

重庆地区末次冰期气候变化的石笋记录研究

王建力^{1,2}, 王 丽¹, 何 潇¹, 吴文骞¹

(1. 西南大学资源环境科学学院, 重庆 400715 2 西南大学
三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 对采自重庆金佛山梁天湾洞穴的 1 根长达 295 mm 的石笋进行了高精度的 TMS-U 系定年和碳氧同位素测试分析, 建立了末次冰期晚期 (31.90~15.21 ka B.P.) 长江中游较高分辨率 (平均为 280 a/mm) 的古气候变化序列。从石笋的氧同位素曲线中明显地检出 Heinrich 事件, 并且氧同位素曲线与南京葫芦洞和贵州董歌洞的石笋记录有着良好的对比关系。但明显的差别是, 重庆地区石笋的同位素记录表明, 该地区末次冰期晚期古气候是受西南季风和东南季风双重影响的。

关键词: 末次冰期; 石笋; 气候变化

中图分类号: P532 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2006)05-0580-06

由于石笋分辨率高、可提取的信息参数多、时间跨度较长, 并且在重建年际及季节时间尺度的气候和环境变化上, 具有其它地质记录无法替代的优势, 目前已经成为全球变化研究中的重要信息库^[1~4]。近年来, 从京津地区到秦岭山区, 从南京到云贵高原, 特别是在广西地区, 一批高分辨率的石笋记录为我们展示了晚更新世以来区域和全球古环境变化的详细档案^[1, 5~9]。然而要深入了解末次冰期以来亚轨道尺度变化的真正原因和机制, 需要依赖于全球气候系统中各类型区域的高分辨率气候变化研究。本文选择了目前研究较少的重庆金佛山地区洞穴石笋为研究对象, 在精确定年的基础上, 提取较高分辨率的气候变化信息, 初步揭示该地区末次冰期晚期气候变化规律及其与周边地区的对比关系。

1 研究区概况

金佛山位于重庆南川区东南隅 (107°~107°20'E, 28°50'~29°20'N), 距重庆市 166 km, 地处四川盆地东南边缘与云贵高原北缘交接带, 属于大娄山北端, 最高峰风吹岭, 海拔 2 251.1 m。金佛山地处亚热带湿润气候区。气候温和、雨量充沛, 云雾多、日照少, 绵雨久、湿度大, 从山脚到山顶气候垂直变化明显, 温度差可达 5~6℃。区内多年平均

气温 14.5℃; 多年平均降雨量为 1 434.5 mm。研究区广泛出露二叠系灰岩, 下二叠统茅口组 (P_m) 和栖霞组 (P_q) 灰岩沉积厚达 333~441 m, 是本区岩溶及洞穴发育层位所在。也是中国南方岩溶区喀斯特化最强烈的地层之一。

2 材料和方法

本文研究的石笋 (LT14) 取自金佛山梁天湾洞, 洞口高程 1 460 m, 沿断层断裂面发育, 洞口走向 N25°E。入洞较开阔, 高 7~10 m, 宽 4~5 m。入洞 100 m 左右, 有数尊石笋。石笋 LT14 取自入洞 300 m 左右。已探洞长为 500 m, 洞穴的宽度和高度变化较小, 无支洞发育, 洞穴上覆碳酸盐原岩山体较厚约 200 m。洞内可见沉积物的种类较少, 有一定规模的石笋和钟乳石。洞穴内滴水较丰富, 相对湿度大于 95%, 洞内温度 13.5℃, 与地表年均温一致。洞穴内部通风极差, 洞穴外部山体坡度大于 45°, 土层较厚, 植被茂密。

LT14 石笋生长高度 29.5 cm, 底部直径 6.5 cm, 向上逐渐缩至 2.5 cm 顶面直径。外缘也没有风化壳。将 LT14 石笋沿中心轴切开磨光后, 磨光面上显示出密集的生长纹层。整个剖面均为较纯净的次生碳酸盐沉积物, 没有重结晶现象, 也未见明显的沉积间断。用小型可调速钻机沿石笋的中

收稿日期: 2005-04-15 修订日期: 2005-08-22

基金项目: 重庆市院士基金项目 (2003-7835) 资助。

作者简介: 王建力 (1969-), 男, 山东威海人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为第四纪环境变迁。E-mail: wangj@swnu.edu.cn

心轴钻取 C、O 同位素样品。钻头直径为 1.5 mm, 自下而上等间距采集, 采样间隔 5 mm, 每次钻取碳酸钙粉样 20~40 mg。TMS-U 系测年样品, 同样用可调速钻机钻取, 钻头改用直径为 7 mm 取心钻头, 每件样品重约 300 mg 取样厚度约为 0.5~1.0 cm。本次研究共取稳定同位素样品 59 件, 获得 59 组氧碳同位素数据。在沿中轴切开的石笋剖面详细沉积学研究的基础上, 按沉积旋回共取测年样 7 个, 获得 7 个有效的年龄数据。

氧碳同位素分析由中国科学院南京地质古生物研究所同位素实验室完成, 分析方法采用 Me-Crea 法^[10]。样品用量 10~30 mg 粉碎至 100~200 目, 经 110℃ 烘干, 在 25℃ 恒温条件下与 100% 的磷酸反应生成 CO₂, 纯化后送质谱分析, 测试仪器为 MAT251 型质谱仪, 每 9 个样品插一标准样品监控, 分析误差小于 2‰, PDB 标准。

年龄样品采用 TMS-U 系法进行年代测定, 由美国明尼苏达大学地质与物理系同位素实验室完成。稀释剂采用 ²²⁹Th-²³³U-²³⁶U, 同位素采用 Finnigan MAT262-RPQ 质谱仪, 年龄误差为 2σ 系统测量误差。

洞穴温度是影响石笋生长和同位素分馏的主要因素, 不同的温度对应于不同的同位素分馏系数。根据 Hendy 判别法则^[11], 为了验证金佛山梁天湾洞穴环境是否符合同位素平衡分馏的条件, 我们取得洞穴滴水、洞穴池水以及现代沉积的碳酸盐进行分析(表 1)。

表 1 洞穴滴水、积水以及现代沉积碳酸钙氧同位素

Table 1 Variation of $\delta^{18}\text{O}$ from the dripping water wellwater and calcium carbonate of cave

样品编号	采样地点	样品类型	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) (‰)
1	金佛山梁天湾	洞穴滴水	-7.026
2	金佛山梁天湾	洞穴滴水	-8.011
3	金佛山梁天湾	洞穴滴水	-7.921
4	金佛山梁天湾	洞内池水	-7.248
5	金佛山梁天湾	现代沉积碳酸钙	-7.460(PDB)
6	金佛山梁天湾	现代沉积碳酸钙	-6.377(PDB)

取池水、滴水的 4 件样品中氧同位素的平均值作为现代介质水的 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O} = -7.552\text{‰}$ (SMOW), 取洞穴碳酸钙氧同位素平均值作为现代沉积碳酸钙 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O} = -6.919\text{‰}$ (PDB)。如果介质水和现代碳酸盐中的氧同位素是平衡分馏的,

那现代洞穴温度可根据克雷格方程^[12]计算:

$$t = 16.9 - 4.2(\delta_c - \delta_w) + 0.13(\delta_c - \delta_w)^2$$

在平衡条件下, 理论上计算的现代洞穴温度为 14.3℃, 现代洞穴实测温度 13.5℃, 两者相差不大。这反映出在现代条件下该洞穴环境基本能满足石笋在沉积时同位素平衡分馏的条件。

3 石笋的时间标尺和沉积速率

3.1 时间标尺

LT14 号石笋的 TMS-U 系年龄如表 2 所示, 石笋生长期在 31.9~15.21 ka B.P. 之间, 共经历了 16.69 ka 的沉积。生长速率较慢, 平均沉积速率为 48.26 mm/ka 是末次冰期晚期以来的沉积物。我们根据 7 个 TMS 年代用线形内插方法得到 LT14 石笋的时间标尺。

3.2 沉积速率和氧同位素结果

石笋的生长率是记录岩溶环境变化的重要信息之一。岩溶的发育程度受到了不同类型的碳酸盐岩、大气 CO₂、土壤 CO₂、岩溶地区的地表水、地下水、外源水等条件的制约。但对指定采集的石笋而言, 在其生长年段内, 若其它制约因素相对稳定, 那么石笋的生长率主要决定于环境的温度和降雨量的变化。对于重庆特定的气候区域, 夏季气温偏高且多雨; 冬季则偏冷少雨, 这两种制约因素对石笋的生长率都有一致的影响。根据沉积特征及年龄数据分布, LT14 石笋生长不是匀速的, 在第一旋回即 31.44~31.9 ka B.P. 时段内, 生长速率为 65.22 mm/ka 沉积厚度则为 30 mm; 第二旋回即 18.29~31.44 ka B.P. 的时段内生长 110 mm, 生长速率约 8.37 mm/ka 第三旋回即 18.29~17.26 ka B.P., 沉积了 100 mm, 速率为 97.09 mm/ka 第四旋回生长了 50 mm, 速率为 22.32 mm/ka 其中晚期生长最慢, 18.29~17.26 ka B.P., 生长最快, 短短 1000 年长了 100 mm。在这之前, 生长速率很慢。

$\delta^{18}\text{O}$ 的最大值为 -5.003‰ $\delta^{18}\text{O}$ 的最小值为 -9.316‰ 平均值为 -7.390‰。第一旋回即: 31.4~31.9 ka B.P., $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围在 -9.316‰~-8.490‰ 平均值为 -8.866‰。出现了整个时段内的最小值, 而且平均值小于整个石笋的平均值。因此, 在这一时段内, 降雨量比较大, 气温可能偏高。第二旋回即 31.44~18.29 ka B.P., $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 -7.938‰~-6.359‰, 它们平均值为

值偏低;当冬季风加强时,气候冷干, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高。由于重庆地区受到了东亚季风和印度洋季风的双重控制,已知前者的水源 $\delta^{18}\text{O}$ 值(约 -6‰)要比后者的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(约 -10‰)偏正^[18],为此,重庆地区石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应是两种水汽源的加权平均值。

碳氧同位素分析结果显示,在 32~ 15 ka B. P. 阶段,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -7.390‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值是 -4.10‰ , 分别与现代碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-7.734‰)和 $\delta^{13}\text{C}$ (-3.304‰)接近,所以,可以用 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值代表研究时段内的正常气候条件(也可以认为是标准),当某一时期, $\delta^{18}\text{O}$ 的值大于这一平均值,指示该时期气候变冷或变凉,显示降水减少或相对偏干;反之,显示降水增多,气候变暖。 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值可作为评价研究时段内植被好坏的一个总体指标。由曲线可以看出 $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度很大,是由于研究区位于西南岩溶区,生态系统极其脆弱。植被易受气候波动影响随气候波动较大,高值达到 -0.862‰ ,表明当时地表可能基本裸露。低值为 -6.480‰ 。

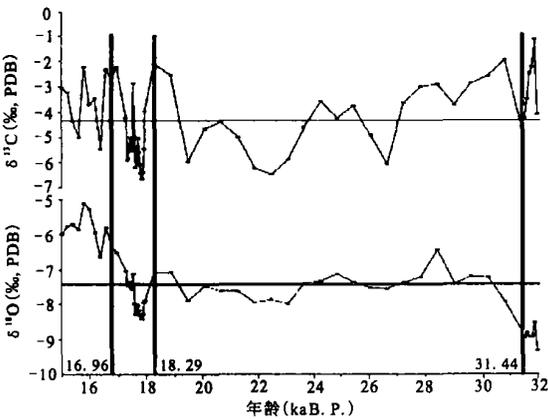


图3 重庆金佛山梁天湾洞 14号石笋 32~ 15 ka B. P. 氧碳同位素记录曲线

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ value of LT14 stalagmite in 32 ka B. P. - 15 ka B. P.

$\delta^{18}\text{O}$ 值最显著的突变发生在与沉积旋回之间(17.845~ 15.79 ka B. P.)。同样, $\delta^{18}\text{O}$ 值由 -8.367‰ 突变为 -5.003‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值也由 17.845 ka 的 -6.480‰ 上升为 -1.977‰ , 碳氧同位素变化趋势一致。在 31.44~ 18.29 ka B. P. 期间 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值与总平均值大体一致,波动不大。亚旋回碳氧同位素特征变化如下: 沉积亚旋回 31.99~ 31.44 ka B. P. 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -8.866‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -2.955‰ ; 在沉积亚旋回 30.84~

23.67 ka B. P. 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -7.256‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -3.463‰ ; H_2 事件定为 24.863 ka B. P., H_3 事件定为 30.244 ka B. P.。在沉积亚旋回 23.07~ 18.29 ka B. P. 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -7.564‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -4.610‰ ; 在沉积亚旋回 17.96~ 17.58 ka B. P. 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -8.1‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -5.526‰ ; 在沉积亚旋回 17.55~ 16.96 ka B. P. 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -7.212‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -4.513‰ ; 在沉积亚旋回 16.77~ 15.99 ka B. P. 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -5.916‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -3.304‰ ; 在沉积亚旋回 15.79~ 15.02 ka B. P. 这个期间, $\delta^{18}\text{O}$ 的值则为 -5.592‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -3.357‰ 。该阶段最冷, H_1 事件定为 15.79 ka B. P.。至此石笋结束沉积。

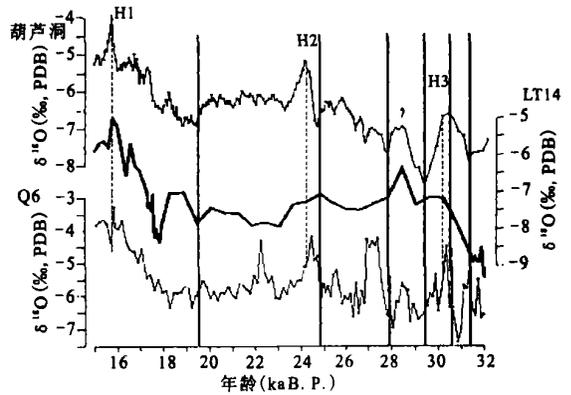


图4 LT14石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与南京葫芦洞和贵州董歌洞 Q6石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 对比

Fig. 4 Comprehensive comparison of stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ from LT14, Huli and Q6

5 结论

通过对重庆金佛山梁天湾洞 14号石笋碳氧同位素的系统分析,对该地区末次冰期晚期(32~ 15 ka B. P.)以来的气候变化有如下认识:

1) 重庆地区末次冰期晚期(32~ 15 ka B. P.)以来的季风气候变化主要分为 4 个时期: 31.99~ 31.44 ka B. P. 期间为稳定气候期,石笋记录 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负,显示西南季风强盛且稳定,气候温暖,气温虽有波动但变化不大,本阶段为温暖干旱气候环境; 31.44~ 18.29 ka B. P. 期间,气候首先迅速变冷,夏季风在该时期持续减弱,随后稳定下来,稳定期内,气候经历了从冷干到暖湿的变化; 18.29~

16.96 ka B. P. 为气候突变期,在这一时期气候先是迅速变暖后又迅速变冷,短短的 1300年, $\delta^{18}\text{O}$ 变化了 2‰; 西南季风和东亚季风在这一时期都很强盛,这是一个季风气候盛行期,温度和降水都持续增多,后期气温降低但降水仍很丰沛,由于整个阶段很暖湿,石笋生长很快,短短的 1300年沉积了 110mm; 16.96~15.02 ka B. P. 为气候稳定期,是整个阶段的最冷期,存在小规模振荡。

2) 碳同位素记录表明该区植被演化的情况。

31.99~31.44 ka B. P. 期间, $\delta^{13}\text{C}$ 均趋向于偏正,是整个阶段的最干旱期,地表植被状况很差,石漠化很强,以 C4 植被为主,但受气候影响波动很大; 31.44~18.29 ka B. P. 季风气候迅速衰退而后处于稳定期,受夏季风衰退的影响,气温和降水都持续减少, $\delta^{13}\text{C}$ 持续偏正,植被稍有恢复,以草本为主; 18.29~16.96 ka B. P. 时期,降水丰沛, $\delta^{13}\text{C}$ 持续偏负,植被以灌木丛和木本为主; 16.96~15.02 ka B. P. 期间,生态系统不稳定,植被受气候变化影响波动较大, $\delta^{13}\text{C}$ 偏正,植被以草本为主。

3) 总观整个阶段, 32~15 ka B. P., $\delta^{18}\text{O}$ 值由偏轻逐渐向偏重方向变化。反映东亚夏季风由强变弱,降雨由多变少,气温由高变低,同时变化幅度也由小到大。

致 谢: 本研究一直得到袁道先院士的支持和指导,参加野外工作的还有中国地质科学院岩溶地质研究所林玉石和张美良研究员以及西南师范大学资源环境学院的沈立成,石笋 TMS-U 系测年数据由美国明尼苏达大学程海博士完成,一并致谢。

参考文献:

- [1] Yuan D X, Cheng H, Zhang M L, et al. Timing, duration and transitions of the last interglacial Asian Monsoon [J]. *Science*, 2004, **304**: 575-578
- [2] Winograd I J, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 500 000 year climate record from vein calcite in Devils Hole Nevada [J]. *Science* 1992, **258**: 255-260
- [3] 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): 304-310
- [4] Dorak JA, Edwards RL, Ito E, et al. Climate and Vegetation History of the Midcontinent from 75 to 25ka. A Speleothem Record from Crevice Cave, Missouri, USA [J]. *Science*, 1998, **282**: 1871-1874.
- [5] 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**: 2345-2348.
- [6] 李红春,顾德隆,Lowell D S. 高分辨率洞穴石笋稳定同位素应用之一——京津地区 500 a 来的气候变化—— $\delta^{18}\text{O}$ 记录 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 1998, **28**(2): 18-186
- [7] 秦小光,刘东生,谭明,等.北京石花洞石笋微灰度变化特征及其气候意义 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2000, **30**(3): 239-248.
- [8] 张美良,林玉石.黔南洞穴石笋古气候变化记录及终止点的确定 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2002, **33**(11): 942-950.
- [9] Christoph S, Augusto M. Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard-Oeschger events during isotope stages 3: Implications for the absolute chronology of Greenland ice cores [J]. *Earth and Planetary Sciences Letter* 2002, **203**: 507-518
- [10] McCrea J M. The isotopic Chemistry of carbonates and a paleotemperature scale [J]. *Journal of Chemical Physics* 1950, **18**: 849-857
- [11] Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothem: Part 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**: 801-824.
- [12] Craig H, Gordon L I, Horibe Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water—low temperature results [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1965, **68**: 5079-5087.
- [13] 覃嘉铭. 古气候变化的石笋记录——以盘龙洞为例 [J]. *地球学报*, 1997, **18**(3): 225-260.
- [14] 张美良,袁道先,林玉石,等.桂林响水洞 6.00 ka B. P. 以来的石笋高分辨率的气候记录 [J]. *地球学报*, 2003, **24**(5): 439-444.
- [15] 彭子成,张兆峰,蔡演军,等.贵州七星洞晚更新世晚期石笋的古气候环境记录 [J]. *第四纪研究*, 2002, **22**(3): 273-282.
- [16] Tan M, Cai B. Preliminary calibration of stalagmite oxygen isotopes from Eastern Monsoon China with Northern Hemisphere temperature [J]. *PAGES News* 2005, **13**(2): 16-17
- [17] 卫克勤,林瑞芬.论季风气候对我国雨水同位素组成的影响 [J]. *地球化学*, 1994, **23**(1): 33-41
- [18] 蔡演军,彭子成,安芷生,等.贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化 [J]. *科学通报*, 2001, **46**(16): 1398-1402.

Study on Climate Change Based on Stalagmite from Chongqing Cave During the Last Glaciation

WANG Jian-Li^{1,2}, WANG Li¹, HE Xiao¹, WU Wen-Jian¹

(1. School of Geographical Sciences, South West University, Chongqing, 400715;

2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), South West University, Chongqing, 400715)

Abstract A relatively high-resolution paleoclimatic change sequences was established based on a mass-spectrometric uranium-series dated stalagmite from the Jinfu Mountains Caves of Chongqing region during the late period of Last Glaciation (31.90 ka–15.21 ka B.P.). The stalagmite began to deposit at 31.90 ka B.P. and ended at about 15.21 ka B.P. without any obvious hiatus. The depositional rate is about 1.77 mm/100a in average. A high-resolution $\delta^{18}\text{O}$ records of the stalagmite demonstrates not only the existence of the abrupt climatic change—the Heinrich events—but also bears a high similarity to the $\delta^{18}\text{O}$ -paleotemperature record of Nanjing Huli and Guizhou Dongge caves, indicating the paleoclimate of Chongqing region, even at the middle reaches of the Yangtze River, was confined by both the influences of Indian summer monsoon and East Asia summer monsoon at the late period of the Last Glaciation.

Key words stalagmite; the Last Glaciation; depositional characteristics; stable isotopes