

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.100

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



石油烃污染土壤活性碳增强微波热修复及 菌剂深度降解试验研究

陈维墉¹, 胡林潮¹, 朱雷鸣², 贺晓江², 陈婕¹, 张文艺¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 中石化广州工程有限公司, 广州 510000)

摘要:利用活性碳增强微波热效应对某石油化工厂区石油烃污染土壤进行修复研究,在微波处理最佳条件下,考察场地石油烃污染土壤的处理效果,通过三维荧光(3D-EEM)和气相色谱(GC)分析了石油烃污染物的组分和去除特性,并采用菌剂强化法对修复后的土壤进行深度生物降解试验。结果表明:活性碳增强微波热修复技术对石油烃污染土壤具有较好的去除效果,在微波功率700 W、辐照15 min、土壤含水率10%、添加5%活性碳的试验条件下,可将土壤中的石油烃含量由5 700 mg/kg降至2 800 mg/kg,去除率达50.9%;GC分析表明:土壤中污染组分主要为TPH(C₆—C₉)、TPH(C₁₅—C₂₈)和TPH(C₂₉—C₃₆),经微波热修复后,土壤中TPH(C₁₅—C₂₈)去除率较高,达到70.4%;3D-EEM解析表明:微波热消解对土壤中三环芳烃及其同系物去除效果较好;对微波热修复后的土壤进行工程菌剂深度生物降解14 d后,污染土壤中石油烃含量降至716.8 mg/kg,去除率提升至74.4%,达到《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中的第一类用地筛选值。

关键词:石油烃;污染土壤;微波热修复;石油降解菌

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)04-0195-07

Study on activated carbon enhanced microwave thermal remediation and deep degradation of microbial agent in petroleum contaminated soil

CHEN Weiyong¹, HU Linchao¹, ZHU Leiming², HE Xiaojiang², CHEN Jie¹, ZHANG Wenyi¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, P. R. China;
2. Sinopec Guangzhou Engineering Co., Ltd, Guangzhou 510620, P. R. China)

Abstract: The remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil was studied by using activated carbon enhanced microwave thermal effect technology in a petrochemical plant. Under the best condition of microwave treatment, the treatment effect of petroleum hydrocarbon contaminated soil was investigated in the site. The components and removal characteristics of petroleum pollutants were analyzed by 3D-EEM (three-dimensional fluorescence) and GC (gas chromatography), and the deep biodegradation test of the

收稿日期:2020-03-26

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技计划(319005-7);江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX19_0644)

作者简介:陈维墉(1995-),男,主要从事土壤修复研究,E-mail:546984051@qq.com。

张文艺(通信作者),男,教授,E-mail:zhangwenyi888@sina.com。

Received:2020-03-26

Foundation items: Science and Technology Project of Sinopec (No. 319005-7); Research and Practice Innovation Program for Postgraduates in Jiangsu Province (No. SJCX19_0644)

Author brief: CHEN Weiyong (1995-), main research interest: soil remediation, E-mail: 546984051@qq.com.

ZHANG Wenyi (corresponding author), professor, E-mail: zhangwenyi888@sina.com.

repaired soil was carried out by the bacterial strengthening method. The results showed that the activated carbon enhanced microwave thermal remediation technology had a better removal effect on petroleum hydrocarbon contaminated soil. Under the experimental conditions of microwave power of 700 W, irradiation for 15min, soil moisture content of 10% and addition of 5% activated carbon, the content of petroleum hydrocarbon in the soil could be reduced from 5 700 mg/kg to 2 800 mg/kg, and the removal rate reached 50.9%; GC analysis showed that the main pollutants in the soil were TPH (C₆—C₉), TPH (C₁₅—C₂₈) and TPH (C₂₉—C₃₆), and after the microwave thermal remediation, the removal rate of TPH (C₁₅—C₂₈) in the soil was higher, reaching 70.4%; Based on 3D-EEM analysis, the results showed that the microwave thermal remediation had a better effect on removing tricyclic aromatic compounds and their homologues in the soil. The deep biodegradation of the engineered bacterial agent was carried out on the soil after microwave thermal remediation, the results showed that after 14 days of degradation, the content of petroleum hydrocarbon in the contaminated soil decreased to 716.8 mg/kg, and the removal rate increased to 74.4%, which reached the first class of land selection value in standard for Soil Environmental Quality Standards for Soil Pollution Risk Control of Construction Land (Trial) (GB 36600—2018).

Keywords: petroleum hydrocarbons; contaminated soil; microwave thermal remediation; petroleum degrading bacteria

近年来,随着社会经济的迅速发展以及城市工业结构调整、工业企业搬迁、城市空间规划重构等因素形成了各种类型的污染场地^[1],这些场地来源于化工、机械、冶炼、汽车、印染、制药、食品等企业,其中绝大部分污染场地均存在石油烃^[2]。中国石油类企业每年产生落地油约 700 万 t^[3],以石化行业加工、加油站企业等的污染最严重,其污染物主要来自于生产活动中的废水渗漏、固体废弃物的堆积、原材料的使用及储存过程中的跑冒滴漏等。这类搬迁场地大部分分布在主城区,具有数量多、分布广、隐蔽性高、危害性大等特点。

针对石油烃污染土壤的修复,现阶段的方法主要有以物理技术为主的电动修复、气相抽提、热解析,以化学技术为主的化学氧化,以生物技术为主的微生物修复和植物修复。其中,电动修复技术对于难溶于水且不易迁移的石油组分往往去除效率较低^[4],气相抽提技术受制于土壤自身的原始性质^[5];化学氧化技术包括芬顿试剂氧化、臭氧氧化、高锰酸钾等试剂氧化,该技术往往不确定性大,外源物质的引入对土壤环境有二次污染的隐患^[5];微生物、植物修复技术存在耗时长且效率低等问题。微波热修复技术是热解吸的一种新兴技术,具有快捷、高效、适用性广等优点,引起了学者的广泛研究^[6-7]。近年多采用各类敏化剂进行微波修复有机污染土壤的试验,Calvert 等^[8]和 Apul 等^[9]添加涂层石墨棒作为敏化材料分别微波处理六氯苯、石油污染土壤,其中

六氯苯去除率比未加涂层石墨棒高 125%,TPH 含量从 11 000 mg/kg 降至 2 000~6 000 mg/kg;刘爱宝等^[10]、Zhao 等^[11]均采用微波辐照修复氯丹污染土壤,活性碳的添加可使氯丹去除率达 90%左右;曹梦华等^[12]、王贝贝等^[13]研发微波土壤修复设备,对土壤中的 HCB、4-NP、DDT 等污染物辐照 30 min 后,4-NP、HCB 的去除率均可达 90%以上,DDT 的去除率可达 77.6%。这些研究多以人工配制的模拟污染土壤为研究对象,仅以其中的有机物去除为研究目标,未见对实际污染土壤及其去除机制的研究报道。高效敏化剂活性碳可强化微波消解石油烃,能快速吸收微波并升温,且高温下稳定,对石油烃污染物的去除效果好。如李大伟^[14]的研究表明,碳材料辅助微波消解石油污染土壤,具有较高的去除效率。

笔者采用“微波热修复+工程菌剂深度生物降解”联合技术修复常州某石油化工厂区石油烃污染土壤,通过添加高效敏化剂活性碳进行微波热修复试验研究,探究场地石油烃污染土壤的修复效果,并利用 3D-EEM、GC 分析石油烃污染物的组成及去除特性,研究其去除机制,探索工程菌剂深度生物降解的可行性。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自江苏省常州某石油化工厂区的搬

迁遗留场地,总占地面积 12 万 m^2 (其中重污染厂区内面积约 5 000 m^2),主要从事石化产品及润滑油生产,由于该地块规划用地的变更,2017 年厂区停产并完成搬迁。

土壤样品采自深度 0~1 m 的生产厂区内,表面油泥可见,经采集后风干、去杂、研磨(过 2 mm 筛)、密封备用。经测定土壤的 pH 值为 7.63、含水率 5.3%、有机质含量 12.38 g/kg,试验土壤为粘土,污染土壤中总石油烃含量 5 700 mg/kg。

1.2 试验仪器与试剂

试验试剂:粉状活性炭、二氯甲烷,试剂均为分析纯;试验仪器:K 型热电偶、石英管、恒温培养箱和改造的家用微波炉;试验装置见图 1。

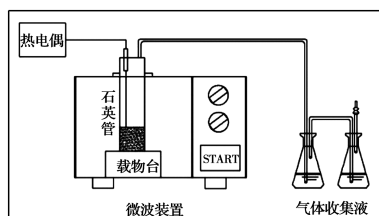


图 1 微波炉改造试验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental equipment for microwave oven modification

1.3 菌株来源

试验使用的石油降解菌种筛选于来自大庆油田某采油井的含油污泥,经测定该菌株为腐败希瓦氏菌 (*Shewanella putrefaciens*),命名为 SY-3,保藏编号:CGMCC No. 17505,专利申请号:201910720937.9。所述石油降解菌对含油污泥中石油烃类的降解条件为 25~30 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.5~8,30 d 后含油污泥中石油烃类去除率达到 65.894%,降解效果显著。

1.4 试验设计及运行

参考已有研究^[14-15],试验在微波辐照功率 700 W 条件下称取 5.0 g 土样于石英管中,控制场地石油烃污染土壤含水率 10%,并添加质量分数为 5% 的活性炭混匀,放入微波装置中单独处理 5、10、15、20 min,处理完成后,待土样冷却至室温,准确测定石油烃污染土壤的残留含量,试验过程产生的石油烃气体由气体收集液进行收集和处理。

将微波热修复后的场地石油烃污染土壤置于锥形瓶中,按照土样:菌液(1:1)比例,加入 5 mL 的石油降解菌,并置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 的恒温培养箱内振荡培养,每隔 7 d 取样测定污染土壤中石油烃含量,连续测定 4 个周期。试验均设置 3 个重复,并采用标准差 SD 进行误差分析。

2 测试项目与分析方法

2.1 样品前处理

将微波热处理前后的土壤样品于 40~45 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 12 h,然后准确称取烘干后的待测土壤样品 0.1 g 于锥形瓶中,并向锥形瓶中加入 20 mL 的二氯甲烷,恒温培养箱内(25 $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min)振荡提取 30 min,最后将提取液过滤后移入 25 mL 比色管中,二氯甲烷定容至 25 mL 作为待测液。

2.2 三维荧光的测定

三维荧光分析采用荧光分光光度计(安捷伦, Cary Eclipse, 2014 年)进行测定,扫描速度 1 200 nm/min,扫描范围:激发波长(λ_{Ex})为 220~400 nm,发射波长(λ_{Em})为 250~550 nm。其中,使用超纯水扣除空白。

2.3 GC 石油含量组分测定

样品处理后密封,及时送至江苏康达检测技术股份有限公司进行检测,场地污染土壤石油烃的测定标准采用《土壤和沉积物 石油烃(C_6 — C_9)的测定 吹扫捕集/气相色谱法》(HJ 1020—2019)、《土壤和沉积物 石油烃(C_{10} — C_{40})的测定 气相色谱法》(HJ 1021—2019)。

3 结果

3.1 场地石油烃污染土壤微波去除效果

微波热修复对场地石油烃污染土壤加热升温及去除率的影响见图 2。由图 2 可知,与不加活性炭的对照组相比,试验土壤表面温度及石油烃去除率有显著性差异。随着辐照时间的增加,加入 5% 活性炭组升温速率高,辐照 20 min 后,土壤表面温度高达 510.6 $^{\circ}\text{C}$,未加活性炭组温度仅有 129.8 $^{\circ}\text{C}$,由于活性炭本身具有较大的介电损耗系数,其物质的加入增强了污染土壤体系对微波的吸收和传热能力,使土壤温度迅速升高^[6],故加入 5% 活性炭试验组升温速率快,反应终了体系温度高;微波热修复的主要机理是依靠反应体系内易挥发和半挥发污染物受热后的分解挥发作用^[16],故随着微波辐照的进行,加入 5% 活性炭组石油烃污染物的去除率较高,辐照 15 min 后,反应体系基本达到平衡,此时加入 5% 活性炭组石油烃污染物的去除率达 50.9%,不加活性炭组石油烃去除效果较低,仅为 14.3%,活性炭的加入不仅提升了反应体系温度,且作为微波

体系的催化剂,降低反应的活化能,使石油烃污染物的去除快速、高效^[17]。研究选择辐照 15 min 为最佳条件,此时处理后的石油烃含量为 2 798.7 mg/kg,低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中的第二类工业用地筛选值(4 500 mg/kg),可作为工业建设用地进行开发。

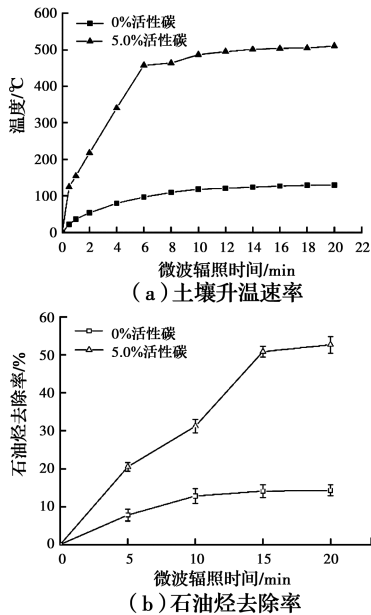


图 2 微波热修复对场地石油烃污染土壤加热升温及去除率的影响

Fig. 2 Effect of microwave thermal remediation on the heating up and removal rate of petroleum hydrocarbon contaminated soil

3.2 石油烃污染物去除的三维荧光解析

石油中含有丰富的芳香烃成分,此类物质具有长共轭、刚性和共平面性的分子结构,是一种强荧光物质,而多环芳烃作为这种分子的代表,毒性较大,可用于反映石油污染的种类及程度^[18]。因此,对微波热处理 15 min 前后的场地石油烃污染土壤进行 3D-EEM 分析,处理前后土壤的三维荧光见图 3。由图 3 可以看出,处理前石油烃污染土壤的荧光区域主要位于发射波长为 260~550 nm、激发波长为 230~380 nm 的区域,处理后的石油烃污染土壤的荧光区域主要位于发射波长为 260~530 nm、激发波长为 230~360 nm 的区域。由图 3(a)可知,石油烃污染土壤在 $E_m/E_x = (270 \sim 300 \text{ nm}) / (240 \sim 260 \text{ nm})$ 与 $(340 \sim 400 \text{ nm}) / (240 \sim 280 \text{ nm})$ 范围出现 2 个峰,根据相关研究^[19-21],前者为单环芳烃及其同系物,后者为三环芳烃及其同系物(340 nm 为菲、360 nm 为屈、380 nm 为蒽);且单环芳烃及其同系物的

激发/发射光谱峰在 280 nm 左右短波长范围内,随着芳烃环数的增加和结构的复杂,其激发/发射光谱峰向长波长方向移动。因此,试验石油烃污染土壤中的芳香烃类物质主要为单环芳烃、三环芳烃及相应同系物,经过微波热消解后,由于污染土壤中低分子芳烃其热稳性较差、含量高,故其相应三环芳烃及其同系物对应区域的峰值明显降低,去除效果较好。

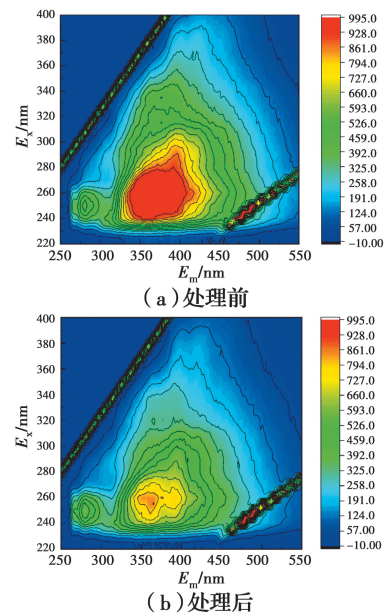


图 3 三维荧光光谱图

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectra

3.3 石油烃污染土壤 TPH 组分去除机制

石油烃污染物中成分复杂,GC 分析技术可获取更多的石油烃组成信息,常被用石油污染土壤的检测。对微波热处理 15 min 前后的场地石油烃污染土壤进行 GC 分析,并采用标准曲线进行验证,污染土壤中石油烃处理前后各组分变化见表 1。

表 1 石油烃污染土壤中组分变化

Table 1 Changes of components in soil polluted by petroleum hydrocarbons

石油组分	处理前/ (mg · kg ⁻¹)	处理后/ (mg · kg ⁻¹)	去除 率/%
TPH(C ₆ —C ₉)	105	93	11.4
TPH(C ₁₀ —C ₁₄)	未检出	未检出	
TPH(C ₁₅ —C ₂₈)	4 045	1 197	70.4
TPH(C ₂₉ —C ₃₆)	1 550	1 510	2.6
TPH(C ₃₇ —C ₄₀)	未检出	未检出	
总石油烃	5 700	2 800	50.9

由表 1 可得,场地土壤中总石油烃含量为 5 700 mg/kg,经过微波热修复后去除率可达 50.9%,土壤

中污染物组分主要为 TPH(C₆—C₉)、TPH(C₁₅—C₂₈)和 TPH(C₂₉—C₃₆)。石油中碳链越长,其分子量越大,沸点越高,挥发性越差,将 TPH(C₆—C₉)、TPH(C₁₅—C₂₈)、TPH(C₂₉—C₃₆)3种污染物分别模拟挥发性、半挥发性和难挥发性有机物。挥发性有机物 TPH(C₆—C₉)检测含量仅为 105 mg/kg,相关研究表明^[22],土壤中有有机污染物含量较低时,污染物吸附性较强,紧密吸附至土壤颗粒中,去除速率低,故挥发性有机物 TPH(C₆—C₉)去除率较低,仅为 11.4%;半挥发性有机物 TPH(C₁₅—C₂₈)含量高达 4 045 mg/kg,且去除率高达 70.4%,微波在高速升温过程中,污染物 TPH(C₁₅—C₂₈)中部分半挥发性有机物达到沸点,受热发生分解、挥发,随土壤中水分脱离出来;难挥发性有机物 TPH(C₂₉—C₃₆)处理前后含量率无明显变化,这是由于 TPH(C₂₉—C₃₆)分子量较大,碳链之间紧密结合,沸点高,难以分解、挥发,故去除率较低。

结合三维荧光解析,推测去除机制为^[22-23]:石油烃污染土壤在微波场中消解的同时,由于活性碳材料的加入增强了污染土壤体系对微波的吸收,致使体系温度急剧上升,石油烃污染物 TPH(C₆—C₉)、TPH(C₁₅—C₂₈)短链中的挥发性、半挥发性有机污染物通过受热后挥发进行污染物去除,难挥发性有机物 TPH(C₂₉—C₃₆)可通过菌剂深度降解进行污染物的去除。

3.4 工程菌剂深度生物降解效能研究

研究表明,石油烃长链碳分子有机物具有吸附紧密、挥发性低、难降解等特点,微波热修复技术手段无法实现石油烃污染物的 100%去除,而许多微生物能以烃类作为唯一碳源和能源生长,可实现微波热修复后剩余石油烃长链(C₂₈—C₄₄)污染物的降解,并将其降解为 CO₂ 和 H₂O 或无害物质^[24-25]。且该技术具有绿色环保、成本较低、适用性广、不产生二次污染等优势^[26-28]。试验按照固液比 1:1加入 5 mL 筛选的石油降解菌 SY-3,对微波热修复后的石油烃污染土壤进行工程菌剂深度生物降解试验研究,其石油降解菌对场地石油烃污染土壤的降解率见图 4。

由图 4 可知,降解前第 0 d 时,微波热修复后场地石油烃污染土壤去除率为 50.9%,石油烃含量为 2 800 mg/kg,加入石油降解菌 SY-3 后,随着降解时间的增加,场地石油烃污染土壤中石油烃的去除率

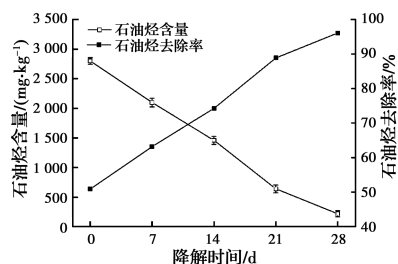


图 4 石油降解菌对场地石油烃污染土壤的降解率

Fig. 4 Degradation rate of petroleum degrading bacteria to soil polluted by petroleum hydrocarbon

逐渐升高,当降解时间达到 14 d 时,土壤中石油烃去除率提高至 74.4%,且石油烃含量降至 716.8 mg/kg,并达到《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中的第一类用地筛选值(826 mg/kg),随着石油降解菌降解时间的增加,4 个周期后(28 d)石油烃去除率最高可达 96.1%,由上述 GC 分析可知,微波热修复后,污染土壤中长碳链的 TPH(C₁₅—C₂₈)和 TPH(C₂₉—C₃₆)含量较高,经石油降解菌剂深度处理后,组分含量逐渐减小,表明石油降解菌 SY-3 的加入对微波热修复后石油烃内难挥发组分 TPH(C₁₅—C₂₈)和 TPH(C₂₉—C₃₆)具有明显的深度生物降解作用。

4 结论

1)在微波功率 700 W、土壤含水率 10%、微波辐照时间 15 min 的最佳条件下,添加 5%活性炭,场地石油烃污染土壤去除率可达 50.9%,土壤表面温度可达 500 °C 左右,污染物石油烃的去除主要依靠反应体系内易挥发和半挥发污染物受热后的分解挥发作用。

2)通过对微波处理前后场地石油烃污染土壤的 3D-EEM 比较分析,石油烃污染土壤中的芳烃类物质主要为单环芳烃、三环芳烃及相应同系物,其中,三环芳烃及其同系物去除率较高;基于对微波热修复前后成分的 GC 分析,场地污染土壤中污染物主要为 TPH(C₆—C₉)、TPH(C₁₅—C₂₈)和 TPH(C₂₉—C₃₆),其中,TPH(C₁₅—C₂₈)去除效率最高,可达 70.4%。

3)结合 3D-EEM 和 GC 分析,推测石油烃污染土壤去除机制为:石油烃污染土壤在微波场中消解的同时,由于活性碳材料的加入增强了污染土壤体系对微波的吸收,致使体系温度升高,石油烃污染物

内 TPH(C_6-C_9)、TPH($C_{15}-C_{28}$)短链中的挥发性、半挥发性有机污染物通过受热后挥发,进行污染物去除。

4)对微波热修复后的场地石油烃污染土壤进行工程菌剂深度降解研究,降解时间 14 d 后,石油烃含量降至 716.8 mg/kg,达到《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中的第一类用地筛选值(826 mg/kg),降解 28 d 后,石油烃去除率可达 96.1%。

参考文献:

- [1] 常春英,肖荣波,章生健,等. 城市工业企业搬迁遗留污染场地再开发环境管理问题与思考[J]. 生态经济, 2016(8): 191-195.
CHANG C Y, XIAO R B, ZHANG S J, et al. The problems and thoughts on environmental management in redevelopment of contaminated sites of relocated industrial enterprises in urban centers [J]. Ecological Economy, 2016(8): 191-195. (in Chinese)
- [2] 吴昊. 大连某 TPH 污染场地原位强化过硫酸钠修复技术研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2017.
WU H. Study on in-situ enhanced sodium persulfate remediation technology at a TPH contaminated site in Dalian[D]. Shenyang: Shenyang University, 2017. (in Chinese)
- [3] 刘五星, 骆永明, 王殿玺. 石油污染场地土壤修复技术及工程化应用[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(3): 47-51.
LIU W X, LUO Y M, WANG D X. Advances and prospects in remediation technology and large-scale applications for petroleum contaminated soil [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23(3): 47-51. (in Chinese)
- [4] 李佳, 曹兴涛, 隋红, 等. 石油污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(5): 811-833.
LI J, CAO X T, SUI H, et al. Overview of remediation technologies for petroleum-contaminated soils [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2017, 33(5): 811-833. (in Chinese)
- [5] 陈果, 王景瑶, 李聚揆. 石油烃污染土壤修复技术的研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(5): 1014-1018.
CHEN G, WANG J Y, LI J K. The research developments in remediation technology of petroleum hydrocarbon contaminated soils [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(5): 1014-1018. (in Chinese)
- [6] 易辰博. 微波热修复有机物污染场地土壤技术进展[J]. 江西科学, 2015, 33(1): 116-121.
YI C B. Microwave introduced thermal remediation technologies of organic contaminated soil [J]. Jiangxi Science, 2015, 33(1): 116-121. (in Chinese)
- [7] CHEN G, CHEN J, PENG J H. Effects of mechanical activation on structural and microwave absorbing characteristics of high titanium slag [J]. Powder Technology, 2015, 286: 218-222.
- [8] CALVERT C A, SUIB S L. An initial study into the use of microwave remediation of hexachlorobenzene treated soil using selected oxidants and coated graphite rods [J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(3): 147-152.
- [9] APUL O G, DELGADO A G, KIDD J, et al. Carbonaceous nano-additives augment microwave-enabled thermal remediation of soils containing petroleum hydrocarbons [J]. Environmental Science: Nano, 2016, 3(5): 997-1002.
- [10] 刘爱宝, 孙文全, 成维川, 等. 微波辐照修复氯丹污染土壤的影响因素[J]. 化工环保, 2016, 36(1): 96-100.
LIU A B, SUN W Q, CHENG W C, et al. Factors affecting remediation of chlordane-contaminated soil by microwave irradiation [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2016, 36(1): 96-100. (in Chinese)
- [11] ZHAO H, ZHOU R, ZHAO M Y, et al. Effects of different absorbing medium on microwave remediation of chlordane contaminated soil [J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(4): 750-754.
- [12] 曹梦华, 朱湖地, 王琳玲, 等. 自制微波设备修复污染土壤的实验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 113-116.
CAO M H, ZHU H D, WANG L L, et al. Experimental tests for remedying contaminated soil by home-made microwave equipments [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 113-116. (in Chinese)
- [13] 王贝贝, 朱湖地, 胡丽, 等. 硝基酚、六氯苯污染土壤的微波修复[J]. 环境化学, 2013, 32(8): 1560-1565.
WANG B B, ZHU H D, HU L, et al. Remediation of 4-Nitrophenol and hexachlorobenzene contaminated soils using microwave energy [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(8): 1560-1565. (in Chinese)
- [14] 李大伟. 石油污染土壤的碳材料增强微波热修复研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
LI D W. Study on carbon material enhanced microwave

- thermal remediation of petroleum-contaminated soil [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2008.
- [15] 吕顺亮, 王仪超, 徐炎华, 等. 微波耦合超声波技术处理柴油污染土壤[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(Sup2): 304-307.
- LV S L, WANG Y C, XU Y H, et al. Experimental study of remediation of diesel contaminated soil with microwave-ultrasonic [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(Sup2): 304-307. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 张茹, 张学杨, 王昌松, 等. 微波辐照活性炭催化还原氮氧化物性能[J]. 环境科技, 2018, 31(5): 15-19.
- ZHANG R, ZHANG X Y, WANG C S, et al. Catalytic reduction of NO_x by activated carbon under microwave irradiation [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 31(5): 15-19.
- [18] 左兆陆, 赵南京, 孟德硕, 等. 基于三维荧光光谱的土壤中石油类有机物分类识别[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222601.
- ZUO Z L, ZHAO N J, MENG D S, et al. Identification of petroleum organic matter in soil based on three-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222601.
- [19] 杨丽丽. 石油类污染物的三维荧光光谱测量与识别方法研究[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- YANG L L. Research on 3D fluorescence spectrum measurement and identification of petroleum pollutants [D]. Qinhuangdao, Hebei: Yanshan University, 2013.
- [20] 李爱民, 连增艳, 杨仁杰, 等. 基于三维荧光光谱直测土壤中的多环芳烃[J]. 环境化学, 2018, 37(4): 910-912.
- LI A M, LIAN Z Y, YANG R J, et al. Direct determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil based on three-dimensional fluorescence spectrum [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(4): 910-912. (in Chinese)
- [21] ZHOU Z Z, GUO L D, SHILLER A M, et al. Characterization of oil components from the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico using fluorescence EEM and PARAFAC techniques [J]. Marine Chemistry, 2013, 148: 10-21.
- [22] 唐金华. 多环芳烃污染土壤的微波修复技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- TANG J H. Study on microwave remediation of PAHs-contaminated soil [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [23] PIÑA J, MERINO J, ERRAZU A F, et al. Thermal treatment of soils contaminated with gas oil: influence of soil composition and treatment temperature [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 94(3): 273-290.
- [24] 张子间, 刘勇弟, 孟庆梅, 等. 微生物降解石油烃污染物的研究进展[J]. 化工环保, 2009, 29(3): 193-198.
- ZHANG Z J, LIU Y D, MENG Q M, et al. Research progresses on biodegradation of petroleum hydrocarbon pollutants [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, 29(3): 193-198. (in Chinese)
- [25] 苏荣国, 牟伯中, 王修林, 等. 微生物对石油烃的降解机理及影响因素[J]. 化工环保, 2001, 21(4): 205-208.
- SU R G, MU B Z, WANG X L, et al. Biodegradation mechanism and affecting factors of petroleum hydrocarbons [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2001, 21(4): 205-208. (in Chinese)
- [26] MORALES-GUZMÁN G, FERRERA-CERRATO R, RIVERA-CRUZ M D C, et al. Diesel degradation by emulsifying bacteria isolated from soils polluted with weathered petroleum hydrocarbons [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 121: 127-134.
- [27] 张娟, 方祥位, 刘汉龙, 等. 石油污染土中微生物的分离鉴定及降解特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 144-152.
- ZHANG J, FANG X W, LIU H L, et al. Isolation, identification and degradation characteristics of microorganisms in petroleum contaminated soil [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 144-152.
- [28] 曹小方, 方祥位, 刘汉龙, 等. 石油烃混合降解菌对汽油污染土的降解条件优化试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 195-202.
- CAO X F, FANG X W, LIU H L, et al. Optimization of degradation conditions of gasoline-contaminated soil by petroleum hydrocarbon-degrading bacteria [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 195-202.

(编辑 胡玲)