

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评价	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应

李晓东^{1,2}, 杨清^{1,2}, 刘惠秋^{1,2}, 巢欣^{1,2}, 杨胜娴^{1,2}, 巴桑^{1,2*}

(1. 西藏大学地球第三极碳中和研究中心, 拉萨 850000; 2. 西藏大学理学院青藏高原湿地与流域生态系统实验室, 拉萨 850000)

摘要: 河流生态健康评价是保护河流生物多样性、遏制河流环境恶化趋势的前提, 为探究雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态及其对水环境因子响应机制, 于2021年的7月和10月在雅鲁藏布江中游进行浮游植物样品的采集和水环境因子的测定, 鉴定浮游植物物种并计算其细胞丰度和生物量, 构建浮游植物完整性指数评价该河段河流生态健康状态, 分析水环境因子和浮游植物群落时空分布特征、P-IBI值和群落参数与水环境因子的相关性。结果表明, 水环境因子在时间上差异不明显, 在空间上有显著的差异; 浮游植物平均细胞丰度和平均生物量大小为: 丰水期 > 枯水期以及干流 > 支流, 硅藻在群落中占绝对优势, pH和WT是驱动浮游植物时空分布的主要水环境因子; 雅鲁藏布江中游生态健康状态整体为“健康-亚健康”, 河流健康状态枯水期优于丰水期、支流优于干流, EC、TUR、WT、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N是影响该河段生态健康状态的主要水环境因子, 可通过影响水体中浮游植物群落演替的方向和速率, 参与和影响河流生态系统的物质循环和能量流动过程, 驱动了雅鲁藏布江中游河流生态健康状态。

关键词: 河流生态健康; 生物完整性指数; 水环境因子; 浮游植物; 雅鲁藏布江中游

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4941-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211063

Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River

LI Xiao-dong^{1,2}, YANG Qing^{1,2}, LIU Hui-qiu^{1,2}, CHAO Xin^{1,2}, YANG Sheng-xian^{1,2}, BA Sang^{1,2*}

(1. Earth's Third Pole Carbon Neutralization Research Center, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Wetland and Watershed Ecosystem, School of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China)

Abstract: River ecological health assessments are the premise for protecting river biodiversity and curbing river water environment deterioration. To explore the river ecosystem health status and its response mechanism to water environmental factors in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, phytoplankton samples were collected during July and October 2021, and water environmental factors were measured. The phytoplankton species were identified, and their cell abundance and biomass were calculated. The phytoplankton integrity index was constructed to evaluate the ecological health status of the river. The temporal and spatial distribution characteristics of water environmental factors and phytoplankton community, as well as the correlation between P-IBI value and community parameters and water environmental factors were analyzed. The results showed that the difference in water environmental factors was not evident in time but was significant in space. The average cell abundance and biomass of phytoplankton were in the order of wet season > dry season and main stream > tributaries. Diatoms dominated the community, and pH and WT were the major water environmental factors driving the spatial and temporal distributions of phytoplankton. The ecological health status of the middle reaches of the Yarlung Zangbo River was “healthy to sub-healthy.” The river health status was better than that of the dry season, and that of the tributaries was better than that of the main stream. EC, TUR, WT, NO₃⁻-N, and NH₄⁺-N were the major water environmental factors affecting the ecological health status of the river reach, which could be affected by the direction and rate of phytoplankton community succession. It is involved in and affects the process of material circulation and energy flow of the river ecosystem, thereby driving the ecological health of the middle reaches of the Yarlung Zangbo River.

Key words: river ecological health; index of biotic integrity; water environment factor; phytoplankton; middle reaches of the Yarlung Zangbo River

河流生态健康评价是对河流生态系统状态与社会服务功能的评价^[1], 能辨识河流存在的生态风险, 是保护河流生物多样性、遏制河流健康状况恶化趋势的前提^[2]。根据水利部《河湖健康评价指南》^[3], 生物完整性指数是河流生态健康评价的重要手段, 其有效解决了仅利用物理和化学指标评价河流健康状况的局限性^[4]。1981年, Karr^[5]以鱼类为对象最先建立了利用IBI评价河流健康的方法, 目前已在鱼类^[6]、底栖动物^[7]、着生藻类^[8]、浮游动物^[9]和高等水生植物^[10]等类群上得到广泛应用,

利用浮游植物完整性指数(P-IBI)评价水生态健康状态的研究也已有相关报道。Li等^[11]利用P-IBI评价了水坝建立前后河流生态健康状态, 结果表明, P-IBI可以较好地反映水坝对河流水生态健康的影响。顾毓蓉等^[12]基于P-IBI评价了松雅湖的水生态健康状态, 发现其与水质评价结果在时间与空间上

收稿日期: 2022-11-05; 修订日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32070418); 2022年中央财政支持地方高校改革发展专项(藏财预指[2022]1号)

作者简介: 李晓东(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为河流生态健康与风险评估, E-mail: Lixiaodong2021911@163.com

* 通信作者, E-mail: hbasang2003@aliyun.com

总体相似,具有一定的应用价值.蔡琨等^[13]将冬季太湖 P-IBI 评价结果与水质状况相比较,发现 P-IBI 评价结果与太湖水质较差的状况相一致.近年来,P-IBI 在河流、湖泊和水库的健康评价研究中应用得越来越普遍^[14],研究区域大多数位于长江流域^[15],基于 P-IBI 评价雅鲁藏布江流域的相关研究尚未见报道.

浮游植物是水生态系统中主要的生物类群之一,是河流、湖泊等水体的重要组成成分^[16],其生活周期短,对水环境变化敏感^[17],能吸附水体中的污染物,净化水质^[18].浮游植物在急流水域会对水环境中水体理化因子和污染物的变化迅速响应,尤其是对营养水平的变化做出直接的反应而经常被用做水质监测的指示生物和水质评估依据^[19,20].作为重要的初级生产者,浮游植物可通过光合作用将太阳能转化为化学能储存起来^[21],并产生和释放氧气,在水生态系统物质循环和能量流动中发挥着重要功能,浮游植物拥有较高的初级生产力,水环境的变动能影响浮游植物的繁殖和代谢速率而使群落结构发生改变^[22],将直接影响上层食物链结构,通过反馈调节,水环境的变动能直接或间接驱动水生态系统的健康状态^[23].

位于青藏高原的雅鲁藏布江是西藏境内最为主要的自然水生态系统,具有众多低海拔河流所不具有的特殊地貌及生态条件,其生态环境十分敏感脆弱,极易受到全球气候变化和人类活动干扰等事件的影响,为探究雅鲁藏布江中游河流健康状态及其

环境驱动力,通过构建浮游植物生物完整性指数对该水域河流健康状态进行评价,分析驱动浮游植物群落结构特征的主要水环境因子,揭示雅鲁藏布江中游河流生态系统的健康状态对水环境因子的响应机制,以达到丰富高原河流浮游植物群落特征及生态学价值,以期为保障西藏水生态安全、实现资源可持续发展与环境保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样点设置

雅鲁藏布江流域(82°00'~97°07'E, 28°00'~31°16'N)位于冈底斯-念青唐古拉山脉和喜马拉雅山脉之间^[24],起源于中国西藏自治区日喀则市仲巴县境内的杰马央宗曲,东西横贯西藏南部,地势西高东低,流域全长约 2 057 km,流域面积 240 480 km²^[25].依据流域地形特征与气候类型对河道进行分区,拉孜-派镇为中游,河谷宽窄交错,河流两岸以河漫滩与阶地居多,多为高原温带半干旱气候,年平均降水量 300~600 mm,流域面积 16.5 万 km²,长约 1 293 km,总落差 1 520 m,占干流总落差的 28.1%^[26].

根据地表水质监测断面的布设原则以及雅鲁藏布江中游自然环境状态,在雅鲁藏布江中游共设置了 30 个样点(图 1),其中,包括 11 个干流采样点,17 个支流采样点,2 个河流湿地.于 2021 年 7 月(丰水期)和 2021 年 10 月(枯水期)进行浮游植物样品的采集和水环境因子的测定.

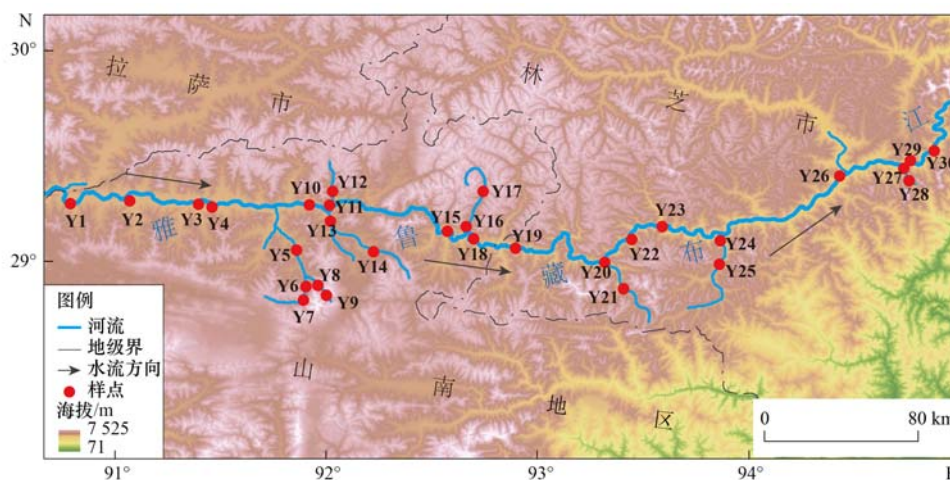


图 1 雅鲁藏布江中游样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sample sites in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

1.2 样品采集与测定

1.2.1 水环境因子的样品采集与分析

现场使用 HI98195 高精度多参数水质测试仪(HANNA,意大利)测定水体酸碱度(pH)、电导率(EC)、盐度(Salt)、总溶解固体(TDS)和水温

(WT),水流速度(v),采用 FP-111 直读式流速仪(美国产)测定,使用 HI98193 微电脑溶解氧测定仪(HANNA,意大利)测得溶解氧(DO),氨氮(NH_4^+-N)用水杨酸分光光度法测定,使用 HI98703 微电脑多量程浊度测定仪(HANNA,意大利)测得浊

度(TUR)等,并分别进行3个平行检测.按照GB3838-2002《地表水环境的质量标准》对水样进行采集、保存与运输,送有检测资质公司对总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO_3^- -N)和化学需氧量(COD)等指标进行测定.

1.2.2 浮游植物的样品采集、鉴定和计数

浮游植物的调查方法根据《淡水浮游生物研究方法》^[27]中规定的方法进行采集和鉴定.浮游植物定性样品用25号浮游生物网在水体表面下0.5 m处以“∞”字形捞取,将采集的滤液样品放入采样瓶中,用体积分数4%的甲醛溶液保存,在室内利用LEICA DM500研究型光学显微镜鉴定物种.定量样品在水深0~0.5 m处采集1 L混合水样,随后立即用鲁哥氏试剂固定,样品带回实验室沉淀48 h后浓缩至50 mL,移取0.1 mL浓缩液到0.1 mL计数框,在10×40倍显微镜下全片计数,每个样品计数2~3次.浮游植物的鉴定参考文献^[28~30].浮游植物生物量利用合适的体积公式将浮游植物丰度转化为生物量(鲜重),并假设其比重为1.0,即生物量为浮游植物的丰度乘以各自体积的平均湿重^[31,32].

1.3 数据统计与分析

1.3.1 多样性指数计算

利用 Margalef 丰富度指数(d)^[33]、Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[34]和 Pielou 均匀度指数(J)^[35]计算雅鲁藏布江中游浮游植物群落的生物多样性.计算公式如下:

$$d = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i \quad (2)$$

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

式中, S 为采样点的物种数; N 为采样点所有浮游植物的细胞丰度; P_i 为第*i*种的个体所占的比例.

1.3.2 浮游植物完整性指数的构建

浮游植物完整性指数的构建主要分为参照点与受损点的确定、候选指标的选择和筛选、P-IBI指数的计算等4个步骤^[36,37].

(1)参照点与受损点的确定 参考 Barbour 等^[36]调查村庄、污染源和森林覆盖率等情况,根据受人类活动干扰程度,选取无干扰样点或干扰极小样点作为参考点,本研究根据河流栖息地质量评价方法^[38,39]来确定样点的受干扰程度,通过计算30个样点栖息地综合指数(RHI),选取评价等级为“好”的样点($\text{RHI} > 150$)作为参考点,其余样点作为受损点.

(2)候选指标的选择和筛选 基于对各个断面的现场勘查和室内定量分析数据,选取浮游植物种

类、细胞丰度、生物量、群落多样性指数等指标作为候选指标^[40].在对候选指标进行统计后,通过分布范围分析、判别能力分析和相关性分析等步骤,剔除判别能力较差以及信息高度重叠的指标,得到核心指标.

(3)利用参照点与受损点的箱型图 IQ (25%~75%分位数的箱体重叠情况)进行指标筛选 箱体没有重叠, $\text{IQ} = 3$; 两箱体有重叠,但两中位线不在对方箱体内, $\text{IQ} = 2$; 任意一方中位线在对方箱体内, $\text{IQ} < 2$.选择 $\text{IQ} \geq 2$ 的参数进行 Pearson 相关性分析,对于相关系数绝对值大于0.75的两个参数,两者独立性较低,包含的生态信息相似程度高,删去其中一个^[41].

(4)P-IBI 指标的计分及评价标准 采用3分制法^[42]计算 P-IBI 值.对随干扰减小的指标,高于参考点的25%分位数值(对随干扰增大的指标,低于参考点的75%分位数值),计6分;低于25%分位数值(高于75%分位数值)的分布范围进行二等分,分别计3分和0分.将筛选所得指标的分值进行加和,获得 P-IBI 值.以参考点的25%分位数为最佳期望值,确定 P-IBI 指标体系评价标准^[41,43],若采样点的 P-IBI 值大于25%分位数值,则表示该样点受到的干扰很小,是健康的;对小于25%分位数值值的分布范围进行四等分,确定出健康、亚健康、一般、较差和极差共5个健康等级^[12].

1.3.3 数据处理与分析

采用 ArcGIS10.0 软件绘制地图,利用 Excel 2016 软件统计浮游植物物种数、细胞丰度和生物量,利用 R 4.1.3 软件计算多样性指数、R 中的 ggplot2 包对水环境因子进行时空差异分析,利用 OriginPro 2019 软件对水环境因子、群落结构、指标筛选进行统计绘图.水环境因子与群落参数的相关性热图利用 R 中的 pheatmap 包进行可视化,水环境因子与 P-IBI 值的相关性利用 R 中的 gcooknook 包进行可视化.

2 结果与分析

2.1 水环境因子特征

雅鲁藏布江中游水环境因子样点分布特征如图2所示,在30个样点中,EC、TUR、WT、pH、TN、TDS、 v 、TP、和 COD 在丰水期的变化幅度较枯水期大(极差), NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DO 在丰水期的变化幅度较枯水期小(极差); EC、TUR、WT、pH、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、DO、TN、TDS 在不同水文期各样点间的变化趋势基本一致;空间上看,除 v 外,干流的水环境因子均值均比支流高,对水环境

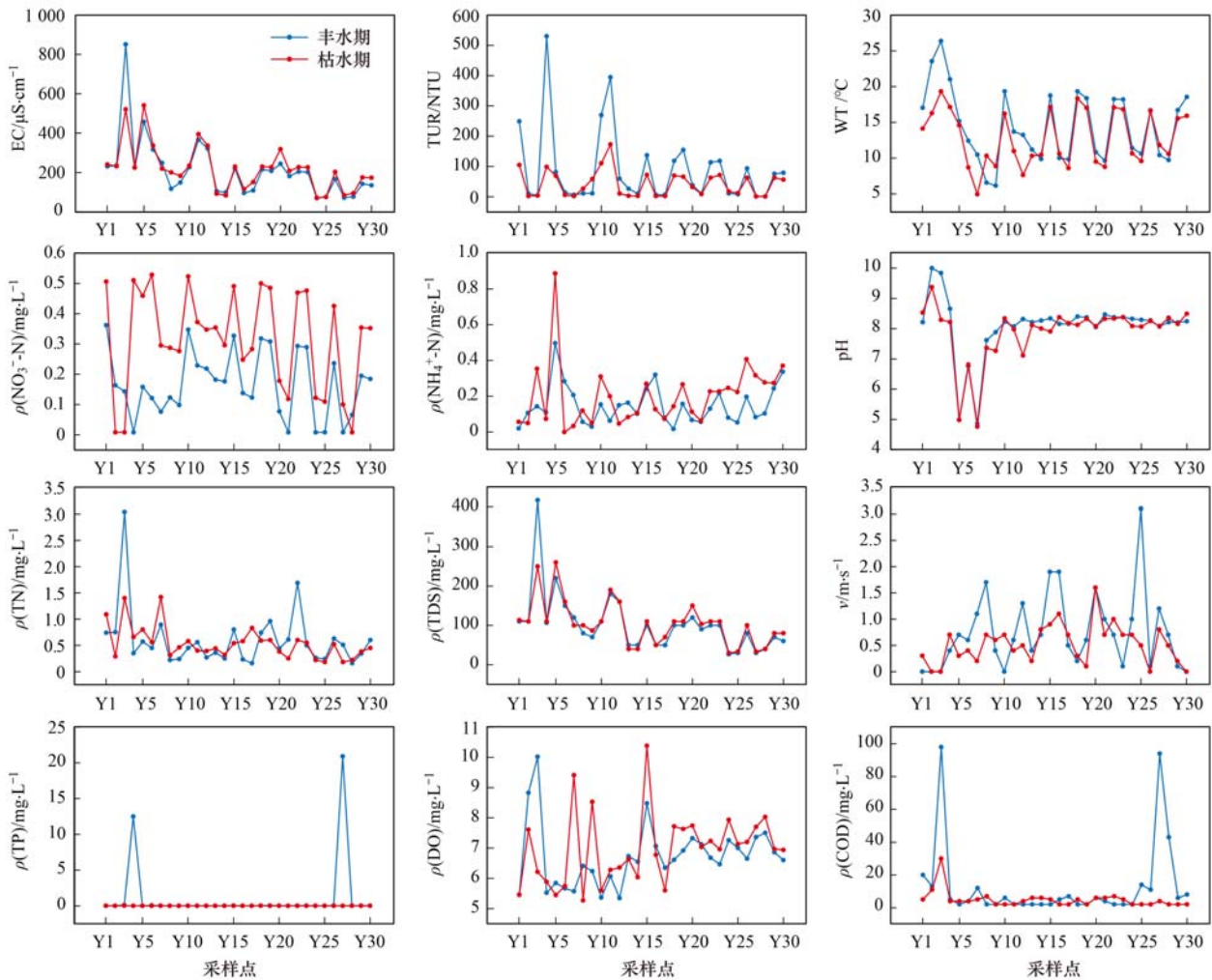


图2 雅鲁藏布江中游水环境因子样点分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of water environmental factor sample sites in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

因子进行空间维度差异性分析, pH、WT、 NO_3^- -N、TUR、 v 和 TN 在干流和支流间均具有显著差异 ($P < 0.01$).

对两个水文期的水环境因子进行分组后对两组数据进行 t 检验, 结果如图 3 所示. 其中, 丰水期 EC 均值 ($211.99 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 小于枯水期 ($221.48 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); 丰水期 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ ($0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 小于枯水期 ($0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 且具有极显著差异 ($P < 0.001$); 丰水期 $\rho(\text{TN})$ ($0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 大于枯水期 ($0.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 丰水期 $\rho(\text{TP})$ ($1.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 大于枯水期 ($0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 丰水期 TUR (88.17 NTU) 大于枯水期 (42.17 NTU); 丰水期 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ ($0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 小于枯水期 ($0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 丰水期 $\rho(\text{TDS})$ ($102.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 小于枯水期 ($105.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 丰水期 $\rho(\text{DO})$ ($6.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 小于枯水期 ($6.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 丰水期 WT (14.45°C) 大于枯水期 (12.82°C); 丰水期 pH (8.08) 大于枯水期 (7.89); 丰水期 v ($0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 大于枯水期 ($0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$); 丰水期 $\rho(\text{COD})$ ($12.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 大于枯水

期 ($4.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.2 浮游植物群落结构

雅鲁藏布江中游浮游植物群落物种组成如图 4 所示, 通过对两个水文期浮游植物进行物种鉴定, 共鉴定到浮游植物 644 种, 隶属于 8 门 12 纲 25 目 49 科 152 属, 其中, 硅藻占总物种数 49.53%, 绿藻占 25.16%, 蓝藻占 17.70%, 其它门类占比较小, 仅占 8.21%, 整体呈硅藻-绿藻-蓝藻型群落特征. 丰水期, 共鉴定到浮游植物 571 种, 硅藻占总物种数 51.31%; 枯水期, 共鉴定到浮游植物 471 种, 硅藻占总物种数 59.02%, 该流域两个水文期浮游植物群落物种组成最主要门类均为硅藻.

2.3 浮游植物生物完整性指数评价

2.3.1 候选指标的选择

共选取了 16 个应用广泛且入选率较高^[41,42] 的指标作为备选指标(表 1). 对这 16 个备选指标进行分布范围、判别能力和相关性分析, 筛选出合适的参数指标.

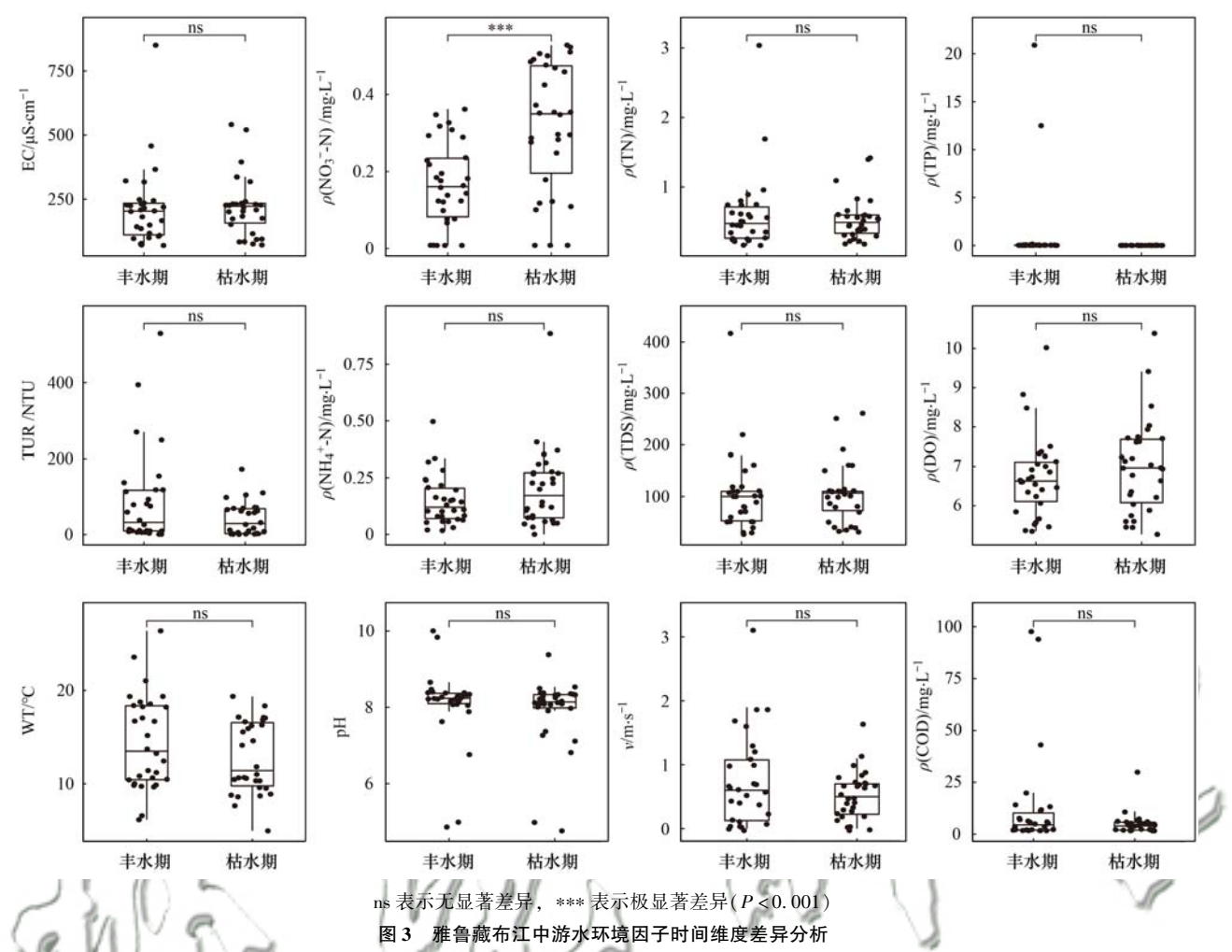


Fig. 3 Temporal difference analysis of water environmental factors in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

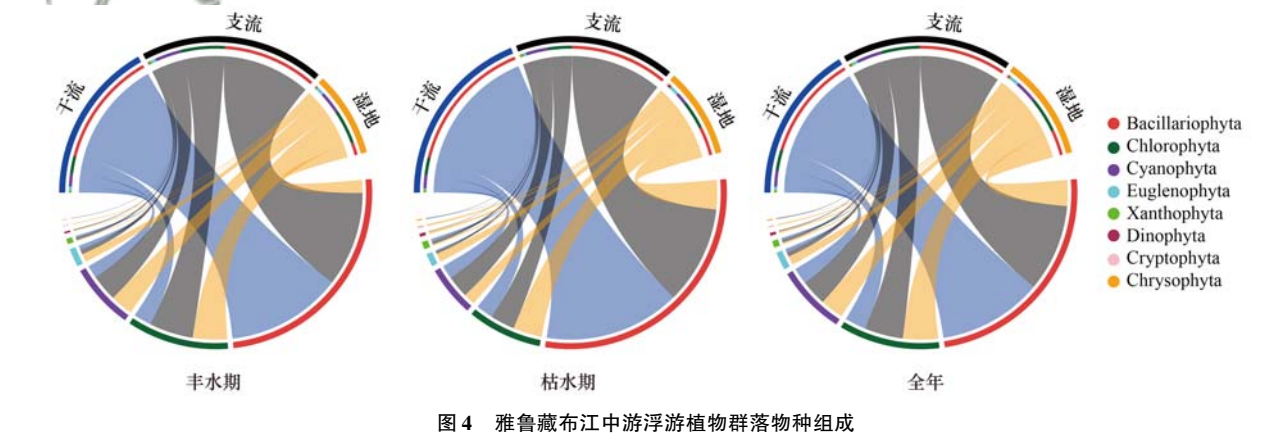


Fig. 4 Species composition of phytoplankton community in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

2.3.2 参考点与受损点的确定

根据雅鲁藏布江中游 30 个样点的河流栖息地质量评价结果,河流栖息地质量等级为“好”的样点共 16 个(Y1、Y6~Y9、Y11、Y12、Y14、Y16、Y17、Y20、Y21、Y24、Y25、Y27 和 Y28),说明这些样点受到的人为干扰较小,水质和生境状况较好,故选取该 16 个样点作为参考点,余下的 14 个样点作为受损点。

2.3.3 判别能力分析

利用参考点与受损点的箱型图 IQ (25%~75% 分位数的箱体重叠情况) 对 16 个候选指标进行筛选,筛选出符合标准的 14 个生物参数 (M2~M7 和 M9~M16) 纳入下一步分析 (图 5)。

2.3.4 Pearson 相关性分析

对筛选出的 14 个生物指标进行 Pearson 相关分析 (表 2),来检验各指标所反映信息的独立性。两个

指数间的相关系数 $|r|$ 大于 0.750 表示两个指数间高度相关,对高度相关的两个指标,优先保留信息含量大的指标,剔除其中一个候选指标,通过对 14 个候选指标进行筛选,最终确定 P-IBI 指标体系由 M2 (浮游植物物种总数)、M3 (非硅藻物种总数)、M4

(蓝藻物种数)、M5 (绿藻物种数)、M6 (硅藻物种数)、M7 (浮游植物总密度)、M9 (浮游植物均匀度指数)、M10 (浮游植物丰富度指数)、M11 (蓝藻密度占比)和 M16 (浮游植物总生物量)共 10 个指标构成。

表 1 P-IBI 备选指标描述及对干扰的反映

Table 1 Description of candidate metrics for P-IBI and their expected response to disturbance					
指标类型	指标代码	候选指标	指标描述	单位	对干扰的反应
物种丰富度参数	M1	浮游植物分类单元数	浮游植物门类数目	个	上升
	M2	浮游植物物种总数	浮游植物总的种类数目	个	上升
	M3	非硅藻物种总数	除硅藻外种的数目	个	上升
	M4	蓝藻物种数	蓝藻物种总数	个	上升
	M5	绿藻物种数	绿藻物种总数	个	下降
	M6	硅藻物种数	硅藻物种总数	个	上升
	M7	浮游植物总密度	浮游植物的细胞总密度	cells·L ⁻¹	上升
	M8	浮游植物香浓多样性指数	浮游植物的 Shannon-Wiener 指数		上升
	M9	浮游植物均匀度指数	浮游植物的 Pielou 均匀度指数		下降
	M10	浮游植物丰富度指数	浮游植物 Margalef 丰富度指数		上升
群落结构组成参数	M11	蓝藻密度占比	蓝藻细胞数/浮游植物总细胞数×100%	%	上升
	M12	绿藻密度占比	绿藻细胞数/浮游植物总细胞数×100%	%	下降
	M13	硅藻密度占比	硅藻细胞数/浮游植物总细胞数×100%	%	上升
	M14	蓝藻+绿藻密度占比	蓝藻+绿藻细胞数/浮游植物总细胞数×100%	%	下降
	M15	绿藻+硅藻密度占比	绿藻+硅藻细胞数/浮游植物总细胞数×100%	%	上升
生产力	M16	浮游植物总生物量	浮游植物的总生物量	mg·L ⁻¹	上升

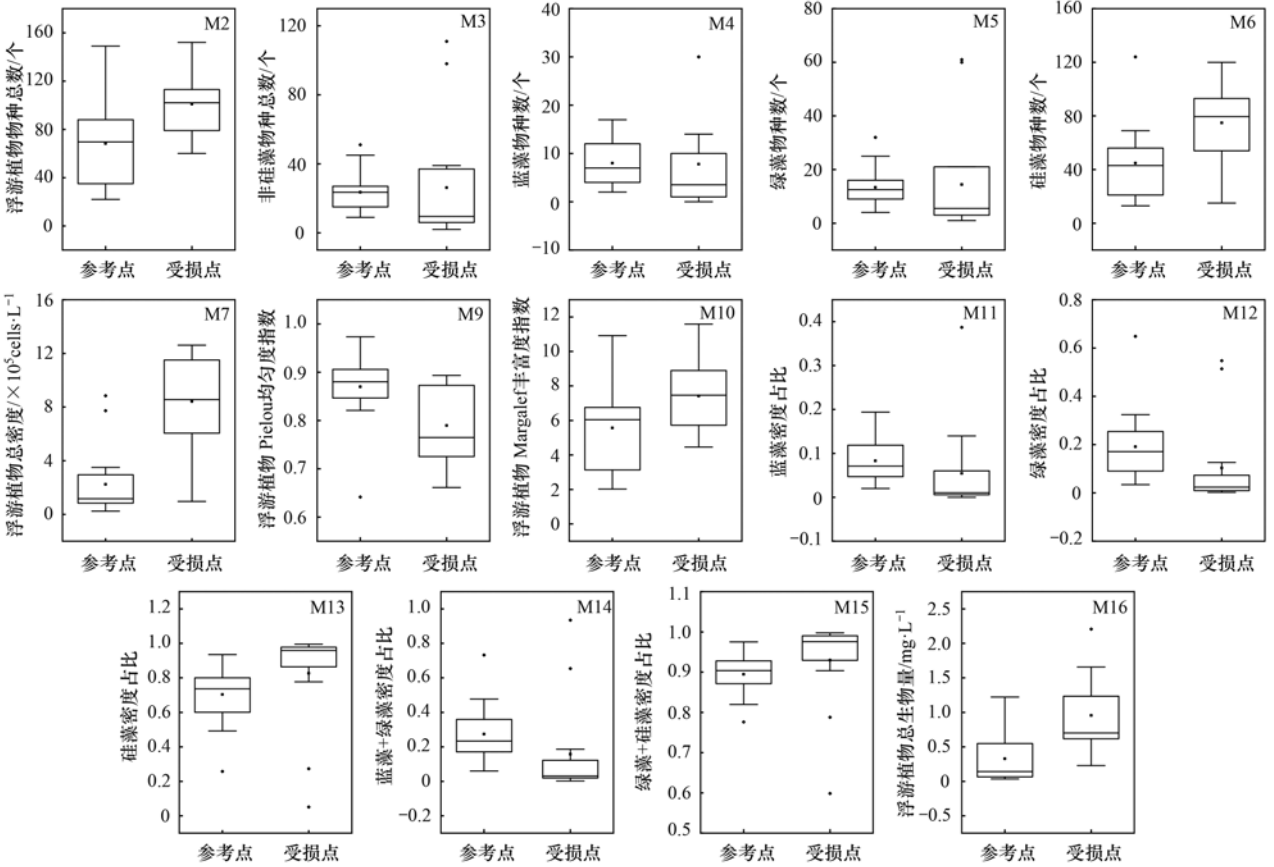


图 5 16 个候选指标筛选结果

Fig. 5 Screening results of 16 candidate indicators

表 2 14 个生物指标的 Pearson 相关分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis of 14 biological indicators

	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
M2	1													
M3	-0.08	1												
M4	0.11	-0.19	1											
M5	-0.16	-0.08	0.23	1										
M6	-0.37 *	-0.12	-0.09	-0.10	1									
M7	-0.16	0.08	-0.30	-0.13	0.22	1								
M9	0.06	-0.20	0.18	0.26	-0.12	-0.55 **	1							
M10	-0.33	-0.04	-0.13	0.31	0.74 **	0.08	0.08	1						
M11	-0.06	-0.01	0.42 *	0.65 **	-0.42 *	-0.17	0.34	-0.09	1					
M12	-0.05	-0.09	0.37 *	0.75 **	-0.49 **	-0.22	0.24	-0.14	0.85 **	1				
M13	0.12	-0.01	-0.38 *	-0.73 *	0.49 **	0.12	-0.20	0.13	-0.92 **	-0.96 **	1			
M14	-0.11	0.02	0.41	0.72 **	-0.45 *	-0.11	0.18	-0.09	0.92 **	0.95 **	0.99 **	1		
M15	0.20	-0.06	-0.33	-0.60 **	0.45 *	0.09	-0.30	0.11	-0.96 **	-0.79 **	0.90 **	-0.89 **	1	
M16	-0.17	-0.01	-0.32	-0.10	0.19	0.52 **	-0.41 *	0.07	-0.30	-0.36	0.27	-0.26	0.26	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.3.5 P-IBI 指标体系评价标准及评价结果

根据 3 分制法的计分标准(表 3),将筛选所得指标的分值进行加和,即获得 P-IBI 值.以参考点

的 25% 分位数为最佳期望值,确定 P-IBI 指标体系评分标准(表 4),进而得出各采样点浮游植物生物完整性评分及健康评价.

表 3 P-IBI 指标在参考点中的分布及 3 分制法评分标准

生物指标	统计分布			评分标准		
	25% 分位数	50% 分位数	75% 分位数	6	3	0
M2	35	69.5	85	<85	85 ~ 117	>117
M3	15.5	23.5	26.5	<26.5	26.5 ~ 38.75	>38.75
M4	4	7	11.5	<11.5	11.5 ~ 14.25	>14.25
M5	9	12.5	16	>9	9 ~ 6.5	<6.5
M6	21	43	55.5	<55.5	55.5 ~ 89.75	>89.75
M7	85 875	116 500	273 450	<273 450	273 450 ~ 579 025	>579 025
M9	0.853	0.880	0.905	>0.853	0.853 ~ 0.747	<0.747
M10	3.249	6.044	6.734	<6.734	6.734 ~ 8.825	>8.825
M11	0.048	0.071	0.115	<0.115	0.115 ~ 0.154	>0.154
M16	0.070	0.141	0.514	<0.514	0.514 ~ 0.868	>0.868

表 4 雅鲁藏布江中游 P-IBI 3 分制法评价标准

Table 4 Evaluation criteria of the P-IBI three-point system in the middle reaches of Yarlung Zangbo River					
分级	健康	亚健康	一般	较差	极差
P-IBI	>48	48 ~ 36	36 ~ 24	24 ~ 12	<12

雅鲁藏布江中游 P-IBI 评价结果如图 6 所示,丰水期,30 个样点 P-IBI 的平均值为 42.80,健康状态等级为“亚健康”,其中,健康状态为“健康”的样点占 43.33%,健康状态为“亚健康”的样点占 26.67%,健康状态为“一般”的样点占 26.67%,健康状态为“较差”的样点占 3.33%;枯水期,30 个样点 P-IBI 值的平均值为 47.20,健康状态等级为“亚健康”,其中,健康状态为“健康”的样点占 56.67%,健康状态为“亚健康”的样点占 23.33%,健康状态为“一般”的样点占 20%.总体上看,雅鲁藏布江中

游河流生态健康状态枯水期(P-IBI 值 = 47.20)优于丰水期(P-IBI 值 = 42.80),支流(P-IBI 值 = 53.35)优于干流(P-IBI 值 = 34.91).

2.4 河流生态健康状态与水环境因子的关系

2.4.1 浮游植物群落参数与水环境因子相关性分析

对雅鲁藏布江中游浮游植物物种数(S)、细胞丰度(A)和生物量(B)与水环境因子进行 Mantel 相关性分析,结果如图 7 所示.丰水期:WT 与 TUR、TN、TP 和 NO₃⁻-N 呈极显著正相关(P<0.001),与 v 呈极显著负相关;枯水期:TDS 与 TUR 和 TN 呈显著正相关(P<0.01),与 NO₃⁻-N 呈正相关(0.01<P<0.05).丰水期:物种数与 v 具有相关性,细胞丰度与 WT、v 和 NO₃⁻-N 呈显著相关,生物量与 NO₃⁻-N 具有相关性;枯水期:物种数与 pH 和 WT 有显著相关性;细胞丰度与 EC、TDS、NO₃⁻-N 和 TN 具有

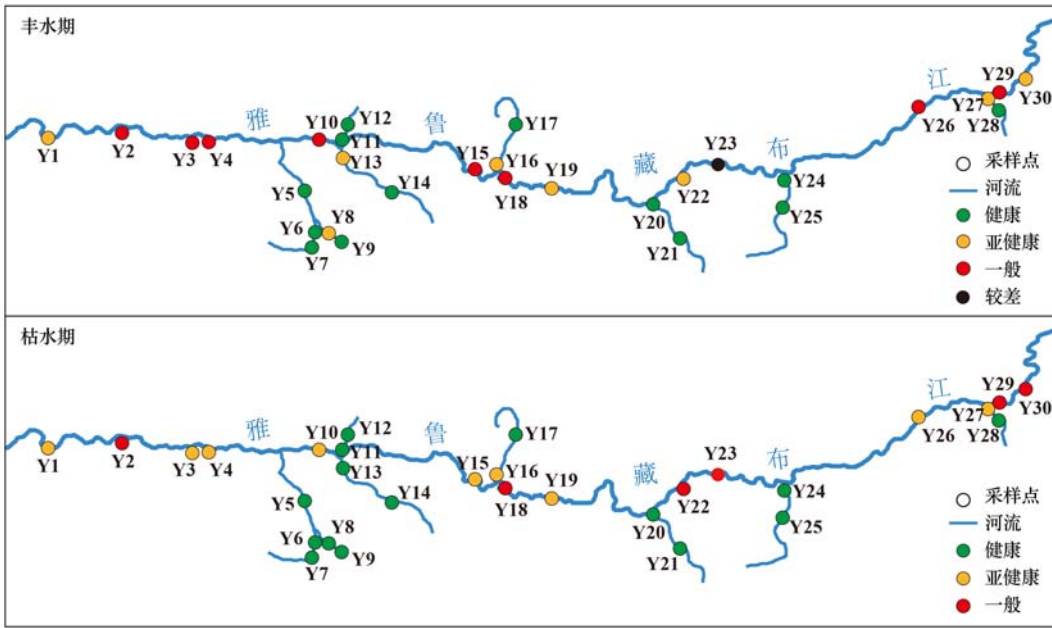
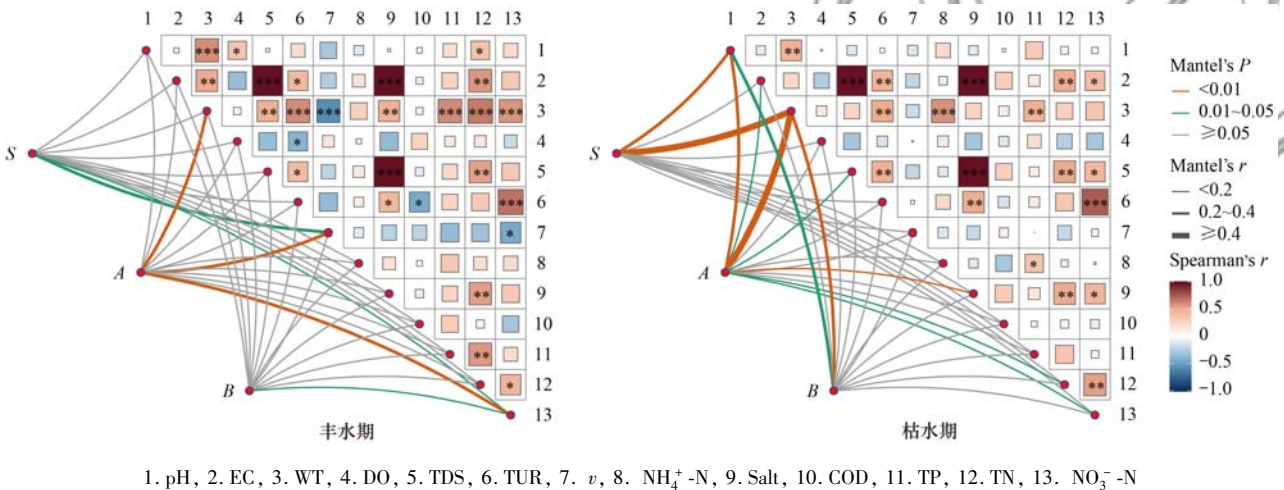


图 6 雅鲁藏布江中游河流生态健康评价结果

Fig. 6 Ecological health assessment results of the middle reaches of Yarlung Zangbo River



1. pH, 2. EC, 3. WT, 4. DO, 5. TDS, 6. TUR, 7. v , 8. NH_4^+-N , 9. Salt, 10. COD, 11. TP, 12. TN, 13. NO_3^--N

图 7 雅鲁藏布江中游浮游植物群落与水环境因子的 Mantel 分析

Fig. 7 Mantel analysis of phytoplankton community and water environmental factors in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

相关性,与 pH 和 WT 有显著相关性;生物量与 pH 具有相关性,与 WT 呈显著相关。

2.4.2 P-IBI 值与水环境因子相关性分析

对雅鲁藏布江中游 P-IBI 值与水环境因子进行相关性分析,结果如图 8 所示,其中, P-IBI 值与 TUR、pH 呈负相关 ($P < 0.05$), P-IBI 值与 WT、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 呈显著负相关 ($P < 0.01$),与 v 呈显著正相关 ($P < 0.01$),其它水环境因子与 P-IBI 值均无显著相关性 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 水环境因子特征

通过对雅鲁藏布江中游水环境因子进行分析,30 个样点的 EC、TN、TP、TUR、WT、pH、TDS、 v

和 COD 在丰水期的变化幅度较枯水期大(极差),说明雅鲁藏布江中游枯水期河流水体的稳定性较丰水期高,该流域丰水期处于夏季,夏季相对于其它季节不仅气温较高,而且降水、冰川融化速率都较其他季节大,而气温和降水等气候因素会间接影响河流水体的稳定性^[44],气候的季节变化可能是影响该流域不同水文期水体稳定性的重要因素。雅鲁藏布江中游水环境因子在时间维度上仅 NO_3^--N 具有显著差异 ($P < 0.01$),说明该流域水环境因子季节变化不明显。相比季节变化,水环境因子在空间维度有明显的差异,通过对水环境因子的空间差异性分析, pH、WT、 NO_3^--N 、TUR、 v 和 TN 在干流和支流间均具有显著差异 ($P < 0.01$),不同海拔梯度的河段其气候特征、汇入水体中无机盐和有机酸的来源和浓

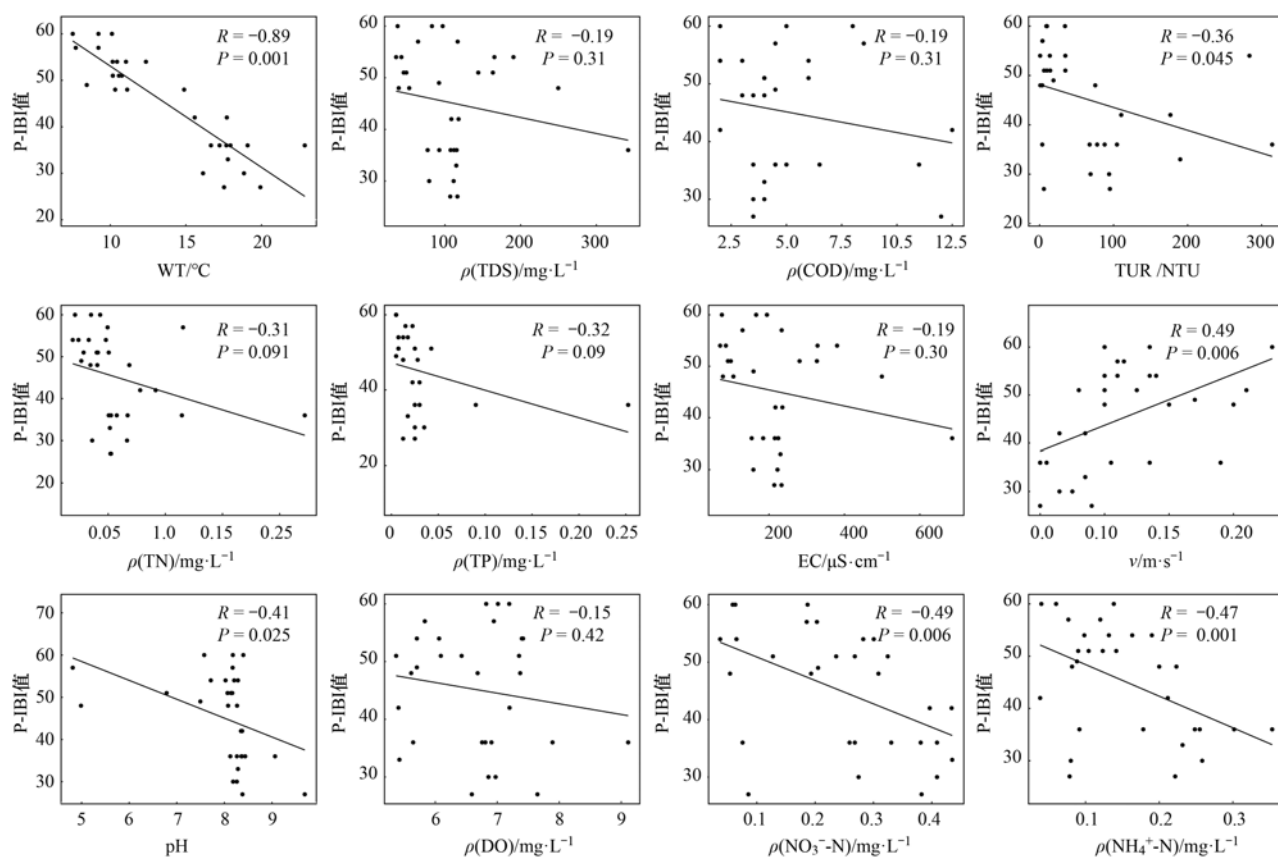


图8 雅鲁藏布江中游 P-IBI 值与水环境因子相关性

Fig. 8 Correlation between P-IBI values and water environmental factors in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

度有一定的差异^[45],研究区域的30个样点中,支流平均海拔(3 650 m)较干流(3 133 m)高,依据样点周边的环境状况,干流附近多为公路和村庄,受到的人为干扰比支流大,海拔梯度和人类活动可能是雅鲁藏布江中游水环境因子在干流和支流间具有明显的差异的主要影响因素。

3.2 浮游植物群落结构特征

雅鲁藏布江中游浮游植物群落整体上呈硅藻-绿藻-蓝藻型特征,在丰水期和枯水期硅藻在群落中均占绝对优势(分别占51.31%和59.02%),雅鲁藏布江流域平均海拔在3 000 m以上,水温较低海拔地区低,水温能影响浮游植物自身营养盐吸收速率,进而影响浮游植物的代谢和增殖^[46,47]。Mantel相关性分析结果表明,浮游植物物种数、细胞丰度、生物量均与WT具有相关性($P < 0.05$),硅藻与其它藻类相比,对低水温环境具有较宽的生态幅^[19],在水温降低时对环境中资源的利用具有一定优势,该流域低温的水环境可能抑制了其它喜高温藻类的繁殖,使其成为浮游植物群落中的优势类群。硅藻在偏碱性水环境中具有极强的适应性^[48],魏俊伟等^[49]对拉萨河流域附石藻类和水体环境因子进行RDA分析表明,硅藻门优势种细胞密度与pH成正相关,雅鲁藏布江中游丰水期浮游植物细胞丰度和生物量

占比均大于枯水期,同时pH均值丰水期(8.08)大于枯水期(7.89),Mantel相关性分析结果显示,浮游植物物种数、细胞丰度与pH具有相关性($P < 0.05$),说明pH也是影响雅鲁藏布江中游群落结构的重要水环境因子。

3.3 河流生态健康状态评价

雅鲁藏布江中游P-IBI评价结果显示,丰水期和枯水期的健康状态整体为“健康-亚健康”,雅鲁藏布江中游河流生态健康状态枯水期(P-IBI值=47.20)优于丰水期(P-IBI值=42.80)。原因可能是河流在枯水期水力扰动减小而水体相对稳定,更有利于浮游植物的生长,浮游植物群落更容易达到相对稳定状态^[50],对外界环境的干扰也具有更高的抵抗力,群落整体的代谢速率也会随之增强。作为初级生产者,浮游植物群落代谢水平的增强不仅会增加水体中的含氧量^[51],同时也促进了对水环境中污染物的吸收,河流水环境质量将进一步优化,河流生态系统进入正反馈调节阶段,间接驱动了该流域枯水期河流生态健康状态。从全河段上看,干流健康状态整体为“一般”,支流健康状态整体为“健康”,雅鲁藏布江中游河流生态健康状态支流(P-IBI值=53.35)优于干流(P-IBI值=34.91)。陈红等^[52]和骆鑫等^[53]的研究表明营养盐和水温都为浮游植物群

落结构的主要影响因子,由于支流海拔高且水温较低,水温可能代替营养盐成为浮游植物生长的主要影响因子,温度较低时会限制某些优势物种的生长,当以温度等外力条件为主要影响因素时,浮游植物种群之间的竞争能力将被削弱^[41]. 种群之间的竞争能力减弱时,群落内部能达到相对的动态平衡,群落结构趋于稳定,浮游植物群落与其它水生生物、水环境之间的生态关系也维持相对的稳定,使得雅鲁藏布江中游支流河流生态健康状态较干流好. 浮游植物在水生态系统中处于食物链最底端^[16],因其体积小且对水环境的变化较敏感,相对于利用鱼类^[6]和水生高等植物^[10]构建生物完整性指数,基于 P-IBI 的评价或更有实效性,能快速反映河流水体质量及水生态系统健康状态,对于及时辨识河流生态风险、预测河流水环境恶化趋势具有一定参考价值.

3.4 水环境因子驱动河流生态健康状态

雅鲁藏布江中游干流浮游植物平均细胞丰度 ($7.83 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) 大于支流 ($1.62 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$),且具有显著差异 ($P < 0.01$). 有研究发现,河流的流速和流量的大小会对浮游植物的群落结构造成影响^[54],雅鲁藏布江中游干流流速 ($0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 小于支流 ($0.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 且差异显著,浮游植物细胞丰度与流速具有显著相关性 (图 7),原因可能是干流流速低,能给浮游植物提供相对稳定的生存空间,物种能对资源进行充分地利用;支流流速大且径流量小,相对于干流稳定性差,给浮游植物提供的资源和空间也相对较小,种间和种内竞争加剧而物种细胞丰度随之受影响,而浮游植物细胞丰度的变化将直接影响 P-IBI 评价结果. pH 能直接影响浮游植物自身的生理生化活动,还可以与水体中其它理化因子共同作用于藻类^[55,56],本研究 pH 均值丰水期大于枯水期,通过 Mantel 相关性分析,细胞丰度与 pH 具有相关性 (图 7),说明 pH 的大小是不同水文期浮游植物细胞丰度差异的影响因子之一,浮游植物细胞丰度的增加或减少会造成水体营养水平的变化^[17,57],可间接驱动河流生态系统的健康状态. 海拔能通过影响一个地区的温度、光照和降水等环境因素,间接影响河流生态系统^[58],研究区域平均海拔支流较干流高且河流冰冻期长,本研究浮游植物平均生物量为:干流 ($0.897 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 支流 ($0.372 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),浮游植物生物量与 WT 具有相关性 (图 7),可能是由于海拔高度的不同造成水温的差异间接影响了生物量的大小,而浮游植物生物量是决定水生态系统初级生产力大小的重要生物因素^[21]. 总体来说,雅鲁藏布江中游浮游植物结构是受河流水温、流速和 pH 等因素的综合影响,水环境

因子可通过影响河流生态系统中处于食物链底端的浮游植物群落稳定性,控制食物链中更高一级营养级的能量获取速率,间接影响河流生态系统的健康状态.

对雅鲁藏布江中游 P-IBI 值与水环境因子进行相关性分析,P-IBI 值与 EC 呈负相关,EC 可以反映水体中无机酸、碱、盐的含量^[59],EC 在一定程度上反映了河流两岸的利用情况,P-IBI 评价结果显示干流的样点水体 EC 较高且健康状态一般,可能是由于干流样点附近多为公路和城镇,人口相对于支流较密集,人类生产活动频繁引起水体中无机盐和悬浮物增加,河流中过量无机盐汇入能直接影响水生生物代谢水平^[60],使水体中生物多样性降低而使河流生态系统正反馈调节受阻,导致干流 P-IBI 值较低. 通过分析,P-IBI 值与流速呈正相关,一定的流速增大,有利于硅藻繁殖^[16],同时也会增加水中溶解氧的含量,促进浮游植物结构复杂化而 P-IBI 得分随之较高,这也可能是支流河流生态健康状态优于干流的因素之一. P-IBI 值与 TUR 呈负相关 (图 8),降水会在一定程度上增加河流悬浮物含量,使得水体 TUR 增大而影响水体的透光率,该流域丰水期降水较多且 TUR 也比枯水期高,可能是在低光照条件下,蓝藻相较于其他藻类更具竞争优势^[61],蓝藻的过度繁殖会破坏浮游植物种群结构的多样性,导致丰水期 P-IBI 值较低. P-IBI 值与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈显著负相关 (图 8),说明富营养化程度与生物完整性指数之间存在相关性,水环境中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度增加可以在一定程度上促进浮游植物优势种的繁殖^[62],也会使某些竞争力较弱的浮游植物得以生长^[63]. 在水流、温度和营养盐的作用下,种间竞争加剧,促使浮游植物群落结构变得不稳定,影响了更高一级食物链上其它生物的能量获取,进入河流生态系统的能量减小,水体中生物与生物之间、生物与环境之间的动态平衡被打破,河流生态生态系统的健康状态也会随之变差. 综上所述,水环境因子的差异能直接影响浮游植物生物完整性的评价结果,说明了水环境因子对河流生态系统健康状态的重要性,不仅能直接体现河流水质状况,还能通过影响水体中水生生物群落演替的方向和速率,参与和影响河流生态系统的物质循环和能量流动过程,驱动雅鲁藏布江中游河流生态健康状态.

4 结论

(1) 雅鲁藏布江中游水环境因子在丰水期的变化幅度较枯水期大 (极差),枯水期河流水体的稳定性较丰水期高,水环境因子在时间维度上异质性较

低,在空间维度有明显的差异, pH、WT、 NO_3^- -N、TUR、 v 和 TN 在干流和支流间均存在显著差异。

(2)雅鲁藏布江中游浮游植物群落呈硅藻-绿藻-蓝藻型特征,浮游植物平均细胞丰度和平均生物量大小为:丰水期 > 枯水期和干流 > 支流; pH 和 WT 是影响浮游植物时空分布特征的主要水环境因子。

(3)雅鲁藏布江中游丰水期和枯水期整体的生态健康状态为“健康-亚健康”,枯水期生态健康状态较丰水期好,支流生态健康状态较干流好; EC、TUR、WT、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 是影响雅鲁藏布江中游河流生态健康状态的主要水环境因子,通过影响水体中浮游植物群落结构特征及演替的方向和速率,参与和影响河流生态系统的物质循环和能量流动过程,直接或间接驱动了雅鲁藏布江中游河流生态健康状态。

致谢:感谢潘成梅、乔楠茜、次仁拉姆、扎西、旦增罗布和王素娟在采样和实验方面提供的帮助,感谢王俊伟、孟华旦尚和张鹏在数据处理和分析方面的指导。

参考文献:

- [1] Raven P J, Holmes, Dawson F H, *et al.* River Habitat Quality The physical character of rivers and stream in the UK and Isle of Man. River Habitat Survey Report No. 2 [M]. Bristol: Environment Agency, 1998.
- [2] 翟红娟. 纵向岭谷区水电工程胁迫对河流生态完整性影响的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2009.
- [3] Zhai H J. Study on the river ecological integrity under the threat of hydropower development in LRGR [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2009.
- [4] 水利部河长办印发河湖健康评价指南(试行)[J]. 水电站机电技术, 2020, **43**(9): 36.
- [5] 侯晓丽, 王云彪. 湿地生态风险评价中生物完整性指数研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(4): 3-8.
- [6] Hou X L, Wang Y B. Research progress of index of biotic integrity for ecological assessment in wetlands[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(4): 3-8.
- [7] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, **6**(6): 21-27.
- [8] 袁立来, 王晓梅, 杨文波, 等. 基于鱼类生物完整性指数的拒马河北京段河流健康评价[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(4): 160-169.
- [9] Yuan L L, Wang X M, Yang W B, *et al.* River ecosystem health evaluation of Juma River in Beijing based on fish-index of biotic integrity[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(4): 160-169.
- [10] 黄彬彬, 李光锦, 丰茂成, 等. 基于底栖动物生物完整性指数的赣江干流健康评价[J]. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(5): 30-36, 41.
- [11] Huang B B, Li G J, Feng M C, *et al.* Health assessment of Ganjiang River mainstream based on B-IBI[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, **31**(5): 30-36, 41.
- [12] 徐宗学, 刘麟菲. 基于着生藻类的渭河流域水生态系统健康评价[J]. 人民黄河, 2020, **42**(9): 123-129.
- [13] Xu Z X, Liu L F. Assessment on the aquatic ecosystem health of the Weihe River Basin based on periphyton[J]. Yellow River, 2020, **42**(9): 123-129.
- [14] 陈宇飞, 严航, 夏霆, 等. 基于浮游动物生物完整性指数的太湖流域生态系统评价[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, **44**(3): 335-343, 356.
- [15] Chen Y F, Yan H, Xia T, *et al.* Ecosystem assessment of Taihu Lake Basin based on zooplankton index of biological integrity[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, **44**(3): 335-343, 356.
- [16] Grabas G P, Blukacz-Richards E A, Permanen S. Development of a submerged aquatic vegetation community index of biotic integrity for use in Lake Ontario coastal wetlands[J]. Journal of Great Lakes Research, 2012, **38**(2): 243-250.
- [17] Li J P, Dong S K, Liu S L, *et al.* Effects of cascading hydropower dams on the composition, biomass and biological integrity of phytoplankton assemblages in the middle Lancang-Mekong River[J]. Ecological Engineering, 2013, **60**: 316-324.
- [18] 顾毓蓉, 薛庆举, 万翔, 等. 基于 P-IBI 因子分析法评价生态修复后松雅湖水生态状况[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26**(6): 1325-1334.
- [19] Gu Y R, Xue Q J, Wan X, *et al.* Aquatic ecosystem state evaluation based on P-IBI factor analysis in Songya Lake after ecological restoration [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, **26**(6): 1325-1334.
- [20] 蔡琨, 秦春燕, 李继影, 等. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价——以 2012 年冬季太湖为例[J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1431-1441.
- [21] Cai K, Qin C Y, Li J Y, *et al.* Preliminary study on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) assessment for lake ecosystem health: a case of Taihu Lake in Winter, 2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(5): 1431-1441.
- [22] 沈强, 俞建军, 陈晖, 等. 浮游生物完整性指数在浙江水源地水质评价中的应用[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(2): 26-31.
- [23] Sen Q, Yu J J, Chen H, *et al.* Planktonic index of biotic integrity (P-IBI) for water source assessment [J]. Journal of Hydroecology, 2012, **33**(2): 26-31.
- [24] 谭巧, 马芊芊, 李斌斌, 等. 应用浮游植物生物完整性指数评价长江上游河流健康[J]. 淡水渔业, 2017, **47**(3): 97-104.
- [25] Tan Q, Ma Q Q, Li B B, *et al.* Ecological health assessment of the upper reaches of the Yangtze River, based on biotic integrity index of phytoplankton[J]. Freshwater Fisheries, 2017, **47**(3): 97-104.
- [26] 刘涛. 藻类系统学[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [27] 沈毓芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [28] 张茉莉, 王恩瑞, 昌盛, 等. 珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4489-4501.
- [29] Zhang M L, Wang E R, Chang S, *et al.* Structural characteristics of phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in a group of drinking water reservoirs by water transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai[J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4489-4501.
- [30] 屈宁, 邓建明, 张祯, 等. 2015~2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3097-3105.
- [31] Qu N, Deng J M, Zhang Z, *et al.* Community structure of phytoplankton and environmental impact factors in Lake Hongze

- from 2015 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3097-3105.
- [20] 王俊颖, 夏雨, 于新平, 等. 赣江中下游浮游藻类时空分布特征及水质评价[J/OL]. *生态与农村环境学报*, <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0235>, 2022-10-25. Wang J J, Xia Y, Yu X P, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and water quality evaluation of planktonic algae in the middle and lower reaches of Ganjiang River[J/OL]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0235>, 2022-10-25.
- [21] 马牧源, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 白洋淀附着藻类的初级生产力及其与水质关系[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2): 443-456. Ma M Y, Cui L J, Zhang M Y, *et al.* Primary production of periphyton and their relationship to water quality in Baiyangdian Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 443-456.
- [22] 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 等. 晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4576-4586. Gao M D, Li Y F, Li Y L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community structure and their relationships with environmental factors in autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4576-4586.
- [23] 张静, 胡愈忻, 胡圣, 等. 长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2072-2082. Zhang J, Hu Y X, Hu S, *et al.* Environmental driving factors and assessment on the aquatic ecosystem of periphytic algae of six inflow Rivers in Yangtze River Basin[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2072-2082.
- [24] 张瑞, 徐宗学, 刘晓婉, 等. 1980-2015年雅鲁藏布江流域土地利用时空演变格局分析[J]. *中国农村水利水电*, 2019, (3): 106-111. Zhang R, Xu Z X, Liu X W, *et al.* Spatiotemporal characteristics of land use/cover change for the Yarlung Tsangpo River Basin from 1980 to 2015[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (3): 106-111.
- [25] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [26] 王塞, 王思诗, 樊凤雷. 基于时间序列分割算法的雅鲁藏布江流域 NDVI(1985-2018)变化模式研究[J]. *生态学报*, 2020, **40**(19): 6863-6871. Wang S, Wang S S, Fan F L. Change patterns of NDVI (1985—2018) in the Yarlung Zangbo River Basin of China based on time series segmentation algorithm[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(19): 6863-6871.
- [27] 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.
- [28] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏藻类[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [29] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [30] 胡鸿钧, 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.
- [31] Sun J, Liu D Y. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(11): 1331-1346.
- [32] Kremer C T, Gillette J P, Rudstam L G, *et al.* A compendium of cell and natural unit biovolumes for > 1200 freshwater phytoplankton species[J]. *Ecology*, 2014, **95**(10), doi: 10.1890/14-0603.1.
- [33] Margalef R. Perspectives in ecological theory[J]. *Oikos*, 1969, **20**(2): 571.
- [34] Shannon C E. The mathematical theory of communication[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1950, **3**(9): 31-32.
- [35] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, **13**: 131-144.
- [36] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**(2): 185-211.
- [37] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish (2nd ed.) [M]. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [38] 邹曦, 杨志, 郑志伟, 等. 长江干流典型区域河流生境健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(10): 2219-2228. Zou X, Yang Z, Zheng Z W, *et al.* Health assessment of river habitat in typical regions of the Yangtze River mainstream[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(10): 2219-2228.
- [39] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 928-936. Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 928-936.
- [40] 马廷婷, 范亚民, 李宽意, 等. 基于浮游植物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(4): 501-508. Ma T T, Fan Y M, Li K Y, *et al.* Ecological health assessment of main estuaries of Lake Taihu based on phytoplankton index of biotic integrity[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(4): 501-508.
- [41] 马芊芊. 以浮游生物完整性指数评价长江上游干流宜宾至江津段河流健康度[D]. 重庆: 西南大学, 2015. Ma Q Q. Assessment of ecosystem health of upper Yangtze River in Yibin to Jiangjin using plankton-index of biotic integrity[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [42] 王霞, 郭凯娟, 李晓旭, 等. 淀山湖浮游植物生物完整性指数的构建及水生态健康评价[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **50**(1): 39-49. Wang X, Guo K J, Li X X, *et al.* Construction of phytoplanktonic index of biotic integrity and evaluation of water ecological health in Dianshan Lake, China[J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 2021, **50**(1): 39-49.
- [43] 李博韬, 刘凌, 朱燕, 等. 利用浮游植物生物完整性对河流健康进行评价[J]. *人民黄河*, 2020, **42**(6): 73-78. Li B T, Liu L, Zhu Y, *et al.* Assessment of river health by using phytoplanktonic index of biotic integrity[J]. *Yellow River*, 2020, **42**(6): 73-78.
- [44] 陈虎林. 西藏麦地卡湿地水体水化学时空变化特征及其控制因素[D]. 拉萨: 西藏大学, 2020. Chen H L. Spatiotemporal variation characteristics of water chemistry and its controlling factors in Mitika Wetland, Tibet[D]. Lasa: Tibet University, 2020.
- [45] 赵文博. 韩江(梅州段)和珠江(广州段)浮游生物完整性评

- 价[D]. 保定: 河北大学, 2018.
- Zhao W B. Assessment of plankton integrity in the Hanjiang River (Meizhou Section) and the Pearl River (Guangzhou Section)[D]. Baoding: Hebei University, 2018.
- [46] 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 等. 长江三口-西洞庭湖环境因子对浮游植物群落组成的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(6): 2532-2540.
- Yan G H, Yin X Y, Wang X, *et al.* Effects of environmental factors on the composition of phytoplankton community in Sankou of the Yangtze River and the Western Dongting Lake[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(6): 2532-2540.
- [47] 李俊龙, 郑丙辉, 刘录三, 等. 长江口浮游植物群落特征及其与环境的响应关系[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(4): 403-409.
- Li J L, Zheng B H, Liu L S, *et al.* Phytoplankton community structure in the Yangtze River estuary and its relation to environmental factors[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(4): 403-409.
- [48] 李亚蒙, 赵琦, 冯广平, 等. 白洋淀硅藻分布及其与水环境的关系[J]. 生态学报, 2010, **30**(17): 4559-4570.
- Li Y M, Zhao Q, Feng G P, *et al.* The diatom assemblages and their response to different environments of Baiyangdian Lake, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(17): 4559-4570.
- [49] 魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 等. 青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1879-1888.
- Wei J W, Li H R, Wang X Z, *et al.* Structure characteristics and driving variables of epilithic algae community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1879-1888.
- [50] 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 等. 三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 535-546.
- Zhang J L, Zheng B H, Liu D F, *et al.* Succession pattern of phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and its driving factors[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 535-546.
- [51] 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 等. 三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1636-1647.
- Mi W M, Shi J Q, Yang Y J, *et al.* Changes in epilithic algae community and its relationship with environmental factors in the Meixi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1636-1647.
- [52] 陈红, 刘清, 潘建雄, 等. 瀾河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(1): 173-184.
- Chen H, Liu Q, Pan J X, *et al.* Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(1): 173-184.
- [53] 骆鑫, 蓝文陆, 李天深, 等. 钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(7): 2603-2613.
- Luo X, Lan W L, Li T S, *et al.* Distribution of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Qinzhou Bay in spring and summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(7): 2603-2613.
- [54] Myrsten M, Rocher-Ros G, Burrows R M, *et al.* Persistent nitrogen limitation of stream biofilm communities along climate gradients in the Arctic[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(8): 3680-3691.
- [55] 汪星, 刘录三, 李黎, 等. 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3403-3413.
- Wang X, Liu L S, Li L, *et al.* Correlation analysis of algae composition and environmental factors in Jingpo Lake[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(11): 3403-3413.
- [56] Schneider S C, Kahlert M, Kelly M G. Interactions between pH and nutrients on benthic algae in streams and consequences for ecological status assessment and species richness patterns[J]. Science of the Total Environment, 2013, **444**: 73-84.
- [57] 林碧琴, 谢淑琦. 水生藻类与水污染监测[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1988.
- [58] Tonkin J D, Shah R D T, Shah D N, *et al.* Metacommunity structuring in Himalayan streams over large elevational gradients: the role of dispersal routes and niche characteristics[J]. Journal of Biogeography, 2017, **44**(1): 62-74.
- [59] 王萍, 卢演涛, 丁国瑜, 等. 甘肃疏勒河冲积扇发育特征及其对构造活动的响应[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(1): 74-81.
- Wang P, Lu Y C, Ding G Y, *et al.* Response of the development of the Shule River alluvial fan to tectonic activity[J]. Quaternary Sciences, 2004, **24**(1): 74-81.
- [60] 杨锐婧, 冯民权. 浮游植物完整性指数与水体富营养化相关性研究—以漳泽水库为例[J]. 黑龙江大学工程学报, 2021, **12**(3): 198-208.
- Yang R J, Feng M Q. Correlation between phytoplankton index of biotic integrity and eutrophication—A case study of Zhangze Reservoir[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2021, **12**(3): 198-208.
- [61] Si J H, Feng Q, Wen X H, *et al.* Major ion chemistry of groundwater in the extreme arid region northwest China[J]. Environmental Geology, 2009, **57**(5): 1079-1087.
- [62] 葛优, 周彦锋, 王晨赫, 等. 阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 3027-3039.
- Ge Y, Zhou Y F, Wang C H, *et al.* Succession patterns of phytoplankton functional groups in western area of Yangcheng Lake and their relationship with environmental factors[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(7): 3027-3039.
- [63] 杨丽, 张玮, 尚光霞, 等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3158-3167.
- Yang L, Zhang W, Shang G X, *et al.* Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3158-3167.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)