

文章编号: 1007-2993(2024)03-0358-07

# 超声辅助复合淋洗对污染黏土的工程性质影响

邵俐 倪逸斐 王帅 郭昉瑾 迟琳

(上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

**【摘要】** 研究采用超声辅助复合淋洗剂(酒石酸、乙二胺四乙酸二钠( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ )), 对人工配制的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  重金属污染黏土开展试验, 分析了在不同重金属离子浓度下, 超声辅助复合淋洗前后土体 pH 值、液塑限、强度特性、压缩特性等工程性质的变化规律。试验结果表明: (1) 超声淋洗修复后, 污染黏土 pH 值显著降低, 酸性淋洗剂会带来较严重的土壤酸化; (2) 修复后土体液性指数增加, 塑性指数降低; (3) 超声淋洗修复后, 土体抗剪强度降低, 内摩擦角整体降低  $2^\circ\sim 3^\circ$ ; (4) 孔隙比随固结压力增大而减小, 重金属浓度越大, 降低幅度越大; (5) 修复后土体的压缩性增大, 压缩系数增加, 压缩模量降低。

**【关键词】** 超声辅助; 复合淋洗; 污染黏土; 工程性质

**【中图分类号】** TU41

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.03.015

## Impact of Ultrasound-assisted Complex Leaching on Engineering Properties of Contaminated Clay

Shao Li Ni Yifei Wang Shuai Wu Fangjin Chi Lin

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**【Abstract】** The ultrasonic-assisted complex leaching agents (tartaric acid and ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt ( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ )) were employed to carry out experiments on contaminated clay containing heavy metals  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , and  $\text{Pb}^{2+}$ . The variation laws of engineering properties such as soil pH, liquid plastic limit, strength characteristics, and compression characteristics before and after ultrasonic-assisted complex leaching were scrutinized under different heavy metal ion concentrations. The results revealed: (1) Post ultrasonic-assisted complex leaching remediation, the pH value of the contaminated clay reduces significantly, with the acidic leaching agent inducing severe soil acidification. (2) Upon remediation, the soil's liquidity index increases while the plasticity index decreases. (3) After ultrasonic leaching remediation, the shear strength of the soil body reduces, with the overall internal friction angle decreasing by  $2^\circ\sim 3^\circ$ . (4) The porosity ratio decreases as consolidation pressure increases, with the reduction being more substantial the higher the heavy metal concentration. (5) Post-remediation, the compressibility of the soil body increases, as does the compression coefficient, while the modulus of compressibility diminishes.

**【Key words】** ultrasonic-assisted; complex leaching; contaminated clay; engineering property

### 0 引言

工业化过程的各种人为活动导致了土壤中重金属的积累, 使得土壤污染问题日益严重, 重金属污染的持久性、潜在性和不可逆性<sup>[1]</sup> 给人类健康和生态环境带来了极大的威胁。为了解决这一问题, 淋洗修复技术成为一种广泛应用于国内的高效土壤修复方法<sup>[2]</sup>。常见淋洗剂包括有机酸、人工螯合剂、无机盐<sup>[3-5]</sup>, 有机酸具有较好的生物降解性<sup>[6]</sup>, 但是其去除重金属离子的效率较低, 人工螯合剂具有较好的重金

属去除效率, 但很难生物降解, 且在环境中持续存在<sup>[7-8]</sup>, 无机淋洗剂的成本低廉, 但存在易破坏土壤结构导致土壤肥力下降的缺点<sup>[9]</sup>。因此, 选择合适的淋洗剂是淋洗修复技术成功应用的重要条件。

在处理重金属污染土的过程中, 单一淋洗技术仍存在一定的<sup>[10]</sup>, 单一无机淋洗剂对于土壤重金属具有很好的去除效率, 但淋洗过程中 pH 的不断降低严重影响了土壤的理化性质及其结构<sup>[11]</sup>。高一丹等<sup>[12]</sup> 采用人工螯合剂对污染土壤进行化学淋洗,

基金项目: 上海市科委扬帆计划(YF1431800)

作者简介: 邵俐, 女, 1969 年生, 汉族, 浙江吴兴人, 副教授, 主要从事环境岩土工程、软土地基处理研究工作。E-mail: shaoli1999@usst.edu.cn

结果表明 EDTA 单一淋洗具有良好的效果, 但高浓度的螯合剂可降解性差, 会导致土壤二次污染, 降低酶活性, 抑制微生物群落活性。复合淋洗修复方法能够较好地解决这些问题, 综合利用不同类型的淋洗剂能够使它们的优势互补。大量试验表明, 复合淋洗效率显著高于单一淋洗, 同时有着良好的环境效益<sup>[13-16]</sup>, He 等<sup>[17]</sup> 研究发现, 二亚硝酸盐与酒石酸复合淋洗修复砷污染土壤具有较高的效率, 与相同浓度下的单一淋洗剂相比, 复合淋洗剂的除砷效率有较大提升, 且对土壤的理化性质与结构影响较小, 砷污染和健康风险显著降低。

为了进一步提高淋洗修复的效率, 尝试将超声技术引入到淋洗修复过程中, 超声波通过对土体结构的空化作用与振荡效果, 在一定程度上能加快淋洗液的反应进程。高 珂等<sup>[18]</sup> 在淋洗剂为 EDTA 的基础上采用超声强化技术, 发现超声 30 min 时对  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  的去除率依次为 82.19%、83.31% 和 53.89%, 重金属去除率显著提高, 淋洗时间大幅缩短。

经过淋洗修复后的土体会再次进行工程应用, 因此需要对修复后土体的工程性质展开研究, 达到修复后土体二次利用的目的。重金属污染会导致黏土 pH 值降低、可塑性降低、渗透性升高<sup>[19]</sup>, Zha 等<sup>[20]</sup> 研究发现,  $Zn^{2+}$  污染土壤的基本性质下降比  $Pb^{2+}$  污染土更显著, 且无侧限抗压强度随着重金属离子浓度的增加而降低, 淋洗修复技术会破坏土颗粒间的连接, 引起土体物理力学性质的变化, 王 平等<sup>[21]</sup> 研究发现 EDTA 淋洗修复  $Pb^{2+}$  污染黏土后, 土体固结系数增大、孔隙比下降、压缩系数增大。目前的研究普遍集中于淋洗技术效果的提高, 而对于修复后土体工程性质变化的试验研究较为匮乏, 因此研究复合淋洗修复后土体工程性质的变化, 是淋洗技术应用于实际工程前必不可少的一步。

本文以上海地区人工配制的  $Cu^{2+}$ 、 $Ni^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  污染黏土和复合淋洗剂酒石酸、乙二胺四乙酸二钠 ( $Na_2EDTA$ ) 为研究对象。分析了超声作用辅助复合淋洗前后, 修复土体 pH 值、液塑限、强度特性、压缩特性等工程性质的变化, 为淋洗修复污染黏土的实际工程应用提供理论支持。

## 1 试验材料与试验内容

### 1.1 试验材料

试验土样取自上海市黄浦江支流——复兴河。试验前将土经 105℃ 烘干 24 h、粉碎过 0.5 mm 筛备用。试验土样的物理性质指标如表 1 所示。对土样进行轻型击实试验, 击实曲线如图 1 所示, 最大干密

度  $1.60 \text{ g/cm}^3$ , 最优含水率 18%。

表 1 试验土样的物理性质指标

天然 含水率/%	液限 /%	塑限 /%	液性 指数	塑性 指数	pH	土粒相 对密度	最优含 水率/%
33	44.3	10.4	0.68	34	7.68	2.74	18

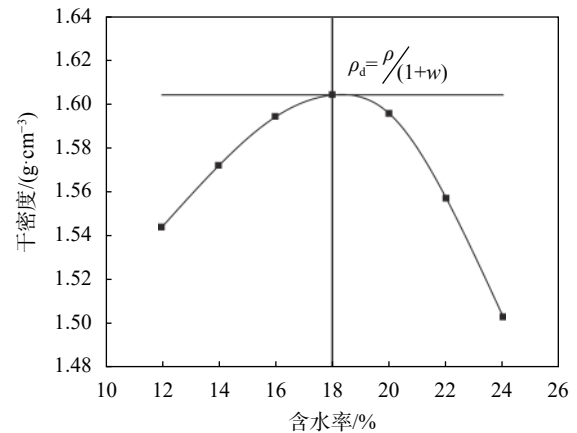


图 1 土样击实曲线图

土壤颗粒分曲线如图 2 所示, 黏粒含量(粒径小于 0.005 mm)为 20.10%, 属于黏土。

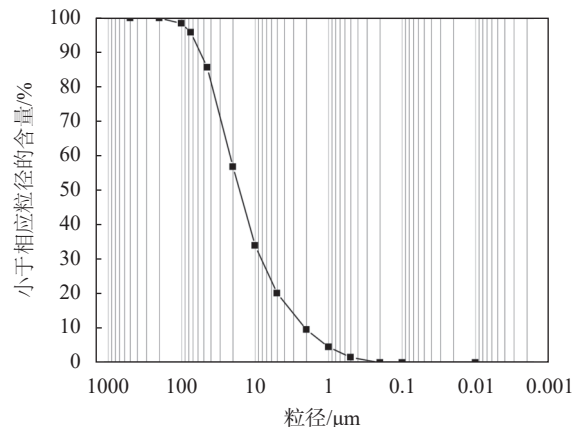


图 2 土壤颗粒分曲线图

试剂包括五水硫酸铜 ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ), 硝酸铅 ( $Pb(NO_3)_2$ ), 六水硝酸镍 ( $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ), 硝酸 ( $HNO_3$ ), 乙二胺四乙酸二钠 ( $Na_2EDTA$ ) 和酒石酸 (TA), 纯度等级均为 AR 分析纯。

## 1.2 试验内容

### 1.2.1 试验方案

根据预试验结果<sup>[22]</sup>, 酒石酸对重金属污染土样的淋洗效果最佳, 因此本试验选取 0.3 mol/L 的酒石酸和 0.08 mol/L 的  $Na_2EDTA$  进行复配, 体积比酒石酸 :  $Na_2EDTA=7:3$ , 采用超声辅助淋洗试验方法, 振荡淋洗 1 h 后, 超声作用 1 min。为了研究不同污染程度的土壤性质, 重金属离子浓度设计值取《土壤环境

质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中一类用地风险筛选值的 2 倍、6 倍、8 倍和 10 倍,见表 2。

表 2 污染土浓度

重金属离子浓度倍数	重金属离子浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> )		
	铜Cu <sup>2+</sup>	镍Ni <sup>2+</sup>	铅Pb <sup>2+</sup>
筛选值	2000	150	400
2	4000	300	800
6	12000	900	2400
8	16000	1200	3200
10	20000	1500	4000

### 1.2.2 污染土制备

根据试验需要人工配制污染土样,称取所需的重金属含量设计值与 330 g 蒸馏水混合,使用恒温磁力搅拌机充分搅拌,将制备完成的重金属溶液倒入 1 kg 干土中搅拌均匀后置于标准养护箱中,焖土养护 6 个月以模拟实际污染土壤环境,按此方法制备若干份目标污染土样供试验备用。

### 1.2.3 试验方法

**超声辅助淋洗试验:**称取一系列 2 g 污染土样,置于 50 ml 聚乙烯离心管中,按固液比 1:20 加入淋洗剂后,将离心管放入水浴恒温振荡器中,振荡淋洗 1 h 后取出,离心 15 min 并取上层清液过 0.45 μm 滤膜。最后引入功率为 300 W、频率为 40 KHz 的超声波进行强化淋洗。

**土体 pH 值测定:**选用玻璃电极法,称取 10 g 待测土样过 10 目筛,置于 50 ml 烧杯中,按固液比为 1:2.5 加入 25 ml 去二氧化碳蒸馏水,充分搅拌混合均匀后静置 30 min,用雷磁 PHS-3C 型号 pH 计测量土体悬浊液 pH 值。

**液塑限:**使用液塑限联合测定仪测定,锥体总质量为 76 g±0.2 g,锥角为 30°±0.2°,每个试样测得 3 个数值后取均值。通过绘制双对数坐标曲线得到土体液限  $w_L$  与塑限  $w_p$ 。

**直剪试验:**将每组待测土样烘干、过筛后,按 18% 的最优含水量制成扰动土样,控制土样干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup>,密封静置 24 h 后,用应变控制式直剪仪进行快剪试验。垂直压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa,以 1 mm/min 的速率匀速剪切。

**固结试验:**将待测土样烘干、过筛后,以 18% 的最优含水量制成扰动土样若干,干密度 1.60 g/cm<sup>3</sup>,

密封静置 24 h。施加 4 级垂直压力,分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa。计算得到各级压力下的孔隙比  $e_v$ 、压缩系数  $a_v$  和压缩模量  $E_s$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土体 pH 值的变化规律

图 3 为不同重金属离子浓度下超声辅助淋洗修复前后污染黏土的 pH 值变化规律。由图中可见,未受污染的黏土 pH 值为 7.68,受到重金属污染后 pH 值随着重金属离子浓度倍数的增大而逐渐降低,但降低幅度很小,呈弱碱状态,说明重金属含量对土壤 pH 值的影响较小。淋洗修复后土壤 pH 值均显著下降,超声复合淋洗后不同浓度下的重金属污染黏土 pH 值分别从 7.67、7.64、7.58、7.52 下降到 5.02、4.98、4.96、4.95,介于酒石酸和 Na<sub>2</sub>EDTA 单一淋洗后的 pH 值之间。这是淋洗剂自身 pH 值所决定的,各淋洗剂 pH 值大小为酒石酸<复合淋洗剂<Na<sub>2</sub>EDTA,由此形成了修复后土体的酸性规律。可以看到酒石酸单一淋洗修复后,不同浓度下的土壤 pH 值均下降到 4.16 左右,说明酸性淋洗剂会导致较大的土壤酸化,因此在实际工程应用中需要慎重考虑淋洗剂的选择对土壤环境的影响。

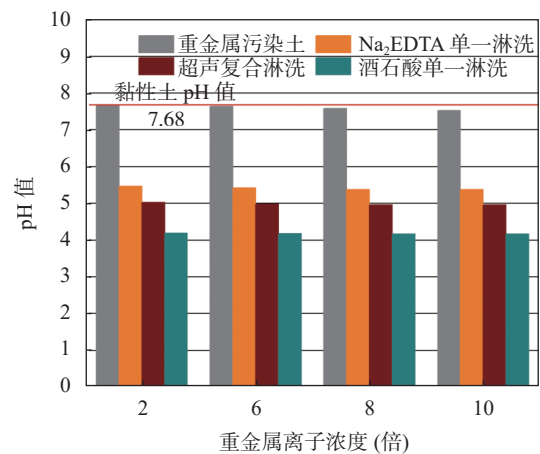
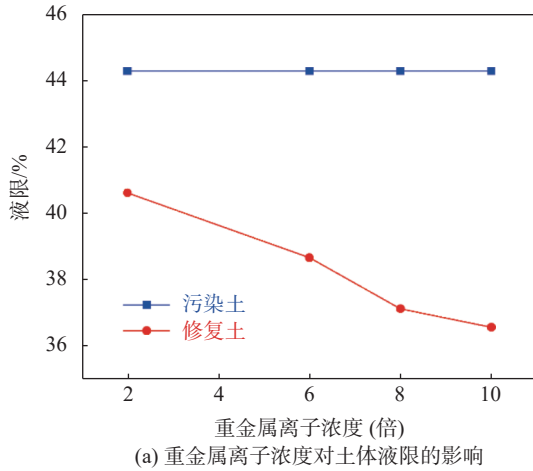


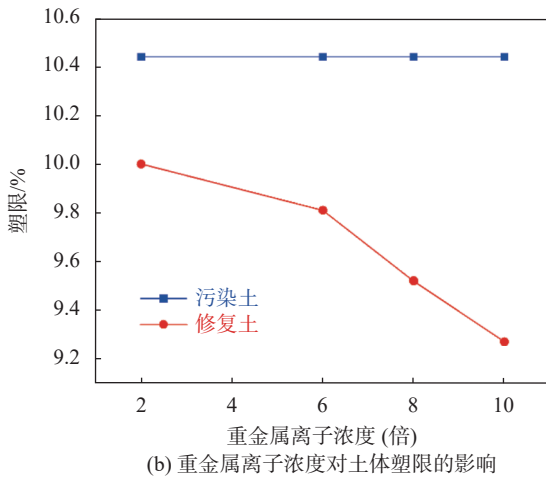
图 3 超声辅助淋洗修复对土体 pH 的影响

### 2.2 土体液塑限的变化规律

图 4 为超声辅助复合淋洗修复前后土体液塑限随着重金属离子浓度设计值的变化规律曲线,超声淋洗修复前,重金属离子浓度的变化对污染黏土液塑限的影响很小,在实际工程中,认为黏粒含量与矿物成分是影响液塑限的主要因素,而重金属离子浓度的增大几乎不会影响其黏粒含量及矿物成分。超声淋洗修复后,随着重金属离子浓度倍数的增大,土体液限从 40.61% 降低至 36.55%,土体塑限从 10.02% 降低至 9.27%。



(a) 重金属离子浓度对土体液限的影响



(b) 重金属离子浓度对土体塑限的影响

图 4 重金属离子浓度对修复前后土体液塑限的影响

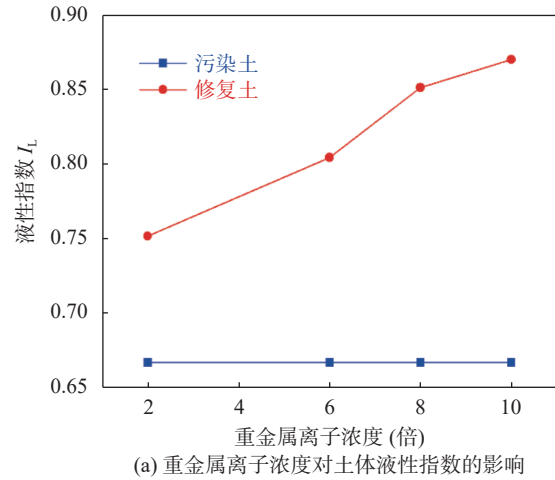
淋洗修复前后土体的塑性指数和液性指数<sup>[23]</sup>变化规律如图 5 所示。液性指数反映的是土体软硬程度, 超声复合淋洗修复后, 土体液性指数随着重金属离子浓度倍数的增大而增大, 从 0.67 分别提高到 0.75、0.80、0.85、0.87, 土体由可塑状态转为软塑状态。塑性指数试验表明, 超声复合淋洗修复后, 土体的塑性指数降低, 可塑性变差, 这是因为淋洗液中的  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  存在大量的碱金属元素  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Na}^+$  在淋洗过程中会和蒙脱石产生化学反应, 从而促进蒙脱石的转化<sup>[21]</sup>, 亲水矿物(蒙脱石)含量降低导致塑性指数降低。另外, 由图 5 可见, 重金属离子浓度倍数越大, 超声淋洗过后的塑性指数越小, 这可能是因为超声作用所产生的空化效应能够破碎土壤颗粒, 淋洗出大量的重金属离子, 从而影响土壤颗粒的结构与排列, 使得土壤可塑性变差。

### 2.3 土体抗剪强度的变化规律

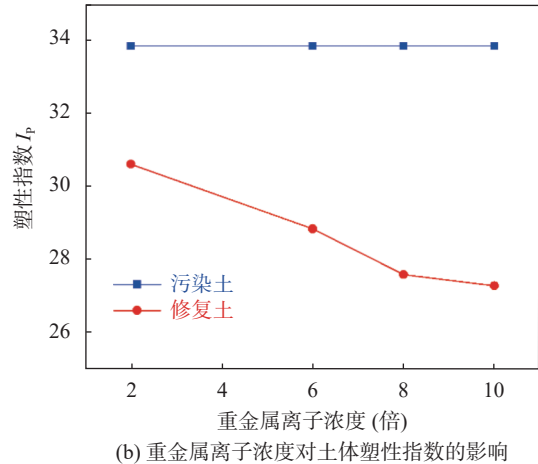
图 6 为超声辅助复合淋洗前后土体抗剪强度的变化情况, 这里采用库伦强度理论公式(1), 拟合污染黏土修复前后的抗剪强度规律曲线。

$$\tau = \sigma \cdot \tan\varphi + c \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为土体抗剪强度, kPa;  $\sigma$  为正应力, kPa;  $\varphi$  为土体内摩擦角, ( $^\circ$ );  $c$  为土体黏聚力, kPa。



(a) 重金属离子浓度对土体液性指数的影响



(b) 重金属离子浓度对土体塑性指数的影响

图 5 重金属离子浓度对修复前后土体液性指数、塑性指数的影响

由图 6 可见, 四种不同重金属浓度倍数下的污染土壤, 在超声辅助复合淋洗修复后抗剪强度降低, 修复土的抗剪强度拟合直线斜率均小于污染土的直线斜率, 可以看到无论重金属浓度倍数如何变化, 污染土和修复土的拟合直线斜率基本都维持在 0.58 和 0.51 左右。

进一步分析超声辅助复合淋洗前后不同重金属离子浓度下的土体抗剪强度参数变化情况如图 7 所示, 素土淋洗前后的土体黏聚力分别为 59.69 和 55.12 kPa, 随着重金属离子浓度倍数的增大, 土体黏聚力均逐渐减小, 这是因为重金属离子的侵入会破坏黏土颗粒间的胶结结构<sup>[24]</sup>, 重金属离子可能与黏土颗粒表面的负电荷相互作用, 使得原本稳定的胶结剥离, 导致胶结的破坏, 从而降低土体黏聚力。当重金属离子浓度为 0~6 倍时, 修复土的黏聚力明显小于污染

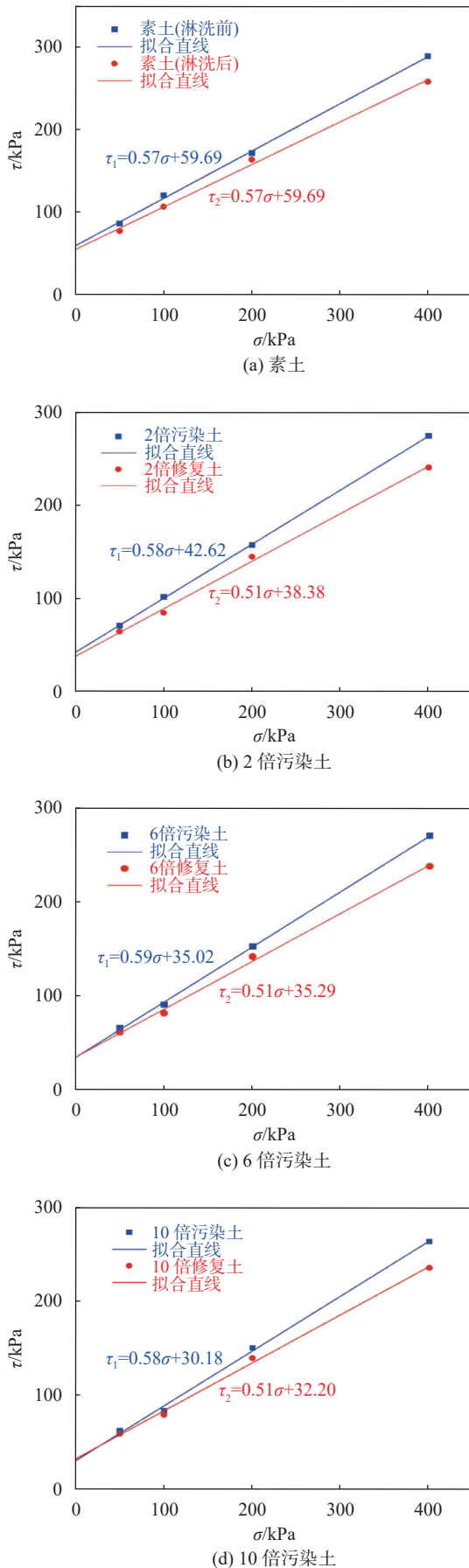


图6 淋洗前后土体抗剪强度对比图

土,这是由于淋洗液中的  $\text{Na}^+$ 会和蒙脱石发生反应,降低黏土矿物含量,导致黏聚力减小;当重金属离子浓度超过6倍时,修复后土体的黏聚力大于污染土,这可能是由于超声辅助复合淋洗修复方法有效地去除了土壤表面与内部的重金属离子和其他污染物,增大了土体中的 zeta 电位,使得胶结力和颗粒聚集力增强。重金属离子浓度的变化对内摩擦角的影响较小,修复后土体的内摩擦角整体减小  $2^\circ \sim 3^\circ$ ,这是因为修复后土颗粒的 zeta 电位增强,颗粒表面电荷增多,吸引更多的水分子形成较厚的水膜层,颗粒之间接触面积减小,更易产生相对移动。

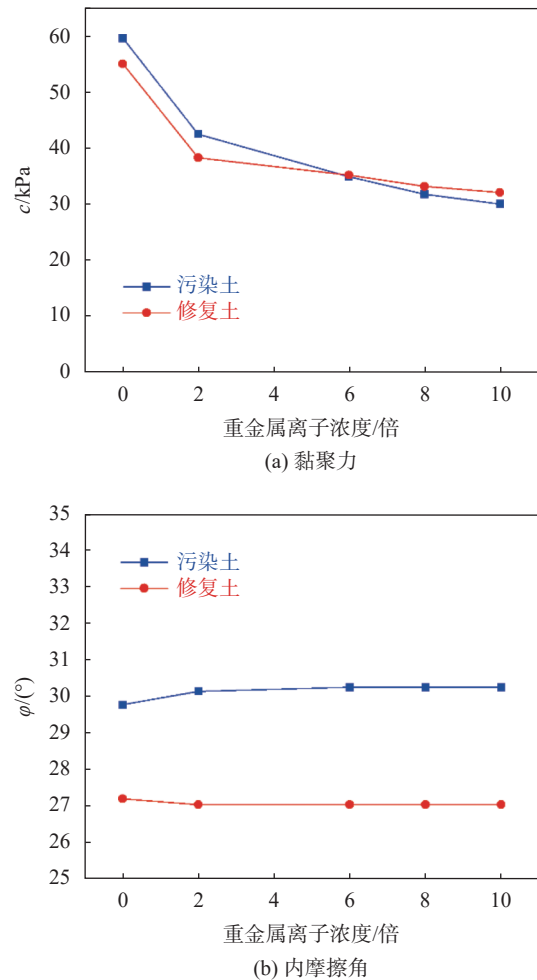


图7 重金属离子浓度对淋洗前后土体黏聚力和内摩擦角的影响

2.4 土体压缩特性的变化规律

图8为2倍重金属离子浓度下超声辅助淋洗前后土体的  $e\text{-}lgp$  曲线。在相同的固结压力区间,修复土的孔隙比从0.45下降到0.37,减小幅度最大,其次是污染土,素土最小,即表现为淋洗修复后土体的压缩性增大。分级加载条件下,土体逐渐被压缩至屈服,如图示污染土的屈服压力最大、其次是修复土体、素

土最小。这是由于黏土中重金属离子及有机质等附着物分散于土壤颗粒中, 土体固化作用无法完成致使土体结构性不足, 胶结物被溶蚀<sup>[25]</sup>, 孔隙增多, 导致压缩性增大; 经超声作用和复合淋洗修复后土体结构被破坏, 孔隙内由淋洗液充斥, 因此修复后土体的压缩性进一步增大。图 9 为不同重金属离子浓度倍数下修复土的  $e$ - $\lg p$  曲线, 由图 9 可见, 超声复合淋洗修复后, 土体的孔隙比随着固结压力的增大而不断减小, 且重金属离子浓度倍数越大, 孔隙比下降幅度越大, 土的压缩性也越大。

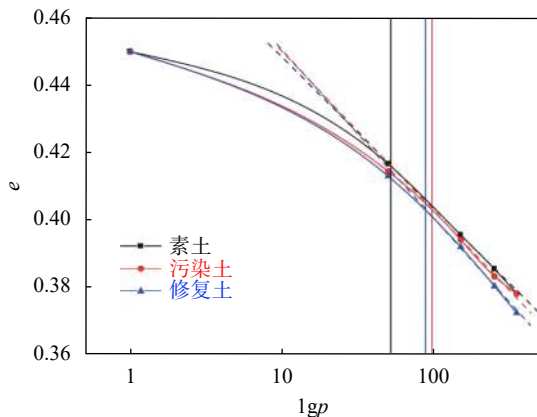


图 8 2 倍重金属离子浓度下淋洗前后土体的  $e$ - $\lg p$  曲线

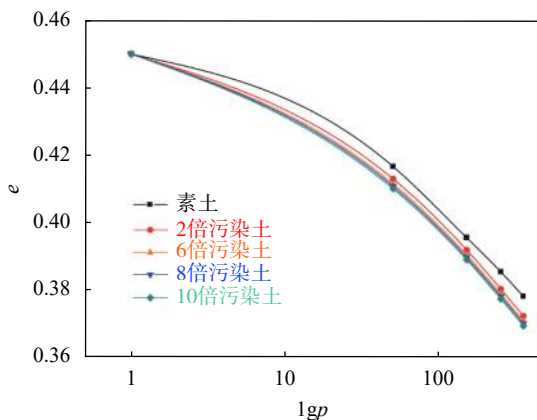


图 9 不同重金属离子浓度下修复土的  $e$ - $\lg p$  曲线

为了能更直观地看出修复土的压缩特性受重金属离子浓度的影响, 取 100 ~ 200 kPa 压力区间下的压缩系数  $a_{v1-2}$ 、压缩模量  $E_{s1-2}$ , 其变化规律如图 10 所示, 素土的压缩系数为 0.203, 2 倍重金属离子浓度条件下, 修复土的压缩系数上升至 0.210 左右, 压缩系数随重金属离子浓度的变化很小; 素土的压缩模量为 6.87, 修复后土体的压缩模量下降至 6.62 左右,  $4\text{MPa} < E_{s1-2} < 20\text{MPa}$ , 属于中压缩性土, 压缩模量随重金属离子浓度的增加略有降低。这可能是因为随着重金属离子浓度的增加, 超声作用和复合淋洗修复对土体结构的破坏作用增大, 黏土颗粒结合力减弱,

孔隙度增大, 致使压缩模量减小。

### 3 结论

(1) 重金属离子浓度对土体 pH 值的影响较小, 超声辅助复合淋洗修复后, 不同浓度下的污染黏土 pH 值均显著降低, 由弱碱性转为酸性。酒石酸单一淋洗修复后, 土体 pH 值下降到 4.16, 说明酸性淋洗剂会导致较大的土壤酸化, 在实际工程应用中需要慎重考虑淋洗剂对土壤环境的影响。

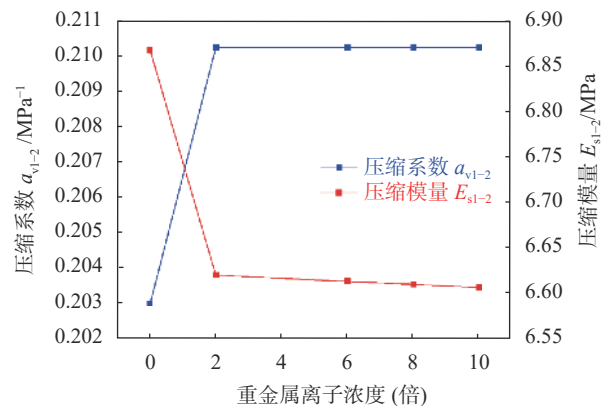


图 10 修复土的压缩系数  $a_{v1-2}$  及压缩模量  $E_{s1-2}$  随重金属离子浓度的变化规律

(2) 超声淋洗修复后, 液塑限随着重金属离子浓度倍数的增加而降低。修复后土体的液性指数从 0.67 分别提高到 0.75, 0.80, 0.85, 0.87, 由可塑状态转为软塑状态。修复后土体的塑性指数降低, 且重金属离子浓度倍数越大, 超声淋洗过后的塑性指数越小。

(3) 超声复合淋洗修复后, 土体的抗剪强度降低。淋洗前后的土体黏聚力均随着重金属离子浓度倍数的增加而逐渐减小, 重金属离子浓度为 0 ~ 6 倍时, 修复土的黏聚力明显小于污染土, 重金属离子浓度超过 6 倍时, 修复土的黏聚力则要大于污染土。修复后土体内摩擦角整体降低  $2^\circ \sim 3^\circ$ , 受重金属离子浓度的影响较小。

(4) 修复土的孔隙比随着固结压力的增大而不断减小, 且重金属离子浓度倍数越大, 孔隙比下降幅度越大; 淋洗修复后土体的压缩性增大, 压缩系数增加, 压缩模量降低。

### 参 考 文 献

- [1] 钟明, 万云, 万安, 等. 沙颍河流域沉积物重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1857-1864.
- [2] 李晓宝, 董焕焕, 任丽霞, 等. 螯合剂修复重金属污染土壤联合技术研究进展 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(12): 1993-2000.

- [3] ZHAO Y, LI H, LI B, et al. Process design and validation of a new mixed eluent for leaching Cd, Cr, Pb, Cu, Ni, and Zn from heavy metal-polluted soil[J]. *Analytical Methods*, 2021, 13(10): 1269-1277.
- [4] 陈欣园, 仵彦卿. 不同化学淋洗剂对复合重金属污染土壤的修复机理[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(10): 2845-2854.
- [5] 叶朝军, 吴家胜, 钟斌, 等. EDTA和有机酸对毛竹修复重金属污染土壤的强化作用[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(3): 431-439.
- [6] HE Z, LONG L, YUAN H, et al. Remediation of heavy-metal-contaminated soil with two organic acids: Washing efficiency, recovery performance, and benefit analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 393: 136235.
- [7] 于艺彬, 李亦然, 高柏, 等. 重金属土壤清洗技术研究进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(3): 129-137.
- [8] GLUHAR S, KAURIN A, LESTAN D. Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: Technological feasibility, remediation efficiency and environmental sustainability[J]. *Chemosphere*, 2020, 257: 127226.
- [9] 孙浩然. 螯合剂淋洗修复土壤中 As、Sb 污染物实验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [10] 张瑞琪. 有机膦酸与辅助剂复合淋洗去除土壤重金属研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2020.
- [11] 吕青松, 蒋煜峰, 杨帆, 等. 重金属污染土壤淋洗技术研究进展[J]. *甘肃农业科技*, 2010(3): 33-37.
- [12] 高一丹, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 不同螯合剂对两类 Cd 和 Ni 污染土壤的淋洗修复对比[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 250-257.
- [13] CHENG S, LIN Q, WANG Y, et al. The removal of Cu, Ni, and Zn in industrial soil by washing with EDTA-organic acids[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(4): 5160-5170.
- [14] 姚苹, 郭欣, 王亚婷, 等. 柠檬酸强化低浓度 EDTA 对成都平原农田土壤铅和镉的淋洗效率[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(3): 448-455.
- [15] HUANG K, SHEN Y, WANG X, et al. Choline-based deep eutectic solvent combined with EDTA-2Na as novel soil washing agent for lead removal in contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2021, 279: 130568.
- [16] ZHU Z, WANG J, LIU X, et al. Comparative study on washing effects of different washing agents and conditions on heavy metal contaminated soil[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2021, 27: 101563.
- [17] HE J, LIN Q, LUO Y, et al. Removal of arsenic from contaminated soils by combining tartaric acid with dithionite: An efficient composite washing agent[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109877.
- [18] 高珂, 朱荣, 邹华, 等. 超声强化淋洗修复 Pb、Cd、Cu 复合污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(8): 2328-2337.
- [19] NEGAHDAR A, NIKGHALBPOUR M. Geotechnical properties of sandy clayey soil contaminated with lead and zinc[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2: 1-13.
- [20] ZHA F, ZHU F, XU L, et al. Laboratory study of strength, leaching, and electrical resistivity characteristics of heavy-metal contaminated soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80: 1-11.
- [21] 王平, 李江山, 薛强. 淋洗剂乙二胺四乙酸对重金属污染土工程特性的影响[J]. *岩土力学*, 2014(4): 1033-1040.
- [22] 邵俐, 付可. 有机酸淋洗修复复合重金属污染河道底泥研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(2): 228-234.
- [23] 薛凯喜, 周朝慧, 田兴华, 等. 竖向渗透分层取样技术在液塑限联合测定试验中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(1): 114-121.
- [24] ZHANG Z, CHEN Y, FANG J, et al. Study on shear behavior of kaolinite contaminated by heavy metal Cu (II)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 13906-13913.
- [25] MISSANA T, ALONSO U, GARCÍA-GUTIÉRREZ M. Evaluation of component additive modelling approach for europium adsorption on 2: 1 clays: Experimental, thermodynamic databases, and models[J]. *Chemosphere*, 2021, 272: 129877.

收稿日期: 2023-08-13