

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 李振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系

滕泽栋, 李敏*, 朱静, 宋明阳

(北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 以野鸭湖湿地芦苇(*Phragmites communis*)根际微生物为研究对象, 采用化学连续提取法分析了芦苇根际/非根际土壤中各形态磷随植物生长(4、7、10月)的变化规律, 同时基于细菌的16S rRNA高通量测序技术, 分析了芦苇根际/非根际土壤微生物多样性, 进一步采用CCA法分析了土壤样品中特定微生物与磷素形态转化关系。结果表明, 无机磷含量的总体顺序大小为: 钙磷(Ca-P) > 闭蓄态磷(Oc-P) > 铁磷(Fe-P) > 交换态磷(Ex-P) > 铝磷(Al-P), 无机磷含量变化主要受芦苇生长状况影响, 在芦苇旺盛期达到最低, 且根际土壤中的总无机磷含量普遍低于非根际。有机磷含量分布为高稳定性有机磷(HR-OP) > 中稳定性有机磷(MR-OP) > 中活性有机磷(ML-OP) > 活性有机磷(L-OP), 各组分含量均随芦苇生长先降低后升高。芦苇根际/非根际土壤微生物中的优势菌门均为变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、放线菌门(Actinobacteria), 但在芦苇生长过程中, 其根际和非根际微生物群落结构受季节影响变化显著, 且根际和非根际的变化有所差异。同时发现了芽孢杆菌属(*Bacillus*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)等可能是与磷形态转化有关的主要功能菌属, 这些菌属能利用大部分的有机磷和无机磷, 在湿地土壤磷素转化中起着关键作用。

关键词: 芦苇; 根际; 非根际; 微生物多样性; 磷素形态

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4589-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704253

Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of *Phragmites communis* in the Yeyahu Wetland in Beijing, China

TENG Ze-dong, LI Min*, ZHU Jing, SONG Ming-yang

(College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this research, microorganisms in rhizosphere/non-rhizosphere soils of *Phragmites communis* in the Yeyahu Wetland were studied. A sequential extraction procedure was used to analyze the phosphorus (P) forms in the rhizosphere/non-rhizosphere soil with a variety of plant growth conditions (April, July, October). The soil bacteria community structure and the diversity was measured using the high-throughput of 16S rRNA amplicons. Furthermore, the complete crystallographic analysis (CCA) method was used to analyze the relationship between phosphate solubilizing microorganisms and P transformation in the soil samples. The results showed that the rank order of inorganic P (IP) fractions in the soil was generally as follows: Ca-bound P (Ca-P) > Occluded P (Oc-P) > Fe-bound P (Fe-P) > Exchangeable P (Ex-P) > Al-bound P (Al-P). The IP content was most affected by the growth of *Phragmites communis*. The minimum content of IP appeared in the vigorous growth period and the total IP content in the rhizosphere soil was generally lower than in the non-rhizosphere soil. The rank order of organic P (OP) fractions were highly resistant OP (HR-OP) > moderately resistant OP (MR-OP) > moderately labile OP (ML-OP) > labile OP (L-OP), and all the components of OP first decreased and then increased with the growth of plant. The major phylogenetic groups in rhizosphere/non-rhizosphere soil of *Phragmites communis*, included Proteobacteria, Acidobacteria, Chloroflexi, and Actinobacteria among which, Proteobacteria was the majority group in the community composition. Furthermore, the rhizosphere/non-rhizosphere microbial community structure was significantly affected by seasonal changes and existing differences between the rhizosphere and non-rhizosphere soils. In addition, the main functional groups of the modal transformation of P bacteria genera were *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Acinetobacter*, which can make use of most OP and IP, playing an important role in the transformation of P in wetland soils.

Key words: *Phragmites communis*; rhizosphere; non-rhizosphere; microbial diversity; phosphate fractions

湿地是地球上水陆作用形成的独特生态系统, 是重要的生存环境和最富生物多样性的自然生态景观之一^[1]。湿地的磷素变化对于水体磷素起着关键性作用^[2], 其磷素截留主要通过植物-微生物的吸收利用^[3]、土壤的物理化学作用(沉淀、吸附)以及颗粒沉积等途径来实现^[4]。有研究表明, 芦苇-水葱植物组合的垂直流人工湿地系统的除磷效率及稳定性

均高于无植物对照, 去除率达 40% ~ 60%^[5]。土壤微生物群落是土壤微生物发挥其生物功能的主要存在单位^[6], 其受环境条件影响较大, 不同植物的根

收稿日期: 2017-04-25; 修订日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279004); 人事部留学基金委择优资助项目(优秀项目类)

作者简介: 滕泽栋(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复技术, E-mail: zedong_teng@126.com

* 通信作者, E-mail: liminbjfu@126.com

际微生物也不同^[7],其对环境的作用主要是通过群落代谢功能差异来实现. 芦苇根际微生物可以通过降低湿地土壤 pH^[8]、释放铁载体^[9]、氧化还原反应等作用改善营养物质的运输,将富营养化水体中不同形式的磷转化为植物能够吸收利用的磷^[10],因而在湿地磷素截留转化过程中发挥重要作用^[11].

然而,目前湿地土壤微生物的研究主要集中在底泥中特定微生物的分离鉴定,磷脂脂肪酸法分析微生物的群落结构,核酸分析等,但是基于核酸的分析方法还处于起步阶段,研究并不深入. 因此,研究湿地土壤微生物群落特征对深入探讨湿地生态系统的结构和功能、保护与治理以及生物资源开发利用等具有重要意义. 本研究旨在通过高通量测序技术(Illumina 测序)、化学连续提取、典型对应分析(CCA)等方法,揭示北京市延庆县野鸭湖湿地芦苇

不同生长时期根际/非根际土壤微生物群落结构及其磷素形态变化规律,并探讨湿地植物根际微生物对土壤磷形态分布的影响,以期为提高湿地土壤磷素利用率以及缓解水体富营养化提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样点布设及样品采集

野鸭湖湿地位于北京市延庆县,是北京地区最大的湿地,地理位置为北纬 40°25′~40°30′,东经 115°47′~115°54′,其湿地生态系统包括官厅水库部分库区和妫水河下游河段、沼泽、人工湖泊以及河岸两旁季节性种植、搁荒的农田等. 土壤类型以褐土为主,植物类型主要有芦苇、茭白、扁秆藨草、香蒲等,地理位置及采样点位的分布情况如图 1 所示.

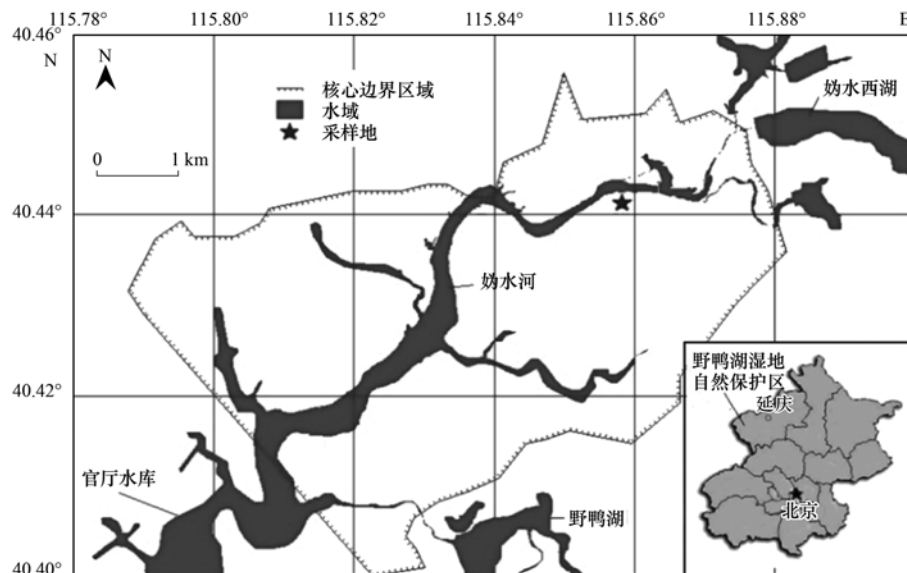


图 1 野鸭湖湿地自然保护区平面及采样点位分布示意

Fig. 1 Map of Yeyahu Wetland natural reserve and the distribution of the sampling sites

2015 年 3~11 月每月中旬采集土壤样品,根据前期实验及采样情况分析,选取 4 月(嫩芽期)、7 月(最旺盛期)、10 月(枯萎期)的芦苇根际/非根际土壤样品为研究对象. 以 3 m×3 m 为样方,挑选长势较好的芦苇植株,多点挖取 5~15 cm 土层内的根系,采用“抖根法”^[12],抖落大块不含植物根系的土壤,混匀作为非根际土样,用刷子扫取根系表面土壤,混匀作为根际土样^[13]. 样品编号为 LG4、LF4、LG7、LF7、LG10、LF10,其中 4、7、10 代表月份, LG 代表芦苇根际土壤样品, LF 代表芦苇非根际土壤样品. 将所取土样置于自封袋中于 12 h 内运回实验室,一部分土壤样品保存于 -20℃ 冰箱用于含水率和微生物多样性分析,其余一部分土壤自然风干

后过 100 目筛,用于磷形态及理化性质的测定,每个样品均设置 3 个重复.

1.2 实验方法

1.2.1 土样理化性质

土壤含水率采用烘干法,总有机质采用重铬酸钾-外加热法, pH 采用电位法(土水比 1:2.5), 碱解氮含量采用碱解扩散法^[14]. 土壤基本理化性质见表 1.

1.2.2 不同形态磷的测定方法

采用化学连续提取法对芦苇根际/非根际土壤中各形态无机磷及有机磷进行测定. 根据文献^[15]将无机磷按照与土壤矿物的结合形态分为交换态磷(Ex-P)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷

表 1 土壤样品基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil samples

样品名称	含水率/%	有机质/g·kg ⁻¹	pH	碱解氮/mg·kg ⁻¹
LG4	38.74 ± 0.66	21.32 ± 0.08	8.39 ± 0.18	38.40 ± 0.75
LF4	27.71 ± 0.85	15.13 ± 0.11	8.54 ± 0.15	28.00 ± 0.88
LG7	38.46 ± 1.25	15.13 ± 0.15	8.63 ± 0.13	38.50 ± 1.03
LF7	32.74 ± 1.11	18.58 ± 0.11	8.61 ± 0.15	38.50 ± 1.21
LG10	25.74 ± 1.01	18.57 ± 0.09	8.22 ± 0.14	64.50 ± 0.68
LF10	23.85 ± 0.95	17.88 ± 0.10	8.33 ± 0.15	57.05 ± 1.33

(Oc-P)、钙磷 (Ca-P); 将有机磷分为活性有机磷 (L-OP)、中等活性有机磷 (ML-OP)、中等稳定有机磷 (MR-OP) 和高稳定有机磷 (HR-OP) 进行提取^[16]. 磷含量的测定均使用钼锑抗分光光度法^[17], 每份土壤样品做 3 次平行.

1.2.3 高通量测序方法

利用试剂盒 (Powersoil® DNA isolation kit) 提取基因组 DNA, 所有样品的 DNA 提取步骤均参照试剂盒说明书. 针对细菌的 16S rRNA 基因 V3-V4 区设计含 barcode 的特异性引物 338F/806R, 引物序列为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3'), 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'). PCR 扩增体系 (50 mL): 10 × PCR Buffer 5 μL; 338F (10 μmol·L⁻¹) 2 μL; 806R (10 μmol·L⁻¹) 2 μL; DNTPs (2.5 μmol·L⁻¹) 4 μL; Pyrobest DNA Polymerase (2.5 U·μL⁻¹, TakaRa Code; DRO05A) 0.3 μL; DNA 样品 30 ng, 补 DdH₂O 至 50 μL. PCR 扩增程序: 95℃ 预变性 5 min; 95℃ 变性 30 s, 56℃ 复性 30 s, 72℃ 延伸 40 s, 25 个循环; 最终 72℃ 延伸 10 min. PCR 产物经过 2% 的琼脂糖凝胶电泳检测, 条带清晰, 片段大小合适 (目的长度为 300 bp 左右), 使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒切胶回收 PCR 产物, 以 Tris-HCl 洗脱, 然后连接“Y”接头, 使用磁珠筛选去除接头自连片段, 利用 PCR 扩增进行文库模板的富集, 之后用氢氧化钠变性, 产生单链 DNA 片段, 并对其进行桥式 PCR, 构建 MiSeq 文库, 进行测序, 高通量测序未设置平行实验组.

1.3 高通量测序数据分析

1.3.1 数据质控

MiSeq 下机数据为具有质量值得分的 fq 格式, 质量检测通过 fastqc 进行^[18], 包括测序数据量、GC 含量、序列平均质量等.

1.3.2 基本数据处理

使用 QIIME 软件 (版本 1.8.0) 对所有测序数据进行分析, 为了得到高质量的 reads, 利用内部编写

程序去除 tags 两端的 barcode 序列及引物序列, 去除嵌合体及其短序列等后得到 clean_tags, 在 97% 的相似度下将其聚类为用于分类的 OTU.

Chao 指数是用 Chao1 算法估计样本中所含 OTU 数目的指数, 是根据所测得的 tags 和 OTU 的数量以及相对比例来预测样品中微生物的种类, 表示菌群的丰度, 是基于已知结果所得相对值, 本次分析使用的计算公式如下所示:

$$S_{\text{Chao1}} = S_{\text{obs}} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)} \quad (1)$$

式中, S_{Chao1} 为估计的 OTU 数; S_{obs} 为实际观测到的 OTU 数; n_1 为只含有一条序列的 OTU 数目; n_2 为只含有两条序列的 OTU 数目;

香农多样性指数 (Shannon index) 是一个综合 OTU 丰度和 OTU 均匀度两方面因素的多样性指数. 其指数值越大, 则表示该样品中的物种越丰富, 其计算公式如下所示:

$$H' = - \sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

式中, H' 为香农指数 (Shannon index); S_{obs} 为实际测量出的 OUT 数目; n_i 为含有 i 条序列的 OUT 数目; N 为所有的序列数.

1.3.3 CCA 分析

利用 R 语言对微生物群落中的溶磷相关微生物与土壤样品中各形态磷进行 CCA 分析.

1.4 其他实验数据分析

其他实验数据用 Microsoft Excel 2016 及 SPSS 18.0 统计软件处理, 文中图形于软件 Origin 9 中完成.

2 结果与讨论

2.1 芦苇根际/非根际土壤中磷素形态季节性变化

2.1.1 芦苇根际/非根际土壤中无机磷形态分布

芦苇根际/非根际土壤不同无机磷组分含量随季节的变化如图 2 所示. 从中可知, 根际/非根际土壤中各形态磷随季节变化趋势大致相似, 且根际土壤总无机磷含量基本低于非根际. Ex-P 为土壤生物

有效磷,其含量随着季节的变化出现先降低后升高的趋势. 7 月 Ex-P 的含量显著低于其他月份,此时植物养分需求量大,磷素迅速被芦苇吸收. 10 月 Ex-P 含量又迅速增加,可能是由钙磷转化或死亡微生物的细胞降解释放导致^[19]. Fe-P 含量随着植物的生长呈现升高的趋势,且在芦苇根际土壤中的含量大于非根际土壤,可能是由于植物根系诱导作用下,土壤中会有一些难以被植物利用的磷释放并转

化结合成 Fe-P,储存于根际附近^[20]. Oc-P 含量随着植物生长出现先降低后升高的趋势,植物旺盛生长期,微生物的活性较高,根毛呼吸作用以及芦苇根系淹水条件下,使得 Eh 降低,最终导致一部分 Oc-P 分解转化为 Fe-P 和 Al-P. Ca-P 在土壤中的含量最高^[21],其含量在 7 月达到最低,受芦苇生长影响较大,可以被植物根系或微生物分泌物分解转化为植物可利用的磷.

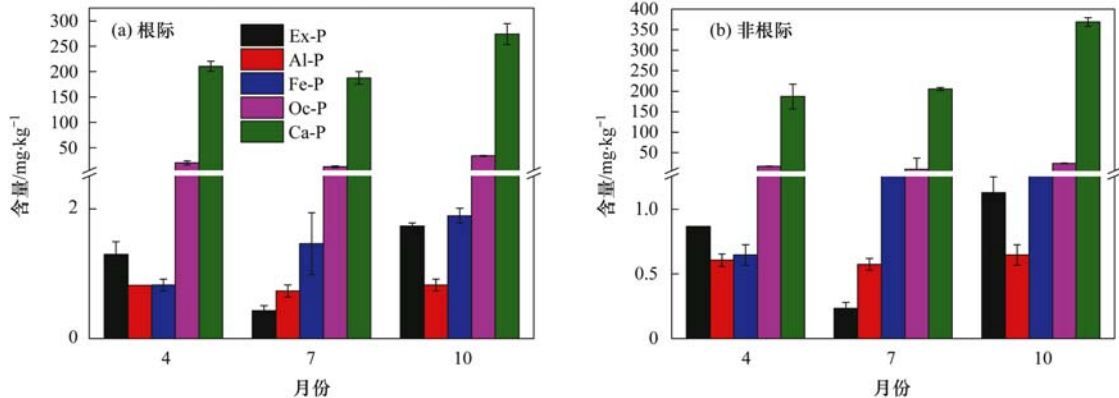


图2 芦苇根际/非根际土壤中各形态无机磷的季节分布

Fig. 2 Seasonal variations of IP contents in the *Phragmites communis* rhizosphere/non-rhizosphere soil of the Yeyahu Wetland

2.1.2 芦苇根际/非根际土壤中有机磷形态分布

芦苇根际/非根际土壤不同有机磷组分含量随季节变化如图3所示. 各形态有机磷随芦苇生长均呈现先降低后升高的趋势. 4 月芦苇处于萌芽阶段,微生物活性较低,土壤养分较为充足. 7 月芦苇生长状况良好,根系的泌氧功能有利于根际氧化还原电位的提高,促进了微生物的生长和繁殖,加速了磷素的转化利用^[4]. 10 月植物枯萎,微生物活动减弱,导致水体中的磷含量累积^[22]. 研究表明,土壤中的 L-OP 是活性最高的有机磷组分,主要成分为磷脂核酸等,易在微生物分泌的磷酸酶的作用下水解转化为植物生长可利用的正磷酸盐. ML-OP 的有

效性仅次于 L-OP,芦苇旺盛生长期对磷素的需求导致 ML-OP 向更有效的形态转化. MR-OP 会在根系及微生物分泌的有机酸、磷酸酶等物质的影响下转化为活性磷^[23]. HR-OP 随芦苇生长呈现明显的先降低后升高的趋势,其含量受枯落物影响较大^[24].

2.2 湿地芦苇根际/非根际土壤细菌多样性变化分析

2.2.1 湿地芦苇根际/非根际土壤细菌物种组成差异分析

芦苇根际/非根际土壤为微生物提供了不同的生长环境,所以微生物群落结构也存在差异. 各样品微生物在门水平上的群落结构组成如图4所示. 从中可以看出,微生物在群落中的优势程度随芦苇

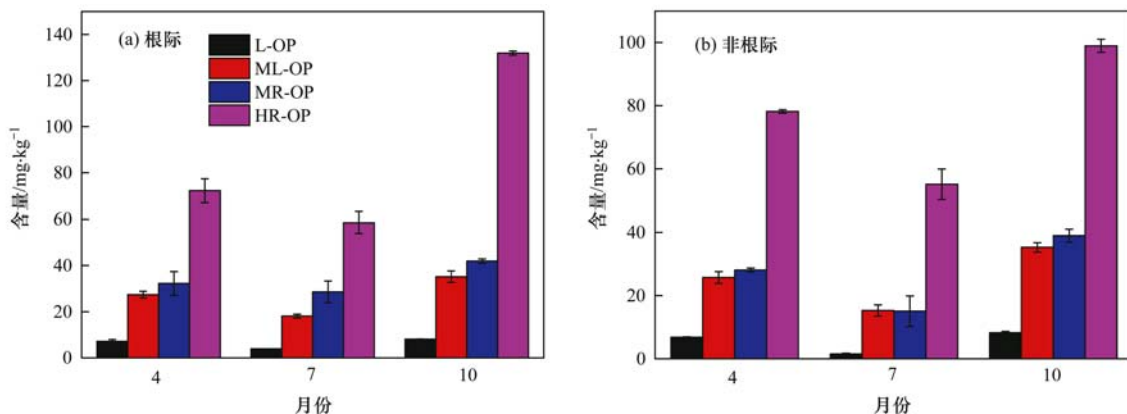


图3 芦苇根际/非根际土壤中各形态有机磷的季节分布

Fig. 3 Seasonal variations of OP contents in the *Phragmites communis* rhizosphere/non-rhizosphere soil of the Yeyahu Wetland

生长的季节变化而发生改变. 但总体来讲, 芦苇根际/非根际土壤中的微生物群落在门水平上有一定的稳定性, 其核心微生物群落结构只是在含量上发生改变.

从物种组成可知(图 4), 4、7、10 月, 在根际微生物中的优势门均为变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)和放线菌门(Actinobacteria), 这 4 个优势门在湿地土壤中可占微生物群落的 70% 以上. 这与已有的研究结果相似^[25,26]. 土壤样本中变形菌门(Proteobacteria)

的含量最高, 平均质量分数大于 20%, 并且不同的月份表现出不同的比例, 其中 10 月 Proteobacteria 门所占的比例最大, 可达 40%. 在同一个月份中, Proteobacteria 门在芦苇根际的含量总是高于非根际含量. 同样, 在所有样本中, Acidobacteria 门、Chloroflexi 门也表现出了较高的丰度, 但是 Acidobacteria 门和 Chloroflexi 门在芦苇根际的含量均低于非根际, 可能是由于芦苇根际分泌的酸性物质对 Acidobacteria 门和 Chloroflexi 门的细菌生长产生了不利影响^[27,28].

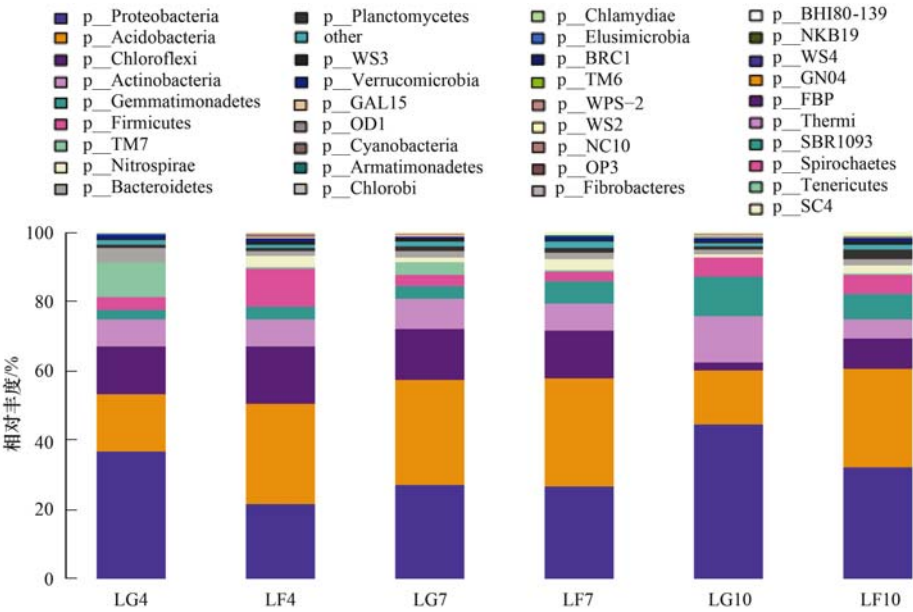


图 4 各样本在门水平上的群落结构组成

Fig. 4 Microbial community composition of the *Phragmites communis* rhizosphere/non-rhizosphere soil in the Yeyahu Wetland at the phyla level

由图 5 可知, 土壤样本中物种组成较为丰富, 包含了 58 个属, 含量比较高的 3 个属分别为 *Kaistobacter*、*Bacillus*、*Rhodoplanes*. 其中, 4 月 *Kaistobacter* 属在芦苇根际的含量明显高于非根际, 但是 *Bacillus* 在芦苇非根际的含量则高于根际, 这可能是由于根际土壤不同的生存环境所致.

2.2.2 芦苇根际/非根际细菌群落多样性分析

采用多样性指数进一步分析芦苇根际/非根际细菌群落的时空分布特征, 分析结果见表 2. 从表中可以看出, Chao 指数和 Shannon 指数受植物生长影响较大, $LG4 > LF4$, $LG7 < LF7$, $LG10 < LF10$, 4 月芦

苇根际的细菌多样性大于非根际, 但是 7 月和 10 月芦苇根际的细菌多样性反而小于非根际. 可能是随着植物的生长, 根系分泌物逐渐增多, 抑制了某些微生物的生长.

综合 Chao 指数和 Shannon 指数可知, $LG7 > LG10 > LG4$, $LF7 > LF10 > LF4$, 表明芦苇根际和非根际的多样性, 都表现出了 7 月大于 10 月, 大于 4 月的趋势. 这是由于微生物的种类会随着季节而变化, 7 月芦苇处于旺盛生长期, 土壤温度较高且水分充足, 有利于微生物生长. 从 7 月芦苇生长期进入 10 月成熟期, 芦苇根际土壤细菌物种多样性逐渐降

表 2 样品 α 多样性						
Table 2 The α -diversity of samples						
α 多样性	LG4	LF4	LG7	LF7	LG10	LF10
Chao	4 047.318	4 053.506	5 427.284	5 490.444	4 486.376	5 224.988
Shannon	9.777 562	9.623 588	9.957 312	10.116 06	9.783 455	10.026 78

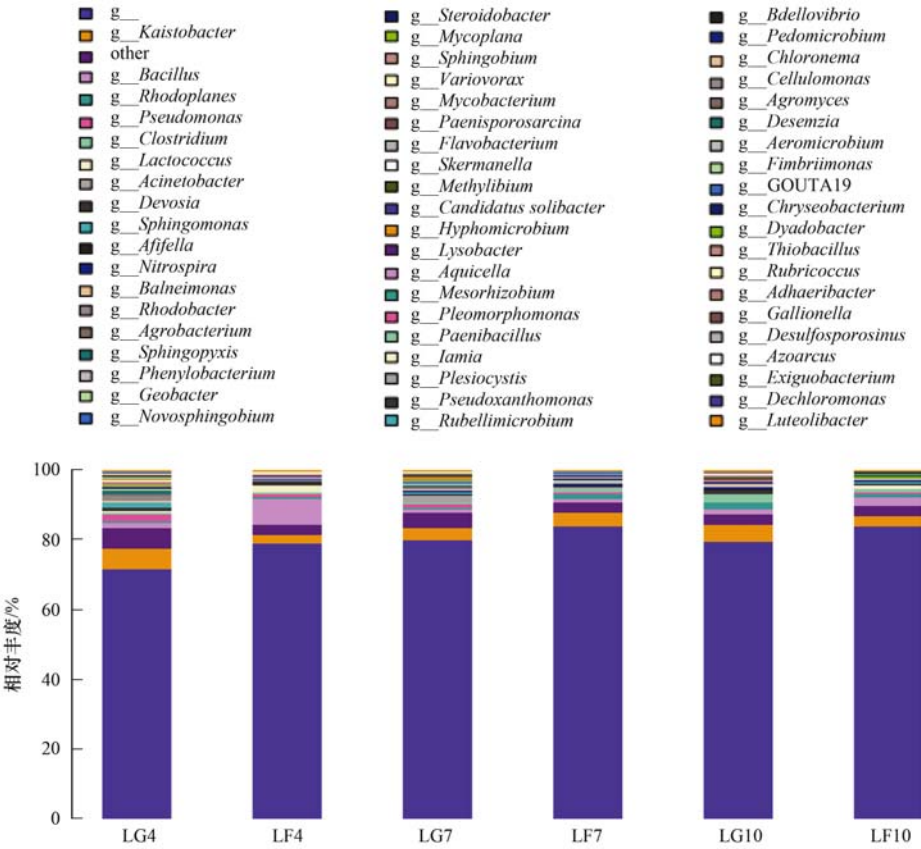


图5 各样本在属水平上的群落结构组成

Fig. 5 Microbial community composition of the *Phragmites communis* rhizosphere/non-rhizosphere soil in the Yeyahu Wetland at the genus level

低,这是因为生长期的芦苇生命活力较成熟期强,根系分泌应更加旺盛,可溶性根系分泌物为微生物提供了丰富的有效性碳源,促进了微生物的生长繁殖.总体来看,湿地芦苇细菌群落多样性受季节及植物根际环境的影响较大.

2.3 湿地芦苇根际/非根际土壤解磷微生物群落与磷形态关系分析

湿地土壤中能参与界面交换及生物可利用磷的量取决于土壤中磷的形态^[29].为了分析微生物在提高土壤磷有效性方面的作用,本文采用 CCA 分析法,研究了湿地芦苇根际/非根际微生物群落结构与土壤磷素形态的响应关系,在 CCA 分析图中,物种用蓝色箭头表示,物种之间夹角余弦值越大表示它们越相关.样品用圆圈表示,样品之间的距离越近则表示样品越相似.各形态磷用红色箭头表示,箭头长短表示某种形态磷与菌群分布的相关性大小,线越长,说明相关性越大,反之则小.结果如图 6、图 7 所示.

由图 6(a)可知,第一排序轴与 Fe-P 呈负相关,与 Ex-P、Oc-P、pH 呈正相关,第二排序轴与 Al-P、Ca-P 呈正相关.4 月种群集中分布于第一轴负半轴,7 月种群分布于第一轴正半轴,10 月种群沿第二

轴集中分布于第一轴负半轴,说明芦苇根际细菌的群落结构具有明显的季节差异^[30].由图 6(b)可知,第一排序轴与 Ex-P、Oc-P 呈负相关关系,与 Fe-P 呈正相关.第二排序轴与 Al-P、Ca-P 呈正相关,与 pH 呈负相关.4、7、10 月非根际土壤种群的分布也出现在不同的排序轴附近,但与无机磷形态和 pH 之间的关系与根际土壤菌群基本一致,说明芦苇非根际土壤中,微生物群落结构也具有明显的季节差异,其对无机磷含量的影响也较大.同时,4、7、10 月芦苇根际/非根际土壤菌群离排序轴的距离基本相一致,说明湿地系统中,这些菌群的结构基本稳定,可以保持相对稳定的丰度.

有研究表明,芽孢杆菌属(*Bacillus*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)为主要的解磷功能菌属^[31,32].这些菌属的大多数无机解磷菌可以分泌苹果酸、草酸、琥珀酸、柠檬酸、葡萄糖酸等有机酸^[33],可以跟土壤中铁铝磷酸盐形成配合物,从而在磷素的转化过程中起到重要作用.本次研究中也发现了大量的与解磷功能有关的菌属,如:*Bacillus* 属、*Burkholderia*

属、*Pseudomonas* 属、*Acinetobacter* 属等。由图 6(a) 可知, 芦苇根际土壤中 *Bacillus* 属、*Burkholderia* 属与 Al-P 和 Ca-P 呈正相关关系, 推测 *Bacillus* 属、*Burkholderia* 属可以通过自身的代谢过程分泌草酸和酒石酸^[34], 从而将土壤中难溶的 Al-P 和 Ca-P 转化为植物可利用的形态。 *Pseudomonas* 属与 Fe-P 呈正相关, 与 pH 呈负相关, 研究表明, *Pseudomonas* 属

微生物可以产生柠檬酸^[8], 有机酸的酸化作用降低了土壤的 pH^[35], 可知微生物代谢产物有机酸在 Fe-P 的转化过程中起到了重要的作用。 *Acinetobacter* 属与 Ex-P、Oc-P 和 pH 呈正相关。由图 6(b) 可知, *Pseudomonas* 属、*Bacillus* 属、*Acinetobacter* 属与 Fe-P 正相关, 这与根际结果相似, 说明 *Pseudomonas* 属对铁磷含量的影响较大。

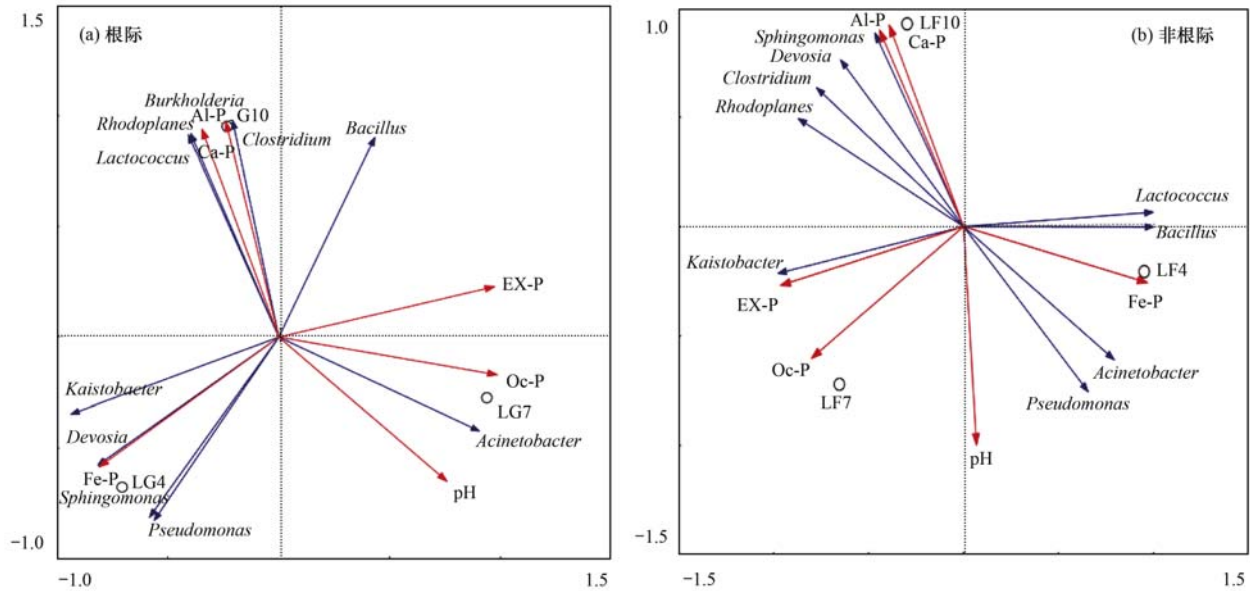


图 6 土壤样品中解磷微生物菌群与各形态无机磷的 CCA 分析

Fig. 6 CCA diagrams of special microbial flora and inorganic phosphorus fractions of the *Phragmites communis* rhizosphere/non-rhizosphere soil in the Yeyahu Wetland

在土壤磷循环中, 磷酸酶可以通过生物转化作用将有机磷转化为磷酸盐^[36], 土壤难溶性磷含量越高, 解磷菌的含量也越高, 分泌的磷酸酶多, 活性也

越强。 本研究中发现的解磷菌对有机磷的形态转化也起到了关键的作用。 由图 7(a) 可知, 第一排序轴与 MR-OP 呈负相关, 与 HR-OP 呈正相关。 第二排

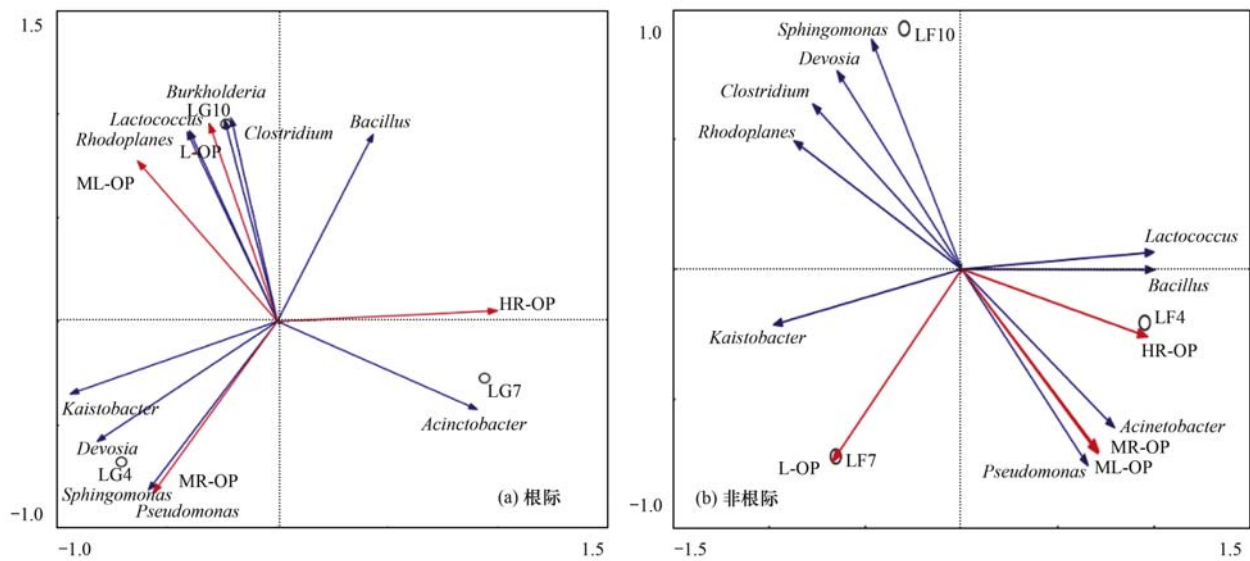


图 7 土壤样品解磷微生物菌群与各形态有机磷的 CCA 分析

Fig. 7 CCA diagrams of the special microbial flora and organic phosphorus fractions of the *Phragmites communis* rhizosphere/non-rhizosphere soil in the Yeyahu Wetland

序轴与 L-OP、ML-OP 呈正相关. 同时还发现, *Burkholderia* 属与 L-OP、ML-OP 呈正相关, *Bacillus* 属、*Acinetobacter* 属与 HR-OP 呈正相关. 由图 7(b) 可知, *Bacillus* 属、*Acinetobacter* 属、*Pseudomonas* 属与 ML-OP、MR-OP、HR-OP 呈正相关, 可能通过分泌磷酸酶等作用^[37] 将土壤中难以利用的有机磷转化为活性有机磷, 同时与环境因子相互影响, 改善了壤磷素水平.

3 结论

(1) 无机磷含量变化主要受芦苇生长状况影响, 在芦苇旺盛期达到最低, 且根际土壤中的总无机磷含量普遍低于非根际. 各形态有机磷在芦苇旺盛生长期均有不同程度的降低, 在芦苇衰亡期则呈逐渐积累的趋势.

(2) 湿地芦苇根际/非根际微生物群落结构受季节影响变化显著, 且根际和非根际的变化有所差异. 4、7、10 月在根际/非根际土壤微生物中的优势门均为 Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi、Actinobacteria, 但其含量受季节影响变化较大. 4 月芦苇根际的细菌多样性大于非根际, 但是 7 月和 10 月芦苇根际的细菌多样性反而小于非根际.

(3) 芦苇根际/非根际均检测出 *Bacillus*、*Enterobacter*、*Pseudomonas* 等与溶磷相关微生物种属, 同时与其生长环境中的各形态无机磷和有机磷表现出极大的相关性, 表明具有特殊功能的解磷微生物可以将土壤中难以利用的磷转化为活性磷, 同时与环境因子相互影响, 改善芦苇根际的磷素水平, 为利用植物修复湿地污染提供有效途径.

参考文献:

- [1] 吴洁婷. 湿生芦苇根际微生物群落结构与功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. 23-25.
- [2] 张丁予, 章婷曦, 董丹萍, 等. 沉水植物对沉积物微生物群落结构影响: 以洪泽湖湿地为例[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1734-1741.
Zhang D Y, Zhang T X, Dong D P, et al. Influence of submerged plants on microbial community structure in sediment of Hongze Lake[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1734-1741.
- [3] 熊薇, 郭逍宇, 赵霏, 等. 湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1443-1445.
Xiong W, Guo X Y, Zhao F, et al. Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1443-1445.
- [4] 李文华, 邵学新, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地土壤碱性磷酸酶活性分布及其与磷形态的关系[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12): 3341-3349.
- [5] Li W H, Shao X X, Wu M, et al. Soil alkaline phosphatase activity and its relationship with phosphorus forms of Hangzhou Bay Intertidal Wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(5): 1443-1445.
- [5] 吴振斌, 陈辉蓉, 贺锋, 等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报, 2001, 25(1): 28-35.
Wu Z B, Chen H R, He F, et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2001, 25(1): 28-35.
- [6] 李新, 焦燕, 代钢, 等. 内蒙古河套灌区不同盐碱程度的土壤细菌群落多样性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 249-260.
Li X, Jiao Y, Dai G, et al. Soil bacterial community diversity under different degrees of saline-alkaline in the Hetao Area of Inner Mongolia [J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 249-260.
- [7] Yücel Ç K. Characterization of microbial communities associated with the rhizosphere of wetland plants from the Sudbury region [D]. Ontario, Canada: The Faculty of Graduate Studies Laurentian University Sudbury, 2015.
- [8] Chen Y P, Rekha P D, Arun A B, et al. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 34(1): 33-41.
- [9] Ahemad M. Phosphate-solubilizing bacteria-assisted phytoremediation of metalliferous soils: a review[J]. 3 Biotech, 2014, 5(2): 111-121.
- [10] Yang P X, Ma L, Chen M H, et al. Phosphate solubilizing ability and phylogenetic diversity of bacteria from P-Rich soils around Dianchi Lake drainage area of China[J]. Pedosphere, 2012, 22(5): 707-716.
- [11] 胡智勇, 陆开宏, 梁晶晶, 等. 根际微生物在污染水体植物修复中的作用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5): 75-79.
Hu Z Y, Lu K H, Liang J J, et al. Role of rhizosphere microorganisms of aquatic plants in phytoremediation of wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(5): 75-79.
- [12] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the Soybean (Glycine max (L.) Merr.) root-soil interface [J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(6): 905-908.
- [13] Hoigné J. Chemistry of aqueous ozone and transformation of pollutants by ozonation and advanced oxidation processes [A]. In: Hrubec J (Ed.). The Handbook of Environmental Chemistry. Quality and Treatment of Drinking Water II [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 84-141.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Zhang J, Li M, Liu S, et al. Seasonal variations and bioavailability of inorganic phosphorus in soils of Yeyahu wetland in Beijing, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26(2): 181-192.
- [16] Li M, Zhang J, Wang G Q, et al. Organic phosphorus fractionation in wetland soil profiles by chemical extraction and phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy [J].

- Applied Geochemistry, 2013, **33**: 213-221.
- [17] 鲁如坤, 时正元, 顾益出. 土壤积累态磷研究——II. 磷肥的表观积累利用率[J]. 土壤, 1995, **27**(6): 286-289.
- [18] Andrade S A L, Silveira A P D, Mazzafera P. Arbuscular mycorrhiza alters metal uptake and the physiological response of *Coffea arabica* seedlings to increasing Zn and Cu concentrations in soil[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(22): 5381-5391.
- [19] Pettersson K. Phosphorus characteristics of settling and suspended particles in Lake Erken [J]. Science of the Total Environment, 2001, **226**(1-3): 79-86.
- [20] 刘晶晶, 李敏, 曲博, 等. 湿地挺水植物根系土壤中的磷形态变化与分析[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 2040-2046.
- Liu J J, Li M, Qu B, *et al.* The morphological changes and analysis of phosphorus in the root soil of emergent aquatic plant in the wetland[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(11): 2040-2046.
- [21] 马双丽, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3607-3614.
- Ma S L, Ni Z K, Wang S R, *et al.* Organic phosphorus forms in sediments and their relationship with the change of water level in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3607-3614.
- [22] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流沉积物中磷形态的垂向分布特征[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 55-63.
- Ji F, Wang G X, Han R M, *et al.* Vertical distribution characteristics of phosphorus fractions in the sediments of a rural malodorous black River in Taihu Lake Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(1): 55-63.
- [23] 杨洋, 刘其根, 胡忠军, 等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- Yang Y, Liu Q G, Hu Z J, *et al.* Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- [24] 王书航, 张博, 姜霞, 等. 采用连续分级提取法研究沉积物中磷的化学形态[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(9): 1382-1388.
- Wang S H, Zhang B, Jiang X, *et al.* Analysis of phosphorus fractions in sediments by sequential extraction [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(9): 1382-1388.
- [25] Peralta R M, Ahn C, Gillevet P M. Characterization of soil bacterial community structure and physicochemical properties in created and natural wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2013, **443**: 725-732.
- [26] Ansola G, Arroyo P, de Miera L E S. Characterisation of the soil bacterial community structure and composition of natural and constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2014, **473-474**: 63-71.
- [27] 李世阳. 芦苇菌根真菌依赖性及其联合环境修复功能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 28-30.
- [28] 贾璇, 任连海, 李鸣晓, 等. 芦苇酶解对氢气-甲烷联产过程微生物群落演替规律的影响[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(1): 138-145.
- Jia X, Ren L H, Li M X, *et al.* Effects of enzymatic pretreatment on microbial community succession in hydrogen and methane coproduction from reed straw [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(1): 138-145.
- [29] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(2): 150-153.
- Qin B Q, Fan C X. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake [J]. China Environmental Science, 2002, **22**(2): 150-153.
- [30] Chazarenc F, Brisson J, Merlin G. Seasonal and spatial changes of microorganism communities in constructed wetlands: a community level physiological profiling analysis [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2010, **2010**: 490240.
- [31] Qian Y C, Shi J Y, Chen Y X, *et al.* Characterization of phosphate solubilizing bacteria in sediments from a shallow eutrophic lake and a wetland: isolation, molecular identification and phosphorus release ability determination [J]. Molecules, 2010, **15**(11): 8518-8533.
- [32] Liu Z G, Li Y C, Zhang S A, *et al.* Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils [J]. Applied Soil Ecology, 2015, **96**: 217-224.
- [33] Gyaneshwar P, Kumar G N, Parekh L J, *et al.* Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants [J]. Plant and Soil, 2002, **245**(1): 83-93.
- [34] 潘虹, 曹翠玲, 林雁冰, 等. 石灰性土壤解磷细菌的鉴定及其对土壤无机磷形态的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, **43**(10): 114-122, 151.
- Pan H, Cao C L, Lin Y B, *et al.* Identification of PSB and their impact on soil inorganic phosphorus [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, **43**(10): 114-122, 151.
- [35] Behera B C, Singdevsachan S K, Mishra R R, *et al.* Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—a review [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2014, **3**(2): 97-110.
- [36] Fraser T, Lynch D H, Entz M H, *et al.* Linking alkaline phosphatase activity with bacterial *phoD* gene abundance in soil from a long-term management trial [J]. Geoderma, 2015, **257-258**: 115-122.
- [37] Jean N, Bogé G, Jamet J L, *et al.* Seasonal changes in zooplanktonic alkaline phosphatase activity in Toulon Bay (France): the role of *Cypris* larvae [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(3): 346-352.

CONTENTS

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