

doi:10.3799/dqkx.2013.047

黄土高原西部石笋记录的 H2 事件特征

吴秀平^{1,2}, 吴锦奎^{3*}, 侯典炯⁴, 丁明虎⁵, 孙维君⁶, 桑文翠¹, 刘伟刚⁷

1. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 甘肃兰州 730000

2. 中国科学院国家科学图书馆兰州分馆, 甘肃兰州 730000

3. 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃兰州 730000

4. 甘肃煤炭地质勘查院, 甘肃兰州 730000

5. 中国气象科学研究院气候系统研究所, 北京 100081

6. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000

7. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃兰州 730020

摘要: 青藏高原与黄土高原过渡带的甘肃武都万象洞位于现代夏季风的边缘区, 对气候变化极为敏感. 通过洞内一支石笋 WX40D 的 6 个高精度 TIMS-U 系定年数据和 616 个样品的氧同位素测定, 建立了 28.3~23.0 ka B. P., 分辨率约为 10 年的亚洲季风气候变化序列. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示 Marine Isotope Stage 2 (MIS2) 早期东亚季风气候具有 10~100 a 尺度高频震荡特征, 从中识别出北大西洋 Heinrich 2 (H2) 特强冷事件, 且记录显示该事件开始于 24.6 ka B. P., 呈突发性降温之后持续跌宕式降温变化. 对比研究发现, 万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 H2 事件与葫芦洞、天鹅洞的石笋记录有差别, 但是与湖南金滩湾洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录、33°N 太阳辐射强度以及极地 GRIP 冰心记录变化趋势一致, 表明季风边缘区气候变化主要受北半球中纬度太阳辐射能背景、北大西洋冰漂碎屑带的扩张以及低纬太平洋海表温度变化等因素的控制, 同时万象洞特殊的地理位置使得区域气候更易受到与极地气候有密切联系的亚洲冬季风和西风环流变化的影响.

关键词: 万象洞; 石笋; 氧同位素; H2 事件; 气候变化.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2013)03-0471-11

收稿日期: 2012-12-27

Characteristics and Variability of Heinrich-2 Event Recorded by Stalagmite Oxygen Isotopic Composition in the Western Loess Plateau

WU Xiu-ping^{1,2}, WU Jin-kui^{3*}, HOU Dian-jiong⁴, DING Ming-hu⁵,
SUN Wei-jun⁶, SANG Wen-cui¹, LIU Wei-gang⁷

1. Research School of Arid Environment & Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Lanzhou Branch of the National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3. Key Laboratory of Ecological Hydrology of Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

4. Gansu Province Exploration Institute of Coal Geology, Lanzhou 730000, China

5. Institute of Climate System, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

6. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

7. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

Abstract: Wanxiang Cave is sensitive to climate change due to its special geographic location, located at the transition of Tibet plateau and Loess plateau. A 10-year resolution oxygen isotope record of stalagmite from the Wanxiang Cave, based on 6 precise ²³⁰Th dates and 616 oxygen isotopic measurements provides a detailed history of the Asian Monsoon from 28.3 to 23.0 ka B. P.. A high-resolution oxygen isotopic record reveals decadal-centural oscillations in air temperature in the East Asi-

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目 (No. 41130638); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”; 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目 (No. SKLCS 2010-10); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目 (No. SKLCS-ZZ-2010-02).

作者简介: 吴秀平 (1983-), 女, 博士研究生, 主要从事全球变化与地球科学信息研究. E-mail: tunxp07@lzu.edu.cn

* **通讯作者:** 吴锦奎, E-mail: jkww@lzb.ac.cn

an monsoon climate area during the early time of marine isotope stadial 2 (MIS2). The most conspicuous feature in the oxygen isotopic record in the period is the particularly cold event synchronized with the penultimate Heinrich event (H2) in the northern Atlantic deep-sea records. This particular cold event, beginning at 24.6 ka B. P., $\delta^{18}\text{O}$ record demonstrates that the event lasted 1200 years with gradually cooling, which is different from $\delta^{18}\text{O}$ record from Hulu Cave and Tian'e Cave—a gradually cooling tendency after the remarkable cooling down. However, the $\delta^{18}\text{O}$ record from Wanxiang Cave matches well with 33°N insolation and $\delta^{18}\text{O}$ record from Jintanwan, Hunan Province; The cooling event recorded in Wanxiang Cave is also consistent with $\delta^{18}\text{O}$ record in GRIP. We maintain that this unique pattern of event recorded in the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ might be controlled by various factors including solar radiation, expansion of ice raft debris in the northern Atlantic and sea surface temperature. The particular location of the Wanxiang Cave makes the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ easily affected by Asian winter monsoon and westerly circulation correlated with Polar climate.

Key words: Wanxiang Cave; stalagmite; oxygen isotopes; H2 event; climate change.

0 引言

北大西洋冰漂碎屑事件(Heinrich事件,简称H事件)是末次冰期一系列的气候突变事件(Heinrich, 1988),北大西洋地区的降温信号通过海—气的快速重组,导致全球气候突发性降温(Broecker, 1994),并且此类事件有可能通过西风带和蒙古高压影响东亚季风系统(Porter and An, 1995);更为重要的是类似这样的气候事件可能同样发生在全新世(Bond *et al.*, 1997; Campbell *et al.*, 1998),因此H事件的内部结构及其成因机制的研究对预测未来气候变化具有实际的应用价值。

众多的冰心记录(Bond *et al.*, 1993; Grootz *et al.*, 1993; Yao *et al.*, 2001)、孢粉记录(Benson *et al.*, 1998)、黄土记录(Porter and An, 1995; 郭正堂等, 1996; Chen *et al.*, 1997)、石笋记录(Wang *et al.*, 2001; 陈仕涛等, 2006; Asmerom *et al.*, 2010; Cosford *et al.*, 2010; 张德忠等, 2011)、海洋记录(Tang *et al.*, 2003; Qian *et al.*, 2010)中都有H事件的踪迹,但很少有足够高分辨率的地质记录来说明这种气候事件遥相关效应的具体变化细节。深入理解千年—百年尺度上的气候快速波动的真正原因与机制,有赖于全球气候系统各区域内准确定年的高分辨率气候记录的研究。目前能揭示H事件内部结构的高分辨率气候记录并不多见。南京葫芦洞YT石笋年纹层序列7~30 a分辨率的氧同位素分析结果揭示了北大西洋Heinrich 2(H2)事件时东亚季风气候十年尺度的降温过程和转型特征(Wang *et al.*, 2002),湖北神农架天鹅洞SW4石笋约30 a分辨率的氧同位素序列揭示H2事件内部结构特征(陈仕涛等, 2006),即事件发生的突变性和事件结束的渐变性,事件发生时36 a内 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正约2‰,随后呈阶梯状逐渐偏负到事件结束历时约

900 a。

为了进一步探索现代季风边缘区MIS2期间H事件的特征,本文在高精度U系定年的基础上,对采自青藏高原和黄土高原过渡带、东亚季风边缘区甘肃省武都县万象洞内石笋进行研究,提取了28.3~23.0 ka B. P.时段内高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征信息,分析了季风边缘区末次冰期MIS2早期H2事件的变化细节,并对东亚季风气候区MIS2早期H事件的成因机制进行初步探讨。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与实验室处理

石笋WX40D采自甘肃省武都县万象洞($33^\circ19'\text{N}$, $105^\circ00'\text{E}$, 1200 m)。该洞位于典型季风系统交互作用的青藏高原与黄土高原过渡带,接近现代夏季风的边缘,对季风的变化非常敏感(安春雷等, 2006; Zhang *et al.*, 2008)。洞穴上覆土壤以黄土为成土母质,植被以灌木和草本为主,且发育良好。洞内次生碳酸盐沉积发育丰富且有大量现代沉积,洞内温度在年内保持恒定约为 11°C ,相对湿度达100%(Liu *et al.*, 2008),洞内沉积环境稳定。

石笋样品于2003年6月采自距万象洞洞口约1000 m处,样品采样区全长100 mm。样品采回后,首先在实验室内用刷子将样品外部清洁,除去表层泥土等杂质,沿着平行于生长轴线方向从中央锯开;然后用金刚砂人工抛光,观察发现样品生长结晶致密、无空隙,没有明显后生变化;样品剖面总体呈棕黄色和黄色,生长纹层清晰可见,纹层略倾斜,并有5条明显的白色条带,分别位于22 mm、29 mm、31 mm、37 mm、52 mm、73 mm、78 mm处。其中0~22 mm为淡黄色不规则白色条纹,23~30 mm样品

颜色逐渐加深,32~51 mm 处样品颜色为棕黄色,53~72 mm、74~77 mm、79~85 mm 处剖面为黄色并有白色细纹,85~100 mm 处剖面颜色为黄色且结晶较前面部分疏松一些.测年结果显示石笋有 2 个沉积间断(分别位于 31 mm、37 mm 处),本文对连续生长的 37~100 mm 段的石笋样品作为研究对象(图 1,黑色方框内部分).

万象洞石笋 WX40D 用于碳氧稳定同位素分析的样品采样面选取方法(Zhang *et al.*, 2010).石笋 WX40D 碳氧同位素样品的实验室取样方式按毫米取样,37~85 mm 之间每毫米取样 30 个,85~100 mm 之间每毫米取样 20 个,共采集 1740 个子样品用于氧碳同位素测试,测试时为了防止样品之间交叉污染,用于同位素测试的样品间隔取样.石笋 WX40D 进行同位素测试时按照每 3 个样品中取 1 个进行同位素测试,在个别时段追加同位素测试样品以提高数据分辨率,得到 616 个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值.

精确的年代是进行古气候研究的关键.石笋 WX40D 抛光后,在实验室采用直径为 0.5 mm 的钻头沿着平行于生长纹层方向分别在 38.0 mm、50.5 mm、54.0 mm、73.0 mm、79.0 mm、99.5 mm 处采样,共采集 6 个石笋年代样品用于 U-Th 定年(图 1,白色箭头所示).

1.2 分析方法

WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 分析样品的前期处理采用 McCrea 方法(Gat, 1996).石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 测试仪器为 Finnigan-Delta-Plus 稳定同位素气体质谱仪.结果

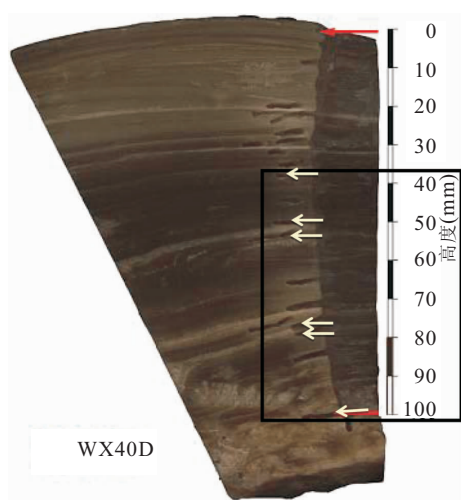


图 1 万象洞石笋 WX40D 剖面(白色箭头标示了年代采样点所在层位)

Fig. 1 Profile of stalagmite WX40D from Wanxiang Cave

以 $\delta^{18}\text{O} = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000$ 表示, R 为 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 相对于 VPDB 标准,精度为 $\pm 0.1\%$,在同位素测试过程中采用每 10 个样品添加 1 个标准样品.石笋样品 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析由兰州大学西部环境教育部重点实验室完成.WX40D 石笋的 ^{230}Th 年代测定由美国 Minnesota 大学地质和地球物理系同位素年代学实验室完成,分析仪器为 MC-ICP-MS,年龄误差为 2δ ,测试方法参照 Shen *et al.* (2002).

2 结果

2.1 WX40D 石笋的 ^{230}Th 年代模式

石笋 WX40D 在 37~100 mm 之间的 6 个 ^{230}Th 年代数据显示石笋生长覆盖了 28.3~23.0 ka B. P. 时段(表 1).测试结果表明所测年代样品的 U 含量非常高($2.1 \times 10^{-6} \sim 7.1 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$),而 ^{232}Th 含量较低($0.3 \times 10^{-9} \sim 0.79 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$),因此测年精度整体较高,误差在 47~65 a 之间,平均误差为 53 a,没有年代倒置现象.

对表 1 数据采用相邻年代点的线性内插建立石笋 WX40D 的年代-深度模型,如图 2 所示.年代深度模型表明石笋在 23.0~28.3 ka B. P. 连续生长,其中 79~100 mm 的生长速率最快约 62 mm/ka,其次为 50~73 mm 的生长速率为 17 mm/ka,38.0~50.5 mm 和 73~79 mm 的生长速率最慢约 5.5 mm/ka.

2.2 石笋 WX40D 氧同位素特征

采用相邻样点的线性内插建立了万象洞 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间变化序列(图 3), $\delta^{18}\text{O}$ 记录的平均分辨率约为 10 a.WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 28.3~23.0 ka B. P. 之间整体逐渐偏正,且 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的最小值为 -10.03% ,最大值为 -5.4% ,其变化幅度为 -4.63% ,平均值为 -7.6% ;逐渐偏正的变化趋势与北半球夏季太阳辐射在该时段的逐渐减弱相对应,说明夏季太阳辐射能量变化对亚洲季风区的气候变化起着宏观调控作用(Wang *et al.*, 2002).石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在整体偏正的背景下呈高频高幅振动,多为一系系列百年和几百年尺度的亚间冰阶-冰阶旋回,指示该地区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对气候波动变化的敏感反映.如图 3 所示,根据石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征,以 26.4 ka B. P. 为界,将 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列分为 2 个阶段:26.4~23.0 ka B. P. 的阶段 I 中 $\delta^{18}\text{O}$ 相对偏正,平均值为 -7.0% ;而 28.3~

表 1 万象洞石笋 WX40D 的 MC-ICP-MS 铀系定年结果

Table 1 Results of ^{230}Th dating for WX40D

| 样品 编号 | 距离 (mm) | ^{238}U (10^{-9}) | ^{232}Th (10^{-12}) | $d^{234}\text{U}^*$ 测量值 | $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 活度比 | ^{230}Th 年龄(a) (未校正) | ^{230}Th 年龄(a) (校正年龄) |
|----------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| WX40D-1 | 38.0 | 7 075±6 | 793±16 | 604±2.0 | 0.311 2±0.000 5 | 23 212±50 | 23 150±50 |
| WX40D-2 | 50.5 | 4 087±3 | 339±8 | 559±1.8 | 0.329 8±0.000 4 | 25 559±50 | 25 497±50 |
| WX40D-3 | 54.0 | 6 301±5 | 311±8 | 554±1.8 | 0.331 0±0.000 4 | 25 747±47 | 25 686±47 |
| WX40D-4 | 73.0 | 4 178±3 | 619±13 | 531±1.7 | 0.339 5±0.000 4 | 26 944±51 | 26 881±51 |
| WX40D-5 | 79.0 | 2 143±2 | 504±11 | 525±2.1 | 0.350 1±0.0005 | 28 022±65 | 27 958±65 |
| WX40D-6 | 99.5 | 4 890±3 | 740±16 | 612±1.8 | 0.374 5±0.000 5 | 28 360±55 | 28 297±55 |

注: $\lambda_{230}=9.1577\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$, $\lambda_{234}=2.8263\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$, $\lambda_{238}=1.55125\times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$; $\delta^{234}\text{U}=(\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}/\text{活度比}-1)\times 1000$, $\delta^{234}\text{U}$ 初始值根据 ^{230}Th 年龄(T)计算获得, 即 $\delta^{234}\text{U}$ 初始值= $\delta^{234}\text{U}$ 测量值 $\times e^{-234\times T}$; ^{230}Th 年龄的校正值是假设初始 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比为 $(4.4\pm 2.2)\times 10^{-6}$.

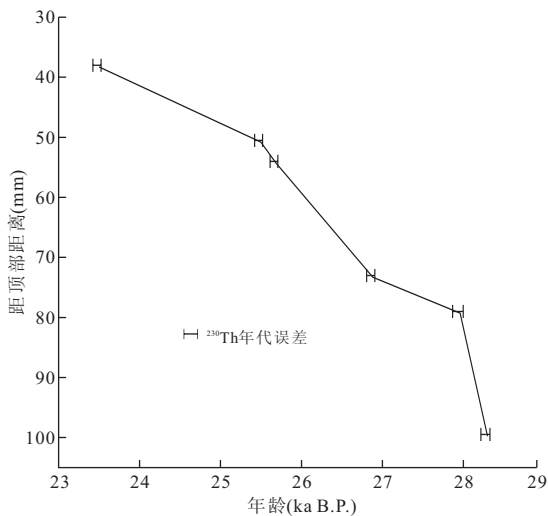


图 2 石笋 WX40D 年代—深度模型

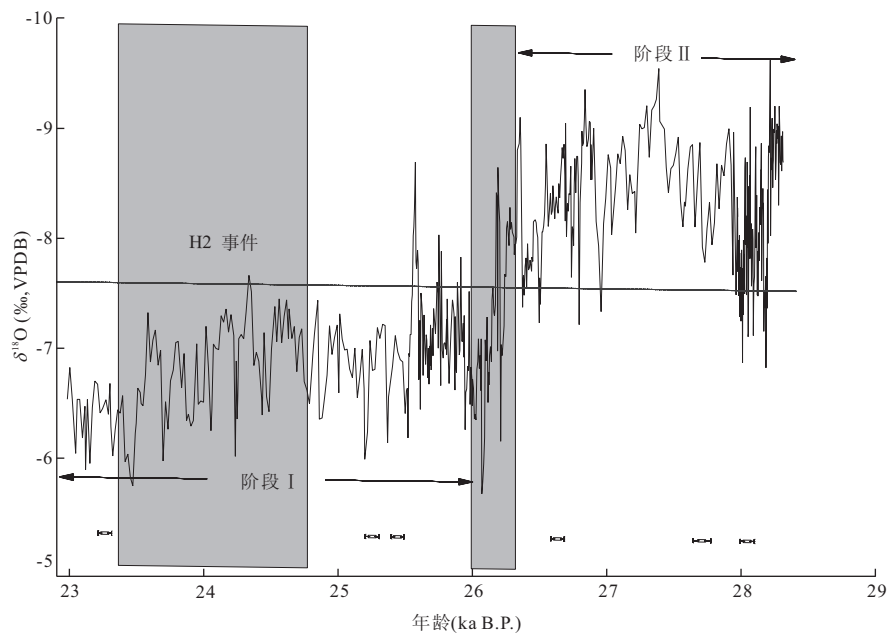
Fig. 2 The relationship of WX40D stalagmite ^{230}Th dating and depth

26.4 ka B. P. 的阶段 II 中 $\delta^{18}\text{O}$ 相对偏负, 平均值为 -8.32‰ . 由阶段 II 向阶段 I 的转换过程从偏轻向偏重的波动时突然跳跃, 波动幅度达到 2.8‰ .

在阶段 I (图 3) 万象洞石笋 WX40D 氧同位素序列波动基本平稳, 约在 24.6~23.3 ka B. P. 显著正偏, 变化幅度为 2‰ , 与北大西洋 H2 事件发生的年龄大致相同 (Bond and Lotti, 1995), 可视为东亚季风气候系统对 H2 事件的响应. 与东亚季风区葫芦洞 (Wang *et al.*, 2002)、天鹅洞石笋 (陈仕涛等, 2006) 氧同位素记录在 MIS2 期间响应北大西洋 H1 和 H2 事件变化幅度一致, 即石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的变化幅度均为 2‰ . 万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线揭示了东亚季风气候 H2 事件的内部结构特征, 即从 24.6 ka B. P. 开始氧同位素记录从 -7.5‰ 迅速变为 -6.4‰ , 变化幅度达到 1.1‰ 开始, 然后呈阶梯状缓慢负偏, 到 23.5 ka B. P. 偏正到最低为

-5.7‰ , 这一过程持续约为 1 100 a. 且 H2 事件内部缓慢负向偏的背景下存在 5 个平均振幅约 1‰ 的次级波动, 反映了事件内部结构的复杂性.

万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录已有的研究表明该区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候指示意义和中国南方地区基本一致 (安春雷等, 2006), 反映了季风强度变化. 万象洞石笋 WX40D $\delta^{18}\text{O}$ 记录阶段 II (图 2) 28.3~26.4 ka B. P. 期间比 I 阶段显著偏负, 表明 II 阶段季风强度要比 I 阶段强, 对应气候状况在 II 阶段比 I 阶段暖湿. 石笋 WX40D $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 28.3~23.0 ka B. P. 期间逐渐偏正波动背景下, 在 26.2 ka B. P. 存在一个突然偏重跳跃且持续时间短 (约为 200 a), $\delta^{18}\text{O}$ 偏正约 3‰ , 由此推断 26.2 ka B. P. 为冷干气候事件. 该事件在中国其他记录中也有记载, 如采用光释光方法测年的黄土高原 4 个具有代表性的晚第四纪黄土剖面 (甘肃环县剖面、环县 M 剖面、西风剖面和陕西蓝田剖面) 的粒度和磁化率记录表明, 以 26 ka B. P. 为界, 气候变化由相对湿润向相对干旱转变 (鹿化煜等, 2006). 南海南部 86GC 浮游有孔虫的氧同位素记录显示在 26.2 ka B. P. 左右海平面显著波动 (付淑清等, 2010); 黄土高原孢粉重建的古植被变化表明, 在 26~25 ka B. P. 间, 草本、木本植物的数量均降低, 花粉浓度也很低, 反映了针叶林再一次向草原过渡, 显示植被稀疏、气候干燥 (唐领余等, 2007). 综合中国北方晚更新世晚期冰缘现象的研究及其他方面研究成果重建了晚更新世以来纬度冻土带南界变迁, 并提出 26 ka B. P. 有 1 次寒冷期 (Cui *et al.*, 2004). 俄勒冈州西部小湖的孢粉和地球化学数据暗示, MIS2 期间的气候变化与 Carp 湖的云杉属孢粉比率增加, 在 26 ka B. P., 23 ka B. P. 和 17.5 ka B. P. 气候冷湿 (Laurie *et al.*, 2001).

图3 万象洞 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录Fig. 3 The $\delta^{18}\text{O}$ record of stalagmite WX40D from Wanxiang Cave, Gansu Province

短线为 WX40D 石笋的实测年龄和误差;虚线为生长时段内 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录平均值;两处阴影分别为 H2 事件和 I、II 阶段的分界线

3 讨论

3.1 MIS2 期间万象洞石笋 WX40D $\delta^{18}\text{O}$ 记录与 WX42A 灰度记录的 H 事件特征的对比

末次冰期晚期深海氧同位素 2 阶段 (MIS2) 是气候最冷、冰川规模最大的时段 (施雅风等, 1997), 期间共发生过 2 次 H 事件 (H1, H2)。万象洞石笋 WX42A 的灰度变化指示了千年—亚千年尺度上亚洲季风强度的盛衰 (张德忠等, 2011), 季风强度高, 灰度值一般会较大, 反之亦然。对比 MIS2 期间万象洞的两根石笋 WX40D 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 H2 事件和 WX42A 灰度记录的 H1 事件 (张德忠等, 2011), 发现两起突变事件高频波动的内部结构大致相同, 如图 4 所示, 主要表现在以下 3 方面: (1) 事件发生的突变性。石笋 WX40D 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示 H2 事件发生时第 1 次波动为 1.1‰, 所需时间约为 100 a; 石笋 WX42A 灰度记录 H1 事件第 1 次波动所需时间约 100 a, 灰度变化值为 24。两石笋记录在 MIS2 期间 H 事件发生时第 1 次偏移所需时间短暂, 且波动一致。(2) 事件内部结构复杂。事件从开始发生至达到最冷最显著的过程中 MIS2 期间两次 H 事件的变化模式相同, 中间伴随约 5 次 10~100 a 尺度的波动, 在气候表现形式上以阶梯状缓慢变化以达到最冷值。(3) 持续时间的相似性。万象洞两根石笋记录的 MIS2 期间两次 H 事件从开始至达到极值所持

续的时间一致, 约为 1 200 a。表明亚洲季风边缘区万象洞洞穴的石笋记录对北大西洋记录的 H 事件能够很好地反映, 这与东亚季风区其他洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Wang *et al.*, 2001, 2002; 陈仕涛等, 2006; Asmerom *et al.*, 2010) 的季风强度变化相似, 这些高分辨率的石笋记录表明北大西洋和东亚季风区气候在冰期气候变化中具有很强的遥相关。来自季风边缘区万象洞的石笋记录, 处于 3 种季风交汇区, 对气候变化敏感, 且具有高分辨率特征的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录有助于更好地理解 MIS2 阶段 H 事件变化细节和驱动机制。

3.2 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与太阳辐射、格陵兰冰心记录对比

在 28.3~23.0 ka B.P. 期间, 万象洞石笋 WX40D $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候变化趋势与高纬度的格陵兰冰心记录 (Rasmussen *et al.*, 2008) (GRIP) 的温度变化和东亚季风区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的季风强度变化以及 33°N 夏季太阳辐射总量 (Berger, 1978) 变化趋势一致 (图 5), 表明该区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在长时间尺度上与来自不同区域不同纬度的气候记录具有共同驱动因素, 即受太阳辐射总量变化的控制。WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所指示的季风减弱响应于 33°N 太阳辐射变化 (Berger, 1978), 也与反映热带辐合带 (ITCZ) 位置变化的委内瑞拉北部 (Carico Basin) 反照率记录相似 (Peterson *et al.*, 2000), 这

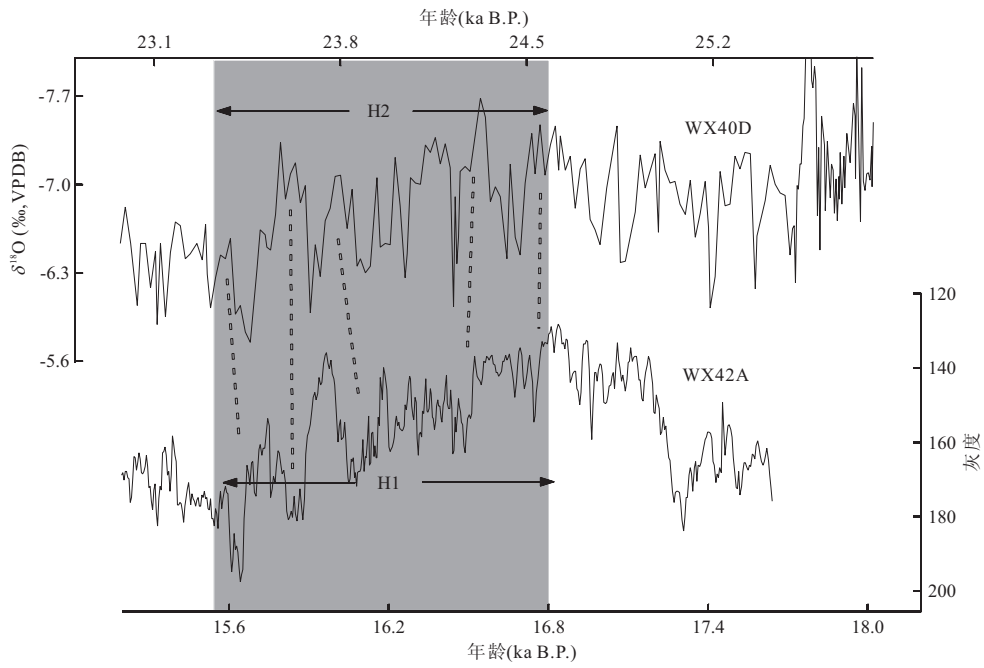


图 4 末次冰期晚期万象洞石笋 WX40D $\delta^{18}\text{O}$ 与 WX42A 灰度记录(张德忠等,2011)的 H 事件
 Fig. 4 Comparison H events recorded by WX40D $\delta^{18}\text{O}$ and WX42A gray scale during late last glacial

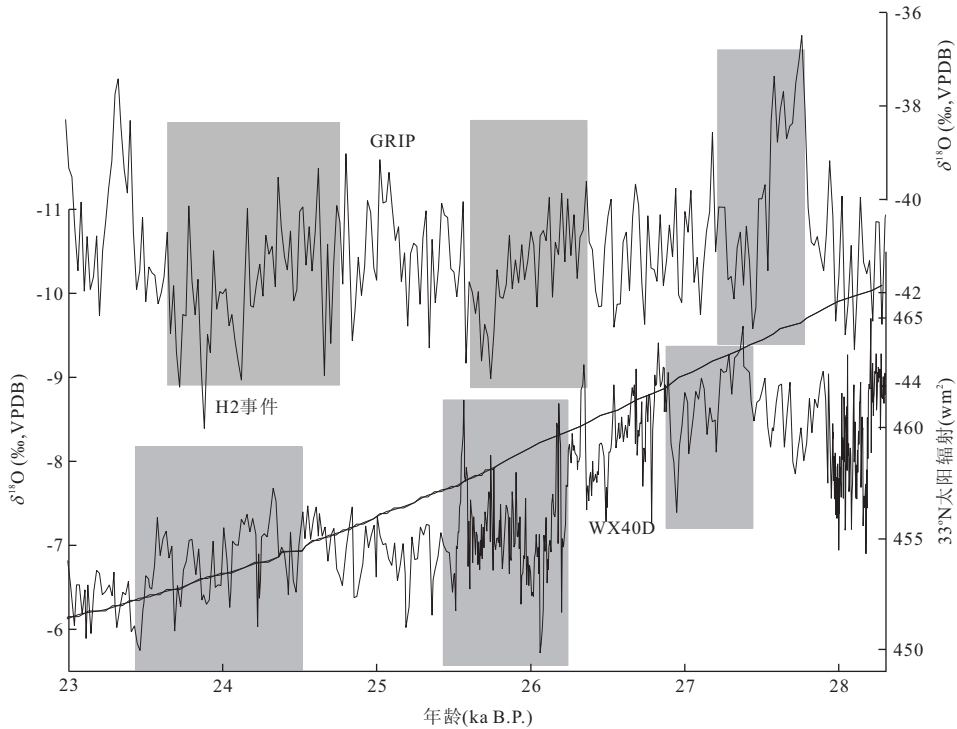


图 5 万象洞 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与格陵兰冰心记录 GRIP 温度记录(Rasmussen *et al.*, 2008)
 Fig. 5 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ record of stalagmite WX40D Wanxiang Cave with GRIP

与已发表洞穴记录所揭示的亚洲季风强度变化与热带辐合带位置(ITCZ)变化相联系(Cui *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2008)的观点一致. 尽管这些记录跟随太阳辐射的变化,在 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和冰心记录

中这种变化趋势还不时地被百年尺度的气候波动打断,这种百年尺度的气候突变不能用米兰科维奇理论解释(Bond *et al.*, 1993),万象洞高分辨率的石笋 WX40D $\delta^{18}\text{O}$ 记录的季风强度变化与格陵兰冰心 $\delta^{18}\text{O}$

记录的温度变化有很好的对应关系,特别是“暖到冷”的转换方式上具有明显的一致性(图5阴影所示),即:格陵兰冰心记录气候变化由暖变冷是缓慢的渐变过程,万象洞石笋记录的季风强度也是缓慢减弱。这与北大西洋深海沉积记录显示的在每次H事件出现时,呈现逐渐降温的变化趋势(Bond *et al.*, 1993)也是一致的,表明末次冰期石笋记录的东亚季风环流强度与极地温度变化在千年尺度上遥相关(Wang *et al.*, 2002; 陈仕涛等, 2006; Cosford *et al.*, 2010),并且这种遥相关在高分辨率的万象洞WX40D石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中得到了进一步验证。

石笋氧同位素记录与格陵兰GRIP冰心记录也存在一些明显的差别,主要表现在两条曲线的波动幅度不同,GRIP冰心记录的氧同位素波动幅度明显大于万象洞中石笋氧同位素记录,且石笋氧同位素记录曲线的变化趋势与 33°N 太阳辐射变化曲线极为相似,而GRIP冰心氧同位素记录曲线的变化趋势背景曲线平直,这种差异说明大陆气候比极地气候更强烈响应于太阳辐射的变化,即:夏季太阳辐射降低直接导致海陆温差减小,季风减弱(Cohman, 1988)。此外,在26 ka B. P. 万象洞石笋氧同位素记录的季风减弱强度明显要比其他时段的季风减弱强度大,这与热带太平洋浮游有孔虫氧同位素记录的海水温度的突然降低同步(Rina *et al.*, 2009),而格陵兰冰心记录中的温度在该时段的变化与其他时段降温事件变化相似,没有明显的突然降低,表明热带低纬度区域的大气环流变化导致中纬度大陆气候对其产生敏感响应。万象洞地区石笋氧同位素记录的古季风环流变化的动力机制与全球变化是一致的,显示东亚古季风气候变化的直接动力可能来自于全球冰量的变化,即主要受北半球日照辐射强度、北大西洋冰漂碎屑带的扩张以及低纬太平洋海表面温度变化等因素的影响。万象洞石笋与格陵兰冰心记录的H2事件在古气候记录上的极其相似性充分说明了东亚季风气候与高纬极地气候之间的密切联系,说明目前发现的全球气候事件在驱动力、激发区以及传递途径等方面具有统一性。

3.3 万象洞WX40D石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比

万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比显示,在MIS2晚期石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录均具明显偏正变化趋势(图6),指示亚洲季风强度减弱;石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势与在 33°N 太阳辐射能曲线降低的趋势相似,表明亚洲季风区宏观上受到太阳辐射驱

动下气候变化的影响。WX40D石笋与东亚季风区其他洞穴的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线均记录了北大西洋区域H2事件的痕迹(陈仕涛等, 2006; Cosford *et al.*, 2010),且石笋记录的H2事件在变化细节上具有诸多相似性。首先,东亚季风区石笋氧同位素记录响应北大西洋地区H2事件的最大变化幅度一致,均为2‰左右;其次,响应H2事件石笋氧同位素记录曲线均表现为突然跳跃,偏正变化幅度均大于1‰。另外,图5中显示万象洞石笋WX40D氧同位素记录的H2事件与湖南金滩湾洞穴石笋氧同位素记录的H2事件内部变化特征相似,为多旋回偏正波动趋势,H2事件从开始至达到极值,两个区域的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中均显示大约需1200 a,指示东亚季风强度逐渐减弱。上述结果均表明北大西洋区域的H2事件在东亚季风区普遍存在且影响强度相似。

万象洞WX40D石笋氧同位素记录的H2事件与东亚季风区南京汤山葫芦洞、湖南金滩湾洞穴石笋氧同位素记录也存在一些明显的差异(图6),主要表现在以下两个方面。

(1)万象洞石笋氧同位素记录的H2事件与南京汤山葫芦洞石笋氧同位素记录的变化趋势不同。南京汤山葫芦洞响应北大西洋区域的H2事件是一个“V型”模式,即:季风强度突然减弱然后增强的变化模式。笔者推断这种差异是因为北半球高纬地区、热带西太平洋、青藏高原是影响我国气候的三大主控因子,只不过在不同区域,其权重有所不同(管清玉等, 2007)。南方石笋记录的研究揭示,冰期期间高北纬的温度变化相对于太阳辐射对亚洲季风区产生更强的影响,而且很有可能扰乱北半球大气和海洋之间的环流模式,改变东亚地区的季风降水(Zhou *et al.*, 2008)。尤其是北大西洋经向反转环流降低或者关闭导致中纬度地区ITCZ的位置向南移动(Broecker, 2003),东亚地区季风降水减少,石笋氧同位素记录迅速响应气候变化发生正向漂移,季风强度减弱。南京葫芦洞石笋所在地区冰期大气降水主要来自西太平洋表层水的蒸发水汽(Wang *et al.*, 2001),其氧同位素组成主要受海表温度(SST)影响,冰筏碎屑事件过后海温回升,ITCZ北移降水增多,氧同位素记录开始负向偏移,季风强度开始增强。然而万象洞位于季风边缘区,冰期响应北大西洋H事件,北半球大气海洋环流发生变化,ITCZ向南移动导致季风北部界限退出万象洞地区,氧同位素记录迅速偏正。且万象洞石笋独特的地理位置更容易受到与极地气候有密切联系的东亚冬季风和西风环流变化的影响(Porter and

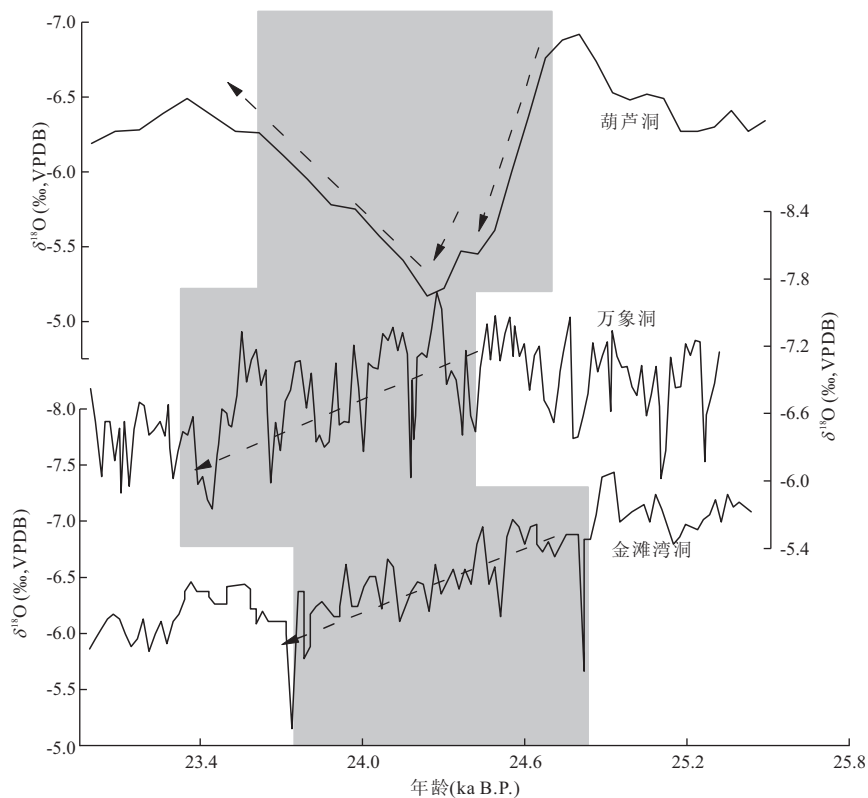


图 6 万象洞 WX40D 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(葫芦洞, 湖南金滩湾洞)

Fig. 6 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ record of WX40D stalagmite Wanxiang Cave with Hulu Cave
灰色阴影为 H2 事件

An, 1995). 同时模拟结果还初步揭示了 H 事件期间, 东亚夏季风也较弱, 引起东亚夏季风降水出现明显减弱, 冬季欧亚大陆偏强和偏南的西风带以及使中国北部干旱化加剧的欧亚夏季风减弱 (Jin *et al.*, 2007), 导致万象洞地区石笋记录氧同位素持续偏正。

(2) 万象洞石笋氧同位素记录响应北大西洋 H2 事件的变化趋势与湖南金滩湾洞穴石笋氧同位素记录的变化相似, 但是也有明显的差别, 主要表现在记录的变化幅度上。古气候模拟的结果指出, 冰期海陆温差的减小是季风减弱的首要原因 (Cohmap, 1988), 而冰盖的存在使冬季风得以加强, 使夏季风得到削弱。万象洞地理位置比湖南金滩湾洞穴偏西北, 在青藏高原东南边缘受到西伯利亚高压下冬季风和西风带的影响, 可能导致万象洞石笋记录对区域气候变化敏感的反应, 因此变化幅度要比位置偏西南的湖南金滩湾洞穴大。

4 结论

(1) MIS2 早期生长的甘肃陇南万象洞 WX40D 石笋高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列记录的 H2 事件变化

特征, 与同一洞穴石笋 WX42A 灰度记录的 H1 事件变化趋势基本一致, 说明 MIS2 期间万象洞石笋记录响应北大西洋气候突变事件具有一致性, 即两次 H 事件可能具有相同的驱动机制。

(2) 季风边缘区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与格陵兰冰心、季风区其他洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的相似性表明, 东亚季风区气候变化主要受北半球中纬地区日辐照能背景、北大西洋冰漂碎屑带的扩张以及低纬太平洋海表温度变化诸因素的控制。

(3) 响应 H2 事件东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列记录的差异性表明, 冰漂碎屑事件发生后, 海表温度发生变化导致 ITCZ 南移, 退出万象洞地区, 降水减少了石笋氧同位素曲线呈偏正变化的趋势; 同时, 冬季欧亚大陆偏强和偏南的西风带以及使中国北部干旱化加剧的欧亚夏季风减弱, 导致万象洞地区石笋记录氧同位素持续偏正。

References

- An, C. L., Zhang, P. Z., Dai, Z. B., *et al.*, 2006. Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ Record during MIS5 in Wanxiang Cave Stalagmite, Gansu Province of Western Loess Plateau and

- Those of Southern China Stalagmites. *Quaternary Sciences*, 26 (6): 985 — 990 (in Chinese with English abstract).
- Asmerom, Y. , Polyak, V. J. , Burns, S. J. , 2010. Variable Winter Moisture in the Southwestern United States Linked to Rapid Glacial Climate Shifts. *Nature Geoscience*, 3(2): 114—117. doi:10.1038/ngeo754
- Benson, L. V. , Lund, S. P. , Burdett, J. W. , et al. , 1998. Correlation of Late-Pleistocene Lake-Level Oscillation in Mono Lake, California, with North Atlantic Climate Events. *Quaternary Research*, 49 (1): 1 — 10. doi: 10.1006/qres.1997.1940
- Berger, A. , 1978. Long-term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climate Changes. *Journal of the Atmospheric Science*, 35(12): 2362 — 2367. doi:10.1175/1520-0469(1978)035<2362;LTVODI>2.0.CO;2
- Bond, G. , Broecker, W. , Johnsen, S. , et al. , 1993. Correlations Between Climate Records from North Atlantic Sediments and Greenland Ice. *Nature*, 365 (6442): 143 — 147. doi:10.1038/365143a0
- Bond, G. , Showers, W. , Cheseby, M. , et al. , 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278(5341): 1257 — 1266. doi:10.1126/science.278.5341.1257
- Bond, G. C. , Lotti, R. , 1995. Iceberg Discharges into the North Atlantic on Millennial Time Scales during the Last Glaciation. *Science*, 267 (5200): 1005 — 1010. doi: 10.1126/science.267.5200.1005
- Broecker, W. S. , 2003. Does the Trigger for Abrupt Climate Change Reside in the Ocean or in the Atmosphere. *Science*, 300 (5625): 1519 — 1522. doi: 10.1126/science.1083797
- Broecker, W. S. , 1994. Massive Iceberg Discharges as Triggers for Global Climate. *Nature*, 372(6505): 421 — 424. doi:10.1038/372421a0
- Campbell, I. D. , Campbell, C. , Apps, M. J. , et al. , 1998. Late Holocene Approximately 1 500 yr Climatic Periodicities and Their Implications. *Geology*, 26(5): 471 — 473. doi: 10.1130/0091-7613(1998)026<0471:LHYCPA>2.3.CO;2
- Chen, F. H. , Bloemendal, J. , Wang, J. M. , et al. , 1997. High Resolution Multi-Proxy Climate Records from Chinese Loess; Evidence for Rapid Climatic Changes over the Last 75 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 130 (1 — 4): 323 — 335. doi: 10.1016/S0031-0182(96)00149-6
- Chen, S. T. , Wang, Y. J. , Wu, J. Y. , et al. , 2006. An Event of the East Asian Monsoon Responding to Heinrich Event 2; Evidence from High Resolution Stalagmite Record. *Geochemical*, 35 (6): 586 — 592 (in Chinese with English abstract).
- Cohmap, M. , 1998. Climatic Changes of the Last 18, 000 Years: Observations and Model Simulations. *Science*, 241 (4869): 1043 — 1052. doi: 10.1126/science.241.4869.1043
- Cosford, J. , Qing, H. , Lin, Y. , et al. , 2010. The East Asian Monsoon during MIS2 Expressed in a Speleothem $\delta^{18}O$ Record from Jintanwan Cave, Hunan, China. *Quaternary Research*, 73 (3): 541 — 549. doi: 10.1016/j.yqres.2010.01.003
- Cui, Z. J. , Yang, J. Q. , Zhao, L. , et al. , 2004. Discovery of a Large Area of Ice-Wedge Networks in Ordos; Implications for the Southern Boundary of Permafrost in the North of China as Well as for the Environment in the Latest 20 ka B. P. . *Chinese Sci. Bull.*, 49(11): 1177 — 1184. doi:10.1360/03wd0211
- Fu, S. Q. , Zhu, Z. Y. , Ouyang, T. P. , et al. , 2010. Palaeoenvironment Changes from Oxygen and Carbon Isotopic Records of Planktonic Foraminifera from the Southern South China Sea since the Last Glacial Stage. *Marine Geology Letters*, 26(9): 19—24 (in Chinese with English abstract).
- Gat, J. R. , 1996. Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Hydrologic Cycle. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 24(1): 225 — 262. doi: 10.1146/annurev.earth.24.1.225
- Groote, P. M. , Stuiver, M. , White, J. W. , et al. , 1993. Comparison of Oxygen Isotope Records from the GISP2 and GRIP Greenland Ice Cores. *Nature*, 366 (6455): 552 — 554. doi:10.1038/366552a0
- Guan, Q. Y. , Pan, B. T. , Wu, G. J. , et al. , 2007. East Asian Monsoon Pattern and Cause of Rapid Climate Fluctuations during the Last Glacial. *Acta Sedimentology Sinica*, 25(3): 429—436 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. T. , Liu, D. S. , Wu, N. Q. , et al. , 1996. Heinrich-Rhythm Pulses of Climates Recorded in Loess of the Last Two Glaciations. *Quaternary Sciences*, 49(1): 21—30 (in Chinese with English abstract).
- Heinrich, H. , 1988. Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the Past 130 000 Years. *Quaternary Research*, 29(2): 142—152. doi:10.1016/0033-5894(88)90057-9
- Jin, L. Y. , Chen, F. H. , Ganopolski, A. , et al. , 2007. Response of East Asian Climate to Dansgaard/Oeschger and Heinrich Events in a Coupled Model of Intermediate Complexity. *J. Geophys. Res.*, 112(D6): D06117. doi:

10. 1029/2006JD007316
- Laurie, D. G., Whitlock, C., Dean W. E., 2001. Evidence for Millennial-scale Climate Change During Marine Isotope Stages 2 and 3 at Little Lake, Western Oregon, U. S. A. *Quaternary Research*, 56(1): 10–22. doi: 10. 1006/qres. 2001. 2246
- Liu, J. H., Zhang, P. Z., Cheng, H., et al., 2008. Asian Summer Monsoon Precipitation Recorded by Stalagmite Oxygen Isotopic Composition in the Western Loess Plateau during AD11875–2003 and Its Linkage with Ocean-Atmosphere System. *Chinese Science Bulletin*, 53(13): 2041–2049. doi: 10. 1007/s11434–008–0286–5
- Lu, H. Y., Zhou, Y. L., Mason, J., et al., 2006. Late Quaternary Climatic Changes in Northern China: New Evidences from Sand Dune and Loess Records Based on Optically Stimulated Luminescence Dating. *Quaternary Sciences*, 26(6): 888–894 (in Chinese with English abstract).
- Peterson, L. C., Haug, G. H., Hughen, K. A., et al., 2000. Rapid Changes in the Hydrological Cycles of the Tropical Atlantic during the Last Glacial. *Science*, 290(5498): 1947–1951. doi: 10. 1126/science. 290. 5498. 1947
- Porter, S. C., An, Z. S., 1995. Correlations between Climate Events in the North Atlantic and China during the Last Glaciation. *Nature*, 375(6529): 305–308. doi: 10. 1038/375305a0
- Qian, G. E., Chu, F. Y., Xue, Z., 2010. Paleoenvironmental Records from the Northern South China Sea since the Last Glacial Maximum. *Acta Oceanol. Sin.*, 29(3): 46–62. doi: 10. 1007/s13131–010–0036–9
- Rasmussen, S. O., Seierstad, I. K., Andersen, K. K., et al., 2008. Synchronization of the NGRIP, GRIP, and GISP2 Ice Cores across MIS 2 and Palaeoclimatic Implications. *Quaternary Science Review*, 27(1–2): 18–28. doi: 10. 1016/j. quascirev. 2007. 01. 016
- Rina, Z., Ann, H., Dirk, N., et al., 2009. Evidence for Indonesian Throughflow Slowdown during Heinrich Events 3–5. *Paleoceanography*, 24(2): 1–15. doi: 10. 1029/2008PA001653
- Shen, C. C., Edwards, R. L., Cheng, H., et al., 2002. Uranium and Thorium Isotopic and Concentration Measurements by Magnetic Sector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Chem. Geol.*, 185(3–4): 165–178. doi: 10. 1016/S0009–2541(01)00404–1
- Shi, Y. F., Zheng, B. X., Yao, T. D., et al., 1997. Glaciers and Environments during the Last Glacial Maximum (LGM) on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 19(2): 97–113 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X. Z., Chen, Z., Yan, W., et al., 2003. Younger Dryas and Heinrich Events Recorded by Magnetic Susceptibility of Sediments from the Central Temperature Area of Western Pacific Warm Pool. *Chinese Sci. Bull.*, 48(8): 808–813. doi: 10. 1007/BF03187058
- Tang, L. Y., Li, C. H., An, C. B., et al., 2007. Vegetation History of the Western Loess Plateau of China during the Last 40 ka Based on Pollen Record. *Acta Palaeontologica Sinica*, 46(1): 45–61 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2001. A High-Resolution Absolute Dates Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550): 2345–2348. doi: 10. 1126/science. 1064618
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2008. Millennial- and Orbital-Scale Changes in the East Asian Monsoon over the Past 224 000 Years. *Nature*, 451(7182): 1090–1093. doi: 10. 1038/nature06692
- Wang, Y. J., Wu, J. Y., Liu, D. B., et al., 2002. A Quick Cooling Event of the East Asian Monsoon Responding to Heinrich Event 1: Evidence from Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Records. *Science in China (Series D)*, 45(1): 88–96. doi: 10. 1360/02yd9010
- Yao, T. D., Xu, B. Q., Pu, J. C., 2001. Climatic Changes on Orbital and Sub-Orbital Time Scale Recorded by the Guliya Ice Core in Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 44(S1): 360–368. doi: 10. 1007/BF02912007
- Zhang, D. Z., Bai, Y. J., Sang, W. C., et al., 2011. Asian Monsoon Intensity Variations during the Last Deglaciation Recorded by Stalagmite Gray Scale from Wanxiang Cave, Western Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 31(5): 791–799 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. Z., Zhang, P. Z., Sang, W. C., et al., 2010. Implications of Stalagmite Density for Past Climate Change: An Example from Stalagmite Growth during the Last Deglaciation from Wanxiang Cave, Western Loess Plateau. *Chinese Sci. Bull.*, 55(34): 3936–3943. doi: 10. 1007/s1134–010–000–2
- Zhang, P. Z., Cheng, H., Edwards R. L., et al., 2008. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1 810-year Chinese Cave Record. *Science*, 322(5903): 940–942. doi: 10. 1126/science. 1163965
- Zhou, H. Y., Zhao, J. X., Feng, Y. X., et al., 2008. Distinct Climate Change Synchronous with Heinrich Event One, Recorded by Stable Oxygen and Carbon Isotopic Com-

positions in Stalagmites from China. *Quat. Res.*, 69(2): 306—315. doi:10.1016/j.yqres.2007.11.001

附中文参考文献

- 安春雷,张平中,代志波,等,2006. 中国黄土高原西缘甘肃万象洞 MIS5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与南方地区石笋记录的对比研究. *第四纪研究*, 26(26):985—990.
- 陈仕涛,汪永进,吴江莹,等,2006. 东亚季风气候对 Heinrich2 事件的响应:来自石笋的高分辨率记录. *地球化学*, 35(6):586—592.
- 付淑清,朱照宇,欧阳婷萍,等,2010. 南海南部浮游有孔虫氧碳同位素记录的末次冰期以来古环境变迁. *海洋地质动态*, 26(9):19—24.
- 管清玉,潘保田,邬光剑,等,2007. 末次冰期东亚季风快速波动的模式与成因. *沉积学报*, 25(3):429—436.
- 郭正堂,刘东生,吴乃琴,等,1996. 最后两个冰期黄土记录中 Heinrich 型的气候节拍. *第四纪研究*, 49(1):21—30.
- 鹿化煜,周亚利, Mason, J., 等,2006. 中国北方晚第四纪气候变化的沙漠与黄土记录——以光释光年代为基础的直接对比. *第四纪研究*, 26(6):888—894.
- 施雅风,郑本兴,姚檀栋,1997. 青藏高原末次冰期最盛时的冰川与环境. *冰川冻土*, 19(2):97—113.
- 唐领余,李春海,安成邦,等,2007. 黄土高原西部四万多年以来植被与环境变化的孢粉记录. *古生物学报*, 46(1):45—61.
- 张德忠,白益军,桑文翠,等,2011. 末次冰消期亚洲季风强度变化的黄土高原西部万象洞石笋灰度记录. *第四纪研究*, 31(5):1—9.