

广东英德宝晶宫洞穴微环境时空变化特征 及其主要影响因素探究

陈琳¹, 黄嘉仪¹, 刘淑华¹, 陈琼¹, 杨亮¹, 童晓宁^{1,2},
黄颖¹, 贺海波^{1,3,4}, 米小建^{1,5}, 周厚云^{1,*}

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510631;
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 岭南师范学院, 广东 湛江 524048)

摘要: 为进一步了解洞穴微环境与气候环境指标之间的相互联系, 本文以广东英德宝晶宫溶洞为研究对象, 对洞穴空气温度、相对湿度、CO₂ 浓度进行了为期 42 个月(2011 年 12 月~2015 年 5 月) 实地监测, 结果发现宝晶宫洞穴微环境存在明显的时空变化: 近洞口处洞穴微环境季节性变化特征明显, 而洞穴深处微环境季节变化显著变弱。洞穴微环境的变化主要受到外界气候和天气的变化以及通风效应的影响, 前者是导致洞穴微环境季节性变化的主要原因, 后者是导致洞穴微环境变化具有空间差异性的主要原因。此外洞穴结构和旅游活动也会对洞穴微环境变化产生影响。本研究结果表明, 洞穴通风作用是影响洞穴微环境变化的重要过程之一, 其对洞穴沉积气候环境指标的影响可能值得今后进一步深入研究。

关键词: 英德宝晶宫; 洞穴环境; 时空变化

中图分类号: P642.25 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)01-0164-07 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.02.007

岩溶洞穴沉积物由于具有分布广、时间跨度大、分辨率高和定年精度高等优势^[1-2], 成为近年来古气候环境研究的热点^[3-6]。洞穴沉积物(尤其是石笋)的微层厚度、微层灰度、微层理内的稳定同位素、微量元素等是目前国内外用该材料重建古气候环境的主要气候代用指标^[7-10]。目前石笋的各种气候代用指标对外界气候环境变化的响应机制解译存在不同观点, 例如将石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 解释为“C₃/C₄ 植被变化”^[11]、“生物量”^[12]、“快速渗透水事件”^[13]等。洞穴滴水是石笋沉积的直接物质来源, 而洞穴微环境则会影响到滴水到石笋沉积这一过程中溶液的碳酸盐平衡—滴水中的 CO₂ 分压高于洞穴空气的 CO₂ 分压而导致滴水中的 CO₂ 溢出(去气作用)以及滴水蒸发使碳酸盐过饱和, 形成碳酸盐沉积, 另外 CO₂ 在水溶液中的溶解度也会随着溶液温度的变化而变化, 潮湿且 CO₂ 浓度高的洞穴微环境可能会导致洞穴滴水达不到饱和状态而溶蚀洞穴沉积物^[14-16]。因此, 对洞穴微环境(洞穴空气 CO₂ 含量、相对湿度

和洞穴空气温度等)变化进行研究, 有助于解译洞穴沉积物的形成机理与其代用指标对外界气候环境变化的响应机制。

不同洞穴由于地质地理背景及洞穴结构不同, 其洞穴微环境的时空变化特征及其主要影响因素有所不同^[17-21]。在中国, 对洞穴微环境(如洞穴内外空气温度、相对湿度和 CO₂ 浓度等)进行多年连续监测并分析其时空变化的报导较少。广东省英德宝晶宫洞穴具有复杂的溶洞系统和较大的规模, 其科学研究价值和观赏价值吸引了曾昭璇等学者^[22-28]对其进行研究, 但研究集中在地貌和旅游景观开发上, 对于洞穴沉积物形成机理及其对洞外气候变化的响应研究较少。童晓宁等^[28]对宝晶宫洞穴空气 CO₂ 浓度 2011 年 12 月~2013 年 4 月的时空变化特点进行了初步分析, 认为洞穴空气 CO₂ 浓度变化主要受到通风效应、气候对植被和土壤生物活动的影响、洞穴结构和游客的影响。

本文在此基础上对宝晶宫微环境变化进行了

收稿日期: 2016-01-29; 改回日期: 2016-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41473093、41271212、40973009); 华南师范大学学生课外科研项目(15DKGB01)。

第一作者简介: 陈琳(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为第四纪地质与全球变化。E-mail: 2008aus@163.com。

* 通讯作者: 周厚云(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为第四纪地质与全球变化。E-mail: hyzhou@gig.ac.cn。

进一步分析,对2011年12月~2015年5月连续42个月的洞穴空气温度、相对湿度和CO₂浓度的时空变化特征进行了分析并探讨其影响因素。研究结果有助于合理解释洞穴沉积物的气候环境代用指标与保护洞穴环境。

1 研究区概况

英德宝晶宫(24°07'43.32"N,113°21'30.16"E)位于距离广东省清远市英德市区约7 km的南郊燕子岩。洞穴发育于中泥盆统棋子桥组石灰岩,有3层水平溶洞^[26]。第一层溶洞海拔60 m,由3个大厅和1个长廊组成,洞口为人工开凿,洞最大高度18 m,是宝晶宫三层溶洞中面积最大的,达8200 m²。第二层溶洞,海拔90 m,洞顶平坦,由竖井连接第一二层。第三层溶洞海拔130 m,顶板厚度在170 m以上,洞高12~15 m,洞长240 m,近第二层处有天窗,由竖井连接二三层,由于洞口在洞体下方,洞内气温较高,被称为“暖洞”。上覆土壤为发育良好的红色石灰土。本区气候类型属典型的亚热带季风气候,雨热同期:多年平均降水量1857.6 mm,且主要集中在4~8月;年平均气温20.9℃,最冷月1月平均气温11.1℃,最热月7月平均气温28.9℃;年平均相对湿度77%^[29]。大气降水为洞穴滴水补给来源^[27]。植被类型为南岭山地亚热带常绿阔叶林。宝晶宫洞内的洞穴沉积物主要有石笋、石钟乳、石柱、石幔等^[26]。开发为旅游景点后,洞内加装彩色灯光、路灯等。

2 研究方法

为研究宝晶宫洞穴环境的时空变化特征及洞内外环境差异与影响,于2011年12月至2015年5月在宝晶宫溶洞内选取样点20个,一层入洞口外、三层出洞口外各选取1个点,共22个观测点,对洞穴内外的CO₂浓度、气温和相对湿度进行每月1次的观测,监测时间集中在当日10:30~14:30,共采集42个月的数据。监测点的分布位置参见童晓宁等^[28]。洞穴内外气温和相对湿度测量的仪器是浙江托普仪器有限公司生产的便携式温湿度监测仪TPJ-20,温度的量程为-40~80℃,精度为±0.4℃,分辨率为0.1℃,相对湿度的量程为0%~100%,精度为±3%,分辨率为0.1%;洞穴内外空气CO₂浓度测量的仪器是TPJ-26型便携式红外CO₂仪,量程为0~5000×10⁻⁶(体积浓度),分辨率为1×10⁻⁶,精确度

为±50×10⁻⁶。测量空气CO₂浓度前,使用标准气体(0×10⁻⁶)进行校准。观测时,将仪器放置于距离操作者约2~3 m处,避免操作者对仪器监测结果的影响。

3 结果与分析

3.1 气温

洞外(监测点1和22)气温季节变化幅度较大(图1,图2)。监测点1气温变化范围11.2~33.3℃,年平均值23.1℃;监测点22气温变化范围11.1~30.2℃,年平均值23.0℃。洞穴内各监测点的气温变化范围12.8~28.5℃,年平均值21.7℃。洞内接近洞口或天窗处(监测点2~6、9~11、19~21)的气温变化幅度总体上较洞穴深处(监测点7~8、15~18)大,但较洞外小(图1)。如近洞口(天窗)处的监测点2、10和21的气温变化与洞外类似(图2)。冬季洞穴内各监测点的气温差异显著大于夏季(图3),显示洞穴通风作用在冬季显著大于夏季。洞穴深处(监测点7~8、12~18)年平均气温与洞外(监测点1和22)年平均地表气温接近。总体上洞穴深处气温变幅较洞外小(图1)。这种现象在湖北和尚洞^[18]、山东九天洞^[20]、贵州织金洞^[21]也有观察到。

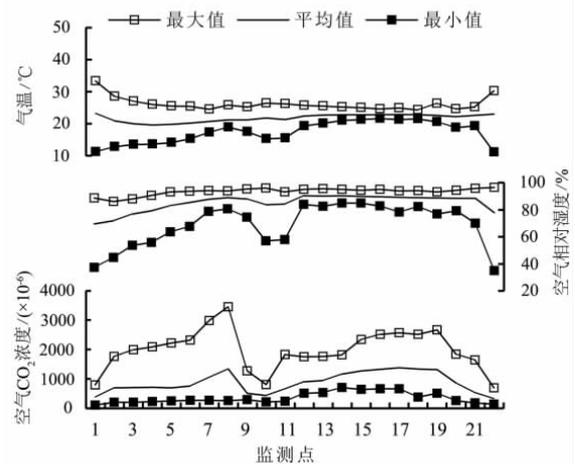


图1 宝晶宫洞穴内外22个监测点空气温度、相对湿度和CO₂浓度多年平均值及最大值情况

Fig.1 Annual average, the maximum and minimum of air temperature, RH and CO₂ concentration for 22 monitoring sites

宝晶宫洞穴空气温度变化主要受以下因素影响:

洞外气温及通风效应。当洞外气温发生变化,

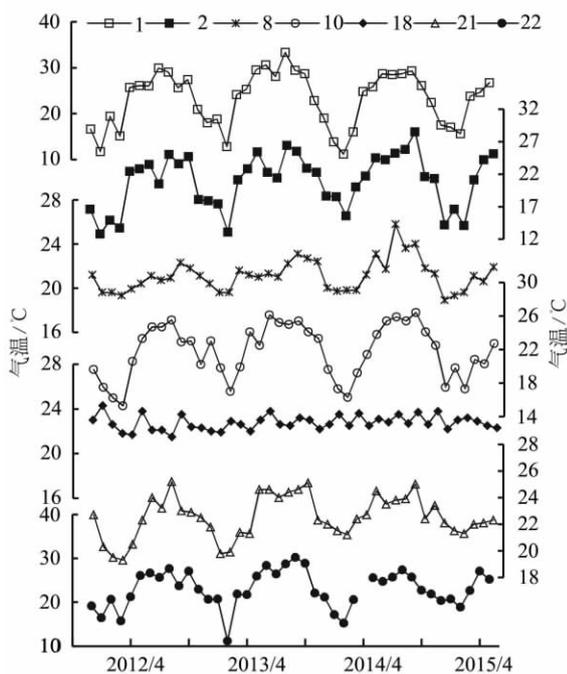


图2 洞穴气温的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of cave air temperature of Baojinggong Cave

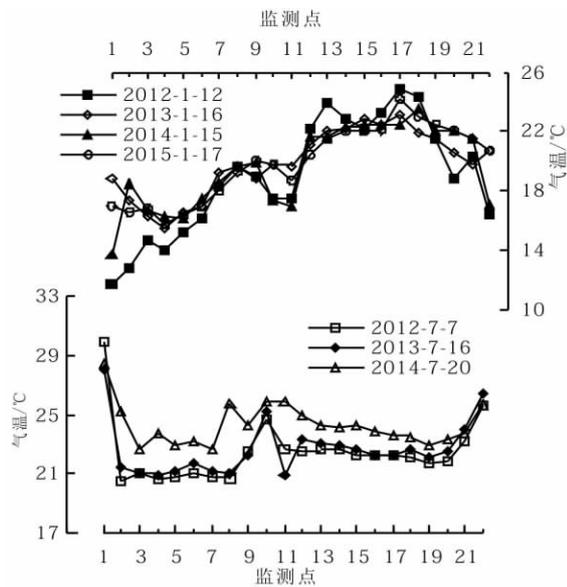


图3 洞穴气温的空间变化

Fig.3 Spatial variation of cave air temperature of Baojinggong Cave

洞内外空气由于温度差而产生热交换作用以及通风作用使得洞内气温随之变化。洞外空气温度降低且低于洞内温度时,洞内外空气密度差驱动冷空气从较低的洞口流入洞内,使得洞内空气温度下降。距离洞口越近或洞内外温差越大,这种效果越

明显。当洞外气温升高则出现相反的情况。洞穴深处的通风效应较弱,因而气温季节性变化幅度明显减小。由于洞内外温度差季节性变化引起的通风效应冬强夏弱,使得洞外气温对洞内气温的影响强度冬季大于夏季,如冬季近洞口(通风)处乃至一层洞穴深处均受到外界气温下降的影响,而夏季仅近洞口(通风)处明显受到外界气温变化调节。

洞穴结构。宝晶宫洞穴分为三层,最上层顶板厚度较厚,且第三层的洞口在洞体之下,二三层之间的天窗靠近二三竖井下方,洞口(天窗)到第三层洞体内的洞道弯曲狭窄(监测点11~14),这种结构有利于暖空气保留在洞穴的第三层洞体内,该洞无地下河或大岩溶裂隙,洞内空气对流不明显,不利于外界温度传递至洞内,因而洞穴深处(监测点12~18)气温较为恒定且温度较高,无明显季节性变化,故第三层被称为“暖洞”。宝晶宫由一竖井连接第一层西侧和第二层洞口,这种特殊结构使得冬季冷空气容易下沉到第一层洞穴深处(监测点7~8),加强冬季通风效应,导致第一层洞内气温普遍较低,冬季第一层洞内气温受外界气温调节明显,故第一层被称为“冷洞”。

旅游活动。从图3可以观察到宝晶宫洞外(监测点1、22)夏季气温2013年比2012年、2014年高,但近洞口处(监测点2、8、10)的夏季气温则是2012~2014年逐年略微增高。这一差异可能与人类活动有关。夏季是宝晶宫旅游旺季,由于人体在洞穴内是一个发热体,如果监测在游客离开后不久进行(这种情况经常较难避免,因为宝晶宫在夏季一直有较大的游客量),会导致测量到的气温偏高。

3.2 相对湿度

与气温类似,相对湿度的季节变化幅度也是在洞外较大(图1)、夏季高冬季低(图4)。洞穴内监测点的相对湿度变化范围44.7%~96.0%,年平均值约为86.2%,其中最大值出现在2012年7月7日的监测点10,最小值出现在2014年1月15日的监测点2(图1)。洞内监测点2~6、9~11、19~21距离洞口越近,相对湿度年平均值越小、变化幅度越大(图1),季节性变化特征与洞外类似,但变化幅度小于洞外。洞穴深处(监测点7~8、12~18)的相对湿度较高(平均值约90%),季节变化不显著(图5)。洞内外监测点总体空气相对湿度夏季比冬季高且变化幅度夏季比冬季小,类似的现象在四川楼房洞^[17]、北京石花洞^[19]及山东九天洞^[20]均有发

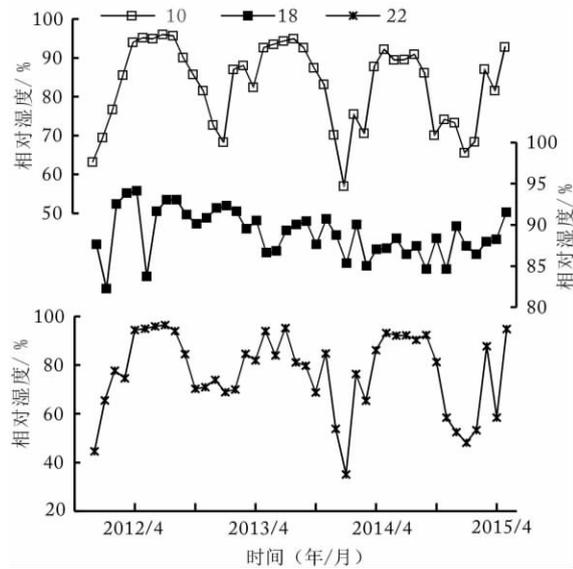


图 4 洞穴空气相对湿度的季节变化

Fig.4 Seasonal variation of cave air RH of Baojinggong Cave

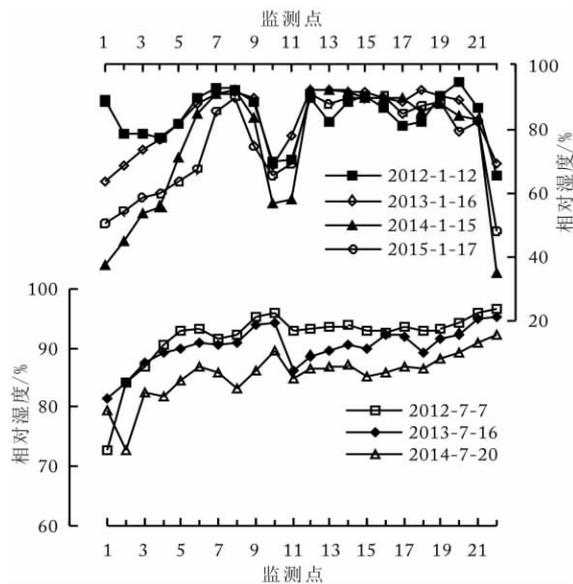


图 5 洞穴空气相对湿度的空间变化

Fig.5 Spatial variation of cave air RH of Baojinggong Cave

现。对各监测点的相对湿度与空气温度进行线性回归分析发现: 监测点 6~8、12~20 的相对湿度与空气温度表现出相反的变化趋势,但监测点 6 和 20 相对湿度与气温的相关系数很低。

初步认为洞穴空气相对湿度变化主要受到以下因素的影响:

洞穴气温。洞穴深处监测点相对湿度与气温的显著负相关关系说明洞穴深处空气相对湿度主要是受洞穴气温控制: 洞穴气温越高,洞穴相对湿

度越低; 洞穴气温较低,相对湿度较高。这反映气温上升导致饱和水汽压上升,相对湿度降低; 气温下降时则相反。

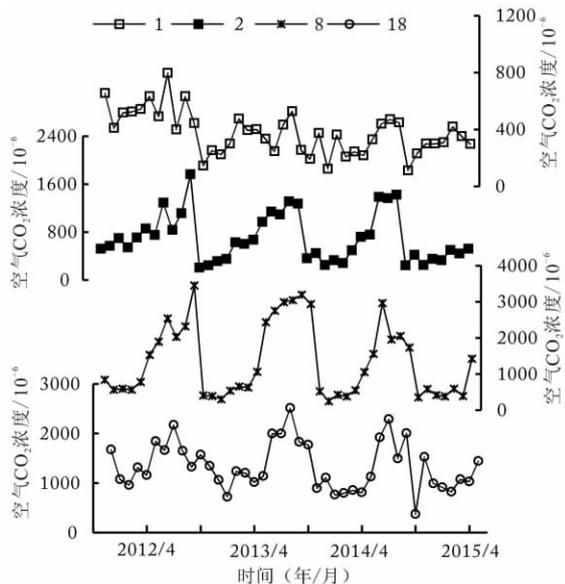
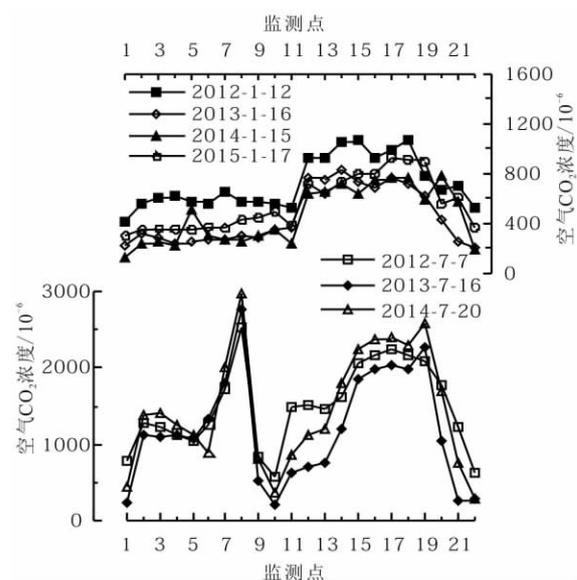
通风效应。一般情况下,空气流动性的强弱与相对湿度高低具有反相关关系,即空气流动性强则相对湿度偏低^[17,19-20]。洞穴深处由于空气流动性弱,其空气相对湿度变化主要受到洞穴气温的影响,变化幅度不大。宝晶宫洞穴冬季通风效应明显,距离洞口(天窗)处越近,通风效应明显,其相对湿度与洞外越接近,因此冬季洞穴深处空气相对湿度最高,距离洞口(天窗)越近,相对湿度越小;夏季通风效应较冬季弱,近洞口(通风)处洞穴空气相对湿度变化不如冬季明显。

降水。冬季以 2012 年 1 月 12 日为例(图 5),监测期间宝晶宫出现小雨,洞外空气相对湿度高,冷湿空气流入洞内,使得洞穴空气相对湿度升高;夏季以 2014 年 7 月为例,由于降水导致气温下降但气温仍高于洞内温度,暖湿空气不易流入洞内,洞内外空气更多的是进行热交换作用,洞内气温升高,相对湿度下降。

旅游活动。游客进入洞穴内呼出水蒸气增加空气湿度,游客散发热量和灯光照射都会引起洞穴温度升高而降低湿度,游客走动会增加洞穴内空气流动性,降低湿度。总的来说游客和洞穴灯光系统二者作用叠加会使得洞穴相对湿度具有降低的趋势^[30-31]。如 2015 年 3 月 18 日在监测点 18 进行监测期间有较多游客经过,这可能是导致监测点出现相对湿度较低的原因。

3.3 CO₂ 浓度

洞外空气 CO₂ 浓度年平均较洞内低,变化幅度较洞内小(图 1),变化特征具有夏季高冬季低的特点(图 6 监测点 1)。洞内空气 CO₂ 浓度在 185×10⁻⁶~3 450×10⁻⁶ 之间变化,年平均值约为 929×10⁻⁶。洞内空气 CO₂ 浓度年平均值和变化幅度均大于洞外,距离洞口越远,年平均值和变化幅度越大(图 1)。洞内空气 CO₂ 浓度也表现为夏季高冬季低,近洞口(天窗)处(监测点 2)和一层洞穴深处(监测点 8)的变化较为相似,即夏半年空气 CO₂ 浓度缓慢升高,冬半年空气 CO₂ 浓度迅速下降后在较低值波动,三层洞穴深处(监测点 18)夏半年变化趋势与前两者相似,但冬半年空气 CO₂ 浓度下降较为平缓(图 6)。冬季监测点 1~11 空气 CO₂ 浓度较低且变化幅度较小,监测点 11~14 空气 CO₂ 浓度迅速

图6 洞穴空气 CO₂ 浓度的季节变化Fig.6 Seasonal variation of cave air CO₂ concentrations in Baojinggong Cave图7 洞穴空气 CO₂ 浓度的空间变化Fig.7 Spatial variation of cave air CO₂ concentrations in Baojinggong Cave

升高,监测点 15~18 空气 CO₂ 浓度维持在较高值,监测点 19~22 空气 CO₂ 浓度迅速下降;夏季和冬季的空气 CO₂ 浓度的空间变化有所不同,监测点 1~8 空气 CO₂ 浓度总体呈上升趋势,在监测点 8 处达到最大值,随后迅速下降,在监测点 10 达到最低值,监测点 10~15 空气 CO₂ 浓度上升,监测点 16~18 空气 CO₂ 浓度维持在较高水平,监测点 19~22 空气 CO₂ 浓度迅速下降(图 7)。

影响宝晶宫洞穴空气 CO₂ 浓度变化的主要因素包括气候变化导致的植被和土壤生物活动产生的 CO₂ 浓度变化、通风效应和游客。

气候变化导致的植被和土壤生物活动产生的 CO₂ 浓度变化。夏季高温多雨,有利于地表植被根系呼吸作用的加强和土壤生物活动性加强,导致土壤空气中的 CO₂ 浓度增加,土壤空气中的 CO₂ 通过溶解于土壤水进入洞内后经过去气作用释放 CO₂ 到洞穴空气中或通过岩溶裂隙经由“泵吸效应”(Pump Effect)直接进入洞穴空气中,使得宝晶宫洞内空气 CO₂ 浓度出现夏季高冬季低的现象。

通风效应。总体上洞穴内空气 CO₂ 浓度显著高于洞外。冬季通风作用加强时洞外低 CO₂ 浓度的空气流入洞内,使洞穴内空气 CO₂ 浓度显著降低。越靠近洞口这种效应越明显。夏季的洞穴通风作用减弱,对洞穴空气 CO₂ 浓度的影响也会减弱。

旅游活动。游客的呼吸作用会使得洞穴内空气 CO₂ 浓度升高。游客在夏季比冬季多,在一定程度上增加了夏季洞内空气 CO₂ 浓度进一步上升。

3.4 对洞穴沉积物古气候研究的意义

大量的研究结果显示,洞穴微环境对洞穴沉积代用指标具有重要影响。例如,CO₂ 浓度的上升将不利于洞穴沉积物的形成,相对湿度的下降将有利于蒸发作用的加强。对宝晶宫洞穴微环境的监测结果显示,尽管每种微环境指标可能受到多种因素的影响,洞穴通风作用可能是对多种微环境指标均有显著影响的重要因素。因此,在对洞穴沉积代用指标的研究中,洞穴通风作用的影响可能是一个应该给予高度重视的因素。已有研究表明,洞穴通风作用对洞穴沉积的 δ¹³C 具有显著影响^[13,32]。但其对其它气候环境代用指标的影响还有待更深入研究。此外,以上监测结果显示洞穴微环境存在显著的季节变化。因而洞穴沉积速率本身也可能存在显著的季节变化。这已在一些洞穴监测中得到验证^[33-34]。因此,根据洞穴沉积重建的过去气候环境变化也可能具有季节偏向性(seasonal bias)。这在今后基于洞穴沉积的古气候环境研究中也应该给予重视。

4 结论

宝晶宫洞穴内气温在洞内深处变化幅度较小,

近洞口(天窗)处变化幅度较大,具有明显的季节性。近洞口(天窗)处的变化幅度较洞穴深处大但小于洞外。这是外界气候和天气变化、通风效应、洞穴结构和旅游活动等因素共同影响的结果。

宝晶宫洞穴深处空气相对湿度较高,变化幅度较小,越往洞口,相对湿度越低,变化幅度越大,显示出明显的季节性。这是洞穴气温、通风效应、降水、旅游活动等因素共同影响的结果。

宝晶宫洞穴空气 CO₂ 浓度在洞穴深处变化幅度较大,且呈现显著的夏高冬低季节性特点;靠近洞口或天窗处空气 CO₂ 浓度季节变化幅度明显减

小。这是气候变化导致的植被和土壤生物活动产生的 CO₂ 浓度变化、通风效应和旅游活动等因素共同影响的结果。

宝晶宫洞穴微环境受到多种因素的影响,其中洞穴通风作用似乎对各种微环境指标都具有显著影响,在今后基于洞穴沉积的古气候环境研究中可能也应该给予足够的重视。

致谢: 广东省英德市宝晶宫景区工作人员给予的诸多帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 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): 105-153.
- [2] 张会领, 覃嘉铭, 张美良, 等. 洞穴化学沉积物的古环境记录研究进展[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(2): 144-153.
- [3] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* A high-resolution absolute-dated late Pleistocene Monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2002, 294(5550): 2345-8.
- [4] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [5] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [6] 程海, 艾思本, 王先锋, 等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 157-163.
- [7] 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义-I. 微层显微特征[J]. *中国科学(D辑)*, 1998(1): 91-96.
- [8] Yuan D, Cheng H, Edwards R, *et al.* The timing and duration of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *American Geophysical Union*, 2002, 304(5670): 575-578.
- [9] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, *et al.* Ice age terminations[J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- [10] 谭明, 刘东生, 秦小光, 等. 北京石花洞全新世石笋微生长层与稳定同位素气候意义初步研究[J]. *中国岩溶*, 1997(1): 1-10.
- [11] 李春红, 顾德隆, 陈文奇, 等. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用-北京元大都建立后对森林资源的破坏- $\delta^{13}\text{C}$ 记录[J]. *地质论评*, 1998, 44(5): 456-463.
- [12] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 洞穴现代沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的生物量效应及机理探讨: 以贵州8个洞穴为例[J]. *地球化学*, 2007, 36(4): 345-348.
- [13] 刘淑华, 杨亮, 黄嘉仪, 等. 川东北宋家洞高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与D/O事件5-10[J]. *地球化学*, 2015, 44(5): 413-420.
- [14] 袁道先, 蔡桂鸿. *岩溶环境学*[M], 重庆, 重庆出版社, 1988: 42-53.
- [15] Baker A, Genty D. Environmental pressures on conserving cave speleothems: Effects of changing surface land use and increased cave tourism[J]. *Journal of Environmental Management*, 1998, 53(2): 165-175.
- [16] Spötl C, Fairchild I J, Tooth A F. Cave air control on drip water geochemistry, Obir Caves(Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005, 69(10): 2451-68.
- [17] 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(05): 696-703.
- [18] He L Y, Hu C Y, Cao Z H, *et al.* Correspondences of Heshang cave temperature to climatic change in Qingjiang, Hubei[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(3): 273-277 282.
- [19] 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.
- [20] 王晓青, 周长春, 孙小银, 等. 山东沂源九天洞洞穴环境变化监测分析[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(1): 91-96.
- [21] 罗时琴, 易武英, 李坡. 织金洞洞穴环境监测及其影响因素分析[J]. *贵州科学*, 2014, 32(6): 92-96.
- [22] 曾昭璇, 丘世均, 谭德隆. 广东英德“宝晶宫”的地形[M]. 广州: 华南师范大学地理系地理丛书, 1987: 1-70.
- [23] 曾昭璇, 丘世钧, 谭德隆. 广东英德“宝晶宫”岩洞地形的研究[J]. *热带地貌*, 1986, 7(1): 48-63.
- [24] 雷作淇. 广东省英德县宝晶宫洞穴堆积的形成时间及自然环境探讨[J]. *热带地理*, 1989(4): 329-336.

- [25] 潘懋, 郑春江, 云祖铿, 等. 广东北江流域第四系时代划分[J]. 热带地理, 1992(3): 202-209.
- [26] 刘尚仁. 广东省英德宝晶宫的科学价值与美景——为提升宝晶宫的文化品位与发展旅游的思考[J]. 热带地理, 2006, 26(2): 173-176.
- [27] 田立军, 周厚云, 段武辉. “蒸发效应”对洞穴滴水氧同位素信号传递的影响——以广东宝晶宫现代观测为例[J]. 第四纪研究, 2013(3): 618-620.
- [28] 童晓宁, 周厚云, 黄颖, 等. 广东英德宝晶宫 CO₂ 浓度的时空变化特征[J]. 热带地理, 2013(04).
- [29] 林扬海, 吴勇, 罗律, 等. 英德市气候特征和主要气象灾害[J]. 农村经济与科技, 2010, 21(10): 122-124.
- [30] Cigna A A. Environmental management of tourist caves[J]. Environmental Geology, 1993, 21(3): 173-180.
- [31] 黄倩. 旅游活动对喀斯特洞穴环境的影响及其保护研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [32] Frumkin A, Ford D C, Schwarcz H P. Paleoclimate and vegetation of the Last Glacial Cycles in Jerusalem from a speleothem record[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 863-870.
- [33] Baldini J U L, McDermott F, Hoffmann D L, et al. Very high-frequency and seasonal cave atmosphere P-CO₂ variability: Implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 272(1): 118-129.
- [34] Baker A J, Mathey D P, Baldini J U L. Reconstructing modern stalagmite growth from cave monitoring, local meteorology, and experimental measurements of dripwater films[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 392: 239-249.

Spatial and Temporal Variation of Environments of Baojingong Cave , Guangdong Province , China and It's Influencing Factors

CHEN Lin¹ , HUANG Jiayi¹ , LIU Shuhua¹ , CHEN Qiong¹ , YANG Liang¹ , TONG Xiaoning^{1 2} ,
HUANG Ying¹ , HE Haibo^{1 3 4} , MI Xiaojian^{1 5} , ZHOU Houyun¹

(1. School of Geography , South China Normal University , Guangzhou 510631 , China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guangzhou 510631 , China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 4. Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 5. Lingnan Normal University , Zhanjiang 524048 , China)

Abstract: Environmental monitoring Result for Baojingong Cave from December , 2011 to May , 2015 , show cave environment including cave air temperature , relative humidity(RH) , and CO₂ concentration , display obvious temporal and spatial variations. The cave environments show obvious seasonal variation near the entrance relative to those in the deep cave. The variation of cave environments is mainly influenced by the climate or weather changes and cave ventilation. The climate or weather changes result in the temporal variation of cave environments , while the cave ventilation leads to the spatial variation of cave environment. And the special structure of Baojingong Cave and the tourism activities would also contribute to the cave environments variation.

Key words: Baojing Cave; cave environment; spatial and temporal variation