

山西省典型土壤对重金属 Cu、Zn 和 Pb 等温吸附特征及应用

秦俊梅¹ 刘奋武¹ 周俊² 卜玉山^{1*}

(1. 山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 南京工业大学 生物与制药工程学院, 南京 211816)

摘要 寻求高效廉价重金属吸附材料在污水重金属去除领域具有重要意义。本研究采用摇瓶试验,研究了山西省石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对 Cu、Zn 和 Pb 的等温吸附效果,并利用土柱吸附试验进一步研究了 3 类吸附材料对污水处理厂入厂污水中重金属的实际吸附去除能力。研究表明,石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对污水中 Cu、Zn 和 Pb 的等温吸附行为均可用 Freundlich 吸附等温线显著拟合。吸附材料对 Cu、Zn 和 Pb 的吸附作用力与吸附容量呈现石灰性黏壤土>碱性膨润土>石灰性砂壤土的变化趋势。石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对 3 类重金属的吸附作用力表现为 Zn>Cu>Pb、Cu>Zn>Pb 与 Cu>Zn>Pb,而吸附容量顺序却为 Cu>Zn>Pb、Pb>Cu>Zn 及 Cu>Pb>Zn。石灰性黏壤土对污水处理厂接纳污水中 Cu、Zn 和 Pb 的吸附去除率为 79.9%、97.7%和 73.4%,碱性膨润土对相应污水重金属指标的去除率也高达 70.3%、90.6%和 90.6%。该研究结果可为湿地污水处理土壤的选择以及污水重金属吸附材料的选择提供一定的理论依据。

关键词 石灰性黏壤土; 石灰性砂壤土; 膨润土; 等温吸附; 重金属

中图分类号 X 131

文章编号 1007-4333(2013)04-0052-07

文献标志码 A

Isothermal adsorption characteristics and applications of Cu, Zn, and Pb in typical soil of Shanxi

QIN Jun-mei¹, LIU Fen-wu¹, ZHOU Jun², BU Yu-shan^{1*}

(1. College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Faculty of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract It was significant to find cheap and efficient adsorption materials to remove heavy metals from wastewater. In this study, the isothermal adsorption efficiencies of Cu, Zn, and Pb by calcareous clay soil, calcareous sandy soil, and alkaline bentonite were investigated through shake flask experiments. In addition, the removal efficiencies of Cu, Zn, and Pb from sewage treatment plant wastewater were studied by the above three adsorption material in the subsequent fixed bed adsorption process. Results showed that the isothermal adsorption characteristics of Cu, Zn, and Pb by calcareous clay soil, calcareous sandy soil, and alkaline bentonite was obviously correlated with Freundlich equation. The heavy metals adsorption forces of the calcareous clay soil, calcareous sandy soil, and alkaline bentonite were Zn>Cu>Pb, Cu>Zn>Pb, and Cu>Zn>Pb, respectively, while the heavy metals adsorption capacity of the calcareous clay soil, calcareous sandy soil, and alkaline bentonite were Cu>Zn>Pb, Pb>Cu>Zn, and Cu>Pb>Zn. Meanwhile, further fixed bed adsorption experiments revealed that the removal efficiency of Cu, Zn, and Pb from wastewater by calcareous clay soil adsorption were 79.9%, 97.7%, and 73.4%, and the removal efficiency of Cu, Zn, and Pb by the alkaline bentonite adsorption were also reached to 70.3%, 90.6%, and 90.6%, respectively. The results obtained from this study were helpful in choose of adsorbent to remove the heavy metals from wastewater.

Key words calcareous clay soil; calcareous sandy soil; alkaline bentonite; isothermal adsorption; heavy metals

收稿日期: 2013-03-30

基金项目: 山西省青年基金项目(2010021028-5)

第一作者: 秦俊梅, 讲师, 主要从事废水处理研究, E-mail: sxaushr@163.com

通讯作者: 卜玉山, 教授, 主要从事自然资源与废弃物的利用研究, E-mail: yushan_bu@126.com

中国目前是世界上污水排放量最大的国家,也是污水排放量增长速度最快的一个国家,1998年的污水排放总量为 3.95×10^{10} t,2008年上升为 5.72×10^{10} t^[1-2],2010年达到 6.17×10^{10} t^[3],在污水排放总量中工业污水约占一半^[1-2]。工业废水特别是采矿业、化工业、电镀业等行业排放的污水中含有 Ni、Zn、Cr、Cu、Pb 和 Cd 等不同种类和数量的重金属^[4-8]。污水重金属进入生态系统严重影响陆地生物及水生生物的新陈代谢过程,进而破坏生态平衡,甚至危害到人类健康^[7-11],因此,污水特别是工业污水必需经过处理达到国家污水排放标准才可外排到环境中。目前国内外处理含有重金属污水的方法主要有药剂沉淀、氧化还原等化学方法^[2,7,12],以及离子交换法、吸附法、萃取法等物理化学方法^[5-7,12]。其中吸附法由于具有工艺简单、操作方便、重金属去除效率高等优点^[6],被很多研究者所关注。活性炭是最常见的吸附材料,对污水重金属有较大的吸附容量^[13],然而高运行成本限制了其推广应用^[9]。许多研究表明,来源广、价低廉的沸石、膨润土、蛭石、蒙脱石等天然矿物是优良的污水重金属吸附剂^[6,14-17]。这些矿物多数是土壤特别是干旱半干旱地区土壤中黏粒部分的主要硅酸盐黏土矿物,这些矿物以及水化程度不同的铁、锰、铝、硅氧化物和少量有机物质的存在,使土壤具备了吸附固定重金属的能力。缪鑫等^[18]的研究结果表明,江西红壤、东北黑土和河北潮土对 Hg 的最大吸附量分别为 451.33、1 699.46 和 1 635.21 mg/kg,对 As 的最大吸附量分别为 818.44、561.87 和 112.77 mg/kg。王金贵等^[19]的研究结果表明,壤土对镉和铅的最大吸附量和最大缓冲容量均大于红壤。孟昭福等^[20]

的研究结果表明,黑垆土对 Cd^{2+} 的吸附最强,而砂土的吸附最差。胡宁静等^[21]的研究结果表明,土壤对镉的吸附量随溶液初始 pH 和土壤 pH 升高而增大。黄爽等^[22]的研究结果表明,土壤对镉的吸附随土壤 pH 及有机质质量分数的增大而增大,决定镉吸附能力的不是黏粒的数量而是其黏粒矿物的组成。可见,不同类型土壤因组成、性质的不同对不同种类重金属的吸附能力不同,且黏土矿物组成、pH 和有机质含量对土壤重金属吸附能力起着重要作用。本研究首先通过摇瓶试验,采用等温吸附方法研究山西省典型石灰性黏壤土、砂壤土及其区域碱性膨润土对重金属 Cu、Zn 和 Pb 的等温吸附差异。并进一步在相关吸附材料的土柱中模拟实际吸附过程,比较 3 种材料对实际污水处理厂相同重金属的吸附能力,以期揭示山西省不同质地石灰性土壤及碱性膨润土对污水不同重金属的理论吸附潜力及实际吸附效果,旨在为山西地区污水湿地处理土壤的选择或添加重金属吸附材料的选择提供一定的理论依据与参数支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 吸附材料

供试材料包括:1)石灰性黏壤土。2011年9月12日采自山西省太谷县农田耕层($112^{\circ}32'42.35''\text{E}$, $37^{\circ}25'14.85''\text{N}$);2)石灰性砂壤土。2011年9月18日采自山西省五寨县农田耕层($111^{\circ}50'25.13''\text{E}$, $38^{\circ}54'37.74''\text{N}$);3)碱性膨润土。2011年9月25日采自山西省浑源县($113^{\circ}41'1.18''\text{E}$, $39^{\circ}41'52.48''\text{N}$),其基本理化性质见表 1。

表 1 供试材料理化性质

Table 1 Physicochemical properties of adsorption materials

供试材料 Tested materials	pH	总铜/ (mg/kg) Total Cu	总锌/ (mg/kg) Total Zn	总铅/ (mg/kg) Total Pb	有机质/(g/kg) Organic matter	黏粒/% Clay particle (<0.01 mm)	阳离子代换量/ (cmol/kg) CEC
石灰性黏壤土 Calcareous clay soil	8.61	13.31	79.00	13.50	36.4	62.7	41.23
石灰性砂壤土 Calcareous sandy soil	8.80	20.63	123.63	17.19	12.9	18.5	8.89
碱性膨润土 Alkaline bentonite	8.12	13.00	70.75	24.94	26.6	59.5	27.00

1.1.2 污水样本

供试污水,2011年10月16日采自太原市杨家堡污水处理厂的进水端,污水样本用塑料瓶密封后,4℃保存备用。与本研究相关的污水指标如下:pH 6.74,总Cu 0.200 mg/L,总Zn 1.150 mg/L及总Pb 0.250 mg/L。

1.1.3 试验药品

试验所用 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 ZnSO_4 、 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 和甲苯等均为分析纯试剂。

1.2 试验方法

1.2.1 不同吸附材料对Cu、Zn与Pb的等温吸附试验

2011年10月9日,分别称取过0.149 mm筛的供试吸附材料1.000 g,置于100 mL塑料离心管中,加入一系列以0.01 mol/L CaCl_2 为背景电解质,不同质量浓度(0.0、5.0、10.0、20.0、30.0、50.0、80.0与100.0 mg/L)的Cu、Zn或Pb溶液25 mL。同时加入3滴甲苯以抑制微生物的活动,25℃条件下置于摇床以140 r/min转速振荡24 h后,9 000 r/min条件下离心10 min过滤,测定不同处理滤液中Cu、Zn和Pb的含量(吸附平衡浓度 C_e),采用差减法计算供试吸附材料对Cu、Zn和Pb的吸附量(单位质量的吸附量 C_s),每个处理3次重复。利用数学模型对3种吸附材料对Cu、Zn和Pb的吸附作用力与吸附容量的差异进行分析。

1.2.2 土柱吸附试验中不同吸附材料对污水中Cu、Zn和Pb的吸附去除效果

本试验在明确不同吸附材料对Cu、Zn和Pb的等温吸附结果的基础上,于2011年10月17日采用土柱吸附试验验证供试材料对污水重金属吸附去除

效果。具体方法如下:在直径3 cm和高22 cm且底部有孔(孔径1 cm)的玻璃管中分别按体积标准装入约50 cm³的3种供试吸附材料,相应的石灰性黏壤土、石灰性砂壤土和膨润土的质量分别为30、30和5 g。每个处理用蠕动泵控制流速,10 min内分别向不同处理体系加入污水各200 mL,每个处理3次重复。石灰性黏壤土、石灰性砂壤土和膨润土完成吸附试验所需时间分别为5.5、3.2与72.5 h。吸附试验完成后,测定净化液中Cu、Zn和Pb含量,分别乘以相应的净化液体积,得出净化液中Cu、Zn和Pb的绝对质量,用差减法计算供试吸附材料对不同污水中重金属Cu、Zn和Pb的吸附去除量和去除率。

1.3 测定方法

Cu、Zn和Pb采用ICP-AES(美国PE公司,型号5300DV)测定。

2 结果与分析

2.1 山西省石灰性土壤及其区域膨润土对Cu、Zn和Pb的等温吸附

石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对Cu、Zn和Pb的吸附等温线见图1。3种吸附材料对Cu与Zn的吸附量均随平衡液Cu与Zn浓度的增加而增加,但3种吸附材料对Cu与Zn的吸附量的增加量在逐渐降低。表明在本试验的Cu与Zn浓度范围(0~100 mg/L)内,3种吸附材料对Cu与Zn的吸附均趋于饱和。而3种吸附材料对Pb的吸附量均随着平衡液Pb浓度的增大呈直线上升趋势。表明3种供试吸附材料对Pb的吸附量在本试验的Pb浓度范围(0~100 mg/L)内均未达到最大吸附量。

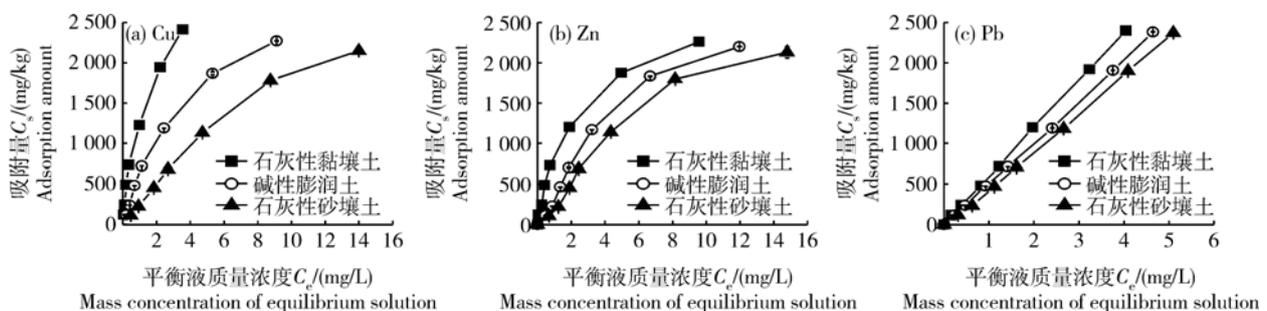


图1 Cu、Zn和Pb在不同吸附材料中的吸附等温线

Fig. 1 Cu, Zn and Pb adsorption isotherms in different adsorption materials

2.2 Freundlich 吸附等温对数式对不同材料吸附 Cu、Zn 和 Pb 的拟合效果

拟合吸附等温线的数学模型多用 Langmuir 吸附等温式或 Freundlich 吸附等温式^[23-25]。本试验 3 种供试吸附材料对 Cu、Zn 和 Pb 的吸附等温线用 Freundlich 吸附模型 ($\lg C_s = (1/n) \cdot \lg C_e + \lg K_f$, 其中 C_s 为吸附材料单位质量的吸附量, mg/kg; C_e 为重金属平衡浓度, mg/L; $1/n$, K_f 为吸附常数) 均能很好地拟合(图 2)。其参数 $1/n$ 为吸附材料对重金属离子吸附作用的强度指标, $1/n$ 越小, 表明吸附材料对相应重金属离子吸附作用力愈强^[19,26]。本研究中, 石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对 Cu 的对数式 Freundlich 吸附等温式中 $1/n$ 分别为 0.723 6, 0.892 9 及 0.771 3(图 2(a)), 表明石灰性黏壤土对 Cu 的吸附作用力最强, 石灰性砂壤土最差, 碱性膨润土介于两者之间。Freundlich 吸附模型中 K_f 代表相对吸附容量的大小, K_f 越大, 表示

吸附材料对该重金属的吸附容量越大^[20,27]。经换算, 石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对 Cu 的 Freundlich 吸附等温式中 K_f 值分别为 1 155. 8、248. 4 与 519. 5, 即 3 类材料对 Cu 最大吸附量也为石灰性黏壤土 > 碱性膨润土 > 石灰性砂壤土。

图 2(b) 为 3 种供试吸附材料对 Zn 的对数式 Freundlich 吸附等温线。比较 Zn 吸附所拟合 Freundlich 吸附等温式中参数 $1/n$ 与 K_f 的大小, 可以得出 3 种吸附材料对 Zn 的吸附作用力和吸附容量大小顺序与对 Cu 的吸附一致, 即石灰性黏壤土 > 碱性膨润土 > 石灰性砂壤土。图 2(c) 为 3 种供试吸附材料对 Pb 的对数式 Freundlich 吸附等温线, 石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土吸附 Pb 相应的 Freundlich 吸附等温式中参数 $1/n$ 分别为 0.943 2、1.091 3 与 0.996 7, K_f 值分别为 619. 6、407. 6 及 507. 7。与 3 种吸附材料吸附 Cu、Zn 相似, 吸附 Pb 作用力强弱与吸附容量均为石灰性黏

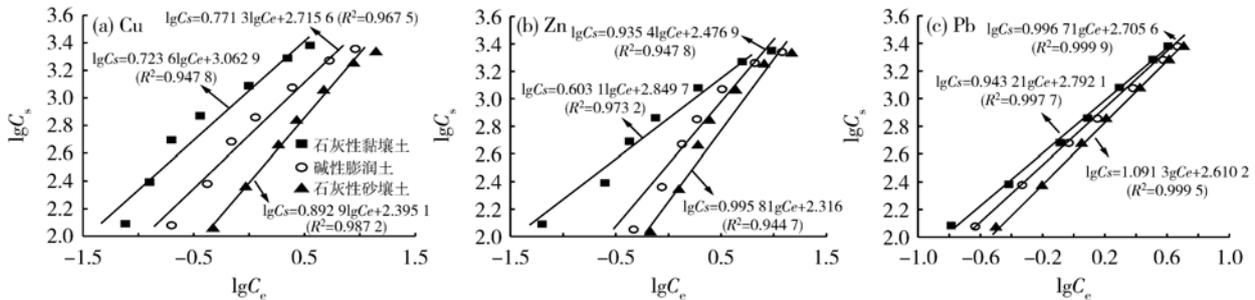


图 2 对数式 Freundlich 等温线对不同材料吸附 Cu、Zn 和 Pb 的拟合效果

Fig. 2 Logarithmic Freundlich isotherms fitting the sorption of Cu, Zn, and Pb by different adsorption materials

壤土 > 碱性膨润土 > 石灰性砂壤土。

比较石灰性黏壤土、石灰性砂壤土和碱性膨润土分别对 Cu、Zn 和 Pb 的 Freundlich 吸附等温对数式中 $1/n$ 与 K_f 值, 可以得出, 石灰性黏壤土对 3 种重金属的吸附作用力为 Zn > Cu > Pb, 吸附容量为 Cu > Zn > Pb; 碱性膨润土对 3 种重金属的吸附作用力为 Cu > Zn > Pb, 吸附容量为 Cu > Pb > Zn; 石灰性砂壤土对 3 种重金属的吸附作用力为 Cu > Zn > Pb, 吸附容量为 Pb > Cu > Zn。

2.3 不同吸附材料对污水中 Cu、Zn 和 Pb 的吸附去除效果

供试污水经过 3 种吸附材料的土壤吸附后, 石灰性黏壤土和碱性膨润土吸附柱产生的净化液中 Cu、Zn 和 Pb 的浓度均较污水原液中浓度显著下

降, 而石灰性砂壤土吸附柱产生的净化液中 Cu、Zn 和 Pb 的浓度较污水原液中浓度下降幅度较小(表 2)。200 mL 污水中 Cu、Zn 和 Pb 的去除量石灰性黏壤土分别为 0.032、0.225 和 0.037 mg, 碱性膨润土分别为 0.028、0.208 和 0.045 mg, 石灰性砂壤土分别仅为 0.012、0.102 和 0.017 mg, 石灰性黏壤土对 Cu、Zn 和 Pb 的吸附量分别为 1.066、7.490 与 1.223 mg/kg, 碱性膨润土分别为 5.625、41.678 和 9.056 mg/kg, 石灰性砂壤土仅分别为 0.406、3.407 和 0.556 mg/kg。同样表明石灰性黏壤土和碱性膨润土对 Cu、Zn 和 Pb 的吸附能力强于石灰性砂壤土, 但柱状吸附试验碱性膨润土对 Cu、Zn 和 Pb 的吸附能力又明显强于石灰性黏壤土, 不同于等温吸附试验的结果。其原因之一是膨润土较石灰性黏壤

土质轻、颗粒细小,渗水性极差,污水在其土柱停留时间长达 72.5 h,而石灰性黏壤土和石灰性砂壤土仅分别为 5.5 和 3.2 h,因此,碱性膨润土对重金属的吸附较石灰性黏壤土更为充分;原因之二为等温吸附试验中 3 种吸附材料均为 1 g 的情况下,膨润

土体积远大于石灰性黏壤土和砂壤土,在等温吸附试验相同条件下,碱性膨润土吸附重金属的充分程度较石灰性黏壤土差。所以,在利用上述吸附材料处理污水的实际工程应用中,污水在吸附柱的渗流速度或停留时间应给与足够的重视。

表 2 土柱吸附试验中污水重金属去除量及供试材料对重金属的吸附量

Table 2 Removal quantities of heavy metals from sewage and heavy metals adsorption quantities of different materials in soil column adsorption experiments

吸附材料 Adsorption material	吸附材料 质量/g Adsorption material	重金属 Heavy metal	污水原液		净化液		去除量/ mg Removing quantity	吸附量/ (mg/kg) Adsorption quantity
			Original sewage		Purification liquid			
			体积/mL Volume	质量浓度/(mg/L) Concentration	体积/mL Volume	质量浓度/(mg/L) Concentration		
石灰性黏壤土 Calcareous clay soil	30.0	Cu	200.0	0.20	160.5	0.050	0.032	1.066
		Zn	200.0	1.15	160.5	0.033	0.225	7.490
		Pb	200.0	0.25	160.5	0.083	0.037	1.223
碱性膨润土 Alkaline bentonite	5.0	Cu	200.0	0.20	143.1	0.083	0.028	5.625
		Zn	200.0	1.15	143.1	0.151	0.208	41.678
		Pb	200.0	0.25	143.1	0.033	0.045	9.056
石灰性砂壤土 Calcareous sandy soil	30.0	Cu	200.0	0.20	166.6	0.167	0.012	0.406
		Zn	200.0	1.15	166.6	0.767	0.102	3.407
		Pb	200.0	0.25	166.6	0.200	0.017	0.556

从供试污水中重金属去除率来看,本试验条件下,石灰性黏壤土对供试污水中 Cu、Zn 和 Pb 的吸附去除率分别为 79.9%、97.7% 和 73.4%,碱性膨润土分别为 70.3%、90.6% 和 90.6%,而石灰性砂壤土分别仅为 30.4%、44.4% 和 33.4% (图 3)。可见,山西省石灰性黏壤土及其区域碱性膨润土对污

水中 Cu、Zn 和 Pb 的去除率可达到 70% 以上,对污水中 Zn 的去除效果尤为明显。

3 讨论

前人研究证实,土壤对重金属的吸附与土壤有机质、黏土矿物、pH 等组成和性质密切相关^[28-29]。土壤有机质的增加能够提高土壤吸附重金属所需官能团(吸附位点),提高土壤的比表面积及阳离子交换量,并通过表面配位、离子交换和表面沉淀等方式增强土壤对重金属的吸附能力^[30]。土壤 pH 较高,土壤表面负电荷越多,其吸附重金属离子的能力也更强^[26]。而土壤对重金属的吸附能力强弱和吸附量的大小不仅与土壤黏粒含量高低有关^[31],而且与黏粒中黏土矿物的种类有关^[22]。本研究 3 种供试吸附材料 pH 差别较小,其有机质和黏粒含量的不同是造成其对重金属吸附效果差异的主要原因。

本研究石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对 Cu 与 Zn 的吸附作用力均大于 Pb,可能与上述 3 种金属离子的水合半径有关,Cu、Zn 和 Pb 的离子半径分别为 0.073、0.083 和 0.132nm,相应

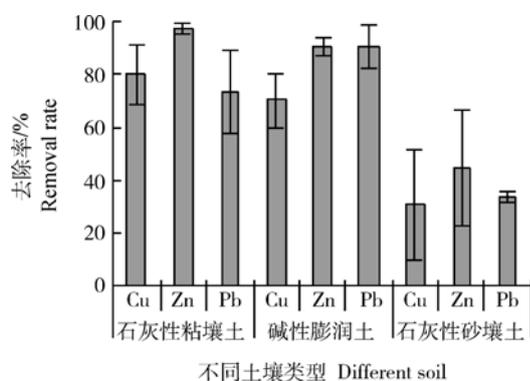


图 3 不同吸附材料固定床工艺对污水 Cu、Zn 和 Pb 的吸附去除效果

Fig. 3 Removal effects of Cu, Zn and Pb in sewage by different adsorption materials with fixed bed

的离子水合半径为 0.206 5、0.216 5 和 0.265 5 nm,金属离子半径/水合半径越大,其在离子吸附剂的吸附作用力越弱^[32]。在本研究等温吸附试验中,3种吸附材料对 Cu、Zn 和 Pb 的吸附能力与吸附量之间的关系不完全一致,以石灰性黏壤土为例,虽然其对 Zn 的吸附量小于对 Cu 的吸附量,但对 Zn 的吸附能力要强于对 Cu 的吸附。不同于部分科研人员认为吸附能力与吸附量二者具有良好正相关关系^[32-33]的结论,但与缪鑫等^[18]的结论相吻合。事实上,二者的关系一直存在争议。这一现象可能与吸附材料中有机、无机物质上吸附重金属活性基团的种类及数量有关。例如,土壤中硅酸盐中的 Si—O 基团和脂肪醇中的 H—O 基团是吸附 Cu 的主要活性位点,而脂肪酸或芳香酸中的 COO—基团和硅酸盐中的 Si—O 基团是其吸附 Zn(II)的主要活性位点^[34]。

因此,不同重金属吸附位点的多寡与强度可能在某种程度上决定着同一材料对不同金属离子吸附作用力的强弱与吸附容量的大小。但这方面的问题需要深入的基础理论研究来解决。本研究土柱吸附试验中3种吸附材料对3种重金属吸附量的大小顺序均为 Zn>Pb>Cu,与等温吸附试验的结果不完全一致,其原因主要是等温吸附试验中3个重金属分别单独进行吸附试验,而土柱吸附试验中3个重金属共存于污水中,在吸附过程中存在竞争吸附位点的现象,而竞争能力的强弱既与重金属种类有关,也与重金属浓度有关,本试验供试污水中3种重金属浓度大小顺序为 Zn>Pb>Cu,与吸附量大小顺序完全一致,符合质量作用定律。

进入方式、废水 pH、温度、水力停留时间等均为污水重金属土柱吸附去除效果的影响因素,且本研究所用吸附装置规模相对较小,只能定性说明供试材料用于废水处理的可行性,确定实际运行所需最佳参数,需要通过较大规模吸附试验获得。同时,山西省石灰性黏壤土及其区域膨润土在有效去除污水重金属过程中,可能也会对污水中的 COD、N、P 等养分实现一定程度的去除,进而减轻后续污水处理压力,因此需要进一步的深入研究。

4 结 论

1)山西省石灰性黏壤土、石灰性砂壤土与碱性膨润土对污水中 Cu、Zn 和 Pb 的等温吸附行为均可用 Freundlich 吸附等温线良好地拟合。

2)Cu、Zn 和 Pb 的吸附作用力与吸附容量均呈现石灰性黏壤土>碱性膨润土>石灰性砂壤土的变化趋势。石灰性黏壤土、石灰性砂壤土及碱性膨润土对3种重金属的吸附作用力分别为 Zn>Cu>Pb、Cu>Zn>Pb 与 Cu>Zn>Pb,对3种重金属吸附容量顺序分别为 Cu>Zn>Pb、Pb>Cu>Zn 及 Cu>Pb>Zn。

3)在本试验条件下,山西省石灰性黏壤土对污水中 Cu、Zn 和 Pb 的吸附去除率分别为 79.9%、97.7%和 73.4%,碱性膨润土对相应污水重金属指标的去除率也分别达 70.3%、90.6%和 90.6%。

参 考 文 献

- [1] 王曦溪,李振山. 1998—2008 年我国废水污水处理的碳排量估算[J]. 环境科学学报,2012,32(7):1764-1776
- [2] 赵正权,徐冬,张浩,等. 中国污水处理电耗分析和节能途径[J]. 科技导报,2010,28(22):43-47
- [3] 蔡圆圆,刘二中. 中国污水处理行业技术发展和创新能力分析[J]. 中国高新技术企业,2012(17):7-10
- [4] 王胡坤. 铜冶炼厂污水治理技术及建议[J]. 工业安全与环保,2003,29(11):13-15
- [5] 王德全,张永胜,刘新杰,等. 电镀综合废水处理工艺研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(6):144-147
- [6] Evina K, Simos M, Katherine J H, et al. Industrial wastewater pre-treatment for heavy metal reduction by employing a sorbent-assisted ultrafiltration system[J]. Chemosphere, 2011, 82(4):557-564
- [7] 刘有才,钟宏,刘洪. 重金属废水处理技术研究现状与发展趋势[J]. 广州化工,2005(4):36-40
- [8] Xu Y, Zhang F. Experimental research on heavy metal wastewater treatment with dipropyl dithiophosphate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3):1636-1642
- [9] 孙晓峰,王海洪,杨卫东,等. 几种污水处理材料对 COD 和 Cr(VI) 的去除比较研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(12):1-13
- [10] Singh S, Kumar M. Heavy metal load of soil, water and vegetables in peri-urban Delhi[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 120(1/2/3):79-91
- [11] Li P J, Wang X, Allinson G, et al. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(1):1636-1642
- [12] 周芬,汪晓军. 化学-混凝沉淀处理含氟含重金属废水研究[J]. 环境工程学报,2012,6(2):445-450
- [13] 徐啸,刘伯羽,邓正栋. 活性炭吸附重金属离子的影响因素分析[J]. 能源环境保护,2010,24(2):48-50
- [14] Malamis S, Katsou E, Stylianou M, et al. Copper removal from

- sludge permeate with ultrafiltration membranes using zeolite, bentonite and vermiculite as adsorbents[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(3): 581-589
- [15] Ijagbemi C O, Baek M H, Kim D S. Montmorillonite surface properties and sorption characteristics for heavy metal removal from aqueous solutions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166(1): 538-546
- [16] Veli S, Alyuz B. Adsorption of copper and zinc from aqueous solutions by using natural clay [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(1): 226-233
- [17] 施惠生, 刘艳红. 膨润土对重金属离子 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 $Cr(VI)$ 、 Cd^{2+} 的吸附性能[J]. *建筑材料学报*, 2006(5): 1-5
- [18] 缪鑫, 李兆君, 龙健, 等. 不同类型土壤对汞和砷的吸附解吸特征研究[J]. *核农学报*, 2012, 26(3): 552-557
- [19] 王金贵, 吕家珑, 曹莹菲. 镉和铅在 2 种典型土壤中的吸附及其与温度的关系[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 244-259
- [20] 孟昭福, 万丹, 邓晶, 等. Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 复合条件下 Cd^{2+} 在陕西 5 中土壤中的吸附[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1): 71-77
- [21] 胡宁静, 骆永明, 宋静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其与有机质、pH 和温度的关系[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 437-443
- [22] 黄爽, 张仁铎, 张家应, 等. 土壤理化性质对吸附重金属镉的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(1): 19-22
- [23] 郭平, 宋杨, 谢忠雷, 等. 冻融作用对黑土和棕壤中 Pb、Cd 吸附/解吸特征的影响[J]. *吉林大学学报*, 2012, 42(1): 227-232
- [24] Giles C H, Smith D, Huitson A A. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I: Theoretical [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1974, 47(3): 755-765
- [25] Christoph H. Description of sorption data with isotherm equations[J]. *Geoderma*, 2001, 99(3/4): 225-243
- [26] Sukul P, Lamshoft M, Zuhlke S. Sorption and desorption of sulfadiazine in soil and soil-manure systems[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(8): 1344-1350
- [27] 张亚楠, 饶伟, 衡利沙, 等. 黄棕壤中活性有机碳对 Cu 吸附的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 113-118
- [28] 陈怀满. 土壤对镉的吸附与解吸的影响: 土壤组分对镉的吸附和解吸的影响[J]. *土壤学报*, 1988, 25(1): 66-74
- [29] Adhikar T, Singh M V. Sorption characteristics of lead and cadmium in some soils of India[J]. *Geoderma*, 2003, 114(1/2): 81-92
- [30] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, 209(1): 27-39
- [31] 王凯丽, 徐绍辉, 杨永亮, 等. 胶体存在时不同质地土壤对锌镉的吸附试验研究[J]. *土壤*, 2011, 43(2): 239-246
- [32] Nada A M A, Hassan M L. Phosphorylated cation-exchanged from cotton stalks and their constituents [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 89(11): 2950-2956
- [33] 杨秀敏, 胡振琪, 李宁, 等. 钠基膨润土对重金属离子 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附实验[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(6): 819-822
- [34] 加紫薇, 廖力, 郭丹, 等. 污水处理厂污泥对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 吸附性能的研究[J]. *杭州师范大学学报*, 2011, 10(1): 64-70

责任编辑: 袁文业