# 硅基磷钼酸铵吸附剂的合成及其对 Cs 的吸附

王启龙,吴 艳\*,韦悦周

上海交通大学 核科学与工程学院,上海 200240

摘要:采用孔内结晶法合成了磷钼酸铵二氧化硅吸附剂(AMP/SiO<sub>2</sub>),通过 XRD、BET、EPMA 等手段对其进行了表征。研究了接触时间、钠钾钙镁四种共存离子对 AMP/SiO<sub>2</sub> 吸附 Cs 的影响。结果表明,AMP/SiO<sub>2</sub> 对 Cs 的吸附在 10 min 即可达平衡,且受钾离子的影响较大而受其他三种共存离子的影响较小,吸附过程符合 Langmuir 吸附模型和假二级动力学方程,在 0.6 mol/L 的钠溶液中对 Cs 的静态及动态交换容量分别可达 0.390 mmol/g 和 0.323 mmol/g。

关键词:Cs;吸附;磷钼酸铵;二氧化硅

中图分类号:TL241 文献标志码:A doi:10.7538/hhx.YX.2014.2013075

**文章编号:**0253-9950(2014)04-0210-06

## Synthesis of Ammonium Molybdopho-Sphate (AMP) Loaded Silica and Its Adsorption for Cesium

WANG Qi-long, WU Yan\*, WEI Yue-zhou

School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: A ammonium molybdopho-sphate (AMP) loaded silica adsorbents (AMP-silica) was synthesized by crystallization method, and its characterization were investigated by XRD, BET and EPMA methods. Effects of contacting time and co-existing cations, such as Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>, were investigated by batch experiments, and column operations were also carried out. The AMP-silica has a very fast adsorption kinetics; it takes just 10 min to reach equilibrium. The distribution coefficient ( $K_d$ ) of Cs<sup>+</sup> is slightly decreased with increasing concentrations of co-existence cations. The adsorption follows a typical Langmuir model and the pseudo-second-order kinetic model. The adsorption capacity of Cs reaches as high as 0.390 mmol/g and 0.323 mmol/g in batch and column experiments in 0.6 mol/L Na, respectively.

Key words: Cs; adsorption; ammonium molybdopho-sphate(AMP); SiO<sub>2</sub>

在 2011 年 3 月 11 日发生的日本福岛核事故 中,由于地震和海啸的共同作用,导致了大量放射 性废水的产生并继而向周边地区扩散,对周围的 生态和环境产生了灾难性的影响,放射性废水中

收稿日期:2013-11-19;修订日期:2014-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 21261140335);上海交通大学新进青年教师启动计划资助项目(No. 2202011001) 作者简介:王启龙(1988—),男,安徽合肥人,硕士,核科学与工程专业

\*通信联系人:吴 艳(1981-),女,广西南宁人,博士,助理研究员,核科学与工程专业,E-mail: wu\_yan@sjtu.edu.cn

主要放射性核素<sup>137</sup>Cs的放射性强度高、半衰期较 长(约30a)、释热量大,在对放射性废水的最终处 置之前必须将其去除。此外,由于<sup>137</sup>Cs在工业及 医疗领域作为辐射和热源的应用<sup>[1]</sup>,也进一步加 深了人们对其的研究兴趣。目前,针对放射性元 素 Cs的去除,学者们总结了不同的方法,如沉淀 法<sup>[2-3]</sup>、溶剂萃取法<sup>[4-7]</sup>和离子交换法<sup>[8-11]</sup>等,而其 中离子交换和吸附法是目前国内外去除溶液中元 素 Cs的主要方法之一。

目前离子交换和吸附法中常见的吸附材料主 要有:人造和天然沸石、多价金属磷酸盐、亚铁氰 化物、钛硅化合物和杂多酸盐等,受限于自身结构 的特性,这些吸附剂材料都存在各自的缺陷。如 沸石类吸附剂的吸附速度通常较慢,多价金属磷 酸盐易受共存离子的干扰,亚铁氰化物材料机械 性能较差,钛硅化合物合成方法尚未成熟,杂多酸 盐类吸附剂造粒困难等。因此如何利用这些材料 的优点而克服上述的诸多缺点,一直是人们研究 的热点和兴趣所在。

磷钼酸铵((NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>12MoO<sub>3</sub>)是一种典型 的杂多酸盐,具有 Keggin 结构,由 4 组 3 个钼氧 八面体组成,每个八面体共用顶角上的氧原子,结 合成 Mo<sub>3</sub>O<sub>10</sub> 单元,NH<sup>4</sup> 位于其结构的间隙当 中<sup>[12]</sup>,可与 Cs 进行离子交换。因为其具有选择 性强、吸附量大和稳定性良好等特点,被广泛用于 Cs 的吸附分离。然而,由于磷钼酸铵本身呈粉末 微晶状,机械强度差,在柱子操作当中容易造成柱 子堵塞。为解决这些问题,本研究采用了一种多 孔性二氧化硅作为载体,采用孔内结晶法将 AMP 负载到二氧化硅的孔道中。该吸附剂具有颗粒均 匀、结构稳定、机械强度好、选择性高等优点,可以 更好地满足柱子操作的要求。

本工作拟合成硅基磷钼酸铵吸附剂,并通过 X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、BET、电子 探针显微分析(EPMA)等表征手段探究该吸附剂 的结构特性;通过静态和动态实验研究其对 Cs 的吸附行为,并研究共存元素的影响,同时和常用 的沸石类吸附剂做性能比较。

### 1 实验部分

### 1.1 试剂和仪器

本实验所使用的化学试剂如磷钼酸、氯化铵、 氯化铯、氯化钠、沸石等均为市售分析纯试剂。

电子天平,日本 SHIMADZU 公司,精度为

0.1 mg; A-1000S 型恒温振动水箱, 日本 EYELA 公司, 转速 120 r/min; ICPS7510 同步电感耦合等 离子体光谱仪, 日本 SHIMADZU 公司; SP3880 原子吸收分光光度计, 上海光谱仪器制造; Sirion200 型扫描电子显微镜(SEM), FEI 公司; D8ADVANCE 型粉末 X 射线衍射(XRD), BRUKER-AXS 公司; ASAP2020 型比表面积及孔隙度分析仪(BET), 美国麦 克公司; 1720Series 电子探针(EPMA), 日本岛津公司。

### 1.2 实验样品制备

将二氧化硅载体(SiO<sub>2</sub>)置于 0.1 mol/L 磷钼 酸的水溶液中浸渍 3~5 h,过滤,40 °C 干燥后,将 得到的产物与 0.5 mol/L 硝酸铵溶液混合 3~ 5 h,过滤,40 °C 干燥。通过氯化铵和磷钼酸的结 晶反应在二氧化硅的纳米孔道内生成磷钼酸铵微 晶,得到本实验所需要的硅基磷钼酸铵吸附剂 (AMP/SiO<sub>2</sub>),并在室温保存。实验中浸渍磷钼 酸一次让其与氯化铵混合而发生结晶反应生成的 吸附剂本文标记为 AMP1/SiO<sub>2</sub>,在 AMP1/SiO<sub>2</sub> 的基础上重复一次上述浸渍和混合步骤而结晶反 应生成的吸附剂样本标记为 AMP2/SiO<sub>2</sub>。

### 1.3 材料表征

使用 SEM 研究了 SiO<sub>2</sub> 载体以及 AMP/SiO<sub>2</sub> 的表面特性,使用 XRD 法比较了合成前后的谱 图,使用氮气作为介质的 BET 方法考察了吸附剂 的孔径、比表面积,使用 EPMA 方法考察了铯元 素被吸附后在吸附剂内部的分布情况。

### 1.4 吸附实验

**1.4.1** 静态实验 在 20  $\mu$ g/g CsCl-0.6 mol/L NaCl 溶液中加入 AMP/SiO<sub>2</sub>,固液比为 400 cm<sup>3</sup>/g,恒温 (25±1)℃振荡一定时间,采用火焰原子吸光光 谱仪测定不同时间的 Cs 浓度。通过计算吸附率 (*R*)和吸附分配系数(*K*<sub>d</sub>)两个指标来考察吸附剂 对 Cs 的静态吸附能力。*R* 及 *K*<sub>d</sub> 的定义如下。

 $R = (w_0 - w_t)/w_0 \times 100 \quad (\%) \qquad (1)$ 

 $K_{d} = [(w_{0} - w_{e})/w_{e}] \times V/m$  (cm<sup>3</sup>/g)(2) 其中: $w_{0}$ 、 $w_{t}$ 、 $w_{e}$ 分别指在初始、t 时刻以及平衡 时刻 Cs 的含量, $\mu$ g/g;V 为液体体积, cm<sup>3</sup>;m 为 吸附剂的质量,g。

**1.4.2** 动态实验 实验用柱子的尺寸为  $\phi$ 10 mm× 300 mm,取 16 g AMP/SiO<sub>2</sub> 均匀紧凑的填充于柱 子内部。将 20 mmol/L CsCl-0.6 mol/L NaCl 的 原液以 1 cm<sup>3</sup>/min 的流速流过柱子,通过自动收 集器,每 6 min 采样一次,测试样品中的 Cs 浓度, 绘制穿透曲线和计算动态离子交换容量。

#### 结果与讨论 2

### 2.1 材料表征

AMP2/SiO<sub>2</sub>

109.3

2.1.1 SEM 和 BET 图 1 显示了 SiO<sub>2</sub> 及 AMP/ SiO<sub>2</sub>的表面特征情况。从图 1 中可以看出,所用 的载体为形状均匀的球状体,担载二次和担载一 次 AMP 的吸附剂相比,在载体表面会出现较多 的白色颗粒,这主要是因为随着结晶次数的增加, 反应生成的 AMP 颗粒逐渐从载体孔内向外部蔓

延所致。且AMP1/SiO2和AMP2/SiO2中AMP 的担载量分别为 32.4%以及 51.6%。表 1 显示 了 SiO<sub>2</sub> 及 AMP/SiO<sub>2</sub> 的 BET 测试结果。从表 1 中可以看出,随着担载次数的增加,BET 表面积 会逐渐增加,而孔体积和平均孔径的大小会相应 的减少。这与 SEM 观测结果中显示的结晶量逐 渐增加,AMP由孔内向孔外延伸的现象一致。同 时可以观察 AMP/SiO<sub>2</sub> 的孔体积大、具有多孔性的 特点,有益于目标金属离子的扩散与吸附<sup>[13]</sup>。



图 1 SiO<sub>2</sub>(a)、AMP1/SiO<sub>2</sub>(b)及 AMP2/SiO<sub>2</sub>(c)的 SEM 表征(×1 000) Fig. 1 SEM results for SiO<sub>2</sub>(a), AMP1/SiO<sub>2</sub>(b) and AMP2/SiO<sub>2</sub>(c)(×1 000)

	Table 1 BE	CT testing results	
吸附剂 (Adsorbents)	BET 表面积	孔体积	平均孔径
	(Surface area)/	(Volume of pole)/	(Aperture
	$(m^2 \cdot g^{-1})$	$(cm^3 \cdot g^{-1})$	averaging)/nn
$\mathrm{SiO}_2$	66.4	0.60	39.09
AMP1/SiO <sub>2</sub>	72.2	0.46	25.42

0.31

4.05

表 1 BET 测试结果

2.1.2 XRD 图谱 图 2 显示了 SiO<sub>2</sub>、AMP1/ SiO<sub>2</sub>及AMP2/SiO<sub>2</sub>的XRD图谱。由图2可以 发现,单纯的 SiO<sub>2</sub> 载体的衍射峰形状平缓说明其 是非晶质物质,随着 AMP 在其孔内的第一次结 晶生成可以发现明显的 AMP 的衍射峰的存在 (2*θ*=22°、26.5°、31°、36°、63°),当 AMP 在载体内 第二次结晶时,其主要衍射峰的位置基本同前一 次的相同,但衍射峰的强度有了明显的增加,这主 要是因为 AMP1/SiO2 及 AMP2/SiO2 中 AMP 的担载量分别为 32.4% 和 51.6%, AMP 担载量 的增加增强了特征衍射峰强度。通过考察,实验 所合成的 AMP 晶体为具有 12 个结晶水的 (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>12M<sub>0</sub>O<sub>3</sub> • 12H<sub>2</sub>O 物质。根据上述实 验结果,吸附性能实验主要采用孔径较大、吸附剂 表面光滑的 AMP1/SiO2 来进行。



#### 2.2 吸附动力学

2.2.1 接触时间对吸附的影响 吸附速度是评价 吸附剂实际应用的重要参数之一,图3显示了接触 时间对 AMP/SiO<sub>2</sub>对 Cs 的吸附性能的影响。为了 比较,图3也列出了在相同实验条件下几种常用沸 石类吸附剂对 Cs 的吸附效果。从图 3 可以看出, AMP/SiO<sub>2</sub> 的初始吸附效率高,吸附速率快,可在 10 min 时达到平衡,吸附率接近 100%。而沸石类 吸附剂的吸附速度则相对缓慢,在6h后仍然没有 达到平衡,其吸附率只有60%左右,这主要是因为





沸石类吸附剂为三维架状结构的材料,内部含有较 多的孔隙通道,铯离子通过这些孔道进入其内部与 阳离子发生交换,但沸石的孔道很小只有几个纳米 左右,从而目标元素的扩散相当缓慢所致。而实验 所合成的 AMP/SiO<sub>2</sub> 吸附剂孔径较大,这非常有利 于离子的扩散和交换,因此其对铯的吸附速度很 快。以上结果表明,AMP/SiO<sub>2</sub> 对 Cs 具有良好的 吸附动力学特性。Cs<sup>+</sup> 在 AMP/SiO<sub>2</sub> 上的吸附可 以用假二级动力学方程描述:

$$\frac{t}{q_{\iota}} = \frac{1}{kq_{\rm e}^2} + \frac{t}{q_{\rm e}} \tag{3}$$

式中: $q_e$ 和 $q_i$ 分别表示平衡时刻和t时刻 Cs在 AMP/SiO<sub>2</sub>上的吸附量,mg/g;k为假二级动力 学方程吸附速率常数,g/(mg•min),其大小与初 始离子浓度、pH、温度等因素有关,该方程假设时 间与吸附量的比值与时间呈线性关系<sup>[14]</sup>。图 4



为 Cs 在 AMP/SiO<sub>2</sub> 上吸附的假二级动力学的线 性拟合。利用其斜率和截距可以求得吸附速度常 数  $k=0.293 2 g/(mg \cdot min), 吸附平衡后的吸附$  $量 <math>q_e = 8.086 mg/g_o$  线性相关系数 r=0.997, 非常接近 1,说明 Cs 在 AMP/SiO<sub>2</sub> 上的吸附符合假 二级动力学模型。

2.2.2 共存离子对 AMP 吸附 Cs 的影响 由于 放射性废水中有大量的共存离子存在,它们会对 Cs 的吸附过程产生竞争性影响。由于沿海核电 站的核事故发生时,大都采用海水进行冷却,产生 大量的含<sup>137</sup>Cs的放射性海水,因此本实验主要以 海水系核事故放射性废水中常见的几种共存离子  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 作为考察对象,考虑到通常 海水中阳离子浓度不超过1 mol/L,因此实验中 从低到高依次选取了 0.01、0.1、0.4、1 mol/L 四 种浓度下四种共存离子对于 AMP/SiO2 吸附 Cs 的影响,其结果示于图 5。由图 5 可见,随着 Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup>浓度的增加,Cs 的分配系数 K<sub>d</sub> 有一个略 微下降的趋势,主要是因为 Na、K 与 Cs 为同族元 素,具有相似的化学性质,且 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>的离子半 径分别为 0.009 5、0.013 8 nm, 与 NH<sup>+</sup> 相近 (0.0143 nm)<sup>[15]</sup>,因此,Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>也可与AMP 中的  $NH_4^+$  发生竞争性交换, 而  $K^+$ 与  $Na^+$ 相比在 半径上更为接近 NH<sup>4</sup>,因而较容易形成更稳定 的结构,因此其对吸附的影响也较  $Na^+$  大。 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>对吸附的影响主要可能涉及离子交换 以外的其他过程,如络合作用或者非特异性表面 吸附等过程<sup>[16]</sup>。尽管 Cs 的吸附受到了共存元素 的影响,然而即使在1 mol/L 共存元素存在的条 件下,Cs的K。值仍能保持在一个很高的水平 (>10<sup>3</sup> cm<sup>3</sup>/g),这表明 AMP/SiO<sub>2</sub> 对 Cs 具有良



好的选择性吸附。

2.2.3 吸附等温线 吸附等温线是指平衡时吸 附剂及液相中被吸附物的含量之间关系的曲线, 可通过吸附模型来拟合判断吸附类型并计算出理 论上的饱和吸附容量。本实验采用 Langmuir 模 型及 Freundlich 模型对吸附等温线进行拟合。 其方程如下:

Langmuir 模型: 
$$\frac{c_{e}}{Q_{e}} = \frac{c_{e}}{Q_{max}} + \frac{1}{K_{L}Q_{max}}$$
 (4)  
Frenchlich 模型:  $\lg Q_{e} = \frac{1}{n} \lg c_{e} + \lg K_{F}$  (5)

其中, $c_e(mol/L)$ 、 $Q_e(mol/g)$ 表示平衡时液相和 固相 Cs 的浓度; $Q_{max}(mol/g)$ 为最大吸附量; $K_L$ (L/mol)为 Langmuir 吸附平衡常数,其值大小与 吸附剂、吸附质的性质及温度高低有关,值越大表 示吸附能力越强; $K_{\rm F}$ 、n为 Freundlich 吸附平衡 常数。其中 Langmuir 模型假设吸附为单分子层 吸附,且固体表面均匀各处吸附能力相同,吸附热 为常数;而 Freundlich 模型适用于多分子层吸 附,且表面为非均匀吸附<sup>[17]</sup>。图 6(a、b)显示了 AMP/SiO<sub>2</sub> 吸附 Cs 的 Langmuir 及 Freundlich 吸附模型。通过拟合计算发现, Langmuir 及 Freundlich拟合的线性相关系数分别为 0.994 4 及 0.936 5,由此可知 Langmuir 模型能更好地拟 合吸附结果,这表明了 AMP/SiO<sub>2</sub> 上的吸附点是 均匀的,Cs在其上面的吸附是单层吸附。通过 Langmuir 拟合曲线斜率可计算得出最大理论饱 和吸附容量约为 0.40 mmol/g, 与实验测量值 0.390 mmol/g 接近; Langmuir 吸附常数值可通 过截距得出,为 0.045 L/mol,显示了 AMP/SiO<sub>2</sub> 对 Cs 良好的吸附性能。



Fig. 6 Langmuir plot(a) and Freundlich plot(b) of Cs<sup>+</sup> adsorption onto AMP/SiO<sub>2</sub>

**2.2.4** 柱子实验结果 图 7 显示了柱子实验的 结果。由图 7 可见,穿透曲线呈典型的"S"形状,



穿透率为 5%时柱子流出液体积约为 270 mL,当 原液进料体积达 350 mL 以后 Cs 开始 100%穿 透,相对应的 5%吸附容量及总吸附容量分别为 0.301 mmol/g 及 0.323 mmol/g,通过两者的比 值可以得出柱子利用率高达 93.2%。由此表明, 即使在 0.6 mol/L 的钠溶液中,AMP/SiO<sub>2</sub> 对 Cs 仍具有较高的交换容量。

### 3 EPMA 线分析

将吸附 Cs 后的 AMP/SiO<sub>2</sub> 制备成金相试 样,用扫描电镜观察剖面的形貌,通过电子探针显 微分析仪(EPMA)对试样的剖面进行元素扫描 (图 8)。在线扫描区域,可同时观察到 Cs 和 AMP的构成元素 Mo 的检出峰,Cs 和 Mo 的元 素分布几乎一致,这说明Cs<sup>+</sup>与钼氧八面体空隙



图 8 AMP/SiO<sub>2</sub> 的剖面 SEM 图(a)和 EPMA 线分析结果(b) Fig. 8 SEM results of cross section(a) and EPMA analysis of AMP/SiO<sub>2</sub> adsorbing Cs<sup>+</sup>(b)

中的 NH<sup>+</sup> 发生离子交换被吸附于 AMP 上, AMP 对 Cs 的吸附选择性好。

### 4 结 论

本实验用孔内结晶的方法,在多孔性二氧化硅 载体内合成磷钼酸铵,从而制备了一种新型吸附 剂,其中 AMP 担载量可达 32.4%~ 51.6%。该吸 附剂与传统的沸石类材料相比具有吸附动力学速 度快、吸附容量大等优点。对 Cs 的吸附在 10 min 即可达到平衡,吸附动力学符合假二级动力学方 程。吸附效果受 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>四种共存离 子的影响较小,吸附过程符合 Langmuir 吸附模型。 对 Cs 的静态和动态的吸附容量的实验值分别可达 0.390 mmol/g 和 0.323 mmol/g,柱子效率为 93.2%。上述结果表明,所合成的吸附剂有望应用 于含有多种共存离子的废水中铯元素的去除。

### 参考文献:

- [1] Wu Y, Kim S-Y. Study on the selective separation of cesium from high level liquid waste using a macroporous silica-based supramolecular[J]. Radioanal Nucl Chem, 2012, 293; 13-20.
- [2] Lehto J, Harjula R, Wallance J. Absorption of cesium on potassium cobalt hexacyanoferrate [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2005, 111(2): 297-304.
- [3] 杨志红,杨磊,丁有钱. 沉淀法分离 Cs 和 Rb 的研究[J]. 核化学与放射化学,2004,26(2):96-98.
- [4] Delmau L H, Bonnesen P V, Moyer B A. A solution to stripping problems caused by organophilic anion impurities in crown-ether-based solvent extraction system: a case study of cesium removal from radioactive wastes [J]. Hydrometallurgy, 2004, 72(1): 9-19.
- [5] Sachleben R A, Bonnesen P V, Haverlock T J, et al. Surveying the extraction of cesium nitrate by 1,3-alternatecalix[4] arena crown-6 ethers in 1,2-dichloroethane[J]. Solvent Extr Ion Exch, 1999, 17(6):

1445-1459.

- [6] 杨群,韩延德,刘大鸣. 冠醚萃取高放废液中 Sr<sup>2+</sup>、Cs<sup>+</sup> 的研究[J]. 核化学与放射化学,1996,18(1):61-64.
- [7] 叶维玲,王建晨,何千舸.二环己基18冠醚-6/异丙 氧基杯[4]冠-6-正辛醇共萃取Sr和Cs[J].核化学 与放射化学,2009,31(3):167-171.
- [8] Nilchi A, Saberi R, Moradi M, et al. Adsorption of cesium on copper hexacyanoferrate-PAN composite ion exchanger from aqueous solution[J]. Chem Eng J, 2011, 172: 572-580.
- [9] Mimura H, Wu Y, Wang Yufei, et al. Selective separation and recovery of cesium by ammonium tungstophosphate-alginate microcapsule [J]. Nucl Eng Des, 2011, 6208: 8.
- [10] Wu Y, Mimura H, Niibori Y, et al. Study on adsorption behavior of cesium using ammonium tungstophosphate (AWP)-calcium alginate microcapsules[J]. Sci China Chem, 2012, 55(9): 1719-1725.
- [11] 姜长印,王士柱.用亚铁氰化钾钛从高放废液中去除铯的研究[J].核化学与放射化学,1995,17(2):99-103.
- [12] 黄召亚,张东,谭昭怡. 沉淀法制备磷钼酸铵及其对 Cs<sup>+</sup>的吸附特性研究[J]. 核技术,2013,36(2):42-45.
- [13] Pan B L, Yue Q F, Ren J F, et al. A study on attapulgite reinforced PA6 composite[J]. Polymer Test, 2006, 25: 384-391.
- [14] Gupta S S, Bhattacharyya K G. Kinetics of metal ions on inorganic material[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2011, 162: 39-58.
- [15] 钱庭宝.离子交换剂应用技术[M].天津:天津科学 技术出版社,1984:419.
- [16] Wu J, Li B, Liao J, et al. Behavior and analysis of cesium adsorption on monotmorillonite mineral[J]. Environ Radioact, 2009, 100: 914-920.
- [17] Wu Y, Kim S-Y, Daisuke Tozawa, et al. Equilibrium and kinetic studies of selective adsorption and separation for strontium using DtBuCH18C6 loaded resin[J]. Nucl Sci Technol, 2012, 49(3): 320-327.