

张鹏, 郭芳, 姜光辉, 等. 甌皮岩洞穴空气环境因子变化及其对遗址文化层的影响[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1007-1019.

DOI: 10.11932/karst20240502

甌皮岩洞穴空气环境因子变化及其对遗址文化层的影响

张鹏^{1,2}, 郭芳², 姜光辉³, 刘凡², 荆宝坤²

(1. 湖南省地质灾害调查监测所, 湖南长沙 410004; 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, 广西桂林 541004; 3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 甌皮岩古人类遗址洞穴内原始文化层的保存是遗址保护的重中之重。为了解洞内空气环境因子变化及其对遗址文化层风化的影响, 选择洞穴温度、湿度以及二氧化碳(CO₂)等环境因子进行为期一个水文年的观测。结果发现洞内空气环境因子随季节呈现三个阶段的变化: 冬季温湿度低, 变幅大, 洞底CO₂不累积; 夏季温湿度高, 变幅小且稳定, CO₂在洞底累积; 春秋为两者过渡阶段。空间上, 温湿度随着洞穴深度的变化而呈现渐进式变化。CO₂在洞穴东部有着高浓度带状的分布区域, 表明水洞是主洞CO₂的重要来源。综合分析认为通风效应、洞穴形态、旅游活动等是影响洞穴空气环境变化的重要因素。观察并结合X射线衍射分析发现, 近洞口、水洞连接处、洞穴中段、洞底以及探方上下部等各处文化层之间, 有明显的风化程度差异, 与空气环境因子的时空变化有关。如洞底探方上部文化层溶蚀空洞较多, 主要是由于水蒸气在上部堆积, 易凝结溶蚀并带走文化层易溶组分; 洞口文化层胶结物松散粉化, 与洞口空气温度变幅较大、干湿交替频繁有关。本研究掌握了具有浅平开阔洞口特征的甌皮岩遗址主要环境因子的时空变化, 探讨了可能的影响因素和对文化层风化的影响, 为洞穴遗址更好的保护和利用提供了科学依据。

关键词: 洞穴遗址; 空气环境; 文化层风化; CO₂; 甌皮岩

创新点: 揭示了甌皮岩遗址洞穴内空气环境动态变化特征以及对文化层影响, 是对甌皮岩遗址环境研究特别是洞穴内部微环境研究的重要补充与延伸。

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1007-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

甌皮岩遗址是我国华南地区重要的新石器时代洞穴遗址, 出土了人类完整的骨骼化石和古人类生活的食物和工具等文物, 是认识距今12 000至7 000年之间华南地区人类活动的重要证据。目前洞内仍

保存着拥有清晰地层序列的完整原始文化层堆积。自考古发掘以来, 对甌皮岩遗址保护的研究就从未停止, 突出表现在甌皮岩区域的水文地质条件调查研究^[1-2]、地下水污染特别是硫酸盐还原对洞穴遗址的潜在影响^[3]、硝酸盐污染的来源与转化^[4]等, 这些研究主要集中于水动力条件变化及地下水污染对遗

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB24010054); 国家自然科学基金(42272303; 42172287); 桂林岩溶地质广西野外科学观测研究站(科研能力建设)(桂科 23-026-274)

第一作者简介: 张鹏(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶洞穴环境和遗址保护的研究。E-mail: 1019948337@qq.com。

通信作者: 郭芳(1978—), 女, 博士, 研究员, 主要从事岩溶水文地质的研究。E-mail: gfkarst@126.com。

收稿日期: 2024-01-01

址的潜在影响, 而对遗址文化层所处洞穴微环境如空气环境的研究较少。

碳酸钙等次生化学沉积是遗址文化层中重要组分^[5]。当前对洞穴微环境的研究表明, 洞穴空气环境因子是影响洞穴次生沉积物沉积和溶蚀的重要因素^[6]。以温度、湿度、CO₂ 等洞穴主要空气环境因子为例, 高浓度的洞穴 CO₂ 通过抑制洞穴水分的脱气速率, 使得水分中 pCO₂ 增大, 从而造成洞穴碳酸盐沉积物的侵蚀; 洞穴温差引起的压力差变化会导致洞穴空气在空间上的二次分布, 进而影响洞穴碳酸盐沉积物的侵蚀速率^[7]; 相对湿度较高的区域, 容易达到露点产生凝结水, 吸收空气中 CO₂ 后, 对碳酸盐沉积物产生侵蚀, 且 CO₂ 浓度越高, 侵蚀越严重^[8]。国内外对洞穴空气环境的监测数据显示, 区域气候

条件、洞穴内部结构、洞穴通风效应、旅游活动等是影响洞穴温度、湿度以及 CO₂ 浓度变化的主要因素^[6,9-12], 在有地下河的洞穴中地下水流速、水温也显著影响洞穴空气^[7]。

为进一步了解甌皮岩洞穴空气环境变化规律及其对文化层风化的影响, 以期对遗址保护和利用提供更好的科学依据, 2020 年起对甌皮岩遗址主洞及洞外主要气象环境因子进行了连续监测。本文选择了监测结果中最为连续的一段(2020 年 11 月—3 月 & 2023 年 3 月—10 月) 组成一个完整水文年, 并在 2022 年 9 月至 2023 年 9 月期间进行了现场加密观测, 观察甌皮岩遗址洞穴空气环境因子的时空变化。此外通过堆积物的 X 射线衍射(XRD, X-ray diffraction), 结合文化层风化现状实地观察结果, 分析洞穴

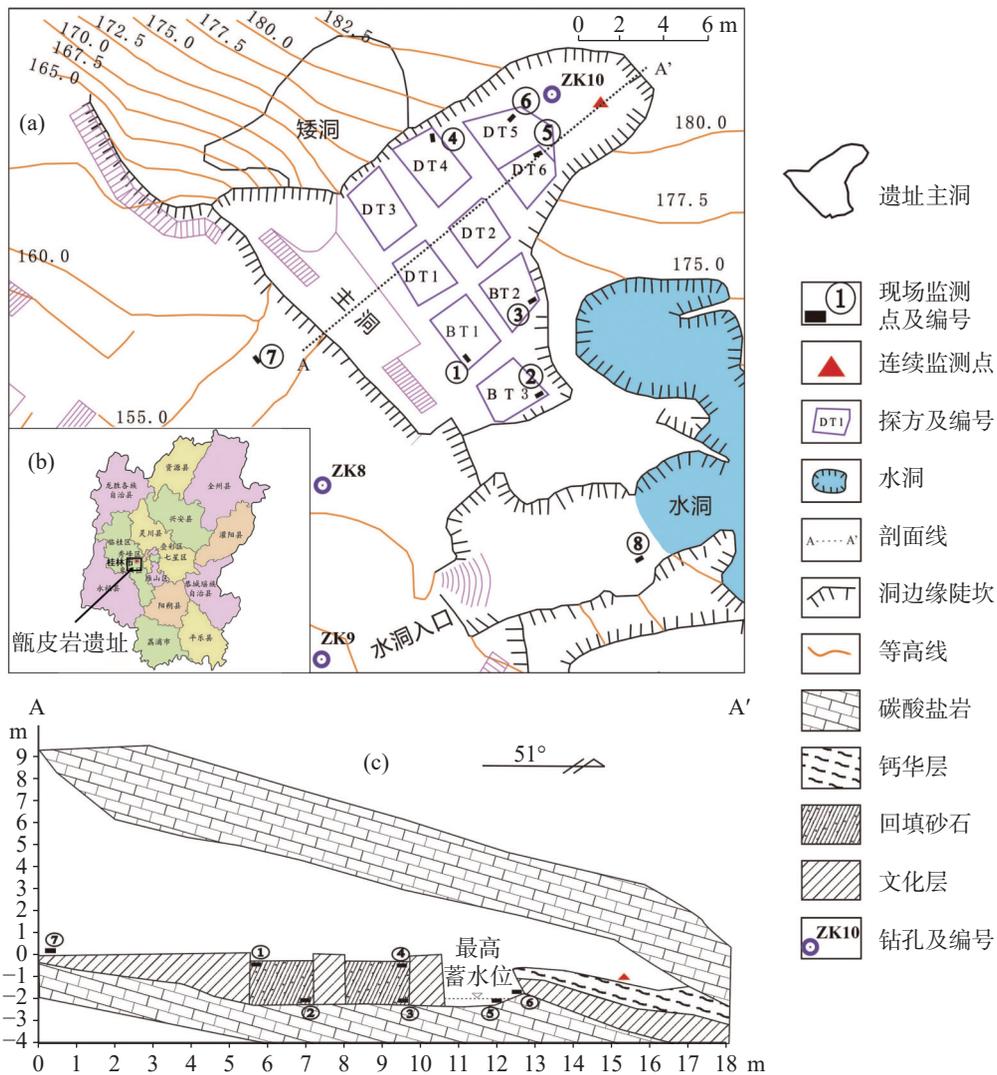


图 1 (a) 洞穴遗址平面图(改编自覃政教等, 2011), (b) 甌皮岩遗址的地理位置, (c) A—A' 洞穴遗址剖面图

Fig. 1 (a) Cave site plan (Adapted from Qin Zhengjiao et al., 2011), (b) Geographical location of Zengpiyan cave site, (c) Cross-section of the cave site A-A'

空气环境因子时空变化可能对文化层的影响。

1 研究区概况

桂林甌皮岩遗址位于广西壮族自治区桂林市一座叫独山的脚洞内(图 1(b)), 地理坐标东经 $110^{\circ}17'2.57''$ 、北纬 $25^{\circ}12'45.63''$, 洞口海拔 155 m。遗址发育于上泥盆统桂林组(D_{3g})碳酸盐岩中。气候上属亚热带季风气候, 多年平均气温 18~19 ℃, 一般最热月为 7 月, 最冷月为 1 月。降水充沛, 年平均降水量为 1 872.1 mm, 但降水的季节分配极不均匀, 春夏季(3 月—8 月)降水量占全年降水量的 80% 左右^[13]。

甌皮岩遗址洞穴(图 1(a))平面上分为主洞、水洞和矮洞。主洞洞穴开口朝向西南, 长轴(NE 向)约 20 m, 短轴(SE 向)为 12~16 m, 总面积约 220 m²。洞口段宽, 往山体内部逐渐变窄, 呈喇叭口状, 主洞纵剖面如图 1(c)所示。甌皮岩主洞口高达 6~9 m, 末端仅 0.5 m。顶板为岩层面, 自洞口向里呈 20°~25°向内倾斜逐渐变矮, 整个主洞的形态呈明显的顺层发

育。矮洞位于主洞西北, 面积较小。水洞位于主洞的东南方向, 洞口小, 进洞则为厅堂式大溶洞, 地下水常年可见, 降雨时有大量滴水。主洞、水洞和矮洞三者相互连通, 形成一个洞穴系统。文化堆积主要位于主洞, 也是本文的主要研究点。

2 研究方法

2.1 监测与取样分析

2.1.1 测点布置

在不影响遗址展示的前提下, 根据文化层出露位置、距洞口距离、挖掘探方形态和洞穴环境等设置了八个现场观测点和一个自动监测点(图 1(a)), 如表 1 测点简表所示。表格中列出了各测点不同的洞穴形态、沉积物及其环境。其中①、④由于探方回填, 测点较浅位于探方上部, ②、③、⑤和⑥位于较深的未回填探方下部, 探方深度可达 2~3 m。自动监测点位于洞底。各测点及探方空间位置关系如图 1 所示。

表 1 测点简介表

Table 1 Introduction of monitoring points

分类	编号	位置	探方深/m	洞口距离/m	洞穴形态、沉积物、环境
近洞口	①	BT1	0.2	4.5	高且宽阔的洞口, 回填砂土以及暴露在外松散的原始堆积, 长期有照明设施
水洞连接	②	BT3	1.5~1.8	6.8	主洞与水洞连接通道, 洞顶发育有较多鹅管, 雨季有长期滴水
洞穴中段	③	BT2	1.3~1.6	8.5	洞穴高度和宽度都有所收缩, 东侧洞壁发育有较多钟乳石, 雨季有滴水
	④	DT4	0.2	9.5	较宽阔洞穴中部, 近矮洞有小型凹槽, 回填砂土覆盖
洞底	⑤	DT6	2.68	13.1	近水洞深坑, 堆积潮湿黏土, 坑底雨季蓄水淹没文化层
	⑥	DT5	1.97~2.47	13.9	有较狭窄向内凹槽, 原始堆积, 雨季滴水汇聚成水流流经
其他	⑦	洞口外	\	\	洞口外开阔地, 自然堆积
	⑧	水洞	\	\	小洞口洞厅, 外部有钙华, 内部松软水池底泥, 洞内存在地下河, 降雨期有大量滴水
	▲	连续监测		15.9	狭窄洞底, 存在未挖掘的原始堆积, 雨季有滴水

备注: ①测试点为近洞口BT1探方测试点; ②测点为水洞连接BT3探方测点; ③、④测点为洞穴中段BT2、DT4探方测点; ⑤、⑥测点为洞底DT6、DT5探方测点; ⑦为洞口外测点; ⑧为水洞测点。

Note: ① measuring point of BT1 near the entrance of the cave; ② measuring point that connects water cave with measuring point of BT3; ③ and ④ measuring points of BT2 and DT4 in the middle of the cave; ⑤ and ⑥ measuring points of DT6 and DT5 at the cave floor; ⑦ measuring point outside the cave; ⑧ measuring point of the water cave.

2.1.2 监测方法

使用美国 Kestrel NK5500 风速仪、VAISALA MI70 主机连接 VAISALA GMP252 CO₂ 探头对各个测点环境的 T、RH、CO₂ 等环境因子进行现场观测(每月 1~2 次), 精度分别为 0.1 ℃、0.1%、 1×10^{-6} , CO₂ 量程为 $0 \sim 10\,000 \times 10^{-6}$ 。观测时间统一为当天的

上午 10:00。测量时人距离仪器大于 2.5 m 以确保测量精度。同期曾使用小型气泵将大气空气抽至 1 L 便携式铝箔气体采样袋中, 利用实验室内 Picarro G2131-I CO₂ 同位素分析仪测定 CO₂ 的浓度, 以检验探头测试结果的准确性。结果显示室内测试结果偏高($>500 \times 10^{-6}$), 对比之下 VASALA 探头测试结果更接近实际大气中 CO₂ 浓度($390 \times 10^{-6} \sim 420 \times 10^{-6}$), 后

续空气 CO₂ 使用现场 VASALA 探头测试结果。

此外使用 HOBO@MX CO₂ 记录仪 (MX1102A) 自动监测洞底的 CO₂、温度、相对湿度、露点空气环境因子, 精度分别为 1×10^{-6} 、0.01 °C、0.01%、0.01 °C, CO₂ 量程为 0~5 000 × 10⁻⁶。设置记录时间间隔为 1 h, 监测时间段为 2020 年 11 月至 2021 年月以及 2023 年 3 月至 10 月。降雨量数据通过安置在甌皮岩遗址公园内的美国产 HOBO-U30-NRC 便携式自动气象站获得, 分辨率 0.2 mm。

2.2 XRD 分析

在不破坏遗址及文物前提下, 在 BT1、BT2、BT3、DT5、DT6 五个有明显文化层揭露面的探方中收集文化层上下部的堆积物样品。将样品干燥后研磨成粉状(过 200 目筛), 每个样品制备 5 g 以上。之后将试样样品寄送至科学指南针检测机构南宁实验室进行 XRD 测试。XRD 扫描范围 5°~90°, 扫描速度 2°·min⁻¹, X 射线衍射仪型号: 德国 Bruker D8 Advance。

2.3 数据处理和分析

根据每月现场观测的各测点洞穴环境因子数据, 依据反距离权重法 (IDW, Inverse Distance Weighting) 绘制洞穴温湿度以及 CO₂ 插值图。空间插值常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面, 即利

用研究区已知数据来估算未知数据的过程^[9]。

使用 Arcgis 和 Origin 对获得的洞穴空气环境数据进行处理分析。XRD 衍射数据使用 Highscoreplus 软件处理, Origin 绘图。

3 结果与分析

3.1 洞穴环境因子的时间变化特征

3.1.1 季节变化

如图 2 所示, 洞内 CO₂ 浓度在冬春季节明显低于夏秋季节, 11 月至 5 月长期保持较低水平, 低于平均值 $1\ 039 \times 10^{-6}$, 从春季开始 CO₂ 逐渐增大, 到夏季保持较高水平(8 月份最大值 $3\ 475 \times 10^{-6}$)。春季至夏季 CO₂ 累积现象明显, 秋季逐渐降低, 直到冬季与洞外保持一致水平并趋于平缓。洞内 CO₂ 浓度主要来源一是土壤空气, 二是来自洞穴水分的脱气作用, 三是来自游客的呼吸作用^[14]。甌皮岩遗址游客参观位置主要在洞口外, 对洞内 CO₂ 的影响较小。图中观察到雨季 CO₂ 浓度明显增加, 可能是由于雨季土壤生物量大, 呼吸作用强烈导致土壤 CO₂ 增加。高浓度的 CO₂ 一方面通过裂隙和管道直接进入洞中, 另一方面溶解在流经的雨水中, 最终以滴水及地下水

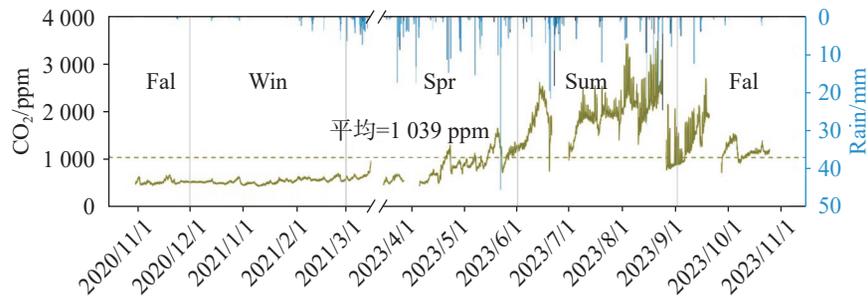


图 2 洞内 CO₂ 随时间(四季)变化曲线

Fig. 2 Variation curve of CO₂ within the cave with the change of four seasons

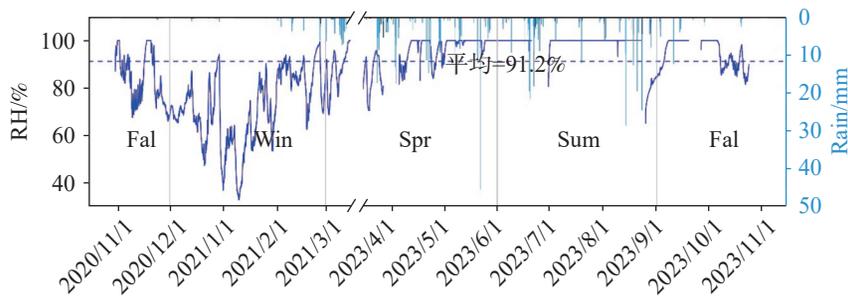


图 3 洞内相对湿度随时间(四季)变化曲线

Fig. 3 Variation curve of relative humidity within the cave with the change of four seasons

脱气的方式在洞穴内累积^[15]。

洞内夏季湿度(RH, Relative Humidity)明显高于其它季节,绝大部分时间都保持在 100% 水平(图 3)。全年相对湿度最低值(34%)出现在冬季,且波动幅度全年最大,但整体低于全年湿度平均水平,秋季、春季湿度在平均值附近范围内波动。同样可以看到洞内相对湿度高值与降雨同期出现,降雨带来的洞穴滴水、探方蓄水等洞穴水分的增加,是洞内湿度上升的重要原因。

洞内气温冬春低、夏秋高,11 至 5 月份低于平均气温、6 至 10 月份高于平均气温(图 4)。1 月份的最低气温为 7 °C,8 月份观测到全年最高气温 25 °C,变幅较大。原因可能是洞穴深度较浅,洞内温度整体受外界气候变化的影响明显。另外洞穴内冬春季节温度波动幅度较大,而夏季温度相对平稳、变幅较小,这可能代表了洞穴通风模式的改变:冬春气体交换

频繁,而夏秋气体交换较弱。

露点(DP, Dew Point)的整体变化趋势与温度一致,在湿度达到 100% 时,即春末、夏季和初秋,露点与温度的变化曲线高度重合;在湿度较低时如秋末和冬季其变化幅度受相对湿度控制,因此与相对湿度具有相似的变化趋势。

3.1.2 日变化

2023 年 6 月 30 日至 7 月 9 日的洞内外高频率(记录间隔 1 h)监测结果显示,洞穴内的相对湿度长期达 100% 且保持不变,洞内气温稳定在 24 °C 左右。洞外温湿度由于昼夜变化呈现峰状起伏,且受蒸发作用影响,有着高温低湿、低温高湿的变化特征(图 5 a、b)。总的来说,洞穴内温湿度变幅都较小,极为稳定,洞外温湿度受昼夜影响而波动,变幅较大。洞内 CO₂ 呈现缓慢增加的趋势,由 6 月 30 日放置时

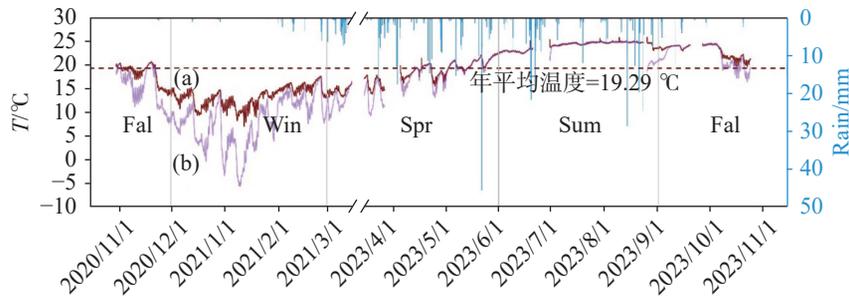


图 4 洞内温度(a)、露点(b)随时间(四季)变化曲线

Fig. 4 Variation curves of temperature (a) and dew point (b) within the cave with the change of four seasons

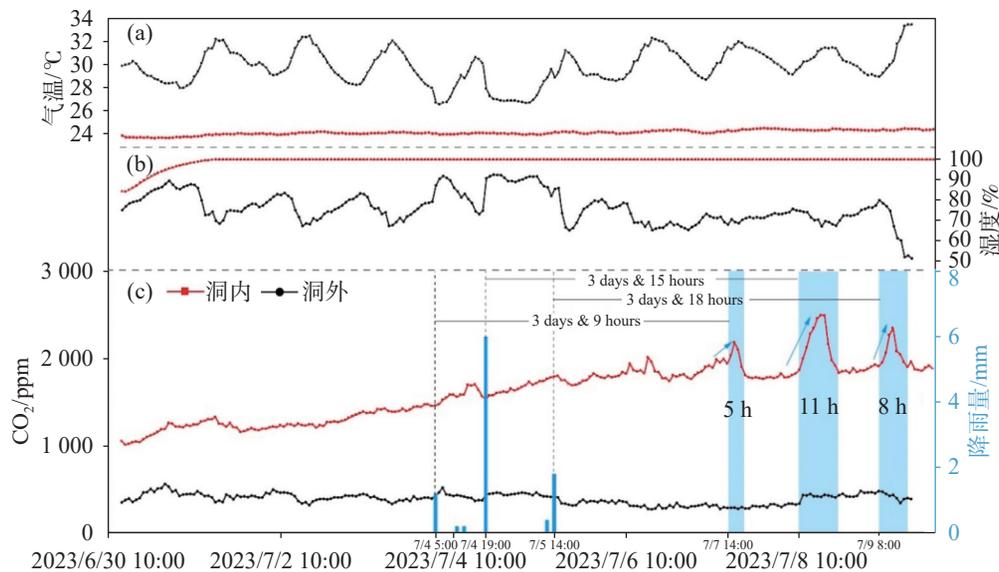


图 5 2023 年 6 月 30 日至 7 月 9 日甌皮岩遗址洞穴内外空气环境因子变化趋势对比

Fig. 5 Comparative analysis of variations in air environmental factors inside and outside the Zengpiyan cave site from June 30 to July 9, 2023

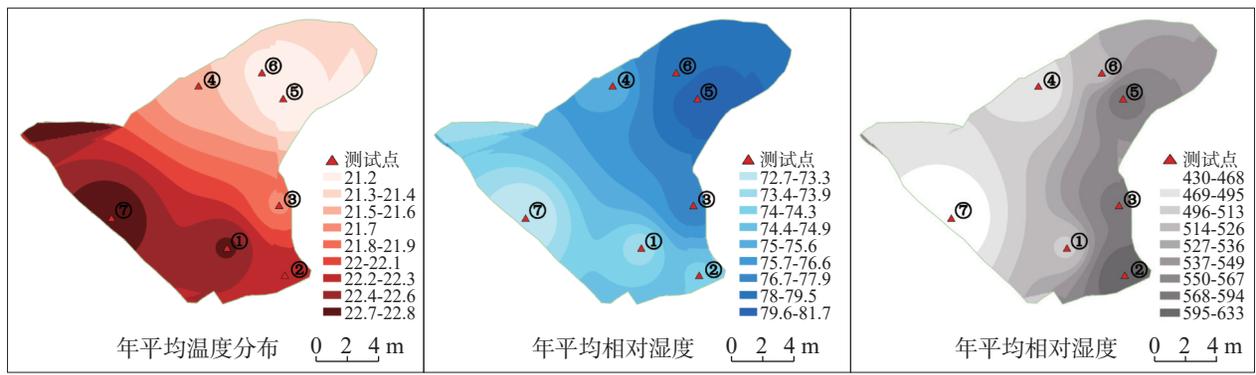


图 6 温度、湿度、二氧化碳(CO₂)年平均插值结果图

Fig. 6 Interpolated annual averages of temperature, humidity and CO₂ levels

CO₂ 的浓度长期保持较高水平。东部的高浓度 CO₂ 说明水洞与主洞间也存在着不可忽视的空气流动, 水洞 CO₂ 的扩散是主洞 CO₂ 的重要来源。

3.2.2 洞穴环境因子垂直分布

考古挖掘形成的探方对洞穴形态具有较大的改变, 顶底高差可达 2.68 m(表 3)。考虑到文化层距离

地下水水面距离的差异, 测量未回填探方测点空气环境的同时也测量各探方上部和下部的环境因子, 对比分析各环境因子在探方中垂直空间上的变化。如图 7 所示, 多次测量表明 CO₂ 有明显的沉底现象, 同探方底层 CO₂ 比表层的 CO₂ 浓度高, 除部分地区受洞道结构影响差异不明显外。除 BT2 外, 探方下部温度普遍高于探方上部的温度, 上部的湿度明显

表 3 T、RH、CO₂ 垂直分布变化表

Table 3 Vertical distributions of T, RH and CO₂

位置	BT3(②)		BT2(③)		DT5(⑥)		DT6(⑤)		
	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	
顶底高差/m	1.80		1.60		1.97		2.68		
7月29日	T/°C	27.0	27.9	28.1	27.8	27.5	27.4	27.1	27.5
	RH/%	86.1	82.1	82.9	84.7	83.8	82.6	87.2	81.1
	CO ₂ /×10 ⁻⁶	530	730	493	562	529	568	592	787
8月25日	T/°C	26.1	27.2	26.4	26.7	25.9	26.0	25.8	25.7
	RH/%	94.3	91.1	93.9	92.7	93.0	94.3	96.3	94.5
	CO ₂ /×10 ⁻⁶	861	1 097	896	1 264	658	642	605	786
9月26日	T/°C	26.1	26.6	26.7	26.5	26.4	26.7	25.9	26.2
	RH/%	86.4	83.9	86.0	88.0	85.5	85.3	89.1	87.7
	CO ₂ /×10 ⁻⁶	645	788	552	612	457	556	464	711

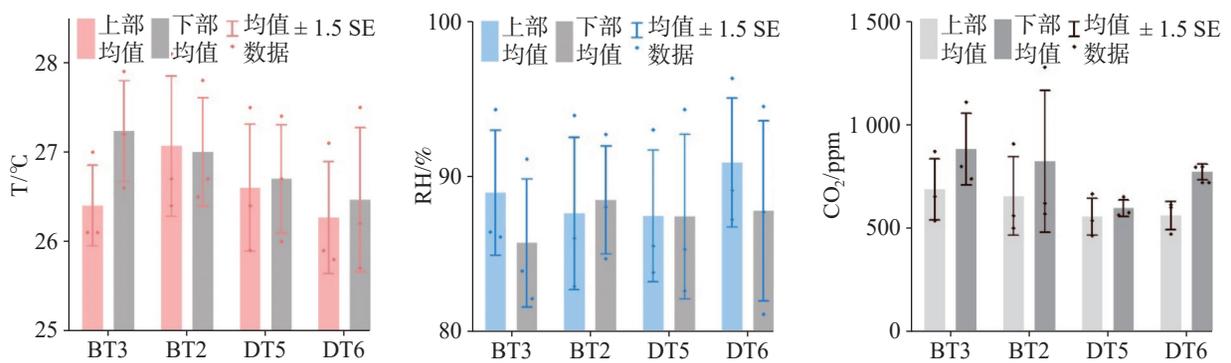


图 7 各探方上下部的 T、RH 和 CO₂ 均值对比图

Fig. 7 Comparison of mean values of T, RH, and CO₂ between the top and bottom surfaces of each exploration unit

高于底部的湿度,这是由于水汽质量分数较轻,自然条件下主要分布在空间的上部。BT2探方的异常表明除水汽、二氧化碳本身的质量,还有其它特殊因素如洞道结构、洞穴形态、空气流动影响着空气环境的垂直分布。

4 讨论

4.1 环境因子影响因素分析

4.1.1 通风效应

由于空气密度主要是空气温度的函数($\rho = \frac{P}{RT}$)^[16],洞内外温度的不同会形成密度差,从而引起洞穴内外的气体流动,称为通风效应。将温度作为空气流动的主要指标,依据洞内外温差将洞内外空气流动分为两种模式(图8)。

第一种通风模式,即洞内温度大于洞外温度($T_{内} > T_{外}$)(图8(a))。由于重力以及温差,洞外冷而致密的空气沿洞底吹入洞内,洞内质量较轻的暖湿空气以及暂时累积的二氧化碳沿洞顶被及时置换出来。洞

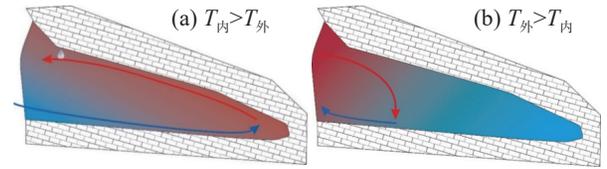


图8 甑皮岩遗址洞穴通风模式一(a)、通风模式二(b)示意图
Fig. 8 Schematic diagram of ventilation mode 1 (a) and ventilation mode 2 (b) of Zengpiyan cave site

内外有着积极的气体交换。如4月5日测得环境因子空间分布所示(图9),CO₂整体平面分布差异较小(446×10⁻⁶~493×10⁻⁶),累积现象不明显。但这种模式存在的时间往往较短,会因为积极的空气交换使得洞内外温差迅速拉近而改变。

第二种模式即洞外温度大于洞内温度($T_{外} > T_{内}$)(图8(b))。洞内密度较大的冷空气受洞穴向内倾斜形态影响被聚集在洞底。洞外暖空气沿洞顶进入洞穴时,在近洞口处遇冷下沉,形成局部气流循环,无法深入洞穴内部导致洞内外气流交换受到抑制,随着滴水脱气、生物呼吸等作用,CO₂在洞底逐渐累积。如6月16日观测的环境因子空间分布所示(图10),洞底CO₂相比第一种模式累积明显(402×10⁻⁶~632×10⁻⁶)。

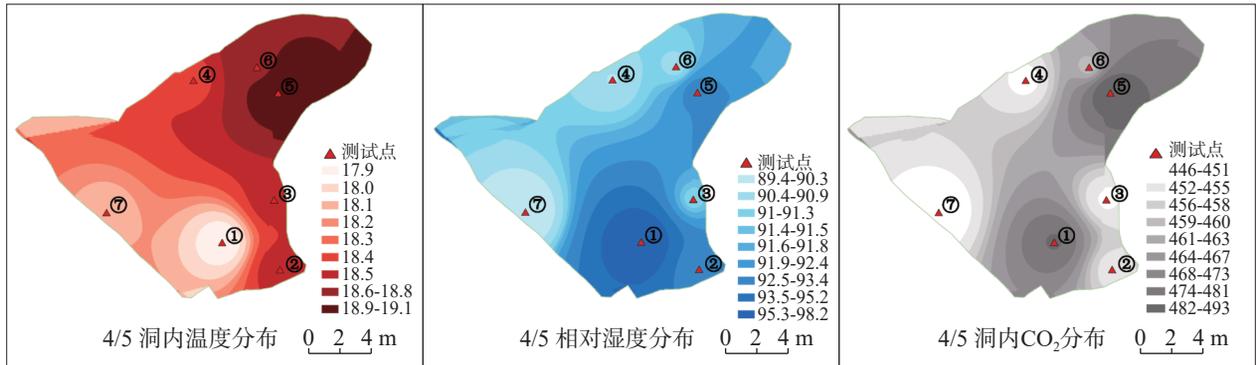


图9 4月5日洞穴环境因子观测结果插值图

Fig. 9 Interpolations of measured results of cave environmental factors on April 5

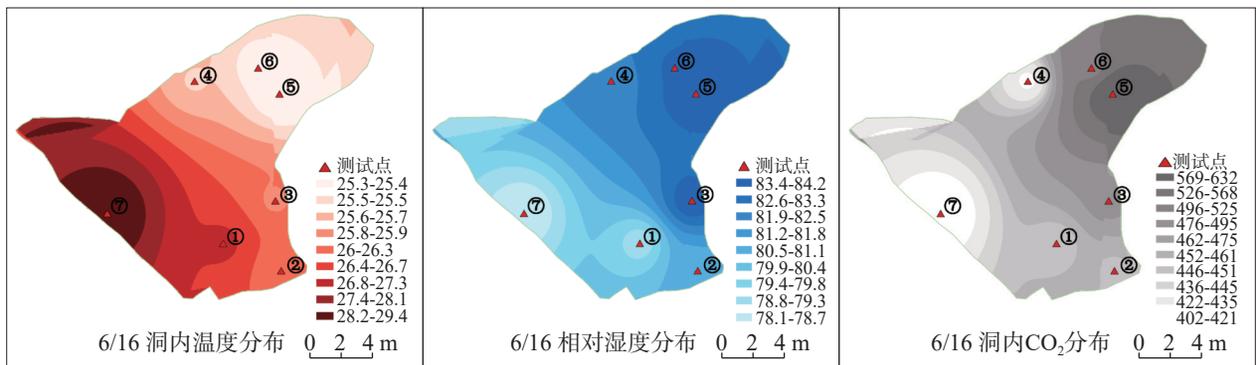


图10 6月16日洞穴环境因子观测结果插值图

Fig. 10 Interpolations of measured results of cave environmental factors on June 16

实际情况下,由于洞外大气温度较大的昼夜变化,洞穴通风模式一直在以上两种通风模式中转换。这种动态变化也是洞穴环境因子随时间变化曲线中短期波峰出现的重要原因(图 2, 图 3, 图 4),维持时间较长的通风模式主导着洞内空气环境因子的变化。冬季当洞外温度较低时,往往是第一种积极的模式占主导作用,因此冬季洞内 CO_2 不易累积(图 2),且洞内温湿度变幅较大,受洞外大气变化影响明显(图 3, 图 4)。夏季洞外的温度较高,第二种消极通风模式占主导,洞内外空气循环受限, CO_2 逐渐累积,且洞内气团的温度和湿度处于稳定的状态。春秋两季则处于两者的过渡阶段,通风效应对洞穴空气环境因子影响的解释与实际观测到的时空变化规律相吻合。

4.1.2 其它影响因素

除通风效应外,洞穴形态与洞道结构、旅游活动等因素也会对洞穴空气环境产生重要影响。一方面甌皮岩浅平开阔的洞口和较浅的洞体导致其与西南地区其它较深洞穴(织金洞、麻黄洞、双河洞)的热量传导方式不同。在甌皮岩洞穴,太阳光线可直射洞底,平均接收辐射热量较多,各观测点的年平均温度较高①~⑦,同时蒸发作用较强,年平均湿度较低(图 6)。洞底温湿度年变幅更大,只在夏季出现较稳定的阶段^[9,17-18]。另一方面甌皮岩向内倾斜延伸的洞穴形态导致洞底容易累积密度更大、质量更重的冷空气。如图 6 所示,洞底⑤、⑥年平均温度较洞外低,属于“冷洞”。

考古挖掘探方也会极大的改变洞穴形态,影响洞内空气环境的空间分布。如 CO_2 浓度在洞穴内的垂直方向上的分布显示,各探方 CO_2 及水汽分层现象明显,探方下部出现 CO_2 积累,上部空气则有较高的相对湿度(图 7)。图 6 中测点②出现 CO_2 峰值,结合水洞测点⑧的高 CO_2 浓度,体现了洞道结构对 CO_2 分布的重要影响。

旅游活动同样是遗址洞穴空气环境变化的重要影响因素。从插值图模拟结果上看,在①测点处出现年平均温度高值和平均湿度低值区域,表明该处的照明设施对其空气环境带来了增温减湿作用。

4.2 环境因子对遗址文化层的影响分析

XRD 分析表明(图 11),各探方上下部文化层主

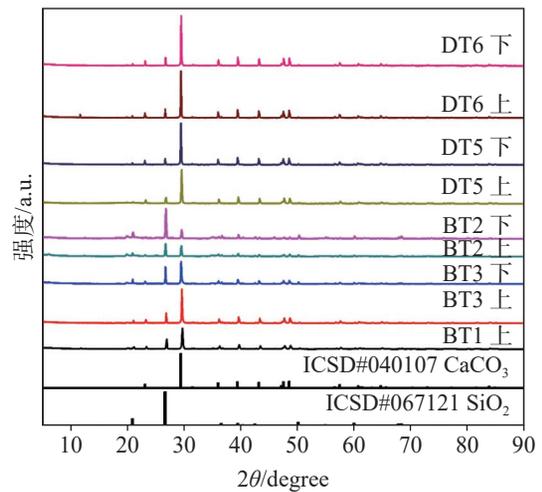


图 11 文化层各探方上下部矿相成分 XRD 分析图

Fig. 11 XRD analysis diagram of mineral phase composition in the upper and lower parts of each exploratory unit of the cultural layer

要成分是方解石(CaCO_3)和石英(SiO_2)。图中波峰强度与对应物相含量有关。从波峰强度来看,大部分以碳酸钙为最主要成分,且各探方之间、同探方上下部之间的含量差异明显。BT2、BT3 两处探方下部文化层的碳酸钙组分含量相较上部要少;洞底 DT5、DT6 两处探方文化层碳酸钙组分较多,且下部略高于上部;洞口 BT1 碳酸钙组分相比洞底较少;洞穴中段 BT2 探方碳酸钙组分含量异常低。石英是硅酸盐矿物中抗风化能力最强的矿物^[19],洞穴空气环境因子对其作用较小,而以微细裂隙和孔隙沉积为主的遗址文化堆积层中的碳酸钙沉积来说,洞穴空气的温度、湿度及 CO_2 浓度对其沉积程度和形态有较大影响^[20]。

洞底湿度和 CO_2 长期保持较高水平,尤其在夏季,湿度能达到 100%,表明洞底探方如 DT5、DT6 文化层的温度容易达到露点从而产生凝结水,覆盖在文化层表面,使其长期处于低矿化度水包裹的环境。对上部文化层来说,未饱和的凝结水吸收洞底高浓度 CO_2 ,形成酸性水环境,溶蚀文化层 CaCO_3 组分,并在重力作用下滴落带走,最终形成可观察到的溶蚀空洞^[21](图 12 左)。对于下部文化层,则会由于滴水蒸发脱气产生碳酸钙薄膜或微细脉状沉积加固文化层胶结^[5](图 12 中)。

BT2、BT3 两处探方下部文化层的碳酸钙组分含量相较上部要少,考虑到洞穴中段测点③及水洞连接处测点②的观测结果表明,BT2、BT3 两处探方



图 12 文化层的主要风化状态

左: DT6 探方疏松多孔上部文化层 中: DT6 探方致密紧实下部文化层 右: 近洞口文化层文物干裂

Fig. 12 Principal weathering conditions of the cultural layer

Left: the loose and porous upper cultural layer of DT6; Middle: the compact lower cultural layer of DT6; Right: the relic drying splits in the cultural layer near the cave entrance

的 CO_2 沉底作用明显(图 7), 在雨季滴水流经条件下, 底层高浓度 CO_2 使得水环境中 pCO_2 增大, 抑制脱气作用, 造成底层碳酸钙沉积物的侵蚀流失^[22], 可能是形成上下部文化层碳酸钙组分含量差异重要原因。

近洞口①测点处的 BT1 探方文化层及文物干裂、松动、多孔化、文物碎片化, 风化程度明显较高(图 12 右)。由于此处是温度及湿度变幅最大区域, 遗址土体内较大的团聚体骨架颗粒原始结构发生破坏, 瓦解成尺寸更小的土质颗粒, 并伴有携沙风磨蚀和盐分重结晶。在昼夜温差引起的热胀冷缩及干湿循环反复影响下, 土颗粒的结构性能下降, 骨质文物干裂、变形, 文物及保存文物的文化层持续发生劣化^[23]。

此外, 在采集 XRD 样品的过程中观察发现文化层从表层至里层的颜色、孔隙度和胶结强度都逐渐发生变化, 表现为颜色变深、孔隙变少和胶结强度逐渐变大的特点。而内部文化层在表层文化层的保护下, 受洞穴空气环境因子影响较小, 文化层风化程度随深度增加逐渐减弱^[24]。

5 结 论

(1) 甌皮岩遗址洞内空气环境因子随季节呈现三个阶段的变化, 即冬季温湿度低, 变幅大, 洞底 CO_2 不累积。夏季温湿度高, 变幅小而稳定, CO_2 在洞底累积。春秋两季则处于前两者的过渡阶段。短期尺度的洞内外监测表明, 受洞内外消极的气流交换限制, 上覆土壤的 CO_2 经裂隙管道到达洞穴后, 在洞底持续堆积, 降雨造成的滴水脱气是洞穴内 CO_2

出现峰值的重要原因。

(2) 空间上, 洞穴环境因子随着洞穴深度的变化而呈现渐进式的带状变化, 洞底为温度低值但湿度高值区域, 洞口则是温度高值和湿度低值区域。 CO_2 在洞穴东部有着高浓度带状分布区域, 与洞穴东部为水洞有关, 表明了水洞空气对遗址洞 CO_2 的重要贡献。

(3) 洞穴空气环境因子变化受到通风效应、洞穴形态与洞道结构、旅游活动等因素的综合影响。通风效应是洞穴环境因子季节性变化的主要影响因素, 洞穴形态与洞道结构是决定洞内环境因子的空间分布的重要因素, 旅游活动可造成洞穴环境因子空间上的局部差异。

(4) 在近洞口、水洞连接、洞穴中段、洞底以及各处上下部之间, 都可以观察到明显的风化程度差异, 这与甌皮岩洞穴空气环境因子的时空变化有密切的关系。如洞底在夏季 CO_2 浓度较高的情况下, 易生成凝结水溶蚀并滴落带走文化层的易溶组分, 形成溶蚀空洞。洞口较大的温差及干湿循环造成文物及文化层的干裂现象。

参考文献

- [1] Jiang G, Guo F, Wei M. Hydrogeological characteristics of foot caves in a karst peak-forest plain in South China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(2): 535-548.
- [2] 黄文化. 桂林甌皮岩遗址地下水害防治工程水文地质试验[J]. *西部探矿工程*, 2019, 31(1): 125-127, 130.
- [3] Guo F, Jiang G H, Liu F. Biological sulfate reduction in an epigenetic karst aquifer and its impact on cave environment[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126804.
- [4] Bao J, Wu X S, Zhang Q, Yuan D X, Guo F, Liu F. Unveiling

- the nitrogen transport and transformation in different karst aquifers media[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129335.
- [5] 张美良, 朱晓燕, 覃军干, 吴夏, 曹建华. 桂林甌皮岩洞穴的形成、演化及古人类文化遗址堆积浅议[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 305-312.
ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, QIN Jungan, WU Xia, CAO Jianhua. Primary research on the formation and development of Zengpiyan cave and the ancient cultural layer at the Zengpiyan archaeological site, Guilin, China[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 305-312.
- [6] 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.
BAN Fengmei, CAI Binggui. Research on seasonal variations of the air's main environmental factors in the Shihua cave, Beijing[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(2): 132-137.
- [7] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [8] 方雨, 蒋忠诚, 张卫, 章程. 岩溶作用过程试验方法研究: 以岩溶作用仪研制为例[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 40-51.
FANG Yu, JIANG Zhongcheng, ZHANG Wei, ZHANG Cheng. Study on test method of karstification process: Take the development of karstification instrument as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 40-51.
- [9] 石亮星, 周忠发, 范宝祥, 汤云涛, 闫利会, 安丹, 朱黎黎. 喀斯特洞穴通风效应特征变化及其对洞内空气环境的影响研究: 以贵州绥阳麻黄洞为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1704-1713.
SHI Liangxing, ZHOU Zhongfa, FAN Baoxiang, TANG Yuntao, YAN Lihui, AN Dan, ZHU Cancan. Characteristics of ventilation effect in karst caves and its influence on cave air environment: A case study of Mahuang cave of Suiyang, Guizhou Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1704-1713.
- [10] Milanolo S, Gabrovšek F. Analysis of carbon dioxide variations in the atmosphere of Srednja Bijambarska cave, Bosnia and Herzegovina[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 131(3): 479-493.
- [11] Sánchez Cañete E P, Serrano Ortiz P, Domingo F, Kowalski A S. Cave ventilation is influenced by variations in the CO₂-dependent virtual temperature[J]. *International Journal of Speleology*, 2013, 42(1): 1-8.
- [12] 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 Linhua, WEI Xiaoning, LIANG Fuyuan. Effect of speleotourism on the CO₂ content and temperature in Baiyun cave, Lincheng, Hebei[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(3): 230-235.
- [13] 卫敏洁. 甌皮岩洞穴遗址地下水的水—气界面侵蚀性气体的产生机理[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
WEI Minjie. Production mechanism of corrosive gas at the water-air interface of groundwater at Zengpiyan cave site in Guilin[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [14] 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: 以贵州织金洞为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
PAN Yanxi. Study on the characteristics of air elements variety in karst cave and its impact on the cave environment: A case study of Zhijin cave, Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.
- [15] 蔡炳贵, 沈凛梅, 郑伟, 李克普, 白云志, 董春志. 本溪水洞洞穴空气CO₂浓度与温、湿度的空间分布和昼夜变化特征[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 348-354.
CAI Binggui, SHEN Linmei, ZHENG Wei, LI Kepu, BAI Yunzhi, DONG Chunzhi. Spatial distribution and diurnal variation in CO₂ concentration, temperature and relative humidity of the cave air: A case study from Water cave, Benxi, Liaoning, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 348-354.
- [16] 吴天太. 空气密度年变化情况对风电场发电量计算的影响[J]. *太阳能*, 2023(4): 22-29.
WU Tiantai. Influence of annual variation of air density on power generation capacity calculation of wind farm[J]. *Solar Energy*, 2023(4): 22-29.
- [17] 薛冰清, 张结, 汪炎林, 周忠发, 张昊天, 汤云涛. 贵州双河洞空气环境主要因子化特征及影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(2): 81-88.
XUE Bingqing, ZHANG Jie, WANG Yanlin, ZHOU Zhongfa, ZHANG Haotian, TANG Yuntao. Variation characteristics and causes of main factors of air environment of Shuanghe cave in Guizhou Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(2): 81-88.
- [18] 殷超, 周忠发, 曹明达, 张结, 张强, 张绍云, 潘艳喜. 岩溶洞穴内气候环境因子关系分析: 以贵州省织金洞为例[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(4): 414-424.
YIN Chao, ZHOU Zhongfa, CAO Mingda, ZHANG Jie, ZHANG Qiang, ZHANG Shaoyun, PAN Yanxi. Analysis on the relationship between climatic and environmental factors in karst caves: An example from Zhijin cave of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(4): 414-424.
- [19] 傅寒晶, 简星, 梁杭海. 硅酸盐化学风化强度评估的沉积物指标与方法研究进展[J]. *古地理学报*, 2021, 23(6): 1192-1209.
FU Hanjing, JIAN Xing, LIANG Hanghai. Research progress of sediment indicators and methods for evaluation of silicate chemical weathering intensity[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(6): 1192-1209.
- [20] 朱学稳, 汪训一, 朱德浩, 龚自珍, 覃厚仁. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [21] Fernando Gázquez, José María Calaforra, Paolo Forti, Jo De Waele, Laura Sanna. The role of condensation in the evolution of dissolutional forms in gypsum caves: Study case in the karst of Sorbas (SE Spain)[J]. *Geomorphology*, 2015, 229: 100-111.
- [22] Houillon N, Lastennet R, Denis A, Malaurent P, Minvielle S, Peyraube N. Assessing cave internal aerology in understanding carbon dioxide (CO₂) dynamics: Implications on calcite mass variation on the wall of Lascaux Cave (France)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(4): 170.

- [23] 易泉. 干旱区土遗址风化特征及劣化模型研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
YI Quan. Deterioration model for earthen monuments in arid weathering condition[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [24] 陈毅, 张虎元, 杨龙. 遗址土劣化进程中微观结构变化的类比研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4117-4124, 4141.
CHEN Yi, ZHANG Huyuan, YANG Long. Analogy study on evolution of microstructure of earthen monument during natural weathering process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4117-4124, 4141.

Changes of air environmental factors in Zengpiyan cave site and its influence on the cultural layers

ZHANG Peng^{1,2}, GUO Fang², JIANG Guanghui³, LIU Fan², JING Baokun²

(1. Hunan Province Geological Disaster Survey and Monitoring Institute, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract The Zengpiyan cave site is a significant Neolithic cave site in Southern China, yielding complete human skeletal fossils as well as artifacts related to the diet and tools of ancient human inhabitants. This cave site provides essential evidence for understanding human activities in Southern China between 12,000 and 7,000 years ago. The cave system at the site consists of three distinct areas: the main cave, the water cave, and the low cave. The main cave retains an intact original cultural layer, featuring clear stratigraphic sequences. Cultural layers, representing the area where artifacts are preserved within the cave site, embody the most important cultural content of the site. Previous research on karst caves has shown that temperature, relative humidity, and carbon dioxide (CO₂) concentrations inside the cave exhibit markedly different temporal and spatial variations compared to the outside environment. These factors influence the formation and degradation of carbonate deposits such as stalactites.

To understand the temporal and spatial variations of air environmental factors within the Zengpiyan cave site and their influence on the weathering of cultural layers, this study acts as a crucial supplement and extension to the environmental research on the Zengpiyan cave site, with a particular emphasis on the microenvironment of the cultural layers of the cave. The study specifically examines environmental factors such as cave temperature, relative humidity, and CO₂ concentrations. A hydrological year-long observation was conducted in Zengpiyan cave with the use of various air monitoring devices, along with the sampling and analysis of cultural layer deposits from different excavation units.

The results reveal that the air environmental factors inside the cave exhibit three distinct seasonal stages: in winter, both temperature and humidity are low with large fluctuations, and CO₂ does not accumulate at the cave floor. In contrast, summer, brings high temperature and humidity with small and stable variations, resulting in CO₂ accumulation at the cave floor. Spring and autumn serve as transitional phases between winter and summer. Spatially, temperature and humidity show a gradual variation with the increase of cave depth. CO₂ concentrations exhibited a banded distribution with high-concentrations in the eastern section of the cave, suggesting that the water cave plays a significantly role in eevating the CO₂ levels within the main cave. The primary source of CO₂ in the cave is the overlying soil, with rainfall events identified as critical triggers for peak CO₂ levels within the cave. A comprehensive analysis suggests that ventilation effects are the main factors influencing the temporal and spatial variations of air within the cave. Additionally, cave morphology and tourism activities are also recognized as significant contributors to the air environment within the cave. Observing and combining X-ray diffraction analysis, it was found that there are significant differences in the degree of weathering of cultural layers near the entrance of the cave, water cave connections, cave middle sections, cave bottoms, and the upper and lower parts of the exploration area, which are related to the spatiotemporal changes of air environmental factors. For example, there are more dissolution cavities in the upper cultural layer at the cave floor, mainly due to the accumulation of water vapor in the upper part, which

condenses and dissolves, transporting easily soluble components away from the cultural layer. In contrast, the cultural layer at the cave entrance is characterized by loose and powdery cementation, which is associated with the significant temperature fluctuations and frequent cycles of drying and wetting at the entrance.

This study has documented the temporal and spatial variations of the main air environmental factors at the Zengpiyan cave site, which is characterized by a shallow, wide-open entrance. It has also explored the potential influencing factors and their impact on the weathering of cultural layers. These findings provide a scientific basis for the improved preservation and utilization of cave sites.

Key words cave sites, air environment, weathering of cultural layer, CO₂, Zengpiyan

(编辑 杨杨)

桂林喀斯特——自然的遗产，人类的瑰宝

桂林喀斯特发育于地层产状平缓、岩层巨厚而纯净、厚度达 3000 m 的上泥盆统至下石炭统的石灰岩中, 历经亿万年的地质构造演化形成了桂林“盆景”的基本框架。特别是新近纪以来, 随着地壳间歇式

抬升, 加之气候上雨热同期, 降水充足以及外源水的侵蚀, 在大自然的精雕细琢下, 最终形成了现今独特的桂林喀斯特景观。

(供稿: 钟亮 陈伟海 摄影: 钟亮)



受地壳间歇式抬升形成的象鼻山与穿山