

◆ 水产渔业 ◆

贵州习水国家级自然保护区大型底栖动物群落结构及水质评价^{*}陈振林¹, 杨卫诚^{1,2,*}, 罗康³, 熊玲³, 杨涛¹, 黄玉杰¹, 张高发¹

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州师范大学喀斯特洞穴研究中心, 贵州贵阳 550025; 3. 贵州习水国家级自然保护区管理局, 贵州习水 564600)

摘要:为了解贵州习水国家级自然保护区(以下简称“习水保护区”)大型底栖动物资源及水质现状,于2022年7月(丰水期)及2022年11月(平水期)对习水保护区5个管理站内的大型底栖动物进行采样调查,分析习水保护区大型底栖动物群落结构物种组成、优势种、密度、生物量及生物多样性特征,并基于水质理化参数及生物指数对保护区水质进行综合评价。结果表明,丰水期和平水期共采集大型底栖动物45种,隶属3门6纲13目37科,其中昆虫纲(Insecta)占比最多(35种,占77.80%)。优势种为中华沼螺 *Parafossarulus sinensis*、扁蜉 *Heptagenia* sp.、扁蚴蜉 *Ecdyonurus* sp.、纯襁 *Paragnetina* sp.、四节蜉 *Baetis* sp.。从时间上看,平水期的密度和生物量均大于丰水期,丰水期的群落生物多样性指数大于平水期;从空间上看,密度大小排序为蔺江管理站>大白塘管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站;生物量大小排序为蔺江管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站>大白塘管理站。Shannon-Wiener多样性指数的大小排序为大白塘管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站>蔺江管理站。不同指数显示的习水保护区水质结果不同,水质理化参数结果表明习水保护区水质为Ⅱ类水,水质较好;Shannon-Wiener多样性指数表明保护区水质为轻污染状态;生物指数(BI)显示保护区水质为清洁型。结合水质理化参数及保护区大型底栖动物优势种的耐污值结果可知,生物指数的结果更符合保护区实际的水质情况。本研究结果表明习水保护区大型底栖动物以水生昆虫为主,水质为清洁型。

关键词:大型底栖动物;群落结构;水质评价;贵州习水国家级自然保护区

中图分类号:Q958.8 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)02-0258-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20231107.001

收稿日期:2023-09-12

修回日期:2023-10-09

* 国家自然科学基金项目(30560024),贵州省科学技术基金项目(LKS-2016-7207),贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2811号、黔林科合[2022]27号)和贵州省科技重大专项项目(黔科合重大专项字[2016]3022-03号)资助。

【第一作者简介】

陈振林(1999—),男,在读硕士研究生,主要从事水生生物及生态学研究,E-mail:chenzhenlin0223@qq.com。

【* * 通信作者简介】

杨卫诚(1981—),男,副教授,主要从事动物生态学研究,E-mail:yangweicheng0908@sina.com。

【引用本文】

陈振林,杨卫诚,罗康,等.贵州习水国家级自然保护区大型底栖动物群落结构及水质评价[J].广西科学,2024,31(2):258-268.

CHEN Z L, YANG W C, LUO K, et al. Macroinvertebrate Community Structure and Water Quality Evaluation in Xishui National Nature Reserve of Guizhou Province [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(2): 258-268.

河流生态系统是由水生生物及其生活环境共同构成的生态系统,其不仅能为水生生物提供栖息场所,而且能提供丰富的食物资源^[1,2]。健康的河流生态系统在流域生物多样性和可持续发展的维持中起着至关重要的作用^[3],河流中水生生物的群落结构是河流生态系统研究的重要内容,也是对水生态学领域研究的重要补充。

大型底栖动物是指个体大于 0.5 mm 的无脊椎动物群,其生活史的全部或大部分时间在水中,栖息于水体底部淤泥、砾石和石块间隙中^[4],且具有一定的活动能力,以取食浮游生物及其他碎屑物为主。大型底栖动物在河流生态系统的物质循环和能量流动中起着承上启下的作用,是河流生态系统中食物链的重要组成部分^[5]。大型底栖动物对环境的变化较为敏感,其群落结构及生物多样性能间接反映河流生态系统的健康状况^[6]。因此,开展大型底栖动物的研究对了解河流生态系统及监测水质具有重要意义。

目前,国内外均有对大型底栖动物的相关研究,从起初的分类研究发展到利用其群落结构及生物指数进行水质评价^[7,8],其间还包括区系^[9]、功能摄食群^[10]、群落结构^[11]、优势种^[12]、功能摄食群^[13]、营养结构^[14]、水质评价^[15]等。如贺湛斐等^[16]研究得出太浦河大型底栖动物种类组成以软体动物为主;张宇航等^[17]研究发现永定河流域大型底栖动物功能摄食类群以收集者占绝对优势;徐丹丹等^[18]研究得出大型底栖动物群落结构与其生存环境相关。此外,还有对自然保护区大型底栖动物的相关研究,如七星河国家级自然保护区^[19]、广东车八岭国家级自然保护区^[20]、扎龙湿地自然保护区等^[21],但目前尚无关于贵州习水国家级自然保护区(以下简称“习水保护区”)大型底栖动物的相关研究报道。

本研究以习水保护区为研究对象,在丰水期和平水期分别对保护区各管理站的大型底栖动物的物种组成、优势种、密度、生物量及生物多样性等进行调查研究,并采用水质理化参数与大型底栖动物生物指数对保护区水质进行综合评价。本研究通过调查习水保护区大型底栖动物的种类组成及资源现状,以了解习水保护区大型底栖动物群落结构特征以及水质状况,为丰富习水保护区水生生物相关本底资料和水生态研究提供基础数据,拟为生物多样性的保护、资源的合理利用以及保护区水生态环境的监测与保护提供理论依据和科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样时间

习水保护区位于贵州省遵义市习水县(105°50′—106°29′E,28°07′—28°34′N),权属管理面积 51 911 m²,是贵州省面积最大的国家级自然保护区,水系溪流涵盖习水河以及部分赤水河中下游支流。习水保护区属亚热带湿润季风性气候,下设 6 个管理站,分别为小坝、蔺江、长坝、长嵌沟、大白塘、三岔河管理站^[22]。

由于长坝管理站无成型河流分布,且因天气原因而干涸,无法开展相关采样调查,故不设置采样点。于 2022 年 7 月上旬(丰水期)和 2022 年 11 月上旬(平水期)分别对习水保护区剩余 5 个管理站的河流进行野外调查,每个管理站设置 3 个采样断面,共 15 个采样点,即三岔河管理站(S1、S2、S3)、大白塘管理站(S4、S5、S6)、长嵌沟管理站(S7、S8、S9)、小坝管理站(S10、S11、S12)、蔺江管理站(S13、S14、S15),具体采样点位见表 1。

表 1 研究区各区域采样点基本概况

Table 1 Basic overview of sampling sites in each region of the study area

所属区域 Region	编号 Serial number	地理坐标 Geographic coordinate	海拔/m Altitude/m
Shancha River management station	S1	106°23′96.77″E, 28°33′86.23″N	939
	S2	106°23′80.24″E, 28°33′42.56″N	922
	S3	106°23′76.59″E, 28°32′50.25″N	905
Dabaitang man- agement station	S4	106°15′71.52″E, 28°27′10.13″N	768
	S5	106°14′49.57″E, 28°26′90.19″N	790
	S6	106°13′29.17″E, 28°25′06.23″N	702
Changqiangou management station	S7	106°08′15.75″E, 28°28′05.17″N	715
	S8	106°10′02.37″E, 28°26′46.03″N	862
	S9	106°08′86.07″E, 28°26′56.51″N	701
Xiaoba man- agement station	S10	105°71′91.47″E, 28°16′53.03″N	634
	S11	105°63′47.32″E, 28°15′26.21″N	602
	S12	105°59′20.77″E, 28°15′33.15″N	571

续表

Continued table

所属区域 Region	编号 Serial number	地理坐标 Geographic coordinate	海拔/m Altitude/m
Lingjiang man- agement station	S13	105°61'20.49"E, 28°10'84.11"N	542
	S14	105°71'94.07"E, 28°10'46.58"N	586
	S15	105°80'51.67"E, 28°10'80.23"N	557

1.2 大型底栖动物的采集及鉴定

大型底栖动物的采样参考《生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物》(HJ 710.8—2014)^[23],因习水保护区河流生境状况较统一,均以砾石和卵石为底质,故定量样品使用D形抄网进行采集,每个样点采3个样,将抄网网口正对上游,用小铁扒搅动水体底质,使大型底栖动物连同部分底质随水流一起被冲进网内,然后挑拣网内的大型底栖动物于5%的甲醛溶液中保存带回实验室镜检;定性样品使用徒手采集法,选择水流较缓慢且有较多石块的区域进入小溪或浅河,轻轻掀起水中石块,采集石块上的大型底栖动物并放入采集瓶中,加入固定液保存带回实验室镜检。

在实验室采用奥林巴斯SZX7研究级体式显微镜和JSZ5B体视显微镜对采集到的大型底栖动物进行鉴定,鉴定工作主要参照《淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学》^[24]、《辽河流域底栖动物检测图鉴》^[25]、《中国动物志 无脊椎动物 第三十六卷 甲壳动物亚门 十足目 匙指虾科》^[26]、《中国动物志 节肢动物门 甲壳动物亚门 软甲纲 十足目 束腹蟹科 溪蟹科》^[27]等。使用SQP电子天平(精度为0.0001g,赛多利斯科学仪器有限公司)进行称量并计数,以此计算密度(ind./m²)及生物量(g/m²)。

1.3 水样的采集及测定

水样的采集参考《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)^[28],包括水温(WT)、pH值、透明度(SD)、电导率(Cond)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、叶绿素a(Chl-a)。其中WT、pH值和Cond使用HI98194多功能水质检测仪(美国HANNA公司)现场进行测定,透明度使用SD20黑白盘(河南泰恒塑业有限公司)进行测定,COD_{Mn}采用酸性法测定^[29]、TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法

(HJ 636—2012)测定^[30]、TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定^[31]、NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定^[32]、叶绿素a(Chl-a)采用分光光度法(SL 88—2012)测定^[33],每个指标均取3次测量的平均值,用测到的水质理化参数与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)进行对比评价^[34]。

1.4 数据分析

1.4.1 群落结构与多样性分析

采用优势度指数(Y)描述大型底栖动物群落优势种,当Y≥0.02时为优势种^[35]。采用Margalef丰富度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H')和Pielou均匀度指数(J)描述大型底栖动物群落生物多样性^[36]。相关计算公式如下:

$$Y = \left(\frac{n_i}{N}\right) \times f_i, \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left[\frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N} \right], \quad (2)$$

$$D = \frac{S-1}{\ln N}, \quad (3)$$

$$J = H' / \log_2^s, \quad (4)$$

式中,S代表样品总种类数;N代表所有种类总个体数;n_i代表第i个物种的个体数;f_i代表第i个物种在各点位出现的频率。

1.4.2 水质生物学评价

采用Shannon-Wiener多样性指数(H')和生物指数(Biological Index, BI)进行水质评价,BI的计算公式为

$$BI = \sum_{i=1}^n \frac{n_i \times t_i}{N}, \quad (5)$$

式中,n为物种数,n_i为第i个物种的个体数,t_i为物种i的耐污值,N为各物种的总个体数。耐污值的数值参考文献^[37],评价标准^[38,39]见表2。

表2 水质评价标准

Table 2 Water quality evaluation standard

指数 Index	数值范围 Numerical range	水质状态 Water quality status
H'	(3,∞)	Good
	(2,3]	Light pollution
	(1,2]	Moderate pollution
	(0,1]	Heavy pollution
BI	(0.00,2.73]	Excellent
	(2.73,4.55]	Good
	(4.55,6.38]	Good-fair
	(6.38,8.21]	Fair
	(8.21,10.00]	Poor

1.4.3 统计分析

水质理化因子及所鉴定到的大型底栖动物数据均使用 Excel 表格进行记录,运用单因素方差分析(One-way ANOVA)、Kruskal-Wallis 检验、独立样本 t 检验等进行数据差异性检验^[40],使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件检验数据差异性,使用 Excel 计算生物多样性指数与优势度指数,使用 Origin 2021 绘制分析图。

2 结果与分析

2.1 物种组成及优势种

总体来看,丰水期和平水期共采集大型底栖动物 3 032 头,其中丰水期 1 168 头、平水期 1 864 头,共计 45 种,隶属 3 门 6 纲 13 目 37 科。大型底栖动物的优势类群为昆虫纲(Insecta),有 35 种,占总种数的 77.8%,其他种类较少(图 1)。

从时间上看,丰水期采集到大型底栖动物 44 种,

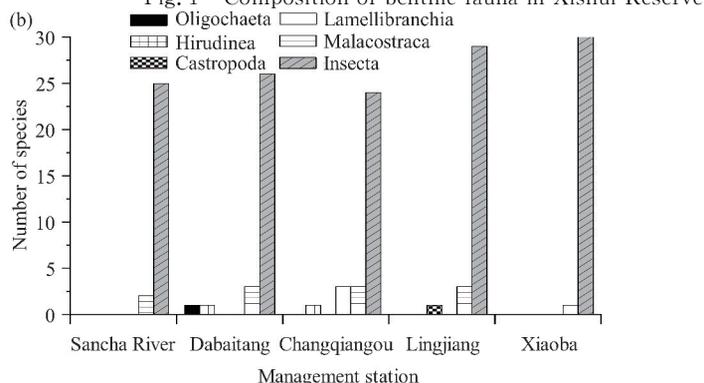
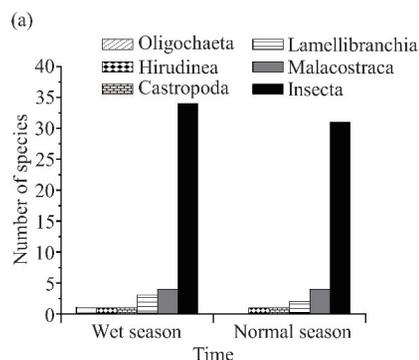


图 2 习水保护区大型底栖动物的种类组成

Fig. 2 Species composition of macroinvertebrates in Xishui Reserve

优势度指数结果表明,习水保护区大型底栖动物的优势种以蜉蝣目(Ephemeroptera)和襀翅目(Plecoptera)的水生昆虫为主。在丰水期,优势种为中华沼螺 *Parafossarulus sinensis* ($Y=0.022$)、扁蜉 *Heptagenia* sp. ($Y=0.182$)、扁蚴蜉 *Ecdyonurus* sp. ($Y=0.051$)、纯襀 *Paragnetina* sp. ($Y=0.072$)。在平水期,优势种为扁蜉($Y=0.234$)、扁蚴蜉($Y=0.072$)、纯襀($Y=0.052$)、四节蜉 *Baetis* sp. ($Y=0.035$)。其中,扁蜉、扁蚴蜉、纯襀是丰水期和平水期的共有优势种。

2.2 密度与生物量

平、丰水期 5 个管理站的总平均密度为 101.07 ind./m²,总平均生物量为 9.86 g/m²。密度和生物

量在不同水期以及各管理站之间可能存在一定差异。从时间上看(图 3),丰水期的大型底栖动物密度为 50.67—113.67 ind./m²,平均值为 77.87 ind./m²;生物量为 4.93—15.50 g/m²,平均值为 8.92 g/m²。平水期的大型底栖动物密度为 84.67—158.33 ind./m²,平均值为 84.67 ind./m²;生物量为 7.50—15.50 g/m²,平均值为 10.77 g/m²。密度与生物量的最高值均出现在平水期,最小值均出现在丰水期。总体来看,平水期大型底栖动物的密度和生物量均大于丰水期,但 Kruskal-Wallis 检验结果表明两个时期大型底栖动物的密度和生物量差异不显著($P>0.05$)。

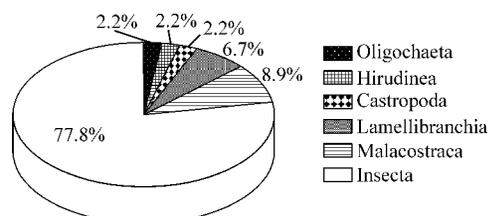


图 1 习水保护区底栖动物种类组成

Fig. 1 Composition of benthic fauna in Xishui Reserve

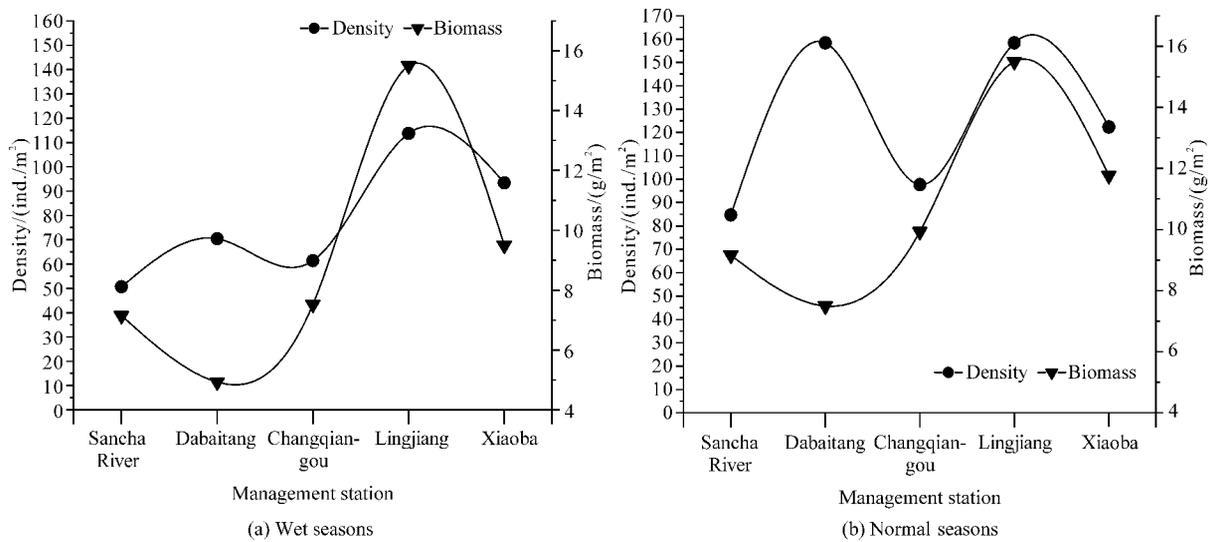


图3 不同水期大型底栖动物的密度和生物量

Fig. 3 Density and biomass of macroinvertebrates at different water periods

从空间上看(图4),三岔河管理站的大型底栖动物平均密度为 67.67 ind./m²,生物量的平均值为 8.16 g/m²;大白塘管理站的平均密度为 114.33 ind./m²,平均生物量为 6.22 g/m²;长嵌沟管理站的平均密度为 79.50 ind./m²,平均生物量为 8.73 g/m²;漓江管理站的平均密度为 136.00 ind./m²,平均生物量为 15.50 g/m²;小坝管理站的平均密度为 107.82 ind./m²,平均生物量为 10.64 g/m²。密度最高值出现在大白塘管理站,为 178.00 ind./m²,最

低值出现在三岔河管理站,为 42.00 ind./m²;生物量最高值出现在漓江管理站,为 18.00 g/m²,最低值出现在大白塘管理站,为 3.79 g/m²。总体来看,大型底栖动物密度表现为漓江管理站>大白塘管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站;生物量表现为漓江管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站>大白塘管理站,单因素方差分析结果表明不同管理站大型底栖动物的密度与生物量的差异均不显著($P>0.05$)。

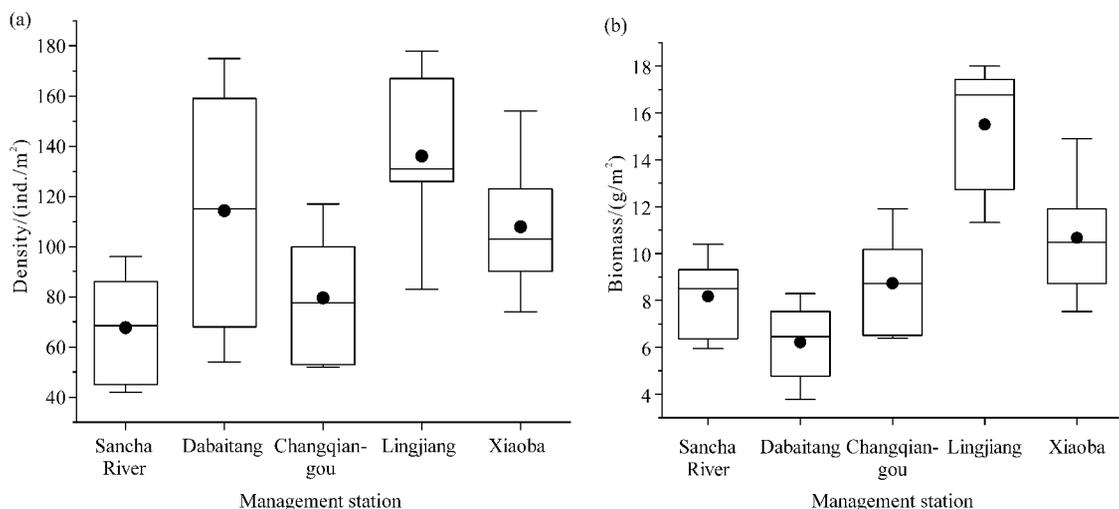


图4 不同管理站的大型底栖动物的密度(a)和生物量(b)

Fig. 4 Density (a) and biomass (b) of macroinvertebrates at different management stations

2.3 多样性指数分析

丰水期的 H' 、 D 和 J 分别为 2.50—3.00、4.97—5.24 和 0.51—0.62,平均值分别为 2.80、5.21 及 0.58, H' 、 D 、 J 的最大值分别出现在大白塘管理站(3.00)、大白塘管理站(5.42)和三岔河管理站

(0.62)。平水期的 H' 、 D 和 J 分别为 2.32—2.84、3.97—4.77 和 0.50—0.59,平均值分别为 2.52、4.49 及 0.54, H' 、 D 、 J 的最大值分别出现在大白塘管理站(2.84)、漓江管理站(4.77)和大白塘管理站(0.59)。丰水期群落多样性指数大于平水期(图5),

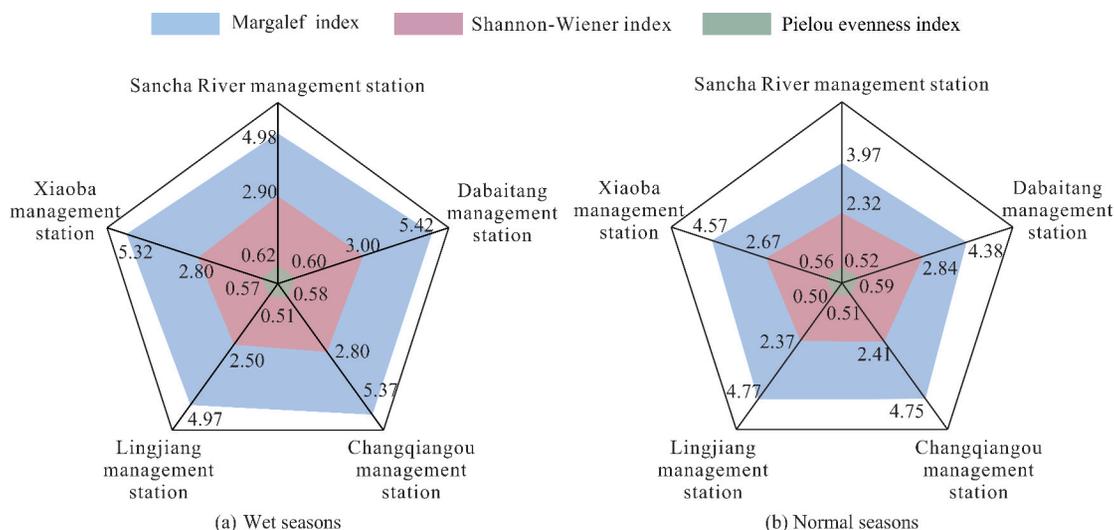


图5 不同水期大型底栖动物的多样性指数

Fig. 5 Diversity index of macroinvertebrates in different water periods

独立样本 t 检验结果表明大型底栖动物的 H' 、 D 和 J 在丰水期和平水期均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

从空间上看,三岔河管理站大型底栖动物的 H' 、 D 和 J 平均值分别为 2.61、4.48 和 0.57; 大白塘管理站 H' 、 D 和 J 平均值分别为 2.92、4.90 和 0.56; 长嵌沟管理站 H' 、 D 和 J 平均值分别为 2.61、5.06 和 0.55; 蔺江管理站 H' 、 D 和 J 平均值分别为 2.44、4.87 和 0.51; 小坝管理站 H' 、 D 和 J 平均值分别为 2.74、4.95 和 0.57(图 6)。整体上看, H' 在

各站点大小的排序为大白塘管理站 > 小坝管理站 > 长嵌沟管理站 > 三岔河管理站 > 蔺江管理站, D 在各站点大小的排序表现为长嵌沟管理站 > 小坝管理站 > 大白塘管理站 > 蔺江管理站 > 三岔河管理站, J 在各站点大小的排序表现为大白塘管理站 > 三岔河管理站 > 小坝管理站 > 长嵌沟管理站 > 蔺江管理站, 单因素方差分析结果表明大型底栖动物的 H' 、 D 和 J 在各个管理站间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

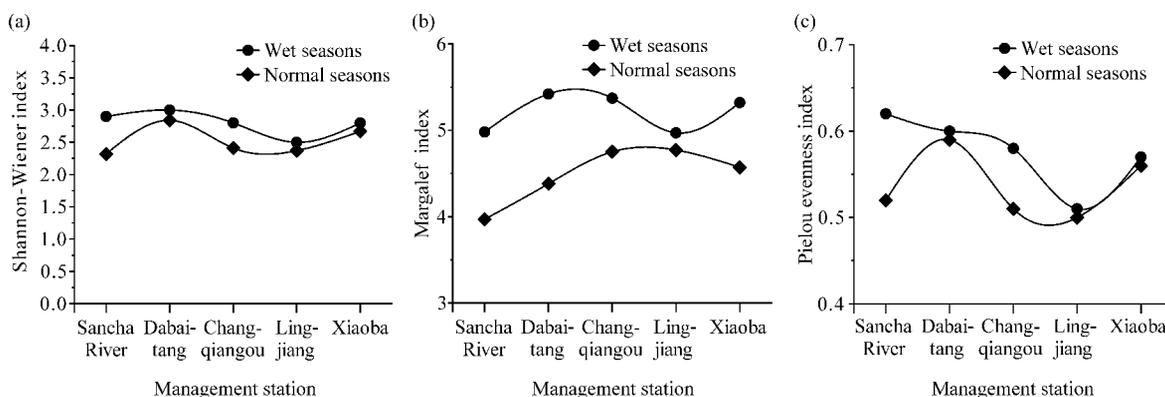


图6 不同管理站大型底栖动物的 Shannon-Wiener 指数(a)、Margalef 指数(b)和 Pielou 均匀度指数(c)

Fig. 6 Shannon-Wiener index (a), Margalef index (b) and Pielou evenness index (c) of macroinvertebrates at different management stations

2.4 水质评价

2.4.1 水质理化参数

如表 3 所示,习水保护区丰水期的 WT、 COD_{Mn} 、TN、TP、 NH_4^+-N 均大于平水期,丰水期的平均水温为 23.67 °C, COD_{Mn} 、TN、TP、 NH_4^+-N 的平均值分别为 2.58、0.15、0.040、0.130 mg/L; 平水期的平均水温为 17.26 °C, COD_{Mn} 、TN、TP、 NH_4^+-N 的平均值分

别为 2.05、0.08、0.030、0.080 mg/L。平水期的 Cond、DO、pH 值均大于丰水期,丰水期 Cond、DO、pH 值的平均值分别为 204.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、8.49 mg/L、8.45, 平水期分别为 248.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、8.53 mg/L、8.66。WT 随季节气温变化,DO 在一年四季中波动范围不大且含量较高;水体呈弱碱性,全年变化不大。根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),pH

表3 习水保护区不同水期水质理化参数变化(平均值±标准差)

Table 3 Changes of physicochemical parameters of water quality at different water stages in Xishui Reserve (Mean±SD)

水期 Water period	WT/°C	pH值 pH value	DO/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	Cond/ (μS/cm)	Chl-a (μg/L)
Wet seasons	23.67±2.27	8.45±0.24	8.49±0.07	0.15±0.01	0.040±0.001	0.130±0.010	2.58±0.09	204.10±9.47	6.95±0.67
Normal seasons	17.26±1.20	8.66±0.26	8.53±0.17	0.08±0.01	0.030±0.001	0.080±0.004	2.05±0.11	248.00±14.80	8.77±0.55

值均处于正常值范围, DO和TN含量水平达到地表水Ⅰ类标准, COD_{Mn}、TP和NH₄⁺-N含量为Ⅱ类水。综合水质理化参数来看, 习水保护区水质属于Ⅱ类水, 水质状况较好。

2.4.2 水质生物学评价

水质生物学评价结果见表4。H'表明习水保护区水质状况处于轻污染状态, 而BI表明保护区水质为清洁型, 两种评价方法结果存在差异。丰水期的

H'为2.50—3.00, 平水期的H'为2.32—2.84, 5个管理站在两个水期的水质均处于轻度污染状态, 丰水期水质优于平水期。丰水期的BI为2.82—3.84, 平水期的BI为2.90—3.64, 水质等级均处于清洁状态, 丰水期水质优于平水期。H'与BI表明, 5个管理站中大白塘管理站的水质最好, 漓江管理站的水质最差。

表4 水质生物学评价结果

Table 4 Biological evaluation results of water quality

管理站 Management station	水期 Water period	Shannon-Wiener 多样性指数(H')		生物指数(BI)	
		指数值 Index value	水质级别 Water quality level	指数值 Index value	水质级别 Water quality level
Sancha River management station	Wet seasons	2.90	Light pollution	3.15	Good
	Normal seasons	2.32	Light pollution	3.64	Good
Dabaitang management station	Wet seasons	3.00	Light pollution	3.05	Good
	Normal seasons	2.84	Light pollution	2.90	Good
Changqiangou management station	Wet seasons	2.80	Light pollution	2.82	Good
	Normal seasons	2.41	Light pollution	2.90	Good
Lingjiang management station	Wet seasons	2.50	Light pollution	3.84	Good
	Normal seasons	2.37	Light pollution	3.57	Good
Xiaoba management station	Wet seasons	2.80	Light pollution	2.86	Good
	Normal seasons	2.67	Light pollution	3.04	Good

3 讨论

3.1 大型底栖动物群落结构特征

本研究结果表明, 习水保护区大型底栖动物物种组成主要以昆虫纲为主, 占总种数的77.8%, 与国内其他流域^[15, 41, 42]以及长江流域^[43]的大型底栖动物群落结构相似。张梦娜等^[44]研究表明, 当河流的底质以石块、砾石和卵石为主时, 水生昆虫会成为主要优势类群。在本研究中, 习水保护区大型底栖动物均以水生昆虫为主要优势种, 且河流生境均以砾石为主, 优势种的组成符合以砾石为底质的河流生境, 本研究结果与张梦娜等^[44]的研究结果一致。陈含墨等^[45]

研究表明, 在河流生态系统中, 河水流量状况显著影响大型底栖动物的分布, 蜉蝣目等水生昆虫在河流生态系统中具有较好的抗冲击能力且占据优势种地位, 本研究结果与之一致。阚春梅等^[46]在研究水生昆虫群落特征与环境因子的关系时发现, 蜉蝣目昆虫喜流水和清洁的水体且对水环境变化敏感, 在河流生态系统中喜居溶解氧充足和底质多为圆石、漂砾的地方。本研究结果表明习水保护区水体溶解氧均达到Ⅰ类水标准^[34], 各项水质理化指标显示保护区水质状况较好, 且蜉蝣目昆虫数量最多, 符合其喜居溶解氧充足与水体清洁的生境条件。

本研究结果表明习水保护区平水期大型底栖动

物密度与生物量均大于丰水期,这不仅可能是因为丰水期降水量较多,河流流量比平水期大,从而导致丰水期底栖动物的密度和生物量低于平水期^[47],还可能与大型底栖动物的生活史有密切联系,如蜉蝣目昆虫的羽化会受环境的影响^[48]。大型底栖动物密度大小在空间的分布为蔺江管理站>大白塘管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站,生物量大小在空间的分布为蔺江管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站>大白塘管理站,密度与生物量在空间上分布不完全一致。本研究结果显示,习水保护区大型底栖动物的生物量贡献量最大的是溪蟹科和腹足纲,因为蔺江管理站分布有大量腹足纲的螺类,所以蔺江管理站大型底栖动物的密度和生物量均最高;大白塘管理站未见螺类且溪蟹科的数量少于其他管理站,故该管理站底栖动物的密度高但生物量低。多样性结果表明,各管理站物种多样性差异不大,但三岔河管理站与蔺江管理站的多样性指数较其他管理站较低。三岔河管理站位于习水丹霞谷景区,景区内人类活动较频繁,在保护区各管理站中受干扰最大,因此该管理站物种多样性较低。蔺江管理站的河流水位不同时段波动较大且处于饮用水源铜灌口水库下游,水库在夏季因降雨原因而开闸放水,河床被大量水流冲刷,其物种组成多以蜉蝣目及腹足纲的螺类为主,这可能是导致该管理站的大型底栖动物密度和生物量较高但多样性较低的原因。

3.2 水质评价

大型底栖动物是水生态系统中的重要生物类群,在水生态系统的物质循环和能量流动等方面均起着十分重要的作用^[49],其对周围环境的变化较敏感,因此常被作为水质评价的指示生物。国内很多研究均表明,大型底栖动物在反映水质状况方面具有较大优势与说服力^[50,51]。基于此,本研究以水质理化参数、Shannon-Wiener 多样性指数和生物指数对习水保护区水质进行综合评价。水质理化参数结果显示保护区水质为 I—II 类水;Shannon-Wiener 多样性指数显示保护区水质为轻污染状态;生物指数显示保护区水质为清洁型水体。水质理化参数与生物指数的评价结果一致,但两者与 Shannon-Wiener 多样性指数的评价结果存在差异。水质理化参数结果表明习水保护区水体中 DO 和 TN 含量水平达到地表水 I 类标准,但 COD_{Mn} 、TP 和 NH_4^+-N 的含量为 II 类水。相关研究表明,水体中铵盐和磷酸盐含量过高是水体营养化的重要原因^[52],应加强对保护区水生态环境

的保护,以确保其向着健康有序的方向发展。

国内已有大量研究使用大型底栖动物进行水质生物学评价^[53-55]。本研究中的 Shannon-Wiener 多样性指数和生物指数对保护区水质评价结果有差异,其主要原因是 Shannon-Wiener 多样性指数的结果主要与物种的多样性有关,多样性越高代表水质越好,但是忽视了不同物种对其周围环境污染的耐受能力、适应性及敏感性的差异,在很多情况下不能真实地反映水质的实际状况^[56]。张蕾等^[57]研究表明,如果被评价生境的物种组成单一且敏感物种较多时,Shannon-Wiener 多样性指数的评价结果可能会与实际存在较大误差,且有较多研究的结果表明 Shannon-Wiener 多样性指数对湖泊和河流生态系统的水质评价效果不理想^[18,58,59]。习水保护区优势种主要是耐污性较低且喜清洁环境的蜉蝣目和襁翅目的水生昆虫,水质理化参数结果显示保护区水质为 II 类水,使用生物指数进行水质评价的结果与水质理化参数结果吻合度最高,生物指数结合每个大型底栖动物的耐污值,评价结果相对客观准确,具有较高的可信度。综上,习水保护区大型底栖动物的物种组成主要以水生昆虫为主,结合大型底栖动物生物指数及水质理化参数的综合评价结果可以看出保护区水质较好。

4 结论

2022 年 7 月(丰水期)和 2022 年 11 月(平水期)共采集到大型底栖动物 45 种,属 3 门 6 纲 13 目 37 科,物种组成以水生昆虫为主,有 35 种,占总种数的 77.80%,其他种类较少。优势种为中华沼螺、扁蜉、扁蚴蜉、纯襁、四节蜉。从时间上来看,贵州习水国家级自然保护区平水期大型底栖动物的密度和生物量均大于丰水期,而平水期的群落多样性指数则小于丰水期;从空间上来看,保护区各管理站大型底栖动物密度大小排序为蔺江管理站>大白塘管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站;生物量大小排序为蔺江管理站>小坝管理站>长嵌沟管理站>三岔河管理站>大白塘管理站。水质理化指标结果显示贵州习水国家级自然保护区的水质为 II 类水,Shannon-Wiener 多样性指数显示保护区水质为轻污染状态,生物指数显示保护区水质为清洁型,水质较好。综合水质理化指标及优势种的耐污性来看,贵州习水国家级自然保护区水质较好,生物指数的结果更符合保护区实际水质的情况。

本研究通过对贵州习水国家级自然保护区大型

底栖动物群落结构进行研究并运用生物指数和水质理化参数综合评价了保护区的水质状况, 夯实了保护区大型底栖动物的本底数据, 揭示了保护区大型底栖动物的资源现状及水质状况, 丰富了保护区水生生态系统的相关研究成果, 为保护区水生态的保护和管理工作提供了科学依据。但是, 本研究仅通过大型底栖动物这一生物类群来揭示水质状况, 而在水生态系统中各水生生物之间、生物与环境之间的关系错综复杂, 研究工作依旧任重道远。因此, 今后将增加对贵州习水国家级自然保护区中浮游生物、鱼类、高等水生植物等生物类群的群落结构与多样性以及其与环境因子的关系的研究, 并且在水质评价方面, 结合水质理化因子、生物指数、综合营养指数和物种耐污值等因素, 以完善对贵州习水国家级自然保护区水生生态系统的研究。

参考文献

- [1] JONI A A M, ZULKIFLI S Z, MOHAMAT-YUSUFF F, et al. Utilization of dual stable isotope markers ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) to determine trophic structure in aquatic environment of Malaysian peat swamp forest [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 30: 250-255.
- [2] HOEINGHAUS D J, VIEIRA J P, COSTA C S, et al. Estuary hydrogeomorphology affects carbon sources supporting aquatic consumers within and among ecological guilds [J]. *Hydrobiologia*, 2011, 673(1): 79-92.
- [3] PALMER M A, BERNHARDT E S, ALLAN J D, et al. Standards for ecologically successful river restoration [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2): 208-217.
- [4] 游清徽, 王硕, 孙晨松, 等. 基于大型底栖无脊椎动物的鄱阳湖湿地水质评价[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(6): 1570-1576.
- [5] SERRANO BALDERAS E C, GRAC C, BERTI-EQUILLE L, et al. Potential application of macroinvertebrates indices in bioassessment of Mexican streams [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 558-567.
- [6] MENCIO A, BOIX D. Response of macroinvertebrate communities to hydrological and hydrochemical alterations in Mediterranean streams [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 566-580.
- [7] MARIN I. A new stygobiotic Xiphocaridinella (Crustacea; Decapoda; Atyidae) from the Motena Cave, Samegrelo-Zemo Svaneti Region of Georgia, Caucasus [J]. *Zootaxa*, 2019, 4648(3): 592-600.
- [8] GALINDO-PÉREZ E J, DE MÉXICO U N A, CHÁVEZ-SANDOVAL B E, et al. Cave macroinvertebrates used as bioindicators of water quality [J]. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 2017, 8(5): 5-17.
- [9] KNIGHT L R F D, BRANCELJ A, EDWARDS F, et al. The aquatic invertebrate fauna of the Ogof Draenen cave system in South Wales, UK [J]. *Cave & Karst Science*, 2018, 45(1): 19-30.
- [10] PELLEGRINI T G, FARIA L D B, FERREIRA R L. Temporal diversity patterns of benthic insects in subterranean streams: a case study in Brazilian quartzite caves [J]. *Hydrobiologia*, 2020, 847(11): 2417-2431.
- [11] 董世淇, 张合焯, 孙国庆, 等. 北黄海裙礁岛海藻场邻近海域大型底栖动物群落营养结构的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1763-1770.
- [12] 陈屹洋, 张秀梅, 裴文豪, 等. 贻贝养殖区大型底栖动物优势种生态位及种间联结性[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(6): 765-774.
- [13] 沙婧婧, 刘欣禹, 鲍萌萌, 等. 2016—2018年夏季渤海浮游生物和大型底栖动物多样性与优势种的时空变化研究[J]. *海洋通报*, 2022, 41(3): 268-280.
- [14] 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.
- [15] 杨强强, 徐光来, 章翩, 等. 青弋江流域大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4169-4180.
- [16] 贺湛斐, 童春富. 太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4619-4631.
- [17] 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.
- [18] 徐丹丹, 詹雪梅, 陶敏, 等. 嘉陵江四川段大型底栖动物群落结构和水质评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(3): 602-614.
- [19] 明霄阳, 柴一涵, 马瑞富, 等. 2017年七星河国家级自然保护区大型底栖动物群落结构、多样性和摄食功能群研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19(6): 673-681.
- [20] 易祖盛, 黄元骏, 易晖, 等. 广东车八岭国家级自然保护区大型底栖动物多样性[J]. *生物多样性*, 2021, 29(5): 680-687.
- [21] 刘茂奇, 刘曼红, 姜连杰, 等. 扎龙湿地自然保护区大型底栖动物群落特征的分析[J]. *水产学杂志*, 2012, 25(2): 40-42, 61.
- [22] 穆君, 王娇娇, 张雷, 等. 贵州习水国家级自然保护区红外相机鸟兽监测及活动节律分析[J]. *生物多样性*, 2019, 27(6): 683-688.
- [23] 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: HJ 710. 8—2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [24] RICHOUX P, BOURNAUD M, USSEGLIO-POLATIERA P, et al. 淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学[M]. 刘威, 王旭涛, 黄少峰, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [25] 仇伟光. 辽河流域底栖动物监测图鉴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [26] 梁象秋. 中国动物志 无脊椎动物 第三十六卷 甲壳动物亚门 十足目 匙指虾科[M]. 北京: 科学出版社,

- 2004.
- [27] 戴爱云. 中国动物志 节肢动物门 甲壳动物亚门 软甲纲 十足目 束腹蟹科 溪蟹科[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [28] 国家环境保护总局. 地表水和污水监测技术规范: HJ/T 91-2002 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [29] 王丹. 水质监测中高锰酸盐指数测定手工分析法和仪器法的对比研究[J]. 山西化工, 2023, 43(5): 35-36.
- [30] 国家环境保护总局. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [31] 国家环境保护局. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893-1989[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [32] 环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535-2009 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [33] 中华人民共和国水利部. 水质 叶绿素的测定 分光光度法: SL 88-2012 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [34] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002 [S]. 中国: 中国标准出版社, 2002.
- [35] 刘硕然, 杨道德, 李先福, 等. 滇西北高山微水体与溪流生境底栖动物多样性和环境特征[J]. 生物多样性, 2019, 27(12): 1298-1308.
- [36] 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): 119-131.
- [37] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 等. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价[J]. 应用与环境生物学报, 2003(3): 279-284.
- [38] 秦春燕. 长江三角洲淡水底栖动物耐污值修订和 BI 指数水质评价分级研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [39] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [40] 高忠江, 施树良, 李钰. SPSS 方差分析在生物统计的应用[J]. 现代生物医学进展, 2008, 8(11): 2116-2120.
- [41] 俞乃琪, 张敏, 樊仕宝, 等. 深圳市城市区域内典型生境特征溪流大型底栖动物群落结构比较[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(4): 1034-1041.
- [42] 王燕妮, 田伊林, 刘雨薇, 等. 新疆巩乃斯河枯、丰水期大型底栖动物群落结构与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2022, 41(5): 208-218.
- [43] 潘超, 周驰, 苗滕, 等. 长江流域鄂西四河流大型底栖动物群落结构特征及水质生物学评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2529-2539.
- [44] 张梦娜, 高文娟, 张婷玉, 等. 长江中下游干流大型底栖动物的分布模式[J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1546-1555.
- [45] 陈含墨, 渠晓东, 王芳. 河流水动力条件对大型底栖动物分布影响研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 758-765.
- [46] 阚春梅, 于洪贤. 亚布力山涧溪流秋季水生昆虫群落特征及其与环境因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(1): 143-147.
- [47] 王琴, 王海军, 崔永德. 武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价[J]. 水生生物学报, 2010, 34(4): 739-746.
- [48] CHRISTMAN V D, VOSHELL J R. Life history, growth, and production of Ephemeroptera in experimental ponds [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1992, 85(6): 705-712.
- [49] ZHANG L L, LIU J L, LI Y. Comparison of the spatial and temporal variability of macroinvertebrate and periphyton-based metrics in a macrophyte-dominated shallow lake [J]. Frontiers of Earth Science, 2015, 9(1): 137-151.
- [50] 于帅, 贾娜尔·阿汗, 张振兴, 等. 新疆伊犁河大型底栖动物群落及水质生物评价[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(4): 728-733.
- [51] 盛萧, 毛建忠, 曹然, 等. 基于 5 种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 75-82.
- [52] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, 58(10): 855-864.
- [53] 乔雪, 刘其根, 陈丽平, 等. 长江口明珠湖大型底栖动物群落结构特征与水质评价[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 699-708.
- [54] 李晋鹏, 彭明春, 董世魁, 等. 澜沧江小湾水坝运行前后大型底栖动物群落及水质评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1900-1908.
- [55] 李文浩, 张萌, 门吉帅, 等. 江西仙女湖流域大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(8): 1218-1227.
- [56] MORES J C, YANG L F, TIAN L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [57] 张蕾, 于海燕, 黄旻, 等. 浦阳江底栖动物群落特征与水质生物评价[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(1): 155-161.
- [58] 陆晓晗, 曹宸, 李叙勇. 付疃河流域中下游大型底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3201-3214.
- [59] 纪磊, 李晓明, 邓道贵. 淮北煤矿区塌陷湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 水生生物学报, 2016, 40(1): 147-156.

Macroinvertebrate Community Structure and Water Quality Evaluation in Xishui National Nature Reserve of Guizhou Province

CHEN Zhenlin¹, YANG Weicheng^{1,2* *} , LUO Kang³, XIONG Ling³, YANG Tao¹, HUANG Yujie¹, ZHANG Gaofa¹

(1. School of Life Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou, 550025, China; 2. Institute of Karst Caves, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou, 550025, China; 3. The Administration of Xishui National Nature Reserve of Guizhou Province, Xishui, Guizhou, 564600, China)

Abstract: In order to understand the resources and water quality of macrobenthos in Xishui National Nature Reserve of Guizhou Province (hereinafter referred to as the “Xishui Reserve”), the macrobenthos in five management stations of Xishui Reserve were sampled and investigated in July 2022 (wet season) and November 2022 (normal season). The species composition, dominant species, density, biomass and biodiversity characteristics of macrobenthos community structure in Xishui Reserve were analyzed, and the water quality of Xishui Reserve was comprehensively evaluated based on physical and chemical parameters and biological indexes of water quality. The evaluation results showed that a total of 45 species of macrobenthos were collected during the wet season and the normal season, belonging to 3 phyla, 6 classes, 13 orders and 37 families. Among them, Insecta accounted for the most (35 species, accounting for 77.80%). The dominant species were *Parafossarulus sinensis*, *Heptagenia* sp., *Ecdyonurus* sp., *Paragnetina* sp. and *Baetis* sp. In terms of time, the density and biomass in the normal water period were greater than those in the wet period, and the community biodiversity index in the wet period was greater than that in the normal water period. From the perspective of space, the order of density is Linjiang management station > Dabaitang management station > Xiaoba management station > Changchagou management station > Sanchahe management station. The order of biomass size is Linjiang management station > Xiaoba management station > Changqiangou management station > Sanchahe management station > Dabaitang management station. The order of Shannon-Wiener diversity index was Dabaitang management station > Xiaoba management station > Changqiangou management station > Sanchahe management station > Linjiang management station. The results of physical and chemical parameters of water quality show that the water quality of Xishui Reserve is in Class II water, and the water quality is good. The Shannon-Wiener diversity index shows that the water quality of the reserve is lightly polluted, and the Biological Index (BI) shows that the water quality of the reserve is clean. Combined with the physical and chemical parameters of water quality and the results of the pollution tolerance of the dominant species of macrobenthos in the reserve, this study believes that the results of BI are more in line with the actual water quality of the reserve. The results of this study show that the macrobenthos in Xishui Reserve are mainly aquatic insects, and the water quality is clean.

Key words: macroinvertebrate; community structure; water quality assessment; Xishui National Nature Reserve of Guizhou Province

责任编辑: 陆雁, 陈少凡