

文章编号: 1000-0550(2009) 04-0684-07

# 芙蓉洞次生碳酸盐沉积特征及与降水的关系研究<sup>1</sup>

叶明阳<sup>1</sup> 李廷勇<sup>1</sup> 王建力<sup>1,2</sup> 刘 仙<sup>1</sup> 王 勇<sup>1</sup> 李俊云<sup>1</sup> 王建明<sup>1</sup> 庞 巧<sup>1</sup>

(1 西南大学地理科学学院 重庆 400715; 2 三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆 400715)

**摘 要** 通过对重庆市芙蓉洞内两处滴水 and 两处池水长期定点观测,现场测试 pH、温度和  $\text{HCO}_3^-$  浓度等指标,并采集适量水样带回实验室利用 ICP-OES 和离子色谱仪测试主要离子的浓度,计算  $\text{CO}_2$  分压 ( $P_{\text{CO}_2}$ ) 和方解石饱和度指数 ( $SI_c$ ),探讨了芙蓉洞内次生碳酸盐的沉积情况及与当地降水的关系。结果显示:四个观测点洞穴水在大部分时间相对于方解石为过饱和水,且正在沉积碳酸盐,可见芙蓉洞地区大部分时间具有洞穴碳酸盐沉积的温度和降水条件;不饱和出现在较大降水量之后的 1~2 个月内,是降水对岩溶水的稀释作用导致的。因此,降水量的变化是洞穴水呈现过饱和与不饱和交替的出现主要原因,最终导致碳酸盐沉积的季节变化,降水量过大时不利于碳酸盐的沉积。

**关键词** 芙蓉洞 次生碳酸盐沉积 方解石饱和度指数 pH  $\text{CO}_2$  分压 降水

**第一作者简介** 叶明阳 男 1979 年出生 在读硕士 第四纪地质学 E-mail ym yq@ 163. com

**通讯作者** 王建力 博士生导师 E-mail wangji@ swu. edu. cn

**中图分类号** P642. 25 P512. 2 **文献标识码** A

高分辨率洞穴石笋记录研究已成为当前国际古气候研究的重点<sup>[1-3]</sup>。石笋中可以提取出诸如  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$ <sup>[4-7]</sup>、微量元素<sup>[8-10]</sup> 及生长速率<sup>[11,12]</sup> 等多种气候代用指标,其中中年生长速率(年层厚度)的变化已有可能用来恢复最近数千年来降水变率<sup>[13,14]</sup>。当今石笋古气候研究的重点在于利用其稳定氧碳同位素重建古气候,并利用高精度的 U/Th 测年数据对一系列气候突变事件进行对比研究;然而关于洞穴次生化学沉积物沉积机理及其对外界环境变化的响应机制等研究却有待深入。洞穴水既是洞穴沉积的物质传输媒介,也是气候信号的携带者,对其进行长期观测有利于了解洞穴水的水化学特征及各种指标在碳酸盐沉积过程中的变化特征,并且对进一步探索石笋生长机理、解释石笋中各种指标对古气候信息的记录等方面有重要意义<sup>[15-17]</sup>。

恰当的选择指标是研究洞穴水的基础,当前国内外学者已经展开对洞穴水进行多方面的监测研究,取得的成果主要集中在洞穴水的水文特征<sup>[18]</sup>、化学组份来源和运移过程<sup>[15]</sup>、 $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$ <sup>[19-21]</sup>、洞穴滴水有机碳对环境变化的响应<sup>[22]</sup> 等方面。洞穴石笋生长作为碳酸盐从洞穴水中沉积的过程,受多种因素控制<sup>[23,24]</sup>,其中最主要的是岩溶水的  $\text{CO}_2$  浓度(通常用

$P_{\text{CO}_2}$ ; the Pressure of  $\text{CO}_2$  表示)、pH、 $\text{Ca}^{2+}$  浓度和溶液温度等。本研究选取世界自然遗产地——“中国南方喀斯特”重要组成部分——重庆武隆芙蓉洞为研究地点,通过对洞穴滴水 and 池水的长期定点观测和实验分析,拟从洞穴水的  $SI_c$  (Saturation Index of calcite) 及其主要影响因子  $P_{\text{CO}_2}$  和 pH 的变化规律着手,探讨芙蓉洞内次生碳酸盐的沉积特征对当地气候的响应。

## 1 研究区域概况

研究区位于我国西南地区重庆市武隆县(图 1)境内,属于中亚热带季风性湿润气候区,多年平均气温 17.9℃。降水受季风环流的影响,季节差异明显,多年平均降雨量 1 082 mm,其中 5~10 月降水量约 830 mm,占全年降水量的 77%。芙蓉洞(29°14'44" N, 107°55'13" E)位于芙蓉江入乌江的汇合口上游约 4 km 的芙蓉江右岸岸坡上,发育在中寒武统平井组白云质灰岩和白云岩中。洞体所在地层为中厚层状,倾角小于 25°,走向北北东,倾向东南,主要节理有北东及北西两组。天然洞口(原称气洞)海拔 480 m,主洞长约 2 392 m,洞体宏大,宽高多在 30~50 m 以上。现洞内常年温度为 16.0~16.3℃,平均温度 16.1℃<sup>[7]</sup>。

<sup>1</sup> 西南大学博士基金项目(编号: SWUB2007030)、重庆市自然科学基金项目(编号: CSTS2007BB7346)、岩溶动力学重点实验室开放基金(编号: 桂科能 0842008)、国家自然科学基金项目(批准号: 40802035)共同资助。

收稿日期: 2008-08-29 收修修改稿日期: 2008-12-04

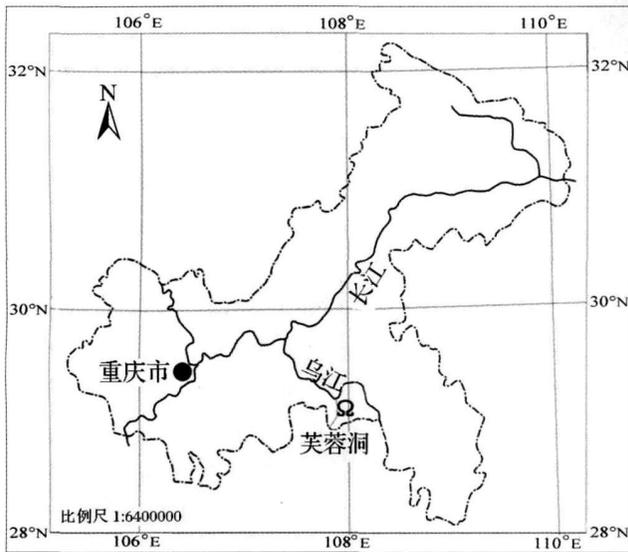


图 1 芙蓉洞地理位置图

Fig 1 The Location of Furong Cave

## 2 研究方法

在芙蓉洞内选取离洞口较远、封闭条件好的两处滴水 (1#、3#) 和两处池水 (2#、4#) (图 2) 进行长期连续观测。1#滴水点位于大厅顶部, 红外线测距仪测定滴水点高度约为 22 m, 水量较大, 下落过程中分散为多个滴水点。2#观测点是距离 1#观测点约 50 m 左侧洞壁上的一个小水池, 水量较小且在一年中稍有波动, 周围有较多新生石笋。3#滴水点高约 30 cm, 位于洞壁雪白的沉积物中, 以一根短小鹅管为滴水口, 水量相对较小。4#池水距洞口约 1 000 m, 水量稳定, 水池面积约 8.5 m<sup>2</sup>, 水深不超过 35 cm<sup>[25]</sup>。

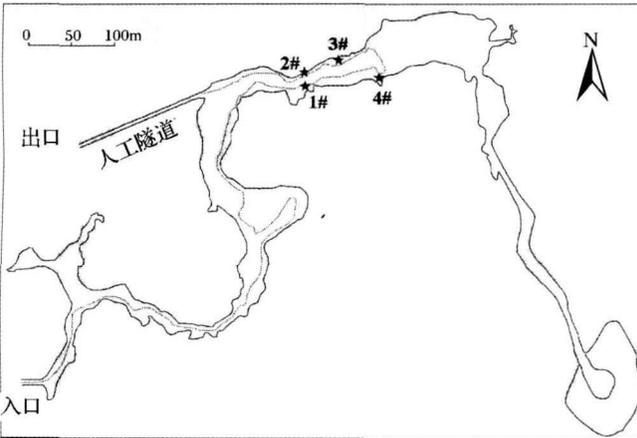


图 2 芙蓉洞洞穴平面图及观测点分布

Fig 2 The sketch map and distribution of the four monitoring sites in Furong Cave

本研究小组于每月下旬到现场观测并取样 (除个别月份外, 大部分时间在每月 21~24 号取样)。利用德国产 Mult350 便携式多参数测试仪现场测试水样的电导率 (EC)、pH 和温度, 测量精度分别为 1 μs/cm、0.01 pH 单位和 0.1°C; 并利用碱度测试盒 (Aquamerck, 德国) 测试水样的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度, 精度为 0.1 mmol/L。同时, 在每个观测点取适量水样 (约 60 mL) 装入经净化处理的聚四氟乙烯瓶中, 并加入 2~3 滴 1:1 浓度的 HNO<sub>3</sub>, 以保持离子活度, 带回实验室利用美国珀金埃尔默公司生产的 Optima 2100DV 电感耦合等离子发射光谱仪 (ICP-OES) 测试其中的 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 等离子浓度, 检出限为 0.001 ppm, 测量相对误差小于 2%。另取约 500 mL 水样, 带回实验室用瑞士 Metrohm 公司生产的 761 Compact IC 离子色谱仪测试其中的 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等离子浓度。采集时, 先用水样分别将采样瓶润洗两次, 采集池水时, 将采样瓶直接放入水体中, 并尽量避免采集表层和底层池水。将以上指标输入 WATSPEC 软件<sup>[26]</sup> 计算 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 和 SI<sub>c</sub><sup>[27]</sup>。其中, P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 的计算公式为:

$$P_{CO_2} = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{K_H K_1} \quad (1)$$

式中 K<sub>1</sub> 和 K<sub>H</sub> 分别是 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>2</sub> 的平衡常数<sup>[28]</sup>; SI<sub>c</sub> 的计算公式为:

$$SI_c = \lg \frac{(Ca^{2+})(CO_3^{2-})}{K_c} \quad (2)$$

式中 K<sub>c</sub> 为方解石溶解于水的平衡常数<sup>[29]</sup>。当 SI<sub>c</sub> = 0 时, 表示溶液中的方解石呈平衡状态; 当 SI<sub>c</sub> > 0 时, 表示溶液中的方解石浓度已超过饱和, 可能沉积方解石; 当 SI<sub>c</sub> < 0 时, 表示溶液中方解石尚未饱和, 可以溶解更多的方解石<sup>[27]</sup>。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 SI<sub>c</sub> 和 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 的变化特征

图 3 为 SI<sub>c</sub> 在观测时间的变化情况, 可以看出各点洞穴水的 SI<sub>c</sub> 变化明显, 且趋势相似。各个观测点的 SI<sub>c</sub> 大部分时间较为稳定, 且 SI<sub>c</sub> > 0 但在 2006 年 11 月、2007 年 8 月和 2008 年 6 月突然降低。其中, 1#滴水在 2007 年 8 月和 2008 年 6 月为不饱和水, SI<sub>c</sub> 分别为 -0.12 和 -0.11, 3#滴水在 2006 年 11 月和 2007 年 8 月不饱和, SI<sub>c</sub> 分别为 -0.17 和 -0.37; 两处滴水在其它时间均为过饱和状态, 但 1#滴水的 SI<sub>c</sub> 稍高于 3#滴水。可见, 两处滴水下的钙板和石笋正

在接受沉积。2007 年 3 月开始,在 3#滴水点下放置了一块凸面向上的弧形玻璃片接受沉积,实际观察到的沉积现象与方解石饱和指数理论计算结果一致。对此玻璃片上的沉积物进行用 X 衍射分析,结果表明此沉积物为方解石。两处池水在 2006 年 11 月、2007 年 8 月和 2008 年 6 月为不饱和水,其它时间均呈过饱和状态,但  $SI_c$  稍低于两处滴水,可见两处池水中有次生碳酸盐沉积,这与“犬牙晶花”池(4#点)中大量齿状碳酸盐晶体的现象相符合。其中,两处滴水的  $SI_c$  高于两处池水是因为滴水在下落过程中尚未沉淀碳酸盐类物质,池水在洞中时间较长,其中的部分碳酸盐物质已经沉积所致。

图 4 为四个观测点洞穴水  $P_{CO_2}$  的变化情况。各点洞穴水的  $P_{CO_2}$  变化趋势相似,在一年中的大部分时间各个点的  $P_{CO_2}$  较小 ( $P_{CO_2} < 500 Pa$ ),且波动很小;均在 2006 年 11 月、2007 年 8 月和 2008 年 6 月出现高值,但各个点的变化幅度相差较大,2006 年 11 月 2#、3#和 4#均大于 2 000 Pa 其中 4#超过 3 500 Pa 而

3#滴水点却低于 500 Pa 2007 年 8 月 3#点接近 3 500Pa 而其它三个点在 1 700~ 2 400Pa 之间;2008 年 6 月四个观测点均出现相对较小的峰值。同时,3#滴水的  $P_{CO_2}$  大部分时间稍高于其它三个点,主要是因为滴水的高度、水量及滴落速度等因素都不同程度的影响  $CO_2$  的逸出造成的<sup>[32]</sup>。

### 3.2 pH 的变化特征

图 5 为四个观测点洞穴水 pH 与当地降水的响应关系图。观测中各个点 pH 波动较大,1#、2#和 4#大部分时间在 8.1~ 8.4 之间,3#稍低,在 7.7~ 8.1 之间。四个观测点洞穴水的 pH 均在 2006 年 11 月、2007 年 8 月和 11 月、2008 年 6 月明显降低,达到 7 左右,同时,在 2006 年 10 月、2007 年 7 月和 9 月、2008 年 5 月的降水量均明显高于其它月份,达到 100 mm,甚至超过 200 mm,基于此,可以判断观测期间 pH 突然下降是降水对岩溶水的稀释作用导致的<sup>[30 31]</sup>。其中,2006 年 10 月降水对洞穴水的稀释作用最为最明显,这是因为 2006 年重庆遭遇特大干旱,

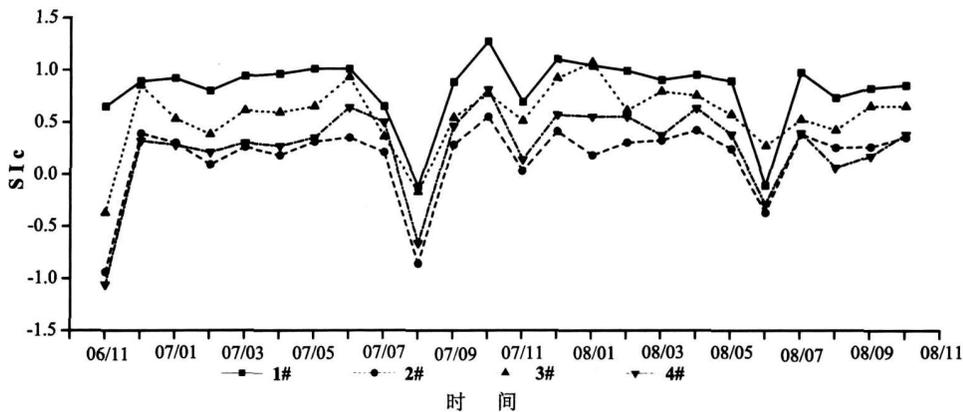


图 3 四个观测点洞穴水的  $SI_c$

Fig. 3 The  $SI_c$  values of the cave water for the four monitoring sites

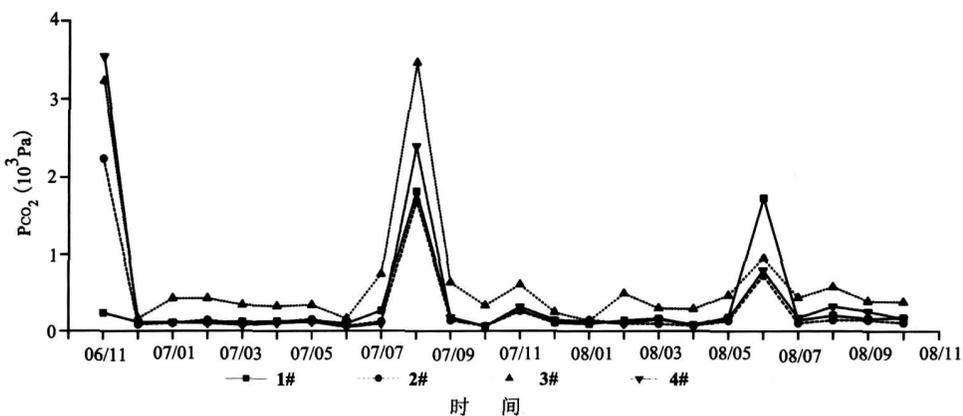


图 4 四个观测点洞穴水的  $P_{CO_2}$  ( $P_{CO_2}$  为计算值,单位:Pa)

Fig. 4 The  $P_{CO_2}$  of the four monitoring sites ( $P_{CO_2}$  is calculated values, Unit: Pa)

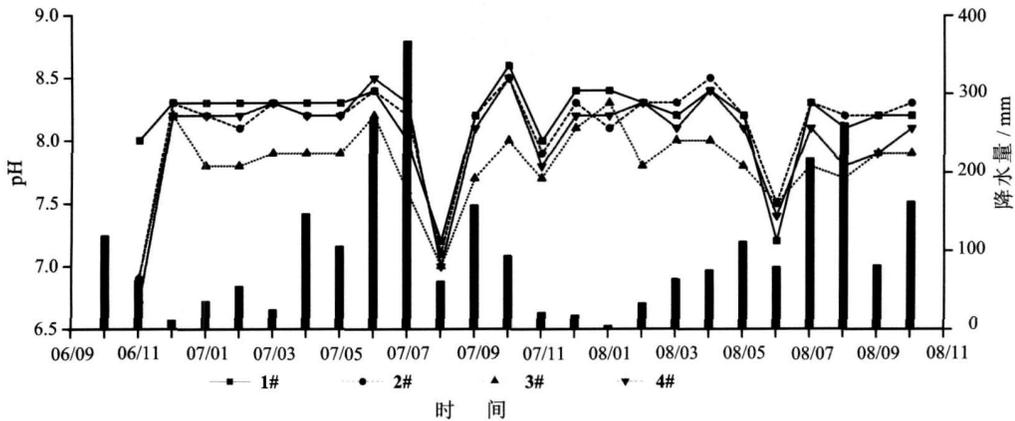


图 5 四个观测点洞穴水的 pH 值 (pH 为现场测定值, 降雨量单位: mm)

Fig. 5 The pH of the four monitoring sites (pH is monitored on the spot. Unit of the rainfall mm)

使洞穴顶板岩层管道中的岩溶水显著减少, 大旱之后, 降水可以相对较快通过岩层裂隙和管道系统进入洞穴, 使稀释作用增强, 洞穴水对降水的响应时间相对较短。

芙蓉洞内选取的两处池水水量相对较为稳定, 混合较为充分; 滴水在洞穴顶板裂隙中相互混合, 因此采集的水样代表一个时间段洞穴水的性质。洞内温度常年稳定在  $16.0 \sim 16.3^{\circ}\text{C}$ <sup>[25]</sup>, 对洞穴水次生碳酸盐沉积影响很小, 而两处池水与两处滴水的 pH、 $P_{\text{CO}_2}$  和  $SI_c$  均呈现相同的变化趋势, 说明四个观测点的变化特征均是对外界温度和降水变化的响应。

地表水下渗到洞穴中转变为洞穴水要经过一定的滞后期, 因此洞穴水理化性质的变化滞后响应于大气降水。平滑掉滞后期, 可以讨论洞穴水的各种理化性质对当地降水、地表温度、土壤生物活动和微生物活动的响应, 并进一步探讨次生碳酸盐的沉积对当地气候的响应。根据 pH 与月降雨量的响应关系 (图 5), 可以初步判定芙蓉洞洞穴水对外界降水的滞后时间约为 1 个月。

## 4 讨论

石笋生长速率是对大气降水的响应, 目前大部分研究者认为, 石笋微层厚度与降水量呈正相关<sup>[13, 23, 33, 34]</sup>, 但也存在相反情况<sup>[35]</sup>。研究表明,  $\text{CO}_2$  是形成喀斯特地上和地下景观的原始动力<sup>[36, 37]</sup>, 控制着  $\text{CaCO}_3$  的溶解和沉积, 这种控制作用是通过调节溶液的 pH 来实现的, 而 pH 的变化是对外界气温和降水的反映。气温和降水通过影响土壤水分、溶质运移和温度, 改变土壤中的生物呼吸、微生物分解等作

用, 使经过土壤层的降水转化为溶解了大量  $\text{CO}_2$  具有侵蚀能力的岩溶水; 岩溶水沿基岩裂隙、节理下渗的过程中不断溶蚀基岩而富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子, 为洞穴次生碳酸盐的沉积提供条件<sup>[38]</sup>; 进入洞穴后, 因为岩溶水的  $P_{\text{CO}_2}$  高于洞内空气而释放部分  $\text{CO}_2$ , 导致  $SI_c$  随  $P_{\text{CO}_2}$  降低和 pH 的升高而升高, 当  $SI_c > 0$  时, 形成碳酸盐沉淀。可见, 温度和降水是控制洞穴中次生碳酸盐沉积的先决条件。

重庆武隆县位于亚热带季风性湿润气候区, 冬暖夏热, 夏季平均气温  $27 \sim 29^{\circ}\text{C}$ , 冬季平均气温  $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 。根据近几年的降水资料, 该地区月的降水量变化较大, 整体而言, 每年 11 月 ~ 第二年 3 月降水较少, 月平均降水量在 50 mm 以下, 为旱季; 4 ~ 10 月降水较多, 有的月份甚至超过 200 mm, 为雨季。当然, 旱季与雨季的界限也并不是绝对的, 有的年份可能提前或者推迟。同时, 雨季期间由于温度较高, 植被茂盛, 地面水分蒸发和植物蒸腾强烈, 在一定程度上削弱降水对岩溶水的作用。分析显示, 芙蓉洞内的两处滴水 and 两处池水的  $SI_c$  在一年中的大部分时间均为较为稳定, 且  $SI_c > 0$  正在沉积碳酸盐类物质, 可见芙蓉洞地区温度和降水条件, 在一年中的大部分时间能够形成洞穴碳酸盐沉积。

需要注意的是, 四个观测点的  $SI_c$  均在 2006 年 11 月、2007 年 8 月、2008 年 6 月突然降低到 0 以下, 且每次降低之前的 1 ~ 2 个月降水量均相对较大, 可见较大降水对芙蓉洞洞穴水的稀释作用明显, 导致洞穴水的  $P_{\text{CO}_2}$  升高, pH 降低,  $SI_c$  变小, 当  $SI_c < 0$  时, 不能形成沉积甚至侵蚀原有的沉积。因此, 温度适宜时降水对岩溶水形成的稀释作用对碳酸盐的沉积的影

响起主导作用。总的来说,降水对岩溶水的影响与降水量大小、地貌特征、植被等多种因素有关,可以分两种情况探讨降水量与岩溶水的关系:一是适量降水时,降水与温度因子相结合通过影响土壤中的生物呼吸、微生物分解来影响岩溶水的  $SI_C$ , 其结果是  $SI_C$  变大, 利于沉积形成;二是降水过大时对降水的稀释作用,使  $SI_C$  减小,不利于沉积,甚至侵蚀原有的沉积物。芙蓉洞洞穴水的观测显示,一年中的大部分时间为第一种情况,只在降水量超过 100 mm 时表现出稀释作用。因此,次生碳酸盐沉积状况是对外界温度和降水变化的反映,且降水量的变化是洞穴水呈现过饱和与不饱和交替的出现主要原因,并且最终导致碳酸盐沉积的季节变化,降水量太大时不利于碳酸盐的沉积。

## 5 小结

次生碳酸盐的生长是弱酸性岩溶水溶蚀地表基岩,并携带所溶蚀的碳酸盐类物质,进入洞穴内部迅速脱气,转变为弱碱性洞穴水而沉积的过程。芙蓉洞内四个观测点在观测年中的大部分时间为过饱和水,一年中,不饱和的时间仅为 1~2 个月,说明洞内正在沉积次生碳酸盐;由于池水在洞中的时间较长已经发生了碳酸盐的沉积,因此观测中出现同一季节滴水的  $SI_C$  均大于池水的现象。

降水量相对较大的月份之后的 1~2 个月中,各个观测点洞穴水的  $P_{CO_2}$  升高, pH 降低,  $SI_C$  降低的现象,是由降水的稀释作用导致的。温度适宜时降水对岩溶水形成的稀释作用对碳酸盐沉积的影响起主导作用。因此,次生碳酸盐的沉积状况是对外界温度和降水变化的反映,且降水量的变化是洞穴水呈现过饱和与不饱和交替的出现主要原因,最终导致碳酸盐沉积的季节变化,降水量大时不利于碳酸盐的沉积。

总之,次生碳酸盐沉积物的生长与洞穴水的  $P_{CO_2}$ , pH,  $Ca^{2+}$  浓度和溶液温度等多种指标有关,这些指标的变化在不同程度上均受当地降水和温度的影响,因此洞穴沉积物的生长速率是对当地气候变化尤其是降雨量变化的反映,而石笋等洞穴沉积物在一定程度上能够反映古气候的变化情况。但是要建立长时间洞穴次生碳酸盐的沉积速率与当地的降水量的响应关系还有待更加广泛深入的研究,并尽量减小温度因子对地表岩溶水的侵蚀能力的影响。

致谢 该研究工作得到芙蓉洞风景名胜区以及武隆县气象局的大力支持,在此表示衷心感谢!

## 参考文献 (References)

- 汪永进, 孔兴功, 邵晓华, 等. 末次盛冰期百年尺度气候变化的南京石笋记录 [J]. 第四纪研究, 2002, 22(3): 243-251 [Wang Yongjin, Kong Xingong, Shao Xiaohua, et al. Century-scale climatic oscillations during the last Glacial Maximum recorded in a stalagmite from Nanjing [J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(3): 243-251]
- Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, et al. An millennium- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224 000 years [J]. Nature, 2008, 451: 1090-1093
- Fairchild I J, Borsato A, Tooth A F, Frisia S, et al. Controls on trace element Sr/Mg compositions of carbonate cave waters: Implications for speleothem climatic records [J]. Chemical Geology, 2000, 166: 255-269
- 汪永进, 吴江滢, 刘殿兵, 等. 石笋记录的东亚季风气候 H1 事件的突发性特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(3): 327-333 [Wang Yongjin, Wu Jiangying, Liu Dianbing, et al. A quick cooling event of the East Asian monsoon responding to Heinrich Event 1: Evidence from stalagmite  $\delta^{18}O$  records [J]. Science in China Series D, 2002, 45(1): 88-96]
- Li Tingyong, Yuan Daoxian, Li Hongchun, et al. High-resolution climate variability of southwest China during 57~70 ka reflected in a stalagmite  $\delta^{18}O$  record from Xinya Cave [J]. Science in China Series D, 2007, 50(8): 1202-1208
- Hu Chaoyong, Huang Junhua, Fang Nianqiao, et al. Adsorbed silica in stalagmite carbonate and its relationship to past rainfall [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(9): 2285-2292
- 李廷勇, 李红春, 李俊云, 等. 重庆芙蓉洞洞穴沉积物  $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{18}O$  特征及意义 [J]. 地质论评, 2008, 54(5): 712-720 [Li Tingyong, Li Hongchun, Li Junyun, et al. The  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$  features and their significances of speleothems in Furong Cave, Chongqing, China [J]. Geological Review, 2008, 54(5): 712-720]
- Roberts M S., Smart P L., Baker A. Annual trace element variations in a Holocene speleothem [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 154(1-4): 237-246
- 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 洞穴次生化学沉积物中 Mg/Sr/Ca 及其比值的环境指代意义 [J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 115-122 [Li Bin, Yuan Daoxian, Lin Yushi, et al. The ratios of Mg/Ca, Mg/Sr in the speleothems and their environmental meanings in Guilin area [J]. Carsol Sinica, 2000, 19(2): 115-122]
- 马志邦, 李红春, 夏明, 等. 距今 3ka 来京东地区的古温度变化: 石笋 Mg/Sr 记录 [J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1829-1834 [Ma Zhibang, Li Hongchun, Xia Ming, et al. Paleotemperature changes over the past 3000 years in eastern Beijing, China: A reconstruction based on Mg/Sr records in a stalagmite [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 48(4): 395-400]
- 邵晓华, 汪永进, 孔兴功, 等. 南京葫芦洞石笋生长速率及其气候意义讨论 [J]. 地理科学, 2003, 23(3): 304-309 [Shao Xiaohua, Wang Yongjin, Kong Xingong, et al. Approach to the growth rate and the climatic significance of stalagmites in Huluhu Cave, Nanjing [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(3): 304-309]

- 12 Baker A, Asrat A, Fairchild I J *et al.* Analysis of climate signal contained within  $\delta^{18}\text{O}$  and growth rate parameters in two Ethiopian stalagmites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71: 2975-2988
- 13 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——iv微层显微特征 [J]. *中国科学: D 辑*, 1998, 28(1): 91-96 [Qin Xiaoguang, Liu Dongsheng, Tan Ming *et al.* Grey characteristics of microbanding of stalagmite in Shihua cave, Beijing and its climatic significance (iv): The study of microstructure of microbanding [J]. *Science in China Series D*, 1998, 28(1): 91-96]
- 14 谭明, 侯居峙, 程海. 定量重建气候历史的石笋年层方法 [J]. *第四纪研究*, 2002, 22(3): 209-219 [Tan Ming, Hou Juzhi, Cheng Hai. Methodology of quantitatively reconstructing paleoclimate from annually laminated stalagmites [J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(3): 209-219]
- 15 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素——以北京石花洞为例 [J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 258-264 [Wang Xinzhong, Ban Fengmei, Pan Genxing. Temporal and spatial variation of cave drip water geochemistry in Shihua Cave, Beijing, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 258-264]
- 16 周运超, 王世杰. 洞穴滴水的水文地球化学过程: 贵州犀牛洞的研究 [J]. *地球与环境*, 2005, 33(2): 25-30 [Zhou Yunchao, Wang Shijie. Hydrogeochemical process of cave drips study on Xiniu cave, Zhenyning, Guizhou [J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 25-30]
- 17 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 洞穴滴(流)水的沉积及溶-侵蚀作用——以桂林盘龙洞为例 [J]. *中国岩溶*, 2007, 26(4): 326-334 [Zhang Meiliang, Zhu Xiaoyan, Lin Yushi *et al.* Drip water deposits and erosion-dissolution process by drip water in karst cave: Taking the Panlong cave as an example [J]. *Carso Sinica*, 2007, 26(4): 326-334]
- 18 周运超, 王世杰. 贵州凉风洞洞穴滴水水文水化学过程分析 [J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 208-215 [Zhou Yunchao, Wang Shijie. Analysis of hydrochemical process of drip water in Liangfeng cave, Libo, Guizhou [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 208-215]
- 19 张平中, 陈一萌, Johnson K P, 等. 甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义 [J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1529-1531 [Zhang Pingzhong, Chen Yimeng, Johnson K P, *et al.* Environmental significance of isotope in drip water and present stalagmites from Wanxiang cave, Wudu, Gansu [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1529-1531]
- 20 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 2000, 30(1): 81-87 [Li Bin, Yuan Daoxian, Lin Yushi *et al.* Oxygen and carbon isotopic characteristics of rainwater, drip water and present speleothems in a cave in Guilin area and their environmental meanings [J]. *Science in China Series D*, 2000, 43(3): 277-285]
- 21 刘子琦, 李红春, 徐晓梅, 等. 贵州中西部洞穴水系与碳酸钙的稳定同位素意义 [J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 234-241 [Liu Ziqi, Li Hongchun, Xu Xiaomei *et al.* Stable isotopes of water and carbonate samples from caves in Central Westem Guizhou: Implications of paleoclimate and paleoenvironment [J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 234-241]
- 22 李兴能, 王世杰, 周运超 *et al.* Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of dissolved organic carbon in cave drip waters and their responses to environment changes: Four cave systems as an example in Guizhou Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 884-889
- 23 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, 16(1): 1-10 [Tan Ming, Liu Dongsheng, Qin Xiaoguang *et al.* Preliminary study on the data from microbanding and stable isotopes of stalagmites of Beijing Shihua Cave [J]. *Carso Sinica*, 1997, 16(1): 1-10]
- 24 刘再华, Dreier W. 方解石沉积速率控制的物理化学机制及其古环境重建意义 [J]. *中国岩溶*, 2002, 21(4): 252-258 [Liu Zaihua, Dreier W. Physicochemical mechanisms of rate determination of calcite deposition and their implications for paleoenvironmental reconstruction [J]. *Carso Sinica*, 2002, 21(4): 252-257]
- 25 李廷勇. 重庆地区石笋古环境信息影响因素及末次冰期以来气候变化的初步研究 [D]. 重庆: 西南大学地理科学学院, 2007 [Li Tingyong. The Controlling Factors Research on the Paleoenvironmental Information in Stalagmite and the Paleoclimate Reconstruction since the Last Glacial Period in Chongqing Area [D]. Chongqing: the Geology School of Southwest University, 2007]
- 26 Wigley T M L. WATSPIC: A computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions [J]. London: British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, 1977, 20: 1-40
- 27 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 138-156 [Yuan Daoxian, Cai Guihong. The Science of Karst Environment [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 138-156]
- 28 Stumm W, Morgan J J. *Aquatic Chemistry* [M]. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: Wiley-Interscience, 1981: 780
- 29 吕保樱, 刘再华, 廖长君, 等. 水生植物对岩溶水化学日变化的影响——以桂林岩溶水文地质试验场为例 [J]. *中国岩溶*, 2006, 25(4): 335-340 [Lü Baoying, Liu Zaihua, Liao Changjun, *et al.* The influence of aquatic plants on diurnal variations of hydrochemistry in karst system: A case in the Guilin karst experimental site [J]. *Carso Sinica*, 2006, 25(4): 335-340]
- 30 Tooth A F, Fairchild I J. Soil and karst aquifer hydrological controls on the geochemical evolution of speleothem forming drip waters, Crag Cave, Southwest Ireland [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 273(1-4): 51-68
- 31 Liu Zaihua, Chris Groves, Yuan Daoxian *et al.* Hydrochemical variations during flood pulses in the southwest China peak cluster karst: Impacts of  $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$  interactions [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(13): 2423-2437
- 32 张美良, 林玉石, 覃嘉铭. 洞穴石笋沉积纹层的形态组合及其滴水的水动力条件 [J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 26

- (4): 466-470 [Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jianing. The formation combinations and dynamic conditions of dripping water of deposition limestone from stalagmites in caves [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science, 2001, 114(4): 466-470]
- 33 Baker A, Smart P L, Edwards R L, *et al.* Annual growth banding in a cave stalagmite [J]. Nature, 1993, (364): 518-520
- 34 Genty D, Quinif Y. Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites—importance for paleoclimatology [J]. Sedimentary Research, 1996, 66(1): 275-288
- 35 Baker A, Proctor C, Lauritzen S E, *et al.* SPEP: High-resolution stalagmite records of NE Atlantic climate in the last millennium [J]. Pages, 2000, 8(2): 14
- 36 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移 [J]. 地理学报, 1999, 54(5): 438-444 [ Jiang Zhongcheng. Element migration of karst dynamic system [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(5): 438-444]
- 37 潘根兴, 曹建华. 表层带岩溶作用以土壤为媒介的地球表层生态系统过程——以桂林峰丛洼地岩溶系统为例 [J]. 中国岩溶, 1999, 18(4): 287-296 [Pan Genxing, Cao Jianhua. Karstification in epikarst zone: The earth surface ecosystem processes taking soil as a medium: Case of the Yaji karst experiment site, Guilin [J]. Carsol Sinica, 1999, 18(4): 287-296]
- 38 王静, 宋林华, 向昌国, 等. 不同植被类型覆盖下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度对洞穴景观的影响 [J]. 地理研究, 2004, 23(1): 71-77 [Wang Jing, Song Linhua, Xiang Changguo, *et al.* The impact of the soil CO<sub>2</sub> concentration under different types of vegetation on landscape in caves [J]. Geographical Research, 2004, 23(1): 71-77]

## Study on Variations of Speleothem and the Relationship Between $SI_C$ and Precipitation in Furong Cave

YE Ming-yang<sup>1</sup> LITing-yong<sup>1</sup> WANG Jian-li<sup>1,2</sup> LIU Xian<sup>1</sup> WANG Yong<sup>1,2</sup>  
LI Jun-yun<sup>1</sup> WANG Jian-ming<sup>1</sup> PANG Qiao<sup>1</sup>

(1 School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715;

2 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715)

**Abstract** Four monitoring sites were selected in Furong Cave, Wulong county of Chongqing China, including two drip water sites and two pool sites, respectively. The pH, temperature and concentration of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in water for the four sites were tested in the cave; other water samples are analyzed in the laboratory for the concentration of some main ions (e.g. Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>, etc.). Then the  $P_{CO_2}$  (Pressure of CO<sub>2</sub>) and the  $SI_C$  (Saturation Index of calcite) were calculated with the WATSPEC software; the sediment of carbonate and the relationship between  $SI_C$  and precipitation in Furong Cave were discussed. Some conclusions were drawn as follows: in most months of monitoring year, the water of the four sites is oversaturated to calcite, which reflected the stalagmites beneath them are in depositing. Activating sediments on a piece of glass which placed under one drip water in Furong Cave confirmed the results of the calculation of  $SI_C$ . Furthermore, the  $SI_C$  of drip water was usually higher than that of pool water in the same season. So the temperature and precipitation was well for the deposition in Furong Cave. And the unsaturated period also after the high-rainfall month shows that the precipitation had a big effect on the  $SI_C$ , so the high-rainfall is the key factor for the deposition and lead to the alternate over saturation and unsaturation.

**Key words** Furong Cave, speleothem,  $SI_C$ , pH,  $P_{CO_2}$ , precipitation