

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异

李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠

(内蒙古农业大学水资源保护与利用自治区重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探索寒旱区湖泊在夏季非冰封开放、冬季冰冻近封闭等状态差异下表水中典型理化指标和浮游细菌群落结构差异, 利用2018年7月和2019年1月采集的内蒙古达里湖41个表水(冰)样品, 基于16S rRNA高通量测序和典型理化指标含量分析, 讨论了浮游细菌群落结构特征及其对氮(N)和磷(P)元素等理化指标的夏-冬季节差异的响应。首先, 夏季表水(夏水)中N和P及电导率(EC)等指标参数相对含量明显高于冬季(包含冬季表水-冬水和湖冰-冰体), 且Proteobacteria、Actinobacteria和Cyanobacteria等构成夏水、冬水和冰体中广泛存在的优势浮游细菌门类(相对丰度大于1%)。不过, 夏水中优势浮游细菌门类数量明显多于冬水和冰体, 如Deinococcus-Thermus、Tenericutes和Firmicutes等仅在夏水中为优势菌门; 其次, 夏-冬季环境条件差异, 特别是冬季“冰-水”内部状态改变, 不仅引起表水富营养化程度明显差异, 还导致优势细菌门类对N和P等营养元素及EC、溶解氧(DO)、冰厚(thickness)和化学需氧量(COD)等理化指标变化产生差异性响应。整体上, 虽然聚类及分型结果将样品主要分为冰、水两种类别, 且冰体中各理化指标参数对优势菌属相对丰度变化的影响最显著, 但冰体优势菌属主要受到结冰过程引起的湖泊内部环境(如不同形态P元素迁移和冰厚等)变化的影响, 而冬水和夏水优势菌属则受到外部环境[如水深(depth)和溶解性总固体(TDS)等]变化的影响较为明显。

关键词: 理化指标; 菌群结构; 季节差异; 表水; 达里湖

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5814-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103189

Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake

LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, DU Lei, TIAN Ya-nan

(Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Lakes are usually influenced by the obvious seasonal changes that occur in cold and arid areas, in which they are nearly completely covered by ice during the winter but receive large amounts of precipitation and other exogenous inputs during the summer. In this study, we collected a total of 41 surface water and ice samples in July, 2018, and January, 2019, in Dali Lake, an inland closed lake located in the Inner Mongolia Plateau. Through 16S rRNA gene-based high throughput sequencing technology, coupled with comparisons of physicochemical proxies between summer and winter surface water samples, the seasonal characteristics of the planktonic bacterial community were analyzed in detail. First, the contents of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved total phosphorus (DTP), electrical conductivity (EC), and oxidation-reduction potential (ORP) were noticeably higher in summer surface water than those in winter surface water. The results revealed clear seasonal differences in the dominant planktonic bacterial phyla that had a relative content greater than 1%. For example, Proteobacteria, Actinobacteria, and Cyanobacteria were the most dominant phyla in both summer and winter samples. However, Deinococcus-Thermus and Tenericutes were two of the dominant planktonic bacterial phyla that were only present in summer surface water, whereas Gemmatimonadetes was one of the dominant planktonic bacterial phyla present only in winter surface water. Further, the structure of the planktonic bacteria also varied based on the changing of dominant operational taxonomic units (OTUs). Second, the different environmental conditions between winter and summer, especially the exchange process between “ice” and “water,” not only caused obvious differences in the eutrophication of surface water but also led to different responses of the dominant bacteria phyla to the content changes in P, EC, DO, COD, ice thickness, etc. For example, the TSI (TP) proxy had higher correlations with changes in the contents of Proteobacteria, Actinobacteria, and Cyanobacteria in ice samples than those in winter and summer surface water samples. Finally, by coupling these findings with the results of sample clustering and typing, we concluded that the dominant bacteria were mainly affected by changes in the internal environment (such as the migration of different P forms, ice thickness, etc.) caused by the freezing process in ice samples. However, the dominant bacteria were mainly affected by changes in the external environment (such as depth, TDS, etc.) in winter and summer water samples.

Key words: physical and chemical proxies; bacteria community; seasonal rotation; surface water; Dali Lake

湖泊是区域生态环境演变过程中重要的组成环节^[1-4]。而寒旱区湖泊, 往往经历显著的夏、冬理化指标及水文循环差异, 导致湖泊生态系统发生季节性改变^[5,6]。一方面, 在夏、冬季里, 湖面将分别呈现开放、冰封近封闭的不同状态, 导致湖泊接收大气降水等外源输入过程存在明显差异, 尤其是夏季表层水体(表水)中的溶解氧(DO)、氮(N)和磷(P)营养元素等理化指标受外部环境变化影响明显^[7-10]; 另一方面, 冬季漫长的冰封期及厚层湖冰

的形成, 不仅导致湖泊水-气交换过程近于中断, 湖冰形成过程中的“冷冻浓缩”效应还会引起冰体净化、冰下水体富营养化, 在湖冰和冰下表水之间

收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2021-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409205); 内蒙古自治区科技攻关项目(2020GG0009); 内蒙古自治区科技重大项目(2020ZD0009); 国家自然科学基金项目(51669021); 内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”项目(NJYT-20-A14)

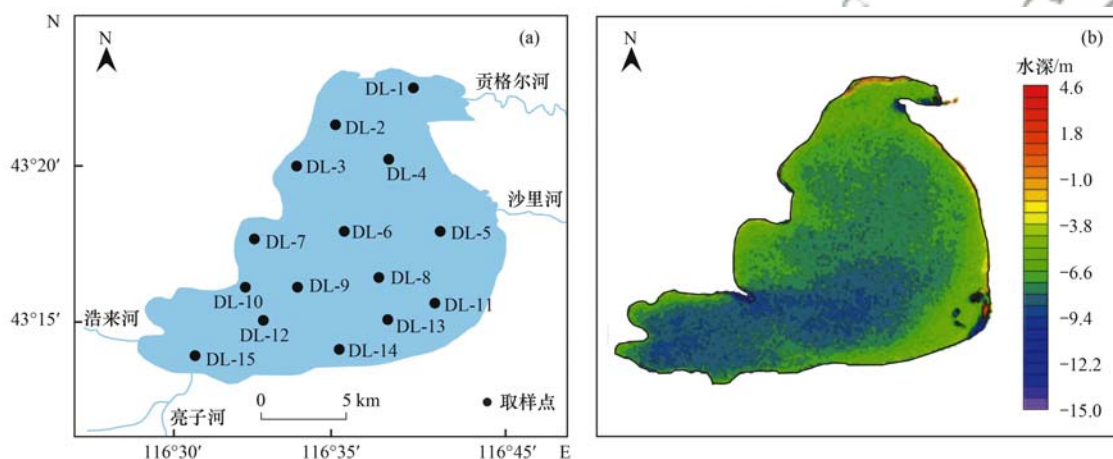
作者简介: 李文宝(1980~), 男, 博士, 主要研究方向为湖泊水环境演变, E-mail: tianshid@126.com

形成明显的理化性质差异^[9,10]. 浮游细菌作为湖泊物质和能量迁移的重要参与者, 在湖泊水生态系统中扮演着极其重要的角色, 对水体理化性质的改变存在明显响应^[11,12]. 目前, 关于冰封期或非冰封期湖泊水体中细菌群落结构及生态功能特征的研究成果已较为丰富^[13~16], 为湖泊微生态系统研究提供了大量基础资料^[4]. 不过, 多数研究成果过程或时间阶段较为单一, 将冰封期和非冰封期进行系统对比研究的成果比较少见. 因此, 在寒旱区湖泊开展夏季开放状态、冬季近封闭状态下表水中浮游细菌群落结构特征综合分析, 结合湖泊表水理化性质的差异对比, 如 DO 和电导率(EC)等, 将为深入分析寒旱区湖泊水体微生态系统演化差异提供基础支撑.

达里湖(达里诺尔湖)位于内蒙古赤峰市克什

克腾旗境内, 是草原内陆封闭型湖泊, 即具有重要的生态经济价值, 也是区域环境调节过程中的重要组成节点(图 1). 达里湖每年拥有长达 4~6 个月的冰封期^[9], 这一特征为详细对比寒旱区湖泊夏-冬环境条件差异下浮游细菌群落结构变化特征及差异提供了理想条件.

因此, 本文以达里湖为研究对象, 基于 2018 年 7 月湖水和 2019 年 1 月湖冰和冰下表水等样品的采集, 利用 16S rRNA 高通量测序方法的分析结果^[17,18], 在分析表水理化性质差异的基础上, 对夏-冬季节湖泊表水中浮游细菌群落组成及优势细菌门类结构的变化特征进行了对比分析, 进而探讨了浮游细菌空间分布特征的影响因素, 以实现寒旱区湖泊水体浮游细菌群落组成及其对外部环境变化响应过程的具体分析.



(a) 取样点位置概况, (b) 达里湖水深变化特征, 修改自文献[19,20]

图 1 达里湖取样点位置概况及水深变化特征

Fig. 1 Sample locations and water depth in Dali Lake

1 材料与方法

1.1 样品采集与测试

根据达里湖地形地貌、水深和冰厚及现代水文特征, 共设 15 个取样点, 依次命名为 DL-1~DL-15 (图 1). 结合 1 月冰层达到最厚, 7 月大气降水量最大等区域气候特征, 在 2018 年 7 月进行表水、2019 年 1 月进行湖冰和冰下表水等样品的采集, 分别命名为夏水、冰体和冬水. 样品采集完成, 分取适量水样品(包括夏水、冬水和冰体融水), 进行常规理化指标测试; 再将剩余的样品, 先经 5 μm 无菌滤膜过滤去除颗粒杂质, 后经 0.22 μm 无菌滤膜过滤收集浮游细菌^[21], 过滤完成, 滤膜置于 10 mL 无菌管中, 放置在 -20°C 以下条件中保存. 最后, 利用成熟的 2 代测序方法, 在上海美吉生物医药科技公司使用 MiSeq PE300 测序仪(Illumina Inc. San Diego, CA, USA)完成序列测定.

样品 pH 值、EC、TDS、氧化还原电位(ORP)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和溶解性无机磷(DIP)等理化指标的测试方法参照文献[22], 分析工作均在内蒙古农业大学水资源保护与利用自治区重点实验室及达里湖观测站完成. 样品具体采集测试过程参考文献[17,18], 最终获得冬季有效样品 26 个, 夏季有效样品 15 个.

1.2 数据处理

在基因测试数据处理过程中, 首先对原始数据进行拼接、去杂质及非特异性片段, 然后基于有效数据进行 OTU 聚类 and 物种分类, 将具有不小于 97% 相似性的序列分配给相同的 OTU. 选取每类中最长的序列为代表序列, 在 QIIME 中调用 Blast 方法对序列数据库进行比对, 获得每个 OTU 代表序列的分类学信息. 最终, 本次实验有效序列的平均长度为 260.3 bp.

利用 R 语言工具包进行样品中 OTU 统计; 利用 QIIME 软件包计算样品的 Shannon、Simpson、Heip、Coverage、Chao 和 Ace 等 α 多样性指数; 利用 R 语言工具进行 PCoA 统计分析和作图, 开展样品物种群落组成柱状图 (即 Bar 图) 以及群落 Heatmap 图绘制; 采用 abund-jaccard 算法, 以优势细菌门类相对含量变化为依据, 对冰体、冬水和夏水中的浮游细菌进行了分类学统计; 利用 Networkx 软件包对样品进行了网络分析.

2 结果与分析

2.1 表水理化指标夏-冬差异

夏-冬季节不同外界条件下, 达里湖不仅所处外部环境存在明显差异, 表水的基本形态也出现变

化. 特别是在冬季, 表水被分为冰和冰下水两部分, 这导致达里湖表水中典型理化指标的相对含量在冰和水间出现明显季节差异 (图 2)^[9,17].

整体上, 夏季表水中各理化指标的相对含量与冬季表水 (包含冰体和冬水, 在此取相应取样点处冰体和冬水中各指标的平均值) 间均存在明显的差异 (表 1). 除去个别无有效数据的取样点外, 夏季表水中 TN、TP、DTP 和 DIP 等不同形态营养元素含量及 EC 和 ORP 等指标均明显高于冬季表水中的含量, 而 DO 和 pH 值则在冬季表水中略高. 这与 DO 和 pH 等理化指标的变化主要受到结冰过程影响、明显差异出现在冰体和冰下表水之间有关^[18]. 另一方面, 夏季表水中各指标取样点间的差异幅度明显比冬季表水中差异幅度小 (图 2).

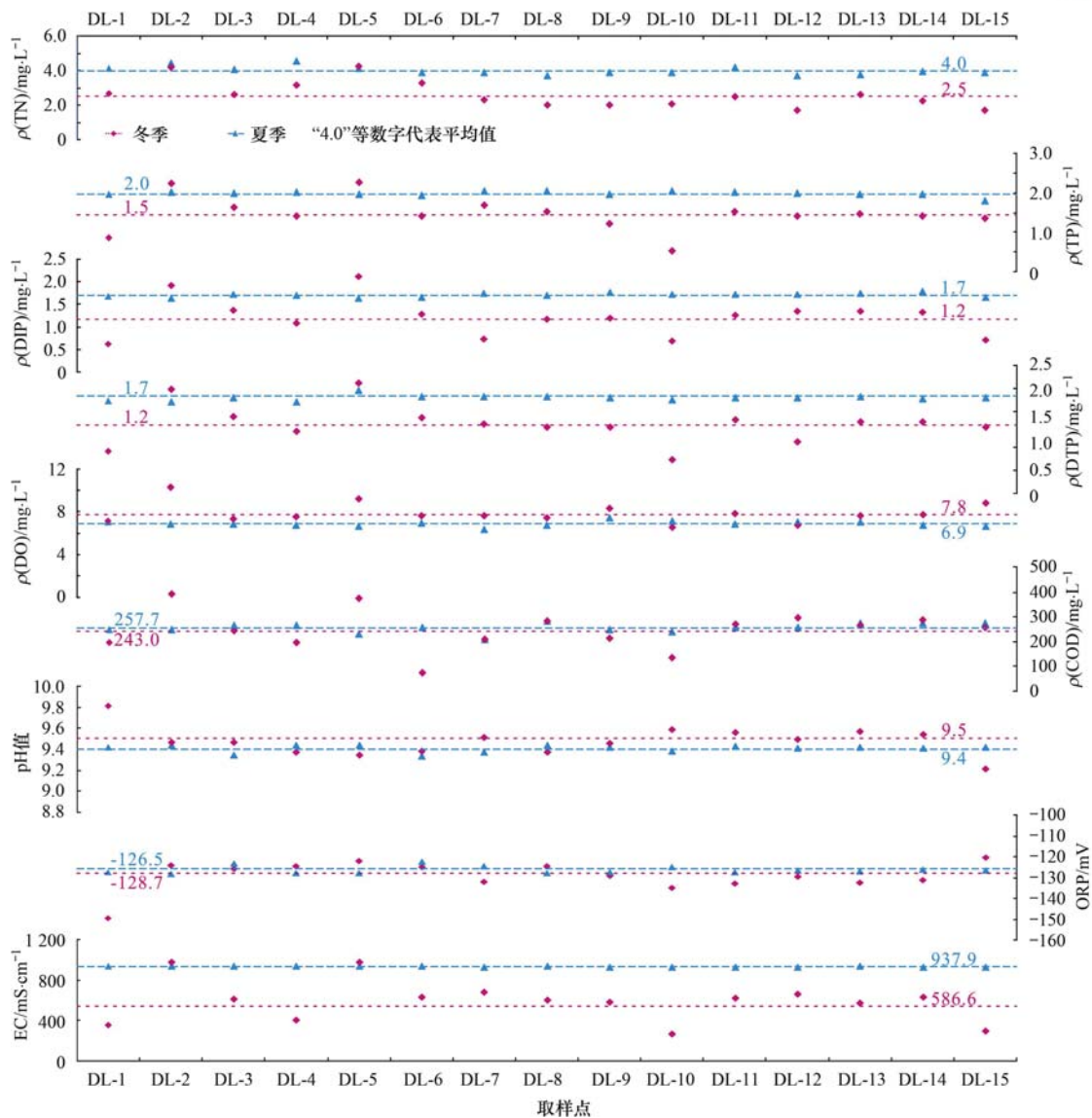


图 2 达里湖夏-冬季表水中主要理化指标的变化

Fig. 2 Comparisons of physicochemical proxies in summer and winter surface water

进一步, 对比冬水和冰体、夏水和冬水、夏季和冬季 (采用相应冬水和冰体样品的平均值) 中

不同理化指标的变异率, 结果显示冬水和冰体间的差异率最为明显, 变化幅度远远超过夏水和冬

水以及夏季和冬季间的变异幅度。特别地,在冬水和冰体间,P 元素的变异率较大,均超过了 50%,明显高于 N 元素的变异率,如 NH_4^+ -N 和 TN 的变异率分别为 41.3% 和 25.1%;在夏水和冬水中,TN、DO 和 COD 的变异率较大,分别为 12.0%、12.7% 和 11.9%,其他指标的变异率均相对较低;而在夏季和冬季间,只有 TN 的变异率与其冬水和冰体间的变异率接近,pH 值在夏水和冬水间的差异率与在夏季和冬季间的差异率接近(表 1)。

表 1 达里湖夏-冬季表水中主要理化指标变化情况及变异率¹⁾/%

Table 1 Changes in physicochemical proxies in summer and winter surface water/%

理化指标		TN	NH_4^+ -N	TP	DIP	DTP	DO	COD	pH	ORP	EC
		/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹		/mV	/mS·cm ⁻¹
冰体	最大值	2.7	1.0	0.4	0.7	0.8	7.4	125.8	9.8	-126.7	444.0
	最小值	0.6	0.1	1.0	0.2	0.2	5.8	253.3	9.2	-149.5	178.9
	平均值	1.9	0.3	0.7	0.6	0.6	6.7	174.2	9.6	-136.8	311.6
冬水	最大值	4.8	2.1	2.5	2.1	2.1	10.3	407.7	9.5	-114.3	984.0
	最小值	1.9	0.3	2.1	1.0	1.0	7.3	120.2	9.3	-124.3	326.0
	平均值	3.1	0.6	2.2	1.8	1.9	8.9	327.2	9.3	-120.6	861.6
夏水	最大值	4.6	—	2.0	1.8	2.0	7.4	284.5	9.4	-122.5	947.0
	最小值	3.7	—	1.8	1.6	1.7	6.4	209.2	9.3	-128.3	931.0
	平均值	4.0	—	2.0	1.7	1.8	6.9	257.7	9.4	-126.5	937.9
冬水和冰体		25.1	41.3	51.6	53.1	55.1	13.9	35.8	1.4	6.3	46.9
变异率 夏水和冬水		12.0	—	5.6	3.3	2.9	12.7	11.9	0.4	2.4	4.2
夏季和冬季		22.8	—	15	17.8	18.7	6.3	2.9	0.3	0.9	23.1

1)“变异率”根据各理化指标的相对含量的方差计算,原始数据来自参考文献[17,18];“—”表示无数据

显然,夏季和冬季转换对表水中各理化指标的影响并没有结冰过程造成的影响程度显著。虽然个别取样点理化指标存在一定程度的区域性差异,但夏季表水中多数指标参数在不同取样点间的空间变化相对较小。

2.2 表水富营养状态指数的夏-冬对比

利用不同样品中 TN 和 TP 的相对含量变化,以 $\text{TSI}(\text{TN}) = 54.45 + 14.43 \ln(\text{TN})$ ^[23] 和 $\text{TSI}(\text{TP}) = 14.42 \ln(\text{TP}) + 4.15$ ^[24] 计算了不同样品中的营养状态指数(trophic state index, TSI);同时,基于优势浮游细菌门类相对丰度变化,分别计算了基于相对丰度比值(cyanobacteria/actinobacteria, C/A 和 actinobacteria/proteobacteria, A/P)的细菌富营养化指数(bacterial eutrophic index, BEI)^[25]。

由于结冰过程的存在,冰体中的 TSI(TP)值(平均值约为 98.3)明显低于相应冬水和夏水中的值(平均值分别约为 115.4 和 113.5),对应了不同样品间 TP 值的明显变异率(表 1)。相应地,虽然冰体中 TSI(TN)平均值(约 62.8)同样低于冬水和夏水中的平均值(分别约 70.3 和 74.4),但在 DL-8 ~ DL-14 等 6 个西南深水区样品中,冰体中 TSI(TN)值与冬水中值几乎一致,均明显低于夏水中的 TSI(TN)值(图 3)。整体上,夏水中 TSI 指数的不同取样点间的空间差异最小,冰体中的空间差异最为明显。

相对于 TSI 指标参数的变化, BEI 指数显示出

更加明显的空间差异。夏季, BEI(C/A) 和 BEI(A/P) 指数取样点间差异幅度均相对明显,而冬季近于封闭的状态下, BEI(C/A) 和 BEI(A/P) 指数的空间差异则相对变小。整体上,夏水 BEI(C/A) 指数的平均值最高(约 0.42),冬水 BEI(A/P) 指数的平均值最高(约 1.46),而冰体 BEI(C/A) 和 BEI(A/P) 指数的平均值都最小,也显示夏水中浮游细菌群落结构的不均匀性最明显。

2.3 表水中浮游细菌群落结构夏-冬对比

在对序列质量进行控制和筛选,确保测序结果可以反映样品真实性的基础上(Coverage 指数高于 99%),结合 α 多样性分析中反映群落多样性的 Simpson 和 Shannon 指数、反映均匀度的 Heip 指数、反映浮游细菌组成丰富度的 Chao 和 Ace 指数^[26,27],以及 PCoA 分析对比了夏-冬表水中浮游细菌群落的结构差异。

首先,根据 Sobs 指标(表示实际测试到的 OTU 数目)构建稀释曲线,结果显示多数样品的稀释曲线在 1 万条测试序列数后逐渐平坦, OTU 数目增加幅度趋于平稳,显示测序数据可以反映各个样品内的物种信息情况^[28,29]。不过,夏水样品的稀释曲线最为分散,而冬水样品的稀释曲线最为集中。根据原始测试 OTU 的抽平结果统计,达里湖夏水中 OTU 个数最多,而冬水中 OTU 个数最少。这基本对应了稀释曲线所反映的样品间 OTU 数量变化情况[图 4(a)]。

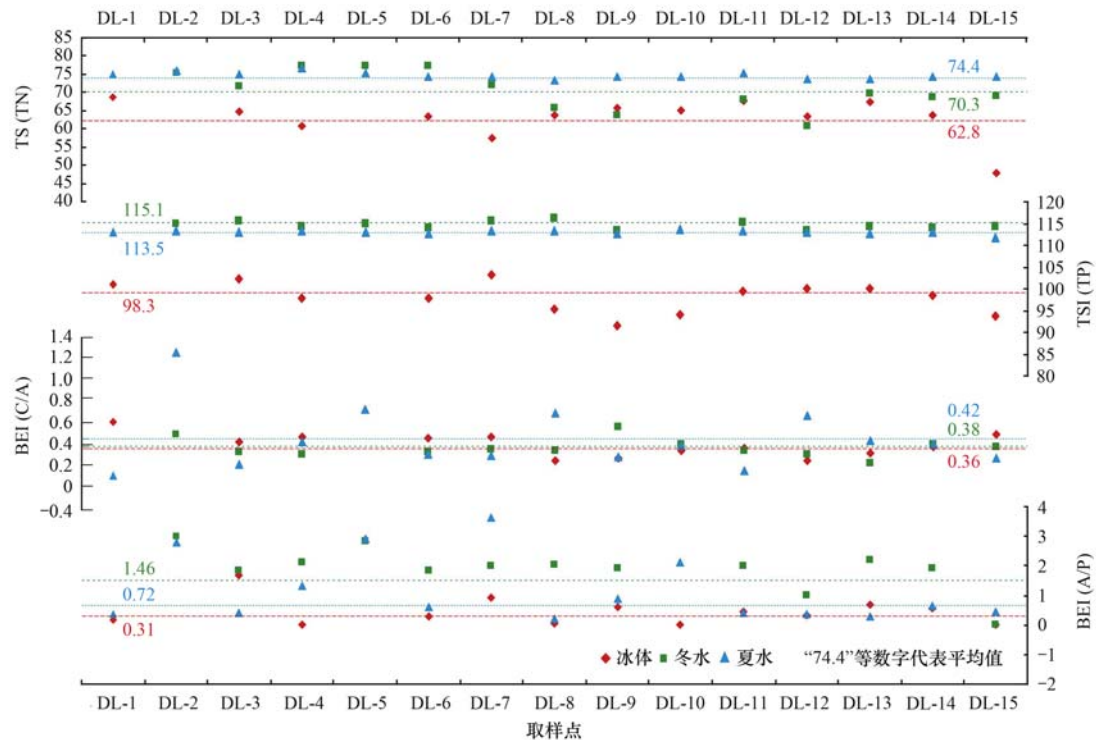


图3 夏-冬季表水中营养状态指数及细菌富营养化指数变化

Fig. 3 Changes in trophic state index and bacterial eutrophic index in summer and winter surface water

其次, α 多样性指标参数分析结果显示夏-冬水体状态差异引起了浮游细菌群落特征发生改变: 如 Shannon 指数和 Heip 指数的最小值、Simpson 指数的最大值均出现在冰体中[图 4(b)]. 由于 Shannon 指数和 Heip 值越大、Simpson 指数越小, 指示样品中细菌群落多样性越高、均匀度越好, 因此这显示冰体中浮游细菌群落多样性相对较低, 且均匀度不好. 此外, 冬水中 Chao 和 Ace 指数的值均最小, 说明冬水中浮游细菌群落的丰富度最低^[30]. 再者, 样品 PCoA 分析结果显示 3 类样品间的浮游细菌组成差异相对明显. 不过, 相对于其他两类样品, 冬水中不同取样点间的浮游细菌群落组成的差异性最小[图 4(c)和 4(d)].

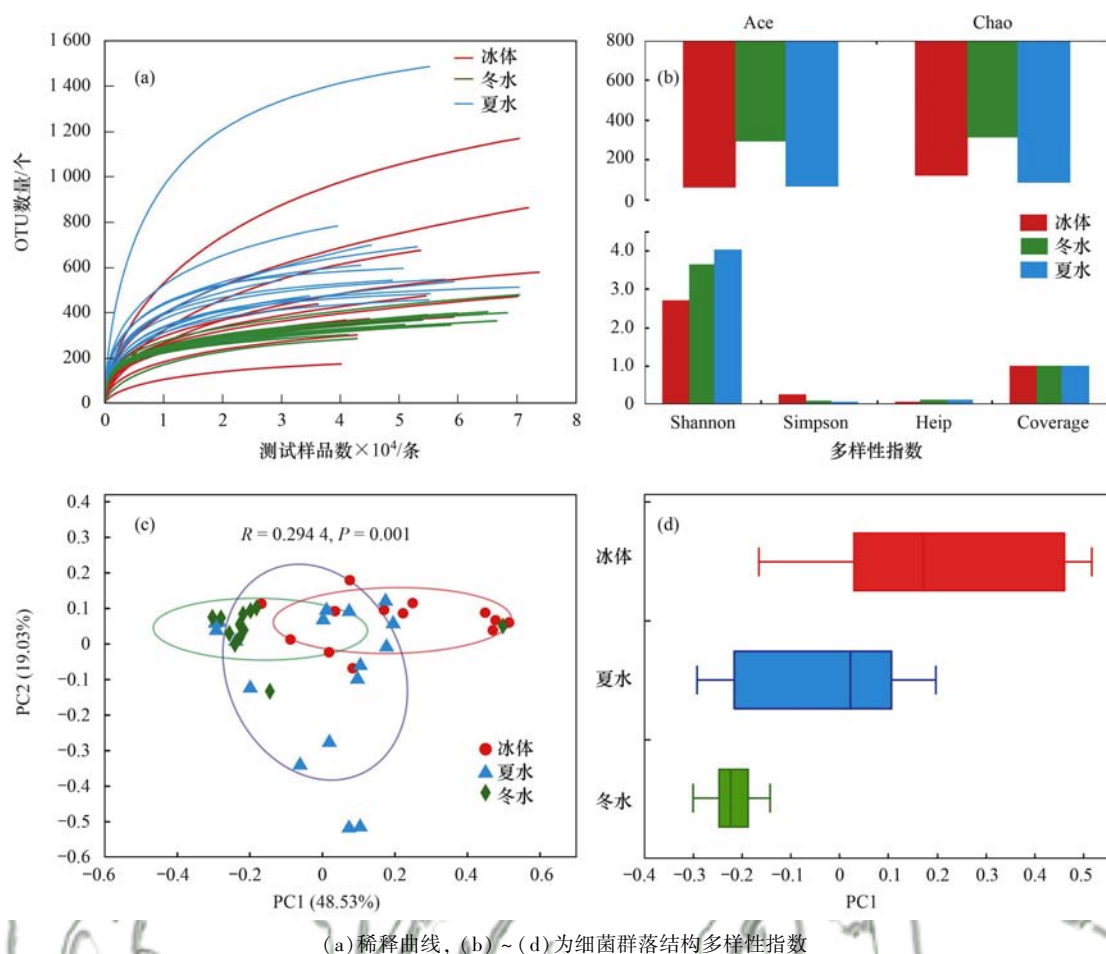
显然, 夏季开放条件下, 夏水中浮游细菌群落的多样性最高. 而在冬季冰封状态下, 由于湖冰形成, 导致冰体和冬水中浮游细菌群落特征出现明显差异. 不过, 湖泊内部结冰过程对细菌群落多样性的影响程度要比外源输入的影响更加显著.

2.4 表水中优势浮游细菌门类空间分布

在分析夏、冬表水中浮游细菌群落多样性指数差异的基础上, 以平均相对丰度超过 1% 作为样品中优势细菌门类的计算依据, 在门类水平上对不同样品中的浮游细菌群落结构进行了对比, 并对浮游细菌门类的构成特征及优势细菌门类相对丰度变化的样品组间差异进行了分析^[31,32].

首先, Proteobacteria (变形菌)、Actinobacteria (放线菌)、Cyanobacteria (蓝细菌)、Bacteroidetes (拟杆菌)、Verrucomicrobia (疣微菌) 和 Tenericutes (软壁菌) 等构成相对丰度排在前 15 位且在冰体、冬水和夏水样品中均广泛存在的优势细菌门类(图 5). 当然, 由于夏-冬季外界环境的显著差异, 夏水中相对丰度较高的 Deinococcus-Thermus (异常球菌-栖热菌门) 等细菌门类在冬季样品中的丰度却较少; 而 Gemmatimonadetes (芽单胞菌) 在冬水中相对丰度却明显高于夏水和冰体中的相对丰度(图 5). 其次, 不同取样点上, 无论冬水还是夏水样品, Proteobacteria、Actinobacteria、Cyanobacteria 和 Bacteroidetes 等浮游细菌门类相对丰度的空间差异都相对较小, 而冰体中 Proteobacteria 等优势细菌门类相对丰度的空间的变化明显[图 5(a)和 5(b)]. 显然, 夏季开放与冬季冰封状态下的外界环境条件差异会对表水中优势细菌门类相对丰度及其空间分布产生影响, 而结冰过程中“冰-水”状态改变对优势细菌门类结构特征的影响则更加显著, 样品聚类结果显示出“冰”与“水”存在明显不同[图 5(b)].

不同样品类型间差异性检验结果显示, 除个别优势细菌门类外, 如 Verrucomicrobia 和 Deinococcus-Thermus 等, 其他优势浮游细菌门类间均存在明显的组间差异[图 5(c)]. 就平均相对丰度排在前列的 Proteobacteria 和 Actinobacteria 而



(a) 稀释曲线, (b) ~ (d) 为细菌群落结构多样性指数

图4 稀释曲线及浮游细菌群落结构 α 和 β 多样性指数变化Fig. 4 Rarefaction curve basing on the Sobs proxy and α , β indexes of bacterioplankton community

言, Proteobacteria 相对丰度在冰体中的平均值最高, 为 63.64%; Actinobacteria 的相对丰度则在冬水中最高, 为 39.10%。此外, Deinococcus-Thermus、Tenericutes、Firmicutes、Acidobacteria、Planctomycetes 和 Chlorobi 等浮游细菌门类的平均相对丰度在夏水中均占有一定程度的优势[图 5(c)]。

整体上, 达里湖表水中优势浮游细菌门类构成及相对丰度变化均存在一定程度的季节差异。相对丰度排在前 3 位的 Proteobacteria、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 等在不同样品间差异主要受冬季冰封状态下冰-水形态差异的影响; 而 Tenericutes、Firmicutes 和 Gemmatimonadetes 等相对丰度样品组间差异则主要受冬、夏季节差异的影响(图 5)。

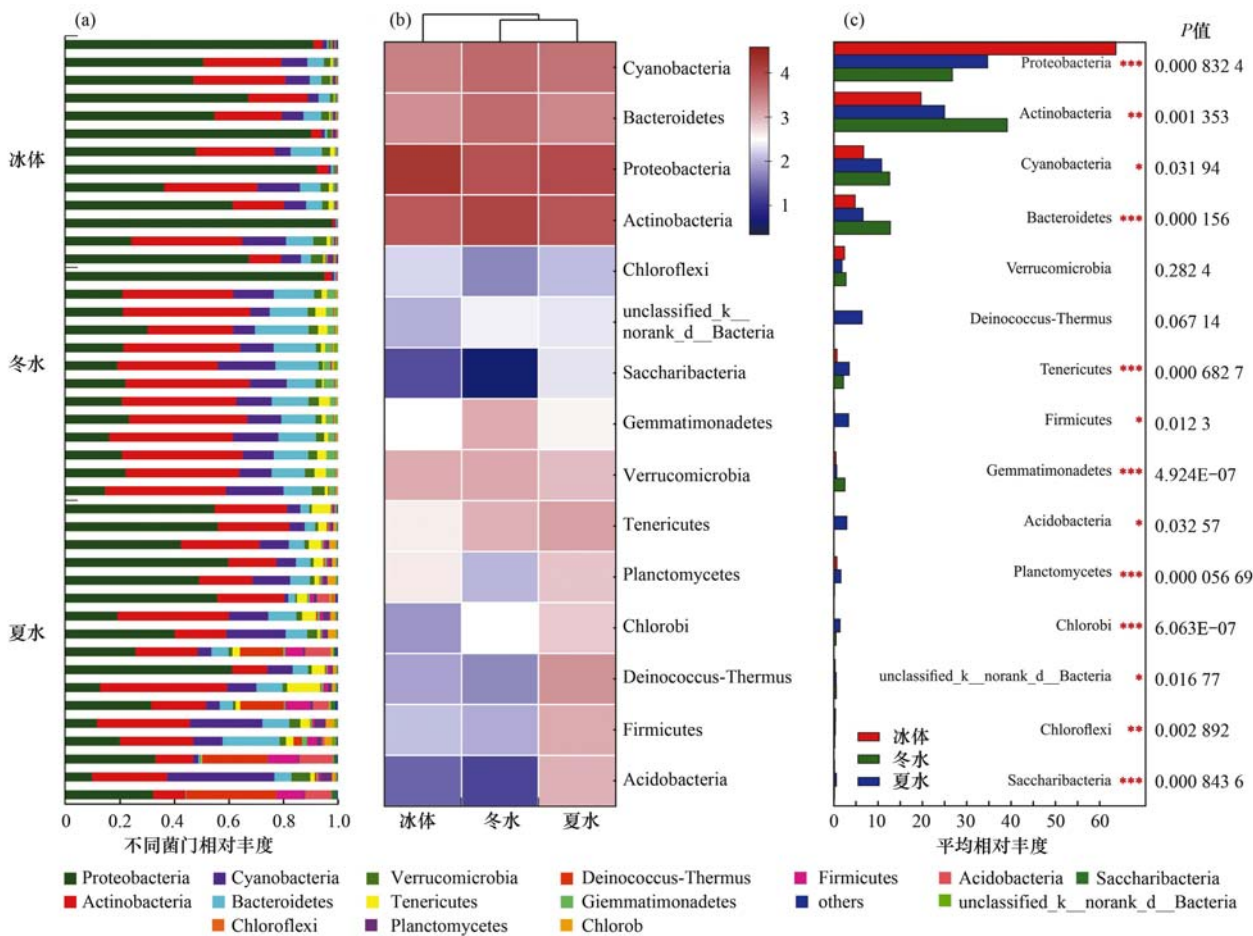
2.5 表水中浮游细菌分型分析

为进一步分析冰封-非冰封状态下表水浮游细菌群落结构特征变化差异, 以优势浮游细菌门类为依据, 在 OTU 水平上, 首先利用 Networkx 软件包, 对样品进行了共现性网络分析; 再采用 abundance-jaccard 算法, 以相对丰度变化为依据, 对冰体、冬水和夏水中的主要浮游细菌门类中的 OTU 相对丰

度进行了统计分析^[33]。

如图 6(a) 所示, 在样品丰度(序列数不少于 30)空间共现性网络分析中, 冰体中共有 84 个 OTUs, 冬水中为 112 个 OTUs, 夏水中为 114 个 OTUs。在 3 类样品中都出现的 OTU 共计 46 个。相对地, 冰体中单独存在的 OTU 共 7 个, 约占总数的 8.3%; 冬水中单独存在的 OTU 共 28 个, 约占总数的 25.0%; 夏水中单独存在的 OTU 共 49 个, 约占总数的 43.0%。而分型结果显示 3 种不同类型样品中的浮游细菌被分成两种类型: 分型 I 主要分布于冬水和夏水样品中, 分型 II 则主要分布于冰体样品中[图 6(b)]。显然, 在 OTU 水平上, 样品被按照“水”和“冰”两种不同的形态进行分型, 对应了样品类型的聚类分析结果[图 5(b)]。

进一步, 基于分型结果对两种类型样品中相对丰度排在前 30 位的 OTU 进行再分析[图 6(c)], 结果显示在两种类型样品中都存在的 OTU 有 16 个, 分别来自 Proteobacteria、Actinobacteria、Cyanobacteria、Bacteroidetes 和 Tenericutes 等 5 个浮游细菌门类, 共含有 15 个浮游细菌菌种。其中分型 I 中来自 Actinobacteria 的 OTU4205 的相对丰度最



(a) 浮游细菌群落结构柱状图, (b) 优势浮游细菌门类相对丰度的聚类分析, (c) 优势浮游细菌门类泊平均相对丰度的组间差异; 图例表示(a)中的优势细菌门类; *表示 $0.01 < P \leq 0.05$, **表示 $0.001 < P \leq 0.01$, ***表示 $P \leq 0.001$

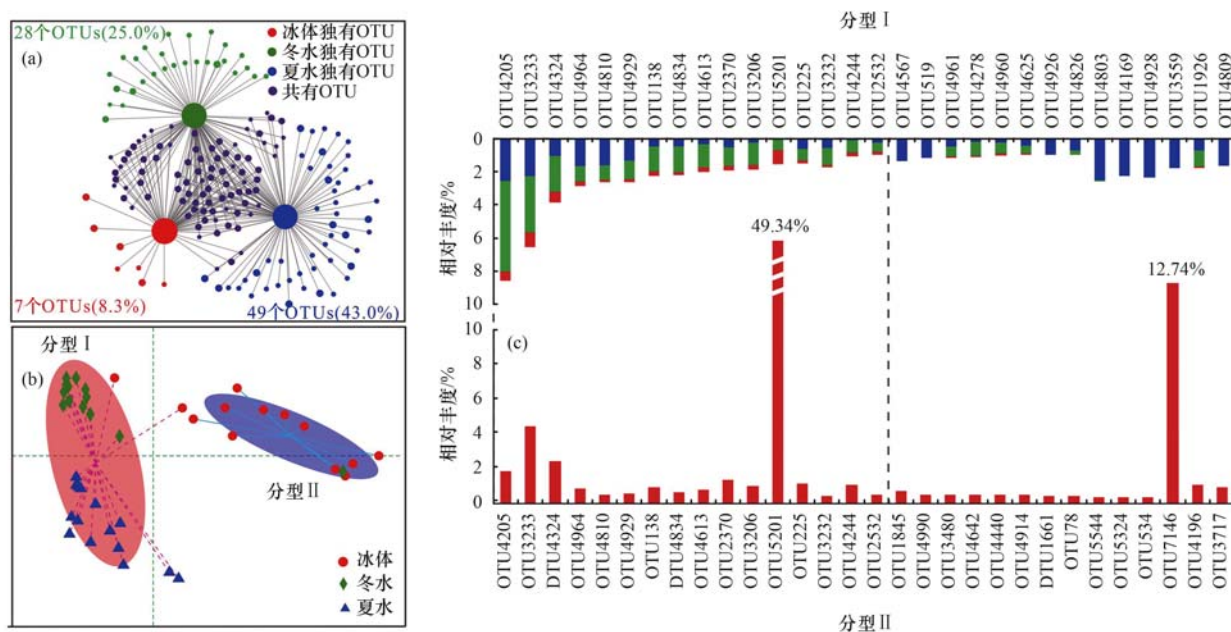
图5 夏-冬季表水样品中细菌群落结构变化及差异对比

Fig. 5 Vertical variation in bacterioplankton community structure in summer and winter surface water samples of Dali Lake

高, 约为 8.6% (冬水和夏水中相对丰度分别为 5.5% 和 2.8%, 冰体为 0.4%); 分型 II 中来自 Proteobacteria 的 OTU5201 的相对丰度最高, 为 49.4%, 且在冰体中的相对丰度最大(冰体和冬水中相对丰度分别为 44.4% 和 5.0%). 其次, 在分型 I 中独有的 14 个 OTU 分别来自 6 个浮游细菌门类, 其中来自夏水 Proteobacteria 中的 OTU4803 相对丰度最高, 为 2.57%; 而分型 II 中独有的 OTU 则来自 5 个浮游细菌门类, 其中主要来自冰体 Proteobacteria 中的 OTU7146 相对丰度最高, 为 12.7% (冰体和冬水中相对丰度分别为 11.6% 和 1.1%). 整体上, 分型 I 以冬水和夏水中各 OTU 的相对丰度为主, 排在前三位的 OTU 分别来自 Proteobacteria、Actinobacteria、Cyanobacteria、Bacteroidetes、Tenericutes、Chlorobi、Acidobacteria、Gemmatimonadetes 和 Deinococcus-Thermus 等 9 个优势浮游细菌门类; 而分型 II 则以冰体中 OTU 的相对丰度为主, 排在前三位的 OTU 分别来自 Proteobacteria、Actinobacteria、Cyanobacteria、

Bacteroidetes、Tenericutes、Verrucomicrobia 和 Firmicutes 等 7 个优势浮游细菌门类. 特别地, 来自 Proteobacteria 的 OTU5201 和 OTU7146 的相对丰度明显较高.

进一步, 在冬水和夏水样品为主的分型 I 中, 相对丰度排在前 30 位的 OTU 中归属于 Actinobacteria 的约为 24.3% (其中 OTU4205 和 OTU3233 的相对丰度较高, 分属于 *g_CL500-29_marine_group* 和 *g_norank_f_Nitriliruptoraceae* 两个菌属), 归属于 Proteobacteria 的约为 17.0% (其中 OTU4613 和 OTU3206 的相对丰度较高, 分属于 *g_Methylothera* 和 *g_Pseudohongiella* 两个菌属, 图 6); 相对地, 以冰体样品为主的分型 II 中前三位的 OTU 归属于 Actinobacteria 的相对丰度为 11.7% (相对丰度较高的菌种与分型 I 中一致), 归属于 Proteobacteria 的相对丰度为 67.6% (其中 OTU5201 和 OTU7146 的相对丰度较高, 分属于 *g_Pseudomonas* 和 *s_Pseudomonas_azotoformans*, 图 6).



(a) 不同样品中物种序列数 ≥ 30 的 OTU 空间现性网络; (b) 样品的分型情况; (c) 不同分型中相对丰度前 30 位的 OTU 变化情况. (a) 中如“7 个 OTUs(8.3%)”代表冰体物种序列数不少于 30 的 OTU 中有 7 个 OTUs 为冰体独有, 占总个数的 8.3%, (c) 中段划线框中为分型 I 和分型 II 中均存的 OTU, 其中分型 II 中 OTU5201 相对丰度为 49.34%

图 6 达里湖表层浮游细菌 OTU 水平上的空间共现性网络和分型分析

Fig. 6 Spatial co-occurrence network and typing of planktonic bacteria at the OTU level in surface water of Dali Lake

显然不同优势细菌门类相对丰度在冬水和夏水间的差异比其在水与冰间的差异要小, 不过夏-冬季节转换导致的外部环境条件差异, 也引起达里湖表水中浮游细菌群落的结构特征出现变化. 如夏水中 OTU4205、OTU3233、OTU4324、OTU3206 和 OTU4613 等相对丰度均明显低于冬水; 而 OTU4964、OTU3559、OTU4567、OTU4809、OTU519、OTU4928、OTU4926 和 OTU4810 等相对丰度则均明显高于冬水(图 6). 显然, 即使同样来自 Proteobacteria 的 OTU3206、OTU4613、OTU3559、OTU4567 和 OTU4809 等相对丰度也伴随季节交替出现明显变化, 促使优势细菌门类的优势菌种发生了变化.

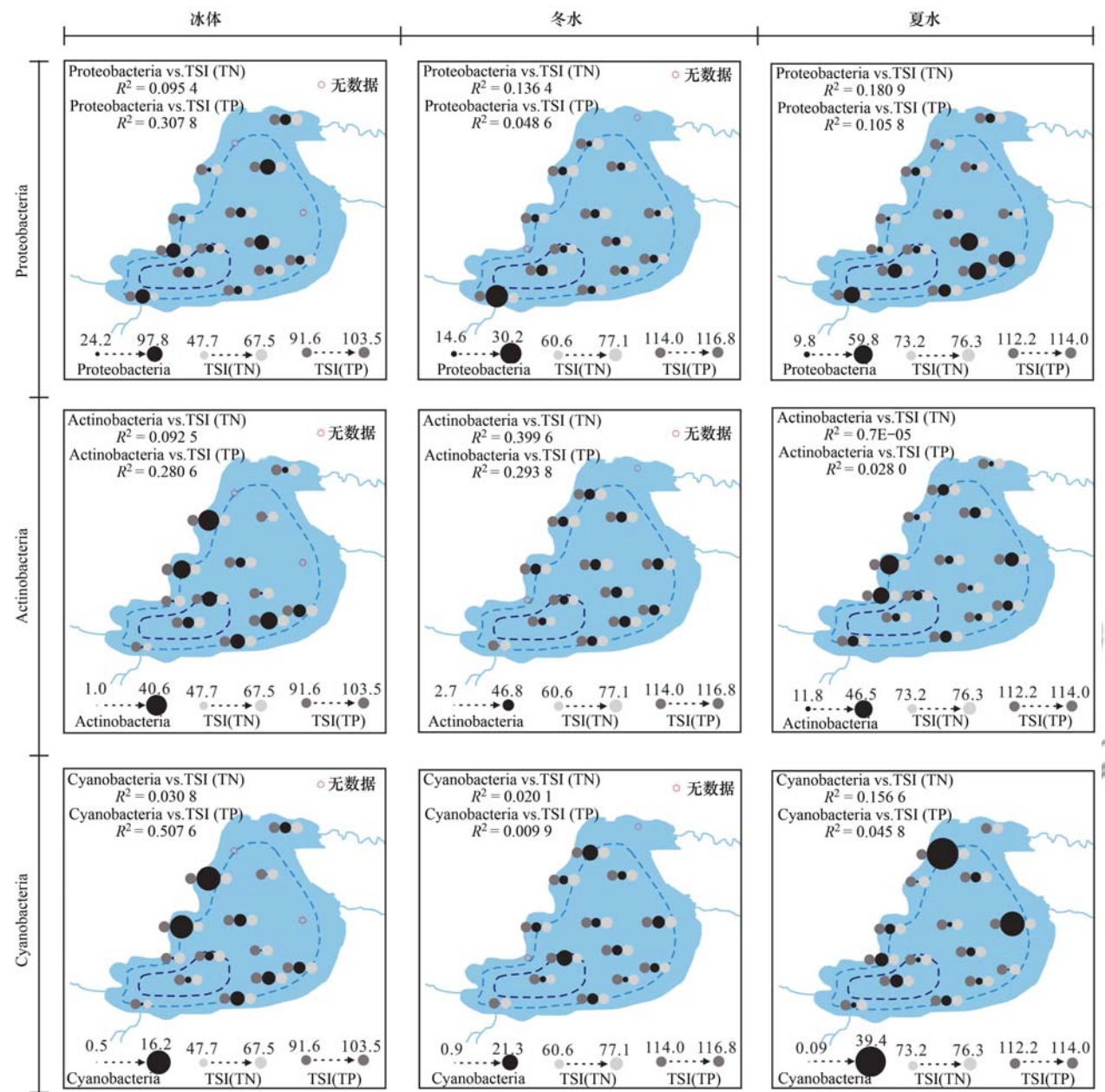
3 讨论

达里湖为高原内陆型湖泊, 除去 4 条河流输入外, 湖水的补给主要依靠地下水和大气降水^[6,8]. 夏季开放状态下, 大气降水等外源输入相对集中, 河流汇入顺畅; 而在冬季近封闭状态下, 地下水输入成为外源补给主体, 河流输入受到结冰、来水量等因素的影响, 甚至出现断流现象^[6], 表水主要受到结冰过程的影响. 浮游细菌作为水生态系统的重要组成部分, 对水环境演变过程响应显著^[4,11,34]. 冬、夏季节差异以及结冰过程中的“冷冻浓缩”效应会导致湖泊表水中理化指标参数出现明显变

化^[10,17,18](图 2), 这对水体微生物群落组成结构产生影响, 进而改变浮游细菌群落的空间分布特征^[34~38].

首先, 通过 Proteobacteria、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 等 3 个主要优势细菌门类相对丰度与 TSI 指数进行空间相互关系的对比, 可以看出夏水中 3 个优势细菌门类的相对丰度与 TSI 指数的相互关系最弱, 而冰体中 3 个优势细菌门类的相对丰度与 TSI 指数的相互关系最明显. 具体来看, 冰体中 TSI(TP)指数与 3 个优势细菌门类均存在较为明显的相关性, 其中与 Proteobacteria 相对丰度变化呈负相关关系(相关系数 $R^2 = 0.3078$, $n = 15$, 图 7), 而与 Actinobacteria 和 Cyanobacteria 相对丰度变化呈正相关关系(相关系数分别为 $R^2 = 0.2806$ 和 $R^2 = 0.5076$, $n = 13$, 图 7). 此外, Actinobacteria 相对丰度变化与冬水中 TSI(TN)和 TSI(TP)指数均存在正相关关系(相关系数分别为 $R^2 = 0.3996$ 和 $R^2 = 0.2938$, $n = 13$, 图 7). 显然, 冰体中不同取样点 P 元素含量变化引起的样品富营养化程度改变成为影响冰体中主要优势浮游细菌门类相对丰度变化的主要因素之一, 这与浅水湖泊中 P 元素的生态功能分析一致^[18,38]; 而冰下水体即冬水富营养化的增加则可能对 Actinobacteria 相对丰度起到积极的促进作用^[39](图 5).

其次, 结合浮游细菌门类优势菌属(本文选取相对丰度前 50 位的菌属作为分析对象, 基本包含



图点的大小代表相关指标的相对丰度或相对含量,如 24.2 和 97.8 分别代表冰体中各取样点 Proteobacteria 相对丰度的最低值和最高值,以此类似

图 7 夏-冬季表水中 Proteobacteria、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 的空间分布及其与 TSI 指标的相互关系

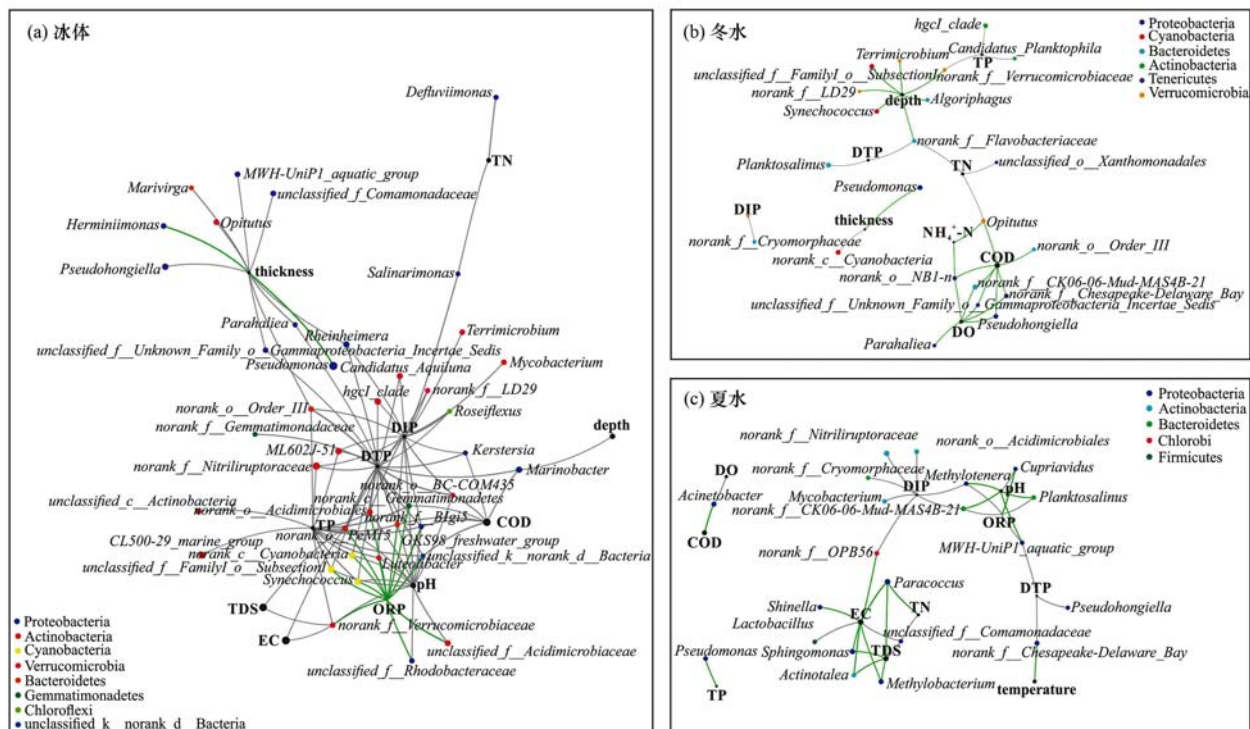
Fig. 7 Distribution of Proteobacteria, Actinobacteria, and Cyanobacteria and their relationships with changes in the TSI proxy in summer and winter surface water

相对丰度 ≥ 30 的 OTU)和理化指标参数间的双因素网络分析,对浮游细菌群落结构的影响因素进行了讨论(图 8). 在夏季开放条件下,湖泊表水中主要浮游细菌菌属与理化指标间相互关系的整体网络连通性较差. 不过,反映表水接收外源输入(如风尘沉积和大气降水等)而引起理化性质改变的 TDS、EC、ORP 及 pH 值等指标参数与 Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes 和 Chlorobi 等菌门中的部分优势菌属存在负相关关系,如 *Paracoccus* (含 OTU3074)、*norank_f_OPB56* (含 OTU4826) 等 (OTU 相对丰度见图 6,下同),而 DIP 和 DTP 则

与 Actinobacteria、Proteobacteria 和 Bacteroidetes 等菌门中优势菌属呈正相关关系,如 *norank_f_Nitrliruptoraceae* (含 OTU3233 和 OTU2370) 和 *Pseudohongiella* (含 OTU3206) 等 [图 8(c)]; 相对地,在冬季冰封条件下,各取样点(除个别河口区域的取样点,如 DL-1 和 DL-15 等)表水主要受到结冰过程的影响,而浅水区的取样点可能还会受到地下水输入的影响^[9],这导致分析网络的连通性依然较差. 不过,作为冰体和夏水的过渡性样品,冬水中 DO、COD 及水深(depth)成为与优势菌属相对丰度的关系最为密切的理化指标参数,

如限制了 *Pseudohongiella* 和 *Synechococcus* (含 OTU3559) 等菌属相对丰度的增加 [图 8(b)]. 而极端环境状态下的冰体, 其理化性质主要受到结冰过程的影响, 存留其中的优势菌属和理化指标间的网络性却最好, 一方面以 DTP、DIP 和 TP 形态为主的 P 元素变化显著促进 Actinobacteria 菌门中优势菌属的相对丰度, 如 *norank_f_Nitiliruptoraceae* 等; 另一方面, COD、pH、ORP 和

冰厚 (thickness) 变化则明显影响 Proteobacteria、Cyanobacteria 等菌门中优势菌属相对丰度变化, 如 ORP 抑制了 *GKS98_freshwater_group* (含 OTU4796) 和 *Synechococcus* (含 OTU4964) 等菌属的相对丰度增加, 而冰厚则抑制了 Proteobacteria 菌门中的 *Herminiimonas* (含 OTU4914) 和 *Pseudomonas* (含 OTU5201) 菌属相对丰度的增加 [图 8(a) 和 8(b)].



(a) 冰体中网络分析; (b) 冬水中网络分析; (c) 夏水中网络分析; 圆点大小表示相对含量或丰度大小; 连线的颜色表示正负相关性, 灰色表示正相关, 绿色表示负相关; 线的粗细表示相关性系数的大小, 线越粗, 表示物种之间的相关性越高; 线越多, 表示该物种与相关参数指标间的联系越密切; 图例表示优势细菌门类; 同一比例仅限于各图内部比较

图 8 夏-冬季节水中优势浮游细菌属水平上的双因素网络分析

Fig. 8 Network analysis between dominant planktonic bacteria and physicochemical proxies in summer and winter surface water

整体上, 冰体中不同形态 P 元素、COD、ORP、pH 及冰厚等理化指标变化与 Proteobacteria、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 等菌门中主要菌属相对丰度变化的关系最为密切, 这也部分解释了冰体中 TSI (TP) 指数与上述 3 个优势细菌门类均存在明显相关性的原因 (图 7). 而在冬水、夏水中, 一方面 N 和 P 等营养元素的含量变化仅与个别菌属关系密切; 另一方面, 冬水中优势菌属相对丰度主要受到水深 (不同水深受地下水补给影响存在差异^[10]) 和由结冰过程造成的冬水中 DO 及 COD 变化的影响, 而夏水中优势菌属相对丰度则主要受到反映水-气交换、大气降水输入等过程的 EC、pH、TDS 和 ORP 等理化参数变化的影响. 显然, 这即部分解释了达里湖夏、冬水体样品富营养化指数 TSI 值与 Proteobacteria 等优势细菌门类相关性较低的原因,

又表明夏-冬季节变化导致表水浮游细菌群落结构的主要影响因素出现改变. 不过, 虽然结冰过程导致冰下表水富营养化增加可以影响某一优势浮游细菌门类的相对丰度, 但是同一菌属在表水中的绝对丰度变化可能来源于夏-冬季多个理化指标参数变化幅度的差异影响.

虽然达里湖表水主要优势浮游细菌门类组成与其他湖泊或水库中细菌群落结构基本相似^[40,41], 但是作为寒旱区封闭型湖泊, 达里湖表水中优势菌属相对丰度变化的影响因素不仅存在夏-冬季节性差异, 同样也显示出一定程度的区域特征. 例如, 来自 Proteobacteria 的 *Pseudomonas* 相对丰度在冬季受冰厚的抑制、在夏水中则受 TP 的抑制, 而 *Pseudohongiella* 相对丰度在冰体中受到冰厚的促进、在冬水中受 DO 和 COD 抑制、而在夏水中则受

到 DTP 的促进^[28,42]；来自 Actinobacteria 的 *hgcl*_clade 相对丰度在冰体中受到 DTP 和 DIP 含量变化的共同促进、在冬水中则主要受到 TP 含量变化的促进^[28,43]；来自 Cyanobacteria 的 *Synechococcus* 虽然在夏季出现相对丰度明显增加的现象^[28]，但是在冰体中受到 TP、DTP、ORP 和 pH 等理化指标的影响、而在冬水中却只与水深关系明显、在夏水中却并不存在与之明显相关的理化指标。因此，这也特别地显示寒旱区湖泊水体细菌群落结构特征及主要影响因素分析还有待深入开展。

4 结论

(1) 达里湖表水中理化指参数的相对含量和浮游细菌群落结构特征对夏-冬外部环境状态的季节变化存在显著响应。如在相对丰度大于 1% 的优势浮游细菌门类中，虽然 Proteobacteria、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 等构成冰体、冬水和夏水中均存在的优势浮游细菌门类，但是夏水中的 *Deinococcus-Thermus*、*Tenericutes* 和 *Firmicutes* 等浮游细菌门类相对丰度明显高于冰体和冬水中的相对丰度。整体上，夏水中浮游细菌群落的多样性、均匀度最好，冰体中的多样性较低、均匀度较差。这导致优势浮游细菌门类的聚类分析结果显示出“冰”与“水”间存在明显差异。

(2) 夏-冬季节转换导致达里湖表水受到诸如大气降水等外部因素的影响以及湖水内部出现冰-水状态改变，进而引起表水理化指标出现变化，导致冰体、冬水和夏水不同样品中优势细菌门类相对丰度不同。整体上，冰体中优势菌属主要受到结冰过程引起的冰体内部理化指标（如不同形态 P 元素迁移、冰厚和 ORP 等）变化的影响；相对地，冬水和夏水等水体样中优势菌属主要受到外部环境改变引起的理化指标变化的影响，如冬水中优势菌属除受结冰过程（如 COD 和 DO 等）影响外还可能对地下水输入产生响应（如水深等），而夏水中优势菌属则主要受到如 TDS、EC 和 pH 等理化指标的影响。

参考文献：

- [1] Lauro F M, DeMaere M Z, Yau S, *et al.* An integrative study of a meromictic lake ecosystem in Antarctica [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(5): 879-895.
- [2] Garcia S L, Salka I, Grossart H P, *et al.* Depth-discrete profiles of bacterial communities reveal pronounced spatio-temporal dynamics related to lake stratification [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2013, **5**(4): 549-555.
- [3] Zhao D Y, Xu H M, Zeng J, *et al.* Community composition and assembly processes of the free-living and particle-attached bacteria in Taihu Lake [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(6), doi: 10.1093/femsec/fix062.
- [4] 任丽娟, 何昶, 邢鹏, 等. 湖泊水体细菌多样性及其生态功能研究进展 [J]. *生物多样性*, 2013, **21**(4): 421-432.
- [5] Ren L J, He D, Xing P, *et al.* Bacterial diversity and ecological function in lake water bodies [J]. *Biodiversity Science*, 2013, **21**(4): 421-432.
- [6] 刘晓旭, 李畅游, 李文宝, 等. 冰封期达里诺尔湖同位素与营养盐分布特征及关系的定量分析 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1159-1167.
- [7] Liu X X, Li C Y, Li W B, *et al.* The distribution and relationship of isotope and nutrient during freeze-up period in the Lake Dalinuer: a quantitative approach [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1159-1167.
- [8] 刘志娇. 达里诺尔湖水动力条件及氢氧稳定同位素试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [9] 王亚俊, 孙占东. 中国干旱区的湖泊 [J]. *干旱区研究*, 2007, **24**(4): 422-427.
- [10] Wang Y J, Sun Z D. Lakes in the arid areas in China [J]. *Arid Zone Research*, 2007, **24**(4): 422-427.
- [11] 李文宝, 刘志娇, 杨旭, 等. 内蒙古高原达里诺尔湖夏季水体稳定同位素变化特征 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 539-550.
- [12] Li W B, Liu Z J, Yang X, *et al.* Changes of stable oxygen and hydrogen isotopes in summer Dali-nor Lake in Inner Mongolia of Northern China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 539-550.
- [13] 李文宝, 杜蕾, 王旭阳, 等. 内蒙古达里诺尔湖水体稳定同位素空间分布特征指示的区域补给差异 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(5): 1334-1343.
- [14] Li W B, Du L, Wang X Y, *et al.* Regional groundwater recharges based on the characteristics of stable isotope distribution in Dali-nor Lake in Inner Mongolia [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1334-1343.
- [15] 杨芳, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海冰封期湖泊冰盖结构特征对污染物分布的影响 [J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(2): 455-462.
- [16] Yang F, Li C Y, Shi X H, *et al.* Impact of seasonal ice structure characteristics on ice cover impurity distributions in Lake Ulansuhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(2): 455-462.
- [17] 冯胜, 秦伯强, 高光. 细菌群落结构对水体富营养化的响应 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(11): 1823-1829.
- [18] Feng S, Qin B Q, Gao G. Response of bacterial communities to eutrophic water in Lake Taihu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(11): 1823-1829.
- [19] Qin H, Han C, Jin Z, *et al.* Vertical distribution and community composition of anammox bacteria in sediments of a eutrophic shallow lake [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2018, **125**(1): 121-132.
- [20] 丁理, 常玉梅, 杨琦, 等. 我国东北典型河流冰封期细菌多样性的研究——以松花江为例 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(6): 1415-1423.
- [21] Ding C, Chang Y M, Yang Q, *et al.* Bacterial biodiversity in the river in Northeast China during the freezing seasons: a case in Songhua River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(6): 1415-1423.
- [22] 杨文焕, 毋凡琛, 申涵, 等. 冰封期内蒙古南海湖细菌菌群结构特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, **39**(10): 75-81.
- [23] Yang W H, Wu F C, Shen H, *et al.* Structure of bacteria community in the Nanhai Lake at frozen [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, **39**(10): 75-81.
- [24] 左乐, 吕昌伟, 何江, 等. 微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4501-

- 4508.
- Zuo L, Lü C W, He J, *et al.* Impacts of microorganisms on degradation and release characteristics of organic phosphorus in lake sediments during freezing season [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4501-4508.
- [16] 周石磊, 孙悦, 岳胥丞, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2177-2187.
- Zhou S L, Sun Y, Yue G C, *et al.* Spatial distribution characteristics and driving factors of aerobic denitrification bacterial community structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area during the winter freezing period [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2177-2187.
- [17] 杜蕾, 李文宝, 杨旭, 等. 达里诺尔湖夏季水体浮游细菌群落垂直变化特征差异[J]. *地球科学*, 2020, **45**(5): 1818-1829.
- Du L, Li W B, Yang X, *et al.* Vertical changes of planktonic bacteria community and predictive functional analysis in summer Dali-nor Lake [J]. *Earth Science*, 2020, **45**(5): 1818-1829.
- [18] 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 等. 冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2276-2286.
- Li W B, Yang X, Tian Y N, *et al.* Changes in the bacterioplankton community between "Ice" and "Water" in the frozen Dali lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2276-2286.
- [19] 王旭阳. 基于3S技术的达里诺尔湖水深反演研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [20] Xiao J L, Si B, Zhai D Y, *et al.* Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2008, **40**(1): 519-528.
- [21] Kannikollu S, Wemheuer B, Herber J, *et al.* Distinct compositions of free-living, particle-associated and benthic communities of the Roseobacter group in the North Sea [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2015, **92**(1), doi: 10.1093/femsec/fiv145.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 239-284.
- [23] Kratzer C R, Brezonik P L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1981, **17**(4): 713-715.
- [24] Carlson R E. A trophic state index for lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369.
- [25] Ji B, Liang J C, Ma Y Q, *et al.* Bacterial community and eutrophic index analysis of the East Lake [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 682-688.
- [26] Chao A. Nonparametric estimation of the number of classes in a population [J]. *Scandinavian Journal of Statistics*, 1984, **11**(4): 265-270.
- [27] Rogers M B, Fire B, Shi M, *et al.* Disruption of the microbiota across multiple body sites in critically ill children [J]. *Microbiome*, 2016, **4**(1), doi: 10.1186/s40168-016-0211-0.
- [28] 陈兆进, 丁传雨, 朱静亚, 等. 丹江口水库枯水期浮游细菌群落组成及影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 336-344.
- Chen Z J, Ding C Y, Zhu J Y, *et al.* Community structure and influencing factors of bacterioplankton during low water periods in Danjiangkou Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 336-344.
- [29] Ye J, Joseph S D, Ji M, *et al.* Chemolithotrophic processes in the bacterial communities on the surface of mineral-enriched biochars [J]. *The ISME Journal*, 2017, **11**(5): 1087-1101.
- [30] Chen B S, Teh B S, Sun C, *et al.* Biodiversity and activity of the gut microbiota across the life history of the insect herbivore *Spodoptera littoralis* [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep29505.
- [31] Zhou Y J, Li J H, Friedman C R, *et al.* Variation of soil bacterial communities in a chronosequence of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fpls.2017.00849.
- [32] Zhang F, Sun X X, Zhang X C, *et al.* The interactions between gut microbiota and entomopathogenic fungi: a potential approach for biological control of *Blattella germanica* (L.) [J]. *Pest Management Science*, 2018, **74**(2): 438-447.
- [33] Li K, Dan Z, Gesang L, *et al.* Comparative analysis of gut microbiota of native Tibetan and Han populations living at different altitudes [J]. *PLoS One*, 2016, **11**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0155863.
- [34] 戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 等. 三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1414-1422.
- Dai W F, Guo Y H, Yu W N, *et al.* Effects of coastal organic pollution on bacterioplankton community in Sanmen Bay [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1414-1422.
- [35] Newton R J, Jones S E, Eiler A, *et al.* A guide to the natural history of freshwater lake bacteria [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2011, **75**(1): 14-49.
- [36] Jiang J G, Shen Y F. Development of the microbial communities in lake Donghu in relation to water quality [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **127**(1-3): 227-236.
- [37] Bosshard P P, Santini Y, Grütter D, *et al.* Bacterial diversity and community composition in the chemocline of the meromictic alpine Lake Cadagno as revealed by 16S rDNA analysis [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, **31**(2): 173-182.
- [38] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1229-1243.
- Qin B Q. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1229-1243.
- [39] Allgaier M, Grossart H P. Diversity and seasonal dynamics of *Actinobacteria* populations in four lakes in northeastern Germany [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(5): 3489-3497.
- [40] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, *et al.* The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization [J]. *Science*, 2008, **321**(5889): 684-686.
- [41] Haukka K, Kolmonen E, Hyder R, *et al.* Effect of nutrient loading on bacterioplankton community composition in lake mesocosms [J]. *Microbial Ecology*, 2006, **51**(2): 137-146.
- [42] 王欢, 赵文, 谢在刚, 等. 碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3660-3669.
- Wang H, Zhao W, Xie Z G, *et al.* Bacterial community structure characteristics in the Biliuhe reservoir and its key driving factors [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3660-3669.
- [43] 李建柱, 侯杰, 张鹏飞, 等. 空心菜浮床对鱼塘水质和微生物多样性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 3071-3080.
- Li J Z, Hou J, Zhang P F, *et al.* Influence on water quality and microbial diversity in fish pond by *Ipomoea aquatica* floating-bed [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 3071-3080.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)