

桂林洞穴滴水与现代碳酸钙 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的环境意义^① ——以桂林七星岩 NO.15 支洞为例

张美良¹ 朱晓燕¹ 吴 夏¹ 张碧云² 潘谋成¹

(1.中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶动力学重点实验室 桂林 541004;

2.广西水文地质工程地质勘察院 广西柳州 545000)

摘 要 现代洞穴动态监测的一个先决条件就是为洞穴碳酸盐(CaCO_3)沉积物—石笋的各种替代指标的解译提供可靠的依据,充分利用现代碳酸盐(CaCO_3)沉积物的各种替代指标,并与现代器测气象资料进行相互对比、并用以校正,是精确或定量解释石笋气候替代指标的关键。

经对桂林七星岩 15 号支洞的 5 个滴水点进行了长达四个水文年(2008~2011 年)的大气降水、洞穴滴水、现代碳酸盐沉积物的动态监测和研究,并探讨了洞穴滴水与现代碳酸盐(CaCO_3)的 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关关系。研究表明,洞穴滴水与现代碳酸盐(CaCO_3)的年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值非常接近降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值,并具有与地表降水 $\delta^{18}\text{O}$ 相同的变化趋势,反映了洞穴滴水与现代碳酸盐(CaCO_3)的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要来自大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$,即明显受控于降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 。在 4 个水文年中,现代洞穴次生化学碳酸盐(CaCO_3)沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录的年内(或年际)变化或多年的变化趋势基本相同,表现出明显的四高峰($\delta^{18}\text{O}$ 低值区)四低谷($\delta^{18}\text{O}$ 高值区)的波动变化特征,具有明显的年际、季节性变化规律,显示具有雨热同季的特点。研究结果表明洞穴滴水和洞穴现代碳酸盐(CaCO_3)沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 可以记录当地或洞穴上方的气候变化信号,即现代碳酸盐(CaCO_3)沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要作为夏季风强度或降雨量的替代指标。

关键词 大气降水 洞穴滴水 现代碳酸盐沉积 氧同位素 桂林七星岩 15 号支洞

第一作者简介 张美良 男 1956 年出生 研究员 岩溶环境与全球变化研究 E-mail:mlzh2010@163.com

中图分类号 P597+.2 TE121.3+1 **文献标识码** A

0 引言

众多的调查研究已经证实了洞穴次生化学沉积物的稳定同位素组成提供了实用的大陆气候变化的替代指标记录(McDermott, 2004; Fairchild *et al.*, 2006; Lachniet, 2009)^[1-3]。洞穴次生化学碳酸盐岩沉积物中最常用的气候替代指标是 $\delta^{18}\text{O}$,它能记录研究区(点)大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化,基于假定:①洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随当地雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化而变化;②洞穴空气温度恒定;③现代洞穴沉积的碳酸盐岩(CaCO_3)与滴水之间达到同位素平衡(Hendy, 1971)^[4]。热带和亚热带地区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录主要反映降雨量(Neff *et al.*, 2001; Matthews *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2007)^[5-7],然而,在高纬度地区,大气温度是主要的控制因素(Lachniet, 2009)^[3]。其他用来解释石笋中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的控制因素包括:水汽源的变化(Cruz *et al.*, 2005)^[8],季风强度的变化(Wang *et al.*,

2001)^[9]和飓风着陆(Frappier *et al.*, 2007)^[10]。早期的研究表明,降雨和滴水稳定同位素之间的关系明显受洞穴特有的复杂因素的影响,如降雨从地表到洞穴滴水之间的稳定同位素信号产生的衰减程度,它由于洞穴上覆基岩厚度影响着含水层的滞留时间而造成衰减程度不同(Matthews *et al.*, 1996; Ayalon *et al.*, 1998; McDermott, 2004; Fairchild *et al.*, 2006; Lachniet, 2009)^[1,2,9,11-12]。而 Yonge 等^[13]在北美地区不同洞穴中的不同监测点进行的滴水监测研究发现,作为渗流流过或穿过洞穴之上的基岩时,由于渗流水或滴水受到均一化作用,降水中同位素的季节性信号被衰减直至完全平滑,这种均一化作用是由水流通过洞顶岩溶化的基岩时所经历的曲折通道所造成。Geode 等^[14]通过在澳大利亚的小型试验证实了滴水均一化现象。Williams 和 Fowler(2002)^[15]在新西兰做的研究工作同样也印证了洞穴滴水受均一化作用的结果。但是, Li 等^[16]对桂林地区的洞穴滴水研究表明,洞穴滴水的氧同位素却反映了地表降水的季节性

①国家自然科学基金(批准号:41372190)与地调局“中国气候变化岩溶沉积物记录研究”(编号:12120113005700)联合资助

收稿日期:2014-05-05;收修稿日期:2014-08-18

氧同位素变化。而 Beynen 等^[17]对纽约的 Indian Oven Cave 的洞穴滴水 and 大气降水的同位素监测,研究表明洞穴渗流水经过表层岩溶带时发生较弱的均一化作用,导致季节性降雨中的同位素信号虽有所衰减,但滴水的同位素值仍表现出季节性的变化特征。

当前监测研究的长周期的高分辨率降水与同期洞穴滴水、现代碳酸盐沉积物同位素时间序列的关系,能为洞穴石笋古气候替代指示记录研究提供重要的指导(Matthews *et al.*, 1996; Ayalon *et al.*, 1998; Spötl *et al.*, 2005; Matthey *et al.*, 2008; Lachniet, 2009)^[3,11-12,18-19]。如罗维均等^[20]利用贵州凉风洞石笋中 $\delta^{18}\text{O}$ 进行气候环境研究时,利用在 2003~2004 年间的降水、洞穴滴水监测记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,揭示了大气降水,土壤水和洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值是同步变化的,即洞顶滴水与洞外大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 具有很好的相关性,认为石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 代表了沉积时的古大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化。Pape 等^[21]采集了从德克萨斯州到新墨西哥州六个洞穴的滴水进行氧同位素分析,显示离墨西哥湾越远,其氧同位素值越偏轻,这种变化来自于风暴路径和水汽来源的变化。谭明等^[22]从大气环境这个角度出发对石笋氧同位素信号的意义进行研究,讨论了降水氧同位素年际变化的一种气候变化效应——“环流效应”,指出 La Nina 型年份,中国季风区内来自近源的太平洋水汽份额减少,导致中国季风区的雨水及石笋氧同位素变轻;El Nino 型年份,中国季风区内来自近源的太平洋水汽份额增大,导致中国季风区的雨水及石笋氧同位素变重。所以,开展现代洞穴监测对于了解到达洞穴顶部的降水中氧同位素在表层岩溶带中的转变过程,是精确校准气候指示意义的关键。

本文通过对桂林地区的降水、桂林七星岩 15 支洞的洞穴滴水 and 现代碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究,以揭示大气降水的水汽来源和季风气候变化的信号,并可为解译石笋记录的环境信息提供理论依据。

1 研究概况和样品的采集与分析

1.1 概况

七星岩 NO.15 支洞位于桂林市东区一漓江左岸的七星公园内,公园内由三座残存岩溶石峰组成,其中,NO.15 支洞位于普陀山石峰的东部的南侧。地理坐标为: $25^{\circ}31' \text{ N}$, $107^{\circ}50' \text{ E}$,海拔标高 155 m。洞穴发育在上泥盆统融县组 (D_3r) 厚层状亮晶砂屑灰岩中,属下层洞,并与现代地下河相通。实测七星岩

NO.15 支洞长 1 108 m。洞顶基岩覆盖层厚 20~40 m (进入洞穴深部 400 m 后,洞顶覆盖层厚达 80 m),基岩裸露,裂隙发育。而在基岩面上基本没有土层,仅在一些基岩裂隙中有极少量黏土充填,岩溶表层带调蓄能力差,有利于降水下渗。在洞穴顶部分布有亚热带常绿阔叶与落叶阔叶混交林,如桉木、香椿、桂花树、枫树和恩树等,呈稀疏分布,在洞穴顶部的峰体上均为 C3 植物,基本上没有 C4 植物。

区内年平均降水为 1 868 mm,年蒸发量 1 268 mm,年平均湿度 76%,日照为 1 285 h。桂林七星岩 NO.15 支洞内年平均气温为 19.2°C ,相对湿度约为 90%~98%。洞穴内不仅发育有丰富的洞穴次生化学碳酸盐沉积物,而且仍有许多现代滴水和现代碳酸盐沉积。

桂林七星岩 NO.15 支洞的滴水和新碳酸盐沉积监测点如图 1 所示,共有 5 个滴水监测点、一个池水监测点、7 个现代碳酸盐沉积监测点。现代碳酸盐沉积物的监测方法是将玻璃板放置在滴水监测点的新石笋上,监测并收取玻璃板上的碳酸盐 (CaCO_3) 沉积物。

1.2 洞穴滴水、现代碳酸盐样品的采集与分析

在 2008 年 1 月至 2011 年 12 月期间,我们进行了 4 个水文年的洞穴滴水的水样和现代碳酸盐 (CaCO_3) 样品的收集。大气降水以天或场为单位,每次降水后即将降水样装入预先冲洗好的塑料瓶中并封闭保存。滴水收集于洞穴中的 5 个滴水点(图 2),样品为每半月采集 1 次。样品采集需先预冲洗塑料瓶,在样品采集前再用洞穴滴水冲洗。

洞穴中现代碳酸盐 (CaCO_3) 样品的采集,主要是利用平板玻璃片或表面皿作为沉积试板(片),分别放在现在正在生长的新石笋顶部,使洞穴滴水滴落在试板(片)上,接受现代碳酸盐 (CaCO_3) 沉积(图 3),并按半月对玻璃试片或表面皿上沉积的现代碳酸盐 (CaCO_3) 用刀片刮取,然后装入袋中带回实验室,并烘干和进行碳氧同位素分析。

洞穴滴水的分析,由国家测试中心实验室完成,以 δ 表示氢氧同位素数据,计算公式如下:

$$\delta = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{std}}) - 1] \times 1000, \text{ 其中 } R \text{ 分别为 } \text{D}/\text{H}, {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}.$$

其中,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 采用 CO_2 与水的平衡方法。样品用 Gasbench-MAT253 质谱仪进行同位素测定。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值相对于 VSMOW 标准, $\delta^{18}\text{O}$ 精度为 $\pm 0.01\text{‰}$, δD 的精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

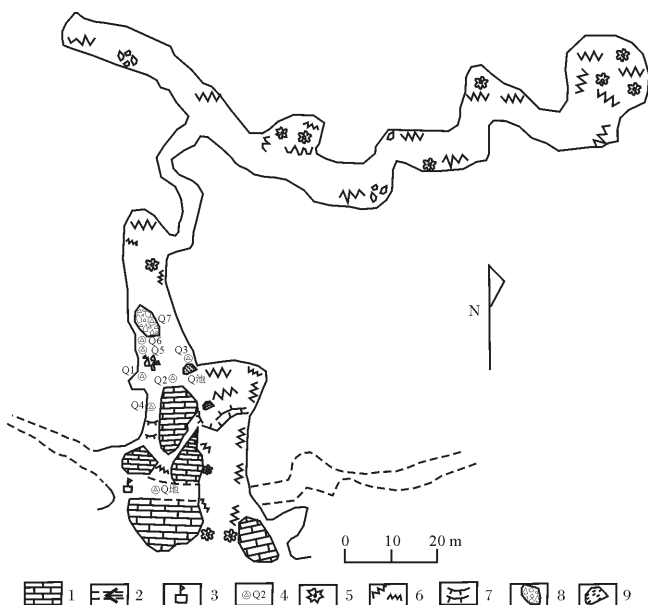


图1 桂林七星岩 NO.15 支洞平面图及滴水监测点

1.灰岩;2.地下河;3.地下河抽水站;4.滴水监测点;5.石笋;6.钙华;
7.陡坎;8.坍塌石块;9.池水

Fig.1 No.15 branch cave plane of the Seven Star Cave in Guilin and monitoring sites of drip water

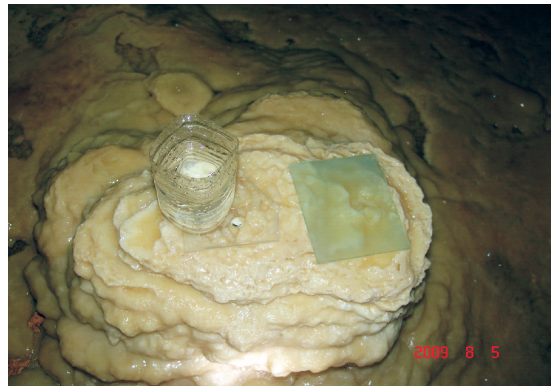


图2 滴水及玻璃板上 CaCO_3 沉积

Fig.2 Drip water and carbonate deposit

现代碳酸盐 (CaCO_3) 样品的碳氧同位素分析,由中国科学院南京古生物研究所同位素实验室完成,用 Kiel IV-MAT253 质谱仪进行同位素分析,每 8 个样品插一个标准样品 (NBS-19), $\delta^{18}\text{O}$ 值为相对于 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) 标准,系统误差为 $<0.1\text{‰}$ 。

2 结果与讨论

研究表明,桂林七星岩 NO.15 支洞的洞穴上方基岩基本裸露 (仅在一些基岩裂隙中有极少量黏土充填),亚热带常绿阔叶与落叶阔叶混交林呈稀疏分



图3 表面皿上 CaCO_3 的沉积

Fig.3 Carbonate (CaCO_3) deposit

布,地形为陡坡不允许降水汇集,岩溶表层带调蓄能力差,有利于降水快速流失或下渗,因此,洞穴滴水的稳定同位素不受地面蓄水库蒸发作用的影响,也不会导致剩余水中的同位素含量增大;而季风强弱、降水气团来源与雨量效应是影响七星岩 NO.15 支洞滴水及现代沉积 CaCO_3 的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号的主要因素。

2.1 降雨中同位素信号的季节性变化

通常,将大气降水同位素的组分与各环境要素之间的相关关系称为环境同位素效应。温度效应,是指降水的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着年平均温度升高而增加的现象称为温度效应,即指温度与同位素的正相关关系。在各个环境同位素效应中,温度效应尤其重要,这是因为环境同位素的分馏作用主要受制于相变过程中的温度。

据 2008 年至 2011 年间降水及降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分析结果,获得了 4 年的大气雨水线方程 ($\delta\text{D} = 8.89\delta^{18}\text{O} + 18.58, R^2 = 0.98$),大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的组成及降水量和温度变化曲线图 (图 4)。由曲线可以看出,本区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较大,变化范围在 $-14.48\text{‰} \sim +2.38\text{‰}$ 之间,平均为 -5.78‰ (462 件降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值)。总体表现为在夏半年 (5~10 月) 降水多,占总降水量的 67.6%, $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏低或偏负,其变化范围在 $-14.48\text{‰} \sim -5.38\text{‰}$ (VSMOW) 之间,平均值为 -8.04‰ (共 261 组); δD 变化范围在 $-140\text{‰} \sim +33.3\text{‰}$, δD 平均为 -56.03‰ 。经对 2008~2011 年间的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值及降水量的关系进行相关分析,获得了相关方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.027P - 9.417$, 其相关系数 $R^2 = 0.64$, 显示降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降雨量呈负相关关系—量效应,特别是在夏半年 (或夏季) 存在明显的降水的量效应,即单场的降水量越大,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值越负。

利用 HYSPLIT 模式中的后向轨迹法 (Backwards Trajectory) 追踪 (关于水汽源的讨论将在另文发表), 揭示在夏半年季风降水期间 (5~10 月), 大气降水的稳定同位素组成主要受夏季风或夏季台风的影响, 即受来自孟加拉湾、南海海洋气团的水汽源的控制, 存在有明显的降水的量效应, 降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低或偏负, 是由于重同位素在水汽输送过程中因不断冷凝而大大贫化, 从而降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低或偏小, 服从瑞利同位素平衡分馏模式, 明显反映了季风区降水的特点。在冬半年 (11 月至次年 4 月) 降水减少, 占总降水量的 32.4%, $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏高或不断富集, 其变化范围在 $-7.48\text{‰} \sim +2.38\text{‰}$ (VSMOW) 之间, 平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2.89‰ (共 210 组), δD 平均值为 -9.23‰ (共 210 组)。

分析结果表明, 冬半年 (11 月至翌年 4 月) 大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍偏正, 揭示桂林地区冬半年大气降水的水汽源主要来自西太平洋暖湿气团、冬季风冷气团或西风环流所携带的大陆性气团和局地水汽环流的影响。由于冬半年具有降水少而小、湿度低、蒸发性强等特点, 说明降水的水汽在输送途中受到一定蒸发作用的影响, 同时, 又叠加了局地蒸发水汽循

环的影响, 这是导致冬半年大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重或偏正的主要因素。

夏半年大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量、温度之间存在显著的负相关关系——量效应 (主要是指单场的降水量与降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值而言, 而不是指月平均降水量与月平均降水的 $\delta^{18}\text{O}$) 和反温度效应, 即降水量越大或是温度高、降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值越低或越负。例如, 2008 年和 2009 年间 (6~8 月) 的几场暴雨, 降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较偏低或偏负 (图 4), 其降水的量效应的影响远远掩盖了温度效应。在冬半年, 由于受西太平洋的暖湿气团与冬季风冷气团的影响, 有时部分叠加了局地水汽环流的影响, 所形成的锋面雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏正或偏高。但从图 4 可以看出, 在 2010 年和 2011 年的秋冬大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量、温度之间存在显著的正相关关系, 即降水量小或是温度低, 而降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值则偏低或偏负, 为什么? 这是因为 2010 年和 2011 年为最近 50 年来最干旱的年份 (夏季风强盛, 雨带北移), 秋冬季大气降水量虽然小或少, 温度降低, 但是据 HYSPLIT 模式中的后向轨迹法 (Backwards Trajectory) 追踪发现, 其大气降水的大部分水汽均来源于南海或西太平洋区的热带海洋的暖湿气

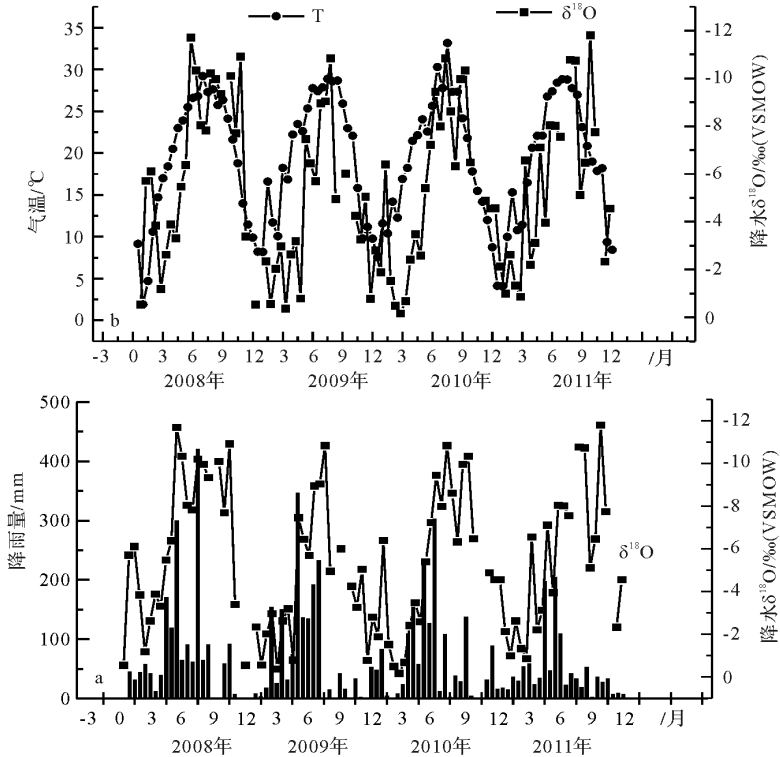


图 4 桂林七星岩附近 2008~2011 年大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温、降水量关系

Fig.4 The curve of surface temperature, precipitation and $\delta^{18}\text{O}$ of the meteoric precipitation during 2008~2012 in the nearly Seven Star Cave of Guilin

团,这是导致秋冬大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低或负的主要原因。由此说明,不同大气降水的水汽团来源及性质对大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的年际变化起着重要的作用。

2.2 洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号

经过 4 个水文年对桂林七星岩 NO.15 支洞的洞穴滴水(共计 7 个监测点,其中,5 个为洞穴滴水点,1 个为池水点和 1 个为地下水)的监测以及对所采集的不同滴水点的水样进行了氧同位素分析,获得的结果如图 5 所示,其滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变幅为 $-4.2\text{‰} \sim -8.6\text{‰}$ 之间(存在有 4.4‰ 的差异,主要受季节性降水变化的影响),平均值为 -5.8‰ (据 632 组数 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均)。洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 相对于大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值(-6.25‰)稍偏重或偏正 0.45‰ ,但两者的变化趋势基本一致,表明洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要来源于大气降水,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响或控制。

由图 5 可清楚地表明洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显与同期的降雨量、降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有很好的相关关系,表现出明显的四高峰($\delta^{18}\text{O}$ 低值区)四低谷($\delta^{18}\text{O}$ 高值区)的波动变化特征。在夏半年(晚春、夏季),大气降雨与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏负或偏低,平均为 -6.08‰ (VSMOW);在冬半年(冬季、早春),大气降雨与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏正或偏重,平均为 -4.92‰

(VSMOW)。结果表明,在夏半年,大气降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显受降雨量的影响——量效应的影响,即大气降水量越大(特别是单场降水),大气降水和洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则明显偏负或偏低(图 5),同时,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也会受到较弱的均一化或混合作用的影响。但是,在秋季(9~11 月),如在 2008、2010 和 2011 年的 9~11 月,大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值虽然比较偏负或偏低(图 5a),但是因其气候干燥、相对湿度小,降水的量较小或偏小,月降水量不足 50 mm(单场降水为 1~8 mm 不等),大气降水的一部分基本保存在地表的表部,另一部分因空气比较干燥,而被蒸发掉,而能真正参与表层岩溶带的调蓄或下渗补给洞穴的滴水极少或甚至无。这种干旱的气候条件,缺乏地表降水的下渗补给,导致洞穴滴水的滴速相对较慢,滴水量相对较小,表明洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值没有获得 9 至 11 月大气降水的补给,所以,滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 也不能反映秋季(9~11 月)降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的信息。由此说明,单场降水量的大小及其降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值起着至关重要的作用。在冬半年,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏重或偏正(图 5b),具有明显的季节性变化特征,如在 12 月至次年 4 月的降雨表现为细雨绵绵,连续不断,空气湿度大,累计降水量相对较大(月降水量达 50~150

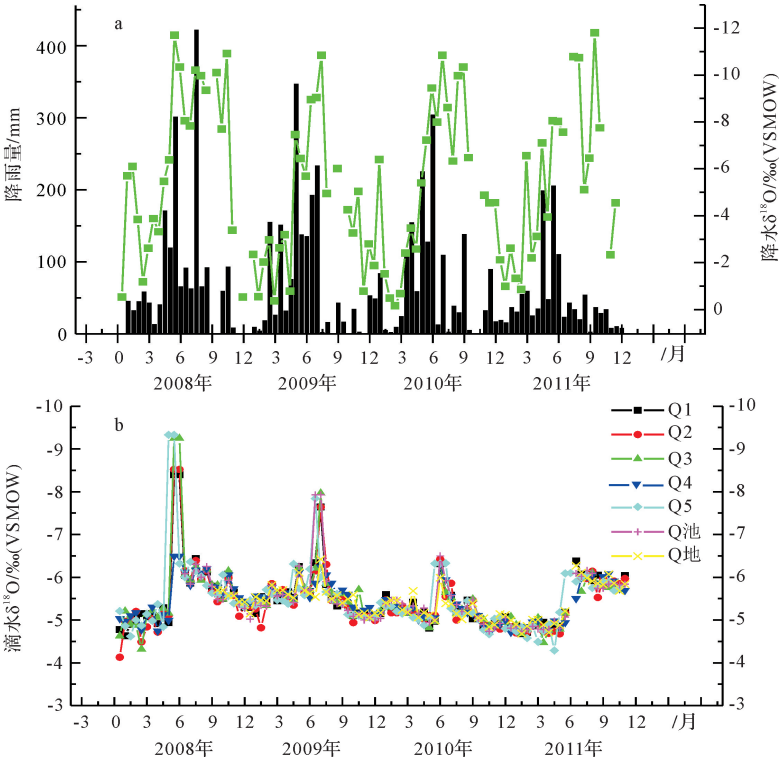


图 5 桂林七星岩 No.15 支洞滴水与大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线

Fig.5 The $\delta^{18}\text{O}$ curve of the meteoric precipitation and drip water in No.15 branch cave of the Seven Star Cave in Guilin

mm),从而使冬季降水达到了参与表层岩溶带的调蓄并能下渗补给洞穴,并参与洞穴滴水过程,所以,滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 比较偏重或偏正,保存了冬季大气降雨中的同位素信号。

从图 5b 可以看出,其中 2008 年及 2009 年 6~8 月的 Q5、Q1 滴水 and Q 池水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值极偏负,其原因是,这三个点的滴水速率相对较快,监测取样的时间刚好是在降大雨或暴雨后的当天或第 2 天,反映明显受单场大雨或暴雨的量效应的影响;而 2010 年及 2011 年 6~8 月的滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值没有发现像 2008 年及 2009 年 6~8 月那样的异常偏负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,原因是在降大雨或暴雨后没有跟进或没有进行同步监测与取样,通常监测与取样是按半月一次进行的,所以,经常是在降大雨或暴雨后过了 1 周或 2 周以后才进行的监测与取样,所以,没有及时抓住降大雨或暴雨事件或漏掉了降大雨或暴雨事件后快速补给的滴水样品的信息,所取的监测滴水样品的信息已受到岩溶表层带中岩石孔隙水或蓄水的混合作用,使其滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值已受到混合影响,故而,对 2010 年及 2011 年 6~8 月的滴水监测,未能揭示出滴水的异常 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

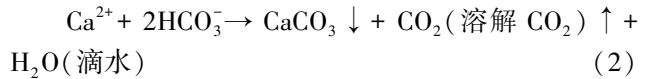
从降水量的记录来看,从 2008 年(2 074 mm)、2009 年(1 691 mm)、2010 年(1 630 mm)至 2011 年(1 133 mm)降水量逐年减少,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则显示逐年偏重,表明洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显受降雨的量效应的影响;而洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的年内变化则是从夏季的 6 月最负或最低开始到冬季逐渐偏重或偏正,次年则再次循环从夏季最负到冬季逐渐偏重的循环过程。洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究结果显示,在同一洞穴中的不同部位监测点的滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 是相同的,具有明显的重现性特征,表明洞穴各点滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 具有相同信号和季节性变化特征,可以准确反映大气降水量及降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征,继而反映气候的特征。

2.3 洞穴次生化学沉积物 (CaCO_3)—石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号

石笋是洞穴碳酸盐(钙)沉积的滴水类型,其形成过程,包括:①洞穴碳酸盐岩的溶解过程;②洞穴碳酸钙(盐)的沉积过程。在碳酸盐岩地区,大气降水在下渗过程中吸收了大气中的 CO_2 和大量源于土壤层中由(微)生物制造的 CO_2 ,形成了具有侵蚀能力的碳酸水,这种含 CO_2 的水沿洞穴上部碳酸盐岩的(微)裂隙或孔隙下渗,对其流经的碳酸盐岩产生溶解作用,其反应过程为:



在其作用过程中不断溶解碳酸盐岩,使之形成富含碳酸钙的渗流水,当含碳酸钙的水溶液由洞顶裂隙或孔隙渗出构成洞穴滴水,当滴水落在洞底或其它沉积物上时,滴水变成极薄的水膜后,由于 CO_2 的逸出或水分蒸发而导致 CaCO_3 过饱和而析出沉淀。其反应如下:



由方程(1)可见,控制洞穴次生化学碳酸盐沉积物的氧同位素成分主要是滴水,而形成洞穴化学碳酸盐沉积物的滴水主要来自大气降水。研究表明,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化基本继承了大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征。在此之前,Yonge 等(1985)^[1]的研究结果也与这一结论相吻合。

据四个水文年 8 个滴水点(其中,1 个为池水沉积点)的监测,获取了 768 个现代洞穴碳酸盐沉积物(CaCO_3)样,经对碳酸盐沉积物(CaCO_3)的氧同位素分析结果显示, $\delta^{18}\text{O}$ 值的年际变幅为 $-8.24\text{‰} \sim -4.06\text{‰}$ (图 6),平均值为 -5.87‰ 。8 个滴水点的现代洞穴碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化趋势相同,具有明显的重现性特征,表明现代洞穴碳酸盐沉积物的氧同位素记录的信号相同。

从图 6 可知,1 到 4 月为碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高(或偏重)时段,从 4 月开始,碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值开始下降,在 6~8 月降到最低值,尔后从 9 月开始上升,到 10~12 月达到最高值。在 2008 年至 2011 年的 4 个水文年中,现代洞穴碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录的年内(或年际)变化或多年的变化趋势基本相同,表现出明显的四高峰($\delta^{18}\text{O}$ 低值区)四低谷($\delta^{18}\text{O}$ 高值区)的波动变化特征。在夏半年(晚春、夏季),现代洞穴碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏轻或偏低,平均为 -6.4‰ (VPDB),具有夏半年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的特征,显示具有雨热同季的特点;在冬半年(冬季、早春),洞穴现代碳酸盐沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏重或偏正,平均为 -5.2‰ (VPDB),具有明显的冬半年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的特征,表现出明显的年、季节变化规律。

此外,现代碳酸盐(CaCO_3)和滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的年际变幅没有大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 的变幅大,主要原因在于现代碳酸盐(CaCO_3)和滴水的监测取样是按半月一次,并存在有一些降水效应、较弱的均一化或混合作用的影响,而对于秋季那些低于 5 mm 的降水,

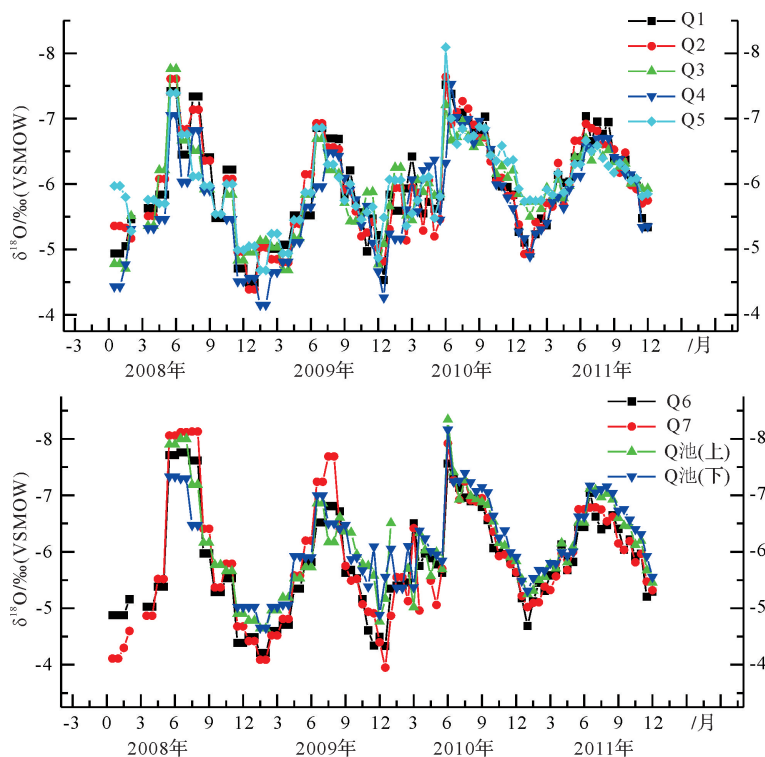


图6 桂林七星岩 No.15 支洞现代碳酸盐 (CaCO_3) $\delta^{18}\text{O}$ 记录曲线

Fig.6 The curve of $\delta^{18}\text{O}$ record from the modern carbonate (CaCO_3) in No.15 branch cave of the Seven Star Cave in Guilin

由于空气比较干燥,受强蒸发作用的影响,通常极少参与下渗补给洞穴的滴水;冬季降雨则表现为细雨绵绵,连续不断,空气湿度大,累计降水量相对较大,降水参与表层岩溶带的调蓄,并能下渗补给洞穴,所以,洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 较好保存了季节性降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号。

据图 5、6 可以看出,现代洞穴碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变幅受降水的变化影响较明显,如 2010 年 1~6 月的碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值受 2010 年 1~3 月降水或降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现为快速的波动特征,显示了冬季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征。由此说明,现代碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要记录(或反映)了大气降水和季风强度变化的信息,即能作为可靠的气候替代指标。

3 结论

通过对桂林七星岩 No.15 支洞 4 个水文年的滴水和新碳酸盐沉积物的及降水的氧同位素研究,可得出以下初步的结论:

(1) 大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$

桂林大气降水线方程具有独特的局地气候特征,夏半年大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量、温度之间存有显著的负相关关系—量效应和反温度效应,且降水量

效应的影响远远掩盖了温度效应。降水同位素信号的季节性变化仍然比较明显,降水同位素信号受较强的季节性降水和大气环流效应的影响。

(2) 洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的重现性

研究区从 2008 年(2 074 mm)至 2011 年(1 133 mm)四个水文年的降水量逐年减少,滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则呈现逐年偏重的变化,表明洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显受降雨的量效应的影响,特别是单场降水量的大小及其降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值起着至关重要的作用;而洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的年内(或年际)变化则是从夏季的 6 月最负或最低开始到冬季逐渐偏重或偏正,次年再次循环从夏季最负到冬季逐渐偏重的循环过程。

据近 4 年洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究结果显示,在同一洞穴中的不同部位其滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 是相同的,具有明显的重现性特征,表明洞穴各点滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录具有相同信号和季节性变化特征,可以准确反映大气降水量及降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征,继而反映气候变化特征。

(3) 洞穴滴水与新沉积碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

在 4 个水文年中,现代洞穴次生化学碳酸盐沉积

物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录的年内(或年际)变化或多年的变化趋势基本相同,表现出明显的四高峰($\delta^{18}\text{O}$ 低值区)四低谷($\delta^{18}\text{O}$ 高值区)的波动变化特征,具有明显的年、季节变化规律,显示具有雨热同季的特点。

研究表明,洞穴滴水 and 现代碳酸盐(CaCO_3) 的年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值非常接近降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值,并具有与地表降水 $\delta^{18}\text{O}$ 相同的变化趋势,反映了洞穴滴水和现代碳酸盐(CaCO_3) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要来自大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$,即明显受控于降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 。这些结果说明洞穴滴水和洞穴现代碳酸盐(CaCO_3) 沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 可以记录当地或洞穴上方的气候变化信息,即能作为可靠的气候替代指标。故认为现代洞穴次生化学碳酸盐沉积物(CaCO_3) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要作为夏季风强度或降雨量的替代指标。

参考文献 (References)

- McDermott F. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 901-918.
- Fairchild I J, Smith C L, Baker A, et al. Modification and preservation of environmental signals in speleothems [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/2/3/4): 105-153.
- Lachniet M S. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(5/6): 412-432.
- Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems—I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35(8): 801-824.
- Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago [J]. *Nature*, 2001, 411(6835): 290-293.
- Bar-Matthews M, Ayalon A, Gilmour M, et al. Sea - land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(17): 3181-3199.
- Baker A, Asrat A, Fairchild I J, et al. Analysis of the climate signal contained within $\delta^{18}\text{O}$ and growth rate parameters in two Ethiopian stalagmites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(12): 2975-2988.
- Cruz Jr F W, Karmann I, Viana Jr O, et al. Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: implications for paleoclimate inferences from speleothems [J]. *Chemical Geology*, 2005, 220(3/4): 245-262.
- 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*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- Frappier A B, Sahagian D, Carpenter S J, et al. Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events [J]. *Geology*, 2007, 35(2): 111-114.
- Bar-Matthews M, Ayalon A, Matthews A, et al. Carbon and oxygen isotope study of the active water-carbonate system in a karstic Mediterranean cave: Implications for paleoclimate research in semiarid regions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(2): 337-347.
- Ayalon A, Bar-Matthews M, Sass E. Rainfall-recharge relationships within a karstic terrain in the Eastern Mediterranean semi-arid region, Israel: $\delta^{18}\text{O}$ and δD characteristics [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 207(1/2): 18-31.
- Yonge C J, Ford D C, Gray J, et al. Stable isotope studies of cave seepage water [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1985, 58(1/2): 97-105.
- Goede A, Green D C, Harmon R S. Isotopic composition of precipitation, cave drips and actively forming speleothems at three Tasmanian cave sites [J]. *Helveticite*, 1982, (20): 17-29.
- Williams P W, Fowler A. Relationship between oxygen isotopes in rainfall, cave percolation waters and speleothem calcite at Waitomo, New Zealand [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 41(1): 53-70.
- Li Bin, Yuan Daoxian, Qin Jiaming, 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: Earth Sciences*, 2000, 43(3): 277-285.
- van Beynen P, Febroriello P. Seasonal isotopic variability of precipitation and cave drip water at Indian Oven Cave, New York [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(8): 1793-1803.
- 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.
- Mattey D, Lowry D, Duffet J, et al. A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem: reconstructed drip water and relationship to local precipitation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 269(1/2): 80-95.
- 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. [Luo Weijun, Wang Shijie. Transmission of oxygen isotope signals of precipitation-soil water-drip water and its implications in Liangfeng Cave of Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(17): 2071-2076.]
- Pape J R, Banner J L, Mack L E, et al. Controls on oxygen isotope variability in precipitation and cave drip waters, central Texas, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1/2/3/4): 203-215.
- 谭明, 南素兰. 中国季风区降水氧同位素年际变化的“环流效应”初探 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 620-622. [Tan Ming, Nan Sulan. Primary investigation on interannual changes in the circulation effect of precipitation oxygen isotopes in monsoon China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 620-622.]

Environmental Significance of $\delta^{18}\text{O}$ Record from Cave Drip Water and Recent Carbonate Deposit at No.15 Branching Cave of Seven Star Cave in Guilin

ZHANG MeiLiang¹ ZHU XiaoYan¹ WU Xia¹ ZHANG BiYun² PAN MouCheng¹

(1. Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004;

2. Hydrologic and Engineering Geological Prospecting Institute of Guangxi, Liuzhou, Guangxi 545000)

Abstract: A prerequisite for the dynamic monitor of modern cave is to provide a reliable basis for the interpretation of a variety or multiple proxies from modern carbonate (CaCO_3) sediment - stalagmites in cave, and to make full use of the multiple proxies from modern carbonate (CaCO_3) sediment in field cave monitoring, and compared to local measuring meteorological data each other and correction, is the key of the accurate and quantitative interpreting multiple climate proxies in stalagmites.

The four hydrological years of the meteoric precipitation, cave drips, modern carbonate sediments for 5 sites in No.15 branching cave of Seven Star Cave in Guilin during 2008-2011 were continuously monitored, and the correlation between the $\delta^{18}\text{O}$ of cave drip and modern carbonate (CaCO_3) and $\delta^{18}\text{O}$ of the meteoric precipitation were also discussed. The study results have shown that the annual average $\delta^{18}\text{O}$ value of cave drip and modern carbonate (CaCO_3) is very close to $\delta^{18}\text{O}$ of the meteoric precipitation and the same change trend, and indicated that the $\delta^{18}\text{O}$ of cave drip and modern carbonate (CaCO_3) came mainly from $\delta^{18}\text{O}$ of the meteoric precipitation, that is, it is obviously controlled by $\delta^{18}\text{O}$ of the meteoric precipitation.

In four hydrological years, the year (or annual) change and or many years change trends of $\delta^{18}\text{O}$ record from the modern secondary chemical carbonate sediments (CaCO_3) and drip water in cave are basically the same and show obvious change characteristics of four peak (low value area of $\delta^{18}\text{O}$) and four trough (high value area of $\delta^{18}\text{O}$), and has obvious rule of the seasonal change and year change and has the same seasonal characteristics of the meteoric precipitation or heat. The research results shown that $\delta^{18}\text{O}$ of drip water and modern carbonate (CaCO_3) sediments in cave can record the climate change signal at local or at the top of the cave. So that it has been considered that $\delta^{18}\text{O}$ of modern carbonate (CaCO_3) sediment in cave is mainly taken as the alternative proxies of the summer monsoon intensity and rainfall amount.

Key words: the meteoric precipitation; drip water; recent carbonate deposit; oxygen isotopes; No.15 branching cave; Guilin