

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.233

引用格式: 潘天望, 史文强, 李成展, 等. 洞穴空气环境开发利用适宜性研究——以大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统为例[J]. 中国地质调查, 2025, 12(1): 60–68. (Pan T W, Shi W Q, Li C Z, et al. Suitability study of cave air environment development and utilization: A case study of Dacao sinkhole – Red Rose hall cave system[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 60–68.)

洞穴空气环境开发利用适宜性研究

——以大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统为例

潘天望^{1,2}, 史文强^{1,2*}, 李成展^{1,2}, 陈伟海^{1,2}, 唐亮亮^{1,2}

- 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/联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004;
- 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406)

摘要: 洞穴空气环境研究是洞穴保护的基础, 洞穴开发前应开展空气环境开发利用适宜性评价, 评估是否适于开展洞穴游览活动, 从而避免洞穴景观资源遭受破坏。以广西乐业县大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统为例, 对拟开发利用洞段中的温度、相对湿度、CO₂ 浓度、空气正负离子、气压和风速评价指标进行了测量。结果表明: 拟开发利用洞段洞内平均温度为 17.2 °C, 相对湿度平均值为 94.74%, CO₂ 平均浓度为 625.82 × 10⁶, 属一级卫生标准, 且洞内气压(流)环境良好, 空气流动缓慢; 洞内和洞外空气负离子平均浓度分别为 5 370 个/cm³ 和 1 350 个/cm³, 最大值为 14 000 个/cm³, 洞内空气质量评价指数(comprehensive index, CI)平均值为 7.73, 最高值可达 28, 远大于空气质量等级分级标准中“最清洁”级别的临界指标(1.0)。综合以上结论认为该洞段适于开展洞穴游览活动。通过该案例提出对岩溶洞穴景观资源空气环境开发利用适宜性评价的理论方法体系, 可为旅游洞穴的保护和利用提供科学参考。

关键词: 洞穴空气环境; 环境保护; 适宜性评价; 洞穴开发; 大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统

中图分类号: P642.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2025)01-0060-09

0 引言

岩溶洞穴景观是一种具有高度吸引力的特殊地下旅游景观资源, 以其稀有性、奇异度和神秘性吸引着游客^[1], 同时也是一种不可再生的旅游资源^[2]。我国是旅游洞穴开发数量最多的国家, 截至 2022 年 9 月, 据统计已有近 800 个旅游洞穴景点^[3], 经济和社会效益十分显著。洞穴的空气环境指洞穴内部特殊的小气候条件, 包括温度、相对湿度、风速、气压、CO₂ 浓度、正负离子浓度等环境要素^[4]。大部分洞穴未开发前往往处于空气环境相

对稳定和封闭状态, 且具有异于外界环境的小气候^[5], 由于岩溶洞穴的相对封闭性以及钟乳石景观的成因具有多样性, 导致其对外部环境和人类活动较为敏感, 环境承载力较低^[6]。因此, 在旅游开发建设中必须采取开发与保护并重的建设方针, 才能达到可持续利用的目的。然而, 由于人们对洞穴资源的保护认识不足, 管理措施相对滞后, 造成部分旅游洞穴在开发利用过程中空气环境发生改变, 致使洞内沉积物^[7]和洞穴景观退化^[8], 甚至破坏洞穴生态系统^[9-10], 因此, 洞穴空气环境研究是洞穴保护的基础^[11], 洞穴开发前应开展空气环境开发利用适宜性评价, 评估是否适于开展洞穴游览活动,

收稿日期: 2023-08-09; 修订日期: 2024-01-10。

基金项目: 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费“重庆金佛洞望天宮冰洞成景机制研究(编号: 2023005)”和中国地质调查局“渝东南地区岩溶地貌地质遗迹立典调查评价(编号: DD20242325)”项目联合资助。

第一作者简介: 潘天望(1988—), 男, 助理研究员, 主要从事构造地质学、岩溶地貌景观与洞穴方面的研究。Email: pantianwang@mail.cgs.gov.cn。

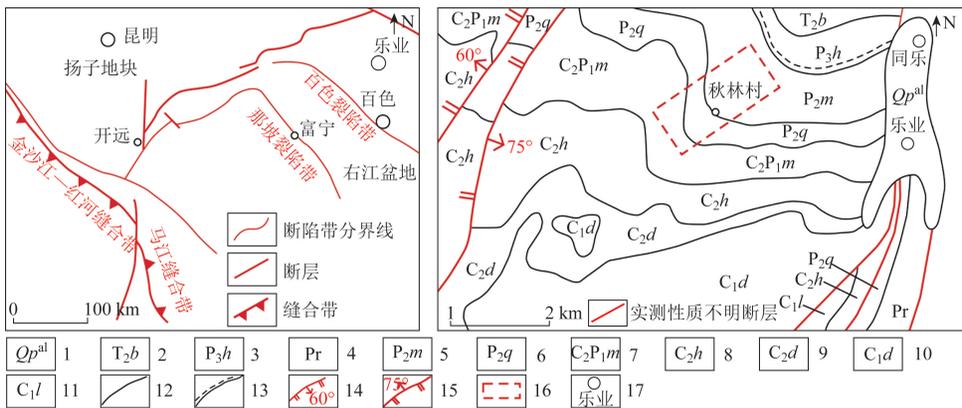
通信作者简介: 史文强(1986—), 男, 副研究员, 主要从事岩溶与洞穴地质遗迹资源调查、评价开发与保护研究。Email: swenqiang@mail.cgs.gov.cn。

避免洞穴景观资源遭受破坏。目前,关于旅游洞穴空气环境的研究主要集中在洞穴气候环境^[12-14]、旅游活动和空气自净能力^[15-17]等方面,对洞穴空气环境开发利用适宜性的研究相对较少。因此,本文以广西乐业县大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统为例,对拟开发利用洞段开展空气环境开发利用适宜性评价研究,以期为旅游洞穴的保护和利用提供科学参考。

1 地质概况

乐业地区位于右江盆地西北侧,处于金沙江—红河—马江缝合带与扬子地块之间的大陆边缘^[18]

(图 1)。早—中三叠世末期前陆盆地阶段,受印支地壳运动的影响,该区三叠纪和晚古生代地层发生强烈褶皱、断裂,形成了对乐业县地貌形态影响深远的 S 型旋扭地质构造^[19]。大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统发育于 S 型岩溶地块中部东南侧,是百朗地下河系统的重要组成部分。该洞穴系统发育于上石炭统马平组 (C_2P_1m)、中二叠统栖霞组 (P_2q) 和茅口组 (P_2m) 中(图 1),主要岩性为中—厚状灰岩、生物砂屑灰岩、白云岩、白云质灰岩等,总厚度超过 900 m,巨厚的碳酸盐岩地层为天坑、溶洞大厅的发育提供了优越的物质基础。同时,该洞穴系统受长槽断层和蒋家断层控制,溶洞主要沿 NW 向和 NE 向构造发育,其中 NE—SW 向最为发育。



1. 更新统冲积层; 2. 中三叠统百逢组; 3. 上二叠统合山组; 4. 二叠系通槽礁灰岩; 5. 中二叠统茅口组; 6. 中二叠统栖霞组; 7. 上石炭统马平组; 8. 上石炭统黄龙组; 9. 上石炭统大埔组; 10. 下石炭统都安组; 11. 下石炭统隆安组; 12. 实测地质界线; 13. 角度不整合界线; 14. 正断层; 15. 逆断层; 16. 研究区范围; 17. 地名

图 1 乐业地区区域地质简图(左)^[20]与大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴区域地质简图(右)^[21]

Fig. 1 Regional geological sketch of Leye area (left)^[20] and regional geological sketch of Dacao sinkhole - Red Rose hall cave (right)^[21]

2 洞穴空气环境

大曹天坑—红玫瑰大厅洞穴系统以垂向岩溶为主,总长度为 9 461 m,分上、中、下 3 层,上层为大曹天坑底部的化石洞,长 213 m,通过末端边壁的一个口径 1.5 m、深 30 m 的竖井与中层洞相连,中层洞是该溶洞系统的主干洞道,下层洞为现代地下河廊道(图 2,图 3)。拟开发利用洞段长度为 1 491 m,主要位于中层洞道,中部多发育宽大洞厅(图 3)。以红玫瑰大厅为代表,该洞厅因中段与下层洞贯通而形成,其平面形状为梯形,呈 NE—SW 向展布,长 300 m,宽超过 200 m,高 200 m,容积为 $5.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。拟开发利用洞段目前正在进行前期

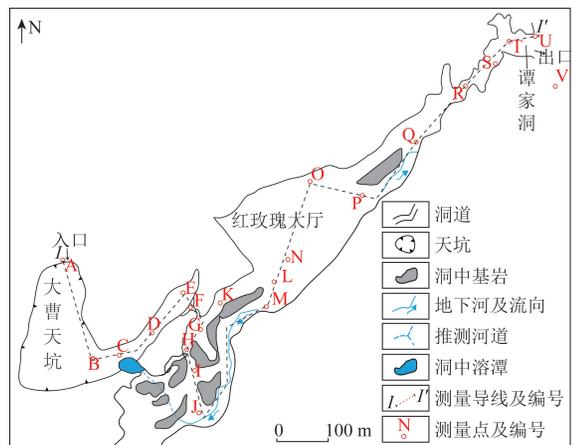


图 2 大曹天坑—红玫瑰大厅洞道平面示意图及监测点位置

Fig. 2 Planar view diagram and layout of the monitoring sites in Dacao sinkhole - Red Rose hall cave

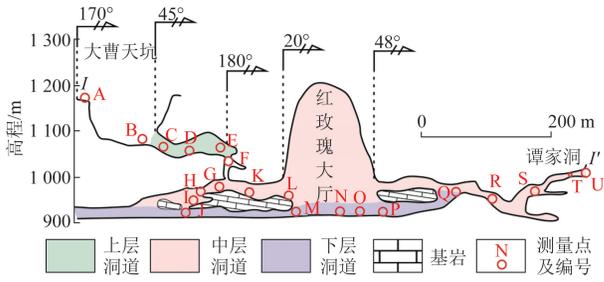


图3 大曹天坑—红玫瑰大厅洞道 II' 测量导线剖面示意图及监测点位置

Fig.2 II' measurement conductor profile diagram and layout of the monitoring sites in Dacao skinhole - Red Rose hall cave

筹备和可行性论证等工作,尚未对游客开放,进出洞口均为开放型,除了大曹天坑、红玫瑰大厅和重见天日大厅,其他洞道洞腔相对较小,且天坑底部连接中层洞的竖井也相对狭窄,阻挡部分了来自天坑底部的对流空气,因此洞穴内外空气交换频率相对较小,主要通过出入口、围岩裂隙和地下河等与

洞外进行空气交换(图3)。

为研究洞段空气环境开发利用适宜性,2022年11月工作组对洞内空气环境评价系列指标,包括温度、相对湿度、CO₂浓度、空气正负离子、气压和风速等进行了测量,进而计算空气质量评价指数(comprehensive index, CI)。测试位置顺序为大曹天坑→红玫瑰大厅→谭家洞出口,共设置了22处观测点(图2和图3),采用人工巡回方法,测量结果见表1。CO₂浓度、压强、温度和湿度的测量采用的是德国 testo453-3 多功能测量仪,测量范围范围分别是(0~10 000) × 10⁻⁶、0~2 000 hPa、0~50 °C 和 0%~100% RH,误差分别为 1 × 10⁻⁶、0.1 hPa、± Pa hP 和 0.1% RH。空气正、负离子浓度测量采用的是 HED-FLZ-1 型便携式负(氧)离子检测仪,量程范围为 0~5 万档,精度和分辨率分别为 ± 5% 和 1 个/cm³。洞内风速和风向采用美国 Kestrel-5500 便捷式风速测定仪测定,测量范围 0.6~40 m/s,分辨率 0.1 m/s。

表1 洞穴空气环境参数测量记录表

Tab.1 Record form of cave air environmental parameters measurement

测点	温度/°C	相对湿度/%	CO ₂ 浓度/ 10 ⁻⁶	气压/ hPa	风速/ (m · s ⁻¹)	正离子浓度/ (个 · cm ⁻³)	负离子浓度/ (个 · cm ⁻³)	单极系数(q)	空气质量评价 指数(CI)
A	23.5	44.4	343	886.2	0.6	1 900	1 400	1.4	1.03
B	17.7	68.6	347	899.8	0.4	2 200	1 300	1.7	0.77
C	15.0	83.6	334	902.5	0.0	2 800	1 500	1.9	0.80
D	14.8	84.7	373	899.7	0.5	1 700	2 000	0.9	2.35
E	15.5	83.4	362	901.2	0.0	3 300	2 700	1.2	2.21
F	16.5	99.8	586	906.6	0.5	2 700	3 600	0.8	4.80
G	17.5	99.9	695	909.1	0.0	6 500	6 300	1.0	6.11
H	18.1	99.9	770	910.3	1.1	5 500	8 600	0.6	13.45
I	18.6	99.9	802	909.4	0.2	7 000	14 000	0.5	28.00
J	19.2	99.9	786	912.1	0.2	6 300	9 600	0.7	14.63
K	18.1	97.5	758	909.4	0.0	1 600	2 300	0.7	3.31
L	18.0	98.5	749	910.0	0.0	3 400	2 900	1.2	2.47
M	17.5	99.9	760	910.9	0.0	4 300	4 800	0.9	5.36
N	17.8	99.1	756	910.7	0.0	4 000	5 600	0.7	7.84
O	17.5	99.8	738	909.7	0.0	5 300	6 900	0.8	8.98
P	18.2	99.7	856	909.8	0.0	5 400	6 500	0.8	7.82
Q	17.6	99.9	827	908.9	0.0	6 100	6 900	0.9	7.80
R	17.3	94.3	687	905.3	0.0	4 700	4 800	1.0	4.90
S	16.7	96.6	660	905.3	0.0	2 200	6 800	0.3	21.02
T	16.3	94.8	582	901.5	0.0	4 100	5 900	0.7	8.49
U	16.5	94.8	612	901.1	0.0	5 600	4 400	1.3	3.46
V	19.6	50.6	385	899.9	1.0	1 600	1 300	1.2	1.06

注:测量日期为2022年11月。

2.1 温度

拟开发利用洞段内的温度变化范围为 14.8~23.5 °C(表1,图4)。由于与外界气流交换较为频

繁,本次测试温度高值出现在大曹天坑顶部入口(A观测点)和谭家洞出口(V监测点),分别为 23.5 °C 和 19.6 °C。除去洞穴入口数值,求得洞内当日平均

温度为 17.2 ℃,与乐业县年平均温度(16.9 ℃)基本一致。由图 4 可知,由大曹天坑→红玫瑰大厅→谭家洞出口,越往洞内深处至红玫瑰大厅附近(L-Q 观测点),温度越低且趋于稳定,因此整条温度变化曲线呈现中间偏高、两端偏低的形状。由于洞穴中部局部地段有气流交换(风速为 0.2~1.1 m/s),导致该段温度偏高,但整体来看,拟开发利用洞段较长,多数洞段相对狭窄,因此洞内外空气交换频率相对较小,温度整体变化不大,幅度变化在 5 ℃之内。

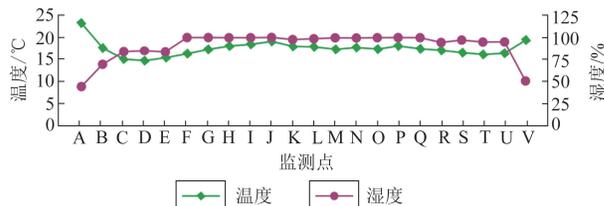


图 4 监测期间洞内温度和相对湿度随监测点的变化

Fig. 4 Temperature and relative humidity change for different monitoring points during the monitoring period

2.2 相对湿度

除去大曹天坑底部化石洞入口和谭家洞入口的数值,拟开发利用洞段洞内相对湿度平均值为 94.74%(表 1)。越往洞中至红玫瑰大厅附近(L-Q 观测点),洞内相对湿度随温度的降低而增高,相对湿度数值变化较小,变化曲线趋于一致,局部洞段相对湿度接近 100%(图 4),表明洞内仍有较多的水汽来源,目前少量的人类活动对洞内相对湿度影响较小。

2.3 CO₂ 浓度、气压和风速

2.3.1 CO₂ 浓度

考虑到空气中 CO₂ 浓度过高会使前来观赏的游客及工作人员产生不适感,严重时会引起呼吸困难,甚至导致死亡。为了解拟开发洞段洞内空气中 CO₂ 浓度及其空间分布特征,进而对其空气质量作初步评价,本研究对其 CO₂ 浓度进行了测定,结果如表 1 和图 5 所示。洞内空气中 CO₂ 含量变化幅度为 $334 \times 10^{-6} \sim 856 \times 10^{-6}$,变化较大,平均浓度为 625.82×10^{-6} ,属一级卫生标准($<1\,000 \times 10^{-6}$)^[21]。

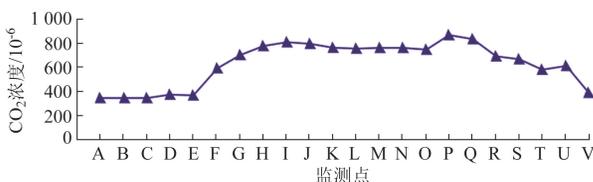


图 5 监测期间洞内 CO₂ 浓度随监测点的变化

Fig. 5 Change of CO₂ concentration for different monitoring points during the monitoring period

2.3.2 气压

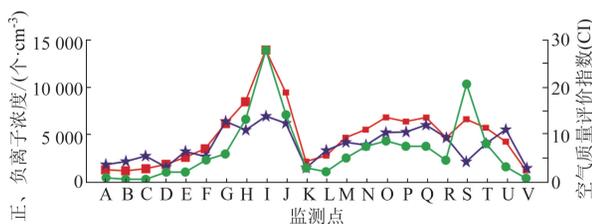
气压的变化可以影响洞中的空气流动和氧气分压,从而影响洞中的氧气含量^[22-23]。洞中氧气含量的高低会影响将来开展洞穴旅游活动时游客体内氧气的供应^[24],从而影响人的心理变化^[25]。拟开发利用洞段气压为 886.2~912.1 hPa,平均气压为 906.66 hPa,略高于洞外气压(886.2~899.9 hPa)(表 1)。

2.3.3 风速

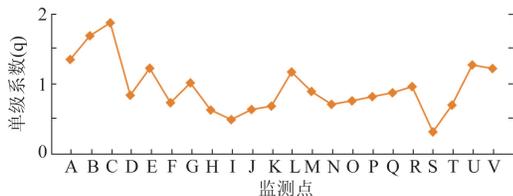
观测数据结果表明,除了洞穴入口和洞中与地下河联通部位,多数洞段洞内风速基本为 0(表 1)。说明开发利用洞穴洞道相对封闭,洞穴内空气运动受洞穴内外及洞内各部位温度和气压差异及地下河流动作用等影响,进而产生微弱风速($<1.0 \text{ m/s}$),但气流缓慢,总体属静态洞穴。

2.4 空气正、负离子浓度

拟开发利用洞段内洞内和洞外空气负离子平均浓度分别为 $5\,370 \text{ 个/cm}^3$ 和 $1\,350 \text{ 个/cm}^3$,越往洞中,空气负离子浓度数值越大,其数值曲线总体呈现中间高、两边低的变化特点(表 1 和图 6)。其中,最高值点位于洞中 H-J 号观测点,为 $8\,600 \sim 14\,000 \text{ 个/cm}^3$,处于空气负离子高浓度区,表明洞内仍有较多的空气负离子产生源。



(a) 空气正、负离子浓度和空气质量评价指数随监测点变化



(b) 单级系数随监测点变化



图 6 监测期间空气正、负离子浓度和空气质量评价指数及单级系数随监测点的变化

Fig. 6 Change of positive, negative air ion concentration, CI and single stage coefficient for different monitoring points during the monitoring period

洞内空气正离子平均浓度为 4 235 个/cm³, 洞外空气正离子平均浓度为 1 600 个/cm³, 空气正离子浓度越往洞中数值越大, 其浓度变化曲线与空气负离子相似, 总体呈现洞中高、两边入口低的变化特点(表 1, 图 6)。其中, 高值点位于洞中 G-J 号观测点, 为 6 500~7 000 个/cm³。

2.5 单极系数

单极系数, 即空气正离子与负离子浓度比值, 单极系数等于 1 或小于 1, 才能给人以舒适感。拟开发利用洞段洞内单极系数平均值为 0.90, 小于 1 (表 1), 洞穴入口单极系数平均值为 1.3, 由于洞口人类活动相对洞内较为频繁, 当日测量空气可能受到轻微影响, 产生微量波动。但总体来看, 拟开发利用洞段洞内、外的空气污染相对较少, 质量优良, 有益于人体健康。

2.6 空气质量评价指数

空气质量评价指数评价计算公式为^[26]

$$P_{CI} = (n^- / 1\ 000) \times (1/q) \quad (1)$$

式中: P_{CI} 为空气质量评价指数; n^- 为空气负离子浓度, 个/cm³; q 为单极系数, 指空气中正离子与负离子的比值, 即 $q = n^+ / n^-$, n^+ 为空气正离子浓度, 个/cm³, n^- 为空气负离子浓度, 个/cm³, 1 000 个/cm³ 是满足人体生物学效应最低需求的空气负离子浓度。

按空气质量评价指数将空气质量分为 5 个等级^[26](表 2)。

表 2 空气质量等级分级标准

Tab. 2 Air quality grading standards

P_{CI}	>1.0	[1.0,0.7)	[0.7,0.5)	[0.5,0.3)	≤0.30
等级	A 级	B 级	C 级	D 级	E 级
清洁度	最清洁	一般清洁	中等清洁	容许	临界值

拟开发利用洞段空气质量评价指数平均值为 7.73, 变化幅度为 0.77~28.00, 多处数值在 10 以上, 最高值可达 28, 洞外空气质量评价指数平均值为 1.04, 大于空气质量等级分级标准中“最清洁”级别的临界指标(1.0), 空气质量评价指数越往洞中数值越大, 其浓度变化曲线与正、负离子浓度变化曲线变化趋于一致, 呈同步、相似性变化(图 4), 因此, 其空气属于最清洁级别。

3 讨论

洞穴空气环境中的 CO₂ 浓度是洞穴环境质量

的一个重要影响因素, 其主要来源于 3 个方面: 游客的呼吸作用产生; 地下河和洞内滴水的脱气作用产生; 洞穴上覆土壤中 CO₂ 与洞穴中 CO₂ 的压差产生的 CO₂ 转移, 通过裂隙和管道扩散传输进入洞穴^[11,27]。尚未开放的洞穴空气中 CO₂ 主要来源于后两项, 同时, 影响洞穴中 CO₂ 的因素除了以上主要来源外, 还有洞道结构、洞穴通风效应和洞道类型(水洞或旱洞)等^[14]。由于拟开发利用洞段尚未开放, 排除游客呼吸作用的影响, 且主体为廊道—厅堂状洞穴, 洞中除了红玫瑰大厅和重见天日大厅, 其他洞道洞腔相对较小, 洞道较长, 两端洞穴入口较为宽大, 且有地下河流经洞穴, 空气流动缓慢, 因此洞中深处、低洼处及通风不良部位 CO₂ 浓度相对较高, 而洞穴入口两端一定距离内, 因与外围空气的交换较为频繁, 以及地下河水流的携带作用使得该洞段 CO₂ 浓度较低, 与外界相差不大。同时, 由于洞穴的呼吸效应, 洞穴深处红玫瑰大厅附近围岩裂隙发育, 外界气流以裂隙为通道, 缓慢扩散到洞穴内部, 在此渗透过程中, 吸收了洞顶土壤层中部分自由态和吸附态的 CO₂, 使得洞内 CO₂ 浓度略微升高^[22]。因此, 本次测量洞段所获得的 CO₂ 浓度变化曲线也明显呈现中间高和两边低的变化趋势(图 3)。即使局部洞段 CO₂ 浓度略有上升和降低(334 × 10⁻⁶ ~ 856 × 10⁻⁶), 但仍属一级卫生标准(< 1 000 × 10⁻⁶)。

岩溶洞穴生态环境容量是指在不至于对洞穴生态环境产生较大污染和破坏, 并满足环境质量标准要求的一定时空条件下, 洞穴所能接待的游客数量, 应根据洞穴 CO₂ 的允许浓度来计算^[28-29]。本次观测取得拟开发利用洞段 CO₂ 浓度上限值为 856 × 10⁻⁶。考虑洞穴空气环境改变后的环境效应以及未来洞穴开放后游客的观赏体验, 以 1 000 × 10⁻⁶ 作为生态环境变化的阈值。游客每小时呼出的 CO₂ 为 25 L^[30], 如果未来计划每天开放 8 h, 人均 CO₂ 呼出量为 200 L。拟开发利用洞段容积约为 5 250 000 m³, 其生态环境容量计算公式^[31]为

$$E_c = \frac{(c_1 - c_0)V}{P_{CO_2} \times 100} \quad (2)$$

式中: E_c 为拟开发利用洞段生态旅游日容量, 人/日; c_1 为既定的 CO₂ 目标浓度(或允许浓度), 10⁻⁶; c_0 为实测洞穴空气中 CO₂ 的最大浓度, 10⁻⁶; P_{CO_2} 为洞穴开放时段内人均 CO₂ 呼出量, L; V 为溶洞的容积, m³。

拟开发利用洞段洞穴系统空间体量巨大,以 CO_2 浓度为指标评定的生态环境容量较大($E_c = 37\ 800$ 人/日)。鉴于该洞段拥有一定的自净能力,故以上结果只是一种理想状态下的最小值。因此,拟开发利用洞段未来对外开放以后,只要生态环境容量控制得当,就能保持相对稳定的 CO_2 浓度空气环境质量。

拟开发利用洞段较为稳定且比洞外部环境略微偏高的气压和低风速,对保持洞穴等温、等湿且相对较稳定的空气环境质量有着积极作用^[32]。以洞内气压为例,作为洞穴环境的一个重要指标,对旅游洞穴有效开发、管理以及游客身体健康(舒适感)有重要影响^[24-25]。拟开发利用洞段洞内及洞外温度和气压存在小的压差和温差,从而吸引气流通过围岩裂隙、洞道和地下河等从高压与高温处缓慢向低压与低温处流动,形成洞穴内外缓慢的空气流动,形成洞穴呼吸效应^[22-23]。这种空气流动可以将外界的新鲜空气带入洞穴内部,并在洞内流通,从而增加洞穴内部的氧气含量。同时,周围良好的植被生态环境能给洞中提供源源不断的水汽来源,使得洞内四季能保持较高的相对湿度,不但有利于钟乳石的保护和生长^[8],而且还能营造良好的洞穴生态环境和游览环境^[14]。而洞外较高的负离子浓度可能与较高的植被覆盖率有关,洞内由于洞顶和洞壁常年保持一定的滴水 and 流量,高处滴水滴水分子裂解产生较高的负离子浓度,且底部局部洞段联通地下河,洞道较为封闭,洞内空气交换缓慢等条件是导致负离子浓度较高的原因。根据空气负离子对人体作用的研究表明,当空气负离子浓度达到 $1\ 000$ 个/ cm^3 以上时,有益于人体健康^[33],而洞内所有观测点空气负离子浓度均达到 $1\ 000$ 个/ cm^3 以上。综上所述,此次调查洞穴中绝大部分洞段空气环境质量优良,适合旅游开发。

4 结论

(1)拟开发利用洞段洞内平均温度为 $17.2\ ^\circ\text{C}$,与乐业县年平均温度($16.9\ ^\circ\text{C}$)基本一致,相对湿度平均值为 94.74% , CO_2 平均浓度为 625.82×10^{-6} ,属一级卫生标准,洞内气压(流)环境良好,空气流动缓慢。

(2)洞内和洞外空气负离子平均浓度分别为

$5\ 370$ 个/ cm^3 和 $1\ 350$ 个/ cm^3 ,最大值为 $14\ 000$ 个/ cm^3 。

(3)洞内单极系数(q)平均值较低,为 0.90 ,洞内空气质量评价指数(CI)平均值为 7.73 ,多处值在 10 以上,最高值可达 28 ,洞外平均值为 1.04 ,远大于空气质量等级分级标准中“最清洁”级别的临界指标(1.0),适于开展洞穴游览活动。

(4)岩溶洞穴景观资源空气环境开发利用适宜性评价是比较特殊且独立的一类洞穴自然资源综合评价体系,在岩溶洞穴景观资源的分类研究中,涉及多学科、多专业,目前国内尚未出台相关评价标准。本文仅探索性地提出了岩溶洞穴资源空气环境开发利用适宜性评价的初步方案,仍需在后续工作与研究中不断调整与完善。

致谢: 本文是项目组成员共同努力取得的集体成果,对项目所有参与者表示感谢!黄保健和韦跃龙正高级工程师给予关键技术指导;邓亚东、农丹、蒋春林等专家在目标优选与野外工作中给予了大力支持;匿名审稿人的建设性意见对完善本文很有价值。在此,一并谨致谢忱。

参考文献(References):

- [1] 杨晓霞,蒙歆媛,向旭.我国洞穴旅游从业者安全认知研究[J].中国岩溶,2019,38(1):139-147.
Yang X X, Meng X Y, Xiang X. Study on the safety cognition of cave tourism practitioners in China[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(1):139-147.
- [2] 杨明德.岩溶洞穴旅游资源特性与开发保护[J].中国岩溶,1998,17(3):233-238.
Yang M D. The characteristics and protection of karst cave tourism resources[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(3):233-238.
- [3] 湖南华旅国盛规划设计院有限责任公司.别有“洞”天——从探洞游乐大爆看洞穴旅游提质升级[EB/OL].北京:搜狐网,(2022-09-23).https://www.sohu.com/a/587284744_121135419.
Changsha Guosheng Tourism Planning Design Co., Ltd. Don't have a "cave" sky - looking at the upgrading of cave tourism from the explosion of cave exploration and amusement[EB/OL]. Beijing: Sohu.com, (2022-09-23). https://www.sohu.com/a/587284744_121135419.
- [4] 袁道光,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆出版社,1988.
Yuan D G, Cai G H. Karst Environmental Science [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1988.
- [5] 朱德浩.岩溶洞穴成因研究和实验研究综述[J].中国岩溶,1993,12(3):285-291.

- Zhu D H. Summary of research and experimental research on the genesis of karst caves [J]. *Carsologica Sinica*, 1993, 12 (3): 285 - 291.
- [6] 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.
- Zhang M L, Zhu X Y, Wu X, et al. Impact of tourism activities on the cave environment and landscape of calcium carbonate (CaCO₃) deposits at Shuijingong cave, Bama county [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36 (1): 119 - 130.
- [7] Bunting B. The physical impacts of recreational users in caves: Methods currently in use for assessing recreational impacts in two New Zealand caves. *Cave and Karst Management in Australasia 12* [C]//Proceedings of the 12th Australasian Conference on Cave and Karst Management. Carlton South, Victoria: Waitomo Caves, New Zealand, Australasian Cave and Karst Management Association, 1998, 29 (58): 47 - 54.
- [8] 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.
- [9] Gillieson D. *Caves: Processes, Development, and Management* [M]. Oxford: Blackwell, 1996.
- [10] 邓亚东, 陈伟海, 张远海, 等. 岩溶洞穴旅游开发对生态环境影响分析——以巴马水晶宫为例[J]. *桂林理工大学学报*, 2011, 31 (3): 412 - 417.
- Deng Y D, Chen W H, Zhang Y H, et al. Ecological environment influenced by karst show cave exploitation: A case study of Shuijingong cave in Bama [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31 (3): 412 - 417.
- [11] 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.
- Pan Y X, Zhou Z F, Li P, et al. Characteristics of spatial temporal variation of air environment in tourism cave and its cause analysis: A case study of Dafeng cave in Suiyang county, Guizhou Province [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35 (4): 425 - 431.
- [12] 黄倩. 旅游活动对喀斯特洞穴环境的影响及其保护研究——以丰都县雪玉洞为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- Huang Q. A Study on the Environmental Impact And the Protections of Karst Caves of Tourism Activities: Taking Xueyu Cave of Fengdu As a Case Study [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [13] Lang M, Faimon J, Pracný P, et al. A show cave management: Anthropogenic CO₂ in atmosphere of Vypustek Cave (Moravian Karst, Czech Republic) [J]. *Journal for Nature Conservation*, 2017, 35: 40 - 52.
- [14] 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.
- Zhu X Y, Zhang M L. Study on cave environmental factors based on karst cave tourism activities [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39 (3): 426 - 431.
- [15] 徐尚全, 殷建军, 杨平恒, 等. 旅游活动对洞穴环境的影响及洞穴的自净能力研究——以重庆雪玉洞为例[J]. *热带地理*, 2012, 32 (3): 286 - 292.
- Xu S Q, Yin J J, Yang P H, et al. Impacts of tourism activities on cave environments and self - purification ability of the cave: A case study of Xueyu cave, Chongqing [J]. *Tropical Geography*, 2012, 32 (3): 286 - 292.
- [16] 范宝祥, 周忠发, 朱粲粲, 等. 短时间尺度下旅游洞穴空气环境自净能力研究——以绥阳大风洞为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39 (2): 275 - 285.
- Fan B X, Zhou Z F, Zhu C C, et al. Self - purification ability of tourist caves on a short - term scale: An example of Dafeng cave in Suiyang county [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39 (2): 275 - 285.
- [17] 潘天望, 史文强, 梁建平, 等. 疫情背景下桂林市芦笛岩空气环境影响因素研究[J]. *中国岩溶*, 2021, 40 (6): 1006 - 1013.
- Pan T W, Shi W Q, Liang J P, et al. Influencing factors of the air environment in the Reed Flute Cave under the background of COVID - 19 in Guilin [J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40 (6): 1006 - 1013.
- [18] 杜远生, 黄宏伟, 黄志强, 等. 右江盆地晚古生代—三叠纪盆地转换及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 2009, 28 (6): 10 - 15.
- Du Y S, Huang H W, Huang Z Q, et al. Basin translation from late Palaeozoic to Triassic of Youjiang Basin and its tectonic significance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28 (6): 10 - 15.
- [19] 韦跃龙, 陈伟海, 黄保健. 广西乐业国家地质公园地质遗迹成景机制及模式[J]. *地理学报*, 2010, 65 (5): 580 - 594.
- Wei Y L, Chen W H, Huang B J. Geological relics formation mechanism and model of the Leye National Geopark, Guangxi [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65 (5): 580 - 594.
- [20] 广西水文地质队. 乐业幅 1:20 万区域水文地质普查报告[R]. 1983.
- Guangxi Hydrogeological Team. Leye Zhang 1: 200 000 Regional Hydrogeological Survey Report [R]. 1983.
- [21] 施小明, 徐东群, 李焱焱, 等. GB/T 18883—2022 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- Shi X M, Xu D Q, Li T T, et al. GB/T 18883—2022 Standards for Indoor Air Quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [22] 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃, 等. 洞穴呼吸及其影响因素[J]. *地质科技情报*, 2017, 36 (4): 82 - 94.
- Wei Y L, Chen W H, Luo Q K, et al. Cave respiration and its impacting factors [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36 (4): 82 - 94.
- [23] 刘子琦, 李开萍. 贵州石漠化地区降雨期间洞穴 CO₂ 变化特征与其影响因素——以石将军洞为例[J]. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 36 (4): 13 - 17.
- Liu Z Q, Li K P. Variation and its effect factors of cave air CO₂ during rainfall in rocky desertification area in Guizhou: A case study of Shijianguan cave [J]. *Journal of Guizhou Normal Univer-*

- sity (Natural Sciences), 2018, 36(4): 13 - 17.
- [24] 刘普和. 高气压与低气压对人体的影响[J]. 中级医刊, 1954(12): 45 - 47.
Liu P H. The impact of high and low air pressure on the human body[J]. Elementary Medicine, 1954(12): 45 - 47.
- [25] 郭铁明, 胡松涛, 刘国丹. 低气压不同声环境下人体心率及声感觉评价的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 168 - 171.
Guo T M, Hu S T, Liu G D. Experimental study on body heart rate and acoustic sensory evaluation under low - pressure of different acoustic environment [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1): 168 - 171.
- [26] 孙景群. 大气电学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
Sun J Q. Fundamentals of Atmospheric Electricity [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987.
- [27] Pu J B, Wang A Y, Yin J J, et al. PCO_2 variations of cave air and cave water in a subtropical cave, SW China [J]. Carbonates and Evaporites, 2018, 33(3): 477 - 487.
- [28] 谢运球, 郑治芾, 杜恩荣. 北京西山地区岩溶旅游资源、洞穴环境容量、环境问题及其对策[J]. 中国岩溶, 1995, 14(1): 89 - 97.
Xie Y Q, Zheng Z X, Du E R. Karst tourism resources, environmental capacity of caves, environmental problems and some countermeasures in the Western Hills, Beijing City [J]. Carsologica Sinica, 1995, 14(1): 89 - 97.
- [29] 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.
Xu Y, Zhou Z F, Fan B X, et al. Analysis of ecological environment capacity and influencing factors of karst cave: Taking Dafeng - Xiangshui caves, Suiyang as an example [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(2): 186 - 195.
- [30] 向旭, 杨晓霞, 施俊庄. 洞穴旅游容量测算方法探讨[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 341 - 348.
Xiang X, Yang X X, Shi J Z. Research on calculating methods for tourism carrying capacity of caves [J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(3): 341 - 348.
- [31] 王剑, 刘洪玉. 喀斯特洞穴景区旅游环境容量研究——以织金洞为例[J]. 毕节学院学报, 2007, 25(3): 52 - 56.
Wang J, Liu H Y. Tourist carrying capacity in karstic caves: A case study of the scenic area of Zhijin Cave, Guizhou, China [J]. Journal of Bijie University, 2007, 25(3): 52 - 56.
- [32] 易连兴, 彭卓玲, 唐征贵. 旅游洞穴内气压变化特征研究——以湖南郴州万华岩为例[C]//第二十二届全国洞穴学术会议论文集. 汉中: 中国地质学会, 2017: 157 - 162.
Yi L X, Peng Z L, Tang Z G. Air - pressure change characteristics study for tourist cave - case study of Wanhuayan, Chenzhou, Hunan [C]//Proceedings of the 22nd National Cave Academic Conference. Hanzhong: Geological Society of China, 2017: 157 - 162.
- [33] 章志攀, 俞益武, 孟明浩, 等. 旅游环境中空气负离子的研究进展[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 103 - 108.
Zhang Z P, Yu Y W, Meng M H, et al. Progresses of aeroanion in tourism environments [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2006, 23(1): 103 - 108.

Suitability study of cave air environment development and utilization: A case study of Dacao sinkhole - Red Rose hall cave system

PAN Tianwang^{1,2}, SHI Wenqiang^{1,2}, LI Chengzhan^{1,2}, CHEN Weihai^{1,2}, TANG Liangliang^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO/National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin Guangxi 541004, China; 2. National Observation and Research Station of Karst Ecosystem in Pingguo of Guangxi, Pingguo Guangxi 531406, China)

Abstract: The study of the cave air environment is the basis for the cave environment protection, and the development and utilization suitability evaluation of the air environment should be carried out before the cave development. It should be evaluated whether it is suitable for carrying out cave sightseeing activities without damaging the cave landscape resources. In this paper, the authors took Dacao sinkhole - Red Rose hall cave system in Leye county as an example to measure the temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration, positive and negative air ions, atmospheric pressure, wind speed and other factors. The results show that the average temperature of the proposed development and utilization tunnel section is 17.2 °C, and the average relative humidity is 94.74%, with the average concentration of CO_2 being 625.82×10^{-6} , belonging to the first level health standard. Besides, the atmospheric pressure (flow) environment inside the tunnel is good, and the wind speed is slow. The average concentration of negative oxygen ions inside and outside the cave is $5\ 370/cm^3$ and $1\ 350/cm^3$, respectively, with the maximum value of $14\ 000/cm^3$. The average value of the air quality evaluation index (comprehen-

sive index, CI) inside the tunnel is 7.73, with the maximum value of 28, which is much higher than the critical indicator (1.0) of the “cleanest” level in the air quality grading standard. This cave section is concluded to be suitable for conducting cave tourism activities based on the above conclusions. The theory and method system for the suitability evaluation of the air environment development and utilization of karst cave landscape resources was proposed in this case study, which could provide scientific references for the protection and utilization of tourist caves.

Keywords: cave air environment; environmental protection; suitability evaluation; cave development; Dacao sinkhole – Red Rose hall cave system

(责任编辑: 刘丹)