

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义

靳振江^{1,2,3,4}, 汤华峰², 李敏², 黄炳富², 李强^{3*}, 张家喻², 黎桂文²

(1. 桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 4. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 探讨土壤微生物指标的变化规律, 用于揭示其在岩溶土壤碳循环中的指示意义. 以桂林岩溶试验场洼地、坡地和垭口这3种岩溶地貌形态下的剖面(0~10、10~20、20~30 cm)土壤为研究对象, 采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳(PCR-DGGE)和荧光定量PCR相结合的方法, 分析这个典型岩溶土壤剖面中的微生物多样性和丰度变化. 数据显示, 16S rRNA最高丰度出现在洼地, 为 1.32×10^{11} 拷贝 $\cdot g^{-1}$, 而18S rRNA最高丰度出现在垭口, 为 1.12×10^{10} 拷贝 $\cdot g^{-1}$; 洼地和垭口剖面的16S rRNA丰度随着深度的增加而降低, 3种岩溶地貌形态的18S rRNA丰度均随着剖面深度的增加而降低, 与土壤有机碳质量分数的变化趋势一致. 但是, 在3种岩溶地貌形态中, 3个16S rRNA和6个18S rRNA的多样性指数均随土壤剖面深度的增加而增大. 由于16S rRNA和18S rRNA的多样性与丰度和土壤有机碳之间总体上表现出相反的变化趋势, 说明微生物丰度指标在土壤碳循环中的指示意义比微生物多样性指数更重要.

关键词: 岩溶; 16S rRNA; 18S rRNA; 香农-威纳指数; 碳循环

中图分类号: X172; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4284-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.034

Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle

JIN Zhen-jiang^{1,2,3,4}, TANG Hua-feng², LI Min², HUANG Bing-fu², LI Qiang³, ZHANG Jia-yu², LI Gui-wen²

(1. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources of China & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The soil microbial characteristics were detected to clarify their indications in organic carbon cycle in karst system. Soil samples from three karst types (saddle, depression and slop) at 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm layers were collected in the Yaji Karst Experimental Site, a typical karst ecosystem. The microbial diversity and abundance were assayed using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE) and fluorescence quantitative PCR. The data showed that the highest abundance of 16S rRNA and 18S rRNA were in depression with 1.32×10^{11} copies $\cdot g^{-1}$ and in saddle with 1.12×10^{10} copies $\cdot g^{-1}$, respectively. The abundance of 16S rRNA in saddle and depression decreased from top to bottom, while that of 18S rRNA in three karst forms decreased, which showed that the abundance changed consistently with soil organic carbon (SOC). The 3 diversity indices of 16S rRNA and 6 diversity indices of 18S rRNA increased from top to bottom in soil profiles of three karst forms. These results showed that microbial diversity changed conversely with the abundance and SOC in soil profile. It can be concluded that the abundance was more important than the diversity index for soil carbon cycle in karst system.

Key words: karst; 16S rRNA; 18S rRNA; Shannon-Wiener indices; carbon cycle

在岩溶生态系统中, 土壤有机碳的质量分数要高于非岩溶系统^[1,2], 因此, 研究岩溶生态系统土壤有机碳的积累机制具有重要的意义. 在以水稻土为研究对象所涉及可能的固碳机制中, 土壤微生物群落的作用不可忽视^[3]. 但是, 在岩溶生态系统中, 微生物群落是如何调控土壤有机碳循环, 人们仍然知之甚少^[4]. 因此, 以岩溶生态系统为研究对象, 探讨

收稿日期: 2014-04-11; 修订日期: 2014-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361054, 41003038); 广西自然科学基金项目(2011GXNSFD018002, 2011GXNSFA018006, 2010GXNSFB013004, 桂科合14123001-13); 岩溶动力学重点实验室开放基金项目(KDL2010-02, KDL2011-10); 广西矿冶与环境科学实验中心项目(KH2012ZD004); 广西高等学校立项科研项目(201204LX162, 201106LX229)

作者简介: 靳振江(1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态学和环境微生物学, E-mail: zhenjiangjin@163.com

* 通讯联系人, E-mail: glqiangli@163.com

微生物群落与土壤有机碳之间的关系可以促进人们对固碳机制的深入理解。

微生物多样性指数和丰度是表征微生物群落特征的两个重要指标。我国西南岩溶区植被在正向演替的过程中,表层土壤有机碳逐渐积累^[5~7],土壤微生物的组成发生了显著变化^[7],可培养微生物及多种功能微生物数量^[8]和总的微生物生物量^[9,10]均显著提高,土壤微生物的碳源代谢多样性与细菌和真菌的多样性也表现出相同的变化趋势^[10,11],这些微生物指标与土壤有机碳质量分数呈显著正相关^[10]。来自不同土地利用方式的研究结果表明,与岩溶区的原生林相比,农田和次生林土壤中微生物的香农-威纳多样性指数、可操作分类单元 (operational taxonomic units, OTUs) 数量和土壤有机碳质量分数等多个养分指标均有所降低,表明微生物群落的丰度和多样性的降低是加速土壤有机碳损失的重要原因^[10,12]。但是,这两个指标在土壤剖面上的变化及其与土壤有机碳之间的关系还缺乏相应的报道。

位于桂林丫吉村的典型岩溶试验场^[13],由洼地、哑口和坡地这3种不同的地貌组成。在这个生态系统中,3种地貌土壤剖面层次上可培养微生物丰度的变化规律较为一致,均随着剖面深度的增加而降低,洼地土壤可培养细菌、真菌和放线菌与多种功能菌群的数量与哑口和坡地也具有明显分异,而且,细菌数量、微生物数量和土壤酶活性与土壤有机碳质量分数均呈显著正相关关系^[14,15]。但是,土壤微生物多样性的变化以及与土壤有机碳质量分数之间的关系仍不明确。因此,本文以此岩溶试验场为研究样点,采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶

电泳 (PCR-DGGE) 和荧光定量 PCR 的方法,分别研究典型岩溶生态系统中细菌和真菌多样性和丰度的变化,探讨二者与土壤有机碳之间的关系,明晰微生物多样性和丰度在土壤有机碳积累过程中的作用和意义,以期为进一步探讨土壤有机碳的积累机制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 采样点及采样方法

桂林丫吉岩溶试验场面积约 2 km²,位于广西桂林市东郊 8 km 的丫吉村,峰丛洼地与峰林平原交界处。桂林市地处亚热带南端,年平均气温为 18.8℃、年降雨量为 1 915.2 mm。场区的土壤为棕色石灰土,区内土壤覆盖率约为 30%,植被覆盖以次生灌丛林为主,覆盖度为 60%~80%,表现出喜钙和耐旱性^[16,17]。

样品采集于 2011 年 11 月,位置为 1 号洼地、坡地和哑口。哑口植被以黄荆为主,土壤厚度 30~50 cm,pH 6.00;坡地植被以黄荆和欆木为主,土壤厚度为 70~150 cm,pH 6.55;洼地植被以老虎刺和构树占优势,土壤厚度为 300~500 cm,pH 6.40^[14]。在样地中随机选取 3 个近 2 m² 的采样区,在每个采样区选择 3 个采样点。每个采样点分别采集 0~10、10~20 和 20~30 cm 深度的土样,同一采样区 3 个采样点的土样按层次等比例混合,当天带回实验室。除去植物残体和入侵体,一部分过 2 mm 筛,迅速提取土壤微生物 DNA 以做微生物分析;另外一部分自然风干,用于土壤理化性质分析。养分含量见表 1^[15]。

表 1 3 种岩溶形态的土壤养分质量分数

土壤养分	哑口			洼地			坡地		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
有机碳/g·kg ⁻¹	38.28	26.57	17.82	40.10	22.61	19.47	24.42	19.80	12.87
总氮/g·kg ⁻¹	1.13	0.94	0.73	2.43	1.33	1.28	1.86	1.13	1.37
总磷/g·kg ⁻¹	7.52	6.04	5.21	8.02	6.81	6.14	4.37	3.56	3.37
碳氮比(C/N)	33.26	28.18	24.48	16.39	17.06	15.23	12.88	17.46	9.38
CNP 归一化养分	0.137	0.105	0.081	0.179	0.115	0.104	0.115	0.084	0.079

1.2 样品分析及方法

1.2.1 基因组 DNA 提取和浓度测定

采用 Mo BIO 公司的 DNA 快速提取试剂盒 (Power Soil) 提取土壤微生物总 DNA,步骤按操作说明进行。土壤微生物总 DNA 用微量紫外分光光度计 (Quawell 3000, 美国) 在 260 nm 处测定其浓度。

1.2.2 荧光定量 PCR

用 CFX 96 (Bio-rad, Hercules, 美国) 测定 16S rRNA 和 18S rRNA 的基因拷贝数。25 μL PCR 反应体系组成如下: 2 × SYBR Green real time PCR master mix (Biouniquer, 北京) 12.5 μL, 去离子无菌水 9.5 μL, DNA 模板 (genomic DNA, 15

$\text{ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$) $1 \mu\text{L}$, 浓度为 $20 \text{ um} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 正向引物和反向引物各 $1 \mu\text{L}$. 细菌扩增引物采用 Muyzer 等^[18] 特异性引物对: 正向 F338 (5'-ACT CCT ACG GGA GGC AGC AG-3') 和反向 R518 (5'-ATT ACC GCG GCT GCT GG-3'). 16S rRNA 扩增条件为首先是 95°C 预变性 3 min, 40 个循环为 95°C 变性 1 min, 56°C 退火 1 min, 72°C 延伸 1 min, 最后再在 72°C 延伸 5 min. 以含有 16S rRNA V3 区片段的质粒作为 DNA 模板, 用从 $3.42 \times 10^8 \sim 3.42 \times 10^5$ 系列 10 倍稀释的梯度的 5 次重复值画出标准曲线. 从标准曲线得到其扩增效率为 87.4%, R^2 值为 0.962. 18S rRNA 扩增引物采用 May 等^[19] 的特异性引物对: 正向 Fungi (5'-ATT CCC CGT TAC CCG TTG-3') 和反向 NS1 (5'-GTA GTC ATA TGC TTG TCT C-3'). 18S rRNA 扩增引物的反应体系与 16S rRNA 一致, 扩增条件为 95°C 预变性 15 min; 40 个循环分别为 95°C 变性 1 min, 57°C 退火 1 min, 72°C 延伸 1 min, 最后再在 72°C 延伸 5 min, 以含有 18S rRNA 片段的质粒作为 DNA 模板, 用从 $3.48 \times 10^7 \sim 3.48 \times 10^3$ 系列 10 倍稀释的梯度的 5 次重复值画出标准曲线. 标准曲线上得到 18S rRNA 的扩增效率为 100.9%, R^2 值为 0.974. 16S rRNA 和 18S rRNA 扩增的溶解曲线中均只有单峰存在, 温度分别为 89.0°C 和 90.5°C , 说明这两个反应中不存在二聚体污染. 微生物丰度计作每克干土中的基因拷贝数 (拷贝 $\cdot \text{g}^{-1}$).

1.2.3 PCR-DGGE

(1) 聚合酶链反应(PCR)

PCR 用于扩增的引物对和反应体系与 1.2.2 节中的相同. 有一点不同的是在 16S rRNA 和 18S rRNA 正向引物的 5' 端分别添加 40 个碱基的 GC 夹子 (5'-CCG CCG CGC GGC GGG CGG GGC GGG GGC ACG GGG-3'). 对细菌而言, PCR 反应采用降落 (touch down) PCR 程序^[18], 具体如下: 94°C 预变性 5 min, 94°C 变性 1 min, 退火温度从 65°C 开始, 每两个循环降低 1°C , 一直到 55°C , 延伸温度为 72°C , 再在退火温度 55°C 下作 15 个循环; 最后在 72°C 完全延伸 5 min. 扩增后的 PCR 产物用 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测质量. 对真菌而言, PCR 反应条件为: 95°C 预变性 15 min, 91°C 变性 1 min, 57°C 退火 1 min, 72°C 延伸 2 min, 共 35 个循环; 然后在 68°C 完全延伸 10 min^[19]. 扩增后的 PCR 产物用 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测质量.

(2) 变性梯度凝胶电泳 (DGGE)

变性梯度凝胶的制备使用 Bio-RAD 公司 475 型梯度制胶系统 (Model 475 Gradient Delivery System). 对于细菌, 变性梯度从上到下是 35% ~ 60%, 聚丙烯酰胺凝胶浓度是 8%. 在 90 V 的电压下, 60°C 电泳 9 h; 对于真菌, 变性梯度从上到下是 15% ~ 30%, 在电压 100 V 下电泳 7 h. 电泳完毕后, 将凝胶在固定液中固定 3 min, 用银染液染色 10 min, 然后用蒸馏水洗涤 2 次, 再加显影液显影 3 min; 将染色后的凝胶用 Bio-RAD 的 Gel Doc-2000 凝胶影像分析系统拍照; 用 Image lab 分析软件 (Bio-RAD) 确定样品电泳条带的数量、亮度峰值, 用 SPSS 13.0 进行聚类分析. 多样性指数计算方法参考文献[20]进行, 具体如下:

$$\text{香农-威纳多样性指数} (H') = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

$$\text{Margalef 丰富度} (D_{\text{mg}}) = \frac{(S-1)}{\ln N}$$

$$\text{均匀度} (E) = \frac{H'}{\ln S}$$

式中, S 是 OTUs 的总数, 在 DGGE 图谱中每一条清晰条带 (克隆) 被计作一个 OTU, N 是在每个泳道中所有 OUT 的总的亮度峰值, $p_i = n_i/N$, 是第 i 个 OTU 在所有克隆中的比值.

1.3 数据处理与统计检验

数据归一化的方法参照文献[21]进行. 首先将所有 9 个样本的微生物丰度值 (或土壤养分) 分别进行归一化, 得到单个样本归一化的数值, 计算公式为 $x'_i = x_i / \sum_{i=1}^9 x_i$ ($i = 1, 2, \dots, 9$); 然后把每个样本归一化的数值相加后取算术平均值, 得到单个样本归一化的数值. 微生物丰度的作图用 EXCEL 2003 完成. 聚类分析图在 SPSS 13.0 上完成. 数据间差异的显著性检验以及属性间相关性及其显著性检测均采用 JMP 5.0 软件进行. 柱状图中的小写字母表示同一岩溶形态不同剖面深度的微生物丰度在 $P \leq 0.05$ 水平上显著差异.

2 结果与分析

2.1 16S rRNA 和 18S rRNA 的丰度

从图 1(a) 可以看出, 16S rRNA 丰度在洼地和垭口土壤剖面随深度的增加总体上呈下降趋势, 而在坡地随深度的变化而无显著差异, 最高的丰度值出现在洼地土壤的 0 ~ 10 cm 土层, 为 1.32×10^{11} 拷贝 $\cdot \text{g}^{-1}$. 从图 1(b) 可以看出, 18S rRNA 的丰度值在 3 种岩溶形态中均随剖面深度的增加而

下降,最高的丰度值出现在坡地的0~10 cm 土层,为 1.16×10^{10} 拷贝 $\cdot$ g $^{-1}$. 显示 16S rRNA 和 18S rRNA 的丰度值随剖面深度的变化规律大致相

同. 从表 2 可以看出,16S rRNA 和 18S rRNA 总的拷贝数以及二者归一化的拷贝数均随着土壤深度的增加而减小.

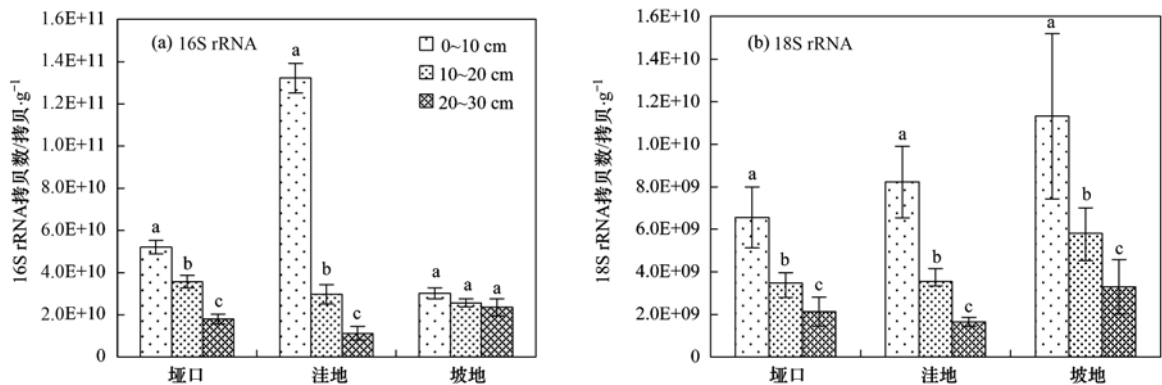


图 1 16S rRNA和18S rRNA基因丰度
Fig. 1 Abundances of 16S rRNA and 18S rRNA

表 2 岩溶生态系统中微生物的丰度

Table 2 Abundances of microbes in karst ecosystem

项目	洼口			坡地			洼地		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
16S rRNA和18S rRNA总的 拷贝数 $\times 10^{10}$ /拷贝 $\cdot$ g $^{-1}$	6.587	3.918	2.014	4.152	3.152	2.700	14.053	3.335	1.295
16S rRNA和18S rRNA归一 化的拷贝数/拷贝 $\cdot$ g $^{-1}$	0.152	0.087	0.048	0.164	0.098	0.068	0.270	0.079	0.033

2.2 细菌和真菌的多样性

从基于16S rRNA和18S rRNA DGGE 图谱的分析结果(图 2)可以看出,同一岩溶形态的不同土壤层次均能较好的聚为一类,表明岩溶地貌形态对土壤细菌和真菌多样性的影响较大,这可能与不同岩溶形态土壤的理化性质和植被凋落物差异有关. 从表 3 可以看出,16S rRNA 的香农-威纳指数和丰富度均随着洼口土壤剖面深度的增加而增大,洼地土壤剖面16S rRNA 的香农-威纳指数也有

相同的变化趋势. 因此,细菌多样性的变化趋势与细菌的丰度总体上呈现相反的变化趋势. 18S rRNA在洼口土壤的 3 种多样性指数、坡地土壤的香农-威纳指数和均匀度与洼地土壤的丰富度均随着剖面深度的增加而增大,表明真菌的多样性与丰度之间呈现出更加明显相反的变化趋势. 微生物丰度与多样性之间的这种关系表明,这两个指标在岩溶生态系统土壤碳循环的指示意义和重要性并不一致.

表 3 基于16S rRNA和18S rRNA DGGE 图谱的微生物多样性指数

Table 3 Microbial diversity indices of 16S rRNA and 18S rRNA based DGGE profile

项目	多样性指数	洼口			坡地			洼地		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
16S rRNA	香农-威纳指数	1.782	2.194	2.706	3.042	2.078	2.831	2.829	2.963	2.994
	丰富度	0.512	0.955	1.009	1.520	0.526	1.233	1.358	1.389	1.157
	均匀度	1.974	1.914	2.301	2.266	2.301	2.255	2.301	2.301	2.299
18S rRNA	香农-威纳指数	1.847	2.348	2.404	1.988	2.202	2.507	1.820	1.820	2.039
	丰富度	0.889	0.997	1.27	0.857	0.830	0.927	0.939	0.998	1.078
	均匀度	1.570	1.950	1.954	1.734	1.921	2.132	1.512	1.479	1.624

3 讨论

在岩溶生态系统中,土壤有机碳的质量分数较高^[1,2],为微生物的生长提供了可以利用的基质;而

且,较高的有机碳水平改善了土壤的通气状况,提高了水分的固持能力,为微生物的生长提供了适宜的环境条件. 以时间换空间的研究方法表明,岩溶区植被在正向演替的过程中,细菌、真菌与放线菌及

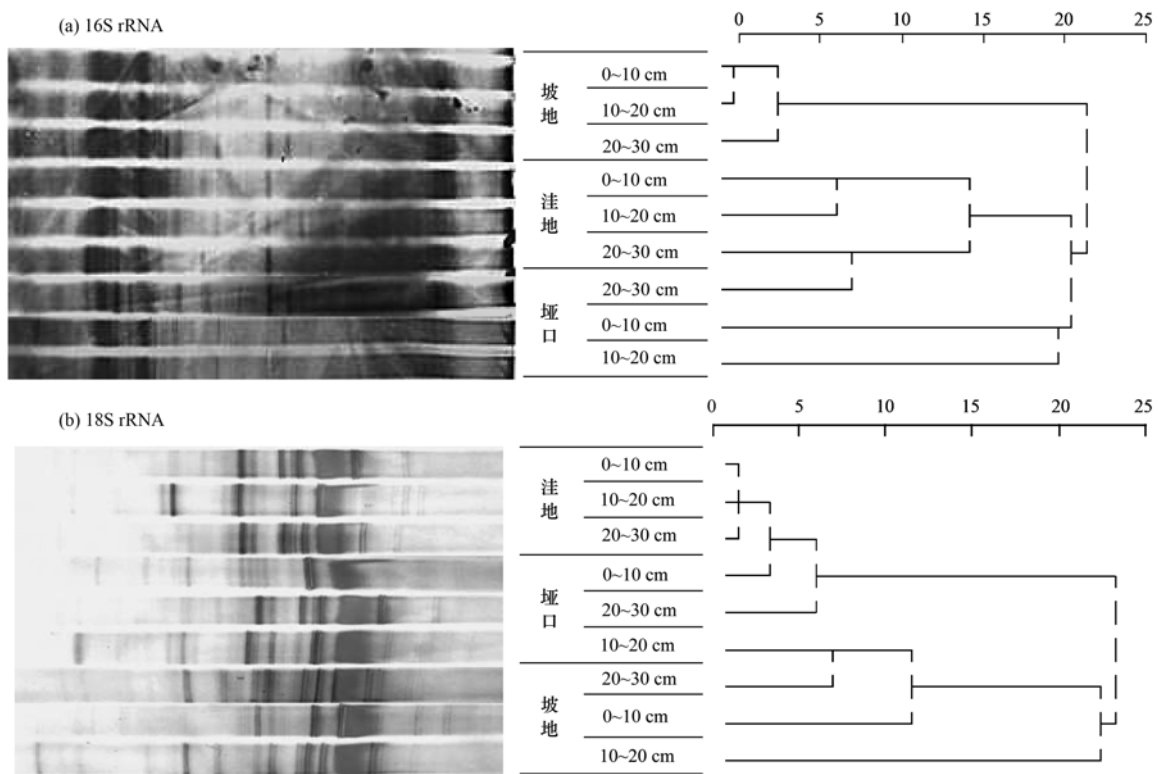


图2 16S rRNA和18S rRNA的DGGE图谱和聚类分析

Fig. 2 DGGE profiles and their cluster analysis of 16S rRNA and 18S rRNA

多种参与碳氮循环的功能微生物数量^[5]和总的微生物生物量^[10,22]均显著提高,土壤微生物的碳源代谢多样与细菌和真菌的多样性指数也表现出相同的变化趋势^[10,11],而且,以上微生物指标与土壤有机碳质量分数均呈显著的正相关关系^[10,14]. 来自限制性片段长度多态性的研究表明,与原生林相比,岩溶区农田和次生林的表层土壤中微生物的香农-威纳多样性指数、OTUs 数量和土壤有机碳质量分数等多个养分指标均有所降低^[23]. 以上这些研究结果表明,在岩溶区土壤剖面的同一层次,微生物的丰度与多样性有着一致的变化趋势. 在岩溶峰丛洼地不同土地利用类型的土壤剖面中,冯书珍等^[24]研究也发现,表征微生物特性的多个指标均随着剖面深度的增加而降低,分析植被和坡位是影响表层微生物特性的主要因子. 在本研究所涉及的表层(0~10 cm)土壤中,3种岩溶形态的土壤有机碳质量分数均高于下层,18S rRNA 丰度与洼地和埡口16S rRNA的丰度也均显著高于下层土壤,二者总的拷贝数和归一化的拷贝数也高于下层,而且与土壤有机碳、总氮和总磷的质量分数均有一致的变化趋势,一方面表明这些养分为土壤微生物提供了可供利用的营养,促进了微生物的生长;另一

方面显示这些微生物在表层土壤碳循环和养分循环中具有重要的作用. 而多样性与丰度和土壤养分的变化趋势并不一致,说明多样性除受土壤有机碳和多种养分的影响之外,可能还与不同的岩溶形态、坡位和地上植被有关,而这些因子对微生物的影响可能是通过凋落物和根系分泌物以及改变土壤的理化因子发挥作用的^[24]. 首先,3种岩溶形态土壤的来源不同^[25],埡口的土壤为残破积土,坡地的土壤为洪积土,而1号洼地的土壤为冲积土,这种差异可能影响微生物的适应性;其次,3种岩溶形态中的优势植物不同^[14],这可能导致植被通过根系及其分泌物对微生物群落的多样性具有选择作用;另外,受岩溶形态的影响,土壤水分等理化因子及土壤稳定性^[26]也不尽相同,因此也可能造成微生物的多样性差异.

在非岩溶区,洞庭湖典型湿地地区微生物生物量也随着土壤剖面的增加而降低^[27]. 来自典型黄土高原不同土地利用类型和不同土壤类型剖面也得出了相似的结论;而且,微生物生物量均与土壤有机碳呈显著正相关关系,因此,土壤有机碳是影响微生物特性的主要因素^[28]. 在本研究所涉及的典型岩溶生态系统中,16S rRNA和18S rRNA的丰度大多

随剖面深度的增加而降低。从表 4 可以看出,把 3 种岩溶形态不同土壤剖面微生物丰度作为一个整体,并且结合文献[15]数据分析表明,可培养细菌数量与16S rRNA的丰度呈显著的正相关,可培养真菌数量与18S rRNA的丰度呈显著的正相关,这也进一步证明,微生物丰度指标在土壤养分循环中的重要指示作用。16S rRNA和18S rRNA的丰度值均与土壤总氮质量分数呈显著的正相关关系(表 4),这

可能表明,岩溶土壤的有机碳的质量分数较高,而氮素相对缺乏^[29],因此可能成为限制微生物生长的关键因子。但是,有研究表明,即使在土壤 C/N 比为 28 的土壤中,土壤有机碳也是微生物生长的限制因素^[30]。因此,在岩溶生态系统中,土壤碳氮对于维持土壤微生物功能同等重要^[31]。反过来,微生物较高的丰度和功能活性可能加快了碳循环并促进了土壤有机碳积累。

表 4 微生物的丰度与可培养微生物数量、土壤酶活性和养分质量分数的相关性¹⁾

Table 4 Correlation between abundance of microbes and culturable microbe number, enzyme activity and nutrient content							
微生物丰度	可培养细菌数量	可培养真菌数量	蔗糖酶活性	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	归一化的土壤酶活性	总氮质量分数
16S rRNA	0.489 (0.039) *	0.489 (0.182)	0.223 (0.200)	0.729 (0.003) **	0.655 (0.008) **	0.776 (0.002) **	0.520 (0.028) *
18S rRNA	0.222 (0.201)	0.679 (0.006) **	0.527 (0.027) **	0.042 (0.599)	0.166 (0.277)	0.304 (0.124)	0.466 (0.043) *
16S rRNA和18S rRNA 归一化的拷贝数	0.198 (0.230)	0.551 (0.022) *	0.050 (0.030) *	0.223 (0.564)	0.354 (0.351)	0.771 (0.002) **	0.305 (0.230)

1) * 表示显著相关, ** 表示极显著相关

根据本研究得到的数据,结合文献[15]的数据,把 3 种岩溶形态的不同剖面得到的数据作为一个整体来做统计分析(表 4),结果表明,在这个典型的岩溶生态系统中,16S rRNA的丰度与脲酶和碱性磷酸酶活性之间均呈极显著的正相关关系,表明细菌(含放线菌)可能在氮素和磷素循环中的作用较大;18S rRNA的丰度与蔗糖酶活性之间也呈极显著的正相关关系,表明真菌可能是蔗糖酶分泌的主体,因此在土壤碳循环中的具有重要的作用。16S rRNA和18S rRNA归一化的拷贝数与归一化的土壤酶活性之间呈极显著的正相关关系,这与归一化的可培养微生物数量与土壤酶活性之间显著正相关关系的结论^[15]是一致的。这些相关性数据表明,尽管不同岩溶地貌形态土壤上生长的植被具有差异,但均可能通过凋落物和根系影响土壤微生物的丰度,从而土壤养分尤其是土壤有机碳与微生物的关系最为密切^[32]。因此,较高的土壤有机碳质量分数提高了对微生物的承载能力,多种多样的微生物各自执行特定的功能,互相配合,提高了微生物活性。因此,在这个典型的岩溶生态系统中,维持一定的微生物丰度是维持土壤碳循环的关键因素。

在本研究中,微生物的多样性指数取决于 DGGE 图谱中的条带(OTUs)的有无、多少和丰度值。分析表明,岩溶区土壤剖面的微生物丰度与多样性呈相反的变化趋势,与土壤酶活性也呈相反的变化趋势,因为绝大多数好氧微生物不能适应养分

和氧质量分数较低的环境,而只有少数能够耐受贫瘠和兼性好氧的微生物却能够适应这一环境,因此,微生物丰度降低了,而多样性却增加了。但是,由于受养分质量分数和氧气体积分数的限制,这种微生物多样性的增加只是意味着少数微生物的种属增加及其数量的少量增加,而相对于庞大的微生物群落来说,增加的数量并不显著,因此总体上微生物数量仍显著降低。土壤微生物受深层土壤环境的制约^[31],生长较为缓慢,活性相对较低,因此在土壤养分循环和碳循环中并不占有主要的地位,表明土壤养分循环不能仅仅依靠少数特定的微生物种群维持,所以维持一定量的微生物数量非常重要。因此,土壤微生物的丰度(或数量)在土壤养分循环中的意义要大于微生物多样性指数,更适合于作为土壤微生物特性变化的评价指标。

4 结论

(1)在典型岩溶地貌形态的土壤中,随着剖面深度的增加,土壤有机碳质量分数显著降低,16S rRNA丰度在洼地和垭口土壤中显著降低,垭口和洼地的香农-威纳指数和垭口丰富度指数也呈降低的趋势;18S rRNA的丰度也显著降低,大多数多样性指数也呈下降的趋势。

(2)土壤有机碳和微生物丰度与多样性指数之间总体上呈相反的变化趋势,表明土壤微生物丰度指标在岩溶土壤碳循环中的意义要重于微生物多样

性指数.

参考文献:

- [1] Ahmed Y A R, Pichler V, Homolák M, *et al.* High organic carbon stock in a karstic soil of the Middle-European Forest Province persists after centuries-long agroforestry management [J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, **131** (6): 1669-1680.
- [2] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(1): 37-44.
- [3] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 901-914.
- [4] Chapin III F S, McFarland J, David McGuire A, *et al.* The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences [J]. *Journal of Ecology*, 2009, **97**(5): 840-850.
- [5] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性[J]. *林业科学*, 2010, **46**(1): 136-141.
- [6] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性[J]. *生态学报*, 2009, **29**(8): 4187-4195.
- [7] Li L Q, Wang D, Liu X Y, *et al.* Soil organic carbon fractions and microbial community and functions under changes in vegetation: a case of vegetation succession in karst forest [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(8): 3727-3725.
- [8] 龙健, 李娟, 滕应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(2): 47-50.
- [9] 张平究, 潘根兴. 不同植被群落下喀斯特土壤养分及生物化学性质特征[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(1): 77-80, 84.
- [10] Zhu H H, He X Y, Wang K L, *et al.* Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a Karst ecosystem [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, **51**: 1-7.
- [11] He X Y, Wang K L, Zhang W, *et al.* Positive correlation between soil bacterial metabolic and plant species diversity and bacterial and fungal diversity in a vegetation succession on Karst [J]. *Plant and Soil*, 2008, **307**(1-2): 123-134.
- [12] Chen X B, Su Y R, He X Y, *et al.* Soil bacterial community composition and diversity respond to cultivation in Karst ecosystems [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2012, **28**(1): 205-213.
- [13] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. *地球科学进展*, 2001, **16**(4): 461-466.
- [14] 李为, 余龙江, 李涛, 等. 岩溶生态系统土壤酶活性的时空动态及其与土壤肥力的关系——以桂林丫吉村岩溶试验场为例[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(1): 260-266.
- [15] 靳振江, 李强, 黄静云, 等. 典型岩溶生态系统土壤酶活性、微生物数量、有机碳含量及其相关性——以丫吉岩溶试验场为例[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(2): 307-313.
- [16] 刘再华, 何师意, 袁道先, 等. 土壤中的 CO₂ 及其对岩溶作
- 用的驱动[J]. *水文地质工程地质*, 1998, **25**(4): 42-45.
- [17] 潘根兴, 曹建华, 何师意, 等. 土壤碳作为湿润亚热带表层岩溶作用的动力机制: 系统碳库及碳转移特征[J]. *南京农业大学学报*, 1999, **22**(3): 49-52.
- [18] Muyzer G, De Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(3): 695-700.
- [19] May L A, Smiley B, Schmidt M G. Comparative denaturing gradient gel electrophoresis analysis of fungal communities associated with whole plant corn silage [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2001, **47**(9): 829-841.
- [20] Hill T C J, Walsh K A, Harris J A, *et al.* Using ecological diversity measures with bacterial communities [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **43**(1): 1-11.
- [21] 靳振江, 邵继承, 潘根兴, 等. 荆江地区湿地与稻田有机碳、微生物多样性及土壤酶活性的比较[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(18): 3773-3781.
- [22] 兰雪, 戴全厚, 喻理飞, 等. 喀斯特退化森林不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. *农业现代化研究*, 2009, **30**(5): 620-624.
- [23] 陈香碧, 苏以荣, 何寻阳, 等. 不同干扰方式对喀斯特生态系统土壤细菌优势类群——变形菌群落的影响[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(2): 354-363.
- [24] 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应[J]. *生态学报*, 2013, **33**(10): 3148-3157.
- [25] 袁道先, 戴爱德, 蔡五田, 等. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1996. 1-4.
- [26] 李强, 靳振江, 李忠义, 等. 岩溶地貌部位对土壤酶活性和微生物丰度的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(3): 50-54.
- [27] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(1): 49-53.
- [28] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, **13**(6): 1020-1027.
- [29] 闫俊华, 周传艳, 文安邦, 等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, **19**(3): 273-278.
- [30] Demoling F, Figueroa D, Bååth E. Comparison of factors limiting bacterial growth in different soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(10): 2485-2495.
- [31] 宋敏, 邹冬生, 杜虎, 等. 不同土地利用方式下喀斯特峰丛洼地土壤微生物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(9): 2471-2478.
- [32] Cavagnaro T R, Jackson L E, Scow K M, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizas on ammonia oxidizing bacteria in an organic farm soil [J]. *Microbial Ecology*, 2007, **54**(4): 618-626.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行