

# 贵州龙洞和万家洞内部分环境因子与动物群落结构的相关性

黎道洪

(贵州师范大学地理与生物科学学院 贵阳 550001)

**摘要** :分别在 2005 年的 10 月和 2006 年的 2 月赴遵义龙洞和万家洞对肉眼见到的软体动物、节肢动物和脊索动物进行了观察和采集,在龙洞共获标本 454 号,隶属 3 门 6 纲 13 目 20 科 29 种或类群;在万家洞共获标本 1 726 号,隶属 3 门 7 纲 11 目 18 科 22 种或类群。根据两洞内各光带中动物种类和数量组成不同,将其划分为 6 个动物群落。经群落多样性分析,物种丰富度、群落多样性、最大多样性、均匀度、优势度和相似性指数最高的分别是群落 A(3.193 2)、C(2.078 8)、A(2.833 2)、B(0.782 8)、E(0.378 9)和 B-E(1.785 4)。此外还研究了部分环境因子与群落多样性的相关性。结果显示,土壤中有机的含量与群落多样性指数呈极显著正相关,相关系数为 0.828(双尾显著性检验  $\leq 0.05$ );空气中 CO<sub>2</sub> 的含量与物种数、物种丰富度指数、群落多样性指数、群落最大多样性指数和群落优势度指数都成不显著负相关,相关系数分别为 -0.160、-0.263、-0.072、-0.117 和 -0.031。由此证明土壤有机质的含量和空气中 CO<sub>2</sub> 的含量是影响洞穴动物群落变化的重要因子。

**关键词** :环境因子;动物群落结构;龙洞;万家洞;贵州省

中图分类号:Q958 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2007)01-140-08

## The Correlation of Partial Environmental Factors to Animal Community Structure in Longdong Cave and Wanjiadong Cave of Guizhou Province

LI Dao-Hong

(School of Geographical & Biological Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract** :The observation and collection of the mollusc, arthropod and chordate visible to naked eye in Longdong cave and Wanjiadong cave of Zunyi City have been carried out in October 2005 and February 2006. 454 samples discovered in Longdong cave are subordinated to 3 phyla, 6 classes, 13 orders, 20 families, 29 species or groups; 1 726 samples, discovered in Wanjiadong cave are subordinated to 3 phyla, 7 classes, 11 orders, 18 families, 22 species or groups. 6 animal communities are divided according to the kinds and numbers of animals in the light belt of two caves. According to the analysis of community diversity and the richness index of species, the diversity, maximum diversity, evenness, dominance and similarity index of community are carried respectively by community A(3.193 2), C(2.078 8), A(2.833 2), B(0.782 8), E(0.378 9) and B-E(1.785 4). Besides, the correlation of some environmental factors to community diversity is studied. The result shows that the content of organic matter in soil has an extremely distinctive correlation to diversity index of community, with the correlation figures of 0.828, whose 2-tailed significant examines is at the  $\leq 0.05$  level. The content of CO<sub>2</sub> in air has a slightly negative correlation to species, the richness index of species

and the diversity ,maximum diversity and evenness index of community ,with the correlation figures of  $-0.160$  ,  
 $-0.263$  , $-0.072$  , $-0.117$  and  $-0.031$  respectively ,which proves that the content of organic matter in soil and the  
content of  $\text{CO}_2$  in air are the important elements influencing the community variation of cave animals.

**Key words** :Environmental factor ; Animal community structure ; Longdong cave ; Wanjiadong cave ; Guizhou Province

贵州喀斯特地貌发育好 ,其分布面积为  $10.91$  万  $\text{km}^2$  ,占全省总面积的  $73.8\%$ <sup>[1]</sup> ,且形成的洞穴多、类型复杂 ,这为研究提供了有利条件。喀斯特洞穴是一个较特殊而又相对封闭的生态系统 ,是研究生态过程、动物的起源和演化及地质历史变迁的理想场所。对洞穴生物(特别是洞穴动物)的研究长期以来在国内没有足够的重视 ,和国外相比较则处于相当落后的状态 ,一些研究领域几乎是空白 ,如对洞穴动物的生态地理特征、生理学、无脊椎动物的遗传学、起源和演化及生态系统研究等。国外对洞穴动物的研究不但全面而且也较广泛 ,从水生到陆生、从无脊椎动物到脊椎动物 ,研究的内容包括系统分类<sup>[2]</sup>、多样性及分布<sup>[3]</sup>、动物地理区划<sup>[4]</sup>、生态学和生理学<sup>[5-6]</sup>、繁殖<sup>[7]</sup>、起源和演化<sup>[8]</sup>等。在国内对洞穴动物的研究大量的工作主要是进行基础的形态分类<sup>[9-11]</sup> ,其次是生态学研究<sup>[12,13]</sup>。关于对洞穴动物群落结构的研究报道在国内均较少 ,国外有学者研究了无脊椎动物的群落组成及动物地理学<sup>[14]</sup> ,国内也有研究动物群落结构的报道<sup>[15]</sup> ;研究洞穴环境因子与洞穴动物群落结构相关性的资料较零星 ,在国外有一些研究报道涉及到温度、湿度和 pH 对洞穴动物的分布影响<sup>[16,17]</sup>及洞穴内硫和氧对洞穴动物生活的影响<sup>[18]</sup> ,在国内也有一些零星研究报道<sup>[19]</sup>。但是 ,关于洞穴空气中  $\text{CO}_2$  含量及洞穴土壤中有有机质和部分无机盐的含量等与洞穴动物群落结构相关性的系统研究到目前为止在国内外还未见报道。故撰写本文目的是要了解影响洞穴动物群落结构变化的主要环境因子和促进国内开展对喀斯特洞穴动物的研究。

## 1 环境概况

龙洞位于遵义县张王乡坡脚组 ,该洞开口于半山腰 ,洞口地理位置为北纬  $27^\circ 26' 9.9''$  ,东

经  $107^\circ 09' 55.0''$ 。洞口标高  $999$  m ,洞口方向为北偏东  $10^\circ$  ,最高处  $9.5$  m ,最宽处  $4.5$  m ,在洞口生长有少量的小灌木、禾本科植物与蕨类等。全洞由主洞和支洞组成 ,主洞为水洞 ,支洞为干洞 ,洞穴水从洞内流向洞外 ,全洞长  $75$  m ,其中有光带长  $15$  m ,弱光带长  $13$  m ,黑暗带长  $47$  m。洞穴横剖面以椭圆形和矩形为主 ,洞内化学沉积形态有钟乳石和石幔等 ,洞顶悬垂的石钟乳较多且具大小不同的棱角 ,洞底多为崩塌石块 ,泥土较少。在有光带生长有苔藓和地衣等植物。

万家洞位于遵义县张王乡鸳鸯村民组 ,该洞开口于山脚 ,洞口地理位置为北纬  $27^\circ 25' 30.8''$  ,东经  $107^\circ 11' 18.0''$ 。洞口标高  $814$  m ,洞口方向为南偏西  $45^\circ$  ,洞口最高处  $4.7$  m ,最宽处  $6.3$  m ,洞口周围生长有大量蕨类、藻类及禾本科植物。在夏季由洞穴渗水会集成溪流流向洞外 ,全洞长  $89$  m ,其中有光带长  $18$  m ,弱光带长  $22$  m ,黑暗带长  $49$  m。洞内化学沉积形态有钟乳石和石幔等 ,洞顶悬垂的石钟乳较少 ,近地面洞壁较光滑 ,洞底以河沙为主 ,有少量粘土。在有光带生长有少量的苔藓、地衣和藻类等植物。

## 2 工作方法

分别在  $2005$  年  $10$  月和  $2006$  年  $2$  月赴遵义龙洞和万家洞进行实地调查 ,调查对象主要是肉眼能看到的软体动物、节肢动物和脊索动物。关于光带的划分、样点和取样面积的设置、标本的采集和处理与已做的研究工作基本相同<sup>[15]</sup>。洞穴的地理坐标和海拔高度用美国出产的奇遇 (eTrex Venture) GPS 接收机进行测定。温、湿度的测定采用北京亚光仪器有限责任公司生产的 JWS A2-2 型温湿度表。洞穴滴水 pH 用精密 pH 试纸测定。气体样品的收集分别在不同的光带(即有光带、弱光带和黑暗带)中各采集篮球大小的气样一袋 ,将气体带回室内用日本岛

津公司出产的气相色谱仪 GC-16A 分析检测氧气、氮气和二氧化碳的含量。土壤样品的收集是在不同的光带中并在典型的地带分别取混合土样 1 kg, 土样带回室内主要检测土壤有机质、钙、钾、磷和钠的含量, 检测方法采用土壤分析标准方法, 主要仪器有 PE 公司生产的等离子体发射光谱仪等。由于缺乏一些动物类群的资料或一些动物只采到幼体, 故部分标本只能鉴定到属或科。

### 3 结果与分析

**3.1 种类组成和相对数量** 经实地调查, 在龙洞共获各类动物标本 454 号, 经鉴定和分类, 隶属 3 门 6 纲 13 目 20 科 29 种或类群; 万家洞共获 1 726 号, 隶属 3 门 7 纲 11 目 18 科 22 种或类群(表 1~3)。

表 1 贵州龙洞和万家洞内动物的分类统计

Table 1 Statistics of the classification of the animals in Longdong and Wanjiadong caves of Guizhou Province

洞穴名称 Cave name	门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	种(或类群) Species or group
龙洞 Longdong cave	3	6	13	20	29
万家洞 Wanjiadong cave	3	7	11	18	22

从表 2 和表 3 可以看出, 龙洞内的优势动物种群是斑灶马 (*Diastrammena marmorata*), 占该洞总捕获数的 21.81%; 万家洞内的优势动物种群是角似喇叭螺 (*Anauchen angulinus*) 和喇叭螺 (*Anauchen*), 分别占该洞总捕获数的 25.55% 和 29.38%。

**3.2 群落组成** 根据不同洞穴、不同光带中动物种类和数量的组成不同及有关环境因子的差异, 可将龙洞和万家洞内的动物群划分为 6 个动物群落, 具体划分如下:

群落 A: 环口螺 + 河蟹群落分布在龙洞的有光带, 两者均为优势种, 分别占该带总捕获数的 40.00% 和 17.33%。

群落 B: 奇马陆 + 斑灶马群落分布在龙洞的弱光带, 两者均为优势种, 分别占该带总捕获数的 39.22% 和 27.45%。

表 2 龙洞内软体动物、节肢动物和脊索动物的种类(或类群)组成及相对数量

Table 2 The species(or group) composition and relative individual numbers of mollusca, arthropoda and chordata in Longdong cave

种类(或类群)Species or group	LB	RLB	DB	P
近水螺科 Hydrocenidae				
巴氏土鸥螺 <i>Georissa bachmanni</i>	5			1.10
环口螺科 Cyclophoridae	60			13.22
钻头螺科 Subulinidae				
细钻螺 <i>Opeas gracilis</i>	3			0.66
条纹钻螺 <i>O. striatissimum</i>	3			0.66
拟阿勇蛞蝓科 Ariophantidae				
微小囊螺 <i>Microcystis minutis</i>			33	7.27
猛盾盾蛞蝓 <i>Macrochlamys rejecta</i>			6	1.32
虹蛞蝓科 Pupillidae				
角似喇叭螺 <i>Anauchen angulinus</i>	3			0.66
喇叭螺 <i>A. sp.</i>	18			3.96
十足目 Decapoda	26			5.73
短尾目 Brachyur	4			0.88
长跗盲蛛科 Phalangidae				
盲蛛 <i>Opilio sp.</i>	1	1	1	0.66
球蛛科 Theridiidae				
温室希蛛 <i>Achaearanea tepidariorum</i>	3		1	0.88
跳蛛科 Salticidae				
蝇虎 <i>Plexippus sp.</i>	5	3	1	1.98
漏斗蛛科 Agelenidae				
尾蛛 <i>Urobia sp.</i>		3	1	0.88
缘漏斗蛛 <i>Agelena limbata</i>			2	0.44
园蛛科 Araneidae				
黄斑园蛛 <i>Araneus ejumodi</i>		6		1.32
园蛛 <i>A. sp.</i>		3		0.66
园蛛 <i>A. sp.</i>			1	0.22
弱蛛科 Leptonetidae				
弱蛛 <i>Leptoneta sp.</i>			1	0.22
蟹蛛科 Thomisidae				
腹突蛛 <i>Phrynarachne sp.</i>	3			0.66
蟋蟀科 Cryllacidae				
斑灶马 <i>Diastrammena marmorata</i>	5	14	80	21.81
石蜈蚣科 Lithobiidae				
粗背石蜈蚣 <i>Bothropohys asperatus</i>	1			0.22
奇马陆科 Paradoxosomatidae				
奇马陆 <i>Hylomini sp.</i>	9	20	26	12.12
微蛾科 Nepticulidae	1	1	15	3.74
大蚊科 Tipulidae				
大蚊 <i>Tipula sp.</i>			7	1.54
箭头蝠科 Rhinolophidae				
中菊头蝠 <i>Rhinolophus affinis</i>			18	3.97
小菊头蝠 <i>R. pusillus</i>			36	7.93
栗黄菊头蝠 <i>R. rouxi</i>			24	5.29
合计 Total	150	51	253	100
百分比 Percentage (%)	33.04	11.23	55.73	

LB: 有光带 (Light belt), RLB: 弱光带 (Reflection light belt), DB: 黑暗带 (Dark belt), P: 百分比 (Percentage) (%); 占总数的 15% 以上为优势种, 占 1% ~ 15% 为普通种, 占 1% 以下为稀有种。

表 3 万家洞内软体动物、节肢动物和脊索动物的种类(或类群)组成和相对数量

Table 3 The species (or group) composition and relative individual numbers of mollusc, arthropoda and chordata in Wanjiadong cave

种类(或类群)Species or group	LB	RLB	DB	P
近水螺科 Hydrocenidae				
巴氏土鹧螺 <i>Georissa bachmanni</i>			2	0.12
环口螺科 Cyclophoridae		260		15.07
拟阿福蛞蝓科 Ariophantidae				
微小囊螺 <i>Microcystis minutis</i>	11	22		1.91
猛巨盾蛞蝓 <i>Macrochlamys rejecta</i>	1			
虹螺螺科 Pupillidae				
角似喇叭螺 <i>Anauchen angulinus</i>	75		366	25.55
喇叭螺 <i>A. sp.</i>	23	184	300	29.38
十足目 Decapoda			1	0.06
长跗盲蛛科 Phalangidae				
盲蛛 <i>Opilio sp.</i>	1		1	0.12
跳蛛科 Salticidae				
蝇虎 <i>Plexippus sp.</i>	8	2	0.58	
美丽蚁蛛 <i>Myrmarachne farmicaria</i>			1	0.06
漏斗蛛科 Agelenidae				
迷宫漏斗蛛 <i>Agelena labyrinthica</i>			1	0.06
园蛛科 Araneidae				
黄斑园蛛 <i>Arameus ejasmodi</i>	1		2	0.18
园蛛 <i>A. sp.</i>		3		0.18
蟹蛛科 Thomisidae				
覆突蛛 <i>Phrymarachne sp.</i>	2			0.12
球腹蛛科 Theridiidae				
金腹蛛 <i>Chrydso sp.</i>			1	0.06
石蜈蚣科 Lithobiidae				
粗背石蜈蚣 <i>Bothropohys asperatus</i>			4	0.23
奇马陆科 Paradoxosomatidae				
奇马陆 <i>Hylomini sp.</i>	9	27	74	6.38
蟋蟀科 Gryllacridae				
斑灶马 <i>Diestrammena marmorata</i>	6	24	75	6.09
大蚊科 Tipulidae				
大蚊 <i>Tipula sp.</i>			1	0.06
蛙科 Ranidae				
云南臭蛙 <i>Rana andersonii</i>	2			0.12
蹄蝠科 Hipposideridae				
大蹄蝠 <i>Hipposideros armiger</i>			150	8.69
蝙蝠科 Vespertilionidae				
大鼠耳蝠 <i>Myotis myotis</i>			86	4.98
合计 Total	139	522	1 065	100
百分比 (%)	8.05	30.24	61.71	

注释与表 2 同。

群落 C: 斑灶马 + 小菊头蝠群落分布在龙洞的黑暗带, 前者为优势种而后者为普通种, 分别占该带总捕获数的 31.62% 和 14.23%。

群落 D: 角似喇叭螺 + 喇叭螺群落分布在万家洞的有光带, 两者均为优势种, 分别占该带总捕获数的 53.96% 和 16.55%。

群落 E: 环口螺 + 喇叭螺群落分布在万家洞的弱光带, 两者均为优势种, 分别占该带总捕获数的 49.81% 和 35.25%。

群落 F: 角似喇叭螺 + 喇叭螺群落分布在万家洞的黑暗带, 两者均为优势种, 分别占该带总捕获数的 34.37% 和 28.17%。

3.3 不同群落的多样性分析 按照 Margalf 的物种 Richness index 公式计算物种的丰富度,  $D = (S - 1) / \ln N_s$ 。根据 Shannon-Weiner index 公式计算群落的多样性,  $H' = - \sum_{i=1}^s (P_i) (\ln P_i)$ ;

$J' = \frac{H'}{H'_{\max}}$ 。采用 Simpson 优势度指数公式计算

群落的优势度,  $C = \sum (n_i / N)^2$ 。按 Whittaker 的相似性指数公式来分析群落的相似性程度,

$I = 1 - 0.5 (\sum |a_i - b_i|)$ 。上述几种指标的计算结果列于表 4 和表 5。

表 4 的计算结果显示, 物种丰富度指数最高是群落 A (3.193 2), 群落多样性指数最高是群落 C (2.078 8), 群落最大多样性指数最高是群落 A (2.833 2), 群落优势度指数最高是群落 B (0.782 8), 群落均匀度指数最高是群落 E (0.378 9)。群落 A 的物种丰富度指数和群落最大多样性指数最高, 是因为群落 A 分布在龙洞的有光带, 射入的光线多, 生长不少的植物种类, 如蕨类、苔藓、地衣和少量的禾本科植物, 为部分杂食性动物提供了一定的食源; 其二是有关带直接和地表环境接触, 洞口周围的一些种类为躲避地表环境中的冬季低温或干旱可迁入洞内暂居或经长期适应而定居下来。群落 C 分布在龙洞的黑暗带, 在黑暗带虽然几乎无光照和植物分布, 但在该洞的黑暗带洞底土壤中的有机质含量却最高 (1.04%), 这可能是导致群落 C 的多样性升高的主要原因。均匀度指数从高到低的顺序是群落 B (0.782 8) > C (0.749 8) > A (0.718 2) > D (0.640 8) > E (0.613 3) > F (0.612 3), 而优势度指数从高到低的顺序则是群落 E (0.378 9) > D (0.334 5) > B (0.254 1) > F (0.233 6) > A (0.214 0) > C

(0.166 9), 这两者从高到低的排列顺序几乎是相反的, 这也就是说群落的均匀度和优势度之间的相关性基本呈负相关的关系 (详见 3.4 节)。

表 4 不同群落的多样性、均匀度和优势度指数

Table 4 Diversity, evenness and dominance indexes of different community

CO	S	D	H'	H' <sub>max</sub>	J'	C
A	17	3.193 2	2.034 7	2.833 2	0.718 2	0.214 0
B	8	1.780 3	1.627 7	2.079 4	0.782 8	0.254 1
C	16	2.710 8	2.078 8	2.772 6	0.749 8	0.166 9
D	11	2.026 6	1.536 6	2.397 9	0.640 8	0.334 5
E	7	0.958 8	1.193 5	1.945 9	0.613 3	0.378 9
F	15	2.008 4	1.658 2	2.708 1	0.612 3	0.233 6

CO: 群落 (Community); S: 物种数 (No. of species); D: 物种丰富度 (Richness of species); H': 群落多样性 (Diversity of community); H'<sub>max</sub>: 群落最大多样性 (The biggest diversity of community); J': 群落均匀度 (Evenness of community); C: 群落优势度 (Dominance of community)。

表 5 中数据表明, 群落相似性指数最高的前三位是群落 B-E (1.785 4)、A-C (1.776 3) 和 A-B (1.719 9), 它们都是分布在不同洞穴的同一光带和同一洞穴的相邻光带中, 由此可见在

不同洞穴的同一光带和同一洞穴的相邻光带中群落间的相似性指数较高, 而不同洞穴的不同光带和同一洞穴相离较远光带中群落的相似性指数较低, 这是因为不同洞穴同一光带和同一洞穴相邻光带的环境因子较为相似, 而不同洞穴不同光带和同一洞穴相隔较远光带间的环境因子一般差异都较大所致。

表 5 不同群落的相似性指数

Table 5 Similarity index between every two communities

CO	A	B	C	D	E
B	1.719 9				
C	1.776 3	1.182 4			
D	0.957 5	1.654 4	0.870 5		
E	0.782 3	1.785 4	1.687 2	1.387 2	
F	1.518 3	1.715 4	1.718 6	0.760 0	1.241 0

### 3.4 部分环境因子与群落多样性的相关性分析

在秋季分别测定和检测了各群落的部分环境因子 (如温度及二氧化碳和土壤有机质的含量等), 有关的测定值见表 6, 并利用 SPSS 12.0 统计分析软件对不同群落中部分环境因子与群落多样性的相关性进行了分析。

表 6 各群落中部分环境因子的测定值

Table 6 Measure value on parts of environmental factors in different community

CO	AT (°C)	H (%)	pH	AO (% v/v)	AN (% v/v)	ACO (% v/v)	SCa (%)	SK (mg/kg)	SP (mg/kg)	SNa (mg/kg)	SOM (%)
A	21	93	6.7	20.6	78.8	0.058	5.01	2 932	835	266	0.66
B	18	98	6.2	20.5	78.4	0.064	3.47	3 609	393	265	0.49
C	16	99	6.2	20.0	77.2	0.069	3.81	2 467	2 642	277	1.04
D	21	92	6.2	20.8	78.3	0.066	17.30	3 110	332	117	0.36
E	20	92	6.2	20.8	78.2	0.064	3.89	3 661	343	223	0.38
F	19	94	6.5	20.8	78.2	0.064	11.90	4 030	3 659	245	0.63

AT: 气温 (Air temperature); H: 湿度 (Humidity); AO: 空气中氧的含量 (Content of oxygen in air); AN: 空气中氮的含量 (Content of nitrogen in air); ACO: 空气中二氧化碳的含量 (Content of dioxide in air); SK: 土壤中钾的含量 (Content of potassium in soil); SNa: 土壤中钠的含量 (Content of sodium in soil); SCa: 土壤中钙的含量 (Content of calcium in soil); SP: 土壤中磷的含量 (Content of phosphorus in soil); SOM: 土壤中有机的含量 (Content of organic matter in soil)

采用 Pearson 相关系数 (Pearson correlation) 公式进行相关性分析, 公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中,  $r$  是相关系数,  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别是  $x$ 、 $y$  的均值,

$x_i$ 、 $y_i$  分别是  $x$ 、 $y$  的第  $i$  个值,  $n$  为样本数量。相关系数  $r$  取值范围是  $-1$  和  $+1$  之间。当  $r > 0$  时, 两变量为正相关; 当  $r < 0$  时, 为负相关。通常, 当  $|r| < 0.3$  时, 视为  $x$  与  $y$  微弱相关; 当  $0.3 \leq |r| < 0.5$ , 视为  $x$  与  $y$  低度相关; 当  $0.5 \leq |r| < 0.8$  时, 视为  $x$  与  $y$  显著相关; 当  $|r| \geq 0.8$  时, 视为  $x$  与  $y$  极显著相关。由于群落

表 7 标准差标准化后不同动物群落的多样性及部分环境因子的各项数据

Table 7 The standardized data of community diversity and parts of environmental factors in different animal community by standard deviations

群落 Community	A	B	C	D	E	F
物种数( $S$ )	1.091 89	- 1.013 89	0.857 91	- 0.311 97	- 1.247 87	0.623 93
物种丰富度( $D$ )	1.397 90	- 0.430 58	0.773 61	- 0.111 83	- 1.493 71	- 0.135 339
群落多样性( $H'$ )	1.049 46	- 0.183 42	1.183 05	- 0.459 38	- 1.498 69	- 0.091 03
群落最大多样性( $H'_{max}$ )	0.999 46	- 0.998 84	0.838 81	- 0.154 51	- 1.352 75	0.667 82
群落均匀度( $J'$ )	0.433 56	1.308 82	0.861 71	- 0.615 12	- 0.987 71	- 1.001 26
群落优势度( $C$ )	- 0.629 53	- 0.121 26	- 1.226 52	0.897 82	1.460 59	- 0.381 10
温度( $AT$ )	0.944 63	- 0.601 13	- 1.631 64	0.944 63	0.429 38	- 0.085 88
湿度( $H$ )	- 0.541 69	1.083 38	1.408 39	- 0.866 70	- 0.866 70	- 0.216 68
pH	1.697 34	- 0.617 21	- 0.617 21	- 0.617 21	- 0.617 21	0.771 52
氧气含量( $AO$ )	0.053 33	- 0.266 65	- 1.866 57	0.693 30	0.693 30	0.693 30
氮气含量( $AN$ )	1.161 94	0.408 25	- 1.852 82	0.219 83	0.031 40	0.031 40
二氧化碳含量( $ACO$ )	- 1.712 52	- 0.046 28	1.342 25	0.509 13	- 0.046 28	- 0.046 28
钙含量( $SCa$ )	- 0.445 20	- 0.713 72	- 0.654 43	1.697 69	- 0.640 48	0.756 14
钾含量( $SK$ )	- 0.648 33	0.539 54	- 1.464 21	- 0.336 01	0.630 78	1.278 23
磷含量( $SP$ )	- 0.372 15	- 0.681 16	0.891 12	- 0.723 80	- 0.716 11	1.602 10
钠含量( $SNa$ )	0.567 93	0.551 14	0.752 58	- 1.933 20	- 0.153 87	0.215 42
有机质含量( $SOM$ )	0.265 21	- 0.411 08	1.776 93	- 0.928 25	- 0.848 68	0.145 87

多样性与环境因子数据单位不统一,因此对原始数据进行标准差标准化处理,消除量纲影响,其计算结果见表 7。

利用 Pearson 相关系数公式,分别计算表 7 中动物群落的各项指数、指标之间的 Pearson 相关系数,得到的各种相关系数矩阵见表 8。

从表 8 中所列的环境因子与物种和群落多样性的相关分析来看,土壤有机质的含量与群落多样性指数呈极显著正相关,相关系数为 0.828(双尾显著性检验  $\leq 0.05$ ),其余相关性均不显著。

从物种和群落多样性的各种指数间的相关性看,物种数与物种丰富度指数和群落多样性指数均呈显著正相关,相关系数分别为 0.888 和 0.861(双尾显著性检验均  $\leq 0.05$ );与群落最大多样性指数呈极显著正相关,相关系数为 0.995(双尾显著性检验  $\leq 0.01$ )。物种丰富度指数与群落多样性指数和群落最大多样性指数都呈显著正相关,相关系数分别是 0.953 和 0.885(双尾显著性检验都  $\leq 0.05$ )。群落多样性指数与群落最大多样性指数和优势度指数分

别呈显著正相关和极显著负相关,相关系数分别为 0.855(双尾显著性检验  $\leq 0.05$ )和 - 0.931(双尾显著性检验  $\leq 0.01$ )。其余相关性均不显著。

## 4 讨 论

通过群落结构和群落多样性的分析,充分显示出喀斯特洞穴动物具有明显的成带性,一般情况有光带的群落多样性最高,这与该光带所处的环境有密切关系,如射入的光线多、 $CO_2$  含量较低、食物条件较好(分布有一定数量的低等植物)等。

从部分环境因子与群落多样性的相关性分析看(3.4 节),影响群落多样性变化的环境因子有多方面,但就上述两洞而言,土壤有机质和空气中  $CO_2$  含量是最主要的影响因子之一。土壤有机质的含量与群落多样性指数呈显著正相关,相关系数为 0.828(双尾显著性检验  $\leq 0.05$ );空气中  $CO_2$  的含量与物种数、物种丰富度指数、群落多样性指数、群落最大多样性指数

表 8 龙洞和万家洞内动物群落的各种 Pearson 相关系数矩阵  
 Table 8 The matrix on Pearson correlation coefficient of different species of animal community in Longdong cave and Wanjiadong cave

R	S	D	H'	H' max	J'	C	AT	H	pH	AO	AN	ACO	SCa	SK	SP	SNa
D	0.888 *															
H'	0.861 *	0.953**														
H' max	0.995**	0.885 *	0.852 *													
J'	0.137	0.478	0.618	0.122												
C	-0.791	-0.801	-0.931**	-0.781	-0.620											
AT	-0.129	-0.084	-0.380	-0.122	-0.540	0.597										
H	0.147	0.257	0.523	0.144	0.801	-0.696	-0.927**									
pH	0.679	0.609	0.461	0.648	-0.077	-0.397	0.413	-0.311								
AO	-0.384	-0.492	-0.705	-0.366	-0.748	0.732	0.830 *	0.860 *	0.217							
AN	-0.165	-0.012	-0.240	-0.171	-0.151	0.345	0.819 *	-0.604	0.547	0.721						
ACO	-0.160	-0.263	-0.072	-0.117	0.026	-0.031	-0.663	0.475	-0.806	-0.459	-0.877 *					
SCa	0.083	-0.031	-0.200	0.166	-0.572	0.294	0.468	-0.507	0.004	0.529	0.156	0.155				
SK	-0.479	-0.670	-0.684	-0.473	-0.507	0.454	0.259	-0.332	0.055	0.729	0.433	-0.228	0.171			
SP	0.634	0.279	0.410	0.641	-0.147	-0.616	-0.505	0.324	0.273	-0.278	-0.499	0.291	0.102	0.082		
SNa	0.327	0.311	0.497	0.260	0.548	-0.678	-0.587	0.622	0.323	-0.564	-0.187 *	-0.195	-0.832 *	-0.068	0.388	
SOM	0.734	0.655	0.828 *	0.711	0.474	-0.885 *	-0.731	0.684	0.163	-0.865 *	-0.676	0.302	-0.382	-0.607	0.656	0.644

\*\* 双尾显著性检验  $\leq 0.01$  (At the 0.01 level (2-tailed)); \* 双尾显著性检验  $\leq 0.05$  (At the 0.05 level (2-tailed)); R 相关系数 (Pearson correlation coefficient) 其余代号见前述。

和群落优势度指数都呈负相关,相关系数分别为 -0.160、-0.263、-0.072、-0.117 和 -0.031。

洞穴内土壤有机质的来源主要靠气流带入、生长在洞口段的植物及洞内动物尸体形成、高等的蝙蝠及其他动物带入等方式,但在离洞口较远的洞尾段则主要靠洞穴岩缝的渗水带入,由于洞穴内食物很贫乏,所以,土壤有机质便成为许多杂食性无脊椎动物(如螺类、马陆等)的主要食物来源,而食物链的顶级消费者(如蜘蛛、蝙蝠等)又以马陆及一些昆虫等无脊椎动物为食,从而形成洞穴内的特殊食物链或食物网。在地表空气中 CO<sub>2</sub> 含量一般为 330 ppm<sup>[20]</sup>,而溶洞内空气中的 CO<sub>2</sub> 含量则高得多,这主要是洞穴内化学堆积物在形成过程中有大量 CO<sub>2</sub> 逸出所致,因为当空气中 CO<sub>2</sub> 含量增加到 10 000 ~ 30 000 ppm 时,脊椎动物的呼吸显著增加,一些昆虫易进入休眠状态<sup>[21]</sup>。

在地表,一般情况下温度和湿度是影响群落多样性的主要因子,但在洞穴内由于洞尾段的温度四季较稳定和整个洞穴内的湿度均较高(一般在 90% 以上),所以,温、湿度与群落多样

性的相关性都不显著(表 8)。

致谢 中国科学院动物研究所陈德牛和张崇洲研究员帮助鉴定部分标本,在此一并致谢。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 高贵龙,邓自民,熊康宁等.喀斯特呼唤与希望——贵州喀斯特生态环境建设与可持续发展.贵阳:贵州科技出版社,2003.

[ 2 ] Sket B. Cave fauna and speleobiology in Slovenia. *Nase Jame*, 1993, **35**(1): 35 ~ 42.

[ 3 ] Stewart B P. A summary of diversity and distribution of the obligate cave-inhabiting faunas of the United States and Canada. *Journal of Cave and Karst Studies*, 1998, **60**(1): 18 ~ 26.

[ 4 ] Decu V G, Iliffe T M. A review of the Terrestrial cavernicolous fauna of Romania. *NSS Bull*, 1983, **45**(4): 86 ~ 97.

[ 5 ] Tercafs R, Brouwir C. Population size of Pyrenean troglolent coleopters (Speonomus species) in a cave in Belgium. *Int J Speleol*, 1991, **20**(1/4): 23 ~ 35.

[ 6 ] Biswass J. Metabolic efficiency and regulation of body weight: a comparison between life in hypogean and epigeal ecosystems. *Int J Speleol*, 1991, **20**(1/4): 15 ~ 22.

[ 7 ] Griffith D M. The effects of substrate moisture on survival of adult cave beetles (*Neaphaenops tellkampfi*) and cave cricket eggs (*Hadenococcus subterraneus*) in a sandy deepcave sit. *NSS*

- Bull* ,1991 **53**(2) 98 ~ 103.
- [ 8 ] Romero A. Can evolution regress. *NSS Bull* ,1985 **47**(2) :86 ~ 88.
- [ 9 ] 黎道洪,罗泰昌,陈德牛.贵州洞穴陆生贝类一新种(肺螺亚纲,柄眼目,烟管螺科).*动物分类学报* ,2003 **28**(3) :446 ~ 447.
- [ 10 ] 黄红,黎道洪,彭贤锦等.中国隙蛛属两新种(蜘蛛目,暗蛛科)(英文).*动物分类学报* 2002 **27**(1) :78 ~ 81.
- [ 11 ] 王大忠,陈宜瑜.贵州鲤科 Cyprinidae 鱼类三新种(鲤形目).*遵义医学院学报* ,1989 **12**(4) :29 ~ 34.
- [ 12 ] 陈樟福.金华双龙洞蜘蛛生态学研究. *杭州师范学院学报(自然科学版)* ,1985 **12**(1) :24 ~ 28.
- [ 13 ] 黎道洪,罗蓉.黔中地区岩溶洞穴翼手类的初步调查及部分生态观察. *贵州师范大学学报(自然科学版)* 2002 **20**(2) :41 ~ 45.
- [ 14 ] Peck S B. Community composition and zoogeography of the invertebrate cave fauna of Barbados. *Fla Entomol* ,1981 **64**(4) :519 ~ 527.
- [ 15 ] 黎道洪,罗蓉,陈浒.贵州大洞口内若干动物群落研究. *生态学报* 2001 **21**(1) :126 ~ 130.
- [ 16 ] Chapman P. Quantitative analysis of cave-dwelling invertebrates in estado falcon, Venezuela. *NSS Bull* ,1983 **45**(2) :40 ~ 44.
- [ 17 ] Lamprecht G, Weber F. Time-keeping mechanisms and their ecological significance in cavemicolous animals. *NSS Bull* , 1985 **47**(2) :147 ~ 162.
- [ 18 ] Sket B. The ecology of anchihaline caves. *Trends Ecol Evol* , 1996 **11**(5) :221 ~ 225.
- [ 19 ] 黎道洪,罗蓉.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. *中国岩溶* 2001 **20**(4) :315 ~ 320.
- [ 20 ] 俞锦标,章海生,黄象洪等.黄果树区域旅游资源研究. 上海:上海科技教育出版社,1990 286 ~ 1 331.
- [ 21 ] 华东师范大学等. *动物生态学(上册)*. 北京:人民教育出版社,1982,1 ~ 114.