

DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.S1.011

# 土壤有机质对铅污染土固稳特性的影响规律及微观机理

李江山 张亭亭 王平 黄茜 薛强

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 为了研究有机质对水泥固稳铅污染土特性的影响规律及其作用机制,开展了不同有机质含量(0%、0.5%、1%、2%、5%)铅污染土的固稳试验。通过无侧限抗压强度、渗透和溶出特性试验,探讨了有机质对水泥固稳铅污染土特性的影响规律。结果表明,随着有机质含量的增加,固化土的渗透性和浸出液 pH 增大,而抗压强度和铅浸出质量浓度降低。通过扫描电镜试验和压汞试验分析了有机质对铅污染土固稳特性影响的微观机制。结果表明,有机质通过阻滞水泥水化反应而使固化土胶结程度减弱,固化土的孔隙增大,渗透性增大且抗压强度降低。重金属与有机质发生络合等化学作用,改变了重金属的赋存形态,降低了重金属的迁移性,这是固化土中铅溶出质量浓度降低的本质原因。

**关键词:** 铅污染土; 固化/稳定化; 有机质; 微观机制

**中图分类号:** U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2016)S1-0057-06

## Effects of organic matter on engineering characteristics and microstructures of lead contaminated soil S/S treated by cement

Li Jiangshan Zhang Tingting Wang Ping Huang Qian Xue Qiang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Unconfined compressive strength, permeability, leaching, and microstructure tests were conducted to investigate the engineering characteristics and micro-mechanisms of stabilized/solidified (S/S) lead-contaminated soils with different organic matter contents (0%, 0.5%, 1%, 2%, and 5%). Results show that the permeability and leaching pH of samples increase with organic matter contents, but the strength and the leaching concentration decrease. Scanning electron microscope (SEM) and mercury intrusion porosity (MIP) tests are conducted to study the micro-mechanisms of the variation of aforementioned properties. Results identify that the organic matter decreases by the quantity and the morphology of cement hydration products by depressing the cement hydration reaction. The quantity of sample pores increases with organic matter contents, the chemical species of heavy metals changed by complexation with organic matter is the reason why the leaching concentration decreases.

**Key words:** solidification/stabilization(S/S); lead contaminated soil; organic matter; micro-mechanism

近年来,我国城市化进程不断加快,导致大量 重金属污染场地遗留<sup>[1]</sup>。重金属污染土能通过食

收稿日期: 2016-05-30. 作者简介: 李江山(1987—),男,博士, jjs\_cersm@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41602315, 51479194)、岩土力学与工程国家重点实验室开放基金课题资助项目(Z015003)、中国科学院科技创新“交叉与合作团队”资助项目(Y426011C01)。

引文格式: 李江山,张亭亭,王平,等.土壤有机质对铅污染土固稳特性的影响规律及微观机理[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(S1):57-62. [DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2016.S1.011]

物链或呼吸、皮肤接触等危害人体健康<sup>[2]</sup>,同时,污染土的工程特性会发生改变,从而导致工程安全隐患<sup>[3]</sup>.因此,污染场地在二次开发利用前须进行修复.固化/稳定化法是重金属污染场地常用的修复技术之一,具有快速、高效、经济、适用范围广等优点.固化剂与污染土之间发生一系列物理化学反应,重金属通过吸附、取代、共沉淀等作用而固定在固化土中,失去迁移性<sup>[4]</sup>.处理后的污染土在满足相应环境标准和工程要求的前提下,可作为充填、路基等建筑材料循环利用.该技术不但解决了重金属污染土治理难题,而且实现了重金属污染土的资源化利用,具有较大的应用和推广价值.

目前,有关重金属污染土固稳特性的研究主要集中于固稳药剂、养护时间、水添加量和重金属浓度等对固稳效果的影响<sup>[4-7]</sup>.然而,有关土壤有机质对重金属污染土的固稳特性影响研究较少.实际上,有机质不仅影响重金属在土壤中的赋存形态,而且会显著阻碍固化剂与污染土颗粒的水化反应,降低固化效果.为了提高重金属污染土固稳处理的稳定性,防止二次污染,就必须揭示土壤有机质对重金属污染土固稳特性的影响规律,探索有机质对固化土影响的微观机制.

针对上述问题,国内外学者开展了相关的研究.如:高文文等<sup>[8]</sup>对污染土中Zn形态的影响研究发现,土壤中有有机质的增加会降低可交换态和铁锰氧化物结合态Zn含量,增加有机质结合态Zn含量,而对残渣态Zn含量影响不大.郭宏峰<sup>[9]</sup>研究发现有机质含量的增加会明显降低水泥土的强度,随着有机质含量由0%增加到15%,固化土的强度降低30%.刘叔灼等<sup>[10]</sup>研究表明有机质含量

越高,水泥土的强度随龄期增长越缓慢,且强度随龄期的增长幅度也随有机质含量的增加而降低.范昭平等<sup>[11]</sup>研究水泥固化淤泥土的力学特性,试验结果表明,有机质含量相差4.4%的两种淤泥,固化土的强度会相差2.3~4.2倍,在低有机质含量土中,有机质存在一个强度影响极限含量,约为4.3%.

不难发现,有机质不仅对土壤中重金属赋存形态影响较大,而且会显著降低固化土的力学特性.因此,研究有机质对重金属污染土固稳特性的影响是非常必要的.目前,有关有机质对重金属污染土固稳特性影响规律的系统研究较少,而从微观角度去揭示有机质对重金属污染土固稳特性的影响机制方面的研究则更加匮乏.

综上所述,本文以铅污染土为研究对象,采用水泥对其进行固化稳定化处理,基于无侧限抗压强度试验、渗透试验和浸出试验,探讨了有机质对铅污染土固稳过程工程特性的影响规律;并结合扫描电镜和压汞试验,分析了有机质对铅污染土固稳特性影响的微观机理.

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验采用土壤为粉质粘土,取自武汉市某地铁施工场地,其物理力学指标见表1.各指标均根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)<sup>[12]</sup>测得.XRD实验结果表明土壤中主要含有蒙脱石、伊利石、高岭石、石英和长石.土壤中Pb初始含量为53 mg/kg,为未受污染土壤.

表1 试验用土壤基本物理—力学性质

含水率/%	天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	比重	孔隙率	液限/%	塑限/%	最优含 水率/%	粒径分布/%			最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
							砂粒	粉粒	粘粒	
20.78	1.85	2.72	0.74	41.6	21.8	19.5	3.45	62.27	34.28	1.72

试验所用水泥为32.5级普通硅酸盐水泥,初凝时间约4 h.

试验用Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和有机质购买于国药集团化学试剂有限公司.

### 1.2 Pb污染土壤配制

将土壤烘干,粉碎过2 mm筛,取筛下的土壤备用.向土壤中添加Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,至土壤中铅含量为5 000 mg/kg(干重比),即铅离子的含量为干土质量的0.5%.5 000 mg/kg为我国工业污染场地铅污染典型浓度值<sup>[13]</sup>.选择Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>作为污染介质是因为Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶解度较大(阳离子活动性

较强),且硝酸根对水泥水化反应影响较弱<sup>[14]</sup>.随后向污染土中添加腐殖酸(土壤中的常见有机质),有机质添加量依次为干土质量的0%、0.5%、1%、2%、5%.再添加蒸馏水使污染土壤中含水率为19.5%.将土壤拌匀后密封,在(20±2)℃、湿度95%养护条件下静置10 d,使Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>与土壤充分反应.

### 1.3 试样制备

污染土普通硅酸盐水泥与干土质量之比为0.2,搅拌2 min后再添加蒸馏水,使水灰比(蒸馏水:水泥)为0.2,混合均匀后制样.制样采用一次

压样成型法,即将混合物置于模具中,模具两端安放垫块,通过反力框架和千斤顶将混合物压制成型。固化土尺寸分别为 39.1 mm × 80 mm 和 50 mm × 50 mm (直径 × 高),各试验均做 3 个平行样。通过脱模器将固化土脱模,再将固化土置于养护箱中在标准条件下(温度(20 ± 2) °C,湿度 > 95%)养护 7 d。

## 2 试验方法

### 2.1 无侧限抗压试验

采用济南市中正试验机制造有限公司生产的 WDW-20 型万能试验机,试验过程中的压缩速率控制在 2 mm/min。每个试验重复三次,试验结果取平均值。

### 2.2 渗透试验

渗透试验方法参照美国试验标准 ASTM-D5084-03<sup>[15]</sup>,试验仪器为美国 HUMBOLDT 公司生产的 HM-4160A 型环境土柔性壁渗透仪。试验前将试样进行真空饱和(先抽真空 30 min,再用去离子水饱和 24 h)。试验过程中围压保持在 100 kPa,试样下部渗透压为 80 kPa,上部渗透压为 0,有效围压为 20 kPa,室温控制在 25 °C。用去离子水进行渗透测试。

### 2.3 微观试验

扫描电镜试验:将养护后的固化土小心掰开,在试样中心处取有新鲜断面的约 1 cm<sup>3</sup> 的小试块,用乙醇在室温下将试块浸泡 96 h,再将浸泡后的试块冷冻干燥并抽真空 12 h。试验仪器为 Quanta250 扫描电子显微镜。

压汞试验:试样预处理方法同扫描电镜试验,仪器为 PoreMaster-33 型全自动压汞仪。

### 2.4 浸出试验

固化土中 Pb 的浸出质量浓度采用 TCLP 方法<sup>[16]</sup>称取粒径小于 9.5 mm 的固化土颗粒 100 g,置于 2 L 提取瓶中,按液固比为 20:1 (L/kg) 计算出所需醋酸(用试剂水定溶 17.25 mL 分析纯冰醋酸至 1 L)的体积,加入浸提剂,将提取瓶固定在翻转式振荡器上,调节转速为 (30 ± 2) r/min,于 (23 ± 2) °C 下振荡 (18 ± 2) h。采用真空抽滤设备对混合液进行过滤(0.45 μm 微孔滤膜)。浸出液 pH 采用上海雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计进行测试,采用 Optima 4300DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试浸出液中的铅质量浓度,每个浸出液测试三次。

## 3 试验结果和分析

### 3.1 强度特性

图 1 为不同有机质含量固化土应力-应变曲线的变化规律。从图 1 中可以得到,当有机质含量不超过 1% 时,应力-应变曲线变化规律相似,应力随应变增加显著,应力达到最大值时很快发生破坏;当有机质含量超过 1% 时,应力随应变增加缓慢,固化土表现出延性,破坏形式为塑性破坏。此外,随着有机质含量从 0% 增加到 5%,固化土的强度从 4 MPa 减少到 0.9 MPa,固化土的强度显著降低,破坏应变增加。其原因在于:有机质吸附在水泥颗粒的表面,阻碍了水泥水化反应,延缓了水化产物的生成,从而降低了土壤胶结性能和强度增长速度。Thompson<sup>[17]</sup>的研究同样表明:有机质会阻碍水泥水化过程中胶凝物质的生成,并通过阻止硅和铝的溶解而妨碍火山灰反应的进行。因此,随着有机质添加量增加,固化土的强度显著降低。

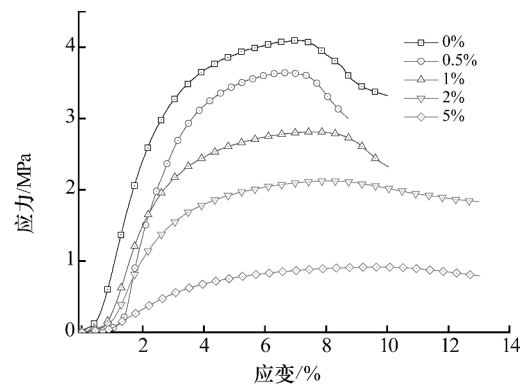


图 1 不同有机质含量固化土的应力-应变曲线

### 3.2 渗透特性

固化土的渗透性与重金属扩散和溶出特性密切相关,是评估固化土中重金属溶出风险的关键参数之一。图 2 为不同有机质含量固化土渗透系数随时间变化规律。从图 2 中可以得到,随着有机质含量的增加,固化土渗透系数变大,当有机质添加量从 0% 增加到 5%,固化土渗透系数从  $1.8 \times 10^{-7}$  cm/s 增加到  $9.0 \times 10^{-6}$  cm/s。固化土渗透系数随有机质添加量增大的原因在于:有机质阻碍了水泥水化反应,减少了水化产物的产量,造成固化土结构松散性增加,固化土的孔隙增多;且有机质具絮状结构,持水性较好,一部分水吸附在有机质中,造成水泥水化反应不完全,未反应的水泥附着在土颗粒表面,增加了土颗粒间的孔隙<sup>[18]</sup>。因此,随着有机质添加量的增加,固化土孔隙增多,渗透系数增大。

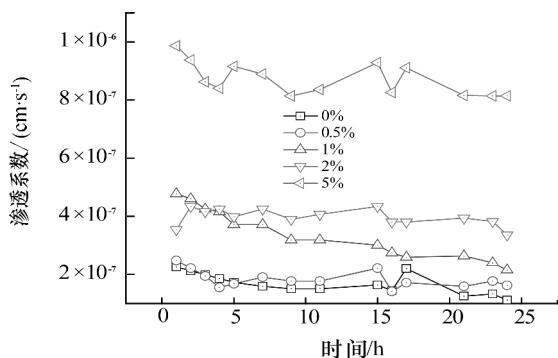
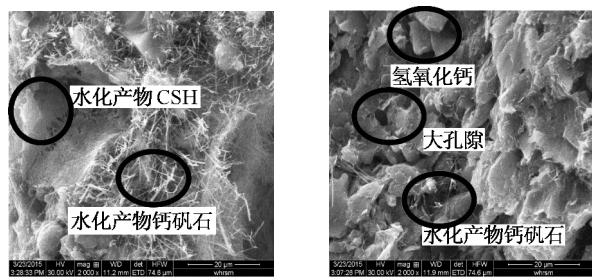


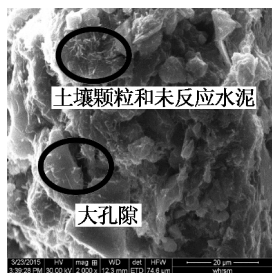
图 2 有机质含量对固化土渗透性影响规律

### 3.3 微观显微结构

不同有机质含量固化土的微观显微结构图如图 3 所示. 随着固化土中有机质含量的增加, 固化土内钙矾石、C-S-H 等水化产物减少, 结晶程度降低. 固化土结构由致密团聚状向片状、颗粒状松散体转变. 当有机质的添加量为 1% 时, 固化土中出现未反应的水泥, 且固化土中的孔隙较大. 随着有机质添加量的增加, 固化土中的大孔隙进一步增多, 这是固化土强度减小和渗透性增大的主要原因. 陈惠娥等<sup>[19]</sup>的研究结果也表明: 有机质含量越高, 固化土结晶程度越低, 颗粒越细小, 结构越松散. 不同有机质含量固化土的微观显微结构图进一步证明了有机质可通过阻滞水泥水化反应而使固化土中大孔隙增加, 因此, 固化土强度减小, 而渗透系数增加.



(a) 0% (b) 1%



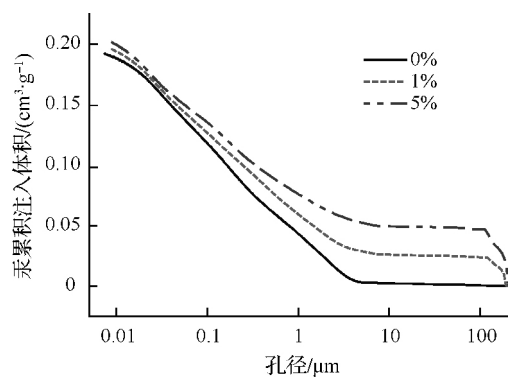
(c) 5%

图 3 不同有机质含量固化土微观显微结构图

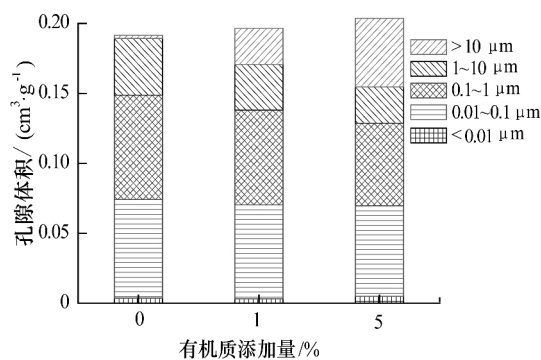
### 3.4 孔隙结构分析

不同有机质含量固化土的汞累积注入体积随

孔径变化规律如图 4 所示. 从图 4(a) 中可以看出, 随着固化土中有机质添加量的增加, 固化土的累积孔隙体积增加. 图 4(b) 中孔隙大小的划分参照 Horpibulsuk 等<sup>[20]</sup>提出的固化土孔隙的分类方法: 孔径小于 0.01 μm 的孔隙(团粒内孔隙); 0.01 ~ 0.1 μm 之间的孔隙; 0.1 ~ 1 μm 的孔隙; 1 ~ 10 μm 的孔隙和孔径超过 10 μm 的孔隙. 从图 4(b) 中可以看出, 随着固化土中有机质含量的增加, 固化土大孔隙(>10 μm) 体积不断增加, 而 0.1 ~ 10 μm 间孔隙体积不断减小, <0.1 μm 的孔隙体积基本保持不变. 不同有机质含量固化土的累积孔隙体积变化规律进一步证明了有机质使固化土中大孔隙增加, 固化土渗透系数增加.



(a) 固化土累积孔隙体积



(b) 固化土中孔隙分布

图 4 不同有机质含量固化土累积孔隙体积分布曲线

不同有机质添加量固化土的孔径分布曲线如图 5 所示. 不含有机质的固化土内孔隙主要分布在 0.01 ~ 10 μm, 分布范围广, 呈多级分布特征. 而添加有机质的固化土试样中主要包含 2 类孔隙: 一类是大直径孔隙, 孔径大于 70 μm, 此类孔隙较多, 且随有机质添加量呈增大趋势; 一类孔隙直径为 0.01 ~ 10 μm, 该类孔隙所占体积较大, 大小不等, 呈多级分布特征. 不同有机质含量固化土试样的孔径分布曲线变化规律也证明了有机质使固化土中大孔隙增加.

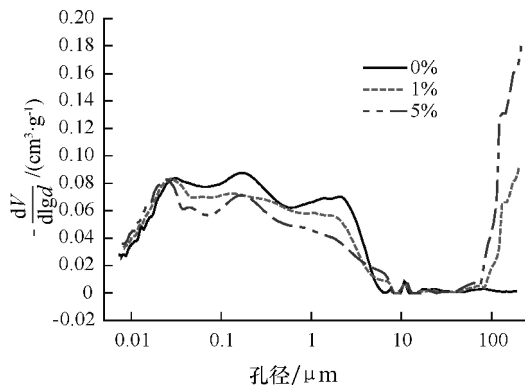


图5 不同有机质含量固化土孔径分布曲线

### 3.5 浸出特性

固化土浸出溶液 pH 和铅浸出质量浓度随有机质含量变化规律如图 6 所示。从图中可以看出, 固化土浸出液 pH 随有机质添加量的增加而增大。原因在于: 与不含有机质的固化土相比, 添加有机质的固化土孔隙较大, 且随有机质的添加量的增加而增大, 因此, 固化土中未反应的水泥和水化产物(如  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等) 溶出量较大, 因此, 随着有机质的添加量的增大, 浸出液 pH 不断增加。

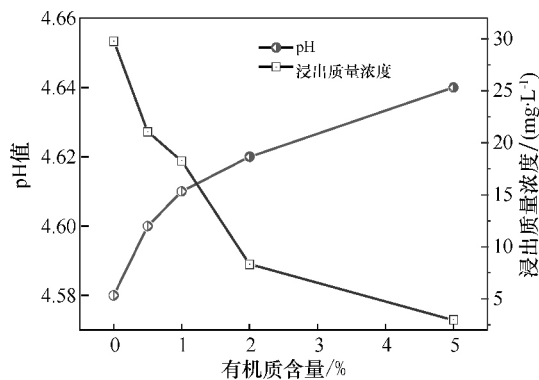


图6 固化土浸出溶液 pH 和铅浸出质量浓度随有机质变化规律

固化土的浸出质量浓度随有机质添加量增加而减小, 当有机质添加量从 0% 增加到 5% 时, 固化土中铅的浸出质量浓度从 29.7 mg/L 减少到 3.0 mg/L。原因在于: 虽然有机质阻碍了水泥的水化反应, 降低了固化效果, 增大了固化土的孔隙, 但由于重金属与有机质中的含氧功能团(羧基、酚基、羟基等) 会发生络合等作用, 改变了重金属的赋存形态, 降低了重金属的溶出特性<sup>[21]</sup>。Balabane 等<sup>[22]</sup> 研究表明, 土壤中有有机质可促进重金属从水溶态和可交换态向有机结合态转化。Covelo 等<sup>[23]</sup> 的研究也发现, 有机质与重金属可发生吸附、螯合等作用从而降低了重金属的有效性。因此, 固化土的浸出质量浓度随有机质含量增加而减小。

## 4 结论

1) 随着有机质添加量增加, 固化土的渗透性增大、浸出液 pH 增大, 而抗压强度降低。有机质会阻滞水泥的水化反应, 减少了水化产物的生成量, 削弱了污染土胶结程度, 增大了大孔隙( $> 10 \mu\text{m}$ ) 体积, 这是导致铅污染土抗压强度降低和渗透性增大的根本原因。

2) 有机质可显著降低固化土中铅的浸出质量浓度。有机质与重金属易发生络合反应, 改变了重金属的赋存形态, 降低了重金属的溶出特性, 这是固化土中铅溶出质量浓度降低的本质原因。

3) 土壤有机质对重金属的稳定化有促进作用, 但对固化重金属污染土进行工程应用时, 应考虑有机质对固化土工程特性劣化的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 张孝飞, 林玉锁, 俞飞, 等. 城市典型工业区土壤重金属污染状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(4): 512-515.  
Zhang Xiaofei, Lin Yusuo, Yu Fei, et al. Pollution of heavy metals in urban soils of typical industrial and surrounding residential area in Nanjing city [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(4): 512-515. (in Chinese)
- [2] Bozkurt S, Moreno L, Neretnieks I. Long term processes in waste deposits [J]. *Science of Total Environment*, 2000, 250: 101-121.
- [3] 蓝俊康. 柳州市红粘土对  $\text{Zn}^{2+}$  的吸附平衡实验[J]. 桂林工学院报, 1995, 15(3): 265-267.  
Lan Junkang. An equilibrium adsorption experiment of  $\text{Zn}^{2+}$  cation by red clay in Liuzhou city [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1995, 15(3): 265-267. (in Chinese)
- [4] 陈蕾, 刘松玉, 杜延军, 等. 水泥固化重金属铅污染土强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1898-1903.  
Chen Lei, Liu Songyu, Du Yanjun, et al. Unconfined compressive strength properties of cement solidified/stabilized lead-contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(12): 1898-1903. (in Chinese)
- [5] 陈蕾, 杜延军, 刘松玉, 等. 水泥固化铅污染土的基本应力-应变特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 715-721.  
Chen Lei, Du Yanjun, Liu Songyu, et al. Experimental study of stress-strain properties of cement treated lead-contaminated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 715-721. (in Chinese)

- [6] 魏明俐,杜延军,刘松玉,等.磷矿粉稳定铅污染土的溶出特性研究[J].岩土工程学报,2014,36(4):768-774. DOI: 10.11779/CJGE201404024.  
Wei Mingli, Du Yanjun, Liu Songyu, et al. Leaching characteristics of lead contaminated clay stabilized by phosphate rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(4): 768-774. DOI: 10.11779/CJGE201404024. (in Chinese)
- [7] 陈蕾,刘松玉,杜延军,等.水泥固化重金属铅污染土的强度特性研究[J].岩土工程学报,2010,32(12):1898-1903.  
Chen Lei, Liu Songyu, Du Yanjun, et al. Unconfined compressive strength properties of cement solidified/stabilized lead-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(12): 1898-1903. (in Chinese)
- [8] 高文文,刘景双,王洋,等.有机质对冻融黑土重金属Zn赋存形态的影响[J].中国生态农业学报,2010,189(1):147-151. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.00147.  
Gao Wenwen, Liu Jingshuang, Wang Yang, et al. Effect of organic matter on fractional transformation of Zn in black soils under freeze-thaw cycle[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 189(1): 147-151. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.00147. (in Chinese)
- [9] 郭宏峰.有机质对水泥土强度影响的机理研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2008.
- [10] 刘叔灼,巴凌真,杨医博,等.有机质含量对水泥土强度影响的试验研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(7):40-43. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2009.07.011.  
Liu Shuzhuo, Ba Lingzhen, Yang Yibo, et al. Research on the influence of organic content on the strength of cement-stabilized soil[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(7): 40-43. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2009.07.011. (in Chinese)
- [11] 范昭平,朱伟,张春雷.有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J].岩土力学,2005,26(8):1327-1330.  
Fan Zhaoping, Zhu Wei, Zhang Chunlei. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1327-1330. (in Chinese)
- [12] 国家质量技术监督局,中华人民共和国建设部. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S].南京:南京水利科学研究院,1999.
- [13] 廖晓勇,崇忠义,阎秀兰,等.城市工业污染场地:中国环境修复领域的新课题[J].环境科学,2011,32(3):784-794. DOI: 10.13227/j.hjxk.2011.03.024.  
Liao Xiaoyong, Chong Zhongyi, Yan Xiulan, et al. Urban industrial contaminated sites: A new issue in the field of environmental remediation in China[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3): 784-794. DOI: 10.13227/j.hjxk.2011.03.024. (in Chinese)
- [14] Boardman D J. Lime stabilization: Clay-metallime interactions[D]. Leicestershire, UK: Loughborough University, 1999.
- [15] American Society for Test and Materials. ASTM D 5084-03 Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter[S]. Philadelphia: ASTM Publisher 2003.
- [16] Office of Solid Waste and Emergency Response, U. S. Environmental Protection Agency. Test methods for evaluation of solid wastes, physical chemical methods: Toxicity characteristic leaching procedure (method 1311) [R]. Washington D C: U. S. EPA, 1992.
- [17] Thompson M R. Lime reactivity of Illinois soil[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Div*, ASCE, 1966, 92(5): 67-92.
- [18] 焦志斌,刘汉龙,蔡正银.淤泥质酸性土水泥土强度试验研究[J].岩土力学,2005,26:57-60.  
Jiao Zhibin, Liu Hanlong, Cai Zhengyin. Experimental study on cement-soil strength in mucky-acid soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26: 57-60. (in Chinese)
- [19] 陈惠娥,王清.水泥加固不同地区软土的试验研究[J].岩土力学,2007,28(2):423-426.  
Chen Huie, Wang Qing. Laboratory study on consolidation effect of different area soft soils stabilized with cement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 423-426. (in Chinese)
- [20] Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. *Soils and Foundations*, 2009, 49(1): 85-98.
- [21] Ashley J T F. Adsorption of Cu(II) and Zn(II) by estuarine, riverine and terrestrial humic acids[J]. *Chemosphere*, 1996, 33(9): 2175-2187.
- [22] Balabane M, van Oort F. Metal enrichment of particulate organic matter in arable soils with low metal contamination[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1513-1516.
- [23] Covelo E F, Vega F A, Andrade M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1/2): 308-315.