

介质粗糙度和铅污染对粘土矿物胶体运移的影响

孙慧敏^{1,2}, 殷宪强^{1,2}, 王益权^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:土壤胶体在多孔介质中的运移受多种环境因素的影响,其中胶体特性和介质条件是决定胶体运移过程的关键因素。选取土壤体系中不同结构类型的粘土矿物胶体高岭石和蒙脱石作为实验材料,通过胶体对铅的吸附实验,制得被铅污染的胶体,利用室内砂柱模拟实验,分别研究了水洗和烘烤处理得到的表面粗糙度不同的石英砂介质条件下,污染与未污染的四种特性胶体在多孔介质中的迁移规律。结果表明:铅的存在降低了高岭石胶体和蒙脱石胶体在饱和多孔介质中的流动性;介质表面粗糙度会显著影响蒙脱石胶体的运移过程,而对高岭石胶体基本无影响;胶体粒径大小是决定胶体运移过程是否受介质表面影响的主要因素。

关键词:多孔介质;表面粗糙度;铅;胶体;运移

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)12-2361-06

Effect of Surface Roughness and Pb Pollution on the Transport of Mineral Colloids in Saturated Porous Media

SUN Hui-min^{1,2}, YIN Xian-qiang^{1,2}, WANG Yi-quan^{1,2}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Properties of porous media and colloids are primary factors controlling colloids transport in porous media. Two typical different structural clay minerals in soil, kaolinite and montmorillonite, were used as the experimental materials. The Pb contaminated colloids were prepared through adsorption of Pb on colloids. The transport of the contaminated and uncontaminated kaolinite and montmorillonite colloids was investigated in quartz sand column with different surface roughness. The columns were packed with washed and baked quartz sand respectively. Results showed that the adsorption of Pb decreased the mobility of kaolinite and montmorillonite. The surface roughness significantly decreased the mobility of montmorillonite but did not influence the transport of kaolinite. Colloids size was the principal factor determining the effects of surface roughness on the transport of colloids through porous media.

Keywords: porous media; surface roughness; Pb; colloids; transport

土壤胶体是土壤中最活跃的部分,对土壤中物质的迁移过程起到重要作用。土壤胶体可以作为环境中污染物的载体,加速或促进污染物运移的速率和距离,土壤胶体携带污染物迁移的能力与胶体自身的稳定性和迁移性能有着密切关系^[1-3]。因此,研究土壤中胶体特性和外部条件对其环境行为的影响,对全面掌

握土壤中污染物的归趋特征,保护地下环境具有重要意义。

胶体在土壤、沉积物等自然多孔介质中,主要通过吸附在介质颗粒的表面和絮凝状态等形式存在。因此,除了化学因素作用可以影响胶体颗粒的迁移沉积行为以外,物理条件的变化(孔隙水流速、胶体颗粒及介质颗粒粒径大小、介质颗粒表面粗糙度等)也是重要的影响因素^[4-9]。Tian等^[9-10]通过研究表面活性剂存在条件下,不同类型纳米胶体颗粒在石英砂介质中的运移,以及介质饱和程度对其迁移的影响,表明表面活性剂的存在能促进纳米胶体颗粒的迁移,增大胶体粒子的回收率;介质含水量对纳米胶体粒子运移影响

收稿日期:2012-07-18

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(QN2011151, QN2011017);
西北农林科技大学博士科研启动基金(2011BSJJ112, 2010BSJJ072)

作者简介:孙慧敏(1977—),女,农学博士,讲师。

E-mail:huiminsun@126.com

不大,只有当水分含量低到一定程度(<0.10),才会制约胶体的迁移。Xu等^[5]在单分散和两次分散的悬浮液(含 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5.1\text{ }\mu\text{m}$ 的微球)在饱和石英砂柱中迁移的实验中发现,使用经验表达式的胶体直径与砂粒直径的比率可以量化作为预测变量的应变率。Ko等^[4]通过研究指出,胶体在介质中的残留是由水动力和双电层排斥力综合作用的结果,通过增加流速和颗粒大小可达到介质区域表面最大的覆盖范围。胡俊栋等^[6]选用四氧化三铁磁纳米颗粒(MENPs)作为研究对象,结果显示:孔隙水流速、介质颗粒的表面物理性质及多孔介质颗粒粒径大小改变时,MENPs穿透曲线及持留分布曲线随之变化明显,MENPs的吸附沉积机制也相应有所不同。殷宪强等^[11]对不同类型胶体在多孔介质中的运移过程研究,也发现孔隙水流速影响着胶体在多孔介质中的移动,胶体表面性质不同,与介质之间的作用力不同,决定了胶体运移过程中的沉积和释放。

虽然影响胶体运移和沉积因素的研究较多,但主要集中在对单一、清洁胶体的运移过程中。有关不同结构类型及受到污染胶体在土壤中运移的研究报道还比较少见。因此,本研究通过饱和砂柱迁移实验,分别探讨了胶体类型、胶体表面特性和运移介质表面粗糙度对土壤胶体运移过程的影响,为预测水土环境中污染物的行为提供理论依据,为污染物土壤迁移的数值模拟提供重要的理论和参数支持。

1 材料与方法

1.1 供试样品及制备

本实验采用的多孔介质为过30~45目筛的分析纯石英砂(Plastican,Dallas,Texas)所装填的砂柱,胶体为不同结构类型的高岭石(Thele kaolin company,Sandersville,GA)和蒙脱石 cloisite Na^+ (Southern clay products,Gonzales,Texas)。

1.1.1 石英砂的制备

擦洗、酸洗及烘烤等是人们常用的去除石英砂表面杂质的方法^[12-13],由于水洗和烘烤的方法对石英砂表面吸附的杂质去除强度不同,本实验采取水洗和烘烤两种方法对石英砂表面进行处理,得到实验所需的不同介质表面粗糙度条件。

(1)水洗法:首先用自来水将石英砂清洗干净,直至洗砂的水溶液中没有悬浮的杂质颗粒为止,然后分别用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HNO_3 和 NaOH 多次漂洗以去除石英砂表面吸附的少许杂质,最后用蒸馏水冲洗,直

至漂洗的水中没有杂质出现, $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干,备用。

(2)烘烤法:将水洗过的石英砂,用锡箔纸包覆,置于马福炉中, $550\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤15 h,冷却,备用。

1.1.2 胶体制备

(1)清洁胶体:将5.0 g高岭石或蒙脱石(Cloisite Na^+)胶体粉末加入到1 L蒸馏水中,往复剧烈振荡,超声分散30 min。将分散后的混合物转入1 L烧杯中,静置24 h,上清液虹吸,得胶体储备液,备用。胶体储备液浓度用重量法测定。然后将胶体原液进行稀释即得实验所用胶体溶液,高岭石胶体溶液浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,蒙脱石胶体溶液浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)铅污染胶体:将50 mL高岭石胶体储备液($2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)或蒙脱石胶体储备液($3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和50 mL浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液混合后,往复振荡24 h, $4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,将上清液吸出,往离心管中加入50 mL蒸馏水,超声分散30 min,重新制备得胶体悬浊液,重复2次。该溶液即为制得的吸附有铅的胶体,实验时将所制备的胶体溶液进行稀释,得到 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 吸附铅的高岭石胶体溶液和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吸附铅的蒙脱石胶体溶液^[14-16]。

1.2 胶体运移实验方法

实验所用玻璃柱直径为2.5 cm,高为15 cm,采用湿法装填石英砂于玻璃柱内。为了在装填的过程中保持均匀且不产生气泡,首先将少量的石英砂轻轻倒入到柱底部8 mL的蒸馏水中,当砂面处于液面以下1 cm左右处,再搅拌玻璃柱中的石英砂。然后继续添加8 mL去离子水于柱中,按照前述方法装填至15 cm。每个柱子用砂约130 g,孔隙率为0.42左右。

胶体溶液的流速利用连接到柱子上方的蠕动泵进行控制,溶液在柱内由下向上流动,实验前先用蒸馏水由上到下冲洗砂柱3~4 h,去除杂质,然后将进水由去离子水切换为相应的供试溶液,进行运移实验。先注入胶体溶液1 h,然后换成蒸馏水冲洗2 h。流速为 $0.2\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$,出流液用自动部分收集器承接,每6 mL换一次接样瓶,测承接液中胶体和铅的浓度。实验装置见图1。

1.3 胶体性质的分析及测定

胶体粒径及 ξ 电位:采用ZetaPlus电位及粒度分析仪(ZetaPALS,Brookhaven Instruments Corporation,Holtville,NY)测定。

胶体浓度:采用紫外分光光度法测定,高岭石胶体于350 nm处比色测定,蒙脱石胶体于243 nm处比色测定^[17]。

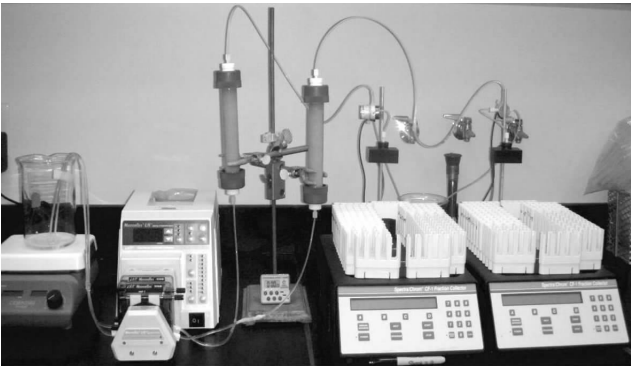


图 1 运移实验装置

Figure 1 Apparatus of the transport experiment

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对石英砂表面的影响

土壤颗粒表面通常带有负电荷,并不利于对胶体吸附与保持,仅有小部分颗粒表面的电荷性质有利于胶体的吸附^[18]。但是,土壤颗粒表面包被的各种金属氧化物、土壤表面的非均质性及土壤的阳离子交换量、粘粒含量、比表面积等都会对胶体的吸附产生影响。

介质颗粒表面状况是影响胶体运移的重要因子之一,为此,通过对石英砂颗粒表面杂质进行水洗和烘烤两种不同的去除方式,得到不同表面性状的介质

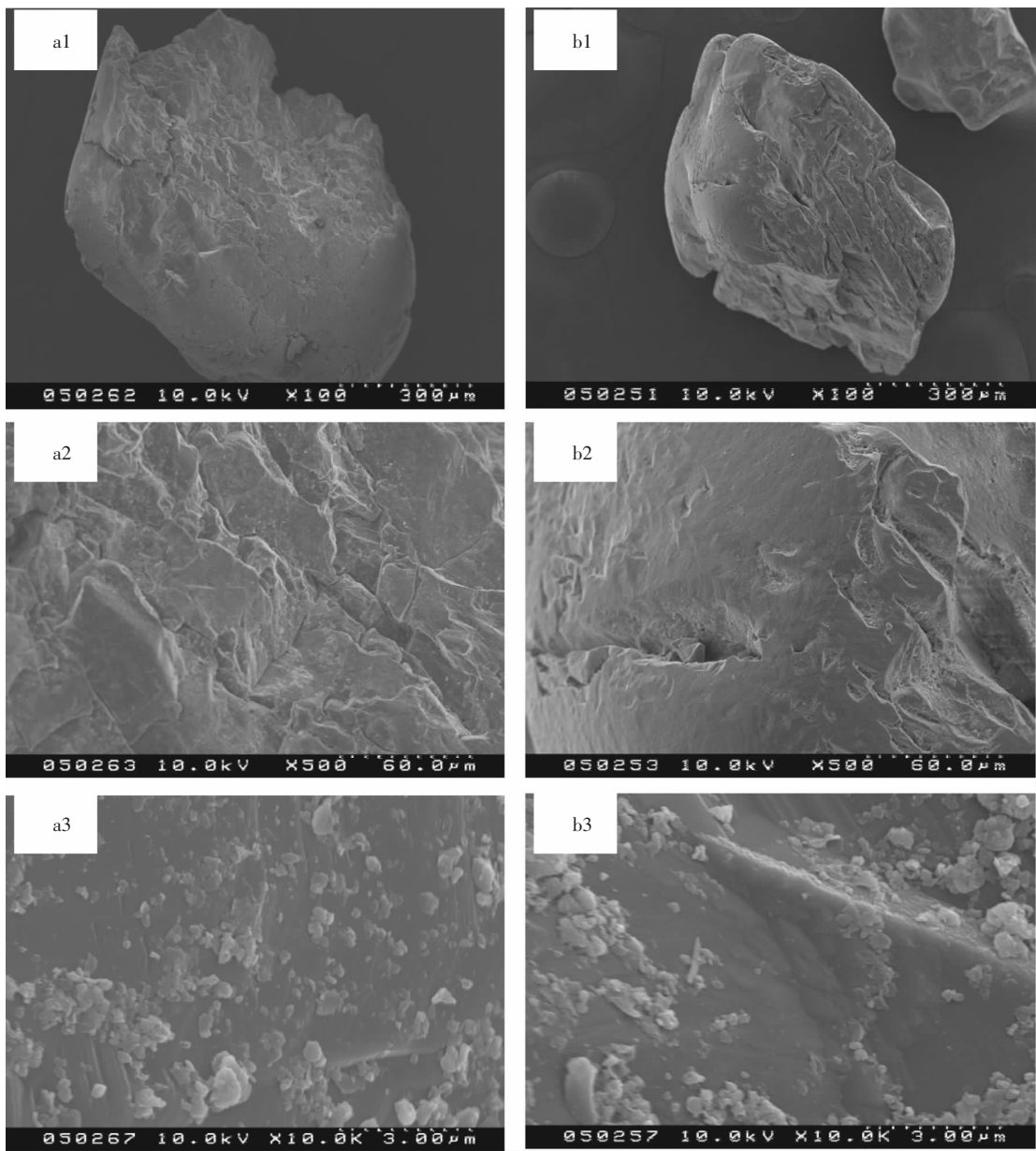


图 2 不同处理方式石英砂表面的 SEM 扫描图

Figure 2 The SEM of quartz sand surface with different treatments

颗粒。图 2 为不同尺度下拍摄的同一颗石英砂表面的 SEM 图片,其中 a1~a3 是用蒸馏水反复清洗的石英砂,b1~b3 是水洗之后经过 550 °C 高温烘烤后的石英砂。从图 2a1~a3 中可以看出,砂粒表面不是光洁的曲面,其上分布着杂质颗粒。杂质颗粒既有直径较大的颗粒,也有微小颗粒,它们大量而散乱地分布在砂粒表面。图 2b1~b3 显示经过 550 °C 焙烧后,石英砂表面的杂质相颗粒数量大大减少,并且在 60 μm 尺度下石英砂表面甚至已经观察不到杂质相,而在相同尺度下观察经过水洗处理的石英砂,则发现表面分布着大量细小的杂质相颗粒,颗粒尺寸也差别较大。如果缩小尺寸观察,可以看到烘烤过后的石英砂表面的杂质相颗粒较粗大,且数量较少,而经过水洗处理的石英砂表面杂质颗粒数量比较多。可见高温烘烤可使石英砂表面的一些细小的杂质相颗粒脱落,石英砂裸露面积大大增加,这有利于提高石英砂的表面活性。

2.2 土壤胶体在砂柱中的运移

土壤胶体在砂柱中的穿透曲线受胶体自身和运移环境的影响而表现出强烈的差异。图 3 和图 4 分别为高岭石胶体和蒙脱石胶体在不同处理砂柱中的穿透曲线。由图 3 可见,高岭石胶体穿透曲线出流时间基本一致,均在 1 个孔隙体积,穿透曲线峰值均小于 1,与 Br^- 穿透曲线相比,高岭石穿透曲线均出现不同程度拖尾现象,说明高岭石胶体在运移的过程中发生了吸附和沉淀反应。比较高岭石胶体在两种不同处理的砂柱中的运移过程,发现清洁的高岭石胶体的穿透曲线并没有明显的差异,说明石英砂表面的特性对高岭石的运移过程几乎没有影响,穿透曲线的拖尾现象可能是由于颗粒粒径较大所产生的沉淀作用所导致。但是比较吸附铅的高岭石胶体在不同处理砂柱中的穿

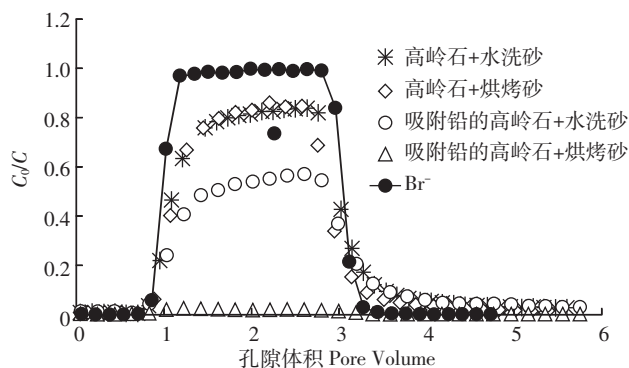


图 3 不同处理砂柱中高岭石胶体穿透曲线

Figure 3 Breakthrough curve of kaolinite in sand column with different treatments

透曲线,则出现了明显的差异,在烘烤砂柱中运移的胶体几乎全部残留在介质中,穿透曲线峰值接近于 0,而相同胶体在水洗砂柱中运移的穿透峰值为 0.57,两者均低于没有吸附铅的高岭石胶体。因此可以证明,高岭石胶体表面吸附的铅离子强烈地改变了胶体原有的表面特性,增强了砂柱对高岭石胶体的吸附性能。

由图 4 可见,相同运移环境条件下,蒙脱石胶体穿透曲线峰值均高于高岭石胶体,而且在运移过程中只有清洁的蒙脱石胶体在水洗砂柱中运移时出现明显的拖尾现象,其他运移过程中蒙脱石基本都没有吸附沉积作用发生,说明高岭石胶体在运移过程中更容易受环境的影响,在土壤物质传输过程中蒙脱石的稳定性更高。清洁蒙脱石胶体在水洗砂柱中的穿透曲线峰值高于 1,而且出现拖尾现象,说明在此介质运移过程中存在介质表面颗粒的解吸和蒙脱石胶体沉淀的过程发生。可能是由于水洗砂表面比烘烤砂表面多了许多细小的杂质颗粒(见图 2),蒙脱石胶体对于这些细小杂质颗粒的吸附力大于石英砂介质对其的吸附力而导致杂质颗粒的解吸所致。当蒙脱石胶体吸附铅之后,其穿透曲线的峰值同样降低,说明铅的存在同样改变了蒙脱石胶体的表面特性,促进了介质对胶体的吸附。

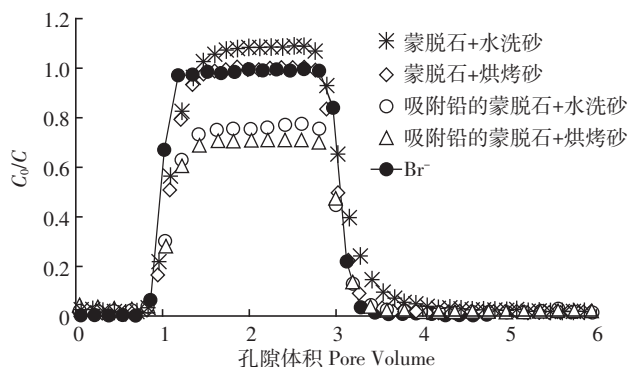


图 4 不同处理砂柱中蒙脱石胶体穿透曲线

Figure 4 Breakthrough curve of montmorillonite in sand column with different treatments

回收率是根据质量守恒定律,通过对胶体穿透曲线进行积分,加和求得,可以近似表示回收的胶体占输入胶体的比率。表 1 为不同类型及特性的胶体在不同处理石英砂柱中穿透曲线的回收率。由表 1 可见,不同胶体在水洗砂柱中运移的回收率均高于在烘烤砂柱中的回收率,回收胶体均达到 60% 以上,相同运移条件下蒙脱石胶体的回收率高于高岭石胶体。由于铅的存在,高岭石胶体与蒙脱石胶体在饱和砂柱中的

运移均有所降低,高岭石胶体受铅的影响更强烈,在烘烤砂中的回收率仅 2.08%。这进一步表明胶体在多孔介质中的运移过程受到胶体类型、胶体表面特性和介质条件的影响。

3 讨论

3.1 铅的存在对土壤胶体特性的影响

铅的存在改变了胶体的运移特征,为了分析不同类型胶体与铅的复合体在多孔介质中迁移能力的差异性,根据多孔介质中影响胶体迁移的基本参数,分别检测了胶体与铅在复合前后粒径和电动电位变化情况,见表 2。清洁的高岭石胶体颗粒直径为 847.5 nm,电动电位为-24.24 mV,当高岭石胶体吸附有铅之后,其颗粒直径为 814.5 nm,电动电位为-24.99 mV,铅的存在对高岭石胶体平均粒径和电动电位影响并不显著。相同作用条件下,蒙脱石胶体则产生了很大的变化:首先,铅使蒙脱石胶体发生了絮凝,使胶体粒径从 197.4 nm 增大到 463.0 nm;其次,铅的存在还改变了胶体的电动电位,使电动电位从-22.95 mV 升高到-10.49 mV,使胶体稳定性降低。但是,从以上变化情况来看,吸附有铅的高岭石胶体的粒径仍大于吸附有铅的蒙脱石胶体,从电动电位上来看其稳定性则高于吸附有铅的蒙脱石胶体。

Gao 等^[9]研究表明,天然矿物表面上重金属离子的吸附可能会影响其表面电荷,因此而改变了其表面性质。高岭石胶体和蒙脱石胶体的表面都带有负电荷,然而,由于他们结构类型的差异,使胶体表面分布有不均匀的不同特性的表面官能团。高岭石胶体的构造类型属于 1:1 型非膨胀晶体结构,其电荷的产生主要是胶体表面-OH 的解离,所以高岭石胶体主要是以可变电荷为主;而蒙脱石胶体为 2:1 型膨胀晶体

结构,胶体所带电荷为主要由同晶替代作用产生的永久电荷。当铅与这些基团相互作用时,可能会改变胶体的表面电荷,导致增加胶体在砂粒表面的残留。

以上结果表明,铅的存在可以降低高岭石胶体和蒙脱石胶体在饱和多孔介质中的流动性。

3.2 介质表面粗糙度对胶体运移的影响

无论是清洁还是铅污染的高岭石和蒙脱石,在烘烤砂介质中的迁移滞留行为与在水洗砂中的趋势基本上一致。但是在胶体的迁移出流量上,水洗砂介质的穿透曲线峰值总体上高于烘烤砂(图 3、图 4)。这说明粘土矿物胶体在水洗砂介质中的迁移性明显大于烘烤砂。与水洗砂相比,烘烤砂的表面相对平滑、表面性质较为均一(图 2)。由于这些表面性状的不同,烘烤砂介质对粘土矿物胶体所能提供的吸附、沉积点位要比水洗砂介质少,烘烤砂介质中胶体的运移应呈现出流量高、持留量低的行为特点。但是,由于水洗砂介质表面有许多细小颗粒,这些细小颗粒在粘土矿物胶体运移的过程中被“吸附携带”而导致胶体出流量显著增大的现象。因此,多孔介质表面粗糙度对胶体运移的影响,主要取决于介质表面颗粒的粒径大小,当颗粒粒径远大于胶体粒径时,胶体出流量和持留量主要取决于介质表面光滑度;当颗粒粒径小于或接近于胶体粒径时,胶体出流量主要取决于细小颗粒的含量。

4 结论

(1)多孔介质的表面特性差异会显著影响蒙脱石胶体的运移过程,水洗砂介质表面粗糙度较高,导致蒙脱石胶体在水洗砂介质中的运移回收率显著高于烘烤砂介质,但是介质表面差异对高岭石胶体的运移基本无影响。

表 1 胶体与铅吸附体在多孔介质中运移的回收率(%)
Table 1 Recovery rate for the transport of colloid and Pb-colloid in saturated porous media(%)

项目	清洁的高岭石 Kaolinite	铅污染的高岭石 Pb contaminated kaolinite	清洁的蒙脱石 Montmorillonite	铅污染的蒙脱石 Pb contaminated montmorillonite
水洗砂 Washed sand	87.32	61.95	111.00	75.17
烘烤砂 Baked sand	80.61	2.08	99.02	72.53

表 2 胶体的平均粒径及电动电位
Table 2 Particle size and zeta potential of colloid and Pb-colloid

项目	清洁的高岭石 Kaolinite	铅污染的高岭石 Pb contaminated kaolinite	清洁的蒙脱石 Montmorillonite	铅污染的蒙脱石 Pb contaminated montmorillonite
平均粒径 Particle size/nm	847.5	814.5	197.4	463.0
电动电位 Zeta Potential/mV	-24.24	-24.99	-22.95	-10.49

(2)铅的存在降低了高岭石胶体和蒙脱石胶体在饱和多孔介质中的流动性。铅的存在会影响胶体表面电荷,改变其表面性质,铅还能使蒙脱石胶体发生絮凝,增大其粒径,进而导致胶体稳定性降低。

参考文献:

- [1] Czigány S, Flury M, Harsh J B. Colloid stability in vadose zone hanford sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(6): 1506–1512.
- [2] 商书波, 王丰雨, 李绪谦. 土壤胶体理化性质对其稳定性和可移动性的影响研究[J]. *土壤*, 2010, 42(6): 1015–1019.
SHANG Shu-bo, WANG Feng-yu, LI Xu-qian. Study on stability and mobility of soil colloids based on physicochemical property[J]. *Soil*, 2010, 42(6): 1015–1019.
- [3] 孙慧敏, 殷宪强, 曹秀荣. 离子强度对蒙脱石胶体在饱和多孔介质中运移与释放的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(5): 1120–1125.
SUN Hui-min, YIN Xian-qiang, CAO Xiu-rong. The effect of solution ionic strength on the transport and release of montmorillonite colloid in saturated porous media[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1120–1125.
- [4] Ko C-H, Elimelech M. The “Shadow Effect” in colloid transport and deposition dynamics in granular porous media: Measurements and mechanisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(17): 3681–3689.
- [5] Xu S, Saiers J E. Colloid straining within water-saturated porous media: Effects of colloid size nonuniformity[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): W05501.
- [6] 胡俊栋, 鞠莉, 寇小明, 等. 几种物理因素对四氧化三铁纳米颗粒在有机质存在条件下的饱和多孔介质中迁移滞留行为的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10): 2017–2024.
HU Jun-dong, JU Li, KOU Xiao-ming, et al. Transport and retention behaviors of magnetite nanoparticles under varying physical conditions in saturated porous media in the presence of NOM[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 2017–2024.
- [7] 褚灵阳, 汪登俊, 王玉军, 等. 不同环境因子对纳米羟基磷灰石在饱和填充柱中迁移规律的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2284–2291.
CHU Ling-yang, WANG Deng-jun, WANG Yu-jun, et al. Transport of hydroxyapatite nanoparticles in saturated packed column: Effects of humic acid, pH and ionic strengths[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2284–2291.
- [8] Tian Y, Gao B, Ziegler K J. High mobility of SDBS-dispersed single-walled carbon nanotubes in saturated and unsaturated porous media[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2–3): 1766–1772.
- [9] Tian Y, Gao B, Silvera-Batista C, et al. Transport of engineered nanoparticles in saturated porous media[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2010, 12(7): 2371–2380.
- [10] Tian Y, Gao B, Wang Y, et al. Deposition and transport of functionalized carbon nanotubes in water-saturated sand columns[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213–214: 265–272.
- [11] 殷宪强, 孙慧敏, 易磊, 等. 孔隙水流速对胶体在饱和多孔介质中运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 101–104.
YIN Xian-qiang, SUN Hui-min, YI Lei, et al. Effect of flowrate of pore water on the transport of colloid in saturated porous media[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 101–104.
- [12] 白宇光, 沈联芸. 擦洗砂的开发选试及应用[J]. *汽车工艺与材料*, 1994(5): 24–29.
BAI Yu-guang, SHEN Lian-yun. Development and application of scrubbed sand[J]. *Automobile Technology & Material*, 1994(5): 24–29.
- [13] 刘向东, 肖柯则, 王文清, 等. 特种覆膜砂粘结机理的研究[J]. *铸造*, 2000, 49(10): 769–772.
LIU Xiang-dong, XIAO Ke-ze, WANG Wen-qing, et al. Study on the bonding mechanism of precoated Non-silica sand [J]. *Foundry*, 2000, 49(10): 769–772.
- [14] McDowell-Boyer L M, Hunt J R, Sitar N. Particle transport through porous media[J]. *Water Resour Res*, 1986, 22(13): 1901–1921.
- [15] McCarthy J E, Zachara J M. Subsurface transport of contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, 23(5): 496–502.
- [16] Sun H, Gao B, Tian Y, et al. Kaolinite and lead in saturated porous media: Facilitated and impeded transport [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(11): 1305–1308.
- [17] Anderson C W. Turbidity (version 2.1); U.S. geological survey techniques of water-resources investigations[M/OL]. 2005, <http://pubs.water.usgs.gov/twri9A6/>.
- [18] Ryan J N, Elimelech M. Colloid mobilization and transport in groundwater[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, 107: 1–56.
- [19] Gao B, Cao X, Dong Y, et al. Colloid deposition and release in soils and their association with heavy metals[J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2011, 41(4): 336–372.