

罗雪琳,周颖,付天祥,等. MIS3 阶段千年尺度突变事件在中国石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中的印迹[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 636-647.

DOI: 10.11932/karst20220411

MIS3 阶段千年尺度突变事件在中国 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中的印迹

罗雪琳,周颖,付天祥,聂旻敏,梁怡佳,董进国

(南通大学地理科学学院, 江苏南通 226007)

摘要: 基于山西阳泉市莲花洞石笋 8 个 ^{230}Th 年代和 109 个 $\delta^{13}\text{C}$ 数据, 获取了末次冰期 54.5~41.1 ka BP 期间平均分辨率为 120 年的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录。综合对比亚洲季风区 29°~41°N 之间 5 条独立定年的、高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录表明: 不同洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在相同生长时段具有较好的重现性, $\delta^{13}\text{C}$ 指标能够有效指示洞穴上覆地区土壤 CO_2 产率, 从而反映洞穴外部环境及季风气候的变化。 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 5 个千年尺度亚洲夏季风增强事件在定年误差范围内响应于格陵兰冰芯记录的 Dansgaard-Oeschger (DO) 10~14 事件, 而 2 个弱季风过程与北大西洋钻孔记录 Heinrich 5 和 Heinrich 5a 事件密切联系。这种石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的空间一致性表明亚洲夏季风及其控制下的区域生态环境波动在千年尺度上通过海—气耦合响应于北高纬气候变化。

关键词: 黄土高原; 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录; 深海氧同位素 3 阶段; 气候突变事件

中图分类号: P532 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 04-0636-12 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

末次冰期发生一系列千年尺度气候突变事件, 包括 Heinrich 事件 (简称 H 事件) 和 Dansgaard-Oeschger (DO) 事件^[1-3]。其中, H 事件是指 6 次冰盖崩塌导致的北大西洋冰漂碎屑 (IRD) 事件, 该类事件以约 1 万年为周期出现, 以北大西洋 40°~55°N 之间海域浮游有孔虫含量降低、碳酸盐沉积物显著增加、低盐度和低水温等为主要特征^[1, 4]。DO 事件是格陵兰冰芯记录中识别的 25 次显著的末次冰期千年尺度气候冷暖振荡, 大约以 1.5 千年为发生频率,

温度在数十年内变化 5~16 °C、变幅可达冰期-间冰期旋回的 1/2^[2-3]。这些千年尺度气候突变事件不仅发生在北大西洋中高纬地区, 也对低纬季风区和赤道地区的气候产生深远且广泛的影响^[5], 表明末次冰期期间高低纬气候系统之间存在显著的遥相关联系^[6-10]。

石笋具有分辨率高、指标多样以及绝对定年等优势, 为古气候记录重建及气候驱动机制研究提供重要地质证据。迄今为止, 中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义仍是学界研究的热点, 对其解释存在一定的分歧; 众多学者指出石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 可能代表亚洲夏季风强

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41877287, 41472317); 江苏省大学生创新训练项目 (202110304106Y); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG2120)

第一作者简介: 罗雪琳 (2000—), 女, 本科, 主要从事第四纪年代学与环境演变研究。E-mail: 2353349683@qq.com。

通信作者: 梁怡佳 (1994—), 女, 讲师, 主要从事全球变化与区域响应研究。E-mail: lucy2012_2015@163.com; 董进国 (1978—), 男, 教授, 主要从事第四纪年代学与环境演变研究, E-mail: jgdong@ntu.edu.cn。

收稿日期: 2022-02-10

度^[6, 11-12]、水汽源和传输路径^[13-14]、大气环流模式与水文过程^[15]或者西风带的移动^[16-17]。早期研究指出亚洲夏季风增强时,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻;夏季风减弱时,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重,一致的季风环流强度变化造成我国境内不同区域洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在轨道至千年尺度的重现性^[6, 11-12]。但是,Dayem 等^[14]模拟得出降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间的空间相关范围不超过 500 km,这与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录大范围的空间一致性特征相矛盾。最近,Cheng 等^[12, 18]继承并发展了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指标对气候意义的理解,认为中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所指示的亚洲夏季风变化应该代表的是一种平均态夏季风强度的变化或者是综合水汽输送的结果。换句话说,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录空间的一致性所揭示的季风强弱变化更多代表了“风”的本质,或大气环流的空间规模及伴随的水汽来源的远近变化的一致性,不一定在所有情况下都代表具体研究地点的降水变化。而在夏季风边缘区,季风“风”和“雨”可能更加协调一致。例如,基于中国北方季风边缘区的珍珠洞石笋,Li 等^[19]发现石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与黄土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在轨道与千年的振幅和趋势上十分相似,提出石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 能够指示夏季风降水量,而 $\delta^{18}\text{O}$ 指示了东亚夏季风强弱相态的变化。尽管有记录与模拟显示中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 倾向于指示陆地尺度亚洲夏季风强度^[6, 11-12, 20],但是其气候意义还有待进一步明确,采用其他代用指标或许可以弥补石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究。

相比于主要受降水控制的石笋 $\delta^{18}\text{O}$,石笋碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)来源更加多样(包括大气、土壤、生物、岩石等)、影响因素更为复杂^[21]。近年来,洞穴观测和精细重建工作显示石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在古气候和古环境重建方面具有较大的潜力,且在一定程度上能够弥补石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 不能指示局地环境变化的不足:例如湖北永兴洞石笋重建的小冰期气候记录表明 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 序列具有良好的对应关系,有助于理解湖北地区在小冰期时的局域湿度特征及相关驱动机制^[22]。利用辽宁暖和洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 重建了当地 10.6~3.5 ka BP 期间植被和气候演变序列,张伟宏等^[23]推测中全新世气候突变可能与北大西洋海表温度降低以及植被、大气系统反馈作用有关,为研究东北中全新世气候特征提供了重要证据。在末次冰期,南京葫芦洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在千年尺度上反映“过湿效应”,基于该序列重建的东亚夏季风降水量变化与指示季风强度的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可相互补充^[24]。此外,三宝洞石笋

$\delta^{13}\text{C}$ 记录揭示倒二冰期存在 9 个大幅振荡的千年尺度气候事件,与北大西洋海表温记录的千年尺度冷暖事件一一对应,该记录表明高低纬气候联系可以拓展到更老的冰期旋回^[25]。

上述记录都是通过单点记录进行古环境的重建和分析,很少有人综合分析不同区域石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对末次冰期中期(深海氧同位素 3 阶段, MIS3)千年尺度气候突变事件的响应过程。为此,本文选取地处亚洲夏季风边缘区的黄土高原东部山西莲花洞石笋作为研究对象,重建 54.5 ka BP 至 41.1 ka BP 期间石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列,进一步将不同区域洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录进行时空对比,探讨石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 代用指标的古气候意义,合理评价中国石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对千年尺度北大西洋气候突变事件响应过程,并揭示其背后可能的驱动机制。

1 材料与方法

山西省地处亚欧大陆东岸中纬度内陆(图 1),是典型的、为黄土广泛覆盖的山地高原,其地势东北高西南低,有利于海洋水汽深入影响。由于该区域处于亚洲季风影响的边缘区,对冬、夏季季风环流的进退变化十分敏感,因此十分适合研究亚洲季风的历史演化。

莲花洞(113°43'N, 38°10'N)位于山西省阳泉市交口镇东,洞口海拔 1 200 m,洞长约 250 m,洞口狭窄,仅可容纳一人匍匐通过。洞穴发育于奥陶系马家沟组灰岩,洞内碳酸盐景观丰富,主要有鹅管、石笋、石柱、石花、羊奶石和石坝等。洞穴通风度不高,洞穴最深处相对湿度可达 98%~100%,7 月份洞内实测温度为 11 °C,接近地表年平均温。受亚洲季风的影响,区域年平均降雨量约为 515 mm,集中于 6~9 月,约占全年降雨量的 73%。洞外植被覆盖度高,主要由温带落叶阔叶林、灌木和草本植物组成。

石笋 LH36 样品呈柱状,长约 206 mm,直径约 80~110 mm,粗细较为均匀。沿其生长轴切开并抛光,可观察到清晰的生长层,样品主要由乳白色和土黄色方解石组成(图 2)。在距顶 33~35 mm 和 145~150 mm 处存在棕色风化壳,界面上下岩相显著变化,表明本样品存在两次明显的沉积间断^[9]。考虑到该样品存在沉积间断,本文仅使用 37~145 mm 层段作为研究对象。在抛光面上,用直径为 0.3 mm

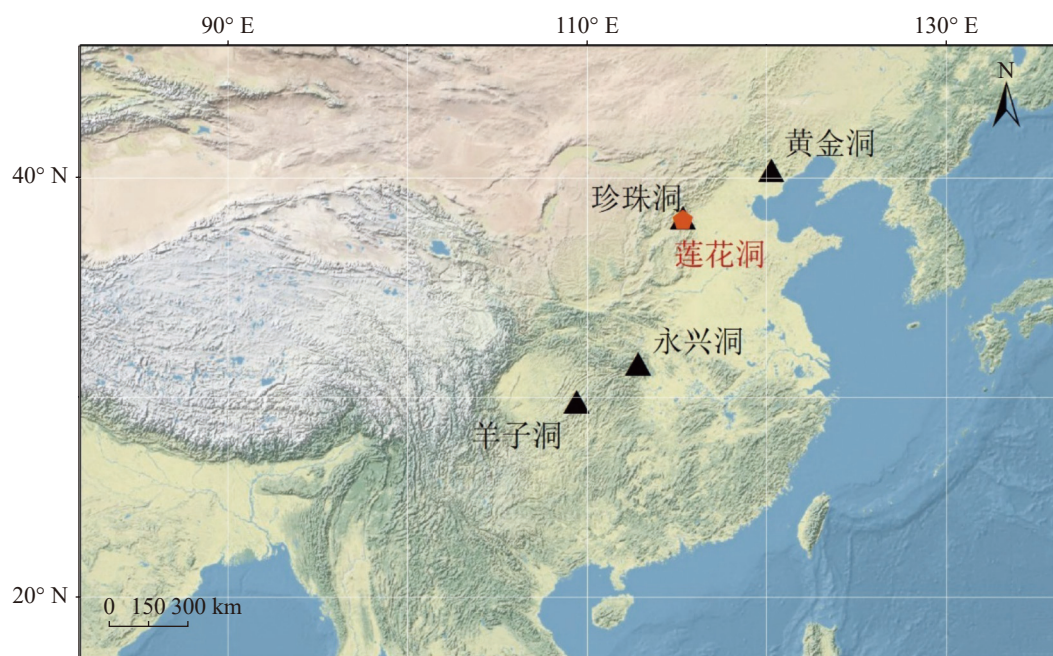


图 1 亚洲季风区莲花洞与其他四个洞穴地理位置图

注: 红色五边形为莲花洞(113°43'E, 38°10'N), 黑色三角形为其他四个洞穴: 珍珠洞(113°42'E, 38°15'N^[19])、黄金洞(118°38'E, 40°17'N^[26])、永兴洞(111°14'E, 31°35'N^[27])、羊子洞(107°47'E, 29°47'N^[28]); 底图数据来源于 US National Park Service。

Fig. 1 Locations of Lianhua cave (pentagon) and other caves mentioned in this paper (triangle)

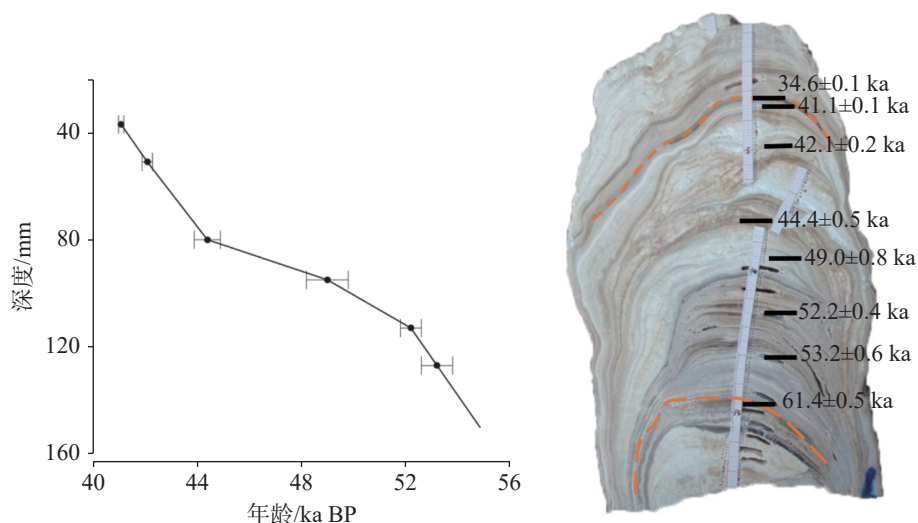


图 2 LH36 石笋年龄模式与样品剖面图

左图中黑点及误差棒分别为实测年龄及误差, 黑色实线为线性内插年龄模式; 右图中石笋剖面上黑色条带为年代样采样位置, 橙色虚线位置为沉积间断

Fig. 2 Age model and polished surface of stalagmite LH36

的牙钻沿着石笋生长中心轴, 以 1 mm 为间距采集, 共获取 109 个样品(单个样量约 50 μg)送南京师范大学地理科学学院同位素实验室用于氧碳同位素分析, $\delta^{18}\text{O}$ 分析误差小于 $\pm 0.05\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 分析误差小于 $\pm 0.06\text{‰}$ 。用直径为 0.9 mm 的牙钻沿石笋生长轴采集 8 个年代样品(单个样重 70~130 mg), 粉末样在台湾大学高精度质谱与环境变迁实验室和南京师范大学同位素实验室处理并测试, 分析仪器为

Neptune 型多接受杯电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS), 样品化学处理与测试分析方法见参考文献 [29]、[30]。年龄分析误差为 $\pm 2\sigma$, 结果见表 1。其中, LH36-37 和 LH36-80 样品在南京师范大学测试完成, 其余样品在台湾大学测试完成。LH36-80 样品在两家单位进行测试, 结果^[9]显示两家单位的年代数据在测年误差范围内基本一致, 重现的数据表明两家单位测年结果均可靠, 本文选用台湾大学测

表 1 石笋 LH36 测年结果
Table 1 ^{230}Th dating results for stalagmite LH36

样品编号	^{238}U /ppb	^{232}Th /ppt	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (活度比)	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比 $\times 10^{-3}$	Age (ka) (未校正)	Age (ka) (校正后)	Age (ka BP) (距1950年)	$\delta^{234}\text{U}$ (初始值)
LH36-33	233.4 ± 0.3	281.0 ± 6.0	1 922 ± 3	0.822 ± 0.002	11.258 ± 0.240	34.73 ± 0.10	34.72 ± 0.10	34.64 ± 0.10	2 120 ± 3
LH36-37	161.9 ± 0.1	2 600.0 ± 20.0	1 571 ± 2	0.839 ± 0.002	0.861 ± 0.008	41.20 ± 0.10	41.10 ± 0.10	41.08 ± 0.14	1 765 ± 3
LH36-51	97.5 ± 0.1	2 088.5 ± 6.8	1 474 ± 3	0.825 ± 0.003	0.635 ± 0.003	42.41 ± 0.20	42.20 ± 0.23	42.13 ± 0.23	1 660 ± 3
LH36-80	95.6 ± 0.1	8 014.6 ± 30.1	1 630 ± 3	0.928 ± 0.006	0.183 ± 0.001	45.30 ± 0.36	44.52 ± 0.53	44.44 ± 0.53	1 849 ± 4
LH36-95	102.6 ± 0.1	11 506.8 ± 53.9	1 196 ± 3	0.842 ± 0.006	0.124 ± 0.001	50.31 ± 0.46	49.06 ± 0.78	48.99 ± 0.78	1 373 ± 5
LH36-113	156.9 ± 0.2	8 096.9 ± 27.0	2 478 ± 4	1.400 ± 0.007	0.447 ± 0.003	52.66 ± 0.31	52.31 ± 0.36	52.23 ± 0.36	2 873 ± 6
LH36-127	140.9 ± 0.2	11 597.0 ± 59.6	1 500 ± 3	1.021 ± 0.007	0.205 ± 0.002	54.11 ± 0.46	53.31 ± 0.60	53.24 ± 0.60	1 743 ± 5
LH36-147	256.9 ± 0.3	10 714.7 ± 42.4	991 ± 3	0.899 ± 0.005	0.356 ± 0.002	61.97 ± 0.44	61.46 ± 0.51	61.39 ± 0.51	1 179 ± 4

注：年龄误差为 2σ ， ^{230}Th 的衰变常数为 $9.1705 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ [31]； ^{234}U 的衰变常数为 $2.8221 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ [31]； ^{238}U 的衰变常数为 $1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ [32]；校正年龄是假设初始 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子数比值为 $(4.4 \pm 2.2) \times 10^{-6}$ ；年龄(ka BP)是相对于公元1950年； $\delta^{234}\text{U}$ 初始值是依据公式 $\delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{校正值}} \times e^{\lambda^{234} \times T}$ 获得，T是 ^{230}Th 年龄。

试的年代结果(表 1 中 LH36-80)来建立石笋时标。

2 结 果

2.1 LH36 石笋的时标

石笋 LH36 的 U、Th 同位素组成以及测年结果见表 1。 ^{238}U 含量较低，在 $95.6 \times 10^{-9} \sim 256.9 \times 10^{-9}$ 范围内； ^{232}Th 含量较高，在 $2\,088.5 \times 10^{-12} \sim 11\,597 \times 10^{-12}$ 范围内； $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比低，在 $0.124 \times 10^{-3} \sim 0.861 \times 10^{-3}$ 范围内。由于样品不纯净、 ^{232}Th 含量较高，LH36 样品年代初始 ^{230}Th 校正较大，大部分在 285~868 年内，LH36-95 校正量最大，达 1 250 年。尽管所有样品年代误差较大(在 228~778 年范围内)，但校正后的年龄仍按照地层学顺序排列(表 1，图 2)。本文通过对实测年龄点线性等间距内插建立深海氧同位素 3 阶段(MIS3)早期石笋沉积演化时间序列。结果显示，石笋 LH36 在沉积间断后再次连续生长于 54.5 ka BP 至 41.1 ka BP，平均分辨率为 120 a，生长速率在 52.3~44.5 ka BP 期间达到 $180 \sim 300 \text{ a} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，在 52.3 ka BP 以前和 44.5 ka BP 以后为 $70 \text{ a} \cdot \text{mm}^{-1}$ 左右。

2.2 LH36 石笋的稳定同位素序列

MIS3 阶段 54.5~41.1 ka BP 期间，山西莲花洞 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-6.9\text{‰} \sim -1.1\text{‰}$ 之间波动，振幅达 5.8‰，平均值为 -2.7‰ ； $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-10.2\text{‰} \sim -6.9\text{‰}$ 之间波动，振幅达 3.4‰，平均值为 -8.9‰ ， $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的相关性达 0.6，呈显著正相关(图 3)。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录了一系列千年尺度气候事件，包括

DO10~14 事件以及 HS5(Heinrich 冰阶 5)和 HS5a 事件。在 5 次 DO 暖阶期间， $\delta^{13}\text{C}$ 显著负偏，数值达 -4‰ 左右，事件平均振幅超过 3‰，表现为梯形的转型结构特征，其中以 DO14 事件的 $\delta^{13}\text{C}$ 振幅最大(5.8‰)、梯形结构尤为明显。在两次 HS 事件中， $\delta^{13}\text{C}$ 值最偏正，大于 0‰ 。相比于石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录，石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的千年尺度事件记录不够清晰，缺失 DO12 与 DO13 事件的峰，并大致以 DO12 为界， $\delta^{18}\text{O}$ 以 -8.5‰ 和 -9‰ 为背景值上下波动(图 3)，这可能是岩溶系统混合效应导致降水同位素信号被平滑的结果 [33]。显然，LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 比 $\delta^{18}\text{O}$ 更加敏感响应于千年气候振荡。

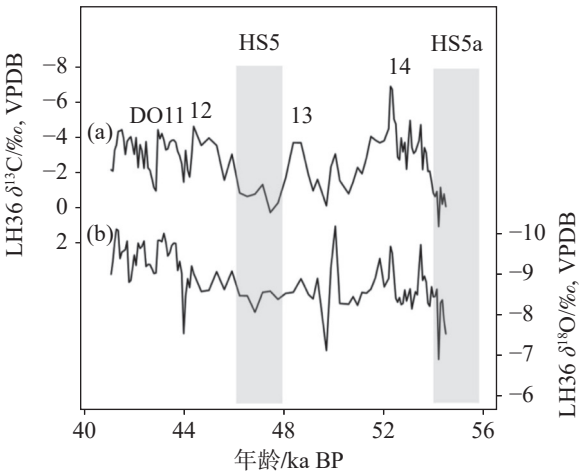


图 3 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

注：灰色阴影条带分别表示 HS5 事件和 HS5a，数字指示 DO11~14 事件。

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ records for stalagmite LH36

使用石笋稳定同位素记录进行古气候重建的重要前提是石笋在同位素平衡分馏条件下沉积，主要

有 Hendy 检验^[34]和重现性检验^[35]两种方法进行检验。Hendy 检验要求同一层上同位素数值变化不大。我们在抛光面上选择 3 条相对清晰的纹层(125 mm, 146 mm 和 158 mm), 每层以 5 mm 为间距向轴心两侧采集稳定同位素样品, 结果显示 LH36 石笋同一层上石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 数值基本稳定($<1\%$), 且三组数据的标准差分别为 0.07、0.1 和 0.17(图 4), 通过 Hendy 检验。另外, Dong 等^[9]研究结果显示, 6 万年以来莲花洞多支石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与该洞附近的龙洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在事件振幅、序列变化趋势等方面有较高的重现性, 支持了重现性检验^[35]。这些证据表明莲花洞石笋在沉积过程中分馏平衡, 因此石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 可以反映气候与环境变化, 进而用于研究当地的气候演化过程与驱动机制。

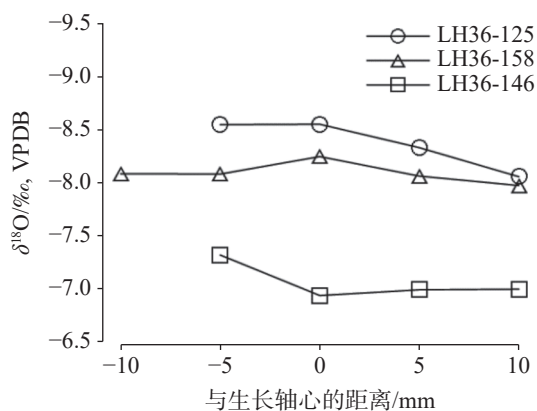


图 4 LH36 石笋 Hendy 检验结果

Fig. 4 Hendy test results for stalagmite LH36

3 讨论

3.1 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候意义

石笋中的碳来源于土壤(80%~95%)、碳酸盐围岩(10%~15%)、大气 CO_2 (浓度仅为 0.03% 左右, 可忽略不计)^[36]。除了强溶解作用会使洞穴滴水 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正外, 一般围岩 $\delta^{13}\text{C}$ 主要影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 本底值^[36]。我国境内奥陶纪马家沟组灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值在 -1‰ ~ 0‰ ^[37], 这可能导致 LH36 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值偏高, 为 -2.7‰ 。相对而言, 土壤 CO_2 更能影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的短尺度波动, 而土壤 CO_2 本身主要受到植被类型、植物与土壤呼吸作用、生物量变化等诸多地表过程的影响^[21, 38-40], 因此与外界气候要素密切联系^[41]。尽管石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 也受到多种洞穴内部因素的干扰, 包括同位素分馏、老碳、岩溶系统开放程度、先期沉积作用

等^[42], 但是越来越多的证据表明洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受控于土壤 CO_2 产率并且可以间接反映外部气候与环境的变化^[21, 26, 38-39, 43]。早先, Hendy 等^[34]发现 C3 或 C4 型植被更替对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 影响最大。C3 植被控制下的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ (-14‰ ~ -6‰)比 C4 植被控制下的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ (-6‰ ~ -2‰)更偏轻^[39], 由于冷湿气候有利于 C3 植被的生长、暖干气候有利于 C4 植被的生长, 因此可以根据石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 反推 C3 和 C4 植被的丰度与气候状况。另外, Genty 等^[38]基于法国 Villars 洞穴研究认为石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在千年尺度上可作为上覆生物量变化的指标, 从而反映生态环境改善或退化。Luo 等^[44]也发现在温暖湿润条件下, 植被生长情况良好、生物量大, 造成土壤 CO_2 产率增加、石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负。显然, 由于植被、生物量变化与气候(温度、湿度)因素具有良好的对应关系, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在一定程度上可以反映气候变化; 同时, 与土壤 CO_2 相关的多种因素对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的作用方向一致, 即良好的气候条件下, 植被茂密、生物量大、C3/C4 占比升高会导致 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻, 反之亦然^[43]。

我们认为 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要指代与植被类型、生物量、生物呼吸作用等有关的土壤 CO_2 产率变化。先前研究发现, 末次冰期黄土高原中部和东部主要发育 C3-C4 混合型植被, 其中 C3 植被占据主导地位、C4 植被比例从高原西北向东南递增^[45-47]。同时, 由于 MIS3 气候整体偏冷, “温度阈值”效应抑制喜暖干的 C4 植被扩张, 因此黄土记录显示 MIS3 阶段 C3 和 C4 植被比例的整体变动不大^[45-47]。但是, 不同于黄土记录的结果, LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示千年尺度振荡, 这种细节差异可能是由于这些黄土记录分辨率较低、短尺度波动难以识别造成^[46], 也有可能是千年尺度上亚洲夏季风增强带来的降水增加进一步抑制 C4 植被发育, 从而使得 C3/C4 植被比例相对增加导致石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻。另外, 在与 Sun 等^[48]所测黄土高原西部高分辨率古浪、靖远剖面的无机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 序列对比时, 发现 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与其存在高度的相似性。Sun 等^[48]认为上述两个剖面无机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 指示与夏季风降水量有关的植被密度, 因此可以推测在 DO 暖阶, 夏季降水量增加可导致土壤水分和植被生物量增加、土壤呼吸作用增强以及 CO_2 分压升高, 这些条件均有利于黄土次生碳酸盐沉积和洞穴石笋中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负。所以, 尽管末次冰期黄土高原是 C3 植被占主导, 但是季风降水控制下

C4 植被比例的相对变化以及植被丰度变化均可能会对 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 产生影响。

与多个洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的对比进一步支持了本文对 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 指代意义的解释。从图 5 对比来看, LH36(图 5(d))和秦皇岛黄金洞(图 5(b))^[26]的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在重叠时段具有较高的相似性, 包括快速的 DO 事件开端、缓慢的 DO14 暖阶偏正以及一致的千年尺度同位素偏移方向。由于黄金洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 可代表区域生物量与 C3/C4 植被比例, 同样位于华北地区、距离相差 <600 km 的莲花洞 $\delta^{13}\text{C}$ 或许可以指示相同气候条件下相似的植被与环境变化。同时, 采集于黄土高原西部的万象洞(相距 <1 000 km)石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 被认为能够指示植被和覆盖度变化, $\delta^{13}\text{C}$ 数值偏负指示植被密度与覆盖度增加、C3/C4 植被比率增加^[49], 也可支持本文 $\delta^{13}\text{C}$ 的解释。再者, 距离研究区更近的河北珍珠洞(相距 <100 km)石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列(图 5(c))^[19]与 LH36 $\delta^{13}\text{C}$ 在千年尺度上变化特征也接近(如相似的 DO14 和 DO13 事件结构特征), 进一步支持相同驱动因子对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的控制作用。现代监测与记录重建均显示珍珠洞 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映土壤 CO_2 变化, 并与外界降水和植被有显著关联^[50-51]。最近 30 年间, 莲花洞与珍珠洞的年均温仅相差 2 °C, 年均降水量仅相差 24 mm^[51], 在现代气候如此相近的情况下, 末次冰期两地降水与植被变化可能也具有一致性。

将 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 多项式拟合曲线(图 5d 虚线)与大气 CO_2 浓度序列(图 5g)^[52]对比, 发现二者在长期趋势上有良好的对应关系, 尤其是 DO13 冷阶和 HS5 事件附近大气 CO_2 浓度偏低时期对应于 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高时段。类似的洞穴 $\delta^{13}\text{C}$ —大气 CO_2 长期对比关系也可以在中纬度其他洞穴记录中观察到(如图 5 中黄金洞、珍珠洞、永兴洞等记录)。一般而言, 中纬度地区主要发育 C3 植被, C4 植被占比偏低, 其中 C3 植被发育需要较高的大气 CO_2 浓度, C4 植被可以在更低浓度大气 CO_2 的环境下生存, 即低大气 CO_2 浓度会突出 C4 植物的竞争优势, 这种相反的作用主要与 C3 和 C4 植被不同光合作用方式有关^[53-54]。因此, 在全球大气 CO_2 浓度偏低(约 200×10^{-6})、季风减弱且气候偏干的状况下, 可能有利于中纬度地区发育 C4 植被, C3/C4 植被比例降低, 从而导致 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在 DO13 冷阶和 HS5 事件附近时偏正。这进一步支持石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 一定程度上反映植

被类型比例变动的观点^[26, 37]。

综上, 莲花洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要指代土壤 CO_2 产率变化, 与洞外当地植被类型、生物量、生物呼吸作用等有关, 可间接反映亚洲夏季风强度变化。

3.2 区域石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的千年尺度气候突变事件

中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在轨道和千年尺度上的变化具有广泛的区域可重复性^[26, 28-29, 51], 表明亚洲季风环流控制下的中国南、北方降水 $\delta^{18}\text{O}$ 信号的一致性^[20], 体现 $\delta^{18}\text{O}$ 陆地尺度的气候意义。同时, 重现性本身也被作为检验石笋稳定同位素平衡分馏的重要手段^[35]。自从葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示末次冰期千年尺度亚洲夏季风强度与格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示的北高纬温度存在一一对应关系以来^[6, 55], 后续众多石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 研究进一步支持北半球高低纬度气候系统的耦合关系, 提出高纬温度和亚洲季风降水可能通过北大西洋温盐环流、中纬西风带或赤道辐合带进行联系^[56-57], 并得到其他研究结果的支持^[58-60]。

本文尝试将莲花洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与亚洲季风区其他洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录综合对比分析, 探讨不同洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在相同生长时段内的相似性和差异性。选取的洞穴位于亚洲季风区 29°~41°N 之间(地理位置见图 1), 五条石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录均为独立铀系定年且分辨率高。在年代误差范围内(其中黄金洞年代误差为 60~160 a, 珍珠洞年代误差为 339~720 a, 永兴洞年代误差为 110~390 a, 羊子洞年代误差为 90~420 a), 五条 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在重叠时段内具有较好的重现性, 主要表现在同位素响应北高纬千年事件的偏移情况、突变事件的转型特征、结构形态和持续时间等方面(图 5)。从南到北的羊子洞、永兴洞、珍珠洞、莲花洞和黄金洞的多条石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示以下几点相似特征: (1) 记录均可识别出 DO10-14 事件和 HS5、HS5a 事件, DO 暖阶期间 $\delta^{13}\text{C}$ 一致偏轻, DO 冷阶和 H 事件期间 $\delta^{13}\text{C}$ 一致偏重; (2) DO14 内部 $\delta^{13}\text{C}$ 数值均逐渐偏重(如图 5 虚线箭头所示); (3) $\delta^{13}\text{C}$ 记录中 DO12 和 DO14 都比其余 DO 事件持续时间长; (4) DO10-14 事件的开端均较为迅速, 发生在几百年内。这种中国南北方大范围内记录的相似性说明石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 指标可以作为一个有效的气候代用指标, 且亚洲季风控制下不同区域的植被生长和土壤 CO_2 产率能一致响应于千年尺度气候冷暖振荡。但是, 我们也发现不同洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录存在南北

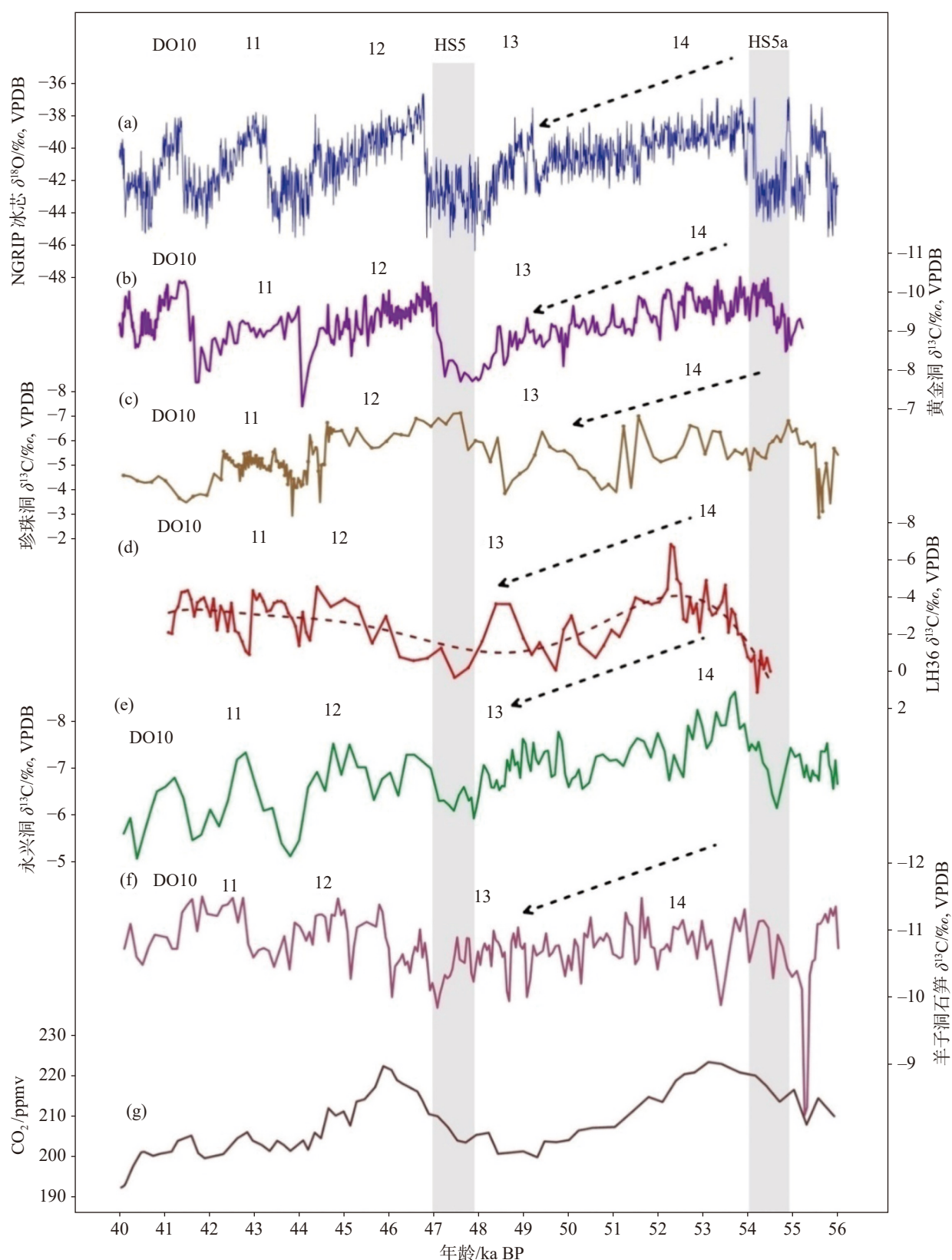


图5 莲花洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与其他地质记录对比

注: (a)格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[55], (b)黄金洞 $\delta^{13}\text{C}$ 记录^[26], (c)珍珠洞 $\delta^{13}\text{C}$ 记录^[19], (d)莲花洞 LH36 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录原始数据(实线)与多项式拟合曲线(虚线), (e)永兴洞 $\delta^{13}\text{C}$ 记录^[27], (f)羊子洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录^[28], (g)大气 CO_2 记录^[52]; 灰色阴影部分为 HS5 事件和 HS5a 事件, 数值表示 DO 事件; 虚线箭头表示 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征。

Fig. 5 Comparison of LH36 $\delta^{13}\text{C}$ profile with other geological records

差异, 相较而言, 华北地区黄金洞、莲花洞和珍珠洞三个洞穴记录千年尺度事件振荡更为明显, DO 暖阶与冷阶之间的同位素偏差达 2‰~5.8‰, 而华中地区永兴洞和西南地区羊子洞的振幅偏小(1‰~2‰), 这种南北差异可能与季风边缘区气候与植被变化更为灵敏有关。

与格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(图 5a)对比表明, 不同洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的相似特征可能与千年尺度北高纬温度变化的统筹调节作用有关, 主要证据包括石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录和冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录具有相同的快速 DO 事件开端, 鲜明的 DO14“锯齿状”结构, 相当的 DO12 和 DO14 持续时间, 以及整体峰形特征的相似。先前研究表明, DO 旋回期间北半球中低纬度陆地和海洋的温度与北大西洋和北高纬地区的温度变化一致^[5], DO 暖阶期间北半球升温、冷阶期间北半球降温。大范围的北半球降温会改变半球间热力梯度, 进一步造成大洋上空赤道辐合带(ITCZ)南移以及西非夏季风、亚洲夏季风的减弱^[58]。格陵兰温度升降主要由北大西洋经向翻转流(AMOC)强弱变化驱动^[61], 而 AMOC 强度变化也影响大西洋低纬 ITCZ 南北移动, 进而带动全球赤道辐合带^[58]。在 DO 暖阶期间, AMOC 增强, 格陵兰升温, 带动北半球升温且南北半球温度梯度增大, ITCZ 北移, 在夏季运送更多海洋水汽到亚洲季风区, 水热条件改善, C3 植被生长茂盛、湿润条件下 C4 植被生长受到抑制, 同时土壤呼吸作用增强, 土壤 CO_2 产率升高, 导致石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻。而在 DO 冷阶与 H 事件时, AMOC 削弱或停滞, 北半球降温, ITCZ 南移, 季风减弱造成降水减少, 冷干条件不适合 C3 植被发育, C3/C4 植被比率降低, 同时植被覆盖率降低, 土壤 CO_2 产率降低, 导致石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重。此外, 北高纬地区气候也可以通过中纬度西风带或欧亚大陆远程控制作用来调节中国的水热条件, 进一步影响洞穴外部环境气候的变化和植被生物量的变化, 从而控制石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[62-63]。因此, 洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录可以指示亚洲季风及其控制下区域生态环境, 其与千年尺度格陵兰冰芯气候波动的相似性表明低纬季风可以通过海气耦合响应于北高纬气候突变事件。

4 结 论

本文基于山西莲花洞石笋 LH36 的 8 个高精度

^{230}Th 定年结果和 109 组 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 数据, 重建了 54.5~41.1 ka BP 黄土高原东缘气候环境变化序列, 平均分辨率达 120 年, 覆盖 DO10~14 事件、HS5 和 HS5a 事件。结合石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 代用指标的气候意义, 综合对比亚洲季风区 29°~41°N 之间多条独立定年、高分辨率的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录得出以下结论:

(1) 山西莲花洞 LH36 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要反映洞穴上覆土壤 CO_2 产率的变化, 一定程度上可以指代该地区植被类型、植被覆盖度与生物量大小, 并可以间接反映亚洲夏季风强度。在 DO 暖阶期间, 亚洲夏季风增强、气候温暖湿润, 山西地区地表生物量增加、C3/C4 植被比例提高, 土壤 CO_2 产率上升, LH36 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负; 在 H 事件期间, 亚洲夏季风减弱、气候寒冷干燥, 山西地区地表生物量减少、C3/C4 植被比例降低, 土壤 CO_2 产率下降, LH36 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正;

(2) 在定年误差范围内, 亚洲季风区内的五条洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在重叠时段内具有较好的重现性, 并与格陵兰冰芯记录的 DO 事件一一对应。洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的空间一致性表明亚洲季风及其控制下区域生态环境通过海气耦合响应于北高纬气候突变事件。

参考文献

- [1] Heinrich H, Hartmut. 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.
- [2] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, Hammer C U, Hvidberg C S, Steffensen J P, Sveinbjornsdottir A E, Jouzel J. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [3] Grootes P M, Stuiver M, White J W C, Johnsen S, Jouzel J. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. *Nature*, 1993, 366(6455): 552-554.
- [4] Naafs B, Hefter J, Stein R. Millennial-scale ice rafting events and Hudson Strait Heinrich(-like) Events during the late Pliocene and Pleistocene: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 80: 1-28.
- [5] Voelker A. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: a database[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(10): 1185-1212.
- [6] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, Anti Z S, Shen J Y, Dorale J A. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550):

- 2345-2348.
- [7] Carolin S A, Cobb K M, Adkins J F, Clark B, Conroy J L, Lejau S, Malang J, Tuen A A I. Varied response of Western Pacific hydrology to climate forcings over the Last Glacial Period[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1564-1566.
- [8] Wang X F, Edwards R L, Auler A S, Cheng H, Kong X, Wang Y, Cruz F W, Dorale J A, Chiang H W. Hydroclimate changes across the Amazon lowlands over the past 45, 000 years[J]. *Nature*, 2017, 541(7636): 204-207.
- [9] Dong J G, Shen C C, Wang Y, Wang Y, Hu H M, Banerjee Y, Huang Y. Multicentennial to millennial-scale changes in the East Asian summer monsoon during Greenland interstadial 25[J]. *Quaternary Research*, 2022: 195-206.
- [10] Woods A, Rodbell D T, Abbott M B, Hatfield R G, Chen C, Lehmann S B, McGee D, Weidhaas N, Tapia P M, Valero-Garcés B L, Bush M B, Stoner J S. Andean drought and glacial retreat tied to Greenland warming during the last glacial period[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5153.
- [11] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, Kong X, Shao X, Chen S, Wu J, Jiang X, Wang X, An Z. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [12] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S, Kelly M M, Kathayat G, Wang X, Li X, Kong X, Wang Y, Ning Y, Zhang H. The Asian monsoon over the past 640, 000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 541(7635): 640-646.
- [13] Maher B. Holocene variability of the East Asian summer monsoon from Chinese cave records: a re-assessment[J]. *Holocene*, 2008, 18(6): 861-866.
- [14] Dayem A, Molnar P, Battisti B, Roe G. Lessons learned from oxygen isotopes in modern precipitation applied to interpretation of speleothem records of paleoclimate from eastern Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 295: 219-230.
- [15] Caley T, Roche D, Renssen H. Orbital Asian summer monsoon dynamics revealed using an isotope-enabled global climate model[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5371.
- [16] Zhang H, Griffiths M, Huang J, Cai Y, Wang C, Zhang F, Cheng H, Ning Y, Hu C, Xie S. Antarctic link with east Asian summer monsoon variability during the Heinrichs stadial-Bolling interstadial transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 453: 243-251.
- [17] Chiang J C H, Herman M J, Yoshimura K, Fung I Y. Enriched East Asian oxygen isotope of precipitation indicates reduced summer seasonality in regional climate and westerlies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117: 14745-14750.
- [18] Cheng H, Zhang H W, Zhao J Y, Li H Y, Ning Y F, Kathayat G. Chinese stalagmite paleoclimate researches A review and perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1489-1513.
- [19] Li Y X, Rao Z G, Xu Q H, Zhang S R, Liu X K, Wang Z L, Cheng H, Edwards R L, Chen F. Inter-relationship and environmental significance of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ records from Zhenzhu Cave, north China, over the last 130 ka[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 536: 116-149.
- [20] He C, Liu Z, Otto-Bliesner B L, Brady E, Bao Y. Hydroclimate footprint of pan-Asian monsoon water isotope during the last deglaciation[J]. *Science Advances*, 2021, 7: eabe2611.
- [21] Fohlmeister J, Voarintsoa N, Lechleitner F A, Boyd M, Brandtstaetter S, Jacobson M, Oster J L. Main Controls on the Stable Carbon Isotope Composition of Speleothems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 279: 67-87.
- [22] 陈剑舜, 张伟宏, 陈仕涛, 邵庆丰, 赵侃, 尹敬文, 朱丽东. 小冰期气候的湖北石笋碳同位素记录[J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 497-504.
- CHEN Jianshun, ZHANG Weihong, CHEN Shitao, SHAO Qingfeng, ZHAO Kan, YIN Jingwen, ZHU Lidong. Carbon isotope record in stalagmites from Hubei during the Little Ice Age[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 497-504.
- [23] 张伟宏, 吴江滢. 辽宁暖洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 对全新世气候变化的生态响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 147-154.
- ZHANG Weihong, WU Jiangying. Ecological response of $\delta^{13}\text{C}$ to Holocene climate changes from stalagmite record in Nuanhe Cave, Liaoning[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 147-154.
- [24] 孔兴功, 汪永进, 吴江滢, Cheng Hai, Edwards R L, Wang Xianfeng. 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, 48(12): 2174-2181.
- KONG Xinggong, WANG Yongjin, WU Jiangying, CHENG Hai, Edwards R L, WANG Xianfeng. Complicated responses of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ to climate change during the last glaciation from Hulu Cave, Nanjing, China[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(12): 2174-2181.
- [25] 姜修洋, 孔兴功, 汪永进, 程海, 张春霞. 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[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(1): 1-7.
- JIANG Xiuyang, KONG Xinggong, WANG Yongjin, CHENG Hai, ZHANG Chunxia. A high-resolution stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record from Sanbao cave over the penultimate glaciation[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(1): 1-7.
- [26] Liang Y J, Zhao K, Wang Y J, Edwards R L, Cheng H, Shao Q F, Chen S, Wang J Y, Zhu J J. 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.
- [27] 王萌, 陈仕涛, 黄琬淳, 蔡雯沁, 龚清霖, 梁怡佳, 王先锋, 汪永进. 石笋灰度和同位素对末次冰期气候事件的响应[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 3064-3075.
- WANG Meng, CHEN Shitao, HUANG Wanchun, CAI Wenqin, GONG Qinglin, LIANG Yijia, WANG Xianfeng, WANG Yongjin. The response of stalagmite gray-level and isotopes to the climatic events during the last glacial period[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12): 3064-3075.

- [28] Wu Y, Li T Y, Yu T L, Shen C C, Chen C J, Zhang J, Li J Y, Wang T, Huang R, Xiao S Y. Variation of the Asian summer monsoon since the last glacial-interglacial recorded in a stalagmite from southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 234: 106-261.
- [29] Shen C C, Wu C C, Cheng H, Edwards R L, Hsieh Y T, Gallet S, Chang C C, Li T Y, Lam D D, Kano A, Hori M, Spötl C. High-precision and high-resolution carbonate ^{230}Th dating by MC-ICP-MS with SEM protocols[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 99: 71-86.
- [30] Shao Q F, Pons-Branchu E, Zhu Q P, Wang W, Valladas H, Fontugne, M. High precision U/Th dating of the rock paintings at Mt. Huashan, Guangxi, southern China[J]. *Quaternary Research*, 2017, 88(1): 1-13.
- [31] Cheng H, Edwards R L, Shen C C, Polyak V J, Asmerom Y, Woodhead J, Hellstrom J, Wang Y, Kong X, Spötl C. Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 371-372: 82-91.
- [32] Jaffey A H, Flynn K F, Glendenin L E, Bentley W C, Essling A M. Precision Measurement of Half-Lives and Specific Activities of ^{235}U and ^{238}U [J]. *Physical Review C*, 1971, 4: 1889-1906.
- [33] Duan W H, Ruan J H, Luo W J, Li T Y, Tian L J, Zeng G N, Zhang D Z, Bai Y J, Li J L, Tao T, Zhang P Z, Baker A, Tan M. The transfer of seasonal isotopic variability between precipitation and drip water at eight caves in the monsoon regions of China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 183, 250-266.
- [34] Hendy C H. Isotopic geochemistry of speleothems—I. Calculation of 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.
- [35] Dorale J A, Liu Z H. Limitations of Hendy Test criteria in judging the paleoclimatic suitability of speleothems and the need for replication[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2009, 71(1): 73-80.
- [36] Genty D, Baker A, Massault M, Proctor C, Gilmour M, Pons-Branchu E, Hamelin B. Dead carbon in stalagmites: Carbonate bedrock paleodissolution vs. ageing of soil organic matter. Implications for ^{13}C variations in speleothems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(20): 3443-3457.
- [37] 杨华, 王宝清, 孙六一, 任军峰, 黄正良, 武春英. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组碳酸盐岩碳、氧稳定同位素特征[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 616-625.
- YANY Hua, WANG Baoqing, SUN Liuyi, REN Junfeng, HUANG Zhengliang, WU Chunying. Characteristics of Oxygen and Carbon Stable Isotopes for Middle Ordovician Majiagou Formation Carbonate Rocks in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 616-625.
- [38] Genty D, Blamart D, Ouahdi R, Proctor C, Gilmour M, Pons-Branchu E, Hamelin B. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data[J]. *Nature*, 2003, 421(6925): 833-837.
- [39] McDermott F. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7): 901-918.
- [40] Campos M C, Chiessi C M, Voigt I, Piola A R, Kuhnert H, Mulitza S. $\delta^{13}\text{C}$ decreases in the upper western South Atlantic during Heinrich Stadials 3 and 2[J]. *Climate of the Past*, 2017, 13(4): 345-358.
- [41] Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, Pickett D A, Baker R G. A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from cold water cave[J]. *Science*, 1992, 258(5088): 1626-1630.
- [42] Fairchild I J, Mcmillan E A. Speleothems as indicators of wet and dry periods[J]. *International Journal of Speleology*, 2007, 36(2): 69-74.
- [43] Huang W, Wang Y J, Cheng H, Richard L E, Wang Q. Multi-scale Holocene Asian monsoon variability deduced from a twin-stalagmite record in southwestern China[J]. *Quaternary Research*, 2016, 86(1): 34-44.
- [44] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 洞穴现代沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的生物量效应及机理探讨: 以贵州4个洞穴为例[J]. *地球化学*, 2007, 36(4): 344-350.
- LUO Weijun, WANG Shijie, LIU Xiuming. Biomass effect on carbon isotope ratios of modern calcite deposition and its mechanism: A case study of 4 caves in Guizhou Province, China[J]. *Geochimica*, 2007, 36(4): 344-350.
- [45] 饶志国, 陈发虎, 曹洁, 张平中, 张平宇. 黄土高原西部地区末次冰期和全新世有机碳同位素变化与 C_3/C_4 植被类型转换研究[J]. *第四纪研究*, 2005, 1: 107-114.
- RAO Zhiguo, CHEN Fahu, CHAO Jie, ZHANG Pingzhong, ZHANG Pingyu. Variation of soil organic carbon isotope and C_3/C_4 vegetation type transition in the western loess plateau during the last glacial and Holocene periods[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 1: 107-114.
- [46] 周斌, 沈承德, 郑洪波, 赵美训, 孙彦敏. 黄土高原中部晚第四纪以来植被演化的元素碳同位素记录[J]. *科学通报*, 2009, 54(9): 1262-1268.
- ZHOU Bin, SHEN Chengde, ZHENG Hongbo, ZHAO Meixun, SUN Yanmin. Vegetation evolution on the central Chinese Loess Plateau since late Quaternary evidenced by elemental carbon isotopic composition[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(9): 1262-1268.
- [47] Sun B Y, Liu W G, Sun Y B, An Z S. The precipitation "threshold value" on C_4/C_3 abundance of the Loess Plateau, China[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(7): 718-725.
- [48] Sun Y B, Kutzbach J, An Z S, Clemens, S, Liu Z Y, Liu W G, Liu X D, Shi Z G, Zheng, W P, Liang L J, Yan Y, Li Y. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon vari-

- ability[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015(115): 132-142.
- [49] 吴秀平, 丁明虎, 侯典炯, 孙维君, 杜文涛, 张德忠, 季顺川. 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[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 42-47.
- WU Xiuping, DING Minghu, HOU Dianjiong, SUN Weijun, DU Wentao, ZHANG Dezhong, JI Shunchuan. Time - frequency analysis of carbon isotope record of stalagmite from Wanxiang Cave, western Loess Plateau, during the late of last Glacial[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(11): 42-47.
- [50] Yin J J, Li H C, Rao Z G, Shen C C, Mii H S, Pillutla R K, Hu H M, Li Y X, Feng X H. Variations of monsoonal rain and vegetation during the past millennium in Tianguai Mountain, North China reflected by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records from Zhenzhu Cave[J]. *Quaternary International*, 2017, 447: 89-101.
- [51] Li Y X, Zhang S R, Liu X K, Gao Y L, Rao Z G. Variations of the stable isotopic composition of precipitation and cave drip water at Zhenzhu cave, north China: a two-year monitoring study[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2019, 81(2): 123-135.
- [52] Bereiter B, Eggleston S, Schmitt J, Nehrbass-Ahles C, Stocker T F, Fischer H, Kipfstuhl S, Chappellaz J. Revision of the EPICA Dome C CO_2 record from 800 to 600 kyr before present[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(2): 542-549.
- [53] Dippert J K, Tissue D T, Thomas R B, Strain B R. Effects of low and elevated CO_2 on C3 and C4 annuals .1.growth and biomass allocation[J]. *Oecologia*, 1995, 101(1): 13-20.
- [54] 汪镇, 田军. 晚中新世 C_4 植被扩张与大气二氧化碳分压的关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 160-172.
- WANG Zhen, TIAN Jun. The Late Miocene C_4 vegetation expansion and its relation with the partial pressure of carbon dioxide in atmospheric[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 160-172.
- [55] North Greenland Ice Core Project. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period[J]. *Nature*, 2004, 431: 147-151.
- [56] 刘殿兵, 汪永进, 陈仕涛. 神农架天鹅洞石笋76~58 ka B. P. 时段DO事件[J]. *沉积学报*, 2007, 25(1): 131-138.
- LIU Dianbing, WANG Yongjin, CHEN Shitao. DO Events During 76-58 ka B. P. from a Stalagmite in Tian'e Cave Shennongjia Area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 131-138.
- [57] 董西瑀, 程海, Kathayat Gayatri, 张帆, 李瀚瑛, 张海伟, 赵景耀, 宁有丰, 李向磊, 成星, 曲晓丽. 石笋记录的印度季风Heinrich 2事件结束过程[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(4): 878-893.
- DONG Xiyu, CHENG Hai, Kathayat Gayatri, ZHANG Fan, LI Hanying, ZHANG Haiwei, ZHAO Jingyao, NING Youfeng, LI Xianglei, CHENG Xing, QU Xiaoli. The termination period of Heinrich 2 event recorded by stalagmite in Indian monsoon domain[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(4): 878-893.
- [58] Chiang J, Friedman A R. Extratropical cooling, interhemispheric thermal gradients, and tropical climate change[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2012, 40(1): 383-412.
- [59] Song Y G, Zeng M X, Chen X L, Li Y, Chang H, An Z S, Guo X H. Abrupt climatic events recorded by the Ili loess during the last glaciation in Central Asia: Evidence from grain-size and minerals[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 155: 58-67.
- [60] Sandeep N, Swapna P, Krishnan R, Farneti R, Prajeesh A G, Ayantika D C, Manmeet S. South Asian monsoon response to weakening of Atlantic meridional overturning circulation in a warming climate[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(7-8): 3507-3524.
- [61] Broecker W S, Peteet D M, Rind D. Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation[J]. *Nature*, 1985, 315(6014): 21-26.
- [62] Hong X W, Lu R Y. The Meridional Displacement of the Summer Asian Jet, Silk Road Pattern, and Tropical SST Anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(10): 3753-3766.
- [63] Hong X W, Lu R Y, Li S L. Amplified summer warming in Europe-West Asia and Northeast Asia after the mid-1990s[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(9): 094007.

Imprints of millennial-scale events during the MIS3 revealed by stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records in China

LUO Xuelin, ZHOU Ying, FU Tianxiang, NIE Minmin, LIANG Yijia, DONG Jinguo

(College of Geosciences, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China)

Abstract During the last glacial period, a series of millennial-scale abrupt climatic events, including Heinrich events and Dansgaard-Oeschger events, exerted influential and profound impacts on the global climate systems. Due to advantages of high resolution, multiple proxies and ^{230}Th dating methods, Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records reveal distinct teleconnections between the climates in the northern high latitudes and the Asian monsoon domain. Generally, during cold Stadials in the northern high latitudes, Asian summer monsoon was weak and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ values shifted positively, and during warm Interstadials, Asian summer monsoon was strong and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ values shifted negatively. However, accompanied with the wide application comes a hot debate on the interpretation of

stalagmite $\delta^{18}\text{O}$. It is suggested that Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ could possibly reflect Asian summer monsoon which is related with the average monsoonal intensity or the overall moisture transport to China, but could not merely represent local precipitation changes. For instance, during Stadials, under the influence of weak Asian summer monsoon, precipitation in southern China might increase, indicating inconsistent changes of "rainfall" and "wind". Climates in the monsoon marginal regions, namely northern China, are found in consistent behavior in terms of "rainfall" and "wind" changes. Besides, calcite $\delta^{13}\text{C}$ is also potential for the reconstruction of paleoclimatology and paleo-environment, thus, to some extent, could compensate the shortage of calcite $\delta^{18}\text{O}$ which lacks changing signals of local environment.

Yangquan City in Shanxi Province is located at the Loess Plateau and the northern edge of the Asian monsoon. Multi-proxy records induced from stalagmites in this region can provide us a better understanding of the "wind" and "rainfall" aspects of the monsoonal climate. At an elevation of 1,200 m above sea level, Lianhua Cave ($38^{\circ}10'\text{N}$, $113^{\circ}43'\text{E}$) is developed in the Ordovician limestone, with a narrow entrance and passages. Relative humidity in the inner cave reaches 98%-100%, and the temperature in July reaches 11°C , close to the mean annual ground temperature. Average annual precipitation is 515 mm (AD 1970-AD 2000; recorded in a meteorological station of Yangquan, 20 km from the cave). Sample LH36 is candle-shaped, 206 mm in length and 80–110 mm in diameter. After halved and polished, we find clear growth layers in the sample and it is composed of milky-white and yellowish calcite. Alternating changes of the petrography and brown weathered layers are observed at the depth of 33–35 mm and 145–150 mm, indicating two growth hiatuses. Considering the hiatuses, we use the depth section of 37–145 mm for this study, which grew in the (Marine Isotope Stage) MIS3. On the polished profile, we drill 109 samples with a 0.3 mm-diameter carbide dental bur at 1 mm intervals, 50 μg each, for stable isotope analyses. Measurements are carried out by the usage of a Finnigan-MAT 253 mass spectrometer equipped with an automated Kiel Carbonate Device at College of Geography Science, Nanjing Normal University. The analytical errors are better than $\pm 0.06\text{‰}$ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\pm 0.05\text{‰}$ for $\delta^{13}\text{C}$. Eight powder samples for ^{230}Th dating are drilled with 0.9 mm-diameter carbide dental bur, 70–130 mg each. Chemical procedures and U-Th isotopic measurement are performed on a multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer (MC-ICP-MS), Thermo Finnigan NEPTUNE, at the High-Precision Mass Spectrometry and Environment Change Laboratory (HISPEC), Department of Geosciences, National Taiwan University, and at the Isotope Laboratory, College of Geography Science, Nanjing Normal University. Uncertainties in isotopic data and dates are relative to AD 1950, and are given at the 2σ level.

Based on 8 ^{230}Th dates and 109 sets of stable isotope data of LH36, we obtain a paleoclimate record with an average resolution of 120 years from 54.5 to 41.1 ka BP during the MIS3. Both Hendy test and Replication test indicate an equilibrium fractionation of isotopes during the stalagmite deposition. Comparison with other four independently-dated, high-resolution stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records between 29°N and 41°N in the Asian monsoon region shows that the stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records from different caves have good reproducibility during the overlapped growth period. We suggest that speleothem $\delta^{13}\text{C}$ effectively indicates soil CO_2 production in the overlying area of the cave, reflecting changes in the cave's external environment and Asian summer monsoon. Five millennial-scale Asian summer monsoon intensification events correspond to the Dansgaard-Oeschger (DO) 10–14 cycles recorded in the Greenland ice core within dating errors, and the two weak monsoon processes are closely related to the Heinrich Event 5 and Heinrich Event 5a in the North Atlantic. The spatial consistency of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records in China suggests that the Asian summer monsoon and the related regional ecological environment fluctuations sensitively respond to climate changes at northern high latitudes through sea-air coupling on the millennial timescale.

Key words Loess Plateau, stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ records, Marine Isotope Stage 3, abrupt climatic event

(编辑 张玲 杨杨)