

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

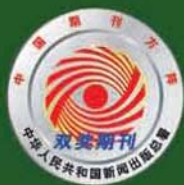
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

# 磷脂脂肪酸 ( PLFA ) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构

左易灵, 贺学礼\*, 王少杰, 赵丽莉

(河北大学生命科学学院, 保定 071002)

**摘要:** 为了评价和管理干旱和半干旱地区的植物生长, 需要了解荒漠土壤资源空间分布和土壤微生物功能. 本试验在乌海、磴口和阿拉善采取蒙古沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 根围土壤样品, 采用磷脂脂肪酸 (PLFA) 法结合 Sherlock 微生物鉴定系统, 研究了蒙古沙冬青根围土壤微生物群落空间分布特征. 结果表明, 蒙古沙冬青根围土壤微生物 PLFA 有较高的多样性, 3 样地土壤共检测到 41、31 和 48 种磷脂脂肪酸, 土壤优势 PLFA 为 16:0、16:0 10-methyl、18:1 $\omega$ 9c 和 16:1 $\omega$ 7c, 均以 16:0 (表征细菌) 含量最大, 16:0 10-methyl、18:1 $\omega$ 9c 和 16:1 $\omega$ 7c 在各样地含量有所差异. 蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构有明显空间异质性; 土壤微生物以革兰氏阳性细菌 (G+) 为主, AM 真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌 (G-) 和真菌均表现为阿拉善 > 乌海 > 磴口, 而放线菌 PLFA 总含量表现为乌海 > 阿拉善 > 磴口. 在土壤真菌生物量中, AM 真菌所占比重最大, 尤其在磴口和阿拉善 AM 真菌占到真菌生物量 91% 和 92%, 说明 AM 真菌是荒漠土壤微生物系统中重要组成成分. RDA 分析表明, AM 真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、真菌和放线菌与土壤磷酸酶、总球囊霉素、氨氮和 pH 正相关. G+/G- 与脲酶、有机碳和易提取球囊霉显著负相关, 而真/细菌与易提取球囊霉素, 脲酶和有机碳显著正相关. 研究说明土壤磷酸酶、总球囊霉素、氨氮和 pH 是影响土壤微生物 PLFA 变化的重要因子. 同时, 土壤微生物群落变化规律可用于检测土地荒漠化和土壤退化状况.

**关键词:** 土壤微生物群落; 磷脂脂肪酸 (PLFA); 空间分布; 蒙古沙冬青; 内蒙古荒漠带

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2705-09 DOI: 10.13227/j.hjxk.2016.07.038

## Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of *Ammopiptanthus mongolicus* by Phospholipid Fatty Acid ( PLFA )

ZUO Yi-ling, HE Xue-li\*, WANG Shao-jie, ZHAO Li-li

(College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** To measure and manage plant growth in arid and semi-arid sandlands, improved understanding of the spatial patterns of desert soil resources and the role of soil microbes is required. The rhizosphere soils of *Ammopiptanthus mongolicus* in Wuhai, Dengkou, and Alxa, Inner Mongolia, China were collected in July 2015. Soil microbial community structure in the rhizosphere of *A. mongolicus* was analyzed by phospholipid fatty acid (PLFA) combined with Sherlock microbial identification system. The results showed that the soil microbial PLFA had a higher diversity and 41, 31 and 48 kinds of phospholipid fatty acids were respectively detected in the rhizosphere of *A. mongolicus* in three different sites. 16:0, 16:0 10-methyl, 18:1 $\omega$ 9c and 16:1 $\omega$ 7c were the dominant PLFA, and the PLFA of 16:0 (indicating bacteria) had a maximum value. However, the differences in contents of 16:0 10-methyl, 18:1 $\omega$ 9c and 16:1 $\omega$ 7c were found in the three sites. Soil microbial community in the rhizosphere of *A. mongolicus* had obvious spatial heterogeneity: the gram positive bacteria were the dominant microorganisms in all soil samples. AM fungi, gram positive bacteria, gram negative bacteria and fungi were all characterized by Alxa > Wuhai > Dengkou, and total PLFA content of actinomycetes followed the order of Wuhai > Alxa > Dengkou. AM fungi occupied the biggest proportion in the soil fungal biomass, especially in Dengkou and Alxa, which accounted for 91% and 92%, respectively. We concluded that AM fungi were an important component of soil microorganisms in the desert ecosystem. AM fungi, gram positive bacteria, gram negative bacteria, fungi and actinomycetes were positively correlated with soil acid and alkaline phosphatase, total glomalin, ammonia nitrogen and pH. G+/G- were extremely negatively correlated with soil urease, organic carbon and easily extractable glomalin. However, the fungi/bacteria were extremely positively correlated to soil urease, organic carbon and easily extractable glomalin. The results of this study support the conclusion that soil acid and alkaline phosphatase, total glomalin, ammonia nitrogen and pH were the main factors influencing soil microbial biomass and activities in desert zone. Moreover, the changing pattern of soil microbial community might be useful to monitor desertification and soil degradation.

**Key words:** soil microbial community; phospholipid fatty acid (PLFA); spatial distribution; *Ammopiptanthus mongolicus*; Inner Mongolia desert

我国荒漠带主要分布于内蒙古、甘肃、宁夏、新疆等西北地区, 气候条件恶劣, 植物种类组成与群落结构简单, 生态系统极其脆弱, 生态环境易受破坏. 蒙古沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 隶属豆

收稿日期: 2015-12-19; 修订日期: 2016-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170488)

作者简介: 左易灵 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为菌根生物学, E-mail: zuoyiling@foxmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: xuelh1256@aliyun.com

科沙冬青属,具有极强的抗逆性,是荒漠地区主要防风固沙的优良灌木和珍稀濒危植物,对于荒漠生态系统维持和沙漠绿化有重要作用.但是,目前沙冬青天然种群的退化导致其分布面积日趋减小而处于濒危状态.

微生物是整个土壤生态系统的重要部分,推动着生态系统物质能量的循环和转化,对生态系统功能维持起关键作用<sup>[1]</sup>.土壤微生物群落结构和多样性能较早反映土壤环境质量的变化,揭示微生物功能差异性,已被认为是重要的生物学指标<sup>[2]</sup>.磷脂脂肪酸(PLFA)是一种可定性和定量分析土壤微生物群落多样性的方法,根据不同微生物体 PLFA 组成和含量的种属特异性,对微生物生物量及其群落结构进行估算.目前 PLFA 已广泛应用于不同土壤类型微生物的研究<sup>[3]</sup>,Tunlid 等<sup>[4]</sup>认为土壤中 PLFA 的组成可直接表示土壤微生物群落的生物量和结构,近年来利用 PLFA 方法对土壤微生物群落结构的研究已取得大量成果<sup>[5,6]</sup>.

土壤微生物作为植物与土壤互作的重要成分,其群落组成除受特殊气候和地理环境影响外,地表植被覆盖类型对土壤微生物的结构和组成有直接影响<sup>[7]</sup>.李晶等<sup>[8]</sup>对土壤微生物环境胁迫响应机制的研究表明,土壤微生物对所生存的土壤环境十分敏感,土壤生态机制变化和環境胁迫都能导致微生物群落结构的改变,进而影响地上植被的生长状况.Fierer 等<sup>[9]</sup>研究认为土壤微生物群落结构具有一定的空间分布特征,土壤通气性、水分状况、养分状况等对土壤微生物群落结构的空間分布均有重要影响.因此,对沙冬青根围土壤微生物群落的研究,有利于更好地理解沙冬青的抗逆机制.此外,探究 AM 真菌在生态系统中的功能已经成为菌根学领域新的研究热点,其根外菌丝分泌物可影响不同微生物类群活跃程度,改变土壤微生物群落结构<sup>[10]</sup>.杜小刚等<sup>[11]</sup>研究表明,AM 真菌对刺槐根际微生物群落的稳定和多样性的增加都具有促进作用.

目前,国内外对沙冬青的研究主要集中在沙冬青内生真菌分布、物种多样性及生态功能等方面<sup>[12,13]</sup>,而对沙冬青根围土壤微生物群落结构的研究甚少.本试验采用磷脂脂肪酸法结合 Sherlock 微生物鉴定系统,研究蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构空间分布和 AM 真菌对荒漠土壤微生物群落的影响,深入探讨土壤因子对微生物分布的影响,以期为干旱风沙区荒漠植被恢复和生态环境保护提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样地概况和样品采集

于 2015 年 7 月在内蒙古乌海、磴口、阿拉善分别选取 3 个小样地,各小样地分别随机选取生长良好的 3 株蒙古沙冬青植株,去除土壤表层枯枝落叶层后,在距植株主干 0~30 cm 范围内采集土壤样品,将土样装入隔热性能良好的采样袋中保存并带回实验室过 2 mm 筛.部分土样保存在 -20℃ 用于 PLFA 检测(0~30 cm)和土壤酶活性测定(0~50 cm),其余土样进行土壤理化性质分析(0~50 cm).各采样点概况如表 1 所示.

表 1 内蒙古荒漠带各采样点及样地概况

Table 1 Sampling sites in Inner Mongolia desert zone			
样地	海拔/m	经纬度	
乌海	前钢	1 129.45	39°49'N,106°49'E
	摩儿沟	1 109.85	39°43'N,106°51'E
	白独贵湾	1 141.35	39°36'N,106°48'E
磴口	阿敦乌苏	1 002.99	40°23'N,106°44'E
	巴彦毛德	1 006.47	40°28'N,106°25'E
	乌兰呼	1 002.18	40°29'N,106°23'E
阿拉善	扎罕乌苏南	1 402.22	39°20'N,106°18'E
	扎罕乌苏北	1 468.21	39°55'N,106°41'E
	扎罕乌苏西	1 482.25	39°55'N,106°40'E

### 1.2 土壤因子测定

土壤 pH 用精密酸度计测定;土壤有机 C 用马弗炉烘干法;氨氮按碱解法并利用全自动化学分析仪 Smartchem200 测定;有效 P 用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[14]</sup>测定;速效 K 用 1 mol·L<sup>-1</sup>醋酸铵浸提-火焰光度法测定.用改进的 Bremner 和 Tabatabai 法<sup>[15]</sup>测定土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶,活性分别以每克土样培养 1 h 酸性磷酸酶和碱性磷酸酶转化对硝基苯磷酸二钠(pNPP)的量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示.土壤脲酶用改进的 Hoffmann 与 Teicher 比色法<sup>[16]</sup>测定,活性以每克土样培养 1 h 催化尿素分解产生 NH<sub>3</sub>-N 的微克数( $\mu\text{g}$ )表示.

土壤球囊霉素分别按 Wright 等<sup>[17]</sup>和 Janos 等<sup>[18]</sup>方法测定.易提取球囊霉素(EEG):取 1 g 土样于试管中,加入 8 mL、20 mmol·L<sup>-1</sup>(pH 7.0)的柠檬酸钠浸提剂,在 103 kPa、121℃ 条件下连续提取 90 min,10 000 r·min<sup>-1</sup>离心 5 min,收集上清液;总球囊霉素(TEG):取 1 g 风干土于试管中,加入 8 mL、50 mmol·L<sup>-1</sup>(pH 8.0)柠檬酸钠浸提剂,在 103 kPa、121℃ 条件下连续提取 60 min,再重复提取 2 次;10 000 r·min<sup>-1</sup>离心 5 min,收集上清液.分别吸

取上清液 0.5 mL 加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂, 在 595 nm 波长下比色. 用牛血清蛋白标液, 考马斯亮蓝法显色, 绘制标准曲线, 求出球囊霉素含量.

### 1.3 磷脂脂肪酸的分离与气相色谱检测

土壤微生物群落结构通过分析土壤中微生物磷脂脂肪酸组分来测定, 根据 Bossio 等的方法有所改进<sup>[19]</sup>.

(1) 提取分离 称取 8.0 g 冻干土样, 使用单相提取剂柠檬酸缓冲溶液[氯仿: 甲醇: 柠檬酸比为 1: 2: 0.8 (体积比)] 浸提(剩余土壤用提取液重复浸提一次), 浸提液倒入分液漏斗, 分别加入 12 mL 三氯甲烷和磷酸缓冲液, 摇动 2 min, 静置过夜.

(2) 纯化 用 SPE 柱(3 mL 氯仿活化)分离, 分别加入 5 mL 氯仿、10 mL 丙酮, 最后用 5 mL 甲醇淋洗, 收集甲醇相于试管中, 32℃ 水浴, N<sub>2</sub> 浓缩.

(3) 甲酯化 向试管中依次加入 1 mL 1:1 甲苯: 甲醇和 0.2 mol·L<sup>-1</sup> KOH 溶液摇匀, 37℃ 下温育 1 h, 依次加入 0.3 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> 醋酸溶液, 2 mL 正己烷和 2 mL 超纯水, 低速振荡 10 min (重复振荡浸提一次), 将上层正己烷溶液移入小瓶, N<sub>2</sub> 脱水干燥, 得到甲酯化脂肪酸样品. 该样品用 200 μL 正己烷溶解, 在气相色谱仪(美国 Agilent6890N 型)上采用 MIDI 软件系统(MINDI, Newark, Delaware, USA) 结合 SherlockMIS4.5 系统 (Sherlock Microbial Identification System) 进行磷脂脂肪酸鉴定分析.

### 1.4 磷脂脂肪酸的命名与含量测定

磷脂脂肪酸命名参考 Frostagard 等<sup>[20]</sup>的命名方法. 每种脂肪酸通过单个样品中的内标(C19:0, 10 ng·μL<sup>-1</sup>) 来表达定量(nmol·g<sup>-1</sup>), 按照 Abaye 等<sup>[21]</sup>描述的方法计算 PLFA 含量, 计算公式为:

$$mF = (PFAME \times c_{ng, std} \times V) / (PISTD \times M_{ng, std} \times W)$$

式中, PFAME 和 PISTD 分别是每个甲酯化脂肪酸和内标峰面积,  $c_{ng, std}$  是内标浓度 (ng·μL<sup>-1</sup>),  $M_{ng, std}$  是内标摩尔质量,  $V$  (μL) 代表溶样体积,  $W$  (g) 代表干重土壤质量.

细菌特征 PLFAs 包含 12:0 anteiso、13:0 anteiso、14:0、15:0 anteiso、15:0 iso、15:0、16:0 anteiso、16:1ω7c、16:0、17:1 iso ω9c、17:0 anteiso、17:0 iso、17:1ω8c、17:0 cyclo ω7c、18:1ω7c、18:1ω5c、19:0 cyclo ω7c, 其中 12:0 anteiso、13:0 anteiso、14:0、15:0 anteiso、15:0 iso、15:0、16:0 anteiso、17:0 iso、17:0 anteiso 和 17:1 iso ω9c 划分为革兰氏阳性细菌(G+), 而 16:0、16:1ω7c、

17:1ω8c、17:0 cyclo ω7c、18:1ω7c、18:1ω5c 和 19:0 cyclo ω7c 归为革兰氏阴性细菌(G-). 18:0 10-methyl、16:0 10-methyl 和 20:0 10-methyl 表征放线菌; 18:1ω9c 和 18:2ω6c 表征真菌; 16:1ω5c 表征 AM 真菌.

### 1.5 数据处理与分析

所有试验数据取 3 个重复的平均值, 用 EXCEL 2003 软件整理, 利用 SPSS 19.0 生物统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA). 采用 CANOCO 4.5 软件对土壤因子进行主成分分析(PCA), 土壤因子与微生物群落的相关性进行 RDA 分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤因子的空间分布

3 个样地土壤 pH 均呈碱性, 磴口和阿拉善各土层 pH 差异不显著, 乌海各土层 pH 均高于乌海和磴口, 随土层加深 pH 增大, 但差异不显著(表 2). 同一样地不同土层, 土壤脲酶在乌海最大值出现在 0~20 cm 土层, 并随土层增加逐渐降低; 磴口和阿拉善样地脲酶在各土层变化规律不显著. 不同样地同一土层, 乌海脲酶在 0~20 cm 高于磴口和阿拉善; 20~50 cm 各土层样地间差异不显著.

同一样地不同土层, 乌海和阿拉善磷酸酶在 0~10 cm 有最大值, 并随土层增加呈降低趋势; 磴口最大值在 0~20 cm 土层, 并逐渐下降(除 40~50 cm 土层). 易提取球囊霉素在乌海最大值出现在 0~10 cm, 各土层变化规律不明显; 磴口和阿拉善易提取球囊霉素在 0~20 cm 土层有最大值, 并随土层深度增加呈降低趋势. 3 样地总球囊霉素最大值都在 0~10 cm 土层, 并随土层增加呈下降趋势. 不同样地同一土层, 阿拉善磷酸酶在 0~50 cm 各土层都显著高于乌海和磴口. 乌海和阿拉善易提取球囊霉素在 0~50 cm 各土层都显著高于磴口. 3 样地总球囊霉素在 0~10 cm 土层差异不显著, 20~50 cm 各土层均表现为阿拉善 > 乌海 > 磴口.

同一样地不同土层, 土壤有机 C 在乌海和阿拉善最大值都在 0~20 cm 土层, 并随土层增加呈降低趋势; 磴口土壤有机碳各土层差异不显著. 乌海氨氮在 0~10 cm 土层有最大值, 并随土层增加呈降低趋势; 磴口氨氮各土层变化规律不明显; 阿拉善氨氮最大值在 0~30 cm 土层. 有效 P 在乌海各土层变化规律不明显; 磴口和阿拉善最大值在 0~10 cm 土层, 并随土层增加呈降低趋势. 速效 K 最大值都出现在 0~20 cm 土层, 乌海呈下降趋势. 不同样地

同一土层,有机 C 在 0~30 cm 表现为乌海 > 阿拉善 > 磴口;阿拉善 0~30 cm 氨氮显著高于乌海和磴口;磴口 0~50 cm 各土层有效 P 显著高于乌海和

阿拉善;磴口 0~20 cm 土层速效 K 高于乌海和阿拉善,20~50 cm 各土层阿拉善速效钾显著低于乌海和磴口。

表 2 蒙古沙冬青根围土壤因子空间分布<sup>1)</sup>

Table 2 Spatial distribution of soil factors in the rhizosphere of *A. mongolicus*

样地	土层 /cm	pH	酸性磷酸酶 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	碱性磷酸酶 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	脲酶 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	EEG / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	TEG / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	有效 P / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	有机 C / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	氨氮 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	速效 K / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
乌海	0~10	7.53Aa	11.04Ab	26.73Ab	4.69Aa	2.75Aa	1.50Aa	2.94Ab	7.59Aa	0.80Aa	76.10ABb
	10~20	7.66Aa	9.18Bb	18.33Bab	4.50Aa	1.83Cb	1.04Bb	2.45Ab	5.24Ba	0.50Bb	77.24Aa
	20~30	7.78Aa	4.64Cb	16.47Ba	3.80Ba	2.34Ba	0.92Bb	2.24Ac	4.66Ba	0.29Cc	64.78Ba
	30~40	7.82Aa	4.20BCb	14.60BCb	3.24Cb	1.42Da	0.90Bb	2.51Ab	4.35Ba	0.27Cb	64.51Ba
	40~50	7.92Aa	4.30Cb	11.84Ca	3.15Cb	1.73Ca	0.80Bab	2.26Ab	4.69Ba	0.30Cab	71.02ABa
磴口	0~10	7.45Aa	4.16Ac	13.03ABc	3.99Bb	1.41Ac	1.67Aa	6.94Aa	3.60BCc	0.54Ab	91.21Aa
	10~20	7.42Aa	1.43Cc	14.51Ab	3.60Cc	0.90Bc	0.75Bc	5.73ABa	3.86ABb	0.57Ab	80.82ABa
	20~30	7.48Aa	1.84Bc	10.10BCb	3.73BCa	0.79Bb	0.42Cc	4.90ABa	4.05Aa	0.49Ab	65.61BCa
	30~40	7.34Aa	1.81Bc	5.62Dc	4.63Aa	0.75Bb	0.48Cc	4.16Ba	3.74ABCab	0.46Aa	63.13BCa
	40~50	7.48Aa	1.36Ca	7.84CDa	3.52Cab	0.64Bb	0.46Cb	4.64ABa	3.48Cb	0.26Bb	61.00Ca
阿拉善	0~10	7.41Aa	20.02Aa	43.53Aa	4.09Ab	2.25ABb	1.69Aa	5.14Aa	5.16Ab	0.93Aa	73.14Ab
	10~20	7.41Aa	13.73Ba	21.84Ba	4.05Ab	2.48Aa	1.39ABa	3.50Bb	4.96Aa	0.87Ac	69.10Aa
	20~30	7.41Aa	12.02BCa	19.49Ba	3.84Aa	1.86BCa	1.10Ba	3.39Bb	4.31Aa	0.90Aa	51.53Bb
	30~40	7.41Aa	10.11Ca	24.89Ba	4.21Aa	1.61Ca	1.20Ba	2.93Bab	2.91Bb	0.42Ba	38.28BCb
	40~50	7.41Aa	10.44Cc	12.96Ca	3.76Aa	1.43Ca	1.13Ba	3.01Bab	2.62Bc	0.38Bc	34.41Cb

1) 不同大写字母表示同样地不同土层差异显著( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示不同样地同一土层差异显著( $P < 0.05$ )

## 2.2 土壤微生物群落结构特征

### 2.2.1 土壤微生物 PLFA 生物标记量变化

从内蒙古乌海、磴口和阿拉善 3 样地土壤样品中分别检测到 41、31 和 48 种磷脂脂肪酸,选取大于  $0.01 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$  的 28 种 PLFA 生物标记进行分析(表 3)。根据周赛等<sup>[22]</sup>微生物空间分布研究,不同地点土壤微生物差异显著。有些 PLFA 生物标记在 3 样地都有属完全分布,如 16:0、16:1 $\omega$ 7c、16:1 $\omega$ 5c、18:2 $\omega$ 6c、18:1 $\omega$ 9c、16:0 10-methyl 和 19:0 cyclo  $\omega$ 7c 等;有些生物标记只在单个样地分布,如 12:0 anteiso、14:0、15:0、15:0 DMA、16:3 $\omega$ 6c、17:0 iso、18:1 $\omega$ 5c 和 19:3 $\omega$ 6c,属不完全分布。

3 样地土壤中含有最高的 PLFA 生物标记是 16:0(指示革兰氏阴性细菌),16:0 10-methyl(指示放线菌),18:1 $\omega$ 9c(指示真菌)和 16:1 $\omega$ 7c(指示革兰氏阴性细菌),说明在不同样地土壤起主要作用,4 种 PLFA 生物标记含量在不同样地差异显著,但都表现为磴口最低。从磷脂脂肪酸变化看,乌海样地中的 16:0、16:0 10-methyl、18:1 $\omega$ 9c 和 16:1 $\omega$ 7c 等 4 种 PLFA 含量分别为 0.096、0.071、0.067 和 0.066  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ,占总脂肪酸含量 38%;以 16:0、16:0 10-methyl、18:1 $\omega$ 9c 和 16:1 $\omega$ 7c PLFA 生物标记为主的磷脂脂肪酸含量在磴口样地占总脂肪酸 36%,分别为 0.056、0.040、0.039 和 0.056

$\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。阿拉善样地,含量较高的为 16:0、16:0 10-methyl、18:1 $\omega$ 9c 和 16:1 $\omega$ 7c,占总脂肪酸 32%,分别为 0.055、0.064、0.077 和 0.110  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总体而言,不同样地,含量较高的脂肪酸结构种类基本相同,但 PLFA 生物标记含量在各样地分布差异显著,说明蒙古沙冬青根围土壤微生物磷脂脂肪酸具有空间分布特征。

### 2.2.2 不同样地土壤微生物群落主成分分析

不同样地土壤微生物群落主成分分析(图 1)表明,与土壤微生物 PLFA 群落多样性相关的 2 个主成分累计贡献率达到 99.6%,其中,第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2)分别解释变量方差的 96.8% 和 2.8%。对主成分 1 起主要作用的微生物 PLFA 有 8 个,其中 16:1 $\omega$ 7c 和 17:0 cyclo $\omega$ 7c 与 PC1 正相关,12:0 anteiso、14:0、15:0、13:0 anteiso、18:1 $\omega$ 5c 和 19:3 $\omega$ 6c 与 PC1 负相关;对主成分 2 起主要作用的微生物 PLFA 有 20:4 $\omega$ 6c、20:0 10-methyl、16:3 $\omega$ 6c、16:0 iso、15:0 DMA、16:0 10-methyl、18:0 10-methyl、17:0 iso、16:0、17:0 anteiso、18:2 $\omega$ 6c 和 18:1 $\omega$ 9c,其中 20:4 $\omega$ 6c、20:0 10-methyl 和 16:3 $\omega$ 6c 与 PC2 负相关。3 样地被明显区分开,乌海样地位于主成分 1 和 2 的正端,磴口样地位于主成分 1 和 2 的负端,阿拉善样地位于主成分 1 的负端,主成分 2 的正端。由此可见,

表 3 蒙古沙冬青根围土壤微生物 PLFA 类型与含量<sup>1)</sup>/nmol·g<sup>-1</sup>Table 3 Types and contents of PLFA in the rhizosphere of *A. mongolicus*/nmol·g<sup>-1</sup>

序号	PLFA 生物标记	微生物类型	乌海	磴口	阿拉善
1	12:0 anteiso	革兰氏阳性	—	—	0.016 ± 0.002a
2	13:0 anteiso	革兰氏阳性	0.013 ± 0.001b	0.017 ± 0.002a	0.015 ± 0.002ab
3	14:0	革兰氏阳性	—	—	0.0157 ± 0.006a
4	15:0 iso	革兰氏阳性	0.030 ± 0.002b	0.018 ± 0.002b	0.045 ± 0.012a
5	15:0 anteiso	革兰氏阳性	0.028 ± 0.002ab	0.021 ± 0.001b	0.033 ± 0.009a
6	15:0	革兰氏阳性	—	—	0.013 ± 0.003a
7	15:0 DMA	厌氧菌	0.013 ± 0.001a	—	0.012 ± 0.001a
8	16:3ω6c	真核生物	0.028 ± 0.002a	—	0.028 ± 0.002a
9	16:0 iso	革兰氏阳性	0.025 ± 0.001a	0.014 ± 0.002b	0.029 ± 0.007a
10	16:1ω7c	革兰氏阴性	0.066 ± 0.005a	0.039 ± 0.004b	0.055 ± 0.011a
11	16:1ω5c	AM 真菌	0.017 ± 0.001b	0.011 ± 0.002b	0.028 ± 0.007a
12	16:0	革兰氏阳性	0.096 ± 0.014a	0.056 ± 0.006b	0.110 ± 0.021a
13	16:0 10-methyl	放线菌	0.071 ± 0.007a	0.034 ± 0.005b	0.064 ± 0.014a
14	17:1 isoω9c	革兰氏阳性	0.038 ± 0.002a	0.031 ± 0.002b	0.038 ± 0.005a
15	17:0 iso	革兰氏阳性	0.012 ± 0.001b	—	0.016 ± 0.003a
16	17:0 anteiso	革兰氏阳性	0.019 ± 0.002a	0.012 ± 0.001b	0.021 ± 0.003a
17	17:1ω8c	革兰氏阴性	0.016 ± 0.001a	0.012 ± 0.002b	0.017 ± 0.003a
18	17:0 cycloω7c	革兰氏阴性	0.029 ± 0.004a	0.009 ± 0.001c	0.019 ± 0.005b
19	18:3ω6c	真核生物	0.019 ± 0.001a	0.036 ± 0.019a	0.018 ± 0.001a
20	18:2ω6c	真菌	0.024 ± 0.004a	0.011 ± 0.001b	0.028 ± 0.005a
21	18:1ω9c	真菌	0.067 ± 0.005a	0.040 ± 0.006b	0.077 ± 0.017a
22	18:1ω7c	革兰氏阴性	0.058 ± 0.003b	0.039 ± 0.004c	0.085 ± 0.016a
23	18:1ω5c	革兰氏阴性	—	—	0.014 ± 0.003a
24	18:0	革兰氏阳性	0.027 ± 0.005b	0.019 ± 0.002b	0.039 ± 0.008a
25	18:0 10-methyl	放线菌	0.018 ± 0.001ab	0.011 ± 0.002b	0.022 ± 0.006a
26	19:3ω6c	真核生物	—	—	0.010 ± 0.004a
27	19:0 cycloω7c	革兰氏阴性	0.021 ± 0.003ab	0.014 ± 0.002b	0.030 ± 0.009a
28	20:4ω6c	真核生物	0.020 ± 0.010a	0.031 ± 0.012a	0.019 ± 0.008a
29	20:0 10-methyl	放线菌	0.048 ± 0.004a	0.056 ± 0.008a	0.050 ± 0.007a
不同磷脂脂肪酸生物标记总量			0.802	1.000	0.967

1) 不同小写字母表示不同样地同种 PLFA 生物标记含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); “—”表示在该样地中未检出

16:1ω7c、17:0 cycloω7c、16:0 iso、15:0 DMA、16:0 10-methyl、18:0 10-methyl、17:0 iso、16:0、17:0 anteiso、18:2ω6c 和 18:1ω9c 是影响沙冬青根围土壤微生物的主要 PLFA。

### 2.3 土壤特征微生物群落结构分布

由表 4 可知,各微生物类群 PLFA 总量在 3 样地表现为 G+ > G- > 放线菌 > 真菌 > AM 真菌。不同样地,革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和真菌均表现为阿拉善含量最高,磴口最低,放线菌 PLFA 总含量表现为乌海 > 阿拉善 > 磴口。G+/G- 大小排序为阿拉善 > 磴口 > 乌海,真菌与细菌比值大小排序为乌海 > 阿拉善 > 磴口。各样地经纬度不同导致到达地面的太阳辐射不均匀,微生物热量条件及自然地理位置

的差异使得土壤微生物呈现出显著空间分布特征。

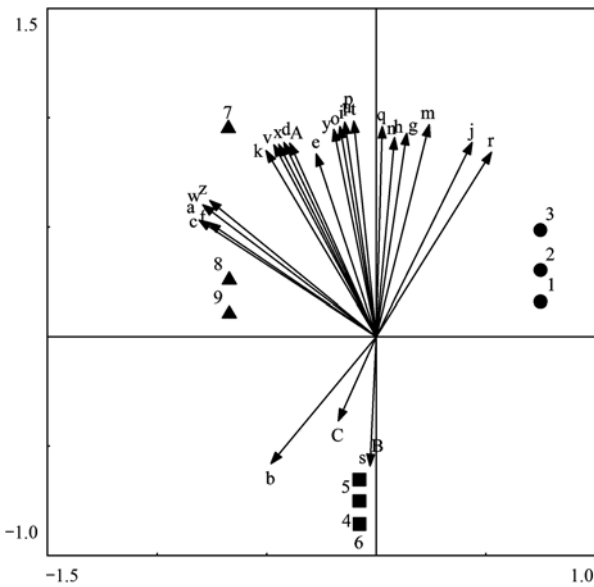
### 2.4 土壤因子的主成分分析

对土壤因子各指标进行 PCA 排序(图 2),两个排序轴对物种变量的解释量达 86.1%,可将其作为主成分轴。其中,第 1 主成分(PC1)可解释变量方差的 54.8%,酸碱磷酸酶(ACP 和 ALP)、EEG、TEG、脲酶(U)和氨氮对 PC1 贡献最大;第 2 主成分(PC2)可解释变量方差的 31.3%,速效 K 对 PC2 起主要作用。由图 2 可知,有机 C 和速效 K 是乌海样地的主要影响因子,速效 K 和有效 P 是磴口样地的主要影响因子,pH,ALP 和氨氮是阿拉善样地的主要影响因子。因此,土壤有机 C、ACP、ALP、EEG、TEG、脲酶、氨氮和有效 P 能综合反映内蒙

表 4 不同样地土壤特征微生物类群 PLFA 总量及其比值/nmol·g<sup>-1</sup>

Table 4 PLFA in G+, G-, Fungi, Actinomycete and the ratio of them in different sites/nmol·g<sup>-1</sup>

特征微生物类群	内 蒙 古 样 地		
	乌海	磴口	阿拉善
AM 真菌	0.017 ± 0.001	0.018 ± 0.001	0.019 ± 0.007
革兰氏阳性细菌	0.205 ± 0.009	0.206 ± 0.006	0.207 ± 0.043
革兰氏阴性细菌	0.219 ± 0.014	0.220 ± 0.007	0.221 ± 0.050
革兰氏阳性/革兰氏阴性	0.936 ± 0.020	0.937 ± 0.043	0.938 ± 0.123
真菌	0.024 ± 0.004	0.025 ± 0.001	0.026 ± 0.005
真菌/细菌	0.026 ± 0.004	0.025 ± 0.001	0.027 ± 0.006
放线菌	0.154 ± 0.007	0.155 ± 0.011	0.156 ± 0.030



a. 12:0 anteiso, b. 13:0 anteiso, c. 14:0, d. 15:0 iso, e. 15:0 anteiso, f. 15:0, g. 15:0 DMA, h. 16:3 $\omega$ 6c, i. 16:0 iso, j. 16:1 $\omega$ 7c, k. 16:1 $\omega$ 5c, l. 16:0, m. 16:0 10-methyl, n. 17:1 iso $\omega$ 9c, o. 17:0 iso, p. 17:0 anteiso, q. 17:1 $\omega$ 8c, r. 17:0 cyclo $\omega$ 7c, s. 18:3 $\omega$ 6c, t. 18:2 $\omega$ 6c, u. 18:1 $\omega$ 9c, v. 18:1 $\omega$ 7c, w. 18:1 $\omega$ 5c, x. 18:0, y. 18:0 10-methyl, z. 19:3 $\omega$ 6c, A. 19:0 cyclo $\omega$ 7c, B. 20:4 $\omega$ 6c, C. 20:0 10-methyl; 各形状代表样地, 1~3、4~6、7~9 分别表示乌海、磴口、阿拉善样地

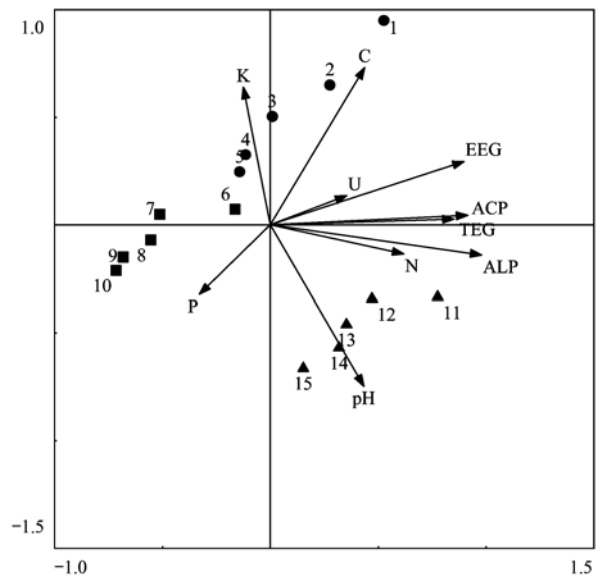
图 1 不同样地土壤微生物 PLFA 主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of different microbial group's PLFA in different sites

古荒漠带土壤营养状况.

2.5 微生物群落多样性与土壤因子的相关性

利用 RDA 对微生物群落多样性与土壤因子(0~30 cm 平均值)的相关性进行分析(图 3),两个排序轴解释量达 99.1%,其中,第 1 主成分(PC1)可解释变量方差的 87.5%,第 2 主成分(PC2)可解释变量方差的 11.6%.由图 3 可知,AM 真菌与酸性磷酸酶和碱性磷酸酶显著正相关,与有效 P 和速效 K 显著负相关;革兰氏阳性菌与磷酸酶和氨氮显著正相关,与速效 K 显著负相关;革兰氏阴性菌、真菌



图中各形状代表样地, 1~5、6~10、11~15 分别表示乌海、磴口、阿拉善 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 土层

图 2 土壤因子 PCA 排序

Fig. 2 Results of PCA analysis of soil factors

和放线菌均与磷酸酶和总球囊霉素显著正相关,与有效 P 和速效 K 显著负相关.革兰氏阳性和革兰氏阴性菌的比值与有效 P 显著正相关,与脲酶,有机 C 和易提取球囊霉素显著负相关;真菌与细菌的比值与易提取球囊霉素,脲酶和有机 C 呈显著正相关,与有效 P 和速效 K 显著负相关.

2.6 AM 真菌占总微生物和真菌的比例关系

由表 5 可知,在土壤真菌生物量中,AM 真菌所占比重很大,尤其在磴口和阿拉善 AM 真菌占到真菌生物量 91% 和 92%,在乌海为 69%.乌海真菌/总微生物量为 0.039,而 AM 真菌/总微生物量为 0.027.在磴口和阿拉善,真菌/总微生物量与 AM 真菌/总微生物量分别为 0.027 和 0.025、0.041 和 0.037,没有显著差异.样地间,磴口真菌/总微生物量显著低于乌海和阿拉善,阿拉善 AM 真菌/总微生物量显著高于乌海和磴口.



表 5 AM 真菌、真菌、总微生物之间的比例关系<sup>1)</sup>

Table 5 Ratio between AM fungi, fungi and total microorganism in different sites

项目	乌海	磴口	阿拉善
AM 真菌/真菌	0.693 ± 0.119a	0.913 ± 0.014a	0.920 ± 0.056a
真菌/总微生物量	0.039 ± 0.004b	0.027 ± 0.002b	0.041 ± 0.002b
AM 真菌/总微生物量	0.027 ± 0.002c	0.025 ± 0.002b	0.037 ± 0.003b

1) 不同小写字母表示同一样地各项目差异显著 ( $P < 0.05$ )

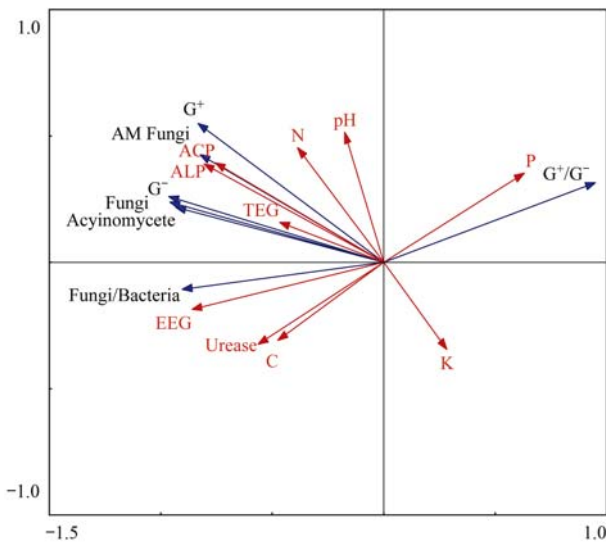


图 3 土壤微生物群落与土壤因子的相关性

Fig. 3 Relativity analysis between soil microbial community and soil factors

### 3 讨论

#### 3.1 土壤微生物群落结构空间分布特征

磷酸脂肪酸生物标记的总含量能够基本反映土壤微生物总量,本研究应用 PLFA 法从内蒙古乌海、磴口和阿拉善样地土壤样品中分别检测到 41、31 和 48 种磷脂脂肪酸,与农田和森林生态系统<sup>[23-24]</sup>土壤相比,蒙古沙冬青根围土壤微生物 PLFA 种类丰富,但 PLFA 相对含量较低,说明荒漠干旱盐碱环境对微生物生长有一定抑制作用,与 Yuan 等<sup>[25]</sup>研究结果相似。蒙古沙冬青根围土壤中含量较高的脂肪酸结构种类基本相同,均以 16:0、18:1 $\omega$ 9c、18:2 $\omega$ 6c 和 16:0 10-methyl 为主。18:1 $\omega$ 9c 和 18:2 $\omega$ 6c 是真菌 PLFA 的主要生物标记, Bardgett 等<sup>[26]</sup>的研究表明真菌比细菌更能适应养分贫瘠环境,本试验 3 样地表征真菌的 18:1 $\omega$ 9c 和 18:2 $\omega$ 6c 的分布量较大,说明真菌对沙冬青在荒漠干旱环境的生长起重要作用。

有关研究表明,不同样地导致土壤温度、水分、养分、有机质分解甚至微生物活性等一系列因子的改变,显著影响土壤微生物群落结构<sup>[27]</sup>。本研究

中,蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构在不同样地差异显著,但对养分缺乏环境耐受力强的革兰氏阳性细菌<sup>[28]</sup>在 3 样地最高,表现出对荒漠干旱环境的适应性。AM 真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、真菌及放线菌均在磴口最低,可能是由于磴口位于乌兰布和沙漠附近,属移动沙丘,受风蚀作用更强,不利于微生物生长繁殖,加之高温作用使得有机质分解加快,有机质的减少使微生物多样性降低;本试验结果显示磴口有机 C 含量最低,真/细菌作为表征土壤有机质的指标,也在磴口有最小值,从侧面反映了磴口土壤质量贫瘠。AM 真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和真菌表现为阿拉善 > 乌海,而放线菌 PLFA 总含量表现为乌海 > 阿拉善。有研究表明<sup>[29]</sup>,大多数真菌为好氧性,细菌喜欢在相对湿润和中性偏碱土壤环境中生长,受水分和干旱胁迫明显,而放线菌喜热耐干,对干燥和碱性条件抗性较大。乌海较阿拉善相比,气候干旱,pH 高于阿拉善,因此干旱和碱性环境使得放线菌含量在乌海大于阿拉善;阿拉善样地的沙冬青较其他样地根系发达,入土更深,加之真菌与沙冬青根系间土壤养分的迁移,形成分泌物等会进一步改善土壤环境,使得细菌和真菌在阿拉善较丰富。

#### 3.2 AM 真菌在土壤微生物群落中的作用

丛枝菌根的生态功能不仅局限于促进植物营养吸收,其菌丝在土壤内延伸,对整个土壤系统及微生物群落都会产生影响<sup>[30]</sup>。在真菌生物量中,AM 真菌所占生物量最大<sup>[31]</sup>,乌海 AM 真菌占到真菌生物量的一半以上,磴口和阿拉善 AM 真菌占到真菌生物量的 91% 和 92%,真菌/总微生物量与 AM 真菌/总微生物量没有显著差异。可见,AM 真菌是荒漠土壤微生物系统中重要组成成分。研究表明,在土壤生态系统中,AM 真菌根外菌丝可向土壤微生物群落分泌、传递营养物质,其广泛延伸的菌丝体网还可影响土壤内部气体和水分状况,从而影响不同微生物类群的活跃程度,改变微生物的群落结构<sup>[10]</sup>。另外,作为植物与土壤微生物能量传递的媒介,AM 真菌可将含丰富能量的光合产物通过其菌

丝体以渗出液的形式传入土壤<sup>[32]</sup>;反过来,AM真菌与土壤其它微生物类群一起形成协同作用,也会抑制植物病原真菌生长,从而促进宿主植物生长<sup>[33]</sup>.由此可见,AM真菌对荒漠植被生长及生态系统稳定有重要作用.

### 3.3 土壤因子与微生物群落组成的相关性

土壤受多种成土因素综合影响,荒漠土壤更复杂,土壤微生物特性在空间变异性相对较大.土壤微生物群落结构主要指土壤中各主要微生物类群(包括细菌、真菌、放线菌等)在土壤中的数量以及各类群所占比率,其分布与土壤性质和植被等环境因子密切相关.本研究中,AM真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、真菌和放线菌均与磷酸酶、总球囊霉素、氨氮和pH正相关.沙冬青与AM真菌能够形成良好共生关系,AM真菌能够分泌球囊霉素和酸性磷酸酶,球囊霉素是由AM真菌分泌产生的具有一定黏附力的糖蛋白<sup>[34]</sup>,是有机碳库最重要的来源;磷酸酶在土壤生态系统中参与物质和能量代谢,能够为土壤微生物生命活动提供所需养分和能量<sup>[35]</sup>;氨氮也是土壤肥力的主要来源,土壤越肥沃,微生物量越大.G+/G-与脲酶、有机碳和易提取囊霉显著负相关,而真/细菌与易提取球囊霉素、脲酶和有机碳显著正相关.G+/G-值高说明土壤状况由贫瘠转向丰富,有机碳和易提取球囊霉越低,土壤营养状况贫乏,G+/G-越大;而在碱性环境中,真/细菌比值高,土壤环境质量改善,微生物类群丰富度较高,数量愈趋平衡<sup>[36]</sup>.

## 4 结论

(1)蒙古沙冬青根围土壤微生物PLFA有较高多样性,共检测到41、31和48种磷脂脂肪酸,16:0、16:0 10-methyl、18:1 $\omega$ 9c和16:1 $\omega$ 7c为土壤优势PLFA,且16:0(表征细菌)含量最大.

(2)蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构有明显空间分布特征,土壤微生物以革兰氏阳性细菌(G+)为主.AM真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌(G-)和真菌表现为阿拉善>乌海>磴口,而放线菌PLFA总含量表现为乌海>阿拉善>磴口,且AM真菌在土壤真菌生物量中所占比重最大.

(3)ACP、ALP、EEG、TEG、有机C、氨氮和有效P能综合反映土壤肥力状况.AM真菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、真菌和放线菌与土壤ACP、ALP、TEG、氨氮和pH正相关.G+/G-与脲酶、有机C和EEG显著负相关,而真/细菌与

EEG、脲酶和有机C显著正相关.

(4)基于荒漠土壤微生物生长特性,选育在干旱环境迅速繁殖的有益微生物,应用生物技术改善荒漠土壤生态环境,对于干旱风沙区荒漠植被恢复和生态环境保护有重要意义.

致谢:感谢河北大学生命科学学院胡从从、王坤同学协助野外样品采集工作.

### 参考文献:

- [1] Zhong W H, Gu T, Wang W, *et al.* The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. *Plant and Soil*, 2010, **326**(1-2): 511-522.
- [2] Alexander K, Bryans T. Evaluation of the sterility test for detection of microbial contaminants of allografts[J]. *Cell and Tissue Banking*, 2006, **7**(1): 23-28.
- [3] 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,等.缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化[J].*环境科学*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- [4] Tunlid A, Hoitink H A J, Low C, *et al.* Characterization of bacteria that suppress *rhizoctonia* damping-off in bark compost media by analysis of fatty acid biomarkers[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, **55**(6): 1368-1374.
- [5] 兰木羚,高明.不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响[J].*环境科学*, 2015, **36**(11): 4252-4259.
- [6] 陈晓娟,吴小红,刘守龙,等.不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析:基于PLFA和MicroResp<sup>TM</sup>方法[J].*环境科学*, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [7] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].*生态学报*, 2014, **34**(14): 3807-3819.
- [8] 李晶,刘玉荣,贺纪正,等.土壤微生物对环境胁迫的响应机制[J].*环境科学学报*, 2013, **33**(4): 959-967.
- [9] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(1): 167-176.
- [10] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure[J]. *New Phytologist*, 2006, **171**(1): 41-53.
- [11] 杜小刚,唐明,陈辉,等.黄土高原不同树龄刺槐丛枝菌根与根际微生物的群落多样性[J].*林业科学*, 2008, **44**(4): 78-82.
- [12] 张淑容,贺学礼,徐浩博,等.蒙古沙冬青根围AM和DSE真菌与土壤因子的相关性研究[J].*西北植物学报*, 2013, **33**(9): 1891-1897.
- [13] Li B K, He X L, He C, *et al.* Spatial dynamics of dark septate endophytes and soil factors in the rhizosphere of *Ammopiptanthus mongolicus* in Inner Mongolia, China[J]. *Symbiosis*, 2015, **65**(2): 75-84.
- [14] 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,2000.271-272.
- [15] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.275-276.
- [16] 宋勇春,李晓林,冯固.菌根真菌磷酸酶活性对红三叶草生

- 境中土壤有机磷亏缺的影响[J]. 生态学报, 2001, **21**(7): 1130-1135.
- [17] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Plant and Soil*, 1998, **198**(1): 97-107.
- [18] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 728-739.
- [19] Bossio D A, Scow K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns [J]. *Microbial Ecology*, 1998, **35**(3): 265-278.
- [20] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(1-2): 59-65.
- [21] Abaye D A, Lawlor K, Hirsch P R, *et al.* Changes in the microbial community of an arable soil caused by long-term metal contamination [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, **56**(1): 93-102.
- [22] 周赛, 梁玉婷, 张厚喜, 等. 我国中亚热带毛竹林土壤微生物群落的空间分布特征及其影响因素 [J]. *土壤*, 2015, **47**(2): 369-377.
- [23] 张秋芳, 刘波, 林营志, 等. 土壤微生物群落磷脂脂肪酸 PLFA 生物标记多样性 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(8): 4127-4137.
- [24] 姜懿珊, 肖静, 罗春玲, 等. 平顶山、长白山、赛罕乌拉森林土壤微生物群落结构分析 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(8): 1272-1279.
- [25] Yuan B C, Li Z Z, Liu H, *et al.* Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, **35**(2): 319-328.
- [26] Bardgett R D, Chan K F. Experimental evidence that soil fauna enhance nutrient mineralization and plant nutrient uptake in montane grassland ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(7): 1007-1014.
- [27] 贺纪正, 葛源. 土壤微生物地理学研究进展 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5571-5582.
- [28] 汪峰, 蒋瑀霁, 李昌明, 等. 不同气候条件下潮土微生物群落的变化 [J]. *土壤*, 2014, **46**(2): 290-296.
- [29] 张桂玲, 胡文革, 庄丽, 等. 荒漠土壤植被改造过程中土壤微生物区系研究 [J]. *北方园艺*, 2010, (7): 1-5.
- [30] Simard S W, Beiler K J, Bingham M A, *et al.* Mycorrhizal networks: mechanisms, ecology and modelling [J]. *Fungal Biology Reviews*, 2012, **26**(1): 39-60.
- [31] 张峰, 段廷玉, 闫飞扬, 等. 丛枝菌根真菌与根际微生物的互作 [J]. *草业科学*, 2014, **31**(9): 1673-1685.
- [32] Johnson D, Leake J R, Ostle N, *et al.* *In situ* <sup>13</sup>C<sub>2</sub> pulse-labelling of upland grassland demonstrates a rapid pathway of carbon flux from arbuscular mycorrhizal mycelia to the soil [J]. *New Phytologist*, 2002, **153**(2): 327-334.
- [33] Sikes B A, Cottenie K, Klironomos J N. Plant and fungal identity determines pathogen protection of plant roots by arbuscular mycorrhizas [J]. *Journal of Ecology*, 2009, **97**(6): 1274-1280.
- [34] 姜桥, 贺学礼, 陈伟燕, 等. 新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(11): 2929-2937.
- [35] 林生, 庄家强, 陈婷, 等. 不同年限茶树根际土壤微生物群落 PLFA 生物标记多样性分析 [J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(1): 64-71.
- [36] de Vries F T, Hoffland E, van Eekeren N, *et al.* Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(8): 2092-2103.

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《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)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行