

川东北石笋 120~103kaB.P. 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, 周厚云

华南师范大学地理科学学院, 广州, 510631

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 $\delta^{13}\text{C}$ 值其变化趋势也存在很大差异。石笋中 C 可能的来源包括大气 CO_2 , 土壤生物来源的 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), 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‰, 碳酸盐岩围岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般在 -1‰ 到 1‰ 之间, 土壤空气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值视植被类型而定。一般来自 C3 植物的平均约 -27‰, 来自 C4 植物的平均约为 -13‰。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 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 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 C3 和 C4 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。一般情况下, 相对温暖湿润的气候更有利于 C3 植物发育, C_3/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。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 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)、 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, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现一致变化 (刘淑华等, 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 CO_2 的溶解平衡 (孔兴功等, 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。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。以上两类效应主要受气候变化的影响。在一定程度上非气候因素也可能影响石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化, 如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。

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, 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。石笋 SZ2 采自四川东北部诺水河溶洞群中的梭子洞 (107°10'E, 32°24'N), 该地属于典型的亚热带东亚季风气候, 多年平均降水量 1000~1200mm, 年均气温 ~15℃。梭子洞发育在晚二叠纪的石灰岩, 地表土层很薄, 一般厚度 <30cm, 土壤物质来源基本上就是当地沉降的大气粉尘; 区域植被以乔木为主, 包括松、柏和一些阔叶落叶树种。石笋长度约 18cm, 外形呈典型的圆锥形, 底部比顶部略粗。定年结果显示石笋 SZ 的生长发育时代为 120~103ka, 该石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据已另文报道 (Zhou et al., 2008)。

图 1 显示 SZ2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化与生长速率的变化趋势非常一致, 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。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

注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 41271212, 41473093 和 40973009) 和华南师范大学研究生科研立项创新基金 (编号 2014ssxm09) 共同资助的成果

收稿日期: 2015-09-28; 改回日期: 2015-09-28; 责任编辑: 刘恋。

作者简介: 刘淑华, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 自然地理学专业, E-mail: liushuhua90@163.com

通讯作者: 周厚云, E-mail: hyzhou@gig.ac.cn

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, 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 et al., 2008), 也反映了滴率变慢和 CaCO_3 沉积的减少。滴水的时间间隔变化通过影响 CO_2 脱气作用和 CaCO_3 沉积来影响石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。 CO_2 逸出和 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(Lambert et al., 2011)。因此, 图 1 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。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 1), 反映滴率变慢和滴水时间间隔变长。这与 Polag 等(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, 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。所以在整体变化趋势上 $\delta^{13}\text{C}$ 变化与生长速率的相似, 反映石笋表面滴水时间间隔影响的 CO_2 脱气作用和 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。

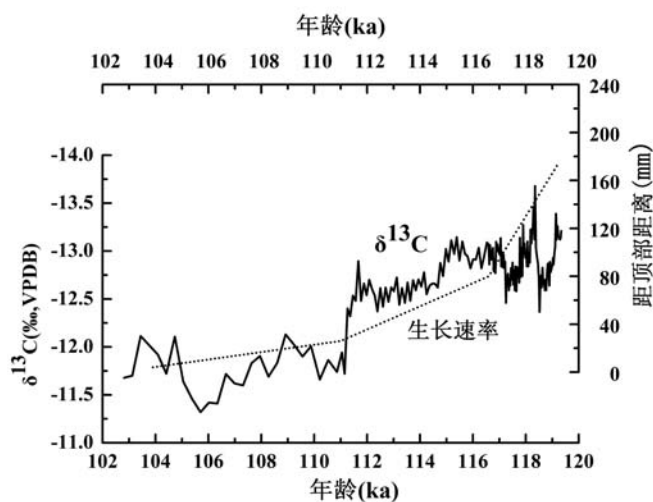


图 1 石笋 SZ2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 与生长速率记录的对比

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夏季风气候的变化。

参 考 文 献/References

- 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. 地球科学, 35(11): 1047~1052.
- 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.
- Frisia S, Fairchild I J, Fohlmeister J, Miorandi R, SPöTL C, Borsato A. 2011. Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(2): 380~400.
- 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.
- 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.
- Polag D, Scholz D, Mühlinghaus C, Spötl C, Schröder-Rizrau A, Segl M, Mangini A. 2010. Stable isotope fractionation in speleothems: Laboratory experiments. *Chemical Geology*, 279(1): 31~39.
- Zhou H Y, Zhao J X, Zhang P Z, Shen C C, Chi B Q, Feng Y X, Lin Y, Guan H Z, You C F. 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.