

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 陈耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
嗜碱降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蚶及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征

秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓*

(西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为研究人工植被恢复后消落带土壤放线菌群落多样性特征, 以三峡库区典型城市消落带重庆江北嘴大剧院消落带和乡村消落带忠县汝溪河流域消落带为研究区域, 于 2015 年 6 月原位采集 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土壤, 利用限制性末端长度多态性 (terminal restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 方法, 对消落带人工恢复植被土壤不同土层的放线菌群落多样性进行研究。结果发现: ①三峡库区城乡消落带人工植被恢复后的土壤放线菌多样性有差异, 表现为城市消落带土壤放线菌多样性高于乡村消落带土壤 ($P < 0.05$), 特别是在表层土壤。②在城乡消落带中, 林地土壤放线菌多样性高于草地, 且在土层之间放线菌多样性无显著性差异。③三峡库区城乡消落带人工植被恢复后的土壤放线菌优势种有差异。④冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 和蒙特卡罗置换检验 (Monte-Carlo permutation test) 表明, 城市消落带中含水量、速效氮含量显著影响放线菌群落多样性; 乡村消落带中土壤含水量、有机质、速效氮和速效钾含量显著影响放线菌群落多样性。结论表明在消落带人工植被修复后, 城市消落带土壤放线菌多样性均高于乡村消落带, 这有可能是人为干扰和土壤养分增加所致。

关键词: 三峡城乡消落带; 林地; 草地; 放线菌多样性; 限制性末端长度多态性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2065-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609072

Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region

QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, LI Chang-xiao*

(Key Laboratory of Eco-Environments in the Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: This study aimed to understand the soil actinobacterial community diversity in the urban and rural hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir region. The hydro-fluctuation zone of Chongqing Great Theatre in Jiangbei District and the Ruxi river basin in Zhong County, Chongqing, was chosen as the study area. Soil samples were collected in June 2015, to measure actinobacterial biodiversity using the terminal-restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) molecular method. Results showed that: ① The actinobacterial biodiversity was different in the urban and rural hydro-fluctuation zone after artificial vegetation restoration. The actinobacterial biodiversity of the urban hydro-fluctuation zone was significantly higher than that of the rural hydro-fluctuation zone ($P < 0.05$), which was most obvious in the surface soil. ② The actinobacterial biodiversity of woodland was higher than that of grassland, but there was no significant difference in the actinobacterial biodiversity among the three soil layers in both the urban and rural hydro-fluctuation zone. ③ The dominant species of actinomycetes was different in different samples. ④ Redundancy analysis and the Monte-Carlo test revealed that water content and available nitrogen (AN) played a critical role in influencing actinobacterial biodiversity in the urban hydro-fluctuation zone ($P < 0.05$). In contrast, the water content, organic matter (OM), available nitrogen (AN) and available phosphorus (AP) played a critical role in influencing actinobacterial biodiversity in the rural hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir region ($P < 0.05$). Thus, we concluded that the actinobacterial biodiversity of the urban hydro-fluctuation zone was significantly higher than that of the rural hydro-fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir region, and such a result was attributed to the increased human disturbance and soil nutrients.

Key words: urban and rural hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir region; woodland; grassland; actinobacterial biodiversity; terminal restriction fragment length polymorphism

消落带是陆生环境和水生环境之间的过渡带, 具有过滤和缓冲的作用^[1,2], 在维护水生和陆生环境的生态健康与生态安全方面具有极其特殊的地位^[3]。三峡大坝修建后, 形成面积为 350 km² 的消落带。三峡消落带主要由城镇消落带、农村消落

收稿日期: 2016-09-09; 修订日期: 2016-12-14

基金项目: 重庆市林业重点科技攻关项目 (渝林科研 2016-8, 渝林科研 2015-6); 国家国际科技合作专项 (2015DFA90900); 中央财政林业科技推广示范项目 (渝林科推 [2014-10]); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS2015068)

作者简介: 秦红 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物生态, E-mail: qinhong@email.swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lichangx@swu.edu.cn

带、库中岛屿消落带组成^[4]。其中城市消落带的面积约 52 km², 约占整个库区消落带的 15%^[5]。三峡消落带是一个高度脆弱的生态系统^[6]。为改善三峡消落带的生态环境, 生态修复措施在消落带得以推广和实施^[7~9]。大量研究表明, 三峡消落带植被恢复重建后土壤生态系统结构和养分条件得到改善, 生态系统的生物多样性和稳定性增加^[10], 尤其是土壤微生物群落的明显变化。

土壤微生物是土壤生态系统中的分解者, 主要由细菌、真菌和放线菌组成, 对土壤中物质循环、能量流通都有着极其重要的作用^[11~13]。放线菌主要是革兰氏阳性细菌, 有高 GC 含量, 其在土壤生态系统中广泛存在^[14]。放线菌已知有亚纲: Rubrobacteridae、Coriobacteridae、Acidimicrobidae、Actinobacteridae 和 Sphaerobacteridae^[15, 16]。放线菌作为土壤中的分解者, 可分解一些难分解化合物, 例如纤维素^[17]、半纤维素、几丁质^[18]等; 同时放线菌可产生大量种类繁多的胞外酶和抗生素^[19, 20], 可抑制土壤中致病菌的传播^[21, 22], 从而保持土壤的生态健康。有研究表明土壤放线菌群落受到多种因素影响, 例如土壤 pH^[23]、海拔^[24]、土壤养分^[25]等因素, 更有发现土壤污染程度和放线菌数量呈正相关^[26]。土壤放线菌作为保持土壤健康的重要因子, 在三峡城乡消落带的植被修复后土壤中还未得到研究。因此, 本文以三峡库区典型城乡消落带(重庆江北嘴大剧院消落带和忠县汝溪河流域)为研究区域, 选取人工生态修复后的典型的植被类型——林地和草地, 通过分析土壤理化性质和放线菌多样性以及其之间的关系, 以期从放线菌群落角度为三峡库区消落带植被修复后的生态保护提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的城市消落带位于重庆江北区嘉陵江与长江干流交汇处(106°34'47"~106°34'48"E, 29°34'22"~29°34'25"N)。消落带土壤基质以沉积泥沙为主, 有少量建筑废弃物和砾石, 多为淤积泥土或沙土生境^[27]。为进行消落带生态恢复, 于 2009 年在江北嘴大剧院消落带区域构建示范基地, 种植扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa* (L. f.) R. Br.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers)、池杉(*Taxodium ascendens*)和枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC)等植被, 同时人为活动十分频繁。

本研究的农村消落带位于三峡库区重庆忠县石

宝镇的汝溪河流域消落带。忠县石宝镇位于重庆市中部(108°08'03"~108°08'21"E, 30°24'16"~30°24'56"N), 距离忠县县城 32 km, 位于忠县、石柱、万州三县(区)交界处。其消落带原生植被破坏殆尽, 现有植被以草本为主; 土壤主要为中性紫色土, 水土流失、崩塌现象较严重^[28]。为进行三峡库区消落带的生态植被恢复与重建, 本课题组于 2012 年 3 月在该地区消落带 165~175 m 海拔区间按 1 m×1 m 的株行距栽种柳树(*Salix matsudana*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)和池杉护岸林; 其中按 0.3 m×0.5 m 栽种扁穗牛鞭草和狗牙根。苗木栽种的岸坡样地土壤均为紫色土, 平均坡度为 26°, 岸坡上接受光照辐射强度大致相同, 土壤预热条件基本一致。

1.2 样地设置和样品采集

在坡度相似、坡向一致、接受光照辐射强度大致相同、土壤预热条件基本一致的消落带区域内, 选定具有典型代表性的样地开展实验研究。2015 年 6 月, 通过实地踏查, 选定城乡消落带区域 165~175 m 海拔区间的林地和草地。根据试验地实际情况、植被类型和受干扰情况, 在城市和乡村消落带分别设置林地和草地重复样地各 3 个, 共 12 个样地, 所有样地尽量保持在同一海拔高度。其中城市消落带林地以落羽杉、枫杨为优势种, 总盖度约为 90%; 乡村消落带林地以落羽杉、柳树和池杉为优势种, 总盖度约为 93%; 城乡消落带草地的优势物种均为狗牙根、扁穗牛鞭草。

在每个样地内随机设 3 条样带, 样带中按 S 形 5 点取样。采样点从总体上控制整个样地, 避免在堆肥料地和田埂、沟边等特殊地形部位采样。在样点清理地被物后, 采取 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 的土壤, 5 点同层土壤等质量混合, 利用四分法保留土壤样品。其中 1 kg 土壤室温风干, 用于土壤理化性质分析。20 g 混合土样装入无菌的自封袋, 低温运输, -80℃保存, 用于土壤放线菌多样性分析。

1.3 土壤理化性质测定

土壤含水量(water content, WC)采用烘干法测定, 土壤密度(soil density, SD)采用比重瓶法测定, 土壤总孔隙度(soil total porosity, SP)采用计算法测定。土壤 pH 值测定采用 IQ150 土壤原位 pH 计(IQ Scientific Instruments, Inc., San Diego, CA, USA)原位测定; 土壤有机质(organic matter, OM)采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤碱解氮(available nitrogen, AN)含量采用碱解-扩散法测定; 速效钾(available potassium, AK)含量采用电感耦合等离子

体发射光谱法(ICP-OES, Thermo Fisher iCAP 6300, UK)测定;速效磷(available phosphorus, AP)含量采用钼锑抗比色法(UV-2550, Shimadzu, CHN)测定,以上测试方法均参考文献[29].

1.4 土壤放线菌多样性测定

本实验土壤放线菌多样性测定方法为限制性末端长度多态性(T-RFLP)^[30]. 具体测定步骤如下.

1.4.1 DNA 提取、扩增和酶切

用 Ultra Clean™ Soil Isolation DNA Kit (MOBIO, USA) 提取土壤总 DNA, 用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测所提 DNA 片段, 并用 UV spectrophotometer (SMA1000, Meriton) 测定 DNA 浓度. 放线菌的扩增引物为 243F (5'-GGATGAGCCCCGCGCCTA-3')/1378R (5'-CGGTGTGTACAAGCCCCGGAACG-3')^[31, 32], 且正向引物 5' 端用 6-FAM 进行荧光标记. 本实验的所用引物由深圳华大基因公司合成并标记. 放线菌 50 μL 的 PCR 反应体系组成如下: 25 μL 2 × Taq Master Mix, 2 μL DNA 模板, 243F/1378R (10 μmol·L⁻¹) 各 0.5 μL, ddH₂O 补水至 50 μL. PCR 反应条件如下: 95℃, 5 min. 30 个循环为: 94℃, 30 s; 55℃, 30 s; 72℃, 1 min; 最后 72℃ 保温 10 min. 每个样品重复 2 管. 扩增产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测, 按照 PCR 产物纯化试剂盒 (TIANGEN, China) 说明书进行 PCR 产物纯化, -20℃ 保存备用.

纯化产物用限制性内切酶 *Hha*I 消化, 反应体系: 10 × Buffer 2 μL, *Hha*I (10 U·μL⁻¹) 1 μL, DNA 200 ng, ddH₂O 补足至 30 μL. 将酶切样品置于 37℃ 水浴中温育 3 h, 酶切完毕后 65℃ 水浴 10 min 终止反应. 每个样品按上述同样条件各重复 3 次. 酶切产物送至上海 Invitrogen 生命技术公司 (Life Technologies) 进行基因扫描, 得到 T-RFLP 图谱.

1.4.2 T-RFLP 分析

在限制性片段 (terminal restriction fragment, T-RF) 的选择中, 删除引物峰小于 50 bp 和荧光值小于 50 RFU 的 T-RFs, 并去除 OTU (operational taxonomic unit) 丰度 < 1% 的 T-RFs, T-RFs 片段大小 ± 1 bp 被认为是同一个 OTU^[33, 34].

1.5 数据处理

以 T-RFLP 图谱中 T-RF 为一个 OTU, 以该 T-RF 的相对峰面积作为对应的 OTU 的丰度并计算以下多样性指数.

物种丰度 (*S*) = 图谱中 T-RF 的总数, 即 OTU 的总数.

Shannon-Wiener 指数 (*H*):

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \ln P_i$$

Simpson 指数 (*D*):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i)^2$$

Pielou 指数 (*E*):

$$E = H/\ln S$$

其中, P_i 为某个峰的峰面积占总峰面积的比例.

采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 分析区域因子和土层以及其交互作用对放线菌多样性的影响, 并用 Duncan 检验法检验每个指标在城乡消落带林地和草地之间的差异显著性 ($\alpha = 0.05$). 利用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 和蒙特卡罗置换检验 (Monte-Carlo permutation test) 分析环境变量对土壤放线菌群落变异解释度的显著性 ($\alpha = 0.05$). 用 Origin 8.5 和 Cano Draw for Windows 4.5 软件制图.

2 结果与分析

2.1 城乡消落带林地和草地土壤放线菌多样性差异

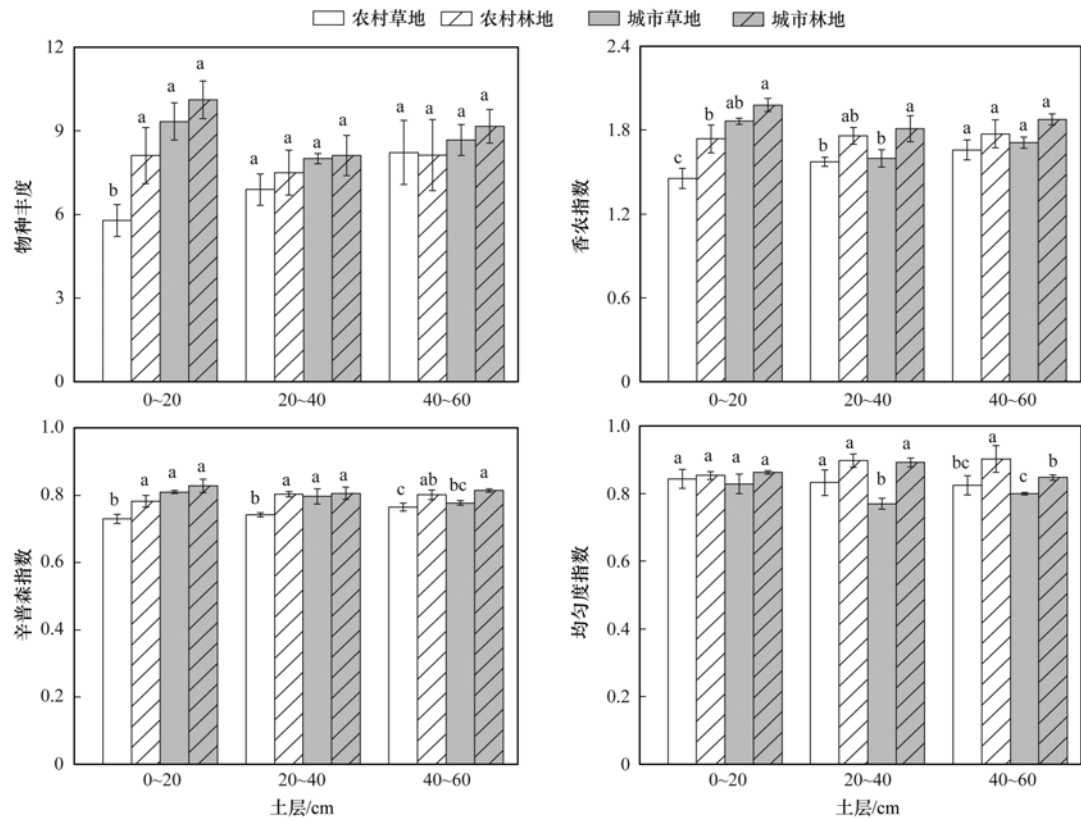
采用双因素方差分析分析区域因子、土层及其交互作用对城区消落带土壤中的放线菌丰度、香农指数、辛普森指数和均匀度指数的影响. 表 1 显示, 土壤放线菌多样性在不同土层之间无显著差异, 城乡区域和土层的交互作用对放线菌多样性对香农指数产生显著性影响 ($P < 0.05$), 但对物种丰度、辛普森指数和均匀度指数未产生显著性影响. 但城乡消落带土壤放线菌的物种丰度、香农指数和均匀度指数之间有显著差异 ($P < 0.05$).

图 1 显示, 城市消落带土壤放线菌物种丰度、香农指数和辛普森指数均呈现出高于乡村消落带的总体趋势; 城乡消落带中, 相同土层的林地放线菌的丰度和多样性均高于或等同于相应草地. 在消落带 0 ~ 20 cm 土壤中, 城市草地土壤放线菌物种丰度、香农指数和辛普森指数显著高于乡村草地; 同时城市林地土壤放线菌的香农指数显著高于乡村林地 ($P < 0.05$). 在消落带 20 ~ 40 cm 土壤中, 城市林地和草地土壤放线菌物种丰度、香农指数和辛普森指数与农村林地和草地之间分别无显著差异; 但均匀度指数显著低于乡村草地 ($P < 0.05$). 在 40 ~ 60 cm 土壤中, 城市林地和草地与农村林地和草地的土壤放线菌物种丰度、香农指数和辛普森指数分别均无显著差异; 但城市林地土壤放线菌均匀度指数显著低于乡村林地 ($P < 0.05$).

表 1 土壤放线菌多样性的双因素方差分析¹⁾

指标	区域因子		土层		区域因子 × 土层	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
物种丰度	10.092	0.002 **	1.44	0.242	2.188	0.118
香农指数	11.89	0.001 **	1.1	0.337	4.587	0.013 *
辛普森指数	3.523	0.064	0.92	0.402	1.808	0.17
均匀度指数	5.308	0.023 *	0.725	0.487	0.109	0.897

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$



同层土壤中,不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同

图 1 城乡消落带土壤放线菌多样性的差异

Fig. 1 Difference in soil actinobacterial biodiversity of urban and rural hydro-fluctuation zone

2.2 城乡消落带放线菌与土壤理化性质之间的关系

2.2.1 城乡消落带放线菌优势种群丰度差异

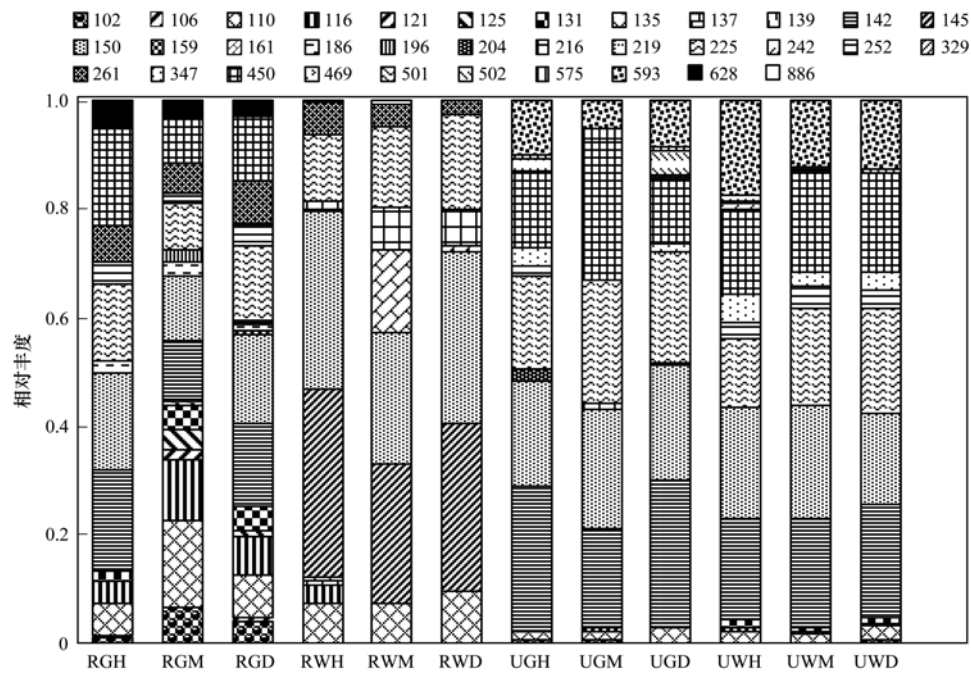
在 T-RFLP 图谱中,每一个 T-RF 至少代表一种放线菌,因此 T-RF 的多样性代表放线菌物种的多样性. 如图 2 所示,柱状堆叠图分别表示不同样点土壤中放线菌优势物种的相对丰度. 从 T-RFLP 图谱可知,经过 *HhaI* 酶切后共得到 34 个优势末端限制性片段(图 2). 图 2 中 110、150 和 225 bp 在土壤中普遍存在,但其丰度在不同用地方式土壤中表现不同. 在不同土地利用方式下,优势片段的种类与丰度均不同,且随土壤深度呈现不同的变化趋势. 在乡村消落带中,145 bp 大量存在乡村消落带林地的各层土壤中,但仅少量存在于乡村消落带的草地

中. 在城市消落带林地和草地存在的优势片段 593 bp 在乡村消落带中并未发现.

2.2.2 城乡消落带土壤理化性质的差异

表 2 显示,城乡消落带土壤的各理化指标有显著差异 ($P < 0.05$). 其中乡村消落带中,林地含水量均高于其草地;但在城市消落带中,在 0 ~ 20 cm 土壤中林地的含水量高于草地,其他土层则相反,为草地的含水量高于其林地. 在城乡消落带 0 ~ 20 cm 土壤中草地土壤密度均高于林地,而其它层的土壤密度则相互之间无显著差异;与此同时,林地的孔隙度在各土层均未出现显著低于草地的现象.

在 0 ~ 20 cm 土壤中,乡村消落带林地 AK 和 AN 含量显著高于草地,但 pH 则相反,而 OM 和 AP



RGH 代表乡村草地 0 ~ 20 cm 土壤;RGM 代表乡村草地 20 ~ 40 cm 土壤;RGD 代表乡村草地 40 ~ 60 cm 土壤;RWH 代表乡村林地 0 ~ 20 cm 土壤;RWM 代表乡村林地 20 ~ 40 cm 土壤;RWD 代表乡村林地 40 ~ 60 cm 土壤;UGH 代表城市草地 0 ~ 20 cm 土壤;UGM 代表城市草地 20 ~ 40 cm 土壤;UGD 代表城市草地 40 ~ 60 cm 土壤;UWH 代表城市林地 0 ~ 20 cm 土壤;UEM 代表城市林地 20 ~ 40 cm 土壤;UWD 代表城市林地 40 ~ 60 cm 土壤

图2 土壤放线菌群落优势 T-RF 的相对丰度

Fig. 2 Relative abundance of predominant T-RFs of soil actinobacterial communities

表2 城乡消落带林地和草地土壤理化性质(平均值±标准误)

Table 2 Soil physical-chemical properties in the urban and rural hydro-fluctuation zone (Means ± SE)

土层 /cm	类型	含水量 /%	密度 /g·cm ⁻³	总孔隙度 /%	pH 值	OM /g·kg ⁻¹	AN /mg·kg ⁻¹	AK /mg·kg ⁻¹	AP /mg·kg ⁻¹
0 ~ 20	乡村草地	14.8 ± 0.08d	2.61 ± 0.01a	43.93 ± 1.47b	7.57 ± 0.06a	12.15 ± 1.35a	85.91 ± 1.99b	119.27 ± 8.3b	1.3 ± 0.13a
	乡村林地	18.27 ± 0.12ab	2.53 ± 0.01b	41.90 ± 0.12b	7.24 ± 0.08b	14.23 ± 2.98a	116.97 ± 6.32a	207.53 ± 73.15a	1.51 ± 0.21a
	城市草地	16.96 ± 0.74bc	2.6 ± 0.00a	42.82 ± 2.12b	7.70 ± 0.18a	3.74 ± 0.64b	47.89 ± 1.11ab	83.22 ± 6.87b	0.5 ± 0.02b
	城市林地	18.64 ± 0.23a	2.48 ± 0.03b	48.02 ± 1.43a	7.58 ± 0.11a	11.03 ± 0.1a	46.3 ± 5.73b	150.07 ± 10.18ab	0.66 ± 0.19b
20 ~ 40	乡村草地	13.31 ± 0.43c	2.62 ± 0.02a	38.54 ± 1.21d	7.83 ± 0.08a	9.58 ± 0.6a	55.07 ± 6.28c	92 ± 2.09b	1.06 ± 0.26a
	乡村林地	17.53 ± 0.67ab	2.59 ± 0.03a	40.57 ± 1.31bc	7.44 ± 0.03a	7.17 ± 0.43b	101.94 ± 7.84b	112.42 ± 6.28a	1.14 ± 0.11a
	城市草地	20.75 ± 0.47a	2.54 ± 0.02a	42.29 ± 1.25b	7.68 ± 0.13a	9.64 ± 2.19a	182.27 ± 12.86a	86.57 ± 5.27b	0.56 ± 0.07b
	城市林地	11.4 ± 0.88d	2.49 ± 0.02a	46.96 ± 1.02a	7.72 ± 0.06a	3.3 ± 0.69c	33.91 ± 8.33c	95.33 ± 6.92b	0.46 ± 0.04b
40 ~ 60	乡村草地	13.68 ± 0.11c	2.57 ± 0.01a	33.46 ± 0.25c	7.9 ± 0.10a	8.01 ± 0.62a	164.28 ± 10.91a	99.02 ± 5.58a	0.95 ± 0.15a
	乡村林地	16 ± 0.31b	2.6 ± 0.00a	38.21 ± 0.96b	7.86 ± 0.15a	4.95 ± 0.43c	61.41 ± 3.79b	100.55 ± 2.21a	0.99 ± 0.17a
	城市草地	20.72 ± 0.36a	2.53 ± 0.03a	45.72 ± 2.39a	7.38 ± 0.25b	4.98 ± 0.38c	50.49 ± 1.22b	90.77 ± 4.41b	0.54 ± 0.02b
	城市林地	9.12 ± 0.75d	2.49 ± 0.03a	44.84 ± 1.79a	7.81 ± 0.08a	6.27 ± 0.52b	37.61 ± 2.38b	79.86 ± 5.93b	0.4 ± 0.01b

的含量无显著差异;城市消落带林地土壤 OM 含量显著高于草地,但 pH、AK、AN 和 AP 无显著差异.在 20 ~ 40 cm 土壤中,乡村消落带林地 AK 和 AN 含量显著高于草地,但 OM 则相反, pH 和 AP 的含量没有显著性差异;在城市消落带草地土壤 OM 和 AN 的含量显著高于林地, pH、AK 和 AP 无显著差异.在 40 ~ 60 cm 土壤中,乡村消落带草 OM 和 AN 的含量显著高于林地, pH、AK 和 AP 无显著差异;城市

消落带林地 pH 和 OM 的含量显著高于草地, AN、AP 和 AK 无显著差异.在不同土层中,乡村消落带林地和草地 AP 的含量显著高于相应城市消落带林地和草地.

2.2.3 土壤理化性质与放线菌多样性之间的关系

图 3 反映城乡消落带土壤放线菌多样性与环境因子之间的关系.从中可知,在城乡消落带中,林地和草地之间的放线菌群落有明显差异.对乡村消落

带分析显示 [图 3(a)], 第 1 序轴解释所有信息的 54.70%, 第 2 序轴解释所有信息的 25.90%, 前两轴可解释 80.60%。蒙特卡罗检验显示 WC ($F = 11.50, P = 0.002$)、AP ($F = 9.69, P = 0.004$)、AN ($F = 5.02, P = 0.038$) 和 OM ($F = 4.96, P = 0.024$) 对乡村消落带放线菌群多样性的影响达到显著水

平 ($P < 0.05$)。对城市消落带 RDA 分析显示 [图 3(b)], 第 1 序轴解释所有信息的 67.70%, 第 2 序轴解释所有信息的 4.20%, 前两轴可解释 71.90%。蒙特卡罗检验显示 WC ($F = 10.05, P = 0.008$)、AN ($F = 8.39, P = 0.008$) 对城市消落带放线菌群多样性的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。

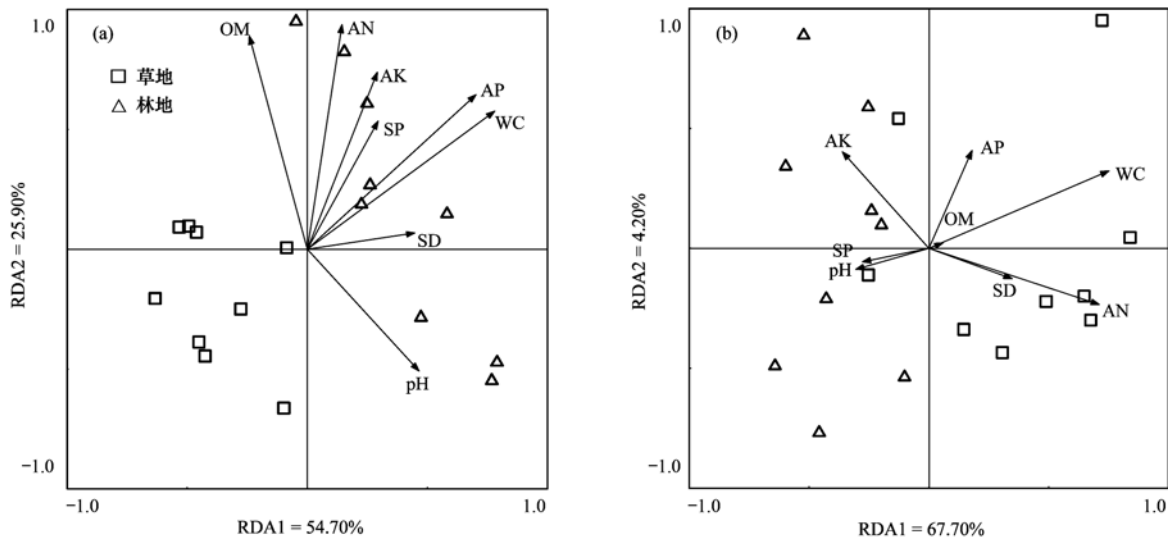


图 3 环境因素对土壤放线菌群结构特征影响的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil actinobacterial biodiversity structure and environmental factors

3 讨论

三峡消落带的生态健康对整个三峡流域至关重要, 其中生态系统组分的完整性是其保证生态健康的基础。消落带植被恢复后, 林地、草地和混合种植区域内土壤养分得到改善^[10, 35], 物种多样性以及土壤酶活性增加^[36]。放线菌作为生态系统的一部分, 可分解纤维素等难分解的化合物, 溶解致病细菌细胞壁中几丁质或抑制其产生, 因而具有生物防治病菌土传的能力^[37, 38], 所以放线菌多样性是保持土壤生态系统的健康和质量的重要因素^[39]。

3.1 城乡消落带林地和草地土壤放线菌多样性差异

本研究发现城乡消落带放线菌多样性有差异, 城市消落带土壤放线菌物种丰度、香浓指数和辛普森指数均呈现出高于乡村消落带的总体趋势; 且城乡消落带中, 相同土层的林地放线菌的丰度和多样性均高于或等同于相应草地, 与 Shirokikh 等^[40]研究结果相似; 但是土层对放线菌多样性的影响没有达到显著性影响, 这与前人研究中发现的土壤微生物群落多样性是随着土壤深度增加而减少^[41]不同, 这主要是由不同微生物类群对外界环境变化的敏感度不同所致。有研究表明放线菌对于环境变化的敏感程度低于细菌和真菌^[26], 在本研究的土壤深度所导致的微环境

变化不足以引起放线菌多样性的显著变化, 使得土层对土壤放线菌群落的影响未达到显著。

本研究中城市消落带土壤放线菌多样性呈现高于乡村消落带的趋势, 这有可能人为干扰会造成土壤微生物多样性的波动^[42]。有研究发现城市土壤微生物数量要高于农村土壤^[43], 城市化会显著影响土壤放线菌群落及多样性^[44]。在城乡消落带中, 区域因子对表层 0~20 cm 土壤放线菌多样性的影响比 20~40 cm 和 40~60 cm 更为显著。这可能是由于在城市消落带中有着频繁的人为活动和外来污染物的输入, 而这种人为干扰和污染会直接作用于土壤表层, 使得表层土壤放线菌群落有较为明显的波动。

3.2 土壤放线菌优势菌群的丰度

土壤微生物的种群的数量、种类、分布等特征均会受到外界环境因子(如土壤水热状况、肥力条件以及植被类型)的影响, 因此导致所得到的 T-RFLP 图谱有所差别^[11, 45, 46]。本文中样品来自典型的城乡消落带和乡村消落带, 相对丰度较高的优势种 110、150 和 225 bp 在所有样品中都大量存在, 其优势种组成的差异主要来自其他相对丰度较小的优势种, 如 450 bp、593 bp 等; 这种差异可能是地理隔离或者放线菌所生存的微环境差异所造成的^[47]。放线菌作为微生物中的一部分, 也受大气氮沉降、

土壤 pH、土壤类型等的影响^[48, 49]。植被对于土壤微生物的影响也是不可忽略的,根系特定的分泌物会限制微生物的生长,从而导致微生物菌群的特异化^[50]。消落带林地和草地的地表植被相差甚远,有可能根系分泌物的差异导致土壤放线菌群落之间的差异。同时土壤放线菌主要以植被凋落物为食,分解木质素、纤维素和半纤维素等,地表凋落物也会对放线菌群落有选择作用,从而导致优势菌群之间的差异。

3.3 消落带土壤放线菌和环境因子之间的关系

在城乡消落带土壤理化性质(表 2)中,城乡消落带土壤的各理化指标有显著差异。在表层土壤中,城乡消落带林地土壤有机质、速效钾、速效磷的含量均高于草地。这可能是由于是林地冠层对于雨水的拦截使得地表径流变小,土壤表层有机质以及矿质营养得以保留,流失较少^[51]。同时,与草地相比,林地中产生的较多的林木根系和枯落物,林地有机物的输入量高于草地,也会有助于土壤营养元素含量的提高。

本研究发现城乡消落带放线菌多样性的影响因子有差异。乡村消落带中含水量、速效磷、速效氮、有机质的含量显著影响放线菌多样性,而城市消落带中含水量、速效氮的含量显著影响放线菌多样性,该结果和 Singh 等^[52]的研究结果相似。在陆地生态系统中,土壤含水量显著的影响放线菌多样性。本研究中,消落带土壤面临着干旱-水淹-干旱交替的特殊水文变化影响,土壤放线菌群落受到双重水分胁迫。土壤含水量可通过影响水压和土壤养分含量影响放线菌群落^[53]。有研究表明,土壤含水量可能成为放线菌物种的选择因子。在土壤含水量相对较低的旱季,耐旱的物种的孢子可以萌发,完成生活史从而被保留^[54]。同时研究表明,放线菌中的 *Streptomyces*、*Micromonospora*、*Actinomadura*、*Saccharopolyspora* 和 *Microbispora* 会在不同的水分条件下发生不同程度的隔离^[55];其中 *Streptomyces* 更倾向于在高水分土壤中生长,在低水分的土壤中其生长会受到限制^[56]。同时土壤养分是土壤微生物生长活动的能源,调节土壤微生物群落结构和活动的重要因子^[57~59]。当土壤中养分达到均衡时,放线菌达到最适生长^[60]。土壤中有有机质和速效氮主要来源于地上植被的凋落物和植被根系分泌物^[61],其含量直接影响土壤放线菌群落。放线菌作为异养微生物,主要以有机碳作为其能源。城市消落带由于水流相对较缓,每年泥沙沉积时,植被残体被滞留在

土壤中^[62],特别是草本植株根系的附着从而被保留于泥沙中。但乡村消落带水流冲刷会剥离表层土壤和残体,使得土壤表层的有机质流失,土壤的碳氮储备量下降,土壤中微生物的生长和次生代谢都较低^[63, 64],在多重影响下最终表现为城市消落带土壤放线菌多样性高于乡村消落带,且影响因素不同。

4 结论

城乡消落带土壤放线菌多样性和优势物种有显著性差异,呈现城市消落带土壤放线菌多样性高于乡村消落带,且林地土壤放线菌多样性高于草地的趋势;放线菌多样性在土层之间无显著差异。经冗余分析和蒙特卡罗置换检验表明,土壤含水量、速效氮含量显著影响城市消落带放线菌多样性,土壤含水量、速效氮、速效钾和有机质的含量显著影响乡村消落带土壤放线菌多样性。由此说明城市化会影响土壤放线菌群落,增加消落带土壤放线菌多样性,这可能主要是由于城市消落带受到更多的人为干扰和土壤养分含量增加所致。建议减少城市消落带的人为干扰,以保护消落带生态环境。

参考文献:

- [1] Kenwick R A, Shammin M R, Sullivan W C. Preferences for riparian buffers[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, **91**(2): 88-96.
- [2] 程瑞梅, 王晓荣, 肖文发, 等. 消落带研究进展[J]. *林业科学*, 2010, **46**(4): 111-119.
Cheng R M, Wang X R, Xiao W F, *et al.* Advances in studies on water-level-fluctuation zone [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, **46**(4): 111-119.
- [3] 张建春, 彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J]. *生态学报*, 2003, **23**(1): 56-63.
Zhang C J, Peng B Z. Study on riparian zone and the restoration and rebuilding of its degraded ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(1): 56-63.
- [4] 范小华, 谢德体, 魏朝富. 三峡水库消落区生态环境保护与利用对策研究[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(2): 165-169.
Fan X H, Xie D T, Wei C F. Study on countermeasures for ecological environmental protection and utilization of riparian zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(2): 165-169.
- [5] 杜立刚, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡库区城市消落带生态规划与保护探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(6): 726-731.
Du L G, Fang F, Guo J S, *et al.* Ecological planning and protection of urban water-level-fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(6): 726-731.
- [6] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. *生态学报*, 2015, **35**(21): 7117-7129.
Ma J, Li C X, Wei H, *et al.* Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**

- (21): 7117-7129.
- [7] Webb A A, Erskine W D. A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2003, **68**(4): 329-341.
- [8] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 等. 三峡库区消涨带植被重建[J]. *植物学通报*, 2005, **22**(5): 513-522.
Wang Y, Liu Y F, Liu S B, *et al.* Vegetation reconstruction in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, **22**(5): 513-522.
- [9] Ye C, Cheng X L, Zhang Q F. Recovery approach affects soil quality in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China: implications for revegetation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(3): 2018-2031.
- [10] 杨予静, 李昌晓, 马朋. 三峡水库城区消落带人工草本植被土壤养分含量研究[J]. *草业学报*, 2015, **24**(4): 1-11.
Yang Y J, Li C X, Ma P, *et al.* Nutrient content of soils under artificial grass vegetation in the urban hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(4): 1-11.
- [11] Unger I M, Goyne K W, Kremer R J, *et al.* Microbial community diversity in agroforestry and grass vegetative filter strips[J]. *Agroforestry Systems*, 2013, **87**(2): 395-402.
- [12] Lienhard P, Terrat S, Mathieu O, *et al.* Soil microbial diversity and C turnover modified by tillage and cropping in Laos tropical grassland[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, **11**(4): 391-398.
- [13] Bardgett R D, Freeman C, Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks[J]. *The ISME Journal*, 2008, **2**(8): 805-814.
- [14] Lechevalier H. Actinomycetes and their products: a look at the future[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1992, **8**(1): 72-73.
- [15] Stackebrandt E, Rainey F A, Ward-Rainey N L. Proposal for a new hierarchic classification system, *Actinobacteria* classis nov. [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1997, **47**(2): 479-491.
- [16] Gao B L, Gupta R S. Conserved indels in protein sequences that are characteristic of the phylum *Actinobacteria*[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, **55**(6): 2401-2412.
- [17] Pankratov T A, Dedysh S N, Zavarzin G A. The leading role of actinobacteria in aerobic cellulose degradation in *Sphagnum* peat bogs[J]. *Doklady Biological Sciences*, 2006, **410**(1): 428-430.
- [18] Krsek M, Wellington E M H. Assessment of chitin decomposer diversity within an upland grassland [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2001, **79**(3): 261-267.
- [19] Gomes R C, Semêdo L T A S, Soares R M A, *et al.* Chitinolytic activity of actinomycetes from a cerrado soil and their potential in biocontrol[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2000, **30**(2): 146-150.
- [20] Challis G L, Hopwood D A. Synergy and contingency as driving forces for the evolution of multiple secondary metabolite production by *Streptomyces* species [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, **100**(S2): 14555-14561.
- [21] Hyakumachi M, Takahashi H, Matsubara Y, *et al.* Recent studies on biological control of plant diseases in Japan [J]. *Journal of General Plant Pathology*, 2014, **80**(4): 287-302.
- [22] Degtyareva E A, Vinogradova K A, Aleksandrova A V, *et al.* Soil actinomycetes as potential biofungicides [J]. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2009, **64**(2): 73-77.
- [23] Sanyika T W, Stafford W, Cowan D A. The soil and plant determinants of community structures of the dominant actinobacteria in Marion Island terrestrial habitats, Sub-Antarctica[J]. *Polar Biology*, 2012, **35**(8): 1129-1141.
- [24] 曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 等. 缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物 PLFA 沿海拔梯度的变化[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- Zeng Q P, He B H, Mao Q Z, *et al.* Effects of different altitudes on soil microbial PLFA and enzyme activity in two kinds of forests [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- [25] Wan X H, Huang Z Q, He Z M, *et al.* Soil C: N ratio is the major determinant of soil microbial community structure in subtropical coniferous and broadleaf forest plantations[J]. *Plant and Soil*, 2015, **387**(1-2): 103-116.
- [26] Větrovský T, Baldrian P. An in-depth analysis of actinobacterial communities shows their high diversity in grassland soils along a gradient of mixed heavy metal contamination[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, **51**(7): 827-837.
- [27] 冯义龙, 先旭东, 黄芳. 重庆江北嘴大剧院段消落带植被生态恢复示范区建设[J]. *南方农业*, 2011, **5**(10): 1-4.
- [28] 杨予静, 李昌晓, 丽娜·热玛赞. 基于 PSR 框架模型的三峡库区忠县汝溪河流域生态系统健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(S1): 66-74.
- Yang Y J, Li C X, Remazan L N. Assessment of ecosystem health in the Ruxi river basin of Zhongxian county in the Three Gorges Reservoir area based on Pressure-State-Response (PSR model)[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(S1): 66-74.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-109.
- [30] Kitts C L. Terminal restriction fragment patterns: a tool for comparing microbial communities and assessing community dynamics[J]. *Current Issues in Intestinal Microbiology*, 2001, **2**(1): 17-25.
- [31] Heuer H, Krsek M, Baker P, *et al.* Analysis of actinomycete communities by specific amplification of genes encoding 16S rRNA and gel-electrophoretic separation in denaturing gradients[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(8): 3233-3241.
- [32] Monciardini P, Sosio M, Cavaletti L, *et al.* New PCR primers for the selective amplification of 16S rDNA from different groups of actinomycetes[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, **42**(3): 419-429.
- [33] Székely A J, Sipos R, Berta B, *et al.* DGGE and T-RFLP analysis of bacterial succession during mushroom compost production and sequence-aided T-RFLP profile of mature compost [J]. *Microbial Ecology*, 2009, **57**(3): 522-533.
- [34] Schütte U M E, Abdo Z, Bent S J, *et al.* Advances in the use of terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) analysis of 16S rRNA genes to characterize microbial communities [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **80**(3): 365-380.
- [35] 马朋, 李昌晓, 任庆水, 等. 三峡水库消落带柳树 (*Salix matsudana*) 种植初期对土壤碳、氮、磷含量的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, **36**(8): 36-43.
- Ma P, Li C X, Ren Q S, *et al.* Soil C, N and P contents after short-term revegetation by *Salix matsudana* in the water-level-

- fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, **36**(8): 36-43.
- [36] 马朋, 李昌晓, 雷明, 等. 三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 1010-1020.
- Ma P, Li C X, Lei M, *et al.* Responses of soil microorganisms and soil enzyme activities to different land use patterns in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(4): 1010-1020.
- [37] El-Tarabily K A, Sivasithamparam K. Non-streptomycete actinomycetes as biocontrol agents of soil-borne fungal plant pathogens and as plant growth promoters [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(7): 1505-1520.
- [38] 宋影, 辜夕容, 严海元, 等. 中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1151-1158.
- Song Y, Gu X R, Yan H Y, *et al.* Dynamics of microbes and enzyme activities during litter decomposition of *Pinus massoniana* forest in mid-subtropical area [J]. Environmental Science, 2015, **35**(3): 1151-1158.
- [39] Shen W S, Lin X G, Gao N, *et al.* Land use intensification affects soil microbial populations, functional diversity and related suppressiveness of cucumber Fusarium wilt in China's Yangtze River Delta [J]. Plant and Soil, 2008, **306**(1-2): 117-127.
- [40] Shirokikh I G, Solov'eva E S, Ashikhmina T Y. Actinomycetes in garden soils of the city of Kirov [J]. Eurasian Soil Science, 2013, **46**(5): 565-571.
- [41] Barness G, Zaragoza S R, Shmueli I, *et al.* Vertical distribution of a soil microbial community as affected by plant ecophysiological adaptation in a desert system [J]. Microbial Ecology, 2009, **57**(1): 36-49.
- [42] Zhang X, Gu Q, Long X E, *et al.* Anthropogenic activities drive the microbial community and its function in urban river sediment [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, **16**(2): 716-725.
- [43] 赵哲霞, 郭恢财. 城市化对城乡梯度森林土壤微生物数量变化的影响(英文) [J]. 农业科学与技术, 2010, **11**(3): 118-122.
- Zhao Z X, Guo H C. Effects of urbanization on the quantity changes of microbes in urban-to-rural gradient forest soil [J]. Agricultural Science and Technology, 2010, **11**(3): 118-122.
- [44] Hill P, Kristufek V, Dijkhuizen L, *et al.* Land use intensity controls actinobacterial community structure [J]. Microbial Ecology, 2011, **61**(2): 286-302.
- [45] Xu H J, Wang X H, Li H, *et al.* Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(16): 9391-9399.
- [46] Spurgeon D J, Keith A M, Schmidt O, *et al.* Land-use and land-management change: relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties [J]. BMC Ecology, 2013, **13**: 46.
- [47] Zhang B L, Wu X K, Zhang W, *et al.* Diversity and succession of actinobacteria in the forelands of the Tianshan Glacier, China [J]. Geomicrobiology Journal, 2016, **33**(8): 716-723.
- [48] Zenova G M, Manucharova N A, Zvyagintsev D G. Extremophilic and extremotolerant actinomycetes in different soil types [J]. Eurasian Soil Science, 2011, **44**(4): 417-436.
- [49] Eisenlord S D, Zak D R. Simulated atmospheric nitrogen deposition alters actinobacterial community composition in forest soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, **74**(4): 1157-1166.
- [50] Berendsen R L, Pieterse C M J, Bakker P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health [J]. Trends in Plant Science, 2012, **17**(8): 478-486.
- [51] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度 [J]. 中国水土保持科学, 2008, **6**(6): 68-73.
- Liu B, Luo Q H, Chang W Z, *et al.* Relationship between percentage of vegetative cover and soil erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, **6**(6): 68-73.
- [52] Singh A K, Singh M, Dubey S K. Changes in Actinomycetes community structure under the influence of *Bt* transgenic brinjal crop in a tropical agroecosystem [J]. BMC Microbiology, 2013, **13**: 122.
- [53] Zvyagintsev D G, Zenova G M, Sudnitsyn I I, *et al.* Development of actinomycetes in brown semidesert soil under low water pressure [J]. Eurasian Soil Science, 2012, **45**(7): 717-723.
- [54] Zenova G M, Gryadunova A A, Doroshenko E A, *et al.* Influence of moisture on the vital activity of actinomycetes in a cultivated low-moor peat soil [J]. Eurasian Soil Science, 2007, **40**(5): 560-564.
- [55] Zvyagintsev D G, Zenova G M, Doroshenko E A, *et al.* Actinomycete growth in conditions of low moisture [J]. Biology Bulletin, 2007, **34**(3): 242-247.
- [56] Goodfellow M, Williams S T. Ecology of actinomycetes [J]. Annual Review of Microbiology, 1983, **37**: 189-216.
- [57] Brant J B, Sulzman E W, Myrold D D. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(8): 2219-2232.
- [58] Brant J B, Myrold D D, Sulzman E W. Root controls on soil microbial community structure in forest soils [J]. Oecologia, 2006, **148**(4): 650-659.
- [59] Högborg M N, Högborg P, Myrold D D. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three? [J]. Oecologia, 2006, **150**(4): 590-601.
- [60] Zhong W H, Gu T, Wang W, *et al.* The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity [J]. Plant and Soil, 2010, **326**(1-2): 511-522.
- [61] 熊顺贵. 基础土壤学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001. 118-230.
- [62] 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 等. 不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 [J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3839-3844.
- Shen B J, Zhu Z K, Yuan H Z, *et al.* Effects of different plantation type on the abundance and diversity of soil microbes in subtropical red soils [J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3839-3844.
- [63] Degens B P, Schipper L A, Sparling G P, *et al.* Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(2): 189-196.
- [64] Zhong W H, Cai Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay [J]. Applied Soil Ecology, 2007, **36**(2-3): 84-91.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)