

表面活性剂在强化疏水性有机污染物土壤修复中的研究与应用进展

吴文伶, 杨明辉, 张鹤清, 王圆生, 汪磊

引用本文:

吴文伶, 杨明辉, 张鹤清, 王圆生, 汪磊. 表面活性剂在强化疏水性有机污染物土壤修复中的研究与应用进展[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1220–1229.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0672>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鼠李糖脂-混合降解菌强化三角梅去除土壤中对硫磷

辛鑫, 刘家女

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 943–949 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1459>

DDTs污染农田土壤的强化微生物修复研究

王晓旭, 孙丽娜, 郑学昊, 吴昊, 王辉, 刘春跃

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 72–78 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0882>

BS-DTAB复配修饰红壤对苯酚的吸附

张洋, 孟昭福, 李文斌, 任爽, 王腾, 刘伟, 田凯

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 132–139 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0293>

纳米材料在有机污染土壤修复中的应用与展望

岳宗恺, 周启星

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 1929–1937 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0330>

改性生物炭的制备及其在环境修复中的应用

张倩茹, 冀琳宇, 高程程, 吕宏虹, YONGSik-Ok

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 913–925 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1253>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴文伶, 杨明辉, 张鹤清, 等. 表面活性剂在强化疏水性有机污染物土壤修复中的研究与应用进展[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1220-1229.

WU W L, YANG M H, ZHANG H Q, et al. Research and application progress in surfactant-enhanced remediation of hydrophobic organic contaminants in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1220-1229.



开放科学 OSID

表面活性剂在强化疏水性有机污染物土壤修复中的研究与应用进展

吴文伶¹, 杨明辉^{2*}, 张鹤清³, 王圆生⁴, 汪磊²

(1. 中建工程产业技术研究院有限公司, 北京 101399; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 3. 中建环能科技股份有限公司, 成都 610045; 4. 天津市博创环保科技有限公司, 天津 300042)

摘要:疏水性有机污染物(Hydrophobic organic contaminants, HOCs)在土壤环境中分布广泛。由于不易从土壤颗粒中解吸, 迁移性和生物有效性低, 化学、生物与物理修复技术对土壤中HOCs的修复效果常受到抑制。表面活性剂对HOCs具有增溶能力, 常被用于强化其他修复技术的处理效率。本文对近20年来表面活性剂在强化土壤化学、生物或物理技术修复土壤HOCs污染领域的研究与应用情况进行了分类总结, 并比较分析了各类表面活性剂强化技术的适用性及局限性, 提出了联合修复技术和表面活性剂泡沫是表面活性剂强化土壤HOCs修复的未来研究方向。

关键词:表面活性剂; 疏水性有机物; 土壤修复; 增溶

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)06-1220-10 doi:10.11654/jaes.2023-0672

Research and application progress in surfactant-enhanced remediation of hydrophobic organic contaminants in soil

WU Wenling¹, YANG Minghui^{2*}, ZHANG Heqing³, WANG Yuansheng⁴, WANG Lei²

(1. China Construction Industrial Engineering and Technology Research Academy Co., Ltd., Beijing 101399, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Cscec Scimee Sci. & Tech. Co., Ltd., Chengdu 610045, China; 4. Bochuang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Tianjin 300042, China)

Abstract: Hydrophobic organic contaminant (HOCs) are widely distributed in soil environments. Due to their limited desorption from soil particles, low mobility and bioavailability, the effectiveness of chemical, biological, and physical remediation techniques on HOCs in soil is often inhibited. Surfactants, known for their solubilization capacity for HOCs, have been employed to enhance the efficiency of other remediation technologies. This review categorizes and summarizes research and applications of surfactant-enhanced techniques in remediating soil HOCs pollution over the past two decades. A comparative analysis of various surfactant-enhanced techniques is presented, highlighting their applicability and limitations. Furthermore, the potential of combined remediation approaches and surfactant foam technology is explored as promising avenues for future research in enhancing soil HOCs remediation with surfactants.

Keywords: surfactant; hydrophobic organic contaminant (HOCs); soil remediation; solubilization

收稿日期: 2023-08-20 录用日期: 2023-10-12

作者简介: 吴文伶(1991—), 女, 天津蓟州人, 高级工程师, 从事土壤修复技术开发与应用研究。E-mail: wuwenling8314@163.com

*通信作者: 杨明辉 E-mail: YangMinghui1018@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1804400); 中建股份科技研发计划课题(CSCEC-2021-Z-1, CSCEC-2021-Z-52); 住建部研究开发项目(2021-K-129)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2019YFC1804400); Research and Development Plan Project of China Construction Corporation Technology (CSCEC-2021-Z-1, CSCEC-2021-Z-52); Research and Development Project of Ministry of Housing and Urban-Rural Development (2021-K-129)

疏水性有机污染物(Hydrophobic organic contaminants, HOCs)如石油烃、多氯联苯、多溴联苯醚、有机磷阻燃剂、多环芳烃等不断进入环境并发生积累^[1]。《2014年全国土壤调查公报》显示,我国土壤中六六六、滴滴涕、多环芳烃3类有机污染物点位超标率分别高达0.5%、1.9%、1.4%。这些HOCs污染的土壤对生态系统和人类健康构成严重威胁。由于具有较大的辛醇/水分配系数,HOCs易于吸附在土壤颗粒表面或形成非水相液体(Non-aqueous phase liquid, NAPL),不易随土壤溶液迁移,因而其环境自净效率通常较低,这也给受HOCs污染土壤的修复造成巨大困难^[2-3]。

表面活性剂对HOCs具有增溶能力,因此表面活性剂强化土壤修复技术研发成为近年来土壤修复研究的热点领域。其中,阴-非离子混合表面活性剂由于具有更低的临界胶束浓度、较低的土壤吸附性能和较小的沉淀损失,以及对温度、盐度、pH等条件的更宽适用范围,近年来被广泛研究^[4]。受到场地土壤类型和环境因素异质性的影响,单独使用表面活性剂进行土壤淋洗的实际修复效率有时并不稳定,且含污染物的表面活性剂废水处理成本较高^[5]。因此,近年来在土壤修复技术研发中,表面活性剂主要用于增强其他修复技术的处理效能,其不仅可提高修复效率,同时又降低了成本^[5-6]。表面活性剂在HOCs修复领域的关注度不断提高,且表面活性剂强化的HOCs修复技术的研究与应用也逐渐增多。

1 表面活性剂强化的化学氧化修复技术

1.1 化学氧化修复技术

化学氧化修复技术采用强氧化性的化学氧化剂将土壤中的有机污染物彻底矿化或氧化为无毒或低毒形态物质^[7]。土壤有机污染修复中常用的氧化剂包括高锰酸钾、过硫酸钠、臭氧和Fenton试剂等^[8]。在原位应用中,氧化剂被注入污染场地区域,并在重力、地下水流和浓度梯度的作用下不断扩散,与污染物接触并将其氧化,在短期内实现快速修复。

由于氧化反应主要在水相发生,对于吸附在土壤颗粒表面的HOCs,化学氧化技术的效率易受到限制。一项实践应用表明,在处理含大量NAPL污染的场地时,未能被氧化分解的吸附态污染物可能会重新迁移进入地下水,导致修复拖尾或反弹。因此,对HOCs污染土壤进行化学氧化修复的强化技术方法一直受到关注^[9]。

1.2 表面活性剂强化的化学氧化修复技术的提出与发展

在21世纪初,Li^[10]提出了以表面活性剂增溶与氧化剂降解相结合处理NAPL污染物的设想,并通过实验模拟验证了其可行性。表面活性剂强化的原位化学氧化技术(Surfactants enhanced *in-situ* chemical oxidation, S-ISCO)可削弱HOCs的吸附行为,有效提高HOCs的去除效率,减轻化学氧化修复过程中的拖尾和反弹现象。表面活性剂和氧化剂通常被同时注入污染土壤,并根据有机污染物的组成和污染水平优化表面活性剂的用量,以获得直径较小的微乳液。

大量研究表明,表面活性剂的添加对不同类型土壤和含水层中的多环芳烃和石油烃等多种HOCs污染土壤的化学氧化去除具有明显效果^[8,11-13]。Lominchar等^[13]使用非离子表面活性剂Verusol-3与碱活化过硫酸钠原位去除场地土壤中的石油烃,发现与普通原位化学氧化技术相比,S-ISCO处理使石油烃的去除率从65%提升到95%。然而,氧化剂也可能与表面活性剂反应,从而造成增溶效率下降和氧化剂损失^[14-15]。例如,聚氧乙烯型非离子型表面活性剂很容易被 $S_2O_8^{2-}$ 氧化^[11]。因此,在表面活性剂提高化学氧化修复效率的同时,还需要考虑不同表面活性剂与氧化剂之间的相容性^[16]。表1列举了有关表面活性剂对不同氧化剂消耗损失的研究。虽然阴离子表面活性剂对氧化剂的消耗较低,但也有研究认为,阴离子表面活性剂SDS抑制了碱活化过硫酸钠产生 $OH\cdot$ 和 $O_2\cdot$ 等自由基,从而限制了氧化剂对污染物的降解效率^[17]。

目前,S-ISCO技术的研究和应用仍在不断发展。面对含有大量NAPLs的高污染场地,直接采用S-ISCO技术会消耗大量的氧化剂,且修复效率较低。EthicalChem公司在2016年开发了SEPR/S-ISCO修复技术^[11],该技术首先在表面活性剂加强产品回收技术(Surfactant enhanced product recovery, SEPR)阶段向受污染土壤中注入表面活性剂和低剂量过氧化物(如 H_2O_2),以降低NAPLs的黏度并解吸,去除大量自由相的NAPLs;过氧化物分解产生的气体使土壤产生有助于提取NAPLs的气孔;在S-ISCO阶段,再次注入表面活性剂和氧化剂,以去除与土壤颗粒吸附紧密的NAPLs和HOCs。在澳大利亚悉尼的一个前人工煤气厂场地,成功地应用了SEPR/S-ISCO修复技术,在为期2周的SEPR阶段,去除了950 L NAPLs。随后,在为期6.5周的S-ISCO阶段,对土壤和地下水中残留的污染物进行了去除。结果显示,总石油烃去除率高达

表1 表面活性剂对不同氧化剂消耗损失的研究总结

Table 1 Summary of consumption and loss of different oxidants by surfactants

氧化剂及浓度 Oxidant and concentration	活化方式/活化剂及浓度 Activation mode/Activator and concentration	表面活性剂及浓度 Surfactant and concentration	氧化剂损失 Oxidizer consumption	参考文献 Reference
高锰酸钾 10 g·L ⁻¹	—	非离子型:鼠李糖脂、皂素、APG、Tween 80、Tween 20、AOS 阴离子型:SDS、SDBS 两性型:BS-12; 5 mmol·L ⁻¹	单一表面活性剂在30 h时只有BS-12、SDBS和SDS与高锰酸钾的相容性较好,氧化剂损失小于30%,BS-12/SDBS摩尔比为2:1复配时增溶能力最强且相容性最好	[8]
过氧化氢 5 000 mg·L ⁻¹	FeSO ₄ 5 mmol·L ⁻¹	28种阴离子和非离子表面活性剂0.01%~3.5%(m/V)	只有两种阴离子表面活性剂Alfoterra 145-4PO和Aerosol MA-80I,仅在非常低的表面活性剂和氧化剂浓度下两者相容	[18]
过硫酸钠 50 g·L ⁻¹	热活(20,40℃和60℃)	非离子型:Brij 35、Triton X100、Tween 80 阴离子型:SDS、SDBS、SLS、C ₁₂ -MADS、AOT;10 g·L ⁻¹	双价阴离子表面活性剂C ₁₂ -MADS对过硫酸盐消耗最慢,40℃时第14天消耗约40%的过硫酸盐,60℃时第3天消耗约60%的过硫酸盐	[19]
过硫酸钠 84 mmol·L ⁻¹	碱活化 84 mmol L ⁻¹	阴离子型:SDS 非离子型:E-Mulse [®] 、Tween 80、Tween 80/Span80; 3、6、12 g·L ⁻¹	15 d后SDS消耗约10%的过硫酸盐,而非离子型表面活性剂均消耗了约70%以上的过硫酸盐	[20]
过硫酸钠 2.25 mmol·L ⁻¹	柠檬酸0.15 mmol·L ⁻¹ ; Fe(II) 0.30 mmol·L ⁻¹	Tween 80、Brij-35和TX-100;1 g·L ⁻¹	在Brij-35和TX-100溶液中,过硫酸钠的分解率分别为48.3%和49.5%,而在Tween 80溶液中,过硫酸钠的分解率仅为3.6%	[21]

97%,总多环芳烃去除率为73%^[6]。

1.3 表面活性剂泡沫淋洗技术在S-ISCO中的应用

S-ISCO在有效去除渗流区和非均质介质中的NAPL污染物方面仍存在局限。淋洗液在修复过程中优先流向渗透性较好的土壤孔道,导致对污染区域的覆盖有限,修复效果不佳;此外,淋洗液的流动难以控制,易通过重力作用进入地下含水层,引发二次污染^[22]。为了克服这一问题,Peters等^[23]提出了表面活性剂泡沫淋洗技术,即以向污染土壤注入泡沫形式的表面活性剂气液混合体系取代传统的淋洗液^[24]。表面活性剂泡沫能够降低不同介质之间渗透性差异,使表面活性剂在土壤污染区域分布更加均匀^[22]。其次,泡沫具有高黏度和低密度等特点,因而受重力影响较小,可有效减少修复过程对地下水的污染^[25-26]。此外,表面活性剂泡沫还可以显著改善氧化剂的分布及其停留时间^[27]。基于以上研究成果,Bouid等^[25,27-28]开发了一种依次注入表面活性剂泡沫和氧化剂的方法,这种方法能够改善氧化剂在非均质层和包气带的输送性能,减少表面活性剂的非生产性消耗,使S-ISCO的成本和环境风险显著下降。

2 表面活性剂强化的微生物修复技术

2.1 微生物修复技术

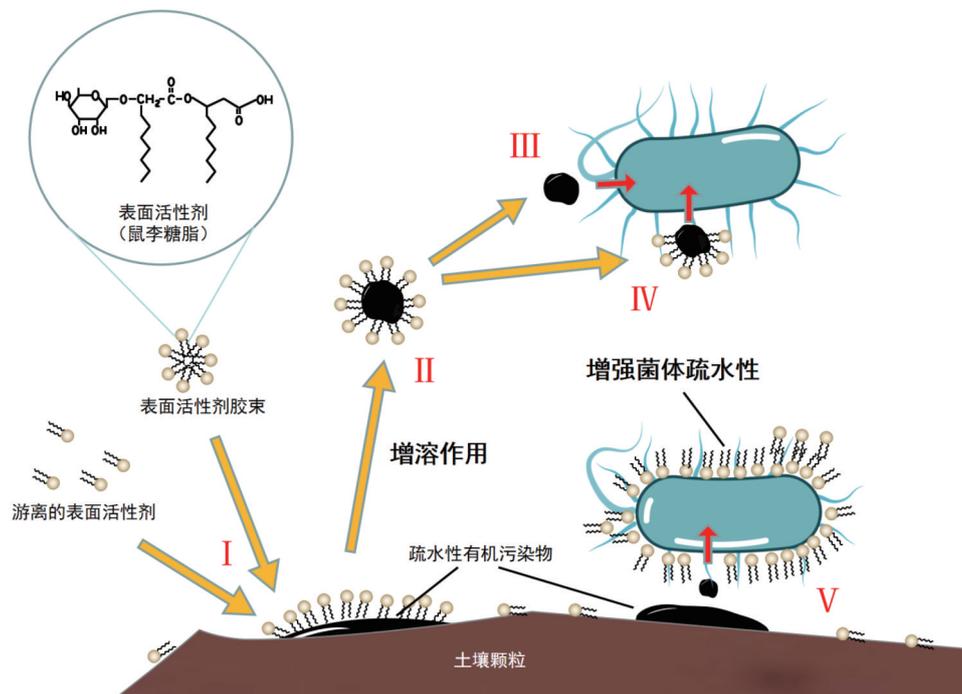
1989年,“埃克森·瓦尔迪兹”号原油泄漏事故引发广泛关注,美国环保署首次使用高效微生物降解菌

剂对海岸线上的受污染土壤进行原位修复^[29]。此后,微生物修复逐渐成为石油污染等有机污染场地修复的重要手段之一^[30]。

微生物修复的效率通常受微生物群落的功能及其在环境中的丰度和稳定性影响^[31]。修复场地的气候及地理条件会限制修复物种的多样性,土壤自身环境条件(如盐度、水分、pH和有机质含量)、营养元素以及污染物都会影响生物的代谢活动、生长及修复效率^[32-33],因此科学有效地选择功能物种成为微生物修复的关键问题。此外,在修复污染土壤时,还要考虑有机污染物的赋存形态、浓度和毒性,以提升生物修复效率。HOCs易吸附在土壤颗粒上,难以被生物吸收或降解。尽管筛选和优化出的适应能力强、酶活性高的微生物菌种,可以一定程度上提高目标污染物的生物有效性,然而,针对具有高分子量的HOCs,如多环芳烃,其生物有效性较低^[34-35],且在土壤老化后这些污染物易转变为结合态和锁定态^[36],因此仍需要寻找更有效的策略以提高微生物修复的效率。

2.2 表面活性剂强化的微生物修复技术的发展与应用

表面活性剂对HOCs的增溶能力可提高污染土壤中HOCs的生物有效性^[37];此外,一些表面活性剂的亲水端可结合到降解微生物菌体的表面,而疏水端朝向水相,这增强了菌体表面的疏水性,促使微生物与HOCs直接接触,从而加速HOCs降解^[38-39]。图1展示了表面活性剂对HOCs微生物修复的强化机制。研



I: 表面活性剂疏水端吸附在 HOCs 表面; II: 表面活性剂胶束溶解 HOCs; III: HOCs 从有机相转移到液相, 并被微生物降解; IV: 微生物摄取胶束中的 HOCs; V: 表面活性剂能够吸附在降解微生物菌体的表面, HOCs 与微生物直接接触而被降解。

I: The hydrophobic side of the surfactant is adsorbed on the surface of the HOCs; II: HOCs are dissolved by surfactant micelles; III: HOCs transfer from organic phase to liquid phase and degraded by microorganisms; IV: microbial uptake of HOCs in micelles; V: surfactants can be adsorbed on the surface of degrading microorganisms, and HOCs will be degraded by direct contact with microorganisms.

图1 生物表面活性剂强化 HOCs 的微生物修复机制示意图

Figure 1 Schematic diagram of the mechanism of microbial repair of HOCs enhanced by biosurfactants

研究表明^[40], 阴-非离子混合表面活性剂(SDBS-Tween 80)的加入, 对球形节杆菌(*Arthrobacter globiformis*)和甲基营养型芽孢杆菌(*Bacillus methylotrophicus*)降解农田土壤中的滴滴涕和多环芳烃具有强化作用, 使两类污染物降解率较单独接菌的对照组分别提高了14.9%和11.9%。

很多表面活性剂因自身对微生物降解菌株具有毒性而影响修复效果^[41]。相比之下, 由植物或微生物代谢产生的生物表面活性剂, 如鼠李糖脂、脂肽和皂素等, 或易被生物降解的化学表面活性剂对微生物生长的抑制作用更低^[42], 且被认为总体上具有更高的环境友好性。此类表面活性剂在 HOCs 微生物修复中的强化效果也已被证实。例如, Mnif 等^[31]研究了枯草芽孢杆菌属和不动杆菌属(*Acinetobacter radiore-sistens*) R17 对土壤中柴油的降解能力, 发现直接添加 0.1% (m/V) 的生物表面活性剂脂肽后, 目标污染物的生物降解率提高了 38.42%。

尽管生物表面活性剂得到越来越广的重视, 但生产成本高、产量低、纯度低等原因限制了其大规模应用及发展^[43]。因此, 优化生产工艺以开发廉价生物表

面活性剂仍面临挑战^[44]。除通过外源添加的方式将表面活性剂注入到受污染的土壤中, 也可以通过刺激诱导微生物原位产生生物表面活性剂, 这种方式被认为更加高效且成本经济^[37, 45-46]。例如, 在营养物质充足的条件下, 与不添加生物表面活性剂产生菌相比, 产生生物表面活性剂的 poae 假单胞菌(*Pseudomonas poae*) BA1、布氏不动杆菌(*Acinetobacter bouvetii*) BP18、苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*) BG3 和嗜根窄食单胞菌(*Stenotrophomonas rhizophila*) BG32 使石油的降解率提高了 16%~28%^[47]。Wu 等^[48]研究可产生生物表面活性剂的芽孢杆菌和柴油降解菌之间的相互作用, 发现当盐生单胞菌(*Halomonas*) HDMP1 和芽孢杆菌(*Pseudomonas*) HDMB2 单独作用时, 柴油的降解率分别为 50.52% 和 35.24%, 而当两者组合使用时, 生物表面活性剂产生菌 HDMB2 产生的脂肽促进了柴油的溶解, 提升了柴油降解菌 HDMP1 的降解能力, 石油降解率达到了 67.38%。

植物-微生物联合修复作为一种新型的修复有机污染土壤的方法, 也能被表面活性剂强化。例如, 谢萌^[49]使用黑麦草与混合菌修复多环芳烃、石油烃和

多氯联苯复合污染的土壤,发现添加生物表面活性剂鼠李糖能显著增加土著微生物中不同优势菌属的相对丰度,向植物-微生物修复体系中添加 50 mg·kg⁻¹ 鼠李糖脂使 5~6 环多环芳烃的去除率提高了 23.99%,总石油烃的去除率提高了 16.70%,多氯联苯的去除率提高了 19.92%。

2.3 表面活性剂泡沫淋洗技术在强化 HOCs 微生物修复中的应用

相比于使用表面活性剂淋洗液的传统方法,基于表面活性剂的泡沫淋洗技术具有一定优势。这种技术能使液相在非均质土壤中更均匀地渗透,从而使土壤的含水量更加均匀,提高修复剂与污染物的接触效率;另外,由于泡沫是气液混合的体系,向土壤内部注入表面活性剂泡沫有利于输送和保留氧气、空气、氢气等,进而强化微生物修复技术^[22,26]。例如,Rothmel 等^[50]证明了使用空气和阴离子表面活性剂 Steol CS-330 产生的泡沫可以强化好氧微生物降解三氯乙烯污染土壤,与直接使用表面活性剂淋洗液相比,产生的表面活性剂泡沫显著提高了三氯乙烯降解菌的分散性;且由于产生泡沫所需的表面活性剂浓度较低,因此与三氯乙烯降解菌具有更好的相容性;此外,泡沫通过气液混合的形式增强了氧传质,提高了微生物活性。除了向土壤内部注入表面活性剂泡沫之外,向土壤表面喷洒表面活性剂泡沫,也能在不扰动土壤的情况下强化化学和生物修复的效果。被喷洒在土壤表面的表面活性剂泡沫可

持续数小时,当泡沫破裂后,表面活性剂逐渐以水相形式渗入土壤^[51]。表 2 列举了采用表面活性剂泡沫强化微生物修复的研究案例。

3 表面活性剂强化的物理修复技术

3.1 表面活性剂对土壤 HOCs 电动力修复的强化作用

土壤中 HOCs 的电动力修复是将电极插入受污染土壤的修复区域,利用直流电场的驱动作用,通过电渗析、电迁移和电泳作用使污染物定向迁移富集至阴极、阳极或某一特定位置^[56],然后再将其去除。该技术于 20 世纪 80 年代末兴起,因其成本低、速度快、无二次污染、不受土壤深度的限制、对土壤质地选择性低而被关注。

电动力修复技术对于脱附能力弱、溶解性差的 HOCs 处理效率较低。加入表面活性剂可以促进 HOCs 从土壤颗粒上脱附和迁移,增强 HOCs 的溶解性,提高其在电场作用下的迁移效率,有效提高 HOCs 的电动力修复效率^[57]。此外,表面活性剂还能改善土壤的导电性,增加电解液与土壤颗粒之间的接触面积,这进一步提高了电动力修复技术的效果。阳离子表面活性剂在土壤颗粒上吸附较强且污染物去除率低,而阴离子表面活性剂趋向于通过电迁移的方式向阳极迁移,但电渗析流通常向阴极迁移,因此也不利于电动力学修复^[58]。因此,非离子表面活性剂或者生物表面活性剂被认为是强化电动力修复的最优选择^[59]。表 3 列举了采用表面活性剂强化电动力修复

表 2 表面活性剂泡沫强化 HOCs 微生物修复研究的效果

Table 2 Summarizes the microbial remediation of HOCs enhanced by surfactant foam

表面活性剂泡沫组成 Surfactant foam composition	修复方式 Remediation mode	强化效果 Enhanced efficiency	参考文献 Reference
非离子表面活性剂 Steol CS-330+三氯乙烯降解菌 ENV 435	表面活性剂泡沫强化好氧微生物修复 TCE- DNAPLs 污染土壤	泡沫能去除 75% 的三氯乙烯,加入三氯乙烯降解菌 ENV 435 后,95%~99% 残留的三氯乙烯被降解	[50] ^a
生物表面活性剂皂素+洋葱伯克霍尔 德 (<i>Burkholderia cepacia</i>) RPH1+营养物质	微气泡作为携带非降解菌、氧气以及营养物质的载体	在限氧系统中,皂素微气泡使约 30% 的非被生物降解,而使用皂素溶液的对照组中的非没有被生物降解	[52] ^a
两性表面活性剂月桂基甜菜碱+土著降解菌+营养物质	原位注入表面活性剂泡沫,再注入芬顿试剂溶液	表面活性剂泡沫使氧化剂的用量降低了 30%,多环芳烃的去除率高达 75% 左右	[53] ^a
阴离子表面活性剂 AOS+嗜冷假单胞菌 (<i>Pseudomonas</i>) G2-2+营养物质	泡沫作为石油降解菌和营养物质的载体,每 12 h 将表面活性剂泡沫喷洒在土壤表层	表面活性剂泡沫将土壤温度 (6 ℃) 提高 2 ℃,与传统的耕地修复方式相比,土壤中石油烃的去除率从 46.3% 提升到 73.7%	[54] ^a
化学修复剂:AOS+过硫酸钠;生物修复剂:AOS+营养物质+不动杆菌 (<i>Acinetobacter</i>) K-6	先喷洒化学修复剂泡沫预处理,然后每 3 d 喷洒 1 次生物修复剂泡沫,进行 1 个月的生物降解	过硫酸钠氧化优于过氧化氢氧化,具有更好的持久性和渗透性。化学和生物两种修复剂泡沫共同使用时,石油烃去除率为 80%,而单独使用生物修复剂的对照组去除率为 52%。化学氧化可以提高柴油的生物有效性,定期喷洒生物修复剂泡沫可以维持微生物的数量和活性	[55] ^b

注:^a表面活性剂泡沫注入到土壤内部;^b表面活性剂泡沫喷洒在土壤表层上方。

Note:^a surfactant foam is injected into the soil; ^b surfactant foam is sprayed above the surface of the soil.

表3 添加表面活性剂对HOCs电动力修复的强化效果

Table 3 Effects of surfactant enhanced electrokinetic remediation of HOCs polluted soil

表面活性剂 Surfactant	研究方法 Research technique	强化效果 Enhanced efficiency	参考文献 Reference
阴离子表面活性剂SDBS作为阴极液,非离子表面活性剂Tween 80作为阳极液	使用不同表面活性剂强化修复十六烷和萘复合污染的土壤	十六烷和萘的去除率分别为56.50%和48.68%;而仅施加电动力处理组无明显去除效果	[59]
非离子表面活性剂Igepal CA-720	将Igepal CA-720添加至电动力修复体系中	Igepal CA-720浓度为5%(m/V)时,土壤中的菲在7 d内可完全去除	[60]
非离子表面活性剂TritonX-100	研究TritonX-100对电动力学-过硫酸钠修复技术强化去除土壤中有机氯农药的效果	TritonX-100的加入使有机氯农药的去除率由22.62%~55.78%增加至56.36%~88.05%	[61]
非离子表面活性剂Igepal CA-720	Igepal CA-720强化电动力学-过硫酸钠修复技术	Igepal CA-720和过硫酸盐处理时,多氯联苯的去除率最高可以达到38.0%	[62]

的研究案例。

电动力修复与化学修复的结合解决了化学修复技术在低渗透性土壤中处理效果较差的缺点,也提高了易吸附的HOCs的去除效果。然而,表面活性剂的加入也可能对联用技术中HOCs的降解存在不利影响。Huang等^[63]发现,加入Tween 80强化电动力-过硫酸钠修复技术去除黏壤土中的多环芳烃时,Tween 80的存在使多环芳烃的去除率从21.3%降至19.9%,这可能是因为Tween 80减少了电渗析流,抑制了过硫酸钠从阳极液向土壤的迁移。此外,电动强化生物修复技术能在不破坏土壤环境的前提下,显著减少营养物质的投加量,提高修复效率,降低修复成本^[64]。章慧^[65]使用脂肽协同鞘氨醇菌GY2B增强电动力去除砂土中的菲,结果发现添加脂肽的电动体系比添加菲降解菌的电动体系具有更好的菲去除效果,且这两个体系中菲的平均去除率比仅施加电动力处理组分别提高了10%和5%。在表面活性剂协同菲降解菌的电动体系中,菲的去除率比仅施加电动力处理组提高了25%。

3.2 表面活性剂对土壤HOCs热脱附修复的强化作用

土壤热脱附修复技术通过加热受污染土壤,使有机污染物从土壤介质上挥发并抽提至尾气处置系统^[66]。热脱附技术被广泛应用于挥发和半挥发有机污染物的修复,具有去除效率高(通常在90%以上)、修复时间短以及不会造成二次污染等优点^[67]。实验表明^[68],当热脱附温度达到300℃以上时,DDT污染土壤的污染物去除率即可达到97%以上,且处理效果受污染土壤初始浓度的影响较小。

热脱附修复技术的效率主要受到温度和停留时间的影响。例如石油烃中C₁₀~C₂₈在热脱附温度为100~350℃范围内具有较好的脱附效果;而要脱附石油中C₂₈~C₄₀,需要将加热温度提高至350~550℃,或

者延长加热时间^[69]。高温或长时间的热脱附需要持续的能源输入,不利于节能减排。

采用添加表面活性剂的方法来提高污染物的脱附率,可以降低热脱附能耗。例如在清洗-热脱附耦合工艺中,表面活性剂清洗预处理可以削弱污染物的吸附行为,实现土壤颗粒的水力筛分,减少热脱附工艺段的土壤物料量,从而降低能耗。牛明芬等^[70]使用阴离子型表面活性剂 α -十六烷基磺酸钠对受污染土壤进行洗脱,并对洗脱分离出的黏粒土再进行电阻热脱附,可将1 t含油率11.75%的石油污染土壤修复至含油率<2%。与直接热脱附相比,该耦合工艺总耗能降低了40 kW·h,且修复时间更短。此外,表面活性剂也被用于共沸共溶土壤低温热脱附工艺,在加热条件下使用表面活性剂对土壤进行洗脱,降低污染物在土壤颗粒上的吸附,并加速挥发性有机物在气相和液相中的分配,以达到去除污染物的目的^[71]。挥发性有机物与水共沸时共沸点温度一般低于100℃,因此该方法可以降低热脱附的加热温度。冉雨灵^[72]发现,添加非离子表面活性剂Triton X-100并将系统加热至95℃,在1 h内土壤中的1,2-二氯乙烷含量可从8 700 mg·kg⁻¹降至1.07 mg·kg⁻¹,去除效果显著优于不添加表面活性剂的对照组。

热脱附-微生物联合修复技术通过低温加热提高目标区域HOCs的微生物可利用度和增强微生物活性,进而提高修复效率^[73-74]。生物表面活性剂与低温加热方法的耦合使用,可有效强化这一效果。Perfumo等^[75]研究了生物表面活性剂鼠李糖脂和温度对土壤环境中普遍存在的嗜热菌地芽孢杆菌(*Geobacillus thermoleovorans*) T60降解土壤中十六烷的影响,发现温度上升不仅使污染物的溶解度提高,还刺激了嗜热降解菌群的生长;而在60℃条件下,鼠李糖脂的加入使十六烷的去除率进一步提升了15%。

3.3 表面活性剂对土壤HOCs超声波修复的强化效果

超声波作用于土壤HOCs,可使其发生物理吸收或化学降解^[76-77]。对于不同质地的受污染土壤,超声波技术去除污染物的主要机制也不同。Shrestha等^[78]采用超声波技术修复3种不同类型的受六氯苯和非污染的土壤,发现在人工和天然黏土的修复过程中,自由基氧化在有机物分解中占主导地位,而在高岭土的修复中,热降解占主导地位。

在单独使用超声波技术时,污染物的降解率较低,且必须将土壤制成泥浆才能进行修复,这增加了对洗脱废水的处理要求^[78]。同时,超声波处理可以使土壤颗粒在溶液中分散得更加稳定,从而增大污染物与表面活性剂的接触面积,因此其对表面活性剂洗脱HOCs的效率有促进作用^[79-80]。研究发现,使用超声波辅助,可将非离子表面活性剂Brij35处理非污染土壤的洗脱率由68.2%提升至76.3%^[81],使阴-非离子混合表面活性剂(SDBS-TX100)对土壤中超重油的洗脱率提高13%^[80]。

4 结论与展望

表面活性剂对土壤中的HOCs有增溶能力,其已广泛用于强化化学、微生物或物理修复技术。然而,各种表面活性剂强化技术具有一定的适用性和局限性。表面活性剂强化的化学氧化修复技术去除效率更稳定,适用范围更广,但需要考虑表面活性剂造成的二次污染以及表面活性剂和氧化体系的相容性问题。表面活性剂强化的生物修复技术多采用环境友好型表面活性剂,对环境的影响较小,但在原位修复过程中,还需要考虑不同环境状况变化对污染物降解的影响,考察不同表面活性剂对微生物群落的影响机制,进一步提高技术的适用性和效率。在物理修复技术如电力修复、热脱附修复和超声波修复中,加入表面活性剂有助于降低能耗成本和提高修复效率,然而修复效果的稳定性不足和较高的修复成本仍然是需要解决的问题。基于近期的研究发展,以下方面有望获得突破:

(1)新型表面活性剂的开发与应用。新型表面活性剂如双子类(Gemini)表面活性剂、开关型表面活性剂等,为表面活性剂强化原位修复提供了新的机遇。双子类表面活性剂分子内具有多个亲水基和亲油基,其自身即具有复合配方表面活性剂的功能特性。开关型表面活性剂可由pH、CO₂、N₂和电流等外界刺激控制表面活性官能团开关,实现非表面活性剂与表面

活性剂之间的转换,这使其在使用后易于再生回收,极大降低了修复成本。这些新型表面活性剂的应用尚停留在实验研究阶段,其在土壤原位修复方面应用的效果仍有待现场验证。

(2)通过耦合技术减少表面活性剂使用量。在表面活性剂强化的HOCs污染土壤修复技术中,表面活性剂的过量残留常造成土壤和地下水的二次污染,或导致氧化剂损耗和表面活性剂浪费问题。因此,表面活性剂的减量化技术值得关注。除采用微生物原位生成获得生物表面活性剂外,超声波的耦合使用以及注入方式的改进如表面活性剂的泡沫注入法等,可有效减少表面活性剂用量,在表面活性剂强化其他原位修复技术发展中也值得关注。此外,结合污染土壤的精细诊断技术和微流控技术,理论上可以将“关闭”状态的表面活性剂,如胶囊缓释表面活性剂和开关型表面活性剂等精准输送到污染位点再“打开”,从而实现表面活性剂的减量增效。

参考文献:

- [1] UMEH A C, DUAN L, NAIDU R, et al. Residual hydrophobic organic contaminants in soil: are they a barrier to risk-based approaches for managing contaminated land?[J]. *Environment International*, 2017, 98: 18-34.
- [2] 孙红文, 张闻. 疏水性有机污染物在土壤/沉积物中的赋存状态研究[J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 231-241. SUN H W, ZHANG W. Existing state of hydrophobic organic compounds in soils and sediments [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1): 231-241.
- [3] TRELLU C, PECHAUD Y, OTURAN N, et al. Remediation of soils contaminated by hydrophobic organic compounds: how to recover extracting agents from soil washing solutions?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 404: 124137.
- [4] 廖艺, 牛亚宾, 潘艳秋, 等. 复配表面活性剂对油水界面行为和性质影响的模拟研究[J]. *化工学报*, 2022, 73(9): 4003-4014. LIAO Y, NIU Y B, PAN Y Q, et al. Modeling the effects of mixed surfactants on the behaviors and properties of the oil-water interface with molecular dynamics[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(9): 4003-4014.
- [5] CHENG M, ZENG G, HUANG D, et al. Advantages and challenges of Tween 80 surfactant-enhanced technologies for the remediation of soils contaminated with hydrophobic organic compounds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 314: 98-113.
- [6] BESHA A T, BEKELE D N, NAIDU R, et al. Recent advances in surfactant-enhanced *in-situ* chemical oxidation for the remediation of non-aqueous phase liquid contaminated soils and aquifers[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, 9: 303-322.
- [7] 李倩, 杨璐, 姜越, 等. 农药生产场地污染土壤的化学氧化修复技术研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(1): 19-29. LI Q, YANG L, JIANG Y, et al. Chemical oxidation techniques for soil reme-

- diation of contamination at pesticide – production sites[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(1):19–29.
- [8] 魏坤昊. 表面活性剂增溶性能及强化KMnO₄氧化甲苯和非效果研究[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2022. WEI K H. The solubilization performance of surfactants and its effect on enhancing oxidation of toluene and phenanthrene by KMnO₄[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2022.
- [9] STROO H F, LEESON A, MARQUSEE J A, et al. Chlorinated ethene source remediation: lessons learned[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(12):6438–6447.
- [10] LI Z. Surfactant-enhanced oxidation of trichloroethylene by permanganate—proof of concept[J]. *Chemosphere*, 2004, 54(3):419–423.
- [11] ETHICALCHEM. SEPR and S-ISCO remediation of creosote Bridgetown, Delaware, New York[EB/OL]. (2016–02–27)[2023–08–08]. http://media.wix.com/ugd/9b5eec_1cc453253d8d48149bc96f2ab39-f0894.pdf.
- [12] SANTOS A, GARCÍA-CERVILLA R, CHECA-FERNÁNDEZ A, et al. Acute toxicity evaluation of lindane—waste contaminated soils treated by surfactant-enhanced ISCO[J]. *Molecules*, 2022, 27(24):8965.
- [13] LOMINCHAR M A, LORENZO D, ROMERO A, et al. Remediation of soil contaminated by PAHs and TPH using alkaline activated persulfate enhanced by surfactant addition at flow conditions[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2018, 93(5):1270–1278.
- [14] WANG L, WU H, DENG D. Role of surfactants in accelerating or retarding persulfate decomposition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384:123303.
- [15] 祝传力. 表面活性剂协同活化过硫酸钠修复石油污染土壤研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2023. ZHU C L. Study on remediation of petroleum contaminated soil by synergistic activation of sodium persulfate by surfactant[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [16] XU J C, YANG L H, YUAN J X, et al. Coupling surfactants with ISCO for remediating of NAPLs: recent progress and application challenges [J]. *Chemosphere*, 2022, 303:135004.
- [17] ELLOY F C, TEEL A L, WATTS R J. Activation of persulfate by surfactants under acidic and basic conditions[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2014, 34(4):51–59.
- [18] DUGAN P J, SIEGRIST R L, CRIMI M L. Coupling surfactants/cosolvents with oxidants for enhanced DNAPL removal: a review[J]. *Remediation Journal*, 2010, 20(3):27–49.
- [19] WANG L, PENG L, XIE L, et al. Compatibility of surfactants and thermally activated persulfate for enhanced subsurface remediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12):7055–7064.
- [20] GARCÍA-CERVILLA R, SANTOS A, ROMERO A, et al. Compatibility of nonionic and anionic surfactants with persulfate activated by alkali in the abatement of chlorinated organic compounds in aqueous phase[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751:141782.
- [21] SUN Y, LI M, GU X, et al. Mechanism of surfactant in trichloroethene degradation in aqueous solution by sodium persulfate activated with chelated-Fe(II)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407:124814.
- [22] 刘相良, 李英杰, 赵健艾, 等. 表面活性剂泡沫强化修复污染土壤研究进展[J]. 化学通报, 2017, 80(12):1116–1122. LIU X L, LI Y J, ZHAO J A, et al. Research progress of surfactant foam-enhanced remediation technology for contaminated soil[J]. *Chemistry*, 2017, 80(12):1116–1122.
- [23] PETERS R W, ENZIEN M V, BOUILLARD J X, et al. Nonaqueous-phase-liquids-contaminated soil/groundwater remediation using foams [R]. Columbus: Battelle Press, 1994.
- [24] MAIRE J, FATIN-ROUGE N. Surfactant foam flushing for *in situ* removal of DNAPLs in shallow soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 321:247–255.
- [25] BOUZID I, MAIRE J, FATIN-ROUGE N. Comparative assessment of a foam-based oxidative treatment of hydrocarbon-contaminated unsaturated and anisotropic soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 233:667–676.
- [26] MAIRE J, DAVARZANI H, COLOMBANO S, et al. Targeted delivery of hydrogen for the bioremediation of aquifers contaminated by dissolved chlorinated compounds[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249:443–452.
- [27] BOUZID I, MAIRE J, AHMED S I, et al. Enhanced remedial reagents delivery in unsaturated anisotropic soils using surfactant foam[J]. *Chemosphere*, 2018, 210:977–986.
- [28] BOUZID I, MAIRE J, FATIN-ROUGE N. Comparative assessment of a foam-based method for ISCO of coal tar contaminated unsaturated soils[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(5):103346.
- [29] LINDEBERG M R, MASELKO J, HEINTZ R A, et al. Conditions of persistent oil on beaches in Prince William Sound 26 years after the Exxon Valdez spill[J]. *Deep-Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2018, 147:9–19.
- [30] AZUBUIKE C C, CHIKERE C B, OKPOKWASILI G C. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2016, 32(11):1–18.
- [31] MNIF I, MNIF S, SAHNOUN R, et al. Biodegradation of diesel oil by a novel microbial consortium: comparison between co-inoculation with biosurfactant-producing strain and exogenously added biosurfactants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(19):14852–14861.
- [32] 丁克强, 骆永明. 多环芳烃污染土壤的生物修复[J]. 土壤, 2001(4):169–178. DING K Q, LUO Y M. Bioremediation of soil contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Soil*, 2001(4):169–178.
- [33] 吴敏, 施柯廷, 陈全, 等. 有机污染土壤生物修复效果的限制因素及提升措施[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5):919–932. WU M, SHI K T, CHEN Q, et al. Controlling factors and strategies to improve the bioremediation of organically contaminated soil: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5):919–932.
- [34] SHEN X, ZHANG J, XIE H, et al. Effect of humic acid on phenanthrene removal by constructed wetlands using birnessite as a substrate [J]. *RSC Advances*, 2022, 12(24):15231–15239.
- [35] NASERI M, BARABADI A, BARABADI J. Bioremediation treatment of hydrocarbon-contaminated arctic soils: influencing param-

- ters[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(19): 11250–11265.
- [36] 褚宴佳, 何宝南, 何江涛, 等. 微乳液增溶及微生物强化去除土壤残留多环芳烃研究现状及展望[J]. 北京水务, 2023(2): 64–68. CHU Y J, HE B N, HE J T, et al. Research status and prospect of microemulsion and microbial removal of residual PAHs in soil[J]. *Beijing Water*, 2023(2): 64–68.
- [37] DECESARO A, MACHADO T S, CAPPELLARO Â C, et al. Biosurfactants during in situ bioremediation: factors that influence the production and challenges in evaluation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(26): 20831–20843.
- [38] 任芳谊. 鼠李糖脂在微生物表面的吸附及其对微生物表面性质的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2008. REN F Y. Adsorption of rhamnolipid on microorganisms and the effect on cell surface lyphohydrophilic property[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [39] SAJADI BAMI M, RAEISI ESTABRAGH M A, OHADI M, et al. Biosurfactants aided bioremediation mechanisms: a mini-review[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2022, 31(7): 801–817.
- [40] 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. WANG X X, SUN L N, ZHENG X H, et al. Enhanced effects of surfactants on the bioremediation of DDTs-PAHs in co-contaminated farmland soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(3): 486–492.
- [41] 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.
- [42] LIMA T M S, PROCÓPIO L C, BRANDÃO F D, et al. Evaluation of bacterial surfactant toxicity towards petroleum degrading microorganisms[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2957–2964.
- [43] GUDIÑA E J, RODRIGUES A I, DE FREITAS V, et al. Valorization of agro-industrial wastes towards the production of rhamnolipids[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 212: 144–150.
- [44] MÜLLER M M, KÜGLER J H, HENKEL M, et al. Rhamnolipids: next generation surfactants?[J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, 162(4): 366–380.
- [45] KUMAR M, LEON V, ILZINS O A. Enhancement of oil degradation by co-culture of hydrocarbon degrading and biosurfactant producing bacteria[J]. *Polish Journal of Microbiology*, 2006, 55(2): 139–146.
- [46] MA Y, XIE Z, LOHMANN R, et al. Organophosphate ester flame retardants and plasticizers in ocean sediments from the North Pacific to the Arctic Ocean[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7): 3809–3815.
- [47] KHAN A H A, TANVEER S, ALIA S, et al. Role of nutrients in bacterial biosurfactant production and effect of biosurfactant production on petroleum hydrocarbon biodegradation[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 158–164.
- [48] WU Y, XU M, XUE J, et al. Characterization and enhanced degradation potentials of biosurfactant-producing bacteria isolated from a marine environment[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(1): 1645–1651.
- [49] 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. XIE M. Plant-microorganism remediation and surfactant enhanced remediation technology for organic contamination in soil of iron and steel plant[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [50] ROTHMEL R K, PETERS R W, ST MARTIN E, et al. Surfactant foam / bioaugmentation technology for in situ treatment of TCE-DNAPLs[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(11): 1667–1675.
- [51] BAJAGAIN R, PARK Y, JEONG S W. Feasibility of oxidation-biodegradation serial foam spraying for total petroleum hydrocarbon removal without soil disturbance[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1236–1242.
- [52] PARK J Y, CHOI Y J, MOON S, et al. Microbubble suspension as a carrier of oxygen and acclimated bacteria for phenanthrene biodegradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2/3): 761–767.
- [53] BOUZID I, HERRERA D P, DIERICK M, et al. A new foam-based method for the (bio) degradation of hydrocarbons in contaminated vadose zone[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123420.
- [54] JEONG S W, JEONG J, KIM J. Simple surface foam application enhances bioremediation of oil-contaminated soil in cold conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 164–170.
- [55] BAJAGAIN R, LEE S, JEONG S W. Application of persulfate-oxidation foam spraying as a bioremediation pretreatment for diesel oil-contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 207: 565–572.
- [56] 张锡辉, 王慧, 罗启仕. 电动力学技术在受污染地下水和土壤修复中新进展[J]. 水科学进展, 2001(2): 249–255. ZHANG X H, WANG H, LUO Q S. Electrokinetics in remediation of contaminated groundwater and soils[J]. *Advances in Water Science*, 2001(2): 249–255.
- [57] 杨珍珍, 耿兵, 田云龙, 等. 土壤有机污染物电化学修复技术研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1110–1122. YANG Z Z, GENG B, TIAN Y L, et al. Research progresses on remediation of organic contaminated soils with electrochemical technologies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1110–1122.
- [58] SAICHEK R E, REDDY K R. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, 35(2): 115–192.
- [59] BOULAKRADECHE M O, AKRETICHE D E, CAMESELLE C, et al. Enhanced electrokinetic remediation of hydrophobic organics contaminated soils by the combination of non-ionic and ionic surfactants[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 174: 1057–1066.
- [60] MATURI K, REDDY K R, CAMESELLE C. Surfactant-enhanced electrokinetic remediation of mixed contamination in low permeability soil[J]. *Separation Science and Technology*, 2009, 44(10): 2385–2409.
- [61] SUANON F, TANG L, SHENG H, et al. Organochlorine pesticides contaminated soil decontamination using Triton X-100-enhanced advanced oxidation under electrokinetic remediation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122388.

- [62] FAN G, CANG L, FANG G, et al. Surfactant and oxidant enhanced electrokinetic remediation of a PCBs polluted soil[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 123:106-113.
- [63] HUANG Q, ZHOU M, ZHOU J, et al. Roles of oxidant, activator, and surfactant on enhanced electrokinetic remediation of PAHs historically contaminated soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(59):88989-89001.
- [64] 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]. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, 23(3):47-51.
- [65] 章慧. 生物表面活性剂协同非降解菌增强电力去除砂土中的菲[D]. 广州:华南理工大学, 2013. ZHANG H. Biosurfactant collaborated phenanthrene degrading bacteria enhanced electrokinetic dislodged phenanthrene from sandy[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2013.
- [66] 王博. 石油烃污染土壤间接热脱附关键影响因素研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021. WANG B. Study on key influencing factors of indirect thermal desorption of petroleum hydrocarbon contaminated soils [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2021.
- [67] 陈俊华, 祝红, 单晖峰, 等. 表面活性剂强化好氧生物修复PAHs污染土壤效果研究[J]. *环境工程*, 2020, 38(5):185-190. CHEN J H, ZHU H, SHAN H F, et al. Performance of surfactants enhanced aerobic bioremediation of PAHs contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(5):185-190.
- [68] 王瑛, 李扬, 黄启飞, 等. 有机质对污染土壤中DDTs热脱附行为的影响[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(6):1419-1424. WANG Y, LI Y, HUANG Q F, et al. Impact of organic matter on thermal desorption of DDTs in contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(6):1419-1424.
- [69] 来珊珊, 李雪娇, 贺艳娟. 石油污染土壤热脱附修复的应用研究进展[J]. *石油化工应用*, 2023, 42(2):1-7. LAI S S, LI X J, HE Y J. Application research progress of thermal desorption remediation for petroleum contaminated soil[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2023, 42(2):1-7.
- [70] 牛明芬, 刘馨芷, 郭英达, 等. 采用清洗-热脱附工艺修复石蜡基与环烷基原油污染土壤[J]. *环境工程*, 2022, 40(9):167-172. NIU M F, LIU X Z, GUO Y D, et al. Washing-thermal desorption remediation of paraffin and naphthenicbased crude oil contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(9):167-172.
- [71] 冉雨灵, 罗启仕, 赵秀红, 等. 基于共沸共溶原理脱除污染土壤中1, 2-二氯乙烷[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2):639-644. RAN Y L, LUO Q S, ZHAO X H, et al. Removal of 1, 2-dichloroethane from contaminated soil based on co-boiling and co-dissolving principle[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2):639-644.
- [72] 冉雨灵. 基于共沸共溶的土壤低温热脱附修复技术研究[D]. 上海:华东理工大学, 2020. RAN Y L. The study on low-temperature thermal desorption technology for contaminated soil using co-boiling and co-dissolving[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2020.
- [73] 贾秀雯, 王盼盼, 张娟, 等. 热脱附对有机氯农药污染土壤微生物响应效应[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(8):197-205. JIA X W, WANG P P, ZHANG J, et al. Microbial response effects of thermal desorption in organochlorine pesticide-contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(8):197-205.
- [74] NGUELEU S K, REZANEZHAD F, AL-RAOUSH R I, et al. Sorption of benzene and naphthalene on (semi)-arid coastal soil as a function of salinity and temperature[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 219:61-71.
- [75] PERFUMO A, BANAT I M, MARCHANT R, et al. Thermally enhanced approaches for bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(1):179-184.
- [76] JI G, ZHOU G. Impact of ultrasonication time on elution of super heavy oil and its biomarkers from aging soils using a Triton X-100 micellar solution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1/2/3):281-288.
- [77] SON Y, NAM S, ASHOKKUMAR M, et al. Comparison of energy consumptions between ultrasonic, mechanical, and combined soil washing processes[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(3):395-398.
- [78] SHRESTHA R A, PHAM T D, SILLANPÄÄ M. Effect of ultrasound on removal of persistent organic pollutants (POPs) from different types of soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(2/3):871-875.
- [79] SONG W, LI J, ZHANG W, et al. An experimental study on the remediation of phenanthrene in soil using ultrasound and soil washing[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(5):1487-1496.
- [80] JI G, ZHOU C, ZHOU G. Ultrasound enhanced gradient elution of super heavy oil from weathered soils using TX100/SBDS mixed salt micellar solutions[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(2):506-512.
- [81] 王玲. 表面活性剂与超声波联合使用去除土壤中PAHs的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012. WANG L. Research on PAHs removal in soil using surfactant and ultrasound[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2012.

(责任编辑:李丹)