

## ◆特邀栏目◆

喀斯特洞穴大型底栖动物群落结构与环境因子的关系——以贵州惠水3个洞穴为例<sup>\*</sup>吴永英, 杜维锋, 张思强, 徐承香<sup>\*\*</sup>, 杨爱军, 陈思旗, 杨瑞雪, 姜雪梅

(贵州师范大学生命科学院, 贵州贵阳 550025)

**摘要:**为了解喀斯特洞穴大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系,选择贵州省惠水县的龙洞、牛洞、龙潭洞作为研究对象,分析洞穴大型底栖动物的群落组成、现存量、生物多样性特征,并且运用 Spearman 相关性分析洞穴部分环境因子与底栖动物群落结构的关系,同时基于底栖动物生物学指数对洞穴水质作出评价。结果表明:夏、冬两季共采集到大型底栖动物 39 种,隶属 4 门 5 纲 10 目 31 科,以节肢动物和软体动物为主。洞穴大型底栖动物密度在季节上表现为夏季>冬季,在空间上表现为有光带>弱光带>黑暗带,生物量则无明显时空变化。Spearman 相关性分析表明,夏季影响洞穴大型底栖动物群落结构的主要环境因子是光照强度、沉积物有机质和浊度,冬季影响洞穴大型底栖动物群落结构的主要环境因子是光照强度、总氮和水温。Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数及科级水平生物指数(Family-Level Biotic Index, FBI) 3 种生物指数评价洞穴水质状况有差异,FBI 的评价结果与洞穴的实际水质情况更符合。

**关键词:**喀斯特洞穴 大型底栖动物 群落结构 环境因子 水质评价

中图分类号:Q958.1 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)05-0984-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20221116.019

大型底栖动物是指生活史的全部或大部分时间生活在水体底部的无脊椎动物群,是淡水生态系统的重要生物类群,主要包括涡虫类、环节动物、软体动物、水生昆虫以及甲壳类等<sup>[1]</sup>。大型底栖动物处于水生生态系统食物链的中间环节,既以小型底栖动物和有机碎屑为食,又被鱼类等经济动物所捕食,也可以

促进有机碎屑分解和调节泥与水界面的物质交换,在水生生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用<sup>[2,3]</sup>。此外,底栖动物生活环境相对固定,具有对水体环境变化十分敏感、易采集和易鉴别等特点,因此被广泛用作水域生态健康监测和水质生物学评价<sup>[4,5]</sup>。

收稿日期:2021-09-30

修回日期:2021-11-11

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(31660152),贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1416)和 2020 级大学生创新创业训练计划项目(2020617)资助。

## 【作者简介】

吴永英(1999-),女,在读本科生,主要从事生物科学研究,E-mail:1853812578@qq.com。

## 【\*\*通信作者】

徐承香(1984-),女,博士,教授,主要从事洞穴动物学与生态学研究,E-mail:xcxiang119@163.com。

## 【引用本文】

吴永英,杜维锋,张思强,等.喀斯特洞穴大型底栖动物群落结构与环境因子的关系——以贵州惠水3个洞穴为例[J].广西科学,2022,29(5):984-994.

WU Y Y, DU W F, ZHANG S Q, et al. Relationships between Macro-benthic Community Structure and Environmental Factors in Karst Caves: A Case Study of Three Caves in Huishui, Guizhou Province [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(5): 984-994.

喀斯特洞穴是一种相对封闭的地下生态系统, 光照强度低、食物匮乏等是其显著特点<sup>[6]</sup>。在洞穴水域生态系统中, 底栖动物是主要的生物类群, 在物质分解和维持生态系统功能的完整性上有着至关重要的作用。国外对洞穴底栖动物的研究较深入, 主要涉及洞穴底栖动物分类<sup>[7]</sup>、食物来源<sup>[8,9]</sup>、生理<sup>[10,11]</sup>、适应性进化<sup>[12,13]</sup>以及对有机污染的响应<sup>[14]</sup>等。此外, 国外对洞穴底栖动物群落结构与环境因子关系的研究也较多, 主要涉及的环境因子有溶解氧、水温、水体 pH、沉积物有机质等<sup>[15,16]</sup>。相较国外而言, 我国对洞穴底栖动物的研究还处于起步阶段, 主要涉及底栖动物分类和区系分析等<sup>[17-19]</sup>, 对洞穴内底栖动物群落结构及其与环境因子关系的研究则更少, 仅有对浙江寿昌江附近喀斯特洞穴内大型底栖动物物种组成和群落多样性的研究<sup>[20]</sup>, 尚无关于贵州惠水喀斯特洞穴底栖动物群落结构及其与环境关系的研究报道。因此, 本研究选择贵州省惠水县 3 个典型喀斯特洞穴作为研究对象, 分析洞穴底栖动物的群落组成、现存量、生物多样性特征, 并且运用 Spearman 相关性分析洞穴部分环境因子与底栖动物群落结构的关系, 同时基于底栖动物生物学指数对洞穴水质作出评价, 旨在为洞穴动物多样性保护、小流域生态学研究 and 洞穴资源的开发利用提供基础数据, 了解不同季节洞穴底栖动物群落组成的变化, 以期当地村民的洞穴用水安全提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点和采样时间

本文选取贵州省惠水县的龙洞、牛洞和龙潭洞作为研究对象, 选取的标准为冬、夏两季均有水流, 且洞穴规模较大, 人能进入洞中采样。于 2020 年 8 月(夏季)和 2021 年 1 月(冬季)对龙洞、牛洞和龙潭洞进行大型底栖动物的调查, 并用 eTrex Venture GPS 定位每个洞穴的地理位置。各洞穴环境概况如下:

龙洞位于羨塘镇桃源村, 地理位置为 25°49'31.79" N, 106°48'12.63" E, 海拔 893 m。该洞穴位于桃源村庄附近, 人为干扰较强, 弱光带和有光带有人为修建的水渠, 用于引流洞穴水作为生活用水和进行农田灌溉。

牛洞位于抵季乡雅洲村, 地理位置为 25°50'11.24" N, 106°41'49.41" E, 海拔 971 m。洞穴常年有流水, 水面清澈。附近村民使用该洞穴水作为生活用水、进行农田灌溉和水产养殖。

龙潭洞位于断杉镇青山村, 地理位置为 25°51'14.19" N, 106°41'28.76" E, 海拔 977 m。该洞穴水流较大, 洞口有人为修建的堤坝。调查时发现附近村民经常来此洞穴钓鱼, 且该水源被用作当地的灌溉用水和用于水产养殖。

### 1.2 样品采集及环境因子测定

大型底栖动物采集及鉴定: 根据每个光带的生境选择采样点, 使用 D 形网(30 cm×30 cm, 网孔为 0.5 mm)逆水流采集大型底栖动物, 一般各样点采样 5-10 min<sup>[1]</sup>, 将收集物放入 60 目网筛中, 人工挑出活体大型底栖动物标本, 放入盛有 75% 酒精的塑料瓶, 在实验室参考《中国经济动物志·淡水软体动物》<sup>[21]</sup>、《淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学》<sup>[22]</sup>等进行分类鉴定。用电子秤(精密密度为 0.000 1 g)称量每个种类所有个体的质量(湿重), 最后计算出其生物量( $g \cdot m^{-2}$ )。

光照强度: 使用 PM6612 光照度计测量洞穴光照强度, 并将每个洞穴划分为有光带(光照度 > 10 lx)、弱光带(光照度 0.1 - 10 lx)和黑暗带(光照度 < 0.1 lx)<sup>[23]</sup>。

沉积物: 在各光带水域底部分别进行梅花点混合采集沉积物, 每袋沉积物约 1 kg, 带回实验室进行干燥处理之后, 用重铬酸钾容量法测定沉积物有机质<sup>[24]</sup>。

水体环境因子的测定和水样采集: 使用 LB-2000 型便携式多参数水体分析仪现场测定溶解氧(DO)、浊度(TUB)和水温(WT), 用酸碱试纸测定水体酸碱度(pH 值)。在采集动物样品前, 每个光带采集水样 1 500 mL 装入聚乙烯塑料瓶, 低温保存, 且 48 h 内带回实验室, 参照《水和废水监测分析方法》<sup>[25]</sup>测量总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)。

### 1.3 数据分析

#### 1.3.1 优势种

采用优势度指数(Y)确定每个样点的底栖动物优势种<sup>[26]</sup>。

$$Y = (N_i / N) \times f_i,$$

式中:  $N$  为样品中生物总个体数,  $N_i$  为第  $i$  种的生物个体数,  $f_i$  为该种出现的频率。当  $Y \geq 0.02$  时, 即为底栖动物优势种。

#### 1.3.2 群落生物多样性指数

测度群落结构的特征指数主要有底栖动物 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )、Margalef 指数( $D$ )及 Pielou 指数( $J'$ )<sup>[27]</sup>, 其公式如下:

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

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

$$J' = \frac{H'}{\ln S},$$

式中:  $S$  为样品中物种数;  $P_i$  为第  $i$  种底栖动物占总的底栖动物个体的比例, 即  $P_i = N_i / N$ ;  $N$  为样品中生物总个体数。

#### 1.4 水质生物学评价指标及标准

应用 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )、Margalef 指数 ( $D$ ) 和科级水平生物指数 (Family-Level Biotic Index, FBI) 进行水质生物健康评价, 评价标准见表 1<sup>[1,28]</sup>。

$$FBI = \sum_{i=1}^F \frac{n_i t_i}{N},$$

表 1 生物学指数的水质评价标准

Table 1 Water quality evaluation standard of biological index

水质级别 Water quality grade	$H'$	$D$	FBI
Severe pollution			7.26 - 10.00
Serious pollution	<1.00	1.00	6.51 - 7.25
Medium pollution	1.00 - 2.00	1.00 - 2.00	5.76 - 6.50
Light pollution	2.00 - 3.00	2.00 - 3.00	5.01 - 5.75
Clean	>3.00	>3.00	0.00 - 5.00

表 2 洞穴大型底栖动物名录

Table 2 List of macrobenthos in caves

种类 Species	LC1	LC2	LC3	NC1	NC2	NC3	LTC1	LTC2	LTC3
Platyelminthes									
<i>Dugesia</i> sp.				+			+		
Annelida									
Lumbriculidae 1 species				+	+				
Mollusca									
<i>Rivularia</i> sp.	+			+			+		
<i>Bithynia</i> sp.				+					
<i>Semisucospira libertina</i>								+	
<i>Oncomelania hupensis</i>								+	
<i>Radix</i> sp.								+	
<i>Gyraulus albus</i>				+				+	
Arthropoda									
<i>Ephemera</i> sp.				+					
<i>Caenis</i> sp.	+			+					
<i>Heptagenia</i> sp.				+				+	
<i>Choroterpes tumebasalis</i>	+			+		+			
<i>Habrophlebiodes</i> sp.				+	+			+	
<i>Gilliesia pulchra</i>				+					

式中:  $F$  为总的科数,  $n_i$  为第  $i$  科的个体数,  $t_i$  为第  $i$  科的耐污值,  $N$  为样品中生物总个体数。

## 2 结果与分析

### 2.1 洞穴底栖动物群落结构

#### 2.1.1 底栖动物物种组成及优势种

2020年8月(夏季)和2021年1月(冬季)对龙洞、牛洞和龙潭洞进行大型底栖动物的调查,共采集到大型底栖动物1398头,经鉴定共39种,隶属4门5纲10目31科(表2)。夏季38种,冬季20种,共有种19种,其中节肢动物门 Arthropoda 物种数最多,有31种,占比79.49%,包括昆虫纲 Insecta 29种和甲壳纲 Crustacea 2种;软体动物门 Mollusca 次之,有6种,占比15.38%;环节动物门 Annelida 和扁形动物门 Platyhelminthes 最少,各门仅有1种,分别占比2.56%(图1,图2)。总体表明洞穴大型底栖动物以节肢动物门为主,昆虫纲主要是蜉蝣目 Ephemeroptera、襀翅目 Plecoptera、毛翅目 Trichoptera (EPT类)和双翅目 Diptera,甲壳纲主要为十足目 Decapoda。

续表

Continued table

种类 Species	LC1	LC2	LC3	NC1	NC2	NC3	LTC1	LTC2	LTC3
<i>Baetis</i> sp.	+			+	+		+		+
<i>Procladius</i> sp.				+					
<i>Centroptilum</i> sp.				+					
Philopotamidae 1 species				+					
<i>Plectrocnemia</i> sp.	+			+			+		
<i>Cheumatopsyche</i> sp.							+		
<i>Ecnomus</i> sp.							+		
<i>Hydroptila</i> sp.							+		+
Rhacophilidae 1 species							+		
<i>Metatypa</i> sp.				+					
Capniidae 1 specie				+	+		+		
Perlidae 1 specie	+			+	+	+	+		
Chironomidae 1 species	+						+		
<i>Ablabesmyia</i> sp.	+			+					
<i>Clinotarypus</i> sp.	+	+							
Tipulidae 1 species	+						+		
<i>Picranota</i> sp.				+					
Stratiomyidae 1 species							+		
<i>Culicinae</i> sp.				+	+			+	
Simuliidae 1 species	+	+	+				+		
<i>Macromla</i> sp.	+								
<i>Stenelmis</i> sp.							+		+
<i>Hydrophilus</i> sp.				+					
<i>Neocaridina</i> sp.				+	+		+		
<i>Sinopotamon</i> sp.	+	+		+		+	+		

Note: "+" represents the appearance at the sample; LC1 - Light zone of Long Cave; LC2 - Twilight zone of Long Cave; LC3 - Dark zone of Long Cave; NC1 - Light zone of Niu Cave; NC2 - Twilight zone of Niu Cave; NC3 - Dark zone of Long Cave; LTC1 - Light zone of Longtan Cave; LTC2 - Twilight zone of Longtan Cave; LTC3 - Dark zone of Longtan Cave

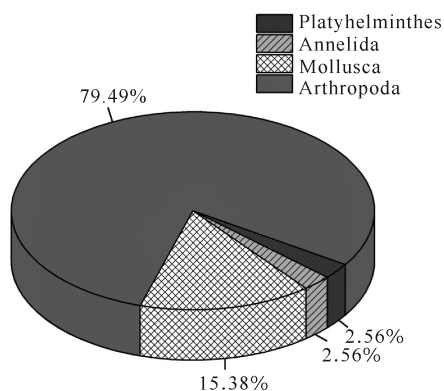


图 1 龙洞、牛洞和龙潭洞底栖动物各类群种数百分比

Fig. 1 Percentage of benthic species in various groups in Long Cave, Niu Cave and Longtan Cave

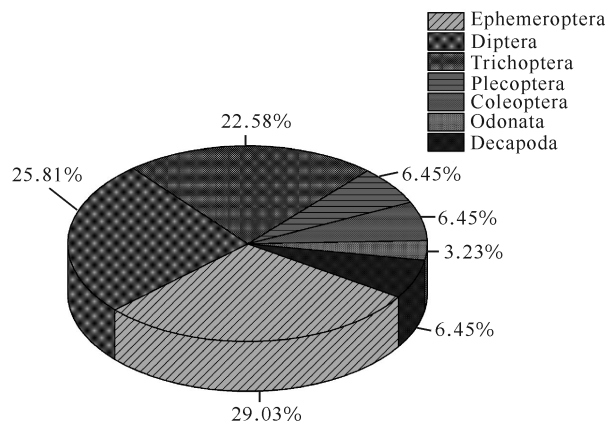


图 2 龙洞、牛洞和龙潭洞节肢动物各类群物种数百分比

Fig. 2 Percentage of arthropod species in various groups in Long Cave, Niu Cave and Longtan Cave

按照调查的3个洞穴来看,优势种由节肢动物和软体动物组成,不同季节同一洞穴,优势种不同,同一季节不同洞穴之间的优势种也不同,即使有的种类相同,优势度也有差异(表3)。夏季:龙洞优势种有5种,分别为河螺 *Rivularia* sp.、四节蜉 *Baetis* sp.、多距石蛾 *Pohycentropus* sp.、摇蚊科 Chironomidae 1种、蚋科 Simuliidae 1种;牛洞有5种,分别为豆螺

*Bithynia* sp.、原二翅蜉 *Procloen* sp.、襁科 Perlidae 1种、库蚊 *Culicinae* sp.、新米虾 *Neocaridina* sp.;龙潭洞仅有2种,为河螺和四节蜉。冬季:龙洞的优势种仅有菱跗摇蚊 *Clinoyanypus* sp.;牛洞有2种,分别为豆螺和新米虾;龙潭洞有4种,分别为河螺、扁蜉 *Heptagenia* sp.、四节蜉、新米虾。

表3 龙洞、牛洞和龙潭洞的优势种及其优势度指数(Y)

Table 3 Dominant species and their dominance index (Y) in Long Cave, Niu Cave and Longtan Cave

优势种 Dominant species	龙洞 Long Cave		牛洞 Niu Cave		龙潭洞 Longtan Cave	
	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter
Mollusca	<i>Rivularia</i> sp.	0.029 1			0.058 5	0.111 8
	<i>Bithynia</i> sp.		0.077 7	0.100 0		
Arthropoda	<i>Heptagenia</i> sp.					0.061 0
	<i>Baetis</i> sp.	0.062 6			0.375 3	0.044 7
	<i>Procloen</i> sp.		0.033 0			
	<i>Pohycentropus</i> sp.	0.024 6				
	Perlidae 1 species		0.095 2			
	Chironomidae 1 species	0.082 8				
	<i>Clinoyanypus</i> sp.		0.661 5			
	<i>Culicinae</i> sp.		0.036 9			
	Simuliidae 1 species	0.268 5				
	<i>Neocaridina</i> sp.		0.038 9	0.363 4		0.067 1

### 2.1.2 底栖动物季节变化

从季节上看,夏季龙洞、牛洞和龙潭洞的大型底栖动物物种数均多于冬季。夏季物种数较高的样点是牛洞、龙潭洞和龙洞的有光带(NC1、LTC1、LC1),分别有24种、22种和12种,其主要组成是EPT类水生昆虫和软体动物。冬季物种数最高的是龙潭洞的有光带(LTC1),有12种,其次是牛洞有光带(NC1),有11种,而龙洞有光带(LC1)仅采集到2种,其中菱跗摇蚊个体数占比高达99.21%;夏季洞穴大型底栖动物密度最高为48.47 ind. · m<sup>-2</sup>,冬季最高为46.14 ind. · m<sup>-2</sup>,均位于牛洞有光带(NC1),3个洞穴的弱光带和黑暗带采集到的大型底栖动物极少或无,所以导致弱光带和黑暗带密度低;夏季洞穴大型底栖动物生物量最高为2.38 g · m<sup>-2</sup>,冬季为1.70 g · m<sup>-2</sup>,也均位于牛洞有光带(NC1)。

独立样本 T 检验表明,3个洞穴的大型底栖动物物种数、密度和生物量在夏、冬两季之间均无显著差异(P>0.05),但均为夏季>冬季。

### 2.1.3 底栖动物空间分布

从空间上看(图3),牛洞有光带的大型底栖动物密度最高(47.27 ind. · m<sup>-2</sup>),龙洞有光带次之(22.08 ind. · m<sup>-2</sup>),密度最低的为龙潭洞黑暗带(0.20 ind. · m<sup>-2</sup>)。洞穴大型底栖动物的生物量主要取决于甲壳纲和腹足纲 Gastropoda,其中大型底栖动物生物量较大的是2.04 g · m<sup>-2</sup>、1.66 g · m<sup>-2</sup>,分别位于牛洞有光带(NC1)和龙洞弱光带(LC2)。3个洞穴大型底栖动物密度在光带之间的变化规律均为有光带>弱光带>黑暗带,而生物量的变化是无规律的。



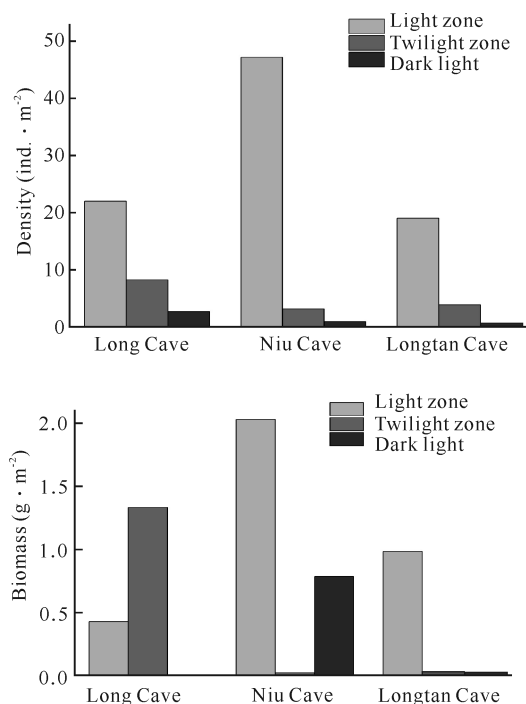


图3 龙洞、牛洞、龙潭洞大型底栖动物的密度和生物量

Fig. 3 Density and biomass of macrobenthos in Long Cave, Niu Cave and Longtan Cave

表4 洞穴大型底栖动物生物多样性指数

Table 4 Biodiversity index of macrobenthos in caves

样点 Sample site	Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ ) Shannon-Wiener index ( $H'$ )		Margalef 指数 ( $D$ ) Margalef index ( $D$ )		Pielou 指数 ( $J'$ ) Pielou index ( $J'$ )	
	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter
	LC1	1.83	0.05	2.34	0.21	0.74
LC2	0.14	0.00	0.29	0.00	0.21	0.00
LC3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NC1	2.44	1.19	4.05	1.75	0.77	0.50
NC2	0.84	0.95	1.28	1.24	0.47	0.86
NC3	0.00	0.45	0.00	0.56	0.00	0.65
LTC1	1.67	1.74	3.86	2.17	0.53	0.70
LTC2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LTC3	1.10	0.00	1.82	0.00	1.00	0.00

Note: LC1 - Light zone of Long Cave; LC2 - Twilight zone of Long Cave; LC3 - Dark zone of Long Cave; NC1 - Light zone of Niu Cave; NC2 - Twilight zone of Niu Cave; NC3 - Dark zone of Long Cave; LTC1 - Light zone of Longtan Cave; LTC2 - Twilight zone of Longtan Cave; LTC3 - Dark zone of Longtan Cave

#### 2.1.4 底栖动物群落的生物多样性变化

夏、冬两季洞穴大型底栖动物的 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )、Margalef 指数 ( $D$ ) 及 Pielou 指数 ( $J'$ ) 空间分布差异性较大 (表 4), 3 个洞穴的有光带 (LC1、NC1、LTC1) 两季均表现出较高的生物指数, 而龙洞黑暗带 (LC3) 和龙潭洞弱光带 (LTC2) 的生物指数均为 0。生物指数大致呈现有光带 > 弱光带 > 黑暗带的趋势, 但龙潭洞夏季是有光带 > 黑暗带 > 弱光带。夏季 3 个洞穴大型底栖动物多样性差距较小, 均是有光带生物多样性最高,  $H'$  值为 0.00 - 2.44,  $D$  值为 0.00 - 4.05,  $J'$  值为 0.00 - 1.00, 其中牛洞有光带 (NC1) 的  $H'$  值和  $D$  值均最大, 龙潭洞黑暗带 (LTC3)  $J'$  值最大; 冬季所有样点中,  $H'$  值为 0.00 - 1.74,  $D$  值为 0.00 - 2.17,  $J'$  值为 0.00 - 0.86, 其中龙潭洞有光带 (LTC1) 的  $H'$  值和  $D$  值均最大, 牛洞弱光带 (NC2) 的  $J'$  值最大, 而且龙洞的底栖动物多样性指数明显低于其他两个洞穴。

#### 2.2 底栖动物群落结构与环境因子的关系

根据夏季和冬季对大型洞穴底栖动物及环境因子的调查, 对大型底栖动物的群落结构与环境因子之间进行 Spearman 相关性分析 (表 5 和表 6)。

表5 夏季洞穴大型底栖动物与环境因子相关性分析

Table 5 Correlation analysis between macrobenthos and environmental factors in summer

项目 Item	Shannon-Wiener 指数( $H'$ ) Shannon-Wiener index ( $H'$ )	Margalef 指数( $D$ ) Margalef index ( $D$ )	Pielou 指数( $J'$ ) Pielou index ( $J'$ )	密度 Density	生物量 Biomass	物种数 Species
WT	0.383	0.357	0.357	0.268	0.326	0.244
TN	-0.044	-0.044	-0.285	0.192	-0.035	0.110
TP	-0.179	-0.179	-0.340	0.053	0.193	-0.176
DO	-0.271	-0.220	-0.034	-0.550	-0.417	-0.326
NH <sub>3</sub> -N	-0.383	-0.357	-0.174	-0.556	-0.496	-0.507
TUB	-0.310	-0.241	-0.017	-0.678 *	-0.661	-0.332
pH value	0.339	0.287	0.235	0.487	0.530	0.288
LI	0.759 *	0.776 *	0.448	0.780 *	0.661	0.783 *
SOM	0.576	0.525	0.305	0.717 *	0.683 *	0.552

Note: \* represents a significant correlation at the level of 0.05 (bilateral); WT - Water temperature; TN - Total nitrogen; TP - Total phosphorus; DO - Dissolved oxygen; NH<sub>3</sub>-N - Ammonia nitrogen; TUB - Turbidity; LI - Light intensity; SOM - Sediment organic matter

表6 冬季洞穴大型底栖动物与环境因子的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between macrobenthos and environmental factors in winter

项目 Item	Shannon-Wiener 指数( $H'$ ) Shannon-Wiener index ( $H'$ )	Margalef 指数( $D$ ) Margalef index ( $D$ )	Pielou 指数( $J'$ ) Pielou index ( $J'$ )	密度 Density	生物量 Biomass	物种数 Species
WT	-0.641	-0.641	-0.755 *	-0.305	-0.662	-0.539
TN	0.367	0.367	0.122	0.692 *	0.748 *	0.404
TP	0.338	0.338	0.144	0.523	0.254	0.496
DO	0.074	0.074	0.127	0.401	0.546	0.116
NH <sub>3</sub> -N	-0.031	-0.031	-0.039	-0.105	-0.118	-0.094
TUT	-0.426	-0.426	-0.635	0.160	-0.134	-0.308
pH value	-0.326	-0.326	-0.335	0.009	0.009	-0.280
LI	0.637	0.637	0.390	0.889 **	0.630	0.887 **
SOM	-0.013	-0.013	-0.135	0.283	0.008	0.107

Note: \*\* indicates extremely significant correlation at 0.01 level (bilateral), \* represents a significant correlation at the level of 0.05 (bilateral); WT - Water temperature; TN - Total nitrogen; TP - Total phosphorus; DO - Dissolved oxygen; NH<sub>3</sub>-N - Ammonia nitrogen; TUB - Turbidity; LI - Light intensity; SOM - Sediment organic matter

综合表5和表6,光照强度在夏、冬两季均影响洞穴大型底栖动物的多样性,是影响群落结构的主要环境因子。夏季:Shannon-Wiener指数和Margalef指数、密度、物种数均与光照强度(LI)呈显著正相关( $P < 0.05$ ),密度、生物量与沉积物有机质(SOM)呈显著正相关( $P < 0.05$ ),密度与浊度(TUB)呈显著负相关。冬季:密度和物种数与光照强度(LI)呈显著正相关( $P < 0.05$ ),生物量和密度与总氮(TN)呈显著正相关( $P < 0.05$ ),Pielou指数与温度(WT)呈显著负相关( $P < 0.05$ )。

### 2.3 水质生物评价

使用Shannon-Wiener指数、Margalef指数及FBI对3个洞穴进行夏季和冬季的水质评价(表7)。Shannon-Wiener指数评价结果显示:龙洞夏季和冬季分别为轻污染和重污染,牛洞则为轻污染和中污染,龙潭洞均为中污染;而使用Margalef指数评价,龙洞两个水期差别较大,冬季和夏季分别为轻污染和重污染,牛洞为清洁和轻污染,龙潭洞为清洁和轻污染;FBI评价显示,每个洞穴不同季节的水质均一致,龙洞轻污染,而牛洞和龙潭洞均为清洁水平。

表 7 洞穴水质生物学评价指数结果

Table 7 Results of biological evaluation of water quality in cave

洞穴 Cave	季节 Season	Shannon-Wiener 指数( $H'$ ) Shannon-Wiener index ( $H'$ )		Margalef 指数( $D$ ) Margalef index ( $D$ )		FBI	
		指数值 Index value	水质级别 Water quality grade	指数值 Index value	水质级别 Water quality grade	指数值 Index value	水质级别 Water quality grade
Long Cave	Summer	2.15	Light pollution	2.59	Light pollution	5.07	Light pollution
	Winter	0.09	Serious pollution	0.21	Serious pollution	5.69	Light pollution
Niu Cave	Summer	2.66	Light pollution	4.44	Clean	4.43	Clean
	Winter	1.31	Medium pollution	2.44	Light pollution	4.88	Clean
Longtan Cave	Summer	1.72	Medium pollution	4.20	Clean	4.78	Clean
	Winter	1.83	Medium pollution	2.35	Light pollution	4.78	Clean

### 3 讨论

#### 3.1 洞穴底栖动物群落结构特征

有学者对张家界洞穴外溪的大型底栖动物进行调查,其结果是水生昆虫为优势类群,相对丰度高达 97.05%<sup>[29]</sup>;薛俊增等<sup>[20]</sup>对浙江寿昌江附近的喀斯特洞穴底栖动物的调查中,洞穴底栖动物的物种组成主要是软体动物和水生昆虫。这与本次调查的 3 个洞穴结果一致,洞穴大型底栖动物优势种主要为水生昆虫类、螺类和甲壳类。虽然本次调查的 3 个洞穴都位于贵州省惠水县,但存在一定的地理隔离,水流也不贯通,所以造成 3 个洞穴的大型底栖动物优势种不同。

Death<sup>[30]</sup>对新西兰 3 个洞穴底栖动物的研究中,结论是洞内底栖动物的密度始终低于洞外。在洞穴陆生动物的研究中,洞穴动物的生物多样性沿着有光带、弱光带、黑暗带呈递减趋势<sup>[31]</sup>,本研究中洞穴大型底栖动物群落结构与其基本一致,3 个洞穴不同光带的底栖动物密度变化规律均为有光带>弱光带>黑暗带。与贵州乌江流域相比<sup>[32]</sup>,洞穴大型底栖动物密度、生物量和物种数均较低,甚至洞穴的弱光带和黑暗带底栖动物数量极少或无,而有光带相对较多,主要是由水生昆虫组成。

夏、冬两季调查中,龙洞的物种数差异较大,夏季采集到 12 种,且物种分布较均匀。调查时发现,龙洞有光带大部分地面均有流水且有一些鹅卵石、枯枝、树叶等,这些条件为底栖动物提供了食物和良好的栖息环境,而冬季龙洞有光带仅采集到 2 种,且菱跗摇蚊属占比为 99.21%,原因可能是冬季调查前,洞穴情况被当地村民人为破坏,造成物种数急剧减少;牛洞和龙潭洞物种数差异较小,洞穴弱光带和黑暗带物

种数均无太大变化,冬季有光带的物种数较夏季减少;在洞穴外大型底栖动物研究中,大型底栖动物密度和生物量的季节性变化主要与底栖动物群落结构和不同类群的生活史特点有关<sup>[33,34]</sup>,如摇蚊幼虫主要在春季至秋季的适宜温度下繁殖,在夏季羽化离水后现存量小<sup>[35]</sup>,龙洞摇蚊幼虫符合上述规律。洞穴大型底栖动物的生物量并不是有光带多于弱光带和黑暗带,这是由于本次调查的洞穴底栖动物生物量主要取决于螺类和甲壳类,而甲壳类在弱光带和黑暗带密度虽很小,但其个体较大,所以导致龙洞弱光带(LC2)和牛洞黑暗带(NC3)的生物量较大。

#### 3.2 底栖动物群落结构与环境因子的关系

在洞外水生生态系统的研究中,沉积物有机质、水温、溶解氧、水体 pH 值、营养水平等环境因子对大型底栖动物群落结构有重要影响<sup>[36,37]</sup>,而在喀斯特洞穴内,光照强度和食物是影响大型底栖动物群落结构的重要因素<sup>[20]</sup>。外国学者测量洞穴内岩石表面的叶绿素 a 和褐色素,其结果是随着光照强度的降低而减少,同时洞穴黑暗处岩石表面无附生植物且有机质层极少,没有适合作为底栖动物食物的底栖物质,这些条件的改变极大地减少了底栖动物物种数和密度<sup>[30]</sup>。光照强度降低还会使洞穴中初级生产者无法进行光合作用<sup>[38]</sup>,而初级光合产物是大多数食物网的基础,并且洞穴中很少有以化学自养的方式提供能量,因此地下系统必须依靠外部输入食物<sup>[39]</sup>。在本研究中,光照强度在夏、冬两季对洞穴大型底栖动物群落结构均有显著正相关性( $P < 0.05$ ),是影响底栖动物的关键环境因子。在新西兰北部河流, Towns<sup>[40]</sup>对一段河床进行人工遮阳,其结果导致了底栖动物物种丰度的变化,该实验验证了光照强度对底栖动物群落的影响。



除此之外, 洞穴大型底栖动物群落结构还受到其他因素的影响, 如沉积物有机质、温度、溶解氧等<sup>[15,16]</sup>。大型底栖动物与沉积物有密切联系, 其原因是底栖动物生活史的大部分时间都要与沉积物接触, 水体表层沉积物有助于底栖动物捕食、躲避敌害等, 而且还能为其产卵和繁殖提供条件<sup>[41,42]</sup>。夏季调查期间水流量较大, 在一些样点水流湍急, 导致水体浑浊, 这也可能是影响大型底栖动物分布的因素之一。本研究得出, 在夏季, 洞穴大型底栖动物密度、生物量与沉积物有机质呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 密度与浊度(TUB)呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 而在冬季无显著相关性。在淀山湖的研究中, 底栖动物群落结构与总氮(TN)呈显著正相关( $P < 0.05$ )<sup>[27]</sup>, 摇蚊是耐污的类群, 其分布与水体营养水平有着密切的关系<sup>[43]</sup>。本研究中, 摇蚊有2种为优势种, 其原因可能是对营养水平较高的水体有耐性, 导致其密度伴随总氮升高而增加。

### 3.3 水质生物学评价

采用 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数对洞穴水质进行评价, 结果显示, 3个洞穴均受到不同程度的污染, 且在冬季时龙洞水质达到重污染, 与实际调查水质情况不符。FBI 评价结果表明, 夏季和冬季水质评价结果均一致, 龙洞水质为轻污染, 牛洞和龙潭洞水质为清洁, 该评价结果与实际水质情况最为贴近。其原因是洞穴水质较好, 未见排污、人为破坏等因素对洞穴水质有严重污染的现象, 适合用于贵州惠水洞穴的水质评价。Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数只考虑底栖动物群落的物种数, 而不考虑其群落组成的差异性, 并且洞穴底栖动物生物多样性指数低, 所以采用这两种评价指数评价洞穴水质具有一定的局限性。在龙子祠泉域的水质评价中, Shannon-Wiener 指数不适合用于泉域的水质评价<sup>[44]</sup>, 陆晓晗等<sup>[26]</sup>也提出 Margalef 指数对付疇河流域水质评价有偏差。FBI 评价法不仅考虑了底栖动物本身的耐污值, 而且也考虑了物种的个体数, 从而增强了评价的可靠性, 如牛洞的优势种新米虾是耐污指数相对较低物种, 而 FBI 就考虑到了耐污值和数量, 因此可更好地对洞穴水质进行评价。

## 4 结论

本研究在贵州省惠水县的龙洞、牛洞、龙潭洞3个洞穴共采集到大型底栖动物39种, 主要有涡虫类、软体动物、水生昆虫和甲壳类等。优势种12种, 主要

由软体动物和节肢动物组成。洞穴大型底栖动物的物种数、密度和生物量在夏季和冬季无显著差异, 但总体表现为夏季 > 冬季。

洞穴大型底栖动物群落结构受洞穴环境因子的影响。夏季影响洞穴大型底栖动物群落结构的主要环境因子为光照强度、沉积物有机质和浊度; 冬季影响洞穴大型底栖动物群落结构的主要环境因子为光照强度、总氮和温度。

Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数对夏季和冬季洞穴水质的评价结果差异较大。FBI 对夏季和冬季洞穴水质的评价结果一致, 其中龙洞均为轻污染, 牛洞和龙潭洞均为清洁水平。研究发现, FBI 的评价结果与实际情况更符合, 更适合洞穴水的水质评价。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张又, 蔡永久, 张颖, 等. 河流大型底栖动物对环境压力的响应: 以太湖、巢湖流域为例 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(1): 204-217.
- [4] CASTELA J, FERREIRA V, GRACA M A S. Evaluation of stream ecological integrity using litter decomposition and benthic invertebrates [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153(2): 440-449.
- [5] 宋聘, 霍堂斌, 王秋实, 等. 红旗河夏季大型底栖动物群落结构及水质生物学评价 [J]. *水产学杂志*, 2020, 33(3): 42-49.
- [6] BARR T C. Observations on the ecology of caves [J]. *The American Naturalist*, 1967, 101(922): 475-491.
- [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] SIMON K S, BENFIELD E F, MACKO S A. Food web structure and the role of epilithic biofilms in cave streams [J]. *Ecology*, 2003, 84(9): 2395-2406.
- [9] SOUZA-SILVA M, JÚNIOR A S, FERREIRA R L. Food resource availability in a quartzite cave in the Brazilian montane Atlantic Forest [J]. *Journal of Caves and Karst Studies*, 2013, 75(3): 177-188.
- [10] MÖSSLACHER F, CHÂTELLIERS M C D. Physio-

- logical and behavioural adaptations of an epigeal and a hypogean dwelling population of *Asellus aquaticus* (L.) (Crustacea, Isopoda) [J]. *Archiv Für Hydrobiologie*, 1996, 138(2): 187-198.
- [11] JEMEC A, ŠKUFCA D, PREVORČNIK S, et al. Comparative study of acetylcholinesterase and glutathione S-transferase activities of closely related cave and surface *Asellus aquaticus* (Isopoda: Crustacea) [J]. *Plos One*, 2017, 12(5): 1-14.
- [12] PROTAS M E, TRONTELJ P, PATEL N H. Genetic basis of eye and pigment loss in the cave crustacean, *Asellus aquaticus* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(14): 5702-5707.
- [13] BRANCELJ A. The epikarst habitat in Slovenia and the description of a new species [J]. *Journal of Natural History*, 2006, 40: 403-413.
- [14] WOOD P J, GUNN J, RUNDLE S D. Response of benthic cave invertebrates to organic pollution events [J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 2008, 18: 909-922.
- [15] PELLEGRINI T G, POMPEU P S, FERREIRA R L. Cave benthic invertebrates in south-eastern Brazil: Are there 'key' factors structuring such communities? [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69: 1762-1770.
- [16] TAYLOR E L S, FERREIRA R L L. Determinants on the structure of an aquatic invertebrate community in a neotropical limestone cave [J]. *Revista Brasileira de Espeleologia*, 2011, 2(1): 1-12.
- [17] 陈德牛, 黎道洪, 罗泰昌. 贵州洞穴淡水、陆生贝类区系及新种记述[J]. *动物分类学报*, 2003, 28(4): 614-620.
- [18] LI J B, HOU Z E, AN J M. A new cave species of the genus *Gammarus* (Crustacea, Amphipoda, Gammariidae) from Sichuan, China [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2013, 38(1): 40-49.
- [19] 蓝春, 吴知鑫, 李维贤. 广西壮族自治区洞穴盲虾一新种——都安盲沼虾[J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(2): 61-62, 81.
- [20] 薛俊增, 吴惠仙. 寿昌江流域及邻近山区溶岩洞穴大型水生底栖动物[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(2): 180-183.
- [21] 刘月英, 张文珍, 王跃龙, 等. 中国经济动物志·淡水软件动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [22] TACHET H, RICHOUX P, BOURNAUD M, 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.
- [23] 黎道洪, 罗蓉, 陈许. 贵州大洞口内若干动物群落研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 126-130.
- [24] 李海玲. 土壤有机质的测定(油浴加热重铬酸钾容量法)[J]. *农业科技与信息*, 2011(10): 52-53.
- [25] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [26] 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.
- [27] 刘乐丹, 王先云, 陈丽平, 等. 淀山湖底栖动物群落结构及其与沉积物碳氮磷的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6): 1269-1278.
- [28] 王银东, 熊邦喜, 杨学芬. 用大型底栖动物对武汉南湖水质的生物学评价[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(4): 312-314.
- [29] 梁志强, 王崇瑞, 伍延安, 等. 张家界大鲵繁殖洞穴外溪冬季大型无脊椎动物[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(4): 931-943.
- [30] DEATH R G. The effect of a cave on benthic invertebrate communities in a South Island stream [J]. *New Zealand Natural Sciences*, 1989, 16: 67-78.
- [31] 徐承香, 李子忠, 黎道洪. 贵州织金洞洞穴动物群落多样性与光照强度及土壤重金属含量的关系[J]. *生物多样性*, 2013, 21(1): 62-70.
- [32] 陈许, 林陶, 秦樊鑫. 乌江流域大型底栖动物群落结构及其水质生物评价[J]. *水生态学杂志*, 2010, 3(6): 5-11.
- [33] 刘祥, 陈凯, 陈求稳, 等. 淮河流域典型河流夏秋季底栖动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 1928-1938.
- [34] 赵瑞, 赵学敏, 苟婷, 等. 广西贝江大型底栖动物群落结构时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 40-49.
- [35] 王丽卿, 吴亮, 张瑞雷, 等. 涪湖底栖动物群落的时空变化及水质生物学评价[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 1990-1996.
- [36] COOPER M J, UZARSKI D G, BURTON T M. Macroinvertebrate community composition in relation to anthropogenic disturbance, vegetation, and organic sediment depth in four Lake Michigan drowned river-mouth wetlands [J]. *Wetlands*, 2007, 27(4): 894-903.
- [37] ZHANG Q, YANG T, WAN X H, et al. Community characteristics of benthic macroinvertebrates and identification of environmental driving factors in rivers in semi-arid areas - A case study of Wei River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 121(2): 1-16.
- [38] CULVER D C. Cave life: Evolution and ecology [M].

- Massachusetts; Harvard University Press, 1982.
- [39] SARBU S M, KANE T C, KINKLE B K. A chemoautotrophically based cave ecosystem [J]. *Science*, 1996, 272(5270):1953-1955.
- [40] TOWNS D R. Effects of artificial shading on periphyton and invertebrates in a New Zealand stream [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1981, 15:185-192.
- [41] MILLER D C, GEIDER R J, MACINTYRE H L. Microphytobenthos: The ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. II. role in sediment stability and shallow-water food webs [J]. *Estuaries*, 1996, 19(2):202-212.
- [42] MCNIE P M, DEATH R G. The effect of agriculture on cave-stream invertebrate communities [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2017, 68(11):1999-2007.
- [43] 龚志军, 谢平, 唐汇涓, 等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. *水生生物学报*, 2001, 25(3):210-216.
- [44] 韩明利, 梁文明, 张元, 等. 龙子祠泉域底栖动物群落组成及水质生物学评价[J]. *水产学杂志*, 2018, 31(5):34-39.

## Relationships between Macrobenthic Community Structure and Environmental Factors in Karst Caves: A Case Study of Three Caves in Huishui, Guizhou Province

WU Yongying, DU Weifeng, ZHANG Siqiang, XU Chengxiang<sup>\* \*</sup>, YANG Aijun, CHEN Siqi, YANG Ruixue, JIANG Xuemei

(School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou, 550025, China)

**Abstract:** In order to understand the community structure of macrozoobenthos in karst caves and its relationship with environmental factors, Long cave, Niu cave and Longtan cave in Huishui County, Guizhou Province were selected as research objects to analyze the community composition, standing stock and biodiversity characteristics of macrobenthos in caves, and Spearman correlation was used to analyze the relationship between some environmental factors in caves and the community structure of macrobenthos. At the same time, the water quality of caves was evaluated based on the biological index of macrobenthos. The results showed that a total of 39 species of macrobenthos were collected in summer and winter, belonging to 4 phyla, 5 classes, 10 orders, 31 families, mainly arthropods and mollusks. The density of macrobenthos in the cave showed summer > winter in season, and showed light zone > disphotic zone > dark zone in space, while the biomass had no obvious temporal and spatial variation. Spearman correlation analysis showed that the main environmental factors affecting the community structure of macrobenthos in caves in summer were light intensity, sediment organic matter and turbidity, and the main environmental factors affecting the community structure of macrobenthos in caves in winter were light intensity, total nitrogen and water temperature. Shannon-Wiener index, Margalef index and Family-Level Biotic Index (FBI) were different in evaluating the water quality of caves. The evaluation results of FBI were more consistent with the actual water quality of caves.

**Key words:** karst cave; macrobenthos; community structure; environmental factors; water quality evaluation

责任编辑: 陆 雁