

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

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

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将求, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子

梁月明^{1,2}, 苏以荣^{1*}, 何寻阳¹, 陈香碧¹, 胡亚军¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 桂林 541000)

摘要: 运用末端限制性片段长度多态性 (terminal restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 和荧光定量 PCR (real-time PCR) 法, 检测喀斯特灌丛生态系统中不同坡位条件下土壤丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌群落结构与丰度的变化, 揭示不同坡位条件下影响灌丛生态系统土壤 AM 真菌群落结构与丰度的关键因子。研究结果表明不同坡位条件下, 土壤有机碳、全氮和速效磷含量差异显著, 变化趋势为上坡位 \approx 中坡位 $>$ 下坡位; 土壤 AM 真菌丰度变化趋势为上坡位 \approx 中坡位 $<$ 下坡位。相关性分析表明, 土壤速效磷含量与 AM 真菌丰度存在显著负相关 ($P < 0.05$)。RDA 分析表明不同坡位条件下, 土壤 AM 真菌与植物群落结构存在显著差异, 植物均匀度指数显著影响土壤 AM 群落结构组成, 而土壤有机碳、全氮显著影响植物群落结构组成。可见, 不同坡位条件下, 土壤养分与植物群落结构共同作用影响土壤 AM 真菌群落结构, 说明利用 AM 真菌用于喀斯特地区植被恢复时, 微形态 (坡位) 对 AM 真菌的影响应该纳入考虑范畴。

关键词: 喀斯特; 灌丛生态系统; 坡位; 丛枝菌根真菌; 群落结构

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4828-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704153

Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems

LIANG Yue-ming^{1,2}, SU Yi-rong^{1*}, HE Xun-yang¹, CHEN Xiang-bi¹, HU Ya-jun¹

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China, 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi Zhuangzu Autonomy Region, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541000, China)

Abstract: Slope position is a key factor used in the restoration of vegetation in degraded karst ecosystems, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role in improving this plant growth. However, little information is available regarding the effects of slope position on arbuscular mycorrhizal fungi. To test whether these fungal communities are impacted by slope position, the abundance, and composition of soil AMF communities along the slope position were analyzed through terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) and real-time fluorescence-based quantitative polymerase chain reaction (real-time PCR). The diversity, richness, and evenness of plant species were evaluated through field surveys and soil properties were also measured. The results show that content of carbon, nitrogen, and phosphorus in the soil are different along the slope, and the trends identified were that the upper slope position \approx middle slope position $>$ lower slope position. The trend for AMF abundance was identified as upper slope position \approx middle slope position $<$ lower slope position. The available phosphorus content in the soil correlated significantly with the AMF abundance. A redundancy analysis showed that the structure of soil, AMF, and plant community compositions differed along the slope. The plant evenness index was shown to significantly contribute to the distribution of the AMF community structure, while the total nitrogen and total organic carbon content of the soil had a significant effect on the plant community structure. These results indicate that the interaction effects of soil nutrients and plant community structures on the soil AMF community structures suggest micro-morphology should be taken into account when AMF is used to restore vegetation in karst regions.

Key words: karst; shrub ecosystem; slope position; arbuscular mycorrhizal fungi; community structure

AM 真菌能够与陆地生态系统 90% 以上的植物形成共生关系^[1]。这种共生关系是建立在互惠互利的基础上, 如植物为 AM 真菌提供碳水化合物, 而 AM 真菌促进植物吸收氮磷养分^[2]。有研究表明, 在养分贫瘠土壤中, AM 真菌会加强与植物共生关系, 促进植物吸收养分^[3], 从而促进植物在养分贫瘠土壤中的定殖及生长^[4]。此外, Van Der Heijden

收稿日期: 2017-04-14; 修订日期: 2017-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505503); 广西自然科学基金项目 (2016GXNSFB380179); 岩溶地质研究所基本科研业务费项目 (2016004); 中国科学院西部之光人才培养计划“西部青年学者”项目 (Y62305040); 中国地质大调查项目 (DD20160305)

作者简介: 梁月明 (1983 ~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为岩溶生态和微生物分子生态学, E-mail: yueming0919@163.com

* 通信作者, E-mail: yrsu@isa.ac.cn

等^[5,6]报道了植物多样性、生产力与 AM 真菌多样性呈正相关关系。因此,AM 真菌在植被恢复中显示其巨大的潜力。

AM 真菌是直接联系植物与土壤的载体,对植物与土壤理化性质变化反应灵敏。已有的研究表明,AM 真菌具有宿主专一性^[7],不同森林生态系统土壤中 AM 真菌群落结构存在显著差异^[8]。同样,土壤理化性质显著影响 AM 真菌群落组成结构与多样性。不同生态系统中,土壤速效磷是驱动 AM 真菌群落结构组成的主要因子^[9,10]。此外, Aliasgharzad 等^[11]的研究表明草丛生态系统中 pH 也显著影响 AM 真菌群落结构组成及多样性。因此,综合分析植物与土壤因素对 AM 真菌群落的影响,能够更加合理的调控 AM 真菌用于植被的恢复。

喀斯特地区约占地球陆地表面面积的 15%,中国西南喀斯特地区面积约 550 000 km²,是世界上最大的喀斯特区域^[12]。喀斯特地区独特的穴洞、落水洞等地貌^[13],导致了该地区生态环境脆弱且对人为干扰敏感。上世纪 50~90 年代,人口剧增及对资源的过度开采进一步加剧了该地区的石漠化^[14]。因此,喀斯特地区退化土壤的恢复刻不容缓。灌丛植物在喀斯特地区具有分布广、早生、适钙等特点,从而成为该地区植被恢复的关键阶段。已有研究表明,AM 真菌在退化土壤恢复中起重要的作用^[5,6]。虽然已有研究报道了喀斯特地区 AM 真菌种质资源丰富^[15],目前,该地区对 AM 真菌的研究主要集中在提高植物抗旱性上^[16,17],但应用于植被恢复还处于起步阶段。冯书珍等^[18]的研究表明,不同坡位条件下,土壤微生物群落结构存在显著差异。在喀斯特灌丛生态系统中,不同坡位条件下,土壤养分与植物群落组成结构存在显著差异^[19],土壤 AM 真菌群落结构如何变化的研究未见报道。因此,本研究运用 T-RFLP 与 Q-PCR 的方法研究喀斯特灌丛生态系统不同坡位条件下土壤 AM 真菌群落结构与丰度,探讨土壤性质、植物群落组成与 AM 真菌群落结构、丰度之间的关系,以期从微生物学的角度为喀斯特地区植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究样区

研究样区同进村(24°50'N,105°55'E)位于广西壮族自治区环江毛南族自治县西北部,属于亚热带季风气候,年均气温 10.1~28℃;年均日照时数 1 451 h;年均降雨量 1 389.1~1 750 mm,空气平均

相对湿度为 79%,成土母质为白云岩发育的石灰土,灌木群落有 15~20 a 的退耕历史。

1.2 植被调查与土壤样品采集

植被调查:2012 年 6 月,在研究区从山顶到山脚布设 3 条样带,每条样带分别在样带的上、中、下坡位布设 3 个样方(10 m×10 m),一共 9 个样方(9 为 3 个坡位×3 个重复),每个样方距离 100 m。将每块灌木样方分成面积相等的 4 个小样方调查植被组成,每个小样方分成 2 层(灌木层、草本层)进行调查。2.5 cm<胸围<3.14 cm 为灌木,胸围<2.5 cm 为草本。同时,记录每种植物的坐标、高度、冠幅、株数。

土壤样品采集:考虑到喀斯特地区土壤异质性高,为了得到具有代表性的土壤样品,每个样方沿“S”形采集 15 点表层 0~15 cm 的土壤样品,将这 15 点采集到的土壤充分混匀成一个混合样(代表整个样方),一共 9 个样品(9 为 3 个坡位×3 个重复样地)。将采集到的土壤样品,用四分法将其分成 2 部分,一部分风干保存用于土壤基本理化性质分析;另一部分(约 50 g)快速置于液氮中运回实验室-70℃保存,用于分子生物学分析。

1.3 土壤基本理化性质的测定

土壤 pH 值用电位法(土水比为 1:2.5)测定;有机碳用重铬酸钾-硫酸氧化法测定^[20];全 N 用半微量凯氏法测定^[20];土壤速效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提、钼锑抗比色法测定^[21];含水量用烘干法测定。

1.4 土壤 DNA 提取、目的片段 PCR 扩增

采用改进的十二烷基硫酸钠-异硫氰酸胍-聚乙二醇法(sodium dodecyl sulfate-glucopyranosyl isothiocyanate-polyethylene glycol, SDS-GITC-PEG)提取土壤微生物总 DNA^[22]。

获得的微生物总 DNA 经 1% 的琼脂糖凝胶电泳进行定性检测,片段大小约为 20 kb;接着,用紫外分光光度计(Nanodrop, PeqLab, Germany)对获得的 DNA 进行定量检测:DNA 浓度 66~178 ng·μL⁻¹,A_{260 nm}/A_{280 nm} 比值为 1.85~1.96, A_{260 nm}/A_{230 nm} 比值为 0.85~2.07,说明所提取的 DNA 产量与纯度较高,可用于下一步的分子生物学分析。每个土壤样品分别提取 3 管 DNA,然后混成一个 DNA 样品,进行目的条带 PCR 的扩增。

采用巢式 PCR 扩增 AM 真菌 18S rRNA,其中,第一次 PCR 扩增引物对为 GeoA2/Geo11(上游 5'-CCAGTAGTCATATGCTTGTCTC-3',下游 5'-ACCTT

GTTACGACTTTTACTTCC-3')^[23],第二次 PCR 扩增引物对为 NS31/AM1 (上游 5'- TTGGAGGGCA AGTCTGGTGCC-3', 下游 5'- CTTTCCCCTAAGGC GCCGAA-3')^[24]. 并在引物对 NS31/AM1 正向引物 5' 添加 FAM 用于 T-RFLP 分析的,所有引物由上海英俊生物技术公司合成,PCR 扩增仪为 Eppendorf Mastercycler (Germany).

第一次 PCR,扩增体系(25 μL): $2 \times$ PCR Premix (0.1U PrimeSTAR HS DNA Polymerase, 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ dNTPs, Takara) 12.5 μL , 上游和下游引物各 10 $\text{pmol} \cdot \text{L}^{-1}$, DNA 模板 20 ng, ddH₂O 补至 25 μL . 扩增程序: 94 $^{\circ}\text{C}$ 2 min; 35 个循环为 95 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 62 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 60 s; 72 $^{\circ}\text{C}$ 终延伸 10 min.

第二次 PCR 反应体系(50 μL):取第一次 PCR 产物 2.5 μL 为模板, $2 \times$ PCR Premix (0.1U PrimeSTAR HS DNA Polymerase, 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ dNTPs, Takara) 25 μL , 上游和下游引物各 10 $\text{pmol} \cdot \text{L}^{-1}$, ddH₂O 补至 50 μL . 扩增程序: 94 $^{\circ}\text{C}$ 2 min; 35 个循环为 95 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 64 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 60 s; 72 $^{\circ}\text{C}$ 终延伸 10 min.

1.5 荧光定量 PCR 扩增

采用 AMV4.5N/AMDGR (上游 5'-AAGCTCG TAGTTGAATTCG-3', 5'-CCCAACTATCCCTATTA ATCAT-3')^[25]引物对测定 AM 真菌基因拷贝数,反应体系(10 μL)与程序按(TaKaRa)试剂盒操作说明书进行,PCR 扩增所用仪器为 ABI 7900 (USA) 荧光定量 PCR 仪.

标准曲线制作:将测序获得的已知种属的阳性克隆子扩增培养后提取质粒 DNA,经紫外分光光度计检测浓度后,将其进行 $10^1 \sim 10^8$ 倍梯度稀释,作为目标基因荧光定量的标准样品.以初始模板 DNA 量的对数为横坐标,以 PCR 反应过程中每个稀释样品的 Ct 值为纵坐标,绘制标准曲线($R^2 = 0.99$),扩增效率为 95% ~ 105%.所有样品均做 4 次技术重复,为了消除不同批次扩增的误差将每个基因的标准曲线样品,阴性对照,样品扩增同时在 384 孔板上进行.

微生物丰度(即核酸拷贝数)计算公式:拷贝数($\text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$) = $(6.02 \times 10^{23} \times \text{DNA 浓度}) / (\text{DNA 长度} \times 660)$.

1.6 限制性片段长度多态技术 (terminal restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 检测

在参考相关研究常用的限制性内切酶的基础上结合 Gentle 软件分析本研究用到的引物片段,最终

选择 *Hinf* I 酶用于 AM 真菌的 T-RFLP 分析.

PCR 产物采用试剂盒“Wizard SV Gel and PCR clean-up Systems” (Promega, Madison, US) 进行凝胶回收纯化.操作步骤见试剂盒说明书. PCR 产物纯化用限制性内切酶,酶切体系 50 μL ,其中 DNA 约为 200 ng,其它试剂加入量及酶切反应温度均按照说明书操作.酶切条件:水浴反应 12 h,热变性(65 $^{\circ}\text{C}$, 20 min)使酶失活从而终止酶切反应.取 10 μL 酶切产物,用 2.0% 的琼脂糖凝胶电泳检查是否酶切完全. T-RFLP 检测由上海桑尼生物科技有限公司完成(Sunny Biotechnology Co., Shanghai),所用仪器为 ABI Prism 3100 Genetic Analyzer.

1.7 数据分析

(1) T-RFLP 数据分析

利用 PeakScan1.0 软件显示末端片段大小(T-RFs)和相对丰度.每个末端片段(T-RFs)的荧光值除以所有片段荧光值的总和为该末端片段的相对百分比,去掉 1% 以下的末端片段,去掉末端片段长度小于 50 bp T-RFs,将相差 2 bp 的 T-RFs 合并为同一个,将相对丰度 $\geq 5\%$ T-RFs 定义为优势种.

采用 T-RFLP 分子生物学的方法研究 AM 真菌群落结构,利用 CANOCO 5.0 软件进行 AM 真菌群落结构分析.首先利用去趋势对应分析法(detrended correspondence analysis, DCA)对数据进行去势分析,轴长梯度小于 3,表明该数据适合采用基于线性模型的排序方法,最终确定利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)来探讨环境因子与 AM 真菌群落结构的关系.

(2) 植物多样性计算方法

植物多样性采用 Shannon-Winer 指数(H' , 香农多样性指数)表示.植物物种多样性指数计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

$$E = H' / H'_{\max} = H' / \ln S$$

P_i = (相对高度 + 相对丰度 + 相对盖度)/3 式中, P_i 为物种 i 的个体数, S 为群落中所有物种个体数之和, E 为植物均匀度指数^[26].

(3) 统计分析

采用 SPSS 19.0 for Windows (SPSS Inc., 芝加哥,美国)和 Microsoft Excel 2010 软件进行数据统计分析.数据不服从正态分布将进行 $\lg(x+1)$ 的转化.差异显著性用 One-way ANOVA (一维方差分析)分析,多重比较采用 LSD 法.相关性采用皮尔森指数(Pearson)分析.

2 结果与分析

2.1 不同坡位条件下土壤理化性质分布特征

单因素方差分析表明,不同坡位条件下,土壤有机碳、全氮和速效磷含量差异显著,具体表现为上坡位 \approx 中坡位 $>$ 下坡位;而 pH 在 3 个坡位间不存在显著差异(表 1)。

表 1 不同坡位条件下土壤理化性质及植物多样性指数¹⁾

Table 1 Soil properties and plant diversity under different slope position conditions

项目	下坡位	中坡位	上坡位	F
速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.71 \pm 0.61b	5.89 \pm 0.27ab	6.52 \pm 0.15a	5.40 *
pH	7.46 \pm 0.19a	7.74 \pm 0.07a	7.89 \pm 0.04a	3.16
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.60 \pm 0.38b	5.78 \pm 0.27a	6.30 \pm 0.03a	10.48 *
有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	61.38 \pm 2.81b	66.49 \pm 0.93ab	73.28 \pm 1.19a	5.47 *
植物丰富度指数	40 \pm 6a	40 \pm 4a	44 \pm 5a	0.2
植物均匀度指数	0.96 \pm 0.003a	0.92 \pm 0.03a	0.98 \pm 0.01a	2.76
植物香农多样性指数	4.54 \pm 0.26a	4.53 \pm 0.12a	4.89 \pm 0.22a	0.95
优势植物	子凌蒲桃 欖木 火棘	欖木 四子海桐 子凌蒲桃	四子海桐 子凌蒲桃 火棘	— — —

1) LSD \leq 0.05; n=3; M+SE; 同一行不同字母代表在 P<0.05 的水平下差异显著; * 表示 P<0.05

由 T-RFLP 图谱可见,不同坡位条件下土壤 AM 真菌群落组成结构差异显著(图 2)。本研究一共获得 29 个 T-RFs,下坡位、中坡位与上坡位土壤中分别获得 19、17 和 19。将相对丰度 \geq 5% T-RFs 定义为优势种,上坡位土壤中的优势种 T-RFs 94、138、189、300 bp,约占总种群的 67%;中坡位土壤中的优势种 T-RFs 125、144、196 bp,约占总种群的 58%;下坡位土壤中的优势种 T-RFs 138、144、189 与 300 bp,约占总种群的 63%。3 个坡位没有共同的优势种,上坡位与下坡位共同优势种为 189 bp 与 300 bp,中坡位与下坡位共有的优势种为 144 bp,上坡位与中坡位没有共同的优势种,3 个坡位没有共同的优势种。稀少种群 T-RFs 152bp 仅在下坡位土壤中检测到,125、203、252、260、284、432 bp 仅在中坡位土壤中检测到,352 bp 仅在上坡位土壤中检测到。

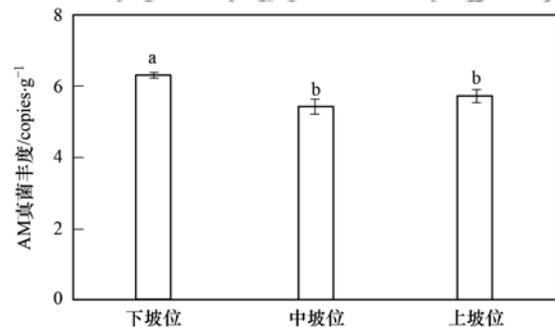
RDA 分析结果显示,植物均匀度指数 ($P = 0.042$, $F = 2.1$) 显著影响土壤 AM 群落组成结构,解释了整个群落变异的 64.9% [图 3(a)]。

2.3 不同坡位条件下植物多样性分布特征及其影响因素

表 1 所示,下坡位优势植物:子凌蒲桃 (*Syzygium championii* B.)、欖木 (*Loropetalum chinense* A. Br.)、火棘 (*Pyracantha fortuneana* M.);中坡位优势植物:欖木 (*Loropetalum chinense* A.

2.2 不同坡位条件下土壤 AM 真菌多样性分布特征及其影响因素

单因素方差分析表明,土壤 AM 真菌丰度在不同坡位条件下存在显著性差异(图 1),变化趋势为上坡位 \approx 中坡位 $<$ 下坡位。相关性分析表明,土壤速效磷含量与土壤 AM 真菌丰度存在显著负相关 ($P < 0.05$)。



不同字母代表在 P<0.05 的水平下差异显著

图 1 不同坡位条件下土壤中 AM 真菌丰度

Fig. 1 Abundance of AM fungal under different slope position conditions

Br.)、四子海桐 (*Pittosporum tonkinense* G.)、子凌蒲桃 (*Syzygium championii* B.);上坡位优势植物:子凌蒲桃 (*Syzygium championii* B.)、四子海桐 (*Pittosporum tonkinense* G.)、火棘 (*Pyracantha fortuneana* M.)。3 个坡位共同的优势植物为子凌蒲桃。

单因素方差分析表明,不同坡位条件下,植物丰富度指数、植物均匀度指数与香农多样性指数差异不显著(表 1)。

RDA 分析表明,不同坡位间植物群落结构组成存在显著差异,土壤有机碳 ($P = 0.046$, $F = 1.7$)、全氮 ($P = 0.047$, $F = 1.1$) 显著影响植物群落结构组成,解释了整个群落变异的 35.7% [图 3(b)]。

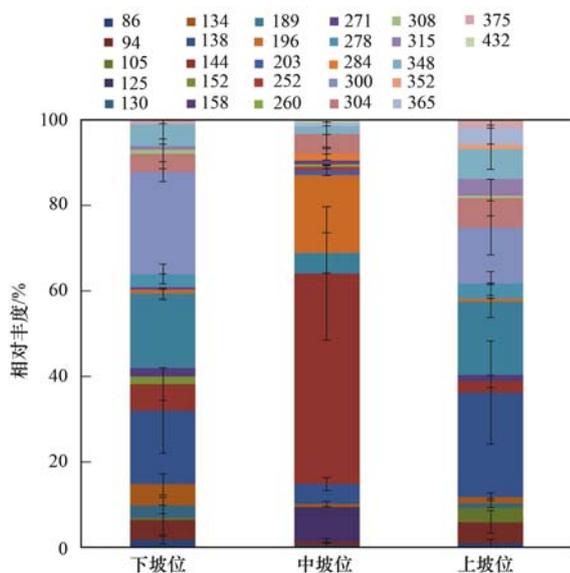


图2 不同坡位条件下土壤 AM 真菌 (*Hinf I* 酶) 群落组成分析

Fig. 2 Average relative abundances of AM fungal T-RFs as determined by endonuclease digestion with *Hinf I* in soil samples from different slope position conditions

3 讨论

3.1 坡位对土壤理化性质及植物多样性的影响

地形因子与土壤之间并没有直接的物质与能量的交换,主要通过径流、侵蚀和生物循环引起物质与能量的空间再分配,进而影响土壤养分的积累和循环过程^[27]。不同的地貌部位,地表径流侵蚀冲刷程度及人为干扰程度不同,均对坡面土壤碳氮磷含量的分布产生重大影响^[28]。一般情况下,土壤碳氮磷含量随着坡位升高而降低^[29, 30],存在养分的“注积效应”。而在本研究中,土壤碳氮磷含量出现了上坡高下坡低的“倒置”现象。主要因为:第一,由于喀斯特地区地表径流少,其侵蚀程度在喀斯特较其他地区弱^[31],土壤碳氮磷随地表径流流失少,加上喀斯特地区自身独特的地貌,上坡位的岩石裸露度较下坡位高^[32],不仅有利于削弱上坡位地表径流对土壤碳氮磷的冲刷,同时对土壤碳氮磷起到了截留作用;第二,相对于上坡位,下坡位受人为干扰比较强,长期耕作和扰动造成土壤碳氮磷大量分解与流失。因此,土壤碳氮磷在喀斯特地区出现了上坡高下坡低的“倒置”现象。

同样,不同坡位条件下植物群落结构组成存在显著差异 [图 3 (b)],与已有的研究结果一致^[33, 34, 35]。这与土壤养分在不同坡位间存在显著差异密切相关。本研究发现,土壤全氮、速效磷含量显著影响植物群落结构组成 [图 3 (b)],与同在喀斯特地区 Peng 等的研究结果一致^[36]。但是,不同

坡位间植物多样性指数不存在显著差异 (表 1),与在北京地区研究落叶阔叶林种地形对植物多样性的影响结果不一致^[37]。最有可能的原因为,本研究选择的样地地形坡度比较缓,上坡位与下坡位最大的垂直高度差约 325 m,微小的地形变化不足以影响植物多样性。与 Zhang 等^[38]在喀斯特地区研究结果一致:在喀斯特地区,陡峭的山坡对植物多样性的影响相对缓坡更大。

3.2 坡位对土壤 AM 真菌群落结构组成及丰度的影响

坡位主要是通过影响微生物生存的微环境进而影响微生物群落结构组成及多样性,如土壤养分^[39]。本研究发现,坡位对土壤中 AM 真菌丰度影响显著。上坡位,土壤养分含量高,AM 真菌的丰度低;下坡位,土壤养分含量低,AM 真菌的丰度高。植物对土壤养分的需求能够解释这种现象。如在养分贫瘠的土壤中,植物依靠 AM 真菌吸收养分满足自身生长,从而增加 AM 真菌丰度;而在养分肥沃的土壤中,植物依靠根系能够吸收足够多的养分满足生长,从而减少 AM 真菌丰度进而减少其对宿主植物碳水化合物的消耗。此外,人为干扰也影响土壤 AM 真菌丰度的另一因子。与上坡位比较,下坡位人为干扰相对频繁,适度人为干扰能够提高 AM 真菌多样性^[40]。

土壤理化性质影响 AM 真菌多样性已被很多研究所证实,尤其是土壤速效磷含量,被认为是改变 AM 真菌多样性的主要驱动因子之一^[41]。已有的研究表明,土壤速效磷含量低将会提高 AM 真菌丰度^[42],与本研究结果一致。在喀斯特地区,土壤全磷含量较同纬度地带性土壤高,然而,受高钙镁和 pH 等的制约,导致植物可利用的磷素养分较低^[43]。本研究显示,在喀斯特地区土壤速效磷含量低的条件下,AM 真菌丰度增大,有利于缓解植物生长受磷素的胁迫,这表明 AM 真菌在喀斯特地区植被恢复中显示巨大的潜力。

同样,植物也影响土壤 AM 真菌群落结构组成^[44~46]。本研究发现,植物均匀度显著影响土壤 AM 真菌群落结构组成 [图 3 (a)]。植物均匀度指数是指一个群落或者生境中全部种的个体数目,反映了种属组成的均匀程度^[47]。在一个特定的环境下,植物均匀度指数越高,其群落结构组成越稳定^[48],土壤 AM 真菌在一个稳定的环境中,有利于促进其种群的生存、稳定及发展。

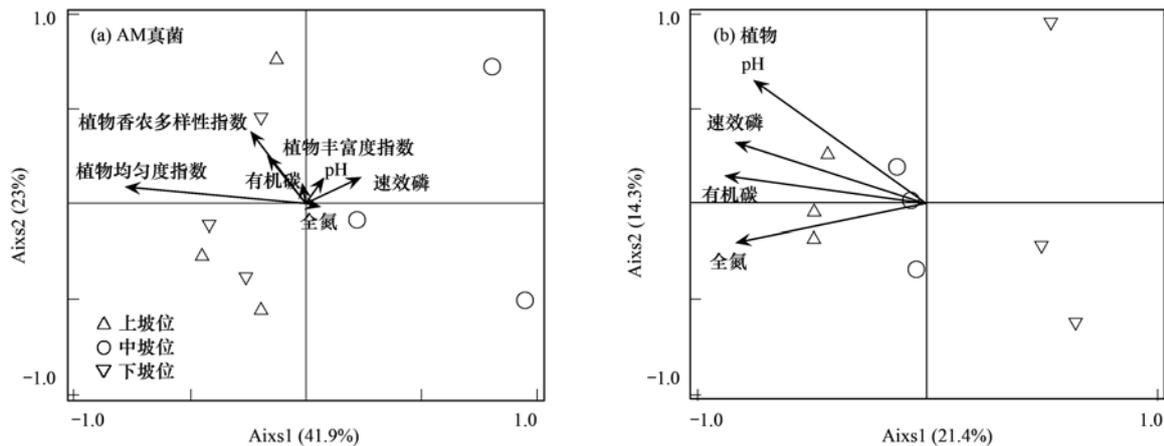


图3 AM真菌与植物群落结构的影响因子分析

Fig. 3 Effect of factors on AM fungi and plant community composition structure

4 结论

(1)不同坡位条件下,土壤养分的变化趋势为上坡位 \approx 中坡位 $>$ 下坡位,土壤AM真菌丰度变化趋势为上坡位 \approx 中坡位 $<$ 下坡位,表明AM真菌在喀斯特贫瘠土壤中起重要的作用。

(2)不同坡位条件下,土壤养分与植物群落结构对土壤AM真菌群落结构的影响是一种复合的作用。因此,AM真菌应用于喀斯特地区植被恢复时,微形态(坡位)对AM真菌的影响应该纳入考虑范畴,才能高效地促进该地区的植被恢复。

参考文献:

- [1] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.) [M]. London, UK: Academic Press Inc, 2008. 815.
- [2] Smith F A, Grace E J, Smith S E. More than a carbon economy: nutrient trade and ecological sustainability in facultative arbuscular mycorrhizal symbioses [J]. New Phytologist, 2009, **182**(2): 347-358.
- [3] Johnson N C, Wilson G W T, Bowker M A, et al. Resource limitation is a driver of local adaptation in mycorrhizal symbioses [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, **107**(5): 2093-2098.
- [4] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis (2nd ed.) [M]. London: Academic Press, 1996.
- [5] Van Der Heijden M G A, Klironomos J N, Ursic M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity [J]. Nature, 1998, **396**(6706): 69-72.
- [6] Van Der Heijden M G A, Scheublin T R. Functional traits in mycorrhizal ecology: their use for predicting the impact of arbuscular mycorrhizal fungal communities on plant growth and ecosystem functioning [J]. New Phytologist, 2007, **174**(2): 244-250.
- [7] Davison J, Öpik M, Daniell T J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal communities in plant roots are not random assemblages [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2001, **78**(1): 103-115.
- [8] Arias R M, Heredia-Abarca G, Sosa V J, et al. Diversity and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores under different coffee production systems and in a tropical montane cloud forest patch in Veracruz, México [J]. Agroforestry Systems, 2012, **85**(1): 179-193.
- [9] Camenzind T, Hempel S, Homeier J, et al. Nitrogen and phosphorus additions impact arbuscular mycorrhizal abundance and molecular diversity in a tropical montane forest [J]. Global Change Biology, 2014, **20**(12): 3646-3659.
- [10] Lin X G, Feng Y Z, Zhang H Y, et al. Long-Term balanced fertilization decreases arbuscular mycorrhizal fungal diversity in an arable soil in North China revealed by 454 pyrosequencing [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(11): 5764-5771.
- [11] Aliasgharzar N, Mårtensson L M, Olsson P A. Acidification of a sandy grassland favours bacteria and disfavours fungal saprotrophs as estimated by fatty acid profiling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(7): 1058-1064.
- [12] 袁道先. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [13] Hollingsworth E. Karst regions of the world (KROW)-populating global karst datasets and generating maps to advance the understanding of karst occurrence and protection of karst species and habitats worldwide [M]. ProQuest Dissertations Publishing, Ann Arbor. 2009.
- [14] Wang S J, Li R L, Sun C X, et al. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China: phenomena and mechanisms [J]. Land Degradation & Development, 2004, **15**(2): 123-131.
- [15] Wei Y, Wang S J, Liu X M, et al. Molecular diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in karst ecosystem, southwest China [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, **11**(80): 14561-14568.
- [16] Qiao G, Wen X P, Yu L F, et al. The enhancement of drought tolerance for pigeon pea inoculated by arbuscular mycorrhizae fungi [J]. Plant Soil and Environment, 2011, **57**(12): 541-546.
- [17] Zhang Z F, Zhang J C, Huang Y Q, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the drought tolerance of *Cyclobalanopsis*

- glauca* seedlings under greenhouse conditions[J]. *New Forests*, 2014, **45**(4): 545-556.
- [18] 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 等. 坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3832-3838.
- Feng S Z, Su Y R, Zhang W, *et al.* Effects of slope position and soil horizon on soil microbial biomass and abundance in Karst primary forest of southwest China[J]. *Environmental science*, 2015, **36**(10): 3832-3838.
- [19] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(1): 68-73.
- Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression area [J]. *Transaction of the CSAE*, 2008, **24**(1): 68-73.
- [20] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total[A]. In: Page A L, Miller R M, Keeney D R (Eds.). *Methods of Soil Analysis* [M]. Madison, WI: America Society of Agronomy, 1965. 1149-1178.
- [21] Colwell J D. The estimation of the phosphorus fertilizer requirements of wheat in southern New South Wales by soil analysis[J]. *Animal Production Science*, 1963, **3**(10): 190-197.
- [22] 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 等. 岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1253-1261.
- Liang Y M, Su Y R, He X Y, *et al.* Effects of lithology on the abundance and composition of soil nitrogen-fixing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungal communities in karst shrub ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1253-1261.
- [23] Schüßler A, Schwarzott D, Walker C. A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution [J]. *Mycological Research*, 2001, **105**(12): 1413-1421.
- [24] Santos-González J C, Finlay R D, Tehler A. Seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities in roots in a seminatural grassland [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(17): 5613-5623.
- [25] Sato K, Suyama Y, Saito M, *et al.* A new primer for discrimination of arbuscular mycorrhizal fungi with polymerase chain reaction-denature gradient gel electrophoresis [J]. *Grassland Science*, 2005, **51**(2): 179-181.
- [26] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. *生态学报*, 1995, **15**(6): 268-277.
- Ma K P, Huang J H, Yu S L, *et al.* Plant community diversity in Dongling mountain, Beijing, China: II. Species richness, evenness and species diversities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(6): 268-277.
- [27] 李天杰, 宁大同, 薛纪渝, 等. *环境地学原理*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [28] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. *生态学报*, 2011, **31**(11): 3036-3043.
- Liu S J, Zhang W, Wang K L, *et al.* Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(11): 3036-3043.
- [29] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(2): 53-56, 60, 79.
- Gao X S, Deng L J, Zhang S R. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **19**(2): 53-56, 60, 79.
- [30] 刘鑫, 满秀玲, 陈立明, 等. 坡位对小叶杨人工林生长及土壤养分空间差异的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(5): 76-81.
- Liu X, Man X L, Chen L M, *et al.* Effects of site condition on growth and spatial differences of soil nutrient in *Populus simonii* Carr. plantations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(5): 76-81.
- [31] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(16): 121-126.
- Chen H S, Yang J, Fu W, *et al.* Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(16): 121-126.
- [32] Chen H S, Liu J W, Wang K L, *et al.* Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi China[J]. *CATENA*, 2011, **84**(1-2): 21-28.
- [33] Brewer S W, Rejmánek M, Webb M A H, *et al.* Relationships of phytogeography and diversity of tropical tree species with limestone topography in southern Belize [J]. *Journal of Biogeography*, 2003, **30**(11): 1669-1688.
- [34] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2001, **12**(1): 53-60.
- [35] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析[J]. *植物生态学报*, 2000, **24**(4): 430-435.
- Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(4): 430-435.
- [36] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, *et al.* Relationships between woody plants and environmental factors in karst mixed evergreen-deciduous broadleaf forest, southwest China [J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2012, **10**(1): 890-896.
- [37] Fu B J, Liu S L, Ma K M, *et al.* Relationships between soil characteristics, topography and plant diversity in a heterogeneous deciduous broad-leaved forest near Beijing, China[J]. *Plant and Soil*, 2004, **261**(1-2): 47-54.
- [38] Zhang Z H, Hu G, Ni J. Effects of topographical and edaphic factors on the distribution of plant communities in two subtropical karst forests, southwestern China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(1): 95-104.
- [39] Gotsch S, Holwerda F, Muñoz L, *et al.* Land cover and slope position affect water use and microclimate in the tropical montane cloud forests of Central Veracruz, Mexico[A]. In: *Proceedings of the 50th Anniversary Meeting*[C]. San Jose, Costa Rica: ATBC, 2013.
- [40] Oehl F, Laczko E, Bogenrieder A, *et al.* Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal

- fungal communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(5): 724-738.
- [41] Yang H S, Yuan Y G, Zhang Q, *et al.* Changes in soil organic carbon, total nitrogen, and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi along a large-scale aridity gradient[J]. *Catena*, 2011, **87**(1): 70-77.
- [42] Gosling P, Mead A, Proctor M, *et al.* Contrasting arbuscular mycorrhizal communities colonizing different host plants show a similar response to a soil phosphorus concentration gradient[J]. *New Phytologist*, 2013, **198**(2): 546-556.
- [43] 杨慧, 曹建华, 孙蕾, 等. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(2): 135-140.
- Yang H, Cao J H, Sun L, *et al.* Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types of karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(2): 135-140.
- [44] Liang Y M, He X Y, Chen C Y, *et al.* Influence of plant communities and soil properties during natural vegetation restoration on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a karst region[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **82**: 57-65.
- [45] Li X L, Gai J P, Cai X B, *et al.* Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with two co-occurring perennial plant species on a Tibetan altitudinal gradient [J]. *Mycorrhiza*, 2014, **24**(2): 95-107.
- [46] Öpik M, Vanatoa A, Vanatoa E, *et al.* The online database MaarjAM reveals global and ecosystemic distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) [J]. *New Phytologist*, 2010, **188**(1): 223-241.
- [47] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 84.
- [48] 叶卫英, 尹林克, 钱翌, 等. 乌鲁木齐市周边荒山植物群落类型及其物种多样性[J]. *新疆农业大学学报*, 2005, **28**(1): 44-48.
- Ye W Y, Yin L K, Qian Y, *et al.* Study on plant community types and species diversity of main barren hill in Urumqi [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005, **28**(1): 44-48.



CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-ru, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)