

洪安河秀山段浮游生物的群落结构、 功能群特征与环境因子的关系^{*}

齐宗强¹, 黄家鑫¹, 王自薇¹, 董霄汉¹, 沈彦君¹, 左 庆²

(1. 重庆师范大学 生命科学学院 水生态健康与环境安全实验室, 重庆 401331;

2. 重庆中医药学院 数智中医药创新研究院, 重庆 402760)

摘要:为探究重庆市洪安河秀山段浮游生物的群落结构、功能群特征与环境因子的关系,于 2025 年 6 月对该河段干支流 12 个采样点的浮游生物进行采样并从分类学与功能群这 2 个维度进行分析,同时测定了有关环境因子。结果显示:1) 共鉴定出浮游植物 8 门 334 种,其中硅藻门(Bacillariophyta)物种数量占比最高,达 52.10%;划分出 24 类浮游植物功能群,其中以沿岸底栖硅藻功能群为主。共鉴定出浮游动物 4 类 84 种,其中轮虫类物种数量占比最高,为 48.81%;划分出 6 类浮游动物功能群,其中以原生动物滤食者为主。2) 从空间分布上看,干流浮游生物群落多样性高、稳定性强,呈现多功能群共存特征;支流浮游生物群落多样性低,群落结构为耐污型简化结构。3) 关键环境驱动因子中,总氮、总磷、氨氮、溶解氧、叶绿素 a 等因子共同塑造了干支流群落差异,海拔差异则进一步放大了局部群落分化。研究结果揭示了环境压力梯度下洪安河秀山段浮游生物的适应性响应机制,为该河段的水生态保护与干支流差异化管理提供了关键科学依据。

关键词:洪安河;浮游生物;群落结构;功能群;环境因子;重庆

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2026)04-0081-13

浮游生物主要包括浮游植物和浮游动物,是水域生态系统的重要组成部分,承担着物质循环与能量流动的基础作用,对维持水域生态结构与功能具有重要意义^[1-3]。由于浮游生物对环境变化高度敏感,因而它们的群落结构及动态变化常被用作重要的水质生物学评价指标^[4-5]。浮游植物作为水生态系统中的初级生产者,在维持水体能量流动与物质循环中扮演着基础性角色^[6]。已有研究表明,浮游植物群落的组成与结构受多种环境因子的影响^[7-8],例如在溶解氧(dissolved oxygen, DO)充足的水体中,浮游植物多样性通常较高且群落结构更稳定^[9-10]。氮磷营养盐是调控浮游植物群落结构的关键营养因子,它们在水体中的含量变化对浮游植物的种群组成和生物量有明显影响^[11-12]。作为初级消费者,浮游动物的群落结构受到水体理化因子的影响,且不同类群浮游动物对环境变化的响应模式存在明显差异^[6]。浮游生物对环境变化的响应机制具有复杂性,浮游生物群落的形成和稳定对整个河流生态系统的功能具有重要意义^[13]。功能群作为一种基于生态功能的浮游生物归类方法^[14],能够有效反映不同类群浮游生物对复杂生境的适应性及它们对环境因子的响应差异^[15-16]。同时,功能群分析从资源利用策略角度克服了传统分类学依赖物种亲缘关系的局限性^[17],进而为系统解析浮游生物与环境因子的内在耦合关系提供了更为科学的研究途径。

洪安河秀山段地处武陵山区,独特的 3 省(直辖市)跨界地理格局使它成为了连接重庆市、湖南省及贵州省的重要生态廊道。受多因素交织影响,该河段干支流生境存在明显的环境压力梯度,为探究浮游生物对环境压力的响应提供了理想的研究场景。本研究于 2025 年 6 月对洪安河秀山段干支流进行了系统调查,解析了该河段浮游生物的群落结构、功能群组成、多样性等特征的空间变化规律,明确了它们沿干流一支流梯度的分布格局,厘清了它们同多种环境因子的关联和关键环境驱动因子,从而为当地流域水生态保护与恢复提供科学依据和基础数据。

^{*} 收稿日期:2025-12-04 修回日期:2026-04-30 网络出版时间:2026-07-22T17:05

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 32202939);重庆市科技创新能力建设项目(No. CSTB2025NSCQ-GPX0992)

第一作者简介:齐宗强,男,研究方向为淡水水域生态,E-mail:2025110513084@stu.cqnu.edu.cn;通信作者简介:沈彦君,男,副教授,博士,E-mail:shenyanjun@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260722.1601.006

1 材料与方法

1.1 研究河段概况和采样点分布

洪安河发源于贵州省松桃县九龙乡庵堂坡,且沿西南—东北方向流动,于重庆市秀山土家族苗族自治县洪安镇汇入花垣河。洪安河秀山段干流全长约 30 公里,流域面积 221 km²。结合洪安河秀山段流域的生境特点,本研究于 2025 年 6 月在该河段干支流共设置 12 个采样点(断面),其中 8 个位于干流、4 个位于支流,它们的编号和具体位置如图 1 所示。

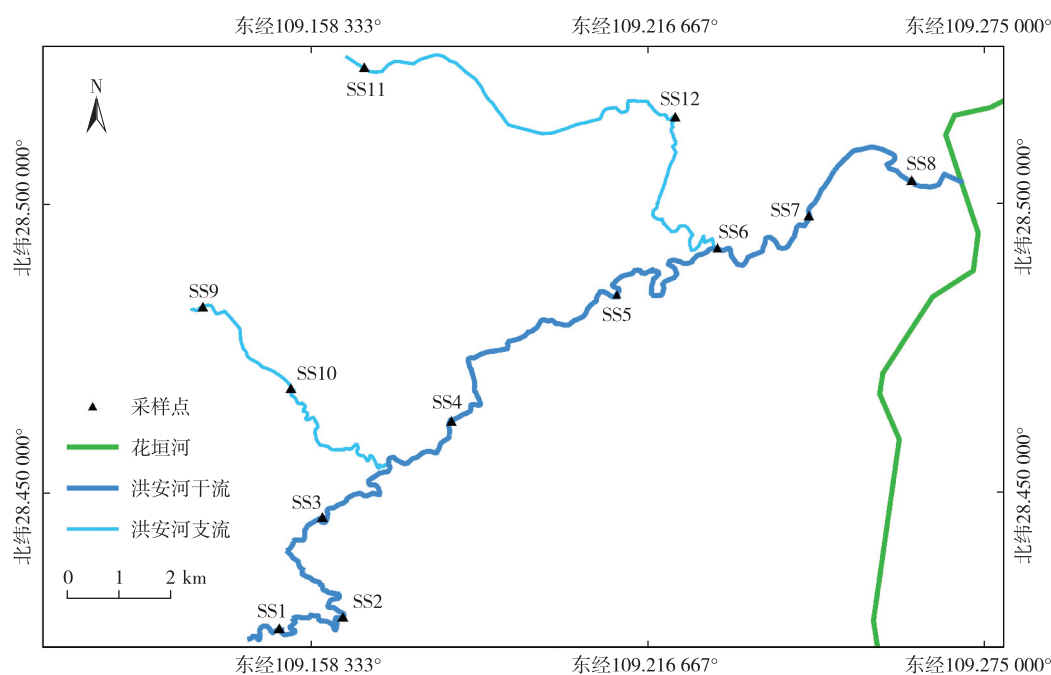


图 1 洪安河秀山段采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution schematic diagram of sampling sites in the Xiushan section of the Hongan River

1.2 浮游生物样品采集与环境因子测定

浮游生物的样品采集、浓缩及生物量测定均依据中华人民共和国水产行业标准 SC/T 9402—2010《淡水浮游生物调查技术规范》^[18]来执行,定性与定量样品的处理方法则参考了罗杨等人^[19]的研究。

在采集浮游生物样本的同时也对环境因子进行测定。整个采样过程中均使用 2002 年中国国家测绘局制定的 GCJ-02 坐标系记录海拔、经度与纬度数据。水温(temperature, TEM)与 DO 采用 JPB-607A+型溶氧仪进行测定;氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)通过 ORP-BL 型水质测试仪检测;化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)与电导率(electrical conductivity, EC)通过 LS310 型多参数水质检测仪测定;pH 使用 SMART PH828 型 pH 计测量;叶绿素 a(chlorophyll a, Chla)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)与氨氮(ammonia nitrogen, NH₃-N)则借助 TE-700PLUS 型一体化便携水质检测仪器测定^[20]。

1.3 数据分析

1.3.1 浮游生物鉴定与群落结构分析

浮游生物的种类鉴定主要参考《淡水微型生物与底栖动物图谱》^[21]《中国淡水生物图谱》^[22]《中国淡水藻类:系统分类及生态》^[23]等文献,其中无节幼体在本研究中被视为 1 个桡足类物种。在种类鉴定过程中以光学显微镜镜检结果为基准,辅以万深 AlgaeC 浮游生物智能鉴定计数仪进行定量及辅助定性。最终,基于镜检鉴定结果对计数仪输出数据进行校准与融合,得到样品中浮游生物物种的组成及丰度数据。

1.3.2 浮游生物功能群分析

参考 Reynolds 等人^[14]和 Padisák 等人^[24]补充完善的以生境为划分依据的功能群分类方法对洪安河秀山段浮游植物进行功能群划分^[25];依据安睿等人^[26]根据浮游动物的大小、摄食习性以及浮游动物之间相互作用为划

分依据的功能群分类方法对洪安河秀山段浮游动物进行功能群划分。

1.3.3 浮游生物多样性及环境关联分析

基于浮游生物的定量数据,通过优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D')、Pielou 均匀度指数(J)等指标进行多样性分析,这些指标的计算涉及物种个体数、全部样品总个体数、物种出现频率、样品中浮游生物物种总数等参数,其中某浮游生物判定为优势种的依据为该物种的 Y 值不低于 0.02^[27-30]。

在环境关联分析层面,所有数据处理和图形绘制均在 R 软件中进行,其中使用“microeco”和“vegan”包进行数据计算,使用“linket”和“ggplot2”包绘制图表^[31]。从相对重要性指数(index of relative importance, IRI)热图中选取 IRI 值大小位于前 15 位的功能群,计算它们与生物和非生物因子的 Spearman 相关性,并绘制 Mantel 检验图。此外,为量化洪安河秀山段干流和支流的环境异质性,选取 TN、TP、NH₃-N、COD、DO、ORP、Chla 等关键环境因子,采用 Tukey's HSD 检验分别比较上述环境因子在干流和支流间的差异是否具有统计学意义,以揭示洪安河秀山段环境因子的空间分异特征。为系统评估环境因子对浮游生物群落结构的影响,本研究进一步整合样本分组信息,将浮游生物群落、功能群生物量数据与分析整理后的环境变量进行 Hellinger 转化,并采用冗余分析(redundancy analysis, RDA),旨在阐释环境因子与功能群之间的关系^[20]。当 $p < 0.05$ 时,上述统计分析结果具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 基于分类学和功能群的浮游生物物种组成

本研究共鉴定出浮游植物 8 门 334 种,其中:硅藻门(Bacillariophyta)为绝对优势类群,有 174 种,物种数量占比为 52.10%;绿藻门(Chlorophyta)为次优势类群,有 88 种,物种数量占比为 26.35%;蓝藻门(Cyanophyta)物种有 30 种,物种数量占比为 8.98%;裸藻门(Euglenophyta)物种有 22 种,物种数量占比为 6.59%;甲藻门(Pyrrophyta)物种有 11 种,物种数量占比为 3.28%;黄藻门(Xanthophyta)、金藻门(Chrysophyta)和隐藻门(Cryptophyta)物种各有 3 种,物种数量占比均为 0.9%(图 2a)。本研究共鉴定出浮游动物 4 类 84 种,其中轮虫类、原生动物、桡足类和枝角类物种分别有 41、20、13 和 10 种,物种数量占比分别为 48.81%、23.81%、14.29% 和 13.09%;由此可见,洪安河秀山段的浮游动物组成以轮虫类物种为主,原生动物门物种次之,枝角类和桡足类物种则更次之(图 2b)。

本研究共划分出 24 类浮游植物功能群,分别是沿岸底栖硅藻功能群(MP)、贫营养生境绿藻功能群(X3)、裸藻功能群(W1)、蓝藻尖头藻功能群(SN)、小型绿藻功能群(X1)、隐藻功能群(Y)、甲藻功能群(LO)、脆杆藻-新月藻功能群(P)、针杆藻功能群(D)、小环藻功能群(B)、星杆藻功能群(C)、螺旋藻功能群(S2)、卵囊藻功能群(F)、转板藻功能群(T)、微囊藻功能群(M)、鼓藻功能群(N)、异极藻功能群(TB)、栅藻-盘星藻功能群(J)、隐球藻功能群(K)、颤藻功能群(TC)、囊裸藻功能群(W2)、衣藻功能群(X2)、丝状蓝藻功能群(S1)和扎卡四棘藻(*Attheya zachariasii*)功能群(A);其中 MP 为主要功能群且在 12 个采样点均有分布,而 S1、S2 与 T 在各采样点分布较少(图 2c、表 1)。本研究共划分出中型浮游动物捕食者(MCC)、轮虫捕食者(RC)、原生动物滤食者(PF)、中型浮游动物滤食者(MCF)、轮虫滤食者(RF)、小型浮游动物滤食者(SCF)等 6 类浮游动物功能群;其中 PF 占绝对优势且在 12 个采样点均有分布,而 MCC 在洪安河秀山段较为少见(图 2d)。

2.2 优势种及相对重要功能群

洪安河秀山段的浮游植物优势种共有 4 种,均为硅藻门物种,分别为谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)、扁圆卵形藻线条变种(*Cocconeis placentula* var. *lineata*)以及隐头舟形藻(*Navicula cryptocephala*);它们的优势度分别为 0.165、0.077、0.048 和 0.033;其中谷皮菱形藻与隐头舟形藻在各采样点均有分布(图 3a)。洪安河秀山段的浮游动物优势种包括原生动物 3 种、轮虫类和桡足类各 1 种,分别为球形砂壳虫(*Difflugia globulosa*)、无节幼体、针棘匣壳虫(*Centropyxis aculeata*)、前节晶囊轮虫(*Asplachna priodonta*)与普通表壳虫(*Arcella vulgaris*);它们的优势度分别为 0.061、0.052、0.049、0.028 和 0.023;其中 SS3 采样点没有上述优势物种分布(图 3b)。

在将浮游植物不同功能群按 IRI 值从大到小进行排名,可以发现其中重要性较高的功能群有 MP、D、P 等(图 4a、表 1);其中 MP 在洪安河秀山段浮游植物群落结构中占据重要地位。同样地,PF 在洪安河秀山段浮游动

物群落结构中处于较为重要地位(图 4b、表 2)。

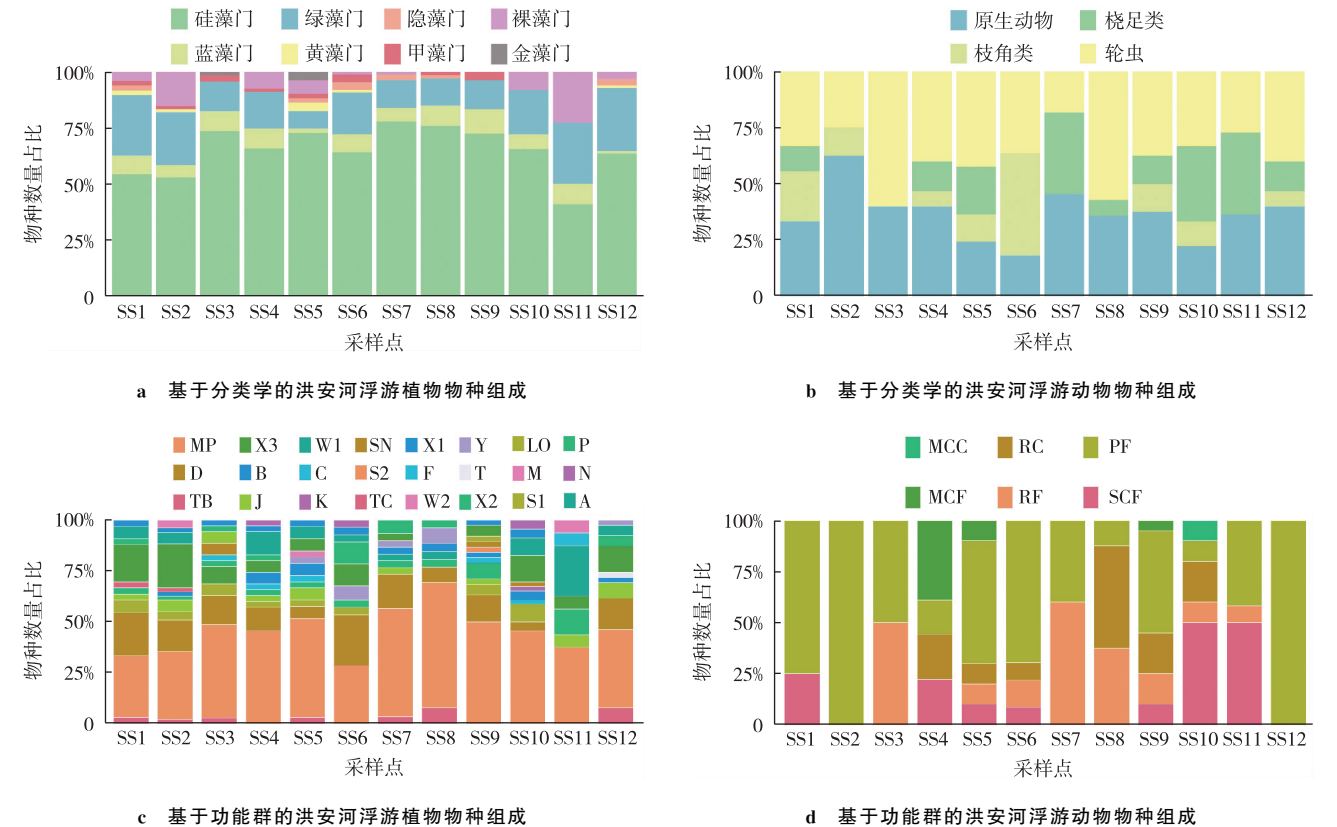


图 2 基于分类学与功能群的洪安河秀山段浮游生物物种组成堆叠柱状图
Fig. 2 Stacked bar charts of species composition of plankton in the Xiushan section of the Hongan River based on taxonomy and functional groups

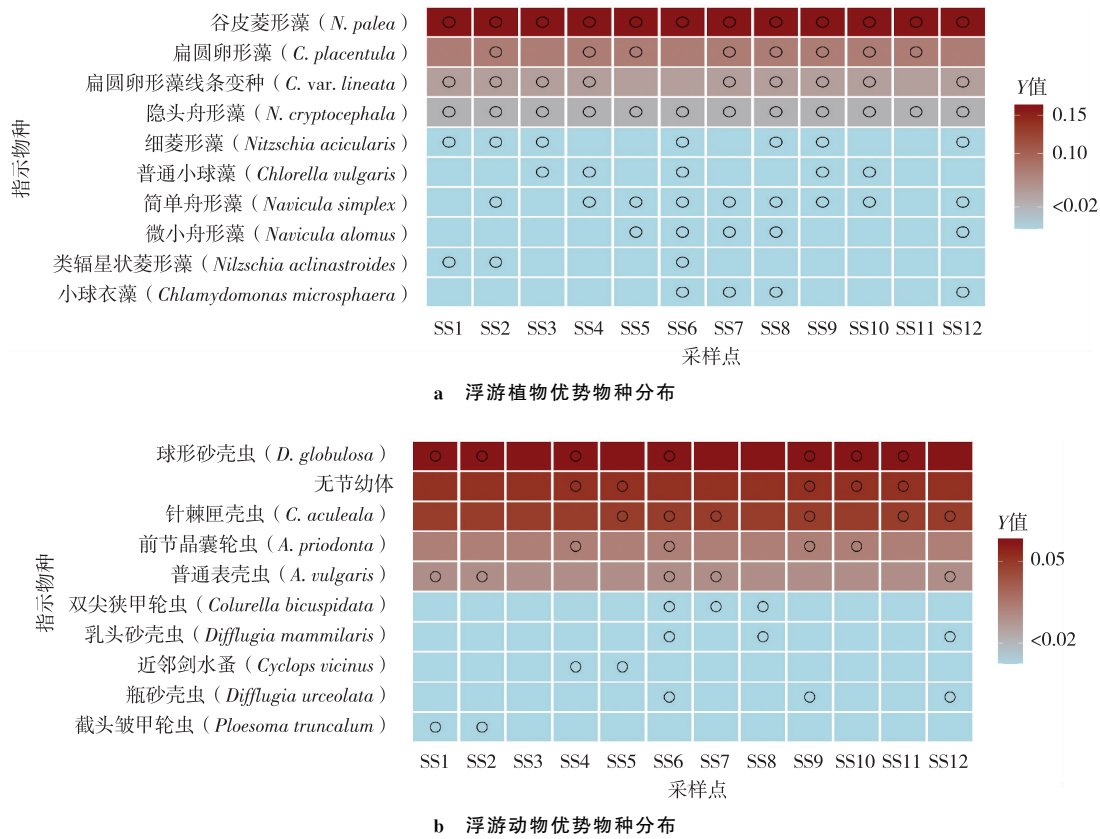
表 1 浮游植物常见功能群组成
Tab. 1 Composition of common functional groups of phytoplankton

浮游植物功能群	生境特征	代表性属
MP	受扰动浑浊型浅水水体	舟形藻属(<i>Navicula</i>)
D	浅水、浊度较大的水体	针杆藻属(<i>Synedra</i>)
P	持续或半持续的中-富营养型混合水体	直链藻属(<i>Melosira</i>)
W1	受到有机污染的浅水水体	裸藻属(<i>Euglena</i>)
J	高营养混合浅水水体	栅藻属(<i>Scenedesmus</i>)
TB	强急流	菱形藻属(<i>Nitzschia</i>)
X3	混合程度较高的贫营养浅水水体	肋缝藻属(<i>Frustulia</i>)
B	中营养、中小型或大型浅水水体	小环藻属(<i>Cyclotella</i>)
X1	混合程度较高的超富营养浅水水体	小球藻属(<i>Chlorella</i>)
LO	深水或浅水, 贫-富营养, 中-大型水体	双眉藻属(<i>Amphora</i>)

2.3 浮游生物多样性指数

在洪安河秀山段干流(SS1~SS8 采样点), 基于分类学的浮游植物多样性指数 H' 与 J 的变化趋势整体保持一致并呈现相对稳定的变化趋势; 而在支流(SS9~SS12 采样点), 这 2 个多样性指数变化幅度较大并表现出明显的波动特征, 同时该河段所有采样点的基于分类学的浮游植物多样性指数 D' 也呈现较大差异(图 5a)。洪安河秀山段干支流基于功能群的浮游植物多样性指数变化趋势与基于分类学的浮游植物多样性指数变化趋势在整体上保持一致(图 5b)。此外结合图 5a、b 可知与其他采样点相比, SS11 采样点基于分类学和功能群的浮游植

物多样性指数 H' 和 D' 均为最低。



注:圆圈表示图中所列出的指示物种在某一采样点中有分布。无节幼体在本研究中被视为 1 个桡足类物种进行统计。

图 3 洪安河秀山段浮游生物优势种分布

Fig. 3 Distribution of dominant plankton species in the Xiushan section of the Hongan River

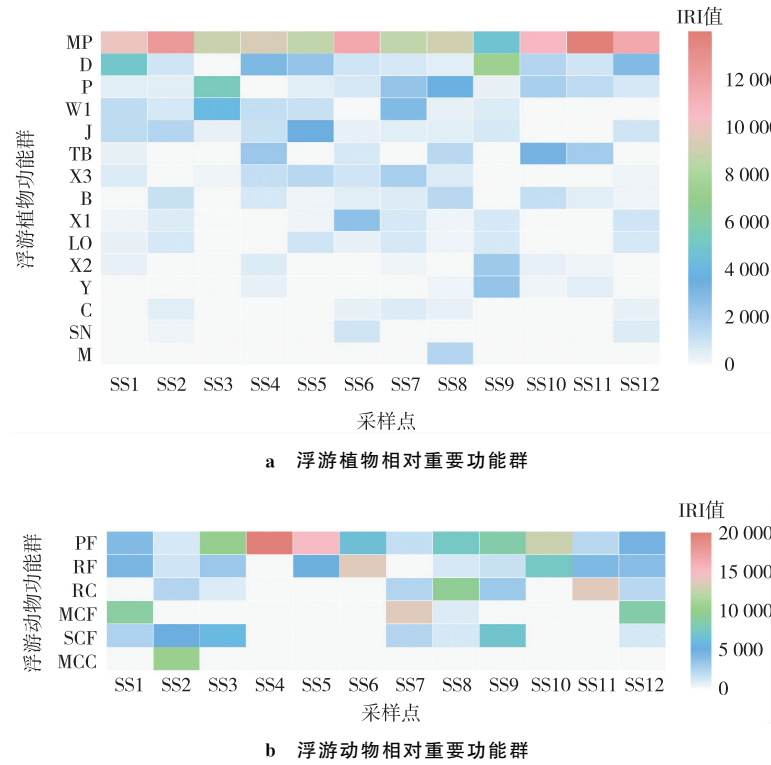


图 4 洪安河秀山段浮游生物相对重要功能群热图

Fig. 4 Heatmaps of relatively important functional groups of plankton in the Xiushan section of the Hongan River

表 2 浮游动物常见功能群组成

Tab. 2 Composition of common functional groups of zooplankton

浮游动物功能群	摄食习性	代表性物种
PF	以细菌、藻类和有机质为食	砂壳虫属(<i>Diffugia</i>)
RF	以细菌、藻类和有机质为食	腔轮属(<i>Lecane</i>)
RC	以原生动物、其他轮虫和小型甲壳动物等为食	晶囊轮属(<i>Asplanchna</i>)
SCF	以细菌、藻类、有机质和原生动物为食	无节幼体
MCF	以细菌、藻类、有机质和原生动物为食	秀体溞属(<i>Diaphanosoma</i>)
MCC	以轮虫、枝角类、双翅目(Diptera)昆虫(如摇蚊幼虫)、寡毛类为食	温剑水蚤属(<i>Thermocyclops</i>)

各采样点基于分类学的浮游动物多样性指数 D' 与 H' 的变化趋势整体上保持一致且波动较大,但 J 的变化趋势整体上相对稳定、波动幅度较小;其中 SS6 采样点(位于干流与支流交汇处)与 SS9 采样点的浮游动物多样性指数 D' 与 H' 均高于其他采样点,而 SS7 采样点的这 2 个指标均低于其他采样点(图 5c)。图 5d 则显示基于功能群的浮游动物多样性指数的变化趋势与基于分类学的浮游动物多样性指数的变化趋势整体上保持一致。

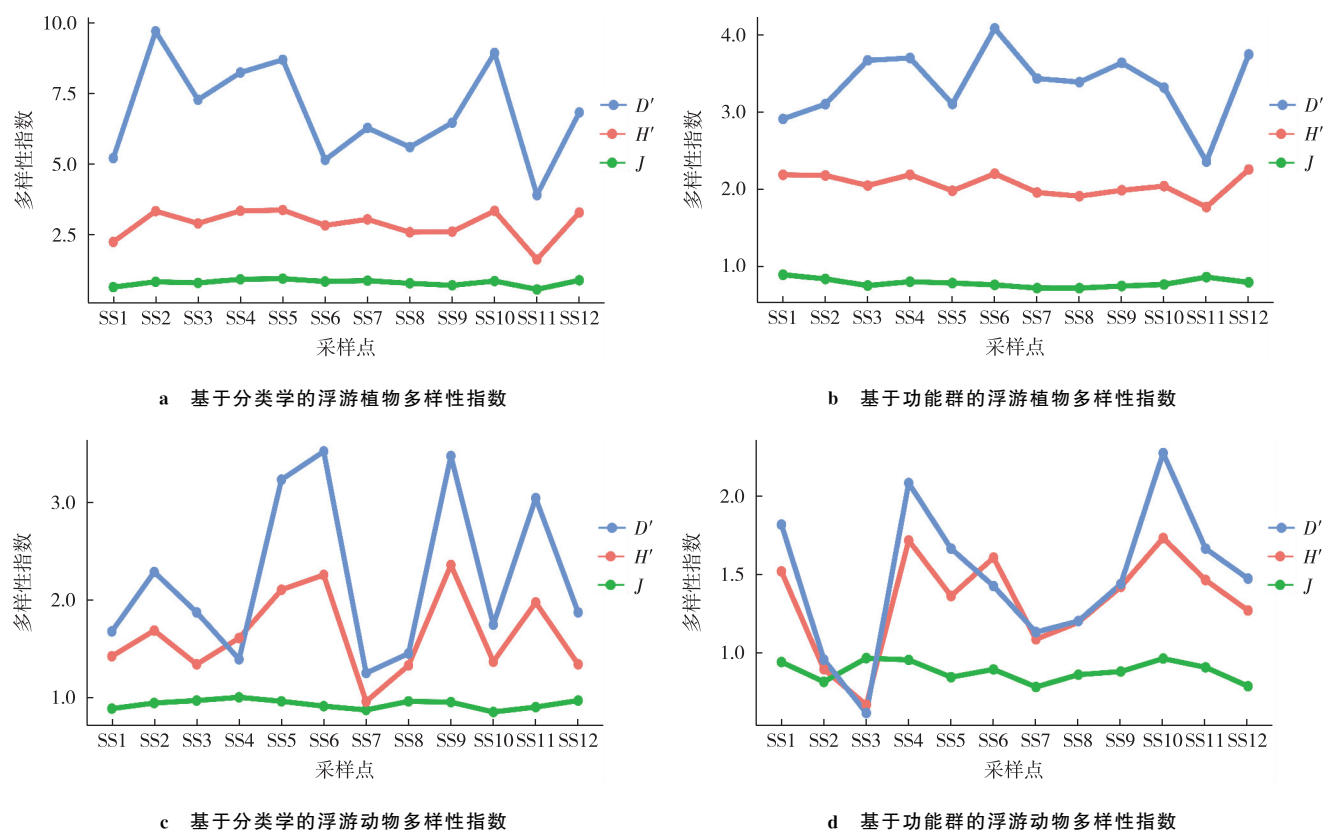


图 5 洪安河秀山段浮游生物多样性指数

Fig. 5 Biodiversity indices of plankton in the Xiushan section of the Hongan River

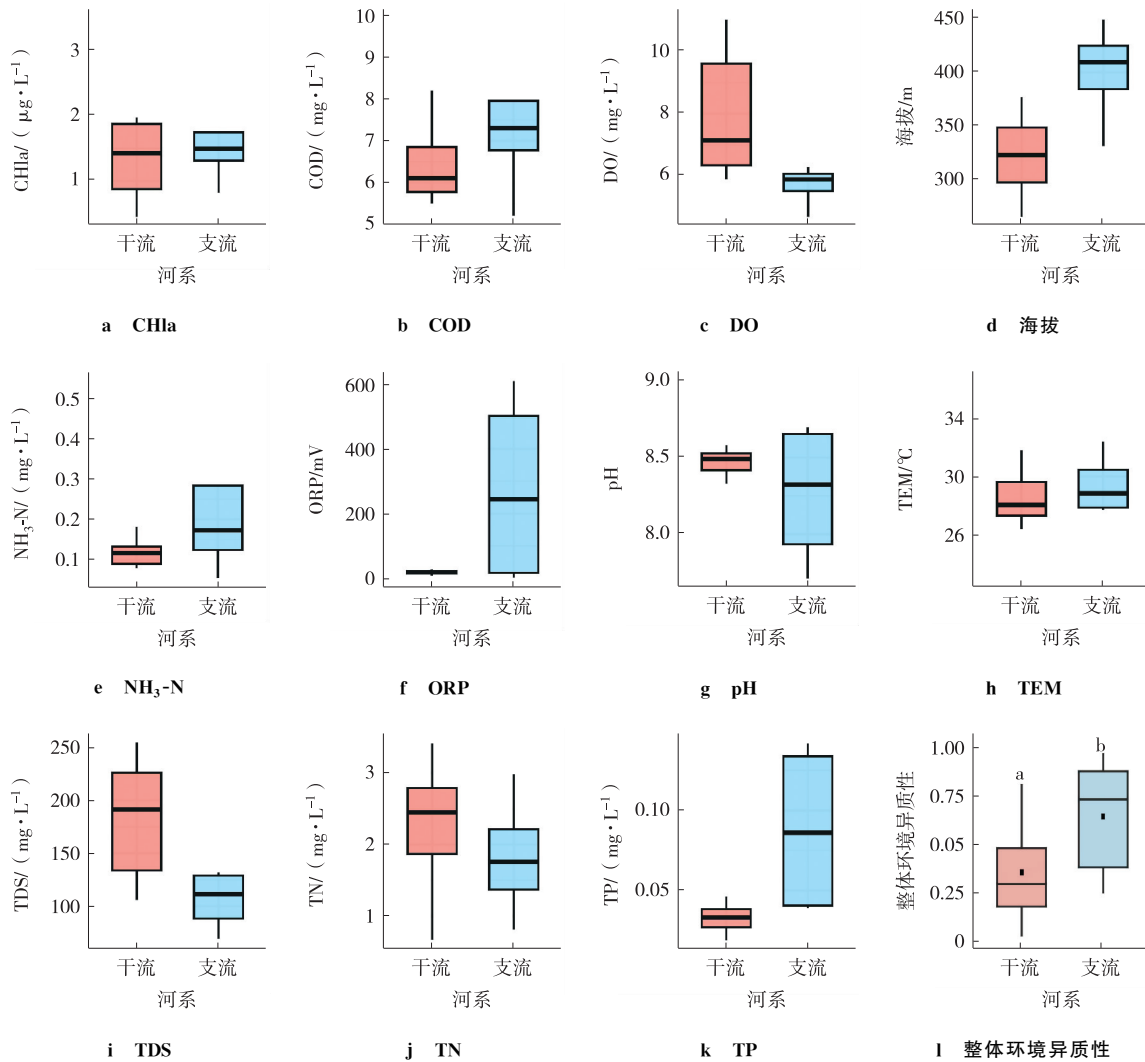
2.4 环境因子

综合图 6a~k 可知,洪安河秀山段干流与支流相比,前者的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、ORP、pH 与 TP 的环境异质性程度更低。而图 6l 显示,洪安河秀山段支流的整体环境异质性明显高于干流,两者差异具有统计学意义($p<0.05$)。

2.5 环境因子与浮游生物的相关性

RDA 排序结果显示不同浮游植物门类与功能群在环境梯度上分布存在明显差异:甲藻门与 ORP、隐藻门与

海拔、绿藻门与 DO、硅藻门与 TDS 以及蓝藻门与 TDS 均呈正相关(图 7a);P 与 pH、TN 以及 D 与 TP、ORP、TEM 也均呈正相关(图 7b)。Mantel 检验结果则表明,不同浮游植物门类对环境因子的响应存在差异:隐藻门与 pH、ORP、TP 的相关性均有统计学意义($p < 0.01$);硅藻门与纬度、裸藻门与经度、甲藻门与 TN、隐藻门与 COD 以及隐藻门与海拔的相关性在 $p < 0.05$ 水平上均有统计学意义(图 7c)。图 7d 显示:在 IRI 值排名前 15 位的浮游植物功能群中,MP 与 TEM、B 与 pH、TB 与 TDS、Y 与 TDS、SN 与 ORP、SN 与 TP、B 与 ORP 以及 B 与 TP 均呈统计学意义上的相关($p < 0.01$);P 与 Chla、X1 与经度、C 与 TDS、B 与 COD、SN 与 COD、X1 与 DO、C 与 DO、D 与 ORP 以及 D 与 TN 也均呈统计学意义上的相关($p < 0.05$)。



注:箱体长度代表环境因子的空间异质性程度或整体环境异质性的变化程度;图1箱体中黑色方块代表同一区域所有样本的平均值,不同小写字母表示组间差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

图6 洪安河秀山段干支流环境因子和整体环境异质性箱线图

Fig. 6 Boxplot of environmental factors and overall environmental heterogeneity of the mainstream and tributaries in the Xiushan section of the Hongan River

图 7e、f 显示:不同浮游动物门类与功能群在环境梯度上分布存在明显差异:桡足类与 DO、原生动物与 TP、原生动物与海拔、原生动物与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、PF 与海拔以及 MCF 与 Chla 均呈正相关。由图 7g 可知,不同浮游动物门类对环境因子的响应存在差异:原生动物、枝角类、桡足类与轮虫均与各环境因子均呈统计学意义上的相关($p < 0.05$),其中枝角类与 TN、桡足类与经度的相关性在 $\alpha = 0.01$ 显著性水平下通过统计学显著性检验。6 个浮游动物功能群与环境因子均呈统计学意义上的相关($p < 0.05$),且 SCF 与经度的相关性在 $\alpha = 0.01$ 显著性水平下通过统计学显著性检验。

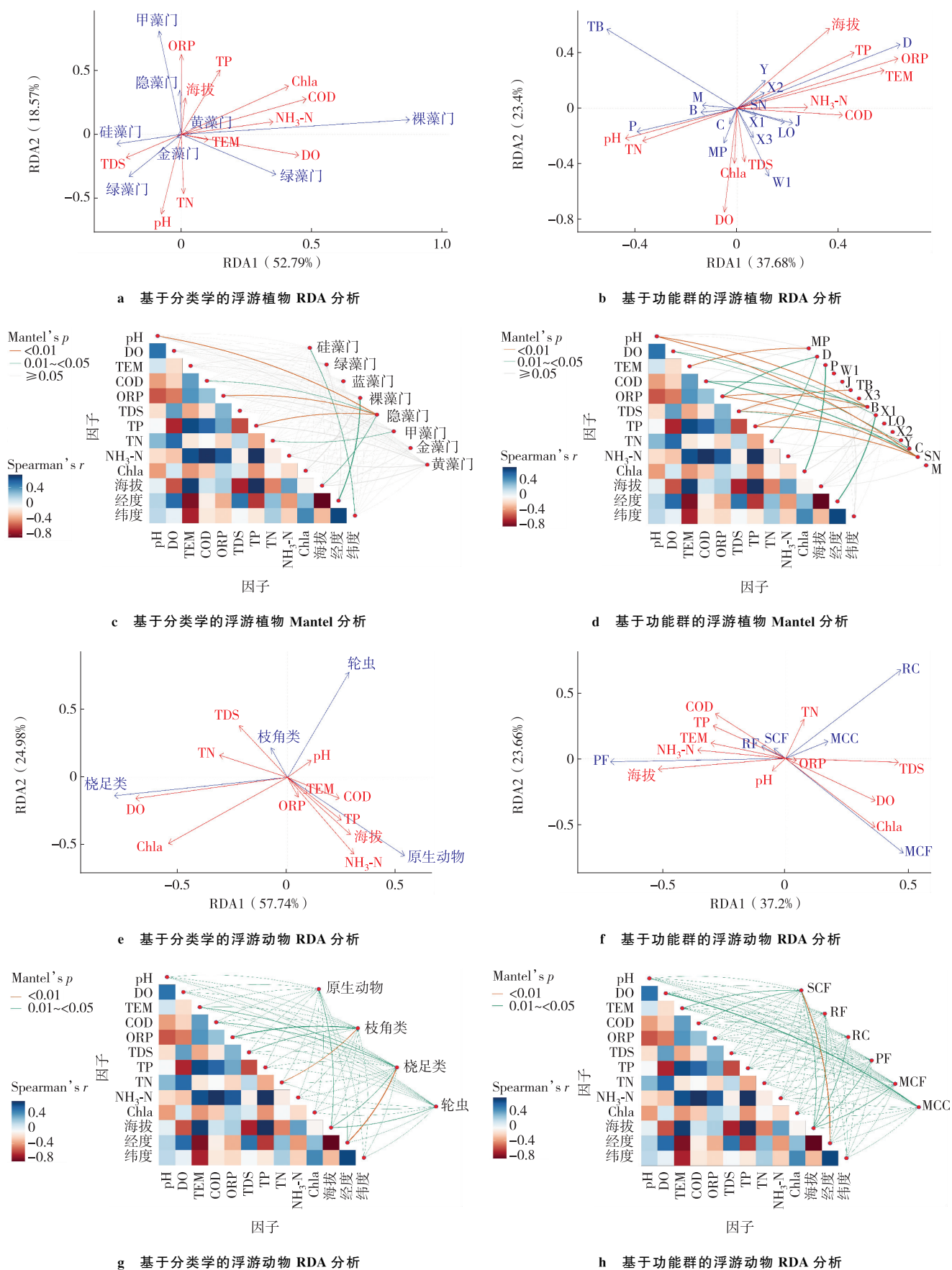


Fig. 7 Plots of RDA ordination and Mantel test for plankton and environmental factors in the Xiushan section of the Hongan River

3 讨论

3.1 浮游生物的群落结构及生境适应性

研究表明,在环境压力梯度下,浮游生物群落可在物种组成和优势种分布上进行差异化调整,形成与现有环境特征相适应的群落格局^[32]。本研究结果显示:从分类学角度看,洪安河秀山段浮游植物物种组成以硅藻门物种为主,浮游动物物种组成以轮虫类物种为主,两者共同构成了该河段浮游生物群落的主要组成部分;其中硅藻门物种多属适宜于流速较快的中营养型水体类群,而轮虫类的高物种数量占比与水体中营养盐浓度明显相关。上述群落特征与中-富营养状态且流速较快的水体特征相吻合^[6,33]。此外,因洪安河汇入花垣河而引发局部环境改变,故位于两河交汇处附近的SS8采样点绿藻门物种数量占比骤升,区域藻类群落结构也被重塑^[34]。这一结果既反映了浮游生物群落对环境压力的快速适应性响应,同时也揭示了区域内的水质营养水平与水动力条件存在空间异质性,而浮游生物群落组成能精准响应跨河流域生态系统交汇带来的压力变化^[35]。

从功能群角度来看,洪安河秀山段浮游植物可被划分为24类功能群,其中以MP为主;这与上述分类学结果相吻合。此外,洪安河秀山段的优势物种均属硅藻门且全流域分布,也与相对重要功能群(如MP)的广布性在生态策略上形成呼应,共同体现了对区域主体生境即中-富营养水平且高流速水体的适应性。优势种的分布状况进一步明确了硅藻门物种的优势地位,使它们成为更精准的生物指示因子^[36]。此外,相对重要功能群与优势种之间具有协同作用,二者分别从物种生存策略与功能实现方式这2个维度共同揭示了生境对浮游生物群落的双重筛选效应^[37]。洪安河秀山段浮游动物功能群以PF为主,这一结果也与上述分类学结果高度一致。PF以细菌、藻类和有机质为食,该功能群的分布与食物丰度密切相关^[38]。PF相对丰度较高也指示洪安河秀山段整体上处于中-富营养状态,这与上述浮游植物群落特征所揭示的结果形成良好呼应。

3.2 干支流环境梯度下的浮游生物功能群分异

浮游生物功能群沿干流—支流环境压力梯度呈“多样组合—特异类群”的转化趋势。洪安河秀山段干流浮游植物群落的多样性水平较高且分布均匀,结构稳定,可支撑多种生物类群的生存;其中以MP和D为优势类群,伴随J、W1、LO等多个功能群共存,这一功能群组成特征指示该河段干流水体流动性强、营养结构完整,属于中营养-清水型生境^[6]。洪安河秀山段支流浮游植物群落稳定性低于干流,群落结构趋向简化,均匀度水平较低;在功能群组成方面,尽管MP仍是支流浮游植物优势类群,但TB、X2、Y等功能群的占比大幅提升,反映出静水、富营养化及潜在人为干扰的叠加影响。浮游动物功能群在洪安河秀山段干流以PF为主,RF、RC等功能群广泛分布,同样指示该河段干流水体流动性强、营养结构完整,并契合清水-中营养的低压力生境特征^[39];该河段支流中PF仍占优势,但SCF、RC等功能群的占比大幅上升,这与富营养化压力下生境特征向流速减缓、底质有机质富集方向过渡的趋势相适应。因此,上述浮游生物功能群组成的梯度变化进一步印证了洪安河秀山段从清水动力环境向静水有机质富集环境的生态过渡特征,而浮游动物功能群的分化从营养级关系与摄食策略这2个维度清晰揭示了它们在区域异质生境中的功能适配机制^[26]。

3.3 干支流浮游生物群落空间分异特征

在空间尺度上,受TN、TP、NH₃-N、DO、Chla等核心环境驱动因子及水文动力条件影响,洪安河秀山段干流与支流的浮游生物群落呈现差异化特征:干流与支流在富营养化水平上的差异尤为突出,后者的TP、NH₃-N、COD、ORP等理化因子指标数值明显升高,两者之间形成明显的环境梯度与环境异质性。产生这一差异的主要原因在于:洪安河秀山段支流沿岸分布有大量农田,由此带来了农业面源污染输入,然而支流径流量较小,对污染物稀释能力相对有限,因而驱动浮游生物群落向耐污型、富营养化适应型转变^[40]——隐藻门、裸藻门、枝角类等门类以及D、RF及SCF等功能群的物种数量占比大幅上升,而原生动物与裸藻门的优势分布也进一步印证了营养盐胁迫对支流浮游生物群落的定向筛选作用。在洪安河秀山段干流水体中NH₃-N、TP、pH等环境因子的数值波动小且处于适宜区间,TN储量充足,为构建低营养盐负荷的稳定生境奠定了基础,并且有效抑制了耐污生物类群的过度增殖^[41],为浮游生物群落稳定发育提供了良好的基础生境条件与物质保障。

环境异质性与空间梯度进一步放大了洪安河秀山段浮游生物的群落分化:海拔差异影响裸藻门、原生动物及PF的空间分布,加剧了支流局部群落的分化。Chla作为初级生产力的综合指标与P、C、MCF等功能群密切相关。洪安河秀山段支流受营养条件限制与人为干扰影响,藻类组成趋于简化^[42-43],多样性指数波动剧烈,群落稳定性下降,导致初级生产力水平与功能群组成之间的适配性降低^[40];干流功能群丰富度偏低但生境稳定能支

撑较高的初级生产力,进而维系了多类功能群的共存^[41]。

水文动力条件与理化因子梯度塑造了洪安河秀山段干支流浮游生物群落稳定性差异。由于该河段干流的水文动力条件相对稳定,DO 较为充足,TDS、ORP 与 pH 适宜且稳定,因而形成了低异质性、高自净能力的稳定生境。DO 作为清洁水体关键指标^[44],支撑了桡足类以及 P、C、MCF 等功能群的存活;TDS 的稳定性则维持了浮游植物的高门类多样性和 PF、RF、RC、MCF 等功能群的多元共存体系。与干流相比,洪安河秀山支流水文动力条件波动剧烈,ORP、TDS 等理化因子变化幅度大,生境稳定性不足。ORP 通过水体氧化状态的定向筛选而仅适配特定耐胁迫类群存活^[45];TDS 的明显波动则进一步推动硅藻门、蓝藻门、枝角类等类群的生态分异,最终形成以耐胁迫类群为核心的简化群落结构。与支流形成鲜明对比的是,洪安河秀山干流中 ORP 的相对稳定状态为隐藻门、D 等适应中性氧化环境的浮游植物类群和功能群提供了适宜生境。

总之,洪安河秀山段干支流在理化因子和水文动力条件的交互作用下,驱动浮游生物群落在干流和支流分别呈现“稳定均质、功能多元”和“波动异质、结构简化”的分异格局。此外值得一提的是, H' 与 J 这 2 个多样性指数在生态学研究中存在固有局限,即两者不仅对样品大小具有依赖性,且与环境胁迫之间呈现非线性响应特征,单一依赖上述指数可能难以全面刻画群落的生态响应。为此,本研究将功能群组成、优势种分布及关键环境因子梯度等多维指标纳入分析框架,通过多指标相互印证,从而增强了本研究结论的科学性与可靠性。

3.4 水生态健康差异化调控策略

基于洪安河秀山段浮游生物群落对环境驱动因子的响应机制,为实现该河段水生态的健康与可持续发展,本研究建议实施以下差异化调控策略。

1) 实施干支流差异化管控。对于干流而言,应以维护水文动力条件稳定与自净能力为核心,保障 DO 充足与其他理化因子稳定,从而维持高多样性浮游生物功能群的共存与生态系统稳定^[46];而对于支流则应强化对外源营养盐的精准削减,从而有效抑制支流的富营养化进程^[47]。

2) 推动支流生境修复。依托生态修复机制改善支流水文动力条件,进而降低环境异质性,从而逆转耐污类群优势化的趋势,促进群落结构正向演替。

3) 构建生态监测与预警体系。建立以“营养盐-理化稳定性”为双重目标、以关键生物功能群为指示的生态监测体系。通过评估初级生产力与群落结构的适配性,实现对生态系统功能状态的早期预警与全过程调控,从而全面提升水生态系统的抵抗力与健康水平,并推动洪安河秀山段水生态系统实现健康可持续发展。

4 总结

本研究系统探究了洪安河秀山段浮游生物的群落结构、功能群特征与环境因子的关系。结果表明:该河段浮游植物以硅藻门物种和 MP 为主、浮游动物以轮虫类物种和 PF 为主,两者共同体现出对所在区域主体生境即中-富营养水平且高流速水体的适应性。

沿干流—支流环境梯度,洪安河秀山段浮游生物呈现清晰的空间分异格局:干流的水文动力条件稳定、理化因子水平适宜,环境异质性较低,可支撑多种浮游生物功能群共存和较高的浮游生物群落稳定性;支流受营养盐富集与水文动力条件剧烈波动影响,环境异质性较高,驱动浮游生物群落向耐污型简化结构演变。环境驱动因子分析结果表明,TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO、Chla 等核心环境驱动因子及水文动力条件是洪安河秀山段干支流浮游生物群落分异的关键驱动因子,而海拔差异进一步放大了局部群落的分化。

基于上述研究结论,本研究建议在洪安河秀山段实施干支流差异化调控策略,干流以维持生境稳定性为核心,支流以削减营养盐负荷与改善水文动力条件为重点,同时构建以关键浮游生物功能群为指示的生态监测体系,推动该河段水生态系统的健康可持续发展。

参考文献:

- [1] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes[J]. *Limnologia*, 2004, 34 (3): 236-248.
- [2] Hansson L A, Gustafsson S, Rengefors K, et al. Cyanobacterial chemical warfare affects zooplankton community composition[J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52 (7): 1290-1301.
- [3] 单秀娟, 线薇薇, 武云飞. 长江河口生态系统鱼类浮游生物生态学研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2004, 26 (4): 87-93.

- Shan Xiujuan, Xian Weiwei, Wu Yunfei. Progress of studies on ichthyoplankton ecology of Changjiang River estuary[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2004, 26 (4): 87-93.
- [4] 刘建康. 高级水生生物学[J]. 北京: 科学出版社, 1999.
- Liu Jiankang. *Advanced aquatic biology*[J]. Beijing: Science Press, 1999.
- [5] 日本生态学会环境问题专门委员会. 环境和指示生物(水域分册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- Specialized Committee on Environmental Issues of the Ecological Society of Japan. *Environment and indicator organisms (watershed fascicle)* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987.
- [6] 刘少全. 渭河中浮游生物和大型底栖动物群落结构及其与水环境因子的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- Liu Shaoquan. *Community structure of plankton and macroinvertebrate in the middle reaches of Weihe River and its relationship with water environmental factors*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2025.
- [7] 郝媛媛, 孙国钧, 张立勋, 等. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2014, 26 (1): 121-130.
- Hao Yuanyuan, Sun Guojun, Zhang Lixun, et al. Relationship between community characteristics of the phytoplankton and environmental factors in Heihe River basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26 (1): 121-130.
- [8] Minaudo C, Curie F, Jullian Y, et al. QUAL-NET, a high temporal-resolution eutrophication model for large hydrographic networks[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15 (7): 2251-2269.
- [9] 刘壮, 魏晓, 陈强, 等. 长江黄河上游地表水溶解氧时空分布特征研究: 以四川省为例[J]. *环境保护科学*, 2023, 49 (3): 74-80.
- Liu Zhuang, Wei Yao, Chen Qiang, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of dissolved oxygen in surface water in the upper reaches of the Yangtze River and the Yellow River: taking Sichuan Province as an example[J]. *Environmental Protection Science*, 2023, 49 (3): 74-80.
- [10] Wright J J, Konwar K M, Hallam S J. Microbial ecology of expanding oxygen minimum zones[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2012, 10 (6): 381-394.
- [11] Duarte C M, Agustí S, Agawin N S R. Response of a Mediterranean phytoplankton community to increased nutrient inputs: a mesocosm experiment[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 195: 61-70.
- [12] Bledsoe E L, Philips E J, Jett C E, et al. The relationships among phytoplankton biomass, nutrient loading and hydrodynamics in an inner-shelf estuary[J]. *Ophelia*, 2004, 58 (1): 29-47.
- [13] Zheng Y Q, Liu T, Huang L, et al. Deterministic niche dynamics drive zooplankton community assembly in megacity river networks: biotic interactions outweigh environmental filtering in winter[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2025, 40: 2501975.
- [14] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24 (5): 417-428.
- [15] Abonyi A, Descy J P, Borics G, et al. From historical backgrounds towards the functional classification of river phytoplankton sensu Colin S. Reynolds: what future merits the approach may hold?[J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848 (1): 131-142.
- [16] Kahsay A, Lemmens P, Triest L, et al. Plankton diversity in tropical wetlands under different hydrological conditions (Lake Tana, Ethiopia) [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 816892.
- [17] Blondel J. Guilds or functional groups: does it matter?[J]. *Oikos*, 2003, 100 (2): 223-231.
- [18] SC/T 9402—2010 淡水浮游生物调查技术规范[S].
- SC/T 9402—2010 specifications for freshwater plankton surveys[S].
- [19] 罗杨, 程如丽, 王梦, 等. 普里河浮游生物群落结构、生物多样性及鱼类资源现状[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 40 (2): 54-64.
- Luo Yang, Cheng Ruli, Wang Meng, et al. Community structure and biodiversity of plankton and fish resources of the Puli River[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2023, 40 (2): 54-64.
- [20] Li Q H, Zhou X X, Zhang Y F, et al. The impact of anthropic activity based on dam construction and land-use-type in plankton on taxonomic and functional groups[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2025, 58: e03494.
- [21] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- Zhou Fengxia, Chen Jianhong. *Atlas of freshwater microorganisms and zoobenthos* [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [22] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- Han Maosen, Shu Yunfang. *Atlas of freshwater organisms in China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1995.

- [23] 胡鸿均, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Hu Hongjun, Wei Yinxin. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [24] Padisák J, Borics G, Fehér G, et al. Dominant species, functional assemblages and frequency of equilibrium phases in late summer phytoplankton assemblages in Hungarian small shallow lakes [C] //Naselli-Flores L, Padisák J, Dokulil M T. Phytoplankton and Equilibrium Concept: the Ecology of Steady-State Assemblages. Dordrecht: Springer, 2003: 157-168.
- [25] Liu J F, Zou H Y, Deng F, et al. Phytoplankton functional groups in Poyang Lake: succession and driving factors[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2024, 42 (6): 1764-1776.
- [26] 安睿, 王凤友, 于洪贤, 等. 三环泡湿地浮游动物功能群季节变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2017, 37 (6): 1851-1860.
An Rui, Wang Fengyou, Yu Hongxian, et al. Seasonal dynamics of zooplankton functional groups and their relationships with environmental factors in the Sanhuanpao wetland reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (6): 1851-1860.
- [27] 赵祺, 张秀文, 于佳, 等. 安格庄水库浮游生物群落季节演替及鲢、鳙鱼产力评估[J]. 水产科学, 2022, 41 (5): 876-882.
Zhao Qi, Zhang Xiuwen, Yu Jia, et al. Seasonal succession of plankton community and evaluation of silver carp and bighead carp production in angezhuang reservoir[J]. Fisheries Science, 2022, 41 (5): 876-882.
- [28] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [29] Margalef R. Information theory in ecology[J]. International Journal of General Systems, 1958, 3: 36-71.
- [30] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York; London: Wiley-Interscience, 1969.
- [31] Doane M P, Ostrowski M, Brown M, et al. Defining marine bacterioplankton community assembly rules by contrasting the importance of environmental determinants and biotic interactions[J]. Environmental Microbiology, 2023, 25 (6): 1084-1098.
- [32] Listmann L, Hattich G S I, Matthiessen B, et al. Eco-evolutionary interaction in competing phytoplankton: nutrient driven genotype sorting likely explains dominance shift and species responses to CO₂ [J/OL]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 00634. <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.00634/full>.
- [33] 王鹏飞, 刘晨, 潘少朴, 等. 贵州不同营养状态水库轮虫多样性及其对环境因子变化的响应[J]. 生态学杂志, 2025, 44 (1): 164-174.
Wang Pengfei, Liu Chen, Pan Shaopu, et al. Rotifer diversity and its response to environmental factors in reservoirs with different nutritional status in Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44 (1): 164-174.
- [34] Nakajima R, Rimachi E V, Santos-Silva E N, et al. The density and biomass of mesozooplankton and ichthyoplankton in the Negro and the Amazon Rivers during the rainy season: the ecological importance of the confluence boundary[J]. PeerJ, 2017, 5: e3308.
- [35] 安婉玉, 郝子垚, 黎亚辉, 等. 清漯河(许昌段)浮游生物群落结构及其与环境因子关系[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2023, 51 (5): 138-146.
An Wanyu, Hao Ziyao, Li Yahui, et al. Plankton community structure and its relationship with environmental factors in Qingyi River (Xuchang Section) [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2023, 51 (5): 138-146.
- [36] Lu X X, Liu Y, Fan Y W. Diatom taxonomic composition as a biological indicator of the ecological health and status of a river basin under agricultural influence[J]. Water, 2020, 12 (7): 2067.
- [37] 李婉璇, 陈瑜, 林镇美, 等. 南亚热带典型水库浮游生物群落的嵌套结构及互作关系[J]. 水生态学杂志, 2024, 45 (6): 115-124.
Li Wanxuan, Chen Yu, Lin Zhenmei, et al. Nestedness and interspecific interactions within the plankton community in reservoirs of southern subtropical China[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45 (6): 115-124.
- [38] Mwagana P C, Ma C X, Yu H X. Seasonal dynamics of Zooplankton functional groups in relation to environmental variables in Xiquanyan Reservoir, Northeast China[J]. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 2018, 54: 33.
- [39] 吴湘香, 王银平, 张燕, 等. 长江干流浮游动物群落结构及时空分布格局[J]. 水产学报, 2023, 47 (2): 181-190.
Wu Xiangxiang, Wang Yinping, Zhang Yan, et al. Zooplankton community structure and spatio-temporal dynamics in the main stream of the Yangtze River[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47 (2): 181-190.
- [40] Cheng L J, Gao X Y, Wang G W, et al. Intensified sensitivity and adaptability of zooplankton Bosminidae in subtropical shallow freshwater lakes with increasing trophic level[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1121632.
- [41] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C, et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50 (17): 8923-8929.

- [42] 陈克峰, 叶麟, 谭路, 等. 2015 年三峡水库典型支流库湾的浮游植物功能群组成和生态状况[J]. 湿地科学, 2022, 20 (2): 268-276.
Chen Kefeng, Ye Lin, Tan Lu, et al. Composition of phytoplankton functional groups and ecological status of typical tributaries of the Three Gorges Reservoir in 2015[J]. Wetland Science, 2022, 20 (2): 268-276.
- [43] 陈越, 潘保柱, 吴利, 等. 渭河干流与其秦岭北麓典型支流浮游动物群落结构及影响因素[J]. 湖泊科学, 2022, 34 (5): 1630-1641.
Chen Yue, Pan Baozhu, Wu Li, et al. Zooplankton community structure and influencing factors in Weihe River mainstream and its tributaries from the northern foot of Qinling Mountains[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (5): 1630-1641.
- [44] Li Y, Xie P, Zhao D D, et al. Eutrophication strengthens the response of zooplankton to temperature changes in a high-altitude lake[J]. Ecology and Evolution, 2016, 6 (18): 6690-6701.
- [45] 王健, 周天艺, 高文程, 等. 低氧化还原电位对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 生长的抑制及恢复的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24 (4): 528-534.
Wang Jian, Zhou Tianyi, Gao Wencheng, et al. Growth inhibition and recovery from low oxidation reduction potential to *Microcystis aeruginosa*[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24 (4): 528-534.
- [46] 钟可儿, 杨潇, 马吉顺, 等. 长江干流浮游植物群落结构空间异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31 (11): 2458-2472.
Zhong Keer, Yang Xiao, Ma Jishun, et al. Spatial heterogeneity and driving factors of phytoplankton community structure in the main stem of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31 (11): 2458-2472.
- [47] Hall C A M, Lewandowska A M. Zooplankton dominance shift in response to climate-driven salinity change: a mesocosm study[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 861297.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Relationship between the Community Structure and Functional Group Characteristics of Plankton and Environmental Factors in the Xiushan Section of the Hongan River

QI Zongqiang¹, HUANG Jiabin¹, WANG Ziwei¹, DONG Xiaohan¹, SHEN Yanjun¹, ZUO Qing²

(1. Laboratory of Aquatic Ecological Health and Environmental Security, College of Life Sciences,
Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Innovation Institute of Digital and Intelligent

Traditional Chinese Medicine, Chongqing University of Traditional Chinese Medicine, Chongqing 402760, China)

Abstract: To explore the relationship between plankton community structure, functional group characteristics and environmental factors in the Hongan River within the Xiushan section of Chongqing. In June 2025, plankton sampling was conducted at 12 sampling sites along the main stream and tributaries of the Hongan River, and analyses were conducted from both taxonomic and functional group, which relevant environmental factors were also measured. The results showed that: 1) A total of 334 species of phytoplankton belonging to 8 phyla were identified, with Bacillariophyta being absolutely dominant (52.10%). The phytoplankton were divided into 24 functional groups, with littoral benthic diatoms being the dominant functional group. For zooplankton, 84 species belonging to 4 categories were identified, with rotifers accounting for the highest proportion (48.81%); they were classified into 6 functional groups, with protozoan filter-feeders being the dominant one. 2) In terms of spatial distribution, the plankton community in the main stream had high diversity and strong stability, showing the characteristics of multi-functional group coexistence; while the plankton community in the tributaries had low diversity and presented a simplified pollution-tolerant structure. 3) Among the key environmental driving factors, TN, TP, NH₃-N, DO, and Chla jointly shaped the community differences between the main stream and tributaries, and altitude further amplified the local community differentiation. This study reveals the adaptive response mechanism of plankton under the environmental stress gradient, and provides key scientific basis for the aquatic ecological protection and the differentiated management and control of the main stream and tributaries in the Hongan River.

Keywords: the Hongan River; plankton; community structure; functional group; environmental factors; Chongqing

(责任编辑 方 兴)