

# 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

石亮星 周忠发 范宝祥 汤云涛 闫利会 安丹 朱粲粲<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001)

**【摘要】:**为探究喀斯特洞穴内部空气变化特征,揭示喀斯特洞穴通风效应时空变化规律及其变化模式,于2016年1月~2019年6月间两个监测周期对贵州绥阳麻黄洞内外温度、湿度、CO<sub>2</sub>浓度以及气压进行为期32个月的数据采集,并基于相关模型进行系统分析,结果表明:(1)麻黄洞存在3种通风模式:限制性通风模式、积极性通风模式和过渡阶段。其中夏季主要为限制性通风模式,洞内外气流交换较弱;冬季主要为积极性通风模式,洞内外气流交换运动明显,春季和秋季处于过渡阶段,两种模式交替存在。(2)洞道结构影响通风模式,同样,通风效应影响洞穴空气环境变化。根据洞道结构和通风效应对洞穴空气环境的影响可以将麻黄洞洞道分为3个部分:空气环境变化较大的1#~5#监测点、空气环境变化逐渐减小的6#~9#监测点以及空气环境稳定的10#~15#监测点。(3)受特殊的洞道结构影响,洞道中6#~9#存在“狭管效应”引起的“峡谷风”,使得春秋两季洞道中部存在明显气流。基于模型分析洞穴通风效应及其对洞穴空气环境影响,研究喀斯特洞穴通风模式及其变化特征,对洞穴沉积物形成及气候变化及碳循环模式研究有重要意义。

**【关键词】:**喀斯特洞穴 空气环境 通风效应 时空变化

**【中图分类号】:**X51 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2021)07-1704-10

“通风效应”一词是对于“Ventilation Effect”<sup>[1~3]</sup>术语的翻译,国内又称“洞穴呼吸现象”。其主要表征洞穴内部气流运行模式以及洞穴与外部大气气流交换作用<sup>[4]</sup>。作为近年来国内外研究的重点,其揭示了洞穴内部气流运动的特殊模式,其通过影响洞内外气团之间的交换,从而影响洞穴微气候变化,进而影响洞穴次生化学沉积物沉积<sup>[5,6]</sup>、古气候环境记录<sup>[7]</sup>、岩溶碳循环过程<sup>[8]</sup>。

对于通风效应的研究,任美镠等<sup>[9]</sup>、韦跃龙等<sup>[10]</sup>基于“呼吸现象”(通风效应),对洞穴微气候环境的影响进行了阐述,总结了洞穴的“呼吸方式”。在定量研究方面,主要通过空气密度差与<sup>222</sup>Rn构建数学计量模型。较为典型是Faimon等<sup>[11]</sup>运用洞内外

**作者简介:**石亮星(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为喀斯特地貌与洞穴.E-mail:shiliangxing999@163.com

周忠发 E-mail:fa6897@163.com

**基金项目:**贵州师范大学资助博士科研项目(GZNUD[2017]6号);国家自然科学基金地区项目(41361081);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y1540)



高约 32m, 宽约 15m。进洞口部分为迷宫型洞段, 洞道走向为南北走向, 洞道中部为 400m 笔直洞段。洞内发育地下河, 出现于洞道中部 9#~12#监测点之间, 地下河流向朝向洞内, 洞道内有明显气流运动。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据监测方法

为探究洞穴空气运动规律, 根据麻黄洞洞道走向, 沿麻黄洞洞口至洞穴深部, 依次设置 1#~15#15 个洞内监测点(图 1), 并于 2017 年 1 月~2017 年 8 月、2018 年 7 月~2019 年 6 月两个监测周期, 逐月对麻黄洞洞内外各监测点进行监测。监测中使用美国 Telaire-7001 型便携式红外 CO<sub>2</sub> 仪对洞内外 CO<sub>2</sub> 进行自动监测, 分辨率为 1×10<sup>-6</sup>, 测量范围为 0~10000×10<sup>-6</sup>, 测量精度为 ±50×10<sup>-6</sup>, 为了保证测量的精确性, 测量时仪器与人保持大于 2.5m 的距离。洞穴内外空气中的温度、相对湿度、气压、海拔则使用美国 Kestrel-4500 型便携式气象站进行实时监测, 仪器分辨率分别为 0.1℃、0.1%、0.1kPa、1m, 精度分别为 ±1.0℃、±3%、±0.15kPa(25℃)、±15m。

### 2.2 研究方法

本文采用洞穴内外部虚拟温度来估算洞穴空气密度, 从而判断洞穴的空气浮力, 进而表明其通风的模式。计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$T_v = T^* (1 + 0.6079r_v - 0.3419r_c) \quad (1)$$

式中:  $r_c$  与  $r_v$  分别为二氧化碳浓度与水蒸气混合比。

虚拟温度差计算公式为: 
$$\Delta T_v = T_{v(\text{内})} - T_{v(\text{外})} \quad (2)$$

当结果  $\Delta T_v > 0$  时, 洞外空气密度高于洞内, 表明气流从洞外吹向洞内; 当  $\Delta T_v < 0$  时, 洞内空气密度高于洞外, 则意味着气流从洞内吹向洞外, 洞内外气流交换受到抑制<sup>[30]</sup>。

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。反距离权重法(IDW)即使用若干个实测点  $Z_i(x_i, y_i)$  来推求未知点  $Z_0(x_0, y_0)$  的一种方法, 一般来说, 首先要计算出预测点周围每个实测点的权重, 然后根据线性加权法计算出  $Z_0$  的预测值, 具体公式为:

$$W_i = \frac{1/d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i} \quad (3)$$

$$Z_0(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(x_i, y_i) \quad (4)$$

## 3 数据分析及结果

### 3.1 麻黄洞洞内空气环境变化特征

麻黄洞洞内空气环境变化如图 2 所示。洞内 CO<sub>2</sub> 浓度变化范围在 458~1041×10<sup>-6</sup> 之间，最低值出现在靠近洞口的 1#、2# 监测点，最高值出现在洞内深处 15# 点，存在随着与洞口距离的增加而变化趋于稳定的空间分布特征。时间上，麻黄洞内空气 CO<sub>2</sub> 浓度表现出明显的夏高、冬低的周期性特征，夏季，各监测点 CO<sub>2</sub> 浓度于 1000×10<sup>-6</sup> 上下波动，平均值为 1007×10<sup>-6</sup>；冬季，各监测点均低于 620×10<sup>-6</sup>，平均值为 486×10<sup>-6</sup>。洞穴温度同样存在明显的时空变化，全年变化范围为 4.4℃~36.6℃，其变化趋势与外部大气温度保持一致，各监测点温度均表现出夏秋高、冬春低的季节变化特征，各监测点四季平均温度分别为春季 14℃、夏季 17℃、秋季 15℃以及冬季 9℃。受洞外空气环境的影响，1#-5# 监测点空气存在较明显的季节变化，其余各监测点温度变化较稳定，在 15℃ 上下波动。如：接近洞口的 1# 监测点，年间温差达到 32.2℃，而距洞口距离最远的 15# 监测点，月际温度最大值为 15.7℃，最小值为 12.3℃，年间温差为 3.4℃。由此可见，距离洞口越远，洞内温度变化越小，洞内均温接近当地年均温。麻黄洞相对湿度最低值为 79.4%，最高值为 100%，呈冬低夏高的季节特征，由于洞内水汽含量较高，相对湿度年际变化不大。麻黄洞洞穴气压表现出与温度和 CO<sub>2</sub> 浓度变化相反的趋势，气压与温度和 CO<sub>2</sub> 的负相关变化表明麻黄洞是一个通风系统。

### 3.2 麻黄洞内外虚拟温度差时空变化特征

如图 3 所示，洞内各监测点的虚拟温差表现出明显的季节特征，具体表现为：虚拟温度差正值 ( $\Delta T_v > 0$ ) 出现在每年的冬季 (12、1 与 2 月) 前后。如 2018 年 12 月~2019 年 2 月，各监测点虚拟温度差值均为正值，其变化范围在 3℃~13℃ 之间，并于 2018 年 12 月出现峰值 (13℃)。相反，在夏季 (6、7、8 月)，虚拟温度差温差为负值 ( $\Delta T_v < 0$ )，并呈下降趋势。如在 2017 年 6、7、8 月，虚拟温度差波动范围为 -23℃~-4℃，在最小值出现在 8 月。在春秋两季，虚拟温度差呈波动趋势。图 3 中春季与秋季分别用绿色和黄色标注出，具体变化特征为：春、秋季洞内各监测点虚拟温度差值在 0℃ 上下波动。春季，虚拟温度差由初春 (3 月) 的 3℃~6℃ 下降至春末 (5 月) 的 -4℃~1℃，呈现下降的趋势；秋季，虚拟温度差范围由 -4℃~0.9℃ 增至 4℃~7℃，与春季洞穴空气运动相比则表现出相反的变化趋势，但总体而言，春、秋两季虚拟温差相比夏、冬两季变化不大。洞内各监测点虚拟温度差同样存在空间变化特征。冬季和夏季，虚拟温度的最值呈现出随洞口距离增加而增加的特征。例如，MH1# 监测点虚拟温度差的变化范围在 -15℃~12℃ 之间，而洞内的 4# 点的变化范围为 -17℃~12℃，9# 后则逐渐趋于稳定，基本保持在 -23℃~13℃ 间范围内。春季和秋季，洞内虚拟温度差的最值出现在洞道中部的 6#~9# 点。

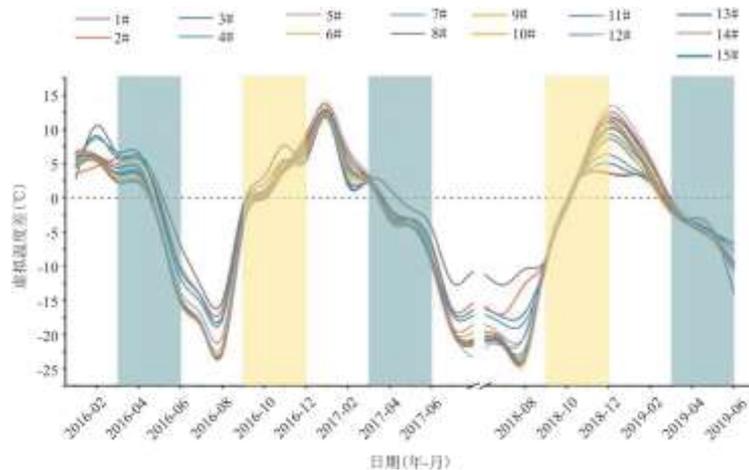


图 3 麻黄洞内各监测点虚拟温度差季节变化

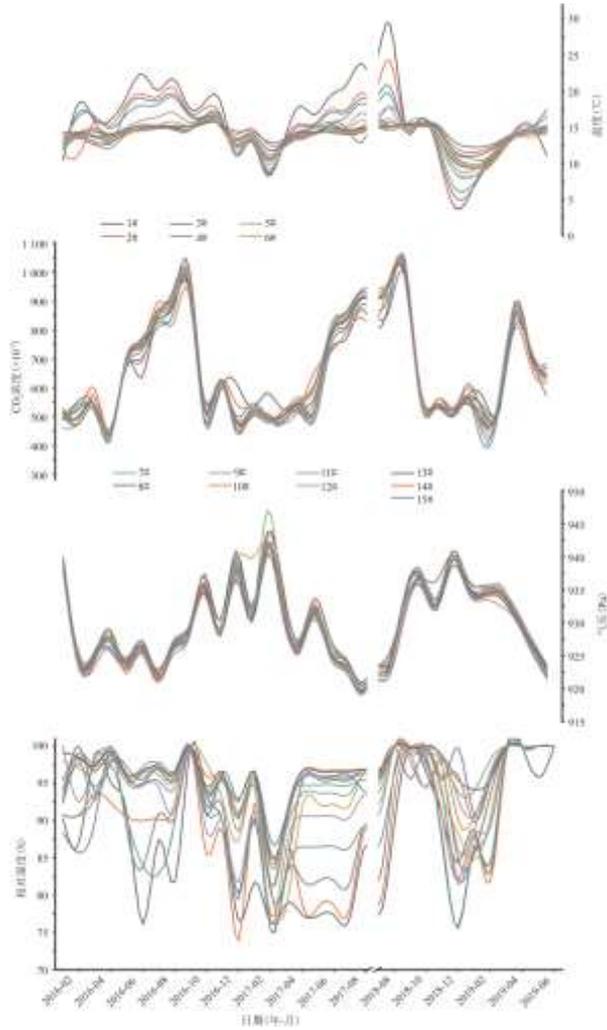


图 2 温度、相对湿度、气压、CO<sub>2</sub>浓度变化趋势

### 3.3 麻黄洞通风效应以及通风模式转换

通常来说，麻黄洞作为单入口水平向洞穴，其通风主要受洞内外密度差驱动。虚拟温度差表征空气密度差，因此，麻黄洞通风模式可以划分为 3 种，即夏季限制性通风模式、冬季积极性通风模式以及春秋的过渡阶段，具体模式如图 4 所示。

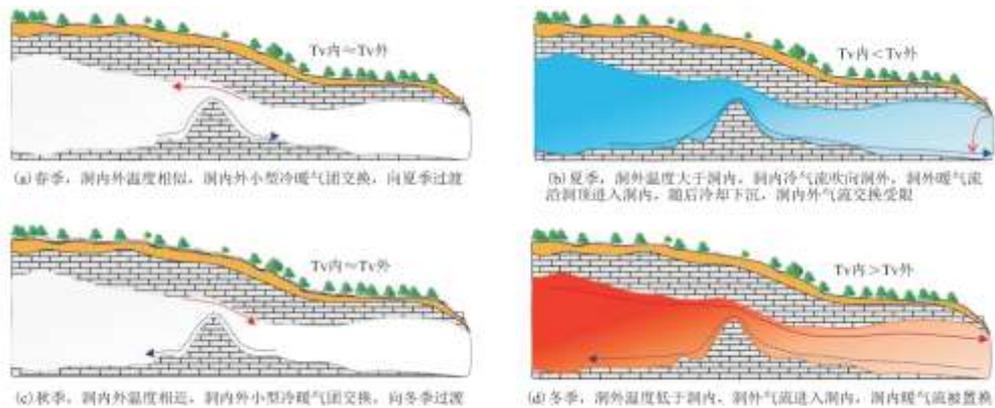


图 4 通风模式转换图

夏季,  $\Delta T_v < 0$ , 洞外密度高于洞内, 气流自洞内流向洞外。洞内冷空气自洞底向外流出, 外界较暖空气沿洞顶进入洞穴, 受洞内低温影响, 而后逐渐冷却下沉, 无法深入洞穴内部, 在洞口处形成小循环, 洞内外气流交换在夏季受到抑制, 形成洞内外气流交换受限的限制性通风模式。

冬季,  $\Delta T_v > 0$ , 表明洞内密度高于洞外, 麻黄洞洞内外气流交换频繁, 气流运行模式主要由洞外吹向洞内, 洞内外气流发生对流、交换, 洞内空气环境发生变化。洞外冷空气沿洞底进入洞内, 洞内热空气沿洞顶交换至洞外, 洞内外气流循环交换, 形成积极性通风模式。

春季和秋季相似, 虚拟温度差  $\Delta T_v$  在  $0^\circ\text{C}$  上下波动, 表明洞内外空气密度相差不大, 气流交换不明显, 在此阶段洞内外气流运动模式处于积极性通风和限制性通风的过渡阶段<sup>[31]</sup>。春季, 通风模式由积极性通风阶段向限制性通过渡, 洞内气流运行由“外向内”逐渐向“内向外”转变。春季初期, 受冬季末期积极性通风模式影响, 气流运动仍具有由洞外吹向洞内趋势, 而后风向逐渐转变, 最后形成由洞内吹向洞外的限制性通风模式特征。秋季, 通风模式表现出由限制性通风模式向积极性通风模式过渡的特征, 洞内气流运行由限制性阶段向积极性阶段过渡。秋季初期, 气流运行具有较强的限制性通风的特征, 随着时间转移, 洞内虚拟温度发生变化, 洞外气流逐渐进入洞内, 秋季末期达到积极性通风模式的特征。

## 4 讨论

### 4.1 洞道结构对通风效应的影响

麻黄洞为典型的水平向袋状洞道结构, 单入口, 封闭性较好, 上覆无明显孔隙裂隙发育, 形成封闭的气流循环模式(图 1)。基于洞道结构与空气环境变化特征, 本文将麻黄洞洞道分为 3 个洞段。第一个洞段为 1#~5#点处, 该段为入口处乱石堆且有一个较大拐弯, 洞厅较大; 第二段为 6#~9#监测点处, 该段为单洞道的前半部分, 洞道平直, 洞厅之间连接洞段狭窄, 在 8#与 9#点之间存在一个陡坎; 第三段为内部 10#~15#点, 洞道平缓, 封闭程度好。在洞道结构的影响下, 洞穴气流受密度驱动, 呈现出沿洞道流动的特征。通常而言, 空气密度差越大表明气流交换速率快, 洞内外气流交换强度大, 空气参数变化明显。洞穴内部虽然密度差大于外部监测点, 但在洞道结构影响下, 尤其随着洞口距离的增加以及洞穴形状的影响, 洞穴内部由于与大气连接性减弱, 其通风强度弱于外部监测点, 其空气环境参与变化也逐渐稳定, 甚至呈现出“孤岛效应”。

因此, 由于麻黄洞洞道前段 1#~5#靠近洞口, 存在较大洞厅, 其  $\text{CO}_2$ 、温度、湿度、气压易受外界大气的影响。因此, 在第一段, 洞道气流运动变化复杂且不稳定, 后 6#~9#监测点处, 洞道平直, 随着与洞口距离的增加, 即出现一个过渡带, 此区域洞穴内部空气环境受外界风、气候变化影响逐渐削弱, 各因素空间变化趋于稳定。而后经过 9#点后, 温度基本达到稳定状态, 其内部空气组成、气压等因素也逐渐与外界大气环境相比保持独立性, 且洞道为简单、平直的单洞道, 气流运动变化状况也随着各因素的稳定而稳定。

通过各监测点虚拟温度值进行插值分析, 从而进一步研究通风效应空间变化, 结果如图 5 所示<sup>[32]</sup>。在春季、秋季的过渡阶段, 该时期洞内外温度相近, 相比夏季和冬季, 气流运行状况总体较弱。但麻黄洞中部 6#~9#点的狭窄洞道气流运行异常强烈。主要是由于该段洞道狭窄、笔直, 气流从相对开阔的洞厅沿着狭窄洞道流动时, 气流横截面骤减, 但空气无法堆积, 由于流体的连续性原理, 气流被迫加速前进, 从而形成强风<sup>[33]</sup>。而该区域洞道笔直, 更加剧了这种类似“狭管效应”的洞穴气流运行现象, 该现象与殷超等<sup>[31]</sup>在对织金洞岩溶洞穴内气候环境分析研究中提出的“虹吸效应”相似, 这种狭管效应增强夏季与冬季洞内气流交换。

### 4.2 通风效应对洞穴空气环境的影响

作为洞内外环境因子交换媒介，通风效应连接洞穴内外微气候，进而影响洞穴空气环境，同时通风模式的转换也受洞内外微气候的影响。

外部大气温度主要受纬度与地貌特征影响，存在明显的日际、季节变化。而与洞外相比，洞内气温变化较小，且平均气温基本上与当地年平均温度相近。由于岩石的低导热性，洞穴温度变化主要受洞穴水流导热以及洞穴通风效应的影响<sup>[14]</sup>。由于麻黄洞内地下河作用较弱，据此猜测洞穴温度变化主要受通风效应影响。通风效应使洞内空气与洞外大气发生交换，改变洞内温度，呈现出夏高冬低的时间特征以及距洞口距离越远而逐渐稳定的空间特征。相反，温度变化同样影响通风模式，空气温度越高，密度越小，空气温度越小，则密度越大，空气从密度高的区域流向密度低的区域<sup>[34]</sup>。因此，温度引起的内外密度差也是驱动麻黄洞洞内气流运动的直接动力。

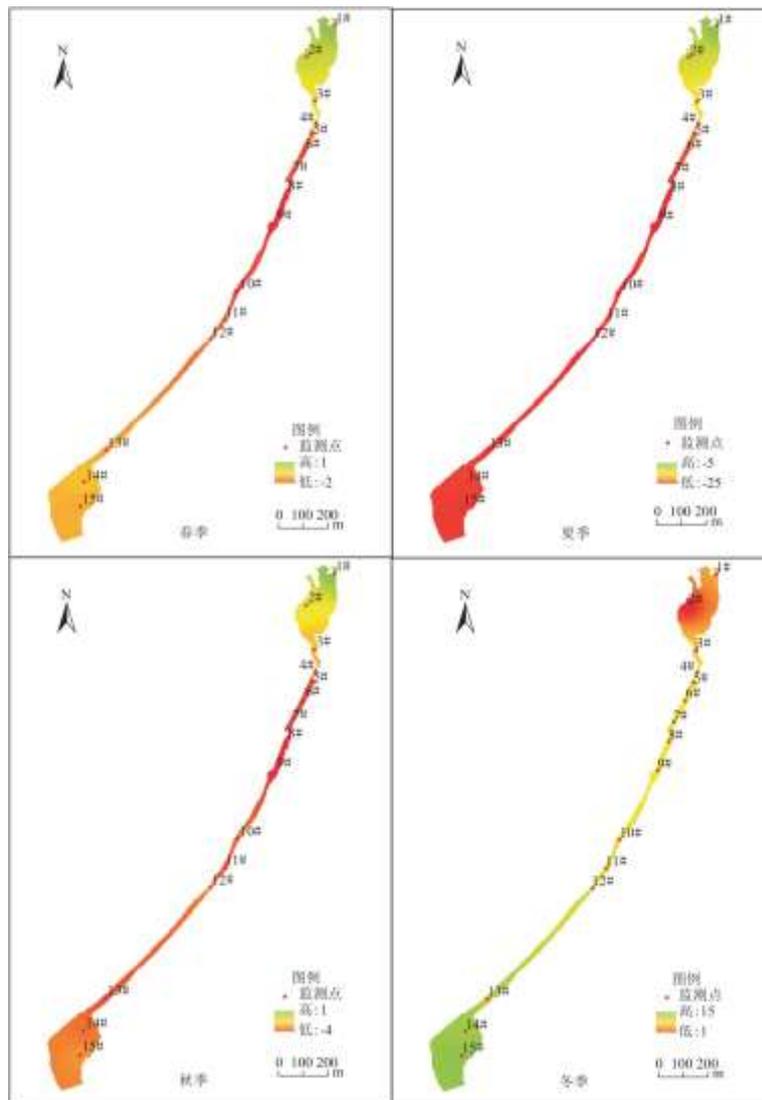


图5 麻黄洞外温差四季插值分析结果

相比于外界大气环境，洞穴中  $\text{CO}_2$  来源复杂且浓度高<sup>[13]</sup>。洞内  $\text{CO}_2$  来源一部分为上覆土层中植物根系呼吸作用以及微生物活动作用释放  $\text{CO}_2$ ，溶入水中随岩溶管道或基岩裂隙下渗进入洞穴中，另一部分为洞穴内生物呼吸作用及洞穴滴水脱气排出  $\text{CO}_2$ 。通风效应使洞内外形成对流，从而对洞穴  $\text{CO}_2$  浓度产生积累或者稀释效应。夏季，洞内外气流交换受限，加之洞外环境雨热同期，

生物作用强、雨水下渗量大，上覆土壤高  $\text{CO}_2$  浓度进入洞内，各来源的  $\text{CO}_2$  在洞内积累，使得洞穴的  $\text{CO}_2$  浓度达到  $1000 \times 10^{-6}$ ；冬季由于洞内外气流交换频繁，高浓度  $\text{CO}_2$  空气被置换，大气低浓度  $\text{CO}_2$  空气被置换进洞内，低浓度  $\text{CO}_2$  的大气与洞内空气发生混合，产生稀释效应，洞内  $\text{CO}_2$  达到年间最小值，为  $458 \times 10^{-6}$ 。春季、秋季，通风模式处于过渡阶段，在上覆以及通风效应对洞内  $\text{CO}_2$  浓度影响下，洞内  $\text{CO}_2$  浓度在全年均值上下波动。

相比其他空气因素，空气相对湿度主要受洞内水汽含量的影响。由于亚热带季风区雨热同期，通风效应影响下，夏季洞内外气流交换受限，除了 1#~5#点外，其余点受洞外影响较小。受上覆以及滴水、地下河影响下富含水汽的空气存在于洞穴内部，呈现出全年最高值。冬季，洞内外气流交换频繁，受洞穴内部受空气流动影响，外部低水汽空气进入洞内，与洞穴水汽结合，降低了相对湿度，呈现出全年最低值。相对湿度在受洞穴滴水、地下河以及外部降水以及通风干预下，洞内滴水点出现干湿特征。

## 5 结论

本文基于 32 个月监测数据对于水平向洞穴麻黄洞通风效应进行分析研究，结合数理模型探究其通风效应变化规律，分析了通风效应对洞穴空气主要参数的影响，结果表明：

(1) 麻黄洞作为水平向洞穴，受空气密度驱动，不同时间尺度存在不同通风模式，具体表现为：夏季，由于洞内空气温度低于洞外，气流沿洞底吹向洞外，洞外气流进入洞内时冷却下沉，洞内外气流交换较弱，形成限制性通风模式。冬季，麻黄洞洞内空气温度高于洞外，受密度驱动，洞外气流进入洞穴，置换出洞内空气，形成积极性通风模式，洞内外气流循环交换。春季，麻黄洞内部气流表现出由积极性通风向限制性通风模式转变的过渡阶段，在此期间洞内外气流发生微弱交换，并伴有微弱的限制性通风特征。与春季相反，秋季麻黄洞内部气流处于由限制性通风向积极性通风的过渡阶段，但此过渡阶段表现出微弱的积极性通风特征。

(2) 基于实地监测和模型计算分析得出，洞道结构是影响通风效应的主要因素。根据洞道结构及其通风状态将麻黄洞洞道分为三部分。第一部分为靠近洞口的 1#~5#监测点，受通风效应影响全年空气环境变化较大；第二部分为洞道中部 6#~9#监测点，这部分由于洞口距离以及洞道影响空气环境变化逐渐减小，属于过渡部分；第三部分为 10#~15#监测点，该部分空气环境变化较小，趋于平稳。

(3) 洞道中部的 6#~9#点，由于其特殊的洞道结构，存在“狭管效应”，形成“峡谷风”现象，这一现象在气流运动特征不明显的春季和秋季表现更显著，基于插值分析也验证了这一特殊现象。

### 参考文献:

[1] BENAVENTE J, VADILLO I, LINAN C, et al. Ventilation effects in a karstic show cave and in its vadose environment, Nerja, Southern Spain[J]. Carbonates and Evaporites, 2011, 26(1): 11-17.

[2] DEININGER M, FOHLMEISTER J, SCHOLZ D, et al. Isotope disequilibrium effects: The influence of evaporation and ventilation effects on the carbon and oxygen isotope composition of speleothems—A model approach[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 96: 57-79.

[3] 贺海波, 汤静, 刘淑华, 等. 川东北楼房洞洞穴环境时空变化与影响因素[J]. 热带地理, 2014, 34(5): 696-703.

[4] LIÑÁN C, VADILLO I, CARRASCO F. Carbon dioxide concentration in air within the Nerja Cave (Malaga, Andalusia,

---

Spain) [J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(2):99-106.

[5] PALMER A N, PALMER M V. Speleothem science: From process to past environments [J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2014, 76(1):67.

[6] MANDI M, MIHEVC A, LEIS A, et al. Concentration and stable carbon isotopic composition of CO<sub>2</sub> in cave air of Postojnska jama, Slovenia [J]. *International Journal of speleology*, 2013, 42(3):279-289.

[7] JAMES E W, BANNER J L, HARDT B. A global model for cave ventilation and seasonal bias in speleothem paleoclimate records [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2015, 16(4):1044-1051.

[8] 赵瑞一, 吕现福, 蒋建建, 等. 土壤 CO<sub>2</sub> 及岩溶碳循环影响因素综述 [J]. *生态学报*, 2015, 35(13):4257-4264.

[9] 任美镠, 刘振中. 岩溶学概论 [M]. 商务印书馆, 1983:212-215.

[10] 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.

[11] FAIMON J, TROPOVÁ D, VÍTBALDÍK, et al. Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císarská Cave (Moravian Karst, Czech Republic) [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(4):599-623.

[12] SÁNCHEZ-CAÑETE E P, SERRANO-ORTIZ P, DOMINGO F, et al. Cave ventilation is influenced by variations in the CO<sub>2</sub>-dependent virtual temperature [J]. *International Journal of Speleology*, 2013, 42(1):1-8.

[13] KOWALSKI A S, SÁNCHEZ-CAÑETE E P. A new definition of the virtual temperature, valid for the atmosphere and the CO<sub>2</sub>-rich air of the vadose zone [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(8):1692-1695.

[14] WANG Y, LUO W, ZENG G, et al. High <sup>222</sup>Rn concentrations and dynamics in Shawan Cave, Southwest China [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, 199:16-24.

[15] TREBLE P C, FAIRCHILD I J, GRIFFITHS A, et al. Impacts of cave air ventilation and in-cave prior calcite precipitation on Golgotha Cave dripwater chemistry, Southwest Australia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 127:61-72.

[16] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 等. 现代岩溶学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016:89-91.

[17] DE FREITAS C R, LITTLBJOHN R N, CLARKSON T S, et al. Cave climate: Assessment of airflow and ventilation [J]. *Journal of Climatology*, 1982, 2(4):383-397.

[18] 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):226-234.

[19] FAIMON J, STELCL J, SAS D. Anthropogenic CO<sub>2</sub>-flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Císarská Cave (Moravian Karst, Czech Republic) [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 369(1-3):231-

---

245.

[20]HOYOS M, SOLER V, CAÑAVERAS J C, et al. Microclimatic characterization of a karstic cave: Human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain) [J]. *Environmental Geology*, 1998, 33(4): 231-242.

[21]童晓宁, 周厚云, 黄颖, 等. 广东英德宝晶宫 CO<sub>2</sub> 浓度的时空变化特征 [J]. *热带地理*, 2013, 33(4): 439-443.

[22]张萍, 杨琰, 孙喆, 等. 河南鸡冠洞 CO<sub>2</sub> 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.

[23]薛冰清, 张结, 汪炎林, 等. 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.

[24]张结, 周忠发, 汪炎林, 等. 短时间高强度旅游活动下洞穴 CO<sub>2</sub> 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): 79-93.

[25]LANG M, FAIMON J, EK C. A case study of anthropogenic impact on the CO<sub>2</sub> levels in low-volume profile of the Balcarka cave (Moravian Karst, Czech Republic) [J]. *Acta Carsologica*, 2015, 44: 71-80.

[26]RUSSELL M J, MACLEAN V L. Management issues in a tasmanian tourist cave: Potential microclimatic impacts of cave modifications [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 87(3): 474-483.

[27]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.

[28]陈建庚, 张英骏. 贵州绥阳双河洞的发育与成因探讨 [J]. *中国岩溶*, 1994, 13(9): 247-255.

[29]李坡, 贺卫, 钱治, 等. 双河洞地质公园研究 [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2008: 58-101.

[30]VIETEN R, WINTER A, WARKEN S F, et al. Seasonal temperature variations controlling cave ventilation processes in Cueva Larga, Puerto Rico [J]. *International Journal of Speleology*, 2016, 45(3): 259-273.

[31]殷超, 周忠发, 曹明达, 等. 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.

[32]张强, 周忠发, 张绍云, 等. 织金洞洞穴环境 CO<sub>2</sub> 浓度的空间变化分析 [J]. *地球与环境*, 2016, 44(6): 654-662.

[33]潘新民, 祝学范, 黄智强, 等. 新疆百里风区地形与大风的关系 [J]. *气象*, 2012, 38(2): 234-237.

[34]JAMES E W, BANNER J L, HARDT B. A global model for cave ventilation and seasonal bias in speleothem paleoclimate records [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(4): 1044-1051.