

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制

刘晋仙¹, 李鑫², 罗正明¹, 王雪¹, 暴家兵¹, 柴宝峰^{1*}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 黄土高原生态恢复山西省重点实验室, 太原 030006; 2. 山西财经大学环境经济学院, 太原 030006)

摘要: 真菌群落的组成和多样性对维持亚高山湖泊生态系统平衡具有重要影响。本文以包括琵琶海(PPH, 0、2和4 m)、马营海(MYH, 0、2、4和6 m)和公海(GH, 0、2、4、6和8 m)在内的亚高山湖群中不同深度的水生真菌群落为研究对象, 通过高通量测序的方法探究真菌群落的分布格局和多样性维持机制(确定性过程 VS 随机过程)。结果表明, 不同湖泊水质差异明显, GH中pH、电导率、铵态氮、总碳和无机碳含量均显著高于其他两者。真菌群落主要由子囊菌门(Ascomycota, 0.82% ~ 21.05%)、担子菌门(Basidiomycota, 1.26% ~ 11.79%)、壶菌门(Chytridiomycota, 0.42% ~ 4.26%)和隐真菌门(Rozellomycota, 0.11% ~ 0.33%)等组成。囊担子菌纲(Cystobasidiomycetes)、座囊菌纲(Dothideomycetes)、壶菌纲(Chytridiomycetes)和粪壳菌纲(Sordariomycetes)为所有湖泊共有。不同湖泊真菌群落的 α -多样性和优势类群差异显著($P < 0.05$), 而在每个湖内不同深度之间没有显著的差异。相似性分析结果表明, 不同湖之间真菌群落的 β -多样性明显不同($r = 0.99$, $P < 0.01$), 同时MYH($r = 0.98$, $P < 0.01$)和GH($r = 0.25$, $P < 0.05$)不同深度真菌群落的 β -多样性也差异明显, 但是PPH($r = 0.23$, $P > 0.05$)不同深度真菌群落的 β -多样性没有显著的差异。冗余分析和方差分解分析结果表明, 在小区域范围内(3个湖之间)以及局域范围内(MYH不同深度)真菌群落的 β -多样性格局是环境选择和扩散限制共同影响的结果, 但是环境选择的相对作用更强, 其中水体pH、溶解氧、总碳和电导率是主要的影响因子。零模型分析结果表明, 种间相互作用驱动了GH中真菌群落 β -多样性格局的维持。总之, 亚高山湖群中真菌群落的 β -多样性格局主要是由确定性过程驱动的。

关键词: 亚高山湖群; 真菌群落; 高通量测序; 多样性格局; 维持机制

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2382-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809200

Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes

LIU Jin-xian¹, LI Cui², LUO Zheng-ming¹, WANG Xue¹, BAO Jia-bing¹, CHAI Bao-feng^{1*}

(1. Shanxi Key Laboratory of Ecological Restoration on the Loess Plateau, Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. School of Environment and Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The composition and diversity of fungal communities are essential to maintain the ecosystem balance of subalpine lakes. The aquatic fungal communities at different depths from the subalpine Pipahai (PPH, 0, 2, 4 m), Mayinghai (MYH, 0, 2, 4, 6 m), and Gonghai (GH, 0, 2, 4, 6, 8 m) lakes were studied. In addition to that, the distribution pattern and diversity maintenance mechanism (determination process vs. random process) of fungal communities were explored using high-throughput sequencing. The results showed that the physicochemical parameters of the water were significantly different among the three lakes. The pH, electrical conductivity (EC), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), total carbon (TC), and inorganic carbon (IC) of GH were significantly higher than in the other two lakes. The fungal community was mainly composed of Ascomycota (0.82% - 21.05%), Basidiomycota (1.26% - 11.79%), Chytridiomycota (0.42% - 4.26%), and Rozellomycota (0.11% - 0.33%). Cystobasidiomycetes, Dothideomycetes, Chytridiomycetes, and Sordariomycetes were the dominant classes shared by the three lakes. The α -diversity index and the relative abundance of dominant classes were significantly different among the three lakes ($P < 0.05$), but there were no significant differences between the various depths on each lake. The results of the ANOSIM analysis showed that the β -diversity of the fungal communities were significantly different ($r = 0.99$, $P < 0.01$) among the lakes. There was also expressive differences at various depths on MYH ($r = 0.98$, $P < 0.01$) and GH ($r = 0.25$, $P < 0.05$), but no significant difference in PPH ($r = 0.23$, $P > 0.05$). The analysis results of redundancy and variation partitioning showed that the β -diversity pattern of fungal communities in small region areas (among the three lakes) and local areas (different depths of MYH) were driven by environmental selection and dispersal limitation. However, the relative role of environmental selection was more significant, with water pH, dissolved oxygen (DO), TC, and EC being the main influencing factors. The results of the null model analysis showed that the interspecific interactions promoted the maintenance of the β -diversity pattern of the fungal community in GH. In summary, the β -diversity pattern of fungal communities in the subalpine lakes was mainly driven by a deterministic process.

Key words: subalpine lakes; fungal community; high throughput sequencing; diversity pattern; maintenance mechanism

真菌群落是水生物食物网的重要组成部分, 在淡水湖生态系统中的养分循环和物质转化过程中发挥着重要作用^[1]。因此研究真菌群落空间分布格局的形成机制及响应环境变化的机制, 对预测湖泊

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31772450, 31801962)

作者简介: 刘晋仙(1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向微生物生态学, E-mail: ailjx1314@126.com

* 通信作者, E-mail: bfcchai@sxu.edu.cn

生态系统功能对当前以及未来环境变化的响应具有重要意义^[2]。目前的研究表明在高山和亚高山湖中微生物群落的组成和多样性主要受到环境因素的影响, 如温度^[3]、溶解氧^[4]、营养物质^[5~7]等; 同时空间距离也是影响微生物群落多样性格局的重要因子^[8]。已有的研究大多针对湖泊中的细菌群落^[6, 9, 10], 而对真菌群落空间分布格局的形成及其对环境变化的响应机制尚不清楚。生态位理论和中性理论是关于群落构建和多样性的维持机制最主要的两种观点^[11]。生态位理论认为确定性的生物和非生物因素(如: 环境因素、生境异质性和种间竞争)影响群落中物种的共存和丰度变化; 而中性理论则认为扩散和随机作用是主要的决定因子^[12]。许多研究已经证实环境过滤、种间竞争和扩散限制是影响微生物群落构建过程的 3 个主要因素^[5, 13, 14]。Liao 等^[5, 15]以及 Langenheder 等^[16]的研究发现, 中性过程和生态位过程对细菌群落的构建都有影响, 而蓝藻群落的构建则是由生态位过程驱动的。竞争也是导致淡水生态系统中细菌群落多样性格局形成的重要原因^[17], 也有研究表明不论是在局域范围还是区域范围内, 淡水湖泊中细菌群落的多样性分布格局都是由中性过程介导的^[8]。从这些已有的研究可以看出, 目前对于湖泊中微生物群落的构建机制还没有统一的结论, 在不同研究区域以及不同研究尺度下确定性过程和随机过程的相对重要性存在差异^[18, 19]。

亚高山淡水湖蕴含着巨大的微生物资源, 在调节气候变化、调控生物地球化学循环和维持生态系统功能方面起重要作用, 因此研究微生物的空间分布格局和成因将有助于人们对亚高山湖生态系统进行合理的管理和功能调控, 从而积极应对全球气候变化和人类干扰等严重的环境问题。认识微生物的生物地理分布并分析驱动微生物分布的因素对于理解微生物多样性具有十分重要的意义, 而研究真菌群落的多样性格局能更好地认识微生物多样性适应机制。由于亚高山湖相比于平原湖有其不同的生态特点——亚高山湖对气候变化和人为干扰更敏感, 即使是很小的环境改变也足以显著地影响亚高山湖水体的理化性质发生改变, 从而引起水体生物群落组成和结构的变化, 进而改变水生生物的功能, 因此, 亚高山湖可作为“优质”的实验研究体系^[20]。

宁武亚高山天然湖群地处汾河源头与恢河源头的分岭地带, 是我国三大亚高山湖群之一, 也是华北地区唯一的湖群, 其形成于距今约 300 万年前的新生代第四纪冰期^[21]。在高山夷平面上共发育有 11 个不同大小的天然淡水湖, 目前只有 3 个湖常年

有水, 包括琵琶海湖、马营海湖和公海湖。张俊芳等^[20]对该湖群中的浮游植物群落调查发现, 不同湖泊中浮游植物群落多样性有显著的变化。因此推测浮游植物群落的组成变化是由于气候变化和人类活动的不断扩展, 使湖水中碳、氮、磷等物质含量增多造成的。但是在该区域这样的环境变化如何影响微生物群落多样性分布格局的研究还未见报道。本研究通过调查琵琶海湖、马营海湖和公海湖 3 个湖中真菌群落的多样性分布格局旨在探讨以下问题: ① 影响水生真菌群落组成和 α -多样性变化的原因; ② 3 个湖之间以及同一个湖不同深度间的真菌群落是否都存在明显的空间分布格局差异, 探讨其影响因素及机制是否相同。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

宁武亚高山湖群位于山西省西北部的宁武县, 海拔 1 771 ~ 1 854 m, 该区域属东亚季风气候, 年均气温 6.2℃, 年均降水量约 490 mm, 夏季水量充沛(6~8 月)占年降水量的 65% 以上, 冬季严寒多雪, 多大风。本实验所用样品采集于常年有水的琵琶海湖(PPH)、马营海湖(MYH)和公海湖(GH), 这 3 个湖的深度和面积各不相同, 其中 MYH 面积最大, GH 最深(表 1)。在每个湖的湖中心沿垂直方向从表层到湖底每隔 2 m 设为一个采样点, PPH 共有 3 个采样点(PPH0、PPH2、PPH4), MYH 共有 4 个采样点(MYH0、MYH2、MYH4、MYH6), GH 共有 5 个采样点(GH0、GH2、GH4、GH6、GH8)每个采样点收集 3 个重复, 所有样品均采集于 2017 年 12 月。3 个湖之间进行比较时把不同深度的所有样品作为重复, 而同一个湖不同深度比较时把同一深度的样品作为重复。利用采水器收集水样 3 L, 装于无菌的塑料桶中运回实验室后通过滤膜(0.22 μm , 50 mm diameter, Millipore, 津腾, 天津)过滤 2.5 L, 后将滤膜置于离心管中放于 -20℃ 冰箱用于微生物 DNA 的提取, 剩余的 0.5 L 用于理化性质分析, 一个月内进行相关的实验分析。

1.2 样品理化性质分析

水体的 pH、溶解氧(DO)、电导率(EC)、盐度(SAL)、硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)用便携式水质监测仪(Aquaread AP-2000, UK)原位测定; 总碳(TC)、总有机碳(TOC)和无机碳(IC)含量用 TOC 分析仪(Shimadzu, TOC-V_{CPH}, Japan)测定; 亚硝态氮(NO_2^-)、硫酸根(SO_4^{2-})和磷酸根(PO_4^{3-})含量用全自动间断化学分析仪(Cleverchem Anna, DeChem-Tech, Germany)测定。

表 1 采样地概括

Table 1 Brief description of the sampling sites

项目	PPH	MYH	GH
地理位置	38. 85°N, 112. 21°E	38. 87°N, 112. 20°E	38. 91°N, 112. 23°E
海拔/m	1 776	1 774	1 854
样本个数	9	12	15
表面积/km ²	~0. 21	~0. 58	~0. 36
最大深度/m	~4. 5	~6. 4	~8. 5

1.3 样品 DNA 提取及高通量测序

利用 Fast DNA SPIN (MP Biomedicals, Santa Ana, CA, USA)试剂盒, 参照说明书提取滤膜上微生物的 DNA. 提取好的 DNA 样品测定浓度和纯度后进行 PCR 扩增, 扩增体系为 20 μL [10 $\times$ Buffer-2 μL , 2.5 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 dNTPs-2 μL , 正反引物 (5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)-0.8 μL , *Taq* 酶-0.2 μL , 牛血清蛋白-0.2 μL , DNA 模板-10ng, 最后用去离子水补充到 20 μL], 扩增真菌的 ITS1 区片段, 引物是 ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGA AGTAA-3') 和 ITS2R (5'-GCTGCGTCTTCATCGATGC-3')^[22]; 扩增条件是: 预变性 3 min(95 $^{\circ}\text{C}$), 变性 30 s(95 $^{\circ}\text{C}$), 退火 30 s(58 $^{\circ}\text{C}$), 延伸 45 s(72 $^{\circ}\text{C}$), 终延伸 10 min(72 $^{\circ}\text{C}$). PCR 产物通过胶回收纯化后在 Illumina MiSeq 测序平台上进行高通量测序, 生物信息学分析方法参照文献[23]描述的方法进行. 本研究的测序和生物信息服务在上海美吉生物科技有限公司完成.

1.4 数据分析

所有的统计分析均是在按最小样本序列数对所有样本抽平后进行的. 3 个湖之间以及同一个湖不同深度间水体的理化参数差异、不同群落丰度的差异以及不同群落 α -多样性指数的差异在 SPSS 20.0 (IBM SPSS statistics, USA) 软件中采用 one-way ANOVA 分析, 并通过 Duncan 检验进行多重比较; 在 CANOCO (version 5.0, USA) 软件中通过 PCoA (principal co-ordinates analysis) 排序比较不同湖泊间以及同一湖泊不同深度间真菌群落空间分布的相似性^[24], 并通过 (vegan) R 软件包中的 ANOSIM (analysis of similarities) 函数检验组间差异; 在 CANOCO 中首先通过 db-RDA (distance-based redundancy analysis) 前选择筛选出对群落结构有显著影响的因子, 然后通过 RDA (redundancy analysis) 分析不同环境因子对群落结构的影响程度; 通过 R 软件中的 (reldist、vegan 和 bipartite) 程序包根据 Tucker 等^[25] 和 Chase 等^[26] 构建的 β -零偏差值来定量分析确定性过程和随机过程在群落构建中的相对重要性, 偏离零 [$(\beta_{\text{obs}} - \beta_{\text{null}})/\beta_{\text{null}}$] 表示群落的构建是确定性过程决定的, 正值表示种间竞

争, 负值表示环境选择, 接近零表示随机过程在群落构建中起决定作用; 在 CANOCO 软件中通过 VPA (variance partitioning analysis) 进一步分析环境因子和空间距离在群落构建过程中的解释率, 其中空间距离通过 R 程序包 (SoDA, PCNM) 由邻体矩阵主坐标分析 PCNM (principal coordinates of neighbour matrices) 获得的 PCNM 变量矩阵表示. 所有统计分析过程的置信区间均为 95% ($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 样品理化性质

pH、EC、 NH_4^+ 、TC 和 IC 在 3 个湖之间差异显著, 其中 PPH 的 pH 值最小, 而 TOC 含量最大, 表明 PPH 的水质污染较严重有酸化的趋势. GH 的理化因子除了 TOC 含量外均最大, 说明 GH 的离子浓度较高 (表 2). 水体理化参数会随着采样深度的变化而变化, 且不同因子的变化趋势不同, 但是 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的浓度在 PPH 和 MYH 不同深度没有显著的变化, TC 和 SO_4^{2-} 的浓度在 GH 不同深度没有显著的变化 (表 3).

2.2 真菌群落组成

经高通量测序获得各采样点真菌群落的丰富度和多样性指数. 真菌群落的 OTU 个数、Chao1 和 Shannon 指数在 MYH 中最大, 而 Simpson 指数在 GH 中最大 (图 1). MYH 表层水体中真菌群落的

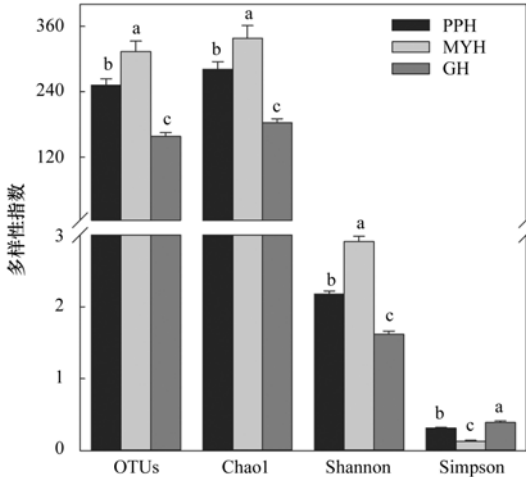


图 1 3 个湖中真菌群落的 α -多样性指数

Fig. 1 The α -diversity index of fungal communities in three lakes

Simpson 指数低于下层水体中真菌群落的 Simpson 指数，而在 PPH 和 GH 中不同深度真菌群落的 4 个 α -多样性指数均没有显著差异(表 4)，说明在同一个湖中真菌群落的 α -多样性不会随取样深度的变化而显著变化，但是在 3 个湖之间真菌群落的 α -多样性却有显著的差异(图 1)。对共线性高的理化因子筛选后，发现不同湖之间真菌群落的 α -多样性差异主要与水体 NO_2^- 和 PO_4^{3-} 浓度显著相关(图 2)。

表 2 3 个湖之间水体的理化参数¹⁾
Table 2 Physical and chemical parameters of water in three lakes

项目	PPH	MYH	GH
$T/^{\circ}\text{C}$	$3.23 \pm 0.160\text{a}$	$3.68 \pm 0.109\text{a}$	$3.60 \pm 0.190\text{a}$
pH	$6.86 \pm 0.040\text{c}$	$7.48 \pm 0.027\text{b}$	$7.94 \pm 0.013\text{a}$
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$6.68 \pm 0.701\text{b}$	$8.37 \pm 0.377\text{a}$	$8.90 \pm 0.248\text{a}$
$\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$494.11 \pm 1.006\text{b}$	$439.33 \pm 3.517\text{c}$	$963.27 \pm 3.653\text{a}$
$\text{SAL}/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	$7.19 \pm 0.735\text{b}$	$8.41 \pm 0.322\text{ab}$	$8.64 \pm 0.044\text{a}$
$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.01 \pm 0.002\text{a}$	$0.01 \pm 0.002\text{a}$	$0.01 \pm 0.002\text{a}$
$\text{NO}_2^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.02 \pm 0.001\text{ab}$	$0.01 \pm 0.001\text{b}$	$0.02 \pm 0.002\text{a}$
$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.01 \pm 0.001\text{c}$	$0.94 \pm 0.07\text{b}$	$4.21 \pm 0.047\text{a}$
$\text{TC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$75.10 \pm 1.075\text{b}$	$59.87 \pm 0.387\text{c}$	$119.53 \pm 0.496\text{a}$
$\text{TOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$25.71 \pm 1.177\text{a}$	$16.28 \pm 0.576\text{b}$	$18.94 \pm 0.596\text{b}$
$\text{IC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$49.39 \pm 0.264\text{b}$	$43.59 \pm 0.262\text{c}$	$100.60 \pm 0.403\text{a}$
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$18.69 \pm 1.239\text{a}$	$16.28 \pm 2.659\text{a}$	$19.72 \pm 1.310\text{a}$
$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.23 \pm 0.091\text{ab}$	$0.11 \pm 0.053\text{b}$	$0.45 \pm 0.098\text{a}$

1) 数值为平均值 $\pm$ 标准偏差，不同字母代表不同样品间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著，下同

表 3 3 个湖中不同深度水体的理化参数
Table 3 Physical and chemical parameters of water at different depths in three lakes

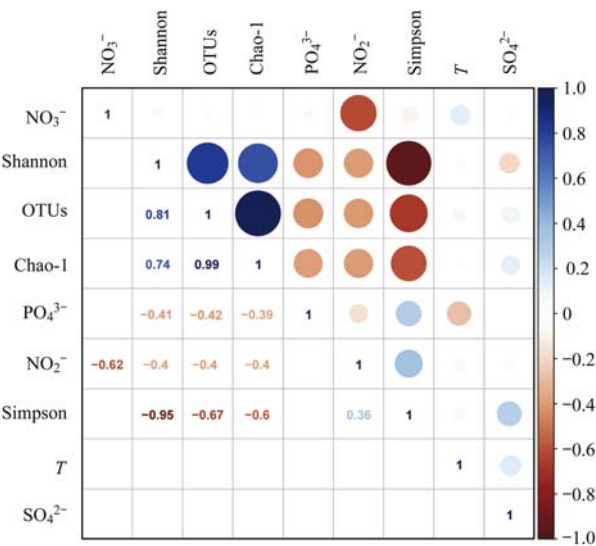
项目	PPH			MYH		
	0 m	2 m	4 m	0 m	2 m	4 m
$T/^{\circ}\text{C}$	$2.60 \pm 0.061\text{b}$	$3.50 \pm 0.001\text{a}$	$3.60 \pm 0.001\text{a}$	$3.07 \pm 0.092\text{b}$	$3.87 \pm 0.033\text{a}$	$3.90 \pm 0.002\text{a}$
pH	$7.02 \pm 0.013\text{a}$	$6.82 \pm 0.021\text{b}$	$6.76 \pm 0.013\text{c}$	$7.43 \pm 0.012\text{b}$	$7.43 \pm 0.011\text{b}$	$7.45 \pm 0.013\text{b}$
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$3.88 \pm 0.071\text{c}$	$7.93 \pm 0.011\text{b}$	$8.23 \pm 0.012\text{a}$	$6.28 \pm 0.031\text{a}$	$8.69 \pm 0.001\text{b}$	$8.96 \pm 0.001\text{c}$
$\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$490.33 \pm 0.672\text{c}$	$497.00 \pm 0.001\text{a}$	$495.00 \pm 0.001\text{b}$	$449.67 \pm 0.881\text{a}$	$443.33 \pm 0.882\text{a}$	$442.67 \pm 0.33\text{a}$
$\text{SAL}/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	$4.25 \pm 0.073\text{c}$	$8.51 \pm 0.011\text{b}$	$8.81 \pm 0.013\text{a}$	$6.81 \pm 0.053\text{d}$	$9.23 \pm 0.012\text{b}$	$9.51 \pm 0.001\text{a}$
$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.01 \pm 0.001\text{a}$	$0.01 \pm 0.001\text{a}$	$0.00 \pm 0.003\text{a}$	$0.01 \pm 0.003\text{a}$	$0.01 \pm 0.003\text{a}$	$0.02 \pm 0.001\text{a}$
$\text{NO}_2^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.02 \pm 0.001\text{b}$	$0.01 \pm 0.001\text{c}$	$0.02 \pm 0.001\text{a}$	$0.01 \pm 0.001\text{ab}$	$0.02 \pm 0.001\text{a}$	$0.01 \pm 0.001\text{a}$
$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.01 \pm 0.001\text{a}$	$0.01 \pm 0.001\text{a}$	$0.01 \pm 0.001\text{a}$	$0.93 \pm 0.013\text{b}$	$0.92 \pm 0.012\text{b}$	$0.96 \pm 0.012\text{a}$
$\text{TC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$73.09 \pm 0.122\text{b}$	$78.43 \pm 0.153\text{a}$	$73.79 \pm 2.322\text{ab}$	$61.28 \pm 0.365\text{a}$	$59.41 \pm 0.152\text{b}$	$58.05 \pm 0.133\text{c}$
$\text{TOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$23.56 \pm 0.507\text{a}$	$29.04 \pm 0.502\text{a}$	$24.54 \pm 2.753\text{a}$	$18.20 \pm 0.253\text{a}$	$16.54 \pm 0.484\text{b}$	$13.28 \pm 0.552\text{c}$
$\text{IC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$49.53 \pm 0.382\text{a}$	$49.39 \pm 0.486\text{a}$	$49.26 \pm 0.673\text{a}$	$43.07 \pm 0.123\text{b}$	$42.88 \pm 0.321\text{b}$	$44.77 \pm 0.553\text{a}$
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$15.48 \pm 0.621\text{a}$	$19.25 \pm 0.452\text{a}$	$21.33 \pm 3.013\text{a}$	$15.27 \pm 0.833\text{a}$	$20.10 \pm 8.232\text{a}$	$12.98 \pm 2.992\text{a}$
$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.21 \pm 0.112\text{a}$	$0.46 \pm 0.201\text{a}$	$0.02 \pm 0.001\text{a}$	$0.15 \pm 0.032\text{a}$	$0.25 \pm 0.201\text{a}$	$0.04 \pm 0.021\text{a}$

项目	MYH		GH			
	6 m	0 m	2 m	4 m	6 m	8 m
$T/^{\circ}\text{C}$	$3.90 \pm 0.001\text{a}$	$2.50 \pm 0.152\text{c}$	$3.33 \pm 0.031\text{b}$	$3.47 \pm 0.032\text{b}$	$4.30 \pm 0.061\text{a}$	$4.40 \pm 0.152\text{a}$
pH	$7.62 \pm 0.062\text{a}$	$7.87 \pm 0.012\text{e}$	$7.94 \pm 0.001\text{c}$	$7.91 \pm 0.001\text{d}$	$7.97 \pm 0.011\text{b}$	$8.01 \pm 0.001\text{a}$
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$9.57 \pm 0.032\text{d}$	$7.92 \pm 0.042\text{e}$	$8.18 \pm 0.011\text{d}$	$8.36 \pm 0.012\text{c}$	$10.10 \pm 0.023\text{a}$	$9.94 \pm 0.034\text{b}$
$\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$421.67 \pm 6.893\text{b}$	$975.00 \pm 5.572\text{a}$	$973.33 \pm 1.673\text{a}$	$970.00 \pm 1.161\text{a}$	$957.00 \pm 3.462\text{b}$	$941.00 \pm 3.221\text{c}$
$\text{SAL}/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	$8.09 \pm 0.041\text{c}$	$8.64 \pm 0.092\text{b}$	$8.72 \pm 0.011\text{b}$	$8.88 \pm 0.012\text{a}$	$8.48 \pm 0.033\text{c}$	$8.48 \pm 0.041\text{c}$
$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.02 \pm 0.006\text{a}$	$0.02 \pm 0.000\text{a}$	$0.01 \pm 0.001\text{b}$	$0.00 \pm 0.000\text{c}$	$0.02 \pm 0.001\text{a}$	$0.02 \pm 0.002\text{a}$
$\text{NO}_2^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.01 \pm 0.001\text{b}$	$0.01 \pm 0.001\text{d}$	$0.03 \pm 0.001\text{a}$	$0.02 \pm 0.001\text{b}$	$0.01 \pm 0.001\text{c}$	$0.02 \pm 0.001\text{ed}$
$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.95 \pm 0.012\text{ab}$	$3.94 \pm 0.022\text{d}$	$4.38 \pm 0.023\text{a}$	$4.07 \pm 0.011\text{c}$	$4.37 \pm 0.033\text{a}$	$4.26 \pm 0.042\text{b}$
$\text{TC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$60.72 \pm 0.083\text{a}$	$119.20 \pm 1.751\text{a}$	$122.10 \pm 0.352\text{a}$	$119.37 \pm 0.173\text{a}$	$118.87 \pm 0.842\text{a}$	$118.10 \pm 0.313\text{a}$
$\text{TOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$17.09 \pm 0.102\text{ab}$	$20.02 \pm 1.733\text{ab}$	$21.76 \pm 0.492\text{a}$	$16.52 \pm 0.423\text{c}$	$18.14 \pm 0.942\text{bc}$	$18.29 \pm 0.354\text{bc}$
$\text{IC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$43.63 \pm 0.045\text{ab}$	$99.22 \pm 0.834\text{b}$	$100.37 \pm 0.593\text{b}$	$102.87 \pm 0.582\text{a}$	$100.73 \pm 0.292\text{b}$	$99.79 \pm 0.593\text{b}$
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$16.78 \pm 8.055\text{a}$	$20.47 \pm 2.913\text{a}$	$16.15 \pm 1.735\text{a}$	$18.06 \pm 1.706\text{a}$	$17.70 \pm 1.176\text{a}$	$26.23 \pm 3.625\text{a}$
$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.00 \pm 0.004\text{a}$	$0.87 \pm 0.105\text{a}$	$0.09 \pm 0.036\text{c}$	$0.66 \pm 0.253\text{ab}$	$0.46 \pm 0.218\text{abc}$	$0.19 \pm 0.044\text{bc}$

表 4 3 个湖中真菌群落的 α -多样性指数

Table 4 The α -diversity index of fungal communities in three lakes

湖名	深度/m	OTUs	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
PPH	0	256.00 $\pm$ 6.028a	289.63 $\pm$ 9.816a	2.26 $\pm$ 0.005a	0.28 $\pm$ 0.010a
	2	229.00 $\pm$ 26.083a	250.93 $\pm$ 36.635a	2.15 $\pm$ 0.115a	0.31 $\pm$ 0.031a
	4	271.67 $\pm$ 18.586a	301.84 $\pm$ 18.534a	2.12 $\pm$ 0.043a	0.33 $\pm$ 0.017a
MYH	0	293.00 $\pm$ 17.388a	325.61 $\pm$ 24.912a	3.07 $\pm$ 0.026a	0.08 $\pm$ 0.004b
	2	335.00 $\pm$ 52.767a	344.21 $\pm$ 51.088a	3.09 $\pm$ 0.177a	0.12 $\pm$ 0.011a
	4	260.00 $\pm$ 12.490a	271.58 $\pm$ 11.260a	2.70 $\pm$ 0.108a	0.13 $\pm$ 0.024a
	6	367.67 $\pm$ 37.489a	411.08 $\pm$ 59.137a	2.78 $\pm$ 0.099a	0.18 $\pm$ 0.024a
GH	0	162.67 $\pm$ 6.333a	192.53 $\pm$ 9.961a	1.58 $\pm$ 0.069a	0.36 $\pm$ 0.024a
	2	139.33 $\pm$ 6.936a	161.60 $\pm$ 2.793a	1.58 $\pm$ 0.123a	0.38 $\pm$ 0.072a
	4	147.00 $\pm$ 3.786a	172.09 $\pm$ 3.225a	1.63 $\pm$ 0.187a	0.38 $\pm$ 0.082a
	6	162.33 $\pm$ 9.905a	191.19 $\pm$ 12.223a	1.64 $\pm$ 0.075a	0.40 $\pm$ 0.041a
	8	179.67 $\pm$ 27.835a	198.16 $\pm$ 32.365a	1.65 $\pm$ 0.055a	0.43 $\pm$ 0.020a



数字代表显著相关系数, 红色表示负相关, 蓝色表示正相关, 颜色越深相关性越大, $P < 0.05$

图 2 理化因子与真菌群落 α -多样性指数的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between physicochemical factors and α -diversity index of fungal communities

2.2.1 真菌群落在门水平的组成

真菌群落主要包括子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、壶菌门(Chytridiomycota)、隐真菌门(Rozellomycota)和 unclassified_k__Fungi(图3). 由于目前数据库的局限性, 本实验中真菌群落中很多 OTU 序列属于未知类群, 这样的结果在其它研究中也存在^[27~29]. 4 个已被注释的真菌门的相对丰度在 3 个湖之间差异显著, MYH 中子囊菌门和担子菌门的相对丰度显著高于 PPH 和 GH, 壶菌门的相对丰度在 GH 最大, 而隐真菌门的相对丰度在 GH 最小[图 4(a)]. 同一湖中不同深度真菌群落的相对丰度在 PPH 和 MYH 是子囊菌门差异显著[图 4(b)和 4(c)], 均是表层的相对丰度最高; 在 GH 中壶菌门的相对丰度在 6 m 处最大, 其

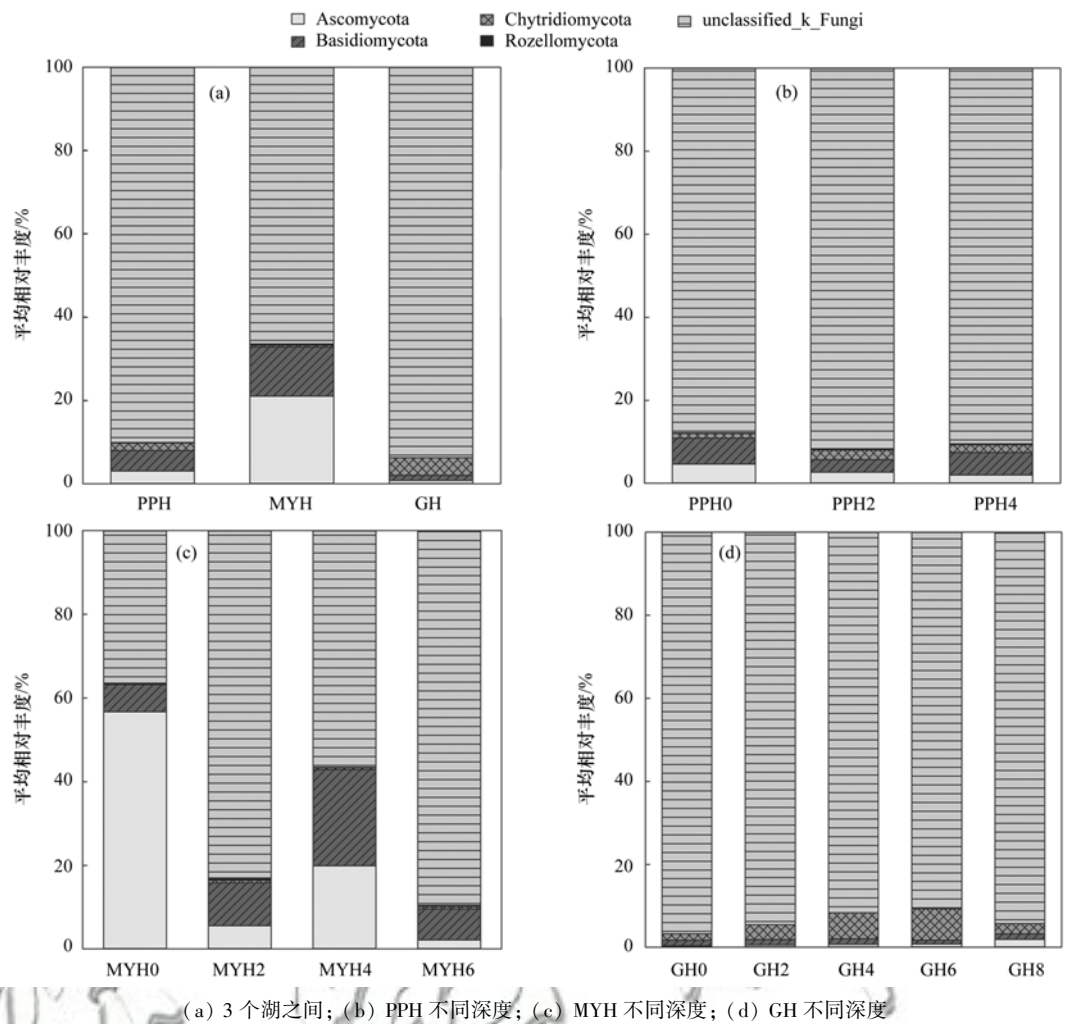
余 3 个门在不同深度没有显著的差异[图 4(d)].

2.2.2 优势真菌纲组成

在 3 个湖中已注释的优势纲(相对丰度 $> 1\%$) 共 4 个, 分别是: 囊担子菌纲(Cystobasidiomycetes)、座囊菌纲(Dothideomycetes)、壶菌纲(Chytridiomycetes)和粪壳菌纲(Sordariomycetes)(图5). 囊担子菌纲、座囊菌纲和粪壳菌纲的相对丰度均是在 MYH 最大, 而壶菌纲的相对丰度在 GH 最大[图 6(a)]. 在 PPH 的 3 个不同深度的水体中, 优势纲也是囊担子菌纲(1.45% ~ 5.91%)、座囊菌纲(0.16% ~ 2.17%)、壶菌纲(0.17% ~ 2.28%)、和粪壳菌纲(0.02% ~ 2.45%), 粪壳菌纲的相对丰度在表层最大, 其余 3 个优势纲的相对丰度在不同深度没有显著的差异[图 6(b)]. MYH 中 4 个不同深度的优势纲是: 囊担子菌纲(4.36% ~ 22.59%)、座囊菌纲(1.32% ~ 9.99%)、银耳纲(Tremellomycetes, 0.25% ~ 1.71%)和粪壳菌纲(0.27% ~ 45.81%), 其中座囊菌纲、银耳纲和粪壳菌纲的相对丰度沿水深逐渐减少, 而囊担子菌纲没有显著变化[图 6(c)]. GH 中 5 个不同深度的优势纲是囊担子菌纲(0.74% ~ 1.24%)、座囊菌纲(0.18% ~ 1.36%)和壶菌纲(1.19% ~ 7.31%), 其中壶菌纲的相对丰度在 6 m 深处最大, 而囊担子菌纲和座囊菌纲的相对丰度在不同深度差异不显著[图 6(d)]. 优势菌纲的相对丰度在不同湖之间以及同一个湖不同深度间均存在显著的变化, 且变化趋势不同, 这可能是由于它们对环境的适应机制不同造成的.

2.3 真菌群落的空间分布格局

基于 Bray-Curtis 的 PCoA 排序以及 ANOSIM 组间差异检验结果表明, 不同湖之间的真菌群落具有明显不同的空间分布格局[$r = 0.99$, $P < 0.01$, 见图 7(a)和表 5], 在 MYH[$r = 0.98$, $P < 0.01$, 见图



(a) 3 个湖之间; (b) PPH 不同深度; (c) MYH 不同深度; (d) GH 不同深度

图3 真菌群落门相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of fungal communities at the phylum leve

7(c)和表5]和GH[$r=0.25$, $P<0.05$, 见图7(d)和表5]不同深度的群落空间分布格局也存在显著差异,而在PPH[$r=0.23$, $P>0.05$, 见图7(b)和表5]中真菌群落的空间分布在3个深度没有显著差异。

表5 基于 Bray-Curtis 距离的 ANOSIM 分析结果¹⁾

Table 5 Results of ANOSIM analysis based on Bray-Curtis distance				
项目	All	PPH	MYH	GH
r	0.994	0.232	0.975	0.254
P	0.001	0.215	0.001	0.046

1) All:指3个湖之间,下同

2.4 影响真菌群落空间格局的因素

通过 db-RDA 前选择筛选出对真菌群落空间分布有显著影响的因子. RDA 分析结果表明 T 、 SAL 、 pH 、 EC 、 TC 和 $PCNM1$ 这6个因子造成了3个湖之间真菌群落空间分布格局的差异[$F=48.5$, $P<0.01$, 图8(a)],且理化因子和空间距离对群落空间分布格局的影响均是显著的,其中理化因子的解释率为43.4%,空间距离的解释率为11.3%,总解释率为72.3%(表6). PPH 中不同深度真菌群落的

空间分布格局不受理化因子和采样深度的显著影响,选择出的解释率较高的4个因子(NO_3^- 、 NO_2^- 、 TOC 和 TC)对群落空间结构的影响不显著[$F=1.6$, $P>0.05$],图8(b)和表6]. MYH 中不同深度真菌群落的空间分布格局受到水体理化因子(IC 、 TC 、和 DO)和取样深度($Depth$)的显著影响[$F=12.9$, $P<0.01$, 图8(c)],其中理化因子的解释率为47.0%,空间距离的解释率为12.9%,总解释率为82.8%(表6). GH 中不同深度真菌群落的空间分布格局与筛选出的3个理化因子(SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 和 DO)和取样深度没有显著的相关性[$F=1.2$, $P>0.05$, 图8(d)和表6]. 零模型分析结果进一步表明在3个湖之间以及 MYH 中真菌群落的空间分布格局主要是环境选择的结果,而在 GH 中主要是种间竞争的结果(图9).

3 讨论

3.1 亚高山湖中真菌群落的组成

真菌群落是水体微食物链的重要组成部分,是

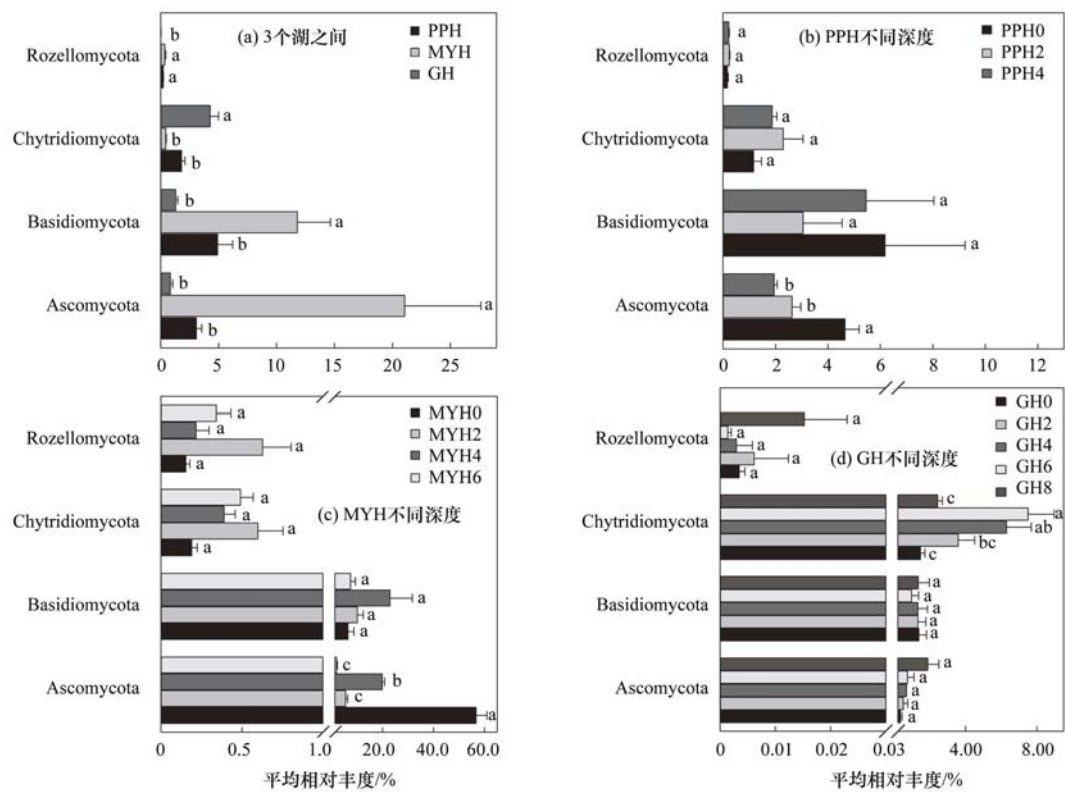


图 4 真菌门相对丰度组成变化
Fig. 4 Changes in relative fungal abundance at the phylum level

表 6 单独的环境因子(E)、单独的空间因素(S)、环境因子和空间因素的交互作用($E \cap S$)以及环境因子和空间因素的总和($E + S$)对真菌群落多样性分布格局解释率的方差分解结果¹⁾/%

Table 6 Variation partitioning results showing the contribution of environmental (E), spatial (S), and interaction effects ($E \cap S$), as well as the total effect ($E + S$) components of the fungal community based on the Bray-Curtis distance/%

因素	ALL	PPH	MYH	GH
E	43.4 **	42.6	47.0 **	-0.4
S	11.3 **	2.1	12.9 **	-4.6
$E \cap S$	17.6 **	0.1	23.0 **	15.8
$E + S$	72.3 **	44.8	82.8 **	10.8

1) 显著性水平: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

难降解有机碳的主要分解者^[30], 同时通过种间相互作用影响细菌和原生动物群落的组成和分布, 从而调节水体的生态平衡, 因此真菌群落的多样性格局可以反映出微生物群落对环境变化的响应机制. 本研究中真菌群落的 α -多样性指数在 3 个湖之间差异显著(图 1), 而在同一个湖不同深度的 α -多样性指数却没有显著的差异(表 4). MYH 中真菌群落的 OTU 个数、Chao1 和 Shannon 指数最大, 而 Simpson 指数在 GH 最大, 通过分析表明这种差异性主要与水体营养状况相关(图 2), 这与 Zhao 等^[10]的研究结果一致. 真菌群落的 α -多样性在同一湖的不同深度间没有显著的差异, 这可能是由于本研究中的 3 个湖均较浅(4~8 m), 且样品采集于

冬季, 因此没有明显的分层现象.

通过 Unite 真菌 ITS 数据库比对后, 被注释的真菌门包括: 子囊菌门、担子菌门、壶菌门和隐真菌门(图 3), 其中子囊菌门、担子菌门和壶菌门是优势门也是水体中常见的 3 个主要的真菌门^[30]. 这 3 个门的相对丰度在 3 个湖之间差异显著, MYH 中子囊菌门和担子菌门的相对丰度最大, 而 GH 中壶菌门的相对丰度最大(图 4). 属于子囊菌门的座囊菌纲和粪壳菌纲, 属于担子菌门的囊担子菌纲和银耳纲, 属于壶菌门的壶菌纲是 5 个主要的已注释的纲(图 5), 3 个湖中共有的座囊菌纲、粪壳菌纲、囊担子菌纲和壶菌纲与它们隶属的门变化趋势相同. 座囊菌纲、粪壳菌纲和囊担子菌纲的相对丰度在 MYH 中最高, 而壶菌纲的相对丰度在 GH 中最高(图 6). 主要的原因可能是由于 MYH 的人为干扰最强烈因此把更多的陆生真菌类群(子囊菌门和担子菌门)^[31]带入了湖水中. 壶菌门类群是水体中普遍存在的真菌类群^[30], 大多腐生在动植物残体上或寄生于水生植物、藻类、小动物和其他真菌上^[31], 是难降解有机碳的主要分解者(纤维素和几丁质)^[27], 也进一步说明 GH 水体中的高碳含量(表 2)与壶菌门类群相关.

3.2 真菌群落的空间分布格局和影响因素

群落空间分布格局的形成是物种被逐层筛选的

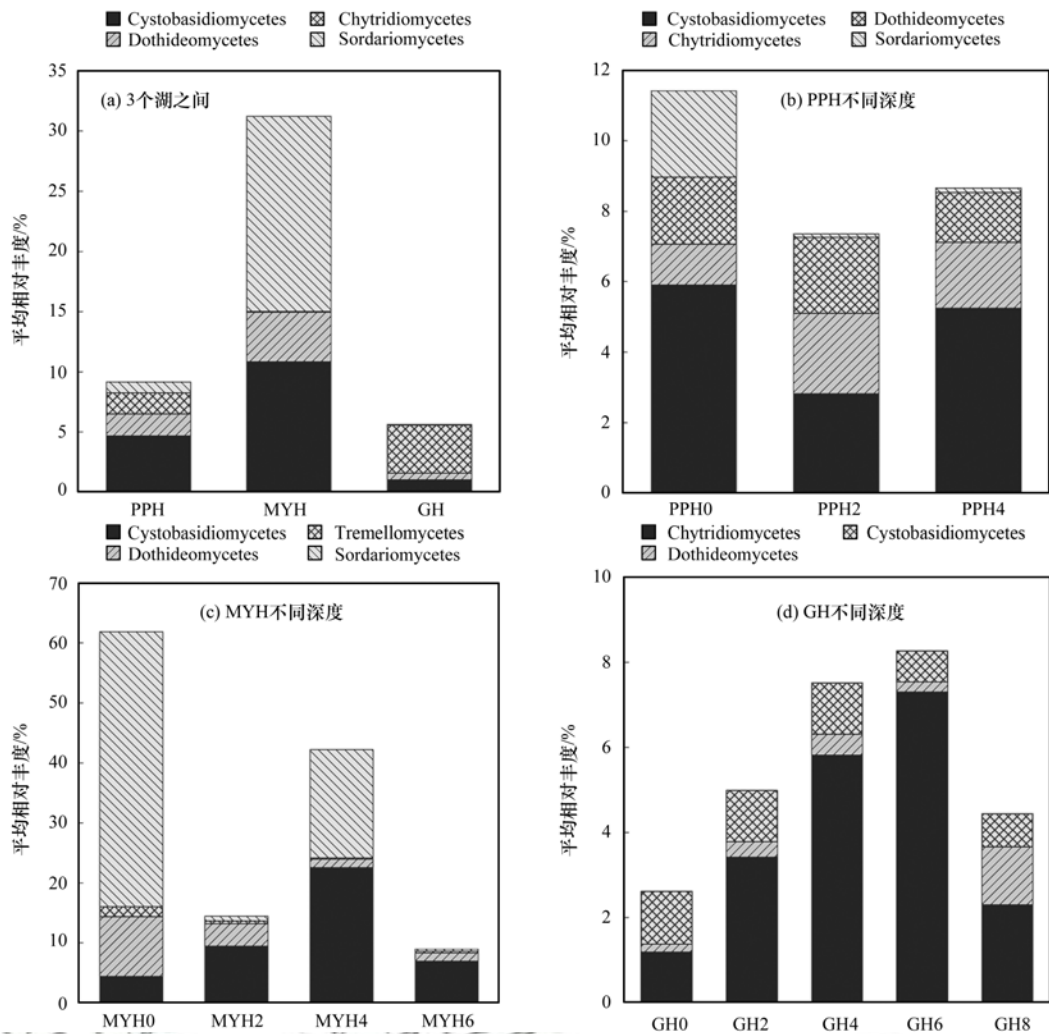


图5 真菌群落优势纲相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of dominant classes in fungal communities

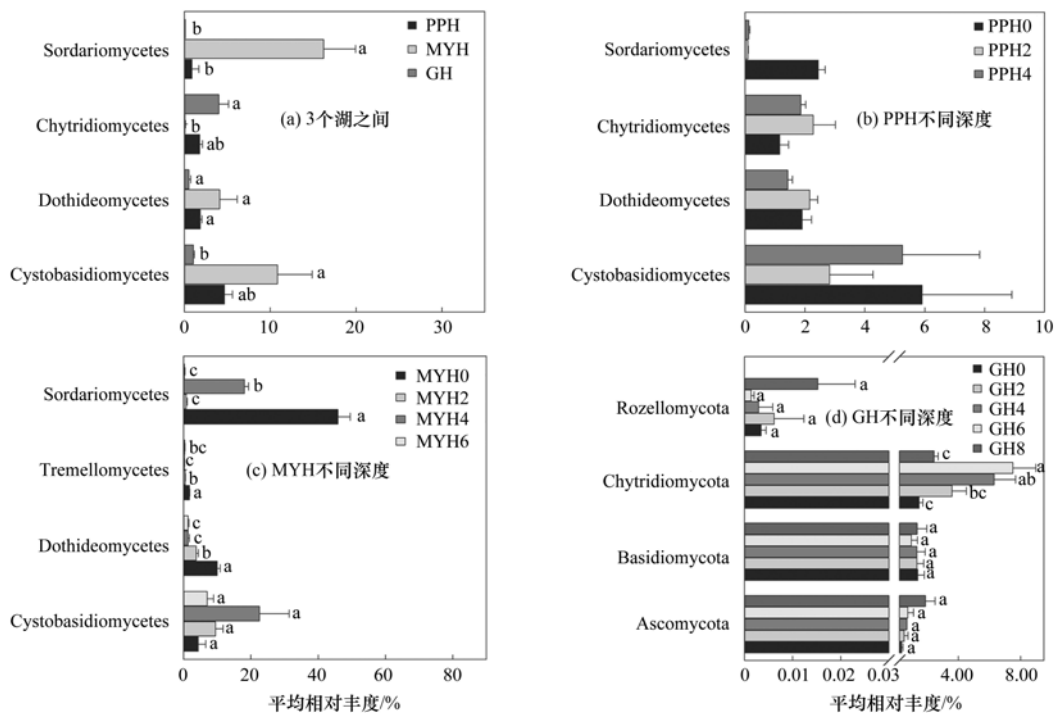


图6 真菌优势纲相对丰度组成变化

Fig. 6 Changes in relative abundance of dominant fungi classes

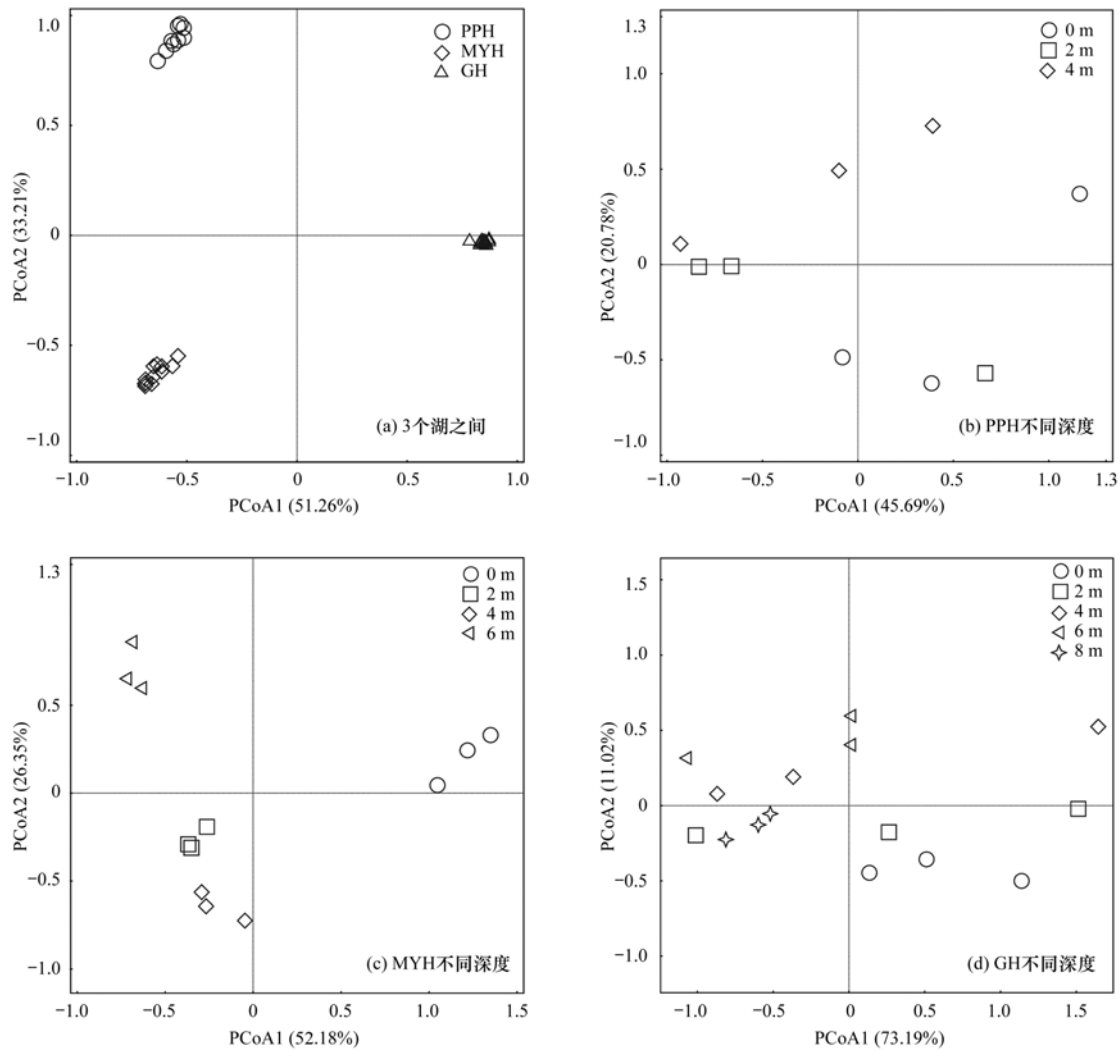


图7 OTU水平的PCoA排序结果

Fig. 7 PCoA results based on OTU level

结果, 确定性过程的环境过滤和种间竞争以及随机过程的扩散限制是影响微生物群落多样性维持机制的重要原因, 它们的相对重要性决定了微生物群落的分布格局^[32]. 不同生境中的真菌群落多样性维持机制明显不同^[10, 31], 确定和随机过程的相对重要性取决于环境类型、环境条件以及生物体特性. 本研究在3个湖之间的小区域生境中, 真菌群落具有显著不同的空间分布格局 [图 7(a) 和表 5]), 这种多样性格局同时受到环境选择和扩散限制的双重影响, 但是环境选择(43.4%)的相对重要性大于扩散限制(11.3%), 见表 6 和图 9. 水体 T 、 SAL 、 pH 、 EC 和 TC 含量共同影响了真菌群落的空间分布格局(图 8), 研究表明水体的营养水平和离子浓度与水体真菌群落结构具有较大的偶联作用^[30]. 课题组对土壤真菌群落的研究也表明环境选择是影响真菌群落空间多样性分布格局的决定性因素^[28, 32]. 在同一个湖不同深度的局域生境中, 真菌群落不同湖中的空间分布格局也不同, PPH 中不

同深度的真菌群落空间分布格局没有显著的差异 [图 7(b) 和表 5]. 虽然 pH 、 DO 、 EC 、 SAL 和 NO_2^- 在 3 个水层差异显著(表 3), 但是并没有引起真菌群落的空间分布差异, 笔者推测可能是因为该湖较浅, 真菌群落不同深度间的扩散阻力小, 因此可以均匀分布, 从而减弱了环境梯度的选择. MYH 中不同深度的真菌群落空间分布格局具有显著的差异 [图 7(c) 和表 5]. 环境选择和扩散限制同时影响真菌群落的空间分布, 但是环境选择(47.0%)的相对重要性大于扩散限制(12.9%). TC 、 IC 、 DO 和取样深度影响了 MYH 中真菌群落的空间分布, 这是由于 TC 和 DO 在不同深度有明显的生态梯度(表 3), 而取样深度与理化因子的异质性变化相对应, 因此取样深度的影响也是显著的. GH 中不同深度的真菌群落空间分布格局存在一定的差异 [图 7(d) 和表 5], 但是环境因子和取样深度的影响均没有达到显著的水平(表 6), 零模型^[25]分析表明这种差异性主要是物种间相互

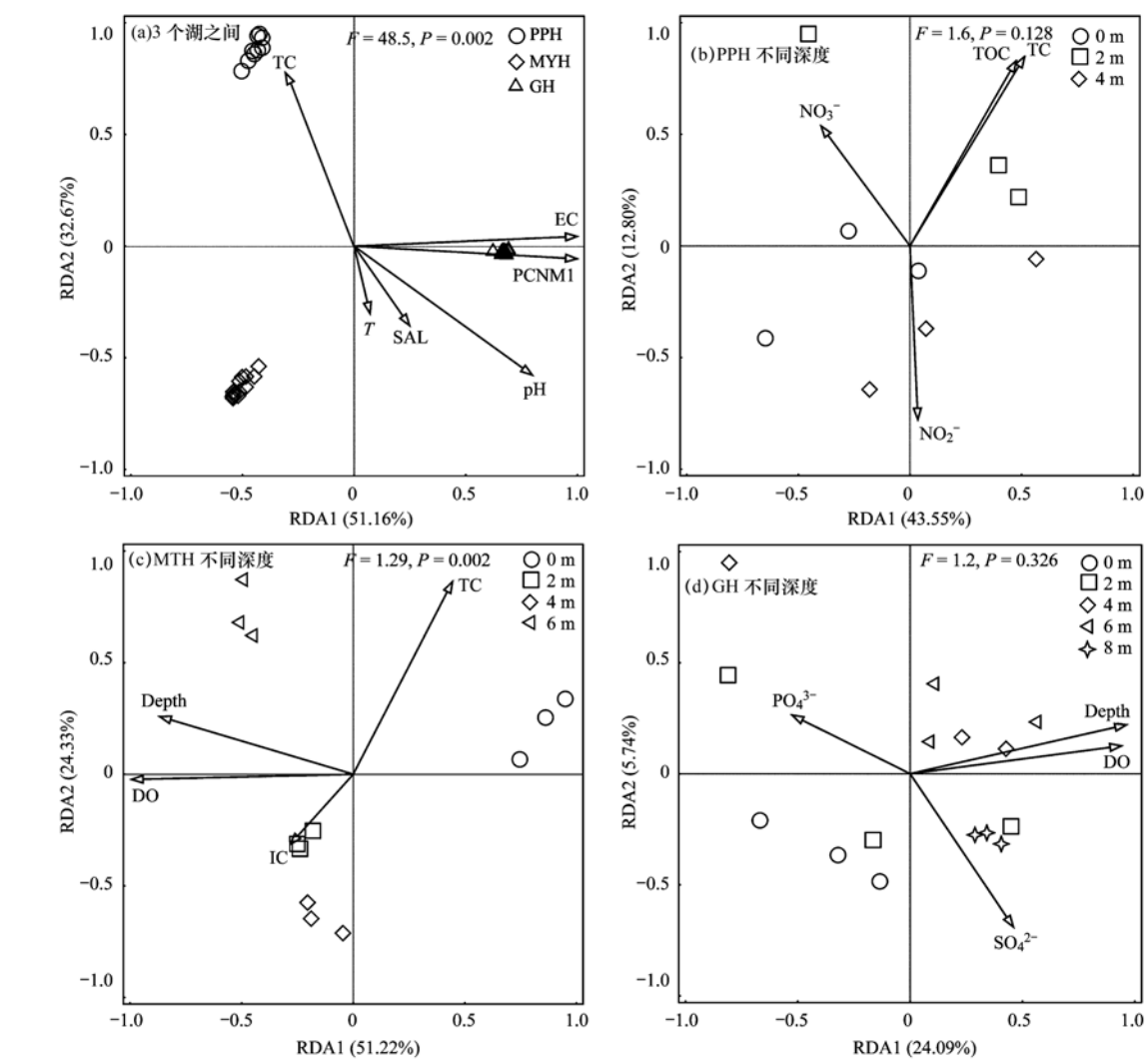


图 8 真菌群落结构与环境因子的 RDA 分析

Fig. 8 RDA showing the relationship between environmental parameters and fungal community structure

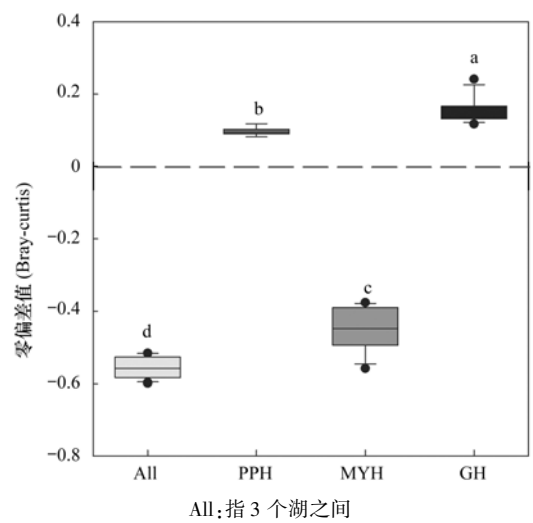


图 9 基于 Bray-Curtis 距离的零偏差结果

Fig. 9 Null deviation result based on Bray-Curtis distance

作用的结果(图 9)。这主要有两方面原因:一方面,由于 GH 中不同深度的生境异质性小且营养丰富(表 3),因此种间竞争激烈^[33];另一方面,在 GH 中以寄生和腐生为主的壶菌纲类群的相对

丰度高,因此种间相互作用更强。

4 结论

- (1)在宁武亚高山湖中真菌群落空间分布格局的影响因素在小区域范围内(3 个湖之间)既存在环境过滤又存在扩散限制,但是环境过滤是主导因素。
- (2)在局域范围内(同一个湖不同深度间),不同湖中影响真菌群落空间分布格局的因素不同,PPH 中真菌群落的空间分布格局没有显著的差异,不受环境选择和扩散限制的影响;MYH 中影响真菌群落空间分布格局的主要驱动力是环境过滤, GH 中影响真菌群落空间分布格局的主要驱动力是种间竞争。

(3)TC 浓度的变化是影响局域和区域生境中真菌群落空间分布格局的最主要的环境因子。

参考文献:

[1] Ma Y T, Li J Q, Wu J, *et al.* Bacterial and fungal community composition and functional activity associated with lake wetland

- water level gradients[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 760.
- [2] Bier R L, Voss K A, Bernhardt E S. Bacterial community responses to a gradient of alkaline mountaintop mine drainage in Central Appalachian streams[J]. *The ISME Journal*, 2015, **9** (6): 1378-1390.
- [3] Callieri C, Hernández-Avilés S, Salcher M M, *et al.* Distribution patterns and environmental correlates of *Thaumarchaeota* abundance in six deep subalpine lakes [J]. *Aquatic Sciences*, 2016, **78**(2): 215-225.
- [4] Di Cesare A, Eckert E M, Teruggi A, *et al.* Constitutive presence of antibiotic resistance genes within the bacterial community of a large subalpine lake [J]. *Molecular Ecology*, 2015, **24**(15): 3888-3900.
- [5] Liao J Q, Cao X F, Zhao L, *et al.* The importance of neutral and niche processes for bacterial community assembly differs between habitat generalists and specialists [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, **92**(11): 1-10.
- [6] Liu K S, Liu Y Q, Jiao N Z, *et al.* Bacterial community composition and diversity in Kalakuli, an alpine glacial-fed lake in Muztagh Ata of the westernmost Tibetan Plateau [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(7): 1-9.
- [7] Rofner C, Peter H, Catalán N, *et al.* Climate-related changes of soil characteristics affect bacterial community composition and function of high altitude and latitude lakes [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(6): 2331-2344.
- [8] Roguet A, Laigle G S, Thieria C, *et al.* Neutral community model explains the bacterial community assembly in freshwater lakes [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2015, **91**(11): 1-11.
- [9] Tang X M, Chao J Y, Gong Y, *et al.* Spatiotemporal dynamics of bacterial community composition in large shallow eutrophic Lake Taihu: high overlap between free-living and particle-attached assemblages [J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, **62**(4): 1366-1382.
- [10] Zhao D Y, Cao X Y, Huang R, *et al.* The heterogeneity of composition and assembly processes of the microbial community between different nutrient loading lake zones in Taihu Lake [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, **101** (14): 5913-5923.
- [11] 牛克昌, 刘烽宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论[J]. *生物多样性*, 2009, **17**(6): 579-593.
Niu K C, Liu Y N, Shen Z H, *et al.* Community assembly: the relative importance of neutral theory and niche theory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 579-593.
- [12] Hubbell S P, Borda-De-água L. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography: reply [J]. *Ecology*, 2002, **85** (11): 3175-3178.
- [13] Zhou J Z, Liu W Z, Deng Y, *et al.* Stochastic assembly leads to alternative communities with distinct functions in a bioreactor microbial community [J]. *mBio*, 2013, **4**(2): e00584-12.
- [14] Zhou J X, Yang H S, Tang F K, *et al.* Relative roles of competition, environmental selection and spatial processes in structuring soil bacterial communities in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **117-118**: 223-232.
- [15] Liao J Q, Zhao L, Cao X F, *et al.* Cyanobacteria in lakes on Yungui Plateau, China are assembled via niche processes driven by water physicochemical property, lake morphology and watershed land-use [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 36357.
- [16] Langenheder S, Székely A J. Species sorting and neutral processes are both important during the initial assembly of bacterial communities [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(7): 1086-1094.
- [17] Pernthaler J. Competition and niche separation of pelagic bacteria in freshwater habitats [J]. *Environmental Microbiology*, 2017, **19**(6): 2133-2150.
- [18] Chase J M, Myers J A. Disentangling the importance of ecological niches from stochastic processes across scales [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, **366**(1576): 2351-2363.
- [19] Winter C, Matthews B, Suttle C A. Effects of environmental variation and spatial distance on *Bacteria*, *Archaea* and viruses in sub-polar and arctic waters [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7** (8): 1507-1518.
- [20] 张俊芳, 冯佳, 谢树莲, 等. 山西宁武亚高山湖群浮游植物群落结构特征 [J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(1): 117-122.
Zhang J F, Feng J, Xie S L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community structures in Ningwu subalpine lakes, Shanxi Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(1): 117-122.
- [21] 孟宪刚, 朱大岗, 邵兆刚, 等. 山西宁武地区全新世以来气候与环境变化 [J]. *地质学报*, 2007, **81**(3): 316-323.
Meng X G, Zhu D G, Shao Z G, *et al.* Paleoclimatic and paleoenvironmental evolution since holocene in the Ningwu Area, Shanxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(3): 316-323.
- [22] Orgiazzi A, Lumini E, Nilsson R H, *et al.* Unravelling soil fungal communities from different mediterranean land-use backgrounds [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(4): e34847.
- [23] Liu J X, Li C, Jing J H, *et al.* Ecological patterns and adaptability of bacterial communities in alkaline copper mine drainage [J]. *Water Research*, 2018, **133**: 99-109.
- [24] Jiang X T, Peng X, Deng G H, *et al.* Illumina sequencing of 16S rRNA tag revealed spatial variations of bacterial communities in a mangrove wetland [J]. *Microbial Ecology*, 2013, **66**(1): 96-104.
- [25] Tucker C M, Shoemaker L G, Davies K F, *et al.* Differentiating between niche and neutral assembly in metacommunities using null models of β -diversity [J]. *Oikos*, 2016, **125**(6): 778-789.
- [26] Chase J M, Kraft N J B, Smith K G, *et al.* Using null models to disentangle variation in community dissimilarity from variation in α - diversity [J]. *Ecosphere*, 2011, **2**(2): 24.
- [27] Jobard M, Rasconi S, Solinhac L, *et al.* Molecular and morphological diversity of fungi and the associated functions in three European nearby lakes [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(9): 2480-2494.
- [28] 赵鹏宇, 李磊, 柴宝峰. 生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3876-3884.
Zhao P Y, Li C, Chai B F. Environmental filters drive the assembly of the soil fungal community in the larix principis-rupprechtii forests of the Guandi Mountains [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3876-3884.
- [29] Chen Z J, Yuan J, Sun F, *et al.* Planktonic fungal community structures and their relationship to water quality in the Danjiangkou reservoir, China [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 10596.
- [30] 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 等. 深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1141-1150.
Shang P L, Chen S N, Huang T L, *et al.* Vertical distribution of fungal community composition and water quality during the deep reservoir thermal stratification [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1141-1150.

- [31] Khomich M, Davey M L, Kauserud H, *et al.* Fungal communities in Scandinavian lakes along a longitudinal gradient [J]. *Fungal Ecology*, 2017, **27**: 36-46.
- [32] 李鑫, 马转转, 乔沙沙, 等. 原位微宇宙法研究温带森林土壤真菌群落构建的驱动机制[J]. *生态环境学报*, 2018, **27** (5): 811-817.
- Li C, Ma Z Z, Qiao S S, *et al.* Analysis of driving forces underlying the structure of fungal community in temperate forest soils based on microcosm experiments [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27** (5): 811-817.
- [33] Lupatini M, Suleiman A K A, Jacques R J S, *et al.* Network topology reveals high connectance levels and few key microbial genera within soils [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, **2**: 10.

《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)