

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 $PM_{2.5}$ 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 $PM_{2.5}$ 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 $PM_{2.5}$ 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 $PM_{2.5}$ 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O_3 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO_2 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱渣对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价

张静, 胡愈忻*, 胡圣, 黄杰

(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)

摘要: 浮游植物常用于水生态健康评价, 国内已有大量相关的研究开展, 但多数研究涉及范围较为局限. 从流域尺度开展浮游植物调查, 在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共布设了 139 个样点进行样品采集. 在长江流域一共鉴定出浮游植物 7 门 82 属, 其中隐藻门、蓝藻门和硅藻门为优势类群. 首先对长江流域各区域的浮游植物群落组成进行分析, 使用 LEfSe 分析各区域显著富集的物种, 然后基于 CCA 探究了长江流域各区域浮游植物群落和环境因子之间的关系. 在流域尺度上, 广义线性模型显示 TN 和 TP 与浮游植物密度显著正相关, TITAN 分析则揭示了环境指示种和它们对应的最适生长阈值范围. 最后, 分别从水生生物和水质两个方面对长江流域各区域进行评价, 尽管两个方面的评价结果不一致, 但基于随机森林算法综合所有指标进行评价, 能够得到长江流域全面且客观的生态评价结果.

关键词: 长江流域; 浮游植物; 环境驱动因子; 随机森林; 生态评价

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2072-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206095

Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin

ZHANG Jing, HU Yu-xin*, HU Sheng, HUANG Jie

(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)

Abstract: Phytoplankton is frequently utilized in the assessment of water ecological health, and a great number of related studies have been conducted in China; however, most of them are limited in scope. A phytoplankton survey was carried out at the basin scale in this study. A total of 139 sampling sites were set up in crucial locations of the main stream, from the Yangtze River's source region to the estuary, as well as the eight primary tributaries and the Three Gorges' tributaries. In the Yangtze River Basin, phytoplankton was found in seven phyla and 82 taxa, with Cryptophyta, Cyanophyta, and Bacillariophyta being the dominant species. To begin, the composition of phytoplankton communities in various sections of the Yangtze River Basin was studied, and LEfSe was utilized to identify highly enriched species in different regions. The association between phytoplankton communities and environmental factors in different sections of the Yangtze River Basin was then investigated using CCA. The generalized linear model demonstrated that TN and TP were strongly positively linked with phytoplankton density at the basin scale, whereas TITAN analysis identified the environmental indicator species and their corresponding optimal growth threshold range. Finally, the study assessed each Yangtze River Basin Region in terms of biotic and abiotic factors. Although the results of the two aspects were incongruent, the analysis of all indicators using the random forest method can yield comprehensive and objective ecological evaluation results for each section of the Yangtze River Basin.

Key words: Yangtze River Basin; phytoplankton; environmental drivers; random forest algorithm; ecological evaluation

长江流域是我国第一大流域, 横跨我国西南、中华和华东三大区, 从西到东跨越我国地势的三大阶地^[1]. 长江流域具有丰富的河流地貌和复杂的生态系统, 是我国横贯东西的黄金水道, 珍稀水生生物的天然宝库, 在我国经济社会发展和生态环境保护中占有重要的战略地位. 随着长江流域经济高速发展以及工业化、城市化和农业现代化进程不断加快, 人类活动、气候变化和经济快速发展改变了流域自然水文情势和径流时空分配格局, 对流域水生生态系统的完整性及其功能产生广泛而深远的影响^[2,3].

为评估长江流域水生生态系统状况的变化, 目前已大量开展了基于浮游植物与环境因子间的相关性研究. 长江源区的浮游植物相关研究显示, 影响浮游植物群落的各类因素会直接或间接与海拔相联系, 随着海拔的不同, 人类活动强度、气候和地理环境

等均会产生显著的不同, 进而对浮游植物群落组成产生影响; 其中人类活动强度是影响源区浮游植物群落的重要环境因子^[4]. 在长江干流的研究中, 浮游植物群落组成会随着季节和空间的不同产生显著变化, 水温、溶解氧、化学需氧量、亚硝酸盐和氨氮均是影响干流浮游植物群落组成的重要环境因子^[5]. 在长江入海口近 50 年的数据表明, 人类活动和气候变化使得长江口物理化学因素产生变化, 例如氮磷浓度和比例的上升、水温的上升和浊度的下降等, 以上环境条件的变化对浮游植物群落组成造成深远影响^[6].

尽管在长江流域已经开展了大量的浮游植物相

收稿日期: 2022-06-08; 修订日期: 2022-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201002)

作者简介: 张静(1986~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为流域生态学, E-mail: zhangjinghappy100@126.com

* 通信作者, E-mail: ssshyx@163.com

关研究,但大多数研究都开展于有限的区域,目前仍然缺乏从整个流域尺度进行大面积的宏观研究. 本文在长江流域开展浮游植物调查,研究区域包括了长江干流中的源区(青海省区域)、金沙江(青海省、四川省交界处的玉树州直门达至四川宜宾)、长江上游(四川宜宾至湖北宜昌)和长江中下游(湖北宜昌至上海入海口),长江支流中的八大支流(赣江、汉江、嘉陵江、岷江、乌江、湘江、雅砻江、沅江)和三峡支流(香溪河、童庄河、神农溪、绵竹

峡、大宁河、梅溪河、磨刀溪). 本研究聚焦流域尺度的浮游植物群落组成、与环境因子的关系和生态评价,以期为流域生态环境管理和水生态健康评价提供参考依据.

1 材料与方法

2020 年 6 月至 2020 年 10 月在长江流域进行浮游植物样品采集,共布设了 139 个采样点,调查区域涵盖了长江干支流各区域,具体点位布设如图 1 所示.

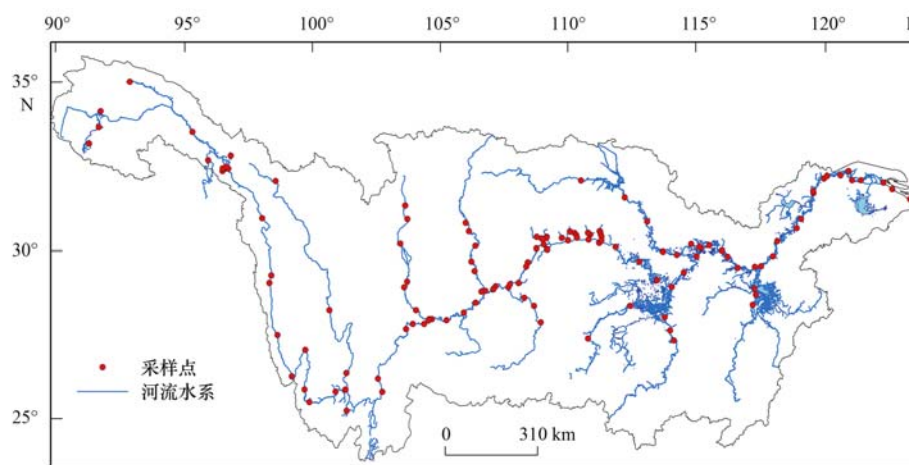


图 1 采样点分布示意

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

参照文献[7]进行浮游植物的样品采集,每个样点使用有机玻璃采水器采集 1.5 L 表层水样,添加 1% 的鲁哥氏溶液进行固定. 将样品带回实验室沉淀浓缩,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,浮游植物的分类鉴定参考文献[8 ~ 12]. 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),高锰酸盐指数、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)参考文献[13]进行测定.

浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数的计算及其评价标准参照相关文献[14]. 浮游植物群落的优势度计算参照相关文献,将优势度大于 0.02 的种类视为优势种^[15]. 综合水质指数(WQI)选取 T 、pH、Cond、DO、TN、TP、高锰酸盐指数和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 共计 8 个水质指标来计算,计算方法及评价标准同文献[16].

使用秩和检验比较各区域间浮游植物密度、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数和 WQI 指数的差异. 使用 LEfSe 分析各区域间的物种差异([http://huttenhower.sph.](http://huttenhower.sph.harvard.edu/lefse/)

[harvard.edu/lefse/](http://huttenhower.sph.harvard.edu/lefse/)),以 LDA 值高于 4 和克鲁斯卡尔-沃利斯检验(Kruskal-Wallis test) P 值小于 0.05 为标准鉴别各区域富集的物种. 使用 R 语言的 vegan 包^[17]进行典型关联分析(canonical correspondence analysis, CCA)和除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)分析浮游植物群落的环境驱动因子,通过 vegan 包中的 anosim 函数进行相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)分析不同分组间的显著性差异,通过 R 语言中的 glm 函数基于广义线性模型分析浮游植物密度与各环境因子间的相关性,使用 R 语言中的 TITAN2 包分析浮游植物的指示物种及其环境因子阈值^[18].

根据 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数和 WQI 指数这 4 个指标,基于随机森林算法对水生态状况进行评价^[19]. 根据相关标准^[14,20,21],将 Shannon-Wiener、Pielou、Margalef 和 WQI 指数分为 5 个评价等级,如表 1 所示. 从中可知各个阈值范围,每个评价等级随机生成 100 组,5 个等级共计 500 组样本,随机选取 350 组作为训练样本,随机选取 150 组作为检验样本构建随机森林模型,然后将本研究得到的结果代入模型,计算各区域的水生态健康状况.

表 1 长江流域各项指标的评价标准

Table 1 Parameters considered for ecosystem assessment in Yangtze River Basin

评价等级	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数	Margalef 指数	WQI 指数
差	0	0	0	0 ~ 25
较差	0 ~ 1	0 ~ 0.3	0 ~ 0.6	25 ~ 50
一般	1 ~ 2	0.3 ~ 0.5	0.6 ~ 1	50 ~ 70
良好	2 ~ 3	0.5 ~ 0.8	1 ~ 1.6	70 ~ 90
优秀	3 ~ + ∞	0.8 ~ 1	1.6 ~ 3	90 ~ 100

2 结果与分析

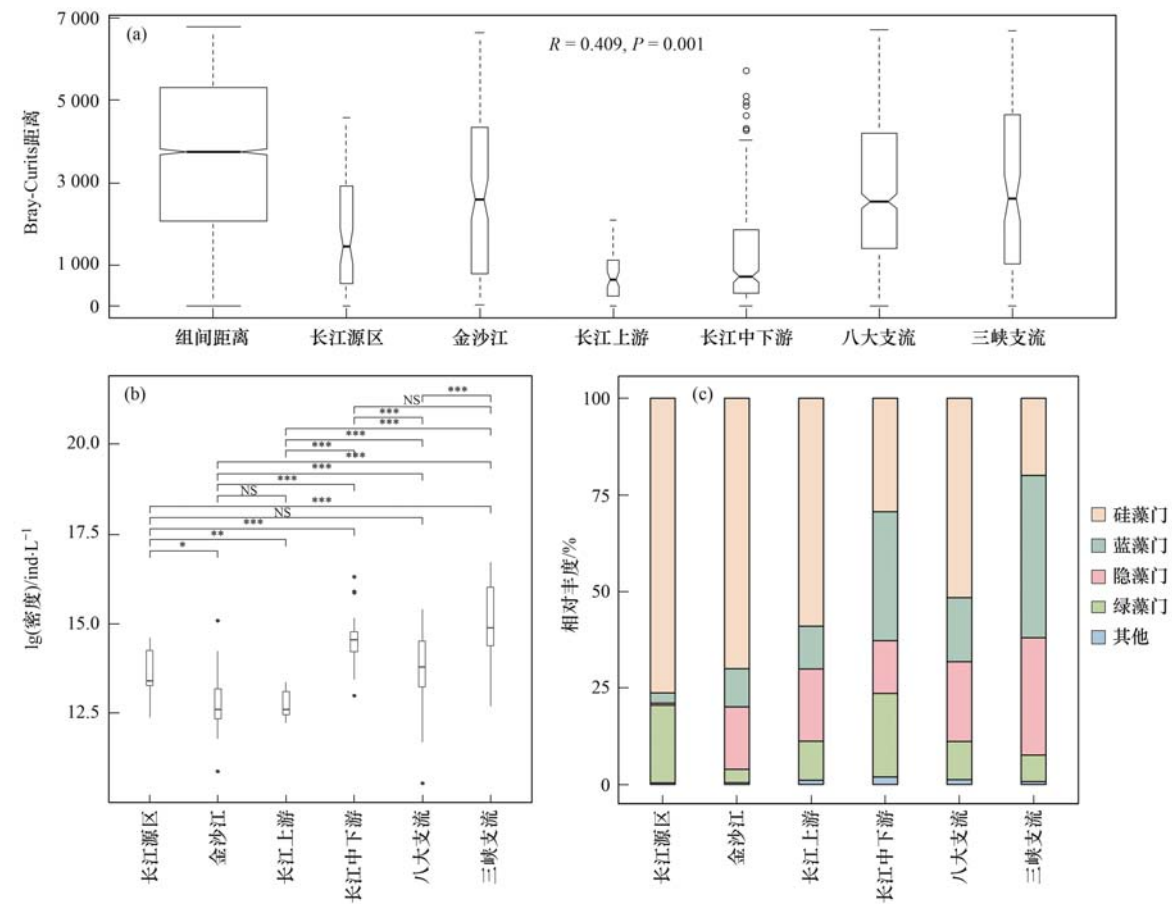
2.1 长江流域浮游植物群落组成的空间格局

在长江流域共监测到浮游植物 7 门 82 属,其中绿藻门 31 属,硅藻门 28 属,蓝藻门 14 属,其他藻类 9 属(包括甲藻门、隐藻门、裸藻门、金藻门).将长江流域的浮游植物群落分为长江源区、金沙江、长江上游、长江中下游、八大支流和三峡支流共 6 个分组,使用 ANOSIM 分析分组的差异显著性如图 2 (a)所示,结果显示 $R > 0$ 且 $P < 0.01$,说明分组有效且不同分组间的差异显著^[22].

各区域浮游植物细胞密度如图 2(b)所示.长江

干流中,长江中下游的浮游植物密度显著高于其他区域,长江源区为干流中密度第二高的区域,长江上游和金沙江间的浮游植物密度不具显著差异.长江支流中,三峡支流的浮游植物密度显著高于八大支流.对比干流和支流,三峡支流与长江中下游的浮游植物密度均显著高于其他区域;八大支流与长江源区的浮游植物密度均显著高于金沙江和长江上游.综上所述,长江流域各区域浮游植物密度可以分为三类水平,从高到低为:三峡支流和长江中下游区域、八大支流和长江源区区域、金沙江和长江上游区域.

各区域浮游植物的群落组成见图 2(c).长江源



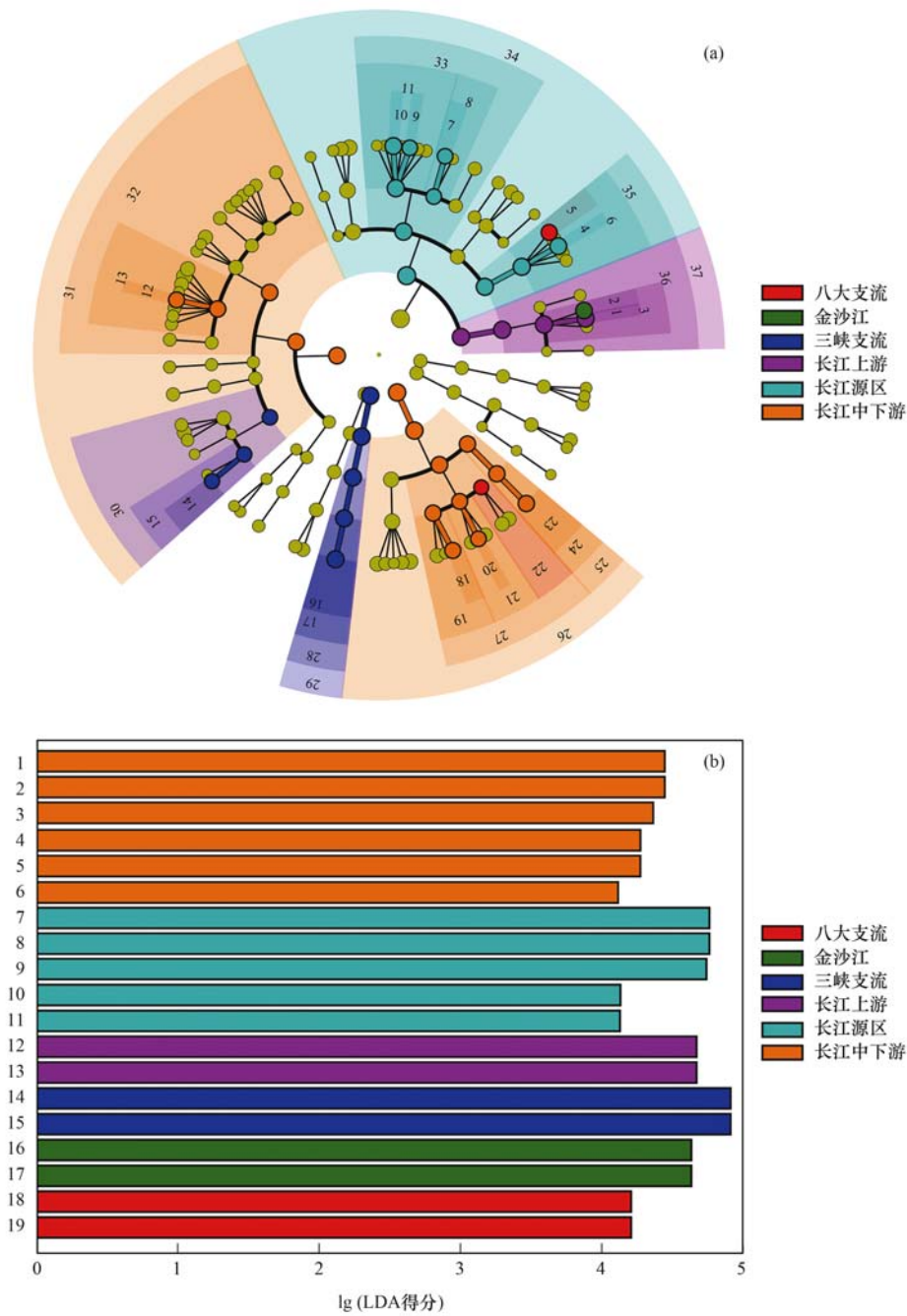
(a) 不同分组区域 ANOSIM 分析, (b) 浮游植物密度, (c) 浮游植物群落组成; *** 为 $P < 0.001$, ** 为 $P < 0.01$, * 为 $P < 0.05$, NS 为差异不显著

图 2 长江流域浮游植物密度及其群落组成

Fig. 2 Phytoplankton algae density and composition of different areas in the Yangtze River Basin

区、金沙江、长江上游和八大支流的主要优势类群为硅藻; 长江中下游和三峡支流的主要优势类群为蓝藻. 其中, 长江干流自西向东, 硅藻所占比例呈降低趋势, 其他藻类(绿藻、蓝藻和隐藻)所占比例呈上升趋势. 八大支流和三峡支流的隐藻所占比例均为第二高, 是支流中的优势类群.

基于 LEfSe 分析(图 3), 以 LDA 大于 4 为阈值可以发现, 长江源区主要富集了硅藻门种类, 主要包



(a) 门、纲、目、科和属这 5 个分类学水平的进化分枝, 1: *Cyclotella*, 2: *Melosira*, 3: *Coscinodiscaceae*, 4: *Diatoma*, 5: *Synedra*, 6: *Fragillariaceae*, 7: *Gomphonema*, 8: *Gomphonemaceae*, 9: *Cymbella*, 10: *Navicula*, 11: *Naviculaceae*, 12: *Sceadsmus*, 13: *Scenedesmaceae*, 14: *Pandorina*, 15: *Volvocaceae*, 16: *Cryptomonas*, 17: *Cryptomonadaceae*, 18: *Aphanizomenon*, 19: *Nostocaceae*, 20: *Oscillatoria*, 21: *Oscillatoriaceae*, 22: *Rivulaiaceae*, 23: *Pseudoanabaena*, 24: *Pseudanabaenaceae*, 25: *Oscillatoriales*, 26: *Cyanophyceae*, 27: *Hormogonales*, 28: *Cyptomonadales*, 29: *Cryptophyceae*, 30: *Volvocales*, 31: *Chlorophyceae*, 32: *Chlorococcales*, 33: *Biraphidinales*, 34: *Pennatae*, 35: *Araphidiales*, 36: *Coscinodiscals*, 37: *Centricae*; (b) 门和属分类学水平的富集物种 LDA 值, 1: *Pseudoanabaena*, 2: *Cyanophyta*, 3: *Aphanizomenon*, 4: *Chlorophyta*, 5: *Scenedesmus*, 6: *Oscillatoria*, 7: *Bacillariophyta*, 8: *Navicula*, 9: *Diatoma*, 10: *Cymbella*, 11: *Gomphonema*, 12: *Bacillariophyta*, 13: *Cyclotella*, 14: *Cryptomonas*, 15: *Cryptophyta*, 16: *Bacillariophyta*, 17: *Melosira*, 18: *Synedra*, 19: *Bacillariophyta*

图 3 长江流域浮游植物各区域的 LEfSe 分析

Fig. 3 LEfSe method shows the spatial variation in the enriched group of algae

括舟形藻 (*Navicula*)、等片藻 (*Diatoma*)、桥弯藻 (*Cymbella*) 和异极藻 (*Gomphonema*); 金沙江主要富集了硅藻门中的直链藻 (*Melosira*); 长江上游主要富集了硅藻门中的小环藻 (*Cyclotella*); 长江中下游主要富集了绿藻门和蓝藻门种类, 主要包括假鱼腥藻 (*Pseudoanabaena*)、束丝藻 (*Aphanizomenon*)、栅藻 (*Scenedesmus*) 和颤藻 (*Oscillatoria*); 八大支流主要富集了硅藻门中的针杆藻 (*Synedra*); 三峡支流主要富集了隐藻门中的隐藻 (*Cryptomonas*)。

2.2 长江流域浮游植物与环境因子的关系

使用 DCA 分析长江流域浮游植物群落数据, 结

果显示排序轴长度大于 4, 因此使用单峰模型探究浮游植物群落对环境的响应^[23]. 对各区域浮游植物群落数据进行 Hellinger 转换^[24], 根据方差膨胀系数衡量分别环境因子中的多重共线性^[25], 筛选后使用的环境因子进行 CCA 分析, 结果如图 4 所示。

CCA 所有约束轴的全模型置换检验 P 值为 0.001, 说明 CCA 分析结果可信. 分析使用的环境因子中, Cond 是对长江源区浮游植物群落影响显著的环境因子, 金沙江中为 DO、Cond 和高锰酸盐指数, 长江上游中为 DO 和 TN, 长江中下游中为 T , 八大支流中为 T 、Cond 和 TP, 三峡支流中为 TN 和 TP。

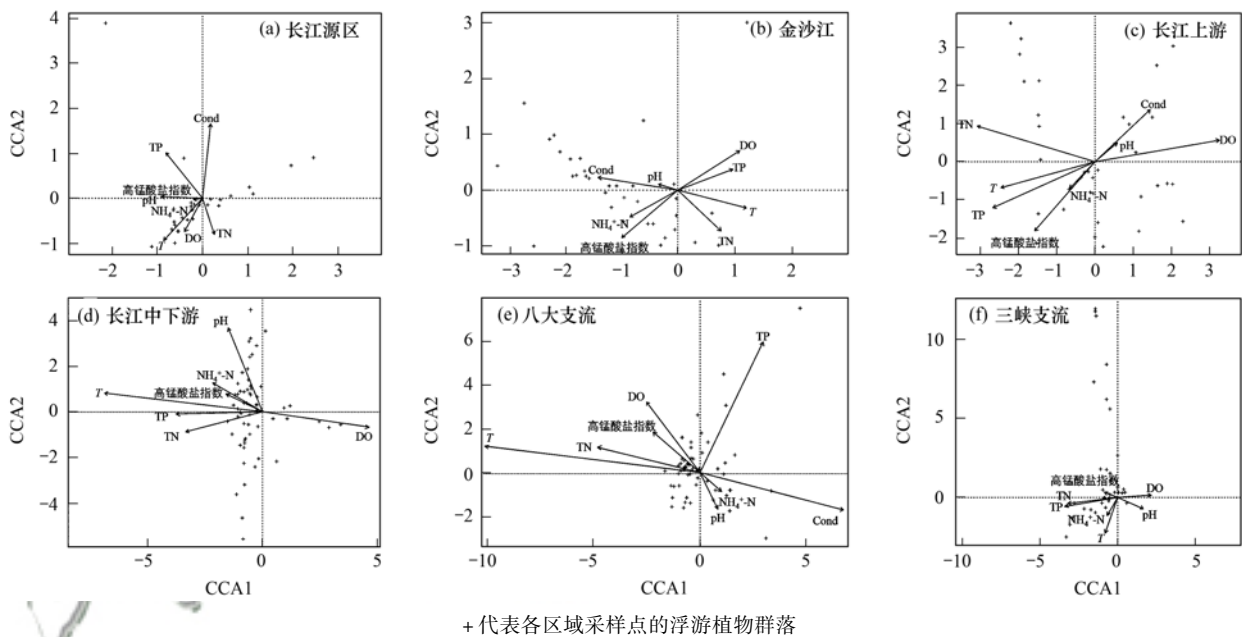


图 4 长江流域浮游植物各区域的 CCA 分析

Fig. 4 Phytoplankton CCA analysis of different areas in the Yangtze River Basin

2.3 长江流域浮游植物的环境指示种及其阈值

将长江流域各区域的浮游植物群落视为一个整体, 使用广义线性模型分析浮游植物密度与各环境因子间的关系, 结果显示 TN 和 TP 与浮游植物密度呈显著正相关性 (图 5)。

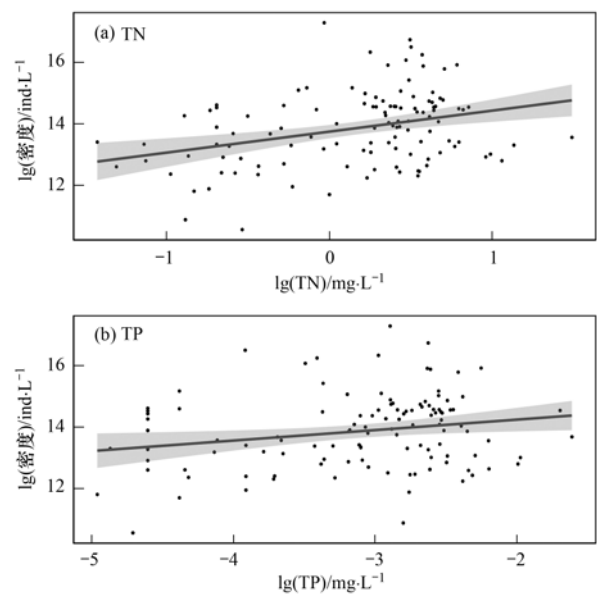
TN 和 TP 均是浮游植物生长必需的营养物质, TN 和 TP 浓度的升高可能会导致浮游植物大量繁殖, 进而威胁水生态健康安全. 因此本研究采用临界指示物种分析法 (threshold indicator taxa analysis, TITAN) 分析长江流域的浮游植物群落与 TN 和 TP 之间的关系, 使用优势度在 0.000 1 以上且出现频率在 3 以上的藻类进行分析. 将 TITAN 的 TN 和 TP 负响应阈值视为触发浮游植物群落变化的河流营养水平, 将正响应阈值视为藻类群落的营养耐受极限, 结果如图 6 所示。

对于 TN, 负响应物种共发现 7 种, 它们的物种数量随着 TN 浓度减少而增加. 当水体的 TN 低于最

低阈值 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 (双眉藻), 浮游植物负响应物种已经超过 TN 耐受极限, 浮游植物群落不再产生显著阈值响应. 正响应物种共发现 19 种, 它们的物种数量随着 TN 浓度增加而增加. 当水体的 TN 达到最高阈值 $1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 (颤藻), 浮游植物正响应物种已经超过 TN 耐受极限, 浮游植物不再产生显著阈值响应. 综上所述, TN 的最适阈值范围为 $0.35 \sim 1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 对于 TP, 负响应物种共发现 7 种, 其中双眉藻的阈值最低, 为 $11.25 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 正响应物种共发现 18 种, 其中裸藻的阈值最高, 为 $83 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此与 TN 阈值范围类似, TP 的最适阈值范围为 $11.25 \sim 83 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

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多样性上的差异并进行水生生态评价, 使用 WQI 指数对长江流域各区域进



点表示各采样点,线表示广义线性模型的拟合结果,
阴影部分表示拟合结果的 95% 置信区间

图 5 浮游植物密度与各环境因子的相关性

Fig. 5 Correlation between algae density and environmental variables

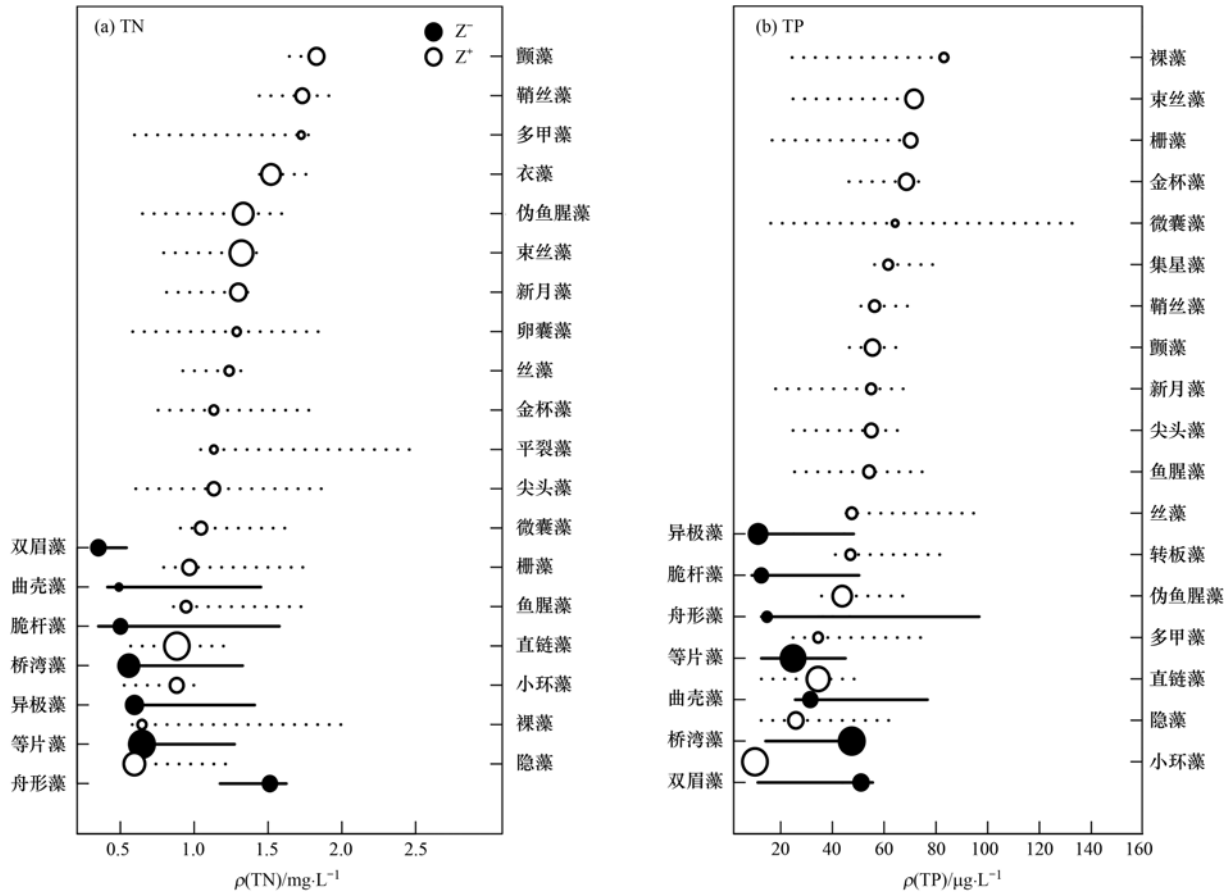
行水质评价,同时基于秩和检验分析各区域差异显著性,结果如图 7 所示.

干流中,整体多样性从高到低依次为:长江中下

游(优秀,评价,下同) > 长江上游(良好 ~ 优秀) > 长江源区(良好) > 金沙江(一般 ~ 良好);金沙江的物种均匀度要显著低于长江中下游,但干流所有区域的评价结果均为良好 ~ 优秀;长江中下游的物种丰富度要显著高于长江干流其他区域,长江中下游评价结果为良好 ~ 优秀,其他区域则多为一般.支流中八大支流的整体多样性(一般 ~ 优秀)显著优于三峡支流(较差 ~ 良好);八大支流的均匀度(良好 ~ 优秀)显著高于三峡支流(较差 ~ 良好);二者的物种丰富度没有显著差异,八大支流的丰富度异质性较高,评价为较差 ~ 优秀,三峡支流的评价为一般 ~ 良好.

根据 WQI 指数,长江流域大部分区域的水质状况评价为良好状态,但不同区域间具有显著差异.干流水质状况从好到差依次为:金沙江 > 长江上游 ~ 长江源区 > 长江中下游;支流中,三峡支流的水质状况要显著优于八大支流.

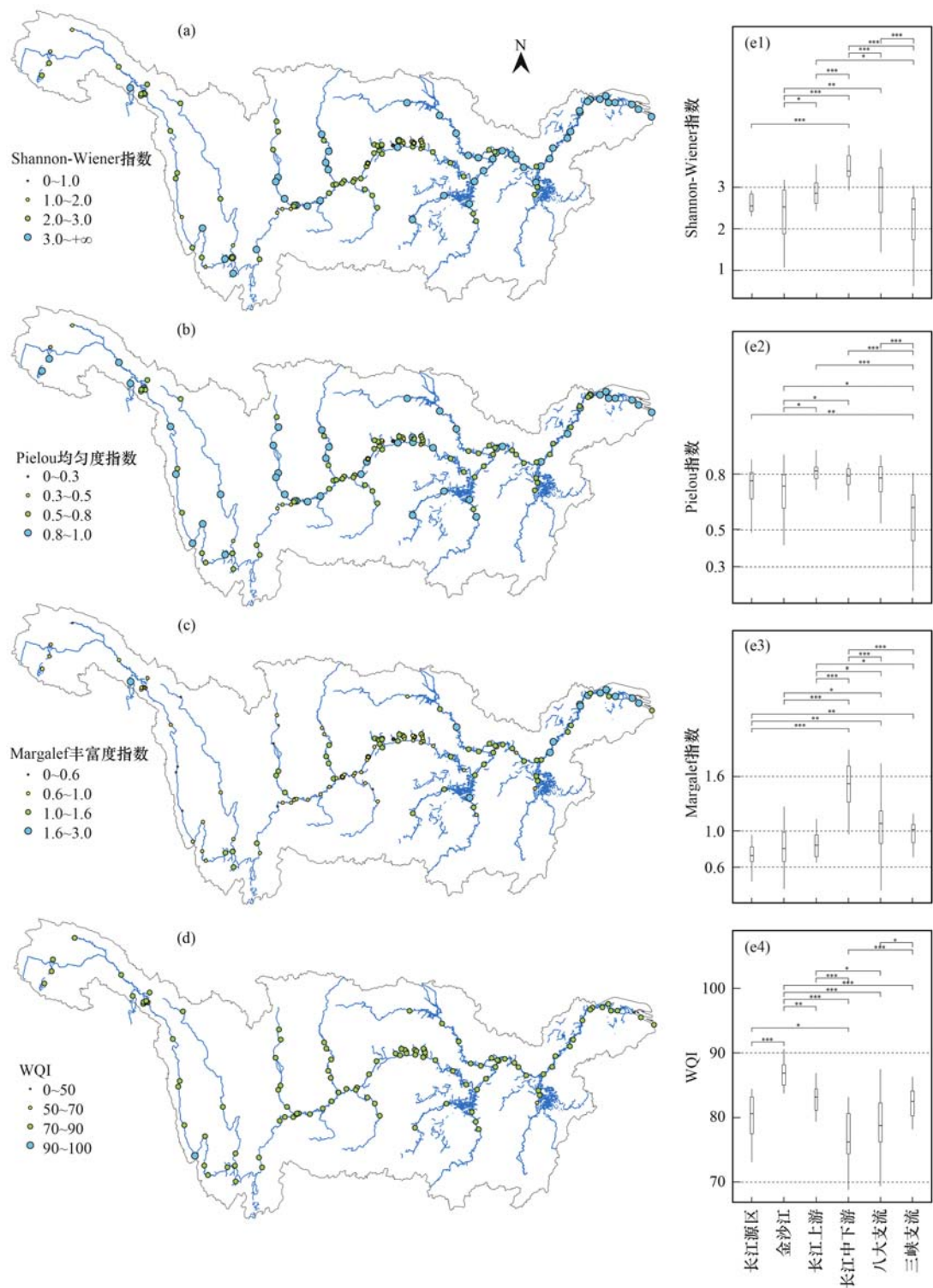
水质与水生态均是生态系统中的重要组成部分,因此本研究使用随机森林算法将二者相结合,以综合评价生态系统状况,结果如图 8 所示.以优良率(优秀的点位占比与良好的点位占比之和)为标



Z⁻表示负响应物种,Z⁺表示正响应物种;圆圈表示突变点,圆圈大小表示响应强度的大小

图 6 TITAN 分析得出的指示物种

Fig. 6 TITAN results showing significant indicator taxa



(a) Shannon-Wiener 指数, (b) Pielou 指数, (c) Margalef 指数, (d) WQI 指数

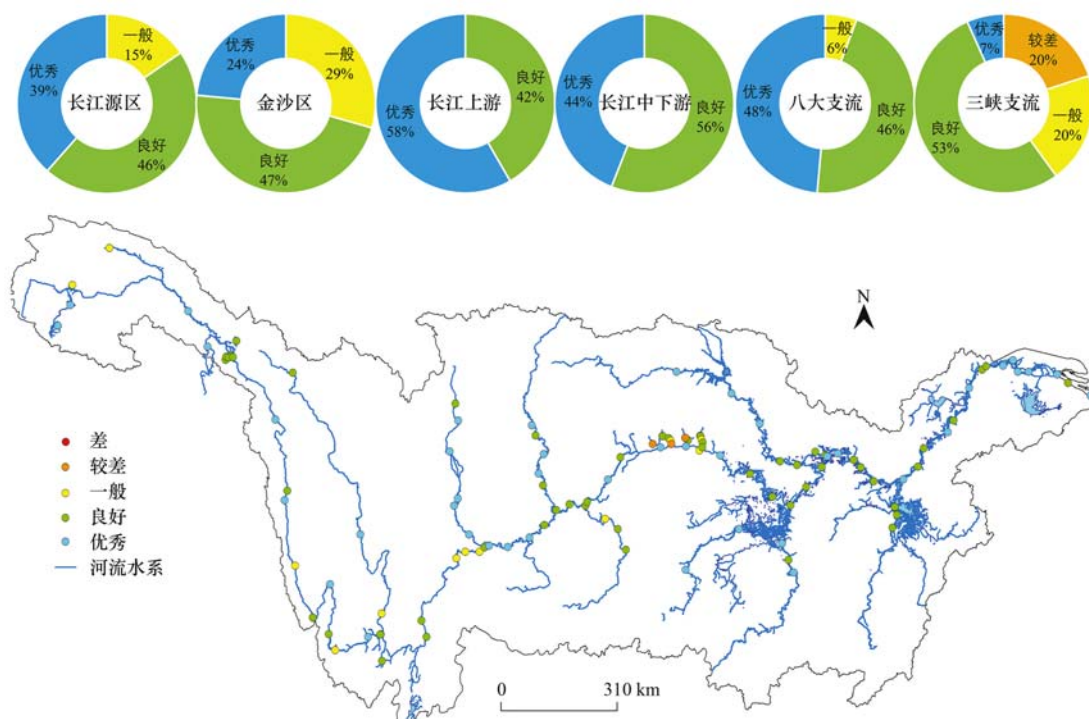
(e) 各指标在各区域的秩和检验差异结果; *** 为 $P < 0.001$, ** 为 $P < 0.01$, * 为 $P < 0.05$, 虚线为根据表 1 划分的评价等级

图 7 长江流域各区域的水生态评价及水质评价

Fig. 7 Biotic and abiotic assessment of each area in the Yangtze River Basin

准比较不同区域间的生态评价结果. 干流中, 长江上游、长江中下游的结果最好, 优良率达到了 100%; 长江源区和金沙江次之, 优良率分别为 85% 和 81%, 综合单项指标的评价可以发现, 这两个区域尽管水质良好, 但由于生物多样性较低从

而得到较低的优良率. 支流中, 三峡支流评价相对较差, 其优良率仅为 60%, 低于八大支流的 94%. 尽管三峡支流的水质优于八大支流, 但由于其浮游植物群落种类少且组成不均匀, 较低的多样性导致评价结果较差.



饼状图表示在各个评价等级的采样点数量占各区域总采样点数量的比例

图8 基于随机森林模型的长江流域各区域生态综合评价

Fig. 8 Comprehensive evaluation of each area in the Yangtze River Basin based on random forest algorithm

3 讨论

3.1 长江流域浮游植物的群落组成

长江源区、金沙江、长江上游和八大支流的主要优势类群为硅藻,在属水平上富集的种类主要包括舟形藻、等片藻、桥弯藻、异极藻、直链藻、小环藻和针杆藻。舟形藻属含有的物种超过了上万种,广泛分布于几乎各类水体中;等片藻属能够在流水的环境下营浮游或者固着生活;桥弯藻是桥弯藻科中最大的一个属,具有较广的温度适应范围;异极藻属能在 pH 近中性的各种湖泊和溪流中生存;直链藻属的不同种类适宜于不同的水体类型和营养水平,能够营浮游和固着生活;小环藻能够在各类营养水平的水体中生长,在海水、海口和淡水等各类环境下均能生长;针杆藻也能够不同季节和不同营养水平的水体中被发现;上述物种均是河流中的常见硅藻种类^[26]。

长江中下游和三峡支流浮游植物群落的优势类群更多,其中长江中下游主要富集的蓝藻门种类包括假鱼腥藻、束丝藻和颤藻,这些都是能够异常增殖形成水华的种类^[27];三峡支流主要富集的种类为隐藻属,该类群能在冬季生长也能在夏季发生水华,是三峡库区藻类中的优势类群^[28]。两个区域具有整个流域最高的浮游植物密度水平,富集的种类也多为水华种类,侧面反映了这些区域的生态环境

深受水华问题困扰^[29,30]。

3.2 长江流域浮游植物与环境因子的关系

CCA 结果显示,对不同区域的浮游植物群落影响显著的环境因子不尽相同。长江的长度约为 6 400 km,自西向东从青藏高原经 11 个省市流入海洋,多样的地理环境条件造成了不同的生态环境条件和水质状况,使得各个区域浮游植物受到的关键环境因子各不相同^[31]。

整体来看, T 、Cond、DO、高锰酸盐指数、TN 和 TP 是影响各区域的重要环境因子。 T 是影响长江中下游和八大支流浮游植物群落的重要环境因子,浮游植物吸收营养盐的效率、细胞内酶的活性、浮游植物的生长繁殖和发育均受到水温的影响^[32]。Cond 是影响长江源区、金沙江和八大支流浮游植物群落的重要环境因子。水体电导率是度量水环境总溶解离子量的参数,其数值的大小一定程度影响到浮游植物群落的构建。有研究表明,浮游植物的 α 多样性及其生物量会随着电导率的不同而产生显著的变化^[33],并且电导率与浮游植物多样性具有显著的正相关关系^[34]。DO 是影响金沙江和长江上游浮游植物群落的重要环境因子。DO 浓度的变化与浮游植物的生命活动密切相关,浮游植物的呼吸作用会消耗水体中的溶解氧,它们的光合作用则会促进水体中的溶解氧^[16]。高锰酸盐指数是影响金沙江浮游植物群落的重要环境因子。高锰酸盐指数用于指

示水体中有机和无机可氧化物质的污染,能够间接反映水体有机污染程度^[35]. 水体中的微生物会通过各类生命活动对有机质进行矿物化,结果产生的各类营养物质能为藻类的生长繁殖提供营养物质^[36]. TN 是影响长江上游和三峡支流浮游植物群落的重要环境因子,而 TP 影响八大支流和三峡支流. TN 和 TP 均是藻类生长繁殖的重要营养物质,它们浓度的变化能够驱使藻类群落结构的改变,高浓度的 TN 和 TP 也是导致水体富营养化的重要原因,从而导致藻类水华的暴发^[16].

3.3 长江流域浮游植物的环境指示种

本研究发现 TN 和 TP 是显著影响长江流域浮游植物群落组成的环境因子. TN 和 TP 是浮游植物生长繁殖密切相关的营养物质,研究结果显示,长江流域浮游植物的 TN 的最适阈值范围为 $0.35 \sim 1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TP 的最适阈值范围为 $11.25 \sim 83 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

当水体 $\rho(\text{TN})$ 低于 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $\rho(\text{TP})$ 低于 $11.25 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,较低的营养水平会导致较低的浮游植物密度;超过这一水平,浮游植物密度会随着 TN 或 TP 浓度的升高而升高;当水体 $\rho(\text{TN})$ 高于 $1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $\rho(\text{TP})$ 高于 $83 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,浮游植物群落结构发生显著变化,此时仅适合少数耐污种生存. 朱广伟等^[37]的研究发现 $\rho(\text{TN})$ 低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\rho(\text{TP})$ 低于 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会限制水库中浮游硅藻的生长,Chambers 等^[38]的研究显示溪流中藻类的最适 TN 阈值为 $0.21 \sim 1.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 的阈值为 $0.01 \sim 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 不同研究之间得到的 TN 和 TP 的最适阈值范围具有一定差异,由于不同研究的研究区域不同,因此最适阈值范围的差异可能来源于地理因素不同导致的气候差异、土地利用类型差异或者与之相关的其他理化因子的差异^[39,40].

3.4 长江流域的生态评价

本研究从水生态和水质两个方面对长江流域进行评价,结果得到了不一致的结果. 对于长江干流而言,水生态评价显示干流自西向东水生态状况逐渐变好,长江中下游多样性远高于其他区域的,水生态评价结果为优秀;然而水质评价显示长江干流中金沙江的水质状况最好,长江中下游是干流中水质状况最差的区域. 比较长江支流区域,八大支流的多样性显著高于三峡支流,但三峡支流的水质状况却显著优于八大支流.

有研究表明,水生态状况和水质状况均是水生态系统的重要组成部分,只有综合二者的结果才能更全面地评价水生态系统状况^[16]. 传统的流域生态健康评价方法包括层次分析法、综合指数法和灰色关联分析法等,这些方法具有一定主观性,难于处理

高维非线性样本数据^[41]. 随机森林是机器学习中的一种算法,该方法更为客观,即使在处理大量变量的状态下也不易出现过拟合的结果,在水文、水生态和环境遥感等方面,该方法已经被广泛用于预测传统统计方法难于预测的各类变量结果^[42,43],因此本研究通过随机森林方法将水生态指标和水质指标进行综合评价. 结果显示,长江流域的绝大多数点位的生态评价处于良好状态. 以优良率进行排序,长江上游和长江中下游的优良率最高,水质最好的金沙江的优良率则是最低的. 主要原因可能在于,金沙江尽管水质状况良好但生物多样性较低,而长江中下游尽管水质状况相对较差但具有较高的生物多样性. 支流中三峡支流的优良率要低于八大支流,主要原因则在于,尽管三峡支流的 WQI 显著高于八大支流,但八大支流的生物群落组成更为均匀,因此八大支流的水生态状况要优于三峡支流. 本研究的结果显示,随机森林算法能够综合水生态和水质指标,从而更全面地对流域水生态系统进行健康评价^[44,45].

4 结论

(1)在长江流域干支流中共鉴定出了浮游植物 7 门 82 属,其中的主要优势类群为隐藻门、蓝藻门和硅藻门种类. TN 和 TP 与浮游植物密度呈显著正相关,二者均是浮游植物生长繁殖必需的营养物质. 对于长江流域的浮游植物而言, TN 的最适阈值范围为 $0.35 \sim 1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 的最适阈值范围为 $11.25 \sim 83 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2)长江浮游植物密度可以分为三类水平,从高到低为:三峡支流和长江中下游区域、八大支流和长江源区区域、金沙江和长江上游区域. 长江源区主要富集了硅藻门中的舟形藻、等片藻、桥弯藻和异极藻, Cond 是驱动该区域浮游植物群落变化的重要环境因子;金沙江主要富集了硅藻门中的直链藻, DO、Cond 和高锰酸盐指数是驱动该区域浮游植物群落变化的重要环境因子;长江上游主要富集了硅藻门中的小环藻, DO 和 TN 是驱动该区域浮游植物群落变化的重要环境因子;长江中下游主要富集了绿藻门中的栅藻、蓝藻门中的假鱼腥藻、束丝藻和颤藻, T 是驱动该区域浮游植物群落变化的重要环境因子;八大支流主要富集了硅藻门中的针杆藻, T、Cond 和 TP 是驱动该区域浮游植物群落变化的重要环境因子;三峡支流主要富集了隐藻门中的隐藻, TN 和 TP 是驱动该区域浮游植物群落变化的重要环境因子.

(3)基于浮游植物进行水生态评价,评价结果由好到差依次为:长江中下游 > 长江上游 $\approx$ 八大支

流 > 长江源区 > 金沙江 $\approx$ 三峡支流; 基于 WQI 指数进行水质评价, 评价结果由好到差依次为: 金沙江 > 长江上游 $\approx$ 三峡支流 > 长江源区 $\approx$ 八大支流 > 长江中下游; 综合水生生物指标和水质指标进行生态系统健康的整体评价, 长江流域水生态系统健康状况由好到差依次为: 长江上游、长江中下游 > 八大支流 > 长江源区 > 金沙江 > 三峡支流。

参考文献:

- [1] 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 等. 长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4687-4697.
Wang Q, Yu S, Jiang P P, *et al.* Water chemical characteristics and influence of exogenous acids in the Yangtze River basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4687-4697.
- [2] 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.
- [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] Han X, Pan B Z, Zhao G N, *et al.* Local and geographical factors jointly drive elevational patterns of phytoplankton in the source region of the Yangtze River, China[J]. River Research and Applications, 2021, **37**(8): 1145-1155.
- [5] Liu Y X, Xu X M, Wang T, *et al.* Microscopic view of phytoplankton along the Yangtze River[J]. Science China Technological Sciences, 2019, **62**(11): 1873-1884.
- [6] Jiang Z B, Liu J J, Chen J F, *et al.* Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years[J]. Water Research, 2014, **54**: 1-11.
- [7] SL 219-2013, 水环境监测规范[S].
- [8] 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, 1988-2018.
- [9] 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.
- [10] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] Lee R E. Phycology (4th ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 Environment Sciences, 2020, **29**(2): 328-336.
- [16] 胡愈圻, 曹亮, 屈仁超, 等. 长江流域着生藻类群落结构的时空格局及其生态评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 3998-4007.
Hu Y X, Cao L, Qu R C, *et al.* Community composition and assessment on the aquatic ecosystem of periphytic algae in the Yangtze River basin[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 3998-4007.
- [17] Dixon P. VEGAN, a package of R functions for community ecology[J]. Journal of Vegetation Science, 2003, **14**(6): 927-930.
- [18] Baker M E, King R S. A new method for detecting and interpreting biodiversity and ecological community thresholds[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, **1**(1): 25-37.
- [19] 陈晟. 基于机器学习的黑河中游作物需水量模型研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2018.
Chen S. Research on crop water requirement models in middle reaches of Heihe River basin based on Machine learning[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2018.
- [20] Ren L P, Zhang Z, Zeng X, *et al.* Community structure of zooplankton and water quality assessment of Jialing River in Nan Chong[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, **10**: 1321-1326.
- [21] 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.
- [22] Huo S L, Li X C, Xi B D, *et al.* Combining morphological and metabarcoding approaches reveals the freshwater eukaryotic phytoplankton community[J]. Environmental Sciences Europe, 2020, **32**(1), doi: 10.1186/s12302-020-00321-w.
- [23] Li D W, Kendrick B. A year-round study on functional relationships of airborne fungi with meteorological factors[J]. International Journal of Biometeorology, 1995, **39**(2): 74-80.
- [24] Legendre P, Gallagher E D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data[J]. Oecologia, 2001, **129**(2): 271-280.
- [25] Thompson C G, Kim R S, Aloe A M, *et al.* Extracting the variance inflation factor and other multicollinearity diagnostics from typical regression results[J]. Basic and Applied Social Psychology, 2017, **39**(2): 81-90.
- [26] Wehr J D, Sheath R G, Kociolek J P. Freshwater algae of North America: ecology and classification (2nd ed.) [M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [27] 胡鸿钧. 水华蓝藻生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [28] Hu Y X, Liu X D, Xing W Y, *et al.* Marker gene analysis reveals the spatial and seasonal variations in the eukaryotic phytoplankton community composition in the Yangtze River, Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Plankton Research, 2019, **41**(6): 835-848.
- [29] Zong J M, Wang X X, Zhong Q Y, *et al.* Increasing outbreak of cyanobacterial blooms in large lakes and reservoirs under pressures from climate change and anthropogenic interferences in the Middle-Lower Yangtze River Basin[J]. Remote Sensing, 2019, **11**(15), doi: 10.3390/rs11151754.
- [30] 潘保柱, 刘心愿. 长江流域水生态问题与修复述评[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(3): 1-8.
Pan B Z, Liu X Y. A review of water ecology problems and

- restoration in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(3): 1-8.
- [31] Zhang S S, Xu H Z, Zhang Y F, *et al.* Variation of phytoplankton communities and their driving factors along a disturbed temperate river-to-sea ecosystem [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106776.
- [32] 刘猛, 宋以兴, 张逸譔, 等. 雅砻江大河湾浮游植物多样性及群落结构[J]. *淡水渔业*, 2022, **52**(1): 3-13.
Liu M, Song Y X, Zhang Y X, *et al.* Phytoplankton diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2022, **52**(1): 3-13.
- [33] Stefanidou N, Katsiapi M, Tsianis D, *et al.* Patterns in alpha and beta phytoplankton diversity along a conductivity gradient in coastal Mediterranean lagoons [J]. *Diversity*, 2020, **12**(1), doi: 10.3390/d12010038.
- [34] Zhang M, Dong J, Gao Y N, *et al.* Patterns of phytoplankton community structure and diversity in aquaculture ponds, Henan, China [J]. *Aquaculture*, 2021, **544**, doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737078.
- [35] 兰静, 吴云丽, 娄保锋, 等. 2004 年以来长江中下游干流水体高锰酸盐指数时空变化分析[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(4): 1112-1122.
Lan J, Wu Y L, Lou B F, *et al.* Spatiotemporal change analysis of permanganate index in the middle and lower mainstem of the Yangtze River since 2004[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(4): 1112-1122.
- [36] Chen X N, Wang X J, Li Y Y, *et al.* Succession and driving factors of periphytic community in the middle route project of South-to-North water division (Henan, China)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(7), doi: 10.3390/ijerph19074089.
- [37] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 等. 太湖流域水库型水源地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.
- [38] Chambers P A, McGoldrick D J, Brua R B, *et al.* Development of environmental thresholds for nitrogen and phosphorus in streams[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(1): 7-20.
- [39] Dodds W K, Clements W H, Gido K, *et al.* Thresholds, breakpoints, and nonlinearity in freshwaters as related to management[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(3): 988-997.
- [40] Leland H V. Distribution of phytobenthos in the Yakima River basin, Washington, in relation to geology, land use and other environmental factors [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(5): 1108-1129.
- [41] 王文川, 梅宝澜, 李磊, 等. 基于随机森林算法的清水河流域生态系统健康评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, **41**(6): 11-17.
Wang W C, Mei B L, Li L, *et al.* Ecosystem health evaluation of the Qingshui River basin based on Random Forest Algorithm[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, **41**(6): 11-17.
- [42] Woo S Y, Jung C G, Lee J W, *et al.* Evaluation of watershed scale aquatic ecosystem health by SWAT modeling and random forest technique[J]. *Sustainability*, 2019, **11**(12), doi: 10.3390/su11123397.
- [43] Zhang J P, Zhi M M, Zhang Y. Combined generalized additive model and random forest to evaluate the influence of environmental factors on phytoplankton biomass in a large eutrophic lake[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **130**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108082.
- [44] Alvarez-Micles G, Irvine K, Griensven A V, *et al.* Relationships between aquatic biotic communities and water quality in a tropical river-wetland system (Ecuador) [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, **34**: 115-127.
- [45] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, **12**(9): 1521-1531.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)