# 活性污泥胞外聚合物对铀酰离子的吸附性能

陈 帅1,刘峙嵘1,吴振宇2

1. 东华理工大学化学生物与材料科学学院,江西 南昌 330013;2. 东华理工大学核工程技术学院,江西 南昌 330013

摘要:用乙酸钠培养驯化了取自污水处理厂的活性污泥,采用 NaOH 提取法从活性污泥中提取了胞外聚合物 (EPS)。用静态法研究了 EPS 对铀酰离子的吸附行为,探讨了温度、pH、反应时间、EPS 投加量和离子强度等因 素对铀酰离子吸附效果的影响,进行了吸附热力学、吸附动力学研究,对比了 EPS 吸附铀酰离子前后的红外谱 图。结果表明:最佳吸附温度为 25 ℃,最佳吸附时间为 120 min,EPS 最佳投加量为 300 mg/L,离子强度对吸附 影响较大;吸附热力学和动力学研究表明,吸附过程更符合 Freundlich 吸附模型和假二级反应动力学模型。 关键词:活性污泥;胞外聚合物;铀酰离子;吸附

中图分类号: TL941.19 文献标志码: A 文章编号: 0253-9950(2014)01-0047-06 doi:10.7538/hhx.2014.36.01.0047

## Adsorption of Uranyl on Extracellular Polymeric Substances From Activated Sludge

CHEN Shuai<sup>1</sup>, LIU Zhi-rong<sup>1</sup>, WU Zhen-yu<sup>2</sup>

School of Chemistry Biology and Materials Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China;
 School of Nuclear Engineering Technology, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China

**Abstract**: The activated sludge got from sewage treatment plant was cultivated by sodium acetate. Extracellular polymeric substances(EPS) were extracted through NaOH extraction method. The adsorption behavior of EPS on uranyl was studied by static method. The influences of temperature, pH, adsorption time, the dosage of the EPS and ionic strength on the effect of adsorption of uranyl were discussed. Thermodynamic and kinetic of adsorption were discussed, too. The infrared spectra of EPS before and after adsorbing uranyl were compared. The experimental results indicate that the best adsorption temperature is 25 °C, the best adsorption time is 120 min, and the best dosage of EPS is 300 mg/L. The ionic concentration has a strongly impact on adsorption. The study of adsorption thermodynamics indicates that the adsorption process conforms to the Freundlich adsorption model. The study of adsorption kinetics indicates that the adsorption process conforms to second order reaction kinetics model.

Key words: activated sludge; extracellular polymeric substances; uranyl ion; adsorption

核能的开发和利用给人类带来巨大的经济效 益和社会效益,但是也不可避免产生了大量的放 射性废物,给人类的生存环境带来了较大的威胁。 放射性废水是放射性废物的重要组成部分,放射

收稿日期:2013-09-23;修订日期:2013-11-13

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(11375043);江西省自然科学基金资助项目(20114BAB203020) 作者简介:陈 帅(1990一),男,江西吉安人,硕士研究生,分析化学专业,E-mail: 451640544@qq.com 性废水的处理问题也是放射性废物处理研究的重 要问题之一。

目前处理放射性废水的方法有很多,其中生物 吸附法具有去除率高、成本低、易于降解、无毒等优 点[1]。大量的研究表明,活性污泥胞外聚合物 (EPS)作为一种新型生物吸附剂对重金属离子具 有很好的吸附性能<sup>[2-4]</sup>。并且,EPS从活性污泥中 获得,解决了一部分污泥的出路,减少了污泥废物, 降低了对环境带来的污染。因此,对其开展一系列 的研究工作非常有意义。国外对 EPS 的研究起步 较早,而且关于 EPS 对重金属吸附作用的研究侧 重于重金属离子的吸附过程和机理。Guibaud<sup>[5]</sup>研 究发现,氢离子与金属离子之间交换不是 EPS 吸 附金属离子的唯一吸附机理,它的吸附机理还有阳 离子交换、配位基或菌胶团周围的电场作用等。国 内用 EPS 进行重金属吸附试验的文献报道较多, 但是用来进行含铀废水吸附的相关报导却很少。 苑士超區对厌氧活性污泥胞外聚合物除铀试验的 研究表明,用 NaOH 法提取获得的厌氧污泥 EPS, 对铀表现出良好的吸附性能,铀去除率可高达 98.3%。本工作拟采用静态吸附法研究好氧活性 污泥胞外聚合物对铀酰离子的吸附情况,并进行吸 附热力学、动力学研究及吸附前后红外谱图比对, 探索吸附机理,以此为相关学者提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

所用试剂除了溴化钾为光谱纯外,其他试剂 均为市售分析纯。试验用水均为去离子水。

721E型可见光分光光度计,上海光谱仪器有限公司;UV-754型紫外可见光分光光度计,上海 光谱仪器有限公司;Flash EA1112型元素分析 仪,Thermo Electron SPA公司;PHS-3C型 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;Nicolet-5700型红外吸收光谱仪,Thermo Nicolet公司; SHA-B型水浴恒温震荡器,常州国华电器有限公 司;AR124CN型电子分析天平,感量为0.0001g, 奥豪斯仪器(上海)有限公司;FD-1A-50型真空冷 冻干燥箱,北京博医康实验仪器有限公司。

## 1.2 活性污泥的培养及其胞外聚合物的提取

1.2.1 活性污泥的培养与驯化 活性污泥取自 江西抚州市污水处理厂 A/O 池的好氧段,采用 SBR 反应器培养。向装培养液的 SBR 反应器加入 乙酸钠,最后加入接种污泥,曝气搅拌,对活性污泥 进行驯化培养。驯化的周期为 12 h,其中进水阶段 30 min、曝气反应阶段 9 h、沉淀阶段1.5 h、排水排 泥阶段 30 min 以及闲置阶段30 min。活性污泥在 实验室室温条件下培养,溶液中溶解氧量控制在 3~5 mg/L,调节 pH=6.5~7.5。每一个周期开始 之前,排出 5 L 经沉淀阶段沉淀下来的上清液,再 补齐 5 L 配置的培养溶液,使得混合后培养液的化 学需氧量(用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 法测定,简写为 COD<sub>cr</sub>)大约 为 600 mg/L。曝气阶段结束前的 20 min 内,反应 器排出 1 L 的混合溶液。培养过程中采用不间断 监测的方法来监测反应器中活性污泥的 4 项参数 污泥沉降比(SV)、污泥浓度(MLSS)、污泥体积指 数(SVI)、混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)及 培养溶液的 COD<sub>cr</sub>,只有当上述5 个参数稳定时间 达 10 d 以上,取样实验才可开始进行。

1.2.2 胞外聚合物的提取 采用 NaOH 提取法 对 EPS 进行提取:(1) 取适量 SBR 反应器中的活 性污泥于烧杯中,用去离子水清洗,静置30 min倒 掉上清液,再用去离子水补齐继续静置 30 min,如 此反复操作3次,得到试验所需活性污泥;(2) 用 NaOH 溶液将污泥的 pH 调为 11,缓慢搅拌 15 min,用冷冻离心机在转速为 10 000 r/min、温 度为4℃的条件下离心 20 min,上清液用滤膜过 滤,得到了较粗的 EPS 溶液;(3) 将粗 EPS 溶液 的 pH 调至中性,转移到透析袋(分子截留量为 8 000~14 000)中,并将透析袋放在体积为 2 L 的 大烧杯中,烧杯加去离子水 1 500 mL,用磁力搅 拌器搅拌 6 h,每隔 1 h 换水一次。经 6 h 的透析 之后得到了纯度较高的 EPS 溶液。

## 1.3 活性污泥胞外聚合物组分的测定、元素分析 以及红外光谱表征

试验分别用苯酚-硫酸法、双缩脲法以及紫外 分析法测定 EPS 中多糖、蛋白质以及核酸的含量。 并且用元素分析仪对 EPS 中的 C、N、H 三种元素 进行含量分析。将冷冻干燥好的 EPS 固体样品与 溴化钾按照 1:200 的质量比均匀混合,倒入研钵 研磨 10 min,过筛(2 μm)之后压片,将制成片状的 样品放入到红外光谱仪中进行红外光谱表征。

## 1.4 活性污泥胞外聚合物吸附铀酰离子研究

在 250 mL 的锥形瓶中加入 EPS、铀酰离子标准溶液、硝酸钾溶液和去离子水,体积之和为 100 mL,用稀硝酸溶液和稀氢氧化钠溶液将混合溶液的初始 pH 值调节成一定值后,将锥形瓶放 在恒温水浴振荡器内振荡,振荡的频率设定为

200 r/min,设定一定温度和时间;振荡吸附后,从 锥形瓶中吸取 50 mL 样品溶液,装入透析袋(截 留分子量为 8 000~14 000)中,然后将透析袋放 入装有 500 mL 去离子水体积为 1 L 的大烧杯内 透析 6 h<sup>[7]</sup>,取少量透析袋外面的水样,用偶氮胂(III) 分光光度法测定水样中的铀离子浓度,进而计算 出锥形瓶溶液中残余的铀酰离子浓度。

## 2 结果与讨论

## 2.1 EPS 组分以及元素分析

试验测得 EPS 总量为 16.851 mg/g(以 MLSS 计), EPS 中多糖、蛋白质、核酸的含量分别为 8.512、0.822、3.532 mg/g(以 MLSS 计,下同), 三种物质分别占 EPS 总量的 50.513%、4.878%、20.960%。其中多糖含量最大,超过50%,这跟当前的一些研究结果相吻合。元素分析仪测得 EPS 中 C、N、H 含量分别为 520.100、95.123、90.002 mg/g。

## 2.2 不同吸附温度对 EPS 吸附铀酰离子的影响

在铀酰离子初始质量浓度 20 mg/L、 $c(KNO_s) = 0 mol/L, \rho(EPS) = 200 mg/L, pH = 3.0, 反应时间 120 min 的试验条件下,进行温度(<math>\theta$ )对铀酰离子吸 附影响的试验,结果示于图 1。由图 1 可知, EPS 对铀酰离子的吸附率随着温度的升高而呈现逐渐 增大的趋势,但吸附率增长的数值并不明显。这与 苑士超<sup>[6]</sup>、陶琴琴<sup>[8]</sup>等的研究结果相一致。选取体 系温度为 25 ℃作为后续实验吸附反应温度。



图 1 不同吸附温度下 EPS 对铀酰离子的吸附 Fig. 1 Adsorption of uranyl ion on EPS at different temperatures

## 2.3 不同 pH 对 EPS 吸附铀酰离子的影响

在铀酰离子初始质量浓度 20 mg/L、 $c(KNO_s)$  = 0 mol/L、 $\rho(EPS)$  = 200 mg/L、反应时间120 min、反应温度 25 ℃的试验条件下,进行 pH 对铀酰离子吸附影响试验,结果示于图 2。由图 2 可知: EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸附受 pH 的影响

很强烈,随着 pH 的升高,吸附率逐渐增大;在 pH=2.0~4.0,EPS 对铀酰离子的吸附率随着 pH 的升高而迅速增大;当 pH>6.0以后,吸附率 曲线趋于平坦,吸附率稳定在 90%以上。这可能 是因为,在低 pH 环境中,溶液中大量的 H<sup>+</sup>与铀 酰离子争夺 EPS 上的结合位点,并使 EPS 表面 质子化,增加其表面张力,导致吸附效率不高。溶 液的 pH 并不是越高越好,为了防止铀酰离子水 解以及沉淀因素<sup>[9]</sup>对实验的影响,选取 pH=3.0 作为后续实验吸附反应的 pH。



Fig. 2 Influence of pH on the adsorption of uranyl to EPS

## 2.4 不同吸附时间对 EPS 吸附铀酰离子的影响

在铀酰离子初始质量浓度 20 mg/L、 $c(KNO_s)$  = 0 mol/L、 $\rho(EPS)$  = 200 mg/L、反应温度 25 ℃、 pH=3.0 的试验条件下,进行反应时间(t)对铀酰 离子吸附影响试验,结果示于图 3。由图 3 可知: EPS 对铀酰离子的吸附率随振荡吸附时间的增 加而增大,反应刚开始的 5~30 min,EPS 对铀酰 离子的吸附较快,吸附效率增加的趋势非常显著; 在 30~60 min 这个阶段吸附率增长变缓;当吸附



on EPS in different time

反应时间达到 120 min 时,吸附率基本接近平衡 值;继续增大吸附时间,吸附率基本不变,趋于稳 定。这可能是因为在反应刚开始时,EPS 上存在 较多的吸附位点,这些位点都可以提供给 EPS 来 吸附溶液中的铀酰离子;而吸附反应发生一段时 间后,EPS 上的吸附位点减少,并且吸附位点上 附着的铀酰离子与溶液体系中的铀酰离子之间存 在同电荷斥力,导致了吸附效率增长的速率变缓; 继续吸附使得 EPS 上的吸附位点趋于饱和,溶液 体系中铀酰离子很难被 EPS 上的吸附位点吸附。 从实验结果来看,EPS 对铀酰离子的吸附比较合 适的吸附反应时间为 120 min,因此在之后的实验 中,选取 120 min 作为后续实验的吸附反应时间。

2.5 不同 EPS 投加量对 EPS 吸附铀酰离子的影响

在铀酰离子初始质量浓度 20 mg/L、 $c(KNO_s)$  = 0 mol/L、反应温度 25 °C、pH = 3.0、反应时间为 120 min 的试验条件下,进行 EPS 浓度对铀酰离 子吸附影响试验,结果示于图 4。由图 4 可知:在 开始阶段,EPS 对铀酰离子的吸附率随着 EPS 投加量的增加而显著升高,继续增大 EPS 投加量,吸附率增速减缓,当投加量到达一定数值之后, EPS 对铀酰离子的吸附率基本保持不变。然而,随着 EPS 投加量的增加,EPS 对铀酰离子的吸附量却逐渐减小。造成此类现象的原因可能是: EPS 量的增加提供了更多的吸附位点,但进一步增加时,高分子链状的 EPS 分子在水中展开程度降低,其吸附位点可能被包埋在内。从实验结果可以得出,EPS 的最佳投放量为 300 mg/L,相对应铀酰离子的吸附率为 68.328%。

2.6 不同离子强度对 EPS 吸附铀酰离子的影响 在铀酰离子初始质量浓度 20 mg/L、反应温



图 4 不同 EPS 投加量下 EPS 对铀酰离子的吸附 Fig. 4 Adsorption of uranyl ion on EPS in different dosages of EPS

度 25 ℃、pH=3.0、反应时间为 120 min、p(EPS) = 200 mg/L的试验条件下,进行离子强度对铀酰离子吸附影响试验,结果示于图 5。由图 5 可知:随着溶液体系中 KNO<sub>8</sub> 初始浓度的增加,EPS 对铀酰离子的吸附率呈现下降的趋势,造成这种现象的原因是,KNO<sub>8</sub> 初始浓度的增加使得溶液体系中电解质浓度增加,削弱了 EPS 与铀酰离子之间的静电作用<sup>[10]</sup>;另外,在溶液体系中的电解质还会同溶液中的铀酰离子一起竞争 EPS 上的吸附位点进而参与到表面吸附反应中来,降低了 EPS 对溶液中铀酰离子的吸附率,尤其是当溶液体系中离子强度在不同量级的时候,上述现象表现得尤为明显。



图 5 不同离子强度下 EPS 对铀酰离子的吸附 Fig. 5 Adsorption of uranyl ion on EPS in different ionic strength

### 2.7 吸附热力学研究

在研究吸附反应机理的过程中,比较常用的 方程有两个<sup>[11-12]</sup>:一个是 Freundlich 方程, ln  $q_e$  = ln  $Q_f$  + nln  $\rho_e$ ; 另外一个是 Langmiur 方程,  $\frac{\rho_e}{q_e}$  =  $\frac{1}{q_{max}K_1} + \frac{\rho_e}{q_{max}}$ 。其中:  $q_e$ ,吸附反应达到平衡时 EPS 对铀酰离子的吸附量, mg/g;  $Q_f$ , Freundlich 方程等 温式中吸附容量, mg/L; n, Freundlich 方程等温式 中模型常数;  $\rho_e$ , 铀酰离子平衡质量浓度, mg/L;  $q_{max}$ , EPS 对铀酰离子的最大吸附量, mg/g;  $K_1$ , Langmuir 方程等温式中吸附反应平衡常数, L/mg。 为了探索 EPS 对溶液中铀酰离子的吸附机理,将用 以上两个方程来对实验数据进行拟合。

在 25 ℃、pH = 3.0、c (KNO<sub>3</sub>) = 0 mol/L、  $\rho$ (EPS) = 200 mg/L、反应时间为 120 min 的试验 条件下进行吸附试验,对试验结果进行拟合,得到 吸附等温线,结果示于图 6。由图 6 可知:EPS 对 铀酰离子的吸附既符合 Freundlich 吸附模型,也 符合 Langmuir吸附模型,但从相关系数评价的





标准角度来看, Freundlich 吸附模型更适合用来 描述 EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸附过程。

Freundlich 吸附模型可以用来描述以下两类 表面吸附行为:一类是表面不均一的表面吸附行 为;另一类是粒子在表面位点吸附后,存在相互作 用的表面吸附行为。Langmuir 吸附模型导出的 条件有两个<sup>[12]</sup>:一个是表面的吸附位点均匀分 布,不存在差异;另一个是单层吸附。说明了 EPS 对铀酰离子的吸附都不是简单的单分子层 吸附。通过拟合得到 EPS 对溶液体系中铀酰离 子的吸附指数 n = 0.185,介于 0.1 和 1.0 之 间<sup>[13]</sup>,反映了 EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸 附反应比较容易进行,吸附性能也比较好。

## 2.8 吸附动力学研究

在研究吸附反应中固相和液相两相的吸附动 力学时,比较常用的有两个模型<sup>[14]</sup>:一个是假一 级反应动力学模型,另一个是假二级反应动力学 模型。两个模型的表达式分别为: $(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \ \pi \frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_{\max,2}^2} + \frac{t}{q_{\max,2}}$ 。其中:t,吸附反应的 时间; $q_t$ ,t时刻 EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸 附量,mg/g; $q_e$ ,假一级反应动力学方程中吸附反 应达到平衡时的吸附量,mg/g; $q_{\max,2}$ ,假二级反应 动力学方程中吸附反应的最大吸附量,mg/g;k1, 假一级反应动力学模型速率常数;k2,假二级反应 动力学模型速率常数。

对 2.3 节的试验数据进行拟合,得出反应动力 学模型方程拟合曲线,结果示于图 7。由图 7可知, 假一级反应动力学方程线性拟合较差,从相关系数 评价的标准角度来看,假二级反应动力学模型更适 合描述 EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸附。假二 级反应动力学模型作出了以下假设<sup>[15]</sup>:① 吸附反 应的作用方式是一种化学作用方式;② 在整个的 吸附过程中,在开始时吸附速率最快,大于其他任 何时刻的瞬时吸附速率;③ 吸附位点对于吸附每 个铀酰离子的吸附能都一样,不存在差异。

假二级反应动力学模型对 EPS 吸附铀酰离 子的数据拟合,得出 EPS 对溶液体系中铀酰离子 吸附最大吸附量(q<sub>max</sub>)为 46.253 mg/g。

## 2.9 EPS 吸附铀酰离子前后的红外光谱分析

EPS 吸附铀酰离子前后的红外光谱图对比示于图 8。由图 8 可知,EPS 吸附铀酰离子前后 红外谱图发生了一些变化,一些官能团的谱峰发 生了漂移或强弱变化。吸附前谱图中 1 200~ 1 600 cm<sup>-1</sup>处有一个特征峰,表示 EPS 中存在羧 基;800~1 200 cm<sup>-1</sup>有几个强度不大的吸收峰,



图 7 假一级(a)和假二级(b)动力学方程拟合曲线

Fig. 7 First order reaction(a) and second order reaction(b) fitting curves of different kinetic equations





表示 EPS 中存在少量的多聚糖和苯环;800 cm<sup>-1</sup>以 下的特征峰表示 EPS 中存在磷酸基或硫酸基团; 吸附反应后,这几个峰都不同程度的向右迁移。这 说明在 EPS 吸附铀酰离子的过程中,羧基、多聚糖 和苯环中的基团以及磷酸基或硫酸基团都参与了 吸附反应;在 3 200~3 600 cm<sup>-1</sup>处的一个宽峰也发 生了较大变化,但是很难确定是其中的哪种基团参 与了吸附反应。EPS 吸附前后的明显变化说明化 学吸附存在于吸附过程中,且吸附过程复杂,有多 种物质的基团参与反应,吸附方式多样。

## 3 结 论

(1) EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸附率随 着温度、EPS 投加量和 pH 的升高而增大,但随温 度升高而变化的幅度较小。吸附量随着 EPS 投 加量的增加而减小。反应进行到 120 min 之后, EPS 对铀酰离子的吸附率增长缓慢。EPS 吸附 铀酰离子的最优试验条件如下:25 ℃、pH=3.0、 反应时间为120 min、EPS 投加量为300 mg/L,相 对应铀酰离子的吸附率为 68.328%,并随溶液体 系中 KNO<sub>3</sub> 浓度的增加,呈现下降的趋势。

(2)吸附热力学研究表明,Freundlich吸附 模型比 Langmuir吸附模型更适合用来描述 EPS 对溶液体系中铀酰离子的吸附过程。吸附动力学 研究表明,假二级反应动力学模型要更加适用于 EPS 对铀酰离子的吸附,吸附反应是化学吸附。

(3) 对比 EPS 吸附铀酰离子前后的谱图发 现,EPS 结构中的有些部位发生了改变,一些特 征吸收峰在位置或强度上发生了变化,这一现象 说明化学吸附方式存在于 EPS 吸附溶液体系中 铀酰离子的吸附过程中,且吸附过程复杂。

### 参考文献:

[1] 王远红,张红波,罗世田,等. 胞外聚合物对水中 Cd(II)

的吸附性能研究[J].环境工程学报,2010,4(10): 2185-2189.

- [2] 王亮,陈桂秋,曾光明,等. 白腐真菌胞外聚合物及 其对菌体吸附 Pb<sup>2+</sup>的影响[J]. 环境科学,2011,32 (3):773-778.
- [3] Wei X, Fang L C, Cai P, et al. Influence of extracellular polymeric substances (EPS) on Cd adsorption by bacteria[J]. Environ Pollut, 2011, 159(5): 1369-1374.
- [4] Ha J, Gélabert A, Spormann A M, et al. Role of extracellular polymeric substances in metal ion complexation on shewanella oneidensis: batchuptake, thermodynamic modeling, ATR-FTIR, and EXAFS study[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2010, 74(1): 1-15.
- [5] Guibaud G, Hullebusch E V, Bordas F. Lead and cadmium biosorption by extracellular polymeric substances (EPS) extracted from activated sludges: pH-sorption edge tests and mathematical equilibrium modeling[J]. Chemosphere, 2006, 64(11): 1955-1962.
- [6] 苑士超. 厌氧活性污泥及厌氧污泥胞外聚合物 (EPS)除铀试验研究[D]. 衡阳:南华大学,2012.
- [7] Dominguez L, Rodríguez M, Prats D. Effect of different extraction methods on bound EPS from MBR sludges part II: influence of extraction methods over molecular weight distribution [J]. Desalination, 2010, 262: 106-109.
- [8] 陶琴琴.有机底物对活性污泥胞外聚合物吸附水中 铜,锌的影响[D].南昌:东华理工大学,2012.
- [9] 高伟. 硅藻土和膨润土对铀的吸附研究[D]. 衡阳: 南华大学,2006.
- [10] Filius J D, Lumsdon D G, Meeussen J C L, et al. Adsorption of fulvic acid on goethite[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2000, 64(1): 51-60.
- [11] Shahwan T, Erten H N, Unugur S. A characterization study of some aspects of the adsorption of aqueous Co<sup>2+</sup> ions on a natural bentonite clay [J]. J Colloid Interface Sci, 2006, 300: 447-452.
- [12] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Am Chem Soc, 1918, 40: 1361-1403.
- [13] Acar F N, Malkoc E. The removal of chromium(VI)
  from aqueous: solutions by fagus orientalis L [J].
  Bioresour Technol, 2004, 94: 13-15.
- [14] Cheung C W, Porte J F, Mckay G. Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using bone char[J]. Water Res, 2001, 35: 605-612.
- [15] 刘峙嵘,韦鹏,周利民.<sup>63</sup>Ni 在泥煤水体系中的吸附 动力学[J].应用化学,2007,24(4):420-423.