

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁根涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应

叶茜琼, 吴蔓莉*, 陈凯丽, 李伟, 袁婧

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 对陕北地区石油污染土壤进行了微生物修复研究, 利用气相色谱-质谱联用技术 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 测定土壤中烷烃和多环芳烃的含量变化, 采用高通量测序技术研究微生物修复对油污土壤微生物群落多样性的影响, 对修复过程中土壤不同形态氮含量变化进行了分析测定。结果表明, 经过 18 周的修复, 土壤中烷烃含量由初始时的 $25\,987.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低为 $12\,788.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 多环芳烃含量由初始时的 $5\,322.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低为 $2\,917.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。高通量测序结果表明, 经过微生物修复处理的土壤微生物群落结构发生了较大变化, 一些可降解烃类的菌群如厚壁菌门 (Firmicutes)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、迪茨氏菌属 (*Dietzia*)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 所占丰度增加。经过修复处理的土壤中总氮、氨氮含量呈降低趋势, 硝态氮含量在修复前期呈降低趋势, 修复后期基本保持不变。研究结果表明, 微生物修复处理可去除土壤中的大部分烷烃和多环芳烃, 烷烃和多环芳烃的降解效果与土壤中硝氮含量和烃降解菌所占丰度相关。

关键词: 石油污染土壤; 微生物修复; GC-MS; MiSeq 高通量测序; 不同形态氮

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0728-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201608008

Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil

YE Xi-qiong, WU Man-li*, CHEN Kai-li, LI Wei, YUAN Jing

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A laboratory study was conducted to investigate the impacts of bioremediation on microbial communities and various nitrogen shifts in petroleum contaminated soil by using GC-MS and Illumina MiSeq technique. Results showed the concentrations of alkane reduced from $25\,987.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $12\,788.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) decreased from $5\,322.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $2\,917.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Illumina MiSeq results showed that soil microbial communities shifted significantly after remediation, and the relative abundance of some phylum of hydrocarbon degraders (Firmicutes, Bacteroidetes), and some genus of degraders (*Dietzia*, *Acinetobacter*) increased. Besides, the contents of total nitrogen and ammonia nitrogen increased firstly and then decreased during remediation. However, the contents of nitrate nitrogen decreased at the early stage, and then kept stable in the later stage of remediation. It can be concluded that bioremediation effectively promoted petroleum hydrocarbon degradation, and the different fractional hydrocarbon degradation was related to the relative abundance of hydrocarbon degraders and available nitrogen contents.

Key words: petroleum contaminated soil; bioremediation; GC-MS; Illumina MiSeq; different forms of nitrogen

在石油的开采、运输及使用过程中由于泄漏或者运输不当造成了各种环境污染。石油进入土壤后一方面会影响土壤中的微生物组成和结构, 另一方面会阻碍植物根系呼吸及对营养的吸收, 导致植物生长不良甚至死亡。微生物修复法具有成本低、效率高、无二次污染等优点, 目前已成为广泛采用的石油污染土壤修复技术^[1~3]。

在利用微生物法修复油污土壤时, 土壤的菌群结构发生相应的变化, 石油烃的去除作用与土壤微生物菌群结构的变化有关。Liu 等^[4]研究认为, 在利用微生物法修复油污土壤前期, 细菌菌群对易降解石油烃的去除起主要作用, 修复后期对难降解石油烃组分的去除, 主要依靠土壤真菌的代谢作用完成。本研究结果表明, 当向油污土壤中同时投加降解菌并补充氮营养时, 对土壤中的石油烃去除效果较

好^[5]。微生物修复作用会导致土壤中石油烃降解菌数量及微生物多样性指数的变化, 石油烃的降解效率和降解菌数量之间存在相关关系^[6,7]。

因此, 土壤微生物因素的变化, 与石油烃的降解效率之间存在着相互作用关系。研究修复前后土壤菌群结构的变化, 对于深入理解修复对土壤微生物的影响作用机制具有较重要的理论意义。

土壤中氮的含量对于微生物降解污染物具有重要的作用。有研究认为, 当土壤中碳氮比值为 100/10 时, 微生物对石油烃的去除效果最好^[8,9]。目前

收稿日期: 2016-08-01; 修订日期: 2016-09-21

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); 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目(13JS048)

作者简介: 叶茜琼(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染土壤的生物修复技术, E-mail: 645974130@qq.com

* 通信作者, E-mail: wumanli@xauat.edu.cn

的文献研究多集中在向土壤中补充氮素进行生物刺激修复方面^[10],对于修复过程中不同形态氮素含量变化的研究,目前报道相对较少。

本文对石油污染土壤进行了微生物修复处理,利用 MiSeq 高通量测序平台对土壤微生物群落结构变化进行了详细研究,同时对修复过程中土壤不同形态氮含量变化进行了沿程测定。研究结果对于明确修复过程中土壤中不同形态氮素的转化规律,以及微生物群落变化特征具有较重

要的意义,以期为石油污染土壤的微生物修复提供一定的理论基础。

1 材料及方法

1.1 土壤

石油污染土壤采自甘肃庆阳某油井周围,土壤为黄绵土。土壤经碎散、除杂、过筛(0.85 mm)、混匀、密封储存于塑料袋中备用。表 1 为供试土壤理化性质的测定结果。

表 1 油污土壤理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of oil-polluted soil

供试土壤监测指标	数值	供试土壤监测指标	数值
pH	8.2	石油烃含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	31 610
含水率/%	3.5	细菌总数/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	2.23×10^7
全碳/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	60 000	石油烃降解菌个数/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	1.4×10^6
总氮(TN)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	800	烷烃降解菌个数/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	2.4×10^5
总磷(TP)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	650	多环芳烃降解菌个数/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	1.8×10^4
有机质/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	35 700		

1.2 降解菌菌源

所用的 12 株降解菌是前期研究中从甘肃庆阳(GQ)、陕北子长(SZ)和陕北清涧(SQ)石油污染土壤中分离获得的,包括 5 株假单胞菌和 7 株杆菌^[11]。

1.3 实验方案设计

将 12 株菌制成 D 值为 0.5 (600 nm 处测定值)的混合菌悬液^[4]。实验方案如表 2 所示,采用花盆模拟实验进行修复研究,称取 9 份供试土壤各 900 g,分装于 9 个花盆中。其中 3 份在自然条件下放置

作为控制实验(CK);另外 3 份在保持含水率为 20% 的条件下,补充氮磷营养液使土壤 C/N/P 比为 100/10/1,并同时投加 12 株混合降解菌悬液进行微生物修复(BA+BS);其余 3 份土壤通过定期向土壤中加入灭菌水保持土壤含水率为 20% (water hold capacity,WHC)。实验具体方案见表 2。

室温条件下每天翻动土壤进行连续修复研究。每隔 7 d 取一次土壤样品,置于通风橱中风干,取 1 g 用于测定石油烃的不同组分。

表 2 石油污染土壤生物修复处理方案

Table 2 Experiment design for bioremediation of oil-polluted soil

编号	修复方案
CK	0.9 kg 石油污染土壤(土壤含水率 3%)
BA + BS	0.9 kg 石油污染土壤 + 9 mL GS2 菌悬液($D_{600\text{ nm}}=0.5$) ¹⁾ + 氮磷营养液(土壤 C: N: P = 100: 10: 1) ²⁾ + 灭菌纯水(保持土壤含水率 20%)
WHC	0.9 kg 石油污染土壤 + 灭菌纯水(保持土壤含水率 20%)

1) $D_{600\text{ nm}}=0.5$,相当于 $5\times 10^7\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$; 2) 向土壤中加入尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 KH_2PO_4 调节土壤 C: N: P 为 100: 10: 1

利用超声波萃取法提取土壤中的总石油烃^[12],参照 EPA 3611B^[13]方法,将提取的总石油烃采用柱层析法分离成不同组分,利用 GC-MS 测定不同组分含量。

GC-MS 测定烷烃如下。色谱柱: HP-5 毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm);进样量: 1 μL ;不分流进样;载气(氦气)流量: 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;进样口温度: 300℃;升温程序: 初始温度为 65℃,保持 5 min,以 10℃·min⁻¹的速率升至 300℃,保持 5 min;电子轰击(EI)离子源能量: 70 eV;离子源温度:

230℃;四级杆温度: 150℃;溶剂延迟: 5 min;选择离子监测(SIM)模式: 特征离子质荷比(m/z)57、85。

GC-MS 测定多环芳烃条件。色谱柱: HP-5 毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm);进样量: 1 μL ;不分流进样;载气(氦气)流量: 1.2 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;进样口温度: 300℃;升温程序: 初始温度为 50℃,保持 1 min,以 15℃·min⁻¹的速率升至 170℃,保持 2 min,然后以 8℃·min⁻¹的速率升至 210℃,最后以 3℃·min⁻¹的速率升至 300℃,保持 5

min; 电子轰击(EI)离子源能量: 70 eV; 离子源温度: 230℃; 四级杆温度: 150℃; 溶剂延迟: 5 min; 碰撞气(氦气、氮气)流量: 1.5 mL·min⁻¹; 多重反应监测(MRM)模式.

1.4 高通量测序分析

利用 Illumina MiSeq 平台对修复 18 周的不同处理石油污染土壤进行高通量分析测定,以研究其菌群结构差异. 具体测定步骤如下.

利用 OMEGA 试剂盒(Life, USA)提取土壤的总 DNA,利用琼脂糖凝胶电泳检验 DNA 的完整性.

利用 Qubit 2.0 DNA 检测试剂盒(Life, USA)对基因组 DNA 精确定量,以确定 PCR 反应应加入的 DNA 量. 利用 341F/805R 引物进行 PCR 扩增,341F 引物: 5'-CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTG- 3'; 805R 引物: 5'-GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGA ATTCCA-3'.

PCR 扩增程序如下: 94℃ 预变性 3 min, 94℃ 变性 30 s, 45℃ 退火 20 s, 65℃ 延伸 30 s, 重复 5 个循环; 94℃ 变性 20 s, 55℃ 退火 20 s, 72℃ 延伸 30 s, 重复 20 个循环; 引入 Illumina 桥式 PCR 兼容引物, 95℃ 预变性 30 s, 95℃ 变性 15 s, 55℃ 退火 15 s, 72℃ 延伸 30 s, 重复 5 个循环. 利用琼脂糖凝胶电泳分析,选用 0.6 倍磁珠处理,纯化回收所需的 PCR 产物.

利用 Qubit 2.0 DNA 检测试剂盒对回收的 DNA 精确定量,并等量混合,每个样品 DNA 质量取 10 ng,最终上机测序量为 20 pmol.

1.5 土壤不同形态氮的测定

每周取不同处理土壤,风干、研磨过 2 mm 筛后,准确称取 1 g 土壤. 利用凯氏定氮法测定土壤中总氮的含量; 利用氯化钙浸提-紫外光度法测定土

壤硝态氮的含量; 利用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定土壤中氨氮的含量. 详见文献[14].

1.6 数据分析

利用 Origin 9.0 软件对数据进行统计分析和计算,利用 Prinseq 软件对高通量测序结果进行质量控制,利用 Usearch 软件校正序列并将所有样本序列按照序列间的距离进行聚类,根据序列之间的相似性将序列分成不同的操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU),物种分类和 Alpha 多样分析分别使用 RDP classifier 和 Mothur 软件进行.

2 结果与讨论

2.1 不同组分烃的降解

不同修复处理土壤中烷烃、多环芳烃的含量变化如图 1 所示. 修复 18 周,经过微生物修复处理的土壤中(BA + BS) 烷烃含量由 25 987.8 mg·kg⁻¹降低至 12 788.6 mg·kg⁻¹,烷烃总去除率为 50.8%; 多环芳烃的含量由初始时的 5 322.9 mg·kg⁻¹降低至 2 917.2 mg·kg⁻¹,总去除率为 45.2%. 在保持土壤湿度为 20% 条件下处理的土壤中(WHC),烷烃含量由 25 987.8 mg·kg⁻¹降低至 21 661.3 mg·kg⁻¹,烷烃总去除率为 16.7%,多环芳烃由 5 322.9 mg·kg⁻¹降低至 4 342.8 mg·kg⁻¹,多环芳烃总去除率为 18.4%. 控制实验(CK)中烷烃含量由 25 987.8 mg·kg⁻¹降低至 23 267.5 mg·kg⁻¹,烷烃总去除率为 10.5%; 多环芳烃由 5 322.9 mg·kg⁻¹降低至 4 952.3 mg·kg⁻¹,多环芳烃总去除率为 7.0%. 结果说明与 CK 处理相比,微生物修复作用可有效去除土壤中大部分的烷烃和多环芳烃. 保持土壤含水率为 20% 的 WHC 处理对于土壤中烷烃、多环芳烃的去除效果并不明显.

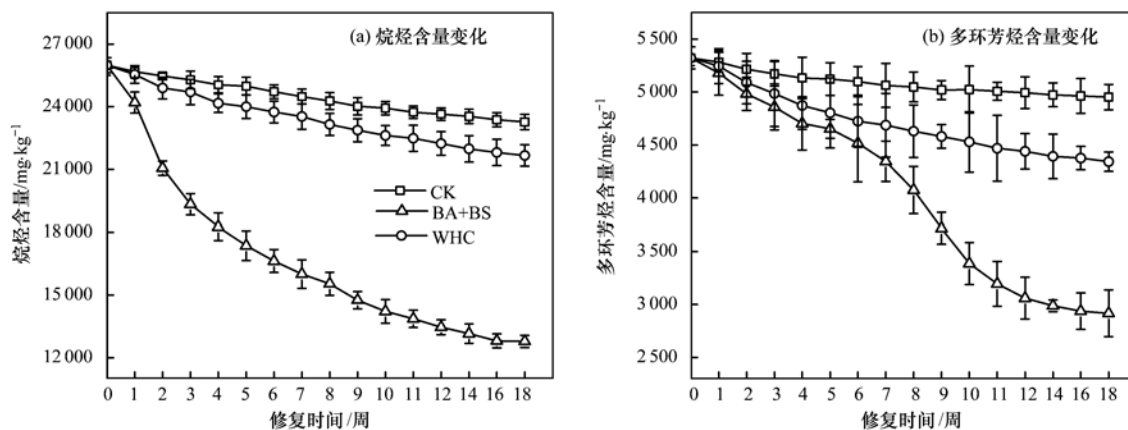


图 1 不同处理土壤中烷烃和多环芳烃含量变化曲线

Fig. 1 Concentrations of alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in soil with different treatments

多数研究认为土壤湿度是影响微生物修复作用的主要因素^[15],在本研究中,土壤湿度为 20% 时,对于不同组分石油烃的去除没有明显促进作用,笔者在前期工作中也得出了相似的研究结果^[4]. 可能是由于西北地区半干旱的环境条件已经使当地的土壤微生物适应了缺水环境,其具体原因有待于进一步的研究.

2.2 微生物群落多样性分析

2.2.1 基因序列优化统计及质量评估

利用 PCR 技术扩增细菌 16S rDNA 基因,并进

行高通量测序. 对测序质量进行评价,结果如表 3 所示,处理前测定的 3 个土壤样品序列总数均在 43 000 条以上. 为了提高后续分析质量和可靠性,利用 Usearch 剔除掉靶区域外序列,同时去除嵌合体,对原始序列进行去接头、质量剪切等处理. 3 个土壤样品有效序列分别为 42 996、43 347、44 233 条,序列优化率均在 89% 以上,说明本次序列优化的步骤合理. 3 种不同处理的土壤样品的测序覆盖率均大于 99%,说明本次 MiSeq 测序深度足够.

表 3 优化序列统计及测序质量评价

Table 3 Sequence statistics and quality estimation of 3 soil samples						
不同处理	优化前序列总数	非靶区域序数目	嵌合体数目	处理后剩余序列	优化率/%	覆盖率/%
CK	43 555	3	556	42 996	98.7	99.5
BA + BS	46 306	0	2 959	43 347	93.6	99.7
WHC	49 519	0	5 286	44 233	89.3	99.8

2.2.2 群落多样性分析

多样性指数是用于评价土壤微生物丰富度和群落均匀度的综合指标^[16]. ACE 指数和 Chao1 指数用来评价土壤微生物的丰富度,ACE 指数和 Chao1 指数值越大,表明土壤微生物丰富度越大. Shannon 和 Simpson 指数用来评价土壤微生物的均匀度,Shannon 指数值越大,Simpson 指数值越小,表明土壤微生物均匀度越高^[17]. 根据表 4 可知,经过修复处理的土壤样品 (BA + BS),其 ACE 指数和 Chao1 指数值分别为 1 031.17 和 648.64,低于未经处理的

土壤指数 (CK 土壤中的两个指数分别为 1 148.91 和 871.91),然而经过修复的土壤 Shannon 指数值大于自然条件下修复的土壤,说明微生物修复作用可降低石油污染土壤中微生物的丰富度. 另外,土壤微生物群落的均匀度经过生物修复处理有所提高.

比较 CK 处理和 WHC 处理的土壤微生物群落多样性指数可知,WHC 处理的 ACE、Chao1 指数相对 CK 较低,但其 Shannon 指数值增加,说明提高土壤含水率可在一定程度上降低土壤微生物群落的均匀度,但土壤微生物群落的丰富度略有增加.

表 4 不同处理土壤的微生物群落多样性指数

Table 4 Diversity indices of bacterial communities of soils with different treatments				
不同处理	Shannon 指数	ACE 指数	Chao1 指数	Simpson 指数
CK	2.93	1 148.91	871.91	0.19
BA + BS	3.31	1 031.17	648.64	0.07
WHC	3.17	566.22	556.14	0.11

2.2.3 土壤的微生物群落结构

(1) 门水平微生物群落结构分析

3 种不同处理的油污土壤样品中微生物归属于 33 个门,其中 12 个门为 3 种处理样品所共有,分别为放线菌门 (Actinobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、暂定螺旋体门 (Candidatus Saccharibacteria)、拟杆菌门 (Bacterodetes)、厚壁菌门 (Firmicutes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、疣微菌门 (Verrucomicrobia)、栖热球菌门 (Deinococcus-Thermus)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes) 以及一种未知菌门 (unclassified).

对不同处理土壤前 10 种优势菌门的相对丰度图进行了分析,所得结果如图 2 所示,经过修复处理 (BA + BS) 的微生物群落结构在门水平丰度分布上发生了较大变化. 未经修复处理的土壤 (CK) 中的优势菌群主要是放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria),所占比例分别为 64.4% 和 29.6%. 经过微生物修复处理的土壤 (BA + BS) 中,放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria) 仍然是土壤中的最优势菌群,但是其所占比例分别降低为 48.5% 和 15.4%. 另外,螺旋体菌门 (Candidatus Saccharibacteria)、拟杆菌门 (Bacterodetes)、厚壁菌门 (Firmicutes)、绿弯菌门

(Chloroflexi)所占丰度在微生物修复处理的土壤(BA + BS)中显著提高。

放线菌群处在多个生态位上,因此它们广泛存在于各种土壤中,有报道指出在多环芳烃污染的土壤中通常含有较多放线菌门^[18]。根据报道,厚壁菌门(Firmicutes)是常见的石油解菌之一,广泛存在于油井附近的污染土壤中;拟杆菌(Bacteroidetes)是石油污染土壤中降解 PAHs 的优势菌群^[19]。本研究,经过微生物修复处理(BA + BS)的土壤中厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)所占丰度高于自然条件下放置的土壤,说明土壤中石油烃去除率的提高与土壤中烃类降解菌的增加有关。

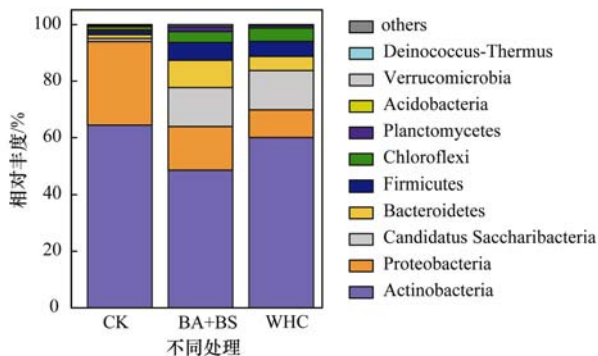


图2 土壤微生物门水平相对丰度

Fig. 2 Relative abundances of the 10 most abundant phyla in three soil samples

(2) 属水平微生物群落结构分析

对不同处理土壤样品中 20 种最优势菌属进行分析,结果如图 3 所示。在属水平上,CK 处理的土壤优势菌属是类诺卡氏菌属(*Nocardioide*s)原小单孢菌属(*Promicromonospora*),次优势菌属包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)、微孢菌属(*Microcella*)、未知菌属(*unclassified*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、螺旋体门未知属(*Saccharibacteria*)；WHC 处理的土壤优势菌属为类诺卡氏菌属(*Nocardioide*s),次优势菌属包括螺旋体门未知属(*Saccharibacteria*)、迪茨氏菌属(*Dietzia*)、赖氏菌属(*Leifsonia*)、未知菌属(*unclassified*)、红色杆菌属(*Olsenella*)、粘质赛氏杆菌(*Saccharofermentans*)；经过微生物处理的土壤,其微生物群落结构在属水平上发生了较大的变化,其优势菌属为类诺卡氏菌属(*Nocardioide*s)、螺旋体门未知属(*Saccharibacteria*)及迪茨氏菌属(*Dietzia*)。

刘健^[20]研究发现,迪茨氏菌属(*Dietzia*)分布在 PAHs 污染含量相对较高的油井井口处,在高盐环境条件下迪茨氏菌属(*Dietzia*)能有效降解石油烃,

Wang 等^[21]从石油污染环境中发现新型迪茨氏菌能有效降解芳香族化合物,并且对烷烃也具有较宽的降解谱($C_6 \sim C_{40}$),对采油区土壤生物修复效率的提高尤为重要。本研究中利用微生物法修复甘肃油田石油开采区盐碱土壤,显著提高了土壤中迪茨氏菌属(*Dietzia*)的相对丰度。

从属水平微生物均匀度来看,BA + BS 处理土壤菌群在属水平上相对丰度相差较小,均匀度较高。除了几种优势菌群,还包括有赖氏菌属(*Leifsonia*)、里氏杆菌属(*Riemerella*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)等,其中赖氏菌属(*Leifsonia*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)已成为现今众多科研者筛选用以石油污染土壤生物修复的特定降解菌群^[22,23]。

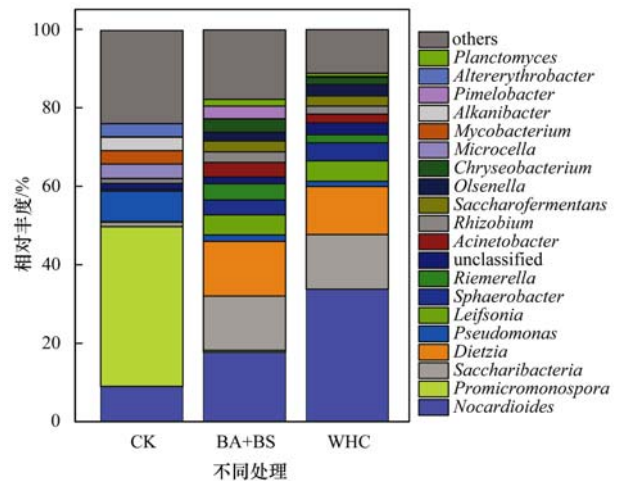


图3 土壤微生物属水平相对丰度

Fig. 3 Relative abundances of the 20 most abundant genera in three soil samples

2.3 土壤中不同形态氮的变化规律

对修复过程中不同处理的土壤中氮素含量变化进行了分析测定,结果如图 4 所示。在微生物修复处理的土壤中(BA + BS),总氮含量在修复初期显著增加,2~6 周时迅速降低,12 周后基本保持不变,修复后期土壤中的总氮含量约为 $1\ 630\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；氨氮含量先增加,在第四周达到最大($53.86\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),第 6 周时迅速降低至 $2.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,并在 6 周后保持不变；硝态氮含量在修复的前 4 周呈下降趋势,4 周后基本保持不变,含量降低至 $6.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。自然放置的土壤(CK)中,总氮、氨氮及硝态氮含量变化不大,分别为 750 、 0.9 和 $38.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 WHC 处理中,总氮、氨氮含量变化趋势与自然放置土壤的变化基本一致；硝态氮含量在修复前期降低,修复后期保持不变。

综合氨氮、硝氮及总氮变化来看,修复初期 BA

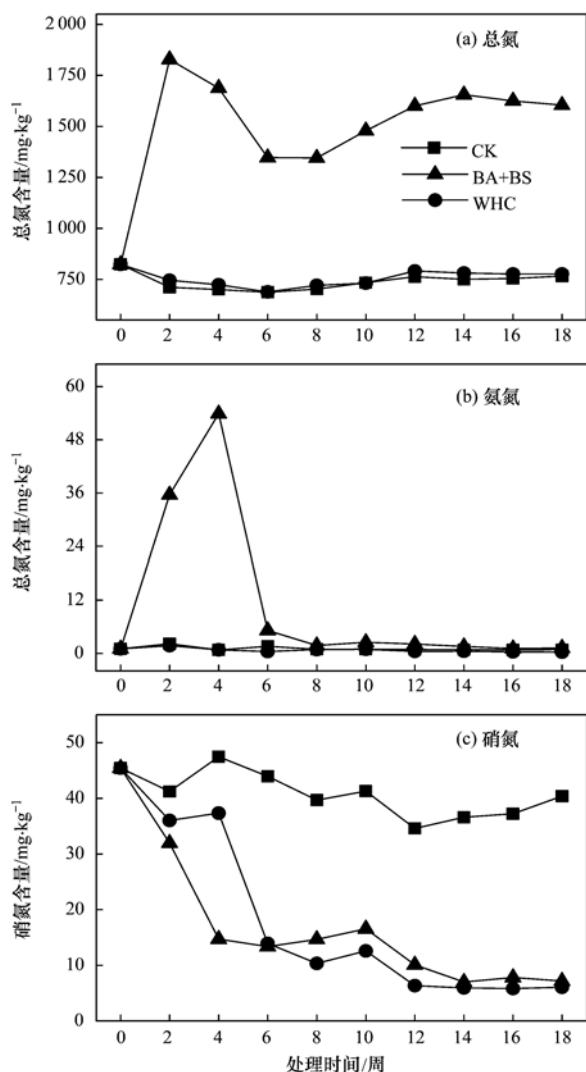


图4 土壤中不同形态氮的含量变化

Fig. 4 Concentration of different types of nitrogen in different soils

+ BS 处理中总氮与氨氮含量明显高于 CK 及 WHC 处理,随后 BA + BS 处理中氨氮和硝氮的含量显著降低,而总氮含量基本趋于稳定. 原因可能是由于本次修复研究中外加氮源为尿素,属酰胺态氮肥,在脲酶的作用下会部分水解为铵态氮,这一部分铵态氮及其通过硝化作用产生的硝态氮能为大多数微生物的新陈代谢所直接利用. 因此 BA + BS 处理的土壤中氨氮含量在修复前期也呈显著增加趋势,修复 4 周后由于微生物新陈代谢作用、生物质土壤胶质的固定作用以及土壤淋洗流失等原因,导致氨氮含量迅速降低^[24]. 但可能由于本次供试土壤中氨化类细菌数量较少或者脲酶活性降低,使得这一转化过程无法继续进行,土壤中的氮素在发生部分氨化后,大部分仍以有机氮的形式存在,所以微生物仅能利用土壤中原有的无机氮源及少量有机氮源进行正

常的新陈代谢作用,引起氨氮及硝氮含量的显著降低. 另外,尿素的水解产物均属不稳定化合物,在一定条件下会有相当量的氮以氨气的形式逸出损失,但铵态氮相对于总氮而言含量很低,因此并没有表现出总氮的显著减少^[25,26].

3 结论

(1)微生物修复处理的土壤中,烷烃和多环芳烃的去除率分别为 50.8% 和 45.2%,不经微生物处理的土壤中烷烃和多环芳烃的去除率分别为 10.5% 和 7.0%,说明微生物修复处理可有效去除土壤中大部分烷烃和多环芳烃.

(2)未经处理的油污土壤中,优势菌门主要为放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria),土壤优势菌属为类诺卡氏菌属 (*Nocardioide*s) 和原小单孢菌属 (*Proteomonomospora*). 微生物修复处理提高了土壤中厚壁菌门 (Firmicutes)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 所占丰度,土壤中的优势菌属为类诺卡氏菌属 (*Nocardioide*s)、螺旋体门未知属 (*Saccharibacteria*) 及迪茨氏菌属 (*Dietzia*). 经过微生物修复处理的土壤中烃降解菌所占丰度明显增加,烷烃和多环芳烃降解效果的提高与土壤中烃降解菌所占丰度的增加有关.

(3)经过修复处理的土壤中总氮、氨氮含量都呈现先增加、后降低的趋势,而硝态氮的含量在修复前期呈降低趋势,修复后期基本保持不变. 说明修复过程中存在着部分总氮向氨氮的转化,而石油烃的降解与土壤硝氮含量相关.

参考文献:

- [1] 宋雪英,宋玉芳,孙铁珩,等. 矿物油污染土壤中芳烃组分的生物降解与微生物生长动态[J]. 环境科学, 2004, **25** (3): 115-119.
Song X Y, Song Y F, Sun T H, et al. Biodegradation of aromatic hydrocarbons and dynamics of microbe growth in soils contaminated with mineral oil [J]. Environmental Science, 2004, **25** (3): 115-119.
- [2] 焦海华,潘建刚,徐圣君,等. 原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性[J]. 环境科学, 2015, **36** (8): 3038-3044.
Jiao H H, Pan J G, Xu S J, et al. Improving agricultural safety of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons by in situ bioremediation [J]. Environmental Science, 2015, **36** (8): 3038-3044.
- [3] Lu L, Yazdi H, Jin S, et al. Enhanced bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil using pilot-scale bioelectrochemical systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **274**: 8-15.

- [4] 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.
- [5] 曹文娟, 吴蔓莉, 张明辉, 等. 石油降解菌的筛选优化及其对油污土壤的修复特性[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(12): 5493-5498.
- Cao W J, Wu M L, Zhang M H, *et al.* Isolation and optimization of petroleum degrading bacteria and their bioremediation effects on petroleum-contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(12): 5493-5498.
- [6] 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 Q, Wu M L, Nie M Q, *et al.* Effects and biological response on bioremediation of petroleum contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1856-1863.
- [7] 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**: 158-164.
- [8] Naseri M, Barabadi A, Barabady J. Bioremediation treatment of hydrocarbon-contaminated Arctic soils: influencing parameters [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, **21**(19): 11250-11265.
- [9] Margesin R, Schinner F. Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2001, **67**(7): 3127-3133.
- [10] Morgan P, Watkinson R J. Hydrocarbon degradation in soils and methods for soil biotreatment [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1989, **8**(4): 305-333.
- [11] 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 Q, Wu M L, Cao B X, *et al.* Isolation of petroleum degrading strains and determination their degrading and gene characteristics [J]. *Journal of Safety & Environment*, 2014, **14**(1): 187-192.
- [12] 姜岩, 伍涛, 张贤明. 土壤中石油烃预处理及含量分析方法研究进展[J]. *土壤*, 2015, **47**(3): 461-465.
- Jiang Y, Wu T, Zhang X M. Research progresses of pretreatment and determination methods for petroleum hydrocarbons in soils [J]. *Soils*, 2015, **47**(3): 461-465.
- [13] Pons-Jiménez M, Guerrero-Peña A, Zavala-Cruz J, *et al.* Removal of oil and petroleum compounds from soils with different physical and chemical characteristics [J]. *Universidad Y Ciencia*, 1999, **27**(1): 1-15.
- [14] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. (第二版). 北京: 农业出版社, 2014. 40-47.
- [15] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **44**(1): 9-20.
- [16] Sengupta A, Dick W A. Bacterial community diversity in soil under two tillage practices as determined by pyrosequencing[J]. *Microbial Ecology*, 2015, **70**(3): 853-859.
- [17] Li H, Ye D D, Wang X G, *et al.* Soil bacterial communities of different natural forest types in Northeast China [J]. *Plant & Soil*, 2014, **383**(1-2): 203-216.
- [18] Ortega-González D K, Martínez-González G, Flores C M, *et al.* *Amycolatopsis* sp. Poz14 isolated from oil-contaminated soil degrades polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, **99**: 165-173.
- [19] Viñas M, Sabaté J, Guasp C, *et al.* Culture-dependent and-independent approaches establish the complexity of a PAH-degrading microbial consortium [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2005, **51**(11): 897-909.
- [20] 刘健. 胜利油田采油区土壤石油污染状况及其微生物群落结构[D]. 济南: 山东大学, 2014. 40-42.
- [21] Wang X B, Chi C Q, Nie Y, *et al.* Degradation of petroleum hydrocarbons (C₆-C₄₀) and crude oil by a novel *Dietzia* strain [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(17): 7755-7761.
- [22] 崔丽虹. 石油烃降解菌的筛选、鉴定及复合菌群降解效果的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. 30-56.
- [23] 王虎, 吴玲玲, 周立辉, 等. 陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能[J]. *生态学报*, 2014, **34**(11): 2907-2915.
- Wang H, Wu L L, Zhou L H, *et al.* Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(11): 2907-2915.
- [24] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 46-51.
- [25] Margesin R, Walder G, Schinner F. The impact of hydrocarbon remediation (diesel oil and polycyclic aromatic hydrocarbons) on enzyme activities and microbial properties of soil [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2000, **20**(3-4): 313-333.
- [26] Margesin R, Schinner F. A feasibility study for the in situ remediation of a former tank farm [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1999, **15**(5): 615-622.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172