

猪粪及其蚓粪对 Pb Cd 吸附行为的比较研究

朱维琴, 贾秀英, 李喜梅, 程海翔

(杭州师范大学 生命与环境科学学院, 浙江 杭州 310036)

摘要:采用吸附-解吸试验及吸附动力学试验,比较研究了 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在猪粪和蚓粪中的吸附、解吸规律及吸附动力学行为。结果表明,在试验采用的浓度范围内,猪粪和蚓粪对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附量随着 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度的增加而增加,猪粪和蚓粪对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附等温线均与 Freundlich 和 Henry 方程有较好的拟合性,且蚓粪对 Cd^{2+} 的吸附固定能力明显强于猪粪。猪粪和蚓粪中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的解吸量均随其吸附量的增大而增加,较之蚓粪,猪粪吸附的 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 更易被解吸。猪粪和蚓粪对 Cd 的吸附可分为快速反应阶段和慢速反应阶段,快速反应阶段两者反应速率相当,而慢速反应阶段中蚓粪对 Cd 的吸附速率明显高于猪粪。猪粪对 Pb 的动力学过程复杂,吸附速率取决于 Pb 初始浓度及反应时间,而蚓粪对 Pb 的吸附速率可以瞬时达到最大,随后降低直至稳定;不同 Pb 初始浓度条件下,蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附速率均远大于猪粪,蚓粪有望广泛用于去除土水溶液中的重金属离子。

关键词:猪粪;蚓粪;吸附;解吸;Cd;Pb

中图分类号:X131 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-1796-07

Adsorption Behaviour of Cadmium and Lead in Pig Manure Waste and Its Vermicompost

ZHU Wei-qin, JIA Xiu-ying, LI Xi-mei, CHENG Hai-xiang

(College of Life and Environmental Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: Utilization of earthworms to break down pig manure is gaining popularity in different parts of the world. The end product termed as vermicompost having very large surface area, which is very different from the original pig manure, mainly because of the increased decomposition and humification. Since both pig manure and its vermicompost are organic waste and used as organic fertilizers, there may be some different effects on the behaviour of heavy metals existing in soil solutions applied with pig manure or its vermicompost. In this paper, the adsorption behaviour of cadmium (Cd) and lead (Pb) on pig manure waste and its vermicompost were described. The results showed that the adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} increased with the increasing initial concentration. The adsorption isotherm of Cd^{2+} and Pb^{2+} by pig manure and its vermicompost well conformed to Freundlich and Henry equations, and much higher adsorption capacity of Cd^{2+} and Pb^{2+} was found in vermicompost than that in pig manure waste. The desorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} increased with their increasing adsorption amount and it was easier for Cd^{2+} and Pb^{2+} to release from pig manure than vermicompost. The adsorption of Cd^{2+} on both pig manure and its vermicompost involved rapid reaction phase with nearly same Cd^{2+} adsorption rate and slow reaction phase with much more higher Cd^{2+} adsorption rate founded in vermicompost. The kinetics of Pb^{2+} adsorption was complicated on pig manure and vermicompost, which depended on the initial Pb^{2+} concentration and adsorption time. But the adsorption rate in vermicompost was always higher than that in pig manure, so vermicompost from pig manure may be used to remove heavy metals existed in soil and water.

Keywords: pig manure; vermicompost; adsorption; desorption; Cd; Pb

土壤及水体环境中无机污染物以重金属最为突出。重金属可转化为毒性更大的烷基化合物,进而通过食物链蓄积于人体并危害人体健康。吸附和解吸过

程是控制重金属在土壤、水体中形态转化、迁移和归趋的重要环境过程^[1]。猪粪和蚓粪是比较常见的有机废物,同时也是十分有效的农业肥料,利用蚯蚓对猪粪进行充分处理后即可获得相应的蚓粪。蚓粪的物化性质、养分含量由原材料和蚯蚓的消化程度所决定,和原材料相比,蚓粪中可溶性盐的含量、阳离子的交换性能和腐殖酸含量明显增加,即有机质转化成了稳

收稿日期:2007-11-12

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y306160)

作者简介:朱维琴(1975—),女,博士,副教授,主要从事农业有机废弃物资源生物利用方面的研究。E-mail:zhwq-2000@tom.com

定的腐殖质类复合物^[2,3]。猪粪和蚓粪作为有机废物,其分子中含有羰基、羧基、醇羟基和酚羟基等多种活性官能团和较大比表面积,从而影响到重金属的吸附及解吸过程。不同的有机物质对重金属吸附的影响不同^[4],有机物质可能增加重金属的吸附或抑制重金属的吸附,也可能对重金属的吸附不产生明显的影响^[5]。目前有关有机物质对土壤重金属吸附及解吸的影响备受关注,文献中有关土壤有机质对重金属吸附影响的研究不少^[6,7],但有关猪粪和蚓粪对重金属化学行为的影响尚未见报道。本文选择养殖场来源的猪粪及其蚓粪研究了它们对 Pb(Ⅱ)和 Cd(Ⅱ)的吸附行为差异。本研究结果对我国猪粪和蚓粪的资源化利用和土水溶液中重金属污染控制具有一定的参考价值。

1 材料和方法

1.1 供试材料

猪粪取自杭州某养猪场,将蚯蚓置于充分堆制后的猪粪中培养一段时间,所得的腐殖化物质即为蚓粪。将猪粪和蚓粪放在阴凉处风干、碾碎、过筛(2 mm)后可以用于试验。猪粪的基本理化性状如下:pH 8.36,有机质 42.8%,全 N 1.92%,全 P 3.45%,全 K 0.98%,阳离子交换量 88.4 cmol·kg⁻¹,全 Cu 1 369.8 μg·g⁻¹,全 Zn 1 378.1 μg·g⁻¹。蚓粪的基本理化性状为pH 6.47,有机质 21.6%,全 N 1.01%,全 P 2.64%,全 K 0.86%,阳离子交换量 109.6 cmol·kg⁻¹,全 Cu 1 352.2 μg·g⁻¹,全 Zn 1 426.4 μg·g⁻¹。

1.2 研究方法

1.2.1 吸附-解吸试验

称取 8 份 1.40 g 猪粪或蚓粪样品于 50 mL 聚丙烯离心管(含盖离心管先称重并做记录)中,分别加入不同量 100 mg·L⁻¹ Cd²⁺溶液或 Pb²⁺溶液(介质均为 0.01 mol·L⁻¹NaNO₃溶液)和 0.01 mol·L⁻¹NaNO₃溶液,使固液比为 1:25,使固相中 Cd²⁺加入量分别为 0、5、10、20、50、200、500、1 500 mg·kg⁻¹,镉源为 Cd(NO₃)₂;而使固相中 Pb²⁺的加入量为 0、50、100、200、500、1 000、1 500 和 2 500 mg·kg⁻¹,铅源为 Pb(NO₃)₂溶液。悬浮液在恒温(25 ℃)振荡器中以 200 r·min⁻¹间歇振荡 24 h,在 2 500 r·min⁻¹下离心 10~20 min,上清液用中速定量滤纸过滤后,用原子吸收分光光度计法测定,并用差减法计算土壤吸附的镉量。每个样品重复 3 次。

将含残余固相的离心管中分别加入 0.01mol·L⁻¹ NaNO₃ 溶液 35 mL,加盖后用力摇荡分散残余固相,

然后置恒温振荡器中以 200 r·min⁻¹(25 ℃)间歇振荡 24 h,在 2 500 r·min⁻¹下离心 10~20 min,上清液用中速定量滤纸过滤。用原子吸收分光光度计测定滤液镉含量,并计算固相解吸量。

1.2.2 吸附动力学试验

选取初始浓度为 50、200、500 mg·kg⁻¹ 3 个梯度的 Cd(NO₃)₂、Pb(NO₃)₂ 样本,固液比仍为 1:25,分别振荡 1、2、5、10、15、30、60、120、240 和 360 min 后离心过滤,用原子吸收分光光度法测定上清液中 Cd²⁺、Pb²⁺浓度,并计算 Cd、Pb 在猪粪和蚓粪上的吸附量。以上处理均重复 3 次。

1.2.3 计算方法

(1)吸附量 $Y=V(C_0-C_e)/m$,单位 mg·kg⁻¹。式中: V 为离心管中液体体积,35 mL; C_0 为 Cd²⁺、Pb²⁺初始浓度,mg·L⁻¹, C_e 为离心管上清液中 Cd²⁺、Pb²⁺浓度,mg·L⁻¹, m 为猪粪或蚓粪质量,g。

(2)解吸量 $X=VC_e/m$,单位 mg·kg⁻¹。式中, V 为离心管中液体体积,35 mL, C_e 为离心管上清液中 Cd²⁺、Pb²⁺浓度,mg·L⁻¹, m 为猪粪或蚓粪质量,g。

2 结果和讨论

2.1 猪粪与蚓粪对 Cd²⁺、Pb²⁺的等温吸附特性

2.1.1 对 Cd²⁺的等温吸附特性

猪粪和蚓粪对 Cd²⁺等温吸附曲线如图 1 所示。猪粪与蚓粪对 Cd²⁺的吸附量随着平衡液 Cd²⁺浓度的增大而增大,且在低 Cd²⁺初始浓度下,猪粪与蚓粪对

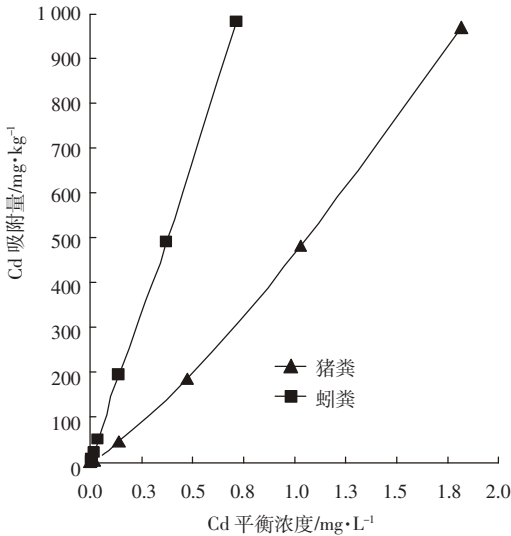


图 1 猪粪和蚓粪对 Cd 的吸附等温曲线

Figure 1 Adsorption isotherm curve of Cd on pig manure waste and its vermicompost

Cd²⁺的吸附量差别不是很大,但在高 Cd²⁺初始浓度下,蚓粪对 Cd²⁺的吸附量明显高于猪粪对 Cd²⁺的相应吸附量。猪粪与蚓粪对 Cd²⁺的吸附行为也可以通过一些等温方程进行拟合和表征^[5,8,9]。拟合结果如表 1 所示。

由表 1 可见,用 Henry 等温线方程对其拟合结果表明,猪粪和蚓粪对 Cd²⁺吸附等温方程分别为 $G = -22.3 + 527.9 \times Ce$ 和 $G = -8.55 + 1\,375.2 \times Ce$, 相关系数 R 分别为 0.996 9 和 0.999 4, 均达极显著相关水平。用 Freundlich 方程拟合结果表明,猪粪和蚓粪对 Cd²⁺吸附等温方程分别为 $G = 466.6 \times Ce^{1.23}$ 和 $G = 1\,395.1 \times Ce^{1.05}$, 相关系数 R 分别为 0.999 6 和 0.999 5, 亦均达极显著相关水平。而用 Langmuir 方程分别就猪粪及蚓粪对 Cd²⁺吸附等温吸附过程拟合结果较差,均未达显著相关水平,这可能与试验中 Cd²⁺加入量还没有达到很高水平有关。可见,猪粪和蚓粪对 Cd²⁺吸附行为同时符合 Henry 型和 Freundlich 型等温吸附过程。平衡常数 K 值的大小,代表吸附剂与金属离子的结合强度, K 值越大,则结合强度越强^[10]。猪粪和蚓粪对 Cd²⁺吸附的 Henry 等温方程中,其 K_h 分别为 527.9 和 1 375.2,猪粪和蚓粪对 Cd²⁺吸附的 Freundlich 等温方程中,其 K_f 分别为 466.6 和 1 395.1,即在两种等温吸附方程中,蚓粪对 Pb²⁺吸附的平衡常数 K 均远大于猪粪,说明蚓粪对 Cd²⁺的吸附固定能力明显高于猪粪,这可能与蚓粪具有较大的阳离子交换量有关。

2.1.2 对 Pb²⁺的等温吸附特性

猪粪和蚓粪对 Pb²⁺等温吸附曲线如图 2 所示。猪粪和蚓粪对 Pb²⁺的吸附量随平衡溶液中 Pb²⁺浓度的增加而增加。在相同初始浓度下,蚓粪中 Pb 的吸附量均明显高于相应猪粪的吸附量。采用 Langmuir 方程、Freundlich 方程和 Henry 方程就猪粪和蚓粪对 Pb²⁺的吸附量数据进行拟合所得的等温式及其拟合参数见表 2。

从表 2 可以看见,猪粪和蚓粪对 Pb²⁺的吸附等温线与 Henry 方程(相关系数 R 分别为 0.942 9 和 0.933 1)

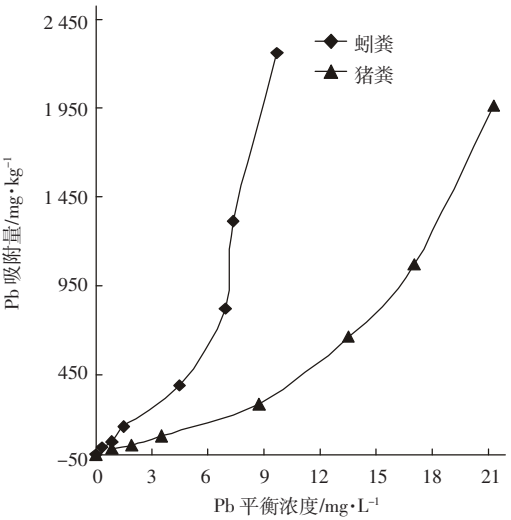


图 2 猪粪和蚓粪对 Pb 的吸附等温曲线
Figure 2 Adsorption isotherm curve of Pb on pig manure waste and its vermicompost

表 1 猪粪和蚓粪对 Cd 吸附等温方程拟合参数									
Table 1 Some constants of isotherm equation for Cd adsorption by pig manure and its vermicompost									
吸附剂	Henry型			Freundlich型			Langmuir型		
	$G=A+K_h \times Ce$			$G=K_f \times Ce^b$			$G=G_0 \times G/(A+G_e)$		
	A	K_h	R	K_f	b	R	G_0	A	R
蚓粪	-8.55	1 375.2	0.999 4**	1 395.1	1.05	0.999 5**	191.4	-0.266	0.219 4
猪粪	-22.03	527.9	0.996 9**	466.6	1.23	0.999 6**	138.5	-0.807 86	0.166 8

注: G 表示吸附量, G_0 表示最大饱和吸附量, Ce 表示平衡液中 Cd 浓度, $n=8$, $R_{0.05}=0.707$, $R_{0.01}=0.834$ 。 ** 表示相关系数达 1% 显著水平。下同。
Note: G indicated adsorption amount, G_0 indicated the maximum adsorption amount. Ce indicated Cd concentration in equilibrium solutions, $n=8$, $R_{0.05}=0.707$, $R_{0.01}=0.834$. ** indicated that correlation coefficient reached 1% significant level. Same as followed.

表 2 猪粪和蚓粪对 Pb 吸附等温方程拟合参数									
Table 2 Some constants of isotherm equation for Pb adsorption by pig manure and its vermicompost									
吸附剂	Henry型			Freundlich型			Langmuir型		
	$G=A+K_h \times Ce$			$G=K_f \times Ce^b$			$G=G_0 \times G/(A+G_e)$		
	A	K_h	R	K_f	b	R	G_0	A	R
蚓粪	-138.2	198.2	0.933 1**	8.76	2.45	0.979 1**	176.7	-6.07	0.008 3
猪粪	-151.5	80.4	0.942 9**	7.24	1.78	0.964 9**	155.3	-11.64	-0.121 2

和 Freundlich 方程（相关系数 R 分别为 0.964 9 和 0.979 1）均有很好的拟合性，相关程度均达到极显著水平。Langmuir 方程对猪粪和蚓粪对 Pb^{2+} 的等温吸附过程的拟合结果较差，均未达显著相关水平，这可能与 Pb^{2+} 加入量还没有达到很高水平有关。因此可以认为，猪粪和蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附量基本随 Pb^{2+} 加入量的增加而增加，且可以采用 Henry 方程或 Freundlich 方程就猪粪和蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附行为进行描述。由表 2 相关系数可见，Freundlich 型方程对两种吸附剂 Pb^{2+} 等温吸附拟合结果最优。Freundlich 方程中的 K_f 值可以作为吸附剂对重金属离子吸附作用的强度指标， K_f 值愈大，表示该吸附剂对重金属离子的吸附作用力愈大^[9]。由表 2 可以看出，蚓粪中的 K_f 值（ K_f 为 8.76）略高于猪粪中的 K_f 值（ K_f 为 7.24），表明蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附固定能力略强于猪粪。

2.2 猪粪及其蚓粪中 Cd、Pb 的解吸特性及与吸附作用的关系

2.2.1 猪粪与蚓粪中吸附态 Cd^{2+} 的解吸

由 Cd^{2+} 解吸曲线（图 3）可知，随吸附态 Cd 含量增加，猪粪与蚓粪中 Cd 的解吸量也逐渐上升，且蚓粪中 Cd 的解吸量小于猪粪。由表 3 亦可以看出，在解吸率方面，随处理浓度的增大，猪粪中 Cd 的解吸率（4.9%~1.7%）和蚓粪中 Cd 的解吸率（1.89%~0.67%）均较小，且在相同处理梯度下，蚓粪的解吸率都明显低于猪粪。

由表 3 可见，蚓粪和猪粪中 Cd 的吸附率分别为 96.6%~98.2%和 91.7%~97%，即蚓粪对 Cd 的吸附率

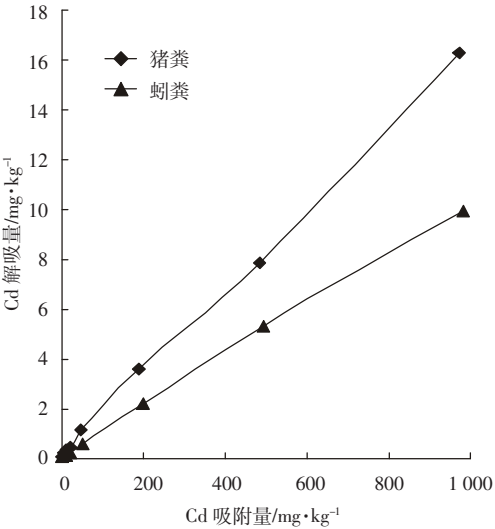


图 3 猪粪和蚓粪中 Cd 的解吸曲线
Figure 3 The desorption curve of Cd adsorbed on pig manure and its vermicompost

明显高于猪粪。这一方面说明猪粪和蚓粪中有相当一部分吸附态 Cd 不能解吸，另一方面蚓粪中吸附态 Cd 的相对较低解吸率亦与蚓粪对 Cd^{2+} 有更强的吸附固定能力的结论相一致。一般来说，静电吸附态重金属可被碱金属或碱土金属盐溶液解吸且解吸速率较快，而专性吸附态或络合态重金属不易被解吸，所以猪粪和蚓粪中丰富的腐殖质组分除对 Cd 具有吸附作用外，可能尚具有较强的络合作用^[11]。

2.2.2 猪粪与蚓粪中吸附态 Pb^{2+} 的解吸

由 Pb 解吸曲线（图 4）可知，猪粪与蚓粪中 Pb 解

表 3 猪粪与蚓粪中 Cd、Pb 的吸附率与解吸率								
Table 3 The ratio of adsorption and desorption for Cd or Pb in pig manure and its vermicompost								
浓度梯度	Cd				Pb			
	猪粪		蚓粪		猪粪		蚓粪	
	吸附率/%	解吸率/%	吸附率/%	解吸率/%	吸附率/%	解吸率/%	吸附率/%	解吸率/%
1	—	—	—	—	—	—	—	—
2	91.69	4.93	96.61	1.89	50.86	8.50	95.39	4.49
3	91.07	3.82	97.85	1.27	51.72	11.19	79.75	8.46
4	92.30	2.37	97.54	0.79	55.99	15.39	80.97	9.51
5	92.95	2.43	98.74	0.78	56.21	11.57	77.51	11.58
6	94.02	1.94	98.19	1.12	66.10	11.75	82.54	8.43
7	96.56	1.66	98.11	0.72	71.53	8.89	87.65	8.49
8	96.97	1.68	98.21	0.67	78.65	7.82	90.32	8.82

注：Cd 处理浓度梯度从 1 到 8 行分别为 0、5、10、20、50、200、500、1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土，Pb 处理浓度梯度从 1 到 8 行分别为 0、50、100、200、500、1 000、1 500、2 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土（由于在处理浓度梯度 1 时，并没有向样本中添加金属离子，不存在吸附率，故没有取这部分数据进行分析）。
Note: From row 1 to row 8, the Cd concentration was 0、5、10、20、50、200、500、1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively and the Pb concentration was 0、50、100、200、500、1 000、1 500、2 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. (Since no heavy metals treated in row 1, no data given in this row).

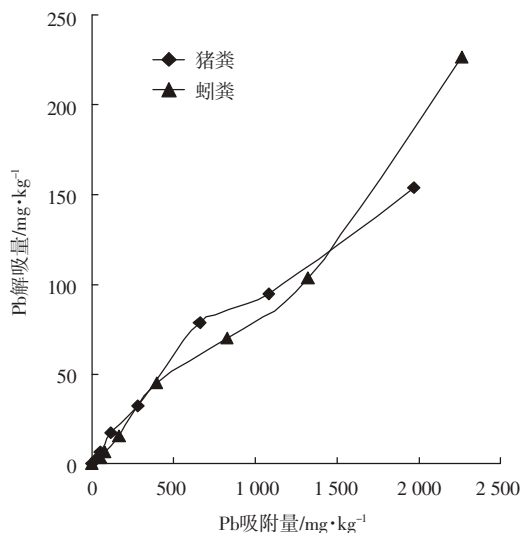


图 4 猪粪和蚓粪中 Pb 的解吸曲线

Figure 4 The desorption curve of Pb adsorbed on pig manure and its vermicompost

吸量均随相应吸附态 Pb 含量增加而增加,在吸附态 Pb 含量较低条件下,猪粪中 Pb 解吸量略高于蚓粪中 Pb 解吸量,且两者亦有交叉重合现象;而在吸附态 Pb 含量较高条件下,蚓粪中 Pb 解吸量则明显高于猪粪。

由表 3 可以看出,随 Pb 处理浓度的增大,猪粪对 Pb^{2+} 的吸附率为 50.86%~78.65%;蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附率为 95.39%~90.32%,即在相同处理浓度下,蚓粪的吸附率都明显高于猪粪;但两者的 Pb^{2+} 解吸率方面,蚓粪解吸率约为 4.49%~8.82%,平均为 8.54%,猪粪约为 8.50%~7.82%,平均为 10.7%,即蚓粪中 Pb 的平均解吸率略低于猪粪。相关分析表明,Pb 在猪粪及蚓粪的吸附率和解吸率之间均呈负相关,相关系

数 R 分别为 0.448 3 和 0.818 2,其中蚓粪中 Pb 的吸附率和解吸率之间达极显著负相关水平。由此可见,尽管高吸附态 Pb 含量时蚓粪中 Pb 解吸总量高于猪粪,但是由于蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附固定能力强于猪粪,蚓粪中 Pb 吸附率和解吸率之间存在显著负相关关系,且蚓粪对 Pb 的平均解吸率低于猪粪,故可以认为蚓粪中吸附态 Pb 的解吸能力相对较低,原因可能在于蚓粪对 Pb 的吸附发生在高能吸附位点,因而难以解吸^[12]。

2.3 猪粪与蚓粪对 Cd、Pb 吸附动力学行为

2.3.1 猪粪与蚓粪对 Cd 的吸附动力学行为

由图 5 可以看出,猪粪与蚓粪吸附 Cd^{2+} 的过程很快,除猪粪对初始浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 的吸附在 60 min 左右趋于稳定之外,不同初始浓度的 Cd^{2+} 在猪粪和蚓粪中的吸附均可在 30 min 左右基本达到平衡。即猪粪与蚓粪对 Cd^{2+} 的吸附大致可以分为 2 个过程:快速反应阶段和经过一段时间后的慢速反应阶段。在快速反应阶段,在 30 min 内 Cd^{2+} 的吸附可完成快速反应过程,且在快速反应过程中猪粪和蚓粪对 Cd 的吸附速率基本相近;随后吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附量变化趋于平缓,这个过程为慢速反应过程。另由图 5 亦可见,随着 Cd^{2+} 初始浓度的增加,猪粪与蚓粪中吸附态 Cd 含量逐渐增大,即猪粪和蚓粪对 Cd 的吸附速率逐渐增大;但 3 种 Cd^{2+} 初始浓度条件下,快速反应阶段,即蚓粪对 Cd 的吸附速率与猪粪相近,而慢速反应阶段时蚓粪对 Cd 的吸附速率均远高于猪粪。究其原因,可能在于吸附反应初期猪粪及蚓粪对重金属离子的吸附主要发生在分子表面。而在吸附后期,吸附受扩散控制,则主要发生在深孔内界面,而蚓粪颗粒

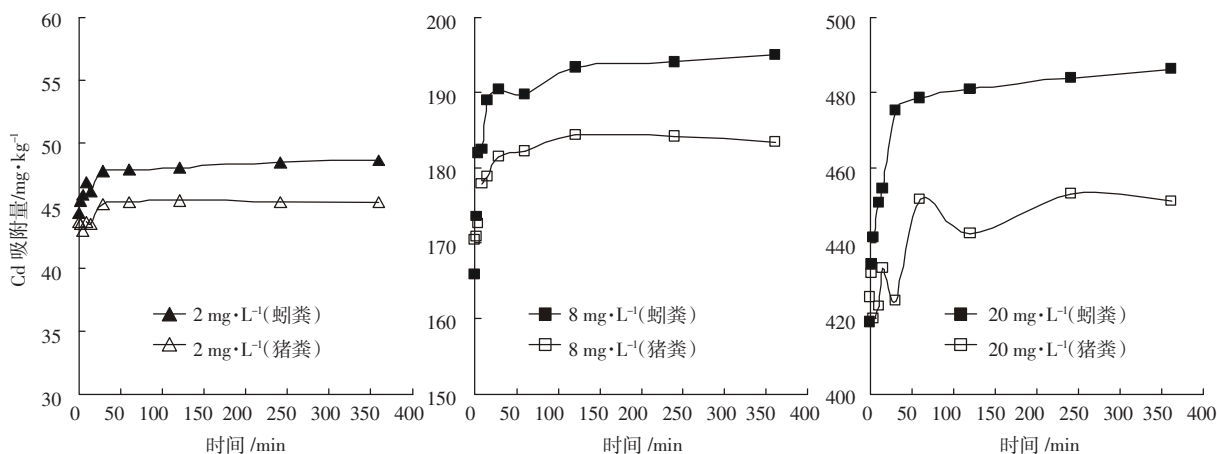


图 5 猪粪和蚓粪对 Cd 的吸附动力学曲线

Figure 5 The dynamic curve of Cd adsorption on pig manure waste and its vermicompost

相对细碎,具有相对更大比表面积和内界面,因此,吸附后期,蚓粪对 Cd 的吸附速率要快于猪粪^[2,13]。

2.3.2 猪粪和蚓粪对 Pb 的吸附动力学

猪粪与蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附动力学曲线如图 6 所示,在 3 种不同 Pb 初始浓度条件下,蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附速率均远大于猪粪,这与前述蚓粪对 Pb^{2+} 的吸附固定能力强于猪粪的结论一致。图 6 亦可见,对猪粪

而言,在 Pb 初始浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,猪粪对 Pb 的吸附量分别在 60 min 和 10 min 达到吸附峰值,即猪粪对 Pb 吸附速率分别在 60 min 和 10 min 达到最大值;而当 Pb 初始浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,猪粪对 Pb 吸附速率以 360 min 达到最大,即尚未达到吸附平衡。可见猪粪对 Pb 的吸附动力学过程复杂,吸附速率取决于起始 Pb 浓度和吸附时间的变化。对蚓粪而言,在 3 种 Pb 初始浓度下,蚓粪对 Pb 的吸附量均可在瞬间(初始的 1 min)达到吸附峰值;随着吸附时间的延长,蚓粪对 Pb 的吸附速率在最初 30~60 min 之内逐渐下降,这可能与吸附态 Pb 出现解吸现象有关;此后吸附速率基本趋于稳定,动力学曲线趋于平稳。

3 结论

在试验浓度范围内, Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在猪粪和蚓粪的吸附量均随着加入 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 浓度的增加而增加,蚓粪对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附能力强于猪粪。Henry 和 Freundlich 方程可以用来拟合 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在猪粪和蚓粪中的等温吸附过程。猪粪与蚓粪中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 解吸量随 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附量增加而增加,但猪粪中吸附态 Cd、Pb 更易解吸。猪粪与蚓粪对 Cd^{2+} 的吸附可分为快速反应阶段和慢速反应阶段,快速反应阶段基本可在 30 min 左右完成且猪粪与蚓粪对 Cd^{2+} 的吸附速率相近,而慢速反应阶段中蚓粪对 Cd^{2+} 的吸附速率明显高于猪粪。猪粪对 Pb 的吸附动力学过程复杂,吸附速率取决于起始 Pb 浓度和吸附时间的变化;而蚓粪对 Pb 的吸附可瞬间达到最大吸附速率,但随着时间的延长,其吸附速率下降直至稳定。

参考文献:

- [1] 谭长银,岳振华,罗槐林,等.菜园土对铅的吸附解吸特性研究[J].水土保持学报,2000,14(2): 88-91.
TAN Chang yin, YUE Zheng hua, LUO Huailin, et al. Study on adsorption and desorption of lead in several garden soils[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000,14(2): 88-91.
- [2] 刘亚纳,刘会丽,张彦,等.蚯蚓处理后的猪粪物质变化试验研究[J].河南农业科学,2005(6): 63-65.
LIU Ya na, LIU hui li, ZHANG Yan, et al. Experiment of the substance variation in pig manure treated by *Eisenia Fetida*[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005(6): 63-65.
- [3] 孙振钧,孙永明.蚯蚓反应器与废弃物肥料化技术[M].北京:化学工业出版社,2004.232-256.
SUN Zheng jun, SUN Yong ming. Earthworm bioreactor and waste fertilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.232-256.
- [4] 余贵芬,蒋新,孙磊,等.有机物质对土壤镉有效性的影响研究[J].生态学报,2002,22(5): 770-776.

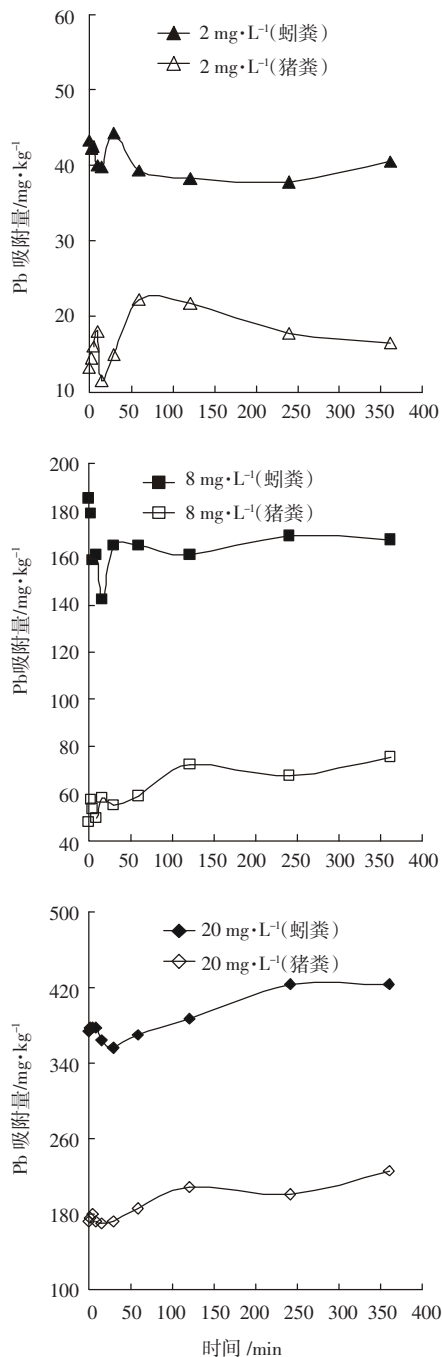


图 6 猪粪和蚓粪对 Pb 的吸附动力学曲线

Figure 6 The dynamic curve of Pb adsorption on pig manure and its vermicompost

