

真菌-细菌协同修复石油污染土壤的场地试验

韩慧龙¹, 陈镇², 杨健民³, 苗长春⁴, 张坤¹, 金文标⁴, 刘铮^{1*}

(1. 清华大学化学工程系, 北京 100084; 2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 3. 中国石油化工股份有限公司中原油田分公司采油五厂, 濮阳 457001; 4. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 采用真菌-细菌微生物制剂对中原油田不同类型石油污染土壤进行原位修复小试和中试. 第 1 期场地试验从 2004-11-05 ~ 2005-03-07, 共 122 d, 柴油、润滑油和石油的 TPH 降解率分别为 61.0%、48.3% 和 38.3%. 中试从 2005-05-18 ~ 2005-11-03, 共历时 161 d. 人工污染土壤、新鲜型石油污染土壤和陈旧型污染土壤的石油烃降解率分别达到 75.0%、46.0% 和 56.6%, 而对照组的降解率分别为 15.7%、20.0% 和 28.0%. 分析了修复过程中土壤中石油烃各组分含量的变化, 结果表明真菌-细菌微生物制剂对饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物均具有较好地降解能力. 分别在修复后的人工污染、新鲜型污染和陈旧型污染地块种植小麦, 产量分别为当地正常耕地产量的 100%、57.2% 和 70.3%. 本研究进一步证实了真菌-细菌协同修复石油烃污染耕地的可行性及其良好的应用前景.

关键词: 协同降解; 生物强化; 生物修复; 石油; 土壤; 中原油田

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0454-08

Field Scale Demonstration of Fungi-Bacteria Augmented Remediation of Petroleum-Contaminated Soil

HAN Hui-long¹, CHEN Zhen², YANG Jian-min³, MIAO Chang-chun⁴, ZHANG Kun¹, JIN Wen-biao⁴, LIU Zheng¹

(1. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. The 5th Oil Production Factory, Zhongyuan Oilfield Company, China Petroleum & Chemical Corporation, Puyang 457001, China; 4. Research Institute in Shenzhen, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Pilot demonstration of the fungal-bacterial augmented *in situ* remediation of petroleum contaminated soil was carried out in Zhongyuan Oilfield, Henan, using artificially prepared soil, newly and aged contaminated soil as sample, respectively. For the first run of the experiment started from Nov. 5, 2004 and lasted for 122 days, the removal of contaminate was 61.0%, 48.3% and 38.3% for diesel, lube and crude oil, respectively. For the second run started from May 18, 2005 and lasted for 161 days, the removal of TPH was 75% for the artificially contaminated soil sample while 46.0% and 56.6% for the fresh and aged contaminated soil. The removal of high concentration salt was involved in the remediation of the freshly and aged contaminated soil. The changes of the petroleum composition was monitored during the remediation process, which confirmed the effective degradation of alkanes, aromatic hydrocarbons and non-hydrocarbon compounds by the fungi-bacteria consortia, as compared to that obtained without the inoculation of the consortia. To further demonstrate the remediation, wheat was planted in above reclaimed soil. While wheat production in the reclaimed artificially contaminated soil yielded nearly as much as that obtained in the normal farmland, the output of wheat in the reclaimed refresh and aged contaminated soil was 57.2% and 70.3% of the averaged output of the normal farmland. The above results further confirmed the workability of fungal-bacterial augmented *in situ* remediation of petroleum contaminated soil and its application potential as well.

Key words: synergistic biodegradation; bioaugmentation; bioremediation; petroleum; soil; Zhongyuan Oilfield

石油开采、加工和运输过程中由于事故、输油管道和储油罐泄漏所造成的土壤和地下水污染已成为全球性的严重问题. 我国石油企业每年产生落地原油约 7 万 t^[1], 且石油污染往往伴随着高矿化度和高盐含量的产出水污染. 以中原油田为例, 多数污染由油、水输送管道穿孔泄漏造成, 单块污染面积从几亩至数百亩不等, 受污染土壤中石油烃含量从 1% ~ 10% 不等. 石油与产出水混合污染不仅造成土壤植被的死亡和有机污染物高度富集, 而且还由此造成全盐含量严重超标、土壤高度板结、氧气及营养物质传递困难、植物及微生物难以生存, 土壤的生态环境

十分恶劣, 治理难度大^[2~4].

生物修复技术是治理石油污染土壤的有效技术^[5~11]. 李培军等^[12]采用堆腐技术对辽河油田石油污染土壤进行了生物修复研究. 作者在前期工作中提出并研究了采用真菌-细菌协同生物修复石油污染土壤的新技术及工艺, 通过筛选适宜真菌-细菌组

收稿日期: 2007-01-30; 修订日期: 2007-03-13

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科学技术研究开发项目 (303060)

作者简介: 韩慧龙 (1979 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为石油污染土壤的生物修复, E-mail: han_hui98@mails.thu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: liuzheng@mail.thu.edu.cn

成复合微生物制剂,可利用其代谢酶系的互补性及真菌菌丝体对细菌迁移的促进来强化土壤中石油污染物的生物降解.在此基础上,本课题组在中原油田现场开展原位真菌-细菌协同生物强化治理中试研究,采用本研究室前期在中原油田筛选的刺孢小克银汉霉菌 *Cun. echinulata* 和阴沟肠杆菌 *E. cloacae* 所组成的真菌-细菌复合微生物制剂^[13,14],分别针对人工污染地块以及中原油田现场新鲜污染和陈旧型污染地块开展修复试验.在修复过程中定期分析土壤石油污染物组成的变化,并对土壤理化性质进行监控,最后通过种植苜蓿和小麦来进一步确认土壤修复效果.

1 材料与方法

1.1 试验材料

第 1 期现场试验石油烃污染土壤:小试试验采用人工配制污染土壤作为现场试验的处理对象,

3 类地块中的污染物分别为柴油、润滑油和原油,各类污染物在各地块中单独存在,每类污染土壤面积为 5 m²,深度为 25 cm.3 类地块中污染物初始含量分别为柴油 2.0%,润滑油 11.5%,原油 3.5%.

第 2 期现场试验石油烃污染土壤:中试试验针对中原油田存在的 3 种类型污染土壤进行了原位生物强化试验,供试土壤的信息见表 1,供试土壤的土壤质地为砂粒 18.7%,粉粒 70.7%,粘粒 10.6%.

化肥:农用尿素、磷酸二铵、硫酸钾.
木屑:采用木材加工厂生产过程中产生的松木木屑,颗粒度为 1~3 mm.

原油样品采自中原油田,该原油样品中饱和烃、芳香烃、沥青胶质及其他非烃化合物质量分数分别为 46.6%、18.8%、15.0%和 19.6%.

真菌-细菌微生物制剂:由筛选自中原油田石油污染土壤的石油烃优势降解菌组成复合微生物制剂^[13].

表 1 第 2 期试验处理的污染土壤基本信息

Table 1 Information of contaminated soils for the second run of demonstration

污染土壤类型	污染时间	来源	面积/m ²	平均油含量 (质量分数)/%	平均盐含量 /mg·g ⁻¹
人工配制石油污染	5 d	未污染土壤与石油混配	60	1.8	380
陈旧型石油和油田产出水混合污染	3 a	中原油田采油二厂污染耕地	90	2.0	4 200
新鲜型石油和油田产出水混合污染	10 d	中原油田采油五厂污染耕地	20	1.5	4 600

1.2 试验方法

1.2.1 第 1 期现场试验

第 1 期现场试验从 2004-11-05~2005-03-07,共 122 d,试验地点为河南濮阳中原油田,每一实验地块面积均为 5 m²,深度为 25 cm.原位生物修复方法按照文献[15]所述进行:翻耕后施加木屑及文献[13]所述的微生物制剂,调整土壤水分含量在 20%~25%之间,按照 C:N:P:K 比例为 100:10:1:2 调整土壤中 N、P、K 的含量,每 2 周翻耕 1 次.每 2 d 测量土壤 3 个参数(湿度、电导率和温度),定期检测土壤中微生物数量和总石油烃含量变化.40 d 后,现场气温降至 0℃以下,土壤表层被冻实,故停止原位测定土壤 3 个参数.

1.2.2 第 2 期现场试验

第 2 期现场试验从 2005-05-18~2005-11-03,共 161 d,试验地点为河南濮阳中原油田.人工污染土壤治理的操作与第 1 期试验相同.新鲜和陈旧型石油污染土壤分别采自中原油田采油五厂和二厂,面积分别为 60、20 和 90 m²,深度为 25 cm.具体操作为将土壤翻耕后施加石膏,添加木屑,定期灌溉将污染

地块盐含量降低至耕地正常水平(3~6 g·kg⁻¹);然后实施真菌-细菌强化生物修复操作,步骤同第 1 期现场试验.每种污染地块各设 10 m² 的对照组,对照组不采用任何治理措施.为考察修复后耕地的种植能力,分别在 2005-09 和 2005-10 在修复后土壤中种植苜蓿和小麦.

1.2.3 土壤中总石油烃含量(TPH)的测定方法

采用 EPA 3546 推荐方法测定土壤中石油烃含量^[16].称取 2 g 干土样放入 CEM 萃取罐中,加入 25 mL 正己烷和丙酮的混合液(1:1,体积比)后拧紧罐体.设定 CEM 操作参数为功率 1 200 W,升温 5 min 至 120℃,保温 30 min.待冷却到 40℃后,取出罐体.将萃取液过滤,置于已称重的烘干三角瓶中,放入通风厨中蒸干萃取液至恒重,称重后按重量法计算土壤中的 TPH 含量.

1.2.4 石油中饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物的测定^[17]

采用氧化铝层析柱分离石油中的饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物.将石油样品配制成 0.05 g/mL 的正己烷溶液,上样后用 50 mL 正己烷洗出饱

和烃,用干燥称重后的三角瓶接收流出液;然后用 50 mL 苯清洗芳烃,用干燥称重后的三角瓶接收流出液;最后用 50 mL 氯仿与甲醇的混合液(3:1,体积比)清洗沥青、胶质等非烃化合物,用干燥称重后的三角瓶接收流出液.待三角瓶中溶剂挥发至三角瓶恒重后称重,分别计算出样品中饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物的含量.

1.2.5 土壤温度、湿度和电导率原位测量

采用 WET 土壤三参数速测仪测量土壤温度、湿度和电导率.

1.2.6 土壤盐含量、电导率精密测量

采用 Orion 150A 精密型电导测量仪测量土壤盐含量和电导率,具体操作为:取干燥后土壤样品 5 g,加入 25 mL 去离子水,160 r/min 振荡 20 min 后,插入电极测量液体的总盐含量和电导率,以此表征土壤的盐含量和电导率.

1.2.7 小麦产量测定方法

麦田中采用对角线法选取 5~10 个样点,四周样点距离地边 1 m 以上,每个样点 1 m×1 m 为 1 个样方.在每个样方内数出有效穗数,求出平均单位面积穗数.在每个样点内随机数取 20 株的每穗结实粒数,求出平均每穗实粒数.将所有选定样本的植株全部脱粒晒干后,测定其千粒重.产量计算按如下公式计算:

理论产量(kg/hm²) = 10 000(m²/hm²)
× 单位面积穗数(穗/m²)
× 每穗实粒数 × 千粒重(g)/10⁶

1.2.8 细菌和真菌的计数

细菌计数采用稀释平板计数法.用 0.2% 焦磷酸钠溶液浸泡土壤样品,经超声、振荡后进行平板计数.场地试验中按照每 10 m² 取 3 个平行样品的原则进行取样分析,并对数据进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 第 1 期场地试验

本试验旨在考察真菌-细菌协同强化修复技术对于柴油、润滑油和原油 3 种不同油品污染土壤的治理效果.实验中监控实验地块土壤温度、湿度、电导率、微生物数量以及各种石油烃含量的变化,结果如图 1 所示.从图 1 中可看出,土壤的湿度在整个实验过程中基本处于 20%~30% 之间,电导率平均在 4 mS/cm,与正常土壤的电导率保持一致.试验开始初期,地温约为 12℃,10 d 后低温降至 6℃ 以下,20 d 后接近 0℃.40 d 后土层温度降至 0℃ 以下,土层表

层被冻实,故停止 3 个参数的原位测量.

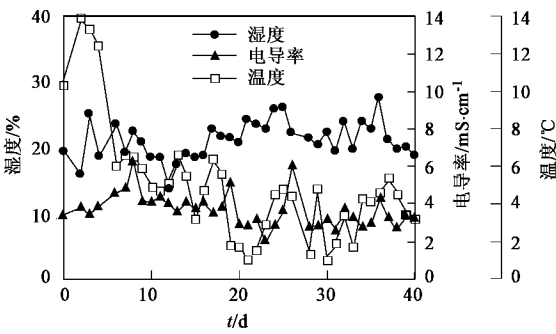


图 1 第 1 期场地试验期间土壤的温度、湿度和电导率
Fig.1 Soil temperature, moisture and conductivity during the first run of experiment

图 2 为污染和空白地块对照接种真菌-细菌微生物制剂后细菌数量的变化.未接种微生物制剂前,土壤中原始细菌数量约为 10⁷ CFU/g.从图 2 中可以看出,初始阶段加入微生物制剂后,2 个地块中细菌的数量均较高.小试试验空白对照中不含石油烃,细菌数量降低较快,30 d 后降至 10⁷ CFU/g.而在石油污染的土壤中,细菌的数量保持在 10⁹ CFU/g,在润滑油和柴油污染的土壤中细菌数量也保持在 10⁸ CFU/g 以上.说明制剂中的细菌在污染土壤中能够稳定地存活,受土著微生物的竞争影响不大.

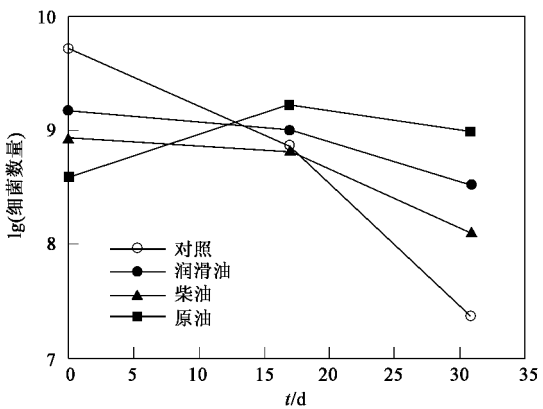


图 2 第 1 期场地试验土壤中细菌数量
Fig.2 Bacterial population in contaminated soils during the first run of experiment

图 3 为土壤冻实前真菌在污染土壤中的生长情况以及土壤解冻后真菌的复苏情况,真菌菌丝如箭头所示.从图 3 中可以看出,虽然整个试验过程都在冬天进行,温度较低,但真菌在受石油烃污染的土壤中的仍可生长.土壤冻实期间,真菌菌丝体明显减少,但土壤解冻后,真菌能够很快恢复活性.

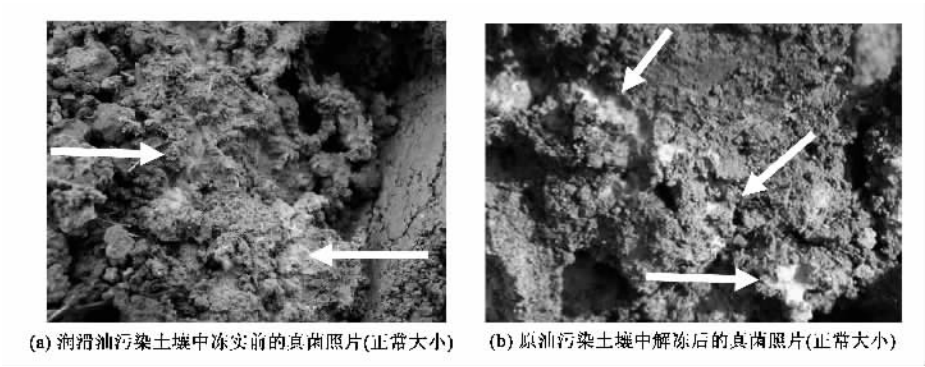


图 3 第 1 期场地试验期间真菌在污染土壤中的生长情况

Fig.3 Growth of *Cun. echinulata* in contaminated soils during the first run of experiment

图 4 为各类污染地块中 TPH 降解率的变化.从图 4 可以看出,经过 122 d 的生物强化治理,柴油污染地块的降解率最高,可达 61.0%,润滑油其次,达到 48.3%,原油污染地块的降解率达到 38.3% .

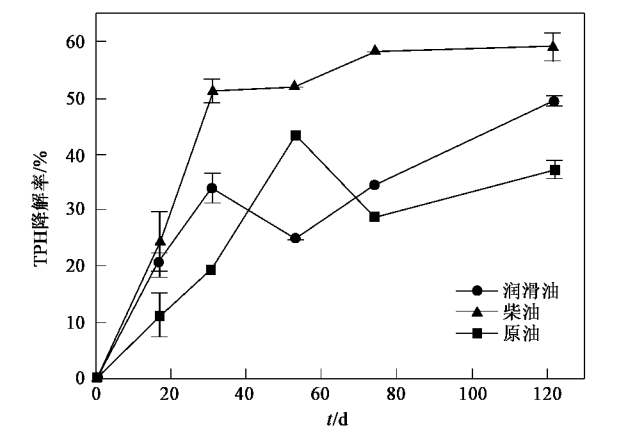


图 4 第 1 期场地试验期间各类污染土壤中 TPH 降解率的变化

Fig.4 Variation of TPH removal in contaminated soils during the first run of experiment

2.2 第 2 期场地试验

2.2.1 环境因素对修复过程的影响

表 2 给出了中原油田 5~10 月份气候变化的情况.

表 2 中原油田 5~10 月份气候变化 ¹⁾				
Table 2 Weather information of Zhongyuan Oilfield from May to October				
月份	平均气温/℃	降水/mm	日照/h	评价
5	20.8	70	241	晴天多云
6	~ 28	121	200	高温 20 d
7	26.7	304	118	洪涝灾害,降水偏多
8	24.8	119	154	降水偏多,气温偏低
9	22	198	100	降水异常偏多
10	14.7	50	—	降水偏多

1) 数据来源:河南省气象局 <http://www.hnqx.cn/fuwu05.jsp>

从表 2 看出,中原油田 7~10 月降水偏多,与同期相比,中原油田降雨高于历史平均水平.降雨量增大造成土壤含水量较高,不利于生物降解的进行.

在第 2 期现场试验中,各类供试土壤中地温保持在 20~37℃ 之间,其中多数时间在 25℃ 以上,适合生物修复治理.

2.2.2 真菌的生长状况

图 5 为修复过程中各类污染地块中真菌的生长情况的典型情形,真菌菌丝如箭头所示.其中图 5(a) 为人工污染地块,而图 5(b) 为陈旧型污染地块.实验中观察到人工污染土壤中真菌生长迅速,接种 1 周以后即可观察到真菌的大量生长,而陈旧型污染地块中在盐污染治理结束后才观察到土壤中有真菌生长.

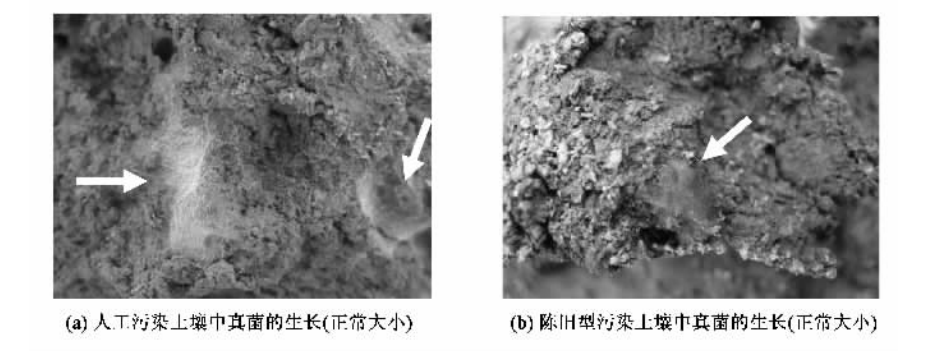


图 5 第 2 期中试试验阶段各污染土壤中真菌的生长状况

Fig.5 Growth of *Cun. echinulata* in contaminated soils during second run of demonstration

2.2.3 总石油烃含量的变化

图 6 为人工污染地块土壤湿度、TPH 含量及降解率的变化. 由图 6 可知, 经过治理, TPH 含量由 1.90% 降至 0.47% (质量分数), 降解率达到 75.0%; 而对照试验中 TPH 含量仅由 1.84% 降至 1.43% (质

量分数), 降解率仅为 15.7%. 在实验初期的 40 ~ 60 d 中石油烃降解较快, 60 d 后降解率即达到 57.0%. 在试验阶段中后期, 由于降雨频繁导致土壤湿度高于 30% 的时间较长, 修复速率趋缓.

图 7 为新鲜型污染土壤中电导率、TPH 含量及

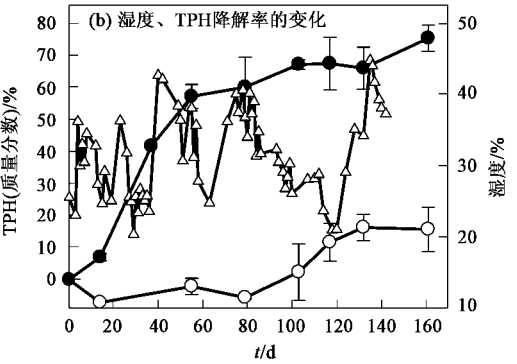
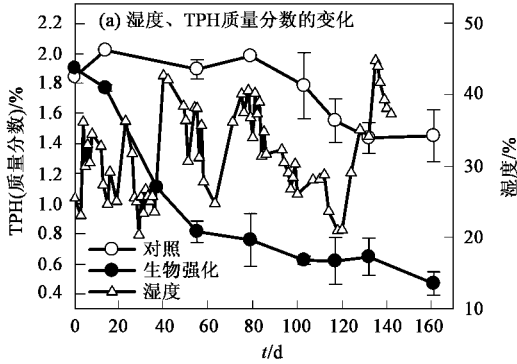


图 6 人工污染土壤中湿度、TPH 质量分数及降解率

Fig.6 Soil humidity and TPH content in artificially contaminated soil

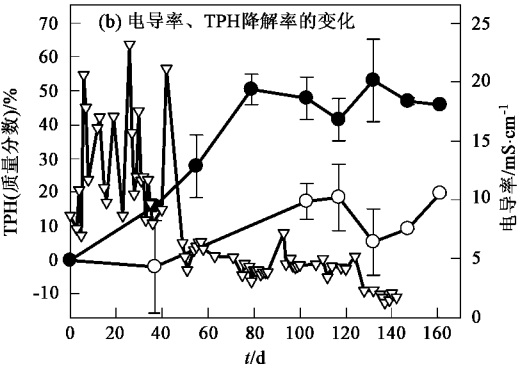
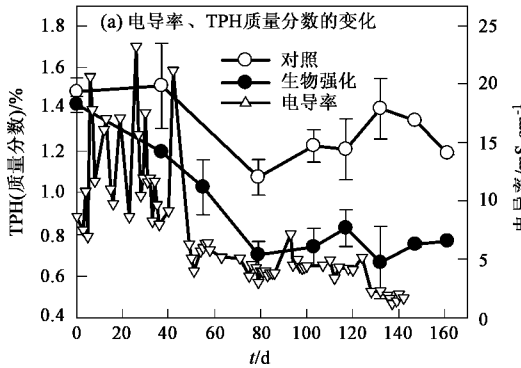


图 7 新鲜型石油污染土壤中电导率、TPH 质量分数及降解率

Fig.7 Soil conductivity and TPH content in the freshly contaminated soil

降解率的变化. 试验开始后首先采用灌溉的方法将盐含量降低至正常耕地的水平(全盐含量 3 ~ 6 g/kg 或电导率 4 ~ 8 mS/cm), 这期间实验地块的电导率变化如图 8 所示. 从图 7 可知, 使污染地块的电导率值降低至正常耕地水平约需 40 d 的时间, 而在此期间内土壤盐含量超标, 微生物制剂在污染土壤中难以生存. 同样, 受到试验中后期降雨偏多的影响, 中后期修复进展趋缓. 综合计入前期除盐和后期雨季导致土壤含水率超标的影响, 对于新鲜型污染地块的生物修复有效时段仅为 50 d. 另外, 新鲜型污染地块地势较低, 雨季中经常浸泡在水中, 因此该地块的修复效率低于陈旧型污染地块. 由图 7 中 TPH 含量和降解率变化可知, 经过治理, 石油烃含量由 1.42% 降至 0.77% (质量分数), 降解率达到 46.0%; 而对

照试验中 TPH 含量仅由 1.48% 降至 1.19% (质量分数), 降解率为 20.0%.

图 8 为陈旧型污染地块中电导率、TPH 含量及降解率的变化. 同样采用灌溉的方法将盐含量降低至正常耕地的水平. 对于陈旧型污染地块的生物修复有效时段仅为 50 d. 由图 8 可知, TPH 含量由 2.04% 降至 0.88% (质量分数), 降解率达到 57.0%; 而对照试验中 TPH 含量仅由 1.96% 降至 1.41% (质量分数), 降解率为 28.0%.

2.2.4 石油烃中饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物含量变化

表 3 为各污染地块的饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物的降解率. 从表 3 中可以看出, 各污染地块中的饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物都有明

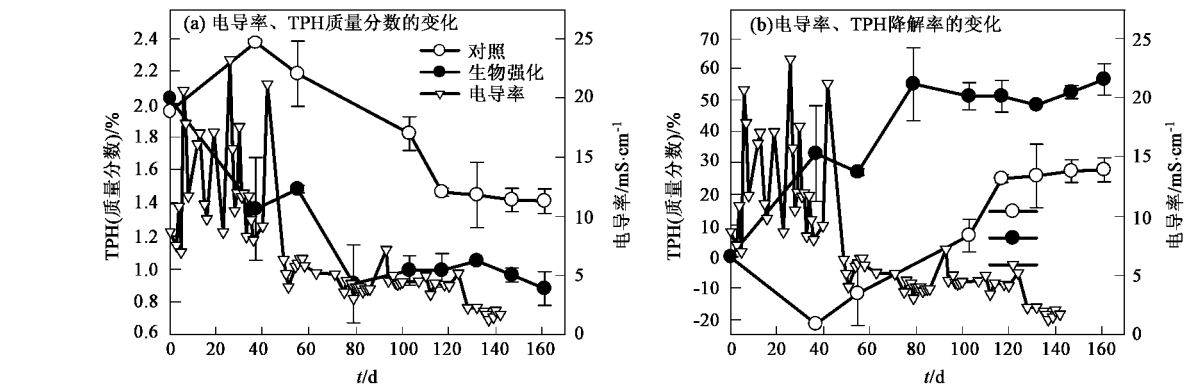


图 8 陈旧型石油污染土壤中电导率、TPH 质量分数及降解率
Fig.8 Soil conductivity and TPH content in the aged contaminated soil

表 3 治理前后各类污染土壤中石油烃的组分变化				
Table 3 Changes of the petroleum composition in contaminated soils				
供试土壤	TPH 降解率 1%	饱和烃 降解率 1%	芳烃降解 率 1%	沥青胶质 及非烃化 合物降解 率1%
人工配制污染对照	15.7	53.0	5.8	-29.2
治理后人工配制污染土壤	75.0	91.9	74.0	51.8
新鲜型污染对照	19.7	63.9	-15.3	-8.5
治理后新鲜型污染土壤	45.9	76.7	36.1	17.0
陈旧型污染对照	27.8	56.9	-2.2	13.5
治理后陈旧型污染土壤	56.6	83.7	52.6	26.0

显的降解,其中饱和烃降解率最高,沥青胶质及非烃化合物降解率最低,说明石油烃中的饱和和烃组分最易被微生物制剂所利用.各对照组试验中,饱和烃的降解率也较高,说明土著微生物也具有降解饱和烃的能力;而芳烃、沥青胶质及非烃化合物的降解率较

低,甚至出现增加的情况,这可能是由于土著微生物在降解饱和烃时无法将产生的中间产物继续降解,这些中间产物的极性与芳烃或沥青胶质及非烃化合物相近,在氧化铝层析测定过程中,作为同极性物质被一同洗出,由此造成芳烃、沥青胶质及非烃化合物含量的增加.可见土著微生物对芳烃、沥青胶质及非烃化合物的降解能力较差,对饱和烃也不能完全降解.上述组分降解率分析结果显示本研究所采用的真菌-细菌微生物制剂对石油烃中的各种组分都有较好的降解能力.

2.2.5 治理后土壤的种植能力考察

为考察土壤的植被生长能力,在 9 月份即在初步修复的人工污染地块中[石油烃含量由 1.90%降至 0.47%(质量分数)]种植了苜蓿,在污染地块的对照组中同样种植了苜蓿,但未见出苗.图 9 为修复地块中苜蓿的生长情况的典型照片,苜蓿出苗率高于 90%.



图 9 修复后人工污染地块中苜蓿的生长情况(正常大小)
Fig.9 Growth of purple medic in the reclaimed artificially contaminated soil

为进一步确认修复后地块的作物耕作能力,在修复结束后即在实施了冬小麦播种.图 10 分别给出

了陈旧型混合污染地块中对照组和试验土壤中小麦生长情况,如箭头所示.由图 10 可见,未经治理的对

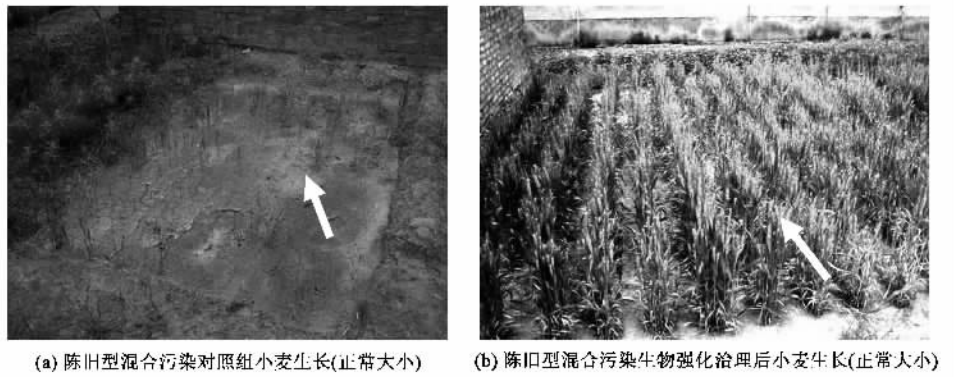


图 10 陈旧型混合污染土壤中小麦生长状况

Fig.10 Growth of wheat in the aged contaminated soil by petroleum and produced water

照组中小麦长势较差;生物强化治理后的土壤中小麦生长较好,且出苗均匀.

各地块的小麦产量如表 4 所示.从表 4 可知,各类污染地块对照组的小麦产量均为 0,而人工污染地块的产量与正常耕地相当;新鲜型和陈旧型污染地块的产量分别达到正常耕地的 57.2%和 70.3%,已基本恢复种植能力.

表 4 正常耕地及各类污染土壤中的小麦产量

地块编号	and control sites			
	平均单位 面积穗数	平均每穗 实粒数	千粒重 /g	理论产量 /kg·hm ⁻²
正常耕地	512.5	42.333	37.5	8 140.5
人工污染对照组	—	0	0	0
人工污染治理后土壤	518	41	38.4	8 154.0
新鲜型污染对照组	—	0	0	0
新鲜型污染治理后土壤	367.5	40	31.6	4 653.0
陈旧型污染对照组	—	0	0	0
陈旧型污染治理后土壤	486	32.3	36.4	5 722.5

我国颁布的《中华人民共和国土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)及其他与土壤污染防治相关的标准中未涉及总石油烃(TPH)的临界值.美国德克萨斯州和新泽西州规定的土壤中 TPH 的临界值为 10 000 mg/kg,荷兰规定的土壤中 TPH 的临界值为 5 000 mg/kg.本研究所述石油烃污染土壤的原位生物修复现场试验中,经过 161 d,人工污染土壤、新鲜型污染土壤和陈旧型污染土壤中 TPH 含量可分别降至 0.47%(即4 700 mg/kg)、0.77%(即7 700 mg/kg)和 0.88%(即8 800 mg/kg).经过原位生物修复治理,场地试验的土壤质量已达到国外土壤修复的临界值标准.

3 结论

(1)本研究将真菌-细菌协同修复技术应用于中

原油田污染耕地的场地修复过程,结果表明,真菌-细菌微生物制剂在土壤中能够抵御土著微生物的竞争作用,生长活性高,对石油烃中饱和烃、芳烃、沥青胶质及非烃化合物的降解能力均高于土著微生物,对石油烃中的各个组分均具有很高的降解能力.通过实施真菌-细菌生物强化修复,新鲜和陈旧型污染地块均基本恢复耕种能力,上述结果证实了本研究组前期所提出的真菌-细菌强化修复石油污染耕地技术的可行性.

(2)现场试验还表明,原位生物修复过程因为是在大气开放环境下进行,气温、降雨等不可控因素对于修复过程具有很大的影响,应根据污染耕地所在地域的气候特点,选择地温较高、降水量适中的季节进行生物修复以提高生物修复过程的效率.上述场地试验修复及种植作物的结果对于真菌-细菌协同修复石油烃污染耕地技术的进一步完善以及更大规模的工业实施提供了借鉴和依据.

参考文献:

[1] 刘文霞,孟祥远,冯建灿,等.中原油田耕地污染分析[J].农业环境保护,2002,21(1):56-59.

[2] Carty D J, Crawley W W, Priebe W E. Remediation of salt-affected soils at oil and gas production facilities [R]. American Petroleum Institute, Health and Environmental Services Department, API Publication Number 4663, 1997.

[3] Rajaretnam G, Spitz H B. Effect of leachability on environmental risk assessment for naturally occurring radioactive materials in petroleum oil fields[J]. Health Physics, 2000, 78(2): 191-198.

[4] Otton J K, Asher-Bolinder S, et al. Effects of produced waters at oilfield production sites on the Osage Indian Reservation, Nrotheastern Oklahoma[R]. USA: U. S. Geological Survey Open-File Report 97-28, 1997.

[5] Swannell R P J, Head I M. Bioremediation comes of age[J]. Nature, 1994, 368(6470): 396-397.

- [6] Boopathy R. Factors limiting bioremediation technologies [J]. Bioresource Technology, 2000, **74**: 63-67.
- [7] 邢新会,刘则华.环境生物修复技术的研究进展[J].化工进展,2004,**23**(6):579-584.
- [8] Sabate J, Vinas M, Solanas A M. Laboratory-scale bioremediation experiments on hydrocarbon-contaminated soils [J]. International Bioremediation & Biodegradation, 2004, **54**: 19-25.
- [9] Balba M T, Al-Daher R, Al-Awadhi N, *et al* . Bioremediation of oil-contaminated desert soil: the Kuwaiti experience [J]. Environment International, 1998, **24**(1-2): 163-173.
- [10] 何翊,魏薇,吴海.菌剂-菌根联合修复石油污染土壤的实验研究[J].土壤,2004,**36**(6):675-677.
- [11] 欧阳威,刘红,于勇勇,等.微生物强化处理与堆制强化处理含油污染对比试验[J].环境科学,2006,**27**(1):160-164.
- [12] 李培军,台培东,郭书海,等.辽河油田石油污染土壤的2阶段生物修复[J].环境科学,2003,**24**(3):74-78.
- [13] 韩慧龙,汤晶,江皓,等.真菌-细菌修复石油污染土壤的协同作用机制研究[J].环境科学,2008,29(1):189~195.
- [14] 中国石油化工股份有限公司,清华大学.一种用于石油污染物降解的液体微生物制剂:中国,200510130676.3[P].2006.07.12.
- [15] 中国石油化工股份有限公司,清华大学.一种石油污染土壤的原位生物修复方法[P].中国专利:200510130674.4,2006-06-14.
- [16] US EPA 3546 Microwave Extraction[S]. www.epa.gov/sw-846/pdfs/3546.
- [17] 谢重阁.环境中石油污染物的分析技术[M].北京:中国环境科学出版社,1987.