

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.018



开放科学(资源服务)标识码OSID:



植物-微生物联合修复柴油污染土试验研究

申春妮¹, 曹小方^{2,3}, 李腾⁴, 方祥位², 张伟⁵, 余咏平⁵

(1. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 3. 苏交科集团股份有限公司检测研究院 安全研究中心, 南京 211100; 4. 32102部队, 山东烟台 265200; 5. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401311)

摘要:利用石油降解菌混合菌和紫花苜蓿、高羊茅2种植物对不同浓度柴油污染土进行植物修复、微生物修复和植物-微生物联合修复室外盆栽对比试验,研究植物修复与植物-微生物联合修复试验中植物种子萌芽率和植物生长状况,采用超声萃取-紫外分光光度法分析3种修复方式对柴油污染土的降解效果。试验结果表明,柴油延长了植物种子的萌芽时间;在植物修复和植物-微生物联合修复过程中,高羊茅的植物生物量和株高大于紫花苜蓿,植物-微生物联合修复的植物生物量和株高总体上明显高于植物修复;3种修复方式修复柴油污染土的总体降解效果排序为:植物-微生物联合修复>微生物修复>植物修复;高羊茅的修复效果优于紫花苜蓿;柴油污染土的柴油浓度越低,修复效果越好。

关键词:柴油污染土;土壤修复;石油降解菌;紫花苜蓿;高羊茅

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)03-0145-09

Experimental study on remediation of diesel contaminated soil by plant-microorganism combination

SHEN Chunni¹, CAO Xiaofang^{2,3}, LI Teng⁴, FANG Xiangwei², ZHANG Wei⁵,
YU Yongping⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. JSTI Safety Research Department Testing Division, Nanjing 211100, P. R. China; 4. Unit 32102 of the Chinese People's Liberation Army, Yantai 265200, Shandong, P. R. China; 5. Department of Military Installations, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: The comparative experiments of phytoremediation, microbial remediation and plant-microorganism combined remediation of outdoor dotted plant for different contents of diesel contaminated soil were carried by

收稿日期:2021-11-25

基金项目:重庆社会事业与民生保障科技创新专项重点研发项目(cstc2017shms-zdyfX0073)

作者简介:申春妮(1976-),女,副教授,主要从事岩土微生物技术及建筑材料研究,E-mail:scn1999@163.com。

方祥位(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:fangxiangwei1975@163.com。

Received:2021-11-25

Foundation item:Key Projects of Scientific and Technological Innovation for Social Undertaking and Peoples Livelihood Guarantee in Chongqing (No. cstc2017shms-zdyfX0073)

Author brief:SHEN Chunni (1976-), main research interests: geotechnical microbiology technology and building material, E-mail: scn1999@163.com.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fangxiangwei1975@163.com.

using mixed strains of petroleum hydrocarbon degrading bacteria and two kinds of plant (alfalfa and tall fescue). The germination rate of plant seeds and plant growth status in phytoremediation and plant-microorganism combined remediation experiments were studied, and the degradation effects on diesel contaminated of three remediation methods by ultrasonic extraction ultraviolet spectrophotometry were analyzed. The experimental results show that diesel oil delayed the germination time of plant seeds. The plant biomass and plant height of tall fescue are greater than that of alfalfa in the process of phytoremediation and plant-microorganism combined remediation. As a whole, the plant biomass and plant height of plant-microorganism combined remediation are significantly higher than that of phytoremediation. The sort of overall degradation effects of three remediation methods for diesel contaminated soil are as follows: plant-microorganism combined remediation, microbial remediation, phytoremediation. The remediation effect of tall fescue is better than that of alfalfa. The lower diesel concentration of diesel contaminated soil would make the remediation effect better.

Keywords: diesel contaminated soil; soil remediation; petroleum hydrocarbon degrading bacteria; alfalfa; tall fescue

柴油是当今世界重要的石油制品,是用量最大的轻质石油产品之一。在日常使用过程中,由于不合理利用和处置,柴油不可避免地会进入土壤,对土壤造成一定程度的污染^[1-4]。柴油进入土壤后将破坏土壤结构,改变土壤理化特性,破坏植物的正常生理机能,影响农作物的正常生长代谢,还会对地下水系统产生危害。同时,柴油等石油烃污染物也会通过口鼻吸入、饮食摄入等方式进入人体,对人体机能造成严重损伤,甚至导致器官癌变^[5-6]。柴油等石油烃污染土的修复技术通常包括物理修复法、化学修复法、植物修复法、微生物修复法、植物-微生物联合修复法等^[7-11]。植物-微生物联合修复法是植物修复、微生物修复及二者协同修复的综合修复法,能够有效地减少修复时间和最大程度地发挥植物和微生物的修复作用,是石油烃污染土修复研究的热点。

植物-微生物联合修复是利用植物-土壤-微生物三者的复合体系进行石油烃污染物降解的修复方式。选择合适的植物是保证植物-微生物联合对石油烃污染物的修复能力能够充分发挥的前提,植物强大的根系及较强的穿透能力有利于土壤中石油的降解^[12]。植物-微生物联合修复技术的成功应用不仅依赖于植物的选择,还依赖于根际环境微生物类群与植物根系的相互作用。一方面,植物为微生物提供营养物质及分泌共代谢底物,同时,根区可以通过吸附作用阻止污染物的进一步转移^[13-14];另一方面,微生物通过代谢作用将污染物分解成植物可以吸收代谢的状态,进而减轻生态环境对植物生长的毒害及对植物修复作用的抑制^[15]。

学者们在植物-微生物联合修复研究方面已取

得诸多成果。王京秀等^[16]筛选出高效石油降解菌,进行了植物-微生物联合修复石油污染土壤的室内试验,结果表明,修复效率最高可达73.47%。刘鹏等^[17]对植物-微生物联合修复石油污染土壤进行了研究,发现利用植物与石油高效降解菌可以使石油烃的降解率达到63.65%~83.26%。Shi等^[18]发现紫花苜蓿与菌株联用加快了污染土壤中多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)的降解。刘永军等^[19]以盆栽试验为基础,研究了植物-微生物组合体系对石油污染土壤的修复效果,发现植物-微生物联合生物修复组合的总石油烃降解率最高为53.08%。侯愷^[20]将柴油污染区土壤中分离得到的微生物添加到种植了沙打旺的柴油污染区土壤中,发现该柴油污染区土壤的柴油含量相比单一种植沙打旺的污染土壤显著下降。与单一的植物、微生物修复技术相比,植物-微生物联合修复对环境中石油烃类污染物的处理起到了强化作用,提高了处理效率及处理污染物种类的多样性,在石油烃类污染物处理方面有着巨大的潜力^[21]。

目前,植物-微生物联合修复石油烃污染土的研究以特定植物与单一微生物联合修复为主,对比研究植物修复、微生物修复与植物-微生物联合修复柴油污染土的研究成果相对较少。笔者利用从石油污染土中提取的5种石油烃降解菌混合菌作为柴油污染土降解菌^[3-4],选择紫花苜蓿与高羊茅作为降解植物,通过室外盆栽试验对比研究植物(紫花苜蓿与高羊茅)修复、微生物修复和植物(紫花苜蓿与高羊茅)-微生物联合修复柴油污染土的降解特性。

1 试验概况

1.1 试验材料

1.1.1 柴油降解菌 试验所用降解菌为课题组自行提取的5种石油烃降解菌混合菌,即假单胞菌属(*Pseudomonas*)、戈登氏菌属(*Gordonia*)、苍白杆菌属(*Ochrobactrum*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)和博得特氏菌属(*Bordetella*)^[3-4]。试验采用湿重法配制10%混合菌悬液,方法为^[4,22]:取出保存的单一纯菌种于LB平板上进行复活;挑选单菌落培养于液体培养基LB中,在200 r/min、32℃恒温振荡器内振荡培养20 h,4 000 r/min离心45 min,去掉上清液,称菌体湿重;用质量浓度为0.85%的无菌生理盐水配制质量分数为10%的菌悬液。利用10%菌悬液配制试验所用混合菌悬液,每种石油烃降解菌占混合菌悬液体积的1/5。

1.1.2 柴油污染土 试验所用柴油为0号柴油,购于中国石油集团重庆某加油站。试验土壤取自重庆大学B区操场地下车库基坑土^[4]。将取得的土样去除植物残渣、碎石等杂质,自然风干后过30目标准筛备用,土壤经过破碎、除杂、筛分过后,将0号柴油和清洁土壤按比例均匀混合,制备成试验所需的柴油污染土壤。试验中设置不加降解菌的条件对照组,以排除柴油挥发的影响^[4]。

1.1.3 植物种子 修复试验所用植物种子为紫花苜蓿和高羊茅种子(图1)。植物种子的前期处理:为减少植物种子的萌芽时间,播种前将植物种子浸泡于蒸馏水中24 h。由于紫花苜蓿和高羊茅种子小、幼苗细弱,顶土能力较差,室外盆栽试验播种深度为0.5 cm。



(a) 紫花苜蓿种子

(b) 高羊茅种子

图1 植物种子

Fig. 1 Plant seeds

1.2 试验方案

1.2.1 柴油污染土中植物种子萌芽率试验 为保证紫花苜蓿和高羊茅的种子在柴油污染土中能萌

芽并且可以正常生长,进行不同浓度柴油污染土植物种子萌芽率的预试验,柴油污染土浓度定义为柴油质量/干土质量。结合2种植物种子发芽率预试验结果,参考文献[23-24]采用的柴油浓度,选取0%、2%、4%、6%、8%和10%共6个浓度的柴油污染土进行盆栽试验。人工拌制600 g上述6个浓度的柴油污染土于规格相同的花盆中,柴油污染土的初始含水率为10%,为提供植物正常生长所需水分,试验期间适量浇水。为方便统计植物种子的萌芽率,每个花盆种植50粒植物种子,于室外自制大棚进行柴油污染土中植物种子萌芽率试验。

1.2.2 柴油污染土修复试验 根据柴油污染土中植物种子萌芽率试验结果,选取4%为修复试验的最大柴油浓度。人工拌制600 g 0%、1%、2%、3%和4%共5个浓度柴油污染土于规格相同的花盆中,微生物修复和植物-微生物联合修复混合降解菌接种量均为12 mL,采用人工注射的方式均匀注射于柴油污染土中,并取少量柴油污染土均匀覆盖于降解菌表面,每个花盆均匀播种50粒植物种子;柴油污染土的初始含水率为10%,为保证试验过程中的土壤湿度,每天定时定量浇水。为避免自然条件下石油烃降解菌的活性影响试验结果,根据混合降解菌的生长周期^[4,22],在试验时间为30、50 d时均补加一次混合菌,添加量与初次接种量相同,即12 mL。柴油污染土修复试验于室外自制大棚中进行,可避免阳光直射和温度变化过大,减小对植物生长及细菌存活的影响。修复试验方案如表1所示。

1.3 测试方法

1.3.1 植物生存状况

植物的生存状况以种子萌芽率体现。将提前处理好的植物种子播种于柴油污染土中,于室外大棚进行修复试验,修复期间用喷壶为植物植株补充水分,每日定时观察、记录植物种子的萌芽情况。以有明显的胚根破壳(露白)为萌芽种子,及时清除腐败种子。当连续3 d无新萌芽种子出现即视为萌芽过程结束,根据种子萌芽总数计算植物种子的萌芽率^[25]。

$$\text{植物种子萌芽率} = \left(\frac{\text{萌芽植物种子数}}{\text{植物种子总数}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 植物生长状况

1) 植物生物量(鲜重计) 试验修复时间为30、50、80 d时,从花盆中随机选取10株完整的植物植株。人工处理植物植株根部多余土壤,清水洗净,用棉布除掉植物植株多余水分。电子秤称量植

表 1 修复试验方案
Table 1 Repair test plan

试验编号	修复类型	修复方式
O1~O4	条件对照组	自然挥发(柴油+水:排除柴油和水分挥发)
A1~A4	植物修复	紫花苜蓿修复
B1~B4		高羊茅修复
C1~C4	微生物修复	石油烃降解菌混合菌修复
D1~D4	植物-微生物联合修复	紫花苜蓿-石油烃降解菌混合菌联合修复
E1~E4		高羊茅-石油烃降解菌混合菌联合修复

注:表中各组试验柴油浓度均为 1%~4%。

株质量,为减小误差,精确到 0.01 g。

2) 植物株高 植物株高用直尺测量,从植株根尖到最高叶片尖端距离作为植物的株高。试验修复时间为 30、50、80 d 时,每盆植物随机测定 10 株,取平均值作为植物株高,精确到 0.1 cm。

1.3.3 剩余油含量

采用超声萃取-紫外分光光度法测定柴油污染土降解率。柴油污染土壤中剩余柴油含量测定方法:取 0.5 g 降解后柴油污染土于 50 mL 离心管中,加入 5 mL 石油醚进行超声萃取,100 W 萃取 30 min,萃取后进行离心,4 000 r/min 离心 15 min,用 1 mol/L 盐酸进行酸化,提取上清液稀释,待测^[22]。柴油降解率的计算公式为^[4]

$$\eta = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_0 为条件对照组柴油浓度,%; C_1 为修复试验组柴油浓度,%。

2 结果与分析

2.1 植物生存状况

2.1.1 不同浓度柴油污染土中植物种子萌芽率 柴油浓度为 0%、2%、4%、6%、8% 和 10% 时,柴油污染土中紫花苜蓿和高羊茅种子萌芽情况如图 2 所示。由图 2 可知,柴油延长了植物种子的萌芽时间,且柴油对高羊茅种子萌芽时间的延后影响更明显;种子萌芽率总体上随柴油浓度的增大而降低。这是因为随着柴油浓度的增大,植物贮蛋白水解酶的活性会降低,贮蛋白的分解受到抑制,营养物质供应不足,从而引起植物种子延迟萌发或胚芽直接坏死。试验时间为 20 d,当柴油浓度为 6%、8% 和 10% 时,紫花苜蓿的萌芽率分别为 18%(9 颗)、10%(5 颗)和 4%(2 颗),高羊茅为 10%(5 颗)、0%(0 颗)

和 0%(0 颗);试验后期高浓度柴油范围内的植物植株易表现出黄叶、植株死亡等现象。因此,为了保证修复试验中植物种子的萌芽率,试验选取 4% 为修复试验的最大柴油浓度。

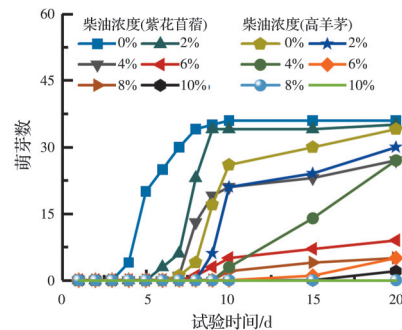


图 2 柴油污染土中植物种子的萌芽情况

Fig. 2 Germination of plant seeds in diesel contaminated soil

2.1.2 柴油污染土修复试验中植物种子萌芽率

图 3 给出了植物修复和植物-微生物联合修复 20 d 时植物种子的萌芽情况。由图 3 可知,当柴油浓度较低(<1%)时,少量柴油会提高植物种子的萌芽率。此现象可能与植物在低柴油浓度下的“伪萌芽”有关,即种子有破土现象,但后期并未真正萌芽和正常生长。当柴油浓度在 1%~4% 时,植物种子的萌芽率随柴油浓度增大呈近似线性降低。柴油浓度为 4% 时,两种植物种子的萌芽率基本大于 50%,可满足后期修复试验要求。相对于同种植物单独修复,植物-微生物联合修复时种子萌芽率高,这是因为植物种子萌芽期间微生物对柴油污染土的修复降低了土壤中柴油含量,继而提高了植物种子的萌芽率。

2.2 植物生长状况

图 4 是试验时间为 30、50 d 时紫花苜蓿和高羊茅生长状况的现场照片。4 组图片中的第 1 排盆栽

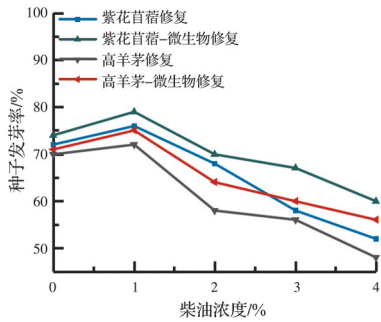


图 3 修复试验中植物种子的萌芽情况
Fig. 3 Germination of plant seeds in repair tests

为植物单独修复,第 2 排盆栽为植物-微生物联合修复;柴油浓度从左到右依次为 1%、2%、3% 和 4%。

由图 4 可知,第 1 排花盆中的植物生长状况普遍比第 2 排花盆中差,这种现象在第 3 列和第 4 列

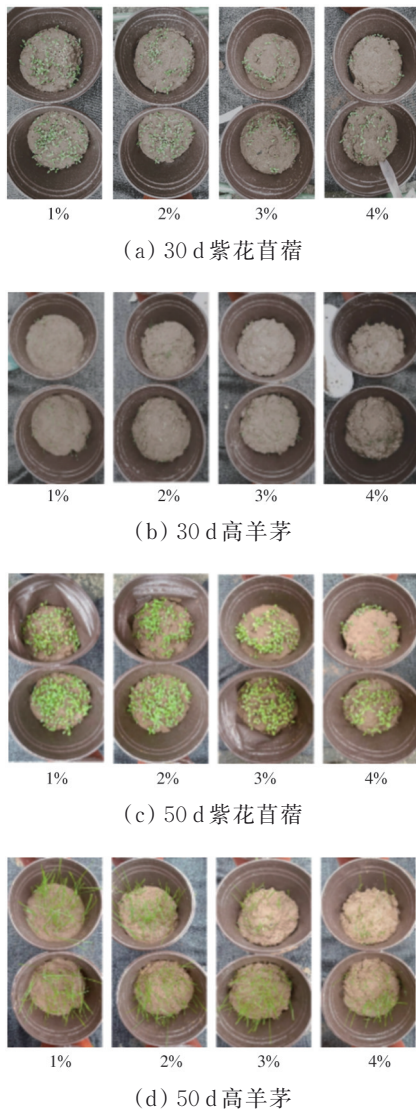


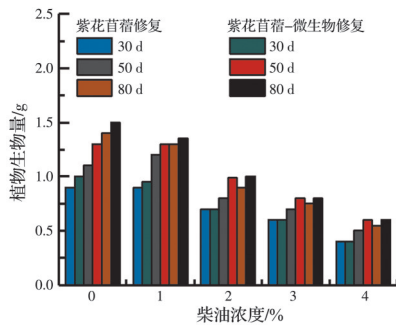
图 4 30、50 d 时植物生长状况照片
Fig. 4 Photos of plant growth at 30 d and 50 d

(柴油浓度为 3% 和 4%) 花盆植物的生长状况中尤其明显。柴油对植物的生长有抑制作用,高浓度柴油污染土对植物生长的抑制更为显著。相较于植物修复,植物-微生物联合修复加快了柴油污染土中柴油的分解,从而使得加入微生物的柴油污染土更有利于植物生长,宏观表现为植物-微生物联合修复花盆中植物种子萌芽率高且植株生长更加茂盛。

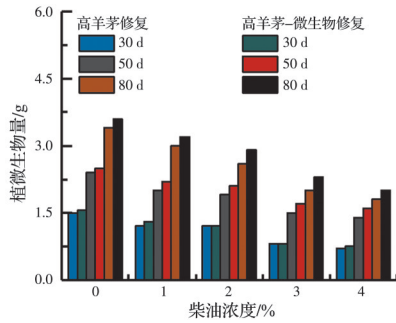
植物种子萌芽后,根部需要从土壤中吸收营养物质以维持植物的正常生长代谢。在植物的正常生长代谢过程中,土壤污染物对根的毒害作用和污染物挥发后经叶片再吸收会导致植物幼苗出现黄叶和干枯现象,进而影响植物正常生长,导致植物植株矮小、瘦弱。植物生物量(鲜重计)和株高是石油烃污染修复效果的重要指标,一般认为相同时间内植物生长发育形成的生物量越大、株高越高,则修复效果越好^[26]。

2.2.1 植物生物量(鲜重计) 图 5 为植物修复和植物-微生物联合修复 30、50、80 d 时两种修复方式下不同柴油浓度对植物生物量影响的柱状图。由图 5 可知,修复时间为 30 d 时,两种植物的生长状况在浓度为 0% 的柴油污染土中均比在其他浓度的柴油污染土中好。修复过程中,植物-微生物联合修复下的植物生物量均大于或等于植物修复;高羊茅的植物生物量均大于紫花苜蓿,且随着试验的进行,高羊茅植物生物量一直增重,在高柴油浓度时紫花苜蓿植物生物量增重逐渐变缓,紫花苜蓿植物生物量受柴油浓度的影响更为明显。相同处理条件下,当试验时间较短,为 30 d 时,由于植物种子尚处于萌芽或嫩芽状态,植物-微生物联合修复作用不能有效发挥,两种修复方式下植物生物量无明显差距。试验时间为 50、80 d 时,微生物可以通过代谢作用将污染物质分解成植物可以吸收代谢的状态,同时,植物为根际圈微生物持续提供营养物质,为其生长创造良好的环境,使植物-微生物联合修复作用充分发挥,促进植物的生长,故植物-微生物联合修复方式的植物生物量远远大于植物修复方式。

2.2.2 植物株高 图 6 为植物修复和植物-微生物联合修复 30、50、80 d 时两种修复方式下不同柴油浓度对植物株高影响的柱状图。由图 6 可知,柴油对两种植物的生长均有一定的抑制作用,高羊茅的植物株高远远高于紫花苜蓿,且随着试验的进行,高羊茅植株一直增高,紫花苜蓿在高柴油浓度时植



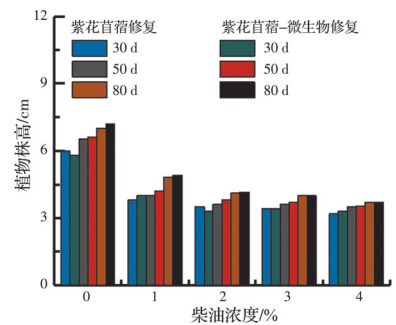
(a) 紫花苜蓿及紫花苜蓿-微生物修复



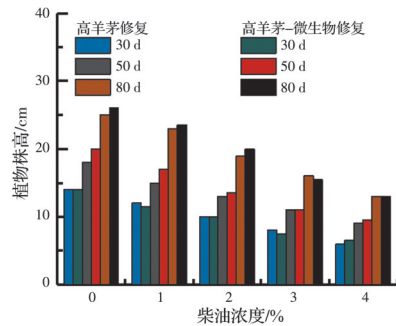
(b) 高羊茅及高羊茅-微生物修复

图 5 不同修复方式下柴油浓度对植物生物量的影响

Fig. 5 Effects of diesel oil concentration on plant biomass under different remediation methods



(a) 紫花苜蓿及紫花苜蓿-微生物修复



(b) 高羊茅及高羊茅-微生物修复

图 6 不同修复方式下柴油浓度对植物株高的影响

Fig. 6 Effect of diesel oil concentration on plant height under different restoration methods

物植株几乎不再增高,紫花苜蓿植物株高受柴油浓度的影响更为明显,与植物生物量所得结论一致,符合实际规律。另外,试验时间为 30 d 时,两种修复方式对植物株高的影响无明显差异,可能与植物的生长状况有关。当试验时间为 50、80 d 时,植物-微生物联合修复方式下的植物株高均高于植物修复方式。

综上,植物-微生物联合修复方式下的植物生长量和株高均高于植物修复方式,这是因为石油烃降解菌混合菌的加入,其在土壤中富集生长成优势菌群,同植物联合作用降低柴油污染土壤中柴油浓度,同时,微生物通过代谢作用将污染物分解成植物可以吸收代谢的状态,进而减轻生态环境对植物生长的毒害及对植物修复作用的抑制,促进了植物的生长^[15]。

2.3 植物-微生物联合修复柴油污染土的效果

植物-微生物联合修复充分利用植物修复与微生物修复两种修复方法的优点,有效强化了对石油烃类污染物的降解作用,提高了修复效果。图 7 给出了植物修复、微生物修复和植物-微生物联合修复 3 种修复方式在 30、50、80 d 时对柴油污染土降解率影响的柱状图(横坐标中 A、B、C、D、E 分别代表紫花苜蓿修复、高羊茅修复、微生物修复、紫花苜蓿-微生物联合修复、高羊茅-微生物联合修复,数字 1~4 分别代表柴油浓度为 1%~4%)。

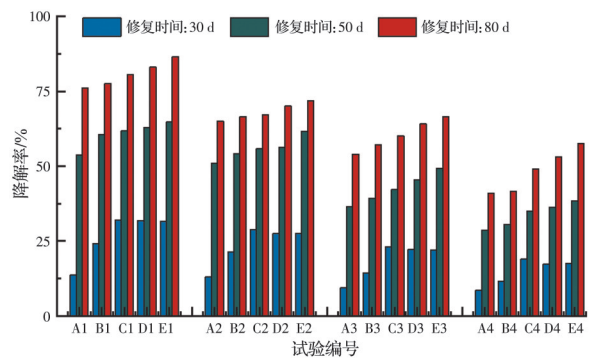


图 7 3 种修复方式下柴油污染土的降解率

Fig. 7 Degradation rate of diesel contaminated soil under three remediation methods

柴油含有多种多环芳烃,多环芳烃的消散有多种方式,如植物积累、植物降解、挥发、微生物降解等,其中,微生物降解被证明是去除多环芳烃的主要机制^[27-28]。由图 7 可知,当试验时间为 30 d 时,微生物修复和植物-微生物联合修复效果较植物修复更好。由植物种子的萌芽试验可知,试验时间为 9 d

时,两种植物种子均开始萌芽。植物对污染土的修复是通过自身的新陈代谢活动来实现的。种子萌芽后,植物为了维持自身正常的生命活动,会不断地从自然环境中吸收水分和营养物质,当吸附在沉积物颗粒上的PAHs被解吸到土壤的水相中,便可以被植物根系吸收。当试验时间较短时,由于植物种子处于萌芽或嫩芽状态,对柴油的降解能力很弱,使得植物修复效果比微生物修复差。

当试验时间为50 d时,相同处理条件下,植物-微生物联合修复柴油污染土的效果优于其他两种修复方式,且高羊茅的修复效果均优于紫花苜蓿。随着植物植株逐渐生长,植物修复方式修复柴油污染土的能力逐渐增强,且植物与根际微生物联合修复柴油污染土的优势逐渐显现,植物-微生物联合修复柴油污染土的能力开始优于微生物修复。

当试验时间为80 d时,3种修复方式对柴油污染土的降解率均大于40%,且柴油污染土的柴油浓度越低,修复效果越好。由试验结果可知,植物-微生物联合修复柴油污染土的效果优于微生物和植物单独修复,可见试验所用石油烃降解菌混合菌与所选植物高羊茅和紫花苜蓿可以联合作用,3种修复方式的总体降解效果排列顺序为:植物-微生物联合修复>微生物修复>植物修复。原因是:一方面,植物在生长代谢过程中可以产生一些石油烃降解菌生长代谢所必需的营养物质,提高石油烃降解菌的生物活性,促进石油烃降解菌对柴油污染土的降解;另一方面,石油烃降解菌在柴油污染土壤中形成优势菌群,微生物的生长代谢可以为植物生长提供所需的营养物质,促进植物生长,从而增强植物对柴油吸附、转移和降解的能力。

3 结论

利用石油烃降解菌混合菌和紫花苜蓿、高羊茅2种植物进行植物修复、微生物修复和植物-微生物联合修复试验,分析柴油污染土植物修复和植物-微生物联合修复试验中植物种子萌芽率和植物生长状况,对比研究3种修复方式对柴油污染土的降解效果,主要结论如下:

1)揭示了柴油浓度对种子萌芽时间和萌芽率的影响规律。柴油延长了紫花苜蓿和高羊茅种子的萌芽时间,柴油对高羊茅种子萌芽时间的延后影响更明显。当柴油浓度较低(<1%)时,少量柴油会提高植物种子的萌芽率;当柴油浓度大于1%时,

植物种子的萌芽率随柴油浓度的增大而降低。植物-微生物联合修复时种子萌芽率相对于同种植物单独修复时高。

2)分析了植物修复和植物-微生物联合修复2种柴油污染土修复方式下植物生物量和株高的变化特性。高羊茅的植物生物量和株高大于紫花苜蓿,随着试验的进行,高羊茅植物生物量和株高一直增大,在高浓度柴油下紫花苜蓿植物生物量缓慢增大、株高几乎不变。试验初期,植物修复和植物-微生物联合修复对植物生物量和株高的影响无明显差异;试验后期,植物-微生物联合修复的植物生物量和株高明显高于植物修复。

3)植物修复、微生物修复和植物-微生物联合修复柴油污染土的总体效果排序为:植物-微生物联合修复>微生物修复>植物修复;高羊茅的修复效果优于紫花苜蓿;柴油污染土中柴油浓度越低,修复效果越好。

参考文献

- [1] ZHANG W, LIU Y G, TAN X F, et al. Enhancement of detoxification of petroleum hydrocarbons and heavy metals in oil-contaminated soil by using glycine- β -cyclodextrin [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1155.
- [2] SUN Y J, LU S D, ZHAO X H, et al. Long-term oil pollution and in situ microbial response of groundwater in northwest China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 72(4): 519-529.
- [3] 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. (in Chinese)
- [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(3): 477-484.
CAO X F, FANG X W, LIU H L, et al. Experimental study on microbial remediation of diesel contaminated soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(3): 477-484. (in Chinese)
- [5] 任磊, 黄廷林. 土壤的石油污染[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(6): 360-363.

- REN L, HUANG T L. Contamination of soils by petroleum [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(6): 360-363. (in Chinese)
- [6] 安玉姿. 土壤石油污染的危害与修复[J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(5): 72-73.
- AN Y Z. Harm and remediation of soil oil pollution [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017, 35(5): 72-73. (in Chinese)
- [7] LI Y T, LI D, LAI L J, et al. Remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by using activated persulfate with ultrasound and ultrasound/Fe [J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 124657.
- [8] RADZIEMSKA M, WYSZKOWSKI M, BEŚ A, et al. The applicability of compost, zeolite and calcium oxide in assisted remediation of acidic soil contaminated with Cr(III) and Cr(VI) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(21): 21351-21362.
- [9] AL-MAILEM D M, SORKHOH N A, MARAFIE M, et al. Oil phytoremediation potential of hypersaline coasts of the Arabian Gulf using rhizosphere technology [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(15): 5786-5792.
- [10] 徐丽萍. 石油污染土壤的微生物修复技术研究进展[J]. *生物学教学*, 2016, 41(6): 6-9.
- XU L P. Research progress on microbial remediation of petroleum contaminated soil [J]. *Biology Teaching*, 2016, 41(6): 6-9. (in Chinese)
- [11] MOHSENZADE F, NASSERI S, MESDAGHINIA A, et al. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils: Pre-screening for suitable plants and rhizospheric fungi [J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2009, 91(8): 1443-1453.
- [12] TANG J C, WANG R G, NIU X W, et al. Characterisation of the rhizoremediation of petroleum-contaminated soil: Effect of different influencing factors [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(12): 3961-3969.
- [13] SCHNOOR J L, LICHT L A, MCCUTCHEON S C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(7): 318A-323A.
- [14] LISTE H H, ALEXANDER M. Plant-promoted pyrene degradation in soil [J]. *Chemosphere*, 2000, 40(1): 7-10.
- [15] ROMANTSCHUK M, SARAND I, PETÄNEN T, et al. Means to improve the effect of in situ bioremediation of contaminated soil: An overview of novel approaches [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(2): 179-185.
- [16] 王京秀, 张志勇, 万云洋, 等. 植物-微生物联合修复石油污染土壤的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(8): 3454-3460.
- WANG J X, ZHANG Z Y, WAN Y Y, et al. Experimental study on plant-microbial remediation of oil-contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(8): 3454-3460. (in Chinese)
- [17] 刘鹏, 李大平, 王晓梅, 等. 石油污染土壤的生物修复技术研究[J]. *化工环保*, 2006, 26(2): 91-94.
- LIU P, LI D P, WANG X M, et al. Study on in situ bioremediation process of oil-contaminated soil [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2006, 26(2): 91-94. (in Chinese)
- [18] SHI W, GUO Y J, NING G H, et al. Remediation of soil polluted with HMW-PAHs by alfalfa or brome in combination with fungi and starch [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 360: 115-121.
- [19] 刘永军, 曹中利, 贾海燕, 等. 黑麦草-不动杆菌组合体系对石油污染土壤的生物强化修复[J]. *化工环保*, 2018, 38(1): 101-105.
- LIU Y J, CAO Z L, JIA H Y, et al. Enhanced bioremediation of petroleum-contaminated soil using ryegrass-*acinetobacter* combination system [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2018, 38(1): 101-105. (in Chinese)
- [20] 侯愷. 污染土壤修复技术综述[J]. *江西化工*, 2019(4): 26-29.
- HOU K. Review of contaminated soil remediation technology [J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2019(4): 26-29. (in Chinese)
- [21] TENG Y, SHEN Y Y, LUO Y M, et al. Influence of *Rhizobium meliloti* on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by alfalfa in an aged contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2/3): 1271-1276.
- [22] 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. (in Chinese)
- [23] LIU Z B, LIU S Y, CAI Y. Engineering property test of Kaolin clay contaminated by diesel oil [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(12): 4837-4843.
- [24] KHAMEHCHIYAN M, HOSSEIN CHARKHABI A,

- TAJIK M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(3/4): 220-229.
- [25] 李方敏,姚金龙,王琼山. 修复石油污染土壤的植物筛选[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(9): 429-431.
- LIF M, YAO J L, WANG Q S. Screening of plants for phytoremediation of petroleum-contaminated soils [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(9): 429-431. (in Chinese)
- [26] 山宝琴,张永涛,曹巧玲,等. 6种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1125-1130.
- SHAN B Q, ZHANG Y T, CAO Q L, et al. Growth responses of six leguminous plants adaptable in northern Shaanxi to petroleum contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1125-1130. (in Chinese)
- [27] ABHILASH P C, JAMIL S, SINGH N. Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(4): 474-488.
- [28] DOMINGUEZ J J A, BACOSA H P, CHIEN M F, et al. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum × drummondii*) [J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 789-795.

(编辑 黄廷)