

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

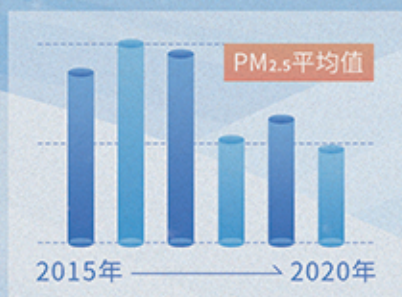
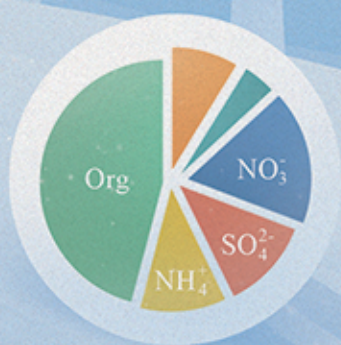
# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

### 北京冬季奥运会历史同期大气PM<sub>2.5</sub>污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,  
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期  
Vol.43 No.8

# 目次

|                                                           |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 北京冬季奥运会历史同期大气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征分析·····               | 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895) |
| 天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····                       | 郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)                                           |
| 长江中游地区 PM <sub>2.5</sub> 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····       | 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)                                            |
| 滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····                        | 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)                                     |
| 典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····                              | 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)                                  |
| 大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····                                 | 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)                                         |
| 河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····                        | 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)                                          |
| 京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····                         | 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)                                           |
| 2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····                     | 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)                                |
| 钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····                                | 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)                       |
| 长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····                                | 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)                               |
| 基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····                  | 庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)                                             |
| 梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····                  | 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)                                 |
| 基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····                           | 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)                                      |
| 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····                           | 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)                           |
| 联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····                              | 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)                                        |
| 江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····                                 | 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)                             |
| 天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····                                | 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)                                           |
| 宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····                | 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)                                      |
| 再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····                           | 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)                                               |
| 太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····                            | 杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)                               |
| 太湖氧化亚氮 (N <sub>2</sub> O) 排放特征及潜在驱动因素·····                | 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)                                |
| 海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····                                | 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)                                           |
| 玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····                       | 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)                                    |
| 环境 pH 条件下 Fe <sup>2+</sup> 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····    | 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)                                               |
| 新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····                         | 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)                                |
| 宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····                         | 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)                                     |
| 宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····                                    | 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)                                          |
| 地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····                                | 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)                               |
| 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····                           | 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)                                  |
| 基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····                              | 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)                                      |
| 柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····                              | 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)                                |
| 不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····                         | 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)                            |
| 橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····                             | 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)        |
| 3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····                              | 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)                                    |
| 连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····                                    | 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)                                        |
| 改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····                             | 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志刚 (4282)                                     |
| 不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····                             | 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)                           |
| 水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····                    | 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)                                              |
| 外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····                     | 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)                              |
| 不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····                         | 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)            |
| 基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····                  | 庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)                             |
| 汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····                           | 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)                                        |
| 岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····                                | 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)                                          |
| 戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····                           | 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)                                      |
| 长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····                               | 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)                                 |
| 秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N <sub>2</sub> O 排放的影响·····        | 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)                   |
| 聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····                                   | 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)                                              |
| 微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····                                     | 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)                                         |
| 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····                             | 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)                                                |
| 《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107) |                                                                        |

# 长江流域着生藻类群落结构的时空格局及其生态评价

胡愈忻<sup>1</sup>, 曹亮<sup>1</sup>, 屈仁超<sup>2</sup>, 黄杰<sup>1</sup>, 胡圣<sup>1</sup>, 周正<sup>1</sup>, 王英才<sup>1</sup>, 张静<sup>1\*</sup>

(1. 生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 宜昌 443133)

**摘要:** 在长江流域河流区域共布设了 130 个采样点开展着生藻类调查, 范围涵盖了自长江源区至入海口的干流重点区域、八大一级支流和三峡支流. 长江干流着生藻类密度从高到低依次为长江上游、长江源区、长江中下游和金沙江, 整个干流自西向东着生藻类群落空间格局呈现硅藻门和蓝藻门交替占优的形式, 硅藻(舟形藻)在干流具最大竞争优势, 干流着生藻类群落分布与总氮、总磷和 pH 密切相关. 长江支流中, 三峡支流着生藻类密度显著高于八大一级支流, 所有支流着生藻类群落主要为蓝藻门, 蓝藻(鞘丝藻)在长江支流具最大竞争优势, 支流着生藻类群落分布与溶解氧和 pH 密切相关. 着生藻类的多样性分析及水生生态评价显示, 长江源区物种丰富度较低, 但均匀度指数较高, 因此是  $\alpha$  多样性最高的区域, 也是水生生态评价较好的区域( $\beta$  中污型); 长江中下游尽管评价也为  $\beta$  中污型, 但着生藻类群落均匀度显著低于源区, 导致其  $\alpha$  多样性低于源区. 水质评价显示长江流域各区域均为良好, 但区域间的 WQI 指数仍具显著差异, 而且其差异结果与水生生态评价结果不一致, 因此建议结合水生生态和水质两种评价结果从而更全面地评价水生生态系统健康.

**关键词:** 长江流域; 着生藻类; 群落结构; 空间格局; 生态评价

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3998-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111229

## Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin

HU Yu-xin<sup>1</sup>, CAO Liang<sup>1</sup>, QU Ren-chao<sup>2</sup>, HUANG Jie<sup>1</sup>, HU Sheng<sup>1</sup>, ZHOU Zheng<sup>1</sup>, WANG Ying-cai<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1\*</sup>

(1. Yangtze River Basin Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yangtze River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430010, China; 2. River Basin Hub Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

**Abstract:** To explore the periphytic algae community structure in the Yangtze River basin, samples were collected from 130 sampling sites, including the source to the estuary along the mainstream of the Yangtze River, eight primary tributaries, and the tributary of the Three Gorges area. The periphytic algae densities of different areas in the mainstream of the Yangtze River ranked from high to low were the upstream area, source area, middle and lower area, and the Jinsha River. The high periphytic algae density in the upstream area was associated with the shift in nutrition level, and the high periphytic algae density in the source area was associated with human activity. The spatial pattern of the periphytic algae community in the whole main stream from west to east presented the alternating dominance of Bacillariophyta and Cyanophyta; the Bacillariophyta (*Navicula*) had a competitive advantage in the main stream, and the distribution of the periphytic algae community was driven by total nitrogen, total phosphorus, and pH. For the tributary of the Yangtze River, the periphytic algae density in the Three Gorges tributary area was far higher than those in the eight primary tributaries; the periphytic algae community was dominated by Cyanophyta (*Lyngbya*), which had a competitive advantage in the tributaries of the Yangtze River. The distribution of the periphytic community was driven by dissolved oxygen and pH. According to the diversity analysis and assessment, the periphytic algae community in the source area showed lower species richness and higher evenness, thus leading to a high  $\alpha$ -diversity and good assessment result (mesosaprobic zone). The middle and lower reaches of the Yangtze River also showed the same assessment result, the mesosaprobic zone. However, the community evenness of the middle and lower reaches was significantly lower than that of the source area, thus making the middle and lower reaches of the Yangtze River have a significantly lower  $\alpha$ -diversity than that of the source area. All areas of the Yangtze River showed good water quality assessment; however, different areas had different WQI index numbers, and the assessment results of the WQI index were inconsistent with the results of the aquatic assessment. Therefore, a comprehensive assessment of aquatic ecosystem health should use both aquatic assessments and water quality assessments.

**Key words:** Yangtze River basin; periphytic algae; community composition; spatial pattern; ecological evaluation

着生藻类附着于各种基质表面, 是水生态系统的重要初级生产者, 能够通过光合作用将物理和化学的扰动整合到水体中<sup>[1]</sup>. 着生藻类对人为干扰和环境变化响应迅速, 如栖息地破坏、富营养化、金属污染、除草剂和酸等导致的污染, 同时着生藻类扰动后重新分布通常较其他生物快, 因此其群落组成能有效指示生态环境的变化<sup>[2]</sup>.

当前人类城镇化、农业活动、水电开发等显著改变了河流水文、水质和水生态, 干扰了水生生态系统健康, 造成着生藻类群落演替及分布格局发生改变<sup>[3,4]</sup>. 例如肖妮娜等<sup>[5]</sup>调查了赣江流域的着生藻

类群落, 发现上下游不同水质状况导致不同的着生藻类群落结构, 中游着生藻类群落组成也受到了流域地貌因子的影响. 胡建成等<sup>[6]</sup>对赤水河着生藻类进行调查, 有效利用着生藻类评价了赤水河的生态状况, 同时分析出影响赤水河生态状况的环境胁迫因子; 胡建成等<sup>[7]</sup>通过对金沙江上段进行藻类调查, 发现着生藻类对季节变化敏感, 能较好地反映河

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2021-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201000)

作者简介: 胡愈忻(1993~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为水生生态监测评价, E-mail: ssshyx@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhangjing100@126.com

流生态状况;马宝珊等<sup>[8]</sup>在雅砻江下游开展着生藻类调查,发现着生藻类沿着河流纵向梯度呈现规律性变化趋势,水质和水文条件是影响着生藻类分布的重要环境因子。

目前长江流域已开展了大量着生藻类相关研究,但仍缺乏从整个流域尺度来分析着生藻类的分布和演替格局。本研究在整个长江流域干支流进行着生藻类样品采集,通过分析其密度、群落组成和多样性为长江流域着生藻类分布提供本底资料,通过分析着生藻类和水质因子的关系了解其分布的驱动因子,通过多样性指数和 WQI 指数对长江流域各区域进行水生态评价,以期对长江流域的水生健康

保护提供理论支持和研究基础。

## 1 材料与方法

2020 年 6 月至 2020 年 10 月在长江流域进行样品采集,从长江源头至下游入海口共布设 130 个采样点,采样范围自西向东涵盖了长江干流的源区、金沙江、上游和中下游。长江的八大一级支流包括雅砻江、岷江、乌江、嘉陵江、湘江、沅江、汉江和赣江,三峡支流的大宁河、龙河、梅溪河、绵竹峡、磨刀溪、汝溪河、神农溪、汤溪河、童庄河、香溪河、小江和御临河。具体点位设置如图 1 所示。

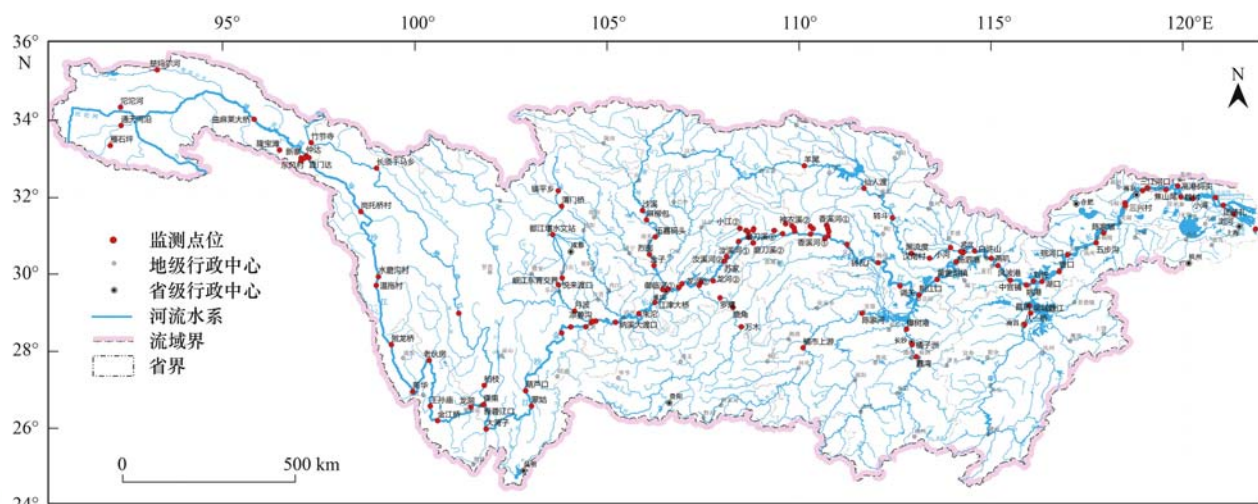


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in the Yangtze River basin

在每个样点选择低潮线附近岸边以及 0.3 m 等深线附近河边作为着生藻类样品采集区域,随机采集 6 块不同的粗砾石、鹅卵石以及树木残干等基质,利用小刀、镊子和牙刷等工具将基质表面共计 10 cm × 10 cm 上的着生藻类刮至样品瓶中,用纯水反复冲洗刮取工具,使用样品瓶收集冲洗混合物。样品用鲁哥氏液固定,用量为水样体积的 1% ~ 1.5%。将着生藻类样品带回实验室浓缩、沉淀后,定容至 30 mL。将定容样品充分摇晃均匀后,取 0.1 mL 置于浮游生物计数框中,在 10 × 40 显微镜下将藻类鉴定至属,进行定量分析,着生藻类的分类鉴定参考文献[9 ~ 13]。利用 YSI 多参数水质测量仪(Xylem)现场测量各样点的水温( $T$ )、pH、溶解氧(DO)和电导率(Cond),生化需氧量(BOD)、高锰酸盐指数、氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)参照文献[14]进行测定。

参照 Shannon-Wiener 生态位宽度的概念计算各类群的生态位宽度<sup>[15]</sup>,同时将着生藻类出现频率进行 1 000 次随机化重排,计算生态位指数的零分布,

将低于零分布 95% 置信区间下限的物种定义为特化种,超过零分布 95% 置信区间上限的物种定义为泛化属,二者之间的物种定义为中性类群<sup>[16]</sup>。使用 R 语言的 vegan 包计算着生藻类群落  $\alpha$  多样性指数,检验着生藻类群落和环境因子的相关性。使用 Shannon-Wiener、Pielou 和 Margalef 指数对水生态状况进行评价<sup>[17]</sup>,使用综合水质指数(WQI)对水质状况进行评价,选取  $T$ 、pH、Cond 和 DO 这 4 个常规水质指标以及 TN、TP、高锰酸盐指数和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  这 4 个与水体营养状况相关的水质指标来计算 WQI,计算相关参数的取值参照文献[18, 19],评价标准为: <25 为极差; 25 ~ 50 为较差; 50 ~ 70 为中等; 70 ~ 90 为良好; >90 为优秀。

## 2 结果与分析

### 2.1 长江流域着生藻类群落组成的空间格局

在长江流域共监测到着生藻类 7 门 75 属,其中绿藻门 28 属,占比 37%; 硅藻门 24 属,占比 32%; 蓝藻门 17 属,占比 23%; 其他藻类 6 属,占比 8%,

包括甲藻门、金藻门、裸藻门和隐藻门. 各区域着生藻类细胞密度如图 2 所示, 长江干流着生藻类密度平均值从高到低依次为长江上游、长江中下游、长江源区和金沙江; 长江支流中, 秩和检验显示三峡支流着生藻类密度显著高于八大一级支流; 从整个流域角度, 着生藻类在三峡支流区域密度最高, 金沙江区域密度最低.

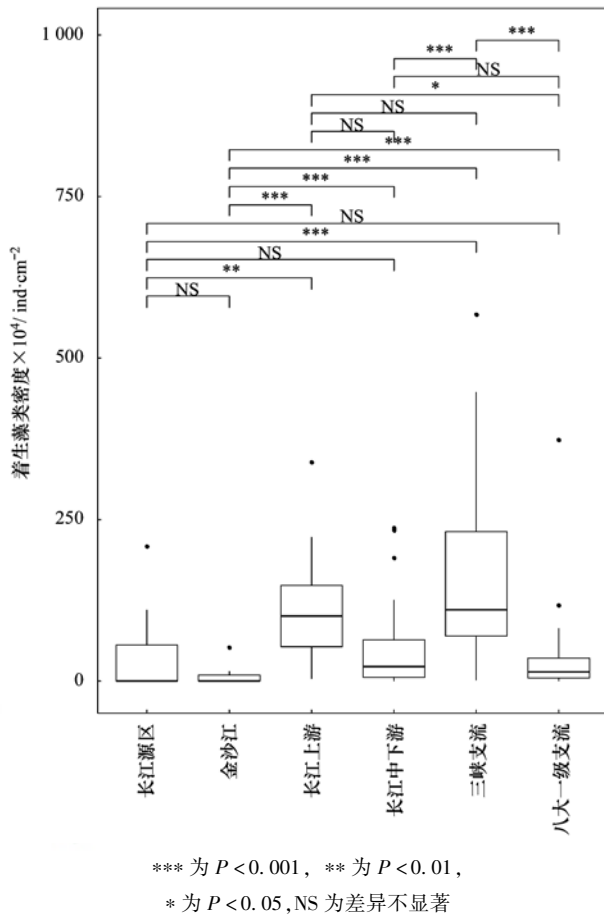


图 2 长江流域各区域的着生藻类密度

Fig. 2 Periphytic algae density of different areas in the Yangtze River basin

长江干流着生藻类密度和群落组成如图 3 所示. 长江源区总体密度偏低, 平均值为  $3.85 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 主要由硅藻组成; 隆宝滩至东风村区域均为蓝藻门占优势, 其较高的密度使得源区整体标准差较高. 金沙江着生藻类以硅藻占优势, 密度整体偏低, 平均值为  $6.94 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 长江上游是干流中着生藻类密度最高的区域, 平均值为  $1.21 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 着生藻类群落中多为蓝藻占优势. 长江中下游着生藻类的密度平均值为  $5.15 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 干流群落呈现蓝藻和硅藻交互占优势的演替格局.

长江八大一级支流着生藻类密度及群落结构如图 4 所示. 八大一级支流中, 汉江着生藻类密度平均值为  $1.61 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 以硅藻占绝对优势, 与近

年的研究结果相一致<sup>[20]</sup>. 除汉江外, 八大一级支流中的其他支流均以蓝藻占绝对优势. 对于三峡库区支流而言, 密度最高为童庄河 (密度平均值为  $3.17 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 和神农溪 (密度平均值为  $2.57 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), 均以硅藻占绝对优势, 其他所有三峡支流的着生藻类均以蓝藻占绝对优势.

## 2.2 着生藻类优势属的生态位宽度

从种水平上分析长江流域各区域的多样性, 对优势度大于 0.02 的优势属<sup>[21]</sup> 计算生态位宽度, 生态位宽度能够表征物种利用资源的能力, 数量多、占据更多资源位点且分布更均匀的优势种具更大的生态位<sup>[22]</sup>. 生态位越宽则竞争力越强, 生态位相对更宽的物种一般是泛化属; 生态位越窄则特化程度较强, 生态位相对更窄的物种一般是特化种; 位于二者之间的则为中性类群<sup>[16]</sup>. 对于长江干流而言 (表 1), 干流各区域均视为优势属的物种有舟形藻和鞘丝藻. 舟形藻在各区域具较高的生态位宽度 (大于 1), 而且在源区和中下游均为泛化属; 鞘丝藻的生态位宽度为 0.7 ~ 2.3, 但在该物种主要为中性类群甚至特化种. 在八大一级支流和三峡支流的优势属中, 鞘丝藻则均为泛化属.

## 2.3 长江流域着生藻类与环境因子的关系

长江流域着生藻类主要由硅藻和蓝藻组成, 为了解影响其群落演替和分布的驱动因子, 分别对长江干流和支流的着生藻类群落和环境因子进行 Mantel test 分析, 结果如图 5 所示.

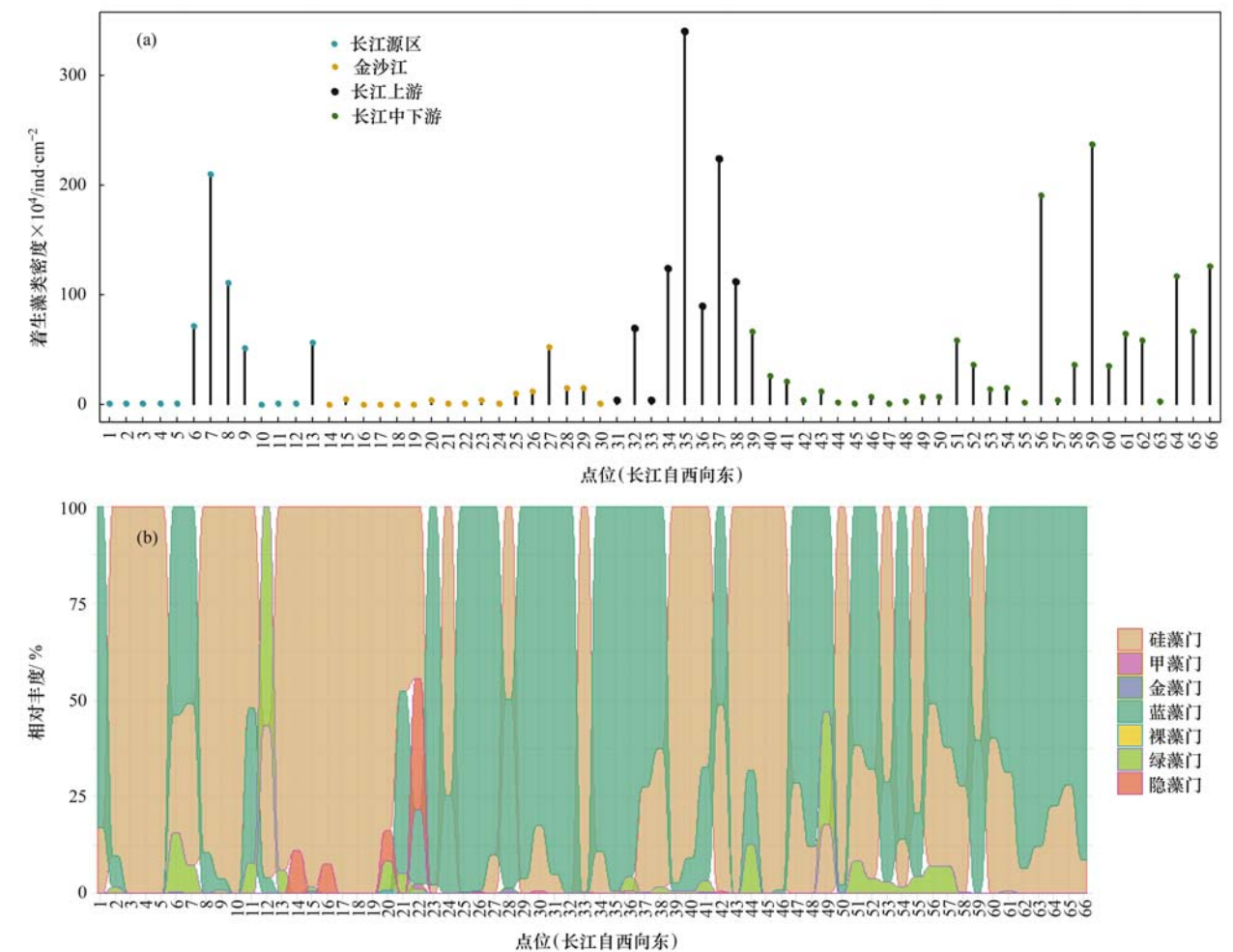
长江干流着生藻类主要优势类群为硅藻和蓝藻, Mantel test 显示干流硅藻与总氮的相关性显著, 干流蓝藻与总磷和 pH 的相关性显著. 环境因子间的 Spearman 相关性显示, pH 与总氮、总磷均呈显著负相关.

长江支流着生藻类主要以蓝藻为主, Mantel test 显示支流蓝藻与溶解氧的相关性显著. 环境因子间的 Spearman 相关性显示溶解氧与水温呈显著负相关, 与 pH 呈显著正相关.

## 2.4 长江流域河流生态及水质评价

从整体多样性 (Shannon-Wiener 指数)、物种均匀度 (Pielou 指数) 和物种丰富度 (Margalef 指数) 这 3 个维度分析长江流域各区域  $\alpha$  多样性上的差异并进行生态评价, 使用 WQI 指数对长江流域各区域进行水质评价, 同时基于秩和检验分析各区域差异显著性, 结果如图 6 所示.

根据 Shannon-Wiener 指数, 长江源区的多样性显著高于长江中下游, 其他区域间未发现显著差异. 评价结果显示, 长江上游部分区域处于  $\alpha$  中污型, 流域其他区域多处于  $\beta$  中污型.



(a) 长江干流着生藻类密度, (b) 长江干流着生藻类群落组成; 1. 雁石坪, 2. 沱沱河, 3. 通天河沿, 4. 楚玛尔河, 5. 曲麻莱大桥, 6. 隆宝滩, 7. 禅古电站, 8. 新寨, 9. 东风村, 10. 仲达, 11. 杂拉, 12. 直门达, 13. 竹节寺, 14. 岗托桥村, 15. 温拖村, 16. 水磨沟村, 17. 贺龙桥, 18. 新华, 19. 老伙房, 20. 王孙庙, 21. 泸沽湖落水岸边, 22. 金江桥, 23. 龙洞, 24. 保果, 25. 大湾子, 26. 葫芦口, 27. 倒流子, 28. 黄沙坡, 29. 三块石, 30. 石门子, 31. 挂弓山, 32. 纳溪大渡口, 33. 朱沱, 34. 沙溪场, 35. 苏家, 36. 晒网坝, 37. 白帝城, 38. 巫峡口, 39. 砖瓦厂, 40. 调关, 41. 荆江口, 42. 黄盖湖镇, 43. 纱帽, 44. 白浒山, 45. 燕吼, 46. 风波港, 47. 中官铺, 48. 姚港, 49. 刘佐, 50. 湖口, 51. 皖河口, 52. 五步沟, 53. 陈家墩, 54. 乌江, 55. 三兴村, 56. 九乡河口, 57. 小河口上游, 58. 三江河口, 59. 焦山尾, 60. 高港码头, 61. 魏村, 62. 小湾, 63. 姚港, 64. 团结扎, 65. 浏河, 66. 朝阳农场

图 3 长江干流着生藻类密度及群落组成

Fig. 3 Periphytic algae density and community composition of mainstream in the Yangtze River basin

根据 Pielou 指数, 长江源区的群落均匀度要显著高于长江干流上游、中下游和各支流区域, 其他区域间未发现显著差异. 长江源区评价结果最好, 处于清洁寡污型 ~ 清洁型; 金沙江、长江中下游、三峡支流和八大一级支流均处于  $\beta$  中污型 ~ 清洁寡污型; 长江上游则处于  $\alpha$  中污 ~ 清洁寡污型.

根据 Margalef 指数, 三峡支流显著高于长江源区、长江上游和中下游, 八大一级支流要显著高于长江上游和中下游, 其他区域间未发现显著差别. 金沙江、三峡支流和八大一级支流的 Margalef 指数相对略高, 处于重污染型 ~ 中污染型; 长江干流源区、上游和中下游则大多处于重污染型.

根据 WQI 指数, 长江流域各区域 WQI 均处于 70 ~ 90 之间, 评价均为良好, 但不同区域间仍有显

著差异. 金沙江的 WQI 指数显著高于长江流域其他区域, 是水质状况最优的区域; 长江源区和长江上游均显著高于长江中下游, 说明长江干流中下游区域的水质状况相对较差. 支流中, 三峡支流的 WQI 指数显著高于八大一级支流.

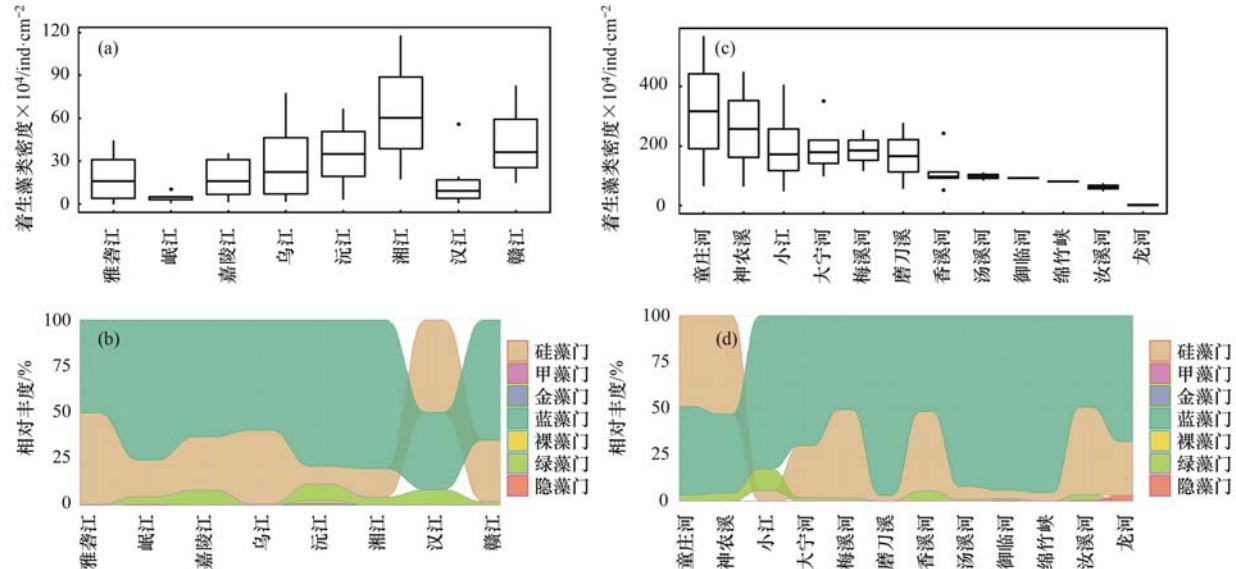
### 3 讨论

#### 3.1 长江流域着生藻类群落的空间格局

目前长江流域着生藻类的相关研究多针对局部区域, 例如长江湖北段着生藻类主要以硅藻和蓝藻为主<sup>[23]</sup>; 雅砻江下游以硅藻、绿藻和蓝藻为主<sup>[8]</sup>; 长江上游宜宾至江津段、金沙江上段和赣江流域等区域的着生藻类则是硅藻门占据优势地位<sup>[5,7,24]</sup>. 本研究从整个流域尺度进行调查, 发现长江流域着生

藻类主要以硅藻和蓝藻为主,其中硅藻的广泛分布可能与该类群能耐受各类环境条件有关<sup>[25]</sup>,而蓝藻的广泛分布则可能与该类群擅于贮存磷元素、固氮

和吸收 CO<sub>2</sub> 等相关<sup>[25]</sup>。  
硅藻门中的舟形藻属是长江干流各区域中的优势属,而且在长江源区和长江中下游均被划分为泛



(a)长江八大一级支流着生藻类密度; (b)长江八大一级支流着生藻类群落组成;  
(c)长江三峡支流着生藻类密度; (d)长江三峡支流着生藻类群落组成

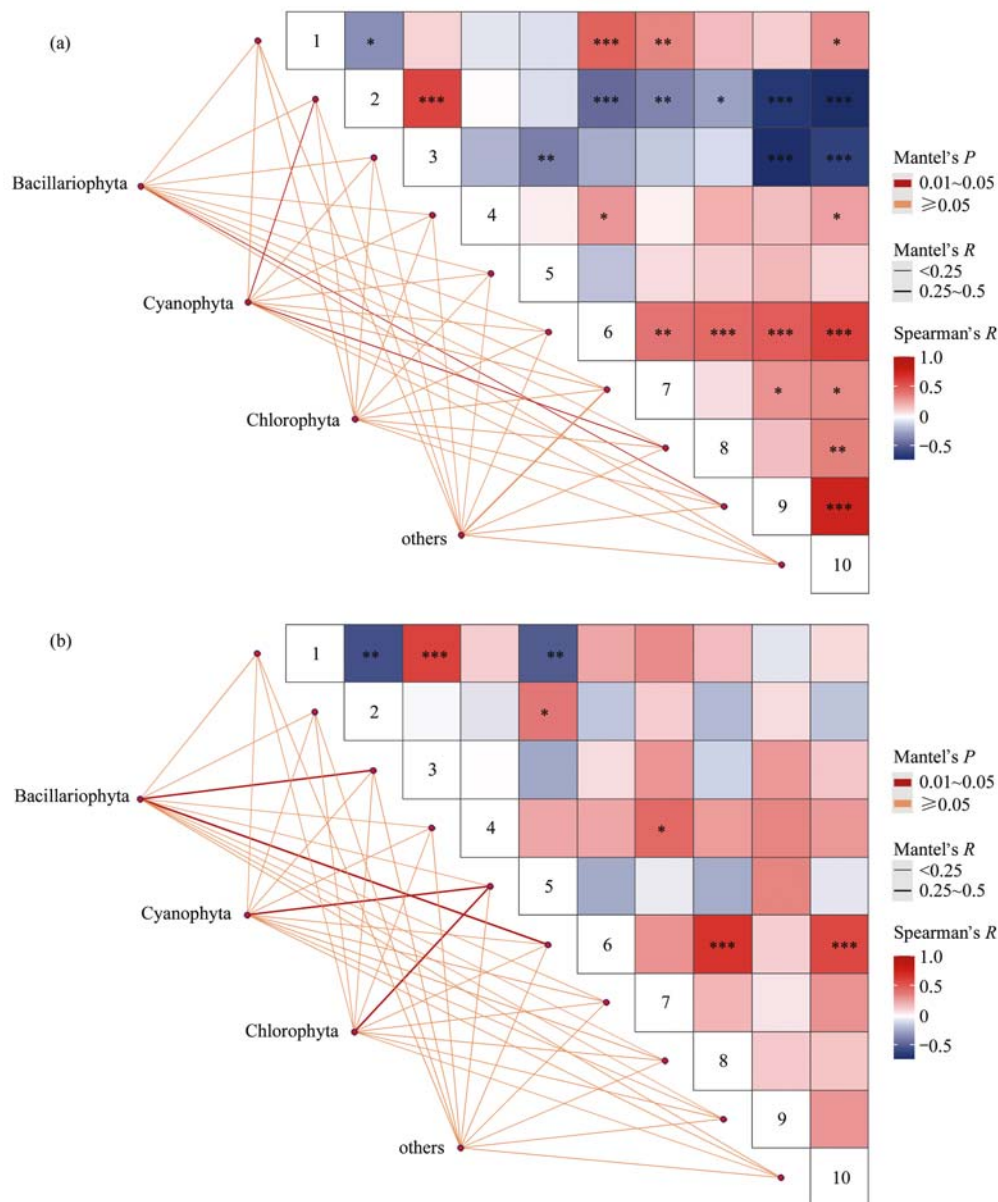
图 4 长江支流着生藻类密度及群落组成

Fig. 4 Periphytic algae density and community composition of a tributary in the Yangtze River basin

表 1 优势属的生态位宽度及其类型划分

Table 1 Niche breadth and classification of dominant genera

| 区域     | 优势属 | 拉丁学名                | 优势度     | 生态位宽度     | 类型   |
|--------|-----|---------------------|---------|-----------|------|
| 长江源区   | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.096 4 | 1.535 148 | 泛化属  |
|        | 曲壳藻 | <i>Achnanthes</i>   | 0.045 8 | 1.472 461 | 中性类群 |
|        | 针杆藻 | <i>Synedra</i>      | 0.021   | 1.383 222 | 泛化属  |
|        | 等片藻 | <i>Diatoma</i>      | 0.322 5 | 1.266 51  | 中性类群 |
|        | 桥湾藻 | <i>Cymbella</i>     | 0.028 3 | 1.214 173 | 中性类群 |
|        | 异极藻 | <i>Gomphonema</i>   | 0.025 4 | 1.055 573 | 中性类群 |
|        | 鞘丝藻 | <i>Lyngbya</i>      | 0.072 5 | 0.747 636 | 中性类群 |
|        | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.061 6 | 1.422 437 | 中性类群 |
| 金沙江    | 鞘丝藻 | <i>Lyngbya</i>      | 0.357 1 | 1.010 121 | 特化种  |
|        | 眉藻  | <i>Calothrix</i>    | 0.054 6 | 0.746 678 | 特化种  |
|        | 鞘丝藻 | <i>Lyngbya</i>      | 0.173 6 | 1.580 945 | 中性类群 |
|        | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.054 6 | 1.113 252 | 中性类群 |
| 长江上游   | 粘球藻 | <i>Gloeocapsa</i>   | 0.114 7 | 0.975 063 | 中性类群 |
|        | 石囊藻 | <i>Entophysalis</i> | 0.210 1 | 0.745 041 | 特化种  |
|        | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.159   | 2.681 679 | 泛化属  |
|        | 鞘丝藻 | <i>Lyngbya</i>      | 0.529   | 2.377 068 | 中性类群 |
| 长江中下游  | 菱形藻 | <i>Nitzschia</i>    | 0.085 6 | 2.091 5   | 中性类群 |
|        | 直链藻 | <i>Melosira</i>     | 0.037 9 | 0.503 682 | 特化种  |
|        | 鞘丝藻 | <i>Lyngbya</i>      | 0.358 1 | 2.662 913 | 泛化属  |
|        | 菱形藻 | <i>Nitzschia</i>    | 0.039   | 2.277 292 | 中性类群 |
| 八大一级支流 | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.072 7 | 2.142 53  | 中性类群 |
|        | 粘球藻 | <i>Gloeocapsa</i>   | 0.112 6 | 0.763 354 | 特化种  |
|        | 鞘丝藻 | <i>Lyngbya</i>      | 0.387 8 | 2.957 449 | 泛化属  |
|        | 针杆藻 | <i>Synedra</i>      | 0.023 2 | 2.888 624 | 中性类群 |
| 三峡支流   | 粘球藻 | <i>Gloeocapsa</i>   | 0.135 4 | 2.344 541 | 特化种  |
|        | 菱形藻 | <i>Nitzschia</i>    | 0.028 1 | 2.324 151 | 中性类群 |
|        | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.114 7 | 2.140 169 | 特化种  |
|        | 曲壳藻 | <i>Achnanthes</i>   | 0.057 2 | 1.857 129 | 特化种  |
|        | 舟形藻 | <i>Navicula</i>     | 0.114 7 | 2.140 169 | 特化种  |



(a) 长江干流, (b) 长江支流; 1.  $T$ , 2.  $pH$ , 3.  $Cond$ , 4.  $BOD$ , 5.  $DO$ , 6. 高锰酸盐指数, 7.  $NH_4^+-N$ , 8.  $COD$ , 9.  $TN$ , 10.  $TP$ ; \*\*\* 为  $P < 0.001$ , \*\* 为  $P < 0.01$ , \* 为  $P < 0.05$

图5 长江流域着生藻类群落与环境因子的关系

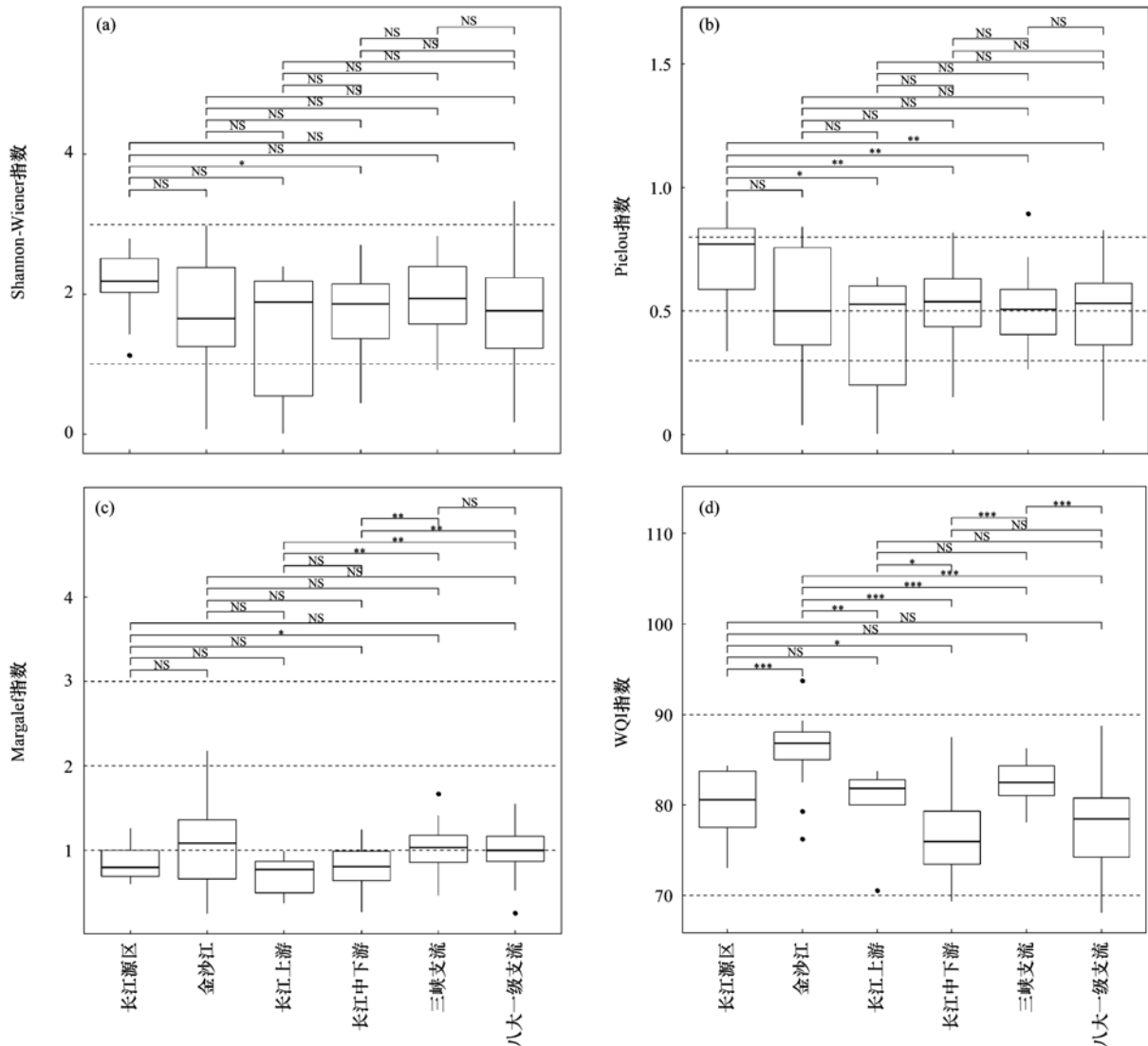
Fig. 5 Correlation between periphytic algae and environmental factors in the Yangtze River basin

化属. 舟形藻属涵盖的种类丰富, 该属含有超过上万个物种<sup>[26]</sup>, 在各类环境条件下均有分布, 而且该族群对温度和  $pH$  等环境因子耐受范围广, 造成了该属较宽的生态位和较强的竞争力<sup>[27]</sup>. 蓝藻门中的鞘丝藻是八大一级支流和三峡支流的优势属和泛化属, 该属物种在水坑、水沟、温泉和河岸等各类生境下均有分布, 广泛生长于各类生境中<sup>[28]</sup>. 沈旭舟等<sup>[29]</sup>通过研究三峡水库浮游植物的群落演替发现, 三峡水库干支流由于生境扰动从而在水温、水体层化结构、光强、营养盐、时间和频率等各方面具有差异, 使得干流通常为“激流型”的硅藻占优势, 支流通常为“静水型”的蓝绿藻占优势. 本研究在更大

的采样范围和更高的分类学水平上发现, 在流域尺度上, “激流型”的硅藻门藻类(舟形藻)在长江干流具最大的竞争优势, “静水型”的蓝藻(鞘丝藻)在长江支流具有最大的竞争优势.

### 3.2 长江流域着生藻类与环境因子的关系

着生藻类能够快速响应环境变化, 因此其群落结构与各类环境因子关系密切. 本研究发现长江流域干流着生藻类优势类群主要为硅藻和蓝藻, 其中硅藻与总氮关系密切, 蓝藻与总磷、 $pH$  关系密切. 总氮是硅藻生长繁殖所需的重要营养物质之一, 总氮的变化能够驱动硅藻的群落结构发生改变<sup>[30]</sup>. 朱广伟等<sup>[31]</sup>的研究发现总氮浓度小于  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时会



(a) Shannon-Wiener 指数, 虚线 1~3 指示  $\beta$  中污型, (b) Pielou 指数, 虚线 0.3~0.5 指示  $\beta$  中污型, 虚线 0.5~0.8 指示清洁寡污型, (c) Margalef 指数, 虚线 1~2 指示重度污染, 虚线 2~3 指示轻度污染, (d) WQI 指数, 虚线 70~90 指示良好; \*\*\* 为  $P < 0.001$ , \*\* 为  $P < 0.01$ , \* 为  $P < 0.05$ , NS 为差异不显著

图 6 长江流域环境因子的空间分布差异

Fig. 6 Distribution of environmental factors in the Yangtze River basin

限值硅藻的生长,而本次调查中约 55% 的长江干流断面要超过此阈值,这些断面的总氮浓度不限制硅藻的生长,应警惕硅藻大量增殖的风险.总磷是导致水体富营养化从而驱动蓝藻增殖的重要环境因子<sup>[32]</sup>; pH 则通过影响蓝藻的光合作用改变其生长和分布<sup>[33,34]</sup>,例如弱碱性水体中有利于藻类吸收  $\text{CO}_2$  从而进行光合作用, pH 也会直接影响藻类的生长繁殖速度<sup>[35]</sup>.同时本研究还发现 pH 与总氮、总磷均呈显著负相关, pH 能够影响营养元素(氮、磷)在水体中的形态、比例和转化<sup>[36]</sup>,而总氮、总磷分别与干流中硅藻、蓝藻的分布密切相关,因此 pH 在间接推动长江干流硅藻和蓝藻分布演替中起着重要作用.

本研究发现长江支流的优势类群为蓝藻,支流

蓝藻与溶解氧的关系密切.蓝藻的生长繁殖离不开溶解氧,蓝藻能够通过光合作用释放氧气从而提高水体中的溶解氧<sup>[37]</sup>,蓝藻的呼吸作用会消耗水体溶解氧,同时蓝藻消亡后的有机质在被降解时也会消耗水体中的溶解氧<sup>[38]</sup>.环境因子间的相关性显示长江支流的溶解氧与水温负相关,原因可能在于较高温度增加水体溶解的盐分从而使得溶解氧偏低<sup>[39]</sup>;长江支流的溶解氧与 pH 正相关,一方面在于溶解氧的增加会降低水体中的  $\text{H}^+$  从而导致 pH 的升高,另一方面在于藻类光合作用释放氧气的同时吸收  $\text{CO}_2$ ,使得水体中碳酸氢根大量积累致使 pH 升高<sup>[40,41]</sup>.综合长江干支流的结果可以发现, pH 通过影响各类水质条件从而推动着长江流域干支流着生藻类的分布,在间接调控着生藻类的演替上起重要

作用。

### 3.3 长江流域的水生态及水质评价

水生态评价显示长江流域多处于  $\beta$  中污型,水质状况评价为好。长江源区尽管物种丰富度较低(评价为重污染),但由于均匀度较高(评价为清洁~寡污型),因此其整体多样性较高(评价为  $\beta$  中污型),是长江流域所有区域中生物评价较好的。长江中下游总体评价也为  $\beta$  中污型,但其 Shannon-Wiener 指数要显著低于长江源区,主要原因在于其群落组成的均匀程度较低;水质评价也显示长江中下游 WQI 指数显著低于长江源区,结果显示长江中下游是长江干流中评价最差的区域。

对比长江源区和长江中下游两个区域,长江源区受到的人类干扰要小于长江中下游区域<sup>[42]</sup>,长江中下游水生态系统健康受到了船舶航运、工业采矿业、港口与岸线开发、城镇化和农业等各类活动的影响<sup>[43]</sup>。从本次调查数据可以发现,长江中下游的总氮、总磷等指标的平均值是源区的数倍,更高的营养盐水平更易驱动藻类的大量繁殖;尽管源区和中下游在本次调查的着生藻类密度上无显著差异,但中下游具更低的群落均匀度,意味着群落稳定性较低<sup>[44]</sup>,藻类群落结构问题已逐步凸显。

支流中,三峡支流和八大一级支流在 Shannon-Wiener、Pielou 和 Margalef 指数这 3 个指标上均无显著差异,然而三峡支流的 WQI 指数显著高于八大一级支流;类似的,金沙江在长江干流中有着最高的 WQI 指数,但金沙江 3 个生物学指标及其评价结果并未显著高于其他区域。周笑白等<sup>[45]</sup>的研究表明水质评价和水生生物评价在较大的尺度上呈现相同的趋势,然而本研究的结果显示水质评价和水生态评价结果并非完全一致。水质评价和水生态评价均为水体健康评价的重要组成部分,水生生物通过与水环境相关作用实现物质循环和能量流动,因此只有从水质和水生生物两个角度同时出发,才能更全面地对流域水生态系统进行健康评价。

## 4 结论

(1)长江源区着生藻类的主要优势类群为硅藻,是长江流域中着生藻类生物评价较好的区域。金沙江是长江流域着生藻类密度最低的区域,群落中硅藻占优势,是长江流域中水质评价最好的区域。长江上游是干流着生藻类密度最高的区域,主要由蓝藻组成,区域内的群落组成和生态评价具较大异质性。长江中下游的着生藻类呈现蓝藻门和硅藻门交替占优势的演替格局,该区域的生态评价较干流其他区域差,水质评价也是干流中最差的。长江支流

中,三峡支流的着生藻类密度最高,主要以蓝藻为主;八大一级支流中,汉江的着生藻类以硅藻占绝对优势,其他支流也均以蓝藻占绝对优势。三峡支流的水质评价要优于八大一级支流,但生物评价各支流类似,均为  $\beta$  中污型。

(2)长江干流着生藻类呈现蓝藻门和硅藻门交替占优势的演替格局,其中硅藻(舟形藻)在长江干流具最大的竞争优势,干流硅藻与总氮的相关性显著,干流蓝藻与总磷和 pH 的相关性显著;pH 直接或者间接地调控了干流着生藻类的群落分布。长江支流的着生藻类主要以蓝藻为主,其中蓝藻(鞘丝藻)在长江支流具有最大的竞争优势,支流蓝藻与溶解氧的相关性显著;pH 间接地调控了支流着生藻类的群落分布。

(3)整个长江流域的水质评价均为良好,生态评价多为  $\beta$  中污型,但不同区域间的生态评价具一定差异。水质评价结果和水生态评价结果并非完全一致,只有结合两种评价结果才能更全面地评价水生态系统健康。

### 参考文献:

- [1] Azim M E, Beveridge M C M, Van Dam A A, et al. Periphyton and aquatic production: an introduction[M]. Wallingford: CABI Publishing, 2005.
- [2] Stevenson J. Ecological assessments with algae: a review and synthesis[J]. Journal of Phycology, 2014, 50(3): 437-461.
- [3] 陈宇顺. 多重人类干扰下长江流域的水生态系统健康修复[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 19-23.  
Chen Y S. Restoring aquatic ecosystem health of Yangtze River Basin under multiple human disturbances[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 19-23.
- [4] Gillett N D, Pan Y D, Asarian J E, et al. Spatial and temporal variability of river periphyton below a hypereutrophic lake and a series of dams[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 1382-1392.
- [5] 肖妮娜, 张萌, 冯兵, 等. 丰水期赣江流域着生藻类群落结构及其与水环境因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(4): 900-910.  
Xiao N N, Zhang M, Feng B, et al. Community structure of periphytic algae and their relationship to water environmental factors in Ganjiang River Basin during the high water period[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(4): 900-910.
- [6] 胡建成, 郭姝含, 唐涛, 等. 基于着生硅藻多参数指标评价赤水河生态状况[J]. 中国环境监测, 2020, 36(3): 94-104.  
Hu J C, Guo S H, Tang T, et al. Using benthic diatom-based multi-metric indices to assess ecological conditions of the Chishui River[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(3): 94-104.
- [7] 胡建成, 宋志斌, 周佳诚, 等. 金沙江上段浮游藻类和着生藻类群落格局及其与环境因子关系的比较研究[J/OL]. 生态学报, 2022, 42(2): 1-10. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=STXB2021090900R>.  
Hu J C, Song Z B, Zhou J C, et al. Comparative study on

- planktonic and periphytic algal community patterns and their relationships with environmental variables in the upper reaches of the Jinsha River[J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 1-10. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=STXB2021090900R>.
- [8] 马宝珊, 魏开金, 徐进, 等. 雅砻江下游及其主要支流安宁河着生藻类多样性与空间分布[J]. *中国水产科学*, 2021, **28**(12): 1602-1611.
- Ma B S, Wei K J, Xu J, *et al.* Diversity and spatial distribution of periphytic algae in the lower reaches of the Yalong River and its main tributary, the Anning River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, **28**(12): 1602-1611.
- [9] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志[M]. 北京: 科学出版社, 1988-2016.
- [10] 水利部水文局, 长江流域水环境监测中心. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [11] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [12] Lee R E. *Phycology* (4th ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [13] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [14] 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.
- [15] Shannon C E, Wiener W. *The mathematical theory of communication*[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
- [16] Zhang J, Zhang B G, Liu Y, *et al.* Distinct large-scale biogeographic patterns of fungal communities in bulk soil and soybean rhizosphere in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 791-800.
- [17] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 440-448.
- Wu T H, Liu J S, Deng J M, *et al.* Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 440-448.
- [18] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River[J]. *Water Research*, 2000, **34**(11): 2915-2926.
- [19] 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2158-2165.
- Li Y Q, Huang T L, Zhang H H, *et al.* Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2158-2165.
- [20] 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.
- [21] 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等. 甘河着生藻类群落结构及其与环境因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(2): 328-336.
- Xue H, Zheng B H, Meng F S, *et al.* Community structures of periphyton and their relationship with aquatic environmental factors in the Gan River, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(2): 328-336.
- [22] 郭坤, 杨德国, 彭婷, 等. 湖北省长湖浮游植物优势种生态位分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(4): 825-834.
- Guo K, Yang D G, Peng T, *et al.* Ecological niche analysis of dominant species of phytoplankton in Lake Changhu, Hubei Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(4): 825-834.
- [23] 卫飞, 姚青梅. 长江着生藻类群落结构时空变化规律研究[J]. *陕西水利*, 2021, (5): 140-142.
- [24] 李斌斌, 李锐, 谭巧, 等. 长江上游宜宾至江津段周丛藻类群落结构及水质评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, **40**(3): 10-17.
- Li B B, Li R, Tan Q, *et al.* Structure of periphytic algal community and evaluation of water quality in the section from Yibin to Jiangjin in the upper Yangtze River[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2018, **40**(3): 10-17.
- [25] Carapunarla L, Baumgartner D, Rodrigues L. Community structure of periphytic algae in a floodplain lake: a long-term study[J]. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, 2014, **36**(2): 147-154.
- [26] Wehr J D, Sheath R G, Kociolek J P. *Freshwater algae of North America: ecology and classification* [M]. London: Elsevier Academic Press, 2015.
- [27] 何佳昕. 我国青海省部分地区舟形硅藻分类学初步研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2021.
- [28] 胡鸿均, 魏印心. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Hu H J, Wei Y X. *The freshwater algae of China-systematics, taxonomy and ecology*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [29] 沈旭舟, 张佳磊, 曾一恒, 等. 三峡水库干支流浮游植物群落演替规律及驱动机制研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, **49**(20): 18-21, 71.
- Shen X Z, Zhang J L, Zeng Y H, *et al.* Research progress of phytoplankton community succession and driving mechanism in the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, **49**(20): 18-21, 71.
- [30] 吴卫菊, 陈晓飞. 汉江中下游冬季硅藻水华成因研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(9): 55-60.
- Wu W J, Chen X F. Study on the formation of diatom blooms in the middle and lower reaches of the Hanjiang River during Winter and Spring[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(9): 55-60.
- [31] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 等. 太湖流域水库型水源区硅藻水华发生特征及对策分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 9-21.
- Zhu G W, Jin Y W, Ren J, *et al.* Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 9-21.
- [32] 吴浩云, 贾更华, 徐彬, 等. 1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(4): 974-991.
- Wu H Y, Jia G H, Xu B, *et al.* Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in lake Taihu, 1980-2020[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(4): 974-991.
- [33] 马宝珊, 徐滨, 魏开金, 等. 安宁河中游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *水生态学杂志*, 2020, **39**(10): 3332-3341.
- Ma B S, Xu B, Wei K J, *et al.* Phytoplankton community structure and its relation to environmental conditions in the middle Anning River, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(10): 3332-3341.
- [34] 党凤花, 吴庆, 柯岚兰. 巢湖蓝藻水华与湖水 pH 值等 10 个因子的关系研究[J]. *化工设计通讯*, 2018, **44**(8): 202-

- 203.
- Dang F H, Wu Q, Ke L L. Study on the relationship between cyanobacteria bloom and 10 factors such as pH value in Lake Chaohu [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, **44**(8): 202-203.
- [35] Agrawal S C. Factors controlling induction of reproduction in algae-review: the text[J]. Folia Microbiologica, 2012, **57**(5): 387-407.
- [36] 高冲, 杨肖娥, 向律成, 等. pH 和温度对薹苳植物床去除富营养化水中氮磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1495-1500.
- Gao C, Yang X E, Xiang L C, *et al.* The effects of pH and temperature on removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated Water by *Coix Lachryma-jobi. L* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1495-1500.
- [37] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 603-613.
- Yu M L, Hong G X, Xu H, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 603-613.
- [38] 刘桦聪, 王巧娟, 毛冠男, 等. 高原湖泊程海蓝藻季节更替的驱动与成因[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26**(6): 1335-1342.
- Liu H C, Wang Q J, Mao G N, *et al.* Driving factors behind the seasonal succession of cyanobacterial composition in Chenghai, a plateau lake[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, **26**(6): 1335-1342.
- [39] 吕琳莉, 李朝霞, 崔崇雨. 高原河流溶解氧变化规律研究[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(7): 133-140.
- Lv L L, Li Z X, Cui C Y. Study on the variation of dissolved oxygen in the plateau river [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(7): 133-140.
- [40] 王庆安, 黄时达, 孙铁珩. 多藻浅水体中 pH 值和溶解氧协同周期性变化初探[J]. 四川环境, 2001, **20**(2): 4-7, 29.
- Wang Q A, Huang S D, Sun T H. Study on the coordinate periodic change and the relativity between pH and DO in shallow water with Algae[J]. Sichuan Environment, 2001, **20**(2): 4-7, 29.
- [41] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2539-2546.
- Yin Y, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dynamic distributions of dissolved oxygen in Lake Qiandaohu and its environmental influence factors [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2539-2546.
- [42] 潘保柱, 韩谓. 长江与黄河两大流域水生态问题剖析[J]. 风景园林, 2020, **27**(8): 18-23.
- Pan B Z, Han X. Analysis of aquatic ecological issues in the Yangtze and Yellow River Basins [J]. Landscape Architecture, 2020, **27**(8): 18-23.
- [43] 陈宇顺. 长江流域的主要人类活动干扰、水生态系统健康与水生态保护[J]. 三峡生态环境监测, 2018, **3**(3): 66-73.
- Chen Y S. Anthropogenic disturbance, aquatic ecosystem health, and water ecological conservation of the Yangtze River Basin in China [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, **3**(3): 66-73.
- [44] Filstrup C T, Hillebrand H, Heathcote A J, *et al.* Cyanobacteria dominance influences resource use efficiency and community turnover in phytoplankton and zooplankton communities [J]. Ecology Letters, 2014, **17**(4): 464-474.
- [45] 周笑白, 张宁红, 张咏, 等. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 271-278.
- Zhou X B, Zhang N H, Zhang Y, *et al.* Preliminary study on the relationship between the water quality and the aquatic biological health status of Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 271-278.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                               |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games                                                       | LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)            |
| Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area                                                               | HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)                |
| Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin                             | WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)             |
| Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan | FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)           |
| Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer                                                                                                 | QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)                  |
| Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian                                                                                   | ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)             |
| One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities                      | LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)         |
| Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region              | ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)              |
| Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020                                               | WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)              |
| Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry                                                                                        | YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)          |
| Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin                                                                  | HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)                 |
| Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model                                  | PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)                          |
| Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing                                        | WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)            |
| Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss                                                                                  | WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)          |
| Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley                                                          | LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)                 |
| Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology                                                                         | ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)                     |
| Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province                                                                 | LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)                  |
| Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin                                                                                        | WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)                |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia                              | LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)                   |
| Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River                        | YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)              |
| Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake               | DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)          |
| Emission of Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors                                                                  | LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)             |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities                                                                    | LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)              |
| Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater                                                           | HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)              |
| Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe <sup>2+</sup> /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions                                     | LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)               |
| Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shay County, Xinjiang                                                | XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154) |
| Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia                                         | SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)               |
| Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia                                                                                                     | WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)              |
| Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale                                                                                 | WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)                          |
| Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province                            | YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)                |
| Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model                                                       | YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)                  |
| Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou                                                               | ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)        |
| Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties                                                                                 | REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)             |
| Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil                                                                     | ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)        |
| Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals                                                                           | ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)              |
| Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application                                                               | PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)                        |
| Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice                                                                                        | YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)         |
| Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>                                  | ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)         |
| Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity                                        | LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)         |
| Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice                                                           | ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)                  |
| Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions         | FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)           |
| High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function                    | PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)              |
| Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors                                  | CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)                    |
| Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field                                                                  | LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)           |
| Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain                                                                        | LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)               |
| Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon                                                                              | LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)                  |
| Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N <sub>2</sub> O Emission in Guanzhong Plain                                                | BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)           |
| Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.                                                                                    | QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)           |
| Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation                                                                                                            | WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)          |
| Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems                                                                               | CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)                 |