

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

徐承香^{1,2} 李子忠^{1*} 黎道洪²

1 (贵州大学昆虫研究所, 贵阳 550025)

2 (贵州师范大学生命科学院, 贵阳 550001)

摘要: 为了解洞穴动物群落多样性与环境的关系, 以及土壤重金属污染对洞穴动物分布和多样性的影响, 作者于2011年8月对贵州的著名旅游洞穴织金洞的动物群落多样性进行了调查。将该洞划分为5个光带, 即入洞口有光带、出洞口有光带、入洞口弱光带、出洞口弱光带和黑暗带, 共设置25个样方。采用Shannon-Wiener多样性指数对群落多样性进行了分析, 采用主成分(PCA)分析动物群落多样性与环境的关系, 用Hakanson潜在生态危害指数法测度和评价了洞内土壤重金属的潜在生态危害程度。结果显示: 共获动物标本1,080号, 隶属3门7纲26科41种(或类群); 多样性指数、丰富度指数、均匀度指数、优势度指数最高的分别是出洞口有光带(2.7996)、入洞口有光带(4.5399)、出洞口有光带(0.9196)和出洞口弱光带(0.1868), 入洞口有光带和出洞口有光带间相似性系数最高(0.6248); 群落多样性和丰富度沿有光带、弱光带、黑暗带呈递减趋势。土壤中的有机质和空气中CO₂含量、洞穴湿度、温度以及土壤中的重金属污染是影响洞穴动物群落多样性的主导因子; 土壤中Cu、Zn、Ni、Cr、As均处于低度生态危害水平, 而Hg污染较为严重, 在入洞口有光带已达到重度生态危害水平($E_r^i=256.000$); 从整个洞穴的综合潜在生态风险指数的平均值($RI=192.714$)来看, 6种重金属总的潜在生态危害程度达到中度生态危害水平, 洞穴受到一定程度的重金属污染。

关键词: 动物群落多样性, 环境因子, 生态危害评价, 主成分分析, 织金洞

Relationships between the diversity of animal communities and the lighting environment and content of heavy metals in soils in Guizhou Zhijin Cave

Chengxiang Xu^{1,2}, Zizhong Li^{1*}, Daohong Li²

1 Institute of Entomology, Guizhou University, Guiyang 550025

2 College of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

Abstract: We investigated the community diversity of cave animals in different light zones of the Guizhou Zhijin Cave in August, 2011. We used principal components analysis (PCA) to examine the relationships between animal community diversity and environment factors. We assessed the potential ecological risk degree of heavy metals in the cave based on the Hakanson potential ecological risk index. We identified 1,080 specimens, which belong to three phyla, five classes, 26 families and 41 species or groups of species, which could be divided into five communities. The highest community diversity, richness index, evenness index, and dominance index were light zone of exit (2.7996), light zone of entrance (4.5399), light zone of exit (0.9196) and weak-light zone of exit (0.1868), respectively. Index of similarity between light zone of entrance and light zone of exit (0.6248) was highest. The richness and dominance indices of the communities were low, but community diversity and richness tended to decrease based on the order of the light intensity (i.e., light zone > weak-light zone > dark zone). Dominant species included *Hemiphaedusa pluvialis* and *H.*

收稿日期: 2012-05-25; 接受日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(31060287, 31160097)

通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lizizhong38@163.com

moellendorffiana. Organic matter of soil, content of CO₂ in the air, cave humidity, cave temperature, and heavy metal contamination of soil were the dominant factors to affect animal community diversity in the cave. Although Cu, Zn, Ni, Cr, As in soils were at ecologically low levels, Hg pollution was relatively high in the whole cave and at especially severe level of ecological risk ($E_r^I=256.000$) in the light zone of cave entrance. As far as the average potential ecological risk level ($RI=192.714$) of six heavy metals were concerned, the cave was contaminated at a certain degree with heavy metals.

Key words: diversity of animal communities, environmental factors, ecological risk appraisal, principal components analysis, Zhijin Cave

喀斯特洞穴是一类特殊的地下生态系统, 在这类生态系统中, 洞穴动物是主要组成部分, 洞穴环境对洞穴动物的群落组成、分布及多样性具有直接或间接的影响。关于洞穴动物的分类国内外均有报道(黎道洪, 2007), 但群落多样性与洞穴环境的关系在国内外的报道均较少, 前人研究洞穴动物与环境的关系仅限于pH、O₂、H₂S、温度、湿度、CO₂等(Ferreira & Martins, 1998; Pipan *et al.*, 2006; Tobler *et al.*, 2006; 黎道洪, 2006a; 徐承香等, 2009), 但未有光照和重金属污染方面的研究。

织金洞是中国南方喀斯特区域最为典型的“化石”洞穴, 1989年被国务院公布为第二批国家重点风景名胜区, 2004年被国土资源部批准为国家地质公园(周百智和金德明, 2009), 具有极大的美学价值和重要的科研价值。迄今, 对织金洞的研究主要有: 美学价值(吴清林等, 2001)、洞穴成因(熊康宁和朱文孝, 1994)、洞穴生物地质作用(安裕国等, 1996)、气候环境(朱文孝等, 1993)、环境容量(王剑和刘洪玉, 2007)、客流时空分布规律与旅游者行为特征等(殷红梅, 1999)。但关于织金洞动物群落多样性与环境的关系在国内外均未见报道。作为旅游洞穴, 织金洞受人工的影响因素较大, 如洞内荧光灯管、电器等设施会造成Hg污染。为此, 本文以光照强度为划分光带或群落的主要依据, 对织金洞的动物群落多样性与光照和土壤重金属含量的关系进行了研究, 以期为该洞的动物多样性保护、环境监测以及洞穴管理提供基础数据。

1 方法

1.1 洞穴环境概况

织金洞位于贵州省织金县官寨乡, 全洞初勘长度为12.1 km, 洞内最宽处173 m, 垂直高度多在50–60 m, 最高达150 m (周百智和金德明, 2009)。入洞

口位于26°46'03" N, 105°53'34" E, 海拔1,368 m处, 开口方向为南偏西116°。洞口周围有大叶女桢(*Ligustrum lucidum*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等乔木及一些灌木和藤本植物。出洞口位于26°46'27" N, 105°54'14" E, 海拔1,337 m处, 开口方向为北偏东280°。

根据各洞段接受光照强度以及各洞段的生境不同(黎道洪, 2007), 将整个洞穴划分为入洞口有光带、入洞口弱光带、黑暗带、出洞口弱光带和出洞口有光带5个光带, 其中, 有光带是太阳光能直接照射到的区域, 光照度在10 lx 以上; 弱光带是射入洞内的入射光通过反射后到达的区域, 光照度在0.1–10 lx 之间; 黑暗带是既无直射光也几乎无反射光的黑暗洞段, 光照度在0.1 lx 以下。入洞口有光带长58 m, 平均温度15℃, 平均湿度90%, 洞底多为泥土且较厚; 弱光带长38 m, 平均温度12℃, 平均湿度92%, 洞底有石梯, 泥土较少, 多为碳酸钙沉积。出洞口有光带长85 m, 平均温度16℃, 平均湿度85%, 洞底主为水泥地, 泥土少; 弱光带长50 m, 平均温度16℃, 平均湿度85%, 洞底主要为水泥地, 泥土少。黑暗带本次调查了7 km, 平均温度12℃, 平均湿度90%, 石笋、石柱、石钟乳较为发育, 多处有石帘、石花、边石坝, 少数地方有卷曲石, 洞底泥土少, 多为碳酸钙沉积。

1.2 样品采集及环境调查

2011年8月, 在每个光带洞底按梅花型布设5个样点, 共计25个(样方面积不小于调查总面积的5%)。采集样点内以及距离样点较近的洞顶和两洞壁(较低处)内肉眼看到的动物, 同种或同类的动物采集5号样品即可, 其余均计数; 每个样点采集土样1 kg和气样1 L。利用上海嘉定学联仪器厂JD-3型数字式光照度计测定光照强度; 北京亚光仪器有限责任公司JWSA2-2型温湿度计测定各样点的温、湿

度;美国奇遇(eTrex Venture)GPS定位仪测定洞穴地理位置。

1.3 室内样品测定

土样经风干、研磨后过100目筛,称取0.2 g加K₂CrO₄和浓H₂SO₄加热消煮1 h,后冷却,用FeSO₄标准溶液滴定后计算有机质含量;称取0.5 g加HNO₃和浓H₂SO₄加热至样品变白后取下冷却,0.5%的HNO₃定容至50 mL,AA800原子吸收光谱仪测定Cr和无机质Ca含量;称取0.5 g加HNO₃和HClO₄加热至样品变白后取下冷却,0.5%的HNO₃定容至50 mL,AA800原子吸收光谱仪测定Cu、Zn和Ni含量;称取0.1 g加新制王水静置12 h后置于沸水中4 h,待冷却后用去离子水定容至50 mL,AF-640原子荧光仪测定Hg和As含量(朱明华,2000)。

岛津GC-9A气象色谱仪测定气样中N₂和O₂含量,岛津GC-2014测定CO₂含量。

1.4 数据处理

1.4.1 群落多样性

采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D)、Pielou均匀度指数(J')、Simpson优势度指数(C)和Whittaker相似性指数(I)测度群落多样性(Shannon & Weaver, 1949; Pielou, 1975; 黎道洪, 2007)。公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$D = (S-1)/\ln S \quad (2)$$

$$J' = H'/\ln S \quad (3)$$

$$C = \sum (n_i/N)^2 \quad (4)$$

$$I = 1 - 0.5 \sum_i |a_i - b_i| \quad (5)$$

式中 P_i 为第 i 种的个体比, S 为物种数, N 为所有物种个体数之和, n_i 为第 i 种的个体数, a_i 和 b_i 分别为物种 i 的个体数在 a 和 b 群落中的比例。

某一种(或类群)个体数占有所有物种个体总数的10%以上为优势种,1-10%为普通种,1%以下为稀有种。

1.4.2 主成分分析

通过主成分(PCA)方法对25个样点的环境变量,即洞穴温度、湿度,土壤中Ca和有机质含量,土壤中重金属Cu、Zn、Ni、Cr、Hg、As含量;空气中O₂、N₂和CO₂含量进行分析。然后以PCA主成分因

子载荷量数值为解释变量,确定影响织金洞动物群落结构的主导因子。分析在SPSS18.0软件支持下进行。

1.4.3 土壤重金属潜在生态危害评价

PCA分析结果表明,土壤中的重金属含量是影响该洞动物群落多样性的主导因子之一,故有必要对土壤重金属进行潜在生态风险评价。本文以贵州省土壤背景值作为参比值(王云等,1995),采用潜在生态危害指数法评价洞内土壤重金属的潜在生态危害程度(Hakanson, 1980)。其公式为:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \cdot C_f^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (6)$$

式中, RI 为多种重金属的潜在生态危害综合指数, E_r^i 为单一重金属的潜在生态危害系数, T_r^i 为某种重金属的毒性响应系数, C_f^i 为某一重金属的污染系数, C_s^i 为土壤重金属含量实测值, C_n^i 为参比值。评价时依据重金属潜在生态危害分级标准,即当 $RI < 150$ 时,总的潜在生态危害处于低度生态危害水平; $150 \leq RI < 300$ 时,处于中度生态危害水平; $300 \leq RI < 600$ 时,处于重度生态危害水平; $RI \geq 600$ 时,达到严重生态危害水平(王伟力等,2009)。

2 结果

2.1 种类组成

通过调查,织金洞共获动物标本1,080号(含统计数),经鉴定分类隶属3门7纲26科41种(或类群)(表1)。无论是种类还是数量,有光带洞穴动物均最丰富(29种740号),其次为弱光带(19种220号),黑暗带最少(15种120号)。洞穴中的优势类群是麦氏拟管螺(*Hemiphaedusa moellendorffiana*)和雨拟管螺(*H. pluvialis*),分别占总捕获数的13.4%和12.9%,普通种有23种,稀有种有16种。

2.2 群落组成及多样性特征

2.2.1 群落的划分

根据织金洞不同光带中动物的种类和数量组成不同,将该洞划分为5个动物群落。

群落A:分布在入洞口有光带,优势类群为麦氏拟管螺和雨拟管螺,分别占该群落总捕获数的25.2%和21.2%。

群落B:分布在出洞口有光带,优势类群为雨

表1 贵州省织金洞内动物的种类(类群)组成及相对数量
Table 1 Animal species (group) composition and relative individual numbers in Zhijin Cave, Guizhou Province

种或类群 Species or group	入洞口有光带 Light zone of entrance	出洞口有光带 Light zone of exit	入洞口弱光带 Weak-light zone of entrance	出洞口弱光带 Weak-light zone of exit	黑暗带 Dark zone	百分比 Percentage (%)
环口螺科 Cyclophoridae						
长羽兔唇螺 <i>Lagochilus longipilus</i>	9	6	4	3		2.0
褐带环口螺 <i>Cyclophorus martensianus</i>	6	4	2	1		1.2
钻头螺科 Subulinidae						
柑卷轴螺 <i>Tortaxis mandarinuse</i>	15					1.4
条纹钻螺 <i>Opeas striatissimum</i>	13	7	5	2		2.5
烟管螺科 Clausiliidae						
尖真管螺 <i>Euphaedusa aculus</i>	7	9	8	4	3	2.9
真管螺属未定种 <i>Euphaedusa</i> sp.	21	17				3.5
雨拟管螺 <i>Hemiphaedusa pluviatilis</i>	101	38				12.9
麦氏拟管螺 <i>H. moellendorffiana</i>	120	25				13.4
拟阿勇蛞蝓科 Ariophantidae						
猛巨楯蛞蝓 <i>Macrochlamys rejecta</i>	14	15	11	9	5	5.0
树脂巨楯蛞蝓 <i>M. resinacea</i>	8	7	4	5	2	2.4
扁平巨楯蛞蝓 <i>M. planula</i>	3					0.3
巨楯蛞蝓属未定种 <i>Macrochlamys</i> sp.	11	33				4.1
虹蛞蝓科 Pupilidae						
喇叭螺属未定种 <i>Boysidia</i> sp.	13	8				1.9
坚齿螺科 Camaenidae						
扁平毛蜗牛 <i>Trichochloritis submissa</i>	4					0.4
巴蜗牛科 Bradybaenidae						
平顶巴蜗牛 <i>Bradybaena strictotaenia</i>	45	9				5.0
灰巴蜗牛 <i>B. ravid</i>	6	19				2.3
锥尖巴蜗牛 <i>B. acustina</i>	2					0.2
巴蜗牛属未定种 <i>Bradybaena</i> sp.	6	3				0.8
小婴石螺 <i>Chalepotaxis infantilis</i>	6	4	3	2		1.4
环肋螺属未定种 <i>Plectotropis</i> sp.	4	7				1.0
潮虫科 Oniscidae						
粗糙鼠妇 <i>Pocellio scaber</i>	3					0.3
长踦盲蛛科 Phalangidae	3	15	12	40		6.5
巨蟹蛛科 Heteropodidae						
严特巨蟹蛛 <i>Thelecticopis severa</i>	2					0.2
球蛛科 Theridiidae						
温室腴蛛 <i>Parasteatoda tepidariorum</i>			2	1	1	0.4
暗蛛科 Amaurobiidae						
龙隙蛛属未定种 <i>Draconarius</i> sp.			1	2	2	0.5
平隙蛛属未定种 <i>Platocoelotes</i> sp.			2		1	0.3
栅蛛科 Hahniidae						
栅蛛属未定种 <i>Hahn</i> sp.					2	0.2
蟹蛛科 Thomisidae						
波纹花蟹蛛 <i>Xysticus croceus</i>			3	1	7	1.0
蚰蜒科 Scutigelidae						
大蚰蜒 <i>Thereuopoda clunifera</i>				1		0.1
长头地蜈蚣科 Mecistocephalidae						
长头地蜈蚣属未定种 <i>Mecistocephalus</i> sp.			1			0.1
奇马陆科 Paradoxosomatidae						
陇马陆属未定种 <i>Kronopolites</i> sp.			2			0.2

表1 (续) Table 1 (continued)

种或类群 Species or group	入洞口有光带 Light zone of entrance	出洞口有光带 Light zone of exit	入洞口弱光带 Weak-light zone of entrance	出洞口弱光带 Weak-light zone of exit	黑暗带 Dark zone	百分比 Percentage (%)
角囊马陆科 Cambalidae						
角囊马陆属未定种 <i>Podoglyiulus</i> sp.	2		16	12	21	4.7
鳖蠊科 Corydiidae						
中华真地鳖 <i>Eupolyphaga sinensis</i>	5					0.5
驼螽科 Rhaphidophoridae						
裸灶螽亚属未定种 <i>Diestrammena</i> sp.	3	15	8	21	19	6.1
蚁蛉科 Myrmeleontidae						
蚁蛉 <i>Myrmeleon formicarius</i>	22	13				3.2
步甲科 Carabidae						
盲目步行虫属未定种 <i>Sinaphaenops</i> sp.			2	2	6	0.9
上野行步甲属未定种 <i>Uenotrechus</i> sp.					2	0.2
夜蛾科 Noctuidae						
闪夜蛾属未定种 <i>Sypna</i> sp.	15	5	21	7	3	4.7
大蚊科 Tipulidae						
大蚊属未定种 <i>Tipula</i> sp.	8	4				1.1
菊头蝠科 Rhinolophidae						
小菊头蝠 <i>Rhinolophus blythi</i>					28	2.6
鼠科 Muridae						
小泡巨鼠 <i>Rattus edwardsi</i>					18	1.7
种类总计 Total species	29	21	18	16	15	
个体数量总计 Toatl individuals	477	263	107	113	120	100.0

拟管螺和巨楯蛞蝓属未定种(*Macrochlamys* sp.), 分别占该群落总捕获数的14.5%和12.6%。

群落C: 分布在入洞口弱光带, 优势类群有闪夜蛾属未定种(*Sypna* sp.)、角囊马陆属未定种(*Podoglyiulus* sp.)、长跗盲蛛科和猛巨楯蛞蝓(*Macrochlamys rejecta*), 分别占该群落总捕获数的19.6%、15.0%、11.2%和10.3%。

群落D: 分布在出洞口弱光带, 优势类群有长跗盲蛛科、裸灶螽亚属未定种(*Diestrammena* sp.)和角囊马陆, 分别占该群落总捕获数的35.4%、18.6%和10.6%。

群落E: 分布在黑暗带, 优势类群有小菊头蝠(*Rhinolophus blythi*)、角囊马陆、裸灶螽和小泡巨鼠(*Rattus edwardsi*), 分别占该群落总捕获数的23.3%、27.5%、15.8%和15.0%。

2.2.2 群落多样性特征

从表2可知, 群落Shannon-Wiener多样性指数排列顺序为出洞口有光带(B)>入洞口有光带(A)>入洞口弱光带(C)>黑暗带(E)>出洞口弱光带(D), 丰富度指数为入洞口有光带(A)>入洞口弱光带(C)>出洞口有光带(B)>出洞口弱光带(D)>黑暗带(E), 即群落多样性指数和丰富度指数沿有光带、弱光带、黑暗

表2 织金洞洞穴动物群落的多样性特征

Table 2 Diversity, richness, evenness and dominance indices of five animal communities in Zhijin Cave

群落 Community	多样性指数(<i>H'</i>) Shannon-Wiener diversity index	丰富度指数(<i>D</i>) Margalef richness index	均匀度指数(<i>J'</i>) Pielou evenness index	优势度指数(<i>C</i>) Simpson dominance index
A	2.6009	4.5399	0.7724	0.1280
B	2.7996	3.5893	0.9196	0.0696
C	2.5193	3.6381	0.8716	0.1037
D	2.0978	3.1730	0.7566	0.1868
E	2.2061	2.9243	0.8146	0.1428

表3 织金洞不同洞穴动物群落的相似性指数
Table 3 Similarity index of five animal communities in Zhijin Cave

群落 Community	A	B	C	D
B	0.6248			
C	0.1803	0.3308		
D	0.1670	0.3155	0.6230	
E	0.0962	0.1594	0.4054	0.4244

带大致呈递减趋势。均匀度指数排列顺序为出洞口有光带(B)>入洞口弱光带(C)>黑暗带(E)>入洞口有光带(A)>出洞口弱光带(D), 而优势度指数则为出洞口弱光带(D)>黑暗带(E)>入洞口有光带(A)>入洞口弱光带(C)>出洞口有光带(B)。

从表3可知, A和B群落均分布在有光带, 相似性指数最高(0.6248), 其次为群落C和D(0.6230), 均分布在弱光带, 再次为群落D和E(0.4244)和群落C和E(0.4054), 均为相邻光带(弱光带与黑暗带)的两群落。而相似性指数最低的为群落A和E(0.0962), 分别分布在有光带和黑暗带。表明处于同一光带或相邻光带的群落间相似性较高, 处于不同光带或相隔较远光带的群落间相似性较低。

2.3 动物群落多样性与环境因子的关系

对织金洞25个样点的环境因子(表4)进行KMO检验和Bartlett检验, 特征值>1的主成分共有4个, 累计贡献率达83.1%, 揭示了洞穴动物群落所生活环境的大部分信息, 已达到统计学的要求, 故适合做主成分分析(表5)。第1主成分的贡献率为26.5%, 从特征向量看, 湿度(0.807)和温度(0.704)的绝对值

明显偏高, 其次为空气中CO₂含量(-0.635)。其中, 湿度和温度的载荷量为正值, CO₂的载荷量为负值。第2主成分的贡献率为25.5%, 从特征向量看, 土壤中所含重金属Cr(-0.965)、Cu(-0.857)的绝对值明显偏高, 两者的载荷量均为负值。第3主成分的贡献率为18.1%, 从特征向量看, 土壤中有机质的含量(0.753)和重金属Ni含量(-0.696)绝对值明显偏高, 其中, 有机质的载荷量为正值, Ni的载荷量为负值。第4主成分的贡献率为13.0%, 仅解释了总因子的13.0%, 说明该主成分的代表性较低, 且从特征向量看, 也是温度的载荷量最高(0.396)。

环境因子的主成分分析表明, 在织金洞内, 洞穴湿度、温度、CO₂含量、土壤中的有机质以及重金属含量是影响洞穴动物群落多样性的主导因子, 对群落的组成和分布起着关键的作用。

2.4 洞穴土壤重金属潜在生态危害

织金洞各光带土壤中Cu、Zn、Ni、Cr、As的单项潜在生态危害系数(E_r^i)均低于40, 处在低度生态危害水平; 而Hg的潜在生态危害系数(E_r^i)在各个光带土壤中均高于80, 其中出洞口的有光带、弱光带及黑暗带介于80-160之间, 处在较重生态危害水平, 入洞口的有光带和弱光带介于160-320之间, 处在重度生态危害水平。

从各光带土壤中6种重金属污染的潜在生态危害综合指数(RI)可看出, 出洞口有光带和黑暗带的重金属总的潜在生态危害程度处于低度生态危害水平; 入洞口有光带、入洞口弱光带和出洞口弱光带的RI均介于150-300之间, 处于中度生态危害水平(表6)。整个洞穴6种重金属潜在生态危害综合指数平均值为192.714, 总的潜在生态危害程度达到

表4 织金洞不同光带各环境因子的平均值
Table 4 Average value of environmental factors in each zone of Zhijin Cave

光带 Light zone	温度 Temperature (℃)	湿度 Humidity (%)	钙 Ca (%)	有机质 Organic matter (%)	氧气 O ₂ (%)	氮气 N ₂ (%)	二氧化碳 CO ₂ (%)	土壤重金属含量(mg/kg)					
								Heavy metal concentration in soil					
								铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni	铬 Cr	汞 Hg	砷 As
入洞口有光带 Light zone of entrance	15	90	12.52	3.41	20.69	77.92	0.46	59.7	106	73.8	46.8	0.64	9.92
出洞口有光带 Light zone of exit	16	85	15.35	4.33	20.87	78.01	0.19	56.7	182	76.6	39.7	0.28	10.30
入洞口弱光带 Weak-light zone of entrance	12	92	20.73	4.31	20.70	77.96	0.41	76.2	174	76.5	30.5	0.49	5.81
出洞口弱光带 Weak-light zone of exit	16	85	14.70	2.24	20.85	77.99	0.22	75.2	398	83.7	29.8	0.37	9.10
黑暗带 Dark zone	12	90	12.38	2.19	20.69	77.84	0.54	53.4	231	83.4	43.9	0.20	8.73

表5 织金洞环境因子主成分的因子负荷量、特征值与贡献率
Table 5 Loading scores, eigenvalue and contribution of principal component of environmental factors in Zhijin Cave

环境因子 Environmental factors	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
温度 Temperature	0.704	0.142	0.498	0.396
湿度 Humidity	0.807	-0.206	-0.353	-0.084
钙 Ca	0.531	0.743	0.156	0.190
有机质 Organic matter	0.502	0.083	0.753	-0.156
氧气 O ₂	-0.343	0.209	0.234	-0.262
氮气 N ₂	-0.237	0.303	0.085	0.228
二氧化碳 CO ₂	-0.635	-0.544	-0.523	0.202
铜 Cu	0.295	-0.857	0.014	-0.178
锌 Zn	-0.497	0.468	-0.467	-0.312
镍 Ni	-0.504	0.286	-0.696	0.379
铬 Cr	-0.074	-0.965	0.071	0.208
汞 Hg	0.478	-0.011	0.463	0.226
砷 As	-0.515	-0.545	0.369	-0.364
特征值 Eigenvalue	3.448	3.315	2.356	1.684
贡献率 Contribution (%)	26.5	25.5	18.1	13.0
累计贡献率 Accumulate contribution (%)	26.5	52.0	70.1	83.1

中度生态危害水平。综上可知, 织金洞洞内土壤受到一定程度的重金属污染。

3 讨论

3.1 织金洞动物群落多样性特点

与荔波9个洞穴的研究结果(黎道洪, 2007)相比, 织金洞洞穴动物群落的丰富度和优势度总体上偏低, 优势类群只有烟管螺科的拟雨管螺和麦氏拟管螺, 且均分布在有光带, 而最具代表性的洞穴优势类群裸灶螽和马陆类(黎道洪和罗蓉, 2001; 黎道洪,

2006a; 彭仕梅等, 2008; 徐承香等, 2009)在该洞的分布相对较少。主要原因如下: (1)该洞为世界闻名的旅游洞穴, 前来观光的游客多, 日接待量可高达2,900人次(王剑和刘洪玉, 2007), 人为因素的干扰(如呼吸释放大量的CO₂, 声音惊扰等)和洞穴的开发在一定程度上破坏了动物的栖息环境, 从而影响部分动物的分布和数量。(2)该洞的温湿度与其他洞穴相比整体偏低。(3)该洞口周围以及有光带的温度、湿度适宜, 分布有乔木、灌草丛, 岩石上多地衣、苔藓, 其凋落物和腐殖质等为这两种螺类提供了丰富的食源和适宜的栖息环境。

3.2 织金洞动物群落多样性与洞穴环境因子的关系

洞穴动物的群落结构与其生存的环境密切相关。本文通过PCA分析得出, 除了土壤中的有机质和空气中CO₂含量外, 洞穴湿度、温度以及土壤中的重金属污染也是影响该洞动物群落多样性的主要因子。

一般情况下, 湿度和温度是影响洞外地表动物群落多样性的主要因子, 但对洞穴动物群落多样性的影响不显著(黎道洪, 2007)。如黎道洪用Pearson相关系数对遵义的龙洞、万家洞(黎道洪, 2007)以及荔波的董背洞、水江洞(黎道洪, 2006a)、水拔洞(黎道洪, 2006b)5个洞穴内的环境因子与群落多样性进行相关性分析, 均得出影响洞穴动物群落多样性的主要因子是土壤中有有机质和空气中CO₂的含量, 而温度、湿度与群落多样性相关性并不显著, 但就织金洞而言, 洞穴湿度和温度在第1主成分中载荷量最大(表5), 可以说是影响织金洞动物群落多样性最主要的两个因子, 分析其原因主要是: 织金洞各洞段的湿度、温度与上述5个洞穴相比总体偏低。而

表6 织金洞不同光带土壤重金属潜在生态危害评价结果
Table 6 Potential ecological risk evaluation of heavy metals in soil in each zone of Zhijin Cave

	单项潜在生态风险指数(E_r^i) Single potential ecological risk index (E_r^i)						综合潜在生态 风险指数 Synthetical potential ecological risk index (RI)
	铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni	铬 Cr	汞 Hg	砷 As	
入洞口有光带 Light zone of entrance	11.615	1.286	10.95	1.081	256.000	7.459	288.391
出洞口有光带 Light zone of exit	11.031	2.209	11.365	0.917	112.000	7.744	145.266
入洞口弱光带 Weak-light zone of entrance	14.825	2.112	11.350	0.704	196.000	4.368	229.359
出洞口弱光带 Weak-light zone of exit	14.630	4.830	12.418	0.688	148.000	6.842	187.408
黑暗带 Dark zone	10.389	2.803	12.374	1.014	80.000	6.564	113.144
平均值 Average	12.498	2.648	11.691	0.881	158.400	6.595	192.714

以往的很多观察和研究表明,干燥和低温会影响洞穴动物的繁殖和分布,进而影响整个动物群落结构。如我们观察发现马陆等为喜湿动物,在湿度高于90%以上的洞段分布数量较多,在90%以下的洞段分布较少,而织金洞的湿度在90%或90%以下。

土壤中有有机质含量和大气中CO₂浓度对洞外地表土壤动物的多样性具直接或间接影响已在很多研究中体现。如土壤动物的种类(类群)或个体数与土壤有机质的含量具有较明显的正相关(李慧等, 2006; Reynolds *et al.*, 2007; Frouz *et al.*, 2009; 肖红艳等, 2012),而在美国Wisconsin州,土壤动物总数、弹尾目和螨类的数量随着CO₂浓度的增高则显著减少(Loranger *et al.*, 2004)。在食物缺乏、CO₂含量较高的特殊生态系统中,土壤中有有机质的含量和洞穴CO₂浓度必然会影响洞穴动物群落结构。本研究中洞穴土壤有机质、洞穴CO₂与洞穴动物群落多样性分别呈明显的正相关、负相关,该研究结果与黎道洪(2006 a, b; 2007)的研究结果一致。

洞外土壤重金属污染是影响动物群落结构的一个重要胁迫因子,对动物的组成和分布具有负面影响。已有研究表明:重金属污染不仅使土壤动物群落中常见类群和稀有类群减少或消失,而且优势类群中的种类亦明显减少(王振中等, 1994);随着重金属污染的加重,动物群落多样性指数、均匀度指数、密度一类群指数均趋于减少,优势度指数趋于增大(孙贤斌, 2007)。对于洞穴土壤重金属污染如何影响动物群落结构,目前未见系统报道。在本研究中,土壤Cr、Cu在第2主成分中载荷量明显偏高, Ni在第3主成分中载荷量也较高,且均为负值,表明织金洞土壤中重金属污染对动物群落结构也具有明显的负面影响。

事实上,各环境因子对洞穴动物群落的组成、分布、群落多样性的影响要复杂得多,其具体影响机理及综合影响程度有待进一步研究。

3.3 织金洞洞穴土壤潜在生态危害分析

本研究得出,织金洞洞内土壤中Cu、Zn、Ni、Cr、As均处于低度生态危害水平,而Hg污染较为严重,在入洞口有光带已达到重度生态危害水平。究其原因:一是贵州省Hg的土壤背景值整体上偏高,高于我国平均水平(王云等, 1995)。二是土壤中Hg含量受人为活动的影响较大(蔡立梅等, 2008),例如织金煤矿的开采以及燃烧,使土壤Hg含量增加,加

之喀斯特洞穴通道发育,故洞内土壤Hg含量也相应较高。另外,洞内的荧光灯管、电器等设施也会造成Hg污染。三是Hg的毒性响应系数较大,其潜在生态危害系数可能相应较大。

就整个洞穴而言,6种重金属总的潜在生态危害程度(RI=192.714)达到中度生态危害水平,故相关部门应对该洞穴周围的环境质量以及洞穴的环境保护给予重视。

参考文献

- An YG (安裕国), Rong KF (戎昆方), Li JY (李景阳), He FS (何复胜) (1996) A study on biogeological process in karst caves: an example from Zhijin Cave of Guizhou. *Guizhou Geology* (贵州地质), **13**, 203–208. (in Chinese with English abstract)
- Cai LM (蔡立梅), Ma J (马瑾), Zhou YZ (周永章), Huang LC (黄兰椿), Dou L (窦磊), Zhang CB (张澄博), Fu SM (付善明) (2008) Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China. *Environmental Science* (环境科学), **29**, 3496–3502. (in Chinese with English abstract)
- Ferreira RL, Martins RP (1998) Diversity and distribution of spiders associated with bat guano piles in Morrinho Cave (Bahia State, Brazil). *Diversity and Distributions*, **4**, 235–241.
- Frouz J, Pižl V, Cienciala E, Kalčík J (2009) Carbon storage in post-mining forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation. *Biogeochemistry*, **94**, 111–121.
- Hakanson L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, **14**, 975–1001.
- Li DH (黎道洪) (2007) *Study on Karst Cave Animal in Guizhou Province* (贵州喀斯特洞穴动物研究). Geological Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Li DH (黎道洪) (2006a) Correlation between the animal community structure and environmental factors in Dongbei Cave and Shuijiang Cave of Guizhou Province. *Zoological Research* (动物学研究), **27**, 481–488. (in Chinese with English abstract)
- Li DH (黎道洪) (2006b) Study on correlation between fauna structure and some environmental factors in Shuiba Cave, Guizhou Province. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), **25**, 256–262. (in Chinese with English abstract)
- Li DH (黎道洪), Luo R (罗蓉) (2001) Study of the relationship between the animal community structure and distribution and part of environmental factors in Longdong Cave of Guizhou Province. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), **20**, 315–320. (in Chinese with English abstract)
- Li H (李慧), Jiang PA (蒋平安), Cheng LM (程路明), Jia HT (贾宏涛), Dong ZH (董自红) (2006) Impacts of fencing on

- soil animals diversity beneath mountainous lawn vegetation in Xinjiang. *Arid Land Geography* (干旱区地理), **29**, 538–542. (in Chinese with English abstract)
- Loranger GI, Pregitzer KS, King JS (2004) Elevated CO₂ and O₃ concentrations differentially affect selected groups of the fauna in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**, 1521–1524.
- Peng SM (彭仕梅), Li DH (黎道洪), Wu QH (武秋红), Ba JW (巴家文) (2008) The preliminary study on cave animal communities diversity in Hebians and Shuijianshang caves in Guangxi. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science)* (贵州师范大学学报(自然科学版)), **26**(3), 1–5. (in Chinese with English abstract)
- Pielou EC (1975) *Ecological Diversity*. John Wiley, New York.
- Pipan T, Christman MC, Culver DC (2006) Dynamics of epikarst communities: microgeographic pattern and environmental determinants of epikarst copepods in Organ Cave, West Virginia. *The American Midland Naturalist*, **156**, 75–87.
- Reynolds BC, Hamel J, Isbanioly J, Klausman L, Moorhead KK (2007) From forest to fen: microarthropod abundance and litter decomposition in a southern Appalachian floodplain/fen complex. *Pedobiologia*, **51**, 273–280.
- Shannon CE, Weaver W (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana and Chicago.
- Sun XB (孙贤斌), Liu HY (刘红玉), Li YC (李玉成), Zhang XP (张小平) (2007) Impact of heavy metals pollution on the community structure and spatial distribution of soil animals. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **18**, 2080–2084. (in Chinese with English abstract)
- Tang L (汤琳), Zhang JP (张锦平), Xu ZL (许兆礼), Chen YQ (陈亚瞿) (2007) Study on annual variation of phytoplankton communities and environment factors in the Yangtze Estuary. *Environmental Monitoring in China* (中国环境监测), **23**(2), 97–101. (in Chinese with English abstract)
- Tobler M, Schlupp I, Heubel KU, Riesch R, García de León FJ, Giere O, Plath M (2006) Life on the edge: hydrogen sulfide and the fish communities of a Mexican cave and surrounding waters. *Biomedical and Life Sciences*, **10**, 577–585.
- Wang J (王剑), Liu HY (刘洪玉) (2007) Tourist carrying capacity in karstic caves: a case study in the scenic area of Zhijin Cave, Guizhou, China. *Journal of Bijie University* (毕节学院学报), **25**(3), 52–56. (in Chinese with English abstract)
- Wang WL (王伟力), Geng AC (耿安朝), Liu HT (刘花台), Gao AG (高爱国) (2009) Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the surface sediments from the Jiulongjiang River Estuary. *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), **27**, 502–508. (in Chinese with English abstract)
- Wang Y (王云), Wei FS (魏复盛), Yang GZ (杨国治), Zheng CJ (郑春江), Wu YY (吴燕玉), Zeng SQ (曾水泉) (1995) *Element Chemistry of the Soil Environment* (土壤环境元素化学). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Wang ZZ (王振中), Hu JL (胡觉莲), Zhang YM (张友梅), Zheng YY (郑云有), Wu ZF (吴志峰), Chen CF (陈彩芳), Deng JF (邓继福), Guo YC (郭永灿), Yan HM (颜亨梅), Lai Q (赖勤) (1994) Influence of heavy metal pollution on soil animal community ecology in Qinsuitang area in Hunan. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), **14**, 64–74. (in Chinese with English abstract)
- Wu QL (吴清林), Li B (李波), Xiong KN (熊康宁) (2010) Analysis of aesthetic value of Zhijin Cave. *Guizhou Science* (贵州科学), **28**(1), 93–96. (in Chinese with English abstract)
- Wu YF (武永锋), Liu CQ (刘丛强), Tu CL (涂成龙) (2007) The heavy metal pollution in urban soils of Guiyang City and their potential ecological hazard assessment. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (矿物岩石地球化学通报), **26**, 254–257. (in Chinese with English abstract)
- Xiao HY (肖红艳), Liu H (刘红), Li B (李波), Yuan XZ (袁兴中), Sun SC (孙书存), Chen ZL (陈忠礼) (2012) Soil fauna diversity in the rotational grazing pasture in subalpine meadow. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), **45**, 292–301. (in Chinese with English abstract)
- Xiong KN (熊康宁), Zhu WX (朱文孝) (1994) Karst geomorphology and speleogenesis of the Zhijin Cave area. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), **13**, 281–292. (in Chinese with English abstract)
- Xu CX (徐承香), Li DH (黎道洪), Mei J (梅杰) (2009) Study on the correlation of animal community diversity and partial environment factors in Zhengjia small cave of Guizhou Province. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science)* (贵州师范大学学报(自然科学版)), **27**(4), 6–11. (in Chinese with English abstract)
- Yin HM (殷红梅) (1999) Passenger spatial and temporal distribution and the characteristics of tourist behavior of Zhijin Cave in Guizhou. *Geography and Territorial Research* (地理学与国土研究), **15**(2), 71–74, 79. (in Chinese)
- Zhou BZ (周百智), Jin DM (金德明) (2009) Zhijin Cave: the utilization and protection of the cave park. *The Earth* (地球), (5), 80–82. (in Chinese)
- Zhu MH (朱明华) (2000) *Instrumental Analysis* (仪器分析). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese)
- Zhu WX (朱文孝), Li P (李坡), Pan GC (潘高潮) (1993) Climate and CO₂ of air in Zhijin Cave. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), **12**, 409–417. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 卜文俊 责任编辑: 闫文杰)