

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20181106.003

陈伟海,邓亚东,唐立,等. 桂林旅游洞穴可持续利用研究[J]. 广西科学,2018,25(5):579-589.

CHEN W H, DENG Y D, TANG L, et al. Study on sustainable utilization of show caves in Guilin city[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(5):579-589.

桂林旅游洞穴可持续利用研究*

Study on Sustainable Utilization of Show Caves in Guilin City

陈伟海^{1**}, 邓亚东¹, 唐立², 韦跃龙¹, 阳和平¹

CHEN Weihai¹, DENG Yadong¹, TANG Li², WEI Yuelong¹, YANG Heping¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 广西地质环境监测总站, 广西桂林 541004)

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:【目的】探讨桂林旅游洞穴的现状及其可持续利用方式。【方法】洞穴环境因子的长期监测、分析及实地考察。【结果】桂林市芦笛岩、七星岩、冠岩、丰鱼岩、银子岩等主要旅游洞穴都不同程度存在钟乳石脱皮掉块、砂状风化、颜色变黑变暗、灯光植物破坏等沉积物老化问题, 景观美学价值大大降低, 对洞穴资源的旅游寿命构成较大威胁。同时认为洞穴开发中的施工改道、增加高能光源, 以及大量游客涌入等, 极大地改变了洞穴的自然环境, 钟乳石化学风化、物理风化和生物风化等综合作用, 加速了洞穴次生化学沉积物景观的风化速度。【结论】在洞穴系统区域构建良好植被生态环境; 减少洞穴与外部空气交换; 减少游人在洞穴中滞留时间; 调整、改造灯光系统, 使用冷光源, 减少开启时间; 预防和控制灯光植物的滋生, 及时处理灯光植物; 定期用适宜水质的水对洞穴景观清洁湿润; 开展次生 CaCO₃ 的沉积效果试验与研究; 对洞穴空气环境进行长期、在线观测和预警; 加强旅游管理, 控制游客数量, 规范游客游览行为等措施。

关键词: 旅游洞穴 洞穴环境 景观退化 可持续利用 广西桂林

中图分类号: P931.5, P901 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2018)05-0579-11

Abstract:【Objective】The objective of this study is to discuss the current situation and sustainable utilization of show caves in Guilin city.【Methods】The study was conducted on the basis of long-term monitoring, analysis and on-site investigations to the environmental factors.【Results】Results showed that some of the show caves, such as the Ludiyuan, Qixingyan, Guanyan,

Fengyuyan, and Yinziyan caves, were suffering from aging problems of various degrees, including stalactite peeling-off and chipping-off, sand-like weathering, color blackening or darkening, and damaging by light and plants. The aesthetic value of the landscape was greatly reduced, threatening the tourism life of cave resources. Meanwhile, it was believed that the construction diversion in the cave development,

收稿日期: 2018-01-29

作者简介: 陈伟海(1965—), 男, 研究员, 博士, 主要从事岩溶与洞穴地质遗迹资源调查、评价开发与保护研究, E-mail: chenweihai@karst.ac.cn.

* 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 0719005-1-5), 全国重要地质遗迹调查项目(DD20179313)和中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2017015, 2018013, 2019021)资助。

** 通信作者。

the increase of high-energy light source, and the influx of tourists, had drastically changed the natural environment of the caves. The comprehensive effects of the chemical, physical and biological weathering of the stalactites had also accelerated the deterioration of the landform of secondary chemical sediments in the caves. **【Conclusion】**To solve these problems and establish a better ecological environment for these caves, urgent intervention measures needed to be implemented, which included reducing air exchange between inside and outside caves, reducing the residence time of tourists in the cave, adjusting or reforming lighting systems in the caves, using cold lights and reducing their operation time, preventing and controlling the breeding of lighting plants, and timely processing the lights plants, and regularly cleaning the landscape of caves with water of good quality. Besides, relevant experiments and researches on the sedimentation of secondary CaCO_3 in the caves should be conducted, and long-term and online monitoring and pre-warning of air quality within the caves should also be done. Other measures including strengthening the management of tourism, controlling amount of tourists, and standardizing tour behaviors of visitors should also be taken.

Key words: show caves, cave environment, landscape deterioration, sustainable utilization, Guilin of Guangxi

0 引言

【研究意义】旅游洞穴,指已被用于旅游开发,促使区域经济、社会、生态效益发生改变的洞穴,是众多、庞大、复杂洞穴体系的重要组成部分^[1-2]。中国是旅游洞穴开发数量最多的国家,据统计,已有400多处旅游洞穴,年游客量5000万人以上,旅游综合收入达100亿元。我国的游览洞穴中,贵州织金洞、张家界黄龙洞、桂林芦笛岩、山东沂水地下峡谷等年游客接待量超过100万人,单个洞穴经营收入超过1亿元,产生显著的经济和社会效益,同时也存在严峻的洞穴环境影响和景观保护问题^[3]。旅游洞穴的保护和可持续利用已成为广泛关注的课题^[4-5]。**【前人研究进展】**意大利、斯洛文尼亚、西班牙、比利时、美国、澳大利亚、中国等都对洞穴的环境因子,主要包括 CO_2 浓度、温度、相对湿度、灰尘、气流等进行了监测,希望能更多地了解旅游活动对洞穴产生的影响程度,找出一个洞穴生态和环境、洞穴碳酸盐景观稳定和安全性预警系统及保护技术^[6-7]。**【本研究切入点】**近年来,旅游洞穴保护主要从洞穴环境变化和建设施工方面研究。对洞穴环境变化主要观测其温度、湿度和 CO_2 含量,更多地关注旅游活动对洞穴环境的影响及景观保护等问题^[8-9]。近十多年来,国际上关于洞穴环境监测的主要状况在2002年出版的《Monitoring of Karst Caves》文集中得到较好的反映。我国洞穴研究者曾经对贵州织金洞、浙江瑶琳洞、北京石花洞作过某些项目的观测和评述,许多学者讨论了旅游洞穴的环境变异与景观保护、洞穴资源与景观修复、旅

游洞穴环境监测与评价、旅游洞穴持续发展等问题,注意到不合理的洞穴游览设计、施工(破坏原有封闭环境),灯光系统和游客活动对洞穴环境的影响以及对景观的破坏,提出了保护建议^[10-12]。**【拟解决的关键问题】**笔者及其研究团队从2003年开始,对桂林市芦笛岩、七星岩、冠岩、丰鱼岩、银子岩等旅游洞穴进行了跟踪调查和洞穴环境监测,对洞穴空气中的温度、湿度、二氧化碳、正负离子、气流、氡以及洞穴中的滴水、池水、流水的温度、pH值、电导率等进行了现场和在线测定,对游览过程中出现的洞穴环境变化、钟乳石景观退化(风化、变黄、变黑等)等技术问题进行分析研究,从而探讨洞穴景观修复、保护措施,提出可持续利用建议,本文即是该研究成果的一部分。

1 材料与方法

1.1 桂林旅游洞穴概况

桂林市位于广西东北部,拥有世界上最典型、发育最完美的湿润热带亚热带岩溶峰林地貌,以“秀、奇、美”为主旋律的桂林山水,是岩溶自然景观美学价值的集中体现,是世界级生态旅游胜地。桂林岩溶地貌中的溶洞更以其独有的地下景观,成为一种开发价值很高的旅游资源,亦是桂林旅游资源的重要组成部分。洞穴内部的钟乳石更是形态奇特,鬼斧神工,吸引着众多游客前往参观游览。

目前,桂林市范围内有调查记录的洞穴达100多处,旅游洞穴约10处,包括芦笛岩、七星岩、冠岩、丰鱼岩、银子岩等著名旅游洞穴。其中,芦笛岩次生化学沉积物非常发育,石笋、石柱密集成林;七星岩洞穴

中波痕、窝穴、角石、边槽、石龛、弧形壁面等溶蚀形态较为显著;冠岩和丰鱼岩皆为地下河洞穴,洞体宏大,次生沉积物丰富,气势雄伟;银子岩流石类次生沉积物发育,晶莹洁白。这 10 处旅游洞穴每年接待游客约 500 万人,直接门票收入约 3 亿元/年,经济和社会效益十分显著,在桂林市旅游业中占据重要位置。

芦笛岩是我国开放较早、游客人数最多的旅游洞穴,也是接待境外游客最多的旅游洞穴,在我国旅游洞穴中具有典型性、代表性和不可替代的地位。然而,随着芦笛岩 50 多年的开放游览,洞穴环境发生了较大的变化,洞内景观受到不同程度的风化、破坏,产生变色、发黑、表层风化脱落等现象,许多地方长出了青苔、杂草等,与刚开放游览时纯净洁白的地下世界形成鲜明的对比,对游客的吸引力呈不断下降的趋势,面临着相当严重的资源可持续利用问题。从可持续发展眼光看,保护好洞穴旅游资源比单纯的商业经营显得更为重要,洞穴保护已成为当务之急。

1.2 洞穴景观退化状况

随着洞穴开发游览,不合理的工程建设和大量游客的进入,开发、游览过程中保护不够,加上洞穴自身的原因,洞穴环境发生了显著变化,芦笛岩等桂林主要旅游洞穴的钟乳石景观均受到不同程度破坏,钟乳石表面成层脱皮掉块、砂状风化,颜色变黑、变暗等现象随处可见。特别是近年来有加速发展的趋势,其景观的美学价值降低,对洞穴资源的旅游寿命构成很大的威胁。

1.2.1 钟乳石脱皮掉块

钟乳石在高能灯光的照射下,表面温度升高,干涸失水,质地变得粗糙,色泽暗淡,造成脱水干裂钙化。同时,在温差变化迅速及钟乳石表面受热不均时,钟乳石也容易开裂脱皮,在外力作用下常常掉块(图 1)。

1.2.2 钟乳石砂状风化

钟乳石在温差、干湿交替变化频繁作用下,具有侵蚀性的水溶液沿着方解石矿物的晶洞、结晶颗粒间界面孔隙和晶体节理,在毛细力作用下进入方解石体内产生溶解作用,造成钟乳石不断疏松软化,失水后成砂状(图 2)。

1.2.3 颜色变黑变暗

洞穴开发施工中产生的粉尘、烟雾,旅游活动中游客携带的尘埃、杂物,伴随空气流动飘落吸附在钟乳石表面,使其颜色变黑,变暗(图 3)。而且粉尘和烟雾在水作用下会渗入沉积物一定深度内,或在沉积物结晶作用下被覆盖在沉积物内部,造成沉积物表面出现无法清除的变色现象。



芦笛岩Ludiyan cave



银子岩Yinziyan cave

图 1 芦笛岩和银子岩内脱皮掉块的钟乳石
Fig. 1 Stalagmite's peeling off and fall in the Ludiyan cave and the Yinziyan cave



芦笛岩Ludiyan cave



银子岩Yinziyan cave

图 2 芦笛岩和银子岩内砂状风化的钟乳石
Fig. 2 Sand-like weathering of stalagmite in the Ludiyan cave and the Yinziyan cave



银子岩Ludiyan cave



银子岩Yinziyan cave



丰鱼岩Fengyuyan cave



芦笛岩Ludiyan cave

图3 银子岩和丰鱼岩内变黑钟乳石

Fig. 3 Darkening stalagmite in the Yinziyan cave and the Fengyuyan cave

1.2.4 灯光植物破坏

适当湿度条件下,洞穴的弱光带及灯光照射的地段,非常有利于藻类、地衣和苔鲜等植物生长(图4),这些植物覆盖在钟乳石的浅表层形成疏松多孔层,会造成钟乳石等沉积物钻孔和破碎。另外,当洞穴流水消失和湿度减小时,植物将枯死,这些枯死植物的有机质残留在沉积物表面,使沉积物变为黑灰色或黄褐色。

1.3 研究方法

为了研究洞穴环境特征以及旅游活动对洞穴影响,本研究团队选择了旅游洞穴的温度、湿度、CO₂以及游客人数作为重点参数,监测研究洞穴环境要素的时、空变化及相互关系,分析旅游活动对洞穴环境的影响及系统的稳定性,探讨洞穴景观修复、保护措施,提出洞穴可持续利用建议。

图4 银子岩和芦笛岩内的灯光植物

Fig. 4 Light plant in the Yinziyan cave and the Ludiyan cave

研究工作从2003年9月开始,在芦笛岩不同部位共设置了8处监测点,分别为监测点①,监测点②,……,监测点⑧,对应的位置及正文描述是:洞口外、洞门内、射影平台、鸟语花香、大厅、花树台阶、裂缝栏杆、出洞台阶(图5)。工作中使用空气温湿度计(CENT313)、二氧化碳测试仪(TEL7001)、数字微风温湿一体机(BYWF-2001)、负离子测试仪(ITC-201A)、氧气测试仪(SA1000)、照度计(TES-1336)等,采用人工巡回监测方法,对芦笛岩洞穴空气环境主要要素进行了为期一个周期年的定时、定位观测,监测空气的温度、湿度、CO₂、气流(风速)、景灯照度等要素,每5d测量一次。同时,为了对比开放游览洞穴和未开发洞穴在空气温度、湿度和CO₂等方面的变化差异,对相距不足1000m且处于相似地质环境背景的茅茅头大岩(未开放游览的洞穴)进行同步对照监测,设置了8处监测点,分别为监测点①,监测点②,……,监测点⑧,对应的位置及正文描述是:洞门外、洞门内、门厅里面、区调不远、大厅末、莲花盆

处、头顶钟乳、中间大石(图6)。

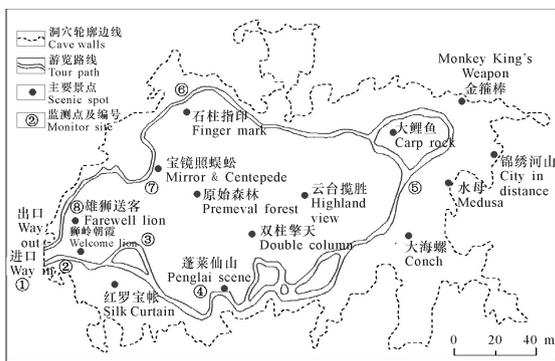


图5 芦笛岩平面及监测点布置

Fig. 5 Planar view and layout of monitor sites in the Ludiyan cave

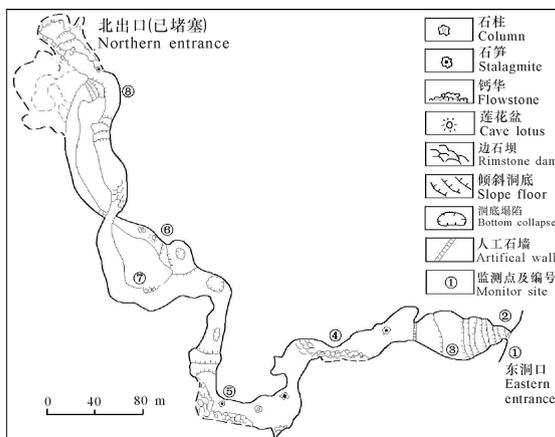


图6 桂林茅茅头大岩平面及观测点布置

Fig. 6 Planar view and layout of monitor sites in the Maomaotou Dayan cave

研究团队在2007年1月又重新启动该项监测工作,对芦笛岩、茅茅头大岩、冠岩、丰鱼岩等洞穴进行了不定期监测。根据研究工作的需要,2008年1月开始在芦笛岩安装了洞穴空气环境自动监测系统(VAISALA)一套共3组,分别安装在芦笛岩的洞口外、洞穴中部和洞穴末端大厅,自动采集洞穴空气的温度、湿度、二氧化碳、氧气等数据,取样及记录间隔为30 min,监测周期为2008年1月至2009年12月,共获取了42万个数据单元。

洞穴空气环境自动监测系统(VAISALA)为多个仪器和配件组合套装,包括气体传感器、数据采集器、传输电缆、无线通讯模块、计算机报表系统等。在洞内不同地方放置多组气体传感器,包括温度、湿度、二氧化碳、氧气等;洞外设中央控制室,安置数据采集器、无线传输装置和不间断供电系统。各气体传感器分别通过数据线连接到数据采集器上,通过GPRS或CDMA无线网络,从远程基站(岩溶所办公室机房),对监测数据进行自动采集、指令传输、处理和分

2 洞穴环境变化特征

2.1 洞穴环境因子日变化特征

2.1.1 洞穴温度日变化特征

芦笛岩洞穴温度的日变化具有较相似的一致性(图7)。观测期内(2008年7月23日至10月23日,下同),9:00—12:00,受洞内游客增多,灯光使用较多,热源释放量增大等影响,气温明显升高;12:00—21:00温度趋于稳定,主要是由于洞内游客数量和灯光释放能量与洞外能量交换达到了一种平衡;虽然在18:00以后基本上没有游客和灯光热能释放,但是之前产生的热能还聚集于洞内,缓慢释放;21:00至次日9:00,由于洞内、外能量得到充分交换,温度基本下降至原值,洞内气温变化趋于平稳。

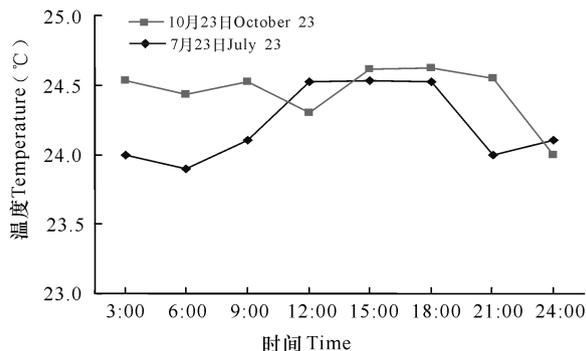


图7 芦笛岩日温度变化曲线

Fig. 7 Curve of daily temperature change in the Ludiyan cave

2.1.2 洞穴湿度日变化特征

观测期内,0:00—9:00,外界干扰较小,洞内湿度趋于平稳,变化较小;9:00—18:00,洞门打开,空气与外界流通,旅游活动强度增大,洞内游客较多,热源释放,使得湿度明显降低;18:00—24:00,由于没有游客的进入,洞口关闭,空气流通减少,湿度逐渐恢复到稳定的范围(图8)。

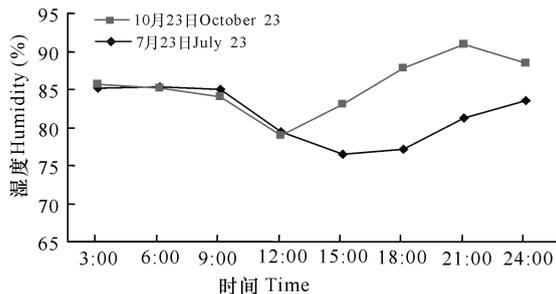


图8 芦笛岩日湿度变化曲线

Fig. 8 Curve of daily humidity change in the Ludiyan cave

2.1.3 洞穴CO₂日变化特征

观测期内,每日0:00—6:00,洞内CO₂逐渐降低;6:00—9:00趋于一个稳定范围,约500~600 ppm;在9:00—18:00 CO₂逐渐增加,大约18:00达

到最大,最高达 2 000 ppm;然后开始下降,至 24:00,CO₂量又恢复至原有水平(图 9)。

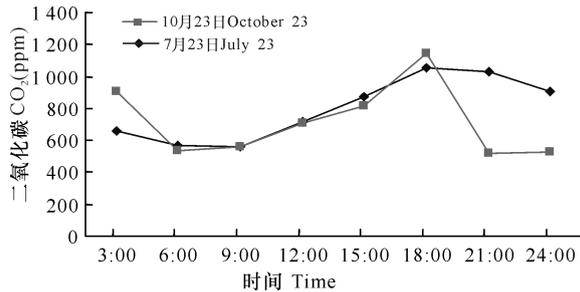


图 9 芦笛岩日二氧化碳曲线图

Fig. 9 Curve of daily CO₂ change in the Ludiyan cave

2.2 洞穴环境因子年际变化特征

2.2.1 洞穴温度年变化特征

观测期内,从芦笛岩洞外、洞门内、洞中大厅 3 个测点(分别为监测点①、②、⑤,见图 5,下同)监测结果看,洞外测点(监测点①)年变化曲线大致相当于当地年温度变化曲线,1月平均最低,为 4.03℃;最高为 9月 30.95℃。而洞门内(监测点②)、洞中大厅(监测点⑤),处于相对封闭的环境,温度变化曲线几乎一致,最低 17.6℃,最高 24.74℃,变幅 7.14℃(图 10)。

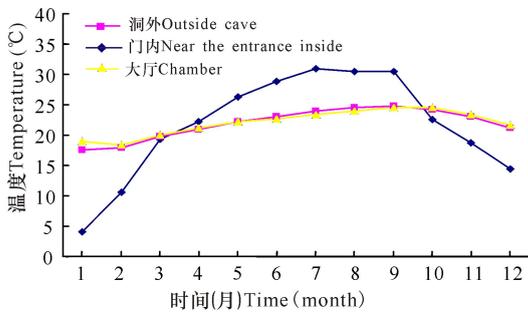


图 10 芦笛岩 2008 年温度变化曲线

Fig. 10 Curve of temperature change in the Ludiyan cave in 2008

2.2.2 洞穴湿度年变化特征

观测期内,从芦笛岩洞外、洞门内、洞中大厅 3 个监测点监测曲线可见,洞外(监测点①)湿度主要在 50%左右变化;相比较而言,洞门内(监测点②)、洞中大厅(监测点⑤)湿度变化较一致,湿度变化都在 70%~90%左右,夏季湿度最高(图 11)。

2.2.3 洞穴 CO₂年变化特征

从芦笛岩观测期内从洞外、洞门内、洞中大厅 3 个测点监测曲线可见(图 12),洞外(监测点①)CO₂比较稳定,基本上反映当地大气二氧化碳水平。

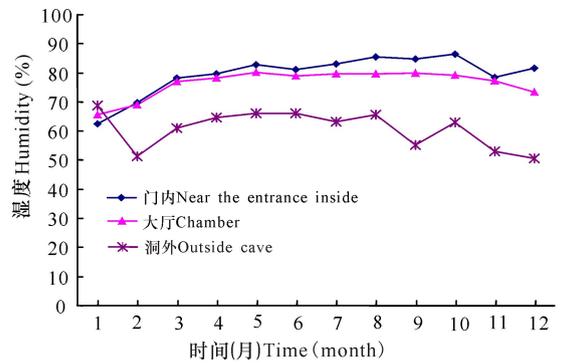


图 11 芦笛岩 2008 年湿度变化曲线

Fig. 11 Curve of humidity change in the Ludiyan cave in 2008

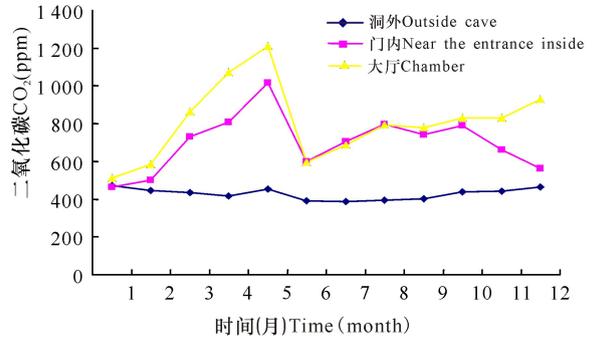


图 12 芦笛岩 2008 年 CO₂变化曲线

Fig. 12 Curve of CO₂ change in the Ludiyan cave in 2008

洞门内(监测点②)与洞中大厅(监测点⑤)在 1—5 月份 CO₂处于增长阶段,究其原因,主要是这一阶段植被缓慢复苏和游客数量稳步增加所致,特别是“五一”假期更为突出;5—10 月比较平稳,这段时间植被生长稳定,游客量也较平稳;在年内的最后 2 个月(11—12 月),植被干枯、游客数量减少,CO₂趋于降低,但洞中大厅(监测点⑤)呈累积滞后。当然,还叠加了由于季节气候变化所带来的降雨、洞顶滴水、植物生长、土壤 CO₂变化等因素对洞内 CO₂的影响。

2.3 洞穴环境因子空间变化特征

为了研究芦笛岩洞穴环境空间变化,取 2008 年 11 月各点测量数据的平均值(表 1、图 13,监测点位置见图 5)进行对比分析,得出以下认识:

(1)从洞口(监测点①)到洞内大厅(监测点⑤),CO₂浓度总体呈上升趋势,即洞口 CO₂浓度最低,越往洞内 CO₂浓度越高。洞口 CO₂平均值为 507 ppm;最高值出现在洞内“裂缝栏杆”测点(监测点⑥),月平均值为 718 ppm。

(2)从曲线形态变化来看(图 13),开放游览洞段由于离洞口近,与外界沟通顺畅,空气扩散与交换速度快,CO₂虽有积累,但累积效应不明显,浓度较低。而距离洞口越远,空气交换越少,造成 CO₂积累相对明显。

表 1 芦笛岩空气环境因子特征表(2018 年 11 月)

Table 1 Features of air environmental factors in the Ludiyan cave (November 2008)

监测点 Monitor sites	温度 Temperature(°C)	湿度 Humidity(%)	二氧化碳 CO ₂ (ppm)
①	16.9	63.7	507
②	16.8	66.7	503
③	17.3	78.6	538
④	17.5	85.3	596
⑤	17.7	87.5	604
⑥	17.6	92.5	618
⑦	18.5	89.5	718
⑧	17.2	76.0	563

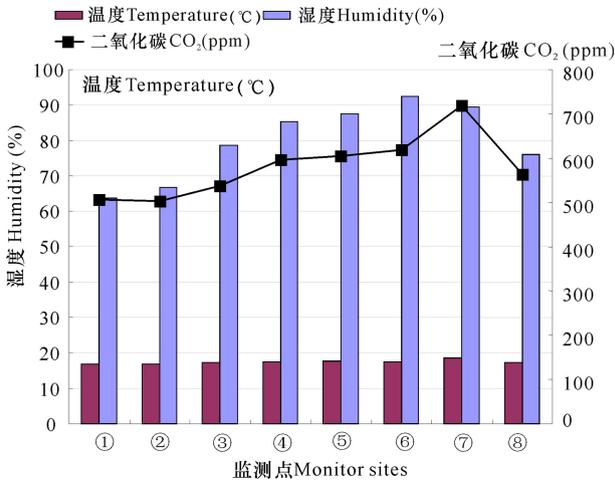


图 13 芦笛岩空气环境因子(平均值)空间变化图(2008 年 11 月)

Fig. 13 Spatial change of air environmental factors (average) in the Ludiyan cave (November 2008)

(3)从监测结果来看,洞内各观测点 11 月气温均高于洞外,而且随着距离洞口的增大,洞内大部测点气温不断升高。

(4)从测点气温变化幅度来看,近洞口变化幅度较大,从洞口到“鸟语花香”测点(监测点④)相差了 0.6℃,而“鸟语花香”与“大厅”相差 0.2℃,与“花树台阶”相差 0.1℃,可见洞内温度较为恒定,而“裂缝栏杆”较其他测点高出许多,主要因为此处地势低、狭窄、封闭,游客及灯光在此处释放的能量容易产生累积效应。

(5)从湿度曲线形态变化来看,湿度从洞口向里逐渐增加,开放洞段由于离洞口近,与外界沟通顺畅,空气扩散与交换速度快,造成在洞口湿度为 63.7%、门内 66.7%,较其他点低了 10 多个百分点;“裂缝栏杆”与其他观测点相比,地势低、狭窄、封闭的特点决定了其湿度相对较高;其余测点由于与洞外空气交换小,湿度相差不大。

2.4 游客对洞穴环境因子影响

2008 年的 5 月 2 日“五一”长假期间,我们对芦笛岩大厅的温度、湿度、CO₂以 1 次/h 的频率监测,同时对进入洞穴的游客人数作分时段统计(表 2)。5 月 2 日进洞游客数为 8 663 人;在上午和下午的游览高峰期,客流量达人 863 人/h 左右,最高达 1 330 人/h。

游客呼吸是旅游洞穴 CO₂的主要来源之一。5 月 2 日 8:00,测点的 CO₂为 530 ppm,随着游客增加,洞内 CO₂含量显著提高,并呈等幅度上升,到 15:30 每小时游客人数达到 1 330 人,CO₂达到 1 369 ppm,相当于平时的 3 倍左右;在 16:30 CO₂含量最大,此时游客人数却只有 1 106 人,比 15:30 人少,这主要是 CO₂含量值较游客人数增幅具有一定的滞后。又如 10:30 游人数达到 1 299 人时,CO₂含量只有 902 ppm;11:30 游客人数虽然只有 749 人,但 CO₂达到了 1 005 ppm。

随着游客减少和游览停止,在经过一个晚上的扩散和对流以后,到 5 月 3 日上午开放游览前,洞内 CO₂含量已迅速下落到原来的水平,只有 647 ppm;温度和湿度也显著降低。未见到明显的温度增高和 CO₂累积等现象,这与国内一些旅游洞穴不同,如北京石花洞开放 20 年后,洞穴的平均温度提高了 3℃以上。

表 2 芦笛岩 2008 年 5 月 2 日洞内大厅环境特征表

Table 2 Environmental features observed on 2 May of 2008 in the hall of the Ludiyan cave

时间 Time	温度 Temperature (°C)	湿度 Humidity (%)	二氧化碳 CO ₂ (ppm)	游客(人) Tourist number
08:30	21.3	75.4	669	556
09:30	21.5	86.0	768	1 116
10:30	21.7	90.8	902	1 299
11:30	21.5	90.7	1 005	749
12:30	21.6	86.8	1 156	442
13:30	21.5	93.9	1 194	770
14:30	21.5	94.0	1 252	1 295
15:30	21.6	91.5	1 369	1 330
16:30	21.6	91.5	1 525	1 106

3 洞穴景观老化原因的分析

洞穴次生化学沉积景观的风化剥蚀和变色是普遍存在的现象。据有关资料,目前世界上 80%以上的旅游洞穴都存在类似的问题,从诱发机制上可分为自然风化和人为风化。

从地质历史时期来看,任何一个洞穴都有幼年-壮年-老年期的发展过程。多数洞穴与外界存在通道,洞内外必然存在物质、能量交换,洞穴外部环境的昼夜、季节性和年际变化在一定程度上改变着洞内的气候特征,从而影响洞穴次生化学沉积物的变化。

人为因素主要出现在旅游洞穴中,洞穴开发中进行施工改道、增加高能光源,以及大量游客进入等,极大地改变了洞穴的自然环境,加速了洞穴次生化学沉积物景观的风化速度。

从风化的动力机制上可分为物理风化、化学风化和生物风化作用。通过对桂林芦笛岩、冠岩等旅游洞穴的调查,发现这3种风化作用都同时存在。

3.1 化学风化作用

化学风化的过程是:在温度、湿度交替变化频繁的作用下,具有侵蚀性的水溶液容易沿着 CaCO_3 的晶洞、结晶颗粒间界面孔隙和方解石晶体节理,在毛细作用下进入岩石体内产生溶解作用,造成岩石不断疏松软化。

在自然条件下,洞穴内的化学风化作用强度相对较弱,原因是自然状态下的洞穴密闭性较好,空气流动性差,洞内温度、湿度稳定,洞穴环境处于一个相对稳定的系统中,这个系统中多数渗水和滴水处于方解石(次生化学沉积物的主要矿物成分)过饱和状态,这也是形成洞穴次生化学沉积的原因。

当洞穴作为游览开发后,先期的建设施工,后期大量游人进入洞穴,稳定的洞穴环境系统遭到破坏。特别是游人呼吸产生大量 CO_2 气体, CO_2 气体会溶于水形成弱酸,使得水对方解石的溶解能力增强。根据调查,芦笛岩,冠岩、七星岩、丰鱼岩、银子岩等一些沉积物景观已形成了 0.3~0.7 mm 的软化层。

一个普通成年人,一天 24 h 需要吸入氧气 5~8 m^3 ,呼出相当量的 CO_2 ,芦笛岩平常日接待游客数千人,而“黄金周”更是达到一万多人,平均一个游客在洞内逗留时间约为 0.5 h,旅客在洞内吸收氧气,呼出二氧化碳,造成 CO_2 含量急剧增加。笔者整理分析了 2008 年 10 月 23 日芦笛岩监测点⑤和监测点⑦收集到的游客数量和 CO_2 数据(图 14)。

从图 14 可见,游客数量从早晨 8:00—9:00 的 467 人开始逐渐增加,14:00—15:00 游客量达到最大 544 人,同样在监测点⑤和监测点⑦ CO_2 也达到最大值 1 683 ppm 和 2 023 ppm,然后游客数量逐渐减少, CO_2 含量也逐渐下降。可见,洞穴中 CO_2 的变化与游客数量同步变化,游客对洞穴 CO_2 含量影响是十分明显的。

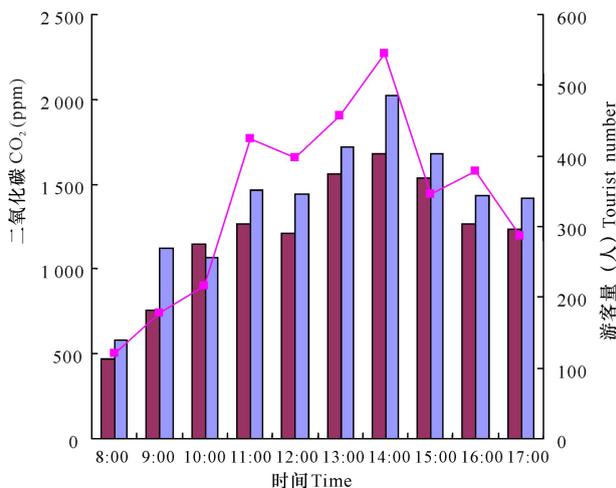


图 14 芦笛岩监测点⑤、⑦的 CO_2 与游客量变化图

Fig. 14 Variations of CO_2 and tourist amount at sites No. 5 and No. 7 in the Ludiyuan cave

3.2 物理风化作用

主要存在风蚀-脱水干裂、温差条件下的热胀冷缩和灰尘覆盖等形式。

3.2.1 风蚀-脱水干裂

洞穴空气流动是洞内、外及洞内各洞段(或支洞)存在气压差所形成的。过强的气流容易引起景观风蚀-脱水干裂作用。风会吹散景物上的水蒸气膜,导致景物脱水剥蚀。经测量,芦笛岩内风速一般为 0.3 m/s 左右,其实际的吹蚀作用并不很明显,但气流导致景物脱水是必然的结果。

3.2.2 冷热膨胀-破碎干裂

钟乳石在高能灯的照射下,表面温度升高,干涸失水,质地变得粗糙,色泽暗淡,造成脱水干裂。同时,高能灯周围的温差变化引起压力差变化,加速局部空气流动,导致钟乳石的干裂。

如芦笛岩“云台览胜”景点(图 5),在灯光照射处和离灯照约 30 cm 及 10 m 处测量了钟乳石表面温、湿度(表 3)。结果表明,在灯光照射处,空气温度高出非照射处 9.5℃。在灯光烘烤下,空气相对湿度也大大降低,只有 59%。同时,由于游览过程中灯光时开时闭,冷热变化较大,也容易导致钟乳石表面频繁发生物理胀缩和脱水等作用,导致钟乳石干裂,脱皮掉块。

3.2.3 干热-脱水钙化

随着溶洞的开发、开放,洞内基础设施的建设,特别是照明灯光的使用,对洞内湿度产生很大的影响。一旦洞内湿度降低,就会引起洞内纤细娇弱的卷曲石、石枝、鹅管及石针等景观发生脱水、干裂。研究表明,当空气湿度降低到 60% 以下或在高能灯的照射下时,很容易造成钟乳石脱水干裂剥落。

通过对芦笛岩的 8 个观测点(图 5),以及芦笛岩附近未开发的茅茅头大岩 8 个观测点(图 6)的空气湿度进行测量和对比(表 4),可以看出,两者的空气湿度差异十分明显。

表 3 灯光照射下的钟乳石表面空气温湿度对比表

Table 3 Comparison of air temperature and humidity on the stalagmite surface under irradiation of light

位置 Sites	温度 Temperature(°C)	湿度 Humidity(%)
灯照处 Irradiation of light	31.2	59.0
距灯照 30 cm 处 30 cm from the light	25.7	61.0
距灯照 10 m 处 10 m from the light	21.7	78.5

3.2.4 粉尘覆盖-景观褪色

洞穴开发施工、游览活动将产生大量粉尘,随空气流动飘落在次生化学沉积物表面,使其颜色变黑。

表 4 茅茅头大岩、芦笛岩空气湿度对比表,2008 年 10 月 23 日

Table 4 Comparison of air humidity in Maomaotoudayan cave and Ludiyan cave, 2008-10-23

监测点 Monitor sites	湿度 Humidity(%)	监测点 Monitor sites	湿度 Humidity(%)
茅茅头大岩 Maomaotou- Dayan cave		芦笛岩 Ludiyan cave	
①洞门 Monitor site ①	73.5	①洞口 Monitor site ①	67.0
②门内 Monitor site ②	84.5	②门内 Monitor site ②	67.1
③门厅里面 Monitor site ③	87.5	③射影平台 Monitor site ③	74.5
④区调不远 Monitor site ④	90.9	④鸟语花香 Monitor site ④	76.0
⑤大厅末 Monitor site ⑤	96.6	⑤大厅 Monitor site ⑤	86.1
⑥莲花盆处 Monitor site ⑥	97.7	⑥花树台阶 Monitor site ⑥	81.5
⑦头顶钟乳 Monitor site ⑦	95.3	⑦裂缝栏杆 Monitor site ⑦	80.0
⑧中间大石 Monitor site ⑧	94.5	⑧出洞台阶 Monitor site ⑧	70.9
平均值 Average	90.1	平均值 Average	75.4

4 旅游洞穴可持续利用建议

洞穴次生化学沉积物景观的风化、变色与洞穴环境条件密切相关。洞穴环境系统是陆地自然环境中的子系统,其要素除围岩、次生化学沉积物等变化缓慢的固态物质外,还包括多种比较敏感的空气、水及生物因子。这些要素在自然和人类活动影响中不断变化,并对洞穴次生化学沉积物景观产生影响。

洞穴景观保护的出发点是针对性地采取一定广西科学 2018 年 10 月 第 25 卷第 5 期

同时,由于洞穴次生化学沉积物具有相对高的空隙度,在水的作用下粉尘会渗入沉积物一定深度内,造成无法清除的变色现象。

3.3 生物风化作用

天然条件下,洞穴深处无光线,没有光合作用,植物种类和数量都很少,仅在洞口附近出现羊齿植物、苔藓和地衣、藻类等植物。但在洞穴的弱光带及照明灯照射到的地段,非常有利于藻类、地衣和苔鲜的生长。生物生长产生的 CO₂,是水-岩作用的催化剂,除植物的根系和部分树杆在生长过程中对钟乳石产生机械破坏外,其生化作用还加速了钟乳石的风化作用。同时,表面生长的藻类分泌的有机酸会对钟乳石产生溶蚀作用,加速了钟乳石的风化。芦笛岩、冠岩、银子岩洞内景灯较多,湿热环境有利于植物生长,因此,多数离景灯较近的景物都不同程度存在被有机质侵染为黑灰色或黄褐色现象。

工程措施,营造一种不利于洞穴化学次生化学沉积物景观风化、变色的洞穴环境。建议采取以下主要措施。

4.1 在洞穴系统区域构建良好植被生态环境

洞穴开发前应该对周边的原生态环境保护 and 资源开发进行规划,严格控制洞穴周围的人类生产活动,保护溶洞周围生态环境。在整个洞穴系统区域内地表植被的好坏,将对洞穴钟乳石的沉积环境产生极大的影响。作为旅游洞穴环境的保护措施之一,应当

在整个洞穴系统区域内构建良好的乔、灌、草结合的植被,通过调节石灰岩体及其覆盖层的储水功能,增加土壤持水时间,有利于土壤水持续沿裂隙流入洞内,改善洞穴空气的湿度,有利于洞内次生沉积物表面长期保持水膜,促进沉积物的生长。

为此,从外部环境方面,芦笛岩、冠岩、丰鱼岩、银子岩、七星岩等洞穴景观的保护和修复,至少应将洞穴所在的山体全部进行保护,最理想的是将洞穴所隶属的地貌单元和水文系统都保护起来。

4.2 减少洞穴与外部空气交换

旅游洞穴开放后,由于人工扩大进洞口、开凿出洞口,洞内与洞外空气流通量加大,加速了洞内空气温度、湿度、CO₂的变化,加速了洞内次生沉积物的风化、钙化、砂化。为此,有必要在洞口安装自动门或其它减少洞内外空气流通的设施。同时,对于自然存在的与外界空气交换的裂隙、天窗,也应适当采取封堵措施。特别需要指出的是,禁止人为在洞中安装排风扇或者抽风机这类加速洞穴空气交换的设备。

4.3 减少游人在洞穴中滞留时间

游客的进入是改变洞穴环境的最主要因素之一。游客带进洞内的尘埃覆盖在次生沉积物的表面会使景物变黑;游人释放的能量使洞内温度上升,使景物表层失水。同时,游人呼吸使洞中 CO₂增加,加大对次生沉积物的溶蚀。减少游人在洞穴中滞留时间,可以降低上述负面影响。

4.4 调整、改造灯光系统

洞内的灯光是洞穴热量增高的最主要来源,与灯光植物的生长息息相关。因此,在洞穴灯光布设上建议采取以下方法:①采用冷光源,用低热高强度灯具;②景观景物较佳、色彩丰富而纯洁的景点,用光宜淡雅;③路灯设置宜矮、宜小,只照路面;④在管理方面,灯光应实行游览进程控制,随走随关,尽量缩短灯光的照射时间。

4.5 处理灯光植物

预防和控制灯光植物的滋生,一是严格控制“种子”传播途径,防止种子进入洞穴,方法之一是在游客进洞以前,用吸尘器、吹风设备清扫身上衣物,避免携带植物孢子体以及尘埃进入洞内;二是定期变换灯光位置,破坏植物生长的环境条件;三是及时清除灯光植物。

4.6 定期用适宜水质的水对洞穴景观清洁湿润

维持洞穴一定湿度有利于洞穴的降尘,防止灰尘对景观污染。对一些重要景观,定期进行表面清洗,不但能够抑制植物的滋生,也会增强其表面折光率,增加美感,但应注意要使用适宜酸碱度和饱和度

的水。

4.7 开展次生 CaCO₃的沉积效果试验与研究

在国内,利用碱性钙溶液吸收 CO₂恢复洞穴碳酸钙景观和降低旅游洞穴 CO₂浓度的试验已取得了很好的成果^[10]。对于在洞穴中进行大面积的试验以及如何常温常压下促进 CaCO₃的沉积结晶,仍需要进一步开展理论研究和试验方法试验。

4.8 对洞穴空气环境进行长期、在线观测

建立洞内环境监测系统,对洞内温度、湿度、空气运动和 CO₂浓度等因子进行长期监测,研究洞穴环境的变化对沉积景观的影响,科学评定洞穴的环境承载力和旅游容量,科学制定合理的日游客流量。同时,通过对洞穴的 CO₂、O₂、温度、湿度、水化学等环境指标进行定期监测,如发现异常,应及时分析并有针对性地进行调控,以保证溶洞旅游的可持续发展。

4.9 加强旅游管理

游览活动对洞穴的影响是深刻的,在洞穴旅游管理中应注意游客数量人为控制。例如,桂林芦笛岩景区已通过环境质量体系认证,应控制游客量不超过 12 600 人/d。同时,要加强对游客游览行为管理,不将任何物件随意扔弃在洞内,不在洞内抽烟,不触摸、不敲击钟乳石,不得带入食品,等等。洞穴的形成需要经历数十、数百万年或者更长时间的自然发展过程,保护洞穴是每个人,尤其是管理者应尽的责任。

5 结论与建议

5.1 主要结论

(1)芦笛岩、冠岩、银子岩、丰鱼岩、七星岩等洞穴是桂林的主要旅游洞穴,由于开发、游览过程中保护不够,加上洞穴自身的原因,这些洞穴都不同程度存在钟乳石脱皮掉块、钟乳石砂状风化、颜色变黑变暗、灯光植物破坏等沉积物老化问题,景观美学价值降低,对洞穴资源的旅游寿命构成一定威胁。

(2)通过在芦笛岩等洞穴安装空气环境监测系统,观测研究洞穴环境要素的时、空变化及相互关系。结果表明:①洞穴温度、湿度、二氧化碳等环境因子的日变化呈现规律性,白天温度升高、湿度降低、二氧化碳提高;晚上关闭游览后,由于没有游客的进入,洞口关闭,空气流动减少,温度、湿度、二氧化碳逐渐恢复到稳定的范围及原有水平。②洞穴空气温度年内最低 17.6℃,最高 24.74℃,变化幅度 7.14℃;湿度变化在 70%~90%左右,夏季湿度最高。洞穴 CO₂在 1—5 月份处于增长阶段,最高 1 200 ppm;5—10 月比较平稳;在年内的最后 2 个月,CO₂趋于降低。

③游览高峰期,游客对洞穴环境因子影响显著。芦笛岩“黄金周”日游客量近万人,每小时客流量达千人以上,洞内测点的 CO₂ 含量从 530 ppm 上升到 1 369 ppm。随着游客减少和游览停止,在经过一个晚上的扩散和对流以后,洞内 CO₂ 含量迅速下落到原来的水平,未见到明显的温度增高和 CO₂ 累积等现象。

(3)洞穴景观老化原因,除地质历史演变的自然因素,人为因素主要有:洞穴开发中进行施工改造、增加高能光源,以及大量游客涌入等,极大地改变了洞穴的自然环境,加速了洞穴次生化学沉积物景观的风化速度。洞穴钟乳石的风化,主要有化学风化、物理风化和生物风化 3 种形式。

5.2 旅游洞穴可持续利用建议

洞穴次生化学沉积物景观的风化、变色与洞穴环境条件密切相关,洞穴景观保护的出发点是有针对性地采取各种措施,营造一种不利于洞穴次生化学沉积物景观风化、变色的洞穴环境。以下建议可供借鉴:(1)在洞穴系统区域构建良好的植被、土壤生态环境。(2)减少洞穴与外部空气交换。(3)减少游人在洞穴中滞留时间。(4)调整、改造灯光系统,使用冷光源,减少开启时间。(5)预防和控制灯光植物的滋生,及时处理灯光植物。(6)定期用适宜水质的水对洞穴景观清洁湿润。(7)开展次生 CaCO₃ 的沉积效果试验与研究。(8)对洞穴空气环境进行长期在线观测和预警。(9)加强旅游工作管理,控制游客数量,规范游客游览行为。

致谢:

本文相关工作得到广西科学研究与技术开发计划项目课题“桂林旅游洞穴可持续利用研究”支持,得到桂林旅游发展公司、桂林芦笛景区管理处等单位的支持,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 韦跃龙,陈伟海,罗劬侃,等. 旅游洞穴保护方式演变及保护式开发[J]. 地域研究与开发,2017,36(2):51-55.
WEI Y L, CHEN W H, LUO Q K, et al. Evolution of protection type and protection development mode of show cave[J]. Areal Research and Development, 2017, 36(2):51-55.

[2] 韦跃龙,陈伟海,黄保健. 试论旅游洞穴主题式开发——以广西巴马百么洞为例[J]. 资源科学,2011,33(7):1398-1407.
WEI Y L, CHEN W H, HUANG B J. Themed development of show cave: A case study on Baimo Cave, Guangxi Bama[J]. Resources Science, 2011, 33(7):1398-1407.

[3] 陈伟海. 洞穴研究进展综述[J]. 地质论评,2006,52(6):65-74.
CHEN W H. An outline of speleology research progress

[J]. Geological Review, 2006, 52(6):65-74.

[4] 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.
WANG X Y, YANG R Y. Environmental changes and protection of show caves[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(3):245-250.

[5] 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,1991,10(1):72-81.
FANG L L, LIU J S. Study on cave climatic features of the Yaolin Cave in Tonglu, Zhejiang[J]. Carsologica Sinica, 1991, 10(1):72-81.

[6] 张蕾,赵淑艳,赵习方. 北京石花洞内 CO₂ 的监测与评价[J]. 中国岩溶,1997,16(4):325-331.
ZHANG Q, ZHAO S Y, ZHAO X F. CO₂ monitoring and assessment of Shihua Cave, Beijing[J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(4):325-331.

[7] 韦跃龙,陈伟海,覃建雄,等. 地质遗迹旅游开发中各类潜在地质灾害的成因机制及其防治对策[J]. 水土保持研究,2008,15(3):246-250.
WEI Y L, CHEN W H, QIN J X, et al. The formation mechanism and countermeasures of various potential geologic disasters in the tourism development of geologic remains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(3):246-250.

[8] 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.
SONG L H, WEI X N, LIANG F Y. Effect of speleotourism on the CO₂ content and temperature in Baiyun Cave, Lincheng, Hebei[J]. Carsologica Sinica, 2003, 22(3):230-235.

[9] 朱德浩,朱其光. 洞穴自然环境系统的观测及研究——以广西柳州响水岩为例[J]. 中国岩溶,2005,24(4):318-325.
ZHU D H, ZHU Q G. Observation and research on the natural environment system in a cave—A case study from Xiangshui Cave in Liuzhou City, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(4):318-325.

[10] 宋林华,杨京蓉,林钧枢,等. 浙江瑶琳洞风化碳酸钙景观复生试验中 CO₂ 吸收动力学研究[J]. 中国岩溶,1999,18(4):297-307.
SONG L H, YANG J R, LIN J S, et al. Dynamics of absorbing CO₂ in the recovering experiment of weathered speleothem in Yaolin Cave, Zhejiang, China[J]. Carsologica Sinica, 1999, 18(4):297-307.

[11] 陈伟海,邓亚东,韩道山,等. 桂林市芦笛岩、大岩洞穴环境特征[J]. 中国岩溶,2004,23(2):113-119.
CHEN W H, DENG Y D, HAN D S, et al. The environment of the Reed Flute Cave and the Great Cave in Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(2):113-119.

[12] 邓亚东,陈伟海,朱德浩. 桂林市芦笛岩、大岩洞穴空气负离子浓度分布研究[J]. 中国岩溶,2005,24(4):326-330.
DENG Y D, CHEN W H, ZHU D H. Study on the distribution of aero-anion concentration in the Reed Flute Cave and the Great Cave in Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(4):326-330.

(责任编辑:符支宏)