周实际,徐 杨,杜延军,等.重金属污染土壤原地异位稳定化搅拌均匀性定量评价研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):5005-5013.
Zhou S J, Xu Y, Du Y J, et al. Quantitative evaluation of mixing uniformity of ex-situ stabilization of heavy metals contaminated soils [J]. China Environment science, 2025,45(9):5005-5013.

重金属污染土壤原地异位稳定化搅拌均匀性定量评价研究

周实际[1],徐 杨[1],杜延军[1*],李江山[2],邵焜琨[3],刘金龙[4],万佳磊[1] (1.东南大学岩土工程研究所,江苏省绿色与低碳岩土工程重点实验室,江苏 南京 211102；2.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,湖北 武汉 430071；3.国合千庭控股有限公司,江苏 无锡 214200；4.云南省设计院集团勘察院有限公司,云南 昆明 650228)

摘要：污染土壤与稳定剂均匀搅拌可有效确保重金属污染土壤原地异位稳定化实施效果.本文开展污染土壤原地异位稳定化现场试验,基于测试获取的污染土壤和稳定剂混拌料的重金属及特征元素全量、含水率、重金属浸出浓度提出搅拌均匀度的概念;研究污染土壤和稳定剂混拌用的设备类型、搅拌次数对搅拌均匀性的影响规律,并通过相关性分析,研究污染土壤和稳定剂搅拌均匀性的快捷评价方法.结果表明,相较于筛分斗,混合机在控制稳定剂在污染土壤中的分散性方面优于筛分斗,而筛分斗搅拌后的土壤砷和锑全量的均匀度显著提高,筛分斗混合范围更大;稳定化污染土壤元素全量、含水率、砷和锑浸出浓度的均匀度随筛分斗搅拌次数的增加而增大,当搅拌次数大于 3 次时,砷和锑浸出浓度均低于修复目标值;砷和锑浸出浓度均匀度与砷、锑全量均匀度显著相关.基于此,建议污染土壤稳定化施工期可通过现场快速测定重金属全量,并结合均匀度分析评价污染土壤和稳定剂的搅拌均匀性.

关键词：重金属；污染土壤；原地异位稳定化；搅拌均匀性；浸出浓度
中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-5005-09

Quantitative evaluation of mixing uniformity of ex-situ stabilization of heavy metals contaminated soils. ZHOU Shi-ji[1], XU Yang[1], DU Yan-jun[1*], LI Jiang-shan[2], SHAO Kun-kun[3], LIU Jin-long[4], WAN Jia-lei[1] (1.Jiangsu Key Laboratory of Sustainable and Low-Carbon Geotechnical Environmental, Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China；2.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China；3.IEM Holding Co., Ltd., Wuxi 214200, China；4.Yunnan Design Institute Group Geotechnical Engineering Institute Co., Ltd., Kunming 650228, China). *China Environment science*, 2025,45(9)：5005~5013

Abstract：Thorough mixing of contaminated soil and stabilizer is essential for effective ex-situ stabilization for heavy metals-contaminated soils. Field tests of ex-situ soil stabilization was conducted, and the total elements, moisture content, and leaching concentrations of target heavy metals (including arsenic(As) and antimony(Sb)) in the stabilized soils were measured. The influence of mixing equipment type, and soil-stabilizer mixing frequency on the ex-situ stabilization efficiency was evaluated. Based on the measured total elemental content and moisture content, a concept termed 'mixing uniformity' was proposed. The results showed the multi-function mixing equipment performed better than screening crushing bucket in controlling the uniformity of stabilizers in the contaminated soil. In contrast, the screening crush bucket significantly improved the uniformity of total As and Sb in the soil, with a larger mixing range. The mixing uniformities of total element content, moisture content, and As and Sb leaching concentrations increased with the number of mixing using the screening crushing bucket. When the number of mixing exceeded three, As and Sb leaching concentrations fell below remediation target values. Additionally, the uniformity of As and Sb leaching concentrations showed a good correlation with the uniformity of total contents. Based on the results, it is recommended that on-site rapid testing of total heavy metal content, combined with uniformity analysis, can be used to evaluate the mixing uniformity of contaminated soil and stabilizers during stabilization processes.

Key words：heavy metal；contaminated soil；ex-situ stabilization；mixing uniformity；leaching concentration

重金属污染土壤稳定化技术通过物理和化学吸附、形成沉淀、氧化还原等多种途径改变重金属在土壤中的赋存形态,降低重金属的生物有效性和迁移性[1-4],因其具有经济、实施简便、处理周期短等特点,广泛应用于我国现阶段的重金属污染土壤修复[5-10].浸出浓度是评价污染土壤稳定化处理效

收稿日期：2025-02-08
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3709604)国家自然科学基金资助项目(42177133,42477178);江苏省重点研发计划项目(BE2022830)
* 责任作者, 教授, duyanjun@seu.edu.cn

果的重要环境安全指标,诸多学者研究了浸出浓度的影响因素,包括稳定剂掺量、养护时间、浸提液类型、压实度等[11-12].实体工程中重金属浸出浓度的高低还受养护环境、施工搅拌均匀性等因素影响,这其中污染土壤与稳定剂的搅拌均匀度可能是造成工程实施与室内试验的稳定化污染土壤浸出浓度差异的主要原因之一.

在土木工程领域,搅拌均匀度度量方法及其对工程施工质量的影响已有较多的研究.电阻率、无侧限抗压强度、水稳定性等指标广泛用于水泥土搅拌桩均匀度的测定[13-14].陈庚等[15]通过便携式 X 射线荧光光谱仪(XRF)对水泥土中钙元素全量进行测定,提出了一种水泥土搅拌均匀度的实时评价方法并表明搅拌均匀度是影响水泥土强度的重要参数.土壤中元素全量的测定方法主要由原子吸收光谱法(AAS)、原子荧光光谱法(AFS)和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)等.虽然这些方法测量结果的准确性较高,然而它们样品前处理操作复杂,检测时间长,难以在工程实施过程中快速检测土壤中的元素全量.XRF 具有操作简便,分析速度快,可同时检测多种元素,实现无损分析等特点,广泛应用于无机物质分布均匀性的检测[16-17].污染土壤中污染物全量的空间变异性、稳定剂在污染土壤中分散均匀性等因素,影响稳定剂与重金属污染物的接触与反应,并对处理后的污染土壤重金属浸出浓度必将产生影响.然而,在污染土壤稳定化研究领域,稳定剂与污染土壤的搅拌均匀度对处理效果的影响规律尚未引起重视.Deng 等[18-19]通过室内试验测定钙元素(Ca)含量变异系数表征水泥固化黏土混合料的搅拌均匀度及其对水泥固化土浸出特性和水力渗透系数的影响,结果表明搅拌均匀性显著影响水泥对黏土的固化效果且采用特征元素的变异系数表征搅拌均匀性的方法具有可行性.

本研究以广西河池刁江茶山支流得马-拉建矿山污染地块、北方某污染地块重金属污染土壤原地异位稳定化工程为依托,开展现场试验,采用手持式 XRF 测试稳定化污染土壤的重金属及特征元素全量、含水率;基于处理后的土壤中重金属全量、稳定剂特征元素全量、土壤含水率,提出了搅拌均匀度的概念,以此表征污染土壤-稳定剂混拌的均匀程度,进而研究搅拌均匀度随筛分斗搅拌次数的变化规律;查明两种施工装备类型(筛分斗、多功能混合机)对稳定化处理土壤的搅拌均匀度的影响规律;分析现场试验取样的重金属浸出浓度均匀度与元素全量、含水率均匀度的相关性,提出重金属污染土壤稳定化工程实施搅拌效果的快捷评价方法.研究结果对于提高重金属污染土壤稳定剂技术水平具有重要的指导意义.

1 材料与方法

1.1 地块土壤污染概况

1.1.1 得马-拉建矿山污染地块 得马-拉建矿山污染地块(地块 I)(CS-I,Contaminated Site I)位于国家土壤防治先行示范区、全国重金属污染防控区,广西壮族自治区河池市南丹县,地块中心坐标 E 107°67′70.93″, N24°82′43.95″.河池市有色金属矿产丰富,被誉为“有色金属之乡”,区域内的大厂、车河、芒场三大矿区砷矿采、选、洗以及冶矿活动产生大量的尾砂和废渣.尾砂和废渣每逢雨季随雨水冲刷进入刁江,造成流域水体和土壤重金属污染严重,直接对附近居民的人体健康构成极大的威胁.前期地块环境调查结果表明,地块污染物为 As(163~11500mg/kg), Sb(13.3~4420mg/kg),污染土壤 As、Sb 的水平振荡法浸出浓度分别为未检出(Not detected, ND)~3.27mg/L、ND~0.596mg/L.

1.1.2 我国北方某污染地块 试验地块 II(CS-II)临近我国华北地区最大的有色金属集散地,中心坐标为 E115°39′39″,N38°47′54″.地块周边有大量的从事金属回收的小作坊,产生大量的含重金属的废弃物,在地块周边随意倾倒,造成地块土壤重金属污染严重.前期地块调查结果表明,地块土壤主要污染物为 As(6.8~18110mg/kg)和 Sb(1.20~1184mg/kg),污染深度为 0~3m.

采用原地异位稳定化对地块 I 和地块 II 污染土壤进行修复,修复目标值为水平振荡法浸出浓度 As<0.1mg/L、Sb<0.01mg/L.稳定剂为质量比为 4:1 的聚合硫酸铁和氢氧化钙,其对 As、Sb 的稳定化机制包括[8,11,20-22]:(1)聚合硫酸铁进入土壤后经水解、氧化等过程形成铁氧化物和铁氢氧化物对 As、Sb 具有较强的吸附能力,游离的铁离子能够与 AsO_4^{3-}、$Sb(OH)_6^-$络合以及生成难溶性的沉淀;(2)氢氧化钙可避免加入聚合硫酸引起的土壤酸化,钙离子也可

与 As 形成 $Ca_3(AsO_4)_2$ 沉淀.稳定剂设计掺量为污染土壤干重的 2%~4%(污染土壤干密度按照 1.5g/cm^3 计算).

表 1　试验地块典型污染土壤物理化学特性

Table 1　Physical and chemical properties of the contaminated soil samples

特性指标		数值	
		地块 I	地块 II
(1)天然含水率 w(%)		25.7	22.3
(2)相对密度 Gs		2.67	2.41
(3)塑限 wP(%)		28.6	30.4
(4)液限 wL(%)		43.7	40.6
(5)最优含水率 wopt(%)		18.1	17.4
(6)最大干密度 ρd(g/cm^3)		1.68	1.54
(7)pH 值		5.93	7.14
(8)粒径分布(%)	黏粒	34.8	25.1
	粉粒	58.9	65.3
	砂粒	6.3	9.6
(9)金属全量(mg/kg)	铁(Fe)	60420	19800
	砷(As)	6438	1066
	锑(Sb)	2417	218

1.2　试验用污染土壤

分别在地块 I 和地块 II 两个污染地块典型污染区域开挖典型的污染土壤,采用 ALLU 筛分斗对污染土壤进行破碎和预拌合,剔除较大的石块和树根等杂物.通过手持式 XRF(ThermoFisher Scientific, Niton XL2)快速检测,确定重金属的种类和全量,采用烘干法确定污染土壤质量含水率.污染物种类、全量、含水率以及代表性土样的物理化学特性参数如表 1 所示.根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145-2007)[23]分类并结合塑性指标判定地块 I 和地块 II 污染土壤均为低液限黏土.将试验用污染土壤分堆,每堆约 400m^3(圆锥形,堆体底部半径约为 12.5m,堆体高度约 2.5m)置于试验地块内、备用.稳定化前,采用挖机分别将试验土堆摊平至 1.25m 的高度,采用网格布点法将土堆的上表面平均划分为 10 个网格,在每个网格的中心以下 30cm 处采集 2kg 土壤,作为未处理污染土壤样品,测定 As、Sb、Fe 全量和含水率.

1.3　污染土壤与稳定剂搅拌设备

筛分斗(ALLU,DH3-23/X75)搅拌原理为固定在滚轴上的上下交错的刀板朝相反方向持续旋转,从而实现污染土壤的破碎以及污染土壤与稳定剂的混合.采用筛分斗进行污染土壤稳定化处理的施工步骤包括:①根据稳定剂设计掺量及试验用污染土壤质量(堆体体积乘与土壤干密度)计算需要的稳定剂质量、稳定化药剂摊铺;②稳定剂与污染土壤拌合(重复多次);③稳定化污染土壤养护.养护过程中覆盖防水布避免雨水的冲刷并能起到保温的作用.

模块化多功能混合机(以下称“混合机”)由多个模块化系统组成,包括筛分系统、传输系统、混合系统、控制系统和供药系统,可在现场根据需求灵活拼装.采用混合机进行污染土壤与稳定剂混合的施工过程为:①采用挖机将污染土壤投入到筛分系统,同时去粒径大于 5cm 的土块和碎石;②筛分后的污染土壤经传输系统进入混合系统与稳定剂混拌;③将混拌后的污染土壤通过传送带输送至养护区养护,养护过程中覆盖防水布.控制系统可实时精准控制污染土壤的进料速度和稳定剂的掺量.

1.4　试验方法

在地块 I 对比筛分斗和混合机对污染土壤与稳定剂的搅拌效果;开展筛分斗搅拌次数对污染土壤与稳定剂搅拌效果的影响研究.以 400m^3 污染土壤为一个试验单元(圆锥形,堆体底部半径约为 12.5m,堆体高度约 2.5m),当筛分斗搅拌次数分别为 1, 2, 3, 4, 5 次时,分别在试验单元内均匀布点采集土样 10 个,每个土样质量约为 2kg,采样方法与未处理污染土样的采样方法相同.设置混合机的进料速度为 80m^3/h,稳定剂掺量为 4%,每间隔 30min 在二级传输系统出口处采集 1 个样品,共采集 10 个样品,每个土样质量约为 2kg.

在地块 II 研究采用筛分斗进行稳定化实施时,搅拌次数对污染土与稳定剂搅拌效果的影响.类似的,以 400m^3 的土壤为一个试验单元,当筛分斗混拌污染土壤和稳定剂的次数分别为 1, 2, 3, 4, 5 次时,在试验单元内均匀布点采集土样 10 个,每个土样质量约为 2kg.

上述试验分别进行两次.采集的土样运回实验室后,去除碎石和杂质,混合均匀后按质量平均分成 2 份,每份约 900g.其中 1 份置于密封袋内,在松散状态、标准养护条件(相对湿度≥95%,温度(20±2)℃)下养护 7d;另 1 份经过 3 次“四分法”取样,获取 3 份土样,每份样品质量约为 25g,采用烘干法测定土样的含水率,并采用手持式 XRF 测定烘干后土样中 Fe、

As、Sb 全量.值得注意的是,土样烘干后测定可有效减小由于土壤水分对手持式 XRF 测量准确度的影响[24-25].王垚等[25]研究了含水率对手持式 XRF 快速测量锌精矿中主次成分相对误差的影响,研究结果表明降低样品的含水率可以提高 XRF 测量结果的准确性,在含水率接近于零的条件下,XRF 对 Fe、Zn、Ca、Pb 等元素测定结果的相对误差小于 5%.因此,本文在使用 XRF 测定污染土壤中 Fe、As、Sb 全量之前对样品进行烘干处理,测量结果能够反映上述元素在土壤中的含量.按上述方法养护的试验达到养护龄期(7d)后,根据《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557−2010)[26]测定试验 As、Sb 浸出浓度,同时测定未处理污染土壤 As、Sb 浸出浓度.As、Sb 浸出浓度依据《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 766−2015)中规定的进行[27].

1.5 搅拌均匀度定义与量化评价

重金属污染土壤和稳定剂的搅拌是原地异位稳定化技术实施的重要环节之一.目标重金属污染物的浸出浓度,是现阶段行业内验收污染土壤稳定化处理效果的关键指标.针对上述现场试验搅拌后的污染土壤−稳定剂混合料,本研究基于下述 4 点考虑选用合理的指标表征搅拌均匀程度:

①污染土壤中 As 和 Sb 是目标污染物,Fe 是稳定剂与 As、Sb 相互作用的主要成分.因此,对于现场试验的多个土壤样品而言,As、Sb 和 Fe 全量的高低与污染土壤 As、Sb 的浸出浓度密切相关;

②土壤含水率对重金属浸出浓度影响显著.冯亚松[28]的研究结果表明含水率对钢渣基固化剂固化重金属污染土壤锌(Zn)、镍(Ni)浸出浓度的影响显著,含水率由 11%升高至 26%,Zn、Ni 的浸出浓度呈现先降低后增加的趋势;

③生态环境部发布的《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)》(HJ 25.5−2018)[29]规定污染土壤修复效果评估每个采样单元(每个样品代表的土方量)不应超过 500m^3;同时又规定对于按照堆体模式处理的修复技术,应结合堆体大小设置采样点,堆体体积为 300~500m^3 时采样单元数量不应少于 3 个.在污染土壤修复工程实施中,常采用评估 1 个样品的修复效果代表 500m^3 堆体的修复效果.然而,对于堆体中不同位置处土壤的物理和环境特性指标变异系数较高时,其代表性很可能不足;

④本研究设置试验土壤堆体体积为 400m^3,设置采样单元为 10 个,大于 HJ 25.5 规定的堆体体积采样单元数量(3 个),能有效降低堆体土壤物理和环境特性差异对效果评估准确性的影响.

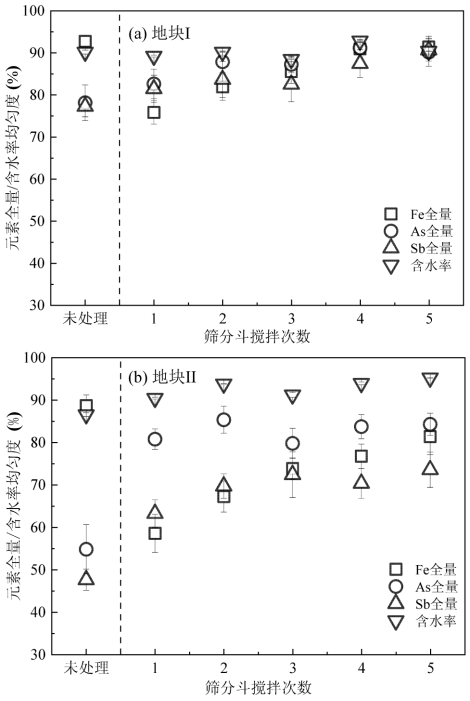


图 1 污染土壤元素全量、含水率均匀度随筛分斗搅拌次数的变化关系

Fig.1 The variations of the mixing uniformities of total elements and moisture contents with the mixing cycle of screening crushing bucket

土壤元素全量可以有效的反应土壤的均匀程度.陈庚等[15]利用水泥土中钙(Ca)元素的平均浓度和相关误差来计算水泥土的搅拌均匀性.类似地,Deng 等[19]利用重金属元素和 Ca 元素含量的平均值和相关误差来评价水泥固化污染土壤的搅拌均匀性.重金属浸出浓度与元素全量、含水率密切联系.因此,本研究以稳定化处理前后污染土壤元素全量、含水率、重金属浸出浓度为评价指标,以 10 个土样上述指标测试结果为样本数据,根据公式(1)~(4)计算上述指标的均匀度(MU),并用 MU 表征污染土壤与稳定剂的搅拌均匀度.MU 值越大,表明污染土壤与稳定剂的搅拌效果越好,同一批次土壤取样的代表性越强.若 MU 等于 100%,表明污染土壤与稳定剂完全搅拌均匀.

$$\mathrm{CV}=\frac{S}{\overline{X}}\times 100\% \tag{1}$$

$$\overline{X}=\frac{x_1+x_2+x_3\cdots+x_n}{n} \tag{2}$$

$$S=\sqrt{\frac{\left(x_1-\overline{X}\right)^2+\left(x_2-\overline{X}\right)^2+\cdots+\left(x_n-\overline{X}\right)^2}{n-1}} \tag{3}$$

$$\mathrm{MU}=1-\mathrm{CV} \tag{4}$$

式中:x_1,x_2,…,x_n为同一批次试样中 As,Sb 和 Fe 全量、含水率、As 和 Sb 浸出浓度的测试结果;$\overline{X}$、S 为同一批次上述指标测试结果的平均值和标准差.

2　结果分析与讨论

2.1　筛分斗对污染土壤-稳定剂搅拌效果

元素全量、含水率均匀度随筛分斗搅拌次数的变化关系如图 1 所示.As 和 Sb 浸出浓度均匀度随筛分斗搅拌次数的变化关系如图 2 所示.由图 1 和图 2 可知,未处理污染土壤 Fe 全量、含水率的均匀度高于 As 全量、Sb 全量、As 浸出浓度、Sb 浸出浓度的均匀度.CS-I 中 As 全量、Sb 全量、As 浸出浓度、Sb 浸出浓度的均匀度高于 CS-II 中上述指标的均匀度;CS-I 和 CS-II 中 Fe 全量和含水率的均匀度相差不大,均在 90%左右,显著高于其余指标的均匀度.加入 4%的稳定剂后,随着筛分斗搅拌次数的增加,各指标均匀度的变化过程有所差异.含水率的混合均匀度基本保持不变.在 CS-I 和 CS-II,加入稳定剂且搅拌 1 次后,Fe 全量均匀度分别由 92.77%和 88.72%降低至 75.84%和 58.57%,而后随着搅拌次数的增加逐渐升高,表明稳定剂加入土壤后出现聚集现象,而后随着搅拌次数的增加逐步分散,在土壤中的均匀度也逐渐提高.As 全量、Sb 全量、As 浸出浓度、Sb 浸出浓度的均匀度随着搅拌次数的增加逐渐升高.筛分斗搅拌次数由 1 次增加至 3 次,As、Sb 全量和浸出浓度均匀度提升较快.搅拌次数由 3 次增加至 5 次,As、Sb 全量和浸出浓度均匀度略微升高.

筛分斗对污染土壤和稳定剂的搅拌效果与污染土壤的初始均匀度及其物理化学特性密切相关.搅拌均匀度是变异系数的函数,而变异系数和各指标的平均值密切相关(公式(1)).由表 1 可知,相比于 CS-II,CS-I 中 Fe 全量、As 全量、Sb 全量、As 浸出浓度和 Sb 浸出浓度较高.因此,CSo-I 中 Fe 全量、As 全量、Sb 全量、As 浸出浓度和 Sb 浸出浓度的初始均匀度高于 CS-II 中各指标的初始均匀度.筛分斗搅拌 5 次,CS-I 中 Fe 全量、As 全量、Sb 全量、As 浸出浓度和 Sb 浸出浓度的均匀度分别为 93.77%、90.18%、90.69%、89.33%和 87.14%,高于 CS-II 的 81.40%、84.31%、73.59%、76.90%和 77.36%.CS-I 和 CS-II 含水率均匀度较高,始终保持在 90%左右,可能和地块污染深度较小,污染范围内土壤含水率变化小有关,搅拌作用不会引起含水率均匀度的显著变化.

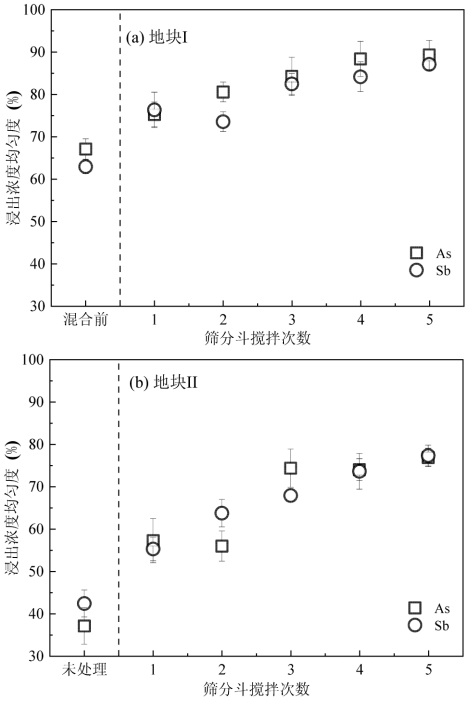


图 2　污染土壤 As 和 Sb 浸出浓度均匀度随筛分斗搅拌次数的变化关系

Fig.2　The variations of the mixing uniformities for As and Sb leaching concentrations with the mixing cycle of screening crushing bucket

图 3 和图 4 分别为两个地块土壤样品中元素全量、含水率、浸出浓度的最大值、最小值和平均值.由图 3 和图 4 可知,随着搅拌次数的增加,各指标的最小值逐步升高,最大值逐渐降低,且均逐渐向平均值趋近.加入稳定剂后,As 和 Sb 浸出浓度的最大值和最小值随着搅拌次数的增加均呈现减小的趋势,且逐渐向平均值趋近,表明稳定剂的加入降低了 As、Sb 的浸出浓度.加入稳定剂后,Fe 全量的最大值出现了升高的现象,可能是试验单元局部区域出现了稳定剂聚集的现象,随着搅拌次数的增加,聚集现象逐渐消失.

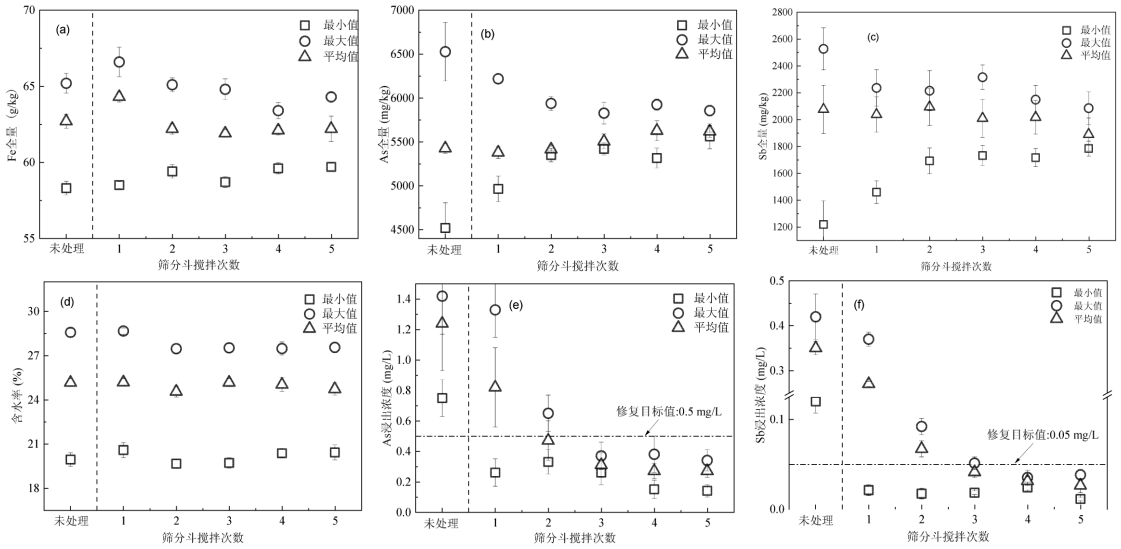


图 3 地块 I 污染土壤元素全量、含水率、浸出浓度的最小值、最大值和平均值随筛分斗搅拌次数的变化关系

Fig.3 The minimum、maximum and average values of total element, moisture content, and leaching concentration change with the screening crushing bucket mixing cycle for the CS−I

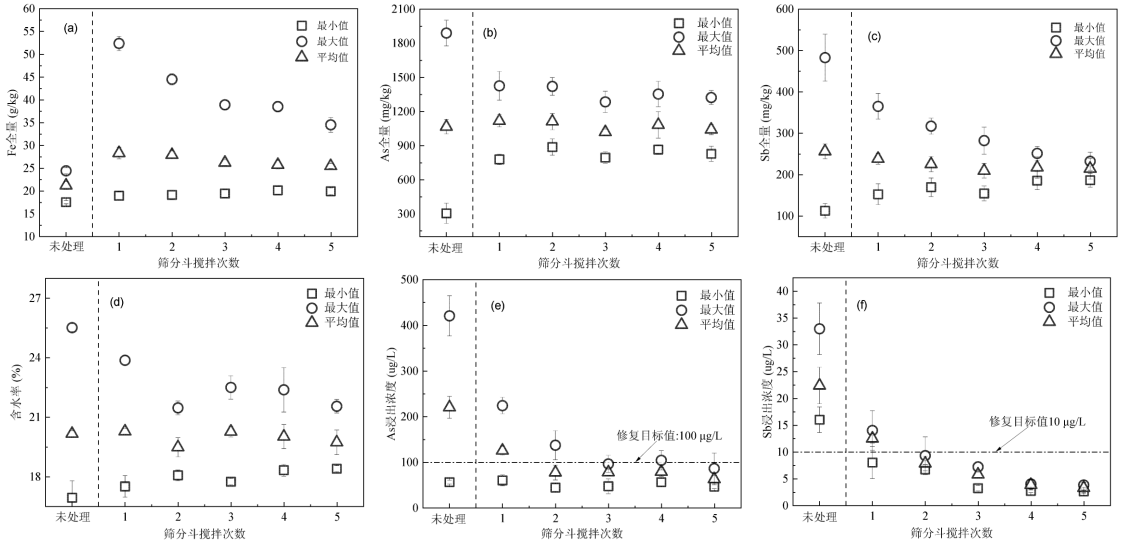


图 4 地块 II 污染土壤元素全量、含水率、浸出浓度的最小值、最大值和平均值随筛分斗搅拌次数的变化

Fig.4 The minimum、maximum and average values of total elements, moisture content, and leaching concentrations change with the screening crushing bucket mixing cycle for the CS−II

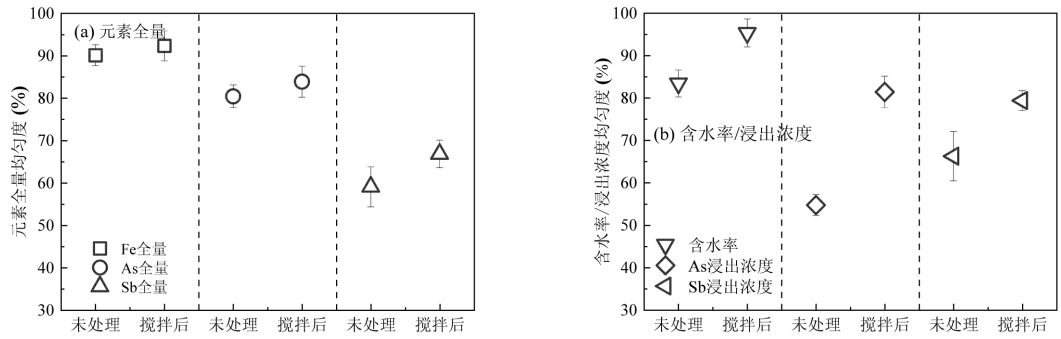


图 5 混合机处理前后元素全量、含水率、浸出浓度均匀度的变化

Fig.5 The variation of mixing uniformities of total element, moisture contents, and leaching concentrations prior to and after mixed by the modular multi−function mixing equipment

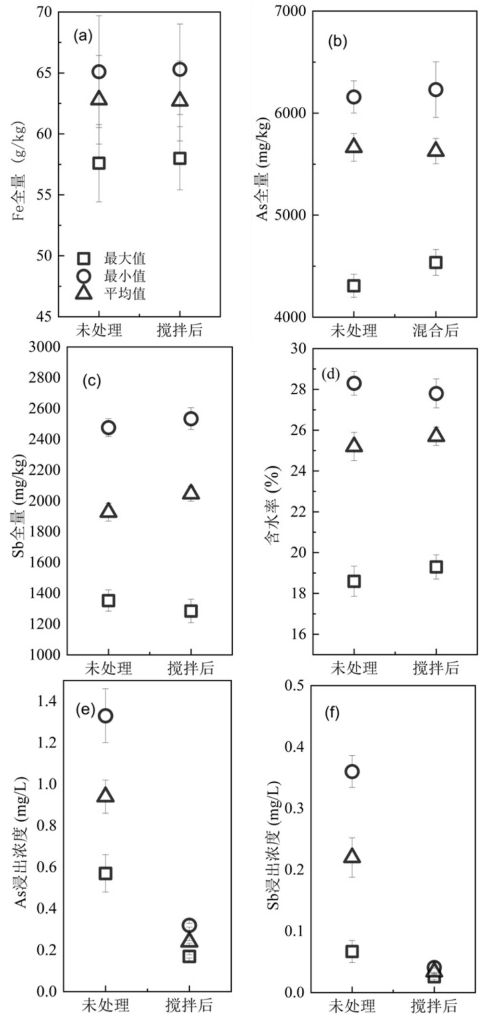


图 6　混合机混合前后元素全量、含水率、浸出浓度的最小值、最大值和平均值的变化

Fig.6　The variation of minimum、maximum and average values of total elements, moisture contents and As and Sb leaching concentrations prior to and after mixed by the multi−function mixing equipment

污染物的浸出浓度是稳定化效果评估最重要的指标之一,筛分斗的搅拌次数对 As 和 Sb 的浸出浓度有显著的影响.在 CS−I 中,筛分斗搅拌次数大于等于 3 次,As 和 Sb 的浸出浓度均低于修复目标值;在 CS−II 中,筛分斗搅拌次数大于等于 3 次,As 的浸出浓度低于修复目标值;筛分斗搅拌次数大于等于 2 次,Sb 的浸出浓度低于修复目标值.为了保证稳定化实施效果,在 CS−I 和 CS−II 稳定化实施过程中,筛分斗搅拌次数均不应少于 3 次.随着搅拌次数的增加,As、Sb 浸出浓度持续降低,稳定化效果持续提升.然而,在污染土壤稳定化工程实施过程中,机械施工费是工程成本的重要组成部分,增加搅拌次数无疑会增加工程实施成本.因此,在保证目标污染物浸出浓度低于修复目标值的前提下,应尽可能的减少搅拌次数.搅拌次数不足易导致修复效果无法满足修复要求,搅拌次数过多造成工程成本增加.综合稳定化工程实施效果和工程成本,筛分斗的搅拌次数应控制在 3 次

2.2　混合机对稳定剂−污染土壤的搅拌效果

混合机处理前后元素全量、含水率、浸出浓度均匀度的变化情况如图 5 所示.由图 5 可知,经混合机处理后,上述指标的均匀度均有所提升.图 6 为 CS−I 污染土添加 4%稳定剂、混合机混合前后 Fe 全量、As 全量、Sb 全量、含水率、As 和 Sb 浸出浓度最小值、最大值和平均值的变化情况.相比于加入稳定剂后,Fe 全量、As 全量、Sb 全量的最大值、最小值随着筛分斗搅拌次数的增加逐渐向平均值趋近的变化情况(图 4),混合机混合前后污染土中 Fe 全量、As 全量、Sb 全量的最大值、最小值并无明显的变化,这可能是两种不同混合方式的混合范围不同导致的.对比图 5 和图 1(b)元素全量在搅拌前后的变化情况,可知混合机在控制稳定剂在污染土壤中的分散性方面优于筛分斗,而筛分斗搅拌后的土壤 As 和 Sb 全量的均匀度显著提高.采用筛分斗进行搅拌,污染土壤可在整个试验单元范围内进行混合,混合范围大;采用混合机混合,由于是流水线的作业方式,只有混合系统内的污染土进行混合,混合范围小.

3　污染土壤原地异位稳定化搅拌均匀性判别方法

图 7 为 As 和 Sb 浸出浓度的均匀度和 Fe 全量、As 全量、含水率均匀度关系图.相比于 As 和 Sb 的浸出浓度需在实验室测定,元素全量可在施工现场通过 XRF 测定,含水率可采用烘干法和酒精燃烧法在现场快速测定.由图 7(a)可知,As 浸出浓度均匀度与土壤中 As 全量均匀度的相关性较好(R^2=0.88),与 Fe 全量和含水率均匀度无显著相关;由图 7(b)可知,Sb 浸出浓度均匀度与土壤中 As 全量均匀度和 Fe 全量均匀度的相关性较好(R^2 分别为 0.94 和 0.78),与含水率均匀度无显著相关.As 和 Sb 为本文关注的重金属元素,As、Sb 浸出浓度的均匀性分别与 As、Sb 全量均匀度显著相关,且重金属全量是影响重金属浸出浓度的重要因素之一.因此,在重金属污染土壤稳定化工程实施过程中,可以采用评价土壤中重金属全量的均匀度来快速评价重金属浸出浓度的均匀度.

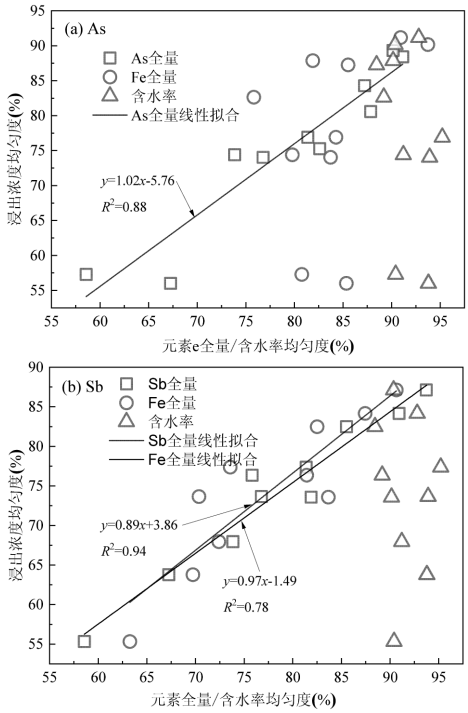


图 7 浸出浓度均匀度与元素全量、含水率均匀度的关系

Fig.7 The relationship of the uniformities of leaching concentrations with the uniformities of total elements and moisture content

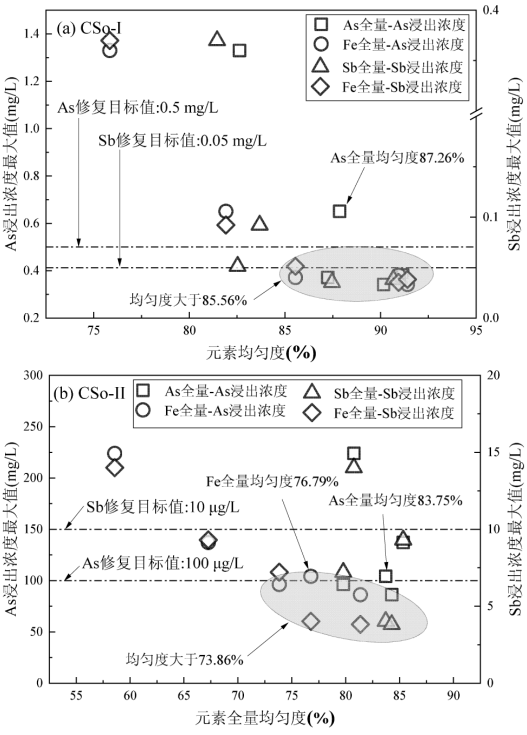


图 8 浸出浓度最大值与元素全量均匀度的关系

Fig.8 The relationship of maximum leaching concentrations with the uniformities of total elements

重金属污染土壤固化稳定化修复工程效果评估结果取决于重金属浸出浓度与修复目标值的关系,浸出浓度最大值低于修复目标值,则满足修复要求;浸出浓度最大值高于修复目标值,则不满足修复要求.稳定剂与污染土壤搅拌均匀性高,能够保障稳定剂中的活跃元素与重金属元素充分接触,避免稳定剂成团、结块,提高稳定剂的利用效率,降低重金属的浸出浓度.因此,浸出浓度最大值是否低于修复目标值也与均匀度密切相关.图 8 为两个地块 As、Sb 浸出浓度最大值与 As/Sb 全量、Fe 全量均匀度的关系图.由图可知,要使 As/Sb 浸出浓度最大值低于修复目标值,As/Sb 全量和 Fe 全量均匀性需符合一定的要求,例如,在 CS−I 中均匀度需大于 85.56%(图 8(a));在 CS−II 中均匀度需大于 73.86%(图 8(b)).但是,均匀度大于上述两个特定值并不能保证浸出浓度最大值低于修复目标值.例如,在 CS−I 中 As 全量均匀度 87.26%大于 85.56%,而 As 浸出浓度 0.65mg/L 大于修复目标值 0.5mg/L.Fe 全量、As 全量/Sb 全量均匀度与 As/Sb 浸出浓度均匀度具有良好的相关性(图 7),而浸出浓度最大值是否低于修复目标值也与均匀度密切相关.因此,稳定化工程实施效果评估过程中可用少数样品的重金属浸出浓度测试,结合重金属全量均匀度分析,对地块污染土壤的稳定化实施效果进行全面准确的评估.

4 结论

4.1 基于变异系数的均匀度计算方法能够准确评估污染土壤原地异位稳定化修复实施过程各个阶段污染土壤−稳定剂的混合效果和土壤元素全量、含水率、重金属浸出浓度的均匀程度.

4.2 污染土壤元素全量、As 和 Sb 浸出浓度均匀度随筛分斗搅拌次数增加而增加;当筛分斗搅拌次数大于 3 次时,As 和 Sb 浸出浓度低于修复目标值.在稳定化工程实施过程中可以通过重金属浸出浓度均匀性优化搅拌工艺参数.混合机在控制稳定剂在污染土壤中的分布均匀性方面优于筛分斗,然而,经筛分斗混合后的土壤 As 和 Sb 全量的均匀度显著提高.

4.3 重金属浸出浓度是污染土壤稳定化效果评估的重要指标,然而其测试操作复杂、耗时较长.重金属全量可通过 XRF 快速测定,且是影响浸出浓度的重要因素.在稳定化工程实施效果评估过程中可用少数样品的重金属浸出浓度测试,结合重金属全量

均匀度分析,对地块污染土壤的稳定化实施效果进行全面准确的评估.

参考文献：

[1] Wang Q W, Lin Q H, Li Q Z, et al. As(III) removal from wasterwater and direct stabilization by in-situ formation of Zn-Fe layered double hydroxide [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,403.

[2] James V, Bothe J R, Brown P W. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation [J]. Environment science & technology, 1999,(33): 3806-3811.

[3] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review [J]. Environment international, 2020,134,105046.

[4] 李天然,蒋建国,李德安,等.铁基固体材料对钒矿污染土壤的固化效果研究 [J]. 中国环境科学, 2016,(7):2108-2114.
Li T R, Jiang J G, Li D A, et al. Solidifying effect of heavy metals in the vanadium deposit-polluted soil by iron-based solid agents [J]. China Environmental Science, 2016,36(7):2018-2114.

[5] Hou D Y, Al-Tabbaa A, O'Connor D, et al. Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023,4(4):271-286.

[6] 谭　娟,吴建强,陈　春,等.复配材料钝化重金属污泥试验及工程应用研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(10):4857-4863.
TANG J, WU J Q, CHEN C, et al. Experiments and engineering application research on passivation of heavy metal contaminated sediment by compound material [J]. China Environmental Science, 2021,41(10):4857-4863.

[7] 于冰冰,颜湘华,王兴润,等.不同稳定化材料对废渣中 As 的固定效果 [J]. 中国环境科学, 2019,39(9):3887-3896.
Yu B B, Yan X H, Wang X R, et al. Stabilization effects of different materials on arsenic-containing slag [J]. China Environmental Science, 2019,39(9):3887-3896.

[8] Zhou S J, Du Y J, Sun H Y, et al. Evaluation of the effectiveness of ex-situ stabilization for arsenic and antimony contaminated soil: Short-term and long-term leaching characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2022,848:157646.

[9] Xia W Y, Du Y J, Li F S, et al. Field evaluation of a new hydroxyapatite-based binder for ex-situ solidification/stabilization of a heavy metal contaminated site soil around a Pb-Zn smelter [J]. Construction and Building Materials, 2019,210:278-288.

[10] Xia W Y, Du Y J, Li F S, et al. In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite-based binder [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,369:353-361.

[11] Zhou S J, Du Y J, Feng Y S, et al. Stabilization of arsenic and antimony co-contaminated soil with an iron-based stabilizer: Assessment of strength, leaching and hydraulic properties and immobilization mechanisms [J]. Chemosphere, 2022,301:134644.

[12] Xue Q, Li J S, Liu L. Effect of compaction degree on solidification characteristics of Pb-contaminated soil treated by cement [J]. Clean-Soil Air Water, 2014,42(8):1126-1132.

[13] 席培胜,刘松玉,张八芳.水泥土搅拌桩搅拌均匀性的电阻率评价方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007,32(2):355-358.
Xi P S, Liu S Y, Zhang B F. Electrical resistivity evaluation method to homogeneity of soil-cement deep mixing column [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007,32(2):355-358.

[14] 陈安定.水泥土搅拌桩桩身均匀性定量判定与评价方法 [J]. 土工基础, 2012,26(4):102-105.
Chen A D. Quantitative evaluation of uniformity of soil-cement mixing columns [J]. Soil Engineering and Foundation, 2012,26(4):102-105.

[15] 陈　庚,林民国,吴勇强,等.水泥土拌合均匀度量化方法及其试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2023,19(2):504-512.
CHEN G, LIN M G, WU Y Q, et al. The Quantification method and verification tests of the mixing uniformity of cement soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023,19(2):504-512.

[16] 邓婷婷,刘　行,张　峰,等.固化/改性土搅拌均匀性测试与评价方法. [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022,52(4):697-703.
Deng T T, Liu H, Zhang F, et al. Test and evaluation method for mixing uniformity of soil stabilization/modification [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022,52(4):697-703.

[17] 杨忠梅,李　静,张春化.熔融制样-X 射线荧光光谱法测定轻烧白云石中主要成分 [J]. 冶金分析, 2020,40(7):82-86.
Yang Z M, Li J, Zhang C H. Determination of main components in light-burned dolomite by X-ray flouresscence spectrometry with fusion sample preparation [J]. Metallurgical Analysis, 2020,40(7):82-86.

[18] Deng T T, Liu H, Deng Y F,et al. Mixing uniformity effect on hydraulic conductivity of cement-based stabilized soft clay [J]. Acta Geotechnica, 2024,19:5585-5596.

[19] Deng T T, Fisonga M, Ke H,et al. Minxing uniformity effect on leaching behaviour of cement-based solidified contaminated caly [J]. Science of the Total Environment, 2024,908,167957.

[20] Yang C Y, Han Z W, Luo G F, et al. In situ remediation and stability assessment of solid waste: alkaline amendments to stabilize acid-generating high-concenttration antimony(Sb) tailings in southwest China [J]. International Journal of Environmental Research, 2023,17:5.

[21] Guo J L, Yin Z P, Zhong W, et al. Immobilization and transformation of co-existing arsenic and antimony in highly contaminated sediment by nano zero-valent iron [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022,112:152-160.

[22] Ko M S, Kim J Y, Bang S B, et al. Stabilization of the As-contaminated soil from the metal mining areas in Korea [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2012,34:143-149.

[23] GB/T 50145-2007　土的工程分类标准 [S].
GB/T 50145-2007　Standard for engineering classification of soil [S].

[24] 腾　婧,石　垚,李会泉,等.电镀污泥成分 X 荧光检测水分影响机制及校正方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2024,2(44):419-425.
Teng J, Shi Y, Li H Q, et al. The mechanism of moisture influence and correction of electroplating sludges testing with EDXRF [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024,2(44):419-425.

[25] 王　垚,段　宁,降林华,等.手持式 X 射线荧光光谱仪快速测量锌精矿中主次成分 [J]. 冶金分析, 2024,44(8):11-17.
Wang Y, Duan N, Jiang L H, et al. Rapid determination of major and minor conpounds in zinc concentrate by Handheld X-ray fluorescence spectrometer [J]. Metallurgical Analysis, 2024,44(8):11-17.

[26] HJ 557-2010　固体废物-浸出毒性浸出方法-水平振荡法 [S].
HJ 557-2010　Solid waste-Extraction procedure for leaching toxicity-Horizontal vibration method [S].

[27] HJ 781-2016　固体废物-22 种金属元素的测定-电感耦合等离子体发射光谱法 [S].
HJ 781-2016　Solid waste-Determination of 22 metal elements-Inductively coupled plasma optical emission spectrometry [S].

[28] 冯亚松.镍锌复合重金属污染黏土固化稳定化研究——可持续固化剂研发与性能测评 [D]. 南京:东南大学, 2021.
FENG Y S. Solidification/stabilization of clay soil contaminated by nickel and zinc: Sustainable binder development and performance evaluation [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

[29] HJ 25.5-2010　污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行) [S].
HJ 25.5-2010　Technical guideline for risk control and soil remediation of contaminated site [S].

致谢：本实验的现场工作由北京中岩大地科技股份有限公司、江苏菲力环保工程有限公司协助完成,在此表示感谢.

作者简介：周实际(1989-),男,福建三明人,东南大学博士研究生,主要从固体废弃物资源化利用技术和污染场地修复与风险管控技术研究,发表论文 6 篇.shijizhou@seu.edu.cn.