

组里塞斯, 杨勋林, 王 勇, 等. 重庆金佛洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 Heinrich6 期间气候环境变化[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 590-602.
DOI: 10.11932/karst2023y008

重庆金佛洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 Heinrich6 期间气候环境变化

组里塞斯¹, 杨勋林^{1,2,3}, 王 勇¹, 胡明广¹, 许奕滨¹

(1. 西南大学地理科学学院/重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715; 2. 重庆岩溶环境开放实验室, 重庆 400715; 3. 自然资源部岩溶生态环境——重庆南川野外基地, 重庆 400715)

摘 要: 在末次冰期发生的 6 次海因里希事件 (Heinrich 事件, 简称 H 事件) 中, H6 事件发生年代最早, 对其研究较少, 利用高分辨率石笋记录研究 H6 事件期间的气候环境变化, 有助于理解高低纬度气候变化对 H 事件的响应过程。本文基于重庆市金佛洞石笋 JF2017 铀系测年数据和碳同位素数据, 重建 H6 事件期间中国西南地区季风气候环境的演化过程。结果显示: 石笋 JF2017 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 61 811±204 a B.P.~59 716±159 a B.P. 时段显著偏重, 持续大约 2 095 a, 暗示该时段季风减弱和生态植被退化, 对应北大西洋 H6 事件。H6 事件期间, 石笋 JF2017 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 61 811~60 848 a B.P. 期间开始先逐渐偏重至最大值, 随后发生短时间尺度的波动变化; 最后在 60 848~59 716 a B.P. 期间缓慢偏轻至 H6 事件结束, 整体呈现先逐渐偏重后又缓慢偏轻的趋势, 内部存在百年际尺度的气候震荡, 表明 H6 事件期间当地气候不稳定。石笋 JF2017 记录的百年际尺度的季风气候变化可能与热带辐合带和北大西洋经向翻转环流密切相关。

关键词: 亚洲季风; Heinrich 6; 石笋 $\delta^{13}\text{C}$; 金佛洞; 中国西南

中图分类号: P532 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 03-0590-13

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

末次冰期气候突变事件的显著特点就是存在冰阶与间冰阶交替的循环, 其中最具标志性的事件为 Dansgaard/Oeschger (D/O) 旋回^[1] 和 Heinrich 事件^[2]。在整个末次冰期, 北大西洋一共发生了 6 次大规模的冰漂碎屑事件, 这些事件主要为气候快速变冷事件^[2], 即海因里希事件 (Heinrich events, 简称 H 事件)。其中 Heinrich 6 (H6) 事件是最早发生的 H 事件^[3-4], 其冰漂碎屑层的含量明显低于 H1、H2、H4、H5^[2-3,5]。对于这些 H 事件的气候信号不仅存在于格陵兰和北

大西洋的地质载体中, 全球其他地区的古气候记录中也陆续发现了类似的气候突变事件。在多种古气候地质载体中, 洞穴石笋记录因其具备分辨率高和精确定年的优势, 逐渐成为研究百年到千年尺度气候突变事件的理想载体^[6]。

目前, 在东亚季风区, 人们更多地利用石笋氧同位素研究 H 事件的气候变化, 并取得了很大进展^[7-12]。随着现代观测技术以及洞穴监测^[13-15]、模拟实验技术的深入发展, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在重建古环境和古气候中的应用^[16-18] 以及其对气候快速变冷事件的响应方面逐渐受到关注^[19-21]。Genty 等^[19] 利用法

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971109, 41572158); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502301)

第一作者简介: 组里塞斯 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩溶记录与全球变化。E-mail: 1977166588@qq.com。

通信作者: 杨勋林 (1974-), 男, 教授, 主要从事亚洲季风气候历史重建等研究工作。E-mail: xlyang@swu.edu.cn。

收稿日期: 2022-06-20

国南部石笋与格陵兰冰芯记录对比发现 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对“Dansgaard-Oeschger (D/O) 循环”的响应比 $\delta^{18}\text{O}$ 记录更敏感。吴江滢等^[22]对南京汤山石笋高分辨率氧-碳同位素记录对气候事件的快速响应研究表明,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 在千年尺度上呈现一一对应关系,说明两者对气候变化同步响应。Wang 等^[23]利用石笋多指标记录研究末次冰期气候,发现石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列中反映有 H 事件和 DO 旋回,并指出 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在差异,说明气候突变事件对这两个代用指标的影响是不同的。中国东北暖洞石笋对 8.2 千年事件的响应上,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 比 $\delta^{18}\text{O}$ 记录更为清晰^[20]。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 作为重要的替代性指标之一,是全球气候变化信号和区域影响共同作用的载体,利用高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录研究古气候突变事件会提供一些参考价值。此外,近年来许多研究者在利用石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录研究古气候环境变化中取得了许多进展^[11,23-26]。因此,当石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对气候事件更为敏感时,利用石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录研究 H 事件,可进一步分析 H 事件期间区域气候环境的变化。根

据 Wu 等^[21]研究重庆羊子洞石笋 YZ1 $\delta^{13}\text{C}$ 记录和区域水文记录的结果表明,在 62 000~57 000 a B.P. 期间,石笋 YZ1 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重,且对应于深海氧同位素阶段 4 (Marine Isotope Stage 4, 简称 MIS 4) 向 MIS3 的过渡。虽然多个石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对末次冰期期间千年尺度事件的气候变化有研究,但针对 H6 事件期间的西南地区高分辨率气候变化情况缺少详细记录。因此,本文利用重庆南川区金佛山金佛洞石笋 JF2017 作为研究对象,建立 63 000~58 000 a B.P. 时段 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的时间演化序列,着重讨论金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的中国西南地区气候环境变化和对北大西洋 H6 事件的响应。

1 研究区概况

金佛洞位于中国西南重庆市南川区金佛山的山顶(图 1),地处四川盆地东南边缘与云贵高原北缘交接带。金佛山山顶存在着一个庞大复杂的地下洞穴系统,其中金佛洞发育于金佛-羊子洞穴系统,洞口

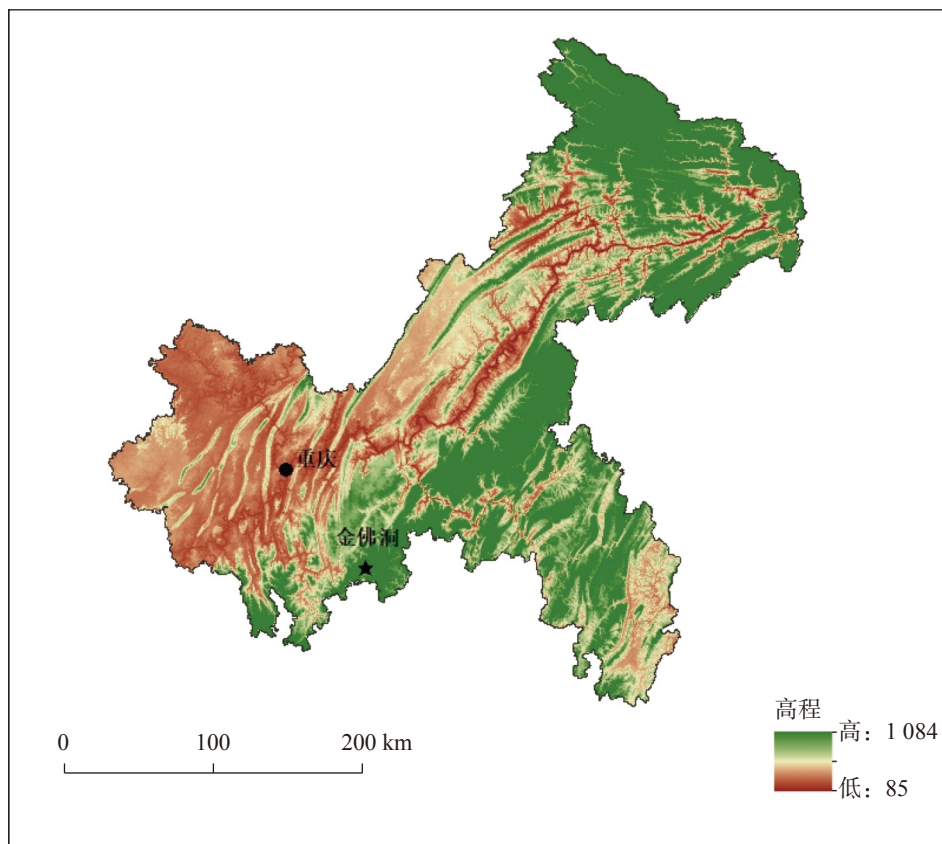


图 1 重庆金佛洞地理位置示意图(图中黑色五角星指示金佛洞位置)

注:审图号:GS(2020)4619号

Fig. 1 Geographical location of Jinfo Cave in Chongqing (Black star indicates the location of Jinfo Cave)

海拔 2 080 m。该地区岩性主要以碳酸盐岩和砂页岩为主,不同岩性之间的交接面容易形成侵蚀面和溶洞层。金佛山属于典型的亚热带湿润气候区,受亚洲夏季风 (Asian Summer Monsoon, ASM) 的影响。根据气象监测资料显示,该区域气候温暖湿润,年平均气温和降水分别约 14.5 °C 和 1 434.5 mm,降水主要集中在 4-10 月,降水类型为季风降水。

2 研究方法

本文研究的石笋 JF2017 采自于金佛洞,石笋整体呈圆柱状,表面呈黄褐色,沿生长轴切开后的剖面呈深褐色,由半透明致密状方解石矿物组成。该石笋样品的总长约 332 mm,断裂后分为上、下两段。此次重点研究石笋的 20~110 mm 部分 (图 2),该部分生长时段为 63 000~58 000 a B.P.,主要讨论 H6 事件期间的气候记录。

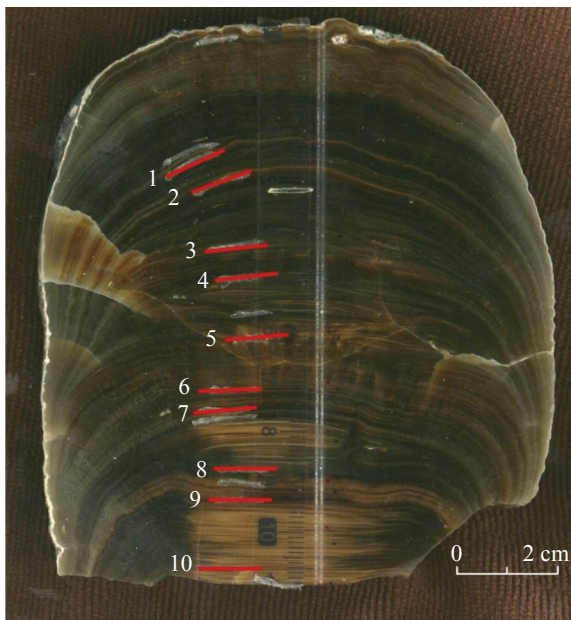


图 2 石笋 JF2017 剖面图

注:红色实线表示 U-Th 测年采样点。

Fig. 2 Profile of stalagmite JF2017

Note: Solid in red indicates U-Th dating sampling point.

使用直径为 1 mm 的牙钻沿着抛光剖面上的生长轴方向钻取粉末样品用于石笋年龄的测定,每个样品的重量为 10~30 mg,其中选取 10 个粉末样品进行年代分析,分析在西安交通大学全球环境变化研究院同位素实验室,采用 Neptune Plus 型多接收等离子电感耦合质谱仪 (MC-ICP-MS) 完成,样品年龄误

差 $\leq 1\%$ (2σ)。其中较高含量的 ^{238}U 和较低含量的 ^{232}Th 为精确测定整个石笋年龄提供了保障。石笋样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 在西安交通大学碳酸盐稳定同位素实验室完成测试,实验仪器使用 Delta-V-Plus 型气体同位素比值质谱仪与碳酸盐自动进样装置 Kiel-IV 联机测试,每间隔 8 个测试样品即插入 1 个 TTB1 国家标准样品。实验测试结果以 V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite) 为标准, $\delta^{13}\text{C}$ 实验分析误差 $< 0.06\%$ (2σ)。

3 结果与分析

3.1 石笋年龄模型

JF2017 石笋基于精确的 ^{230}Th 年龄,利用 StalAge 程序通过对 ^{230}Th 年代数据进行线性插值而建立 JF2017 的年代模型^[27] (图 3),本文主要研究时段为 63 000~58 000 a B.P.。由于 ^{230}Th 测年精度整体比较高,年龄误差按 2σ 计算,平均测年误差为 221 a。此外,10 个年龄数据分析表明石笋 JF2017 连续生长无沉积间断,并均符合沉积序列 (表 1)。

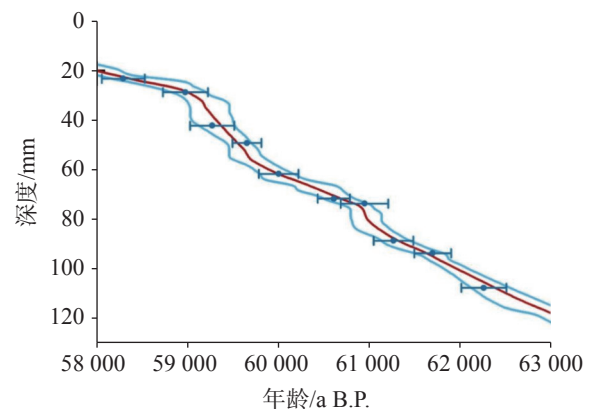


图 3 石笋 JF2017 年代模型图

注:深蓝色圆点表示 U-Th 测年点的年代及深度,深蓝色误差棒表示测年误差 ($\pm 2\sigma$);红色实线表示年代模型曲线,蓝色实线表示 95% 的置信界限。

Fig. 3 Chronological model of stalagmite JF2017

Note: Dark blue dots indicate the age and depth of the U-Th dating points; error bars in dark blue indicate the dating error ($\pm 2\sigma$); solid line in red indicates the chronological model curve; solid line in blue indicates the 95% confidence limit.

3.2 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

由图 4 可知, JF2017 共测试 378 个样品,平均分辨率约为 13.2 a。石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围在 -1.44% ~ -4.92% ,平均值为 -3.40% 。石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 波动显著,其变化幅度可达至 -3.48% 。石笋

表 1 金佛洞石笋 JF2017 ^{230}Th 测年结果
Table 1 ^{230}Th dating results of stalagmite JF2017

| 样品 编号 | 深度 /mm | ^{238}U /ppb | ^{232}Th /ppt | $d^{234}\text{U}^*$ (measured) | $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (activity) | ^{230}Th Age (a B.P.) (corrected) |
|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|---|
| JF2017-1 | 23.0 | 50 639±100 | 42±39 | -118.1±1.1 | 0.361 7±0.001 0 | 58 368±235 |
| JF2017-2 | 28.5 | 35 390±71 | 163±41 | -120.6±1.1 | 0.363 7±0.001 0 | 59 050±248 |
| JF2017-3 | 42.0 | 52 946±106 | 2±39 | -118.6±1.2 | 0.365 9±0.001 0 | 59 345±244 |
| JF2017-4 | 49.0 | 50 680±59 | 98±15 | -116.1±1.0 | 0.368 8±0.000 6 | 59 728±159 |
| JF2017-5 | 61.5 | 39 643±67 | 61±33 | -113.5±1.1 | 0.371 6±0.000 9 | 60 076±217 |
| JF2017-6 | 71.5 | 38 075±48 | 182±19 | -109.8±1.1 | 0.376 1±0.000 6 | 60 681±177 |
| JF2017-7 | 73.5 | 27 942±57 | 610±47 | -110.5±0.8 | 0.377 3±0.001 1 | 61 018±261 |
| JF2017-8 | 88.5 | 57 510±98 | 32±31 | -119.4±1.1 | 0.374 6±0.000 8 | 61 339±219 |
| JF2017-9 | 93.0 | 34 514±51 | 383±26 | -116.1±1.1 | 0.378 1±0.000 7 | 61 769±204 |
| JF2017-10 | 107.5 | 49 708±94 | 91±36 | -119.5±1.1 | 0.379 0±0.001 0 | 62 332±248 |

注：衰变常数取值为 $\lambda^{230}\text{Th}=9.1577\times 10^{-6}\text{a}^{-1}$ ； $\lambda^{234}\text{U}=2.8263\times 10^{-6}\text{a}^{-1}$ ； $\lambda^{238}\text{U}=1.55125\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$ ； $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}}^{-1})\times 10^3$ ， $\delta^{234}\text{U}$ 初始值是根据 ^{230}Th 年龄获得，即 $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial value}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured value}}\times e^{\lambda^{234}\text{U}\times T}$ ；初始 ^{230}Th 年龄校正采用地壳 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 平均比值： $4.4\times 10^{-6}\pm 2.2\times 10^{-6}$ 。
Note: The value of the decay constant is $\lambda^{230}\text{Th}=9.1577\times 10^{-6}\text{a}^{-1}$ ； $\lambda^{234}\text{U}=2.8263\times 10^{-6}\text{a}^{-1}$ ； $\lambda^{238}\text{U}=1.55125\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$ ； $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}}^{-1})\times 10^3$ ， $\delta^{234}\text{U}$ initial value is obtained based on ^{230}Th age, i.e. $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial value}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured value}}\times e^{\lambda^{234}\text{U}\times T}$ ；The initial ^{230}Th age adjustment was based on the average ratio of $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ in the earth's crust: $4.4\times 10^{-6}\pm 2.2\times 10^{-6}$.

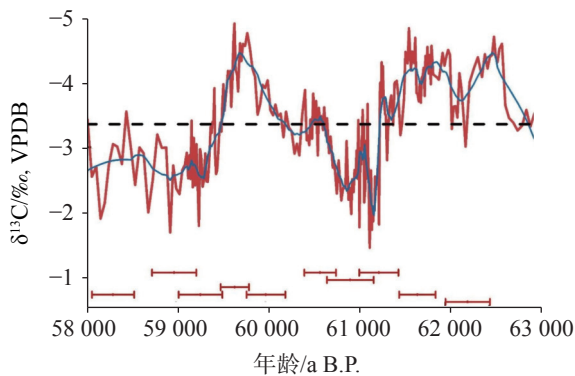


图 4 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

注：深蓝色曲线为该数据 20 点滑动平滑，黑色虚线为数据平均值，红色误差棒表示测年误差 ($\pm 2\sigma$)。

Fig. 4 $\delta^{13}\text{C}$ records of stalagmite JF2017

Note: Dark blue curve indicates that the record is smoothed using a 20-point running mean; the black dotted line indicates the average value of the data; the error bars in red represent dating errors ($\pm 2\sigma$).

JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录结果显示，在 63 000~58 000 a B.P. 时段，石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要呈负—正—负—正的变化趋势。在整个研究时段中，发现在 62 915±248~61 674±204 a B.P. 期间，石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 整体偏轻，且存在多个百年际尺度的气候震荡；在 61 811±204~61 299±219 a B.P. 时段，石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值开始逐渐偏重。此外，在 61 299±219 a B.P.~61 166±219 a B.P. 期间，石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值突然偏重至 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列中最

大值-1.44‰。在 61 270±219~60 201±217 a B.P. 时段，JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录出现了多次年际-百年际尺度的气候震荡，此阶段的石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体偏重。在 60 201±217~59 654±159 a B.P. 时段，JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐偏轻至最小值-4.92‰。而随后 59 654±159~58 012±235 a B.P. 期间，石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值波动偏重至最后稳定，但是稳定变化期间的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于平均值，且波动较明显。

4 讨论

4.1 石笋碳同位素的指示意义

在同位素平衡分馏状态下沉积形成是石笋氧碳稳定同位素能被用作指示气候变化的代理指标的前提条件^[28]。对此，从两个不同深度的生长层中钻取 10 个粉末样品。对于每一层，石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化比较小，基本保持稳定，且同位素值从中心向两侧没有逐渐增加的趋势(图 5)，此外，相关分析显示在任何层中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间都没有明显的相关性。综上所述表明，JF2017 石笋满足 Hendy 检验。另外，利用属于同一金佛山岩溶洞穴系统^[29] 的金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与同时期的羊口洞石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[9] 进行对比，结果显示两个记录具有相似的变化趋势(图 6a, 图 6b)，这表明石笋 JF2017 在沉积

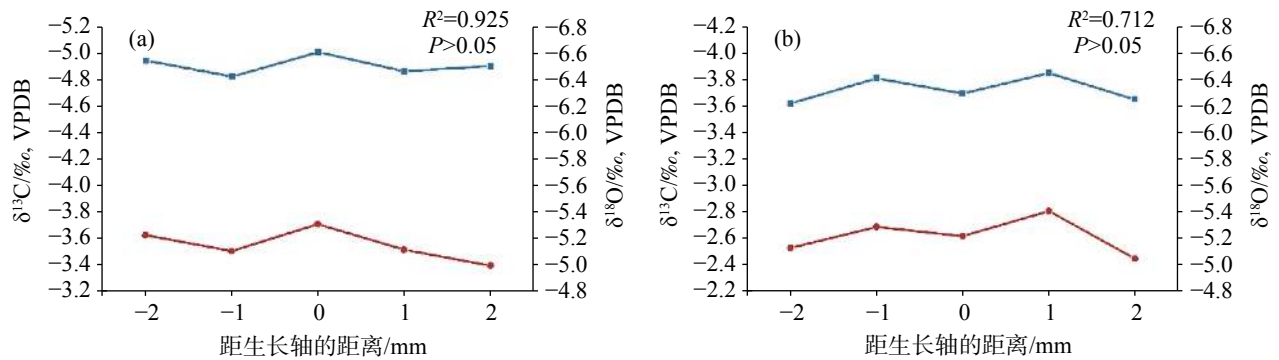


图5 石笋 JF2017 的平衡分馏检验

注: (a) 深度为 70 mm 处生长层的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$; (b) 深度为 81 mm 处生长层的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ (红色点线图为 $\delta^{13}\text{C}$; 深蓝色点线图为 $\delta^{18}\text{O}$)。

Fig. 5 Equilibrium fractionation tests of stalagmite JF2017.

Note: (a) $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values with a depth of 70 mm; (b) $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values with a depth of 81 mm (red dotted line: $\delta^{13}\text{C}$; dark blue dotted line: $\delta^{18}\text{O}$).

过程中没有发生明显的动力分馏。因此,石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录符合同位素平衡分馏的条件,可作为重建古气候和古环境的有效代理指标之一。

尽管石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候指示意义,因其气候环境和洞穴过程的复杂因素影响,限制了 $\delta^{13}\text{C}$ 在古气候和古环境重建中的广泛应用,但关于石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的生态环境指示意义却比较明确。经研究表明,大气 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[30-32] 的变化可通过改变土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响洞穴碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;地表植被类型(如 C3/C4 植物)和地表生物量^[32-33,19],不同植被类型对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响最大。而土壤微生物生产力^[19,34-35]、土壤水滞留时间^[36-37]以及土壤溶液对围岩碳酸盐的溶解能力^[38]、表层岩溶系统的开放程度^[6,39-40]、水-岩相互作用强度^[33,35,41]等通过洞穴系统和洞穴上覆土壤 CO_2 的同位素特征变化影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的值。洞穴内滴水 CO_2 脱气^[42]及方解石前期沉积(prior calcite precipitation, PCP)^[43]、洞穴通风效应^[44]与蒸发过程^[42,45]等作用的增强会使石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正^[40]。吴尧等^[46]研究重庆羊口洞石笋记录表明,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响因素包括与温度和降水变化密切相关的生物有机过程,还包括地下水运移等无机过程。Li 等^[47]对河南鸡冠洞长达十年的洞穴监测研究表明, $\delta^{13}\text{C}$ 在此运移过程中会不断富集,洞穴滴水与次生化学沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 信号继承了土壤二氧化碳变化的信号,可以记录地表植被、温度和降水气候和环境因素的变化过程。此外,王宝艳等^[48]研究表明,金佛洞 J119 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录可能反映洞穴所在区域的植被状况以及类型,进而间接响应当地的季风气候变化。另外,相邻区域羊子洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化反映了亚洲

夏季风控制下区域生态环境的变化^[21]。Wu 等^[21]研究并进一步表明,YZ1 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 强相关性特征是由共同的驱动因素引起的。石笋记录和洞穴监测记录表明,气温和降水所控制的区域水文气候会对地表植被类型及密度、土壤微生物生产力以及土壤 CO_2 产率产生深刻影响^[49-50]。

综上所述,在相对干燥的气候条件下,植被生物量和洞穴上方的植被类型比值减少,土壤中生物成因的 CO_2 产率降低,渗透水在岩溶裂隙中的滞留时间越长,这些因素可能导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对偏重。根据石笋 JF2017 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与羊口洞石笋 JFYK7 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比发现(图 6a, 图 6b),两者具有较好的相似性,当石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重,表明亚洲夏季风减弱,而其对应的石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值显示偏重阶段。因此,本研究认为石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 可反映区域的水文气候变化所引起的生态环境变化。

4.2 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 HS6 期间的气候环境演变

JF2017 石笋在研究时段 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化可分为四个阶段(图 4),第一阶段是 63 000~61 280 a B.P., $\delta^{13}\text{C}$ 整体上在小于平均值(-3.40‰)的偏轻状态下震荡变化,其中在 61 811±204~61 369±219 a B.P.期间,石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录逐渐偏重。在这一阶段期间,属于同一个岩溶洞穴系统的羊口洞石笋 JFYK7 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示^[9](图 6b),在 61 506~60 969 a B.P.之间, $\delta^{18}\text{O}$ 值迅速增加了 1.6‰,表明 ASM 突然减弱;且石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 的突然偏重是由于 H6 事件导致的弱 ASM 条件的开始,并把时间限制在 61 506±256 a B.P.。为进一步对比分析,确定石笋 JF2017 与石笋 JFYK7

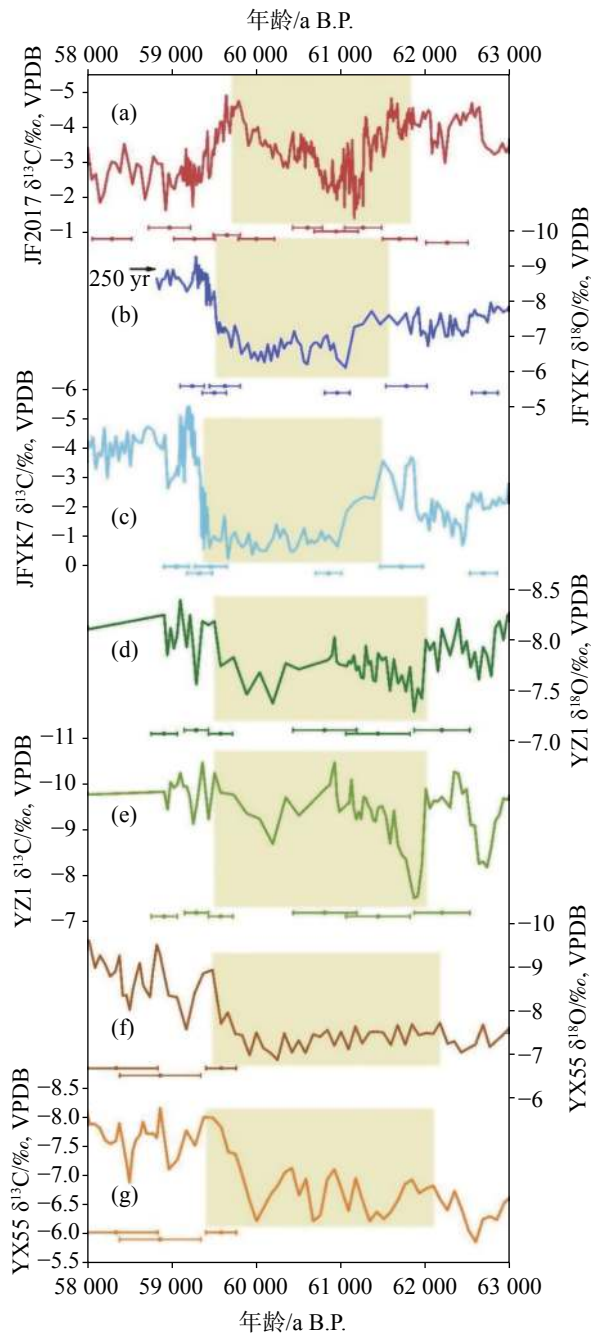


图 6 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与其他石笋记录对比

注: (a) 金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ (本研究); (b) 和 (c) 羊口洞石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[9]; (d) 和 (e) 羊子洞石笋 YZ1 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[21]; (f) 和 (g) 永兴洞石笋 YX55 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[23]; 黄色阴影部分表示 H6 发生的时间段。

Fig. 6 Comparison of JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record with other stalagmite records

Note: (a) JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ in Jinfo Cave; (b) and (c) JFYK7 stalagmites $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ ^[9] in Yangkou Cave; (d) and (e) YZ1 stalagmites $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ ^[21] in Yangzi Cave; (f) and (g) YX55 stalagmites $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ ^[23] in Yongxing Cave; yellow shadow: the time when H6 occurred.

记录之间的相位关系,对羊口洞石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 记录进行误差范围内的 250 a 后撤 (图 6b),在 61 873~

60 969 a B.P.期间,石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 记录偏重约 1.72‰; 对应在 61 604~61 360 a B.P.期间,石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录偏重约 2.05‰。另外,属于相邻区域的羊子洞石笋 YZ1 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也显示 (图 6d),在 62 012 ± 330 a B.P.时 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐偏重,表明 ASM 逐渐减弱^[21]。此外,石笋 YZ1 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示在 MIS3 时期有两次偏正阶段对应于 H4 和 H5 事件;在 MIS3 到 MIS2 的过渡过程中,石笋 YZ1 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的另外两个显著偏重阶段与 H3 和 H2 事件有很好的一致性^[21],说明当石笋碳同位素偏重阶段对应 H 事件。永兴洞石笋 YX55 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[23] 也显示在 62 180~59 590 a B.P. 期间 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重,表明 ASM 减弱。另外,其 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示^[23],分别在 48 057 a B.P.、56 073 a B.P.和 61 932 a B.P.有三次正向偏移,对应于 3 次 H 事件,其中 61 932 a BP 对应 H6 事件。

综上所述,在 61 811 ± 204 ~61 369 ± 219 a B.P.期间,随着亚洲夏季风开始减弱,石笋 JF2017 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录逐渐偏重,表明降水减少,区域水文气候变化影响地表植被、土壤微生物活性和土壤 CO_2 产量,从而使得洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 通过植被和生物量等对气候和环境变化敏感,标志 H6 事件开始。第二阶段为 61 280~60 201 a B.P.,该阶段的主要特征是 $\delta^{13}\text{C}$ 集中在大于平均值 (-3.40‰) 的基础上波动变化。在 61 166 a BP 时,出现了石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 突然偏重,达到最大值 -1.44‰。这一部分的石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示 (图 6b),在 61 506~60 969 a B.P.出现突然偏重,表明 ASM 突然减弱,降水减少;石笋 YZ1 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也表明 (图 6d),在 60 932 ± 376 a B.P.出现偏正,亚洲夏季风减弱,影响区域水文气候条件,造成地表植被受到严重影响,生态环境恶化。随后在 61 160~60 201 a B.P.期间石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示 (图 6a),在短时间内出现多次反弹,出现逐渐偏轻趋势,但变化范围小于平均值且在附近波动。此时相邻区域的石笋 YZ1 的氧碳同位素记录也显示逐渐向偏轻趋势波动变化 (图 6d,图 6e)。因此,推测在该时段由于季风强度较低和气候寒冷,区域蒸发量减少,导致区域气候相对偏冷湿变化。第三阶段是 60 201~59 507 a B.P.期间, $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐偏轻 (小于平均值 -3.40‰) 并波动变化,在 59 654 ± 159 a B.P.时出现 $\delta^{13}\text{C}$ 最大负值 -4.92‰,且发现石笋 JFYK7、YZ1 和 YX55 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (图 6b,图 6d,图 6f),在这一期间氧同位素逐渐偏轻,表明亚洲夏季风逐渐增强,气候环境缓慢向温暖湿润转变。最后为 59 507~58 000 a

B.P., 该时段石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体大于平均值波动变化 (图 4)。另外, 根据石笋 JFYK7 记录显示 H6 事件的结束时间 $59\,402 \pm 191$ a B.P., 对比 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录, 显示北大西洋 H6 事件对应中国西南季风区 $61\,811 \pm 204 \sim 59\,716 \pm 159$ a B.P. 时段, 整个事件持续大约 2 095 a。石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值以 $60\,900$ a B.P. 左右为中心, 以先逐渐偏重后又缓慢偏轻的趋势, 整体呈现出 V 字形结构, 这种结构在其他石笋记录^[7,51-52] 的 H 事件中比较常见。

根据金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 与其他洞穴石笋记录显示 (图 6), 金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 H6 事件期间与其他气候记录具有可比性。首先, 金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与其他记录在 H6 事件期间显示整体偏重。根据金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围在 $-1.44\text{‰} \sim -4.92\text{‰}$ (图 6a), 羊口洞石笋 JFYK7 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-0.28\text{‰} \sim -5.48\text{‰}$ ^[9] (图 6c), 羊子洞 YZ1 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 $-7.56\text{‰} \sim -10.52\text{‰}$ ^[21] (图 6e), 永兴洞 YX55 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-5.48\text{‰} \sim -8.04\text{‰}$ ^[23] (图 6g), 发现其中 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ (图 6a) 与 JFYK7 $\delta^{13}\text{C}$ 记录 (图 6c) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较接近, 但是两者内部结构不太一致, 可能是由于年代误差和分辨率不同而造成的。此外, 两个石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录也有共同的特点: (1) 两个石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 H6 事件期间整体明显偏重 (图 6a, 图 6c); (2) 虽然两个记录在 H6 事件期间存在偏差, 但两者在 H6 事件的持续时间在误差范围内大致相同。当然可能还存在两个洞穴的洞穴滴水稳定同位素在运移过程中的变化差异而造成记录的不同。因此, 关于这一结果还需要其他高分辨率记录以及洞穴监测结果等进一步验证。根据羊子洞石笋 YZ1 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 对比, 在误差范围内两者结构较相似, 在 H6 事件开始阶段都有突然偏重至最大值后有短时间尺度的偏轻趋势。永兴洞石笋记录与 JF2017 石笋对比, 虽然在 H6 事件开始时 YX55 $\delta^{13}\text{C}$ 记录偏重后又波动变化, 但其幅度不太明显。在 H6 结束期间, YZ1 $\delta^{13}\text{C}$ 记录和 YX55 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 具有一样偏轻的趋势。另外, 永兴洞和羊子洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 H6 事件期间也显示偏重趋势, 但与 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比较, 两者的变化范围显示偏轻, 这种差异可能与年代误差或分辨率不同有关, 也有可能是跟自然地理位置和洞穴环境有很大关系。由于金佛洞海拔较高 (2 080 m), 上覆土壤厚度等差异, 会造成一系列地表至洞穴内部的沉积过程受到影

响, 如气温低、渗流水流动较缓慢, 溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon) 与土壤 CO_2 之间碳元素不能充分交换, 使得滴水或沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏大, 会造成石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体偏重。在 H6 事件发生时气候较寒冷, 由于海拔高、气温低等原因对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响不大。金佛洞通风效应差, 动力分馏作用相对较小, JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在一定程度上受到了外界季风气候环境变化的影响。

在 H6 期间中国西南地区在亚洲夏季风减弱的背景下^[9,21], 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 $61\,811 \sim 60\,848$ a B.P. 期间开始先逐渐偏重至最大值, 随后发生短时间尺度的波动变化, 最后在 $60\,848 \sim 59\,716$ a B.P. 期间缓慢偏轻至 H6 事件结束。在 H6 事件主体部分, 特别在 $61\,312 \sim 61\,166$ a B.P. 期间, JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 显著偏重, 在 $61\,166 \pm 172$ a B.P. 可达最大值 -1.44‰ , 随后又突然偏轻至小于平均值, 开始波动震荡, 在 $60\,959 \pm 261$ a B.P. 左右再次偏重达到 -1.96‰ 。在这一期间, 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体变化范围在小于平均值或接近平均值附近波动。因此, 可推测在 H6 事件开始时区域水文条件恶化, 气候由湿转干, 但开始阶段结束后, 该地区水文条件逐渐改善, 气候变得湿润。另外, 在 H6 事件期间石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录也存在百年-千年尺度的震荡变化 (图 4), 表示石笋 JF2017 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对区域的季风气候变化比较敏感。在 $61\,299$ a B.P. $\sim 61\,166$ a B.P. 期间, 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 存在百年际尺度的显著偏重, 说明在短时间尺度内, 导致本区域生态环境受到明显影响。但随后又快速震荡波动至小于平均值, 这可能暗示本区域生态系统虽然受到 H6 事件期间降温和季风降雨减少的影响, 导致区域水文条件以及植被密度有一定程度的响应, 但因处于亚热带季风区, 生态系统恢复比较快。

4.3 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与全球气候记录对比

先前研究表明, 在 Heinrich 事件期间, 大量的冰筏碎屑和淡水注入北大西洋, 造成北大西洋气候快速变冷^[2-4]。此外, Heinrich 事件导致大气-海洋系统快速重组, 对全球的气候变化产生不同程度的影响。在 H6 事件开始前, 北大西洋经向翻转环流 (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) 处于活跃状态, 热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 的经向位置也处于偏北的位置。此时太阳辐射处于上升期^[53] (图 7c), 热量不断从热带海洋向北半

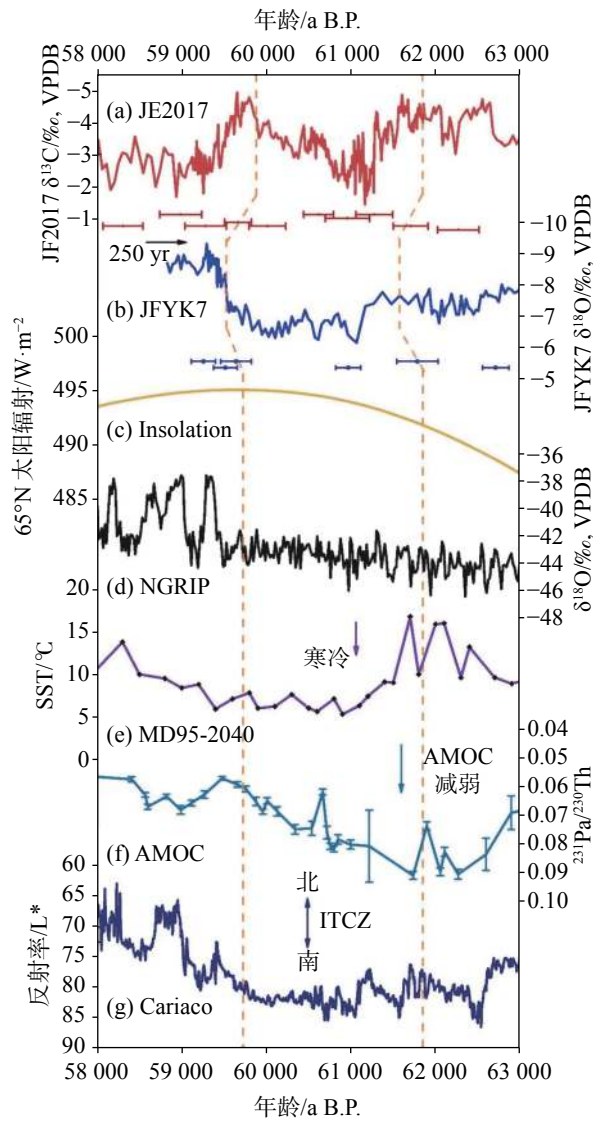


图 7 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与全球其他气候记录对比

注: (a) 金佛洞 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录 (本研究); (b) 羊口洞 JFYK7 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[9]; (c) 65°N 夏季太阳辐射^[53]; (d) 格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[54]; (e) 北大西洋 MD95-2040 沉积岩芯 SST 记录^[55]; (f) 北大西洋 KNR191-CDH19 沉积岩芯 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录 (误差棒表示年代误差)^[56]; (g) 卡里亚科盆地 MD03-2621 沉积岩芯反射率记录^[57]; 橙色虚线表示 H6 的开始和结束。

Fig. 7 Comparison of JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record with other climate records in the rest of world

Note: (a) JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ in Jinfo Cave; (b) JFYK7 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ in Yangkou Cave^[9]; (c) summer solar radiation at 65°N^[53]; (d) ice core $\delta^{18}\text{O}$ record in Greenland^[54]; (e) SST record of MD95-2040 sediment core in North Atlantic Ocean^[55]; (f) $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ record of KNR191-CDH19 sediment core in North Atlantic Ocean (error bar: age error)^[56]; (g) reflectivity of MD03-2621 sediment core in Cariaco Basin^[57]; dotted line in orange: the beginning and the end of H6.

球高纬地区输送, 大西洋海表温度 (sea surface temperature, SST) 升高^[55] (图 7e), 这两个因素可能加速了北半球高纬地区冰盖的融化^[58-60]。当 H6 事件

开始时, 大量浮冰和冰盖融水进入北大西洋, 导致北大西洋海表温度 (SST) 在 61 700 a B.P. 附近突然大幅降低 (图 7e); 北大西洋沉积岩芯 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录^[56] 显示, 在 61 900 a B.P. 时 AMOC 强度突然开始减弱至 61 740 a B.P. 达到最弱, 其对应时段石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正约 0.9‰。随后, AMOC 强度又开始增强, 而对应 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负约 1.2‰ (图 7a), JFYK7 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录偏轻约 0.5‰ (图 7b), 说明在误差范围内 JF2017 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与北大西洋深海沉积记录具有相似性。在 61 800 a B.P. 之前, AMOC 强度经历一次较大幅度的减弱^[61-62], 后又开始增强 (图 7f)。此外, 卡里亚科盆地岩芯反射率记录^[57] (图 7g) 显示 ITCZ 迅速南移。

在 H6 (61 811±204 a B.P.~59 716±159 a B.P.) 开始时, 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示有短暂的偏重, 后又呈偏轻的趋势 (图 7a); AMOC 强度迅速减弱, 然后又开始缓慢增强; 卡里亚科盆地岩芯反射率记录显示^[57], ITCZ 逐渐向南移动, 然后又开始缓慢向北移动。根据北大西洋沉积岩芯 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录^[56] 显示, 在 60 670 a B.P. 附近发生了一次突变, AMOC 随后又恢复了逐渐增强的趋势 (图 7f)。而卡里亚科盆地岩芯反射率记录也显示存在一个“峰”, 表明 ITCZ 短暂快速北移后又迅速南移 (图 7g)。而此时, 对应石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录也呈现了约 400 a 的逐渐偏轻趋势, 但未超过平均值范围, 随后在 60 442 a B.P. 左右出现迅速偏重 (图 7a)。在对应期间石笋 JFYK7 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示逐渐偏轻, 随后又在 60 493 a B.P. 附近出现迅速偏重。在 H6 事件结束期间, AMOC 强度持续增强, 在其影响下, ITCZ 也随着持续向北移动, 此时石笋 JFYK7 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显示逐渐偏轻, 表明亚洲夏季风逐渐增强, 石笋 JF2017 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录也显示开始逐渐偏轻。

综上所述, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录内部存在波动震荡, 而 ITCZ 和 AMOC 也存在类似现象, 说明在 H6 事件期间石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录百年际尺度的变化可能与 ITCZ 移动和 AMOC 变化相关。在末次冰期期间北半球属于寒冷时期, 因此当 H6 事件开始时, 格陵兰冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录没有显著变化^[54] (图 7d)。而在 H6 事件结束时, 格陵兰冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录虽然有大幅度的正向偏移, 但是比石笋记录滞后了大约 300 a, 可能是年代误差造成的 (图 7d)。Cheng 等^[63] 研究表明越来越多来自亚洲夏季风地区的高分辨率洞穴记录显示,

包括新仙女木 (Younger Dryas, YD) 事件在内的千年尺度事件的发生和终止在某种程度上更类似于南极的逐渐变化, 而不是格陵兰气候特征的突然变化。因此, H6 事件的发生和终止可能也与南极的逐渐变化有关。

5 结 论

来自中国西南重庆南川区金佛山金佛洞石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示, 石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 61 811±204 a B.P.~59 716±159 a B.P.时段显著偏重, 此时季风减弱, 气候环境受到影响, 对应北大西洋 Heinrich 6 事件。在 H6 期间, 石笋碳同位素记录在 61 811~60 848 a B.P.期间开始先逐渐偏重至最大值, 随后发生短时间尺度的波动变化, 最后在 60 848~59 716 a B.P.期间缓慢偏轻至 H6 事件结束。与中国季风区其他石笋同位素记录对比分析, 本区域气候环境虽受到 H6 事件期间降温和季风降雨减少的影响, 导致区域水文条件及植被密度有一定程度的响应, 但因处于亚热带季风区, 季风气候调节使生态系统恢复较快。对比分析石笋 JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与全球其他记录, 石笋碳同位素记录的变化可能会受到 ITCZ 和 AMOC 响应变化的影响, 在 H6 事件期间石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的百年际尺度季风气候震荡可能与 ITCZ 和 AMOC 相关。

参考文献

- [1] W Dansgaard, S J Johnsen, H B Clausen, D Dahl-Jensen, N S Gundestrup, C U Hammer, C S Hvidberg, J P Steffensen, A E Sveinbjörnsdóttir, J Jouzel, G Bond. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [2] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [3] Gerard Bond, Hartmut Heinrich, Wallace Broecker, Laurent Labeyrie, Jerry McManus, John Andrews, Sylvain Huon, Ruediger Jantschik, Silke Clasen, Christine Simet, Kathy Tedesco, Mieczysława Klas, Georges Bonani, Susan Ivy. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period[J]. *Nature*, 1992, 360(6401): 245-249.
- [4] Wallace Broecker, Gerard Bond, Mieczysława Klas, Elizabeth Clark, Jerry McManus. Origin of the northern Atlantic's Heinrich events[J]. *Climate Dynamics*, 1992, 6(3-4): 265-273.
- [5] Gerard Bond, Wallace Broecker, Sigfus Johnsen, Jerry McManus, Laurent Labeyrie, Jean Jouzel, Georges Bonani. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice[J]. *Nature*, 1993, 365(6442): 143-147.
- [6] Ian J Fairchild, Claire L Smith, Andy Baker, Lisa Fuller, Christoph Spötl, Dave Matthey, Frank McDermott, E I M F. Modification and preservation of environmental signals in speleothems[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1-4): 105-153.
- [7] Zhang Weihong, Wu Jiangying, Wang Yi, Wang Yongjin, Cheng Hai, Kong Xinggong, Duan Fucui. A detailed East Asian monsoon history surrounding the 'Mystery Interval' derived from three Chinese speleothem records[J]. *Quaternary Research*, 2014, 82(1): 154-163.
- [8] Cheng Hai, R Lawrence Edwards, Ashish Sinha, Christoph Spötl, Yi Liang, Chen Shitao, Megan Kelly, Gayatri Kathayat, Wang Xianfeng, Li Xianglei, Kong Xinggong, Wang Yongjin, Ning Youfeng, Zhang Haiwei. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [9] Zhang Taotao, Li Tingyong, Cheng Hai, R Lawrence Edwards, Shen Chuanchou, Christoph Spötl, Li Hongchun, Han Liyin, Li Junyun, Huang Chunxia, Zhao Xin. Stalagmite-inferred centennial variability of the Asian summer monsoon in Southwest China between 58 and 79 ka BP[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 160: 1-12.
- [10] Cheng Hai, Xu Yao, Dong Xiyu, Zhao Jingyao, Li Hanying, Jonathan Baker, Ashish Sinha, Christoph Spötl, Zhang Haiwei, Du Wenjing, Zong Baoyun, Jia Xue, Gayatri Kathayat, Liu Dianbing, Cai Yanjun, Wang Xianfeng, Nicolás M Strikis, Francisco W Cruz, Augusto S Auler, Anil K Gupta, Raj Kumar Singh, Sonu Jaglan, Som Dutt, Liu Zhengyu, R Lawrence Edwards. Onset and termination of Heinrich Stadial 4 and the underlying climate dynamics[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1-11.
- [11] Liang Yijia, Zhao Kan, Wang Yongjin, R Lawrence Edwards, Cheng Hai, Shao Qingfeng, Chen Shitao, Wang Jinyu, Zhu Junji. Different response of stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ to millennial-scale events during the last glacial, evidenced from Huangjin cave, northern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 276: 107305.
- [12] 李廷勇, 袁道先, 李红春, 杨琰, 王建力, 王昕亚, 李俊云, 覃嘉铭, 张美良, 林玉石. 重庆新崖洞XY2石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的57~70 ka BP古气候变化及其对D-O和H事件的反映[J]. *中国科学D辑*, 2007, 37(6): 798-803.
LI Tingyong, YUAN Daoxian, LI Hongchun, YANG Yan, WANG Jianli, WANG Xinya, LI Junyun, QIN Jiaming, ZHANG Meiliang, LIN Yushi. Paleoclimatic changes recorded by $\delta^{18}\text{O}$ from XY2 stalagmite in Xinya cave Chongqing, China at 57~70 ka BP and their reflection on D-O and H events[J]. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 2007, 37(6):798-803.
- [13] 彭玲莉, 李廷勇. 岩溶洞穴滴水环境监测研究进展[J]. *中国岩*

- 溶, 2012, 31(3): 316-326.
- PENG Lingli, LI Tingyong. Research progress of monitoring for dripping water environment in karst caves[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 316-326.
- [14] 黄春霞, 李廷勇, 韩立银, 李俊云, 袁娜, 王海波, 张涛涛, 赵鑫, 周菁俐. 重庆芙蓉洞洞穴 DIC- $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 299-306.
- HUANG Chunxia, LI Tingyong, HAN Liyin, LI Junyun, YUAN Na, WANG Haibo, ZHANG Taotao, ZHAO Xin, ZHOU Jingli. Variations of cave water DIC- $\delta^{13}\text{C}$ and its influencing factors in Furong cave, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(3): 299-306.
- [15] 吴夏, 潘谋成, 殷建军, 汪智军, 朱晓燕, 杨会, 张美良, 曹建华. 桂林凉风洞洞穴空气及滴水水化学对区域环境的响应[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 513-520.
- WU Xia, PAN Moucheng, YIN Jianjun, WANG Zhijun, ZHU Xiaoyan, YANG Hui, ZHANG Meiliang, CAO Jianhua. Response of cave air and hydrogeochemistry of drip water to local climate in the Liangfeng cave, Guilin City[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 513-520.
- [16] 顾宁, 吴江滢. 辽宁暖洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的古气候环境意义初探[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2): 107-114.
- GU Ning, WU Jiangying. Paleoclimate significance of $\delta^{13}\text{C}$ in stalagmite from Nuanhe cave, Liaoning[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(2): 107-114.
- [17] 李廷勇, 李红春, 袁道先, 杨琰, 王健力, 王昕亚, 李俊云, 覃嘉铭, 张美良, 林玉石. 重庆新崖洞 XY6 石笋 4.5ka 以来高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的气候变化[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 95-100.
- LI Tingyong, LI Hongchun, YUAN Daoxian, YANG Yan, WANG Jianli, WANG Xinya, LI Junyun, QIN Jiaming, ZHANG Meiliang, LIN Yushi. A 4500-year high-resolution climatic record from a stalagmite in Xinya cave, Chongqing, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(2): 95-100.
- [18] 黄帆, 杨勋林, 吕春艳, 李辰丝, 张月明. 重庆羊子洞高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 65~90ka BP 气候变化[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 166-173.
- HUANG Fan, YANG Xunlin, LV Chunyan, LI Chensi, ZHANG Yueming. A high resolution stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record about 65~90 ka BP from Yangzi cave, Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(5): 166-173.
- [19] Genty D, Blamart D, Ouahdi R, Gilmour M, Baker A, Jouzel J, Van-Exter Sandra. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in Western Europe from stalagmite data[J]. *Nature*, 2003, 421(6925): 833-837.
- [20] Wu J Y, Wang Y J, Cheng H, Kong X G, Liu D B. Stable isotope and trace element investigation of two contemporaneous annually-laminated stalagmites from Northeastern China surrounding the "8.2 ka event"[J]. *Climate of the Past Discussions*, 2012, 8(5): 1591-1614.
- [21] Wu Yao, Li Tingyong, Yu Tsailuen, Shen Chuanchou, Chen Chaojun, Zhang Jian, Li Junyun, Wang Tao, Huang Ran, Xiao Siya. Variation of the Asian summer monsoon since the last glacial-interglacial recorded in a stalagmite from Southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 234: 106261.
- [22] 吴江滢, 陈骏, 汪永进, 程海. 南京汤山石笋高分辨率氧-碳同位素记录对气候事件的快速响应[J]. 科学通报, 2001, 46(15): 1307-1311.
- WU Jiangying, CHEN Jun, WANG Yongjin, CHENG Hai. Fast response of high resolution oxygen-carbon isotope record by stalagmites in Tangshan, Nanjing to climate event[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(15): 1307-1311.
- [23] Wang Meng, Chen Shitao, Wang Yongjin, Zhao Kan, Wang Xianfeng, Liang Yijia, Wang Zhenjun, Zhang Zhenqiu, Chen Gongzhe. Stalagmite multi-proxy evidence of wet and dry intervals in the middle Yangtze Valley during the last glacial period[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 586: 110764.
- [24] Jia Wei, Zhang Pingzhong, Zhang Leilei, Li Xinhu, Gao Tao, Wang Haichuan, Zhang Haiwei, Li Hanying, Cheng Hai, R Lawrence Edwards. Highly resolved $\delta^{13}\text{C}$ and trace element ratios of precisely dated stalagmite from northwestern China: Hydroclimate reconstruction during the last two millennia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 291: 107473.
- [25] Huang Wei, Dong Jinguo, Shao Qingfeng, Duan Fucui, Wang Yi. Strong coupling of the East Asian summer monsoon and hydroclimate footprints during 53~47 ka[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 597: 111003.
- [26] Wang Zhenjun, Chen Shitao, Wang Yongjin, Zhao Kan, Liang Yijia, Li Xianglei, Zhang Jingwei, Yang Shaohua, Zhang Zhenqiu, Chen Gongzhe, Zhai Xiumin, Cheng Hai, R Lawrence Edwards. Climatic implication of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ in the middle reaches of the Yangtze River since the Last Glacial Maximum and coupling with $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 608: 111290.
- [27] Scholz D, Hoffmann D L. StalAge-An algorithm designed for construction of speleothem age models[J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(3-4): 369-382.
- [28] 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.
- [29] 张任, 朱学稳, 韩道山, 张远海, 房峰保. 重庆市南川金佛山岩溶洞穴发育特征初析[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 196-211.
- ZHANG Ren, ZHU Xuewen, HAN Daoshan, ZHANG Yuanhai, FANG Fengbao. Preliminary study on karst caves of Mt. Jinfo, Nanchuan, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17(3): 196-211.
- [30] Baskaran M, Krishnamurthy R V. Speleothems as proxy for the carbon isotope composition of atmospheric CO_2 [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(24): 2905-2908.

- [31] Daniel O Breecker. Atmospheric pCO₂ control on speleothem stable carbon isotope compositions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 458: 58-68.
- [32] 李红春, 顾德隆, Lowell D Stott, 袁道先, 陈文寄, 李铁英. 北京石花洞石笋500年来的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与古气候变化及大气CO₂浓度变化的关系[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(4): 285-295.
LI Hongchun, KU Tehlung, Lowell D Stott, YUAN Daoxian, CHEN Wenji, LI Tiejing. Interannual-resolution $\delta^{13}\text{C}$ record of stalagmites as proxy for the changes in precipitation and atmospheric CO₂ in Shihua cave, Beijing[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(4): 285-295.
- [33] 李彬, 袁道先, 林玉石, 覃嘉铭, 张美良. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2000, 30(1): 81-87.
LI Bin, YUAN Daoxian, LIN Yushi, QIN Jiaming, ZHANG Meiliang. Study on precipitation, cave dripping and carbonate oxygen carbon isotopes in modern caves in Guilin and their environmental significance[J]. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 2000, 30(1): 81-87.
- [34] Tan Liangcheng, Zhang Haiwei, Qin Shijiang, An Zhisheng. Climatic and anthropogenic impacts on $\delta^{13}\text{C}$ variations in a stalagmite from Central China[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2013, 24(3): 333-343.
- [35] Andy Baker, Emi Ito, Peter L Smart, Reed F McEwan. Elevated and variable values of ^{13}C in speleothems in a British cave system[J]. *Chemical Geology*, 1997, 136(3-4): 263-270.
- [36] Williams P W, King D N T, Zhao J X, Collerson K D. Speleothem master chronologies: Combined Holocene ^{18}O and ^{13}C records from the North Island of New Zealand and their palaeoenvironmental interpretation[J]. *The Holocene*, 2004, 14(2): 194-208.
- [37] 孔兴功, 汪永进, 吴江滢, L R Edwards. 南京葫芦洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 对冰期气候的复杂响应与诊断[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2005(11): 1047-1052.
KONG Xinggong, WANG Yongjin, WU Jiangying, L R Edwards. Complex response and diagnosis to glacial climate by $\delta^{13}\text{C}$ in stalagmite from Hulu cave, Nanjing[J]. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 2005(11): 1047-1052.
- [38] Andy Baker, Rob Wilson, Ian J Fairchild, Joerg Franke, Christoph Spötl, Dave Matthey, Valerie Trouet, Lisa Fuller. High resolution $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records from an annually laminated Scottish stalagmite and relationship with last millennium climate[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 79(3-4): 303-311.
- [39] Coplen T B, Winograd I J, Landwehr J M, Riggs A C. 500,000-year stable carbon isotopic record from Devils Hole, Nevada[J]. *Science*, 1994, 263(5145): 361-365.
- [40] 孔兴功. 石笋氧碳同位素古气候代用指标研究进展[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(2): 165-170.
KONG Xinggong. Advance in study of oxygen and carbon isotope variations in cave stalagmites as palaeo-climate proxies[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15(2): 165-170.
- [41] Denniston R, DuPree M, Dorale J, Asmerom Y, Polyak V, Carpenter S. Episodes of late Holocene aridity recorded by stalagmites from Devil's Icebox Cave, central Missouri, USA[J]. *Quaternary Research*, 2007, 68(1): 45-52.
- [42] Silvia Frisia, Ian J Fairchild, Jens Fohlmeister, Renza Miorandi, Christoph Spötl, Andrea Borsato. Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(2): 380-400.
- [43] George A Brook, Brooks B Ellwood, L Bruce Railsback, James B Cowart. A 164 ka record of environmental change in the American Southwest from a Carlsbad Cavern speleothem[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237(2-4): 483-507.
- [44] Tremaine D M, Froelich P N, Wang Y. Speleothem calcite formed in situ: Modern calibration of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(17): 4929-4950.
- [45] Lambert W J, Aharon P. Controls on dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothem $\delta^{13}\text{C}$ assessments[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(3): 753-768.
- [46] 吴尧. 重庆羊口洞石笋记录的Heinrich event 4期间中国西南地区气候和环境的演变[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
WU Yao. Climate and environmental changes in Southwest China during the Heinrich Event 4 recorded by a stalagmite in Yangkou cave, Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [47] Li Yidong, Yang Yan, Jiang Xiuyang, Zhao Jingyao, Sun Zhe, Shi Xiao, Tian Ning, Yang Yunyue, Li Jiancang, Duan Junwei. The transport mechanism of carbon isotopes based on 10 years of cave monitoring: Implications for paleoclimate reconstruction [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592:125841.
- [48] 王宝艳, 杨勋林, 孙喜利, 史志超, 刘睿恺. 重庆金佛山石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的全新世千年尺度气候振荡[J]. *地球与环境*, 2019, 47(1): 1-9.
WANG Baoyan, YANG Xunlin, SUN Xili, SHI Zhichao, LIU Ruikai. The millennial time scale climate oscillation in the holocene revealed by $\delta^{13}\text{C}$ of stalagmite from the Jinfo cave, Chongqing[J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(1): 1-9.
- [49] Cosford Jason, Qing Hairuo, Matthey Dave, Eglinton Bruce, Zhang Meiliang. Climatic and local effects on stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ values at Lianhua cave, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(1-2): 235-244.
- [50] Liu Dianbing, Wang Yongjin, Cheng Hai, R Lawrence Edwards, Kong Xinggong, Li TingYong. Strong coupling of centennial-scale changes of Asian monsoon and soil processes derived from stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records, Southern China[J]. *Quaternary Research*, 2016, 85(3): 333-346.
- [51] Li Dong, Tan Liangcheng, Cai Yanjun, Jiang Xiuyang, Le Ma, Cheng Hai, R Lawrence Edwards, Zhang Haiwei, Gao Yongli,

- An Zhisheng. Is Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ solely controlled by the Indian summer monsoon?[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5), 2969-2983.
- [52] Liang Yijia, Zhao Kan, R Lawrence Edwards, Wang Yongjin, Shao Qingfeng, Zhang Zhenqiu, Zhao Bin, Wang Quan, Cheng Hai, Kong Xinggong. East Asian monsoon changes early in the last deglaciation and insights into the interpretation of oxygen isotope changes in the Chinese stalagmite record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 250: 106699.
- [53] Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A C M, Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [54] North Greenland Ice Core Project Members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period[J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 147-151.
- [55] E Salgueiro, A H L Voelker, L de Abreu, F Abrantes, H Meggers, G Wefer. Temperature and productivity changes off the western Iberian margin during the last 150 ky[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(5-6): 680-695.
- [56] Henry L G, McManus J F, Curry W B, Roberts N L, Piotrowski A M, Keigwin L D. North Atlantic ocean circulation and abrupt climate change during the last glaciation[J]. *Science*, 2016, 353(6298): 470-474.
- [57] Deplazes Gaudenz, Lückge Andreas, Peterson Larry C, Timmermann Axel, Hamann Yvonne, Hughen Konrad A, Röhl Ursula, Laj Carlo, Cane Mark A, Sigman Daniel M, Haug Gerald H. Links between tropical rainfall and North Atlantic climate during the last glacial period[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 213-217.
- [58] McManus J F, Francois R, Gherardi J M, Keigwin L D, Brown-Leger S. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes[J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 834-837.
- [59] Bassis J N, Petersen S V, Mac Cathles L. Heinrich events triggered by ocean forcing and modulated by isostatic adjustment[J]. *Nature*, 2017, 542(7641): 332-334.
- [60] Zhang Xin, Qiu Wanyin, Jiang Xiuyang, Hu Hsunming, Xiao Haiyan, Cai Binggui, Shen Chuanchou. Three-phase structure of the East Asia summer monsoon during Heinrich Stadial 4 recorded in Xianyun cave, Southeastern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 274: 107267.
- [61] Bond G C, Lotti R. Iceberg discharges into the North Atlantic on Millennial Time Scales during the Last Glaciation[J]. *Science*, 1995, 267(5200): 1005-1010.
- [62] Barker S, Chen J, Gong X, Jonkers L, Knorr G, Thornalley D. Icebergs not the trigger for North Atlantic cold events[J]. *Nature*, 2015, 520(7547): 333-336.
- [63] Cheng Hai, Zhang Haiwei, Spötl Christoph, Baker Jonathan, Sinha Ashish, Li Hanying, Bartolomé Miguel, Moreno Ana, Kathayat Gayatri, Zhao Jingyao, Dong Xiyu, Li Youwei, Ning Youfeng, Jia Xue, Zong Baoyun, Ait Brahym Yassine, Pérez-Mejías Carlos, Cai Yanjun, Novello Valdir F, Cruz Francisco W, Severinghaus Jeffrey P, An Zhisheng, Edwards R Lawrence. Timing and structure of the Younger Dryas event and its underlying climate dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(38): 23408-23417.

Climatic and environmental changes during Heinrich 6 recorded by $\delta^{13}\text{C}$ in stalagmites from Jinfo Cave, Chongqing

Zulisaisi¹, YANG Xunlin^{1,2,3}, WANG Yong¹, HU Mingguang¹, XU Yibin¹

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University / National Observation and Research Station of Karst Ecosystem in Jinfo Mountain of Chongqing, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, Chongqing 400715, China; 3. Nanchuan Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environment, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Chongqing 400715, China)

Abstract Of the six Heinrich events (H event for short) occurring during the last glacial period, H6 event has been less studied due to its earliest occurrence time. However, using high-resolution stalagmite records to study climate and environmental changes during H6 event can help people understand the response of climate change at high and low latitudes to the H events. In recent years, much progress has been made in terms of studies on paleoclimate and environmental changes with use of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records. Besides, some stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records have been used to study the climate change of the events on a millennium scale during the last glacial period, but there is no detailed record of the high-resolution climate change in Southwest China during the H6 event. In this case, the JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ may provide an excellent proxy for exploring the climate and environmental change during H6 event. Based on the dating data of uranium series and carbon isotope data of JF2017 stalagmite in Jinfo Cave, we analyzed the climate significance indicated by stalagmite $\delta^{13}\text{C}$, and reconstructed the evolution process of the monsoon climate environment in Southwest China during H6 event.

Developed from the Jinfo-Yangzi Cave system, Jinfo Cave is located in Jinfo Mountain, Nanchuan district, Chongqing, Southwest China, with an altitude of 2,080 m. The Jinfo Mountain area belongs to subtropical humid monsoon climate, which is jointly affected by the Indian Summer Monsoon and the East Asian Summer Monsoon (ASM). In this study, the age samples of stalagmites were tested by Neptune Plus Multi-receiver Plasma Inductively Coupled Mass Spectrometry (MC-ICP-MS), and the carbon isotopes of stalagmites were tested by Delta-V-Plus gas isotope ratio mass spectrometer and carbonate automatic sampling device Kiel-IV online. The experimental results are based on Vienna Pee Dee Belemnite (V-PDB) with $\delta^{13}\text{C}$ experimental analysis error $<0.06\text{‰}$ (2σ). According to data analysis, the variation range of stalagmite JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ is from -1.44‰ to -4.92‰ , with an average value of -3.40‰ . JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ fluctuates significantly, and change amplitude is -3.48‰ . JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records show that the value mainly presents a negative-positive-negative-positive trend during the period of 63,000-58,000 a B.P. Due to the complex influence factors of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$, we compared JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records with JFYK7 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in Yangkou Cave which belongs to the same cave system as Jinfo Cave in order to further analyze the climate significance of stalagmite JF2017 $\delta^{13}\text{C}$. The comparison indicates a similar variation between the stalagmite stable isotope records of Yangkou Cave and JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records. Through previous research, JFYK7 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ is indicative of variations in ASM intensity, and the positive shift in stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ corresponds to weakened ASM. In this study, we observed that the stalagmite JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ value was slightly positive, corresponding to the positive JFYK7 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$. Therefore, under the background of weakening ASM, JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records can reflect the change of ecological environment caused by the change of regional hydrological climate. In addition, the comparison between JF2017 stalagmite and the stalagmites from other caves indicate that JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records were comparable with other climate records during H6 event. From 61,811 a B.P. to 60,848 a B.P., the values gradually became heavier, reaching to the maximum, and then fluctuated on a short-time scale. Finally, from 60,848 a B.P. to 59,716 a B.P., they became slightly lighter to the end of H6 event. The comparison between JF2017 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and other relevant records in the rest of the world shows fluctuations in the stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record, so do the corresponding ITCZ and AMOC.

This study shows that the stalagmite JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ value was significantly heavier during the $61,811 \pm 204$ a B.P.- $59,716 \pm 159$ a B.P. period, lasting for about 2,095 a, which may suggest that the monsoon weakened and the ecological vegetation degraded during this period. This result corresponds to the North Atlantic H6 event. During H6 event, stalagmite JF2017 $\delta^{13}\text{C}$ records became heavy to the maximum value during the period of 61,811-60,848 a B.P., followed by the fluctuation change on the short-time scale. During the period of 60,848-59,716 a B.P., the values slowly became lighter to the end of the H6 event. The trend of becoming light after a gradual increase of weight and a climate shock inside on a centennial scale indicate that the local climate was unstable during H6 event. The monsoon climate change on a centennial scale recorded by stalagmite JF2017 may be closely related to the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the North Atlantic meridional overturning circulation (AMOC).

Key words Asian monsoon, Heinrich 6, stalagmite $\delta^{13}\text{C}$, Jinfo Cave, Southwest China

(编辑 黄晨晖)