

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系

贺玉晓¹, 买思婕¹, 任玉芬², 李卫国¹, 赵同谦^{1*}, 马寅男³

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 北京市南水北调大宁管理处, 北京 100442)

摘要: 浮游植物是湖库生态系统物质循环和能量流动的主要参与者, 了解其群落组成对保护水生生态系统平衡具有重要意义. 2021年6月在南水北调中线工程水源地丹江口水库淅川库区设置7个采样点, 分4层分别在0.5、5、10和20 m处共采取28个样品. 采用高通量测序测定真核浮游植物群落结构, 分析真核浮游植物群落在水平和垂直向上的分布特征. 采用冗余分析探讨了浮游植物主要类群与环境因子的关系. 结果表明: ①库区真核浮游植物共12门68属, 物种为甲藻-硅藻-绿藻型结构. 水平方向上浮游植物群落差异较大, 各采样点垂直方向上浮游植物丰度和多样性存在较大差异. 宋岗、土门和党子口浮游植物群落多样性和丰度随水深增加呈下降趋势, 其他采样点的浮游植物群落与水深关系趋势不明显. ②硝氮(NO_3^- -N)、水深、溶解氧(DO)、pH和水温(WT)是影响库区浮游植物垂直分布的重要环境因子. 环境因子对浮游植物门类影响各异, 甲藻门与 NO_3^- -N和pH呈负相关, 与其他环境因子呈正相关; 硅藻门与 NO_3^- -N和pH呈正相关, 与其他环境因子呈负相关; 绿藻门与WT、pH和DO呈负相关, 与水深无明显相关性.

关键词: 丹江口水库; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 高通量测序

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5096-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112135

Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir

HE Yu-xiao¹, MAI Si-jie¹, REN Yu-fen², LI Wei-guo¹, ZHAO Tong-qian^{1*}, MA Yin-nan³

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Daning Management Office of Beijing South to North Water Diversion, Beijing 100442, China)

Abstract: Eukaryotic phytoplankton play crucial roles in ecosystem processes, and understanding their community composition and abundance is of great importance to protect the balance of aquatic ecosystems. Danjiangkou Reservoir is a canyon lake in central China that acts as the water source of the Mid-route of South-to-North Water Diversion Project. In this study, the composition of planktonic microeukaryotes from water samples with a depth ranging from 0.5 to 20 m in Danjiangkou Reservoir were investigated using high-throughput 18S rDNA gene sequencing. The environmental factors including pH, water temperature (WT), nitrate (NO_3^- -N), ammonia (NH_4^+ -N), total nitrogen (TN), conductivity (Cond.), water depth, and dissolved oxygen (DO) in the reservoir areas were measured, and their correlations with the abundance and diversity of eukaryotic phytoplankton were analyzed. The results of high-throughput sequencing showed that a total of 68 genera of phytoplankton belonging to 12 phyla were detected, and the phytoplankton communities were mainly composed of Dinophyceae, Bacillariophyta, and Chlorophyta. In particular, significant differences in the diversity of phytoplankton communities on a vertical distribution were found. The diversity and abundance of the phytoplankton communities in Songgang (SG), Tumen (TM), and Dangzikou (DZK) decreased with the increase in water depth, and the relationship between phytoplankton and water depth in other sampling sites was not obvious. The results of RDA showed that NO_3^- -N, water depth, DO, pH, and WT could influence the vertical distribution of the phytoplankton community in the Danjiangkou Reservoir. Among these phytoplankton types, Dinophyceae was negatively correlated with NO_3^- -N and water depth and positively correlated with other environmental factors. Meanwhile, Bacillariophyta was positively correlated with NO_3^- -N and water depth and negatively correlated with other environmental factors. In addition, Chlorophyta was negatively correlated with WT, pH, and DO and not significantly correlated with water depth.

Key words: Danjiangkou Reservoir; phytoplankton; community structure; environmental factor; high-throughput sequencing

浮游植物作为物质循环和能量流动的主要参与者, 是水生群落中重要的分类群, 在湖泊生态系统中发挥着至关重要的作用, 具有重要的生态功能^[1~3]. 作为水体主要的初级生产力, 浮游植物的产量占全球初级净产量的近50%^[4,5], 其群落种类组成能在一定程度上反映水环境的变化规律, 因此, 浮游植物群落结构及其变化规律常被用于监测水体环境状况^[6,7]. 丹江口水库是南水北调中线工程的水源地, 为沿线20多座城市供水, 其水质安全保障具有重要

意义.

有学者对库区浮游植物群落结构及其影响因子进行了研究, 采样主要集中在水深0.5 m处. 王英华等^[8]在库区共采集到浮游植物66种, 隶属于7门

收稿日期: 2021-12-14; 修订日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1704241); 中原科技创新领军人才项目(194200510010)

作者简介: 贺玉晓(1976~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水生生物, E-mail: heyuxiao@hpu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhaotq@hpu.edu.cn

38 种,发现硅藻为春、秋和冬季的优势门类,溶解氧、pH 值和磷浓度是影响浮游植物群落组成的主要环境因子;郑保海等^[9]对丹江口水库着生藻类进行了 6 次连续监测,共检出着生藻类 6 门 46 属,发现硅藻为优势种,着生藻类群落存在时空差异性;贾海燕等^[10]对丹江口库湾监测,共鉴定出浮游植物 7 门 57 属,发现浮游植物群落组成以硅藻和绿藻为主,影响浮游植物群落组成的主要环境因子为温度、二氧化硅浓度、电导率和氮、磷浓度.贺玉晓等^[11]共检测到库区浮游植物 6 门 57 属,硅藻和绿藻为早春季节的优势门类,浮游植物样品分别于 1.5、5 和 10 m 采集后混合,缺乏库区浮游植物垂直分布特征的研究.

以上研究在方法上主要采用显微镜观察法,这种传统方法存在受取样条件限制、需一定的保存技术、工作量及鉴定时会有较大的差异和分歧等不足^[12].与浮游植物显微检测方法相比,高通量测序技术因能获得特定的 DNA 片段和高效地研究浮游生物群落组成,在水生生态系统生物多样性研究中得到应用^[13].贺玉晓等^[11]通过高通量测序技术发现了前人通过显微镜观察法未发现的绿藻门麦可属(*Mychonastes*);王靖淇等^[14]通过高通量测序和显微镜观察法对比研究了辽河真核浮游植物多样性,利用高通量测序技术弥补了显微镜观察中丢失的物种信息.

上述研究内容主要集中于浅层水体浮游植物群落组成,库区深水水体浮游植物群落结构和分布尚未明确.库区浮游植物在垂直方向上如何变化、影响浮游植物群落组成的水环境因子等成为库区水质保护亟待解决的重要科学问题.本研究采用高通量测序测定浮游植物群落结构,分析浮游植物群落在水平和垂向上的分布特征,采用冗余分析判断浮游植物主要类群与环境因子的关系,以期为丹江口水库水质保护工作积累基础数据,并为水环境进一步提升提供科技支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

丹江口水库分布于湖北省丹江口市和河南省南阳市淅川县之间(小部分涉及湖北省郧县和张湾区等),由湖北境内的汉江库区和河南境内的丹江库区两大部分组成.淅川库区($32^{\circ}39'0.595''\sim 32^{\circ}48'0.892''N$, $111^{\circ}30'0.833''\sim 111^{\circ}37'0.645''E$)属于丹江库区下游(图 1),面积为 546 km^2 ,占水库总面积的 52%,属北亚热带季风气候,四季分明,光照充足,日照率达 44%.春秋季节凉爽,夏季炎热且降雨集中,冬季寒冷少雨雪.库区多年平均气温 15.8°C ,降雨量充沛,年降雨量为 $800\sim 1\,000\text{ mm}$,多年平均降雨量为 808 mm ,相对湿度为 67%^[15].

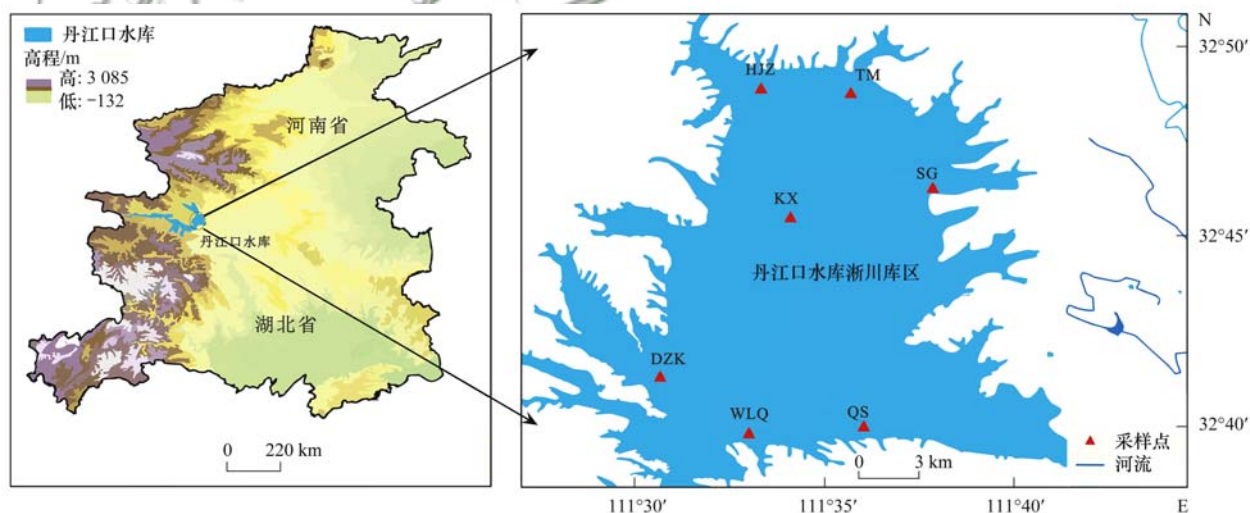


图 1 丹江口水库采样点分布示意

Fig. 1 Location map of sampling sites in Danjiangkou Reservoir area

1.2 样品采集与理化因子测定

采样时间为 2021 年 6 月 20 日,根据淅川库区整体结构特点,依据典型性和代表性等原则,在参照前人研究方法的基础上^[14,16~19],于库区设立了 7 个采样点(图 1),分别为宋岗(SG)、土门(TM)、黑鸡嘴(HJZ)、库心(KX)、党子口(DZK)、五龙泉

(WLQ)和渠首(QS).在每个采样点 0.5、5、10 和 20 m(对应标记为 1、2、3 和 4)处分别采样.每层取 3 组混合后经浮游植物网浓缩,再过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜,并将滤膜转移到 1.5 mL 无菌离心管中放于液氮中保存.采样和分析参考文献^[20,21]的方法.

采用便携式多功能水质参数仪现场测定水温

(WT)、pH、溶解氧(DO)和电导率(Cond.),每层取0.5 L水样放入聚乙烯瓶中带回实验室,按照文献[22]对水体中的总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)等理化指标进行测定.

1.3 浮游植物 DNA 提取、扩增和测序

样品中总 DNA 先用 Mo Bio/QIAGEN 公司的 DNeasy PowerWater Kit 进行抽提,提取的 DNA 采用荧光分光光度计(Quantifluor-ST fluorometer, Promega, E6090; Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit, Invitrogen, P7589)和 1% 琼脂糖凝胶电泳分析,确定浓度和纯度.选取 547F-CCAGCASCYGGC GTAATTC 和 V4R-ACTTTCGTTCTTGATYRA 作为真核浮游植物 PCR 扩增的引物^[23].扩增体系为:Q5® High-Fidelity DNA Polymerase 聚合酶,20 μL 反应系统.扩增程序为:98℃ 预变性 2 min,30 个循环(98℃ 变性 15 s,55℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 30 s),最后 72℃ 延伸 10 min(PCR 仪:ABI 2720 型).PCR 产物经 AxyPrep DNA Gel Extraction Kit 试剂盒分离纯化后采用 Illumina NovaSeq-PE250 高通量测序,通过与 Silva 132 rRNA 数据库比对获得浮游植物种类及相对丰度.测序所得原始数据上传至 NCBI,序列号为 PRJNA(782248).

1.4 数据分析

采用 QIIME2(quantitative insights into microbial ecology)软件对获得的原始序列进行质控、去噪、拼接和去嵌合体后,对高质量序列在相似性 $\geq 97\%$ (默认为种水平的相似度)的划分标准进行最佳分类单元(operational taxonomic units, OTUs)的划分.将测序的 OTUs 结果与 Silva 132 rRNA 数据库进行比对,采用 QIIME2 的 Classify-sklearn 算法^[24](<https://github.com/QIIME2/q2-feature-classifier>)对每个 OTUs 的代表序列,在 QIIME2 软件中使用默认参数,使用预先训练好的 Naive Bayes 分类器进行物种注释.

使用 QIIME2 和 R 语言软件分析真核浮游植物群落的 α 多样性(within-habitat diversity)和 β 多样性(between-habitat diversity). α 多样性是指生境内多样性,可表征浮游植物丰度、多样性和均匀度的变化.以 Chao 指数^[25]和 Observed-Species 指数表征丰富度;以 Shannon-Wiener 指数^[26]和 Simpson 指数^[27]表征多样性;Pielou-evenness 指数表征均匀度^[28];以 Good's coverage 指数表征覆盖度^[29]. β 多样性是指沿着环境梯度变化的不同群落之间,物种组成的相异性.通过主坐标分析(principal coordinate analysis, PCoA)和物种组成热图(heatmap)展示浮游植物垂直变化的主要趋势.

使用 Canoco5.0 软件进行冗余分析(RDA),相关图件采用 Excel 和 Origin 9.0 绘制.

2 结果与分析

2.1 水环境因子

库区 7 个采样点水环境因子监测结果如表 1 所示.从中可知,DO 和 WT 随水深增加而降低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随水深增加而升高.对照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),丹江口水库水质优良.

2.2 测序结果

对库区 0.5 ~ 20 m 共 28 个样品的 18S rDNA V4 可变区 DNA 扩增后,采用 Illumina 进行高通量测序分析库区浮游植物群落的组成结构.共获得 1 972 914 条原始序列,长度平均值为 420 bp,去除非目标序列和嵌合体后,所有样品共获得 1 646 862 条高质量序列,占原始序列的 83.5%.当测序读数达到 20 000 时,稀疏曲线逐渐趋于稳定,表明测序数量充足,分类群丰富度足够高(图 2).

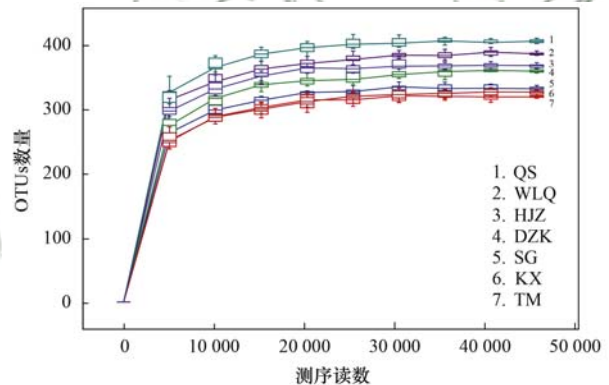


图 2 各采样点稀疏曲线

Fig. 2 Rarefaction indices of phytoplankton in different sampling sites

2.3 库区浮游植物群落组成

2.3.1 库区浮游植物群落水平分布特征

28 个样品共获得 3 135 个 OTUs,属于 12 门 68 属.水平方向上浮游植物群落 α 多样性分析结果如表 2 所示,从中可知,每个样本的 Good's coverage 指数均超过了 0.99,可充分覆盖库区浮游植物类群. Observed-Species 指数和 Chao 指数表征浮游植物丰度,物种丰富程度在 0.5 m 处排序为:TM > SG > QS > DZK > HJZ > KX > WLQ; 在 5 m 处排序为:WLQ > SG > QS > TM > DZK > KX > HJZ; 在 10 m 处排序为:HJZ > DZK > KX > WLQ > QS > TM > SG; 在 20 m 处排序为:QS > HJZ > WLQ > TM > KX > DZK > SG. Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数表征浮游植物多样性程度,最大值分别出现在 SG1、WLQ2、QS3 和 QS4,表明 0.5 m 处 SG 和 5 m 处 WLQ 的浮

表 1 各采样点理化性质参数

Table 1 Physical and chemical properties in different sampling sites

采样点	WT /℃	DO /mg·L ⁻¹	pH	电导率 /μS·cm ⁻¹	ρ(TN) /mg·L ⁻¹	ρ(NH ₄ ⁺ -N) /mg·L ⁻¹	ρ(NO ₃ ⁻ -N) /mg·L ⁻¹
SG1	24.1	8.57	8.89	290	0.93	0.10	0.53
SG2	24.0	8.49	8.90	285	0.93	0.09	0.79
SG3	21.1	8.41	8.80	287	0.97	0.13	0.93
SG4	20.0	7.89	8.66	286	0.96	0.11	0.98
TM1	24.2	8.28	8.93	288	1.06	0.13	0.41
TM2	24.1	8.11	8.94	287	1.09	0.14	0.57
TM3	24.0	7.99	8.90	289	1.08	0.09	0.73
TM4	22.9	7.25	8.83	294	1.06	0.14	0.95
HJZ1	24.3	7.99	8.81	284	1.09	0.08	0.44
HJZ2	24.1	7.77	8.92	289	1.08	0.09	0.54
HJZ3	23.0	7.67	8.87	308	1.15	0.15	0.73
HJZ4	22.1	7.36	8.76	294	1.06	0.11	0.98
KX1	24.7	8.11	8.91	274	0.71	0.13	0.40
KX2	24.5	8.03	8.90	274	0.68	0.09	0.49
KX3	24.1	7.74	8.91	275	0.81	0.09	0.59
KX4	22.3	7.54	8.74	280	0.71	0.14	0.61
DZK1	24.8	7.69	8.90	278	0.90	0.11	0.54
DZK2	24.7	7.57	8.94	282	0.93	0.08	0.55
DZK3	23.5	7.51	8.89	282	0.91	0.09	0.59
DZK4	23.0	7.34	8.88	280	0.94	0.10	0.82
WLQ1	25.1	7.74	9.02	280	0.99	0.09	0.46
WLQ2	24.9	7.51	8.94	288	0.96	0.11	0.63
WLQ3	23.4	7.45	8.85	295	0.94	0.08	0.95
WLQ4	22.1	7.25	8.78	288	0.99	0.08	1.00
QS1	25.6	7.7	8.93	283	1.01	0.12	0.49
QS2	25.0	7.52	8.97	289	1.04	0.12	0.58
QS3	24.4	7.27	8.89	291	1.06	0.11	0.88
QS4	23.0	7.19	8.87	289	1.01	0.11	0.94

表 2 浮游植物 α 多样性指数

Table 2 The α diversity indices of phytoplankton in different samples

采样点	OTUs	Good's coverage 指数	Chao 指数	Observed-Species 指数	Pielou-evenness 指数	Shannon-Wiener 指数	Simpson 指数
SG1	616	0.998 9	622	605	0.68	6.32	0.96
TM1	368	0.999 2	735	630	0.48	4.09	0.84
DZK1	363	0.999 4	369	359	0.52	4.39	0.85
WLQ1	260	0.999 5	264	252	0.18	1.43	0.25
QS1	399	0.999 4	404	394	0.36	3.10	0.55
KX1	311	0.999 4	315	303	0.26	2.15	0.39
HJZ1	348	0.999 2	357	339	0.48	4.04	0.81
SG2	281	0.999 6	283	278	0.32	2.59	0.65
TM2	238	0.999 4	247	234	0.43	3.40	0.70
DZK2	240	0.999 5	243	233	0.30	2.35	0.46
WLQ2	578	0.998 7	593	560	0.61	5.57	0.93
QS2	267	0.999 5	272	264	0.54	4.36	0.88
KX2	200	0.999 6	203	196	0.27	2.09	0.41
HJZ2	89	0.999 8	89	86	0.07	0.48	0.09
SG3	160	0.999 6	166	156	0.43	3.15	0.65
TM3	208	0.999 8	210	207	0.55	4.22	0.86
DZK3	390	0.999 1	404	383	0.41	3.48	0.59
WLQ3	232	0.999 4	243	227	0.57	4.43	0.87
QS3	233	0.999 7	236	232	0.58	4.58	0.84
KX3	344	0.999 1	354	329	0.35	2.95	0.53
HJZ3	555	0.999 0	567	549	0.55	5.03	0.83
SG4	253	0.999 4	259	246	0.46	3.63	0.78
TM4	432	0.999 1	447	430	0.58	5.10	0.88
DZK4	403	0.998 8	418	387	0.33	2.83	0.53
WLQ4	437	0.999 1	449	429	0.54	4.76	0.84
QS4	399	0.998 3	713	676	0.66	6.21	0.95
KX4	418	0.999 1	434	411	0.47	4.09	0.70
HJZ4	450	0.999 1	460	446	0.59	5.15	0.91

游植物多样性最高,10 m 和 20 m 处 QS 浮游植物多样性最高. 每层 Pielou-evenness 指数变化范围较大,表明水平方向上各采样点浮游植物群落差异较大,分布不均匀.

7 个采样点同一采样水深浮游植物相对丰度排名前 10 的群落如图 3 所示,库区浮游植物群落 0.5 m 处甲藻占优,其中 TM 浮游植物群落丰富度最高,以甲藻门 (Dinophyceae, 41.1%) 为主; SG 群落多样性最高,分别为甲藻门 (Dinophyceae, 22.9%)、绿藻门 (Chlorophyta, 7.9%)、定鞭藻门 (Haptophyceae, 5.4%)、金藻

门 (Chrysophyceae, 1.7%) 和硅藻门 (Bacillariophyta, 0.8%) 等. 5 m 处以甲藻为主,其中 WLQ 浮游植物群落丰度和多样性最高,包括甲藻门 (Dinophyceae, 39.7%)、硅藻门 (Bacillariophyta, 6.5%) 和定鞭藻门 (Haptophyceae, 3.7%) 等. 10 m 处除 HJZ 甲藻门 (Dinophyceae, 4.2%) 占优外,其他采样点以硅藻门为主. 20 m 处大多数样点以硅藻门为主, WLQ 绿藻门 (Chlorophyta, 13.6%) 为优势门类, HJZ 甲藻门 (Dinophyceae, 4.2%) 占优. 库区物种组成表现为甲藻-硅藻-绿藻型结构.

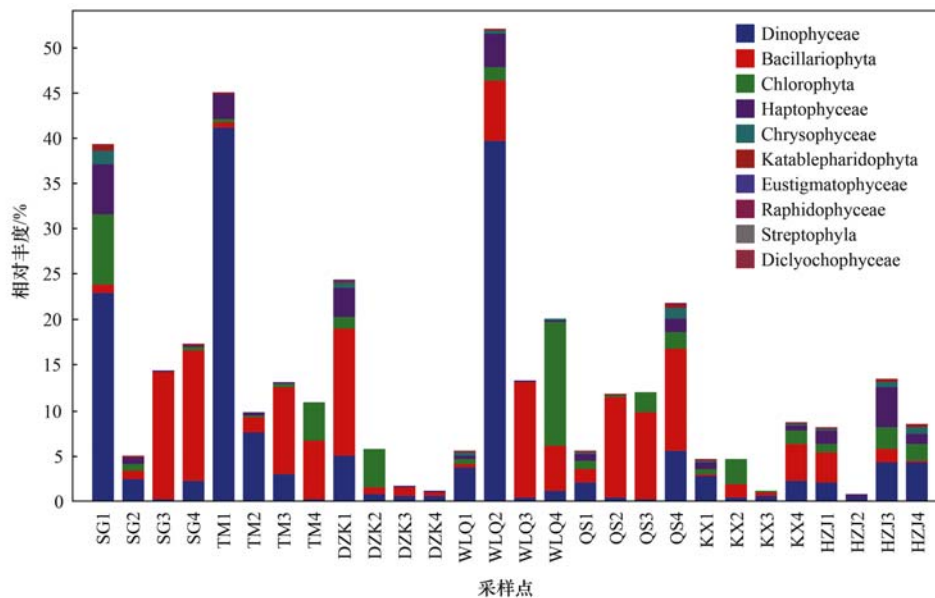


图 3 水平方向上浮游植物相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of phytoplankton in different samples at the phyla level of classification

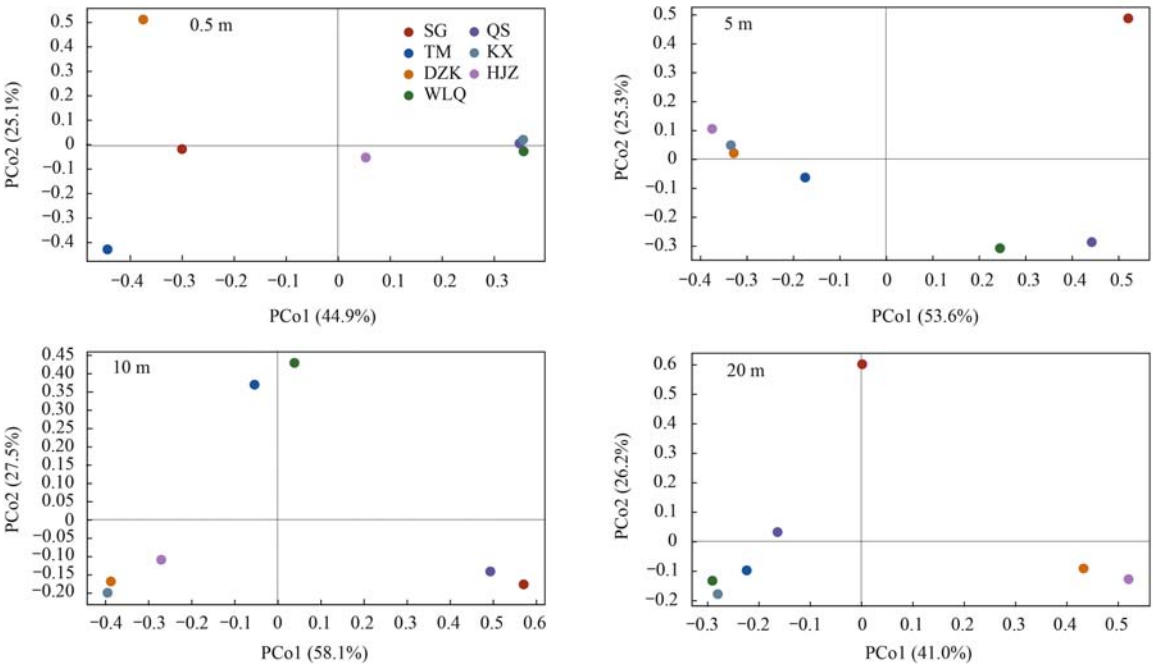
水平方向上浮游植物群落 β 多样性如图 4 所示, 0.5 m 处 KX、WLQ 和 QS 浮游植物组成比较一致, 均以甲藻门 (Dinophyceae)、硅藻门 (Bacillariophyta) 和绿藻门 (Chlorophyta) 为主, SG 含有 9 门浮游植物, 群落组成最为复杂, 所以自成一组, TM、HJZ 和 DZK 因浮游植物群落丰度差异也各为一组; 5 m 处 HJZ、KX 和 DZK 的浮游植物以甲藻门 (Dinophyceae)、硅藻门 (Bacillariophyta) 和绿藻门 (Chlorophyta) 为主, 其余 4 点各为一组; 10 m 处 KX、DZK 和 HJZ 相似度较高为一组, 主要包含甲藻门 (Dinophyceae)、硅藻门 (Bacillariophyta)、绿藻门 (Chlorophyta) 和定鞭藻门 (Haptophyceae), TM 和 WLQ 都由甲藻门 (Dinophyceae)、硅藻门 (Bacillariophyta)、定鞭藻门 (Haptophyceae)、金藻门 (Chrysophyceae) 和绿藻门 (Chlorophyta) 组成, SG 除金藻门 (Chrysophyceae) 外浮游植物群落结构和 QS 完全一致; 20 m 处 KX、WLQ、TM 和 QS 相似度较高为一组, 主要包含硅藻门 (Bacillariophyta)、绿

藻门 (Chlorophyta) 和甲藻门 (Dinophyceae), DZK 与 HJZ 群落结构相同, SG 为一组.

2.3.2 库区浮游植物群落垂直分布特征

各采样点垂直方向上浮游植物群落 α 多样性分析结果如图 5 所示. SG、TM 和 DZK 处浮游植物群落丰度 (Observed-Species 指数、Chao 指数) 和多样性 (Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数) 随水深增加而下降. HJZ、WLQ 和 QS 这 3 个采样点 α 多样性指数变化范围较大, 浮游植物群落垂向分布不均, 随水深变化无明显规律. KX 处 Pielou-evenness 指数变化范围较小, 在垂直方向上浮游植物群落分布较均匀.

为进一步比较各采样点 0.5 ~ 20 m 间物种组成的差异, 利用浮游植物群落组成热图 (β 多样性) 对所有样本进行物种组成差异分析 (图 6), 将高丰度和低丰度的物种分块聚集, 通过颜色梯度来反映浮游植物群落组成的相似性和差异性. 从上到下, 物种对样本的重要性依次递减, 可认为这些重要性靠前的物种是组间差异的标志物种. 横向可比较各采样



横纵坐标括号中的百分数表示对应的坐标轴所能解释的样本差异数据的比例，
两点在坐标轴上的距离越近，表明这两个样本的群落组成越相似

图 4 浮游植物群落多样性的 PCoA 分析

Fig. 4 PCoA analysis of phytoplankton community diversity

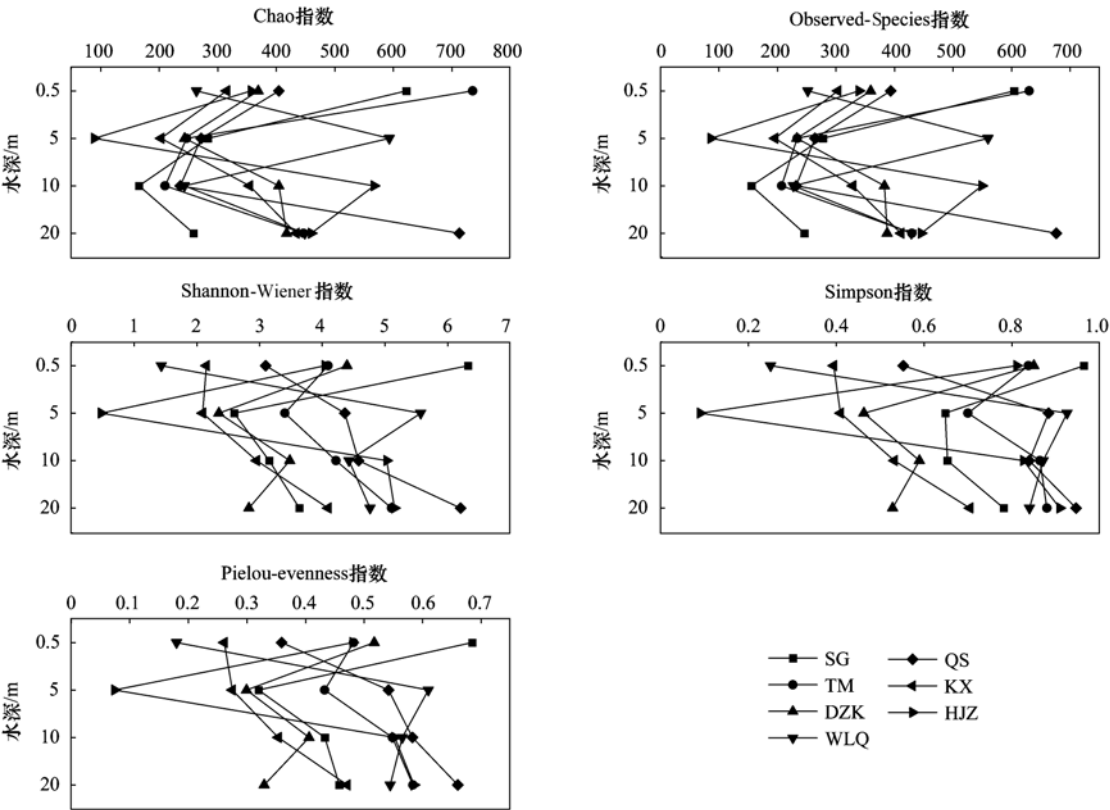
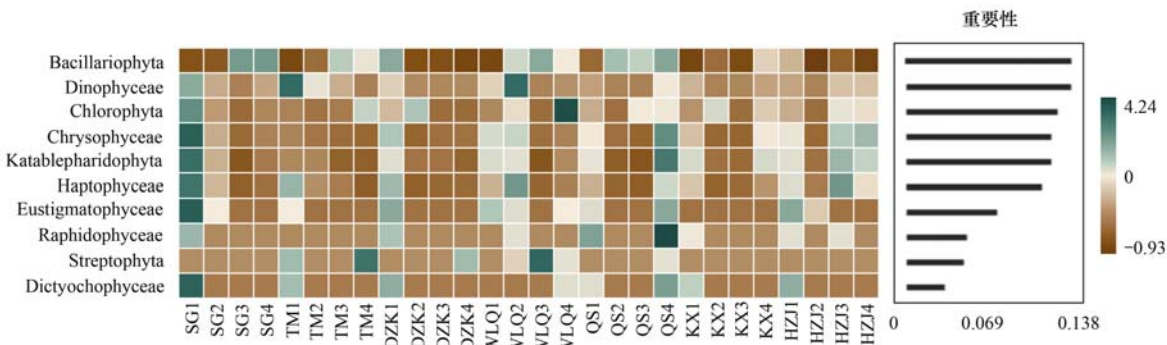


图 5 各采样点垂直方向上浮游植物群落 α 多样性

Fig. 5 The α diversity indices of phytoplankton in different sampling sites

点浮游植物群落不同水深之间的差异,SG 硅藻门 (Bacillariophyta) 丰度随水深递增,金藻门 (Chrysophyceae)、真眼点藻门 (Eustigmatophyceae) 和定鞭藻门 (Haptophyceae) 等群落丰度随水深递

减;TM 甲藻门 (Dinophyceae) 丰度随水深递减. WLQ 绿藻丰度在 20 m 处最高. 造成各采样点浮游植物群落垂直分布差异的标志物种依次为硅藻门 (Bacillariophyta)、甲藻门 (Dinophyceae)、绿藻门



色柱表示浮游植物在各样本中的丰度变化范围; 黑色线段长度表示物种对样本的重要性, 从上到下依次递减

图6 浮游植物物种差异性分析

Fig. 6 Heatmap of phytoplankton

(Chlorophyta) 和金藻门 (Chrysophyceae) 等。

2.4 浮游植物与水环境因子关系

选取水温 (WT)、水深、溶解氧 (DO)、电导率 (Cond.)、pH、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 这 8 个理化因子与硅藻门 (Bacillariophyta)、甲藻门 (Dinophyceae)、绿藻门 (Chlorophyta)、金藻门 (Chrysophyceae)、隐藻门 (Katablepharidophyta) 和定鞭藻门 (Haptophyceae) 这前 6 个差异标志物种进行 RDA 分析 (图 7)。分析前经过 DCA (去趋势对应分析) 第一轴梯度 < 3 , 选择 RDA 方法分析浮游植物与环境因子的相关性, 结果如图 7。第一和第二轴解释的方差百分比分别为 23.30% 和 13.26%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是影响库区浮游植物群落结构和组成最重要的环境因子, 其次是水深、

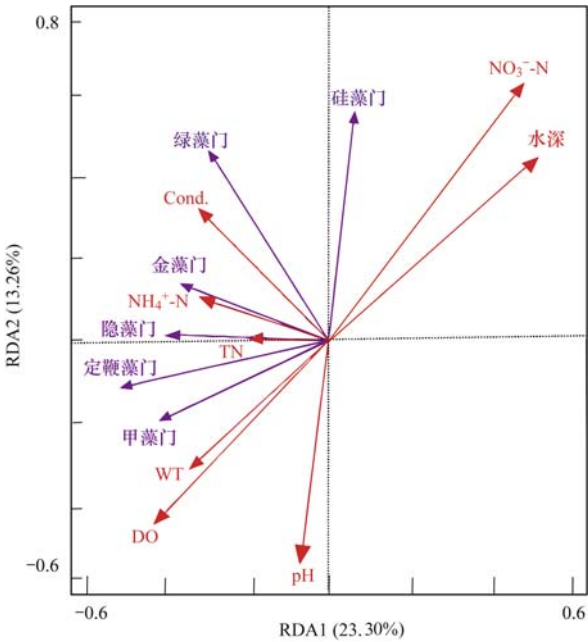
DO、pH、WT、Cond.、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN。硅藻与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、水深、Cond. 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈正相关, 与 WT、pH、DO 和 TN 呈负相关。甲藻与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和水深呈负相关, 与其他环境因子呈正相关。绿藻与 Cond.、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈正相关, 与 DO、pH 和 WT 呈负相关, 与水深无明显相关性。

3 讨论

近年来, 研究丹江口水库真核浮游生物群落主要采用显微镜观察法, 而高通量测序技术可以鉴定出显微镜观察法不能直接鉴别的新物种, 本研究通过对 18S V4 区进行测序发现金藻门金色藻属 (*Chrysochromulina*) 和甲藻纲新属 (*Asulcocephalum*) 等丹江口水库新记录种, 而前人发现的冠盘藻属 (*Stephanodiscus*) 和小环藻属 (*Cyclotella*) 未在测序结果中发现, 可能与 18S V4 区引物的特异性有关, 后期将结合其他条形码基因进一步深入研究^[11]。

丹江口水库浙川库区浮游植物群落组成为甲藻-硅藻-绿藻型结构, 水质、水温和水文因子共同影响了浮游植物群落结构^[30]。前期调查丹江口水库浮游植物群落, 发现水库处于贫营养型和中营养型水体之间^[31,32], 有研究指出甲藻门比硅藻门更适合生活在贫营养型水体中^[33], 硅藻是中营养型水体的优势种^[34], 库区优良的水质使甲藻和硅藻成为优势类群。水温是影响浮游植物群落结构组成的重要环境因子, 在大多数水库水体中均发现浮游植物群落结构受水温影响^[35~37]。硅藻最适生长温度为 10~25℃, 比绿藻低^[38], 库区水体温度有利于硅藻生产繁殖 (表 1)。硅藻与水位、流速和流量呈负相关, 绿藻与水文因子无显著相关性^[30]。本次调查库区水位、流量和流速较低。优良的水质、适宜水温和适合水文状况造就了库区甲藻-硅藻-绿藻型结构的浮游植物群落。

库区水平方向上浮游植物组成存在差异 (图 3), 每层各采样点浮游植物群落结构聚类结果不同



紫色箭头连线表示浮游植物物种, 红色箭头连线表示理化因子

图7 浮游植物与环境因子 RDA 分析

Fig. 7 RDA ordination biplot of planktonic taxa and environmental factors

(图 4). 有研究发现丹江口库区季节、环境因子和采样点等生态因子共解释了浮游植物结构变化的 39%, 其中地理位置占 12%^[30]. 不同的地理条件使水生环境特征发生变化, 导致浮游植物主要类群的空间差异, 这种差异在水生态系统中较为常见, 例如, 厦门和青岛等地区各采样点真核微生物群落结构存在差异^[39]; 美国黄石公园各采样点真核微生物群落相似度较低^[40]. KX 位于丹库中心, 人为干扰因素较少, 更接近自然状态; QS 和 WLQ 地理位置靠近水库南边丘陵地带, 为库区上游; HJZ 在下游支流处附近; TM 靠近北部旱田地; DZK 在汉江排水口附近; SG 离水田比较近, 人类活动比较频繁. 采样点所处的位置的差异导致的环境因子不同和水文状况差别是造成库区浮游植物群落组成水平方向上差异的原因.

SG、TM 和 DZK 浮游植物群落多样性和丰度随水深增加呈下降趋势(图 6), 其他采样点浮游植物群落与水深关系趋势不明显. 2008 年 8 月有研究发现丹江口水库大部分站点浮游植物丰度呈现随水深增加而下降的趋势, 但在其他采样月份没有明显的规律^[21]; 三峡水库在 0~50 m 范围内, 浮游植物丰富度和多样性也没有明显的分布规律^[41]. 有研究发现环境变化仅解释了微生物群季节性变化的 30%^[42]; 湖泊中微生物群的组成与环境条件之间的关系仍不清楚^[43].

在深水水体中, 随着光照、温度和营养盐等环境因素梯度的变化, 浮游植物群落的生物量峰值出现在不同水深^[44,45]. 不同水深浮游植物群落的差异归因于不同环境因素的协同作用^[46]. 由于分层现象, 上层水具有养分浓度和温度的优势. 相比之下, 较深的水层具有极端的环境条件, 例如较高的营养浓度、低温和低光照^[47], 导致浮游植物丰度和物种多样性存在较大差异. 库区各采样点浮游植物群落 α 多样性指数(图 5)和浮游植物群落组成热图(图 6)也说明浮游植物群落在垂向上的异质性. 前期研究发现丹江口水库垂直方向上浮游植物群落丰度无明显差异^[21], 本研究结果与前期研究结果有一定差异, 究其原因一是与水库扩容有关, 前期调查时间为 2007~2008 年, 水库于 2012 年扩容, 扩容后库区水文条件和理化参数发生改变, 导致库区浮游植物群落组成发生相应变化^[48]; 其二与鉴定方法有关, 高通量测序技术得到的浮游植物特征的研究结果, 与前人使用的显微镜观察的结果相比, 提供的群落组成图更为全面^[49].

丹江口水库淅川库区生态环境存在一定空间异质性, 浮游植物组成与环境因子之间有密切的关系^[50~52], 由 RDA 分析可知, NO_3^- -N、水深、DO、pH

和 WT 是影响库区浮游植物群落分布的重要环境因子, 其中 NO_3^- -N 是主要影响因子(图 7). 有研究发现, 由于下沉使营养物质浓度随水深上升^[53]和初级生产者对营养物质的吸收^[54]等原因, 导致表层的 NO_3^- -N 浓度较低, 深层的 NO_3^- -N 浓度较高. 在深水水体中, 营养物质浓度会随水深发生变化, 从而导致浮游植物群落结构相应改变^[55]. 这一现象在本研究中得到了验证, 图 7 表明 NO_3^- -N 浓度与水深呈正相关. 表 2 显示 20 m 处浮游植物群落丰度和多样性(OTUs 均值为 399)高于 0.5~10 m 处(OTUs 均值为 270~381), NO_3^- -N 作为水生态系统中重要的氮源, 由于营养盐随水深增加, 浮游植物的最大生物量出现在深水区^[56]. NO_3^- -N 浓度的升高虽然可以增强浮游植物的生长、生理和代谢过程, 但不同水深的浮游植物群落组成结构取决于营养盐和 WT 等环境因子的共同作用^[57]. 有研究表明 WT 是影响浮游植物群落分布的重要环境因子, 温度通过控制浮游植物呼吸作用和光反应过程中酶促反应的强度直接影响浮游植物的生长状态^[58], 与浮游植物的相对丰度关系密切^[59]. WT 是影响库区浮游植物群落分布的主要环境因子之一, 各采样点 0.5 m 处 WT 明显高于 20 m 处, 又因硅藻门与 WT 呈负相关以及甲藻门与 WT 呈正相关, 导致表层甲藻占优, 深层硅藻丰度高. 证明 WT 的变化是 0.5~20 m 水深之间浮游植物相对丰度差异的重要因素.

4 结论

(1) 库区真核浮游植物共 12 门 68 属, 物种为甲藻-硅藻-绿藻型结构. 水平方向上浮游植物群落差异较大, 各采样点垂直方向上浮游植物丰度和多样性存在较大差异. 宋岗、土门和党子口浮游植物群落多样性和丰度随水深增加呈下降趋势, 而其他采样点的浮游植物群落与水深关系趋势不明显.

(2) 硝氮(NO_3^- -N)、水深、溶解氧(DO)、pH 和水温(WT)是影响库区浮游植物垂直分布的重要环境因子. 环境因子对浮游植物门类影响各异, 甲藻与 NO_3^- -N 和水深呈负相关, 与其他环境因子呈正相关; 硅藻与 NO_3^- -N 和水深呈正相关, 与其他环境因子呈负相关; 绿藻与 WT、pH 和 DO 呈负相关, 与水深无明显相关性.

参考文献:

- [1] Jiang Y, Xu H L, Zhu M Z. Use of planktonic protists for assessing water quality in Jiaozhou Bay, northern China[J]. Protistology, 2012, 7(1): 34-41.
- [2] Filker S, Sommaruga R, Vila I, et al. Microbial eukaryote plankton communities of high-mountain lakes from three continents exhibit strong biogeographic patterns[J]. Molecular

- Ecology, 2016, **25**(10): 2286-2301.
- [3] Zubkov M V, Tarran G A. High bacterivory by the smallest phytoplankton in the North Atlantic Ocean[J]. Nature, 2008, **455**(7210): 224-226.
- [4] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998, **281**(5374): 237-240.
- [5] Salmaso N, Naselli-Flores L, Padisák J. Impairing the largest and most productive forest on our planet: how do human activities impact phytoplankton? [J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 375-384.
- [6] Goto N, Kihira M, Ishida N. Seasonal distribution of photosynthetically active phytoplankton using pulse amplitude modulated fluorometry in the large monomictic Lake Biwa, Japan [J]. Journal of Plankton Research, 2008, **30**(10): 1169-1177.
- [7] Machado K B, Targueta C P, Antunes A M, *et al.* Diversity patterns of planktonic microeukaryote communities in tropical floodplain lakes based on 18S rDNA gene sequences[J]. Journal of Plankton Research, 2019, **41**(3): 241-256.
- [8] 王英华, 陈雷, 牛远, 等. 丹江口水库浮游植物时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1057-1065.
Wang Y H, Chen L, Niu Y, *et al.* Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(5): 1057-1065.
- [9] 郑保海, 朱静亚, 许信, 等. 丹江口水库着生藻类群落特征及其水质评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, **46**(4): 95-101.
Zheng B H, Zhu J Y, Xu X, *et al.* Community structure of periphyton algae and water quality in the Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, **46**(4): 95-101.
- [10] 贾海燕, 徐建锋, 雷俊山. 丹江口库湾浮游植物群落与环境因子关系研究[J]. 人民长江, 2019, **50**(5): 52-58.
Jia H Y, Xu J F, Lei J S. Relationship of community structure of phytoplankton and environmental factors in Danjiangkou Reservoir bay[J]. Yangtze River, 2019, **50**(5): 52-58.
- [11] 贺玉晓, 郑永坤, 李卫国, 等. 丹江口水库早春真核浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2192-2200.
He Y X, Zheng Y K, Li W G, *et al.* Characteristics of eukaryotic phytoplankton community structure in early spring and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2192-2200.
- [12] Simon M, López-García P, Deschamps P, *et al.* Marked seasonality and high spatial variability of protist communities in shallow freshwater systems[J]. The ISME Journal, 2015, **9**(9): 1941-1953.
- [13] Tan B, Ng C, Nshimiyimana J P, *et al.* Next-generation sequencing (NGS) for assessment of microbial water quality: current progress, challenges, and future opportunities [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, **6**, doi: 10.3389/fmicb.2015.01027.
- [14] 王靖淇, 王书平, 张远, 等. 高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1403-1413.
Wang J Q, Wang S P, Zhang Y, *et al.* Community structure characteristics of eukaryotic planktonic algae in Liaohe River through high-throughput sequencing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1403-1413.
- [15] 罗玲. 丹江口水库淅川库区氮沉降特征研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
- Luo L. Study on the atmospheric nitrogen deposition in Xichuan area of Danjiangkou Reservoir[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [16] Ferrera I, Reñé A, Funosas D, *et al.* Assessment of microbial plankton diversity as an ecological indicator in the NW Mediterranean coast[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111691.
- [17] Liu S Y, Gibson K, Cui Z M, *et al.* Metabarcoding analysis of harmful algal species in Jiaozhou Bay[J]. Harmful Algae, 2020, **92**, doi: 10.1016/j.hal.2020.101772.
- [18] Song L, Wu J, Du J, *et al.* The characteristics and distribution of eukaryotic phytoplankton community in Liaodong Bay, China [J]. Ocean Science Journal, 2019, **54**(2): 183-203.
- [19] Lee S R, Song E H, Lee T. Eukaryotic plankton species diversity in the western channel of the Korea strait using 18S rDNA sequences and its implications for water masses[J]. Ocean Science Journal, 2018, **53**(1): 119-132.
- [20] Wang Y B, Hu X K, Sun Y Y, *et al.* Influence of the cold bottom water on taxonomic and functional composition and complexity of microbial communities in the southern Yellow Sea during the summer[J]. Science of the Total Environment, 2021, **759**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143496.
- [21] Yin D C, Zheng L L, Song L R. Spatio-temporal distribution of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir, a water source area for the South-to-North Water Diversion Project (Middle Route), China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, **29**(3): 531-540.
- [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.
- [23] Salmaso N, Boscaini A, Pindo M. Unraveling the diversity of eukaryotic microplankton in a large and deep perialpine lake using a high throughput sequencing approach[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, **11**, doi: 10.3389/fmicb.2020.00789.
- [24] Bokulich N A, Subramanian S, Faith J J, *et al.* Quality-filtering vastly improves diversity estimates from Illumina amplicon sequencing[J]. Nature Methods, 2013, **10**(1): 57-59.
- [25] Chao A N. Nonparametric estimation of the number of classes in a population [J]. Scandinavian Journal of Statistics, 1984, **11**(4): 265-270.
- [26] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, **27**(3): 379-423.
- [27] Belcher P R. Measurement of myocardial contractility [J]. Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia, 1997, **11**(6): 812.
- [28] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, **13**: 131-144.
- [29] Good I J. The population frequencies of species and the estimation of population parameters[J]. Biometrika, 1953, **40**(3-4): 237-264.
- [30] 闫雪燕, 张黎, 李玉英, 等. 动态调水过程水文和理化因子共同驱动丹江口水库库湾浮游植物季节变化[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1350-1363.
Yan X Y, Zhang Y, Li Y Y, *et al.* Hydrologic and physicochemical factors co-drive seasonal changes of phytoplankton during dynamic water diversion processes in the Danjiangkou Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(5): 1350-1363.
- [31] 郭诗君, 王小军, 韩品磊, 等. 丹江口水库叶绿素 *a* 浓度的时空特征及影响因子分析[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 366-376.
Guo S J, Wang X J, Han P L, *et al.* Spatiotemporal

- characteristics of layered chlorophyll-*a* concentration and influencing factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 366-376.
- [32] 赵康平, 杨文杰, 沙健, 等. 丹江口水库水体营养状态空间特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(3): 51-58.
- Zhao K P, Yang W J, Sha J, *et al.* Spatial characteristics of nutrient status in Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(3): 51-58.
- [33] 王一鹤, 吴辉, 朱建荣, 等. 长江口及闽浙海域浮游植物动力学模型研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015, (4): 97-109.
- Wang Y H, Wu H, Zhu J R, *et al.* Numerical simulation on the phytoplankton dynamics in Changjiang estuary and Min-Zhe coastal waters [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2015, (4): 97-109.
- [34] 邱光胜, 涂敏, 叶丹, 等. 三峡库区支流富营养化状况普查[J]. *人民长江*, 2008, **39**(13): 1-4.
- Qiu G S, Tu M, Ye D, *et al.* General investigation of eutrophication for tributaries in TGP reservoir area [J]. *Yangtze River*, 2008, **39**(13): 1-4.
- [35] 汪琪, 黄蔚, 陈开宁, 等. 大溪水库浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(4): 1286-1297.
- Wang Q, Huang W, Chen K N, *et al.* Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Reservoir Daxi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1286-1297.
- [36] 杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 569-576.
- Yang L J, Yu P F, Zhu J Q, *et al.* Community structure characteristics of phytoplankton and related affecting factors in Heng-shan Reservoir, Zhejiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(2): 569-576.
- [37] 张庆文, 宋林旭, 纪道斌, 等. 香溪河库湾水质特征与非回水区水华响应关系[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 3018-3026.
- Zhang Q W, Song L X, Ji D B, *et al.* Relationship between water quality of Xiangxi River Reservoir and the algal blooms in non-return area in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3018-3026.
- [38] 谭香, 夏小玲, 程晓莉, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2875-2882.
- Tan X, Xia X L, Cheng X L, *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2875-2882.
- [39] Zhang W J, Pan Y B, Yang J, *et al.* The diversity and biogeography of abundant and rare intertidal marine microeukaryotes explained by environment and dispersal limitation [J]. *Environmental Microbiology*, 2018, **20**(2): 462-476.
- [40] Meadow J F, Zabinski C A. Spatial heterogeneity of eukaryotic microbial communities in an unstudied geothermal diatomaceous biological soil crust: Yellowstone National Park, WY, USA [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **82**(1): 182-191.
- [41] Zeng H, Song L R, Yu Z G, *et al.* Distribution of phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir during rainy and dry seasons [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(2-3): 999-1009.
- [42] Logares R, Audic S, Bass D, *et al.* Patterns of rare and abundant marine microbial eukaryotes [J]. *Current Biology*, 2014, **24**(8): 813-821.
- [43] Nabout J C, Siqueira T, Bini L M, *et al.* No evidence for environmental and spatial processes in structuring phytoplankton communities [J]. *Acta Oecologica*, 2009, **35**(5): 720-726.
- [44] Huovinen P S, Brett M T, Goldman C R. Temporal and vertical dynamics of phytoplankton net growth in Castle Lake, California [J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, **21**(2): 373-385.
- [45] Ptacnik R, Diehl S, Berger S. Performance of sinking and nonsinking phytoplankton taxa in a gradient of mixing depths [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(5): 1903-1912.
- [46] Zheng B H, Chen Z J, Li Y Y, *et al.* Structural characteristics and driving factors of the planktonic eukaryotic community in the Danjiangkou Reservoir, China [J]. *Water*, 2020, **12**(12), doi: 10.3390/w12123499.
- [47] Sun Y F, Liu Y, Wu C, *et al.* Characteristics of eukaryotic plankton communities in the cold water masses and nearshore waters of the South Yellow Sea [J]. *Diversity*, 2021, **13**(1), doi: 10.3390/d13010021.
- [48] Hoyer A B, Moreno-Ostos E, Vidal J, *et al.* The influence of external perturbations on the functional composition of phytoplankton in a Mediterranean reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **636**(1): 49-64.
- [49] van Dijk E L, Auger H, Jaszczyzyn Y, *et al.* Ten years of next-generation sequencing technology [J]. *Trends in Genetics*, 2014, **30**(9): 418-426.
- [50] Chalar G. The use of phytoplankton patterns of diversity for algal bloom management [J]. *Limnologia*, 2009, **39**(3): 200-208.
- [51] Cudowski A, Pietryczuk A, Hauschild T. Aquatic fungi in relation to the physical and chemical parameters of water quality in the Augustów Canal [J]. *Fungal Ecology*, 2015, **13**: 193-204.
- [52] Reich M, Wichels A, Panzer K, *et al.* Impacts of a reduction in seawater pH mimicking ocean acidification on the structure and diversity of mycoplankton communities [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2017, **79**(3): 221-233.
- [53] De Queiroz A R, Flores Montes M, de Castro Melo P A M, *et al.* Vertical and horizontal distribution of phytoplankton around an oceanic archipelago of the Equatorial Atlantic [J]. *Marine Biodiversity Records*, 2015, **8**, doi: 10.1017/S175526721500130X.
- [54] Wei N, Satheeswaran T, Jenkinson I R, *et al.* Factors driving the spatiotemporal variability in phytoplankton in the Northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2018, **162**: 48-55.
- [55] Tavernini S, Mura G, Rossetti G. Factors influencing the seasonal phenology and composition of zooplankton communities in mountain temporary pools [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2005, **90**(4): 358-375.
- [56] Leal M C, Sá C, Nordez S, *et al.* Distribution and vertical dynamics of planktonic communities at Sofala Bank, Mozambique [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **84**(4): 605-616.
- [57] Staehr P A, Sand-Jensen K. Seasonal changes in temperature and nutrient control of photosynthesis, respiration and growth of natural phytoplankton communities [J]. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(2): 249-262.
- [58] Blinn D W. Diatom community structure along physicochemical gradients in Saline Lakes [J]. *Ecology*, 1993, **74**(4): 1246-1263.
- [59] 陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2013, **33**(9): 2803-2815.
- Lu Q, Chen H L, Shao X Y, *et al.* Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(9): 2803-2815.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)