

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}-O₃ 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, 刘思晗, 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)
基于高空间分辨率的郑州市城镇居民 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 O₃ 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, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO₂ 排放模拟 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 卓海华, 姜保锋, 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, 刘辉, 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, 胡愈焯, 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, 张淑娟, 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 (*Sinularia microclavata*) 共附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)
不同海拔鳧箭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, 魏卢璐, 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)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (2325)
磷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, 薛利祥, 曹国帅 (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)

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*

(西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 环境异质性在一定程度上不仅可以增加物种多样性, 而且影响了陆生生物群落的稳定性. 然而, 环境异质性如何影响水生生态系统附石硅藻群落的物种多样性却较少报道. 因此, 以三峡库区支流香溪河的附石硅藻为研究对象, 通过量化和比较香溪河在时间尺度上的环境异质性, 探究其在驱动物种多样性变化的作用. 结果表明, 环境异质性、分类 β -多样性和功能 β -多样性均表现为非蓄水期显著高于蓄水期, 且周转组分均对不同水文期 β -多样性贡献较大, 而分类 α -多样性则是蓄水期显著高于非蓄水期. 此外, 功能 α -多样性中除功能丰富度非蓄水期显著高于蓄水期外, 功能均匀度和功能分散度均无显著差异. 基于相似或相异度矩阵的多元回归(MRM)分析表明, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 是影响非蓄水期香溪河附石硅藻群落的关键环境异质因子, 而影响蓄水期香溪河附石硅藻群落的关键环境异质因子为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 和TP. 这表明三峡库区不同水文期的环境异质性显著影响附石硅藻的群落结构, 导致群落内物种发生分化, 影响了水生生态系统稳定性.

关键词: 环境异质性; 附石硅藻; 功能多样性; 分类多样性; 功能性状

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2083-10 DOI: 10.13227/j.hjcx.202206113

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, YANG Song-qi*, ZHENG Bao-hai, DU Yu-xin, LI Yu-xin, LI Jia-xin, SHI Jun-qiong, WU Zhong-xing*

(Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources in Three Gorges Reservoir Region, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Environmental heterogeneity can not only increase species diversity to some extent but also affect the stability of terrestrial communities. However, how environmental heterogeneity affects species diversity of epilithic diatom communities in aquatic ecosystems is rarely reported. In this study, therefore, epilithic diatoms and their roles in driving species diversity were explored by quantifying and comparing the environmental heterogeneity in Xiangxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir Area (TGR), on a time scale. The results showed that environmental heterogeneity, taxonomic β -diversity, and functional β -diversity in non-impoundment periods were significantly higher than those in impoundment periods. Moreover, the turnover components in the two hydrological periods showed the highest contribution to β -diversity. However, the taxonomic α -diversity in impoundment periods was significantly higher than that in non-impoundment periods. In addition, functional richness in functional α -diversity was significantly higher in non-impoundment periods than that in impoundment periods, whereas there was no significant difference in other functional α -diversity, i. e., functional dispersion and functional evenness, found between the two periods. Multiple regression on (dis)similarity matrices (MRM) analysis indicated that ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) and silicate ($\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$) were the key environmental heterogeneous factors affecting the epilithic diatom community in Xiangxi River during the non-impoundment periods, whereas the key heterogeneous factors were ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), silicate ($\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$), and total phosphorus (TP) during the impoundment periods. These results suggested that the environmental heterogeneity during different hydrological periods in TGR can significantly affect the community structure of epilithic diatoms, resulting in the differentiation of species within the community and even affecting the stability of aquatic ecosystems.

Key words: environmental heterogeneity; epilithic diatom; functional diversity; taxonomic diversity; functional trait

环境异质性是指一个区域单元内地区之间非生物条件的变化, 即地区之间的环境差异^[1]. 环境异质性普遍存在于生态系统中, 对生物群落结构有着一定的影响^[2]. 有研究表明, 高异质性的环境比低异质性的环境拥有更高的生态位分化, 并能允许更多的物种共存, 因此, 高异质环境往往具有较高的物种差异以及物种多样性^[3,4]. 然而, 近年来, 在人为干扰和全球气候变化的影响下, 环境异质性面临均质化的风险, 导致生物群落趋于均一化, 生物多样性降低, 如 Brustolin 等^[5]指出气候变化可能会使海洋群落的元群落结构简单化, 导致生物多样性丧失, 影响了海洋生态系统的稳定. 淡水湖泊研究也发现, 富

营养化降低了浅水湖泊的生物多样性, 并导致底栖生物同质化^[6,7]. 然而, 环境异质性对多样性的影响主要集中在陆地生态系统或水生动物^[8-11], 而对水生生态系统中藻类的物种多样性影响研究相对较少.

硅藻作为水生生态系统重要的初级生产者, 是食物网的重要组成部分, 对物质循环和能量流动起着至关重要的作用^[12,13]. 由于其生活史较短、分布广泛且对环境变化敏感^[14,15], 因而, 硅藻常作为指

收稿日期: 2022-06-09; 修订日期: 2022-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177055, 41877410)

作者简介: 纪璐璐(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生理生态学, E-mail: 1986689003@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqyang@hxxu.edu.cn; wuzhx@swu.edu.cn

示物种来评价水体环境,如梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)作为中-富营养水体的指示物种^[16],广缘小环藻(*Cyclotella bodanica*)则为酸性水体的指示种^[17].相对于浮游硅藻而言,附石硅藻生长位置相对固定,不能通过迁移或其他方式躲避不良环境^[18,19],因此,附石硅藻多样性的变化更能反映一定区域内的环境变化.然而,先前对附石硅藻的研究主要集中在其水体环境评价^[20,21]和水体营养阈值^[22]等方面,而对附石硅藻多样性变化的研究相对较少.

因此,本文以三峡库区支流香溪河附石硅藻为研究对象,通过分析环境因子与附石硅藻的关系,来量化环境异质性对附石硅藻多样性的影响及驱动作用,通过从环境异质性的角度解释三峡库区不同水文期附石硅藻多样性在时间尺度上的变化及响应机制,旨在为进一步研究环境异质性与生物多样性的关系提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河位于湖北省秭归县,是三峡水库近坝区的最大支流,入江口距三峡大坝约 32 km,受三峡大坝水位调度——冬蓄夏排的影响较大,属亚热带大陆性季风气候,年平均气温为 17.24℃,年平均降雨量约 1 100 mm,4 月开始,随着降水量的增加,河流进入汛期,雨季大都集中在 6~9 月,10 月以后进入枯水期,是典型的山区季节性河流^[23].

1.2 样品的采集与处理

本研究于 2020 年 7 月(非蓄水期)和 12 月(蓄水期)沿香溪河干流进行 2 次附石硅藻样品的采集.由于古夫镇附近存在几个梯级电站(古洞口电站、杨道口电站和白鸡河电站等),同时附石硅藻样品量较少,因此为了更好地阐明本文的研究目标,样点 S4 设置在古夫镇下游(图 1).参照美国环保署(EPA)附石藻类的采集方法^[24],每个样点随机选取 3~5 块直径为 10~20 cm 的石头,并在石头上选取半径为 2.7 cm 的固定面积,用尼龙刷刷取 5 个圆形随机获取样方的藻,获得藻液 250 mL,放入冰盒带回实验室处理.取 20 mL 上述藻液进行离心富集,经盐酸和过氧化氢处理去除有机质,反复洗涤离心后保存于 3 mL 酒精中^[25].取 0.1 mL 硅藻样品滴于盖玻片,并使用 Naphrax(RI = 1.74)制作永久装片.硅藻的鉴定和计数于奥林巴斯 BX-53 光学显微镜(奥林巴斯株式会社,东京,日本)在 100 倍油镜下进行,对于光镜下难以准确鉴定的种类,借助扫描电镜(FEI Quanta 450 FEG)进一步确定.藻类鉴定参

照文献^[26~33],计数采用 20 mm × 20 mm 计数框进行,最后按照相关公式算出附石硅藻数量^[34].

1.3 理化指标的测定

采样现场使用多参数水质测定仪 YSI ProPlus (YSI Inc, Yellow Springs, OH, USA),测定水温(WT)、酸碱度(pH)、浊度(Turb)、电导率(Cond)和溶解氧(DO)等参数.经纬度通过手持式 GPS 仪(佳明 DRIVE51)获取.水体流速(v)采用 LS45A 型旋杯式流速仪测定.铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、亚硝态氮(NO_2^--N)、溶解性总氮(TDN)、总氮(TN)、总磷(TP)、硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-}-\text{Si}$)、溶解性总磷(TDP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、高锰酸盐指数和叶绿素 a [浮游藻类叶绿素 a (P_Chla) 和附石藻类叶绿素 a (B_Chla)] 浓度等指标参照文献^[35]测定.

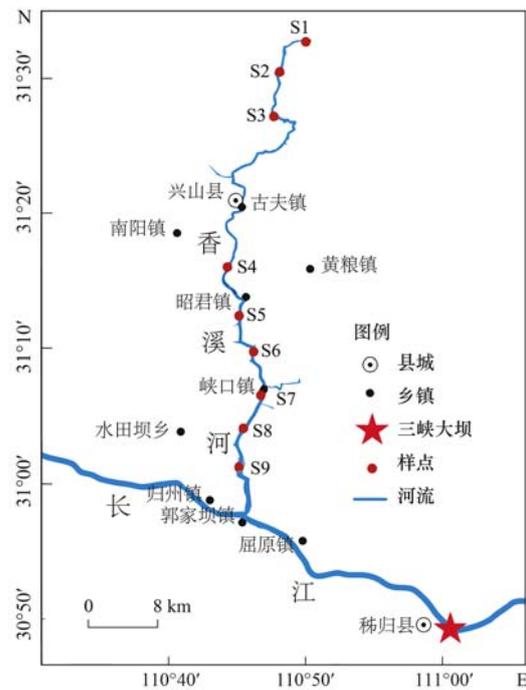


图 1 香溪河采样点位示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in Xiangxi River

1.4 数据处理与分析

1.4.1 环境异质性

为对环境异质性进行定量分析,通过计算基于欧几里得距离(Euclidean distance, Euc)的环境变量矩阵得到相异度(Ed)^[36].公式如下:

$$Ed = (Euc/Euc_{\max}) + 0.001$$

式中, Euc 为两个站点之间的欧几里得距离, Euc_{\max} 为整个数据集中所有成对距离的最大欧几里得距离,加上 0.001 是用于解释站点之间的零相似性.进而通过计算两次采样的环境指标相似矩阵的平均相异度(\overline{Ed}),量化两次采样的环境异质性.同时,利用

置换多元离散度(permutation multivariate dispersion, PERMDISP)方差分析检验两次采样的环境异质性是否具有显著差异。

1.4.2 α -多样性与 β -多样性

利用 Vegan 工具包计算: 丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J),以表示香溪河附石硅藻群落的分类 α -多样性指数;选取硅藻的大小、是否集群、生态习性、生物形态和附着特征等 5 种功能性状,使用 FD 包计算功能丰富度指数(FRic)、功能分散指数(FDis)和功能均匀度指数(FEve)^[37],用于表示功能 α -多样性。其中,功能丰富度能够反映底栖硅藻群落物种占据的功能生态位空间的大小,功能丰富度的高低代表着被底栖硅藻群落所利用资源的多少;功能分散度指数是指主要群落成员之间功能相似性的度量;功能均匀度指数是指群落内物种的功能性状分布的均匀程度^[38,39]。以 t 检验和 Wilcoxon 检验进行两次多样性指数的参数和非参数检验。通过对物种性状矩阵进行 Gower 距离转换,计算种间性状距离,之后选取主坐标分析(PCoA)降维之后的前 5 轴(累计解释率 > 90%)作为计算功能 β -多样性的性状,利用群落物种组成和功能性状的 Sørensen 不相似性分别表示分类 β -多样性和功能 β -多样性,并使用 betapart 工具包将两个时期附石硅藻群落的分类 β -多样性和功能 β -多样性分解为周转(turnover)与嵌

套(nestedness)组分^[40]。

1.4.3 环境异质因子对附石硅藻群落的驱动分析

为了降低稀有种对分析结果的影响,对物种数据进行 Hellinger 转化,并对环境变量进行 $\lg(x+1)$ 转化以提高数据的正态性和方差齐性^[41]。使用 Vegan 工具包进行 Mantel 检验,分析香溪河不同水文期附石硅藻群落相异度和环境异质性的相关性,并对经过共线性筛选后的环境因子进行基于相似或相异度矩阵的多元回归[multiple regression on (dis) similarity matrices, MRM],以评估驱动非蓄水期与蓄水期附石硅藻群落的关键环境异质因子以及对其影响的相对重要性^[42]。

2 结果与分析

2.1 不同水文期附石硅藻的群落特征

在两个水文期,共检出附石硅藻 41 属 150 种。其中,非蓄水期检出 94 种,蓄水期检出 107 种。不同水文期各样点在属水平的组成和分布上都存在着一定的差异(图 2),在非蓄水期,属水平的分布差异较大,其中碟星藻属(*Discostella*)和曲丝藻属(*Achnantheidium*)相对丰度较高,分别为 27.71% 和 20.56% [图 2(a)];而在蓄水期,属水平的分布差异较小,以菱形藻属(*Nitzschia*, 30.75%)和曲丝藻属(*Achnantheidium*, 26.06%)为主[图 2(b)]。

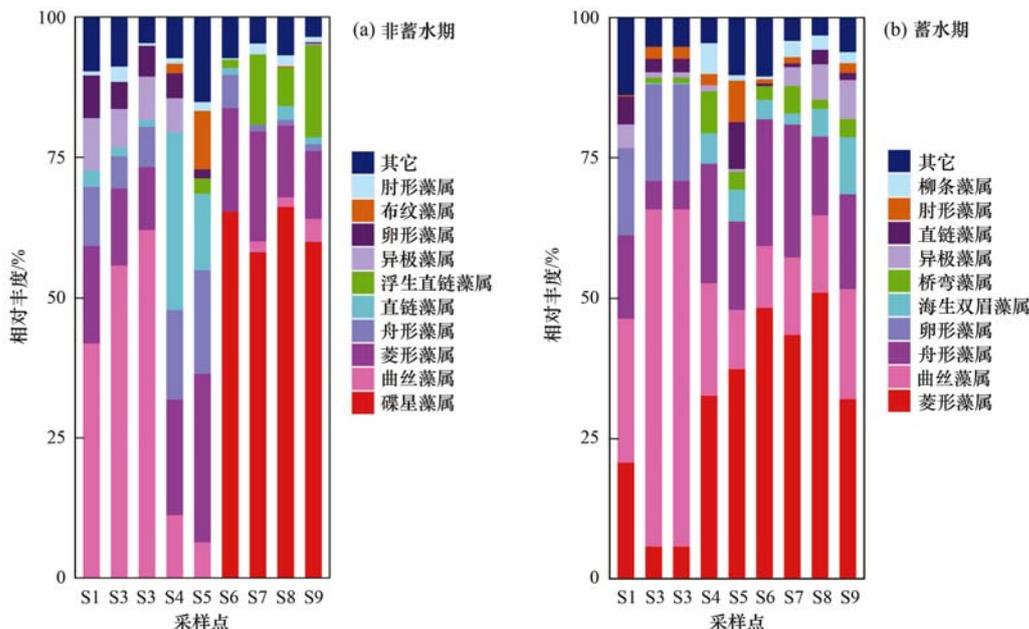


图 2 不同水文期附石硅藻的物种组成(属水平)

Fig. 2 Species composition of benthic diatoms during different hydrological periods (genus level)

2.2 不同水文期的水体理化特征与环境异质性

17 个环境因子中只有 NO_3^- -N、 SiO_3^{2-} -Si、 PO_4^{3-} -P、P_Chla、WT、pH 和 Cond 在不同水文期存

在显著差异($P < 0.05$),且非蓄水期的 WT、pH 和 P_Chla 较高,其余指标在蓄水期呈现较高趋势(表 1)。对比不同水文期的变异系数发现, v 均达到最

高值(蓄水期:119.25%;非蓄水期:115.68%),此外, P_Chla 、 B_Chla 、 TDP 和 NH_4^+-N 在非蓄水期呈现较高变异程度,进一步比较两个水文期的环境异质性发现,非蓄水期显著高于蓄水期($P < 0.05$)。

2.3 α -多样性与 β -多样性

为探究环境异质性对 α -多样性的影响,比较了不同水文期的分类 α -多样性和功能 α -多样性。香溪

河附石硅藻群落的物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数在蓄水期都要显著高于非蓄水期[$P < 0.05$,图3(a)~3(c)].通过计算功能 α -多样性可知,夏季的功能丰富度指数要显著高于冬季[$P < 0.05$,图3(d)],但功能均匀度指数和功能离散度指数在两个季节上的变化并不显著[$P > 0.05$,图3(e)和图3(f)].

表1 不同水文期各环境因子的变化及变异系数¹⁾

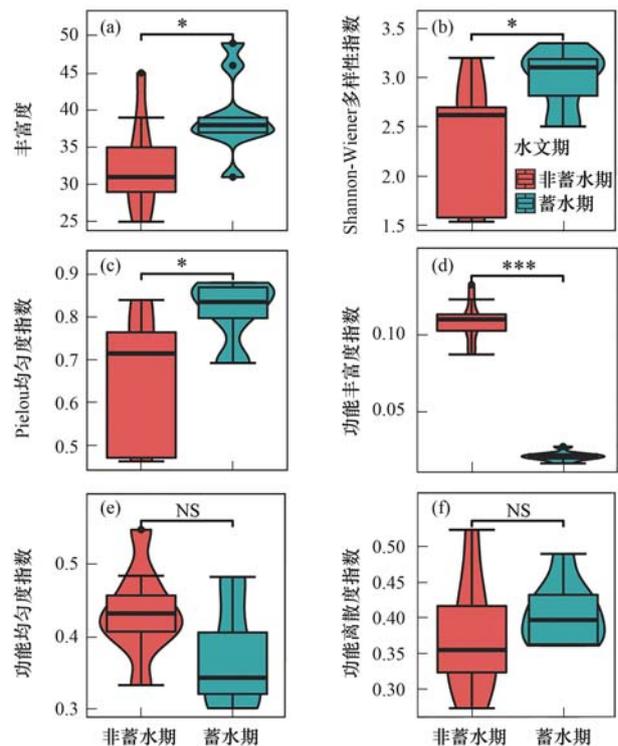
Table 1 Variation and variation coefficient of environmental factors during different hydrological periods

理化因子	非蓄水期	蓄水期	变异系数(CV)/%	
			非蓄水期	蓄水期
$\rho(TN)/mg \cdot L^{-1}$	2.30 ± 0.55	1.79 ± 0.67	24.05	37.33
$\rho(TDN)/mg \cdot L^{-1}$	1.54 ± 0.56	1.46 ± 0.57	36.02	38.96
$\rho(NH_4^+-N)/mg \cdot L^{-1}$	0.11 ± 0.06	0.09 ± 0.01	50.17	17.08
$\rho(NO_3^--N)/mg \cdot L^{-1}$	$0.72 \pm 0.3b$	$1.18 \pm 0.42a$	42.46	35.75
$\rho(NO_2^--N)/mg \cdot L^{-1}$	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.01	39.45	55.90
$\rho(SiO_3^{2--}Si)/mg \cdot L^{-1}$	$1.50 \pm 0.19b$	$3.43 \pm 0.6a$	12.51	17.35
$\rho(TP)/mg \cdot L^{-1}$	0.13 ± 0.04	0.11 ± 0.03	30.62	30.33
$\rho(TDP)/mg \cdot L^{-1}$	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.02	67.60	29.90
$\rho(PO_4^{3--}P)/mg \cdot L^{-1}$	$0.02 \pm 0.00b$	$0.04 \pm 0.02a$	32.06	40.06
$\rho(P_Chla)/\mu g \cdot L^{-1}$	$51.78 \pm 53.48a$	$2.17 \pm 0.93b$	103.29	42.83
$B_Chla/\mu g \cdot cm^{-2}$	34.21 ± 23.75	36.23 ± 14.44	69.43	39.84
高锰酸盐指数/ $mg \cdot L^{-1}$	2.19 ± 0.75	2.62 ± 0.76	34.44	28.98
WT/ $^{\circ}C$	$27.18 \pm 4.73a$	$14.87 \pm 3.21b$	17.40	21.60
DO/ $mg \cdot L^{-1}$	11.09 ± 0.75	9.63 ± 2.00	6.78	20.74
pH	$8.44 \pm 0.41a$	$7.99 \pm 0.18b$	4.88	2.28
Cond/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	$332.46 \pm 44.99b$	$368.94 \pm 17.17a$	13.53	4.65
$v/m \cdot s^{-1}$	0.37 ± 0.43	0.21 ± 0.25	115.68	119.25

1)不同小写字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)

为了解 β -多样性对环境异质性的响应情况,进行分类 β -多样性和功能 β -多样性的划分.分类 β -多样性分析结果表明[图4(a)],非蓄水期附石硅藻群落的分类 β -多样性显著高于蓄水期($P < 0.05$).同上,通过比较不同水文期的功能 β -多样性发现[图4(b)],不同水文期的功能 β -多样性也呈现出显著差异,且非蓄水期显著高于蓄水期($P < 0.05$).

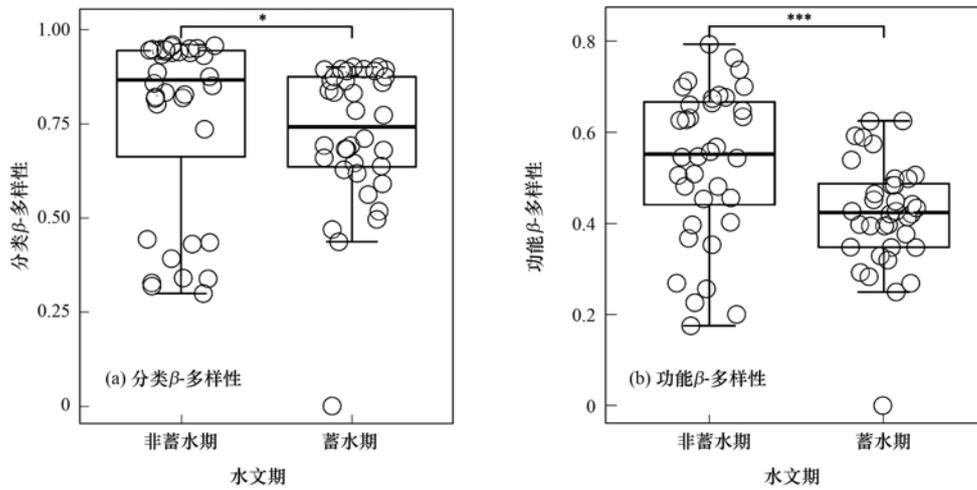
进一步对分类 β -多样性组分进行分解,结果表明,不同水文期的群落相似度均较高,分别达到72.69%和74.81%[图5(a)和图5(b)],且非蓄水期和蓄水期附石硅藻群落组成差异以物种周转过程为主,分别占群落总分类 β -多样性的79.51%和85.51%;而物种嵌套过程平均贡献分别为20.49%和14.49%[图5(a)和图5(b)].然而,附石硅藻群落的功能 β -多样性分解表明,不同水文期的功能相似度都较物种相似度低,分别为46.64%和58.07%[图5(c)和图5(d)],且功能 β -多样性均以相应的周转组分占优势.其中,非蓄水期的周转组分和嵌套组分均值分别为0.3457和0.1879[图5(c)],蓄水期分别为0.2328和0.1865[图5(d)].相对而言,非蓄水期的周转组



*表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.001$, NS表示无显著差异

图3 不同水文期的多样性指数

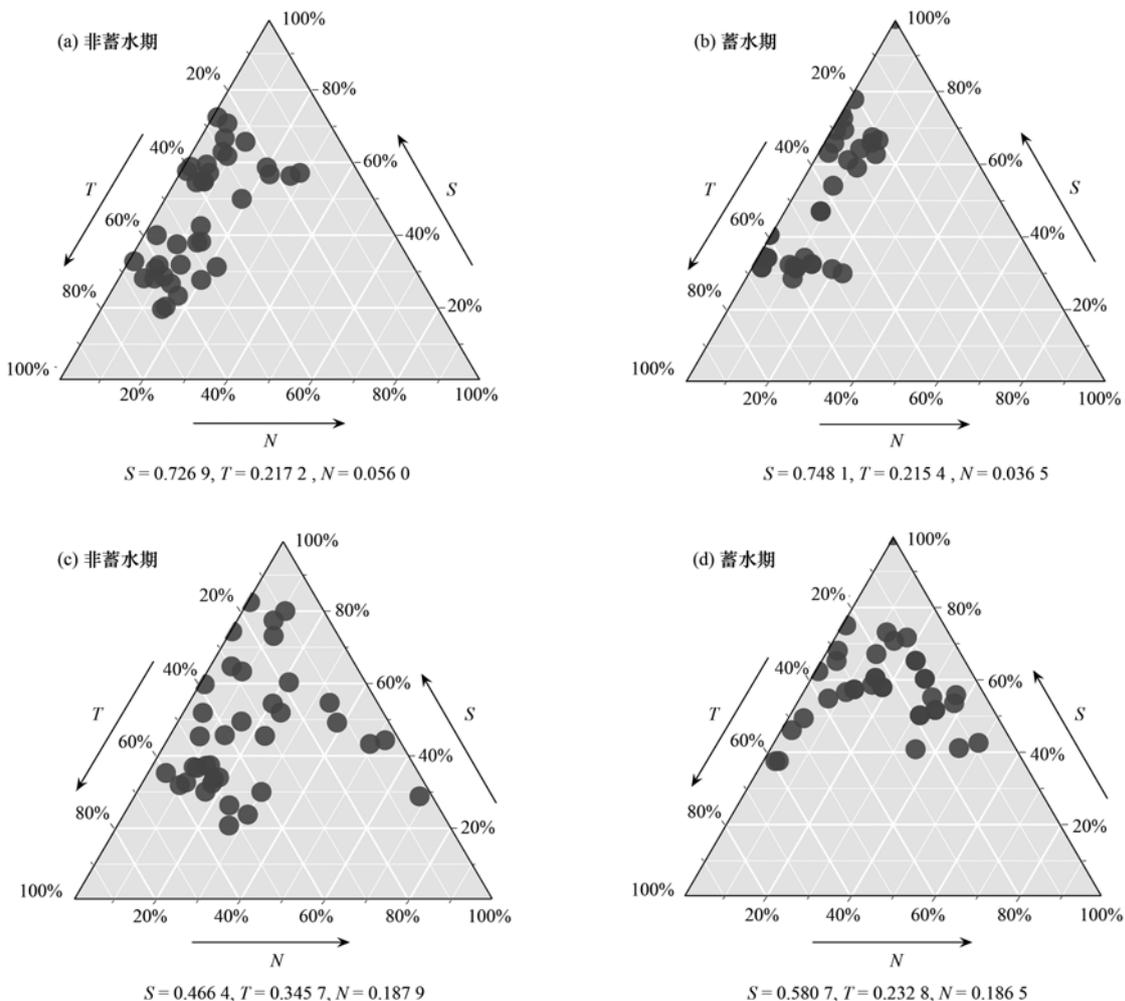
Fig. 3 Diversity index during different hydrological periods



* 表示 $P < 0.05$, *** 表示 $P < 0.001$

图 4 不同水文期的分类 β -多样性和功能 β -多样性

Fig. 4 Taxonomic β -diversity and functional β -diversity during different hydrological periods



(a) 和 (b) 为分类 β -多样性, (c) 和 (d) 为功能 β -多样性; S 为群落相似度, T 为周转组分, N 为嵌套组分

图 5 不同水文期分类 β -多样性和功能 β -多样性的组分分解

Fig. 5 Taxonomic β -diversity and functional β -diversity component decomposition during different hydrological periods

分对功能 β -多样性的平均贡献率 (62.45%) 明显高于蓄水期的周转组分对功能 β -多样性的平均贡献率 (55.52%), 说明功能 β -多样性的周转组分对

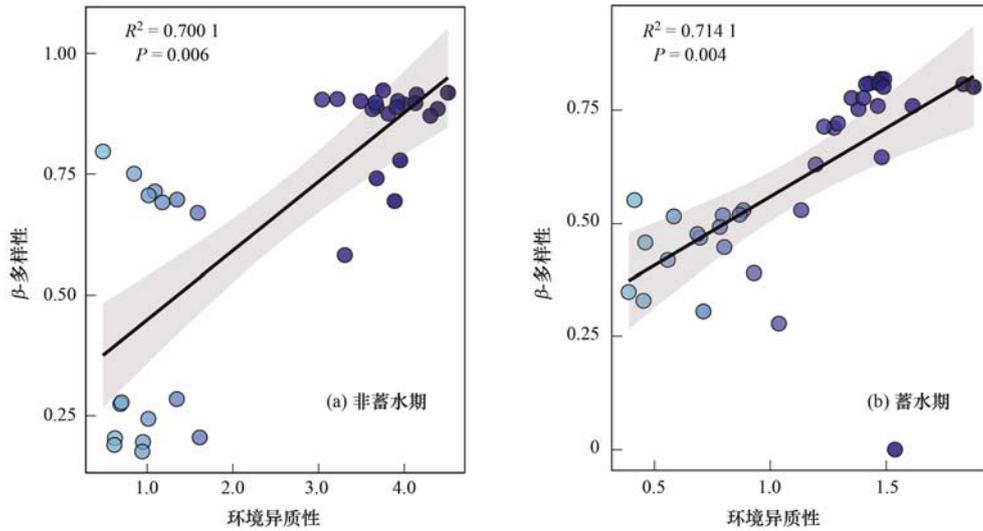
环境异质性的响应更强烈。

2.4 环境异质因子对附石硅藻群落的影响

Mantel 检验分析了两个时期环境异质性与附石

硅藻群落 β -多样性的关系,结果均呈显著正相关($P < 0.05$,图 6).为进一步明确在局域尺度上驱动两种水文时期附石硅藻群落物种变化的关键环境异质因子和相对贡献,进行 MRM 分析,结果表明, NH_4^+ -N和 SiO_3^{2-} -Si对香溪河非蓄水期附石硅藻群落有着显著的驱动作用,能够很好地解释群落内物种的变异($R^2 = 0.685$, $P < 0.05$,图 7),其中 NH_4^+ -N解

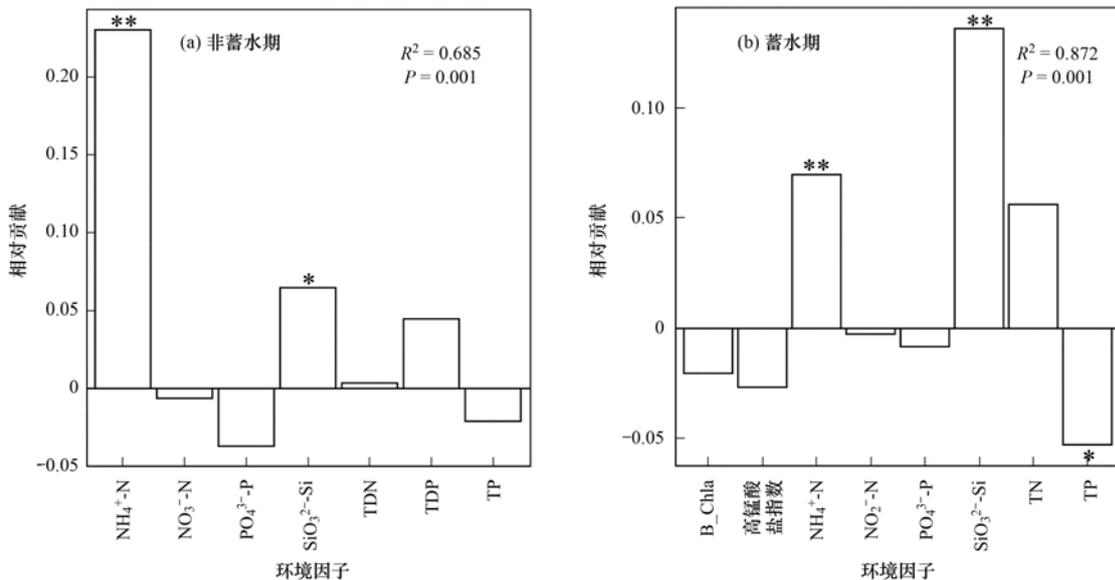
释群落相异性最重要的环境因子,而 SiO_3^{2-} -Si次之(图 7);在蓄水期,除了 NH_4^+ -N和 SiO_3^{2-} -Si是显著影响蓄水期硅藻群落物种差异的环境因子之外,TP也是有显著影响的环境因子,它们共同解释了群落内物种的变异($R^2 = 0.872$, $P < 0.05$,图 7),但与非蓄水期不同的是,蓄水期 SiO_3^{2-} -Si相对贡献高于 NH_4^+ -N.



圆圈颜色由浅到深表示环境异质性由小到大,黑线为拟合线,阴影部分为 95% 的置信区间

图 6 不同水文期环境异质性与附石硅藻群落 β -多样性的 Mantel 检验

Fig. 6 Mantel test of environmental heterogeneity and β -diversity of epilithic diatom community during different hydrological periods



* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

图 7 不同水文期环境异质因子对附石硅藻群落影响的相对贡献

Fig. 7 Relative contribution of environmental heterogeneity factors to epilithic diatom community during different hydrological periods

3 讨论

3.1 环境异质性对附石硅藻群落的影响

香溪河临近三峡大坝,受到大坝水位调度的显著影响(冬蓄夏排),使得蓄水期的水体环境较非蓄

水期而言更趋向于均一化和同质化^[43].因此,在本研究区域内,非蓄水期与蓄水期的环境异质性存在着显著差异,且非蓄水期显著高于蓄水期(表 2),而环境异质性也会对不同水文期附石硅藻群落造成一定的影响,使得群落的物种组成和分布均存在明显

不同(图 2).

表 2 不同水文期的环境异质性

水文期	环境异质性	F	P
非蓄水期	0.516	25.209	0.001
蓄水期	0.444		

物种多样性是群落的主要特征之一,体现了物种与物种之间以及物种与环境之间相关关系的复杂度^[44]. 在与环境异质性相关的生态假说中,异质性-多样性关系在过去几十年里得到了深入研究^[45,46],已有研究证明随着环境异质性的增加,物种越丰富,分类 α -多样性就越高^[47]. 本研究中,非蓄水期的环境异质性显著高于蓄水期,反而蓄水期的分类 α -多样性显著高于非蓄水期[图 3(a)~3(c)],推测分类 α -多样性可能不仅受到了非生物环境因素的影响,生物因素(生物竞争)也在其变化过程中起了很大的作用. 非蓄水期水体中浮游藻类生物量较高因为拥有较高的 P_Chla(表 1),而浮游藻类与附石硅藻对资源的竞争会对附石硅藻的多样性造成了一定的影响,使得附石硅藻的多样性格局发生改变. 赵斌等^[48]对浮游和底栖藻类的研究表明,浮游藻类与底栖藻类的分类 α -多样性指数的最大值会在时间尺度上出现明显分化,底栖藻类因为受到浮游藻类的影响最大值出现在冬末春初. 吉正元等^[49]也发现硅藻多在温度较低的季节生长繁殖. 对于功能 α -多样性,只有功能丰富度在两个时期表现出了显著差异,而功能均匀度与功能离散度并无显著差异[图 3(d)~3(f)],这是由于环境异质性的增加扩展了物种的可利用生态位空间,使得所利用的资源更丰富^[50],进而增加了功能丰富度.

环境异质性通常作为解释 β -多样性最重要的一部分^[51,52],因为在一定空间范围内随着环境异质性的增大,可以让不同物种适应的环境条件多样性增加,从而导致不同地点产生更大的物种组成差异^[53,54]. 本研究支持了前人的这一观点,即环境异质性在不同水文期的增加导致了分类 β -多样性的增加,加剧了物种组成的差异进而使功能 β -多样性出现相同的差异. 在本研究中,非蓄水期比蓄水期拥有更高的环境异质性,物种的分类 β -多样性和功能 β -多样性也表现为非蓄水期要显著高于蓄水期[图 5(a)和图 5(b)]. 环境异质性的加剧虽然增加了分类 β -多样性,但并未对分类 β -多样性的组成造成一定的影响,且都是由周转差异造成的,周转组分起了主导作用,分别占总分类 β -多样性的 79.51% 和 85.51% [图 5(a)和图 5(b)],进而导致了附石硅藻群落间共有物种的减少以及各样点独有物种的增

加^[55,56],而嵌套差异仅仅占了很小的一部分. 这与以往对大型底栖动物以及其他生物类群群落分类 β -多样性的研究相似^[40,56~60]. 与分类 β -多样性的结果类似的是,环境异质性的加剧也并未对功能 β -多样性的组成造成一定的影响. 通过对不同水文期的功能 β -多样性的分析得到,无论是非蓄水期还是蓄水期都是周转组分在功能 β -多样性中起了主导作用,但整体上环境异质性及其在不同水文期的变化对功能 β -多样性的影响要强于分类 β -多样性,这表明附石硅藻可以在不同的环境中表现出不同的性状组合以适应外界环境的变化,这也同时增加了周转组分在附石硅藻群落的功能 β -多样性中的相对重要性[图 5(c)和图 5(d)].

3.2 驱动附石硅藻群落变化的关键环境异质因子

距离衰减模型是描述环境异质性与群落相似性之间关系的重要模型^[61]. 孙胜浩等^[43]发现澜沧江的浮游与底栖硅藻群落的相似性都与环境异质性有着显著的衰减关系. Wetzel 等^[62]也得出巴西内格罗河中的浮游和底栖硅藻群落均符合距离衰减模型. 与前人研究的结果一致,本文发现香溪河两个时期附石硅藻群落在一定区域内都遵循距离衰减模型,即一定区域内的环境异质性越大,相似性越小, β -多样性越大(图 6).

环境因素在附石硅藻群落的变化中有着很大的作用,在不同环境的条件下,群落的结构组成会发生相应变化,其环境的驱动因子也会出现一定的差异^[43,63]. 在本研究中, NH_4^+ -N 和 SiO_3^{2-} -Si 是共同影响香溪河非蓄水期与蓄水期附石硅藻群落的关键环境因子,除此之外,TP 对蓄水期的附石硅藻群落有着显著的驱动作用(图 7). 它们能够很好地解释附石硅藻群落的变异,并且随着环境异质性的改变,环境驱动因子的相对重要性也发生了相应的变化(图 7). 殷大聪等^[64]也指出 SiO_3^{2-} -Si 在硅藻的生长繁殖过程中有着不可或缺的作用. 同时,也有研究得出 N、P 是影响硅藻群落重要的环境因子^[65~67],这与本研究的结果一致. 在蓄水期,由于处在冬季其 WT 较低更适合硅藻的生长繁殖^[49],并且其受到来自浮游植物竞争主要营养盐的压力更小. 因此,主要受到关键营养因子 SiO_3^{2-} -Si、 NH_4^+ -N 和 TP 的驱动作用. 然而与蓄水期相比,非蓄水期 WT 较高更适合浮游植物尤其是蓝藻的生长,附石硅藻群落受到的竞争压力较大,生长受到抑制,此时 SiO_3^{2-} -Si 对其的驱动作用的相对贡献也较小. 虽然驱动的附石硅藻群落的关键环境异质因子会随着环境异质性出现一定的变化,但都受到关键营养因子的驱动^[68,69].

4 结论

(1) 两个水文期, 共检出附石硅藻 41 属 150 种. 其中, 非蓄水期检出 94 种, 属水平的分布差异较大; 蓄水期检出 107 种, 属水平的分布差异较小.

(2) 非蓄水期环境异质性、附石硅藻群落分类 β -多样性和功能 β -多样性显著高于蓄水期, 但分类 α -多样性与功能 α -多样性更易受到其他因素的影响, 并未表现出显著差异.

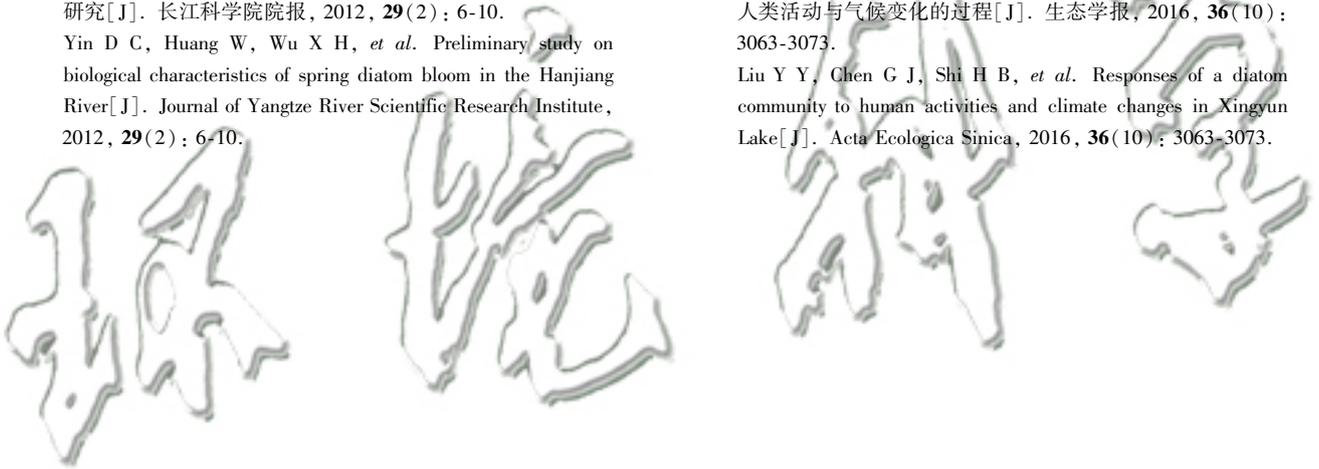
(3) 周转过程是驱动香溪河附石硅藻分类 β -多样性和功能 β -多样性的主要组分. 其中, NH_4^+ -N 和 SiO_3^{2-} -Si 是驱动非蓄水期附石硅藻群落物种变化的关键环境异质因子, 而驱动蓄水期附石硅藻群落物种变化的关键环境异质因子是 NH_4^+ -N、 SiO_3^{2-} -Si 和 TP.

参考文献:

- [1] Anderson M J, Ellingsen K E, McArdle B H. Multivariate dispersion as a measure of beta diversity [J]. *Ecology Letters*, 2006, **9**(6): 683-693.
- [2] Chesson P. Mechanisms of maintenance of species diversity [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, **31**: 343-366.
- [3] Hortal J, Triantis K A, Meiri S, *et al.* Island species richness increases with habitat diversity [J]. *The American Naturalist*, 2009, **174**(6): E205-E217.
- [4] Yang Z Y, Liu X Q, Zhou M H, *et al.* The effect of environmental heterogeneity on species richness depends on community position along the environmental gradient [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep15723.
- [5] Brustolin M C, Nagelkerken I, Ferreira C M, *et al.* Future ocean climate homogenizes communities across habitats through diversity loss and rise of generalist species [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(10): 3539-3548.
- [6] Zhang Y, Cheng L, Li K Y, *et al.* Nutrient enrichment homogenizes taxonomic and functional diversity of benthic macroinvertebrate assemblages in shallow lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**(3): 1047-1058.
- [7] Donohue I, Jackson A L, Pusch M T, *et al.* Nutrient enrichment homogenizes lake benthic assemblages at local and regional scales [J]. *Ecology*, 2009, **90**(12): 3470-3477.
- [8] Lundholm J T. Plant species diversity and environmental heterogeneity: spatial scale and competing hypotheses [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, **20**(3): 377-391.
- [9] Tamme R, Hiiesalu I, Laanisto L, *et al.* Environmental heterogeneity, species diversity and co-existence at different spatial scales [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2010, **21**(4): 796-801.
- [10] Lv T, Wang N J, Xie L, *et al.* Environmental heterogeneity affecting community assembly patterns and phylogenetic diversity of three forest communities at Mt. Huangshan, China [J]. *Forests*, 2022, **13**(1), doi: 10.3390/f13010133.
- [11] Cibic T, Comici C, Bussani A, *et al.* Benthic diatom response to changing environmental conditions [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, **115**: 158-169.
- [12] Pinckney J L. A mini-review of the contribution of benthic microalgae to the ecology of the continental shelf in the South Atlantic Bight [J]. *Estuaries and Coasts*, 2018, **41**(7): 2070-2078.
- [13] Thornton D C O, Dong L F, Underwood G J C, *et al.* Factors affecting microphytobenthic biomass, species composition and production in the Colne Estuary (UK) [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **27**(3): 285-300.
- [14] Hambrook J A. Bioassessment of stream-water quality using benthic and planktonic algae collected along an urban intensity gradient in the Eastern Cornbelt Plains Ecoregion, Ohio, USA [J]. *Journal of Phycology*, 2002, **38**(S1): 14-15.
- [15] Jamoneau A, Passy S I, Soiminen J, *et al.* Beta diversity of diatom species and ecological guilds: response to environmental and spatial mechanisms along the stream watercourse [J]. *Freshwater Biology*, 2018, **63**(1): 62-73.
- [16] 商志文, 田立柱, 王宏, 等. 渤海湾中北部表层沉积硅藻分布及环境指示意义 [J]. *中国地质*, 2012, **39**(4): 1099-1107.
- Shang Z W, Tian L Z, Wang H, *et al.* Diatom assemblages from surficial sediments in north-central Bohai Bay and their implications for environments [J]. *Geology in China*, 2012, **39**(4): 1099-1107.
- [17] Amano Y, Takahashi K, Machida M. Competition between the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* and the diatom *Cyclotella* sp. under nitrogen-limited condition caused by dilution in eutrophic lake [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2012, **24**(4): 965-971.
- [18] Kelly M G, Whitton B A. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1995, **7**(4): 433-444.
- [19] Hirst H, Jüttner I, Ormerod S J. Comparing the responses of diatoms and macro-invertebrates to metals in upland streams of Wales and Cornwall [J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(9): 1752-1765.
- [20] 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 等. 长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 3998-4007.
- Hu Y X, Cao L, Qu R C, *et al.* Community composition and assessment of the aquatic ecosystem of periphytic algae in the Yangtze River Basin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3998-4007.
- [21] 赵杨, 陆欣鑫, 马煜, 等. 阿什河流域底栖硅藻群落特征及水环境健康评价 [J]. *海洋与湖泊*, 2020, **51**(2): 307-317.
- Zhao Y, Lu X X, Ma Y, *et al.* Benthic diatom community characteristics in Ashi River Basin and aquatic environmental health assessment [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, **51**(2): 307-317.
- [22] 汤婷, 任泽, 唐涛, 等. 基于附石硅藻的三峡水库入库支流氮、磷阈值 [J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(8): 2670-2678.
- Tang T, Ren Z, Tang T, *et al.* Total nitrogen and total phosphorus thresholds for epilithic diatom assemblages in inflow tributaries of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(8): 2670-2678.
- [23] 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 等. 香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3077-3087.
- Chen S S, Li W M, Zhang K, *et al.* Distribution characteristics of microplastics and their migration patterns in Xiangxi River Basin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3077-3087.
- [24] Delgado C, Pardo I. Comparison of benthic diatoms from Mediterranean and Atlantic Spanish streams: community changes in relation to environmental factors [J]. *Aquatic Botany*, 2015, **120**: 304-314.

- [25] Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1990, **4** (1): 87-90.
- [26] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [27] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志-第十二卷-硅藻门, 异极藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [28] 李家英, 齐雨藻. 中国淡水藻志-第十四卷-硅藻门, 舟形藻科(I)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [29] 施之新. 中国淡水藻志-第十六卷-硅藻门, 桥弯藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [30] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [31] 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.
- [32] 刘静, 韦桂峰, 胡韧, 等. 珠江水系东江流域底栖硅藻图集[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [33] 水利部水文局, 长江流域环境监测中心. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [34] Abrantes F, Lopes C, Mix A, *et al.* Diatoms in Southeast Pacific surface sediments reflect environmental properties [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, **26**(1-2): 155-169.
- [35] 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.
- [36] Huber P, Metz S, Unrein F, *et al.* Environmental heterogeneity determines the ecological processes that govern bacterial metacommunity assembly in a floodplain river system [J]. *The ISME Journal*, 2020, **14**(12): 2951-2966.
- [37] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits [J]. *Ecology*, 2010, **91**(1): 299-305.
- [38] 江小雷, 张卫国. 功能多样性及其研究方法[J]. *生态学报*, 2010, **30**(10): 2766-2773.
Jiang X L, Zhang W G. Functional diversity and its research method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(10): 2766-2773.
- [39] 帅方敏, 李新辉, 陈方灿, 等. 淡水鱼类功能多样性及其研究方法[J]. *生态学报*, 2017, **37**(15): 5228-5237.
Shuai F M, Li X H, Chen F C, *et al.* Functional diversity of freshwater fishes and methods of measurement [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(15): 5228-5237.
- [40] Bevilacqua S, Terlizzi A. Nestedness and turnover unveil inverse spatial patterns of compositional and functional β -diversity at varying depth in marine benthos [J]. *Diversity and Distributions*, 2020, **26**(6): 743-757.
- [41] Varol M. Phytoplankton functional groups in a Monomictic Reservoir: seasonal succession, ecological preferences, and relationships with environmental variables [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(20): 20439-20453.
- [42] Wang X B, Lü X T, Yao J, *et al.* Habitat-specific patterns and drivers of bacterial β -diversity in China's drylands [J]. *The ISME Journal*, 2017, **11**(6): 1345-1358.
- [43] 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 等. 澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5458-5469.
Sun S H, Chen J, Wang P F, *et al.* Biogeographic distribution patterns of diatoms in Lancang River and their key drivers [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5458-5469.
- [44] 陈康, 孟子豪, 李学梅, 等. 江西柘林水库鱼类群落结构及功能多样性分析[J]. *生态学报*, 2022, **42**(11): 4592-4602.
Chen K, Meng Z H, Li X M, *et al.* Community structure and functional diversity of fishes in Zhelin Reservoir, Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(11): 4592-4602.
- [45] Mazijk R, Cramer M D, Verboom G A. Environmental heterogeneity explains contrasting plant species richness between the South African Cape and southwestern Australia [J]. *Journal of Biogeography*, 2021, **48**(8): 1875-1888.
- [46] Reynolds H L, Hungate B A, Chapin III F S, *et al.* Soil heterogeneity and plant competition in an annual grassland [J]. *Ecology*, 1997, **78**(7): 2076-2090.
- [47] Tews J, Brose U, Grimm V, *et al.* Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures [J]. *Journal of Biogeography*, 2004, **31**(1): 79-92.
- [48] 赵斌, 胡炜, 李成林, 等. 刺参养殖池塘浮游和底栖藻类群落及水质特征[J]. *广西科学院学报*, 2020, **36**(4): 399-405.
Zhao B, Hu W, Li C L, *et al.* Community structure of phytoplankton and benthophyte in *Apostichopus japonicus* aquaculture ponds and water quality characteristics [J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2020, **36**(4): 399-405.
- [49] 吉正元, 刘绍俊. 抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(4): 67-77.
Ji Z Y, Liu S J. Phytoplankton community structure, related influencing factors and the evaluation of water quality in the Fuxian Lake [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 67-77.
- [50] Zorzal-Almeida S, Bini L M, Bicudo D C. Beta diversity of diatoms is driven by environmental heterogeneity, spatial extent and productivity [J]. *Hydrobiologia*, 2017, **800**(1): 7-16.
- [51] Heino J. The importance of metacommunity ecology for environmental assessment research in the freshwater realm [J]. *Biological Reviews*, 2013, **88**(1): 166-178.
- [52] Braghin L S M, Figueiredo B R S, Meurer T, *et al.* Zooplankton diversity in a dammed river basin is maintained by preserved tributaries in a tropical floodplain [J]. *Aquatic Ecology*, 2015, **49**(2): 175-187.
- [53] Heino J, Melo A S, Bini L M. Reconceptualising the beta diversity-environmental heterogeneity relationship in running water systems [J]. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(2): 223-235.
- [54] Leibold M A, Holyoak M, Mouquet N, *et al.* The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology [J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(7): 601-613.
- [55] Lennon J J, Koleff P, Greenwood J J D, *et al.* The geographical structure of British bird distributions: diversity, spatial turnover and scale [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2001, **70**(6): 966-979.
- [56] Williams P H. Mapping variations in the strength and breadth of biogeographic transition zones using species turnover [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1996, **263**(1370): 579-588.
- [57] Barros F, Blanchet H, Hammerstrom K, *et al.* A framework for investigating general patterns of benthic β -diversity along estuaries [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, **149**: 223-231.
- [58] Bottero M A S, Jaubet M L, Llanos E N, *et al.* Spatial-temporal variations of a SW Atlantic macrobenthic community affected by a chronic anthropogenic disturbance [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **156**, doi: 10.1016/j.marpollbul.2020.111189.
- [59] Soiminen J, Heino J, Wang J J. A meta-analysis of nestedness and turnover components of beta diversity across organisms and ecosystems [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, **27**(1): 96-109.

- [60] 张东, 宛凤英, 储玲, 等. 青弋江鱼类分类群和功能群的 α 和 β 多样性纵向梯度格局[J]. 生物多样性, 2018, **26**(1): 1-13.
Zhang D, Wan F Y, Chu L, *et al.* Longitudinal patterns in α and β diversity of the taxonomic and functional organizations of stream fish assemblages in the Qingyi River[J]. Biodiversity Science, 2018, **26**(1): 1-13.
- [61] Wang J W, Liu Q X, Zhao X F, *et al.* Molecular biogeography of planktonic and benthic diatoms in the Yangtze River [J]. Microbiome, 2019, **7**, doi: 10.1186/s40168-019-0771-x.
- [62] Wetzel C E, de C. Bicudo D, Ector L, *et al.* Distance decay of similarity in neotropical diatom communities [J]. PLoS One, 2012, **7**(9), doi: 10.1371/journal.pone.0045071.
- [63] 李巧玉, 刘瑞, 向荣, 等. 三峡库区支流底栖硅藻功能群特征及其驱动因子分析——以汝溪河为例[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1464-1472.
Li Q Y, Liu R, Xiang R, *et al.* Functional group characteristics of benthic diatoms and its driving factors in the branch of three gorges reservoir: a case study of Ruxi River[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(6): 1464-1472.
- [64] 殷大聪, 黄薇, 吴兴华, 等. 汉江水华硅藻生物学特性初步研究[J]. 长江科学院院报, 2012, **29**(2): 6-10.
Yin D C, Huang W, Wu X H, *et al.* Preliminary study on biological characteristics of spring diatom bloom in the Hanjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, **29**(2): 6-10.
- [65] 杨佳星, 蔡德所, 姚文婷, 等. 基于 GAM 模型的硅藻群落与环境因子相关性分析[J]. 人民长江, 2020, **51**(6): 43-48.
Yang J X, Cai D S, Yao W T, *et al.* Analysis on correlation of diatom community and environmental factors in Longjiang River based on GAM model [J]. Yangtze River, 2020, **51**(6): 43-48.
- [66] 吴兴华, 殷大聪, 李翀, 等. 2015-2016 年汉江中下游硅藻水华发生成因分析[J]. 水生态学杂志, 2017, **38**(6): 19-26.
Wu X H, Yin D C, Li C, *et al.* Analysis of factors influencing diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2017, **38**(6): 19-26.
- [67] 董金利, 庄惠如, 占美伶, 等. 氮、磷营养盐对底栖硅藻的生长及生化组成影响[J]. 生物技术, 2010, **20**(2): 64-67.
Dong J L, Zhuang H R, Zhan M L, *et al.* Effects of nitrate and phosphate on growth and biochemical composition of benthic diatom [J]. Biotechnology, 2010, **20**(2): 64-67.
- [68] Liu S R, Xie G X, Wang L Z, *et al.* Different roles of environmental variables and spatial factors in structuring stream benthic diatom and macroinvertebrate in Yangtze River Delta, China [J]. Ecological Indicators, 2016, **61**: 602-611.
- [69] 刘园园, 陈光杰, 施海彬, 等. 星云湖硅藻群落响应近现代人类活动与气候变化的过程[J]. 生态学报, 2016, **36**(10): 3063-3073.
Liu Y Y, Chen G J, Shi H B, *et al.* Responses of a diatom community to human activities and climate changes in Xingyun Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(10): 3063-3073.



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-qi, 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-ping, 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-ling, <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)