

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.029



石灰、粉煤灰改性对盐渍土吸附石油污染物行为的影响

李敏^{1a, 1b}, 董一凡^{1a}, 上官中华², 秦向鹏^{1a}

(1. 河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;

2. 中国地质调查局 西安地质调查中心; 西安中地环境科技有限公司, 西安 710054)

摘要:有效调控污染物的运移是实现污染土工程再利用的前提。考虑石油污染盐渍土的特殊性及工程利用的力学需求, 优选石灰和粉煤灰为改性材料, 结合静态-动态试验, 研究石灰和粉煤灰对滨海盐渍土中石油污染物的吸附-解吸行为的影响。结果表明: 单独的石灰和粉煤灰, 对石油污染物的吸附率分别为 26% 和 14%, 两者联合作用时, 吸附率提高到 39%, 在盐渍土中加入石灰和粉煤灰可有效提高对石油污染物的吸附量, 加快吸附稳定速率; 盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土对石油的吸附动力学均符合 Lagergren 二级动力学非线性方程, 联合作用可使吸附平衡时间由 400 min 缩短至 60 min; 石灰、粉煤灰有利于吸附赋存于土颗粒孔隙中未被盐渍土颗粒吸附的呈自由态的石油; 盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土对石油污染物的吸附等温线均为非线性 Freundlich 模式; 石油被解吸的能力依次为盐渍土>粉煤灰+盐渍土>石灰+盐渍土>石灰+粉煤灰+盐渍土, 石灰+粉煤灰对石油污染物的吸附以化学吸附为主, 具有不可逆性, 有助于缓解环境温度的影响, 增强稳定性。

关键词:石油污染土; 吸附-解吸动力学; 吸附热力学; 石灰; 粉煤灰

中图分类号: TU448 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)02-0053-07

Influence of property-modified lime and fly ash on oil absorption behaviors of saline soil

Li Min^{1a, 1b}, Dong Yifan^{1a}, Shanguan Zhonghua², Qin Xiangpeng^{1a}

(1a. School of Civil and Transportation Engineering; 1b. Hebei Research Center of Civil Engineering

Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China; 2. Xi'an Center

of Geological Survey, CGS; Xi'an Zhongdi Environmental Science and Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, P. R. China)

Abstract: Control of pollutant migration is the prerequisite for the reuse of contaminated soil. Considering the properties of contaminated saline soil and the mechanical demand in engineering utilization, lime and fly ash were chosen optimally as treated materials. The influence of lime and fly ash on adsorption-desorption behaviors of oil contamination in inshore saline soil were studied via static and dynamic tests. Results indicate that: under the individual action of lime and fly ash, the oil adsorption rate is increased by 26% and

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51409079, 41272335); 河北省自然科学基金(E2018202274)

作者简介: 李敏(1985-), 女, 副教授, 博士, 主要从事污染土的修复及再利用研究, E-mail: limin-0409@163.com.

Received: 2018-06-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41272335, 51409079); Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018202274)

Author brief: Li Min (1985-), associate professor, PhD, main research interests: remediation and reuse of contaminated soil, E-mail: limin-0409@163.com.

14%, respectively, and it increases by 39% as combine. As a conclusion, lime and fly ash can effectively increase adsorption rate and improve adsorption rate of oil contamination. Adsorption kinetics of saline soil, lime + saline soil, fly ash + saline soil, lime + fly ash + saline soil on oil contamination conform to the dynamic nonlinear equation of Lagergren second-level dynamics. The adsorption equilibrium time of saline soil was 400 min and it reduced to 60 min for lime and fly ash. Lime and fly ash is beneficial to adsorb the free oil which cannot be adsorbed by saline soil. The adsorption isotherms of saline soil, lime + saline soil, fly ash + saline soil, lime + fly ash + saline soil are non-linear Freundlich models. Adsorption of oil contamination for lime + fly ash is an irreversible chemical process, which can help to reduce the influence of ambient temperature and enhance stability.

Keywords: oil contamination soil; adsorption-desorption kinetics; adsorption thermodynamics; lime; fly ash

石油作为一种含有多种烃类及少量其他有机物的复杂混合物,存在致癌、致畸、致突变的风险^[1]。石油污染土体后,一部分被土颗粒中的矿物质和有机质吸附,另一部分则会在水动力的驱动下,继续向土体内部迁移,造成大面积的土体污染^[2-4]。被土颗粒吸附的石油具有不稳定性,温度、含水率等因素的变化均会使被土颗粒吸附的石油重新发生解吸,成为二次污染源^[5-6]。改性固化以实现其工程再利用是污染土的处置理念之一^[7],有效控制土中污染物的迁移是需解决的关键问题^[8-9]。

针对土体与石油间吸附性的研究集中于非盐渍土:水中细小的油微粒在黄土表面上的粘附速度很快,10 min 即可基本达到平衡^[10]。石油的吸附量与土壤粒径及 pH 值的大小成反比,并随土壤有机质含量的升高而增大^[11]。由于蒙脱石比表面积较大,且含有部分金属离子,当土中加入蒙脱石等吸附剂进行改性后,对石油的吸附量有很大提高^[12]。Linear 吸附关系可描述原油在土体中的吸附状况,有机质含量会影响原油的吸附量^[13];较高的介质盐

度和较低的温度有利于重油在沉积物上的吸附,吸附速率方程可用伪二级动力学模型描述^[14];高岭石对沥青质的吸附等温线符合 Langmuir 吸附等温式^[15];多环芳烃类物质浓度为 100~1 000 $\mu\text{g/L}$ 时,土体对芳烃类物质的吸附符合 Freundlich 等温吸附模型^[16]。

石油污染引发盐渍土斥水性增强的特性为实现其工程再利用提供了切入点。综合考虑目前盐渍土较成熟的固化技术及用于含油废水/油污染水的处置材料,优选石灰、粉煤灰为改性材料,借助静态-动态吸附试验,探索石灰、粉煤灰单一及联合作用对滨海盐渍土中石油污染物的吸附动力学及吸附热力学行为的影响。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

盐渍土取自天津滨海新区,基本物理性质指标见表 1;石油为天津大港油田开采;石灰、粉煤灰取自天津蓟县石灰生产厂及电厂,参数指标见表 2。

表 1 滨海盐渍土的基本性质

Table 1 Basic characteristics of saline soil in inshore

含盐类型	含盐量/%	初始含水率/%	粒径分布/%				
			<0.005 mm	0.01~0.005 mm	0.05~0.01 mm	0.075~0.05 mm	>0.075 mm
NaCl	2.64	3	46.4	12.7	37.2	1.5	2.2

表 2 石灰和粉煤灰的主要成分

Table 2 Main components of the lime and fly ash

(mass ratio, %)

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
石灰	1.08			85.5	3.5
粉煤灰	55.1	21.91	10.25	3.51	1.47

1.2 试验方法

1.2.1 石油悬浮溶液的配制 取 3 个带瓶盖的四

角方瓶,分别加入 600 mL 蒸馏水,用吸管向四角方瓶中滴入 0.2、0.4、0.6 g 石油,置于恒温振荡器(上海一恒科学仪器有限公司)中振荡 4 h。在振荡过程中,借助四角方瓶的棱角把石油均匀打散成细小颗粒,进而均匀分散在水中。试验过程中发现:1:3 000 悬浮液浓度较低;1:1 000 悬浮液不易被打散,溶液中仍有大块的块状石油;1:1 500 悬浮液中石油颗粒较小,且分布均匀,测量平均浓度为

105.09 mg · L⁻¹。经比较,确定选取 1 : 1 500 石油悬浮液进行吸附试验。

1.2.2 吸附动力学测定 分别取盐渍土和掺加不同配比的石灰(干土质量的 6%、8%、10%)和粉煤灰(干土质量的 20%、25%、30%)的混合土各 12 g,石灰及粉煤灰配比参数的选定依据盐渍土固化研究中得出的最优配比及粉煤灰处理含油废水的配比^[17-18]。将混合土样放入 600 mL 锥形瓶中,每个锥形瓶加入 300 mL 配置好的石油悬浮溶液,在恒温器中进行振荡(150 r/min,恒温 25 °C),振荡时间为 1、8、20、60、120、40、360、720、1 440 min。利用离心机(上海安亭科学仪器厂)对混合液体进行固液分离(4 000 r/min,10 min),并用石油醚萃取上清液、定容,用紫外分光光度计(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)测量溶液中石油的浓度。通过对比前后石油浓度变化反算被吸附的石油含量。

1.2.3 吸附热力学测定 1)分别取不同配比混合土放入 600 mL 锥形瓶中,加入 300 mL 不同浓度石油悬浮溶液,在恒温 25 °C 条件下振荡 4 h(根据吸附动力学试验可得,土样在 4 h 内都能达到吸附平衡),测定石油浓度,获取吸附等温线;2)分别取不同配比混合土放入 600 mL 锥形瓶中,加入 300 mL 1 : 1 500 石油悬浮溶液,温度分别控制在 5、10、20、25、30、40 °C,振荡 4 h,测定石油浓度,重点分析温度的影响。

1.2.4 解吸动力学测定 分别称取 10 g 不同的石油污染土样,置于 600 mL 锥形瓶中,加入 300 mL 0.005 mol/L 的 CaCl₂ 溶液以维持溶液中离子的浓度。放入恒温振荡器中进行震荡,控制水温 25 °C,振荡速率为 150 r/min,控制震荡时间为 5 min,10 min,20 min,30 min,1 h,2 h,4 h,6 h,10 h,16 h,24 h,34 h,48 h,60 h。达到震荡时间后取出,利用电动离心机进行固液分离(4 000 r/min,10 min),并用石油醚萃取上清液、定容,用紫外分光光度计测量溶液中石油的浓度。

2 试验结果与分析

2.1 石灰和粉煤灰掺入盐渍土对石油污染物吸附动力学行为的影响

盐渍土对石油的吸附量随时间增加而增大。具体表现为,前 50 min 吸附速率呈线性增长;随后,吸附速率逐渐减小;400 min 后,曲线趋于稳定(图 1)。盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+石灰+盐渍土对石油的吸附平衡时间分别为 400、120、80、60 min。证实:石灰和粉煤灰有助于提高对

石油的吸附稳定速率。

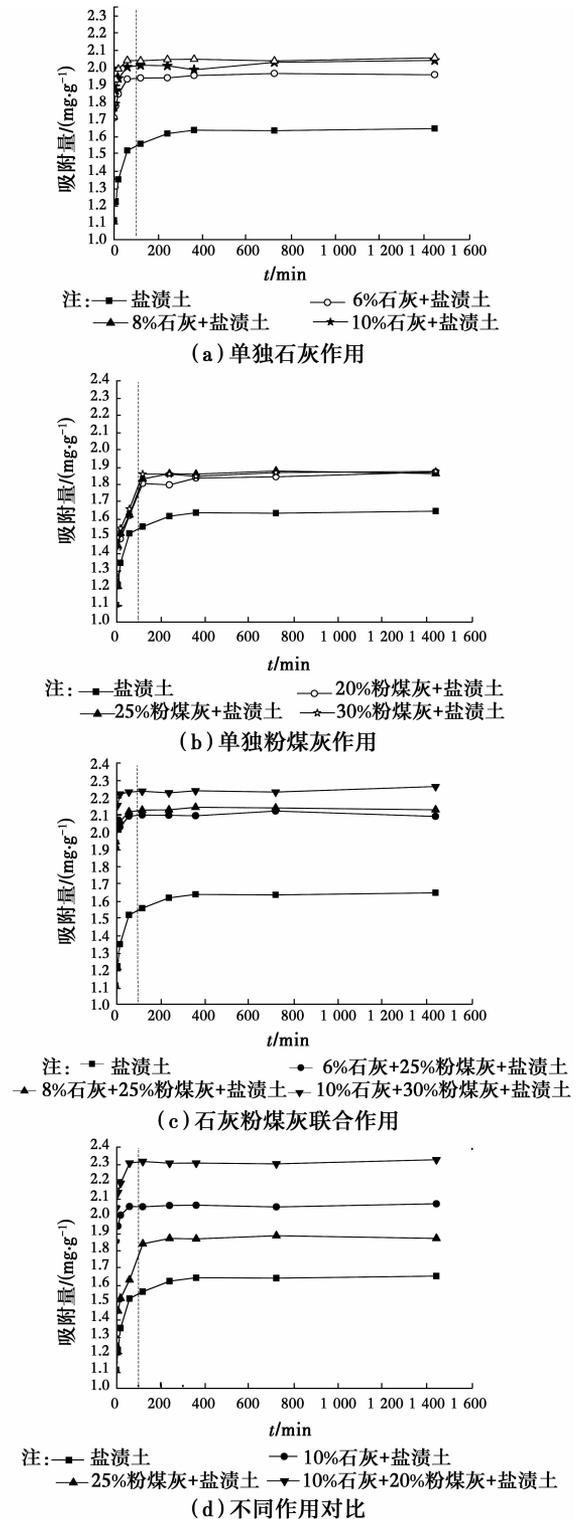


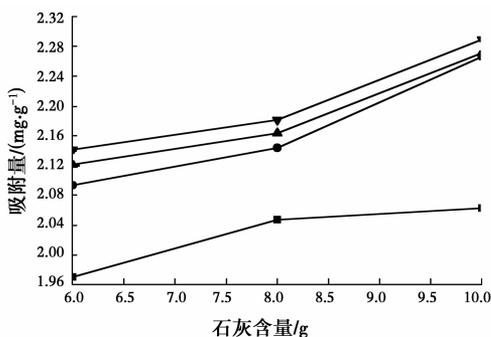
图 1 混合土对石油污染物的吸附动力学曲线

Fig. 1 Adsorption kinetics curves of soil samples for oil contamination

各种混合土样对石油污染物的平衡吸附量排序:石灰+粉煤灰+盐渍土(2.09~2.32 mg · g⁻¹)>石灰+盐渍土(1.95~2.05 mg · g⁻¹)>粉煤灰+盐渍土(1.83~1.86 mg · g⁻¹)>盐渍土(1.63 mg ·

g^{-1})。单一石灰(图 1(a))、粉煤灰(图 1(b))及联合作用(图 1(c))对石油污染物的吸附量较盐渍土分别提高 26%、14%、39%。石灰对石油污染物吸附性略强于粉煤灰(图 1(d))。通过比较图 1(c)和图 1(d),粉煤灰掺量为 30%时的吸附量小于掺量为 20%时的工况,可认为在掺加 10%石灰的情况下,粉煤灰的最优配比为 20%。当粉煤灰掺量超过 20%时,随着粉煤灰用量增加,石油吸附总量不再增加,故石油的单位吸附量呈下降趋势^[19]。

随着石灰和粉煤灰掺量的增加,对石油污染物的平衡吸附量也逐渐增大。石灰+粉煤灰+盐渍土对石油的最小平衡吸附量为 $2.09 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,大于单独掺加石灰和粉煤灰的最大平衡吸附量。粉煤灰和石灰在吸附石油方面存在相互联合作用(图 2)。单独石灰和粉煤灰作用下,对石油吸附曲线呈先后慢增长;两者联合作用时,吸附曲线呈先慢后快的上升趋势。对比石油污染土及 6%石灰+20%粉煤灰固化石油污染土的微观图片(图 3),土颗粒与石油污染物之间为物理吸附,被吸附石油呈油膜态、自由态赋存在土颗粒表面及孔隙中,油膜的张力导致两者间吸附的不紧密性;在石灰及粉煤灰的作用下,石灰和粉煤灰遇水发生火山灰反应,粉煤灰中的活性氧化硅与石灰电离出的 Ca^{2+} 形成 C—S—C 和 C—A—H 凝聚在土颗粒表面,与土颗粒胶结成为整体。一方面将更多的石油颗粒牢牢包裹其中,另一方面颗粒表面积的增加为石油的吸附提供更多的吸附质点^[20]。石灰和粉煤灰对石油污染物的吸附以化学作用为主,油膜可依据所产生的胶体形态,紧密附贴于其表面,具有较强吸附力。



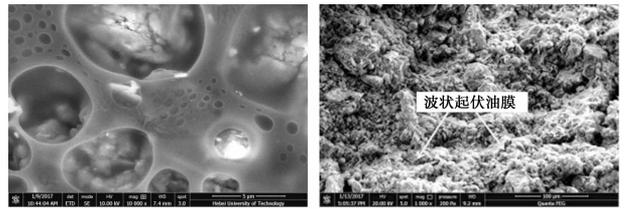
注: ■—0%粉煤灰 ●—20%粉煤灰 ▲—25%粉煤灰 ▼—30%粉煤灰

图 2 石灰粉煤灰掺量与石油吸附量间的关系

Fig. 2 Influence of lime and fly ash on oil adsorption

按 Lagergren 二级吸附动力学曲线对图 1(d) 曲线的数据进行拟合,以 t/q 对 t 作图^[17],见图 4。

二级速率方程线性模型为



(a) 石油污染土

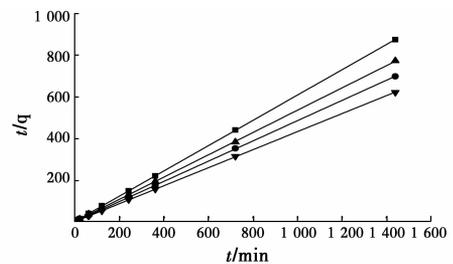
(b) 6%石灰+20%粉煤灰
固化石油污染土

图 3 石油污染土及固化石油污染土 SEM 照片

Fig. 3 SEM of treated and un-treated oil-contaminated soil

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{1}{q_e}t \quad (1)$$

式中: t 为吸附时间,单位为 min ; q 为吸附时间为 t 时的吸附量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_e 为吸附平衡时的吸附量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k 为二级吸附速率常数,单位为 $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}$ 。



注: ■ 盐渍土 ● 20%粉煤灰+盐渍土
▲ 25%粉煤灰+盐渍土 ▼ 30%粉煤灰+盐渍土

图 4 混合土对石油吸附中 t/q 与 t 间的关系

Fig. 4 Relationship between t/q and t of soil on oil

盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+石灰+盐渍土对石油污染物吸附过程符合二级动力学非线性方程,石灰和粉煤灰未改变吸附动力学模式。由方程斜率得平衡吸附量 q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$),由截距得速率常数 k ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}$) (表 3)。平衡吸附量和吸附速率大小依次均为:10%石灰+20%粉煤灰+盐渍土 > 10%石灰+盐渍土 > 25%粉煤灰+盐渍土 > 盐渍土。

表 3 石油吸附的二级速率方程拟合数据参数

Table 3 Parameters of the second order rate equation

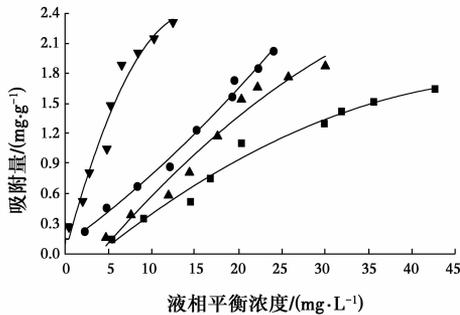
样号	拟合方程	R^2	q_e	k
1	$y=0.6062x+2.5154$	0.9988	1.650	0.1460
2	$y=0.4853x+0.7963$	0.9986	2.061	0.2956
3	$y=0.5346x+1.4916$	0.9984	1.871	0.1915
4	$y=0.4322x+0.5425$	0.9986	2.314	0.3442

注:1. 盐渍土;2. 10%石灰+盐渍土;3. 25%粉煤灰+盐渍土;
4. 10%石灰+20%粉煤灰+盐渍土。

2.2 石灰和粉煤灰对盐渍土中石油污染物吸附热力学行为的影响

混合土对石油污染物的吸附等温线均接近线性,但整体上差异较大(图 5)。液相石油浓度较低

时,各混合土样对石油的吸附量相差较小;随液相浓度的增大,4种曲线斜率逐步呈现较大差异,石灰+粉煤灰+盐渍土对石油污染物吸附的优越性(吸附量多且吸附速率快)越显著。吸附强弱顺序与吸附动力学呈统一变化趋势。相比较于加入蒙脱石等吸附剂的改性非盐渍土,在相同液相平衡浓度下的石油吸附量与加入10%石灰的改性盐渍土吸附量接近,约为10%石灰粉+20%煤灰联合作用下的改性盐渍土吸附量的50%^[12]。



注: ■ 盐渍土 ● 10%石灰+盐渍土
▲ 25%粉煤灰+盐渍土 ▼ 10%石灰+20%粉煤灰+盐渍土

图 5 混合土对石油污染物的吸附等温线

Fig. 5 Adsorption isotherm curves of difference soil on oil contamination

采用 Freundlich 吸附等温式对吸附等温线进行拟合,拟合结果见表 4。

$$Q_e = K_f \times C_w^n \quad (2)$$

式中: Q_e 为吸附达到平衡时单位吸附剂上吸附量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; C_w 为石油悬浮液中吸附质的浓度,单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_f 为 Freundlich 吸附系数; n 为指数项常数。

表 4 吸附等温式拟合数据参数 (Freundlich 型)

Table 4 adsorption isotherm Data (Freundlich type)

样号	拟合方程	R^2	K_f	n
1	$y=0.0377x^{1.0740}$	0.96041	0.0377	1.1794
2	$y=0.0999x^{0.9524}$	0.9884	0.0999	0.9310
3	$y=0.0543x^{1.0637}$	0.9779	0.0543	1.2671
4	$y=0.1674x^{0.9770}$	0.9516	0.1674	0.6947

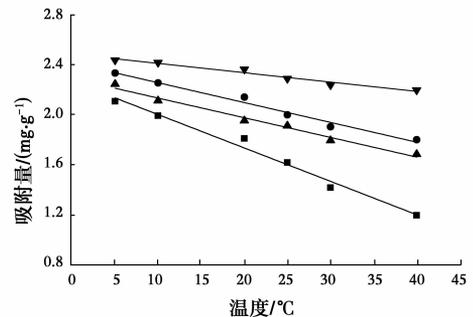
注:1. 盐渍土;2. 10%石灰+盐渍土;3. 25%粉煤灰+盐渍土;
4. 10%石灰+20%粉煤灰+盐渍土。

由表 4 拟合结果可知,拟合曲线的相关系数均大于 0.95,呈显著相关,说明盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土对石油污染物的吸附热力学行为均可用 Freundlich 型吸附模型来表示。

石灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土的 n 值小于 1,再次证实其吸附模式为单分子吸附,以化学吸附为主,具有不可逆性。石灰掺入、特别是石灰与

粉煤灰的共同作用改变了对石油污染物的吸附作用模式,有助于提高对石油污染物的吸附稳定性。

随温度的上升,盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土对石油污染物的平衡吸附量均呈下降趋势(图 6)。原因为:石油的乳化程度、粘滞系数、水溶性均与温度密切相关,温度是影响介质对石油污染物吸附的关键因素^[5]。温度越高,石油污染物的粘着性越小,溶解度和流动性增大,越不易于吸附在介质表面;同时,石灰、粉煤灰及盐渍土对石油污染物的吸附过程为放热反应,温度升高对吸附过程产生一定的抑制作用。



注: ■ 盐渍土 ● 10%石灰+盐渍土
▲ 25%粉煤灰+盐渍土 ▼ 10%石灰+20%粉煤灰+盐渍土

图 6 混合土对石油的吸附量随温度的变化

Fig. 6 Oil adsorption of soil under different temperature

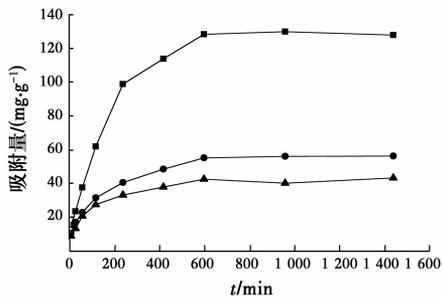
对比混合土样,盐渍土对石油污染物的吸附量随温度变化的曲线斜率较陡,下降趋势显著。5℃时吸附量为 $2.11 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,45℃时吸附量为 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平衡吸附量下降了 42%。10%石灰+盐渍土、25%粉煤灰+盐渍土和 10%石灰+20%粉煤灰+盐渍土对石油污染物的吸附量随温度变化的曲线斜率分别为 22%、25%和 9%,曲线变化较为平缓。从数值对比可以得出,石灰、粉煤灰均能缓解温度对吸附性的影响,石灰的作用略优于粉煤灰,两者联合作用效果最好,可在一定程度上缓解石油污染土的温度敏感性问题。

2.3 石灰粉煤灰对盐渍土中石油污染物解吸动力学行为的影响

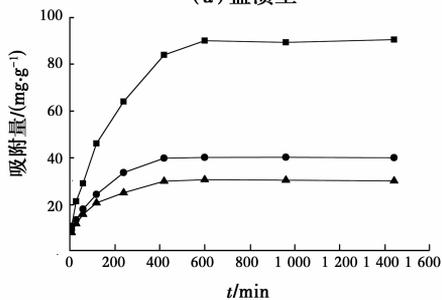
石油污染程度在 4%、8%及 12%条件下,4 种类型石油污染土样解吸动力学曲线呈现出统一趋势(图 7)。解吸过程均可划分为 3 个阶段:快速解吸过程,缓慢解吸过程,稳定阶段。石油污染盐渍土的解吸平衡时间在 960 min 左右,远大于吸附平衡时间 240 min。石油含量为 12%、8%和 4%的石油污染土平衡解吸量分别为 128.57、56.09、40.97 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。石油污染土的污染程度与解吸量呈正相关,污染程度越重,解吸量越高(图 7(a))。粉煤灰+盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤

灰+石灰+盐渍土的平衡解吸时间分别为600、420、400 min(图7(b)~(d)),平衡解吸量与石油污染土的污染程度也呈正相关。

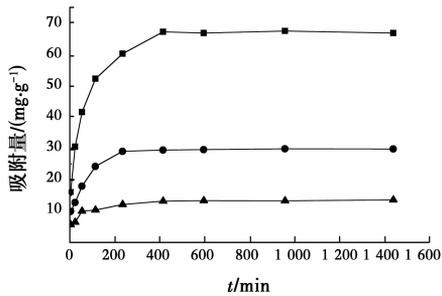
石灰粉煤灰的加入降低了解吸平衡时间。当石油含量都为12%时,25%粉煤灰+盐渍土、8%石灰+盐渍土、20%粉煤灰+8%石灰+盐渍土的平衡解吸量分别为89.81、67.10、57.41 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与污染程度相同的盐渍土相比,解吸量下降了30.14%、47.81%、55.35%。石灰和粉煤灰可抑制土中石油污染物的解吸。



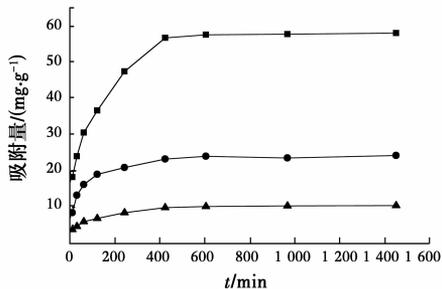
(a) 盐渍土



(b) 25%粉煤灰+盐渍土



(c) 8%石灰+盐渍土



(d) 20%粉煤灰+8%石灰+盐渍土

注: —■— 石油含量12% —●— 石油含量8% —▲— 石油含量4%

图7 不同污染土样的石油解吸动力学曲线

Fig. 7 Desorption kinetics curves of different soil samples for oil

3 结论

1) 盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土的石油吸附动力学曲线均符合 Lagergren 二级动力学非线性方程。单独石灰、粉煤灰及联合作用下对石油污染物的吸附平衡时间较盐渍土缩短72%、50%、75%,吸附量较盐渍土分别提高了26%、14%、39%。石灰和粉煤灰加入盐渍土可提高对石油污染物的吸附稳定速率和吸附量。

2) 盐渍土、石灰+盐渍土、粉煤灰+盐渍土、石灰+粉煤灰+盐渍土对石油的吸附等温线符合 Freundlich 吸附模式。石灰、石灰+粉煤灰对石油污染物的吸附等温线的指数项常数小于1。石灰、石灰+粉煤灰对土中石油污染物的吸附以化学吸附为主,具有不可逆性,有助于改善吸附稳定性。

3) 温度升高不利于盐渍土对石油污染物的吸附。石灰、粉煤灰均能在一定程度上缓解温度的影响,石灰的作用略优于粉煤灰。火山灰反应可增强对石油污染物的吸附力,提供更多吸附质点,增强吸附性。

4) 石油污染土的污染程度与解吸量呈正相关,石油从土样中解吸的能力依次为盐渍土>粉煤灰+盐渍土>石灰+盐渍土>石灰+粉煤灰+盐渍土。石灰粉煤灰的加入可降低解吸平衡时间及解吸量。高浓度污染条件下,石灰、粉煤灰对石油污染物的解吸控制作用更强。

参考文献:

- [1] 杨明星,冶雪艳,杨悦锁,等. 石油有机组分在包气带水土中残留和迁移差异[J]. 化工学报, 2013, 64(11): 4231-4239.
YANG M X, YE X Y, YANG R S, et al. Residual and migration diversities of petroleum hydrocarbons in vadose zone [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013, 64(11): 4231-4239. (in Chinese)
- [2] OSTROM M, TREEX M J, TARAKOVSKY G D, et al. Three-dimension of volatile organic compound mass flux from the vadose zone to ground [J]. Water Monitoring & Remediation, 2010, 30(3): 45-46.
- [3] 张丹,姜林,夏天翔,等. 土壤-地下水系统中石油烃的迁移和生物降解述评[J]. 环境工程, 2015(7): 1-6, 11.
ZHANG D, JIANG L, XIA T X, et al. The migration and biodegradation of petroleum hydrocarbons in soils-groundwater system: A review [J]. Environmental Engineering, 2015(7): 1-6, 11. (in Chinese)
- [4] 刘晓艳,李英丽,朱谦雅,等. 石油类污染物在土壤中的吸附/解吸机理研究及展望[J]. 矿物岩石地球化学通

- 报,2007,26(1): 82-87.
- LIU X Y, LI Y L, ZHU Q Y, et al. Research on the mechanism of the adsorption/desorption of petroleum pollutants in soils and its prospective [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007,26(1): 82-87. (in Chinese)
- [5] 解岳,黄廷林,王志盈,等. 河流沉积物中石油类污染物吸附与释放规律的实验研究[J]. 环境工程,2000, 18(3): 59-67.
- XIE Y, HUANG T L, WANG Z Y, et al. An experimental study of petroleum pollutant's adsorption on and release from river sediments [J]. Environmental Engineering, 2000, 18(3): 59-67. (in Chinese)
- [6] 李国玉,马巍,穆彦虎,等. 多年冻土区石油污染物迁移过程试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(Sup1): 83-89.
- LI G Y, MA W, MU Y H, et al. Experimental study of migrating process of oil contaminants in permafrost regions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 83-89. (in Chinese)
- [7] AL-RAWAS A, HASSAN H F, TAHA R, et al. Stabilization of oil-contaminated soils using cement and cement by-pass dust [J]. Management of Environmental Quality, 2005, 16(6): 670-680.
- [8] 孙清,陆秀君,梁成华. 土壤的石油污染研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2002,33(5): 390-393.
- SUN Q, LU X J, LIANG C H. Progress on contamination of soils by petroleum [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(5): 390-393. (in Chinese)
- [9] 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 F, CHEN L H, FU S J, 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. (in Chinese)
- [10] 史红星. 石油类污染物在黄土高原地区环境中迁移转化规律的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2001.
- SHI H X. Research on the migration and transformation of petroleum pollutants in the Loess Plateau [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2001. (in Chinese)
- [11] 高翀. 石油类污染物在土壤中的吸附和解吸研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- GAO C. Study on Adsorption and desorption of petroleum pollutants in soil [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)
- [12] 楚伟华. 石油污染物在土壤中迁移及转化研究[D]. 黑龙江大庆:大庆石油学院,2006.
- CHU W H. Study on the migration and conversion of petroleum pollutants in soil [D]. Daqing, Heilongjiang: Daqing Petroleum Institute,2006. (in Chinese)
- [13] 曹晓燕,韩辉,杨桂朋. SDBS对重油在胶州湾沉积物上吸附行为的影响[J]. 环境科学,2011, 32(10): 3011-3017.
- CAO X Y, HAN H, YANG G P. Influence of SDBS on sorption behaviors of heavy oil on Jiaozhou Bay sediment [J]. Environmental Science, 2011, 32(10): 3011-3017. (in Chinese)
- [14] WALTER T, EDERER H J, FÖRST C, et al. Sorption of selected polycyclic aromatic hydrocarbons on soils in oil-contaminated systems [J]. Chemosphere, 2000, 41(3): 387-397.
- [15] 申圆圆,王文科,李春荣. 不同介质中石油污染物吸附过程的动力学及热力学研究[J]. 安徽农业科学,2012, 40(9): 5442-5445.
- SHEN Y Y, WANG W K, LI C R. Study on kinetics and thermodynamics of petroleum adsorption onto the different media [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(9): 5442-5445. (in Chinese)
- [16] GABORIAU H, SADA A. Influence of heavy organic pollutants of anthropic origin on PAH retention by kaolinite [J]. Chemosphere, 2001, 44(7): 1633-1639.
- [17] LI M, CHAI S X, DU H P. Effect of chlorine salt on the physical and mechanical properties of inshore [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(3): 327-335.
- [18] 郭常颖,赵鹏程,肖靖. 几种吸附材料在含油废水处理中的应用[J]. 环境科学与管理,2010,35(3): 96-102.
- GUO C Y, ZHAO P C, XIAO J. Application of several absorbing material to treated oil wastewater [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(3): 96-102. (in Chinese)
- [19] 周光红,项学敏,李厚芬等. 粉煤灰对水溶液中磷的吸附性能及机理[J]. 环境工程学报,2012,6(8):2600-2606.
- ZHOU G H, XIANG W M, LI H F, et al. Adsorption performance and mechanism of phosphorus in aqueous solution with fly ash [J]. Journal of Environmental Engineering,2012,6(8):2600-2606. (in Chinese)
- [20] 晁晓波,赵文谦,张萍. 石油从泥沙上解吸的特性研究[J]. 环境科学学报,1997,17(4): 49-53.
- CHAO X B, ZHAO W Q, ZHANG P. Desorption properties of oil on sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(4): 49-53. (in Chinese)