

铜尾矿对水溶液中磷的吸附与解吸

张 辉, 陈 政, 高 毅, 孙庆业

(安徽省生态工程与生物技术重点实验室, 安徽大学生命科学学院, 合肥 230039)

摘 要:为研究铜尾矿作为吸附剂对水溶液中磷的吸附与解吸,从铜陵尾矿库采取尾矿样本,以其作为吸附材料对 KH_2PO_4 配制的水溶液进行吸附,用比色法测定磷的平衡浓度,然后计算平衡吸附量和解吸量。结果表明,Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程能够较好地描述铜尾矿对水溶液中磷的吸附过程;尾矿废弃物对水溶液中磷酸根的吸附量与尾矿样本中游离氧化铁、晶质氧化铁、有机络合铁含量以及烧失量呈极显著正相关,而与 pH 呈极显著负相关;各种植物群落下 A 层尾矿对磷的吸附量低于 C 层,尾矿对水溶液中磷的平均最大吸附量超过 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 铜官山老尾矿库白茅群落下硬盘层对水溶液中磷的平均最大吸附量达到 $8.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,被铜尾矿吸附的磷的平均解吸率低于 5%。

关键词:铜尾矿;磷;吸附;解吸;铁氧化物

中图分类号:X753 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1542-05

Adsorption-desorption Characteristics of Dissolved Phosphorus on Surface of Copper Mine Tailings

ZHANG Hui, CHEN Zheng, GAO Yi, SUN Qing-ye

(Anhui Key Laboratory of Ecological Engineering and Biotechnology, School of Life Science, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: The research using ecological restoration method to resolve abundant cumulate mine tailings is becoming a hot spot, however, the bioavailable phosphorus utilized by vegetation in the mine tailings is relatively low. The adsorption and desorption characteristics of dissolved phosphorus on surface of copper mine tailings was studied on the view of phosphorous bioavailability. Furthermore the effect of mine tailings on the process of ecological restoration was explored. The copper mine tailings samples from Tongling tailings reservoir were used as adsorption material to adsorb phosphorus from solution prepared with KH_2PO_4 concentrations. After washing the equilibrium solution twice with saturated NaCl solution to remove dissociative phosphorus and adding CaCl_2 solution to proceed desorption experiment, the phosphorus concentration in equilibrium was determined by spectrophotometric method and the equilibrium adsorption capacity and desorption capacity were calculated. Both adsorption and desorption processes were shaken for 1 hour, maintained the equilibrium for 24 hours and then centrifuged. The adsorption isotherm experiment, using a series of KH_2PO_4 concentrations with pH 7, was conducted to vibrate for 3 hours under constant temperature (25°C). The result indicated that the adsorption isotherm data were preferably described by both the Langmuir and Freundlich isotherm models. The adsorption capacity with the free ferric oxide, crystalloid ferric oxide, chelated ferric oxide and loss in ignition of copper mine tailings was highly significant positive relation, but the highly significant negative relation with pH. The adsorption capacity of A layers for every plant community was lower than that of C layers. The average maximum adsorption capacity of copper mine tailings on phosphorus was above $0.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and the average maximum adsorption capacity of oxidation layers under cogon community of Tongguanshan tailings reservoir was $8.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. The average desorption rate of adsorbed phosphorus was less than 5%.

Keywords: copper mine tailings; phosphorus; adsorption; desorption; iron oxides

铜尾矿是铜矿开采过程中产生的矿业固体废弃物,弃置之后会形成大面积的铜尾矿废弃地,进而对周

围的环境造成污染和破坏^[1]。但作为一种特殊的植物生长基质(植物所需的养分匮乏),也是一种特殊的成土母质,弃置后的铜尾矿会逐渐开始化学风化作用^[2]。伴随着铜尾矿中金属硫化物(特别是 FeS_2)的氧化作用,将形成大量的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 以及各种形态的铁铝氧化物^[3],这些金属离子和铁氧化物对磷的地球化学行为及其生物有效性产生显著的影响^[4]。

收稿日期:2010-03-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA06Z359);
安徽省自然科学基金资助项目(070415208)

作者简介:张 辉(1986—),男,山东邹城人,在读硕士,主要从事生态环境修复方面的研究。E-mail:zhanghuiw86@163.com

通讯作者:孙庆业 E-mail:sunqingye@ahu.edu.cn

磷是植物生长必须的元素之一,铜尾矿中一般含有一定数量的总磷^[5]。但植物生长所需的有效态磷含量很低($<1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[6],不能满足植物生长需要,因此在尾矿生态修复过程中通过施用有机肥或化学肥料提高有效磷含量。目前,关于土壤中的铁氧化物对磷的吸附、解吸研究较多,而尾矿废弃物中铁氧化物对磷的吸附研究涉及较少^[7-8]。

本研究以自然生态恢复过程中不同成土阶段尾矿废弃物为研究对象,探索不同土壤发育程度的尾矿废弃物对磷的吸附、解吸能力及其影响因素,为铜尾矿废弃地生态修复过程中基质改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 样本采集

在铜陵杨山冲尾矿废弃地(弃置 17 a)和铜官山老尾矿废弃地(弃置 30 a 以上)植物群落定居处各选择 4 块植被覆盖良好的代表性地段,每地段制作 5 个小型剖面,长 $\times$ 宽 $\times$ 深 $=0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,同一地段 5 个小型剖面相同层次的样本均匀混合得到 1 个样本。按照土壤自然发生层分别采集不同层次尾矿样本(面积 $=10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$),另在杨山冲尾矿废弃地无植物生长的裸地处采集样本作为对照。铜官山老尾矿废弃地白茅群落下自上而下分别采集 A 层(TIA)、C1 层(TIC1)和硬化层(TIpan)。杨山冲白茅群落下采集 A 层(YIA)、C1 层(YIC1)和 C2 层(YIC2)样本;杨山冲木贼群落下采集 A 层(YHA)、C1 层(YHC1)和 C2 层(YHC2)样本;杨山冲中华结缕草群落下采集 A 层(YZA)、C1 层(YZC1)和 C2 层(YZC2)样本;杨山冲裸地处采集 0~2 cm(YBC1)和 2~10 cm(YBC2)两层样本,计 56 个样本(每层样本 4 个重复)。野外采集样本在室内自然风干后去除植物凋落物和根系,研磨、过筛,装入密封袋备用。

1.2 尾矿理化性质测定

样本中游离氧化铁(Fe_d)采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠方法测定^[9],无定形氧化铁(Fe_o)采用酸性草酸铵溶液提取、比色法测定^[9];络合态铁(Fe_p)采用焦磷酸钠提取、比色法测定^[9];晶质氧化铁 $=\text{Fe}_d-\text{Fe}_o$ 。尾矿 pH 值用 pH 计测定(尾矿:水 $=1 \text{ g}:2 \text{ mL}$)^[10];尾矿中有机质含量据烧失量(550°C , 6 h)测定^[10]。

1.3 吸附、解吸试验方法

吸附等温试验:分别称取尾矿样本 1.00 g 置于 250 mL 的三角瓶中,加入 50 mL 具有不同浓度、经过稀 HCl 和稀 NaOH 调节 pH 值为 7.0 的 KH_2PO_4 溶

液。其中用于杨山冲尾矿样本吸附等温试验的溶液浓度分别为 0、5、10、15、20、25、30、40、50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而用于铜官山老尾矿样本吸附等温试验的溶液浓度分别为 0、100、120、140、160、180、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。恒温振荡 3 h,用无磷滤纸过滤,磷钼蓝比色法测其上清液中磷的浓度。根据吸附前后溶液中磷浓度的变化计算铜尾矿对磷的吸附量。

吸附试验:于 2 个 100 mL 聚乙烯离心管中各加入 1.00 g 过 60 目的尾矿样本,分别加 50 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ P (KH_2PO_4 制备)溶液,振荡 1 h 后,在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下平衡 24 h、离心,根据离心液中磷浓度的降低计算尾矿对磷的吸附量^[11]。饱和吸附后的离心管用于磷的解吸试验。

解吸试验:用 30 mL 饱和 NaCl 溶液洗涤离心管中饱和吸附磷的尾矿样本 2 次,除去离心管中游离的磷,再加 50 mL 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液,振荡 1 h 后,在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下平衡 24 h、离心,根据离心液中磷浓度计算磷的解吸量;磷的解吸量占吸附量的百分数为磷的解吸率^[11]。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 和 SPSS10.0 软件进行分析,单因素方差分析 Tukey 检验被用于样本多重比较($P \leq 0.05$),双变量相关性用 Pearson 相关系数表示。吸附等温试验数据分别用 Langmuir、Freundlich 等温吸附方程进行拟合。

2 结果与分析

2.1 尾矿废弃物对磷的吸附等温线

表 1 是 pH=7 条件时 2 个尾矿库白茅群落下尾矿对磷的等温吸附特征。由表 1 可以看出,Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程均可用于描述其吸附过程。在 pH=7 条件下杨山冲白茅群落 A、C1、C2 层的最大吸附量(Q_{max})分别为 0.86、1.05、1.05 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,铜官山白茅群落 A、C1 和 TIpan 的最大吸附量(Q_{max})分别为 0.85、1.09、8.66 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。与 A 层相比,杨山冲白茅群落下的 C1 层和 C2 层尾矿以及铜官山白茅群落样本的 C2 层和硬化层尾矿具有较高的吸附量,来自于铜官山老尾矿废弃地的 TIpan 吸附量远高于其他层样本。各层尾矿吸附量之间的差异,可能是由于铜尾矿有机质含量不同,以及其中含有的一定量金属硫化物(如 FeS_2 、 CuS 、 ZnS 等)^[5,12]在自然状态下发生氧化作用而形成的铁氧化物^[12-14]的量不同,而在此过程中 pH 值的下降也会影响尾矿的吸附量。

本研究中,铜官山老尾矿库中总铁、无定形氧化铁、游离氧化铁、晶质氧化铁和有机络合铁含量分别为 $180.01 \sim 291.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.26 \sim 11.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $16.16 \sim 51.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $9.72 \sim 50.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $23.98 \sim 128.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;杨山冲尾矿废弃地中总铁、无定形氧化铁、游离氧化铁、晶质氧化铁和有机络合铁含量分别为 $73.47 \sim 118.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3.63 \sim 13.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.46 \sim 18.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.38 \sim 7.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $12.36 \sim 59.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相关分析表明,尾矿对水溶液中磷的吸附量与烧失量呈极显著正相关($r=0.459, P<0.001$);吸附量与 pH 则呈极显著负相关($r=-0.671, P<0.001$)。

表 1 pH=7 条件下 Langmuir 和 Freundlich 常数
Table 1 The constant of Langmuir and Freundlich on pH=7

Horizons	Langmuir 常数			Freundlich 常数		
	$Q_{\text{max}}/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$B/L \cdot \text{mg}^{-1}$	r^2	K	$1/n$	r^2
YIA	0.86	0.04	0.842	0.05	0.68	0.936
YIC1	1.05	0.06	0.962	0.09	0.59	0.941
YIC2	1.05	0.45	0.997	0.42	0.27	0.943
TIA	0.85	0.03	0.947	0.04	0.69	0.984
TIC1	1.09	0.03	0.815	0.02	1.03	0.895
Tipan	8.66	0.38	0.999	3.80	0.23	0.927

2.2 尾矿废弃物对磷的吸附特征

图 1 显示不同植物群落铜尾矿样本对磷的吸附结果(图中各层样本数据均为 4 个重复样本数据的平均值)。由图 1 可知,杨山冲尾矿废弃地不同植物群落下尾矿对磷的吸附能力表现为:YZ(中华结缕草群落下尾矿)>YI(白茅群落下尾矿)>YH(木贼群落下尾矿)>YB(裸地处尾矿)。杨山冲尾矿废弃地 3 种植物群落下同一层数据比较表明:中华结缕草群落下 A 层样本(YZA)对磷的吸附量($0.75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)显著高于木贼群落 A 层(YHA)样本($0.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)($F \text{ Value} = 3.657, \text{Significance} = 0.044$);中华结缕草群落下 C1 层(YZC1)样本对磷的吸附量($0.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)显著高于裸地 C1 层(YBC1)样本($0.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)($F \text{ Value} = 12.963, \text{Significance} = 0.000$)。上述结果表明不同植物群落对尾矿吸附磷的能力具有一定的影响,这是由于不同植物群落各自的生理特征,如地上匍匐茎、地下根状茎、对水分和重金属的耐性,以及植被下尾矿经过多年的氧化所具有的不同理化性质造成的。由于尾矿样本的 pH 差别不大^[15],而化学性质尤其是不同类型的氧化铁含量差异较大,植物群落对尾矿吸附磷的影响主要是化学吸附作用之间的差异造成的。

在杨山冲尾矿废弃地,3 种植物群落下 A 层尾矿

对磷的吸附量低于 C1 和 C2 层,而且表现为随着深度的增加逐渐升高(木贼群落下 C2 层样本吸附量小于 C1 层样本),裸地处 C2 层样本吸附量也大于 C1 层样本。尽管同一植物群落下不同层次尾矿对磷的吸附量存在差异,但单因素方差分析表明,杨山冲白茅群落下 3 层尾矿(YIA、YIC1 和 YIC2)之间存在显著差异($F \text{ Value} = 4.403, \text{Significance} = 0.046$),即 YIC2 [$(0.813 \pm 0.113) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$] 对水溶液中磷的吸附量显著高于 YIA [$(0.643 \pm 0.076) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$]。

2.3 尾矿废弃物吸附磷的解吸特征

图 2 展示了被不同尾矿样本所吸附磷的解吸率变化。从图 2 可以看出,来自于杨山冲尾矿废弃地各植物群落下的尾矿废弃物所吸附磷的解吸率情况复杂:木贼群落下尾矿 A 层解吸率最大,C2 层最小($F \text{ Value} = 1.112, \text{Significance} = 0.370$);中华结缕草群落下尾矿与之相反,C2 层显著大于 A 层,存在显著性差异($F \text{ Value} = 4.710, \text{Significance} = 0.040$);白茅群落下尾矿则 C2 层最大,C1 层最小($F \text{ Value} = 3.011, \text{Significance} = 0.100$);而对于裸地处的尾矿,C1 层解吸率大于 C2 层($F \text{ Value} = 0.520, \text{Significance} = 0.498$)。但总体

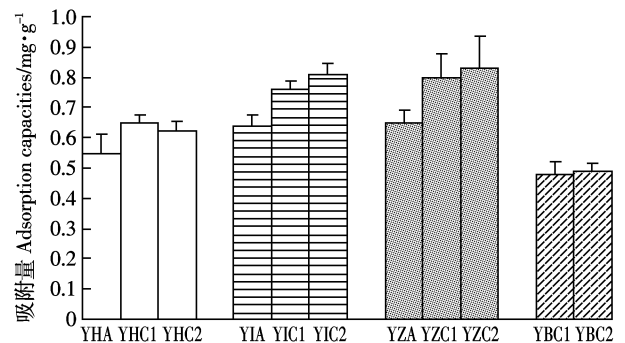


图 1 不同尾矿样本对水溶液中磷的吸附

Figure 1 Adsorption capacities of PO_4^{3-} from aqueous solution on copper mine tailings

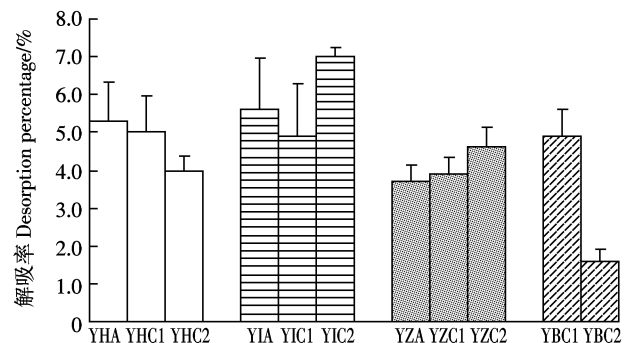


图 2 不同尾矿样本磷的解吸率变化

Figure 2 Desorption percentage of PO_4^{3-} from different samples

来看,杨山冲白茅群落下各层尾矿废弃物所吸附磷的解吸率均高于中华结缕草群落和木贼群落下以及裸地相应的各层(C1层之间 $F Value = 0.587$, $Significance = 0.635$; C2层之间 $F Value = 7.149$, $Significance = 0.005$)。这是由于各层尾矿铁氧化物含量,以及 pH 值不同使难溶的 Fe-P 很难形成可溶性磷酸盐。

3 讨论

图1和图2皆表明,下层尾矿对水溶液中磷的吸附量高于上层尾矿。与土壤对磷的吸附作用相比,所研究的尾矿废弃物对磷的吸附能力明显较强,尾矿对水溶液中磷的较强吸附能力可能与其中总铁及不同形态铁氧化物较高的含量具有一定的关系。

李明锐和沙丽清^[16]发现森林土壤对磷的饱和吸附量与土壤有机质含量呈正相关,而与土壤 pH 呈负相关。江凤娟等^[17]也发现氧化铜尾矿的铁氧化物含量与 pH 值呈负相关。孔荔玺等^[8]则发现热活化尾矿由于其自身的特殊晶层结构,对磷的吸附率会随着 pH 值的增加而增加。因此, pH 对尾矿吸附量的影响较为复杂,需要进一步的研究。本研究中,所研究的各层次尾矿废弃物的有机质含量均很低,而 pH 基本上呈中性至碱性^[15]、且变化较小,因而有机质含量和 pH 对尾矿吸附磷的总体影响相对较小。相关分析还表明,尾矿废弃物对水溶液中磷酸根的吸附量与尾矿样本中游离氧化铁、晶质氧化铁和有机络合铁含量呈极显著正相关性($P < 0.001$),相关系数分别为 0.588、0.516 和 0.514。利用氧化铜尾矿进行的研究也表明尾矿中氧化铁的含量与磷的吸附量之间呈极显著正相关^[18];李明锐和沙丽清^[16]研究发现土壤磷饱和吸附量与活性 Fe^{3+} 呈正相关;王永和徐仁扣^[18]认为土壤中铁铝氧化物含量强烈影响土壤对磷的吸附量,土壤中铁铝氧化物含量越高对磷的吸附能力越强。与土壤相比,所研究的尾矿废弃物中,来自杨山冲尾矿废弃地不同植物群落下的尾矿废弃物对磷的平均最大吸附量 ($0.86 \sim 1.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 与红壤对磷的最大吸附量相接近^[18],但远高于森林土壤^[16]、黄土母质土壤^[19]、某些类型的干旱区土壤^[20]以及城市土壤^[11]对磷的最大吸附量;来自铜官山老尾矿废弃地白茅群落下 T1pan 层的尾矿,其平均最大吸附量可达到 $8.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (表1)。

磷的解吸数据分析表明,尽管铁氧化物含量与磷解吸率之间无显著相关性,但铁氧化物含量高的 TIC1 磷解吸率(3.0%)较低,而游离氧化铁含量最高的 T1pan 样本所吸附的磷几乎不能被解吸(1.0%)。这

表明尾矿废弃物对磷的强烈吸附作用可能主要与其中的铁氧化物通过交换配位体与磷结合形成难溶的 Fe-P 有关。Hartikainen^[9]认为,伴随着岩石的风化,所形成的铁、铝氧化物可以通过交换配位体和磷结合形成难溶的 Fe-P、Al-P,降低可溶性磷酸盐的含量。

根据本研究的结果可以推测,随着尾矿废弃物弃置时间的增加,尾矿中金属硫化物逐渐氧化、pH 逐渐降低,而铁氧化物、 Ca^{2+} 含量逐步升高,尾矿对磷的吸附能力、固持能力逐步增强,溶解态磷的含量逐渐减少。

4 结论

铜尾矿对水溶液中的磷具有较强的吸附能力,随着弃置时间的增加尾矿对磷的吸附能力提高;铜尾矿对水溶液中磷酸根的吸附符合 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程;各种植物群落下 A 层尾矿对磷的吸附量低于 C 层;尾矿中铁氧化物含量与磷的吸附量呈极显著正相关,尾矿中铁氧化物含量越高磷的解吸率越低。

参考文献:

- [1] Belén E Ramírez Cordero, María P Cañizares-Macías. Determination of bioavailable soluble arsenic and phosphates in mine tailings by spectrophotometric sequential injection analysis[J]. *Talanta*, 2009, 78(3): 1069–1076.
- [2] 孙庆业, 刘付程. 铜陵铜矿尾矿理化性质的变化对植被重建的影响[J]. 农村生态环境, 1998, 14(1): 21–23.
SUN Qing-ye, LIU Fu-cheng. Study on the effects of physical and chemical property changes of copper mine tailings on vegetation rehabilitation in Tongling copper mine[J]. *Rural Eco-Environment*, 1998, 14(1): 21–23.
- [3] Hartikainen S H, Hartikainen H H. Phosphorus retention by phlogopite-rich mine tailings[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(9): 2716–2723.
- [4] Lena Alakangas, Björn Öhlander, Angela Lundberg. Estimation of temporal changes in oxidation rates of sulphides in copper mine tailings at Laver, Northern Sweden[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(6): 1386–1392.
- [5] 田胜尼, 孙庆业, 王铮峰, 等. 铜陵铜尾矿废弃地定居植物及基质理化性质的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 88–93.
TIAN Sheng-ni, SUN Qing-ye, WANG Zheng-feng, et al. Plant colonization on copper tailings and the change of physio-chemistry properties of substrate in Tongling City, Anhui Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1): 88–93.
- [6] 代宏文, 王春来, 汪庚火, 等. 杨山冲尾矿库复垦建立植被技术研究[J]. 资源. 产业, 2000(7): 26–29.
DAI Hong-wen, WANG Chun-lai, WANG Geng-huo, et al. Study of Yangshanchong tailings pond reclamation and establishment vegeta-

- tions technology[J]. *Resources and Industries*, 2000(7):26-29.
- [7] ZENG Le, LI Xiao-mei, LIU Jin-dun. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using iron oxide tailings[J]. *Water Research*, 2004, 38(5):1318-1326.
- [8] 孔荔玺, 薛 峰, 陈莉莉, 等. 尾矿吸附模拟废水中磷的初步研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(5):15-17.
- KONG Li-xi, XUE Feng, CHEN Li-li, et al. Adsorption of phosphate on copper mine tailing samples[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(5):15-17.
- [9] 熊 毅. 土壤胶体[M]. 第二册. 北京:科学出版社, 1985:241-268.
- XIONG Yi. Soil colloid[M]. Volume Two. Beijing:Science Press, 1985:241-268.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978:132-150.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of soil physio-chemistry properties[M]. Shanghai:Shanghai Science & Technology Press, 1978:132-150.
- [11] 卢 瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤磷的形态和吸附-解吸特征[J]. 土壤通报, 2003, 34(1):40-43.
- LU Ying, GONG Zi-tong, ZHANG Gan-lin. Phosphorus forms and adsorption-desorption characteristics of urban soils in Nanjing[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1):40-43.
- [12] Deopker R D, O'Connor W K. Column leach study 1: Heavy metal dissolution characteristics from selected copper mine tailings [J]. *Mine Water and the Environment*, 1991, 10(1):57-72.
- [13] Wiertz J V, Marinkovic F A. Dissolved pollutant transport in tailings ponds[J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(2):237-240.
- [14] Forsberg R G, Ledin D W. The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, 76(3):195-207.
- [15] 孙庆业, 任冠举, 杨林章, 等. 自然植物群落对铜尾矿废弃地土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):37-43.
- SUN Qing-ye, REN Guan-ju, YANG Lin-zhang, et al. Effect of natural plant communities on soil enzyme activities in deserted copper mine tailings dumps[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):37-43.
- [16] 李明锐, 沙丽清. 云南保山西庄河流域森林土壤磷吸附特性[J]. 山地学报, 2002, 20(3):313-318.
- LI Ming-rui, SHA Li-qing. A primary study on phosphorus adsorption of forest soils in Xizhuang watershed, Baoshan Yunnan[J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(3):313-318.
- [17] 江凤娟, 檀 婧, 孙庆业, 等. 氧化铜尾矿对水溶液中磷的吸附[J]. 环境化学, 2008, 27(5):600-604.
- JIANG Feng-juan, TAN Jing, SUN Qing-ye, et al. Oxidized copper mine tailings and its adsorption on phosphate from aqueous solution[J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(5):600-604.
- [18] 王 永, 徐仁扣. 可变电荷土壤对水体中磷酸根的吸附去除作用[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4):63-67.
- WANG Yong, XU Ren-kou. Role of variable charge soils of removing phosphate from water body through adsorption[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4):63-67.
- [19] 李文祥. 几种黄土母质土壤磷吸附特征及缓冲性能的初步研究[J]. 土壤肥料, 2002(1):46-47.
- LI Wen-xiang. Preliminary study on the adsorption characters of soil phosphorus and buffer capacity of some yellow soil forming rocks[J]. *Soils and Fertilizers*, 2002(1):46-47.
- [20] 孙 权, 韩秀云, 郭晓宁. 宁夏主要土壤的磷酸根吸附特征及影响因素[J]. 土壤通报, 2003, 34(5):418-421.
- SUN Quan, HAN Xiu-yun, GUO Xiao-ning. Study on phosphorus adsorption and application by the major soils of Ningxia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5):418-421.