

DOI: 10.12264/JFSC2022-0200

金沙江下游沿岸区大型底栖动物群落结构及影响因素

茹辉军¹, 张燕¹, 吴湘香¹, 吴凡¹, 盛强², 李云峰¹, 倪朝辉¹

1 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部长江中上游渔业生态环境监测中心, 湖北 武汉 430223;

2 湖州师范学院, 生命科学学院, 浙江 湖州 313000

摘要: 为掌握金沙江下游区域底栖动物群落组成及资源现状, 探究影响群落结构的主要环境因子, 本研究于 2017—2018 年对金沙江下游四级梯级水库区域干、支流共计 16 个位点的沿岸区底栖动物群落进行了 3 次调查。共记录大型底栖动物 63 属种, 物种组成以节肢动物昆虫纲(Insecta)占优势, 占总分单元数的 66.7%。不同站点底栖动物分类单元在 1~22 之间, 不同水库区域乌东德库区最高, 溪洛渡库区最低, 不同季节夏季最高, 冬季最低。底栖动物总密度均值为 (201.6 ± 306.1) ind/m², 生物量 (3.2 ± 5.5) g/m², 且在不同水库区域呈差异显著。典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)表明, 金沙江下游沿岸区底栖动物群落组成的主要影响因子为底质、流速、海波和溶氧。总体来看, 金沙江下游沿岸区的大型底栖动物群落结构组成以节肢动物昆虫纲和环节动物门(Annelida)为主, 密度和生物量低于区域其他河流。干流生境由于流速较高, 生境底质单一, 大型底栖动物种类、密度和生物量均不高, 但区间支流底栖动物资源丰富, 对区域生物多样性起到重要的维持作用。基于本研究结果, 就金沙江下游水生生态保护提出以下建议: 开展长期的水生生物监测和生态影响评估; 保护河流沿岸带生境多样性; 统筹干、支流保护, 维持河流生态网络完整性。

关键词: 底栖动物; 金沙江; 水电开发; 群落结构; 水生生态保护

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)12-1679-14

河流是生物圈核心组成部分, 具有极高的社会和经济重要性。对人类生存与发展、水域生态多样性维持以及全球生物地化循环有着重要贡献。然而, 日益增多的大坝等水利设施使得河流生态系统面临功能日益退化, 生物多样性下降的威胁^[1]。金沙江指青海省玉树巴塘河口至四川省宜宾岷江口的长江干流, 流经青海、西藏、云南、贵州、四川 5 省, 全长约 2290 km, 山高谷深, 河谷多呈 V 型或 U 型, 具有高、深、曲、窄、陡的特色^[2]。它是长江上游重要的生态屏障区, 承担水源涵养、防风固沙和生物多样性保护等重要功能^[3]。特殊的自然条件和河流演化历史, 孕育出丰富而独特的生物区系, 分布鱼类 200 种^[4-5]。同

时, 金沙江流域蕴藏极为丰富的水能资源, 也是我国重要的水电基地和“西电东送”重要电源基地, 共规划有 19 座梯级电站。其中, 在金沙江下游干流规划有乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝 4 个梯级电站。水电开发在发挥巨大社会经济综合效益的同时, 也将改变河流水文情势, 使得金沙江下游段低流量提高, 高流量脉动散化^[6], 进而将对区域生态环境以及生物多样性产生深刻影响^[7-8]。

底栖动物作为生活史全部或大部分时间生活于水体底部的一类水生生物, 是水生态系统中重要的生态类群^[9]。其中, 大型底栖动物一般为不能通过孔径为 500 μ m 分样筛的底栖动物类群。在河流生态系统中, 底栖动物多样性高、分布广, 是碎

收稿日期: 2022-06-20; 修订日期: 2022-09-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409262); 中国长江三峡集团公司项目(201803081).

作者简介: 茹辉军(1980-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为渔业生态环境保护. E-mail: hjru@yfi.ac.cn

通信作者: 倪朝辉, 研究员, 研究方向为鱼类保护生物学. E-mail: zhaohui_ni@126.com

表 1 金沙江下游干流各采集站点信息
Tab. 1 Sampling site information in the lower Jinsha River

库区 reservoir area	河流级别 river rank	站位编码 site code	样点位置 site location	经纬度 longitude and altitude
乌东德 Wudongde	一级支流 1st-order tributary	YL	雅砻江河口	N26°36'22.56" E101°48'00.99"
	干流 mainstream	JB	江边乡	N25°57'40.64" E101°52'54.22"
	一级支流 1st-order tributary	LC	龙川江河口	N25°57'05.83" E101°52'54.66"
	干流 mainstream	JP	皎平渡	N26°17'45.67" E102°23'05.43"
	一级支流 1st-order tributary	SY	鲹鱼河河口	N26°27'46.04" E102°32'54.44"
白鹤滩 Baihetan	干流 mainstream	JZ	金坪子	N26°18'31.39" E102°38'11.61"
	一级支流 1st-order tributary	PD	普渡河	N25°29'56.51" E102°34'41.08"
	一级支流 1st-order tributary	XJ	小江河口	N26°31'05.36" E103°03'33.83"
	干流 mainstream	DC	东川渡口	N26°31'13.10" E103°03'08.51"
	一级支流 1st-order tributary	HS	黑水河河口	N26°57'56.36" E102°52'33.54"
溪洛渡 Xiluodu	干流 mainstream	FJ	冯家坪	N27°22'29.21" E102°59'21.60"
	一级支流 1st-order tributary	NL	牛栏江河口	N27°24'17.64" E103°09'03.63"
	干流	SW	沙湾	N27°25'36.36" E103°08'20.99"
向家坝 Xiangjiaba	干流 mainstream	FT	佛滩村	N28°14'05.10" E103°41'22.09"
	干流 mainstream	SJ	绥江	N28°37'31.75" E103°54'55.39"
	干流 mainstream	BS	向家坝坝上	N28°38'43.62" E104°22'23.94"

1.2 样品采集与处理

1.2.1 水体理化和生境参数测定 现场使用手持 Garmin GPS 仪对经纬度(longitude and latitude)和海拔(elevation, Ele)进行测量;使用 YSI EXO2 便携式多参数水质分析仪对水温(water temperature, WT)、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、电导率(conductivity, Con)、浊度(turbidity, Tur)和叶绿素 a (chlorophyll a, Chl-a)进行测定;使用 Global Water FP-211 直读式流速仪在采集点对流速(water velocity, WV)进行测定。对采集点底质(substrate, Sub)分为 5 类^[20]: (1) 淤泥和黏土(silt plus clay, <0.06 mm); (2) 沙(sand, 0.06~2 mm); (3) 砾石(pebbles plus gravel, 2~64 mm); (4) 卵石(cobble, 64~256 mm); (5) 巨石(boulder, >256 mm), 并在每一采样点目测估算每一类型底质占比, 以量化采集点底质粒径。

1.2.2 底栖动物采集与鉴定 根据多生境采样原则采集底栖动物。使用 Suber 网(面积 30 cm×30 cm, 网衣 40 目)在河流沿岸带进行定量采集。将 Suber 网逆水流方向固定于采集点, 将采样框内的底质翻动, 使底栖动物顺着水流方向进入网内。每个生境类型重复采集 2~3 次。此外, 在各采集点周围使用 30 cm 开口直径、40 目网衣孔径手抄 D 型网(D-frame net)进行多生境定性采集。样品经 60

目分样筛洗净后, 将剩余物倒入自封袋, 并低温保存运回。运回后将底栖动物样品置入白瓷盘分拣入标本瓶, 使用 5%~8%的甲醛缓冲液保存。在实验室, 样品经显微镜和体视显微镜依据相关文献^[21-26]进行鉴定, 对同一分类单元个体进行计数, 其后使用滤纸吸取底栖动物表面的液体, 使用精度为 0.0001 g 天平进行称重。

1.3 数据处理与分析

底栖动物优势种确定应用优势度指数(Y)

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

式中, n_i 为第 i 种的个体数, N 为该点位底栖动物个体总数, f_i 为第 i 种在该点位的出现频率。本研究以 $Y\geq 2\%$ 作为优势种。

分析检验不同江段理化因子以及底栖动物密度和生物量差异。考虑到底质参数具有选择性, 未参与差异显著性检验。分析前先对原始数据进行 $\lg(x+1)$ 正态转化, 其后采用单因素方差(one-way ANOVA)或 Kruskal-Wallis 检验(数据非正态分布或方差不齐性时)。采用非参数多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS)及多响应置换过程(multi-response permutation procedures, MRPP)用于分析及检验不同水库区域底栖动物群落组成差异性。采用典范排序分析底栖动物群落

组成与环境因子之间相互关系。首先运用去势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)判断数据适合线性分析还是单峰梯度分析。本研究计算结果排序轴最大值超过 3, 因此通过典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)进行分析。数据分析之前, 对除 pH 外的所有理化环境因子进行数据标准化。基础数据整理分析在 Excel 2019 中进行, 其他统计分析均在 R 软件中完成(Version 4.1.0, R development Core Team)。

2 结果与分析

2.1 环境因子特征

调查期间金沙江下游各采集区域的主要水文环境因子如表 2 所示。结果显示, pH、浊度、叶绿素 a 和流速在不同库区区域具有显著差异。白鹤滩库区 pH 显著低, 而浊度、叶绿素 a 和流速显著高。其他参数差异不明显。

2.2 底栖动物群落组成与时空分布

3 次共采集底栖动物 5 门 8 纲 63 属种(附录

1), 群落组成主要以节肢动物昆虫纲(Insecta)和环节动物门(Annelida)为主, 分别占总分类单元数的 66.7%和 14.3%, 软体动物门仅采集到 7 种, 占总数 11.1%。其中, 昆虫纲主要为双翅目(Diptera)(18 种)、蜉蝣目(Ephemeroptera)(7 种)和毛翅目(Trichoptera)(6 种)。

不同站点底栖动物分类单元数均值 8.6 ± 7.2 , 范围 1~22。在不同水库区域, 乌东德库区最高, 溪洛渡库区最低。不同季节, 夏季最高, 秋季次之, 冬季最低(图 2)。3 次采集共同出现的有水丝蚓属(*Limnodrilus* sp.)、舌蛭属(*Glossiphonia* sp.)、萝卜螺属(*Radix* sp.)、纹石蛾(*Hydropsyche* sp.)、四节蜉(*Baetis* sp.)、扁螭蜉(*Ecdyonurus* sp.)、多足摇蚊属(*Polypedilum* sp.)共 7 个分类单元。

底栖动物优势种如表 3 和表 4 所示, 优势度 $\geq 2\%$ 的共计 12 种(类), 其中纹石蛾(*Hydropsyche* sp.)优势度最高。优势种类在不同季节和区域存在差异, 夏季优势种主要为萝卜螺属、摇蚊属(*Chironomus* sp.)、米虾属(*Caridina* sp.)、水丝蚓属等; 秋

表 2 金沙江下游各采集区域环境参数

Tab. 2 Environmental parameters of different reservoir areas in the lower Jinsha River

$\bar{x} \pm SD$

环境参数 environmental parameter	水库区域 reservoir area				F	P
	乌东德 Wudongde	白鹤滩 Baihetan	溪洛渡 Xiluodu	向家坝 Xiangjiaba		
海波/m elevation	1077.0 $\pm$ 278.6 ^a (898–1620)	887 $\pm$ 354.5 ^b (659–1570)	617.7 $\pm$ 22.6 ^c (588–641)	367.7 $\pm$ 6.9 ^d (360–376)	38.35	<0.001
水温/°C water temperature	20.0 $\pm$ 3.6 (9.0–26.1)	20.2 $\pm$ 3 (10.8–23.0)	20.9 $\pm$ 2.2 (15.0–23.1)	21.5 $\pm$ 1.7 (17.3–22.7)	1.29	0.279
pH	8.2 $\pm$ 0.1 ^a (8.1–8.4)	8.1 $\pm$ 0.3 ^b (7.4–8.5)	8.2 $\pm$ 0.1 ^a (8.2–8.4)	8.2 $\pm$ 0.1 ^{ab} (8.1–8.4)	2.7	0.049
溶氧/(mg/L) dissolved oxygen	8.8 $\pm$ 1.5 (7.2–12.1)	8.4 $\pm$ 1.2 (5.7–10.7)	9.0 $\pm$ 0.4 (8.5–9.9)	8.9 $\pm$ 0.7 (7.8–9.7)	1.518	0.214
浊度/FNU turbidity	145.8 $\pm$ 161.7 ^a (29.9–600.5)	381 $\pm$ 431.8 ^b (25.2–1206.8)	109.7 $\pm$ 71.5 ^a (19.0–261.8)	11.1 $\pm$ 6.3 ^a (2.2–20.3)	9.045	<0.001
电导率/(μ S/cm) conductivity	350.5 $\pm$ 141.1 (174.0–615.4)	342.5 $\pm$ 78 (199.0–475.3)	345.2 $\pm$ 35.7 (300.1–399.8)	349.9 $\pm$ 21.1 (322.6–387.2)	0.047	0.986
叶绿素 a/(μ g/L) chlorophyll a	0.7 $\pm$ 0.4 ^a (0.3–1.7)	1.8 $\pm$ 1.8 ^b (0.3–5.2)	0.7 $\pm$ 0.3 ^a (0.4–1.1)	0.7 $\pm$ 0.5 ^a (0.2–1.9)	5.84	0.001
底质粒径/mm substrate size*	10.3 $\pm$ 28.1 (0.3–80.0)	19.3 $\pm$ 34.9 (0.1–90.0)	0.1 $\pm$ 0.1 (0.1–0.2)	8.2 $\pm$ 13.8 (0.1–24.1)	–	–
流速/(m/s) water velocity	0.8 $\pm$ 0.6 ^{ab} (0–1.9)	1.2 $\pm$ 0.7 ^b (0–2.0)	0.4 $\pm$ 0.6 ^a (0.1–1.9)	0.4 $\pm$ 0.7 ^a (0–1.8)	3.958	0.0134

注: *表示未参与差异性分析。括号内数字表示范围。同行不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: * indicates data are not conducted with the significance difference test. Figures in the brackets indicate range of the data. Different letters in the same row indicate significant difference ($P < 0.05$).

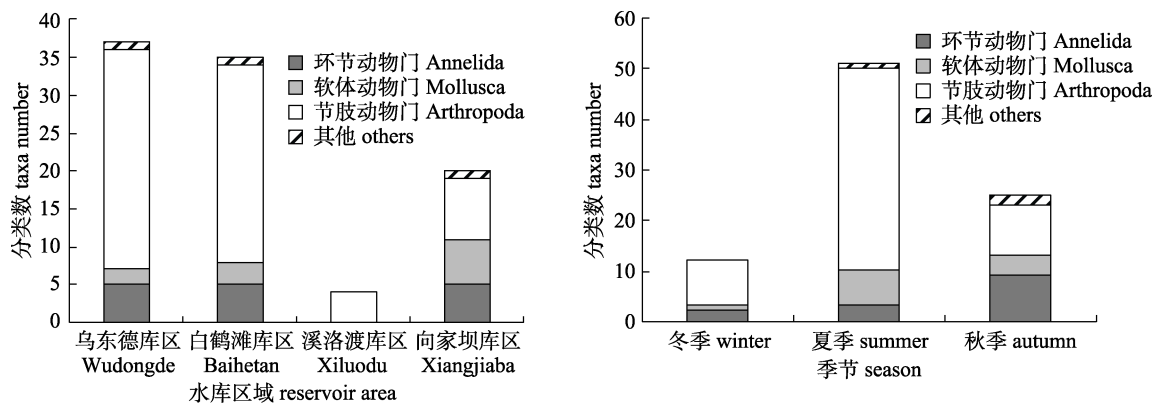


图 2 金沙江下游大型底栖动物分类数时空分布

Fig. 2 The spatial-temporal distribution of macrozoobenthos taxa number in the lower Jinsha River

表 3 金沙江下游不同季节底栖动物优势种及优势度分布

Tab. 3 Dominant species of macrozoobenthos and their degree of dominance in different seasons in the lower Jinsha River				
门类 category	优势种 dominate species	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
环节动物 Annelida	八目石蛭 <i>Erpobdella octoculata</i>		0.04	
	水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i> sp.	0.02	0.07	
	颤蚓属 <i>Tubifex</i> sp.		0.06	
软体动物 Mollusca	萝卜螺属 <i>Radix</i> sp.	0.05		
	尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i>	0.02		
甲壳动物 Crustacea	米虾属 <i>Caridina</i> sp.	0.04		
水生昆虫 Aquatic insect	扁蜉属 <i>Heptagenia</i> sp.		0.02	0.04
	四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.		0.04	0.05
	花翅蜉属 <i>Baetiella</i> sp.		0.02	
	纹石蛾 <i>Hydropsyche</i> sp.			0.28
	小纹石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp.			0.06
	摇蚊属 <i>Chironomus</i> sp.	0.05		

表 4 金沙江下游不同区域底栖动物优势种及优势度分布

Tab. 4 Dominant species of macrozoobenthos and their degree of dominance in different areas in the lower Jinsha River					
门类 category	优势种 dominate species	乌东德库区 Wudongde	白鹤滩库区 Baihetan	溪洛渡库区 Xiluodu	向家坝库区 Xiangjiaba
环节动物 Annelida	颤蚓属 <i>Tubifex</i> sp.		0.03		
	水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i> sp.				0.19
	八目石蛭 <i>Erpobdella octoculata</i>		0.05		
软体动物 Mollusca	萝卜螺属 <i>Radix</i> sp.	0.03	0.04		0.08
甲壳动物 Crustacea	米虾属 <i>Caridina</i> sp.	0.06			
水生昆虫 Aquatic insect	蜉蝣 <i>Ephemeroptera</i> spp.	0.04	0.06		
	纹石蛾 <i>Hydropsyche</i> sp.	0.05	0.12		
	摇蚊 <i>Chironomidae</i> spp.	0.19	0.06	0.18	0.20

季优势种主要为水丝蚓属、颤蚓属(*Tubifex* sp.)和八目石蛭(*Erpobdella octoculata*)等; 冬季优势种主要为纹石蛾、小纹石蛾(*Cheumatopsyche* sp.)及四节蜉等。在乌东德和溪洛渡区域主要是摇蚊

(*Chironomidae* spp.), 白鹤滩区域主要是纹石蛾, 而在向家坝区域主要是水丝蚓属和摇蚊。

2.3 底栖动物群落密度和生物量比较

采集期间金沙江下游各站点底栖动物总密度

均值(201.6 ± 306.1) ind/m², 范围 4.0~1217.4 ind/m², 最低在夏季 NL 站点, 最高在冬季 LC 站点; 生物量(3.2 ± 5.5) g/m², 范围 0.01~21.9 g/m², 最低在秋季 FJ 站点, 最高在夏季 PD 站点。不同水库区域

底栖动物密度和生物量如图 3 所示。K-W 检验表明, 不同水库区域底栖动物的密度($H=8.77$, $P<0.05$)和生物量($H=8.77$, $P<0.05$)差异显著, 乌东德和白鹤滩较溪洛渡库区显著高。

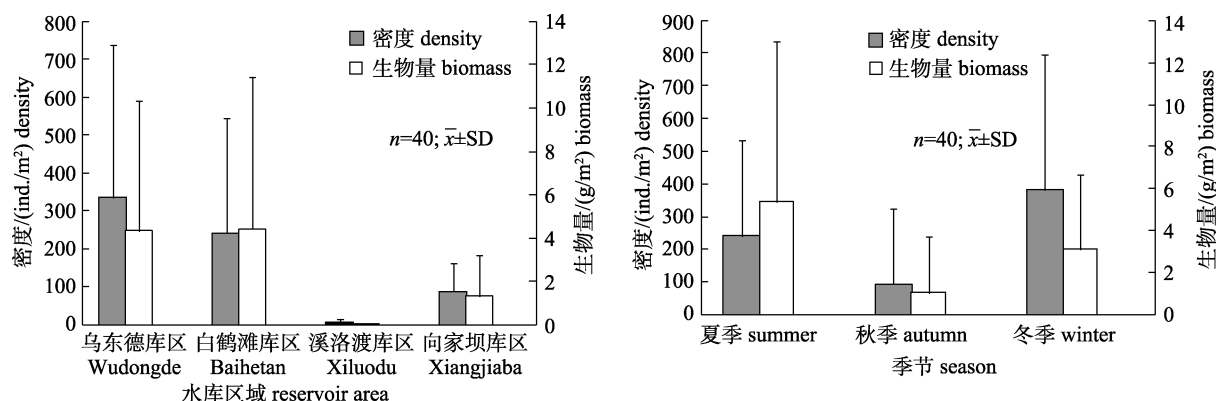


图 3 金沙江下游大型底栖动物密度和生物量时空分布

Fig. 3 The spatial-temporal distribution of macrozoobenthos density and biomass in the lower Jinsha River

2.4 底栖动物群落结构比较

底栖动物群落 NMDS 排序结果显示, 底栖动物群落组成存在明显的季节差异, stress 值为 0.14 (图 4)。其中, 夏季底栖动物群落主要分布在第四象限; 秋季底栖动物主要分布在第一、二象限; 冬季主要分布在第二象限。多响应置换过程(MRPP)结果表明, 不同季节底栖动物群落差异存在显著性($P<0.05$)。

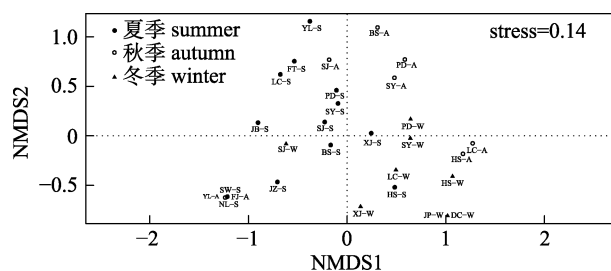


图 4 金沙江下游不同季节大型底栖动物群落结构的非度量多维标度排序
站位编码注释见表 1。

Fig. 4 The non-metric multidimensional scaling ordination (NMDS) of macrozoobenthos communities across seasons in the lower Jinsha River
Site codes are explained in tab.1.

2.5 底栖动物与环境因子的关系

CCA 分析结果显示(图 5), 第一轴和第二轴的特征值分别为 0.77 和 0.57, 能够解释物种与环

境因子累计方差的 62.8%, 表明前两轴可解释较多环境因子对底栖动物群落的影响。金沙江下游沿岸区底栖动物群落主要影响因子为 Sub、WV、Ele 和 DO, 其中与第一轴相关性较强的环境因子为 Sub 和 WV ($P<0.001$); 与第二轴相关性较强的环境因子为 Ele 和 DO ($P<0.01$)。

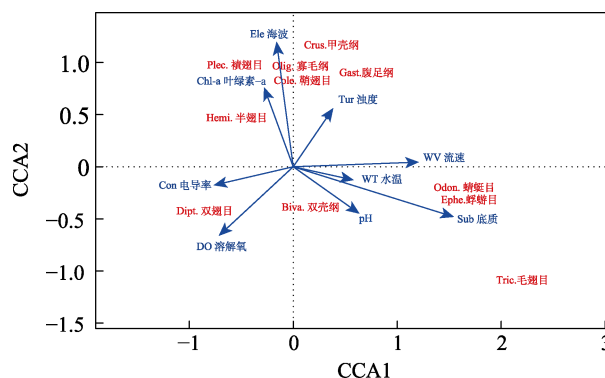


图 5 金沙江下游大型底栖动物群落与环境因子的 CCA 排序图

Biva: 双壳纲; Cole: 鞘翅目; Crus: 甲壳纲; Dipt: 双翅目; Ephe: 蜉蝣目; Gast: 腹足纲; Hemi: 半翅目; Odon: 蜻蜓目; Olig: 寡毛纲; Plec: 襁翅目; Tric: 毛翅目。

Fig. 5 CCA ordination of macrozoobenthos communities and environmental factors in the lower Jinsha River

Biva: Bivalvia; Cole: Coleoptera; Crus: Crustacea; Dipt: Diptera; Ephe: Ephemeroptera; Gast: Gastropoda; Hemi: Hemiptera; Odon: Odonata; Olig: Oligochaeta; Plec: Plecoptera; Tric: Trichoptera.

3 讨论

3.1 底栖动物群落结构变化

有关长江上游底栖动物研究最早可见学者梁彦龄^[27]于 20 世纪 80 年代对长江底栖寡毛类的报道, 其后 Xie 等^[10]对上游重庆至宜昌段底栖动物进行了报道。然而迄今, 上游金沙江流域底栖动物的系统研究还鲜有报道(仅见长江流域相关综合^[28])。长期以来金沙江被认为不适宜底栖动物生存, 这与其高流速、高浊度及复杂的河流环境有关。本研究通过 3 个季节对金沙江下游区域 16 个点位沿岸带进行调查, 对金沙江下游干流沿岸带底栖动物物种组成、群落结构时空动态及主要影响环境因子进行了系统研究。调查采集到底栖动物 63 种, 与 Xie 等^[10]相比, 种类数略高, 但类群组成比例却有较大差异。长江上游重庆至宜昌调查中, 物种组成主要以寡毛类为主, 而此次调查中水生昆虫大为增加(42 种)。分析原因可能与调查方式和样点设置的差异有关。首先, 本研究主要使用 Suber 网在河流可涉水区域进行; 其次, 本研究增加区间支流的调查, 对以卵石、砾石适合水生昆虫生存的生境调查有所增加。将本次调查结果与同区域其他河流相比, 种类数与主要支流黑水河调查结果较为接近^[29], 但较另一支流安宁河偏低^[30], 这可能与河流生境差异大以及采集频率的多寡有关。

结果显示, 金沙江下游沿岸区底栖动物优势种主要以水生昆虫和寡毛类为主, 在不同季节亦有差异。夏季在乌东德鲮鱼河和白鹤滩黑水河静水区域出现较多萝卜螺, 在其他采样点也不同程度的出现, 说明萝卜螺既是优势种也是区域常见种类。夏、秋节的寡毛类主要出现在向家坝库区、乌东德区域鲮鱼河和白鹤滩普渡河, 一方面是库区底质多淤泥底质, 适宜寡毛类栖息生存; 另一方面, 由于水丝蚓属、颤蚓属均属耐污种, 因此也反映出支流河段的一些污染情况。相应地, 由群落排序结果可知, 无论是底栖动物的整体群落, 还是单一站点群落, 均显示显著的季节差异, 这也说明底栖动物群落组成与水域环境变化及区域人为干扰程度密不可分。

与区域相关研究相比, 金沙江下游大型底栖

动物密度远低于这些河流, 生物量也较这些河流低, 与长江上游大体相同^[10], 在 $2\sim 3\text{ g/m}^2$ 。这也反映河流特征与生物分布间密切的关系。金沙江属典型深谷河流, 浊度高, 流速大, 底质主要以细沙及粗砂为主。调查期间笔者也观察到虽然较多采集点存在一定自然生境, 但沿岸生境较为单一, 岸坡陡峭, 水位变化大, 尤其在溪洛渡库区区域, 这些因素对底栖动物的生存和分布均是不利的。而沿岸生境较为丰富的样点, 例如黑水河口, 底栖动物物种则较为丰富。本研究中底栖动物密度和生物量在季节间差异不显著。而在区域间, 乌东德和白鹤滩区域密度和生物量均高于下游两个库区区域, 分析原因应为乌、白二区域众多支流的生物分布丰富了区域生物资源的多样性, 如乌东德区域龙川江和江边乡, 白鹤滩区域普渡河口均具有较高的底栖动物密度。从这点来看, 保持干流区间支流的自然生境条件对区域生物多样性及分布有着重要意义。

3.2 底栖动物群落与环境因子关系

宏观上, 流域气候、河流地理形态特征以及沿岸土地利用特征等均可影响河流底栖动物长期分布, 而河流物理特征如海波^[31-32]、底质构成^[33]、流速^[16]、水文连通性^[34]以及化学因子^[35]等与底栖动物群落组成有直接关系。本研究显示金沙江下游底栖动物群落结构主要受环境因子 Sub、WV、Ele 和 DO 影响($P<0.001$), 这与其他河流环境因子影响底栖动物的认识较为一致, 底质对底栖动物的影响作用主要体现在底质的密实性、稳定性和异质性层面上^[33]。本研究中蜻蜓目、蜉蝣目和毛翅目昆虫与 Sub 和 WV 具较强正相关, 说明流水生境中卵石、砾石等这些便于这些昆虫附着和栖息的基质有利于多样的水生昆虫生存, 为其提供了较为稳定的栖息环境^[36]。淤泥虽含氧较低, 但为富有机质的软泥, 利于颤蚓科寡毛类和摇蚊亚科幼虫等类群的生存。因此, 该类群在底质多淤泥的向家坝库区采集点如绥江、坝上则更为丰富。

海波作为影响区域气候、光照及植被分布等的环境因子, 对物种分布形成影响。本研究中, 研究区域自上而下海波跨度较大(1620~360 m), 并且干流沿岸植被亦随海波的降低表现出了逐渐增

加的趋势。虽然物种丰富度与海波并未呈现线性相关关系,但不同海波采集点底栖动物群落组成明显存在不同。本研究中 DO 为影响底栖动物群落的另一主要因素,也反映出 DO 与河流生境质量密切相关。DO 一般与河流流态及污染情况有关,在急流态以及未受污染河流中 DO 含量较高^[37]。高 DO 含量的河流中水生昆虫丰富度则较高,较多出现如蜻蜓目、蜉蝣目和毛翅目等水生昆虫清洁种。而本研究中鲢鱼河静水区域呈现较低 DO,出现淡水腹足类(萝卜螺),该物种为耐污种;龙川江和普渡河水体环境较差,亦呈现较低 DO,并存在大量寡毛类水丝蚓属等耐污种。

3.3 金沙江下游水生态保护与恢复

金沙江下游流域是典型的生态脆弱区,也是长江上游重要的生态屏障^[3],其生态环境变化更值得关注,但目前除鱼类外的其他生物类群基础资料仍十分缺乏。底栖动物作为水域生态系统中重要的次级生产者,可支持水域食物网,维持水域渔业资源^[9,38]。如前人所述特征,在本次调查中干流生境由于流速较大,沿岸生境底质单一等因素,大型底栖动物的种类及现存量一般不高,但区间支流底栖动物资源较为丰富,对区域生物多样性起到重要维持作用。基于本研究,笔者就水利开发等人类活动加剧背景下的金沙江下游水生态保护提出建议:(1)积极开展长期的水生生物监测和生态影响评估工作;(2)加强河流沿岸生境保护,如沿岸湿地生境、滩洲等,维持河流生境多样性;(3)从维持生物多样性角度,应统筹干支流保护,在干流密集开发背景下,加大区域重要支流如黑水河、鲢鱼河等支流的水生态环境保护 and 修复工作,维持河流生态网络完整性。

致谢: 本研究野外调查期间得到沈子伟、李荣、杜开开、杨传顺、余丽梅、杨兵、杨晓江等人帮助,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Palmer M, Ruhi A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration[J]. Science, 2019, 365(6459): eaaw2087.
- [2] Hydrological Bureau of Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Changjiangzhi: River System[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2003: 63. [长江水利委员会水文局. 长江志: 水系[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2003: 63.]
- [3] Zheng J X, Gao S B, Chi S Y, et al. Hydro-ecological assessment and protection strategies of Jinsha River downstream[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(9): 174-179, 204. [郑金秀, 高少波, 池仕运, 等. 金沙江下游水生态状况评价及保护战略[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 174-179, 204.]
- [4] Wu J, Wu M S. Fish fauna of Jinsha River[J]. Sichuan Journal of Zoology, 1990, 9(3): 23-26. [吴江, 吴明森. 金沙江的鱼类区系[J]. 四川动物, 1990, 9(3): 23-26.]
- [5] Zhang C G, Yang J X, Zhao Y H. Fishes in the Jinsha Jiang River Basin, the Upper Reaches of the Yangtze River, China[M]. Beijing: Science Press, 2019. [张春光, 杨君兴, 赵亚辉. 金沙江流域鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [6] Wang B, Huang W, Yin Z J. On ecological flow impact of large cascade reservoirs—a case study on lower Jinsha River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(9): 860-864. [王波, 黄薇, 尹正杰. 大型梯级水库对河流生态流量的影响——以金沙江下游梯级为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 860-864.]
- [7] Chen D Q, Chang J B, Gu H B. Impacts of Jinsha River first stage project on ecology and environment of nature reserve and its countermeasures[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(2): 21-24. [陈大庆, 常剑波, 顾洪宾. 金沙江一期工程对保护区生态环境的影响与对策[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(2): 21-24.]
- [8] Zhou X D, Li G F, Wang L X, et al. Advance in Hydraulics and Hydroinformatics in China-2009[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2009: 63-69. [周孝德, 李桂芬, 王连祥, 等. 水力学与水利信息学进展-2009[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009.]
- [9] Liu J K. Advanced Aquatic Biology[M]. Beijing: Science Press, 1999. [刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [10] Xie Z C, Liang Y L, Wang J, et al. Preliminary studies of macroinvertebrates of the mainstream of the Changjiang (Yangtze) River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1999, 23(suppl.): 148-157.
- [11] Smith M J, Kay W R, Edward D H D, et al. AusRivAS: Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 269-282.

- [12] Rafia R, Ashok K P. Macroinvertebrates (oligochaetes) as indicators of pollution: A review[J]. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 2014, 6(4): 140-144.
- [13] Peng Z H, He X B, Feng W S, et al. Macrozoobenthic community structure in different types of habitat, Zhenjiang reach, the Yangtze River, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(4): 433-438. [彭增辉, 何雪宝, 冯伟松, 等. 长江镇江段不同生境类型底栖动物群落结构研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(4): 433-438.]
- [14] Chen X F, Xia W, Pan B Z, et al. Community structure characteristics of macroinvertebrate from Yichang to Wuhan in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(5): 973-981. [陈秀粉, 夏伟, 潘保柱, 等. 长江中游宜昌至武汉段底栖动物群落结构特征研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 973-981.]
- [15] Wu C, Xu J, Yin S L, et al. The littoral zone macroinvertebrate distribution in relation to environment variables in the Lower Yangtze River Channel from Nanjing to the estuary[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(3): 553-560. [吴聪, 徐靖, 银森录, 等. 长江下游南京段至河口近岸带底栖动物分布格局及影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(3): 553-560.]
- [16] Ma Y X, Yao W L, Yuan S B, et al. Community structure and environmental analysis of macrozoobenthos in Yichang-Anqing reaches of the Yangtze mainstem[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(3): 634-642. [马雅雪, 姚维林, 袁赛波, 等. 长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(3): 634-642.]
- [17] Gong T D, Yang W J, He T, et al. Investigation on water quality and community structure of aquatic organisms at ShuiFu section in Jin-Sha River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(4): 25-34. [龚廷登, 杨伟阶, 何滔, 等. 金沙江水富段水生生物的群落结构及水质监测[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(4): 25-34.]
- [18] Xu C J, Fan K X, Xiao T G. Runoff characteristics and variation tendency of Jinsha River Basin[J]. *Yangtze River*, 2010, 41(7): 10-14, 51. [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[J]. *人民长江*, 2010, 41(7): 10-14, 51.]
- [19] Lu L, Wang Q, Wang G Q, et al. Trend of climate change over the recent 60 years and its hydrological responses for Jinsha River Basin[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2016, 37(5): 16-21. [卢璐, 王琼, 王国庆, 等. 金沙江流域近 60 年气候变化趋势及径流响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(5): 16-21.]
- [20] Barbour M T. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish[M]. 2nd ed. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [21] Dalian Institute of Aquaculture. Freshwater Biology-Volume 1 (Taxonomy)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1982: 1-346. [大连水产学院. 淡水生物学-上册(分类学部分)[M]. 北京: 农业出版社. 1982: 1-346.]
- [22] Wang H Z. Studies on taxonomy, distribution and ecology of microdrile oligochaetes of China, with descriptions of two new species from the vicinity of the Great Wall Station of China, Antarctica[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. [王洪铸. 中国小蚓类研究附中国南极长城站附近地区两新种[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [23] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality-Volume 13[M]. Nanjing: Hohai University Press. 1994: 1-570.
- [24] Epler J H. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina[M]. Special Publication SJ2001-SP13. North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Raleigh, NC, and St. Johns River Water Management District, Palatka, FL. 2001: 1-526.
- [25] Liu Y Y. Chinese Economic Animal-Freshwater Mollusca[M]. Beijing: Science Press. 1979: 1-134. [刘月英. 中国经济动物志-淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社. 1979: 1-134.]
- [26] Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X. Medical Shellfish[M]. Beijing: China Ocean Press. 1993: 1-156. [刘月英, 张文珍, 王耀先. 医学贝类学[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-156.]
- [27] Liang Y L. Preliminary study of the aquatic Oligochaeta of the Changjiang (Yangtze) River[J]. *Hydrobiologia*, 1987, 155(1): 195-198.
- [28] He Y J, Wang H Z, Shu F Y, et al. Macro-patterns of species diversity and standing crops of macrozoobenthos in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(S1): 9-17. [和雅静, 王洪铸, 舒凤月, 等. 长江流域底栖动物资源的宏观格局[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(S1): 9-17.]
- [29] Lü Y N, Xie Y, Wang S M, et al. Studies about Heishui River as an alternative habitat for aquatic biodiversity protection based on macroinvertebrate community similarity[J].

- China Environmental Science, 2020, 40(6): 2647-2657. [吕雅宁, 解莹, 王少明, 等. 基于底栖动物群落相似性的黑水河替代生境的研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2647-2657.]
- [30] 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.]
- [31] 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.]
- [32] Xu M Z, Zhao N, Zhou X D, et al. Macroinvertebrate biodiversity trends and habitat relationships within headwater rivers of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Water*, 2018, 10(9): 1214.
- [33] Duan X H, Wang Z Y, Tian S M. Field experiment on the effect of streambed substrate on macroinvertebrate diversity[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, 47(9): 1553-1556. [段学花, 王兆印, 田世民. 河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(9): 1553-1556.]
- [34] Pan B Z, Wang H J, Liang X M, et al. Macrozoobenthos in Yangtze floodplain lakes: Patterns of density, biomass, and production in relation to river connectivity[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(2): 589-602.
- [35] Qu X D, Cao M, Shao M L, et al. Macrobenthos in Jinping reach of Yalongjiang River and its main tributaries[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 158-162. [渠晓东, 曹明, 邵美玲, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 158-162.]
- [36] Bunn S E, Davies P M. Why is the stream fauna of south-western Australia so impoverished?[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 194(2): 169-176.
- [37] Allan J D, Castillo M M. *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*[M]. 2nd ed. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2007
- [38] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J]. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.

Macrozoobenthos community structure and its relationship with environmental factors in the riparian zone of the lower Jinsha River

RU Huijun¹, ZHANG Yan¹, WU Xiangxiang¹, WU Fan¹, SHENG Qiang², LI Yunfeng¹, NI Zhaohui¹

1. Fishery Eco-Environment Monitoring Center in Middle and Upper Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Science, Wuhan 430223, China;

2. College of Life Sciences, Huzhou University, Huzhou 313000, China

Abstract: The Jinsha River basin has been marked as an ecological shelter and functional critical region of the upper Yangtze River. It undertakes a variety of important functions, including biodiversity conservation. However, studies on the species composition and community structure of macrozoobenthos in this region are still very limited. To systematically understand the composition and resource status of macrozoobenthos in the lower Jinsha River and to explore the main environmental factors affecting the community structure, the macrozoobenthos of 16 sites in the riparian zone of the mainstream and its tributaries within the four cascade reservoirs along the lower Jinsha River were surveyed three times in 2017–2018. A total of 63 taxa of macrozoobenthos were recorded, and the species composition was mainly aquatic insects, accounting for 66.7% of the total taxa. The number of taxa was between 1 and 22 among the sampling sites. In terms of different reservoir areas, it was the highest within the Wudongde reservoir area and the lowest within the Xiluodu reservoir area. Among different seasons, it was the highest in summer and the lowest in winter. *Hydropsyche* sp. had the highest dominance among the species, and the dominant species differed across the seasons. The mean density and biomass of macrozoobenthos were (201.6 ± 306.1) ind./m² and (3.2 ± 5.5) g/m², respectively, with significant differences in different reservoir areas. The CCA (canonical correspondence analysis) results showed that the key affecting factors of macrozoobenthos community composition in the lower Jinsha River were substrate (Sub), water velocity (WV), elevation (Ele), and dissolved oxygen (DO). In general, the macrozoobenthos community structure of the lower Jinsha River was dominated by aquatic insects and Annelida, with lower density and biomass than other rivers in this region. Due to the fast flow velocity and simple habitat bottom in the mainstream, the macrozoobenthos were generally not high in species number or standing crop. However, the rich macrozoobenthos resources in the tributaries of the interval play an important role in maintaining regional biodiversity. Based on the results, several suggestions for the environmental protection of the lower Jinsha River were provided, i.e., meeting the conservation challenges necessitate long-term monitoring of aquatic organisms and impact assessment of aquatic ecology, protecting the riparian zone of rivers to support the river habitat diversities and coordinating the protection of mainstream and tributaries of the lower Jinsha River aimed at maintaining the integrity of the river ecological network.

Key words: macrozoobenthos; Jinsha River; hydropower development; community structure; aquatic ecology protection

Corresponding author: NI Zhaohui. E-mail: zhaohui_ni@126.com

附表 1 金沙江下游大型底栖动物种类名录
Appendix 1 Taxa list of macrozoobenthos in the lower Jinsha River

中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	水库区域 reservoir area			
		乌东德 Wudongde	白鹤滩 Baihetan	溪洛渡 Xiluodu	向家坝 Xiangjiaba
线虫动物门	Nematoda				
线虫一种	Nematoda sp.				+
扁形动物门	Platyhelminthes				
涡虫纲	Turbellaria				
涡虫一种	Turbellaria sp.	+	+		
环节动物门	Annelida				
寡毛纲	Oligochaeta				
颤蚓科	Tubificidae				
水丝蚓属一种	Limnodrilus sp.	+	+		+
多毛管水蚓	Aulodrilus pluriseta				+
苏氏尾鳃蚓	Branchiura sowerbyi	+			+
克拉泊水丝蚓	Limnodrilus claparedeianus		+		
巨毛水丝蚓	Limnodrilus grandisetosus				+
霍甫水丝蚓	Limnodrilus hoffmeisteri				+
颤蚓属一种	Tubifex sp.	+	+		
蛭纲	Hirudinea				
石蛭科	Erpobdellidae				
八目石蛭	Erpobdella octoculata	+	+		
舌蛭科	Glossiphoniidae				
舌蛭属一种	Glossiphonia sp.	+	+		
软体动物门	Mollusca				
腹足纲	Gastropoda				
豆螺科	Bithyniidae				
长角涵螺	Alocinma longicornis				+
狭口螺科	Stenothyridae				
光滑狭口螺	Stenothyra glabra				+
椎实螺科	Lymnaeidae				
萝卜螺属一种	Radix sp.	+	+		+
膀胱螺科	Physidae				
尖膀胱螺	Physa acuta	+	+		+
扁蜷螺科	Planorbidae				
圆扁螺属一种	Hippeutis sp.		+		
双壳纲	Bivalvia				
贻贝科	Mytilidae				
湖沼股蛤	Limnoperna lacustris				+
蜆科	Corbiculidae				
河蜆	Corbicula fluminea				+

(待续 to be continued)

		(续表 1 Tab. 1 continued)			
中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	水库区域 reservoir area			
		乌东德 Wudongde	白鹤滩 Baihetan	溪洛渡 Xiluodu	向家坝 Xiangjiaba
节肢动物门	Arthropoda				
甲壳亚门	Crustacea				
匙指虾科	Atyoidae				
米虾属一种	<i>Caridina</i> sp.	+	+		
长臂虾科	Palaemonidae				
长臂虾属一种	<i>Palaemon</i> sp.				+
螺赢蜚科	Corophiidae				
螺赢蜚属一种	<i>Corophium</i> sp.		+		
昆虫纲	Insecta				
蜉蝣目	Ephemeroptera				
扁蜉科	Heptageniidae				
扁蜉属一种	<i>Ecdyonurus</i> sp.	+	+		
似动蜉属一种	<i>Cinygmina</i> sp.	+			
高翔蜉属一种	<i>Epeorus</i> sp.	+			
扁蜉属一种	<i>Heptagenia</i> sp.	+	+		
四节蜉科	Baetidae				
四节蜉属一种	<i>Baetis</i> sp.	+	+		
花翅蜉属一种	<i>Baetiella</i> sp.		+		
细蜉科	Caenidae				
细蜉属一种	<i>Caenis</i> sp.		+		
襁翅目	Plecoptera				
襁科	Perlidae				
襁科一种	<i>Totropina</i> sp.	+			
毛翅目	Trichoptera				
纹石蛾科	Hydropsychidae				
短脉纹石蛾属一种	<i>Cheumatopsyche</i> sp.		+		
纹石蛾属一种	<i>Hydropsyche</i> sp.	+	+		
舌纹石蛾	<i>Glossosoma</i> sp.	+	+		
侧枝纹石蛾属一种	<i>Ceratopsyche</i> sp.		+		
角石蛾科	Stenopsychidae				
角石蛾属一种	<i>Stenopsyche</i> sp.		+		
蝶石蛾科	Psychomyiidae				
蝶石蛾一种	<i>Lype</i> sp.				+
蜻蜓目	Odonata				
春蜓科	Gomphidae				
环尾箭蜓属	<i>Lamelligomphus</i> sp.		+		
丝螋科	Lestidae				
印丝螋属一种	<i>Indolestes</i> sp.	+	+		
		(待续 to be continued)			

(续表 1 Tab. 1 continued)

中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	水库区域 reservoir area			
		乌东德 Wudongde	白鹤滩 Baihetan	溪洛渡 Xiluodu	向家坝 Xiangjiaba
鞘翅目	Coleoptera				
步甲科成虫	Carabidae sp.	+			
龙虱科成虫	Dytiscidae sp.	+	+		
龙虱科幼虫	Dytiscidae sp.	+			
泥甲科成虫	Dryopidae sp.		+		
溪泥甲属幼虫	<i>Stenelmis</i> sp.		+		+
半翅目	Hemiptera				
盖蝽科	Aphelocheiridae				
盖蝽属一种	<i>Aphelocheirus</i> sp.		+		
划蝽科	Corixidae				
划蝽属一种	<i>Sigara</i> sp.	+			
龟蝽科	Gerridae				
龟蝽科一种	Gerridae sp.	+			
双翅目	Diptera				
水蝇科	Ephydriidae				
水蝇属一种	<i>Ephydra</i> sp.	+			
幽蚊科	Chaoboridae				
幽蚊属一种	<i>Chaoborus</i> sp.	+	+		
蚊科	Culicidae				
蚊科一种	Culicidae sp.	+			
蠓科	Ceratopogonidae				
蠓科一种	Ceratopogonidae sp.	+			
摇蚊科	Chironomidae				
摇蚊亚科	Chironominae				
多足摇蚊属一种	<i>Polypedilum</i> sp.	+	+	+	+
隐摇蚊属一种	<i>Cryptochironomus</i> sp.	+		+	
拟隐摇蚊属一种	<i>Demicryptchironomus</i> sp.		+	+	
摇蚊属一种	<i>Chironomus</i> sp.	+	+		+
二叉摇蚊属一种	<i>Dicrotendipes</i> sp.		+		+
长跗摇蚊属一种	<i>Tanytarsus</i> sp.	+			
摇蚊亚科一种	Chironomidae sp.			+	
长足摇蚊亚科	Tanypodinae				
前突摇蚊属一种	<i>Procladius</i> sp.	+			+
长足摇蚊属一种	<i>Tanypus</i> sp.	+			
拟麦氏摇蚊属一种	<i>Paramerina</i> sp.	+			
直突摇蚊亚科	Orthoclaadiinae				
水摇蚊属一种	<i>Hydrobaenus</i> sp.		+		
拟三突摇蚊属一种	<i>Paratrichocladius</i> sp.	+			
真开氏摇蚊属一种	<i>Eukiefferiella</i> sp.	+			
直突摇蚊属一种	<i>Orthocladus</i> sp.		+		

注：+表示该种类存在。

Note: + indicates the taxon was present.