

吴夏,潘谋成,曹建华,等. 开放洞穴环境变化特征及其影响因素:以桂林凉风洞为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3):361-369.
DOI:10.11932/karst2018y16

开放洞穴环境变化特征及其影响因素 ——以桂林凉风洞为例

吴夏^{1,2}, 潘谋成¹, 曹建华¹, 朱晓燕¹, 张美良¹, 杨会¹, 唐伟¹, 蓝高勇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. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:通过对桂林凉风洞洞穴内、外温湿度、 $p\text{CO}_2$ 进行连续高频监测,发现洞穴温度受大气度温影响呈现出季节性变化规律。由于受到洞穴结构的阻隔作用影响,洞穴由外向里的温度变化幅度逐渐变小,并且响应的存在季节性差异。监测数据表明:洞穴内部温度的季节性变化幅度明显低于洞外气温变化幅度。比较洞内、外温度的时间序列发现,在季节尺度上洞穴温度升温阶段滞后时间长(与外部通风的气温流动交换慢),降温阶段滞后时间短(与外部通风的气温流动交换快,呈现突变特征),这可能与不同季节洞穴内部结构的“缓冲作用”的强弱变化有关。该洞穴空气中 $p\text{CO}_2$ 存在明显的夏季高、冬季低的季节性变化特征。并且外界大气环境季节性变化和洞穴上覆动植物的季节性活动,使得洞穴 $p\text{CO}_2$ 主控因素也存在季节性差异。

关键词: 洞穴温度; 洞穴湿度; 洞穴 $p\text{CO}_2$; 季节性变化

中图分类号: P642.25; P463.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2019)03-0361-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

当今,对洞穴监测以查明洞穴内部环境对外界环境变化的响应,受到利用洞穴石笋重建古环境的国内外专家的重视^[1-3]。但是由于不同研究区域地形、地貌、气候环境等因素存在差异,使得国内外许多学者认为洞穴内部第四纪古气候重建载体—石笋中气候替代指标的解释存在不确定性或者多解性^[4-5]。然而,洞穴内部环境对石笋的物理化学指标具有重要影响,通过系统研究洞穴环境各项指标在不同尺度上的演变特征,有助于从机理上解译洞穴沉积物记录的古气候信息^[6]。由于岩溶洞穴系统条件的变化,使得岩溶系统封闭(或开放)程度对洞穴顶部基岩溶解量的控制起着重要的调控作用^[7-8]。如果岩溶洞穴内部是相对封闭的环境,则一般认为洞穴深部有一个相对

稳定的温度—恒温,而这个温度类似洞穴外部的年平均温度^[9]。由于地表温度和洞穴温度之间存在联系,导致在洞穴第四纪载体中可记录地表的温度变化。在较短时间尺度上可认为洞穴温度相对保持恒定,然而最近的洞穴监测结果表明不同类型的洞穴系统温度变化特征存在差异^[10-12]。由于洞穴温度是洞穴内部环境重要环境参数,对洞穴内部物质和能量的迁移转换有着重要的影响^[13]。此外,洞口通风是岩溶洞穴物质交换的主要方式,主要是洞内外气压差和温度梯度驱动^[14],二氧化碳作为驱动岩溶作用最主要的物质^[15],在岩溶洞穴中的分布及其对区域碳循环的影响已受到比较广泛的关注^[16]。研究表明,岩溶洞穴中的二氧化碳主要来源于土壤/表层岩溶带扩散、洞穴沉积物中有机质分解、动物呼吸和内源二氧化碳,其中,土壤二氧化碳的扩散是最主要的。同时,洞

基金项目:国家自然科学基金项目(41501222; 41530316; 41701235);广西青年科学基金项目(2018GXNSFAA281320)

第一作者简介:吴夏(1984—),男,副研究员,主要研究方向:稳定同位素地球化学。E-mail: wuxia@karst.ac.cn。

收稿日期:2018-01-30

穴空气中二氧化碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值兼具土壤空气和大气二氧化碳的特征,说明洞穴通风对洞内二氧化碳有强烈影响。此外,洞内外季节性温差和气压的变化导致洞穴内部 $p\text{CO}_2$ 变化,进而对碳酸盐沉积物同位素值有至关重要影响^[17-19]。因此,进行现代洞穴系统监测是解译石笋中环境替代指标所蕴含环境信息的有效途径,也是近年来国内外研究的洞穴碳源、汇的研究热点之一。现阶段国内针对不同洞穴环境开展了一系列监测工作,在较短时间尺度上可认为洞穴温度相对保持恒定,然而最近的洞穴监测结果表明不同类型的洞穴系统温度变化特征存在差异^[11,20]。这两类洞穴中的石笋都能够记录外界环境信息,但是是否因为洞穴环境存在着差异而导致记录环境信息存在不同,值得深入研究。

从2015年5月6日开始,笔者对广西桂林市潮田乡毛村凉风洞以监测现代环境信息纵向迁移过程为科学目标的洞穴过程观测,获取了洞内、外温、湿度、 $p\text{CO}_2$ 长时间序列、高分辨率的监测数据。因此本文将利用该监测的温、湿度数据,来对比研究洞内温度的变化特征及其对洞外气候变化的时空响应规律,以探究洞内环境变化与外界气候变化之间的响应。

1 研究地区与方法

凉风洞(N: $25^{\circ}11'55.93''$, E: $110^{\circ}31'42.66''$)位

于桂林南部 38 km 处毛村的潮田河边(图 1A)。凉风洞发育在上泥盆统融县组灰岩中,属下层洞穴,洞口标高 183 m,洞长约 80 m,洞高 2~7 m,洞宽 5~8 m。桂林凉风洞为一残存洞道,由干洞和部分水洞组成,洞穴次生化学沉积物丰富。洞道位于潮田河岸边的山峰半腰上,次生林植被茂盛,洞穴地表生态环境较好,洞穴周缘保持较好的水汽环境。洞穴入口是由洞道顶部基岩坍塌形成,并且洞穴内部多处与地下河系统联通。洞穴顶部覆盖层厚度为 60~70 m,洞穴顶部没有裂缝或者天窗。其覆盖植被类型主要为灌木丛,顶部土壤类型以灰褐、黄褐色黏土为主,土壤分布不均匀,厚度为 30~50 cm。洞早期洞穴次生化学沉积物丰富,洞道多为石柱,壁流石等填充,因风化作用强而具有褐黄色—黑色风化壳。并且该洞穴有许多现代滴水以及正在沉积的现代碳酸盐沉积。洞穴内部上层沉积了胶结和半胶结卵砾石和砂卵石层,具河流相斜层理、交错层理。洞穴中有丰富或大量的现代滴水和新的碳酸盐—新石笋沉积。

该洞穴所处区域为属于亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,夏季的降水主要受到夏季风的影响,4月至8月的降水量相对较大,年均气温 19.5°C ,年均降水量 1 868 mm。该洞穴为开放洞穴,受到外界大气温度变化影响。桂林凉风洞为非旅游洞穴,洞内环境不受人为的干扰影响。

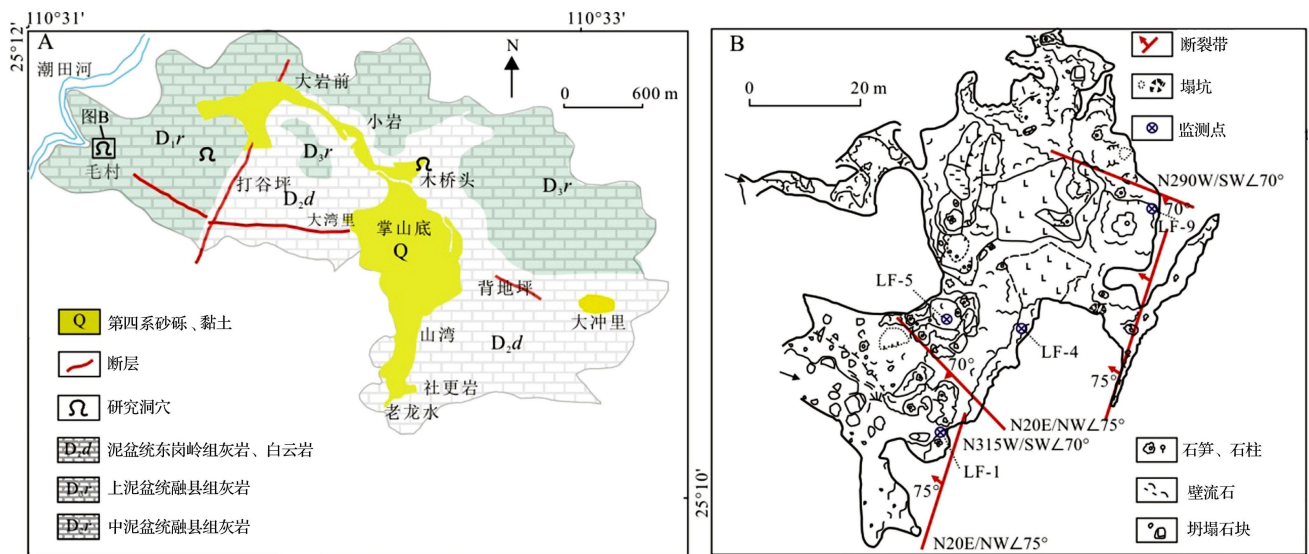


图 1 研究区位置与监测点分布示意

Fig. 1 Distribution of the Liangfeng cave and the monitoring sites

(A. 洞穴地理位置图; B. 洞穴监测点位置投图)

2 研究方法

洞穴外部大气环境数据由放置在洞穴附近的自动气象站(型号:HOBO U30)记录,记录时间间隔是1 h,温度精度为0.2℃,湿度精度为2.5%。气象站记录的时间始于2015年5月5日至2017年1月15日。洞穴内部环境的温度和湿度由放置不同洞穴位置的自动温湿度记录仪记录(型号:HOBO U23-001),记录时间间隔是1 h,温度精度为0.2℃,湿度精度为2.5%。洞穴的池水温度由放置池水内部的自动温记录仪记录(型号:HOBO UTBI-001),记录时间间隔是1 h,温度精度为0.2℃。本次研究从洞口向洞穴内部依次分布监测点,编号为LF-1、LF-4、LF-5、LF-9(图1B)。将所有仪器记录的温度和湿度数据进行日平均处理。监测期间LF-5监测点在2016年6月28日由于仪器故障,没有记录温、湿度数据。在2016年11月1日将温湿度记录仪取出更换后又重新投入使用。LF-5池水温度记录仪于2015年6月5日放入池水中连续记录温度。LF-4和LF-9池水温度记录仪于2016年3月28日放入池水中连续记录温度。

收集气体使用自制气泵分别抽取约100 mL大气和洞穴空气注入已抽取真空的铝箔气体采样袋内。为避免人为呼吸作用的影响进气口距离操作者2~3 m处。室内利用中国地质科学院岩溶动力学重点实验室的Agilent 7890B气相色谱仪,FID检测器测定野外收集的CO₂气体浓度,实验前使用不同浓度的标准气体校准。

3 结果与分析

3.1 洞穴温湿度受大气环境影响的季节变化规律

桂林凉风洞(LF-1、LF-4、LF-5、LF-9点)洞穴温度呈现出明显的季节性变化规律(图2)。洞穴空气温度变化与大气温度的季节变化相似,存在明显的升温 and 降温过程。洞穴温度最低值出现在1—2月份,在2月底洞穴温度受到大气升温的影响而开始缓慢直线型升温,直至最高温的9月。因此,洞穴温度最高值出现在9月份,随后受到大气降温的影响而开始快速阶梯状降温,直至次年最低温的1月。整个监测期间,洞穴温度非正态分布的升温 and 降温过程明

显区别于大气温度表现出的正态分布特征。由此可见,洞穴内部温度对大气温度的响应过程存在明显的季节性差异,在升温的春、夏两季洞穴温度呈现缓慢的升温过程,而秋、冬两季呈现出快速的下降过程。凉风洞总体上为洞穴温度升温阶段滞后时间长,但是降温阶段滞后时间相对较短。

LF-1点洞穴温度变化范围为8.6℃至22.2℃,平均值为17.5℃;LF-4点洞穴温度变化范围为12.9℃至21.1℃,平均值为18.2℃,该点LF-4C池水温度变化范围为14.5℃至20.5℃,平均值为18.6℃;LF-5点洞穴温度变化范围为8.7℃至20.7℃,平均值为16.6℃,该点LF-5C池水温度变化范围为7.0℃至20.0℃,平均值为16.4℃;LF-9点洞穴温度变化范围为14.2℃至21.0℃,平均值为18.4℃,该点LF-9C池水温度变化范围为15.6℃至20.4℃,平均值为18.9℃;而洞外大气温度变化范围3.5℃至36.1℃,平均值为21.9℃。桂林凉风洞洞穴温度季节性变化幅度是明显小于大气温度的变化幅度,反映了洞穴系统对洞穴温度调节作用,即洞穴内部结构抑制了空气与外部环境进行热交换作用。并且由于受到洞穴内部结构和该洞穴下部地下河水的叠加影响,加强了洞穴内部的通风效应以及洞内与洞外的空气交换,而这一点也在其他洞穴得到印证^[21-23]。桂林凉风洞除了洞口LF-1冬季时湿度小于100%,监测期间的洞穴湿度基本维持100%。洞口LF-1冬季时湿度小于100%主要是由于受到外部相对较干大气湿度的影响。而洞穴深处监测点由于空气流动性相对较弱,导致其该处洞穴空气相对湿度幅度基本稳定。各个监测点的池水温度变化趋势与该点处洞穴气温变化趋势基本相同,但是池水温度的变化范围和变化幅度要小于洞穴温度。这主要是由于池水与洞穴空气热交换速率相对洞穴大气与外界大气交换速率相对较慢。

桂林凉风洞(LF-1、LF-4、LF-5、LF-9点)洞穴温度与大气温度、大气降水量的线性相关图(图3)。LF-1和LF-5监测点温度与大气温度线性关系分别为 $R^2=0.74$ 、 0.68 ,LF-4监测点温度与大气温度线性关系分别为 $R^2=0.51$,LF-9监测点温度与大气温度线性关系分别为 $R^2=0.45$ 。洞穴内部监测点的温度线性关系总体上呈现出 $LF-1$ 、 $LF-5 > LF-4 > LF-9$ 。LF-1和LF-5与大气温度线性关系明显高于其他两处,主要是由于LF-1和LF-5

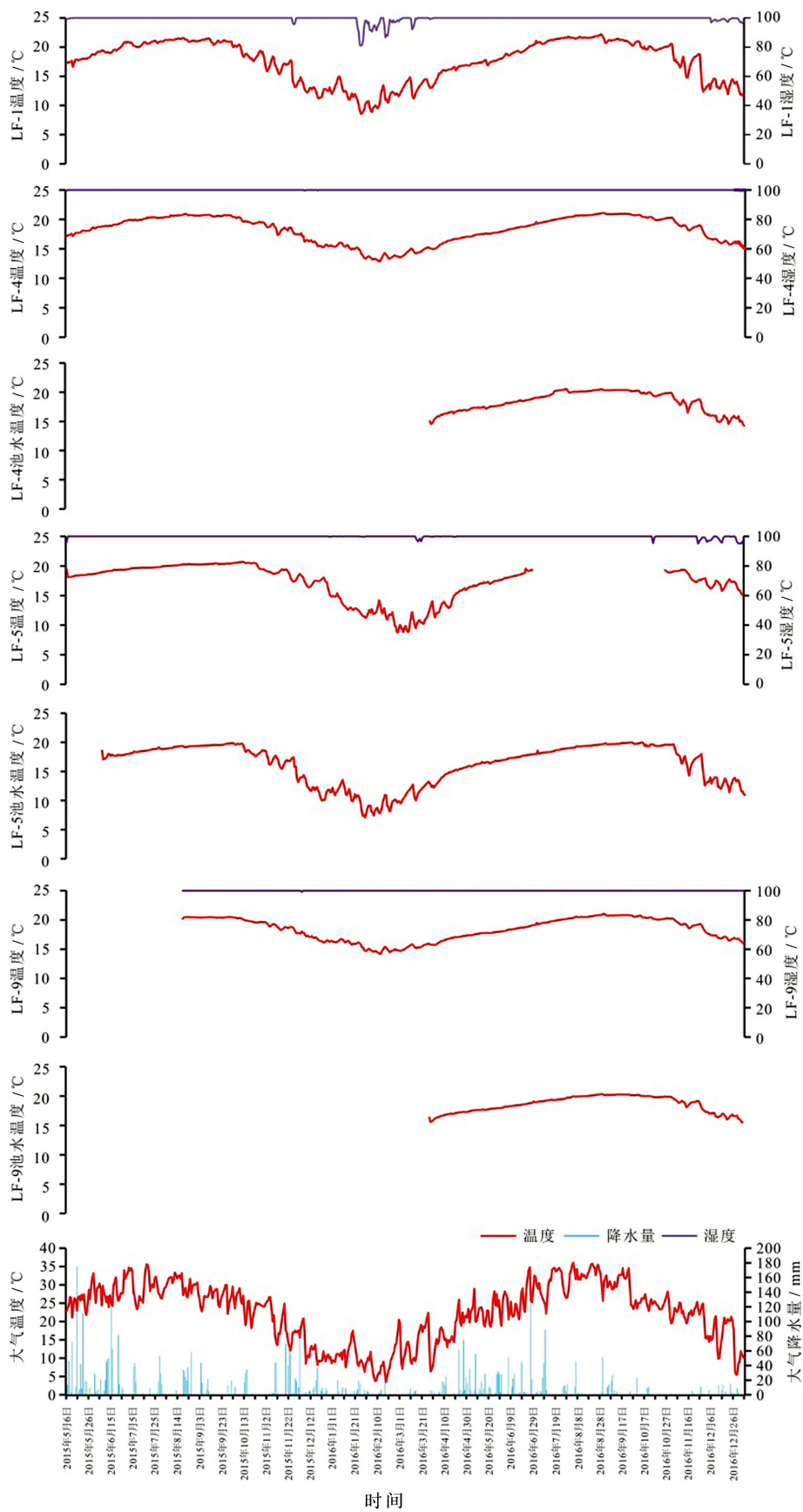


图 2 凉风洞洞穴温湿度季节性变化

Fig. 2 Seasonal variation of humidity and temperature in Liangfeng cave

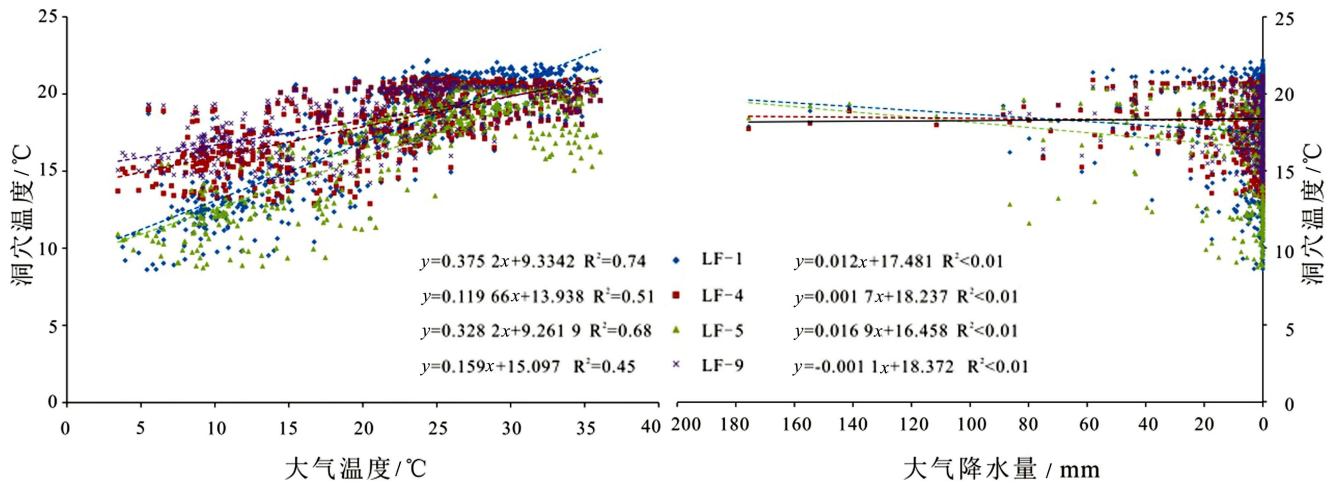


图3 凉风洞洞穴温与大气温度、降水量线性相关

Fig. 3 Linear correlations between cave temperature and atmospheric temperature and precipitation in Liangfeng cave

与外界大气直接连通,热交换较好。LF-4 监测点温度的线性关系位于 LF-1、LF-5 和 LF-9 之间,主要其位于洞穴大厅处过渡带,与外界大气连通和热交换都小于前两者。LF-9 监测点温度线性关系最小主要是由于该监测点位于洞穴最内部,受到洞穴内部结果的影响导致其与外界大气连通性弱,热交换也相对较差。凉风洞洞穴内部四处温度监测结果说明凉风洞洞内空气温度除了受外界温度的影响外还具有相对独立性,且距离洞口越远受外界温度变化的影响越小。四个监测点的温度与大气降水量均无明显线性关系($R^2 < 0.01$),说明对于凉风洞控制其洞穴温度的主控因素为外界大气温度。

3.2 洞穴内部温湿度变化特征

桂林凉风洞的内部温度变化如图3所示,从洞口温度(LF-1)到洞穴最深部温度(LF-9)的变化幅度逐渐变小。LF-1 和 LF-5 靠近洞口,受外界气候影响最为明显,LF-1 洞穴的最低温度为 8.6 °C,最高温度为 22.2 °C,相差 13.6 °C;LF-5 的最低温度为 8.7 °C,最高温度为 20.7 °C,相差 13.0 °C,两者基本上与洞外的气温变化基本相同。进入洞穴内部,洞穴内部丰富的次生化学沉积物—石柱、壁流石类等结构的阻隔作用开始发挥效应,并且洞穴深度增加,效应越明显。如 LF-9 处观测点,其冬、夏季温差为 6.8 °C,而洞穴中部 LF-4 的季节温度差为 8.2 °C,两者变化幅度均明显小于洞口监测点。说明变化幅度随着洞穴深度增加而稳定。这主要是由于热交换从洞口(LF-1、LF-5)到洞深部传递过程中受到洞

穴内部结构影响而逐渐减弱,使得洞穴内部(LF-9)气温变化幅度相对减小。此外,例如 2017 年 3 月 7 日上午 12 时气温 22.40 °C,而后由于受到冷空气影响气温 8 日下降至 11.75 °C、9 日下降至最低温度 6.39 °C,整个降温幅度为 16.01 °C。2017 年 3 月 7 日 LF-1 处洞穴温度为 14.47 °C,虽然 8 日大气温度已经处于降温阶段而该处洞穴温度任然处于升温,升至 8 日的 14.85 °C 后,9 日才开始逐步降温,响应时间存在 1 天的滞后,最后 11 日降至最低温 11.20 °C,整个降温幅度为 0.75 °C。2017 年 3 月 7 日 LF-4 处洞穴温度为 14.56 °C,一直升温至 10 日最高温度 15.06 °C 后,11 日才开始逐步降温,响应时间存在 3 天的滞后,最后 14 日降至最低温 14.24 °C,整个降温幅度为 0.81 °C。2017 年 3 月 7 日 LF-5 处洞穴温度为 15.09 °C,一直升温至 9 日最高温度 15.47 °C 后,10 日才开始逐步降温,响应时间存在 2 天的滞后,最后 12 日降至最低温 14.16 °C,整个降温幅度为 0.93 °C。2017 年 3 月 7 日 LF-9 处洞穴温度为 15.48 °C,一直升温至 10 日最高温度 15.89 °C 后,11 日才开始逐步降温,响应时间存在 4 天的滞后,最后 14 日降至最低温 15.17 °C,整个降温幅度为 0.72 °C。2016 年 11 月 20 日洞穴温度响应外界大气降温时间也存在同样响应差异。凉风洞中 4 个监测洞穴温度点响应时间存在差异,说明洞穴内部结构的阻隔也使得洞穴温度与外界大气温度的变化不完全同步。总体而言,桂林凉风洞洞穴温度的季节变化明显,其变化幅度大于国内研究一些大型洞穴的温度变

化^[10,23],与笔者长期监测的桂林盘龙洞^[24]的温度也存在差异,可能是洞穴长度较短、洞口较大等特殊的洞穴结构导致了较强洞穴内外热交换。

3.3 洞穴内部 CO₂ 浓度季节性变化特征

CO₂ 气体在 CaCO₃(固)–CO₂(气)–H₂O(液)三相不平衡系统中起着重要的十分重要的作用。与此同时,岩溶作用又对整个系统中的 CO₂ 气体具有一定的调控作用。2015 年 6 月 5 日至 2016 年 12 月 23 日大气 pCO₂ 浓度变化范围 409.0×10⁻⁶至 643.0×10⁻⁶,季节性变化幅度为 234.0×10⁻⁶,平均值为 463.9×10⁻⁶。凉风洞中空气 pCO₂ 变化范围:LF-1 为 417.0×10⁻⁶至 706.8×10⁻⁶,季节性变化幅度为 289.8×10⁻⁶,平均值为 529.0×10⁻⁶;LF-4 为 434.0×10⁻⁶至 667.7×10⁻⁶,季节性变化幅度为 233.7×10⁻⁶,平均值为 531.7×10⁻⁶;LF-5 为 432.5×10⁻⁶至 692.3×10⁻⁶,季节性变化幅度为 259.8×10⁻⁶,平均值为 550.9×10⁻⁶;LF-9 为 434.6×10⁻⁶至 751.3×10⁻⁶,季节性变化幅度为 316.7×10⁻⁶,平均值为 553.9×10⁻⁶(图 4)。凉风

洞洞穴空气 pCO₂ 变化呈现出季节性变化特征:夏、秋季高(平均值为 582.9×10⁻⁶),秋、冬季低(平均值为 485.0×10⁻⁶)。桂林凉风洞的 pCO₂ 监测结果发现,洞穴内部空气 pCO₂ 浓度与国内已经报道监测洞穴相比明显偏低^[23,25–26],可能是由于洞穴封闭程度存在差异所造成的,但是夏季时洞穴空气中 pCO₂ 浓度整体还是高于大气 pCO₂(图 4),主要是受到洞穴顶部土壤在 5–8 月高温多雨气候背景下,微生物分解有机质转化为 CO₂ 释放出来^[27–28],随着淋失进入洞穴中。洞穴空气 pCO₂ 整体上也是夏季高于冬季,主要是由于桂林地区雨热同季,夏季时,受到夏季风影响降水量增加,气温升高,同时导致植物根系呼吸作用和土壤微生物作用增强,使得洞穴顶部上覆土壤层 pCO₂ 上升。从而在降水充沛的夏季,高浓度的土壤 pCO₂ 被雨水携带进入洞穴使得洞穴 pCO₂ 浓度上升。同时,由于洞穴内部多处滴水沉积,方解石过饱和发生沉积,逸出的 CO₂ 进入洞穴空气中。因此夏季降水量增加,沉积量增多,逸出的 CO₂ 也逐渐增加。因此滴水 pCO₂ 溢出也促进了洞穴 pCO₂ 浓度上升。

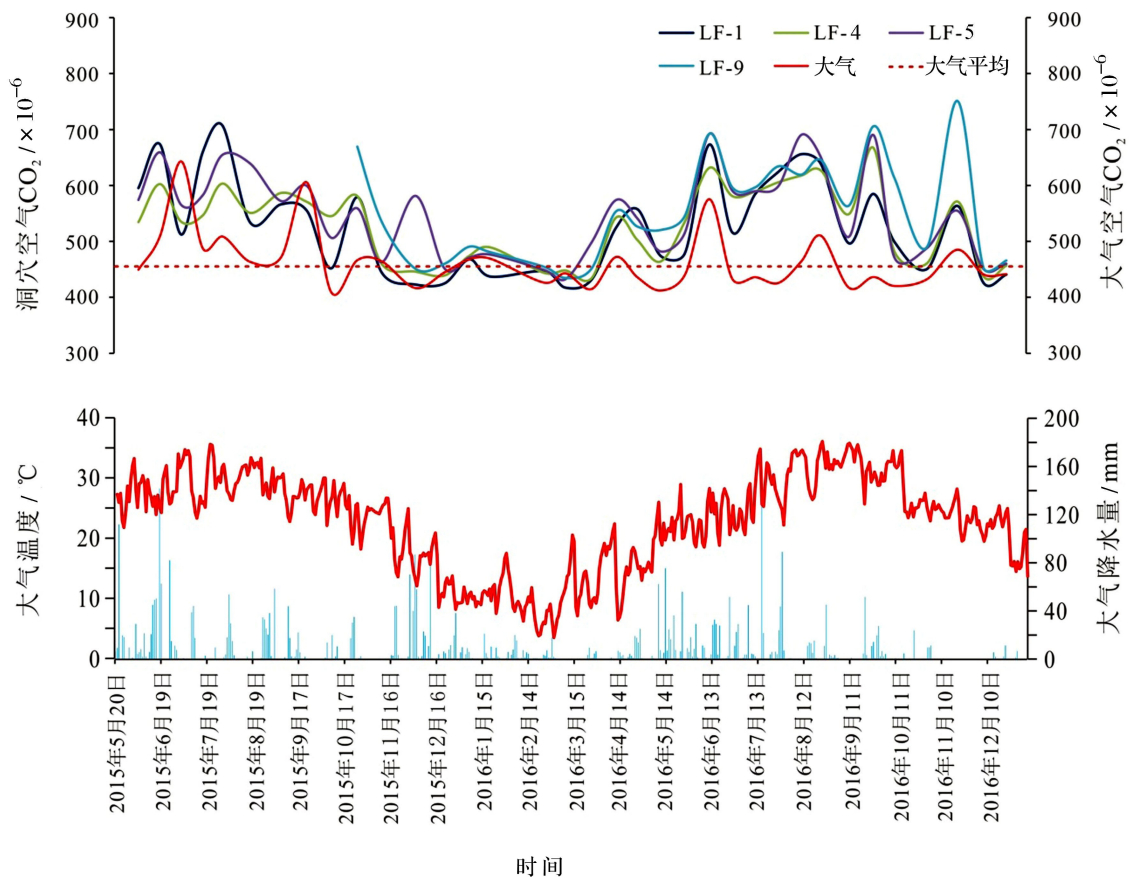


图 4 凉风洞洞穴 CO₂ 季节性变化

Fig. 4 Seasonal variation of CO₂ in Liangfeng cave

桂林凉风洞(LF-1、LF-4、LF-5、LF-9点)洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 与大气温度、大气降水量的线性相关图(图5)。LF-1和LF-5监测点 $p\text{CO}_2$ 与大气温度线性关系分别为 $R^2=0.58$ 、 0.57 , LF-4监测点 $p\text{CO}_2$ 与大气温度线性关系分别为 $R^2=0.63$, LF-9监测点 $p\text{CO}_2$ 与大气温度线性关系分别为 $R^2=0.47$ 。洞穴 $p\text{CO}_2$ 与大气温度之间的线性关系主要是由于随着夏季温度升高,凉风洞顶部土壤植物生长茂盛、微生物活动强烈、土壤空气中 CO_2 被降水携带进入洞穴。虽然在夏季时虽然凉风洞受到通风效应的影响,但是土壤 $p\text{CO}_2$ 是洞穴空气的几十倍甚至上百倍^[28],此时土壤 $p\text{CO}_2$ 成为凉风洞 $p\text{CO}_2$ 主控因素;在冬季时土壤 $p\text{CO}_2$ 下降,通风效应使得外界大气 $p\text{CO}_2$ 成为凉风洞 $p\text{CO}_2$ 主控因素。2016年凉风洞 $p\text{CO}_2$ 在夏半年和冬半年记录的四个高峰,有可能是

由于取样前一段时间降水量增加导致雨水携带更多土壤 CO_2 进入洞穴。但是由于本次研究 CO_2 气体测样频率仅为半月,对于开放洞穴中空气流动性相对较强监测远远不够,因此需要再下一步研究工作中提高监测频率,同时增加同位素示踪来揭示贡献率和空气周转速率等问题。由于洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 浓度会对石笋沉积产生抑制或促进作用^[29],因此岩溶洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 变化影响次生沉积物沉积和溶蚀。虽然凉风洞洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 浓度存在明显季节性变化,但与现有研究成果存在一定的差异^[30-31],主要是由于不同洞穴由于其所处的地质地理条件不同,以及洞体结构的不同导致洞穴通风条件存在差异,从而使得洞穴内部和外部 CO_2 的流通和扩散都有着的不同。从而导致凉风洞内部 $p\text{CO}_2$ 交换与累积程度与其他洞穴存在差异。

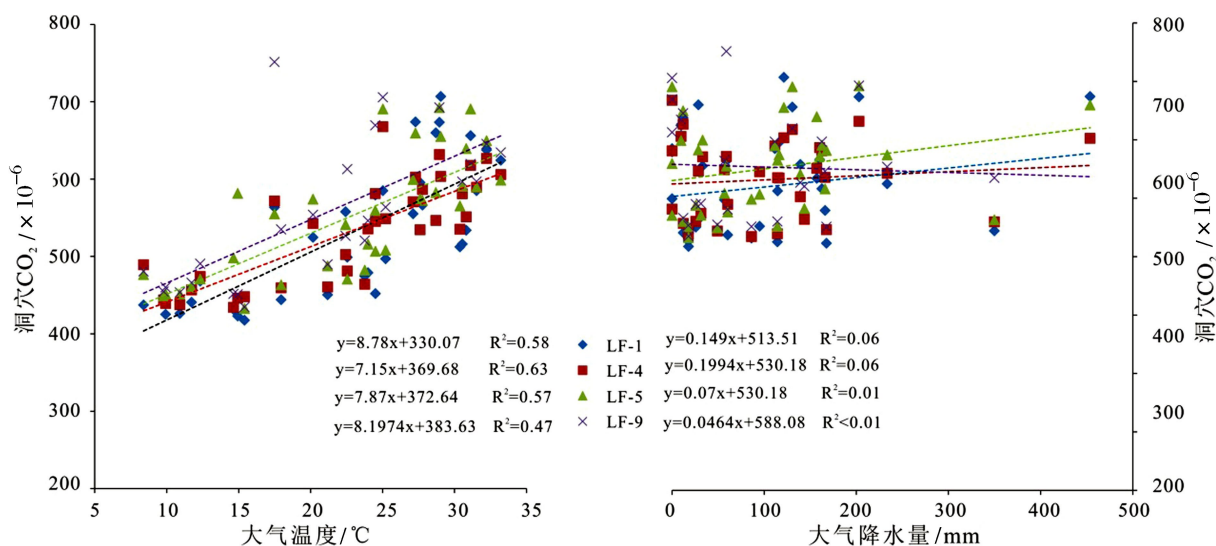


图5 凉风洞洞 CO_2 与大气温度、降水量线性相关

Fig. 5 Linear correlation of CO_2 with atmospheric temperature and precipitation in Liangfeng cave

4 结论

(1)凉风洞洞穴温度越靠近洞口,洞穴温度受到气温影响越明显,但是洞穴内部温度受到洞穴内部结构的阻隔作用的影响,对外界大气温度的响应存在一定滞后,并且滞后时间存在差异。

(2)洞穴温度和池水温度都呈现出不同季节升温 and 降温过程,其中洞穴温度和池水温度升温缓慢,而降温迅速的特点,并且升温阶段滞后时间长,降温阶段滞后时间短。

(3)凉风洞洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 夏季明显高于冬季,

监测结果显示在不同的季节,洞穴 $p\text{CO}_2$ 的变化特征及其主控因素也存在差异。夏季时,土壤 $p\text{CO}_2$ 为洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 的主控因素,冬季时,大气 $p\text{CO}_2$ 为洞穴空气 $p\text{CO}_2$ 的主控因素。

参考文献

- [1] Hansen M, Scholz D, Froeschmann M L, et al. Carbon isotope exchange between gaseous CO_2 , and thin solution films: Artificial cave experiments and a complete diffusion-reaction model [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2017, 211:28-47.
- [2] Maša Surić, Robert Lončarić, Neven Bočić, et al. Monitoring

- of selected caves as a prerequisite for the speleothem-based reconstruction of the Quaternary environment in Croatia[J]. *Quaternary International*, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.042>)
- [3] Laurent S Devriendt, James M Watkins, Helen V, et al. Oxygen isotope fractionation in the $\text{CaCO}_3\text{-DIC-H}_2\text{O}$ system[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2017. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2017.06.022>)
- [4] Fairchild I J, Smith C L, Baker A, et al. Modification and preservation of environmental signals in speleothems[J]. *Earth Science Reviews*, 2006, 75(1-4):105-153.
- [5] Fairchild I J, Treble P C. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(5-6):449-468.
- [6] Fairchild I J, Tuckwell G W, Baker A, et al. Modelling of drip-water hydrology and hydrogeochemistry in a weakly karstified aquifer (Bath, UK): Implications for climate change studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 321(1-4):213-231.
- [7] Dulinski M, Rozanski K. Formation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios in speleothems: A semi-dynamic model[J]. *Radiocarbon*, 1990, 32(1):7-16.
- [8] Rudzka D, McDermott F, Baldini L M, et al. The coupled $\delta^{13}\text{C}$ -radiocarbon systematics of three Late Glacial / early Holocene speleothems: Insights into soil and cave processes at climatic transitions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(15):4321-4339.
- [9] McDermott F. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothem: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7):901-918.
- [10] 张鹤娟, 蔡演军, 张海伟, 等. 神农宫和祥龙洞洞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.
- [11] 何璐瑶, 胡超涌, 曹振华, 等. 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.
- [12] Luo W, Wang S, Zeng G, et al. Daily response of drip water isotopes to precipitation in Liangfeng Cave, Guizhou Province, SW China[J]. *Quaternary International*, 2014, 349:153-158.
- [13] Gunn J. Karst Hydrology and Physical Speleology by A. B GLI[J]. 1980, 18(1):100-101.
- [14] Troester J W, White W B. Seasonal Fluctuations in the Carbon Dioxide Partial Pressure in a Cave Atmosphere[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(1):153-156.
- [15] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. *科学通报*, 2011, 56(26):2174-2180.
- [16] Penélope S O, Marilyn R, Sergio S M, et al. Hidden, abiotic CO_2 flows and gaseous reservoirs in the terrestrial carbon cycle: Review and perspectives[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(3):321-329.
- [17] Banner J L, Guilfoyle A, James E W, et al. Seasonal Variations in Modern Speleothem Calcite Growth in Central Texas, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2011, 77(7-8):615-622.
- [18] Spötl C, Fairchild I J, Tooth A F. Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(10):2451-2468.
- [19] Frisia S, Fairchild I J, Fohlmeister J, et al. Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(2):380-400.
- [20] Luo W, Wang S, Zeng G, et al. Daily response of drip water isotopes to precipitation in Liangfeng Cave, Guizhou Province, SW China[J]. *Quaternary International*, 2014, 349:153-158.
- [21] 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.
- [22] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5):628-636.
- [23] 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.
- [24] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 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.
- [25] 张萍, 杨琰, 孙喆, 等. 河南鸡冠洞 CO_2 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.
- [26] 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.
- [27] 黄黎英, 毛村土壤溶解有机碳的季节变化及环境效应[D]. 桂林:广西师范大学, 2006.
- [28] 吴夏, 朱晓燕, 张美良, 等. 桂林岩溶表层带土壤 CO_2 体积分数时空变化规律及其意义[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(5):834-839.
- [29] Banner J L, Guilfoyle A, James E W, et al. Seasonal Variations in Modern Speleothem Calcite Growth in Central Texas, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(7-8):615-622.
- [30] 张蔷, 赵淑艳, 赵习方. 北京石花洞内 CO_2 的监测与评价[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(4):325-331.
- [31] 蔡炳贵, 沈凛梅, 郑伟, 等. 本溪水洞洞穴空气 CO_2 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.

Characteristics of open cave environment and its influencing factors: A case study of Liangfeng cave, Guilin

WU Xia^{1,2}, PAN Moucheng¹, CAO Jianhua¹, ZHU Xiaoyan¹,
ZHANG Meiliang¹, YANG Hui¹, TANG Wei¹, LAN Gaoyong¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract By continuous high-frequency monitoring of the internal and external temperature, humidity and $p\text{CO}_2$ in the Liangfeng cave of Guilin, it is found that the temperature of the cave is seasonally changed under the influence of atmosphere temperature. However, due to "buffering effect" in the cave, the range of temperature change decreases with the cave depths from the outside to the inside, and its response time varies with season. The analysis of monitoring data indicated that the seasonal variation of temperature inside the cave is significantly lower than that outside the cave. By comparing the time series of temperature inside and outside of the cave, it is found that the temperature of the cave shows a longer lag time with the increase of atmospheric temperature and a shorter lag time with the decrease of atmospheric temperature at the seasonal timescale. This difference may be affected by the "buffering effect" of the internal structure of the cave in different seasons. The $p\text{CO}_2$ in this cave has obvious seasonal variation characteristics of high in summer and low in winter. Moreover, seasonal changes in the external atmospheric environment and seasonal activities of the animals and plants on the caves have also caused seasonal variations in the main controlling factors of $p\text{CO}_2$ in the caves.

Key words cave temperature, cave humidity, cave carbon dioxide, seasonal variation

(编辑 张玲)