

Comparison of Air Temperature, Relative Humidity, CO₂ Concentration and Cave-Dwelling Creatures between Tourist-Attraction and Tourism-Abandoned Karst Cave

Xiaoyan Gong, Taifu Huang, Tao Wu, Youxiang Zhang, Zhixiao Liu*

College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou Hunan
Email: *zxliu1965@163.com

Received: Nov. 3rd, 2017; accepted: Nov. 18th, 2017; published: Nov. 24th, 2017

Abstract

Numerous caves have recently been investigated in Xiangxi Tujia & Miao Nationality Autonomous Prefecture (Hunan Province) to clarify the impact of Human tourism activity on Karst cave environment and cave-dwelling creatures. Based on the previous investigation, we selected two different caves in tourism intensity but with similar complex tunnel structure as the objective, and focused on the response of air temperature, relative humidity, CO₂ concentration and cave-dwelling creatures in the caves to tourism activity. The main results were as follows: 1) The meteorological factors in the caves and the population size & distribution of cave-dwelling creatures were not only of spatial-temporal heterogeneity, but also showed different-degree response to intensity of tourism activity; 2) There existed significantly difference ($P < 0.05$) in the air temperature and relative humidity of the caves between the slack and peak tourist season, and the CO₂ concentration rose abruptly in some relative-close tunnel sections in the peak tourist season; 3) Long-time intense Human tourism interference and light illumination led to scanty species and less amount of animals, as well as caused lampenflora in the tourist-attraction Qiliang cave; 4) By contrast, there were relatively more species and amount of animals but lack lampenflora in the tourism-abandoned Tangle cave.

Keywords

Karst Cave, Air Temperature, Relative Humidity, CO₂ Concentration, Cave-Dwelling Creature, Tourism Activity

*通讯作者。

旅游热点洞穴与废弃洞穴温湿度、CO₂浓度及洞内生物的比较研究

龚小燕, 黄太福, 吴 涛, 张佑祥, 刘志霄*

吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首

Email: zxliu1965@163.com

收稿日期: 2017年11月3日; 录用日期: 2017年11月18日; 发布日期: 2017年11月24日

摘 要

为探究人类旅游活动对洞穴环境及洞穴生物的影响, 本文以湘西州境内洞穴结构相似、复杂度较高, 但受旅游活动影响程度不同的堂乐洞和奇梁洞为研究对象, 比较研究了不同强度的人类旅游活动对溶洞气温、湿度、CO₂浓度及洞内生物的影响。结果表明: 溶洞中的主要气象因子及生物不仅存在时空异质性, 而且对人类旅游活动的强度有不同程度的反应; 旅游淡期和旺期溶洞中的气温及湿度存在明显差异, 旺期空气中CO₂的浓度显著升高($P < 0.05$); 长期高强度的旅游活动及灯光照射等人为干扰, 使得在奇梁洞中生活的动物种类及数量很少, 并滋生了灯光植物, 而在旅游废弃后, 人为活动较弱或消除的堂乐洞内栖居的动物种类及数量较多, 且缺乏灯光植物。

关键词

溶洞, 气温, 相对湿度, CO₂含量, 洞穴生物, 旅游活动

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩溶洞穴简称溶洞(Karst cave), 是指经过岩溶作用形成的人体能够进入的天然地下空间, 也是近年人类热衷于研究并具有区域开发利用价值的自然资源。由于溶洞是相对封闭的自然生态系统, 洞内环境较少受到外界气象因子的影响, 洞穴生物(尤其是真洞穴动物)的生态生物学特征及其起源演化机制等方面的研究已受到广泛的重视[1] [2] [3] [4]。洞穴医疗、洞穴旅游开发也已成为区域经济开发的重要内容[5] [6] [7] [8]。

人类的洞穴旅游活动对洞穴动物的生存和繁衍可能产生深远的影响, 并可能导致洞内灯光植物(Lampenflora)的滋生, 而灯光植物的生长进而会促使洞穴内环境的改变, 以致钟乳石变色或崩塌, 加速洞穴衰退[9] [10]。可是, 由于缺乏对溶洞景观吸引力及游客客源的系统评估, 有些溶洞被盲目开发后被迫废弃。而被废弃的溶洞与旅游热点溶洞之间主要气象因子及洞穴生物的比较研究是洞穴旅游管理和洞穴资源开发与保护的基础性工作。

为探究溶洞主要气象因子及洞穴生物对于人类洞穴旅游活动的反应, 近年笔者对湘西土家族苗族自

治州(简称湘西州)境内的多个溶洞进行了调查,选取两个具有代表性的旅游热点洞穴与废弃洞穴开展了气温、湿度、CO₂ 浓度及生物种类的观测、调查和比较, 以期对洞穴旅游开发管理及洞穴资源保护相关问题的深入研究提供参考。

2. 研究方法

2.1. 调查区域自然概况与样洞选择

湘西州(109°10'~110°22.5'E, 27°44.5'~29°38'N)位于武陵山脉东部,属云贵高原向东部丘陵平原的过渡区域,地处我国华中、华南、西南三个动物地理区的交汇地带及湘鄂渝黔四省边区,下辖 7 县 1 市,总面积约 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由于受酉水、猛洞河、武水、沅水、辰水等河流的冲蚀,境内被切割成众多的盆地、台地、高峰、沟谷及陡坡。州域属中亚热带季风湿润性气候,具有明显的大陆性气候特征,一月平均气温约为 4.4℃,无霜期 271~294 d,年均降雨量 1200~1600 mm,但受海拔、地形、坡向等因素的影响,州境内的小气候存在明显的垂直和水平分布格局,气温、降水、日照、无霜期等气候因子的小区域差异显著。州域内碳酸盐广布,岩溶地貌发育良好,溶洞较多[11]。

根据项目组前期调查所获得的信息[12],选取洞道结构层次及复杂度较为相似、海拔接近且周围植被景观差异性较小的溶洞作为样洞(表 1),其中堂乐洞是旅游废弃洞穴,奇梁洞是旅游热点洞穴,对比研究旅游活动对其主要气象因子及洞穴生物的影响。

2.2. 研究方法

采用智能手机的 GPS 功能记录溶洞的地理坐标及海拔,利用 UT391+激光测距仪(量程 60 m,精确度 $\pm 1.5 \text{ mm}$)测量洞道的深度,将便携式气象站(Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker)(精确度:湿度 $\pm 3\%$,温度 $\pm 1^\circ\text{C}$)和手持农业环境监测仪(THHY-5-A) (CO₂ 精确度: $\pm 0.07\%$)悬挂在大背包外随人身所到之处自动记录洞穴中的气温、湿度及 CO₂ 浓度等主要气象因子,以反映洞内气象因子的连续动态变化情况。将便携式气象站的数据自动记录时间间隔设定为 30 或 60 秒。手持农业环境监测仪的数据自动记录时间间隔虽最短只能设置为 5 分钟,但由于观察记录洞道周围动、植物分布情况需要花费较多的时间,人行进的速度较慢,因此仪器每 5 分钟自动记录一次气象因子数据也能够反映各洞道内主要气象因子的基本情况。

沿洞道调查时,通常 3~5 人相隔一定的距离缓慢行进,头戴或手持强光灯全面扫视在保证安全的情况下人身能够进入或涉水能够通过并且肉眼可达的洞内各处,观察记录并拍摄所见到的生物种类、数量及其微生境。对于旅游洞穴,则沿着旅游通道行进,同时用强光灯全面扫视所到之处及其附近地面和岩壁上可能隐藏的动物,特别注意观察、记录、拍摄每盏灯周围可能分布的灯光植物,并用小刀刮取或小心拔出一些样株放入采集袋中,编号,带回室内,依据有关的工具书及参考文献[13] [14] [15] [16] [17],必要时请求相关的专家帮助进行物种鉴定。

Table 1. Basic information of the two sample Karstic caves

表 1. 两个样洞的基本信息

洞名 Name	经纬度 Longitude & latitude	海拔 Altitude (m)	洞穴类型 Type	洞穴深度 Depth (m)	溶洞的复杂度 Complexity
堂乐洞 Tangle cave	28°18'9"N 109°39'2"E	337	F	442	+++
奇梁洞 Qiliang cave	27°59'19"N 109°35'25"E	372	L	580	+++

注: F—开发后被废弃的溶洞; L—旅游热点溶洞; +—洞道短,结构简单; ++—洞道较长,结构较为复杂; +++—洞道较长且分支分层。(Notes: F—abandoned Karst cave after unconscionable development; L—hotspot Karst cave for tourism; +—short cave tunnel with simple structure; ++—little long cave tunnel with slightly complex structure; +++—longer cave tunnel with multilayered and branching structure)

无论是旅游洞穴还是废弃洞穴，每天进洞旅游观光或游玩的人数都有所不同，往往差异还很大，为简化分析，我们根据实际观察并结合洞穴管理人员或附近村民所反映的情况将调查时间划分为旅游淡季和旅游旺期：对于奇梁洞，淡季是指一天之内进洞旅游的人数仅为数百人，旺期则多达数千人，分批统一进出洞穴；对于堂乐洞，淡季意味着一天之内进洞游玩的人数很少，通常只有几人或十几人，而旺期(主要是节假日)进洞游玩的人数虽较多，通常也不过数十人，并且大多三五成群自由进出洞穴。

根据主要景点的位置将奇梁洞和堂乐洞的洞道划分为若干洞段，然后分段、分期统计分析仪器自动记录的气温、湿度及 CO₂ 浓度。按行进路线将奇梁洞的主要洞段划分如下：A-洞口→雨洗新荷、B-雨洗新荷→白岭大海沟、C-白岭大海沟→海底世界、D-石花→苗王议事大厅、E-十里画廊→黄果树瀑布、F-黄果树瀑布→黄龙戏水、G-倒挂石林→林海雪原、H-林海雪原→西湖、I-西湖→白象迎宾、J-人工隧道→天堂景区、K-天堂景区→御花园、L-御花园→白塔群、M-白塔群→天堂景区、N-白岭大海沟→海底世界、O-雨洗新荷→洞口，其中 E-I 为“十里画廊大景区”的洞段。同样，按行进路线将堂乐洞的主要洞段划分如下：a-洞口→迎客厅、b-迎客厅→龙宫、c-龙宫→雀儿寨、d-雀儿寨→三岔口、e-三岔口→舞厅、f-舞厅→观景台、g-观景台→南瓜洞、h-南瓜洞→观景台、i-观景台→三岔口、j-三岔口→一线天、k-一线天→石壁长廊、l-石壁长廊→南天门、m-南天门→司令部、n-司令部→岔路口、o-岔路口→洞穴最深处、p-洞穴最深处→岔路口、q-岔路口→盲洞、r-盲洞→岔路口、s-岔路口→司令部、t-司令部→南天门、u-南天门→一线天、v-一线天→雀儿寨、w-雀儿寨→迎客厅、x-迎客厅→洞口。

采用 Excel、Spss22.0 软件进行数据分析，利用其中的单因素 ANOVA 对两个溶洞的气象数据进行方差分析。

3. 结果与分析

3.1. 旅游淡、旺期两个溶洞内气温、湿度及 CO₂ 浓度的动态变化

无论是在旅游淡季还是旺期，奇梁洞和堂乐洞洞道内的气温(TP)、湿度(RH)及 CO₂ 浓度都存在差异，处于动态(图 1~6)，但也具有一些共同的特征。在旅游淡、旺期，两个溶洞的最高气温均在洞口附近，随着洞道的深入，气温逐渐下降，奇梁洞淡、旺期的最低气温都在倒挂石林-林海雪原(G)洞段(图 1)，堂乐洞则都在三岔口-一线天(j)洞段(图 4)。相反，两个溶洞中空气的最低湿度都在洞口附近，随着洞道的深入湿度逐渐增大，在淡、旺期时，奇梁洞分别在十里画廊-黄果树瀑布(E)和御花园-白塔群(L)洞段达到最大值(图 2)，堂乐洞则分别在岔路口-司令部(s)和司令部-南天门(t)洞段达到最大值(图 5)。奇梁洞中 CO₂ 浓度

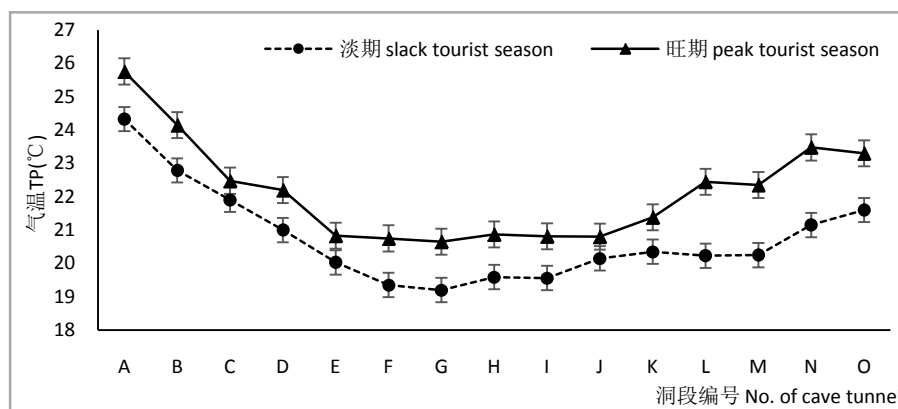


Figure 1. Changes of air temperature in the different tunnel sections of Qiliang cave in slack and peak tourist season

图 1. 在旅游淡、旺期奇梁洞不同洞段气温的变化

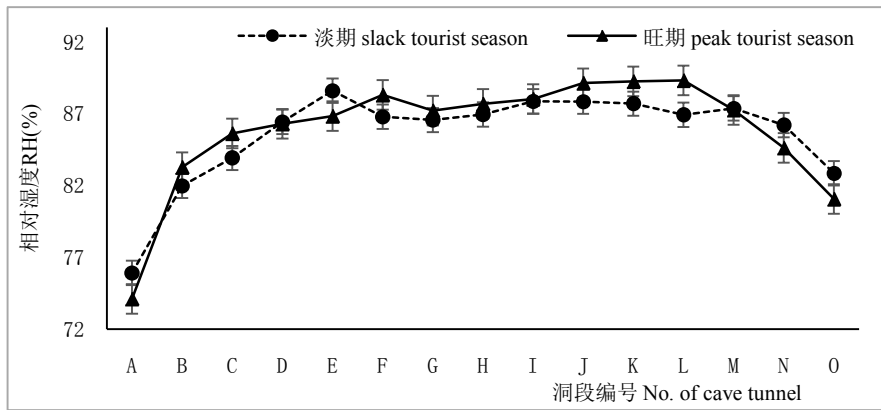


Figure 2. Changes of air relative humidity in the different tunnel sections of Qiliang cave in slack and peak tourist season

图 2. 在旅游淡、旺期奇梁洞不同洞段空气相对湿度的变化

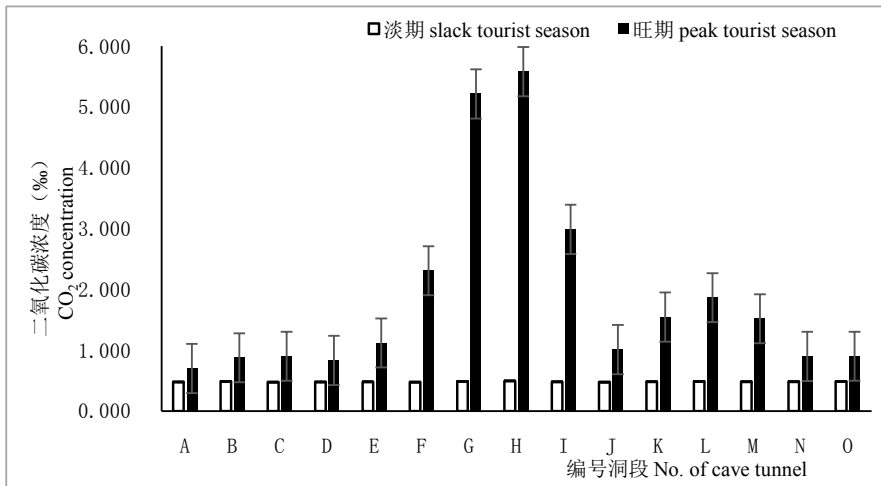


Figure 3. Changes of air CO₂ content in the different tunnel sections of Qiliang cave in slack and peak tourist season

图 3. 在旅游淡、旺期奇梁洞不同洞段空气中 CO₂ 含量的变化

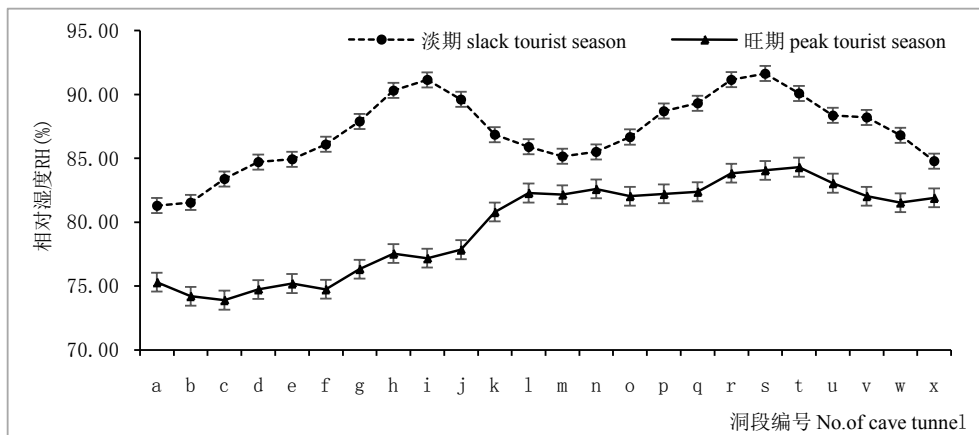


Figure 4. Changes of air relative humidity in the different tunnel sections of Tangle cave in slack and peak tourist season

图 4. 在旅游淡、旺期堂乐洞不同洞段相对湿度的变化

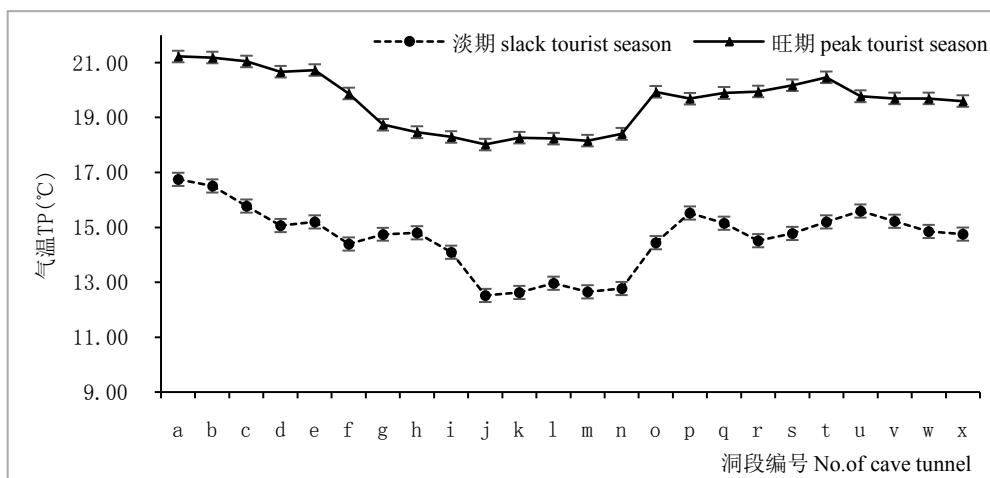


Figure 5. Changes of air temperature in the different tunnel sections of Tangle cave in slack and peak tourist season

图 5. 在旅游淡、旺期堂乐洞不同洞段空气气温的变化

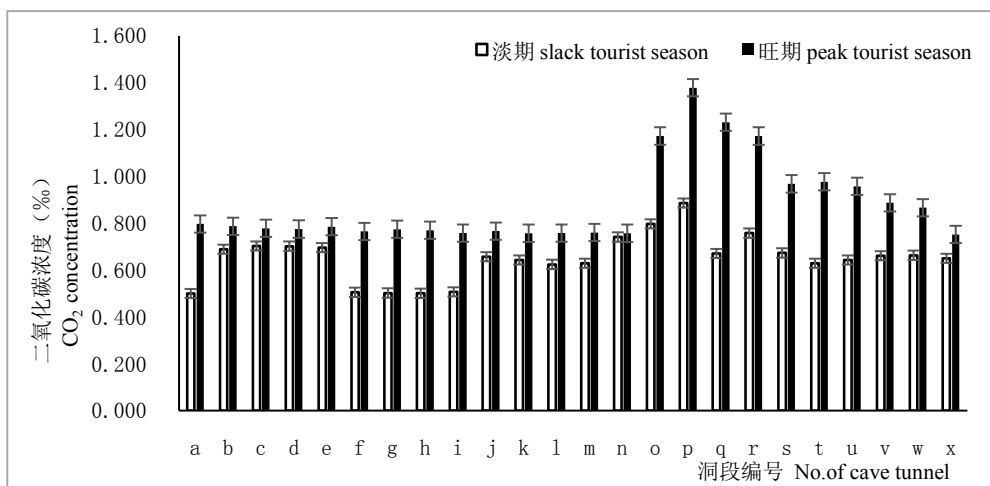


Figure 6. Changes of air CO₂ concentration in the different tunnel sections of Tangle cave in slack and peak tourist season

图 6. 在旅游淡、旺期堂乐洞不同洞段空气中 CO₂ 浓度的变化

的峰值在淡、旺期均于十里画廊大景区的林海雪原-西湖(H)洞段呈现，最小值则在洞口段(图 3)，而堂乐洞均在洞穴最深处-岔路口(p)洞段达到峰值，最小值则分别在洞口-迎客厅(a)和迎客厅-洞口(x)洞段呈现(图 6)。总体而言，奇梁洞十里画廊大景区(E-I)的气温、湿度变化较为平缓，但 CO₂ 浓度的变化特别剧烈(图 1~3)；两个溶洞的洞口段由于受到外界气象因子的影响，出洞和入洞时洞口段的温、湿度存在明显的差异(P < 0.05)，出洞时的气温低于进洞时的气温，湿度则相反。

3.2. 两个溶洞之间温湿度及 CO₂ 浓度的比较

奇梁洞和堂乐洞洞道内的气温、湿度及 CO₂ 浓度在旅游淡、旺期的(变化)范围、(平)均值及其相互之间的差异性比较见表 2。奇梁洞的气温、CO₂ 浓度，以及堂乐洞的气温、湿度和 CO₂ 浓度在淡、旺期都存在显著性差异，而奇梁洞的湿度不存在显著性差异。两个溶洞之间的气温、湿度和 CO₂ 浓度在旺期均存在显著性差异，但在淡期湿度不存在显著性差异。

Table 2. Comparison of air temperature, relative humidity, CO₂ concentration between Qiliang and Tangle caves in slack and peak tourist season

表 2. 奇梁洞和堂乐洞在淡、旺期气温、湿度及 CO₂ 浓度的比较

洞名 Name	时期 Tourist season	TP (°C)		RH (%)		Content of CO ₂ (%)	
		范围 range	均值 average	范围 range	均值 average	范围 range	均值 average
奇梁洞 Qiliang	淡期 slack	19.20~24.33	20.77 ± 1.41	75.93~88.61	85.60 ± 3.28	0.475~0.495	0.482 ± 0.006
	旺期 peak	20.80~25.76	22.15 ± 1.55	74.12~89.32	85.87 ± 3.98	0.699~5.582	1.907 ± 1.563
	P 值	P < 0.05		P > 0.05		P < 0.05	
堂乐洞 Tangle	淡期 slack	12.52~16.75	14.62 ± 1.38	81.30~91.63	87.08 ± 2.89	0.500~0.886	0.651 ± 0.097
	旺期 peak	18.02~21.23	19.59 ± 1.02	73.90~84.30	79.67 ± 3.62	0.752~1.378	0.881 ± 0.181
	P 值	P < 0.05		P < 0.05		P < 0.05	
洞间比较 comparison	淡期 slack	P < 0.05		P > 0.05		P < 0.05	
	旺期 peak	P < 0.05		P < 0.05		P < 0.05	

3.3. 在两个样洞中所观察到的主要生物类群

在这两个溶洞中，总共观察记录到动物 18 科 25 种，灯光植物 3 科 7 种，其中洞栖性蝙蝠占优势，共计 4 科 11 种(表 3)。在奇梁洞内，记录到动物 9 科 9 种，其中蝙蝠 4 科 4 种，即大蹄蝠、皮氏菊头蝠、鼠耳蝠和印度吸血蝠；其他动物还有蜘蛛、斑灶马、菌蚊、尺蛾和烟管螺。在堂乐洞内，观察到动物 17 科 24 种，其中蝙蝠 3 科 10 种，即中华菊头蝠、菲菊头蝠、皮氏菊头蝠、大菊头蝠、贵州菊头蝠、大耳菊头蝠、大蹄蝠、西南鼠耳蝠等，还见到小泡巨鼠、雷氏大疣蛛、盲蛛、马陆、蚰蜒及紫啸鸫等更多的动物。从奇梁洞 15 个采样点采集的灯光植物中已鉴定出 7 种蕨类植物，另 2 种苔藓还有待鉴定。蕨类中包括黑足鳞毛蕨、凤尾蕨、岩凤尾蕨，以及贯众属 3 种和卷柏属 1 种。在堂乐洞中数量较多的是中华菊头蝠、斑灶马和尺蛾，而奇梁洞中的灯光植物以贯众占优势，各种动物的数量则很少。

4. 讨论

4.1. 溶洞中主要气象因子的时空异质性

一般认为，溶洞处于封闭或半封闭状态，洞道中的气温、湿度等气象因子处于稳定或恒定状态，因此通常仅在洞道的某处或个别位点测量有关的气象数据。本文发现，溶洞内部的气象因子存在明显的时空异质性，不仅存在洞间差异，在同一洞穴中的不同洞段及不同时段都存在差异，既具有日变化也存在季节性变化，还受到人为因素的影响，甚至还具有短期的非周期性变化[18]，因此今后在洞穴气象因子测量及溶洞环境质量评价时对于洞穴环境因子的时空异质性应予以充分的重视。

洞穴气象或环境因子异质性产生的原因是多方面的，但洞内外空气流动是主要原因，洞内空气与洞外空气之间通过洞口进行对流、传导、辐射等热量交换，从而影响洞内气温、湿度等气象因子的分布变化[19]。另一方面，由于人类经济活动的加剧，人类对于洞穴环境因子的影响也日益加剧。在自然因素和人为因素的双重作用下，不同溶洞呈现不同的时空异质性。就堂乐洞而言，由于被旅游业所废弃，旅游强度较低，受到的人为影响相对较小，洞内气象因子自我调节能力较强，恢复较快，在旅游淡、旺期气温、湿度及 CO₂ 浓度的分布差异较为明显(图 4~6、表 2)。相反，奇梁洞是旅游热点洞穴，旅游强度较大而稳定，旅客对洞内环境产生持续的影响，致使洞内温湿度的分布相对较为均匀，差异相对较小，并且在通风不良，气流不畅的洞段还积蓄着高浓度的 CO₂ (图 1~3、表 2)。

Table 3. Animals and plants observed in the two sample Karst caves
表 3. 在奇梁洞和堂乐洞所观察到的动物与植物种类

种类 species	奇梁洞 Qiliang cave	堂乐洞 Tangle cave
一、动物		
(一) 蹄蝠科 Hipposideridae		
1.大蹄蝠 <i>Hipposideros armiger</i>	+	++
(二) 菊头蝠科 Rhinolophidae		
2.中华菊头蝠 <i>Rhinolophus sinicus</i>		+++
3.菲菊头蝠 <i>Rhinolophus pusillus</i>		+
4.皮氏菊头蝠 <i>Rhinolophus pearsoni</i>	+	+
5.大菊头蝠 <i>Rhinolophus luctus</i>		+
6.大耳菊头蝠 <i>Rhinolophus macrotis</i>		+
7.贵州菊头蝠 <i>Rhinolophus rex</i>		+
8.菊头蝠 <i>Rhinolophus</i> sp.		+
(三) 蝙蝠科 Vesperitlionidae		
9.西南鼠耳蝠 <i>Myotis altarium</i>		+
10.鼠耳蝠 <i>Myotis</i> sp.	+	+
(四) 假吸血蝠科 Magadermatidae		
11.印度假吸血蝠 <i>Megaderma lyra</i>	+	
(五) 鼠科 Murinae		
12.小泡巨鼠 <i>Leopoldamys edwardsi</i>		++
(六) 鸫科 Turdidae		
13.紫啸鸫 <i>Myiophoneus caeruleus</i>		+
(七) 地蛛科 Atypidae		
14.地蛛 <i>Atypus</i> sp.		++
(八) 六疣蛛科 Hexathelidae		
15.雷氏大疣蛛 <i>Macrothele raveni</i>		+
(九) 节板蛛科 Liphistiidae		
16.七纺蛛 <i>Heptathela</i> sp.	+	++
(十) 长奇盲蛛科 Phalangiidae		
17.盲蛛 <i>Opilio</i> sp.		++
(十一) 驼螽科 Rhabdiphoridae		
18.斑灶马 <i>Diestrammena marmorata</i>	+	+++
(十二) 菌蚊科 Sciaridae		
19.菌蚊 <i>Sciophila</i> sp.	+	++
(十三) 尺蛾科 Geometridae		
20.尺蛾 <i>Herochroma</i> sp.	+	+++
(十四) 烟管螺科 Clausiliidae		
21.烟管螺 <i>Hemiphaedusa</i> sp.	+	++
(十五) 带马陆科 Polydesmidae		
22.带马陆 <i>Epannerchodus</i> sp.		++
(十六) 仿角囊马陆科 Cambalopsidae		
23.雕马陆 <i>Glyphiulus</i> sp.		++
(十七) 蛭蜒科 Scutigelidae		
24.蛭蜒 <i>Scutigera</i> sp.		+
(十八) 山蛭科 Haemadipsidae		
25.洞穴山蛭 <i>Haemadipsa</i> sp.		+
种数小计	9	24

Continued

二、灯光植物		
(十九) 鳞毛蕨科 <i>Dryopteridaceae</i>		
26. 贯众 <i>Cyrtomium</i> sp.	++	
27. 贯众 <i>Cyrtomium</i> sp.	+++	
28. 贯众 <i>Cyrtomium</i> sp.	++	
29. 黑足鳞毛蕨 <i>Dryopteris fuscipes</i>	++	
(二十) 凤尾蕨科 <i>Pteridaceae</i>		
30. 凤尾蕨 <i>Pteris cretica</i>	++	
31. 岩凤尾蕨 <i>Pteris deltoodon</i>	++	
(二十一) 卷柏科 <i>Selaginellaceae</i>		
32. 卷柏 <i>Selaginella</i> sp.	++	
种数小计	7	0

注：“+”有发现但数量少；“++”较为常见；“+++”数量较多(Notes: “+” less; “++” common; “+++” more)。

洞口的数目及位置也是影响洞穴环境异质性的重要因素，尤其是位于洞道顶壁的垂直洞口通常还会产生“烟囱效应”，使得洞内外的气压、气流、风速产生明显的季节性变化[20]，继而引发洞口附近微环境的季节性差异。

4.2. 溶洞气象因子对人类旅游活动的反应

溶洞在开发之前，洞内小气候(或微气候)与洞外大气候相比相对稳定[21]。但在旅游开发利用的过程中，游道、灯光、护栏等洞内旅游设施的建设会使洞穴原生态受到破坏，不仅洞道的原始形态发生变化，游客的体热和呼吸也会影响洞道内的小环境，导致洞内气温、湿度的变化与 CO₂ 浓度的升高[22] [23]。

对于单洞口的溶洞或虽有多个洞口但支洞内仅有一个进出口的溶洞而言，洞道中 CO₂ 的浓度随洞道的深入而升高，通常在空气流动不畅的洞段或洞道的盲端达到最大值，奇梁洞的十里画廊大景区(E-I)洞道低矮(人需低头弯腰才能通过)，空气几乎处于静止状态，而该洞段又是进出著名景点——林海雪原的必经之道，因此游客呼出的 CO₂ 在此处积蓄，CO₂ 浓度骤然升高，并且游客较多的旺期与较少的淡期相比，存在显著性差异(P < 0.05)，在林海雪原-西湖(H)洞段峰值高达 5.582‰，超过空气中 CO₂ 含量对人体及洞穴环境影响评价指标二级(1‰~3‰)和三级标准(3‰~5‰) [24]。

堂乐洞的情况明显不同，因已被废弃，其受人类旅游活动的影响相对较小，洞内 CO₂ 浓度在淡期总体较低，仅在旺期时在岔路口通往洞穴最深处与盲洞洞段(o-r)达到二级标准。堂乐洞淡、旺期 CO₂ 浓度虽也存在明显差异(表 2)，但与奇梁洞相比，差异较小。

4.3. 洞穴动物分布的不均匀性及对人类旅游活动的反应

洞道中的微环境多种多样，微环境因子具有时空异质性，因此生活在洞穴中的动物也并非均匀分布，斑灶马和尺蛾是洞道中常见的无脊椎动物，多见于洞道的前段，洞的深处较为少见。而马陆、烟管螺等许多无脊椎动物的分布与蝙蝠的粪场密切相关。蝙蝠是溶洞中处于优势地位的脊椎动物类群，但不同的蝙蝠种类栖于不同的洞段，冬眠期间，鼠耳蝠多栖于洞的前段，菊头蝠多见于洞的深处，而夏季繁殖期间大蹄蝠特别强势，多集群悬挂于洞口附近宽阔洞厅的顶壁。最值得注意的是，专一性地吸食蝙蝠血液的洞穴山蛭仅分布于某些湿度较高并相对封闭的特殊洞道的洞壁。

由于长期高强度的人为干扰，栖于奇梁洞中的动物种类及数量都很少，并且主要隐藏在游客难以到达或不易觉察的狭缝间或构造复杂的黑暗岩壁凹窝内。堂乐洞已被废弃多年，游客零星而分散，旅游强度较低，在洞内栖息的动物种类及数量都较多，我们还发现了 400 多只中华菊头蝠聚集在一起冬眠，

以及 300 多只大蹄蝠聚在一起育幼的场景。

蝙蝠对人类进洞活动特别敏感, 尤其在选择冬眠场所的“冬眠前期”和选择育幼场所的“育幼前期”, 强烈的人为干扰通常会促使蝙蝠迁出而另寻它洞栖居。而洞栖性蝙蝠的迁居必然影响到洞内其他粪食性无脊椎动物的种群繁衍, 以至整个洞穴生态系统的演化。

4.4. 洞穴植物的馈乏与灯光植物的滋生

洞穴植物通常仅分布在洞道的弱光带或门坎带[25][26], 在黑暗的洞道中植物不能持续生长和繁衍, 因此生长在溶洞内的植物种类及数量都很少。但随着溶洞旅游的兴起及旅游品味的提升, 客流量持续增长, 洞内游道及照明设施的建设越趋规模化和现代化, 为洞内植物的生长创造了条件, 从而导致灯光植物的滋生。奇梁洞游客较多而稳定, 洞内灯光设施完善, 长期的灯光照射已导致灯光植物的繁衍, 而堂乐洞被废弃后尽管洞内温、湿度等微环境因子适合植物的短期生长, 但因缺乏持续的光照, 植物体发芽或长出后就很快萎缩。

一般认为, 灯光植物对洞穴生态系统有负面的影响, 应加以防治[27]。可是, 灯光植物在洞穴生态系统中是否有多方面的作用, 对于洞穴动物类群的演化是否也有积极的意义值得深入探讨和研究。

致 谢

在植物标本的鉴定过程中, 得到本院张代贵老师的悉心指导, 本院研究生孙林、李冰在数据处理过程中予以帮助, 谨此一并致以诚挚的谢意。

基金项目

国家自然科学基金(31560130)。

参考文献 (References)

- [1] Groves, C.G. and Howard, A.D. (1994) Minimum Hydrochemical Conditions Allowing Limestone Cave Development. *Water Resources Research*, **30**, 607-615. <https://doi.org/10.1029/93WR02945>
- [2] Sarbu, S.M., Kane, T.C. and Kinkle, B.K. (1996) A Chemoautotrophically Based Cave Ecosystem. *Science*, **272**, 1953-1955. <https://doi.org/10.1126/science.272.5270.1953>
- [3] Moseley, M. (2014) History of Biological Investigations at Batu Caves, Malaysia, and Consequences for the Progress of Tropical Speleobiology: Part 1—The 19th Century. *Cave & Karst Science*, **41**, 52-56.
- [4] 魏兴萍, 刘文. 当前国际岩溶洞穴学界研究热点——袁道先院士访谈录[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2014, 31(1): 1-5.
- [5] 保继刚. 喀斯特洞穴旅游开发[J]. 地理学报, 1995, 50(4): 353-359.
- [6] 朱其光, 朱德浩, 陈华奇. 洞穴医疗及柳州响水岩洞穴医疗研究[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 269-277.
- [7] 朱文孝, 李坡, 苏维词. 喀斯特旅游洞穴景观多样性特征及其保护[J]. 经济地理, 2000, 20(1): 103-107.
- [8] 陈伟海. 洞穴研究进展综述[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 65-74.
- [9] 杨晓霞, 施俊庄, 向旭, 等. 浅议旅游洞穴灯光植物的危害及防治[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 433-440.
- [10] 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 张碧云, 潘谋成. 旅游活动对巴马水晶宫洞穴环境及碳酸钙沉积物景观的影响[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 119-130.
- [11] 武吉海. 中国西部概览——湘西州[M]. 北京: 民族出版社, 2002.
- [12] 黄太福, 彭乐, 吴涛, 等. 大菊头蝠冬眠期栖点选择的初步调查[J]. 世界生态学, 2016, 5(3): 57-66.
- [13] 吴兆洪, 秦仁昌. 中国蕨类植物科属志[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [14] 罗蓉. 贵州兽类志[M]. 贵州: 科技出版社, 1993.
- [15] 尹文英, 等. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

- [16] 张佑祥, 刘志霄, 胡开良, 等. 大菊头蝠在湖南省分布新纪录[J]. 动物学杂志, 2008, 43(2): 141-144.
- [17] 史密斯. 中国兽类野外手册[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2009.
- [18] 程寿全. 夏季喀斯特洞穴小气候特征[J]. 气象, 1988, 14(9): 17-20.
- [19] 章典. 贵州喀斯特洞穴的气象特征和气候分带研究[J]. 中国岩溶, 1985(z1): 146-154.
- [20] 方龙龙, 刘际松. 浙江桐庐瑶琳洞洞穴气候特征及其分析[J]. 中国岩溶, 1991, 1(1): 72-81.
- [21] 宋林华, 韦小宁, 梁福源. 河北临城白云洞洞穴旅游对洞穴 CO₂ 浓度及温度的影响[J]. 中国岩溶, 2003, 22(3): 230-235.
- [22] Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., *et al.* (1997) Human Impact in a Touristkarstic Cave (Ara-cena, Spain). *Environmental Geology*, **31**, 142-149. <https://doi.org/10.1007/s002540050173>
- [23] Russell, M.J. and Maclean, V.L. (2008) Management Issues in a Tasmanian Tourist Cave: Potential Microclimatic Impacts of Cave Modifications. *Journal of Environmental Management*, **87**, 474-83.
- [24] 朱文孝, 李坡, 潘高潮. 织金洞的气候环境及空气中二氧化碳[J]. 中国岩溶, 1993(4): 407-417.
- [25] 张朝晖, 艾伦培特客斯. 法国阿尔卑斯—罗讷(Rhone-Alps)岩溶洞穴弱光带苔藓植物群落研究[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 236-240.
- [26] 施俊庄. 旅游洞穴灯光植物的危害与防治[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [27] 王昕亚, 王建力, 胡蓉, 等. 浅谈灯光植物对旅游洞穴的影响及其防治措施——以湖南梅山龙宫为例[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(11): 2400-2402.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-7967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ije@hanspub.org