

赤水河上游（云南段）溪流浮游动物分类群及功能群对比*

刘宝贵¹, 钱洁琼¹, 徐杰^{2/3**}, 李宁昱¹, 金文捷³, 王颖¹, 曾淋钦¹, 徐诺¹, 钟利林¹, 许晓光⁴, 彭国樟³

(1: 浙江海洋大学水产学院, 舟山 316021)

(2: 生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430014)

(3: 流域水生态智能监测预警与保护湖北省重点实验室, 武汉 430010)

(4: 南京师范大学环境学院, 南京 210023)

摘要: 溪流生态系统因其丰富的水生生物多样性和特异性而具有重要生态价值, 但同时也是极为脆弱的生态系统, 亟需得到更多关注和保护。浮游动物作为水生生物食物网的重要组成部分, 其在溪流生态系统中的功能和作用长期被忽视。为了深入探究浮游动物在溪流生态系统中的角色, 本研究以受人类活动影响较小的赤水河源头流域作为研究对象, 对比分析了枯水期(12月)和丰水期(5月)两种不同水文条件下的浮游动物分类群和功能群特征, 以及它们与水环境因子之间的相互关系。研究共鉴定出浮游动物29种, 其中枯水期鉴定出的物种数量(24种)是丰水期(12种)的2倍。与其它水体类型相比溪流浮游动物密度(0.02~4.9 ind./L)极低。依据浮游动物生境偏好、体型、摄食习性等功能将分类群划分为11个功能群, 其中阶段性营浮游生活的底层刮食者类群(SS), 具备游泳能力的中小型捕食者(SP)和小型滤食者(SCC)类群占优势, 反映了对湍流生境的功能性适应策略。本研究发现, 底层刮食者类群(SS)占总功能群的比例可由枯水期的17.7%, 激增至丰水期的68.4%, 表现出对水文转换的敏感响应。此外, Mantel检验结果表明, 功能群的构成与浮游植物藻细胞密度、水温、pH值、氧化还原电位、总磷、氨氮等多种环境因子显著相关, 表现出比分类群更灵敏的环境指示特征。研究表明, 功能群的划分, 可以整合生态位相近的物种, 从而有效弥补分类群在溪流浮游动物现存量评估方面的不足, 为构建溪流生态健康诊断指标体系提供了新的理论视角。

关键词: 分类群; 功能群; 脆弱生态系统; 生境; 水文情势

A Comparative Study on the Taxonomic and Functional Groups of Stream Zooplankton in the Upper Reaches of the Chishui River(Yunnan Section)

Liu Baogui¹, Qian Jieqiong¹, Xu Jie^{2/3**}, Li Ningyu¹, Jin Wenjie³, Wang Ying¹, Zeng Linqin¹, Xu Nuo¹, Zhong Lilin¹, Xu Xiaoguang⁴, Peng Guozhang³

(1: College of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, P.R.China)

(2: China Changjiang Basin Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Changjiang Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan, 430014, P.R.China)

(3: Hubei Key Laboratory of Intelligent Monitoring, Early Warning and Protection for Basin Aquatic Ecology, 430010,

* 2025-04-04 收稿 2025-12-06 收修改稿。

浙江海洋大学人才引进研究基金(JX6311033023)、湖北省技术创新计划项目(2024BCB068)、丹江口水库高光谱遥感水质监测系统高光谱水质监测平台建设项目(ZSY/YG-JA(2024)012)和云南省重点研发计划-赤水河流域绿色治理和发展技术研究及应用示范项目(202203AC100001)联合资助。

** 通信作者; E-mail: xujie@cjjg.mec.gov.cn。

P.R.China)

(4: College of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

Abstract: Stream ecosystems possess significant ecological value due to their rich aquatic biodiversity and unique characteristics, yet they are highly vulnerable and require urgent attention and protection. Zooplankton, as an important component of the aquatic food web, is often overlooked in terms of its functional role in stream ecosystems. To better understand the ecological function of zooplankton in these environments, this study focused on the headwaters of the Chishui River, a minimally disturbed basin, and compared the taxonomic and functional group characteristics of zooplankton under two distinct hydrological conditions: the dry season (December) and the wet season (May). Relationships between these characteristics and water environmental factors were also analyzed. A total of 29 zooplankton species were identified, with species richness in the dry season (24 species) being twice that in the wet season (12 species). Compared to other aquatic systems, stream zooplankton density was extremely low, ranging from 0.02 to 4.9 ind./L. Based on functional traits such as habitat preference, body size, and feeding habit, taxonomic groups were classified into 11 functional groups. Dominant functional groups included the occasional planktonic benthic scraper (SS), the small to medium-sized swimming predator (SP), and the small filter-feeder (SCC), all reflecting adaptive strategies to turbulent lotic habitats. Notably, the proportion of the benthic scraper group (SS) increased sharply from 17.7% in the dry season to 68.4% in the wet season, demonstrating high sensitivity to hydrological shifts. Mantel tests further revealed that functional group composition was significantly correlated with multiple environmental factors, including phytoplankton cell density, water temperature, pH, oxidation-reduction potential (ORP), total phosphorus (TP), and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), indicating that functional groups serve as more sensitive environmental indicators than taxonomic groups. This study demonstrates that functional group classification can integrate species with similar ecological niches, effectively compensating for the limitations of taxonomic approaches in assessing stream zooplankton standing stock, thereby offering a new theoretical perspective for constructing diagnostic indicator systems for stream ecological health.

Key Words: taxonomic groups; functional groups; fragile ecosystem; habitat; hydrological regime

浮游动物是淡水生态系统的重要组成部分,表现出广泛的生态多样性,是富营养化、环境污染、气候变化等生态问题的指示生物^[1]。尽管利用浮游动物作为环境指示生物的相关研究越来越多,但将浮游动物列为生物评价要素(BQEs: biological quality elements)进行生态环境质量评价是当前相关研究的难点。现有浮游动物评价指标主要依赖分类群指标体系,包括物种丰富度参数、群落组成参数、生物多样性参数、耐污敏感参数、现存量参数等,基于功能群指标体系(如生活方式、营养级、运动方式、捕食方式等)的生态评价鲜有研究。

功能群理论通过整合物种相似的生态策略与资源利用模式,被广泛用于生物完整性评价,在许多情况下,基于功能群的分析比传统的分类群能更好地理解群落的功能和结构^[2]。研究表明,基于摄食类型(如滤食者、掠食者)、运动能力(如浮游型、兼性浮游型)和体型结构(如微型、中型)划分的功能群,能够更敏感地反映环境梯度对群落功能的筛选作用^[3-5]。例如,在溪流的湍流中,传统的“滤食”策略效率降低,因此,能够利用底栖生物膜和附着性有机物或进行底栖-浮游耦合摄食的杂食性(Omnivory)和食碎屑性(Detritivory)策略变得更为重要,如枝角类盘肠溇科、泥溇科、桡足类猛水蚤目物种和部分轮虫等^[6]。此外,溪流环境还对浮游动物的运动能力提出了极高要求,拥有强劲运动能力的类群将具有显著优势,而缺乏强运动能力的类群则更容易被水流带走^[7]。总之,溪流环境的水文水动力等物理力量对浮游动物摄食、运动和体型结构等功能性状有严格的筛选、“过滤”作用。因此,功能群指标体系的引入为利用浮游动物进行水生生态系统评价提供了全新的思路,对于阐明溪流浮游动物的群落组装机制及其生态功能具有重要意义。然而,已有研究大都关注于湖泊、水库和大型河流等水体,对溪流生境浮游动物功能群特征缺乏关注。

源头山地溪流生态系统呈现独特的“纵向连续体”特征:其一定的海拔梯度形成水温、溶氧和底质类型的空间异质性,而水文水动力则塑造特殊的生物适应策略^{错误:未找到引用源。}。颀志刚等^[9]对瓯江水系上游一

级支流松荫溪发源地的高碧溪和成屏水库的鱼类物种进行调查，发现高碧溪 α -多样性指数均高于成屏水库，其中高碧溪 Magalef 指数近为成屏水库 1.5 倍；何燕飞^[10]对宜兴市区域内 30 个点位进行底栖动物群落组成调查，发现宜兴的底栖动物多样性呈溪流>河流>水库>湖泊的变化趋势。因此，溪流生物群落也可能具有显著的特化现象，而当前对基于浮游动物功能群的水生态评价方面存在显著的不足。

欧美等发达国家于上世纪 90 年代将水生生物纳入了水生态健康评价体系，然而，时至今日，欧盟水框架指令（WFD: Water Framework Directive）、美国环保局（EPA: Environmental Protection Agency）、中国生态环境部和中国环境监测总站等科研和管理机构在筛选 BQEs 时，仍未将浮游动物功能群涵盖其中。在中国环境科学学会发布的团体标准《河湖水生生物完整性评价技术指南》（T/CSES 171-2024）中，浮游动物在河流中仅作为“可选”指标作为参考。现有溪流生态评价技术框架仍沿用河湖生态系统的参数阈值，不能体现溪流浮游动物的功能特性。

因此，本研究选取赤水河上游（云南段）溪流生境为对象。通过对比浮游动物分类群与功能群的多样性、组成及结构特征，研究了二者对水环境的响应差异。旨在：（1）揭示溪流生境浮游动物功能特征；（2）提高浮游动物在溪流生境生态环境质量评价中的应用价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

赤水河，系长江右岸一级支流，发源于云南省昭通市镇雄县赤水河镇漈水岩，其云南段境内流域面积 1976.6 km²，范围位于 104° 44' 20" ~105° 20' 25" E，27° 25' 16" ~27° 56' 80" N，干流全长 97.0 km，一级支流全长 142.8 km，二级支流全长 84.9 km^[11]，主要支流有雨河、石坎河、倒流水、铜车河等（图 1）。非公开数据显示，2022 年，赤水河（云南段）降雨量平均为 1027.5mm，水资源量达 20.31×10⁹ m³；2023 年的降雨量平均为 1094.7 mm，水资源量达 21.64×10⁹ m³。赤水河流域（云南段）属于高原、丘陵地带，平均海拔超过 1400 m，受高原山地地貌影响，本区域呈现高山深切河谷特征：河谷深切狭窄，山势陡峻，水资源及气象气候多样。复杂的地质特征也造就了流域内干支流多具备溪流特征：河道狭窄落差大，水浅流急，底质以卵石和砾石为主等^[12]。赤水河多个源头支流均被划入“长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区”^[13]，构成维系长江上游水生生物多样性的关键生态廊道。

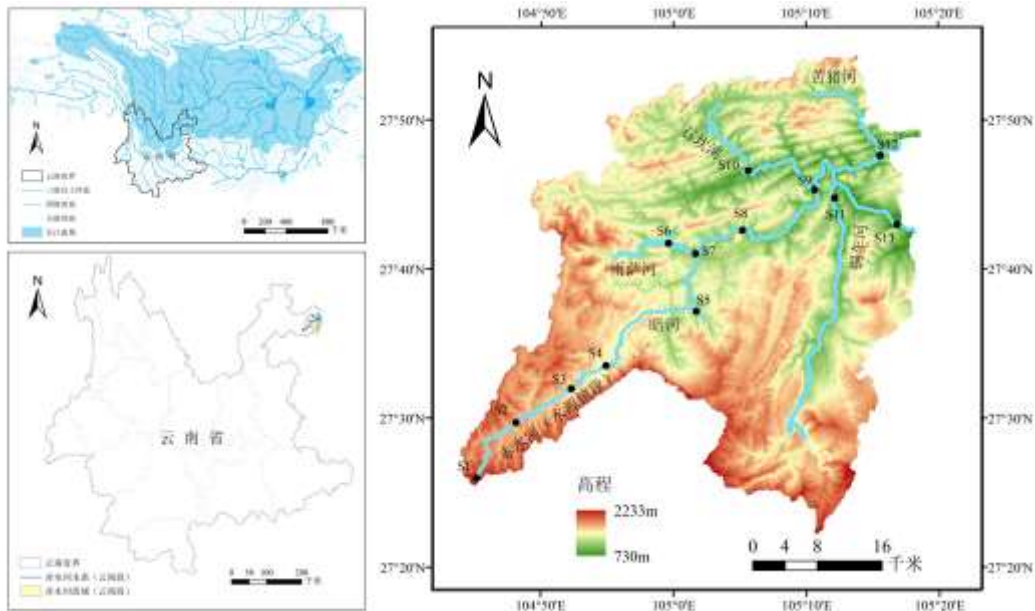


图 1 赤水河云南段调查点位

Fig.1 Sampling sites in the Yunnan section of the Chishui River

1.2 监测点位布设与样品采集

分别于 2022 年 12 月（枯水期）和 2023 年 5 月（丰水期）对赤水河云南段进行了生态调查。本次调查共在干流设置 8 个点位，支流设置 5 个点位，其中 S1~S4 号点位位于溪流发源地，海拔最高，水面较为狭窄，水流较小；S7、S8、S9 和 S12 位于下游，水面相对较宽，水流更大；其它点位位于支流。为了保证研究的可持续性，所设采样点尽可能覆盖研究区域内的水质控制断面，涵盖岔河渡口国家级控制断面 1 个，洗白、石坎云南省级控制断面 2 个和苦猪河、铜车河、雨河和洛甸河等昭通市级控制断面 4 个。

浮游甲壳动物定量样品使用 5L 采水器于溪流的沿岸带和中心区、静水区和湍流区等不同位置采集 10 次，累计采集水样 50 L，经 25 # 浮游生物网（孔径 64 μm ）过滤后，将滤后样品全部转移至 100 ml 样品瓶中，并加入最终浓度为 4% 的甲醛溶液固定。样本送回实验室后使用解剖显微镜在 10~100 倍镜下对全部样品进行鉴定计数，物种鉴定主要依据《中国动物志——淡水桡足类》^[14]和《中国动物志——枝角类》^[15]，大部分浮游动物个体鉴定到种（或属）水平，由于桡足类缺乏成体，无法鉴定到种水平，仅鉴定为桡足类无节幼体、剑水蚤目、哲水蚤目和猛水蚤目等四类。轮虫和浮游植物共用一个样品：每个采样点处先使用塑料水瓢于溪流的沿岸带和中心区、静水区和湍流区等不同位置分别采集水样置于水桶内搅拌均匀，然后再采集水样 1 L，于现场加入 15 ml 鲁哥氏液固定，带回实验室静置 48 h 以上，之后采用虹吸法浓缩至 30 mL。轮虫分析时，使用 1 ml 浮游生物计数框，在普通光学显微镜 40~400 倍镜下平行计数至少 3 次，鉴定主要依据《中国淡水轮虫志》^[16]。浮游植物分析时，用移液枪吸取 0.1 ml 摇匀的样品置于 0.1ml 计数框中进行计数和鉴定，每个样品平行计数至少 3 次，鉴定主要依据《中国淡水藻类：系统、分类及生态》^[17]，并通过视野法计算浮游植物密度^[18]。采用天然基质法采集着生藻类，选取容易刮取和测量的硬质天然基质，用硬质毛刷刷取基质表面的着生藻类，用纯水反复冲洗硬质毛刷及基质表面，收集冲洗混合物于采样瓶中，加入水样体积的 1%~1.5% 鲁哥氏液固定，带回实验室处理后，参考浮游植物鉴定方法进行分析。

用多参数水质分析仪（YSI PRO professional，美国）原位测定水体溶解氧（DO）含量、电导率（Cond）、溶解性总固体（TDS）、pH、氧化还原电位（ORP）和水温（WT）等环境参数。同时现场采集水样放置在车载冰箱中设置 0 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存，运至实验室后，参照《水和废水监测分析方法》（第四版）的技术要求分别使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮（TN），钼酸铵分光光度法测定总磷（TP）、纳氏试剂分光光度法测定氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、酸性滴定法测定高锰酸盐指数（ COD_{Mn} ）、丙酮提取分光光度法测定叶绿素 a（Chl-a）等水体理化指标。

1.3 数据分析

水质指数（WQI）是基于物理化学参数的水质评价指数，介于 0 和 100 之间，得分越高表明水质状况越好。水质状况根据 WQI 值分为 5 个等级：差（ $0 \leq \text{WQI} \leq 25$ ）、一般（ $25 < \text{WQI} \leq 50$ ）、中等（ $50 < \text{WQI} \leq 70$ ）、良好（ $70 < \text{WQI} \leq 90$ ）、优秀（ $\text{WQI} > 90$ ）^[19]。本研究依据 DO、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、高锰酸盐指数、pH 五项指标计算 WQI 指数，计算公式如下：

$$\text{WQI} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式中， n 为参与计算的水质指标的个数， C_i 和 P_i 分别为变量 i 的归一化值和权重。本研究利用 WQI 评估赤水河水质，其指标权重、赋分标准及范围参考相关文献确定^[20]。

采用优势度指数（ Y ）确定优势类群种类，当 $Y \geq 0.02$ 时表示该种为优势类群。计算公式如下：

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (2)$$

式中， n_i 表示第 i 种物种的个数， N 表示所有物种的个体总数， f_i 表示出现的频率。

对浮游动物分类群和功能群与水环境因子进行 Pearson 相关分析和 Mantel 检验。以上分析均通过 R4.3.2 软件中的 ggcrr、dplyr、ggpubr、ggsci 包在 R studio 环境中进行。

1.4 功能群划分

基于不同浮游动物类群的生态独特性和功能性状权重差异，如枝角类的生态功能高度依赖其形态适应性（甲壳结构、附肢特化等）和复杂的生活史策略（孤雌生殖与有性生殖交替），桡足类和轮虫的生

态角色更依赖摄食类型（滤食、捕食）和运动方式（如桡足类的跳跃运动），将检出的枝角类按照 Eric 等^[21]提出的淡水枝角类功能群分类方法划分，桡足类和轮虫按照 Gavrilko 等^[2]提出的淡水浮游动物功能群分类方法划分。Eric 等选择了 5 个生存性状、4 个形态性状和 1 个行为性状，将摄食、生长、繁殖、生存四个生态功能进一步细分为不同的性状类型：形态、生理、行为和生活史。Gavrilko 等仅选用最大体长、营养类群、摄食类型和运动类型 4 个功能性状作为浮游动物功能群的划分依据。

表 1 浮游动物功能群划分依据

Tab.1 The basis for the classification of zooplankton functional groups

功能群	特征	生态角色
BP 底栖捡食者	具有独特的摄食方式（用胸肢拾取藻类和碎屑，而非刮食沉积物），栖息于湖泊沿岸区的底泥或临时水体底部	参与有机碎屑的分解和能量传递
SS 底层刮食者	具有刮食沉积物中藻类和碎屑的胸肢，体型小，每窝孤雌生殖卵数量少	在富营养化水体中可能迁移至敞水区，主要参与有机质循环
LF 沿岸滤食者	附着于水面或植物下以躲避捕食者，游泳能力较弱，滤食浮游有机物	沿岸区资源利用，连接能量流动
BFF 滤菌滤食者	体型极小，水平游动滤食	高效摄食细菌和原生生物
SP 中小型捕食者	体型较小，具游泳能力，摄食方式为捕食	捕食小型浮游生物，控制微生物群落和幼体阶段浮游动物
RVS 垂直滤食-吸食性轮虫	具游泳和爬行能力，摄食方式为垂直滤食和吸食	游泳与爬行能力使其在沉积物-水界面活动，将底层有机物重新悬浮至水柱，加速营养循环
LG 垂直滤食游泳轮虫	仅游泳能力，摄食方式为垂直滤食	摄食浮游植物和细菌，影响藻类群落动态
RSC 底栖吸食者	具游泳和爬行能力，摄食方式为吸食	专性吸食腐屑和附着细菌，分解水体中的有机颗粒，尤其在浅水或临时水体中起关键作用
RV 垂直滤食游泳轮虫	仅游泳能力，摄食方式为垂直滤食	利用纤毛产生涡流摄取藻类控制浮游植物生物量
MDS 混合摄食游泳轮虫	仅游泳能力，摄食方式为捕食和吸食	捕食其他轮虫或小型浮游生物
SCC 小型初级滤食者	体型较小，仅游泳能力，摄食方式为初级滤食	滤食微小藻类和细菌，适应高捕食压力环境，替代大型滤食者

2 结果与分析

2.1 水环境因子特征分析

现场监测数据所示，调查期间赤水河上游云南段枯水期水温变化范围是 5.4~13.5 °C，平均值为 10.1 °C；pH 变化范围 7.89~8.52，平均值为 8.21；溶解氧含量变化范围 6.5~11.8 mg/L，平均值为 9.4 mg/L；总氮含量变化范围 0.17~0.53 mg/L，平均值为 0.39 mg/L；总磷含量变化范围 0.02~0.10 mg/L，平均值为 0.06 mg/L；氨氮含量变化范围 0.07~0.22 mg/L，平均值为 0.14 mg/L；高锰酸盐指数变化范围 0.83~2.31 mg/L，平均值为 1.52 mg/L；着生藻类细胞密度变化范围 12.2~982.4×10⁴ cells/cm²，平均值为 196.2×10⁴ cells/cm²；浮游植物细胞密度变化范围 54.7~1447.1×10⁴ cells/L，平均值为 228.2×10⁴ cells/L。丰水期水温变化范围 15.9~25.9 °C，平均值为 19.4 °C；pH 变化范围 8.12~8.91，平均值为 8.38；溶解氧含量变化范

围 4.8~9.36 mg/L, 平均值为 7.12 mg/L; 总氮含量变化范围 0.14~0.48 mg/L, 平均值为 0.34 mg/L; 总磷含量变化范围 0.01~0.17 mg/L, 平均值为 0.07 mg/L; 氨氮含量变化范围 0.07~0.35 mg/L, 平均值为 0.20 mg/L; 高锰酸盐指数变化范围 0.55~2.27 mg/L, 平均值为 1.12 mg/L; 着生藻类细胞密度变化范围 0.9~816.1×10⁴ cells/cm², 平均值为 118.2×10⁴ cells/cm²; 浮游植物细胞密度变化范围 56.8~410.4×10⁴ cells/L, 平均值为 247.0×10⁴ cells/L (图 2)。

WQI 指数 (图 3) 计算结果显示, 枯、丰水期 WQI 均高于 90, 综合水质评价结果均为“优秀”。

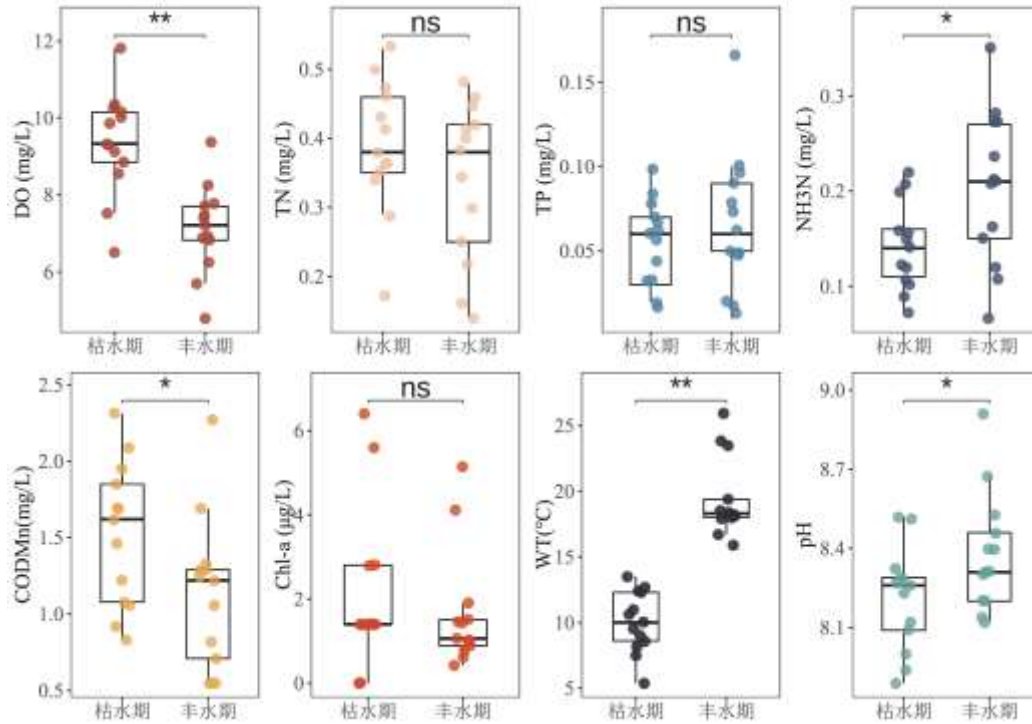


图 2 赤水河云南段枯、丰水期水体理化因子箱线图 (ns 表示丰枯水期之间差异不显著, *表示差异达到显著水平, 即 $0.01 < p \leq 0.05$; **表示差异达到极显著水平, 即 $p < 0.01$)

Fig.2 Boxplot of physicochemical factors during dry and wet seasons in the Yunnan section of the Chishui River (ns indicates no significant difference between wet and dry periods, * indicates a significant difference, that is, $0.01 < p \leq 0.05$; ** indicates an extremely significant difference, that is, $p < 0.01$)

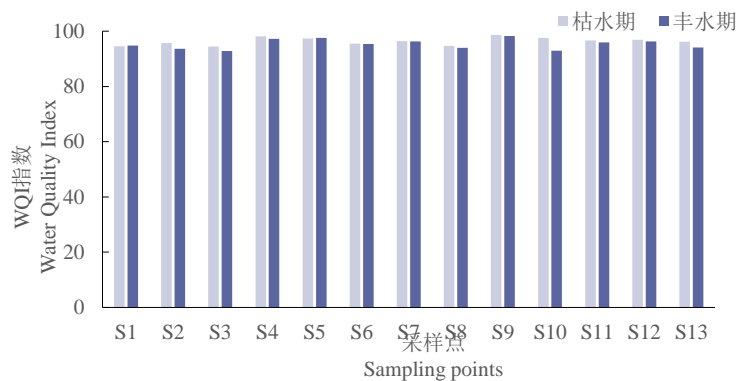


图 3 赤水河云南段枯、丰水期 WQI (Water Quality Index) 指数空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of WQI (Water Quality Index) in the Yunnan section of the Chishui River during dry and wet seasons

2.2 浮游动物分类群生态特征分析

枯水期共检出浮游动物 24 种，其中轮虫种类最多，有 18 种，占整个浮游动物群落的 75%；桡足类 2 种，占 8.3%；枝角类 4 种，占 16.7%。丰水期共检出浮游动物 12 种，其中枝角类最多，有 7 种，占 58.3%；轮虫 3 种，占 25%；桡足类 2 种，占 16.7%。

枯水期浮游动物丰度的平均值为 1.18 ind./L，丰度的变化范围为 0.06~4.90 ind./L；丰度最高点与最低点丰度相差 80 余倍。丰水期浮游动物丰度的平均值为 0.51 ind./L，丰度的变化范围为 0.02~2.60 ind./L，丰度最高点与最低点相差达到 130 倍（图 4）。以优势度指数 $Y \geq 0.02$ 作为判断标准，丰枯水期共确定浮游动物优势类群 5 类：其中枯水期优势类群依次为尖额溞($Y=0.12$)、剑水蚤($Y=0.09$)、猛水蚤($Y=0.03$)和异尾轮虫($Y=0.03$)；丰水期优势类群依次为尖额溞($Y=0.17$)、平直溞($Y=0.12$)和猛水蚤($Y=0.11$)；猛水蚤和尖额溞为丰枯水期共同优势类群。

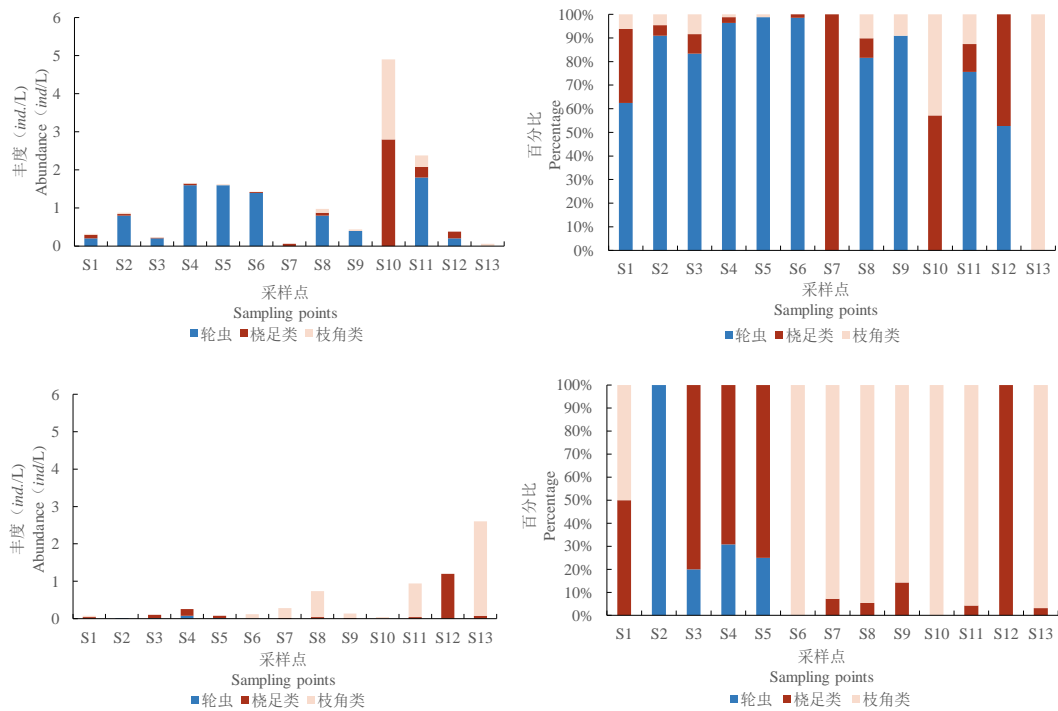


图 4 赤水河云南段浮游动物丰度构成分布情况（上：枯水期；下：丰水期）

Fig.4 Distribution of zooplankton abundance in the Yunnan Section of the Chishui River (upper panel: dry season; lower panel: wet season)

2.3 浮游动物功能群特征分析

按照 Eric 等人和 Gavrillo 等人提出的淡水浮游动物功能群分类方法，将丰、枯两季节赤水河浮游动物 29 种分类群共划分为 11 个功能群（表 2）。

表 2 赤水河云南段浮游动物功能群划分结果

Tab. 2 Classification of functional groups of zooplankton in the Yunnan section of the Chishui River

物种 s	拉丁名	门类	功能群
钝角狭甲轮虫	<i>Colurella obtusa</i>	轮虫	LG
鬼轮虫属	<i>Trichotria</i> sp.	轮虫	LG
臂尾轮虫属	<i>Brachionus</i> sp.	轮虫	LG
蒲达臂尾轮虫	<i>Brachionus budapestinensis</i>	轮虫	LG
壶状臂尾轮虫	<i>Brachionus urceolaris</i>	轮虫	LG
真跳轮虫	<i>Eudactylota eudactylota</i>	轮虫	LG
竖琴须足轮虫	<i>Euchlanis lyraa</i>	轮虫	LG
须足轮虫属	<i>Euchlanis</i> spp.	轮虫	LG
盘状鞍甲轮虫	<i>Lepadella patella</i>	轮虫	LG
高跳轮虫	<i>Scaridium longicaudum</i>	轮虫	RSC
粗颈轮属	<i>Macrotrachela</i> sp.	轮虫	RSC
异尾轮属	<i>Trichocerca</i> spp.	轮虫	RSC
腔轮虫属	<i>Lecane</i> spp.	轮虫	RVS
月形腔轮虫	<i>Lecane luna</i>	轮虫	RVS
唇形叶轮虫	<i>Notholca labis</i>	轮虫	RV
螺形龟甲轮虫	<i>Keratella cochlearis</i>	轮虫	RV
尖角单趾轮虫	<i>Monostyla hamata</i>	轮虫	RV
月形单趾轮虫	<i>Monostyla lunaris</i>	轮虫	RV
皱甲轮属	<i>Ploesoma</i> sp.	轮虫	MDS
前节晶囊轮虫	<i>Asplanchna priodonta</i>	轮虫	MDS
象鼻溞属	<i>Bosmina</i> spp.	枝角类	BFF
尖额溞属	<i>Alona</i> spp.	枝角类	SS
平直溞属	<i>Pleuroxus</i> spp.	枝角类	SS
盘肠溞属	<i>Chydorus</i> spp.	枝角类	SS
无刺大尾溞	<i>Leydigia acanthocercoides</i>	枝角类	SS
裸腹溞属	<i>Moina</i> spp.	枝角类	LF
底栖泥溞	<i>Ilyocryptus sordidius</i>	枝角类	BP
猛水蚤目	<i>Harpacticoida</i>	桡足类	SCC
剑水蚤目	<i>Cyclopoidea</i>	桡足类	SP

11 个功能群中 LG 功能群所包含的分类种类最多，为 9 种，占总数的 31.03%；其次为 SS 和 RV 功能群，为 4 种，占总数的 13.79%（图 5）。

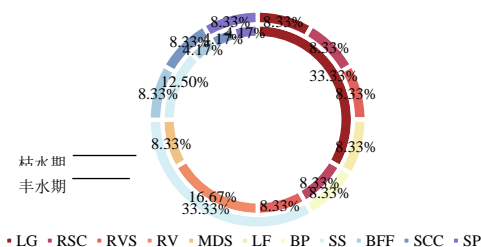


图 5 赤水河云南段浮游动物功能群种类组成

Fig.5 Species composition of zooplankton functional groups in the Yunnan section of the Chishui River

枯水期主要以 SS 和 SP 功能群占优势，占比分别达到 17.7%和 17.1%。丰水期以 SS 功能群占显著优势，占比为 68.4%，其后 SCC 功能群优势较大，占比 21.7%。以功能群优势度指数 (Y_f) 判断 (图 6)，枯水期占优势的功能群依次为 SS($Y_f=0.14$)、SP($Y_f=0.09$)、LG($Y_f=0.08$)、RVS($Y_f=0.06$)、RSC($Y_f=0.05$)和 SCC、RV($Y_f=0.04$)；丰水期占优势的功能群依次为 SS($Y_f=0.37$)、SCC($Y_f=0.12$)和 SP($Y_f=0.02$)。

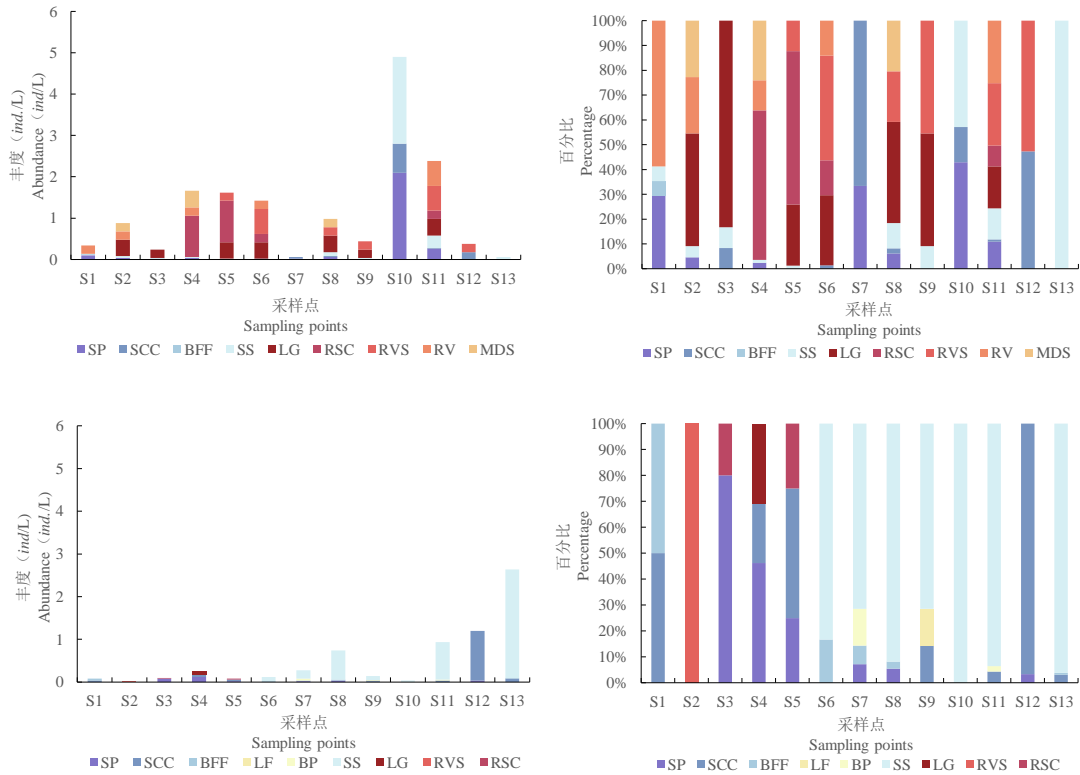


图 6 赤水河云南段浮游动物功能群空间分布特征 (上: 枯水期; 下: 丰水期)

Fig.6 Spatial distribution characteristics of zooplankton functional groups in the Yunnan section of the Chishui River (upper panel: dry season; lower panel: wet season)

2.4 浮游动物分类群及功能群与环境因子的关系探究

Mantel 检验结果表明功能群累计与 15 个环境参数显著相关，而浮游动物分类群的优势类群仅与 7 个环境因子显著相关 (图 7)。枯水期浮游动物优势类群与 TP、NH₃-N、WT、ORP 显著正相关，丰水期浮游动物优势类群与 NH₃-N 显著正相关。枯水期 SP 功能群与浮游植物丰度显著正相关 ($p<0.05$)，与着生藻类细胞密度呈极显著正相关 ($p<0.01$)；RSC 功能群与 TP 呈显著正相关 ($p<0.05$)，与 NH₃-N 呈极显著正相关 ($p<0.01$)；RV 功能群与 COD_{Mn}、WT 呈极显著正相关 ($p<0.01$)，与 pH、ORP 显著正相关 ($p<0.05$)；MDS 功能群与 TN 呈显著正相关 ($p<0.05$)。丰水期 SP 功能群与 ORP 呈极显著正相关 ($p<0.01$)，与 pH、WT 呈显著正相关 ($p<0.05$)；BFF 功能群与浮游植物丰度呈显著正相关 ($p<0.05$)。

3 讨论

本研究揭示了浮游动物分类群和功能群在溪流生态系统中的特异性和功能群划分在溪流生境健康评价中的应用潜力：首先分类学层面，所研究溪流中浮游动物密度 (0.02~4.9 ind./L) 较低；其次，功能特性层面，溪流水体优势类群以兼营底栖生活的刮食者类群 (SS)、中小型捕食者 (SP) 和小型初级滤食

者（SCC）占优势；第三，相比于分类群，功能群的划分提升了浮游动物对关键环境参数（如水文水力特征和着生藻类细胞密度等）响应的灵敏度。

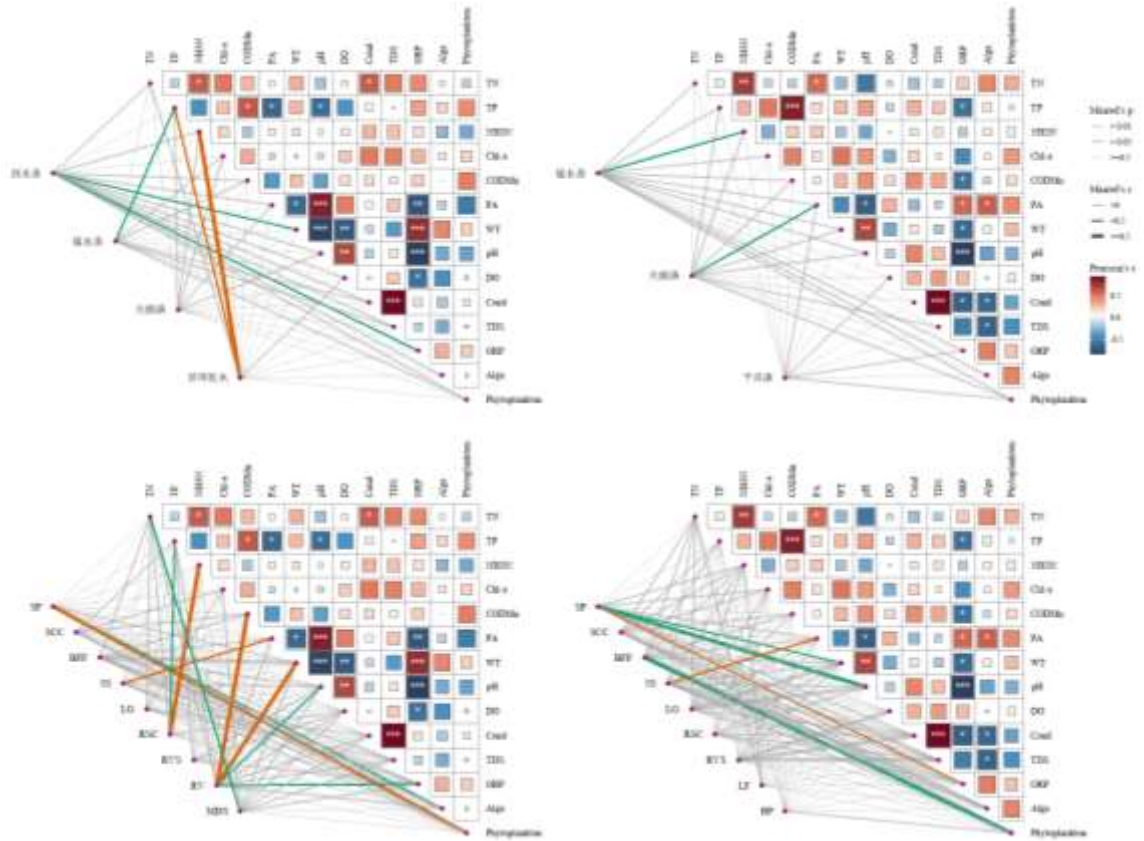


图7 丰（右）、枯（左）水期浮游动物优势种（上）及功能群（下）与水环境因子的 Mantel 检验

Fig.7 The Mantel test was conducted to examine the correlations between the dominant species of zooplankton (upper panel) and their functional groups (lower panel) with various water environmental factors during both the wet (right panel) and dry (left panel) seasons

溪流生态系统特有的水文特征可能是形成浮游动物分类群物种多样性和生物群落格局的关键驱动因子。溪流流速快，丰、枯水期径流量差异较大^[22]，一方面湍流作用直接抑制浮游生物的生长和繁殖；另一方面溪流营养盐的浓度低（TP 平均浓度为 0.06 mg/L）、滞留时间短^[23-24]，从而导致浮游植物生物量低，进而影响许多以浮游植物为食的浮游动物的增殖和生长^[25]。这些机制共同支持“上行效应（bottom-up effect）”理论在本研究区的适用性，具体表现为浮游动物丰度与藻细胞密度呈显著正相关。此外，从分类群物种数量上看，枯水期浮游动物组成以轮虫种类数最多，这一研究结果与 Picapedra 等^[26]的研究结果一致。溪流的理化环境与水文条件波动较大，而轮虫为孤雌生殖，且个体小、繁殖快、生命周期短，能够在短时间内快速适应这种动态环境波动变化^[27-29]。

所研究溪流浮游动物功能群以阶段性营浮游生活的底层刮食者类群（SS）、具备游泳能力的中小型捕食者（SP）和小型滤食者（SCC）类群占优势。这与非溪流生境的研究相比差异较大：如中国东北西泉眼水库春季以滤食性轮虫（RF）占主导（约 80%），夏季以肉食性轮虫（RC）占优势（约 36%），秋季以小型滤食性枝角类和桡足类（SCF）占优势（约 27%）^[30]；波兰的 Goldap 湖则以轮虫滤食者（RF）全年占优势，尤其在夏季；小型滤食性枝角类和桡足类（SCF）仅在春季较为丰富^[31]；塔里木河的四个水库以小型滤食性枝角类和桡足类（SCF）为核心功能群^[32]。浮游动物功能群对溪流生境的特异性适应，可能是导致这种差异的关键因素。

Mantel 分析表明, 浮游动物分类群与功能群对环境梯度的响应明显不同: 分类群结构主要受营养盐、水温、氧化还原电位驱动 ($p < 0.05$), 更多反映环境筛选作用, 而功能群还与 COD_{Mn} 、浮游植物和着生藻类藻细胞密度等多元因子关联, 进一步体现了生态位特异性与资源利用策略的差异。水温是影响浮游动物分布的重要因素^[33], 研究结果表明水温与 SP 和 RV 功能群呈现显著正相关关系, 这与林青等^[34]、Ju 等^[35]的研究结果类似, 但在丰水期水温增高的情况下, 浮游动物总密度却大幅降低, 这说明溪流湍流环境对浮游动物影响更大, 但是水温的变化可能驱动了优势功能类群的演替。水体 pH 值对浮游动物也具有重要影响, 不同种类的轮虫适宜生长的 pH 不同, 许多枝角类也对较高或较低的 pH 值非常敏感^[34], 但本研究显示仅浮游动物功能群与 pH 存在显著相关性, 浮游动物分类群并未显示, 这揭示了浮游动物功能群对 pH 的敏感度。另外, COD_{Mn} 反映水体中有机碎屑的含量, 是浮游动物的重要食物来源, 研究结果中仅浮游动物功能群受到 COD_{Mn} 的显著影响, 这进一步证实了功能群对环境的响应更为灵敏。

相对于浮游动物分类群的指标体系, 功能群的特征与环境的联系更为密切^[36], 溪流生境中功能群比分类群更直接地反映了影响浮游动物群落的生态过程, 尤其是更能反应对水文变化的响应^[37]。从摄食类型来看, 尽管丰水期浮游动物总密度大幅降低, 但是丰水期底层刮食者类群 (SS) 的百分比激增 (17.7% → 68.4%)。着生藻类是溪流生态系统中主要的初级生产者^[26], 浮游动物分类群与着生藻类和浮游藻类之间的营养联系并未达到显著水平, 但浮游动物功能群与着生藻类和浮游藻类的关系显著, 揭示了浮游动物功能群对藻类的敏感度。这可能源于洪水脉冲作用下刮食者的资源竞争优势, 并迫使群落向附着策略转型^[38]。此前, 已有研究习惯于关注营养盐浓度、食物丰富度和捕食压力的影响: 例如对海南省长旺河 (Changwang)、美舍河 (Meishe)、五源河 (Wuyuan) 的浮游动物功能群的研究发现, 营养盐促进滤食者 (SCF、MCF) 与中型肉食者 (MCC) 生长; 大型滤食者 (LCF、LCC) 稀少, 可能与食物资源不足、鱼类捕食压力有关^[38]。而底层刮食者类群 (SS) 对溪流丰枯水期转换的敏感响应的现象值得在未来的研究中进一步验证和探索。

溪流浮游动物功能群的划分还可以印证运动方式、体型等生态适应策略: 例如, 功能群以体型较小的、可以营底栖生活的或具备一定游泳能力的个体占优势, 它们可以很好的应对激流的环境, 会根据水流调整自己的行为等^[39]。但这些生态适应策略是否有更直接的证据证明还有待将来进一步的探究。受赤水河云南段河谷深切、山势陡峻、交通可达性差以及极端匮乏的历史本底数据的客观条件制约, 本研究目前的采样站点数量和调查频率可能降低了我们对某些稀有功能群分布的评估精度, 未能完全解析关键水文事件对浮游动物群落的剧烈扰动和后续的恢复动态。此外, 现有采样方法 (水柱采样) 也有可能低估底栖兼性浮游动物 (如猛水蚤目) 的真实丰度。因此, 我们建议, 未来需要设计一种专门的采用网具来解决山区源头溪流浮游动物密度过低的问题; 同时, 将来的研究需要在更密集的采样设计和更多的案例研究中进行验证。

4 结论

本研究通过整合分类学和功能生态学方法, 系统解析了赤水河上游溪流浮游动物群落的结构特征及其影响因素: 揭示了其群落密度低、物种数和丰度枯水期显著高于丰水期的基本特征; 优势功能群为适应湍流生境的底层刮食者 (SS)、中小型捕食者 (SP) 与小型滤食者 (SCC), 其中 SS 群对水文转换响应极为敏感, 丰水期占比激增。相比于传统分类群, 功能群划分能有效整合生态位相近物种, 弥补溪流浮游动物存量评估中分类群的不足; 功能群与多种环境因子关联更显著, 表现出更优的环境指示灵敏度。研究建议将来可重点发展基于功能群的多尺度评价体系, 如将 SS 等功能群占比纳入溪流水动力扰动评价体系。

5 参考文献

- [1] Ulku NT, Nuray EA. Seasonal Dynamics of Riverine Zooplankton Functional Groups in Turkey: Kocaçay Delta as a Case Study. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, 20(1):69-77. DOI:10.4194/1303-2712-v20107.
- [2] Gavrilko DE, Shurganova GV, Kudrin IA, et al. Identification of freshwater zooplankton functional groups based on the functional

- traits of species. *Biology Bulletin*,2021,**48**(10):1849–1856. DOI:10.1134/s1062359021100095.
- [3] Walker BH. Biodiversity and ecological redundancy. *Conservation Biology*,1992,**6**(1):18-23. DOI:10.1046/j.1523-1739.1992.610018.x.
- [4] Symstad AJ, Siemann E, Haarstad J. An experimental test of the effect of plant functional group diversity on arthropod diversity.*Oikos*,2000,**89**(2):243-253.DOI:10.1034/j.1600-0706.2000.890204.x.
- [5] Tilman D, Knops J, Wedin D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes.*Science*,1997,**277**(5330):1300-1302. DOI:10.1126/science.277.5330.1300.
- [6] Pécseli HL, Trulsen JK, Fiksen Ø. Predator-encounter and capture rates in turbulent environments. *Progress in Oceanography*, 2015, **101**(1):14-32.DOI:10.1215/21573689-2768717.
- [7] Karaouzas I, Theodoropoulos C, Vourka A, et al. Stream invertebrate communities are primarily shaped by hydrological factors and ultimately fine-tuned by local habitat conditions. *Science of The Total Environment*,2019,**665**:290-299.DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.02.134.
- [8] Golden, H.E., Christensen, J.R., McMillan, H.K. et al. Advancing the science of headwater streamflow for global water protection. *Nature Water*,2025,**3**:16 – 26. DOI:https://doi.org/10.1038/s44221-024-00351-1.
- [9] Xie ZG, Ruan G. Sensitivity and Effectiveness Evaluation of Environmental DNA Metabarcoding for Monitoring Fish Species Diversity in Stream and Reservoir Water. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023,**39**(6):157-164. DOI:10.11924/j.issn.1000-6850.casb2022-0317. [颜志刚, 阮高. 环境 DNA 宏条形码技术应用于溪流和水库鱼类物种多样性监测的敏感性和有效性评估.中国农学通报,2023,**39**(6):157-164.]
- [10] 何燕飞. 江苏省昆山市和宜兴市河流与湖泊大型底栖无脊椎动物群落特征与水质生物评价[学位论文]. 南京:南京农业大学, 2020.
- [11] Li JZ, Li YM, Yu YH, et al. Land use driving analysis and future development prediction of the Chishui River Basin(Yunnan Section) based on the PLUS-Geo Detector Model. *Environmental Science*,1-23[2025-09-02]. DOI:10.13227/j.hjcx.202411222.[李建忠,李云梅,余艳红,等.基于 PLUS-GeoDetector 模型的赤水河流域(云南段)土地利用驱动分析及未来发展预测.环境科学,1-23[2025-09-02]. DOI:10.13227/j.hjcx.202411222.]
- [12] Wang Q, Xia ZJ, Zeng XM, et al. Age, Growth and Reproduction of *Pseudogyrinocheilus procheilus* in the Upper Reaches of the Chishui River. *Chinese Journal of Zoology*,2025, **60**(02):201-212.[王钦,夏治俊,曾旭茂,等.赤水河上游泉水鱼的年龄、生长与繁殖特征.动物学杂志,2025,**60**(02):201-212.]
- [13] Tang C, Deng HT, Tian HW, et al. Analysis on the characteristics of fish community structure in the main stream section of the National Nature Reserve for Rare and Endemic Fish in the upper reaches of the Yangtze River *Journal of Fisheries of China*,2023,**47**(02):81-100.DOI:10.11964/jfc.20220913696 [唐成,邓华堂,田辉伍,等.长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流段鱼类群落结构特征分析.水产学报,2023,**47**(02):81-100.]
- [14] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 中国动物志——淡水桡足类.北京:科学出版社,1979.
- [15] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 中国动物志——枝角类.北京:科学出版社,1979.
- [16] 王家楫,中国科学院水生生物研究所. 中国淡水轮虫志.北京:科学出版社,1961.
- [17] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态.北京:科学出版社,2006.
- [18] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法.北京:科学出版社,1991.
- [19] Wu ZS, Lai XJ, Li KY. Water quality assessment of rivers in Lake Chaohu Basin (China) using water quality index. *Ecological Indicators*,2021,**121**:107021. DOI:10.1016/j.ecolind.2020.10702.
- [20] Geng J, Wang Y, Hu SG, et al. WQI-based water quality assessment and spatial-temporal change in plain river network areas. *Environmental Engineering*,2023,**41**(06):187-193+209.DOI:10.13205/j.hjgc.202306025.[耿姣,王洋,胡术刚,等.基于 WQI 的平原河网地区河流水质评价与时空变化分析.环境工程,2023,**41**(06):187-193+209.]
- [21] Eric CR, Gu YL, Rey SP, et al. Identifying functional groups and ecological roles of tropical and subtropical freshwater Cladocera in Asia. *Hydrobiologia*,2017,**799**(1):83-99. DOI:10.1007/s10750-017-3199-y.
- [22] Ji SC, Li Y, Zhao W, et al.Study on the community structure of zooplankton in Biliuhe reservoir and basin. *Journal of biology*,

- 2018,**35**(06):68-73. DOI:10.3969/j.issn.2095-1736.2018.06.068. [季琛琛,李媛,赵文,等. 碧流水库及其流域河流浮游动物的群落结构研究.生物学杂志,2018,**35**(06):68-73.]
- [23] 魏莹,解宜兴,毛盼,等.湖南张家界大鲵国家级自然保护区河流浮游动物群落特征.湖南林业科技,2023,**50**(3):59-65.
- [24] Wang S, Yang T, Li XP, et al. Zooplankton community structure and the water quality in the Wei river basin. *Acta Hydrobiologica Sinica*,2019,**43**(6):1333-1345.DOI:10.7541/2019.157.[王硕,杨涛,李小平,等.渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价.水生生物学报,2019,**43**(6):1333-1345.]
- [25] Jiang X, Liu Y, Su WX, et al. Seasonal and flow regime differences should be considered in explaining zooplankton metacommunity assembly. *Global Ecology and Conservation*,2023,**47**:02653.DOI:10.1016/j.gecco.2023.e02653.
- [26] Picapedra PHS, Fernandes C, Lansac FA. Zooplankton community in the Upper Parnaiba River (Northeastern, Brazil). *Brazilian Journal of Biology*,2017,**77**(2):402-412. DOI:10.1590/1519-6984.20215.
- [27] Wang T, Liu Y, Quan QM, et al. Community structure characteristics of zooplankton in main freshwater rivers of Jiangmen City, Guangdong Province *South China Fisheries Science*, 2021,**17**(04):9-17. DOI: 10.12131/20210019.[王腾,刘永,全秋梅,等. 广东江门市主要淡水河流浮游动物群落结构特征.南方水产科学,2021,**17**(04):9-17.]
- [28] Wu L, Li YL, Chen YS. Characteristics of community structures of zooplankton in the mainstream of Huaihe River. *Journal of Lake Sciences*,2015,**27**(5):932-940.DOI:10.18307/2015.0521[吴利,李源玲,陈延松.淮河干流浮游动物群落结构特征.湖泊科学,2015,**27**(5):932-940.]
- [29] Liu MD, Yuan L, Xue JZ, et al. Characteristics and influencing factors of zooplankton community in the into-lake rivers of Dishui Lake, Shanghai. *Transactions of Oceanology and Limnology*,2025,**47**(02):74-84.DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2025.02.010.[刘茂东,袁林,薛俊增,等.上海滴水湖入湖河道浮游动物群落特征及其影响因素.海洋湖沼通报,2025,**47**(02):74-84.]
- [30] Mwagona PC, Ma CX, Yu HX. Seasonal dynamics of Zooplankton functional groups in relation to environmental variables in Xiquanyan Reservoir, Northeast China. *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology*, 2018,**54**. DOI:10.1051/limn/2018024.
- [31] Pikula K, Heese T, Arciszewski M, et al. Dynamics of zooplankton in a lake undergoing restoration. *International journal of ecohydrology and hydrobiology*, 2024,**2**:24.DOI:10.1016/j.ecohyd.2023.09.006.
- [32] Qiu XL, Zi FZ, Yun L, et al. Mechanisms of Zooplankton Community Assembly and Their Associations with Environmental Drivers in Arid-Region Reservoirs of Northwest China. *Biology*,2025,**14**(6):732. DOI:10.3390/biology14060732.
- [33] Song XH, Bing XW, Sun LP, et al. The spatial and temporal changes of nutrients of net-pen aquaculture area in Yangcheng lake and its water quality evaluation. *Journal of Hydroecology*,2010,**3**(6):23-29. DOI:10.15928/j.1674-3075.2010.06.005 [宋学宏,邢旭文,孙丽萍,等.阳澄湖网围养殖区水体营养盐的时空变化与水质评价.水生态学杂志,2010,**3**(6):23-29.]
- [34] Lin Q, You WH, Xu FJ, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dishui Lake. *Acta Ecologica Sinica*,2014,**34**(23):6918-6929.DOI: 10.5846/stxb201303060360.[林青,由文辉,徐凤洁,等.滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系.生态学报,2014,**34**(23):6918-6929.]
- [35] Ju YF, Sun X, Shabani E I, et al. Relationships between zooplankton biomass and environmental factors of Xiaoxingkai Lake in northeastern China. *Environmental Science and Pollution Research*,2019,**26**:30279-30285.DOI:10.1007/s11356-019-06171-1.
- [36] 闫莉莉.青弋江河源溪流鱼类分类群与功能群的纵向梯度格局研究[学位论文].安徽:安徽师范大学,2013.
- [37] Wu L, Ji L, Chen XJ, et al. Distribution of Zooplankton Functional Groups in the Chaohu Lake Basin,China.*Water*,2022,**14**:2106. DOI:10.3390/w14132106.
- [38] Mutethya E, Yongo E, Liu Q, et al. Spatial and seasonal dynamics of zooplankton functional groups and their relationship with environmental factors in urban rivers in Haikou City, China. *Limnologica*, 2024,**108**:126200. DOI:10.1016/j.limno.2024.126200.
- [39] Michalec FG, Souissi S, Holzner M. Turbulence triggers vigorous swimming but hinders motion strategy in planktonic copepods. *Journal of the Royal Society Interface*,2015,**12** (106):20150158. DOI:10.1098/rsif.2015.0158.