

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017年) 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM_{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 潘泳兴, 陈盟, 王橹橹 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 韩杰, 黄鑫, 杨昆仓, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 罗珊, 胡锦涛, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济关系 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析

陈婷¹, 杜珣^{2,3}, 陈义永², 郭逍宇^{1*}, 熊薇^{2*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 浮游藻类是引起水华暴发的主要原因. 为筛选潜在水华藻类, 评估白洋淀水华风险区域, 于2020年8月对白洋淀373点位展开浮游藻类调查. 利用宏条形码技术分析, 解析水华藻类群落组成, 同时采用显微镜计数法统计藻密度. 根据总藻密度对白洋淀不同区域的水华程度进行评估, 同时进一步针对水华藻类群落, 耦合淀区水质条件, 探究白洋淀不同区域水华藻类群落空间差异驱动因子, 以甄别影响水华藻类群落结构关键环境因子. 结果表明, 95%以上采样区域无水华风险(藻类密度 $<2 \times 10^6$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$), 仅5个样点存在轻微水华风险. 但水华藻类群落分析共检测到了90种水华藻类, 其中优势水华藻种有20种, 隶属于以绿藻门、蓝藻门和裸藻门为主. 水华藻类群落结构在不同区域上具有显著空间异质性($P < 0.05$). 关键驱动因子解析结果表明, 总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)是造成水华藻类群落结构差异的关键因子. 其中, 门水平上, 蓝藻门水华藻类与以上关键因子显著正相关; 种水平上, 硅藻门和绿藻门水华藻类与关键因子响应更显著. 因此, 水华藻类群落的研究结果表明, 水华藻类的种类和丰度与水体营养盐浓度密切相关, 建议控制白洋淀水体氮磷等营养盐的输入, 防止水华暴发.

关键词: 白洋淀; 宏条形码; 水华藻类; 群落结构; 水污染; 有害藻类

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6116-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211309

Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake

CHEN Ting¹, DU Xun^{2,3}, CHEN Yi-yong², GUO Xiao-yu^{1*}, XIONG Wei^{2*}

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Phytoplankton are the main cause of algal blooms. To identify bloom algae and assess the risks of the algal blooms in Baiyangdian Lake, a survey on 373 sites was conducted in August 2020. The phytoplankton were studied via both morphological-based density counting and metabarcoding profiling. Then, the bloom degree was classed according to algae density, and the relationship between the community of bloom algae and environmental variables were modeled to determine key factors constraining spatial variation in bloom algae communities. The results showed that more than 95% of the sampling sites were free from the risk of algal blooms (phytoplankton density $< 2 \times 10^6$ cells $\cdot\text{L}^{-1}$), and only five sites had a slight risk of algal blooms. A total of 90 species with potential of algal blooming were detected, including 20 dominant species, which were mainly affiliated with Chlorophyta, Cyanophyta, and Euglenophyta. Communities of bloom algae significantly varied among different regions ($P < 0.05$). Total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) were the key factors significantly affecting the spatial variation in algal bloom communities. At the phylum level, these key factors were significantly positively correlated with Chlorophyta, whereas at the species level, species in Bacillariophyta and Chlorophyta responded significantly to these key factors. Thus, our findings suggested that nutrient levels were significantly related to bloom algae communities, and we proposed that controlling the input of nutrients such as nitrogen and phosphorus and regulating the hydrological process of the lake would be effective management techniques to prevent algal blooms in Baiyangdian Lake.

Key words: Baiyangdian Lake; metabarcoding; algal blooms; community structure; water pollution; harmful algae

水华是指由于水体富营养化等导致的藻类等浮游植物快速繁殖, 聚集在水体表面, 从而导致水体颜色呈绿色、蓝色或暗褐色的现象. 水华是浅水湖泊重要的危害之一, 可造成水体质量急剧恶化, 严重危害淡水生态环境^[1,2]. 各国政府或组织已制定相关标准, 以加强对水华的监管和防控. 例如: 加拿大政府对娱乐用水限值为蓝藻密度不大于 1×10^8 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ ^[3]. 世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 规定娱乐用水蓝藻密度 $< 2 \times 10^7$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 为低风险、 $2 \times 10^7 \sim 10 \times 10^7$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 为中等风险、 $10 \times 10^7 \sim 100 \times 10^7$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 为高风险水平^[4]. 我国生态环境部2020年通过的《水华遥感与

地面监测评价技术规范(试行)》(HJ 1098-2020)中根据总藻密度(个 $\cdot\text{L}^{-1}$)将水华程度分为5类级别评价. 水华暴发的实质是藻类等初级生产力的急剧增大的现象, 因此控制水体中初级生产力的营养物质是防控水华暴发的关键^[5]. 另外, 大多数学者研究倾向于从众多复杂因子中寻找关键因子, 以更好地开展水华的预测和治理^[6-8].

水华藻类是引起水华暴发的主要浮游藻类群

收稿日期: 2022-11-29; 修订日期: 2023-01-31

基金项目: 白洋淀生态环境基线调查与综合治理项目(20200494)

作者简介: 陈婷(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境微生物, E-mail: 2200902036@cnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xiaoyucnu@126.com; weixiong@rcees.ac.cn

落,常见水华藻属有微囊藻属、鱼腥藻属、裸藻属和小环藻属等^[9]. 对水华藻类的研究主要集中在蓝藻,硅藻等具体优势类群上^[10,11],针对全部水华藻类群落的研究鲜见. 藻类鉴定是研究水华藻类的基础步骤,传统方法通常借助显微镜对藻类进行鉴定和计数统计^[12],但是以多样性组成为目的的研究往往遇到形态难以区分,费时费力的困境,尤其针对大批量样品分析的情况. 基于高通量测序的宏条形码技术(metabarcoding)通过多年发展,具有高效、可靠和易于标准化等优点^[13]. 目前,基于宏条形码技术的浮游藻类的研究包括了提高浮游藻类鉴定的准确性和特异性的方法学研究^[14],以及浮游藻类群落多样性^[15]、浮游藻类群落地理分布格局和影响因素^[16]的理论性研究,和评估淡水系统生态状况^[17]应用性研究.

白洋淀位于河北省雄安新区,属海河流域大清河南支水系湖泊,是华北平原最大的淡水湖泊,水域面积约 366 km². 白洋淀是雄安新区的重要生态水体,具有缓洪滞沥、调节局部气候、改善生态环境和保护生物多样性等多种生态功能^[18]. 然而,长期以来在人类活动和气候变化的综合作用下,白洋淀湿地出现水源不足、水体污染、生物多样性减少和富营养化加剧等危机^[19]. 据报道,白洋淀近 5 年整体富营养化水平均为中度富营养,未发生大面积大规模水华,但小部分区域仍存在较高水华暴发风险^[20]. 本研究利用传统显微镜计数法统计藻密度评估水体水华程度,确定白洋淀潜在水华风险区域,同时基于宏条形码技术筛选水华藻类,结合淀区水质条件,甄别影响水华藻类群落结构的关键环境驱动因子,以期对白洋淀水华防控提供理论支撑.

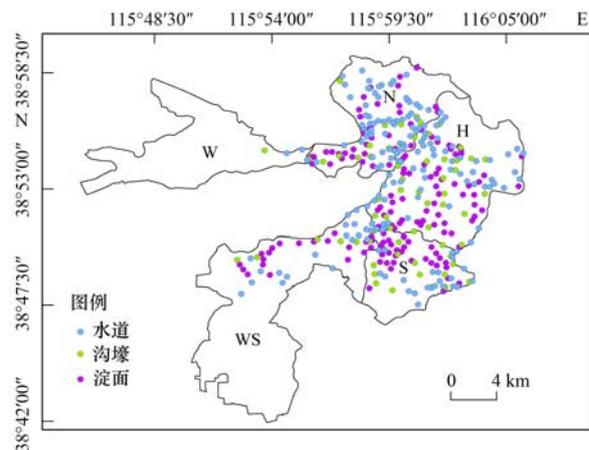
1 材料与方法

1.1 样点布设

本研究于 2020 年夏季(8 月 10 ~ 18 日)对白洋淀进行水质和浮游藻类样品采集. 依据 5 大功能区特征共布设 373 个样点. 具体如图 1 所示,包括北部入流区 114 个(N1 ~ N114)、汇流混合区 140 个(H1 ~ H140)、南部入流区 69 个(S1 ~ S69)、西部入流区 3 个(W1 ~ W3)和西南部入流区 47 个(WS1 ~ WS47);同时,布设样点分布于 3 种不同的生境类型,包括淀面(DM,143 个)、沟壕(GH,64 个)和水道(SD,166 个).

1.2 样品采集与处理

浮游藻类:从底层到表层分别取 3 次水,每次 10 L,混合后通过 20 μm 孔径浮游生物网过滤,收集滤网内所有存留物,加无水乙醇固定,并定容到 100



N. 北部入流区, H. 汇流混合区, S. 南部入流区, W. 西部入流区, WS. 西南部入流区

图 1 全淀区浮游植物基线调查样点分布

Fig. 1 Sampling sites of phytoplankton in Baiyangdian Lake

mL, 样品置于 -20℃ 冰箱保存用于宏条形码实验. 用于显微镜计数统计的定量样品则重复同样操作,加入适量的鲁哥氏液固定,并定容到 100 mL. 为避免样点之间交叉污染,采样前用样点原位水彻底冲洗采水器及生物网.

水质样品:现场使用多参数水质检测仪(MYRON Company, USA)测定表层水(水下 0.5 m 处)的水温(T)、溶解氧(DO)、pH、总溶解性固体(TDS)和氧化还原电位(ORP)等. 另外,采集 1 L 表层水用于实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)等水质因子. 实验室测定前,所有样品均在 4℃ 保存,并于 48 h 内测定完成. 水质测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)(增补版)》.

1.2.1 藻密度分析方法和水华评价标准

针对鲁哥氏液保存样品,在实验室内静置 24 ~ 48 h,用虹吸管缓慢吸走上清液,保留 50 mL 浓缩样品作为镜检样品. 藻密度参照《内陆水域浮游植物监测技术规程》(SL 733 2016)计算. 藻密度结果参考《水华遥感与地面监测评价技术规范(试行)》(HJ 1098-2020)中水华评价分级标准(表 1)对白洋淀各样点水华风险进行评估.

表 1 水华评价分级标准

Table 1 Classification criteria for algal bloom evaluation

藻类密度/个·L ⁻¹	水华程度
<2.0 × 10 ⁶	无明显水华
≥2.0 × 10 ⁶	轻微水华
≥1.0 × 10 ⁷	轻度水华
≥5.0 × 10 ⁷	中度水华
≥1.0 × 10 ⁸	重度水华

1.2.2 宏条形码分析实验

针对每个乙醇保存样品,首先,采用试剂盒

DNeasy Blood and Tissue Kit (Qiagen, 69506) 提取浮游藻类总 DNA. 然后, 采用藻类通用 18S rDNA 引物 1389F: TTGTACACACCGCCC 和 1510R: CCTTCYGCAGGTTACCTAC 以及 16S rDNA 引物 515F: GTGCCAGCMGCCGCGGTAA 和 806R: GGACTAC HVGGGTWTCTAAT 作为分子标记分别对真核和原核藻类进行 PCR 扩增, 将每个样品的扩增引物加上特异性 8 碱基标签进行混合建库. 扩增体系和程序设置参考相似研究^[21]. 每个样品进行 3 次重复 PCR 扩增以避免扩增偏差. 利用 2% 的琼脂糖凝胶电泳检测扩增结果, 并采用 SanPrep Column PCR 产物纯化试剂盒对 PCR 产物进行纯化. 最后, 利用紫外分光光度计 NanoDrop 2000 进行 PCR 产物纯化质量和浓度测定, 并按照等摩尔量原则将 PCR 产物混合建库, 采用 Illumina NovaSeq 平台 PE150 和 PE250 双端测序法对 18S 和 16S 文库进行测序.

1.3 生物信息学分析

生物信息学分析主要通过本地服务器平台 Galaxy (<http://mem.rcees.ac.cn:8080/>) 完成. 首先, 根据特异性的标签将获得的原始序列分配到每个样品, 然后进行序列拼接. 以每 5 个碱基为一个操作窗口 (windows), 删除: ① 序列标签 (tags) 或引物有错配的序列, ② 平均 Q 值 (Phred scores) < 20 的序列, ③ 包含任何不确定碱基的序列, 18S 和 16S 保留序列长度区间分别为 115 ~ 125 bp 和 248 ~ 258 bp. 采用 UNOISE 算法对滤错后的数据进行聚类, 得到 ZOTUs 和每个 ZOTU 对应的序列信息, 即 ZOTU 表格. 最后利用 Seed 软件, 真核藻类用 PR2, 原核用 SILVA 数据库为参照, 对得到每个 OTU 的物种信息进行分类注释. 其中, 比对结果筛选标准为: E 值 $< 10^{-80}$, 最小覆盖度 (coverage) $> 85\%$, 序列相似度 (identity) $> 90\%$ ^[22,23]. 结合水华藻类历史资料筛选出水华藻类物种, 从而揭示各研究点位的水华藻类群落.

1.4 生态学与统计学分析

1.4.1 环境差异性分析

为了分析不同区域及生境类型采样点的环境异质性, 首先采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 对不同样点之间水质环境数据进行聚类. 然后, 采用相似性分析 (analysis of similarity, ANOSIM) 对不同区域类型及生境类型间的差异程度进行显著性检验. 在统计分析之前, 除 pH 值外, 其余环境变量采用 $\log_{10}(x+1)$ 转换. 所有分析均基于所有环境变量的欧式距离计算. PCA 分析在 R 语言环境由 rda 函数实现^[24], ANOSIM 分析在 Primer 5.0 软件中实现^[25].

1.4.2 浮游植物群落多样性分析

采用 Primer 5.0 软件计算水华藻类群落 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数^[26,27], 并用 Origin 2021 绘制 α 多样性指数箱线图. 利用 Excel 计算各水华藻类优势度以确定淀区内优势水华藻种.

1.4.3 环境与生物群落相互关系分析

采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA), Mantel 相关分析和 Pearson 相关性分析多角度探究水华藻类群落与环境因子之间的关系. 在 RDA 分析过程中, 采用方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 检验去除共线性强的环境因子, 前向选择 (forward selection) 和蒙特卡罗检验 (1 000 次置换检验) 解析影响水华藻类群落的关键因子. 前向选择、VIF 检验和蒙特卡罗检验和 RDA 分析均在软件 Canoco 5.0 实现. Mantel 相关性分析和 Pearson 相关性分析在 R 语言环境由 ggcor 包实现.

2 结果与分析

2.1 白洋淀水体环境的空间异质性

结合环境因子 PCA 排序分析和 ANOSIM 相似性分析结果表明, 不同区域之间环境条件显著不同, 且不同生境类型之间环境条件显著不同. PCA 分析中, 主成分 PC1 方差贡献率为 28%, 其中 TP、TN 和 NH_4^+ -N 因子载荷比重较大, 且与 PC1 正相关; 同理主成分 PC2 方差贡献率为 21.1%, 其中 DO 和 pH 因子载荷比重较大, 且与 PC2 正相关. ANOSIM 相似性分析结果显示 (表 2), 不同区域之间的水体环境具有显著差异, 两两区域间差异程度不同, 其中 H 与 N 区水体环境差异最大; 同理, 不同生境之间的环境差异显著, DM 与 GH 和 SD 水体环境均差异极显著.

表 2 白洋淀环境因子相似性的显著性检验结果¹⁾

区域类型	ANOSIM		生境类型	ANOSIM	
	R	P		R	P
H 与 N	0.024	0.025			
H 与 S	-0.010	0.625	DM 与 GH	0.145	0.001
H 与 WS	0.000	0.466			
H 与 W	0.394	0.001			
N 与 S	0.001	0.455	DM 与 SD	0.053	0.001
N 与 WS	-0.021	0.729			
N 与 W	0.371	0.012			
S 与 WS	0.007	0.319	GH 与 SD	-0.033	0.925
S 与 W	0.425	0.011			
WS 与 W	0.362	0.016			

1) R 为 ANOSIM 检验的统计量, P 为显著性水平; N. 北部入流区, H. 汇流混合区, S. 南部入流区, W. 西部入流区, WS. 西南部入流区; DM. 淀面, GH. 沟壕, SD. 水道

2.2 水华风险区域评估

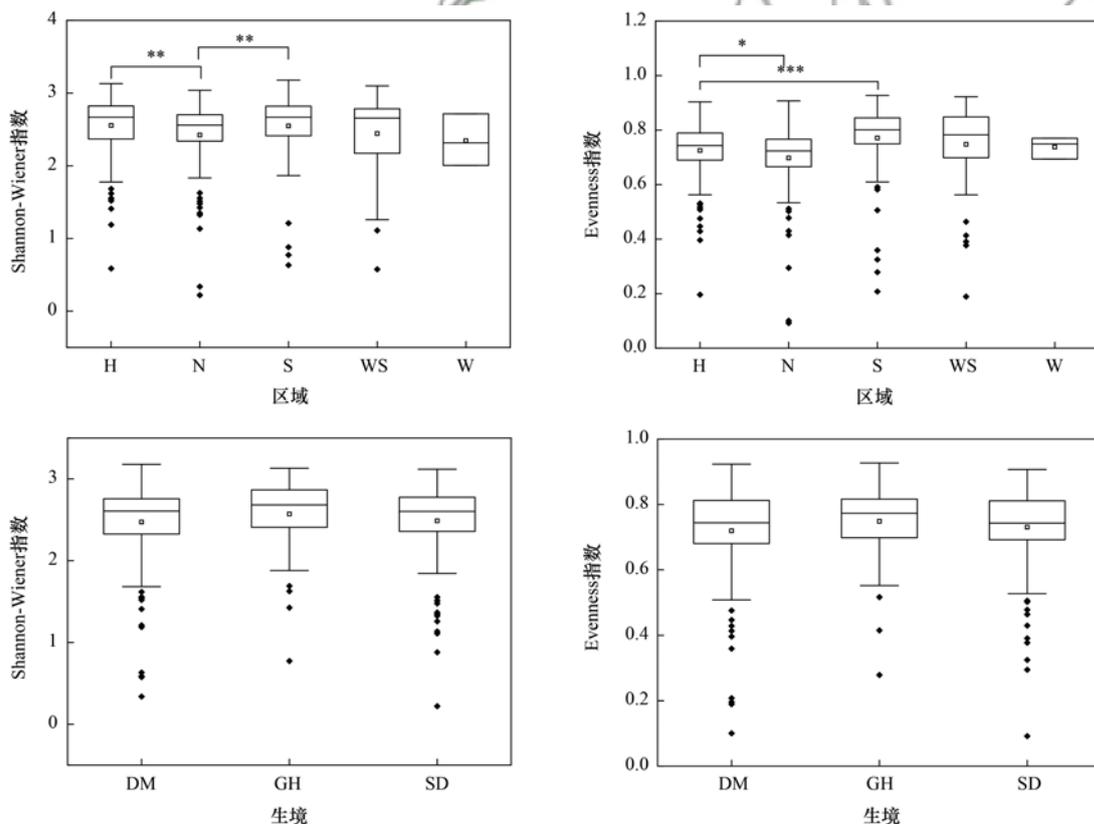
依据藻密度的水华风险区域评估结果表明, 95% 以上样点无水华风险 (藻密度 $< 2 \times 10^6$ 个 \cdot L $^{-1}$), 仅在淀面 (点位编号: DM135, 位于 N 区; DM166, 位于 H 区) 与水道 (点位编号: SD224, 位于 N 区; SD17 和 SD245, 位于 WS 区) 共 5 个点位检测到藻类密度为 $2 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ 个 \cdot L $^{-1}$, 达到轻微水华程度。

2.3 白洋淀水华藻类组成及分布特征

根据宏条形码分析结果, 结合相关文献及历史资料, 在白洋淀整个研究区域共检出 90 种水华藻类, 隶属于 7 个门, 包括金藻门、隐藻门、裸藻门、甲藻门、硅藻门、绿藻门和蓝藻门。其中, 从藻类丰度看, 绿藻门水华藻类相对丰度最高 (38%), 裸藻门次之 (27%), 隐藻门最少 (0.04%)。从种类上看, 水华藻群落以绿藻门和蓝藻门水华种类为主, 其中绿藻门水华藻类 30 种, 占 33.33%, 包括 1

纲、1 目、4 科、4 属和 30 种; 蓝藻门 24 种, 占 26.67%, 包括 2 纲、2 目、3 科、9 属和 24 种。因此, 无论从丰度还是物种数来看, 白洋淀最主要的水华藻类为绿藻门。同时, 裸藻门和蓝藻门也是白洋淀重要的水华藻类。

对群落 α 多样性的分析发现不同区域水华藻类 α 多样性存在差异 (图 2), 基于不同区域, N 区水华藻类群落 Shannon-Wiener 指数显著低于 H 和 S 区 ($P < 0.01$), S 区域 Evenness 指数显著高于 H 区 ($P < 0.001$)。基于不同生境, Shannon-Wiener 和 Evenness 指数均值显示, GH 生境水华藻类的多样性略高于 DM 和 SD。但是, 不同生境类型水华藻类 α 多样性差异不显著 ($P > 0.05$)。进一步 ANOSIM 相似性分析表明不同区域之间的水华藻类群落结构具有显著差异 ($P = 0.001$, $R = 0.185$)。但是不同生境类型之间的水华藻类群落结构差异性不显著 ($P = 0.43$, $R = 0.002$)。



Kruskal-Wallis F 检验, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 2 不同区域和不同生境 α 多样性指数的箱线图

Fig. 2 Boxplots of α diversity index in different regions and habitats

优势度计算结果表明 90 种水华藻类中共有 20 种优势水华藻种, 其中包括绿藻门与裸藻门藻类各 6 种, 蓝藻门藻类 5 种, 硅藻门藻类 2 种, 甲藻门 1 种 (表 3)。H 区优势水华藻种最多, 有 14 种, 占有优势种 70%。此外, 5 种水华藻种在所有分区内均为优势物种, 分别是活泼裸藻 (*Euglena agilis*)、

Cyclotella scaldensis、冠盘藻 (*Stephanodiscus hantzschii*)、*Chlorella* sp. 和 *Chlamydomonas* sp.

2.4 水华藻类群落结构与环境因子的关系

水华藻类群落与白洋淀环境因子间进行 RDA 分析。先通过方差膨胀因子 (VIF) 分析, 剔除共线性显著的 TDS 和 COND ($VIF > 10$)。通过前向选择和

表 3 白洋淀不同区域水华浮游藻类优势种¹⁾

Table 3 Dominant species in different regions of Baiyangdian Lake

分类	物种	区域					生境		
		N	H	S	W	WS	DM	GH	SD
裸藻门	<i>Euglena anabaena</i>	—	—	0.022	—	—	—	—	—
	<i>Euglena chlamydomophora</i>	—	—	—	0.033	—	—	—	—
	<i>Euglena tristella</i>	0.022	0.021	—	—	—	—	—	0.021
	<i>Euglena</i> sp.	0.024	0.020	0.065	—	0.142	0.039	0.039	0.031
	<i>Euglena deses</i>	—	—	—	—	0.023	—	0.021	—
	<i>Euglena agilis</i>	0.141	0.098	0.133	0.050	0.100	0.122	0.117	0.112
甲藻门	<i>Gymnodinium</i> sp.	0.108	0.041	0.062	0.250	0.048	0.072	—	0.089
硅藻门	<i>Cyclotella scaldensis</i>	0.112	0.093	0.021	0.194	0.029	0.092	0.085	0.082
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	0.140	0.121	0.036	0.165	0.047	0.134	0.116	0.094
绿藻门	<i>Chlamydomonas</i> sp.	0.071	0.099	0.078	0.026	0.092	0.083	0.081	0.089
	<i>Chlamydomonas monadina</i>	0.020	0.026	—	—	—	0.023	—	—
	<i>Chlamydomonas dorsoventralis</i>	—	0.026	0.035	—	—	—	—	—
	<i>Chlamydomonas fasciata</i>	—	0.032	—	—	—	0.021	0.021	0.022
	<i>Scenedesmus ovalternus</i>	—	—	—	—	—	—	0.029	—
	<i>Chlorella</i> sp.	0.082	0.122	0.104	0.048	0.074	0.083	0.139	0.109
蓝藻门	<i>Microcystis aeruginosa</i>	—	—	—	0.022	—	—	0.028	—
	<i>Microcystis elabens</i>	0.097	0.050	—	0.656	—	—	—	0.142
	<i>Spirulina major</i>	0.088	0.130	0.094	0.066	0.028	0.081	0.085	0.105
	<i>Spirulina</i> sp.	—	—	—	—	0.021	—	—	—
	<i>Anabaenopsis nadsonii</i>	0.069	0.095	0.176	0.044	0.075	0.163	0.045	—

1) 数字表示优势度 y 的值; “—” 表示 $y < 0.020$, 不具体显示

蒙特卡罗检验, 筛选出 TP ($R^2 = 0.141$, $P = 0.001$), TN ($R^2 = 0.118$, $P = 0.001$) 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($R^2 = 0.163$, $P = 0.001$) 这 3 个环境因子是造成藻华藻类群落结构差异的主导因子. 根据筛选出的关键环境因子构建 RDA 模型 (图 3), 其中所示的环境因子共解释了水华藻类群落结构差异的 42.3%, RDA 排序图前两轴累计解释率达到 98.26%, RDA1 为 93.41%, RDA2 为 4.85%. 图 3 显示了丰度前 10 的水华藻种与水体关键环境因子的响应规律, 可以发现不同的水华藻类与 3 个关键因子间响应规律呈现出差异, 以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为例, 常温衣藻 (*Chlamydomonas monadina*) 和冠盘藻 (*Stephanodiscus hantzschii*) 等与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈正相关, 而 *Gymnodinium* sp. 和 *Euglena* sp. 则呈负相关 (图 3).

为了进一步研究水华藻类与环境因子间的响应的关系, 在门水平上, 选取丰度, 种类数和优势度排名前 3 的蓝藻门, 裸藻门和绿藻门与环境因子进行 Mantel 相关性分析 [图 4(a)], 结果发现蓝藻门水华藻类与 TP、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 显著正相关. 在种水平上, 将全部 20 种优势水华藻类分别对关键环境因子做 Pearson 相关性分析 [图 4(b)], 结果发现硅藻门和绿藻门所有优势种均与 TP、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈现不同程度的显著关系. 以上结果表明, 氮磷等营养元素是影响水华藻类群落差异的关键因子, 且对不同水华藻类的影响程度呈现出差异.

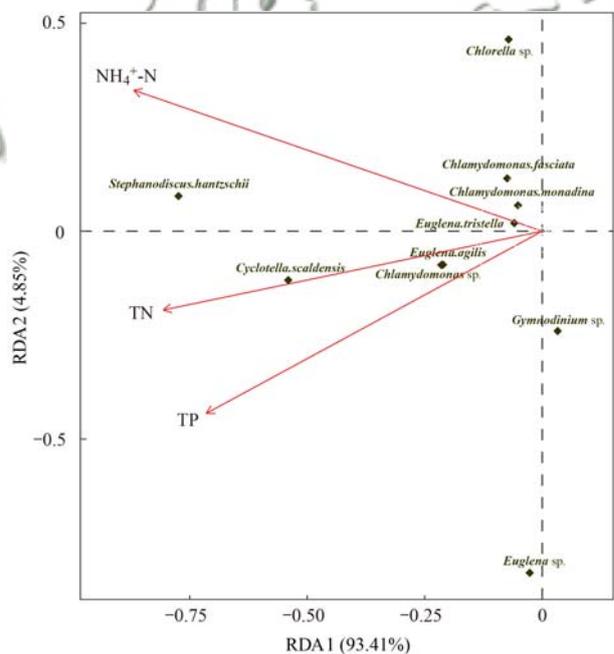


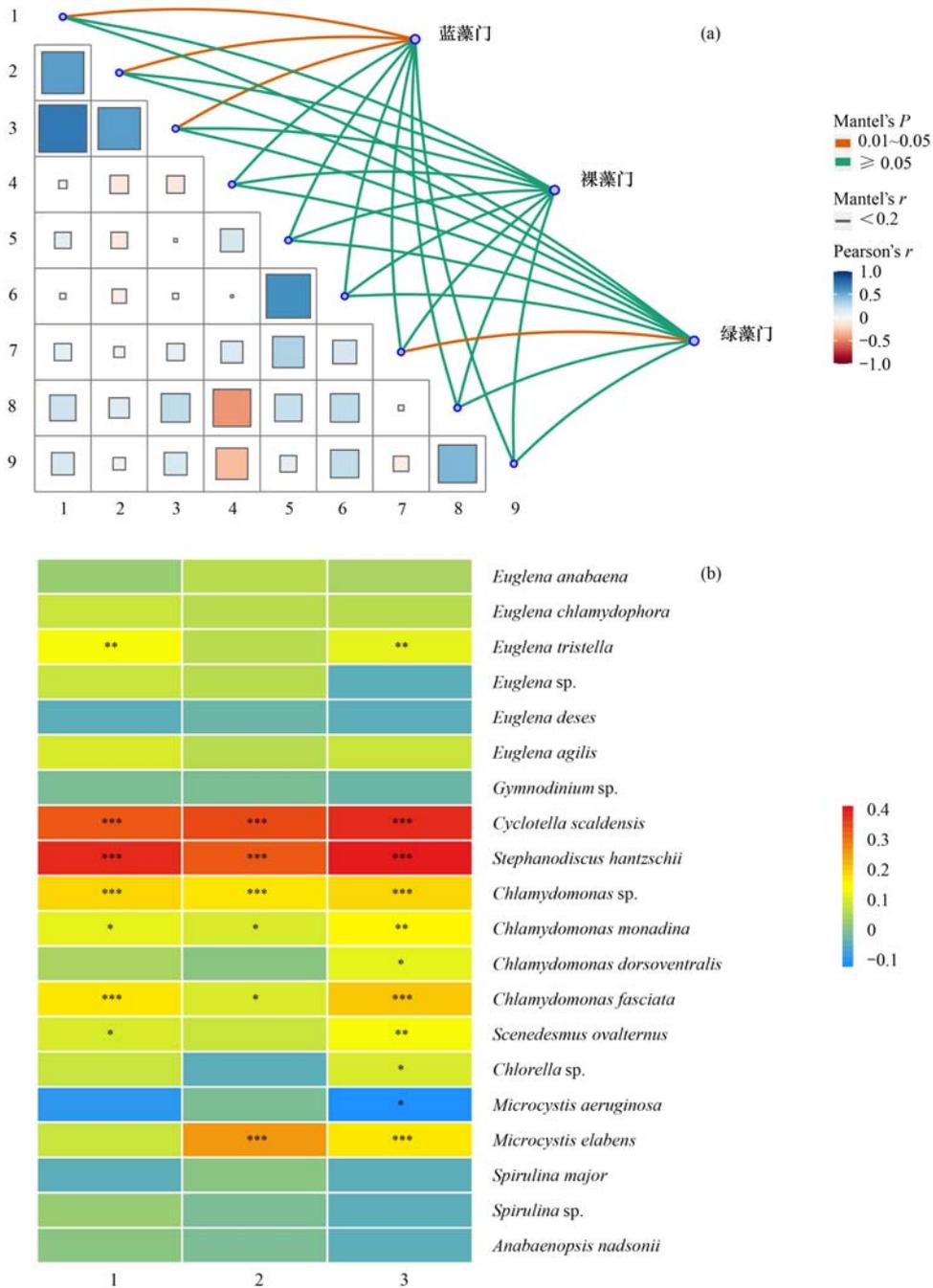
图 3 白洋淀不同区域水华藻类群落与水体环境因子的 RDA 分析

Fig. 3 RDA biplot of algal bloom communities and water environmental factors in different areas and habitats of Baiyangdian Lake

3 讨论

3.1 白洋淀水体环境与水华风险区域评估

白洋淀作为雄安新区生态建设的重要依托, 由于人类活动产生的污染物长期积累导致其治理措施



1. TN, 2. TP, 3. NH₄⁺-N, 4. T, 5. DO, 6. pH, 7. ORP, 8. COND, 9. NTU; * 表示 P < 0.05, ** 表示 P < 0.01, *** 表示 P < 0.001

图4 水华藻类与环境因子相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between algal blooms and environmental factors

效果不明显,多处点位水质仍为IV ~ 劣V类水平,不能达到水功能区划的要求^[28-30].水质主要受降雨和水文循环等自然因素及生产生活的人工调水等人为因素的影响^[31].夏季强降雨和高温导致此时淀区水质最差^[32],淀区环境因子PCA排序分析显示,营养盐浓度对淀区内水质差异贡献最大,且淀区水体环境存在空间异质性.以生境类型来看,DM的ρ(TN)和SD的ρ(TP)都处于较高水平,平均值分别为1.37 mg·L⁻¹和0.07 mg·L⁻¹.以区域类型来看,N、

H和WS区是营养盐平均浓度排名前3的区域.

本研究选取2020年夏季利用藻密度调查评估淀区水华风险区域,结果更具有代表性.结果显示2020年夏季白洋淀95%以上地区无水华风险(藻类密度 < 2 × 10⁶ 个·L⁻¹),仅在DM(点位编号:DM135,位于N区;DM166,位于H区)与SD(点位编号:SD224,位于N区;SD17和SD245,位于WS区)共5个点位检测到藻类密度为2 × 10⁶ ~ 1 × 10⁷ 个·L⁻¹,达到轻微水华程度.DM风险点位具体位于

南刘庄(DM135)和光淀张庄(DM166),SD 风险点具体位于小白洋淀(SD224 和 SD245)和烧车淀(SD17),相关研究表明以上片区氮磷污染严重,其中南刘庄水质最差,属于重度富营养状态^[33~35].

3.2 白洋淀水华藻类群落结构差异及其驱动因子

基于宏条形码分析,共计得到 90 种白洋淀潜在水华藻类,隶属于 7 个门,以绿藻门和蓝藻门种类为主,占比达 60%. 蓝藻和绿藻在温暖环境中更易繁殖,同时绿藻门在富营养化环境中也更具优势^[36,37],因此绿藻门物种丰度和数量在夏季白洋淀水华藻类群落中占据优势. 通过优势度确定了淀区不同分区内 20 种水华优势藻种,以绿藻门和裸藻门为主. 这与针对已经暴发水华的淡水系统藻类研究有区别,Xin 等^[38]发现汉江中下游水华优势种为小环藻属(*Cyclotella* sp.),还有一些相关研究指出蓝藻是水华暴发优势群落^[39,40],针对白洋淀区域浮游植物优势种的调查研究也与本研究结果呈现出差异^[41]. 造成上述差异除了与地理气候等自然因素有关,也可能是研究对象(水华藻类群落与浮游植物群落)的不同.

结合群落 α 多样性和 ANOSIM 相似性分析发现,与不同生境类型相比,水华藻类群落差异在不同区域上更显著(图 2),同时,白洋淀水环境因子在不同区域也具有显著的空间异质性(表 2). 淀区的水华藻类群落和水体环境都展现出较强的空间异质性,说明淀区环境复杂,且不同区域群落结构不同,需分别关注和分析. RDA 分析探究白洋淀水华藻类群落和水环境因子之间的关系,筛选出 TP、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 这 3 个环境因子是造成水华藻类群落结构差异的关键因子($P < 0.05$),且 3 个环境因子之间呈极显著正相关(图 3). 国内学者研究白洋淀浮游植物和环境因子关系,发现水温(T)、pH 和溶解氧(DO)也会不同程度地影响浮游植物群落^[42,43]. 而本研究中氮磷等营养元素是影响水华藻类群落差异的关键因子,说明特定浮游植物群落与环境响应关系也更为集中和具体. 其他湖泊也有类似结果,Wang 等^[44]在研究滇池北部赤潮时,发现 TN 和 TP 是关键因素. Tong 等^[45]发现湖泊营养盐浓度年内剧烈变化,为蓝藻在一年内持续更长时间的水华创造了有利条件. 基于水华藻类群落门水平和优势种水平分别与环境因子做相关性分析发现(图 4),不同分类水平对关键环境因子的响应规律不同,门水平上,蓝藻与营养盐浓度响应显著正相关;种水平上,则呈现出硅藻门和绿藻门优势种与营养盐浓度响应更显著,可能是与高级分类单元相比,低级分类单元情况更为复杂,涉及到个体物种间的差异和相互作用

用等.

基于以上对白洋淀水华藻类群落的调查分析和水华暴发风险区域评估,结合白洋淀实际情况,提出以下水华防控意见:建议重点控制淀面和水道等宽阔水域的营养元素的输入,降低水体富营养化程度;同时保证白洋淀流域水华风险区域的基础水位,有助于维持白洋淀高生物多样性,降低水华暴发风险.

4 结论

(1) 基于藻密度评估白洋淀水华风险区域显示,2020 年夏季白洋淀 95% 以上地区无水华风险(藻类密度 $< 2 \times 10^6$ 个 $\cdot \text{L}^{-1}$),仅 5 个样点存在轻微藻华风险:DM135,位于 N 区;DM166,位于 H 区;SD224,位于 N;SD17 和 SD245,位于 WS 区. 上述区域水质差,氮磷污染严重,建议控制白洋淀淀面和水道等宽阔水域氮磷等营养盐的输入,监管维持水华风险区域的基础水位,抑制水华藻类生长,防止水华暴发.

(2) 通过宏条形码技术白洋淀淀区共检测到 90 种水华藻类,隶属于 7 个门,以绿藻门和蓝藻门为主,其中优势水华藻类 20 种. 淀区的水华藻类群落和水体环境均在不同区域上具有更强的空间异质性. TP、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 这 3 个环境因子是造成水华藻类群落结构差异的关键因子,水华藻类群落对关键环境因子的响应程度和规律在门分类和种分类水平上不同.

参考文献:

- [1] 王菁晗,何吕奇姝,杨成,等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较(1981—2015 年)[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 897-906.
Wang J H, He L Q S, Yang C, et al. Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981-2015)[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 897-906.
- [2] 张虎军,宋挺,朱冰川,等. 太湖蓝藻水华暴发程度年度预测[J]. 中国环境监测, 2022, **38**(1): 157-164.
Zhang H J, Song T, Zhu B C, et al. Annual forecast of the extent of cyanobacteria bloom in Taihu lake[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, **38**(1): 157-164.
- [3] Health Canada. Guidelines for Canadian recreational water quality(3rd ed.)[S]. Ottawa, Canada: Health Canada, 2012.
- [4] World Health Organization. Guidelines for safe recreational water environments. Volume 1, coastal and fresh waters[M]. France: World Health Organization, 2003.
- [5] Yu P X, Gao R, Zhang D Z, et al. Predicting coastal algal blooms with environmental factors by machine learning methods[J]. Ecological Indicators, 2021, **123**, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2020.107334.
- [6] Wang C, Wang Z Y, Wang P F, et al. Multiple effects of environmental factors on algal growth and nutrient thresholds for harmful algal blooms: application of response surface methodology[J]. Environmental Modelling & Assessment, 2016, **21**(2),

- 247-259.
- [7] Xia R, Zhang Y A, Wang G S, *et al.* Multi-factor identification and modelling analyses for managing large river algal blooms[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113056.
- [8] Zhou Z X, Yu R C, Zhou M J. Resolving the complex relationship between harmful algal blooms and environmental factors in the coastal waters adjacent to the Changjiang River estuary[J]. *Harmful Algae*, 2017, **62**: 60-72.
- [9] 陈修康. 水环境治理中藻华的危害及其防控技术[J]. *绿色环保建材*, 2021, (10): 27-28.
- [10] 张民, 阳振, 史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 336-344.
Zhang M, Yang Z, Shi X L. Expansion and drivers of cyanobacterial blooms in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 336-344.
- [11] 李建, 尹炜, 贾海燕, 等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(5): 136-144.
Li J, Yin W, Jia H Y, *et al.* Research progress on diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River: review and advances [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(5): 136-144.
- [12] 孟溪. 藻类鉴定及分类方法研究进展[J]. *生物化工*, 2019, **5**(2): 102-104.
Meng X. The progress of the methods to identify and classify phytoplankton [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2019, **5**(2): 102-104.
- [13] 张军毅, 孙蓓丽, 朱冰川, 等. 基于分子标记的藻类鉴定研究进展[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(6): 1607-1625.
Zhang J Y, Sun B L, Zhu B C, *et al.* Research progress in the taxonomic identification of algae on the basis of molecular markers [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(6): 1607-1625.
- [14] Gao Y C, Fang H D, Dong Y H, *et al.* An improved method for the molecular identification of single dinoflagellate cysts [J]. *PeerJ*, 2017, **5**, doi: 10.7717/peerj.3224.
- [15] Dzhembekova Ni, Moncheva S, Ivanova P, *et al.* Biodiversity of phytoplankton cyst assemblages in surface sediments of the Black Sea based on metabarcoding [J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2018, **32**(6): 1507-1513.
- [16] Gao Y C, Chen Y Y, Xiong W, *et al.* Distribution patterns of dinoflagellate communities along the Songhua River [J]. *PeerJ*, 2019, **7**, doi: 10.7717/peerj.6733.
- [17] Hanžek N, Udovič M G, Kajan K, *et al.* Assessing ecological status in karstic lakes through the integration of phytoplankton functional groups, morphological approach and environmental DNA metabarcoding [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108166.
- [18] 杨苗, 龚家国, 赵勇, 等. 白洋淀区域景观格局动态变化及趋势分析[J]. *生态学报*, 2020, **40**(20): 7165-7174.
Yang M, Gong J G, Zhao Y, *et al.* Analysis of dynamic changes and trends in the landscape pattern of the Baiyangdian Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(20): 7165-7174.
- [19] 刘世存, 王欢欢, 田凯, 等. 白洋淀生态环境变化及影响因素分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(5): 1060-1069.
Liu S C, Wang H H, Tian K, *et al.* Ecological environmental changes and influencing analysis in Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 1060-1069.
- [20] 段茂庆, 许维, 苑飞燕, 等. 白洋淀近 5 年水生态环境质量变化趋势与营养状态分析[J]. *环境化学*, 2022, **41**(6): 1988-2000.
- Duan M Q, Xu W, Yuan F Y, *et al.* Analysis on the trend and nutritional status of water environment quality in Baiyangdian Lake in recent 5 years [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(6): 1988-2000.
- [21] Esenkulova S, Sutherland B J G, Tabata A, *et al.* Comparing metabarcoding and morphological approaches to identify phytoplankton taxa associated with harmful algal blooms [J]. *Facets*, 2020, **5**(1): 784-811.
- [22] Yang Y Z, Gao Y C, Chen Y Y, *et al.* Interactome-based abiotic and biotic impacts on biodiversity of plankton communities in disturbed wetlands [J]. *Diversity and Distributions*, 2019, **25**(9): 1416-1428.
- [23] Machado K B, Antunes A M, Targueta C P, *et al.* DNA metabarcoding reveals the responses of prokaryotes and eukaryotes microbiota to warming: Are the patterns similar between taxonomic and trophic groups? [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106452.
- [24] Oksanen J, Kindt R, Legendre P, *et al.* The vegan package, community ecology package [M]. 2010.
- [25] Clarke K R, Gorley R N. *Primer v5: user manual/tutor3* [M]. Plymouth: Primer-E Ltd, 2001.
- [26] Ludwig J A, Reynolds J F. *Statistical ecology: a primer on methods & computing* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [27] Pielou E C. *Ecological diversity* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [28] 任晓强, 管孝艳, 陶园, 等. 白洋淀流域水环境风险评估综述[J]. *中国农村水利水电*, 2021, (1): 22-27.
Ren X Q, Guan X Y, Tao Y, *et al.* Review of water environment risk assessment in Baiyangdian Basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, (1): 22-27.
- [29] 王淑娟, 龚艳伟, 刘新军, 等. 白洋淀流域水体新污染物研究现状综述[J]. *环境与发展*, 2022, **34**(8): 102-108.
Wang S J, Gong Y W, Liu X J, *et al.* Review on the research status of emerging contaminants in Baiyangdian Lake [J]. *Environment and Development*, 2022, **34**(8): 102-108.
- [30] 高秋生, 焦立新, 杨柳, 等. 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1616-1627.
Gao Q S, Jiao L X, Yang L, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1616-1627.
- [31] Galbraith L M, Burns C W. Linking land-use, water body type and water quality in southern New Zealand [J]. *Landscape Ecology*, 2007, **22**(2): 231-241.
- [32] 王欢欢, 白洁, 刘世存, 等. 白洋淀近 30 年水质时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(5): 1051-1059.
Wang H H, Bai J, Liu S C, *et al.* Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 1051-1059.
- [33] 王子铭, 杨丽虎, 宋献方. 雄安新区建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应[J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3820-3834.
Wang Z M, Yang L H, Song X F. Spatial-temporal variation of water quality and its response to precipitation and land use in Baiyangdian Lake in the early stage of the construction of Xiong'an new area [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3820-3834.
- [34] 赵黔伟, 汪敬忠, 魏浩, 等. 白洋淀水体氮、磷和重金属的

- 变化特征及影响因素[J]. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(6): 103-108.
- Zhao Q W, Wang J Z, Wei H, *et al.* Variation characteristics of nitrogen, phosphorus and heavy metals in waters from Baiyangdian Lake and the influencing factors [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, **31**(6): 103-108.
- [35] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 白洋淀湿地生态功能评价及分区[J]. 生态学报, 2020, **40**(2): 459-472.
- Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, *et al.* Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(2): 459-472.
- [36] 侯秀丽, 苑春刚, 李学平, 等. 滇池氮磷浓度变化对蓝、绿、硅藻年际变化的影响[J]. 水生态学杂志, 2018, **39**(1): 16-22.
- Hou X L, Yuan C G, Li X P, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus concentrations on the planktonic algae dynamics in Dianchi Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2018, **39**(1): 16-22.
- [37] Jensen J P, Jeppesen E, Orlík K, *et al.* Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, **51**(8): 1692-1699.
- [38] Xin X K, Zhang H, Lei P, *et al.* Algal blooms in the middle and lower Han River: characteristics, early warning and prevention [J]. Science of the Total Environment, 2020, **706**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135293.
- [39] Kim J, Jones J R, Seo D. Factors affecting harmful algal bloom occurrence in a river with regulated hydrology [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, **33**, doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100769.
- [40] Zhu C M, Zhang J Y, Wang X, *et al.* Responses of cyanobacterial aggregate microbial communities to algal blooms [J]. Water Research, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117014.
- [41] 陈家琪, 董丽, 麻晓梅, 等. 基于 eDNA 技术的白洋淀微型生物群落监测[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(8): 1773-1786.
- Chen J Q, Dong L, Ma X M, *et al.* Microbial community monitoring in Baiyangdian Lake based on eDNA technology [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(8): 1773-1786.
- [42] 李娜, 周绪申, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 772-783.
- Li N, Zhou X S, Sun B W, *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(3): 772-783.
- [43] 金磊, 李林钰, 周杨, 等. 白洋淀三大典型水域浮游植物群落及水质评价[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2017, **37**(3): 329-336.
- Jin L, Li L-Y, Zhou Y, *et al.* Phytoplankton community and water quality analysis of three typical waters in Baiyangdian Lake [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2017, **37**(3): 329-336.
- [44] Wang J H, Li C, Xu Y P, *et al.* Identifying major contributors to algal blooms in Lake Dianchi by analyzing river-lake water quality correlations in the watershed [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **315**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128144.
- [45] Tong Y D, Xu X W, Qin M, *et al.* Lake warming intensifies the seasonal pattern of internal nutrient cycling in the eutrophic lake and potential impacts on algal blooms [J]. Water Research, 2021, **188**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116570.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)