

芙蓉洞洞穴景观现状评价及旅游可持续发展研究

王晨艺^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2024年6月13日; 录用日期: 2024年7月15日; 发布日期: 2024年8月7日

摘要

重庆市武隆县芙蓉洞是世界自然遗产,但随着旅游经济的快速发展,芙蓉洞的洞穴景观发生退化,影响了旅游业的可持续发展。本研究分析了温度、湿度、CO₂浓度及洞穴通风等主要环境因子变化特征和规律,研究了洞穴景观退化机理,并提出其保护对策。游人和洞穴灯光释放的能量导致芙蓉洞内气温升高。由于洞内外的温度差和空气流通,洞穴内表现出“夏季高温、冬季干燥”的特征。洞穴CO₂浓度会随游人进入的数量增加而明显升高。洞穴升温、灯光热量释放,及空气对流导致洞穴湿度降低,使景观产生干裂和风化等现象。气流带入的洞外气体及高浓度CO₂溶解于水汽,溶蚀洞穴景观。洞穴灯光为苔藓类植物生长提供了条件,附着于洞穴景观的表面;以及洞穴大气粉尘的进入,致使洞穴景观暗沉发黑。洞穴内部环境保护能有效防止洞穴景观退化,保证游客健康旅游,实现旅游资源的可持续开发利用。

关键词

芙蓉洞, 洞穴景观, 旅游洞穴, 可持续发展

Evaluation on the Cave Landscape and the Sustainable Development of Tourism in Furong Cave

Chenyi Wang^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes, Kunming Yunnan

Received: Jun. 13th, 2024; accepted: Jul. 15th, 2024; published: Aug. 7th, 2024

Abstract

Furong Cave in Wulong County of Chongqing is a world natural heritage, but with the rapid development of the tourism economy, the cave landscape of Furong Cave has been degraded, which has affected the sustainable development of tourism. In this study, the characteristics and rules of major environmental factors such as temperature, humidity, CO₂ concentration and cave ventilation were analyzed, the mechanism of cave landscape degradation was studied, and the protection measures were proposed. The energy released by visitors and cave lights causes the temperature inside Furong Cave to rise. Due to the temperature difference and air circulation inside and outside the cave, the cave shows the characteristics of "high temperature in summer and dry in winter". The CO₂ concentration of the cave will increase significantly with the increase in the number of visitors entering the cave. The warming of the cave, the release of heat from lighting, and air convection lead to a decrease in humidity within the cave, causing phenomena such as drying, cracking, and weathering of the landscape. The gas outside the cave and the high concentration of CO₂ brought by the airflow dissolve in the water vapor and dissolve the cave landscape. Cave light provides conditions for the growth of bryophytes, which adhere to the surface of the cave landscape; And the entry of atmospheric dust into the cave, causing the cave landscape dark and black. Cave interior environmental protection can effectively prevent the degradation of the cave landscape, ensure the healthy tourism of tourists, and realize the sustainable development and utilization of tourism resources.

Keywords

Furong Cave, Cave Landscape, Cave Tourism, Sustainable Development

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

中国的碳酸盐岩分布广泛, 总面积约 344.3 万平方千米(含埋藏型碳酸盐岩), 占国土面积的 1/3, 并且碳酸盐岩类型齐全, 为我国各类岩溶洞穴的发育奠定了基础地质条件[1]。

旅游洞穴指洞穴具有丰富的可供人们欣赏和科学研究等的各类洞穴景观[2]。鉴于洞穴旅游的巨额利润和对地方经济的推动作用, 一些地方出现了滥开发的现象, 忽视对洞穴的保护, 导致洞穴景观和洞穴生态环境遭到破坏[3]。除了经济价值外, 洞穴沉积物在古气候变化和环境考古等方面也具有重要科学价值。然而, 洞穴是一种脆弱的开放系统, 对环境变化非常敏感。洞内景观资源和生物资源是在特定的无光、相对恒温、较高湿度、低噪音和空气流动较慢的条件下形成的。大批游客进洞及其必要的照明、通风、道路设施等, 必然改变原有物理化学条件, 影响洞内各种旅游资源。如灯光照明和人体释放热量造成的温度升高, 人体呼吸导致 CO₂ 浓度升高[3], 粉尘随开放洞口进入所造成的污染, 以及凝结水与洞穴高浓度 CO₂ 的结合以及洞外气体进入所产生的侵蚀等[3]。对于洞穴因旅游开放而遭受破坏的现象, 前人研究提出以下改进措施: 改造洞内灯光设施, 尽量采用冷光源, 减少因照明灯散热而造成的洞穴升温, 减少照明设施, 尤其是长明灯, 能有效的防止灯光植物的生长[4]; 通过调整灯光的色调来弥补景观的褪色, 给游客以良好的视觉效果[4]; 控制洞穴日游客量, 使温度和 CO₂ 浓度不至于超过洞穴承载能力的阈

值,让洞穴有能力自净[5];进出口设置双重门,减少洞外有害气体的进入,减轻湿度降低的程度和减少粉尘污染[6];在洞穴汇水补给区范围山顶植树造林,保持良好的自然生态环境[7];尽量避免开凿人工洞口,尽量保持洞穴的自然特性等[8]。

洞穴旅游资源既包括洞内各种景物以满足人们美学享受的需要,也包括一些使人能舒适安全的进洞的洞内环境因子。如温度、湿度、CO₂浓度、正负离子、氡含量等。而这些环境因子的变化,不但能影响游客安全舒适的进洞,也可能对洞内景观资源造成损坏。洞穴是一种开放系统,它通过洞口、天窗、裂隙而与洞外环境有直接联系[9][10]。因此,洞穴景观资源同时受到洞内和洞外人类活动的威胁,主要表现为降雨、土壤、大气及上部工农业生产的影响[11]。针对洞穴破坏,前人研究主要集中在保护知识的宣传和普及、洞穴开发管理、洞外人为活动的影响,以及洞穴环境变异对洞穴的影响等几个方面[12]。除了从洞穴环境变异方面对环境中的温度、湿度、CO₂浓度等指标进行观测外,更多的研究停留在经验分析和理论推理,没有深入分析洞穴景观和环境遭到破坏的机理。本研究将填补洞穴保护在这方面的不足,研究洞穴景观和环境受到破坏的原因及机理,为洞穴环境保护和景观恢复提供科学依据;这将有利于洞穴资源的可持续开发利用,提高我国洞穴旅游资源开发保护和管理水平。

2. 研究区概况

芙蓉洞(107°54'E, 29°13'N)位于重庆市武隆区江口镇,地处芙蓉江东岸,发育于寒武系石灰岩和白云岩地层中。芙蓉洞所在的武隆区属于典型的喀斯特峡谷分布区。芙蓉洞上方植被茂盛,以C3植被乔木和灌木为主,其上覆土壤多为山地黄壤,土壤厚度受坡度等影响,变化范围大致为30~90 cm,上覆岩层厚度可达300~500 m [13]。该区域属于典型的亚热带季风性气候,夏季高温多雨,冬季偏冷少雨,雨季(5~10月)降水量占全年降水量的70% [13]。

芙蓉洞洞口海拔480 m,洞长2700 m,自1994年开始对游客开放。洞穴主要由巨幕飞瀑大厅(高5~15 m、宽15~20 m)、辉煌大厅(高20~50 m、宽20~70 m)、石膏花支洞(高15~30 m、宽16~20 m)等构成,平面走向呈现“S”形(图1) [14][15]。芙蓉洞洞内温度稳定在16.0°C~16.3°C,湿度>95%,洞穴次生化学沉积物形态多样[16][17]。

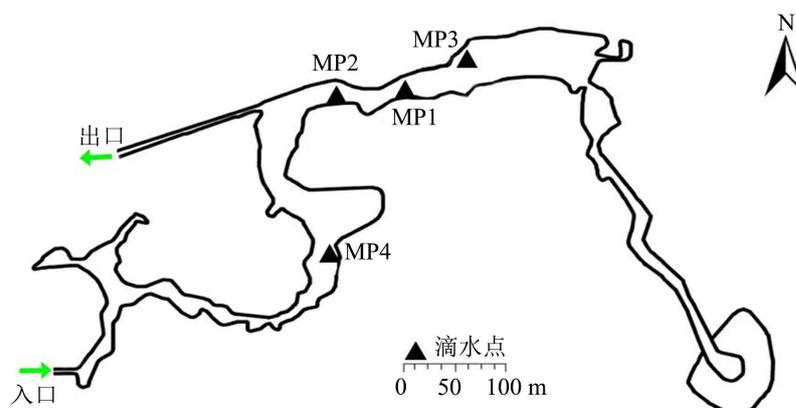


Figure 1. Plan of Furong cave and location of monitoring points (MP1, MP2, MP3, MP4, black triangle) (modified from reference [15])

图1. 芙蓉洞平面图及监测点位置(MP1、MP2、MP3、MP4 黑色三角形) (修改自参考文献[15])

3. 研究方法

本研究以实地观测与实验研究相结合,综合整理采集的数据,以碳酸钙次生沉积景观的形成、分布、

退化特征为基础；从洞穴环境中的 CO₂ 浓度、湿度、温度等因素的变化，及其对景观所产生的影响入手，探索其退化及损坏的因素及机制；并综合多学科知识，对景观保护和恢复提出建议。

1) 洞穴温度和湿度测量：洞内温湿度用数字式温湿度仪置于洞内定点监测(监测点：MP1、MP2、MP3、MP4)，监测时间集中在 2012 年 1 月到 2022 年 12 月，每月一次；待数字稳定后读数；取 2012 年 1 月到 2022 年 12 月各点每月监测数据的平均值代表各点的年均温度/湿度进行对比分析。

2) CO₂ 浓度测量：在芙蓉洞内 MP1、MP2、MP3、MP4 监测点利用德图 Testo535 红外 CO₂ 测量仪测量洞穴空气 CO₂ 浓度，测量范围为 0~9999 ppm，测量精度为 1 ppm，误差为 2%；监测时间集中在 2012 年 1 月到 2022 年 12 月，每月一次。

4. 结果与讨论

4.1. 导致景观损坏环境因素的变化特征及其损坏机理

洞穴是一个相对封闭的脆弱环境系统，洞穴景观在开放旅游后，一般都会对次生沉积物景观效果产生负面影响[18]。洞穴环境条件的改变是多方面的，而每种因素又有其自己的变化规律和特征(表 1)。

Table 1. Characteristics of air environmental factors at each monitoring point from 2012 to 2022

表 1. 各监测点 2012~2022 年均空气环境因子特征表

年份	MP1			MP2			MP3			MP4		
	CO ₂ (ppm)	温度 (°C)	湿度 (%)									
2012	993	16.5	95	1292	16.9	94	1226	16.7	93	1533	17.1	94
2013	1341	16.6	95	1415	16.9	94	1400	16.8	93	1608	17.5	94
2014	1341	16.6	95	1430	16.9	94	1415	16.8	93	1618	17.6	94
2015	1375	16.6	95	1538	16.9	94	1545	16.9	92	1629	17.6	93
2016	1392	16.6	95	1549	17.0	94	1607	16.9	92	1637	17.6	93
2017	1395	16.6	95	1558	17.0	94	1613	16.9	92	1648	17.7	93
2018	1396	16.7	94	1558	17.0	94	1615	16.9	92	1666	17.7	93
2019	1400	16.7	94	1560	17.0	94	1616	17.0	92	1679	17.7	93
2020	1566	16.7	94	1671	17.1	92	1750	17.0	92	1689	17.7	93
2021	1598	16.8	92	1689	17.1	92	1771	17.1	92	1700	17.8	92
2022	1605	16.8	92	1696	17.1	92	1779	17.1	92	1798	17.8	92

4.1.1. 洞穴能量(温度)变化及影响

自然状况下，相对封闭的洞穴内部基本是恒温的。但开放旅游之后，改变了能量流状况及其与外界交换的速度，恒温状况被打破。影响洞穴能量输入的最重要方式是洞穴照明和游客释放的能量。

如只考虑游客和照明的影响，旅游对洞穴热量的影响可以用下式计算[19]：

$$E = 170N_1t_1 + N_2N_3wt_2 \quad (1)$$

上式中， E = 洞穴中新增热量总和；

t_1 = 平均每人在洞内停留时间(S)；

t_2 = 每个团队进洞后每段游程开灯时间之和(S);

N_1 = 日均进入洞穴总人次(人/次);

N_2 = 每段游程内灯泡个数(个);

N_3 = 每天进洞团队数;

w = 灯泡的平均功率(J/S)。

游客和灯光向洞内释放了大量能量，导致洞穴环境改变，洞穴景观遭受破坏。其主要影响表现在：洞穴空气升温(图 2)、灯光植物的生长等方面[20]。洞穴温度升高，空气携带水汽的能力增强，相对湿度降低，洞穴本身脆弱的沉积环境发生改变；导致洞穴空气和水化学特征发生相应调整，溶解、沉积及其保持的平衡点发生改变，使得原来环境条件下沉积物发生性状改变。也可导致脆弱的沉积景观，如石花、卷曲石等出现风化干裂等现象[20]。芙蓉洞内几个主要景点处的长明灯，为洞穴灯光植物提供了生存条件；当长明灯的光强超过灯光植物生长所需的临界条件值，灯光植物便会大量繁殖[21]，使部分钟乳石表面生长灯光植物，损坏了原有的景观效果；同时，附着在钟乳石表面的植物根的酸性分泌物对钟乳石具有严重的腐蚀性[22]。

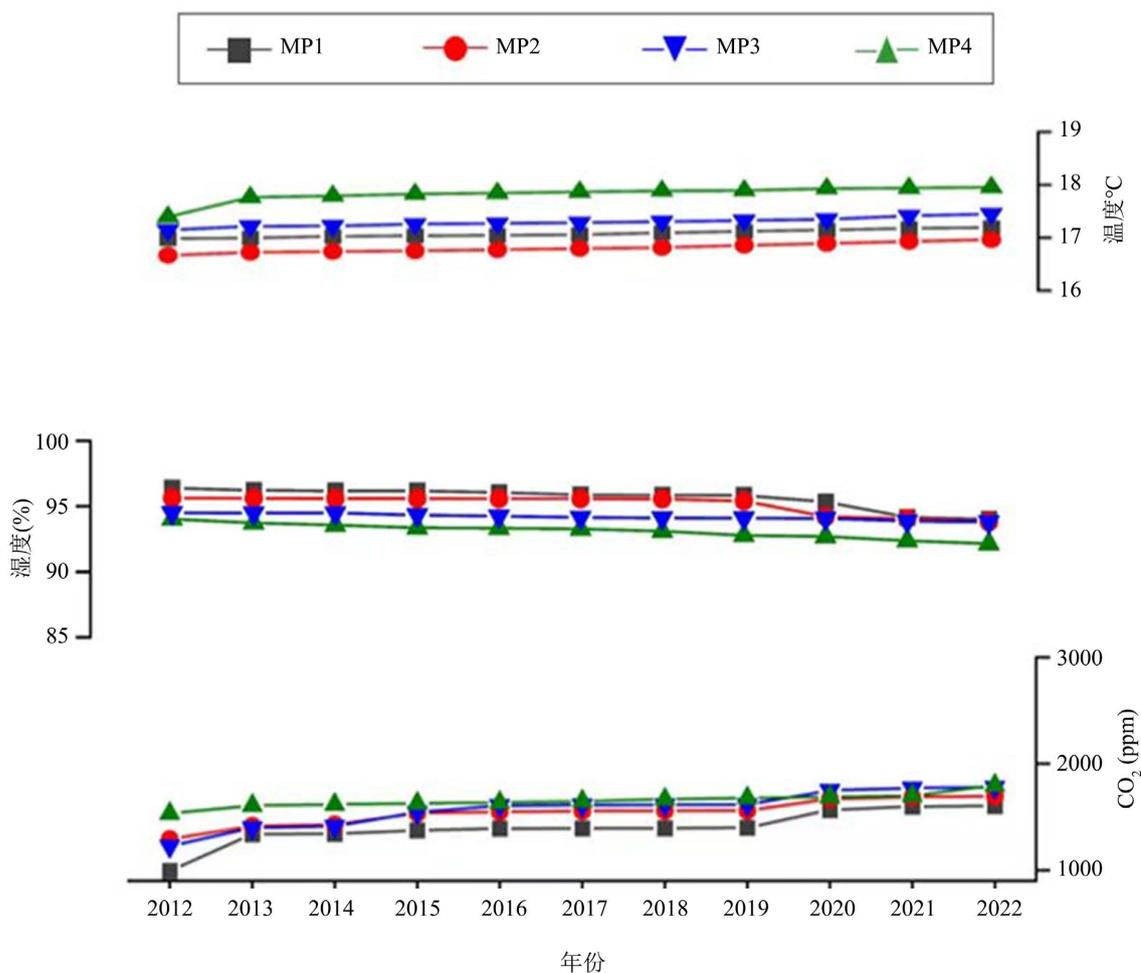


Figure 2. Annual mean variations of air temperature, humidity and CO₂ concentration at each monitoring point (MP1, MP2, MP3, MP4) in Furong Cave during 2012~2022

图 2. 芙蓉洞内各监测点(MP1、MP2、MP3、MP4)在 2012~2022 年期间，洞穴空气温度、湿度，CO₂ 浓度年平均变化图

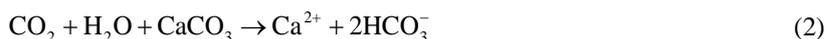
4.1.2. 洞穴湿度变化及影响

洞穴湿度在很大程度上受地方气候环境制约,对洞穴景观保护具有重要意义[23]。芙蓉洞夏季滴水丰富,多数时间湿度在90%以上,降雨期间则在95%以上,其洞内景观也湿润富有光泽[24]。冬季由于降水减少,洞穴环境相对干燥,部分沉积物表面干燥、无光泽,甚至出现严重风化[24]。洞穴湿度也有微小幅度的日变化,一般晚上较白天高1%~2%左右,其原因主要是白天洞穴开放旅游,通风使洞穴升温及与外界空气交换而导致相对湿度降低,其变化幅度大小受当日进洞人数影响[25]。在整个监测期间,芙蓉洞四个监测点的空气湿度呈现逐渐降低的趋势(图2)。

根据湿度高低,洞穴环境可以分为高湿度环境和低湿度环境[26]。在洞穴较高湿度的条件下,洞穴气流的进入,一般情况下不利于洞穴保护。因为洞外空气中含有一定量的HCl、H₂S、SO₂等有害气体,在一定条件下与洞穴凝结水结合产生强酸,对于洞穴景观的破坏能力远远大于CO₂[27]。而低湿度的洞穴环境将导致钟乳类景观的失水、干裂、风化,也不利于洞穴景观保护。此外,干湿变化和温度的升降能使钟乳石等洞穴沉积物表面产生不均匀涨缩,使其表面破裂,从而加速其风化的速度[28]。

4.1.3. 洞穴CO₂变化及影响

洞穴CO₂浓度是对洞穴次生沉积景观影响最为直接和重要的一个因素[29],由反应式:



可知,CO₂与水结合(主要是洞穴景观表面的凝结水),可对碳酸盐景观产生溶蚀,从而使景观遭受破坏。CO₂溶于水后形成碳酸的浓度,取决于洞穴空气中CO₂的分压:洞穴空气中的CO₂分压小,形成的碳酸浓度低,对钟乳类景观的腐蚀作用弱,反之亦然[30][31]。被溶蚀后的钟乳类沉积物出现软化,凹凸不平等现象,失去表面的光泽,降低景观效果。

旅游洞穴CO₂主要来源于土壤空气、游人呼吸、碳酸钙沉积时释放的CO₂,以及洞穴腐殖质等[32]-[34]。大量游客进入洞穴,将持续向洞内排放CO₂,使洞内的CO₂浓度明显升高(图2)。数据资料显示,芙蓉洞景区接待游客人数从2000年的15万人次,增长至2016年的48万人次,以及2022年的68万人次(数据来源:芙蓉洞游客服务管理中心)。因此,游客人数是影响洞穴内CO₂浓度的重要因素。当洞穴处于高湿度的环境时,高浓度CO₂溶于水,形成碳酸,溶蚀洞穴景观。此外,碳酸钙沉积时也会向洞内排放CO₂。根据亨利-胡克尔定理,CO₂从高分压位向低分压位运动,且分压差ΔP越大,CO₂的运动越快,当岩溶水中的pCO₂大于洞穴空气中的pCO₂时,水中的CO_{2(aq)}很快转变成CO_{2(g)},并在压力差的驱动下向洞穴空气中迁移,增加空气中的CO₂量和pCO₂,同时产生碳酸钙沉积,直到ΔP接近0为止[1]。该过程表示为:



洞穴碳酸钙沉积过程中释放的CO₂在洞内聚集,并与空气凝结水结合,也可能产生溶蚀作用,破坏原有的洞穴景观。

4.1.4. 洞穴气流及影响

洞穴气流强度与洞内外温差成正比[35]-[37]。当洞外气温(夏季)高于洞内气温时,洞内气流流出;反之(冬季)洞外气流流入。洞穴通风以及游客进出带入的洞外污染物,对洞穴景观有重要影响[38]。受污染的洞穴景观表现出一些基本特征,例如:大面积污染现象主要出现在狭小洞厅或廊道内。因为污染物的重力沉降,导致洞穴景观表面、面向行人通道的面,和迎风面受到的污染相对更严重(图3);而背向人行道的面和背风面受轻度污染或未受污染。

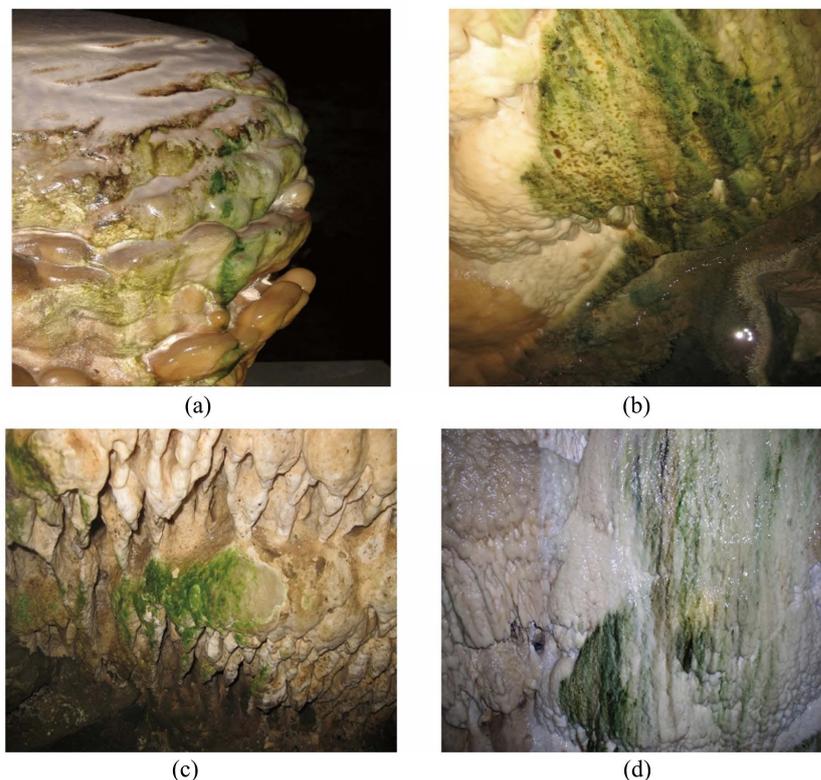


Figure 3. Cave landscape with polluted wind surface inside Furong Cave (**Figure 3(a)**, **Figure 3(b)**, **Figure 3(d)** are the cave landscape polluted by light plants on the wind side of Furong Cave, and **Figure 3(c)** is the cave landscape polluted by sand weathering and light plants in Furong cave)
图 3. 芙蓉洞内向风面被污染的洞穴景观(图 3(a)、图 3(b)、图 3(d)为芙蓉洞内向风面被灯光植物污染的洞穴景观, 图 3(c)为芙蓉洞内砂化风化及被灯光植物污染的洞穴景观)

5. 对策与建议

5.1. 能量流的解决对策

破坏洞穴能量平衡的能量主要来源人流和灯光。因此, 针对灯光释放能量的问题, 建议推广冷光源、减少或取消长明灯。由于游客 CO_2 排放量和热量释放量均与游客数量及停留时间成正比, 故可用低于洞内温度的 NaOH 溶液进行喷洒[39], 同时解决 CO_2 浓度和温度升高, 以及湿度偏低的问题。

由公式:

$$V = 11nt/N \quad (4)$$

式中, V : 吸收液(NaOH 溶液)总体积(l); n : 入洞团队人数(个); t : 进洞时间(s); N : 吸收液(NaOH 溶液)中的钙浓度(g/l) [39]。

可知溶液喷洒的体积与游客人数和停留时间成正比, 与溶液的浓度呈负相关关系。增加湿度的多少由溶液喷洒的大小决定。如果洞穴湿度较小, 可使用浓度较低的溶液, 增大喷洒量, 从而增加湿度; 若洞穴湿度较大, 则喷洒溶液的浓度可以适当调高。

5.2. 湿度解决对策

洞穴主要通过洞口、天窗, 或裂隙等, 与洞外进行物质和能量交换, 并对洞穴沉积物产生重要影响。由于岩溶地区透水性强的特征, 旅游洞穴水源缺乏较为普遍, 尤其在旱季更为明显。因此, 对洞穴所在

山体汇水区进行水源保护非常重要。主要措施有：① 恢复自然生态系统，建立良好的植被防护系统，涵养水土。② 避免各种人为污染，科学施肥，科学管理。③ 工程措施与生态措施相结合，通过在上覆山体打孔或者修建蓄水池等方式，截留雨季多余的降水，在旱季持续补给洞穴。

此外，岩溶洞穴环境本身是碱性环境，洞穴沉积物也是在碱性环境下形成的。酸性气体在洞内滞留将会对洞穴旅游景观造成损害；保持洞穴碱性环境有利于洞穴景观保护。在 CO_2 与水结合过程中，会发生 $\text{CO}_2 + \text{OH}^- = \text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- = \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ 过程[40] [41]，导致次生化学沉积物的形成。因此，以碱性溶液对洞穴增湿能有效保持洞穴碱性环境，促进洞穴景观的形成和保护。

5.3. 洞穴通风的解决对策

芙蓉洞开放后，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、 CO_2 的变化，加速了洞内次生沉积物的风化、钙化、砂化[42] [43]。芙蓉洞景区管理部门已经在旅游洞穴入口和出口设置了双重门，在一定程度上减轻了旅游开放所造成的通风效应。需要在实际运营管理中，严格执行出入口双重门的开关制度，切实做到“人到开门，人走关门”；尽最大可能减少洞穴通风效应。

此外，加强旅游工作管理，控制游客数量，规范游客游览行为、定期使用适当的碱性溶液对洞穴景观进行清洁喷淋(增湿，恢复洞穴景观表面)，并对洞穴空气环境进行长期在线观测和预警等，也有助于旅游洞穴的可持续发展。

6. 结论

重庆芙蓉洞自旅游开放以来，由于人类活动的影响，导致洞穴景观不同程度的受到影响和退化，存在钟乳石脱皮掉块、颜色变黑变暗、灯光植物破坏等问题，降低了景观美学价值，影响了旅游洞穴的可持续发展。

芙蓉洞内环境监测结果表明：游人和洞穴灯光向芙蓉洞内输入大量能量，导致洞穴空气升温，降低洞穴湿度，使洞穴景观出现干裂、风化等现象。旅游活动导致洞穴 CO_2 浓度升高；旅游通风带入的洞外酸性气体及洞穴大气粉尘的进入对洞穴景观产生酸侵蚀作用，且粉尘沉积附着于钟乳类景观的表面，致使受污染面发黑变暗。

针对以上问题，建议：

- 1) 严格控制洞穴内旅游灯光的功率大小和开灯时间，严格控制游客数量。
- 2) 选择用低于洞内温度的碱性溶液进行喷洒，吸收洞穴内 CO_2 、降低洞穴空气温度、增加湿度、修复洞穴景观表面。
- 3) 洞穴上覆山体的植被恢复、保土蓄水、持续性向洞穴补水，维持洞穴湿度，保护洞穴景观。
- 4) 加强监督和管理，严格控制洞穴进出口双重门的开和关，有效降低洞穴通风效应。

参考文献

- [1] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [2] 朱晓燕, 张美良. 基于岩溶洞穴旅游活动中洞穴环境因子的研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 426-431.
- [3] 黄倩. 旅游活动对喀斯特洞穴环境的影响及其保护研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [4] 杨晓霞, 施俊庄, 向旭. 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.
- [5] 刘玲. 旅游与环境承载力研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [6] 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, 67.
- [7] 郑国璋. 重庆武隆喀斯特旅游资源开发与生态环境保护对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(S1): 172-175.

- [8] 罗培, 况明生, 李华. 浅析岩溶洞穴旅游的可持续性发展——以重庆武隆芙蓉洞为例[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2004, 24(4): 61-65.
- [9] 陈启贵. 威宁县石漠化监测结果分析与治理对策[J]. 绿色科技, 2023, 25(16): 64-67.
- [10] 马伟杰, 马晓谋, 顾国斌, 周芳. 毕节市石漠化综合治理成效分析与对策建议[J]. 绿色科技, 2023, 25(16): 68-72.
- [11] 张任, 朱学稳. 游览洞穴开发水平评价与我国游览洞穴开发现状、存在问题及改进建议[J]. 中国岩溶, 1998(3): 72-77.
- [12] 高占冬, 吴克华, 李坡, 等. 贵州省喀斯特洞穴旅游资源开发现状和思考[J]. 绿色科技, 2019(10): 235-238.
- [13] Li, H., Lee, Z., Wan, N., Shen, C., Li, T., Yuan, D., et al. (2011) The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ Records in an Aragonite Stalagmite from Furong Cave, Chongqing, China: A-2000-Year Record of Monsoonal Climate. *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**, 1121-1130. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2010.06.011>
- [14] 朱学稳. 芙蓉洞的次生化学沉积物[J]. 中国岩溶, 1994, 12(4): 357-368.
- [15] Li, T., Shen, C., Li, H., Li, J., Chiang, H., Song, S., et al. (2011) Oxygen and Carbon Isotopic Systematics of Aragonite Speleothems and Water in Furong Cave, Chongqing, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**, 4140-4156. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.04.003>
- [16] Li, J. and Li, T. (2018) Seasonal and Annual Changes in Soil/cave Air PCO_2 and the $\delta^{13}\text{C}_{\text{dic}}$ of Cave Drip Water in Response to Changes in Temperature and Rainfall. *Applied Geochemistry*, **93**, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.04.002>
- [17] 周绪伦, 李振伦. 钙华洞穴的形成与保护[J]. 中国岩溶, 2004, 23(2): 107-112.
- [18] 周长春, 王晓青, 孙小银, 等. 旅游洞穴环境变化监测分析及其影响因素研究——以山东沂源九天洞为例[J]. 旅游学刊, 2009, 24(2): 81-86.
- [19] 宋林华, 丁怀元, 等. 喀斯特与洞穴风景旅游资源研究[C]//林均枢, 曹南燕, 薛军, 张耀光. 喀斯特与洞穴风景旅游资源研究论文集. 北京: 地震出版社, 1994: 26-30.
- [20] 潘天望, 史文强, 陈伟海, 等. 桂林漓江风景名胜区重要旅游洞穴保护与利用探讨[J]. 中国矿业, 2023, 32(S2): 132-137.
- [21] 翁子凡, 杨晓霞, 向旭, 等. 喀斯特洞穴灯光照明系统研究述评与展望[J]. 中国岩溶, 2014, 33(2): 255-262.
- [22] 贾敏, 罗时琴, 吴克华. 喀斯特洞穴旅游景区生态安全影响因素及应对策略探析[J]. 丝绸之路, 2019(1): 187-192.
- [23] 潘艳喜. 喀斯特洞穴空气要素变化特征及其对洞穴环境的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [24] 梁明强, 李俊云, 周菁俐, 等. 重庆市芙蓉洞空气环境变化特征与影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 962-970.
- [25] 邱丽. 基于环境脆弱性评价和情景分析的洞穴旅游容量测算[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [26] 吴夏, 潘谋成, 殷建军, 等. 桂林凉风洞洞穴空气及滴水水化学对区域环境的响应[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 513-520.
- [27] 韦跃龙, 陈伟海, 罗劬侃, 等. 洞穴呼吸及其影响因素[J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 82-94.
- [28] 潘艳喜, 周忠发, 李坡, 等. 旅游洞穴空气环境时空变化特征及其影响因素——以贵州省绥阳大风洞为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(4): 425-431.
- [29] 周福莉. 芙蓉洞 CO_2 变化特征初探[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2012, 26(1): 36-38.
- [30] 张结, 周忠发, 汪炎林, 等. 短时间高强度旅游活动下洞穴 CO_2 的变化特征及对滴水水文地球化学的响应[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1687-1701.
- [31] 徐亚, 周忠发, 范宝祥, 等. 岩溶洞穴生态环境容量及影响因素分析: 以绥阳大风洞——响水洞为例[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(2): 186-195.
- [32] 丁梦凯, 吴夏, 曹建华, 等. 桂林凉风洞洞穴系统垂向碳迁移特征及其影响因素[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 600-607.
- [33] 吴夏, 潘谋成, 曹建华, 等. 开放洞穴环境变化特征及其影响因素——以桂林凉风洞为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 361-369.
- [34] 田衷琿, 周忠发, 张绍云, 等. 喀斯特洞穴 CO_2 时空变化特征及其控制因素分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 43-51.
- [35] 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.

- [36] 班凤梅, 蔡炳贵. 北京石花洞空气环境主要因子季节性变化特征研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 132-137.
- [37] 曹敏, 蒋勇军, 贺秋芳, 等. 重庆丰都雪玉洞群洞穴现代监测与古环境研究回顾和展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 414-428.
- [38] 邓亚东, 杨洪勇, 郭小红, 等. 旅游洞穴景点保护等级评价——以重庆酉阳太古洞为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(6): 987-994.
- [39] 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.
- [40] 安丹, 周忠发, 范宝祥, 等. 贵州大风洞洞穴空气 CO₂ 浓度及滴水水化学与洞穴通风的响应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 338-345, 352.
- [41] 张萍, 杨琰, 孙喆, 等. 河南鸡冠洞 CO₂ 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.
- [42] 邓亚东, 陈伟海, 罗书文, 等. 旅游洞穴景观脆弱性概念与评价研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(8): 129-137.
- [43] 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 等. 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.