

殷超,周忠发,潘艳喜,等. 织金洞洞穴环境变化及成因分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(4): 591-597.
DOI:10.11932/karst20170422

织金洞洞穴环境变化及成因分析

殷超,周忠发,潘艳喜,张结,曹明达,张绍云

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵阳 550001)

摘要:对比和拟合分析1989年、2011—2013年和2015—2016年织金洞内气候环境因子监测数据以及游客量数据发现:织金洞自开发初期至今,洞内CO₂浓度和温度水平增高明显,增加幅度分别可达1 000 ppm和2~3℃,而2011—2013年与2015—2016年间CO₂差值最大达465 ppm。洞内环境变化的最主要因素是旅游活动和人工光源;游客量从1985年的不足5万人增至2015年的59.4571万人,洞内CO₂浓度总体上呈现出随着时间增加而不断增高的趋势;各年份气温差距不大,但总体上仍展现出逐年降低的趋势,湿度除2011年外,差距并不明显;人工光源产生的温度与环境温度最大温差可达33℃,湿度和周边环境的湿度最大差值可达66.7%。

关键词:CO₂浓度;游客量;年际变化;相关性分析;织金洞

中图分类号:P642.25;P463.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)04-0591-07

0 引言

随着选择喀斯特洞穴旅游的人数增高,旅游活动对洞内气候环境的影响越来越明显。游客呼出的CO₂气体、人工灯光照明、洞内工程施工均会对洞内气候环境产生巨大影响。在前期研究中,游客产生的CO₂对洞内环境影响的研究十分丰富,如Simone^[1]对旅游洞穴Srednja Bijambarska洞内气温的对比,洞内CO₂浓度的插值分析和扩散率的研究。Cigna^[2]对意大利旅游洞穴Drande delvento洞中环境因子的评估分析。Baldini等^[3]对爱尔兰Ballynamintra洞的CO₂来源、沉积和分布变化的研究中,也分析了人类呼吸产生的CO₂对洞内环境的影响。国内对于人类活动与洞穴环境响应的研究有:袁道先等^[4]对洞穴空气质量、景物的保护等存在的一些问题提出了一系列解决方法。张英俊^[5]提到人为活动对洞穴景观的破坏和洞内照明对洞内环境的影响以及洞穴导游和安全等问题,并在这些问题的基础上提出了解决方

法。杨晓霞等^[6]探讨了洞内灯光对灯光植物生长的影响,并在此基础上对比分析了不同治理办法的优劣。此外宋林华^[7]、车家骧^[8]和张萍^[9]等对河北白云洞、贵州龙宫和河南鸡冠洞的监测研究发现洞内的CO₂浓度与入洞距离的增加和游客人数具有十分密切的联系。洞内人工光源对洞内环境和景观的影响在北京石花洞、桂林芦笛岩、重庆雪玉洞以及浙江瑶琳洞等^[10-12]喀斯特旅游洞穴得到了许多专家学者的关注和研究。人工光源极易引发洞内灯光植物的滋生和石笋、石钟乳等景物的脱水干裂等,从而影响景观的观赏价值^[13],严重情况下甚至会危及游客生命安全。尽管旅游活动和洞内灯光对洞内环境影响的研究资料或成果已较为丰富,但是对于喀斯特洞穴多年间气候环境状况的对比和人类活动对洞穴环境影响的量化研究并不多。因此,本文就人类活动对洞内环境影响的因素进行探讨并进行量化研究,分析影响洞内环境的主要因素,以期对洞穴环境和景观保护提供科学依据。

基金项目:国家自然科学基金地区项目“岩溶洞穴CO₂迁移变化机制及对洞穴岩溶环境的影响研究”(41361081);贵州省科技计划“贵州省洞穴调查数据技术服务”(黔科合G字[2014]4004-2号)

第一作者简介:殷超(1992-),男,硕士研究生,研究方向:喀斯特地貌与洞穴。E-mail:997250278@qq.com。

通信作者:周忠发(1969-),男,博导,研究方向:喀斯特地貌与洞穴、GIS与遥感。E-mail:fa6897@163.com。

收稿日期:2016-10-09

1 研究区概况

织金洞位于贵州省西部毕节地区织金县城东北 21 km 处,处于倚结河下段^[14],地理坐标为 $26^{\circ}38'31'' \sim 26^{\circ}52'35''\text{N}$, $105^{\circ}44'42'' \sim 106^{\circ}11'38''\text{E}$,海拔为 900 ~ 1 670 m^[15]。织金洞世界地质公园总面积为 307 km²^[16],中心景区地处乌江上游支流六冲河与三岔河交汇处,发育于三叠纪下统夜郎组(T_1y)黄椿坝段

(T_1y^2)地层中^[17]。由于瑰丽而独特的地貌景观,2004 年该公园获得国家地质公园资格,2015 年被评为世界地质公园,是贵州省首家世界地质公园。

2 材料与方法

文中观测数据采集于织金洞内的 41 个观测点(图 1,其中含洞外和织金洞出入口)。

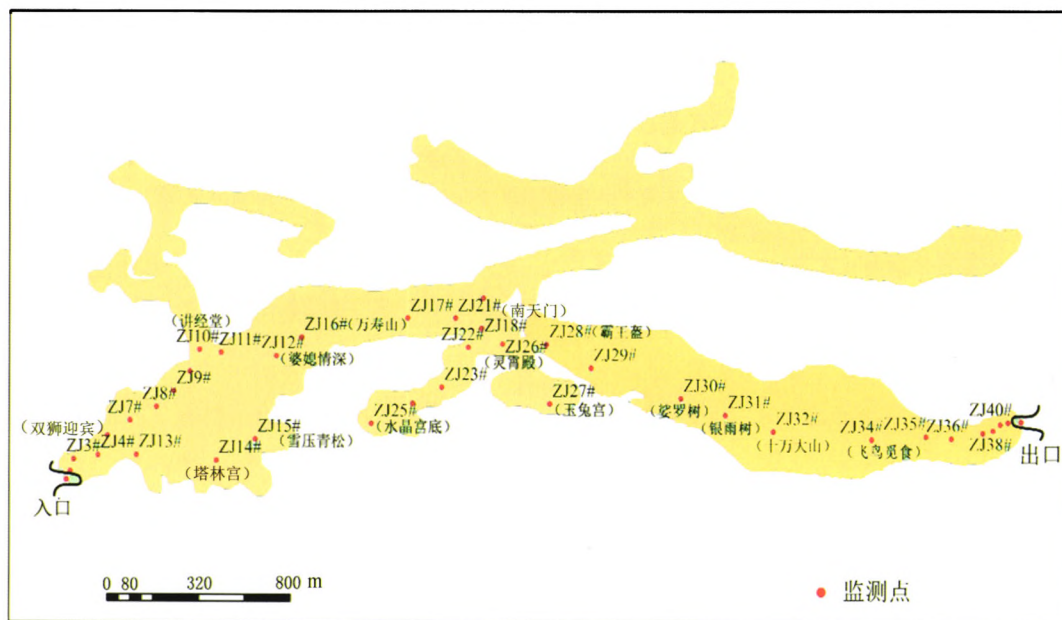


图 1 织金洞监测点位置分布图

Fig. 1 Map showing location of monitoring sites in Zhijin cave

从 2015 年 1 月到 2016 年 5 月,每月对洞穴温度、CO₂ 浓度、气压、湿度及风速进行观测。洞穴空气中 CO₂ 浓度使用 Telaire-7001 型便携式红外 CO₂ 仪测定,仪器分辨率为 1 ppm,量程为 0 ~ 10 000 ppm。洞内湿度、温度、气压和风速使用 Kestrel4500 型风速仪进行观测。游客量数据由织金洞管理局提供。

利用文献法搜集朱文孝等^[18]和罗时琴等^[19]发表的数据。将前人研究数据与监测数据进行点对点的比对。选取洞中的日月潭(现讲经堂附近)、摩天岭(九龙撑天附近)、万寿宫、南天门、霸王盔、银雨树、十万大山、卷曲石厅等监测点数据与前期研究数据进行对比分析。从而分析自织金洞开放初期至现今的洞内环境和旅游人数的变化状况及两者间的关系,同时分析人工光源对洞内环境的影响状况。

3 结果与分析

3.1 80 年代以来洞内环境变化

3.1.1 洞内 CO₂ 变化

朱文孝等^[18]1989 年 5 月在银雨树、十万大山、霸王盔、神女宫、卷曲石洞等位置对 CO₂ 和气温等指标进行了监测。如图 2a,银雨树 CO₂ 浓度达 1 460 ppm,在 5 个监测点中处于最高水平,十万大山 CO₂ 浓度也相对较高,仅次于银雨树。霸王盔、神女宫和卷曲石洞的 CO₂ 浓度较为接近,且与前两个监测点相比差异显著。2015 年和 2016 年 5 个监测点 CO₂ 浓度均高于 1989 年,1989 年银雨树 CO₂ 浓度与近年来的监测值差距并不十分悬殊,差值较 2016 年为 259 ppm。但其他 4 个监测点 CO₂ 浓度较 2015 年和 2016 年差异较为悬殊,特别是在未开放的封闭洞段卷曲石洞,差值超过 1 000 ppm。同时,在图 2a 中也

能看出2016年监测点的 CO_2 浓度均高于2015年。特别是在2015年5月和2016年5月监测数据均显示出卷曲石洞这一封闭洞段具有较高的 CO_2 浓度水平。

3.1.2 洞内温度变化

温度数据分析根据朱文孝等^[18]在织金洞的研究成果,分别对1989年5月、2015年5月、2016年5月的银雨树、十万大山、霸王盔、神女宫、卷曲石洞的温度变化进行分析。如图2b,2015年各监测点的温度均高于1989年和2016年。银雨树、霸王盔、十万大山和卷曲石洞的温度值在1989—2015年间分别上升了 1.4°C 、 1.7°C 、 1.9°C 和 0.4°C ,而神女宫这一增值则高达 2.4°C 。神女宫温度有高增长值的原因可能在于其所在洞段比较封闭,空气与外界对流作用较弱。2016年与1989年的温差虽较2015年低,但两个年份间的最大温差接近 2°C 的水平。这3个年份的数据均显示出在卷曲石洞这一封闭洞段的温度在各监测点中处于最低水平。

如图2c,对日月潭(讲经堂附近)、摩天岭(九龙撑天附近)、万寿宫、南天门、霸王盔、银雨树、十万大山、卷曲石厅,在1986年、1989年、2015年、2016年的温度对比可知,2015年总体上温度高于其他年份,而2016年的温度数据仅在霸王盔、银雨树、十万大山处高于1986年和1989年,其他监测点较20世纪80年代总体上偏低。总体上看,2015年各监测点的温度总体上较20世纪80年代高出 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 。这一差距在洞穴这一相对较为稳定的环境中是十分需要重视的问题。

3.2 近年来洞穴环境变化

洞内10月份 CO_2 浓度在2015年均高于其他年份(图3a),2012年 CO_2 浓度较2013年略低,而2011年 CO_2 浓度处于最低水平。双狮迎宾、塔林宫、万寿宫、南天门、凌霄殿、广寒宫、银雨树和十万大山的温度(图3b),在2015年总体上较2011—2013年低。这一现象与游客人数增长的事实相悖,其原因在于2015年期间织金洞的塔林宫、万寿宫、雪压青松等景点受洞内工程和修复工作的需要,进行了一段时间的封闭,期间禁止游客进入,因此其环境受游客活动的影响大大减弱,且广寒宫在2015年之前已经封闭,故广寒宫的气温也较其他年份低。2011年洞内温度总体处于4个年份最高水平。气温的变化状况与 CO_2 浓度变化状况差异明显。在温度上4个年份洞内温度的变化趋势较为一致。

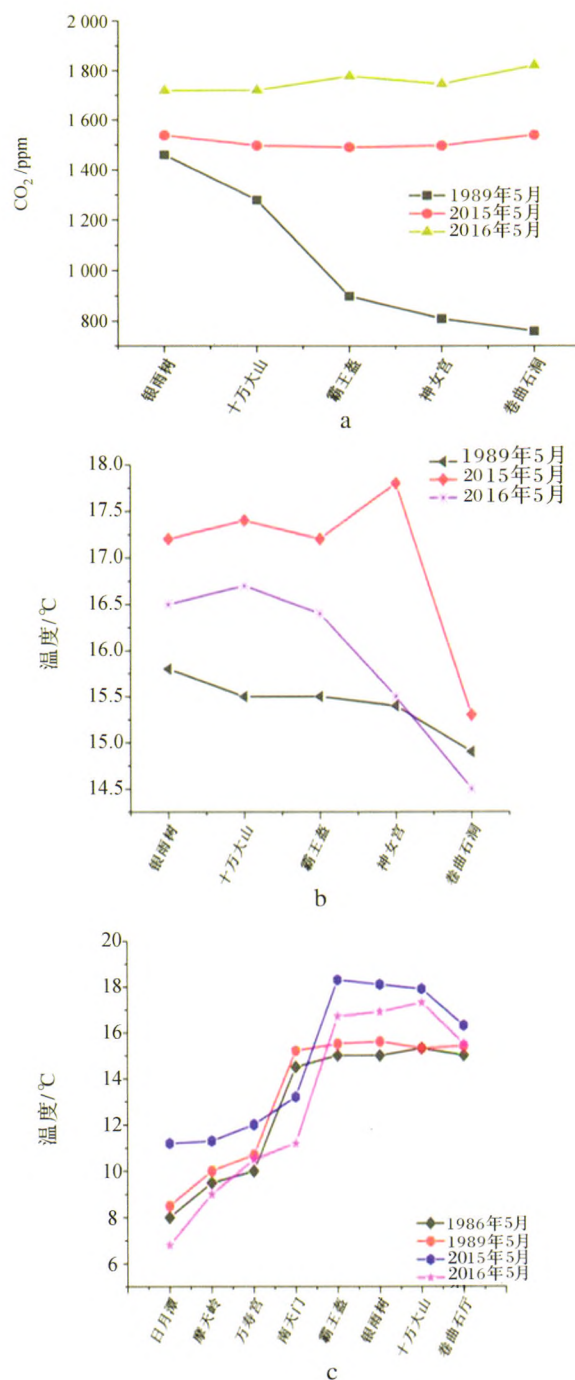


图2 织金洞近年与20世纪80年代洞内环境对比图

Fig. 2 Environment comparison of Zhijin cave between recent years and the 1980s

除洞内 CO_2 浓度与温度变化外,洞内湿度也存在着年际变化。由图3c可知,2015年湿度与2012年、2013年相似,年际变化较小。而2011年洞内湿度与其他年份差异较大,湿度较其他年份低。

3.3 洞内环境变化成因

3.3.1 游客量对洞内环境的影响

根据朱文孝^[18]和罗时琴^[20]等的前期研究并结合

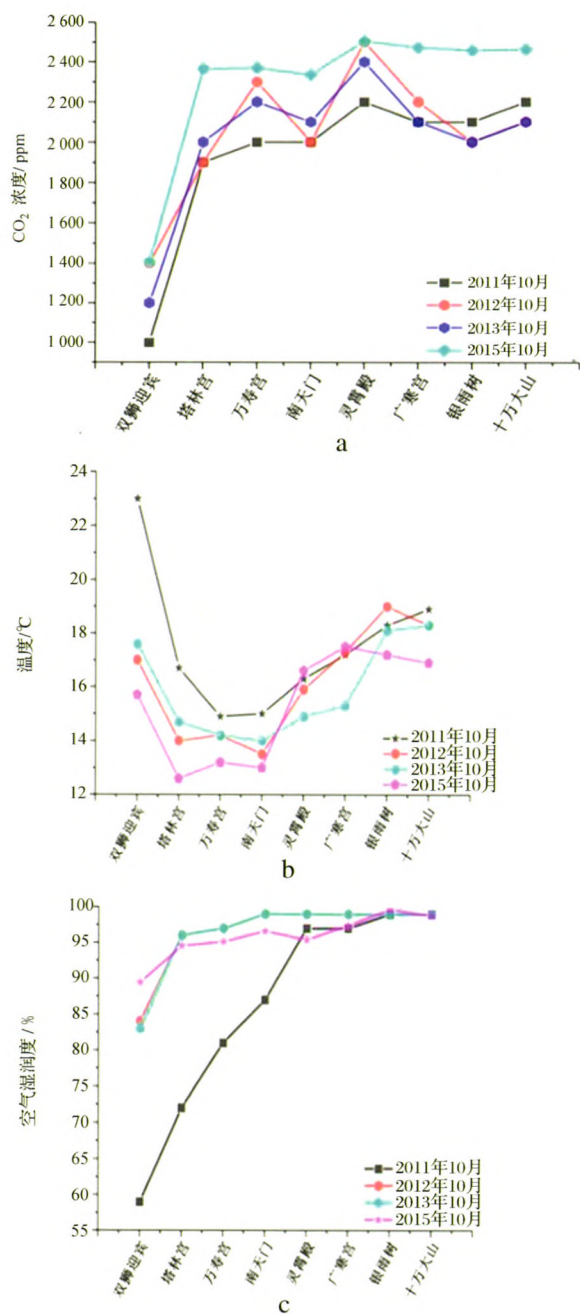


图3 近年来织金洞洞内环境变化图

Fig. 3 Environment variation of Zhijin cave in recent years

本研究收集的数据进行分析可知:游客人数从1985年的不足5万人逐渐增长至2015年的59.4571万人(图4)。从2012年开始织金洞游客人数开始激增,其中2014年至2015年游客人数增长幅度超过其他任何年份。一个健康的成年人在静态下,新陈代谢过程中释放热量 $82 \sim 116 \text{ J} \cdot \text{S}^{-1}$,呼出的二氧化碳为 $20 \sim 30 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1[21]}$,因此游客的增加势必增加洞内CO₂浓度,同时织金洞的旅游收入由2002年的442万元^[21]增长至2015年的6 476.520 1万元。

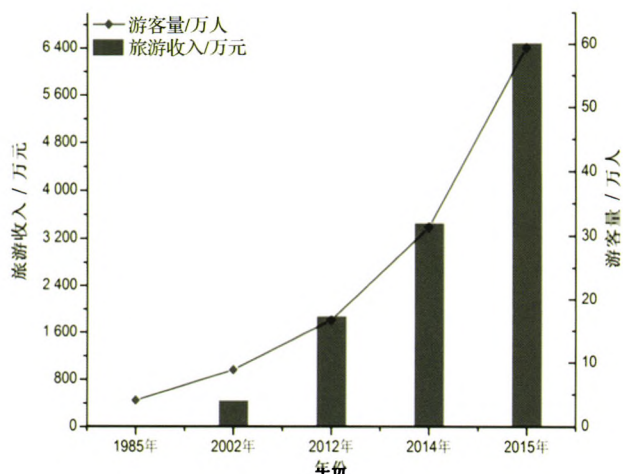


图4 织金洞游客人数和旅游收入变化图

Fig. 4 Variations of tourist number and tourism revenue of Zhijin cave

随着旅游人数的增加,洞内CO₂浓度和温度均受到影响。洞内CO₂浓度在2015年均高于其他年份(图3a),同样的2015年游客人数也明显高于其他年份。2011年游客量较其他年份少,洞内CO₂浓度也处于4个年份的最低水平。洞内温度的变化更是进一步显示了游客数对洞内环境的影响,由于部分洞段采取阶段性开放(如塔林宫)和封闭(如广寒宫)措施,即便2015年游客人数远远超出其他年份,2015年洞内塔林宫和广寒宫的温度仍较其他年份低(图3b)。

3.3.2 人工光源对洞穴环境的影响

洞穴旅游活动依赖于灯光效应,旅游洞穴内的灯光照明实质上在洞穴内产生了一个人工热源,对洞内环境的影响十分显著。由于灯具表面与周围环境的关系,在不同距离具有很大差异,故将离灯1 m距离的环境指标作为媒介,分析灯具对周边环境的影响。如图5a,灯具表面温度明显高于离灯1 m距离的温度和附近环境温度。灯具表面的最高温度可达45℃,灯具表面温度与环境温度最大温差可达33℃,这直接表明了灯具对洞内环境具有明显的加温效应。对环境温度和离灯1 m距离的温度进行拟合分析发现(图5b),两者间相关性较高,拟合度可达到0.677,这说明环境温度与灯具产生的温度具有明显的响应关系。由于灯具表面温度高,蒸发作用明显,所以灯具表面的湿度与周边环境的湿度差距很大,最大差值可达66.7%(图5c)。而离灯1 m距离的湿度与周边环境的湿度差距较灯具表面小,且两者间的拟合度(R²)为0.512(图5d)。

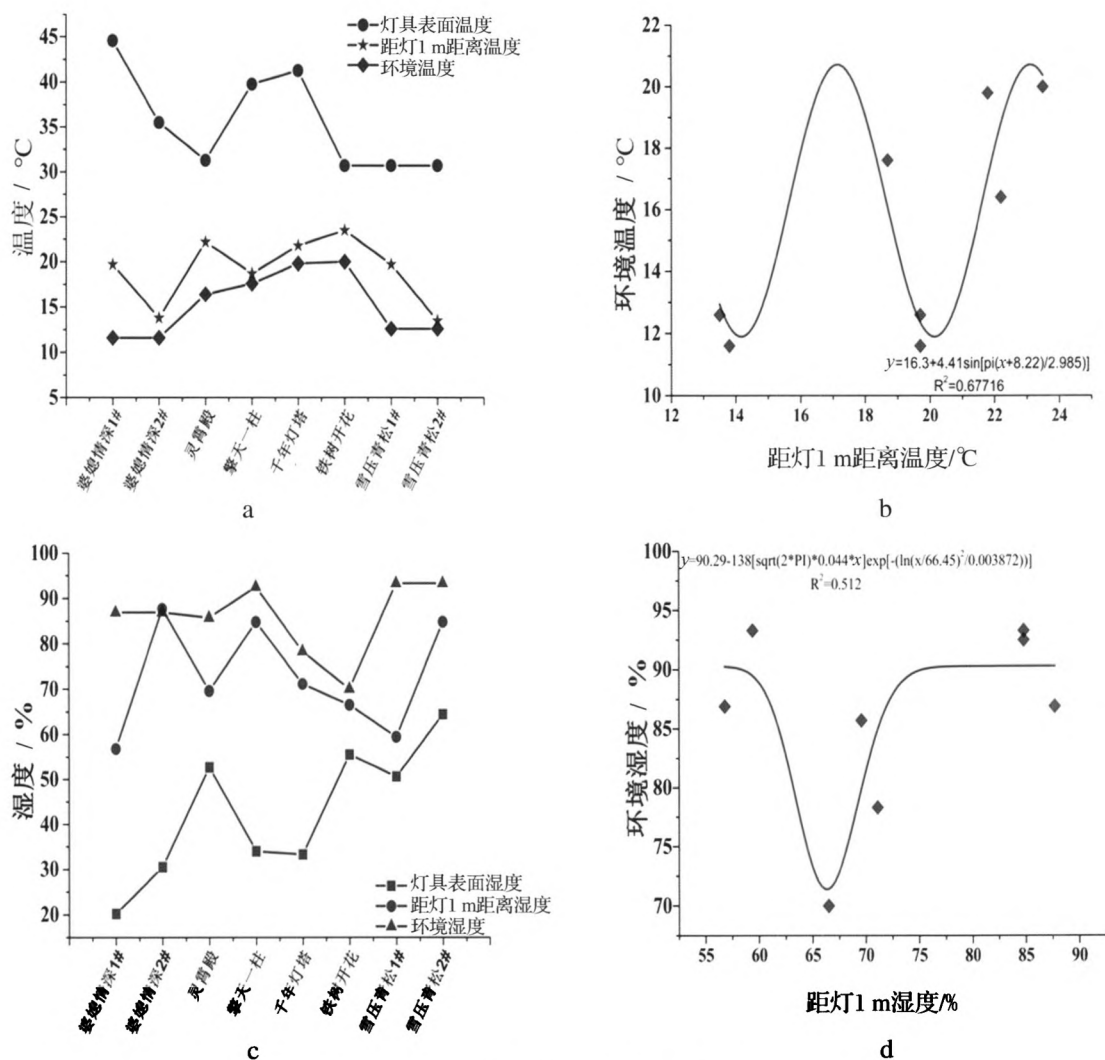


图5 灯具表面与周边环境关系分析图

Fig. 5 Relationship between the surface of the lamp and the surrounding environment

对灯光热源与周边环境因子进行关系拟合(图6a),灯具表面湿度与灯具表面温度具有强负相关关系,两者间的拟合度(R^2)可达到0.79。对离灯1 m距离的灯光照射方向的温度与环境湿度进行拟合分析(图6b),发现两者间不仅存在明显的负相关性,且拟合度可达0.642,这说明灯具产生的热量会对洞内环境湿度产生不可忽视的影响。

3.3.3 工程改造对洞内环境的影响

当洞穴作为旅游风景开发时,为使游览路径不重复而增加洞穴的出入口,或为了疏导人流对洞穴通道进行人工扩大,这种改变洞穴原有形态的做法将影响洞内空气的稳定,并引起洞内空气动力与热力条件的变化,从而使洞内环境发生改变。为方便游客游玩减少停留时间,2002年开凿了长38.3 m,断面面积为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的人工“S”型隧道,将织金洞与雷子洞贯通,成为织金洞旅游出口^[22]。由于洞内外环境

的差异,雷子洞口产生了明显的空气对流。

由2015年7—12月的风速数据可知,在隧道打通之后空气对流加强,雷子洞口风速可达 $0.3 \sim 1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,隧道中的风速也可达 $0.1 \sim 1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经计算,整个人工隧道的容积约 240 m^3 ,故隧道的气体交换量可达 $8.6 \times 10^4 \sim 1.64 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,空气交换量大。对洞内空气环境产生明显扰动,破坏了洞内环境的稳定性。因此,人工改变洞道形态会对洞穴气候环境的稳定产生十分重要的影响。

3.3.4 其他影响因素

除了洞内人为活动对洞穴环境会产生影响外,洞顶植被覆盖率、外界大气降水、气温等地表因素同样有重要影响。目前织金洞景区对地表的耕地进行退耕还林,并在一些漏斗和天窗周围修建拦沙墙,该区植被已得到很好恢复,景区中心森林覆盖率为68%以上^[21]。由于植物根部的机械破坏作用及分解的植

物残余物、腐殖质能产生大量的游离二氧化碳。同时植被的覆盖能增加洞穴中空气的湿度,也能减弱地表径流的速度加强下渗作用^[22]。因此地表植被的恢复和增加对洞内环境具有重要意义。由于洞穴环境相

对封闭,外界大气降水和温度的变化对洞内环境的影响并不显著。刘子琦通过织金洞石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析发现降水和气温不是影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因素^[23],说明外界环境条件并非洞内环境变化的主要影响因素。

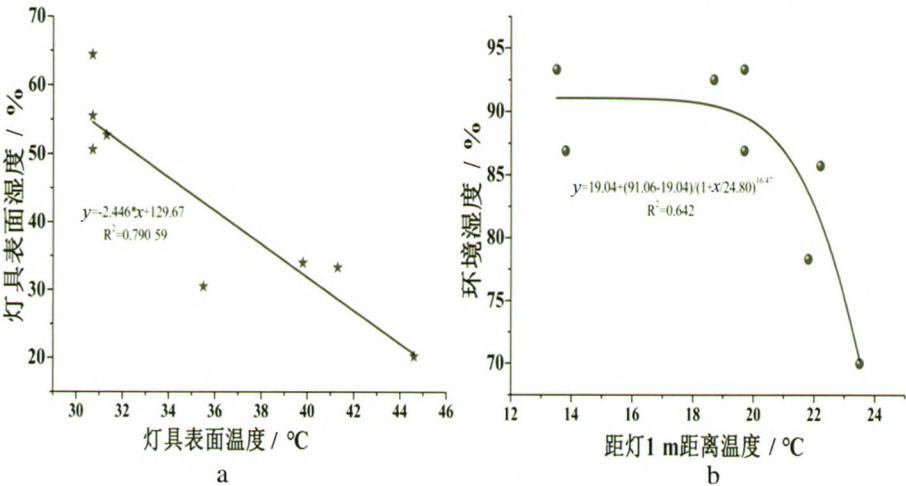


图 6 灯具表面湿度与温度、环境湿度与离灯 1 m 温度拟合分析图
Fig. 6 Fitting analysis of surface humidity and temperature of lamp, ambient humidity and temperature 1 meter distant to the lamp

表 1 雷子洞口与隧道中部风速表 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Table 1 Wind speeds at entrance of Leizi cave and central tunnel

	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
雷子洞口	0~0.3	0.8~1.2	0.6~1.0	0.5~1.1	1~1.6	0.3~1.9
隧道中部	0	0.1~0.4	0.3~0.6	0~0.6	0.7~1.3	0.6~1.2

4 结 论

旅游活动和人工光源是引起洞内环境变化的最主要因素,游客量自 1985 年的低于 5 万人增至 2015 年的 59.4571 万人。洞内 CO_2 浓度总体上呈现出随着时间增加而不断增高的趋势。在 1989 年织金洞开放初期,洞内 CO_2 浓度明显低于同一时期的 2015 年和 2016 年,特别是未开放的神女宫和卷曲石洞两个洞厅的变化幅度最大; CO_2 浓度增加幅度最大可达 1 000 ppm,洞内温度增加可达 2~3 $^{\circ}\text{C}$ 。气温上各年份差距不大,但总体上仍展现出逐年降低的趋势;湿度除 2011 年外,其他年份差距并不明显。人工光源对洞内环境的作用主要体现在对洞内温度和湿度的影响。洞内灯具散发的热量对洞内环境具有明显的增温减湿作用,而洞外大气降水、气温等的变化对洞内环境的影响并不明显。

参考文献

[1] Milanolo S, Gabrovšek F. Analysis of Carbon Dioxide Varia-

tions in the Atmosphere of Srednja Bijambarska Cave, Bosnia and Herzegovina[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2009, 131 (3):479-493.

[2] Cigna A, Fort P. The environmental impact assessment of a tourist cave[C]//Kranjc A. Cave Tourism: Proceedings of International Symposium at 170-anniversary of Postojnska Jama, Postojna. Postojna: Centre of Scientific Research of the Sazu Institute for Karst Research and Postojnska Jama Tourist and Hotel Organization, 1988:29-38.

[3] Baldini J U L, Baldini L M, Mcdermott F, et al. Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamintra Cave, Ireland[J]. Journal of Cave & Karst Studies, 2006, 68(1):4-11.

[4] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆出版社,1988:315-319.

[5] 张英俊.应用岩溶学及洞穴学[M].贵阳:贵州人民出版社,1985:266-267.

[6] 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.

[7] 宋林华,韦小宁,梁福源.河北临城白云洞洞穴旅游对洞穴 CO_2 浓度及温度的影响[J].中国岩溶,2003,22(3):230-235.

[8] 车家骧,彭熙,严忠海,等.贵州龙宫风景名胜区分水溶洞环境变化特征与预测研究[J].热带地理,2012,32(4):385-388.

[9] 张萍,杨琰,孙喆,等.河南鸡冠洞 CO_2 季节和昼夜变化特征及

- 影响因子比较[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 60-69.
- [10] 贺卫. 试论喀斯特洞穴若干环境因子与旅游活动[C]//宋林华, 丁怀元, 张发明. 喀斯特与洞穴风景旅游资源研究[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 83-87.
- [11] 汪训一, 杨日英. 旅游洞穴环境的变异与保护之研究[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 245-250.
- [12] 胡希军, 马永俊, 朱丽东, 等. 旅游活动对溶洞环境、景观的影响和保护对策[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2005, 28(1): 76-79.
- [13] 施俊庄. 旅游洞穴灯光植物的危害与防治[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [14] 熊康宁, 朱文孝. 织金洞地区的喀斯特地貌与洞穴成因[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 281-291.
- [15] 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃. 贵州织金洞世界地质公园喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 368-378.
- [16] 贺卫, 李坡, 钱治, 等. 织金洞地质遗迹的开发保护与管理[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2011: 11.
- [17] 安裕国, 成昆方, 何复胜, 等. 岩溶洞穴沉积物生物成因初探: 以贵州织金洞为例[J]. 贵州地质, 1994, 2(11): 112-121.
- [18] 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, 12(4): 409-417.
- [19] 罗时琴, 易武英, 李坡. 织金洞洞穴环境监测及其影响因素分析[J]. 贵州科学, 2014, 32(6): 92-96.
- [20] 罗时琴, 吕文强, 李安定, 等. 织金洞二氧化碳的变化规律及其影响因素分析[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(2): 291-297.
- [21] 杨汉奎. 旅游洞穴的开展与保护[G]//宋林华, 丁怀元. 喀斯特景观与洞穴旅游[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 160-165.
- [22] 贺卫, 李坡. 织金洞发育特征及其科学价值[J]. 贵州科学, 2016, 34(2): 31-36.
- [23] 刘子琦. 利用石笋记录探究贵州织金地区近百年气候环境变化[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 165-171.

Environmental changes and their cause of the Zhijin cave in Guizhou Province

YIN Chao, ZHOU Zhongfa, PAN Yanxi, ZHANG Jie, CAO Mingda, ZHANG Shaoyun

(School of Karst Science, Guizhou Normal University / State Engineering Technology Center Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract The Zhijin cave is located in the northeast of Zhijin county in western Guizhou Province. The area of Zhijin cave world geological park is 307 km², and its central scenic spot lies at the intersection of the Liuchong river and Sancha river, where developed the Huangchun dam (T₁y²) Formation of Lower Triassic Yelang Group (T₁y). Because of the magnificent and unique landscape, the Zhijin cave has been honored with national geological park in 2004 and the world geological park in 2015.

From January 2015 to May 2016, monthly monitoring has been conducted to the temperature, air CO₂ concentration, air pressure, air humidity and wind speed in this cave. The cave air CO₂ concentration was measured by Telaire-7001 portable infrared CO₂ instrument, of which the resolution and the range are 1 ppm and 0—10,000 ppm, respectively. The humidity, temperature, air pressure of cave air and wind speed in the tunnel were observed by the Kestrel4500 anemometer. The data on visitor amount are provided by the Zhijin Cave Management Bureau. The previous research data are collected from the literature and compared with the new monitoring data point by point. Then this work analyzes the change of the environment and the number of tourists from the initial stage of opening of the Zhijin cave to the present and the relationship between the environment and the visitor amount and the influence of artificial light sources on the environment inside the cave. Thus the impact of human activities on environmental factors in the cave are quantified, and the main factors affecting the environment inside the cave are identified, which could provide a scientific basis for protection of the cave environment and landscape. The results show that the CO₂ concentration and temperature level have been increased significantly since the initial stage of opening of the Zhijin cave, with amplitudes reaching 1,000 ppm and 2—3 °C, respectively. The maximum CO₂ difference was up to 465 ppm between 2011—2013 and 2015—2016. The main factors of the environmental change are tourism activities and artificial light. The amount of tourists has increased from less than 50 thousand in 1985 to 594,571 thousand in 2015, leading to increase of the CO₂ concentration with time. The annual temperature difference was not large, but the overall trend was still decreasing year by year and the gap of humidity was not obviously except 2011. The maximum temperature difference between surrounding environment and artificial lights can reach 33 °C, and the maximum humidity difference between the cave interior and surrounding environment is up to 66.7%.

Key words CO₂ concentration, tourist volume, inter-annual variation, correlation analysis, Zhijin cave

(编辑 黄晨晖)