

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.

WU Man-li, ZHANG Chen, QI Yan-yun, et al. Degradation of petroleum hydrocarbons during the bioremediation of cultivated loessial soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1159–1165.

生物修复对黄土壤中石油烃的去除作用及影响因素

吴蔓莉, 张 晨, 祁燕云, 叶茜琼, 祝长成

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘 要:利用微生物法对石油污染黄土壤进行实验室模拟修复研究,通过测定修复过程中的不同组分烃、不同形态氮和有效磷含量,石油烃降解菌数量对修复效果及影响因素进行了评价。结果发现,经过5周的修复处理,生物刺激法处理的土壤中总石油烃、烷烃、多环芳烃的去除率分别为14.54%、21.98%、33.14%,土壤铵态氮含量由初始添加的 $210.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $97.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤硝态氮含量在修复过程中基本保持不变。经过生物刺激修复的土壤中石油烃、烷烃、多环芳烃降解菌数分别为 1.60×10^5 、 3.09×10^5 、 7.08×10^3 ,而未经修复处理的土壤中三种烃降解菌数量分别为 2.69×10^4 、 2.57×10^4 、 4.07×10^3 。结果表明利用生物刺激法可有效去除黄土壤中的石油烃。影响石油污染黄土壤生物修复作用的限制性因素为土壤中铵态氮和有效磷含量,与未经修复处理的石油污染土壤相比,生物刺激处理使土壤中烃降解菌数量增加。

关键词:石油污染黄土壤;生物强化;生物刺激;铵态氮;降解菌数量;限制性因素

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)06-1159-07 doi:10.11654/jaes.2017-1549

Degradation of petroleum hydrocarbons during the bioremediation of cultivated loessial soil

WU Man-li, ZHANG Chen, QI Yan-yun, YE Xi-qiong, ZHU Chang-cheng

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

Abstract: A microcosm study was conducted to assess the effects of bioremediation and limiting factors on petroleum hydrocarbon degradation during the remediation of oil-contaminated soil. The contents of petroleum hydrocarbons, nitrogen (total N, nitrate N, and ammonium N), available phosphorus, and hydrocarbon-degrading microorganisms were measured during bioremediation. The correlations between petroleum hydrocarbon degradation and influential factors were analyzed using SPSS 19.0. Biostimulation was more effective than bioaugmentation in removing petroleum hydrocarbons from the cultivated loessial soil and degraded 14.54%, 21.98%, and 33.14% of the total petroleum hydrocarbons (TPH), alkanes, and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) respectively within five weeks. The ammonium N content of the soil decreased from $210.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $97.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the nitrate N was unaffected. The populations of TPH-, alkane-, PAH-degraders reached 1.60×10^5 , 3.09×10^5 , and $7.08\times 10^3\text{ CFU g}^{-1}$ soil, respectively, in the biostimulation treatment, which was greater than those in the control treatment. Correlation analysis indicated that bioremediation was limited by the contents of available phosphorus and ammonium N, which were related to TPH and alkane degradation.

Keywords: petroleum contaminated cultivated loessial soil; bioaugmentation; biostimulation; ammonium nitrogen; hydrocarbon-degrading population; limiting factor

西北地区是我国重要的石油生产地,石油的开采在给当地带来经济效益的同时,不可避免地带来环境

污染问题。目前西北地区的石油污染土壤问题十分严重,许多学者对当地的石油污染情况进行了调查研

收稿日期:2017-11-08 录用日期:2018-01-24

作者简介:吴蔓莉(1974—),女,内蒙古赤峰人,教授,从事污染土壤的生物修复技术研究。E-mail:447005853@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(21577109);陕西省自然科学基金项目(2015JM5163)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (21577109); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (2015JM5163)

究^[1-2]。刘培等^[3]的调查结果表明,陕北某采油区油井周围石油烃含量高达 10 850~13 488 mg·kg⁻¹,是土壤背景值的 21~27 倍,石油污染使土壤在有机质含量、总烃含量及生态毒性等方面均达到重度污染水平,污染情况十分严重。因此,如何有效去除黄土壤中的石油污染物,已经成为当地亟需解决的主要环境问题。

利用微生物修复法处理石油污染土壤具有成本低、无二次污染等优点,目前已成为广泛采用的土壤修复技术^[4-5]。微生物修复技术包括微生物强化(Bioaugmentation)和微生物刺激(Biostimulation)两种方法^[6-7]。微生物强化是指通过向污染场地中投加高效降解菌以加快污染物降解的方法。一般在功能性降解菌数量较少的污染土壤中,利用微生物强化法进行修复效果较好^[8-10]。微生物刺激是指通过向污染场地添加烃降解菌生长所需的氮磷等营养元素以及 H₂O₂、O₂ 等电子受体,通过刺激微生物的生长而达到加速降解石油污染物的目的^[11-13]。多数研究认为,当土壤的碳氮磷比为 100/10/1 时,降解菌的活性最强,有利于土壤中污染物的去除^[14-15]。

在对油污土壤进行生物修复处理时,石油烃的去除效果既与土壤湿度、pH、通氧量、养分等土壤环境因素有关,也受土壤功能性微生物数量和活性的影响。杨茜等^[13]的研究结果发现,在对陕北地区黄土壤进行生物修复时,通过补充氮磷进行生物刺激的修复效果好于投加降解菌进行的生物强化修复。Haghol-lahi A 等^[16]的研究结果表明,在利用生物法对沙子、黏质土、粗粒土中的石油烃分别进行 270 d 的修复时,存在于沙子中的石油烃去除率可达到 70%以上,而黏质土中石油烃的去除率仅为 23.5%,说明土壤有机质是影响石油烃去除的重要影响因素。研究还发现当土壤湿度为 10% 时,对石油烃去除效果较好。继续增加土壤湿度对石油烃的去除无显著性的影响。

尽管文献对影响石油烃去除的因素进行了研究报道,但是,不同因素对土壤中石油烃去除效果的影响程度存在差异。文献对于影响修复效果的限制性因素报道相对较少。本论文利用微生物强化和微生物刺激两种方法对西北地区石油污染黄土壤进行模拟修复研究,以期确定适合黄土壤中石油污染物去除的生物修复方法,并利用 SPSS 软件分析土壤营养物质、降解菌数量及不同组分烃之间的相关关系,以期明确影响黄土壤中石油烃降解的限制性因素。研究结果对于探明黄土壤中石油烃的微生物去除特性及影响石油烃去除的限制性因素具有重要的理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及测定方法

石油污染土壤采自甘肃庆阳某油井周围,土样经除杂、碎散、过筛(0.85 mm)、混匀后密封储存在塑料袋中,以备实验使用。

土壤性质测定方法:土壤含水率、总有机碳、总氮、铵态氮、硝态氮、有效磷的测定方法见“土壤分析技术规范”^[17],土壤中石油烃的测定采用超声波提取-重量法测定^[18],利用层析法分离总石油烃中的烷烃和多环芳烃并采用 GC-MS 进行测定^[19]。石油烃、烷烃、多环芳烃降解菌数量的测定采用最大可能计数法^[20]。测定结果如表 1 所示。

表 1 石油污染土壤的生物与理化性质
Table 1 Physical and biochemical properties of the petroleum-contaminated soil

测定指标	数值	测定方法
总石油烃/mg·kg ⁻¹	18 800	超声萃取-重量法
烷烃/mg·kg ⁻¹	13 266	GC-MS
多环芳烃/mg·kg ⁻¹	3066	GC-MS
含水率/%	5.3	重量法
总有机碳/%	0.39	重铬酸钾容量法
总氮/g·kg ⁻¹	1.17	凯氏蒸馏-滴定法
铵态氮/mg·kg ⁻¹	0.84	靛酚蓝比色法
硝态氮/mg·kg ⁻¹	12.39	紫外分光光度法
有效磷/mg·kg ⁻¹	11.77	钼酸铵分光光度法
石油烃降解菌/MPN·g ⁻¹ soil	2.95×10 ⁵	最大可能计数法
烷烃降解菌/MPN·g ⁻¹ soil	2.95×10 ⁵	最大可能计数法
多环芳烃降解菌/MPN·g ⁻¹ soil	5.75×10 ²	最大可能计数法

1.2 石油烃降解菌群的富集筛选

取 5 g 石油污染土壤接种于含有 50 mL 灭菌的磷酸盐缓冲溶液中,150 r·min⁻¹、30 ℃振荡培养 2 h。吸取 5 mL 培养液,转接到以石油烃为唯一碳源的 100 mL PBS 缓冲液中,相同条件下振荡培养 7 d。如此连续富集培养 3 次,将最后一次培养液在 4 ℃、10 000 r·min⁻¹ 条件下离心 10 min,弃去上清液,向离心管中加入 30 mL PBS 缓冲液,摇匀,在相同条件下离心 10 min,弃去上清液;如此反复 5 次。用 PBS 调节混菌悬液 OD 值为 1.0(600 nm 处测定)。

1.3 实验方案设计

生物强化修复处理(BA):向 800 g 供试土壤中加入 1.2 中获得的石油烃降解菌群混菌悬液 10 mL (OD₆₀₀=1.0),使土壤中外加降解菌个数为 10⁸ cfu·g⁻¹。

生物刺激修复处理(BS):向 800 g 土壤中加入 1.202 3 g NH_4NO_3 和 0.504 9 g KH_2PO_4 ,使土壤 C:N:P=100:10:1。

自然衰减(CK):取 800 g 供试土壤,不进行任何处理作为控制实验(CK)。

每种处理 3 个平行,室温条件下,连续进行 5 周的修复。

每周取 2 g 土样,分别对土壤中不同组分烃、不同功能降解菌数、不同形态氮、有效磷含量进行测定。

1.4 数据统计分析和处理

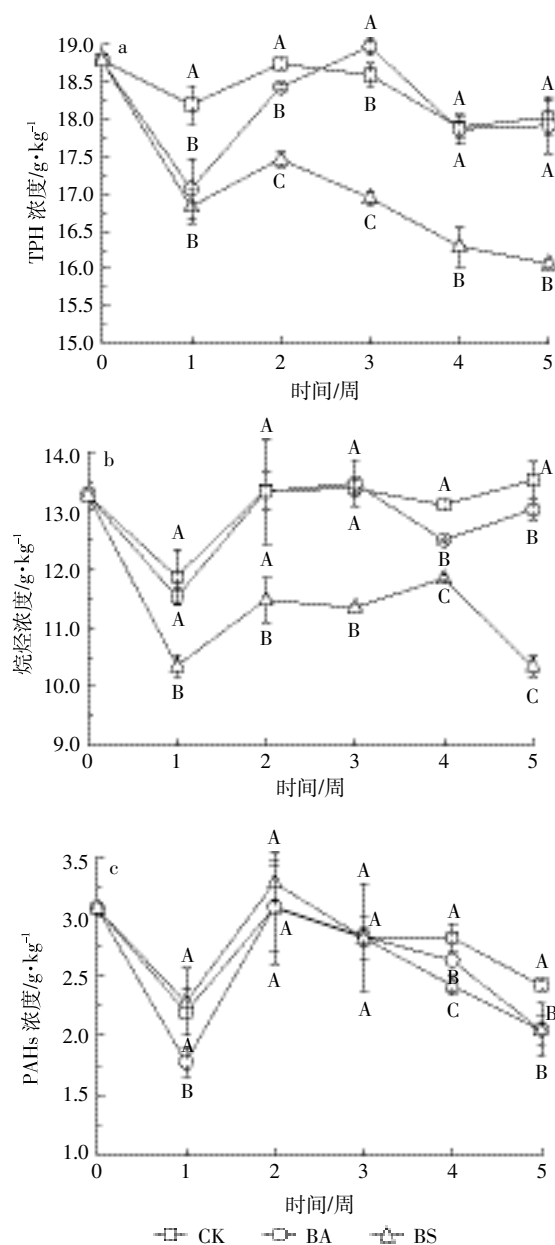
利用 SPSS19.0 软件对不同组分烃、土壤氮、磷营养含量以及降解菌数量的测定数据进行统计分析处理。利用单因素方差分析(ANOVA),在 $P<0.05$ 水平时对总菌、石油烃、烷烃、多环芳烃降解菌数量、不同形态氮及有效磷含量、不同组分烃含量进行显著性检验,利用双变量法(Pearson 相关系数)进行相关性分析^[21]。

2 结果与讨论

2.1 微生物修复对不同组分烃的去除作用

不同修复处理对土壤中总石油烃、烷烃、多环芳烃的去除情况如图 1a、图 1b、图 1c 所示。石油污染土壤中初始石油烃、烷烃、多环芳烃的含量分别为 $18\,800\pm115.4$ 、 $13\,266\pm500.0$ 、 $3066\pm333.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。经过 5 周的修复,自然衰减(CK)土壤中石油烃、烷烃和多环芳烃的含量变为 $18\,033\pm233.3$ 、 $13\,516\pm316.7$ 、 $2416\pm50.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,三种烃的去除率分别为 $(4.08\pm0.02)\%$ 、 $(-1.88\pm0.01)\%$ 、 $(21.23\pm0.07)\%$;生物强化处理的土壤中(BA)石油烃、烷烃、多环芳烃的含量为 $17\,916\pm383.3$ 、 $13\,016\pm183.3$ 、 $2050\pm116.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,去除率分别为 $(4.70\pm0.03)\%$ 、 $(1.88\pm0.05)\%$ 、 $(33.14\pm0.16)\%$;生物刺激处理的土壤中(BS)石油烃、烷烃、多环芳烃的含量为 $16\,066\pm66.7$ 、 $10\,350\pm183.3$ 、 $2050\pm216.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,三种烃的去除率分别为 $(14.54\pm0.01)\%$ 、 $(21.98\pm0.04)\%$ 、 $(33.14\pm0.13)\%$ 。相比自然衰减和生物强化的修复处理,利用生物刺激修复可对黄土壤中总石油烃、烷烃和多环芳烃起到较好的去除作用。

石油烃组分中,烷烃比多环芳烃易于被微生物降解^[11,14]。但在本研究中,三种不同处理土壤中的烷烃去除率均低于多环芳烃去除率,可能的原因是由于本次实验使用的是经过了一次生物修复处理的油污土壤,一些易降解烃类已在第一期修复中大部分被去除。



a-总石油烃;b-烷烃;c-多环芳烃;不同字母表示同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$),下同

图 1 土壤中不同组分烃的浓度变化

Figure 1 The concentrations of different fractional petroleum hydrocarbons in cultivated loessial soil

生物强化技术的核心是投加高效降解菌。但是外源微生物添加至污染土壤中后一般会受到土著微生物的竞争而发生拮抗,从而影响生物强化处理效果^[22-23]。因此,有研究认为从石油污染土壤中直接分离出具有石油降解能力的土著微生物,将其富集后重新投加到石油污染土壤中进行生物强化实验,会取得较好的修复效果^[10,24]。本次研究中,利用从石油污染土壤中富集的降解菌对原污染土壤进行了生物强化修复,

对土壤中的多环芳烃起到了较好的降解作用,但是对烷烃和总石油烃的去除效果相对较差。利用生物刺激法对黄土壤中不同组分石油烃的去除作用较好。

杨茜等^[13]对陕北子长石油污染黄土壤进行生物修复研究时发现,加入氮磷营养进行生物刺激好于投加降解菌进行生物强化的修复效果。刘五星等^[25]对南京近郊炼油厂附近的污染潮土进行生物修复处理研究表明,添加氮磷等营养后,土壤中烃降解菌明显增加,石油降解速率显著加快,但接种菌剂以及定期翻动对石油烃降解率没有显著影响。这些结果说明对于西北地区石油污染的黄土壤及我国南方一些不同土质的土壤,利用生物刺激法进行修复对石油烃的去除效果好于生物强化修复。

2.2 土壤不同形态氮的变化规律

修复过程中土壤不同形态氮的变化情况如图2a、图2b、图2c所示。

土壤中硝态氮的初始含量为 $12.4 \pm 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整个修复过程中 CK、BA 处理的土壤中硝态氮的含量基本保持不变,BS 处理中由于加入硝酸铵进行生物刺激处理,使得土壤中硝态氮的含量增加至 $248.2 \pm 3.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,修复前3周呈增加趋势,第4周时开始降低。说明本次修复中对硝态氮几乎不利用。

土壤中铵态氮的初始含量为 $0.84 \pm 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, BA 处理中铵态氮含量在第1周增加至 $5.21 \pm 0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第2周后开始降低,修复5周后稳定在 $1.38 \pm 0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。BS 处理中由于添加了硝酸铵,使得土壤中铵态氮含量增加至 $210.4 \pm 4.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,修复1周后,土壤中铵态氮含量降低为 $171.6 \pm 1.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在此后的3周内持续降低,修复第5周时降低为 $97.2 \pm 0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明在进行生物刺激处理的土壤中微生物在降解石油烃过程中对铵态氮有所利用。

一些研究认为,生物修复油污土壤过程中存在着氮的迁移转化及利用过程。叶茜琼等^[11]对西北地区石油污染黄土壤的修复研究结果表明,合并生物强化与生物刺激处理油污土壤可使总氮、氨氮含量呈先增加、后降低的趋势,而硝态氮的含量在修复前期降低,修复后期基本不变。本研究中,修复过程中消耗了铵态氮,对硝态氮几乎不利用。可能是由于本次修复中,对油污土壤进行了单独生物强化和生物刺激处理,其土壤修复机制与同时进行生物强化和生物刺激修复的机制有所不同,造成了对不同形态氮利用上的差异。

2.3 土壤有效磷变化规律

如图3所示,土壤中有有效磷的初始浓度为 $11.8 \pm 0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在整个修复过程中,CK 处理的土壤中有有效磷浓度保持在 $(12.3 \pm 0.15) \sim (15.6 \pm 0.50) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,BA 处理中,由于投加的菌悬液中有磷酸盐缓冲液,使土壤中有有效磷浓度增加至 $(22.2 \pm 1.20) \sim (26.2 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并在修复期间保持不变;BS 处理中 KH_2PO_4 的添加使有效磷的浓度增加至 $93.5 \pm 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在修复的第4、5周降低至 $84.1 \pm 1.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $87.4 \pm 0.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

许多文献研究认为,向土壤中添加氮磷营养有利

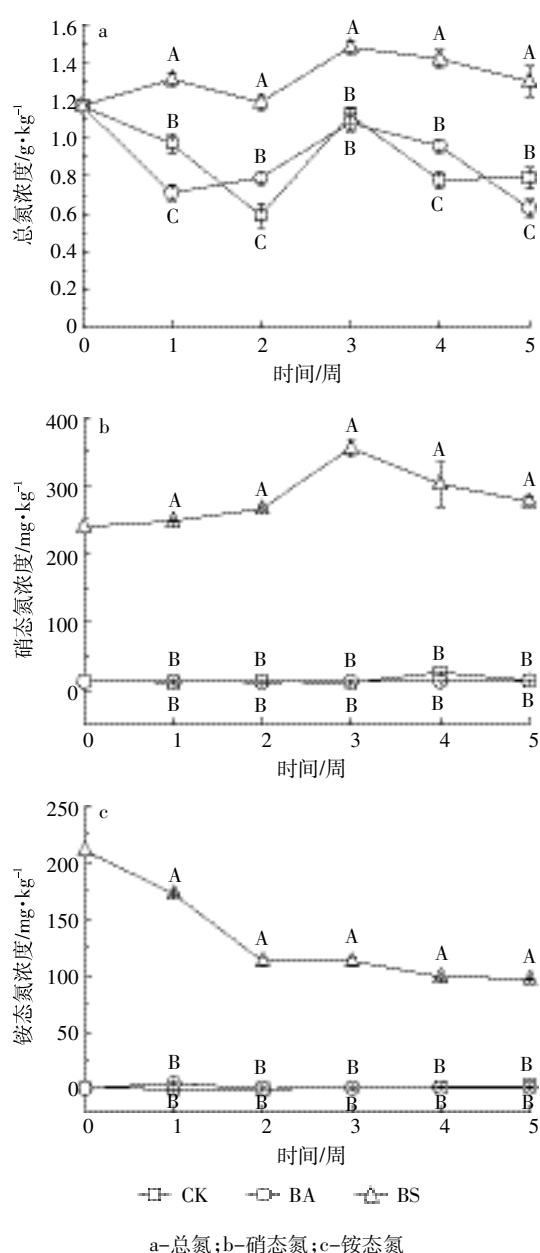


图2 土壤中不同形态氮浓度变化

Figure 2 The changes of various of nitrogen in different treatments

于土壤中石油烃的去除^[14-15,25]。然而,对于修复过程中有效磷含量变化的研究,文献报道相对较少。本研究中通过测定修复过程中有效磷的含量变化发现,生物刺激修复过程中对有效磷有一定的消耗作用,而生物强化修复过程中有效磷的含量基本保持不变。

2.4 土壤微生物变化规律

如图4所示,修复处理前,污染土壤中总细菌数

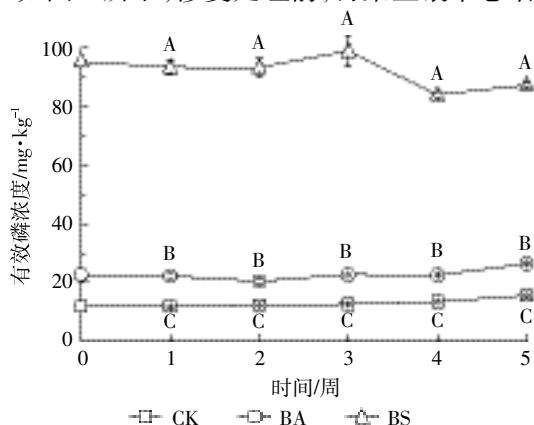
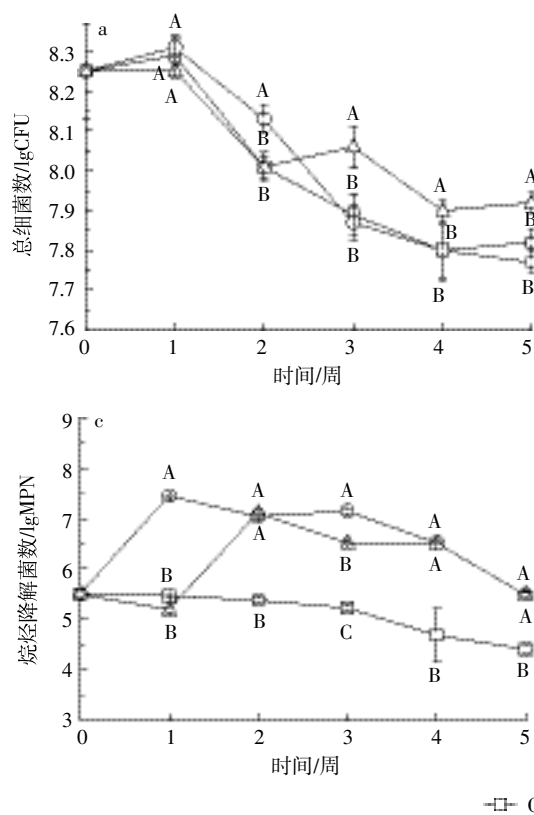


图3 土壤中有有效磷浓度变化

Figure 3 The changes of available phosphorus in different treatments

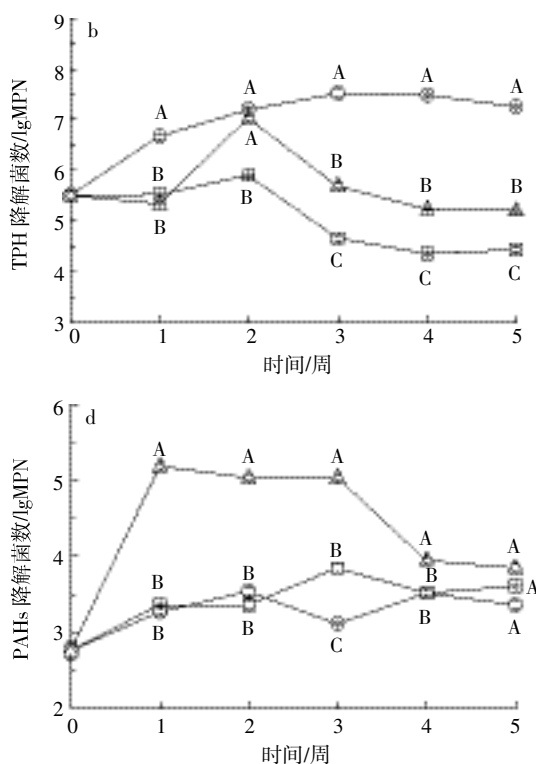


和石油烃、烷烃、多环芳烃降解菌数量分别为 1.78×10^8 CFU·g⁻¹ 和 2.95×10^5 、 2.95×10^5 、 5.75×10^2 MPN·g⁻¹。

与CK与BS相比,BA处理的土壤中石油烃降解菌数量最多,在修复期间达到 1.10×10^7 MPN·g⁻¹ 并基本保持不变;烷烃降解菌数在修复第1周时达到最大 (2.85×10^7 MPN·g⁻¹),第2周后开始迅速降低,修复结束时降低至 2.96×10^5 MPN·g⁻¹;土壤中多环芳烃降解菌数量在整个修复过程中基本保持不变。

BS处理的土壤中,石油烃、烷烃降解菌数均在修复第2周时达到最大,分别为 4.30×10^7 MPN·g⁻¹ 和 1.25×10^7 MPN·g⁻¹,第2周后开始降低,修复结束时石油烃和烷烃降解菌数分别降低至 1.60×10^5 MPN·g⁻¹ 和 2.96×10^5 MPN·g⁻¹;土壤中多环芳烃降解菌在修复第1周时数量最多,由初始时的 5.75×10^2 MPN·g⁻¹ 增加至 1.60×10^5 MPN·g⁻¹,第5周时减少至 7.08×10^3 MPN·g⁻¹。

土壤微生物是利用生物法去除石油烃的核心资源。许多文献对于修复过程中降解菌数量变化进行了报道。杨茜^[13]、Wu^[19-20]、刘五星^[25]等的研究表明,添加氮磷等营养使土壤中的烃降解菌数量明显增加,



a-细菌总数;b-石油烃降解菌;c-烷烃降解菌;d-多环芳烃降解菌

图4 土壤降解菌数量变化

Figure 4 The counts of hydrocarbon degraders in different treatments

石油降解速率加快。尽管直接投加菌剂也会使土壤中的降解菌数量增加,但是总体上接种菌剂的土壤中降解菌数量比添加氮磷营养的土壤中少。

本研究中,生物刺激作用使土壤中多环芳烃降解菌数量在修复前期显著增加,而生物强化处理的土壤中总石油烃降解菌数多于生物刺激处理的土壤。但总体上,与不经处理的土壤相比,生物强化和生物刺激均可显著增加土壤中石油烃、烷烃降解菌的数量,研究结果与文献报道基本一致。

2.5 相关性分析

本次研究中,利用生物刺激法(BS)可有效去除石油污染黄土壤中的总石油烃、烷烃和多环芳烃。为了进一步研究影响不同组分烃去除的主要因素,利用SPSS19.0 软件对生物刺激处理的土壤中不同组分烃含量与降解菌数量以及氮磷含量进行相关性分析。所得结果如表2所示。

BS处理中,土壤石油烃含量与土壤总氮、铵态氮、有效磷浓度、细菌总数及烷烃降解菌数显著相关(相关系数分别为0.641、0.793、0.570、0.693、0.571);烷烃含量与土壤铵态氮浓度、石油烃降解菌数显著相关(相关系数分别为0.508、0.552);多环芳烃含量与有效磷浓度显著相关(相关系数为0.543);土壤铵态氮浓度与石油烃降解菌数量、烷烃降解菌数量和细菌总数显著相关。结果表明,向土壤中添加铵态氮可刺激土壤中石油烃和烷烃降解菌的生长,进而对土壤中的石油烃和烷烃的降解起到促进作用。影响石油污染黄土壤生物修复作用的限制性因素为土壤中铵态氮和有效磷含量。

3 结论

(1) 经过5周的修复,生物刺激法处理的土壤中

石油烃、烷烃、多环芳烃去除率分别为14.54%、21.98%和33.14%。与自然衰减和生物强化处理相比,利用微生物刺激法可有效去除黄土壤中的石油烃。

(2) 生物刺激修复处理的土壤中铵态氮浓度随修复时间的增加而降低,土壤中硝态氮浓度几乎不发生变化,石油烃降解过程中需利用铵态氮和有效磷,对硝态氮几乎不利用。与自然衰减的土壤相比,生物刺激可增加土壤中石油烃、烷烃、多环芳烃降解菌的数量。

(3) 影响石油污染黄土壤生物修复作用的限制性因素为土壤中铵态氮和有效磷含量,向土壤中添加氮磷营养可刺激土壤中烃降解菌的生长,从而对土壤中不同组分烃的降解起到促进作用。

参考文献:

- [1] 李小利, 刘国彬, 许明祥. 陕北油田土壤和地表水石油污染特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 145-148.
LI Xiao-li, LIU Guo-bin, XU Ming-xiang. Features of oil pollution of soil and surface water in Northern Shaanxi oilfield[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(5): 145-148.
- [2] 黄廷林, 解岳, 王晓昌, 等. 延河沉积物的石油污染调查与分析[J]. 环境工程, 2000, 18(4): 62-64.
HUANG Ting-lin, XIE Yue, WANG Xiao-chang, et al. An investigation and analysis of petroleum contaminated river sediments of Yanhe River [J]. *Environment Engineering*, 2000, 18(4): 62-64.
- [3] 刘培, 梁继东, 高伟, 等. 延安石油开采对周边黄土壤污染的调查分析[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 123-127.
LIU Pei, LIANG Ji-dong, GAO Wei, et al. Investigation of soil contamination caused by petroleum exploitation in Yan'an[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(7): 123-127.
- [4] 卢晓霞, 李秀利, 马杰, 等. 焦化厂多环芳烃污染土壤的强化微生物修复研究[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 864-869.
LU Xiao-xia, LI Xiu-li, MA Jie, et al. Enhanced bioremediation of coking plant soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J].

表2 生物刺激处理的土壤中各项指标相关性分析(r)

Table 2 Correlation analysis of different impact factors in biostimulation treatment(r)

因子	参数										
	石油烃	烷烃	多环芳烃	总氮	硝态氮	铵态氮	TPH 降解菌	烷烃降解菌	PAHs 降解菌	有效磷	总菌
总氮	0.641*	0.331	0.424	1	0.852**	0.518*	0.146	0.466	0.366	0.053	0.389
硝态氮	0.429	0.170	0.030	0.852**	1	0.692*	0.337	0.608*	0.382	0.176	0.482
铵态氮	0.793*	0.508*	0.288	0.518*	0.692*	1	0.658*	0.830**	0.372	0.463	0.934**
TPH 降解菌	0.415	0.522*	0.174	0.146	0.337	0.658*	1	0.903**	0.819**	0.008	0.452
烷烃降解菌	0.571*	0.414	0.072	0.466	0.608*	0.830**	0.903**	1	0.700*	0.166	0.682*
PAHs 降解菌	0.407	0.669*	0.012	0.366	0.382	0.372	0.819**	0.700*	1	0.316	0.049
有效磷	0.570*	0.163	0.543*	0.053	0.176	0.463	0.008	0.166	0.316	1	0.675*
总菌	0.693*	0.268	0.266	0.389	0.482	0.934**	0.452	0.682*	0.049	0.675*	1

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关,**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

- Environmental Science*, 2011, 32(3):864–869.
- [5] Chaineau C H, Rougeux G, Yéprémian C, et al. Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(8):1490–1497.
- [6] Abed R M M, Al-Sabahi J, Al-Maqrahi F, et al. Characterization of hydrocarbon-degrading bacteria isolated from oil-contaminated sediments in the Sultanate of Oman and evaluation of bioaugmentation and biostimulation approaches in microcosm experiments[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 89(4):58–66.
- [7] Taccari M, Milanovic V, Comitini F, et al. Effects of biostimulation and bioaugmentation on diesel removal and bacterial community[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2012, 66(1):39–46.
- [8] Castiglione M R, Giorgetti L, Becarelli S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils: Bioaugmentation of autochthonous bacteria and toxicological assessment of the bioremediation process by means of *Vicia faba* L.[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2016, 23(8):7930–7941.
- [9] Xu Y H, Lu M. Bioremediation of crude oil-contaminated soil: Comparison of different biostimulation and bioaugmentation treatments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183(1/2/3):395–401.
- [10] Wu M L, Chen L M, Tian Y Q, et al. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by microbial consortia enriched from three soils using two different culture media[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178(1):152–158.
- [11] 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 等. 微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应[J]. *环境科学*, 2017, 38(2):728–734.
- YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, et al. Impacts of bioremediation on microbial communities and different forms of nitrogen in petroleum contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2):728–734.
- [12] 乔俊, 陈威, 张承东. 添加不同营养助剂对石油污染土壤生物修复的影响[J]. *环境化学*, 2010, 29(1):6–11.
- QIAO Jun, CHEN Wei, ZHANG Cheng-dong. Bioremediation of petroleum contaminated soil by various nutrient amendments[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(1):6–11.
- [13] 杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 等. 石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应[J]. *环境科学*, 2015, 36(5):1856–1863.
- YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, et al. Effects and biological response on bioremediation of petroleum contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5):1856–1863.
- [14] 刘五星, 骆永明. 土壤石油污染与生物修复[M]. 北京: 科学出版社, 2015:166–170.
- LIU Wu-xing, LUO Yong-ming. Soil petroleum pollution and bioremediation[M]. Beijing: Science Press, 2015:166–170.
- [15] Leys N M, Bastiaens L, Verstraete W, et al. Influence of the carbon/nitrogen/phosphorus ratio on polycyclic aromatic hydrocarbon degradation by mycobacterium and sphingomonas in soil[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2005, 66(6):726–736.
- [16] Haghollahi A, Fazaelipoor M H, Schaffie M. The effect of soil type on the bioremediation of petroleum contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 180:197–201.
- [17] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 二版. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- National Agricultural Technology Extension Service Center. Technical specifications for soil analysis[M]. 2th Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2014.
- [18] U. S. Environmental Protection Agency. N-hexane extractable material (HEM; oil and grease) and silica gel treated N-hexane extractable material (SGT-HEM; non-polar material) by extraction and gravimetry [R]. EPA-821-R-98-002, 1999.
- [19] Wu M L, LI W, Dick W A, et al. Bioremediation of hydrocarbon degradation in a petroleum contaminated soil and microbial population and activity determination[J]. *Chemosphere*, 2017, 169:124–130.
- [20] Wu M L, Dick W A, Li W, et al. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 107(3):158–164.
- [21] 杨茜, 吴蔓莉, 曹碧霄, 等. 石油降解菌的筛选、降解特性及其与基因的相关性研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(1):187–192.
- YANG Qian, WU Man-li, CAO Bi-xiao, et al. Isolation of petroleum degrading strains and determination their degrading and gene characteristics[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(1):187–192.
- [22] Liu P W G, Chang T C, Whang L M, et al. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: Effects of strategies and microbial community shift[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, 65(8):1119–1127.
- [23] Liu P W G, Whang L M, Yang M C, et al. Biodegradation of diesel-contaminated soil: A soil column study[J]. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2008, 39(5):419–428.
- [24] Ueno A, Ito Y, Yumoto I, et al. Isolation and characterization of bacteria from soil contaminated with diesel oil and the possible use of these in autochthonous bioaugmentation[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2007, 23(12):1739–1745.
- [25] 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.