

杨明凤, 殷建军. 岩溶洞穴温度与当地多年平均气温的关系研究——以云南普者黑排龙洞为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 780-795.
DOI: [10.11932/karst20240404](https://doi.org/10.11932/karst20240404)

岩溶洞穴温度与当地多年平均气温的关系研究 ——以云南普者黑排龙洞为例

杨明凤^{1,2}, 殷建军¹

(1. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;
2. 贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳 550018)

摘要:一般而言, 岩溶洞穴温度等于当地多年平均气温, 但实际监测中发现, 不同地区洞穴温度与当地多年平均气温的关系并不一致。为更好地认识岩溶洞穴温度与当地多年平均气温的关系, 对云南普者黑排龙洞洞穴内部及洞口温湿度进行连续高频监测, 发现平均温度呈现洞穴内部>洞外>洞口的空间特征。洞口温度主要受洞穴通风效应影响, 而洞穴内部温度则主要受到温度和降水的季节分布影响。结合我国已探究洞穴的洞穴内部温度与洞外气温进行比较分析得出: 就大的空间尺度而言, 洞穴温度同当地多年平均气温一样都与纬度呈现显著的负相关, 而洞内外温差与纬度呈现显著的正相关关系。通过分析不同区域气象数据发现, 洞内外温差的变化与当地暖季(4—10月)温度距平显著相关, 暖季时间越长, 暖季温度距平越大, 洞内外温差越大。另外, 雨季的时间分布同样会影响随滴水输入到洞穴的热量变化。因此, 认识到中国洞穴内外的温度差主要受控于当地热量的分布。这项工作将有利于我们更好的认识岩溶洞穴环境。

关键词:岩溶洞穴; 洞穴温度; 洞内外温差; 空间差异; 暖季温度距平

创新点:(1)首次发现中国区域洞内外温度差与纬度、经度的显著正相关关系;(2)首次提出暖季温度长度和温差是控制洞内外温度差的关键因素。

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2024)04-0780-16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶洞穴因其相对恒定的洞穴温度, 在旅游、医疗、储藏、科学研究及生物多样性保育等方面发挥着巨大的作用。特别是随着洞穴科学的研究发展, 岩溶洞穴及洞穴沉积物在气候变化研究领域的异军突起, 岩溶洞穴及洞穴环境的研究越来越受到重视。

洞穴调查和监测是了解洞内环境变化及其对洞外气候响应的有效手段, 因而备受利用洞穴石笋重建古环境的国内外专家的重视^[1-3]。洞穴环境的改变可以影响石笋的生长及其物质含量变化, 导致石笋气候环境替代指标指示意义发生改变, 从而影响石笋中替代指标对气候环境的解译^[4]。其中温度作为洞穴监测的重要指标, 其变化对碳酸钙的沉积速率或者

资助项目: 桂林岩溶地质广西野外科学观测研究站科研能力建设项目(桂科 23-026-274); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021002)

第一作者简介: 杨明凤(2000—), 女, 自然地理与资源环境专业本科生。E-mail: 2827425744@qq.com。

通信作者: 殷建军(1985—), 男, 副研究员, 主要从事岩溶环境与全球变化研究工作。E-mail: jianjunyin@foxmail.com。

收稿日期: 2023—01—16

石笋的生长速率^[5]、石笋中微量元素的分配系数^[6-7]产生影响。一般而言,洞穴温度是否恒定,是判断能否利用洞穴石笋开展古气候研究的前提条件之一。当然,一些特殊洞穴虽然洞穴温度存在显著的季节性变化,但洞穴石笋仍可以用来开展气候变化研究,如湖北和尚洞。因此,研究洞穴温度的变化具有十分重要的科学意义。

目前,随着洞穴研究和石笋古气候研究的兴起,国内外针对不同的洞穴环境开展了一系列的监测和研究工作。总体而言,封闭洞穴的温度与当地多年平均气温相当,且变幅很小^[8]。然而,不同洞穴的监测结果却显示,在不同的洞穴系统的洞内温度与洞外温度并非完全一致,如 Andrea Bussan^[9]于2019年4月25日至2021年5月8日对意大利 Costantino Doria 洞穴进行监测得到洞穴温度平均值为11.33 °C,结合洞外气象站数据,发现洞内平均温度小于同时期洞外温度(13.2 °C)。此外,Charlotte Honiat^[10]对阿尔卑斯山脉南部(Obir 和 Katerloch)两个洞穴的监测表明,两个洞穴多年平均温度 5.8 ± 0.1 °C 和 5.7 °C 也均小于当地多年平均气温 6.8 ± 0.1 °C 和 8.5 °C。而就国内洞穴而言,Duan W 等^[11]人在对河北承德兴隆洞的监测期间(2013年12月至2019年11月),发现洞穴气温的月变化非常有限,平均为 12.4 ± 0.4 °C,高于该地区年平均气温 9.1 ± 0.5 °C。同时李渊^[12]以贵州地区的6个洞穴进行监测研究,其中安顺市西秀区

七眼桥镇的玄母洞(12.8 °C)、石将军洞(14.7 °C)及贞丰县大消洞(13.6 °C)、荣发洞(14.8 °C)洞温分别小于当地气温(15.0 °C 和 18.4 °C),而毕节市七星区撒拉溪镇内的朝营洞(13.5 °C)和韩家冲洞(14.2 °C)洞温大于当地多年平均气温(12.0 °C)。

对此,笔者对国内洞穴监测文献进行搜集整理,发现我国的洞穴监测数据存在以下三种类型:(1)洞穴平均温度大于当地多年平均温度^[13-14];(2)洞穴平均温度小于当地多年平均温度^[15-16];(3)洞穴内部多年平均温度与当地多年平均气温相等^[17-18]。为什么不同洞穴内外温差会存在如此大的差异?受什么因素影响和控制?它们在空间上是否存在联系?基于上述疑问,本文以云南省普者黑排龙洞为例,并搜集整理中国已发表的相关数据,结合野外监测经验和相关分析,对上述问题进行探讨,以期促进同行对洞穴温度与当地多年平均气温之间关系的研究。

1 研究区概况

排龙洞位于云南省文山壮族苗族自治州丘北县双龙营镇普者黑村排龙组后山体之中(图1a)。洞口海拔1467 m,洞口高出平原面约20 m,洞顶盖层厚度小于60 m。洞穴全长约434 m,宽1.0~21.5 m,高1.0~9.0 m。洞穴基岩为中生代三叠系中统托味组(T_2)中厚层灰岩,洞穴主要受区域北西—南东向构

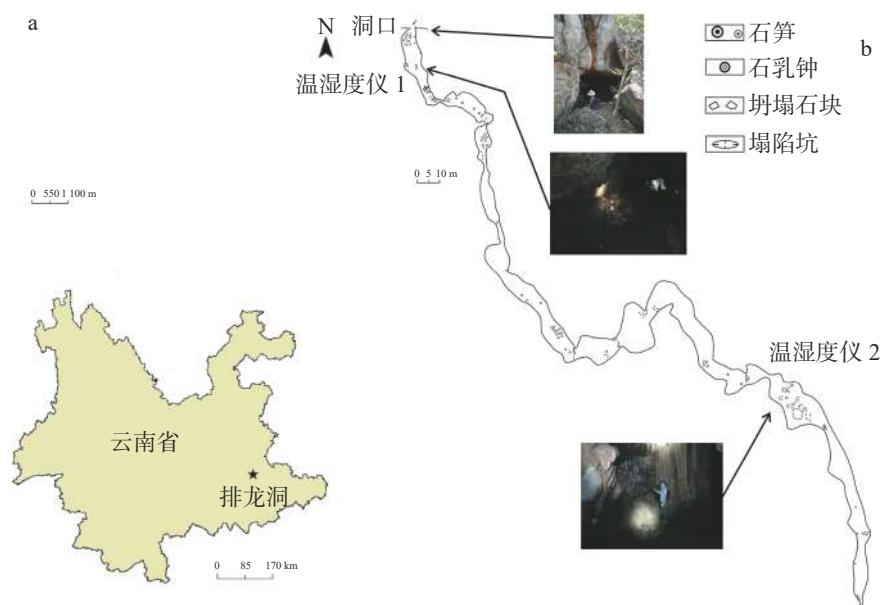


图1 云南普者黑排龙洞位置(a)及排龙洞监测点位置(b)

Fig. 1 Location of Pailong cave (a) and monitoring sites (b) in Pailong cave of Puzhehei in Yunnan

造控制。洞内沉积物非常丰富,石笋、石钟乳、石柱、石幔、石盾、卷曲石大量分布。洞内坍塌堆积石块,河道沉积黏土在部分洞道处可见。洞内蝙蝠较多,多处可见蝙蝠粪。洞穴温度约 19.14 ℃,湿度常年保持在 100%。

排龙洞所在的文山州属于亚热带季风气候。当地多年平均气温为 18.2 ℃,当地总体而言“冬无严寒,夏无酷暑”,月平均气温均在 10.0 ℃ 以上,最低月平均气温为 11.0 ℃(1 月),最高月平均气温为 22.9 ℃(6 月)。多年平均降水量为 996.5 mm。降水主要分布在 5—10 月,占全年降水量的 80% 以上。

2 研究方法

2.1 排龙洞数据监测及洞外气象数据的获取

在排龙洞洞口及洞穴内部放置 ONSET MX2301A 温度/相对湿度记录仪获取温湿度数据,温度精度为 0.2 ℃,湿度精度为 2.5%。设置记录时间间隔均为 1 h。洞口温度/相对湿度记录的时间始于 2019 年 8 月 9 日 20:00 时,其间,由于仪器故障,于 2020 年 2 月 26 日 20:00 时停止记录,修复后于 2020 年 10 月 21 日 11:00 再次启动,仪器正常并连续记录,结束于 2022 年 6 月 8 日 9:00 时。洞穴内部记录时间始于 2019 年 8 月 9 日 20:00 时,在 2020 年 10 月 12 日 13:00 时因电量耗尽停止记录,2020 年 10 月 21 日 14:00 时更换电池后,重新开始记录至存储器充满,结束于 2022 年 4 月 10 日 9:00 时。两个监测点的位置如图 1b。

洞外气象数据获取自云南文山气象站,数据来源于国家气象科学数据中心,<http://data.cma.cn/>。监测周期为 1955 年 11 月至 2019 年 6 月,本文提取日平均和月平均气象数据进行分析。

2.2 中国洞穴数据资料收集及洞顶植被指数获取

搜集已经发表的关于中国洞穴温度的相关论文,对其经纬度、洞穴海拔高度、洞穴长度、洞穴上覆盖基岩厚度、当地多年平均气温及洞穴温度的相关资料进行整理和统计。排除非长期监测(单次或者几次测量的洞穴温度数据)洞穴温度不具参考性的洞穴,最终选取含排龙洞在内的 48 个洞穴作为统计和分析对象。

洞顶植被情况用洞穴顶部植被指数表示,数据

来源于:中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据注册与出版系统,<http://www.resdc.cn>。选取 1998 年至 2018 年的中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据,提取年平均植被指数进行分析。

2.3 分析方法

利用 SPSS 25,结合 Origin 2022 绘图,ArcGIS 10.2 提取洞顶植被指数数据,对当地多年平均温度、洞穴温度及其影响因子进行相关性分析。

3 结果与讨论

3.1 云南普者黑排龙洞温湿度变化特征

3.1.1 温度变化特征

当地多年气象数据显示,当地温度从 1 月开始逐步上升,6 月温度升至最大值(22.9 ℃),5—8 月温度稳定在 22 ℃ 以上,8 月后逐步下降,降至次年 1 月,温度最低(11.0 ℃)。

排龙洞洞口温度变化大体与当地气温变化趋势一致,呈现明显的季节性变化特征。4—10 月温度相对偏高,11 月至次年 3 月温度相对偏低(图 2)。但洞口温度与当地气温却存在明显差异,表现为 4—10 月洞口温度明显偏低于当地气温,11 月至次年 3 月,当气温出现大幅降低时,洞口温度变幅明显偏小。如 2022 年 2 月 22 日,当地气温降至 0 ℃ 附近,洞口温度仍保持在 7.72 ℃。另外,每年 1 月份左右以后,当地气温表现为快速的上升过程,在 5—6 月达到当年的最高温度,随后温度逐渐降低,而洞口温度则表现为持续缓慢的上升过程,在 8—10 月份达到最高值,而后温度快速下降(图 2)。

相对于当地气温和洞口大幅度的温度变化,洞穴内部温度变化幅度较小,主要在 19.10~19.30 ℃ 之间波动,平均温度为 19.14 ± 0.06 ℃(图 2)。

3.1.2 湿度变化特征

不同于当地相对湿度的变化,排龙洞洞口相对湿度的变化与温度变化趋势更为相似(图 2)。洞口相对湿度变化表现为 4—10 月份相对湿度相对偏高,维持在 85% 以上,11 月至次年 3 月,相对湿度相对偏低并表现为高频波动变化,总体在 85% 以下且最大变幅超过 20%。与洞口温度变化相似,4—10 月相

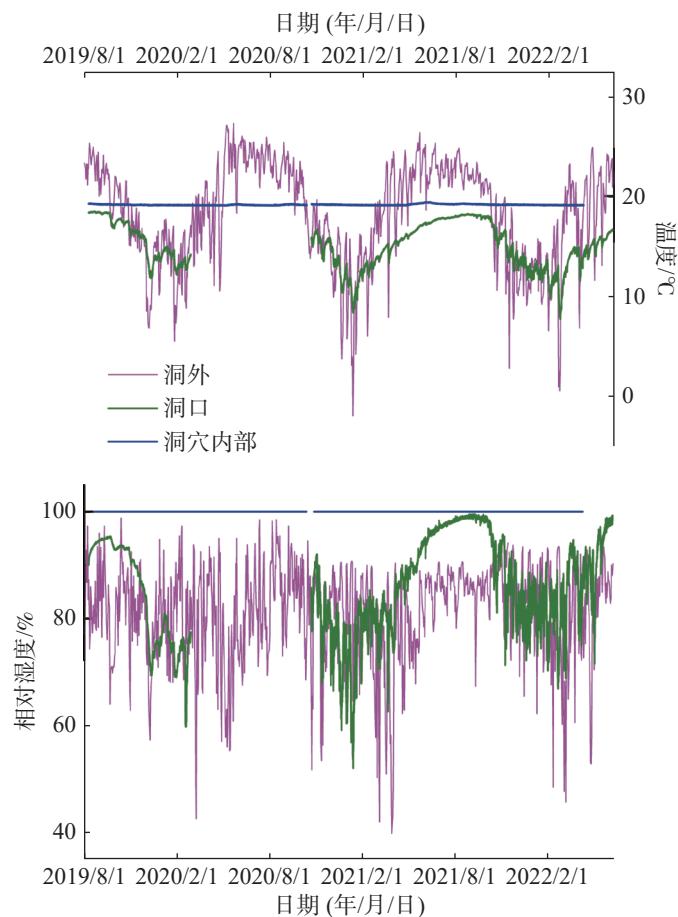


图2 云南普者黑排龙洞洞口及洞穴内部温湿度变化与当地温湿度对比

Fig. 2 Comparison between changes in temperature and humidity at the entrance of and inside Pailong cave and local temperature and humidity

对湿度表现为逐步上升的过程，并在8—10月达到最高值，总体维持在98%以上(图2)。

洞穴内部相对湿度常年无明显变化，一直维持在100%水平(图2)。

3.2 云南普者黑排龙洞温度与当地温度的差异

3.2.1 洞内外温度差异

根据前面分析可知，排龙洞洞穴内部、洞口温度变化均与当地气温存在差异。而这种差异更多表现为季节性差异，为更好地探究产生差异的原因，将数据统计成月平均数据，来比较洞穴内部、洞口温度变

化与当地气温的差异及可能原因。

通过统计1955—2019年当地的多年月平均气温，发现洞外气温1—6月上升，由11.0℃上升到22.9℃。6月后洞外气温逐步下降，由22.9℃下降到11.8℃(表1)。监测期间气温变化大致呈现正态分布。

洞口温度1—8月上升，由12.5℃上升到18.2℃，9—12月温度下降，从18.0℃下降至13.2℃(表1)。洞穴温度非正态分布的升温和降温过程明显区别于洞外大气温度呈现出的正态分布特征，在升温的春、夏两季，洞口温度呈现缓慢的上升过程，而在降温的秋、冬两季，总体呈现较快的下降过程。并且洞口温

表1 排龙洞洞外、洞口和洞穴内部月平均温度对比

Table 1 Comparison of the monthly average temperature outside, inside and at the entrance of Pailong cave

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
当地多年平均温度/℃	11.0	13.1	16.9	20.3	22.2	22.9	22.8	22.3	21.0	18.4	15.1	11.8
洞口月平均温度/℃	12.5	13.2	14.5	15.7	16.7	17.5	17.8	18.2	18.0	17.1	15.4	13.2
洞穴内部月平均温度/℃	19.1	19.1	19.1	19.1	19.2	19.2	19.1	19.2	19.2	19.1	19.1	19.1

度对洞外升温阶段的响应较及时, 没有出现响应滞后情况, 而降温阶段的响应滞后。

洞外多年平均温度约 18.2 °C。洞口年平均温度 14.9 °C, 而洞穴内部温度波动范围极小, 基本稳定在 19.1 °C 左右。平均温度: 洞穴内部 > 洞外 > 洞口, 且最高温度、最低温度均是洞口低于洞外(表 1)。为什么会产生这种差异呢? 笔者对洞口与洞穴内部温度分别进行了讨论。

3.2.2 洞口与洞外温度差产生的原因

洞穴温度变化受到多种因素的影响, 其中最主要还是受到洞外温度变化的影响。如洞穴易受到洞穴通风效应和洞穴水流导热的影响而发生温度的变化。排龙洞内无地下河, 因此主要从排龙洞的通风效应来分析洞穴温度变化。通风效应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的交换作用。通过洞内外的气流交换改变洞穴内部温度。一般而言, 产生的气流越强, 洞穴温度受外界温度的影响越大, 反之越小^[19]。另外, 温度变化同样影响洞穴通风效应, 一般而言, 空气温度越低, 密度越大, 反之, 大气温度越高, 空气密度越小。当两个区域内存在较大的密度差时, 空气从高密度区域流向低密度区域^[20]。因此, 洞穴内外温度差产生的空气密度差是形成排龙洞洞穴通风效应的直接动力因素。

此外, 在狭长型洞穴中, 随着距洞口的距离增加, 洞穴内部结构阻隔作用的增强, 受到通风效应的影响越小, 温度则越稳定。排龙洞洞穴结构狭长弯曲, 内部温湿度监测设置点距离洞口远, 且在距洞口 65 m 左右处的狭窄通道宽度不足 1 m, 很大程度上将洞穴内部隔离开(图 1b)。因此排龙洞内部气流交换作用弱, 洞穴内部温度稳定。

排龙洞作为单入口水平向洞穴, 通常情况, 通风主要受洞内外密度差驱动。目前对洞穴通风情况的判定较为精确的方法是通过计算虚拟温度差($\Delta T_v = T_v(\text{内}) - T_v(\text{外})$)来估算空气浮力差的变化^[21]。以 ΔT_v 表征洞穴通风情况, 当 $\Delta T_v > 0$ 时, 空气浮力差为正值, 洞内温度高于洞外温度, 洞内外气流交换属于积极通风状态, 此时洞内的暖轻空气被洞外的冷重气流挤压而离开洞穴。当 $\Delta T_v < 0$ 时, 洞内温度低于洞外温度, 空气浮力差为负值, 表示洞穴空气将滞留在洞内, 洞内外气流交换受到抑制。本研究尝试利用虚拟温度差(ΔT_v)表征排龙洞内外空气密度差, 判

断洞穴通风模式。

据图 3, 将排龙洞的通风模式划分为 3 类, 即积极性通风模式、限制性通风模式以及过渡阶段模式。1—3 月份, $\Delta T_v > 0$, 洞穴处于积极通风状态, 洞外冷空气自洞口向洞内流入, 洞内较暖较轻的空气自洞口上方流出。4—9 月份, $\Delta T_v < 0$, 洞穴处于限制性通风状态, 洞内冷空气自洞内向洞外流出, 外界较暖空气受到洞内低温的影响无法进入洞穴而在洞口附近冷却下沉, 仅在洞口形成小循环, 洞内外的气流交换受限。10 月份, ΔT_v 在 0 °C 上下波动, 为过渡阶段, 此时洞内外空气密度相差不大, 洞穴的气流交换处于限制性通风模式和积积极性模式的缓冲转换阶段, 气流交换不明显, 表现为洞口温度变化的滞后。11—12 月份, $\Delta T_v > 0$, 洞穴再次处于积积极性通风模式, 洞口温度变化显著, 下降快。因此, 洞口温度呈现夏季升温缓慢而冬季降温滞后且变化快的特征。

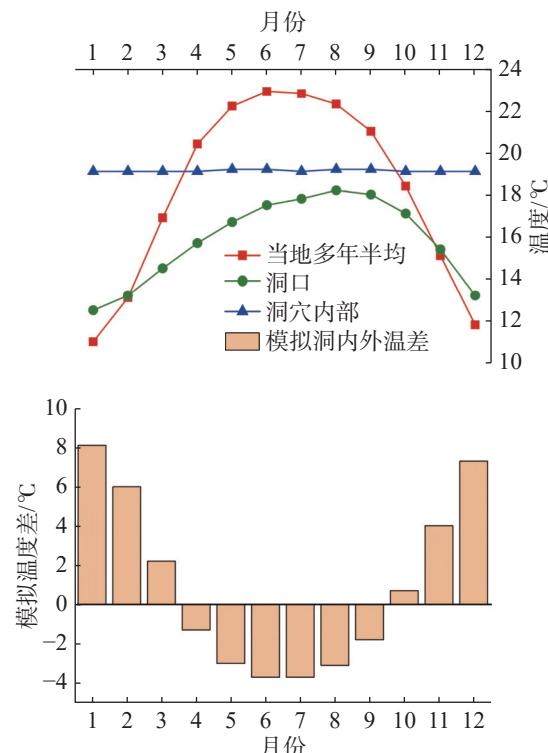


图 3 当地气温、排龙洞洞口和洞穴内部月平均温度与模拟温度差变化图

Fig. 3 Difference between local temperature, monthly average temperature and simulated temperature at the entrance of and inside Pailong cave

通过上述分析可知, 洞口的通风效应冬强夏弱, 冬季气流由洞外吹向洞内, 夏季气流由洞内吹向洞外。观察 ΔT_v 绝对值的变化, 洞口冬季 ΔT_v 绝对值

明显大于夏季, 证明洞口的气流主要受到洞外气流的影响。排龙洞洞口升温阶段因围岩的阻隔和岩石的热导性, 以及洞内吹出来的较弱气流而导致洞口增温受到阻碍; 降温阶段洞口受到洞外吹来的活跃气流, 迅速降温以至于洞口的温度变化不及洞外的温度变化剧烈。因此, 洞口平均温度及最高温度均都低于洞外多年平均温度。

3.2.3 洞穴内部与洞外温度差产生的原因

通过前面的分析可知, 洞穴内部平均气温较当地多年平均气温高, 那又是什么原因呢? 理论上讲, 洞穴内部温度与当地多年平均气温一致, 维持着能量平衡。那么排龙洞洞穴内部温度高于当地多年平均气温可能与当地热量的季节分布不均有关。通过统计当地多年月平均气温, 并与多年平均气温相减, 得出月平均气温距平, 可以发现当地 4—10 月月平均气温距平大于 0, 11 月至次年 3 月, 月平均气温距平小于 0。而对洞穴内部月平均气温做同样的处理, 发现洞穴内部月平均气温距平在 5—9 月大于 0, 在 10 月至次年 4 月小于 0, 且其平均气温均为 19.1 °C (表 1)。而前面分析得知, 10 月至次年 3 月, 洞内外空气交换最为剧烈, 表现为洞内的失温(图 3)。而 10 月至次年 4 月洞穴内部的气温保持不变, 说明由于洞穴内部相对封闭, 洞内外空气交换并未对洞穴内部热量产生明显影响。但温度距平 < 0, 说明还是存在微弱的失温。而在 5—9 月, 由于气温的升高, 虽然此时洞穴处于限制性通风模式, 外界温度很难通过空气输入, 但洞穴内部气温出现微弱上升。可能与外界大气通过基岩与洞穴内部进行热量传递和交换有关。但总体而言, 由于当地月均温距平大于 0 的时间较月均温距平小于 0 的时间偏长, 所以洞穴温度较当地多年平均气温偏高。

除空气外, 洞穴滴水可能是影响洞穴温度的另一重要因素^[8]。当降水量超过一定阈值时, 降雨是可以进入洞穴的, 且在雨季, 洞穴滴水的温度要高于洞穴温度^[22]。在中国东部季风区, 雨季降水集中了全年降水的 70% 以上, 雨季降水集中且当场降水量相对偏大, 而旱季降水相对分散且当场降水量相对偏小。总体而言, 雨季引起洞穴滴水快速响应的降水量阈值小于旱季^[22~23]。因此, 雨季滴水携带的升温信号大于旱季可能的降温信号。中国雨热同期的季风气候可能是导致洞穴内部温度与当地多年平均气温

差异的另一个重要原因。

虽然解释了有的洞穴内部温度高于当地多年平均气温, 但为什么有的洞穴内部温度低于多年平均气温呢? 为更好地认识洞穴内部温度为什么低于当地多年平均气温, 笔者对中国已经发表的关于洞穴温度的数据进行了搜集和整理, 并进行分析讨论。

3.3 中国洞穴内外温度差异及成因分析

3.3.1 温度差异特征

为探究洞穴温度的影响因素, 对已收集整理的中国已探究洞穴数据进行整理(表 2)。从表 2 可知, 由于我国岩溶分布的特点, 岩溶洞穴主要分布在我国西南地区。另外, 岩溶洞穴的发育除受到构造、岩性等控制之外, 还与气候密切相关, 中国东部的季风气候为岩溶洞穴发育提供了良好条件。因此, 岩溶洞穴主要发育在我国的季风区。我们统计的洞穴也大致分布在漠河—腾冲一线以东, 其中西南地区最多。

总体而言, 以长江为界, 以北大部分洞穴洞内外温差 > 0 °C, 以南大部分洞穴洞内外温差 < 0 °C (表 2)。总体而言, 以 110°E 为界, 以西大部分洞穴洞内外温差 < 0 °C, 以东大部分洞穴洞内外温差 > 0 °C (表 2)。

由表 3 可知: 洞穴温度与纬度、洞穴海拔高度及洞穴顶部年均植被指数之间均呈现出显著性负相关关系, 相关系数值分别是 -0.658, -0.511, -0.396, 意味着洞穴气温随着纬度、海拔高度和洞顶植被覆盖的升高, 洞穴温度呈现下降趋势。但与经度、洞穴长度和洞穴上覆基岩厚度之间均无显著的相关性。洞穴温度与经度无明显相关性是因为我国气温梯度变化主要是纬向变化。而与洞穴长度和洞穴上覆基岩厚度无显著相关性, 而说明相对封闭洞穴, 洞穴长度的增加以及通过基岩的热传导, 并不会导致洞穴温度的上升/下降, 因为其与当地多年平均气温达到了一定程度的均衡。前人研究指出随着洞穴上覆基岩厚度增加, 洞穴温度降低^[8], 本研究虽然发现洞穴温度与上覆基岩厚度存在正相关关系, 但并没有通过显著性检验, 具体原因需要进一步研究。当地多年平均气温与洞穴气温与其洞穴参数的关系一致(表 3), 说明洞穴温度主要受到当地多年平均气温的影响。

表2 搜集的已发表的洞穴相关数据
Table 2 Cave-related data collected from published essays

洞穴名	纬度	经度	洞穴海拔高度/m	洞穴长度/m	洞穴上覆基岩厚度/m	洞顶年均植被指数	洞穴多年平均气温/℃	当地多年平均气温/℃	洞内外温度差值/℃
排龙洞(云南)	24.1269	104.1496	1 467	434	60	0.7486	19.10	18.30	0.86
珍珠洞(河北) ^[16]	38.2600	113.7200	947	100	10	0.7935	9.00	13.00	-4.00
荣发洞(贵州) ^[12]	25.6414	105.6350	1 079	50	20	0.7310	14.80	18.40	-3.60
凉风洞(贵州) ^[15,24]	25.2667	108.0500	620	1 000	110	0.7914	15.10	18.60	-3.50
大消洞(贵州) ^[25]	25.6308	105.6361	1 209	110	22	0.7223	14.90	18.40	-3.46
葫芦洞(南京) ^[26-27]	32.0500	119.0333	70	64	7.5	0.7192	13.00	15.40	-2.40
仙云洞(福建) ^[28-29]	26.5500	116.9833	970	2 470	40	0.8270	17.50	19.90	-2.40
芙蓉洞(重庆) ^[30]	29.2289	107.9036	480	2 700	400	0.8059	16.40	18.70	-2.30
本寨洞(贵州) ^[31-32]	26.4906	106.0839	1 478	300		0.7659	12.80	15.00	-2.20
玄母洞(贵州) ^[12]	26.3075	106.1022	1 596	200	25	0.7779	12.80	15.00	-2.20
万象洞(甘肃) ^[33]	33.3333	104.9833	1 200	1 100	140	0.7383	12.60	14.60	-2.00
七星洞(贵州) ^[34]	25.9833	107.2667	987	383	90	0.7971	14.30	16.10	-1.85
梁天湾洞(重庆) ^[35]	29.0833	107.1670	1 460		200	0.8442	13.50	15.00	-1.50
凉风洞(广西) ^[36-37]	25.1989	110.5167	180	80	65	0.8078	18.4	19.50	-1.10
神奇洞(四川) ^[38]	28.9333	109.1000	1 407	400		0.7994	11.70	12.80	-1.10
羊口洞(重庆) ^[39]	29.0333	107.1833	2 140	2 245		0.8223	7.50	8.50	-1.00
羊子洞(重庆) ^[40-41]	29.7833	107.7833	400	500		0.7520	16.00	17.00	-1.00
暖和洞(辽宁) ^[42-43]	41.3333	124.9167	627	150	25	0.8787	6.00	7.00	-0.95
茅茅头大岩(广西) ^[44-45]	25.5833	110.5997	209	690	150	0.8116	18.80	19.50	-0.70
玉华洞(福建) ^[46-47]	27.1667	117.8167	300	5 000	40	0.8185	18.50	19.00	-0.50
水鸣洞(重庆) ^[48]	29.7833	107.7833				0.7520	13.50	14.00	-0.50
龙泉洞(贵州) ^[49]	25.5167	107.8333	520	1 300	115	0.7724	17.80	18.20	-0.40
和尚洞(湖北) ^[50-52]	30.4469	110.4200	294	250	175	0.8040	17.70	18.00	-0.30
石将军洞(贵州) ^[31,53]	26.2000	105.5000	1 300	500	100	0.6749	14.70	15.00	-0.30
科桑洞(新疆) ^[54]	42.8667	81.7500	2 000			0.7594	4.20	4.50	-0.30
水南洞(广西) ^[55-56]	25.2835	110.2679	170	250	90	0.5745	19.70	19.50	-0.20
东石崖洞(河南) ^[57-58]	33.7833	111.5667	840		35	0.7777	13.00	13.10	-0.10
玲珑洞(湖南) ^[59]	27.4833	111.5667	390	400	30	0.7263	18.00	18.00	0.00
盘龙洞(广西) ^[17]	24.9609	110.3548	200	251	105	0.5745	19.50	19.50	0.00
祥龙洞(陕西) ^[18]	33.0000	106.3333	940	1 200	50	0.7954	13.00	13.00	0.00
宝晶宫洞(广东) ^[60-61]	24.1167	113.3500	610		170	0.7063	21.30	21.20	0.10
雪玉洞(重庆) ^[62]	29.7833	107.7833	233	1 643	200	0.7520	17.00	16.50	0.50
董哥洞(贵州) ^[63]	25.3333	108.0833	608	1 107.7	100	0.8090	15.90	15.30	0.55
沙湾洞(贵州) ^[64-65]	26.3600	105.7600	1 170	30	7	0.7114	17.50	16.70	0.80
三宝洞(湖北) ^[54,66-67]	31.6667	110.4333	1 900		200	0.8404	8.50	7.50	1.00
石花洞(北京) ^[68-70]	39.6500	115.9333		5 000	80	0.6537	13.00	11.90	1.10
朝营洞(贵州) ^[12]	27.2306	105.1039	1 797	20	10	0.7629	13.50	12.00	1.50
宋崖洞(浙江) ^[71]	29.1667	119.6667	268	809		0.7629	19.00	17.50	1.50
神农宫(江西) ^[18]	28.7000	117.2500				0.4566	19.10	17.40	1.70
蓬莱仙洞(安徽) ^[26]	30.2333	117.5333	170	3 000		0.8263	18.00	16.00	2.00
仙人洞(云南) ^[72-73]	24.1167	104.1333	1 443		90	0.7328	18.70	16.70	2.00
韩家冲洞(贵州) ^[12]	27.2422	105.0739	1 818	30	17	0.7855	14.20	12.00	2.20

续表 2

洞穴名	纬度	经度	洞穴海拔高度/m	洞穴长度/m	洞穴上覆基岩厚度/m	洞顶年均植被指数	洞穴多年平均气温/℃	当地多年平均气温/℃	洞内外温度差值/℃
开元洞(山东) ^[74]	36.4089	118.0347	340	1 280	110	0.7261	15.00	12.80	2.20
九天洞(山东) ^[13,75]	36.2667	118.0668	470	1 010		0.6836	15.00	12.50	2.50
鸡冠洞(河南) ^[57]	33.7667	113.5667	900	5 600	35	0.8213	16.40	13.11	3.29
兴隆洞(河北) ^[11]	40.4833	117.4833	710	42	120	0.7990	12.40	9.10	3.30
本溪庙洞(辽宁) ^[76-77]	41.0500	125.5167	193	500	50	0.8286	11.50	7.40	4.10
本溪水洞(辽宁) ^[78-79]	42.2972	124.0713	262	5 800		0.8451	12.00	7.80	4.20

表 3 温度与影响因子的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of temperature and other influencing factors

	洞穴多年平均气温/℃	当地多年平均气温/℃	内外温度差值/℃
纬度	-0.658**	-0.794**	0.367*
经度	0.149	-0.034	0.345*
洞穴海拔高度/m	-0.511**	-0.396**	-0.149
洞穴长度/m	0.044	-0.157	0.338*
洞穴上覆基岩厚度/m	0.172	0.167	-0.028
洞顶年均植被指数	-0.396**	-0.335*	-0.066

注: *表示两种因子的相关性达到显著水平($P < 0.05$); **表示两种因子的相关性达到极显著水平($P < 0.01$)。

Note: * indicates a significant correlation at a 0.05 level; ** indicates a significant correlation at a 0.01 level.

不同于洞穴温度, 洞穴内部温度与当地多年平均气温的差值与纬度、经度和洞穴长度之间均呈现出显著正相关关系, 相关系数分别为 0.367, 0.345, 0.338(表 3)。意味着洞内外温度差与其经纬度空间分布及洞穴长度存在一定联系。前面分析知道, 洞穴温度与洞穴长度并无显著相关性。那为什么洞内外温差却与洞穴长度存在显著正相关呢? 这可能与我们前面讨论的空气对流有关, 即洞穴越长, 洞内外空气交换越小, 洞穴越短, 洞内外空气交换越大。那么, 洞内外温差为什么会与经纬度存在显著正相关关系呢?

3.3.2 洞内外温差与经纬度的关系

前面分析可知: 当地多年平均温度和洞穴多年平均温度与纬度均呈现显著的负相关(表 3), 从大尺度上进行分析: 随着纬度增加的同时太阳高度角递减, 导致太阳辐射减弱, 地面接收到的太阳能量减少, 温度降低。而洞穴温度的相关系数较当地多年平均气温而言有所减小, 考虑到洞穴温度与洞穴海拔高度呈现显著的负相关关系, 相同纬度下, 洞穴海拔越高, 洞穴温度降低。一定程度影响了洞穴多年平均温度与纬度的相关性。

为进一步探讨洞内外温度差与经纬度分布的关系, 我们引入暖季温度距平的概念, 即将当地多年月平均气温与多年平均气温的差值作为距平值, 大于 0 的时期我们定义为暖季。从纬向分布上, 我们选择桂林、宜昌、郑州和北京 4 个气象站点数据进行讨论, 探讨洞内外温度差与暖季温度距平的关系(图 4), 我们发现除桂林外, 其他 3 个站点在 4—10 月温度距平大于 0, 而桂林在 5—10 月温度距平大于 0, 暖季与冷季月份相等, 这可能是为什么桂林多个研究洞穴洞内外温度差小于当地多年平均气温的重要原因。当然, 降水与温度的不匹配有关, 如桂林降水主要发生在 4—7 月, 而温度距平大于 0 发生在 5—10 月, 导致暖季的热量无法最大限度输入, 而宜昌、郑州和北京的雨季主要发生在 5—9 月, 因此, 桂林洞内外温度差低于多年平均气温。这里, 我们将 4—10 月定义为暖季, 我们可以看到, 随着纬度的升高, 暖季温度距平随之升高(图 4a 和 b)。

而为了研究经向的变化, 我们以文山到桂林拉个剖面, 加上百色和河池共 4 个气象站点, 我们同样发现, 随着经度的增加, 洞内外温差随之增大(图 4c 和 d)。当然桂林多个洞穴洞内外温差是小于当地的多年平均气温的, 这主要还是受纬度控制的。但经

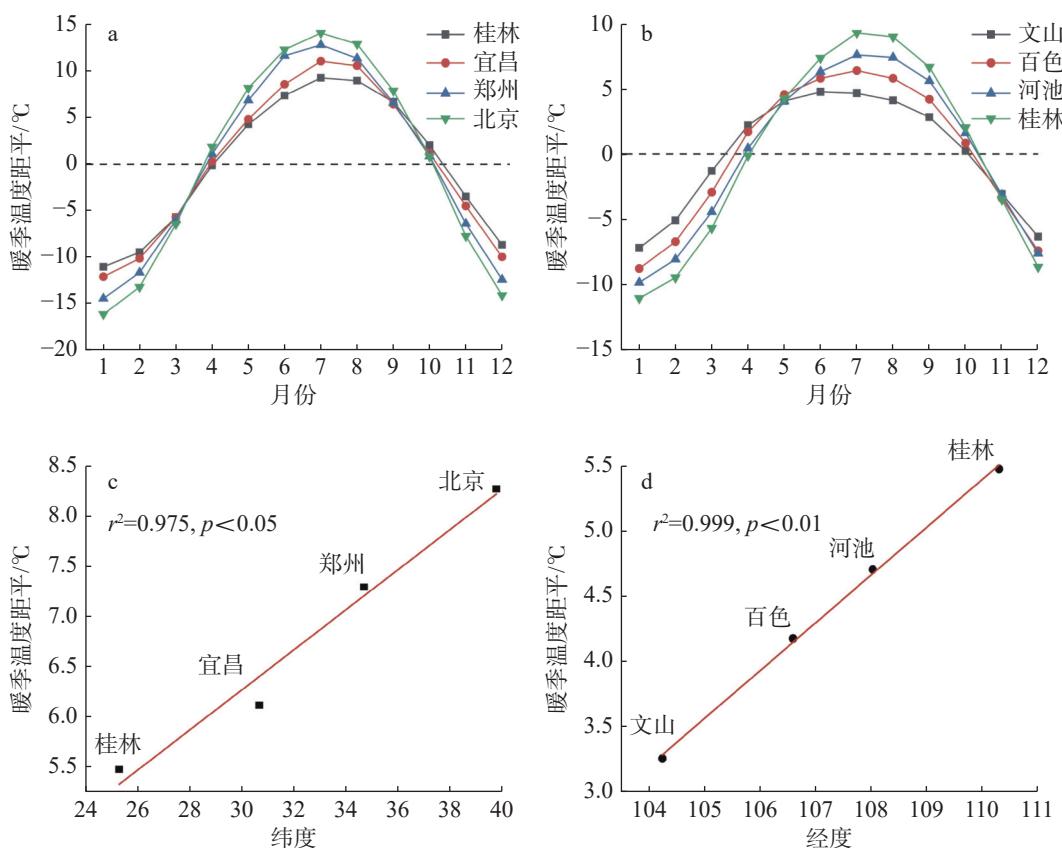


图4 暖季温度距平与经纬度分布的关系

Fig. 4 Correlation between temperature anomaly in the warm season and longitude and latitude

向分布的特征，同样表明暖季温度距平是影响洞内外温度差的关键因素。特别地，我们以云南文山向辽宁沈阳拉一条剖面，自西南向北东方向，随着经度和纬度的增加，洞内外温差由负变正，并逐渐增加。这也即为什么洞内外温差与经纬度显著相关。

3.3.3 洞内外温差与洞顶植被的关系

有研究指出植被的改变将导致地表温度的变化，进而影响洞穴温度的变化^[80-82]。表3表明洞穴内部温度、洞外气温与洞顶植被呈现显著的负相关，而洞内外温差与植被覆盖无明显相关性。洞顶植被变化通过生物物理过程影响地表能量平衡来影响地表温度^[79]，植被指数的上升形成的遮阳程度增强，导致洞外气温降低，由于植被的覆盖的变化，植被的反射和辐射改变了洞外气温热量平衡各要素。另外，植物冠层蒸腾作用增强，增加空气湿度，从而增加降雨，也会产生降温效应。而洞内温度随植被指数上升而下降原因在于洞穴在接收净太阳辐射的热量及其在土壤中的热传递受到洞顶植被覆盖变化而发生显著变化^[79]，植被覆盖高，使热量发生转

移，以至于洞内接收的热量减少，温度降低。表3显示洞穴温度与洞顶植被指数显著负相关，说明植被覆盖增加，遮阳效应增强，洞穴气温降低与前人的观测结果是一致的^[81]。但是洞内外温差与洞顶植被指数并无显著相关性，可能还是与在经向和纬向上，洞顶植被指数无显著增加趋势有关。即纬向上暖季温度距平对洞内外温差的影响大于洞顶植被覆盖对其影响。

3.3.4 洞内外温差与洞穴环境差异的关系

我们也发现位于广西桂林的水南洞、盘龙洞、茅茅头大岩及凉风洞的洞穴多年平均温度和当地多年平均气温的正负关系并不一致(表2)。相较水南洞和盘龙洞而言，茅茅头大岩和凉风洞内外温差较大，洞穴内部温度均小于洞外多年平均气温。茅茅头大岩洞内外温差为负，可能与茅茅头大岩上覆基岩厚度最大有关，前人研究指出，洞穴上覆基岩厚度越大，洞穴温度相对更低^[8]。不过前面分析也发现，就全国范围而言，洞内外温差与洞穴上覆基岩厚度并无显著相关，可能与上覆基岩厚度难以准确测量有关。

而凉风洞较茅茅头大岩而言, 洞内外温差更大, 可能是因为凉风洞是一个开放性洞穴, 且洞穴长度较短, 加之洞穴内部多处与地下河系统联通, 很大程度上增强了洞穴通风效应与洞内外的空气交换, 导致洞内外温差增加(类似于排龙洞洞口)。盘龙洞为近水平展布的旱洞, 开展了多年的长期监测, 发现洞穴内部相对封闭稳定, 与当地多年平均气温一致, 与洞穴空间发育条件密切相关。而水南洞与盘龙洞的发育较为一致, 理论上讲, 二者应该均与桂林多年平均气温一致, 但洞内外温差偏高 0.2 ℃, 可能与水南洞洞穴温度为单次或几次观测有关。因此, 洞穴环境的差异在一定程度上会导致对洞内外温差统计出现偏差。本文统计了全国 48 个洞穴, 虽然个别洞穴的差异可能会有所影响, 但是对随纬度增加, 洞内外温差增大的趋势难以改变。当然, 若在不同纬度选择合适的洞穴进行长期观测, 将使研究结果精度大大提高。

4 结 论

通过对云南普者黑排龙洞洞穴温度进行高分辨率的监测, 并搜集整理中国洞穴温度数据, 分析洞穴温度与气候环境因子的相互关系, 我们得到以下认识:

(1) 排龙洞洞穴多年平均温度在空间上呈现洞穴内部>洞外>洞口的特征, 其原因在于洞口的通风效应冬强夏弱, 且洞口冬季 ΔT_v 绝对值明显大于夏季, 证明洞口的气流主要受到洞外气流的影响。洞口升温阶段洞口因围岩的阻隔和岩石的热导性, 以及洞内吹出来的较弱气流而导致洞口增温受到阻碍; 降温阶段洞口受到洞外吹来的活跃气流, 迅速降温以至于洞口的温度变化不及洞外的温度变化剧烈。此外由于排龙洞特殊的结构, 洞穴内部处于一个十分封闭的状态, 温度稳定。因此, 多年平均温度的平均值及最大值均是洞口低于洞外。

(2) 通过统计中国已经发表的洞穴温度数据, 发现洞穴多年平均温度与纬度均呈现极显著的负相关, 而洞穴内外温差与纬度呈现正相关。洞穴温度与海拔高程、洞顶植被指数呈显著负相关关系。而洞内外温度差还与经度和洞穴长度存在显著的正相关关系。

(3) 洞内外温度差与经纬度的显著正相关, 可能

与我国典型的季风气候有关, 特别是暖季温度的分布。总体而言, 随着纬度和经度的增加, 洞内外温度差升高, 这与暖季温度距平随纬度和经度增加是一致的。而暖季与冷季长度的差异则是导致洞内温度高于/低于当地多年平均气温的关键因素。而雨季降水的分布, 也是导致热量输入差异的一个重要因素, 进而导致洞内温度高于/低于当地多年平均气温。另外, 洞穴环境的差异可能在一定程度上影响洞内外温度差。

致谢: 洞穴调查和监测得到了中国地质科学院岩溶地质研究所汪智军、李建鸿、张陶、陈金珂、叶昕霞、曾锐、王赛男等的帮助, 在此一并感谢。

参 考 文 献

- [1] Hansen M, Scholz D, Froeschmann M L, Schöne B R, Spötl Christoph. Carbon isotope exchange between gaseous CO₂, and thin solution films: Artificial cave experiments and a complete diffusion reaction model[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2017, 211: 28-47.
- [2] Surić M, Lončarić R, Bočić N, Lončar N, Buzjak N. Monitoring of selected caves as a prerequisite for the speleothem-based reconstruction of the Quaternary environment in Croatia[J]. *Quaternary International*, 2018, 494: 263-274.
- [3] Devriendt L S, Watkins J M, McGregor H V. Oxygen isotope fractionation in the CaCO₃-DIC-H₂O system[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2017, 214: 115-142.
- [4] 周福莉. 重庆芙蓉洞洞穴水—现代次生沉积物的地球化学特征、联系及意义[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- ZHOU Fulì. Research on the geochemical characteristics, relations and environmental significance of cave water-modern deposits in Furong Cave, Chongqing, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [5] Dreybrodt Wolfgang. Chemical kinetics, speleothem growth and climate[J]. *Boreas*, 1999, 28(3): 347-356.
- [6] Roberts M S, Smart P L, Baker A. Annual trace element variations in a Holocene speleothem[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 154: 237-246.
- [7] 李清, 王建力, 李红春, 叶明阳, 王勇, 李廷勇, 何潇. 重庆地区石笋记录中 Mg/Ca 比值及古气候意义[J]. 中国岩溶, 2008, 27(2): 145-150.
LI Qing, WANG Jianli, LI Hongchun, YE Mingyang, WANG Yong, LI Tingyong, HE Xiao. Climatic significance of the Mg/Ca ratio from speleothems in Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(2): 145-150.
- [8] 朱学稳, 汪训一, 朱德浩, 等. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [9] Bussani A. Seasonal characteristics of atmospheric thermal tides in "Costantino Doria" Cave (N. 3875 VG)[J]. *Atti e Memorie*

- della Commissione Grotte "Eugenio Boegan", 2022, 51: 41-67.
- [10] Honiat C, Koltai G, Dublyansky Y, Edwards R L, Zhang H, Cheng H, Spötl C. A paleoprecipitation and paleotemperature reconstruction of the Last Interglacial in the southeastern Alps[J]. *Climate of the Past Discussions*, 2022: 1-36.
- [11] Duan W H, Wang X, Tan M, Cui L L, Wang, X F, Xiao Z Y. Variable phase relationship between monsoon and temperature in East Asia during Termination II revealed by oxygen and clumped isotopes of a northern Chinese stalagmite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(15): 1-10.
- [12] 李渊. 喀斯特石漠化地区洞穴滴水元素特征分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017.
- LI Yuan. Analysis of elements characteristics of cave drip water in the karst rocky desertification areas[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017.
- [13] 马倩倩. 山东半岛九天洞洞穴滴水微量元素季节变化及其气候环境意义研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2014.
- MA Qianqian. Research on the seasonal variation of trace elements in drip water of Jiutian cave in Shandong Peninsula and their implications for climate and Environment[D]. Yantai: Ludong University, 2014.
- [14] Jia W, Zhang P Z, Zhang L L, et al. Highly resolved $\delta^{13}\text{C}$ and trace element ratios of precisely dated stalagmite from Northwestern China: Hydroclimate reconstruction during the last two millennia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 291: 107473.
- [15] 罗维均, 王世杰. 贵州凉风洞大气降水-土壤水-滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号传递及其意义[J]. *科学通报*, 2008, 53(17): 2071-2076.
- [16] Li Y X, Rao Z G, Xu Q H, et al. Inter-relationship and environmental significance of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ records from Zhenzhu cave, North China, over the last 130 ka[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 536: 116149.
- [17] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 陈坤琨, 彭稳, 邹丽霞. 桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义[J]. 地球与环境, 2009, 37(1): 1-10.
- ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, LIN Yushi, CHEN Kunkun, PENG Wen, ZOU Lixia. Study on the variation of physical-chemical properties of dripping water in the Panlong cave in Guilin and its significance[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(1): 1-10.
- [18] 张鹤娇, 蔡演军, 张海伟, 谭亮成, 秦世江. 神农宫和祥龙洞气温季节变化特征及其对石笋氧同位素组成的可能影响[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 363-372.
- ZHANG Heqiao, CAI Yanjun, ZHANG Haiwei, TAN Liangcheng, QIN Shijiang. Seasonal temperature changes in Shennonggong and Xianglong caves and their potential impact on oxygen isotope composition of stalagmite carbonate[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(3): 363-372.
- [19] Smithson P A. Inter-relationships between cave and outside air temperatures[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1991, 44: 65-73.
- [20] James E W, Banner J L, Hardt B. A global model for cave venti-
- lation and seasonal bias in speleothem paleoclimate records[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(4): 1044-1051.
- [21] 安丹, 周忠发, 范宝祥, 薛冰清, 朱粲粲, 石亮星. 贵州大风洞洞穴空气 CO_2 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.
- AN Dan, ZHOU Zhongfa, FAN Baoxiang, XUE Bingqing, ZHU Cancan, SHI Liangxing. Air CO_2 concentration and response of dripping water chemistry to cave ventilation in Dafeng cave of Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 338-345, 352.
- [22] 殷建军, 郭小娇, 姜光辉, 郭芳, 唐伟, 汤庆佳, 刘绍华. 桂林硝盐洞洞穴滴水示踪及气候环境意义研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 18-23.
- YIN Jianjun, GUO Xiaojiao, JIANG Guanghui, GUO Fang, TANG Wei, TANG Qingjia, LIU Shaohua. Tracer test of drip water in Xiaoyan cave, Guilin and its climatic and environmental significance[J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(4): 18-23.
- [23] 郭小娇, 龚晓萍, 袁道先, 殷建军, 姜光辉, 林玉石, 白冰, 汤庆佳, 陈长杰. 典型岩溶包气带洞穴滴水水文过程研究: 以桂林硝盐洞为例[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 537-548.
- GUO Xiaojiao, GONG Xiaoping, YUAN Daoxian, YIN Jianjun, JIANG Guanghui, LIN Yushi, BAI Bing, TANG Qingjia, CHEN Changjie. Research on hydrological processes of cave dripping water in a typical karst vadose zone: A case study of Xiaoyan cave, Guilin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 537-548.
- [24] 朱小龙, 罗维均, 王世杰. 贵州凉风洞洞穴系统锶同位素特征[J]. 地球化学, 2018, 47(2): 209-216.
- ZHU Xiaolong, LUO Weijun, WANG Shijie. The characteristics of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the Liangfeng cave system, Guizhou, China[J]. *Geochimica*, 2018, 47(2): 209-216.
- [25] 胡晨鹏, 刘子琦, 吕小溪, 李渊, 罗鼎. 洞穴滴水水文地球化学的季节变化及其环境指示意义: 以贵州大消洞为例[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2135-2145.
- HU Chenpeng, LIU Ziqi, LYU Xiaoxi, LI Yuan, LUO Ding. Seasonal changes in hydrogeochemistry of cave drip water and its environmental indicator significance: A case study of Daxiao cave in Guizhou[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(7): 2135-2145.
- [26] 张伟. 相同气候条件下不同洞穴沉积差异机理研究: 来自葫芦洞和蓬莱仙洞的证据[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- ZHANG Wei. The mechanism of different depositional patterns in different caves under the same climate conditions: Evidence from Hulu cave and Penglaixian cave[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.
- [27] Liu S S, Liu D B, Wang Y J, Zou L Z, Gao H. Spatio-temporal expressions of precessional-scale stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ variations from the Asian monsoon area[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 585: 110720.
- [28] 车印平, 肖海燕, 姜修洋, 蔡炳贵. DO4 事件的精确定年及亚旋

- 回特征: 来自福建龙岩仙云洞石笋的证据[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 377-384.
- CHE Yiping, XIAO Haiyan, JIANG Xiuyang, CAI Binggui. Precise dating of the Dansgaard-Oeschger event 4 and its sub-cycles: Evidence from a stalagmite from Xianyun cave in Longyan City, Fujian Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(2): 377-384.
- [29] 崔梦月, 肖海燕, 孙晓双, 洪晖, 姜修洋, 蔡炳贵. 福建仙云洞石笋记录的 Heinrich 1 事件突变特征 [J]. 科学通报, 2017, 62(26): 3078-3088.
- CUI Mengyue, XIAO Haiyan, SUN Xiaoshuang, HONG Hui, JIANG Xiuyang, CAI Binggui. Characteristics of the Heinrich 1 abrupt climate event inferred from a speleothem record from Xianyun cave, Fujian Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(26): 3078-3088.
- [30] 黄春霞, 李廷勇, 韩立银, 李俊云, 袁娜, 王海波, 张涛涛, 赵鑫, 周菁俐. 重庆芙蓉洞洞穴水 DIC- $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征及影响因素 [J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 299-306.
- HUANG Chunxia, LI Tingyong, HAN Liyin, LI Junyun, YUAN Na, WANG Haibo, ZHANG Taotao, ZHAO Xin, ZHOU Jingli. Variations of cave water DIC- $\delta^{13}\text{C}$ and its influencing factors in Furong cave, Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(3): 299-306.
- [31] 吕小溪. 洞穴滴水的水文地球化学过程及其石漠化环境响应: 以贵州 6 个洞穴为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- LYU Xiaoxi. Hydrogeochemical process of cave drip water and its response to karst desertification: With a special reference to six caves in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [32] 付超凡. 喀斯特石漠化地区洞穴滴水阳离子变化特征与环境响应[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.
- FU Chaofan. Positive ion characteristics of cave drips and responds to environment in karst rocky desertification area[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2014.
- [33] 袁野. 甘肃武都万象洞石笋灰度、微层特征及其古气候意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- YUAN Ye. The gray and micro-layer characteristics of stalagmite from Wanxiang cave in Gansu Province and their significance in reconstruction paleoclimate[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [34] 殷建军, 林玉石, 唐伟, 程海, EDWARDS R L. 贵州七星洞石笋记录的一次强降水事件的探讨[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 326-332.
- YIN Jianjun, LIN Yushi, TANG Wei, CHENG Hai, EDWARDS R L. A tentative discussion on a heavy precipitation event recorded by stalagmites from Qixing cave, Guizhou Province[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 326-332.
- [35] 何潇, 王建力, 李清, 李红春, 李廷勇, 程海. 重庆地区石笋沉积速率与古气候意义初探[J]. 中国岩溶, 2007, 26(3): 196-201.
- HE Xiao, WANG Jianli, LI Qing, LI Hongchun, LI Tingyong, CHENG Hai. Growth rate and the paleoclimatic significance of stalagmites in Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(3): 196-201.
- [36] 吴夏, 潘谋成, 曹建华, 朱晓燕, 张美良, 杨会, 唐伟, 蓝高勇. 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.
- WU Xia, PAN Moucheng, CAO Jianhua, ZHU Xiaoyan, ZHANG Meiliang, YANG Hui, TANG Wei, LAN Gaoyong. Characteristics of open cave environment and its influencing factors: A case study of Liangfeng cave, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 361-369.
- [37] 吴夏. 桂林洞穴滴水和现代沉积物对气候变化的响应研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- WU Xia. Response of cave dripping water and modern sediments in Guilin to climate change[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [38] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. High resolution monsoon precipitation changes on southeastern Tibetan Plateau over the past 2,300 years[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 195: 122-132.
- [39] 张涛涛, 李廷勇, 韩立银, 程海, 李俊云, 赵鑫, 周菁俐. MIS 5a/5b 时期亚洲夏季风变化的高分辨率石笋记录 [J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 162-170.
- ZHANG Taotao, LI Tingyong, HAN Liyin, CHENG Hai, LI Junyun, ZHAO Xin, ZHOU Jingli. Variation of the Asian summer monsoon during the MIS 5a/5b period inferred from a new high-resolution stalagmite record[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(2): 162-170.
- [40] Shi X, Yang Y, Cheng H, et al. Influences on Asian summer monsoon during Dansgaard-Oeschger events 19 to 25 (70–115 kyr BP)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 587: 110798.
- [41] 黄帆, 杨勋林, 吕春艳, 李辰丝, 张月明. 重庆羊子洞高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 65—90ka BP 气候变化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 166-173.
- HUANG Fan, YANG Xunlin, LYU Chunyan, LI Chensi, ZHANG Yueming. A high-resolution stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record about 65–90 ka BP from Yangzi cave, Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, 36(5): 166-173.
- [42] 张伟宏, 吴江滢. 辽宁暖和洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 对全新世气候变化的生态响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 147-154.
- ZHANG Weihong, WU Jiangying. Ecological response of $\delta^{13}\text{C}$ to holocene climate changes from stalagmite record in Nuanhe cave, Liaoning[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3): 147-154.
- [43] 郭允. 早全新世辽宁暖和洞石笋纹层与气候事件研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [44] 韩军. 桂林洞穴滴水及其化学沉积物的地球化学特征研究摘要 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2006.
- HAN Jun. The studies on cave dripwater and the feature of its geochemical parameters in Guilin area[D]. Beijing: Chinese

- Academy of Geological Sciences, 2006.
- [45] 殷建军, 唐伟. 桂林茅茅头大岩近 50 年来石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与局地气候/大尺度环流关系探讨[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 2035-2042.
YIN Jianjun, TANG Wei. The relationship between local climate/large scale circulation and $\delta^{18}\text{O}$ recorded by stalagmite in the past 50 years from Maomaotou big cave, Guilin[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(8): 2035-2042.
- [46] 杨邦. 大气降水—洞穴滴水—现代碳酸盐沉积氧同位素传递研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
YANG Bang. Transmission of oxygen isotope signal in precipitation-drip water-speleothem in Yuhua cave[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2014.
- [47] 姜修洋, 李志忠, 李金全, 孔兴功, 郭允. 最近 500 年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 207-212.
JIANG Xiuyang, LI Zhizhong, LI Jinquan, KONG Xingong, GUO Yun. Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Yuhua cave over the past 500 years and its regional climate significance[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(2): 207-212.
- [48] 张月明, 杨勋林, 黄帆, 程海, 杨琰, 吕春艳, 李辰丝. 重庆丰都高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与 AD1250-1750a 季风气候变化[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 117-123.
ZHANG Yueming, YANG Xunlin, HUANG Fan, CHENG Hai, YANG Yan, LYU Chunyan, LI Chensi. A high-resolution stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record from Shuiming cave over the past 500 years[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(3): 117-123.
- [49] 张美良, 朱晓燕, 程海, 林玉石, 覃嘉铭, 冉景丞, 王华, 何师意. 贵州荔波 1200 年来石笋高分辨率的古气候环境记录[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 831-840.
ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, CHENG Hai, LIN Yushi, QIN Jiaming, WANG Hua, FENG Yumei, TU Linling, ZHANG Huiling. Records of carbon and oxygen isotopes and palaeoclimate reconstruction from a stalagmite formed during 140–250 ka B.P. in Shuinan cave, Guilin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1): 57-68.
- [50] 何璐瑶, 胡超涌, 曹振华, 马仲武, 熊志方. 湖北清江和尚洞洞穴温度对气候变化的响应[J]. 中国岩溶, 2008, 27(3): 273-277.
HE Luyao, HU Chaoyong, CAO Zhenhua, MA Zhongwu, XIONG Zhifang. Correspondences of Heshang cave temperature to climatic change in Qingjiang, Hubei[J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(3): 273-277.
- [51] 廖金. 喀斯特土壤有机质的输出与演化: 以湖北清江和尚洞为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
LIAO Jin. Export and evolution of karstic soil organic matter: A case study from Heshang cave, Southern China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.
- [52] 张翠贞, 朱宗敏, 丁建宇, 石太衡. 鄂西和尚洞石笋 500 年生长周期及其对区域水文变化的响应[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 246-253.
ZHANG Cuizhen, ZHU Zongmin, DING Jianyu, SHI Taiheng. 500-year growth cycle of stalagmite and its response to regional hydrological changes in Heshang cave, western Hubei[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 246-253.
- [53] 刘子琦, 李开萍. 贵州石漠化地区降雨期间洞穴 CO_2 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 Ziqi, LI Kaiping. Variation and its effect factors of cave air CO_2 during rainfall in rocky desertification area in Guizhou: A case study of Shijiangjun cave[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2018, 36(4): 13-17.
- [54] 胡超涌, 汪颖钊, 李骜扬, 廖金, 谢树成. 中国东部季风区与西北干旱区降水变化的石笋记录对比[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(2): 268-274.
HU Chaoyong, WANG Yingzhao, LI Aoyang, LIAO Jin, XIE Shucheng. Speleothem-based rainfall records: A comparison of the arid region of Northwest China to the monsoon region of the eastern part of China[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(2): 268-274.
- [55] 张美良, 程海, 林玉石, 覃嘉铭, 王华, 冯玉梅, 涂林玲, 张会领. 桂林地区水南洞 14~25 万年石笋的碳氧同位素记录和古气候重建[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 57-68.
ZHANG Meiliang, CHENG Hai, LIN Yushi, QIN Jiaming, WANG Hua, FENG Yumei, TU Linling, ZHANG Huiling. Records of carbon and oxygen isotopes and palaeoclimate reconstruction from a stalagmite formed during 140–250 ka B.P. in Shuinan cave, Guilin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1): 57-68.
- [56] 张美良, 林玉石, 覃嘉铭, 李彬. 桂林水南洞 1 号石笋的年龄与稳定同位素测定及其古气候意义[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 41-47.
ZHANG Meiliang, LIN Yushi, QIN Jiaming, LI Bin. Ages and stable isotopic measurements of No.1 stalagmite from Shuinan cave in Guilin and their palaeoclimatic implications[J]. Geology-Geochemistry, 2000, 28(1): 41-47.
- [57] 田宁. 豫西现代岩溶洞穴碳同位素演化过程及其环境意义[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
TIAN Ning. Environmental significance of the modern karst cave in the western of Henan Province[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [58] Zhang N, Yang Y, Cheng H, Zhao J Y, Yang X L, Liang S, Nie X D, Zhang Y H, Edwards R L. Timing and duration of the East Asian summer monsoon maximum during the Holocene based on stalagmite data from North China[J]. The Holocene, 2018, 28(10): 1631-1641.
- [59] Liu Y, Hu C, Belshaw N S. Reconstruction of the East Asian Summer monsoon rainfall distribution at centennial scale during the Last Glacial Maximum[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 556: 109879.
- [60] Tian L, Zhou H, Duan W. The evaporation effect on transmis-

- sion of oxygen isotope signal of drip water in Baojinggong, Guangdong revealed by cave monitoring[J]. Quaternary Science, 2013, 33: 618-620.
- [61] 童晓宁, 周厚云, 黄颖, 贺海波, 朱礼妍. 广东英德宝晶宫 CO₂ 浓度的时空变化特征[J]. 热带地理, 2013, 33(4): 439-443.
TONG Xiaoning, ZHOU Houyun, HUANG Ying, HE Haibo, ZHU Liyan. Spatio-temporal variation of air CO₂ concentration in Baojinggong cave, Guangdong, China[J]. Tropical Geography, 2013, 33(4): 439-443.
- [62] 王晓晓. 雪玉洞洞穴系统碳的变化特征及洞内 CO₂ 来源研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
WANG Xiaoxiao. The character of carbon variation and source of CO₂ in Xueyu cave[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [63] 赵侃. 贵州董哥洞近 1000 年石笋纹层年代学与同位素气候重建[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
ZHAO Kan. Annually-counting chronology and the isotopic climate reconstruction over the past millennia from stalagmites in Dongge cave[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.
- [64] 吕伊娜. 洞穴系统现代过程监测及其指示意义: 以普定沙湾洞为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
LYU Yina. Monitoring of modern process in the cave system and its indicative implications for paleoenvironment: A case study from the Shawan cave, Puding, Guizhou[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [65] Wang Y W, Luo W J, Zeng G N, Wang Y, Yang H L, Wang M F, Zhang L, Cai X L, Chen J, Cheng A Y, Wang S J. High ²²²Rn concentrations and dynamics in Shawan cave, Southwest China[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2019, 199-200: 16-24.
- [66] 崔田丰, 段福才, 张伟宏, 董进国, 朱丽东. 石笋初始²³⁴U/²³⁸U 值的冰量周期特征及其环境意义: 以湖北三宝洞为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(2): 301-308.
CUI Tianfeng, DUAN Fucai, ZHANG Weihong, DONG Jinguo, ZHU Lidong. Ice volume cycle characteristics and the environmental significance of the initial ²³⁴U/²³⁸U ratio inferred from stalagmites: A case study from Sanbao cave, Hubei[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(2): 301-308.
- [67] 董进国, 刁伟, 孔兴功. 湖北三宝洞石笋²³⁸U 值变化的古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 129-135.
DONG Jinguo, DIAO Wei, KONG Xingong. Variation in uranium isotopes of stalagmites from Sanbao cave, Hubei Province: Implications for palaeoclimate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(1): 129-135.
- [68] 班凤梅. 洞穴滴水地球化学变化特征及其与土壤过程的联系[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
BAN Fengmei. Temporal and spatial variations of cave dripwater geochemistry and its soil processes in Shihua cave, Beijing, China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [69] 李芳. 北京石花洞灯光植物调查与治理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
LI Fang. A study on survey and control of Lampenflora within Shihua cave, Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [70] 傅迷, 张文昭, 王俊辉, 唐洁云, 许新路, 黄文辉. 北京石花洞岩溶景观特色及成因探讨[J]. 资源与产业, 2010, 12(6): 149-155.
FU Mi, ZHANG Wenzhao, WANG Junhui, TANG Jieyun, XU Xinlu, HUANG Wenhui. Karst landscape features and genesis of Beijing Shihudong cave[J]. Resources & Industries, 2010, 12(6): 149-155.
- [71] 崔田丰. 浙江宋崖洞石笋记录的晚全新世气候和环境变化[D]. 金华: 浙江师范大学, 2019.
CUI Tianfeng. Late Holocene paleoclimatic and paleoenvironmental evolutions recorded by stalagmite mental evolutions recorded by stalagmite[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2019.
- [72] Duan W H, Cai B G, Tan M, Liu H, Zhang Y. The growth mechanism of the aragonitic stalagmite laminae from Yunnan Xianren cave, SW China revealed by cave monitoring[J]. Boreas, 2013, 4: 113-123.
- [73] Duan W H, Ruan J Y, Luo W J, et al. The transfer of seasonal isotopic variability between precipitation and drip water at eight caves in the monsoon regions of China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, 183: 250-266.
- [74] 程珂, 王庆, 郑志惠, 战超, 周厚云, 迟宏. 山东开元洞滴水微量元素季节变化特征及影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 154-162.
CHENG Ke, WANG Qing, ZHENG Zhihui, ZHAN Chao, ZHOU Houyun, CHI Hong. Seasonal variations in trace elements and influencing factors in drip water from Kaiyuan cave, Shandong Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(1): 154-162.
- [75] 周长春, 王晓青, 孙小银, 武传震. 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.
ZHOU Changchun, WANG Xiaoqing, SUN Xiaoyin, WU Chuanyi. A test analysis of environmental changes of tourism karst caves and study on influencing factors: A case of Jiutian cave in Yiyuan county, Shandong Province[J]. Tourism Tribune, 2009, 24(2): 81-86.
- [76] 闫禹, 王芳, 蔡炳贵, 马志邦, 李苗发, 李婷婷. 辽宁本溪庙洞石笋氧同位素记录的距今 4—3 千年东亚夏季风演化历史[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(1): 19-25.
YAN Yu, WANG Fang, CAI Binggui, MA Zhibang, LI Miaofa, LI Tingting. Variability in East Asian summer monsoon during 4-3 ka BP recorded by stalagmite δ¹⁸O sequence from Benxi, Liaoning Province[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2017, 12(1): 19-25.
- [77] 赵雷, 吉奇, 林双, 吴英杰. 1953—2012 年桓仁县气温与蒸发量变化特征及趋势分析[J]. 现代农业科技, 2015(3): 226-228.
ZHAO Lei, JI Qi, LIN Shuang, WU Yingjie. Analysis on varia-

- tion characteristics and trend of temperature and evaporation in Huanren county from 1953 to 2012[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(3): 226-228.
- [78] 蔡炳贵, 沈凜梅, 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.
- [79] 李婷婷. 本溪水洞高分辨率石笋氧同位素记录的 5.82~4.77 kaBP 东亚季风演化过程[D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
- LI Tingting. The evolution of East Asian monsoon during [80] 5.82–4.77 ka BP recorded by a high-resolution stalagmite δ¹⁸O from Shuidong cave, Liaoning Province[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017.
- Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance[J]. *Nature Communication*, 2018, 9: 697.
- [81] Domínguez Villar D, Fairchild I J, Baker A, Carrasco R M, Pedraza J. Reconstruction of cave air temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation changes: Implications for speleothem palaeoclimate records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369-370: 158-168.
- Ferguson G, Beltrami H. Transient lateral heat flow due to land-use changes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242: 217-222.

Relationship between temperatures of karst caves and local average temperatures: Taking Pailong cave of Puzhehei, Yunnan as an example

YANG Mingfeng^{1,2}, YIN Jianjun¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang, Guizhou 550018, China)

Abstract Generally speaking, temperatures of karst caves are comparable to local annual average temperatures. However, the actual monitoring has found that the relationship between cave temperatures and local annual average temperatures varies in different regions. To understand the relationship between these two kinds of temperature, we monitored the temperatures of Pailong cave in Puzhehei, Yunnan Province, Southwest China. Our high-resolution monitoring discovered higher temperatures within the cave compared to the local annual average temperatures and the temperatures at the cave entrance. Temperatures at cave entrance were primarily affected by ventilation, while temperatures inside the cave were influenced by seasonal temperatures and precipitation. The monitoring revealed a stronger effect of ventilation in winter and a weaker one in summer at the cave entrance. Additionally, monthly temperatures exceeded local annual temperatures from April to October, and fell below them from November to March, indicating that longer and effective heat import and less heat loss led to higher temperatures inside the cave. Rainfall during the rainy season (May to October) formed a fast flow into the cave and transfers heat, further increasing cave temperatures. Thus, longer and effective heat import, less heat loss, and rainfall-induced heat import resulted in higher cave temperatures than local annual average temperatures. To validate our hypothesis, we collected 48 published data on cave temperatures from China and analyzed the temperature differences inside and outside the cave. Generally, the difference is positive in the north of the Yangtze River and negative in the south. It is positive in the east of longitude 110°E and negative in the west.

Correlation analysis between cave temperatures and other influencing factors such as latitude, longitude, altitude, bedrock depth, and overlying vegetation index shows that there is a significant negative correlation between cave temperatures and factors of latitude, altitude, and overlying vegetation index. The same is true of the correlation between local annual average temperatures and these factors, suggesting that cave temperatures are primarily influenced by local annual average temperatures. Weak ventilation effects can be attributed to the large depth of caves, and thus resulting in a negative correlation between the temperature difference inside and outside the cave and the cave

length. Interestingly, the temperature differences inside and outside the cave correlate positively with latitude and longitude. To explain this, we introduce the concept of temperatures in the warm season (April to October), when the monthly temperature minus the annual temperature is above zero. We found significantly positive correlations of temperatures in the warm season with latitude as well as with temperature difference inside and outside the cave, indicating a longer warm season and anomaly of higher temperatures in the warm season may contribute to the large temperature difference inside and outside the cave.

Furthermore, the rainy season may also influence cave temperatures via heat that is generated by drip water and transported into the cave. Hence, the temperature difference inside and outside the cave is primarily influenced by heat distribution. For instance, temperatures in the warm season increase from Guilin of South China to Beijing of North China. Similarly, temperatures in the warm season also increase with longitude. For example, temperatures in the warm season increase from Wenshan of Southwest China to Guilin of South China. Although the overlying vegetation index negatively correlates with cave temperatures and local annual average temperatures, there is no significant correlation between the overlying vegetation index and the temperature difference inside and outside the cave, probably because the dense vegetation cover can reduce the heat transported to the cave and lower cave temperatures. However, the vegetation cover does not vary significantly with latitude. Additionally, differences in cave structure and environment also affect the temperature difference inside and outside the cave. For example, temperatures in the caves of Guilin are respectively equal to (e.g. Panlong cave), above (e.g. Shuinan cave), or below (e.g. Maomaotou Big cave) the local annual average temperatures. Thus, selecting appropriate caves will ensure the accuracy of statistical results in understanding the difference between cave temperatures and local annual average temperatures. Though some individual results may influence statistical results, the positive correlation between the temperature difference inside and outside the cave and latitude indicated by the 48 cave data will not change. Finally, the long-term monitoring in some closed cave systems at different latitudes can increase the precision of the results.

Our study highlights the local seasonal heat distribution and heat transport in the cave as the primary factors that influence cave temperatures, and our study will contribute to a better understanding and protection of the karst cave environment.

Key words karst cave, cave temperature, temperature difference inside and outside the cave, spatial discrepancy, temperature anomaly of the warm season

(编辑 张玲)