

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

|                                                           |                                                       |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 .....                               | 颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)                     |
| 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 .....                 | 赵仕伟, 高晓清 (2637)                                       |
| 秋冬季节华北背景地区 PM <sub>1</sub> 污染特征及来源 .....                  | 张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)              |
| 杭州市 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 .....             | 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)   |
| 青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 .....                          | 谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)                                  |
| 西安市重污染与清洁天 PM <sub>2.5</sub> 组分及其活性氧物质对比 .....            | 王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)                     |
| 黄山 PM <sub>10</sub> 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 .....            | 孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)               |
| 泉州市大气 PM <sub>2.5</sub> 铜系元素组成特征及来源解析 .....               | 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)                   |
| 西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 .....                          | 许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)         |
| G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 .....                          | 张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)           |
| 四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征 .....                      | 冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)                           |
| 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 .....                           | 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738) |
| 我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 .....                     | 张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)                           |
| 地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析 .....                            | 赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)                              |
| 胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 .....                                 | 张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)      |
| 桂江流域夏季水-气界面 CO <sub>2</sub> 脱气的空间变化及其影响因素 .....           | 张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)                     |
| 都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 .....                            | 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)              |
| 太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 .....                       | 陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)             |
| 洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 .....                       | 李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)           |
| 阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 .....                          | 孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)                |
| 北京市水环境中精神活性物质污染特征 .....                                   | 张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)                 |
| 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 .....                            | 陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)                          |
| CaO <sub>2</sub> 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 .....             | 徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)                  |
| 坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 .....                               | 鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)                                   |
| 微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 .....                                 | 陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)                               |
| 氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性 .....                                  | 王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)                              |
| Pd/Fe <sup>0</sup> 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 .....            | 张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)                     |
| 针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 .....                         | 孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)                          |
| 污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 .....                                 | 韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)                   |
| 微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 .....                                | 孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)                        |
| 水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 .....                              | 苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)                               |
| 沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 .....                                    | 蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)                          |
| K <sup>+</sup> 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 .....                     | 吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)                          |
| 包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 .....                                  | 于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)                       |
| ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 .....             | 李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)                     |
| 厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 .....                                  | 李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)            |
| 基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 .....                                    | 林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)                        |
| 基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 .....                            | 沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)                                |
| 罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 .....                       | 高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)                        |
| 不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 .....                       | 周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)                                |
| CO <sub>2</sub> -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 .....          | 王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)             |
| 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 .....                      | 田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)                             |
| 模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 .....                            | 腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)                     |
| 秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 .....                             | 杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)             |
| 微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响 .....                                  | 贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)                 |
| 施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 .....                         | 方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)                           |
| BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 .....                         | 刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)                               |
| 1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 .....             | 李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)                       |
| 铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 .....                   | 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)                     |
| 膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 .....                          | 周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)               |
| 餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 .....                                | 郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)                         |
| 我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 .....                              | 晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)                |
| 甲烷催化还原 NO <sub>x</sub> 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 .....        | 潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)                     |
| 《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027) |                                                       |

# 模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响

腾昌运<sup>1</sup>, 沈建国<sup>2</sup>, 王忠<sup>2</sup>, 王行<sup>1</sup>, 李鸿毅<sup>1</sup>, 张志剑<sup>1,3\*</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 杭州市余杭区农业生态与植物保护管理总站, 杭州 311100; 3. 浙江大学中国西部发展研究院, 杭州 310058)

**摘要:** 通过构建微宇宙湿地柱模拟气候升温的方法, 采用高通量测序和核磁共振技术, 分别研究了湿地土壤微生物群落和磷素形态对暖化作用的响应特征. 结果表明, 暖化作用导致了 Firmicutes、Clostridia、Clostridiales、Clostridiaceae 和 *Clostridium* 的相对丰度分别显著下降 65%~98%、69%~87%、67%~87%、73%~97% 和 74%~93%, 这表明暖化作用对不同分类水平上的物种 Firmicutes 到 *Clostridium* 具有显著的抑制效应. 通过主坐标分析和聚类分析, 不同湿地柱采样点的暖化组与对照组样本表现出显著的分异特征, 揭示了暖化作用能够诱导微生物群落组成发生显著性变化. 磷酸单酯和正磷酸盐是各湿地柱土壤主导的磷素形态, 同时暖化作用导致了 XX 湿地柱采样点的磷酸单酯和正磷酸盐相对丰度分别显著升高 275% 和下降 20%, JH 湿地柱采样点的磷酸单酯和多聚磷酸盐相对丰度分别显著升高 85% 和下降 49%, 这表明不同磷素形态对暖化作用的响应具有土壤异质性特征. 通过典型对应分析, 揭示了暖化条件下微生物群落组成的显著变化对磷素形态具有显著的影响效应.

**关键词:** 微宇宙; 气候升温; 微生物群落; 磷素形态; 高通量测序; 核磁共振; 湿地土壤

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-3000-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201601044

## Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils

TENG Chang-yun<sup>1</sup>, SHEN Jian-guo<sup>2</sup>, WANG Zhong<sup>2</sup>, WANG Hang<sup>1</sup>, LI Hong-yi<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-jian<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Yuhang District Agricultural Ecology and Plant Protection Management Station, Hangzhou 311100, China; 3. China Academy of West Region Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Microbial community and phosphorus forms in response to simulated climate warming were studied by high-throughput sequencing and <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance (<sup>31</sup>P-NMR) respectively, which were from wetland soils in constructed microcosm columns. The results revealed that relative abundances of Firmicutes, Clostridia, Clostridiales, Clostridiaceae and *Clostridium* were significantly decreased by 65%-98%, 69%-87%, 67%-87%, 73%-97% and 74%-93% under warming condition respectively, suggesting warming had a significant inhibitory effect on the bacterial lineage from Firmicutes to *Clostridium* at different taxonomic level. Particularly, principal coordinate analysis and cluster analysis also demonstrated warming had a significant effect on microbial community structure with obvious separation of samples between control and warmed groups from each wetland column site. Phosphorus forms were dominated by phosphomonoester and orthophosphate in each wetland column soil, which were significantly increased and decreased by 275% and 20% in XX wetland column soil respectively. Similarly, phosphomonoester and polyphosphate were also found to be increased and decreased by 85% and 49% in JH wetland column soil respectively, indicating that phosphorus forms in response to warming had soil heterogeneity. Canonical correspondence analysis showed that obvious changes in microbial community composition had significant effects on phosphorus forms under warming condition.

**Key words:** microcosm; climate warming; microbial community; phosphorus forms; high-throughput sequencing; <sup>31</sup>P-NMR; wetland soils

据推测到 2100 年, 全球气温将上升大约 1.4~5.8℃<sup>[1]</sup>, 同时我国首份《气候变化国家评估报告》指出: 相对于 1961~1990 年全国气温平均值, 2020 年我国年平均气温将增加 1.3~2.1℃, 并且至 2050 年将增加 2.3~3.3℃<sup>[2]</sup>. 众所周知, 伴随经济的发展, 水体富营养化成为了我国乃至全球水环境污染的核心生态问题之一. 此外, 研究发现气候变暖能够加剧水体富营养化过程<sup>[3]</sup>. 其中磷素被认为是导致水体富营养化的关键限制因子<sup>[4]</sup>, 湿地土壤磷素以无机磷和有机磷两大类形式存在. 土壤是水体中

磷素的重要蓄积库. 其迁移转化是湿地生态系统中土-水界面间磷素循环的主要过程, 直接影响水体富营养化过程. 因而, 在全球气候变暖条件下, 研究湿地土壤磷素的生物地球化学循环过程、“源-汇”演替及其机制等科学问题对于管理湿地生态系统及保

收稿日期: 2017-01-06; 修订日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373073, 41673081); 浙江省科技计划项目(2015F5002)

作者简介: 腾昌运(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学循环, E-mail: 1039344938@qq.com

\* 通信作者, E-mail: zhangzhijian@zju.edu.cn

障湿地生态系统的健康,发挥其稳定的生态功能提供了前瞻性的理论基础。同时,微生物是湿地土壤磷素生物地球化学循环过程中重要的参与者,首先微生物能够提高湿地土壤植物有效磷的含量<sup>[5]</sup>,例如植物根际菌能够有效地溶解土壤中沉淀或吸附态的无机磷成为有效磷形态<sup>[6]</sup>。其次,由于微生物本身具有高效的磷素吸收系统,故微生物也与其他生物体发生竞争并吸收土壤中的有效磷<sup>[7]</sup>。研究表明升高的土壤温度能够影响微生物活动进而导致土壤磷素释放到水体中<sup>[8]</sup>,因此研究暖化条件下湿地土壤微生物群落的变化特征对认识磷素生物地球化学循环过程具有重要意义。

湿地土壤升温不仅对磷素形态具有显著地影响,如不同磷素形态间的相互转换<sup>[9]</sup>。而且会影响微生物群落组成,如微生物种类和数量<sup>[10]</sup>,进一步推测出暖化诱导下土壤微生物群落组成与磷素形态可能具有潜在地关联性及其相互影响效应。因此,本文以暖化湿地微宇宙生境研究平台为基础,选取了长三角南区六处具有不同磷库特征的湿地区域作为研究对象,开展暖化条件下土壤磷库与微生物群落特征及其关联性研究,以期探究暖化条件下微生物驱动的湿地土壤磷素生物地球化学循环机制提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 微宇宙平台设计及样品收集

关于本实验构建的人工智能微宇宙湿地柱研究平台的详细信息可见参考文献<sup>[11]</sup>中的相关报道。简而言之,将从长三角南区六处湿地采样点收集的表层土壤及上覆水样品分别填充在透明的 PVC 塑料管中构成微宇宙湿地柱并置于辅助水箱中于室外长期培养,同时对每个采样点分别设置 3 个平行的对照组(control, C)和暖化组(warmed, W),即对照组湿地柱处于自然状态,暖化组湿地柱通过温控智能设备升温 3℃。此外,六处湿地采样点地理位置及基本理化特征可参考文献研究报道<sup>[12]</sup>,即绍兴镜湖湿地公园(JH)、长兴包漾河(BY)、德清下渚湖湿地(XZ)、桐乡养鸭塘(YT)、嘉兴石臼漾水源地(SJ)和杭州西溪湿地公园(XX)。其中 SJ 属于低营养化磷库湿地, JH 属于中低营养化磷库湿地, XZ、XX、BY 属于中高营养化磷库湿地, YT 属于高营养化磷库湿地。该微宇宙暖化湿地柱实验平台从 2008 年 5 月运行至今。为探究暖化条件下湿地土壤磷库与微生物群落特征及其关联性,本实验于 2016 年

10 月 15 日收集了各湿地柱中约 100 g 土壤新鲜样品,即共计收集了 36 个土壤样本,每个湿地采样点的暖化组和对照组分别包含 3 个生物性重复。各湿地柱土壤样本一部分用于微生物群落(16S rRNA gene)高通量测序分析,另一部分用于磷素核磁共振(<sup>31</sup>P-NMR)表征分析。

### 1.2 微生物群落测序分析

土壤全基因组 DNA 提取根据美国 MoBio 公司的强力土壤 DNA 提取试剂盒说明进行,提取的土壤 DNA 送至北京诺禾致源生物信息科技有限公司对 16S rRNA gene 的 V4 ~ V5 高变区进行高通量测序分析,其测序策略参考文献相关报道<sup>[13]</sup>。测序得到的原始数据使用 QIIME v1.9.1 软件<sup>[14]</sup>进行预处理,然后使用 Uclust v1.2.22q 软件进行 OTUs 聚类,其相似性阈值设为 97%,最后再采用 Greengenes 数据库对 OTUs 进行分类学鉴定<sup>[15]</sup>。

### 1.3 核磁共振表征分析

土壤磷素提取过程及检测分析可参考文献<sup>[16]</sup>,步骤如下:称取 3.00 g 冷冻干燥的土壤样本放置于 50 mL 离心管中并加入 30 mL 0.20 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 和 0.050 mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>EDTA 混合液,然后在 20℃ 室温条件下缓慢振荡浸提 16 h,接着在 10 000 r·min<sup>-1</sup> 下离心 20 min 获取上清液。该上清液经过 -20℃ 冷藏 36 h 后被冷冻干燥并研磨成粉末,大约 300 mg 的粉末再重新溶解到由 0.50 mL D<sub>2</sub>O、0.30 mL 10 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 和 0.30 mL NaOH-EDTA 提取液组成的混合液中。溶解的样品再经过 20 min 超声混合,10 000 r·min<sup>-1</sup> 下离心 10 min 再次获得上清液,该上清液被装载到 5 mm 规格的核磁管中并采用布鲁克公司的 600 MHz 核磁共振波谱仪进行检测。其检测相关参数为:脉冲角度 90°, 捕集时间 0.68 s, 脉冲延迟 4.0 s, 脉冲宽度 17.9 μs, 自旋频率 10 Hz, 扫描次数范围 2 400 ~ 2 800, 测定温度 20℃。所有<sup>31</sup>P 化学移位均参照 85% 的正磷酸。最后对于获得的<sup>31</sup>P-NMR 谱图采用 MestReNova7.0 软件进行分析,其中所有谱图的正磷酸化学移位被校正至 6.0 ppm。其他磷素形态化合物的化学移位根据相关参考文献进行确定<sup>[17]</sup>。对于单个磷素形态化合物,其相对丰度为其对应的峰值面积与全体磷素峰值面积和之比。

### 1.4 统计分析

本实验采用 PAST3.0 软件<sup>[18]</sup>对微生物群落数据进行主坐标分析(principal coordinate analysis)、典型对应分析(canonical

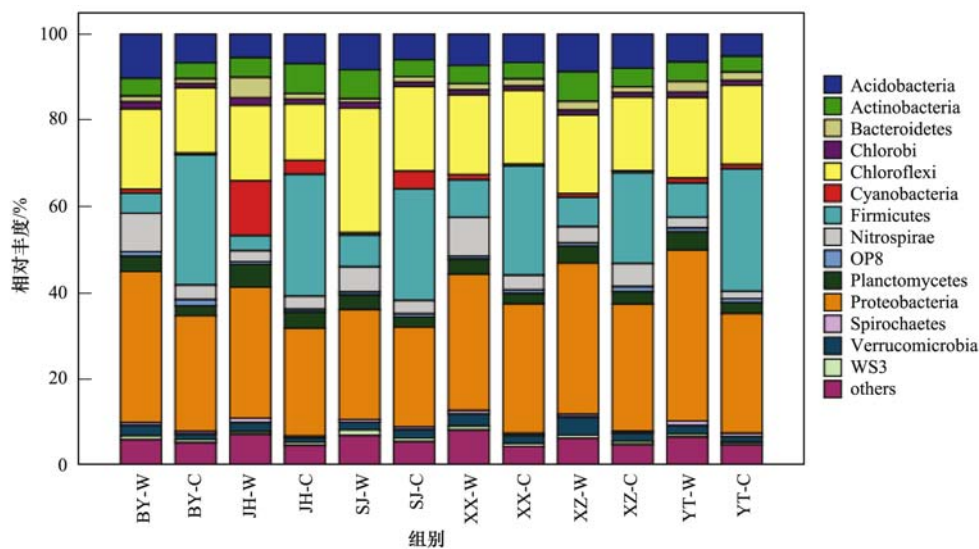
correspondence analysis)、聚类分析(cluster analysis)及 Spearman 秩相关性分析等多元统计分析. 采用 LEfSe (linear discriminant analysis coupled with effect size) 在线软件<sup>[19]</sup>进行组间微生物群落组成差异分析. 同时采用 SPSS 17.0 软件进行单变量方差分析和显著性检验及一般描述性统计分析, 多重比较方差分析运用 LSD 法, 其中  $P < 0.05$  表示组间具有显著性差异.

## 2 结果与分析

### 2.1 微生物群落组成分析

对微生物群落门水平物种组成而言(图 1), 其

中 others 包含相对丰度低于 1% 和未知的物种, 各湿地柱采样点暖化组的优势物种主要为 Proteobacteria (26% ~ 40%) 和 Chloroflexi (18% ~ 29%), 而各湿地柱采样点对照组的优势物种主要为 Proteobacteria (23% ~ 30%)、Chloroflexi (13% ~ 20%) 和 Firmicutes (21% ~ 30%). One-way ANOVA 的 LSD 多重比较分析表明: 对于 Firmicutes 的相对丰度, 各湿地柱采样点的暖化组与对照组之间均具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ ). 即和对照组相比, 暖化作用导致了 JH、XZ、YT、XX、BY 和 SJ 湿地柱采样点的 Firmicutes 相对丰度分别显著下降 88%、68%、72%、65%、85% 和 98%.



W 和 C 分别表示各湿地柱采样点的暖化组和对照组, 下同

图 1 各湿地柱土壤微生物群落门水平组成的相对丰度

Fig. 1 Relative abundances of microbial community composition at phylum level from each wetland column soil

对微生物群落纲水平物种组成而言(图 2), 其中 others 包含相对丰度低于 1% 和未知的物种, 各湿地柱采样点暖化组的优势物种主要为  $\delta$ -Proteobacteria (13% ~ 24%) 和 Anaerolineae (15% ~ 24%). 而各湿地柱采样点对照组的优势物种主要为  $\delta$ -Proteobacteria (13% ~ 18%)、Anaerolineae (10% ~ 17%) 和 Clostridia (20% ~ 30%). One-way ANOVA 的 LSD 多重比较分析表明: 对于 Clostridia 的相对丰度 ( $P < 0.05$ ), 各湿地柱采样点的暖化组与对照组之间均具有统计学显著性. 即和对照组相比, 暖化作用导致了 JH、XZ、YT、XX、BY 和 SJ 湿地柱采样点的 Clostridia 相对丰度分别显著下降 86%、69%、75%、67%、87% 和 73%.

对微生物群落目水平物种组成而言(图 3), 其中 others 包含相对丰度低于 1% 和未知的物种, “o\_”表示未知的目水平物种. 各湿地柱采样点暖化

组的优势物种主要为 GCA004 (3% ~ 6%)、Clostridiales (3% ~ 8%) 和 Syntrophobacterales (4% ~ 7%). 而各湿地柱采样点对照组的优势物种主要为 Clostridiales (20% ~ 29%). One-way ANOVA 的 LSD 多重比较分析表明: 对于 Clostridiales 的相对丰度, 各湿地柱采样点的暖化组与对照组之间均具有统计学显著 ( $P < 0.05$ ). 即和对照组相比, 暖化作用导致了 JH、XZ、YT、XX、BY 和 SJ 湿地柱采样点的 Clostridiales 相对丰度分别显著下降 87%、70%、76%、67%、87% 和 73%.

对微生物群落科水平物种组成而言(图 4), 其中 others 包含相对丰度低于 1% 和未知的物种, “o\_”和“f\_”分别表示未知的纲水平和科水平物种. 各湿地柱暖化组的优势物种主要为未知的 o\_ GCA004; f\_ (3% ~ 6%) 和 Thermodesulfovibrionaceae (2% ~ 8%). 而各湿地柱采样点对照组的优势物种

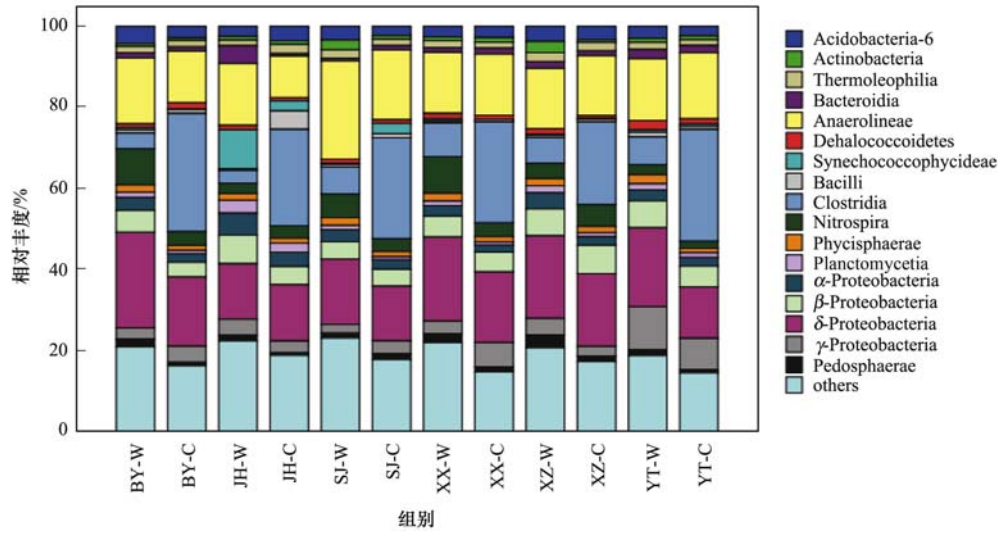


图 2 各湿地柱土壤微生物群落纲水平组成的相对丰度

Fig. 2 Relative abundances of microbial community composition at class level from each wetland column soil

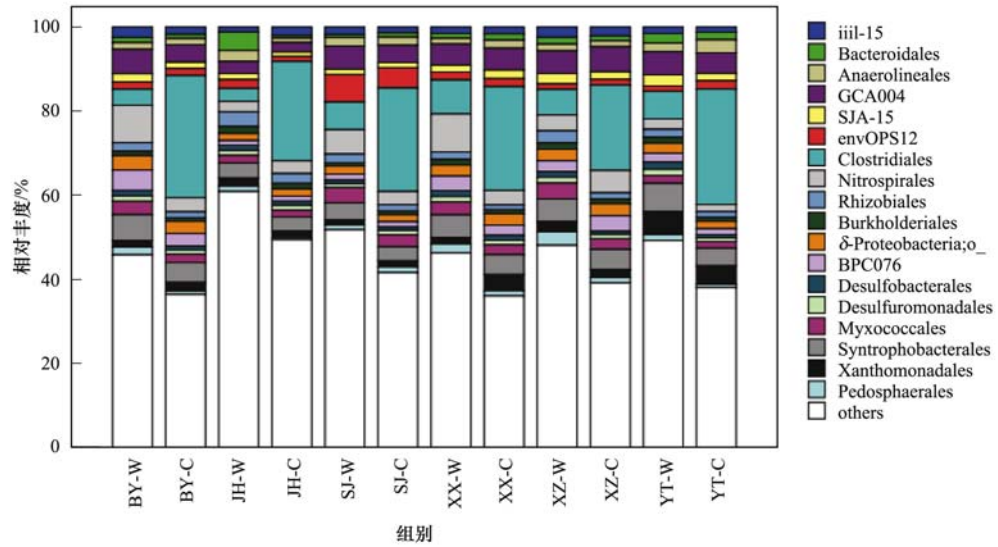


图 3 各湿地柱土壤微生物群落目水平组成的相对丰度

Fig. 3 Relative abundances of microbial community composition at order level from each wetland column soil

主要为 Clostridiaceae (19% ~ 28%)。One-way ANOVA 的 LSD 多重比较分析表明：对于 Clostridiaceae 的相对丰度 ( $P < 0.05$ )，各湿地柱采样点的暖化组与对照组之间均具有统计学显著性。即和对照组相比，暖化作用导致了 JH、XZ、YT、XX、BY 和 SJ 湿地柱采样点的 Clostridiaceae 相对丰度分别显著下降 97%、77%、82%、73%、91% 和 76%。

对微生物群落属水平物种组成而言(图 5)，其中 others 包含相对丰度低于 1% 和未知的物种，“o\_”、“f\_”和“g\_”分别表示未知的纲水平、科水平和属水平物种。各湿地柱采样点暖化组的优势物种主要为未知的 GCA004；f\_；g\_ (3% ~ 6%)、BPC076；f\_；g\_ (1% ~ 5%) 和 Clostridium (2% ~

6%)。One-way ANOVA 的 LSD 多重比较分析表明：对于 Clostridium 的相对丰度，各湿地柱采样点的暖化组与对照组之间均具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ )。即和对照组相比，暖化作用导致了 JH、XZ、YT、XX、BY 和 SJ 湿地柱采样点的 Clostridium 相对丰度分别显著下降 93%、78%、83%、74%、91% 和 76%。

2.2 微生物群落属间差异分析

主坐标分析(图 6)展示了 PCoA1 和 PCoA2 能够分别解释 83% 和 5% 的微生物群落属水平物种组成的方差变异。其中红色标签代表所有暖化组样本，黑色标签代表所有对照组样本。实心点代表湿地柱采样点 JH、加号代表湿地柱采样点 XZ、方形

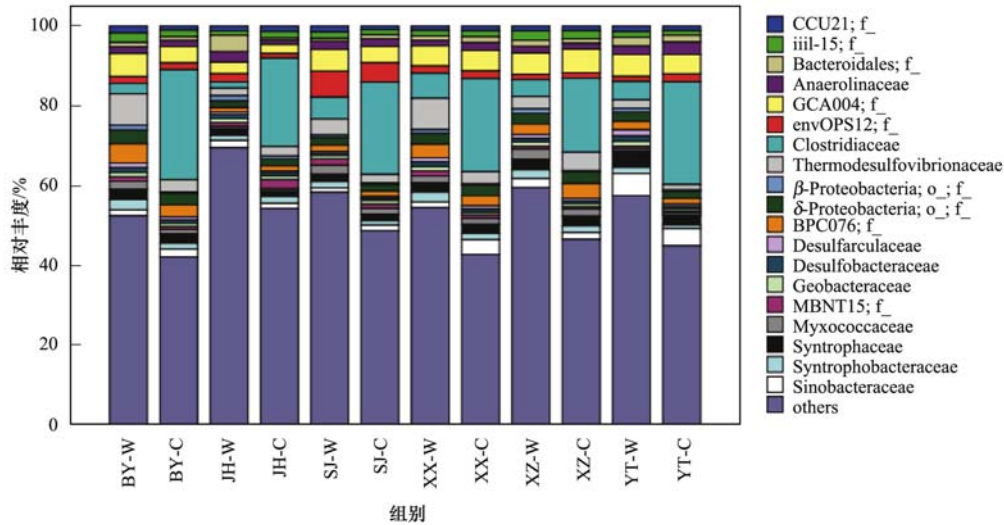


图 4 各湿地柱土壤微生物群落科水平组成的相对丰度

Fig. 4 Relative abundances of microbial community composition at family level from each wetland column soil

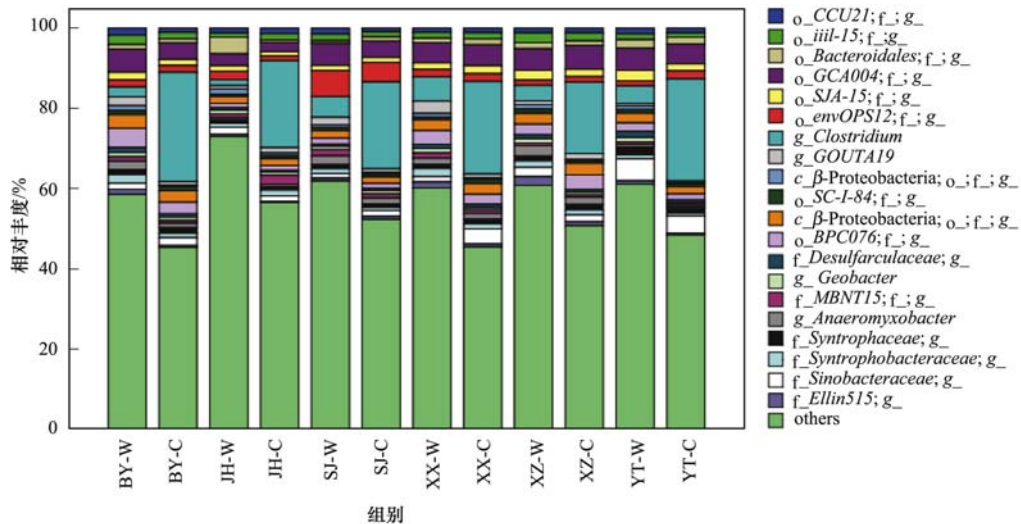


图 5 各湿地柱土壤微生物群落属水平组成的相对丰度

Fig. 5 Relative abundances of microbial community composition at genus level from each wetland column soil

代表湿地柱采样点 YT、菱形代表湿地柱采样点 XX、星号代表湿地柱采样点 BY 和三角形代表湿地柱采样点 SJ。显然地,各湿地柱采样点的暖化组与对照组样本分别沿着 PCoA1 和 PCoA2 表现出了显著的分離特征。进一步地,聚类分析(图 7)也揭示了不同湿地柱采样点的暖化组和对照组样本明显聚类为两组,即组一包含所有暖化组样本,组二包含所有对照组样本,这表明暖化作用对湿地土壤微生物群落结构组成具有显著性影响效应。为了全面寻找在暖化组和对照组之间具有显著差异影响效应的单个物种,本研究将所有样本整体分为暖化和对照两组并进行 LEfSe 分析(图 8),仅得分值大于 3.0 的物种被展示。结果展示暖化组和对照组在不同分类水平上共有 18 个物种表现出了显著性的组间差异,

其中得分值的大小也代表了每个差异物种在各自分组中的影响效应大小。特别地,对于微生物群落在纲水平上的物种组成,暖化组富集到的具有显著影响效应的纲水平物种有  $\alpha$ -Proteobacteria、 $\beta$ -Proteobacteria、 $\delta$ -Proteobacteria、Nitrospira、Synechococcophycidae、Pedosphaerae,而对照组富集到的具有显著影响效应的纲水平物种是 Clostridia。这表明微生物群落组成在不同分类水平上对暖化作用具有不同的响应特征,也说明了暖化诱导下微生物群落组成的显著变化与特定物种的消长具有明显的相关性。

### 2.3 磷素组成分析

核磁共振谱图(图 9)揭示了各湿地柱土壤中六类磷素形态均被检测到,即正磷酸盐

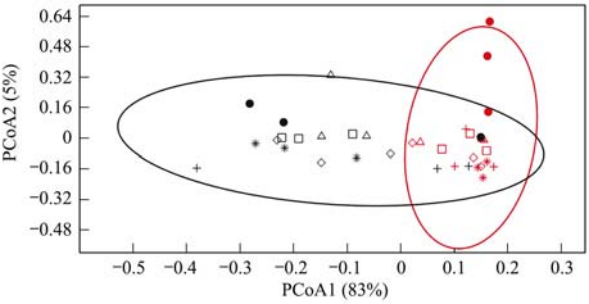


图 6 基于微生物群落属水平组成的主坐标分析  
Fig. 6 Principal coordinate analysis based on microbial community composition at genus level

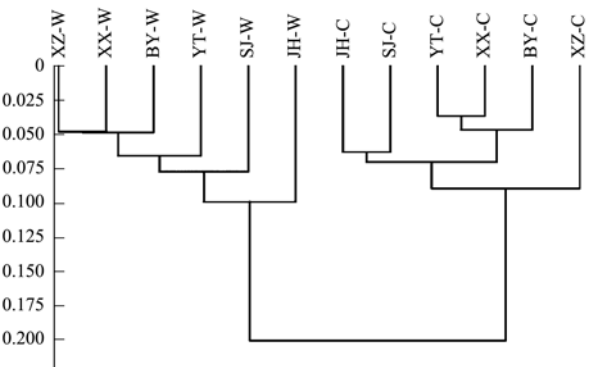


图 7 基于微生物群落属水平组成的聚类分析  
Fig. 7 Cluster analysis based on microbial community composition at genus level

( orthophosphate, 6.0 ppm )、磷酸单酯 ( phosphomonoester, 2.6 ~ 5.9 ppm )、磷酸二酯 ( phosphodiester, 2.5 ~ 3.8 ppm )、焦磷酸盐 ( pyrophosphate, -4.0 ~ -5.0 ppm )、多聚磷酸盐 ( polyphosphate, -5.5 ~ -25.0 ppm ) 和麟酸脂 ( phosphonate, 7.0 ~ 28.0 ppm ). 对应的各磷素形

态相对丰度 (图 10) 分别为正磷酸盐 ( Ortho-P, 35% ~ 88% )、磷酸单酯 ( Mono-P, 8% ~ 50% )、磷酸二酯 ( Di-P, 1% ~ 9% )、焦磷酸盐 ( Pyro-P, 0.2% ~ 2% )、多聚磷酸盐 ( Poly-P, 1% ~ 10% )、麟酸脂 ( Phon-P, 1% ~ 13% ). One-way ANOVA 的 LSD 多重比较分析表明:对于正磷酸盐的相对丰度,XX 湿地柱采样点的暖化组 and 对照组之间具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ ). 对于磷酸单酯的相对丰度,JH 和 XX 湿地柱采样点的暖化组 and 对照组之间具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ ). 对于磷酸二酯的相对丰度,YT 湿地柱采样点的暖化组 and 对照组之间具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ ). 对于焦磷酸盐的相对丰度,SJ 湿地柱采样点的暖化组 and 对照组之间具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ ). 对于多聚磷酸盐的相对丰度 ( $P < 0.05$ ),JH 湿地柱采样点的暖化组 and 对照组之间具有统计学显著性 ( $P < 0.05$ ). 即和对照组相比,暖化作用导致了 XX 湿地柱采样点的正磷酸盐相对丰度显著下降 20%,JH 和 XX 湿地柱采样点的磷酸单酯相对丰度分别显著升高 85% 和 275%. YT 湿地柱采样点的磷酸二酯相对丰度显著升高 87%,SJ 湿地柱采样点的焦磷酸盐相对丰度显著下降 41%,JH 湿地柱采样点的多聚磷酸盐相对丰度显著下降 49%. 这表明不同磷素形态组成对暖化作用的响应具有土壤异质性特征.

2.4 微生物群落与磷素关联分析

典型对应分析 (图 11) 揭示了 CCA1 和 CCA2 分别解释了 79% 和 19% 的磷素形态组成的方差变异,这表明微生物群落组成对磷素形态具有显著的影响

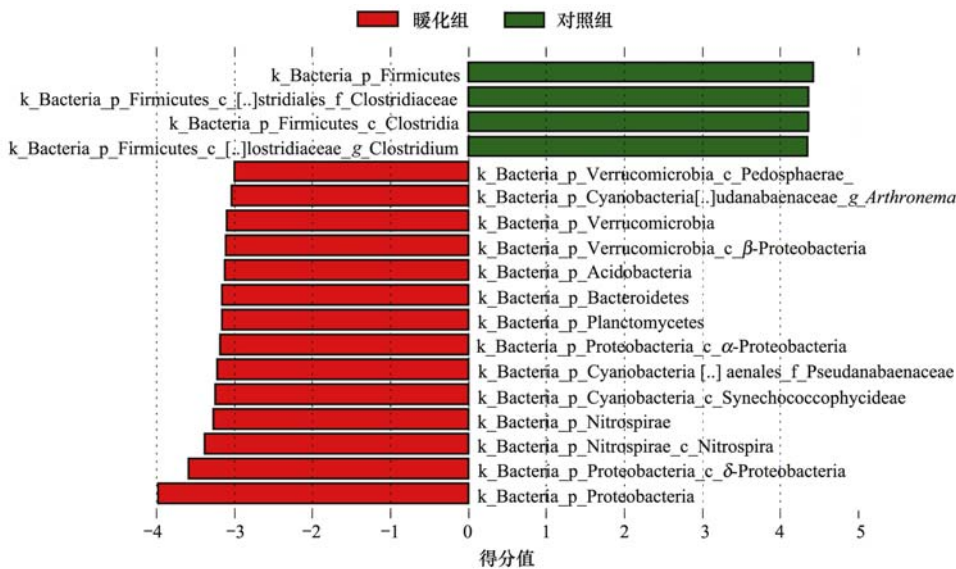


图 8 基于微生物群落组成在不同分类水平上的 LefSe 分析  
Fig. 8 LefSe analysis based on microbial community composition at different taxonomic level

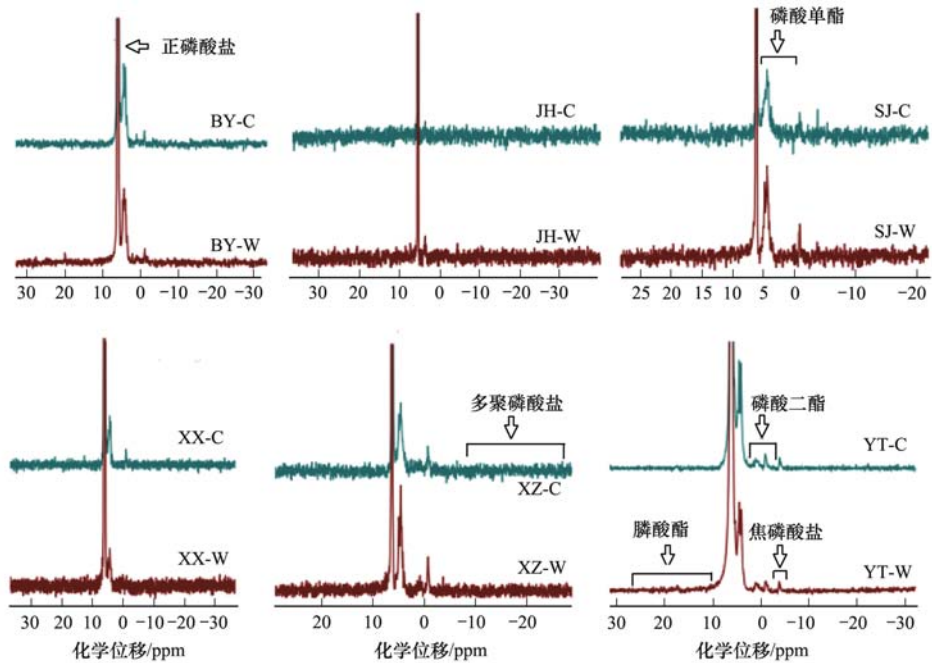


图 9 各湿地柱土壤代表性的<sup>31</sup>P-NMR 谱图

Fig. 9 Representative <sup>31</sup>P-NMR spectra from each wetland column soil

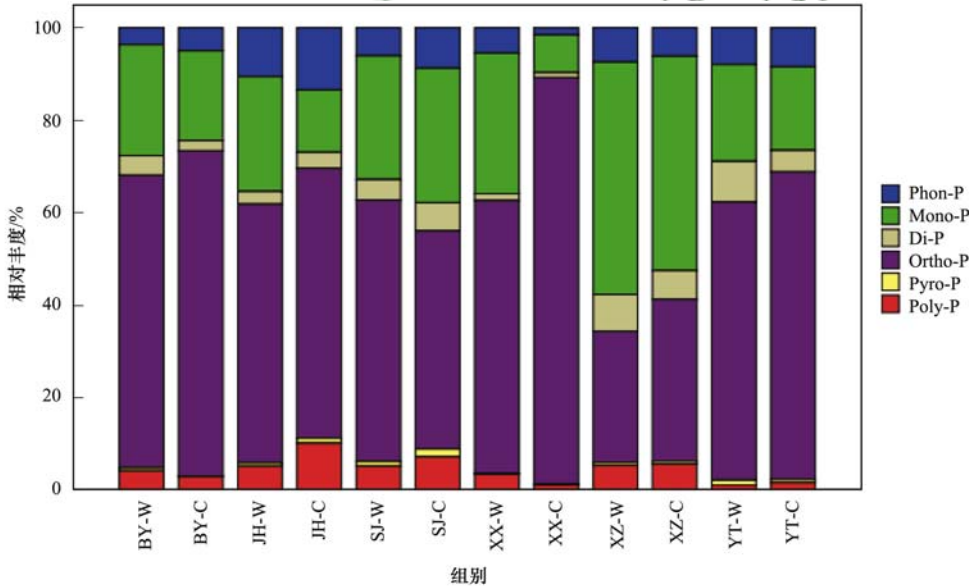


图 10 各湿地柱土壤磷素形态的相对丰度

Fig. 10 Relative abundances of phosphorus forms from each wetland column soil

效应. 其中由 LEfSe 分析得到的纲水平差异物种 (图 8) 被挑选代表整个纲水平微生物群落组成, 蓝色实心点点代表单个磷素形态, 即正磷酸盐 (Ortho-P)、磷酸单酯 (Mono-P)、磷酸二酯 (Di-P)、焦磷酸盐 (Pyro-P)、多聚磷酸盐 (Poly-P) 和磷酸酯 (Phon-P). 绿色线段代表单个物种, 线段长度越长代表其 对整体磷素形态组成影响作用越大. 红色标签代表所有暖化组样本, 黑色标签代表所有对照组样本, 其中实心点代表湿地柱采样点 JH、加号代表

湿地柱采样点 XZ、方形代表湿地柱采样点 YT、菱形代表湿地柱采样点 XX、星号代表湿地柱采样点 BY 和三角形代表湿地柱采样点 SJ. 结果表明: 各湿地柱采样点的暖化组与对照组样本分别沿着 CCA1 和 CCA2 表现出显著的分 离特征, 其中 CCA1 与  $\alpha$ -Proteobacteria、 $\beta$ -Proteobacteria 和 Synechococcophycideae 呈正相关, 与  $\delta$ -Proteobacteria、Nitrospira、Pedosphaerae 和 Clostridia 呈负相关. 而 CCA2 主要与  $\beta$ -Proteobacteria 和

Pedospaerae 呈正相关,与 Nitrospira 和 Clostridia 呈负相关. 这表明不同的物种对磷素形态组成的影响效应具有差异性. 进一步地典型对应分析揭示了暖化诱导下  $\alpha$ -Proteobacteria、Synechococcophycidae、 $\delta$ -Proteobacteria 和 Nitrospira 是影响磷素形态组成的主要纲水平物种. 同时 Spearman 秩相关性分析也揭示了  $\alpha$ -Proteobacteria 分别与 Phon-P ( $R = 0.51$ ,  $P < 0.05$ ), Di-P ( $R = 0.33$ ,  $P < 0.05$ ), Poly-P ( $R = 0.45$ ,  $P < 0.05$ ) 具有显著的正相关性,与 Ortho-P

( $R = -0.40$ ,  $P < 0.05$ ) 具有显著的负相关性. 特别地, Pyro-P 分别与  $\delta$ -Proteobacteria ( $R = -0.46$ ,  $P < 0.05$ ), Nitrospira ( $R = -0.39$ ,  $P < 0.05$ ) 呈现显著的负相关性,而与 Synechococcophycidae ( $R = 0.41$ ,  $P < 0.05$ ),  $\alpha$ -Proteobacteria ( $R = 0.33$ ,  $P < 0.05$ ) 呈现显著的正相关性. 这表明暖化条件下单个物种的变化与单个磷素形态的变化具有相应的内在关联性. 因此,典型对应分析和 Spearman 秩相关性分析揭示了暖化诱导下微生物群落组成的变化与磷素形态的变化具有显著的相关性.

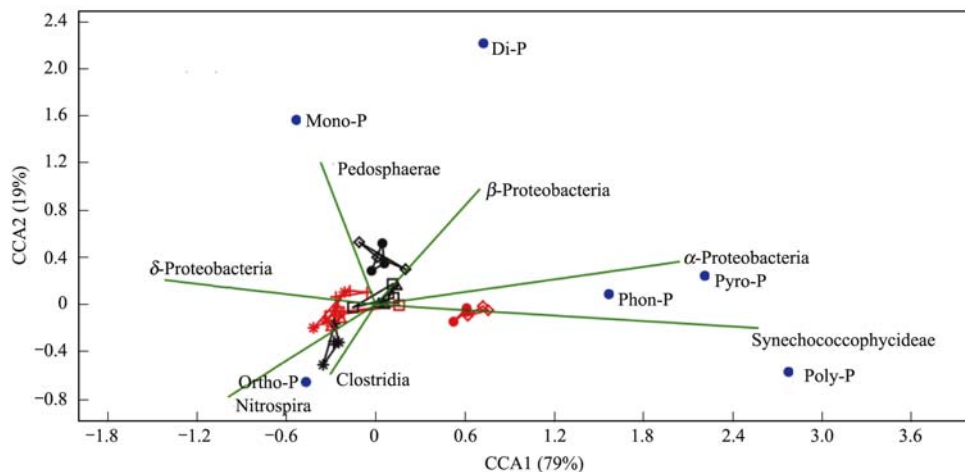


图 11 基于微生物群落纲水平组成与磷素形态的典型对应分析

Fig. 11 Canonical correspondence analysis based on microbial community composition at class level and phosphorus forms

### 3 讨论

尽管 Supramaniam 等<sup>[20]</sup>发现 Firmicutes 的相对丰度在短期的土壤升温条件下呈现出显著性升高特征,它被认为 Firmicutes 作为革兰氏阳性菌在极端条件下(如高温)能够形成孢子而适应环境变化<sup>[21]</sup>. 然而在笔者长达 8 年的土壤升温实验中,通过对微生物群落物种组成在不同分类学水平上的优势物种分析,本研究发现各湿地柱采样点从 Firmicutes 到 Clostridium 这一世系物种的相对丰度在暖化诱导下呈现大幅度下降现象(图 1 ~ 5),这可能归因于 Proteobacteria 在持续暖化诱导下成为了主导的优势物种且在暖化条件下具有显著的影响效应(图 8),进而使得微生物群落组成发生了显著性变化(图 6 和图 7). DeAngelis 等<sup>[22]</sup>发现长期的土壤升温能够显著增加 Proteobacteria 的丰度. 此外, Rousk 等<sup>[23]</sup>发现提升的温度能够加速土壤有效基质的消耗进而使得不同微生物之间产生显著的竞争现象,从而导致某些物种的丰度因为营养物质的缺乏而下降<sup>[24]</sup>. 同时土壤升温也能够导致某些适冷微生物的死

亡<sup>[25]</sup>. 这说明不同种类的土壤微生物在暖化诱导下具有不同的环境适应性. 因此 Firmicutes 到 Clostridium 这一世系物种可能对长期暖化诱导下的土壤环境变化不适应(如营养物质的缺乏)而失去竞争优势,从而导致了该世系物种呈现大幅度消亡特征. Proteobacteria 物种可能适应了长期暖化诱导下的环境变化从而成为了优势物种<sup>[26]</sup>, 获得了更多的有效基质的供应<sup>[27]</sup>(如碳基质). 先前的研究表明暖化条件下微生物群落组成与功能的显著性变化能够导致土壤碳库发生变化<sup>[28]</sup>, 同时由于磷库与碳库具有潜在的耦合效应,即碳库的变化能够引发磷库的响应<sup>[29]</sup>, 因此本研究认为暖化诱导下土壤微生物群落组成变化与磷库变化具有潜在的相关性(图 11). 即暖化诱导下土壤微生物群落组成的显著变化可能会导致磷库的潜在变化<sup>[30]</sup>. 在笔者的观测中,除 BY 和 XZ 湿地柱采样点外,其他各湿地柱采样点均有磷素形态(如 JH 和 XX 湿地柱采样点的磷酸单酯)对暖化作用表现出了显著的响应特征(图 9). 这是合理的, Xiong 等<sup>[31]</sup>发现暖化效应可能会被潜在的土壤类型及植被特征所掩盖,而且磷库的

变化与湿地土壤营养状态具有潜在的相关性<sup>[32]</sup>. 那可能导致某些类型的湿地土壤磷库对暖化作用没有明显地响应特征而其他类型的湿地土壤磷库具有明显的响应特征. 同时 Allison 等<sup>[33]</sup>发现暖化诱导下能够抑制土壤微生物的活性,从而降低了土壤有机质的分解速率<sup>[34]</sup>. 另外 Wu 等<sup>[35]</sup>发现升高的土壤温度也能够抑制磷酸酶活性,这说明暖化诱导下可能会降低有机磷组分的分解速率从而使得有机磷组分的相对丰度呈现出升高的特征,例如 XX 湿地柱采样点的磷酸单酯在暖化条件下呈现出显著的升高特征(图 10). 因此,本研究的暖化实验表明长期的暖化作用能够导致微生物群落组成发生显著性变化,进而导致土壤磷库的潜在变化.

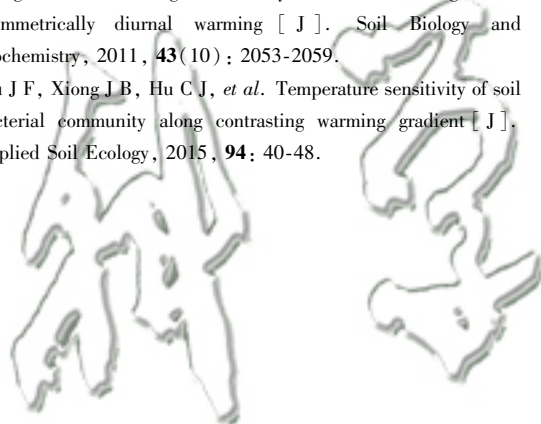
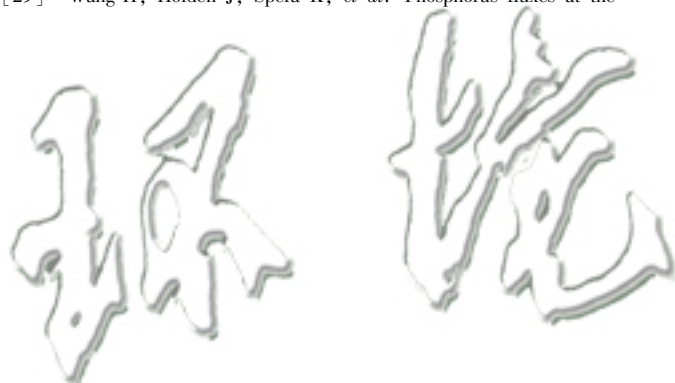
#### 4 结论

对土壤微生物群落组成而言,暖化作用导致了 Firmicutes 到 *Clostridium* 这一世系物种的相对丰度呈现出显著的下降特征. 通过主坐标分析和聚类分析,揭示了暖化作用对微生物群落组成具有显著性影响效应. 对土壤磷素组成而言,磷酸单酯和正磷酸盐是湿地土壤主要的磷素形态,且不同磷素形态对暖化作用的响应具有土壤异质性特征. 通过典型对应分析,揭示了暖化诱导下土壤微生物群落组成的显著性变化能够导致磷库不同组分发生潜在变化.

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Yang C M, Yang L Z, Lee J H. Organic phosphorus fractions in organically amended paddy soils in continuously and intermittently flooded conditions[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, **35**(4): 1142-1150.
- [3] 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.
- [4] Sanz-Lázaro C, Valdemarsen T, Marín A, *et al.* Effect of temperature on biogeochemistry of marine organic-enriched systems: implications in a global warming scenario[J]. Ecological Applications, 2011, **21**(7): 2664-2677.
- [5] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus[J]. Plant Physiology, 2011, **156**(3): 989-996.
- [6] Gyaneshwar P, Naresh Kumar G, Parekh L J, *et al.* Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants[J]. Plant and Soil, 2002, **245**(1): 83-93.
- [7] Wanner B L. Gene regulation by phosphate in enteric bacteria[J]. Journal of Cellular Biochemistry, 1993, **51**(1): 47-54.
- [8] Holdren G C, Armstrong D E. Factors affecting phosphorus release from intact lake sediment cores[J]. Environmental Science & Technology, 1980, **14**(1): 79-87.
- [9] 李楠, 单保庆, 张洪, 等. 沉积物中有机磷在 pH 和温度影响下的矿化机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1008-1014.  
Li N, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Organic phosphorus mineralization in the sediments under the impact of pH and temperature[J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1008-1014.
- [10] Miraglia M, Marvin H J P, Kleter G A, *et al.* Climate change and food safety: an emerging issue with special focus on Europe[J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, **47**(5): 1009-1021. PH
- [11] Zhang Z J, Wang Z D, Holden J, *et al.* The release of phosphorus from sediment into water in subtropical wetlands: a warming microcosm experiment[J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(1): 15-26.
- [12] Wang H, Holden J, Zhang Z J, *et al.* Concentration dynamics and biodegradability of dissolved organic matter in wetland soils subjected to experimental warming[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 907-916.
- [13] Jiao S, Liu Z S, Lin Y B, *et al.* Bacterial communities in oil contaminated soils: biogeography and co-occurrence patterns[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **98**: 64-73.
- [14] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data[J]. Nature Methods, 2010, **7**(5): 335-336.
- [15] McDonald D, Price M N, Goodrich J, *et al.* An improved Greengenes taxonomy with explicit ranks for ecological and evolutionary analyses of bacteria and archaea[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(3): 610-618.
- [16] Jin Y, Liang X Q, He M M, *et al.* Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: a microcosm incubation study[J]. Chemosphere, 2016, **142**: 128-135.
- [17] Giles C D, Lee L G, Cade-Menun B J, *et al.* Characterization of organic phosphorus form and bioavailability in lake sediments using <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance and enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Environmental Quality, 2015, **44**(3): 882-894.
- [18] Hammer Ø, Harper D A T, Ryan P D. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis[J]. Palaeontologia Electronica, 2001, **4**(1): 4.
- [19] Segata N, Izard J, Waldron L, *et al.* Metagenomic biomarker discovery and explanation[J]. Genome Biology, 2011, **12**: R60.
- [20] Supramaniam Y, Chong C W, Silvaraj S, *et al.* Effect of short term variation in temperature and water content on the bacterial community in a tropical soil[J]. Applied Soil Ecology, 2016, **107**: 279-289.
- [21] Singh B K, Munro S, Potts J M, *et al.* Influence of grass species and soil type on rhizosphere microbial community structure in grassland soils[J]. Applied Soil Ecology, 2007, **36**(2-3): 147-155.
- [22] DeAngelis K M, Pold G, Topçuoğlu B D, *et al.* Long-term forest

- soil warming alters microbial communities in temperate forest soils [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**: 104.
- [23] Rousk J, Frey S D, Bååth E. Temperature adaptation of bacterial communities in experimentally warmed forest soils [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(10): 3252-3258.
- [24] Riah-Anglet W, Trinsoutrot-Gattin I, Martin-Laurent F, *et al.* Soil microbial community structure and function relationships: a heat stress experiment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **86**: 121-130.
- [25] Allison S D, Martiny J B H. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(S1): 11512-11519.
- [26] Rinnan R, Rousk J, Yergeau E, *et al.* Temperature adaptation of soil bacterial communities along an Antarctic climate gradient: predicting responses to climate warming [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(11): 2615-2625.
- [27] Bradford M A, Watts B W, Davies C A. Thermal adaptation of heterotrophic soil respiration in laboratory microcosms [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(5): 1576-1588.
- [28] Wang H, He Z L, Lu Z M, *et al.* Genetic linkage of soil carbon pools and microbial functions in subtropical freshwater wetlands in response to experimental warming [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(21): 7652-7661.
- [29] Wang H, Holden J, Spera K, *et al.* Phosphorus fluxes at the sediment-water interface in subtropical wetlands subjected to experimental warming: a microcosm study [J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(6): 1794-1804.
- [30] Wang H, Li H Y, Zhang Z J, *et al.* Linking stoichiometric homeostasis of microorganisms with soil phosphorus dynamics in wetlands subjected to microcosm warming [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(1): e85575.
- [31] Xiong J B, Sun H B, Peng F, *et al.* Characterizing changes in soil bacterial community structure in response to short-term warming [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, **89**(2): 281-292.
- [32] Zhang Z J, Wang H, Zhou J Z, *et al.* Redox potential and microbial functional gene diversity in wetland sediments under simulated warming conditions: implications for phosphorus mobilization [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **743**(1): 221-235.
- [33] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(12): 2898-2909.
- [34] Zhang N L, Xia J Y, Yu X J, *et al.* Soil microbial community changes and their linkages with ecosystem carbon exchange under asymmetrically diurnal warming [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2053-2059.
- [35] Wu J F, Xiong J B, Hu C J, *et al.* Temperature sensitivity of soil bacterial community along contrasting warming gradient [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **94**: 40-48.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                             |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry .....                                                                                                                               | YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)                 |
| Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product .....                                       | ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)                                    |
| Sources and Characteristics of Regional Background PM <sub>1</sub> in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...                                                          | ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647) |
| Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Hangzhou .....                                                                    | WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)          |
| Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China .....                                                              | XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)                       |
| Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM <sub>2.5</sub> in Xi'an, China During Haze and Clean Days .....                                                          | WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)     |
| Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM <sub>10</sub> from Mt. Huangshan .....                                                                     | MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)     |
| Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM <sub>2.5</sub> of Quanzhou .....                                                                                  | ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)        |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China .....                             | XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)            |
| VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit .....                                                                                                   | ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)             |
| Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014 .....                                                                            | FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)        |
| Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China .....                                                                                           | LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)                |
| Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China .....                                                       | ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)          |
| Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment .....                                                           | ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)            |
| Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay .....                                                                                                     | ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)        |
| Spatial Variations of CO <sub>2</sub> Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China .....                                                  | ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)            |
| Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River .....                                             | NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)  |
| Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu .....                                                                   | CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)            |
| Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources .....                                                                 | LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)          |
| High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...                                                       | SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)       |
| Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China .....                                                                         | ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)       |
| Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution .....                                                                  | CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)                |
| Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO <sub>2</sub> .....                                                                | XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)                  |
| Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks .....                                                                                      | XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)                          |
| Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed .....                                                                                   | CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)             |
| MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water .....                                                                                                                                  | WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)        |
| Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber .....                                                                                 | ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)                  |
| Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol .....                                                                                          | KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)      |
| Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes .....                                                                                      | HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)      |
| Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell .....                                                                                                                     | SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)       |
| Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta .....                                                                                                 | SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)              |
| Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization .....                                                     | CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)            |
| Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K <sup>+</sup> Addition in Saline Surroundings .....                                                                                   | WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)               |
| Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria .....                                                                                     | YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)                 |
| Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules .....                                                                                                      | LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)       |
| Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge .....                                                                                                                  | LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)                    |
| Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process .....                                                                                                                         | LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)                    |
| Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling .....                                                                                                                  | SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)                  |
| Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge .....                                                                 | GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)         |
| Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment .....                                                            | ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)               |
| Shift of Microbial Communities During the CO <sub>2</sub> -Brine-Sandstone Interaction Process .....                                                                                        | WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)             |
| Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems .....                                                           | TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)                 |
| Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils .....                                                                                      | TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)       |
| Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains ..... | DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)                |
| Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area .....                                                                                           | JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)                   |
| Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination .....                                    | FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)              |
| Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil .....                                                                                    | LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)               |
| Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014 .....                                          | LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)                        |
| Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area .....                                                          | ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)        |
| Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost .....                                                            | ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)           |
| Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw .....                                                                                                            | GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)         |
| Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China .....                                                                                    | YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)                   |
| Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO <sub>x</sub> by CH <sub>4</sub> .....                                                     | PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)             |