

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.09.2015031802

周健, 金诚, 李晓林, 等. 熟污泥改性黄土对 Pb^{2+} 的吸附解吸特征[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1710-1715

ZHOU Jian, JIN Cheng, LI Xiaolin, et al. Sorption and desorption of Lead in loess improved by composted sludge[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9): 1710-1715

熟污泥改性黄土对 Pb^{2+} 的吸附解吸特征*

周健 金诚 李晓林 姚驯 南忠仁**

(兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000)

摘要 以不同熟污泥配比改性黄土作为实验供试土壤, 采用序批实验法研究了外源铅在 0%、1%、2%、4%、6%、8%、10%、15%、20%、30% 熟污泥质量配比的土壤样品中的吸附-解吸特征. 结果表明: (1) 不同熟污泥配比改性黄土对铅的吸附量随着 Pb^{2+} 平衡浓度的增加而增大, 且在铅初始添加浓度小于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸附量急剧增加. (2) 在实验设定的浓度范围内 (Pb^{2+} 的初始添加浓度分别为 0、5、10、25、50、100、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Henry 模型、Langmuir 模型、Freundlich 模型对实验数据均有较好的拟合, 但总体来看 Freundlich 型吸附等温方程是描述改性黄土对铅吸附的最佳模型. (3) 在 NH_4AC 作用下, 改性黄土铅的解吸量随着吸附量的增加而增大. 吸附量和解吸量之间的关系可以用线性方程很好地描述. 当铅初始添加浓度小于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Pb^{2+} 的解吸率随着熟污泥配比的增加而增大, 大于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 解吸率随着熟污泥配比增加而减小, 且解吸率变化范围在 0.11%—1.35%. (4) 随着改性黄土中熟污泥含量的增加, 不仅增加了改性黄土中有机质和全磷的含量, 而且将会增强土壤对 Pb^{2+} 的吸附亲和力, 降低了土壤中的铅对地下水造成二次污染的风险.

关键词 熟污泥, 黄土, 铅, 吸附, 解吸.

Sorption and desorption of Lead in loess improved by composted sludge

ZHOU Jian JIN Cheng LI Xiaolin YAO Xun NAN Zhongren**

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: In this article, we adopted the laboratory batch experiments to test the sorption and desorption of lead in soils improved by 0%, 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20%, 30% composted sludge. The results revealed that: (1) The adsorption of lead in the tested soil increased with Pb^{2+} concentration; and the adsorption increased dramatically with initial concentrations $< 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. (2) Within the experimental concentration range Pb^{2+} adsorption was fitted well by Henry, Freundlich, and Langmuir equations, but it was best fitted by Freundlich. (3) Desorption of lead by NH_4AC increased with increasing sorption. A linear equation well described the relationship between desorption and sorption. The desorption rate of lead increased with the proportion of composted sludge when the initial concentration of Pb^{2+} was $< 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, however when the initial concentration was $> 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the desorption rate of lead decreased with the proportion of composted sludge, and it was in the range of 0.11%—1.35%. (4) As the composted sludge in the tested soil increased, it not only increased organic matter and total phosphorous content, but also strengthened the adsorption affinity of Pb^{2+} , and reduced the risk of secondary contamination of Pb^{2+} to underground water.

Keywords: Composted sludge, loess, Lead, sorption, desorption.

2015年3月18日收稿.

* 国家自然科学基金(51178209, 91025015); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2015-214)资助.

** 通讯联系人, E-mail: zhongrennan@126.com

随着社会经济发展,工业进程迅速加快,土壤重金属污染日益严重.截止 2009 年底,甘肃省累计查明铅储量约为 4.27×10^6 t^[1].在铅矿开采的过程中必然会造成土壤中可溶性铅含量的增加,导致铅更易被植物吸收,进而通过食物链在人体内富集,对人体健康造成极大危害.黄土分布在我国西北干旱、半干旱区,由于黄土中营养元素和有机质含量较低.熟化后的城市生活污水可作为良好的土壤改性剂^[2]对土壤进行改良,但在此过程中会产生相应的风险,其中重金属污染是一个不可忽视的问题.而重金属的吸附-解吸是影响重金属在土壤溶液中的浓度及生物有效性的重要因素^[3],并间接地影响其在食物链中的传递等^[4-5].因此研究污泥改性土壤对铅的吸附解吸十分必要.

目前,研究西北干旱、半干旱区土壤对重金属吸附解吸特征主要针对灰钙土和绿洲土^[6-8].但有关熟污泥改性黄土对铅的吸附解吸特征研究鲜见.本研究选取城市生活污水,经熟化后与黄土按不同比例混合,老化稳定,通过吸附解吸实验深入研究熟污泥改性黄土对铅吸附解吸特征,以期在城市污泥改性黄土方案提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试材料为熟污泥改性黄土,来源为甘肃省榆中县夏官营镇的非农田黄土层,采集深度 20—60 cm.生活污水来源为兰州安宁七里河污水处理厂(A²O 工艺).将污泥晾干并将其破碎为 1—2 cm,由于小麦秸秆结构疏松,添加秸秆有利于供氧,因此将污泥以 8:1 的比例和经粉碎处理的小麦秸秆进行混合,定期翻动.待其腐熟度后破碎,过 2 mm 尼龙筛.其基本理化性质:pH = 7.69、EC = 3252 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 ω (有机质) = 151.49 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、TP = 10.00%、 ω (碳酸盐) = 3.90%、 ω (Pb) = 36.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 满足污泥农用污染物控制标准^[9].将熟污泥按 0%、1%、2%、4%、6%、8%、10%、15%、20%、30% 质量比例与黄土进行混合,老化 60 d,将供试土壤置于阴凉处自然风干.磨碎后过 2 mm、0.85 mm 尼龙筛.按四分法取样,进行 pH、EC、有机质、碳酸盐、全磷指标的测定,剩余样品均过 0.149 mm 尼龙筛待用.熟污泥改性黄土基本理化性质见表 1.由表 1 可知,添加熟污泥后供试土壤较黄土而言,理化性质改变,肥力得到改善.因此文中以下部分均称此类土壤为改性黄土.

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

熟污泥配比/%	pH	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳酸盐/%	全磷/%	Pb ²⁺ / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0	8.37	1769	3.90	4.87	4.67	10.94
1	8.35	1818	4.57	4.84	4.87	11.27
2	8.33	1822	7.62	4.92	5.07	13.74
4	8.27	1854	13.34	4.92	5.42	13.84
6	8.24	1882	14.97	4.95	5.77	14.00
8	8.22	1894	20.30	4.89	7.25	14.08
10	8.19	1931	24.06	4.81	8.36	15.23
15	8.15	1996	31.25	4.83	8.23	17.49
20	8.12	2067	41.75	4.73	8.37	20.81
30	8.01	2250	65.64	4.64	9.42	25.41

1.2 吸附-解吸实验

吸附-解吸实验流程见表 2.所有重金属浓度测试均使用印尼生产的 Thermo Fisher iCE3000 原子吸收光谱仪测定.实验中所用的离心管和容量瓶等在使用之前都用 20% 的硝酸浸泡过夜,冲洗.以下实验均做空白实验和 20% 平行样进行质量控制,误差控制在 5% 以内.

1.3 数据分析

本文所用的数据均为平行样($n=3$)的平均值,并采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 对数据进行分析.

表 2 吸附-解吸实验流程

Table 2 Process of adsorption-desorption experiment

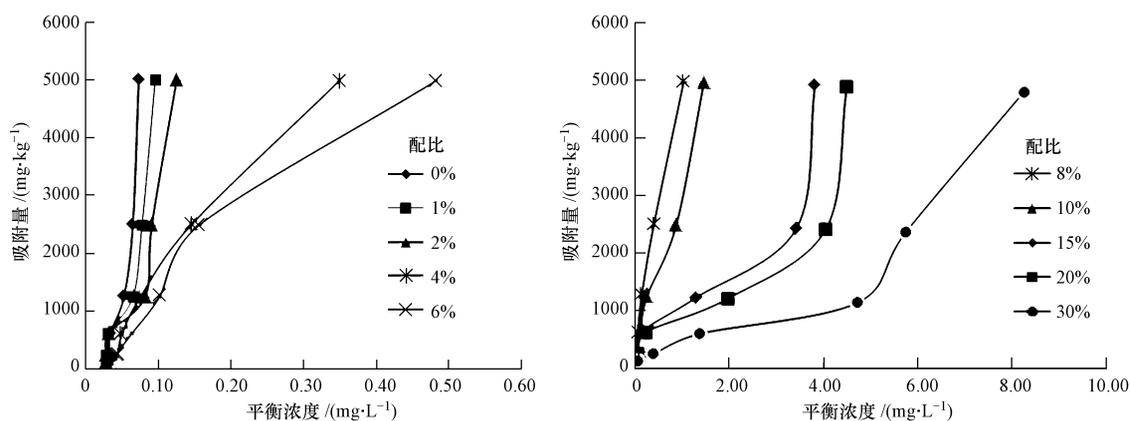
实验类型	步骤	操作
吸附试验	1	称取 1.0000 g 土(0.149 mm)置于 50 mL 塑料离心管中
	2	加入含有 0.01 mg·L ⁻¹ 的 NaNO ₃ 背景离子强度的不同质量 Pb(NO ₃) ₂ 溶液 25 mL(Pb ²⁺ 初始添加浓度分别为 0、5、10、25、50、100、200 mg·L ⁻¹) ¹⁾
	3	摇匀、混合后放入 25 °C、200 r·min ⁻¹ 恒温振荡箱连续振荡 2 h 后取出,静置 24 h
	4	4000 r·min ⁻¹ 离心 10 min、过滤、定容
解吸实验	1	向装有吸附重金属土壤的离心管中加入 0.01 mol·L ⁻¹ 的 NH ₄ AC 溶液 25 mL
	2	摇匀、混合后放入 25 °C、200 r·min ⁻¹ 的恒温振荡箱中振荡 2 h 后取出,静置 24 h
	3	取出后在 4000 r·min ⁻¹ 条件下离心 10 min、过滤、定容

1) 根据城市污水处理厂污泥处置土地改良用泥质(GB/T24600—2009)和农用污泥中污染物控制标准(GB4284-84),结合盆栽试验植物生长情况(未发表)制定 Pb²⁺ 初始添加浓度。

2 结果与讨论

2.1 不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺ 的吸附等温线

通过不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺ 的等温吸附实验,吸附等温线如图 1 所示。在所研究的质量浓度范围内,改性黄土对铅的吸附等温线变化趋势相似,Pb²⁺ 的吸附量均随着铅初始添加浓度的增加而增加。图 1 中每条吸附等温线由下至上 1—7 号数据点分别对应不同 Pb²⁺ 初始添加浓度(0、5、10、25、50、100、200 mg·L⁻¹),不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺ 的吸附量在 4 号数据点之前,即 Pb²⁺ 初始添加浓度小于 25 mg·L⁻¹ 时,随着平衡浓度的增加迅速增大,且吸附等温线基本重合,这是由于在铅初始添加浓度较低条件下,Pb²⁺ 占据高能量吸附位点,且以专性吸附为主^[6],此时改性黄土对 Pb²⁺ 的吸附量主要是取决于 Pb²⁺ 的初始添加量。而后吸附量随着平衡浓度的增加稳定上升,且吸附量差异逐渐变大,这是由于随着 Pb²⁺ 初始添加浓度的进一步增大,专性吸附位点逐渐饱和,此时非专性吸附逐渐增多,而不同熟污泥配比改性黄土的非专性吸附位点存在差异,因此会导致吸附量的差别较大^[10]。根据吸附等温线的变化趋势可知,不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺ 的吸附均未达到饱和。

图 1 不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺ 的吸附等温线Fig.1 Adsorption isotherms of Pb²⁺ in different sludge proportion soil

为了进一步得到不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺ 的等温吸附特征,分别采用 Henry、Freundlich、Langmuir 方程进行拟合,由表 3 可知,不同熟污泥改性黄土对 Pb²⁺ 的等温吸附行为与上述 3 个方程均有较好的拟合性。

通过 Langmuir 方程计算出的不同熟污泥配比土壤对 Pb²⁺ 的最大吸附量(G_0)存在负值并且有的 G_0 远远小于实验条件下的最大吸附量。因此 Langmuir 方程不适合描述改性黄土对 Pb²⁺ 的等温吸附行为。Freundlich 方程的拟合系数要优于 Henry 方程,因此 Freundlich 方程更适宜描述不同熟污泥配比改性黄

土对 Pb²⁺的吸附.许多学者认为^[11-13] Freundlich 方程中 K_F 值可以表示吸附能力的强弱, n 值可作为衡量土壤对重金属离子吸附作用的亲和力指标. n 值越大, 土壤对重金属吸附亲和力越强^[14]. 由表 3 可知, 不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺的吸附能力强弱顺序为: 0% > 1% > 2% > 4% > 6% > 8% > 10% > 15% > 20% > 30%. 对 Pb²⁺吸附亲和力强弱顺序为: 0% < 1% < 2% < 4% < 6% < 8% < 10% < 15% < 20% < 30%. 表明随着施入土壤中熟污泥配比增加, 改性黄土对 Pb²⁺的吸附能力降低. 而对 Pb²⁺的吸附亲和力增强.

表 3 不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺等温吸附的拟合结果¹⁾

Table 3 Parameters of Henry, Freundlich and Langmuir isotherms for the sorption of Pb²⁺

污泥配比/%	Henry ($Q=K_H C_e$)		Freundlich ($Q=K_F C_e^{1/n}$)			Langmuir ($Q=G_0 C_e/(A+C_e)$)		
	K_H	R^2	K_F	n	R^2	G_0	A	R^2
0%	97076	0.7579 *	7.90×10^7	0.2605	0.9126 **	-196.07	-0.078	0.8032 *
1%	62137	0.8191 *	1.60×10^6	0.3880	0.9378 **	-384.62	-0.077	0.8211 *
2%	46570	0.8978 **	5.80×10^5	0.4306	0.9644 **	-384.62	-0.115	0.8807 **
4%	15204	0.9762 **	35399.73	0.6651	0.8852 **	-588.24	-0.176	0.7697 *
6%	10655	0.9533 **	20739.58	0.7296	0.9185 **	-714.29	-0.214	0.8555 **
8%	4700.3	0.9773 **	6161.69	0.9833	0.9235 **	-1250.0	-0.375	0.8463 **
10%	3131.8	0.9796 **	3454.62	1.1579	0.9634 **	-12500.0	-2.500	0.8515 **
15%	970.76	0.8575 **	1437.80	1.5770	0.9316 **	10000.0	3.000	0.9388 **
20%	815.97	0.8413 **	1213.67	1.5883	0.9355 **	3333.0	1.000	0.9454 **
30%	502.29	0.8708 **	637.97	1.6202	0.9021 **	909.09	0.360	0.8675 **

注: 1) Q 为吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_e 为平衡液浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; G_0 为最大吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; K_H, K_F, A 为常数; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

土壤理化性质对于改性黄土对 Pb²⁺的吸附解吸行为有不同程度的影响^[15-17], 为进一步了解土壤理化性质对铅吸附的影响, 利用 SPSS19.0 对铅的吸附方程 (Freundlich) 中的参数 (K_F 和 n) 和土壤理化性质参数进行相关性分析. 由表 4 可以看出, 改性黄土的 pH 和 Freundlich 方程中的参数 (n) 成极显著负相关, 电导率 (EC) 与土壤对 Pb²⁺的吸附亲和力呈显著正相关, 土壤电导率反映了土壤中盐分的情况^[18], 而土壤盐分的增加有助于增加土壤对重金属的固定能力^[19]. 改性黄土中的有机质、全磷含量与土壤对 Pb²⁺的吸附亲和力呈极显著正相关. 表明土壤中的有机质、全磷对土壤吸附反应具有重要作用^[17, 20]. 这是由于土壤中的有机质含有羧基、酚羟基以及含氧官能团, 对重金属离子产生螯合或者络合吸附. 而土壤中磷酸根离子增加, 会增加土壤胶体表面的负电荷, 进而增强了土壤对金属阳离子的吸附力^[21-22]. 改性黄土的碳酸盐含量对铅的吸附亲和力起到负的作用, 这与王胜利^[6]研究结果一致. 以上说明改性黄土对 Pb²⁺的吸附作用力不是由某一个土壤理化指标所控制, 而是由土壤理化指标的联合控制.

表 4 不同熟污泥配比对 Pb²⁺的吸附参数和土壤理化性质之间的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between Pb²⁺ sorption parameters and physicochemical properties of tested soil

理化参数	K_F	n
pH	0.353	-0.952 **
EC	-0.226	0.892 **
碳酸盐	0.133	-0.721 *
有机质	-0.269	0.851 **
全磷	-0.415	0.967 **

注: ** 0.01 水平上显著相关, * 0.05 水平上显著相关.

2.2 不同熟污泥配比改性黄土对 Pb²⁺的解吸特征

许多学者认为^[7, 23] NH₄AC 解吸重金属的量和土壤中吸收的重金属的量之间有很好的相关性, 因此本文采用 NH₄AC 作为解吸剂对不同熟污泥配比改性黄土中吸附的 Pb²⁺进行解吸. 图 2 为不同熟污泥配比改性黄土在 NH₄AC 作用下, Pb²⁺解吸量与吸附量之间的关系. 由图 2 可知, 改性黄土对 Pb²⁺解吸量均随着吸附量的增大而增加. 根据相同吸附量条件下 Pb²⁺解吸量大小判断, 解吸能力大小顺序为: 0% > 1% > 2% > 4% > 6% > 8% > 10% > 15% > 20% > 30%. 表明随着熟污泥配比的增加解吸量逐渐减小. 这可能是由于

增加改性黄土中熟污泥质量配比,使有机质和全磷含量增大,进而增强了改性黄土对 Pb^{2+} 的吸附亲和力,这与刘铮^[19]等研究结果一致.改性黄土对铅的解吸属于非均相扩散过程,为了定量描述 NH_4AC 对 Pb^{2+} 解吸量与吸附量之间的关系,采用不同的方程对其进行拟合,发现线性方程更适宜描述不同熟污泥配比改性黄土对铅的解吸量与吸附量的关系,其拟合方程参数以及相关系数见表 5.

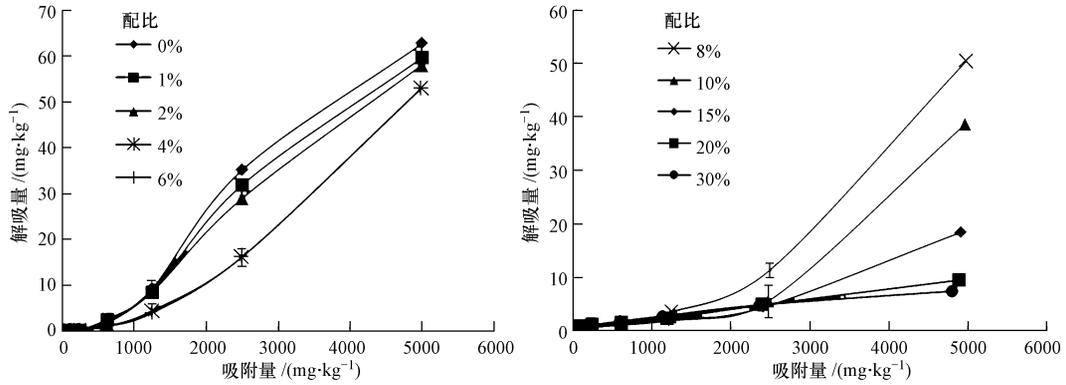


图 2 不同熟污泥配比改性黄土对 Pb^{2+} 的解吸与吸附的关系

Fig.2 Relationship between desorption and adsorption of Pb^{2+} in different sludge proportion soil

表 5 NH_4AC 对 Pb^{2+} 的解吸量与吸附量之间的关系模拟方程¹⁾

Table 5 Simulation equations of relationship between desorption of Pb^{2+} by NH_4AC and adsorption of Pb^{2+}

熟污泥 配比/%	$y=ax+b$			熟污泥 配比/%	$y=ax+b$		
	a	b	R^2		a	b	R^2
0	0.0135	-3.7439	0.9831 **	8	0.0101	-5.0453	0.9224 **
1	0.0128	-3.5593	0.9877 **	10	0.0076	-3.9583	0.8753 **
2	0.0123	-3.6546	0.9904 **	15	0.0037	-1.2627	0.9258 **
4	0.0109	-5.0215	0.9576 **	20	0.0018	0.4274	0.9953 **
6	0.0109	-5.0781	0.9557 **	30	0.0104	1.9543	0.9727 **

注: 1) y 为 Pb^{2+} 的解吸量, $mg \cdot kg^{-1}$; x 为 Pb^{2+} 的吸附量, $mg \cdot kg^{-1}$; ** $P < 0.01$.

2.3 Pb^{2+} 初始添加浓度与 NH_4AC 解吸率的关系

由图 3 可以看出不同熟污泥配比改性黄土在 NH_4AC 解吸作用下的解吸率变化趋势.

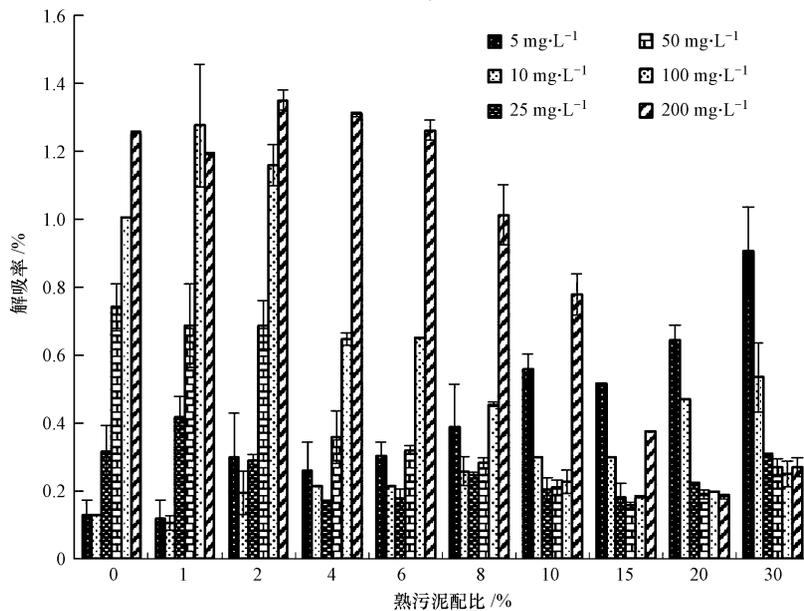


图 3 不同 Pb^{2+} 初始添加浓度下供试土样对铅的解吸率

Fig.3 Desorption rate of Pb^{2+} in tested soils under different initial concentration

由图 3 可知,改性黄土在不同 Pb^{2+} 初始添加浓度条件下,解吸率变化范围在 0.11%—1.35%。说明不同熟污泥配比改性黄土对 Pb^{2+} 有一定的固定作用,生物有效性低。这可能是由于铅化学性质较稳定^[24],其络合物难以被乙酸铵解吸。根据图中同一初始添加浓度下不同熟污泥配比改性黄土 Pb^{2+} 解吸率变化可知,在铅初始添加浓度小于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,改性黄土对 Pb^{2+} 的解吸率随熟污泥配比增加而增大,可能由于此阶段改性黄土对 Pb^{2+} 的吸附以专性吸附为主,所添加的 Pb^{2+} 基本全部被吸附且不易被解吸,而熟污泥含量的增大,带入了更多的铅离子。而当初始添加浓度大于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,专性吸附位点逐渐饱和,此阶段主要以非专性吸附为主, Pb^{2+} 解吸率随熟污泥配比增加而减小,这可能是由于熟污泥配比的增大,增加了土壤中有机质和全磷含量,使得部分 Pb^{2+} 离子不易被乙酸铵解吸^[25]。

3 结论

本文研究发现在 Pb^{2+} 初始添加浓度为 0— $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,改性黄土对铅的吸附量随着铅初始添加浓度的增加而增大,且在铅初始添加浓度小于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,吸附量随着初始添加浓度的增加急剧上升,Freundlich 型吸附等温线方程是描述改性黄土对 Pb^{2+} 的吸附量和平衡浓度之间关系的最佳方程。研究还发现不同熟污泥配比改性黄土对铅的解吸量随着铅的吸附量增加而增大。且线性方程可以很好地描述吸附量和解吸量之间的关系。当初始添加浓度小于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,改性黄土对铅的解吸率随着熟污泥配比的增加而增加,大于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,解吸率随着改性黄土中熟污泥含量的增加呈下降趋势。因此可以看出,随着熟污泥含量增加,不仅增加了改性黄土中有机质和全磷的含量,而且增加了土壤对 Pb^{2+} 的吸附亲和力,降低了土壤中的铅对地下水造成二次污染的风险。

参 考 文 献

- [1] 魏孔友,甘肃省铅锌利用现状分析[D].甘肃:兰州大学硕士学位论文,2014:1-2
- [2] 孙颖,桂长华.污泥堆肥化对重金属生物可利用性的影响[J].重庆建筑大学学报,2007,29(3):110-114
- [3] He Q B, Singh B R. Crop up take of cadmium from phosphorus fertilizers I. Yield and cadmium content [J] . Water, Air and Soil Pollution, 1994, 74: 251-265
- [4] Scheidegger A M, Sparks D L. A critical assessment of sorption-desorption mechanism at the soil mineral/water interface [J]. Soil Sciences, 1996, 161(12): 813-831
- [5] Doula M, Loannou, A. Dimirkou A. Thermodynamics of copper adsorption desorption by Ca kaolinite [J]. Adsorption, 2000, 6(4): 325-335
- [6] 王胜利.干旱区绿洲灌漠土重金属吸附-解吸机理及其应用研究 [D]. 甘肃:兰州大学博士学位论文,2008
- [7] 胡小娜,南忠仁,王胜利等.干旱区绿洲灌漠土 Cu、Zn 和 Pb 的吸附解吸特征 [J], 生态环境学报, 2009, 18(6): 2183-2188
- [8] 谢忠雷,董德明,赵晓松.草甸黑土对铜镍铅的吸附特征 [J]. 应用生态学报 2002, 13(2): 183-186
- [9] GB 4284-84. 农用污泥中污染物控制标准 [S]
- [10] 宋正国,徐明岗,刘平,等.不同比例钾钙锌共存对土壤镉吸附的影响 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1284 -1290
- [11] 张增强,张一平,朱兆华.镉在土壤中吸持的动力学特征研究 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 370-375
- [12] 王胜利,武文飞,南忠仁,等.绿洲区土壤镍的吸附解吸特征 [J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 825-831
- [13] 陈苏,孙铁珩,孙丽娜,等. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在根际和非根际土壤中的吸附-解吸行为 [J]. 环境科学, 2007, 28(4): 843-851
- [14] 王金贵.我国典型农田土壤中重金属镉的吸附-解吸特征研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学博士学位论文,2012
- [15] 何振立.污染及有益元素的土壤化学平衡 [M]. 北京:中国环境科学出版社,1998:276-303
- [16] Wan W Y, Zhu H R. Sorption capacity on lead copper and zinc by clay soil from South Wales [J]. United Kingdom Environmental Geology, 2003, 45: 236-242
- [17] Yu S, He Z L, Huang C Y. Adsorption-desorption behavior of copper at contaminated levels in red soils from China [J] Environ Qual, 2002, (31): 1129-1136
- [18] 吴月茹,王维真,王海兵,等.采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律 [J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 869-973
- [19] 刘铮,白英,刘琴,等.熟污泥改性黄土对铜的吸附解吸特征 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2306-2312
- [20] 李军,张玉龙,陈维新.有机质对土壤铅吸附特性的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 1992, 23(专辑): 38-42
- [21] 王明娣,刘芳,刘世亮.不同磷含量和秸秆添加量对褐土镉吸附解吸的影响 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 803-808
- [22] 杨金燕,杨肖娥,何振立,等.土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展 [J]. 生态环境, 2005, 14(1): 102-107
- [23] 贺建群,许嘉琳,杨居荣,等.土壤中有效态 Cd、Cu、Zn、Pb 提取剂的选择 [J]. 农业环境保护, 1994, 12(6): 246-251
- [24] 朱宁,颜丽.棕壤及其各粒级微团聚体对吸附解吸特性的研究 [J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 92-95
- [25] 姜强,夏建国,刘朗.不同土地利用方式下土壤微团聚体对 Pb^{2+} 的吸附解吸特征研究 [J]. 水土保持学报. 2013, 27(6): 237-243