

石油污染盐碱土壤的淋洗施肥修复

王新新, 白志辉, 金德才, 吕作鹏, 韩 祯, 庄国强 *

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要:采用淋洗施肥修复方法处理石油污染盐碱土壤,评价该修复方法对石油污染盐碱土壤的修复效果,并且采用最大或然数和 Biolog 方法对土壤微生物数量和微生物群落水平生理特性进行研究。结果表明,经过 182 d 的培养,淋洗施肥处理中油和脂的降解率分别比对照处理和施肥处理高 $(19.7\pm 4.3)\%$ 和 $(13.8\pm 3.4)\%$,土壤盐分去除率分别比对照处理和施肥处理高 $(66.5\pm 2.9)\%$ 和 $(41.3\pm 6.2)\%$,说明该处理是一种修复石油污染盐碱土壤的有效方式。淋洗施肥处理明显提高异养细菌、石油烃降解菌、烷烃降解菌和多环芳烃降解菌数量和土壤微生物活性,促进了微生物对土壤中油和脂的降解。此外,淋洗施肥处理提高了土壤微生物 Shannon 多样性指数和 Simpson 指数,促进了微生物种群的稳定,这暗示着土壤微生物种群正在逐渐恢复。

关键词:石油污染盐碱土壤;淋洗;施肥;修复;最大或然数;Biolog

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0331-07

Remediation of Petroleum-Contaminated Saline-Alkali Soil by a Combination of Leaching and Fertilization

WANG Xin-xin, BAI Zhi-hui, JIN De-cai, LÜ Zuo-peng, HAN Zhen, ZHUANG Guo-qiang*

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: A method was developed to remediate petroleum-contaminated saline-alkali soil using a combination of leaching and fertilization. The degradation efficiency of oil and grease was $(19.7\pm 4.3)\%$ higher in soil treated by leaching combined with fertilization than that in control soil, and was $(13.8\pm 3.4)\%$ higher than that in soil treated by fertilization. In addition, the removal efficiency of salinity was $(66.5\pm 2.9)\%$ higher in soil treated by the combination of leaching and fertilization than that in control soil, and was $(41.3\pm 6.2)\%$ higher than that in soil treated by fertilization. The results suggested that the treatment of leaching combined with fertilization might be an efficient method for the remediation of petroleum-contaminated saline-alkali soil. The number of heterotrophic bacteria, petroleum hydrocarbon degraders, alkane degraders and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degraders and soil microbial activity increased significantly in the treatment of leaching combined with fertilization, further suggesting the microbial degradation of oil and grease was enhanced. Shannon index and Simpson index of the microbial community also increased markedly in such treatment, implying the microbial community was in recovery.

Keywords: petroleum-contaminated saline-alkali soil; leaching; fertilization; remediation; MPN; Biolog

我国华北平原、松嫩平原和西北地区均分布有大面积的盐碱土壤^[1-3],同时上述地区均拥有丰富的油气资源,并建立了多个大型油田。石油生产过程中容易发生石油污染,形成石油污染盐碱土壤^[4]。由于该类土壤难以自然恢复,如何采用人工强化措施修

复该类土壤成为亟待解决的重要任务。近年来,采用生物修复措施治理该类土壤已有部分研究报道。Betancur-Galvis 等^[5]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^[6]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。但是该类土壤含盐量高和土壤肥力低等特性仍抑制了土壤微生物的降解活性,严重阻碍了该类土壤修复。采用淋洗措施促进 NaCl 等土壤盐分的去除,降低土壤含盐量,可以部分解除盐分对土壤微生物的胁迫^[7]。采用施肥措施补充营养元素,提高土壤肥力,可以促进土壤微生物降解活性^[8-11],有利

收稿日期:2011-07-22

基金项目:中国科学院知识创新工程(kzcx1-yw-06-03);北京市科技计划(D101105046410004);中国科学院生态环境研究中心知识创新工程(ZXPP2009113001)

作者简介:王新新(1983—),男,博士研究生,主要从事环境微生物学研究。

* 通讯作者:庄国强 E-mail: gqzhuang@rcees.ac.cn

于该类土壤的修复^[12-14]。然而,关于采用淋洗施肥措施修复石油污染盐碱土壤的研究罕见报道,该修复措施的有效性并不清楚。

因此,本文采用淋洗施肥措施对石油污染盐碱土壤进行修复,动态监测油和脂含量变化,以了解该修复措施对土壤中油和脂的降解效果。同时采用最大或然数(most probably number,MPN)法和 Biolog 方法对土壤微生物数量和微生物群落水平生理特性进行研究,以期获得微生物群落的信息,为了解微生物在该修复过程中起的作用提供线索。

1 材料与方法

1.1 供试材料

采集某油田污染区域 0~20 cm 表层土壤,去除植物残根和石砾后,自然风干,过 2 mm 筛,4 ℃保存。采用常规分析方法^[15]分析土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、pH 值、含水量和含盐量等基本理化性质(表1)。

1.2 试验方案

将 2 kg 土壤装入直径 8 cm、高 50 cm、底部排水孔直径 0.8 cm 的有机玻璃柱中。设置施肥处理(F)、施肥淋洗处理(F+L)和对照处理(CK)共 3 个处理,每个处理 3 个重复。施肥处理:土壤中添加 3%的牛粪有机肥,混合均匀。施肥淋洗处理:根据预实验结果,采用 1 300 mL 蒸馏水对土壤进行淋洗,随后加入 3%的牛粪有机肥,混合均匀。以未做任何施肥和淋洗处理的土壤做为对照处理。土壤保持约 60%田间含水量,室温避光放置。分别于第 0、45、90、152 d 和 182 d 采样,用于后续油和脂含量分析和土壤微生物学分析。

1.3 油和脂含量分析

油和脂含量采用 Mishra 等^[16]报道的重量法测定。称取 10 g 风干土壤样品,与 1 g 无水 Na₂SO₄ 混匀。采用 100 mL 正己烷、二氯甲烷和氯仿分别连续超声浸

提 20 min。浸提液用无水 Na₂SO₄ 除水,置于已知重量的烧杯中,室温挥发至恒重,重量法测定。

1.4 微生物计数

采用 5 管 MPN 法分别对土壤中的异养细菌、石油烃降解菌、烷烃降解菌和多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons,PAHs)降解菌进行计数^[17-18]。

1.5 Biolog 分析

采用 Biolog 微生物自动分析系统(Biolog, Hayward, CA, USA)对土壤微生物群落水平生理特性进行分析^[19]。称取相当于 10 g 风干土壤的新鲜土壤,加入 100 mL 无菌的 0.145 mol·L⁻¹ 的 NaCl 溶液,180 r·min⁻¹ 摇床振荡 20 min,静置 5 min,取上层土壤浸提液,用上述 NaCl 溶液梯度稀释至 1 000 倍。加入到 Biolog GN2 微孔板中,每孔添加 150 μL。25 ℃恒温培养,每隔 24 h 读取 590 nm 和 750 nm 波长下的吸光值,培养时间共 240 h。孔的平均颜色变化率(average well color development,AWCD)按照 Garland 等^[20]报道的方法计算。

1.6 统计分析

采用 SPSS 13.0 for windows 统计软件对所得数据进行方差分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 土壤油和脂含量以及土壤含盐量的动态变化

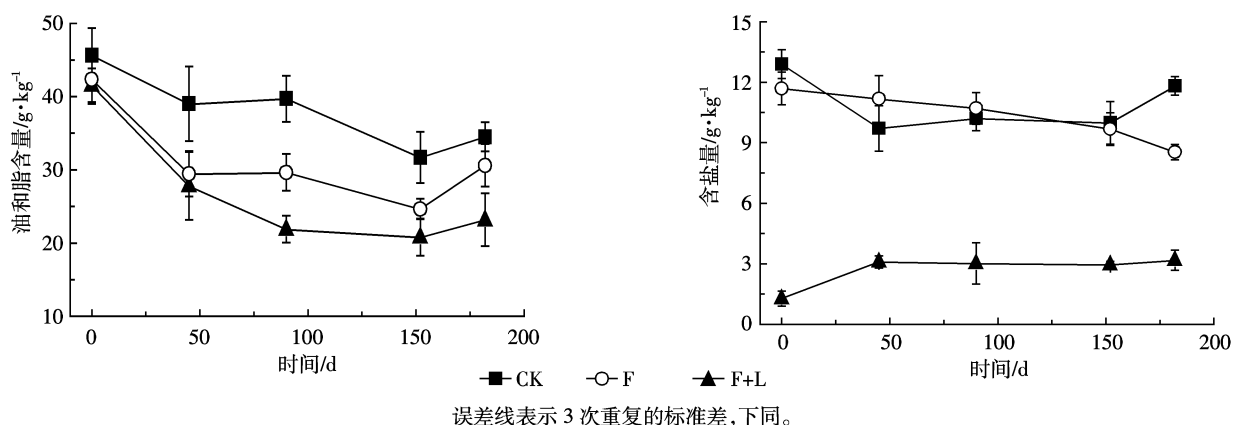
采用淋洗施肥措施对石油污染盐碱土壤进行修复,土壤中油和脂的降解动态如图 1 所示。起始浓度为(45.7±3.7)g·kg⁻¹ 的油和脂在对照处理中随处理时间延长浓度逐渐降低,182 d 后浓度降低至(34.5±2.0)g·kg⁻¹,降解率为(24.5±4.4)%。施肥处理的油和脂含量同样逐渐降低,182 d 后浓度降低至(30.6±2.9)g·kg⁻¹,降解率为(27.6±6.9)%,高于对照处理降解率。淋洗施肥处理油和脂含量降低最为明显,182 d 后降低至(23.2±3.6)g·kg⁻¹,降解率为(44.2±8.7)%,显著(*P*<0.05)高于对照处理和施肥处理降解率,分别高出(19.7±4.3)%和(13.8±3.4)%。这说明淋洗施肥处理可以明显促进土壤油和脂的降解。

同时监测土壤含盐量的动态变化。对照处理起始浓度为(12.9±0.7)g·kg⁻¹ 的土壤含盐量在实验过程中变化并不明显。施肥处理土壤含盐量略有下降。而淋洗施肥处理的土壤含盐量经过实验开始时的淋洗即降至(1.3±0.4)g·kg⁻¹,随后略有上升,182 d 后土壤含盐量为(3.2±0.5)g·kg⁻¹。淋洗施肥处理的土壤盐分去除率显著(*P*<0.05)高于对照处理和施肥处理,分别高

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil

项目	含量
有机质/g·kg ⁻¹	50.8±1.6
全氮/g·kg ⁻¹	1.3±0
碱解氮/mg·kg ⁻¹	81.5±8.8
有效磷/mg·kg ⁻¹	87.9±4.2
pH	8.8±0.3
含水量/%	14.8±0.5
含盐量/g·kg ⁻¹	12.9±0.7
油和脂含量/g·kg ⁻¹	45.7±3.7



Error bars indicate the standard deviation of triplicate determinations, the same below.

图1 修复过程中油和脂含量和土壤含盐量的动态变化

Figure 1 Dynamics of oil and grease concentration and soil salinity in the period of remediation

出(66.5±2.9)%和(41.3±6.2)%。这说明淋洗施肥处理可以明显促进土壤盐分的去除。

2.2 微生物计数

采用 MPN 法分别对 182 d 各处理土壤中的异养细菌、石油烃降解菌、烷烃降解菌和多环芳烃降解菌进行计数,结果如图 2 所示。对照处理这 4 类细菌的数量分别为 5.8、4.2、4.5、3.4 lg MPN·g⁻¹。施肥处理中这 4 类细菌分别增长了 2.9、1.7、1.8 倍和 1.9 倍,其中异养细菌数量和多环芳烃降解菌数量的增长达到显著水平($P<0.05$)。淋洗施肥处理中这 4 类细菌分别增长了 4.0、3.2、3.7 倍和 11.2 倍,均达到显著水平($P<0.05$)。这说明淋洗施肥处理可以明显提高土壤异养细菌和烃降解菌的数量。

2.3 Biolog 分析

采用 Biolog 方法对土壤微生物群落水平生理特

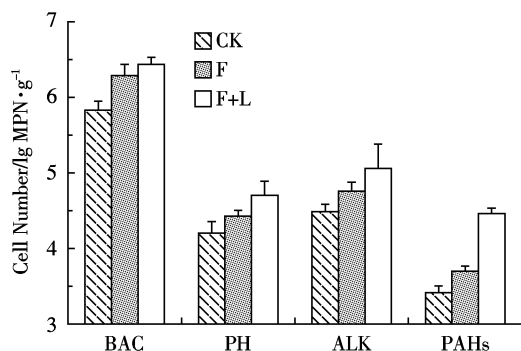


图2 异养细菌、石油烃降解菌、烷烃降解菌和多环芳烃降解菌数量

Figure 2 Most probable number(MPN) of heterotrophic bacteria (BAC), petroleum hydrocarbon degraders(PH), alkane degraders (ALK)and PAHs degraders(PAHs)

性进行分析,土壤修复过程中各处理的 AWCD 值变化如图 3 所示。对照处理的 AWCD 值在 0 d 的 3 个处理中最低,说明对照处理中的微生物活性较低。0 d 的施肥处理和淋洗施肥处理 AWCD 值均显著($P<0.05$)高于对照处理,说明这 2 个处理均可以提高土壤微生物活性。90 d 后施肥处理的 AWCD 值与对照处理没有显著差异,而淋洗施肥处理的 AWCD 值显著($P<0.05$)高于对照处理。182 d 各处理的 AWCD 值同样表现出类似的特点。这说明:施肥处理可以提高土壤微生物活性,但是作用较为有限;而淋洗施肥处理可以明显提高土壤微生物活性。

采用主成分分析方法,将培养 120 h 的每孔相对吸光值转化为几个综合变量(主成分),以反映各处理对微生物群落水平生理特性的影响,结果如图 4 所示。0 d 各处理提取的前 2 个主成分的方差累积贡献率为 86.4%,其中第一主成分和第二主成分分别解释变量方差的 61.6%和 24.8%。施肥处理和淋洗施肥处理区分并不明显,但是均与对照处理有明显区别。90 d 各处理提取的前 2 个主成分的方差累积贡献率为 80.8%,其中第一主成分和第二主成分分别解释变量方差的 71.4%和 9.4%。各处理微生物的群落水平生理特性均有明显区别。182 d 各处理提取的前 2 个主成分的方差累积贡献率为 87.9%,其中第一主成分和第二主成分分别解释变量方差的 76.1%和 11.8%。各处理微生物的群落水平生理特性同样均有明显区别。这说明施肥处理和淋洗施肥处理均可以明显改变土壤微生物群落水平生理特性。

分别计算 182 d 各处理土壤微生物种群的 Shannon 多样性指数和 Simpson 指数,结果如图 5 所示。对

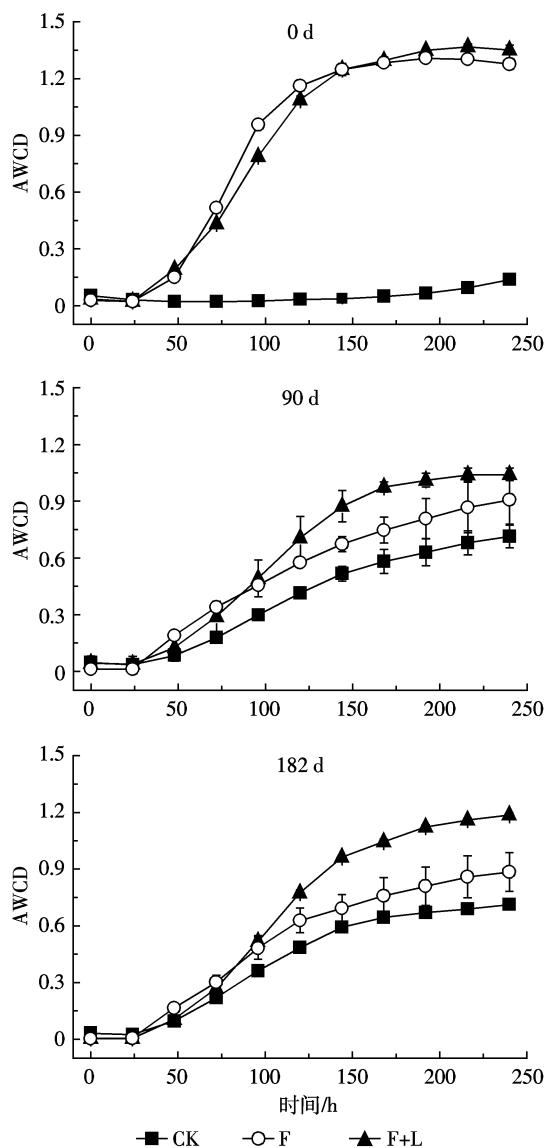


图3 修复过程中不同处理土壤微生物种群的 AWCD 值
Figure 3 AWCD value of soil microbial community in the period of remediation with different treatments

照处理的 Shannon 多样性指数在 3 个处理中最低,为 3.665 ± 0.001 。施肥处理的 Shannon 多样性指数显著 ($P < 0.05$) 高于对照处理。淋洗施肥处理的 Shannon 多样性指数最高。类似地,对照处理的 Simpson 指数在 3 个处理中最低,为 0.969 ± 0.001 。施肥处理的 Simpson 指数显著 ($P < 0.05$) 高于对照处理。淋洗施肥处理的 Simpson 指数最高。这说明淋洗施肥处理明显提高了土壤微生物种群的 Shannon 多样性指数和 Simpson 指数。

对 182 d 各处理土壤微生物种群对不同类型碳源的利用程度进行分析,结果如图 6 所示。对照处理对聚合物类碳源的利用强度较大,占该处理总碳源利

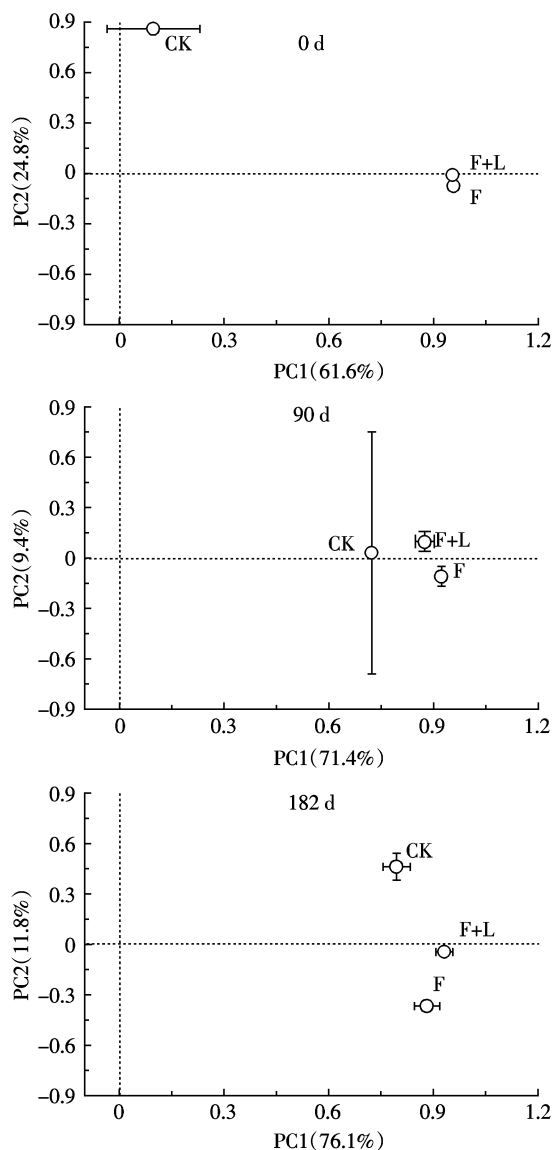


图4 不同处理土壤微生物种群对碳源利用的主成分分析
Figure 4 Principal components analysis of substrate utilization patterns of soil microbial community with different treatments

用的 27.8%,而施肥处理和淋洗施肥处理均对糖类碳源的利用强度较大,分别占各自总碳源利用的 29.7% 和 26.5%,特别是对 D-纤维二糖、赤藻糖醇和 D-果糖等糖类碳源利用强度较大。这说明对照处理土壤微生物种群对聚合物类碳源较为偏好,而施肥处理和淋洗施肥处理对糖类碳源较为偏好。

3 讨论

石油污染盐碱土壤含盐量高、肥力低,难以自然恢复,亟需有效的修复方式。本文采用淋洗施肥修复方法处理石油污染盐碱土壤,评价该修复方法对石油污染盐碱土壤的修复效果。

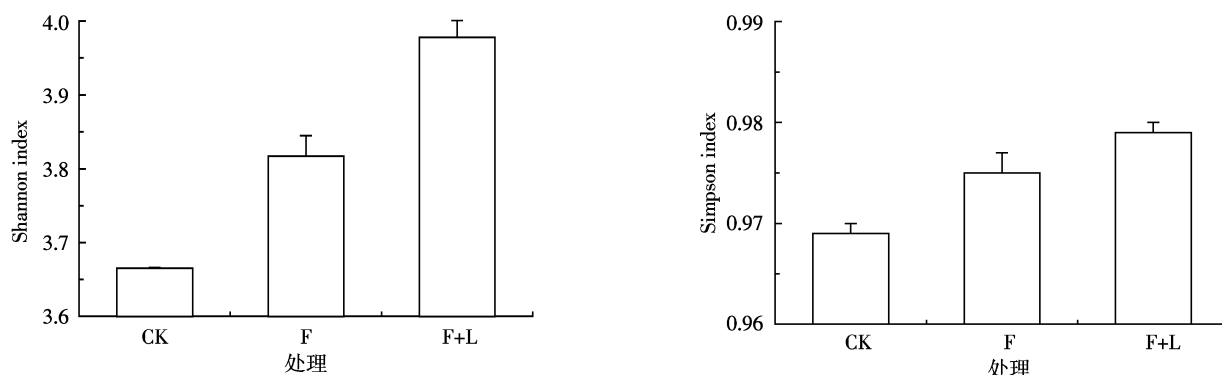


图5 不同处理土壤微生物种群的 Shannon 指数和 Simpson 指数

Figure 5 Shannon index and Simpson index of soil microbial community with different treatments

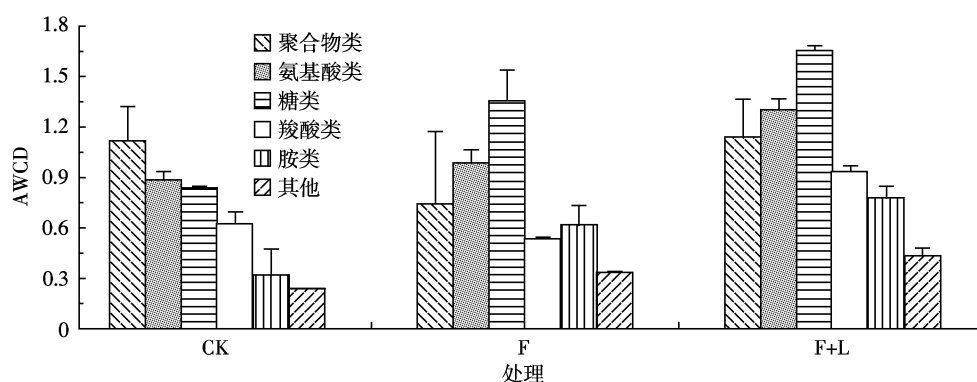


图6 不同处理土壤微生物种群对碳源的利用

Figure 6 Utilization of carbon sources of soil microbial community with different treatments

施肥处理对土壤中油和脂的降解略有促进效果(图1),这与 Margesin 等^[21]的研究报道一致。然而值得注意的是,淋洗施肥处理对油和脂降解的促进效果更为明显。尽管淋洗施肥处理的 pH 值没有明显变化(数据未显示),但是土壤含盐量却明显降低,这可能是淋洗施肥处理促进油和脂降解的原因之一。Rhykerd 等^[22]研究发现电导率为 $200 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 的高盐土壤的石油烃矿化速率比正常土壤降低了 20%~44%,土壤盐分显示出对石油烃降解的抑制作用,同时指出降低土壤含盐量可能加速石油烃降解。实验初期淋洗使土壤含盐量明显降低,而后期土壤含盐量却逐渐升高,与大田实验的研究报道一致^[23-24]。这可能是由于我们的模拟土柱较深,淋洗并未使土壤盐分完全排出实验装置,而是部分残留在土壤深处,土壤盐分随着水分的不断蒸发,沿土壤毛细管上升,使表层土壤含盐量逐渐升高。尽管如此,淋洗施肥处理仍显著促进了土壤含盐量的降低,可能部分解除了土壤盐分对油和脂降解的抑制作用,从而促进了土壤中油和脂的降解。因此,淋洗施肥处理是一种修复石油污染盐碱土壤的有效方式。

施肥处理提高了土壤烃降解菌的数量(图2),这与文献报道一致^[11,25]。而淋洗施肥处理可以进一步提高土壤烃降解菌数量和土壤微生物活性(图2、图3)。这可能是由于淋洗降低了土壤含盐量,解除了土壤盐分对石油烃降解菌的抑制作用所致。烃降解菌由于受高盐胁迫,在高盐环境中的生物量和降解活性均处于较低水平^[26-27],因此降低土壤含盐量可能促进烃降解菌的数量和降解活性,从而促进土壤中油和脂的降解。淋洗施肥处理降低了土壤含盐量,减轻了土壤盐分对石油烃降解菌的胁迫,从而提高了烃降解菌的数量和土壤微生物活性,促进了微生物对土壤中油和脂的降解。

多样性是反映土壤微生物生态系统是否稳定的重要指标之一。一般认为,多样性较高的土壤微生物种群较为稳定^[28],并且对污染物胁迫具有较好的耐受能力,而稳定的微生物种群是健康土壤的标志之一。施肥处理改变土壤微生物群落代谢功能特征,提高土壤的 Shannon 多样性指数(图5)。而淋洗施肥处理进一步提高土壤的 Shannon 多样性指数,表明淋洗施肥处理促进了土壤微生物种群的稳定,这进一步暗示了

土壤微生物种群正在逐渐恢复。淋洗施肥处理较高的 Simpson 指数同样暗示了这一点。

对照处理土壤微生物种群对聚合物类碳源较为偏好,而施肥处理和淋洗施肥处理对 D-纤维二糖等糖类碳源较为偏好(图 6)。这一结果与 Benizri 等^[29]报道的施肥降低了土壤微生物对糖类碳源利用的现象并不一致,这一不同可能与我们施加的牛粪有机肥含有大量的纤维素类物质有关。牛粪有机肥施入土壤后,大量的纤维素在纤维素降解菌的作用下,分解为 D-纤维二糖等糖类^[30],提供了大量的糖类碳源,导致了施肥处理和淋洗施肥处理表现出对糖类碳源的偏好性。

4 结论

(1)淋洗施肥处理促进了土壤中油和脂的降解以及土壤含盐量的降低,是一种修复石油污染盐碱土壤的有效方式。

(2)淋洗施肥处理提高了烃降解菌的数量和土壤微生物活性,促进了微生物对油和脂的降解。同时提高了土壤微生物多样性,促进了微生物种群的稳定,暗示了土壤微生物种群正在逐渐恢复。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG Jie, CHEN Li-xin, KOU Shi-wei, et al. Characteristics and evaluation of salinization of different land: Use types of soils in Daqing City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1):171-179.
- [2] Weng Y L, Gong P, Zhu Z L. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River Delta region of China using EO-1 Hyperion data[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3):378-388.
- [3] Wang Y G, Xiao D N, Li Y, et al. Soil salinity evolution and its relationship 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.
- [4] Nie M, Zhang X, Wang J, et 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 and Biochemistry*, 2009, 41(12):2535-2542.
- [5] Betancur-Galvis L A, Alvarez-Bernal D, Ramos-Valdivia A C, et al. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated saline-alkaline soils of the former Lake Texcoco[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(11):1749-1760.
- [6] Fernandez-Luqueno F, Marsch R, Espinosa-Victoria D, et 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.
- [7] Luna-Guido M L, Beltran-Hernandez R I, Solis-Ceballos N A, et al. Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(2):102-108.
- [8] Rodriguez-Blanco A, Antoine V, Pelletier E, et al. Effects of temperature and fertilization on total vs. active bacterial communities exposed to crude and diesel oil pollution in NW Mediterranean Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(3):663-673.
- [9] 刘五星,骆永明,滕应.石油污染土壤的生态风险评价和生物修复Ⅲ.石油污染土壤的植物-微生物联合修复[J].土壤学报,2008,45(5):994-999.
LIU Wu-xing, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. Eco-risk assessment and bioremediation of petroleum contaminated soil Ⅲ. Phyto-microbial remediation of petroleum contaminated soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):994-999.
- [10] 刘五星,骆永明,余冬梅,等.石油污染土壤的生态风险评价和生物修复Ⅳ.油泥的预制床修复及其微生物群落变化[J].土壤学报,2010,47(4):621-627.
LIU Wu-xing, LUO Yong-ming, YU Dong-mei, et al. Eco-risk assessment and bioremediation of petroleum contaminated soil Ⅳ. Prepared bed remediation of oily sludge and changes in microbial community during remediation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):621-627.
- [11] 王敏,刘永民.腐植酸强化脱硫石膏改良油污盐碱土壤的研究[J].灌溉排水学报,2010,29(2):131-139.
WANG Min, LIU Yong-min. Effect of humic acid on improving oil-contaminated saline-alkali soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(2):131-139.
- [12] 齐建超,张承东,乔俊,等.微生物与有机肥混合剂修复石油污染土壤的研究[J].农业环境科学学报,2010,29(1):66-72.
QI Jian-chao, ZHANG Cheng-dong, QIAO Jun, et al. Bioremediation of petroleum-contaminated soil by mixed microbes and organic fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):66-72.
- [13] Sadej W, Namiotko A. Content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil fertilized with composted municipal waste[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, 19(5):999-1005.
- [14] Syafruddin S, Wieshammer G, Puschenreiter M, et al. Effect of N and P fertilization and aeration on biodegradation of crude oil in aged hydrocarbon contaminated soils[J]. *Plant Soil and Environment*, 2010, 56(4):149-155.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:106-196.
LU Ru-kun. Agriculture chemical analytical methods of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:106-196.
- [16] Mishra S, Jyot J, Kuhad R C, et al. Evaluation of inoculum addition to stimulate in situ bioremediation of oily-sludge-contaminated soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(4):1675-1681.
- [17] Wrenn B A, Venosa A D. Selective enumeration of aromatic and aliphatic hydrocarbon degrading bacteria by a most-probable-number procedure[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1996, 42(3):252-258.
- [18] Brown E J, Braddock J F. Sheen screen, a miniaturized most-probable-number method for enumeration of oil-degrading microorganisms[J].

- Applied and Environmental Microbiology*, 1990, 56(12):3895–3896.
- [19] Perez-Piqueres A, Edel-Hermann W, Alabouvette C, et al. Response of soil microbial communities to compost amendments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3):460–470.
- [20] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57(8):2351–2359.
- [21] Margesin R, Schinner F. Bioremediation(natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(7):3127–3133.
- [22] Rhykerd R L, Weaver R W, McInnes K J. Influence of salinity on bioremediation of oil in soil[J]. *Environmental Pollution*, 1995, 90(1):127–130.
- [23] 李国华, 岳增璧, 朱金兆, 等. 滨海盐碱地基盘法造林试验[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6):8–13.
- LI Guo-hua, YUE Zeng-bi, ZHU Jin-zhao, et al. Tests of seed-base for afforestation on saline-alkali soil by sea[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(6):8–13.
- [24] 蔡典雄, 胡育骄, 赵全胜, 等. 海冰水灌溉配合农艺措施对棉田土壤水盐动态的影响[J]. 资源科学, 2010, 32(3):457–465.
- CAI Dian-xiong, HU Yu-jiao, ZHAO Quan-sheng, et al. Effects of agronomic practices on soil water-salt dynamics in cotton fields under sea ice water irrigation conditions[J]. *Resources Science*, 2010, 32(3):457–465.
- [25] Chaineau C H, Rougeux G, Yepremian C, et al. Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(8):1490–1497.
- [26] Chen J F, Wong M H, Wong Y S, et al. Multi-factors on biodegradation kinetics of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) by *Sphingomonas* sp. a bacterial strain isolated from mangrove sediment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57(6–12):695–702.
- [27] Tam N F Y, Guo C L, Yau W Y, et al. Preliminary study on biodegradation of phenanthrene by bacteria isolated from mangrove sediments in Hong Kong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45(1–12):316–324.
- [28] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, et al. Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation[J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(3):301–313.
- [29] Benizri E, Amiaud B. Relationship between plants and soil microbial communities in fertilized grasslands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11):2055–2064.
- [30] Ulrich A, Klimke G, Wirth S. Diversity and activity of cellulose-decomposing bacteria, isolated from a sandy and a loamy soil after long-term manure application[J]. *Microbial Ecology*, 2008, 55(3):512–522.