

DOI: 10.12264/JFSC2023-0253

# 西藏雅鲁藏布江大峡谷墨脱江段大型底栖动物群落结构及多样性的时空分布特征

张泽鹏<sup>1,2</sup>, 金洪宇<sup>1,2</sup>, 李雷<sup>1,2</sup>, 鲁万桥<sup>1,2</sup>, 李慎辉<sup>1</sup>, 王海鹏<sup>1</sup>

1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 农业农村部黑龙江流域渔业资源环境科学观测实验站, 黑龙江 哈尔滨 150070;
2. 国家渔业资源环境抚远观测实验站, 黑龙江 哈尔滨 150070

**摘要:** 为摸清西藏雅鲁藏布江大峡谷墨脱江段在 2017 年遭遇大型泥石流滑坡等自然灾害后大型底栖动物分布现状及多样性的时空分布特征, 分别于 2022 年 10—11 月(秋季)和 2023 年 4—5 月(春季)对墨脱江段及其附属支流大型底栖动物的种类组成进行了调查, 并对其群落结构及多样性的时空分布特征进行了分析。结果表明, 春、秋两季共采集大型底栖动物 52 个种类, 隶属于 3 门 3 纲 10 目 30 科, 其中水生昆虫占绝对优势(50 种)。春季大型底栖动物优势种为四节蜉属一种(*Baetis* sp.1)、鳞石蛾属一种(*Lepidostoma* sp.); 秋季优势种为四节蜉属一种(*Baetis* sp.1)、缺距纹石蛾属一种(*Potamyia* sp.), 且大型底栖动物群落组成在春季和秋季间存在一定的差异( $P<0.001$ )。流域内秋季大型底栖动物的总平均丰度为  $6.67 \text{ ind/m}^2$ , 总平均生物量  $0.04 \text{ g/m}^2$ ; 春季大型底栖动物的总平均丰度高于秋季, 为  $8.71 \text{ ind/m}^2$ , 总平均生物量  $0.04 \text{ g/m}^2$ 。此外, 大型底栖动物生物多样性在不同季节的干、支流均呈现出一定的差异( $P<0.01$ )。对比已发表数据(2015—2016 年)并结合现阶段水体环境因子现状, 大型底栖动物优势种已发生明显变化, 且物种总丰度及生物量严重下降, 说明灾害后水生生物栖息环境已受到干扰, 大型底栖动物现存量较少, 结果可为高原地区生物多样性保护提供参考依据。

**关键词:** 雅鲁藏布江大峡谷; 墨脱江段; 大型底栖动物; 群落结构; 多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)12-1520-10

雅鲁藏布江(Yalung Zangbo River, 以下简称雅江)位于西藏自治区境内, 是中国最长的高原河流, 也是世界上海拔最高的大河之一。雅江独特的自然环境及生态系统, 孕育了多种特有且珍稀的野生动植物资源, 是生物多样性相对较高的区域, 也是全球生物多样性保护研究的重点区域<sup>[1]</sup>。在水生生物方面, 更是分布有裂腹鱼类[如弧唇裂腹鱼(*Schizothorax curvilabius*)、墨脱裂腹鱼(*Schizothorax molesworthi*)]等多种土著鱼类。但由于这些物种分布范围极其狭窄, 加之高原地区生存环境特殊以及生态系统相对脆弱, 水生生物种

群一经遭到破坏则很难恢复, 部分物种的濒危程度也在不断加剧<sup>[2-5]</sup>。

大型底栖动物作为河流生态系统的重要组成部分, 在水生生态系统物质循环和能量流动中发挥着重要作用<sup>[6-8]</sup>。由于大型底栖动物活动范围相对较小, 寿命长且易于收集, 故常被认为是河流生态系统中过去与现在是否受到环境污染的最佳指示物种<sup>[9-10]</sup>。因此, 研究大型底栖动物群落结构特征、物种多样性、与环境因子的响应关系以及生物完整性可以有效指示河流生态系统是否健康, 并为生物多样性保护及生态修复提供基础数据<sup>[11-13]</sup>。

收稿日期: 2023-11-06; 修订日期: 2023-11-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31802299); 农业农村部政府购买服务项目“雅鲁藏布江水生生物资源现状调查分析”。

作者简介: 张泽鹏(1994-), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为水生生物保护与利用. E-mail: 13372878837@163.com

通信作者: 李雷, 副研究员, 研究方向为渔业资源保护及利用. E-mail: lilei12100821@163.com

目前,关于雅江水生生物资源分布情况已有许多报道,包括下游墨脱江段<sup>[5]</sup>、中游桑日至加查江段<sup>[14]</sup>等区域的鱼类群落结构特征;中游谢通门江段<sup>[15-16]</sup>等区域的浮游生物、底栖动物资源现状等。但由于高原地理环境的特殊性,大多数研究的空间和时间尺度明显不足,仍需利用不同空间尺度连续性的采样调查数据进行后续分析以充分反映物种分布的实际情况。在底栖生物多样性的研究中,李正飞等<sup>[17]</sup>于 2015 年 10 月(秋季)和 2016 年 3 月(春季)对雅江干流(朗县至墨脱段)及其主要支流共计 75 个样点(其中雅江大峡谷上游干、支流 36 个样点,下游干、支流 39 个样点)的底栖动物进行了详细调查,覆盖区域之丰富足以以为雅鲁藏布江中下游流域底栖动物多样性保护提供重要参考数据。但在 2017 年 9 月,雅江大峡谷内(墨脱江段以上)突发大型泥石流滑坡;2018 年 10 月林芝发生堰塞湖险情,加之这里地震频繁,岩石碎裂,雨季常有滑坡、崩塌等地质灾害发生,导致雅江干流河道严重受损并改变,水体浑浊,水生生物重要栖息地受到严重影响,渔业资源量急剧下降<sup>[4]</sup>。基于以上问题,分别于 2022 年 10—11 月(秋季)和 2023 年 4—5 月(春季)开展了雅江大峡谷墨脱江段大型底栖动物的调查工作,对比已发表的 2015—2016 年的数据结果<sup>[17]</sup>,旨在阐明雅江大峡

谷墨脱江段大型底栖动物资源分布现状及群落结构的时空分布特征,为生物多样性保护提供基础数据,并为修复生态环境奠定基础。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

雅江作为西藏自治区第一大河,在中国境内可分为上、中、下游,其中林芝市派镇至墨脱县巴昔卡为下游江段,境内拥有世界上最深的峡谷—雅鲁藏布江大峡谷。雅江下游河谷狭窄,水流湍急,水量较丰富,流速一般在 2~3.5 m/s 之间,河床多乱石、险滩等。这里水资源丰富,坐拥帕隆藏布、白马西路河、西工河、拉萨河等几大主要支流。随着海拔高度的降低,气温逐渐升高并伴随降雨量增加,使得雅江下游流域环境复杂且神秘,加之河道基本未得到开发,人为干扰较少,其生物资源更是冠绝整个西藏地区。但雅江下游及支流的河谷两侧地形险峻,切割强烈,导致此处地震频繁,雨季常有泥石流滑坡等自然灾害发生<sup>[4]</sup>。

### 1.2 样品采集及处理

分别于 2022 年 10—11 月(秋季)和 2023 年 4—5 月(春季)对雅江下游墨脱江段(图 1)西莫河大桥至甲嘎沟干流及其附属支流西莫河、哈果河、西工

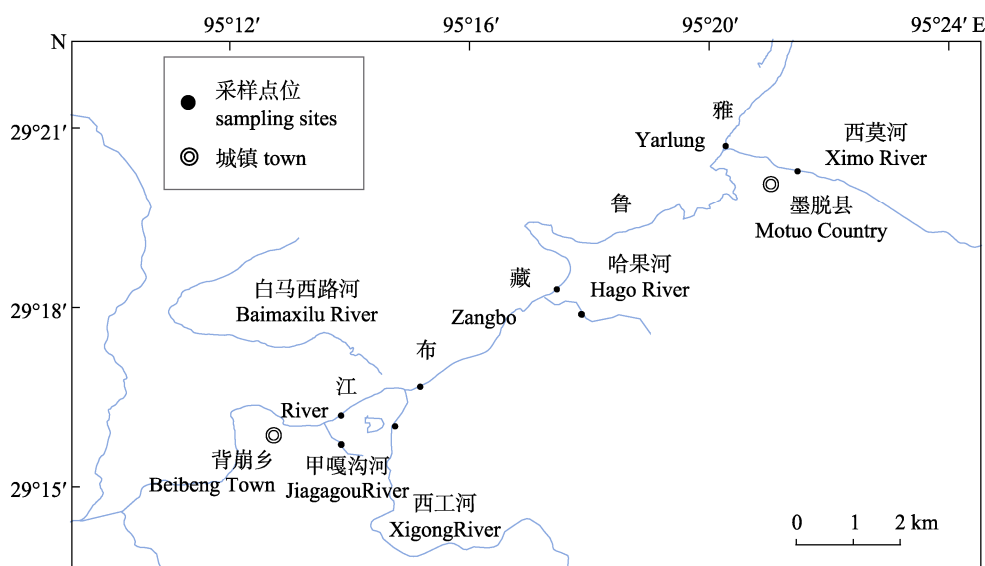


图 1 雅鲁藏布江下游墨脱江段采样点位分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River

河、甲嘎沟河的大型底栖动物样品进行采集。依据空间整体性及代表性原则,每个采样断面选取复合生境进行定量及定性采集。由于本次采样样品相对较少,为丰富高原河流样品的多样性,于 2022 年 10 月在扎墨公路 k51 处(29°74'N, 95°68'E)选取一处无名河流(雅江二级支流,上游为瀑布)进行样品的定性采集。

根据各断面的生境现状,选取可涉水区域,使用 D 型抄网(60 目)采集定量样品。使用时,将其一直边(长约 0.3 m)紧贴水体底部,逆水流方向由下游至上游移动约 1 m,通过脚踢使水体底部泥沙及碎石等物质在搅动及水流的作用下进入收集网内,采集 3 个样方,总面积即为 1 m<sup>2</sup>,依此类推,每个断面采集 3 m<sup>2</sup>并记录各断面采样面积。采集完成之后,去除抄网内明显杂质,将剩余样品全部倒入 60 目筛网中,用水清洗至完全干净后倒入白瓷盘中。除此之外,选取一些特殊生境,如枯枝、倒木、大石块等,对大型底栖动物进行定性采集。使用尖头镊子挑拣出大型底栖动物,并装入提前贴好标签的采样瓶中,倒入 75%乙醇溶液进行样品的固定,24 h 后更换一次 75%乙醇溶液,以便长期保存样品<sup>[18]</sup>。

为了解水体环境现状,在采集生物样品的同时,于现场使用便携式水质分析仪及流速仪同步对水体温度(℃)、溶解氧(mg/L)、pH、透明度(m)、流速(m/s)等指标进行监测。

回到实验室后,参考相关书籍及资料等<sup>[19-21]</sup>,在 Nikon SMZ745T 体式显微镜下将样品鉴定至最低分类单元。记录数量后,使用吸水纸吸干样品表面的水分,并称其湿重(天平精度为 0.0001 g)。

### 1.3 数据分析

通过 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )<sup>[22]</sup>、Margalef 丰富度指数( $d$ )<sup>[23]</sup>、Pielou 均匀度指数( $J$ )<sup>[24]</sup>计算大型底栖动物群落多样性指数;通过优势度指数( $Y$ ,当  $Y>0.02$  时,即为优势种)<sup>[25]</sup>确定群落中的优势种,其中:

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = -\sum (P_i)(\log_2 P_i)$$

Margalef 丰富度指数:

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

Pielou 均匀度指数:

$$J = H'/\log_2 S$$

优势度指数:

$$Y = n_i/N \times f_i$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  种个体数量与总个体数量的比值;  $n_i$  为第  $i$  种的个体数量;  $N$  为物种的总个体数量;  $f_i$  为第  $i$  种在各断面出现的频率;  $S$  为物种的总种类数。

使用 Arcgis 10.7 绘制采样点位图; Primer 6.0 进行相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM, 检验大型底栖动物群落结构在时空分布尺度上的差异显著性。其中,  $P<0.05$  代表差异显著,  $P<0.01$  代表差异极显著)及生物多样性指数的计算<sup>[26]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 种类组成

两次调查共采集大型底栖动物样本 405 个,经鉴定共 52 个种类,隶属于 3 门 3 纲 10 目 30 科(表 1)。其中,优势类群为水生昆虫(50 种,占总种类数的 96.16%),线虫纲和寡毛纲各 1 种(分别占 1.92%)。水生昆虫主要包括襀翅目 7 科 14 种(占水生昆虫总种类数的 28.0%),蜉蝣目 3 科 13 种(26.0%),毛翅目 6 科 7 种(14.0%),鞘翅目 5 科 6 种(12.0%),双翅目 2 科 4 种(8.0%),半翅目 3 科 3 种(6.0%),蜻蜓目 2 科 2 种(4.0%),广翅目 1 科 1 种(2.0%)。春季优势种包括四节蜉属一种(*Baetis* sp.1)及鳞石蛾属一种(*Lepidostoma* sp.);秋季优势种包括四节蜉属一种(*Baetis* sp.1)及缺距纹石蛾属一种(*Potamyia* sp.)。总物种数及各季节物种数分布情况如图 2 所示。

ANOSIM 检验结果显示,大型底栖动物群落组成在春季和秋季间存在一定的差异( $P<0.001$ )。结合所有样品调查结果,春季共采集到 23 个种类,隶属于 7 目 17 科,其中干流 17 种,支流 11 种,且全部为水生昆虫。秋季共采集到 39 个种类,隶属于 10 目 24 科,其中包括水生昆虫 37 种,寡毛类 1 种,线虫 1 种,其中干流共采集 7 种,支流 37 种。综上所述,在两个季节的调查中,水生昆虫均为占绝对优势的类群。此外,ANOSIM 检验结果还显示,干支流大型底栖动物群落组成在春季( $P<0.001$ )及秋季( $P<0.05$ )均存在明显的空间差异。

表 1 雅鲁藏布江下游墨脱江段大型底栖动物种类名录  
Tab. 1 Species list of macrobenthos in the Motuo Reach of the Yarlung Zangbo River

| 编号<br>code           | 种类<br>species                   | 干流<br>main<br>stream | 支流<br>tributary | 编号<br>code        | 种类<br>species                      | 干流<br>main<br>stream | 支流<br>tributary |
|----------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------|
| 线形动物门 Nematomorpha   |                                 |                      |                 | 扁襴科 Peltoperlidae |                                    |                      |                 |
| 线虫纲 Nematodes        |                                 |                      |                 | 28                | 扁襴科 Peltoperlidae spp.             | +                    |                 |
| 1                    | 铁线虫属一种 <i>Gordius</i> sp.       |                      | +               |                   | 叉襴科 Nemouridae                     |                      |                 |
| 环节动物门 Annelida       |                                 |                      |                 | 29                | 叉襴属一种 <i>Nemoura</i> sp.           | +                    | +               |
| 寡毛纲 Oligochaeta      |                                 |                      |                 | 毛翅目 Trichoptera   |                                    |                      |                 |
| 2                    | 颤蚓科 Tubificidae spp.*           |                      | +               |                   | 原石蛾科 Rhyacophilidae                |                      |                 |
| 节肢动物门 Arthropoda     |                                 |                      |                 | 30                | 原石蛾属一种 <i>Rhyacophila</i> sp.      |                      | +               |
| 昆虫纲 Insecta          |                                 |                      |                 |                   | 纹石蛾科 Hydropsychidae                |                      |                 |
| 蜉蝣目 Ephemeroptera    |                                 |                      |                 | 31                | 纹石蛾属一种 <i>Hydropsyche</i> sp.      | +                    | +               |
| 四节蜉科 Baetidae        |                                 |                      |                 | 32                | 缺距纹石蛾属一种 <i>Potamyia</i> sp.       | +                    | +               |
| 3                    | 四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.1       | +                    | +               |                   | 弓石蛾科 Arctopsychidae                |                      |                 |
| 4                    | 四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.2*      | +                    | +               | 33                | 弓石蛾属一种 <i>Arctopsyche</i> sp.      | +                    |                 |
| 5                    | 花翅蜉属一种 <i>Baetiella</i> sp.1    | +                    | +               |                   | 鳞石蛾科 Lepidostomatidae              |                      |                 |
| 6                    | 花翅蜉属一种 <i>Baetiella</i> sp.2    | +                    |                 | 34                | 鳞石蛾属一种 <i>Lepidostoma</i> sp.      | +                    | +               |
| 7                    | 扁四节蜉属一种 <i>Platybaetis</i> sp.  |                      | +               |                   | 沼石蛾科 Limnophilidae                 |                      |                 |
| 扁蜉科 Heptageniidae    |                                 |                      |                 | 35                | 沼石蛾科 Limnephilidae spp.            | +                    |                 |
| 8                    | 高翔蜉属一种 <i>Epeorus</i> sp.1      | +                    | +               |                   | 等翅石蛾科 Philopotamidae               |                      |                 |
| 9                    | 高翔蜉属一种 <i>Epeorus</i> sp.2*     |                      | +               | 36                | 等翅石蛾属一种 <i>Dolophilodes</i> sp. *  |                      | +               |
| 10                   | 溪蛭蜉属一种 <i>Rhithrogena</i> sp.   |                      | +               | 双翅目 Diptera       |                                    |                      |                 |
| 11                   | 似动蜉属一种 <i>Cinygmina</i> sp. *   |                      | +               |                   | 摇蚊科 Chironomidae                   |                      |                 |
| 12                   | 背刺蜉属一种 <i>Notacanthurus</i> sp. |                      | +               | 37                | 多足摇蚊属一种 <i>Polypedium</i> sp.      |                      | +               |
| 小蜉科 Ephemerellidae   |                                 |                      |                 | 38                | 真开氏摇蚊属一种 <i>Eukiefferiella</i> sp. | +                    | +               |
| 13                   | 天角蜉属一种 <i>Uracanthella</i> sp.  |                      | +               | 39                | 长跗摇蚊属一种 <i>Tanytarsus</i> sp. *    |                      | +               |
| 14                   | 锯形蜉属一种 <i>Serratella</i> sp.    |                      | +               |                   | 蚋科 Simuliidae                      |                      |                 |
| 15                   | 弯握蜉属一种 <i>Drunella</i> sp.      | +                    |                 | 40                | 蚋科一属 <i>Stegopterna</i> sp.        | +                    | +               |
| 襴翅目 Plecoptera       |                                 |                      |                 | 广翅目 Megaloptera   |                                    |                      |                 |
| 网襴科 Perlodidae       |                                 |                      |                 | 41                | 星齿蛉属一种 <i>Protohermes</i> sp.      | +                    | +               |
| 16                   | 巨襴属一种 <i>Megarcys</i> sp.       | +                    |                 | 半翅目 Hemiptera     |                                    |                      |                 |
| 17                   | 网襴科 Perlodidae spp.*            |                      | +               | 42                | 龟蝽科 Gerridae spp.                  |                      | +               |
| 带襴科 Taeniopterygidae |                                 |                      |                 | 43                | 盖蝽科 Aphelocheiridae spp.           |                      | +               |
| 18                   | 带襴属一种 <i>Taenionema</i> sp.     | +                    |                 | 44                | 跳蝽科 Saldidae spp.                  |                      |                 |
| 19                   | <i>Strophopteryx</i> sp.        |                      | +               | 鞘翅目 Coleoptera    |                                    |                      |                 |
| 20                   | 带襴科 Taeniopterygidae spp.       |                      | +               | 45                | 龙虱科 Dytiscidae spp.                |                      | +               |
| 襴科 Perlidae          |                                 |                      |                 | 46                | 溪泥甲科 Elmidae spp.                  | +                    |                 |
| 21                   | 襴属一种 <i>Togoperla</i> sp.       |                      | +               | 47                | 溪泥甲亚科 Elminae spp.                 | +                    |                 |
| 22                   | 纯襴属一种 <i>Paragnetina</i> sp.    |                      | +               | 48                | 隐翅甲科 Staphylinidae spp.            |                      | +               |
| 23                   | <i>Calineuria</i> sp.           |                      | +               | 49                | 豉甲科 Gyrinidae spp.                 |                      | +               |
| 24                   | <i>Tetropina</i> sp.            |                      | +               | 50                | 水龟甲科 Hydrophilidae spp.*           |                      | +               |
| 25                   | 襴科一种 <i>Perlidae</i> sp.*       |                      | +               | 蜻蜓目 Odonata       |                                    |                      |                 |
| 绿襴科 Chloroperlidae   |                                 |                      |                 |                   | 春蜓科 Gomphidae                      |                      |                 |
| 26                   | <i>Paraperla</i> sp.            | +                    |                 | 51                | 戴春蜓属一种 <i>Davidius</i> sp.         |                      | +               |
| 卷襴科 Leuctridae       |                                 |                      |                 | 蜻科 Libellulidae   |                                    |                      |                 |
| 27                   | 卷襴科 Leuctridae spp.*            |                      | +               | 52                | 蜻科 Libellulidae spp.               | +                    | +               |

注: + 表示采集到该物种, 空白表示没有采集到该物种, \*表示 k51 采集到的物种。  
Note: + donates the species was collected, blank donates no species, \* donates the species was collected in k51.

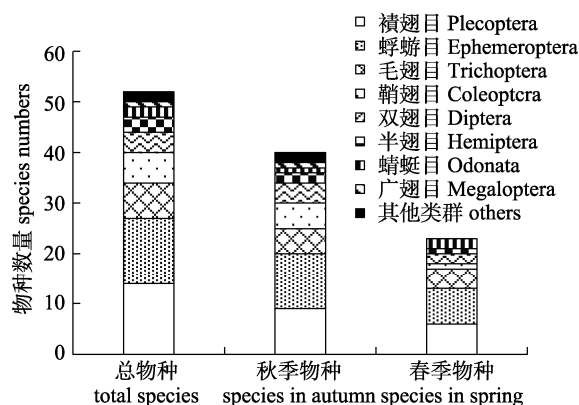


图 2 雅鲁藏布江下游墨脱江段大型底栖动物的种类组成

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

## 2.2 密度和生物量

在秋季调查中,流域中大型底栖动物的总平均丰度为  $6.67 \text{ ind/m}^2$ ,总平均生物量  $0.04 \text{ g/m}^2$ 。其中,干流的总平均丰度为  $3.25 \text{ ind/m}^2$ ,明显低于支流  $13.45 \text{ ind/m}^2$ 。而在生物量方面,无论干流 ( $0.01 \text{ g/m}^2$ )还是支流 ( $0.07 \text{ g/m}^2$ )均处于比较低的水平。在春季调查中,流域中大型底栖动物的总平均丰度高于秋季,为  $8.71 \text{ ind/m}^2$ ,总平均生物量  $0.04 \text{ g/m}^2$ 。其中,干流的总平均丰度为  $10.75 \text{ ind/m}^2$ ,明显高于支流  $6.67 \text{ ind/m}^2$ 。而在生物量方面,干流 ( $0.04 \text{ g/m}^2$ )与支流 ( $0.04 \text{ g/m}^2$ )所处的水平几乎持平(图 3,图 4)。

## 2.3 生物多样性

在秋季调查中,流域内 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $d$ )、Pielou 均匀

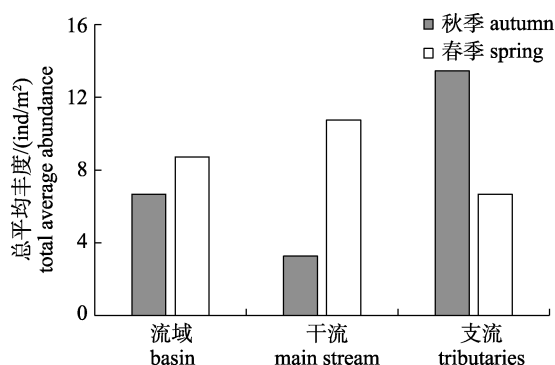


图 3 雅鲁藏布江下游墨脱江段大型底栖动物的总平均丰度

Fig. 3 Total average abundance of benthic macroinvertebrates in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River

度指数( $J$ )分别介于  $0\sim 2.6$  (均值  $1.25$ )、 $1.12\sim 3.05$  ( $1.94$ )、 $0.54\sim 1$  ( $0.79$ )。其中,干流的 Shannon-Wiener 多样性指数(均值  $0.78$ )明显低于支流( $1.72$ ),而 Margalef 丰富度指数( $0.83$ )、Pielou 均匀度指数( $1.47$ )则高于支流( $0.76$ ;  $0.73$ )。在春季调查中,流域内 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数分别介于  $0\sim 2.55$  ( $1.14$ )、 $0.55\sim 2.47$  ( $1.35$ )、 $0.20\sim 0.88$  ( $0.53$ )。其中,干流的 Shannon-Wiener 多样性指数( $1.42$ )、Margalef 丰富度指数( $1.46$ )、Pielou 均匀度指数( $0.57$ )均明显高于支流( $0.87$ ;  $1.21$ ;  $0.47$ )(图 5,图 6)。

## 2.4 水体环境参数

在两次调查期间,8 个采样断面的平均海拔为 ( $682\pm 23$ ) m。秋季平均水温为 ( $14.3\pm 0.5$ )  $^{\circ}\text{C}$ ; 溶解

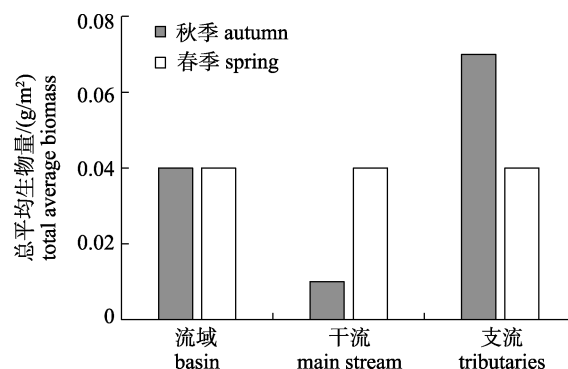


图 4 雅鲁藏布江下游墨脱江段大型底栖动物的总平均生物量

Fig. 4 Total average biomass of benthic macroinvertebrates in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River

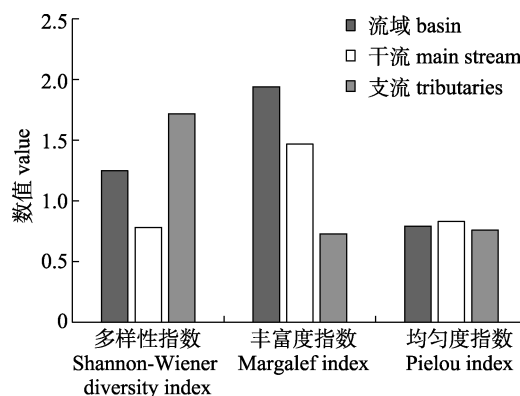


图 5 秋季雅鲁藏布江下游墨脱江段大型底栖动物物种多样性的空间变化

Fig. 5 Spatial variation in biodiversity indices of benthic macroinvertebrates in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River in autumn

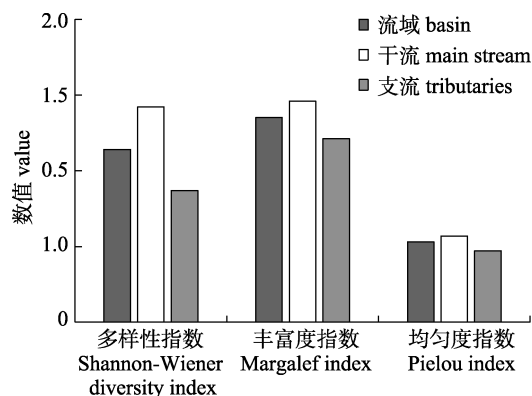


图 6 春季雅鲁藏布江下游墨脱江段大型底栖动物物种多样性的空间变化

Fig. 6 Spatial variation in biodiversity indices of benthic macroinvertebrates in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River in spring

氧为 $(9.8 \pm 0.2)$  mg/L; pH 为  $8.8 \pm 0.3$ ; 流速为 $(2.0 \pm 0.5)$  m/s; 干流透明度为 $(0.08 \pm 0.03)$  m, 支流由于河道较窄, 水质清澈见底, 故未进行测量; 春季平均水温为 $(14.2 \pm 0.8)$  °C; 溶解氧为 $(10.5 \pm 0.3)$  mg/L; pH 为  $8.2 \pm 0.2$ ; 流速为 $(2.0 \pm 0.3)$  m/s; 干流透明度为 $(0.07 \pm 0.01)$  m, 支流同样未测量(其中, 甲嘎沟河春季断流, 故无法统计数据)。在两次调查期间, 各水体环境参数变动不大, 仅干流透明度极低。根据课题组前期调查发现(未发表数据), 2015 年 4 月雅江背崩江段干流平均透明度为 0.48 m, 平均流速为 0.6 m/s; 在 2017 年 10 月遭遇大型泥石流滑坡等自然灾害后, 2018 年 3 月雅江大峡谷墨脱江段干流平均透明度为 0.30 m, 平均流速为 1.2 m/s; 2019 年 11 月雅江大峡谷墨脱江段干流平均透明度为 0.18 m, 平均流速为 0.8 m/s。综合分析, 在接连遭遇泥石流滑坡等自然灾害后, 墨脱江段透明度指标呈现逐年下降的趋势, 且流速指标呈现上升的趋势。

### 3 讨论

关于雅江底栖动物的调查, 早在 20 世纪 90 年代《青藏高原鱼类》一书中就有记载<sup>[2]</sup>。此后, 相关学者先后对雄村河段及其支流<sup>[27]</sup>、谢通门江段<sup>[16]</sup>、日喀则至林芝江段干、支流<sup>[28]</sup>等断面进行了调查, 但以往的研究大多仅聚焦于局部断面及附属支流。在已报道的相关研究中, 以李正飞等<sup>[17]</sup>

调查覆盖区域(雅江中下游)最为广泛, 且涵盖了本研究中 3 个干流采样断面及全部支流采样断面。在本研究中, 雅江大峡谷墨脱江段及其附属支流共采集到 52 种大型底栖动物, 除扁四节蜉属一种(*Platybaetis* sp.)及天角蜉属一种(*Uracanthella* sp.)外, 其他种类在李正飞等<sup>[17]</sup>的研究中均有报道, 且本研究中大型底栖动物群落组成同样以水生昆虫为主体, 说明群落优势类群组成在几年间变化趋势并不大, 但优势种则仅有四节蜉属(*Baetis* sp.)重叠, 间接表明泥石流灾害导致底栖动物群落生存环境受到干扰, 优势种发生了演替, 一些机会物种成为现阶段的优势物种。而在本研究中, 采样断面底质环境多以巨石或卵石为主, 低沙底质也直接导致软体动物十分罕见(在拉萨河等其他雅江干支流断面可见<sup>[28-29]</sup>)。

通过对比已发表数据<sup>[17]</sup>, 2022—2023 年雅江大峡谷墨脱江段及其附属支流大型底栖动物总种类数、总个体数、生物量、丰度等部分较 2015—2016 年<sup>[17]</sup>发生了区域性的变化。如 2015 年秋季及 2016 年春季主要支流断面哈果河分别采集到 29 种和 12 种大型底栖动物, 而本研究中两个季节分别采集到 8 种和 6 种(西莫河亦是如此, 2015—2016 年两个季节分别为 8 种和 20 种, 2022—2023 年分别为 3 种和 0 种)。在李正飞等<sup>[17]</sup>的研究中, 以金珠藏布、白马西路河、察隅河等支流物种较为丰富且季节略有差异, 而本研究中所涉及的 4 个支流采样断面物种数目与现阶段相比均略高一些。这与 2017 年大型泥石流灾害过后河流级别改变有关, 加之河道变窄, 诸如甲嘎支流 2023 年春季已断流, 故底栖动物群落组成会发生明显的改变, 导致物种丰度急剧下降<sup>[30]</sup>, 后续有必要继续对支流进行长期监测, 查明支流严重受损的原因是否与自然灾害有关。

ANOSIM 检验结果显示, 干、支流大型底栖动物在两个季节均存在明显的空间差异, 这主要与支流断流以及干流未采集到样品有关。一方面, 本研究中干流采样断面仅涉及到浅水区, 手段单一且采样断面较少导致物种数目相对减少; 另一方面, 由于 2017 年大型泥石流及其他自然灾害的

爆发, 多处河流形态受损(流速较快且水体浑浊发黑)、河道条件受损, 底栖动物所能适应的栖息环境遭到严重破坏, 多数需庇护所的底栖物种已不见踪影。在本研究中, 两次调查平均流速均大于 2 m/s, 对比 2021 年雅江中游丰水期平均流速 ( $<1$  m/s)<sup>[31]</sup>要高得多, 这会加快水体的更新速度, 有利于敏感物种生存。在本研究结果中, EPT 昆虫(蜉蝣目 Ephemeroptera、襁翅目 Plecoptera、毛翅目 Trichoptera)作为环境污染的指示物种(耐污值相对较低, 对水质污染极敏感, 常通过其存亡表示水质变化的程度), 所占比例高达 67.3%, 说明雅江大峡谷墨脱江段现阶段水体环境仍适宜此类敏感物种生存<sup>[32-34]</sup>, 但自然灾害所引起的局部水体浑浊(透明度急剧下降)、河流形态受损(河内常见大型枯木漂浮, 系由于泥水流冲毁岸边植被)、流速过快等则还是会影响到底栖动物的栖息生境, 部分非流水性种类庇护所受到破坏而难以生存, 导致底栖动物整体现存量较低。

通过对雅江大峡谷墨脱江段干流及其支流大型底栖动物生物多样性的进行分析, 结果显示, 在 2022 年秋季, 干流多样性指数明显低于支流, 但丰富度指数及均匀度指数却高于支流, 说明干流虽出现物种较多, 但物种个体数目相对稀疏, 导致生物量极低。如 2015 年秋季及 2016 年春季亚让江段分别采集到 5 种和 5 种, 而本研究中两个季节分别采集到 0 种和 8 种; 背崩江段分别采集到 9 种和 5 种, 而本研究中分别采集到 3 种和 8 种, 说明两个阶段底栖动物分布均较少, 这其中可能存在的原因有: (1) 干流的底质多为巨石及卵石, 加之现阶段流速过快(约 2 m/s, 2015 年及 2018—2019 年调查的未发表数据显示流速均  $<1.5$  m/s), 导致生境异质性及稳定性降低<sup>[17,35]</sup>, 并不能为底栖动物提供良好的栖息生境, 导致部分类群生物零星分布, 而支流卵石、碎石等底质或许会为底栖动物提供更好的庇护所; (2) 泥石流等自然灾害导致干流水体浑浊, 透明度急剧降低 ( $<0.1$  m, 2015 年及 2018—2019 年调查的未发表数据显示透明度均  $>0.1$  m), 诸如 EPT 昆虫等喜清澈水体物种丰度明显较 2015—2016 年降低, 且部分

站位未采集到样品, 导致物种总生物量严重下降, 这与 Li 等<sup>[30]</sup>研究结果一致。在 2023 年春季调查中, 各生物多样性指数均呈现干流高于支流的趋势, 但相差比例并不大, 这主要与春季采样时间为枯水期, 支流水量较少有关, 如甲嘎支流在春季已断流, 未能开展采样工作。支流水量较低直接导致流速、水深等环境因素发生改变, 河流稳定性及外源营养物质输入降低也导致原有的栖息环境发生巨大改变, 以水生昆虫为主的类群会进行更主动的迁移及扩散至干流中, 故干流生物多样性指数略高于支流。李正飞等<sup>[17]</sup>研究表明, 海拔、流速、河宽、底质类型均驱动着雅江中下游大型底栖动物群落结构的变化。通过查阅资料, 在 2017 年 9 月雅江大峡谷内(墨脱江段以上)突发大型泥石流滑坡后, 相关数据已表明<sup>[4]</sup>, 雅江下游断面水质浊度由 2017 年的 4.9~7.0 升高至 2018 年的 47.1~53.2 以及 2019 年的 53.5~55.4, 水质目前已严重浑浊, 2022—2023 年度透明度极低 ( $<0.1$  m) 且水中泥沙、浮游生物等悬浮物明显增多, 这会在一定程度上影响部分底栖动物的摄食及生存<sup>[36]</sup>。

综上所述, 在后续的调查研究中, 有必要进行如下工作: (1) 增加采样断面, 包括干流及金珠藏布、白马西路等主要支流, 力求从空间尺度上阐明底栖动物分布现状; (2) 增加采样频次, 摸清时间尺度上底栖动物群落结构的分布特征; (3) 结合水深、浊度、底质类型等多项环境因子进行相关性分析, 查明影响高原河流底栖动物群落结构差异的关键环境因子, 并为高原河流生物多样性研究和保护提供重要的参考依据。

#### 参考文献:

- [1] Jiang Z G. Exploring the distribution patterns and conservation approaches of biodiversity on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(2): 107-110. [蒋志刚. 探索青藏高原生物多样性分布格局与保育途径[J]. 生物多样性, 2018, 26(2): 107-110.]
- [2] Wu Y F, Wu C Z. The Fishes of the Qinghai Xizang Plateau [M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science Technology, China, 1992: 133-562. [武云飞, 吴翠珍. 青藏高原鱼类 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1992: 133-562.]
- [3] Bureau of Aquatic Products of Tibet Autonomous Region.

- Fishes and Fish Resources in Tibet, China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 1-143. [西藏自治区水产局. 西藏鱼类及其资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 1-143.]
- [4] Ji F, Ma B, Wang B Q. The Fisheries resources and environment research report of the middle reaches of the Yarlung Zangbo River[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 1-68. [纪锋, 马波, 王炳谦. 雅鲁藏布江中游渔业资源与环境科考报告[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 1-68.]
- [5] Li L, Ma B, Jin X, et al. Structural and diversity characteristics of fish communities in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo Grand Canyon[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(9): 1326-1336. [李雷, 马波, 金星, 等. 西藏雅鲁藏布江大峡谷墨脱江段鱼类群落结构及多样性的空间分布特征[J]. 中国水产科学, 2022, 29(9): 1326-1336.]
- [6] Noman M A, Mamunur R, Islam M S, et al. Spatial and seasonal distribution of intertidal macrobenthos with their biomass and functional feeding guilds in the Naf River estuary, Bangladesh[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 3: 1010-1023.
- [7] Zhang X T, Li W M, Zhang K, et al. Spatiotemporal distribution of macroinvertebrate functional feeding groups in Oiaobian River, a tributary of Yangtze River in Yichang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2559-2570. [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[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2559-2570.]
- [8] Zhang Z H, Zhang J X, Yu M, et al. Temporal-spatial distribution of functional feeding groups of macroinvertebrate and biological evaluation of water quality in Xinyang section of Huaihe River main stream [J/OL]. Chinese Journal of Applied Ecology: 12023, 34(10): 2820-2826. [张泽豪, 张景晓, 于森, 等. 淮河干流信阳段大型底栖动物功能摄食类群时空分布及水质评价[J/OL]. 应用生态学报: 12023, 34(10): 2820-2826.]
- [9] Duan X H, Wang Z Y, Yu G A. Ecological assessment of the Yangtze river co-system with benthic invertebrate as indicator species[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(3): 241-247. [段学花, 王兆印, 余国安. 以底栖动物为指示物种对长江流域水生生态进行评估[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(3): 241-247.]
- [10] Wang C M, Huang D Z, Zhang Y, et al. Assessment of integrity of macrobenthos in Lake Dongting (1988-2021) and impacts from environmental stress[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1765-1773. [王丑明, 黄代中, 张屹, 等. 1988-2021 年洞庭湖大型底栖动物完整性评价及环境压力影响分析[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1765-1773.]
- [11] Huo T B, Li Z, Jiang Z F, et al. Macrozoobenthos community structure and water quality bioassessment in the mid-reaches of the Heilongjiang River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(1): 177-188. [霍堂斌, 李喆, 姜作发, 等. 黑龙江中游底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. 中国水产科学, 2013, 20(1): 177-188.]
- [12] Zhang Y H, Peng W Q, Peng S, et al. Temporal-spatial distribution and ecological evaluation of macroinvertebrate functional feeding groups in Yongding River Basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3433-3440. [张宇航, 彭文启, 彭帅, 等. 永定河流域大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态评价[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3433-3440.]
- [13] Su M, Dong W P, Zhao S G, et al. Ecosystem health assessment based on benthic index of biological integrity (B-IBI) in Tongling city[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(1): 104-112. [苏梦, 董伟萍, 赵世高, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的河湖生态系统健康评价-以安徽铜陵为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(1): 104-112.]
- [14] Li L, Wu S, Wang N M, et al. Community structure of fishery resources from the Sangri to Jiacha reach of middle Yarlung Zangbo River of Tibet, China[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(1): 40-45. [李雷, 吴松, 王念民, 等. 雅鲁藏布江中游桑日至加查江段渔业资源群落结构特征[J]. 水产学杂志, 2021, 34(1): 40-45.]
- [15] Ma B S, Yang X F, Xie C X, et al. Resource status and seasonal variation of plankton in the Xaitongmoin reach of the Yarlung Zangbo River[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(6): 19-28. [马宝珊, 杨学峰, 谢从新, 等. 雅鲁藏布江谢通门江段浮游生物资源现状及其季节动态[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(6): 19-28.]
- [16] Ma B S, Xie C X, Yang X F, et al. A preliminary study on periphyton and zoobenthos in the Xaitongmoin reach of the Yarlung Zangbo River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(8): 942-950. [马宝珊, 谢从新, 杨学峰, 等. 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[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(8): 942-950.]
- [17] Li Z F, Jiang X M, Wang J, et al. Species diversity and driving factors of benthic macroinvertebrate assemblages in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River [J]. Biodiversity Science, 2022, 30(6): 123-135. [李正飞, 蒋小明, 王军, 等. 雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素[J]. 生物多样性, 2022, 30(6): 123-135.]
- [18] Ministry of Environmental Protection. Technical guidelines for biodiversity monitoring-freshwater benthic macroinvertebrates [S]. HJ 710.8-2014. [环境保护部. 生物多样性观测技术导

- 则 淡水底栖大型无脊椎动物[S]. HJ 710.8-2014.]
- [19] Zhou C F, Gui H, Zhou K Y. Larval key to families of ephemeroptera from China (Insecta)[J]. Journal of Nanjing Normal University, 2003, 26(2): 65-68. [周长发, 归鸿, 周开亚. 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), 2003, 26(2): 65-68.]
- [20] Brinkhurst R O, Guide to the freshwater aquatic microdrile oligochaetes on North America[J]. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 1986, 84: 1-259.
- [21] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 1-570.
- [22] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379-423.
- [23] Margalef R. Information theory in ecology[J]. General Systems, 1958, 3: 36-71.
- [24] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 131-144.
- [25] Ma B S, Xu B, Wei K J, et al. Macroinvertebrate community structure and its relation to the environmental conditions in the middle Anning river[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(3): 643-653. [马宝珊, 徐滨, 魏开金, 等. 安宁河中游底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2019, 43(3): 643-653.]
- [26] Zhang Z P, Dong S Q, Wang Z G, et al. Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in the adjacent waters of Dalian Island seaweed beds in the North Yellow Sea[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(3): 369-377. [张泽鹏, 董世淇, 王兆国, 等. 北黄海裙带岛海藻场邻近海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(3): 369-377.]
- [27] Zhao W H, Liu X Q. Preliminary study on macrozoobenthos in Yarlung Zangbo River and its branches around Xiongcu, Tibet, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(3): 281-286. [赵伟华, 刘学勤. 西藏雅鲁藏布江雄村河段及其支流底栖动物初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 281-286.]
- [28] Xu M Z, Wang Z Y, Pan B Z, et al. Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2351-2360. [徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等. 雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2351-2360.]
- [29] Jian D, Huamg D M, Chang X L, et al. Zoobenthos community structure in the middle and lower reaches of Lhasa River[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(1): 40-46. [简东, 黄道明, 常秀岭, 等. 拉萨河中下游底栖动物群落结构特征分析[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 40-46.]
- [30] Li Z F, Wang J, Meng X L, et al. Disentangling the effects of dispersal mode on the assembly of macroinvertebrate assemblages in a heterogeneous highland region[J]. Freshwater Science, 2019, 38: 170-182.
- [31] Yang Q, Li X D, Yang S X, et al. Protozoan community diversity and its impact factor in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River in the wet season[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(4): 100-115. [杨清, 李晓东, 杨胜炯, 等. 雅鲁藏布江中游丰水期原生动动物群落多样性及其影响因子[J]. 生物多样性, 2023, 31(4): 100-115.]
- [32] Xu S S, Liu F, Chen S Y, et al. Correlation analysis of macrobenthos community structure with plankton and environmental factors in the Chaiku Zangbo Basin in Tibet [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(8): 418-427. [徐赛赛, 刘飞, 陈诗雨, 等. 西藏柴曲藏布流域大型底栖动物群落结构与浮游生物、环境因子的相关性分析[J]. 环境科学学报, 2023, 43(8): 418-427.]
- [33] Chi S Y, Wang R, Wei M, et al. Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010-2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8723-8738. [池仕运, 王瑞, 魏秘, 等. 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物群落结构特征和多样性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8723-8738.]
- [34] Zhang Z P, Jin H Y, Lu W Q, et al. Community structure analysis of macrobenthos in Jiayin to Luobei section of the mid-reaches of Heilongjiang River in summer[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2023, 36(6): 87-93. [张泽鹏, 金洪宇, 鲁万桥, 等. 黑龙江中游嘉荫至萝北段夏季大型底栖动物群落结构分析[J]. 水产学杂志, 2023, 36(6): 87-93.]
- [35] Jiang X, Xie Z, Chen Y. Longitudinal patterns of macroinvertebrate communities in relation to environmental factors in a Tibetan-Plateau River system[J]. Quaternary International, 2014, 304: 107-114.
- [36] Maiolini B, Lencioni V. Longitudinal distribution of macroinvertebrate assemblages in a glacially influenced stream system in the Italian Alps[J]. Freshwater Biology, 2001, 46: 1625-1639.

## Spatial and temporal distribution characteristics of benthic macroinvertebrates community structure and diversity in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River Grand Canyon, Tibet

ZHANG Zepeng<sup>1,2</sup>, JIN Hongyu<sup>1,2</sup>, LI Lei<sup>1,2</sup>, LU Wanjiao<sup>1,2</sup>, LI Shenhui<sup>1</sup>, WANG Haipeng<sup>1</sup>

1. Heilongjiang River Basin Fishery Resources and Environment Scientific Observation and Experimental Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Heilongjiang River Fishery Research Institute of the Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;
2. Fuyuan Observation and Experimental Station of the National Fishery Resources and Environment, Harbin 150070, China

**Abstract:** The Yarlung Zangbo River is the largest river on the Tibetan Plateau in China. It nurtures a variety of endemic, rare, and valuable species and is a key area for global biodiversity research. However, in recent years, other natural disasters, such as mudslides within the Yarlung Zangbo River Grand Canyon (above the Motuo reach), have led to a serious decline in fishery resources in the mainstream. Benthic macroinvertebrates are an important component of river ecosystems; however, their biodiversity has not been investigated properly, and most studies are clearly inadequate at the spatial and temporal scales. To characterize the benthic macroinvertebrate community structure of the Motuo reach of the Yarlung Zangbo River Grand Canyon in Tibet, the species composition in the Motuo reach and its affiliated tributaries were investigated in October–November 2022 (autumn) and April–May 2023 (spring), and the spatial and temporal distributions of their community structure and diversity were analyzed. The results showed that 52 species of benthic macroinvertebrates, belonging to 3 phyla, 3 classes, 10 orders, and 30 families, were collected in spring and autumn. Compared with the results of a previous study, the number of benthic macroinvertebrate species was greatly reduced. Among these, aquatic insects are dominant (50 species). In addition, the dominant species in spring were *Baetis* sp.1 and *Lepidostoma* sp., whereas *Baetis* sp.1 and *Potamyia* sp. were dominant in autumn. The macrobenthic community composition differed somewhat between spring and autumn ( $P < 0.001$ ). The total average abundance of benthic macroinvertebrates in the basin was 6.67 ind/m<sup>2</sup> and the total average biomass was 0.04 g/m<sup>2</sup> in autumn. Meanwhile, the total average abundance in spring was higher than that in autumn (at 8.71 ind/m<sup>2</sup>), and the total average biomass was 0.04 g/m<sup>2</sup>. Macrobenthic biodiversity showed some differences in both the main streams and tributaries during the different seasons ( $P < 0.01$ ), which may be related to water quantity and habitat stability. Natural disasters, such as mudslides, are the most significant cause of such consequences. Compared with published data (2015–2016) and combined with the current status of water environmental factors, the dominant species of macrobenthos have significantly changed, and the total abundance and biomass of species have significantly decreased, indicating that the habitat of aquatic organisms was disturbed after the disaster. The results of this study help map the current status of benthic macroinvertebrate resources in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo Grand Canyon in Tibet after the 2017 mudslide and provide a reference basis for biodiversity conservation in plateau regions. However, it is necessary to conduct correlation analyses in conjunction with several environmental factors to identify the key factors influencing differences in the macrobenthic community structure in subsequent studies.

**Key words:** Yarlung Zangbo Grand Canyon; Motuo reach; benthic macroinvertebrates; community structure; diversity

**Corresponding author:** LI Lei. E-mail: lilei12100821@163.com