

DOI: 10.11779/CJGE202001005

优先流作用下的胶体-重金属共迁移试验研究

张文杰¹, 李俊涛²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 土壤中的重金属污染物大部分源自外界的工、农业排放, 地表土层是重金属迁移至地下的必经途径。由于干缩和动植物活动, 地表土中存在大孔隙, 形成污染物运移的优势通道, 在一些情况下, 这些通道是重金属穿过包气带向下迁移的唯一途径。针对胶体对重金属具有较大吸附能力且在优先流条件下具有移动性, 从而可能加快重金属污染物迁移这一问题, 通过等温吸附试验确定了上海表层褐黄色粉质黏土与土壤胶体对重金属镉、铅的吸附特征, 制备具有可重复性优先流特征的试验土柱, 进行优先流条件下胶体-重金属共迁移土柱淋滤试验, 分析得到胶体-重金属共迁移规律。试验结果表明, 胶体对重金属的吸附能力明显高于粉质黏土。有胶体情况下, 镉出流量是无胶体情况下镉出流量的1.49倍, 铅的出流量是无胶体情况下的33.88倍, 有胶体情况下土上吸附的重金属和孔隙溶液中的重金属浓度都低于无胶体的情况, 更多的重金属随胶体向下迁移, 优先流条件下胶体明显加快了重金属的迁移。虽然铅的源浓度和淋滤时间都大于镉, 但铅的出流量仅约为镉的1/13, 由于易发生吸附, 铅在土中的迁移能力较弱。

关键词: 重金属; 优先流; 土壤胶体; 吸附; 共迁移

中图分类号: TU475 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)01-0046-07

作者简介: 张文杰(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhwjlyl@163.com。

Investigation of co-migration of heavy metal with colloid under preferential flow

ZHANG Wen-jie, LI Jun-tao

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Most of the heavy metal pollutants in soil come from external industrial and agricultural activities. Surface soil layer is the only access through which the heavy metal can migrate downward. Because of drying shrinkage and animal or plant activities, there are macropores in surface soil, which form preferential flow channels. In some cases, these channels are the only way for the heavy metal to pass through the vadose zone. Colloid has great adsorption capacity of heavy metal and can be transported under preferential flow, so the colloid may accelerate the migration of the heavy metal. The adsorption characteristics of heavy metal cadmium and lead in brown-yellow silty clay in Shanghai and soil colloid are determined by the isothermal adsorption tests. Leaching tests are carried out using the soil columns with repeatable preferential flow characteristics to investigate the colloid-heavy metal co-migration under preferential flow condition. The results show that the soil colloid has higher adsorption capacity of heavy metal than the silty clay. When there is colloid, the outflow of cadmium is 1.49 times higher than that without colloid, and the outflow of lead is 33.88 times higher than that without colloid. By the effect of colloid, the concentrations of heavy metal adsorbed in silty clay and kept in pore solution are both lower than those without colloid, so more heavy metal migrates downward. The migration of heavy metal is obviously accelerated by the colloid under preferential flow condition. Although the source concentration and leaching time of lead are both higher than cadmium, the outflow of lead is only about 1/13 of cadmium. The migration of lead in soil is weak due to high adsorption.

Key words: heavy metal; preferential flow; soil colloid; adsorption; co-migration

0 引言

伴随着工农业现代化进程, 人类向环境排放的污染物日益增多, 在众多污染物中, 重金属由于其不可降解性、生物积累效应、较低浓度下即具有较大毒性和“三致”(致突变、致癌和致畸)等特点, 成为一类

重点污染物而备受关注^[1-2]。在一定条件下, 重金属可随水流发生迁移, 穿过地表包气带从而对土壤和地下水造成污染。包气带是地表重金属进入地下土层的必

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772300, 51478256)

收稿日期: 2019-04-01

经途径, 包气带表层中由于干湿交替、动物活动、植物根系、冻融与化学溶解以及人类耕作等作用而产生孔隙和缝隙, 从而形成溶质运移的优先通道。大孔隙优先流是指水携带溶质沿着优先通道绕过大部分基质快速通过土壤介质的现象^[3]。研究表明^[4], 通常情况下重金属迁移范围有限, 但在优先流存在的情况下重金属迁移能力明显增大。同时, 在黏土中普遍存在的土壤胶体(粒径1 nm~2 μm)具有很强的重金属吸附能力, 有时会从土中分离出来, 作为重金属载体在土层中迁移, 从而扩大重金属的污染范围。研究优先流条件下胶体-重金属共迁移, 对于科学揭示表土中重金属迁移规律从而进行重金属污染防治, 具有重要理论和实践意义。

通常镉、铅等重金属在土中易发生吸附和沉淀、迁移较慢, 因此理论上主要分布在地表浅层, 但实际上在有些地区土中的迁移深度却很大^[5]。Welch等^[6]研究表明, 重金属几乎不会穿过均质土壤进入地下水; Smith^[7]研究发现, 因为重金属在大孔隙中的吸附和沉淀微乎其微, 所以大孔隙为土壤重金属迁移提供了通道; Kim等^[8]、Behbahaninia等^[9]、Garrido等^[10]研究表明, 优先流对土壤重金属迁移具有重要影响, 在有些情况下, 优先流是重金属穿过包气带到达地下水的唯一途径。张英虎等^[11]通过分析优先流区和基质流区土壤重金属浓度分布, 发现优先流区重金属浓度高于基质流区。目前对于优先流的试验研究一般基于两种优先流土样: ①采用天然地表土, 如郑欣等^[12]通过野外染色示踪试验, 研究了天然表土的优先流特征, 因大孔隙在表土中的分布具有随机性, 这种制样方法的可重复性较差; ②采用人工制造大孔隙的方法, 如人工插孔, 虽然具有可重复性, 但这种方法制造的大孔隙与实际大孔隙在孔径、大孔隙连通性和分布上均有较大差别。Kohne等^[13]、Zhou等^[14]、郭会荣^[15]均通过人工插管的方法研究了大孔隙对溶质运移的影响, 发现优先流大大地加快了溶质迁移。除了优先流的作用外, 土壤可移动胶体也是加快重金属迁移的重要因素。Gamerdinger等^[16]通过土柱出流试验发现胶体可以具有很强的移动性, 其移动性受离子浓度影响; Sayers等^[17]发现高岭石胶体加快了¹³⁷Cs在砂柱中的迁移; Grolimund等^[18]通过土柱试验证实了饱和多孔介质中胶体明显促进了强吸附性重金属Pb²⁺的迁移; Roy等^[19]研究了不同酸碱度和离子浓度条件下胶体对重金属Ni²⁺迁移的影响。但目前极少有考虑优先流的土壤胶体-重金属共迁移研究。综上所述, 目前对于优先流条件下重金属迁移的试验研究还不完善, 对优先流作用下土壤胶体-重金属共迁移的研究还需要进一

步深入。

本文将烘干后的黏土碾碎成大小不一的土块, 通过控制干密度和土块粒径组成制成大孔隙优先流试样, 从而使试样具有可重复性, 利用此试样进行有、无土壤胶体情况下重金属镉和铅的淋滤试验, 研究了优先流条件下胶体-重金属共迁移规律。

1 试验材料

来源于外界的重金属一般要穿过表层土向下迁移, 因此选择上海市地表杂填土之下的第一个稳定土层, 即②₁层褐黄色粉质黏土作为本文试验用土, 基本参数列于表1, 化学成分见表2, 其主要矿物成分为石英(64.7%)、白云母(24.0%)和斜绿泥石(11.3%), 粉质黏土中的金属离子含量测定结果列于表3。采用传统的虹吸法(GB7872—87), 使用膨润土制备土壤胶体, 因用量极少, 故使用业内熟知的高庙子膨润土。

表1 试验用土的基本参数

Table 1 Basic parameters of test soils

土类	颗粒密度 (g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	天然含水率/%
粉质黏土	2.71	38.10	24.3	12.4
膨润土	2.76	163	32.0	9.6

为保证制成的土样中具有大孔隙优先路径, 将烘干后的粉质黏土碾碎成大小不一的土块, 混合均匀后填筑成直径15 cm的土柱, 控制干密度为1.15 g/cm³, 使用亮蓝作为染色剂进行染色示踪试验, 确定了具有明显优先流特征土柱的土块粒径组成比例(图1), 按此固定比例重复制样, 进行本文的各平行试验。下文将通过Cl⁻出流试验对土柱中优先流一致性进行验证。

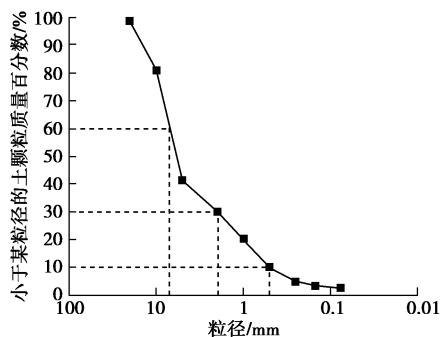


图1 供试土柱的土块粒径组成

Fig. 1 Grain-size distribution of test soil column

2 等温吸附试验

试验采用的化学试剂分别为Cd(NO₃)₂·4H₂O、Pb(NO₃)₂的分析纯。选择重金属镉的初始浓度C₀为25, 40, 50, 60, 75, 80, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500 mg/L, 铅的初始浓度为25, 50, 75, 100, 125,

表2 粉质黏土的化学成分

Table 2 Chemical compositions of silty clay

(%)

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO ₂
含量	62.81	13.63	5.34	3.82	2.26	2.25	1.24	0.78	0.10

表3 粉质黏土的金属元素含量

Table 3 Metal elements in silty clay

(mg·g⁻¹)

金属元素	K	Fe	Al	Na	Mg	Ca	Mn	Zn	Cr	Pb	Cd	Cu
含量	21.20	18.05	11.07	7.50	7.36	5.43	0.472	0.063	0.082	0.041	0.033	0.029

150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 400, 500 mg/L。

试验中取镉吸附的土水比为1:100, 考虑到铅具有比镉更强的吸附性, 铅的吸附土水比为1:250。吸附试验过程中用0.01 mol/L的HNO₃和NaOH溶液调节反应体系的pH为6.0±0.1。使用恒温振荡器以180 rpm转速振荡24 h后, 用电动离心机以3000 rpm离心30 min, 取上清液, 用电感耦合等离子体发射光谱仪测重金属的浓度C_e, 利用差减法获得吸附量q_e:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}, \quad (1)$$

式中, C₀为初始浓度(g/mL), C_e为上清液浓度(g/mL), V为溶液的体积(mL), m为土的质量(g)。

利用Langmuir方程拟合重金属的吸附等温线^[20]:

$$q_e = q_{\max} K_L C_e / (1 + K_L C_e), \quad (2)$$

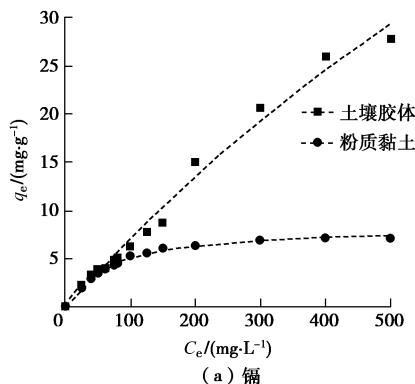
式中, q_e为平衡时的吸附量(mg/g), q_{max}为最大吸附量(mg/g), C_e为平衡时浓度(mg/L), K_L为Langmuir常数(L/mg)。

Langmuir方程拟合的吸附等温线见图2, 拟合参数见表4, 可见Langmuir方程能较好地拟合试验用土对重金属的吸附, 其中土壤胶体对重金属的吸附能力明显高于粉质黏土。在试验浓度范围内粉质黏土对重金属的吸附已趋于饱和, 而土壤胶体对重金属的吸附尚未达到饱和, 说明由于土壤胶体具有巨大的比表面积和双电层结构, 因此具有极大的吸附容量, 若土壤胶体可在土中移动, 将携带更多的重金属一起迁移。

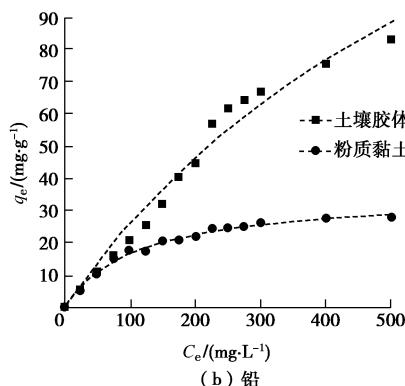
表4 试验用土对镉、铅的Langmuir吸附参数

Table 4 Langmuir parameters of Cd and Pb for test soils

重金属 吸附	参数	拟合值	
		粉质黏土	土壤胶体
镉	q _{max} /(mg·g ⁻¹)	7.45	82.32
	K _L /(L·mg ⁻¹)	0.528	0.197
	R ²	0.981	0.973
铅	q _{max} /(mg·g ⁻¹)	27.17	120.06
	K _L /(L·mg ⁻¹)	1.72	2.64
	R ²	0.929	0.970



(a) 镉



(b) 铅

图2 镉和铅的Langmuir吸附等温线

Fig. 2 Langmuir adsorption isotherms of Cd and Pb

3 氯离子土柱穿透试验

为验证平行试验所用土柱中优先流的一致性, 也即制样的可重复性, 进行惰性(不吸附)溶质Cl⁻的穿透试验。穿透试验装置主要包括模型桶(内径150 mm, 土柱高度30 cm)、降雨模拟器和出流收集装置3部分, 如图3所示。模型桶底部铺一层1 cm厚的细砂(导排), 之后分3层装填前述级配和干密度的土块, 制成优先流土柱, 在土柱顶部铺土工布以减少对土表面的冲刷。降雨模拟器包括马氏瓶和洒水器以及流量计, 控制定速淋滤。用接样瓶收集模型桶底部出流溶液。

首先用去离子水饱和土柱, 再由土柱上端注入去离子水进行淋滤, 前期淋滤过程中发现, 土中细小颗粒随水流移动在局部产生堵塞, 使土柱透水能力逐渐降低, 为此, 打开土柱分段处的阀门将水流携带的细小颗粒排出后, 最终使土柱中水流速度达到稳定, 出

流液吸光度小于 0.002 (说明已基本无胶体流出), 且土中自带的 Cl^- 降低至 30 ppm 以内。之后使用浓度为 195 mg/mL 的 NaCl 溶液 30 mL (含 NaCl 为 0.1 mol) 按 10 mm/h 的强度淋滤土柱, 同时开始计时, NaCl 溶液淋滤完成后, 用去离子水以相同强度淋滤土柱, 每隔 30 min 收集一次出流溶液, 量测出流的溶液体积和浓度, 至出流溶液的浓度接近背景浓度时停止淋滤。

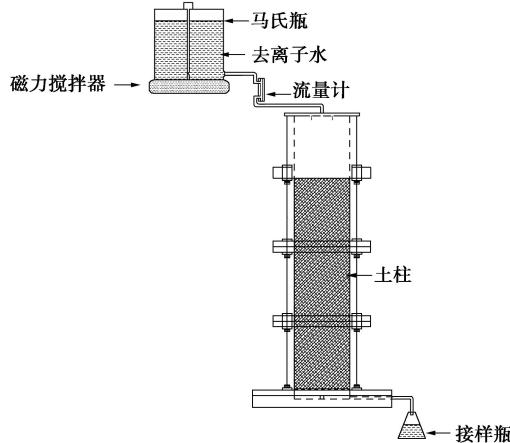


图 3 土柱溶质穿透试验装置示意图

Fig. 3 Set-up for solute breakthrough tests

为定量分析土柱中的优先流, 使用双峰概率密度模型对出流数据进行拟合, 该模型能反映出优先流过程中参与溶质运移的大孔隙比例, 具体可参文献[21]。对于脉冲式施加溶质的稳态流情况, 标准化的溶质质量可看作关于深度和时间的概率密度函数 $f(z,t)$:

$$s(z,t)/\rho_A = f(z,t) \quad , \quad (3)$$

式中, $s(z,t)$ 表示深度 z 处 t 时刻的出流溶质质量, ρ_A 表示单位横截面内的溶质质量。溶液同时在基质和大孔隙中发生流动时, 概率密度函数可表示为双峰形式:

$$f(z,t) = m f_1(z,t) + (1-m) f_2(z,t) \quad . \quad (4)$$

式中 m 为权重调整参数; $f_1(z, t)$ 和 $f_2(z, t)$ 分别为溶液流经路径为基质域和大孔隙域的概率密度函数, 均服从对数正态分布:

$$f_i(z,t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left[\left(\frac{(\ln t - \ln T_i^G)^2}{-2\sigma_i^2}\right)\right] \quad , \quad (5)$$

式中, $i=1, 2$ 分别代表基质域和大孔隙域, T_i^G 为几何均值, σ_i^2 为 $\ln t$ 的方差。相应的, 出流量 Q 和体积含水率 θ 也划分为基质域和大孔隙域两部分:

$$Q = Q_1 + Q_2 = mQ + (1-m)Q \quad , \quad (6)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad , \quad (7)$$

表 5 双峰概率密度模型参数值

Table 5 Parameters of bimodal probability density model

组别	$1-m$	σ_1	T_1^G	σ_2	T_2^G	θ_1	θ_2	θ	R^2	n
第一组	0.32	0.48	753.27	0.67	753.15	0.33	0.17	0.50	0.986	0.58
第二组	0.35	0.57	785.36	0.49	785.14	0.34	0.19	0.53	0.978	0.58

$$\theta_1 = V_{W1}/V, \quad \theta_2 = V_{W2}/V \quad . \quad (8)$$

式中 V_{W1} 为基质域中溶液体积, V_{W2} 为大孔隙域中溶液体积, V 为试样总体积。定义 \bar{T}_1 和 \bar{T}_2 分别表示基质域和大孔隙域中的溶液平均运移时间,

$$\bar{T}_i = T_i^G \exp(\sigma_i^2/2) \quad , \quad (9)$$

则

$$V_{W1} = Q_1 \cdot \bar{T}_1, \quad V_{W2} = Q_2 \cdot \bar{T}_2 \quad . \quad (10)$$

由式 (6) ~ (10) 可得

$$\theta = m \frac{\bar{T}_1 Q}{V} + (1-m) \frac{\bar{T}_2 Q}{V} \quad , \quad (11)$$

式 (11) 中待定参数 T_1 , T_2 和 m 可通过双峰概率密度模型回归分析得到。为验证所制土柱中优先流的一致性, 按图 1 土块粒径组成和相同干密度先后重复配制两个土柱, 按上述操作步骤进行 Cl^- 的穿透试验, 得到两组击穿曲线及其回归曲线示于图 4, 拟合得到的参数见表 5。数据表明, 两组试验通过大孔隙运移的流量占比 $(1-m)$ 较接近, 分别为 0.32 和 0.35, 且其它参数也比较接近, 说明本文控制干密度和土块粒径分布填筑的土柱中优先流具有一致性, 可利用此方法重复制样进行后续重金属淋滤的平行试验。

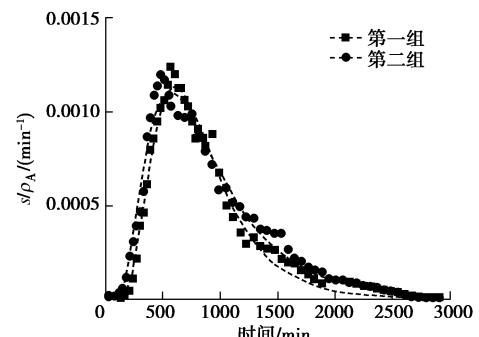


图 4 Cl^- 穿透试验曲线双峰概率密度模型拟合

Fig. 4 Fitting of Cl^- breakthrough curves with bimodal probability density model

4 优先流条件下胶体-重金属共迁移

4.1 优先流条件下胶体-镉共迁移试验

采用与 Cl^- 穿透试验基本相同的装置进行有、无胶体参与情况下的重金属淋滤试验, 不同之处在于因为重金属的吸附导致迁移较慢, 经前期试验, 较长时间后在 30 cm 高土柱中迁移距离仍较短, 故最终使用了 10 cm 高的土柱, 试验装置如图 5 所示。操作步骤如

下：先用去离子水淋滤土柱至出流速度稳定且出水吸光度小于 0.002，以排除土中原有胶体的影响，静置释水 24 h 后，将 Cd 浓度为 167 mg/mL 的 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液 30 mL（其中镉质量为 5 g）均匀喷洒在土柱表面，之后按 10 mm/h 进行淋滤。进行胶体-镉共迁移试验时，使用 200 mg/L 的胶体悬浊液持续淋滤土柱，并使用磁力搅拌器搅拌溶液，防止胶体聚沉；进行无胶体的淋滤试验时，直接使用去离子水以 10 mm/h 的强度进行淋滤。间隔固定时间收集土柱下端出流液并测镉浓度。

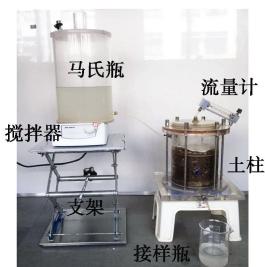


图 5 胶体-重金属共迁移土柱淋滤装置

Fig. 5 Leaching tests on co-migration of heavy metal with colloid

经过 100 h 淋滤，镉的出流浓度降至低于 0.5 mg/L，终止淋滤，所得出流液中镉的浓度随时间变化如图 6 所示。可见随淋滤进行土柱底部逐渐有镉流出，并在约在 2 h 后达到峰值，随后出流浓度逐渐降低，这与前期镉通过大孔隙快速迁移，后期从小孔隙中释放的过程相对应。其中有胶体的情况下，出流浓度峰值为 386.98 mg/L，高于无胶体的 318.54 mg/L，且有胶体情况下后期的出流浓度也高于无胶体的情况，从镉出流总量来看，有胶体情况下是无胶体条件下的 1.49 倍。由此可见，胶体的参与明显加快了镉的迁移。

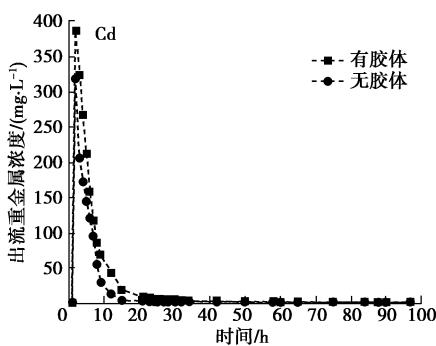
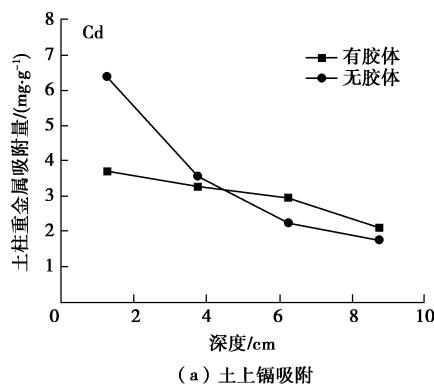


图 6 有、无胶体情况下 Cd 出流浓度

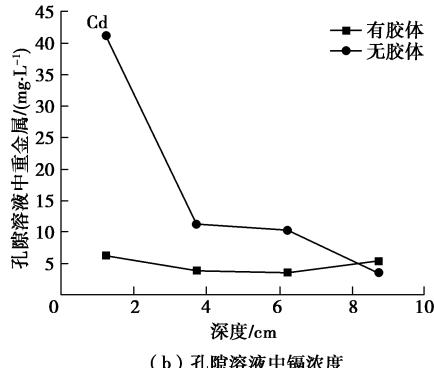
Fig. 6 Effluent concentrations of Cd with and without colloid

拆解装置后将土柱分层切片，按每层 2.5 cm 高度共切成 4 层，得到有、无胶体时土柱不同深度土中的镉吸附量（图 7(a)）及孔隙溶液中镉浓度（图 7(b)）。由图 7(a) 可知，无胶体情况下，土柱上部镉的最大吸附量基本达到了等温吸附试验中的吸附平衡浓度，

而有胶体情况下，土柱上部镉的吸附量明显偏低，而土柱下部吸附量稍高，说明胶体携带重金属向下迁移，减少了土柱上部的吸附量。有胶体情况下整个土柱中镉的吸附总量低于无胶体的情况，说明更多镉被胶体吸附并携带最终出流，胶体的存在减小了土上镉的吸附量，促进了镉迁移。由图 7(b) 可以看出，有胶体情况下孔隙溶液中镉的浓度明显更低，说明溶液中的一部分镉已经被胶体携带出流。总之，有胶体情况下土柱中吸附在土上的镉和孔隙溶液中的镉都比无胶体情况下少，而出流的镉更多，胶体明显加快了镉的迁移。



(a) 土上镉吸附



(b) 孔隙溶液中镉浓度

图 7 有、无胶体情况下土上 Cd 吸附量与孔隙中 Cd 浓度

Fig. 7 Adsorbed Cd and Cd concentrations in pore water

4.2 优先流条件下胶体-铅共迁移试验

采用相同试验方法，进行优先流条件下胶体-铅共迁移试验，使用的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液中 Pb 浓度为 333 mg/mL（30 mL 溶液中铅质量为 10 g）。经过 200 h 淋滤，铅的出流浓度降至 0.01 mg/L 以下，终止淋滤，得到铅出流浓度曲线如图 8 所示。图 8 中显示，在有胶体情况下各时刻铅的出流浓度明显高于无胶体的情况，铅的累计出流量是无胶体情况下的 33.88 倍，说明胶体的存在极大程度上加快了铅的迁移。另外，对比镉的试验结果可以看出，虽然试验所用铅溶液的浓度更高，但出流液中镉的浓度明显高于铅，有胶体情况下镉的总出流量是铅的 12.82 倍，说明淋滤过程中铅更容易被土吸附，导致其迁移能力远低于镉，这与

等温吸附试验结果一致。

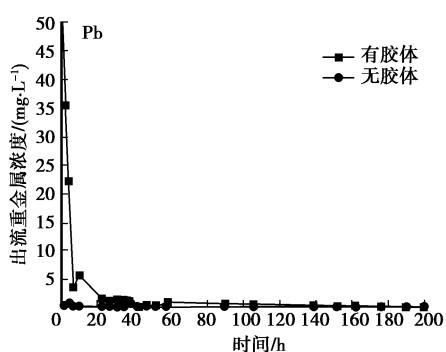


图8 有、无胶体情况下Pb出流浓度

Fig. 8 Effluent concentrations of Pb with and without colloid

拆解装置进行切片, 得到有、无胶体时土柱中不同深度土上的铅吸附量(图9(a))及孔隙溶液中铅浓度(图9(b))。因为铅容易在土中发生吸附, 因此有、无胶体情况下土柱各深度处的铅吸附量差别不大, 土柱顶部基本达到了等温吸附试验测得的平衡吸附浓度, 仅在6.25 cm深度处有胶体情况下铅吸附量偏小较明显(图9(a)), 更多铅随胶体出流所以土上吸附少; 有胶体情况下各深度处孔隙溶液中的铅浓度明显更低(图9(b)), 说明此时溶液中的一部分铅被吸附在胶体上随胶体向下迁移并出流, 这与图8有胶体情况下出流液中铅浓度更高的结果一致, 说明胶体加快了铅的迁移。

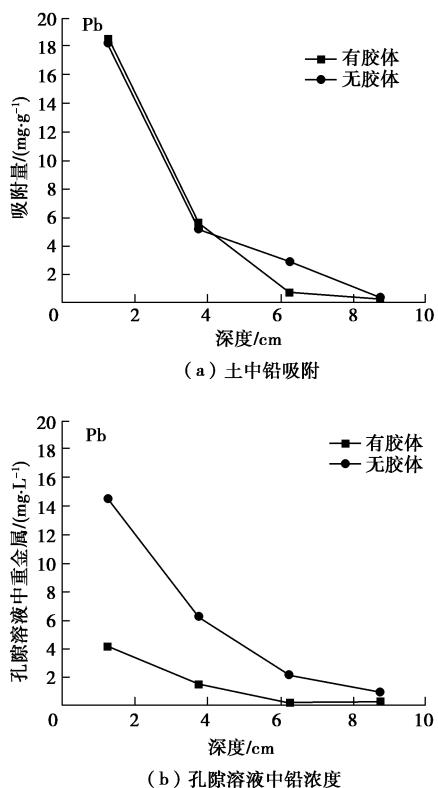


图9 有、无胶体情况下土上Pb吸附量与孔隙中Pb浓度

Fig. 9 Adsorbed Pb and Pb concentrations in pore water

5 结 论

本文通过构筑优先流土柱, 进行有、无胶体情况下的重金属淋滤试验, 研究了优先流条件下胶体-重金属共迁移规律, 得出以下4点结论。

(1) 通过等温吸附试验, 基于Langmuir等温吸附方程拟合表明, 土壤胶体对铅和镉的吸附能力远大于粉质黏土, 使得可移动的土壤胶体具有加快重金属迁移的能力, 另外, 胶体和粉质黏土对铅的吸附能力明显大于镉。

(2) 使用固定粒径分布的土块填筑具有大孔隙的土柱, 重复制样进行Cl⁻的穿透试验并使用双峰概率密度模型拟合出流曲线, 结果表明两组试验通过大孔隙运移的流量占比接近, 本文制样方法所得土柱中优先流具有一致性, 可用于重金属淋滤的平行试验。

(3) 胶体-重金属共迁移淋滤试验结果表明, 有胶体情况下各时刻出流的重金属浓度高于无胶体情况, 镉出流总量是无胶体条件下的1.49倍, 铅出流总量是无胶体条件下的33.88倍; 切片分析表明, 有胶体情况下粉质黏土上吸附的重金属减少, 孔隙溶液中的重金属浓度减小, 胶体的存在明显加快了重金属迁移; 虽然铅的淋滤试验源浓度更高、历时更长, 但铅的总出流量约是镉的1/13, 铅的迁移能力远弱于镉。

(4) 本文研究表明, 由于土壤胶体具有较强的吸附重金属的能力, 在优先流条件下胶体可移动性增加, 从而可明显加快土中重金属迁移。

参考文献:

- [1] 詹良通, 陈如海, 陈云敏, 等. 重金属在某简易垃圾填埋场底部及周边土层扩散勘查与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 853 - 861. (ZHAN Liang-tong, CHEN Ru-hai, CHEN Yun-min. et al. Migration of heavy metals in soil strata below and around a simple dump of MSWs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 853 - 861. (in Chinese))
- [2] GU Y G, GAO Y P, LIN Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016, 67: 52 - 58.
- [3] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3071 - 3092.
- [4] CAMOBRECO V J, RICHARDS B K, STEENHUIS T S, et al. Movement of heavy metal through undisturbed and homogenized soil columns[J]. Soil Science, 1996, 161: 740 -

- 750.
- [5] BANKS M K, SCHWAB A P, HENDERSON C. Leaching and reduction of chromium in soil as affected by soil organic content and plants[J]. Chemosphere, 2006, **62**(2): 255 - 264.
- [6] WELCH J E, LUND L J. Soil properties, irrigation water quality, and soil moisture level influences on the movement of nickel in sewage sludge-treated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1987, **16**(4): 403 - 410.
- [7] SMITH S R. Agricultural recycling of sewage sludge and the environment[J]. Environmental Pollution, 1995, **94**(2): 241.
- [8] KIM Y J, STEENHUIS T S, NAM K. Movement of heavy metals in soil through preferential flow paths under different rainfall intensities[J]. Clean, 2008, **36**(12): 984 - 989.
- [9] BEHBAHANINIA A, MIRBAGHERISA, JAVID A H. Heavy metals transport in the soil profiles under the application of sludge and waste water [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, **43**: 53 - 55.
- [10] GARRIDO F, HELMHART M. Lead and soil properties distributions in a roadside soil: effect of preferential flow paths[J]. Geoderma, 2012, **170**: 305 - 313.
- [11] 张英虎, 汤崇军, 郑海金, 等. 土壤重金属在优先流区和基质流区迁移能力研究[J]. 土壤通报, 2015(6): 1386 - 1391. (ZHANG Ying-hu, TANG Chong-jun, ZHENG Hai-jin, et al. Research of soil heavy metal mobility in preferential flow pathsand soil matrix[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015(6): 1386 - 1391. (in Chinese))
- [12] 郑 欣, 程金花, 张洪江, 等. 北京地区 2 种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(3): 113 - 119, 131. (ZHANG Xin, CHENG Jin-hua, ZHANG Hong-jiang, et al. Characteristics and influencing factors of preferential flow dyeing morphology of two soils in Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(3): 113 - 119, 131. (in Chinese))
- [13] KOHNE J M, MOHANTY B P. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: experiment and hierarchical modeling[J]. Water Resources Research, 2005, **41**(41): 222 - 229.
- [14] ZHOU B B, LI Y, WANG Q J, et al. Preferential water and solute transport through sandy soil containing artificial macropores[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(5): 2371 - 2379.
- [15] 郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移实验与模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008. (GUO Hui-rong. The Experimental Study and Numerical Simulation of Groundwater Recharge Processes and Preferential Solute Transport in Soils[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese))
- [16] GAMERDINGER A P, KAPLAN D I. Colloid transport and deposition in water-saturated yucca mountain tuff as determined by ionic strength[J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(16): 3326 - 3331.
- [17] SAIERS J E, HORNBERGER G M. The role of colloidal kaolinite in the transport of cesium through laboratory sand columns[J]. Water Resources Research, 1996, **32**(1): 33 - 41.
- [18] GROLIMUND D, BORKOVEC M, BARMETTLER K, et al. Colloid-facilitated transport of strongly sorbing contaminants in natural porous media: a laboratory column study[J]. Environ Sci, Technol, 1996, **30**: 3118 - 3123.
- [19] ROY S B, DZOMBAK D A. Chemical factors influencing colloid-facilitated transport of contaminants in porous media[J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(3): 658 - 664.
- [20] SPARKS D L. Environmental Soil Chemistry[M]. London: Academic Press, 2003.
- [21] 张文杰, 严宏罡, 孙 铖. 城市生活垃圾中优先流规律的穿透试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(7): 1316 - 1321. (ZHANG Wen-jie, YAN Hong-gang, SUN Cheng. Breakthrough tests on preferential flow in municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(7): 1316 - 1321. (in Chinese))