

贵州松桃腊山河洞洞穴动物群落结构与环境因子的关系研究

温清¹, 杨卫诚^{1,2*}, 陶红梅¹

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学喀斯特洞穴研究中心, 贵阳 550001)

摘要:通过对贵州省松桃县腊山河洞洞穴动物进行采集和调查,共获标本 472 号,隶属于 3 门 9 纲 19 目 33 科 38 种。按个体组成和环境差异,将腊山河洞洞穴动物划分为 4 个群落,群落多样性分析结果显示,群落 A 的物种数最多(23)、丰富度最大(4.571 7),群落多样性指数依次为群落 A (2.637 9) > B (2.475 7) > C (1.442 3) > D (1.311 5)。群落 D 均匀度指数最高(0.946 1),虽然群落 C 物种数较少但形成了较大的类群,所以优势度最高(0.378 8)。群落多样性与环境因子的 Pearson 相关性分析显示,温度与物种丰富度呈极显著正相关($r=1.000$),土壤中汞(Hg)与物种数呈显著正相关($r=0.997$),土壤中砷(As)与多样性指数、丰富度、优势度之间呈显著相关,相关系数分别为 -1.000、-0.999、0.998。重金属污染评价结果表明,3 个光带内土壤重金属 Hg、As 的综合污染指数均达到重污染等级,而水体中重金属 Hg、As 的含量均达到国家 III 类地下水水质标准,与相关性分析结果相吻合。由此可见,环境中重金属的含量与洞穴动物群落结构密切相关,影响着洞穴动物群落的组成及分布。

关键词: 洞穴动物; 汞; 砷; 群落结构; 腊山河洞; 贵州

中图分类号: Q958.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7083(2017)04-0404-08

A Study on the Relationship between Animal Community Structure and the Cave Environment Factors in Lashanhe Cave in Guizhou

WEN Qing¹, YANG Weicheng^{1,2*}, TAO Hongmei¹

(1. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Institute of Karst Caves, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Through an in-depth investigation in Lashanhe cave, a total of 472 animal specimens belonging to 3 phyla, 9 classes, 19 orders, 33 families and 38 species were obtained, and divided into 4 communities based on individual numbers and environmental differences. The result of community diversity analysis showed that the diversity indices of each community were 2.637 9 (A), 2.475 7 (B), 1.442 3 (C), and 1.311 5 (D), respectively. Specifically, community A showed the highest species number and richness indices, community D showed the highest evenness indices, and community C showed the highest dominance indices. Moreover, although the species number of community C was the lowest, it formed a larger group. The result of Pearson correlation coefficient analysis indicated that temperature was positively correlated with diversity of community (1.000). Soil mercury was positively correlated with species number (0.997), and the correlation coefficient of soil arsenic with diversity index, richness and dominance were -1.000, -0.999 and 0.998, respectively. The comprehensive pollution index reached heavy pollution level after evaluating the soil pollution of heavy metals in Lashanhe cave, while that of water pollution reached the class III quality standard for ground water. There is a close relationship between the content of heavy metals and animal community structure in cave.

Keywords: cave animals; mercury; arsenic; community structure; Lashanhe cave; Guizhou

贵州是喀斯特地貌极为丰富的省份之一,总面积占全省的 73% 以上,其中地下溶洞众多,覆盖贵州全省(冉景丞,2008)。喀斯特洞穴是一个不同于地表且较为封闭的生态系统,植物分布较少,类型比

较单一,二氧化碳含量较高(黎道洪,2007;徐承香等,2012),环境的特殊性使洞穴动物种类的组成和分布发生了特殊的演化(Culver, 1982; Biswas, 1991)。目前国内大多数对喀斯特洞穴动物的研究

收稿日期:2016-12-02 接受日期:2017-03-28

基金项目:国家自然科学基金“贵州喀斯特洞穴节肢动物资源及其与环境的关系研究”(31460570);贵州省基金“贵州喀斯特洞穴节肢动物多样性研究”(2017GZ40481)

作者简介:温清(1993—),女,硕士研究生,研究方向:动物学, E-mail:wenzqingzg@163.com

* 通信作者 Corresponding author, 男,博士,研究方向:动物学, E-mail:yangweicheng0908@sina.com

围绕重金属污染,研究内容包括环境中重金属对动物群落的影响,洞穴动物对锌(Zn)、铜(Cu)、镍(Ni)、砷(As)、铬(Cr)、汞(Hg)等重金属的富集作用等(杨卫诚,黎道洪,2010;叶子郟,黎道洪,2011;杨卫诚等,2013)。土壤中的重金属含量在一定程度上影响着洞穴动物的分布,并对其生存产生严重威胁(张广等,2015)。贵州省松桃县地属“寒武统黑色岩系区”,重金属含量较高(王兴富,顾秉谦,2016),国内对这一区系内的洞穴动物群落结构与环境因子的关系研究较少。本文通过对贵州省松桃县腊山河洞洞穴动物群落结构进行研究,揭示其与环境因子的关系,丰富国内对洞穴动物研究的数据库。

2016年7月,对松桃县喀斯特洞穴进行野外考察,发现腊山河洞环境特殊,洞穴发育良好,物种丰富度较高,具暗河且水流量较大,旧时曾用于躲匪,受人为干扰较严重。以其作为研究对象,分析环境因子对洞穴动物群落结构的影响,既能较好反映两者之间的关系,也为洞穴动物多样性保护、管理提供基础数据。

1 洞穴概况

腊山河洞位于贵州省铜仁市松桃县乌罗镇,地理坐标 $108^{\circ}51'E, 28^{\circ}06'N$,海拔566 m,洞口较大,

呈卵圆形,宽43.44 m,高34.62 m。洞内有流水向外涌出,流速快,较湍急,在洞口端洞底岩石走势垂直向下,形成一道小型山涧瀑布(图1)。

有光带长74.54 m,宽10.45 m,高18.28 m,光带内空间宽敞,底部两侧人为铺垫大量碎石,洞厅右侧有一大型灶台,中央一条暗河流出,水质清澈透明且流速快,洞壁及洞顶较光滑,接近弱光带处洞宽逐渐缩小,光带交界处的洞底有蝙蝠排泄物。弱光带长19.10 m,洞底暗河覆盖面达70%,最深处近2 m,水流缓慢,顶部有蝙蝠盘旋,此带距离较短且呈 120° 向右弯曲,洞壁凹凸不平,较湿滑。黑暗带长115 m(此为调查行走长度,由于水流较深无法继续前行,致使实际长度无法测量),流水较浅,顶部有大量蝙蝠,幼体居多,洞壁为沉积岩,有横纹,较湿滑,流水清澈见底,泥沙较多,布满蝙蝠排泄物,分布有红点齿蟾 *Oreolalax rhodostigmatus*。另外,各光带均可见白色生活垃圾,部分由水流带入。

2 研究方法

2.1 样品采集与环境调查

2.1.1 环境调查 用CEM华盛昌公司生产的LDM-70红外激光测距仪测定洞口的宽度、高度以及各光带的长度,用美国生产的奇遇(eTrex Venture)

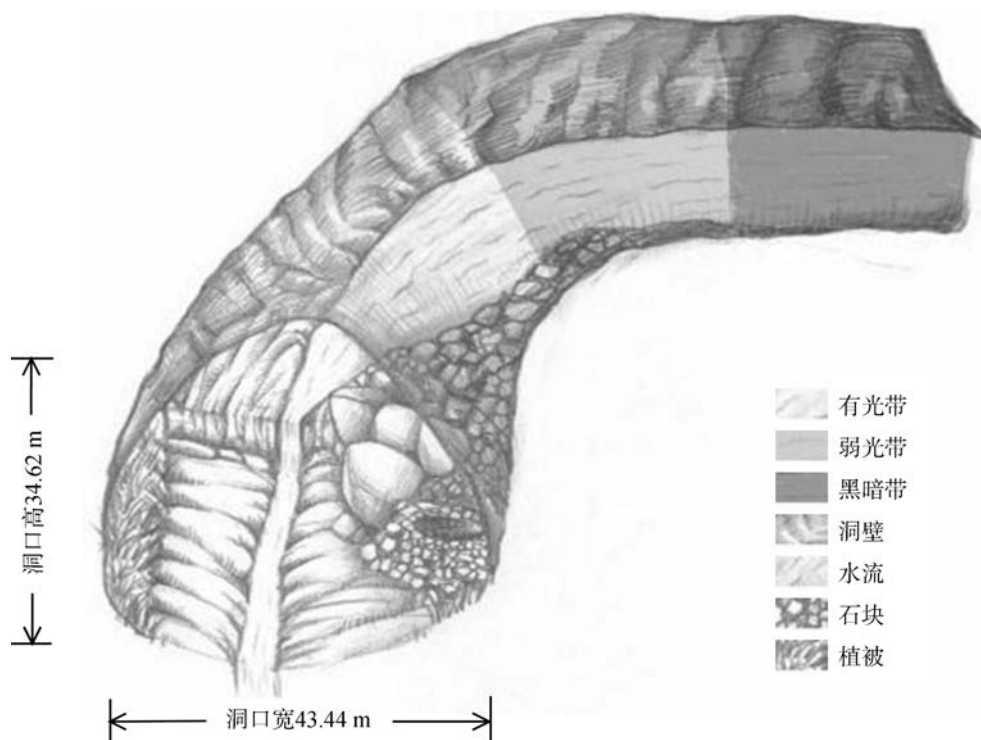


图1 腊山河洞洞穴结构简图
Fig. 1 The structure of Lashanhe cave

GPS 定位仪测定海拔,用北京亚光仪器有限责任公司生产的 JWSA2-2 型温湿度计测定各洞段的温湿度。各光带的气体检测用青岛陆博建业环保科技有限公司生产的便携式气体检测仪(LB-MS4X),主要检测 CO₂、O₂ 的含量,光照度的测量用泰仕电子公司生产的光照度计(TES-1339R)。光带划分参照黎道洪(2007)。

2.1.2 样品采集 动物样品:在每个洞段对洞底和洞壁进行采集,由于洞较高(均在 15 m 以上),所以洞顶区域仅采集较大型的脊索类动物。将肉眼能见的动物采集装瓶(用 95% 酒精浸泡),蝙蝠数量庞大,只采集 4~5 只,其余进行计数处理。

水样品:对各光带内的水样进行瓶装采集,每瓶水量不低于 1 000 mL。

土壤样品:在各光带底部分别进行梅花点混合采样,每袋土样约 0.5 kg,湿润土样取出风干。

2.2 样品处理

用 OLYMPUS(SZ51)解剖镜对本标本进行分类鉴定,由于资料缺乏,少数标本未能鉴定至种。对洞内土样和水样进行分析,具体步骤参照杨卫诚和黎道洪(2010)。用 AF-640 原子荧光光度仪测定水样和

土样中 Hg 和 As 的平均含量。

2.3 数据处理

以群落为单位进行分析,数据更具有可比性和整体性。对群落各项多样性指数、相似性指数等进行分析,以研究腊山河洞洞穴动物群落结构的组成、分布概况,具体方法参照黎道洪(2006)。洞穴土壤中重金属污染评价方法参照张广等(2015),以分析重金属对洞穴动物群落结构、分布的影响。

3 结果与分析

3.1 洞穴动物种类组成及相对数量

通过调查和采集,共获标本 472 号,经初步鉴定隶属于 3 门 9 纲 19 目 33 科 38 种。

通过表 1 可以看出,腊山河洞有光带的物种数最多,弱光带次之,黑暗带最少。

表 1 腊山河洞不同光带内动物类群组成比较
Table 1 The category components of different ray zone in Lashanhe cave

光带	门	纲	目	科	属或种
有光带	2	6	11	19	24
弱光带	3	7	12	19	20
黑暗带	2	8	13	17	17

表 2 腊山河洞洞穴动物种类(或类群)组成和相对数量
Table 2 The species (groups) and relative number of animals in Lashanhe cave

物种 S	有光带 LB	弱光带 RLB	黑暗带 DB	水环境 P1	百分比 P2/%
软体动物门 MOLLUSCA					
腹足纲 CASTROPODA					
琥珀螺科 Succineidae					
伞形琥珀螺 <i>Succinea daucina</i>	5	3			1.69
烟管螺科 Clausiliidae					
尖真管螺指名亚种 <i>Euphaedusa aculus aculus</i>	5	3			1.69
细长真管螺 <i>Euphaedusa tau</i>	2				0.42
钻头螺科 Subulinidae					
索形钻头螺 <i>Opeas funiculare</i>	2	3			1.06
进水螺科 Hydrocenidae					
奈氏土欧螺 <i>Georissa nachmanni</i> (水生)				8	1.69
节肢动物门 ARTHROPODA					
蛛形纲 ARACHNIDA					
长奇盲蛛科 Phalangidae					
盲蛛 <i>Opilio</i> sp.			3		0.64
球蛛科 Theridiidae					
温室希蛛 <i>Achaearanea tepidariorum</i>	12	2			2.97
温室拟肥腹蛛 <i>Parasteatoda tepidariorum</i>	22	3	2		5.72
漏斗蛛科 Agelenidae					
机敏漏斗蛛 <i>Agelena difficilis</i>	2				0.42
阴暗隙蛛 <i>Coelotes luctuosus</i>	3	2			1.06

续表 2

物种 S	有光带 LB	弱光带 RLB	黑暗带 DB	水环境 P1	百分比 P2/%
暗蛛科 Amaurobiidae					
家隅蛛 <i>Tegenaria domestica</i>	2	2			0.85
贵州隙蛛 <i>Coelotes guizhouensis</i>	2				0.42
跳蛛科 Salticidae					
普氏散蛛 <i>Spartaeus platnicki</i>	4				0.85
昆虫纲 INSECTA					
蚁蛉科 Myrmeleontidae					
蚁蛉 <i>Myrmeleon formicarius</i>	15				3.18
大蚊科 Tipulidae					
大蚊 <i>Tipula</i> sp.		2	23		5.30
蕈蚊科 Mycetophilidae					
Mycetophilidae sp.	1		3		0.85
蟋蟀科 Gryllacrididae					
斑灶马 <i>Diestrammena marmorata</i>		11	9		4.24
菱蝗科 Tetrigidae					
蓬菜棘菱蝗 <i>Platygalia validium formosanum</i>	7	3			2.12
蠼螋科 Labiduridae					
蠼螋 <i>Labidura riparia</i>	1				0.21
象甲科 Curculionidae					
Curculionidae sp.	1				0.21
中国瘰象 <i>Episomus chinensis</i>	1				0.21
隐翅虫科 Staphylinidae					
青翅隐翅虫 <i>Paederus fuscipes</i>	2	2			0.85
萤科 Lampyridae					
黑翅萤 <i>Luciola cerata</i>			3		0.64
步甲科 Carabidae					
Carabidae sp.	2				0.42
金龟子科 Scarabaeoidea					
孔蜣螂 <i>Copris confucius</i>		1	2		0.64
蝽科 Pentatomidae					
Pentatomidae sp.		3			0.64
蜻蜓目 Odonata					
水虿 Odonata sp.		1	1		0.42
叶蝉科 Cicadellidae					
Cicadellidae sp.		2	1		0.64
甲壳纲 CRUSTACEA					
潮虫科 Oniscidae					
粗糙鼠妇 <i>Porcellio scaber</i>	22	12	9		9.11
倍足纲 DIPLOPODA					
奇马陆科 Paradoxosomatidae					
奇马陆 <i>Kronopus</i> sp.	3				0.64
交翅马陆科 Cambalopsidae					
足雕背马陆 <i>Podoglyphiulus</i> sp.	5	21	43		14.62
唇足纲 CHILOPODA					
石蜈蚣科 Lithobiidae					
蜈蚣 <i>Bothropolys</i> sp.	2				0.42

续表 2

物种 S	有光带 LB	弱光带 RLB	黑暗带 DB	水环境 P1	百分比 P2/%
蛭蜒科 Scutigerae					
大蛭蜒 <i>Thereopoda clunifera</i>		1	2		0.64
脊索动物门 CHORDATA					
鱼纲 PISCES					
鲈科 Cobitidae					
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> (水生)				3	0.64
鲤科 Cyprinidae					
鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i> (水生)				10	2.12
两栖纲 AMPHIBIA					
角蟾科 Megophryidae					
红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i> (水生)				7	1.48
姬蛙科 Microhylidae					
饰纹姬蛙 <i>Microhyla ornata</i>			1		0.21
哺乳纲 MAMMALIA					
蝙蝠科 Vespertilionidae					
西南鼠耳蝠 <i>Myotis altarium</i>		2	140		30.08
总计	123	79	242	28	100
百分比/%	26.06	16.74	51.27	5.93	

注 Notes: 优势种 dominant species, $P2 > 15\%$; 普通种 common species, $P2 = 1\% \sim 15\%$; 稀有种 rare species, $P2 < 1\%$.

由表 2 可知, 腊山河洞中优势种为西南鼠耳蝠 *Myotis altarium*, 占捕获总数的 30.08%, 普通种为足雕背马陆 *Podoglyphiulus* sp. 和粗糙鼠妇 *Pocellio scaber*, 分别占捕获总数的 14.62%、9.11%, 该洞的优势类群突出。在水环境中, 优势种为鲤鱼 *Cyprinus carpio*、红点齿蟾 *Oreolalax rhodostigmatus*、奈氏土欧螺 *Georissa nachmanni*, 均占水环境捕获总数的 15% 以上, 前两者只分布在黑暗带。

3.2 群落组成及多样性分析

3.2.1 群落组成 由于水、陆环境的差异, 导致腊山河洞内不同光带的软体动物、节肢动物、脊索动物的分布、数量不同, 故将其划分为以下 4 个动物群落。

群落 A: 粗糙鼠妇 + 温室拟肥腹蛛 *Parasteatoda tepidariorum* 群落, 分布在腊山河洞有光带, 两者同为优势种, 均占该光带总捕获数的 17.89%, 普通种为蚁蛉 *Myrmeleon formicarius*, 占该光带总捕获数

的 12.20%。

群落 B: 足雕背马陆 + 粗糙鼠妇群落, 分布在腊山河洞弱光带, 两者均为优势种, 分别占该光带总捕获数的 26.58%、15.19%, 普通种为斑灶马 *Diestramena marmorata*, 占该光带总捕获数的 13.92%。

群落 C: 西南鼠耳蝠 + 足雕背马陆群落, 分布在腊山河洞黑暗带, 同为优势种, 分别占该光带总捕获数的 57.85%、17.77%。

群落 D: 鲤鱼 + 红点齿蟾 + 奈氏土欧螺群落, 该群落相对较匮乏, 除奈氏土欧螺外(有光带和弱光带分布数量分别为 5、3), 其他物种皆集中分布在腊山河洞黑暗带的溪流中, 三者均为优势种, 分别占水体总捕获数的 35.71%、25.00%、28.57%, 泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus* 为普通种, 占水体总捕获数的 10.71%。

3.2.2 群落多样性分析 根据各指数公式计算出腊山河洞中 4 个群落的多样性指数(表 3)。

表 3 腊山河洞不同光带内群落的多样性、均匀性和优势度指数
Table 3 Diversity, evenness and dominance indices of different ray zones in Lashanhe cave

群落 Co	物种数 S	群落多样性 H'	群落最大多样性 H'_{max}	群落均匀度 J'	物种丰富度 D	物种优势度 C
A	23	2.637 9	3.135 5	0.841 3	4.571 7	0.101 2
B	19	2.475 7	2.944 4	0.840 8	4.119 5	0.126 7
C	14	1.442 3	2.639 1	0.546 5	2.368 4	0.378 8
D	4	1.311 5	1.386 3	0.946 1	0.900 3	0.283 2

腊山河洞中群落 A 的物种数最多(23),物种丰富度最大(4.571 7),群落多样性指数依次为群落 A(2.637 9) > B(2.475 7) > C(1.442 3) > D(1.311 5),符合物种数越多,群落多样性指数越高的特点(黎道洪,罗蓉,2001;杨卫诚等,2007)。均匀度指数最高的是群落 D(0.946 1),说明水环境中的物种分布较均匀,但由于洞穴水环境很难形成大种群(黎道洪,2006),所以其余各项指数相对较低。优势度最高的是群落 C(0.378 8),虽然群落 C 相较群落 A 的物种数较少,但形成了较大的类群(西南鼠耳蝠和足雕背马陆群落),所以优势度最大。

由于水环境中的物种较少,所以将其归入光带中进行分析。结果表明,群落 C 与群落 B 之间的相似性指数最高,为 0.568 8,与群落 A 之间的相似性指数最低,为 0.368 2(表 4),而群落 A、群落 B、群落 C 分别位于有光带、弱光带和黑暗带,所以腊山河洞不同群落之间的相似性指数符合相邻群落(A-B 或 B-C)的相似性指数最高这一理论(黎道洪,2006)。

表 4 不同群落间的相似性指数
Table 4 Similarity indices between communities

群落	A	B
B	0.475 2	
C	0.368 2	0.568 8

3.3 洞穴内环境因子的测定及相关性分析

对腊山河洞各光带的部分环境因子进行统计和测定,结果见表 5。由于各项环境因子和多样性指数单位不统一,因此对表 3 和表 5 中的数据进行标准差标准化处理后利用 SPSS 17.0 对腊山河洞内群落多样性和环境因子进行相关性分析,结果见表 6。

物种数与群落最大多样性指数($r = 0.979$)、温度与群落多样性指数($r = 0.998$)之间显著相关,物种丰富度与温度呈极显著正相关($r = 1.000$),与物种数、湿度、多样性指数均呈显著相关,相关系数分别为 0.982、0.959、-1.000。由于腊山河洞水环境的 pH 值在 8.34 ~ 8.40,属天然弱碱性水质,适合红点齿蟾生长(刘健昕,2010),且红点齿蟾为水环境中

表 5 各群落中部分环境因子的测定
Table 5 Measurement of environmental factors in different communities

群落 Co	温度 AT	湿度 H	水样的 pH 值	水样中 Hg 的含量 $W_{Hg}/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	水样中 As 的含量 $W_{As}/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	土壤中 Hg 的含量 $S_{Hg}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	土壤中 As 的含量 $S_{As}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	空气中 O ₂ 的含量/% Vol	空气中 CO ₂ 的含量/ppm
A	25	71	8.39	0.017 3	6.837 6	13.095 5	28.717 8	20.81	267
B	23	74	8.40	0	12.554 3	9.246 5	30.598 9	20.80	353
C	15	84	8.34	0	16.257 2	5.538 3	40.379 5	20.72	367
D	-	-	8.34	0	-	-	-	-	-

表 6 腊山河洞的群落多样性与环境因子的 Pearson 相关系数矩阵
Table 6 Pearson correlation coefficient matrix between community diversity and environmental index of Lashanhe cave

	S	AT	H'	H'_{max}	J'	D	C	H	pH	W _{Hg}	W _{As}	S _{Hg}	S _{As}	O ₂
AT	0.964													
H'	0.896	0.998 *												
H'_{max}	0.979 *	0.980	0.808											
J'	-0.203	0.982	0.242	-0.376										
D	0.982 *	1.000 **	0.959 *	0.941	-0.042									
C	-0.672	-0.994	-0.929	-0.532	-0.584	-0.787								
H	-0.972	-0.999 *	-0.995	-0.986	-0.976	-1.000 *	0.990							
pH	0.812	0.941	0.972 *	0.735	0.315	0.907	-0.934	-0.929						
W _{Hg}	0.650	0.655	0.652	0.516	0.185	0.625	-0.614	-0.679	0.469					
W _{As}	-0.983	-0.898	-0.867	-0.968	-0.799	-0.900	0.846	0.911	-0.695	-0.921				
S _{Hg}	0.997 *	0.941	0.918	0.990	0.861	0.943	-0.900	-0.952	0.771	0.871	-0.994			
S _{As}	-0.953	-0.999 *	-1.000 *	-0.971	-0.989	-0.999 *	0.998 *	0.997 *	-0.953	-0.624	0.880	-0.927		
O ₂	0.937	0.996	1.000 *	0.958	0.995	0.996	-1.000 *	-0.993	0.967	0.585	-0.855	0.908	-0.999 *	
CO ₂	-0.897	-0.747	-0.702	-0.865	-0.609	-0.750	0.672	0.768	-0.477	-0.992	0.963	-0.927	0.720	-0.685

注 Notes: ** $P \leq 0.01$, 极显著相关 there is a significant correlation at 0.01 level (2-tailed); * $P \leq 0.05$, 显著相关 there is a significant correlation at 0.05 level (2-tailed).

的优势种,所以 pH 与 H' 呈显著正相关($r=0.972$)。氧气与多样性指数呈显著正相关($r=1.000$),与优势度呈显著负相关($r=-1.000$)。水中的重金属 Hg 和 As 与多样性指数的相关性不显著,但土壤中的 Hg 与物种数呈显著正相关,相关系数为 0.997,土壤中的 As 与多样性指数、丰富度、优势度之间呈显著相关,相关系数分别为 -1.000 、 -0.999 、 0.998 。由此可见,土壤中重金属的含量与洞穴动物群落密切相关,影响着洞穴动物的群落组成和分布。

3.4 重金属污染评价

3.4.1 土壤重金属污染评价 对腊山河洞内土壤中重金属 Hg 和 As 的污染评价结果见表 7。

表 7 腊山河洞土壤重金属汞和砷的污染情况
Table 7 Heavy metal pollution of the soil samples from Lashanhe cave

光带	单项污染指数		综合污染指数	污染等级
	Hg	As		
有光带	87.31	1.91	44.61	重污染
弱光带	61.65	2.71	32.18	重污染
黑暗带	50.25	2.89	26.57	重污染
平均值	66.40	2.50	34.45	重污染

3 个光带的综合污染指数均达到重污染等级,其中有光带污染指数最高(44.61),除人为影响、流水沉积等因素外,最重要因素在于贵州松桃属寒武统黑色岩系区,蕴含“多元素富集矿层”土壤,其最主要的特点是重金属(Hg、As)含量较高(王兴富,顾秉谦,2016),所以腊山河洞各光带内土壤重金属 Hg、As 含量普遍偏高,因而对腊山河洞洞穴动物群落结构存在着一定的影响,与表 6 中 Pearson 相关系数分析的结果相符。

3.4.2 水体重金属污染评价 根据《地下水环境质量标准 GB-T14848-93》对腊山河洞的水体进行污染评价,结果见表 8。

表 8 腊山河洞水体重金属汞和砷的污染情况
Table 8 Heavy metal pollution of the water samples from Lashanhe cave

	$W_{Hg}/(mg \cdot L^{-1})$	水质标准	$W_{As}/(mg \cdot L^{-1})$	水质标准
有光带	0.000 017 3	I	0.006 837 6	II
弱光带	0	I	0.012 554 3	III
黑暗带	0	I	0.016 257 2	III

腊山河洞各光带水体中重金属 Hg 的含量均属国家 I 类地下水水质标准,重金属 As 的含量除有光带属国家 II 类地下水水质标准外,其余均属国家 III 类地下水水质标准。《地下水环境质量标准 GB-T14848-93》规定 I 类、II 类、III 类水质均可适用于集中式生

活饮水,由此可见腊山河洞水体未被污染,适宜洞穴动物生存,所以表 6 中水体重金属 Hg、As 与多样性指数之间的相关性不显著。

4 小结

看似封闭的洞穴环境实则与外界环境关系密切。以本文为例,腊山河洞洞穴内与外环境通过诸多途径相互联系,如翼手目 Chiroptera 动物外出觅食、洞外腐殖质等随水流进入洞内等(杨卫诚等,2013),都为洞穴生物提供了一定的食物来源。外界环境间接或直接地影响着洞穴环境,洞穴各项环境因子相互之间、与洞穴动物群落之间都存在着相关性。由于贵州松桃地区属“寒武统黑色岩系区”(王兴富,顾秉谦,2016),土壤中重金属含量较高,已有研究表明,环境中重金属较高导致动物群落中常见类群、稀有类群减少或消失,且群落多样性指数、均匀度指数等均趋于减小(王振中等,1994)。本研究中,土壤中的 As 与多样性指数、丰富度之间均呈显著负相关,说明在一定程度上腊山河洞土壤重金属的含量对洞穴动物群落具有负面影响,与诸多研究结果一致(Gutiérrez *et al.*, 2004; 杨卫诚等, 2007; Xu *et al.*, 2012, 2013)。目前,重金属污染问题在洞穴研究领域备受关注,国内的研究多停留在土壤和水环境中重金属对洞穴动物群落结构的影响,而国外对洞穴动物的研究囊括了环境因子对洞穴生物(Sket, 1996)、微生物的影响(Chronáková *et al.*, 2009)以及重金属的追踪(Cuculić *et al.*, 2011)等多项内容。相较而言,国内喀斯特洞穴研究在整体性、完整性上有待完善,需加强喀斯特洞穴生态系统的系统性研究工作。

参考文献:

- 黎道洪, 罗蓉. 2001. 贵州龙洞内动物群落结构和分布与部分环境因子的关系研究[J]. 中国岩溶, 20(4): 315-320.
- 黎道洪. 2006. 贵州水拔洞内动物群落结构与部分环境因子的相关性研究[J]. 中国岩溶, 25(3): 256-262.
- 黎道洪. 2007. 贵州波多洞和甲良洞内部分环境因子与动物群落结构的相关性[J]. 生态学报, 27(6): 2167-2176.
- 刘健昕. 2010. 红点齿蟾的个体发育及生态的初步研究[J]. 生物学通报, 45(1): 50-52.
- 冉景丞. 2008. 地下的贵州[J]. 森林与人类, 12: 72-81.
- 王兴富, 顾秉谦. 2016. 贵州地区下寒武统黑色岩系区“多元素”富集矿层分析及土壤重金属污染研究进展[J]. 贵州科学, 34(5): 63-68.
- 王振中, 胡觉莲, 张友梅, 等. 1994. 湖南省清水塘工业区重金属污

- 染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. 地理科学, 14(1): 64-72.
- 徐承香, 李子忠, 黎道红. 2012. 喀斯特洞穴动物与部分生态环境因子的关系[J]. 湖北农业科学, 51(6): 1081-1084.
- 杨卫诚, 黎道洪, 苏晓梅. 2007. 贵州紫云洞和樱桃洞洞内动物的群落结构与洞穴环境关系初步研究[J]. 四川动物, 26(4): 738-745.
- 杨卫诚, 黎道洪, 徐承香. 2013. 广西大岩洞和岩头2号洞洞穴动物群落结构及其与环境因子关系分析[J]. 四川动物, 32(3): 442-448.
- 杨卫诚, 黎道洪. 2010. 广西大岩洞洞穴动物体与环境重金属含量关系[J]. 生态学杂志, 29(8): 1554-1558.
- 叶子郟, 黎道洪. 2011. 贵州屯上洞洞穴动物对5种重金属富集的研究[J]. 四川动物, 30(3): 372-376.
- 张广, 杨卫诚, 梁云, 等. 2015. 贵州白云岩喀斯特洞穴动物群落结构及其与环境因子关系研究[J]. 四川动物, 34(3): 375-382.
- Biswas J. 1991. Metabolic efficiency and regulation of body weight: a comparison between life in hypogean and epigean ecosystems [J]. International Journal of Speleology, 20(1/4): 15-22.
- Chronáková A, Horák A, Elhottová D, *et al.* 2009. Diverse archaeal community of a bat guano pile in Domica Cave (Slovak Karst, Slovakia) [J]. Folia Microbiologica, 54(5): 436-446.
- Cuculić V, Cukrov N, Željko K, *et al.* 2011. Distribution of trace metals in anchialine caves of Adriatic Sea, Croatia [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 95(1): 253-263.
- Culver DC. 1982. Cave life: evolution and ecology [M]. Cambridge: Harvard University Press.
- Gutiérrez M, Neill H, Grand RV. 2004. Metals in sediments of springs and cave streams as environmental indicators in karst areas [J]. Environmental Geology, 46(8): 1079-1085.
- Sket B. 1996. The ecology of anchihaline caves [J]. Trends Ecology Evolution, 11(5): 221-225.
- Xu CX, LI ZZ, LI DH. 2013. Relationships between the diversity of animal communities and the lighting environment and content of heavy metals in soils in Guizhou Zhijin Cave [J]. Biodiversity Science, 21(1): 62-70.
- Xu CX, LI DH, LI ZZ. 2012. Bioaccumulation of eight heavy metals in cave animals from Dashui and Malang caves, Guizhou province, China [J]. African Journal of Biotechnology, 11(92): 15931-15935.