

文章编号: 2096-3424(2021)04-0285-08

DOI: [10.3969/j.issn.1004-3810.2021.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-3810.2021.04.001)

# 石油及石化污染场地生物修复技术进展与展望

周启星, 展海银

(南开大学 环境科学与工程学院 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 石油资源为经济社会发展提供源源不断动力的同时,也产生了大面积的石油及石化污染场地,对场地环境造成日益严重的污染。生物修复技术由于其绿色、环境友好、无二次污染等优点引起人们广泛关注。概述了石油及石化污染场地基于微生物和植物修复的生物修复技术的研究概况和目前进展,分析了生物修复技术的局限性并对其未来研究重点进行了展望,旨在为石油及石化污染场地的生物修复技术的发展及全方位应用提供科学依据。

**关键词:** 石油及石化污染场地;土壤污染;生物修复;微生物修复;植物修复

**中图分类号:** X53; Q958.116      **文献标志码:** A

## Progress and Prospect of Bioremediation Technology for Petroleum and Petrochemical Contaminated Sites

ZHOU Qixing, ZHAN Haiyin

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** While petroleum resources provide a steady stream of power for economic and social development, they also result in a large area of oil and petrochemical contaminated sites, causing increasingly serious pollution to the environment of the sites. Bioremediation technology has attracted extensive attention due to its advantages of being green, environment-friendly, and secondary-pollution-free. This review mainly summarizes the current status and progress of research on bioremediation technology based on microbes and phytoremediation of petroleum and petrochemical contaminated sites, and analyzes limitations of bioremediation technology and prospects for future research focus, aiming to improve the development of bioremediation for petroleum and petrochemical contaminated sites, and provide a scientific basis for the development of bioremediation technology and its all-round applications.

**Key words:** petroleum and petrochemical contaminated site; soil pollution; bioremediation; microbial remediation; phytoremediation

收稿日期: 2021-08-12

基金项目: NSFC-山东联合基金重点项目(U1906222);国家重点研发计划(2020YFC1808800)资助

作者简介: 周启星(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为生态地球化学、环境修复、环境基准与标准研究。

E-mail: [zhouqx@nankai.edu.cn](mailto:zhouqx@nankai.edu.cn)

引文格式: 周启星,展海银.石油及石化污染场地生物修复技术进展与展望[J].应用技术学报,2021,21(4):285-292.

Citation: ZHOU Qixing, ZHAN Haiyin. Progress and Prospect of Bioremediation Technology for Petroleum and Petrochemical Contaminated Sites[J]. Journal of Technology, 2021, 21(4): 285-292.



在过去几十年中,由于工业化和城市化进程的加快,中国等经济快速发展的国家面临着日益严重的土壤污染问题<sup>[1]</sup>。有机污染物如有机氯农药(organochlorine pesticides, OCPs)、多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)、邻苯二甲酸酯(phthalate ester, PAEs)和多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)等具有高毒性、持久性和在环境中生物富集等特点<sup>[2]</sup>,其在土壤中的污染引起了越来越多的公众关注。土壤作为有机污染物的重要储存库,同时也是空气和水污染的排放源<sup>[3-4]</sup>。在正常生态条件下,土壤中的大多数有机污染物很难生物降解,其在土壤中残留可通过动物、植物和微生物等进入食物链,并最终通过营养转移对人类健康构成潜在风险<sup>[5]</sup>。石油被称为“工业的血液”,是工业社会发展重要的动力燃料,石油及石油产品不仅是民生必需品,更是现代化的工业、农业和国防的重要物资。早在 20 世纪早期,世界各国就开始石油开采与资源掠夺的竞赛,石油在开采过程中由于管理不善、设备缺陷、高压作用会产生井喷、管道破裂与储罐漏油等事故以及各阶段产生的落地原油、油泥和废弃泥浆等,必然会产生大面积的石油污染场地<sup>[6]</sup>。石油污染场地土壤中的石油污染物主要包括 C<sub>15</sub>~C<sub>36</sub> 的烷烃、PAHs、烯烃、苯系物和酚类等有机污染物<sup>[7]</sup>。石油污染物引起土壤理化性质的重大变化,影响土壤 pH、渗透率、堆积密度、氧气、矿物质和养分含量,导致土壤渗透性降低,从而阻碍水、氧、矿物质和养分的运输,使土壤肥力下降,阻碍植物生长发育<sup>[8]</sup>。目前,对石油污染场地的修复方法主要分为生物修复、化学修复、物理修复和物理化学修复等几大类,主要包括植物修复<sup>[9]</sup>、微生物修复<sup>[10]</sup>、化学氧化<sup>[11]</sup>、光催化降解<sup>[12]</sup>、电动修复(electrokinetic remediation, ER)<sup>[13]</sup>、焚化<sup>[14]</sup>、热脱附<sup>[15]</sup>、溶剂萃取<sup>[16]</sup>、蒸汽提取<sup>[17]</sup>和生物电化学修复<sup>[18]</sup>等技术。其中,生物修复因其绿色、实用、成本低、易于原位修复、无二次污染等优点受到了广泛研究,是一种环境友好的修复方法<sup>[19]</sup>。因为单一的生物修复在实际修复过程中具有一定的局限性,所以,基于微生物和植物修复的联合修复技术逐渐成为生物修复技术研究的重点。

## 1 基于微生物的联合修复技术

石油的微生物修复从上世纪 40 年代就开始使用,到 80 年代埃克森·瓦尔迪兹号油轮泄漏事件后开始普及<sup>[20]</sup>。石油污染物降解微生物利用碳化合物作为能量来源生长、繁殖,利用选定的微生物降解石油烃的微生物修复引起广泛研究。一些最常见的石油烃降解菌如假单胞菌、红球菌、产碱杆菌、青枯菌、不动杆菌、

诺卡氏菌、弧菌和无色杆菌等,均能有效将石油烃降解为更简单的化合物<sup>[1, 21]</sup>。此外,真菌种类如青霉属、镰刀菌属和根霉菌属已被分离并用于石油烃污染土壤和沉积物的生物修复<sup>[1, 21-22]</sup>。目前研究表明,细菌、真菌、放线菌、酵母菌和霉菌中 100 属的 200 多种微生物都能有效地降解石油烃类污染物<sup>[23]</sup>。经过多年研究,结合污染场地的实际情况,基于微生物的修复技术逐渐发展起来并日趋完善。

### 1.1 降解微生物协同组合技术

由于单一微生物没有足够的代谢能力来高效降解所有的石油组分,因此针对石油污染土壤的修复,人们倾向于关注各种类型的细菌和真菌等微生物的组合降解技术。利用多种微生物的协同作用,即多种微生物相互促进、相互强化、共同作用,从而提高对石油污染场地的修复效率。Varjani 等<sup>[24]</sup>在印度石油开发污染场地,现场试验了由 6 种细菌组成的烃利用菌群原位协同降解石油烃污染物,在 75 d 的时间内达到了 83.7% 的去除效率。Covino 等<sup>[25]</sup>通过利用石油烃污染土壤中的本地真菌并添加假单胞菌属 *sp* 强化来降解被石油烃污染的黏土土壤,在 60 d 后达到 79.7% 的去除效率。Ramadass 等<sup>[26]</sup>引入降解石油烃污染物的细菌菌株恶臭假单胞菌 TPK-1 或铜绿假单胞菌 TPK-4 处理南澳大利亚油污染场地土壤,结果表明 2 种细菌具有明显的生物协同效应。屈撑囤等<sup>[27]</sup>从油泥中分别筛选出高效降解菌铜绿假单胞和无色杆菌,对其独立使用和组合使用对原油的降解规律进行研究,结果表明:微生物协同作用对土壤石油污染的降解率高于单独使用时的降解率。可见,多种降解微生物的协同组合大大提高了石油污染土壤的生物修复效率,弥补了单一降解微生物普遍适用性差、降解效率低、污染物选择性差等缺点。

### 1.2 微生物-物理组合技术

物理修复是一种广泛使用的土壤修复技术<sup>[1]</sup>,使用单一或混合溶剂从土壤中萃取去除污染物,萃取的有效性取决于土壤和溶剂混合物之间的密切接触。研究表明,从土壤中去除石油的溶剂包括多种有机溶剂、表面活性剂辅助水溶液、超临界和亚临界流体<sup>[28]</sup>。物理萃取的主要缺点包括运行成本较高、所用溶剂会带来二次污染。采用微生物和物理修复技术组合不仅可以提高修复效率,还有效降低了二次污染的风险。Wu 等<sup>[29]</sup>评估了溶剂萃取和微生物降解组合技术用于修复石油污染土壤的效率和可持续性,表明溶剂萃取预处理降低了土壤中 TPH 的浓度和毒性,从而为微生物修复技术应用提供了更有利的环境。溶剂萃取 15 min 后,去除了大约 90% 的污染物。经过 132 d

的后续生物修复,石油污染物进一步降低至97%。因此,这种组合方法具有高效率 and 可持续性,在高浓度风化烃修复方面显示出良好的性能。Yan等<sup>[30]</sup>对4种土壤冲洗方法(水冲洗、表面活性剂冲洗(Tween-80)、生物修复+水冲洗以及生物修复+表面活性剂冲洗)对石油污染场地中石油污染物的去除效率进行了研究,发现表面活性剂促进了微生物的运输和递送,提高了污染物的生物利用度,从而提高了生物修复效率。总体而言,表面活性剂冲洗与微生物修复相结合是一种对石油污染场地有前途的修复策略。此外,开发环保溶剂、使用生物表面活性剂或非离子表面活性剂,是微生物-物理组合技术的发展趋势。生物表面活性剂是引起生物安全的一种绿色溶剂,由于毒性低,很容易从可再生资源中提取,并有可能通过再生再利用。

### 1.3 降解微生物-化学强化技术

微生物修复具有绿色、安全、可持续、无二次污染等优点,但其处理效率低、处理周期长,在实际应用中具有一定的局限性。采用微生物修复并加以化学技术强化,不仅可减少二次污染还能提高修复效率,是石油污染场地修复中常用的联合修复技术。Lu等<sup>[31]</sup>研究了通过类Fenton预处理后,采用微生物降解从土壤中去石油的方法。结果表明,当 $H_2O_2 : Fe^{3+}$ 的最佳体积配比为300:1时,类Fenton处理废水的去除率可达67.3%。经过10w的微生物处理,去除了50.6%的污染物,该联合修复技术的总除油效率约为83.5%。使用化学氧化方法进行预处理,不仅破坏了目标化合物,还降低了污染物在后期生物降解过程中对微生物的总体毒性。Kim等<sup>[32]</sup>研究表明,添加 $H_2O_2$ 不会损害生物降解过程,并且这项组合技术可有效地从受污染的现场去除污染物。Gong等<sup>[33]</sup>首先对石油污染场地进行微生物降解,以修复风化的原油污染土壤,使用额外的养分和花生壳作为填充剂进行微生物修复长达8w,然后进行改良的Fenton氧化技术进行化学强化,将 $H_2O_2$ 直接添加到土壤中进行氧化。在生物修复阶段的污染物去除显示出38.6%的去除效率,随后通过添加 $H_2O_2$ 去除率增加到88.9%。

### 1.4 降解微生物-电化学强化技术

微生物修复因其廉价、方便,是最常用的污染土壤修复技术。但是,微生物修复存在一些局限性,包括生态条件、电子受体和营养物质、污染物的性质以及微生物和新陈代谢的增长等<sup>[34]</sup>;电动技术可解决这些限制并提高处理效率,即可通过电渗、电泳和电迁移过程转移污染物、营养物以及微生物<sup>[35]</sup>。近年来,电动冲洗生物修复技术(electrokinetic soil flushing - bioremediation, EKSF-Bio),即电动冲洗和微生物修

复的结合,得到了许多研究人员的关注。这一技术主要采用电动技术增加土壤孔隙中微生物的生物降解率,配合使用增溶剂如表面活性剂,可改善生物降解过程。例如,Prakash等<sup>[36]</sup>研究表明,枯草芽孢杆菌AS2、地衣芽孢杆菌AS3和芽孢杆菌AS4对原油的电动生物降解效率分别为88%、92%和97%。将生物表面活性剂添加到原油中会使它们溶解,这使细菌菌株更容易分解它们。EKSF-Bio和表面活性剂的联合修复可用于以生态友好的方式修复受原油污染的土壤。

近年来,本课题组还率先开发了一种新的节能生物修复工艺,称为生物电化学系统(bioelectrochemical system, BES),也称为微生物电化学系统,用于增强和加速对石油污染土壤的修复<sup>[18]</sup>。BES提供两种氧化还原反应(氧化和还原),从而形成集成的微生物-电化学去除机制,即使对于复杂的污染物,也有较高的去除效率<sup>[37-38]</sup>。Lu等<sup>[39]</sup>研究表明,BES在50L中试规模反应器中的应用可修复柴油污染土壤,去除效率最高可达89.7%。目前,生物电化学系统修复石油污染场地仍处于探索阶段,由于该技术的复杂性和多样性,将其应用于石油污染土壤的原位修复,还需要进行更多的工艺开发<sup>[40]</sup>。

## 2 基于绿色植物的联合修复技术

石油污染场地的植物修复是一种很有前途的生物修复技术。该技术利用植物及其根系相关微生物固定、降解土壤中的石油污染物,从而达到土壤修复的作用<sup>[1, 40]</sup>。植物修复用于石油污染场地的修复具有诸多优点,主要包括绿色安全、无二次污染、易于现场修复、维护成本低等。目前,许多植物被用于石油污染场地的修复,如关节菜、大麦、高羊茅、紫丁香树、盐草、野鸢尾和马蔺等<sup>[40-45]</sup>。传统的植物修复技术其修复效率低、环境适用性差等缺点,因而绿色植物与其他修复技术的组合技术逐渐成为研究的方向和重点。

### 2.1 绿色修复植物组合技术

绿色植物修复是一种潜在的绿色技术解决方案<sup>[46]</sup>,但由于污染土壤的多样性和复杂性,单一的绿色植物修复可能具有挑战性。通过利用不同植物独特的修复功能,多种修复植物组合对各种污染土壤修复具有可能性并可以提高土壤修复效率。Brereton等<sup>[45]</sup>研究表明,2种植物共同耕种相比于单一植物耕种,根际相关细菌物种更丰富,这些细菌共同促进了降解植物的生长发育,从而提高共种植物的修复效率。Da Cunha等<sup>[47]</sup>研究了*Salix Rubens*和*Salix Triandra* 2种植物种共同种植修复石油污染土壤,在2种植物

种植的污染土壤中,总碳氢化合物浓度降低了近 98%, PAHs 含量也显著降低。Desjardins 等<sup>[48]</sup>也证明了多种植物共同栽培使它们生物学特性互补,从而带来更高的植物修复效率。

## 2.2 绿色修复植物-降解微生物协同组合技术

绿色植物与细菌、真菌等微生物协同修复污染土壤在一定程度上促进了植物对污染物的吸收,这也是目前植物修复领域中最为重要的研究方向之一<sup>[1, 40, 49]</sup>。微生物的加入不仅可以直接降解石油污染物,而且还可以通过自身代谢促进绿色植物的生长、改善土壤结构、降低土壤 pH,使土壤形成利于污染物降解的环境条件等,与绿色植物联合处理石油污染场地具有很好的应用前景。周启星等<sup>[46, 50]</sup>为了研究绿色植物与巨大芽孢杆菌 BB-1 的协同降解修复作用,通过对比研究将该菌株加入到种植紫茉莉的 Benzo[a]pyrene (B[a]P) 污染土壤中,在未加入 BB-1 的污染土壤中,紫茉莉在开花期和成熟期对 B[a]P 的降解率分别为  $(27.42 \pm 1.99)\%$  和  $(51.31 \pm 3.06)\%$ ; 在加入 BB-1 的污染土壤中, B[a]P 降解率分别提高到  $(68.22 \pm 1.21)\%$  和  $(77.16 \pm 0.62)\%$ 。可见,加入 BB-1 能显著提高紫茉莉对土壤中 B[a]P 降解效率。尚琼琼等<sup>[51]</sup>研究表明,秸秆与微生物固定化的修复方式对石油污染土壤的协同修复效果较好,既加速了秸秆的腐解,又提高了微生物的活性,从而提高了降解效率。唐景春等<sup>[52]</sup>发明了一种黑麦草-高效微生物修复石油污染盐碱土壤的技术,微生物与黑麦草联合处理可起到良好的协同效应,提高石油烃的降解效果,经 5 个月的生长石油烃的降解率可达到 57%。近年来,向土壤中添加促进植物生长的植物根际细菌(plant growth promoting rhinoacteria, PGPR)引起了人们极大兴趣,PGPR 可帮助促进植物生长,减轻环境压力并增强现有 PGPR 的降解能力。此外,PGPR 还可提高植物抵御石油污染物毒性的能力<sup>[53]</sup>。

## 2.3 绿色修复植物的物理/化学强化技术

绿色植物的物理/化学强化技术主要包括添加营养物质、植物生长调节剂、表面活性剂等化学溶剂来提高植物修复效率。受污染的土壤通常营养水平低,并可能阻碍微生物和植物的生长,进而减少污染物的消散<sup>[1, 40]</sup>。因此,通过添加肥料来平衡营养可减少植物与微生物之间的竞争,从而提高根际修复效率。添加营养物质还可提高被石油污染物污染的土壤中植物的存活率并促进植物生长,从而产生足够的根系生物量来促进根际微生物的发展,提高植物根际降解污染物的效率。Wang 等<sup>[54]</sup>报道了施用堆肥可使黑麦草(*L. perenne*)和紫花苜蓿(*M. sativa*)对土壤中石油

污染物的降解率提高 46%。近年来,已有研究表明使用植物生长调节剂作为提高植物修复效果的可行性<sup>[55-56]</sup>。改善植物修复的有效植物生长调节剂主要包括生长素、赤霉素、细胞分裂素和水杨酸等。这些物质的活性取决于其浓度、影响其吸收的环境因素以及植物的生理状态。使用这些调节剂可增加植物的生物量,并减少植物中污染物的存在所带来的负面影响<sup>[1, 40]</sup>。表面活性剂在分子结构中同时由亲水性部分和疏水性部分组成,这种独特的结构可增强土壤污染物的水溶性,特别是对于一些疏水性有机化合物,如石油烃、PAHs),从而促进它们被植物吸收利用<sup>[57]</sup>。已有研究表明,化学合成或天然的多种表面活性剂(如阴离子、阳离子、两性离子和非离子表面活性剂)均已被用于增强石油污染物的植物根际修复作用<sup>[58]</sup>。Fadhile 等<sup>[59]</sup>比较了生物表面活性剂与碳氢降解菌、十二烷基硫酸钠和细菌培养上清液对 2 g/kg 汽油污染土壤的植物修复性能。结果表明,在 72 d 的测试中,生物表面活性剂的去除率为 93.5%,而细菌、培养上清液和十二烷基硫酸钠的去除率分别为 85.4%、70.3% 和 86.3%。

绿色植物的物理/化学强化还可通过施加螯合剂和酸化剂,来增强土壤中的氧化-还原电势来促进植物生长和提高植物修复效率<sup>[60]</sup>;纳米材料不仅可以直接去除污染物<sup>[40, 61]</sup>,还可以促进植物生长以及增加污染物的植物利用率,在植物修复系统中发挥重要作用<sup>[62]</sup>。纳米级零价铁是用于植物修复研究最多的纳米材料<sup>[63-65]</sup>,富勒烯纳米颗粒也可增加污染物的植物利用率。通常,使用纳米材料促进受污染土壤的植物修复是一种有效的策略,但仍处于探索和尝试阶段<sup>[66]</sup>。生物炭作为一种土壤改良剂,近几年在植物修复领域逐渐得到重视。生物炭具有长期固定碳、减少土壤  $N_2O$  排放、增加土壤水和养分保留以及调节土壤 pH 的潜力<sup>[67]</sup>,并且可通过促进有益微生物的繁殖来刺激植物的生长<sup>[68]</sup>。

## 2.4 绿色修复植物的电化学强化技术

研究发现,在绿色修复植物附近施加电场可促进植物生长发育,并通过移动养分和污染物来增强植物的修复能力,使这些养分和污染物更易于植物吸收<sup>[69-70]</sup>。因此,绿色修复植物通过电化学强化可提高石油污染场地修复效率,是一种有前途的联合修复技术<sup>[46]</sup>。Rocha 等<sup>[70]</sup>研究了通过使用石墨电极修复污染石油的土壤,通过 ER 增强植物修复的效率,结果表明电动处理可提高养分的生物利用度以及减少蒸发通量来提高植物的修复效率。Acosta-Santoyo 等<sup>[69]</sup>研究发现,在黑麦草种子附近的干净土壤中施用 0.2 DCV/cm 可使发芽率提高 75%,从而提高黑麦草对污染场地的修复。土壤中污染物的存在,阻碍了黑麦草的发芽和生长,

直流电场的施加有利于植物的发芽和生长,从而补偿了污染物的负面影响。在绿色修复植物的电化学强化技术中,污染物的去除或降解是由植物完成的,而电场则通过增加污染物的迁移率和生物利用度来增强植物的活性,从而弥补污染物对植物修复的负面影响。由于电场有效地将越来越多的可溶性重金属推向植物根部,从而导致植物处于胁迫状态,因此,具有快速生长期的高蓄积植物被认为是与电化学技术结合使用的最佳选择<sup>[40,70]</sup>。

### 3 展 望

由于石油仍是经济社会发展的主要能源,大量的石油勘探、开采、生产势必会产生大面积的石油及石化污染场地,污染场地的修复成为我国乃至世界土壤修复领域的难题。因此,迫切需要开发低成本、高效、可持续和生态友好的修复技术来应对更多的石油污染场地。由于传统的修复技术存在缺陷以及环境效益差,生物修复技术比物理和化学方法更具优势,是一种环境安全和可持续的方法,引起了人们的广泛兴趣。国内外对石油污染场地的生物修复的研究已取得一系列的显著成果,这些成果为推进生物修复技术的发展提供了理论基础、数据支持和技术支撑。但是,生物修复技术在实际的石油烃污染场地的修复过程中存在一些局限性,如不同的微生物、植物种类只能降解一种或几种特定污染物,普遍适用性不强;对污染物降解不彻底,矿化率不高,一些中间产物的毒性甚至超过母体;场地条件和环境因素对生物修复的微生物、植物生存以及修复效率影响较大等。因此,生物修复技术的研究与应用还需要更深入的探讨来克服生物技术的局限性,达到更好的修复效果。基于目前生物修复技术的进展<sup>[1,40,70-71]</sup>,结合实际应用的修复背景和需要提出以下几点建议:

(1) 提高联合修复的水平将成为今后研究的重点。一方面,提高微生物修复和植物修复的微生物-植物联合修复水平,不断完善生物修复技术,使其体系更加系统、成熟;另一方面,如何将生物修复技术与传统的物理、化学修复技术有效结合以提高石油污染场地的修复效率仍然是研究的重点,生物修复技术与传统技术取长补短,保持生物修复技术绿色、环境友好的特点,引入传统修复技术的高效、对污染物普遍适用性等优点,使两者达到有机结合,发挥各自优势、共同提高石油污染土壤的修复效率。

(2) 生物修复技术的关键在于培养和筛选具有降解石油污染物的植物或微生物,在实际应用过程中应以污染场地的本土植物和微生物为研究重点,通过生

物修复的手段和机制,开发它们的生物修复潜力;当需要外源植物和外源微生物强化生物修复效果时,应考虑对当地其他生物群落和土壤健康的影响,避免对当地生态系统带来系统性的破坏。

(3) 应用基因组学技术更好地了解植物及其根际微生物群落之间的相互作用,可以帮助我们了解复杂的有机化合物(如石油烃、苯系物等)是如何在土壤系统中协同代谢降解的,有助于建立新的和高效的生物修复系统。

#### 参考文献:

- [1] 周启星,宋玉芳,等.污染土壤修复原理与方法[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] SUN J, PAN L, ZHAN Y, *et al.* Contamination of phthalate esters, organochlorine pesticides and polybrominated diphenyl ethers in agricultural soils from the Yangtze River Delta of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 670-674.
- [3] ZHONG Y, ZHU L. Distribution, input pathway and soil-air exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons in Banshan Industry Park, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 177-182.
- [4] ANA C, JORDI D, CLAUDIA M, *et al.* Factors influencing the soil-air partitioning and the strength of soils as a secondary source of polychlorinated biphenyls to the atmosphere [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45 (11): 4785.
- [5] LIU Y, LI S, NI Z, *et al.* Pesticides in persimmons, jujubes and soil from China: Residue levels, risk assessment and relationship between fruits and soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 620-628.
- [6] RITA D C F S S, DARNE G A, RAQUEL D R, *et al.* Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2014, 15 (7): 12523-12542.
- [7] ABENA M T B, LI T, SHAH M N, *et al.* Biodegradation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in highly contaminated soils by natural attenuation and bioaugmentation [J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 864.
- [8] EWEJE G. Environmental costs and responsibilities resulting from oil exploitation in developing countries: The case of the Niger Delta of Nigeria [J]. *Journal of Business Ethics*, 2006, 69 (1): 27-56.
- [9] ABIOYE O P, AGAMUTHU P, AZIZ A R A. Phytotreatment of soil contaminated with used lubricating oil using hibiscus cannabinus [J]. *Biodegradation*, 2012, 23 (2): 277-286.
- [10] ROY A S, BARUAH R, BORAH M, *et al.* Bioremediation potential of native hydrocarbon degrading

- bacterial strains in crude oil contaminated soil under microcosm study [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2014, 94: 79-89.
- [11] SHERWOOD M K, CASSIDY D P. Modified fenton oxidation of diesel fuel in arctic soils rich in organic matter and iron [J]. *Chemosphere*, 2014, 113: 56-61.
- [12] GAN S, LAU E V, NG H K. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172 (2): 532-549.
- [13] PAZOS M, PLAZA A, MARTÍN M, *et al.* The impact of electrokinetic treatment on a loamy-sand soil properties [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 183: 231-237.
- [14] ANTHONY E J, WANG J. Pilot plant investigations of thermal remediation of tar-contaminated soil and oil-contaminated gravel [J]. *Fuel*, 2005, 85 (4): 443-450.
- [15] FALCIGLIA P P, GIUSTRA M G, VAGLIASINDI F G A. Low-temperature thermal desorption of diesel polluted soil: Influence of temperature and soil texture on contaminant removal kinetics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185 (1): 392-400.
- [16] KAVITHA V, MANDAL A B, GNANAMANI A. Microbial biosurfactant mediated removal and/or solubilization of crude oil contamination from soil and aqueous phase: An approach with bacillus *licheniformis* MTCC 5514 [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2014, 94: 24-30.
- [17] MALINA G, GROTENHUIS J T C, RULKENS W H. Vapor extraction/bioventing sequential treatment of soil contaminated with volatile and semivolatile hydrocarbon mixtures [J]. *Bioremediation Journal*, 2002, 6 (2): 159-176.
- [18] WANG X, CAI Z, ZHOU Q, *et al.* Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using u-tube microbial fuel cells [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, 109 (2): 426-433.
- [19] ANNA G, YOAN P, DAVID H, *et al.* Effect of digestate application on microbial respiration and bacterial communities' diversity during bioremediation of weathered petroleum hydrocarbons contaminated soils [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 670: 271-281.
- [20] HOFF R Z. Bioremediation: An overview of its development and use for oil spill cleanup [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1993, 26 (9): 476-481.
- [21] MANCERA-LÓPEZ M E, ESPARZA-GARCÍA F, CHÁVEZ-GÓMEZ B, *et al.* Bioremediation of an aged hydrocarbon-contaminated soil by a combined system of biostimulation-bioaugmentation with filamentous fungi [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2008, 61 (2): 151-160.
- [22] POTIN O, RAFIN C, VEIGNIE E. Bioremediation of an aged polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) - contaminated soil by filamentous fungi isolated from the soil [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2004, 54 (1): 45-52.
- [23] 张腾飞, 黄玉杰, 季蕾, 等. 石油污染土壤生物修复技术研究进展 [J]. *山东科学*, 2020, 33 (5): 106-112, 126.
- [24] VARJANI S J, RANA D P, JAIN A K, *et al.* Synergistic ex-situ biodegradation of crude oil by halotolerant bacterial consortium of indigenous strains isolated from on shore sites of Gujarat, India [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2015, 103: 116-124.
- [25] COVINO S, D'ANNIBALE A, STAZI S R, *et al.* Assessment of degradation potential of aliphatic hydrocarbons by autochthonous filamentous fungi from a historically polluted clay soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 545-554.
- [26] RAMADASS K, MEGHARAJ M, VENKATESWARLU K, *et al.* Bioavailability of weathered hydrocarbons in engine oil-contaminated soil: Impact of bioaugmentation mediated by pseudomonas spp. on bioremediation [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 968-974.
- [27] 屈撑囤, 马健波, 贾汉忠, 等. 微生物协同降解深层石油污染土壤研究 [J]. *油气田环境保护*, 2016, 26 (5): 6-9, 17.
- [28] WU G, LI X, COULON F, *et al.* Recycling of solvent used in a solvent extraction of petroleum hydrocarbons contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186 (1): 533-539.
- [29] WU G, ZHU X, JI H, *et al.* Molecular modeling of interactions between heavy crude oil and the soil organic matter coated quartz surface [J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 242-249.
- [30] YAN G, MA W, CHEN C, *et al.* Combinations of surfactant flushing and bioremediation for removing fuel hydrocarbons from contaminated soils [J]. *CLEAN – Soil Air Water*, 2016, 44 (8): 984-991.
- [31] LU M, ZHANG Z, QIAO W, *et al.* Remediation of petroleum-contaminated soil after composting by sequential treatment with fenton-like oxidation and biodegradation [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (7): 2106-2113.
- [32] KIM I, LEE M. Pilot scale feasibility study for in-situ chemical oxidation using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution conjugated with biodegradation to remediate a diesel contaminated site [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 241-242: 173-181.
- [33] GONG X B. Remediation of weathered petroleum oil-

- contaminated soil using a combination of biostimulation and modified fenton oxidation [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2012, 70: 89-95.
- [34] LAHEL A, FANTA A B, SERGIENKO N, *et al.* Effect of process parameters on the bioremediation of diesel contaminated soil by mixed microbial consortia [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2016, 113: 375-385.
- [35] WANG C P, ZHANG Z Y, XU W, *et al.* Electrokinetic-assisted bioremediation of field soil with historic polycyclic aromatic hydrocarbon contamination [J]. *Environmental Engineering Science*, 2016, 33: 44-52.
- [36] PRAKASH A A, PRABHU N S, RAJASEKAR A, *et al.* Bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil enhanced by bacterial biosurfactant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020: 124061.
- [37] WANG H, LUO H, FALLGREN P H, *et al.* Bioelectrochemical system platform for sustainable environmental remediation and energy generation [J]. *Biotechnology Advances*, 2015, 33 (3): 317-334.
- [38] WANG X, FENG C, DING N, *et al.* Accelerated OH<sup>-</sup> transport in activated carbon air-cathode by anchoring or mixing quaternary ammonium for microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (7): 4191-4198.
- [39] LU L, YAZDI H, JIN S, *et al.* Enhanced bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil using pilot-scale bioelectrochemical systems [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 274: 8-15.
- [40] 周启星, 刘家女, 薛生国, 等. 污染环境修复实践与案例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [41] EBADI A, KHOSHKHOLGH SIMA N A, OLAMAEE M, *et al.* Remediation of saline soils contaminated with crude oil using the halophyte *salicornia persica* in conjunction with hydrocarbon-degrading bacteria [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 219: 260-268.
- [42] KOTOKY R, PANDEY P. Rhizosphere mediated biodegradation of Benzo (a) pyrene by surfactin producing soil bacilli applied through *melia azedarach* rhizosphere [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22 (4): 363-372.
- [43] XIA M Q, CHAKRABORTY R, TERRY N, *et al.* Promotion of saltgrass growth in a saline petroleum hydrocarbons contaminated soil using a plant growth promoting bacterial consortium [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2020, 146: 104808.
- [44] CHENG L, WANG Y, CAI Z, *et al.* Phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated saline-alkali soil by wild ornamental iridaceae species [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2017, 19 (3): 300-308.
- [45] BRERETON N J B, GONZALEZ E, DESJARDINS D, *et al.* Co-cropping with three phytoremediation crops influences rhizosphere microbiome community in contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 135067.
- [46] 周启星, 唐景春, 魏树和. 环境绿色修复的地球化学基础与相关理论探讨 [J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36 (1): 1-10.
- [47] DA CUNHA A C B, SABEDOT S, SAMPAIO C H, *et al.* *Salix rubens* and *salix triandra* species as phytoremediators of soil contaminated with petroleum-derived hydrocarbons [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2012, 223 (8): 4723-4731.
- [48] DESJARDINS D, BRERETON N J B, MARCHAND L, *et al.* Complementarity of three distinctive phytoremediation crops for multiple-trace element contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610-611: 1428-1438.
- [49] 苗欣宇, 周启星. 污染土壤植物修复效率影响因素研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34 (3): 870-877.
- [50] 顾平, 周启星, 王鑫, 等. 一株苯并 [a] 芘降解菌-紫茉莉联合修复污染土壤的研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38 (4): 1613-1620.
- [51] 尚琼琼, 张秀霞, 李振伟, 等. 秸秆与微生物协同修复石油污染土壤 [J]. *石油学报*, 2018, 34 (6): 1203-1210.
- [52] 唐景春, 董健, 牛晓伟, 等. 黑麦草-高效微生物联合修复石油污染盐碱土壤的方法, CN, 201010229416. 2 [P]. 2010-07-18.
- [53] HOU J, LIU W, WANG B, *et al.* PGPR enhanced phytoremediation of petroleum contaminated soil and rhizosphere microbial community response [J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 592-598.
- [54] WANG M C, CHEN Y T, CHEN S H, *et al.* Phytoremediation of pyrene contaminated soils amended with compost and planted with ryegrass and alfalfa [J]. *Chemosphere*, 2012, 87 (3): 217-225.
- [55] SUN Y, XU Y, ZHOU Q, *et al.* The potential of gibberellic acid 3 (GA3) and Tween-80 induced phytoremediation of co-contamination of Cd and Benzo [a] pyrene (B [a] P) using *Tagetes patula* [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 202-208.
- [56] ROSTAMI S, AZHDARPOOR A, ROSTAMI M, *et al.* The effects of simultaneous application of plant growth regulators and bioaugmentation on improvement of phytoremediation of pyrene contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 219-223.
- [57] AGNELLO A C, HUGUENOT D, VAN HULLEBUSCH E D, *et al.* Enhanced phytoremediation: A review of low molecular weight organic acids and

- surfactants used as amendments [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, 44 (22): 2531-2576.
- [58] FIRDAUS E B. Chelate assisted phytoextraction using oilseed brassicas [M]. Dordrecht: Springer Netherlands. 2012: 289-311.
- [59] FADHILE A A, ABU HASAN H, IDRIS M, *et al.* Potential application of a biosurfactant in phytoremediation technology for treatment of gasoline-contaminated soil [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 113-120.
- [60] 岳宗恺, 周启星. 纳米材料在有机污染土壤修复中的应用与展望 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (10): 1929-1937.
- [61] ZHOU Q, MA S, ZHAN S. Superior photocatalytic disinfection of Ag-3D ordered mesoporous CeO<sub>2</sub> under visible light condition [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 224: 27-37.
- [62] HU X, ZHOU Q. Health and ecosystem risks of graphene [J]. *Chemical Reviews*, 2013, 113 (5): 3815-3835.
- [63] GAO Y Y, ZHOU Q X. Application of nanoscale zero valent iron combined with *Impatiens balsamina* to remediation of e-waste contaminated soils [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 790: 73-76.
- [64] 高园园, 周启星. 纳米零价铁在污染土壤修复中的应用与展望 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (3): 418-425.
- [65] SONG B, XU P, CHEN M, *et al.* Using nanomaterials to facilitate the phytoremediation of contaminated soil [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49 (9): 791-824.
- [66] KOLTON M, GRABER E R, TSEHANSKY L, *et al.* Biochar-stimulated plant performance is strongly linked to microbial diversity and metabolic potential in the rhizosphere [J]. *New Phytologist*, 2017, 213 (3): 1393-1404.
- [67] CAO Y, YANG B, SONG Z, *et al.* Wheat straw biochar amendments on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in contaminated soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130: 248-255.
- [68] CANG L, WANG Q Y, ZHOU D M, *et al.* Effects of electrokinetic-assisted phytoremediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by Indian mustard [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 79 (2): 246-253.
- [69] ACOSTA-SANTOYO G, CAMESELLE C, BUSTOS E. Electrokinetic – enhanced ryegrass cultures in soils polluted with organic and inorganic compounds [J]. *Environment Research*, 2017, 158: 118-125.
- [70] ROCHA I M V, SILVA K N O, SILVA D R, *et al.* Coupling electrokinetic remediation with phytoremediation for depolluting soil with petroleum and the use of electrochemical technologies for treating the effluent generated [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 208: 194-200.
- [71] CAMESELLE C, CHIRAKKARA R A, REDDY K R. Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities [J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (4): 626-636.

(编辑 陈 红)



周启星,南开大学学术委员会委员、教授、博导、环境科学与工程学院学术委员会主任、院长(前任)。1998年入选中科院百人计划,2002年获国家杰出青年科学基金,2004年受聘教育部长江学者特聘教授,2016年获天津市首批杰出人才。2013、2015、2017和2021年分别入选中国科学院院士候选人。系国务院学科评议组成员(先后为环境科学与工程、生态学),教育部科技委学部委员(先后为地学与资源环境学部、环境学部)。兼任中国农业生态环境保护协会副理事长,中国环境科学学会、中国自然资源学会和中国生态学会常务理事;担任《生态毒理学报》《农业环境科学学报》《环境工程技术学报》副主编,以及 *Journal of Hazardous Materials*、*Land Degradation & Development*、*Journal of Soils and Sediments* 等国际 SCI 期刊编委。主要从事生态地球化学、环境科学与工程以及资源循环科学与工程等方面的科研与教学工作。主持国家重点研发和联合基金重点等项目。在国内外重要学术期刊发表论文 700 余篇,其中第一/通信作者 SCI 收录 273 篇,主编/共同主编著作 17 部。其论著 SCI 总引达 2 万余次,Web of Science 的 H 指数为 71,连续 7 年入选爱思唯尔高被引学者。以第 1 完成人,获天津市自然科学奖特等奖、教育部自然科学奖一等奖和辽宁省自然科学奖一等奖等等奖项 10 余项。