

韩伟, 张海涛, 曹虎. 基于低温的原位热脱附对农药污染土修复研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(11): 50-55. Han Wei, Zhang Haitao, Cao Hu. Study on the remediation of pesticide contaminated soil by low temperature *in situ* thermal desorption[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(11): 50-55.

基于低温的原位热脱附对农药污染土修复研究

韩伟¹, 张海涛², 曹虎^{3*}

(1. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029;

2. 北京中环丰清环保科技有限公司, 北京 100027;

3. 中国教育科学研究院区域教育研究所, 北京 100088)

摘要: 农药污染场地的修复具有复杂性和挑战性。原位热脱附技术是去除有机污染物的有效手段, 节能降耗是其重要改进方向。本研究构建了一套基于低温热传导的原位热脱附实验装置, 评估其对典型有机磷农药污染土壤的修复效果。结果显示, 初始土壤中对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷含量分别为63.80、555.0、110.5和7.3 mg/kg, 其中甲拌磷与特丁硫磷分别超标41.69倍和54.25倍。在模拟地下水渗流条件下, 设定加热温度为95 °C, 经20 d处理后, 4种农药去除率分别达到89.03%、99.05%、98.82%和97.26%, 满足修复目标; 延长至30 d后, 去除率均超过99.90%, 低于检测限。加热距离显著影响升温速率及去除效率, 距热源5、10和15 cm处的升温速率分别为6.67、2.22和0.13 °C/min, 对应的农药平均半衰期分别为0.29、0.51和0.98 d。物料平衡分析表明, 有机磷农药主要通过热裂解或抽提-吸附方式被去除, 迁移至水相的比例仅为0.002%~0.211%。不同农药在土壤-水界面的迁移能力存在差异, 对硫磷和甲拌磷更易淋滤迁移。研究成果可为有机磷农药污染场地的原位热脱附修复工程提供理论依据与技术支持。

关键词: 热传导; 有机磷农药; 原位热脱附; 污染场地; 修复; 淋滤

中图分类号: X53 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.0700.25.338 文章编号: 1003-6504(2025)11-0050-06

Study on the Remediation of Pesticide Contaminated Soil by Low Temperature *in situ* Thermal Desorption

HAN Wei¹, ZHANG Haitao², CAO Hu^{3*}

(1. Solid Waste and Chemical Management Technology Center of Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China;

2. Beijing Zhong Huan Feng Qing Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100027, China;

3. Institute of Regional Education Research, China National Academy of Educational Sciences, Beijing 100088, China)

Abstract: The remediation of pesticide contaminated sites is complex and challenging. *In situ* thermal desorption is an effective remediation way to remove organic pollutants in contaminated site, however, energy saving is the main improvement direction. In this study, an *in situ* thermal desorption device based on low-temperature heat conduction was built, and the remediation effect and influencing factors of low-temperature heat conduction on contaminated soil from typical organophosphorus pesticide sites were studied based on natural scenario simulation. The results showed that the contents of parathion, phorate, terbufos and ethiphos in the tested soil were 63.80 mg/kg, 555.0 mg/kg, 110.5 mg/kg and 7.3 mg/kg, respectively. Compared with the remediation target value, phorate and terbufos exceeded 41.69 times and 54.25 times, respectively. Under the condition of leaching simulated groundwater flow, after heating at 95 °C for 20 days, the removal rates of parathion, phorate, terbufos and ethiphos in soil reached 89.03%, 99.05%, 98.82% and 97.26%, respectively, which met the remediation objectives. After 30 days of heating, the removal rates of the four pesticides exceeded 99.90%, which was lower than the detection limit. The heating distance significantly affected the heating effect and the removal of pollutants. The heating rates of contaminated soil at 5 cm, 10 cm and 15 cm from the heat source were 6.67 °C/min, 2.22 °C/min and 0.13 °C/min (in fast heating stage), respectively. The average half-lives of the four pesticides at different heat source distances were 0.29 d, 0.51 d and 0.98 d, respectively. Through material balance analysis, organophosphorus pesticides in contaminated soil were mainly removed by thermal cracking or adsorption after extraction, and the part of organophosphorus pesticides transferred to the aque-

ous phase was only 0.002%~0.211%. At the same time, after low-temperature heat conduction treatment, the migration of different types of pesticides at the soil-water interface showed great variation. Among them, parathion and phorate were more easily leached out, but they all met the Class III quality standard of groundwater. The experimental results and parameters can provide technical and process reference for the actual in-situ remediation project of organophosphorus contaminated sites.

Key words: heat conduction; organophosphorus pesticides; *in situ* thermal desorption; contaminated sites; remediation; leaching

土壤污染日益成为全球性重大问题,尤其是在工业活动和城市化密集的地区,复杂工业污染场地修复是一个世界性难题^[1]。我国农药生产 50% 以上为有机磷农药,尽管自 2006 年以来,甲胺磷、对硫磷等高毒有机磷品种列入禁限农药,但在农药开发和生产等活动中如发生泄漏,会对土壤和地下水造成长期、潜在的危害,产生大量的农药污染地块^[2-4]。农药对土壤环境的污染过程通常具有累积性、隐蔽性,且因分子量大、脂溶性高等特点而具有持久性、生物富集性和高毒性,对人体健康和生态环境造成严重威胁^[5],同时恶臭问题是农药污染场地治理修复过程中的巨大挑战。

原位热脱附技术是一种通过加热土壤促使污染物挥发并对其进行集中处理的土壤修复方法^[6],因具有良好的处理效果及较短的修复周期等诸多优势,在土壤修复中得到了越来越多的研究和应用^[5,6],适用的污染物包括苯系物、氯代烃、多环芳烃和石油烃等^[7-9]。传统原位热处理技术存在能耗和碳排放较高的弊端^[10],热脱附技术能耗和二氧化碳排放仍处于高位,亟需开展原位热处理技术优化以降低其能效比。相比其他加热方式,在加热效率及能耗方面,热传导热效率最高^[11]。常规的高温热脱附技术,如利用燃气热传导方式加热污染区域,温度最高可达 750~800 °C^[8]。目前原位热脱附实际工程案例其加热温度范围为 200~350 °C^[6],且为保证升温效果,减少地下水吸热及流动换热,常设置地下阻隔或地下水降水。目前加热温度相对较低的原位热脱附技术为电阻加热,其最高加热温度为 100 °C,常用的温度范围为 80~100 °C^[12]。低温的电阻加热是利用焦耳效应,将电能转化为热能以对物体进行加热,电极插入污染场地,电流流经介质时产生热量,加热通路上的土壤和水分,促使污染物从土壤表面脱附,同时土壤水分蒸发形成的蒸汽流将污染物带出,但是不适用于地下水流较快(流速大于 10⁻⁴ m/s),而且适用条件要求土壤含水率宜高于 20%,因此适用条件受限^[13]。因此,修复高沸点的异味物质时,原位热脱附成本中大部分能耗都被浪费,投入能耗大,修复成本高。有研究证实,当超过一定阈值后,升温对提升修复效果的经济性不

佳^[14],高温修复不可避免地产生高能耗及高成本,在确保修复目标条件下,优化热脱附参数条件,提高能量的有效利用率,避免过度修复,是实现低能耗绿色修复的关键。

针对热脱附技术存在高能耗、高碳排放的问题,优化加热方式是一种重要途径,如温度突破 100 °C 后,为预防场地升温过快,实施降低电功率等。本文设计了一种基于电热传导的低温加热方式,用于研究基于土壤分层且存在地下水流动条件下污染土壤有机磷农药的去除效果,旨在验证模拟基于自然条件下的农药污染土壤修复成效,摸索关键因素,掌握加热参数,为大规模实施绿色原位热传导修复工程提供技术支撑和借鉴。

1 材料与方法

1.1 装置系统

本实验所装置系统见图 1,主要包括加热装置、淋滤注水系统、淋滤液收集系统、气相抽提系统、尾气吸附处理系统等。

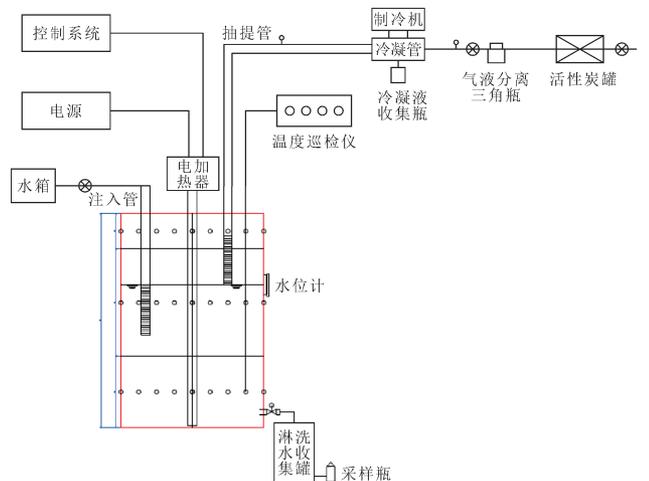


图1 热脱附装置系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of thermal desorption device system

模拟实验在直径为 40 cm、高 60 cm 的不锈钢圆桶中进行,为了模拟实际自然土层情况,加热装置内自上至下分别装填黏土 10 cm、污染土 20 cm 和砂土 20 cm。电加热棒为热源,加热棒加热端长度为 60 cm,加热功率为 0.6 kW。采用多通道温度巡检仪对不同深度、距热源不同水平距离的土壤温度进行采集。选用插入

式热电偶,利用胶塞在固定点位插入热电偶,确保监测点位准确。29个热电偶分别设置于黏土、污染土和砂土中。测温点与热源的水平距离分别设置为0、5、10和15 cm。对气体抽提管抽出气体进行换热冷凝,并利用活性炭吸附作用进行尾气处理。

主要设备及其参数型号如下:(1)电子式智能温度控制器采购自广东展毅公司,产地深圳市,温控范围 $-50\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$,型号WK7016C1。(2)气相抽提用风机为50微型管道风机,风量为 $36\text{ m}^3/\text{h}$,转速为 $14\ 700\text{ r}/\text{min}$,型号为JYF-50S,来自广东九叶风公司,产地广州。(3)热源加热棒来自浙江万森电热设备股份有限公司,使用加热设备为电加热棒,金属管体,材质不锈钢,直径 30 mm ,功率 600 W 。加热棒总长为 60 cm ,最高加热温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(4)多路温度记录仪用于不同点位土壤加热变化,采购自永鹏公司,产地广东中山,型号YP5000,32通道,5寸全触摸屏。测试温度: $-200\sim 1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,扫描速度 $60\text{ s}/\text{次}^{[15]}$ 。

1.2 运行参数

利用温控仪控制加热棒的启停,温控仪探头设置在距离热源 10 cm 位置,控制温度设定为 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。利用蠕动泵注水和排水模拟地下水降水过程,根据本场地粉土的平均渗透系数($3\sim 4\text{ L}/\text{d}$),蠕动泵流量设置为 $2\text{ mL}/\text{min}$ 。

采用多通道温度巡检仪对不同深度、距热源不同水平距离的点位的温度进行采集。深度分别设置于黏土、污染土和砂土中。测温点与热源的水平距离分别设置为 $0、5、10$ 和 15 cm 。本实验采用温控

仪控温方式加热,温控仪探头设置在距热源 10 cm 处,设置 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温控范围,探头传感温度在温控仪下限时,加热棒开始加热,当监测点位达到温控上限时,加热棒停止加热。待 10 cm 温度探头显示为 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,自动停止加热;取样时停止加热 6 h 自然冷却后再取样分析。

1.3 土壤及检测分析

为反映实际效果,避免使用标准溶液所配制污染土与实际老化污染土不同而带来的误差,所试土壤来自实际污染场地。

土样和淋滤水采样时间为距离热源 10 cm 处达到 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后的第 $0、1、4、7、10、15、20、25、30$ 天。采样前 $2\sim 3\text{ h}$,停止注水和加热,装置冷却后利用专用钻孔取样器原位采集土壤($5\sim 10\text{ g}$),对样品中的甲拌磷、对硫磷、乙硫磷及特丁硫磷、含水率及pH指标进行检测,每个样品做3个平行样。土壤等样品预处理及农药监测分析方法等严格参照文献[16]中提供的方法执行。

2 结果与讨论

2.1 热传导升温效果

系统运行开始后,热源装置中部温度迅速上升,呈现中间热、两头温的趋势。运行 30 min 后,热源中间核心温度达到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$;从 50 min 开始,温度上升速度变缓,进入平稳期,维持稳定在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。加热 40 min 后,加热体上部及下部的温度分别为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同加热装时间点试验装置剖面的温度变化见图2。

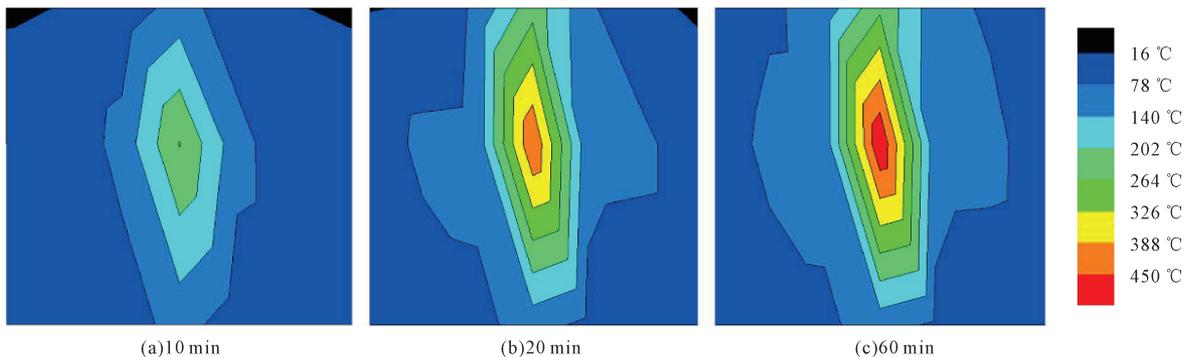


图2 不同加热时间装置剖面温度变化
Fig.2 Temperature change of device profile at different heating time

同一土层中与热源不同距离点位的土壤升温状况见图3,总体趋势为距热源越远的点位升温越慢。针对表层黏土,启动加热后,表层黏土中热源和距离热源 5 cm 处的点位升温明显,在 $0\sim 40\text{ min}$ 内,距离热源 5 cm 点位的土壤温度匀速升至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,随后升温速度变缓,此时黏土中的水分的大量蒸发会带走热量,温度处于稳定状态。加热 40 min 后,

10 cm 处点位则开始快速升温,最终稳定在 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在黏土层, 15 cm 距离点位土壤升温最慢。土壤包气带含水率较低时,热量传递主要为固、液、气间三相接触热传导传热,湿分的增加提高了介质的热传导能力,同时提高了介质的比热容,使导温率呈现先增大后减小的变化趋势,此规律与其他学者的研究结果一致^[11]。

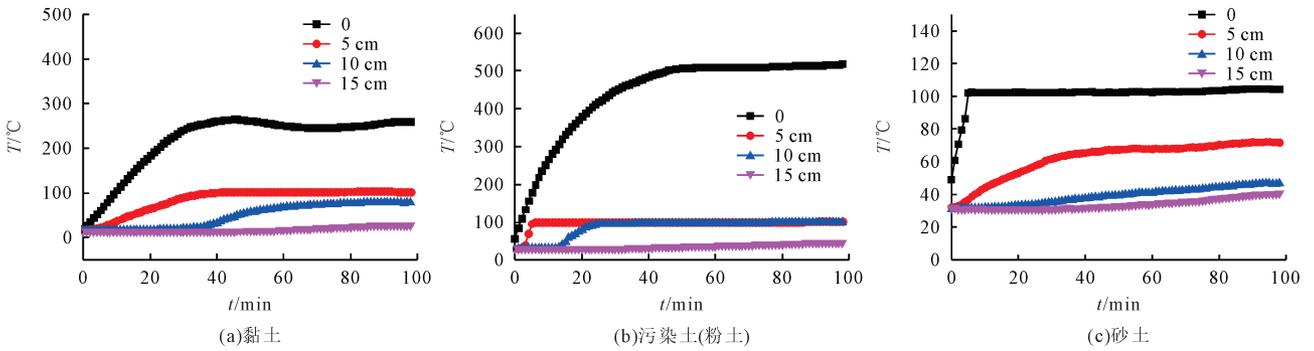


图3 距离热源不同距离的不同点位土壤升温效果
Fig.3 Temperature of the different soils from different locations

针对中层污染土壤,加热 10 min 后距离热源 5 cm 点位土壤温度升至 100 °C,加热 30 min 后距离热源 10 cm 点位土壤温度升至 95~100 °C,并维持稳定。距离 15 cm 处土壤升温最慢,加热 100 min 后土壤温度达到 46 °C。针对污染土壤,在升温阶段距离热源 5、10 和 15 cm 处的污染土壤升温速率分别为 6.67、2.22 和 0.13 °C/min。因此,加热距离显著影响升温效果及污染物去除。

针对低层砂土,因为饱和水的存在,砂土层中各点位温度均不超过 100 °C,加热 40 min 后 5、10 和 15 cm 处点位土壤的温度分别为 65、37 和 31 °C。加热 100 min 后 5、10 和 15 cm 处点位土壤的温度分别为 71、47 和 41 °C,因此,水的存在可实现土壤均匀加热。有研究证实,在原位热传导加热过程中,热源功率、含水层介质类型及地下水流速等因素对传热有重要影响^[15]。

针对不同距离(5、10 和 15 cm),污染土的升温速率明显高于表层黏土和低层砂土的升温速率,这与加热体结构、表层土接触外环境以及砂土位于水层等因素有关。其中,砂土层升温速率最慢。相比污染土和砂土,黏土层中热源距离对温度的影响更为显著,这主要是由于黏土层含水率低,热传导系数高,升温更为迅速^[11]。

2.2 不同农药衰减退除效果分析

所试污染土壤中对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷 4 种农药含量分别为 63.80、555.0、110.5、7.3 mg/kg,甲拌磷和特丁硫磷超标倍数分别为 41.69 和 54.25,污染较重;有研究表明农药污染场地中甲拌磷超标率最高且普遍被检出^[4],供试土壤具有很好的代表性。针对与热源不同距离的污染土,农药含量在不同加热阶段的变化情况如图 4~图 6。随着加热时间的延长,土壤中 4 种农药含量逐渐降低。加热处理效果总体上分为 2 个阶段,其中第 1~10 天为急剧衰减阶段,第 10~30 天为去除效果趋于稳定阶段。

针对距离热源 5 cm 点位的土壤,农药含量在不同加

热阶段的变化如图 4 所示。加热 10 d 后,该点位土壤中的甲拌磷和特丁硫磷含量均低于修复目标值,两者的含量分别从 555.0 和 110.5 mg/kg 降低至 9.6 和 1.9 mg/kg,去除率分别为 98.27% 和 98.28%;土壤中乙硫磷无检出,去除率达到 100%。加热 15 d 之后,此距离点位土壤中的农药含量趋于稳定且皆低于检出限。在 5 cm 加热处的土壤,对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷的半衰期分别为 0.11、0.01、0.06 和 0.96 d。4 种农药的平均半衰期为 0.29 d。

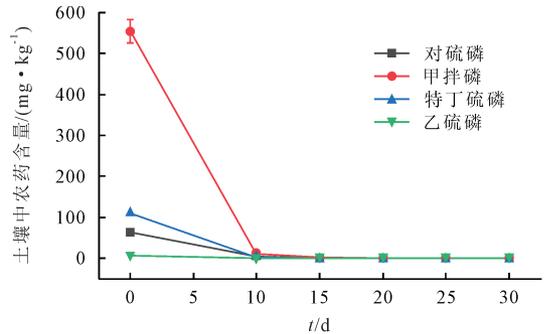


图4 距离热源5 cm 点位不同加热时间土壤农药含量
Fig.4 Pesticide content in soil 5 cm away from the heat source at different heating time

距离热源 10 cm 处的点位土壤中农药污染物在不同加热时间段的变化见图 5,距离热源水平距离 10 cm 处点位加热至 90 °C 并继续加热 1 d 后,土壤中对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷含量分别从 63.80、555.0、110.5 和 7.3 mg/kg 降至 50.30、334.0、96.4 和 7.0 mg/kg,去除率分别为 21.16%、39.82%、12.76% 和 4.11%,相比其他农药,乙硫磷表现出一定的“顽固性”;加热第 10 天时,土壤中甲拌磷和特丁硫磷的去除率分别为 89.96% 和 82.26%;加热第 20 天时,甲拌磷和特丁硫磷含量分别降至 4.3 mg/kg 和 1.3 mg/kg,此时 2 种污染物含量已低于修复目标值。对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷 4 种农药的去除率分别达到 89.03%、99.05%、98.82% 和 97.26%,满足修复目标。加热 20 d 后,土壤 4 种农药组分含量趋于稳定,加热 30 d,土壤中的 4 种农药基本低于检出限。其衰减退除符合一级降解动力学特征,

在10 cm加热处的土壤,对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷的半衰期分别为0.19、0.02、0.11和1.70 d。4种农药的平均半衰期为0.51 d。从开始运行至温控点位升温至90 ℃之间,甲拌磷的去除效果最显著。

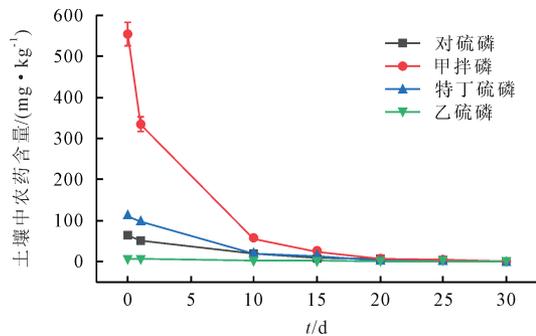


图5 距离热源10 cm点位不同加热时间土壤农药含量
Fig.5 Pesticide content in soil 10 cm away from the heat source at different heating time

距离热源15 cm处的点位土壤中农药污染物在不同加热时间段的变化见图6,在第1~15天,距离热源15 cm处点位土壤甲拌磷和特丁硫磷的浓度降低趋势缓慢,加热15 d后,对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷去除率仅分别为25.71%、4.32%、2.26%和52.05%;在加热15 d后的第二阶段,土壤中的农药去除效率提高,在第25天时,甲拌磷和特丁硫磷去除率超过90%;加热第30天时,土壤中农药含量满足修复达标,但是仍有检出。相比距离热源5 cm和10 cm的点位土壤,15 cm处土壤中农药去除效果低的主要原因是加热温度相对低,平均65 ℃。在15 cm加热处的土壤,对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷的半衰期分别为0.41、0.04、0.44和3.01 d。4种农药的平均半衰期为0.98 d。

加热距离是影响土壤中农药去除效果的重要因素,同等条件下,距离越远加热温度越低,污染物去除

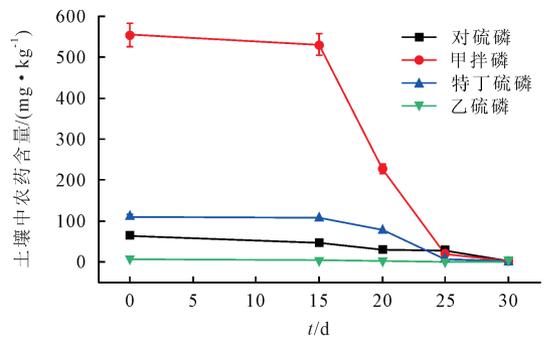


图6 距离热源15 cm点位不同加热时间土壤农药含量
Fig.6 Pesticide content in soil 15 cm away from the heat source at different heating time

效率越低,要达到修复目标值就需要更长的加热时间。距离、加热温度及加热时间是影响去除效果的关键因素。因此,工程实施过程中结合项目实际需求重点全文三者关系。高温条件(100~200 ℃)下,加热10 d即可达到修复目标值;中温条件下(90~100 ℃),加热15 d可达到修复目标值;低温条件下(50~70 ℃),需要加热30 d才能达到修复目标值。在高温热传导应用案例中,温度即使加热至300 ℃,其修复周期也需要30 d^[6],因此,本研究中的低温修复体现出一定的经济成本优势。此外,相同处理条件下,不同农药之间去除效果和变化趋势有较大差异,主要归因于不同农药污染物之间的物化性质的不同^[14]。

2.3 物料平衡初步分析

在热传导加热过程中,污染土壤中有机磷农药的去向主要有4种途径:降解、转移至气相(被抽提后处理)、转移至水相(渗滤液被集中收集)、残留于土壤中。对热脱附过程中的淋滤水样进行检测,通过热处理后农药去向及物料平衡情况见表1,在不同热处理阶段的淋滤水样中,农药组成差异较大。

表1 农药去向及平衡分析

Table 1 Fate and material balance analysis of organophosphorus pesticides

农药	土壤原始总量/mg	土壤残留量/mg	渗滤液中农药总量/μg	其他(气相抽提及热裂解等)/mg	气相抽提及降解等去除占比/%
对硫磷	3 651.05	2.86	89.16	3 648.10	99.919 1
甲拌磷	31 760.71	14.31	846.80	31 745.55	99.952 3
特丁硫磷	6 323.523	2.86	147.60	6 320.52	99.952 4
乙硫磷	417.75	2.86	884.78	414.00	99.103 3

经过30 d处理后,土壤中4种农药含量皆低于检出限,转移至水相中的农药含量极低,占比范围是0.002%~0.211%,其中相比处理前,水样中乙硫磷占比最高,因此,在实际热脱附工程中应更关注地下水中乙硫磷的归趋。通过热化学降解以及气相抽提处理的4种农药去除率皆大于99%,其中对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷的去除率大于99.9%。

在加热处理初期,甲拌磷迁移能力更强,容易迁移淋滤出(图7)。有研究表明相比其他有机磷农药,

甲拌磷在土壤中迁移能力更强^[14]。乙硫磷、特丁硫磷在处理后期才有大量淋滤(图7),说明其迁移能力较弱但持久性强。这可能与不同污染物的物化性质差异有关,相比其他3种农药,乙硫磷具有最大辛醇-水分配常数、最大分子量和最低水溶解度^[4,14]。

3 结论

(1)加热距离显著影响污染土壤升温效果及污染物去除,距离热源5、10和15 cm处的污染土壤升温速率

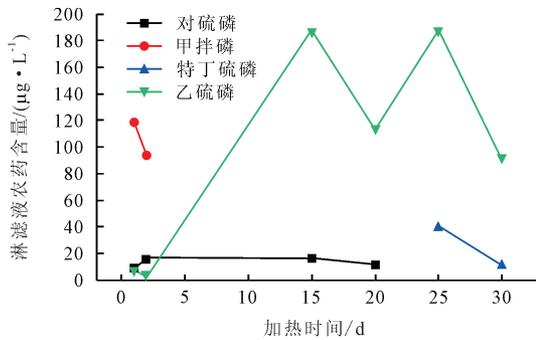


图7 不同加热时间收集的淋滤水中农药含量
Fig.7 Pesticide content in leachate collected at different heating time

分别为6.67、2.22和0.13 °C/min(升温阶段),不同热源距离处农药的平均半衰期分别为0.29、0.51和0.98 d。

(2)低温热传导处理下,距离热源5 cm的污染土壤,超标农药在热处理10 d后达标;距离热源10 cm点位土壤,超标农药在热处理20 d时达标;距离热源15 cm点位,超标农药在热处理30 d后达标。

(3)在淋滤模拟地下水流动情况下,在95 °C条件下加热20 d后,土壤中对硫磷、甲拌磷、特丁硫磷和乙硫磷4种农药的去除率分别达到89.03%、99.05%、98.82%和97.26%,满足修复目标;加热30 d后,4种农药去除率分别超过99.10%,低于检出限。

[参考文献]

- [1] Smith P, Poch R M, Lobb D A, et al. Status of the world's soils[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2024, 49:73-104.
- [2] 翟增秀,李伟芳,李佳音,等. 有机磷农药污染地块有机物质组成特征与异味物质识别[J]. 环境化学, 2025,44(1):164-173. Zhai Zengxiu, Li Weifang, Li Jiayin, et al. Composition characteristics of organic matter and identification of odorous substances in organophosphorus pesticide-contaminated land[J]. Environmental Chemistry, 2025,44(1):164-173.
- [3] 孟洁,王静,肖咸德,等. 有机磷农药污染地块异味污染调查与健康风险评估[J]. 岩矿测试, 2021,40(6):907-918.
- [4] 赵倩,籍龙杰,吕静,等. 有机磷农药生产场地污染分布特征分析[J]. 环境工程学报, 2023,17(3):929-937. Zhao Qian, Ji Longjie, Lyu Jing, et al. Analysis on distribution characteristics of soil organophosphorus pesticides (OPPs) in the production site[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023,17(3):929-937.
- [5] 籍龙杰,陈芒,张维琦,等. 原位热脱附去除土壤有机污染机理及技术研究[J]. 能源环境保护, 2022,36(5):46-52. Ji Longjie, Chen Mang, Zhang Weiqi, et al. Study of organic pollutant removal mechanism and technology for *in situ* thermal desorption in soil[J]. Energy Environmental Protection, 2022,36(5):46-52.
- [6] 韩伟. 热强化气相抽提在典型有机污染场地修复中的应用

[J]. 环境保护科学, 2022,48(4):7-12.

Han Wei. Application of thermal enhanced vapor extraction in remediation of typical organic pollutants contaminated site[J]. Environmental Protection Science, 2022,48(4):7-12.

- [7] Li D C, Xu W F, Mu Y, et al. Remediation of petroleum-contaminated soil and simultaneous recovery of oil by fast pyrolysis[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(9):5330-5338.
- [8] Vidonish J E, Zygourakis K, Masiello C A, et al. Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: a review of technology innovation for sustainable remediation[J]. Engineering, 2016,2(4):426-437.
- [9] Song W, Vidonish J E, Kamath R, et al. Pilot-scale pyrolytic remediation of crude-oil-contaminated soil in a continuously-fed reactor: treatment intensity trade-offs[J]. Environmental Science and Technology, 2019,53(4):2045-2053.
- [10] Ding D, Song X, Wei C L, et al. A review on the sustainability of thermal treatment for contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2019,253:449-463.
- [11] 韩亚鲁. 不同加热方式土中热湿迁移规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. Han Yalu. Study on the Law of Heat and Moisture Transfer in Soil Under Different Heating Methods[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [12] 顾俊彦,李忠元,王长安,等. 污染土壤热修复技术的研究现状及进展[J]. 化工环保, 2025,45(3):309-319. Gu Junyan, Li Zhongyuan, Wang Chang'an, et al. Research status and progress of thermal remediation technology for contaminated soil[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2025,45(3):309-319.
- [13] Horst J, Munholland J, Hegele P, et al. In situ thermal remediation for source areas: technology advances and a review of the market from 1988-2020[J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 2021,41(1):17-31.
- [14] 张坤,张杰西,王航,等. 某污染地块合成麝香在土壤中的分布特性及修复技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024,32(1):20-30. Zhang Kun, Zhang Jiexi, Wang Kang, et al. Study on distribution characteristics and remediation technology of synthetic musk in the contaminated site[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024,32(1):20-30.
- [15] Sun H, Qin X M, Yang X R, et al. Study on the heat transfer in different aquifer media with different groundwater velocities during thermal conductive heating[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(29):36316-36329.
- [16] Han W, Ye Y, Liu S, et al. Characterization and thermal removal of organophosphorus pesticides in soils from a former agrochemical factory[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022,19(11):10845-10854.