

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析

梁月明^{1,2}, 苏以荣^{2*}, 何寻阳², 陈香碧²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 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)

摘要: 运用末端限制性片段长度多态性 T-RFLP 法 (terminal restriction fragment length polymorphism), 检测岩溶区典型 13 种灌丛植物根系丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 群落结构变化特征, 探讨岩溶区 AM 与宿主植物是否存在选择特性. 结果表明, 不同灌丛植物根际土壤养分存在显著差异, 豆科植物显著高于非豆科植物. 聚类分析表明, 13 种灌丛植物均能被 AM 侵染, 不同灌丛植物根系 AM 群落结构存在显著差异, 尤其豆科与非豆科植物, 但 AM 群落结构在 9 种非豆科植物间差异显著而在 4 种豆科植物间则差异不显著. 冗余分析表明, 影响豆科与非豆科植物根系 AM 群落结构的因子各异, 土壤 Olsen-P、pH 和全氮是影响岩溶区灌丛植物根系 AM 群落组成结构的主要因子. 研究还表明, 岩溶区灌丛植物根系 AM 与宿主植物具有选择特性, 这种选择特性出现在植物功能群的几率比植物种类大, 将 AM 应用于岩溶区植物恢复时, 应考虑 AM 与宿主植物的选择特性问题.

关键词: 岩溶; 灌丛; 豆科植物; 丛枝菌根真菌; 群落结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5657-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804117

Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions

LIANG Yue-ming^{1,2}, SU Yi-rong^{2*}, HE Xun-yang², CHEN Xiang-bi²

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Nature and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: To explore if there are species-preferential characteristics of arbuscular mycorrhizal (AM) and host plants in karst regions, 13 shrub plants (including leguminosae and non-leguminosae) were selected to study the AM community structure of root samples. The soil nutrients in rhizosphere soils significantly differ among shrubs; they are higher in leguminosae than in non-leguminosae. Cluster analysis shows that all 13 shrubs can be infected by AM. Significant differences of the AM community structure were observed among root samples from different shrubs, especially leguminosae and non-leguminosae. Redundancy analysis shows that soil Olsen-P, pH, and total nitrogen significantly influence the AM community structure of plant roots, although the factors affecting this fungus in leguminosae and non-leguminosae differ. These results indicate species-preferential characteristics of AM and host plants in karst regions, especially of the plant function group compared with plant species, suggesting that these characteristics should be taken into account when AM fungi are used for vegetation restoration in karst regions.

Key words: karst; shrub; leguminosae; arbuscular mycorrhizal fungus; community structure

丛枝菌根真菌是专性共生微生物, 可与陆地 90% 的植物形成共生关系^[1], 与植物形成共生关系之后, 能够与植物建立起一种互惠互利的关系, 有利于促进植物的生长发育. 然而, 不同植物由于其生理代谢、根系形态结构与分泌物等方面的差异, 必然会影响到丛枝菌根对宿主植物的侵染^[2], 进而影响其群落组成、多样性等. 同时, 宿主植物本身需要适应其生存环境, 丛枝菌根面临宿主和环境的 双重选择, 只有适应当地特有生态环境的丛枝菌根才能够生存并更好地发挥其生态功能^[3], 因而, 丛枝菌根与宿主植物存在某种程度上的选择特性, 与早期的研究认为丛枝菌根全球随机分布矛盾. 因此, 丛枝菌根与宿主植物是否具有选择特性的问题

仍然存在着争议, 成为菌根学研究的热点问题之一.

岩溶地貌主要分布在中国西南地区, 面积约 550 000 km², 是世界上分布面积最大的岩溶区^[4].

由于岩溶区独特的地形地貌, 例如: 土层浅薄, 岩石裸露度高, 受人为干扰敏感, 导致生态系统脆

收稿日期: 2018-04-16; 修订日期: 2018-05-25

基金项目: 国家应急管理项目(31741021); 中国科学院西部之光人才培养计划“西部青年学者”项目(Y62305040); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380179, 2017XNSFAA198241); 岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2016004); 中国地质大调查项目(DD20160324)

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

弱,容易发生石漠化现象.虽然,近几年来,岩溶区实施了大量石漠化治理工程措施,并取得了一定的成效,但整体形势还是比较严峻的.植被恢复是石漠化治理最有效的措施之一,灌丛在岩溶区具有分布广、旱生、岩生、嗜钙等特点^[5],是该地区植被从草丛恢复到乔木林的关键过渡阶段^[6].苏宗明等^[7]的研究表明,欆木、红背山麻杆、黄荆、龙须藤、灰毛浆果楝、小果蔷薇、火棘、雀梅藤、金合欢等是广西岩溶石山主要的优势灌丛植物.然而,由于不同灌丛群落类型其物种组成及多样性随植被的恢复往往具有各自的规律^[8],加上不同灌丛群落类型在不同植被恢复阶段中其生态位存在差异^[9],对资源的需要与获取也不一样,从而导致某些灌丛群落类型在植物恢复过程中逐渐占优势,而某些群落类型的优势地位进一步削弱.灌丛植物在植被恢复过程中出现不同的变化趋势,除了与植物本身的生理生态功能有关外,与其根系共生微生物多样性变化密切相关,例如丛枝菌根.因此,探究不同灌丛植物根系丛枝菌根多样性的变化规律,有利于明晰共生丛枝菌根在灌丛植物演替中所起的作用.

目前,国内只有少数学者开展了岩溶区丛枝菌根真菌多样性的研究,例如, Li 等^[10]、魏源等^[11]和何跃军等^[12]进行贵州岩溶高原或云南干热河谷中的丛枝菌根真菌多样性调查;而对于岩溶峰丛洼地生态系统中丛枝菌根真菌群落结构及其生态功能的研究较少,只有 Qiao 等^[13]、Zhang 等^[14]和张中峰等^[15]探讨了丛枝菌根真菌对植物生理生态的影响.本项目组前期在岩溶峰丛洼地区也开展了一些工作:发现岩溶峰丛洼地不同植被恢复生态系统中土壤丛枝菌根真菌多样性在草丛阶段最低,在原生林阶段最大^[16];微生境(岩性、坡位)对土壤丛枝菌根真菌多样性产生显著的影响^[17, 18].结果表明,岩溶区土壤丛枝菌根真菌的种质资源丰富,但针对岩溶峰丛洼地区灌丛植物根系丛枝菌根的研究很少.因此,本研究运用 T-RFLP 的方法分析了岩溶区灌丛植物根系丛枝菌根群落结构变化特征,探讨丛枝菌根与宿主植物是否存在选择特性,以期从微生物学的角度为岩溶区植被恢复提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究样区

研究样区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县同进村(24°50'N, 105°55'E),木伦村(25°04'N,

107°57'E)、仪凤村(24°57'N, 108°02'E),属于亚热带季风气候,年均气温 18.5℃,年均降雨量 1 389 mm,雨季主要集中在 4~9 月,尤以 6 月中旬至 7 月中旬最多,空气平均相对湿度为 79%,灌木群落样地有 15~20 a 的退耕历史.

1.2 植物根系与根际土壤样品采集

植物选择:于 2012 年在同进村、木伦村和仪凤村共布设 21 个灌丛样方,采用经典植物群落调查方法调查植物多样性,然后,根据研究目的与植物重要值,确定目标植物,其中,包括 4 种豆科植物:香合欢(*Albizia odoratissima*)、老虎刺(*Pterolobium punctatum*)、羊蹄甲(*Bauhinia purpurea*)、龙须藤(*Bauhinia championii*), 9 种非豆科植物:欆木(*Loropetalum chinense*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、子凌蒲桃(*Syzygium championii*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、貂皮樟(*Litsea coreana*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、三脉叶荚蒾(*Viburnum triplinerve*)、四子海桐(*Pittosporum tonkinense*)和清香木(*Pistacia weinmannifolia*).

植物根系及根际土壤样品采集:考虑到植物树龄会影响根际养分,选择地茎约 2 cm 目标植物,采集其根系与根际土.不同植物根际土壤样品采集采用抖落法^[19].在上述所选的典型样地内挖取具有完整根系的土体(根系主要分布的范围),先轻轻抖动植物,抖落不含根系的大块土壤,然后采集粘附在根围的土壤(距离根围 0~5 mm)作为根际土,并尽可能去除混杂于根际土中的根系.采集完粘在根系上的土壤后,每株植物采集 2 mm 细根,用于 AM 群落分析.一共获得 204 个样品(102 个根与 102 个根际土壤样品),其中,香合欢 3 个,老虎刺 6 个,羊蹄甲 6 个,龙须藤 5 个,清香木 3 个,灰毛浆果楝 4 个,貂皮樟 11 个,红背山麻杆 5 个,三脉叶荚蒾 3 个,四子海桐 5 个,欆木 14 个,火棘 19 个,子凌蒲桃 18 个.在采集豆科植物根系与根际土壤时,记录植物是否形成根瘤.将采集到的土壤样品,风干保存用于土壤基本理化性质分析;采集到的根系样品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

用电位法(土水比为 1:2.5)测定土壤 pH 值;用重铬酸钾-硫酸氧化法测定有机碳^[20];用半微量凯氏法测定全 N^[20];用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提、钼锑抗比色法测定土壤 Olsen-P^[21];用烘干法测定含水量.

1.4 植物根系 DNA 提取、目的片段 PCR 扩增

利用植物提取试剂盒(天根, 北京)提取植物根系 DNA. 获得的总 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; 然后, 用紫外分光光度计(Nanodrop, PeqLab, Germany)对获得的 DNA 进行定量检测, 获得产量与纯度较好的 DNA 后用于进行下一步的分子生物学分析.

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'-ACCTTGTTACGACTTTTACTTCC-3')^[22], 第二次 PCR 扩增引物对为 NS31/AM1 (上游 5'-TTGGAGGGCAAGTCTGGTGCC-3'、下游 5'-CTTTCCCGTAAGGCGCCGAA-3')^[23], 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 μ L): DNA 模板 20 ng, 2 $\times$ PCR Premix (0.1U PrimeSTAR HS DNA Polymerase, 0.5 mmol $\cdot$ L⁻¹ dNTPs, Takara) 12.5 μ L, 上游和下游引物各 1 μ L, ddH₂O 补至 25 μ L; 扩增程序为 94 $^{\circ}$ C 2 min; 35 个循环为 95 $^{\circ}$ C 60 s, 62 $^{\circ}$ C 60 s, 72 $^{\circ}$ C 60 s; 72 $^{\circ}$ C 终延伸 10 min.

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

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

采用试剂盒 "Wizard SV Gel and PCR clean-up Systems" (Promega, Madison, US) 对 PCR 产物进行切胶回收纯化, 具体操作步骤见试剂盒说明书. PCR 产物用限制性 *Hinf*I 内切酶进行酶切, 酶切体系 (50 μ L): 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 $^{\circ}$ C, 20 min) 使酶失活从而终止酶切反应. 取 10 μ L 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.

1.6 数据分析

(1) T-RFLP 数据分析

利用 PeakScan 1.0 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 的 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.

基于 T-RFLP 数据, 利用 CANOCO 5.0 软件进行 AM 真菌群落结构分析. 首先, 数据进行趋势对应分析法 (detrended correspondence analysis, DCA), 获得轴长梯度大小, 确定数据适合采用的排序方法; 最终, 根据本研究数据轴长梯度小于 3, 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) 统计分析

数据统计分析分别在 SPSS 19.0 for Windows (SPSS Inc., 芝加哥, 美国) 和 Microsoft Excel 2010 软件中进行. 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.

2 结果与分析

2.1 典型灌丛植物根际土壤理化性质

表 1 显示, 13 种灌丛植物根际土壤有机碳、全氮、Olsen-P 含量的变化范围分别为 64 ~ 191 g $\cdot$ kg⁻¹、4 ~ 17 g $\cdot$ kg⁻¹、4 ~ 17 mg $\cdot$ kg⁻¹; 土壤 pH 的变化范围为 7.21 ~ 7.79.

单因素方差分析表明, 不同灌丛植物根际土壤有机碳、全氮、Olsen-P 含量存在显著性差异 (表 1), 其中, 豆科灌丛植物根际土壤养分显著高于非豆科灌丛植物; 在豆科植物中, 香合欢根际土壤养分显著高于其它 3 种豆科植物; 在非豆科植物中, 三脉叶荚蒾与四子海桐根际土壤养分显著低于其它植物.

2.2 典型灌丛植物根系丛枝菌根群落结构

由 T-RFLP 图谱可见 (图 1), 不同灌丛植物根系一共获得 44 个 T-RFs AM, 其中, 香合欢、老虎刺、羊蹄甲、龙须藤、清香木、灰毛浆果楝、貂皮樟、红背山麻杆、三脉叶荚蒾、四子海桐、檵木、火棘、子凌蒲桃根系中分别获得 16、22、21、24、18、19、26、27、16、19、33、34 和 34 个 T-RFs. 除貂皮樟外, 其余灌丛植物根系 AM 优势种群 T-RFs 为 105、138、189、300 和 348 bp, 占总种群的 46% 以

表 1 典型灌丛植物根际土壤理化性质¹⁾

Table 1 Soil properties in different shrub rhizospheres

项目	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Olsen-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
香合欢	191.40 ± 72.28 a	17.91 ± 6.51 a	17.87 ± 4.54 a	7.21 ± 0.39 a
老虎刺	85.04 ± 12.8 b	8.57 ± 1.38 b	10.04 ± 1.25 b	7.26 ± 0.15 a
羊蹄甲	73.00 ± 6.67 b	7.81 ± 1.95 bc	9.06 ± 0.64 bc	7.27 ± 0.17 a
龙须藤	77.12 ± 5.88 b	6.78 ± 0.69 bc	7.17 ± 1.37 bed	7.77 ± 0.12 a
清香木	75.31 ± 2.76 b	5.94 ± 0.11 bc	6.24 ± 0.52 cd	7.79 ± 0.12 a
灰毛浆果楸	65.27 ± 2.94 b	6.09 ± 0.58 bc	9.88 ± 1.49 b	7.57 ± 0.17 a
貂皮樟	64.38 ± 3.49 b	5.05 ± 0.41 bc	5.78 ± 0.61 cd	7.07 ± 0.17 a
红背山麻杆	69.59 ± 6.89 b	5.87 ± 0.88 bc	9.03 ± 0.32 bc	7.28 ± 0.18 a
三脉叶茛苳	70.41 ± 2.56 b	4.22 ± 0.54 c	4.51 ± 0.88 d	7.78 ± 0.09 a
四子海桐	68.67 ± 7.5 b	4.47 ± 0.57 c	5.29 ± 0.44 d	7.49 ± 0.17 a
欒木	69.33 ± 3.27 b	5.05 ± 0.25 bc	5.96 ± 0.49 cd	7.26 ± 0.19 a
火棘	67.16 ± 3.25 b	5.29 ± 0.33 bc	5.86 ± 0.33 cd	7.51 ± 0.11 a
子凌蒲桃	66.62 ± 2.21 b	6.17 ± 0.56 bc	7.05 ± 0.81 bed	7.54 ± 0.11 a

1) 数值表示平均值 + 标准误; 最小显著差异 t 检验 (least-significant difference, LSD) ≤ 0.05 ; 同一列不同字母代表在 $P < 0.05$ 的水平下差异显著

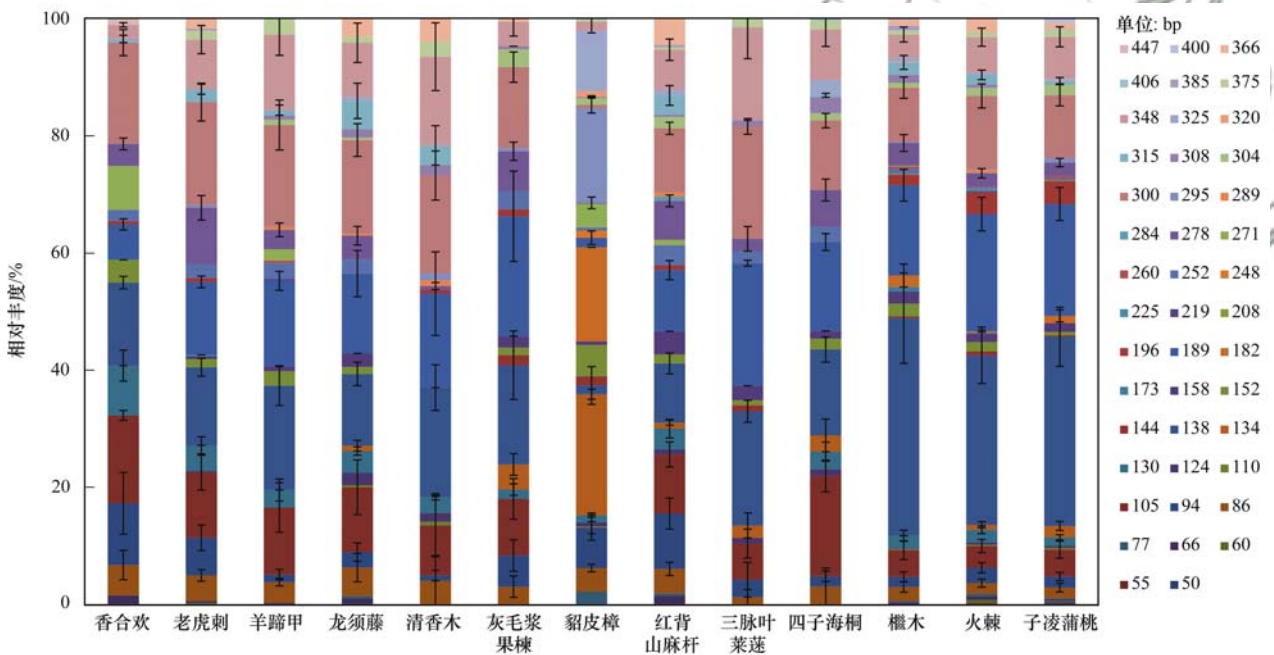


图 1 不同灌丛植物根系 AM (*Hinf*I 酶) 群落组成分析

Fig. 1 Average relative abundances of AM T-RFs as determined by endonuclease digestion with *Hinf*I in the root samples from different shrubs

上; 貂皮樟中优势 AM 优势种群 T-RFs 为 134、182、295 和 325 bp, 占总种群的 62% 以上。

2.3 典型灌丛植物根系丛枝菌根群落结构的影响因子

灌丛植物根系 AM 群落组成结构差异显著[图 2(a)], 其中, 豆科与非豆科植物根系 AM 群落组成结构存在显著差异; 而 4 种豆科植物中, 其根系 AM 群落组成结构不存在显著差异[图 2(b)]; 9 种非豆科植物中, 其根系 AM 群落组成结构存在显著

差异[图 2(c)].

RDA 分析表明, 土壤 Olsen-P ($P = 0.001$, $F = 3.5$)、pH ($P = 0.008$, $F = 2.4$) 和全氮 ($P = 0.026$, $F = 2.1$) 是影响不同灌丛植物根系 AM 群落组成结构的主要因子[图 3(a)]; 土壤全氮 ($P = 0.049$, $F = 1.7$) 是影响豆科灌丛植物根系 AM 群落组成结构的主要因子[图 3(b)]; 土壤有机碳 ($P = 0.002$, $F = 3.4$) 和 pH ($P = 0.006$, $F = 2.7$) 是影响非豆科灌丛植物根系 AM 群落组成结构的主要因子[图 3(c)].

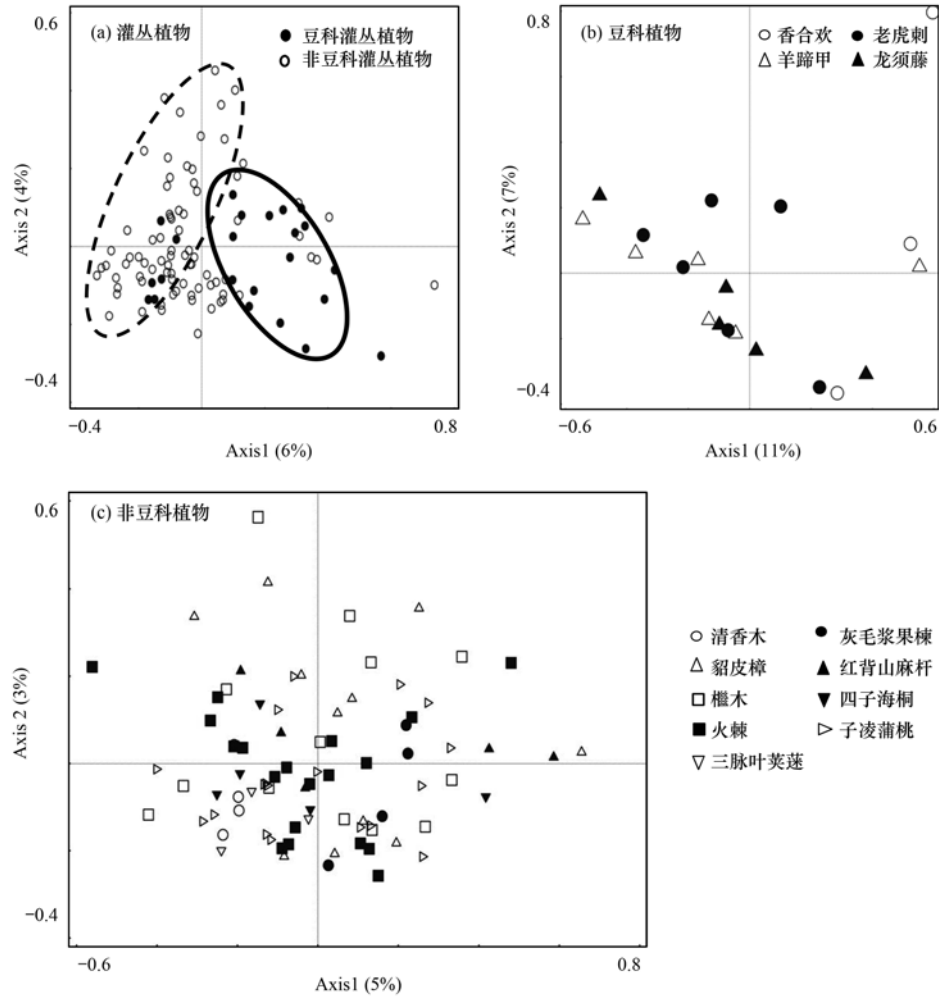


图2 不同灌丛植物根系 AM 群落组成聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of the AM community in root samples from all shrubs, leguminous plants, and non-leguminous plants

3 讨论

3.1 岩溶区典型灌丛植物根际土壤养分分布特征

不同植物由于其生理生态功能不一样，导致其根系分泌物各异^[24]。本研究发现，岩溶区不同灌丛植物根际土壤养分存在显著差异(表 1)，尤其是豆科与非豆科植物之间，与 Chen 等^[25]的研究结果一致。本研究选择的 4 种豆科植物：香合欢、羊蹄甲、老虎刺与龙须藤，均发现根瘤，表明这 4 种豆科植物具有固氮能力，因此，其根际土壤全氮含量显著高于其它非豆科固氮植物(表 1)。

在生物地球化学循环中，氮、磷循环呈现出一种很好的耦合关系^[26]。本研究结果表明：相对于非豆科植物，豆科植物根际土壤全氮含量高伴随着高磷素含量(表 1)，与已有的研究结果一致。例如，Chen 等^[25]报道，亚热带地区豆科植物根际土壤全磷含量显著高于非豆科植物；Shi 等^[27]发现在造林

过程中，将固氮植物移植于草丛生态系统后，草丛根际土壤全磷含量显著增高。以上的研究表明，氮的输入显著影响磷循环，其可能的机制为：① 氮的输入将改变微生物活性及群落结构，因而影响有机磷矿化成无机磷^[28]；② 氮的输入通过刺激初级生长力来增加有机磷的形成，从而刺激微生物与植物对无机磷的需求^[29]；③ 氮的输入影响磷素各种形态之间的转化速率^[30]。因此，相对于非豆科植物而言，豆科植物固氮速率高伴随较高的磷素需求量，随之，磷酸酶活性增强，植物对磷吸收速率提高，从而加快磷循环。

3.2 岩溶区典型灌丛植物根系 AM 群落结构的影响因子

本研究通过 T-RFLP 技术获得不同灌丛根系 44 个 T-RFs AM，与其他非岩溶区用同样的技术研究植物根系 AM 真菌群落结构相比较，岩溶区植物根系 AM 真菌丰富度高^[31]，表明岩溶区 AM 真菌种质

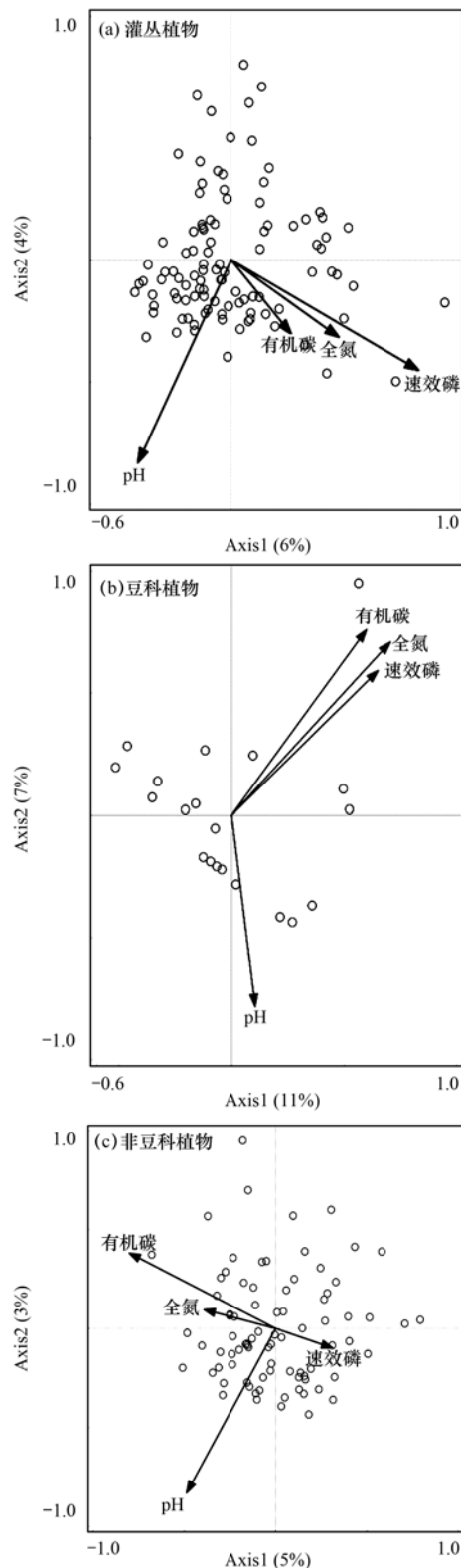


图3 不同灌丛植物、豆科植物和非豆科植物根系 AM 群落结构影响因子分析

Fig. 3 Effect of factors on the AM community structure in root samples from all shrubs, leguminous plants, and non-leguminous plants

质性环境可以为 AM 真菌提供多样化的栖息地及资源^[32], 从而促进 AM 真菌生长进而提高其数量。

丛枝菌根真菌是专性共生微生物, 可与陆地 90% 的植物形成共生关系^[1], 然而, 丛枝菌根与植物是否具有选择特性仍然存在着争议, 成为菌根学研究急需解决的问题。本文在岩溶区选择 13 种典型灌丛植物作为研究对象, 通过 T-RFLP 分子生物学技术, 发现均是丛枝菌根共生植物, 表明丛枝菌根在岩溶区的宿主植物范围广。同时, 聚类分析表明, 岩溶区不同灌丛植物根系丛枝菌根群落结构存在显著差异[图 2(a)], 尤其是豆科与非豆科植物。在此基础上, 又分别对豆科与非豆科植物根系丛枝菌根真菌群落结构进行聚类分析, 发现只是单独考虑豆科植物或者非豆科植物, 根系丛枝菌根群落结构在非豆科植物中差异显著[图 2(c)], 而在豆科植物中则差异不显著[图 2(b)]。以上的结果表明, 岩溶区灌丛植物根系丛枝菌根与植物存在选择特性, 而植物功能群对丛枝菌根选择特性比植物种类大^[33]。可能的机制为: ①本研究中, 植物功能群划分为豆科与非豆科植物, 相对于非豆科植物, 豆科植物根系能够形成根瘤菌, 根瘤菌与丛枝菌根真菌虽然在生态功能上具有一定的互补作用^[34, 35], 但是, 为了满足自身生长需要, 又存在着对宿主植物碳水化合物竞争的关系, 所以, 根瘤菌与丛枝菌根真菌在竞争-协同相互作用中, 朝着有利于两者生存的方向进行选择, 从而影响两者的群落组成; ②相对非豆科植物, 豆科植物形成的根瘤菌能够固定氮素, 固氮速率的增强将会影响植物对磷素的吸收以及其转化^[30], 而磷素是影响丛枝菌根真菌群落结构的一个重要驱动因子^[36], 即使侵染豆科与非豆科植物根系的优势丛枝菌根种类没有发生改变, 但是豆科植物通过增加氮素的输入, 对根系优势的丛枝菌根种群相对丰度也将产生显著的影响(图 1)。

除了植物外, 土壤根际养分对植物共生的丛枝菌根真菌群落结构也产生显著影响。本研究发现, 土壤 Olsen-P 是影响岩溶区灌丛植物根系 AM 群落变化的主要驱动因子[图 3(a)], 与 Xiang 等^[36]和 Lin 等^[37]的研究结果一致。在岩溶区, 土壤磷素总含量较同纬度地带性土壤高, 但是受高钙镁和 pH 等的制约, 导致土壤中可利用的磷素养分较低^[38], 从而成为影响植物根系 AM 群落结构的一个重要限制因子。同时, 笔者还发现, 岩溶区不同功能群植物根系 AM 群落结构的影响因子各异: 例如, 土壤

资源丰富。这与岩溶区生境异质性高有关, 因为异

全氮是影响岩溶区豆科灌丛植物根系 AM 群落组成结构的主要因子[图 3(b)], 土壤有机碳和 pH 是影响岩溶区非豆科灌丛植物根系 AM 群落组成结构的主要因子[图 3(c)]. 这表明, 不同功能群植物根系 AM 群落结构影响因子不一样, 与植物生态功能密切相关.

4 结论

(1) 岩溶区不同灌丛植物根际土壤养分存在显著差异, 豆科植物根际土壤养分显著高于非豆科植物, 与豆科植物具有固氮功能, 显著影响植物对磷吸收及转化密切相关.

(2) 本研究选择的岩溶区 13 种灌丛植物均能被丛枝菌根侵染, 不同灌丛植物根系丛枝菌根群落结构存在显著性差异, 且植物功能群对丛枝菌根群落结构的影响比植物种类大.

(3) 与非岩溶区相比, 岩溶区灌丛植物根系 AM 丰富度高, 与岩溶区独特的植物区系及环境资源空间异质性高密切相关.

参考文献:

- [1] Smith S E, Read D. Mycorrhizal symbiosis [M]. Amsterdam: Academic Press, 2008.
- [2] Lugo M A, Reinhart K O, Menoyo E, *et al.* Plant functional traits and phylogenetic relatedness explain variation in associations with root fungal endophytes in an extreme arid environment[J]. *Mycorrhiza*, 2015, **25**(2): 85-95.
- [3] Rowe H I, Brown C S, Claassen V P. Comparisons of mycorrhizal responsiveness with field soil and commercial inoculum for six native montane species and *Bromus tectorum* [J]. *Restoration Ecology*, 2007, **15**(1): 44-52.
- [4] Yuan D X. Geology and geohydrology of karst and its relevance to society [A]. In: Proceedings of the 30th Session of IGCP Scientific [C]. Paris: UNESCO, 2002.
- [5] 屠玉麟. 贵州喀斯特灌丛区系与生态特征分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1995, **13**(3): 1-8.
Tu Y L. A analysis of flora and ecological characteristics of karst scrubs in Guizhou province [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science)*, 1995, **13**(3): 1-8.
- [6] 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.
- [7] 苏宗明, 李先琨. 广西岩溶植被类型及其分类系统[J]. 广西植物, 2003, **23**(4): 289-293.
Su Z M, Li X K. The types of natural vegetation in karst region of Guangxi and its classified system [J]. *Guihaia*, 2003, **23**(4): 289-293.
- [8] 马姜明, 吴蒙, 占婷婷, 等. 漓江流域岩溶区柃木群落不同恢复阶段物种组成及多样性变化[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(1): 66-71.
Ma J M, Wu M, Zhan T T, *et al.* Changes of species composition and diversity among restoration stages of *Loropetalum chinense* communities in karst area of Lijiang River valley [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(1): 66-71.
- [9] 马姜明, 占婷婷, 莫祖英, 等. 漓江流域岩溶区柃木群落不同恢复阶段主要共有种生态位变化[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(12): 2530-2536.
Ma J M, Zhan T T, Mo Z Y, *et al.* Changes of niche among restoration stages of *Loropetalum chinense* communities in karst area of Lijiang River valley [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(12): 2530-2536.
- [10] Li L F, Li T, Zhang Y, *et al.* Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their distribution patterns related to host-plants and habitats in a hot and arid ecosystem, southwest China [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **71**(3): 418-427.
- [11] 魏源, 王世杰, 刘秀明, 等. 不同喀斯特小生境中土壤丛枝菌根真菌的遗传多样性[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(10): 1083-1090.
Wei Y, Wang S J, Liu X M, *et al.* Genetic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in karst microhabitats of Guizhou Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(10): 1083-1090.
- [12] 何跃军, 吴春玉, 何丙辉, 等. 喀斯特不同植被恢复阶段土壤 AMF 组成及多样性研究[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 305-309, 321.
He Y J, Wu C Y, He B H, *et al.* Composition and species diversity of AMF in different vegetation restoration stages in karst region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(5): 305-309, 321.
- [13] 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 Environment*, 2011, **57**(12): 541-546.
- [14] Zhang Z F, Zhang J C, Huang Y Q. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the drought tolerance of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings under greenhouse conditions [J]. *New Forests*, 2014, **45**(4): 545-556.
- [15] 张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等. 模拟岩溶水分供应分层的干旱胁迫对青冈栎光合特性和生长的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **31**(9): 2197-2202.
Zhang Z F, You Y M, Huang Y Q, *et al.* Effects of drought stress on the photosynthesis and growth of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings: a study with simulated hierarchical karst water supply [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **31**(9): 2197-2202.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 等. 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[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4828-4835.

- Liang Y M, Su Y R, He X Y, *et al.* Various effects on the abundance and composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities in soils in karst shrub ecosystems [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4828-4835.
- [19] Bell C, Carrillo Y, Boot C M, *et al.* Rhizosphere stoichiometry: are C:N:P ratios of plants, soils, and enzymes conserved at the plant species-level? [J]. *New Phytologist*, 2014, **201**(2): 505-517.
- [20] Bremner J, Mulvaney C. Total nitrogen[A]. In: Black C A. *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbial Properties. Number 9 in Series Agronomy* [M]. Madison: American 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]. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 1963, **3**(10): 190-197.
- [22] Schüßler A, Schwarzott D, Walker C. A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution [J]. *Mycological Research*, 2001, **105**(12): 1413-1421.
- [23] 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.
- [24] Zhao K, Wu Y Y. Rhizosphere calcareous soil P-extraction at the expense of organic carbon from root-exuded organic acids induced by phosphorus deficiency in several plant species [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, **60**(5): 640-650.
- [25] Chen H, Chen M L, Li D J, *et al.* Responses of soil phosphorus availability to nitrogen addition in a legume and a non-legume plantation[J]. *Geoderma*, 2018, **322**: 12-18.
- [26] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(12): 1135-1142.
- [27] Shi S W, Peng C H, Wang M, *et al.* A global meta-analysis of changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, and stoichiometric shifts after forestation[J]. *Plant and Soil*, 2016, **407**(1-2): 323-340.
- [28] Kritzler U H, Johnson D. Mineralisation of carbon and plant uptake of phosphorus from microbially-derived organic matter in response to 19 years simulated nitrogen deposition[J]. *Plant and Soil*, 2010, **326**(1-2): 311-319.
- [29] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Application*, 2010, **20**(1): 5-15.
- [30] Carreira J A, García-Ruiz R, Liétor J, *et al.* Changes in soil phosphatase activity and P transformation rates induced by application of N-and S-containing acid-mist to a forest canopy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(13): 1857-1865.
- [31] Uibopuu A, Moora M, Saks Ü, *et al.* Differential effect of arbuscular mycorrhizal fungal communities from ecosystems along management gradient on the growth of forest understorey plant species[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(10): 2141-2146.
- [32] Martínez-García L B, Armas C, de Dios Miranda J, *et al.* Shrubs influence arbuscular mycorrhizal fungi communities in a semi-arid environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(3): 682-689.
- [33] Van Der Heijden M G A, Horton T R. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems [J]. *Journal of Ecology*, 2009, **97**(6): 1139-1150.
- [34] Abd-Alla M H, El-Enany A W E, Nafady N A, *et al.* Synergistic interaction of rhizobium *leguminosarum* bv. *viciae* and arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth promoting biofertilizers for faba bean (*Vicia faba* L.) in alkaline soil[J]. *Microbiological Research*, 2014, **169**(1): 49-58.
- [35] Siviero M A, Motta A M, Lima D D S, *et al.* Interaction among N-fixing bacteria and AM fungi in Amazonian legume tree (*Schizolobium amazonicum*) in field conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**(2): 144-152.
- [36] Xiang D, Verbruggen E, Hu Y J, *et al.* Land use influences arbuscular mycorrhizal fungal communities in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. *New Phytologist*, 2014, **204**(4): 968-978.
- [37] 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.
- [38] 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.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physiochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)