



• 研究报告 •

雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素

李正飞¹, 蒋小明², 王军³, 孟星亮¹, 张君倩¹, 谢志才^{1*}

1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 3. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070

摘要: 雅鲁藏布江流域维系着丰富而独特的生物资源, 是全球生物多样性研究的热点区域。然而, 该流域底栖动物多样性的调查却极不充分。本文于2015年10月和2016年3月对雅鲁藏布江干流(朗县至墨脱段)和主要支流的底栖动物进行了调查, 并采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和典范对应分析(canonical correspondence analysis)等对群落多样性格局进行解析。共采集到底栖动物270种, 隶属于5门8纲20目92科, 包括昆虫纲246种, 寡毛纲14种, 腹足纲4种, 其他动物6种。春季和秋季分别采集到底栖动物184种和214种, 优势种均以喜清洁和冷水的水生昆虫为主, 包括四节蜉属一种(*Baetis* sp.)、花翅蜉属一种(*Baetiella* sp.)、蚬属一种(*Simulium* sp.)、小突摇蚊属一种(*Micropsetra* sp.)和短石蛾属一种(*Brachycentrus* sp.)等。全流域平均密度为939.1 ind./m², 平均生物量为5.44 g/m²。底栖动物的物种组成、密度和多样性在季节和区域之间存在一定差异, 支流的多样性显著高于干流。典范对应分析显示, 海拔、流速、河宽和底质类型等环境因子是影响雅鲁藏布江流域底栖动物群落结构的关键环境因素, 而大峡谷地区多变的气候类型和地理阻隔是造成群落变化的根本原因。本研究可为雅鲁藏布江流域底栖动物多样性评估和环境监测提供重要的基础和参考。

关键词: 雅鲁藏布江; 底栖动物; 物种组成; 物种多样性; 典范对应分析

李正飞, 蒋小明, 王军, 孟星亮, 张君倩, 谢志才 (2022) 雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素. 生物多样性, 30, 21431. doi: 10.17520/biods.2021431.

Li ZF, Jiang XM, Wang J, Meng XL, Zhang JQ, Xie ZC (2022) Species diversity and driving factors of benthic macroinvertebrate assemblages in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River. Biodiversity Science, 30, 21431. doi: 10.17520/biods.2021431.

Species diversity and driving factors of benthic macroinvertebrate assemblages in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River

Zhengfei Li¹, Xiaoming Jiang², Jun Wang³, Xingliang Meng¹, Junqian Zhang¹, Zhicai Xie^{1*}

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072

2 School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

3 College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

ABSTRACT

Aims: The Yarlung Zangbo River basin supports rich and unique biological resources, which makes it a global biodiversity hotspot. However, surveys on benthic macroinvertebrates in this river basin are far from sufficient. To fill this gap, this study focused on the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River, where macroinvertebrates were sampled from the main stream and tributaries in autumn (October 2015) and spring (March 2016).

Methods: One-way ANOVA was used to examine the differences of abundance, biomass and ecological indices between the main stream and tributaries. Canonical analysis of principal coordinates (CAP) was adopted to test if community structures varied among different site groups. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to identify the key environmental factors that significantly influence the community structure of macroinvertebrates during

收稿日期: 2021-10-29; 接受日期: 2022-01-08

基金项目: 科技基础资源调查专项(2019FY101903; 2019FY101906)和中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司资助

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhxie@ihb.ac.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

each season.

Results: A total of 270 species were identified, belonging to 5 phyla 8 classes 20 orders and 92 families. The community included 246 aquatic insects, 14 oligochaetes, 4 mollusks and 6 others. The average density was 939.1 ind./m², and the average biomass was 5.44 g/m². 184 and 214 macroinvertebrate species were collected in spring and autumn, respectively. The dominant species were aquatic insects that preferred clean and cold water, including *Baetis* sp., *Baetiella* sp., *Simulium* sp., *Micropsetra* sp. and *Brachycentrus* sp. The community structure, density and diversity indices exhibited significant temporal and spatial variation, and the diversity in tributaries was significantly higher than that of the main stream. CCA analysis indicated that environmental factors including altitude, velocity, river width and substrate types were key factors structuring the benthic community in the Yarlung Zangbo River.

Conclusion: The variation in community structure and diversity pattern were mainly derived from the variable climate types and geological barriers in the Grand Canyon area. This study can provide important basis and reference for macroinvertebrate diversity assessments and environmental monitoring in the Yarlung Zangbo River basin.

Key words: Yarlung Zangbo River; benthic macroinvertebrates; species composition; species diversity; canonical correspondence analysis

作为河流中生物多样性的重要组成部分, 大型底栖无脊椎动物(以下简称底栖动物)在河流生态系统能量流动和物质循环中起着承上启下的作用(Wallace & Webster, 1996)。由于其多样性高、活动地点相对固定、生活周期长且不同种类对环境变化及人为干扰响应各异, 底栖动物成为了解河流生态系统结构与功能的关键类群, 被广泛应用于群落多样性研究以及环境生物学评价中(于帅等, 2017; Berger et al, 2018; Li et al, 2019a)。

中国幅员辽阔, 河流众多, 是世界上河流最为丰富的国家之一。然而, 我们对河流底栖动物多样性的研究仍然滞后于世界同期水平。国内已有的研究多集中在长江、黄河、珠江和澜沧江等流域的中下游江段和支流, 而对中西部高原河流的调查仍然不足(王昱等, 2021)。雅鲁藏布江发源于西藏自治区境内, 是中国最长的高原跨境河流, 也是世界上海拔最高的大河(刘天仇, 1999)。该河流为我国西藏地区和下游南亚地区提供了主要的淡水资源, 在全球具有重要的地位(聂宁等, 2012)。由于具有海拔高、地表物理性质复杂等特点, 栖居于此的生物在全球气候变化中具有其自身特殊的演化规律(Jiang et al, 2014; Li et al, 2019a)。相比低海拔河流, 雅鲁藏布江流域的生态环境更为脆弱, 其生物有着明显的地理区系特点, 与其他区系重叠较少, 具有丰富而独特的基因、物种及生态系统多样性, 是全球生物多样性的热点区域(Guo et al, 2010; 拉琼等, 2014; Li et al, 2021)。

关于雅鲁藏布江流域的植物和脊椎动物已有许多报道, 然而对该河流底栖动物多样性的研究尚

不充分, 主要体现在: (1)研究的空間尺度较小。关于雅鲁藏布江流域底栖动物的调查多只聚焦在局部河段(马宝珊等, 2012; 徐梦珍等, 2012; Jiang et al, 2014), 而缺乏囊括干流和重要支流的大范围、多位点的样品采集; (2)调查的时间尺度明显不足。多数研究仅基于单次采样, 缺乏连续性或季节性的调查, 所得结论不能充分反映该流域底栖动物种类及分布的真实状况(刘海平等, 2014)。此外, 由于雅鲁藏布江中下游水系复杂、生境多样, 底栖动物资源极为丰富, 以往的研究缺乏系统性, 物种需要进一步复核。在全球气候变化和河流水电开发的背景下, 开展雅鲁藏布江流域大范围底栖动物多样性调查, 摸清其家底, 是科学评价河流生态系统健康状况, 实现生物多样性保护和资源可持续开发利用的重要基础。有鉴于此, 本文于2015–2016年开展了雅鲁藏布江中下游干流(朗县至墨脱段)和19条支流底栖动物的调查工作, 力图揭示这一江段底栖动物的物种多样性, 刻画底栖动物的群落结构和时空分布格局, 并探讨影响群落结构的关键环境要素, 以期合理利用和保护该流域的底栖动物多样性资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

雅鲁藏布江中下游地处藏东南(26°52′–30°40′ N, 92°09′–98°47′ E), 位于地球第三极的较低位置(图1)。不同于上游地区的高寒少雨, 该区域气候温暖湿润, 年均气温8.7℃, 年均降水量650 mm左右。雅鲁藏布江中下游地区横跨多个气候带, 从

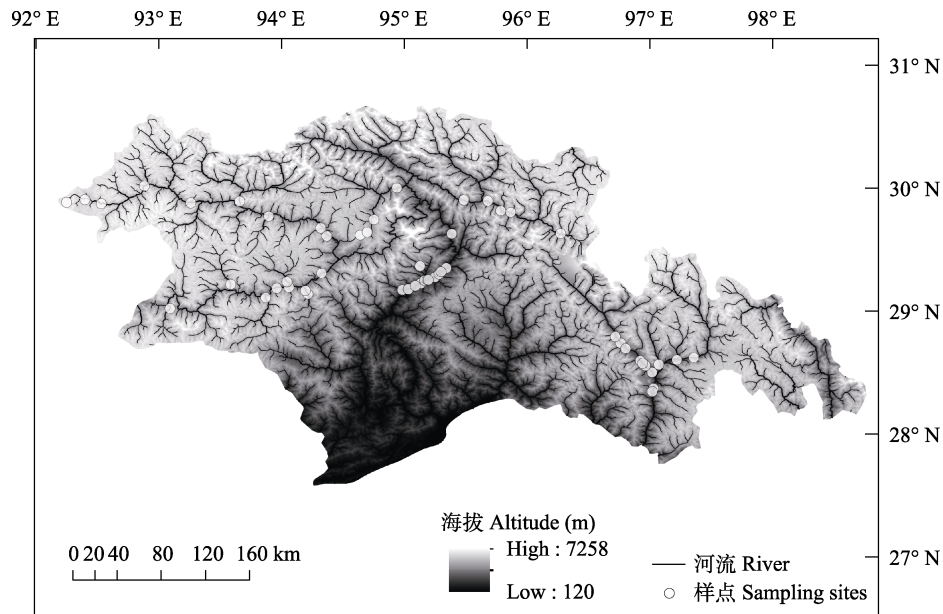


图1 雅鲁藏布江流域采样点分布图
Fig. 1 Geographical locations of the sampling sites in the Yarlung Zangbo River, China

中游高原温带半干旱气候向下游山地亚热带和热带湿润气候过渡。该江段河道落差极大, 蕴含丰富的水能资源, 尤其在流经雅鲁藏布江大峡谷后, 海拔落差达到2,000 m。大峡谷的存在使得上下游形成截然不同的气候、生境和植被类型, 是区域内生物多样性形成的重要基础, 亦是阻碍生物扩散和分布的天然屏障。独特的气候特征、地形地貌和多样的生态系统、丰富的生物资源, 使雅鲁藏布江中下游成为亚洲乃至北半球气候变化的调节器, 成为维系高原生态系统、生物多样性及周边地区生态平衡的重要缓冲区。

1.2 样品采集和处理

本文于2015年10月和2016年3月对雅鲁藏布江干流(朗县–墨脱)和19条支流进行底栖动物样品的采集。采集的19条支流包括大峡谷上游的10条(拉多、金东曲、比布曲、里龙、当嘎小溪、扎绕、玉松普曲、南伊沟、尼洋河和帕隆藏布)和大峡谷下游的9条(察隅河、金珠藏布、西莫河、哈果河、西贡河、果果糖支流、甲嘎支流、白马西路河和多雄河)。共设样点75个, 其中干流样点17个, 大峡谷上游支流样点30个, 大峡谷下游支流样点28个(图1, 附录1)。

在每个样点选取流速、水深和底质组成均有代表性的地点进行定量采集, 各样点均采集3个重复样。依据样点的生境状况, 在鹅卵石–砾石底质为主

的可涉水区域采用Surber网(筛网孔径420 μm , 采样面积0.09 m^2)进行采集, 在水位较深的不可涉水样点用Peterson采泥器(1/16 m^2)采集。同时, 使用手抄网或D型网对各样点底栖动物进行定性采集, 目的是对定量采集进行补充和完善。

采集样品经450 μm 铜筛洗净后, 在白色解剖盘中将动物标本拣出, 储存在50 mL的标本瓶中, 并使用75%的酒精固定。为防止加入固定液后标本脱色, 固定前记录好样品色泽。参考相关资料(刘月英等, 1979; Brinkhurst, 1986; Morse et al, 1994; Epler, 2001; 周长发等, 2003)对动物标本进行鉴定。水生昆虫除摇蚊(鉴定到种或属)外, 皆在解剖镜下鉴定到科或属。多数软体动物和水栖寡毛类均鉴定到种。鉴定完成后, 记录每个物种的个数(条), 并用吸水纸将动物体表的水分吸干, 由精确度为0.0001 g的电子天平称量湿重。

在采集底栖动物样品的同时, 测定该样点的生境指标。使用美国麦哲伦手持式GPS(探险家210型)对海拔和经纬度进行测定, 使用优利德激光测距仪(LM600型)对河宽进行测量。使用美国黄泉仪器公司(Yellow Springs Instrument)的多参数水质分析仪(YSI6600)对pH值、水温、溶解氧和电导率进行测定。流速(LJD-10A型打印式流速流量仪, 北京戴美克科技有限公司)和水深(用标尺)则需要在样点所

在的河段内随机选取5–10个断面测量, 并取平均值。参考Barbour等(1999)的标准, 将底质组成划分为四大类: (1)沙; (2)砾石; (3)鹅卵石; (4)大石, 通过目测估算每一种底质类型的百分比。

1.3 数据分析

基于以下公式计算群落多样性指数:

(1) Margalef丰富度指数(Margalef, 1958):

$$D = (S - 1) / \ln N$$

(2) Shannon-Wiener多样性指数(Shannon, 1948):

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

(3) Simpson多样性指数(Simpson, 1949):

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

(4) Pielou均匀度指数(Pielou, 1966):

$$J = H' / \ln S$$

其中, 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 为样本中总个体数。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较干流、大峡谷上游支流及下游支流密度、生物量和多样性指数间的差异。如果方差分析的组间差异显著, 就进行多重比较; 如果方差齐, 就进行HSD (Tukey's honestly significant difference)检验; 如果方差不齐, 就选用Games-Howell检验(Beckmann et al, 2005)。

使用相似性分析 (analysis of similarities, ANOSIM)检测底栖动物群落结构在时间(春季和秋季)和空间(干流、峡谷上游支流、峡谷下游支流)尺度上差异的显著性, 并采用主坐标典范分析(canonical analysis of principal coordinates, CAP)对不同组间的群落差异进行可视化。为了优化分析, 在CAP分析时, 每组生物数据都进行 $\lg(x + 1)$ 转换, 以减少优势种类的优势度(Clarke & Warwick, 2001)。转换后的数据经Bray-Curtis不相似性测定, 建立所有样点间的等级相似矩阵。在不同相似矩阵的基础上建立CAP平面图。多样性指数的计算、ANOSIM和CAP分析均在PRIMER 6.0中运行(Anderson, 2008)。

采用束缚型排序(constrained ordination)解析两个季度底栖动物群落结构与环境因子之间的关系。环境参数作为环境数据源, 底栖动物物种组成作为生物数据源, 构成环境因子与生物矩阵。对底栖动物群落的除趋势对应分析(detrended correspondence

analysis, DCA)显示, 非线性模式(gradient length > 4 standard units)更为适合动物群落与环境因子关系的分析。因此采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)。为了优化分析, 底栖动物群落数据进行 $\lg(x + 1)$ 转换, 具有较高偏相关系数的环境因子($r > 0.80$)、膨胀因子(inflation factor)大于20的环境因子均被剔除, 并在分析中降低了稀有种的权重(downweighting option)。用前选(forward selection)和Monte Carlo转置法确定对底栖动物群落分布具有重要且独立作用的最小变量组合, 该最小变量组用于最终的CCA模型中。数据分析采用Canoco for Windows 4.5软件完成(ter Braak & Šmilauer, 2002)。

2 结果

2.1 群落结构

对采集的标本进行鉴定, 共发现底栖动物270种, 隶属于5门8纲20目92科(附录2)。底栖动物的优势类群为水生昆虫(246种, 占总物种数的91.11%); 此外还发现寡毛纲14种(占5.56%), 腹足纲4种、软甲纲2种, 涡虫纲、线虫纲、蛭纲、蛛形纲各1种(图2)。水生昆虫包括蜉蝣目9科24种, 襀翅目9科22种, 毛翅目20科43种, 双翅目19科123种(摇蚊科85种), 蜻蜓目5科14种, 鞘翅目11种, 半翅目5种, 鳞

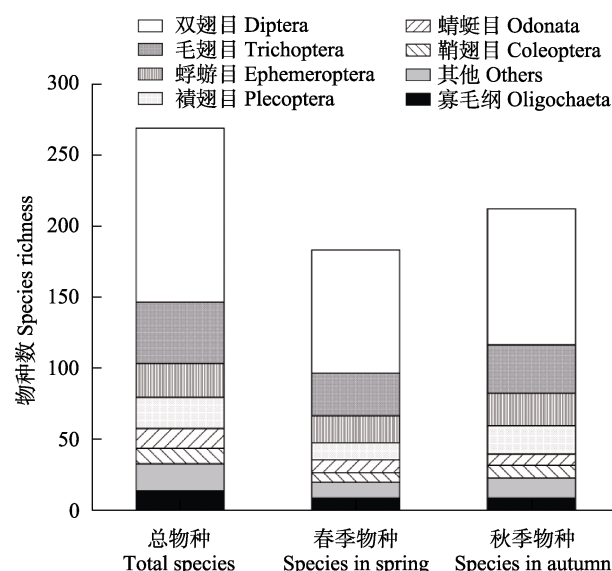


图2 雅鲁藏布江流域大型底栖动物的物种组成

Fig. 2 Species composition of benthic macroinvertebrates in the Yarlung Zangbo River

翅目2种以及广翅目和脉翅目各1种。

春季和秋季采集到的底栖动物组成上存在一定的差异(ANOSIM, Global R = 0.22, $P < 0.001$)。其中, 春季共采集到184种, 包括寡毛类9种, 软体动物2种, 水生昆虫171种和其他动物2种。优势种为四节蜉属一种(*Baetis* sp., 相对丰度百分比为10.00%)、蚋属一种(*Simulium* sp., 7.60%)、小突摇蚊属一种(*Micropsetra* sp., 7.50%)、短石蛾属一种(*Brachycentrus* sp., 5.06%)、东方帕摇蚊(*Pagastia orientalis*, 3.90%)以及弯握蜉属一种(*Drunella* sp., 3.20%)。秋季共采集到214种, 包括寡毛类9种, 软体动物3种, 软甲纲2种, 水生昆虫196种和其他动物4种(图2)。优势种为四节蜉属一种(18.65%)、花翅蜉属一种(*Baetiella* sp., 6.50%)、溪蛭蜉属一种(*Rhithrogena* sp., 4.03%)、小突摇蚊属一种(3.65%)以及纽多聚石蛾属一种(*Neureclipsis* sp., 3.48%)。干支流各样点底栖动物类群组成如附录3所示, 虽然各断面的物种数和类群组成在两个季度略有差异,

但总体来说, 水生昆虫在春秋两季均为绝对优势的类群, 而软体动物、寡毛类以及其他底栖动物数量极少。

ANOSIM分析显示, 干流、大峡谷上游和下游支流的底栖动物群落结构在春秋两季均存在明显的空间差异($P < 0.001$)。由CAP排序图可以看出, 大峡谷上游和下游支流的群落可以比较明显地区分开, 而干流群落的区分度则较差(图3)。

2.2 密度和生物量

全流域底栖动物的平均密度为939.1 ind./m², 平均生物量为5.44 g/m²。密度和生物量在各断面的差异均较大。春季干流各样点的密度为44~1,494 ind./m², 均值为477.5 ind./m²。生物量方面, 除朗县干流(14.29 g/m²)外, 其余各断面均处于较低的水平, 均值为2.12 g/m²。方差分析显示, 大峡谷上游支流(平均密度1,402.2 ind./m²; 生物量7.05 g/m²)及大峡谷下游支流(1,075.7 ind./m²; 8.24 g/m²)的密度及生物量均显著高于干流(表1)。

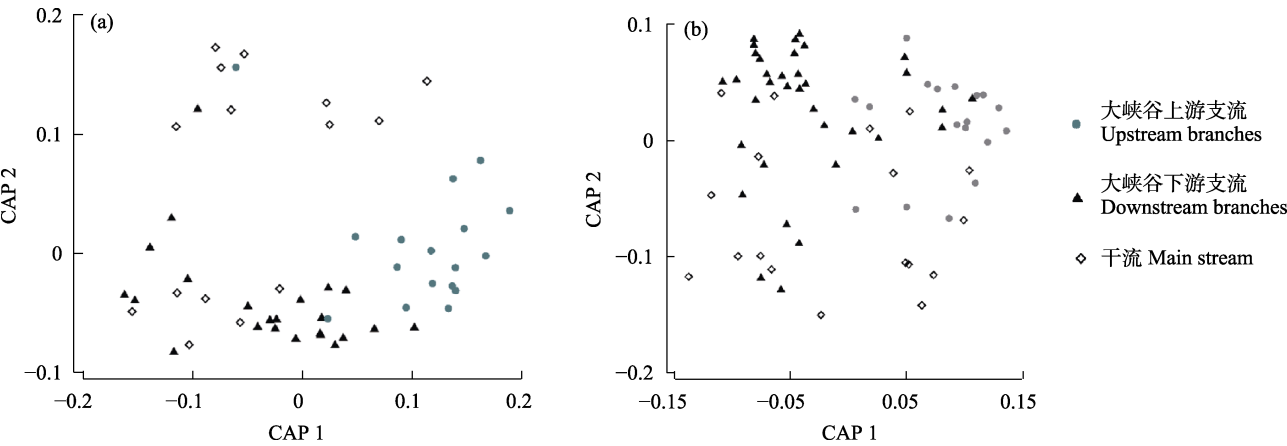


图3 雅鲁藏布江各区域底栖动物群落差异的CAP排序图。(a)春季;(b)秋季。
Fig. 3 Canonical analysis of principal coordinates (CAP) ordination diagrams of benthic macroinvertebrates in different reaches of the Yarlung Zangbo River. (a) Spring; (b) Autumn.

表1 雅鲁藏布江干支流断面底栖动物密度与生物量的比较
Table 1 Comparison of density and biomass of macroinvertebrates in different reaches of the Yarlung Zangbo River

	时期 Periods	干流 Main stream	大峡谷上游支流 Upstream branches	大峡谷下游支流 Downstream branches	F	P
密度 Density (ind./m ²)	春季 Spring	477.5 ± 465.6 ^a	1,402.2 ± 1,080.6 ^b	1,075.7 ± 1,319.4 ^b	6.741	0.005
	秋季 Autumn	327.1 ± 301.7 ^a	1,219.2 ± 1,008.3 ^b	1,321.9 ± 864.6 ^b	5.945	0.007
生物量 Biomass (g/m ²)	春季 Spring	2.12 ± 3.69 ^a	7.05 ± 4.36 ^{ab}	8.24 ± 7.28 ^b	4.114	0.028
	秋季 Autumn	2.89 ± 4.68	5.71 ± 7.50	3.37 ± 2.31	0.872	0.428

不同字母表示存在显著差异($P < 0.05$) Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$)

秋季干流底栖动物密度为56–1,217 ind./m², 均值为327.1 ind./m²; 干流生物量为0.02–16.81 g/m², 均值为2.89 g/m²。方差分析显示, 大峡谷上游支流(1,219.2 ind./m²)和下游支流(1,321.9 ind./m²)的密度均显著高于干流($P < 0.05$), 而生物量在各组间并未表现出显著差异(表1)。

2.3 物种多样性

春季底栖动物的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数分别在0.68–5.08 (均值为1.83)、0–2.36 (1.65)、0–0.91 (0.73)和0–1.00 (0.75)之间。支流的Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数均显著高于干流($P < 0.05$, 图4), 而Pielou均匀度指数和Simpson多样性指数则无明显差异。

秋季底栖动物的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数分别在0.54–2.82 (均值为1.37)、0.75–2.20

(1.49)、0–2.36 (1.65)和0.57–0.83 (0.74)之间。除Pielou均匀度指数无显著差异外, 支流底栖动物的多样性指数均显著高于干流($P < 0.05$, 图5)。

2.4 关键驱动力

CCA分析结果表明, 环境因子共解释了春季底栖动物群落结构变异的19.08%。其中, 第一轴和第二轴分别解释了6.91%和4.49%。海拔、河宽、pH值和流速是影响春季底栖动物分布的关键环境因子(图6a, 表2)。寡角摇蚊属一种(*Diamesa* sp.)、原石蛾属一种(*Rhyacophila* sp.)和微动蜉属一种(*Cinygmula* sp.)等种类主要分布在高海拔的样点; 而脊突摇蚊属一种(*Cyphomella* sp.)、四节蜉属一种等种类则表现出对较高流速生境的偏好(图6a)。对于秋季来讲, 环境因子共解释了21.71%底栖动物群落结构的变异。其中, 第一轴和第二轴分别解释了4.92%和4.21%。海拔、底质(沙%)、pH值、溶解氧、水深和河宽是影响秋季雅鲁藏布江底栖动物分布的关键环境因子(图6b, 表2)。

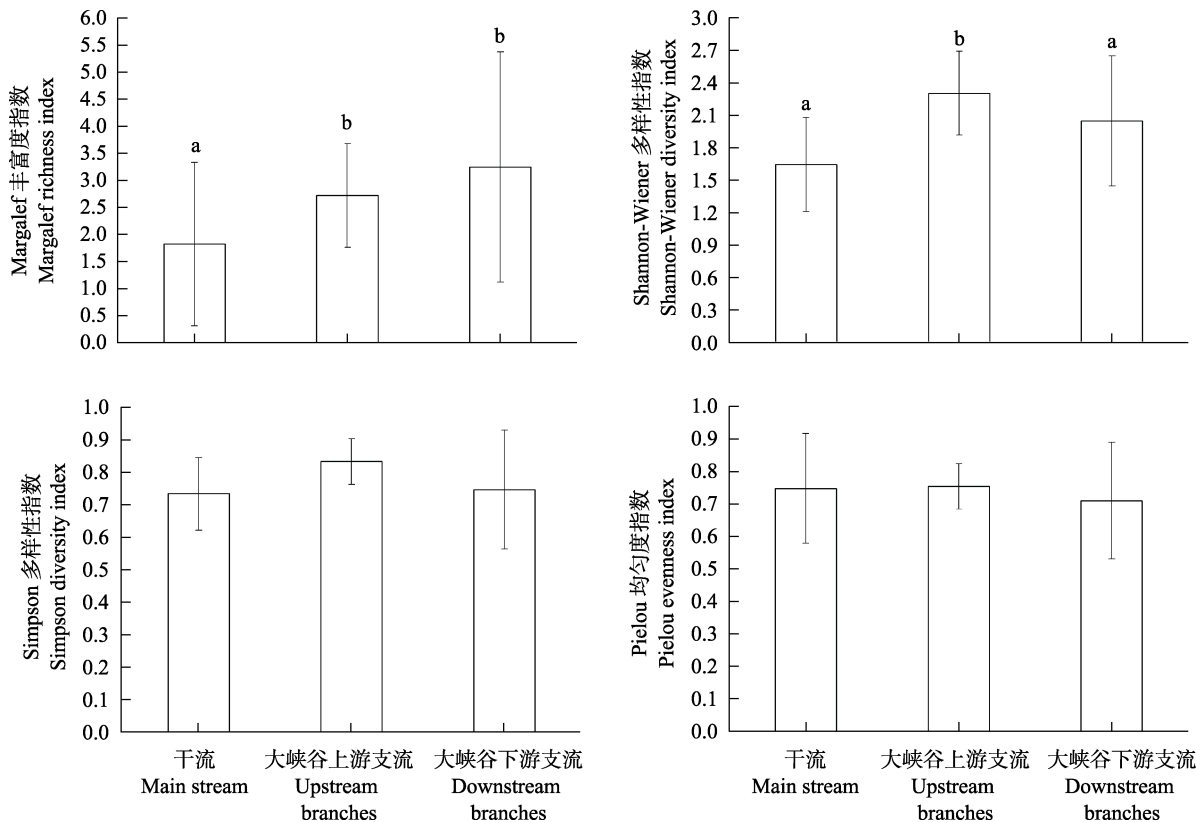


图4 雅鲁藏布江春季干支流河段底栖动物多样性指数的差异。不同字母表示存在显著差异($P < 0.05$)。

Fig. 4 Comparison of diversity index of benthic macroinvertebrates in different reaches of the Yarlung Zangbo River in spring. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

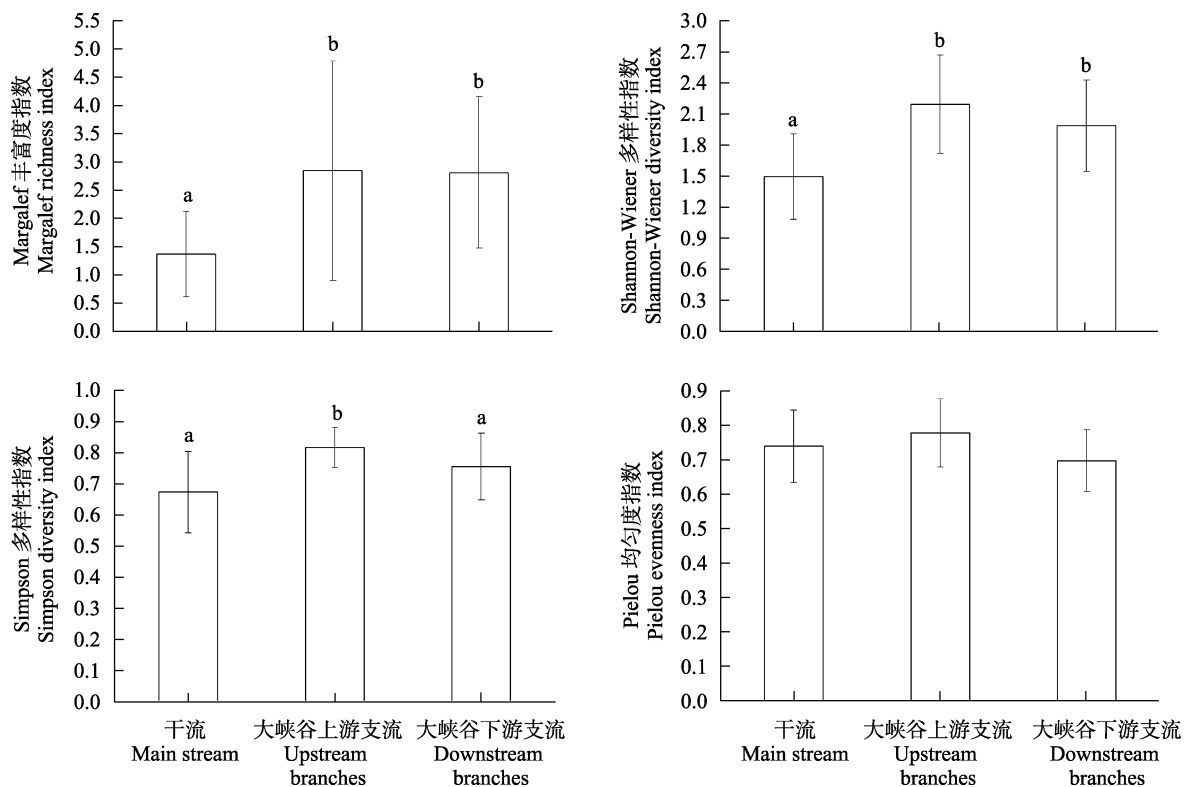


图5 雅鲁藏布江秋季干支流河段底栖动物多样性指数的差异。不同字母表示存在显著差异($P < 0.05$)。
Fig. 5 Comparison of diversity index of macroinvertebrates in different regions of the Yarlung Zangbo River in autumn. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

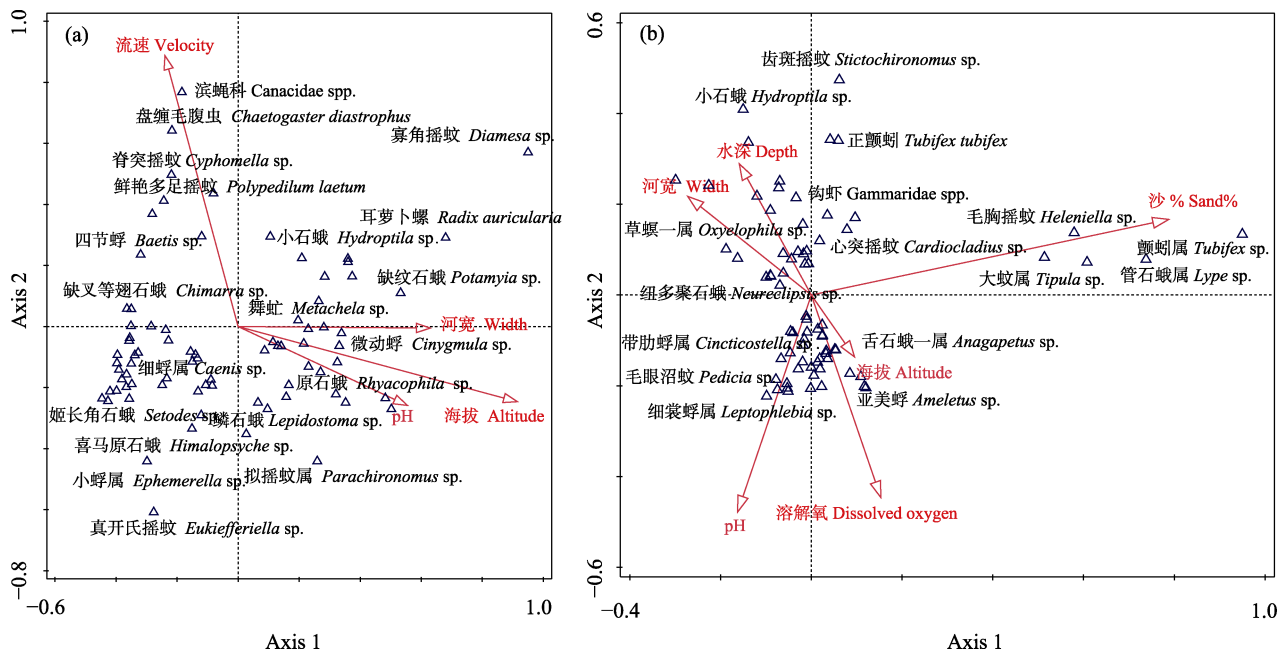


图6 雅鲁藏布江春季(a)和秋季(b)底栖动物物种与环境因子的典范对应分析排序图
Fig. 6 Canonical correspondence analysis ordination diagram of benthic macroinvertebrate communities with significant environmental variables in spring (a) and autumn (b)

表2 雅鲁藏布江底栖动物群落结构与环境因子关系的典范对应分析结果汇总表

Table 2 The key environmental factors affecting macroinvertebrate communities in the Yarlung Zangbo River based on canonical correspondence analysis

	获取的关键因子 Key factors selected	与排序轴的相关系数 Correlation coefficients with the axes					
		F	P	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
春季 Spring	海拔 Altitude	1.60	0.001	0.762	-0.183	-0.408	-0.182
	河宽 Depth	1.93	0.001	0.643	0.019	0.121	0.164
	pH	1.23	0.064	0.485	-0.405	0.292	0.097
	流速 Velocity	1.25	0.080	-0.325	0.175	0.454	-0.606
秋季 Autumn	海拔 Altitude	1.78	0.001	0.070	0.266	0.612	-0.521
	沙% Sand%	1.89	0.004	0.682	0.243	-0.339	-0.015
	pH	1.61	0.004	-0.165	-0.205	-0.226	-0.478
	溶解氧 Dissolved oxygen	1.67	0.004	-0.406	0.453	-0.168	0.226
	水深 Depth	1.46	0.052	0.289	0.123	0.551	0.244
	河宽 Width	1.48	0.021	0.203	-0.268	0.194	-0.047

3 讨论

3.1 物种组成和多样性

有关雅鲁藏布江底栖动物的调查可追溯至20世纪90年代,武云飞和吴翠珍(1992)在《青藏高原鱼类》中记载了寡毛纲、腹足纲和昆虫纲中的一些种类。之后,赵伟华和刘学勤(2010)报道了日喀则市雄村河段及其附近支流的底栖动物,共计20科42属47种。徐梦珍等(2012)对位于日喀则至林芝的干流河段和部分支流进行了调查,共记录底栖动物57科102属110种。马宝珊等(2012)报道了雅鲁藏布江中游谢通门江段底栖动物26种。Jiang等(2014)对雅鲁藏布江支流尼洋河进行了调查,共记录38科78属94种;刘海平等(2014)随后对尼洋河底栖动物与环境的关系进行了初步研究。简东等(2015)记录了拉萨河中下游底栖动物22科30属31种。本次调查涵盖雅鲁藏布江干流和支流样点75个,共记录动物270种,是近年来该流域底栖动物调查最为全面的一次。由于区域内人类活动较少,河流基本保持原始状态,各样点的底栖动物多以EPT类群(蜉蝣目、襀翅目和毛翅目)及其他水生昆虫的敏感种类为主。此外,由于样点分布在海拔500–4,500 m范围内,区域内气候、地貌、植被以及其他环境条件差异极大,造就了丰富且复杂的底栖动物区系:既分布着寡角摇蚊属一种(*Diamesa* sp.)、帕摇蚊属一种(*Pagastia* sp.)、同襀属一种(*Isoptera* sp.)、短石蛾属一种(*Brachycentrus* sp.)等诸多适应高海拔低温水体的种

类,又有东方春蜓属一种(*Orientogomphus* sp.)、缅甸春蜓属一种(*Burmagomphus* sp.)等喜好分布在中低海拔的种类。

水生昆虫(246种)是雅鲁藏布江中下游底栖动物中的优势类群,而寡毛类、软体动物和软甲类的物种数较少。就昆虫而言,双翅目和毛翅目的物种多样性最高,分别记录了19科96属和20科37属(附录2)。一般认为,双翅目和毛翅目是进化上较为高等的昆虫(Morse et al, 1994),这些动物可通过多种生存对策(如全变态、复杂的生活史、较强的迁移能力、较高的繁殖力等)来适应不同的环境(Vieira et al, 2006)。蜉蝣目和襀翅目则是较为低等的昆虫类群,它们一般为原变态和半变态发育,具有相对较弱的迁移能力(一般几公里)和繁殖能力(Li et al, 2018)。但蜉蝣目(9科25属)和襀翅目(9科22属)在雅鲁藏布江水系的分化亦较为强烈,可能与这些物种对低温和清洁水体的偏好有关。值得注意的是,蜻蜓目主要分布在大峡谷下游,尚未突破大峡谷的天然屏障。尽管这类动物有着较强的主动迁移能力,但大峡谷上游的极端环境可能不适宜其生存和繁衍。与西江(软体动物70种;苏炳之等, 1989)、赣江(65种;邢圆等, 2019)和淮河(26种;丁建华等, 2017)等低海拔河流不同,软体动物在雅鲁藏布江水系的物种多样性极低,且出现的多为机会主义者和广布种,如腹足纲的萝卜螺属一种(*Radix* sp.)。一般认为软体动物的物种起源是在低海拔地区(如海洋),随着时间的推移,逐渐向高海拔地区扩散和物种分化(王军,

2018)。它们的主要迁移方式为通过水体的被动扩散(Li et al, 2019a), 移动能力极为有限, 难以突破大峡谷的阻隔。此外, 高海拔地区恶劣的环境(如极端低温和食物匮乏)也使这些物种难以生存和定居(Maiolini & Lencioni, 2001)。

3.2 底栖动物时空分布差异的影响因素

由CCA分析结果可以看出, 海拔均为春秋两季最为关键的环境因子(图6, 表2)。本次调查所采样点涵盖约4,000 m的海拔范围, 如此大的海拔梯度引起的一系列环境变化是导致样点间底栖动物物种组成及多样性差异的重要因素。海拔决定了一个地区的水温、溶解氧、光照、植被覆盖率等环境条件, 因而从根本上决定了底栖动物的群落结构(Jacobsen et al, 2003; Wang et al, 2010; Laursen et al, 2015)。许多研究表明, 高海拔河流中较低的水温和溶解氧, 以及稀少的岸带植被和沉水植物(造成食物来源较少)是造成底栖动物种类数和现存量低的主要原因(Milner et al, 2001; Chaves et al, 2008)。这些恶劣的环境条件对底栖动物的扩散、定居和繁衍提出了巨大的挑战(Lencioni et al, 2007; Madsen et al, 2015)。相反, 在气候温暖湿润的低海拔区域, 适宜的生境条件和岸带植被为底栖动物提供了更多的栖息地和食物来源。因此, 大峡谷下游断面(察隅和墨脱地区)的物种多样性和现存量均较高。

河流底栖动物的种类组成很大程度上取决于生境的多样性和稳定性(Heino, 2013; Milesi et al, 2016)。底质是构成局域生境异质性的主体, 也是底栖动物的生长、繁殖等一切生命活动的必备条件。底质的颗粒大小、稳定程度、表面构造和营养成分等都对底栖动物有很大的影响(Beisel et al, 2000; 段学花等, 2007)。一般来说, 底栖动物的物种多样性随底质的异质性和稳定性的增加而增加(Jiang et al, 2014; 李正飞等, 2016)。例如, 卵石等大粒径的河床底质结构稳定且异质性高, 其中存在的大量间隙能够保护动物免受外界的干扰(如洪水、天敌等), 因此底栖动物的种类组成丰富而稳定; 反之, 在底质较为细密的河床(如泥沙), 密实的底质限制了生存空间的大小, 同时也降低了氧气的可获取性(Allan, 1995), EPT等好氧类群往往较少, 而摇蚊和寡毛类等适应此环境的物种则会有较高的密度(Milesi et al, 2016; Zhang et al, 2018)。干流许多断面

的底质主要为泥沙, 其生境异质性较低, 也无法为底栖动物的生存提供充足的空间, 因此物种数和现存量较低。

河宽是影响流域内底栖动物群落结构的重要因素。河宽在一定程度上能够代表河流级别(Tonkin et al, 2018)。河流的局域环境(如底质类型、营养物质和水深)会随河流级别发生一系列变化, 相应地, 群落内物种组成和多样性亦会发生明显的改变(Li et al, 2019b)。通常来讲, 河流的源头多是浅水激流, 河道狭窄, 底质类型以卵石和砾石为主, 河岸带植被凋落物丰富。底栖动物的功能摄食类群主要以凋落物和粗有机颗粒为食的撕食者(shredders)为主, 如毛翅目的沼石蛾科和襁翅目的卷襁科等。随着河流级别的增加, 植被凋落物不断被降解利用, 以细小颗粒为食的收集者(collectors)逐渐占据优势(Vannote et al, 1980), 如蜉蝣科的蜉蝣目及寡毛类等。


流速、水深和pH值对流域内底栖动物的物种组成亦起着重要作用。流速一方面塑造着局域群落底栖动物的身体外形, 使之在形态上适应流水生境, 避免被水流冲走, 同时还影响着溶解氧与营养物质的获取(Gallardo et al, 2009; Jiang et al, 2014)。此外, 一定的流速也加快了水体更新, 保证了水质的清洁, 有利于敏感物种生存^①。但流速过快会降低底栖动物的密度和多样性, 成为影响底栖动物定居和繁殖的重要限制因素(Li et al, 2019b)。水深的变化会引起一些重要环境指标(如溶解氧、水压等)的改变, 从而间接影响底栖动物的群落结构(Meng et al, 2016)。通常来讲, 底栖动物的密度、生物量和多样性均会随着水深增加而不断递减(赵永晶等, 2011; 李正飞等, 2016)。多数底栖动物生存于略偏碱性的水体中, 而酸性水体不利于底栖动物生存和繁衍。有研究表明, 当pH值在7-8之间时摇蚊幼虫生存状况最好, pH过高或过低均会影响摇蚊幼虫的正常生长(谢建春, 2001)。然而在本次调查中, 各样点的pH值多呈弱碱性(6.8-9.0之间; 均值7.9), 因此不太可能成为限制底栖动物分布的因素。推测某个重要却未被测量的环境因子可能与pH值存在较强的共线性, 因而被CCA模型筛选出来。

①许晨 (2017) 长白山源头溪流大型底栖动物群落特征初步研究. 硕士学位论文, 东北师范大学, 长春.

本文对雅鲁藏布江中下游地区进行重点调查,初步摸清了这一区域底栖动物的家底,可为后续生物多样性评估和生态环境监测积累重要的原始资料。总体来看,雅鲁藏布江水系维持了极为丰富的底栖动物多样性,但其群落结构相对简单,主要以喜清洁和冷水的水生昆虫为主,对抗外界胁迫和环境变化的能力相对较弱。可喜的是,目前该区域人类活动还比较少,基本保持了水域环境和生物群落的自然状态。然而,全球气候变暖及流域内人类活动(如大规模的建坝行为、城镇化、外来种入侵等)的增加极易破坏包括底栖动物在内的河流生物群落的结构、功能和生物多样性,导致不可逆转的影响。需要说明的是,由于我国水生昆虫的分类体系尚不完善,对雅鲁藏布江的昆虫标本主要鉴定至属级水平。相信随着我国无脊椎动物分类学知识的不断积累和完善,我们对该流域水生昆虫物种多样性的认识水平会逐渐提高。值得注意的是,本文仅对雅鲁藏布江中下游底栖动物与环境因子的关系进行了初步探讨。受限于野外工作条件,多元分析中涉及的环境因子仅为现场测量的物理因子,而水体化学指标(如总磷、总氮等)等可能影响底栖动物群落的因素则未能测量。但鉴于流域内人类干扰较弱,生态环境保存较好,水体的营养盐浓度通常不会成为底栖动物分布的限制因素。后续的研究可考虑更多的环境因子,如河道形态、水体有机质含量和植被盖度等,以便对雅鲁藏布江流域底栖动物多样性格局做出更合理的解释。

致谢: 感谢中国科学院水生生物研究所的曹亮、刘飞、林鹏程和巩政博士在采样过程中的帮助和关心。感谢西藏大学农牧学院的刘海平教授在项目执行期间提供的无私帮助。

ORCID

李正飞  <https://orcid.org/0000-0003-3281-6015>
蒋小明  <https://orcid.org/0000-0003-2404-4449>
王军  <https://orcid.org/0000-0003-2481-1409>
孟星亮  <https://orcid.org/0000-0002-3141-018X>
张君倩  <https://orcid.org/0000-0001-8141-7622>
谢志才  <https://orcid.org/0000-0002-5264-505X>

参考文献

Allan JD (1995) *Stream Ecology*. Chapman and Hall, London.

- Anderson MJ (2008) Animal-sediment relationships re-visited: Characterising species' distributions along an environmental gradient using canonical analysis and quantile regression splines. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 366, 16–27.
- Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD (1999) *Rapid Bioassessment for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*, 2nd edn. Environment Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, USA.
- Beckmann L, Thomas DC, Fischer C, Chang-Claude J (2005) Haplotype sharing analysis using mantel statistics. *BMC Genetics*, 59, 67–78.
- Beisel JN, Usseglio-Polatera P, Moreteau JC (2000) The spatial heterogeneity of a river bottom, a key factor determining macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia*, 422/423, 163–171.
- Berger E, Haase P, Schäfer RB, Sundermann A (2018) Towards stressor-specific macroinvertebrate indices: Which traits and taxonomic groups are associated with vulnerable and tolerant taxa? *Science of the Total Environment*, 619/620, 144–154.
- Brinkhurst RO (1986) *Guide to the freshwater aquatic microdrile oligochaetes on North America*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 84, 1–259.
- Chaves ML, Rieradevall M, Chainho P, Costa JL, Costa MJ, Prat N (2008) Macroinvertebrate communities of non-glacial high altitude intermittent streams. *Freshwater Biology*, 53, 55–76.
- Clarke KR, Warwick RM (2001) A further biodiversity index applicable to species lists: Variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress*, 216, 265–278.
- Ding JH, Zhou LZ, Deng DG (2017) Community structure of macrozoobenthos and biological evaluation of water quality in the mainstream of Huai River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26, 1875–1883. (in Chinese with English abstract) [丁建华, 周立志, 邓道贵 (2017) 淮河干流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. *长江流域资源与环境*, 26, 1875–1883.]
- Duan XH, Wang ZY, Cheng DS (2007) Benthic macroinvertebrates communities and biodiversity in various stream substrata. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 1664–1672. (in Chinese with English abstract) [段学花, 王兆印, 程东升 (2007) 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. *生态学报*, 27, 1664–1672.]
- Epler JH (2001) *Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina*. America: EPA Grant X984170-97.
- Gallardo B, Gascon S, García-Antón M, Comín FA (2009) Testing the response of macroinvertebrate functional structure and biodiversity to flooding and confinement. *Journal of Limnology*, 68, 315–326.

- Guo B, Xie C, Qi L, Qi P, Wu C, Abbas K (2010) Assessment of the genetic diversity among *Glyptosternum maculatum*, an endemic fish of Yarlung Zangbo River, Tibet, China using SSR markers. *Biochemical Systematics and Ecology*, 38, 1116–1121.
- Heino J (2013) Environmental heterogeneity, dispersal mode, and co-occurrence in stream macroinvertebrates. *Ecology and Evolution*, 3, 344–355.
- Jacobsen D, Rostgaard S, Vázquez JJ (2003) Are macroinvertebrates in high altitude streams affected by oxygen deficiency? *Freshwater Biology*, 48, 2025–2032.
- Jian D, Huang DM, Chang XL, Zhang Q, Xie S, Chen F, Chen S (2015) Zoobenthos community structure in the middle and lower reaches of Lhasa River. *Journal of Hydroecology*, 36, 40–46. (in Chinese with English abstract) [简东, 黄道明, 常秀岭, 张庆, 谢山, 陈峰, 陈胜 (2015) 拉萨河中下游底栖动物群落结构特征分析. *水生态学杂志*, 36, 40–46.]
- Jiang X, Xie Z, Chen Y (2014) Longitudinal patterns of macroinvertebrate communities in relation to environmental factors in a Tibetan-Plateau River system. *Quaternary International*, 304, 107–114.
- La Q, Zhaxi C, Zhu WD, Xu M, Zhong Y (2014) Plant species-richness and association with environmental factors in the riparian zone of the Yarlung Zangbo River of Tibet, China. *Biodiversity Science*, 22, 337–347. (in Chinese with English abstract) [拉琼, 扎西次仁, 朱卫东, 许敏, 钟扬 (2014) 雅鲁藏布江河岸植物物种丰富度分布格局及其环境解释. *生物多样性*, 22, 337–347.]
- Laursen SK, Hamerlik L, Moltesen K, Christoffersen K, Jacobsen D (2015) Diversity and composition of macroinvertebrate assemblages in high-altitude Tibetan streams. *Inland Waters*, 5, 263–274.
- Lencioni V, Maiolini B, Marziali L, Lek S, Rossaro B (2007) Macroinvertebrate assemblages in glacial stream systems, a comparison of linear multivariate methods with artificial neural networks. *Ecological Modelling*, 203, 119–131.
- Li C, Xu WL, Li QK, Wang JS (2021) Community structure and diversity distribution pattern of sandy plants in the middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River. *Journal of Resources and Ecology*, 12, 11–21.
- Li FQ, Tonkin JD, Haase P (2018) Dispersal capacity and broad-scale landscape structure shape benthic invertebrate communities along stream networks. *Limnologia*, 71, 68–74.
- Li ZF, Jiang XM, Wang J, Meng XL, Heino J, Xie ZC (2019a) Multiple facets of stream macroinvertebrate alpha diversity are driven by different ecological factors across an extensive altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9, 1306–1322.
- Li ZF, Wang J, Meng XL, Heino J, Sun MQ, Jiang XM, Xie ZC (2019b) Disentangling the effects of dispersal mode on the assembly of macroinvertebrate assemblages in a heterogeneous highland region. *Freshwater Science*, 38, 170–182.
- Li ZF, Wang J, Xie ZC, Ding CZ, Jiang XM (2016) Relationship between zoobenthos biodiversity and environmental factors in Nanla River. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 3364–3373. (in Chinese with English abstract) [李正飞, 王军, 谢志才, 丁城志, 蒋小明 (2016) 南腊河底栖动物多样性与环境因子的关系. *生态学杂志*, 35, 3364–3373.]
- Liu HP, Ye SW, Yang XF, Zhang LS, Zhong GH, He YP, Basang, Li ZJ (2014) Spatio-temporal dynamics of aquatic organism community and their relationships to environment in Niyang River, Tibet. 3. Macrozoobenthos. *Journal of Lake Sciences*, 26, 154–160. (in Chinese with English abstract) [刘海平, 叶少文, 杨雪峰, 张良松, 钟国辉, 何勇平, 巴桑, 李钟杰 (2014) 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系. 3. 大型底栖动物. *湖泊科学*, 26, 154–160.]
- Liu TC (1999) Hydrological characteristics of Yarlung Zangbo River. *Acta Geographica Sinica*, 54, 157–164. (in Chinese with English abstract) [刘天仇 (1999) 雅鲁藏布江水文特征. *地理学报*, 54, 157–164.]
- Liu YY, Zhang WZ, Wang YX, Wang EY (1979) *Freshwater Mollusk: Economic Fauna of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义 (1979) *中国经济动物: 淡水软体动物*. 科学出版社, 北京.]
- Ma BS, Xie CX, Yang XF, Huo B (2012) A preliminary study on periphyton and zoobenthos in the Xaitongmoin reach of the Yarlung Zangbo River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 21, 942–950. (in Chinese with English abstract) [马宝珊, 谢从新, 杨学峰, 霍斌 (2012) 雅鲁藏布江谢通门江段着生生物和底栖动物资源初步研究. *长江流域资源与环境*, 21, 942–950.]
- Madsen PB, Morabowen A, Andino P, Espinosa R, Cauvy-Fraunié S, Dangles O, Jacobsen D (2015) Altitudinal distribution limits of aquatic macroinvertebrates: An experimental test in a tropical alpine stream. *Ecological Entomology*, 40, 629–638.
- Maiolini B, Lencioni V (2001) Longitudinal distribution of macroinvertebrate assemblages in a glacially influenced stream system in the Italian Alps. *Freshwater Biology*, 46, 1625–1639.
- Margalef R (1958) Information theory in ecology. *General Systems*, 3, 36–71.
- Meng XL, Jiang XM, Xiong X, Wu CX, Xie ZC (2016) Mediated spatio-temporal patterns of macroinvertebrate assemblage associated with key environmental factors in the Qinghai Lake area, China. *Limnologia*, 56, 14–22.
- Milesi SV, Dolédec S, Melo AS (2016) Substrate heterogeneity influences the trait composition of stream insect communities: An experimental *in situ* study. *Freshwater Science*, 35, 1321–1329.
- Milner AM, Brittain JE, Castella E, Petts GE (2001) Trends of macroinvertebrate community structure in glacier-fed rivers

- in relation to environmental conditions: A synthesis. *Freshwater Biology*, 46, 1833–1847.
- Morse JC, Yang LF, Tian LX (1994) *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Hohai University Press, Nanjing.
- Nie N, Zhang WC, Deng C (2012) Spatial and temporal climate variations from 1978 to 2009 and their trend projection over the Yarlung Zangbo River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34, 64–71. (in Chinese with English abstract) [聂宁, 张万昌, 邓财 (2012) 雅鲁藏布江流域 1978–2009 年气候时空变化及未来趋势研究. *冰川冻土*, 34, 64–71.]
- Pielou EC (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131–144.
- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379–423.
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688–688.
- Su BZ, Li WX, Lai ZX (1989) A survey on benthic macroinvertebrates in the Pearl River basin (Guangdong reach). *Chinese Journal of Zoology*, 24(3), 15–19. (in Chinese) [苏炳之, 黎伟新, 赖泽兴 (1989) 珠江水系(广东江段)底栖动物调查. *动物学杂志*, 24(3), 15–19.]
- ter Braak CJF, Šmilauer P (2002) *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Section on Permutation Methods* Microcomputer Power, Ithaca, New York.
- Tonkin JD, Altermatt F, Finn DS, Heino J, Olden JD, Pauls SU, Lytle DA (2018) The role of dispersal in river network metacommunities: Patterns, processes, and pathways. *Freshwater Biology*, 63, 141–163.
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE (1980) The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 130–137.
- Vieira NK, Poff N, Carlisle DM, Moulton S, Koski ML, Kondratieff BC (2006) A database of lotic invertebrate traits for North America. *US Geological Survey Data Series*, 187, 1–15.
- Wallace JB, Webster JR (1996) The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology*, 41, 115–139.
- Wang J (2018) *Macroinvertebrate Diversity and Its Application in Health Bioassessment in the Chishui River*. PhD dissertation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [王军 (2018) 赤水河大型无脊椎动物多样性与河流生态系统健康评价. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉.]
- Wang JJ, Soininen J, Zhang Y, Wang BX, Yang XD, Shen J (2010) Contrasting patterns in elevational diversity between microorganisms and macroorganisms. *Journal of Biogeography*, 38, 595–603.
- Wang Y, Zuo YF, Feng Q, Li BL, Kong DX, Zhang XY, Lu H, Wang S (2021) Assessment of macrozoobenthos habitat suitability in the upper and middle reaches of the Heihe River. *Chinese Journal of Ecology*, 40, 1116–1127. (in Chinese with English abstract) [王昱, 左一锋, 冯起, 李宝龙, 孔德星, 张昕雨, 卢晗, 汪双 (2021) 黑河中上游大型底栖动物栖息地适宜度评估. *生态学杂志*, 40, 1116–1127.]
- Wu YF, Wu CZ (1992) *The Fishes of the Qinghai-Xizang Plateau*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [武云飞, 吴翠珍 (1992) 青藏高原鱼类. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Xie JC (2001) Water pollution and aquatic animal. *Bulletin of Biology*, 36(6), 10–11. (in Chinese) [谢建春 (2001) 水体污染与水生动物. *生物学通报*, 36(6), 10–11.]
- Xing Y, Wu XP, Ouyang S, Zhang JQ, Xu J, Yin SL, Xie ZC (2019) Assessment of macrobenthos biodiversity and potential human-induced stressors in the Ganjiang River system. *Biodiversity Science*, 27, 648–657. (in Chinese with English abstract) [邢圆, 吴小平, 欧阳珊, 张君倩, 徐靖, 银森录, 谢志才 (2019) 赣江水系大型底栖动物多样性与胁迫因子初探. *生物多样性*, 27, 648–657.]
- Xu MZ, Wang ZY, Pan BZ, Gong TL, Liu L (2012) Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2351–2360. (in Chinese with English abstract) [徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 巩同梁, 刘乐 (2012) 雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价. *生态学报*, 32, 2351–2360.]
- Yu S, Jia NE, Zhang ZX, Li K, Sun DD, Yang HJ (2017) Community structure and environmental determinants of macroinvertebrates in Ili River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 41, 1062–1070. (in Chinese with English abstract) [于帅, 贾娜尔·阿汗, 张振兴, 李昆, 孙东东, 杨海军 (2017) 新疆伊犁河不同生境大型底栖动物群落及其影响因素. *水生生物学报*, 41, 1062–1070.]
- Zhang Y, Cheng L, Tolonen KE, Yin HB, Gao JF, Zhang ZM, Li KY, Cai YJ (2018) Substrate degradation and nutrient enrichment structuring macroinvertebrate assemblages in agriculturally dominated Lake Chaohu Basins, China. *Science of the Total Environment*, 627, 57–66.
- Zhao WH, Liu XQ (2010) Preliminary study on macrozoobenthos in Yarlung Zangbo River and its branches around Xionggun, Tibet, China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19, 281–286. (in Chinese with English abstract) [赵伟华, 刘学勤 (2010) 西藏雅鲁藏布江雄村河段及其支流底栖动物初步研究. *长江流域资源与环境*, 19, 281–286.]
- Zhao YJ, Li H, Wang T, Liu Y, Liu QG, Liu J, Hao ZC, Zhu XQ, Shen JZ (2011) Community structure of benthic macroinvertebrates in Lake Ulungur in Xinjiang. *Journal of Lake Sciences*, 23, 974–981. (in Chinese with English abstract) [赵永晶, 李鸿, 王腾, 刘宇, 刘其根, 刘军, 郝

李正飞等: 雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素

志才, 朱湘强, 沈建忠 (2011) 新疆乌伦古湖大型底栖无脊椎动物的群落结构. 湖泊科学, 23, 974–981.]

Zhou CF, Gui H, Zhou KY (2003) Larval Key to Families of Ephemeroptera from China (Insecta). Journal of Nanjing Normal University, 26(2), 65–68. (in Chinese with English

abstract) [周长发, 归鸿, 周开亚 (2003) 中国蜉蝣目稚虫科检索表(昆虫纲). 南京师大学报(自然科学版), 26(2), 65–68.]

(责任编辑: 吴纪华 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 雅鲁藏布江中下游大型底栖动物采样断面

Appendix 1 Sampling sections of benthic macroinvertebrates in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021431-1.pdf>

附录2 雅鲁藏布江中下游大型底栖动物物种名录

Appendix 2 Species list of benthic macroinvertebrates in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021431-2.pdf>

附录3 雅鲁藏布江流域主要干支流样点春秋两季大型底栖动物物种组成

Appendix 3 Species composition in the main stream and tributaries of the Yarlung Zangbo River basin in spring and autumn
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021431-3.pdf>