J. Lake Sci.(湖泊科学),2024,**36**(2):536-547
DOI 10.18307/2024.0233

澜沧江下游补远江大型底栖动物群落结构的时空分布及其影响因素*

鲍思敏[1],张　凯[2],丁城志[2],陶　捐[2],王　军[1**]
(1:华中农业大学水产学院,武汉 430070)
(2:云南大学国际河流与生态安全研究院,昆明 650091)

摘　要: 自然流淌的支流在维持建坝河流水生生物多样性中起着重要作用。补远江是澜沧江下游的重要一级支流,保持了较为天然的河流状态,人类活动干扰相对较少,是流域土著鱼类保护区和水生生物重要栖息地。在澜沧江流域水电开发的背景下,掌握补远江大型底栖动物群落结构的时空分布及其影响因素,对澜沧江乃至西南河流的水生生物多样性保护和恢复具有重要参考意义。于 2019 年 4 月(旱季)和 2019 年 10 月(雨季)对补远江的大型底栖动物进行了详细调查,共检出大型底栖动物 150 个分类单元,隶属于 5 门 7 纲 68 科,其中水生昆虫 121 种,软体动物 20 种,蛭类 3 种,寡毛类 2 种,甲壳类 2 种,涡虫、线虫各 1 种。毛翅目和蜉蝣目为全流域优势类群。补远江底栖动物密度和生物量在旱季和雨季均表现为上游大于中下游,物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数在雨季显著高于旱季。功能摄食类群中,滤食者(41.09%)和收集者(31.81%)占绝对优势,其次为刮食者(11.00%)、捕食者(11.21%),撕食者(4.89%)较少。Mantel 检验分析表明,河宽(RW)、硝态氮(NO_3^--N)、化学需氧量(COD_{Mn})是影响补远江大型底栖动物群落结构的主要环境因子;不同功能摄食类群所受到的环境影响因素不同。生物指数(*BI*)和生物监测工作组记分(*BMWP*)系统评价显示,补远江大部分样点处于良好及以上水平,少数样点处于中等及以下水平,总体水生态状况良好。
关键词: 补远江;澜沧江湄公河;大型底栖动物;群落结构;功能摄食类群

Spatio-temporal variation and influencing factors of macroinvertebrate community structure in Buyuan River, a tributary of the lower Lancang River*

Bao Simin[1], Zhang Kai[2], Ding Chengzhi[2], Tao Juan[2] & Wang Jun[1**]
(1: *College of Fisheries*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *P.R.China*)
(2: *Institute of International Rivers and Eco-security*, *Yunnan University*, *Kunming* 650091, *P.R.China*)

Abstract: Free flowing tributaries are important for maintaining of the aquatic biodiversity in dammed systems. As an important first-class tributary of the lower reaches of the Lancang River, the Buyuan River maintains a relatively natural state with little anthropogenic disturbance, serving as an important habitat for indigenous fish and aquatic organisms of the Lancang River basin. In the context of hydropower development in the basin, knowledge on the spatio-temporal distribution of macroinvertebrate community in Buyuan River and its influencing factors are of great significance to the biodiversity conservation and restoration of the Lancang River and the rivers in southern China. To address these issues, a detailed survey on macroinvertebrate in the Buyuan River was conducted in April 2019 (dry season) and October 2019 (rainy season). As a result, a total of 150 macroinvertebrate taxa were detected, belonging to 5 phyla, 7 classes and 68 families, including 121 aquatic insect species, 20 mollusca species, 3 leeches, 2 oligochaetes, 2 crustaceans, and 1 planaria and 1 nematode. Trichoptera and ephemeroptera were dominant taxa groups in the whole basin. The density and biomass of macroinvertebrate species in the upper reaches of Buyuan River were higher than those in its middle and lower reaches in both the dry and rainy seasons. The species richness and the Shannon-Wiener diversity index was

---

* 2023-04-22 收稿;2023-07-27 收修改稿。
国家自然科学基金项目(41907400)、中国博士后科学基金项目(2019M663583)和云南省应用基础研究计划(2019FB131)联合资助。
** 通信作者; E-mail:wangjun89@mail.hzau.edu.cn。

significantly higher in the rainy season than in the dry season. Among the functional feeding groups, the filter-collectors (41.09%) and gather-collectors (31.81%) dominated, followed by the scrapers (11.00%), predators (11.21%) and shredders (4.89%). Mantel test showed that river width (RW), NO_3^--N and chemical oxygen demand (COD_{Mn}) were the main environmental factors affecting the diversity of macroinvertebrate fauna in Buyuan River. Meanwhile, different functional feeding groups were affected by different environmental factors. The evaluation of biological index and biological monitoring working party showed that most sample sites in Buyuan River were at the good level and above (only a few sites as medium level and below), and the overall water ecological condition was good.

Keywords: Buyuan River; Lancang-Mekong River; macroinvertebrate; community structure; functional feeding groups

澜沧江-湄公河是西南地区的一条典型纵向发育国际河流,其纬度跨越大、海拔高差悬殊、气候复杂、地形多样,造就了特有的生物群落[1],该区域是世界上生物多样性最丰富的地区之一,也是生物多样性保护的热点地区[2]。同时,澜沧江也是我国水电能源基地的重点建设区,而水电开发会改变上下游的理化条件、水文节律和营养物质的输送迁移,导致河流生态系统的生境破碎化,进而对水生生物的生存和繁衍造成影响,从而改变河流中水生生物的群落结构和多样性,因此其水环境、水生态和生物多样性问题一直是国内外学者的关注焦点[2-5]。补远江发源于云南普洱地区大青山与笔架山之间,跨北热带和南亚热带湿润季风气候带[6-7],是澜沧江下游径流量最大的重要一级支流。补远江流域地貌类型丰富,山地为主,丘陵和盆地相间,流域内河流形态多样,河道激流、险滩与深潭交错分布,充沛的水能和复杂多样的生境为众多水生生物提供了得天独厚的生存繁衍场所[7-9]。补远江保持了较为天然的河流状态,是水电开发背景下澜沧江下游的重要鱼类自然保护区,也是澜沧江-湄公河洄游鱼类的重要产卵场[9]。有研究表明补远江在一定程度有效缓解了澜沧江水电开发对鱼类产生的生态影响,有利于澜沧江下游流域鱼类多样性的维持[7],而大型底栖动物作为鱼类重要的饵料生物[2],其多样性对于澜沧江下游乃至全流域水生生物多样性的维持具有重要作用。

大型底栖动物是鱼类等经济动物的天然饵料,也是水域中有机碎屑的分解者,作为食物链的中间环节,能促进河流有机质分解、营养物质转化以及加速河流自净过程,是河流生态系统关键组成部分[10-12]。此外,大型底栖动物具有种类多、易采集、生活周期长、对水质变化敏感、受干扰后的群落结构变化可预测等优点,因此大型底栖动物被认为是衡量水生态系统生态状况的重要指标[13-14]。了解并掌握补远江大型底栖动物群落结构、时空动态及其影响因素,对于澜沧江流域水生生物多样性的维持和河流生态系统的保护及管理具有重要意义[15-17]。

国内有关补远江生态环境方面的研究主要集中在水文特征[18-19]、地形地貌[20]和鱼类多样性[7-9,21-23],但对底栖动物的相关研究目前仍处于空白状态。鉴于底栖动物对水生态健康水平的良好指示作用以及补远江对水电开发背景下澜沧江流域生物多样性维持的重要性,本研究于 2019 年 4 月(旱季)和 10 月(雨季)在补远江流域进行底栖动物的野外调查,对该流域底栖动物的物种组成、多样性、功能摄食类群的时空分布进行研究,分析底栖动物多样性和功能摄食类群与河流环境因子之间的相关性。同时,以底栖动物为指示生物,对补远江进行水质生物学评价,以期为该流域乃至西南诸河水生生物多样性保护和恢复提供科学依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

根据流域水文条件和河流地貌特征布设样点,力求覆盖补远江典型的生境类型,共设置 22 个样点。于 2019 年 4 月(旱季)和 10 月(雨季)进行大型底栖动物样品采集及水体理化指标的测定,参照程馨雨[21]将采样点划分为上中下 3 个河段,上游样点 7 个,中游样点 6 个,下游样点 9 个(图 1)。

1.2 采样方法

1.2.1 底栖动物采集与处理　采用索伯网进行底栖动物的定量采集(采样面积 0.09 m^2,孔径 420 μm),为覆盖河流各个微生境类型,每个样点采集 3 次,同时采用 D 型网进行定性采样。将采集到的样品经 500 μm 孔径的铜筛洗净装袋后带回实验室于白色解剖盘中进行挑取。随后置于 50 mL 标本瓶内,加入 70% 浓度的酒精固定,于体视镜和显微镜下进行种类鉴定[24-27]。

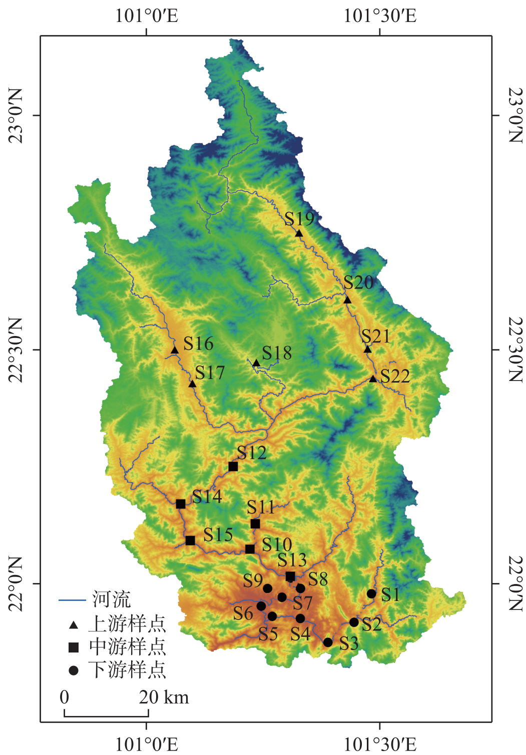

图 1 补远江采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in Buyuan River

1.2.2 环境指标的测定 在采集底栖动物的同时进行水环境指标的测定。使用 YSI 多参数水质分析仪(YSI 6600)及流速仪等现场测定水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率(CON)、pH 值、流速(V),结果取 3 次平行测量结果的平均值;使用 LJD 流速仪于河流横断面上等距离测定河流流速取平均值;干流河宽(RW)用测距仪测定,可涉水河流的河宽使用卷尺进行人工测量。同时,在采样点取 1 L 水样,冷藏带回实验室进行水化学指标的测定,包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)、硝态氮(NO_3^--N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})。测定方法参照《水与废水监测分析方法(第四版)》[28]。

1.3 多样性指数

选择 5 种生物多样性指数进行大型底栖动物群落数据的分析,分别是:物种丰富度指数(R)、物种优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数(J),计算方法分别为:

$$R = S \tag{1}$$

$$Y = f_i N_i / N \tag{2}$$

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \tag{3}$$

$$D = 1 - \ln \sum_{i=1}^{S} (P_i)^2 \tag{4}$$

$$J = H'/\ln S \tag{5}$$

式中, S 为样本中总分类单元数, P_i 为物种 i 在样本中的相对丰度, N 为样本中的总个体数, N_i 是物种 i 的个体数。

1.4 功能摄食类群划分

参考 Cummins[29] 和 Poff 等[30] 的方法,将大型底栖动物划分为滤食者(FC)、收集者(GC)、捕食者(PR)、刮食者(SC)和撕食者(SH) 5 种功能摄食类群 (functional feeding groups,FFG)。

1.5 统计分析

采用 PERMANOVA 检验分析大型底栖动物群落结构空间分布的差异。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验比较补远江不同河段的环境变量及大型底栖动物密度、生物量、物种多样性指数的差异。采用 Mantel 检验对补远江流域大型底栖动物多样性指数、功能摄食类群与环境因子的关系进行相关性分析,以上分析均在 R 语言 vegan 包中完成。

1.6 水质生物学评价

采用生物指数(biological index,BI)和生物监测工作组记分(biological monitoring working party,$BMWP$)进行水质生物评价,计算公式如下:

$$BI = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{n_i t_i}{N} \tag{6}$$

式中,n_i为第 i 个分类单元 (属或种) 个体的数量,N_s为物种数,N 为总个体数,t_i为第 i 个分类单元 (属或种) 的耐污值。

$$BMWP = \sum_{i=1}^{N_z} F_i \tag{7}$$

式中,N_z为科级分类单元数,F_i为第 i 个分类单元 (科) 的记分。

大型底栖动物耐污值、BMWP 记分、*BI* 和 *BMWP* 的评价标准参照《水生态监测评价技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)》(HJ 1295－2023)[31]的核定值,指南中未查到的种类耐污值参照王备新等的耐污值划分进行核定[32],根据指南,*BI* 划分为 5 级,分别为<3.9(优秀)、3.9~5.4(良好)、5.4~7.0(中等)、7.0~8.5(较差)和>8.5(极差);*BMWP*(可涉水河流)划分为 5 级,分别为>146(优秀)、110~146(良好)、73~110(中等)、37~73(较差)和<37(极差)。

2 结果

2.1 环境因子特征

单因素方差分析结果显示(附表Ⅱ),旱季与雨季的总氮、氨氮、pH 值、溶解氧 4 个环境指标在存在显著差异,旱季的 pH 值高于雨季,但雨季的总氮、氨氮、溶解氧显著高于旱季。对于不同河段,旱季补远江上游硝态氮浓度和化学需氧量显著高于中下游;雨季补远江上游硝态氮浓度显著高于中下游,其余环境因子在补远江全流域未显示出季节或者河段间的显著差异。

2.2 大型底栖动物群落结构

2.2.1 物种组成　共鉴定出大型底栖动物 150 个分类单元(附表 I),隶属于 5 门 7 纲 68 科。其中,水生昆虫 121 种(占总物种数的 80.67%),软体动物 20 种(13.33%),蛭类 3 种,寡毛类 2 种,软甲纲 2 种,涡虫、线虫各一种。补远江旱季全流域及上中下游大型底栖动物平均密度分别为 633.9、1040.7、715.2、444.1 ind./m^2,生物量分别为 12.0、27.1、10.5、7.9 g/m^2;雨季全流域及上中下游平均密度分别为 700.7、880.8、542.6、666.1 ind./m^2,生物量分别为 15.3、17.6、11.6、15.9 g/m^2(图 2)。方差分析结果显示,补远江底栖动物旱季生物量上游显著大于下游($P=0.017$),中游和上游($P=0.051$)、下游($P=0.853$)未呈现显著差异,不同河段旱季密度($P=0.071$)、雨季密度($P=0.302$)和生物量($P=0.772$)未呈现显著差异。

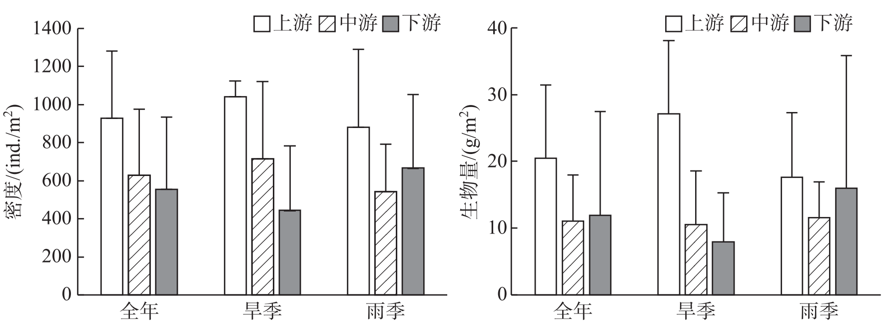

图 2 补远江各河段底栖动物的密度和生物量

Fig.2 Comparison of density and biomass between three reaches of Buyuan River

PERMANOVA 分析结果表明,补远江不同季节的大型底栖动物群落结构接近于显著差异($P=0.054$),不同河段的大型底栖动物群落结构差异不显著(表 1)。优势度计算结果显示,补远江流域优势种有 10 种(表 2),长角纹石蛾(*Macrostemum* sp.)仅在旱季上游和下游为优势种,埃蜉(*Ephoron* sp.)只在旱季中游为优势种,拟踵突多足摇蚊(*Polypedilum paraviceps*)仅在下游为优势种,放逸短沟蜷(*Semisulcospira libertina*)仅在旱季上游为优势种,扁泥甲科(*Psephenidae* spp.)仅在雨季中游为优势种。

2.2.2 群落多样性分析　补远江旱季有 93 种大型底栖动物,其中上、中、下游分别有 41、50、75 种,Shannon-Wiener 多样性指数介于 2.11~2.44 之间,Simpson 指数介于 0.79~0.86 之间,Pielou 均匀度指数介于 0.72~0.81 之间,其中,中游的 3 种指数略低于上下游。雨季共有 129 种大型底栖动物,其中上中下游分别有 78、84、91 种,Shannon-Wiener 多样性指数介于 2.46~2.86 之间,Simpson 指数介于 0.86~0.91 之间,Pielou 均匀度指数介于 0.77~0.82 之间,其中中游 3 项指数略高于上、下游(图 3)。单因素方差分析结果表明,补远江旱季的物种丰富度($P=0.004$)和 Shannon-Wiener 多样性指数($P=0.044$)显著低于雨季,但 Simpson 指数($P=0.073$)和 Pielou 均匀度指数($P=0.92$)无显著差异,不同季节上中下游河段大型底栖动物群落多样性指数均

无显著差异(P>0.05)。

表 1 补远江底栖动物群落空间结构 PERMANOVA 检验结果

Tab.1 PERMANOVA test results of spatial structure of benthos community in Buyuan River

分组	自由度 df	平方和	均方和	F	P
季节	1	4415.8	4415.8	1.527	0.054
河段	2	7296.3	3648.2	1.261	0.113
季节×河段	2	6129.6	3049.8	1.062	0.357
残差	34	98322	2891.8		
总和	39	116666			

表 2 补远江不同优势种的时空分布

Tab.2 Dominant species with different temporal and spatial distributions in Buyuan River

优势种	旱季			雨季			全年
	上游	中游	下游	上游	中游	下游	
短脉纹石蛾 *Cheumatopsyche* sp.	0.12	0.19	0.10	0.11	0.09	0.25	0.15
侧枝纹石蛾 *Ceratopsyche* sp.	0.08	0.16	0.03	0.07			0.05
缺距纹石蛾 *Potamyia* sp.			0.03	0.08	0.04	0.02	0.03
长角纹石蛾 *Macrostemum* sp.	0.02		0.03				
Aethalopsyche 属一种 *Aethalopsyche* sp.	0.02		0.02	0.03		0.03	0.02
似宽基蜉 *Choroterpides* sp.	0.04	0.10	0.06	0.13	0.15	0.08	0.09
四节蜉 *Baetis* sp.	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03
细蜉 *Caenis* sp.		0.03	0.02		0.04		
埃蜉 *Ephoron* sp.		0.03					
扁蜉 *Heptagenia* sp.		0.03	0.03	0.03	0.11		0.03
朝大蚊 *Antocha* sp.		0.02		0.03	0.04	0.04	0.03
流粗腹摇蚊 *Rheopelopia* sp.	0.02	0.02			0.04		0.02
拟踵突多足摇蚊 *Polypedilum paraviceps*			0.02			0.02	
河蚬 *Corbicula fluminea*			0.02		0.02		
放逸短沟蜷 *Semisulcospira libertina*	0.02						
扁泥甲科一种 *Psephenidae* spp.					0.02		
溪泥甲 *Stenelmis* sp.	0.08	0.03		0.03	0.03	0.03	0.03

2.3 大型底栖动物功能摄食类群时空分布特征

滤食者和收集者在补远江流域占显著优势,相对丰度分别为 41.09% 和 31.81%,其次为捕食者和刮食者,相对丰度分别为 11.21% 和 11.00%,撕食者的相对丰度最低,为 4.89%。旱季滤食者相对丰度为 40.33%,下游的相对丰度略大于中游和上游,收集者相对丰度为 31.37%,中游的相对丰度略大于上游和下游,捕食者相对丰度为 12.82%,上中下游相对丰度逐步减小,刮食者相对丰度为 11.14%,上游的相对丰度大于中游和下游,撕食者相对丰度为 4.34%,中游的相对丰度略大于上游和下游。雨季滤食者相对丰度为 36.94%,中游的相对丰度小于中游和下游,收集者相对丰度为 34.30%,中游的相对丰度大于上游和下游,捕食者相对丰度为 10.88%,上游和中游相对丰度略大于下游,刮食者相对丰度为 12.32%,中游的相对丰度大于上游和下游,撕食者相对丰度为 4.34%,上中下游逐步增加(图 4)。

2.4 大型底栖动物物种多样性、功能摄食类群与环境因子的关系

环境因子与大型底栖动物多样性指数的 Mantel 检验结果表明(图 5),补远江流域大型底栖动物旱季物种丰富度指数与 RW(P=0.043)呈显著正相关关系;雨季 Pielou 均匀度指数与 NO_3^--N(P=0.041)、COD_{Mn}(P=0.038)呈显著正相关关系。

环境因子与大型底栖动动物功能摄食类群 Mantel 检验结果表明,补远江流域大型底栖动物旱季收集者

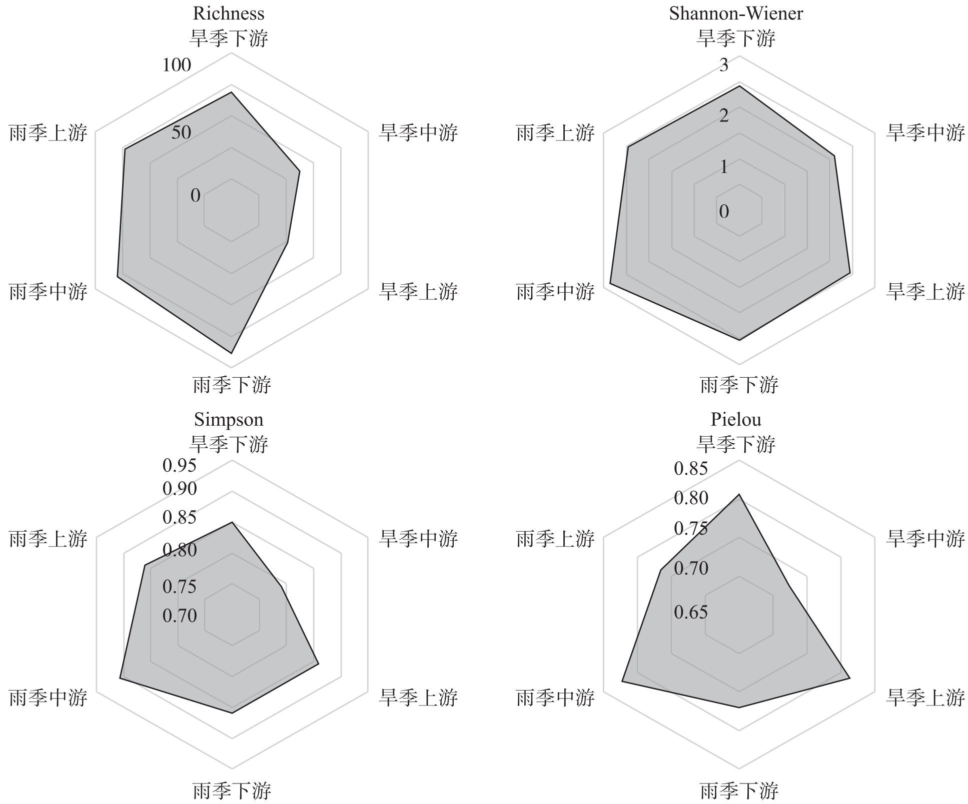

图 3 补远江各河段大型底栖动物生物多样性指数

Fig.3 Macroinvertebrate diversity index in in each reach and season of Buyuan River

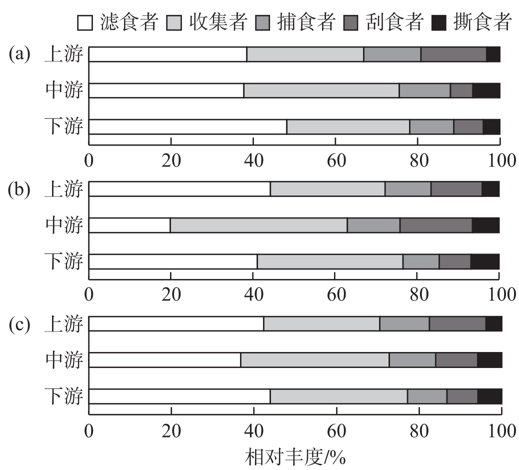

图 4 补远江大型底栖动物功能摄食类群相对丰度时空变化：旱季(a)、雨季(b)、全年(c)

Fig.4 Spatiotemporal variation of relativesh abundance of functional feeding groups of macroinvertebrates of Buyuan River, dry season(a), rainy season(b) and the whole year(c) in turn

密度与 CON($P=0.014$)呈显著正相关关系;捕食者密度与 pH($P=0.035$)呈显著正相关关系。雨季滤食者密度与 pH 呈极显著正相关关系($P=0.009$),与 TN($P=0.042$)、NO_3^--N($P=0.012$)呈显著正相关关系;收集者

密度与 NH_3-N(P=0.044)、CON(P=0.045)呈显著正相关关系;捕食者密度与 WT(P=0.029)、CON(P=0.028)呈显著正相关关系;刮食者密度与 DO(P=0.016)、CON(P=0.012)呈显著正相关关系。

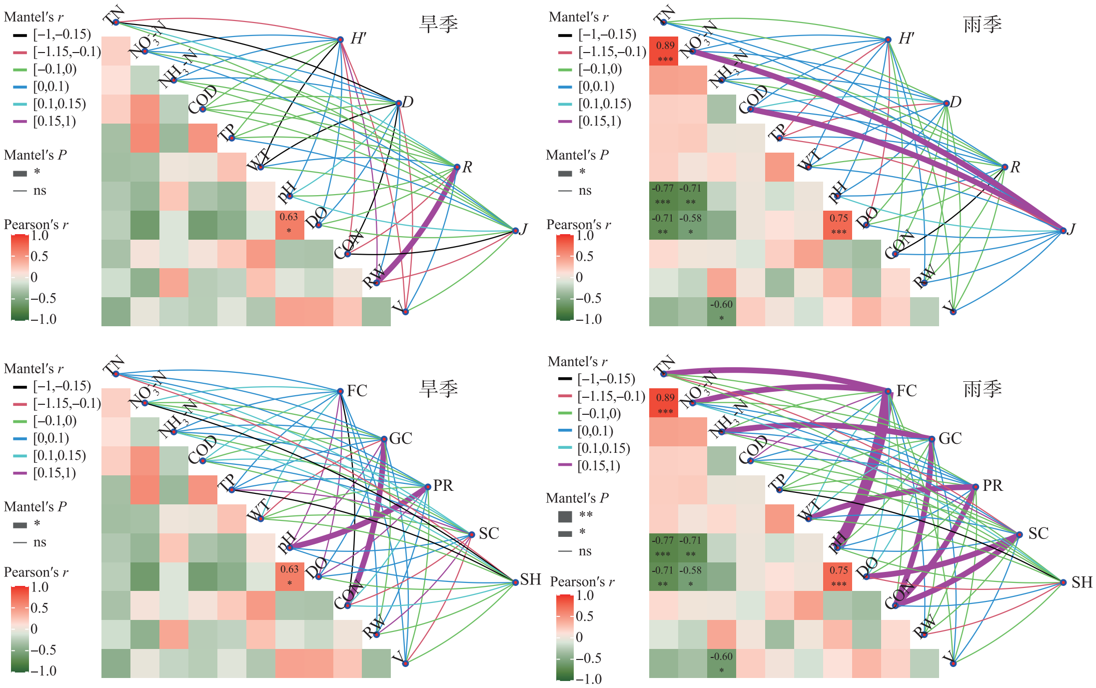

图 5 补远江大型底栖动物多样性指数、功能摄食类群与环境因子的 Mantel 检验

Fig.5 Relationships of macroinvertebrates diversity index, FFGs and environmental factors obtained by Mantel test in the Buyuan River

2.5 水质评价

BI 评价结果显示,补远江 *BI* 总体均值为 3.89,处于优秀水平。旱季 *BI* 介于 3.36~6.25 之间,其中61.11% 处于优秀水平,38.89% 处于良好水平,5.56% 处于中等水平。雨季 *BI* 介于 3.09~5.39 之间,其中 72.73% 处于优秀水平,27.27% 处于良好水平,整体来看补远江水质较好,只有个别采样点处于中等水平(表 3)。

表 3 补远江不同样点的 *BI* 评价结果

Tab.3 *BI* assessment with different temporal and spatial distributions in Buyuan River

样点	旱季	评价结果	雨季	评价结果	样点	旱季	评价结果	雨季	评价结果
S1	3.65	优秀	3.39	优秀	S12	3.55	优秀	3.09	优秀
S2	3.83	优秀	3.21	优秀	S13	3.99	良好	3.55	优秀
S3	6.25	中等	3.60	优秀	S14	3.91	优秀	3.49	优秀
S4	3.83	优秀	4.65	良好	S15	4.22	良好	3.86	优秀
S5	3.36	优秀	3.57	优秀	S16	4.16	良好	4.02	良好
S6	4.21	良好	3.59	优秀	S17	4.23	良好	4.05	良好
S7	3.65	优秀	3.12	优秀	S18	3.71	优秀	3.57	优秀
S8	4.41	良好	3.69	优秀	S19	—	—	5.39	良好
S9	5.04	良好	3.35	优秀	S20	—	—	3.70	优秀
S10	3.75	优秀	4.61	良好	S21	—	—	3.98	良好
S11	3.83	优秀	3.42	优秀	S22	—	—	3.29	优秀

—表示旱季未采集 S19~S22 点位样本,无值。

BMWP 记分结果显示,补远江 *BMWP* 总体均值为 132.6,处于良好水平。其中旱季 *BMWP* 介于 34~183 之间,其中 22.22% 处于优秀水平,38.89% 处于良好水平,16.67% 处于中等水平,11.11% 处于较差水平,11.11% 处于极差水平。雨季 *BMWP* 介于 71~230 之间,其中 59.09% 处于优秀水平,13.64% 处于良好水平,22.73% 处于中等水平,4.54% 处于较差水平,整体来看补远江水质较好,只有少数采样点处于较差水平(表 4)。

表 4 补远江不同样点的 *BMWP* 评价结果

Tab.4 Biological monitoring working party assessment with different temporal and spatial distributions in Buyuan River

样点	旱季	评价结果	雨季	评价结果	样点	旱季	评价结果	雨季	评价结果
S1	155	优秀	178	优秀	S12	147	优秀	129	良好
S2	34	很差	99	中等	S13	94	中等	164	优秀
S3	36	很差	107	中等	S14	113	良好	222	优秀
S4	100	中等	84	中等	S15	100	中等	213	优秀
S5	118	良好	193	优秀	S16	59	较差	114	良好
S6	183	优秀	168	优秀	S17	113	良好	230	优秀
S7	143	良好	90	中等	S18	128	良好	192	优秀
S8	156	优秀	177	优秀	S19	—	—	71	较差
S9	113	良好	144	良好	S20	—	—	159	优秀
S10	63	较差	167	优秀	S21	—	—	94	中等
S11	130	良好	162	优秀	S22	—	—	162	优秀

—表示旱季未采集 S19~S22 点位样本,无值。

3 讨论

3.1 大型底栖动物群落结构特征

自然流淌的支流在维持建坝河流水生生物多样性中具有重要作用[33-34]。补远江是澜沧江下游重要的一级支流,维持了自然流淌的状态,为澜沧江下游水生生物提供了丰富的栖息环境[7]。本研究在补远江共采集到大型底栖动物 150 个分类单元,与西南地区其它受干扰河流如澜沧江支流景谷河与小黑江(61 种)[35]、南腊河(98 种)[4]和金沙江支流红水河(41 种)[36]相比,具有较高的物种多样性,这与流域内人类活动的类型和影响程度有关。补远江人类活动干扰相对较少,而景谷河和南腊河流域内的水电开发和城镇污染在一定程度上影响底栖动物生存条件,导致物种丰富度的下降[4,35]。物种组成方面,喜流水和指示清洁水体的水生昆虫在整个补远江流域都是优势类群,如毛翅目、蜉蝣目等,而相邻的南腊河则以霍甫水丝蚓、摇蚊为优势类群[4],侧面反映了补远江为澜沧江下游区域敏感水生昆虫提供了良好的栖息环境。在西南地区其他河流研究如红水河[36]、雅砻江下游[37]等,也显示大坝建设会导致河流物种组成由急流、富氧、贫营养的蜉蝣目、襀翅目、毛翅目种类向耐污、耐低氧的寡毛纲、摇蚊科种类转变。此外,水质生物学评价结果中,*BI* 评价结果显示补远江 90% 以上样点都维持在良好及以上水平,*BMWP* 评价结果显示 60% 以上样点处于良好及以上水平。*BI* 和 *BMWP* 评价结果存在一定差异,这是由于二者所采用的分类阶元不同所导致。*BI* 采用属级赋分按各属比例累加,而 *BMWP* 采用科级赋分直接累加,部分样点物种较少但多为清洁种时,便导致该样点得分较低。但从总体上看,两种指数对全流域的评价结果均显示良好或优秀,表明补远江处于较为健康的状态。目前对于西南地区的河流研究集中于已建坝河流[4,35-37],而水电开发会对底栖动物群落组成及分布产生一定影响,因此在西南地区水电开发的背景下,维持补远江的自然流淌状态和丰富多样的生境,对于澜沧江下游区域水生生物多样性的保育及西南地区水生生物保护具有重要意义。

从时间分布来看,补远江旱季和雨季物种都以水生昆虫为主,特别是毛翅目和蜉蝣目昆虫。但底栖动物多样性随季节变化表现出一定差异,雨季大型底栖动物的物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数均显著高于旱季,这可能是因为雨季降雨充沛,河流的流量增加,连通性增强,同时雨水冲刷促进河流与岸边植被

的营养和有机物交换[38-39],有利于更多底栖动物物种生存。补远江底栖动物密度和多样性呈现出明显的空间差异性,下游的底栖动物物种丰富度大于中上游,这与补远江下游属于澜沧江橄榄坝-南腊河鱼类保护区[40],该区域人为干扰较小有关。而我们在上游采样过程中观察到桥梁施工,可能对上游栖息地造成一定破坏,导致上游物种丰富度较低[41]。值得注意的是,与物种数相反,上游密度和生物量高于中下游,这与部分样点靠近城镇,受到人类活动影响有关。如 S16 靠近普文镇,其总氮浓度较高,该点短脉纹石蛾密度较高(旱季 255.56 ind./m^2,雨季 316.67 ind./m^2),从而导致整体密度偏高。相比其它毛翅目类群,短脉纹石蛾对污染水体更为耐受,这与该样点所观察到的情况相一致[42]。

3.2 大型底栖动物功能摄食类群空间分布

功能群分析表明,补远江滤食者和收集者在所有季节和河段都占绝对优势,这与国内外一些热带和亚热带溪流的研究结果一致[43-45],其次为捕食者和刮食者,撕食者的相对丰度最低。Vannote 等[46]在 1980 年提出河流连续体概念(river continuum concept,RCC),以北美温带森林未受干扰的河流生态系统的研究结果为基础,描述了河流系统从源头到河口呈现连续的物理特征变化梯度,以及底栖动物的功能摄食类群的相对丰度沿河流梯度响应的变化趋势。滤食者和收集者通常在河流中较为丰富,可归因于水中富集的有机物能够被滤食者和收集者有效利用[47],促进其生长繁殖。收集者和滤食者在整个河流都十分重要,并且沿纵向梯度递增[46],补远江的研究结果也与此相符,全年的收集者与滤食者相对丰度沿河流纵向梯度呈现递增趋势。而捕食者处于较高营养级,食物的可利用性大和竞争相对较少,使其对环境变化的适应性较强,沿着河流的纵向梯度,捕食者类群的物种丰富度很高且相对丰度变化不大,这与河流连续体理论相符[46]。

河流连续体概念是基于理想状态下的未受干扰河流对底栖动物的分布情况进行预测,而现实中河流会受到各种人类活动干扰,进而影响底栖动物的分布。河流连续概念中认为,撕食者可以利用枯叶及相关的生物质来产生细颗粒有机物,因此其在河流上游与收集者同等重要[48]。但是在补远江撕食者的相对丰度最低,并且从河流上游至下游逐渐增加。一方面,撕食者主要以粗颗粒有机物为食,河岸植被的变化可能会影响栖息地特征、碎屑质量和无脊椎动物定殖(即迁移或扩散)率[49-50]。近年来,补远江河岸森林大量被橡胶树替代,而橡胶树叶片难以分解,因此可能导致水生系统凋落物等输入的食物资源的不足,造成撕食者的缺少。另一方面,补远江处于热带亚热带交错区,而撕食者大多更适宜于温度较低的区域,因此普遍认为热带和亚热带地区撕食者丰度和多样性较低[51]。此外,刮食者的食物来源主要是周丛藻类和有机碎屑,河流连续体理论认为刮食者在河流中游的密度较大[46],而本研究中补远江刮食者相对丰度沿河流纵向梯度逐渐减小,这可能与上游底质多为石头,而下游泥沙沉积,不能为刮食者提供良好的栖息生境有关。

3.3 大型底栖动物物种多样性、功能摄食类群与环境因子的关系

Mantel 检验表明,不同季节影响补远江大型底栖动物物种多样性的环境因子不同。旱季物种丰富度与河宽呈显著正相关,这与通常认为的宽度较窄的源头溪流要比下游河流物种丰富度高的观点并不相符,这可能是由于补远江下游为澜沧江鱼类保护区,而上游受到人类活动的影响较大[40],导致下游的物种数高于上游,造成了物种丰富度与河宽呈显著正相关的现象。此外也有研究表明随着河流大小的增加物种丰富增大[52],这可能是因为河宽越大能为水生生物提供更多的生存空间。雨季的多样性则更多受到营养盐(NO_3^--N)和有机污染(COD_{Mn})的影响,这与雨季降水造成的水体和陆地生态系统的物质交换有关,因此需要加强补远江雨季农业面源污染的防治工作。

此外,Mantel 相关性分析结果显示不同季节功能摄食类群与环境因子的对应关系不同。雨季雨水冲刷河岸带,加强了河岸带对河流的营养物质输入,导致雨季总氮、氨氮、pH、溶解氧都显著高于旱季,一定程度上导致显著影响雨季功能摄食类群的环境因子多于旱季。雨季的显著影响环境因子有 pH、DO、TN、NO_3^--N、NH_3-N、WT、CON,旱季有 pH、CON。雨季滤食者和旱季捕食者与 pH 显著正相关,补远江 pH 值范围是 6.79~7.91,在绝大部分的底栖动物生存的适宜 pH 值范围 6~8 内[53],表明补远江的环境适合底栖动物生存,并且在该流域中 pH 值较高更适合滤食者和捕食者生存。旱季收集者密度和雨季收集者、刮食者、捕食者密度与电导率显著正相关,电导率由水体中的总溶解离子浓度决定,这些离子能够为大型底栖动物提供生存必需的矿物质离子[54]。雨季滤食者密度与 TN、NO_3^--N 显著正相关,收集者密度与 NH_3-N 显著正相关,这是因为雨季河流与河岸带物质交换增强,水中营养物质增多,为滤食者和收集者提供了丰富的食物来源。

雨季刮食者密度与DO浓度呈正相关,表明水体适宜范围内较高的DO浓度能够促进刮食者摄食、繁殖等生命活动。雨季捕食者密度与水温显著正相关,雨季相对于旱季温度较低,而在较为普遍的认识中在适宜的温度范围内,而较高的水温有利于底栖动物捕食、摄食等生长繁殖的等生命活动[55],因此温度成为雨季捕食者的主要限制因子。综合以上分析可知pH、CON在补远江底栖动物的功能摄食类群组成方面起着重要的驱动作用。此外,相比于旱季,营养盐对雨季的底栖动物多样性和功能摄食类群组成发挥着更为关键的作用。

4 结论

1)补远江大型底栖动物维持较高的多样性。2019年两期共采集并鉴定出150个分类单元。其中,以水生昆虫为绝对优势类群,优势物种多为毛翅目、蜉蝣目等,以敏感型为主。

2)补远江底栖动物群落结构呈现明显的时空分布格局。物种数表现为雨季>旱季,上游低于中下游;而密度生物量则呈现上游高于中下游的趋势,不同季节趋势一致。补远江流域底栖动物滤食者和收集者占绝对优势,其次为捕食者和刮食者,撕食者相对丰度较低。功能摄食类群分布基本符合河流连续体理论预测,表现出自然河流的底栖动物分布特征。

3)补远江水质生物学评价总体为良好水平。*BI*评价显示大部分样点(旱季94.44%,雨季100%)处于良好及优秀水平,部分样点处于中等水平,总体为优秀水平;*BMWP*记分显示大部分样点(旱季61.11%,雨季72.73%)处于良好及优秀水平,部分样点处于中等及以下水平。

4)补远江底栖动物分布受到环境因子和人类活动的影响。其中,旱季底栖动物主要受到河宽等自然因素的影响,而雨季则与营养盐、有机污染高度相关。此外,撕食者的较低丰度可能与橡胶树的种植有一定关系。因此,在制定相应的河流保护措施时应注意不同类群以及不同季节环境因子的差异。

5 附录

附表Ⅰ和Ⅱ见电子版(DOI: 10.18307/2024.0233)。

6 参考文献

[1] He DM, Wu RD, Feng Y *et al*. China's transboundary waters: New paradigms for water and ecological security through applied ecology. *Journal of Applied Ecology*, 2014, **51**(5): 1159-1168. DOI: 10.1111/1365-2664.12298.

[2] Wang J, Ding CZ, Tao J *et al*. Damming affects riverine macroinvertebrate metacommunity dynamics: Insights from taxonomic and functional beta diversity. *Science of the Total Environment*, 2021, **763**: 142945. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142945.

[3] He DM, Feng Y, Magee GS *et al*. Transboundary hydrological effects of hydropower dam construction on the Lancang River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**: 16-24. DOI: 10.1007/s11434-006-0016-9

[4] Li ZF, Wang J, Xie ZC *et al*. Relationship between zoobenthos biodiversity and environmental factors in Nanla River. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(12): 3364-3373. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201612.038. [李正飞, 王军, 谢志才等. 南腊河底栖动物多样性与环境因子的关系. 生态学杂志, 2016, **35**(12): 3364-3373.]

[5] Wang J, Bao SM, Zhang K *et al*. Responses of macroinvertebrate functional trait structure to river damming: From within-river to basin-scale patterns. *Environmental Research*, 2023, **220**: 115255. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115255.

[6] 《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典西南诸河卷. 北京: 水利水电出版社, 2014.

[7] 林诗芸. 补远江干流鱼类生境特征与鱼类多样性的关联研究[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2016.

[8] Chen LH, He DM. The ecological impacts of hydropower cascade development in Lancang-Mekong river. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(5): 577-586. [陈丽晖, 何大明. 澜沧江-湄公河水电梯级开发的生态影响. 地理学报, 2000, **55**(5): 577-586.]

[9] Kang B, Hu WX, Qi WL *et al*. Research on fish species diversity in the Buyuan River. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, **31**(3): 6-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7075.2010.03.002. [康斌, 胡文娴, 祈文龙等. 补远江鱼类多样性研究. 渔业科学进展, 2010, 31(3): 6-14.]

[10] Wallace JB, Webster JR. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology*, 1996, **41**: 115-139. DOI: 10.1146/annurev.en.41.010196.000555.

[11] Wang J, Zhou Q, Xie CX *et al*. The community structure of macrozoobenthos and biological assessment of water quality in the Irtysh River of Xinjiang. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(9): 2420-2428. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0157. [王军, 周琼, 谢从新等. 新疆

额尔齐斯河大型底栖动物的群落结构及水质生物学评价. 生态学杂志, 2014, **33**(9): 2420-2428.]

[12] Cai YJ, Zhang Y, Hu ZX *et al*. Metacommunity ecology meets bioassessment: Assessing spatio-temporal variation in multiple facets of macroinvertebrate diversity in human-influenced large lakes. *Ecological Indicators*, 2019, **103**: 713-721. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.03.016.

[13] Dalu T, Wasserman RJ, Tonkin JD *et al*. Assessing drivers of benthic macroinvertebrate community structure in African highland streams: An exploration using multivariate analysis. *Science of the Total Environment*, 2017, **601/602**: 1340-1348. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.023.

[14] Wang J, Huang ZL, Li HY *et al*. Construction of macroinvertebrate integrity-based health assessment framework for the Chishui River. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(6): 62-72. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2018.06.07. [王军, 黄真理, 李海英等. 基于大型无脊椎动物完整性的赤水河健康评价体系构建. 中国环境监测, 2018, **34**(6): 62-72.]

[15] Yang HQ, Pan BZ, Zhu PH *et al*. Structure of macroinvertebrate communities and bioassessment of water quality in the Weihe River mainstream and its typical tributaries from the northern Qinling Mountains. *J Lake Sci*, 2020, **32**(6): 1793-1805. DOI:10.18307/2020.0619. [杨海强, 潘保柱, 朱朋辉等. 渭河干流和秦岭北麓典型支流底栖动物群落结构及水质生物评价. 湖泊科学, 2020, **32**(6): 1793-1805.]

[16] Mangadze T, Wasserman RJ, Froneman PW *et al*. Macroinvertebrate functional feeding group alterations in response to habitat degradation of headwater Austral streams. *Science of the Total Environment*, 2019, **695**: 133910. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133910.

[17] Li LJ, Chong XY, Sheng CH *et al*. Response of riparian land-use types to functional groups of benthic macroinvertebrates in Taizi River, Liaoning Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(22): 8667-8674. DOI: 10.5846/stxb201809011865. [李丽娟, 崇祥玉, 盛楚涵等. 太子河大型底栖动物摄食功能群对河岸带土地利用类型的响应. 生态学报, 2019, **39**(22): 8667-8674.]

[18] Zhang XT, Li WM, Zhang K *et al*. Spatiotemporal distribution of macroinvertebrate functional feeding groups in Qiaobian River, a tributary of Yangtze River in Yichang. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(7): 2559-2570. DOI: 10.5846/stxb202107061806. [张续同, 李卫明, 张坤等. 长江宜昌段桥边河大型底栖动物功能摄食类群时空分布特征. 生态学报, 2022, **42**(7): 2559-2570.]

[19] Zhong RH, Fu KD, He DM *et al*. ARIMA-based sediment concentration forecasting for Buyuanjiang River. *Journal of China Hydrology*, 2011, **31**(6): 48-52. [钟荣华, 傅开道, 何大明等. 基于 ARIMA 模型的补远江含沙量预测. 水文, 2011, **31**(6): 48-52.]

[20] Jiang B, Wang FS, Shen C *et al*. Water temperature of Lancang River influenced by its tributary Buyuan River. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, **38**(2): 82-88. DOI: 10.11660/slfdxb.20190208. [蒋博, 王福山, 沈忱等. 澜沧江支流补远江对干流水温影响研究. 水力发电学报, 2019, **38**(2): 82-88.]

[21] 程馨雨. 梯级水电开发下澜沧江鱼类功能特征及功能多样性的变化研究[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2020.

[22] Gu ZK, Fan H, Song ZJ. Quantitative analysis of the macro-geomorphic evolution of Buyuan Basin, China. *Journal of Mountain Science*, 2019, **16**(5): 1035-1047. DOI: 10.1007/s11629-018-5289-3.

[23] Ding CZ, Chen YF, Yao JL *et al*. Otolith characteristics and age determination of Poropuntius huangchuchieni (Tchang, 1962) in Lancang River. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(11): 3069-3073. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0464. [丁城志, 陈毅峰, 姚景龙等. 澜沧江云南吻孔鲃的耳石年轮特征及其年龄鉴定. 生态学杂志, 2013, **32**(11): 3069-3073.]

[24] Morse JC, Yang LF, Tian LX. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994.

[25] Epler JH. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of Northand South Carolina. North Carolina: St. Johns River Water Management District, 2001.

[26] 刘月英. 中国经济动物志:淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.

[27] 何雪宝. 西藏和四条大型河流水栖寡毛类区系研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2011.

[28] 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[29] Cummins KW, Klug MJ. Feeding ecology of stream invertebrates. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1979, **10**: 147-172. DOI: 10.1146/annurev.es.10.110179.001051.

[30] Poff NL, Olden JD, Vieira NKM *et al*. Functional trait niches of North American lotic insects: Traits-based ecological applications in light of phylogenetic relationships. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, **25**(4): 730-755. DOI: 10.1899/0887-3593(2006)025[0730: ftnona]2.0.co;2.

[31] 中华人民共和国生态环境部.《水生态监测评价技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)》(HJ 1295-2023). 2023.

[32] Wang BX, Yang LF. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(12): 2768-2775. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.12.014. [王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, **24**(12): 2768-2775.]

[33] Ferreira DG, Carlsson J, Galindo BA *et al*. The role of free-flowing tributary rivers in the maintenance of genetic diversity of a migratory fish species living in a river fragmented by dams. *Hydrobiologia*, 2022, **849**(5): 1221-1237. DOI: 10.1007/s10750-021-04782-9.

[34] Vasconcelos LP, Alves DC, Câmara LF *et al*. Dams in the Amazon: The importance of maintaining free-flowing tributaries for fish reproduction. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2021, **31**(5): 1106-1116. DOI: 10.1002/aqc.3465.

[35] Zhao WH, Peng ZH, Wang ZH *et al*. Studies on macrozoobenthic community structure and the impacts of small hydropower plants in Jinggu

River, Yunnan Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(2): 310-318. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201502018. [赵伟华，彭增辉，王振华等. 云南景谷河底栖动物群落结构及小水电站的影响研究. 长江流域资源与环境，2015，**24**(2)：310-318.]

[36] Jian D, Huang DM, Chang XL *et al*. The succession of Zoobenthos in the mainstream of Hongshui River after the formation of the cascade reservoirs. *Journal of Hydroecology*, 2010, **31**(6): 12-18. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2010.06.003. [简东，黄道明，常秀岭等. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替. 水生态学杂志，2010，**31**(6)：12-18.]

[37] Zhang K, Zhou LF, Chen W *et al*. Macroinvertebrates community structure in relation to environmental variables in the lower reaches of the Yalong River. *China Environmental Science*, 2023, **43**(4): 1857-1866. [张葵，周连凤，陈威等. 雅砻江下游大型底栖无脊椎动物群落结构及与环境因子的关系. 中国环境科学，2023，**43**(4)：1857-1866.]

[38] Qian ZY, Chen JQ, Feng J *et al*. Harmonious development of humanity and rivers. *China Water Resources*, 2006, **34**(2): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.2006.01.001. [钱正英，陈家琦，冯杰. 人与河流和谐发展. 中国水利，2006，**34**(2)：1-5.]

[39] Yuan B, Guo MJ, Zhou XD *et al*. Research advances in climate change and human activities on riverine dissolved organic matter (DOM). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(7): 1604-1614. [袁博，郭梦京，周孝德等. 气候变化及人类活动对河流溶解性有机质(DOM)影响的研究进展. 长江流域资源与环境，2018，**27**(7)：1604-1614.]

[40] Huang GM, Wang HL, Wang WY *et al*. Fish habitat conservation in the Lancang River Basin. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(6): 86-92. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2015.06.013. [黄光明，王海龙，王伟营等. 澜沧江流域鱼类栖息地保护实践. 水生态学杂志，2015，**36**(6)：86-92.]

[41] Yu ZD, Wang H, Wang RQ *et al*. The effects of bridge abutments on the benthic macroinvertebrate community. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, **25**(3): 1331-1337. DOI: 10.15244/pjoes/61879.

[42] Wiggins GB. Larvae of the North American *Caddisfly* Genera (Trichoptera). Canada: University of Toronto Press, 2015.

[43] Jiang XM, Xiong J, Xie ZC *et al*. Longitudinal patterns of macroinvertebrate functional feeding groups in a Chinese River system: A test for river continuum concept (RCC). *Quaternary International*, 2011, **244**(2): 289-295. DOI: 10.1016/j.quaint.2010.08.015.

[44] Jiang XM, Xiong J, Qiu JW *et al*. Structure of macroinvertebrate communities in relation to environmental variables in a subtropical Asian River system. *International Review of Hydrobiology*, 2010, **95**(1): 42-57. DOI: 10.1002/iroh.200811131.

[45] Addo-Bediako A. Spatiotemporal distribution patterns of benthic macroinvertebrate functional feeding groups in the blyde river, South Africa. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2021, **19**(3): 2241-2257. DOI: 10.15666/aeer/1903_22412257.

[46] Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW *et al*. The River continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(1): 130-137. DOI: 10.1139/f80-017.

[47] Tomanova S, Goitia E, Helešic J. Trophic levels and functional feeding groups of macroinvertebrates in neotropical streams. *Hydrobiologia*, 2006, **556**(1): 251-264. DOI: 10.1007/s10750-005-1255-5.

[48] Cummins KW, Wilzbach MA, Gates DM *et al*. Shredders and riparian vegetation. *BioScience*, 1989, **39**(1): 24-30. DOI: 10.2307/1310804.

[49] Niba AS, Mafereka SP. Benthic macroinvertebrate assemblage composition and distribution pattern in the upper Mthatha River, Eastern Cape, South Africa. *African Journal of Aquatic Science*, 2015, **40**: 133-142. DOI: 10.2989/16085914.2015.1028323.

[50] Dalu T, Sachikonye MTB, Alexander ME *et al*. Ecological assessment of two species of potamonautid freshwater crabs from the eastern Highlands of Zimbabwe, with implications for their conservation. *PLoS One*, 2016, **11**(1): e0145923. DOI: 10.1371/journal.pone.0145923.

[51] LII J, Oswood MW, Stoutr J *et al*. Latitudinal pattern sinleaf litter breakdown: Is temperature really important? *Freshwater Biology*, 2006, **32**(2): 401-411. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1994.tb01135.x.

[52] Heino J, Parviainen J, Paavola R *et al*. Characterizing macroinvertebrate assemblage structure in relation to stream size and tributary position. *Hydrobiologia*, 2005, **539**(1): 121-130. DOI: 10.1007/s10750-004-3914-3.

[53] Zhu CX, Mo KL, Tang L *et al*. Spatial-temporal distribution and ecological effects of macroinvertebrate functional feeding groups in the Lijiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(1): 60-69. DOI: 10.5846/stxb201811262574. [朱晨曦，莫康乐，唐磊等. 漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应. 生态学报，2020，**40**(1)：60-69.]

[54] Zhang Y, Ding S, Zhao Q *et al*. Exploring the feasibility of establishing conductivity criteria for macroinvertebrate based on the field investigations. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(1): 204-214. [张远，丁森，赵茜等. 基于野外数据建立大型底栖动物电导率水质基准的可行性探讨. 生态毒理学报，2015，**10**(1)：204-214.]

[55] Wang YD, Xiong BX, Chen CB *et al*. The effect of environment factors on life activity of zoobenthos. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2005, **24**(3): 253-257, 280. DOI: 10.3969/j.issn.1008-830X.2005.03.013. [王银东，熊邦喜，陈才保等. 环境因子对底栖动物生命活动的影响. 浙江海洋学院学报：自然科学版，2005，**24**(3)：253-257，280.]

附表 I 补远江水环境参数特征及方差分析

Attached Tab.I Characteristics of water environment parameters and ANOVA of Buyuan River

环境指标	旱季			雨季			*P*
	上游	中游	下游	上游	中游	下游	
TN/(mg/L)	0.67±0.16	0.59±0.23	0.46±0.18	2.36±2.23	1.09±0.37	1.16±0.70	＜0.01
NO_3^--N/(mg/L)	0.37±0.15 a	0.16±0.02 b	0.19±0.06 b	0.38±0.27 a	0.17±0.07 ab	0.11±0.04 b	0.96
NH_3-N/(mg/L)	0.22±0.19	0.16±0.22	0.26±0.29	0.84±0.15	0.68±0.33	0.73±0.23	＜0.01
COD_{Mn}/(mg/L)	4.88±2.17 a	2.03±0.97 b	2.43±1.34 ab	2.64±0.85	3.32±2.48	2.41±0.70	0.96
TP/(mg/L)	0.29±0.16	0.09±0.11	0.13±0.10	0.12±0.06	0.13±0.05	0.11±0.03	0.49
WT/℃	24.59±0.53	25.75±0.72	25.06±1.88	21.03±1.53	22.13±0.97	21.37±1.04	0.07
pH 值	7.47±0.37	7.49±0.24	7.66±0.09	7.34±0.29	7.57±0.09	7.43±0.11	＜0.01
DO/(mg/L)	7.00±1.32	7.91±0.53	7.66±0.47	7.83±1.26	8.42±0.84	8.19±0.74	＜0.05
电导率 CON/(s/m)	248.89±52.65	297.97±20.85	284.07±35.94	245.96±38.96	272.67±15.28	262.76±26.5	0.11
河宽 RW/m	7.67±2.05	50.02±28.71	52.47±37.36	20.43±16.16	50.67±27.24	38.69±26.7	0.09
流速 V/(m/s)	0.16±0.04	0.35±0.24	0.63±0.38	0.29±0.15	0.35±0.24	0.29±0.15	0.53

附表 II 补远江大型底栖动物物种名录

Attached Tab.II List of macroinvertebrates in Buyuan River

物种		FFGs	旱季	雨季	物种		FFGs	旱季	雨季
线形动物门	Nematomorpha				69.短丝蜉	*Siphlonurus* sp.	GC		+
线虫纲	Nematoda				70.蜉蝣	*Ephemera* sp.	GC	+	+
1.线虫	*Nematoda* spp.	PR		+	71.埃蜉	*Ephoron* sp.	GC	+	+
扁形动物门	Platyhelminthes				72.小蜉	*Ephemerella sp*	GC	+	+
涡虫纲	Turbellaria				73.锯形蜉	*Serratella* sp.	GC	+	
2.涡虫	*Turbellaria* spp.	PR	+		74.带肋蜉	*Cincticostella* sp.	SC		+
环节动物门	Annelida				75.等蜉	*Isonychia* sp.	FC	+	
蛭纲	Hirudinea				76.新蜉	*Neoephemera* sp.	GC	+	+
无吻蛭目	Arhynchobdellida				77.似宽基蜉	*Choroterpides* sp.	GC	+	+
3.石蛭	*Erpobdella* sp.	PR	+	+	78.细裳蜉	*Leptophlebia* sp.	GC		+
4.巴蛭	*Barbronia weberi*	PR		+	79.河花蜉	*Potamanthus* sp.	FC		+
吻蛭目	Rhynchobdellida				80.红纹蜉	*Rhoenanthus* sp.	FC		+
5.舌蛭	*Helobdella stagnalis*	PR	+	+	毛翅目	Trichoptera			
寡毛纲	Oligochaeta				81.长角石蛾科一属	*Athripsodes* sp.	GC	+	+
颤蚓目	Tubificida				82.长角石蛾科一属	*Setodes* sp.	GC		+
6.霍甫水丝蚓	*Limnodrilus hoffmeisteri*	GC		+	83.沼石蛾科一种	Limnophilidae spp1.	SH	+	+
7.苏式尾鳃蚓	*Branchiura sowerbyi*	GC		+	84.沼石蛾科一种	Limnophilidae spp2.	SH	+	+
软体动物门	Mollusca				85.沼石蛾科一属	*Nemotalius* sp.	SC		+
腹足纲	Gastropoda				86.沼石蛾科一属	*Ecclisomyia* sp.	GC		+
基眼目	Basommatophora				87.细皱伪突沼石蛾	*Pseudostenophylax granulatus*	SH	+	+
8.尖膀胱螺	*Physa acuta Draparnaud*	SC	+	+	88.石蛾科一属	*Apatania* sp.	SC		+
9.椭圆萝卜螺	*Radix swinhoei H.Adams*	SC	+	+	89.石蛾科一属	*Gumaga* sp.	FC		+

10.卵萝卜螺	*Radix ovata*	SC	+	+
11.耳萝卜螺	*Radix auricularia*	SC	+	
12.狭萝卜螺	*Radix lagotis*		+	+
中腹足目	Mesogastropoda			
13.铜锈环棱螺	*Bellamya aeruginosa*	SC		+
14.多棱角螺	*Angulyagra polyzonata*	SC	+	+
15.长角涵螺	*Alocinma longicornis*	SC		+
16.光滑狭口螺	*Stenothyra glabra*	SC	+	+
17.卵圆仿雕石螺	*Lithoglyphopsis ovatus*	SC		+
18.放逸短沟蜷	*Semisulcospira libertina*	SC	+	+
19.色带短沟蜷	*Semisulcospira mandarina*	SC	+	
20.塔蜷	*Thiara*	SC		+
21.斜肋齿蜷	*Sermyla riqueti*	SC		+
瓣鳃纲	Lamellibranchia			
蚌目	Unionoida			
22.圆顶珠蚌	*Unio douglasiae*	FC		+
23.棘裂脊蚌	*Schistodesmus spiosus*	FC		+
24.背角无齿蚌	*Sinanodonta woodiana*	FC		+
真瓣鳃目	Eulamellibranchia			
25.河蚬	*Corbicula fluminea Müller*	FC	+	+
26.湖球蚬	*Sphaerium lacustre*	FC	+	+
异柱目	Anisomyaria			
27.湖沼股蛤	*Limnoperna lacustris*	FC		+
节肢动物门	Arthropoda			
昆虫纲	Insecta			
双翅目	Diptera			
28.流粗腹摇蚊	*Rheopelopia* sp.	PR	+	+
29.长跗摇蚊	*Tanytarsus* sp.	GC	+	+
30.拟踵突多足摇蚊	*Polypedilum paraviceps*	GC	+	+
31.梯形多足摇蚊	*Polypedilum scalaemum*	GC	+	+
32.指突隐摇蚊	*Cryptochironomus digitatus*	GC	+	+
33.齿斑摇蚊	*Stictochironomus* sp.	GC	+	+
34.二叉摇蚊	*Dicrotendipes* sp.	GC	+	+
35.羽摇蚊	*Chironomus plumosus*	GC		+
36.摇蚊属一种	*Chironomus Meigen* sp.	GC		+
37.拟枝角摇蚊	*Paracladopelma* sp.	GC	+	
38.倒毛摇蚊	*Microtendipes* sp.	GC		+
39.刀突摇蚊	*Psectrocladius* sp.	GC	+	+
40.弯铗摇蚊	*Cryptotendipes* sp.	GC	+	
41.脊突摇蚊	*Cyphomella* sp.	GC	+	
90.石蛾科一属	*Oligostomis* sp.	FC		+
91.小石蛾	*Hydroptila* sp.	FC	+	+
92.径石蛾	*Ecnomus* sp.	FC	+	+
93.舌石蛾	*Glossosoma sp*	SC	+	+
94.角石蛾	*Stenopsyche* sp.	SH	+	+
95.短脉纹石蛾	*Cheumatopsyche* sp.	FC	+	+
96.侧枝纹石蛾	*Ceratopsyche* sp.	FC	+	+
97.长角纹石蛾	*Macrostemum* sp.	FC	+	+
98. *Aethalopsyche* 属一种	*Aethalopsyche* sp.	FC	+	+
99. *Potamyia* 属一种	*Potamyia* sp.	FC	+	+
100.管石蛾	*Lype* sp.	SC	+	
101.原石蛾	*Rhyacophila* sp.	PR	+	+
102.缺叉等翅石蛾	*Chimarra* sp.	FC	+	+
103.剑石蛾	*Melanotrinia* sp.	FC		+
104.瘤石蛾	*Goera* sp.	SC		+
105.黑管石蛾	*Ueno a*sp.	FC		+
襀翅目	Plecoptera			
106.襟襀	*Togoperla* sp.	PR	+	+
107.襀科一属	*Tetropina* sp.	PR	+	+
108.大山襀	*Oyamia* sp.	PR		+
109.卷襀	*Leuctra* sp.	SH	+	
蜻蜓目	Odonata			
110.幽蟌	*Euphaea* spp.	PR	+	+
111.隼蟌一种	Chlorocyphidae spp.	PR		+
112.蟌科一种	Coenagriidae spp.	PR	+	
113.色蟌一种	Calopterygidae spp.	PR	+	
114.多棘蜓	*Polycanthagina* sp.	PR		+
115.碧翠蜓	*Anaciaeschna* sp.	PR		+
116.黄足扩腹春蜓	*Stylurus flavipes*	PR		+
117.纤箭蜓	*Leptogomphus* sp.	PR		+
118.具突东方春蜓	*Orientogomphus armatus*	PR	+	+
119.长足春蜓	*Merogomphus* sp.	PR	+	+
120.华春蜓	*Sinogomphus* sp.	PR	+	
121.尖尾春蜓	*Stylogomphus* sp.	PR		+
122.曦箭蜓	*Heliogomphus* sp.	PR	+	
123.环尾春蜓	*Lamelligomphus* sp.	PR	+	+
124.戴春蜓	*Davidius* sp.	PR		+
125.灰蜻	*Orthetrum* sp.	PR		+
126.黄翅蜻	*Brachythemis* sp.	PR		+
127.大伪蜻	*Macromia* sp.	PR	+	+

42.拟隐摇蚊	*Demicryptochironomus* sp.	GC		+
43.环足摇蚊	*Cricotopus* sp.	GC	+	+
44.直突摇蚊一种	*Orthocladius* sp1.	GC	+	+
45.直突摇蚊一种	*Orthocladius* sp2.	GC	+	+
46.直突摇蚊一种	*Orthocladius* sp3.	GC		+
47.蚋	*Simulium* sp.	FC	+	+
48.朝大蚊	*Antocha* sp.	SH	+	+
49.黑大蚊	*Hexatoma* sp.	SH	+	+
50. *Yamatotipula* 属一种	*Yamatotipula* sp.	SH	+	
51.雅大蚊	*Tipula* sp.	SH	+	+
52. *Cutipula* 属一种	*Cutipula* sp.	SH	+	
53.唇大蚊	*Cheilotrichia* sp.	SH		+
54.贝蠓	*Bezzia* sp.	PR	+	+
55.虻科	Tabanidae spp.	PR	+	+
56.伪鹬虻科一种	Athericidae spp.	PR		+
57. *Atrichops* 属一种	*Atrichops* sp.	PR		+
58.猎舞虻	*Rhamphomyia* sp.	PR		+
59.锥长足虻	*Rhaphium* sp.	PR	+	+
60.池蝇	*Limnophora* sp.	PR	+	
蜉蝣目	Ephemeroptera			
61.四节蜉一种	*Baetis* sp1.	GC	+	+
62.四节蜉一种	*Baetis* sp2.	GC	+	+
63.花翅蜉	*Baetiella* sp.	GC	+	+
64.鲎蜉	Prosopistomatidae spp.	GC	+	
65.细蜉	*Caenis* sp.	GC	+	+
66.扁蜉	*Heptagenia* sp.	SC	+	+
67.似动蜉	*Cinygmina* sp.	SC		+
68.高翔蜉	*Epeorus* sp.	GC		+
128.大蜻科一种	Macromiidae spp.	PR	+	+
129.伪蜻科一种	Corduliidae spp.	PR		+
130.大蜓科一种	Cordulegastridae spp.	PR		+
广翅目	Megaloptera			
131.星齿蛉	*Protohermes* sp.	PR	+	+
鳞翅目	Lepidoptera			
132.斑水螟	*Eoophyla* sp.	SC	+	+
133.狭水螟	*Eristena* sp.	SC	+	+
134. *Potamomusa* 属一种	*Potamomusa* sp.	SC		+
鞘翅目	Coleoptera			
135.狭溪泥甲一种	*Stenelmis* sp1.	GC	+	+
136.狭溪泥甲一种	*Stenelmis* sp2.	GC	+	
137.扁泥甲科一种	Psephenidae spp1.	SC	+	+
138.扁泥甲科一种	Psephenidae spp2.	SC	+	
139.水龟甲科一种	Hydroscaphidae spp1.	PR	+	+
140.水龟甲科一属	*Berosus* sp.	PR		+
141.丽龙虱	*Hydaticus* sp.	PR		+
半翅目	Hemiptera			
142.潜蝽科一种	Naucoridae spp1.	PR	+	+
143.潜蝽	*Pelocoris* sp.	PR		+
144.大涧黾	*Rhyacobates* sp.	PR		+
145.黄黾	*Neogerris* sp.	PR		+
146.黾蝽科一种	Gerridae spp1.	PR		+
147.小划蝽	*Micronecta* sp.	PR	+	+
148.盖蝽科一种	Aphelocheiridae spp1.	PR	+	+
十足目	Decapoda			
149.长臂虾科一种	Palaemonidae spp1.	FC		+
150.毛螯沼虾	*Macrobrachium dienbienphuense*	FC		+