

# 温度-负压联合驱动污染土中柴油 迁移与去除的演化规律

陈耀强<sup>1,2</sup>, 仪立宇<sup>1,2</sup>, 陈之祥<sup>2</sup>, 黄子豪<sup>2</sup>, 刘潇<sup>1</sup>, 郭晓霞<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与CAE软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为提高柴油污染土修复效率并降低传统热修复能耗, 基于负压降低液体沸点及温差诱导迁移的原理, 以不同初始干密度的饱和柴油污染土为对象, 开展了-25、25和60℃条件下的负压挥发试验, 分析温度与干密度对柴油去除过程的影响, 并结合SEM和EDS表征土体微观结构及碳元素含量变化。结果表明: 25℃下柴油挥发较弱, 20 d后残余率仍达91.11%~92.89%; 60℃下残余率降至57.01%~63.83%; -25℃条件下柴油挥发显著增强, 最终残余率低至31.03%~34.86%。干密度对柴油迁移具有阶段性影响, 其作用与孔隙结构及低温诱导的微裂隙发育密切相关。温度-负压作用促进了土体孔隙结构重组和柴油脱附。负温-负压联合抽提可作为一种低能耗、高效率的柴油污染土修复新方法。

**关键词:** 柴油污染土; 负压抽提; 温度效应; 气液迁移; 微观结构演化

中图分类号: TU43; X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0194-09

## Evolution of Diesel Migration and Removal in Contaminated Soil Driven by Temperature and Negative Pressure

CHEN Yaoqiang<sup>1,2</sup>, YI Liyu<sup>1,2</sup>, CHEN Zhixiang<sup>2</sup>, HUANG Zihao<sup>2</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>, GUO Xiaoxia<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** To improve the remediation efficiency of diesel-contaminated soil while reducing the energy demand of conventional thermal treatment, this study investigated diesel removal under coupled temperature and negative pressure conditions. Saturated diesel-contaminated soils with different initial dry densities were tested at -25, 25, and 60℃ under vacuum extraction. The effects of temperature and dry density on diesel volatilization were evaluated, and microstructural changes were characterized using SEM and EDS. The results show that diesel volatilization was limited at 25℃, with residual rates of 91.11%~92.89% after 20 days. At 60℃, the residual rate decreased to 57.01%~63.83%. Under -25℃, diesel removal was greatly enhanced, and the final residual rate dropped to 31.03%~34.86%. Dry density showed a stage-dependent influence on diesel migration, mainly related to pore structure evolution and microcrack development induced by low temperature. Microstructural observations further confirmed that tem-

收稿日期: 2026-01-27

修稿日期: 2026-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308384); 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(52322810); 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(51827814)

作者简介: 陈耀强(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土学与工程。E-mail: 1422812049@qq.com

通讯作者: 陈之祥(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事环境岩土工程研究工作。E-mail: zxcchen@whrsm.ac.cn

perature-negative pressure coupling promoted pore rearrangement and diesel desorption. These findings indicate that low-temperature vacuum extraction provides a promising low-energy approach for rapid remediation of diesel-contaminated soil.

**Keywords: diesel contaminated soil; vacuum extraction; temperature effect; gas-liquid migration; microstructure evolution**

石油烃类与化学品泄漏产生的有机污染土,已成为危害地下水安全和生态环境健康的重大环境问题<sup>[1]</sup>。柴油污染土是城市加油站、搬迁炼油厂等散点分布式污染场地处置过程中的典型污染物<sup>[2-3]</sup>。现有主流的气相脱附、强化热气相抽提等技术的修复时间长、能耗大,且存在柴油气相挥发造成的局部空气污染问题<sup>[4-5]</sup>。因此,开展柴油污染土的治理新工艺研究,是散点分布式有机污染场地治理的典型要求。

近年来,围绕具有不同特点的有机污染场地治理,国内外学者开展了广泛而深入的研究工作<sup>[6-7]</sup>。陈星等<sup>[8]</sup>以16种US EPA优先控制多环芳烃为目标污染物进行了热修复试验,发现不同程度污染土的16种多环芳烃在400℃、72 h的试验过程中总去除率均可达到99.9%,且热修复后土颗粒粒径呈增大趋势,土的稳定性、抗压强度均有所增强。姜文超等<sup>[9]</sup>对有机污染土修复中的异位热脱附技术进行了研究,发现一级加热炉膛温度300℃、二级加热炉膛温度500℃,停留时间为30 min的条件下,能实现污染土中石油烃、苯系物和多环芳烃类复合有机污染物的高效去除。毛柏杨<sup>[10]</sup>以挥发性有机物污染土为研究对象,系统研究了有机物污染土中孔隙液分布规律,以及气相抽提修复效率的影响因素和抽提过程中污染物分布变化规律。华龙飞等<sup>[11]</sup>采用离心机法控制吸力条件开展了柴油污染土的持液特性试验研究,探究土体对水油两相非溶混合液体的弛豫性能以及脱湿过程中孔隙水油含量的演化规律。Shang等<sup>[12]</sup>提出了通过洗涤同时脱除和回收柴油重度污染土中柴油的新方法,指出对于柴油含量为336 723 mg/kg的污染土,柴油去除率达到87.5%,回收率达到73.8%。于鑫等<sup>[13]</sup>研究了水铁矿修饰电极对土-微生物电化学系统降解土中有机污染物的强化作用,并揭示电学-微生物协同的增效机制。殷鹏婷等<sup>[14]</sup>通过对比5种不同的修复方式,考察了生物通风协同真菌(BF)对石油烃(TPH)污染土的修复效果、土体理化性质及微生物群落结构的影响。上述研究工作从热修复、气相抽提技术、化学生物协同技术等方面大幅提高了污染场地处置参数的

表征精度,同时也指明了该类研究面临的技术难题。例如,生物修复技术主要依靠微生物的降解作用,其成本相对较低,然而在处理高浓度柴油污染土时,所需周期较长,且容易受到环境条件的制约<sup>[15-16]</sup>;气相抽提技术在常温下对有机污染物去除率低;热脱附技术通过高温(通常300~500℃)促使有机物挥发,尽管其效率较高,但同时也面临着热能耗大、土微观结构破坏以及二次挥发有机物逃逸等难题<sup>[17-19]</sup>。此外,上述技术在处理低渗透性土或高黏度烃类物质(如柴油)时,其效率普遍受到限制<sup>[20-22]</sup>。柴油污染土治理的核心难题在于平衡其物化特性与修复效率之间的关系,即如何通过利用孔隙中柴油的物理性质,降低高沸点(180~340℃)柴油的脱附能耗。另一方面,土的自身性质,尤其是干密度相关的孔隙结构是影响污染物迁移的关键内在因素<sup>[23-24]</sup>。宏观认知认为高干密度会抑制挥发,但这一结论是否在更大的温域范围内成立尚缺乏系统验证<sup>[24]</sup>,温度与干密度条件对柴油污染土去除的影响机理尚需深入。因此,目前尚未解决的核心矛盾是如何通过调控土体孔隙结构与温压场协同作用,实现柴油低能耗高效脱附。具体表现为负温条件下晶体生长对柴油相的挤压效应缺乏定量研究,干密度与温度交互作用对挥发动力学的影响机制不清。

近年来,基于负压抽提技术的有机污染土修复技术受到广泛关注,该技术通过降低土中孔隙压力,使污染物沸点降低、挥发驱动力增大,从而有效促进有机污染物的去除<sup>[6,11]</sup>。然而,目前研究集中于常温下真空抽提和能耗较高的高温(>200℃)强化热气相抽提,对于变温阶段和负温情况研究缺乏。前期研究表明,冻结过程中土中水汽会向着冻结缘迁移,且-15℃或更低温度下仍会存在气态水的迁移<sup>[25]</sup>。因此,将负压抽提和冻结过程中的水分迁移作用相结合,利用负压降低孔隙环境中液体的挥发温度可以驱使污染物挥发成气相;再利用负温诱导气相挥发产物向冻结缘迁移,即将污染土中的有机污染物诱导至冻结缘区域。

鉴于此,本研究基于负压环境液体沸点降低,温

差诱导液体迁移的客观规律,开展不同于密度柴油污染土中柴油的挥发试验。在此基础上,对比不同初始干密度试样柴油去除率随温压作用时间的变化,研究温度对真空环境下柴油挥发动力学的主导规律,并结合柴油污染土挥发前后土体微观结构演变以及碳元素质量分数变化进行分析。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用红黏土采自湖北省武汉市江夏区某加油站附近的清洁区域,土中主要矿物质为石英、伊利石、斜长石、钠长石等。该土颗粒黏粒含量较高,具有较高可塑性,其基本物理性质和颗粒级配分别如表 1 和图 1 所示。试验用柴油为标准 0#柴油,密度为  $0.84 \text{ g/cm}^3$ ,沸点为  $180 \sim 370^\circ\text{C}$ ,黏度系数为  $3.45 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

表 1 土的基本参数

比重 $G_s$	均匀性系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	最优含水率 $W_{op}/\%$
2.75	50.26	1.97	52.7	21.8	22

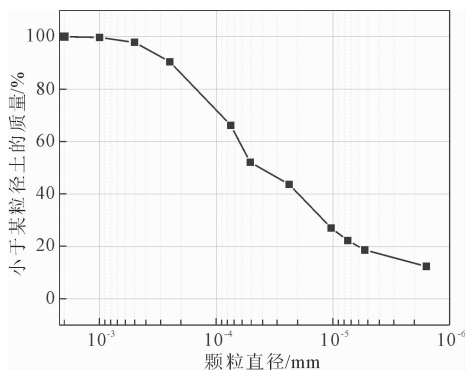


图 1 土的颗粒级配曲线

### 1.2 样品制备

试验共设置表 2 所示的 5 种不同初始干密度土样,以探究温度-负压条件下土中柴油的挥发速率,及土样初始干密度对柴油去除量的影响。制样步骤为:①将土手动除杂,放入烘箱  $110^\circ\text{C}$  烘干 24 h 并破碎后过 2 mm 筛备用。②按照表 2 设置的配比方案,用喷壶向干土均匀喷洒柴油,以配置预设饱和度的样品。③将拌合后的土样按照标准压样法压入尺寸为  $\Phi 20 \times 20 \text{ mm}$  的小型环刀中。④将土样上下各贴一层滤纸,用饱和器夹紧后放于饱和桶中,利用真空泵抽真空 2 h 后,注入柴油淹没土样顶面,关闭阀门静置 12 h 使土样达到充分饱和。

表 2 柴油污染土试样配比方案

编号	干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	油饱和度 $S_r_d$	含油率 $\theta_d/\%$
A	1.3	1	34.07
B	1.4	1	29.45
C	1.5	1	25.45
D	1.6	1	21.95
E	1.7	1	18.87

### 1.3 试验方法

本研究设置三种试验环境:①将试样放入恒温室内的真空桶中,作为常温真空组的试验环境;②使用真空冷冻干燥机设备作为低温真空组的试验环境;③将真空桶放入恒温恒湿箱中并调控温度至  $60^\circ\text{C}$ ,以此模拟升温真空组的试验环境,系统开展特定温度-负压耦合作用下土样单元中的气液两相质量损失规律研究。本研究所有温度组 ( $-25$ 、 $25$ 、 $60^\circ\text{C}$ ) 的真空环境均采用统一负压值:  $0 \text{ Pa}$  (误差  $0.5 \text{ kPa}$ )。所有试验组在整个 480 h 试验周期内均保持该负压值稳定:低温真空组通过真空冷冻干燥机的内置真空控制系统实时调控;常温真空组和高温真空组采用真空泵搭配压力传感器进行闭环控制,每 12 h 记录一次负压值,确保各组负压波动范围不超过  $\pm 2 \text{ kPa}$ ,满足试验条件一致性要求。电子天平称量精度为  $0.001 \text{ g}$ ,定时称量土样质量变化,以称得的损失量作为不同条件下从土样中移除的气液质量。称量的时间间隔筛选为 0.02、5、10、15、20 d。

### 1.4 数据分析方法

数据分析方法围绕温度-负压耦合作用下柴油污染土的挥发特性与微观机制展开,通过数据整合与量化分析实现研究目标。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各干密度柴油挥发量随温度演化

根据试验所得数据,得到五种不同干密度的样品中柴油挥发量,绘制出各干密度下不同温度的柴油挥发量曲线,如图 2 所示。

通过对比不同干密度条件下的柴油挥发曲线可以发现,整体来看,随着干密度的增加,柴油的挥发量逐渐降低。这表明高干密度条件下,土体孔隙结构更加紧密,限制了柴油挥发的通道,导致其迁移速率降低。在同一温度下,干密度增大即土体更紧实会显著抑制柴油的挥发速率和最终挥发量。该抑制作用在低温和升温下尤为明显,而在常温下相对较弱。土体孔隙比与有效应力关系的变化趋势进一步

解释了干密度对柴油迁移的抑制作用,从土体孔隙角度分析,高干密度意味着低孔隙比,导致土体骨架的有效应力增大,颗粒间排列更为紧密。该结构变化从两方面抑制柴油挥发:其一,低孔隙比直接减小了柴油蒸气迁移的通道截面面积,增大了扩散的曲

折度;其二,有效应力的增大增强了土颗粒对柴油的吸附势能和毛细管束缚力,提高了柴油(尤其是极性组分)从土颗粒表面解吸并进入孔隙空间所需的能量门槛<sup>[26]</sup>。

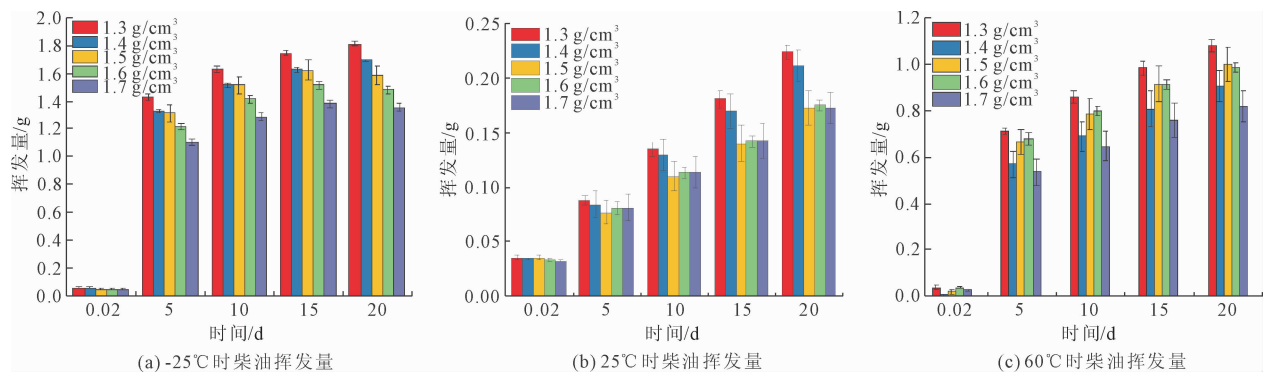


图2 三种温度下的柴油挥发量曲线

试验数据进一步表明,在不同温度条件下柴油挥发行为存在显著差异。具体而言,在升温环境和低温环境下,无论土的干密度如何变化,柴油的挥发总量都明显超过了常温条件下的挥发量。这一现象充分证实了在真空环境中,温度变化对柴油迁移和挥发过程具有重要影响:温度的升高会加速分子运动,而负温环境则可能通过改变柴油的物理性质来促进其挥发。值得注意的是,在常温条件下,所有不同干密度土样中的柴油挥发过程都表现出相似的特征:挥发速率持续保持在较低水平,最终累积挥发量也基本相当。这说明在该温度下,柴油挥发本身就是一个动力学受限的缓慢过程<sup>[26]</sup>,以至于土体干密度差异所导致的孔隙结构变化等影响因素,在这个温度条件下难以显现出明显的差异性影响。

## 2.2 温度影响

各温度柴油残余率曲线如图3所示,由图3可知,温度在整个挥发过程中起着决定性作用。对比不同温度条件下柴油的挥发量变化趋势,试验结果显示,在升温的环境中,柴油的挥发总量达到常温条件下的4.7倍至4.8倍;而在负温的极端条件下,柴油挥发量更是显著增加,达到常温条件下的7.8倍至8.8倍。这些数据充分证明,无论是升温还是降温的极端温度条件,都会显著加速柴油中各类组分的挥发过程。

具体而言,在60℃的环境中,柴油的饱和蒸气压会呈现急剧上升的趋势,这是由于升温条件下分子运动动能大幅增加,使得挥发驱动力显著增强<sup>[27]</sup>。观察所有土样在480 h内的挥发过程,柴油

残余率均呈现出典型的指数型快速下降特征,最终残余率稳定在57.01%~63.83%的区间范围内。而在低温条件下,低温优先挥发轻组分(如短链烷烃)<sup>[28]</sup>,且柴油的去除过程则表现出明显的两阶段特征:初期由于样品处于饱和状态,土的吸力接近于零,此时挥发速率较快;随着试验的持续进行,柴油总去除率逐步提高,土的吸力也随之增大,导致后续的柴油去除难度增加,这一变化特征直观地体现在柴油残余率曲线的斜率逐渐变大的趋势上。低温比另外两种温度挥发速率快的另一个原因是低温下土壤孔隙中的柴油析出蜡质结晶,挤压柴油相使其更易暴露于负压环境<sup>[29]</sup>,从而加速挥发。

## 2.3 干密度影响

干密度不是控制土中污染物挥发速率的唯一决定因素,其作用强度受环境温度影响下的孔隙流体物理状态影响<sup>[30-31]</sup>。

各干密度柴油残余率曲线如图4所示,由图4可知,在正温条件下,例如60℃时,干密度较低的样品呈现出更高的挥发效率。这是由于孔隙结构的差异为柴油分子提供了更为通畅的逸出通道。但由于干密度低的土样柴油初始含量高,所以在残余率图中不易看出明显规律。在负温下,不同初始干密度间,柴油蒸发率随时间变化的规律在前期表现为:在同一时间下,初始干密度越小的试样,柴油的去除率越高。而随着时间的增加,在试验的中后期,规律则刚好相反,表现为初始干密度越大的试样柴油的去除率越高。在试验结束时,不同初始干密度试样的柴油去除率均稳定在70%左右。这是因为在试验

初期,相较于初始干密度大的试样,初始干密度小的试样与空气的接触面积大,进而其蒸发速率较快,但随着时间的推移,土体表层柴油蒸发,初始干密度大的试样中,柴油与空气接触的界面数量增多,超越初始干密度小的试样界面数量,并且在长期冷冻过程中,柴油析出蜡质结晶产生的冻胀力可能更易在致

密土体中产生微裂隙<sup>[32-33]</sup>。这些微裂隙成为柴油蒸气(或通过升华)逸出的新通道,表现为初始干密度越大蒸发速率越快。由此可见,干密度对柴油挥发的影响具有动态性和阶段性特征,其作用机制在不同温度条件下差异显著。这一现象与土体孔隙结构及柴油迁移路径的变化密切相关<sup>[34]</sup>。

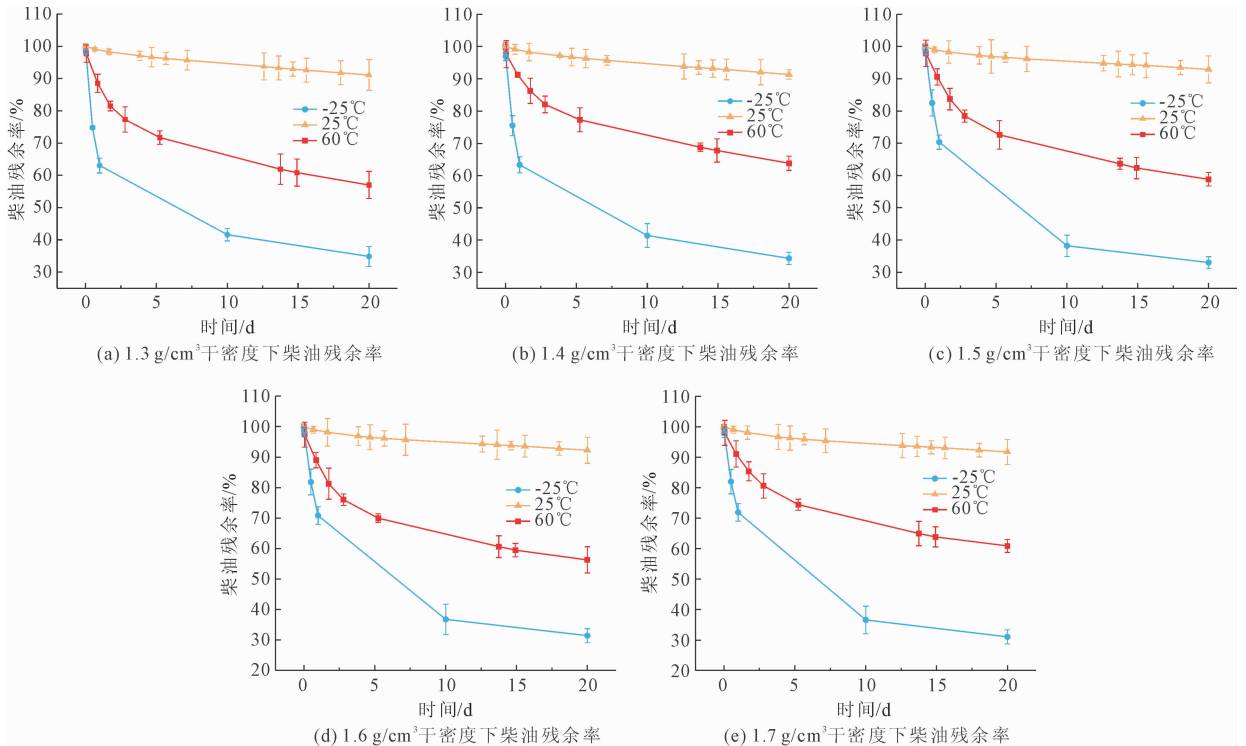


图3 各温度柴油残余率曲线

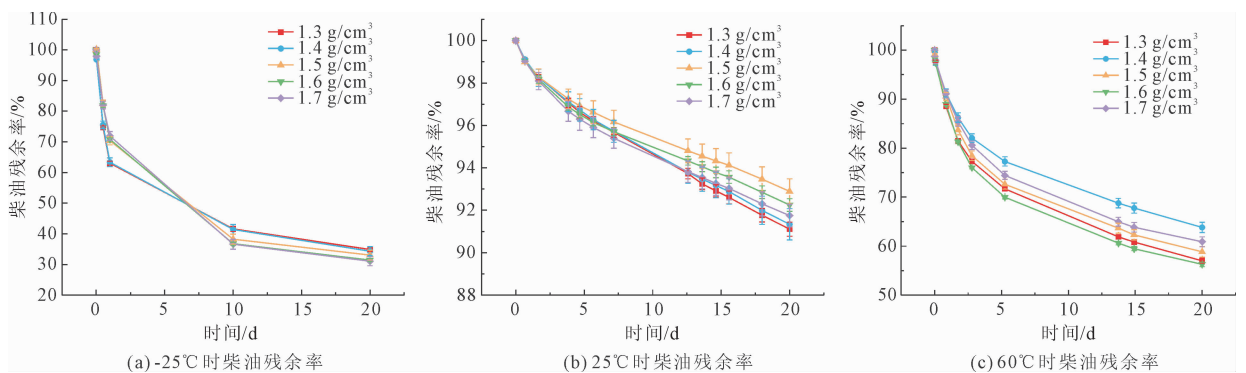


图4 各干密度柴油残余率曲线

## 2.4 污染土孔隙结构演化

为探究柴油污染土在不同温度及真空条件下微观结构的变化特征,采用扫描电子显微镜(SEM)对试验前后土样的微观形貌进行观测。通过对比不同温度及不同干密度条件下土样的孔隙结构、颗粒表面形态及柴油分布特征,揭示土-柴油体系在温度-负压耦合作用下的响应机制。

图5为样品进行柴油饱和后,不同初始干密度土样在试验第1天与第20天的SEM图像。可见,随着时间推移,初始干密度较小的试样中,小团聚体逐渐转化为大团聚体,孔隙尺寸亦呈增大趋势。相较之下,初始干密度较大的样品虽也呈现类似变化,但幅度不及前者显著。这是由于初始干密度较小的试样内部结构约束力较弱,在柴油蒸发过程中更易

发生颗粒重排与团聚体重组,导致大孔隙逐渐增多<sup>[35]</sup>。

根据液体蒸发与界面接触面积密切相关的物理规律<sup>[36-37]</sup>,柴油污染土中柴油的去除速率与孔径分布变化直接相关。在制备阶段,初始干密度较小的试样孔隙体积更大,需要更多柴油才能达到饱和,并使柴油与土颗粒充分接触,因此形成比干密度大的样品更多、更大的团聚体。

在负温试验中,对比图5(a)与图5(d)可知,干密度较小的试样因团聚体和孔隙数量较多,使空气接触面积更大,从而表现出更高的柴油去除速率。

而在试验第20天,对比图5(b)与图5(e)可发现,干密度较小的试样中,大孔隙继续扩大,而干密度较大的试样则形成较多的小孔隙,此时其土颗粒表面与空气接触面积反而更大,因此负温试验中柴油去除速率在中后期表现为干密度较大的试样更快。在升温条件下,试验后的高干密度试样团聚体和孔隙数量均比试验前增多,表明热作用促进了颗粒间的胶结与团聚<sup>[38-39]</sup>,增强了土体内部的连通性。SEM分析表明,低温-负压联合作用能破坏柴油在土颗粒表面的吸附状态,促进其从孔隙中脱附<sup>[40-41]</sup>,微观结构演变与宏观挥发规律一致。

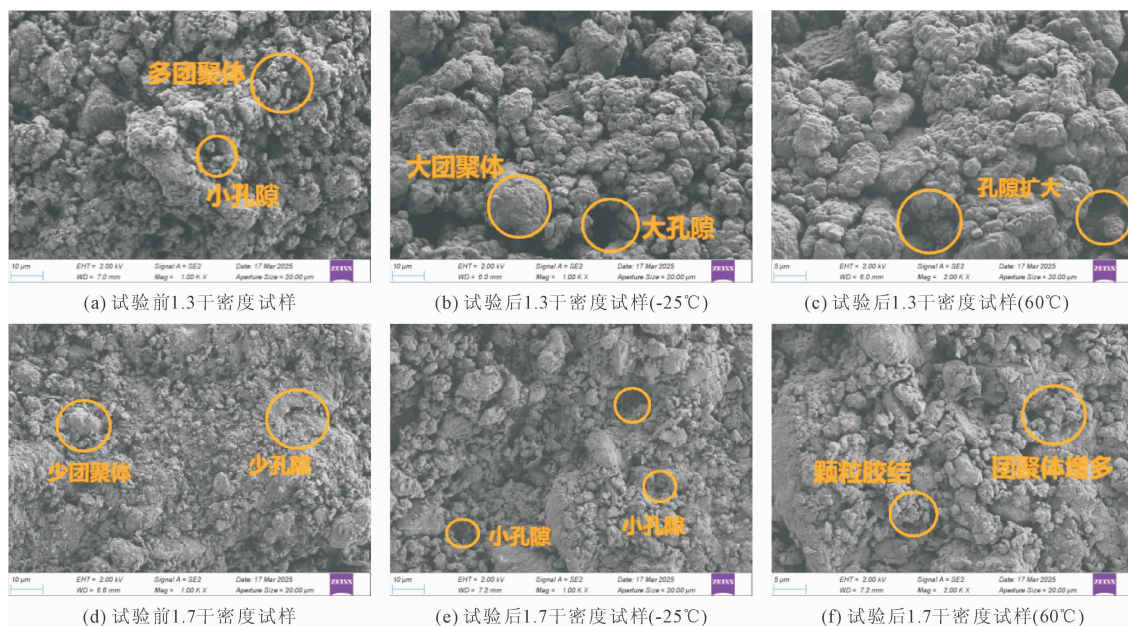


图5 不同干密度柴油试样试验前后的SEM图像

## 2.5 试验前后能谱分析

碳元素是柴油的主要组成成分之一<sup>[42-43]</sup>,碳含量的变化可作为柴油去除效率的指标。图6显示了负温真空组试样在试验第1天与第20天的EDS图像,对比可见,C元素质量分数由45.12%降至28.98%。这表明在负温-负压条件下,土中柴油被部分去除,但颗粒表面仍存在碳氢化合物残留。这些残留柴油滞留于颗粒间,以润滑和分隔的形式影响土颗粒间的相互作用,阻碍颗粒的紧密堆积,并削弱黏粒间的胶结作用。微观结构的这一变化直接导致宏观性质发生改变,具体表现为颗粒堆积密度降低、孔隙量增多以及骨架整体性削弱等<sup>[45-46]</sup>。

## 3 讨论

本研究创新点在于传统有机污染土修复领域普

表3 能谱元素分析

元素	试验前质量分数/%	试验后质量分数/%
C	45.12	28.98
O	37.12	45.27
Al	4.62	5.75
Si	9.43	13.55
K	0.65	0.83
Ca	0.08	0.11
Fe	2.98	5.51

遍认为<sup>[47]</sup>,高温(通常 $>200^{\circ}\text{C}$ )是促进高沸点污染物挥发的核心条件,相关研究多围绕高温热脱附、强化热气相抽提展开<sup>[48-49]</sup>。但本研究通过系统试验发现,负温环境与负压耦合时,柴油挥发效率显著优于 $60^{\circ}\text{C}$ 升温组,且能耗仅为高温热脱附技术的 $1/8\sim 1/5$ 。这一发现突破了“高温促挥发”的传统认知,

揭示了负温下柴油“固态-气态”直接升华的新机制——负压环境降低了固态柴油的升华温度阈值<sup>[49-50]</sup>,同时避免了高温导致的土体结构破坏与二次污染物生成风险<sup>[51-52]</sup>,为低能耗修复技术研发提

供了新方向。本研究局限是采用饱和柴油污染土,而实际场地土多为非饱和状态,含水率可能影响冻胀微裂隙发育与柴油相态;未来可开展非饱和和土的负温-负压修复试验,探究含水率的影响规律<sup>[53]</sup>。

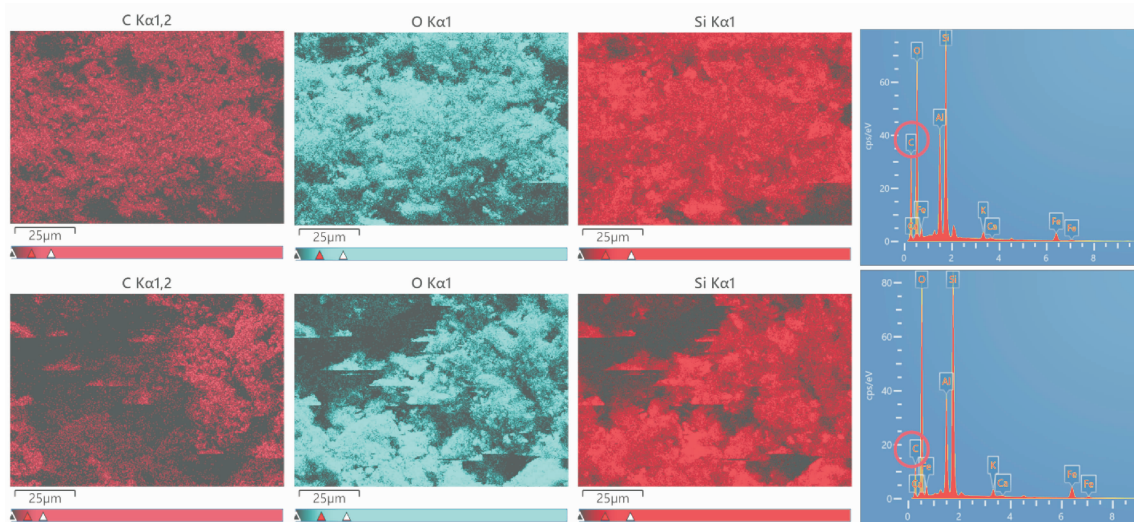


图 6 干密度  $1.7 \text{ g/cm}^3$  试样试验前后能谱分析

## 4 结 论

(1) 温度是控制真空抽提环境下柴油挥发速率的决定性因素;  $60^\circ\text{C}$  高温通过大幅提升柴油饱和蒸气压,使挥发过程遵循指数衰减规律,480 h 去除率可达  $36\% \sim 43\%$ ;  $25^\circ\text{C}$  常温下挥发动力不足,过程趋于平衡,去除率仅为  $7\% \sim 9\%$ ;  $-25^\circ\text{C}$  低温下最终去除率高达  $65\% \sim 69\%$ ,低温真空抽提修复的柴油残余量少且负温环境的能耗更小<sup>[54]</sup>,技术优势明显。

(2) 干密度是影响土中柴油挥发速率的重要因素,且会随孔隙液组成比例发生动态变化。在  $60^\circ\text{C}$  和  $25^\circ\text{C}$  下,干密度表现出经典的抑制效应,高干密度通过增大毛细管力和传质阻力导致更高的柴油残余率。在  $-25^\circ\text{C}$  下,干密度效应呈现阶段性反转:前期各密度样品挥发行为一致;中后期,高干密度土体因冻胀作用更易产生微裂隙<sup>[55]</sup>,反而为柴油挥发提供了新通道,导致其最终残余率低于低干密度土样。

(3) 温度-负压抽提作用下的柴油挥发过程伴随显著的土颗粒团聚化和孔隙结构重组,且微观结构演化与宏观柴油挥发效率存在明确的关联机制,土体孔隙的形态、数量及连通性演变是调控柴油气液迁移的核心微观因素。负温抽提条件下干密度较小的试样大孔隙继续扩大,而干密度较大的试样则形成较多的小孔隙;在正温抽提条件下,试验后的高干密度试样团聚体和孔隙数量均比试验前增多。同

时,柴油挥发后土颗粒表面碳氢化合物残留减少,削弱了黏粒间的胶结作用<sup>[56]</sup>,使土体颗粒堆积密度降低、孔隙量增多,这一微观结构变化又会反向促进土体内部剩余柴油的接触与挥发,形成微观结构与宏观挥发的动态反馈。

### 参考文献:

- [1] 曾献奎,田靖龙,王瑾彤,等. 多环芳烃运移模拟中数据驱动方法的应用[J]. 水文地质工程地质,2025,52(05):1-9.
- [2] 林广宇,符亚兵,焦志亮,等. 基于 GMS 的水力控制措施下污染物迁移预测分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(03):243-248.
- [3] 姜海波,张 军,喻天龙,等. 湿干冻融下渠基膨胀土裂隙发育与强度衰减规律研究[J]. 水利水电技术,2025,56(07):190-200.
- [4] 曹小方,方祥位,刘汉龙,等. 微生物修复柴油污染土试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(03):477-484.
- [5] 马蓝建,陈世万,田 浪,等. 岩溶区矿山地下水通道精细探查与地质模型构建[J]. 水利水电技术,2025,56(01):203-216.
- [6] 薛 强,杜延军,胡黎明,等. 环境土力学与工程研究进展[J]. 土木工程学报,2025,58(03):83-112.
- [7] 占鑫杰,许小龙,张青民,等. 河道底泥污染物释放控制试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(03):240-245.

- [8] 陈星,宋昕,吕正勇,等. PAHs 污染土壤的热修复可行性[J]. 环境工程学报,2018,12(10):2833-2844.
- [9] 姜文超,殷瑶,朱煜. 异位间接两级热脱附技术在有机污染土壤修复工程中的应用[J]. 环境工程学报,2021,15(11):3764-3772.
- [10] 毛柏杨. 挥发性有机污染场地气相抽提(SVE)修复技术机理与分析方法研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- [11] 华龙飞,万勇,陈之祥,等. 考虑水油分离的柴油污染土持液特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(05):995-1003.
- [12] Shang Zhijie, Xu Pan, Ke Zhenyu, et al. Diesel removal and recovery from heavily diesel-contaminated soil based on three-liquid-phase equilibria of diesel + 2-butyloxyethanol plus water[J]. J Hazard Mater, 2023, 442:130061.
- [13] 张鹏远,孟泽阳,白冰. 考虑吸附历史的污染物迁移过程及滞后特征研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(01):205-212,219.
- [14] 殷鹏婷,杨红军,高焕方,等. 生物通风协同真菌对石油烃污染土壤修复效果和微生物群落的影响[J]. 化工环保,2025,45(04):548-555.
- [15] 王菲,叶子俊,苗文权,等. 过硫酸盐修复有机污染土的效果及强度特性研究[J]. 岩土力学,2024,45(12):3635-3644.
- [16] Yu Jie, Yu Jiang, Deng Siwei, et al. Oxidation of chromium(III): A potential risk of using chemical oxidation processes for the remediation of 2-chlorophenol contaminated soils[J]. J Environ Manage, 2024,359:120973.
- [17] 吴秉泽,张文文,刘昭玥,等. 热脱附对多环芳烃和重金属复合污染土壤的影响[J]. 环境工程技术学报,2024,14(01):121-129.
- [18] Wei Wei, Wei Mingli, Li Yuan, et al. Low-temperature treatment optimization for diesel-contaminated kaolin: Mutual impacts of generated pyrolytic carbon and particle agglomeration[J]. Environ Pollut, 2024, 363: 125196.
- [19] 刘宗辉,陈庆祥,柳仪忠,等. 高温作用下柴油污染土导热系数演化特征及机理[J]. 应用基础与工程科学学报,2025,33(04):923-933.
- [20] 朱利中. 有机污染物界面行为调控技术及其应用[J]. 环境科学学报,2012,32(11):2641-2649.
- [21] 刘松玉. 污染场地测试评价与处理技术[J]. 岩土工程学报,2018,40(01):1-37.
- [22] 陈斌,徐江,周文军,等. 有机污染场地土壤化学氧化耦合微生物修复技术[J]. 中国环境科学,2024,44(06):3280-3288.
- [23] Chen Zhixiang, Rao Jielong, Liu Liyang, et al. Water-diesel ratio dependent deformation behaviour of diesel contaminated clay[J]. J Soils Sediments, 25(03):759-769.
- [24] Yu Huayue, Chen Zhixian, Wan Yong, et al. Temperature-humidity-density dependent evaporation behaviour of clay and sandy clay[J]. Eurasian Soil Sci, 2024,75(02):e13484.
- [25] 刘建龙,滕继东,张升,等. 气态水迁移诱发非饱和粗粒土冻胀的试验研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(07):1297-1305,1379-1380.
- [26] Xiong Gaoyan, Chao Feng, Hsiao-Chien Chen, et al. Atomically dispersed Pt-doped CO<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Spinel nanoparticles embedded in polyhedron frames for robust propane oxidation at low temperature[J]. Small Methods, 2023,7:2300121.
- [27] 童富果,杨佳璐,李彪,等. 干湿循环作用下红壤土孔隙结构与强度特性试验研究[J]. 水利水电技术,2024,55(09):153-163.
- [28] Kastanek F, Topka P, Soukup K, et al. Remediation of contaminated soils by thermal desorption; effect of benzoyl peroxide addition[J]. J Cleaner Prod, 2016,125:309-313.
- [29] Polyakov D G, Ryabukha, Ryabukha A G, et al. Freezing of chalk cryomorphic soil complexes of the orenburg oblast: temperature regime and cryogenic processes in soil profile[J]. Eurasian Soil Sci, 2024,57(06):981-994.
- [30] Rao Jielong, Yi Liyu, Wan Yong, et al. Dual effects of supergravity deformation and suction deformation on the determination of soil water characteristic curve by centrifugal testing method[J]. Soil Tillage Res, 2025,249:106495.
- [31] 高彦征,吴一铭,汤磊,等. 基于微生物组学的有机污染土壤生物修复研究进展[J]. 应用生态学报,2024,35(12):3225-3234.
- [32] Zhang Xiang, Wei Bing, You Junyu, et al. Characterizing pore-level oil mobilization processes in unconventional reservoirs assisted by state-of-the-art nuclear magnetic resonance technique[J]. Energy, 2021, 236: 121549.
- [33] 宋宇,刘伟,杨承琨,等. 水泥-石灰固 Zn<sup>2+</sup> 污染土的力学特性及微观机制研究[J]. 水利水电技术,2025,56(09):236-247.
- [34] 陈思莉,易仲源,王骥,等. 淋洗-抽提技术修复柴油污染土壤及地下水案例分析[J]. 环境工程,2020,38(01):178-182.
- [35] Carrier O, Shahidzadeh-Bonn N, Zargar R, et al. Evaporation of water: evaporation rate and collective effects[J]. J Fluid Mech, 2016,798:774-786.

- [36] Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(01-02):3-22.
- [37] 谭文峰,许运,史志华,等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. *土壤学报*, 2023, 60(05):1297-1308.
- [38] Fu Xiangqin, Kokkinaki A, Shi Xiaoqing, et al. An ice-air-water-NAPL multiphase model for simulating NAPL migration in subsurface system under freeze-thaw condition[J]. *J Contam Hydrol*, 2023, 257:104214.
- [39] Lu Ming, Hu Zhang, Li Anyuan, et al. Migration laws of petroleum in silty clay under freeze-thaw action[J]. *Research in Cold and Arid Regions*, 2025, 18(01):1-10.
- [40] Yi Liyu, Rao Jielong, Wan Yong, et al. Enhanced diesel removal from contaminated soil: A coupled approach of negative-pressure extraction and subzero-temperature-induced migration[J]. *Soils Found*, 2026, 66(02):101742.
- [41] Zhang Mingjian, Chen Qing, Gong Zhen. Microbial remediation of petroleum-contaminated soil focused on the mechanism and microbial response: a review[J]. *Environ Sci Pollut Res.*, 2024, 31:33325-33346.
- [42] 何启凡,王群英,侯祥东,等. 区域土壤污染实景数据可视化平台研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2025, 23(06):217-224.
- [43] 吴兴国,尹炳奎. 气相抽提技术在四氯乙烯污染修复场地中试研究[J]. *山东化工*, 2025, 54(24):204-207, 212.
- [44] 吴畏,孟令健,陈玉堃,等. 循环冻融作用下盐渍土变形及强度劣化规律研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2025, 23(06):1-7, 48.
- [45] 赵丹,於方,廖晓勇,等. 发达国家(地区)污染场地修复现状及对中国的启示[J]. *中国科学院大学学报*, 2023, 40(04):441-452.
- [46] 薛强,詹良通,胡黎明,等. 环境岩土工程研究进展[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(03):80-94.
- [47] 朱煜. 原位热脱附修复技术节能降耗措施研究进展[J]. *能源与环保*, 2023, 45(10):186-200.
- [48] Zhang Chenxi, Jiang Fujie, Hu Tao, et al. Oil occurrence state and quantity in alkaline lacustrine shale using a highfrequency NMR technique[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 154:106302.
- [49] Zhao Chen, Dong Yan, Feng Yupeng, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2019, 221:841-855.
- [50] Qin Lei, Zhang Xian, Matsushima J, et al. Accurate characterization method of coal pore and pore throat structure of different coal ranks based on two-dimensional NMR liquid nitrogen fracturing cycles[J]. *Fuel*, 2023, 341:127729.
- [51] 申春妮,曹小方,李腾,等. 植物-微生物联合修复柴油污染土试验研究[J]. *土木与环境工程学报*, 2023, 45(03):145-153.
- [52] 宋宇,刘伟,杨承琨,等. 水泥、石灰固化  $Zn^{2+}$  污染土的力学特性及微观机制研究[J]. *水利水电技术*, 2025, 56(09):236-247.
- [53] 于鑫,张晓林,曲永帅,等. 电极负载水铁矿强化微生物电化学系统修复石油烃污染土壤性能[J]. *中国环境科学*, 2026, 46(03):1475-1485.
- [54] Zhao Shan, Zhang Jian, Feng Shijin. The era of low-permeability sites remediation and corresponding technologies: a review[J]. *Chemosphere*, 2023, 313:137264.
- [55] Jiang Meiling, Fang Haixu, Liu Yang, et al. On movable fluid saturation of tight sandstone and main controlling factors: case study on the Fuyu oil layer in the Da'an oilfield in the Songliao basin[J]. *Energy*, 2023, 267:126476.
- [56] Han Yalu, Wang Yanlong, Liu Chengyang, et al. Study on numerical model of thermal conductivity of non-aqueous phase liquids contaminated soils based on mesoscale[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 197:108790.