E+03	4.78E+04	4.10E+01	1.30E+00

表 2.2.3-15 不同粒径对 Ru 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}
Ru-50-1	0.08~0.095	9.35E-08	4.73E-04	5.10E+03	1.10E+01
Ru-50-2	0.08~0.095	8.58E-08	4.24E-04	4.90E+03	8.30E+00
Ru-50-3	0.08~0.095	9.13E-08	4.45E-04	4.90E+03	6.30E+00
Ru-51-1	0.075~0.08	8.18E-08	4.05E-04	5.00E+03	7.20E+00
Ru-51-2	0.075~0.08	9.66E-08	4.55E-04	4.70E+03	7.00E+00
Ru-51-3	0.075~0.08	9.11E-08	4.56E-04	5.00E+03	7.70E+00
Ru-52-1	<0.075	9.00E-08	4.57E-04	5.10E+03	6.90E+00
Ru-52-2	<0.075	9.53E-08	4.65E-04	4.90E+03	1.10E+01
Ru-52-3	<0.075	9.21E-08	4.52E-04	4.90E+03	7.30E+00



图 2.2.3-3 河床概貌



图 2.2.3-4 河边卵石

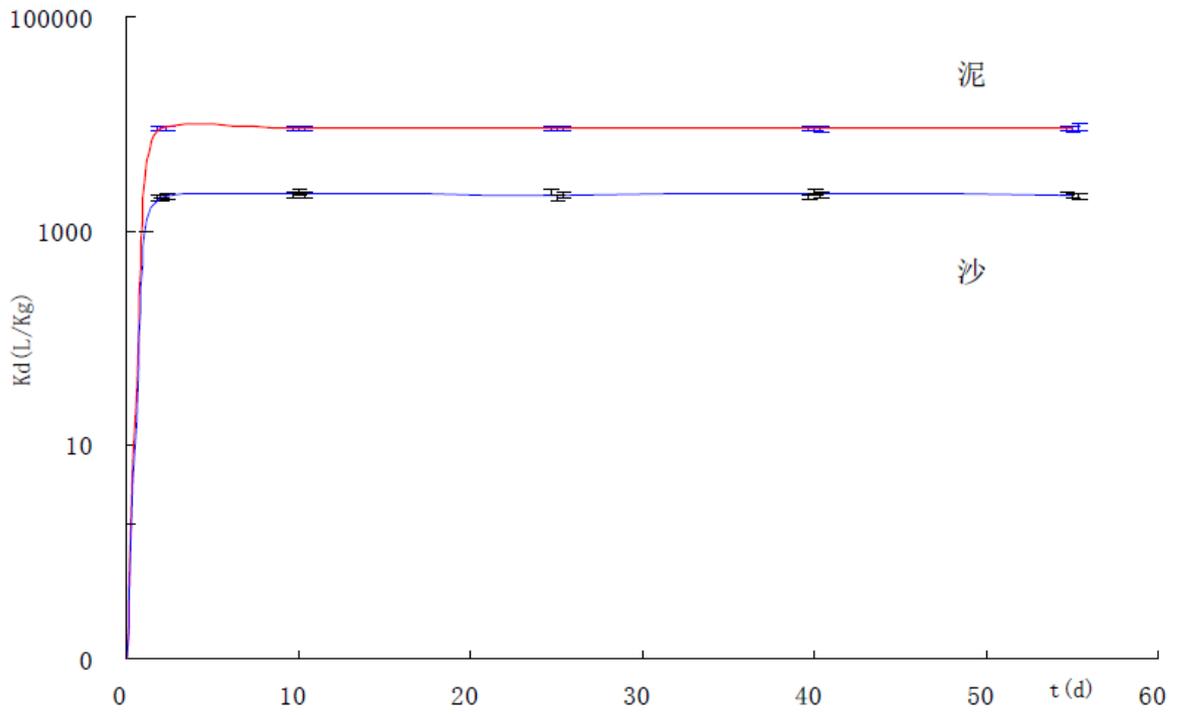


图 2.2.3-5 ^{60}Co 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

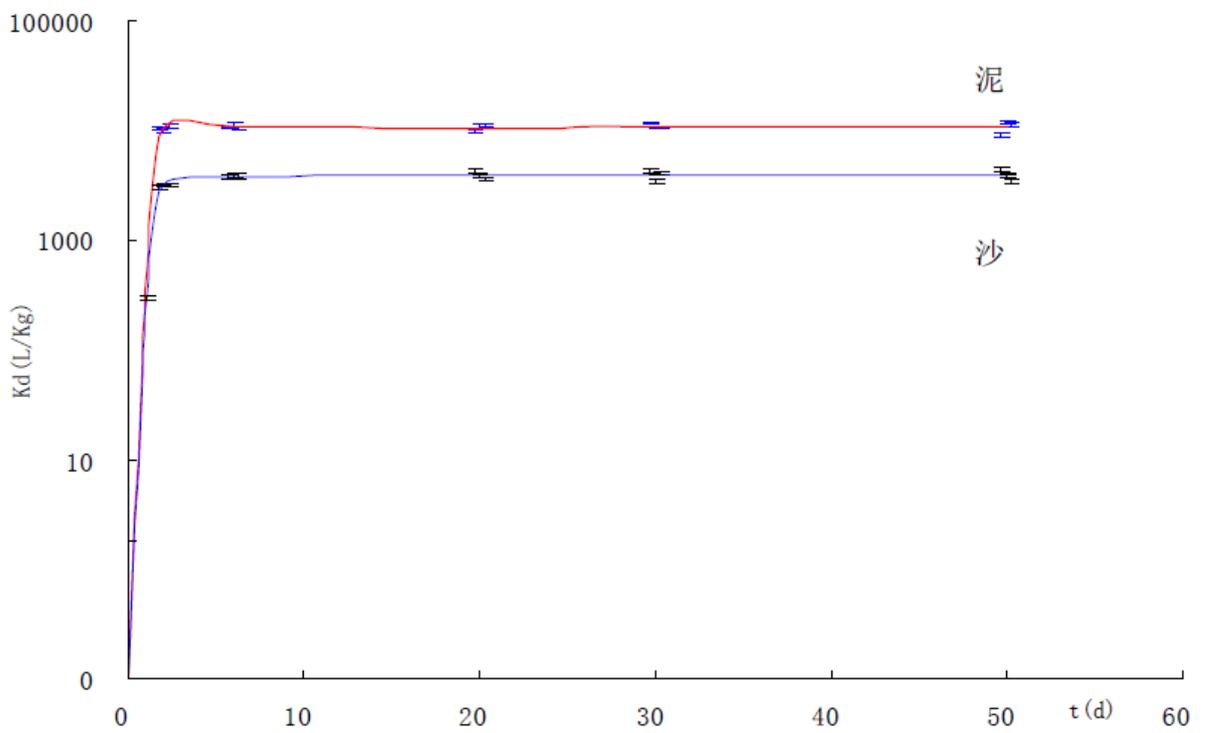


图 2.2.3-6 ^{137}Cs 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

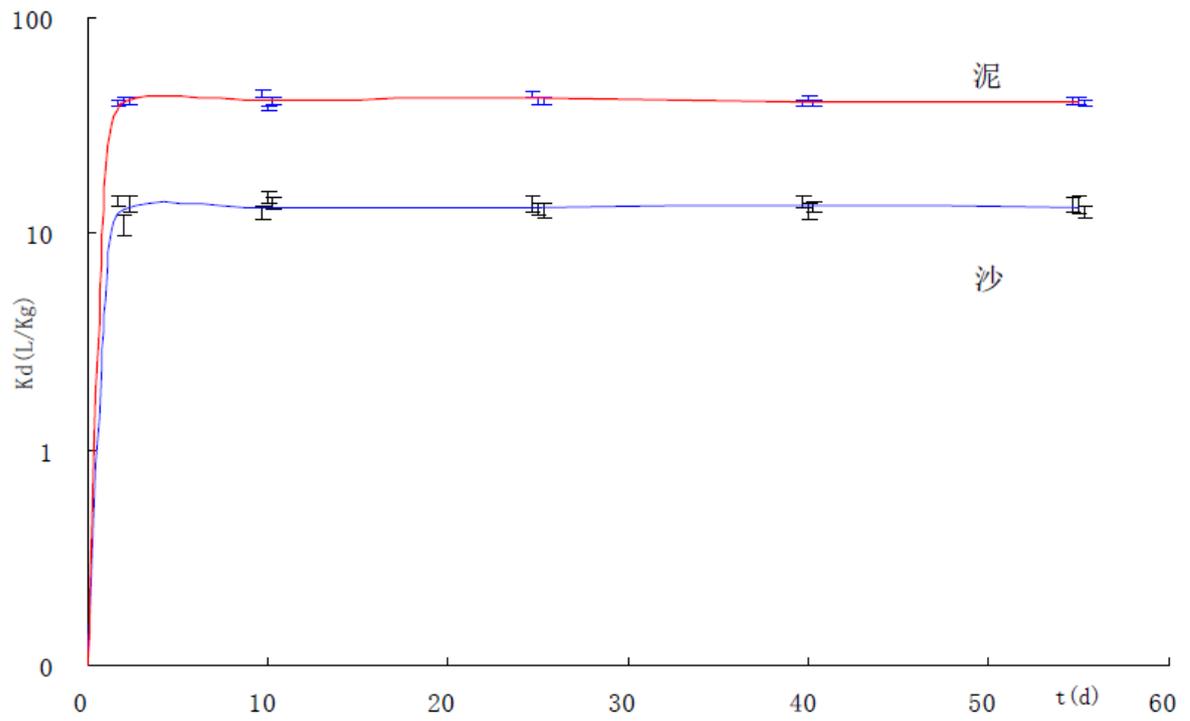


图 2.2.3-7⁹⁰Sr 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

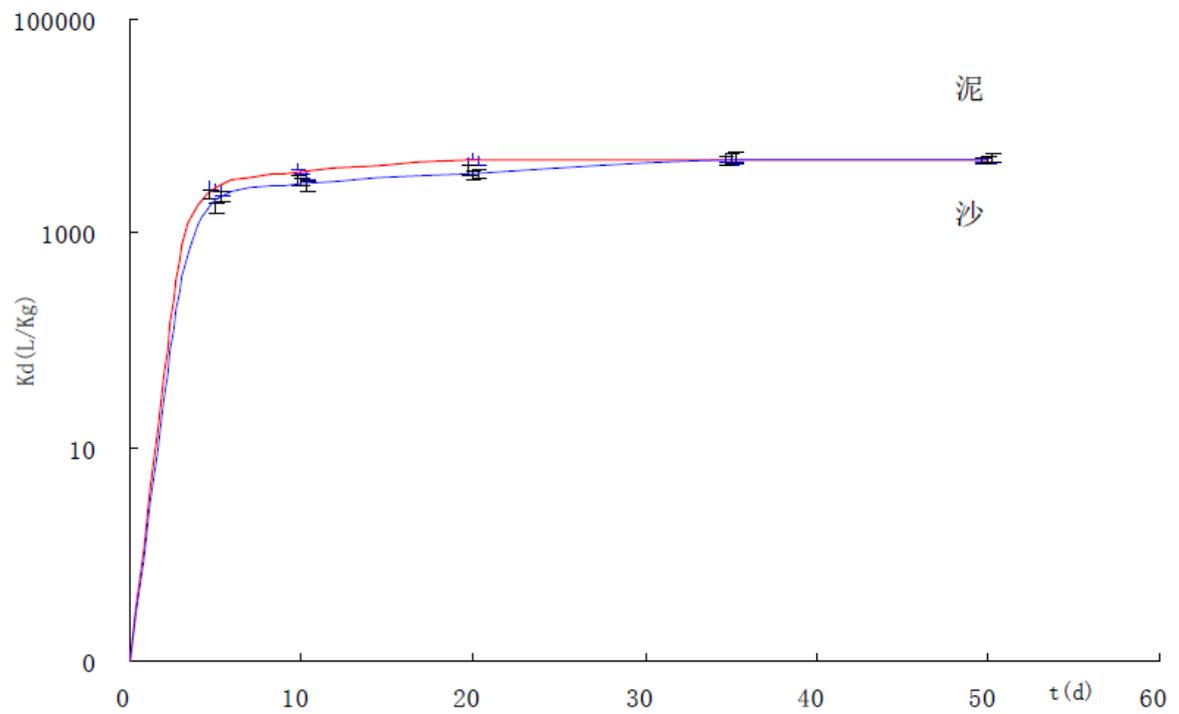


图 2.2.3-8Ru 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

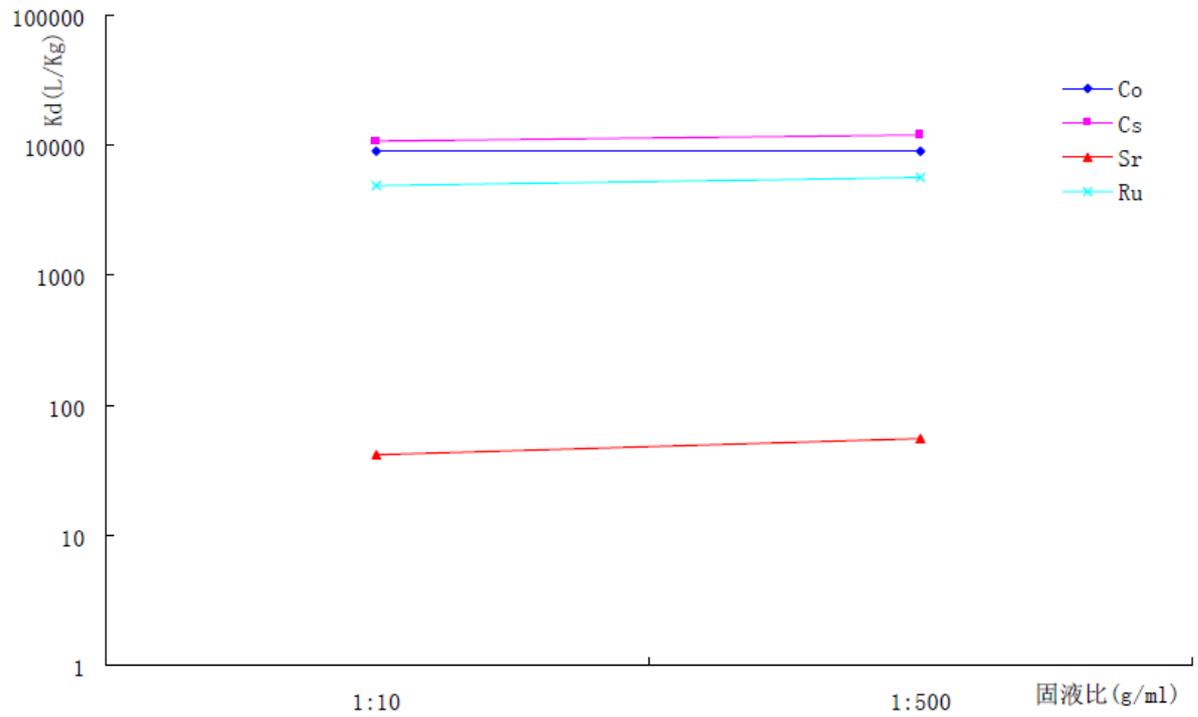


图 2.2.3-9 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 Ru 悬浮物实验结果

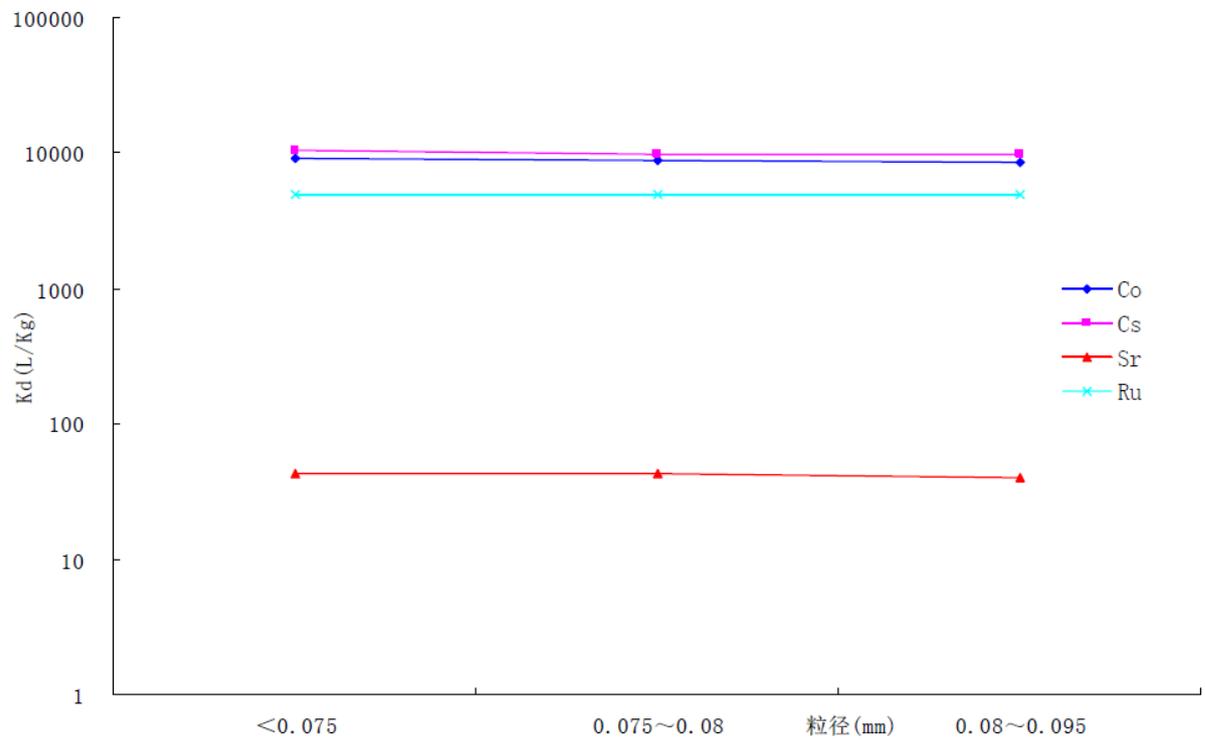


图 2.2.3-10 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 Ru 不同粒径实验结果

2.2.4 江西彭泽

江西彭泽厂址位于九江市彭泽县马垱镇境内，西距彭泽县约 23.2km，距九江市 93.4km，距下游上界湖口 61.3km，东距安庆市约 73.8km，距大通站约 150.4km，厂址北临长江、南靠太泊湖，东西均为山谷和沟壑。

彭泽厂址所在的区域滨临长江右岸，附近河道属马垱河段，位于长江下游。马垱河段上起彭郎矶(小孤山)，下至张公矶(华阳河口)，右岸属彭泽县，左岸属安徽省望江县，为微弯分汊河道。右汊较为顺直，为主汊，是长江的主航道。左汊弯曲，为支汊，左右汊分流比汛期约为 0.3:0.7。

江西彭泽核电厂规划建设总装机为4×1000MW级容量的压水堆核电机组。循环水系统及重要厂用水系统的取排水工程，直接取用长江水。经处理合格并达到排放标准后的低放废水，将与冷却塔排污水混合后一起排入长江。

2.2.4.1 流域概况

厂址至下游大通水位站之间没有大的支流汇入，取水总流量（163万t/a）占长江流量的份额很小。

断面含沙量较小，各断面实测含沙量在 $0.040\text{g}/\text{m}^3\sim 0.150\text{g}/\text{m}^3$ 之间。从统计的悬移质颗粒级配分特征值看，中值粒径在 $0.007\text{mm}\sim 0.065\text{mm}$ 之间，最大颗粒在 $0.021\text{mm}\sim 0.121\text{mm}$ 之间。

2.2.4.2 样品的采集

为了使分配系数 K_d 的测定条件更接近现场实际情况，直接采用长江水作为吸附实验的水样。根据现场实际情况，土壤样品则收集了两种，一种为淤泥，一种为沙土，分别测其分配系数。根据现场实地勘察，选取能代表大多数水域情况的采样地点进行采样。经过两个多小时的实际踏勘，在以下两个地点进行了取样，一处位于排水口下游约8公里处，一处位于排水口下游约30公里处。取样点位置见图2.2.4-2。在两处地点均收集了两种样品(淤泥和沙)，并将两个地点的淤泥或沙分别混合，运回实验室进行预处理。

2009年7月30日，进行了土壤样品和水样的采集。土壤样品采用长江河床的沉积物样品，水样用长江水，悬浮物样品则采集长江河水中的悬浮物。采样图见图2.2.4-3~图2.2.4-5。

河床表层覆盖有卵石，卵石粒径较大，主要是粒径1cm以上的卵石，在低洼处有淤泥沉积。河床多处覆盖有粒径很小的细沙。河水清澈，悬沙很少。

沙样代表长江河床，泥样代表少数低洼处的底泥。为尽量避免水样的化学性质发生变化，采集后用塑料桶密封盛装水样，运输回实验室在4℃下进行冷藏保存。

2.2.4.3 核素吸附特性模拟实验

根据放射性废液排放源项，并综合考虑核素的半衰期、毒性等，确定了四种有代表性的放射性核素Ru、¹³⁷Cs、⁶⁰Co、⁹⁰Sr，用静态批试法进行核素吸附特性的模拟实验。

1) 粒径分布

对泥和沙两种样品分别进行筛分预处理，得到两种样品的粒径分布见表2.2.4-1。由上表可以看出，沙中以粗砂、中砂为主，粒径0.3~0.45mm所占比例接近1/3，而泥中主要为细砂和粉粘粒，粒径小于0.075mm所占比例接近一半。实验时每个试验管所用沙子和泥均为1g，按照各个粒径所占质量的组分称重，并将其混合均匀。沙和泥的实验组成如表2.2.4-2。

2) 土样的化学成分分析及矿物组成

土壤矿物质是岩石经物理风化作用和化学风化作用形成的，占土壤固相部分总重量90%以上。土壤粘粒矿物是土壤矿物质中最活跃的部分，它的类型决定了土壤对放射性核素吸附能力的大小。由于土壤的物质组成和化学成分等条件都会影响土壤介质对核素的吸附性能，进而影响到分配系数，因而在进行吸附实验前，需要对土样的理化性质进行测试和分析。

土壤的矿物组成和化学成分分析由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心河南省岩石矿物测试中心进行测定，测得的矿物组成和化学成分结果列于表2.2.4-3和表2.2.4-4。由此可见，这两种样品主要化学成分均以SiO₂为主，含量分别为沙中79.46%和泥中57.51%。其次为Al₂O₃，含量分别约为8%和13%。其余还有少量的Fe₂O₃、CaO、K₂O、MgO等。

从表2.2.4-4可以看出，沙和泥中主要为含氧化物矿物，如石英、长石，其中石英的比重最大，分别为沙中接近80%和泥中约50%。次生粘土矿物有云母(伊利石)、绿泥石等，其中泥中云母约20%左右，绿泥石约10%。泥中还有约1%的磁铁矿。

3) 水样的化学成分分析

同样，水样的化学性质（如PH值）也会影响分配系数的大小，且水样中有

无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响，因此用ICP-MS对水样的 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 、 ^{88}Sr 和 ^{101}Ru 的本底进行了测量，结果见表2.2.4-5。取样点附近的水外观清澈、无沉淀，PH呈弱碱性。水中在ICP-MS检测限内没有检出钴和铯，说明水的本底中基本没有钴和铯，或者说钴和铯含量极低。钌的含量为 $5.941 \times 10^{-10} \text{mol/L}$ ，水中钌的含量很低。而锶的含量为 $1.032 \times 10^{-6} \text{mol/L}$ ，说明现场水中锶的含量较高。

4) 吸附实验

取15ml的聚乙烯塑料离心管，洗净后晾干，向每个离心管中加入9.2ml的溶液，溶液为现场所取的水样，再称取 (1 ± 0.002) 克的泥/沙放入管中，盖紧盖子，摇匀，静置七天。吸附实验开始后向盛有泥/沙和水的离心管中加入0.8ml含放射性核素的溶液，溶液中四种核素（ ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 Ru ）的投放量按照仪器的最低检测限来定，具体四种核素在每个离心管中的投放量见表2.2.4-6。立即将之振荡使固液充分混合，并且在实验时间内每天都要放入振荡器中振荡两次（上午下午各一次，每次不少于60分钟）。间隔不同时间取样测量，直至吸附平衡为止，计算分配系数 K_d 。

(1) ^{60}Co 吸附实验结果

在加入 ^{60}Co 后的第2、6、23、35、45 天进行取样，每次取三个平行样。先将试验管离心三十分钟，然后分别取出管中的液体和固体。液体直接测量活度，然后计算其比活度，固体则先烘干，在烘箱中自然降温后称重测量其活度，将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度，再算得固相的比活度；最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数 K_d 。 σ_{K_d} 为测量的统计误差。 ^{60}Co 的吸附实验结果见表2.2.4-7。

^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.4-6。由图表可以看出， ^{60}Co 在沙和泥中的平衡均比较缓慢，平衡时间较长，基本在加入 ^{60}Co 后20天左右才达到吸附平衡。 ^{60}Co 在沙的分配系数约为 $1.1\text{E}+03\text{L/kg}$ ，在泥中分配系数约为 $8.0\text{E}+3\text{L/kg}$ 。

(2) ^{137}Cs 吸附实验结果

在加入 ^{137}Cs 后的第2、6、23、35、45 天进行取样，取样过程同上。 ^{137}Cs 的吸附实验结果见表2.2.4-8。 ^{137}Cs 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.4-7。

由图表可以看出， ^{137}Cs 在沙和泥中的平衡时间均较短。 ^{137}Cs 在沙中的分配

系数接近 $2.7E+3$ L/kg, 基本在加入 ^{137}Cs 的6天前达到吸附平衡。在泥中分配系数接近 $8.9E+3$ L/kg, 且吸附速度很快, 平衡时间很短, 在加入 ^{137}Cs 后第2天就达到了吸附平衡。

(3) ^{90}Sr 吸附实验结果

在加入 ^{90}Sr 后的第2、6、23、35、45天进行取样, 取样过程同上。 ^{90}Sr 的吸附实验结果见表2.2.4-9。 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.4-8。由图表可以看出, ^{90}Sr 在沙中的分配系数很小, 约为6.6 L/kg, 吸附速度较慢, 约在加入 ^{90}Sr 20 天左右才达到吸附平衡。在泥中分配系数有 $3.0E+1$ L/kg, 吸附平衡时间很短, 在加入 ^{90}Sr 后第2天就达到了吸附平衡。 ^{90}Sr 在这两种土壤样品中的吸附分配系数均很小, 这可能与前面测得的水中锶本底值很高有关。由于现场锶本底值很高, 减少了所加入的 ^{90}Sr 的吸附。

(4) Ru 吸附实验结果

在加入Ru 后的第5、10、20、35、45天进行取样, 取样过程同上。Ru的吸附实验结果见表2.2.4-10。Ru在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.4-9。

由图表可以看出, Ru 在沙中的分配系数较小, 接近 $6.7E+2$ L/kg, 约在加入Ru 后20天左右基本达到吸附平衡。在泥中分配系数接近 $3.9E+3$ L/kg, 时间也基本是在20 天时达到吸附平衡。

(5) 悬浮物实验结果

采集河水中的悬浮物样品, 晒干后称取1g 的重量放入试验瓶中, 分别按固液比1:500g/ml 加入河水, 盖紧盖子, 摇匀, 静置七天。吸附实验开始后向盛有悬浮物和河水的试验瓶中各加入15ml含四种放射性核素(^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、Ru)的溶液, 立即将之振荡使固液充分混合, 并且在实验时间内每天都要振荡两次。在实验30天后进行取样测量, 计算分配系数 K_d 。悬浮物实验结果见表2.2.4-11。

四种核素的悬浮物实验结果并与固液比为1: 10g/ml 的泥的实验值相比较所得结果见图2.2.4-10。由图表可以看出, 三种核素(^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、Ru)的分配系数均随着固液比的减小, K_d 值逐步增大, 而 ^{60}Co 的实验结果正好相反, 其分配系数均随着固液比的减小而减小, 但变化范围不大, 表明不同固液比对 K_d 值的影响不明显。

(6) 不同粒径实验结果

将沙子和泥分成不同的粒径, 测量不同的粒径对分配系数的影响。沙子共做

了三组，粒径分别为 $>0.45\text{mm}$ 、 $0.3\sim 0.45\text{mm}$ 、 $0.105\sim 0.15\text{mm}$ ；同样泥也做了三组，粒径分别为 $0.08\sim 0.095\text{mm}$ 、 $0.075\sim 0.08\text{mm}$ 及 0.075mm 以下。每种样品做两个平行样，固体样品均加入 1g 左右，放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 及 Ru 各约 0.8ml ，固液比 $1:10\text{g/ml}$ 。在实验时间内将实验管每天放入振荡器中振荡，放置30天后进行取样。实验结果见表2.2.4-12~表2.2.4-15。

不同核素分配系数随粒径的变化曲线见图2.2.4-11。

可以看出，四种核素分配系数的变化趋势在沙中基本是随着颗粒粒径的减小，分配系数逐渐增大，其变化很明显，这主要是由于随着颗粒粒径减小，颗粒比表面积增大，表面吸附能力增强，有利于各种核素的吸附，从而使分配系数增大；而在泥中的分配系数变化不大，基本变化趋势不太明显，主要因为不同泥的粒径差别不大，比表面积也差别不大，其吸附性能基本相同。

表 2.2.4-1 样品中各粒径的质量组分

分子筛(目)	粒径(mm)	泥(%)	沙(%)
20~40	0.45~0.9		27.44
40~60	0.3~0.45		31.52
60~80	0.2~0.3		24.16
80~100	0.15~0.2		11.76
100~120	0.125~0.15		3.10
120~140	0.105~0.125		0.64
140~160	0.095~0.105	8.94	0.72
160~180	0.08~0.095	2.01	0.14
80~200	0.075~0.08	40.23	0.12
>200	<0.075	48.82	0.40

表 2.2.4-2 样品中各粒径的质量组分(%)

沙	粒径(目)	20~60	60~100	100~160	160~200
	粒径(mm)	0.3~0.9	0.15~0.3	0.095~0.15	0.075~0.095
	质量组分	59	36	4	1
泥	粒径(目)	140~180	80~200	>200	
	粒径(mm)	0.08~0.105	0.075~0.08	<0.075	
	质量组分	11	40	49	

表 2.2.4-3 土壤中主要化学成分的质量组分(%)

化学成份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
沙	79.46	8.12	2.32	2.51	1.04	2.3	1.42
泥	57.51	13.92	6.41	6.18	2.68	2.66	0.78

表 2.2.4-4 土壤中主要矿物质的质量组分(%)

样品	石英	斜长石	钾长石	伊利石	方解石	角闪石	绿泥石	白云石	磁铁矿
沙	76~80	3~5	5~10	2~3	1~2	2~3	1~2	1~2	-
泥	49~51	5~10	1~2	15~20	5~8	1	10	3~5	1

表 2.2.4-5 水样 pH 值和 ⁵⁹Co、¹³³Cs、⁸⁸Sr 和 ¹⁰¹Ru 的含量(mol/l)

分析项目	外观描述	pH	本底值			
			⁵⁹ Co	¹³³ Cs	⁸⁸ Sr	¹⁰¹ Ru
水样	澄清, 无沉淀	7.74	≤1.697×10 ⁻⁸	≤7.524×10 ⁻⁹	1.032×10 ⁻⁶	5.941×10 ⁻¹⁰

表 2.2.4-6 每个试样吸附实验中各核素的投放量

核素	Co	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	Ru
化学浓度(mol/l)	3.10×10 ⁻⁷	1.37×10 ⁻⁸	1.48×10 ⁻⁸	4.53×10 ⁻⁵
投放量	3.09×10 ⁴ Bq	4.81×10 ⁴ Bq	5.25×10 ⁴ Bq	4.09×10 ⁸ mol

表 2.2.4-7⁶⁰Co 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}	
泥	Co-1-1	2	1.11E+01	3.47E+04	3.1E+03	4.7E+02
	Co-1-2	2	1.05E+01	3.44E+04	3.3E+03	5.0E+02
	Co-1-3	2	9.78E+00	3.29E+04	3.4E+03	5.5E+02
	Co-2-1	6	6.98E+00	3.48E+04	5.0E+03	9.1E+02
	Co-2-2	6	7.76E+00	3.39E+04	4.4E+03	7.3E+02
	Co-2-3	6	6.91E+00	3.40E+04	4.9E+03	9.0E+02
	Co-3-1	23	4.35E+00	3.48E+04	8.0E+03	3.1E+03
	Co-3-2	23	4.09E+00	3.25E+04	7.9E+03	3.8E+03
	Co-3-3	23	4.28E+00	3.38E+04	7.9E+03	3.0E+03
	Co-4-1	35	4.38E+00	3.49E+04	8.0E+03	3.6E+03
	Co-4-2	35	4.03E+00	3.23E+04	8.0E+03	3.2E+03
	Co-4-3	35	4.05E+00	3.20E+04	7.9E+03	3.8E+03
	Co-5-1	45	4.41E+00	3.54E+04	8.0E+03	2.6E+03
	Co-5-2	45	4.30E+00	3.35E+04	7.8E+03	2.3E+03
Co-5-3	45	4.21E+00	3.27E+04	7.7E+03	2.4E+03	
沙	Co-10-1	2	1.53E+02	2.98E+04	1.9E+02	1.3E+01
	Co-10-2	2	1.54E+02	2.79E+04	1.8E+02	1.2E+01
	Co-10-3	2	1.62E+02	2.83E+04	1.8E+02	1.2E+01
	Co-11-1	6	6.75E+01	2.92E+04	4.3E+02	3.2E+01
	Co-11-2	6	6.21E+01	3.10E+04	5.0E+02	3.8E+01
	Co-11-3	6	7.10E+01	3.05E+04	4.3E+02	3.1E+01
	Co-12-1	23	3.15E+01	3.43E+04	1.1E+03	1.1E+02
	Co-12-2	23	2.80E+01	2.97E+04	1.1E+03	9.6E+01
	Co-12-3	23	2.76E+01	2.89E+04	1.0E+03	1.0E+02
	Co-13-1	35	3.07E+01	3.24E+04	1.1E+03	1.0E+02
	Co-13-2	35	2.73E+01	3.00E+04	1.1E+03	1.1E+02
	Co-13-3	35	2.92E+01	3.14E+04	1.1E+03	1.1E+02
	Co-14-1	45	2.75E+01	2.68E+04	9.7E+02	8.1E+01
	Co-14-2	45	2.05E+01	2.63E+04	1.30E+03	1.20E+02
Co-14-3	45	2.63E+01	2.38E+04	9.10E+02	8.10E+01	

表 2.2.3-8¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}	
泥	Cs-1-1	2	1.13E+01	5.52E+04	4.9E+03	4.8E+02
	Cs-1-2	2	1.12E+01	5.49E+04	4.9E+03	4.8E+02
	Cs-1-3	2	1.01E+01	5.20E+04	5.2E+03	6.1E+02
	Cs-2-1	6	6.08E+00	5.36E+04	8.8E+03	1.6E+03
	Cs-2-2	6	6.03E+00	5.21E+04	8.7E+03	1.4E+03
	Cs-2-3	6	6.13E+00	5.33E+04	8.7E+03	1.4E+03
	Cs-3-1	23	6.07E+00	5.44E+04	9.0E+03	1.9E+03
	Cs-3-2	23	6.00E+00	5.26E+04	8.8E+03	2.1E+03
	Cs-3-3	23	6.11E+00	5.34E+04	8.7E+03	2.2E+03
	Cs-4-1	35	6.46E+00	5.67E+04	8.8E+03	2.3E+03
	Cs-4-2	35	5.80E+00	5.19E+04	8.9E+03	2.2E+03
	Cs-4-3	35	5.90E+00	5.24E+04	8.9E+03	1.9E+03
	Cs-5-1	45	6.25E+00	5.55E+04	8.9E+03	1.2E+03
	Cs-5-2	45	6.22E+00	5.51E+04	8.9E+03	1.3E+03
	Cs-5-3	45	6.00E+00	5.27E+04	8.8E+03	1.2E+03
沙	Cs-10-1	2	1.88E+01	5.11E+04	2.7E+03	1.7E+02
	Cs-10-2	2	1.84E+01	4.84E+04	2.6E+03	2.1E+02
	Cs-10-3	2	1.89E+01	4.92E+04	2.6E+03	2.0E+02
	Cs-11-1	6	2.02E+01	5.20E+04	2.6E+03	1.6E+02
	Cs-11-2	6	1.85E+01	5.30E+04	2.9E+03	1.8E+02
	Cs-11-3	6	1.91E+01	5.04E+04	2.6E+03	2.0E+02
	Cs-12-1	23	2.31E+01	5.93E+04	2.6E+03	2.2E+02
	Cs-12-2	23	1.82E+01	4.94E+04	2.7E+03	2.5E+02
	Cs-12-3	23	1.83E+01	4.93E+04	2.7E+03	2.4E+02
	Cs-13-1	35	2.07E+01	5.57E+04	2.7E+03	1.9E+02
	Cs-13-2	35	2.00E+01	5.25E+04	2.6E+03	1.9E+02
	Cs-13-3	35	2.00E+01	5.38E+04	2.7E+03	1.8E+02
	Cs-14-1	45	1.95E+01	5.22E+04	2.7E+03	1.6E+02
	Cs-14-2	45	1.80E+01	4.86E+04	2.7E+03	1.9E+02
	Cs-14-3	45	1.95E+01	5.20E+04	2.7E+03	1.6E+02

表 2.2.3-9¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{Kd}	
泥	Sr-1-1	2	1.89E+03	5.50E+04	2.9E+01	1.9E+00
	Sr-1-2	2	1.91E+03	5.68E+04	3.0E+01	2.0E+00
	Sr-1-3	2	1.60E+03	4.87E+04	3.1E+01	1.9E+00
	Sr-2-1	6	1.80E+03	5.27E+04	2.9E+01	1.8E+00
	Sr-2-2	6	1.49E+03	4.66E+04	3.1E+01	1.9E+00
	Sr-2-3	6	1.65E+03	4.69E+04	2.8E+01	1.9E+00
	Sr-3-1	23	1.79E+03	5.25E+04	2.9E+01	1.7E+00
	Sr-3-2	23	1.80E+03	5.25E+04	2.9E+01	1.7E+00
	Sr-3-3	23	1.53E+03	4.69E+04	3.1E+01	1.8E+00
	Sr-4-1	35	1.77E+03	5.14E+04	2.9E+01	1.7E+00
	Sr-4-2	35	1.74E+03	4.99E+04	2.9E+01	1.6E+00
	Sr-4-3	35	1.62E+03	4.80E+04	3.0E+01	1.8E+00
	Sr-5-1	45	1.63E+03	4.86E+04	3.0E+01	1.8E+00
	Sr-5-2	45	1.62E+03	4.80E+04	3.0E+01	1.8E+00
	Sr-5-3	45	1.58E+03	4.59E+04	2.9E+01	1.7E+00
沙	Sr-10-1	2	4.55E+03	2.43E+04	5.3E+00	3.9E-01
	Sr-10-2	2	4.71E+03	2.30E+04	4.9E+00	3.6E-01
	Sr-10-3	2	4.47E+03	2.35E+04	5.3E+00	3.7E-01
	Sr-11-1	6	4.35E+03	2.81E+04	6.5E+00	3.4E-01
	Sr-11-2	6	4.56E+03	3.08E+04	6.8E+00	3.5E-01
	Sr-11-3	6	4.44E+03	2.73E+04	6.2E+00	3.3E-01
	Sr-12-1	23	4.06E+03	2.82E+04	6.9E+00	4.5E-01
	Sr-1-1	2	1.89E+03	5.50E+04	2.9E+01	1.9E+00
	Sr-1-2	2	1.91E+03	5.68E+04	3.0E+01	2.0E+00
	Sr-1-3	2	1.60E+03	4.87E+04	3.1E+01	1.9E+00
	Sr-2-1	6	1.80E+03	5.27E+04	2.9E+01	1.8E+00
	Sr-2-2	6	1.49E+03	4.66E+04	3.1E+01	1.9E+00
	Sr-2-3	6	1.65E+03	4.69E+04	2.8E+01	1.9E+00
	Sr-3-1	23	1.79E+03	5.25E+04	2.9E+01	1.7E+00
	Sr-3-2	23	1.80E+03	5.25E+04	2.9E+01	1.7E+00

表 2.2.3-10¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{Kd}
泥	Ru-1-1	5	3.15E-07	4.56E-04	1.4E+03	7.5E+00
	Ru-1-2	5	3.80E-07	4.54E-04	1.2E+03	7.1E+00
	Ru-1-3	5	2.37E-07	4.52E-04	1.9E+03	7.2E+00
	Ru-2-1	10	2.07E-07	4.50E-04	2.2E+03	7.1E+00
	Ru-2-2	10	1.62E-07	4.55E-04	2.8E+03	7.1E+00
	Ru-2-3	10	1.74E-07	4.67E-04	2.7E+03	6.7E+00
	Ru-3-1	20	1.15E-07	4.52E-04	3.9E+03	7.4E+00
	Ru-3-2	20	1.23E-07	4.57E-04	3.7E+03	7.9E+00
	Ru-3-3	20	1.16E-07	4.58E-04	4.0E+03	6.7E+00
	Ru-4-1	35	1.22E-07	4.54E-04	3.7E+03	7.4E+00
	Ru-4-2	35	1.17E-07	4.56E-04	3.9E+03	7.0E+00
	Ru-4-3	35	1.14E-07	4.54E-04	4.0E+03	6.7E+00
	Ru-5-1	45	1.19E-07	4.55E-04	3.8E+03	6.7E+00
	Ru-5-2	45	1.16E-07	4.55E-04	3.9E+03	7.0E+00
	Ru-5-3	45	1.18E-07	4.55E-04	3.8E+03	6.1E+00
沙	Ru-10-1	5	1.63E-06	4.38E-04	2.7E+02	6.4E+00
	Ru-10-2	5	1.00E-06	4.43E-04	4.4E+02	6.7E+00
	Ru-10-3	5	1.10E-06	4.41E-04	4.0E+02	6.1E+00
	Ru-11-1	10	8.74E-07	4.48E-04	5.1E+02	6.2E+00
	Ru-11-2	10	8.86E-07	4.46E-04	5.0E+02	6.0E+00
	Ru-11-3	10	7.92E-07	4.49E-04	5.7E+02	6.2E+00
	Ru-12-1	20	6.96E-07	4.46E-04	6.4E+02	6.3E+00
	Ru-12-2	20	6.94E-07	4.48E-04	6.4E+02	6.5E+00
	Ru-12-3	20	6.91E-07	4.46E-04	6.5E+02	7.0E+00
	Ru-13-1	35	6.78E-07	4.48E-04	6.6E+02	6.4E+00
	Ru-13-2	35	6.56E-07	4.46E-04	6.8E+02	6.2E+00
	Ru-13-3	35	6.82E-07	4.54E-04	6.7E+02	6.2E+00
	Ru-14-1	45	6.67E-07	4.49E-04	6.7E+02	7.5E+00
	Ru-14-2	45	6.61E-07	4.45E-04	6.7E+02	6.8E+00
	Ru-14-3	45	6.74E-07	4.49E-04	6.7E+02	6.1E+00

表 2.2.3-11 悬浮物实验结果

	液相比活 (Bq/L) 或(mol/L)	固相比活度(Bq/kg)或 (mol/kg)	K _d (L/kg)
⁶⁰ Co	1.63E+01	1.14E+05	7.0E+03
¹³⁷ Cs	1.91E+01	1.81E+05	9.5E+03
⁹⁰ Sr	7.27E+02	2.42E+04	3.3E+01
Ru	1.35E-06	6.12E-03	4.5E+03

表 2.2.3-12 不同粒径对 ^{60}Co 分配系数的影响

试验管编号		粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
沙	Co-50-1	>0.45	3.40E+01	2.90E+04	8.5E+02	1.1E+02
	Co-50-2	>0.45	3.71E+01	3.04E+04	8.2E+02	1.3E+02
	Co-51-1	0.3~0.45	3.38E+01	3.01E+04	8.9E+02	1.2E+02
	Co-51-2	0.3~0.45	3.46E+01	3.06E+04	8.8E+02	1.3E+02
	Co-52-1	0.105~0.15	2.09E+01	3.13E+04	1.5E+03	4.1E+02
	Co-52-2	0.105~0.15	2.04E+01	3.11E+04	1.5E+03	4.3E+02
泥	Co-54-1	0.08~0.095	4.22E+00	3.15E+04	7.5E+03	2.3E+03
	Co-54-2	0.08~0.095	4.56E+00	3.21E+04	7.0E+03	1.5E+03
	Co-55-1	0.075~0.08	4.21E+00	3.25E+04	7.7E+03	3.0E+03
	Co-55-2	0.075~0.08	4.31E+00	3.30E+04	7.7E+03	2.7E+03
	Co-56-1	<0.075	4.09E+00	3.21E+04	7.9E+03	1.5E+03
	Co-56-2	<0.075	4.48E+00	3.32E+04	7.4E+03	2.0E+03

表 2.2.3-13 不同粒径对 ^{137}Cs 分配系数的影响

试验管编号		粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (l/kg)	σ_{K_d}
沙	Cs-50-1	>0.45	2.24E+01	5.32E+04	2.40E+03	1.90E+02
	Cs-50-2	>0.45	2.21E+01	5.31E+04	2.40E+03	2.60E+02
	Cs-51-1	0.3~0.45	2.08E+01	5.20E+04	2.50E+03	3.00E+02
	Cs-51-2	0.3~0.45	1.85E+01	5.32E+04	2.90E+03	3.10E+02
	Cs-52-1	0.105~0.15	1.56E+01	5.38E+04	3.40E+03	5.50E+02
	Cs-52-2	0.105~0.15	1.75E+01	5.26E+04	3.00E+03	5.60E+02
泥	Cs-54-1	0.08~0.095	6.43E+00	5.34E+04	8.30E+03	7.80E+02
	Cs-54-2	0.08~0.095	5.82E+00	5.54E+04	9.50E+03	9.60E+02
	Cs-55-1	0.075~0.08	5.85E+00	5.21E+04	8.90E+03	1.30E+03
	Cs-55-2	0.075~0.08	6.08E+00	5.27E+04	8.70E+03	1.30E+03
	Cs-56-1	<0.075	6.23E+00	5.23E+04	8.40E+03	1.10E+03
	Cs-56-2	<0.075	5.38E+00	5.16E+04	9.60E+03	1.20E+03

表 2.2.3-14 不同粒径对 ⁹⁰Sr 分配系数的影响

试验管编号		粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}
沙	Sr-50-1	>0.45	4.60E+03	2.39E+04	5.20E+00	3.70E-01
	Sr-50-2	>0.45	4.49E+03	2.38E+04	5.30E+00	3.70E-01
	Sr-51-1	0.3~0.45	5.02E+03	3.06E+04	6.10E+00	4.10E-01
	Sr-51-2	0.3~0.45	5.12E+03	3.07E+04	6.00E+00	3.90E-01
	Sr-52-1	0.105~0.15	5.06E+03	3.54E+04	7.00E+00	4.90E-01
	Sr-52-2	0.105~0.15	4.82E+03	3.42E+04	7.10E+00	4.60E-01
泥	Sr-54-1	0.08~0.095	1.29E+03	4.01E+04	3.10E+01	8.70E-01
	Sr-54-2	0.08~0.095	1.41E+03	4.02E+04	2.90E+01	8.20E-01
	Sr-55-1	0.075~0.08	1.47E+03	4.11E+04	2.80E+01	1.00E+00
	Sr-55-2	0.075~0.08	1.41E+03	4.09E+04	2.90E+01	1.20E+00
	Sr-56-1	<0.075	1.48E+03	4.02E+04	2.70E+01	1.10E+00
	Sr-56-2	<0.075	1.40E+03	4.13E+04	3.00E+01	1.10E+00

表 2.2.3-15 不同粒径对 Ru 分配系数的影响

试验管编号		粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}
沙	Ru-50-1	>0.45	7.88E-07	4.49E-04	5.70E+02	6.20E+00
	Ru-50-2	>0.45	7.49E-07	4.02E-04	5.40E+02	6.30E+00
	Ru-51-1	0.3~0.45	6.77E-07	4.10E-04	6.10E+02	5.40E+00
	Ru-51-2	0.3~0.45	7.02E-07	4.07E-04	5.80E+02	4.20E+00
	Ru-52-1	0.105~0.15	5.96E-07	4.05E-04	6.80E+02	5.50E+00
	Ru-52-2	0.105~0.15	6.42E-07	4.16E-04	6.50E+02	5.20E+00
泥	Ru-54-1	0.08~0.095	1.28E-07	4.04E-04	3.20E+03	4.30E+00
	Ru-54-2	0.08~0.095	1.22E-07	4.14E-04	3.40E+03	5.40E+00
	Ru-55-1	0.075~0.08	1.11E-07	4.11E-04	3.70E+03	5.30E+00
	Ru-55-2	0.075~0.08	1.11E-07	4.18E-04	3.80E+03	5.20E+00
	Ru-56-1	<0.075	1.09E-07	4.05E-04	3.70E+03	5.50E+00
	Ru-56-2	<0.075	1.08E-07	4.06E-04	3.80E+03	5.00E+00



图 2.2.4-3 河床概貌



图 2.2.4-4 河边淤泥

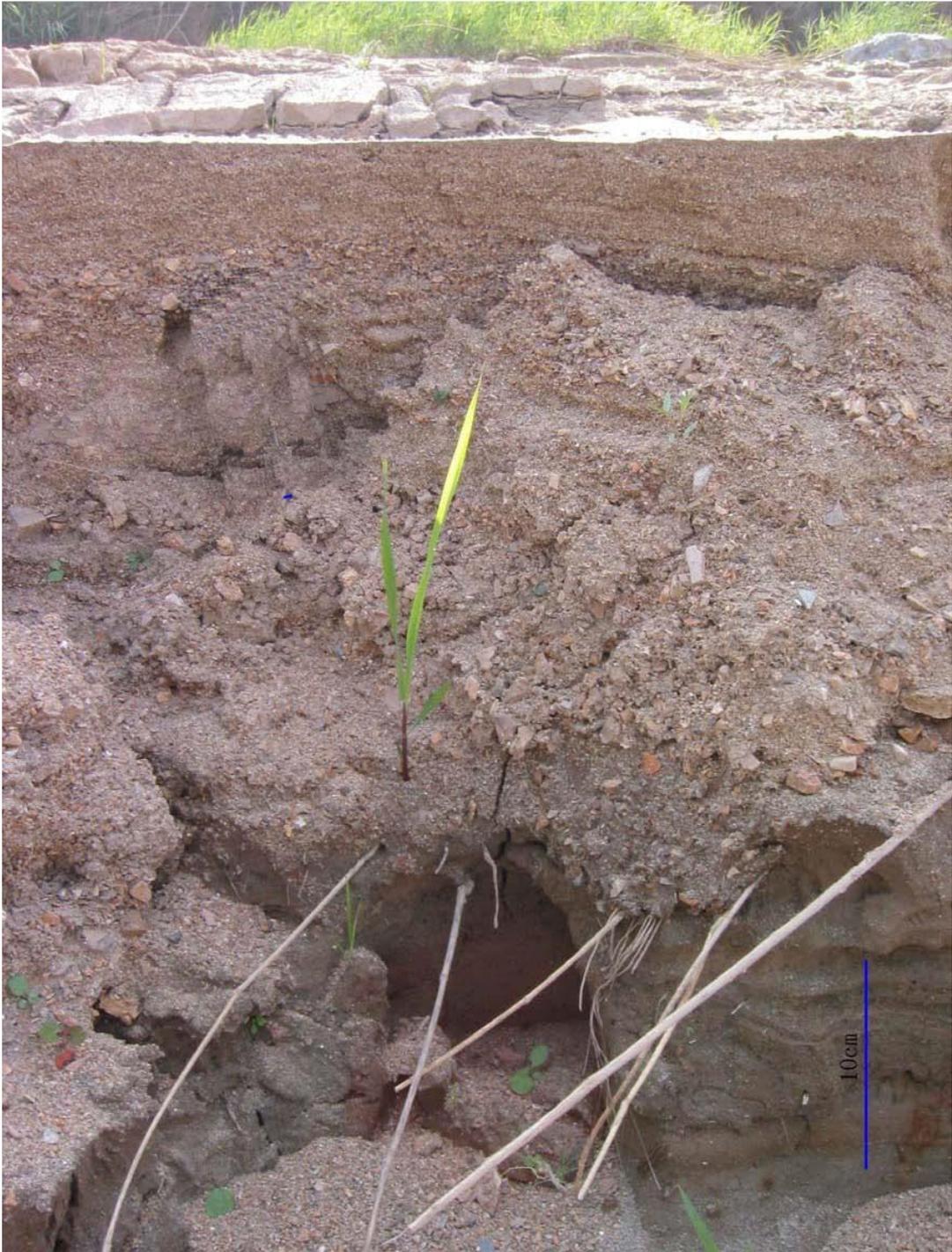


图 2.2.4-5 河边细砂

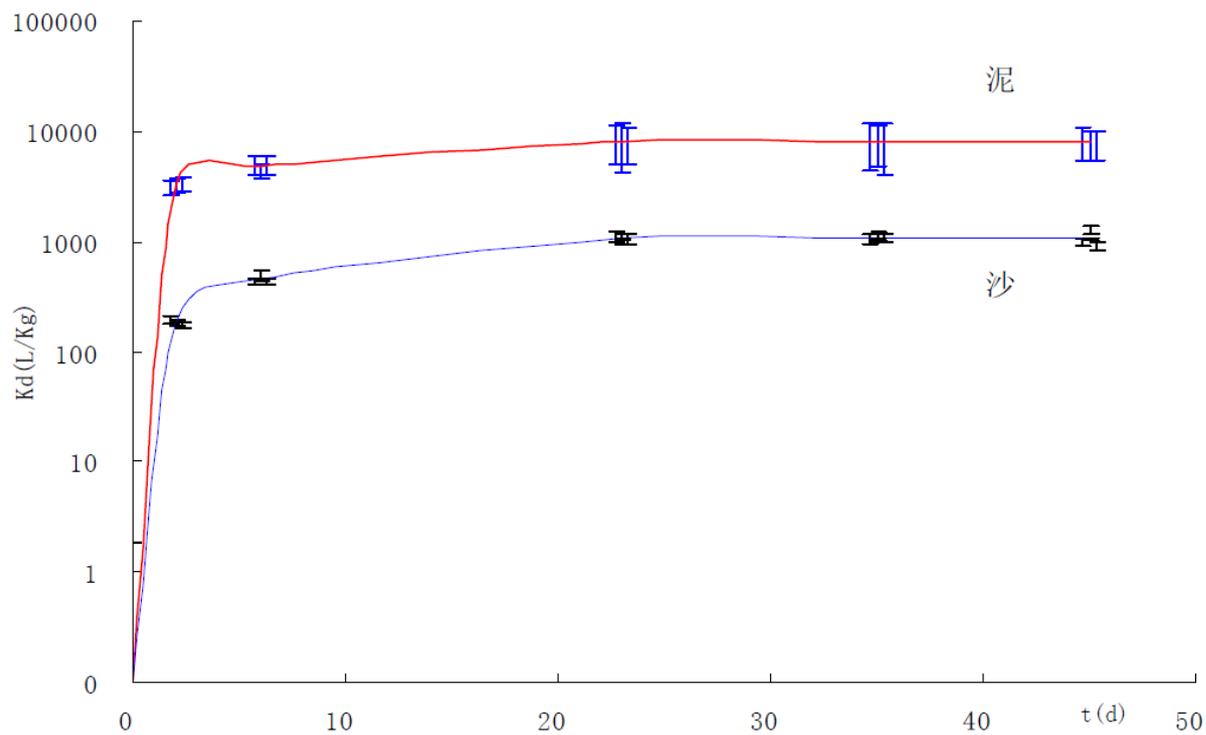


图 2.2.4-6 ^{60}Co 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

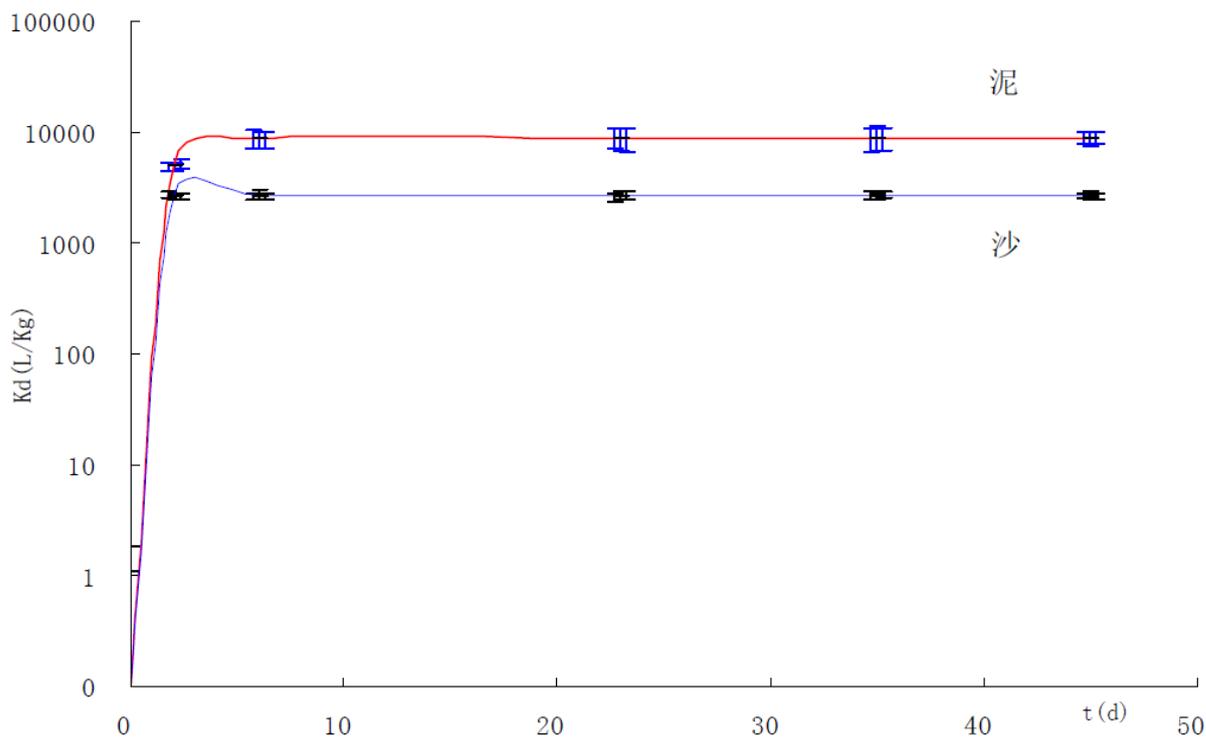


图 2.2.4-7 ^{137}Cs 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

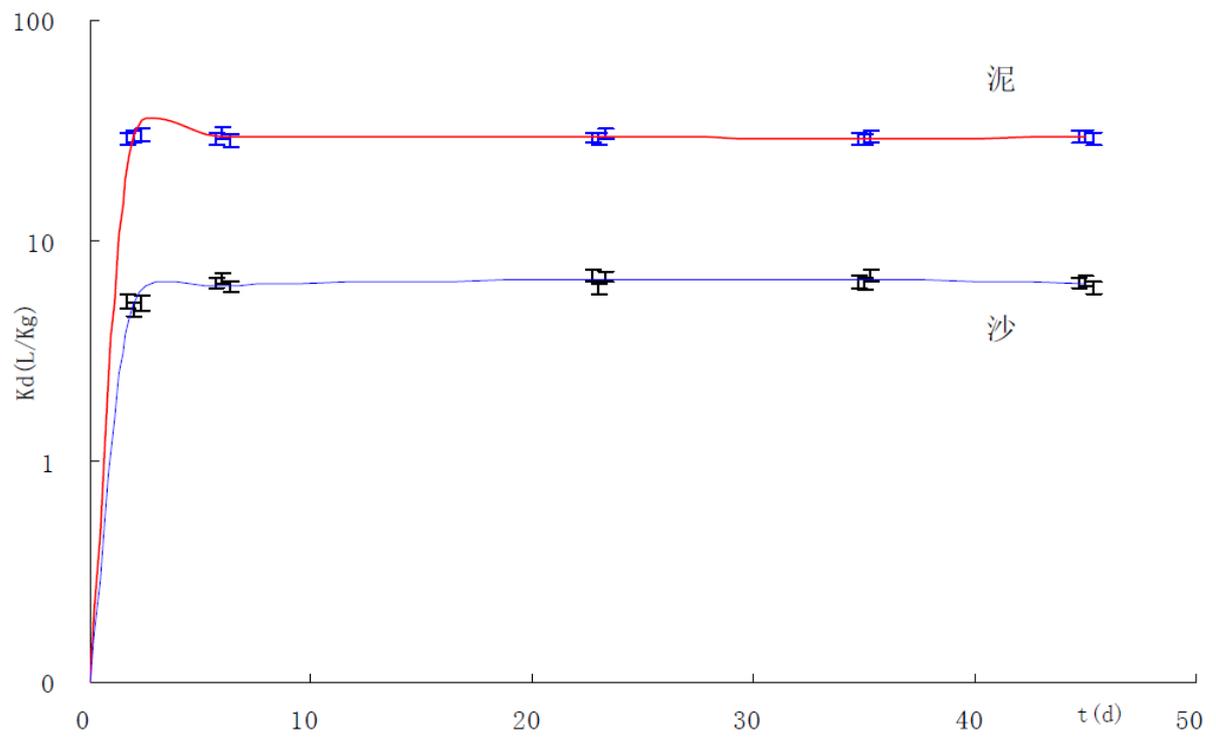


图 2.2.4-8 ^{90}Sr 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

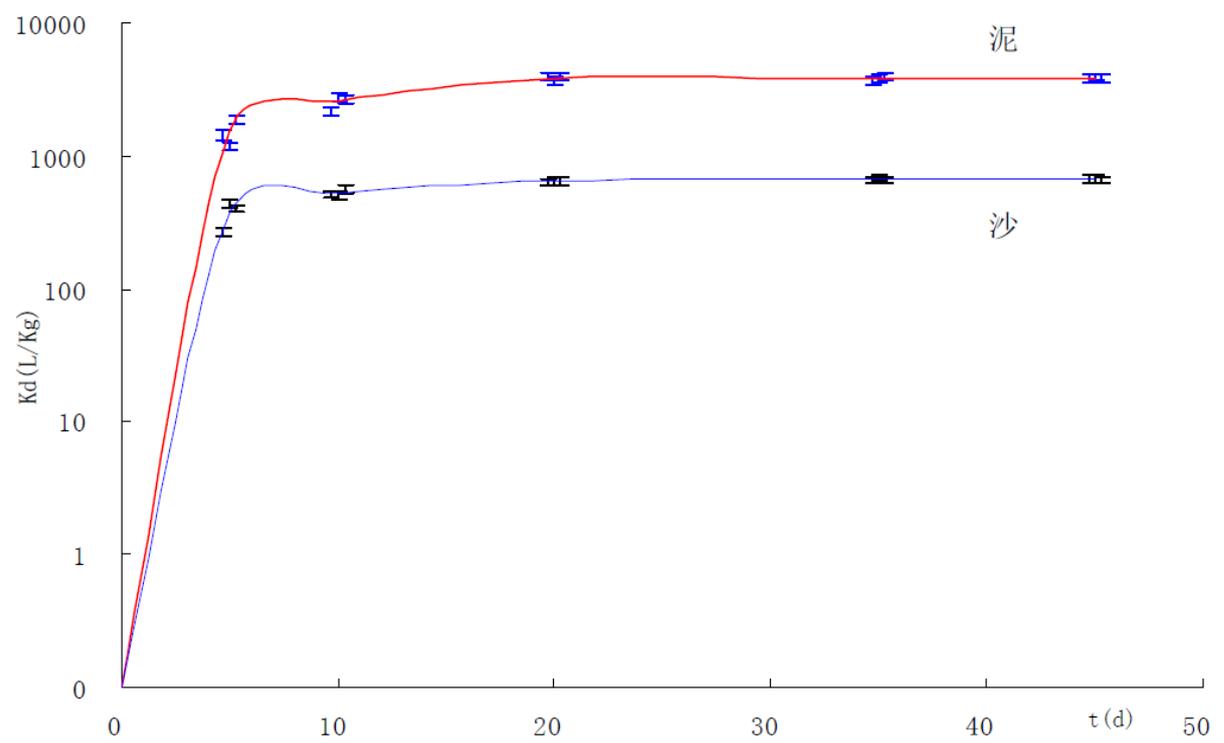


图 2.2.4-9 Ru 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

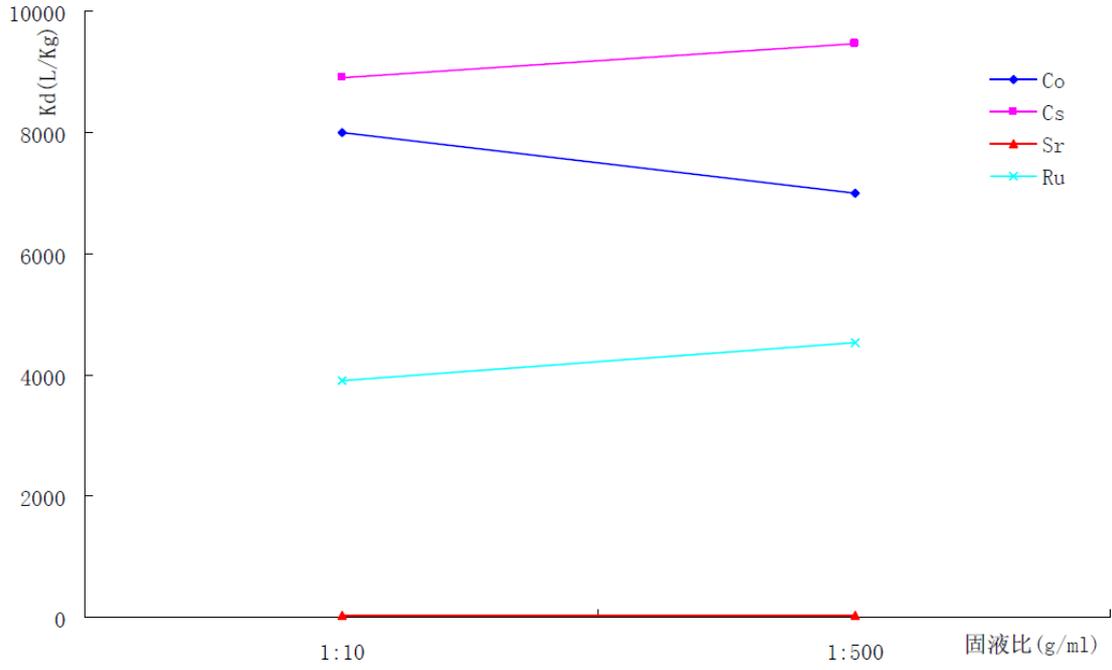


图 2.2.4-10 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 Ru 悬浮物实验结果

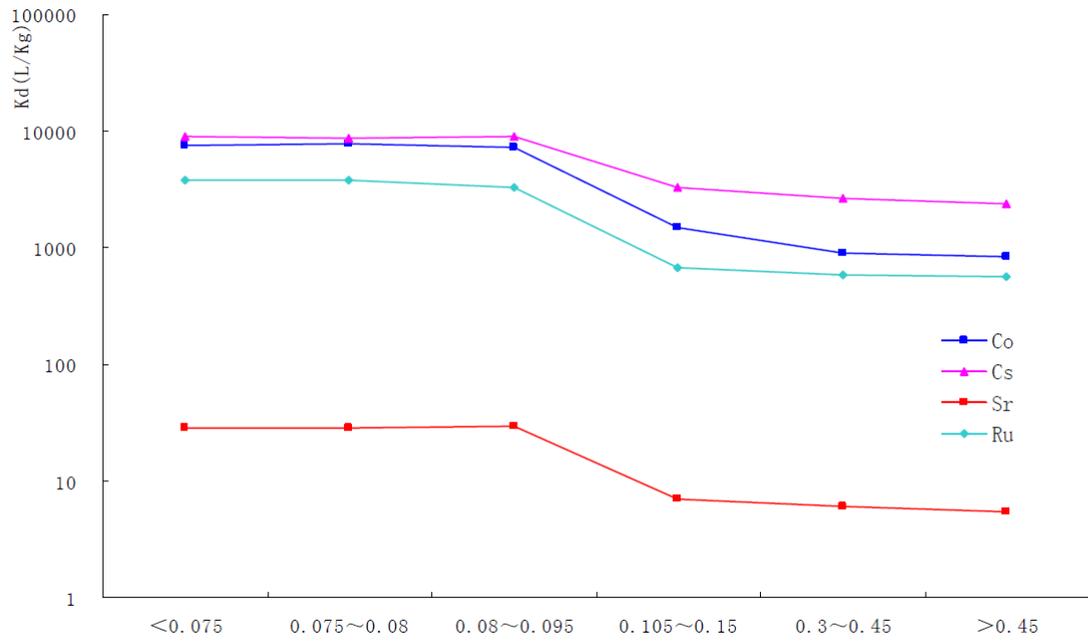


图2.2.4-11 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和Ru 不同粒径实验结果

2.2.5 湖南桃花江

桃花江核电厂厂址（荷叶山厂址）位于湖南省益江市桃江县沾溪乡肖车塘村谢家塘冲，地处资水中上游，上距1962年建成的柘溪水库坝址117.5km，下距已建的修山水库坝址约9km。

桃花江核电厂规划建设4台AP1000压水堆核电机组，四台机组一次性规划，分两期建设。核电厂在运行过程中，经处理合格并达到排放标准后的低放废水，将与冷却塔排污水混合后一起排入资水，2台机组夏季运行期间排水量为1.0m³/s，冬季为0.7m³/s；4台机组夏季运行期间排水量为2.0m³/s，冬季为1.4m³/s。

2.2.5.1 流域概况

资水流域地表植被良好，上游有已建柘溪水库、马迹塘电站和在建的东坪、珠溪口电站的拦沙作用，在马迹塘以下资水河段来沙量小，所以修山水库泥沙也不会很大。根据桃江站实测泥沙资料，修山水库多年平均悬移质来沙量为170万t。悬移质平均粒径为0.043-0.046mm，中数粒径为0.032-0.043mm，最大粒径0.621mm。

2.2.5.2 样品采集

根据现场实际情况，土壤样品则收集了三种，一种为水库内淤泥，一种为河道淤泥，一种为河道沙土，分别代表水库库区和下游河道河床。根据现场实地勘察，选取能代表大多数河床情况的采样地点进行采样。2008年12月16日，在两个地点进行了取样，一处位于排水口下游约15公里处，一处位于排水口下游约30公里处。在这两个地方的河道河床上收集了两种样品(淤泥和沙)，代表下游河道河床的淤泥和沙。将两个地点的淤泥或沙分别混合，运回实验室进行预处理。2009年7月28日，在修山水库下进行了淤泥的取样，代表水库库内的淤泥样品。取样点位置见图2.2.5-4。

2008年12月16日和2009年7月28日，进行了两次土壤样品和水样的采集。土壤样品采用资江河床的沉积物样品，水样则用资江水。采样点见图2.2.5-5~图2.2.5-8。河床表层覆盖有卵石，卵石粒径较大，主要是粒径1cm以上的卵石，卵石下面有粒径较大的沙子，细沙较少，在少数低洼处有淤泥沉积。河水清澈，悬沙很少。库内底泥采用水库近岸的底泥。悬浮物样品采自水库悬浮物。为尽量避免水样的化学性质发生变化，采集后用塑料桶密封盛装水样，运输回实验室在4℃下进行冷藏保存。

2.2.5.3 核素吸附特性模拟实验

根据放射性废液排放源项，并综合考虑核素的半衰期、毒性等，确定了四种有代表性的放射性核素Ru、¹³⁷Cs、⁶⁰Co、⁹⁰Sr，用静态批试法进行核素吸附特性的模拟实验。

1) 粒径分布

对采集的泥和沙共三种样品分别进行筛分预处理，得到粒径分布见表2.2.5-1。由上表可以看出，河道沙中以粗砂、中砂为主，库内泥中主要为细砂和粉粘粒，粒径0.075~0.08mm所占比例接近一半，河道泥的粒径则相对大一些，粒径0.095~0.105mm占60%以上。

实验时每个试验管所用沙子和泥均为1g，按照各个粒径所占质量的组分称重，并将其混合均匀。沙和泥的实验组成如表2.2.5-2。

2) 土样的化学成分分析及矿物组成

土壤矿物质是岩石经物理风化作用和化学风化作用形成的，占土壤固相部分总重量90%以上。土壤粘粒矿物是土壤矿物质中最活跃的部分，它的类型决定了土壤对放射性核素吸附能力的大小。由于土壤的物质组成和化学成分等条件都会影响土壤介质对核素的吸附性能，进而影响到分配系数，因而在进行吸附实验前，需要对土样的理化性质进行测试和分析。

土壤的矿物组成和化学成分分析由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心河南省岩石矿物测试中心进行测定，测得的矿物组成和化学成分结果列于表2.2.5-3和表2.2.5-4。由此可见，这三种样品主要化学成分均以SiO₂为主，含量分别为河道沙中87.88%、河道泥中76.40%和库内泥中72.99%。其次为Al₂O₃含量约为10%左右。其余还有少量的Fe₂O₃、CaO、K₂O、Na₂O等。

沙和泥中主要含氧化物矿物，如石英，其比重很大，接近90%。次生粘土矿物有云母(伊利石)、绿泥石等。河道泥和库内的成份基本接近。

3) 水样的化学成分分析

同样，水样的化学性质（如PH值）也会影响分配系数的大小，且水样中有无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响，因此用ICP-MS对水样的⁵⁹Co、¹³³Cs、⁸⁸Sr和¹⁰¹Ru本底进行了测量，结果见表2.2.5-5。

取样点附近的水外观清澈、无沉淀，PH呈弱碱性。水样中在ICP-MS检测限内没有检出钴和铯，说明水的本底中基本没有钴和铯，或者说资江水中钴和铯含量极低。钆的含量为 4.950×10^{-10} mol/L，资江水中钆的含量很低。而铟的含量为

1.027×10⁻⁶mol/L，说明资江水中锶的含量较高。

4) 吸附实验过程

取15ml的聚乙烯塑料离心管，洗净后晾干，向每个离心管中加入9.2ml的溶液，溶液为现场所取的水样，再称取(1±0.002)克的泥/沙放入管中，盖紧盖子，摇匀，静置七天。吸附实验开始后向盛有泥/沙和水的离心管中加入0.8ml 含放射性核素的溶液，溶液中四种核素（¹³⁷Cs、⁶⁰Co、⁹⁰Sr、Ru）的投放量按照仪器的最低检测限来定，具体四种核素在每个离心管中的投放量见表2.2.5-6。立即将之振荡使固液充分混合，并且在实验时间内每天都要放入振荡器中振荡两次（上午下午各一次，每次不少于60分钟）。间隔不同时间取样测量，直至吸附平衡为止，计算分配系数*K_d*。

(1) ⁶⁰Co吸附实验结果

在加入⁶⁰Co后的第2、6、23、35、45 天进行取样，每次取三个平行样(最后一位数字-1、-2、-3 为平行样编号)。先将试验管离心三十分钟，然后分别取出管中的液体和固体。液体直接测量活度，然后计算其比活度，固体则先烘干，在烘箱中自然降温后称重测量其活度，将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度，再算得固相的比活度；最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数*K_d*。σ_{K_d}为测量的统计误差。⁶⁰Co 的吸附实验结果见表2.2.5-7。

⁶⁰Co在泥和沙中的*K_d*随时间变化的关系曲线见图2.2.5-9。由图表可以看出，⁶⁰Co在河道沙中的分配系数接近1.5E+03 L/kg，而且基本在加入⁶⁰Co 后20 天后才达到吸附平衡；在河道泥中分配系数接近7.0E+03 L/kg，且吸附速度很快，平衡时间很短，第2 天就基本达到吸附平衡；在库内泥中分配系数略小于河道泥中的分配系数，约为6.0E+03 L/kg，平衡也比较缓慢，平衡时间较长，约在加入⁶⁰Co 后30天才达到吸附平衡。

(2) ¹³⁷Cs 吸附实验结果

在加入¹³⁷Cs后的第2、6、23、35、45天进行取样，取样过程同上。¹³⁷Cs的吸附实验结果见表2.2.5-8。¹³⁷Cs在泥和沙中的*K_d*随时间变化的关系曲线见图2.2.5-10。

由图表可以看出，¹³⁷Cs在河道沙中的分配系数接近4.7E+03L/kg，基本在加入¹³⁷Cs 后20天后才达到吸附平衡；在河道泥中分配系数接近1.1E+04 L/kg，且吸附速度很快，平衡时间很短，第6天就达到吸附平衡；在库内泥中分配系数略大

于河道泥中的分配系数，约为 $1.3E+04$ L/kg，平衡也比较缓慢，平衡时间较长，约在加入 ^{137}Cs 后30天左右才达到吸附平衡。

(3) ^{90}Sr 吸附实验结果

在加入 ^{90}Sr 后的第2、6、23、35、45天进行取样，取样过程同上。 ^{90}Sr 的吸附实验结果见表2.2.5-9。 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.5-11。

由图表可以看出， ^{90}Sr 在河道沙中的分配系数很小，只有 7.4 L/kg，而且吸附速度很慢，约在加入 ^{90}Sr 30天后才达到吸附平衡；在河道泥中分配系数约为 $1.8E+01$ L/kg，平衡时间较短，第20天达到吸附平衡；在库内泥中分配系数略大于河道泥中的分配系数，约为 $3.0E+01$ L/kg，平衡时间较长，约在加入 ^{90}Sr 后35天左右才达到吸附平衡。 ^{90}Sr 在这三种土壤样品中的吸附分配系数均很小，这可能与前面测得的水中铯本底值很高有关。由于现场铯本底值很高，减少了所加入的 ^{90}Sr 的吸附。

(4) Ru 吸附实验结果

在加入Ru后的第5、10、20、35、45天进行取样，取样过程同上。Ru的吸附实验结果见表2.2.5-10。Ru在泥和沙中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图2.2.5-12。

由图表可以看出，Ru在河道沙中的分配系数较小，接近 $5.4E+02$ L/kg，约在加入Ru后10天就基本达到吸附平衡；在河道泥中分配系数约为 $3.5E+03$ L/kg，平衡时间也较短，基本在第10天就达到吸附平衡；在库内泥中的分配系数略小于在河道泥中的分配系数，约为 $3.3E+03$ L/kg，平衡时间也较河道泥中的时间长，约在加入Ru后35天左右才达到吸附平衡。

由这四种核素在三种土壤样品中的吸附特性模拟实验可以得出，在河道沙中的分配系数最小，河道泥和库内泥中分配系数基本接近，差别不大。而吸附平衡则是在河道泥中最快，四种核素最短在第2天就达到吸附平衡，最慢也在第10天也达到了吸附平衡；在库内泥中则吸附平衡最慢，基本都在第30天才能达到吸附平衡。

(5) 悬浮物实验结果及讨论

采集河水中的悬浮物样品，晒干后称取 1g 的重量放入试验瓶中，分别按固液比 $1:500\text{g/ml}$ 和 $1:2000\text{g/ml}$ 加入河水，盖紧盖子，摇匀，静置七天。吸附实验开始后向盛有悬浮物和河水的试验瓶中分别加入 15ml 和 60ml 含四种放射性核素

(^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 Ru) 的溶液，立即将之振荡使固液充分混合，并且在实验时间内每天都要振荡两次。在实验30 天后进行取样测量，计算分配系数 K_d 。

悬浮物实验结果见表2.2.5-11。四种核素的悬浮物实验结果并与固液比为1:10g/ml 的库内泥的实验值相比较所得结果见图2.2.5-13。

由图表可以看出，三种核素(^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 Ru)的分配系数均随着固液比的减小， K_d 值逐步增大，而 ^{60}Co 的实验结果正好相反，其分配系数均随着固液比的减小而减小，但变化范围不大，表明不同固液比对 K_d 值的影响不明显。

(6) 不同粒径实验结果

将河道沙和河道泥分成不同的粒径，测量不同的粒径对分配系数的影响。河道沙共做了三组，粒径分别为 $>0.45\text{mm}$ 、 $0.3\sim 0.45\text{mm}$ 、 $0.105\sim 0.15\text{mm}$ ；同样河道泥也做了三组，粒径分别为 $0.08\sim 0.095\text{mm}$ 、 $0.075\sim 0.08\text{mm}$ 及 0.075mm 以下。每种样品做三个平行样，固体样品均加入 1g 左右，放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 及 Ru 各约 0.8ml，固液比 1:10g/ml。在实验时间内将实验管每天放入振荡器中振荡，放置 30 天后进行取样。实验结果见表 2.2.5-12~表 2.2.5-15。不同核素分配系数随粒径的变化曲线见图 2.2.5-14。可以看出，四种核素分配系数的变化趋势在河道沙中基本是随着颗粒粒径的减小，分配系数逐渐增大，其变化很明显，这主要是由于随着颗粒粒径减小，颗粒比表面积增大，表面吸附能力增强，有利于各种核素的吸附，从而使分配系数增大；而在河道泥中的分配系数变化不大，基本变化趋势不太明显，主要因为不同泥的粒径差别不大，比表面积也差别不大，其吸附性能基本相同。

表 2.2.5-1 样品中各粒径的质量组分

分子筛(目)	粒径(mm)	河道泥(%)	库内泥(%)	河道沙(%)
20~40	0.45~0.9			56.18
40~60	0.3~0.45			25.44
60~80	0.2~0.3			8.43
80~100	0.15~0.2			5.88
100~120	0.125~0.15			1.80
120~140	0.105~0.125			0.36
140~160	0.095~0.105	61.30	23.94	0.96
160~180	0.08~0.095	1.45	1.44	0.17
180~200	0.075~0.08	18.19	42.04	0.36
>200	<0.075	19.06	32.59	0.43

表 2.2.5-2 样品中各粒径的质量组分(%)

河道沙	粒径(目)	20~60	60~100	100~160	160~200
	粒径(mm)	0.3~0.9	0.15~0.3	0.095~0.15	0.075~0.09
	质量组分	56	25	17	52
河道泥	粒径(目)	140~180	180~200	>200	
	粒径(mm)	0.08~0.10	0.075~0.08	<0.075	
	质量组分	54	47	49	
库内泥	粒径(目)	140~180	180~200	>200	
	粒径(mm)	0.08~0.105	0.075~0.08	<0.075	
	质量组分	25	42	33	

表 2.2.5-3 土壤中各主要化学成分的质量组分(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
河道沙	87.88	5.70	2.18	0.39	0.46	1.72	0.36
河道泥	76.40	10.57	3.96	1.04	0.91	2.05	0.68
库内泥	72.99	12.20	4.30	0.74	0.88	2.08	0.60

表 2.2.5-4 土壤中各矿物质的质量组分(%)

	石英	斜长石	钾长石	伊利石	绿泥石	方解石	锐钛矿	其他
河道沙	85~90	1~2	5~10	1~2	1	-	-	1
河道泥	88~89	3~5	-	2~3	1~2	1~2	1	1
库内泥	88~89	5~8	-	2~3	1~2	-	-	1

表 2.2.5-5 水样 pH 值和 ⁵⁹Co、¹³³Cs、⁸⁸Sr 和 ¹⁰¹Ru 的含量(mol/l)

分析项目	外观描述	pH	本底值			
			⁵⁹ Co	¹³³ Cs	⁸⁸ Sr	¹⁰¹ Ru
水样	澄清, 无沉淀	7.18	≤1.697×10 ⁻⁸	≤7.524×10 ⁻⁹	1.027×10 ⁻⁶	4.950×10 ⁻¹⁰

表 2.2.5-6 每个试样吸附实验中各核素的投放量

核素	Co	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	Ru
化学浓度(mol/l)	3.10×10 ⁻⁷	1.37×10 ⁻⁸	1.48×10 ⁻⁸	4.53×10 ⁻⁵
投放量	3.09×10 ⁴ Bq	4.81×10 ⁴ Bq	5.25×10 ⁴ Bq	4.09×10 ⁸ mol

表 2.2.5-7⁶⁰Co 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{Kd}	
河道沙	Co-1-1	2	5.36E+02	2.44E+04	4.60E+01	3.20E+00
	Co-1-2	2	5.58E+02	2.50E+04	4.50E+01	3.20E+00
	Co-1-3	2	5.75E+02	2.41E+04	4.20E+01	3.10E+00
	Co-2-1	6	1.60E+02	3.09E+04	1.90E+02	1.30E+01
	Co-2-2	6	1.49E+02	3.05E+04	2.10E+02	1.40E+01
	Co-2-3	6	1.46E+02	2.98E+04	2.00E+02	1.40E+01
	Co-3-1	23	2.38E+01	2.95E+04	1.20E+03	1.10E+02
	Co-3-2	23	2.22E+01	3.14E+04	1.40E+03	1.20E+02
	Co-3-3	23	2.72E+01	3.22E+04	1.20E+03	1.10E+02
	Co-4-1	35	2.26E+01	3.10E+04	1.40E+03	1.40E+02
	Co-4-2	35	2.03E+01	3.22E+04	1.60E+03	1.70E+02
	Co-4-3	35	2.40E+01	3.11E+04	1.30E+03	1.30E+02
	Co-5-1	45	1.99E+01	3.08E+04	1.50E+03	2.00E+02
	Co-5-2	45	2.25E+01	3.13E+04	1.40E+03	1.70E+02
	Co-5-3	45	2.28E+01	3.18E+04	1.40E+03	1.40E+02
河道泥	Co-10-1	2	6.46E+00	3.42E+04	5.30E+03	1.10E+03
	Co-10-2	2	5.44E+00	3.42E+04	6.30E+03	2.60E+03
	Co-10-3	2	4.71E+00	3.14E+04	6.70E+03	2.10E+03
	Co-11-1	6	4.84E+00	3.38E+04	7.00E+03	1.80E+03
	Co-11-2	6	5.00E+00	3.37E+04	6.70E+03	1.80E+03
	Co-11-3	6	5.33E+00	3.54E+04	6.60E+03	2.50E+03
	Co-12-1	23	6.03E+00	4.09E+04	6.80E+03	1.80E+03
	Co-12-2	23	4.20E+00	3.08E+04	7.30E+03	1.60E+03
	Co-12-3	23	5.29E+00	3.62E+04	6.80E+03	1.40E+03
	Co-13-1	35	4.94E+00	3.45E+04	7.00E+03	3.10E+03
	Co-13-2	35	5.41E+00	3.18E+04	5.90E+03	2.20E+03
	Co-13-3	35	4.59E+00	3.43E+04	7.50E+03	3.20E+03
	Co-14-1	45	5.43E+00	3.65E+04	6.70E+03	3.30E+03
	Co-14-2	45	5.44E+00	3.45E+04	6.30E+03	4.30E+03

	Co-14-3	45	4.91E+00	3.20E+04	6.50E+03	3.80E+03
库 内 泥	Co-20-1	2	1.04E+02	3.60E+04	3.40E+02	2.40E+01
	Co-20-2	2	1.21E+02	3.35E+04	2.80E+02	1.90E+01
	Co-20-3	2	1.14E+02	3.05E+04	2.70E+02	1.80E+01
	Co-21-1	6	4.92E+01	3.58E+04	7.30E+02	5.10E+01
	Co-21-2	6	4.68E+01	3.37E+04	7.20E+02	4.90E+01
	Co-21-3	6	4.91E+01	3.28E+04	6.70E+02	4.40E+01
	Co-22-1	23	7.58E+00	3.44E+04	4.50E+03	3.60E+02
	Co-22-2	23	7.62E+00	3.33E+04	4.40E+03	3.50E+02
	Co-22-3	23	6.34E+00	3.29E+04	5.20E+03	4.60E+02
	Co-23-1	35	6.23E+00	3.59E+04	5.80E+03	1.80E+03
	Co-23-2	35	5.15E+00	3.32E+04	6.50E+03	2.40E+03
	Co-23-3	35	5.95E+00	3.43E+04	5.80E+03	2.00E+03
	Co-24-1	45	5.96E+00	3.47E+04	5.80E+03	1.90E+03
	Co-24-2	45	5.37E+00	3.15E+04	5.90E+03	2.10E+03
	Co-24-3	45	5.71E+00	3.54E+04	6.20E+03	2.20E+03

表 2.2.5-7¹³⁷Cs 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}	
河道沙	Cs-1-1	2	9.53E+01	4.77E+04	5.00E+02	2.30E+01
	Cs-1-2	2	1.12E+02	4.95E+04	4.40E+02	2.00E+01
	Cs-1-3	2	1.07E+02	4.85E+04	4.60E+02	2.10E+01
	Cs-2-1	6	2.84E+01	5.34E+04	1.90E+03	9.40E+01
	Cs-2-2	6	3.22E+01	5.60E+04	1.70E+03	9.80E+01
	Cs-2-3	6	3.37E+01	5.58E+04	1.70E+03	9.20E+01
	Cs-3-1	23	1.24E+01	5.08E+04	4.10E+03	2.80E+02
	Cs-3-2	23	1.13E+01	5.44E+04	4.80E+03	3.60E+02
	Cs-3-3	23	1.14E+01	5.51E+04	4.90E+03	3.60E+02
	Cs-4-1	35	1.10E+01	5.48E+04	5.00E+03	3.80E+02
	Cs-4-2	35	1.29E+01	5.66E+04	4.40E+03	3.10E+02
	Cs-4-3	35	1.21E+01	5.60E+04	4.60E+03	3.40E+02
	Cs-5-1	45	1.29E+01	5.32E+04	4.10E+03	2.80E+02
	Cs-5-2	45	1.32E+01	5.40E+04	4.10E+03	2.70E+02
	Cs-5-3	45	1.32E+01	5.47E+04	4.10E+03	2.50E+02
河道泥	Cs-10-1	2	8.09E+00	5.39E+04	6.70E+03	5.90E+02
	Cs-10-2	2	7.32E+00	5.52E+04	7.50E+03	6.70E+02
	Cs-10-3	2	8.36E+00	5.25E+04	6.30E+03	5.30E+02
	Cs-11-1	6	5.45E+00	5.51E+04	1.00E+04	1.00E+03
	Cs-11-2	6	5.97E+00	5.48E+04	9.20E+03	9.00E+02
	Cs-11-3	6	4.34E+00	5.55E+04	1.30E+04	1.40E+03
	Cs-12-1	23	5.24E+00	6.27E+04	1.20E+04	1.30E+03
	Cs-12-2	23	4.76E+00	5.22E+04	1.10E+04	1.20E+03
	Cs-12-3	23	6.66E+00	5.71E+04	8.60E+03	8.20E+02
	Cs-13-1	35	4.81E+00	5.52E+04	1.10E+04	1.70E+03
	Cs-13-2	35	5.25E+00	5.26E+04	1.00E+04	1.30E+03
	Cs-13-3	35	5.07E+00	5.51E+04	1.10E+04	1.50E+03
	Cs-14-1	45	5.44E+00	5.81E+04	1.10E+04	1.30E+03
	Cs-14-2	45	5.26E+00	5.59E+04	1.10E+04	1.40E+03
Cs-14-3	45	4.79E+00	5.28E+04	1.10E+04	1.50E+03	
库内泥	Cs-20-1	2	1.64E+01	5.98E+04	3.60E+03	2.80E+02
	Cs-20-2	2	1.58E+01	5.72E+04	3.60E+03	2.80E+02
	Cs-20-3	2	1.61E+01	5.01E+04	3.10E+03	2.30E+02
	Cs-21-1	6	5.32E+00	5.90E+04	1.10E+04	1.70E+03
	Cs-21-2	6	5.32E+00	5.59E+04	1.10E+04	1.60E+03
	Cs-21-3	6	4.83E+00	5.44E+04	1.10E+04	1.80E+03
	Cs-22-1	23	4.59E+00	5.79E+04	1.30E+04	2.00E+03
	Cs-22-2	23	4.97E+00	5.56E+04	1.10E+04	1.80E+03
	Cs-22-3	23	4.15E+00	5.45E+04	1.30E+04	2.30E+03

Cs-23-1	35	4.57E+00	5.76E+04	1.30E+04	2.20E+03
Cs-23-2	35	4.05E+00	5.54E+04	1.40E+04	2.60E+03
Cs-23-3	35	4.86E+00	5.69E+04	1.20E+04	2.00E+03
Cs-24-1	45	4.45E+00	5.67E+04	1.30E+04	1.90E+03
Cs-24-2	45	4.44E+00	5.44E+04	1.20E+04	2.10E+03
Cs-24-3	45	4.67E+00	5.86E+04	1.30E+04	2.10E+03

表 2.2.5-79 ⁹⁰Sr 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}	
河道沙	Sr-1-1	2	4.93E+03	2.31E+04	4.70E+00	3.00E-01
	Sr-1-2	2	5.09E+03	2.07E+04	4.10E+00	3.00E-01
	Sr-1-3	2	5.15E+03	2.21E+04	4.30E+00	3.00E-01
	Sr-2-1	6	5.04E+03	2.46E+04	4.90E+00	2.90E-01
	Sr-2-2	6	4.82E+03	2.47E+04	5.10E+00	3.00E-01
	Sr-2-3	6	4.56E+03	2.56E+04	5.60E+00	3.40E-01
	Sr-3-1	23	4.61E+03	2.79E+04	6.10E+00	3.50E-01
	Sr-3-2	23	4.52E+03	2.51E+04	5.60E+00	3.60E-01
	Sr-3-3	23	4.32E+03	2.63E+04	6.10E+00	3.60E-01
	Sr-4-1	35	4.33E+03	2.94E+04	6.80E+00	3.50E-01
	Sr-4-2	35	4.23E+03	2.77E+04	6.50E+00	3.30E-01
	Sr-4-3	35	4.63E+03	2.78E+04	6.00E+00	3.40E-01
	Sr-5-1	45	3.73E+03	2.82E+04	7.60E+00	4.20E-01
	Sr-5-2	45	3.87E+03	2.72E+04	7.00E+00	3.90E-01
	Sr-5-3	45	4.60E+03	2.49E+04	5.40E+00	3.40E-01
河道泥	Sr-10-1	2	2.87E+03	3.94E+04	1.40E+01	7.90E-01
	Sr-10-2	2	2.68E+03	3.86E+04	1.40E+01	8.00E-01
	Sr-10-3	2	2.82E+03	3.66E+04	1.30E+01	7.10E-01
	Sr-11-1	6	2.52E+03	4.15E+04	1.60E+01	9.30E-01
	Sr-11-2	6	2.46E+03	3.98E+04	1.60E+01	8.70E-01
	Sr-11-3	6	2.41E+03	3.99E+04	1.70E+01	9.00E-01
	Sr-12-1	23	2.26E+03	4.20E+04	1.90E+01	1.00E+00
	Sr-12-2	23	2.29E+03	3.94E+04	1.70E+01	8.90E-01
	Sr-12-3	23	2.25E+03	3.99E+04	1.80E+01	9.30E-01
	Sr-13-1	35	2.46E+03	4.25E+04	1.70E+01	9.50E-01
	Sr-13-2	35	2.27E+03	4.25E+04	1.90E+01	1.00E+00
	Sr-13-3	35	2.40E+03	3.96E+04	1.70E+01	9.20E-01
	Sr-14-1	45	2.67E+03	4.04E+04	1.50E+01	8.50E-01
	Sr-14-2	45	2.42E+03	4.26E+04	1.80E+01	9.60E-01
	Sr-14-3	45	2.56E+03	3.95E+04	1.50E+01	8.60E-01
库内泥	Sr-20-1	2	2.66E+03	4.19E+04	1.60E+01	8.80E-01
	Sr-20-2	2	2.45E+03	4.08E+04	1.70E+01	8.90E-01
	Sr-20-3	2	2.60E+03	3.96E+04	1.50E+01	8.30E-01
	Sr-21-1	6	2.75E+03	3.93E+04	1.40E+01	7.90E-01
	Sr-21-2	6	2.73E+03	4.07E+04	1.50E+01	8.00E-01
	Sr-21-3	6	2.68E+03	4.30E+04	1.60E+01	8.60E-01
	Sr-22-1	23	1.86E+03	4.52E+04	2.40E+01	1.30E+00
	Sr-22-2	23	1.85E+03	4.50E+04	2.40E+01	1.30E+00
	Sr-22-3	23	2.28E+03	4.52E+04	2.00E+01	1.10E+00

	Sr-23-1	35	1.59E+03	4.58E+04	2.90E+01	1.60E+00
	Sr-23-2	35	1.51E+03	4.67E+04	3.10E+01	1.70E+00
	Sr-23-3	35	1.61E+03	4.40E+04	2.70E+01	1.50E+00
	Sr-24-1	45	1.64E+03	4.61E+04	2.80E+01	1.60E+00
	Sr-24-2	45	1.75E+03	5.32E+04	3.00E+01	1.70E+00
	Sr-24-3	45	1.65E+03	4.64E+04	2.80E+01	1.50E+00

表 2.2.5-10 Ru 吸附分配系数

试验管编号		取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/l)	固相比活度 (Bq/kg)	K _d (l/kg)	σ _{K_d}
河道 沙	Ru-1-1	5	1.66E-06	4.86E-04	2.90E+02	9.30E+00
	Ru-1-2	5	1.78E-06	4.85E-04	2.70E+02	9.80E+00
	Ru-1-3	5	1.64E-06	4.86E-04	3.00E+02	9.30E+00
	Ru-2-1	10	8.94E-07	4.95E-04	5.50E+02	9.70E+00
	Ru-2-2	10	9.79E-07	4.95E-04	5.10E+02	9.30E+00
	Ru-2-3	10	9.55E-07	5.06E-04	5.30E+02	1.00E+01
	Ru-3-1	20	9.86E-07	5.00E-04	5.10E+02	9.30E+00
	Ru-3-2	20	9.56E-07	4.98E-04	5.20E+02	8.70E+00
	Ru-3-3	20	1.00E-06	4.92E-04	4.90E+02	8.80E+00
	Ru-4-1	35	8.85E-07	5.04E-04	5.70E+02	9.40E+00
	Ru-4-2	35	1.02E-06	4.96E-04	4.90E+02	8.70E+00
	Ru-4-3	35	1.02E-06	4.94E-04	4.80E+02	8.80E+00
	Ru-5-1	45	9.69E-07	5.08E-04	5.20E+02	7.00E+00
	Ru-5-2	45	8.61E-07	4.93E-04	5.70E+02	5.20E+00
	Ru-5-3	45	9.71E-07	4.95E-04	5.10E+02	6.80E+00
河道 泥	Ru-10-1	5	2.18E-07	5.01E-04	2.30E+03	8.10E+00
	Ru-10-2	5	2.50E-07	5.04E-04	2.00E+03	8.70E+00
	Ru-10-3	5	2.63E-07	5.04E-04	1.90E+03	8.20E+00
	Ru-11-1	10	1.52E-07	5.02E-04	3.30E+03	8.40E+00
	Ru-11-2	10	1.59E-07	5.05E-04	3.20E+03	8.60E+00
	Ru-11-3	10	1.24E-07	5.03E-04	4.10E+03	8.80E+00
	Ru-12-1	20	1.38E-07	5.10E-04	3.70E+03	7.30E+00
	Ru-12-2	20	1.67E-07	5.04E-04	3.00E+03	9.80E+00
	Ru-12-3	20	1.32E-07	5.08E-04	3.80E+03	9.00E+00
	Ru-13-1	35	1.51E-07	5.05E-04	3.30E+03	8.00E+00
	Ru-13-2	35	1.62E-07	5.05E-04	3.10E+03	8.50E+00
	Ru-13-3	35	1.26E-07	5.17E-04	4.10E+03	8.40E+00
	Ru-14-1	45	1.48E-07	5.08E-04	3.40E+03	6.50E+00
	Ru-14-2	45	1.41E-07	5.03E-04	3.60E+03	6.50E+00
	Ru-14-3	45	1.36E-07	5.02E-04	3.70E+03	7.20E+00
库 内	Ru-20-1	5	2.02E-06	4.80E-04	2.40E+02	8.30E+00
	Ru-20-2	5	1.37E-06	4.90E-04	3.60E+02	9.30E+00

泥	Ru-20-3	5	1.22E-06	4.92E-04	4.00E+02	8.90E+00
	Ru-21-1	10	7.48E-07	4.97E-04	6.60E+02	9.20E+00
	Ru-21-2	10	7.63E-07	4.95E-04	6.50E+02	9.00E+00
	Ru-21-3	10	5.99E-07	4.97E-04	8.30E+02	7.90E+00
	Ru-22-1	20	2.53E-07	5.05E-04	2.00E+03	8.10E+00
	Ru-22-2	20	3.13E-07	5.06E-04	1.60E+03	8.80E+00
	Ru-22-3	20	3.25E-07	5.04E-04	1.60E+03	7.80E+00
	Ru-23-1	35	1.10E-07	5.03E-04	4.60E+03	6.90E+00
	Ru-23-2	35	1.93E-07	5.02E-04	2.60E+03	7.60E+00
	Ru-23-3	35	1.89E-07	5.07E-04	2.70E+03	9.70E+00
	Ru-24-1	45	1.66E-07	5.04E-04	3.00E+03	6.50E+00
	Ru-24-2	45	1.58E-07	5.05E-04	3.20E+03	6.90E+00
	Ru-24-3	45	1.67E-07	5.08E-04	3.00E+03	6.40E+00

表 2.2.5-11 悬浮物实验结果

试验管编号	固液比 (g/ml)	液相比活度 (Bq/L)或(mol/L)	固相比活度 (Bq/kg)或 (mol/kg)	K_d (L/kg)
Co-1	1:500	1.84E+01	1.12E+05	6.1E+03
Co-2	1:2000	6.32E+01	3.52E+05	5.6E+03
Cs-1	1:500	7.24E+00	2.54E+04	1.5E+04
Cs-2	1:2000	2.57E+01	2.70E+04	1.6E+04
Sr-1	1:500	6.18E+02	2.18E+04	3.5E+01
Sr-2	1:2000	7.38E+02	2.72E+04	3.7E+01
Ru-1	1:500	1.26E-06	6.13E-03	4.9E+03
Ru-2	1:2000	3.56E-06	2.00E-02	5.6E+03

表 2.2.5-12 不同粒径对 ^{60}Co 分配系数的影响

试验管编号		粒径(mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σK_d
河道沙	Co-50-1	>0.45	3.50E+01	3.28E+04	9.40E+02	1.00E+02
	Co-50-2	>0.45	3.21E+01	3.20E+04	1.00E+03	1.10E+02
	Co-50-3	>0.45	2.61E+01	3.14E+04	1.20E+03	1.40E+02
	Co-51-1	0.3~0.45	2.89E+01	3.13E+04	1.10E+03	1.20E+02
	Co-51-2	0.3~0.45	2.81E+01	3.26E+04	1.20E+03	1.30E+02
	Co-51-3	0.3~0.45	1.96E+01	3.05E+04	1.60E+03	2.00E+02
	Co-52-1	0.105~0.15	1.16E+01	3.30E+04	2.80E+03	4.30E+02
	Co-52-2	0.105~0.15	1.08E+01	3.16E+04	2.90E+03	4.70E+02
	Co-52-3	0.105~0.15	9.94E+00	3.28E+04	3.30E+03	5.50E+02
河道泥	Co-53-1	0.08~0.095	1.11E+01	3.53E+04	3.20E+03	6.20E+02
	Co-53-2	0.08~0.095	4.47E+00	3.50E+04	7.80E+03	2.70E+03
	Co-53-3	0.08~0.095	6.49E+00	3.71E+04	5.70E+03	1.50E+03
	Co-54-1	0.075~0.08	6.61E+00	3.44E+04	5.20E+03	1.70E+03
	Co-54-2	0.075~0.08	4.62E+00	3.45E+04	7.50E+03	3.30E+03
	Co-54-3	0.075~0.08	4.47E+00	3.30E+04	7.40E+03	2.80E+03
	Co-55-1	<0.075	5.73E+00	3.41E+04	5.90E+03	1.50E+03
	Co-55-2	<0.075	4.45E+00	3.27E+04	7.40E+03	2.80E+03
	Co-55-3	<0.075	5.23E+00	3.32E+04	6.40E+03	2.00E+03

表 2.2.5-13 不同粒径对 ^{137}Cs 分配系数的影响

试验管编号	粒径(mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σK_d	
河道沙	Cs-50-1	>0.45	1.35E+01	5.42E+04	4.00E+03	2.90E+02
	Cs-50-2	>0.45	1.39E+01	5.52E+04	4.00E+03	1.90E+02
	Cs-50-3	>0.45	1.39E+01	5.51E+04	4.00E+03	2.70E+02
	Cs-51-1	0.3~0.45	1.24E+01	5.50E+04	4.40E+03	3.30E+02
	Cs-51-2	0.3~0.45	1.32E+01	5.62E+04	4.30E+03	3.10E+02
	Cs-51-3	0.3~0.45	1.04E+01	5.40E+04	5.20E+03	4.10E+02
	Cs-52-1	0.105~0.15	8.68E+00	5.68E+04	6.50E+03	5.70E+02
	Cs-52-2	0.105~0.15	7.90E+00	5.56E+04	7.00E+03	6.60E+02
	Cs-52-3	0.105~0.15	7.27E+00	5.75E+04	7.90E+03	7.20E+02
河道泥	Cs-53-1	0.08~0.095	6.82E+00	5.64E+04	8.30E+03	8.80E+02
	Cs-53-2	0.08~0.095	4.65E+00	5.84E+04	1.30E+04	1.60E+03
	Cs-53-3	0.08~0.095	6.85E+00	6.07E+04	8.90E+03	8.90E+02
	Cs-54-1	0.075~0.08	5.57E+00	5.51E+04	9.90E+03	1.50E+03
	Cs-54-2	0.075~0.08	5.37E+00	5.57E+04	1.00E+04	1.70E+03
	Cs-54-3	0.075~0.08	5.15E+00	5.72E+04	1.10E+04	1.80E+03
	Cs-55-1	<0.075	6.74E+00	5.53E+04	8.20E+03	1.10E+03
	Cs-55-2	<0.075	4.26E+00	5.46E+04	1.30E+04	2.40E+03
	Cs-55-3	<0.075	5.66E+00	5.46E+04	9.60E+03	1.50E+03

表 2.2.5-14 不同粒径对 ^{90}Sr 分配系数的影响

试验管编号	粒径(mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σK_d	
河道沙	Sr-50-1	>0.45	4.54E+03	2.59E+04	5.70E+00	3.70E-01
	Sr-50-2	>0.45	4.27E+03	2.75E+04	6.40E+00	3.90E-01
	Sr-50-3	>0.45	4.56E+03	2.58E+04	5.70E+00	3.70E-01
	Sr-51-1	0.3~0.45	4.62E+03	3.26E+04	7.10E+00	4.10E-01
	Sr-51-2	0.3~0.45	4.38E+03	3.07E+04	7.00E+00	3.90E-01
	Sr-51-3	0.3~0.45	3.99E+03	3.17E+04	7.90E+00	4.30E-01
	Sr-52-1	0.105~0.15	4.20E+03	3.84E+04	9.20E+00	4.90E-01
	Sr-52-2	0.105~0.15	4.38E+03	3.72E+04	8.50E+00	4.60E-01
	Sr-52-3	0.105~0.15	3.75E+03	3.69E+04	9.80E+00	5.40E-01
河道泥	Sr-53-1	0.08~0.095	2.90E+03	4.31E+04	1.50E+01	8.70E-01
	Sr-53-2	0.08~0.095	2.86E+03	4.06E+04	1.40E+01	8.20E-01
	Sr-53-3	0.08~0.095	2.46E+03	4.43E+04	1.80E+01	1.10E+00
	Sr-54-1	0.075~0.08	2.67E+03	4.41E+04	1.70E+01	1.00E+00
	Sr-54-2	0.075~0.08	2.46E+03	4.25E+04	1.70E+01	1.10E+00
	Sr-54-3	0.075~0.08	2.24E+03	4.39E+04	2.00E+01	1.20E+00
	Sr-55-1	<0.075	2.56E+03	4.32E+04	1.70E+01	1.00E+00
	Sr-55-2	<0.075	2.47E+03	4.43E+04	1.80E+01	1.10E+00
	Sr-55-3	<0.075	2.53E+03	4.43E+04	1.70E+01	1.10E+00

表 2.2.5-15 不同粒径对 Ru 分配系数的影响

试验管编号	粒径(mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σK_d	
河道沙	Ru-50-1	>0.45	1.30E-06	4.89E-04	3.70E+02	7.20E+00
	Ru-50-2	>0.45	1.64E-06	4.43E-04	2.70E+02	6.90E+00
	Ru-50-3	>0.45	1.11E-06	4.42E-04	4.00E+02	7.30E+00
	Ru-51-1	0.3~0.45	1.05E-06	4.44E-04	4.20E+02	6.40E+00
	Ru-51-2	0.3~0.45	7.99E-07	4.47E-04	5.60E+02	6.20E+00
	Ru-51-3	0.3~0.45	7.05E-07	4.48E-04	6.40E+02	6.80E+00
	Ru-52-1	0.105~0.15	6.98E-07	4.45E-04	6.40E+02	6.50E+00
	Ru-52-2	0.105~0.15	8.78E-07	4.46E-04	5.10E+02	7.20E+00
	Ru-52-3	0.105~0.15	5.30E-07	4.56E-04	8.60E+02	6.70E+00
河道泥	Ru-53-1	0.08~0.095	1.32E-07	4.54E-04	3.40E+03	6.30E+00
	Ru-53-2	0.08~0.095	1.36E-07	4.64E-04	3.40E+03	6.40E+00
	Ru-53-3	0.08~0.095	2.17E-07	4.49E-04	2.10E+03	6.20E+00
	Ru-54-1	0.075~0.08	1.39E-07	4.59E-04	3.30E+03	6.50E+00
	Ru-54-2	0.075~0.08	1.70E-07	4.61E-04	2.70E+03	1.40E+01
	Ru-54-3	0.075~0.08	1.38E-07	4.58E-04	3.30E+03	6.20E+00
	Ru-55-1	<0.075	1.69E-07	4.55E-04	2.70E+03	6.50E+00
	Ru-55-2	<0.075	1.40E-07	4.56E-04	3.30E+03	6.00E+00
	Ru-55-3	<0.075	1.24E-07	4.61E-04	3.70E+03	6.10E+00



图 2.2.5-6 修山水库



图 2.2.5-7 河边卵石



图 2.2.5-8 河边细沙

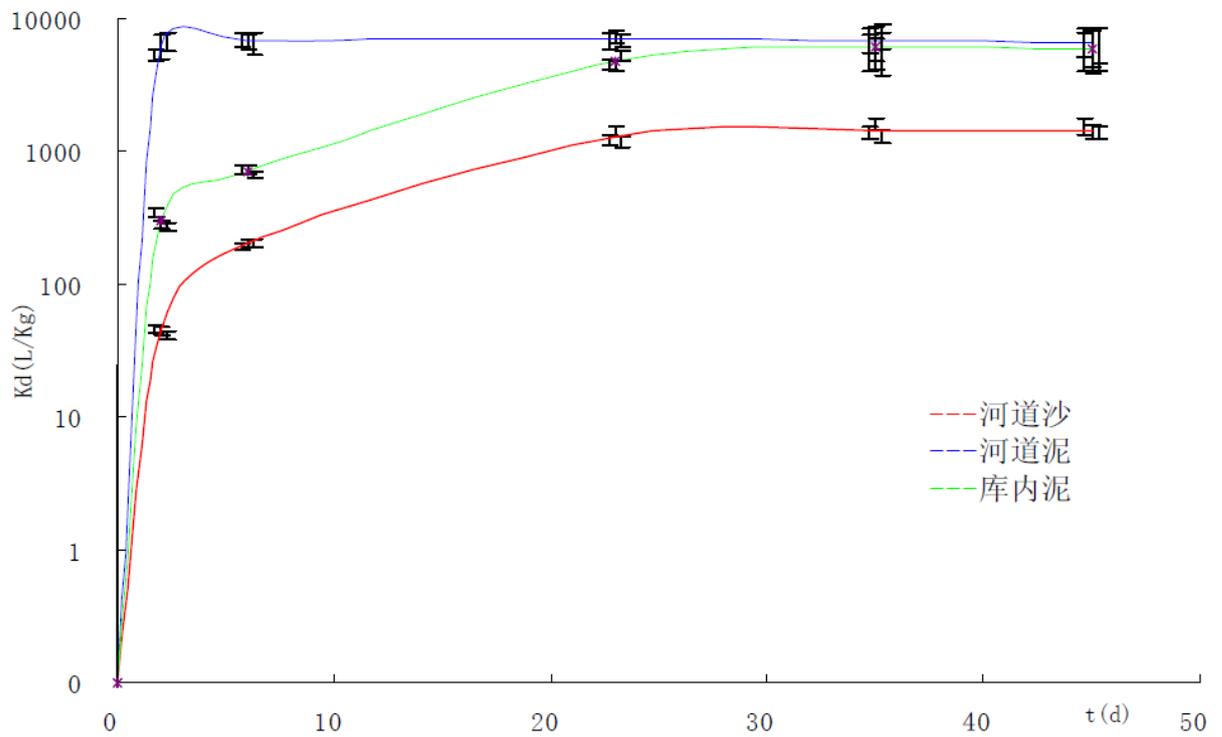


图 2.2.5-9 ^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

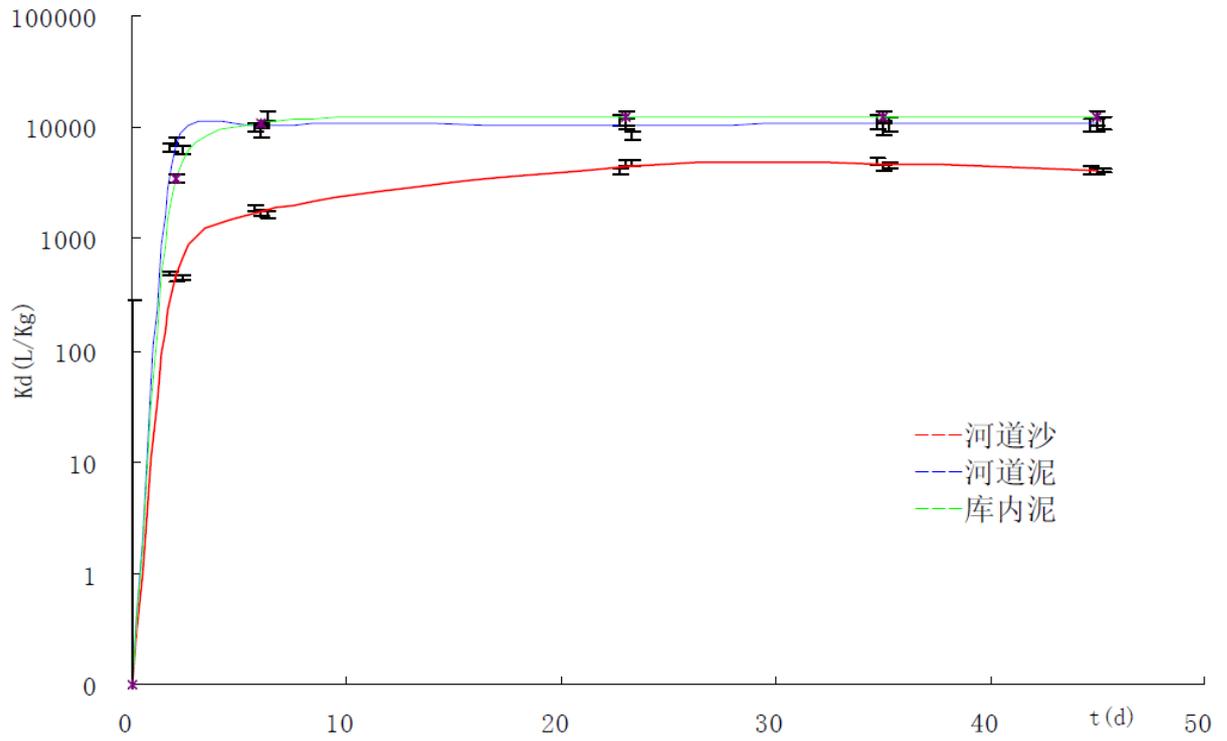


图 2.2.5-10 ^{137}Cs 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

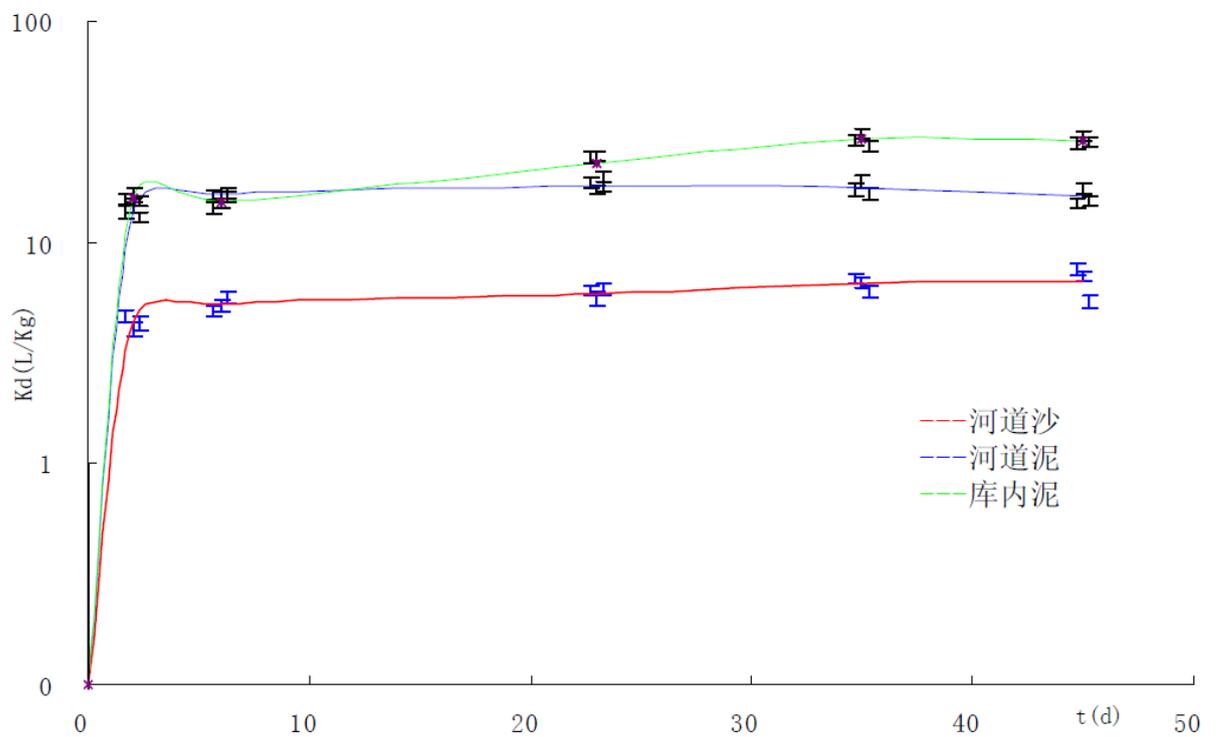


图 2.2.5-11 ^{90}Sr 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

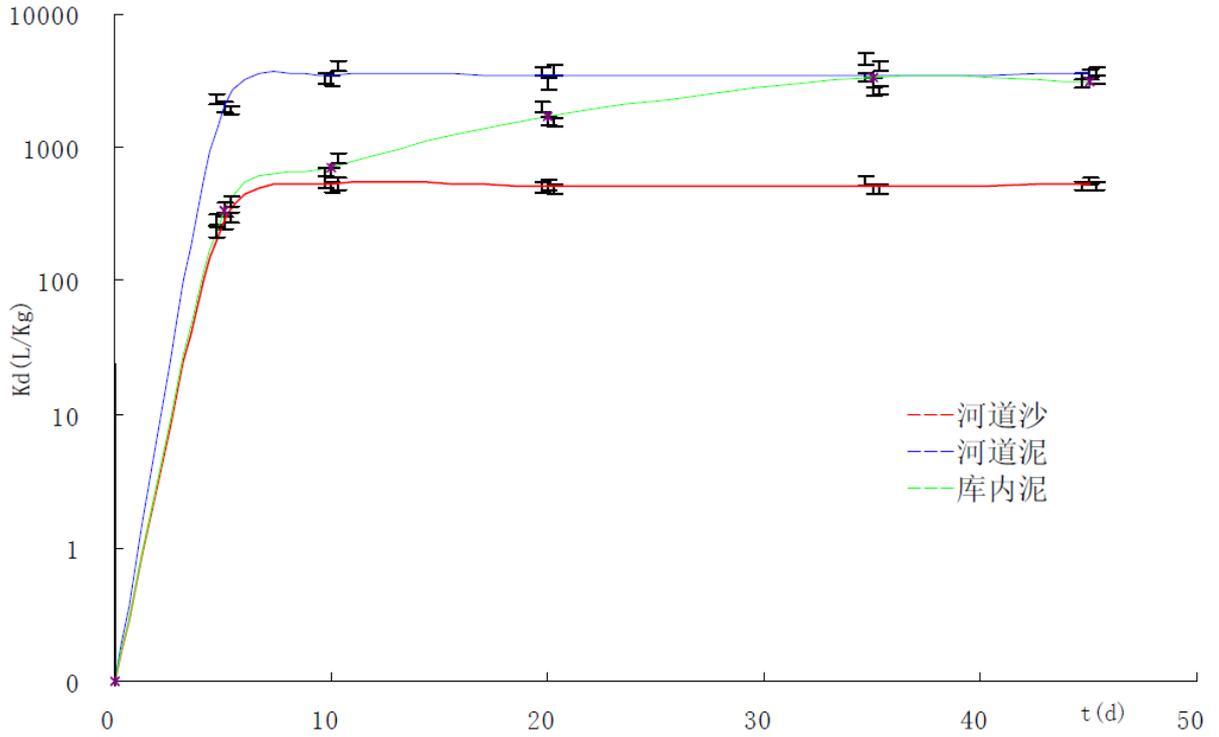


图 2.2.5-12 Ru 在泥和沙中的 Kd 与时间关系曲线

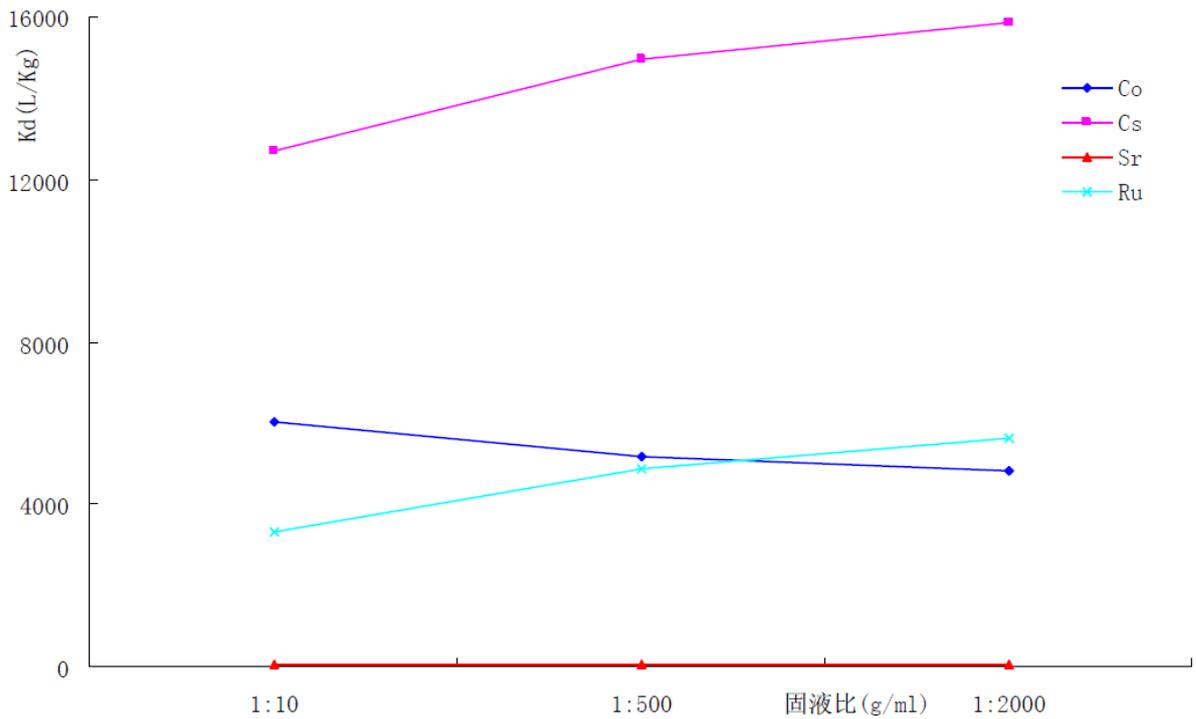


图 2.2.5-13 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 Ru 悬浮物实验结果

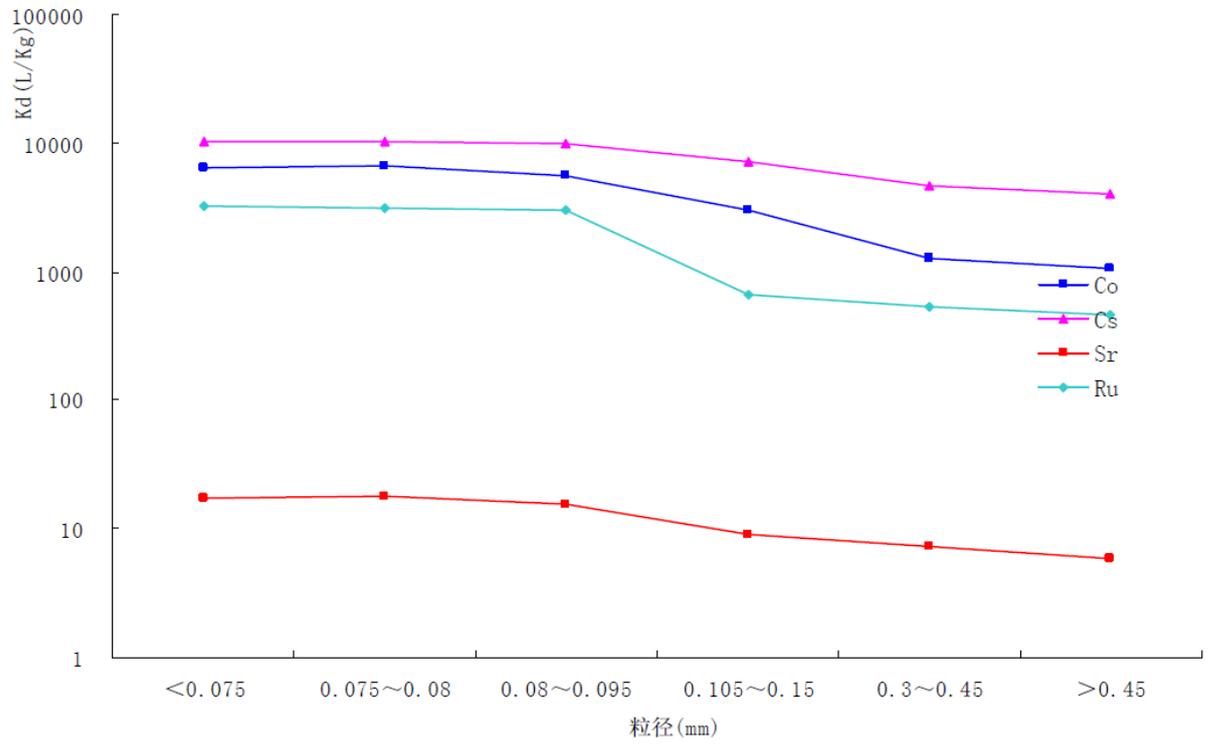


图 2.2.5-14 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 Ru 不同粒径实验结果

2.2.6 湖北咸宁

咸宁核电厂工程规划建设 4 台 AP1000 压水堆核电机组，四台机组一次性规划，分两期建设。在电厂运行期间，通过液态途径释放的放射性核素经处理合格并达到排放标准后，与冷却塔排污水混合后一起排入富水水库，排水口位于富水水库北岸，距水库大坝约 20km。

2.2.6.1 流域概况

咸宁核电厂厂址位于鄂东南富水流域富水水库中段北岸。富水为长江中游下段南岸一级支流，发源于湖北省通山、崇阳和江西省修水三县交界处的幕阜山北麓，其上源厦铺河流至通山县城关与西支通山河汇合后始称富水，然后向东流经通山、阳新二县，沿途顺次接纳的南北支流有横石河、黄沙河、燕厦河、龙港河和三溪河等主要支流及湖泊来水，至阳新县富池口汇入长江。

2.2.6.2 样品采集

为了使分配系数 K_d 的测定条件更接近现场实际情况，直接采用富水水库的水作为吸附实验的水样。根据现场实际情况，土壤样品则采集了四种，分别为水库内岸边泥土、水库内库底底泥、下游河道岸边泥土和河道底泥，分别代表水库库区和下游河道河床的岸边及底部情况。根据现场实地勘察，选取能代表大多数河床情况的采样地点进行采样。2010 年 8 月 9 日至 10 日在富水水库内和下游河道进行了取样，库内和水库下游的取样点位置分别见图 2.2.6-2 和图 2.2.6-3。在多个地方的水库和河道河床上分别采集了四种样品（水库内岸边泥土和库底底泥、河道岸边泥土和底泥），可代表库内和下游河道河床的岸边和底泥现场情况，土样编号见表 2.2.6-1。

富水水库及河道两岸植被丰富，有梯田、松树、灌丛及茅草等（见图 2.2.6-4、2.2.6-5、2.2.6-6）。水库库边土壤基本为褐红色～褐黄色粘土（见图 2.2.6-6），部分区域为基岩；库底为褐红色粘土和淤泥，部分区域也是基岩。下游河道水面开阔，两岸基本都是耕地，河边主要是黄色粘土（见图 2.2.6-4、2.2.6-6）；河道中间有多处采砂区域，致使河道中间表层大部分区域覆盖粒径较小的泥沙。库内各处的泥土样性质基本一致，库下各处的泥土样性质也基本一致。

为尽量避免水样的化学性质发生变化，采集后用塑料桶密封盛装水样，低温运输回实验室在 4℃ 下进行冷藏保存。

2.2.6.3 核素吸附特性模拟实验

核素吸附特性模拟实验采用 HAD101/05 推荐的静态批式法, 该方法是被广泛使用的一种方法, 它的实验条件比较简单, 可同时进行大量的平行实验, 且实验周期较短。其操作过程是先将样品进行预处理和分选, 再将其与含有某种核素的水溶液 (已知浓度) 在振荡下长时间混合, 直到水溶液中核素浓度稳定为止, 然后进行离心或过滤使固液相分离, 最后分别测定固相和液相中的核素浓度。通过计算固、液相中的核素浓度之比即可得出分配系数 K_d 。

测定分配系数实验中的影响因素很多, 核素形态、固相介质、水的成分、固液比、PH 值等都可能会影响分配系数 K_d 。对上述因素进行综合考虑后, 并结合以往的一些研究成果, 实验中选取固液比 1:10g/ml。所有实验均在室温下进行。定期取液体、固体样, 测量 K_d 随时间的变化过程直至平衡。

根据放射性废液排放源项, 并综合考虑核素的半衰期、毒性等, 确定了四种有代表性的放射性核素 ^{106}Ru 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr , 用静态批式法进行核素吸附特性的模拟实验。

1) 粒径分布

对所有采样点采集的四种样品分别进行混合, 去除其中杂质后风干, 并进行轻微研压、筛分预处理, 其中的三种样品粒径均为 200 目以下, 只有下游河道底泥中有粒径较大的沙粒, 细泥所占比例较大, 其粒径分布见表 2.2.6-2。

实验时每个试验管所用土壤样品均为 1g。下游河道底泥的样品按照各个粒径所占质量的组分称重, 并将其混合均匀, 其实验组成见表 2.2.6-3。

2) 土样的化学成分分析及矿物组成

土壤矿物质是岩石经物理风化作用和化学风化作用形成的, 占土壤固相部分总重量 90% 以上。土壤粘粒矿物是土壤矿物质中最活跃的部分, 它的类型决定了土壤对放射性核素吸附能力的大小。由于土壤的物质组成和化学成分等条件都会影响土壤介质对核素的吸附性能, 进而影响到分配系数, 因而在进行吸附实验前, 对土样的理化性质进行了测试和分析。

四种土壤的矿物组成和化学成分分析由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心进行测定, 测得的矿物组成和化学成分结果列于表 2.2.6-4 和 2.2.6-5。

由此可见, 这三种样品主要化学成分均以 SiO_2 为主, 含量分别为水库内岸

边淤泥中 78.78%和库底底泥中 58.03%、下游河道岸边淤泥中 64.24%和底泥中 75.72%。其次为 Al_2O_3 含量约为 10~20%左右。其余还有少量的 Fe_2O_3 、 FeO 、 K_2O 、 MgO 等。

沙和泥中主要含氧化物矿物，如石英，其比重很大，均在 50%以上。其次为蒙脱石、高岭石也占了较大比重。次生粘土矿物有云母(伊利石)、绿泥石等。样品 A、B、C 的成份基本一致，只有比重不太一样，而样品 D 的成份与其它三种有所不同，增加了白云石和绿泥石。

3) 水样的化学成分分析

同样，水样的化学性质（如 PH 值）也会影响分配系数的大小，且水样中有无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响，因此用 ICP-MS 对水样的 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 、 ^{88}Sr 和 ^{101}Ru 本底进行了测量，结果见表 2.2.6-6。

取样点附近的水外观清澈、无沉淀，PH 呈弱碱性。水样中在 ICP-MS 检测限内没有检出钴和铯，说明水的本底中基本没有钴和铯，或者说富水中的钴和铯含量极低。钆的含量为 $4.901\text{E}-10\text{mol/L}$ ，富水中钆的含量很低。而铟的含量为 $1.027\text{E}-6\text{mol/L}$ ，说明富水中铟的含量较高。

4) 吸附实验

取 15ml 的聚乙烯塑料离心管，洗净后风干，称取(1 ± 0.002)克的土壤样品放入管中(编号为 A、B、C 的三种样品直接称取，样品 D 按表 2.2.6-2 中各个粒径所占质量的组分称重并混合均匀)，再加入约 9.8ml 现场所取的水样，盖紧盖子，摇匀，放置七天。吸附实验开始后向盛有土壤样品和水的离心管中加入约 0.2ml 含放射性核素的溶液，溶液中四种核素 (^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{106}Ru) 的投放量按照仪器的最低检测限来定，具体四种核素在每个离心管中的投放量见表 2.2.6-7。立即将之振荡使固液充分混合，并且在实验时间内每天都要放入振荡器中振荡两次（上午下午各一次，每次不少于 60 分钟）。间隔不同时间取样并用 γ 谱仪进行测量，直至吸附平衡为止，计算分配系数 Kd 。

吸附实验共进行了近两个月，实验条件及测量方法见表 2.2.6-8。

(1) ^{60}Co 吸附实验结果

在加入 ^{60}Co 后的第 5、14、27、40 天进行取样，每次取三个平行样(最后一位数字-1、-2、-3 为平行样编号)。先将试验管离心三十分钟，然后分别取出管中

的液体和固体。液体直接测量活度，然后计算其比活度，固体则先烘干（烘干温度 60°C ，在烘箱中自然降温后称重测量其活度，将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度，再算得固相的比活度；最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数 Kd 。 σ_{Kd} 为测量的统计误差。 ^{60}Co 的吸附实验结果见表 2.2.6-9。

^{60}Co 在泥和沙中的 Kd 随时间变化的关系曲线见图 2.2.6-7。

由图表可以看出， ^{60}Co 在水库内岸边淤泥中的分配系数接近 $1.6\text{E}+2\text{L/kg}$ ，平衡时间很短，基本在第一次取样时即加入 ^{60}Co 后 5 天就达到吸附平衡；在水库内库底底泥中分配系数最小，接近 $1.3\text{E}+2\text{ L/kg}$ ，且吸附速度很快，平衡时间很短，第一次取样时就达到吸附平衡；在河道岸边淤泥中分配系数接近 $6.5\text{E}+2\text{L/kg}$ ，平衡时间很短，第一次取样时就基本达到吸附平衡；在下游河道底泥中分配系数最大，约为 $5.6\text{E}+3\text{L/kg}$ ，平衡也比较缓慢，平衡时间较长，约在加入 ^{60}Co 后 27 天才达到吸附平衡。

(2) ^{137}Cs 吸附实验结果

在加入 ^{137}Cs 后的第 5、14、27、40 天进行取样，取样过程同上。 ^{137}Cs 的吸附实验结果见表 2.2.6-10。 ^{137}Cs 在土壤样品中的 Kd 随时间变化的关系曲线见图 2.2.6-8。

由图表可以看出， ^{137}Cs 在水库内岸边淤泥中的分配系数最小，约为 $1.8\text{E}+3\text{L/kg}$ ，且吸附速度很快，平衡时间很短，基本在第一次取样时即加入 ^{137}Cs 后 5 天就达到吸附平衡；在水库内库底底泥中分配系数最大，接近 $8.0\text{E}+3\text{L/kg}$ ，平衡时间很短，第一次取样时就达到吸附平衡；在河道岸边淤泥中分配系数接近 $3.0\text{E}+3\text{L/kg}$ ，平衡时间很短，第一次取样时就基本达到吸附平衡；在下游河道底泥中分配系数约为 $6.7\text{E}+3\text{L/kg}$ ，平衡也比较缓慢，平衡时间较长，约在加入 ^{137}Cs 后 14 天才达到吸附平衡。

(3) ^{90}Sr 吸附实验结果

在加入 ^{90}Sr 后的第 5、14、27、40 天进行取样，取样过程同上。 ^{90}Sr 的吸附实验结果见表 2.2.6-11。 ^{90}Sr 在土壤样品中的 Kd 随时间变化的关系曲线见图 2.2.6-9。

由图表可以看出， ^{90}Sr 在水库内岸边淤泥中的分配系数约为 $4.0\text{E}+1\text{L/kg}$ ，且吸附速度很快，平衡时间很短，基本在第一次取样时即加入 ^{90}Sr 后 5 天就达到吸

附平衡；在水库内库底底泥中分配系数接近 $1.1\text{E}+2\text{L/kg}$ ，平衡时间较长，约在加入 ^{90}Sr 后 14 天才达到吸附平衡；在河道岸边淤泥中分配系数最大，接近 $3.0\text{E}+1\text{L/kg}$ ，平衡时间很短，第一次取样时就基本达到吸附平衡；在下游河道底泥中分配系数最小，接近 $2.0\text{E}+1\text{L/kg}$ ，平衡时间很短，基本在第一次取样时就达到吸附平衡。

(4) ^{106}Ru 吸附实验结果

在加入 ^{106}Ru 后的第 3、14、27、40 天进行取样，取样过程同上。 ^{106}Ru 的吸附实验结果见表 2.2.6-12。 ^{106}Ru 在土壤样品中的 K_d 随时间变化的关系曲线见图 2.2.6-10。

由图表可以看出，相比前三种核素来说， ^{106}Ru 在四种样品中的平衡时间均较长，都是在加入 ^{106}Ru 后第 27 天才达到吸附平衡。 ^{106}Ru 在水库内岸边淤泥中的分配系数最小，接近 $8.5\text{E}+2\text{L/kg}$ ；在水库内库底底泥中的分配系数最大，接近 $4.8\text{E}+3\text{L/kg}$ ；在河道岸边淤泥中分配系数接近 $2.0\text{E}+3\text{L/kg}$ ；在下游河道底泥中分配系数约为 $1.5\text{E}+3\text{L/kg}$ 。

(5) 不同粒径实验结果

将河道底泥按不同粒径分组，测量不同的粒径大小对分配系数的影响。共做了四组，粒径分别为 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ 、 $0.105\sim 0.2\text{mm}$ 、 $0.075\sim 0.105\text{mm}$ 及 0.075mm 以下(见表 2.2.6-3)。每种样品做三个平行样，固体样品均为 1g ，固液比均为 $1:10\text{g/ml}$ 。在实验时间内将实验管每天放入振荡器中振荡，放置 38 天后进行取样测量，并计算其分配系数。实验结果见表 2.2.6-13~2.2.6-16。

不同核素分配系数随粒径的变化曲线见图 2.2.6-11。

可以看出，四种核素分配系数的变化趋势在河道底泥中基本是随着颗粒粒径的减小，分配系数逐渐增大，其变化很明显，这主要是由于随着颗粒粒径减小，颗粒比表面积增大，表面吸附能力增强，有利于各种核素的吸附，从而使分配系数增大。

表 2.2.6-1 土样的编号

采样位置	水库内		下游河道	
	库边泥土	库底底泥	岸边泥土	底泥
土样编号	A	B	C	D

表 2.2.6-2 河道底泥样品中各粒径的质量组分

分子筛(目)	粒径(mm)	质量组分(%)
60~80	0.2~0.3	11.98
80~100	0.15~0.2	13.55
100~120	0.125~0.15	10.50
120~140	0.105~0.125	5.09
140~160	0.095~0.105	17.30
160~180	0.08~0.095	2.06
180~200	0.075~0.08	10.87
>200	<0.075	28.65

表 2.2.6-3 河道底泥实验样品中各粒径的质量组分

粒径(目)	60~80	80~140	140~200	>200
粒径(mm)	0.2~0.3	0.105~0.2	0.075~0.105	<0.075
质量组分(%)	12	29	30	29

表 2.2.6-4 土壤中各主要化学成分的质量组分(%)

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
A	74.78	11.50	1.27	2.57	1.30	0.40	0.34	0.54
B	58.03	20.07	5.53	1.90	3.77	0.77	0.64	1.28
C	64.24	15.14	2.04	3.57	3.18	0.70	0.72	1.10
D	75.72	9.84	1.42	2.25	2.04	0.56	0.88	1.34

表 2.2.6-5 土壤中各矿物质的质量组分(%)

样品编号	石英	蒙脱石	伊利石	高岭石	斜长石	白云石	绿泥石	钾长石	锐钛矿	褐铁矿
A	82~83	1~2	2~3	1~2	1~2	-	-	2~3	1	1
B	51~56	15~20	10	10	2~3	-	-	1~2	2	2
C	68~69	2~3	10	10	2~3	-	-	1~2	2	2
D	56~60	-	5~10	5~10	10~15	3~5	3~5	1~2	2	2

表 2.2.6-6 水样 pH 值和 ^{59}Co 、 ^{133}Cs 、 ^{88}Sr 和 ^{101}Ru 的含量(mol/L)

项目	外观描述	pH	本底值			
			^{59}Co	^{133}Cs	^{88}Sr	^{101}Ru
水样	澄清, 无沉淀	7.11	$\leq 1.697\text{E-}8$	$\leq 7.524\text{E-}9$	$1.014\text{E-}6$	$4.901\text{E-}10$

表 2.2.6-7 每个试样吸附实验中各核素的投放量

核素	Co^*	^{137}Cs	^{90}Sr	^{106}Ru
化学浓度(mol/L)	$2.56\text{E-}5$	$3.83\text{E-}9$	$2.98\text{E-}9$	$7.01\text{E-}10$
投放量(Bq)	$1.05\text{E+}4$	$1.68\text{E+}4$	$1.38\text{E+}4$	$9.20\text{E+}4$

注: ^{60}Co : ^{59}Co 按 1:10000 计算

表 2.2.6-8 吸附实验条件及测量方法

实验条件	水	土	运输及储存	实验温度
	河水	沉积物样品	低温密封, 冷藏	室温
测量方法	^{106}Ru	^{137}Cs	^{60}Co	^{90}Sr
	γ 谱	γ 谱	γ 谱	γ 谱/放化分析 (液闪)

表 2.2.6-9 ⁶⁰Co 吸附分配系数

试管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
A	Co-1-1	5	8.15E+4	1.08E+7	1.3E+2	8.5E+0
	Co-1-2	5	8.29E+4	1.17E+7	1.4E+2	9.0E+0
	Co-1-3	5	8.47E+4	1.08E+7	1.3E+2	7.6E+0
	Co-2-1	14	6.40E+4	1.03E+7	1.6E+2	1.0E+1
	Co-2-2	14	7.44E+4	1.04E+7	1.4E+2	8.3E+0
	Co-2-3	14	6.63E+4	1.07E+7	1.6E+2	1.0E+1
	Co-3-1	27	6.57E+4	1.07E+7	1.6E+2	1.1E+1
	Co-3-2	27	7.59E+4	1.06E+7	1.4E+2	8.0E+0
	Co-3-3	27	5.91E+4	1.06E+7	1.8E+2	1.1E+1
	Co-4-1	40	7.47E+4	8.95E+6	1.2E+2	8.8E+0
	Co-4-2	40	6.14E+4	1.02E+7	1.7E+2	1.2E+1
	Co-4-3	40	6.00E+4	9.73E+6	1.6E+2	1.1E+1
B	Co-1-1	5	9.34E+4	1.12E+7	1.2E+2	1.0E+1
	Co-1-2	5	9.50E+4	1.09E+7	1.2E+2	8.7E+0
	Co-1-3	5	9.63E+4	1.12E+7	1.2E+2	9.7E+0
	Co-2-1	14	8.81E+4	1.09E+7	1.2E+2	9.2E+0
	Co-2-2	14	9.03E+4	1.08E+7	1.2E+2	8.4E+0
	Co-2-3	14	9.07E+4	1.17E+7	1.3E+2	1.2E+1
	Co-3-1	27	9.05E+4	1.08E+7	1.2E+2	7.9E+0
	Co-3-2	27	8.98E+4	1.11E+7	1.2E+2	7.9E+0
	Co-3-3	27	9.15E+4	1.11E+7	1.2E+2	8.6E+0
	Co-4-1	40	8.62E+4	1.09E+7	1.3E+2	1.2E+1
	Co-4-2	40	8.67E+4	1.12E+7	1.3E+2	1.1E+1
	Co-4-3	40	8.71E+4	1.12E+7	1.3E+2	1.0E+1
C	Co-1-1	5	2.82E+4	1.18E+7	4.2E+2	3.5E+1
	Co-1-2	5	2.12E+4	1.23E+7	5.8E+2	5.2E+1
	Co-1-3	5	1.87E+4	1.16E+7	6.2E+2	5.5E+1
	Co-2-1	14	1.95E+4	1.20E+7	6.2E+2	5.6E+1
	Co-2-2	14	1.66E+4	1.07E+7	6.4E+2	6.1E+1
	Co-2-3	14	1.94E+4	1.18E+7	6.1E+2	6.3E+1
	Co-3-1	27	1.90E+4	1.08E+7	5.7E+2	3.8E+1
	Co-3-2	27	1.77E+4	1.17E+7	6.6E+2	4.4E+1
	Co-3-3	27	1.60E+4	1.12E+7	7.0E+2	6.1E+1
	Co-4-1	40	1.92E+4	1.13E+7	5.9E+2	5.3E+1
	Co-4-2	40	1.46E+4	1.11E+7	7.6E+2	9.5E+1
	Co-4-3	40	1.99E+4	1.09E+7	5.5E+2	6.2E+1
D	Co-1-1	5	5.16E+3	1.09E+7	2.1E+3	2.8E+2
	Co-1-2	5	5.69E+3	1.16E+7	2.0E+3	2.9E+2
	Co-1-3	5	5.53E+3	1.10E+7	2.0E+3	2.2E+2

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}
Co-2-1	14	3.20E+3	1.20E+7	3.8E+3	6.4E+2
Co-2-2	14	2.40E+3	1.09E+7	4.5E+3	9.2E+2
Co-2-3	14	3.10E+3	1.12E+7	3.6E+3	5.6E+2
Co-3-1	27	2.01E+3	1.17E+7	5.8E+3	1.3E+3
Co-3-2	27	1.69E+3	1.15E+7	6.8E+3	1.1E+3
Co-3-3	27	2.78E+3	1.14E+7	4.1E+3	5.1E+2
Co-4-1	40	2.41E+3	1.13E+7	4.7E+3	7.8E+2
Co-4-2	40	2.00E+3	1.02E+7	5.1E+3	9.0E+2
Co-4-3	40	1.64E+3	1.05E+7	6.4E+3	1.2E+3

表 2.2.6-10 ^{137}Cs 吸附分配系数

试管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
A	Cs-1-1	5	9.96E+3	1.85E+7	1.9E+3	3.1E+2
	Cs-1-2	5	9.37E+3	2.00E+7	2.1E+3	3.7E+2
	Cs-1-3	5	1.12E+4	1.82E+7	1.6E+3	2.3E+2
	Cs-2-1	14	9.61E+3	1.75E+7	1.8E+3	2.8E+2
	Cs-2-2	14	1.03E+4	1.80E+7	1.7E+3	2.8E+2
	Cs-2-3	14	8.92E+3	1.79E+7	2.0E+3	3.3E+2
	Cs-3-1	27	9.96E+3	1.82E+7	1.8E+3	2.3E+2
	Cs-3-2	27	9.81E+3	1.85E+7	1.9E+3	4.6E+2
	Cs-3-3	27	1.08E+4	1.80E+7	1.7E+3	2.6E+2
	Cs-4-1	40	7.81E+3	1.73E+7	2.2E+3	5.7E+2
	Cs-4-2	40	1.09E+4	1.74E+7	1.6E+3	1.6E+2
	Cs-4-3	40	1.00E+4	1.60E+7	1.6E+3	2.2E+2
B	Cs-1-1	5	2.73E+3	2.02E+7	7.4E+3	4.6E+3
	Cs-1-2	5	2.41E+3	1.96E+7	8.2E+3	4.9E+3
	Cs-1-3	5	2.82E+3	2.05E+7	7.3E+3	4.1E+3
	Cs-2-1	14	2.16E+3	1.78E+7	8.2E+3	5.2E+3
	Cs-2-2	14	2.44E+3	1.80E+7	7.4E+3	3.4E+3
	Cs-2-3	14	2.05E+3	1.74E+7	8.5E+3	4.4E+3
	Cs-3-1	27	2.54E+3	1.93E+7	7.6E+3	3.3E+3
	Cs-3-2	27	2.42E+3	1.91E+7	7.9E+3	4.4E+3
	Cs-3-3	27	2.36E+3	1.94E+7	8.2E+3	4.5E+3
	Cs-4-1	40	2.33E+3	2.01E+7	8.6E+3	4.2E+3
	Cs-4-2	40	2.58E+3	1.98E+7	7.7E+3	3.3E+3
	Cs-4-3	40	2.69E+3	1.99E+7	7.4E+3	3.0E+3
C	Cs-1-1	5	7.75E+3	1.92E+7	2.5E+3	3.7E+2
	Cs-1-2	5	6.22E+3	2.02E+7	3.3E+3	5.2E+2
	Cs-1-3	5	5.80E+3	1.71E+7	2.9E+3	5.1E+2
	Cs-2-1	14	6.04E+3	1.71E+7	2.8E+3	4.7E+2
	Cs-2-2	14	6.52E+3	1.73E+7	2.7E+3	4.7E+2
	Cs-2-3	14	5.85E+3	1.74E+7	3.0E+3	5.9E+2
	Cs-3-1	27	6.14E+3	1.85E+7	3.0E+3	4.0E+2
	Cs-3-2	27	6.36E+3	1.95E+7	3.1E+3	3.9E+2
	Cs-3-3	27	6.55E+3	1.87E+7	2.9E+3	4.5E+2
	Cs-4-1	40	7.27E+3	1.86E+7	2.6E+3	3.1E+2
	Cs-4-2	40	6.05E+3	1.90E+7	3.1E+3	3.3E+2
	Cs-4-3	40	6.35E+3	1.84E+7	2.9E+3	3.4E+2
D	Cs-1-1	5	3.83E+3	1.75E+7	4.6E+3	7.0E+2
	Cs-1-2	5	3.33E+3	1.75E+7	5.2E+3	9.1E+2
	Cs-1-3	5	2.90E+3	1.73E+7	6.0E+3	1.1E+3

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}
Cs-2-1	14	3.90E+3	1.96E+7	5.0E+3	6.8E+2
Cs-2-2	14	3.12E+3	1.77E+7	5.7E+3	9.2E+2
Cs-2-3	14	2.69E+3	1.86E+7	6.9E+3	1.3E+3
Cs-3-1	27	2.81E+3	1.93E+7	6.9E+3	1.5E+3
Cs-3-2	27	2.86E+3	1.91E+7	6.7E+3	8.8E+2
Cs-3-3	27	2.88E+3	1.85E+7	6.4E+3	5.5E+2
Cs-4-1	40	2.60E+3	1.76E+7	6.7E+3	7.1E+2
Cs-4-2	40	2.65E+3	1.74E+7	6.5E+3	1.1E+3
Cs-4-3	40	2.69E+3	1.71E+7	6.4E+3	8.9E+2

表 2.2.6-11 ⁹⁰Sr 吸附分配系数

试管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
A	Sr-1-1	5	2.51E+5	8.49E+6	3.4E+1	1.1E+0
	Sr-1-2	5	1.89E+5	9.32E+6	4.9E+1	1.5E+0
	Sr-1-3	5	3.31E+5	9.60E+6	2.9E+1	9.5E-1
	Sr-2-1	14	2.25E+5	9.96E+6	4.4E+1	1.6E+0
	Sr-2-2	14	2.54E+5	1.08E+7	4.3E+1	1.5E+0
	Sr-2-3	14	3.08E+5	9.03E+6	2.9E+1	1.1E+0
	Sr-3-1	27	2.42E+5	9.03E+6	3.7E+1	1.3E+0
	Sr-3-2	27	2.28E+5	8.94E+6	3.9E+1	1.2E+0
	Sr-3-3	27	2.60E+5	9.81E+6	3.8E+1	1.3E+0
	Sr-4-1	40	3.19E+5	1.05E+7	3.3E+1	1.4E+0
	Sr-4-2	40	4.60E+5	1.69E+7	3.7E+1	1.7E+0
	Sr-4-3	40	2.98E+5	1.03E+7	3.4E+1	1.4E+0
B	Sr-1-1	5	1.69E+5	1.51E+7	9.0E+1	3.7E+0
	Sr-1-2	5	1.64E+5	1.45E+7	8.8E+1	3.8E+0
	Sr-1-3	5	1.72E+5	1.39E+7	8.1E+1	3.4E+0
	Sr-2-1	14	1.21E+5	1.24E+7	1.0E+2	3.5E+0
	Sr-2-2	14	9.61E+4	1.26E+7	1.3E+2	4.0E+0
	Sr-2-3	14	9.10E+4	1.18E+7	1.3E+2	3.6E+0
	Sr-3-1	27	1.11E+5	1.18E+7	1.1E+2	3.0E+0
	Sr-3-2	27	1.19E+5	1.19E+7	1.0E+2	2.8E+0
	Sr-3-3	27	1.15E+5	1.13E+7	9.8E+1	2.8E+0
	Sr-4-1	40	1.12E+5	1.22E+7	1.1E+2	4.4E+0
	Sr-4-2	40	1.36E+5	1.45E+7	1.1E+2	3.7E+0
	Sr-4-3	40	1.30E+5	1.31E+7	1.0E+2	3.1E+0
C	Sr-1-1	5	3.28E+5	1.21E+7	3.7E+1	1.2E+0
	Sr-1-2	5	3.23E+5	1.28E+7	4.0E+1	1.3E+0
	Sr-1-3	5	3.37E+5	1.18E+7	3.5E+1	1.1E+0
	Sr-2-1	14	3.49E+5	1.04E+7	3.0E+1	1.1E+0
	Sr-2-2	14	3.39E+5	1.06E+7	3.1E+1	1.1E+0
	Sr-2-3	14	3.19E+5	1.04E+7	3.3E+1	1.2E+0
	Sr-3-1	27	3.52E+5	1.02E+7	2.9E+1	9.4E-1
	Sr-3-2	27	3.40E+5	1.06E+7	3.1E+1	1.1E+0
	Sr-3-3	27	2.99E+5	1.01E+7	3.4E+1	1.1E+0
	Sr-4-1	40	3.68E+5	1.07E+7	2.9E+1	9.8E-1
	Sr-4-2	40	3.20E+5	1.11E+7	3.5E+1	1.3E+0
	Sr-4-3	40	3.39E+5	1.06E+7	3.1E+1	1.2E+0
D	Sr-1-1	5	5.03E+5	1.19E+7	2.4E+1	6.7E-1
	Sr-1-2	5	4.85E+5	9.59E+6	2.0E+1	5.8E-1
	Sr-1-3	5	5.04E+5	1.03E+7	2.0E+1	6.2E-1

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
	Sr-2-1	14	4.25E+5	8.86E+6	2.1E+1	7.2E-1
	Sr-2-2	14	4.35E+5	1.01E+7	2.3E+1	7.8E-1
	Sr-2-3	14	4.31E+5	1.03E+7	2.4E+1	8.3E-1
	Sr-3-1	27	4.50E+5	9.43E+6	2.1E+1	6.1E-1
	Sr-3-2	27	4.36E+5	8.67E+6	2.0E+1	8.3E-1
	Sr-3-3	27	4.55E+5	8.35E+6	1.8E+1	7.7E-1
	Sr-4-1	40	4.64E+5	1.04E+7	2.2E+1	9.6E-1
	Sr-4-2	40	4.30E+5	9.53E+6	2.2E+1	1.1E+0
	Sr-4-3	40	4.83E+5	1.15E+7	2.4E+1	1.1E+0

表 2.2.6-12 ^{106}Ru 吸附分配系数

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
A	Ru-1-1	3	7.71E+6	1.60E+7	2.1E+0	4.6E-1
	Ru-1-2	3	7.90E+6	1.38E+7	1.7E+0	3.4E-1
	Ru-1-3	3	7.98E+6	1.35E+7	1.7E+0	4.0E-1
	Ru-2-1	14	8.31E+5	9.15E+7	1.1E+2	5.6E+0
	Ru-2-2	14	7.24E+5	8.77E+7	1.2E+2	6.2E+0
	Ru-2-3	14	6.78E+5	8.71E+7	1.3E+2	6.6E+0
	Ru-3-1	27	1.11E+5	9.05E+7	8.2E+2	4.8E+1
	Ru-3-2	27	1.08E+5	9.52E+7	8.8E+2	5.2E+1
	Ru-3-3	27	1.20E+5	9.57E+7	8.0E+2	4.6E+1
	Ru-4-1	40	1.10E+5	9.27E+7	8.4E+2	5.3E+1
	Ru-4-2	40	1.11E+5	9.54E+7	8.6E+2	5.6E+1
	Ru-4-3	40	1.25E+5	9.24E+7	7.4E+2	4.1E+1
B	Ru-1-1	3	4.36E+6	6.19E+7	1.4E+1	1.4E+0
	Ru-1-2	3	4.26E+6	6.74E+7	1.6E+1	1.6E+0
	Ru-1-3	3	4.26E+6	6.44E+7	1.5E+1	1.6E+0
	Ru-2-1	14	4.59E+4	9.72E+7	2.1E+3	1.9E+2
	Ru-2-2	14	5.14E+4	1.01E+8	2.0E+3	1.8E+2
	Ru-2-3	14	4.54E+4	9.85E+7	2.2E+3	2.0E+2
	Ru-3-1	27	1.98E+4	9.49E+7	4.8E+3	4.6E+2
	Ru-3-2	27	2.17E+4	9.62E+7	4.4E+3	4.0E+2
	Ru-3-3	27	2.05E+4	9.74E+7	4.7E+3	4.3E+2
	Ru-4-1	40	2.11E+4	9.75E+7	4.6E+3	4.8E+2
	Ru-4-2	40	2.10E+4	1.02E+8	4.8E+3	5.6E+2
	Ru-4-3	40	2.07E+4	9.91E+7	4.8E+3	3.8E+2
C	Ru-1-1	3	1.04E+6	8.27E+7	7.9E+1	6.5E+0
	Ru-1-2	3	9.60E+5	9.04E+7	9.4E+1	8.3E+0
	Ru-1-3	3	1.10E+6	8.36E+7	7.6E+1	8.7E+0

试验管编号	取样时间 (d)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}	
Ru-2-1	14	9.69E+4	8.72E+7	9.0E+2	5.9E+1	
	14	9.27E+4	8.93E+7	9.6E+2	6.7E+1	
	14	6.38E+4	9.18E+7	1.4E+3	1.2E+2	
	27	4.98E+4	9.13E+7	1.8E+3	1.6E+2	
	27	4.59E+4	8.79E+7	1.9E+3	1.7E+2	
	27	4.62E+4	9.07E+7	2.0E+3	1.7E+2	
	40	4.56E+4	9.32E+7	2.0E+3	2.1E+2	
	40	4.56E+4	9.02E+7	2.0E+3	1.9E+2	
	40	5.56E+4	1.01E+8	1.8E+3	1.9E+2	
D	Ru-1-1	3	7.90E+5	9.34E+7	1.2E+2	1.1E+1
	Ru-1-2	3	7.97E+5	9.63E+7	1.2E+2	1.1E+1
	Ru-1-3	3	7.46E+5	8.40E+7	1.1E+2	9.8E+0
	Ru-2-1	14	6.84E+4	9.93E+7	1.5E+3	1.0E+2
	Ru-2-2	14	6.86E+4	8.77E+7	1.3E+3	8.9E+1
	Ru-2-3	14	6.55E+4	9.35E+7	1.4E+3	1.1E+2
	Ru-3-1	27	5.99E+4	8.73E+7	1.5E+3	7.9E+1
	Ru-3-2	27	5.82E+4	8.84E+7	1.5E+3	9.1E+1
	Ru-3-3	27	5.67E+4	8.60E+7	1.5E+3	8.4E+1
	Ru-4-1	40	6.29E+4	9.78E+7	1.6E+3	1.3E+2
	Ru-4-2	40	5.96E+4	9.39E+7	1.6E+3	1.3E+2
	Ru-4-3	40	5.64E+4	8.66E+7	1.5E+3	1.3E+2

表 2.2.6-13 不同粒径对 ^{60}Co 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}
Co-50-1	0.2~0.3	2.14E+3	1.01E+7	4.7E+3	7.0E+2
Co-50-2	0.2~0.3	1.75E+3	1.03E+7	5.9E+3	9.1E+2
Co-50-3	0.2~0.3	2.17E+3	9.58E+6	4.4E+3	6.6E+2
Co-51-1	0.105~0.2	2.11E+3	1.05E+7	4.9E+3	7.2E+2
Co-51-2	0.105~0.2	1.76E+3	1.02E+7	5.8E+3	1.0E+3
Co-51-3	0.105~0.2	1.81E+3	1.05E+7	5.8E+3	1.1E+3
Co-52-1	0.075~0.105	1.40E+3	1.06E+7	7.6E+3	1.6E+3
Co-52-2	0.075~0.105	1.60E+3	1.04E+7	6.5E+3	1.1E+3
Co-52-3	0.075~0.105	1.41E+3	1.07E+7	7.5E+3	1.3E+3
Co-53-1	<0.075	1.05E+3	1.00E+7	9.6E+3	4.0E+3
Co-53-2	<0.075	9.41E+2	1.03E+7	1.1E+4	3.9E+3
Co-53-3	<0.075	1.03E+3	1.05E+7	1.0E+4	5.4E+3

表 2.2.6-14 不同粒径对 ^{137}Cs 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{Kd}
Cs-50-1	0.2~0.3	3.01E+3	1.64E+7	5.5E+3	8.5E+2
Cs-50-2	0.2~0.3	3.20E+3	1.63E+7	5.1E+3	1.3E+3
Cs-50-3	0.2~0.3	3.53E+3	1.58E+7	4.5E+3	6.2E+2
Cs-51-1	0.105~0.2	2.60E+3	1.73E+7	6.6E+3	1.2E+3
Cs-51-2	0.105~0.2	3.33E+3	1.66E+7	5.0E+3	6.9E+2
Cs-51-3	0.105~0.2	2.96E+3	1.72E+7	5.8E+3	1.2E+3
Cs-52-1	0.075~0.105	2.39E+3	1.73E+7	7.2E+3	1.7E+3
Cs-52-2	0.075~0.105	2.53E+3	1.70E+7	6.7E+3	7.7E+2
Cs-52-3	0.075~0.105	2.56E+3	1.75E+7	6.8E+3	1.1E+3
Cs-53-1	<0.075	2.55E+3	1.68E+7	6.6E+3	1.0E+3
Cs-53-2	<0.075	1.78E+3	1.73E+7	9.7E+3	1.8E+3
Cs-53-3	<0.075	2.17E+3	1.73E+7	7.9E+3	1.5E+3

表 2.2.6-15 不同粒径对 ^{90}Sr 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}
Sr-50-1	0.2~0.3	3.65E+5	9.09E+6	2.5E+1	8.2E-1
Sr-50-2	0.2~0.3	4.18E+5	9.31E+6	2.2E+1	7.0E-1
Sr-50-3	0.2~0.3	3.65E+5	9.62E+6	2.6E+1	8.5E-1
Sr-51-1	0.105~0.2	3.60E+5	9.57E+6	2.7E+1	9.8E-1
Sr-51-2	0.105~0.2	3.40E+5	9.82E+6	2.9E+1	1.1E+0
Sr-51-3	0.105~0.2	3.25E+5	9.51E+6	2.9E+1	1.1E+0
Sr-52-1	0.075~0.105	3.16E+5	9.48E+6	3.0E+1	1.1E+0
Sr-52-2	0.075~0.105	3.47E+5	9.46E+6	2.7E+1	1.0E+0
Sr-52-3	0.075~0.105	3.12E+5	9.30E+6	3.0E+1	1.1E+0
Sr-53-1	<0.075	2.64E+5	1.07E+7	4.0E+1	1.5E+0
Sr-53-2	<0.075	2.48E+5	1.03E+7	4.1E+1	1.6E+0
Sr-53-3	<0.075	2.44E+5	1.02E+7	4.2E+1	1.6E+0

表 2.2.6-16 不同粒径对 ^{106}Ru 分配系数的影响

试验管编号	粒径 (mm)	液相比活度 (Bq/L)	固相比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	σ_{K_d}
Ru-50-1	0.2~0.3	8.87E+4	9.67E+7	1.1E+3	7.7E+1
Ru-50-2	0.2~0.3	9.97E+4	9.35E+7	9.4E+2	6.5E+1
Ru-50-3	0.2~0.3	7.46E+4	9.36E+7	1.3E+3	9.6E+1
Ru-51-1	0.105~0.2	7.56E+4	8.81E+7	1.2E+3	8.1E+1
Ru-51-2	0.105~0.2	7.48E+4	9.25E+7	1.2E+3	8.6E+1
Ru-51-3	0.105~0.2	6.79E+4	8.61E+7	1.3E+3	8.8E+1
Ru-52-1	0.075~0.105	6.38E+4	9.40E+7	1.5E+3	9.7E+1
Ru-52-2	0.075~0.105	5.76E+4	9.48E+7	1.6E+3	1.2E+2
Ru-52-3	0.075~0.105	6.04E+4	9.22E+7	1.5E+3	1.0E+2
Ru-53-1	<0.075	4.54E+4	8.97E+7	2.0E+3	1.3E+2
Ru-53-2	<0.075	4.79E+4	8.72E+7	1.8E+3	1.2E+2
Ru-53-3	<0.075	5.22E+4	8.81E+7	1.7E+3	1.1E+2



图 2.2.6-4 富水水库



图 2.2.6-5 河床概貌



图 2.2.6-6 (1) 水库岸边泥



图 2.2.6-6 (2) 河道岸边泥

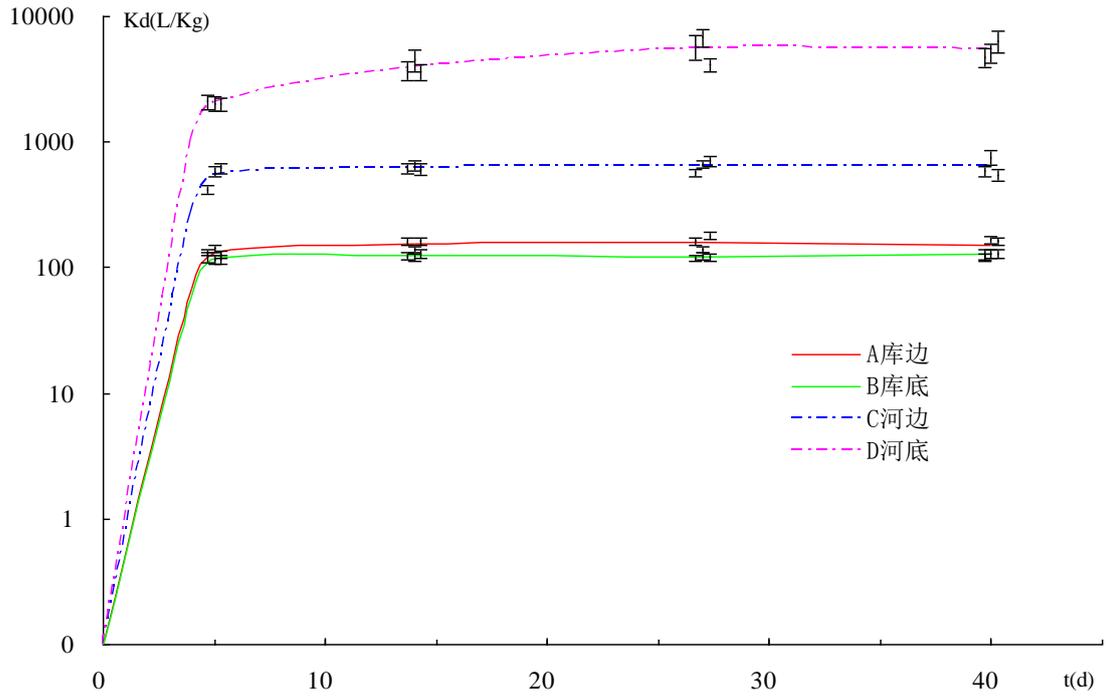


图 2.2.6-7 ^{60}Co 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

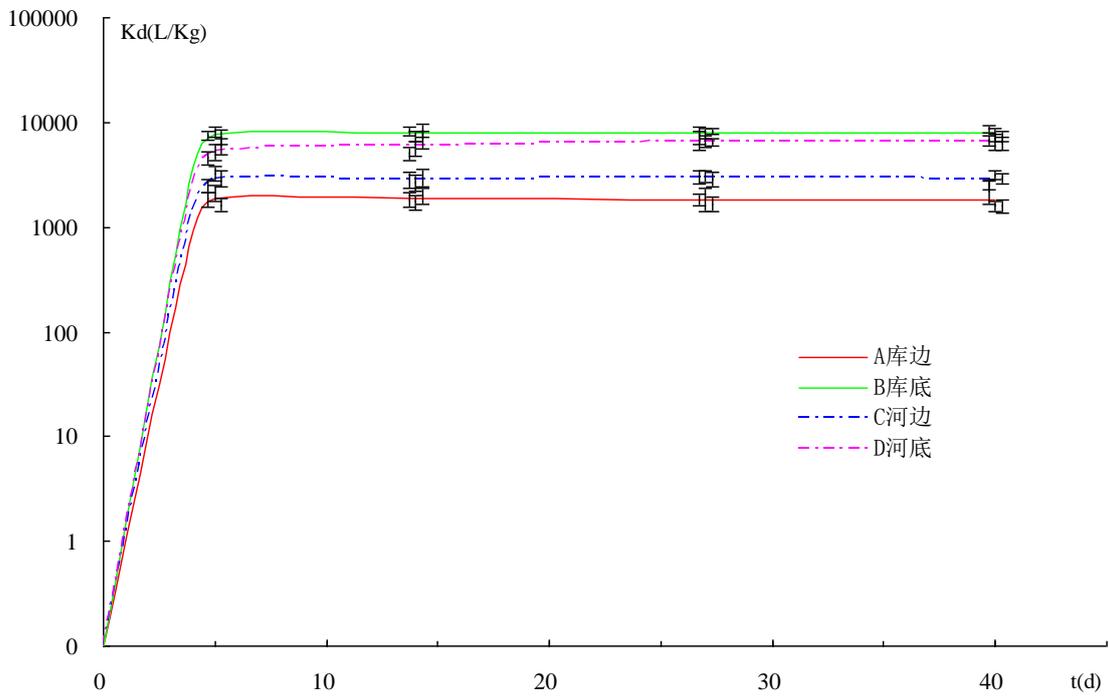


图 2.2.6-8 ^{137}Cs 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

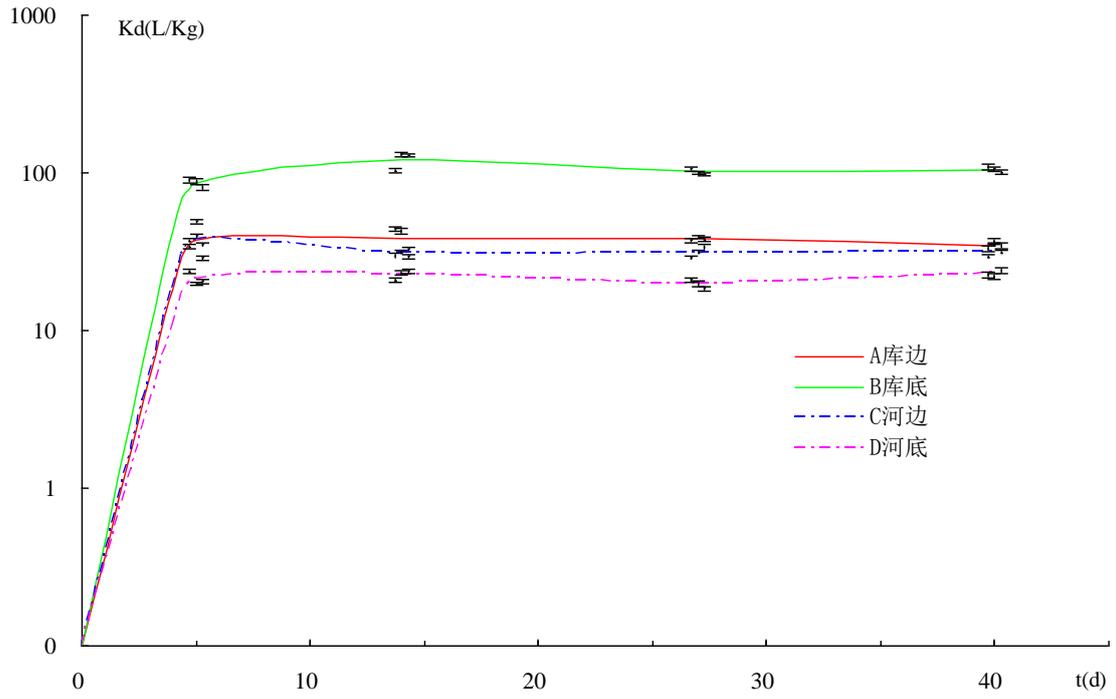


图 2.2.6-9 ^{90}Sr 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

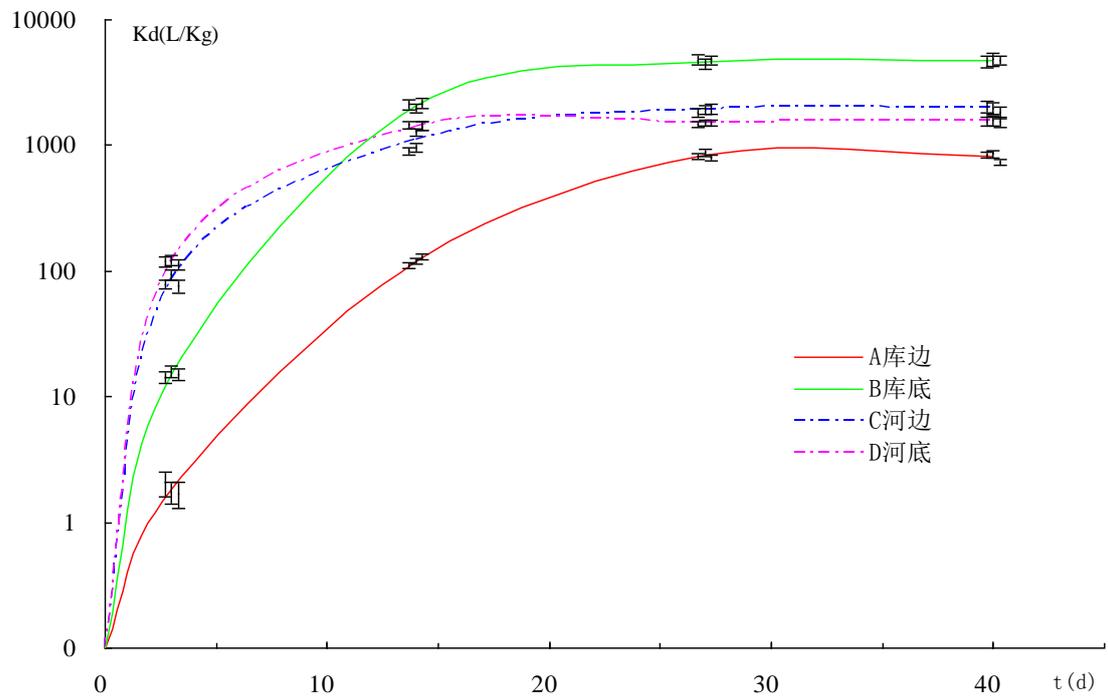


图 2.2.6-10 ^{106}Ru 在泥和沙中的 K_d 与时间关系曲线

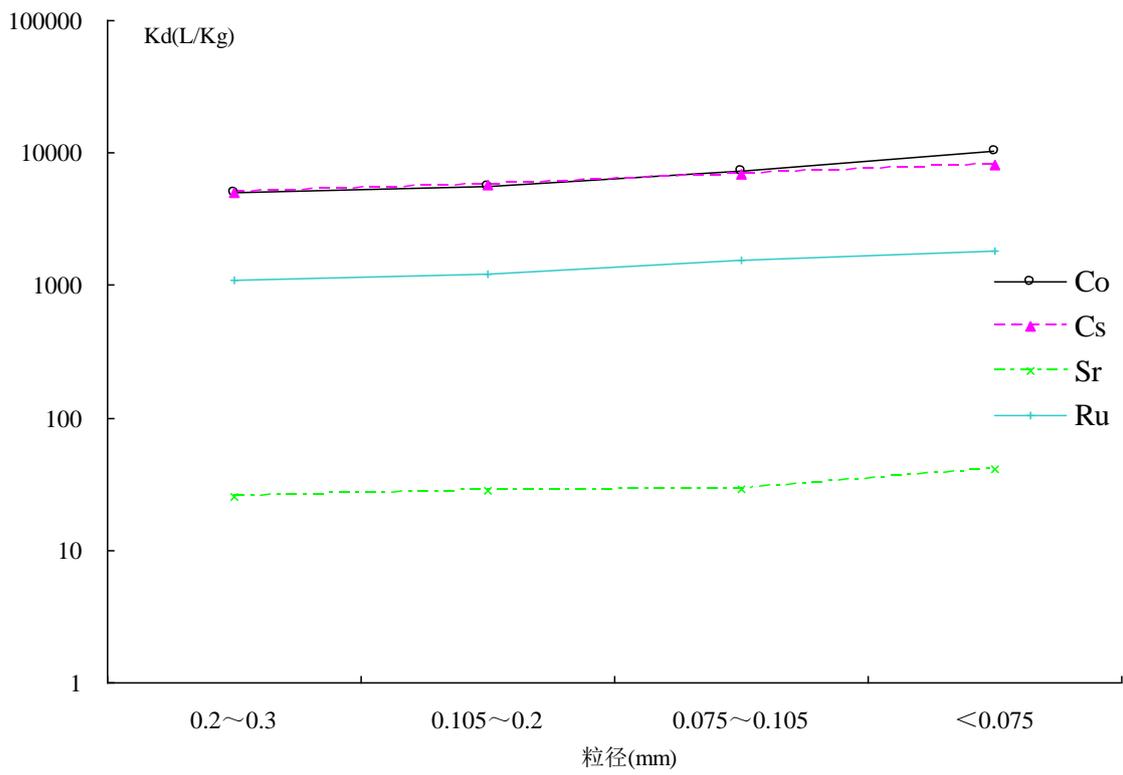


图 2.2.6-11 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 不同粒径实验结果

2.3 土壤矿物吸附实验研究

内陆一些核电厂址（如：广西平南、河南南阳、吉林靖宇、江西彭泽、湖南桃花江、湖北咸宁）已经开展了泥沙对放射性核素吸附实验并对其吸附特性进行研究，同时对影响分配系数的一些单因素也开展了实验，包括河流沉积物对核素（ ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 Ru ）的吸附、解吸特性分析，不同固液比、不同粒径、pH 值对分配系数 K_d 的影响，实验结果 2.3.1-1。不同厂址的河流沉积物对以上四种核素的吸附、解吸时 K_d 值不尽相同，缺少共性；不同固液比对 K_d 的影响不明显；砂随着粒径减少 K_d 值增大，泥随着粒径减少 K_d 值变化不明显；pH 在 4~8 范围时 Ru 的 K_d 值随着 pH 增大而增大。

总之，泥沙对放射性核素的吸附特性研究取得了一些成果，但对其影响因素的考虑并不全面，如不同土壤矿物对核素吸附的差异；水和土壤中稳定同位素对土壤吸附放射性核素的影响；不同放射性核素之间竞争吸附的影响。

土壤中的矿物质占土壤固相总重量的 90% 以上，而粘粒矿物又是矿物质中最活跃的部分，它的类型决定了对放射性核素吸附能力的大小。研究单独的土壤矿物对核素的吸附特性，与以往的一些厂址的研究进行比较分析，有助于得到泥沙对放射性核素的吸附特性规律，为今后内陆核电厂的环境影响评价工作提供必要的技术支持，还可为内陆核电厂环境影响评价的审评提供参考和依据。本次研究主要包括：

（1）考虑不同矿物对核素吸附特性的，研究土壤矿物成分对土壤吸附能力的影响，尝试配制模拟土壤，与现场土壤的吸附特性进行比较。

（2）研究放射性核素与稳定核素（同一元素）对彼此分配系数的相互影响，不同核素之间的竞争吸附。

2.3.1 实验方案及准备

根据以往工作经验，各厂址采集土壤的矿物成分主要有高岭石、蒙脱石、伊利石、石英、绿泥石、钾长石、方解石、斜长石等，不同厂址不尽相同，本次实验选取较常见的几种土壤矿物研究其吸附特性，并选取咸宁厂址的一种土壤样品作为参照，配制模拟土的矿物成分。实验中使用的核素与以往厂址所做实验的核素一样，以便进行比较分析，即 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{106}Ru 。

2.3.1.1 实验方案

方案分 A、B 两组，A 组研究不同矿物对四种核素的吸附解吸特性进行研究，

B 组研究各种矿物中稳定 Sr 对放射性 Sr-90 吸附能力的影响、稳定 Co 对放射性 Co-60 吸附能力的影响以及 Sr 与 Co 之间的竞争吸附。具体实验方案见表 2.3.1-2。

模拟土壤：参照咸宁核电厂土壤矿物组成，用高岭石、蒙脱石、伊利石和石英砂配制。具体配方见表 2.3.1-3，每种核素、土壤不做平衡过程，做 3 个平行样，测量平衡状态的 K_d 。

五种化学浓度：2.50E-05mol/L、2.50E-04mol/L、1.25E-03mol/L、2.50E-03mol/L、5.00E-03mol/L。

2.3.1.2 矿物的采集及预处理

根据实验方案采集吸附实验所需矿物，主要通过向产地购买方式，购得矿物为产地原状矿石，见图 2.3.1-1~图 2.3.1-4，矿物特征描述及编号说明见表 2.3.1-4。

2.3.1.3 岩土样的化学成分分析及矿物组成

矿物采自产地的原矿石，存在复杂杂质组分，可能会影响对核素的吸附，因此在进行吸附实验前，需对采回矿物进行矿物组成及化学成分分析。

样品的矿物组成和化学成分分析由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心进行测定，测得的矿物组成和化学成分结果列于表 2.3.1-5 和表 2.3.1-6。

由样品的矿物质组分可见，各种矿物均含有一定量的杂质，河南伊利石(YL)中伊利石成分只占 53%，有 40% 是石英成分，GL2（山西）的高岭石成分比 GL1（长白山）的含量要多，因此在配制模拟土时选用 GL2。采集的原矿石中还含有方石英、方解石、钾长石等杂质，均为常见的粘土矿物。

由矿物样品的化学成分分析可见，高岭石中 SiO_2 和 Al_2O_3 占主要成分，比例相当，蒙脱石和伊利石中主要为 SiO_2 ，有不到 20% 的 Al_2O_3 ，还有少量的 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 等均为土壤中的常见成分。

2.3.1.4 实验用水的化学成分分析

水样的化学性质（如 PH 值）也会影响分配系数的大小，且水中有无实验核素的离子会对实验结果产生影响。因此本次实验采用蒸馏水，可减少水中离子对实验带来的影响，同时委托山西省分析科学研究院对现场采集水样的 Co-59、Cs-133 和 Sr-88 的本底进行了测量，结果见表 2.3.1-7。取样水外观清澈，无沉淀，PH 呈中性。水中的 Cs-133 和 Sr-88 均有检出，Co-59 在探测限内未检出。

2.3.2 矿物吸附特性实验

吸附主要分为物理吸附和化学吸附，影响吸附过程的因素很多，固相介质和水的成分、固液比、核素形态、PH 值等因素都会影响分配系数 K_d 。对上述因素进行综合考虑后，并在结合以往的一些研究成果的基础上，选取固液比 1:10 g/ml，给定 PH 值(地下水的 PH 值)的条件下进行核素吸附特性模拟实验。所有实验均在室温下进行。

根据矿物采购情况，高岭石采自两个产地，矿物分析结果显示，成份有差别，故两产地的高岭石均做同样 A、B 两组实验。

2.3.2.1 实验仪器

本实验使用的主要设备如下：

(1) GEM-FX8530P4 宽能高纯锗 γ 谱仪(DSPEC jr 2.0)，美国 ORTEC 公司生产，相对探测效率为 53%，能量响应范围为 10Kev~10Mev，能量分辨率：1.67keV (1.332MeV)，642eV (122keV)，531eV (14.4keV)；

(2) TG16G 型台式高速离心机，凯特实验仪器有限公司，最大转速 16000r/min；

(3)EL204 电子天平，梅特勒-托利多仪器，最大载荷 220g，测量精度 0.0001g；

(4) HZC-1 型恒温振荡水槽，辽阳市恒温仪器厂；

(5) HG101-2 型电热鼓风干燥箱，南京实验仪器厂，加热功率 3.6Kw，最高温度 300℃，控制器灵敏度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ；

(6) 202-0 型电热恒温干燥箱，北京科伟永兴仪器有限公司；

(7) YS-2 型摇摆式筛析机，南京土壤仪器厂；

(8) E-201-C 型酸度计，上海精密仪器有限公司；

(9) 2250CA 型液体闪烁计数器，美国 PACKARD 公司生产，测量低能 β ，对无淬灭源 3H 效率 58%，14C 效率 75%；

上述设备中凡属于计量器具的均按规定进行了检定。

2.3.2.2 吸附实验过程

1) 矿物吸附——解吸特性实验 (A 组)

(1) 吸附实验

取 15ml 的聚乙烯塑料离心管，洗净后晾干，称取 (1 ± 0.0001) 克的样品放入管中，再加入 9.7ml 现场所取的水样，盖紧盖子，摇匀，静置七天后向离心管中加入 0.3ml 含放射性核素的溶液 (溶液中核素 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{106}Ru 的投放

量按照最终所用测量仪器的最低检测限来定), 具体核素在每个离心管中的投放量及在溶液中的化学形态见表 2.3.2-1。立即振荡离心管使固液充分混合, 并且在实验时间内每天放入振荡器中振荡两次(上午下午各一次, 每次不少于 60 分钟)。根据以往工作经验, 取 45 天为吸附平衡时间, 取样测量, 计算分配系数 K_d 。

(2) 解吸实验

把吸附实验的试样离心分离, 取出矿物后烘干后称重, 按 1: 10 的固液比加入蒸馏水, 进行解吸实验, 其过程与吸附实验相同。在 50 天取样测量计算固相和液相的比活度, 再计算固、液相重的核素浓度之比即为解吸分配系数 K_d 。

2) 矿物竞争吸附特性实验 (B 组)

B 组实验土壤矿物有五种, 包括两种高岭石、蒙脱石、伊利石、模拟土, 五种化学浓度见表 2.3.2-2, 每种土壤每种浓度做 3 个平行样, 不做平衡过程。平衡时间按照以往经验取 30 天。放射性核素的投放量见表 2.3.2-3。

B 组实验过程大致与 A 组吸附试验一致, 主要分成 3 组:

(1) Sr-90 与 Sr 竞争吸附: 1g 土壤+9.6ml 的蒸馏水+0.3ml 的 Sr-90 溶液+0.1ml 稳定 Sr 溶液;

(2) Co-60 与 Co 竞争吸附: 1g 土壤+9.6ml 的蒸馏水+0.3ml 的 Co-60 溶液+0.1ml 稳定 Co 溶液;

(3) Sr 与 Co 竞争吸附: 1g 土壤+9.6ml 的蒸馏水+0.3ml 的 Sr-90 溶液+0.3ml 的 Co-60 溶液+0.1ml 稳定 Sr 溶液+0.1ml 稳定 Co 溶液。

投放的放射性 Sr 与稳定 Sr 均为 SrCl_2 形式, 投放的放射性 Co 与稳定 Co 均为 CoCl_2 形式。其中 B1 组浓度的 Co-60 与 Co 竞争吸附与 Sr 与 Co 竞争吸附不加入稳定 Co 溶液。

3) 实验条件及测量方法

A、B 组实验共进行 3 个多月 (不包括最后测量样品时间), 实验条件及测量方法见下表 2.3.2-4。

2.3.2.3 实验结果

A 组吸附实验在加入放射性核素后 45 天进行取样, 解吸实验为 50 天, B 组竞争吸附实验为 30 天。取样过程为先将试管离心 1 小时, 然后分别取出管中的液体和固体。液体直接测量活度, 然后计算其比活度, 固体则先烘干, 在烘箱中自然降温后称重测量其活度, 将固体的活度减去取样时所夹带残留液体的活度,

再算的固相的比活度；最后计算固、液相中的核素浓度之比即为分配系数 K_d 。
 σ_{Kd} 为测量的统计误差。

1) A 组吸附实验结果

五种矿物对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 的吸附实验达到吸附平衡时间为 45 天，实验结果见表 2.3.2-5~表 2.3.2-8，图 2.3.2-1~图 2.3.2-4。样品编号最后一位为平行样编号。

由实验结果得到，长白山高岭石 (GL1) 对 ^{137}Cs 的吸附分配系数 K_d 为 1000L/kg，山西高岭石 (GL2) 为 1400L/kg，内蒙蒙脱石 (MT) 为 1200L/kg，河南伊利石 (YL) 为 17000L/kg，模拟土壤 (MN) 为 5700L/kg。

GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{60}Co 吸附分配系数 K_d 依次为 20000L/kg、20000L/kg、19000L/kg、23000L/kg 和 5200 L/kg。

GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{90}Sr 吸附分配系数 K_d 依次为 50L/kg、120L/kg、1200L/kg、240L/kg 和 250L/kg。

GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{106}Ru 吸附分配系数 K_d 依次为 480L/kg、1000L/kg、150L/kg、1000L/kg 和 910L/kg。

2) A 组解吸实验结果

不同矿物对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 的解吸实验结果见表 2.3.2-9~表 2.3.1-12，图 2.3.2-1~图 2.3.2-4。

由实验结果得到，长白山高岭石 (GL1) 对 ^{137}Cs 的解吸分配系数 K_d 为 4300L/kg，山西高岭石 (GL2) 为 6300L/kg，内蒙蒙脱石 (MT) 为 4300L/kg，河南伊利 (YL) 石为 18000L/kg，模拟土壤 (MN) 为 35000L/kg。

GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{60}Co 解吸分配系数 K_d 依次为 21000 L/kg、34000L/kg、22000L/kg、27000 L/kg 和 20000L/kg。

GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{90}Sr 解吸分配系数 K_d 依次为 120L/kg、310L/kg、3000L/kg、1100L/kg 和 560L/kg。

GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{106}Ru 解吸分配系数 K_d 依次为 1600L/kg、7000L/kg、230L/kg、1800L/kg 和 1700L/kg。

3) A 组实验结果分析

对不同矿物对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 四种核素的吸附实验结果(表 2.3.1-6~表 2.3.1-13，图 2.3.2-1~图 2.3.2-4) 分析如下：

(1) 不同矿物与单一核素的比较:

● 不同矿物对 ^{137}Cs 吸附、解析能力比较

五种矿物对 ^{137}Cs 吸附分配系数大小比较为: $\text{YL} > \text{MN} > \text{GL2} > \text{MT} > \text{GL1}$, 解吸分配系数为 $\text{MN} > \text{YL} > \text{GL2} > \text{MT} = \text{GL1}$ 。由表 2.3.1-6 和图 2.3.2-1 可看出, GL2 、 MT 和 GL1 的对 ^{137}Cs 吸附分配系数差别不大, YL 对 ^{137}Cs 的吸附能力明显突出, MN 在 YL 与 GL2 之间, MN 为单独的矿物混合配制而成的模拟土壤, 可见单独的矿物的吸附特性, 在混合成后其吸附能力可能大大改变。

五种矿物对解吸 ^{137}Cs 的解吸分配系数均比吸附分配系数高, 表明其吸附能力比解吸作用大。 MN 对 ^{137}Cs 的吸附能力比值最高的 YL 弱 (约占 1/3), 但其解吸分配系数比其他四种矿物 K_d 大 (约为 YL 的两倍), 表明混合的模拟土壤更不容易把已经吸附的 ^{137}Cs 解吸到液相中, 有较稳定的吸附能力。 YL 的解吸 K_d 值比其吸附 K_d 值略大, 对 ^{137}Cs 吸附稳定性最弱。

● 不同矿物对 ^{60}Co 吸附、解析能力比较

五种矿物对 ^{60}Co 吸附分配系数大小比较为: $\text{YL} > \text{GL1} = \text{GL2} > \text{MT} > \text{MN}$ 。解吸分配系数为 $\text{GL2} > \text{YL} > \text{MT} > \text{GL1} > \text{MN}$ 。由表 2.3.1-7 和图 2.3.2-2 可看出, GL1 、 GL2 、 MT 、 YL 四种矿物对 ^{60}Co 吸附分配系数 K_d 值大小相当, YL 的 K_d 值略大, 而 MN 的 K_d 值不到其他四种矿物的一半。

五种矿物的解吸分配系数均比吸附分配系数大, GL2 的解吸 K_d 值最突出, 约为吸附的 1.7 倍; MN 的解吸分配系数约为吸附 K_d 值的 3 倍, 对 ^{60}Co 吸附的稳定性最强。其余四种矿物的解吸 K_d 值比其吸附 K_d 大不到一倍, 其中 GL1 的解吸 K_d 值比其吸附 K_d 值略大, 对 ^{60}Co 吸附稳定性最弱。

● 不同矿物对 ^{90}Sr 吸附、解析能力比较

五种矿物对 ^{90}Sr 吸附分配系数大小比较为: $\text{MT} > \text{MN} > \text{YL} > \text{GL2} > \text{GL1}$ 。由表 2.3.1-7 和图 2.3.2-3 可看出, 解吸分配系数为 $\text{MT} > \text{YL} > \text{MN} > \text{GL2} > \text{GL1}$ 。比较可见, MT 对 ^{90}Sr 的吸附分配系数比其他四种矿物大, MN 与 YL 的吸附分配系数大小相当。

五种矿物解吸分配系数均比吸附分配系数大一倍多, 其中 YL 的解吸 K_d 值为吸附 K_d 值的 3 倍多, 吸附能力最稳定。其余三种的矿物的解吸 K_d 值比其吸附 K_d 值大 1 倍左右。

● 不同矿物对 ^{106}Ru 吸附、解析能力比较

五种矿物对 ^{106}Ru 吸附分配系数大小比较为: $\text{GL2}=\text{YL}>\text{MN}>\text{GL1}>\text{MT}$ 。解吸分配系数为 $\text{GL2}>\text{YL}>\text{MN}>\text{GL1}>\text{MT}$ 。由表 2.3.1-8 和图 2.3.2-4 可看出, 比较可见, GL2 与 YL 对 ^{106}Ru 的吸附分配系数相当, 较其他 3 种矿物大, MT 的最小, 不到 GL2 和 YL 的 $1/6$ 。五种矿物的解吸分配系数均比吸附分配系数大, 其中 GL2 最大, 为其吸附分配系数的 7 倍, 吸附能力最稳定。 GL1 的解吸 K_d 值为吸附 K_d 值的 3 倍多, 吸附稳定性仅次于 GL2 。其余 3 种矿物的解吸 K_d 值比其吸附 K_d 大不到一倍。

可见五种矿物对不同核素的吸附-解吸能力不一致, YL 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的吸附能力较强, MT 对 ^{90}Sr 的吸附能力较强, GL2 与 YL 对 ^{106}Ru 的吸附能力较强。解吸分配系数均比吸附分配系数大。不同产地的高岭石 GL1 与 GL2 的吸附解吸特性有明显差别, 可能原因是高岭石的纯度、所含其它矿物成分等不同。

(2) 同种矿物中不同核素的吸附—解吸特性比较

GL1 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较为: $\text{Co}>\text{Cs}>\text{Ru}>\text{Sr}$; 解析分配系数比较关系与吸附情形相同。

GL2 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较为: $\text{Co}>\text{Cs}>\text{Ru}>\text{Sr}$, 解析分配系数比较 $\text{Co}>\text{Ru}>\text{Cs}>\text{Sr}$ 。

MT 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较为: $\text{Co}>\text{Cs}=\text{Sr}>\text{Ru}$, 解析分配系数比较 $\text{Co}>\text{Cs}>\text{Sr}>\text{Ru}$ 。

YL 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较为: $\text{Co}>\text{Cs}>\text{Ru}>\text{Sr}$; 解析分配系数比较关系与吸附情形相同。

MN 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较为: $\text{Cs}>\text{Co}>\text{Ru}>\text{Sr}$; 解析分配系数比较与吸附情形相同。

由以上比较可见, GL1 、 GL2 、 YL 对四种核素的吸附能力强弱比较大致相同为 $\text{Co}>\text{Cs}>\text{Ru}>\text{Sr}$, MT 对 Cs 与 Sr 的吸附分配系数相同, 比 Co 弱, 比 Ru 大。而 MN 则对 Cs 的吸附能力与 Co 的相当, 表明不同土壤混合后其吸附特性与单独矿物的吸附特性有差异。

(3) 模拟土壤与现场土壤比较

模拟土是参照《咸宁核电放射性核素吸附特性研究》中的库底泥的矿物成分配制而成, 具体配比见表 2.3.1-3。模拟土壤与现场土壤对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较见表 2.3.2-5。比较可见, 两者不具一致性, 而且差异较大。模

拟土对 ^{60}Co 的吸附 K_d 为现场的土壤的 40 倍,对 ^{90}Sr 的 K_d 比现场土则大一倍。然而现场土壤对 ^{106}Ru 的吸附 K_d 比模拟土大 4 倍多,对 ^{137}Cs 的 K_d 比模拟土大不到一倍。可见模拟土壤的吸附分配系数 K_d 值不能代替现场土壤的 K_d 值。

由两种高岭石 (GL1、GL2) 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 的吸附试验结果可见,不同产地的高岭石其吸附特性有所差别,可能是其矿物成分、成矿条件、化学成分的差别等复杂的因素造成。可见配制模拟土壤代替现场土壤比现场采样困难。

4) 稳定 Sr 对 B 组矿物吸附放射性 Sr-90 影响分析

核电厂排放废水中,稳定 Sr 与放射性 Sr-90 共存,分别研究矿物对其中一种核素的吸附能力,不能反映真实情况。为研究溶液中稳定 Sr 存在时,对放射性 Sr-90 在 B 组 5 种不同矿物中的分配系数影响情况,配制了 6 种不同浓度的 Sr、Sr-90 溶液,见图 2.3.2-5。图中初始点溶液中只有放射性 Sr-90,浓度为水中本底值 ($3.41\times 10^{-8}\text{mol/L}$),后 5 点溶液在初始点溶液基础上加入稳定 Sr 配制而成,浓度逐步增加。放射性 Sr-90 在 B 组 5 种不同矿物中的 K_d 值见表 2.3.2-14。

由实验结果可知,当稳定 Sr 与放射性 Sr-90 共存时,矿物会同时对两者进行吸附,放射性 Sr-90 在五种矿物中的 K_d 值随着稳定 Sr 浓度的增加而下降,在 0-5mol/l 浓度范围内, K_d 值均缩小了约 10 倍,表明稳定 Sr 的存在影响了矿物对 Sr-90 的吸附,单独用放射性 Sr-90 计算五种矿物对总 Sr 的分配系数偏小。

5) 稳定 Co 对 B 组矿物吸附放射性 Co-60 影响分析

研究溶液中稳定 Co 存在时,对放射性 Co-60 在 B 组 5 种不同矿物中的分配系数影响情况,思路与实验步骤与研究稳定 Sr 与放射性 Sr-90 一致。配制了 5 种不同浓度的 Co、Co-60 溶液,见图 2.3.2-6。放射性 Co-60 在 B 组 5 种不同矿物中的 K_d 值见表 2.3.2-15。

由实验结果可知,当稳定 Co 与放射性 Co-60 共存时,矿物会同时对两者进行吸附,放射性 Co-60 在五种矿物中的 K_d 值随着稳定 Co 浓度的增加而下降,在 0-5mol/l 浓度范围内,Co-60 在 GL2 矿物中的 K_d 值下降幅度最大,约 2045 倍;在 MN 矿物中 K_d 值下降幅度最小,约 44 倍,表明稳定 Co 的存在影响了矿物对 Co-60 的吸附,单独用放射性 Co-60 计算五种矿物对总 Co 的分配系数偏小。

结合图 2.3.2-5、图 2.3.2-6 分析可知,两者加入的稳定 Sr、稳定 Co 浓度相同,但相应的放射性核素在矿物中的 K_d 值下降趋势却截然不同,很明显在

0-5mol/l 浓度范围内, Sr-90 在五种矿物中的 K_d 值均缩小了约 10 倍, 而 Co-60 在五种矿物中的 K_d 值最小也缩小了约 44 倍, 由此可见随着浓度的增加矿物对稳定 Co 的吸附能力强于稳定 Sr。

6) B 组 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果

B 组 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果及见表 2.3.2-16、表 2.3.2-17, 表中编号最后一位数字样品的平行样, 倒数第二位为浓度编号, 对应表 2.3.2-2 的浓度。由于实验时同时投入 Co-60 与稳定 Co, Sr-90 与稳定 Sr, 测量时只测量固相和液相中 Sr-90 和 Co-60 的浓度, 需校正后, 用总 Co 和总 Sr 的浓度分别计算 K_d , 才得到 Co、Sr 在矿物中的分配系数 K_d 。校正公式见式 4-1, 校正后结果见表 2.3.2-16、表 2.3.2-17。

$$K'_d = K_{de} \times \frac{C_o}{C_{oe}} \times \frac{C_{pe}}{C_p}$$

其中, K'_d 为校正后分配系数;

K_{de} 为加稳定核素时测量计算的分配系数;

C_o 为不加稳定核素时水中初始时刻浓度;

C_{oe} 为加稳定核素时水中初始时刻浓度;

C_{pe} 为加稳定核素时水中平衡浓度;

C_p 为不加稳定核素时水中平衡浓度。

7) B 组 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果分析

(1) GL1 对 Co、Sr 的竞争吸附规律

溶液中只有 Co 且化学浓度不大于 2.5mmol/L 时, GL1 样品对 Co 的吸附规律符合等温线性吸附, 随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变, 约为 $1.9E+04\text{mL/g}$; 当 Co 的化学浓度超过 2.5mmol/L 时, 1g 质量的 GL1 样品对 Co 的吸附能力达到饱和状态, 随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小。当溶液中 Co、Sr 共存, Co 的化学浓度为 2.5mmol/L 时, GL1 样品对 Co 的 K_d 值为 $1.8E+04\text{mL/g}$, 意味着浓度还没有达到 2.5mmol/L 临界值, K_d 值就出现了下降的趋势, 说明溶液中加入 Sr 后, 降低了 GL1 样品对 Co 的吸附能力, 但是与溶液中只有 Co 的情况相比, K_d 值降低幅度较小, 使其吸附 Co 达到饱和状态的临界浓度稍有提前, 1g 质量的 GL1 样品对 Co 的吸附能力受影响程度很小, 见图 2.3.2-7。

溶液中只有 Sr 与溶液中 Sr、Co 共存这两种情况, 本次实验所设置的浓度范

围 (0.025mmol—5 mmol) 均不能体现等温线性吸附过程, GL1 样品对 Sr 的分配系数 K_d 随着浓度的增加一直降低, 但是溶液中 Sr、Co 共存与溶液中只有 Sr 的情况相比, K_d 值降低幅度较大, 说明溶液中加入 Co 后, 1g 质量的 GL1 样品对 Sr 吸附达到饱和状态的临界浓度提前很多, 对 Sr 的吸附能力下降较大, 见图 2.3.2-8。

从以上分析可知, 溶液中 Co、Sr 共存时, GL1 样品对 Co 的吸附能力较溶液中只有 Co 时有所下降, 但是下降幅度很小, 对 Co 吸附达到饱和状态的临界浓度提前也较小。而 GL1 样品对 Sr 的吸附能力较溶液中只有 Sr 时下降幅度较大, 对 Sr 吸附达到饱和状态的临界浓度提前很多。综上所述, 当溶液 Co、Sr 共存时, GL1 样品优先吸附 Co。

(2) GL2 对 Co、Sr 的竞争吸附规律

溶液中只有 Co 与溶液中 Co、Sr 共存这两种情况, 本次实验所设置的浓度范围不能体现 GL2 样品对 Co 的等温线性吸附过程, 分配系数 K_d 随着浓度的增加一直降低。溶液中 Co、Sr 共存与溶液中只有 Co 的情况相比, 浓度不大于 0.25mmol/L 时, K_d 值与后者一致; 浓度超过 0.25mmol/L 后, K_d 值降低幅度也较小, 说明溶液中加入 Sr 后, 1g 质量的 GL2 样品对 Co 的吸附能力受影响程度较小, 见图 2.3.2-9。

溶液中只有 Sr 且化学浓度不大于 0.25mmol/L 时, GL2 样品对 Sr 的吸附规律符合等温线性吸附, 随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变, 约为 $1.0E+02\text{mL/g}$; 当 Sr 的化学浓度超过 0.25mmol/L 时, 1g 质量的 GL2 样品对 Sr 的吸附能力达到饱和状态, 随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小。当溶液中 Sr、Co 共存时, GL2 样品吸附 Sr 达到饱和状态的临界浓度提前至 0.025mmol/L, K_d 随着浓度的增加一直降低, 且下降幅度较大, 说明加入 Co 后, 1g 质量的 GL2 样品对 Sr 的吸附能力受影响程度很大, 见图 2.3.2-10。

从以上分析可知, 溶液中 Co、Sr 共存时, GL2 样品对 Co 的吸附能力较溶液中只有 Co 时有所下降, 但是下降幅度很小, 对 Co 吸附达到饱和状态的临界浓度几乎不提前。而 GL2 样品对 Sr 的吸附能力较溶液中只有 Sr 时下降幅度较大, 对 Sr 吸附达到饱和状态的临界浓度提前约 10 倍。综上所述, 当溶液 Co、Sr 共存时, GL2 样品优先吸附 Co。

(3) MT 对 Co、Sr 的竞争吸附规律

溶液中只有 Co 时，本次实验所设置的浓度范围内 MT 样品对 Co 的吸附一直处于等温线性吸附过程，随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变，约为 $1.9E+04\text{mL/g}$ ，1g 质量的 MT 样品对 Co 的吸附能力还没有达到饱和状态。溶液中 Co、Sr 共存与溶液中只有 Co 的情况相比，两者的 K_d 值几乎一致，说明溶液中加入 Sr 后，1g 质量的 MT 样品对 Co 的吸附能力几乎不受影响，见图 2.3.2-11。

溶液中只有 Sr 时，本次实验所设置的浓度范围内 MT 样品对 Sr 的吸附一直处于等温线性吸附过程，随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变，约为 $1.1E+03\text{mL/g}$ ，1g 质量的 MT 样品对 Sr 的吸附能力还没有达到饱和状态。当溶液中 Sr、Co 共存时，Sr 的化学浓度不大于 2.5mmol/L 时，MT 样品对 Sr 的吸附依然符合等温线性吸附， K_d 值与前者保持一致，约为 $1.1E+03\text{mL/g}$ ；当 Sr 的化学浓度超过 2.5mmol/L 时，1g 质量的 MT 样品对 Sr 的吸附能力达到饱和状态，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小，说明加入 Co 后，MT 样品对 Sr 的吸附达到饱和状态的临界浓度提前很多，吸附能力下降很大，见图 2.3.2-12。

从以上分析可知，在浓度范围 0.025mmol/L — 5mmol/L 内，溶液中 Co、Sr 共存与溶液中只有 Co 相比，MT 样品对 Co 的吸附能力几乎保持不变。而 MT 样品对 Sr 的吸附能力较溶液中只有 Sr 时下降幅度较大，对 Sr 吸附达到饱和状态的临界浓度提前很多。综上所述，当溶液 Co、Sr 共存时，MT 样品优先吸附 Co。

(4) YL 对 Co、Sr 的竞争吸附规律

溶液中只有 Co 且化学浓度不大于 2.5mmol/L 时，YL 样品对 Co 的吸附规律符合等温线性吸附，随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变，约为 $2.3E+04\text{mL/g}$ ；当 Co 的化学浓度超过 2.5mmol/L 时，1g 质量的 YL 样品对 Co 的吸附能力达到饱和，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小。当溶液中 Co、Sr 共存，Co 的化学浓度不大于 1.25mmol/L 时，YL 样品对 Co 的吸附依然符合等温线性吸附， K_d 值与前者保持一致，约为 $2.3E+04\text{mL/g}$ ；当 Co 的化学浓度超过 1.25mmol/L 时，YL 样品对 Sr 的吸附能力达到饱和，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小，说明加入 Sr 后，稍微降低了 YL 样品对 Co 的吸附能力，使其吸附达到饱和状态的临界浓度稍有提前，吸附能力受影响程度很小，见图 2.3.2-13。

溶液中只有 Sr 且化学浓度不大于 1.25mmol/L 时，YL 样品对 Sr 的吸附规律符合等温线性吸附，随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变，约为 $2.2E+02\text{mL/g}$ ；当 Sr 的化学浓度超过 1.25mmol/L 时，1g 质量的 YL 样品对 Sr 的

吸附能力达到饱和，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小。当溶液中 Sr、Co 共存时，YL 样品吸附 Sr 达到饱和状态的临界浓度提前至 0.025mmol/L， K_d 随着浓度的增加一直降低，且下降幅度较大，说明加入 Co 后，1g 质量的 YL 样品对 Sr 的吸附能力受影响程度很大，见图 2.3.2-14。

从以上分析可知，溶液中 Co、Sr 共存时，YL 样品对 Co 的吸附能力较溶液中只有 Co 时有所下降，但是下降幅度很小，对 Co 吸附达到饱和状态的临界浓度提前约 2 倍。而 YL 样品对 Sr 的吸附能力较溶液中只有 Sr 时下降幅度较大，对 Sr 吸附达到饱和状态的临界浓度提前约 50 倍。综上所述，当溶液 Co、Sr 共存时，YL 样品优先吸附 Co。

(5) MN 对 Co、Sr 的竞争吸附规律

溶液中只有 Co 且化学浓度不大于 2.5mmol/L 时，MN 样品对 Co 的吸附规律符合等温线性吸附，随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变，约为 5.3E+03mL/g；当 Co 的化学浓度超过 2.5mmol/L 时，1g 质量的 MN 样品对 Co 的吸附能力达到饱和，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小。当溶液中 Co、Sr 共存，Co 的化学浓度不大于 1.25mmol/L 时，MN 样品对 Co 的吸附依然符合等温线性吸附， K_d 值与前者保持一致，约为 5.3E+03mL/g；当 Co 的化学浓度超过 1.25mmol/L 时，MN 样品对 Sr 的吸附能力达到饱和，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小，说明加入 Sr 后，稍微降低了 MN 样品对 Co 的吸附能力，使其吸附达到饱和状态的临界浓度稍有提前，吸附能力受影响程度很小，见图 2.3.2-15。

溶液中只有 Sr 且化学浓度不大于 2.5mmol/L 时，MN 样品对 Sr 的吸附规律符合等温线性吸附，随着浓度的增加分配系数 K_d 几乎保持不变，约为 2.5E+02mL/g；当 Sr 的化学浓度超过 2.5mmol/L 时，1g 质量的 MN 样品对 Sr 的吸附能力达到饱和，随着浓度的增加 K_d 值开始逐渐变小。当溶液中 Sr、Co 共存时，MN 样品吸附 Sr 达到饱和状态的临界浓度提前至 0.025mmol/L， K_d 随着浓度的增加一直降低，且下降幅度较大，说明加入 Co 后，1g 质量的 MN 样品对 Sr 的吸附能力受影响程度很大，见图 2.3.2-16。

从以上分析可知，溶液中 Co、Sr 共存时，MN 样品对 Co 的吸附能力较溶液中只有 Co 时有所下降，但是下降幅度很小，对 Co 吸附达到饱和状态的临界浓度提前约 2 倍。而 MN 样品对 Sr 的吸附能力较溶液中只有 Sr 时下降幅度较大，对 Sr 吸附达到饱和状态的临界浓度提前约 100 倍。综上所述，当溶液 Co、Sr

共存时，MN 样品优先吸附 Co。

总之，随着浓度增加，Co、Sr 的分配系数都有降低的趋势，但 Sr 的降低较快，Co 的降低很慢。在 Co、Sr 共存情况下，同浓度中 Sr 的分配系数降低较大，Co 的分配系数降低较小，说明：Co 的存在影响了 Sr 的分配系数，两者存在竞争关系，Co 的竞争吸附能力大于 Sr。

2.3.3 实验结论

对采集的四种矿物(长白山高岭石 GL1、山西高岭石 GL2、内蒙蒙脱石 MT、河南伊利石 YL) 以及配置的模拟土壤 MN 五种样品在实验室进行对放射性核素的吸附、解吸、竞争吸附的实验，实验条件：实验采用蒸馏水，pH 取 7~8，样品粒径磨细至 200 目 (0.075mm) 左右，温度为室温。在以上实验条件下，结果分析得到以下结论：

1) 由 GL1、GL2、MT、YL、MN 五种矿物对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 的吸附实验实验结果分析可见，解吸分配系数均比吸附分配系数大。

2) 五种矿物对不同核素的吸附-解吸能力不一致，YL 对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的吸附能力较强，MT 对 ^{90}Sr 的吸附能力较强，GL2 与 YL 对 ^{106}Ru 的吸附能力较强。不同产地的高岭石 GL1 与 GL2 的吸附解吸特性有明显差别，可能原因是高岭石的纯度、所含其它矿物成分等不同。

3) GL1、GL2、YL 对四种核素的吸附能力强弱比较大致相同为 $\text{Co} > \text{Cs} > \text{Ru} > \text{Sr}$ ，MT 对 Cs 与 Sr 的吸附分配系数相同，比 Co 弱，比 Ru 大。而 MN 则对 Cs 的吸附能力与 Co 的相当，表明不同土壤混合后其吸附特性与单独矿物的吸附特性有差异。

4) 模拟土壤与现场土壤对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 吸附分配系数比较可见，两者不具一致性，而且差异较大。可见模拟土壤的吸附分配系数 K_d 值不能代替现场土壤的 K_d 值。

5) 不同产地的高岭石其吸附-解吸特性有所差别，可能是其矿物成分、成矿条件、化学成分的差别等复杂的因素造成。可见配制模拟土壤代替现场土壤比现场采样困难。

6) 当稳定 Sr 与放射性 Sr-90 共存时，矿物会同时对两者进行吸附，放射性 Sr-90 在五种矿物中的 K_d 值随着稳定 Sr 浓度的增加而下降，在 0-5mol/l 浓度范

围内， K_d 值均缩小了约 10 倍，表明稳定 Sr 的存在影响了矿物对 Sr-90 的吸附，单独用放射性 Sr-90 计算五种矿物对总 Sr 的分配系数偏小。

7) 当稳定 Co 与放射性 Co-60 共存时，矿物会同时对两者进行吸附，放射性 Co-60 在五种矿物中的 K_d 值随着稳定 Co 浓度的增加而下降，在 0-5mol/l 浓度范围内，Co-60 在 GL2 矿物中的 K_d 值下降幅度最大，约 2045 倍；在 MN 矿物中 K_d 值下降幅度最小，约 44 倍，表明稳定 Co 的存在影响了矿物对 Co-60 的吸附，单独用放射性 Co-60 计算五种矿物对总 Co 的分配系数偏小。

8) Co 与 Sr 竞争吸附实验结果表明，随着浓度增加，五种矿物对 Co、Sr 的分配系数都有降低的趋势，但 Sr 的降低较快，Co 的降低很慢。在 Co、Sr 共存情况下，同浓度中 Sr 的分配系数降低较大，Co 的分配系数降低较小，且矿物吸附 Sr 达到饱和状态的临界浓度比吸附 Co 提前很多，说明 Co 的存在影响了 Sr 的分配系数，两者存在竞争关系，Co 的竞争吸附能力大于 Sr。

9) 不同矿物对于 Sr、Co 的吸附饱和浓度不同。

2.3.4 分配系数的选取

放射性核素在内陆水体中的滞留主要由于悬浮颗粒和表层沉积物对核素的吸附作用引起。悬浮物对核素的吸附包括一系列的动力学过程（氧化作用、络合作用、离子交换等），还有其它环境因素（悬浮颗粒的浓度，离子浓度，pH 值，胶体作用等）。这些影响因素复杂繁多，引起了悬浮物对核素的吸附分配系数 K_d 不确定性很高。

K_d 表示放射性核素在固相中的活度浓度与液相中活度浓度之比。反应了放射性核素在特定土壤条件下的分配规律。实验室 K_d 的简单计算方法是测定土壤固相上放射性核素的活度浓度和水溶液中放射性核素的活度浓度。这样的测定值通常会高估真实的 K_d 值，因为土壤固相上的核素并不是全部可交换的，即有相当一部分是处于所谓的固定态。因此运用这种方法测定的 K_d 值通常被成为 K_d 值，该值随时间的推移不断增加。因此真正的 K_d 值的测定取决于交换态的测定。李建国与商照荣编写的《放射生态学转移参数手册》（2006）中给出了部分元素在土壤的分配系数。《手册》中把土壤分成四类（砂、壤土、粘土和有机质），根据四类土壤分别给出了一些元素的分配系数的期望值，部分 K_d 列出了取值范围， K_d 的取值范围达到 3 个数量级，可见 K_d 值的不确定性很高。

IAEA（国际原子能机构）在 TRS No. 472 报告（2009）^[16]和其技术报告 TECDOC -1616（2009）^[17]中提出了用影响 Kd 的参数的概率密度函数来表征 Kd 值，通过概率密度函数来选取 Kd 值不但可以考虑已有数据的最优值，而且考虑了所有可能值的范围。这就需要根据不同的条件下测量的 Kd 值建立其一个庞大的数据库。472 报告中把土壤分成四类，表 2.3.4-1，并根据分类收集了大量的研究结果，按照最大值，最小值，平均值等形式给出了一些元素的分配系数。表 2.3.4-2 中列出了根据以往研究经验一些源项核素在文献中的推荐值。然而现场的样品一般不符合表 2.3.4-1 的土壤分类，从表 2.3.4-1 和表 2.3.4-2 中可见，推荐值的参数难以满足现场条件。

而对于我国内陆水体中悬浮物和沉积物对核素的吸附研究比较少。根据以往对内陆一些核电厂址（如：广西平南、河南南阳、吉林靖宇、江西彭泽、湖南桃花江、湖北咸宁）开展了泥沙对放射性核素吸附实验和吸附特性进行研究得到的数据（表 2.3.1-1，表 2.3.4-3），研究结果反映了分配系数不确定性高的特点，如：江西彭泽与河南南阳厂址的沙对 Co 的吸附分配系数为 1100L/Kg 和 3.3L/Kg，0.2~0.3mm 粒径的沙（吉林靖宇、河南南阳、湖北咸宁）对 Co 的 Kd 值分别为 170L/Kg、3.8L/Kg 和 5900L/Kg 等等。

有些研究指出，Cs-137 容易被非膨胀性层状硅酸盐吸附，如伊利石和云母，同族元素可能与核素存在竞争吸附，如 Fe 和 Co。对各厂址的沉积物样品作化学成分和矿物成分分析，见表 2.3.4-4，2.3.4-5。由表 2.3.4-4，2.3.4-5 与表 1-1 的分析对比可见，各厂址的矿物成分及化学成分差异与其分配系数的差异规律性不明显。如，如：广西平南的泥中矿物成分与咸宁的河边泥比较，咸宁的泥中含有蒙脱石和伊利石两种吸附能力较强的矿物，广西的则不含，但广西泥对 Co 的 Kd 值为 9200L/Kg，咸宁为 650L/Kg，对 Cs 的 Kd 值分别为 11000L/Kg 和 3000L/Kg，其中广西泥的 Fe 含量比咸宁泥高。

以上分析表明分配系数是多种作用共同影响的结果。然而这些研究数据量少，不足以建立数据库，通过概率密度函数来选择，但可以作为建立数据库的基础。

本研究中对 4 种的土壤矿物成分（长白山高岭石 GL1、山西高岭石 GL2、内蒙蒙脱石 MT、河南伊利石 YL）对核素的吸附特性单独作了研究，从本报告实验结果可见，土壤矿物成分对核素的吸附特性规律性不明显，简单的模拟土壤成分配制的模拟土壤与现场土壤的 Kd 值差别较大。不同产地的矿物的杂质成分

及矿物的层状结构可能存在差异，然而本研究的实验样品数少，只能得到在本次实验条件下，采集的样品对 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 和 ^{106}Ru 四种核素的分配系数。可作为将来数据库的一些基础数据，不能反映大部分的规律，还需要进一步的增大样品量和增加不同实验条件研究。

现阶段建议通过现场取样测量 K_d 值，对现场取回的悬浮或表层沉积物（0-5cm）样品进行粒径分析、化学及矿物成分分析，对水样进行 pH、Eh 值的测量，尽量模拟现场的环境条件，除模拟现场的实验条件外并限制一些条件进行实验，如：不同粒径，不同 pH 值，不同固液比等。待不同参数条件数据足够时，可通过 IAEA 推荐的概率密度函数的评估方法来选取 K_d 值。

表 2.3.1-1 内陆厂址的泥沙对放射性核素吸附分配系数 K_d (L/kg)

核素	江西	河南	广西	湖北				湖南		吉林
	彭泽	南阳	平南	咸宁				桃花江		靖宇
	沙	沙	沙	---	---	---	---	---	河道砂	沙
Co-60	1100.0	3.3	2200.0	---	---	---	---	---	1500.0	260.0
Sr-90	6.6	5.9	13.0	---	---	---	---	---	8.0	17.0
Ru-106	670.0	44.0	5000.0	---	---	---	---	---	540.0	450.0
Cs-137	2700.0	780.0	4000.0	---	---	---	---	---	4700.0	2600.0
	泥	泥	泥	库边泥	库底泥	河边泥	河道泥	库内泥	河道泥	泥
Co-60	8000.0	2300	9200.0	160.0	130.0	650.0	5600.0	6000.0	7000.0	2800.0
Sr-90	30.0	12	42.0	40.0	110.0	30.0	20.0	30.0	18.0	62.0
Ru-106	3900.0	1000	5000.0	850.0	4800.0	2000.0	1500.0	3300.0	3600.0	3150.0
Cs-137	8900.0	5400	11000.0	1800.0	8000.0	3000.0	6700.0	13000.0	11000.0	6200.0

表 2.3.1-2 实验方案

分组	土壤矿物	水	核素	吸附	解吸	竞争吸附	样品数
A	高岭石	蒸馏水	Sr-90、Cs-137、 Co-60、Ru-106	是	是	否	4种土壤×4种核素×3个平行样×2 =96
	蒙脱石						
	伊利石						
	模拟土壤						
B	高岭石	蒸馏水	Sr-90 (Sr) Co-60 (Co或 Fe)	是	否	是	4种土壤×2种核素×3个平行样×5 种化学浓度=120
	蒙脱石						
	伊利石						
	模拟土壤						

表 2.3.1-3 模拟土壤配方

矿物	咸宁-库底泥 矿物组分	模拟土 矿物组分*	矿物配比
伊利石	10.00%	10.00%	18.90%
高岭石	10.00%	10.00%	10.60%
蒙脱石	17.50%	17.50%	23.00%
石英	53.50%	55.00%	47.50%
钾长石	1.50%	0.90%	
方石英	2.00%	5.10%	
锐钛矿	0.00%	0.19%	
方解石	0.00%	0.69%	
其他	5.50%	0.60%	

*说明：表中模拟土中伊利石、高岭石、蒙脱石、石英以外的矿物组分是原矿石中含有杂质成分，由表 2.3.1-5 的矿物成分检测结果可见，采集的原矿石并非纯矿物，因此矿物配比与原土壤的成分有差别。

表 2.3.1-4 采集矿物特征及编号说明

矿物	化学成分	矿物特征	产地	对应编号
高岭石	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈ , 具有两层结构单元的层状铝硅酸盐矿物	白色	长白山	GL1
		黑色	山西	GL2
蒙脱石	(Ca、Na) _{0.33} (H ₂ O) ₄ {Al _{1.67} Mg _{0.33} [Si ₄ O ₁₀](OH) ₂ }具有三层结构单元的含水铝硅酸盐矿物	乳白色	内蒙古	MT
伊利石	K _{0.75} (Al _{1.75} R)[Si _{3.5} Al _{0.5} O ₁₀](OH) ₂ 单斜晶系的含水层状结构硅酸盐矿物	乳白色	河南	YL
模拟土壤	高岭石+蒙脱石+伊利石+石英	-	-	MN

表 2.3.1-5 样品中主要矿物质的质量组分 (%)

矿物成分	高岭石	石英	方石英	方沸石	蒙脱石	方解石	伊利石	钾长石	锐钛矿
GL1	78	10	10	1	---	---	---	---	---
GL2	94	5		---	---	---	---	---	---
MT	---	---	20	---	76	3	---	---	---
YL	---	40	---	---	---	---	53	5	1

表 2.3.1-6 样品中主要化学成分的质量组分 (%)

化学成份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
GL1	48.86	40.62	0.74	0.26	0.17	0.73	0.24
GL2	44.41	42.03	0.82	0.09	0.17	0.20	0.18
MT	71.26	12.23	3.76	0.07	0.17	3.02	4.03
YL	65.72	18.81	3.63	6.96	0.19	0.59	1.96

表 2.3.1-7 水样 PH 值和 Co-59、Cs-133 和 Sr-88 的含量 (mol/L)

项目	PH	本底值		
		Co-59	Cs-133	Sr-88
蒸馏水	7	<1.19×10 ⁻⁷	4.36×10 ⁻⁶	3.41×10 ⁻⁸

表 2.3.2-1 A 组每个试 Kd 样各核素投放量及化学形态

核素	Co	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹⁰⁶ Ru
化学浓度(mol/L)	7.97×10 ⁻⁶	3.40×10 ⁻⁹	4.32×10 ⁻⁹	2.47×10 ⁻¹⁰
投放量(Bq)	2.00×10 ⁴	1.50×10 ⁴	2.00×10 ⁴	3.24×10 ⁴
化学形态	Co ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺	Ru ³⁺

注: Co 的化学浓度, ⁶⁰Co: ⁵⁹Co 按 1:10000 计算

表 2.3.2-2 B 组投放化学浓度及编号说明

浓度编号	Sr-90与 Sr 组	Co-60与 Co 组	Sr 与 Co 组	
	总 Sr 浓度 (mol/L)	总 Co 浓度 (mol/L)	总 Sr 浓度 (mol/L)	总 Co 浓度 (mol/L)
B1	2.50E-05	2.50E-05	2.50E-05	2.50E-05
B2	2.50E-04	2.50E-04	2.50E-04	2.50E-04
B3	1.25E-03	1.25E-03	1.25E-03	1.25E-03
B4	2.50E-03	2.50E-03	2.50E-03	2.50E-03
B5	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03

表 2.3.2-3 B 组每个试样各核素投放量及化学形态

核素	Co	⁹⁰ Sr
化学浓度(mol/L)	2.5×10 ⁻⁵ *	3.0×10 ⁻⁹
投放量(Bq)	1.1×10 ⁴	1.4×10 ⁴
化学形态	Co ²⁺	Sr ²⁺

*注：Co 的化学浓度，⁶⁰Co: ⁵⁹Co 按 1:10000 计算

表 2.3.2-4 吸附实验条件及测量方法

实验条件	水	土	储存	实验温度
	蒸馏水	采购的矿物	室温	室温
测量方法	⁶⁰ Co 1332keV 1170keV	¹³⁷ Cs	¹⁰⁶ Ru	⁹⁰ Sr
		662keV	622keV	
	γ 谱			放化分析（液闪）/韧致辐射

表 2.3.2-5 模拟土壤与现场土壤比较

核素	咸宁库底泥 <i>K_d</i> (L/kg)	模拟土 MN <i>K_d</i> (L/kg)
⁶⁰ Co	1.3E+02	5.2E+03
⁹⁰ Sr	1.1E+02	2.5E+02
¹⁰⁶ Ru	4.8E+03	9.1E+02
¹³⁷ Cs	8.0E+03	5.7E+03

表 2.3.2-6 不同矿物对 ^{137}Cs 的吸附分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差(L/kg)
长白山 高岭石	GL1Cs-A1	1.45E+04	1.46E+07	1.0E+03	1.0E+03	2.2E+01
	GL1Cs-A2	1.34E+04	1.39E+07	1.0E+03		
	GL1Cs-A3	1.40E+04	1.47E+07	1.0E+03		
山西 高岭石	GL2Cs-A1	1.00E+04	1.46E+07	1.5E+03	1.4E+03	5.8E+01
	GL2Cs-A2	1.07E+04	1.44E+07	1.3E+03		
	GL2Cs-A3	1.02E+04	1.47E+07	1.4E+03		
蒙脱石	MTCs-A1	1.24E+04	1.40E+07	1.1E+03	1.2E+03	4.5E+01
	MTCs-A2	1.16E+04	1.38E+07	1.2E+03		
	MTCs-A3	1.14E+04	1.39E+07	1.2E+03		
伊利石	YLCs-A1	8.35E+02	1.44E+07	1.7E+04	1.7E+04	5.5E+02
	YLCs-A2	8.14E+02	1.45E+07	1.8E+04		
	YLCs-A3	8.74E+02	1.46E+07	1.7E+04		
模拟土	MNCs-A1	2.65E+03	1.43E+07	5.4E+03	5.7E+03	2.6E+02
	MNCs-A2	2.55E+03	1.44E+07	5.6E+03		
	MNCs-A3	2.39E+03	1.42E+07	5.9E+03		

表 2.3.2-7 不同矿物对 ^{60}Co 的吸附分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差 (L/kg)
长白山高 岭石	GL1Co-A1	1.02E+03	1.97E+07	1.9E+04	2.0E+04	8.4E+02
	GL1Co-A2	9.31E+02	1.94E+07	2.1E+04		
	GL1Co-A3	1.06E+03	2.10E+07	2.0E+04		
山西 高岭石	GL2Co-A1	1.03E+03	2.07E+07	2.0E+04	2.0E+04	1.1E+03
	GL2Co-A2	9.69E+02	2.07E+07	2.1E+04		
	GL2Co-A3	1.02E+03	1.95E+07	1.9E+04		
蒙脱石	MTCo-A1	1.09E+03	2.07E+07	1.9E+04	1.9E+04	1.8E+03
	MTCo-A2	8.98E+02	1.87E+07	2.1E+04		
	MTCo-A3	1.07E+03	1.83E+07	1.7E+04		
伊利石	YLCo-A1	8.36E+02	1.99E+07	2.4E+04	2.3E+04	3.4E+03
	YLCo-A2	7.31E+02	1.92E+07	2.6E+04		
	YLCo-A3	9.61E+02	1.89E+07	2.0E+04		
模拟土	MNCo-A1	3.67E+03	1.92E+07	5.2E+03	5.2E+03	4.2E+01
	MNCo-A2	3.71E+03	1.94E+07	5.2E+03		
	MNCo-A3	3.82E+03	1.97E+07	5.2E+03		

表 2.3.2-8 不同矿物对 ^{90}Sr 的吸附分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差 (L/kg)
长白山 高岭石	GL1Sr-A1	3.47E+05	1.54E+07	4.4E+01	5.0E+01	6.5E+00
	GL1Sr-A2	3.27E+05	1.87E+07	5.7E+01		
	GL1Sr-A3	3.19E+05	1.56E+07	4.9E+01		
山西 高岭石	GL2Sr-A1	1.62E+05	2.14E+07	1.3E+02	1.2E+02	1.3E+01
	GL2Sr-A2	1.90E+05	2.14E+07	1.1E+02		
	GL2Sr-A3	1.91E+05	2.08E+07	1.1E+02		
蒙脱石	MTSr-A1	1.94E+04	2.43E+07	1.2E+03	1.2E+03	1.4E+02
	MTSr-A2	1.77E+04	2.41E+07	1.4E+03		
	MTSr-A3	1.95E+04	2.10E+07	1.1E+03		
伊利石	YLSr-A1	9.01E+04	2.07E+07	2.3E+02	2.4E+02	2.3E+01
	YLSr-A2	9.32E+04	2.09E+07	2.2E+02		
	YLSr-A3	9.26E+04	2.46E+07	2.7E+02		
模拟土	MNSr-A1	8.70E+04	2.43E+07	2.8E+02	2.5E+02	2.4E+01
	MNSr-A2	8.42E+04	2.02E+07	2.4E+02		
	MNSr-A3	8.47E+04	1.99E+07	2.4E+02		

表 2.3.2-9 不同矿物对 ^{106}Ru 的吸附分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差 (L/kg)
长白山 高岭石	GL1Ru-A1	5.19E+04	2.92E+07	5.6E+02	4.8E+02	7.1E+01
	GL1Ru-A2	6.48E+04	2.91E+07	4.5E+02		
	GL1Ru-A3	6.24E+04	2.69E+07	4.3E+02		
山西 高岭石	GL2Ru-A1	2.70E+04	3.07E+07	1.1E+03	1.0E+03	9.6E+01
	GL2Ru-A2	3.05E+04	2.98E+07	9.8E+02		
	GL2Ru-A3	3.01E+04	2.90E+07	9.7E+02		
蒙脱石	MTRu-A1	2.01E+05	2.86E+07	1.4E+02	1.5E+02	1.9E+01
	MTRu-A2	2.14E+05	2.76E+07	1.3E+02		
	MTRu-A3	2.05E+05	3.42E+07	1.7E+02		
伊利石	YLRu-A1	2.96E+04	2.97E+07	1.0E+03	1.0E+03	2.5E+01
	YLRu-A2	2.64E+04	2.76E+07	1.0E+03		
	YLRu-A3	2.95E+04	2.98E+07	1.0E+03		
模拟土	MNRu-A1	3.26E+04	2.93E+07	9.0E+02	9.1E+02	6.5E+01
	MNRu-A2	3.21E+04	2.76E+07	8.6E+02		
	MNRu-A3	3.21E+04	3.16E+07	9.9E+02		

表 2.3.2-10 不同矿物对 ^{137}Cs 的解吸分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差(L/kg)
长白山 高岭石	GL1Cs-A1	3.44E+03	1.48E+07	4.3E+03	4.3E+03	6.2E+01
	GL1Cs-A2	3.37E+03	1.45E+07	4.3E+03		
	GL1Cs-A3	3.34E+03	1.47E+07	4.4E+03		
山西 高岭石	GL2Cs-A1	2.56E+03	1.48E+07	5.8E+03	6.3E+03	4.4E+02
	GL2Cs-A2	2.35E+03	1.53E+07	6.5E+03		
	GL2Cs-A3	2.35E+03	1.54E+07	6.6E+03		
蒙脱石	MTCs-A1	3.36E+03	1.43E+07	4.3E+03	4.3E+03	9.5E+01
	MTCs-A2	3.20E+03	1.40E+07	4.4E+03		
	MTCs-A3	3.37E+03	1.41E+07	4.2E+03		
伊利石	YLCs-A1	7.67E+02	1.51E+07	2.0E+04	1.8E+04	1.0E+03
	YLCs-A2	8.31E+02	1.50E+07	1.8E+04		
	YLCs-A3	8.42E+02	1.50E+07	1.8E+04		
模拟土	MNCs-A1	4.43E+02	1.51E+07	3.4E+04	3.5E+04	1.8E+03
	MNCs-A2	4.51E+02	1.49E+07	3.3E+04		
	MNCs-A3	4.00E+02	1.47E+07	3.7E+04		

表 2.3.2-11 不同矿物对 ^{60}Co 的解吸分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差 (L/kg)
长白山高 岭石	GL1Co-A1	7.89E+02	1.90E+07	2.4E+04	2.1E+04	2.9E+03
	GL1Co-A2	1.02E+03	1.94E+07	1.9E+04		
	GL1Co-A3	1.03E+03	1.98E+07	1.9E+04		
山西 高岭石	GL2Co-A1	5.73E+02	2.05E+07	3.6E+04	3.4E+04	1.7E+03
	GL2Co-A2	6.19E+02	2.03E+07	3.3E+04		
	GL2Co-A3	6.15E+02	2.01E+07	3.3E+04		
蒙脱石	MTCo-A1	8.80E+02	2.00E+07	2.3E+04	2.2E+04	1.3E+03
	MTCo-A2	7.83E+02	1.82E+07	2.3E+04		
	MTCo-A3	8.95E+02	1.85E+07	2.1E+04		
伊利石	YLCo-A1	6.28E+02	1.95E+07	3.1E+04	2.7E+04	3.4E+03
	YLCo-A2	7.89E+02	1.95E+07	2.5E+04		
	YLCo-A3	7.68E+02	1.99E+07	2.6E+04		
模拟土	MNCo-A1	1.16E+03	1.92E+07	1.7E+04	2.0E+04	3.6E+03
	MNCo-A2	1.05E+03	1.94E+07	1.9E+04		
	MNCo-A3	8.17E+02	1.92E+07	2.4E+04		

表 2.3.2-12 不同矿物对 ^{90}Sr 的解吸分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差 (L/kg)
长白山 高岭石	GL1Sr-A1	1.57E+05	1.86E+07	1.2E+02	1.2E+02	1.3E+01
	GL1Sr-A2	1.40E+05	1.87E+07	1.3E+02		
	GL1Sr-A3	1.72E+05	1.86E+07	1.1E+02		
山西 高岭石	GL2Sr-A1	6.19E+04	2.02E+07	3.3E+02	3.1E+02	1.7E+01
	GL2Sr-A2	6.86E+04	2.01E+07	2.9E+02		
	GL2Sr-A3	6.41E+04	1.98E+07	3.1E+02		
蒙脱石	MTSr-A1	8.09E+03	2.48E+07	3.1E+03	3.0E+03	3.0E+02
	MTSr-A2	7.64E+03	2.50E+07	3.3E+03		
	MTSr-A3	7.79E+03	2.09E+07	2.7E+03		
伊利石	YLSr-A1	1.94E+04	2.06E+07	1.1E+03	1.1E+03	1.1E+02
	YLSr-A2	2.04E+04	2.04E+07	1.0E+03		
	YLSr-A3	2.01E+04	2.44E+07	1.2E+03		
模拟土	MNSr-A1	3.28E+04	1.92E+07	5.9E+02	5.6E+02	2.1E+01
	MNSr-A2	3.59E+04	1.95E+07	5.4E+02		
	MNSr-A3	3.43E+04	1.93E+07	5.6E+02		

表 2.3.2-13 不同矿物对 ^{106}Ru 的解吸分配系数 K_d

矿物	试管编号	水比活度 (Bq/L)	土比活度 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	均值(L/kg)	偏差 (L/kg)
长白山 高岭石	GL1Ru-A1	1.46E+04	2.56E+07	1.8E+03	1.6E+03	1.3E+02
	GL1Ru-A2	1.62E+04	2.48E+07	1.5E+03		
	GL1Ru-A3	1.63E+04	2.52E+07	1.5E+03		
山西 高岭石	GL2Ru-A1	3.58E+03	2.54E+07	7.1E+03	7.0E+03	1.2E+02
	GL2Ru-A2	3.62E+03	2.49E+07	6.9E+03		
	GL2Ru-A3	3.75E+03	2.59E+07	6.9E+03		
蒙脱石	MTRu-A1	1.08E+05	2.37E+07	2.2E+02	2.3E+02	1.7E+01
	MTRu-A2	1.07E+05	2.40E+07	2.2E+02		
	MTRu-A3	1.10E+05	2.76E+07	2.5E+02		
伊利石	YLRu-A1	1.34E+04	2.61E+07	1.9E+03	1.8E+03	1.6E+02
	YLRu-A2	1.42E+04	2.34E+07	1.6E+03		
	YLRu-A3	1.54E+04	2.60E+07	1.7E+03		
模拟土	MNRu-A1	1.47E+04	2.56E+07	1.7E+03	1.7E+03	6.5E+01
	MNRu-A2	1.41E+04	2.52E+07	1.8E+03		
	MNRu-A3	1.58E+04	2.61E+07	1.7E+03		

表 2.3.2-14 B 组矿物对 Sr、⁹⁰Sr 吸附实验结果

编号	Sr 水 (Bq/L)	Sr 土 (Bq/kg)	Sr- <i>K_d</i> (L/kg)	<i>K_d</i> 均值 (L/kg)	<i>K_d</i> 偏差 (L/kg)	校后 <i>K_d</i> (L/kg)	校后 <i>K_d</i> 均值 (L/kg)	校后 <i>K_d</i> 偏差 (L/kg)
GL1Sr-B11	3.48E+05	1.07E+07	3.1E+01	3.1E+01	1.9E-01	5.1E+01	5.1E+01	3.1E-01
GL1Sr-B12	3.45E+05	1.07E+07	3.1E+01			5.1E+01		
GL1Sr-B13	3.56E+05	1.09E+07	3.1E+01			5.2E+01		
GL1Sr-B21	3.86E+05	9.88E+06	2.6E+01	2.4E+01	1.1E+00	4.7E+01	4.5E+01	2.1E+00
GL1Sr-B22	3.84E+05	9.21E+06	2.4E+01			4.4E+01		
GL1Sr-B23	4.04E+05	9.43E+06	2.3E+01			4.5E+01		
GL1Sr-B31	6.29E+05	7.13E+06	1.1E+01	1.1E+01	4.3E-01	3.4E+01	3.3E+01	1.3E+00
GL1Sr-B32	6.33E+05	6.93E+06	1.1E+01			3.3E+01		
GL1Sr-B33	6.78E+05	7.11E+06	1.0E+01			3.4E+01		
GL1Sr-B41	8.19E+05	5.87E+06	7.2E+00	7.2E+00	5.0E-01	2.8E+01	2.8E+01	2.0E+00
GL1Sr-B42	7.79E+05	5.95E+06	7.6E+00			2.8E+01		
GL1Sr-B43	8.81E+05	5.86E+06	6.6E+00			2.8E+01		
GL1Sr-B51	1.20E+06	3.87E+06	3.2E+00	3.1E+00	1.4E-01	1.8E+01	1.8E+01	8.3E-01
GL1Sr-B52	1.23E+06	3.76E+06	3.1E+00			1.8E+01		
GL1Sr-B53	1.21E+06	3.57E+06	3.0E+00			1.7E+01		
GL2Sr-B11	2.37E+05	1.20E+07	5.1E+01	5.2E+01	2.4E+00	1.0E+02	1.0E+02	4.8E+00
GL2Sr-B12	2.18E+05	1.20E+07	5.5E+01			1.0E+02		
GL2Sr-B13	2.40E+05	1.21E+07	5.0E+01			1.1E+02		
GL2Sr-B21	2.68E+05	1.18E+07	4.4E+01	4.3E+01	5.9E-01	1.0E+02	1.0E+02	1.4E+00
GL2Sr-B22	2.71E+05	1.18E+07	4.3E+01			1.0E+02		
GL2Sr-B23	2.82E+05	1.20E+07	4.3E+01			1.0E+02		
GL2Sr-B31	4.55E+05	9.02E+06	2.0E+01	2.0E+01	7.0E-01	7.8E+01	7.8E+01	2.8E+00
GL2Sr-B32	4.39E+05	8.98E+06	2.0E+01			7.8E+01		
GL2Sr-B33	4.66E+05	8.89E+06	1.9E+01			7.7E+01		
GL2Sr-B41	6.76E+05	7.45E+06	1.1E+01	9.8E+00	1.1E+00	6.5E+01	5.9E+01	6.3E+00
GL2Sr-B42	7.21E+05	6.49E+06	9.0E+00			5.6E+01		
GL2Sr-B43	6.85E+05	6.49E+06	9.5E+00			5.6E+01		
GL2Sr-B51	9.25E+05	5.25E+06	5.7E+00	5.6E+00	1.8E-01	4.6E+01	4.5E+01	1.4E+00
GL2Sr-B52	9.25E+05	5.26E+06	5.7E+00			4.6E+01		
GL2Sr-B53	9.38E+05	5.05E+06	5.4E+00			4.4E+01		
MTSr-B11	2.25E+04	1.40E+07	6.2E+02	6.2E+02	1.7E+01	1.2E+03	1.2E+03	3.2E+01
MTSr-B12	2.25E+04	1.42E+07	6.3E+02			1.2E+03		
MTSr-B13	2.32E+04	1.39E+07	6.0E+02			1.2E+03		
MTSr-B21	3.16E+04	1.45E+07	4.6E+02	4.4E+02	1.6E+01	1.2E+03	1.2E+03	4.4E+01
MTSr-B22	3.23E+04	1.41E+07	4.4E+02			1.2E+03		
MTSr-B23	3.28E+04	1.40E+07	4.3E+02			1.2E+03		

(续) 表 2.3.2-14 B 组矿物对 Sr、⁹⁰Sr 吸附实验结果

编号	Sr 水 (Bq/L)	Sr 土 (Bq/kg)	Sr- <i>Kd</i> (L/kg)	<i>Kd</i> 均值 (L/kg)	<i>Kd</i> 偏差 (L/kg)	校后 <i>Kd</i> (L/kg)	校后 <i>Kd</i> 均值 (L/kg)	校后 <i>Kd</i> 偏差 (L/kg)
MTSr-B31	4.49E+04	1.29E+07	2.9E+02	3.1E+02	2.1E+01	1.1E+03	1.1E+03	7.7E+01
MTSr-B32	4.34E+04	1.43E+07	3.3E+02			1.2E+03		
MTSr-B33	4.61E+04	1.41E+07	3.0E+02			1.2E+03		
MTSr-B41	8.69E+04	1.34E+07	1.5E+02	1.6E+02	2.0E+01	1.1E+03	1.1E+03	1.4E+02
MTSr-B42	8.67E+04	1.20E+07	1.4E+02			1.0E+03		
MTSr-B43	7.75E+04	1.38E+07	1.8E+02			1.1E+03		
MTSr-B51	1.70E+05	1.31E+07	7.7E+01	7.6E+01	1.4E+00	1.1E+03	1.1E+03	2.0E+01
MTSr-B52	1.73E+05	1.28E+07	7.4E+01			1.1E+03		
MTSr-B53	1.71E+05	1.30E+07	7.6E+01			1.1E+03		
YLSr-B11	9.11E+04	1.25E+07	1.4E+02	1.4E+02	1.1E+01	2.1E+02	2.2E+02	1.8E+01
YLSr-B12	9.03E+04	1.26E+07	1.4E+02			2.1E+02		
YLSr-B13	9.02E+04	1.42E+07	1.6E+02			2.4E+02		
YLSr-B21	1.36E+05	1.39E+07	1.0E+02	9.9E+01	3.4E+00	2.4E+02	2.4E+02	8.2E+00
YLSr-B22	1.42E+05	1.40E+07	9.9E+01			2.4E+02		
YLSr-B23	1.45E+05	1.39E+07	9.6E+01			2.4E+02		
YLSr-B31	2.21E+05	1.24E+07	5.6E+01	5.7E+01	2.6E+00	2.1E+02	2.2E+02	1.0E+01
YLSr-B32	2.18E+05	1.30E+07	6.0E+01			2.2E+02		
YLSr-B33	2.28E+05	1.24E+07	5.4E+01			2.1E+02		
YLSr-B41	3.75E+05	1.13E+07	3.0E+01	3.1E+01	7.1E-01	1.9E+02	2.0E+02	4.5E+00
YLSr-B42	3.68E+05	1.17E+07	3.2E+01			2.0E+02		
YLSr-B43	3.70E+05	1.15E+07	3.1E+01			2.0E+02		
YLSr-B51	6.90E+05	8.82E+06	1.3E+01	1.3E+01	3.8E-01	1.5E+02	1.5E+02	4.6E+00
YLSr-B52	6.75E+05	8.71E+06	1.3E+01			1.5E+02		
YLSr-B53	7.36E+05	8.98E+06	1.2E+01			1.5E+02		
MNSr-B11	8.48E+04	1.38E+07	1.6E+02	1.6E+02	5.0E+00	2.5E+02	2.5E+02	7.9E+00
MNSr-B12	8.40E+04	1.36E+07	1.6E+02			2.5E+02		
MNSr-B13	9.02E+04	1.39E+07	1.5E+02			2.6E+02		
MNSr-B21	1.16E+05	1.43E+07	1.2E+02	1.1E+02	7.5E+00	2.6E+02	2.6E+02	1.7E+01
MNSr-B22	1.27E+05	1.41E+07	1.1E+02			2.6E+02		
MNSr-B23	1.28E+05	1.41E+07	1.1E+02			2.6E+02		
MNSr-B31	1.60E+05	1.19E+07	7.4E+01	8.0E+01	4.5E+00	2.2E+02	2.4E+02	1.3E+01
MNSr-B32	1.66E+05	1.37E+07	8.2E+01			2.5E+02		
MNSr-B33	1.61E+05	1.31E+07	8.2E+01			2.4E+02		
MNSr-B41	2.59E+05	1.41E+07	5.4E+01	5.2E+01	2.1E+00	2.6E+02	2.5E+02	1.0E+01
MNSr-B42	2.69E+05	1.35E+07	5.0E+01			2.5E+02		
MNSr-B43	2.63E+05	1.35E+07	5.1E+01			2.5E+02		
MNSr-B51	4.28E+05	1.09E+07	2.6E+01	2.1E+01	3.7E+00	2.0E+02	1.9E+02	3.3E+01
MNSr-B52	5.11E+05	9.35E+06	1.8E+01			1.7E+02		
MNSr-B53	5.27E+05	1.08E+07	2.0E+01			2.0E+02		

表 2.3.2-15 B 组矿物对 Co、⁶⁰Co 吸附实验结果

编号	Co 水 (Bq/L)	Co 土 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	K_d 均值 (L/kg)	K_d 偏差 (L/kg)	校后 K_d (L/kg)	校后 K_d 均值 (L/kg)	校后 K_d 偏差 (L/kg)
GL1Co-B11	5.38E+02	1.10E+07	2.0E+04	2.0E+04	6.1E+02	2.0E+04	1.9E+04	5.6E+02
GL1Co-B12	4.58E+02	9.67E+06	2.1E+04			1.7E+04		
GL1Co-B13	5.34E+02	1.06E+07	2.0E+04			1.9E+04		
GL1Co-B21	2.12E+03	1.08E+07	5.1E+03	5.1E+03	1.1E+02	2.0E+04	2.0E+04	4.0E+02
GL1Co-B22	2.16E+03	1.08E+07	5.0E+03			2.0E+04		
GL1Co-B23	2.07E+03	1.08E+07	5.2E+03			2.0E+04		
GL1Co-B31	9.03E+03	1.09E+07	1.2E+03	1.2E+03	7.0E+01	2.0E+04	1.9E+04	1.1E+03
GL1Co-B32	8.12E+03	1.06E+07	1.3E+03			1.9E+04		
GL1Co-B33	9.08E+03	1.06E+07	1.2E+03			1.9E+04		
GL1Co-B41	6.41E+04	1.04E+07	1.6E+02	1.6E+02	1.5E+00	1.9E+04	1.9E+04	1.8E+02
GL1Co-B42	6.34E+04	1.03E+07	1.6E+02			1.9E+04		
GL1Co-B43	6.31E+04	1.04E+07	1.6E+02			1.9E+04		
GL1Co-B51	2.12E+05	8.64E+06	4.1E+01	4.1E+01	8.1E-01	1.6E+04	1.6E+04	3.1E+02
GL1Co-B52	2.11E+05	8.57E+06	4.1E+01			1.5E+04		
GL1Co-B53	2.05E+05	8.61E+06	4.2E+01			1.6E+04		
GL2Co-B11	6.29E+02	1.15E+07	1.8E+04	1.8E+04	7.3E+02	2.1E+04	2.1E+04	8.4E+02
GL2Co-B12	6.87E+02	1.17E+07	1.7E+04			2.1E+04		
GL2Co-B13	6.11E+02	1.11E+07	1.8E+04			2.0E+04		
GL2Co-B21	3.00E+03	1.10E+07	3.7E+03	3.7E+03	9.2E+01	2.0E+04	2.0E+04	4.9E+02
GL2Co-B22	2.96E+03	1.10E+07	3.7E+03			2.0E+04		
GL2Co-B23	2.86E+03	1.10E+07	3.8E+03			2.0E+04		
GL2Co-B31	8.81E+04	9.51E+06	1.1E+02	1.1E+02	2.6E+00	1.7E+04	1.8E+04	4.2E+02
GL2Co-B32	8.98E+04	9.85E+06	1.1E+02			1.8E+04		
GL2Co-B33	8.79E+04	9.94E+06	1.1E+02			1.8E+04		
GL2Co-B41	2.89E+05	7.92E+06	2.7E+01	2.7E+01	6.3E-01	1.4E+04	1.5E+04	3.4E+02
GL2Co-B42	2.90E+05	8.14E+06	2.8E+01			1.5E+04		
GL2Co-B43	3.05E+05	8.17E+06	2.7E+01			1.5E+04		
GL2Co-B51	5.59E+05	4.78E+06	8.5E+00	8.8E+00	3.8E-01	8.6E+03	8.8E+03	3.8E+02
GL2Co-B52	5.41E+05	5.00E+06	9.3E+00			9.0E+03		
GL2Co-B53	5.64E+05	4.87E+06	8.6E+00			8.8E+03		
MTCO-B11	4.69E+02	1.05E+07	2.2E+04	2.0E+04	2.3E+03	1.9E+04	1.8E+04	2.1E+03
MTCO-B12	5.51E+02	1.11E+07	2.0E+04			2.0E+04		
MTCO-B13	5.30E+02	9.40E+06	1.8E+04			1.7E+04		
MTCO-B21	1.60E+03	1.08E+07	6.8E+03	7.0E+03	1.9E+02	1.9E+04	1.9E+04	5.4E+02
MTCO-B22	1.52E+03	1.08E+07	7.1E+03			1.9E+04		
MTCO-B23	1.55E+03	1.09E+07	7.0E+03			1.9E+04		
MTCO-B31	2.65E+03	1.08E+07	4.1E+03	3.7E+03	3.6E+02	1.9E+04	1.9E+04	1.9E+03
MTCO-B32	3.21E+03	1.09E+07	3.4E+03			2.0E+04		
MTCO-B33	3.04E+03	1.08E+07	3.6E+03			1.9E+04		

(续) 表 2.3.2-15 B 组矿物对 Co、⁶⁰Co 吸附实验结果

编号	Co 水 (Bq/L)	Co 土 (Bq/kg)	K_d (L/kg)	K_d 均值 (L/kg)	K_d 偏差 (L/kg)	校后 K_d (L/kg)	校后 K_d 均值 (L/kg)	校后 K_d 偏差 (L/kg)
MTCO-B41	7.85E+03	1.07E+07	1.4E+03	1.3E+03	7.1E+01	1.9E+04	1.9E+04	1.1E+03
MTCO-B42	8.63E+03	1.07E+07	1.2E+03			1.9E+04		
MTCO-B43	8.50E+03	1.06E+07	1.2E+03			1.9E+04		
MTCO-B51	3.61E+04	1.03E+07	2.9E+02	2.9E+02	1.1E+01	1.8E+04	1.8E+04	7.0E+02
MTCO-B52	3.40E+04	1.03E+07	3.0E+02			1.8E+04		
MTCO-B53	3.66E+04	1.04E+07	2.8E+02			1.8E+04		
YLCo-B11	3.80E+02	1.10E+07	2.9E+04	2.7E+04	2.0E+03	2.4E+04	2.4E+04	1.8E+03
YLCo-B12	4.18E+02	1.12E+07	2.7E+04			2.4E+04		
YLCo-B13	4.56E+02	1.14E+07	2.5E+04			2.5E+04		
YLCo-B21	3.15E+03	1.07E+07	3.4E+03	3.3E+03	1.9E+02	2.3E+04	2.3E+04	1.3E+03
YLCo-B22	3.49E+03	1.08E+07	3.1E+03			2.3E+04		
YLCo-B23	3.18E+03	1.08E+07	3.4E+03			2.3E+04		
YLCo-B31	7.84E+03	1.09E+07	1.4E+03	1.3E+03	6.4E+01	2.3E+04	2.3E+04	1.1E+03
YLCo-B32	8.51E+03	1.08E+07	1.3E+03			2.3E+04		
YLCo-B33	7.63E+03	1.05E+07	1.4E+03			2.3E+04		
YLCo-B41	3.93E+04	1.08E+07	2.7E+02	2.7E+02	8.6E+00	2.3E+04	2.3E+04	7.4E+02
YLCo-B42	4.16E+04	1.07E+07	2.6E+02			2.3E+04		
YLCo-B43	3.88E+04	1.05E+07	2.7E+02			2.3E+04		
YLCo-B51	1.40E+05	9.11E+06	6.5E+01	7.5E+01	8.3E+00	2.0E+04	2.1E+04	2.3E+03
YLCo-B52	1.29E+05	1.00E+07	7.7E+01			2.2E+04		
YLCo-B53	1.19E+05	9.69E+06	8.1E+01			2.1E+04		
MNCo-B11	2.42E+03	1.12E+07	4.6E+03	4.9E+03	2.5E+02	5.5E+03	5.5E+03	2.7E+02
MNCo-B12	2.33E+03	1.17E+07	5.0E+03			5.7E+03		
MNCo-B13	2.14E+03	1.09E+07	5.1E+03			5.3E+03		
MNCo-B21	3.40E+03	1.09E+07	3.2E+03	3.1E+03	1.2E+02	5.3E+03	5.3E+03	2.0E+02
MNCo-B22	3.62E+03	1.10E+07	3.0E+03			5.3E+03		
MNCo-B23	3.62E+03	1.09E+07	3.0E+03			5.3E+03		
MNCo-B31	1.03E+04	1.09E+07	1.1E+03	1.1E+03	1.8E+01	5.3E+03	5.3E+03	8.8E+01
MNCo-B32	1.04E+04	1.08E+07	1.0E+03			5.3E+03		
MNCo-B33	9.94E+03	1.07E+07	1.1E+03			5.2E+03		
MNCo-B41	3.87E+04	1.06E+07	3.0E+02	2.9E+02	1.5E+01	5.6E+03	5.4E+03	2.7E+02
MNCo-B42	3.78E+04	1.02E+07	2.7E+02			5.0E+03		
MNCo-B43	3.98E+04	1.17E+07	2.9E+02			5.7E+03		
MNCo-B51	9.64E+04	1.00E+07	1.0E+02	1.1E+02	4.6E+00	4.9E+03	4.9E+03	2.1E+02
MNCo-B52	9.12E+04	1.00E+07	1.1E+02			4.9E+03		
MNCo-B53	8.81E+04	9.97E+06	1.1E+02			4.9E+03		

表 2.3.2-16 B 组矿物 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果-Sr 分配系数

编号	Sr 水 (Bq/L)	Sr 土 (Bq/kg)	Sr-Kd (L/kg)	Kd 均值 (L/kg)	Kd 偏差 (L/kg)	校后 Kd (L/kg)	校后 Kd 均值 (L/kg)	校后 Kd 偏差 (L/kg)
GL1Co-Sr-11	2.75E+05	-	4.1E+01	3.9E+01	1.5E+00	5.3E+01	5.3E+01	2.0E+00
GL1Co-Sr-12	2.91E+05	-	3.8E+01			5.3E+01		
GL1Co-Sr-13	2.86E+05	-	3.9E+01			5.3E+01		
GL1Co-Sr-21	6.37E+05	-	1.2E+01	1.1E+01	4.3E-01	3.6E+01	3.6E+01	1.3E+00
GL1Co-Sr-22	6.61E+05	-	1.1E+01			3.5E+01		
GL1Co-Sr-23	6.58E+05	-	1.1E+01			3.5E+01		
GL1Co-Sr-31	8.03E+05	-	7.4E+00	7.3E+00	1.1E-01	2.8E+01	2.8E+01	4.1E-01
GL1Co-Sr-32	8.13E+05	-	7.2E+00			2.8E+01		
GL1Co-Sr-33	8.06E+05	-	7.4E+00			2.8E+01		
GL1Co-Sr-41	8.13E+05	-	7.2E+00	7.2E+00	2.2E-01	2.8E+01	2.8E+01	8.7E-01
GL1Co-Sr-42	8.22E+05	-	7.0E+00			2.7E+01		
GL1Co-Sr-43	8.01E+05	-	7.5E+00			2.8E+01		
GL1Co-Sr-51	1.10E+06	-	2.8E+00	3.2E+00	4.1E-01	1.4E+01	1.6E+01	2.1E+00
GL1Co-Sr-52	1.07E+06	-	3.1E+00			1.6E+01		
GL1Co-Sr-53	1.03E+06	-	3.6E+00			1.8E+01		
GL2Co-Sr-11	1.38E+05	-	9.1E+01	9.1E+01	5.5E+00	1.1E+02	1.1E+02	6.7E+00
GL2Co-Sr-12	1.32E+05	-	9.6E+01			1.1E+02		
GL2Co-Sr-13	1.47E+05	-	8.5E+01			1.1E+02		
GL2Co-Sr-21	3.20E+05	-	3.4E+01	3.3E+01	1.6E+00	9.4E+01	9.3E+01	4.6E+00
GL2Co-Sr-22	3.42E+05	-	3.1E+01			9.2E+01		
GL2Co-Sr-23	3.19E+05	-	3.4E+01			9.4E+01		
GL2Co-Sr-31	6.31E+05	-	1.2E+01	1.1E+01	1.1E+00	6.7E+01	6.3E+01	6.7E+00
GL2Co-Sr-32	6.77E+05	-	1.1E+01			6.3E+01		
GL2Co-Sr-33	7.03E+05	-	9.9E+00			6.1E+01		
GL2Co-Sr-41	6.26E+05	-	1.2E+01	1.2E+01	1.1E+00	6.7E+01	6.5E+01	6.2E+00
GL2Co-Sr-42	6.32E+05	-	1.2E+01			6.7E+01		
GL2Co-Sr-43	6.88E+05	-	1.0E+01			6.2E+01		
GL2Co-Sr-51	9.41E+05	-	4.9E+00	4.7E+00	3.5E-01	4.0E+01	3.9E+01	2.9E+00
GL2Co-Sr-52	9.32E+05	-	5.0E+00			4.1E+01		
GL2Co-Sr-53	9.76E+05	-	4.3E+00			3.7E+01		
MTCO-Sr-11	1.14E+04	-	1.2E+03	1.2E+03	5.5E+01	1.2E+03	1.2E+03	5.2E+01
MTCO-Sr-12	1.08E+04	-	1.3E+03			1.2E+03		
MTCO-Sr-13	1.18E+04	-	1.2E+03			1.2E+03		

(续) 表 2.3.2-16 B 组矿物 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果-Sr 分配系数

编号	Sr 水 (Bq/L)	Sr 土 (Bq/kg)	Sr-K _d (L/kg)	K _d 均值 (L/kg)	K _d 偏差 (L/kg)	校后 K _d (L/kg)	校后 K _d 均值 (L/kg)	校后 K _d 偏差 (L/kg)
MTCO-Sr-21	2.35E+04	-	5.8E+02	4.9E+02	8.5E+01	1.1E+03	1.1E+03	2.0E+02
MTCO-Sr-22	3.08E+04	-	4.4E+02			1.1E+03		
MTCO-Sr-23	3.16E+04	-	4.3E+02			1.1E+03		
MTCO-Sr-31	8.76E+04	-	1.5E+02	1.5E+02	1.0E+00	1.1E+03	1.1E+03	7.6E+00
MTCO-Sr-32	8.69E+04	-	1.5E+02			1.1E+03		
MTCO-Sr-33	8.81E+04	-	1.5E+02			1.1E+03		
MTCO-Sr-41	1.32E+05	-	9.6E+01	9.6E+01	1.0E+00	1.1E+03	1.1E+03	1.1E+01
MTCO-Sr-42	1.32E+05	-	9.6E+01			1.1E+03		
MTCO-Sr-43	1.30E+05	-	9.8E+01			1.1E+03		
MTCO-Sr-51	2.45E+05	-	4.7E+01	4.2E+01	4.7E+00	9.6E+02	9.4E+02	1.1E+02
MTCO-Sr-52	2.94E+05	-	3.8E+01			9.2E+02		
MTCO-Sr-53	2.69E+05	-	4.2E+01			9.4E+02		
YLCo-Sr-11	5.94E+04	-	2.3E+02	2.1E+02	1.6E+01	2.3E+02	2.3E+02	1.7E+01
YLCo-Sr-12	6.58E+04	-	2.0E+02			2.3E+02		
YLCo-Sr-13	6.82E+04	-	2.0E+02			2.3E+02		
YLCo-Sr-21	1.79E+05	-	6.8E+01	6.7E+01	1.8E+00	2.1E+02	2.1E+02	5.7E+00
YLCo-Sr-22	1.78E+05	-	6.9E+01			2.1E+02		
YLCo-Sr-23	1.86E+05	-	6.5E+01			2.1E+02		
YLCo-Sr-31	4.10E+05	-	2.4E+01	2.4E+01	1.5E+00	1.7E+02	1.7E+02	1.1E+01
YLCo-Sr-32	3.90E+05	-	2.6E+01			1.7E+02		
YLCo-Sr-33	4.26E+05	-	2.3E+01			1.7E+02		
YLCo-Sr-41	4.09E+05	-	2.4E+01	2.2E+01	2.1E+00	1.7E+02	1.6E+02	1.6E+01
YLCo-Sr-42	4.36E+05	-	2.2E+01			1.6E+02		
YLCo-Sr-43	4.66E+05	-	2.0E+01			1.6E+02		
YLCo-Sr-51	7.79E+05	-	8.0E+00	8.9E+00	1.1E+00	1.1E+02	1.1E+02	1.4E+01
YLCo-Sr-52	7.57E+05	-	8.5E+00			1.1E+02		
YLCo-Sr-53	6.95E+05	-	1.0E+01			1.2E+02		
MNCo-Sr-11	5.87E+04	-	2.3E+02	2.4E+02	1.5E+01	2.5E+02	2.5E+02	1.6E+01
MNCo-Sr-12	5.97E+04	-	2.2E+02			2.5E+02		
MNCo-Sr-13	5.34E+04	-	2.5E+02			2.5E+02		
MNCo-Sr-21	1.43E+05	-	8.8E+01	9.9E+01	2.0E+01	2.3E+02	2.3E+02	4.6E+01
MNCo-Sr-22	1.42E+05	-	8.8E+01			2.3E+02		
MNCo-Sr-23	1.06E+05	-	1.2E+02			2.4E+02		

(续) 表 2.3.2-16 B 组矿物 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果-Sr 分配系数

编号	Sr 水 (Bq/L)	Sr 土 (Bq/kg)	Sr- K_d (L/kg)	K_d 均值 (L/kg)	K_d 偏差 (L/kg)	校后 K_d (L/kg)	校后 K_d 均值 (L/kg)	校后 K_d 偏差 (L/kg)
MNCo-Sr-31	2.23E+05	-	5.3E+01	5.6E+01	3.9E+00	2.2E+02	2.2E+02	1.5E+01
MNCo-Sr-32	2.12E+05	-	5.6E+01			2.2E+02		
MNCo-Sr-33	1.98E+05	-	6.1E+01			2.2E+02		
MNCo-Sr-41	2.32E+05	-	5.0E+01	5.6E+01	4.5E+00	2.2E+02	2.2E+02	1.8E+01
MNCo-Sr-42	2.07E+05	-	5.8E+01			2.2E+02		
MNCo-Sr-43	2.04E+05	-	5.9E+01			2.2E+02		
MNCo-Sr-51	4.81E+05	-	1.9E+01	2.0E+01	6.2E-01	1.7E+02	1.7E+02	5.4E+00
MNCo-Sr-52	4.72E+05	-	2.0E+01			1.7E+02		
MNCo-Sr-53	4.61E+05	-	2.0E+01			1.7E+02		

表 2.3.2-17 B 组矿物 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果-Co 分配系数

编号	Co 水 (Bq/L)	Co 土 (Bq/kg)	Co-Kd (L/kg)	Kd 均值 (L/kg)	偏差 (L/kg)	校后 Kd (L/kg)	校后 Kd (L/kg)	校后 Kd 偏差 (L/kg)
GL1Co-Sr-11	6.47E+02	1.09E+07	1.7E+04	1.5E+04	2.7E+03	2.0E+04	2.0E+04	3.6E+03
GL1Co-Sr-12	9.51E+02	1.12E+07	1.2E+04			2.0E+04		
GL1Co-Sr-13	6.85E+02	1.08E+07	1.6E+04			1.9E+04		
GL1Co-Sr-21	3.04E+03	1.09E+07	3.6E+03	3.9E+03	2.7E+02	2.0E+04	2.0E+04	1.4E+03
GL1Co-Sr-22	2.70E+03	1.11E+07	4.1E+03			2.0E+04		
GL1Co-Sr-23	2.74E+03	1.08E+07	4.0E+03			2.0E+04		
GL1Co-Sr-31	1.07E+04	1.06E+07	9.9E+02	8.8E+02	9.2E+01	1.9E+04	1.9E+04	2.0E+03
GL1Co-Sr-32	1.27E+04	1.06E+07	8.3E+02			1.9E+04		
GL1Co-Sr-33	1.30E+04	1.08E+07	8.3E+02			1.9E+04		
GL1Co-Sr-41	7.14E+04	1.02E+07	1.4E+02	1.4E+02	8.5E+00	1.8E+04	1.8E+04	1.1E+03
GL1Co-Sr-42	7.21E+04	1.03E+07	1.4E+02			1.9E+04		
GL1Co-Sr-43	7.84E+04	1.00E+07	1.3E+02			1.8E+04		
GL1Co-Sr-51	2.60E+05	8.12E+06	3.1E+01	3.0E+01	1.3E+00	1.5E+04	1.4E+04	6.2E+02
GL1Co-Sr-52	2.75E+05	7.92E+06	2.9E+01			1.4E+04		
GL1Co-Sr-53	2.73E+05	8.02E+06	2.9E+01			1.4E+04		
GL2Co-Sr-11	5.71E+02	1.16E+07	2.0E+04	1.9E+04	1.3E+03	2.1E+04	2.1E+04	1.3E+03
GL2Co-Sr-12	5.71E+02	1.10E+07	1.9E+04			2.0E+04		
GL2Co-Sr-13	6.47E+02	1.15E+07	1.8E+04			2.1E+04		
GL2Co-Sr-21	3.65E+03	1.11E+07	3.0E+03	3.3E+03	3.3E+02	2.0E+04	2.0E+04	2.0E+03
GL2Co-Sr-22	2.97E+03	1.09E+07	3.7E+03			2.0E+04		
GL2Co-Sr-23	3.31E+03	1.07E+07	3.2E+03			1.9E+04		
GL2Co-Sr-31	1.18E+05	9.73E+06	8.3E+01	8.0E+01	5.4E+00	1.8E+04	1.7E+04	1.2E+03
GL2Co-Sr-32	1.17E+05	9.66E+06	8.3E+01			1.7E+04		
GL2Co-Sr-33	1.31E+05	9.60E+06	7.3E+01			1.7E+04		
GL2Co-Sr-41	3.87E+05	7.86E+06	2.0E+01	1.9E+01	1.7E+00	1.4E+04	1.3E+04	1.2E+03
GL2Co-Sr-42	4.31E+05	7.27E+06	1.7E+01			1.3E+04		
GL2Co-Sr-43	3.75E+05	7.12E+06	1.9E+01			1.3E+04		
GL2Co-Sr-51	6.41E+05	4.02E+06	6.3E+00	6.1E+00	1.3E-01	7.2E+03	7.1E+03	1.6E+02
GL2Co-Sr-52	6.48E+05	3.93E+06	6.1E+00			7.1E+03		
GL2Co-Sr-53	6.40E+05	3.85E+06	6.0E+00			6.9E+03		
MTCO-Sr-11	3.42E+02	1.09E+07	3.2E+04	3.1E+04	1.7E+03	1.9E+04	1.9E+04	1.1E+03
MTCO-Sr-12	3.42E+02	1.08E+07	3.2E+04			1.9E+04		
MTCO-Sr-13	3.80E+02	1.10E+07	2.9E+04			2.0E+04		
MTCO-Sr-21	1.86E+03	1.08E+07	5.8E+03	7.7E+03	1.8E+03	1.9E+04	1.9E+04	4.6E+03
MTCO-Sr-22	1.37E+03	1.09E+07	8.0E+03			1.9E+04		
MTCO-Sr-23	1.14E+03	1.08E+07	9.4E+03			1.9E+04		
MTCO-Sr-31	4.49E+03	1.07E+07	2.4E+03	2.4E+03	6.8E+01	1.9E+04	1.9E+04	5.4E+02
MTCO-Sr-32	4.45E+03	1.09E+07	2.4E+03			1.9E+04		
MTCO-Sr-33	4.60E+03	1.06E+07	2.3E+03			1.9E+04		

(续) 表 2.3.2-17 B 组矿物 Sr 与 Co 竞争吸附实验结果-Co 分配系数

编号	Co 水 (Bq/L)	Co 土 (Bq/kg)	Co-Kd (L/kg)	Kd 均值 (L/kg)	偏差 (L/kg)	校后 Kd (L/kg)	校后 Kd (L/kg)	校后 Kd 偏差 (L/kg)
MTCO-Sr-41	1.38E+04	1.05E+07	7.6E+02	7.1E+02	5.0E+01	1.9E+04	1.9E+04	1.3E+03
MTCO-Sr-42	1.49E+04	1.06E+07	7.1E+02			1.9E+04		
MTCO-Sr-43	1.58E+04	1.05E+07	6.6E+02			1.9E+04		
MTCO-Sr-51	6.23E+04	1.02E+07	1.6E+02	1.6E+02	5.2E+00	1.8E+04	1.8E+04	6.0E+02
MTCO-Sr-52	6.49E+04	1.02E+07	1.6E+02			1.8E+04		
MTCO-Sr-53	6.46E+04	9.92E+06	1.5E+02			1.8E+04		
YLCo-Sr-11	4.18E+02	1.11E+07	2.9E+04	2.8E+04	1.5E+03	2.6E+04	2.6E+04	1.4E+03
YLCo-Sr-12	4.57E+02	1.08E+07	2.6E+04			2.6E+04		
YLCo-Sr-13	4.18E+02	1.08E+07	2.8E+04			2.5E+04		
YLCo-Sr-21	6.28E+03	1.08E+07	1.7E+03	1.6E+03	7.5E+01	2.3E+04	2.3E+04	1.1E+03
YLCo-Sr-22	6.73E+03	1.07E+07	1.6E+03			2.3E+04		
YLCo-Sr-23	6.85E+03	1.09E+07	1.6E+03			2.4E+04		
YLCo-Sr-31	1.74E+04	1.05E+07	6.0E+02	5.8E+02	7.2E+01	2.3E+04	2.3E+04	2.8E+03
YLCo-Sr-32	2.12E+04	1.06E+07	5.0E+02			2.3E+04		
YLCo-Sr-33	1.67E+04	1.07E+07	6.4E+02			2.3E+04		
YLCo-Sr-41	6.65E+04	1.02E+07	1.5E+02	1.7E+02	1.3E+01	2.2E+04	2.2E+04	1.8E+03
YLCo-Sr-42	6.41E+04	1.06E+07	1.6E+02			2.3E+04		
YLCo-Sr-43	5.86E+04	1.05E+07	1.8E+02			2.3E+04		
YLCo-Sr-51	2.21E+05	8.33E+06	3.8E+01	3.9E+01	8.9E-01	1.8E+04	1.8E+04	4.1E+02
YLCo-Sr-52	2.10E+05	8.29E+06	4.0E+01			1.8E+04		
YLCo-Sr-53	2.15E+05	8.36E+06	3.9E+01			1.8E+04		
MNCo-Sr-11	2.17E+03	1.13E+07	5.2E+03	5.3E+03	1.9E+02	5.5E+03	5.6E+03	2.1E+02
MNCo-Sr-12	2.02E+03	1.11E+07	5.5E+03			5.4E+03		
MNCo-Sr-13	2.36E+03	1.21E+07	5.1E+03			5.9E+03		
MNCo-Sr-21	4.22E+03	1.10E+07	2.6E+03	2.9E+03	5.4E+02	5.3E+03	5.3E+03	1.0E+03
MNCo-Sr-22	4.34E+03	1.09E+07	2.5E+03			5.3E+03		
MNCo-Sr-23	3.16E+03	1.10E+07	3.5E+03			5.4E+03		
MNCo-Sr-31	1.72E+04	1.04E+07	6.0E+02	7.1E+02	9.6E+01	5.1E+03	5.2E+03	7.1E+02
MNCo-Sr-32	1.37E+04	1.08E+07	7.9E+02			5.3E+03		
MNCo-Sr-33	1.51E+04	1.10E+07	7.3E+02			5.4E+03		
MNCo-Sr-41	4.61E+04	1.08E+07	2.3E+02	2.2E+02	1.1E+01	5.2E+03	5.2E+03	2.6E+02
MNCo-Sr-42	4.65E+04	1.03E+07	2.2E+02			5.0E+03		
MNCo-Sr-43	5.03E+04	1.06E+07	2.1E+02			5.2E+03		
MNCo-Sr-51	1.31E+05	9.33E+06	7.1E+01	7.4E+01	3.3E+00	4.5E+03	4.6E+03	2.1E+02
MNCo-Sr-52	1.29E+05	9.43E+06	7.3E+01			4.6E+03		
MNCo-Sr-53	1.23E+05	9.56E+06	7.7E+01			4.7E+03		

表 2.3.4-1 IAEA 土壤分类

土壤分组	pH	有机质含量%	阳离子交换容量 cmol/kg	矿物成分中的沙含量%	矿物成分中的粘土含量%
沙 sand	3.5-6.5	0.5-3.0	3.0-15.0	≥65	<18
壤土 Loam	4.0-6.0	2.0-6.5	5.0-25.0	65-82	18-35
Clay 粘土	5.0-8.0	3.5-10.0	20.0-70.0	——	≥35
有机质 Organic	3.0-5.0	≥20	20.0-200.0	——	——

表 6-3 Co-60、Cs-137、Sr-90、Ru 在不同粒径土壤中的分配系数 (L/Kg)

核素 粒径(mm)	Co-60	Cs-137	Sr-90	Ru	备注
>0.45	9.40E+02	4.00E+03	5.70E+00	3.70E+02	湖南桃花江
	1.00E+03	4.00E+03	6.40E+00	2.70E+02	湖南桃花江
	1.20E+03	4.00E+03	5.70E+00	4.00E+02	湖南桃花江
	8.50E+02	2.40E+03	5.20E+00	5.70E+02	江西彭泽
	8.20E+02	2.40E+03	5.30E+00	5.40E+02	江西彭泽
0.3~0.45	1.10E+03	4.40E+03	7.10E+00	4.20E+02	湖南桃花江
	1.20E+03	4.30E+03	7.00E+00	5.60E+02	湖南桃花江
	1.60E+03	5.20E+03	7.90E+00	6.40E+02	湖南桃花江
	8.90E+02	2.50E+03	6.10E+00	6.10E+02	江西彭泽
	8.80E+02	2.90E+03	6.00E+00	5.80E+02	江西彭泽
0.2~0.3	1.50E+02	1.10E+03	1.40E+01	3.20E+02	吉林靖宇
	1.70E+02	1.40E+03	1.30E+01	3.80E+02	吉林靖宇
	3.80E+00	5.40E+02	5.80E+00	2.50E+01	河南南阳
	2.80E+00	4.00E+02	4.30E+00	1.90E+01	河南南阳
	4.70E+03	5.50E+03	2.50E+01	1.10E+03	湖北咸宁
	5.90E+03	5.10E+03	2.20E+01	9.40E+02	湖北咸宁
	4.40E+03	4.50E+03	2.60E+01	1.30E+03	湖北咸宁
0.105~0.2	4.90E+03	6.60E+03	2.70E+01	1.20E+03	湖北咸宁
	5.80E+03	5.00E+03	2.90E+01	1.20E+03	湖北咸宁
	5.80E+03	5.80E+03	2.90E+01	1.30E+03	湖北咸宁
0.125~0.15	2.30E+02	2.50E+03	1.70E+01	3.50E+02	吉林靖宇
	2.50E+02	2.10E+03	1.50E+01	4.40E+02	吉林靖宇
	3.50E+00	6.70E+02	6.30E+00	2.60E+01	河南南阳
	3.10E+00	6.10E+02	5.70E+00	2.40E+01	河南南阳
0.105~0.15	2.80E+03	6.50E+03	9.20E+00	6.40E+02	湖南桃花江
	2.90E+03	7.00E+03	8.50E+00	5.10E+02	湖南桃花江
	3.30E+03	7.90E+03	9.80E+00	8.60E+02	湖南桃花江
	1.50E+03	3.40E+03	7.00E+00	6.80E+02	江西彭泽
	1.50E+03	3.00E+03	7.10E+00	6.50E+02	江西彭泽
<0.125	1.60E+02	2.90E+03	1.70E+01	5.60E+02	吉林靖宇
	4.20E+02	2.80E+03	2.00E+01	5.80E+02	吉林靖宇
	4.00E+00	1.10E+03	7.90E+00	6.90E+01	河南南阳
	3.10E+00	8.60E+02	6.10E+00	5.30E+01	河南南阳
0.075~0.105	7.60E+03	7.20E+03	3.00E+01	1.50E+03	湖北咸宁
	6.50E+03	6.70E+03	2.70E+01	1.60E+03	湖北咸宁
	7.50E+03	6.80E+03	3.00E+01	1.50E+03	湖北咸宁
0.08~0.095	3.20E+03	8.30E+03	1.50E+01	3.40E+03	湖南桃花江
	7.80E+03	1.30E+04	1.40E+01	3.40E+03	湖南桃花江
	5.70E+03	8.90E+03	1.80E+01	2.10E+03	湖南桃花江
	7.50E+03	8.30E+03	3.10E+01	3.20E+03	江西彭泽

核素 粒径(mm)	Co-60	Cs-137	Sr-90	Ru	备注
	7.00E+03	9.50E+03	2.90E+01	3.40E+03	江西彭泽
	2.80E+03	5.10E+03	5.70E+01	4.10E+03	吉林靖宇
	2.30E+03	6.80E+03	6.00E+01	3.30E+03	吉林靖宇
	2.50E+03	5.60E+03	1.30E+01	9.90E+02	河南南阳
	1.90E+03	5.20E+03	9.40E+00	7.40E+02	河南南阳
	8.90E+03	1.03E+04	4.10E+01	5.10E+03	广西平南
	8.40E+03	9.28E+03	4.00E+01	4.90E+03	广西平南
	8.60E+03	1.01E+04	3.80E+01	4.90E+03	广西平南
0.075~0.08	5.20E+03	9.90E+03	1.70E+01	3.30E+03	湖南桃花江
	7.50E+03	1.00E+04	1.70E+01	2.70E+03	湖南桃花江
	7.40E+03	1.10E+04	2.00E+01	3.30E+03	湖南桃花江
	7.70E+03	8.90E+03	2.80E+01	3.70E+03	江西彭泽
	7.70E+03	8.70E+03	2.90E+01	3.80E+03	江西彭泽
	1.30E+03	2.30E+03	6.40E+01	3.40E+03	吉林靖宇
	2.90E+03	8.10E+03	6.50E+01	3.60E+03	吉林靖宇
	2.10E+03	4.80E+03	1.50E+01	8.90E+02	河南南阳
	1.90E+03	4.70E+03	1.30E+01	8.10E+02	河南南阳
	8.30E+03	9.96E+03	4.50E+01	5.00E+03	广西平南
	9.20E+03	9.92E+03	4.00E+01	4.70E+03	广西平南
	9.10E+03	1.00E+04	4.20E+01	5.00E+03	广西平南
<0.075	5.90E+03	8.20E+03	1.70E+01	2.70E+03	湖南桃花江
	7.40E+03	1.30E+04	1.80E+01	3.30E+03	湖南桃花江
	6.40E+03	9.60E+03	1.70E+01	3.70E+03	湖南桃花江
	7.90E+03	8.40E+03	2.70E+01	3.70E+03	江西彭泽
	7.40E+03	9.60E+03	3.00E+01	3.80E+03	江西彭泽
	2.30E+03	3.80E+03	4.70E+01	3.10E+03	吉林靖宇
	2.70E+03	7.30E+03	4.80E+01	3.70E+03	吉林靖宇
	2.60E+03	5.40E+03	1.10E+01	8.30E+02	河南南阳
	2.00E+03	4.70E+03	8.80E+00	6.50E+02	河南南阳
	9.10E+03	9.63E+03	4.40E+01	5.10E+03	广西平南
	9.30E+03	1.14E+04	4.20E+01	4.90E+03	广西平南
	8.60E+03	1.03E+04	4.10E+01	4.90E+03	广西平南
	9.60E+03	6.60E+03	4.00E+01	2.00E+03	湖北咸宁
	1.10E+04	9.70E+03	4.10E+01	1.80E+03	湖北咸宁
	1.00E+04	7.90E+03	4.20E+01	1.70E+03	湖北咸宁

表 2.3.4-4 各厂址土壤样品化学成分 (%)

样品类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	厂址
泥	74.78	11.50	1.27	2.57	1.30	0.40	0.34	0.54	咸宁
	58.03	20.07	5.53	1.90	3.77	0.77	0.64	1.28	
	64.24	15.14	2.04	3.57	3.18	0.70	0.72	1.10	
	75.72	9.84	1.42	2.25	2.04	0.56	0.88	1.34	
	76.40	10.57	3.96		2.05	0.68	1.04	0.91	桃花江
	72.99	12.20	4.30		2.08	0.60	0.74	0.88	
	57.51	13.92	6.41		2.66	0.78	6.18	2.68	江西彭泽
	55.80	13.27	5.49	8.60	2.10	2.57	7.68	2.15	河南南阳
	65.11	12.97	7.79	1.96	0.66		1.39	1.78	广西平南
	58.68	15.09	8.47	6.23	2.70	2.62	2.39	1.96	吉林靖宇
沙	87.88	5.70	2.18		1.72	0.36	0.39	0.46	桃花江
	79.46	8.12	2.32		2.30	1.42	2.51	1.04	江西彭泽
	71.04	13.92	4.24	0.32	3.05	3.69	2.92	1.36	河南南阳
	74.99	13.16	2.98	0.50	2.28	4.22	2.67	0.80	吉林靖宇

注：空格表示未作测量

表 2.3.4-5 各厂址沉积物样品矿物成分 (%)

厂址	样品类型	石英	蒙脱石	伊利石	高岭石	斜长石	白云石	绿泥石	钾长石	锐钛矿	褐铁矿	方解石	角闪石	磁铁矿	蛇纹石	有机质	黑云母	长石	其他
咸宁	库边泥	82.5	1.5	2.5	1.5	1.5	---	---	2.5	1	1	---	---	---	---	---	---	---	---
	库底泥	53.5	17.5	10	10	2.5	---	---	2.5	2	2	---	---	---	---	---	---	---	---
	河边泥	68.5	2.5	10	10	2.5	---	---	1.5	2	2	---	---	---	---	---	---	---	---
	河底泥	58	---	7.5	7.5	12.5	4	4	1.5	2	2	---	---	---	---	---	---	---	---
桃花江	河道沙	85~90	---	1~2	---	1~2	---	1	5~10	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1
	河道泥	88~89	---	2~3	---	3~5	---	1~2	---	1	---	1~2	---	---	---	---	---	---	1
	库内泥	88~89	---	2~3	---	5~8	---	1~2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1
江西彭泽	沙	76~80	---	2~3	---	3~5	1~2	1~2	5~10	---	---	1~2	2~3	---	---	---	---	---	---
	泥	49~51	---	15~20	---	5~10	3~5	10	1~2	---	---	5~8	1	1	---	---	---	---	---
河南南阳	沙 1	25	10	10~15	少量	20	---	5	20	---	---	---	5~10	---	---	---	---	---	---
	沙 2	30~35	2~3	10~15	---	20	---	2~3	25	---	---	---	2~3	---	2~3	---	---	---	---
	泥	25	5	15	---	13	---	5	7	---	---	10	5	---	5~10	5~10	---	---	---
广西平南	泥	56~58	---	---	3~5	3~5	---	10~12	---	---	---	3~5	---	1~2	---	---	15~20	---	---
吉林靖宇	沙	25~30	5	15~20	---	20	---	少量	20	---	---	---	5	---	5	---	---	---	---
	泥	20	20	20~25	5	---	---	5	---	---	---	---	---	---	---	5~10	---	20	---

注：“—”表示未检出。



图 2.3.1-1 长白山高岭石



图 2.3.1-2 山西高岭石



图 2.3.1-3 河南伊利石

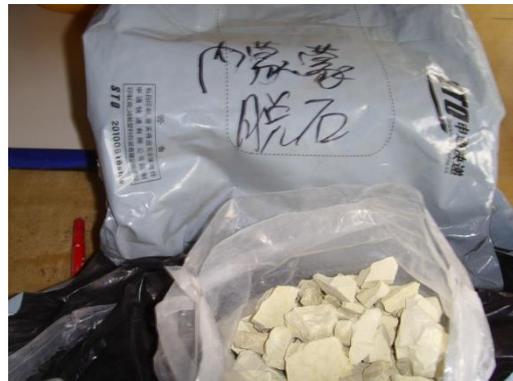


图 2.3.1-4 内蒙蒙脱石

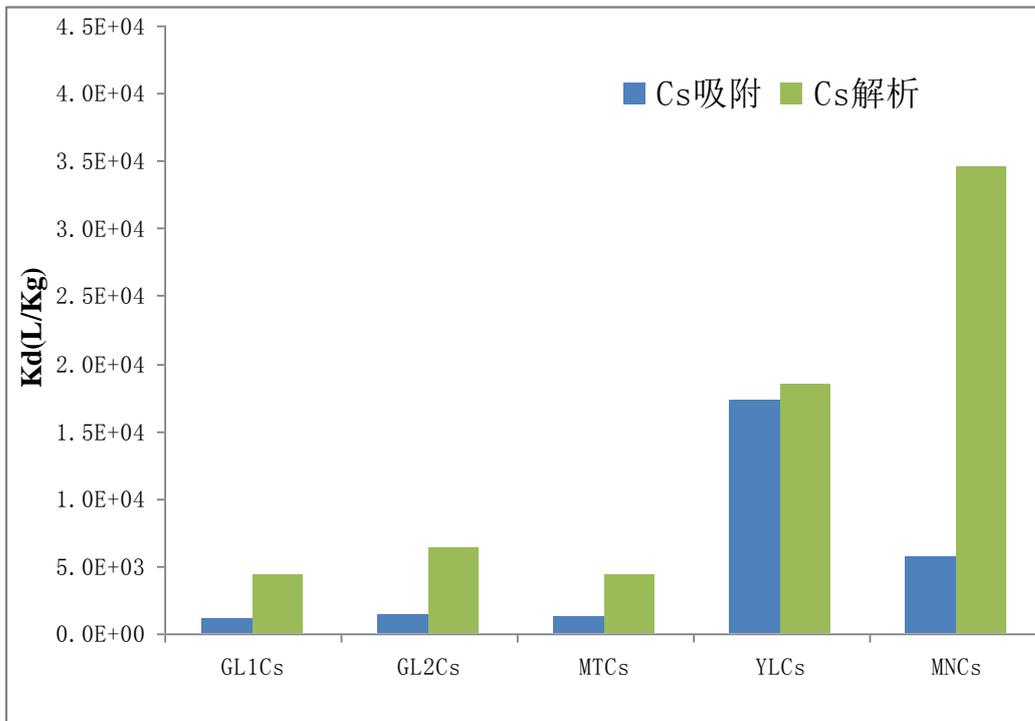


图 2.3.2-1 五种矿物对 ^{137}Cs 的吸附和解吸分配系数比较

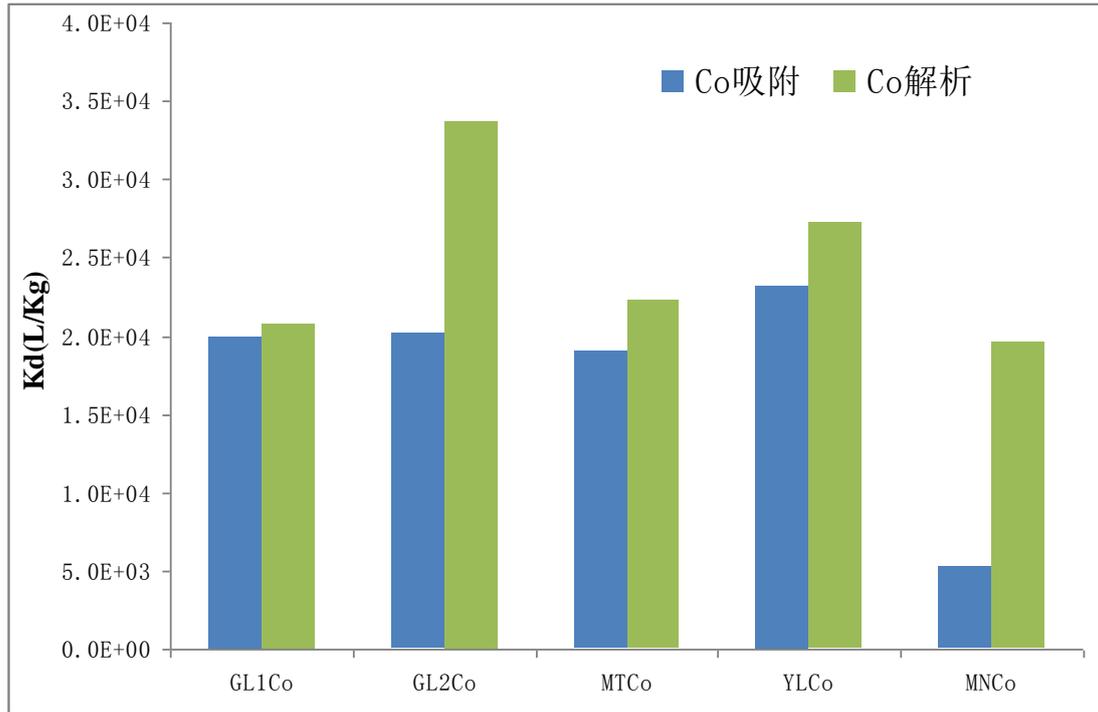


图 2.3.2-2 五种矿物对 ^{60}Co 的吸附和解吸分配系数比较

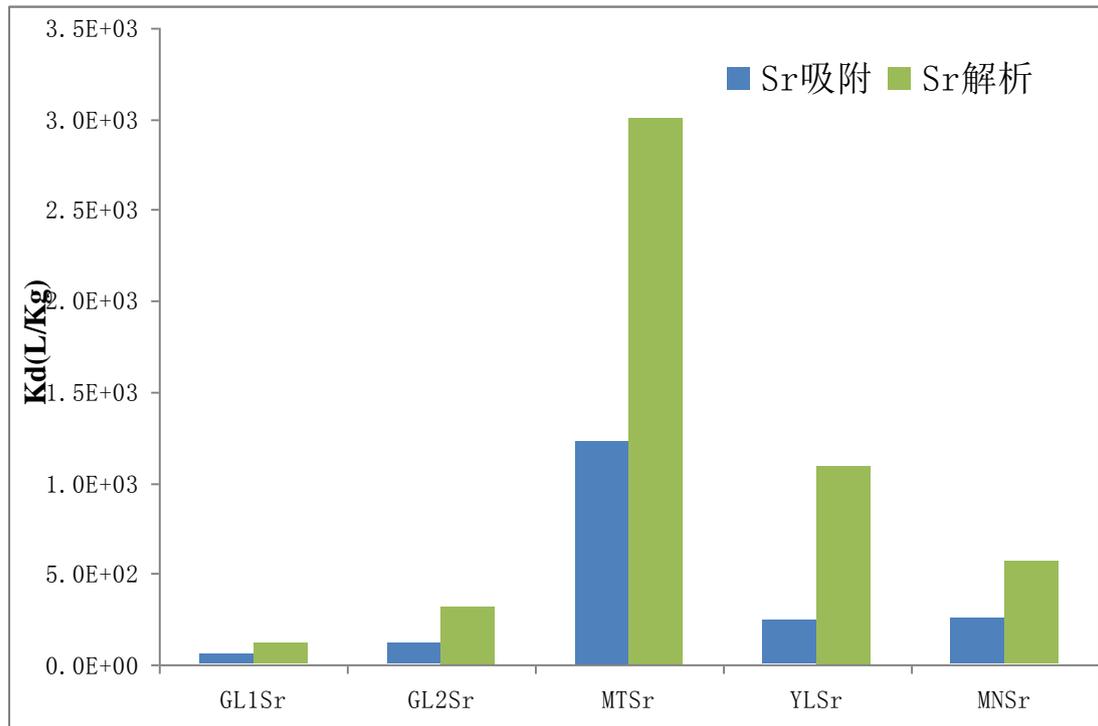


图 2.3.2-3 五种矿物对 ^{90}Sr 的吸附和解吸分配系数比较

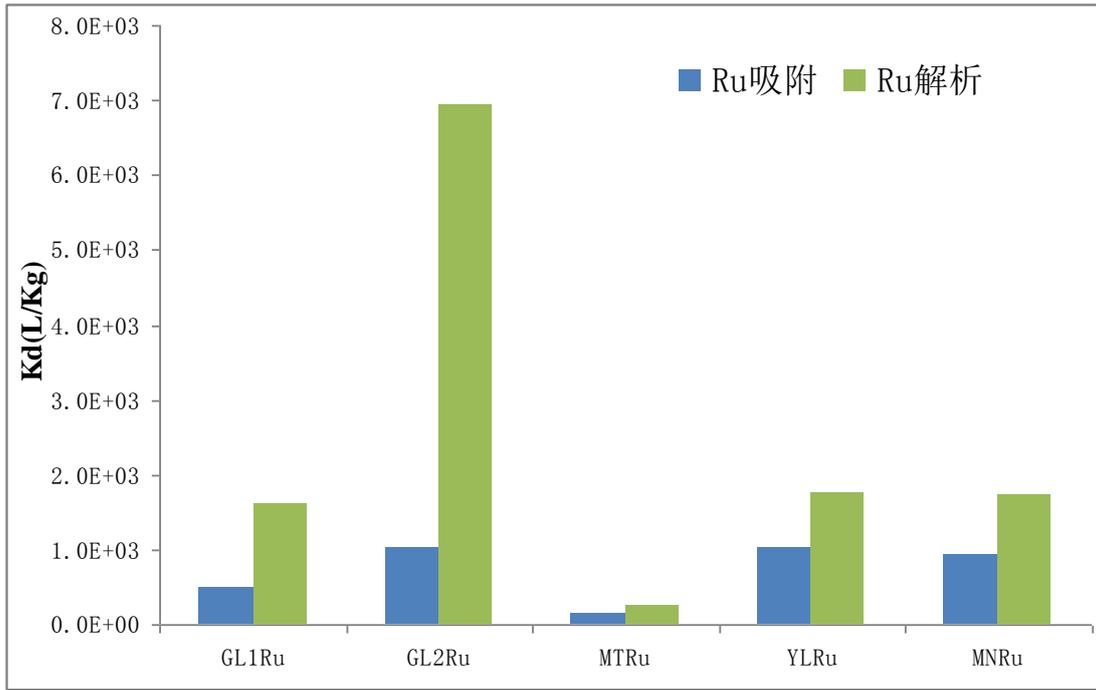


图 2.3.2-4 五种矿物对 ^{106}Ru 的吸附和解吸分配系数比较

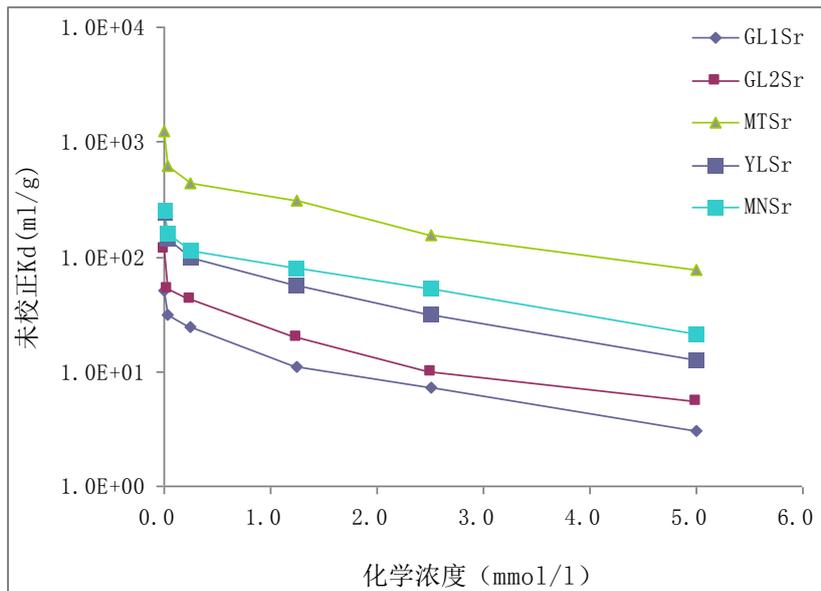


图 2.3.2-5 Sr-90 在不同矿物中的 K_d 值随 Sr 浓度增大变化情况

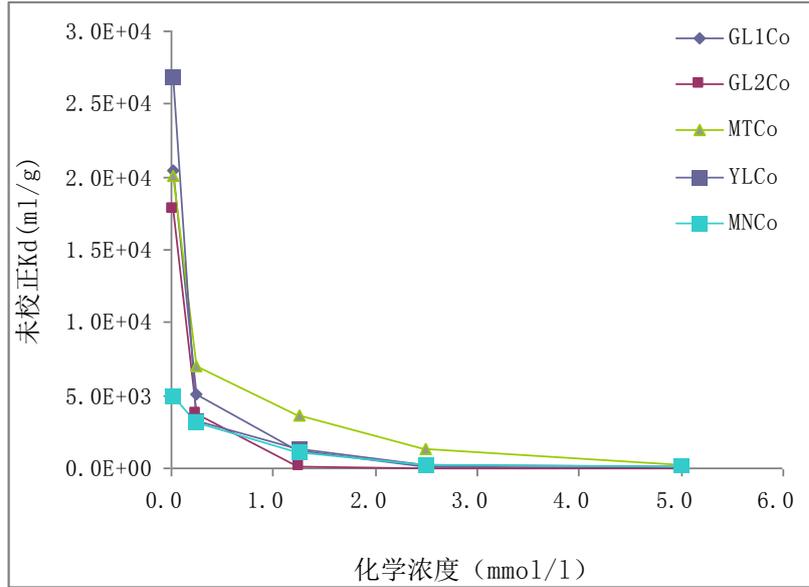


图 2.3.2-6 Co-60 在不同矿物中的 K_d 值随 Co 浓度增大变化情况

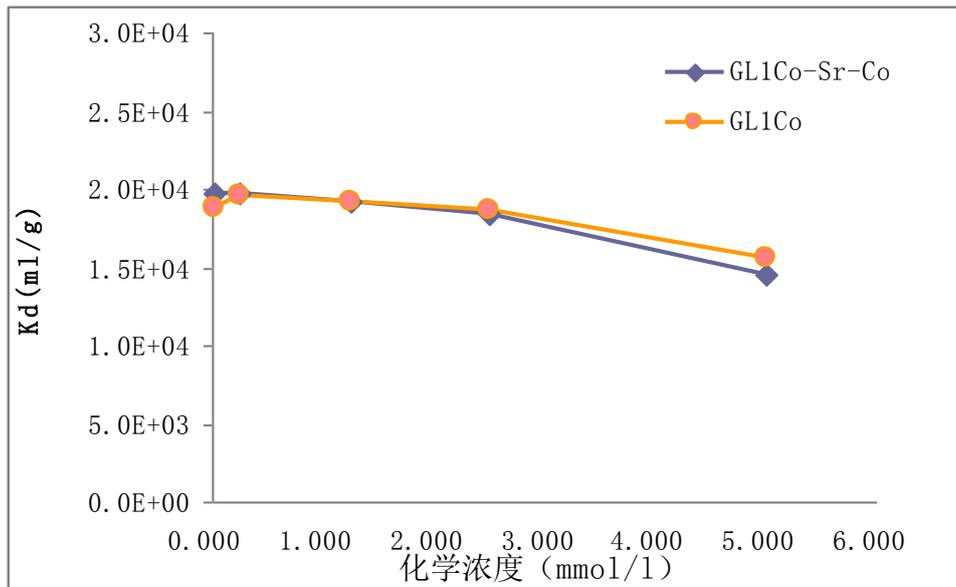


图 2.3.2-7 GL1 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Co 的吸附分配系数

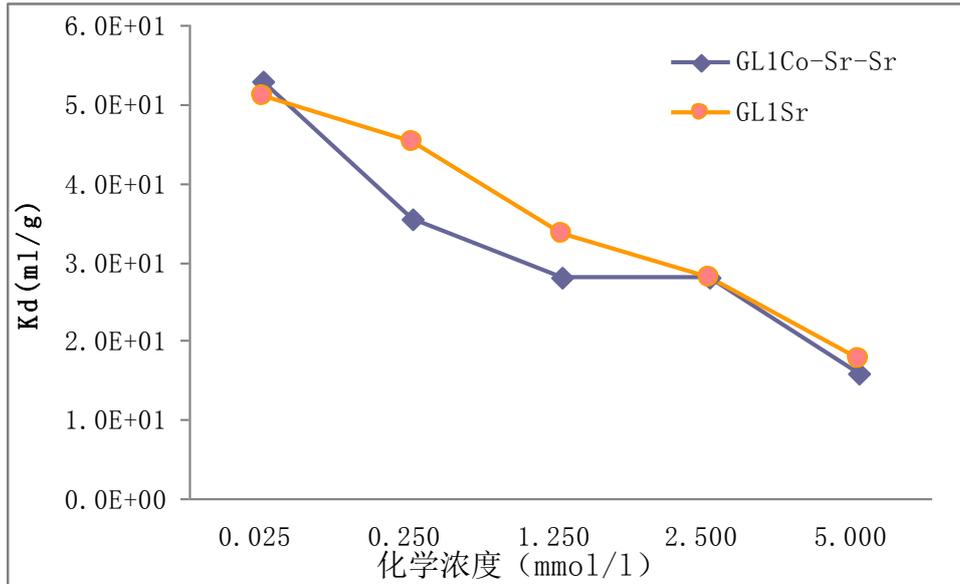


图 2.3.2-8 GL1 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Sr 的吸附分配系数

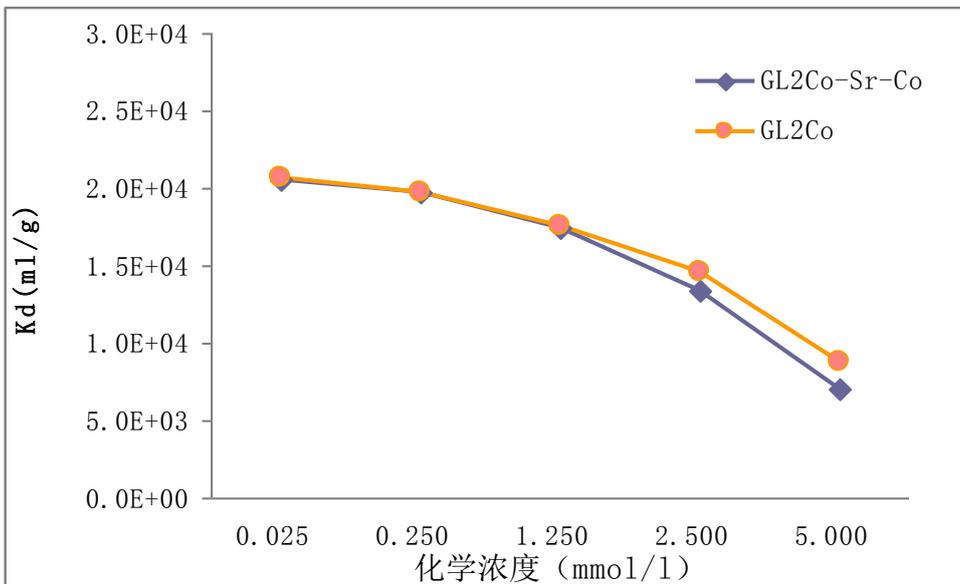


图 2.3.2-9 GL2 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Co 的吸附分配系数

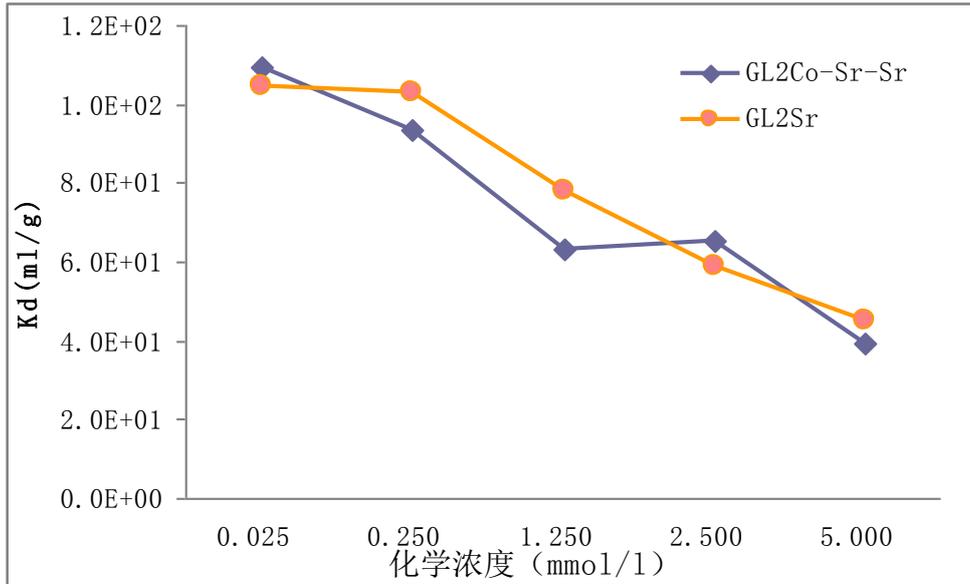


图 2.3.2-10 GL2 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Sr 的吸附分配系数

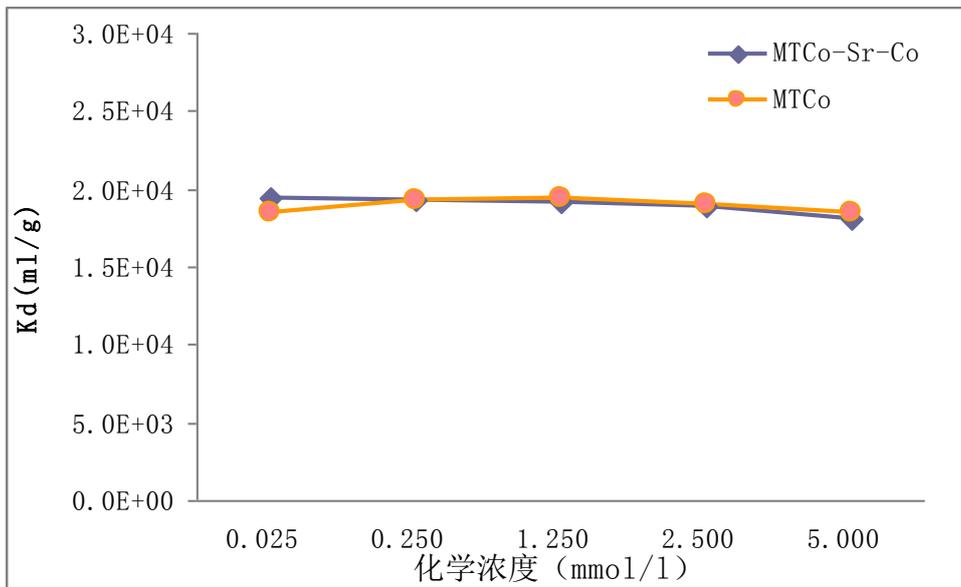


图 2.3.2-11 MT 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Co 的吸附分配系数

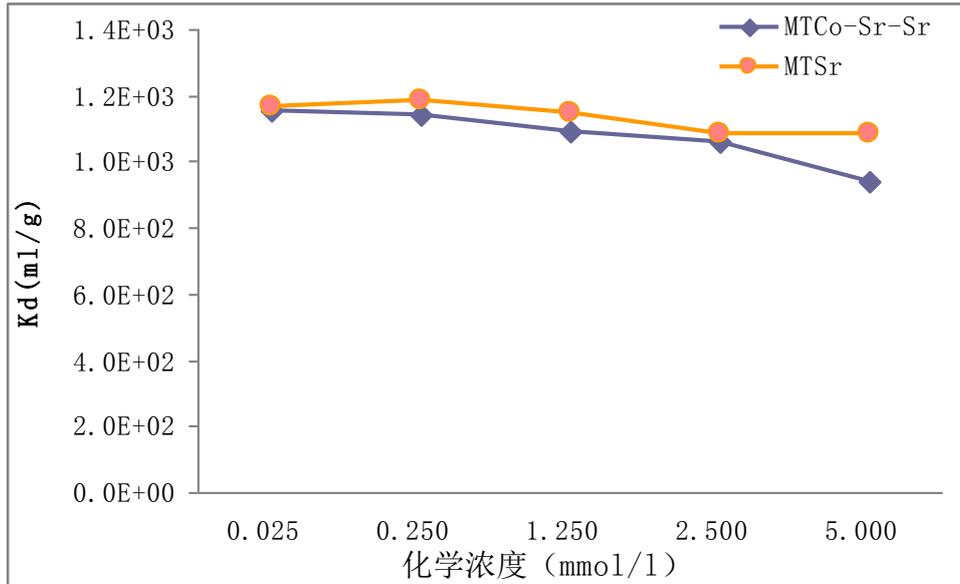


图 2.3.2-12 MT 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Sr 的吸附分配系数

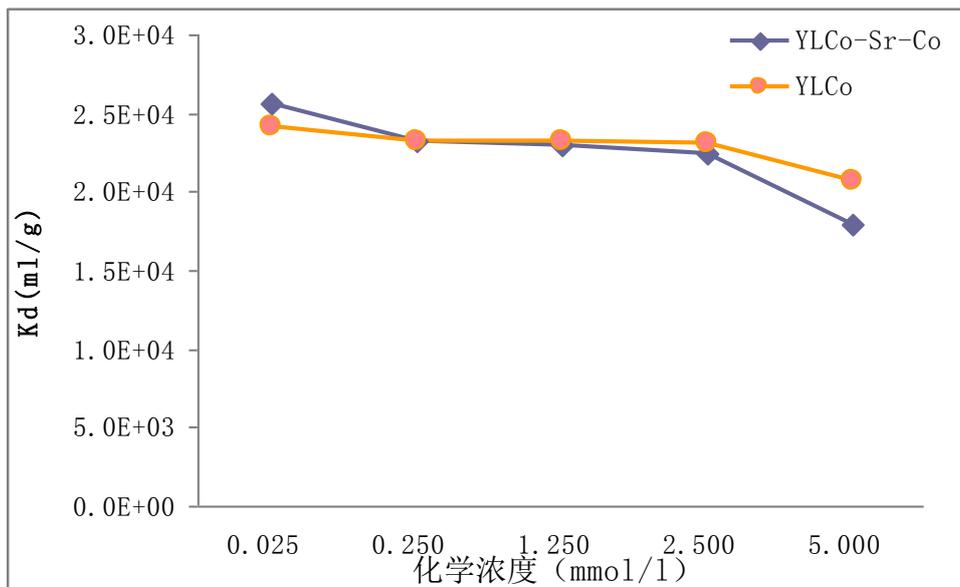


图 2.3.2-13 YL 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Co 的吸附分配系数

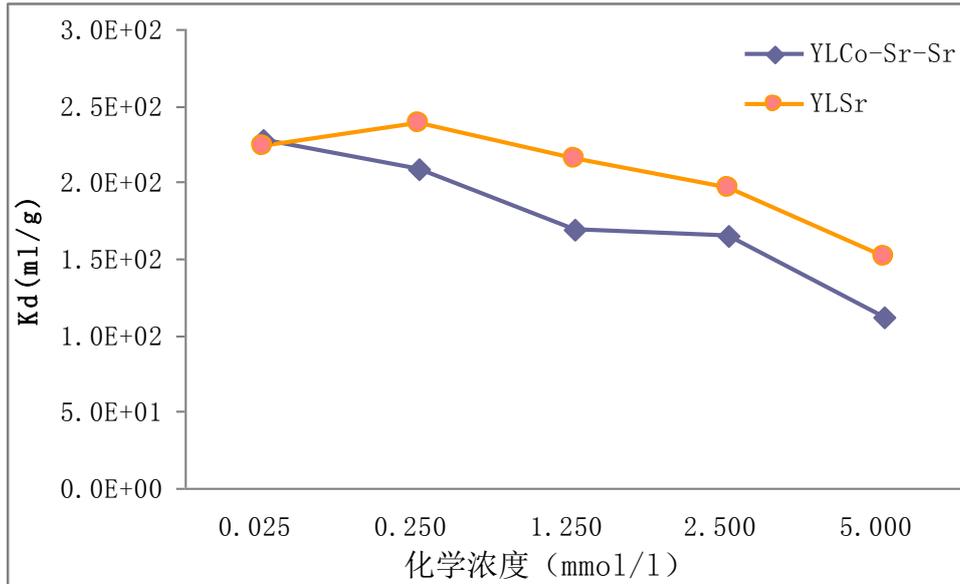


图 2.3.2-14 YL 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Sr 的吸附分配系数

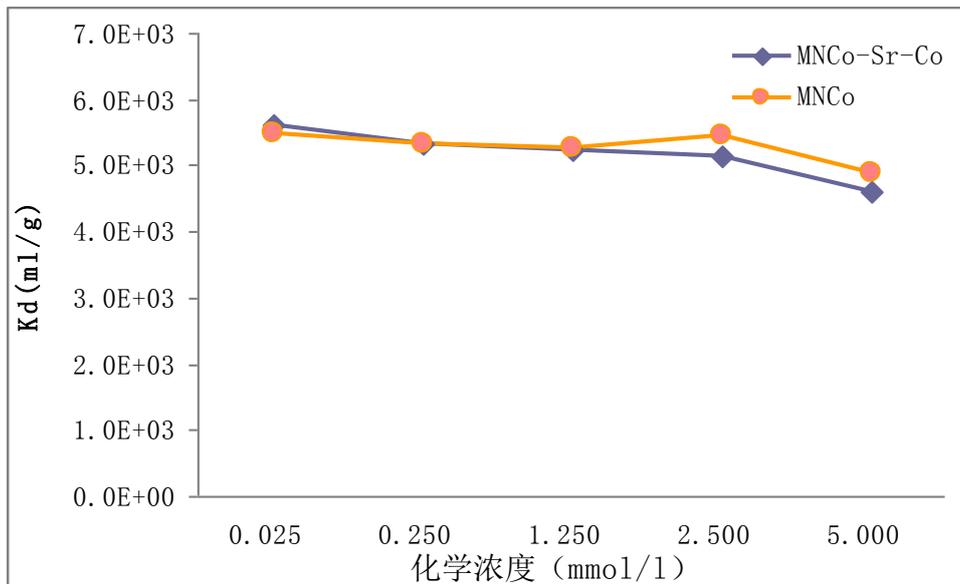


图 2.3.2-15 MN 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Co 的吸附分配系数

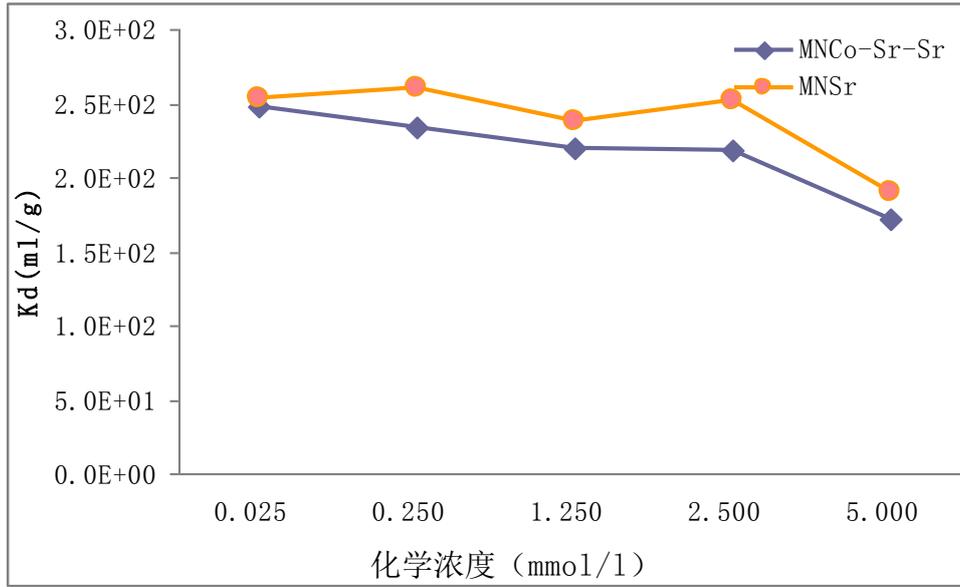


图 2.3.2-16 MN 在 Co-Sr 竞争吸附条件下对 Sr 的吸附分配系数

2.4 本章总结

通过对典型内陆核电厂址（广西平南、河南南阳、吉林靖宇、江西彭泽、湖南桃花江、湖北咸宁）开展的泥沙对放射性核素吸附实验、吸附特性研究以及对影响分配系数的一些单因素实验，包括河流沉积物对核素（ ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 Ru ）的吸附、解吸特性分析，不同固液比、不同粒径、PH 值对分配系数 K_d 的影响，以及通过开展不同矿物对核素吸附特性等实验研究，得出以下结论：

1) 通过调研分析研究，研究放射性核素在地表水中迁移时，目前常用的测定分配系数的方法有实验室静态批式法和现场示踪实验法二种。其中，静态批式法是被广泛使用的一种方法，它的实验条件比较简单，可同时进行大量的平行实验，且实验周期较短，准确性高，重复性好。

2) 水相 PH 值的变化对 Ru 在泥和沙中分配系数的影响是很大的，在 $\text{PH}=4\sim 8$ 范围内， Ru 在泥和沙中分配系数随水相 PH 值的升高而增大，且水相 PH 值对沙中分配系数的影响较为明显，对泥中分配系数的影响则要小一些。

3) 水样的化学性质也会影响分配系数的大小，且水样中有无实验核素的离子会对实验结果产生很大的影响。通过典型厂址现场水样化学成分分析，水样在 ICP-MS 检测限内没有检出钴和铯，说明水的本底中基本没有钴和铯，或者说钴和铯含量极低。部分厂址（平南、彭泽、桃花江、咸宁厂址）检测出钷的含量，但含量很低；而所有厂址均检测出铟，含量在 $1.004\times 10^{-6}\text{mol/L}\sim 1.038\text{E}-6\text{mol/L}$ 之间。

4) 通过试验可见，实验中选取的四种核素（ ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 Ru ）的分配系数的变化趋势在河道沙中基本是随着颗粒粒径的减小，分配系数逐渐增大，其变化很明显，这主要是由于随着颗粒粒径减小，颗粒比表面积增大，表面吸附能力增强，有利于各种核素的吸附，从而使分配系数增大；而在河道泥中的分配系数变化不大，基本变化趋势不太明显，主要因为不同泥的粒径差别不大，比表面积也差别不大，其吸附性能基本相同。

5) 通过模拟土壤与现场土壤对不同核素吸附分配系数比较可见，两者不具一致性，而且差异较大。可见模拟土壤的吸附分配系数 K_d 值不能代替现场土壤的 K_d 值。

6) 不同产地的矿物，其吸附-解吸特性有所差别，可能是其矿物成分、成矿条件、化学成分的差别等复杂的因素造成。因此，配制模拟土壤代替现场土壤比

现场采样困难。

7) 当稳定核素与放射性核素(同一元素)共存时,矿物会同时对两者进行吸附,通过对 Sr-90 和 Sr、Co-60 和 Co 的实验研究发现,放射性核素在不同矿物(如长白山高岭石、山西高岭石、内蒙蒙脱石、河南伊利石等)中的 Kd 值均随着稳定核素浓度的增加而下降,表明稳定核素的存在影响了矿物对放射性核素(同一元素)的吸附,单独用放射性核素(Sr-90 或 Co-60)计算五种矿物对总 Sr 或总 Co 的分配系数偏小。

8) Co 与 Sr 竞争吸附实验结果表明,随着浓度增加,五种矿物对 Co、Sr 的分配系数都有降低的趋势,但 Sr 的降低较快,Co 的降低很慢。在 Co、Sr 共存情况下,同浓度中 Sr 的分配系数降低较大,Co 的分配系数降低较小,且矿物吸附 Sr 达到饱和状态的临界浓度比吸附 Co 提前很多,说明 Co 的存在影响了 Sr 的分配系数,两者存在竞争关系,Co 的竞争吸附能力大于 Sr。

9) 通过研究分析,悬浮物对核素的吸附包括一系列的动力学过程(氧化作用、络合作用、离子交换等),还有其它环境因素(悬浮颗粒的浓度,离子浓度,pH 值,胶体作用等)。这些影响因素复杂繁多,引起了悬浮物对核素的吸附分配系数 Kd 不确定性很高。而且现场的样品一般与相关文献给出的土壤分类不一致,因此,推荐值的参数 Kd 值难以反映现场的实际情况。

10) 通过实际厂址的现场采样以及静态批示法实验,可以获取较为丰富的实验样品,包括不同粒径的沙样、不同矿物质组成和化学成分的土(泥)样,使得实验分析成果相比较文献的推荐值,更加具有代表性。

参考文献

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, IAEA, Vienna (2001).

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).

[3] 商照荣,李建国等. 放射生态转移参数手册,原子能出版社.北京. 2006.

[4] SCHELL.W R.SIBLEY T H,NEVISSI A E,et al.Distribution Coefficients for radionuclides in aquatic Environments,Methodology,

NUREG/CR-1852-V1[M].Seattle;College of Fisheries,University of Washington,1981:1-26.

[5] SCHELL.W R.SIBLEY T H,NEVISSI A E,et al.Distribution Coefficients for radionuclides in aquatic Environments,Adsorption Studies of Cobalt, NUREG/CR-1852-V6[M].Seattle;College of Fisheries,University of Washington,1981:1-11.

[6] SCHELL.W R.SIBLEY T H,NEVISSI A E,et al.Distribution Coefficients for radionuclides in aquatic Environments,Desorption Studies of ^{85}Sr , NUREG/CR-1852-V4[M].Seattle;College of Fisheries,University of Washington,1981:1-25.

[7] SCHELL.W R.SIBLEY T H,NEVISSI A E,et al.Distribution Coefficients for radionuclides in aquatic Environments,Effect of sediment Concentration on Distribution Coefficients, NUREG/CR-1852-V5[M].Seattle;College of Fisheries,University of Washington,1982:1-35.

[8] ASTM International. Standard Test Method for 24-h Batch-Type Measurement of Contaminant Sorption by Soils and Sediments. Designation: D4646-03. 2008.

[9] Savannah River National Laboratory. K_d distribution coefficients test results -Attachment H. WSRC-STI-2007-00244. 2007.

[10] K.J.Cantrell,R.J.Seme,G.V.Last,Hanford Contaminant Distribution Coefficient Database and Users Guide.PNNL-13895 Rev. 1 . Pacific Northwest National Laboratory 2003.

[11] 王志明,李书绅,郭择德,杨月娥,王金生, ^{85}Sr 在黄土包气带中的迁移,辐射防护,第20卷第1—2期,2000年1月.

[12] 王志明,安永锋, ^{85}Sr 在非饱和黄土中的迁移特征,原子能科学技术,第38卷第1期2004年1月.

[13] 郭择德,王志明,黄土包气带中放射性核素迁移的现场试验,辐射防护,第20卷第1—2期,2000年1月.

[14] ASTM International. Standard Test Method for Distribution Coefficients of Inorganic Species by the Batch Method. Designation: C1733-10. 2010.

[15] J.F.Relyea, R.J.Serne, D.Rai. Methods for Determining Radionuclide Retardation Factors. PNL-3349. 1980.

[16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater

environments, IAEA TRS No.472, 2009.

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments IAEA-TECDOC -1616, May, 2009.