

# 川东北石笋 120~103 ka BP 稳定碳同位素记录与控制机制

刘淑华,黄嘉仪,陈琳,杨亮,陈琼,米小建,贺海波,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,周厚云

华南师范大学地理科学学院,广州,510631

**内容提要:**利用川东北梭子洞石笋 SZ2 的稳定碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )高分辨率重建了 120~103ka 时段的石笋碳同位素序列。SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  变化与该石笋稳定氧同位素组成( $\delta^{18}\text{O}$ )的长期变化趋势明显不同。在整体变化趋势上  $\delta^{13}\text{C}$  变化与生长速率相似,反映石笋表面滴水时间间隔影响的  $\text{CO}_2$  脱气作用和  $\text{CaCO}_3$  沉积可能是影响 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  长时间尺度上变化的主要因素。但在较短时间尺度上,SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  变化基本趋势一致,反映了地表植被类型(如 C3/C4 植被比例)、植被密度、土壤微生物活动以及洞穴通风效应的变化可能是引起 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  短时间尺度上变化的主要因素。

**关键词:**华中;石笋; $\delta^{13}\text{C}$ ;滴率;古气候

石笋具有沉积连续、没有后期扰动、分辨率高、分布广泛和能精确定年等优势,是研究古气候环境变化的良好材料(Yuan Daoxian et al., 2004; Tan Ming et al., 2003; Zhou Houyun et al., 2014; Li Hongchun et al., 1998; Jiang Xiuyang et al., 2011; Wu Jiangying et al., 2002; Yang Yan et al., 2008)。目前利用石笋稳定氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )重建古气候环境已经取得了很多重要成果,石笋稳定碳稳定同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )因控制机制比较复杂,在古气候环境研究中应用相对较少。Dorale et al. (1992)通过对美国 Iowa 州东北部冷水洞石笋  $\delta^{13}\text{C}$  变化的研究,认为 C3 和 C4 植物比例变化控制了石笋  $\delta^{13}\text{C}$  的变化。Zhang Haiwei et al. (2015)研究江西神龙洞两只石笋  $\delta^{13}\text{C}$  变化时,也认为主要是地表植被 C3/C4 比例的变化影响了石笋  $\delta^{13}\text{C}$  的变化。Wu Xiuping et al. (2012)根据对万象洞石笋  $\delta^{13}\text{C}$  的分析,发现在末次冰期晚期存在多尺度变化特征,较长时间尺度的周期变化中嵌套较短时间尺度的周期变化。Kong Xinggong et al. (2005)通过对葫芦洞多支石笋的  $\delta^{13}\text{C}$  记录分析,发现在冰期/间冰期尺度上, $\delta^{13}\text{C}$  记录主要反映了季风气候变化控制的 C3/C4 植被相对比例变化;但在千年尺度上(D/O 旋

回)则主要反映了土壤水快速渗透(未与土壤  $\text{CO}_2$  达到溶解平衡)的影响。这可能与这一地区气候湿润和降水较多有关。近年来国外很多学者尝试通过模拟的办法来探究石笋  $\delta^{13}\text{C}$  的影响因素,比如 Romanov et al. (2008)、Wiedner et al. (2008)和 Polag et al. (2010)都模拟了类似洞穴环境下地下水在石笋表面流动时随着流动距离的增加石笋表面水膜中溶解无机碳(DIC)的  $\delta^{13}\text{C}$  变化。所有的模拟结果均显示  $\delta^{13}\text{C}$  值随着流动距离的增加而逐渐增加。Mühlinghaus et al. (2009)则模拟了温度、滴水时间间隔和滴水的  $p\text{CO}_2$  等多个因素对  $\delta^{13}\text{C}$  的影响,发现  $\delta^{13}\text{C}$  在按照瑞利分馏模型变化时与滴水时间间隔和滴水在石笋表面的停留时间密切相关:时间间隔和停留时间越长,沉积的方解石  $\delta^{13}\text{C}$  增加越多,反之亦然。本文报道了采自我国中部地区一支石笋  $\delta^{13}\text{C}$  变化的研究结果。该石笋发育在末次间冰期盛期(MIS5e)之后(相当于从 MIS 5d 到 MIS 5c 的时期)。结果发现该石笋的  $\delta^{13}\text{C}$  变化在不同时间尺度上可能受控于不同的因素,具有不同的气候环境指示意义。

## 1 研究区域、材料、方法

石笋 SZ2 采自四川东北部诺水河溶洞群中的

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41473093,41271212 和 40973009)和教育部博士点基金项目(编号 20120101110050)共同资助的成果。

收稿日期:2015-07-15; 改回日期:2015-11-18; 责任编辑:黄敏。

作者简介:刘淑华,1990 年生。硕士研究生,研究方向为第四纪地质与全球变化,Email:liushuhua90@163.com。通讯作者:周厚云,教授,研究方向为第四纪地质与全球变化,Email:hyzhou@gig.ac.cn。

梭子洞(107°10'E, 32°24'N), 洞口海拔约 680m。该研究地点位于秦巴山地南坡, 地处四川、陕西两省交界处(图 1)。区域气候为典型的亚热带东亚季风气候, 夏季盛行夏季风, 高温多雨, 夏季降水占全年降水的 45%左右; 冬季盛行冬季风, 寒冷干旱, 冬春季节大气粉尘活动强烈。该地多年平均降水量 1000~1200mm, 年均气温~15℃。梭子洞的围岩为晚二叠纪的石灰岩(四川省地质矿产局, 1990), 地表土层很薄, 一般厚度小于 30cm, 许多地方还能见到裸露的石灰岩, 土壤物质化学组成与黄土高原黄土沉积相似(Zhou Houyun et al., 2012), 反映其来源基本上就是当地沉降的大气粉尘。地表植被以乔木为主, 包括松、柏和一些阔叶落叶树种。

梭子洞的洞口非常狭窄, 仅够一人匍匐进出, 石笋 SZ2 采自该洞穴深处。石笋长度约 18cm, 外形呈典型的圆锥形, 从底部到顶部呈变细趋势。沿生长中心将该石笋切开后, 在石笋的纵切面上看不到明显的沉积间断。

TIMS U-Th 定年在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室完成, 结果显示石笋 SZ2 生长发育时代为 120~103ka, 即末次间冰期盛期(MIS5e)之后相当于 MIS 5d 到 MIS 5c 的时期。有关该石笋年龄数据和年代模式参见 Zhou Houyun et al., 2008。 $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$  分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学实验室进行, 使用仪器为 GVIsoPrimeII 型稳定同位素质谱仪, 该仪器

配备 MultiPrep 在线制样系统,  $\delta^{13}\text{C}$  数据报道相对于 VPDB 标准, 分析误差小于 0.06‰。共分析 178 个样品。该石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  数据已另文报道(Zhou Houyun et al., 2008)。

2 结果

SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  变化趋势如图 2 所示, 其变化范围在 -13.68‰ 到 -11.32‰ 之间, 变化幅度达 2.36‰, 平均值为 -12.67‰。在 111.2~102.8ka 时段,  $\delta^{13}\text{C}$  值的整体变化幅度较小, 仅为 0.81‰, 基本维持在 -11.76‰ 左右波动, 105.7ka 处  $\delta^{13}\text{C}$  值达到 -11.32‰ 是整个  $\delta^{13}\text{C}$  记录的最高值。120~111.2ka 期间,  $\delta^{13}\text{C}$  值表现出一个明显的正向偏移, 幅度达到 2.02‰, 在 118.3ka 处出现的 -13.68‰ 是整个  $\delta^{13}\text{C}$  记录最负的值。石笋  $\delta^{13}\text{C}$  值整体呈现出一个正向偏移的变化趋势, 同时局部也表现出小幅度的负向偏移变化。105.7~103.4ka 时段出现一个小幅度的负向偏移, 幅度为 0.78‰。由图 1 可以看出部分时间段  $\delta^{13}\text{C}$  值表现出比较大的波动, 比如 113.1~110.2ka 期间  $\delta^{13}\text{C}$  值的正向偏移幅度达到 1.06‰, 118.8~118.3ka 期间  $\delta^{13}\text{C}$  值的正向偏移幅度达到 1.09‰。

3 讨论

如前所述, 石笋  $\delta^{13}\text{C}$  的影响因素比较复杂。不同的洞穴甚至同一洞穴的石笋  $\delta^{13}\text{C}$  值其变化趋势

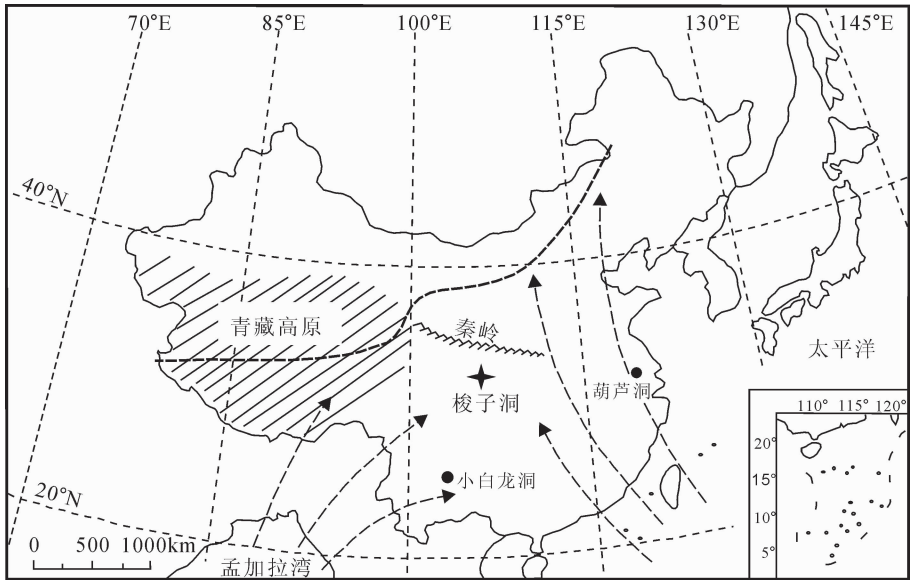


图 1 川东北梭子洞位置图。虚线箭头指示夏季风和夏季水汽传输方向。粗点线指示夏季风的西北边界。  
Fig. 1 Location of Suozhi Cave in Northeast Sichuan. Dashed arrows indicate routes of the summer monsoon and transport of moisture during the summer season. The dashed thick line indicates the northwestern boundary of the summer monsoon

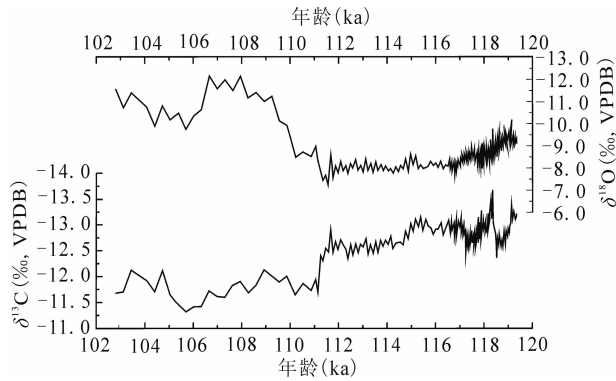


图2 川东北石笋SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录  
(Zhou Houyun et al., 2008)对比

Fig. 2 The  $\delta^{18}\text{O}$  (Zhou Houyun et al., 2008) and  $\delta^{13}\text{C}$  records of stalagmite SZ2 in Northeast Sichuan

也存在很大差异(Bake et al., 1997; Linge et al., 2001)。石笋中C可能的来源就包括大气 $\text{CO}_2$ (Baskaran et al., 1993),土壤生物来源的 $\text{CO}_2$ (主要来自植物根系的呼吸作用和微生物活动对土壤有机质的分解)(Genty et al., 2003),以及碳酸盐岩(石灰岩或白云岩)围岩。这些不同来源C的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异——大气C的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均约为 $-8\text{‰}$ (Baskaran et al., 1993),碳酸盐岩围岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般在 $-1\text{‰}$ 到 $1\text{‰}$ 之间(Hendy et al., 1971),土壤空气 $\text{CO}_2$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值视植被类型而定,一般来自 $\text{C}_3$ 植物的平均约 $-27\text{‰}$ ,来自 $\text{C}_4$ 植物的平均约为 $-13\text{‰}$ ——它们的相对贡献比例变化将对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 变化产生重要影响;地下水在进入岩溶洞穴之后的 $\text{CO}_2$ 去气作用(degassing)和碳酸盐沉积过程中也存在C同位素分馏(Hendy et al., 1971);此外,洞穴的通风效应因为将洞外大气带入洞穴内,会影响 $\text{CO}_2$ 去气作用和碳同位素的分馏过程,因而其强弱变化也可能对石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响(Frisia et al., 2011)。目前许多研究中认为 $\text{C}_3$ 和 $\text{C}_4$ 植被相对比例的变化是影响洞穴沉积 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主要因素(Genty, 2008; Genty et al., 2003; McDermott, 2004; Uchida et al., 2013; Zhang Yueming et al., 2013; Huang Fan et al., 2014; Huang Junhua et al., 2000; Liu Shuhua et al., 2015)。一般情况下,相对温暖湿润的气候更有利于 $\text{C}_3$ 植物发育, $\text{C}_3/\text{C}_4$ 比例上升将使地下水溶解无机C和洞穴沉积的 $\delta^{13}\text{C}$ 下降(Dorale et al., 1992; Holmgren et al., 1995)。同时,更加湿润的气候往往也有利于植物总体的发育和植被密度增大,根系呼吸作用和微生物活动及有机质分解加强,土壤空

气 $\text{pCO}_2$ 上升,以及洞穴系统的通风效应减弱、石笋表面滴水时间间隔缩短(如果滴水时间间隔主要由降水控制)、 $\text{CO}_2$ 去气作用减弱和先期碳酸盐沉积减少。所有这些效应(这里不妨称之为第一类效应)将导致洞穴沉积的 $\delta^{13}\text{C}$ 更低(Fleitmann et al., 2009; Polag et al., 2010), $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现一致变化(Liu Shuhua et al., 2015)。不过在另一方面,更加湿润的气候也使土壤水与土壤空气的接触时间缩短,甚至可能未达到 $\text{CO}_2$ 的溶解平衡(Kong Xinggong et al., 2005),以及在洞穴盖层中碳酸盐岩的溶解更易发生在相对封闭的环境中(Fohlmeister et al., 2011)。这些效应(这里不妨称之为第二类效应)将使石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 更重。还应该注意,以上两类效应主要受气候变化的影响。非气候因素也可能影响石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化,如人类活动对地表植被的改变(Zhang Haiwei et al., 2015),或洞穴盖层中地下水流路的改变导致的滴水时间间隔变化等。

对比SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可以看到(图2),两者的总体变化趋势显著不同。因此SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化总体趋势不是由第一类效应主导的,似乎主要由第二类效应控制。但在较短的时间尺度上,SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化大体一致(图3)。反映在较短的时间尺度上第一类效应对SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主导。

控制SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主要因素似乎在不同的时间尺度上存在矛盾。但如果考虑到非气候因素对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响,则这种矛盾不再存在。如图4所示,SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化总体趋势与生长速率非常一致,表明SZ2的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化总体趋势可能主要受滴水时间间隔控制。石笋的生长速率是外界气候环境变化及洞穴内部地质背景条件变化的综合指标,能够反映洞顶滴水的流量和流速、渗流水的动态变化以及钙离子浓度变化等,还能说明不同气候环境下洞穴滴水供给的物源差异(Zhang Meiliang et al., 2001, 2015; Burns et al., 2002; Xue Zhiguo et al., 2014; Liu Qiming et al., 2007)。120~103ka期间石笋SZ2的生长速率呈现出一个逐渐变慢的过程,反映了滴水时间间隔延长,滴率变慢,石笋表面水膜达到过饱和状态的过程延长, $\text{CaCO}_3$ 沉积速率逐渐下降。这还得到SZ2生长形态的支持。SZ2从底部往上总体上变细(Zhou Houyun et al., 2008),也反映了滴率变慢和 $\text{CaCO}_3$ 沉积的减少。滴水的时间间隔变化通过影响 $\text{CO}_2$ 脱气作用和

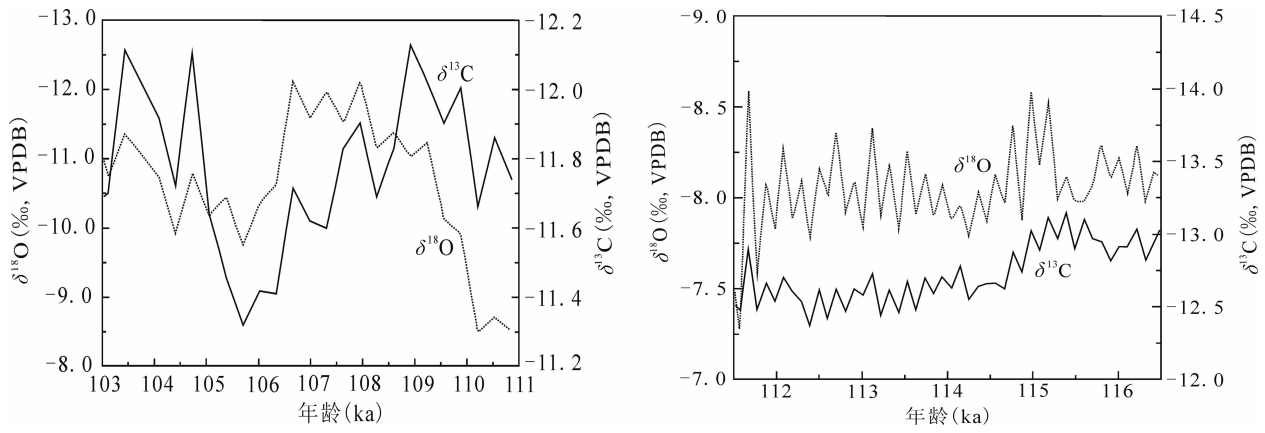


图 3 川东北石笋 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  记录和  $\delta^{18}\text{O}$  记录(Zhou Houyun et al. , 2008)分别在 120~111ka 和 111~103ka 的变化。  
两者显示在较短的时间尺度上  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的变化存在较好的一致性  
Fig. 3 Comparison between the  $\delta^{18}\text{O}$  (Zhou Houyun et al. , 2008)and  $\delta^{13}\text{C}$  records of stalagmite SZ2 at a time interval of 120 ~111ka and 111 ~ 103ka. Both show a good consistency in terms of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  records on a short time scale in Northeast Sichuan

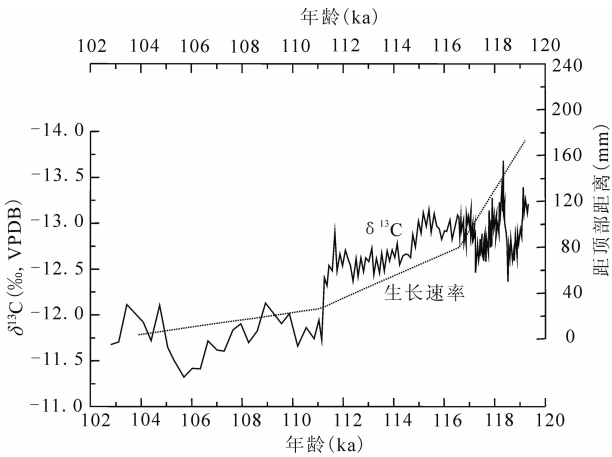


图 4 川东北石笋 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  与生长速率的对比  
Fig. 4 The  $\delta^{13}\text{C}$  and growth rate records of stalagmite SZ2 in Northeast Sichuan

$\text{CaCO}_3$  沉积来影响石笋的  $\delta^{13}\text{C}$  值。 $\text{CO}_2$  逸出和  $\text{CaCO}_3$  沉积使地下水 DIC 的  $\delta^{13}\text{C}$  不断变化,其综合效应使地下水 DIC 的  $\delta^{13}\text{C}$  不断上升(Mickler et al. , 2006; Lambert et al. , 2011)。因此,图 4 所示的 120~103ka 时段石笋 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  总体趋于变重的过程,主要反映了滴水时间间隔变长和滴率变慢导致的方解石沉积  $\delta^{13}\text{C}$  不断上升。这与 Polag et al. (2010)的模拟实验结果完全一致。控制 SZ2 滴率变化的主要因素可能不是气候因素。例如,111~102ka 时段,  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负,反映气候暖湿,而此时 SZ2 变细,生长速率减慢(图 4),反映滴率变慢和滴水时间间隔变长。推测 SZ2 的滴水时间间隔变化可能受梭子洞洞穴盖层中供水管道和渗流水流路变化的影响。

虽然 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  记录在整体趋势上存在明显差异,但是仔细对比发现两个指标在较短时间尺度上的变化表现出较好的相似性(图 3)。如图 3 所示,在较短时间尺度上, SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  变化的趋势和一些小的波峰、波谷似乎都能较好地对应。反映在数十年至百年时间尺度上,气候变化控制的地表植被变化(包括植被类型和植被密度)、土壤微生物活动和洞穴通风效应等(即前述的第一类效应)是控制 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  的主要因素,即在较短时间尺度上 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  记录较好地响应了东亚季风气候的变化。

#### 4 结论

本文提供了我国中部梭子洞石笋 SZ2 的高分辨率  $\delta^{13}\text{C}$  记录。SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  变化总体趋势与该石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录明显不同。在整体变化趋势上 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  变化与生长速率变化一致,反映了滴水时间间隔影响的  $\text{CO}_2$  脱气作用和  $\text{CaCO}_3$  沉积对  $\delta^{13}\text{C}$  变化的主导作用。这一解释也与 SZ2 的形状一致。SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  值变重的过程反映了滴水时间间隔变长和滴率变慢。这一滴水变化主要不是地表气候变化引起的,可能与梭子洞洞穴盖层中供水管道和渗流水流路的变化有关。在较短时间尺度上, SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  变化基本一致,反映了气候变化控制的地表植被变化(包括 C3/C4 植被比例和植被密度)、土壤微生物活动以及洞穴通风效应的变化可能是控制数十年至百年尺度上 SZ2 的  $\delta^{13}\text{C}$  变化的主要因素。

致谢:感谢审稿专家和编辑部老师提出的宝贵

的修改意见。

## References

- Bake A, Ito E, Smart P L, McEwan. 1997. Elevated and variable values of  $^{13}\text{C}$  in speleothems in a British cave. *Chemical Geology*, 136: 236~270.
- Baskaran M, Krishnamurthy R V. 1993. Speleothems as proxy for the carbon isotope composition of atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Geophysical Research Letters*, 20(24): 2905~2908.
- Burns S J, Fleitmann D, Mudelsee M, Neff U, Matter A, Mangini A. 2002. A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984~2012), 107(D20): ACL 9-1-ACL 9-9.
- Dorale J A, González L A, Reagan M K, Pickett D A, Murrell M T, Baker R G. 1992. A High-Resolution Record of Holocene Climate Change in Speleothem Calcite from Coldwater Cave, Northeast Iowa. *Science*, 258: 1626~1630.
- Fleitmann D, Cheng H, Badertscher S, Edwards R L, Mudelsee M, G? ktürk O M, Fankhauser A, Pickering R, Raible C C, Matter A, Kramers J, Tüysüz O. 2009. Timing and climatic impact of Greenland interstadials recorded in stalagmites from northern Turkey. *Geophysical Research Letters*, 36 (19), L19707, doi:10.1029/2009GL040050.
- Fohlmeister J, Scholz D, Kromer B, Mangini A. 2011. Modelling carbon isotopes of carbonates in cave drip water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(18): 5219~5228.
- Frisia S, Fairchild I J, Fohlmeister J, Miorandi R, SP? TL C, Borsato A. 2011. Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(2): 380~400.
- Genty D, Blamart D, Ouahdi R, Gilmour M, Baker A, Jouzel J, van Exter S. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421(6925): 833~837.
- Genty D. 2008. Palaeoclimate research in Villars Cave (Dordogne, SW-France). *International Journal of Speleology*, 37(3): 173~191.
- Hendy C H. 1971. The isotopic geochemistry of speleothems-I. The calculation of the effect of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability palaeo-climatic indicators. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 35(8): 801~824.
- Holmgren K, Karlén W, Shaw P A. 1995. Paleoclimatic significance of the stable isotopic composition and petrology of a Late Pleistocene stalagmite from Botswana. *Quaternary Research*, 43(3): 320~328.
- Huang Fan, Yang Xunlin, Lü Chunyan, Zhang Yueming. 2014. A High-Resolution stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  record about 65~90 ka BP from Yangzi Cave, Chongqin. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 36(5): 166~173. in Chinese with English abstract.
- Huang Junhua, Hu Chaoyong, Zhou Qunfeng. 2000. High-resolution carbon and oxygen isotope records from stalagmite and palaeoclimate in Heshangdong Cave, Qingjiang, Hubei Province. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25 (5): 505~509. in Chinese with English abstract.
- Jiang Xiuyang, Kong Xinggong, Wang Yongjin, Cheng Hai, Zhang Chunxia. 2011. A high-resolution stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  record from Sanbao Cave over the Penultimate Glaciation. *Quaternary Sciences*, 31(1): 1~7. in Chinese with English abstract.
- Kong Xinggong, Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards L R, Wang Xianfeng. 2005. Complicated responses of stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  to climate change during the last glaciation from Hulu Cave, Nanjing, China. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 35 (11): 1047~1052. in Chinese without English abstract.
- Lambert W J, Aharon P. 2011. Controls on dissolved inorganic carbon and  $\delta^{13}\text{C}$  in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothem  $\delta^{13}\text{C}$  assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(3): 753~768.
- Li Hongchun, Gu Delong, Chen Wenji, Yuan Daoxian, Li Tiying. 1998. Application of high-resolution carbon isotope record of a stalagmite from the Shihua Cave, Beijing. *Geological Review*, 44(5): 456-463. in Chinese with English abstract.
- Linge H, Lauritzen S E, Lundberg J, Berstad I M. 2001. Stable isotope stratigraphy of Holocene speleothems: Examples from a cave in Rana, Northern Norway. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167: 209~224.
- Liu Qiming, Wang Shijie, Li Tingyu. 2007. Modern Ecological environment recorrded in Liangfeng Cave in Guizhou. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 12 (3): 261~263. in Chinese with English abstract.
- Liu Shuhua, Yang Liang, Huang Jiayi, Chen Lin, Chen Qiong, Mi Xiaojian, He Haibo, Zhou Houyun. 2015. A high-resolution speleothem  $\delta^{13}\text{C}$  record from Songjia Cave in NE Sichuan, Central China and D/O event 5 to 10. *Geochimica*, 44 (5): 413-420. in Chinese with English abstract.
- McDermott F. 2004. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23(7): 901~918.
- Mickler P J, Stern L A, Banner J L. 2006. Large kinetic isotope effects in modern speleothems. *Geological Society of America Bulletin*, 118(1-2): 65~81.
- Mühlinghaus C, Scholz D, Mangini A. 2009. Modelling fractionation of stable isotopes in stalagmites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(24): 7275~7289.
- Polag D, Scholz D, Mühlinghaus C, Sp? tl C, Schr? der-Rizrau A, Segl M, Mangini A. 2010. Stable isotope fractionation in speleothems: Laboratory experiments. *Chemical Geology*, 279 (1): 31~39.
- Romanov D, Kaufmann G, Dreybrodt W. 2008.  $\delta^{13}\text{C}$  profiles along growth layers of stalagmites: Comparing theoretical and experimental results. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72

(2): 438~448.

Tan Ming, Liu Tungsheng, Hou Juzhi, Qin, Xiaoguang, Zhang Hucai, Li Tieying. 2003. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophysical Research Letters*, 30(12).

Uchida S, Kurisaki K, Ishihara Y, Haraguchi S, Yamanaka T, Noto M, Yoshimura K. 2013. Anthropogenic impact records of nature for past hundred years extracted from stalagmites in caves found in the Nanatsugama Sandstone Formation, Saikai, Southwestern Japan. *Chemical Geology*, 347: 59~68.

Van Beynen P E, Soto L, Pace-Graczyk K. 2008. Paleoclimate reconstruction derived from speleothem strontium and  $\delta^{13}$  in Central Florida. *Quaternary International*, 187(1): 76~83.

Wiedner E, Scholz D, Mangini A, Polag D, Mühlinghaus C, Segl M. 2008. Investigation of the stable isotope fractionation in speleothems with laboratory experiments. *Quaternary International*, 187(1): 15~24.

Wu Jiangying, Wang Yongjin, Shao Xiaohua, Chen Jun, Mu Xinan. 2002. Instability of the Late Pleistocene East Asian Monsoon Climate-Evidence from the variation of the stable isotope composition of a Cave stalagmite. *Acta Geologica Sinica*, 76 (3): 413~419. in Chinese with English abstract.

Wu Xiuping, Ding Minghu, Hou Dianjiong, Sun Weijun, Du Wentao, Zhang Dezhong, Ji Shunchuan. 2012. Time-frequency analysis of carbon isotope record of stalagmite from Wanxiang Cave, western Loess Plateau, during the late of last Glacial. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26 (11): 42~47. in Chinese with English abstract.

Xue Zhiguo, Liu Ziqi, Chen Hu. 2014. Karstic Cave crystal growth rate and its significance in climate reconstruction. *Earth And Environment*, 42 (01): 34 ~ 40. in Chinese with English abstract.

Yang Yan, Yuan Daoxian, Cheng Hsi, Qin Jiaming, Lin Yushi, Zhang Meiliang, Zhu Xiaoyan. 2008. Initial  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  variation of stalagmites: implications for Paleoclimate reconstruction. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 692~701. in Chinese with English abstract.

Yuan Daoxian, Cheng Hai, Edwards R L, Dykoski C A, Kelly M J, Zhang Meiliang, Qing Jiaming, Lin Yushi, Wang Yongjin, Wu Jiangyin, Dorale, J A, An Zhisheng, Cai Yanjun. 2004. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 304(5670): 575~578.

Zhang Haiwei, Cai Yanjun, Tan Liangcheng, Cheng Hai, Qin Shijiang, An Zhisheng, Edwards R L, Ma L. 2015. Large variations of  $\delta^{13}$  in stalagmites from southeastern China during historical times; implications for anthropogenic deforestation. *Boreas*, 44(3): 511~525.

Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jiaming. 2001. The form combinations and dynamic conditions of dropping water of depositon laminate from stalagmites in caves. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science)*, 26(4): 466~470. in Chinese with English abstract.

Zhang Meiliang, Zhu Xiaoyan, Wu Xia, Pan Moucheng, Yang Heping. 2015. Significance and uncertainty of speleothem-stalagmite proxies. *Earth And Environment*, 43(2): 138 ~ 151. in Chinese with English abstract.

Zhang Yueming, Yang Xunlin, Huang Fan, Cheng Hai, Yang Yan, Lv Chunyan, Li Chensi. 2013. A high-resolution stalagmite  $\delta^{13}$  record from Shuiming Cave over the past 500 years. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 35(3): 117~123. in Chinese with English abstract.

Zhou Houyun, Zhao Jianxin, Zhang Pingzhong, Shen Chuan-Chou, Chi Baoquan, Feng Yuexing, Lin Yin, Guan Huazheng, You Chen-Feng. 2008. Decoupling of stalagmite-derived Asian summer monsoon records from North Atlantic temperature change during marine oxygen isotope stage 5d. *Quaternary Research*, 70(2): 315~321.

Zhou Houyun, Greig A, Tang Jing, You Chen-Feng, Yuan Daoxian, Tong Xiaoning, Huang Ying. 2012. Rare element patterns in a Chinese stalagmite controlled by sources and scavenging from karst groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 83: 1~18.

Zhou Houyun, Zhao Jian-xin, Feng Yuexing, Chen Qiong, Mi Xiaojian, Shen Chuan-Chou, He Haibo, Yang Liang, Liu Shuhua, Chen Lin, Huang Jiayi, Zhu Liyan. 2014. Heinrich event 4 and Dansgaard/Oeschger events 5-10 record by high-resolution speleothem oxygen isotope data from central China. *Quaternary Research*, 82(2): 394~404.

参 考 文 献

黄帆, 杨勋林, 吕春艳, 李辰丝, 张月明. 2014. 重庆羊子洞高分辨率石笋  $\delta^{13}\text{C}$  记录的 65-90kaBP 气候变化. *西南大学学报*, 36 (5): 166~173.

黄俊华, 胡超涌, 周群峰. 2000. 湖北清江和尚洞石笋的高分辨率碳氧同位素及古气候研究. *地球科学-中国地质大学学报*, 25 (5): 505~509.

姜修洋, 孔兴功, 汪永进, 程海, 张春霞. 2011. 神农架三宝洞倒数第二次冰期高分辨率石笋  $\delta^{13}\text{C}$  记录. *第四纪研究*, 31(1): 1 ~ 7.

孔兴功, 汪永进, 吴江滢, Cheng Hai, Edwards L R, Wang Xianfeng. 2005. 南京葫芦洞石笋  $\delta^{13}\text{C}$  对冰期气候的复杂响应与诊断. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 35 (11): 1047~1052.

李红春, 顾德隆, 陈文奇, 袁道先, 李铁英. 1998. 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. *地质论评*, 44(5): 456~463.

刘启明, 王世杰, 黎延宇. 2007. 贵州凉风洞综合体系的现代生态环境记录. *集美大学学报(自然科学版)*, 12(3): 261~263.

刘淑华, 杨亮, 黄嘉仪, 陈琳, 陈琼, 米小建, 贺海波, 周厚云. 2015. 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. *地球化学*, 44(5): 413~420.

四川省地质矿产局. 1990. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社.

吴江滢, 汪永进, 邵晓华, 陈骏, 许汉奎, 穆西南. 2002. 晚更新世东亚季风气候不稳定性洞穴石笋同位素证据. *地质学报*, 76 (3): 413~419.

- 吴秀平, 丁明虎, 侯典炯, 孙维君, 杜文涛, 张德忠, 季顺川. 2012. 末次冰期晚期黄土高原西部万象洞高分辨率石笋  $\delta^{13}\text{C}$  记录时频分析. 干旱区资源与环境, 26(11): 42~47.

薛治国, 刘子琦, 陈许. 2014. 喀斯特洞穴晶体生长速率的古气候重建意义. 地球与环境, 42(01): 34~40.

杨琰, 袁道先, 程海, 覃嘉铭, 林玉石, 张美良, 朱晓燕. 2008. 洞穴石笋初始  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  变化的古气候记录意义. 地质学报, 82(5): 692~701.

张美良, 林玉石, 覃嘉铭. 2001. 洞穴石笋纹层的形态组合及其滴水的水动力条件. 西南师范大学学报(自然科学版), 26(4): 466~470.

张月明, 杨勋林, 黄帆, 程海, 杨琰, 吕春艳, 李辰丝. 2013. 重庆丰都高分辨率石笋  $\delta^{13}\text{C}$  记录与 AD1250—1750a 季风气候变化. 西南大学学报, 35(3): 117~123.

张美良, 朱晓燕, 吴夏, 潘谋成, 阳和平. 2015. 洞穴次生化学碳酸盐沉积物—石笋的气候替代指标的意义与不确定性因素. 地球与环境, 43(2): 138~151.

## A Speleothem $\delta^{13}\text{C}$ Record and Control Mechanism During 120~103ka B. P. from NE Sichuan, Central China

LIU Shuhua, HUANG Jiayi, CHEN Lin, YANG Liang, CHEN Qiong, MI Xiaojian, HE Haibo, DENG Xiaomin, PENG Xiaotao, LI Hanjie, ZHOU Houyun  
*School of Geograhpy, South China Normal University, Guangzhou, 510631*

### Abstract

A stalagmite(SZ2) collected from Suozi Cave in NE Sichuan, China, established with  $\delta^{13}\text{C}$  data, provides a high-resolution spleothem  $\delta^{13}\text{C}$  time series during 120~103ka. The SZ2  $\delta^{13}\text{C}$  record appeared to be significantly different from the long-term change trend of the  $\delta^{18}\text{O}$  record. The  $\delta^{13}\text{C}$  record and growth rate of SZ2 show the consistency in the whole trend, which mainly reflected that  $\text{CO}_2$  degassing and carbonate sediment influenced by drip rates over a speleothem surface influence the SZ2  $\delta^{13}\text{C}$  record on the long-time scale. On a short time scale, the SZ2  $\delta^{13}\text{C}$  record appeared to be consistent with the change trend of the  $\delta^{18}\text{O}$  record. The SZ2  $\delta^{13}\text{C}$  record may be mainly influenced by vegetation above the cave(proportion of C3 to C4 plant), density of vegetation, soil microbial activity and cave ventilation.

**Key words:**Central China; stalagmite;  $\delta^{13}\text{C}$ ; drip rate; paleoclimate