地球与环境

2013年第41卷第5期

Vol. 41. No. 5,2013

EARTH AND ENVIRONMENT

石油污染盐碱化土壤修复技术的研究进展

李永霞，黄 莹＊ ，徐民民，杨 健，高甫威，孙 博

（山东省环境保护科学研究设计院生态与土壤修复研究所，济南 250013）

摘 要 ：油田周围普遍存在着土壤盐碱化和石油污染的双重问题，石油污染盐碱化土壤的修复是亟需解决的环境瓶颈问题。 本文在分析石油污染盐碱化土壤特性的基础上，介绍了适用于盐碱地土壤修复的技术，包括微生物修复、植物－微生物联合修 复以及物理／化学修复技术的研究进展，并对该领域今后的研究方向与重点进行了展望。

关键词：盐碱土；石油污染；修复技术

中图分类号：X53 文献标识码：A 文章编号：1672-9250（2013）03-0583-06

收稿日期：2012－10－05；改回日期：2012－12－04

第一作者简介：李永霞（1986 — ）,女，硕士，主要从事土壤和地下水修复技术研究。E-mail： liyxouc@163. \*通讯作者：黄莹，高级工程师。E-mail： [sdhy07@hotmail.com](mailto:sdhy07@hotmail.com).

com

石油资源的开发在给国家和地方带来益处的同 时也产生了一系列的环境问题。石油在勘探、开采、 运输以及储存过程中不可避免地污染土壤生态系 统，特别是在油田及贮油场所，污染尤为严重。据国 家统计局公布的2010年环境统计数据，我国石油开 采及加工相关行业企业工业固体废物产生量为

3719X 104 t,其中危险废物194X104 t ［1］；另据文献 报道［2］，平均作业一口井残留在地面的落地油约1 t,目前，我国石油企业每年产生落地油约700 X 104 t因此，如何采用人工强化措施修复受损土壤，降 低生态风险,是亟待解决的环境瓶颈问题。

在我国华北平原、松嫩平原和西北地区分布有 大面积的盐碱土壤［3－5］, 同时上述地区油气资源丰 富,建立了多个大型油田。该类地区普遍面临着土 壤盐碱化和石油污染的双重问题。由于盐度和石油 污染对土壤微生态环境的破坏,使土壤的自然降解 功能减弱,同时,随着时间的延长, 土壤盐渍化现象 加剧［6］。因此,石油污染盐碱化土壤的治理必须与 盐碱地治理、土壤微生态环境恢复结合起来。

本文首先介绍了石油污染盐碱化土壤的特性, 然后综述了国内外石油污染盐碱地修复技术的研究 进展,并在此基础上展望了今后该领域土壤修复技 术的研究方向与重点,以期为油田区盐碱土地的修 复和治理提供技术参考。

**1**石油污染盐碱化土壤的特性

石油进入土壤后,会引起土壤理化性质的改变, 如影响土壤的通透性,降低有效氮、磷含量,减弱土 壤肥力； 毒害植物根部, 影响作物对水分和营养盐的 吸收；多环芳烃等有害物质能在植物中富集,通过食 物链影响人体健康；没有被土壤吸附的石油（NA- PL,非水相液体）可渗入地下并污染地下水，增加污 染范围,从而对人类生存环境的多个层面产生广泛 影响［7］。

石油污染盐碱化土壤受到油盐混合污染,使其 修复和治理成为当前研究的热点和难点。 一方面, 石油烃类污染物使土壤颗粒疏水,增加了水浸洗盐 的难度,也抑制了土壤中水溶性营养物质的传递,对 植物和微生物的生长不利［8］；另一方面,当土壤盐度 大于3％时,非耐盐微生物的代谢会受到抑制,降低 甚至丧失其修复能力［9］。 因此,为了能够更经济、有 效地修复石油污染土壤,需要联合多种技术,发挥各 自优点,达到最佳的修复效果。

**2**微生物修复

微生物修复技术是利用土壤中的土著菌或向污 染土壤中接种选育的高效降解菌,在优化的环境条 件下,加速石油污染物的降解。 微生物修复主要包 括生物刺激(Biostimulation)和生物强化(Bioaug­mentation) 两种方法「10〕，国内外学者对两方面均进 行了有益的探讨。

**2.1**实验研究

目前，盐碱地石油污染微生物修复技术的研究 大多停留在实验室阶段，取得了一定的研究成果；野 外试验由于面临较为恶劣的环境条件，研究相对较 少。土壤盐碱化和石油污染会对石油烃降解菌产生 双重毒害作用，降低土壤盐碱含量和提高石油烃的 生物可利用性是增强微生物修复效果的根本途径， 而营养物质(如有机肥、污泥等) 的施加则有利的促 进了降解菌的生长繁殖。

在国内，齐建超等［11］采用含有4 种石油烃降解 菌的菌剂与多种有机肥联合修复石油污染土壤，结 果表明，有机肥和菌剂(4％处理)的加入使土壤盐碱 环境得到明显改善，石油烃降解率可达到73%，对 难降解的苯并(a)芘和苯并(g, h, i)芘亦有良好的 修复效果。刘其友等［12］应用复合菌株CM-13对东 营地区的盐渍化石油污染土壤进行强化修复， 并对 修复技术条件进行优化。 在国 外 ,Betancur-Galvis 等［13］采用污泥刺激土壤微生物，加速了盐碱土壤中 多环芳烃的降解。Fernandez-Luqueno等「14〕进一步 证实了施加污泥对盐碱土壤中多环芳烃降解的促进 效果。 但盐碱化土壤含盐量高, 土壤肥力低, 仍抑制 了土著微生物的降解活性［15］。 针对盐分对土壤微 生物的胁迫作用，Rhykerd等少〕研究表明，在有无 机 N、P 及 NaCl 含量降低(0. 4% ,1. 2% ,2% ,w/w) 的情况下，土壤肥沃化，促进了石油的矿化。 王新新 等［15］采用淋洗施肥法修复石油污染盐碱土壤, 淋洗 施肥处理明显提高了石油烃降解菌的数量和土壤微 生物活性，促进了土壤中油和脂的降解。郭婷等旧 使用浇水漫灌方式压盐后，利用生物刺激(BS)、生 物刺激+生物强化(BS + BA)2种方案修复石油污 染盐碱土壤，结果发现土壤改良剂及营养盐的加入 使土壤盐碱环境得到明 显改善， 提高了石油烃的生 物可利用性。对比2组小试系统，BS + BA处理修 复效果更加显著。

近年来，相关研究逐渐认识到高效降解菌剂在 污染土壤中普遍面临传代时间短、竞争力弱等问题， 治理效果难以长时间维持。 盐渍化土壤中土著微生 物具有独特的耐盐机制，能够适应高盐环境，可能对 修复盐渍化土壤的石油 污染具有较高潜力，因而从 污染土壤中筛选土著微生物逐渐成为研究热点。 王 震宇等［17］从黄河三角洲盐渍化地区筛选得到土著 石油烃降解菌，该降解菌属轻度嗜盐菌，对原油、柴 油、烷烃及多环芳烃均表现出较强的降解能力，显示 出土著菌在盐渍化环境下较强的生物修复潜力。 张 竹圆等［18］对辽河口湿地筛选所得高效石油降解菌 进行了生物学特性及降解能力的研究，结果显示两 株菌在低温、高盐条件下对石油烃仍具有良好的降 解效果。郭若勤等［19］采用了嗜盐菌强化石油污染 土壤的生物修复，表明了 嗜盐菌和 土著菌的共同作 用加强 了 土 壤 的 高 效 生 物 修 复 效 果。 在 国 外， Nicholson 等［20］从俄克拉荷马州石油区盐土中得到 了以 *Marinobacter* 为主的嗜盐微生物菌群， 研究表 明，在高盐条件下， 该菌 群能以苯为唯一 碳源和 能 源，经4周培养，约46%的苯被完全转化为CO2,酵 母粉的加入可进一步促进菌群的降解作用。Plotni- kova 等［21］从盐污染土壤中 分离得到 了 能够将萘、 菲和联苯作为唯一碳源和能源进行利用的多种菌 株，这些菌株大部分属于耐盐菌种。

石油污染土壤微生物修复的另一个关键技术是 生物表面活性剂的应用 。 与化学表面活性剂相比， 生物表面活性剂具有特异性强、高效、低毒、不污染 环境以及生产成本低等优点。 生物表面活性剂能显 著降低表面张力，提高不溶性石油 组分的生物可利 用性，已被广泛的应用于石油污染土壤修复实践中， 显示了良好的应用 前景。 宋立超［22］从天津大港油 田滨海盐土中筛选出耐盐碱PAHs高效降解菌，室 内模拟实验表明，降解菌*Panroea* sp. *T］B5 ^Penie- illium* sp. TJF1和菌群TJM在固定化、添加表面活 性剂等处理条件下对菲和芘污染的盐土修复效果明 显。Hisashi Saeki 等〔23 通过培养 *Gordonia* sp. strain JE-1058制备了含生物表面活性剂的修复剂 JE1058BS,JE1058BS在海水和海滩等含盐条件下 的石油污染修复中显示出极大的降解潜力。Ilori、 Batista.Costa等〔24-26〕研究了在极端环境条件(pH、 温度和盐分)下生物表面活性剂对石油的降解效果， 由于生物表面活性剂的增溶特性， 各种极端环境下 应用生物表面活性剂去除土壤中石油污染仍具有可 能性。

**2** ．**2** 场地试验

现阶段，针对盐碱地石油污染修复的实际和示 范工程较少。 根据已有文献［8，27］， 石油污染盐碱化 场地微生物修复试验常以筛选土著微生物制备液体 或固体菌剂的方式进行。 场地试验的首要任务是减

少土壤中盐碱含量，其主要方法有：水浸洗盐、利用 覆盖物和改良剂改良以及生物措施改良盐碱化土壤 等［8］。通过提高石油烃生物可利用性以增强修复效 果的场地试验还未见报道。

胥九兵等［27］将土著石油烃降解菌与草炭混合 制备固态微生物菌剂，采用挖沟排盐、淡水压盐、土 壤翻耕、添加菌剂和营养盐等措施对胜利油田周围 污染土壤进行了现场修复，经过2个月的修复实验， 修复区的石油降解了67 7％，效果显著。张坤［8］在 中原油田实施了6400 m2 场地修复试验，验证了添 加麦秸对水浸洗盐的强化作用，在洗盐结束后施加 由阴沟肠杆菌*(Enterobacter cloacae')*和刺抱小克银 汉霉菌(*Cunninghamella echinulata* )构成的真菌- 细菌复合液体菌剂,5 d后试验地块中的总石油烃 质量分数降至0 3％以下，降解率最高达到75％。 韩慧龙等［28］进一步研究发现，真菌-细菌复合菌剂 对饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物均具有较好 的降解能力，通过种植小麦证实了修复石油烃污染 耕地的可行性及良好的应用 前景。卢桂兰等［29］采 用现场土耕法对草炭强化陈化油泥生物降解的研究 表明，草炭能显著提高陈化油泥的生物修复效果。 经过26个月的 降解过程，陈化油泥中总石油烃 (TPH)的降解率为38. 9%，其理化性质得到显著改 善，盐碱浓度降低，有机质浓度增加，有效态营养元 素浓度增加。

**3**植物—微生物联合修复

植物对有机污染土壤的生物修复作用主要表现 在植物对有机污染物的直接吸收，植物释放的各种 分泌物或酶类促进有机污染物生物降解以及强化根 际微生物的矿化作用等方面。此外，植被也可以有 效改善土壤条件、增强土壤透气性，从而提高降解效 率［30］。尽管植物修复措施已成功应用于石油污染 土壤的修复实践，但由于油盐混合污染土壤对植物 生长的抑制作用，限制了传统植物修复措施的开展。 植物-微生物联合修复利用 土壤、植物、微生物组成 的复合体系来共同降解污染物，其发展和应用备受 瞩目。一方面，植物为微生物的生存提供了氧气、营 养物以及“共代谢”基质［31］，另一方面微生物的降解 作用减轻了污染物对植物的毒性， 提高了植物的耐 受性。菌根生物修复技术的发展为石油组分中难降 解有机物的生物修复带来了希望［30］。

王新新等［32］研究了石油污染盐碱土壤翅碱蓬 根围的细菌多样性，并筛选得到耐盐石油烃降解菌， 指出戈登氏菌属(*Gordonia* )、无色杆菌属*(Achro- mobacter))*迪茨菌属*(Dietzia))*芽胞杆菌属*(.Bad Ims)*和假单胞菌属*(,Pseudomonas)*等耐盐石油烃降 解菌可能参与该类土壤翅碱蓬植物修复过程中的石 油烃降解。马传鑫［33］从大港油田筛选微生物种群， 并采用耐盐碱植物苜蓿作为供试植物，研究了微生 物菌群、植物及植物-微生物菌群对不同含盐量土 壤中石油污染物的修复效率，结果发现植物-微生物 联合修复效果优于前者。Al-Mailem等〔34〕将阿拉 伯湾高耐盐植物 *Halonemum strobilaceum* 应 用 于 石油修复，该植物生长状况良好，其根际微生物数量 是没有植被地区的14〜38倍。根际中常见的菌属 为古细菌盐杆菌属(*Halbac t erium)*、嗜盐球菌属 *(Halococcus* )、*Brevibacillus bosstenlensis*、 变形菌 属(*P seudoatteromonas)* 和 *Halomonas sinaensis ,*以 上菌种均可以在1〜4 mol/L NaCl的溶液中生长。 Nie 等［35］研究了黄河三角洲石油烃污染盐渍化土壤 中根际效应对细菌丰度和多样性的影响，根际土壤 中，石油烃降解菌显著高于非根际土壤，根际细菌的 存在降低盐渍化对植物根系的胁迫，从而使根系为 微生物的生长提供良好的环境。

植物-微生物联合修复的另一关键技术是农田 生态措施的应用。 施肥、翻耕、水分管理等强化措施 可有效提高生物修复效果。 张松林等［36］进行了人 为石油污染土壤紫花苜蓿田间修复试验， 结果显示 施肥有助于种植苜蓿组土壤石油污染物的去除。 牛 明芬等［37］研究了微生物-植物联合对稠油污染土壤 的修复效果，结果表明施用微生物菌剂、生物表面活 性剂及氮肥可提高联合修复的效果，但在不同时期， 影响效果不同。

**4**物理/化学修复

20 世纪80 年代以前，石油污染土壤的修复方 法仅限于物理/化学方法。 与生物修复技术相比， 物 理/化学修复受土壤盐碱化环境的影响小，适用范围 广。

物理修复是指以物理手段为主的客土法、焚烧 法、物理分离法、溶液淋洗法、固化稳定法、热脱附法 及电动力法等污染治理技术。 其中前几种方法是早 期的石油污染土壤治理技术，虽然可以取得一定的 修复效果，但投资巨大，污染物消除不彻底，潜在危 险性较大，已逐渐被淘汰。 取而代之的是热脱附法、 电动修复等一批技术经济可行的新工艺［38］。温军 杰采用声热耦合与煤吸附联合技术对胜利油田 重质油污染高含盐细粒土进行了室内实验研究，该 技术可同时实现污染治理与资源回收。Li等〔如采 用碳材料增强的微波热修复方法，将石油污染物从 土壤中快速去除，同时将其绝大部分回收，取得了良 好的修复和回收效果。 李婷婷等［41］进行了电动-微 生物联合修复技术对石油污染物去除的研究，结果 表明，在施加电场下，石油降解菌的数量增加，石油 的去除率是对照组的2〜4倍。Chien［42］进行了石 油污染场地的原位微波热修复，验证了水在修复中 的重要作用 ，表明微波热修复技术在土壤原位修复 中具有良好的应用前景。

化学修复主要包括溶液淋洗萃取法、光催化氧 化法和化学氧化法等。 相对于其他污染土壤修复技 术，化学修复技术发展较早，也相对成熟。 但其修复 过程可能严重影响土壤的物理结构和生物学活性， 技术成本较高，容易产生二次污染。 到目前为止，化 学修复技术只适宜在特定的情况下使用［38］。 Lu 等利用H2O2和Fe3+-EDTA复合体，通过泥浆 法对石油污染土壤进行处理，使土壤中油质量比由 14800 mg/kg降低到2300 mg/kg,获得了非常理想 的修复效果。 Guieysse 等［44］研究了紫外和生物联 合对PAHs降解的影响，发现除了蔥以外，4环〜5 环的 PAHs 总是先被降解， 紫外处理优先作用 于高 分子PAHs,可为微生物的降解提供了很好的补充。 Usman等〔旳分别采用磁铁矿催化Fentorrlike和过 硫酸盐氧化技术对新鲜和陈化油泥进行了修复， 在 天然pH条件下降解率可达80%〜90%。

土壤含盐量能在一定程度上影响污染土壤电动 修复（电渗析，电迁移， 电泳）、溶液淋洗及化学氧化 等物理/化学方法的修复效果，但目前有关土壤含盐 量对石油污染土壤修复效果的影响还未见诸报道。 由于石油烃的主要组成部分（烷烃和芳烃）仅具有弱 极性或无极性，传统的电动方法修复效果不明显，土 壤含盐量的影响作用较小。 在采用含表面活性剂的 淋洗液进行石油污染土壤修复时， 土壤含盐量通过 作 用 于 油 -水界面张力而影响洗脱效果。 Liang 等［46］指出离子强度的增大不利于过硫酸盐的活化， 从而间接影响石油烃的修复效果。 因此有必要开展 不同盐碱化条件下石油污染土壤物理/化学修复效 果的探索。

**5**结论和展望

对于盐碱地石油污染土壤， 当前研究仍集中于 微生物修复， 主要从选育高 效降解菌、添加 营养物 质、降低土壤盐碱毒害以及提高石油烃的生物可利 用性等方面开展室内实验， 相关场地试验还较少， 需 待进一步验证。 受根际效应的影响， 植物-微生物联 合修复效果优于单一修复技术， 并可通过农田 生态 措施实现强化修复。 土壤盐碱条件能在一定程度上 影响污染土壤物理/化学修复效果，而针对盐碱地石 油污染的物理/化学修复的报道还很少。 今后的研 究重点应主要从以下几方面着手：

1） 进一步探讨传统生物修复、物理/化学修复技 术在土壤盐碱化条件下的适应性。 同 时， 我国北方 油田冬季低温期较长， 应开展低温生物修复技术的 研究。

2） 采用遗传学、应用 分子生物学手段进行盐碱 条件下高效石油烃降解菌的筛选， 包括植物-微生物 根际生物制剂，并提高其降解性能和环境适应性。

3） 开发与利用适用于盐碱地石油污染修复的新 型功能材料，包括生物表面活性剂和固定化载体等。

4） 针对高浓度石油污染土壤， 采用物化-生物联 合修复技术在修复污染场地的同时实现原油资源的 回 收。

1. 中华人民共和国国家统计局.各行业工业固体废物产生和排放情况(2010年)[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/> tjsj/qtsj/hjtjzl/hjtjsj2010/t20111227丄102788762. htm.
2. 毛丽华.石油污染土壤生物通风堆肥修复研究[D**]**.北京**：**中国地质大学**，**2006.
3. 张杰**，**陈立新**，**寇士伟**，**等.大庆地区不同利用方式土壤盐碱化特征分析及评价[J**]**.水土保持学报**，**2011**,** 25(1**)：** 171 -179．
4. Weng Y L，Gong P，Zhu ZL. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River Delta region of China using

EO-1 Hyperiondata[J]．Pedosphere， 2010， 20(3): 378-388．

1. Wang Y G，Xiao D N，Li Y，*et a l*. Soil salinity evolution and its relation-ship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins： Case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008 , 140(1 — 3) : 291 — 302.
2. 郭婷，张承东，张清敏.生物修复石油污染盐碱土壤小试模拟系统中土壤性质与微生物特性变化[J].中国环境科学, 2010， 30(8)： 1123-1129．
3. 孙铁珩,周启星，李培军.污染生态学[M].北京：科学出版社.
4. 张坤.麦秸强化油-盐污染土壤生物修复过程研究及场地中试[D].北京：清华大学，2008
5. 赵百锁,王慧,毛心慰.嗜盐微生物在环境修复中的研究进展[].微生物学通报,2007, 34(6)： 1209 — 1212.
6. 刘五星*,*骆永明，滕应*,*等.石油污染土壤的生态风险评价和生物修复[].土壤学报*,*2008, 45(5)： 994-999.
7. 齐建超，张承东，乔俊，等.生物与有机肥混合剂修复石油污染土壤的研究[].农业环境科学学报，2010, 29(1)： 66

-72

1. 刘其友，赵朝成，申完伟，等.微生物强化修复盐渍化石油污染土壤研究[].油气田环境保护，2011, 21(2)： 8-10.
2. Eetancur-Galvis L A, Alvarez-Eernal D, Ramos-Valdivia A C, *t al.* Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon- contaminated salinealkaline soils of the former Lake Texcoco[J]. Chemosphere, 2006, 62(11)： 1749- 1760.
3. Fernandez-Luqueno F, Marsch R, Espinosa-Victoria D, *t al.* Remediation of PAHs in a saline-alkaline soil amended with wastewater sludge and the effect on dynamics of C and N[J]. Science of the Total Environment, 2008, 402(1) : 18 -28
4. 王新新，白志辉，金德才，等.石油污染盐碱土壤的淋洗施肥修复[].农业环境科学学报，2012, 31(2)： 331-337.
5. Rhykerd R L, Wearver R W, Mclnnes K J. Influence of salinity on bioremediation of oil in soil[J]. Environmental Pol­

lution, 1995, 90(1)： 127-130

1. 王震宇，赵建，李锋民，等.盐渍化土壤中土著菌的石油烃降解潜力研究[].农业环境科学学报，2009, 28(7)： 1316

-1421

1. 张竹圆，白洁，周方，等.两株河口湿地耐盐石油降解菌的生物学特性及降解能力研究[].海洋湖沼通报，2011, 1：

147-153

1. 郭若勤，杨玉楠，丁秀玲，等.嗜盐菌强化石油污染土壤生物修复过程的初步研究[].现代农业科学，2009, 16(11)：

71-74

1. Nicholson C A, Fathepure B Z. Biodegradation of benzene by halophilic and halotolerant bacteria under aerobic condr tions[J] AppliedEnvironmentalMicrobiology,2004,70(2)：1222-1225
2. Plotnikova E G, Altyntseva O V, Kosheleva I A, *t al.* Bacterial degraders of polycyclic aromatic hydrocarbons isolated fromsalt-contaminatedsoilsandbo**t**omsedimentsinsaltminingareas[J] Microbiology,2001,70(1)：51-58
3. 宋立超.盐土多环芳烃降解菌筛选分离及其污染修复应用基础研究[D].沈阳：沈阳农业大学，2011.
4. SaekiH, SasakiM, KomatsuK, *t al* Oilspi**l**remediationbyusingtheremediationagentJE1058BSthatcontainsa biosurfactant produced by *Gordonia* sp. strain JE-1058[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(2)： 572 一 577.
5. IloriM O, AmobiCJ, OdochaA C Factorsa**f**ectingbiosurfactantproductionbyoildegrading*A romonas* spp isola- tedfromatropicalenvironment[J] Chemosphere,2005,(7)：985-992
6. BatistaSB, MounteerA H, Amorim F R, *ta l* Isolationandcharacterizationofbiosurfactant／bioemulsifierproducing bacteria from petroleum contaminated sites[J]. *Bioresource Technology* , 2006, 97(6)： 868 — 875.
7. CostaSG, Nitschke M, HaddadR, *t al* ProductionofPseudomonasaeruginosaLBIrhamnolipidsfo**l**owinggrowth onBraziliannativeoils[J] ProcessBiochemistry,2006(2)：483-488 ,41
8. 胥九兵，迟建国，邱维忠，等.微生物菌剂对石油污染土壤的修复研究[].环境工程学报，2011, 5(6)： 1414-1418.
9. 韩慧龙，陈镇，杨健民，等.真菌-细菌协同修复石油污染土壤的场地试验[].环境科学，2008, 29(2)： 454 —460.
10. 卢桂兰，王世杰，郭观林，等.草炭强化对油田陈化油泥生物修复工程效果的影响[].环境工程技术学报，2011, 1

(5)： 389-395

[0]程国玲，李培军.石油污染土壤的植物与微生物修复技术[].环境工程学报，2007, 1(6)： 91-96.

1. 张太平，潘伟斌.根际环境与土壤污染的植物修复研究进展[].生态环境，2003, 12(1)： 76-80.
2. 王新新，白志辉，金德才，等.石油污染盐碱土壤翅碱蓬根围的细菌多样性及耐盐石油烃降解菌筛选[].微生物学通 报,2011,38(12)：1768-1777

[3]马传鑫.不同含盐量石油污染土壤的植物—微生物联合修复效率[D].天津：天津理工大学，2011.

1. Al-Mailem D M, SorkhohN A, Marafie M, *t al* OilphytoremediationpotentialofhypersalinecoastsoftheArabian

Gulf using rhizosphere technology]」]. Bioresource Technology, 2010, 101(15)： 5786 - 5792.

1. Nie M, Zhang X D, Wang J Q, *el al.* Rhizosphere effects on soil bacterial abundance and diversity in the Yellow River

Deltaic ecosystem as influenced by petroleum contamination and soil salinization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009 , 41(12)： 2535-2542.

1. 张松林，董庆士，周喜滨,等.人为石油污染土壤紫花苜蓿田间修复试验[J].兰州大学学报,2008, 44(1)： 47-50.
2. 牛明芬，郭书海,李风梅,等.稠油污染土壤的生物修复应用研究[].沈阳建筑大学学报，2006, 22(6)： 968-971.
3. 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[].环境监测管理与技术，2011, 23(3)： 47 — 51
4. 温军杰.重质油污染高含盐细粒土修复技术研究[D].青岛：中国海洋大学，2011.
5. LiD W, ZhangYB, QuanX,*et al* Microwavethermalremediationofcrudeoilcontaminatedsoilenhancedbycarbon fiber[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009 , 21(9)： 1290 - 1295.
6. 李婷婷，张玲妍，郭书海，等.完全对称电场对电动—微生物修复石油污染土壤的影响[].环境科学研究，2010, 10 (23)： 1262-1267
7. Chien Y C Fieldstudyofinsituremediationofpetroleumhydrocarboncontaminatedsoilonsiteusingmicrowaveener- gy[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199一200 : 457 - 461
8. Lu M，ZhongZZ，Qiao W，*eta l* Removalofresidualcontaminantsinpetroleum-contaminatedsoilbyFenton-likeoxi- dation [J] JournalofHazardous Materials，2010，179(1-3)： 604-611
9. GuieyssebB, Viklund G, Toes A C, *t al* CombineUV-biological degradation of PAHs[J]. Chemosphere, 2004(55): 1493-1499
10. Usman M, Faure P, Hanna K, *t al.* Application of magnetite catalyzed chemical oxidation (Fenton-like and persulfate)

fortheremediationofoilhydrocarboncontamination[J] Feul，2012，96： 270-276

1. Liang C, Bruell C J, Marley M C, *t al.* Persulfate oxidation for in situ remediation of TCE. II. Activated by chelated

ferrousion[J] Chemosphere，2004，55(9)： 1225-1233

Progress in Research on Remediation Technology of Petroleum

Contamination in Saline-Alkali Soil

**LIYong-xia，HUANG Ying**＊ **，XU Min-min，YANGJian，GAOFu-wei，SUNBo** (Shandong Academy of Environmental Science，Institute of Ecology and Soil Remediation，Jinan 250013，China)

Abstract：Soil salinization and petroleum contamination are dual problems for oil fields. The remediation of petroleum contamr nationinsaline-alkalisoilisabo**t**leneckproblemthatneedstobeaddressedurgently Basedontheanalysisofthecharacteris- ticsofpetroleumcontaminationinsaline-alkalisoil，sometechnologiesareintroducedconcerningtheremediationofcontamina- tedoilfield，suchas microbialremediation，phyto-microbialremediationandphysical／chemicalremediation Theresearchdi- rectionandemphasiswereprospectedaccordingtothecurrentstatusinthisfield

Key words:salinealkali soil； petroleum contamination； remediation technology