

生物技术在油田土壤修复中的应用

周畅¹, 梁恒², 黄理龙³, 张晓飞⁴, 王加宁¹, 宋繁永¹, 傅晓文^{1*}

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)生态研究所 山东省应用微生物重点实验室, 山东 济南 250103;
2. 山东省环科院环境工程有限公司, 山东 济南 250109; 3. 山东大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266237;
4. 东营金岛环境工程有限公司, 山东 东营 257231)

摘要: 油田土壤的石油污染问题严重威胁区域环境安全和人类健康。利用生物技术修复油田污染土壤具有生态性、经济性和高效性等优势。综述了不同类型生物技术应用在油田土壤修复中的研究进展。通过阐述生物修复技术在油田污染土壤中的应用原理和方法, 分析和评价了微生物修复、植物修复及其与表面活性剂、化学氧化和电动修复等多种技术的联合应用模式, 强调了效果评估在生物修复中的重要性。该研究对生物修复技术在油田土地质量提升和生态环境恢复领域中的推广与应用具有重要指导意义。

关键词: 油田土壤; 石油烃; 生物降解; 联合修复

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4026(2025)02-0041-12

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Biotechnologies used for the remediation of oil-field soils

ZHOU Chang¹, LIANG Heng², HUANG Lilong³, ZHANG Xiaofei⁴,
WANG Jianing¹, SONG Fanyong¹, FU Xiaowen^{1*}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Applied Microbiology, Ecology Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103, China; 2. Shandong Environmental Sciences Environmental Engineering Co., LTD., Jinan 250109, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China; 4. Dongying Jindao Environmental Engineering Co., LTD., Dongying 257231, China)

Abstract: Petroleum contamination in oil-field soils poses significant risks to both regional environmental safety and human health. The use of biotechnologies for the remediation of contaminated oil-field soils offers advantages such as ecological sustainability, economic feasibility, and high efficiency. This paper reviews the research progress on various biotechnologies used for the remediation of contaminated oil-field soils. By describing the mechanisms and methods of various bioremediation technologies, the study analyzes and evaluates microbial remediation, phytoremediation, and their combined applications with surfactants, chemical oxidation, and electrokinetic remediation. It also highlights the

收稿日期: 2024-12-06

基金项目: 山东省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2023057); 国家自然科学基金项目(32272530); 国家重点研发计划(2019YFC1804103)

作者简介: 周畅(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤污染修复。E-mail: 13053399704@163.com

* 通信作者, 傅晓文, 男, 副研究员, 研究方向为土壤污染修复。E-mail: seanfv@163.com, Tel: 15953122080

importance of assessing the effectiveness of bioremediation strategies. This study provides valuable guidance for the promotion and application of bioremediation technologies aimed at improving the quality of oil-field soils and restoring the ecological environment.

Key words : oil-field soils; petroleum hydrocarbon; biodegradation; combined remediation

石油类物质的主要成分为饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质,有很高的复杂性和疏水性,且污染面积广^[1-2]。其中多环芳烃具有致癌、致畸和致突变性,能够通过呼吸、皮肤接触和饮食摄入等方式进入人体,影响肝、肾等器官的正常功能,甚至引起癌变^[3]。由于它们对人类健康和环境有不利影响,废矿物油被列入《国家危险废物名录》(2021 年版)中的 HW08 类危险废物^[4]。土壤中的石油污染物不仅破坏了土壤结构和生物多样性,而且威胁着周边水生态、大气环境和人类健康。随着石油工业的快速发展,油田开发、运输过程及历史遗留等原因造成的石油污染问题日益严重,产生了大面积的待修复污染土地。如何尽快修复土壤中的石油污染物,成为了行业专家和学者们关注的焦点。研发高效、经济且可持续的修复技术已成为环境治理领域的重要研究方向。

物理和化学等传统的修复方法,尽管能够在短期内取得修复成效,但普遍存在成本高、能耗大、操作复杂且极易引发二次污染的问题^[5]。相比之下,生物修复技术利用微生物、植物或其代谢产物降解和转化石油类污染物,能够在降低污染物毒性和浓度的同时恢复土壤的生态功能^[6]。生物修复技术因其环境友好、成本较低和可持续性强的优势,成为油田土壤修复领域的研究热点^[7-8]。

本文系统总结了常用生物修复技术在油田土壤修复中的原理、方法和应用,探讨了不同生物修复技术在应用过程中的优势和限制,并开展生物技术在油田土壤修复应用中的效果评估,进一步揭示了其在实际应用中的潜力和广阔的应用前景。

1 生物修复技术的原理及方法

自然界中的大量微生物、植物和低等动物等能够将大分子有毒污染物分解为小分子低毒或无毒物质,同时产生机体所需的能量和营养物质供其生长和繁殖^[8-9]。生物修复技术即利用这些生物及其代谢活动来消除、分解或转化环境中的污染物,使得受污染介质恢复自然状态^[10-11]。在土壤修复中,生物利用自身调节机制和对多元净化能力对污染物进行处理,不会产生二次污染,是应用前景最为乐观的土壤修复方法^[12]。

生物修复的基本原理是利用不同生物体自身的生理功能和酶促反应,以及相应的一系列生物化学反应,消除或降低有机污染物的毒性^[13]。其中,生物酶是微生物合成的生物催化剂,能够促进外来物质分解的同时转化为自身提供能量和营养维持生物自身生命活动^[8]。微生物代谢石油烃的核心是酶促反应机制和代谢途径^[14]。石油烃降解微生物通常可以分泌表面活性剂将有机污染物乳化,污染物在透过酶的作用下,通过主动运输、被动扩散和胞吞等作用进入细胞,然后与相应的酶发生酶促反应,从而完成降解^[12]。微生物降解烷烃和芳香烃等石油类污染物的代谢途径各不相同^[12]。烷烃类化合物首先通过烷烃单加氧酶等酶类的作用下形成醇类,然后通过醇脱氢酶和醛脱氢酶的作用进一步氧化为醛类和脂肪酸,脂肪酸与辅酶 A 结合经 β 氧化生成乙酰辅酶 A 进入三羧酸循环,最终转化为二氧化碳和水^[15]。而对于芳香烃类化合物,微生物则通过芳香烃单加氧酶催化其结构开环,形成酚类、醛类等中间产物,随着进一步的酶促反应,这些产物最终被降解为较简单的化合物^[16]。不同微生物通过不同的酶组合和代谢途径,通过科学配伍能够有效地降解石油中复杂的多种石油烃类物质,并且在细胞内通过物质和能量的代谢实现自身的生长和繁殖。

生物修复技术的影响因素不仅包括温度、湿度、pH 等环境因子,也包括生物活性和代谢效率等生物因素,同时污染物本身的化学特征,如不同地区石油组分组成、生物可利用性、溶解性和毒性等也会影响生物修复效果^[17]。由于土壤生态系统的复杂性和污染物种类多样,使得生物修复技术的应用范围和稳定性受到很大限制,相关研究针对生物修复过程中的影响因素开展了大量研究^[18-20]。

2 不同类型生物技术在石油污染土壤修复中的应用

土壤中石油类污染物的来源主要是原油开采、运输和开发等过程中的事故泄漏或不当操作导致的落地油,其成分包括脂肪烃、芳香烃、胶质和沥青质等组分^[21]。利用植物、微生物等对石油不同组分的吸收、转化和代谢作用,不仅能够去除土壤污染、恢复土壤的生态功能,而且具有环保、经济、高效等特点^[22]。石油污染土壤的生物修复主要分为微生物修复、植物修复以及联合修复技术。

2.1 微生物修复技术

利用微生物修复石油污染土壤的关键是提高特异性降解微生物(包括降解菌、降解酶及相关的遗传信息等)在土壤中的丰度,优化微生物群落结构,强化土壤菌群对石油烃的降解能力,进而大幅提高土壤修复效率。除了能够代谢石油烃的微生物以外,某些微生物能够合成鼠李糖脂等生物表面活性剂,这些物质能提高石油烃类有机物在土壤中的解吸程度和生物利用率^[23],从而进一步改善土壤中有机污染物的去除效率。

土壤中石油烃的微生物代谢可以分为好氧型和厌氧型^[24]。其中氧气浓度是影响降解速率的关键因素。在氧气充足的条件下,好氧微生物将氧气作为电子受体,通过呼吸作用高效释放能量,促进其生长和繁殖。目前已知的好氧型细菌中,假单胞菌属、不动杆菌属和芽孢杆菌等能有效降解石油烃类^[25]。能够降解烃类污染物的真菌主要包括假丝酵母属、曲霉属、镰刀霉属等,这些真菌能够分解复杂的烃类物质,尤其是长链烷烃^[26-27]。厌氧代谢是在无氧或缺氧条件下,微生物以硝酸盐、硫酸盐、二氧化碳或某些有机化合物为电子受体进行代谢来获取能量。目前报道较多的厌氧降解菌有发酵菌、硫酸盐还原菌和产甲烷菌等,它们分解石油烃的速率相比好氧菌较慢,但在氧气传输受阻的黏土中,厌氧修复具有优势^[28]。

在自然环境中,土著微生物对污染物的降解过程通常较为缓慢,因此需要对土壤中的微生物群落采取一些强化措施,以提高修复效率。根据所受强化的功能微生物的不同来源,可以将土壤石油污染的微生物修复方法分为生物刺激法和生物强化法两种。

2.1.1 生物刺激法

生物刺激修复技术通过向土壤添加营养物质促进土著微生物的生长繁殖,或添加表面活性剂等提高污染物的生物可利用性,进而提高污染物的生物代谢效率。当土壤微生物群落中具备石油烃降解能力的野生土著微生物时,采用生物刺激方法更为经济和便捷。不同有机污染物在环境中经历的生物化学过程复杂且多样,这些生化过程与土壤中微生物的种群结构、数量、活性密切相关,同时也受到土壤环境条件的显著影响^[29]。因此,为了优化污染物去除过程的稳定性,通常采用合理配比营养添加以及通风、施肥、浇水等方式促进生物刺激法的修复效果^[29-30]。Jayeeta等^[31]通过添加硝酸盐增强本地微生物群落的生物降解能力来处理石油精炼污泥,TPH降解率超过95%。殷鹏婷等^[32]采用生物通风技术对模拟石油污染土壤进行修复,修复63 d后,TPH降解率为68.3%,同时指出该工艺对环境的影响小、经济性好、能够实现污染物的永久去除。然而,较高的土壤pH、盐分含量、高温以及其他土壤异常特性均会抑制细菌生长,降低石油烃去除效率^[33]。Maimona等^[34]研究发现添加生物炭能够刺激石油污染土壤中微生物的数量和活性,增强了碳氢化合物的降解能力。Wu等^[35]采用滴灌施肥法处理石油污染土壤,90 d后,总石油烃(TPH)的去除效率相比对照提高了21.5%。Zhao等^[36]发现在油田土壤修复过程中,添加氮磷营养盐能够显著提高石油去除率。王建刚等^[37]用生物刺激法修复石油污染荒漠土,修复90 d后C14-C30组分石油烃总含量降低93%以上,并指出生物刺激法能够加强脱氢酶、过氧化氢酶和脲酶的活性,进而促进了石油污染物的生物降解。这些研究表明,通过添加不同营养物质和改善土壤条件,能够有效去除土壤中的石油烃污染物,证实了生物刺激法是一种有效、经济和可持续的生物修复技术。

尽管生物刺激法能提高石油类污染物的去除率,但人为添加的高活性氮磷等营养元素,极易破坏土壤营养结构,同时威胁地表水和地下水的水质^[19]。另外一方面,生物刺激法通常效率不高,一般耗时较长,在实

际工程应用中通常需数月甚至数年才能获得理想效果^[38]。

2.1.2 生物强化法

生物强化是指通过向土壤中添加特定外源微生物或功能性酶来增强污染物去除能力的方法^[39]。高鹏飞等^[40]从松原油田石油污染土壤中筛选出嗜酸寡养单胞菌、类产碱假单胞菌和红球菌 3 种效降解石油烃的菌株,以 1:0.5:1.5 的复比对石油污染土壤进行修复,达到了 94.3% 的去除效果。刘虹等^[41]指出假单胞菌属对不同碳原子数的 3 种烷烃的降解效果较好,5 d 的降解率均达到 80% 以上。Yuan 等^[42]研究了土著细菌群和外源真菌共培养下的石油降解潜力,结果发现共培养 7 d 后原油降解率由 61.06% 提高到 81.45%。Muthukumar 等^[43]研究发现,复配的细菌群落(铜绿假单胞菌 PP3 和铜绿假单胞菌 PP4)能够在短时间内有效降解原油中的碳氢化合物。

生物强化适用于当地微生物无法有效降解目标污染物或受污染物毒性、不良环境条件等影响而不足以进行污染物降解的污染区域^[44]。微生物菌株的选择应根据具体污染物和现场条件进行定制^[45]。大量研究表明,将生物刺激法与生物强化法结合具有更高的污染物降解效率,并且在应对复杂污染物和不良环境条件时能更好发挥两者的优势,提高污染修复效果和稳定性^[44,46-47]。Nikolopoulou 等^[48]提出添加尿酸和卵磷脂可以显著提高石油烃的去除率,认为采用生物刺激添加剂与经过自然预适应的碳氢化合物降解微生物群相结合的方法,能够有效处理沿海地区石油泄漏。Yaman^[49]对污染土壤同时进行 *Alcanivorax* 菌属生物强化和添加氮磷生物刺激处理后,在 6 d 内有效去除了 TPH 并恢复了土壤肥力。

通过向土壤中添加高效石油烃降解微生物或酶,生物强化法能够扩充土壤中降解污染物的“贡献者”,从而显著提高生物修复效率,大幅缩短修复时间,弥补生物刺激法的不足。然而,尽管大量研究所采用的降解菌株是筛选自待修复土壤的土著菌,通过高密度发酵制备的菌群对自然环境的适应性仍不容乐观。如何提高外源菌在修复过程中的定殖效率和作用时间,维持高效降解菌群结构和活性,是进一步提高生物强化法修复效率的关键。

2.2 植物修复技术

植物修复是在受污染土壤中科学合理种植植物并利用植物的根系或者茎叶部分来吸收、积累、转化或降解污染物,对环境影响小,并可以同时稳定地表和改善土壤理化特性^[50]。植物对污染物的直接作用具体表现为植物吸收和分解污染物。植物可通过自身新陈代谢作用将吸收的污染物在体内分解为二氧化碳和水^[51]。与此同时,植物根系根际释放的分泌物和酶能够改善土壤质量和微生物生存环境,提高微生物丰度和活性,从而间接促进石油烃的降解^[52]。这些表现对土壤健康和生态恢复具有重要意义^[53]。

大量植物能够应用到石油污染土壤的修复中,而不同植物对石油烃的去除率不同。李先梅等^[54]研究发现墨西哥玉米草(*Purus frumentum*)对质量分数为 10 g/kg 的石油污染物的去除率高达 63.00%,而苏丹草(*Sorghum sudanense*)对质量分数为 20 g/kg 的石油污染物的去除率为 55.00%,并指出两种植物适用于华北油田石油污染治理。邓开良等^[55]发现柠条、沙打旺、黑麦草、高羊茅和冰草对土壤石油污染物均有去除效果。Dickson^[56]发现向日葵对土壤石油污染的修复效率高达 69%。高世珍等^[57]指出黄河三角洲翅碱蓬根际土壤中的持久性有机污染物含量低于周围非根际土壤,从而推断翅碱蓬具有吸收 PAHs 并转移到根叶和茎的能力。相同环境下,鞑靼滨藜和盐地碱蓬比野榆钱菠菜和盐角草有更好的石油烃污染耐受性和修复效果^[58]。Zhang 等^[59]利用牵牛花修复浓度为 0.5% 的石油污染土壤,经过 127 d 后石油烃的去除率为 67.42%,比空白组高 31.81%。

植物修复同时具备生态恢复和固碳作用,是一种经济、高效的绿色治理技术^[60]。然而,植物修复也存在修复时间长、受环境影响大等弊端^[61-63]。另一方面,尽管植物可以有效吸收 N、P 等无机盐和小分子有机物,但是对大分子有机物的吸收效果不佳^[64]。因此,大量专家学者开展了植物与微生物联合的修复技术研究,以期能够更高效地去除土壤中的石油烃等有机污染物^[4]。

2.3 植物-微生物联合修复技术

植物-微生物联合修复是整合植物与根际微生物、内生微生物的协同修复技术^[65]。植物和微生物具有天然的互惠共生关系:一方面植物通过根系释放的酶和分泌物能够改善根际生物环境,提高了根际微生物的生存环境,有利于微生物的生长和繁殖^[66];另一方面根系微生物通过代谢改变污染物的存在状态或降解污染物,减轻污染物的毒性,能够增强植物的耐受性,并促进植物对污染物的吸收和转化^[67]。在修复过程中,微生物与植物的协同作用关系如图 1 所示,植物通过分泌根系分泌物影响根际微生物的种群结构、生长发育和代谢活动等,而进入植物体内的石油烃污染物则通过内生微生物协同降解^[68]。另外,根系分泌物中的表面活性剂等组分可以促进疏水性有机物从土壤中解吸附,进而提高有机污染物的生物可利用性^[44]。韩博远等^[69]研究发现根系分泌物使得优势物种的丰度增强,促进了 PAHs 降解菌的生长。相关研究表明根系分泌物中的糖类、氨基酸、黄酮类等能够显著影响微生物的生理代谢,进而决定根际微生物的种类和群落结构^[70]。根际微生物对植物生长的促进作用也受到了广泛关注:Pawlik 等^[71]从百脉根和月见草中分离出 26 种内生碳氢化合物降解菌,并证实所有菌株都具有广泛的植物生长促进特性。刘鑫等^[72]研究发现在 PAHs 污染土壤或大田试验条件下接种的 PAHs 降解菌株 *Rhizobium petrolearium* SL-1 可以有效促进紫花苜蓿的生长,且微生物植物联合修复 PAHs 的效果优于单独微生物或植物处理。Xun 等^[73]发现接种植物促生菌和丛枝菌根真菌可以提高植物抗氧化酶活性,促进植物生长,同时促进石油烃的降解。在石油污染土壤修复领域,已有相关研究者利用植物-微生物联合修复技术取得了成果^[74-75]。申春妮等^[76]利用石油烃降解菌群与紫花苜蓿和高羊茅两种植物,通过盆栽实验证实了植物-微生物联合修复技术对柴油污染土壤的修复效果。Kiamarsi 等^[77]研究发现香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)在与降解细菌的共存情况下,可以有效去除原油污染土壤。

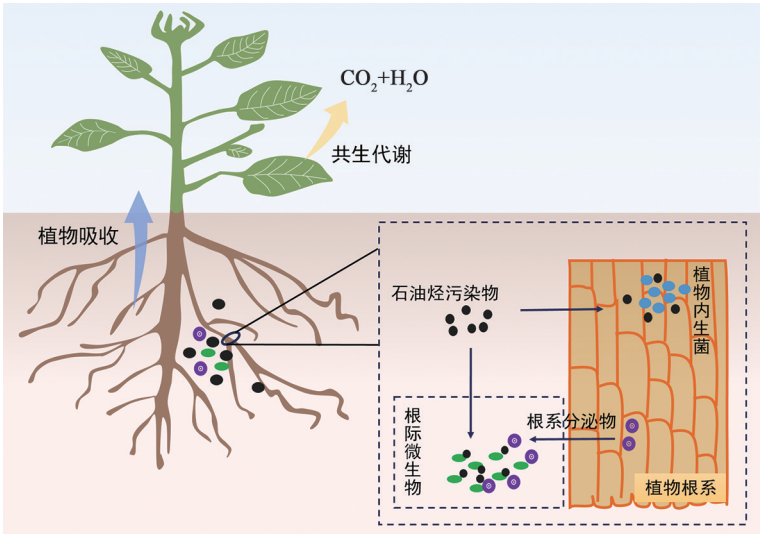


图 1 植物-微生物联合修复石油烃污染土壤的作用机制

Fig.1 Mechanisms of plant-microbe synergistic remediation of petroleum-hydrocarbon-contaminated soil

相较于单一修复技术,植物-微生物联合修复技术具有高效性、稳定性和生态恢复等优点,同时还具备碳封存、土壤稳固、生物燃料及植物纤维生成的潜力^[78]。然而,目前对植物-微生物联合修复技术的机理尚不明确,深入剖析植物和微生物的协同作用机制和耦合生存机理仍是实现联合修复技术大规模推广应用和提高环境修复效率的关键。

2.4 生物表面活性剂联合生物修复技术

尽管大多生物表面活性剂属于生物的次级代谢产物,但它们对微生物的生长有重要作用^[78]。相关研究表明,表面活性剂能够增强有机物的分散性和吸收性,提高土壤孔隙中石油烃的解吸附,改变油水接触面的

表面张力,调节其与细胞表面的亲和力,促进微生物分解、转化有机物和自身的生长、繁殖^[79]。王晓旭等^[80]采用 SDBS-Tween80 联合微生物修复 PAHs 污染土壤,去除率与不添加表面活性剂处理相比提高了 11.9%。与人工合成的化学表面活性剂相比,生物表面活性剂通常具有更好的环境相容性,与土壤成分的相互作用较弱,减少了土壤污染风险;另一方面,生物表面活性剂能有效乳化石油为更小的油滴,增加其表面积,便于微生物附着和分解,从而提升石油的生物降解效率^[81]。其中鼠李糖脂、甘露糖基赤藓糖醇脂质等具有优秀的表面活性和生物活性,可以增强碳氢化合物的溶解度,被广泛应用于石油开采、环境修复等领域^[82]。Liu 等^[83]在大港油田筛选出一种产表面活性剂的石油降解菌株(地衣芽孢杆菌 Y-1),对原油具有很强的乳化活性,能够显著提高石油污染土壤的修复效率。Patowary 等^[84]利用铜绿假单胞菌 SR17 产生的鼠李糖脂耦合微生物修复石油污染土壤,结果表明添加鼠李糖脂后 TPH 的降解率为 86.1%,而添加人工合成表面活性剂十二烷基硫酸钠的 TPH 降解率为 70.8%,证明了生物表面活性剂相比合成试剂的优越性。

生物表面活性剂的添加能够提高土壤中石油烃等有机污染物的活性和生物利用性,从而提高修复效率,可视为一种高效且安全的生物刺激手段,然而生物表面活性剂的成本较高^[85]。目前生物表面活性剂的应用大多处在实验室阶段,发展方向主要为复合生物表面活性剂和专性活性剂的研发,以及应用过程中生物表面活性剂作用机制的研究^[86]。

2.5 化学氧化联合生物修复技术

化学氧化联合修复的流程大多为先使用化学氧化剂将高浓度、难分解有机污染物氧化为低毒性、易生物降解的小分子产物,再利用微生物或植物降解这些氧化产物,从而实现了对污染物的彻底清除^[87]。目前常用的化学氧化剂有臭氧、芬顿(Fenton)试剂、过氧化氢(H₂O₂)、高锰酸钾和过硫酸盐等^[88]。Li 等^[89]利用臭氧使得 BaP 在短时间内加速分解为小分子易降解物和低分子量的中间体。Li 等^[90]使用 Fenton 试剂对受油污染的土壤进行预氧化处理,能够提高后续的生物修复效率。Gou 等^[91]对 H₂O₂预处理的老化土壤中 PAHs 的缺氧生物降解进行了研究,发现过氧化氢预处理后能增加细菌群落的丰度,提高 PAHs 的生物降解效果。Fanaei 等^[92]用 H₂O₂进行生物刺激,在 6 d 中实现 32 g/kg TPH 的完全生物降解,显著加快了石油烃的生物修复速率。Liao 等^[93]将高锰酸盐和过硫酸盐用于修复 PAHs 污染土壤,结果表明两种氧化剂均能够显著促进土著微生物的生长,进而促进 PAHs 的生物降解。

尽管化学氧化剂与生物修复技术的联合应用能够显著提高石油污染土壤的处理效率,然而该技术也存在许多局限性。因为氧化剂本身及其中间产物具有的非特异性氧化活性和生物毒性,大多数化学氧化剂都会在一定程度上抑制土著微生物的活性和生长繁殖^[94]。此外,氧化剂的成本较高且添加量不易估算,过量和残留的氧化剂亦可能对土壤生态系统产生影响^[95]。因此,在实际应用中,需要对氧化剂的用量和反应条件进行科学控制,以确保最佳修复效果。

2.6 电动修复联合生物修复技术

电动修复是在污染区域施加电场,促使污染物发生电泳、电渗析、电迁移和扩散等过程,与微生物联合修复时,电动作用可以为微生物提供电子受体,增强微生物代谢活性,从而提高污染物的降解率^[96-97]。相关研究表明电动修复对土壤微生物健康没有显著的负面作用,相反可以促进微生物的迁移和营养物质的传递,证明了电动联合修复是可行的土壤修复技术^[95]。马永松等^[98]指出,在最佳修复电压下,处理 15 d 的石油污染土壤中石油烃的去除率达到了 46.85%。李婷婷等^[99]利用石油降解菌和电动法联合修复石油质量分数为 2%的模拟污染土壤,结果表明电动修复能够将土壤的 pH 和温度维持在相对稳定的范围内,为微生物的生存和活动提供了稳定的环境,从而提高了微生物对石油的降解效率。赵敏等^[100]用电动强化微生物修复油污土壤的效率显著高于单菌处理和单电处理,说明电场的存在可以显著提高石油烃的降解率。Li 等^[101]用电动联合修复土壤中的 PAHs,发现电场强度和电极反应影响降解菌的活性和群落结构,优化实验条件可以使 PAHs 去除率最佳。

电动联合修复技术的弊端在于其能耗问题,该技术在实际应用过程中维持电场的能耗较大,且长期施加电场会改变土壤理化性质,破坏土壤结构,影响土地使用价值^[102]。因此在实际应用中需要根据修复目标和场地情况平衡修复方法的优缺点,以达到最佳的修复效果。

2.7 多手段联合生物修复技术

与单一的物理修复、化学修复和生物修复技术相比,将3种或以上的修复方法相结合形成联合修复技术,使其既能同时具备多种修复技术的优势和特点,又能克服单一修复技术的弊端和局限性,有效的提升修复效率和降低修复成本,是当前土壤修复技术的重要研究方向^[103-104]。许多研究表明,不仅植物、微生物和动物在修复污染土壤时能够相互促进,生物表面活性剂的存在对这些不同生物的生长代谢都具有促进效果^[105]。根际微生物通过分泌植物生长激素来促进植物生长同时通过代谢反应生成生物表面活性剂,提高植物对污染物的吸收能力,而植物分泌的根系分泌物又为微生物的生长和代谢提供营养支持^[106]。目前有许多学者已经探索出许多联合修复的技术,如谢萌^[107]研究表明鼠李糖脂-混合菌-黑麦草对TPH的去除率达到72.2%,说明表面活性剂强化植物-动物修复促进土壤中有有机物污染物的去除。牛秋雅等^[108]利用臭氧预氧化-堆肥法降解污染土壤中的菲,堆肥31d后臭氧预氧化处理的表层土和次表层土中菲的残留率分别为1.1%和0.9%。孟欣等^[109]在电动-微生物修复油污土壤内种植植物,结果表明与未施加电流的对照组相比,施加电场的处理组高羊茅生物量显著提高,30d和60d时,电动-植物-微生物修复组的微生物数量以及脱氢酶活性最高,土壤中TPH的去除率达48.21%,显著高于其他处理组。

通过多种修复手段的耦合和协同作用,能够高效利用各生物体对石油烃等有机污染物的吸附、吸收、氧化、分解等作用,从而实现土壤污染的稳定、高效修复。然而由于需要采用多种技术手段,需要进行复杂的工程设计和施工,提高了修复成本,并限制了其在大范围污染场地上的应用。同时,不同的技术手段所需的修复时间通常不能重叠,可能需要较长时间才能完成修复工作。在联合修复过程中,不同技术手段之间的协调和配合如果处理不当,可能严重影响修复效果,甚至产生负面效应。因此,掌握各修复手段的联合作用机理、优化和改进技术手段、推动修复工艺设备化和建立科学评价体系等,是多手段联合生物修复技术的发展方向。

3 展望

3.1 生物修复技术的优势与局限

生物修复具有环保性、低成本、安全性和环境适应性等特点,它能自然降解污染物,减少对土壤和生态环境的破坏,被认为是理想的修复方法,被越来越多应用到修复石油污染土壤中。然而,该技术在实际应用中仍存在较多局限,如修复效果容易受到温度、湿度、营养等环境因素的影响,修复周期较长,在降解高浓度或高毒性污染物时的效率不高。因此,生物修复技术适合长期治理、对环境影响较小的场地,而不适用于短期内需要快速修复的严重污染区域。

3.2 生物修复技术的应用前景与挑战

生物修复因其具有生态可持续性的特点,一直是一种可行的土壤净化方法,同时也是未来研究的富有潜力的领域,在土壤中污染物的降解与环境修复中具有重要意义。近年来,生物修复技术得到了越来越广泛的应用,特别是在土壤修复领域中,生物修复技术越来越多的应用在石油污染场地的修复工程中。然而,生物修复技术也面临一些挑战,为尽快发挥生物修复的优势,实现工业化推广应用,今后需从以下几个方面加强研究:(1)培育和强化出适用于高污染浓度、极端环境条件下的功能菌株,从而进一步提高降解效率;(2)深入开展生物技术与其它修复技术的耦联机理研究,从而改善联合修复的使用方法以优化修复进程;(3)探索更多技术结合的可行性,寻求多元化的修复技术方案,以应对复杂污染场景,提升土壤修复绩效;(4)开发创新型环境友好材料,探讨新材料与生物的联合作用机理,实现污染物的彻底去除;(5)深入分析生物技术在油田土壤修复中的应用案例,掌握具体技术难题、解决措施以及修复效果的长期监测数据等,为提高生物修复技术的可行性和开展规模化应用提供支撑;(6)关注修复效果评估的重要性,重视生物技术在油田土壤修

复应用中的效果评估,包括修复效果评估和经济效益评估,从而能够全面了解修复技术的实际成效,同时确保修复项目的资源投入与收益平衡。

4 结语

本文系统介绍了生物修复技术及其在油田土壤修复中的应用。在诸多可行的石油污染土壤修复技术中,生物修复是普遍认为最具有前景的方法,在油田土壤修复中发挥重要作用。目前对石油污染土壤生物修复技术的研究主要在实验室内进行,仍缺少在实际污染场地中的应用经验。生物修复技术对环境的依赖性强,应加强现场修复工艺研究,进一步提高修复效率和规范修复流程,尽快将研究成果应用到现实中去解决实际问题。

参考文献:

[1]魏样. 土壤石油污染的危害及现状分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(4): 120-122. DOI:10.3969/j.issn.1008-9500.2020.04.033.

[2]刘五星. 石油污染土壤的生态风险评价和生物修复[D]. 南京:中国科学院,2006.

[3]岳敏, 谷学新, 邹洪, 等. 多环芳烃的危害与防治[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 40-44. DOI:10.19789/j.1004-9398.2003.03.009.

[4]杨博, 李娜娜, 陈景辉, 等. 微生物修复石油烃污染土壤研究进展[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 108-119. DOI:10.3969/j.issn.1673-064X.2023.01.013.

[5]李俊, 胡健, 马文敏, 等. 石油污染土壤修复技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2024, 43(8): 2502-2512. DOI:10.13292/j.1000-4890.202408.028.

[6]潘云飞, 唐正, 彭欣怡, 等. 石油烃污染土壤微生物修复技术研究现状及进展[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4562-4572. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2020-2013.

[7]钟磊, 卿晋武, 陈红云, 等. 微生物修复石油烃土壤污染技术研究进展[J]. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3636-3652. DOI:10.13345/j.cjb.210115.

[8]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. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.02.025.

[9]叶振城, 苏亦凡, 杨云锋. 基于分子生物学的微生物修复技术在石油污染环境中的应用[J]. 生物工程学报, 2024, 40(3): 739-757. DOI:10.13345/j.cjb.230431.

[10]LV Y F, BAO J F, ZHU L D. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites[J]. Energy Reports, 2022, 8: 7976-7988. DOI:10.1016/j.egyr.2022.06.034.

[11]储明, 杨英, 程晓蕾, 等. 水环境中抗生素去除方法的研究进展[J]. 阜阳师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 45-50. DOI:10.14096/j.cnki.cn34-1069/n/2096-9341(2021)02-0045-06.

[12]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. DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.2020.05.013.

[13]秦力斌. 生物修复技术在土壤污染治理上的应用[J]. 绿色环保建材, 2020(2): 68. DOI:10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2020.02.051.

[14]LI X K, LI H, QU C. A review of the mechanism of microbial degradation of petroleum pollution[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 484: 012060. DOI:10.1088/1757-899x/484/1/012060.

[15]林海, 陈茜, 李强, 等. 石油污染土壤的生物修复研究进展[J]. 化学与生物工程, 2023, 40(5): 1-8. DOI:10.3969/j.issn.1672-5425.2023.05.001.

[16]李宝明. 石油污染土壤微生物修复的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2007.

[17]安森, 周琪, 李晖. 土壤污染生物修复的影响因素[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 397-400. DOI:10.3969/j.issn.1674-

5906.2002.04.018.

- [18]吴蔓莉,张晨,祁燕云,等.生物修复对黄土壤中石油烃的去除作用及影响因素[J].农业环境科学学报,2018,37(6):1159-1165. DOI:10.11654/jaes.2017-1549.
- [19]CHANDRA S, SHARMA R, SINGH K, et al. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon[J]. Annals of Microbiology, 2013, 63(2): 417-431. DOI:10.1007/s13213-012-0543-3.
- [20]樊鑫,刘璐.生物修复技术在石油污染治理中的应用研究进展[J].现代化工,2021,41(12):64-68. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.12.013.
- [21]杜卫东,万云洋,钟宁宁,等.土壤和沉积物石油污染现状[J].武汉大学学报(理学版),2011,57(4):311-322. DOI:10.14188/j.1671-8836.2011.04.005.
- [22]王庆仁,刘秀梅,崔岩山,等.土壤与水体有机污染的生物修复及其应用研究进展[J].生态学报,2001,21(1):159-163. DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2001.01.026.
- [23]吴洁婷,赵若帆,包红旭,等.鼠李糖脂强化多环芳烃微生物修复的研究进展[J].生态环境学报,2022,31(1):205-214. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.01.023.
- [24]PANDOLFO E, BARRA CARACCILO A, ROLANDO L. Recent advances in bacterial degradation of hydrocarbons[J]. Water, 2023, 15(2): 375. DOI:10.3390/w15020375.
- [25]LI Q Q, LI J B, JIANG L F, et al. Diversity and structure of phenanthrene degrading bacterial communities associated with fungal bioremediation in petroleum contaminated soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123895. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.123895.
- [26]孙娟,王宁,陈宏坤,等.石油污染土壤微生物群落分布特征[J].石油学报(石油加工),2021,37(2):372-383. DOI:10.3969/j.issn.1001-8719.2021.02.016.
- [27]FAN C Y, KRISHNAMURTHY S. Enzymes for enhancing bioremediation of petroleum-contaminated soils: A brief review[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1995, 45(6): 453-460. DOI:10.1080/10473289.1995.10467375.
- [28]李晓楼.石油污染土壤土著微生物强化修复研究[J].西安文理学院学报(自然科学版),2015,18(1):39-42. DOI:10.3969/j.issn.1673-1409(1).2014.08.009.
- [29]屠明明,王秋玉.石油污染土壤的生物刺激和生物强化修复[J].中国生物工程杂志,2009,29(8):129-134.
- [30]曹斐姝,陈婷婷,梁家宇,等.石化场地污染土壤生物修复技术研究[J].化学与生物工程,2022,39(11):47-54. DOI:10.3969/j.issn.1672-5425.2022.11.010.
- [31]SARKAR J, KAZY S K, GUPTA A, et al. Biostimulation of indigenous microbial community for bioremediation of petroleum refinery sludge[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1407. DOI:10.3389/fmicb.2016.01407.
- [32]殷鹏婷,韩书新,刁志龙,等.生物通风法修复石油烃污染土壤[J].化工环保,2023,43(6):805-812. DOI:10.3969/j.issn.1006-1878.2023.06.013.
- [33]武秀琦.西北黄土地区石油污染土壤生物修复影响因素研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
- [34]SAEED M, ILYAS N, JAYACHANDRAN K, et al. Biostimulation potential of biochar for remediating the crude oil contaminated soil and plant growth[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(5): 2667-2676. DOI:10.1016/j.sjbs.2021.03.044.
- [35]WU M L, MA C, WANG D, et al. Nutrient drip irrigation for refractory hydrocarbon removal and microbial community shift in a historically petroleum-contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: 136331. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136331.
- [36]ZHAO D F, LIU C S, LIU L H, et al. Selection of functional consortium for crude oil-contaminated soil remediation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(8): 1244-1248. DOI:10.1016/j.ibiod.2011.07.008.
- [37]王建刚,王婷,卞卫国,等.生物刺激法对石油污染荒漠土的修复效应[J].环境化学,2014,33(12):2214-2215. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2014.12.024.
- [38]郑金秀,彭祺,张甲耀,等.优势降解菌群生物强化修复石油污染土壤[J].农业环境科学学报,2006,25(5):1212-1216. DOI:10.3321/j.issn:1672-2043.2006.05.024.
- [39]王悦明,王继富,李鑫,等.石油污染土壤微生物修复技术研究进展[J].环境工程,2014,32(8):157-161. DOI:10.

13205/j.hjgc.201408037.

- [40] 高鹏飞, 刘虹, 丛唯一, 等. 石油烃降解菌株的复配及其降解特性研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(6): 108-113. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2019.06.016.
- [41] 刘虹, 张朋朋, 刘娜, 等. 三种细菌降解直链烷烃的效果及降解动力学研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(3): 66-70. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2017.03.012.
- [42] YUAN X Y, ZHANG X Y, CHEN X P, et al. Synergistic degradation of crude oil by indigenous bacterial consortium and exogenous fungus *Scedosporium boydii*[J]. Bioresource Technology, 2018, 264: 190-197. DOI:10.1016/j.biortech.2018.05.072.
- [43] MUTHUKUMAR B, SURYA S, SIVAKUMAR K, et al. Influence of bioaugmentation in crude oil contaminated soil by *Pseudomonas* species on the removal of total petroleum hydrocarbon[J]. Chemosphere, 2023, 310: 136826. DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.136826.
- [44] 李瑜婷. 基于植物-微生物联合机制的 PAHs 污染土壤生物修复过程及共存微塑料的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [45] 吴蔓莉, 李可欣, 侯爽爽, 等. 贫养分低有机质黄绵土中石油烃的生物去除特性及菌群结构变化[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8): 1961-1970. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2021.04.13.
- [46] 慕庆峰, 于立红, 张涛, 等. 油污土壤修复微生物的筛选及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 330-335.
- [47] 徐佰青, 李平平, 王山榕, 等. 植物修复石油污染土壤的研究进展[J]. 当代化工, 2020, 49(7): 1527-1531. DOI:10.3969/j.issn.1671-0460.2020.07.063.
- [48] NIKOLOPOULOU M, PASADAKIS N, KALOGERAKIS N. Evaluation of autochthonous bioaugmentation and biostimulation during microcosm-simulated oil spills[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 72(1): 165-173. DOI:10.1016/j.marpolbul.2013.04.007.
- [49] YAMAN C. Performance and kinetics of bioaugmentation, biostimulation, and natural attenuation processes for bioremediation of crude oil-contaminated soils[J]. Processes, 2020, 8(8): 883. DOI:10.3390/pr8080883.
- [50] 魏树和, 周启星, Pavel V K, 等. 有机污染环境植物修复技术[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 716-721.
- [51] 吴凡, 刘训理. 石油污染土壤的生物修复研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(5): 701-707. DOI:10.3321/j.issn:0253-9829.2007.05.005.
- [52] 彭胜巍, 周启星. 持久性有机污染土壤的植物修复及其机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3): 469-475.
- [53] 施奇, 卢杰. 根系分泌物的影响因素及对植物的影响研究概况[J]. 农业与技术, 2023, 43(11): 13-17. DOI:10.19754/j.nyyjs.20230615004.
- [54] 李先梅, 肖易, 吴芸紫, 等. 华北油田石油污染土壤的修复植物筛选[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 14-19. DOI:10.3969/j.issn.1003-6504.2015.06.003.
- [55] 邓开良, 韦星辉. 土壤石油污染中植物的修复效应作用研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(2): 117-121. DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2023.02.001.
- [56] DICKSON U J, COFFEY M, GEORGE MORTIMER R J, et al. Investigating the potential of sunflower species, fermented palm wine and *Pleurotus ostreatus* for treatment of petroleum-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2020, 240: 124881. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.124881.
- [57] 高世珍, 赵兴茹, 崔世茂, 等. 典型持久性有机污染物在翅碱蓬中的分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2456-2461. DOI:10.13227/j.hjlx.2010.10.033.
- [58] 黄建, 田长彦, 卞卫国, 等. 4 种盐生植物生长对土壤石油污染的响应[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 100-104.
- [59] ZHANG Z N, ZHOU Q X, PENG S W, et al. Remediation of petroleum contaminated soils by joint action of *Pharbitis nil* L. and its microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5600-5605. DOI:10.1016/j.scitotenv.2010.08.003.
- [60] 郑澜. 石油污染土壤修复技术的研究现状[J]. 化工管理, 2023(27): 58-61. DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2023.27.016.
- [61] SELVAKUMAR R, RAMADOSS G, MENON M P, et al. Challenges and complexities in remediation of uranium contaminated

- soils: A review[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 192: 592-603. DOI:10.1016/j.jenvrad.2018.02.018.
- [62] ZHAO L, LYU C, LI Y. Analysis of factors influencing plant-microbe combined remediation of soil contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Sustainability, 2021, 13(19): 10695. DOI:10.3390/su131910695.
- [63] KHODAVERDILOO H, HAN F, TAGHLIDABAD R H, et al. Potentially toxic element contamination of arid and semi-arid soils and its phytoremediation[J]. Arid Land Research and Management, 2020, 34: 361-391. DOI: 10.1080/15324982.2020.1746707.
- [64] 刘玲, 谢影, 汪承润, 等. 植物修复多环芳烃(PAHs)研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 309-312. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2012.03.025.
- [65] GUTIÉRREZ-GINÉS M J, HERNÁNDEZ A J, PÉREZ-LEBLIC M I, et al. Phytoremediation of soils co-contaminated by organic compounds and heavy metals: Bioassays with *Lupinus luteus* L. and associated endophytic bacteria[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 143: 197-207. DOI:10.1016/j.jenvman.2014.04.028.
- [66] 宋清梅, 吴文成. 浅析污染土壤的植物-微生物联合修复机理及研究现状[C]//中国环境科学学会. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 深圳:中国环境科学学会, 2015: 6.
- [67] 沈源源. 多环芳烃污染土壤的植物-微生物联合修复效应[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [68] 吴辉, 郑师章. 根分泌物及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1992, 11(6): 44-47.
- [69] 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 等. 模拟及实际根系分泌物对芘污染土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 1077-1088. DOI:10.13227/j.hjxx.202103204.
- [70] EZE M O, AMUJI C F. Elucidating the significant roles of root exudates in organic pollutant biotransformation within the rhizosphere[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 2359. DOI:10.1038/s41598-024-53027-x.
- [71] PAWLIK M, CANIA B, THIJS S, et al. Hydrocarbon degradation potential and plant growth-promoting activity of culturable endophytic bacteria of *Lotus corniculatus* and *Oenothera biennis* from a long-term polluted site[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(24): 19640-19652. DOI:10.1007/s11356-017-9496-1.
- [72] 刘鑫, 黄兴如, 张晓霞, 等. 高浓度多环芳烃污染土壤的微生物-植物联合修复技术研究[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(4): 632-640. DOI:10.7685/jnau.201606036.
- [73] XUN F F, XIE B M, LIU S S, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on oats in saline-alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(1): 598-608. DOI:10.1007/s11356-014-3396-4.
- [74] BANKS M K, MALLEDE H, RATHBONE K. Rhizosphere microbial characterization in petroleum-contaminated soil[J]. Soil and Sediment Contamination, 2003, 12(3): 371-385. DOI:10.1080/713610978.
- [75] 黄俊伟, 闯绍闯, 陈凯, 等. 有机污染物的植物-微生物联合修复技术研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(6): 757-765. DOI:10.3785/j.issn.1008-9209.2017.05.161.
- [76] 申春妮, 曹小方, 李腾, 等. 植物-微生物联合修复柴油污染土试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(3): 145-153. DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2022.018.
- [77] KIAMARSI Z, KAFI M, SOLEIMANI M, et al. Conjunction of *Vetiveria zizanioides* L. and oil-degrading bacteria as a promising technique for remediation of crude oil-contaminated soils[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119719. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119719.
- [78] 曹雨欣, 周晓琴, 武娟, 等. 解烃菌 BD-2 产表面活性剂及其稳定性研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(10): 69-76. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.0811.24.338.
- [79] 廉梅花, 曾祥峰, 马阳阳, 等. 表面活性剂强化生物修复重金属和多环芳烃污染土壤研究进展[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9): 2813-2823. DOI:10.13292/j.1000-4890.202409.030.
- [80] 王晓旭, 孙丽娜, 郑学昊, 等. 表面活性剂强化微生物修复 DDTs-PAHs 复合污染农田土壤影响研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 486-492. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.03.018.
- [81] KUYUKINA M S, IVSHINA I B, MAKAROV S O, et al. Effect of biosurfactants on crude oil desorption and mobilization in a soil system[J]. Environment International, 2005, 31(2): 155-161. DOI:10.1016/j.envint.2004.09.009.

- [82] SAJNA K V, SUKUMARAN R K, GOTTUMUKKALA L D, et al. Crude oil biodegradation aided by biosurfactants from *Pseudozyma sp.* NII 08165 or its culture broth[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 191: 133-139. DOI:10.1016/j.biortech.2015.04.126.
- [83] LIU Y, ZENG G M, ZHONG H, et al. Effect of rhamnolipid solubilization on hexadecane bioavailability: Enhancement or reduction? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 322: 394-401. DOI:10.1016/j.jhazmat.2016.10.025.
- [84] PATOWARY R, PATOWARY K, KALITA M C, et al. Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 129: 50-60. DOI:10.1016/j.ibiod.2018.01.004.
- [85] LAI C C, HUANG Y C, WEI Y H, et al. Biosurfactant-enhanced removal of total petroleum hydrocarbons from contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 609-614. DOI:10.1016/j.jhazmat.2009.01.017.
- [86] 张洁, 靳静. 鼠李糖脂去除多环芳烃、石油烃及重金属的应用研究进展[J]. *广州化工*, 2023, 51(20): 10-14. DOI:10.3969/j.issn.1001-9677.2023.20.004.
- [87] 邹春景, 傅晓文, 马荣辉, 等. 石油污染土壤的生物-化学联合修复技术研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(10): 36-40. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.10.007.
- [88] LU M, ZHANG Z 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. DOI:10.1016/j.biortech.2009.11.002.
- [89] LI X, LUO T, WANG Y X, et al. Improving the degradation of benzo[a]Pyrene and soil biodegradability by enhanced ozonation with mechanical agitation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 423: 130056. DOI:10.1016/j.cej.2021.130056.
- [90] LI L, ZHANG Z N, WANG Y H, et al. Efficient removal of heavily oil-contaminated soil using a combination of Fenton pre-oxidation with biostimulated iron and bioremediation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: 114590. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.114590.
- [91] GOU Y L, YANG S C, CHENG Y J, et al. Enhanced anoxic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in aged soil pretreated by hydrogen peroxide[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 524-533. DOI:10.1016/j.cej.2018.09.059.
- [92] FANAEI F, MOUSSAVI G, SHEKOOHIYAN S. Enhanced bioremediation of oil-contaminated soil in a slurry bioreactor by H_2O_2 -stimulation of oil-degrading/biosurfactant-generating bacteria: Performance optimization and bacterial metagenomics [J]. *Biodegradation*, 2023, 34(1): 83-101. DOI:10.1007/s10532-022-10008-z.
- [93] LIAO X Y, WU Z Y, LI Y, et al. Effect of various chemical oxidation reagents on soil indigenous microbial diversity in remediation of soil contaminated by PAHs[J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 483-491. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.03.126.
- [94] WEI K H, MA J, XI B D, et al. Recent progress on *in situ* chemical oxidation for the remediation of petroleum contaminated soil and groundwater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 432: 128738. DOI:10.1016/j.jhazmat.2022.128738.
- [95] 许科伟, 顾磊, 郑旭莹, 等. 化学氧化强化生物堆修复石油污染土壤研究[J]. *应用技术学报*, 2021, 21(4): 356-361. DOI:10.3969/j.issn.1004-3810.2021.04.009.
- [96] LEAR G, HARBOTTLE M J, VAN DER GAST C J, et al. The effect of electrokinetics on soil microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1751-1760. DOI:10.1016/j.soilbio.2004.04.032.
- [97] 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. DOI:10.1016/j.electacta.2006.03.117.
- [98] 马永松, 李瑞, 罗廷, 等. 电动微生物法修复石油和镍污染土壤的研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(8): 201-208. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.08.029.
- [99] 李婷婷, 吴迪, 辛亮, 等. 石油污染土壤电动-微生物修复技术研究[J]. *应用技术学报*, 2021, 21(4): 362-368. DOI:10.3969/j.issn.1004-3810.2021.04.010.
- [100] 赵敏, 杨琴, 周立辉, 等. 电场强化下微生物降解油污土壤的研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(4): 726-730. DOI:10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2015.04.030.

[19]白杨,郑华,庄长伟,等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 711-717. DOI:10.5846/stxb201203270417.

[20]吕宪国,王起超,刘吉平. 湿地生态环境影响评价初步探讨[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 83-85.

[21]YANG Q J, LIU H Y. Marine ecological damage assessment model for offshore oil extraction[J]. Global NEST Journal, 2024: 26-8. DOI:10.30955/gnj.06076

[22]曾建军,邹明亮,郭建军,等. 生态风险评价研究进展综述[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(1): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1006-2009.2017.01.001.

[23]吕一河,刘国华,冯晓明. 土壤水蚀的环境效应:影响因素、研究热点与评价指标的评述[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 93-99. DOI:10.3969/j.issn.1673-4831.2011.01.019.

[24]於方,周昊,许申来. 生态恢复的环境效应评价研究进展[J]. 生态环境学报,2009,18(01):374-379. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2009.01.001.

[25]刘岩,贾岳清,刘获. 中国生态环境损害鉴定评估现状及建议[J]. 世界环境, 2021(6): 73-75.

[26]於方,张志宏,孙倩,等. 生态环境损害鉴定评估技术方法体系的构建[J]. 环境保护, 2020, 48(24): 16-21. DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.24.003.



(上接第 52 页)

[101]LI F M, GUO S H, WANG S, et al. Changes of microbial community and activity under different electric fields during electro-bioremediation of PAH-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2020, 254: 126880. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.126880.

[102]高丽军,陈韬,马颐琳,等. 电动及其联合技术修复有机污染土壤的研究进展[J]. 现代化工,2024,44(12):39-43. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.12.007.

[103]刘利军,李颖异,刘永杰,等. 表面活性剂强化植物-微生物联合修复双对氯苯基三氯乙烷污染土壤研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(10): 1193-1197. DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.10.012.

[104]NI H W, ZHOU W J, ZHU L Z. Enhancing plant-microbe associated bioremediation of phenanthrene and *Pyrene* contaminated soil by SDBS-Tween 80 mixed surfactants[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5): 1071-1079. DOI:10.1016/S1001-0742(13)60535-5.

[105]姚丹丹,王辉,田坤,等. 土壤多环芳烃污染生物表面活性剂强化修复的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 164-170. DOI:10.3969/j.issn.1671-3206.2023.01.032.

[106]石扬,陈沅江. 我国污染土壤生物修复技术研究现状及发展展望[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(1): 24-32. DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2017.02.002.

[107]谢萌. 钢铁场地有机物污染的植物-微生物及表面活性剂强化修复技术[D]. 济南: 山东大学, 2021. DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2021.004072.

[108]牛秋雅,曾光明,牛一乐,等. 臭氧预氧化-堆肥去除污染土壤中菲实验研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2352-2358. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2009.11.014.

[109]孟欣,李刚,高鹏,等. 高羊茅对电动-微生物修复石油污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1532-1539. DOI:10.11654/jaes.2019-1438.

