

文章编号:1000-0550(2018)04-0674-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.051

湖北高分辨率石笋记录的 DO18 事件特征

张伟宏¹, 廖泽波², 陈仕涛², 邵庆丰², 段福才¹, 朱丽东¹, 王天阳¹

1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

摘要 研究冰量较大时期千年尺度事件的区域响应和结构特征有助于进一步理解和验证千年尺度事件的驱动机制。基于湖北永兴洞一支石笋的5个高精度²³⁰Th 年龄和323个氧同位素数据,重建了 Dansgaard-Oeschger (DO) 18事件发生时高分辨率的东亚水文循环变化的过程和特征。结合同一洞穴另两支石笋记录,发现永兴洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在~64.7 ka 迅速负偏 1.5‰, 指示在 MIS4 阶段东亚季风区确实发生了持续时间较短的 DO18 事件。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 结果精确标定了 DO18 事件的结束时间为~63.0 ka, 结束过程呈现出5个百年尺度的季风增强振荡。在形态特征上,不同于格陵兰冰芯 DO18 事件的快速开始和快速结束 (~60 a) 的对称变化,季风区 DO18 事件呈现出快速增强但缓慢结束 (持续达 1500 a) 的显著不对称特征。但是,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与北大西洋温盐环流 (AMOC) 变化在形态特征和持续时间上高度一致,暗示了 AMOC 对东亚季风区 DO 事件的重要调控作用。DO18 事件时东亚季风与北大西洋气候的不同结构特征可归于高低纬气候系统对 AMOC 响应方式的差异。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 功率谱结果呈现出 208 a、150 a、52 a 和 14~12 a 的变化周期,分别接近于太阳活动的 207 a、149 a、57 a 和 11 a 周期,说明在冰量较大的 MIS4 阶段太阳活动仍控制着东亚季风短尺度的波动。

关键词 石笋; 高分辨率; DO18; 东亚季风; AMOC

第一作者简介 张伟宏,女,1987年 出生,博士,讲师,全球气候环境变化,E-mail: zhangwh@zjnu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

末次冰期气候变化的一个显著特征是存在着一系列千年尺度气候突变事件,即 Dansgaard-Oeschger 事件 (DO 事件)^[1]。其中,在深海氧同位素 4 阶段 (Marine Isotope Stage 4, 简称 MIS4), 北半球太阳辐射减少,全球冰量较大 (海平面比现在低 60~80 m) 仅次于末次冰盛期^[2], 格陵兰冰芯记录显示此阶段仅存在 DO19 和 DO18 两次增暖事件^[3]。其中,持续时间长达 2000 a 的 DO19 事件在北大西洋区域表现为先典型快速升温再缓慢降温 and 再快速降温的锯齿状变化模式,相类似的气候突变事件在北半球中、低纬记录中多有体现^[4-8]。然而,格陵兰冰芯记录中持续不到 400 a 的 DO18 事件在部分中、低纬区域记录中并不显著,导致学者对于持续时间较短的该类事件在中、低纬地区的响应以及动力学机制仍存疑惑^[6]。如欧洲阿尔卑斯山北部高分辨率洞穴石笋清晰的记录到 DO19 事件,但未记录到随后发生的持续较短的

DO18 事件^[6]。而在较低纬度的中国西南季风区域,重庆新崖洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 64.7±0.5 ka 快速负偏达 1‰, 指示了 DO18 季风事件的快速开始^[9]。但是,在东亚季风区的南京葫芦洞、贵州董哥洞和湖北三宝洞石笋记录 (均满足记录 DO18 的分辨率) 均未显示出 DO18 事件时季风显著增强的印记^[4-5,10-11]。不同的是,距离三宝洞约 130 km 的湖北永兴洞的两支石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录却显示出季风在此时增强的特征^[8]。因此,尽管在中国季风区有若干记录捕捉到 DO18 事件,但是目前还缺少高分辨率和精确定年的记录来进一步验证此事件在中低纬度的发生、以及进一步刻画其详细的结构特征和持续时间。这些特征有助于理解短尺度季风气候事件与北高纬气候之间的协同性和差异性以及这些事件的驱动机制。

在冰量规模中等的 MIS3 阶段,DO 事件的周期性发生被广泛认为与北大西洋温盐环流 (AMOC) 强度的变化密切相关^[12-15]。但是,不清楚的是在冰量较大的 MIS4 阶段 AMOC 对于 DO 事件的发生是否有

收稿日期: 2017-05-24; 收修改稿日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41602350, 41602181, 41572340); 浙江省自然科学基金项目 (LY16D010001) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41602350, 41602181, 41572340; Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China, No. LY16D010001]

重要作用。对于冰量较大的末次冰期后期, Lynch-Stieglitz *et al.*^[16] 通过对佛罗里达海峡底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究, 发现在 Heinrich 2 (H2) 和 Heinrich 3 (H3) 事件发生时北大西洋深层水变化极为微弱, 提出 H2 和 H3 事件发生以前 AMOC 已经减弱到极致的观点。该研究表明在冰量较大时期 (如 MIS 2) 的 AMOC 不再如 MIS 3 时期活跃, 也有研究指出 MIS 2 和 MIS 4 时期, 两半球间 Bipolar see-saw 现象消失, AMOC 停滞^[17]。有学者对 DO 事件的发生机制也提出不同看法。Wunsch^[18] 认为 DO 事件是风场和陆地冰盖相互作用的结果, 风场具有较大的波动能力且产生迅速的全球尺度的遥相关, 且是大洋环流变化的有效驱动器; Petersen *et al.*^[19] 提出北大西洋冰架和海冰的协同变化能够解释 DO 旋回不同阶段的形态及转换过程。那么, 检验在冰量较大的 MIS4 阶段 DO 事件的发生是否与 AMOC 相关还需提供更多的高分辨率地质记录。

本文根据湖北神农架永兴洞石笋的高精度²³⁰Th 定年和高分辨率氧同位素数据, 重建 DO18 事件发生时东亚季风水文循环变化过程。通过与南北极冰芯和海洋记录的对比, 探讨亚洲季风 DO18 事件与 AMOC 的耦合过程, 为理解末次冰期不同气候背景下气候突变事件发生机制提供基础。

1 研究区域、样品与方法

石笋样品 (No. YX274) 采自湖北省神农架保康县歇马镇的永兴洞 (31°35'N, 111°14'E)。神农架地区主要是由大巴山脉东段近东西方向延伸的中高地貌组成, 区内总地势为西南高而东北低的阶梯状, 地表土壤发育较好, 植被以灌木和草本植物为主。该区隶属于长江中下游区域, 主要受亚热带季风气候环流系统控制。本区年均降水量为 1 500~2 000 mm, 夏季 6 月—8 月降水集中, 占全年雨量的 50% 以上; 冬季 12 月—2 月降水量较少, 仅占全年降水量的 5%。永兴洞洞口海拔约 800 m, 洞长约 500 m。2013 年 6 月—2016 年 12 月的洞内外监测结果显示, 洞外温度呈现出显著的季节变化特征, 夏季高温可达 30 °C, 冬季温度最低 5 °C, 洞内温度每月维持在约 14 °C 左右, 湿度约 100%。YX274 石笋外形呈圆柱状, 总长 324 mm, 外部直径 80~130 mm。沿生长轴切开、抛光后, 发现近轴部呈黄褐色而近边缘区多呈黄白色, 岩性整体上无显著变化 (无明显沉积间断), 结晶致密但局部发育孔洞 (图 1)。肉眼观测, 大部

分层段发育有明/暗色层偶相间特征的纹层。据永兴洞 4 个滴水点监测结果显示, 这 4 个点常年滴水, 但季节差异显著。夏季的滴水速率明显高于冬季, 并且夏季碳酸盐沉积量也显著多于冬季。这种季节性气候条件的变化很可能是永兴洞 YX274 石笋微层出现明/暗交替沉积韵律变化的原因。

在抛光面上, 用直径为 0.9 mm 牙钻分别从距顶 47、131、165、212 和 270 mm 处获取 5 个铀系年代样 (重约 100 mg), 由南京师范大学同位素质谱实验室 MC-ICP-MS Neptune 仪器测试, 化学实验方法参照 Shen *et al.*^[20] 和 Shao *et al.*^[21] 研究, 年龄误差为 $\pm 2\sigma$ (表 1)。用直径 0.5 mm 钻头沿生长中心轴方向每 1 mm 钻取一个样品, 共获得 323 组氧碳同位素数据。利用碳酸盐自动进样装置与 Finnigan MAT-253 型质谱仪联机完成测试, 分析误差小于 0.1‰, VPDB 标准, 由南京师范大学同位素实验室完成。



图1 永兴洞石笋 YX274 抛光面照片
黑点及数字分别指示轴系定年点的位置及对应年龄
Fig.1 Polishing face photo of Stalagmite YX274
from Yongxing Cave

表1 永兴洞石笋 YX274 铀系测年结果

Table 1 U-series dating results of stalagmite YX274 from Yongxing Cave

Sample	^{238}U	^{232}Th	$\delta^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	^{230}Th 年龄 (ka)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{Initial}}$	^{230}Th 年龄 (ka)
深度/mm	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-12}$	(测量值)	(活度比)	(未校正)	(校正后)	(校正后)
YX274-47	782.4±0.7	986.1±1.1	362.3±0.5	0.607 7±0.001 1	62.443±0.158	432.1±0.6	62.418±0.158
YX274-131	728.6±0.5	928.8±0.8	358.8±1.4	0.610 3±0.000 8	63.018±0.144	428.6±1.7	62.992±0.145
YX274-165	618.0±0.3	851.7±0.8	354.7±1.2	0.609 2±0.000 8	63.137±0.136	423.9±1.5	63.108±0.137
YX274-212	714.5±0.5	750.3±0.6	362.9±1.6	0.612 7±0.000 8	63.084±0.153	433.6±1.9	63.063±0.153
YX274-270	725.3±0.6	871.5±1.1	353.6±0.5	0.613 1±0.001 1	63.741±0.148	423.3±0.6	63.717±0.149

注： ^{234}U 、 ^{238}U 和 ^{230}Th 的衰变常数 $\lambda_{234} = 2.82206 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ 、 $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ 和 $\lambda_{230} = 9.1705 \times 10^{-16} \text{ a}^{-1}$ ； $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$ ；校正的 ^{230}Th 年龄是假定初始的 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比为 $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$ 。年龄均相对于 1 950 a。

2 结果与讨论

2.1 铀钍测年及时标序列的建立

表1为YX274石笋的5个 ^{230}Th 测年结果。样品 ^{238}U 含量在 $(618 \sim 782) \times 10^{-9}$ 之间变化， ^{232}Th 含量较低，在 $(108 \sim 1\ 242) \times 10^{-9}$ 之间变化，测年绝对误差为137~158 a（相对误差为2.2‰~2.5‰）。实测年代数据表明YX274石笋生长时段覆盖了62.42~63.72 ka，生长速率较快，在88~291 $\mu\text{m}/\text{a}$ 之间变化。本文采用StalAge年龄模式建立时标^[22]（图2）。该年龄模式采用Monte-Carlo统计算法，通过调整线性合集以适合年龄数据子集来计算出年龄模式及对应的95%置信度，显著降低了年龄模式的不确定性。结果显示，石笋YX274生长于62.2~63.6 ka，对应于DO18事件结束时期。

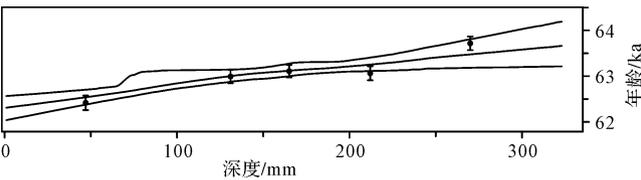


图2 石笋 YX274 年龄模式图

黑点及垂直误差棒分别为实测年龄及对应 2 σ 误差；中间线为年龄模式，两侧线为 95% 置信度范围

Fig.2 Age model of stalagmite YX274

2.2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

图3c显示YX274石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-7.5\text{‰} \sim -9.7\text{‰}$ 之间波动。从63.6 ka开始， $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐正偏，在~63.0 ka时正偏趋势结束，转变为稳定的水平波动。整个时段叠加了众多百年—数十年尺度的波动。如以63.4 ka和63.1 ka为中心的持续~150 a和300 a的负偏波动（图4a-4,5），这些振荡与同一洞穴石笋YX55 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[8]的两次百年尺度负偏波动相对应（63.5

ka和63.2 ka，图4b中4,5）。此外，YX274 $\delta^{18}\text{O}$ 在63.6~63.0 ka时段的正偏变化也得到同一洞穴YX55、YX46石笋记录^[8]的支持。整体上，YX274与YX55 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在长期变化趋势和百年尺度波动上均具有较好的重现性。

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 作为古气候代用指标的重要前提是方解石沉积时与岩溶水之间同位素分馏达到平衡^[23]。依据Hendy准则^[23]，YX274石笋生长轴方向上 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化没有显著相关性（ $r=0.3$ ， $n=322$ ），表明石笋生长过程中受动力分馏较小，基本达到同位素平衡分馏。此外，YX274与YX55 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的重现性强有力地证实了动力分馏对同位素变化影响不显著，暗示这两种同位素受相同的外部气候因子控制。一般来说，中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要继承大气降水氧同位素的信息，反映东亚夏季风强度变化特征。近来，部分研究认为东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 并不能有效指示与东亚夏季风强度相关的降水量变化，其主要受诸如水汽源区^[24-25]及传输路径^[26]、ENSO^[27-28]、北大西洋气候信号^[29]等因素的影响。尽管存在以上不同的认识，但是东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在千年甚至百年尺度上有着很好的重现性特征，表明东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 应能代表区域大尺度环流信号。最近，反映北方降水量变化的内蒙古湖泊沉积记录显示出与中国（南方和北方）石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录高度一致的变化特征，支持中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 能够反映季风强度带来的降水量变化解释^[30]。此外，北京Kulishu洞石笋年纹层内季节分辨率的 $\delta^{18}\text{O}$ 结果显示冰消期时较轻的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与夏季风带来较多的降水量密切相关，在百年尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正的Younger Dryas (YD)时期综合降水量要低于 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负的Bølling-Allerød暖期和早全新世时期^[31]。似乎是中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在千年—数百年尺度上能代表区域尺度降水整体演化过程。Cheng *et al.*^[32]基于对全球季风

的对比研究,提出东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 能反映平均态的夏季风强度或综合水汽输送。目前,东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 大尺度的一致性与器测及历史记录研究显示的短尺度上中国南、北方降水存在反相位关系(区域降水存在差异)的结论存在矛盾,因此对于 $\delta^{18}\text{O}$ 短时间尺度气候意义的完整理解还有待于今后深入研究。从全

球季风视角考虑,在千年—数百年尺度上中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 具有广泛区域意义和全球可对比性,似乎能够反映夏季风强度变化的综合特征^[33],这一解释也得到模拟结果的支持^[34]。据此,本文 YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,可表示东亚夏季风增强,反之,东亚夏季风减弱。

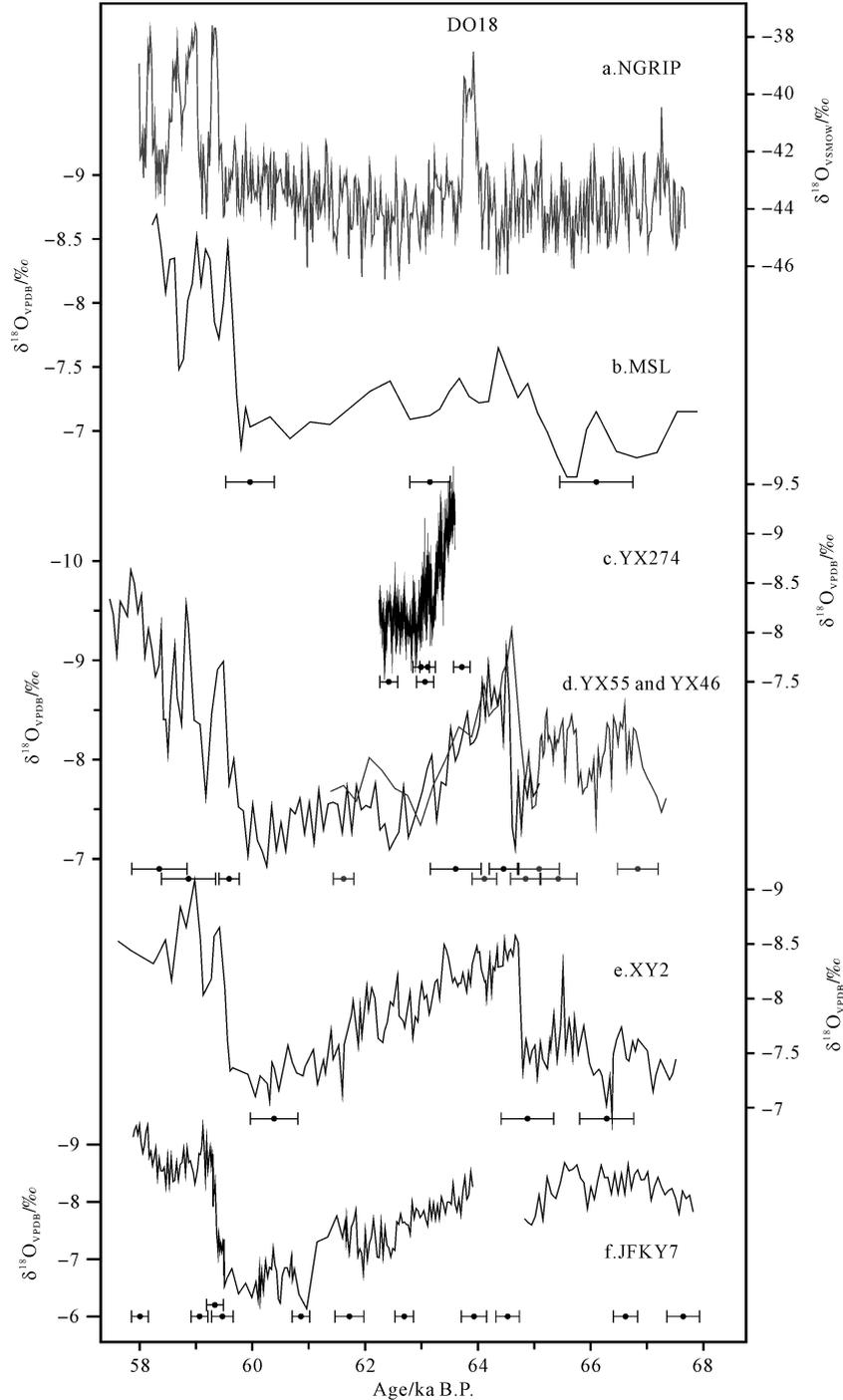


图3 中国石笋与格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比

a.格陵兰冰芯 NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[35]; b.葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[4]; c.永兴洞 YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录; d.永兴洞 YX55 (黑色)和 YX46 (灰色)石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[8]; e.新崖洞 XY2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[9]; f.羊口洞 JFKY7 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[36]

Fig.3 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ records between Chinese stalagmites and Greenland ice core

2.3 石笋记录的 DO18 事件

尽管 YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录缺失 DO18 事件的开始变化,但是变化一致的 YX55 和 YX46 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[8] 显示了 DO18 事件的快速开始过程(图 3d)。YX55 记录显示从 64.7 ± 0.3 ka 开始, $\delta^{18}\text{O}$ 在约 160 a 内迅速负偏 2‰,在测年误差范围内与 YX46 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的在 64.8 ± 0.2 ka 开始在约 250 a 内负偏 1.6‰ 的变化相一致,表明在 64.7 ± 0.3 ka 左右东亚夏季风强度开始快速增强(图 3d)。重庆新崖洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 64.7 ± 0.2 ka 快速负偏 1.3‰(图 3e),清晰地记录到夏季风快速增强的变化,指示 DO18 事件的迅速开始^[9]。不同于以上记录,葫芦洞 MSL 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 64.7 ± 0.2 ka 时仅呈现出微弱的负偏波动(0.4‰,图 3b),不能判定其为一次明显的季风增强变化。尽管如此,以上相隔数百公里的永兴洞和新崖洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 64.7 ± 0.3 ka 时一致负偏的变化表明 DO18 事件应是一次区域性的亚洲季风增强事件。基于格陵兰 NGRIP AICC2012 时标,冰芯 DO18 暖事件开始于 64.1 ± 0.6 ka,在 160 a 内完成升温过程^[35],与石笋记录的持续时间约为 200 a 的季风快速增强过程较为一致。在年龄误差范围内,永兴洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 DO18 快速开始过程与 NGRIP 冰芯快速升温过程相一致(图 3),在一定程度上支持了 NGRIP AICC2012 时标。然而,二者在 DO18 事件结束过程上却存在显著差异。NGRIP 冰芯记录显示 DO18 事件在 100 a 内完成快速降温过程,永兴洞石笋记录显示 $\delta^{18}\text{O}$ 从 64.5 ka 左右开始逐步正偏,到 ~63.0 ka 时正偏结束,持续时间长达 1 500 a,期间叠加了 5 次显著的百年尺度负偏波动,表明亚洲季风在持续减弱的过程中存在百年尺度的季风增强波动(图 3,4)。类似地,DO18 结束时呈持续时间达千年的缓慢变化特征,此特征在羊口洞和新崖洞石笋记录中也尤为显著^[9,36]。所不同的是,新崖洞和羊口洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 DO18 冰阶仍呈现出逐渐正偏的趋势^[9,36],与反映印度季风强度变化的阿拉伯海和 Cariaco 盆地沉积记录变化趋势相一致^[7],而永兴洞 3 支石笋和葫芦洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化一致,在 DO18 冰阶表现出较为稳定的水平波动(图 3)。这一差异可能表明西南区域的羊口洞和新崖洞受印度季风影响更为敏感,而中部区域的永兴洞和东部葫芦洞受东亚季风影响较显著。东亚和印度季风区不同的陆地/大洋分布格局可能引起水热组合模式差异而造成短时间尺度上石笋氧同位素的区域差异^[37]。

为了精确标定亚洲季风 DO18 向 GS18 事件转型的时间,本文采用回归统计方法(RAMPFIT)来进行评估。RAMPFIT 方法通过对分析数据采用加权最小二乘法进行“倾斜”拟合过程,进而定量计算出气候转型的确切时间,计算原理和方法详见 Mudelsee^[38]。通过 RAMPFIT 对 YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行拟合分析,确定 DO18 向 GS18 的转型在 63.0 ka 完成(图 4)。该转型时间与 YX55 和 YX46 石笋分别记录的 62.6 和 63.0 ka 在定年误差范围内相一致^[8]。该结束时间的标定有助于研究 DO18 事件的驱动机制。

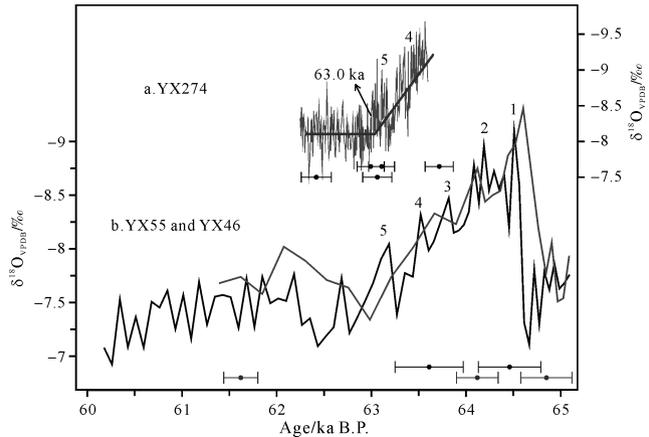


图4 永兴洞石笋 YX274 和 YX55、YX46 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比 a.YX274 $\delta^{18}\text{O}$ 记录;b.YX55 (黑色)和 YX46 (灰色) $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[8]。数字 1~5 为 5 次百年尺度波动;灰色折线为 RAMPFIT 统计分析获得的“倾斜”结果,63.0 ka 为 $\delta^{18}\text{O}$ 由缓慢增大状态转变为稳定波动的时间点

Fig.4 Comparison of stalagmite YX274, YX55 and YX46 $\delta^{18}\text{O}$ records

2.4 高低纬对比及驱动机制

石笋 YX274 结合同一洞穴两支石笋 YX55 和 YX46 的记录^[8] 能够还原 DO18 事件附近详细的东亚季风变化历史。如图 5 所示,将永兴洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[35] 进行对比,发现 MIS4 冰量较大时期东亚季风与北高纬温度在千年—百年尺度事件上仍存在遥相关关系,季风增强对应于北高纬升温,反之则相反。如格陵兰 NGRIP 冰芯记录^[35] 的 DO18、DO17 暖事件以及 H6 冰阶在永兴洞石笋记录中均有体现,分别对应于 DO18、DO17 强季风事件及 H6 弱季风事件。这种对应表明高、低纬气候系统紧密耦合关系在冰量较大的时期仍然存在,这种耦合关系可能由于 AMOC 的变化引起。如图 5c 所示,反映 AMOC 强度变化的 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录^[39] 与石笋记录、NGRIP 冰芯记录显示出相似的波动特征,

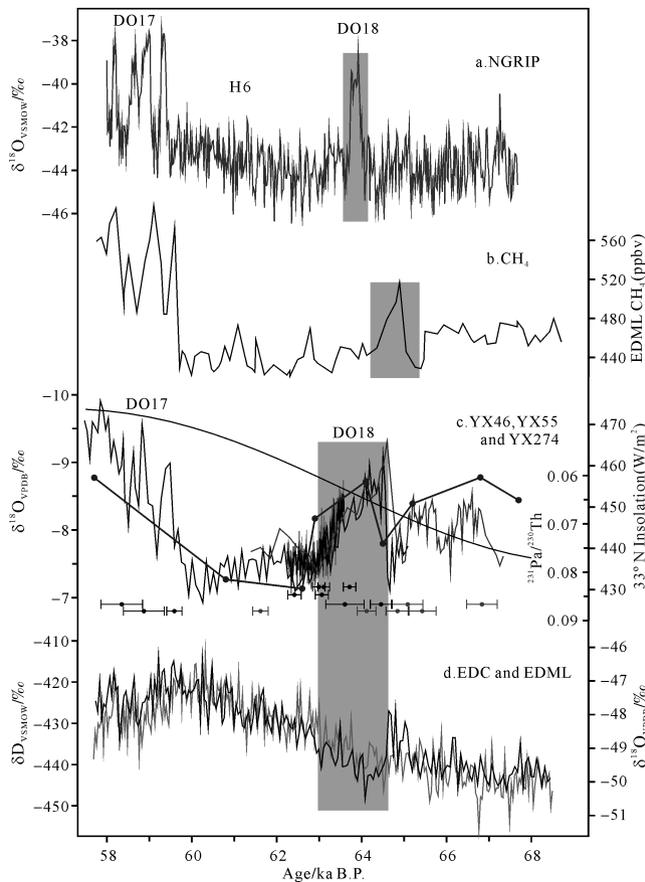


图 5 永兴洞石笋记录与其他记录对比

a. 格陵兰冰芯 NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[35]; b. 南极 EDML 冰芯 CH_4 记录^[35]; c. 黑色和灰色曲线为永兴洞石笋 YX55、YX46^[8] 和 YX274 $\delta^{18}\text{O}$ 记录; 黑色折线为副热带北大西洋沉积物 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录^[39]; 灰色平滑曲线为 33°N 太阳辐射曲线^[42]; d. 南极 EDC 冰芯 δD (黑色) 和 EDML 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (灰色)^[35]

Fig.5 Comparison of the Yongxing cave records with other paleoclimatic records

在石笋和冰芯中记录到的气候突变事件均可在 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 记录中得到体现。 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 值在 DO18、DO17 事件时呈现出低值, 指示 AMOC 增强; 在 H6 冰阶时, $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 值增加, 指示 AMOC 减弱, 支持 AMOC 在间冰阶时加强而在冰阶时减弱的假说^[40]。可能的变化过程是 AMOC 强度变化引起北高纬冷/暖和高南纬暖/冷气候态之间的转换, 促使高低纬之间的温度梯度变化, 并改变了热带辐合带 ITCZ 的平均位置, 进而调节东亚季风强度变化。此外, 南极温度在 DO18、DO17 事件的降温以及在 H6 冰阶的升温变化, 呈现出与北高纬、东亚季风反相位的对应关系, 支持了两半球之间在千年—百年尺度上受 AMOC 调控并呈 see-saw 的变化模式的结论^[14]。此外, MIS2—

MIS5 时期永兴洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的多个 DO 事件^[8] 与 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 值对比进一步提供了 AMOC 调节千年—百年尺度气候变化的证据 (图 6)。尽管在事件持续时间和相对振幅方面石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 二者存在差异, 但是永兴洞石笋记录的 H8—H2 弱季风事件均与减弱的 AMOC 相对应, 而 AMOC 的增强则对应于季风的增强。综上所述, AMOC 变化在调节冰期千年—百年尺度高低纬气候突变事件中起主导作用。

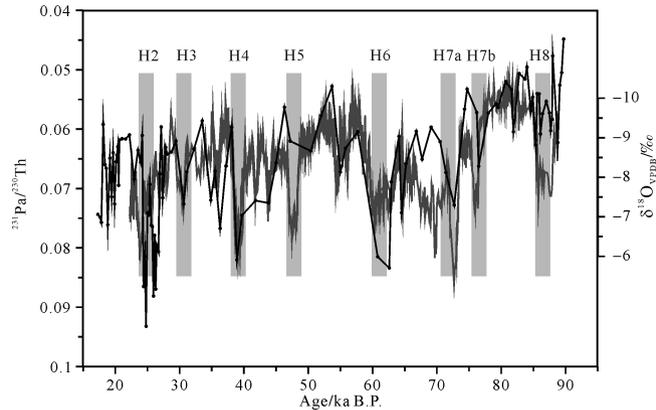


图 6 永兴洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (灰色) 与北大西洋 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ (黑色) 记录对比灰色阴影带表示 H2—H8 事件

Fig.6 Comparison of Yongxing $\delta^{18}\text{O}$ record^[8] with $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ record^[39] (black) in the northwest Atlantic

尽管永兴洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ ^[35] 均记录到 DO18 事件, 但是二者呈现出不同的事件变化模式。如图 5 所示, NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示 DO18 在 ~ 370 a (64.077~63.70 ka) 内完成快速增温和快速降温变化过程, 呈显著的对称变化形态^[35]。但是, 永兴洞石笋记录的 DO18 事件呈现出季风快速增强、缓慢减弱的“倒三角形”变化模式, 形态上与格陵兰冰芯记录的中 MIS 3 阶段典型的千年尺度 DO 事件结构相类似^[1, 41]。这种 DO18 事件结束时低纬季风减弱比高纬降温较为缓慢的变化特征表明低纬水文环流与北高纬温度的不同响应。DO18 事件结束时 AMOC 缓慢减弱的变化 ($^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 值缓慢增加) 可能是控制低纬季风强度缓慢减弱的重要因素。 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 值在约 64.1~62.6 ka 持续增加^[39], 与永兴洞石笋记录的 ~ 64.5 —63.0 ka 时间段内 DO18 事件结束过程较为一致, 二者均体现出 DO18 结束时间长达 1 500 a 的缓慢变化特征。此外, Cariaco 盆地沉积岩芯反照率显示出相似的缓慢增加变化过程, 说明此时期 ITCZ 缓慢南移^[7]。这些证据表明 DO18 事件结束

时 AMOC 逐步减弱可能引起 ITCZ 缓慢南移,造成东亚季风缓慢减弱。另外,太阳辐射和南半球温度变化一定程度上也调控着季风变化。DO18 事件结束时太阳辐射处于快速增大时期^[42],对于季风的快速减弱起到阻碍作用,延缓了季风减弱的发生过程。南极区域相对应的降温变化表明来自南半球的越赤道气流增强^[43-44],较多的水汽输送到亚洲季风区,同样延缓了季风减弱的变化。北高纬 DO18 事件快速结束可归结为 AMOC 减慢在北大西洋区域会引起冬季海冰的快速扩张,促使格陵兰温度快速下降^[45]。类似地,这种高、低纬不同气候变化模式在末次冰消期 DO1 事件向 YD 事件转型中也尤为显著。东亚季风区与西太平洋暖池边缘的石笋记录均显示此转型过程异常缓慢^[46-50],显著不同于格陵兰冰芯记录的快速转型过程。尽管淡水注入北大西洋导致 AMOC 减弱,但是高低纬对 AMOC 减弱的响应模式存在显著差异^[49]。

全球 CH₄浓度的变化与格陵兰温度及亚洲季风强度在 MIS4 阶段显示出相似的千年尺度变化(图 5)。CH₄浓度在 65.05~64.36 ka 增加了约 70×10^{-10} ,对应于 DO18 事件发生^[35](图 5b)。大气 CH₄变化的主要源区为赤道和北方地区的湿地^[51],其变化主要受源区变化控制^[52-53]。现代卫星监测显示北高纬温度变化和低纬区域水体平面变化是控制湿地 CH₄释放的主要因素^[54]。对于北高纬,温度变化通过改变泥炭的沉积速率,冻土层的融化和冻结以及季节性的冰雪覆盖影响着甲烷的释放。模拟研究表明格陵兰间冰阶时因温度升高可造成北方湿地释放的 CH₄加倍^[55],因此 DO18 事件时北高纬升温是 CH₄释放量增加的重要因素。但是,CH₄记录的 DO18 事件的持续时间(~690 a)要显著长于格陵兰冰芯记录(~360 a)(图 5),暗示其他源区对于大气 CH₄信号的改变。DO18 事件时亚洲夏季风显示出持续时间长达 1 500 a 的增强变化,季风水文循环的增强可能通过扩大湿地面积(增加土壤微生物范围)而加大 CH₄释放量。CH₄记录的 DO18 事件的持续时间介于格陵兰和亚洲季风记录之间,表明亚洲季风对 DO18 事件时全球 CH₄的重要贡献以及间接证实了季风区 DO18 事件较长的持续时间。

为了研究 MIS4 大冰盖时期石笋记录的亚洲季风在短时间尺度上的波动特征,对 YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行功率谱分析(图 7)。结果显示,在 90%置信度水平上分别有 208 a、150 a、52 a 和 14~12 a 的

变化周期,分别接近于太阳活动的 207 a (deVries 周期)、149 a、57 a 和 11 a 的太阳黑子活动周期^[56],可能说明太阳活动控制着东亚夏季风短尺度气候波动。重要的是,年际尺度的高分辨率 YX274 记录证实在大冰盖时期太阳黑子活动的 11 a 周期仍然控制着季风的震荡。此外,全新世亚洲季风典型的 3 个百年尺度主周期(~80 a、~200 a 和~340 a),在冰盖较大的 MIS4 阶段仅有~200 a 的波动周期存在。如果全新世的百年尺度周期是由太阳活动和大洋环流共同引起^[57],那么冰盖较大时期缺少百年尺度太阳活动周期可能与 AMOC 的微弱变化有关^[16]。

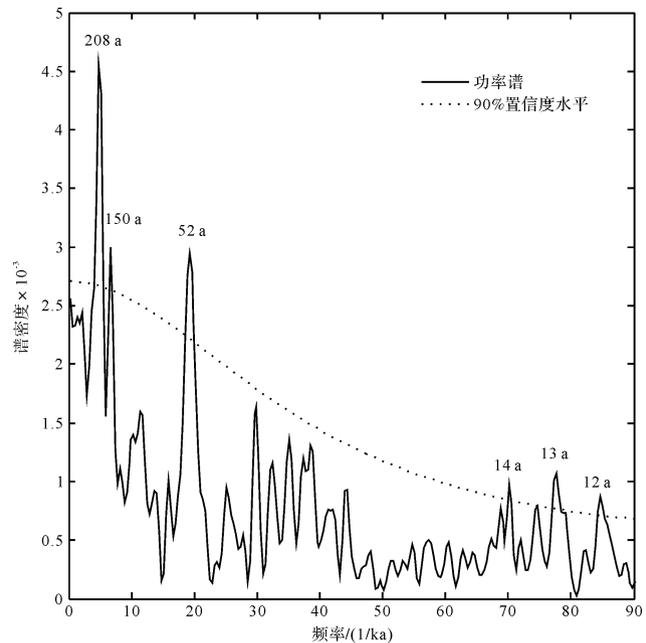


图7 石笋 YX274 $\delta^{18}\text{O}$ 功率谱分析图

Fig.7 Spectral analysis of stalagmite YX274 $\delta^{18}\text{O}$ record
The 90% confidence level is labeled by dotted line

3 结论

(1) 湖北永兴洞石笋高精度²³⁰Th 年龄和高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,重建了 DO18 事件附近东亚夏季风千年—数百年尺度的演化历史。永兴洞 YX55 和 YX46 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[8]显示在 64.7 ± 0.3 ka 时系统偏负达 1.5‰,表明在 MIS4 阶段亚洲区域确实经历了 DO18 季风增强事件。同时,YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 63.6~63.0 ka 时段整体负偏的特征也进一步证实 DO18 期间季风增强变化。

(2) 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 DO18 事件与格陵兰冰芯快速升温事件在测年误差范围内发生时间一致。所不同的是,DO18 季风增强事件结束时间长达

1 500 a, 显著长于格陵兰冰芯记录的降温变化期 (~60 a)。

(3) 东亚季风 DO18 事件快速开始、缓慢结束的变化模式与 AMOC 变化高度耦合, 证实 AMOC 对于千年尺度 DO 事件的重要控制作用。YX274 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录精确标定 DO18 事件的结束时间和转型特征。功率谱分析结果显示在 MIS4 大冰盖时期东亚夏季风在百年至十年尺度的气候波动仍受太阳活动控制。

参考文献 (References)

- [1] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [2] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1/2/3): 295-305.
- [3] Wolff E W, Chappellaz J, Blunier T, et al. Millennial-scale variability during the last glacial: the ice core record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(21/22): 2828-2838.
- [4] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [5] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [6] Boch R, Cheng H, Spötl C, et al. NALPS: a precisely dated European climate record 120-60 ka[J]. *Climate of the Past*, 2011, 7(4): 1247-1259.
- [7] Deplazes G, Lückge A, Peterson L C, et al. Links between tropical rainfall and North Atlantic climate during the last glacial period[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 213-217.
- [8] Chen S T, Wang Y J, Cheng H, et al. Strong coupling of Asian Monsoon and Antarctic climates on sub-orbital timescales[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32995.
- [9] Li T Y, Yuan D X, Li H C, et al. High-resolution climate variability of southwest China during 57-70 ka reflected in a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Xinya Cave[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(8): 1202-1208.
- [10] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.
- [11] Xia Z F, Kong X G, Jiang X Y, et al. Precise dating of East-Asian-monsoon D/O events during 95-56 ka BP: Based on stalagmite data from Shanbao Cave at Shennongjia, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(2): 228-235.
- [12] Broecker W S, Bond G, Klas M, et al. A salt oscillator in the glacial Atlantic? 1. The concept[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(4): 469-477.
- [13] Ganopolski A, Rahmstorf S. Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2001, 409(6817): 153-158.
- [14] EPICA Community Members, Barbante C, Barnola J M, et al. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica[J]. *Nature*, 2006, 444(7116): 195-198.
- [15] Henry L G, Memanus J F, Curry W B, et al. North Atlantic ocean circulation and abrupt climate change during the last glaciation[J]. *Science*, 2016, 353(6298): 470-474.
- [16] Lynch-Stieglitz J, Schmidt M W, Henry L G, et al. Muted change in Atlantic overturning circulation over some glacial-aged Heinrich events[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(2): 144-150.
- [17] Wolff E W, Fischer H, Röthlisberger R. Glacial terminations as southern warmings without northern control[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(3): 206-209.
- [18] Wunsch C. Abrupt climate change: an alternative view[J]. *Quaternary Research*, 2006, 65(2): 191-203.
- [19] Petersen S V, Schrag D P, Clark P U. A new mechanism for Dansgaard-Oeschger cycles[J]. *Paleoceanography*, 2013, 28(1): 24-30.
- [20] Shen C C, Edwards R L, Cheng H, et al. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 2002, 185(3/4): 165-178.
- [21] Shao Q F, Bahain J J, Wang W, et al. Coupled ESR and U-series dating of Early Pleistocene *Gigantopithecus* faunas at Mohui and Sanhe Caves, Guangxi, southern China[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 524-528.
- [22] Scholz D, Hoffmann D L. StalAge: an algorithm designed for construction of speleothem age models[J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(3/4): 369-382.
- [23] 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.
- [24] Maher B A. Holocene variability of the East Asian summer monsoon from Chinese cave records: a re-assessment[J]. *The Holocene*, 2008, 18(6): 861-866.
- [25] Pausata F S R, Battisti D S, Nisancioglu K H, et al. Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 474-480.
- [26] Dayem K E, Molnar P, Battisti D S, et al. 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(1/2): 219-230.
- [27] 谭明. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义; 古气候记录与现代气候研究的一次对话[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 851-862. [Tan Ming. Circulation effect: climatic

- significance of the short term variability of the oxygen isotopes in stalagmites from monsoonal China: Dialogue between paleoclimate records and modern climate research [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 851-862.]
- [28] Tan M. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(3/4): 1067-1077.
- [29] Lu R Y, Dong B W, Ding H. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24): L24701.
- [30] Goldsmith Y, Broecker W S, Xu H, et al. Northward extent of East Asian monsoon covaries with intensity on orbital and millennial timescales [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(8): 1817-1821.
- [31] Orland I J, Edwards R L, Cheng H, et al. Direct measurements of deglacial monsoon strength in a Chinese stalagmite [J]. *Geology*, 2015, 43(6): 555-558.
- [32] Cheng H, Sinha A, Wang X F, et al. The global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5): 1045-1062.
- [33] 汪永进, 刘殿兵. 亚洲古季风变率和机制的洞穴石笋档案 [J]. *科学通报*, 2016, 61(9): 938-951. [Wang Yongjin, Liu Dianbing. Speleothem records of Asian paleomonsoon variability and mechanisms [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(9): 938-951.]
- [34] Liu Z Y, Wen X Y, Brady E C, et al. Chinese cave records and the East Asia Summer Monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 83: 115-128.
- [35] Veres D, Bazin L, Landais A, et al. The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years [J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(4): 1733-1748.
- [36] Zhang T T, Li T Y, Cheng H, et al. 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.
- [37] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(3/4): 432-439.
- [38] Mudelsee M. Ramp function regression; a tool for quantifying climate transitions [J]. *Computers & Geosciences*, 2000, 26(3): 293-307.
- [39] Böhm E, Lippold J, Gutjahr M, et al. Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle [J]. *Nature*, 2015, 517(7532): 73-76.
- [40] Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years [J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 207-214.
- [41] Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, et al. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core [J]. *Nature*, 1992, 359(6393): 311-313.
- [42] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- [43] An Z S, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics [J]. *Science*, 2011, 333(6043): 719-723.
- [44] Cai Y J, An Z S, Cheng H, et al. High-resolution absolute-dated Indian Monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China [J]. *Geology*, 2006, 34(8): 621-624.
- [45] Denton G H, Alley R B, Comer G C, et al. The role of seasonality in abrupt climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10/11): 1159-1182.
- [46] Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. A detailed comparison of Asian Monsoon intensity and Greenland temperature during the Allerød and Younger Dryas events [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(3/4): 691-697.
- [47] Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. Centennial-scale Asian monsoon variability during the mid-Younger Dryas from Qingtian Cave, central China [J]. *Quaternary Research*, 2013, 80(2): 199-206.
- [48] Ma Z B, Cheng H, Tan M, et al. Timing and structure of the Younger Dryas event in northern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 41: 83-93.
- [49] Partin J W, Cobb K M, Adkins J F, et al. Millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum [J]. *Nature*, 2007, 449(7161): 452-455.
- [50] 王权, 刘殿兵, 汪永进, 等. 湖北神农架年纹层石笋记录的 YD 与 8.2 ka 事件转型模式研究 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(6): 1140-1148. [Wang Quan, Liu Dianbing, Wang Yongjin, et al. Transitional patterns of YD and 8.2 ka event recorded by annually-laminated stalagmites from Qingtian Cave, Mt. Shennongjia [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(6): 1140-1148.]
- [51] Guo Z T, Zhou X, Wu H B. Glacial-interglacial water cycle, global monsoon and atmospheric methane changes [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5): 1073-1092.
- [52] Chappellaz J A, Fung I Y, Thompson A M. The atmospheric CH_4 increase since the Last Glacial Maximum [J]. *Tellus B*, 1993, 45(3): 228-241.
- [53] Levine J G, Wolff E W, Hopcroft P O, et al. Controls on the tropospheric oxidizing capacity during an idealized Dansgaard - Oeschger event, and their implications for the rapid rises in atmospheric methane during the last glacial period [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): L12805.
- [54] Bloom A A, Palmer P I, Fraser A, et al. Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data [J]. *Science*, 2010, 327(5963): 322-325.
- [55] van Huissteden J. Methane emission from northern wetlands in Europe during Oxygen Isotope Stage 3 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(18/19): 1989-2005.
- [56] Damon P E, Peristykh A N. Radiocarbon calibration and application to geophysics, solar physics, and astrophysics [J]. *Radiocarbon*, 2000, 42(1): 137-150.
- [57] Stuiver M, Braziunas T F. Sun, ocean, climate and atmospheric

¹⁴CO₂: An evaluation of causal and spectral relationships[J]. The

Holocene, 1993, 3(4): 289-305.

DO18 Event Depicted by a High-resolution Stalagmite Record from Yongxing Cave, Hubei Province

ZHANG WeiHong¹, LIAO ZeBo², CHEN ShiTao², SHAO QingFeng², DUAN FuCai¹, ZHU LiDong¹, WANG TianYang¹

1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

2. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: It helps further understand and test forcing mechanisms behind millennial-scale events to decipher their regional responses and structures during the periods of large ice sheets. Using 323 stable oxygen isotope ratios and 5 ²³⁰Th ages of a stalagmite in Yongxing Cave, central China, we reconstruct a detailed history of the East Asian hydrological cycle during the time span surrounding the Dansgaard-Oeschger (DO) 18 event. The calcite δ¹⁸O profile, together with another two stalagmite records from the same cave, shows a rapid decrease of 1.5‰ at ~64.7 ka, confirming the occurrence of DO18 in the East Asian monsoon (EAM) region. The ending limb of DO18 in the EAM regime is characterized by five centennial-scale monsoon enhancing events, and finally culminates at ~63.0 ka. Divergent from a rapid temperature increasing followed by a similarly rapid cooling (~60 a) back to stadial environments of the Greenland DO18 event, the DO18 event in the monsoon region exhibits a significant asymmetric feature with a sharp EAM strengthening but then a smoothing, lasting 1 500 a, decrease. Nonetheless, our stalagmite δ¹⁸O records mirror, in shape and timing, the variations of Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) estimated by the ratio of ²³¹Pa/²³⁰Th and recovered from the deep western North Atlantic. This similarity suggests that the AMOC played an important role in regulating the DO18 event in the EAM region. On the other hand, the discrepancy in the pattern of DO18 between the EAM and the North Atlantic climate systems can be attributed to the different regional response to the AMOC change in the high- and low- latitude climate systems. Spectral analysis of the stalagmite δ¹⁸O record denotes significant cycles at the 90% confidence level at 208, 150, 52 and 14-12 a, close to the previously reported solar cycles at 207, 149, 57 and 11 a. This consistency of cyclical variabilities between the EASM intensity and solar activity might indicate that solar forcing of centennial- and decadal-scale EASM variation still existed during the MIS4 interval with larger ice volumes.

Key words: stalagmite; high resolution; DO18; EAM; AMOC