

DOI: 10.5846/stxb202103250790

池仕运, 王瑞, 魏秘, 徐靖, 戴逢斌, 吕克强, 李嗣新, 胡菊香. 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. 生态学报, 2022, 42(21): 8723-8738.

Chi S Y, Wang R, Wei M, Xu J, Dai F B, Lü K Q, Li S X, Hu J X. Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010—2019. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8723-8738.

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

池仕运^{1,2,3}, 王 瑞^{1,2,3}, 魏 秘^{1,2,3}, 徐 靖⁴, 戴逢斌⁴, 吕克强^{1,2,3}, 李嗣新^{1,2,3}, 胡菊香^{1,2,3,*}

1 水利部中国科学院水工程生态研究所, 武汉 430079

2 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079

3 湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心, 武汉 430079

4 中国环境科学研究院, 北京 100038

摘要: 研究将 2010—2019 年的大型底栖无脊椎动物观测资料进行了系统整理分析, 旨在为金沙江上中段大型底栖无脊椎动物的多样性评估以及高海拔地区河流的生物多样性研究和保护提供较为全面的基础资料。研究结果显示, 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物种类组成上水生昆虫占据绝对优势地位, 主要由双翅目、蜉蝣目、毛翅目和襀翅目组成, 软体动物占比较低, 且以基眼目为主。就科级水平而言, 四节蜉科、摇蚊科、扁蜉科和石蝇科为整个研究区域的常见分类单元, 其中摇蚊科和四节蜉科在干支流和丰枯期均较为常见。干流和支流大型底栖无脊椎动物的群落结构显著不同, 不受丰水期和枯水期的影响。丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物的群落结构差异显著, 不受干流和支流的局限。四节蜉(四节蜉属 *Baetis*、二翼蜉 *Cloeon dipterum*、花翅蜉属 *Baetiella* 和四节蜉科 *Baetidae*) 和石蝇(纯石蝇属 *Paragnetina* 和石蝇科 *Perlidae*) 以及纹石蛾(纹石蛾属 *Hydropsyche*) 是造成不同群组群落结构差异的关键分类单元。整个研究区域大型底栖无脊椎动物呈现较高的嵌套度, 且嵌套度枯水期高于丰水期, 支流高于干流。底栖物种丰富度和现存量枯水期高于丰水期, 支流高于干流。 β 多样性干流高于支流, 丰水期高于枯水期。基于近十年的观测资料, 金沙江流域出现的大型底栖无脊椎动物种类较为丰富, 观测物种数达 148 种, 基于统计学的估计值也在 200 种左右变动, 但就单次调查情况来看, 干流丰水期和枯水期单站出现的物种数很少, 群落结构十分简单, 而支流单站出现的物种数相对较多, 群落结构则相对复杂。

关键词: 大型底栖无脊椎动物; 多样性评估; 金沙江上中段; 监测数据; 群落结构

Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010—2019

CHI Shiyun^{1,2,3}, WANG Rui^{1,2,3}, WEI Mi^{1,2,3}, XU Jing⁴, DAI Fengbin⁴, LÜ Keqiang^{1,2,3}, LI Sixin^{1,2,3}, HU Juxiang^{1,2,3,*}

1 Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China

3 Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration, Wuhan 430079, China

4 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100038, China

基金项目: 生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405305); 国家自然科学基金项目(51779158); 国家自然科学基金项目(51679152)

收稿日期: 2021-03-25; **网络出版日期:** 2022-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hujuxiang2005@163.com

Abstract: In this study, the data of macroinvertebrates from 2010 to 2019 were systematically analyzed, to provide more comprehensively basic information for the macroinvertebrate diversity assessment in the upper and middle reaches of Jinsha River and the biodiversity research and protection of the high-altitude rivers. The results showed that aquatic insects were dominant in the composition of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River, mainly composed of Diptera, Ephemeroptera, Trichoptera and Plecoptera, while mollusks, mainly Basommatophora were lower. At the family level, the Baetidae, Chironomidae, Heptageniidae and Perlidae were the common taxa in the whole study area, among which Chironomidae and Baetidae were common both in the main stream and tributaries as well as in the wet and dry seasons. The community structure in the main stream and tributaries was significantly different, which was not affected by the wet season and dry season, meanwhile the community structure in the wet and dry seasons was significantly different, which was not limited by the main stream and tributaries. Small minnow mayflies (*Baetis*, *Cloeon dipterum*, *Baetiella* and Baetidae), common stoneflies (*Paragnetina*, Perlidae) and hydropsychids (*Hydropsyche*) were the key taxa that caused the significant differences in community structure between groups. The macroinvertebrates in the whole study area showed a high nestedness, and the distribution pattern of macroinvertebrates in dry season was more nested than in wet season, and that in the tributaries was more nested than in the main stream. The taxa richness and density & biomass were higher in dry season than in wet season, and higher in the tributaries than in the main stem. On the contrary, the β diversity was higher in wet season than in dry season, and higher in the main stream than in the tributaries. Based on the observation data in the past decade, the taxa of macroinvertebrates in Jinsha River Basin were relatively rich, with 148 observed taxa, and the estimated taxa number based on statistics was about 200. However, according to the single survey, the taxa number in a single station in the dry and wet seasons of the main stream was very low, indicating that the community structure was very simple, and the taxa number in a single station of tributaries was relatively high, indicating that the community structure was relatively complex.

Key Words: macroinvertebrates; diversity assessment; the upper and middle reaches of Jinsha River; monitoring data; community structure

金沙江主源为沱沱河,发源于青藏高原唐古拉山脉的格拉丹东雪山西南侧^[1],以多沙湍急著称^[2],其高度复杂的自然环境孕育了丰富的水生生物资源,具有巨大的经济、社会、生态和科研价值^[3]。金沙江水量充沛且稳定,河道落差大而集中,水能资源十分丰富,是我国最大的水电基地,但又是长江上游泥沙最多的河流,是三峡水库入库泥沙的主要来源^[4,5]。金沙江是长江流域的重要生态屏障区,承担了长江上游水源涵养、防风固沙和生物多样性保护等重要功能^[6]。目前,金沙江干支流河流生态系统面临的主要问题为水电梯级开发对急流流水生境的连续性和完整性的破坏、沿江排污以及过度捕捞^[3],这些对金沙江流域的水生生物多样性构成了较为严重的胁迫,因此开展金沙江流域的水生生物多样性监测与保护工作是当前践行水生态安全文明的要求和体现,刻不容缓。

金沙江上游直门达至石鼓段海拔较高,环境恶劣,人口稀少和交通不便,对该区段的水生态调查多限于水电开发阶段的环评,公开发表的资料和报道甚少,且仅限于浮游植物的零星报道^[3]。从文献调研情况来看,对大型底栖无脊椎动物的调查报道限于石鼓以下河段^[7-9],对该区段的大型底栖无脊椎动物多样性情况了解甚少。水工程生态研究所近年来在金沙江上游段承担了不少水电开发环评水生生物专题项目,积累了该区段不少水生态监测资料。本研究将本所 2010—2019 年在该区段的有关历史监测资料进行收集整理,比较分析了干支流和丰枯期大型底栖无脊椎动物的群落分布特征、现存量 and 物种多样性,旨在为金沙江上中段大型底栖无脊椎动物的多样性评估以及高海拔地区河流的生物多样性研究和保护提供较为全面的基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域

金沙江是长江的上游河段,位于我国青藏高原、云贵高原和四川盆地的西部边缘,干流全长 3496 km,总落差 5154 m,流域面积 47.3 万 km²,流域多年平均径流量 1520 亿 m³,水资源和水能资源十分丰富^[4]。为满足国民经济发展的需求,长江水利委员会编制的《金沙江干流综合规划报告》推荐 19 级梯级开发方案,最大限度考虑发电、灌溉供水、防洪、航运等综合效益^[2]。

金沙江河谷地貌特征上段为峡宽相间河谷段,中段为深切峡谷段,下段为峡谷间窄谷段。金沙江上游为玉树直门达至云南石鼓区间河段,流域面积 7.65 万 km²,河段长 974 km,落差约 1715 m,河道平均比降 1.76‰。金沙江上游段山高谷深,峡谷险峻,除在支流河口处因分布着洪积冲积锥,河谷稍宽外,大部分谷坡陡峻,坡度一般在 35°—45°,不少河段为悬崖峭壁,坡度达 60°—70°以上。从直门达至邓柯乡,具有高山深切曲流河谷地貌特点,局部河段显示宽谷特征,该河段海拔高、气候干冷、水温低。从邓柯乡到石鼓,河谷愈切愈深,山岭高度降低有限,河谷高差达 1000—1500 m,成为横断山区“山高谷深”的典型地段。

金沙江流域属典型的季风气候区,每年 5—10 月为本流域雨季或汛期。年平均降雨量呈由南向北递减的总趋势。金沙江流域的暴雨较小,主要是受青藏高原、横断山脉和西南季风影响。金沙江流域气温总的趋势是由南向北递减,南北年均气温相差达 27.8℃。北部青藏高原区年平均气温约在 -6—8℃ 之间,每年 8、9 月开始下雪,10 月结冰,11 月河流封冻,次年 5 月开始解冻。流域内横断山区年平均气温大致在 8—20℃ 之间。金沙江流域径流主要来自降雨,上游有部分融雪补给。径流年内分配与气温和降水的季节变化基本一致。每年 4 月随气温的逐步升高,融雪、融冰随之增加。5 月以后,径流渐变为以降雨补给为主,7—9 月为降雨最为集中的季节,也是径流量最大的月份。10 月以后,降雨逐渐减少,径流量也随之减少。

1.2 站位设置与样品采集

本研究大型底栖无脊椎动物样本主要采集于金沙江干流叶巴滩至大具段以及部分支流。样品采集时段为 2010—2019 年。具体站位信息见图 1 和表 1。采集工具主要采用长柄矩形踢网。由于金沙江水流很急,流速很快,为安全起见,采集区域限定在岸边带可涉水区域。采集时,采样人员身穿背带式下水裤和救生衣,用脚踢击矩形踢网前方的水体底部底质,从而扰动水体,让水体底部隐藏的水生昆虫、甲壳动物等大型底栖无脊椎动物随水流流进踢网,从而收集大型底栖无脊椎动物样品。为定量收集大型底栖无脊椎动物样品,采集时要记录下踢网移动的距离,踢击面积为网口宽度乘以踢网移动的距离。现场采集到的样品现场进行粗拣剔除粗枝乱叶以及大的杂质后装入塑料封口袋或 500 mL 的宽口塑料瓶后带回宾馆,在室内分拣后装入 100 mL 样品瓶中,用 10% 的福尔马林液进行固定保存。

样品转运到实验室中进行进一步仔细分拣。分拣完毕后通过生物显微镜和解剖镜进行镜鉴,水生昆虫除摇蚊类外鉴定到科,摇蚊类鉴定到属,寡毛类鉴定到属或种,软体动物鉴定到种,其他类群鉴定到科或至少区分到科。大型底栖无脊椎动物密度通过统计样品中的个数除以采样面积进行推算;生物量则是将单个样品中的物种用电子天平称取湿重后,再根据采样面积进行推算。

1.3 数据处理与分析

采用多响应置换过程分析(MRPP)检验大型底栖无脊椎动物群落结构在不同群组间的差异显著性。采用百分比相似性分析(SIMPER)探讨导致群组差异显著的关键物种。为探讨大型底栖无脊椎动物的分布模式,采用 Nestedness 6 模块进行嵌套度分析,计算嵌套度 Na , $Na = [d(A) - E(d)] / s(d)$ 。式中, $d(A)$ 为观察差异值, $E(d)$ 为原假设下的期望差异值, $s(d)$ 为原假设下的差异值的标准偏差。 Na 分值越低,嵌套度越高。采用 SPADE 软件计算 Chao 氏(Chao 2)指数和折刀法(Jackknife)估计物种数。采用 PAST 3.0 计算 Harrison 指数。MRPP 分析和 Nestedness 分析均采用 PC-Ord v6.22 进行。采样图采用 ArcGis v10.2 绘制,一般图表采用 WPS Excel 和 GraphPad Prism 8 绘制。

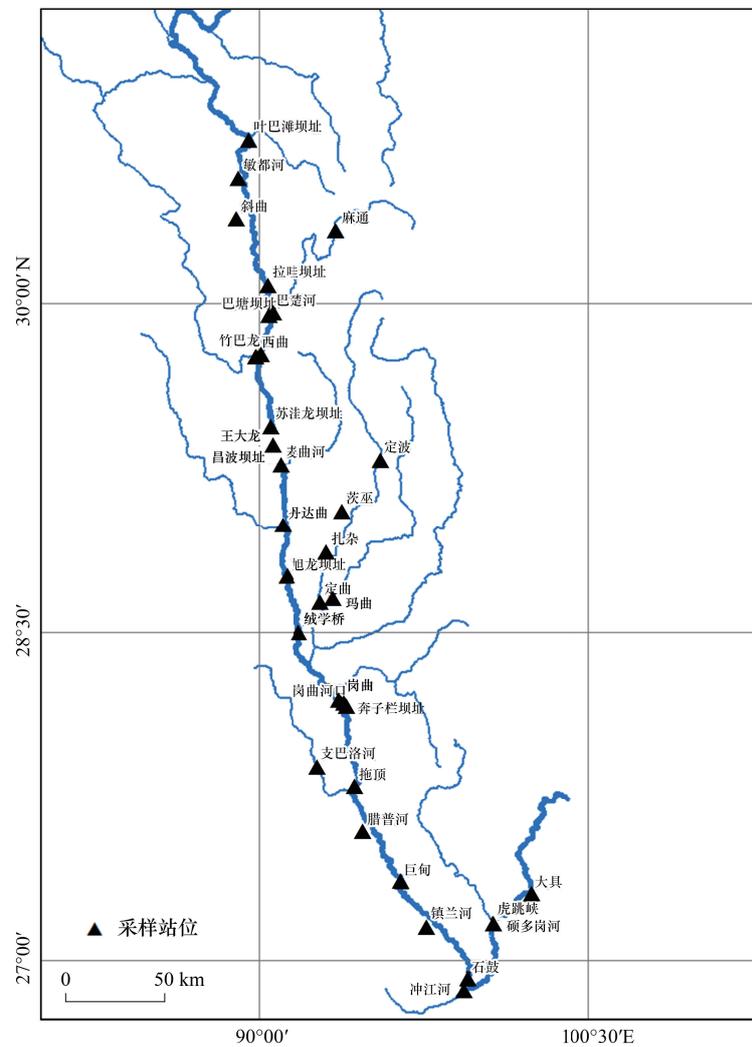


图 1 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物采样示意图

Fig.1 Sketch map of sampling sites of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River

表 1 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物采样站点详细信息

Table 1 Detailed information of sampling sites of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River

| 区域 Area | 站点 Station | 网格编号 Grid number | 经度(°) Longitude | 纬度(°) Latitude | 备注:采样时期(年-月) Note: Sampling date(year-month) |
|-------------------|---------------|---------------------|--------------------|-------------------|---|
| 干流 Main stream | 叶巴滩坝址 | 44203270 | 98.96034 | 30.75117 | 2019-05 |
| | 拉哇坝址 | 44303200 | 99.04432 | 30.08313 | 2012-10 |
| | 巴塘坝址 | 44303180 | 99.05292 | 29.93974 | 2010-06、2010-11、2012-10、2013-06、2019-05 |
| | 竹巴龙 | 44203160 | 99.00982 | 29.77168 | 2010-06、2010-11 |
| | 苏洼龙坝址 | 44203120 | 99.05944 | 29.43699 | 2010-06、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 昌波坝址 | 44203110 | 99.06641 | 29.35000 | 2010-11、2012-11、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 王大龙 | 44203110 | 99.06947 | 29.32968 | 2010-11、2012-11、2013-06 |
| | 绒学桥 | 44303020 | 99.18728 | 28.49043 | 2014-03、2014-07、2019-05 |
| | 旭龙坝址 | 44303050 | 99.12815 | 28.74387 | 2012-11、2014-03、2014-07、2019-05、 |
| | 奔子栏坝址 | 44402990 | 99.30488 | 28.23587 | 2012-11、2013-06、2014-03、2014-07、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 拖顶 | 44502940 | 99.43955 | 27.79087 | 2014-03、2014-07、2017-06、2017-09、2019-05 |

续表

| 区域 Area | 站位 Station | 网格编号 Grid number | 经度(°) Longitude | 纬度(°) Latitude | 备注:采样时期(年-月) Note: Sampling date(year-month) |
|-----------------|---------------|---------------------|--------------------|-------------------|---|
| 支流 Tributary | 巨甸 | 44702890 | 99.65681 | 27.34782 | 2014-03 |
| | 石鼓 | 44902840 | 99.95333 | 26.90556 | 2014-03、2014-07、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 虎跳峡 | 45102870 | 100.06889 | 27.16889 | 2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 大具 | 45302880 | 100.24069 | 27.29049 | 2014-03、2014-07 |
| | 扎杂 | 44403060 | 99.31571 | 28.85872 | 2019-05 |
| | 定波 | 44703100 | 99.55805 | 29.28429 | 2019-05 |
| | 岗曲河口 | 44502980 | 99.39528 | 28.17417 | 2019-05 |
| | 麻通 | 44603220 | 99.36019 | 30.33393 | 2019-05 |
| | 玛曲 | 44503030 | 99.34437 | 28.65365 | 2017-09、2019-05 |
| | 巴楚河 | 44303180 | 99.06876 | 29.95459 | 2010-06、2010-11 |
| | 冲江河 | 44902830 | 99.93372 | 26.85406 | 2014-03、2014-07 |
| | 茨巫 | 44503080 | 99.38347 | 29.04972 | 2019-05 |
| | 丹达曲 | 44303070 | 99.11807 | 28.98227 | 2012-11、2013-06、2016-04、2019-05 |
| | 定曲 | 44403030 | 99.28514 | 28.63079 | 2014-03、2014-07、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 岗曲 | 44502980 | 99.38734 | 28.19634 | 2014-03、2014-07、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 麦曲河 | 44303100 | 99.10644 | 29.26119 | 2012-11、2013-06、2016-04、2017-06、2017-09、2019-05 |
| | 敏都河 | 44203250 | 98.91464 | 30.56963 | 2013-06、2016-05 |
| | 西曲 | 44203160 | 98.99471 | 29.76088 | 2010-06、2010-11、2016-05 |
| | 斜曲 | 44103230 | 98.90052 | 30.38870 | 2013-06、2016-05 |
| | 腊普河 | 44502910 | 99.47614 | 27.58220 | 2014-03、2014-07 |
| 硕多岗河 | 45102870 | 100.06889 | 27.16889 | 2014-03、2014-07 | |
| 镇兰河 | 44802860 | 99.76724 | 27.14956 | 2014-03、2014-07 | |
| 支巴洛河 | 44302950 | 99.27123 | 27.88209 | 2014-03、2014-07 | |

2 结果与分析

2.1 水文特征

根据 2016 年石鼓水文站的观测资料进行分析,发现金沙江上中段自进入 6 月后径流量大幅增加,7 月的径流量达到最大,为汛期之最,8 月和 9 月的径流量仍处于较高水平,进入 11 月后径流量大幅下降。因此可以认为 6 月至 10 月为主汛期,其他月份金沙江上中段基本处于枯水期(图 2)。

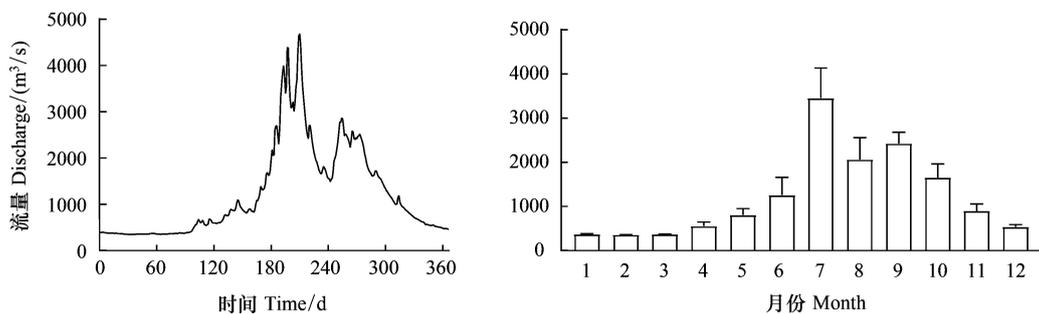


图 2 2016 年石鼓水文站流量过程线以及月均流量

Fig.2 Discharge hydrograph and monthly average discharge of Shigu hydrological station in 2016

金沙江丰水期水色浑黄,透明度较低,泥沙含量较高,枯水期水色较清,透明度相对较高,泥沙含量相对较低。就全年情况来看,年均含沙量处于较高水平,是典型的多水多沙河流。据长江泥沙公报 2009 年至 2018

年的统计资料,直门达多年平均含沙量为 725.6 mg/L,石鼓为 701.6 mg/L(图 3)。

2.2 群落分布特征

2.2.1 物种组成

金沙江上中段出现的大型底栖无脊椎动物隶属 3 门 5 纲 12 目 54 科。节肢动物门出现 137 种,占比 92.57%,环节动物门出现 7 种,占比 4.73%,软体动物出现 4 种,占比 2.71%。节肢动物门中水生昆虫占比 99.27%。就各目组成情况来看,金沙江上中段大型底栖无脊椎动物主要由双翅目、蜉蝣目、毛翅目和襁翅目组成,占比分别为 42.28%、20.81%、12.75%和 6.71%,其他各目占比较低,不超过 5%,软体动物出现的目仅为基眼目,中腹足目未有出现(图 4)。

本研究将出现频次超过 30%的分类单元定义为常见分类单元。就科级水平来看,整个研究区域常见分类单元为四节蜉科、摇蚊科、扁蜉科和石蝇科;摇蚊科和四节蜉科均为干支流和丰枯期的常见分类单元,但扁蜉科、纹石蛾科、小蜉科在支流和枯水期也较为常见。就干流而言,四节蜉科和摇蚊科在丰水期和枯水期均为常见分类单元;就支流而言,四节蜉科、摇蚊科、扁蜉科、纹石蛾科和石蝇科在丰水期和枯水期均为常见分类单元。总体来看,四节蜉科和摇蚊科在金沙江流域极为常见,扁蜉科、纹石蛾科和石蝇科在支流极为常见(表 1)。

就整个区域而言,丰水期和枯水期、干流和支流的大型底栖无脊椎动物群落结构差异显著。就干支流而言,干流丰水期和枯水期的群落结构差异较大,但未达到显著水平($P=0.079$),而支流丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物的群落结构显著不同($P=0.021$)。就不同水文期而言,丰水期干支流群落结构显著不同($P=0.014$),枯水期干流和支流的群落结构差异仍然显著($P<0.0001$)。总之,干支流的群落结构无论是丰水期还是枯水期均差异显著,干流群落结构丰水期和枯水期的差异程度要小于支流。不考虑水文期的影响,干流和支流的大型底栖无脊椎动物群落结构显著不同,将干流和支流作为一个整体考虑,丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物的群落结构也会显著不同(表 3)。

SIMPER 分析结果表明,造成整个研究区域丰水期和枯水期,干流和支流大型底栖无脊椎动物群落结构差异显著的前五位关键分类单元为四节蜉属 *Baetis*、纹石蛾属 *Hydropsyche*、二翼蜉 *Cloeon dipterum*、四节蜉科和石蝇科。就干支流而言,造成干流丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物群落结构差异的前五位关键分类单元为二翼蜉、四节蜉属、流水长跗摇蚊属 *Rheotanytarsus*、石蝇科和小划蜉 *Sigarua substriata*;造成支流丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物群落结构差异的前五位关键分类单元为四节蜉属、纯石蝇属 *Paragnetina*、纹石蛾属、花翅蜉属 *Baetiella* 和直突摇蚊属。就丰枯期而言,丰水期干流和支流大型底栖无脊椎动物群落结构显著不同的前五位关键分类单元为四节蜉属、纹石蛾属、二翼蜉、四节蜉科和石蝇科;枯水期干支流大型底栖无脊椎动物群落结构显著不同的前五位关键分类单元为四节蜉属、纯石蝇属、直突摇蚊属、花翅蜉属和纹石蛾属(表 4)。

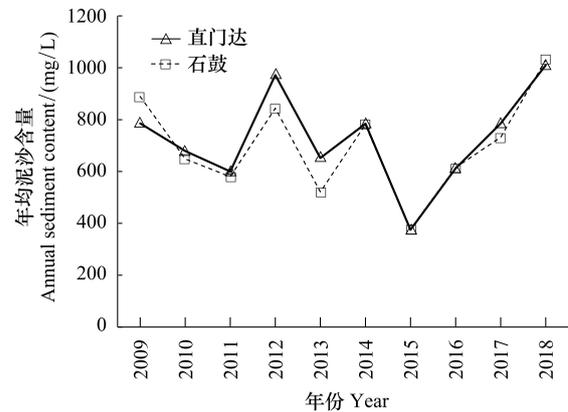


图 3 金沙江上段泥沙含量年际变化(数据收集自长江泥沙公报)

Fig.3 Interannual variation of sediment content in the upper reaches of Jinsha River (The used data are from Yangtze River Sediment Bulletin)

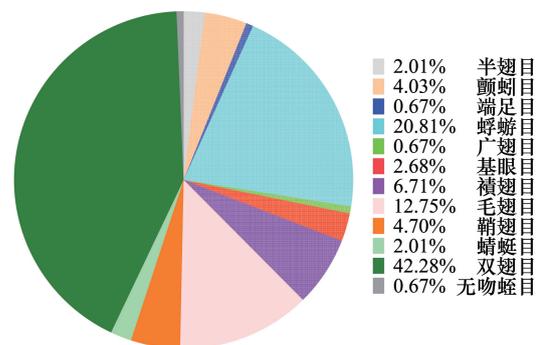


图 4 大型底栖无脊椎动物各目比例组成

Fig.4 Proportions of different orders of macroinvertebrates

表 2 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物常见分类单元(科级水平)

Table 2 The common taxa of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River (family level)

| 组群 Groups | 分类单元 Taxa |
|---------------------------------|---|
| 整个区域 The whole area | 四节蜉科(64.71%)、摇蚊科(61.34%)、扁蜉科(36.13%)、石蝇科(32.77%) |
| 干流 Main stream | 蚊科(43.64%)、四节蜉科(40%) |
| 支流 Tributary | 四节蜉科(85.94%)、摇蚊科(76.56%)、扁蜉科(59.38%)、石蝇科(53.13%)、纹石蛾科(43.75%)、小蜉科(42.19%)、大蚊科(31.25%) |
| 丰水期 Wet season | 四节蜉科(57.89%)、摇蚊科(43.86%) |
| 枯水期 Dry season | 摇蚊科(77.42%)、四节蜉科(70.97%)、扁蜉科(45.16%)、石蝇科(41.94%)、小蜉科(30.65%) |
| 干流丰水期 Main stream in wet season | 四节蜉科(34.48%)、摇蚊科(31.03%) |
| 干流枯水期 Main stream in dry season | 摇蚊科(57.69%)、四节蜉科(46.15%) |
| 支流丰水期 Tributary in wet season | 四节蜉科(82.14%)、摇蚊科(57.14%)、扁蜉科(46.43%)、纹石蛾科(42.86%)、石蝇科(32.14%) |
| 支流枯水期 Tributary in dry season | 摇蚊科(91.67%)、四节蜉科(88.89%)、扁蜉科(69.44%)、石蝇科(69.44%)、小蜉科(52.78%)、纹石蛾科(44.44%)、大蚊科(36.11%) |

表 3 基于 MRPP 的大型底栖无脊椎动物群组间群落结构差异性检验

Table 3 Difference test on community structure of macroinvertebrates based on MRPP

| 群组比较 Group comparison | T | A | P |
|-----------------------|---------|-------|---------|
| 整个区域 The whole area | | | |
| 丰水期 vs 枯水期 | -3.389 | 0.004 | 0.004 |
| 干流 vs 支流 | -11.214 | 0.013 | <0.0001 |
| 干流 Main stream | | | |
| 丰水期 vs 枯水期 | -1.488 | 0.005 | 0.079 |
| 支流 Tributary | | | |
| 丰水期 vs 枯水期 | -2.572 | 0.006 | 0.021 |
| 丰水期 Wet season | | | |
| 干流 vs 支流 | -2.664 | 0.008 | 0.014 |
| 枯水期 Dry season | | | |
| 干流 vs 支流 | -8.948 | 0.022 | <0.0001 |

MRPP: 多响应置换过程分析 Multi-response permutation procedure

表 4 大型底栖无脊椎动物 SIMPER 分析结果

Table 4 The results of SIMPER analysis on macroinvertebrates

| 群组 Groups | 物种 Taxon | 平均不相似度 Av. dissim | 贡献比 Contrib.% | 累积比 Cumulative% | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------|-----------------|-------|
| 整个区域 The whole area | 丰水期 vs 枯水期 | | | | |
| | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | 6.469 | 6.845 | 6.845 | |
| | 纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> | 4.682 | 4.954 | 11.800 | |
| | 二翼蜉 <i>Cloeon dipterum</i> | 3.873 | 4.098 | 15.900 | |
| | 干流 vs 支流 | | | | |
| | 四节蜉科 Baetidae | 3.760 | 3.978 | 19.880 | |
| | 石蝇科 Perlidae | 3.558 | 3.765 | 23.640 | |
| | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | 4.740 | 5.086 | 5.086 | |
| | 二翼蜉 <i>Cloeon dipterum</i> | 3.312 | 3.554 | 8.640 | |
| | 纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> | 3.207 | 3.441 | 12.080 | |
| 干流 Main stream | 丰水期 vs 枯水期 | | | | |
| | 四节蜉科 Baetidae | 2.938 | 3.153 | 15.240 | |
| | 石蝇科 Perlidae | 2.796 | 3.000 | 18.240 | |
| | 二翼蜉 <i>Cloeon dipterum</i> | 6.758 | 7.020 | 7.020 | |
| | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | 5.702 | 5.924 | 12.940 | |
| | 流水长跗摇蚊属 <i>Rheotanytarsus</i> | 5.094 | 5.292 | 18.240 | |
| | 石蝇科 Perlidae | 4.863 | 5.051 | 23.290 | |
| | 小划蜉 <i>Sigaru substriata</i> | 3.704 | 3.847 | 27.130 | |
| | 支流 Tributary | 丰水期 vs 枯水期 | | | |
| | | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | 3.456 | 3.929 | 3.929 |
| 纯石蝇属 <i>Paragnetina</i> | | 3.030 | 3.445 | 7.374 | |
| 纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> | | 2.980 | 3.388 | 10.760 | |
| 花翅蜉属 <i>Baetiella</i> | | 2.806 | 3.189 | 13.950 | |
| 丰水期 Wet season | 干流 vs 支流 | | | | |
| | 直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> | 2.583 | 2.937 | 16.890 | |
| | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | 6.469 | 6.845 | 6.845 | |
| | 纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> | 4.682 | 4.954 | 11.800 | |

续表

| 群组 Groups | 物种 Taxon | 平均不相似度 Av. dissim | 贡献比 Contrib.% | 累积比 Cumulative% |
|-------------------|----------------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| 枯水期 Dry season | 干流 vs 支流 | | | |
| | 二翼蜉 <i>Cloeon dipterum</i> | 3.873 | 4.098 | 15.900 |
| | 四节蜉科 Baetidae | 3.760 | 3.978 | 19.880 |
| | 石蝇科 Perlidae | 3.558 | 3.765 | 23.640 |
| | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | 4.221 | 4.439 | 4.439 |
| | 纯石蝇属 <i>Paragnetina</i> | 3.447 | 3.625 | 8.064 |
| | 直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> | 3.166 | 3.330 | 11.390 |
| | 花翅蜉属 <i>Baetiella</i> | 3.022 | 3.178 | 14.570 |
| | 纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> | 2.698 | 2.837 | 17.410 |

2.2.2 嵌套度分析

嵌套度分析结果见表 5。表 5 呈现的结果显示,虽然整个区域大型底栖无脊椎动物的分布呈现嵌套分布 ($N_a = -2.838, P = 0.002$),但干流嵌套度低于支流,丰水期嵌套度低于枯水期,且枯水期嵌套度达到显著水平 ($N_a = -2.198, P = 0.014$)。

表 5 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物的嵌套度检验

Table 5 Nestedness test of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River

| | N_a | P | | N_a | P |
|---------------------|--------|-------|----------------|--------|-------|
| 整个区域 The whole area | -2.837 | 0.002 | 丰水期 Wet season | 0.661 | 0.755 |
| 干流 Main stream | 0.322 | 0.874 | 枯水期 Dry season | -2.198 | 0.014 |
| 支流 Tributary | -1.002 | 0.159 | | | |

2.3 现存量

就大型底栖无脊椎动物密度而言,丰水期干流密度变动在 0.33—7.00 个/ m^2 之间,平均 3.69 个/ m^2 ,支流密度变动在 7.00—187.50 个/ m^2 之间,平均 88.80 个/ m^2 ;枯水期干流密度变动在 0.81—115.57 个/ m^2 之间,平均 30.49 个/ m^2 ,支流密度变动在 2.47—483.43 个/ m^2 之间,平均 155.83 个/ m^2 。就大型底栖无脊椎动物生物量而言,丰水期干流生物量变动在 0.0089—0.1990 g/m^2 之间,平均 0.0816 g/m^2 ,支流生物量变动在 0.1662—5.7150 g/m^2 之间,平均 1.3909 g/m^2 ;枯水期干流生物量变动在 0.0220—2.2243 g/m^2 ,平均 0.7049 g/m^2 ,支流生物量变动在 1.3509—3.2250 g/m^2 之间,平均 2.3152 g/m^2 (图 5)。总之,丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物的密度和生物量均是支流要高于干流。

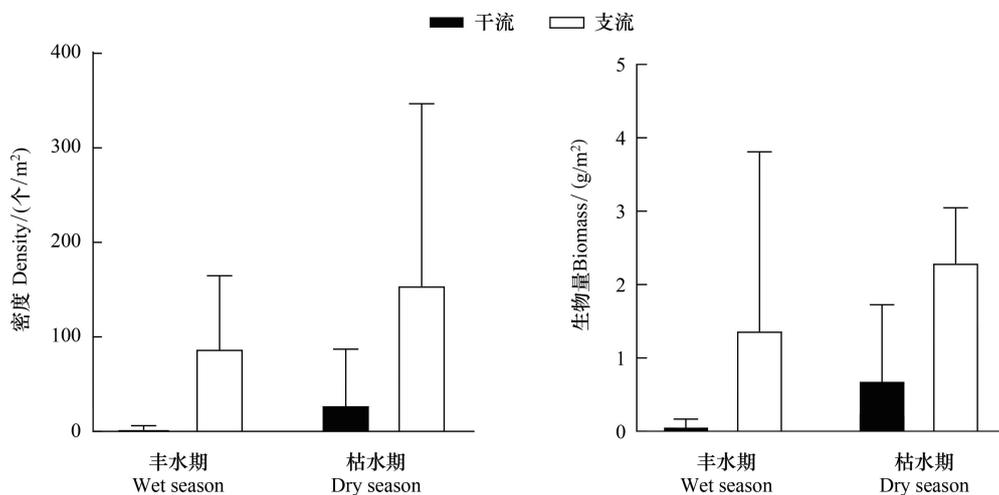


图 5 不同水文期的大型底栖无脊椎动物的现存量

Fig.5 The density and biomass of macroinvertebrates in different hydrological periods

2.4 物种丰富度和 β 多样性

基于 2010—2019 年的观测资料,金沙江上中段大型底栖无脊椎动物的观测物种数为 148 种,Jackknife 估计物种数在 190—210 种之间,Chao 2 估计物种数在 180 种左右;干流观测物种数为 71 种,Jackknife 估计物种数在 100—130 种之间,Chao 2 物种数在 115 种左右;支流的观测物种数为 132 种,Jackknife 估计物种数在 180—210 种之间,Chao 2 估计物种数在 180 种左右;丰水期观测到的物种数为 83 种,Jackknife 估计物种数在 110—120 种之间,Chao 2 估计物种数在 100 种左右;枯水期观测物种数为 124 种,Jackknife 估计物种数在 170—200 种之间,Chao 2 估计物种数在 170 种左右。无论是观测物种数还是基于统计学手段的估计物种数,支流物种数远远高于干流,枯水期物种数远远高于丰水期(表 6)。

表 6 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物的物种丰富度

Table 6 Species richness of macroinvertebrates in different hydrological periods in the upper and middle reaches of Jinsha River

| | 观测物种数 Taxa observed | 折刀法 1 Jackknife 1 | 折刀法 2 Jackknife 2 | Chao 氏估计 Chao 2 | 修正 Chao 2 |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 整个区域 The whole area | 148 | 192.6 (177.6—215.2) | 209.6 (185—250.4) | 183.9 (165.1—223) | 181.9 (164.1—219) |
| 干流 Main stream | 71 | 106.3 (93.4—126.9) | 127.8 (105.9—163.4) | 116.4 (90.5—176.8) | 112.2 (88.8—166.4) |
| 支流 Tributary | 132 | 180.2 (164.5—203.5) | 203.9 (177.8—244.9) | 179.3(155.1—228.7) | 176.5(153.8—223.1) |
| 丰水期 Wet season | 83 | 112.5 (100.9—131.6) | 119.6(101.6—155.2) | 102.6 (90.9—129.8) | 100.8 (90.2—126.7) |
| 枯水期 Dry season | 124 | 170.3 (155—193.1) | 195.8(170.1—235.8) | 175.8 (148.8—232.2) | 172.4 (147.2—224.9) |

括号内为估计值的 95% 的置信区间

就单次调查情况来看,丰水期干流单站的观测物种数均值为 2.2 种,低于支流的 5.1 种,枯水期干流的单站观测物种数均值为 2.9 种,支流的单站观测物种数为 9.6 种。无论是丰水期还是枯水期,支流的单站物种观测值均远高于干流。就 β 多样性指数而言,Harrison 指数丰水期高于枯水期,干流高于支流(图 6)。

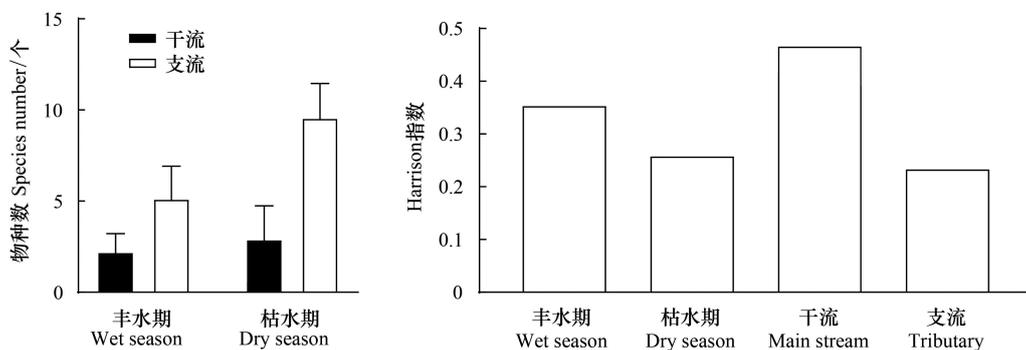


图 6 大型底栖无脊椎动物物种数和贝塔多样性

Fig.6 Species number and β diversity of macroinvertebrates

3 讨论

金沙江上中段出现的大型底栖无脊椎动物以节肢动物为主,其中水生昆虫占据绝对优势地位,软体动物和环节动物均占比很低,其中软体动物中的基眼目占据绝对统治地位,中腹足目的物种未有出现。在多沙和高海拔地区河流中,大型底栖无脊椎动物中的水生昆虫往往占据主导地位,软体动物占比往往很低。如黄河大型底栖无脊椎动物种类组成中,水生昆虫物种数占比高达 74.4%,软体动物占比只有 5.6%^[10];拉萨河中下游水生昆虫物种数占比 70.97%,软体动物占比只有 9.68%^[11];雅鲁藏布江干支流大型底栖无脊椎动物均以

水生昆虫为主,水生昆虫占整个物种数的比例占比高达 92.8%,软体动物占比仅为 2.4%^[12];安宁河水生昆虫物种数占比 89.34%,软体动物占比 4.10%^[13]。基眼目的物种如萝卜螺、膀胱螺和扁卷螺能够适应多沙环境,出现于黄河、岷江和雅鲁藏布江流域^[10-15]。金沙江流域大型底栖无脊椎动物的类群组成和常见软体动物和以上这些流域有较多的共通之处。王川等认为,大型底栖无脊椎动物在水体污染程度较轻的河流中水生昆虫类群占据优势地位,在水体污染程度较为严重的河流中则以软体动物和环节动物为主^[16]。在本研究中,金沙江流域大型底栖无脊椎动物以水生昆虫为主,与水生昆虫生活史较短,能以滞育虫卵态度过高原极端环境有较大关系。就目前的调查资料而言,高海拔地区河流出现的软体动物以肺螺亚纲的基眼目为主,如椎实螺、尖膀胱螺和扁卷螺等,黄河源、雅鲁藏布江干流以及拉萨河干支流均有分布^[11-12,15,17],表明该类软体动物能够耐受极端寒冷的气候,能够在高海拔和高寒地区生存^[11]。椎实螺的生态学研究资料表明,该类物种对饥饿和干燥具有较强的抵抗力,当环境不利时可以进行迁移性移动,冬季可在泥层或深水处越冬^[18]。

四节蜉科、摇蚊科、扁蜉科和石蝇科为整个研究区域的常见分类单元,其中摇蚊科和四节蜉在干支流和丰枯期均较为常见。就干流而言,摇蚊科常出现于一些流速相对较缓的近岸带,由于巨岩凌乱分布于岸边带,形成沉积较为充分的缓流小生境,有利于摇蚊科一些种类的生存繁衍,四节蜉科的种类既适应静水也适应流水环境,更喜好藏身于巨岩交错分布形成的缓流小生境,特别是岸边带的岩石缝隙中常分布有较多的四节蜉。就支流而言,生境多样性以及相对较缓的流速本就有利于摇蚊科和四节蜉科的种类生存,同时一些扁蜉科、纹石蛾科和小蜉科种类在支流也极为常见。比较而言,干流一些站位偶尔会出现小蜉科的一些种类,这可能与干流流速较快,缺少必要的掩蔽场所有关,如枯枝落叶以及腐殖质难以留存于水体中,岩石上难以形成青苔,而小蜉科种类多为撕食性和刮食者,干流中缺少小蜉科的适宜生境^[19]。研究表明,寡毛类、钩虾、双翅目摇蚊科以及蜉蛄科稚虫比较喜好泥沙碎屑较为丰富的区域^[20],泥沙沉积会导致大型底栖无脊椎动物多样性较低和一些物种的消亡,但一些物种适应这种生境,如四节蜉、溪颚蜉和颤蚓^[21]。本研究发现,寡毛类、钩虾和蜉蛄科稚虫多出现于支流中,而双翅目摇蚊科和蜉蛄目的四节蜉在干支流均有出现,且干流出现的频次不低,这表明金沙江干流近岸带的局部沉积环境为四节蜉稚虫和摇蚊科幼虫提供了较为良好的栖息环境。总之,四节蜉科和摇蚊科在干流丰枯期均能成为常见分类单元与干流一些河段近岸带由于巨岩的交错分布形成局部缓流生境以及沉积环境有较大关系;四节蜉科、摇蚊科、扁蜉科、纹石蛾科和石蝇科成为支流丰枯期的常见分类单元与支流多样化的生境有较大关系,这些分类单元均能找到适宜的生存环境。

就采样情况来看,隶属蜉蛄目的四节蜉科以及毛翅目的纹石蛾科在金沙江上中下游以及主要支流均有出现,无论是丰水期还是枯水期,均能采集到,这也为金沙江下游梯级电站开发前的本底调查资料(未公开发表,内部资料)所证实。四节蜉科和纹石蛾科在国内很多河流中均较为常见,也往往是大型底栖无脊椎动物的常见种和优势种,如昌江^[22]、横石水河^[23]、三峡库区主要支流^[24]、清江^[25]、汉江^[26]、拉萨河^[11]、雅砻江^[8]、湟水河^[27]、太子河^[28]、浑太河^[29]、额尔齐斯河^[30]等。这些物种分布范围很广,从热带到亚热带,从低海拔到高海拔,且能适应多沙环境。钩虾为典型的冷水性物种,广泛分布于长江中下游^[26,31]以及拉萨河干支流上^[11],本研究发现,该物种也广泛分布于金沙江上中段,在金沙江干流托顶以及支流巴楚河、丹达曲、岗曲、麦曲河和西曲均有检出,但出现频次不高,推测该物种比较适应支流的生境环境,干流出现的群体应主要来源于支流的漂流群体。石蝇科为冷水性清洁物种,对水环境的要求较高,其在金沙江上中段的出现率高达 32.77%,该分类单元在雅鲁藏布江干流也广泛存在^[12]。隶属摇蚊科直突摇蚊亚科的直突摇蚊比较适应冷水激流环境,其在金沙江上中段的出现率为 21.85%,该分类单元在高海拔的雅鲁藏布江干支流以及极高海拔的长江源和黄河源上均有分布^[11-12,17]。

金沙江上中段干流和支流大型底栖无脊椎动物的群落结构显著不同,不受丰水期和枯水期的影响。丰水期和枯水期大型底栖无脊椎动物的群落结构差异显著,也不受干流和支流的局限。SIMPER 分析结果表明,四节蜉(四节蜉属、二翼蜉、花翅蜉属和四节蜉科)和石蝇(纯石蝇属和石蝇科)以及纹石蛾(纹石蛾属)是造成不同群组群落结构差异的关键分类单元,其种群的动态变化是造成干支流、丰枯期大型底栖无脊椎动物群

落结构差异较大的重要原因。雅鲁藏布江的研究案例表明,其干支流优势种组成差异显著,干流以多足摇蚊、直突摇蚊和流水巴氏摇蚊为主,而支流则以刺翅蜉、高翔蜉和四节蜉为主^[12]。就金沙江而言,干支流大型底栖无脊椎动物的群落结构差异较大,支流出现的物种以蜉蛄目、襁翅目、毛翅目(EPT)分类单元为主,而干流出现的物种绝大多数也在支流中出现,这可能是整个区域大型底栖无脊椎动物的分布呈现嵌套分布的主要原因。

就大型底栖无脊椎动物现存量而言,无论是丰水期还是枯水期,金沙江干流远低于支流。这可能与支流生境多样性更高,流速相对较缓,沿岸村落较多,营养物质输入相对充裕,更适宜大型底栖无脊椎动物的生长繁殖有较大关系。处于高海拔的雅鲁藏布江流域干流大型底栖无脊椎动物现存量远小于支流^[12,14],本研究结果表明金沙江上中段大型底栖无脊椎动物的现存量特征与雅鲁藏布江存在类似之处。金沙江干流大型底栖无脊椎动物密度处于较低水平,丰水期平均密度 3.69 个/m²,枯水期平均密度 30.49 个/m²,总平均密度为 17.30 个/m²,低于雅鲁藏布江干流的 38.50 个/m²[12]。金沙江是长江上游流域面积最大,产水产沙最多的河流^[32]。泥沙含量过高和生态系统脆弱对大型底栖无脊椎动物具有较大的负面影响,其现存量往往较低^[17,33],这在高海拔的长江源表现尤为明显。越溪河多年含沙量 998 mg/L,相比金沙江上中段泥沙含量处于较高水平,但其大型底栖无脊椎动物现存量对较高,平均密度为 172 个/m²,平均生物量为 58.966 g/m²^[16]。这可能与越溪河地处丘陵地带,水流相对较缓,外源营养物质输入较为充沛有关。相比越溪河,金沙江上中段主要地处横断山脉的高山峡谷,植被分布稀少,水流湍急,宽谷河段相对较少,沿岸村落和城镇稀少导致外源营养物质输入较少,水土流失造成的泥沙含量过高导致大型底栖无脊椎动物的食物来源较为短缺^[17],同时水沙运动形成的高剪切力不利于大型底栖无脊椎动物的生长繁殖,因而现存量处于较低水平,远低于低海拔地区的河流,这也是高海拔地区河流大型底栖无脊椎动物的主要特征^[10,12]。

就野外调查情况来看,金沙江上中段干流大型底栖无脊椎动物的栖息生境复杂多变且环境恶劣,如水位全年落差大、岸坡不稳、崩岸频发,不利于大型底栖无脊椎动物的生存繁衍,干流大型底栖无脊椎动物沿环境梯度的更替速率要高于支流,导致其 Harrison 指数要高于支流。就整个区域而言,丰水期 Harrison 指数高于枯水期,表明丰水期大型底栖无脊椎动物的栖息环境要劣于枯水期,导致大型底栖无脊椎动物沿环境梯度的更替速率要高于枯水期。研究表明,水生昆虫具有很强的主动迁移扩散能力,往往导致水生昆虫群体,相比被动扩散的群体如甲壳动物,展现出更高的嵌套度^[34]。金沙江上中段大型底栖无脊椎动物以水生昆虫为主,枯水期水生昆虫扩散更为主动,导致枯水期的嵌套度要高于丰水期。就干支流而言,支流的大型底栖无脊椎动物嵌套度高于干流,与支流有更高的水生昆虫多样性有关。如干流出现水生昆虫 63 种,而支流出现 122 种,几乎是干流的 2 倍。基于近十年的观测资料,金沙江流域出现的大型底栖无脊椎动物种类较为丰富,观测物种数达 148 种,基于统计学的估计值也在 200 种左右变动,但就单次调查情况来看,干流单站出现的物种数很少,丰水期和枯水期的均值均不超过 3 种/站,群落结构十分简单,而支流大型底栖无脊椎动物群落结构则相对复杂,单站出现的物种数均值枯水期接近 10 种/站。巴西亚马逊流域的研究案例表明,悬浮泥沙会给大型底栖无脊椎动物的多样性带来显著的负面影响^[35],黄河水系的研究案例也表明,干流的高含沙量,水流急,水量分布不均等是造成黄河干流各样点物种数少的主要原因^[10]。基于观测值以及统计学的估计值,金沙江上中段干流出现的物种数少于支流与干流生境不稳以及泥沙含量过高有很大关系,也与支流生境复杂多样且较为稳定,沿岸村落较多,外源营养输入较多有一定关系。

参考文献(References):

- [1] 唐会元, 杨志, 高少波, 万力, 朱迪, 刘宏高, 陈小娟, 乔晔. 金沙江下游巧家江段鱼类生物多样性及群落结构的年际动态. 水生态学杂志, 2014, 35(6): 7-15.
- [2] 罗小勇, 陈蕾, 李斐. 金沙江干流梯级开发环境影响分析. 水利水电快报, 2004, 25(14): 7-10.
- [3] 魏志兵, 何勇风, 龚进玲, 朱挺兵, 孟子豪, 柴毅, 杨德国. 金沙江干流浮游植物群落结构特征及其时空变化. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1356-1365.

- [4] 徐长江, 范可旭, 肖天国. 金沙江流域径流特征及变化趋势分析. 人民长江, 2010, 41(7): 10-14, 51-51.
- [5] 潘久根. 金沙江流域输沙特性分析. 水土保持通报, 1997, 17(5): 35-39.
- [6] 郑金秀, 高少波, 池仕运, 胡俊, 李嗣新, 胡菊香. 金沙江下游水生生态状况评价及保护战略. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 174-179, 204-204.
- [7] 孙超白, 张抱膝, 童远瑞, 周风帆, 孟文新, 赵相林, 孟冰. 应用大型底栖无脊椎动物评价金沙江(渡口市段)枯水期的水质. 南京大学学报: 自然科学版, 1985, 21(3): 525-536, 572-572.
- [8] 吕雅宁, 解莹, 王少明, 渠晓东, 张敏. 基于底栖动物群落相似性的黑水河替代生境的研究. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2647-2657.
- [9] 龚廷登, 杨伟阶, 何滔, 刘建虎, 张春霖, 郑永华, 冯兴无. 金沙江水富段水生生物的群落结构及水质监测. 淡水渔业, 2014, 44(4): 25-34.
- [10] 傅小城, 叶麟, 徐耀阳, 蔡庆华. 黄河主要水系水环境与底栖动物调查研究. 生态科学, 2010, 29(1): 1-7.
- [11] 简东, 黄道明, 常秀岭, 张庆, 谢山, 陈峰, 陈胜. 拉萨河中下游底栖动物群落结构特征分析. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 40-46.
- [12] 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. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 281-286.
- [13] 马宝珊, 徐滨, 魏开金, 梁孟, 徐进, 朱祥云. 安宁河中游底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 水生生物学报, 2019, 43(3): 643-653.
- [14] 徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 巩同梁, 刘乐. 雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价. 生态学报, 2012, 32(8): 2351-2360.
- [15] 马宝珊, 谢从新, 杨学峰, 霍斌. 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, 2012, 21(8): 942-950.
- [16] 王川, 岳兴建, 谢嗣光, 王芳, 王清, 杨攀, 谢碧文. 越溪河春季底栖动物的群落结构及水质评价. 内江师范学院学报, 2010, 25(12): 59-64.
- [17] 潘保柱, 王兆印, 余国安. 长江源和黄河源的大型底栖动物群落特征研究. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 369-374.
- [18] 李国清, 靳家声, 才学鹏, 段志勤. 甘肃牧区椎实螺的生态学研究. 中国兽医科技, 1989, (1): 8-11.
- [19] 周长发. 中国大陆蜉蝣目分类研究[D]. 天津: 南开大学, 2002.
- [20] Bazzanti M. Sandy bottom macroinvertebrates in two moderately polluted stations of the River Treia (Central Italy): structural and functional organization. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 1991, 27(3): 287-298.
- [21] Nuttall P M. The effects of sand deposition upon the macroinvertebrate fauna of the River Camel, Cornwall. *Freshwater Biology*, 1972, 2(3): 181-186.
- [22] 孙小玲, 蔡庆华, 李凤清, 杨顺益, 谭路. 春季昌江大型底栖无脊椎动物群落结构及功能摄食类群的空间分布. 应用与环境生物学报, 2012, 18(2): 163-169.
- [23] 迟国梁, 赵颖, 官昭瑛, 王建武, 童晓立. 广东横石水河大型底栖动物群落与环境因子的关系. 生态学报, 2010, 30(11): 2836-2845.
- [24] 池仕运, 胡菊香, 陈胜, 张原圆. 三峡库区支流底栖动物群落结构研究. 水生态学杂志, 2011, 32(4): 24-30.
- [25] 江晶, 温芳妮, 王利肖, 邱爽, 李晓宇, 闫云君. 长江流域清江胡家溪四种蜉蝣优势种的周年生产量及其动态. 湖泊科学, 2013, 25(1): 147-155.
- [26] 池仕运, 陈胜, 汪红军, 马沛明, 胡菊香. 汉江中下游底栖动物群落结构特征研究. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 82-90.
- [27] 其木乐, 李宁, 孙瑜扬, 杨春江, 白露超. 青海湟水河上游大型底栖动物群落结构分析. 青海大学学报, 2019, 37(1): 1-8.
- [28] 郑文浩, 渠晓东, 张远, 孟伟. 太子河流域大型底栖动物栖适性. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1355-1363.
- [29] 张晏溧. 浑太河沉积物中重金属分布特征及其对大型底栖动物的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [30] 王军, 周琼, 谢从新, 李君, 韦丽丽. 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.
- [31] 龚成, 池仕运, 夏纬, 汪红军, 胡俊, 陈威, 胡菊香. 天鹅洲长江段底栖动物的群落结构与季节变化. 水生态学杂志, 2021, 42(1): 66-74.
- [32] 黄川, 娄霄鹏, 刘元元. 金沙江流域泥沙演变过程及趋势分析. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(1): 21-23.
- [33] 陈锋, 常剑波, 郭玉, 胡菊香, 赵先富. 长江源区水生生态调查及分析//2012 中国·青海绿色经济投资贸易洽谈会绿色发展高峰论坛暨三江源生态文明专题论坛论文集. 西宁: 青海省人民政府, 2012.
- [34] Ruhí A, Boix D, Gascón S, Sala J, Quintana X D. Nestedness and successional trajectories of macroinvertebrate assemblages in man-made wetlands. *Oecologia*, 2013, 171(2): 545-556.
- [35] Couceiro S R M, Hamada N, Forsberg B R, Padovesi-Fonseca C. Effects of anthropogenic silt on aquatic macroinvertebrates and abiotic variables in streams in the Brazilian Amazon. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(1): 89-103.

附录 1 金沙江上中段底栖动物名录

Appendix 1 List of macroinvertebrates in yhr upper and middle reaches of Jinsha River

| 类群 Group | 纲 Class | 目 Order | 科 Family | 物种 Taxa | 丰水期 Wet season | | 枯水期 Dry season | | |
|---------------|------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|---|
| | | | | | 干流 Main stream | 支流 Tributary | 干流 Main stream | 支流 Tributary | |
| 水生昆虫 | 昆虫纲 | 蜉蝣目 | 扁蜉科 | 扁蜉科 Heptageniidae | | | | + | |
| | | | | 扁蜉 <i>Ecdyrus</i> | | + | + | + | |
| | | | | 扁蜉属 <i>Ecdyonurus</i> | | + | | + | |
| | | | | 动蜉属 <i>Cinygma</i> | | | | + | |
| | | | | 高翔蜉属 <i>Epeorus</i> | + | + | | + | |
| | | | | 假蜉属 <i>Iron</i> | | | | + | |
| | | | | 似动蜉属 <i>Cinygmina</i> | | + | | + | |
| | | | | 微动蜉属 <i>Cinygmula</i> | | | | + | |
| | | | | 溪须蜉属 <i>Rhithrogena</i> | + | + | | + | |
| | | | | 亚非蜉属 <i>Afronurus</i> | | | + | + | |
| | | | 蜉蝣科 | 多瘤锐利蜉 <i>Ephaverella tylacantha</i> | | + | | | |
| | | | | 蜉蝣科 Ephemeraeidae | | | | + | |
| | | | | 蜉蝣属 <i>Ephemera</i> | | + | | + | |
| | | | | 美丽蜉属 <i>Epicharmeropsis</i> | | + | | | |
| | | | | 锐利蜉属 <i>Ephacera</i> | | | | + | |
| | | | | 小蜉科 | 小蜉科 Ephemereleidae | | | | + |
| | | | | | 带肋蜉属 <i>Cincticostella</i> | + | + | | + |
| | | | | | 锯形蜉属 <i>Serratella</i> | | | | + |
| | | | | | 弯握蜉属 <i>Drunella</i> | | + | | + |
| | | | | 四节蜉科 | 小蜉属 <i>Ephemerella</i> | + | + | | + |
| | | | 二翼蜉 <i>Cloeon dipterum</i> | | + | + | + | + | |
| | | | 花翅蜉属 <i>Baetiella</i> | | | + | + | + | |
| | | | 四节蜉科 Baetidae | | + | + | + | + | |
| | | | 四节蜉属 <i>Baetis</i> | | + | + | + | + | |
| | | | 等蜉科 | | 等蜉科 Isonychiidae | | | | + |
| | | | | | 等蜉属 <i>Isonychia</i> | | + | | |
| | | | | | 短丝蜉科 | 二尾蜉 <i>Siphionurus</i> | | + | + |
| | | | | | 河花蜉科 | 河花蜉科 Potamanthidae | | | + |
| | | | 广翅目 | | 细蜉科 | 细蜉 <i>Caenis</i> | | + | + |
| | | | | 细裳蜉科 | | 宽基蜉属 <i>Choroterpes</i> | | | + |
| | | | | 鱼蛉科 | 鱼蛉科 Corydalidae | | | + | |
| | | | | 鞘翅目 | 豉甲科 | 豉甲 <i>Orectochilus</i> | + | | |
| 豉甲科 Gyrinidae | | | | | | + | | | |
| 龙虱科 | 龙虱科成虫 Dytiscidae | 龙虱科成虫 Dytiscidae | + | | | | | | |
| | | 龙虱科幼虫 Dytiscidae | + | | | | | | |
| | 长角泥虫科 | 长角泥虫科成虫 Elmidae | | + | | + | | | |
| | | 长角泥虫科幼虫 Elmidae larva | | + | | | | | |
| 沼甲科 | 沼甲科 Scirtidae | | | | + | | | | |
| 蜻蜓目 | 春蜓科 | 春蜓科 Gomphidae | | | + | + | | | |
| | | 长足春蜓属 <i>Merogomphus</i> | + | + | | | | | |
| | 大蜻科 | 大伪蜻属 <i>Macromia</i> | + | | | | | | |
| 毛翅目 | 灯蛾蜉科 | 灯蛾蜉 <i>Oligonenriella rhenana</i> | + | + | + | + | | | |
| | | 等翅石蛾科 | 等翅石蛾科 Philopotamidae | | + | | + | | |
| | 碟石蛾科 | 碟石蛾科 Psychomyiidae | | + | | + | | | |

续表

| 类群 Group | 纲 Class | 目 Order | 科 Family | 物种 Taxa | 丰水期 Wet season | | 枯水期 Dry season | |
|-------------|------------|------------|-------------|--------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | | | | | 干流 Main stream | 支流 Tributary | 干流 Main stream | 支流 Tributary |
| | | | 短石蛾科 | 短石蛾科 <i>Brachycentridae</i> | | + | | + |
| | | | 多距石蛾科 | 多距石蛾科 <i>Polycentropodidae</i> | | | | + |
| | | | 角石蛾科 | 角石蛾科 <i>Stenopsychidae</i> | + | | | |
| | | | | 角石蛾属 <i>Stenopsyche</i> | | + | | + |
| | | | 纹石蛾科 | 似纹石蛾属 <i>Hydropsychodes</i> | + | + | | + |
| | | | | 纹石蛾科 <i>Hydropsychidae</i> | | | | + |
| | | | | 大纹石蛾属 <i>Macronema</i> | | + | | + |
| | | | | 纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> | + | + | + | + |
| | | | 舌石蛾科 | 舌石蛾科 <i>Glossosomatidae</i> | | | | + |
| | | | 石蛾科 | 低头石蚕属 <i>Neyreclipsis</i> | | | + | + |
| | | | | 石蚕 <i>Phryganea</i> | | + | | + |
| | | | 原石蛾科 | 喜马拉雅石蛾属 <i>Himalopsyche</i> | | | | + |
| | | | | 原石蛾属 <i>Phyacophila</i> | | | | + |
| | | | | 原石蛾科 <i>Rhyacophilidae</i> | | | | + |
| | | | 沼石蛾科 | 沼石蛾 <i>Halesochila</i> | | | | + |
| | | | | 沼石蛾科 <i>Limnophilidae</i> | | + | | |
| | | | 弓石蛾科 | 弓石蛾科 <i>Arctopsychidae</i> | | | | + |
| | | 襀翅目 | 短尾襀科 | 倍叉襀属 <i>Amphinemura</i> | | + | + | + |
| | | | | 叉襀属 <i>Nemoura</i> | | + | | + |
| | | | 黑襀科 | 黑襀科 <i>Capniidae</i> | | | | + |
| | | | 卷石蝇科 | 卷石蝇科 <i>Leuctridae</i> | | | | + |
| | | | 石蝇科 | 纯石蝇属 <i>Paragnetina</i> | | + | | + |
| | | | | 大石蝇属 <i>Pteronacys</i> | | | | + |
| | | | | 剑襀属 <i>Aagnetina</i> | | + | | + |
| | | | | 石蝇科 <i>Perlidae</i> | + | + | + | + |
| | | | 绿襀科 | 长绿襀属 <i>Sweltsa</i> | | | | + |
| | | 半翅目 | 盖蝽科 | 盖蝽科 <i>Aphelocheiridae</i> | + | | | |
| | | | 划蝽科 | 划蝽科 <i>Corixidae</i> | + | | + | |
| | | | | 小划蝽 <i>Sigarua substriata</i> | + | + | + | |
| | | | 潜水蝽科 | 潜水蝽科 <i>Naucoridae</i> | + | | | |
| | | 双翅目 | 虻科 | 虻科 <i>Tabanidae</i> | | | | + |
| | | | | 虻属 <i>Tabanus</i> | | + | | |
| | | | 蠓科 | 蠓科 <i>Ceratopogonidae</i> | + | + | | |
| | | | | 贝蠓属 <i>Bezzia</i> | + | + | | |
| | | | 蚋科 | 蚋科 <i>Simuliidae</i> | + | + | + | + |
| | | | | 蚋属 <i>Simulium</i> | | + | + | + |
| | | | 网蚊科 | 网蚊科 <i>Deuterophlebiidae</i> | | | | + |
| | | | 伪蚊科 | 伪蚊科 <i>Tanyderidae</i> | | + | + | |
| | | | 伪鹬虻科 | 伪鹬虻科 <i>Athericidae</i> | | | | + |
| | | | | 伪鹬虻属 <i>Atherix</i> | | | | + |
| | | | 蚊科 | 蚊科 <i>Culicidae</i> | + | + | | |
| | | | 舞虻科 | 舞虻科 <i>Empididae</i> | | + | + | + |
| | | | 大蚊科 | 朝大蚊属 <i>Antocha</i> | + | + | + | + |
| | | | | 大蚊科 <i>Tipulidae</i> | | | + | |
| | | | | 大蚊属 <i>Tipula</i> | | + | + | + |

续表

| 类群 Group | 纲 Class | 目 Order | 科 Family | 物种 Taxa | 丰水期 Wet season | | 枯水期 Dry season | |
|-------------|------------|------------|-------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | | | | | 干流 Main stream | 支流 Tributary | 干流 Main stream | 支流 Tributary |
| | | | | 花翅大蚊属 <i>Hexatoma</i> | + | + | | + |
| | | | | 双大蚊属 <i>Dicranota</i> | | | | + |
| | | | 摇蚊科 | 矮突摇蚊属 <i>Nanocladius</i> | | + | | + |
| | | | | 斑特突摇蚊属 <i>Thienemanimyia</i> | | + | + | + |
| | | | | 波摇蚊属 <i>Pothastia</i> | | | | + |
| | | | | 齿斑摇蚊属 <i>Stictochironomus</i> | | + | | |
| | | | | 粗腹摇蚊 <i>Pelopia</i> | | + | | + |
| | | | | 单寡角摇蚊属 <i>Monodiamesa</i> | | + | + | + |
| | | | | 刀突摇蚊属 <i>Psectrocladius</i> | | | + | |
| | | | | 倒毛摇蚊属 <i>Microtendipes</i> | | | + | + |
| | | | | 多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> | | + | + | + |
| | | | | 多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.1 | | + | + | + |
| | | | | 多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.2 | | + | + | + |
| | | | | 寡角摇蚊属 <i>Diamesa</i> | | + | | + |
| | | | | 环足摇蚊属 <i>Cricotopus</i> | + | + | + | + |
| | | | | 间摇蚊属 <i>Paratendipes</i> | | | | + |
| | | | | 列摇蚊属 <i>Platysmittia</i> | | + | | |
| | | | | 流水长跗摇蚊属 <i>Rheotanytarsus</i> | + | + | + | + |
| | | | | 毛突摇蚊属 <i>Chaetocladius</i> | | | | + |
| | | | | 拟毛突摇蚊属 <i>Paratrichocladius</i> | | | + | + |
| | | | | 拟突摇蚊属 <i>Paracladius</i> | | | + | |
| | | | | 拟枝角摇蚊属 <i>Paracladopelma</i> | | + | | + |
| | | | | 拟中足摇蚊属 <i>Parametricnemus</i> | | | | + |
| | | | | 帕摇蚊属 <i>Pagastia</i> | | | | + |
| | | | | 前突摇蚊 <i>Procladius</i> | + | + | | + |
| | | | | 趋流摇蚊属 <i>Rheocricotopus</i> | | | + | + |
| | | | | 水摇蚊属 <i>Hydrobaenus</i> | | | + | |
| | | | | 特维摇蚊属 <i>Tvetenia</i> | | | | + |
| | | | | 特维摇蚊属 <i>Tvetenia</i> sp.1 | | | + | + |
| | | | | 特维摇蚊属 <i>Tvetenia</i> sp.2 | | | | + |
| | | | | 提尼曼摇蚊属 <i>Thienemanniella</i> | | | + | |
| | | | | 心突摇蚊属 <i>Cardiocladius</i> | | | + | + |
| | | | | 摇蚊 <i>Saetheria</i> | | + | | + |
| | | | | 摇蚊 <i>Symphastia</i> | | | | + |
| | | | | 摇蚊属 <i>Chironomus</i> | + | + | | |
| | | | | 摇蚊蛹 <i>Chironomidae pupa</i> | | | | + |
| | | | | 异三突摇蚊属 <i>Heterotrissocladius</i> | | | + | |
| | | | | 异伪长足摇蚊 <i>Aspectrotanytus</i> | | | | + |
| | | | | 隐摇蚊 <i>Cryptochironomus</i> | | + | + | |
| | | | | 扎长足摇蚊属 <i>Zavrelimyia</i> | | | | + |
| | | | | 长跗摇蚊属 <i>Tanytarsus</i> | + | | + | + |
| | | | | 长足摇蚊 <i>Alotanytus</i> | + | + | | |
| | | | | 长足摇蚊 <i>Radotanytus</i> | | | | + |
| | | | | 真开氏摇蚊属 <i>Eukiefferiella</i> | | | | + |
| | | | | 直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> | + | + | + | + |

续表

| 类群 Group | 纲 Class | 目 Order | 科 Family | 物种 Taxa | 丰水期 Wet season | | 枯水期 Dry season | |
|-------------|------------|------------|-------------|--|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | | | | | 干流 Main stream | 支流 Tributary | 干流 Main stream | 支流 Tributary |
| | | | | 直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> sp.1 | | | + | + |
| | | | | 直突摇蚊 <i>Orthocladius</i> sp.2 | | | + | + |
| 软体动物 | 腹足纲 | 基眼目 | 膀胱螺科 | 尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i> | + | + | | + |
| | | | | 泉膀胱螺 <i>Physa fontinalis</i> | | + | | |
| | | | 扁蛭螺科 | 扁旋螺 <i>Gyraulus cimpressus</i> | | | + | |
| | | | 椎实螺科 | 椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i> | | + | + | |
| 寡毛类 | 寡毛纲 | 颤蚓目 | 颤蚓科 | 霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> | | | | + |
| | | | | 克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedeianus</i> | | + | | + |
| | | | | 正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i> | + | | | |
| | | | | 亨利蚓属 <i>Henlea</i> | | + | | |
| | | | 仙女虫科 | 等毛吻盲虫 <i>Pristina aquiseta</i> | | | + | + |
| | | | | 哑口仙女虫 <i>Nais elinguis</i> | + | | + | + |
| 甲壳动物 | 甲壳纲 | 端足目 | 钩虾科 | 钩虾属 <i>Gammarus</i> | | | + | + |
| 其他类群 | 蛭纲 | 无吻蛭目 | 舌蛭科 | 舌蛭科 <i>Glossiphoniidae</i> | + | | | + |