

· 专论与综述 ·

有机污染场地微生物修复研究进展

李亚娇¹, 张静玉¹, 李家科²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:结合国内外研究,从典型有机污染物微生物修复机理、降解菌株的筛选、微生物修复技术,以及微生物修复技术的表面活性剂和电化学强化等方面综述了微生物修复技术的研究进展,并对其发展方向和趋势做出展望。

关键词:微生物修复;有机污染场地;高效降解菌;表面活性剂;电动修复

中国分类号:X53;X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-2009(2019)02-0001-05

Research Advance of Microbial Remediation in Organic Polluted Site

LI Ya-jiao¹, ZHANG Jing-yu¹, LI Jia-ke²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in

Northwest Arid Region of China, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: With reference to the domestic and foreign literature, the microbial remediation mechanism for typical organic pollutants, the screening of degradation strains, as well as the surfactant and electrochemical reinforcement of microbial remediation technology were reviewed and summarized. The direction and trend of microbial remediation technology development were prospected.

Key words: Microbial remediation; Organic polluted site; Efficient degradation bacteria; Surfactant; Electric remediation

自然界中,环境污染物在水、大气和土壤三相循环迁移,造成土壤污染日趋严重。目前我国农用地质量逐步下降,工业废弃地土壤污染问题凸显,土壤修复迫在眉睫。我国的场地类型主要包括农田耕地、工业市政场地、矿区土地和非正规堆场^[1]。土壤污染物类型很多,具有新老并存、有机无机复合的特点,既有化学、物理和生物污染物,又有放射性污染物。土壤修复方法众多,如何针对污染场地选择环保、高效的修复手段颇有难度。微生物修复技术在土壤修复方面的优势日渐突出,特别是在有机污染场地修复中具有很大的应用价值。

1 典型有机污染物微生物修复机理

1.1 多环芳烃(PAHs)

PAHs是一类具有“三致”效应的持久性有机污染物,在化石燃料燃烧、煤气和煤焦油生产、木材

加工、石油泄漏及废物焚烧等过程中产生^[2]。微生物对PAHs的降解机制分为两种:一种是利用PAHs作为唯一的碳源和能源将其降解^[3]。在有氧条件下, O_2 作为电子受体,微生物产生的加氧酶使苯环上加入氧原子,形成碳氧键,氧化为中间产物,最后生成 H_2O 和 CO_2 ;在厌氧条件下,硝酸盐、硫酸盐、铁、锰和 CO_2 作为电子受体,最终产物为 CO_2 和 CH_4 ^[4]。另一种是PAHs和其他有机物共代谢^[5]。微生物有其他的碳源和能源,酶的活性增强,在降解维持自身生长物质的同时,也降解了某些非生长必需的物质^[6]。高环数PAHs较低环数

收稿日期:2018-04-19;修订日期:2018-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51279158);陕西省自然科学基金资助项目(2015JZ013)

作者简介:李亚娇(1978—),女,辽宁大石桥人,副教授,博士,研究方向为环境水文学。

PAHs 更不易被降解。May 等^[7]用白腐真菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 处理受 PAHs 污染的土壤,发现低分子量 PAHs 的降解率为 70% ~ 100%,高分子量 PAHs 的降解率为 50% ~ 60%。实验表明,4 环以上 PAHs 的降解机制为共代谢^[8]。共代谢作用扩大了碳源和能源的选择范围,提高了微生物降解 PAHs 的效率。

1.2 多氯联苯(PCBs)

PCBs 是氯代芳香烃类持久性有机污染物,可用作润滑材料、增塑剂、杀菌剂等,应用于多种工业生产。PCBs 具有低水溶性,吸附土壤颗粒后有较高势能,能稳定存在于土壤中,不易被去除,在好养菌和厌氧菌协同作用下可被脱氯降解^[9]。在氧气充足的条件下,氯原子个数少于 5 个的低氯代 PCBs 在好氧菌分泌的加氧酶作用下苯环开环,最终被矿化^[10];在氧气不足条件下,高氯代 PCBs 作为电子受体发生还原反应,脱掉氯原子,生成低氯代化合物^[11]。低氯代化合物在氧气不足条件下不易被完全降解为 CO₂ 和 H₂O,因而好氧降解和厌氧脱氯联合使用更有利于 PCBs 的降解^[12]。Long 等^[13]利用好氧-厌氧协同技术处理土壤和堆肥混合物,PCBs 的降解率可达 25%,其中 60.8% 的低氯 PCBs 被降解。

1.3 农药

土壤中农药的微生物降解反应复杂、多变。微生物组成的强大的酶体系对农药降解起到直接作用,酶促降解作为其主要的修复机制^[14]分为两种:一种是利用农药作为唯一的碳源和能源将其降解;另一种是通过共代谢作用产生非专一性酶,其在共代谢反应中不但能代谢转化生长基质,还能催化氧化目标污染物^[15]。此外,一些非酶促降解反应(如氧化还原作用、脱卤作用、脱烃作用、胺和酯的水解)也能参与农药降解。目前已发现多种能降解农药的细菌、真菌、放线菌和藻类等,而实际应用较少,将是未来重要的研究方向。

2 微生物修复技术及强化技术

2.1 土壤微生物修复技术

微生物修复主要利用微生物的代谢功能降低有毒污染物的活性,或将其降解为无毒物质^[16]。该技术作用范围广,操作简单,是目前土壤污染修复研究的热点。

2.1.1 高效降解菌株的获取

发展微生物修复技术的前提是获得高效降解菌。微生物与污染物发生的反应多种多样,必须筛选出在微生物生长的情况下,对污染物有较高降解效率的菌株。土壤中广泛存在的微生物被称为土著微生物,其增殖缓慢,代谢活性低,在土壤被污染物侵蚀的环境下数目减少,活性降低,对污染物的降解能力也随之下降^[17]。此时,在污染土壤中接种高效降解菌,土著微生物与外源微生物相互促进、共同作用,可以增强修复效果。

针对某些特定污染物的降解,可以通过驯化培养功能性微生物和运用基因工程导入功能基因的方式获取目标微生物菌株:①功能性微生物驯化培养。功能性微生物一般来自污染场地,长期的污染环境使其具备较强的适应能力和降解能力。对受污染土壤中的微生物富集培养,筛选出针对某一类污染物的专性降解菌,通过驯化培养增殖,获得含有大量微生物的菌群,投加到需要修复的污染土壤中(流程见图 1)^[18]。②功能基因导入的微生物培养。基因工程是目前研究构建新型菌株、改造传统菌株的重要手段,主要包括 DNA 体外重组、质粒分子育种和原生质体融合等遗传工程手段^[19]。将一种或多种降解基因转入同一微生物中,筛选出对土壤污染物有专一性或能增加具有高效降解作用的酶的数量和活性的基因工程菌,用于土壤修复可以显著提高微生物的降解进度。基因工程筛选菌株的方法比较见表 1。

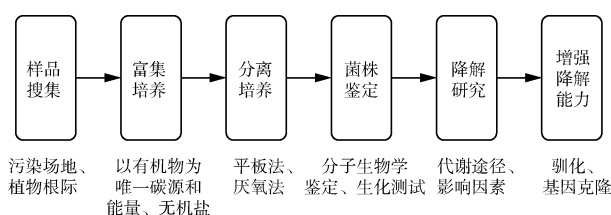


图 1 高效菌株驯化培养流程

Fig. 1 Efficient degradation bacteria domestication and culture flow chart

2.1.2 土壤微生物修复技术种类

微生物修复技术根据修复地点不同,分为原位修复和异位修复^[16]。几种微生物修复技术的原理与应用比较见表 2。

2.2 强化微生物修复技术

2.2.1 表面活性剂-微生物修复

土壤中的有机污染物生物有效性低,易被土壤

表 1 基因工程筛选菌株的方法比较

Table 1 Comparison of methods of genetic engineering screening strains

方法	原理	实例
DNA 体外重组	用 DNA 连接酶将所需基因连接到合适的载体 DNA 上, 导入基因受体中表达	bph C 基因转入烟草 bph 基因 ^[20] ; bph 基因转至烟草植株, 使其表达为双加氧酶 bph AE、bph F 和 bph G ^[21]
质粒分子育种	将供体菌质粒导入受体菌体内, 受体菌进而具有双重质粒	六六六质粒 ^[22] ; 阿特拉津质粒 ^[23]
原生质体融合	融合两个具有不同遗传性状的细胞, 亲代的遗传性状在新细胞表达出	葱的高效降解菌株 An815 和能产生生物表面活性剂的铜绿假单胞菌进行细胞融合, 得到能有效降解葱的融合菌 ^[24]

表 2 几种微生物修复技术的原理与应用比较

Table 2 Comparison of principles and applications of several microbial remediation techniques

修复技术	操作原理	实例	
原位修复	生物通风法	在受污染的土壤中强制通入空气, 然后抽出土壤中的挥发性有机物	单组分甲苯和多组分苯、甲苯、对二甲苯混合物的降解率可达 10% ~ 38% ^[25]
	投菌法	直接向污染土壤中投加高效降解菌和营养物质	在韭菜试验田中投加有机磷降解菌, 3 d 后对辛硫磷、甲基对硫磷的降解率分别为 99.52%、98.83% ^[26]
	生物培养法	定期向污染土壤中投加 H ₂ O ₂ 和营养物质, 保证降解菌正常生长代谢	将碳、氮和磷按一定比例投入石油污染土壤, 降解率为 33.4% ~ 52.5% ^[27]
	土地耕作法	对污染土壤耕耙、施加肥料、灌溉, 加入石灰, 给微生物降解提供好的生长环境	美国 HSR 公司土地耕作法处理污泥 ^[28]
	固定化	将游离、分散的微生物与载体相结合, 固定在某一限定空间区域内	采用吸附法将菌株固定在高岭石上, 3 d 后对菲的去除率为 95.24% ^[29]
异位修复	堆制法	在污染土壤中加入木屑、秸秆、粪便等, 用石灰调节 pH 值, 再机械充氧, 利用微生物的生化作用分解污染物	添加稻草和有机肥, 对含油污泥进行堆肥处理 ^[30]
	预制床法	在平台上铺以石子、沙子, 再铺上污染土壤, 最后加入营养液和水分	采用长条形预制床处理石油污染土壤 ^[31]
	泥浆生物反应器法	将污染土壤与水混合加入生物反应器, 添加营养物质和表面活性剂, 调节 pH 值, 通 O ₂ 搅拌	应用液相(土壤泥浆)生物修复工艺, 修复受五氯苯酚和杂酚油污染的表土和沉积物 ^[32]

颗粒吸附, 顽固存在于土壤中, 使微生物降解受到限制。表面活性剂含有亲水和亲油基团, 可以提高有机污染物在土壤中的溶解度, 便于其从土壤中解吸, 促进微生物对其降解, 增强修复效果^[33]。

表面活性剂增强修复效果主要利用吸附作用和增溶洗脱作用^[34]。表面活性剂在土壤表面以吸附态形式存在, 可以促进有机物在土壤中的吸附, 在一定浓度下自发形成胶束, 此时溶液浓度被称为临界胶束浓度(CMC)^[35]。当溶液浓度超过 CMC, 表面活性剂由单体形式转化为胶束形式, 疏水性有机污染物的基团位于胶束内部形成疏水性内核, 提高了污染物在水中的溶解度, 促使其从固相到液相解吸, 加快了降解速度。

一般而言, 使用混合表面活性剂比仅使用单一表面活性剂的强化修复效果更为显著。金海微^[36]使用十二烷基溴化吡啶(DDPB)-曲拉通(Triton X100)混合表面活性剂固定菲, 发现其吸附固定菲的效率是仅使用 DPPB 组的 1.5 倍, 是土壤对照组

的 24.5 倍。陈苏等^[37]通过实验发现, 使用比例为 2:3 的十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和吐温 80(Tween80)混合表面活性剂处理添加了甲基营养型芽孢杆菌(*Bacillus methylotrophicus*)的土壤, 1 个月后滴滴涕降解率可达 63.53%。当土壤中黏土矿物含量较高时, 对表面活性剂有吸附作用, 影响其对土壤的增溶洗脱。魏燕富^[38]在使用单一和混合表面活性剂修复芘污染土壤的实验中发现, 对于富含蒙脱石的土壤, SDBS 的洗脱效果优于阴离子-非离子混合表面活性剂; 对于富含高岭土的南方红壤, TX-100 的洗脱效果优于阴离子-非离子混合表面活性剂。

采用化学方法生产表面活性剂的成本较高, 且不易被土壤中的微生物降解, 会造成土壤再次污染。许多生物表面活性剂如鼠李糖脂、烷基糖苷、皂苷、海藻糖脂^[39-40]等已得到了广泛应用。李鱼等^[41]采用微生物修复稠油污染土壤, 分别加入生物表面活性剂和化学表面活性剂, 结果表明, 前者

的降解率60 d后达到72%, 优于后者。生物表面活性剂成本低, 处理效果好, 对生态环境影响程度低, 是未来表面活性剂的发展方向。

2.2.2 电动-微生物修复

电动修复技术最初用于重金属污染物的去除, 后来与微生物修复技术联合使用, 在有机污染土壤治理中具有良好的应用前景^[42-43]。

电动-微生物修复技术提高有机污染物去除效率的机制如下: ①在电极附近发生电化学反应, 加快污染物的降解速率^[44]; ②促进微生物迁移和营养物质运输, 加快降解菌和污染物质反应, 改善环境参数和微生物代谢条件, 提高修复效率^[45]。范瑞娟等^[46]分别采用电动修复、微生物修复和电动-微生物联合修复3种方法处理混合有机污染物, 结果表明, 电动-微生物联合修复的细菌数量和氢酶活性明显增高, 修复效率显著高于单一修复技术。嵇婷婷等^[47]分别采用电动-微生物技术与微生物技术修复石油胶质污染土壤, 60 d后前者的降解率高于后者3倍以上。魏巍等^[48]选取不同的电压梯度修复芘污染土壤, 35 d后各反应器中芘的平均降解率均达到85%。

电极处分别产生的 H^+ 和 OH^- 会造成土壤pH值不均匀, 影响微生物对营养物质的利用和对污染物的降解^[49]。Lear等^[50]发现, 施加单向电场后阳极区域土壤呈酸性, 会减少微生物数量, 削弱污染物降解效果。杨衔等^[51]采用对称电场使土壤pH值维持在6.6~6.9, PAHs的去除率明显提高。张静^[52]选择每小时切换一次电极和不切换电极两种通电方式, 发现切换电极组的微生物降解效果更好。因此, 周期性切换电极可以消除土壤pH值变化幅度大及微生物数量少、活性低的不利影响, 提高污染物的降解速率^[44,53]。

3 结论与展望

美国超级基金最新公布的修复原则为绿色修复、原位修复和高效修复, 代表着未来场地修复技术的发展方向^[54]。微生物修复技术虽然具有显著优势, 但在实际操作中微生物的不可控性、易对土壤造成二次污染等问题限制了其应用。基于此, 建议今后土壤微生物修复技术的研究方向如下: ①针对降解菌降解一种或几种有机污染物的特性, 需要寻找多种多样的降解菌来应对复杂多变的受污染土壤, 建立高效菌株信息库, 便于在处理实际问题

时查询; ②土壤修复使用的微生物可能会污染地下水, 破坏植被生长, 造成二次污染, 而过高的有机物含量又会抑制微生物活性, 因而需要针对微生物性质开展深入研究; ③微生物修复技术的实际应用较少, 应继续探索微生物去除污染物的最佳环境条件, 开展中试试验评估其技术可行性, 优化修复技术体系, 将其应用于实际工程项目, 提高修复效率。

[参考文献]

- [1] 杨再福. 污染场地调查评价与修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 1-292.
- [2] BAMFORTH S M, SINGLETON I. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: current knowledge and future directions [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2010, 80(7): 723-736.
- [3] 张灵利, 徐宏英, 葛晶丽. 多环芳烃污染生物修复研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2016, 36(2): 81-86.
- [4] 侯梅芳, 潘栋宇, 黄赛花, 等. 微生物修复土壤多环芳烃污染的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1233-1238.
- [5] 刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 等. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展 [J]. *土壤*, 2002, 34(5): 257-265.
- [6] WILSON S C, JONES K C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Environmental Pollution*, 1993, 81: 229-249.
- [7] MAY R, SCHRÖDER P, SANDERMANN H. Ex-situ process for treating PAH-contaminated soil with *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(9): 2626-2633.
- [8] 李梅, 万红友. 多环芳烃污染土壤的微生物修复 [J]. *环保科技*, 2008, 14(4): 35-37, 46.
- [9] 张雪, 刘维涛, 梁丽琛, 等. 多氯联苯 (PCBs) 污染土壤的生物修复 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 1-11.
- [10] 范聪, 肖炜, 张仕颖. 微生物修复污染土壤的应用研究进展 [J]. *贵州农业科学*, 2017, 45(8): 53-58.
- [11] 周际海, 黄荣霞, 樊后保, 等. 污染土壤修复技术研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 366-372.
- [12] 王晓锋, 张磊. 有机污染土壤的微生物修复研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(2): 125-132.
- [13] LONG Y Y, FANG Y, ZHANG C, et al. Degradation of polychlorinated biphenyls by sequential anaerobic-aerobic composting [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2015, 226(3): 1-12.
- [14] 赵玲, 滕应, 骆永明. 中国农田土壤农药污染现状和防控对策 [J]. *土壤*, 2017, 49(3): 417-427.
- [15] 王新, 姚梦琴, 祝虹钰, 等. 土壤农药污染原位生物修复技术及其研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(31): 67-71.
- [16] 滕应, 李秀芬, 潘澄, 等. 土壤及场地持久性有机污染的生物修复技术发展及应用 [J]. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(3): 43-46.
- [17] 滕应, 骆永明, 李振高. 污染土壤的微生物修复原理与技术进

- 展[J]. 土壤, 2007, 39(4): 497-502.
- [18] 郝大程, 周建强, 韩君. 土壤重金属和有机污染物的微生物修复: 生物强化和生物刺激[J]. 生物技术通报, 2017, 33(10): 9-17.
- [19] 周际海, 袁颖红, 朱志保, 等. 土壤有机污染物生物修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 343-351.
- [20] NOVAKOVA M, MACKOVA M, ANTOSOVA Z, et al. Cloning the bacterial bph C gene into *Nicotiana tabacum* to improve the efficiency of phytoremediation of polychlorinated biphenyls[J]. *Bioengineered Bugs*, 2010, 1(6): 419-423.
- [21] MOHAMMADI M, CHALAVI V, NOVAKOVA-SURA M, et al. Expression of bacterial biphenyl-chlorobiphenyl dioxygenase genes in tobacco plants[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, 97(3): 496-505.
- [22] NAWAB A, ALEEM A, MALIK A. Determination of organochlorine pesticides in agricultural soil with special reference to gamma-HCH degradation by *Pseudomonas* strains[J]. *Bioresource Technol*, 2003, 88(1): 41-46.
- [23] ROUSSEAU S, SOULAS G, HARIMANN A. Plasmid localisation of atrazine-degrading genes in newly described *Chelatobacter* and *Arthrobacter* strains[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, 41(1): 69-75.
- [24] 魏明宝, 魏丽芳, 李军, 等. 细胞电融合构建高效降解重组菌株的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2): 725-728.
- [25] 段云霞. 生物通风(BV)法去除土壤中石油污染物的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [26] 王文凤, 顾立锋, 宋任祥. 化学农药污染土壤微生物的原位修复[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(7): 1350-1351.
- [27] 曾琳. 矿化垃圾生物反应器修复石油污染土壤的优化试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [28] 姜淑兰. 土地耕作法处理油田含油污泥[J]. 油气田地面工程, 2009, 28(1): 12-13.
- [29] 陶柯霖, 贾汉忠, 汪立今, 等. 高岭石固定化微生物对非的降解研究[J]. 应用化工, 2017, 46(4): 650-654.
- [30] 余冬梅, 骆永明, 刘五星, 等. 堆肥法处理含油污泥的研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1019-1025.
- [31] 白云, 李川. 预制床法修复石油污染土壤的应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2009, 26(4): 373-377.
- [32] 陶颖, 周集体, 王竞, 等. 有机污染土壤生物修复的生物反应器技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 46-51.
- [33] 张永, 廖柏寒, 曾敏, 等. 表面活性剂在污染土壤修复中的应用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2007, 33(3): 348-352.
- [34] ZHOU W J, ZHU L Z. Solubilization of pyrene by anionic-nonionic mixed surfactants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 109(1): 213-220.
- [35] YANG X, LU G, SHE B, et al. Cosolubilization of 4,4'-dibromodiphenyl ether, naphthalene and pyrene mixtures in various surfactant micelles[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260: 74-82.
- [36] 金海微. 表面活性剂对非土壤-水界面分配行为及微生物降解的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [37] 陈苏, 单岳, 晁雷, 等. 表面活性剂-微生物联合修复滴滴涕污染土壤的研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1522-1527.
- [38] 魏燕富. 表面活性剂增效修复 PAHs 污染土壤的影响因素及机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [39] KACZOREK E, SALEK K, GUZIK U, et al. Cell surface properties and fatty acids composition of *Stenotrophomonas maltophilia* under the influence of hydrophobic compounds and surfactants[J]. *New Biotechnology*, 2013, 30(2): 173-182.
- [40] 姜霞, 井欣, 高学晟, 等. 表面活性剂对土壤中多环芳烃生物有效性影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1179-1186.
- [41] 李鱼, 伏亚萍. 稠油污染土壤微生物强化修复的研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(5): 84-88.
- [42] 仓龙, 周东美. 场地环境污染的电动修复技术研究现状与趋势[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(3): 57-62.
- [43] FAN R J, GUO S H, LI T T, et al. Contributions of electrokinetics and bioremediation in the treatment of different petroleum components[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2015, 43(2): 251-259.
- [44] HARBOTTLE M J, LEAR G, SILLS G C, et al. Enhanced biodegradation of pentachlorophenol in unsaturated soil using reversed field electrokinetics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(5): 1893-1900.
- [45] WICK L Y, SHI L, HARMS H. Electro-bioremediation of hydrophobic organic soil-contaminants: A review of fundamental interactions[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(10): 3441-3448.
- [46] 范瑞娟, 郭书海, 李凤梅, 等. 混合烃污染土壤微生物-电动修复中的互补性研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 64-71.
- [47] 嵇婷婷, 郭书海, 李凤梅, 等. 电动-微生物修复过程中石油胶质结构和毒性变化[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3846-3852.
- [48] 魏巍, 李凤梅, 杨雪莲, 等. 电动修复过程中电压对土壤中萘降解及微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1382-1388.
- [49] ALCANTARA M T, GÓMEZ J, PAZOS M, et al. Electrokinetic remediation of PAH mixtures from kaolin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1): 1156-1160.
- [50] LEAR G, HARBOTTLE M J, SILLS G, et al. Impact of electrokinetic remediation on microbial communities within PCP contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 146(11): 139-146.
- [51] 杨衍, 韩国睿, 李军, 等. 污染土壤电动增强修复技术研究进展[J]. 农村经济与科技, 2013, 24(8): 17-20.
- [52] 张静. 电动-微生物技术修复石油污染盐碱土壤的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2016.
- [53] 范瑞娟, 郭书海, 李凤梅, 等. 有机污染土壤电动-微生物修复过程中的影响因素及优化措施[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 522-530.
- [54] 杨宾, 李慧颖, 伍斌, 等. 污染场地中挥发性有机污染工程修复技术及应用[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(1): 78-84.