

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1284

石灰粉煤灰固化对盐渍土中石油污染物迁移的控制性研究

李 敏^{1,2}, 于禾苗¹, 马国伟¹, 柴寿喜³

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384)

摘 要: 提高石油污染物被土吸附的稳定性是实现污染土工程再利用的前提和关键。依托滨海地区石油污染盐渍土的处置需求, 优选兼具固化和吸附作用的石灰和粉煤灰为固化材料, 以固化作用、污染强度、土体密度为变量参数, 搭建加压淋滤平台模拟外界环境, 借助滤后含油量和渗出石油量为指标评价固化作用对盐渍土中石油污染物迁移的控制性。研究结果表明: 固化作用可提高石油污染物的吸附稳定性, 有效控制土中石油污染物的迁出。加压淋滤作用下, 固化污染土含油量变化率仅为 1.52%~2.27%, 渗出含油量为 7.15~14.92 mg/L, 满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 三级标准。固化作用可解决未固化污染土中因土体密度、污染强度变化而引起的污染物大幅度迁移问题, 滤后含油量均接近于初始含油量。石灰粉煤灰的固化作用对污染物迁移的控制效果稳定, 在石油污染土处置方面具有普遍适用性。

关 键 词: 石油污染土; 迁移控制性; 固化再利用; 石灰粉煤灰; 加压淋滤

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2022) 增刊 2—0337—08

Study on control of lime-fly ash solidification on migration of petroleum pollutants in saline soil

LI Min^{1,2}, YU He-miao¹, MA Guo-wei¹, CHAI Shou-xi³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Hebei Research Center of Civil Engineering Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Improving the adsorption stability of petroleum pollutants in soil is the premise and key to the engineering reuse of contaminated soil. Relying on the disposal needs of oil contaminated saline soil in coastal areas, lime and fly ash that have solidification and adsorption function, were selected as solidifying materials. Solidification effect, contamination intensity and soil density were taken as variable parameters. The external environment was simulated with the help of pressure leaching. The control effect of solidification on the migration of pollutants in soil was evaluated by the residual oil content and oil seepage of soil. Results show that solidification can improve the adsorption stability of pollutants and control its migration. Under the action of pressure leaching, the change rate of oil contents in the solidified contaminated soil is only 1.52%~2.27%, and the oil seepage is 7.15~14.92 mg/L, which meet the class III standard of *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB 8978—1996) of China. Solidification can solve the large-scale migration problem of pollutants caused by the change of soil density and pollution intensity in unsolidified contaminated soil, and the oil content after leaching is close to the initial oil content. Solidification of lime and fly ash has a stable control effect on pollutants and has universal applicability in the disposal of petroleum contaminated soil.

Keywords: petroleum-contaminated soil; migration control; solidification and reuse; lime and fly ash; pressure leaching

1 引 言

中国沿渤海湾三大油田(辽河、大港、胜利)

的石油储量达数十亿吨^[1]。石油在开采、冶炼、运输和使用等过程中会不可避免地造成沿海地区土体污染, 石油污染物具有不稳定性, 极易在土中发生

收稿日期: 2021-08-10

修回日期: 2022-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(No.51978235); 河北省自然科学基金(No.E2018202274); 河北省科技创新战略基金(No.20180602)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51978235), the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2018202274) and the Technology Innovation Strategy Foundation of Hebei Province(20180602).

第一作者简介: 李敏, 女, 1985 年生, 博士, 教授, 主要从事污染土的处置方面的研究。E-mail: limin0409@hebut.edu.cn

二次解吸及迁移扩散等行为,对人类健康和生态环境造成威胁^[2-3]。将石油污染土固化处理并进行工程再利用是一种良好的经济处置方式,是目前的研究热点^[4-6]。然而,石油是各种烷烃、环烷烃、芳香烃的混合物,控制土中石油污染物的迁移扩散是推进污染土工程再利用需要解决的关键科学问题。

石油类污染物进入土壤后,部分被吸附在土颗粒表面,乳化和溶解态的污染物可随水流向土层深处迁移或平面扩散^[7]。石油污染物在土中的迁移受环境条件、土体性质、污染程度等多种因素影响^[8-9]。pH 值和温度的提升,会减弱土壤对石油污染物的吸附作用,使污染物更容易在土中发生迁移^[10]。相同入渗条件下,柴油在砂土中的纵深迁移比在壤土中容易^[11-12]。石油污染物在土中的迁移深度与污染强度和淋滤总量成正比^[13]。

针对石油污染土的固化处理研究多集中于力学性能和工程应用:在石油污染高岭土中加入石灰和水泥,可提高污染土的无侧限抗压强度,降低浸出性和压缩指数^[14];硅酸盐水泥处理后污染土的力

学性能得到大幅改善,可用来支撑结构基础或道路路面结构^[15]。李敏等^[16-17]已证实石灰粉煤灰可提高盐渍土对石油污染物的吸附稳定速率和吸附量,固化处理后的污染土强度可满足工程回用的路基规范要求。

依托滨海地区石油污染盐渍土的处置需求,在已有研究基础上,考虑固化作用、土体密度、污染强度(初始含油量)的影响,搭建加压淋滤试验平台模拟外界环境,通过分析滤后含油量及渗出石油量的变化规律,评价固化作用对盐渍土中石油污染物迁移的控制性。研究结果可为石油土体的评估、控制及修复利用提供数据支持,助于推进石油污染土资源化利用的实现。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

2.1.1 试验原料

试验用盐渍土取自天津市滨海新区,其物理化学指标见表 1。

表 1 盐渍土的物理化学指标
Table 1 Physical and chemical indexes of saline soil

含盐量/%	风干含水率/%	稠度指标			粒径分布%				
		液限/%	塑限/%	塑性指数	<0.005 mm	0.01~0.005 mm	0.05~0.01 mm	0.075~0.05 mm	>0.075 mm
3	2.4	30.6	18.8	11.8	46.4	12.7	37.2	1.5	2.2

试验用油取自天津市大港区油田,为深棕色半流体状轻质原油,密度为 0.858 g/cm^3 ,主要由碳、氢元素组成,含少量氧、硫、氮元素,及微量磷、砷、镍、铁、钒等元素,具有一定的挥发性、溶解性、黏滞性和毒性。

2.1.2 固化材料

优选兼具吸附及固化作用的环境友好型建筑材料——石灰和粉煤灰为固化材料^[18]。石灰取自河北省鑫阳钙业有限公司,为袋装生石灰,有效钙镁成分含量为 80%;粉煤灰取自天津杨柳青电厂,结构呈多孔蜂窝状,主要由煤灰和炉渣组成(质量比为 7:3),平均比表面积为 $0.812 \text{ m}^2/\text{g}$,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 。

2.2 试验设计及方法

2.2.1 试验装置及试样制备

自行搭建的加压淋滤试验平台见图 1。据石油污染土的已有研究可知,石油污染区域主要集中于距地表 10 cm 以内的土壤中^[19],石油污染物会导致土体结构松散,降低土体的持水性和渗透性^[20]。为

保证研究内容充足有效,试样直径×高度选择 $7 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$,顶部放置透水石并设一定的缓冲区域。考虑淋滤液压力对土体结构的影响及淋滤的充足性,通过预试验确定试验总压力维持在 100 kPa,整体运行时间为 5 h。

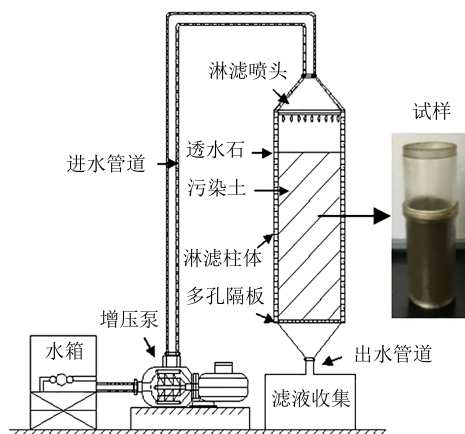


图 1 试验装置
Fig.1 Test device

淋滤液经泵增压后通过进水管及淋滤喷头均匀作用于试样上方。底端渗出液经出水管后进行收集检测。

综合已有文献中石油含量分布、固化剂的掺量以及滨海盐渍土的饱和度^[21-23], 采用人工配制石油污染土, 设计参数见表 2。含油量及固化材料的掺量均以干土质量百分比计算。

表 2 试验设计参数
Table 2 Test design parameters

土体含油量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	土体密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	取样深度/cm	固化材料掺量/%	
			石灰	粉煤灰
20, 30, 60, 90, 120, 150, 180	1.4, 1.5, 1.6	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14	10	20

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24], 在风干过 2 mm 筛的盐渍土中注入蒸馏水, 混合均匀后静置浸润 24 h, 加入相应比例的石油拌匀密封; 7 d 后将相应比例的生石灰和粉煤灰同时掺入污染土中混合均匀 (未固化污染土不考虑此步骤), 采用手动轻型击实仪进行制样, 然后置于恒温恒湿养护箱中养护 28 d。以未固化石油污染土为对照组。

2.2.2 土中真实含油量测定

采用超声-紫外法测定试样中的石油含量^[22]。以 2 cm 为间隔进行分层取样, 为保证取样的随机性, 每层选取 5 个不同点 (见图 2)。所取点样在 70 °C 条件下烘干后经石油醚萃取、离心、稀释、定容, 结合紫外分光光度计所测吸光度及标准曲线获取石油浓度值。

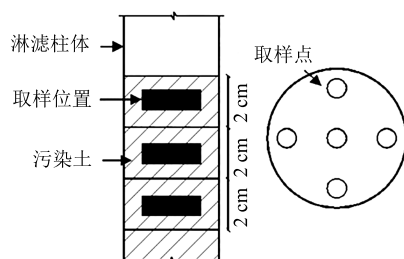


图 2 取样点分布图

Fig.2 Distribution diagram of sampling points

考虑土中石油污染物在烘干时存在一定的挥发性, 配制已知浓度石油污染土试样, 在同等条件下烘至恒重。按上述超声-紫外法测定烘干后污染土中的石油含量, 得出石油挥发率与含油率呈线性关系 (见图 3), 石油挥发系数 $\lambda = 0.2073$ 。结合上述石油浓度值, 即可求出土中真实含油量。

2.2.3 渗出液中含油量测定

在待测水样中加入石油醚, 放置于恒温振荡器中充分振荡后静置至形成石油醚和水的分层液面, 稳定后用移液管将上层石油醚溶液转移至比色管中, 在紫外分光光度计下测量其吸光度, 通过石油浓度与吸光度关系曲线获取渗出石油量。

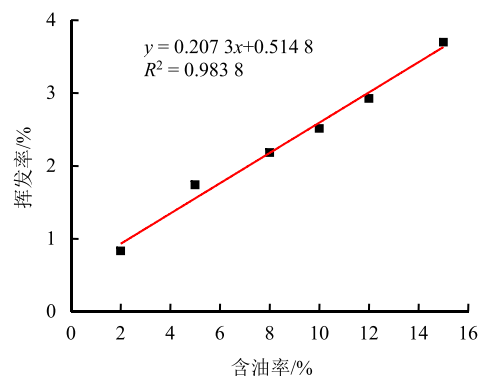


图 3 污染土中石油挥发率与含油率关系曲线

Fig.3 Relationship between oil volatilization rate and oil content in contaminated soil

3 结果分析与讨论

3.1 淋滤作用下未固化污染土及固化污染土中滤后含油量的分布规律

未固化污染土对淋滤作用反应强烈, 滤后含油量显著降低, 如图 4 所示。当未固化污染土的初始含油量为 30~180 mg/g 时, 其平均滤后含油量为 19.55~24.95 mg/g, 含油量变化范围为 34.83%~86.14%。不同初始含油量条件下的污染土滤后含油量接近, 说明盐渍土对石油污染物存在最大吸附容量, 超出容量的石油污染物易受外界因素的影响二次解吸迁移和扩散。

固化污染土的平均滤后含油量为 29.32~177.25 mg/g, 与初始含油量接近, 含油量变化范围为 1.52%~2.27%, 远小于未固化污染土。说明固化作用提高了石油污染物的吸附稳定性, 改善了污染土对淋滤作用的敏感性。这是因为固化污染土中粉煤灰表面的硅醇基及硅醚基有较强吸附的偶极矩, 可实现对石油污染物的强吸附^[25], 同时石灰中的 Ca^{2+} 与土中的铝硅酸盐反应生成水化胶凝产物^[26], 将相邻的土颗粒与石油分子粘在一起, 增强试样整体结构稳定性, 有效控制石油污染物在土中的迁移。

3.2 淋滤作用下未固化污染土及固化污染土的渗出含油量分布规律

未固化污染土的渗出石油量随土体污染程度的增加而增加 (见图 5), 当土中初始含油量为 20 mg/g

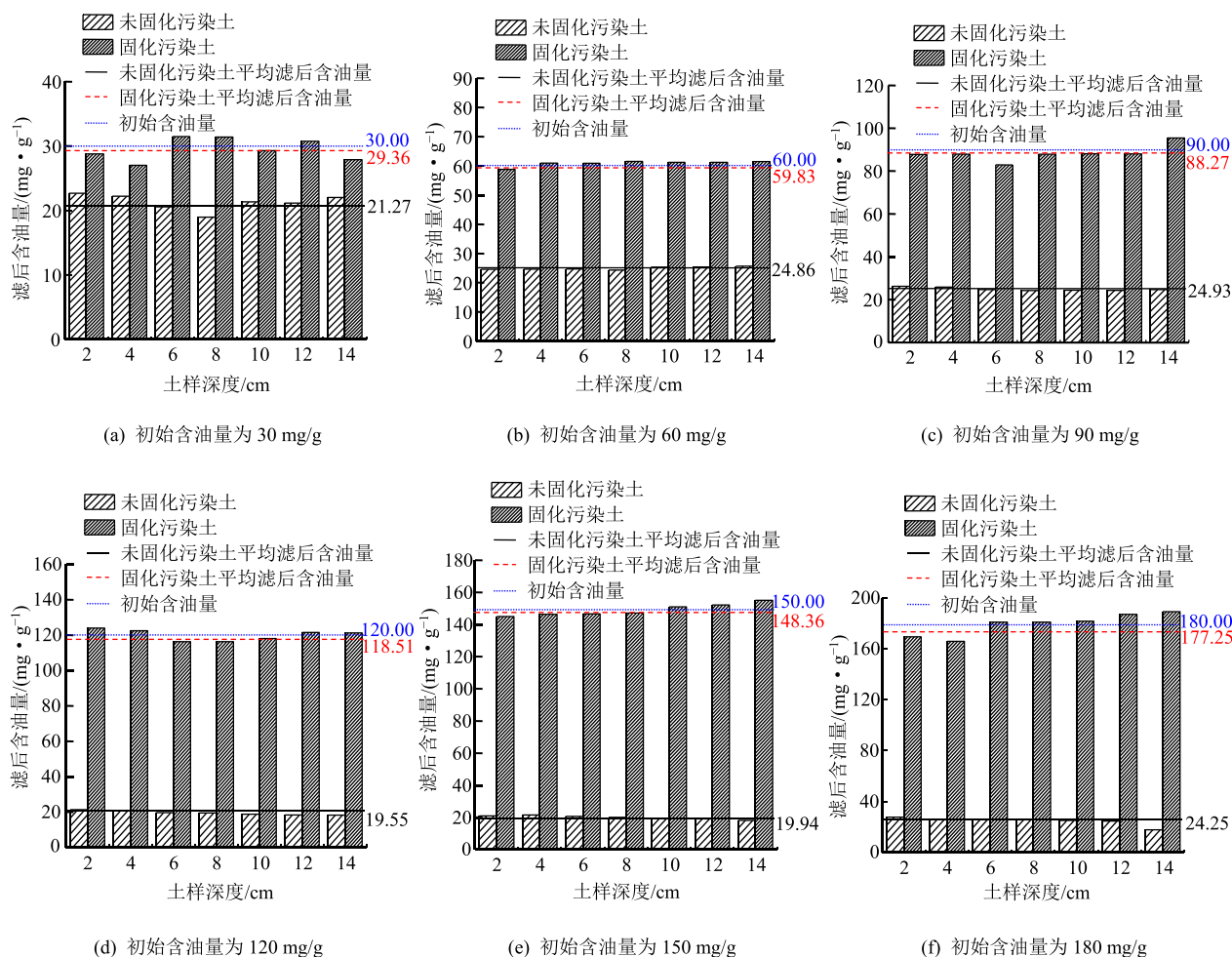
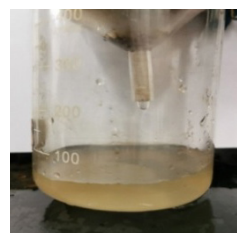
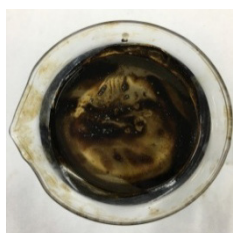


图4 固化及未固化污染土滤后含油量分布图

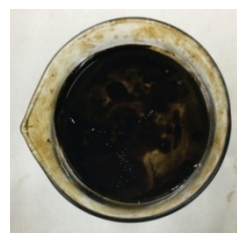
Fig.4 Distribution of leached oil content of contaminated soils with and without solidification



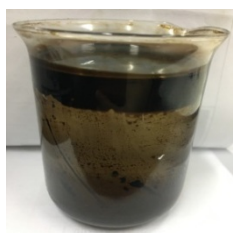
(a) 初始含油量为 20 mg/g



(b) 初始含油量为 30 mg/g



(c) 初始含油量为 60 mg/g



(d) 初始含油量 ≥90 mg/g

图5 未固化污染土的石油渗出现象

Fig.5 Oil seepage of contaminated soil without solidification

时, 渗出液呈淡黄色, 存在土颗粒流出现象 (见图 5(a))。这是因为当土中含油量较低时, 石油分子与土颗粒呈强结合状态, 吸附稳定性好。同时验证了第 3.1 节中所述盐渍土对石油污染物存在最大吸附容量的现象。当土中含油量逐渐增加 ($>30 \text{ mg/g}$), 渗出液含油量逐渐增多, 超出盐渍土容纳范围的石油分子与土颗粒解吸后随淋滤液一起渗出土体, 在渗出液表面可观察到漂浮着的厚重油层 (见图 5(b)~5(d))。

固化作用可显著改善石油污染物的渗出问题, 在含油量为 $30 \sim 180 \text{ mg/g}$ 的污染条件下, 固化污染土的渗出液均呈清澈透明状态, 肉眼无法从渗出液中观测到石油污染物 (见图 6)。将渗出液收集检测, 固化污染土的渗出含油量为 $7.15 \sim 14.92 \text{ mg/L}$ (见表 3), 小于《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 三级标准^[27] (30 mg/L)。证实石灰和粉煤灰联合固化作用提高了盐渍土对石油污染物的吸附稳定性, 能有效控制石油污染物的再次解吸及迁移扩散行为。

通过式(1)计算土体的渗透系数,结果见表4。

$$K = \frac{\frac{Q}{H} \times L}{A \times \Delta h} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数(cm/s); Q 为渗出液体积(mL); H 为淋滤时间(s); L 为试样长度(cm); A 为试样横截面积(cm^2); Δh 为水头差(cm)。



(a) 初始含油量为 30~90 mg/g

(b) 初始含油量为 120~180 mg/g

图 6 固化污染土的石油渗出现象

Fig.6 Oil seepage of contaminated soil with solidification

表 3 固化污染土的渗出石油量

Table 3 Oil seepage of contaminated soil with solidification

序号	初始含油量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	渗出石油量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	30	12.88
2	60	12.98
3	90	13.38
4	120	9.35
5	150	7.15
6	180	14.92

未固化污染土的渗出液体积及渗透系数随土体初始含油量的增加而增加(见表4),当初始含油量为 180 mg/g 时渗透系数略降低。分析原因是盐渍土内存在盐晶体析出现象^[28],析出的盐晶体填充在土体孔隙中,与石油分子共同阻碍水分在孔隙通道内的运移,影响土体的渗透性能^[29]。当土中石油污染物增多,吸附在土颗粒表面的水分子会受石油分子的影响游离在土颗粒外围,溶解土体孔隙中的盐晶体,相对提高了土体的渗透性。当土中含油量超过一定范围,会形成疏水表面,土体内水分子的流动阻力增大,渗透性反而降低。

表 4 固化与未固化石油污染土的渗透系数

Table 4 Permeability coefficient of oil contaminated soil with and without solidification

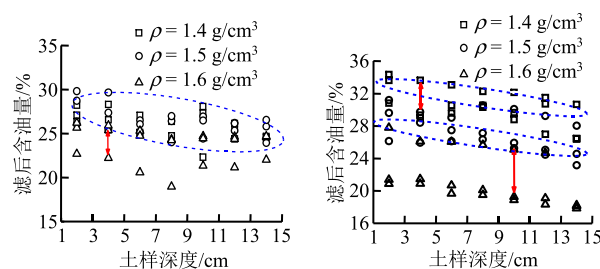
序号	初始含油量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	渗出液体积		渗透系数	
		未固化土/ mL	固化土/ mL	未固化土/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	固化土/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	30	10	3 500	0.55×10^{-6}	1.92×10^{-4}
2	60	50	3 700	2.75×10^{-6}	2.03×10^{-4}
3	90	150	4 500	8.26×10^{-6}	2.47×10^{-4}
4	120	165	4 900	9.08×10^{-6}	2.69×10^{-4}
5	150	178	5 600	9.80×10^{-6}	3.08×10^{-4}
6	180	150	6 000	8.26×10^{-6}	3.30×10^{-4}

固化污染土的渗出液体积(3 500~6 000 mL)远大于未固化污染土(10~150 mL),固化污染土的渗透系数随土体初始含油量的增加而增加,为 $1.92 \times 10^{-4} \sim 3.30 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,相比于未固化污染土的渗透系数($0.55 \times 10^{-6} \sim 9.80 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$),增加了两个数量级。这是因为石油分子的存在使污染土呈斥水性^[30],当对污染土进行固化处理后,粉煤灰能有效吸附石油污染物,同时石灰粉煤灰进行火山灰反应的生成物能将石油分子包裹在土体内部^[14],弱化石油分子对土体渗透性的影响,极大减弱了土体内水分子的流动阻力,提高了固化污染土的渗透性。

3.3 淋滤作用下土中石油污染物迁移的影响因素分析

3.3.1 土体密度的影响

在未固化污染土中,土体密度的增加会加快石油污染物在污染土内的迁移,初始含油量越高,密度的影响越明显(见图7)。由图7(a)可知,在较低初始含油量下(30~90 mg/g),密度为 1.4、1.5 g/cm^3 试样的滤后含油量接近,密度为 1.6 g/cm^3 试样的滤后含油量略低。由图7(b)可知,在较高初始含油量下(120~180 mg/g),3 种密度下的滤后含油量差距增大,密度越大的试样淋滤后土中石油污染物含量越少。这是因为在试样击实过程中,密度越大的土体受到的击实功越大,土体内形成的微裂隙越多,构成的毛细管数量也相应增多^[31]。污染土内的毛细管孔道被油-水两相填充,石油污染物的流向主要取决于毛细管两端的压差。试验时淋滤液的渗入会使土体内的毛细管水压上升,相应存在于土内的石油分子会向下迁移,被排出毛细管,随淋滤液渗出土体,因此密度越大的土体渗出的石油量越多。同时,土体含油量越高,填充进毛细管的石油分子较多,导致这一效果越明显。这与李兴柏^[32]的研究一致。



(a) 初始含油量为 30~90 mg/g

(b) 初始含油量为 120~180 mg/g

图 7 不同密度下未固化污染土滤后含油量沿深度分布图
Fig.7 Distribution of leached oil content along depth of contaminated soil without solidification for different densities

固化作用可弱化土体密度对石油污染物迁移的影响, 初始含油量为 30~180 mg/g 时, 3 种密度的试样内含油量变化趋势一致, 数值接近, 均在初始含油量上下浮动, 石油污染物仅在固化污染土体内部进行微量迁移 (见图 8)。

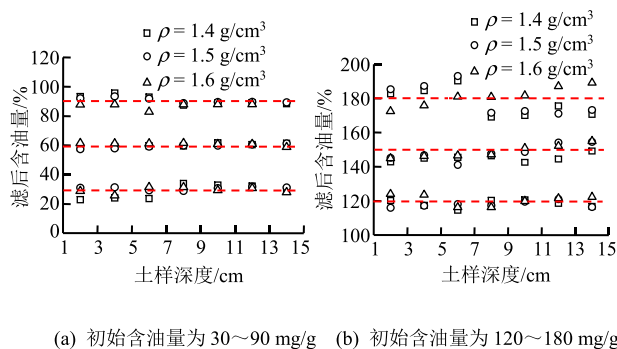


图 8 不同密度下固化污染土滤后含油量沿深度分布图
Fig.8 Distribution of leached oil content along depth of contaminated soil with solidification for different densities

图 9 为固化与未固化污染土的微观检测图。由图可知, 未固化作用下, 石油污染物进入盐渍土中后会将土颗粒包裹形成一层“油膜”, 降低土颗粒之间的连接, 在土体内部形成较大的孔隙通道 (见图 9(a)、9(b)); 而石灰和粉煤灰的固化反应改变了污染土的质地和结构 (见图 9(c)、9(d)), 碳化及硅酸化反应^[33-34]形成的网状的骨架式结构体将土颗粒联结并包裹起来形成集聚体, 减小土体孔隙, 增强污染土的结构, 进而缓解了毛细作用对土中石油污染物迁移的影响。

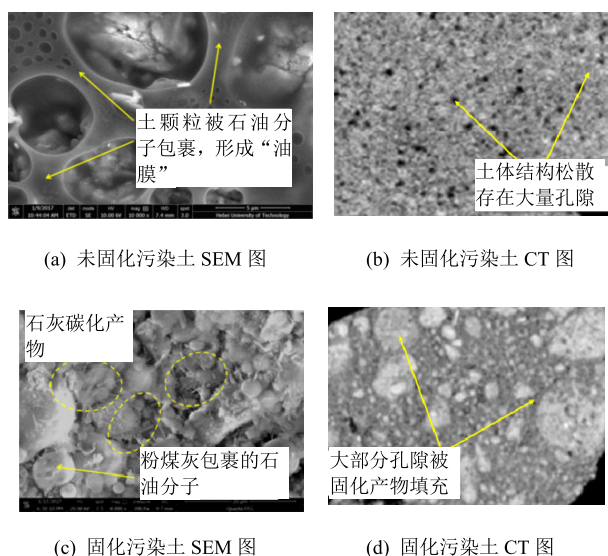


图 9 固化及未固化污染土的微观检测图
Fig.9 Microscopic inspection diagram of contaminated soil with and without solidification

3.3.2 污染强度 (初始含油量) 的影响

将滤后含油量较初始含油量的改变率定义为迁移率, 单位为%。以迁移率为指标评价分析强度的影响 (见图 10)。未固化条件下, 污染强度对土中重金属污染物迁移影响显著, 当初始含油量由 30 mg/g 增大到 180 mg/g 时, 其不同土层的迁移率由 24.44% 增大至 90.08%, 污染强度越大, 超出土体吸附容量的污染物越多, 迁移率越大。污染强度直接决定着未固化污染土对环境的影响度。

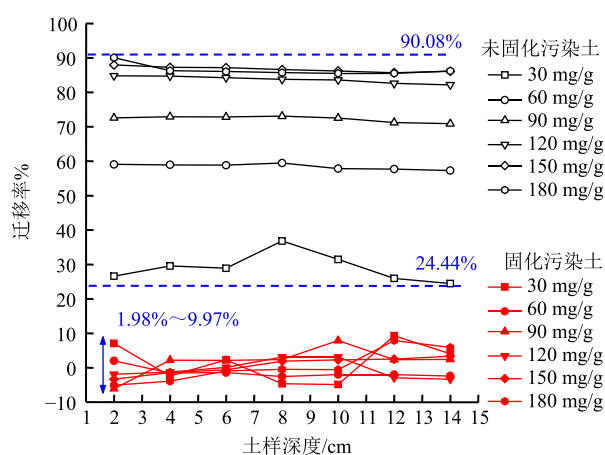


图 10 不同污染强度下固化及未固化污染土中污染物迁移率沿深度分布图

Fig.10 Distribution of contaminant migration rate along depth of contaminated soil with and without solidification under different contamination intensities

对于固化污染土, 在所有污染强度下, 固化污染土中的滤后含油量均接近于初始含油量, 各污染强度下的迁移率的变化范围为 1.98%~9.97%, 远小于未固化污染土的 24.44%~90.08%。因此, 污染强度对固化作用控制迁移效果的影响较小, 石灰粉煤灰的固化作用在石油污染土处置方面具有普遍适用性。

4 结 论

(1) 固化污染土平均滤后含油量均与初始含油量接近, 各截面含油量变化范围为 1.52%~2.27%, 远小于未固化污染土的 34.83%~86.14%。固化作用可有效控制石油污染物在土中各层面的迁移。

(2) 固化作用可解决未固化土中石油污染物大量滤出问题, 滤出液清澈, 渗出含油量仅为 7.15~14.92 mg/L, 满足《污水综合排放标准》三级标准。固化作用对石油污染物具有良好的吸附稳定性。

(3) 在土体密度、污染强度因素改变条件下, 固化污染土中的滤后含油量均接近于初始含油量,

各污染强度下污染物的迁移率的变化范围为1.98%~9.97%, 固化作用可解决未固化污染土中因土体密度、污染强度变化而引起的污染物大幅度迁移问题。固化作用对迁移的控制效果稳定, 石灰和粉煤灰的固化作用在石油污染土处置方面具有普遍适用性。

参 考 文 献

- [1] 张玮. 渤海海域原油特征及油源分析[J]. 内江科技, 2018, 39(10): 90-92.
ZHANG Wei. Characteristics and source analysis of crude oil in Bohai Sea area[J]. *Neijiang Science and Technology*, 2018, 39(10): 90-92.
- [2] MA Jie, LIU Hui, TONG Lei, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and n-alkanes in the soil-sediment profile of Jiangnan Oil Field, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(15): 13344-13351.
- [3] TANG Jun-hong, WANG Guo-jian, YIN Hao-yong, et al. Methane in soil gas and its transfer to the atmosphere in the Yakela condensed gas field in the Tarim Basin, Northwest China[J]. *Petroleum Science*, 2013, 10(2): 183-189.
- [4] LI Yi-rui, ZENG Xiao-hui, ZHOU Jun-liang, et al. Incorporation of disposed oil-contaminated soil in cement-based materials[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2020, 160: 104838.
- [5] YU Chuang, LIAO Rao-ping, ZHU Chao-peng, et al. Test on the stabilization of oil-contaminated Wenzhou clay by cement[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018(5): 9675479.
- [6] KARAMALIDIS A K, VOUDRIAS E A. Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: leaching behavior of alkanes and PAHs[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(1-2): 122-135.
- [7] BALSEIRO-ROMERO M, MONTERROSO C, CASARES J J. Environmental fate of petroleum hydrocarbons in soil: review of multiphase transport, mass transfer, and natural attenuation processes[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(6): 833-847.
- [8] VURUNA M, VELIČKOVIĆ Z, PERIĆ S, et al. The influence of atmospheric conditions on the migration of diesel fuel spilled in soil[J]. *Archives of Environmental Protection*, 2017, 43(1): 73-79.
- [9] 薛镇坤, 左锐, 王金生, 等. 石油烃在非均质包气带中的吸附作用及迁移规律[J]. 环境科学研究, 2020, 33(4): 1028-1036.
XUE Zhen-kun, ZUO Rui, WANG Jin-sheng, et al. Migration of petroleum pollutants in strong heterogeneous vadose zones[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(4): 1028-1036.
- [10] SZYMANSKI K, ANOWSKA B. Migration of pollutants in porous soil environment[J]. *Archives of Environmental Protection*, 2016, 42(3): 87-95.
- [11] 宁丽, 曾溅辉, 陈广. 柴油在土壤中迁移的试验模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 4(3): 1-6.
NING Li, ZENG Jian-hui, CHEN Guang. Simulated study on the migration process and effects of diesel oil on the soil properties[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 4(3): 1-6.
- [12] 潘峰, 陈丽华, 付素静, 等. 石油类污染物在陇东黄土塬区土壤中迁移的模拟试验研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 410-418.
PAN Feng, CHEN Li-hua, FU Su-jing, et al. A study on the transport performance of the petroleum contaminants in soil of the Longdong loess plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 410-418.
- [13] 陈丽华, 周立辉, 张彧瑞, 等. 陇东油区包气带土壤对原油吸附行为[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 56-60.
CHEN Li-hua, ZHOU Li-hui, ZHANG Yu-rui, et al. Crude oil adsorption behaviors in the soil of Longdong oilfield[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, 47(2): 56-60.
- [14] OLUWATUYIA O E, OJURI O O, KHOSHGHALB A. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(1): 160-167.
- [15] AKINWUMI I I, BOOTH C A, DIWA D, et al. Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2016, 169(40): 336-345.
- [16] 李敏, 孟德骄, 姚昕好. 基于温度效应下二灰固化石油污染滨海盐渍土力学特性优化固化需求[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1203-1210.
LI Min, MEGN De-jiao, YAO Xin-yu. Optimization of requirement for two kinds of ash solidified materials used in oil contaminated saline soil considering temperature sensitivity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1203-1210.
- [17] 李敏, 董一凡, 上官中华, 等. 石灰、粉煤灰改性对盐渍土吸附石油污染物行为的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 53-59.
LI Min, DONG Yi-fan, SHANGGUAN Zhong-hua, et al. Influence of property-modified lime and fly ash on oil

- absorption behaviors of saline soil[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2019, 41(2): 53-59.
- [18] LI Min, MA Cong, SUN Zhao-ming, et al. Mechanical properties distribution of lime-fly ash solidified oil contaminated soil in a coastal environment[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2020, 6: 1-16.
- [19] 刘晓艳, 史鹏飞, 孙德智, 等. 大庆土壤中石油类污染物迁移模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006(2): 120-124.
- LIU Xiao-yan, SHI Peng-fei, SUN De-zhi, et al. Transferring simulation of petroleum pollutants in soils of Daqing area[J]. **Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)**, 2006(2): 120-124.
- [20] ABOUSNINA R M, MANALO A, SHIAU J, et al. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand[J]. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, 2015, 24(8): 833-845.
- [21] SAYED ALIREZA NASEHI, ALI UROMEIHY, MOHAMMAD REZA NIKUDEL, et al. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2016, 34(1): 333-345.
- [22] 李敏, 王宸, 谢首斌. 石油污染水平对固化参数的需求分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3252-3261.
- LI Min, WANG Chen, XIE Shou-bin. Analysis of requirement of oil contaminated level for solidified parameters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.1): 3252-3261.
- [23] 李敏, 王宸, 谢首斌. 二灰固化石油污染盐渍土的力学增强演变机制[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018, 35(2): 119-127.
- LI Min, WANG Chen, XIE Shou-bin. Formation and development of oil contaminated saline soil solidified with lime and fly ash[J]. **Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)**, 2018, 35(2): 119-127.
- [24] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [25] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. 岩土力学, 1991, 12(3): 11-23.
- YANG Zhi-qiang, GUO Jian-yang. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1991, 12(3): 11-23.
- [26] 张豫川, 姚永国, 周泓. 长龄期改良黄土抗剪强度与渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 2): 170-176.
- ZHANG Yu-chuan, YAO Yong-guo, ZHOU Hong. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Suppl.2): 170-176.
- [27] 北京市环境保护科学研究院. GB 8978—1996 污水综合排放标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1996.
- Beijing Institute of Environmental Protection. GB 8978—1996 Integrated wastewater discharge standard[S]. Beijing: China Planning Press, 1996.
- [28] 刘力, 万旭升, 王智猛, 等. 硫酸钠盐渍土渗透特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(6): 628-634.
- LIU Li, WAN Xu-sheng, WANG Zhi-meng, et al. Study of permeability of sodium sulfate saline soil[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2020, 60(6): 628-634.
- [29] 郑西来, 张俊杰, 梁春. 石油污染多孔介质水动力效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 286-291.
- ZHENG Xi-lai, ZHANG Jun-jie, LIANG Chun. Hydrodynamic effects in oil-contaminated porous medium[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2011, 40(2): 286-291.
- [30] MOHAMMAD KERMANI, TAGHI EBADI. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils[J]. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, 2012, 21(5): 655-671.
- [31] 周良忠, 郑颖人, 冯遗兴. 浅探毛细管在地基土强夯加固中的作用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 121-123.
- ZHOU Liang-zhong, ZHENG Ying-ren, FENG Yi-xing. Study on soil capillary stabilization action in dynamic consolidation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 121-123.
- [32] 李兴柏. 多年冻土区石油污染物迁移试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- LI Xing-bai. Experimental study on migration of oil contaminants in permafrost regions[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [33] AL-MUKHTAR M, KHATTAB S, ALCOVER J-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil[J]. **Engineering Geology**, 2012, 139-140: 17-27.
- [34] FATIMA GUERIDI, ZOHRA DERRICHE. Strength development and lime consumption progress relationship in lime stabilized bentonite samples[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80: 5505-5514.