

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 ..... 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 ..... 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 ..... 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 ..... 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析 ..... 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 ..... 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 ..... 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 ..... 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 ..... 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO<sub>2</sub> 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 ..... 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 ..... 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 ..... 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  和  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  示踪北京城区河流硝酸盐来源 ..... 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 ..... 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 ..... 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 ..... 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 ..... 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

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 ..... 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 ..... 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 ..... 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 ..... 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 ..... 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 ..... 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 ..... 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 ..... 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 ..... 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 ..... 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 ..... 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 ..... 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 ..... 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 ..... 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的优势藻种筛选 ..... 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 ..... 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 ..... 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响 ..... 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 浓度特征 ..... 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 ..... 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 ..... 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 ..... 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 ..... 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 ..... 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对土壤重金属释放及形态变化的影响 ..... 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 ..... 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 ..... 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 ..... 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 ..... 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 ..... 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 ..... 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

# 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

张丁予<sup>1</sup>, 章婷曦<sup>1,2,3,4\*</sup>, 董丹萍<sup>1</sup>, 李德芳<sup>1</sup>, 王国祥<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023; 4. 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 应用磷脂脂肪酸 (PLFA) 方法分析洪泽湖湿地典型沉水植物菹草群丛、菹齿眼子菜群丛、菹-菹混丛对其根系沉积物微生物群落结构的影响, 以期了解沉水植物种类以及在不同生长时期对沉积物微生物群落结构的影响规律. 结果表明, 植物群丛根系沉积物 PLFA 总量在不同的时期发生了明显的变化, 而同一时期的不同群丛 PLFA 总量差异不显著. 沉积物微生物群落结构受沉水植物根系影响, 菹草群丛中  $G^+/G^-$  (革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌) 在 3 个不同生长时期比值为 0.74、1.35、1.26, 菹齿眼子菜群丛  $G^+/G^-$  比值为 0.89、0.98、1.49, 菹-菹混合群丛  $G^+/G^-$  比值为 0.95、1.39、1.35, 其  $G^+/G^-$  的变化和植物根系生长有密切关系. 沉积物微生物群落结构受环境因子的影响, 环境因子如 T、pH、TOC、DO 等与沉积物 PLFA 中特征磷脂存在相关性.

**关键词:** 磷脂脂肪酸; 微生物群落; 沉积物; 沉水植物; 生长周期

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1734-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.018

## Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake

ZHANG Ding-yu<sup>1</sup>, ZHANG Ting-xi<sup>1,2,3,4\*</sup>, DONG Dan-ping<sup>1</sup>, LI De-fang<sup>1</sup>, WANG Guo-xiang<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change & Ecological Construction, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Phospholipid fatty acids (PLFAs) method was applied to analyze the influence of submerged plants on sediment microbial community structure, in order to investigate the changes of sediment microbial community structure for different kinds of the submerged plants in different growth periods. Particularly, *Potamogeton crispus* L., *Potamogeton pectinatus* L and the mixed group were chosen as the typical submerged plants in Hongze Lake for investigation in this paper. The results indicated that the change of total PLFAs in different periods was significant, on the contrary, the PLFA change for different groups in the same period was insignificant. The values of  $G^+$  PLFA/ $G^-$  PLFA in the submerged plant group were also highly related to the different growth periods, which demonstrated that the root function of the submerged plant had a severe impact on the microbial community in sediment. Furthermore, some environmental factors, such as Temperature, pH, TOC and DO, were correlated to characteristic phospholipid of PLFAs in sediment, which means the environmental factors could also affect the microbial community structure.

**Key words:** phospholipid fatty acids (PLFAs); microbial community; sediment; submerged plant; growth period

水体富营养化是我国湖泊面临的主要环境问题, 改善湖泊富营养化现状成为水环境修复的当务之急<sup>[1~4]</sup>. 磷是湖泊富营养化的限制因子, 湖泊沉积物是内源磷的主要来源, 沉积物中磷含量是湖泊富营养化的主要指示参数<sup>[5]</sup>.

近年来, 恢复与重建沉水植物作为控制湖泊富营养化的重要途径, 已经得到了广泛应用<sup>[6,7]</sup>. 沉水植物作为湖泊生态系统重要的组成部分, 不仅可以吸收水体中的磷元素, 而且根系泌氧给沉积物创造有氧环境, 改变沉积物理化因子从而影响微生物群落结构, 而这种微生物群落结构的变化是影响沉积

物中磷营养盐形态转换的重要因素之一. 因此, 深入研究沉水植物对微生物群落结构变化的影响, 对于改变沉积物中磷元素含量并进一步缓解湖泊水体的富营养化问题, 有着重要的意义<sup>[8,9]</sup>. 磷脂脂肪酸 (phospholipid fatty acid, PLFA), 是一种用来表征微生物群落结构的方法, 可以作为微生物生物量和群

收稿日期: 2015-11-18; 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41303058, 41573061); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省太湖水污染治理专项 (TH2014402)

作者简介: 张丁予 (1991~), 女, 硕士, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: 841575181@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhangtingxi@njnu.edu.cn

落结构变化的特征微生物标记物<sup>[10]</sup>. Zhang 等<sup>[11]</sup>利用磷脂脂肪酸方法研究了不同年限的黄土高原两种优势植物根系土壤微生物群落结构特征, 闫法军等<sup>[12]</sup>对刺参池塘底质微生物群落的研究也表明刺参池塘底泥和附着基微生物功能多样性具有显著的不同季节变化. 目前, PLFA 方法国内外多用于土壤微生物群落的检测<sup>[13~16]</sup>, 应用于湖泊沉积物微生物群落结构的研究较少.

当前, 针对湖泊沉积物微生物结构变化的研究主要着眼于比较季节变化的影响<sup>[17,18]</sup>, 野外实验很少考虑植物在不同生长周期的微生物群落结构变化趋势, 因为植物群丛萌芽和衰亡时存在在湖面以下, 很难在野外的环境条件下确定这个植物具体位置, 而本研究选取的洪泽湖保护湿地由于范围小, 水位较浅, 而且没有外来干扰, 加上 GPS 的定位结合人工定点定位能够较准确地确定采样点, 对于定点分期采样有很大优势. 植物的根系随着生长周期的变化会影响营养盐的循环, 而磷营养盐的循环与微生物群落结构的变化密切相关. 因此, 本研究利用 PLFA 方法对洪泽湖保护湿地沉水植物根系沉积物群落结构进行分析, 探究沉积物微生物群落在水生

植物影响下不同生长周期的结构变化以及其与环境因子之间的影响关系.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概述

洪泽湖, 中国第四大淡水湖, 平均深度 3~4 m, 地处江苏省西部淮河下游, 苏北平原中部西侧, 淮安、宿迁两市境内, 如图 1 所示的区域(502-菹混丛、503-菹草群丛、504-菹齿眼子菜群丛), 具有完整的生态系统, 植物物种丰富. 研究此区域既能够摒除外来干扰, 单纯研究植物受自然环境下的影响, 也能够弥补室内模拟实验生态系统不健全的不足.

洪泽湖保护湿地湖边沉水植物以菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 和菹齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus* L.) 为优势种, 菹草具有能够抑制藻类的过量生长、增加水体透明度、耐污能力高、适应能力强的特点<sup>[19]</sup>, 菹齿眼子菜具有生态幅度宽、耐污和适阴性强较强、能够净化水质和抗风浪的特点<sup>[20]</sup>, 因此两者在水生植被修复方面发挥着先锋物种的作用.

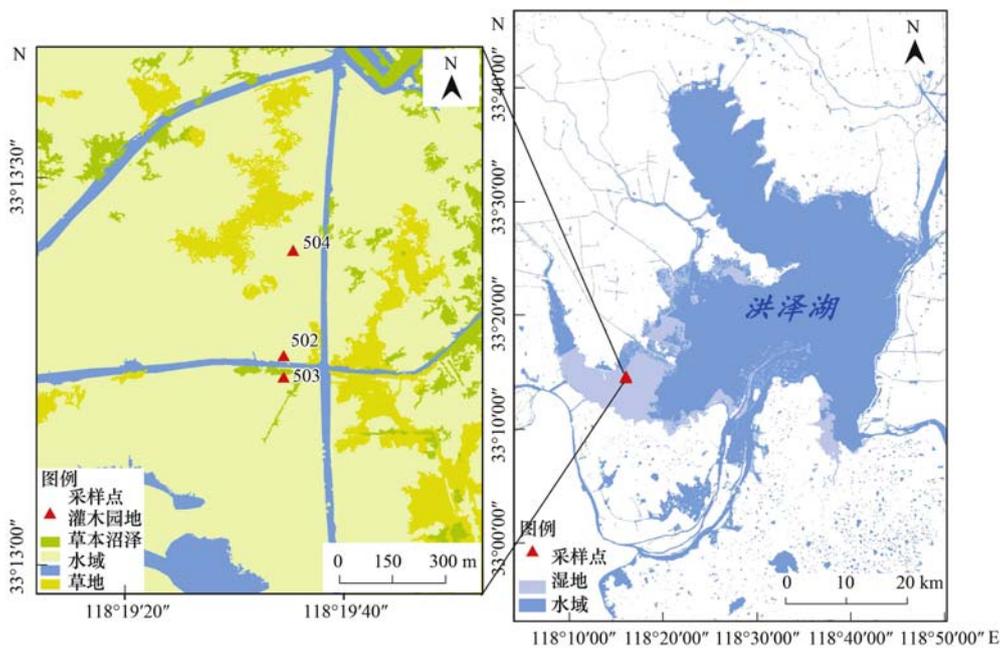


图 1 洪泽湖示意

Fig. 1 Map of Hongze Lake

### 1.2 样品采集

本次采样选取菹草群丛、菹齿眼子菜群丛和两者混丛作为研究对象, 于 2014 年 3 月末(菹草旺盛期、菹齿眼子菜生长初期)、5 月末(菹草衰亡期、菹齿眼子菜旺盛期)和次年 2 月初(菹草生长初期、

菹齿眼子菜萌芽期)分别在其群落内部分层采集沉积物样品. 采样点分别为菹草群丛 (HZZ, 33° 13' 20. 43"N, 118° 19' 16. 14"E)、菹齿眼子菜群丛 (HZB, 33° 13' 29. 73"N, 118° 19' 15. 45"E)、混合群丛 (HZH, 33° 13' 21. 86" N, 118° 19' 16. 93"E), 每个

采样点采集 3 个样品作为平行. 使用彼得森采样器采样,并将底泥装入聚乙烯自封袋中,放入冷藏箱 4℃ 保存. 带回实验室后样品经冷冻干燥后在 -70℃ 保存,一周内完成 PLFA 测定及磷形态测定.

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 PLFA 方法

参照文献[21]的方法加以改进.

(1) 提取 称取 4 g 冻干的沉积物土样,每个样品加 20 mL 的提取剂(柠檬酸盐缓冲液:氯仿:甲醇=0.8:1:2)避光振荡 2 h 后,离心取上清液,加入 3.6 mL 柠檬酸和 4 mL 氯仿,充分混合避光静置 12 h,吸取下层氯仿相于干净玻璃管,氮吹至干.

(2) 分离 分别用 5 mL 丙酮、三氯甲烷将固相萃取小柱(Supelco Discovery SPE DSC-Si Silicatube, 3 mL, 500 mg)活化,用总计 1 mL 的氯仿将玻璃管提取物转移到萃取小柱,然后依次加入 5 mL 氯仿并弃去,5 mL 丙酮并弃去,5 mL 甲醇并收集(此步提取磷脂颗粒),收集的甲醇相在氮气下吹干.

(3) 甲脂化 向吹干样品中加入 1 mL 甲醇:甲苯(1:1)和 1 mL 0.2 mol·L<sup>-1</sup> KOH 甲醇溶液,摇匀后 35℃ 水浴 15 min,待冷却到室温后,顺次加入 2 mL 去离子水,0.3 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> HAc,2 mL 正己烷,漩涡混合 30s,然后以 710 g·min<sup>-1</sup> 离心力离心 5 min,重复提取一次,合并两次提取的正己烷相,氮气下吹干,-20℃ 冷冻保存.

磷脂脂肪酸数据测定采用 GC 7890 N 型气相色谱仪(美国 Agilent 公司),包括全自动进样装置、石英毛细管柱及氢火焰离子化检测器,色谱柱:P/N 19091J-413,HP-5 毛细柱:30 m,320 μm × 0.25 μm. GC 条件:进样口温度 250℃,柱温 300℃,载气为高纯氮气(20 mL·min<sup>-1</sup>),不分流进样,进样量 1 μL. 磷脂脂肪酸的鉴定采用美国 MIDI 公司开发的基于细菌细胞磷脂脂肪酸成分鉴定的 Sherlock MIS 系统(Sherlock Microbial Identification System).

PLFA 的命名采用以下原则:以总碳数:双键数 ω 双键距离分子末端位置命名,前缀 a 和 i 分别表示支链的反异构和异构,cy 则表示环丙烷脂肪酸;后缀 c 表示顺式,t 表示反式;10 Me 表示一个甲基侧链在距分子末端第 10 个碳原子上,br 表示不知道甲基的位置. 革兰氏阳性菌(G<sup>+</sup>)的磷脂脂肪酸有 14:0、16:0、i15:0、a15:0、15:0、i16:0、a17:0、i17:0 等,革兰氏阴性菌(G<sup>-</sup>)的磷脂脂肪酸有 14:1ω5c、15:1ω6c、16:12OH、cy17:0、18:1ω5c、18:1ω7c、18:1ω7t、

11Me18:1ω7c、cy19:0 等,真菌的磷脂脂肪酸有 16:1ω5、18:1ω9c、18:2ω6,9c、18:3ω6c(6,9,12),放线菌的磷脂脂肪酸有 10Me16:0、10Me17:0、10Me18:0,此外部分磷脂脂肪酸仅特异性地存在于某类群微生物的细胞膜中如好氧菌的磷脂脂肪酸有 16:1ω7、16:1ω7t、18:1ω7,厌氧菌的磷脂脂肪酸有 cy17:0、cy19:0<sup>[22,23]</sup>.

#### 1.3.2 相关指标分析方法

分别对采样点区域水体的 pH、Eh、DO 指标进行测定,分别使用 HACH PHC301、MTC301、LDO101 电极测定,TOC 测定使用型号为 multi N/C 3100 德国耶拿 TOC 仪.

#### 1.4 数据处理

采用 PRIMER 5 软件做多维标度法(MDS)分析和 Canoco 软件进行 RDA 分析. 数据分析采用 Excel 2007 和 SPSS v18.0 软件完成. 采用单因素方差分析(ANOVA)中的最小显著性法(LSD)进行方差分析和差异显著性检验( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 不同沉水植物群丛根系沉积物 PLFA 总量变化

分析 3 种植物群丛不同时期 PLFA 总量变化,并对其作方差分析(ANOVA)以及 LSD 进行差异显著性检验.

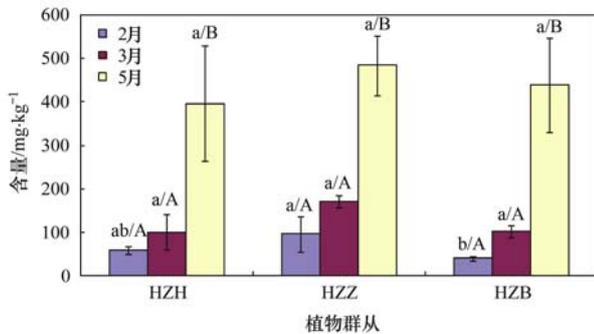
图 2 为混合群丛、菹草群丛、菹齿眼子菜群丛在其不同生长周期的其根系沉积物 PLFA 总量的变化. 从中可以看出随着时间变化,PLFA 总量呈现增加趋势,混合群丛、菹草群丛和菹齿眼子菜群中沉积物 PLFA 总量在 2 月和 3 月无显著差异,但 2 月和 3 月均与 5 月有显著性差异.

在 2 月,菹草群丛沉积物 PLFA 总量与菹齿眼子菜群丛沉积物 PLFA 总量有显著差异,而两者均与混合群丛沉积物无显著差异,在 3 月和 5 月,3 种植物群丛之间均无显著性差异. 在 2 月,同样的温度条件下菹草群丛的沉积物 PLFA 总量与菹齿眼子菜沉积物中的总量差异显著,这是由于此时菹草处于生长初期,根系在沉积物中已经开始生长,而且植物根系分泌物中的种类多达 200 种以上,包括糖、氨基酸、有机酸、生物酶等物质,这些物质为微生物的生存创造良好的条件<sup>[24]</sup>.

在 3 月时,菹草群丛沉积物 PLFA 总量增加 73.0%,而菹齿眼子菜群丛沉积物 PLFA 总量增加 153.0%,可能是由于菹草在之前生长阶段沉积物中 PLFA 总量已累积,而且菹草根系组织较菹齿眼子

菜根系组织欠发达,根系发达的植物其分泌的营养物质可以有效地提高根际微生物的数量<sup>[25]</sup>。

5 月菹齿眼子菜进入旺盛期,沉积物中 PLFA 总量达到  $440.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 较生长初期增加了 330.0%, 菹草进入衰亡期沉积物 PLFA 总量达到  $483.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 较旺盛期增加 181.0%, 菹草衰亡时期和菹齿眼子菜旺盛时期沉积物 PLFA 总量差异不明显,是由于菹草衰败的残体进入沉积物表层,植物残体生物量的增大可能会影响微生物群落数量<sup>[26~28]</sup>,残体分解过程会诱发大量微生物生成以加速其分解,且残体会造成沉积物表面有机质含量增加为微生物提供丰富底物。



不同小写字母表示同一时期不同群丛差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一群丛不同时期差异显著 ( $P < 0.05$ )

图2 不同生长周期各植物群丛沉积物 PLFA 含量

Fig. 2 Content of PLFA in sediment during different growth periods of the plants

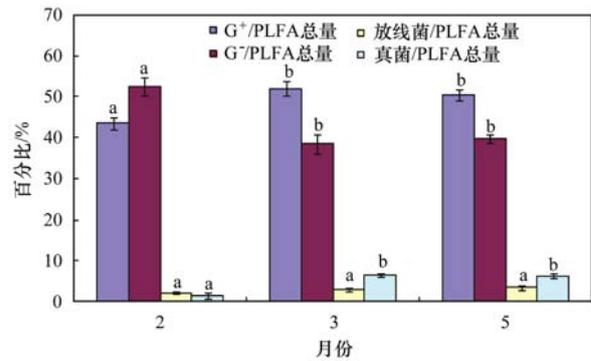
混合群丛此时主要受菹草影响,其沉积物 PLFA 总量介于菹齿眼子菜和菹草群丛沉积物 PLFA 总量之间,可能是由于混合群丛中菹草在混丛中覆盖密度低,分布较分散,根系影响作用不够明显;在 3 月和 5 月时,混合群丛沉积物微生物总量并非处于两种单一群丛总量之间,可能是两种植物根系分泌不同物质,这些物种之间互相影响从而反映到微生物数量,后期菹草衰亡时,菹齿眼子菜正处于旺盛期能够有效地吸收残体中的有机质,形成更加复杂的环境影响微生物的活动。

## 2.2 不同植物群丛根系沉积物微生物群落结构变化

### 2.2.1 不同时期 3 种群丛根系沉积物微生物结构比例变化

比较分析菹草群丛不同时期表层沉积物各类微生物的百分比含量变化,如图 3,在菹草群丛的生长周期中其沉积物中细菌含量占主要成分。在菹草的生长初期(2 月)、旺盛期(3 月)、衰亡期(5 月)其沉积物中  $G^+/G^-$  (革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌) 比值变化为 0.83、1.35、1.26。  $G^-$  比例在菹草的生长周期

呈现先降低后升高趋势,  $G^+$  比例在菹草的生长周期呈现先升高后降低趋势,放线菌比例出现小幅度增加,真菌比例先增加后降低。对菹草群丛沉积物微生物群落结构作方差分析,结果表明在菹草群丛沉积物中,  $G^+$  在 2 月与 3 月、5 月均差异显著,其  $G^-$  在 2 月与 3 月、5 月均差异显著;放线菌随时间变化无显著差异,真菌在 2 月与 3 月、5 月差异显著。



不同小写字母表示同一类型微生物结构在不同时期的差异显著,下同

图3 菹草群丛沉积物微生物百分比分布

Fig. 3 Distribution of microbial percentages in sediment of *Potamogeton crispus* L.

比较分析菹齿眼子菜群丛不同时期表层沉积物各类微生物的百分比含量变化,如图 4,在菹齿眼子菜群丛的生长周期中沉积物中细菌含量占主要成分。在菹齿眼子菜的萌芽期(2 月)、生长初期(3 月)、旺盛期(5 月)其沉积物中  $G^+/G^-$  比值变化为 0.89、0.98、1.49。  $G^-$  比例在菹齿眼子菜的生长周期呈现连续降低趋势,  $G^+$  比例在菹齿眼子菜的生长周期呈现连续升高趋势,放线菌比例先升高后小幅降低,真菌比例先增加后降低。对菹-菹混合群丛沉积物微生物群落结构作方差分析,结果表明在混合群丛中,混合群丛沉积物中的  $G^+$  在 2 月与 5 月差异显著,其  $G^-$  在 2 月与 3 月、5 月显著差异,放线菌在 2 月和 3 月有显著差异,真菌在 2 月与 3 月、5 月差异显著。

比较分析菹-菹混合群丛不同时期表层沉积物各类微生物的百分比含量变化,如图 5,在混合群丛的生长周期中沉积物中细菌含量占主要成分。在混丛生长的 2、3、5 月其沉积物中  $G^+/G^-$  比值变化为 0.73、1.25、1.39。  $G^-$  比例在菹-菹混合群丛的生长周期呈现连续降低趋势,  $G^+$  比例在菹-菹混合群丛的生长周期呈现连续增加趋势,放线菌比例先增加后降低,真菌比例先增加后降低。对菹齿眼子菜群丛沉积物微生物群落结构作方差分析,结果表明在

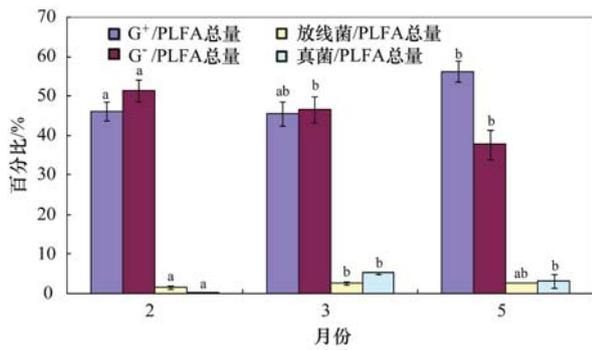


图 4 菹齿眼子菜群丛沉积物微生物百分比分布  
Fig. 4 Distribution of microbial percentages in sediment of *Potamogeton pectinatus* L.

菹齿眼子菜群丛沉积物中, G<sup>+</sup> 在 2 月、3 月均与 5 月差异显著, 而其 G<sup>-</sup> 只在 2 月和 5 月有显著性差异; 放线菌随时间变化无显著差异, 真菌在 2 月和 5 月无显著差异, 但这两者均与 3 月有显著性差异。

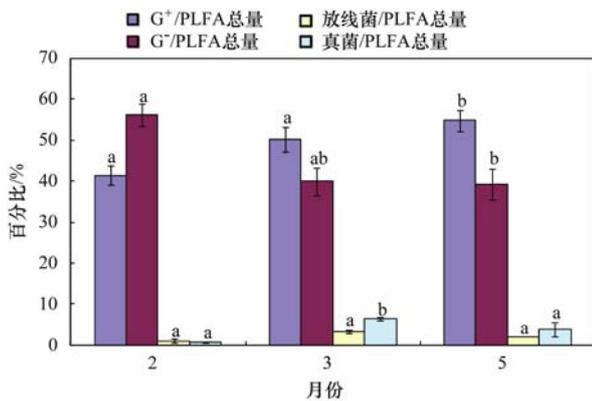


图 5 菹-菹混合群丛沉积物微生物百分比分布  
Fig. 5 Distribution of microbial percentages in sediment of mixed group

一般认为沉水植物扎根于沉积物, 能够通过根际作用促进根际微生物生长, 改变微生物群落结构<sup>[29]</sup>。沉积物中 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 比值在菹齿眼子菜和混丛的生长周期中呈现连续增加趋势, 而在菹草群丛沉积物中呈现先升高后降低的趋势。一般认为 G<sup>-</sup> 相对于其他细菌对养分的变化更加敏感, 且认为 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 与有机质含量负相关关系<sup>[30]</sup>, 菹草 5 月时其沉积物中 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 略微降低, 由于此时菹草处于衰亡时期, 沉积物表层累积菹草残体导致表层沉积物有机质含量升高。在菹齿眼子菜 5 月时, 其沉积物中 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 增加, 可能由于菹齿眼子菜此时处于生长旺盛期, 植物生长过程对有机质有吸收作用。

菹齿眼子菜旺盛期跟其生长初期的沉积物微生物结构差异比菹草旺盛期跟其生长初期的沉积物微生物结构差异显著。可能由于菹齿眼子菜在沉积物

中的根系比菹草发达, 对周围理化环境的影响较大, 而且两种植物群丛的生长周期不一致且温度的变化对其也有调控影响。

### 2.2.2 不同时期的 3 种群丛沉积物微生物群落结构差异分析

对不同时期 3 种不同植物群丛沉积物中 PLFA 数据利用 PRIMER 5 软件做多维标度法 (MDS) 分析, 结果如图 6 所示 (HZZ: 洪泽湖菹草群丛 HZB: 洪泽湖菹齿眼子菜群丛 HZH: 洪泽湖菹-菹混合群丛)。从中可以看出微生物的组成结构在不同的时期发生了明显的变化, 不同时期对微生物结构的影响远大于植物群丛本身, 同一时期不同植物群丛可以聚类, 而不同时期同一群丛差异较大, 无法聚类。进一步对 PLFA 的数据进行 SIMPER 分析, 得到的分析报告结果如表 1 所示。2 月时期的 3 种群丛沉积物微生物相似度为 82.57%, 其中对相似度贡献最大的磷脂脂肪酸为 10:0 3OH、13:0 anteiso、12:0 iso 3OH、14:0 iso 等; 3 月时期的 3 种群丛相似度为 84.51%, 其中对相似度贡献最大的磷脂脂肪酸为 16:00、16:1ω7c、18:1ω7c; 5 月时期的 3 种群丛沉积物微生物相似度为 80.23%, 其中对相似度贡献最大的磷脂脂肪酸为 16:00、16:1ω7c、18:1ω7c。2 月和 3 月的沉积物微生物组成结构的差异度为 67.39%, 其中对差异度贡献最大的磷脂脂肪酸为 16:00、10:0 3OH、16:1ω7c、13:0 anteiso、18:1ω7c 等; 2 月和 5 月的沉积物微生物组成结构的差异度为 68.41%, 其中对差异度贡献最大的磷脂为 16:00、10:0 3OH、13:0 anteiso、16:1ω7c、12:0 iso 3OH 等; 3 月和 5 月沉积物的微生物组成结构的差异度为 19.00%, 其中对差异度贡献最大的磷脂脂肪酸为 16:1ω7c、16:00、19:1 iso I、18:1ω7c、18:00 等。

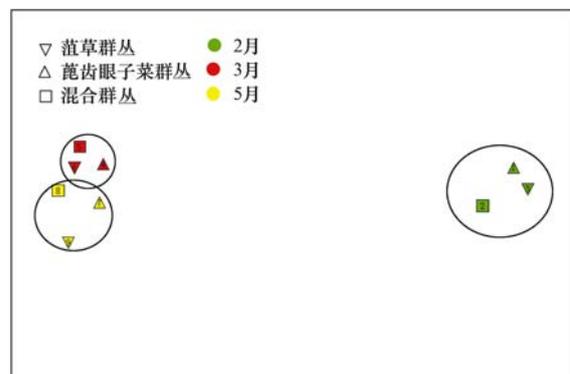


图 6 不同季节不同植物群丛沉积物微生物 MDS 分析  
Fig. 6 MDS analysis of microorganisms in sediment for different groups during different seasons

表 1 不同季节不同植物群丛沉积物微生物 SIMPER 分析

Table 1 SIMPER analysis of microorganisms in sediment for different groups during different seasons

月份	相似度/%	磷脂脂肪酸	月份	差异度/%	磷脂脂肪酸
2	82.57	10:0 3OH 13:0 anteiso 12:0 iso 3OH 14:0 iso	2、3	67.39	16:00 10:0 3OH 16:1 $\omega$ 7c 13:0 anteiso 18:1 $\omega$ 7c
3	84.51	16:00 16:1 $\omega$ 7c 18:1 $\omega$ 7c	2、5	68.41	16:00 10:0 3OH 13:0 anteiso 16:1 $\omega$ 7c 12:0 iso 3OH
5	80.23	16:00 16:1 $\omega$ 7c 18:1 $\omega$ 7c	3、5	19.00	16:1 $\omega$ 7c 16:00 19:1 iso I 18:1 $\omega$ 7c 18:00

综合 MDS 和 SIMPER 分析的结果可以看出, 在 3 种植物群丛中沉积物微生物群落结构随着生长周期变化而变化, 而且时间越长差异度越显著. 有研究表明微生物群落结构组成存在明显时间性变动<sup>[31]</sup>, 而且植物根系活力也能够增强微生物的生长, 改变根系微生物群落结构<sup>[32]</sup>.

### 2.3 沉积物中微生物群落结构和环境因子相关性研究

#### 2.3.1 理化指标变化

3 个采样点在 2、3 以及 5 月水温、DO、Eh、pH 的理化指标如表 2 所示. 从中可以看出, 从 2~5 月随着气温的回升, 水体的温度也在增加. 在 2 月植物刚萌芽阶段, 菹齿眼子菜群丛、菹草群丛、菹-菹混丛的溶解氧 (DO) 相差不多, 但在 3 月末, 此时菹草处于旺盛期, 单一的菹草群丛明显比其他群丛 DO 高, 这是因为植物在旺盛期, 叶片较密, 其光合作用释放的氧气显著大于呼吸作用消耗的氧气. 但在 5 月末此时处于菹草衰亡期和菹齿眼子菜旺盛时期, 菹草群丛的溶解氧远低于菹齿眼子菜群丛, 这是因为在菹草衰亡期其叶片枯萎进行光合作用的能力较弱, 而且叶片及沉积物根系腐烂分解需要消耗大量溶解氧<sup>[33]</sup>. 在 2~5 月期间, 菹草从生长初期到衰亡期, pH 值出现先增加后降低的趋势, 菹齿眼子菜从萌芽期到生长旺盛期 pH 一直呈现增加趋势, 说明植物的生长可以提高水体的 pH<sup>[34]</sup>.

#### 2.3.2 沉积物中微生物群落结构和环境因子的影响关系

对环境因子和微生物群落结构使用 Canoco 软件进行 RDA 分析, 结果如图 7 所示, 其中代表环境

表 2 沉水植物群丛水体理化指标

Table 2 Physical and chemical indicators in the water with different submerged plants

采样点	指标	2 月	3 月	5 月
HZH	T/°C	4.2	15.6	27.1
	pH	8.1	8.78	9.45
	DO/mg·L <sup>-1</sup>	10.62	6.09	8.1
	Eh/mV	156.0	—	-145.4
HZZ	T/°C	4.2	15.6	26.7
	pH	8.26	9.6	8.85
	DO/mg·L <sup>-1</sup>	11.09	10.08	5.88
HZB	Eh/mV	125.2	—	-109.4
	T/°C	4.7	15.7	28.9
	pH	8.19	8.75	9.77
	DO/mg·L <sup>-1</sup>	10.82	7.84	17.6
	Eh/mV	134	—	-186.9

因子和磷脂脂肪酸的直线方向越相近, 表明二者相关程度越高; 若代表环境因子和磷脂脂肪酸的直线箭头方向相同, 表明正相关, 否则负相关. 首先对环境因子和微生物群落结构作趋势对应分析 (DCA) 可知, 第一排序轴的梯度范围小于 3 (lengths of gradient = 1.359), 则后续分析采用 RDA 进行评估. 结果显示第一象限解释 87.5%, 第二象限解释 5.7%, 4 个象限共解释 97.8%. 结果显示: 18:2 $\omega$ 6c、16:1 $\omega$ 5c 所代表的真菌、16:0 10-methyl 所代表的放线菌以及 16:00、17:0 iso 等磷脂脂肪酸与 T、pH 以及季节变化这类环境因子呈正相关, 其中 17:0 iso 这类磷脂脂肪酸与环境因子呈极显著正相关. DO 与 17:0 10-methyl 这类代表放线菌的磷脂脂肪酸呈正相关, 与 14:00、18:00 这类磷脂脂肪酸呈负相关性. 18:1 $\omega$ 7c 11-methyl、17:0 cyclo、18:

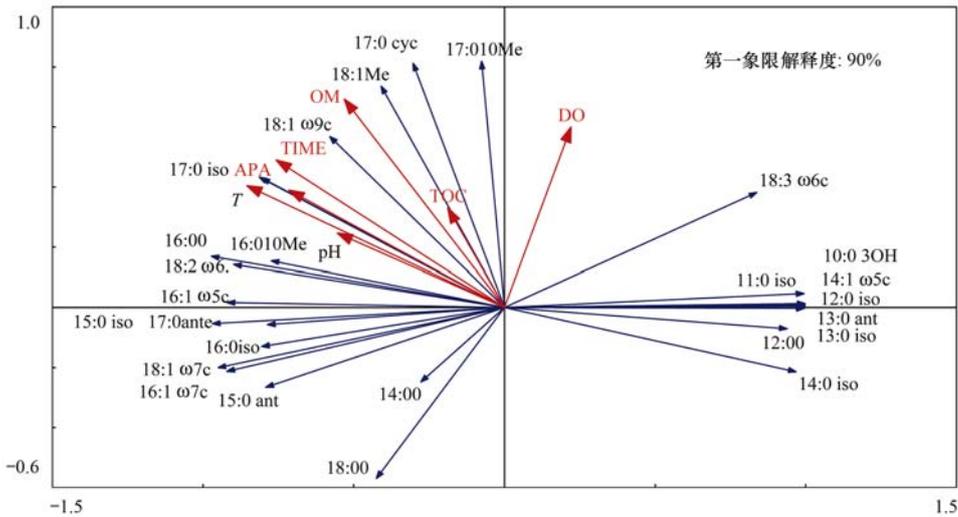


图7 环境因子和微生物群落结构的 RDA 分析

Fig. 7 RDA analysis of environmental factors and microbial community structure

1 $\omega$ 9c 磷脂脂肪酸与 TOC 和有机质有着显著正相关,其中 18:1 $\omega$ 7c 11-methyl 所代表的放线菌与 TOC 呈极显著正相关,说明环境因子的改变一定程度上影响微生物群落结构的变化<sup>[32]</sup>。

以下针对部分代表性磷脂脂肪酸和环境因子间关系进行深入讨论。图7中 18:1 $\omega$ 7c 11-methyl 代表  $G^-$ 、17:0 cyclo 代表的厌氧菌、18:1 $\omega$ 9c 代表的真菌与 TOC 有正相关关系,这是因为植物在衰败时,真菌是分解有机质的主要微生物类群,而且群丛内累积大量植物残体造成 TOC 含量升高,此时为了加快有机质的分解会产生大量真菌,真菌在分解有机质时需要消耗氧气,造成周围区域呈现缺氧状态,因此厌氧菌的特征磷脂脂肪酸显示出了与 TOC 很好的相关性; 17:0 10-methyl 代表放线菌的磷脂脂肪酸与 DO 呈正相关,可能是因为放线菌为专性好氧菌,能产生各种酶和维生素。此外,DO 也显示出了与 17:0 cyclo 这类  $G^-$  呈正相关性,与 14:00、18:00 这类  $G^+$  呈负相关性,比照前文提到衰亡期时  $G^+$  比例减少, $G^-$  比例增加,因为衰亡期时植物无法进行光合作用且需要分解植物残体需要消耗 DO,当 DO 低的时候显示与  $G^-$  正相关关系,与  $G^+$  负相关关系; 16:00、17:0 iso 代表的  $G^+$  与 pH 呈正相关关系,是由于植物的根系能够分泌有机酸使得 pH 值降低,革兰氏阳性菌( $G^+$ )更易在酸性条件下生长,细菌受 pH 的影响,这与郭子武等研究结果一致<sup>[35]</sup>。温度( $T$ )和时间( $TIME$ )也与 pH 的相关磷脂脂肪酸类似,pH 也是随着植物不同生长周期根系生长变化而改变的。微生物的生长与  $T$ 、pH、DO 密切相关,这与朱健等研究结果一致<sup>[36]</sup>。

### 3 结论

(1) 沉水群丛根系沉积物 PLFA 总量在不同的时期发生了显著的变化,而且生长周期对沉积物微生物群落的影响远大于植物群丛本身,时间相差越长,差异性越大。

(2) 沉水植物根系能够影响沉积物微生物群落结构。沉水植物的生长能够增加沉积物中  $G^+/G^-$  的比例,植物的衰亡能够降低沉积物中  $G^+/G^-$  的比例。

(3) 环境因子与沉积物微生物群落结构密切相关。革兰氏阴性菌、厌氧菌、真菌的部分特征磷脂脂肪酸与 TOC 有正相关关系; DO 与放线菌、革兰氏阴性菌的部分特征磷脂脂肪酸呈正相关,与革兰氏阳性菌部分特征磷脂脂肪酸呈负相关性; pH 与革兰氏阳性菌部分特征磷脂脂肪酸呈正相关关系;  $T$  和  $TIME$  与 pH 影响类似。

#### 参考文献:

- [1] 庆旭瑶,任玉芬,吕志强,等. 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2446-2452.
- [2] 王斌,马健,王银亚,等. 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2465-2471.
- [3] 揣小明,杨柳燕,程书波,等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 951-957.
- [4] 刁晓君,席北斗,何连生,等. 基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1687-1694.
- [5] Huang L D, Du S T, Fan L, et al. Microbial activity facilitates

- phosphorus adsorption to shallow lake sediment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(1): 185-193.
- [6] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环细菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3764-3768.
- [7] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, *et al.* Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes-A guideline and state of the art in Germany [J]. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2006, **36**(3): 155-171.
- [8] 孔祥龙, 叶春, 张春华, 等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 539-549.
- [9] Zhao D Y, Liu P, Fang C, *et al.* Submerged macrophytes modify bacterial community composition in sediments in a large, shallow, freshwater lake [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2013, **59**(4): 237-244.
- [10] Zelles L, Bai Q Y. Fractionation of fatty acids derived from soil lipids by solid phase extraction and their quantitative analysis by GC-MS[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**(4): 495-507.
- [11] Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al.* Changes in rhizospheric microbial community structure and function during the natural recovery of abandoned cropland on the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 161-171.
- [12] 闫法军, 田相利, 董双林, 等. 刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化[J]. *生态学报*, 2014, **34**(11): 2996-3006.
- [13] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 等. 利用 PLFA 方法研究不同土地利用方式对潮棕壤微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, **43**(9): 1834-1842.
- [14] 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp™ 方法[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [15] Mechri B, Manga A G B, Tekaya M, *et al.* Changes in microbial communities and carbohydrate profiles induced by the mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) in rhizosphere of olive trees (*Olea europaea* L.) [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **75**: 124-133.
- [16] Wu Y P, Ding N, Wang G, *et al.* Effects of different soil weights, storage times and extraction methods on soil phospholipid fatty acid analyses [J]. *Geoderma*, 2009, **150**(1-2): 171-178.
- [17] 彭青, 谢冰, 袁琦, 等. 青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3634-3640.
- [18] 祁建华, 武雨婧, 高冬梅, 等. 青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 801-809.
- [19] Mi W J, Zhu D W, Zhou Y Y, *et al.* Influence of *Potamogeton crispus* growth on nutrients in the sediment and water of Lake Tangxunhu [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **603**(1): 139-146.
- [20] 陈开宁, 强胜, 李文朝, 等. 菹齿眼子菜的光合速率及影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(4): 357-362.
- [21] White D C, Davis W M, Nickels J S, *et al.* Determination of the sedimentary microbial biomass by extractible lipid phosphate [J]. *Oecologia*, 1979, **40**(1): 51-62.
- [22] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Häggblom M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil [J]. *Ecology*, 2002, **83**(11): 3152-3166.
- [23] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(1-2): 59-65.
- [24] 旷远文, 温达志, 钟传文, 等. 根系分泌物及其在植物修复中的作用 [J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(5): 709-717.
- [25] Fan S X, Li P J, Gong Z Q, *et al.* Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(8): 1593-1598.
- [26] Galicia L, García-Oliva F. Litter quality of two remnant tree species affects soil microbial activity in tropical seasonal pastures in western Mexico [J]. *Acid Land Research and Management*, 2011, **25**(1): 75-86.
- [27] Gul S, Whalen J K, Ellis B E, *et al.* Plant residue chemistry impacts soil processes and microbial community structure: A study with *Arabidopsis thaliana* cell wall mutants [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **60**: 84-91.
- [28] 曹培培, 刘茂松, 唐金艳, 等. 几种水生植物腐解过程的比较研究 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(14): 3848-3858.
- [29] 迟杰, 郝雪龙. 菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 对酚酸酯污染沉积物的净化作用 [J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(2): 271-276.
- [30] 裴雪霞, 周卫, 梁国庆, 等. 长期施肥对黄棕壤性水稻土生物学特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2010, **43**(20): 4198-4206.
- [31] Thoms C, Gleixner G. Seasonal differences in tree species influence on soil microbial communities [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, **66**(66): 239-248.
- [32] Sheng J L, He Z L, Zeng Y Y, *et al.* Microbial biomass and PLFA profile changes in rhizosphere of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) as affected by external cadmium loading [J]. *Pedosphere*, 2014, **24**(4): 553-562.
- [33] 叶春, 王博, 李春华, 等. 沉水植物黑藻腐解过程中营养盐释放过程 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(10): 2653-2659.
- [34] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 385-392.
- [35] 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(18): 5623-5630.
- [36] 朱健, 王平, 李捍东, 等. 河水高浓度有机污染降解菌分离、鉴定及降解特性 [J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(5): 1311-1318.

## CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC .....	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry .....	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou City .....	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM <sub>2.5</sub> in Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region .....	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources .....	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing .....	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing .....	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO <sub>2</sub> Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis .....	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication .....	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region .....	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers .....	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin .....	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region .....	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China .....	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network .....	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake .....	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors .....	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province .....	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China .....	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou .....	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River .....	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing .....	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province .....	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example .....	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co <sup>2+</sup> Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process .....	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile .....	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process .....	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System .....	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters .....	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment .....	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge .....	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor .....	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain .....	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring .....	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N <sub>2</sub> O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism .....	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China .....	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates .....	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang .....	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil .....	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic .....	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil .....	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i> .....	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source .....	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting .....	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行