

北京石花洞空气环境主要因子季节性变化特征研究

班凤梅¹, 蔡炳贵²

(1. 山西财经大学环境经济学院, 山西太原 030006; 2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 洞穴大气 CO₂ 浓度不仅是影响洞穴沉积物沉积(或者溶蚀)的重要因素之一, 而且在旅游洞穴, 它关系到沉积物景观的稳定性以及旅游环境的舒适性。本文通过对石花洞洞穴大气温度、湿度及 CO₂ 浓度近 4 个水文年的观测, 结果表明: (1) 洞穴温度在 15 °C 上下波动, 夏季约高 1 °C, 主要与洞内外温差的季节性变化和旅游活动有关; (2) 洞穴 CO₂ 浓度随着大气温度上升而缓慢升高, 至每年的 7 月上旬雨季来临时, 气温、降水及土壤中 CO₂ 大幅提高, 降水溶解大量的土壤 CO₂ 并渗入洞穴中, 导致洞穴 CO₂ 浓度迅速上升, 8 月观测到的最高浓度可达到 4 334 ppm, 在雨季结束后, 随着大气温度降低, CO₂ 浓度缓慢下降, 2 月份平均值达到最低, 为 360~458 ppm。另外, 在 5 月份和 10 月份的旅游黄金周, 旅游人数的增加, 洞穴 CO₂ 浓度异常增高。在进行洞穴管理与规划时, 应综合考虑自然和人为因素对洞穴的影响。

关键词: CO₂ 浓度; 季节性变化; 旅游活动; 北京石花洞

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

0 引言

近年来, 洞穴沉积物在古气候和古环境研究中发挥越来越重要的作用, 在诸多代用指标中, 石笋生长速率(微层厚度)可作为温度^[1-2]和降雨^[3-4]的良好代用指标。从石笋的形成过程分析, 大气降水渗入土壤获取大量生物成因 CO₂, 从而具有较强的溶蚀力, 而后溶解下伏碳酸盐岩进入洞穴, 由于滴水 CO₂ 分压大于洞穴大气 CO₂ 分压, 使得滴水二氧化碳溢出, 导致碳酸钙饱和度增加, 从而产生碳酸钙沉淀。从这个过程可以看出, 洞穴空气 CO₂ 浓度大小会对石笋沉积产生抑制或促进作用^[5-7]。此外, 洞穴 CO₂ 浓度作为洞穴环境的重要指标, 其浓度大小对洞穴旅游的舒适性有直接影响^[8]。因此, 了解洞穴空气 CO₂ 浓度的变化对研究石笋生长速率、洞穴景观保护以及洞穴环境的评价都具有重要的意义。已有研究表明^[6-7, 9-10], 洞穴空气 CO₂ 浓度存在明显季节性变

化, 但不同洞穴由于其所处的地质地理条件不同, 以及洞体结构的差别, 洞穴 CO₂ 的变化特征及其主控因素也存在差异。

地处北京郊区的石花洞是开放多年的旅游洞穴, 洞内次生碳酸盐沉积类型丰富, 吸引了大量游客, 然而随着旅游的深度开发, 洞穴保护工作逐渐提上日程。同时, 石花洞的石笋被成功地用于古气候研究, 深入理解石笋微层形成机理是解译石笋气候信号的基础。本研究通过对北京石花洞洞穴 CO₂、温度和湿度近 4 个水文年的观测, 结合洞外大气温度和降水数据, 分析其变化的主要影响因素及其对石花洞滴水沉积速率的影响, 为旅游洞穴景观保护提供科学依据。

1 地质地理概况

石花洞(39°47'N, 115°56'E)位于北京市房山区

基金项目: 山西省高校科技开发项目(2010113)、全球变化研究国家重大科学研究计划 2010CB950101 课题

第一作者简介: 班凤梅(1979-), 女, 博士, 讲师, 2007年毕业于南京农业大学土壤专业, 环境化学研究方向。E-mail: banfm@163.com。

收稿日期: 2011-04-05

南车营村,距北京市区约50 km。该洞上覆地层为奥陶系马家沟组灰岩。洞穴顶板厚度介于30~130 m。上覆植被以灌丛和草被为主,土壤为褐土,山谷中土层厚度约60~100 cm,山坡土层厚度一般在0

~50 cm,土壤表层(0~15 cm)总有机碳含量较高(40~70 g/kg)。石花洞洞体分为上下7层(1~3层结构见图1),1~4层对外开放。

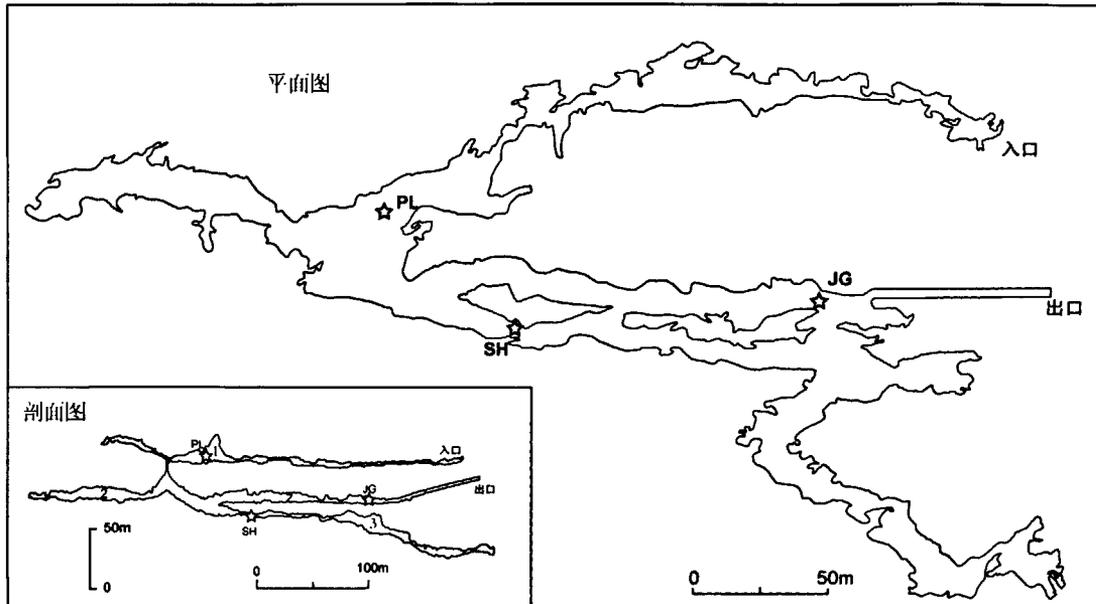


图1 石花洞1~3层洞穴平、剖面图及采样点分布图(1,2,3分别表示洞穴1~3层,其中空五角星代表监测点)(据郑明存等^[11]修改)

Fig. 1 Plan view and longitudinal profile of layer 1 to 3 of the Shihua Cave and location of sampled drip sites (cave layers are numbered from 1 to 3, and the hollow stars and capital letters indicate the sampled drip sites) (adapted from Zheng M. et al., 2007)

根据洞道结构以及顶板厚度,选取3个观测点(图1),其中PL位于洞穴一层盘龙玉柱大厅,顶板厚度约70 m;JG位于二层洞的出口处,顶板厚度约40 m;SH位于三层,洞道比较窄,顶板厚度约60 m。3个点在地表的投影均落在山谷及阴坡处,上覆土壤连续且较厚,植被生长茂盛。

石花洞位于东亚季风气候区,干、湿季明显且雨热同季,降水年内分布为典型季风区单峰型,主要集中在夏季的6~8月,占全年降水的70%以上;从9月至次年5月,降水稀少,经历长达半年左右的旱季。

2 材料方法

从2003年11月到2008年3月,每隔1~14天对洞穴温度、湿度及CO₂浓度进行监测。洞穴空气中的CO₂浓度使用Telaire-7001型便携式红外CO₂仪测定,仪器分辨率为1 ppm,量程为0~10 000 ppm,精确度为±50 ppm。实验前,使用标准气体(0 ppm)进行校准。洞穴温度和相对湿度(RH)使用哈纳HI8564温湿度计测定,测定范围分别为0~60 ℃和

10%~95%,分辨率分别为0.1 ℃和0.1%,精确度分别为±0.4 ℃和±2%。需要说明的是,观测到的部分洞穴湿度>95%,尽管其具体值可能存在误差,但说明实际湿度超过了95%,不影响本文所得结论。

3 结果与讨论

3.1 洞穴温、湿度变化

观测期间,洞穴空气温湿度均表现出明显季节性和年际变化(图2)。洞穴空气温度稳定在15 ℃上下波动,冬季平均低约1 ℃,夏季平均高约1 ℃。通常,洞穴常年温度与当地的年均温度相当,季节性波动很小。石花洞洞口较小,洞穴顶板很厚,而且PL和SH观测点距离洞口至少在500 m以上,自然状态下,洞穴温度受外界温度影响较小。石花洞洞穴温度的季节性变化主要受几个因素影响:第一,洞穴内外的气流运动。石花洞具有多层结构,落差大,洞口窄小,烟囱效应可能比较明显,尤其是石花洞在二层人为开凿一个出口,与原生的进口形成一个环状循环(见图1),增强了洞穴与大气的能量交换,冬季冷空气流入

洞穴导致洞穴温度降低,位于出口处的JG点,温度变化最明显,冬季该点的温度明显低于其他两个点(表1)。第二,洞穴旅游活动。一般来说,夏季是石花洞的旅游旺季,尤其是“五一”和“十一”旅游黄金周,洞内景观灯释放大量热能,洞穴温度大幅升高。但洞穴自身具有一定的自净能力,昼夜循环在一定程度上可以消除旅游活动带来的高频变化。除了旅游活动和洞穴内外的空气交换外,强降水事件也会导致洞穴温度短时间内大幅降低,如2005年7月份的几次特大暴雨后,地下水大量向洞穴排泄,导致洞穴温度降低大约1℃(如图2a)。

不同年份的洞穴温度的变化主要表现在变化幅

度上,2004—2005年的波动幅度较2006—2007年大得多,并有大幅度的高频变化。这可能主要与两方面因素有关,其一,2006—2007年洞内严格控制景观灯照射时间后,温度变化幅度大为减小;其二,后两年温度缺少高频变化可能与观测频率减少有关。

相对湿度变化与温度反相关(如图2b),冬天高,夏天低,除受洞内外气流交换的影响外,这种现象可能与水温和洞穴温度的季节性变化有关。因为洞穴岩石的温度接近于当地年均温度,滴水的温度在一般情况下与岩石保持平衡,夏季洞穴温度相对滴水温度低,蒸发量较小,而在冬季,洞穴温度相对于滴水温度较高,蒸发反而增加。

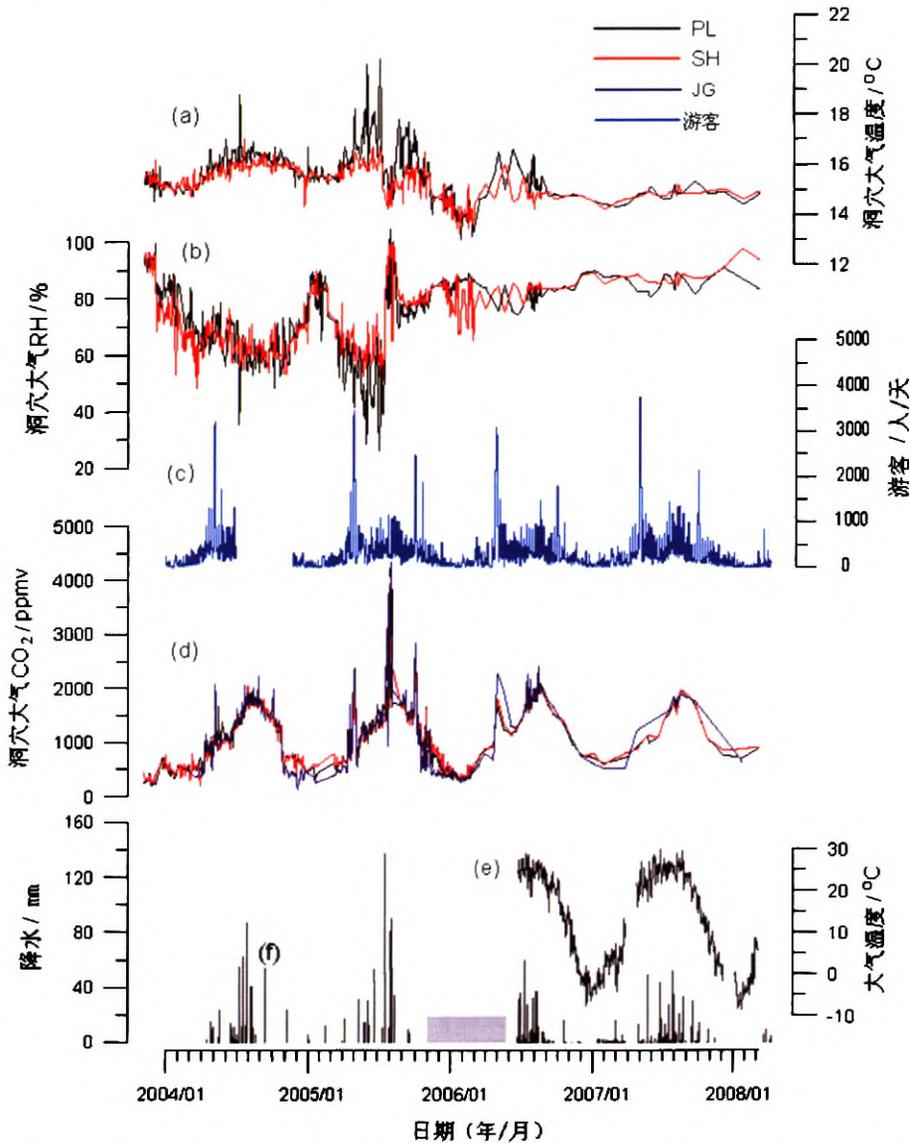


图2 观测期间洞穴空气温度(a),湿度(b),游客量(c),CO₂浓度(d),大气温度(e)和降水(f)的时间变化
 Fig. 2 Time series of the cave air temperature (a), relative humidity (b), total visitors(c), CO₂ concentration (d), atmospheric temperature (e) and precipitation (f) are also plotted for comparing through the monitored years

3.2 洞穴 CO₂ 浓度的变化

洞穴空气 CO₂ 浓度的季节性变化与大气温度变化类似(如图 2(d)),呈正弦曲线变化,但是二者的峰型不同。大气温度夏季峰值是左右对称的平顶峰,而 CO₂ 浓度变化曲线呈快速升高缓慢下降的尖顶峰。每年的 3 月份,CO₂ 浓度随着大气温度上升而缓慢升

高,至每年的 7 月上旬,雨季来临时,伴随首场强降水事件(在洞穴内有大量地下水排泄),CO₂ 浓度迅速上升,观测到的最高浓度可达到 4 334 ppmv,是旱季的十几倍,8 月份,洞内 CO₂ 浓度平均值最高,雨季结束后,9 月份 CO₂ 浓度缓慢下降,2 月份平均值达到最低(表 1)。

表 1 洞穴空气温度、湿度和 CO₂ 浓度月统计表

Tab. 1 Monthly statistics of the cave air temperature, RH and CO₂ concentration

月份	PL			SH			JG		
	T/°C	RH/%	CO ₂ /ppm	T/°C	RH/%	CO ₂ /ppm	T/°C	RH/%	CO ₂ /ppm
1	13.0/15.9 (14.8)	72.7/90.1 (84.5)	292/709 (442)	13.2/15.8 (14.9)	52.9/97.6 (78.2)	257/865 (486)	8.6/13.4 (11.1)	7.1/64.9 (33.6)	250/632 (372)
2	13.1/15.9 (14.6)	64.7/88.8 (81.2)	281/586 (433)	13.4/15.6 (14.7)	61.1/87.5 (75.4)	267/604 (458)	10.0/13.1 (11.6)	7.1/48.6 (24.6)	276/483 (360)
3	13.4/16.2 (15.1)	52.0/88.2 (71.7)	392/889 (571)	14.4/16.1 (15.2)	48.0/93.6 (69.2)	203/906 (588)	10.2/14.6 (12.1)	7.1/56.3 (26.9)	363/554 (452)
4	14.7/16.9 (15.9)	47.5/83.8 (65.0)	504/1313 (822)	14.6/16 (15.5)	58.7/88.5 (68.6)	531/1234 (763)	11.7/15.1 (13.5)	16.0/83.4 (53.4)	365/1699 (785)
5	14.9/18.2 (16.4)	37.6/84.7 (61.4)	744/2006 (1252)	14.9/16.5 (15.9)	52.5/85.6 (64.3)	700/2160 (1116)	13.3/15.7 (14.6)	51.6/80.9 (62.6)	528/2370 (1287)
6	14.7/20.0 (16.7)	28.4/84.1 (62.5)	895/1403 (1174)	14.5/16.7 (15.8)	55.3/85.5 (66.9)	859/1272 (1112)	13.6/17.1 (15.2)	45.3/84.2 (63.2)	999/1352 (1189)
7	14.6/20.2 (16.0)	25.9/100.0 (68.9)	1361/2053 (1617)	14.2/17.0 (15.3)	50.8/99.0 (73.5)	1042/2090 (1551)	13.6/16.6 (14.9)	52.8/99.0 (73.2)	918/3734 (1675)
8	14.6/17.8 (15.8)	52.9/100.0 (75.9)	1673/3809 (1928)	14.3/16.3 (15.2)	59.2/99.0 (78.0)	1508/4278 (1937)	13.9/16.2 (14.7)	53.1/99.0 (78.7)	1601/4334 (2015)
9	14.7/17.7 (16.5)	55.6/83.6 (69.2)	1320/1804 (1575)	14.6/16.5 (15.7)	53.9/87.2 (70.6)	1295/1783 (1545)	14.1/15.8 (15.1)	53.9/85.3 (72.5)	1365/1949 (1595)
10	14.7/16.9 (15.9)	48.2/86.9 (72.2)	791/2430 (1287)	14.6/16.5 (15.6)	53.5/87.5 (72.5)	766/2215 (1288)	13.4/16.0 (15.0)	48.2/82.1 (70.2)	426/2832 (1250)
11	14.0/16.3 (15.5)	56.7/84.5 (72.5)	476/1182 (764)	14.6/16.1 (15.5)	53.2/85.5 (71.7)	515/1240 (827)	11.4/14.8 (13.9)	35.5/78.2 (57.8)	335/1243 (512)
12	14.2/16.7 (15.2)	66.2/90.8 (78.9)	352/757 (542)	13.8/15.9 (15.0)	64.1/91.2 (76.8)	401/903 (605)	10.0/13.3 (12.1)	7.1/52.3 (35.4)	115/717 (381)

注:表中数据斜杠前为最小值,斜杠后为最大值,括弧中为平均值。

洞穴空气 CO₂ 浓度的变化取决于洞穴内的 CO₂ 气体的排放和洞穴与大气之间的气体交换。通过对数据的进一步分析,可以发现石花洞内 CO₂ 变化主要受以下三个因素影响:

第一,大气温度季节性大幅度波动与相对稳定的洞穴温度引起的洞穴内外气流运动(洞穴呼吸)的季节性变化,冬季低 CO₂ 浓度的冷空气大量流入洞穴,稀释洞穴空气 CO₂,夏季洞穴气流方向刚好相反,高 CO₂ 浓度的洞穴空气向洞外流动,但是强度要小得多,从而导致洞穴空气 CO₂ 浓度类似于大气温度夏高冬低的低频波动,这种现象在奥地利 Obir Caves

表现很明显^[7]。

第二,洞穴 CO₂ 主要来源于土壤,其主要通过洞穴滴水的以及裂隙渗流水的脱气而进入洞穴。在石花洞,从 3 月份开始,随着气温回升和降水逐渐增多,植被开始复苏,土壤 CO₂ 浓度也逐渐升高,在整个夏季(7—9 月)均保持较高水平,而最高值通常出现在每年的 8 月,是其最低值的 20~30 倍。这样,大气降水流经土壤层时可吸收更多的 CO₂ 并携带到洞内。尤其是雨季洞穴滴水增多,强降水导致大量地下水在洞穴内排泄,滴水排放的 CO₂ 显著增加,从而引起洞穴空气 CO₂ 浓度快速升高,如图 3 所示,2005 年,几

场暴雨过后,洞穴内滴水骤增,甚至一些地方大量排水,因此,这一年洞穴 CO₂ 浓度也随着降水出现大量高的针刺状峰形。可见,强降水事件是引起雨季洞穴空气 CO₂ 浓度高频变化的主要原因之一。另外,在洞穴顶板较薄的地方,洞穴与上覆基岩和土壤的联通性较好,这种情况下,土壤空气 CO₂ 可能以气相(对流或扩散)的形式向洞穴排放,但这种情况,在石花洞缺少直接数据支持,尚无法评估。

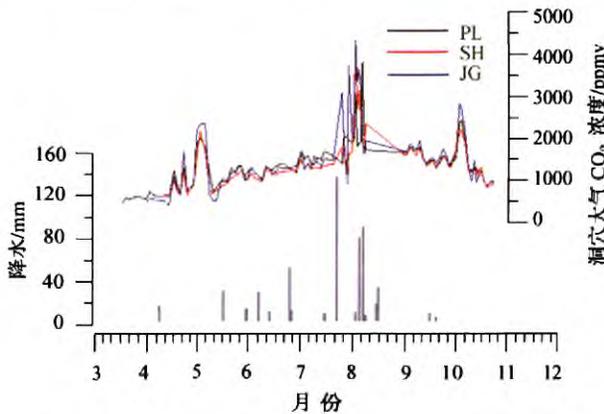


图3 2005年3—12月洞穴空气 CO₂ 浓度的变化图

Fig. 3 Regime of the CO₂ concentration in cave air from March to December, 2005

第三,游客的呼吸排放。一般来说,人的呼吸作用产生的气体中 CO₂ 浓度高达 3%~4.5%,一个人休息时的呼出率,可以达到 200 ML/min^[12]。上世纪 80 年代初,研究者就已经发现在澳大利亚 Jenolan Caves,白天游客走后洞穴 CO₂ 浓度可以从 400 ppm 增到 1 500 ppm,白天 CO₂ 峰值与游客的数量呈显著正相关^[12]。类似的结果在多个洞穴都有报道^[8,10,13-14]。但一般情况下,洞穴经过一个晚上的净化,即洞穴空气 CO₂ 浓度的昼夜变化不会对洞穴 CO₂ 浓度造成累积效应^[14],而当游客超过一定数量时,人为排放的 CO₂ 将大大超过洞穴当时的净化能力,CO₂ 浓度会在短期内出现异常高值。在石花洞,观测期间的五一和十一假期是石花洞旅游的两个高峰期,白天洞穴 CO₂ 浓度都会出现明显的高峰,这可能主要由游客呼吸引起(如图 2d 和图 3,表 1)。尤其是出口处 JG 点,因取像处设在这个地方,游客聚集比较多,因此,在旅游高峰期,此处的洞穴 CO₂ 浓度也较其它两个点高。张蔷等^[15]对石花洞 CO₂ 的研究也表明,游客呼吸作用对研究洞穴 CO₂ 浓度的增加是很重要的。

洞穴空气 CO₂ 浓度的变化是以上三种因素共同作用的结果,由于北京地区雨热同季,而且游客数量

变化也是夏高冬低,所以,定量或半定量地评估三种因素的贡献大小还需要进一步的开展碳同位素工作。

洞穴空气 CO₂ 浓度较高可能会产生以下几方面的影响:第一,洞穴环境因素(包括洞穴大气温度、湿度和 CO₂ 浓度等)通过改变滴水蒸发、CO₂ 脱气等过程对沉积速率可产生影响^[2,7,16]。而据我们的研究表明^[17],夏季洞穴滴水饱和度明显降低,主要与洞穴滴水 CaCO₃ 饱和指数降低有关。但夏季洞穴 CO₂ 分压的大幅增加,在一定程度上抑制滴水 CO₂ 的溢出,这也可能是该洞穴夏季沉积速率减慢的另一个原因。第二,对于旅游洞穴,洞穴湿度的昼夜或者较短时间内的大幅变化,可能会在次生沉积物上形成凝结水^[8],在洞穴大气 CO₂ 分压较高的情况下,会使洞穴次生沉积物表面的滞留水酸性增强,从而可能会导致碳酸钙和其他洞穴景观的溶蚀。第三,空气高浓度的 CO₂,对游客尤其是洞内长期工作人员健康状况产生一定影响。因此,如何调节洞内 CO₂ 浓度,使其处在一个合理的水平,要综合自然和游客两方面因素进行适时的管理和规划。

4 结论

北京石花洞洞穴空气 CO₂ 浓度表现出明显的季节性变化,低频变化类似于大气温度,呈正弦曲线变化,但 CO₂ 浓度升高较快,雨季随着降雨的发生出现针刺状峰型,可能主要由携带有大量土壤 CO₂ 的地下水的渗入和滴水脱气引起。而洞穴 CO₂ 浓度的季节性低频变化可能主要由洞内外大气交换导致,但游客呼吸作用也有明显的影响。石花洞夏季 CO₂ 浓度较高的事实可能成为该洞次生碳酸钙雨季沉积量减少的原因之一。此外,洞穴高浓度 CO₂ 可能会对洞穴次生碳酸钙沉积物景观以及入洞人群的身体产生一定的影响,因此,要综合自然和游客两方面因素对洞穴进行合理的管理和规划,保证洞穴 CO₂ 维持在一个合理水平。

致谢:感谢中科院地质与地球物理研究所谭明研究员对本文的建议与支持;感谢王新中博士和朱健协助野外采样;感谢北京石花洞管理处对本项研究提供相关资料。

参考文献

- [1] Tan M, Liu T S, Hou J Z, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature [J]. *Geophysical Research Letter*,

- 2003, 30(12): 1617-1620.
- [2] Frisia S, Borsato A, Fairchild I J, et al. Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70: 1183-1196.
- [3] Brook G A, Rafter M A, Railsback L B, et al. A high-resolution proxy record of rainfall and ENSO since AD 1550 from layering in stalagmites from Anjohible Cave, Masagascar[J]. *The Holocene*, 1999, 9: 695-705.
- [4] Proctor C, Baker W L, Barnes W L, et al. A thousand year speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland[J]. *Climate Dynamic*, 2000, 16: 815-820.
- [5] Bake 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: 165-175.
- [6] Banner J L, Guilfoyle A, James E W, et al. Seasonal variations in modern speleothem calcite growth in Central Texas [J]. USA, *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77: 615-622.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 朱文孝, 李坡, 潘高潮. 织金洞气候环境及空气中的 CO₂[J]. *中国岩溶*, 1993, 12(4): 409-417.
- [10] 王朝宇, 蒲俊兵, 沈立成, 等. 重庆雪玉洞 CO₂ 浓度变化的自然与人为因素探讨[J]. *热带地理*, 2010, 30(3): 272-277.
- [11] 郑明存, 景常顺, 姚天顺, 等编. 石花洞[M]. 北京: 外文出版社, 2007: 157.
- [12] Dragovich D and Grose J. Impact of tourists on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave development[J]. *Geoforum*, 1980; 21: 111-120.
- [13] Craven, S. A. Carbon dioxide variations in Cango Cave, South Africa[J]. *Cave and Karst Science*, 1996, 23: 89-92.
- [14] 蔡炳贵, 沈凛梅, 郑伟, 等. 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.
- [15] Huang Y M, Fairchild I J, Borsato A, et al. Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy)[J]. *Chemical Geology*, 2001, 175 (3-4): 429-448.
- [16] 张蕾, 赵淑艳, 赵习方. 北京石花洞内 CO₂ 的监测与评价[J]. *中国岩溶*, 16(4): 325-331.
- [16] Cai B G, Zhu J, Ban F M, et al. Intra-annual variation of calcite deposition rate of drip water in Shihua Cave, Beijing, China and its implications for palaeo-climatic reconstructions. *Boreas*. DOI 10.1111/j.1502-3885.2010.00201.x. ISSN 0300-9483.

Research on seasonal variations of the air's main environmental factors in the Shihua Cave, Beijing

BAN Feng-mei¹, CAI Bing-gui²

(1. Faculty of Environment Economics, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. National Research Center for Geo-analysis, Beijing, 100037, China)

Abstract: The CO₂ concentration in cave air is an important factor not only controlling the deposition or corrosion of carbonate in caves but also affecting the stability of carbonate landscape and comfort of tourist in show cave. The CO₂ concentration, temperature and relative humidity (RH) are monitored for near 4 hydrologic years in the Shihua Cave, Beijing. The results show that (1) cave temperature fluctuates around 15 °C and is about 1 °C higher in summer, which is related to tourism activities and the seasonal variation of temperature difference between inside and outside of the cave; (2) the CO₂ concentration of cave air increases slowly with the air temperature until July, when it can increase quickly due to a large quantity of groundwater coming into the cave after the every strong rain. In August the highest CO₂ concentration of cave air can reach 4 334 ppmv. After the rainy season, the CO₂ concentration of cave air also attenuates slowly with the decreasing of the air temperature to reach minimum value (360~458 ppmv) in February. In addition, it has two small CO₂ concentration peaks in May and October with the increasing in tourists. The analyzed results indicate that high concentration CO₂ in soil environment dissolved in drip water makes a greater contribution to CO₂ concentration in cave air during rainy period. Respiration of tourists is another contributor during the busy traveling season. Therefore, both natural and anthropogenic factors can be considered when planning and management is carried out for show cave.

Key words: CO₂ concentration; seasonal variation; tourism activity; the Shihua Cave in Beijing