

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.01.012

川东北石笋记录的 334~320 ka 夏季风变化与影响机制

米小建^{1,2}, 刘淑华¹, 陈琼¹, 赵建新³, 周厚云¹

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 岭南师范学院地理系, 湛江 524048;

3. 澳大利亚昆士兰大学地球科学学院 RIF 实验室, 布里斯班 4072)

摘要: 间冰期气候是古气候研究中重点关注的内容之一。通过对川东北宋家洞石笋 SJ5-6 高精度²³⁰Th 定年和高分辨率氧同位素分析, 重建了该地区 334~320 ka(MIS9)时期高分辨率夏季风气候变化历史。结果发现, SJ5-6 记录的夏季风变化趋势总体上与亚洲季风区其他石笋记录相似, 也与南极冰芯记录的温度变化基本一致, 反映了在 MIS9 间冰期南半球高纬度地区温度变化可能对川东北地区的夏季风气候变化产生了重要影响。

关键词: 石笋氧同位素; 夏季风; MIS9; 华中; 南极影响

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)01-0102-05

黄土-古土壤序列是系统全面研究亚洲季风气候的重要地质档案之一。相关研究成果显示在轨道尺度上亚洲季风变化主要受控于北半球高纬冰盖的变化^[1], 即冰盖变化影响西伯利亚高压, 进而影响亚洲季风环流, 同时冰盖变化控制海面升降, 进而控制亚洲大陆的大陆度、影响亚洲季风气候。但是黄土-土壤记录分辨率相对较低, 不能解释更小尺度的季风变化机制。随着岩溶洞穴沉积可以精确定年和高分辨率采样, 其逐渐成为研究亚洲季风变化的理想地质对象之一^[2-6]。来自华东葫芦洞的石笋记录^[2]表明东亚夏季风变化主要受到北半球高纬度温度变化的影响, 与北半球高纬度太阳辐射变化一致。不过, 近年来虽然越来越多的证据——如来自湖泊沉积和石笋的证据——显示南半球温度变化也对亚洲夏季风变化造成了影响^[3,7], 但这些现象基本上发生在较冷的冰期和冰阶气候阶段。现代观测发现南半球温度变化会影响穿赤道气流^[8], 进而对亚洲夏季风造成影响。因此, 在以往的间冰期气候条件下, 南半球温度变化也可能影响亚洲夏季风变化。但到目前为止, 在依据各种地质材料对过去间冰期气候进行的研究中, 有关南半球温度变化影响亚洲夏季风变化的研究成果还未见报道。

本文报道了采自我国中部川东北地区的一支石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录。该石笋具有精确的²³⁰Th 定年, 根据该石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录高分辨率重建了倒数第三次间冰期(MIS9)川东北地区夏季风变化历史, 发现其可能受到了南半球温度变化的显著影响。

1 样品与研究方法

石笋 SJ5-6 采自川东北诺水河地区宋家洞(32°24'N, 107°10'E)(图 1)。之前已经报道过该溶洞的其他一些研究成果^[9]。宋家洞与周围狮子洞^[6]、梭子洞^[10]和仙人洞^[11]等组成一溶洞群, 均发育于晚二叠系石灰岩中。区域气候为典型的季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干旱, 年平均气温约 15℃, 年降水量 1000~1200 mm, 其中 6~9 月降水量占到全年降水量的 60%左右。区域植被以乔木为主, 包括松、柏和一些阔叶落叶树种。

石笋 SJ5-6 长 60 cm, 直径 ~30 cm, 上下比较均匀, 切面上未见明显沉积间断(图 2)。在 SJ5-6 的 6 个层位取样进行²³⁰Th 定年。²³⁰Th 年代采用 MC-ICP-MS 测定, 在澳大利亚昆士兰大学 RIF 实验室完成。采用直径 0.5 mm 钻头沿 SJ-05-6 生长中心钻取粉末样用于 $\delta^{18}\text{O}$ 分析, 每毫米钻取一样, 实际分析中每间隔 4 个样品挑选 1 个样品, 共选取 105 个样品。 $\delta^{18}\text{O}$ 测试在中国科学院南京地质与古生物研究所进行, 使用仪器为 Kiel 型碳酸盐自动进样装置和 Thermo-Fisher MAT 253 质谱仪。 $\delta^{18}\text{O}$ 分析误差 < 0.1‰, 结果报告相对于 PDB 标准。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41473093, 40973009); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1431)

作者简介: 米小建(1981—), 男, 博士生, 第四纪地质与全球变化研究, E-mail: mixiaojian@126.com

通讯作者: 周厚云(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 全球变化研究, E-mail: hyzhou@gig.ac.cn

收稿日期: 2016-09-12; **改回日期:** 2017-01-10. 周立君编辑



图 1 宋家洞(32°24'N,107°10'E),林竹洞(31°31'N,110°19'E)和婆罗洲北部 Whiterock 洞(4°N,115°E)的洞穴位置

Fig. 1 Locations of the Songjia Cave (32°24'N,107°10'E), Linzhu Cave(31°31'N,110°19'E) and Whiterock Cave (4°N,115°E)

2 结果

2.1 年龄

^{230}Th 测年结果见表 1。

表 1 石笋 SJ5-6 的 ^{230}Th 测年结果
Table 1 ^{230}Th dating results for stalagmite SJ5-6

样号	深度/mm	年龄/ka	误差 $\pm 2\sigma$
SJ5-6-2	125	330	4.14
SJ5-6-3	218	324	3.42
SJ5-6-4	328	331	3.39
SJ5-6-5	416	325	4.06
SJ5-6-6	486	328	3.58
SJ5-6-7	610	335	5.83

在不考虑误差的情况下,6 个年龄中深度 125 和 328 cm 处的年龄发生倒序。石笋 SJ5-6 年龄模式采用 StalAge 算法^[12]计算。根据该算法,深度 125 cm 和 328 cm 处的年龄被自动剔除。计算结果显示 SJ5-6 年龄为 320.5~334.0 ka(图 2)。

2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表现出显著的千年尺度波动,变化范围为 -10.7‰ ~ -7.5‰ ,平均值为 -8.9‰ (图 3)。根据图 2 建立的年代模式,SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录最大值出现在约 333.4 ka,最小值出现在约 320.6 ka。大约在 331~324 ka 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 值围绕一相对稳定的值发生上下波动,波动范围从

-8.9‰ 到 -8.1‰ 。

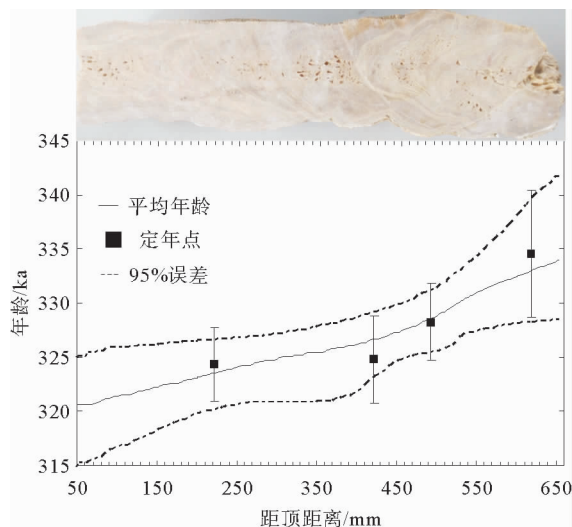


图 2 石笋 SJ5-6 与年龄模式

Fig. 2 Stalagmite SJ5-6 and its age model

3 讨论

亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候环境意义解读目前存在一些争议^[2,5,13,14]。“重复性检验”^[15]被认为可以用于检验石笋碳酸盐是否在同位素平衡条件下沉积及石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录是否能够指示过去气候环境变化。比较石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与亚洲季风区其他石笋(WR5^[5]和 LZ15^[16])的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可以看到,在年龄误差范围内大部分时间段它们的总体变化趋势基本相似(图 3),部分差异(例如在 333.8 ka 附近 SJ5-6,WR5 和 LZ15 三支石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化趋势不一致)可能与各石笋的定年误差有关。这说明石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要受气候因素控制,指示了亚洲夏季风强度的变化,较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对应夏季风增强,较高 $\delta^{18}\text{O}$ 值对应夏季风减弱。

对比东亚季风区其他石笋记录可以看出,石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可以分为三个阶段,即 334~331,331~324 和 324~320 ka。334~331 ka 阶段为夏季风相对较弱的时期;331~324 ka 阶段夏季风处于一个相对平稳的平台期;324~320 ka 阶段则夏季风逐渐增强(图 3)。

石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化趋势与低纬度的婆罗洲北部 Whiterock 洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[16]和南极冰芯 EPICA/Dome C 的 δD 记录^[17]比较一致,特别是与南半球高纬度温度变化相似性较高(图 3)。例如在 331 ka 之前 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表现为相对重值阶段,对应 EPICA/DomeC 的 δD 记录在 331~

336 ka 期间也是相对较重的值; SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化在 331~324 ka 阶段相对平稳, EPICA/Dome C 的 δD 记录在 331~326 ka 阶段也变化不大; SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 324 ka 之后的变轻与 EPICA/Dome C 的 δD 在 326 ka 之后的变轻对应。这似乎显示川东北地区夏季风变化与南半球高纬度地区的温度变化之间存在紧密联系: 南极温度上升对应川东北地区夏季风减弱, 而温度下降则与夏季风增强相对应。

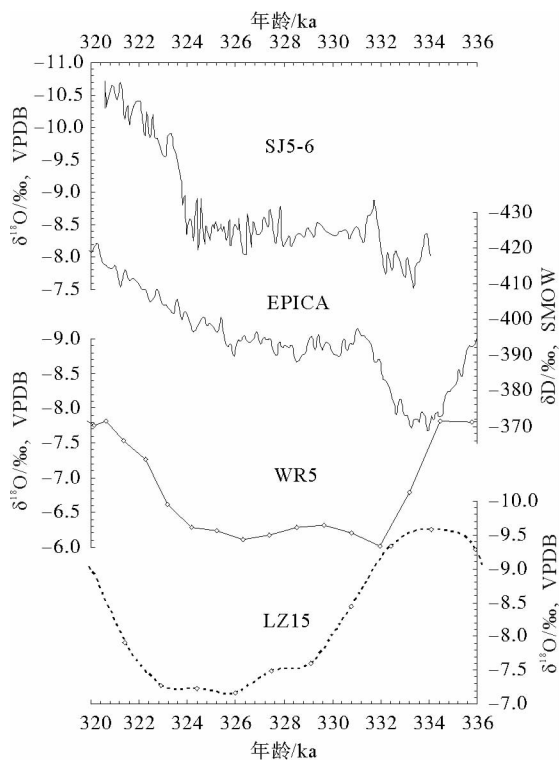


图3 石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与南极冰心 Dome C 的 δD 记录^[17]、婆罗洲北部石笋 WR5^[16] 和湖北林竹洞石笋 LZ15 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[5] 对比

Fig. 3 Comparison of the $\delta^{18}\text{O}$ record of SJ5-6 with the δD record of the EPICA Dome C and the $\delta^{18}\text{O}$ records of WR5 and LZ15

南半球温度变化影响穿赤道气流和亚洲夏季风气候, 已被现代观测和许多地质记录所证实^[3,7,8,18,19]。在现代观测中, Xu 等^[8] 发现南极变冷会导致马斯克林高压加强, 形成加强的穿赤道气流和印度季风^[21]。在对地质记录的研究中, Cai 等^[3] 也认为南半球高纬变冷会诱发强的穿赤道气流, 进一步加强了印度季风^[3]; 而 An 等^[7] 则指出更新世印度季风变化受到南、北半球共同驱动。在千年尺度上, 这种南、北半球温度变化对亚洲夏季风的共同影响被 Rohling 等^[20] 形象地比喻为一种“拉-推”效应, 例如在间冰阶北半球温度的上升对夏季风产生

一种“拉”的效应, 南半球的降温则对夏季风产生一种“推”的效应。不过, 以往地质记录研究发现的南半球温度变化对我国夏季风的影响都是发生在冰期和冰阶阶段。图3所示的石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的我国中部夏季风变化与南极温度的对应关系, 似乎进一步验证了这种南北半球温度变化共同影响我国夏季风变化的观点, 但这是发生在间冰期的气候环境下 (MIS9)。不过, 这一发现对现代观测结果^[8] 是很好的印证, 说明在现在和过去间冰期气候下南半球温度变化都可能是影响亚洲夏季风变化的重要因素。334~320 ka 属于倒数第三次间冰期。从南极冰心看, 这一时期的升温接近或略弱于末次间冰期, 但明显比全新世强^[21]。但从石笋的研究结果看, 这一时期的亚洲夏季风似乎略弱于末次间冰期和全新世^[22]。不管怎样, 图3和现代观测结果^[8] 都显示即使在较强的间冰期气候下南半球温度变化也对亚洲夏季风变化具有重要影响, 结合以往地质记录所揭示的在冰期和冰阶气候下的现象^[3,7], 可以说南半球温度变化对亚洲夏季风的影响在冰期和间冰期气候下均存在。

南半球温度变化影响亚洲夏季风的重要机制可能是控制印度季风的印度低压 (位于北半球印度半岛) 和马斯克林高压 (位于南印度洋副热带海域)。若马斯克林高压和印度低压增强, 则印度季风增强; 反之, 则印度季风减弱。印度低压主要受北半球温度和印度洋潜热的影响, 北半球温度增高, 则印度低压加强, 反之则相反; 马斯克林高压位于南半球哈得莱 (Hadley) 环流下沉端, 受南半球温度梯度影响, 南极温度降低有利于马斯克林高压增强, 也有利于印度季风加强, 反之则相反。因此我们在图3中可以看到, 当南极温度升高时 (例如 331 ka 以前), 对应川东北地区出现的是较弱的夏季风; 而当南极温度开始下降时 (例如 326 ka 以后), 川东北地区的夏季风出现了增强的趋势。

由于缺乏北半球高纬度地区精确定年的 MIS9 时期气候变化记录, 这里也无法与石笋 SJ5-6 的记录进行对比, 但根据末次冰期和全新世以来亚洲夏季风变化受北半球高纬度温度变化显著影响的事实^[2,5], 我们推测北半球高纬度温度变化也应该是影响 MIS9 时期川东北地区夏季风变化的重要因素之一, 即间冰期 MIS9 时期南-北半球高纬度温度变化都可能对亚洲夏季风产生了重要影响。不过, 这一推测还有待今后更加深入的研究工作证实。

最后应该指出的是, 本文报道的仅仅是一支石笋的研究结果, 而且该石笋的年龄精度还可以进一

步提高。因此,在过去间冰期气候下亚洲夏季风与南半球高纬度地区温度变化的关系,还需要得到更多具有更精确定年的石笋研究成果的支持。

4 结论

利用采自川东北地区宋家洞的石笋 SJ5-6 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,在高精度定年的基础上高分辨率重建了川东北地区约 334~320 kaBP 之间的夏季风变化历史,结果显示石笋 SJ5-6 记录的川东北地区夏季风气候变化过程与亚洲季风区其他石笋记录大体一致,与南极温度变化存在明显的一致性。这可能反映了川东北地区在倒数第三次间冰期时期(MIS 9)的夏季风气候变化受到了南半球高纬度温度变化的显著影响。这一结果与现代观测结果完全一致。南半球温度变化对亚洲夏季风的影响,在过去冰期和间冰期气候下可能都发生过。

致谢:在石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 测试过程中得到了中国科学院南京地质古生物研究所陈小明老师的帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] Ding Z, Liu T, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(2):149-159.
- [2] 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.
- [3] Cai Y, An Z, Cheng H, et al. High-resolution absolute-dated Indian Monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China[J]. *Geology*, 2006, 34(8):621.
- [4] Zhang P, Johnson K R. Test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record [J]. *Science*, 2008, 322 (5903):940-942.
- [5] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S. Ice age terminations [J]. *Science*, 2009, 326 (5950):248-252.
- [6] Zhou H, Zhao J, Wang Q, et al. Speleothem-derived Asian summer monsoon variations in Central China, 54 ~ 46? ka [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(8):781-790.
- [7] An Z, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-Interglacial Indian summer monsoon dynamics [J]. *Science*, 2011, 333(6043): 719-23.
- [8] Xue F, Wang H, He J. Interannual variability of Mascarene High and Australian High and their influences on East Asian summer monsoon [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(4):1173-1186.
- [9] Zhou H, Zhao J X, Feng Y, et al. Heinrich event 4 and Dansgaard/Oeschger events 5 - 10 recorded by high-resolution speleothem oxygen isotope data from central China[J]. *Quaternary Research*, 2014, 82(2):394-404.
- [10] Zhou H, Zhao J, Zhang P, et al. Decoupling of stalagmite-derived Asian summer monsoon records from North Atlantic temperature change during marine oxygen isotope stage 5d [J]. *Quaternary Research*, 2008, 70(2):315-321.
- [11] 陈琼, 刘淑华, 米小建, 等. 川东北石笋记录的 GIS4-5 夏季风气候变化及与高纬气候的联系 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6):1264-1269. [CHEN Qiong, LIU Shuhua, MI Xiaojian, et al. Speleothem-derived Asian summer monsoon variations during Greenland interstadials 4 to 5 in NE Sichuan, central chian and teleconnections with high latitude climates [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1264-1269.
- [12] Scholz D, Hoffmann D L. StalAge - An algorithm designed for construction of speleothem age models [J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(3): 369-382.
- [13] Yuan D, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670):575-578.
- [14] Maher B A, Thompson R. Oxygen isotopes from Chinese caves: records not of monsoon rainfall but of circulation regime [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(6):615-624.
- [15] Dorale J A, Liu Z. Limitations of hendi test criteria in judging the paleoclimatic suitability of speleothems and the need for replication [J]. *Journal of Cave & Karst Studies the National Speleological Society Bulletin*, 2009, 71(1):73-80.
- [16] Meckler A N, Clarkson M O, Cobb K M, et al. Interglacial hydroclimate in the tropical West Pacific through the Late Pleistocene[J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1301-1304.
- [17] Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800 000 years [J]. *Science*, 2007, 317(5839):793-796.
- [18] Zhao K, Wang Y, Edwards R L, et al. High-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records of Asian monsoon changes in central and southern China spanning the MIS 3/2 transition[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2010, 298(1-2):191-198.
- [19] Duan F, Liu D, Cheng H, et al. A high-resolution monsoon record of millennial-scale oscillations during Late MIS 3 from Wulu Cave, south-west China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(1):83-90.
- [20] Rohling E J, Liu Q S, Roberts A P, et al. Controls on the East Asian monsoon during the last glacial cycle, based on comparison between Hulu Cave and polar ice-core records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27): 3291-3302.
- [21] EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 2004, 429:623-628.
- [22] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640 000 years and ice age terminations [J]. *Nature*, 2016, 534: 640-646.

HIGH-RESOLUTION PALEOCLIMATIC RECORDS OF MIS9 IN NORTHEASTERN SICHUAN, CENTRAL CHINA

MI Xiaojian^{1,2}, LIU Shuhua¹, CHEN Qiong¹, ZHAO Jianxin³, ZHOU Houyun¹

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631;

2. Department of Geography, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048;

3. Radiogenic Isotope Facility, School of Earth Sciences, University of Queensland, Brisbane, Qld 4072, Australia)

Abstract: Interglacial climate is one of the major concerns in paleoclimate investigations. The stable oxygen isotope of a stalagmite (SJ5-6) from the Songjia Cave in northeastern Sichuan, central China, which is precisely dated with ^{230}Th dating method, show prominent paleoenvironmental changes during the MIS (marine oxygen isotope stage) 9. The stalagmite of SJ5-6 developed from 334 ka to 320 ka, a part of MIS9. The variations in $\delta^{18}\text{O}$ of the stalagmite are interpreted as the responses to the millennial-scale fluctuations of the Asian summer monsoon intensity during 334~320 ka. The $\delta^{18}\text{O}$ record studied is roughly parallel with the other speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records recovered from the Asian summer monsoon region. In particular, there is a high similarity of temperature pattern between the stalagmite SJ5-6 and the Antarctic ice core. This suggests that temperature changes over the Antarctica may play an important role in the evolution of the Asian summer monsoon during the past interglacial.

Key words: speleothem $\delta^{18}\text{O}$; summer monsoon; MIS9; Central China; Antarctic influence