

洞穴环境因子对动物群落结构的影响 ——以贵州松桃神女洞为例

陶红梅 杨卫诚* 温清

贵州师范大学生命科学学院, 喀斯特洞穴研究中心 贵阳 550001

摘要: 神女洞是位于贵州松桃县的一个典型喀斯特洞穴, 由于洞口已有一部分被旅游开发, 为了能较详细地记录该洞穴的动物资源状况, 了解洞穴环境条件与洞内动物群落结构之间的关系, 及部分环境因子对洞穴动物空间分布的影响, 2016年7月, 在贵州松桃神女洞进行了较为深入的调查, 共采获动物标本645号, 土壤样本9份(250 g/份), 并对空气温湿度及CO、CO₂、O₂、H₂S 4种气体的含量进行现场测定。动物标本经鉴定, 隶属3门8纲13目24科37种。斑灶马(*Diestrammena marmorata*)为优势种, 占整个类群的67.60%。用原子吸收法测定了洞穴土壤中重金属Pb、Cd的含量, 原子荧光法测定Hg、As的含量, 并对这4种重金属进行污染评估, 结果显示, Hg污染严重, 含量超出中国土壤背景值, 综合污染指数远远超过重度污染等级线。结合多样性指数运用相关性分析方法分析该洞穴动物群落的结构特征, 结果表明, 该洞穴动物群落的均匀度指数 J' 和优势度指数 C 与空气中H₂S含量呈现显著相关关系; 最大多样性 H'_{\max} 与温度呈极显著负相关。用典型相关分析方法分析洞穴动物的空间分布状况与环境因子相关性。唇足纲(Chilopoda)、两栖纲(Amphibia)和哺乳纲(Mammalia)的动物在空间分布上差异较小, 且与空气中CO₂和土壤中铅的含量成正相关; 蛛形纲(Arachnoidea)的分布与O₂含量呈正相关; 倍足纲(Diplopoda)喜生活在较潮湿的地方; 腹足纲(Gastropoda)的分布与空气中H₂S的量正相关。

关键词: 动物群落; 环境因子; 相关性; 重金属污染; 神女洞

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2018) 06-899-11

Effects of Cave Environmental Factors on the Structure of Animal Communities — Take Shennv Cave in Songtao of Guizhou Province as An Example

TAO Hong-Mei YANG Wei-Cheng* WEN Qing

School of Life Sciences, Institute of Karst Cave, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 30560024), 贵州省科技基金项目(黔科合 LH 字 LKS[2016]7207 号, 黔科合支撑[2017]2811 号, 黔科合重大专项字[2016]3022 号), 2017 年贵州师范大学博士基金项目;

* 通讯作者, E-mail: yangweicheng0908@sina.com;

第一作者介绍 陶红梅, 女, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学, E-mail: Thongmei4562@163.com。

收稿日期: 2017-09-11, 修回日期: 2018-01-22 DOI: 10.13859/j.cjz.201803101

Abstract: Shennv Cave is a typical Karst cave and located in Songtao County in Guizhou Province. A part of it has been developed by the tourism. In order to record the animal resources in detail, we investigated on the animal community structure in the cave and took measurement on some environment factors in the mean time in July 2016. A total of 645 animal specimens and 9 soil samples (250 g/bag) were collected. The content of air temperature, humidity and content of gases CO, CO₂, O₂ and H₂S were measured in the field. We identified the species and found out all the animal species belonging to 3 phyla, 8 classes, 13 orders, 24 families and 37 groups. Of them *Diestrammena marmorata* was the dominant species, and it is accounted for the entire group of 67.60%. We used the atomic absorption spectrometry to analyze content of heavy metals Pb and Cd, used and atomic fluorescence spectrometry method to determined the contents of Hg for the soil samples. The results showed that the pollution of Hg was more serious compared with the soil background value in China, and the comprehensive heavy metal pollution index was far more than the heavy pollution grade line. We analyzed the structure characteristics of the cave animal community by the method of correlation analysis with the diversity index. The homogeneity index J' and the dominance index C of the cave animal community had a significant correlation with the content of H₂S in the air. The maximum diversity was significantly negatively correlated with the temperature. The correlation between the spatial distribution of the cave animals and the environmental factors was analyzed by canonical correlation analysis. The spatial distribution of Chilopoda, Amphibia, Mammalia had a little difference, and all were positively related to the content of CO₂ in the air and the content of lead in the soil. The distribution of Arachnoidea was positively correlated with the content of O₂. The distribution of Diplopoda was positively correlated with humidity, and the distribution of Gastropoda was positively related to the amount of H₂S in the air.

Key words: Animal community; Environmental factor; Relevance; Heavy metal pollution; Shennv Cave

洞穴是一个比较封闭的生态系统, 被认为是天然的实验室和基因库。目前国内外对洞穴动物的研究范围较广、层次较深、内容丰富 (Cope 1991, Ricardo et al. 2002, Bichuette et al. 2003, Peck 2011, Tercafs et al. 2011)。有不少研究报道涉及了洞穴温度、湿度、pH 及水体和土壤重金属含量等对洞穴动物群落在洞穴内分布状况的影响 (Sket 1996)。

中国对洞穴动物的研究起步较晚, 主要见于 20 世纪末, 研究领域集中在分类区系、新种研究、群落结构等 (周解 1985, 陈建秀等 1990, 黎道洪等 1999), 后来才有部分报道涉及了洞穴环境因子如 pH、湿度、温度等对动物群落分布的影响 (黎道洪 2006, 徐承香等 2013)。近年来有不少关于洞穴动物群落与环境相关性研究 (叶子郢等 2011, 张广等 2015) 和洞穴动物斑灶马 (*Diestrammena marmorata*)、马陆

(*Spiroboleus bungii*) 等对洞穴环境重金属富集的研究报道 (徐承香等 2012, 杨卫诚等 2013)。

2016 年 7 月, 通过对松桃县喀斯特洞穴进行考察, 发现神女洞洞穴发育良好, 但有光带和弱光带已被开发, 受人为干扰较严重, 还未开发的黑暗带物种丰富度较高, 整个洞壁上分布着较高密度的斑灶马, 鉴于神女洞的开发及开发过程中带入的重金属等可能会对动物群落造成影响, 给整个洞穴动物群落造成灾难性破坏, 故以神女洞作为研究地点, 详细调查洞穴动物群落结构及其与洞穴内部分环境因子的相关性, 希望能为该洞穴动物多样性保护、管理等提供较为完整的基础数据。而与其他调查研究不同的是, 对该洞穴的调查是在洞穴被部分开发的情况下进行的, 虽然未能详细记录整个洞穴的原始情况, 但也是首次对该洞穴的动物资源状况进行记录。

1 环境概况

神女洞位于贵州省铜仁市松桃县妙隘乡岩门村堰塘沟组, 洞口位于海拔 590 m 的山腰 (28°07'N, 109°00'E), 呈半圆形, 宽 2.74 m、高 2.68 m, 且装有一铁门, 被开发过。洞外布满杂草, 有碎石和垃圾, 有一经人工修整的石块台阶通向洞内, 贯穿着有光带和弱光带, 洞壁干燥。整个洞长约 55 m 左右, 有光带长 17.5 m、宽 5.7 m、高 2.5 m, 内有 12 棵梧桐树 (*Firmiana platanifolia*) 苗。洞的走势呈 30° 左右倾斜向下, 笔直进入弱光带, 与弱光带的连接口为半圆形。弱光带左侧岩壁较平滑, 右侧岩壁凹凸不平, 洞顶较平滑有似等高线的纹路。弱光带长 13.7 m、宽 3.1 m、高 3.3 m, 有少许梧桐嫩芽及废弃的铁管、电线等, 情形似有光带。黑暗带长 18.5 m、宽 15.3 m、高 3.1 m, 呈一近似圆形的洞厅, 左侧有较大的垂直落差, 深不见底, 无法再进行深入调查, 右侧洞口进入后分为左右两支, 左支长 10 m, 右支长 17 m, 洞厅的洞底较湿滑, 洞壁较湿润且分布着密集的动物群落。

2 材料与方法

2.1 野外调查与样品采集

2016 年 7 月对贵州松桃神女洞进行较为深入的调查, 记录其基本情况。各洞段的长度、宽度和高度用 CEM 华盛昌公司的 LDM-70 红外激光测距仪测量; 洞口海拔用美国产的奇遇 (eTrex Venture) GPS 定位仪测定; 各洞段的温湿度用北京亚光仪器有限责任公司的 JWSA2-2 型温湿度计直接测定; 各光带的 CO、CO₂、O₂、H₂S 气体含量用青岛陆博建业环保科技有限公司的便携式四合一气体检测仪 (LB-MS4X) 直接检测; 光照度用泰仕电子公司的 TES-1339R 光照度计测量, 将光照度在 10 lx 以上的区域划分为有光带, 光照度在 0.1 ~ 10 lx 之间的划分为弱光带, 而光照度在 0.1 lx 以下的属于黑暗带 (黎道洪 2007)。采集的动物用 75% 酒精浸泡保存, 带回实验室进行分类鉴定分析; 土壤采集用梅花型取样法, 在洞内各光

带中分别采集 3 袋 250 g 的土壤, 用塑封袋封存带回实验室进行处理研究; 由于该洞内无积水, 故不进行水质分析。

2.2 样品的室内处理及实验

土样的处理: 将带回实验室的土壤样品自然风干、研磨、并过 100 目筛, 然后称取 0.2 ~ 0.5 g 进行消解定容处理, 用北京海光仪器公司生产的 AFS ~ 230E 双道原子荧光光度计检测土壤汞 (Hg) 和砷 (As) 含量, 用德国耶拿分析仪器股份公司生产的 ZEE nit R700 原子吸收光谱仪测定土壤铅 (Pb) 和镉 (Cd) 含量。

动物标本的处理: 将所采动物标本用 75% 的乙醇浸泡带回实验室镜检鉴定并计数。

2.3 群落划分

群落的划分是以光带的不同为依据, 将群落划分为有光带群落、弱光带群落和黑暗带群落, 然后找出每个光带中动物个体数最多的一个或两个动物群落代表该光带群落。

2.4 数据分析处理

数据分析具体方法均参照黎道洪 (2007)。

采用 Shammom-Weiner 公式 $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 计算多样性指数 H' 、Pielou 公式 $J' = H' / \ln S$ 计算均匀度指数 J' 、Margalef 公式 $D = (S - 1) / \ln N$ 计算丰富度指数 D 、Simpson 公式 $C = \sum (n_i / N)^2$ 求优势度指数 C 、Whittaker 公式 $I = 1 - 0.5 \sum_{i=1}^S |a_i - b_i|$ 求相似性指数 I , 式中, S 为物种数 P_i 为 i 物种在群落中的个体比例, N 为群落中各物种捕获量的总数, n_i 为群落中 i 物种的个体数, a_i 为 i 物种在一个光带内的个体数, b_i 为 i 物种在另一光带内的个体数。

用污染评价公式 $P_i = \frac{C_i}{S_i}$ 、 $P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 对

洞穴土壤重金属污染等级进行评价, 式中, P_i 为单项污染指数、 P 综合污染指数、 C_i 为污染物 i 的实测值、 S_i 为污染物 i 的评价标准、 n 为被评估的土壤中污染物质的种类数 (肖智 2011)。当单项污染指数 $P_i < 1$ 时, 表示未被污

染; 当 $1 \leq P_i < 2$ 时, 表示轻污染; 当 $2 \leq P_i < 3$ 时, 表示中污染; 当 $P_i \geq 3$ 时, 表示重污染(徐新阳等 2004)。综合污染指数 $P < 1.0$ 时未污染, $1.0 \sim 2.5$ 轻污染, $2.5 \sim 5.0$ 中污染, $5.0 \sim 10.0$ 重污染, $P > 10.0$ 严重污染(王振中等 1994)。

动物群落多样性、群落间的相关性用 SPSS18.0 进行方差分析; 动物群落的空间分布与部分环境因子间的关系用 Canoco5.0 软件进行典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, CCA)。

3 结果分析

3.1 洞穴动物的种类相对数量和组成

通过对贵州松桃神女洞的调查发现, 在神女洞里, 物种数分布状况是有光带最高、黑暗带次之、弱光带最少(表 1)。但纲、门、科都是黑暗带大于有光带或弱光带, 导致这一分布现象的原因有两点: 一是采样面积的不同, 各洞段空间及面积呈现出黑暗带 $>$ 有光带 $>$ 弱光带; 其次, 有光带和弱光带受人为干扰严重, 破坏了动物生存原本的天然环境, 导致此二洞段的动物在纲、目、科上分布明显少于黑暗带, 但由于有光带洞口与外界相连, 一些假洞穴动物向洞内迁移, 这就导致了无论是种类还是数量都是弱光带最少的现象。

整个洞穴动物类群中, 只有斑灶马(*D. marmorata*)是优势种, 而其余的除了粗糙鼠妇(*P. scaber*)、常雕囊马陆(*G. valgatus*)、大扁褶口螺(*Ptychopoma expoliatum*)、大银鳞蛛(*Leucauge magnifica*)、盲蛛(*Opilio* sp.)、粪蝇(*Scathophaga* sp.)、大蚊(*Tupula* sp.)、涂

闪夜蛾(*Sypna picta*) 8 个普通种以外, 其余都为稀有种(表 2)。

3.2 群落组成

根据不同光带内的优势种或占该洞段动物总数比例较大的普通种, 将神女洞的动物群落按光带划分为以下 3 个不同的群落。

有光带群落为粗糙鼠妇和大扁褶口螺群落, 前者优势种, 后者为普通种。

弱光带群落为粗糙鼠妇和斑灶马群落, 两者均为优势种。

黑暗带群落为斑灶马群落, 斑灶马为该洞段优势种, 也是整个洞穴动物的优势种, 在此群落常雕囊马陆和粗糙鼠妇均为普通种。

3.3 群落间多样性

3.3.1 群落的相似性分析 群落相似性指数表现为典型的相邻群落间的相似性比不相邻群落间相似性高的模式(表 3), 这可能是由于相邻群落间温度、湿度以及空气中气体成分的含量等环境因子差异性较小。黑暗带群落中优势种为斑灶马, 且占该群落总数的绝大多数, 这也是导致了该群落与其他群落相似性较低的原因之一。有光带群落与弱光带群落间相似性比弱光带群落与黑暗带群落间相似性高的另一原因是, 有光带和弱光带各环境因子都比较接近, 且都有人工开发过的痕迹, 受人为影响因素较严重。

3.3.2 群落多样性分析 神女洞不同光带动物群落的多样性、均匀性及优势度指数(表 4)表明, 贵州松桃神女洞中物种数 S 由高到低的顺序为有光带、弱光带、黑暗带, 物种丰富度 D 由高到低的顺序为有光带、黑暗带、弱光带, 均匀度指数 J' 按由高到低的顺序排列为有光

表 1 神女洞不同光带内动物类群组成

Table 1 The category components at different ray zone in the Shennv Cave

光带 Light band	门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	属或种 Genus or species
有光带 The light area	2	5	7	15	24
弱光带 The lightless area	2	4	7	9	10
黑暗带 The dark area	3	8	11	17	20

表 2 神女洞内动物类群的组成和相对数量

Table 2 The species or groups and relative number of the animals in the Shennv Cave

物种 Species	个体数 Individual number			占总数的比例 Proportion of the total number (%)
	有光带 The light area	弱光带 The lightless area	黑暗带 The dark area	
软体动物门 MOLLUSCA				
腹足纲 PULMONATA				
环口螺科 Cyclophorid				
大扁褶口螺 <i>Ptychopoma expoliatum</i>	8	3		1.71
瞳孔蜗牛科 Corillidae				
褐色圈螺 <i>Plectopylis murata</i>	2			0.31
钻头螺科 Subulinidae				
条纹钻螺 <i>Opeas striatissimum</i>	1			0.16
竖卷轴钻螺 <i>Tortaxis erectus</i>	2		1	0.47
细钻螺 <i>O. gracile</i>	1			0.16
小细钻螺 <i>O. gracilior</i>	2			0.13
小囊钻螺 <i>O. utriculus</i>			1	0.16
拟阿勇蛞蝓科 Ariophantidae				
扁形小囊螺 <i>Macrochlamys perdita</i>	1	1		0.31
华巨楯蛞蝓 <i>M. cathaiana</i>			1	0.16
节肢动物门 ARTHROPODA				
甲壳纲 CRUSTACEA				
潮虫科 Oniscidae				
粗糙鼠妇 <i>Pocellio scaber</i>	13	13	25	7.91
蛛形纲 ARAVHNIDA				
肖蛸科 Tetragnathidae				
大银鳞蛛 <i>Leucauge magnifica</i>	5	1	1	1.09
肖蛸蛛未定种 <i>Tetragnathidae</i> sp.	1	2	1	0.62
球蛛科 Theridiidae				
温室拟肥蛛 <i>Parasteatoda tepidariorum</i>	4		2	0.93
跳蛛科 Salticidae				
卡氏金蝉蛛 <i>Phintella cavaleriei</i>	1			0.16
微菱头蛛 <i>Bianor aenescens</i>	3			0.47
普氏散蛛 <i>Spartaeus platnicki</i>	4			0.62
园蛛科 Araneidae				
山地艾蛛 <i>Cyclosa monticola</i>	1			0.16
侧斑艾蛛 <i>C. laticauda</i>	1			0.16
青新园蛛 <i>Neoscona scylla</i>	1			0.16
五纹园蛛 <i>Araneus pentagrammicus</i>	1			0.16
漏斗蛛科 Agelenidae				
家隅蛛 <i>Tegenaria domestica</i>			2	0.31
漏斗蛛科未定种 <i>Agelenidae</i> sp.			1	0.16
长齐盲蛛科 Phalangidae				

续表 2

物种 Species	个体数 Individual number			占总数的比例 Proportion of the total number (%)
	有光带 The light area	弱光带 The lightless area	黑暗带 The dark area	
盲蛛 <i>Opilio</i> sp.			15	2.33
弱蛛科 Leptonetidae				
徐氏弱蛛 <i>Leptoneta xui</i>	1	1		0.31
镰形弱蛛 <i>L. falcata</i>			3	0.47
倍足纲 DIPLOPODA				
奇马陆科 Paradoxosomatidae				
宽跗陇马陆 <i>Kronopolites svenhedini</i>	3			0.47
雕饰姬马陆科 Glyphiulidar				
常雕囊马陆 <i>Glyphiulus valgatus</i>	1		37	5.89
近鼎马陆科 Paracortinidae				
穴居单棒美肢马陆 <i>Uniclavellus cavicolous</i>			1	0.16
唇足纲 CHILOPODA				
石蜈蚣科 Lithobiidae				
粗背石蜈蚣 <i>Bothropolys asperatus</i>			1	0.16
昆虫纲 INSECTA				
驼螽科 Rhaphidophoridae				
斑灶马 <i>Diestrammena marmorata</i>	5	5	426	67.60
粪蝇科 Scatophagidae				
粪蝇 <i>Scathophaga</i> sp.	4	1	8	2.02
大蚊科 Tupulidae				
大蚊 <i>Tupula</i> sp.	1		6	1.09
蚊科 Culicidae				
微小按蚊 <i>Anopheles minimus</i>		3		0.47
夜蛾科 Noctuidae				
涂闪夜蛾 <i>Sypna picta</i>			10	1.55
水螭科 Mesoveliidae				
水螭 <i>Mesoveliidae</i> sp.		3		0.47
脊索动物门 CHORDATA				
两栖纲 AMPHIBIA				
蟾蜍科 Bufonidae				
中华大蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>			1	0.16
哺乳纲 MAMMALIA				
菊头蝠科 Rhinolophidae				
贵州菊头蝠 <i>Rhinolophus blythi</i>			2	0.31
合计 Total	67	33	545	100

占总数比例: 15%以上的为优势种, 1%~15%为普通种, 1%以下为稀有种。

Proportion to the total number: more than 15% of the total number is dominant species, 1% - 15% of the total number is the common species, and less than 1% of the total number was rare species.

表 3 不同群落间的相似性指数

Table 3 Similarity indices between two communities

	有光带群落 The community in the light area	弱光带群落 The community in the lightless area
弱光带群落 The community in the lightless area	0.465 0	
黑暗带群落 The community in the dark area	0.171 0	0.216 5

表 4 神女洞不同光带内群落的多样性、均匀度和优势度指数

Table 4 Diversity, evenness and dominance indexes at different ray zone in Shennv Cave

群落 Community	物种数 The number of species <i>S</i>	多样性指数 The diversity index <i>H'</i>	最大多样性 The maximum diversity <i>H'</i> _{max}	均匀度指数 The evenness index <i>J'</i>	物种丰富度指数 The richness index of species <i>D</i>	优势度指数 The dominance index <i>C</i>
有光带 Light area	24	2.809 8	4.204 7	0.668 3	5.470 1	0.083 1
弱光带 Lightless area	10	1.900 6	3.496 5	0.543 6	2.574 0	0.210 3
黑暗带 Dark area	20	0.994 8	6.300 8	0.157 9	3.015 5	0.619 2

带、弱光带、黑暗带，而优势度指数由高到低却是黑暗带、弱光带、有光带。虽然黑暗带群落的物种数比有光带群落的少，但由于形成了较大的类群（斑灶马），所以优势度最大。

3.3.3 群落中部分环境因子含量 神女洞内不同洞段部分环境因子测定结果见表 5。

3.3.4 群落间的相关性分析 群落最大多样性 H'_{\max} 与洞内温度呈极显著负相关关系（表 6），原因在于洞穴温度一般比较稳定，尤其夏季，一般洞外温度都会比洞内高得多，而且较为封闭的黑暗带温度受外界温度升降影响最小，所以夏季洞穴内温度一般为有光带高于弱光带高于黑暗带，这与实测结果相符；而黑暗带动物群落中，斑灶马不仅是该群落的优势种，同时也是整个洞穴群落的优势种，所以导致黑暗带的群落最大多样性较有光带和弱光带高，也就导致了群落最大多样性 H'_{\max} 与洞内温度呈极显著负相关关系。群落均匀度指数 J' 和群落优势度指数 C 呈极显著负相关，这是由于群落优势度越高，均匀度指数越低。此外，土壤中的铅与 CO 和土壤中的汞均呈极显著负相关、与

CO_2 呈极显著正相关，群落均匀度指数 J' 和群落优势度指数 C 与空气中 H_2S 含量均呈显著相关关系。

3.3.5 动物群落的空间分布状况与环境因子的关系分析 对于生活在洞穴这个较为封闭的环境中的动物群落，影响其空间分布状况的主要因素是食物资源的丰富程度，其次，是食物资源的安全性。例如，某种动物的食物资源受到严重的污染，而该污染物（如重金属）进入动物体内不能被消化排除，而是不断地富集放大，当该污染物在动物体内富集到一定数量时，可能会导致动物病变甚至死亡，若是某区域内的污染物含量达到让动物致死剂量，则会导致该区域内的动物物种组成及数量减小。由于不同纲动物食性及食物资源不同，在食物链中所处的营养级就不同，而同一纲动物食性和营养级相同或相近，故其空间分布特征相近，所以采用按纲分类来分析动物群落的空间分布状况与环境间的关系。利用 Canoco5.0 软件进行典型相关分析（CCA），能较直观反应出神女洞内洞穴动物的空间分布状况与环境因子的关系。

表 5 神女洞各群落中部分环境因子的实测值

Table 5 Measurement value of partial environmental factors in each community in Shennv Cave

	有光带群落 The community in the light area	弱光带群落 The community in the lightless area	黑暗带群落 The community in the dark area
温度 Air temperature (°C)	27	26	23
湿度 Humidity (%)	82	78	85
一氧化碳 Carbonic oxide CO (mg/kg)	17	17.1	11.5
空气 二氧化碳 Carbon dioxide CO ₂ (mg/kg)	272	193	958
Air 氧气 Oxygen O ₂ (%)	28	21	21
硫化氢 Hydrogen sulfide H ₂ S (mg/kg)	0.44	0.38	0.21
汞 Mercury Hg (mg/kg)	19.52	20.64	10.59
土壤 砷 Arsenic As (mg/kg)	25.16	33.07	26.33
Soil 镉 Cadmium Cd (mg/kg)	0.27	0.67	0.84
铅 Lead in soil Pb (mg/kg)	3.50	2.62	13.41

动物群落和部分环境因子的 CCA 排序图(图 1)可看出,唇足纲(Chilopoda)、两栖纲(Amphibia)和哺乳纲(Mammalia)之间的距离较小,说明这 3 纲的动物在空间分布上差异较小。这 3 纲动物在洞穴内的分布均与空气中 CO₂ 含量和土壤中 Pb 含量呈正相关关系,与土壤 Hg 含量呈现极显著负相关关系,这是因为这 3 纲动物几乎都采集于黑暗带,黑暗带的大量动物及微生物活动都能产生 CO₂,然而黑暗带的空间相对较封闭,空气与外界交换不顺畅,故而黑暗带 CO₂ 含量较高。而针对土壤 Pb 含量,由表 7 可知,虽然黑暗带含量较有光带和弱光带多,但仍属于无污染等级,所以对黑暗带动物的生存及生活没致命性影响。上述 3 纲动物在空间分布上与 Hg 含量呈极显著负相关关系的原因,主要有以下几点,该洞穴中所采集到的哺乳纲动物只有翼手目的菊头蝠,翼手目并非真洞穴动物,而是洞外捕食洞内休息、排泄等,由于其长期的进化机制导致其会选择较安全的洞穴黑暗带作栖息地;唇足纲动物(蜈蚣)主要以翼手目动物粪便中的有机质为食,故与翼手目动物在空间分布上较重叠;两栖纲动物(蟾蜍等)主要以昆虫为食,而由表 4 可知,黑暗带物种群落优势度指数及最大多样性

指数均是三个洞段中最高的,黑暗带物种数量占整个洞穴物种数的 84.5%,对蟾蜍而言,黑暗带的食物资源最丰富。

同时,图 1 左下方的倍足纲(Diplopoda)和左上方的昆虫纲(Insecta)在空间分布上与以上 3 纲相关性较显著,原因是倍足纲的马陆与唇足纲蜈蚣相似,均以翼手目粪便有机质为食;而昆虫纲则是由于斑壮马数量所占整个群落物种数的比例较大,斑壮马的进化机制导致其主要分布在黑暗潮湿的黑暗带(有光带和弱光带较少或无)。蛛形纲(Arachnoidea)对 O₂ 的需求比上述几纲都高,腹足纲(Gastropoda)的分布状况主要受 H₂S 影响。

3.4 土壤重金属污染评价

通过洞穴土壤的单项污染指数和综合污染指数来对洞穴土壤进行重金属污染评价(表 7),神女洞中土壤重金属污染较严重,神女洞 3 个洞段的综合污染均达到重度污染等级,尤其是有光带和弱光带,其综合污染指数远远大于黑暗带。除了受人为开发又废弃等因素的影响外,更重要的因素是贵州松桃属寒武统黑色岩系区,蕴含“多元素富集矿层”土壤,加上铜仁万山汞矿遗址,导致铜仁地区较大范围内重金属(Hg、As)含量较高(王兴富等 2016)。

表 6 神女洞内群落多样性与环境因子的 Pearson 相关系数矩阵
Table 6 The matrix of Pearson correlation coefficient between community diversity and environmental index of Shennv Cave

参数 Parameters	物种数 S The number of species	H'	H'_{\max}	J'	D	C	AT	H	CO	CO ₂	O ₂	H ₂ S	Hg	As	Cd
群落多样性指数 The diversity index of community H'	0.278														
群落最大多样性 The maximum diversity of community H'_{\max}	0.469	-0.718													
群落均匀度指数 The evenness index of community J'	-0.006	0.959	-0.886												
物种丰富度指数 The richness index of species D	0.811	0.787	-0.136	0.580											
群落优势度指数 The dominance index of community C	0.014	-0.957	0.890	-1.000**	-0.573										
温度 Air temperature AT (°C)	-0.466	0.720	-1.000**	0.887	0.139	-0.891									
湿度 Humidity H (%)	0.750	-0.426	0.936	-0.666	0.222	0.671	-0.935								
一氧化碳 Carbonic oxide CO (mg/kg)	-0.255	0.858	-0.974	0.968	0.358	-0.97	0.974	-0.831							
二氧化碳 Carbon dioxide CO ₂ (mg/kg)	0.330	-0.815	0.989	-0.946	-0.284	0.948	-0.989	0.872	-0.997*						
氧气 Oxygen O ₂ (%)	0.721	0.867	-0.275	0.689	0.990	-0.684	0.277	0.082	0.486	-0.416					
硫化氢 Hydrogen sulfide H ₂ S (mg/kg)	0.012	0.964	-0.878	1.000*	0.594	-1.000*	0.879	-0.652	0.964	-0.940	0.702				
土壤中的汞 Mercury in soil Hg (mg/kg)	-0.338	0.810	-0.590	0.943	0.276	-0.946	0.990	-0.876	0.996	-1.000**	0.409	0.937			
土壤中的砷 Arsenic in soil As (mg/kg)	-0.990	-0.138	-0.590	0.149	-0.719	-0.156	0.588	-0.837	0.391	-0.462	-0.614	0.132	0.469		
土壤中的镉 Cadmium in soil Cd (mg/kg)	-0.488	-0.974	0.542	-0.870	-0.906	0.866	-0.544	0.211	-0.719	0.663	-0.957	-0.878	-0.657	0.358	
土壤中的铅 Lead in soil Pb (mg/kg)	0.311	-0.826	0.985	-0.952	-0.303	0.955	-0.986	0.862	-0.998*	1.000*	-0.435	-0.947	-1.000*	-0.444	0.678

*. 在 0.05 水平（双侧）上显著相关， $P \leq 0.05$ ；**. 在 0.01 水平（双侧）上显著相关， $P \leq 0.01$ 。
*. There is a significant correlation at the 0.05 level (bilateral), $P \leq 0.05$. **. There is a significant correlation at the 0.01 level (bilateral), $P \leq 0.01$.

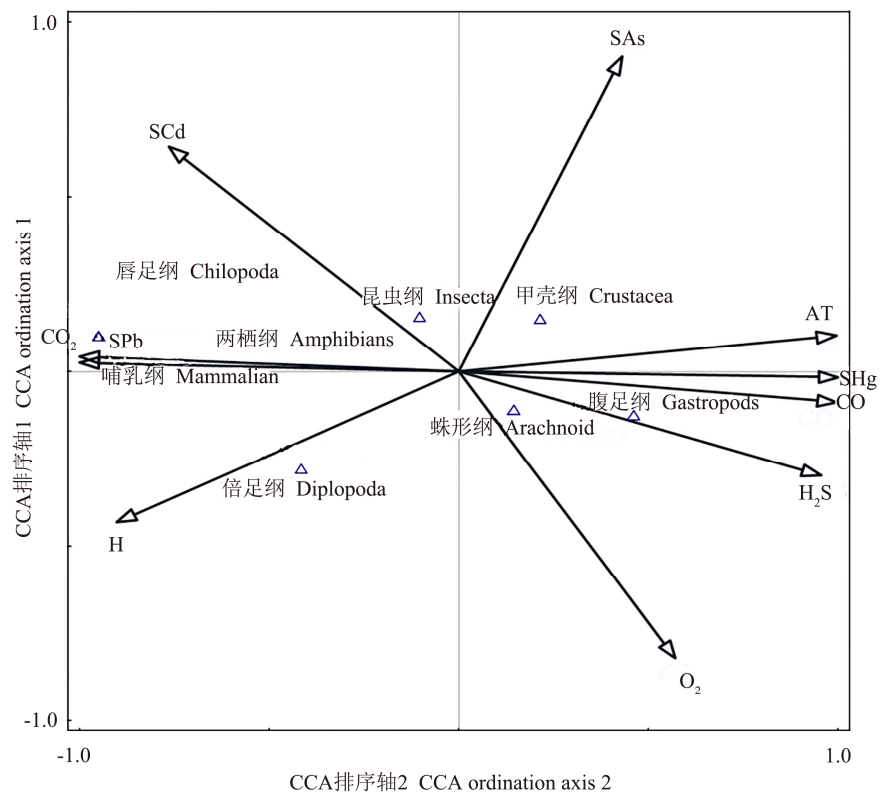


图 1 神女洞内动物群落的空间分布状况与环境因子的关系

Fig. 1 The relationship between the spatial distribution of animals and environmental factors in Shennv Cave

AT. 洞穴内温度; CO. 洞穴内一氧化碳; CO₂. 洞穴内二氧化碳; H. 洞穴内湿度; H₂S. 洞穴内硫化氢气体; O₂. 洞穴内氧气; SAs. 土壤中的砷; SCd. 土壤中的镉; SHg. 土壤中的汞; SPb. 土壤中的铅。

AT. The temperature in the cave; CO. Carbon monoxide in the cave; CO₂. Carbon dioxide in the cave; H. Humidity in the cave; H₂S. Hydrogen sulfide gas in the cave; O₂. Oxygen in the cave; SAs. Arsenic in the soil; SCd. Cadmium in the soil; SHg. Mercury in the soil; SPb. Lead in the soil.

表 7 神女洞土壤中几种重金属的污染情况

Table 7 The pollution of several heavy metals in the soil samples in Shennv cave

光带 Light band	单项污染指数 Single pollution index				综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染等级 Pollution levels
	Hg	As	Cd	Pb		
有光带 The light area	130.13	1.68	1.35	0.10	33.32	重度污染 Heavy pollution
弱光带 The lightless area	137.60	2.20	3.35	0.07	35.81	重度污染 Heavy pollution
黑暗带 The dark area	70.60	1.76	4.20	0.38	19.24	重度污染 Heavy pollution
平均值 Average value	112.80	1.88	2.95	0.19	29.46	重度污染 Heavy pollution

神女洞各光带内土壤重金属 Hg、As 含量普遍偏高，尤其汞含量的严重超标，导致神女洞内不仅汞的单项污染指数严重超标，综合污染指

数也远远超过了重度污染的范围。
较同类型的其他洞穴(杨卫诚 2013)而言，神女洞内动物群落结构较单一，物种数量较少，

高营养级的物种更为罕见，而导致这一现象的原因是否与洞穴土壤 Hg 的重度污染有关还有待研究。Cd 和 Pb 在黑暗带的污染指数最高，但致其污染严重的原因还有待进一步研究。

参 考 文 献

- Bichuette M E, Trajano E. 2003. A population study of epigeal and subterranean *Potamolithus* snails from southeast Brazil (Mollusca: Gastropoda: Hydrobiidae). *Hydrobiologia*, 505(1/3): 107–117.
- Cope E D. 1991. On the Wyandotte Cave and its fauna. *American Naturalist*, 6(7): 406–422.
- Peck S B. 2011. A summary of diversity and distribution of the obligate cave-inhabiting faunas of the United States and Canada. *Journal of Cave & Karst Studies*, 60(1): 18–26.
- Ricardo P D R, Glauco M H, Peter W. 2002. Two new species of *Charinus* Simon, 1892 from Brazil with biological notes (Arachnida; Amblypygi; Charinidae). *Annals & Magazine of Natural History*, 36(1): 107–118.
- Sket B. 1996. The ecology of anchihaline caves. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(5): 221–225.
- Tercafs R, Brouwir C. 2011. Population size of Pyrenean trogllobiont coleopters (*Speonomus* species) in a cave in Belgium. *International Journal of Speleology*, 20(1/4): 23–35.
- 陈建秀, 张崇洲. 1990. 贵州洞穴倍足类: 雕背马陆一新种. *动物分类学报*, 15(4): 406–409.
- 黎道洪. 2006. 贵州董背洞和水江洞内动物群落结构与部分环境因子的相关性. *动物学研究*, 27(5): 482–488.
- 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研究. *生态学报*, 27(6): 2167–2176.
- 黎道洪, 罗蓉. 1999. 贵州和尚洞不同光带内软体动物、节肢动物和脊索动物的多样性及分布研究. *中国岩溶*, 18(2): 143–149.
- 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. *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. *地理科学*, 14(1): 64–72.
- 肖智. 2011. 海南岛砖红壤中 Mn、Zn、Cu、Ni 含量、分布及污染评价研究. 海口: 海南师范大学硕士学位论文, 10–11.
- 徐承香, 黎道洪, 李子忠. 2012. 贵州仙人洞土壤和水体中重金属含量及裸灶螽对重金属的富集. *贵州农业科学*, 40(9): 101–105.
- 徐承香, 李子忠, 黎道洪. 2013. 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. *生物多样性*, 21(1): 62–70.
- 徐新阳, 于庆波, 孙丽娜, 等. 2004. 环境评价教程. 北京: 化学工业出版社, 94–96.
- 杨卫诚, 黎道洪, 杨慧. 2013. 贵州倒马坎洞洞穴动物对土壤及水体重金属的富集. *贵州农业科学*, 41(10): 200–202.
- 叶子郅, 黎道洪. 2011. 贵州屯上洞内动物群落结构与部分环境因子的相关性研究. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 29(3): 3–8.
- 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. *四川动物*, 34(3): 375–382.
- 周解. 1985. 广西岩溶洞穴鱼类. *中国岩溶*, (4): 377–385.