

早全新世季风演化的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究^① ——以河南老母洞石笋为例

张银环^{1,2} 杨 琰^{1,2} 杨勋林^{1,2} 殷建军^{1,2} 黄 帆^{1,2} 任小凤^{1,2}
赵景耀^{1,2} 刘 肖^{1,2} 聂旭东^{1,2}

(1.西南大学地理科学学院 三峡库区生态与环境教育部重点实验室 重庆 400715;2.西南大学地球化学与同位素实验室 重庆 400715)

摘 要 基于豫西老母洞 LM2 石笋 8 个高精度²³⁰Th 年龄,449 个氧碳同位素,建立了达十年际分辨率的 8.2~10.9 ka B.P.亚洲季风变化的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录序列。老母洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值最为偏负达-12.0‰,最偏正为-8.2‰,振幅达 3.8‰。早全新世 10.13~10.9 ka B.P.时段内,河南西部老母洞石笋和东石崖石笋,陕西九仙洞 C996-2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线揭示该时段内季风稳定,而中国南方的衙门洞石笋、三宝洞石笋和极地冰芯 GRIP 记录揭示该时段季风逐渐增强;同时季风达到顶峰的时期也不相同,进一步说明中国南北方早全新世 10.13~10.9 ka B.P.时段季风演变过程的差异,可能与中国南北方气候的响应机制有关。从早全新世平均分辨率 10 年的 LM2 石笋记录中识别出 8.2 ka,9.5 ka,10.2 ka 和 10.9 ka 显著弱季风事件,尤其是 8.2 ka 和 9.5 ka 事件。对比分析老母洞与已发表的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录发现:石笋所揭示的某些冷事件发生时间在亚洲季风区存在差异,主要表现在事件内部变化特征及趋势上。LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线并没有明显记录 9.3 ka 弱季风事件,而是在 9.3~9.6 ka B.P.左右记录了一个弱季风事件,与 DSY09(2009)、Y1、HS-4 记录相似,表明在该时段内存在季风的减弱事件,但是氧同位素传输的复杂性,使其在南北方表现不同。此外,在 LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的 8.2 ka B.P.开始时段,氧同位素曲线阶段性下降,且变幅达 3‰,与 Zhang 等研究万象洞石笋提出的“中国 8 200 阶段”吻合,表明中国北方地区的 8.2 ka 事件是阶段性的事件,而南方的石笋氧同位素记录揭示的 8.2 ka 事件并未表现出阶段性特征,其原因有待于更多北方高精度石笋记录来进一步研究。LM2 石笋氧同位素记录进行功率谱分析发现:在短尺度上季风变化与太阳活动密切相关,这与近年来对早全新世极端气候变化研究的驱动机制是一致的,早全新世亚洲季风的演化与太阳活动变化引起的太阳辐射能量的变化和北半球高纬气候的变化状况有关。

关键词 石笋 亚洲季风 $\delta^{18}\text{O}$ 弱季风事件 太阳活动 老母洞

第一作者简介 张银环 女 1988 年出生 硕士研究生 全球变化研究 E-mail: 1104134991@qq.com

通讯作者 杨 琰 男 副教授 E-mail: yy2954@gmail.com

中图分类号 P532 **文献标识码** A

理解全球气候突变的关键之一就是充分地掌握过去全球极端气候事件变化的规律^[1-12]。YD 事件后的早全新世阶段,是冷事件频发的阶段,其中距今 8.2 ka B.P. 发生的极端气候事件是过去全球变化研究中的热点问题^[12-26]。近几十年来,学者们利用各种地质记录^[1-4]表明 YD 事件后存在多次气候突变事件,特别是近年来在利用洞穴石笋记录研究全新世古季风突变事件方面有了实质的进展^[1,6-7]。但现有高分辨率气候记录并不多,对于这些冷气候事件开始的驱动机制也不确定。此外,这些气候事件在亚洲季风区发生的时间是否存在空间上的相位不同^[23-24]? 其数十年际的气候事件是否有区域意义? 进一步东亚

季风与印度季风有无相位上的差异? 在十年际高分辨率尺度上如何响应北半球高纬气候变化^[23-24]? 也有待深入探讨。本文基于石笋古气候重建研究薄弱的我国北方地区。对亚洲季风响应敏感的河南西部老母洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比分析,重建 10.9~8.2 ka B.P.连续的平均分辨率达十年际的亚洲夏季气候演化特征,着重讨论古亚洲季风气候的变化特征以及对北大西洋气候变化的响应。由于老母洞石笋记录具有高精度年代标尺和高分辨率的特点,其对于在这一时段全球气候变化的对比,以及由此探讨高纬度或低纬度驱动机制和南北半球对比等重要科学问题都将有潜在意义。理解亚洲季风在全新世期间的演

①国家自然科学基金(批准号:41372177,40902053,41272192)、高等学校博士学科点专项科研基金(编号:20090182120005)与教育部中央高校基本科研业务费基金(编号:XDJK2011B004)联合资助
收稿日期:2013-11-27; 收修改稿日期:2014-05-05

变过程和驱动机制对于认识季风如何响应全球气候环境变化以及预测未来气候变化具有重要意义。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

老母洞位于河南省西部栾川县石庙镇弓把沟,地理坐标为 $33^{\circ}46' \text{N}$, $111^{\circ}34' \text{E}$ (图 1), 洞穴上覆岩层厚度大约 25 m 左右, 地处秦岭—淮河一线北侧, 中国地理南北分界线湿润区与半干旱区过渡地带的边界处, 长江和黄河流域分水岭北麓; 每年 7 月~9 月降水量占全年的 50%, 年均温 12.2°C , 年降水量 861 mm, 其特殊的地理位置决定了该区对亚洲夏季风变化响应的敏感性。2012 年在栾川地区的洞穴中发现 6 颗直立人牙齿化石, 老母洞也有人类活动遗迹, 因此本研究对于探讨气候对人类文明演化等有着潜在的科学研究意义。LM2 石笋全长 75 mm, 底部直径 35 mm, 上部稍窄, 下部较宽, 大体呈圆柱状。该样品为方解石组成, 结晶致密, 无溶蚀和重结晶现象, 纹层沿生长轴呈水平叠加发育, 从肉眼观察来看没有明显的沉积间断。石笋的纹层组成, 由下而上叠复成三个旋回, 其组成: 雪白、灰白、雪白加灰黄方解石纹层, 呈韵律式叠加 (图 2)。

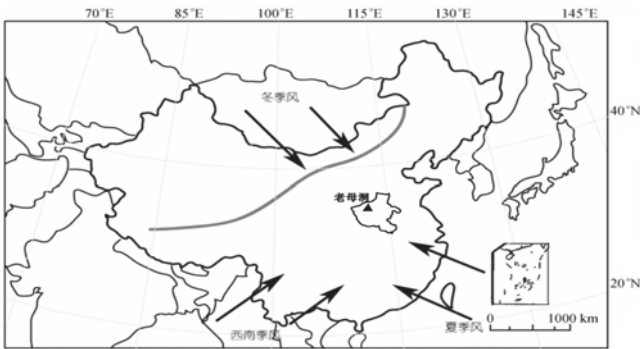


图 1 老母洞地理位置图
Fig.1 The location of Laomu Cave

1.2 分析方法

老母洞 LM2 石笋碳、氧稳定同位素及微量元素样品: 沿石笋伸长轴采用刮样的方法得到测试样品。用刻刀沿中心轴两侧各 5 mm 刮取深 5 mm 的样品粉末。本研究每毫米刮取约 20 个样品, LM2 共取得 1 504 个样品, 选取测试 449 个 $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 数据; 全部分析在西南大学地球化学与同位素实验室完成, 采用 Delta-V-Plus 型质谱与碳酸盐自动进样装置 (Kiel IV) 联机测试, 每 9 个样品加测一个标准样品; 实验室的标准控制样的多次分析的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏差 $<0.1\text{‰}$, 石笋平行样品的分析 $<0.2\text{‰}$, 结果均相对于 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) 标准。

测年方法: 石笋年龄采用 ^{230}Th 铀系不平衡法测定, 本研究的年龄测试在美国明尼苏达大学地球科学系同位素实验室完成, 采用 Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS), 年龄误差 $<0.1\text{‰}$ (2σ , 以下同), 化学实验方法参照 Shen 等 (2003) [8]。

2 结果

2.1 年代数据

图 2 标注了老母洞石笋 LM2 年龄采样点及沉积旋回, TIMS-U 系测年结果列于表 1, 给出了 LM2 石笋的 U、Th 同位素含量和 ^{230}Th 年龄。LM2 样品 ^{238}U 含量在 $647.5\sim 1\ 802 \text{ ng/g}$ 之间, 测年误差约 200 a。老母洞 LM2 石笋 8 个样品覆盖年龄时段为 8 439 ~ 10 947 a B.P.。老母洞石笋年龄分别是在 2009 年末和 2013 年初于美国明尼苏达大学测得 (表 1)。

2.2 重现性检验

石笋生长过程中同位素平衡分馏是其作为气候指标的前提条件。Hendy [9] 提出了检验石笋生长过程中碳酸盐同位素是否分馏平衡的两个准则: ① $\delta^{18}\text{O}$ 值在石笋同一生长层上保持恒定, 且向外侧无富集现

表 1 LM2 石笋 U、Th 同位素组成和 ^{230}Th 年龄

Table 1 Isotopic composition of U/Th and ^{230}Th dating results

编号	深度/mm	$^{238}\text{U}/\text{ng/g}$	$^{232}\text{Th}/\text{pg/g}$	$\delta^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 放射性比	校正年龄/年/距 1950
LM2-BX2	6	849 ± 3	252 ± 6	95.6 ± 3.0	$0.082\ 3\pm 0.000\ 6$	$8\ 439\pm 60$
LM2-BJ2	8	$1\ 023\pm 1$	$1\ 456\pm 29$	45 ± 2.0	$0.080\ 8\pm 0.000\ 3$	$8\ 672\pm 48$
LM2-BX3	14	$1\ 802\pm 13$	$6\ 159\pm 131$	5.3 ± 5.0	$0.079\ 4\pm 0.000\ 9$	$8\ 813\pm 110$
LM2-U1	27	980 ± 7	$1\ 908\pm 42$	-2.0 ± 6.0	$0.080\ 3\pm 0.001\ 5$	$8\ 943\pm 220$
LM2-BX5	35	648 ± 4	$4\ 024\pm 84$	158.5 ± 5.0	$0.098\ 6\pm 0.001\ 2$	$9\ 462\pm 170$
LM2-BX6	41	$1\ 025\pm 5$	$4\ 178\pm 86$	13.4 ± 3.0	$0.092\ 0\pm 0.000\ 8$	$10\ 192\pm 130$
LM2-BJ8	66	$1\ 495\pm 2$	$12\ 872\pm 258$	36 ± 2	$0.100\ 9\pm 0.000\ 4$	$10\ 864\pm 180$
LM2-U2	75	$1\ 419\pm 17$	$16\ 403\pm 87$	37.4 ± 10.0	$0.102\ 4\pm 0.001\ 6$	$10\ 947\pm 270$

注: 衰变常数取值为 $\lambda_{230} = 9.157\ 7\times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_{234} = 2.826\ 3\times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_{238} = 1.551\ 25\times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1\ 000$; 初始 ^{230}Th 年龄校正采用地壳 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 平均比值: $(4.4\pm 2.2) \times 10^{-6}$ 。

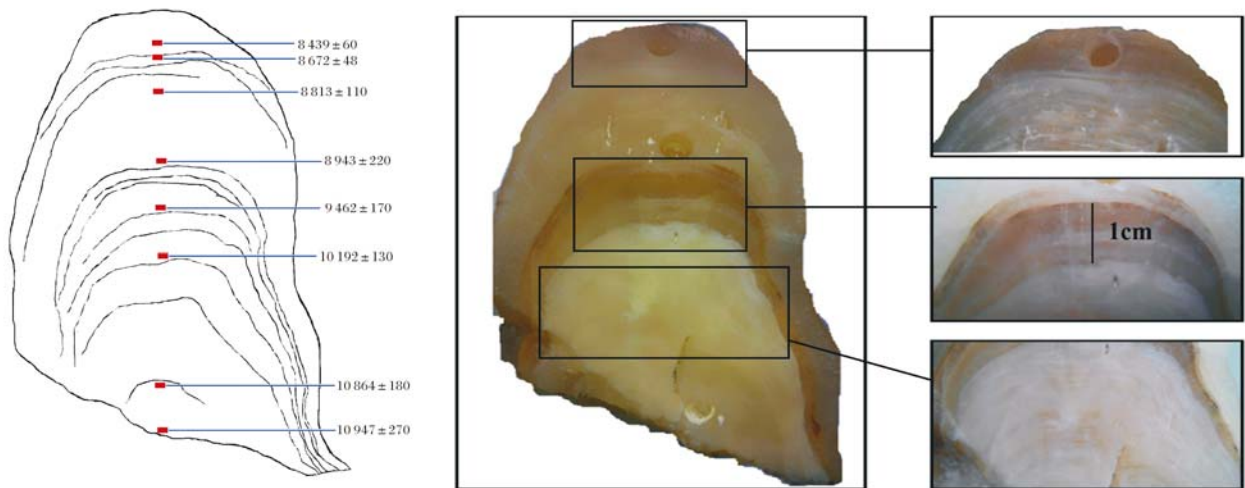
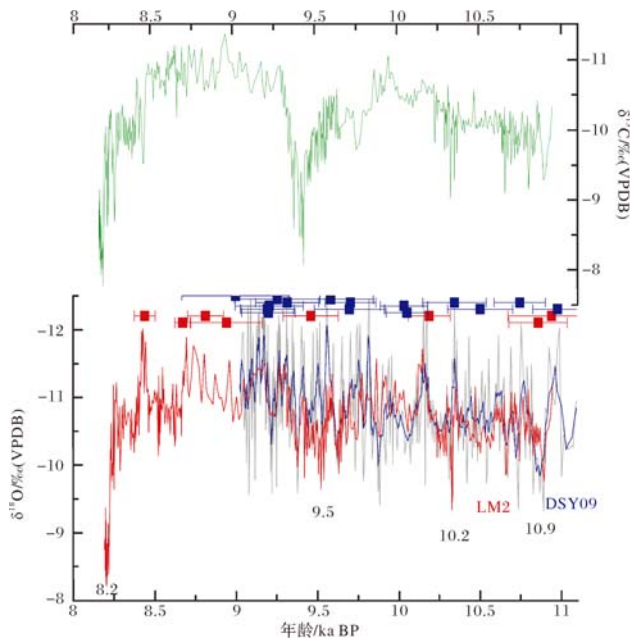


图2 LM2 年龄采样点及纹层组合、旋回组合

Fig.2 The age sampling points and lamina portfolio, cycles of combination of LM2

图3 LM2 稳定同位素与 DSY09 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线图

绿色曲线为 LM2 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线, 红色为 LM2 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线及定年点, 蓝色为 DSY $\delta^{18}\text{O}$ 三点平滑曲线及定年点, 灰色为 DSY09 原始 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线; 黑色数字表示弱季风事件。

Fig.3 LM2 stable isotopes and DSY09 $\delta^{18}\text{O}$ graph

Green curve is LM2 $\delta^{13}\text{C}$ curve, red for LM2 $\delta^{18}\text{O}$ curve and dating, blue is DSY $\delta^{18}\text{O}$ three points smooth curves and dating, Gray was DSY09 original $\delta^{18}\text{O}$ curve, Black numbers indicate weak monsoon event.

象; ②不同生长层的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 之间不存在相关性。由于第一种方法在实际操作中误差较大。近年来对于石笋氧同位素能否作为具有气候信号的一个

重要标准常常采用氧同位素曲线的重现性检验^[10]。该时段 LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线与相邻东石崖洞的 DSY09 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比可见(图 3), LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线 DSY09 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录曲线在误差范围内能够很好的对应, 这说明 LM2 石笋氧同位素是气候信号而非环境噪音。 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现出与 $\delta^{18}\text{O}$ 正相关同步演化特征, 进一步验证了 LM2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录曲线的可靠性。

3 讨论

3.1 10.9~8.2 ka B.P. 石笋 LM2 记录的季风演化趋势

据已有研究表明, 亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 波动主要反映了季风强度变化, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 越偏负, 指示季风越强^[7, 11, 15-17]; 石笋中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的波动主要与土壤中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化有关, 即与 C3 植被与 C4 植被的对比有关, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正, 说明 C4 植被发育, C3 植被减少, 进而指示气候的干冷; 反之亦然^[26]。 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现出与 $\delta^{18}\text{O}$ 正相关同步演化特征, 进一步验证了 LM2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录曲线的可靠性; 但受区域环境影响, 在事件内部细节上 LM2 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 存在差异。

根据 LM2 石笋氧碳同位素曲线变化趋势(图 3), 将研究时段分为以下 3 个阶段:

(1) 自新仙女木(YD)事件后, 亚洲季风在全新世开始时就迅速增强, 但不同地区、不同地质记录中 YD 事件之后的气候变化过程存在差异: 石笋 Q5、D4、Y1 和 SB10 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线和格陵兰 GRIP 冰芯记录 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线在早全新世都表现为持续上升($\delta^{18}\text{O}$ 降低或偏负)的变化趋势, 这种变化趋势持续到 9.6

ka B.P.左右。从 10.13 ka B.P.到 10.9 ka B.P., LM2 中 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值都逐渐偏轻,其变化趋势与南方石笋的变化趋势相比,该石笋的变轻并不明显,与 DSY09、C996-2 相似,即 C996-2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线、DSY09 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线和 LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线在该时段却表现为相对稳定(图 5)。LM2 石笋记录 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 10.2ka 事件后迅速变轻达到了最小值,此时季风达到最强,而在中国东北辽宁暖洞 NH5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[27]和本溪王家崴洞 W4 石笋^[28]在 10.5 ka 达到了最小值,贵州衙门洞 Y1 石笋^[7]和海湾地区的阿曼 Qunf 洞 Q5 石笋^[13]在 9.6 ka 左右达到最小值,进一步说明了早全新世亚洲夏季风演化在不同的区域并不完全相同。由于季风区石笋氧同位素偏负主要指示的是夏季风增强,而格陵兰冰芯记录偏正反映的是温度的升高,因此从图 5 可知早全新世 11~10.13 ka B.P.中国南北方地区夏季风增强与高纬地区温度升高具有相关性,南北方石笋氧同位素记录表现出的差异可能是因为在该时段季风演化的过程中受到了区域性因素的影响,导致中国南北方气候响应机制不同。但由于中国北方早全新世季风变化研究不多,因此要深入研究南北方季风变化还需要更多的地质记录佐证。

(2) 8.75 ka B.P.到 10.13 ka B.P., LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 -11.9‰ ~ -9.5‰ 之间,同时碳同位素在该时段内也发生了剧烈的波动,其波动达 2.2‰ 。10.13 ka B.P.到 8.75 ka B.P., 亚洲季风区不同的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线存在多次明显的峰谷变化(图 5),表明在早全新世 10.13 ka B.P.到 8.75 ka B.P.时段季风活动频繁,存在多次季风减弱,且不同地区不同地质载体记录的季风演化趋势存在差异。

(3) 8.75 ka B.P.后, LM 2 石笋氧碳同位素开始下降。8.42 ka B.P.之后夏季风开始迅速减弱,到 8.245 ka B.P.氧碳同位素偏重的趋势显著增加, $\delta^{18}\text{O}$ 变幅达 3‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 达 2.5‰ (图 4),表明该时段内季风演化呈现出一种阶段性变化的趋势。与 Zhang 等(2010)^[25]研究该时段万象洞 WXB074 石笋提出“中国 8 200 阶段(Chinese 8.2 kyr stadial)”：从 8.47 ka B.P.开始 $\delta^{18}\text{O}$ 开始偏重,并分为三个阶段达到最重相似。

3.2 10.9~8.2 ka B.P. LM2 石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的弱季风事件的内部细节

在全新世温暖湿润的气候背景上,发生了多次弱季风事件,这些事件持续 100~200 a,开始和结束一

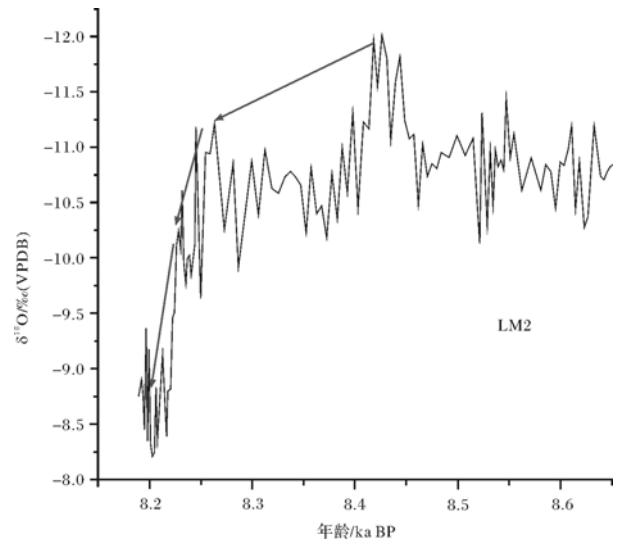


图4 LM2 石笋的阶段性变化趋势

Fig.4 Periodic trends of stalagmite LM2

般均在几十年内完成^[2]。LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线记录到了 10.9 ka 事件、10.2 ka 事件、9.5 ka 事件和 8.2 ka 事件等显著的气候突变事件。在 10.9~8.18 ka B.P.时段, LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与亚洲季风区不同地区石笋记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线具有相似性(图 5),这四次冷事件与北大西洋早全新世出现 8.1 ka, 10.3 ka 及 11.1 ka 冷事件(分别编号为 5, 7, 8)(Bond1997); 贵州茂兰 D4 石笋发现的 10.91 ka 发生干旱^[1]; 河南东石崖洞 DSY09 石笋得出在 11.5~9 ka 年里出现了八个弱季风时期中 10.9 ka B.P., 10.3 ka B.P., 9.4 ka B.P.^[16]; 贵州衙门洞 Y1 石笋发现的 11.0 ka, 10.2 ka 弱季风事件在误差范围内一致^[7]。

从图 5 可以看出, 10.9 ka B.P.事件的起始时间在 LM2、DSY09 和 D4 石笋中基本一致,而在 GRIP 冰芯记录和 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中有 11 ka B.P.事件, SB10 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线在 11 ka B.P.左右并未记录到显著的弱季风事件,可见 10.9 ka B.P.在不同地区、不同地质记录中还存在差异。DSY、D4 和 Y1 石笋记录显示, 10.9 ka B.P.事件的结构为一次强烈的弱季风事件且持续时间较长, LM2 石笋与它们不同的是该事件达到最冷后迅速的转暖。10.2 ka 事件在 LM2 石笋中突变的事件为 10.3 ka, 持续时间短,与 DSY09、NH5 相似,在误差范围内中国南北方石笋对该事件记录基本一致。

多数学者证明, 9.3 ka 事件是百年尺度上的显著的弱季风事件^[7, 11-14]。在 Q5 和 D4 石笋(图 5)氧同位素曲线中可以发现明显的 9.3 ka 事件存在,其强度

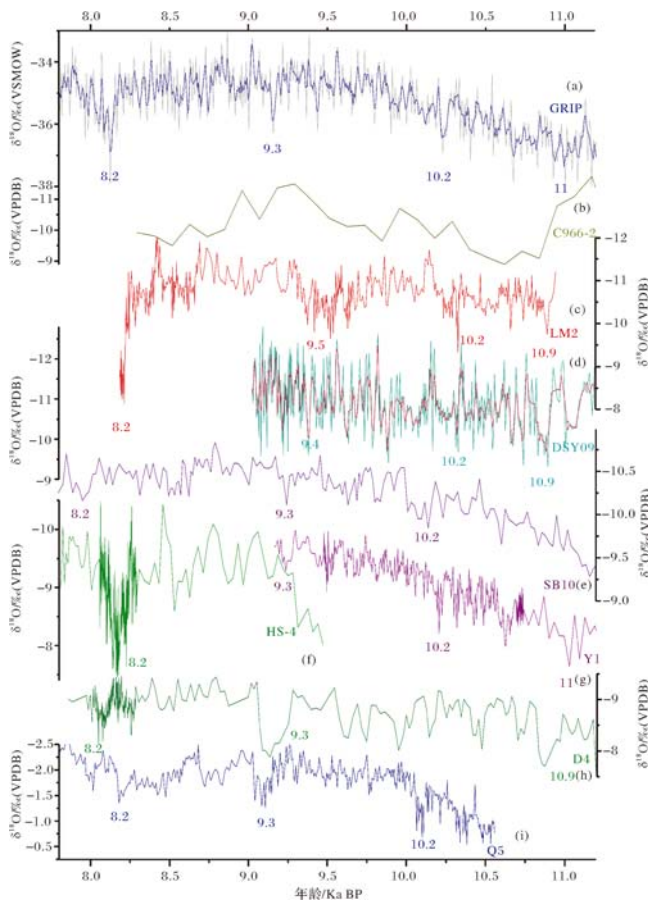


图5 格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线及亚洲不同石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比图
 a. 格陵兰 GRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[16]; b. 陕西九仙洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[24]; c. 河南老母洞 LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录; d. 河南东石崖 DSY09 石笋记录^[16]; e. 湖北三宝洞 SB10 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[20]; f. 贵州衙门洞 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[7]; g. 湖北和尚洞 HS-4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[15, 18]; h. 贵州董哥洞 D4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[11-12]; i. 阿曼 Qunf 洞 Q5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[13-14]。

Fig.5 The comparison of Greenland ice core and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ curve in different parts of Asia

a. Greenland GRIP ice core $\delta^{18}\text{O}$ record^[16]; b. Jiuxian Cave stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record in Shaanxi^[24]; c. LM2 Henan Laomu Cave stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records; d. Dongshiya DSY09 stalagmite records in Henan^[16]; e. Sanbao cave SB10 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record in Hubei^[20]; f. Yamen Cave Y1 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record in Guizhou^[7]; g. Heshang HS-4 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record in Hubei^[15, 18]; h. Dongge Cave D4 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in Guizhou^[11-12]; i. Qunf Cave Q5 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record in Oman^[13-14].

比 8.2 ka 事件还强烈; Y1 石笋在 9.3 ka 事件之前在 9.5 ka 也记录了一个较强的弱季风事件; 但从河南地区的东石崖石笋 DSY09 可以发现, 9.3 ka 事件并不剧烈, 然而在 9.3 ka 事件之前存在的弱季风事件强度更强, Cai 发现了 9.4 ka、9.6 ka 事件; 从图 2 可知老母

洞 LM2 石笋在 9.3 ka B.P. 并没有记录记录到该事件, 而是存在变幅较大的 9.5 ka 事件; 说明在 9.3~9.6 ka B.P. 左右确实存在一个季风快速变化时期, 使 $\delta^{18}\text{O}$ 值频繁波动。

但是与 DSY09 石笋记录不同的是, LM2 石笋(图 3) 氧同位素曲线中 9.5 ka 事件呈现了大的 U 型构成了早全新世 10.9~8.2 ka B.P. 中仅次于 8.2 ka 事件的强烈的季风减弱事件, 与中国南方的董哥洞石笋 D4 和低纬的阿曼 Q5 石笋记录内部趋势相似, 说明该时段频繁发生的 9.3 ka 事件、9.4 ka 事件、9.5 ka 事件、9.6 ka 弱季风事件构成了早全新世 9.3~9.6 ka 快速震荡的弱季风时期。可以看出 D4、Q5 石笋(图 5) 记录的 9.3 ka 事件强度要大于 8.2 ka 事件的强度, 但是图中其他石笋记录该时段内的 9.3 ka 弱季风事件强度要远远小于 8.2 ka 事件的强度, 这些都是氧同位素传输的复杂性造成的。

河南老母洞 LM2 石笋及湖北和尚洞 HS-4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 8.2 ka 事件变化非常显著(图 4)。8.2 ka 事件是全新世以来最为显著的急速降温事件^[2, 6, 17], 此事件的时间和持续范围及结构已经有一定认识, 老母洞 LM2 石笋记录中 8.2 ka 事件突变于 8.245 ± 0.050 ka B.P., 在误差范围内与亚洲季风区不同石笋氧同位素记录^[17-18] 及格陵兰冰芯最新 GICC05 时标中^[6] 的 8.2 ka 气候突变的开始时间是一致的, 不同地区的^[2, 6, 17] 不同地质记录的 8.2 ka 事件突变时间大致在 8.2 ka 左右, 表明 8.2 ka 事件在高纬气候系统与中低纬热带季风之间存在着遥相关关系, 包括海气之间的传输^[19]。但在 8.2 ka 事件上, 只有河南老母洞 LM2 石笋及湖北和尚洞 HS-4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化非常显著, 其余记录在 8.2 ka 事件上变幅为 $1\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ 的变化(图 5)。和尚洞 HS-4 (Hu CY, 2008; Liu YH, 2013) 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 8.2 ka 事件的强度变幅约为 2.5‰ , LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 8.2 ka 事件的强度变幅为 2.95‰ 相似, 说明石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 8.2 ka 事件存在一定区域差异。

以上表明 8.2 ka 事件发生的时间在北半球是一致的, 但事件内部变化特征及趋势有一定区域差异, 这可能与季风区水汽耦合过程中各个圈层氧同位素对气候事件响应及传输的复杂性有关, 值得以后深入研究。

3.3 气候变化的驱动机制

引起气候变化的因素有很多, 如天文因素的米兰科维奇假说, 轨道因素(地轴倾角的变化、轨道偏心

率的变化和黄赤交角的变化等)都会引起太阳辐射在高低纬度之间能量分配的不均衡;此外,随着太阳年龄的增大,其自身向外辐射的能量也逐渐减弱,这些因素都会引起气候的变化;除此以外温盐环流、火山活动等其它因素也会引起气候变化。但是,据已有资料显示,在整个全新世时期,早全新世波动更为强烈^[2,7-8],因此,我们要探讨其变化的驱动机制,有利于我们在未来更好地应对全球变化。

采用 REDFIT37 功率谱分析软件,对老母洞 LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 10.9~7.9 ka B.P. 的数据进行分析(图 6)。在 95% 置信度水平下通过红噪声检验的主要周期为:108 a, 66 a, 55 a, 18 a 等。108 a 周期接近树轮记录的 ^{14}C 活动周期,主要反映了太阳活动的周期;66 a 接近太阳活动世纪周期(70~100 a 的变化周期, Gleissberg 周期);18 a 周期反映了太阳黑子活动周期。因此,豫西老母洞石笋记录的短尺度上季风变化与太阳活动密切相关,这与近年来对早全新世极端气候变化研究的驱动机制是一致的。

因此,太阳活动周期引起的太阳辐射能量的变化和北半球高纬气候状况共同影响着亚洲季风的变化。北半球夏季太阳辐射减弱引起了北半球高纬冰量的变化,冰盖大量反射太阳光而造成地球对太阳能的吸收能力下降,随着冰盖的进一步加大,引起进一步降温,进而导致热带辐合带(ITCZ)南移,造成季风环流的减弱^[18]。

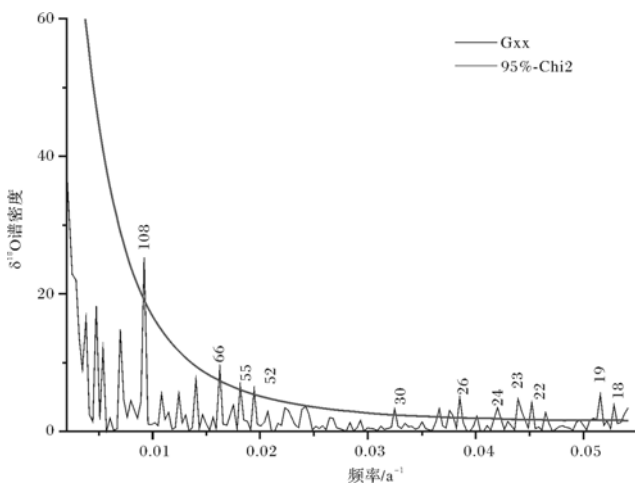


图 6 老母洞石笋 LM2 功率谱分析

Fig.6 Power spectral analysis LM2 Laomu Cave

4 结论

豫西老母洞 LM2 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示了季风强弱的变化;早全新世中国南北方石笋氧同位素记录与格陵兰

冰芯记录具有一致性,表明亚洲季风区季风的变化与高纬极地地区的温度变化相关性。在 10.13 ka B.P. 到 10.9 ka B.P. 时段,中国北方石笋氧同位素记录与南方石笋及海湾地区阿曼石笋变化趋势表现出的差异可能是受到区域因素的影响。LM2 石笋高分辨率记录了 8.2 ka、9.5 ka、10.2 ka 和 10.9 ka 弱季风事件,特别是 8.2 ka、9.5 ka。老母洞与已发表的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比分析发现:石笋所揭示的早全新世某些冷事件在亚洲季风区存在差异,主要表现在事件内部变化特征及趋势有一定区域差异。LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线在 9.3~9.6 ka B.P. 左右记录了一个大的弱季风事件 9.5 ka 事件,与 DSY09(2009)、Y1、HS-4 记录相似,表明在该时段内存在季风的减弱事件,但是氧同位素传输的复杂性,使其在南北方表现不同。LM2 石笋所揭示的 8.2 ka 事件开始时间为 8.245 ± 0.050 ka B.P.,在误差范围内与亚洲季风区不同石笋记录以及格陵兰冰芯最新 GICC05 时标中的 8.2 ka 气候突变的开始时间是一致的,但 LM2 的变幅较以往发表文章变幅较大且呈阶段性变化,原因有待于进一步研究。在测年误差范围内 LM2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与格陵兰 GRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录有着较好的一致变化趋势,根据功率谱分析结果显示豫西老母洞石笋短尺度上季风变化与太阳活动密切相关,说明太阳活动周期引起的太阳辐射能量的变化和北半球高纬气候状况共同影响着亚洲季风的变化。

致谢 感谢西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室李廷勇副研究员、杨平恒副教授在论文完成过程中给予的指导和帮助;感谢西南大学地理科学学院薛倩倩、代然然等硕士研究生在论文样品采集过程中给予的帮助,同时感谢河南省栾川县鸡冠洞景区管理处的大力支持。感谢审稿专家及本文编辑提出的宝贵意见,这些意见对本文的完善有很大的帮助。

参考文献 (References)

- 覃嘉铭,袁道先,程海,等. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件:贵州茂兰石笋氧同位素记录[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2004, 34(1): 69-74. [Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. Younger Dryas and the Early and Middle Holocene abrupt climate change events: Maolan stalagmite oxygen isotope record[J]. Science China (Seri. D); Earth Sciences, 2004, 34(1): 69-74.]
- 王绍武. 全新世气候变化[M]. 北京:气象出版社, 2011: 1-282. [Wang Shaowu. The Holocene Climate Change [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 1-282.]

- 3 王宁练,姚檀栋,Thompson L G. 全新世早期强降温事件的古里雅冰芯记录证据[J]. 科学通报,2002,47(11):818-823.[Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L G. Early Holocene evidence of strong cooling event in Guliya Record [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(11): 818-823.]
- 4 余克服,陈特固,钟晋梁,等. 雷州半岛全新世高温期珊瑚生长所揭示的环境突变事件[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2002,32(2):149-156.[Yu Kefu, Chen Tegu, Zhong Jinliang, et al. Coral growth environment revealed mutations time about high-temperature phase of Holocene in Leizhou Peninsula[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2002, 32(2): 149-156.]
- 5 Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene[J]. Science, 2001, 293(5533): 1304-1308.
- 6 Southon J. A first step to reconciling the GRIP and GISP2 Ice-Core chronologies, 0-14, 500 yr BP [J]. Quaternary Research, 2002, 57(1): 32-37.
- 7 杨琰,袁道先,程海,等. 末次冰消期亚洲季风突变事件的精确定年:以贵州衙门洞石笋为例[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2010,40(2):199-210.[Yang Yan, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. Precise dating of abrupt shifts in the Asian Monsoon during the last deglaciation based on stalagmite data from Yamen Cave, Guizhou province, China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2010, 40(2): 199-210.]
- 8 Shen C C, Cheng H, Edwards R L, et al. Measurement of attogram quantities of ^{231}Pa in dissolved and particulate fractions of seawater by isotope dilution thermal ionization mass spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(5): 1075-1079.
- 9 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.
- 10 Dorale J A, Liu Zaihua. 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.
- 11 Cheng Hai, Sinha A, Wang Xianfeng, et al. The Global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas [J]. Climate Dynamics, 2012, 39(5): 1045-1062.
- 12 Yuan Daoxian, Cheng Hai, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon [J]. Science, 2004, 304(5670): 575-578.
- 13 Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago [J]. Nature, 2001, 411(6835): 290-293.
- 14 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman [J]. Science, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- 15 Hu Chaoyong, Henderson G M, Huang Junhua, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 266(3/4): 221-232.
- 16 Cai Binggui, Edwards R L, Cheng Hai, et al. A dry episode during the Younger Dryas and centennial-scale weak monsoon events during the early Holocene: A high-resolution stalagmite record from southeast of the Loess Plateau, China [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02705.
- 17 Cheng H, Fleitmann D, Edwards R L, et al. Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. event inferred from $\delta^{18}\text{O}$ records of stalagmites from China, Oman, and Brazil [J]. Geology, 2009, 37(11): 1007-1010.
- 18 Liu Y H, Henderson G M, Hu C Y, et al. Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8,200 year event [J]. Nature Geoscience, 2013, 6(2): 117-120.
- 19 Wu J Y, Wang Y J, Cheng H, et al. Stable isotope and trace element investigation of two contemporaneous annually-laminated stalagmites from northeastern China surrounding the "8.2 ka event" [J]. Climate of the Past Discussions, 2012, 8(3): 1591-1614.
- 20 邵晓华,汪永进,程海,等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录[J]. 科学通报,2006, 51(1):80-86.[Shao Xiaohua, Wang Yognjin, Cheng Hai, et al. Holocene monsoon climate evolution and drought events Shennongjia stalagmite records [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 80-86.]
- 21 刘嘉麒,吕厚远, Negendank J, 等. 湖光岩玛珉湖全新世气候波动的周期性[J]. 科学通报,2000, 45(11):1190-1195.[Liu Jiaqi, Lü Houyuan, Negendank J, et al. Holocene climatic fluctuations in the cyclical in Maar Lake Huguangyan [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(11): 1190-1195.]
- 22 姜修洋,何尧启,沈川洲,等. 全新世黔北降水特征的石笋记录及适宜期结束时间在亚洲季风区的不等时性[J]. 科学通报,2012, 57(1):73-79.[Jiang Xiuyang, He Yaoqi, Shen Chuanzhou, et al. Stalagmite-inferred Holocene precipitation in northern Guizhou province, China, and asynchronous termination of the Climatic Optimum in the Asian Monsoon territory [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(1): 73-79.]
- 23 方修琦,候光良. 中国全新世气温序列的集成重建[J]. 地理科学,2011,31(4):385-393.[Fang Xiuyi, Hou Guangliang. Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(4): 385-393.]
- 24 Cai Yanjun, Tan Liangcheng, Cheng Hai, et al. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 291(1/2/3/4): 21-31.
- 25 Li Yu, Wang Nai'ang, Li Zhuolun, et al. Holocene climate cycles in northwest margin of Asian Monsoon [J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(4): 450-461.
- 26 张美良,朱晓燕,林玉石,等. 桂林洞穴滴水及现代碳酸钙(CaCO_3)沉积的碳同位素记录及其环境意义[J]. 地球学报,2009,30(5):634-642.[Zhang Meiliang, Zhu Xiaoyan, Lin Yushi, et al. Cave dripping water and carbon isotopic records of modern carbonate (CaCO_3) deposits: Stalagmite in Panlong Cave of Guilin and its environmental significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(5): 634-642.]
- 27 吴江滢,汪永进,董进国. 全新世东亚夏季风演化的辽宁暖洞石

笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. 第四纪研究, 2011, 31(6): 990-998. [Wu Jianguo, Wang Yongjin, Dong Jinguo. Changes in East Asian summer monsoon during the Holocene recorded by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records from Liaoning province[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(6): 990-998.]

28 董进国, 张富. 本溪王家崮洞 10500-5000a BP 石笋记录及区域气候意义[J]. 海洋地质和第四纪地质, 2012, 32(1): 119-125. [Dong Jinguo, Zhang Fu. The mid-holocene climate variation inferred from a dated stalagmite record from Wangjiawei Cave, Northeast China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 119-125.]

Early Holocene Monsoon Evolution of High-resolution Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Records: in Henan Laomu Cave

ZHANG YinHuan^{1,2} YANG Yan^{1,2} YANG XunLin^{1,2} YIN JianJun^{1,2} HUANG Fan^{1,2}
REN XiaoFeng^{1,2} ZHAO JingYao^{1,2} LIU Xiao^{1,2} NIE XuDong^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University; Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir

Region's Eco-Environment, Chongqing University & Southwest University, Ministry of Education, Chongqing 400715;

2. Laboratory of Geochemistry and Isotope, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Based on 8 U/Th dates, 449 oxygen and carbon isotopic data from stalagmite LM2 from Laomu Cave, West Henan Province, China, a record of the Asian monsoon inter-decadal resolution sequence during 8.2~10.9 ka B.P. was established. The minimum $\delta^{18}\text{O}$ value is -12‰, the maximum value is -8.2‰ and the vibration amplitude reaches 3.8‰. In the 10.13~10.9 ka B.P. sessions of early Holocene, the stalagmites in Jiuxian Cave, Laomu Cave and Dongshiya Cave reveals that monsoon stable in the period, but the stalagmites of Yamen Cave and Sanbao Cave in the southern China, polar ice cores GRIP record monsoon gradually. Differences of monsoon process of evolution between north and south China in the period may be related to climate response mechanism on the North and South China. Stalagmites LM2 recorded 8.2 ka, 9.5 ka, 10.2 ka and 10.9 ka weak monsoon event. Comparisons of LM2 to previously published early Holocene records show significant phase differences. The record of 9.3 ka weak monsoon event is not obvious in LM-2 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ curve, but it recorded a weak monsoon event in 9.3~9.6 ka B.P. and similar to DSY09 (2009), Y1, HS-4 record. This indicated there was a weakening monsoon event in this time. The complexity oxygen isotope transport make it the different performance in north and south. In addition, LM2 stalagmite records the beginning of 8.2 ka B.P., the oxygen isotope curve showing a decline stage, and luffing up to 3‰, with Zhang et al proposing China "8200 phase" agreement by studying similar Wanxiang Cave. Northern China stalagmite showed the 8.2 ka cold event was staged event, while the south records revealed no showing phase characteristics, the reason for this need to more northern precision stalagmite records for further studying. The LM2 correlate within errors with Greenland ice core records, illustrating Asian monsoon and the North Atlantic climate change have fast atmospheric transmission. The stalagmite in Laomu Cave record confirms earlier work that suggested that Asia Monsoon is closely related to solar activity. Early Holocene Asian monsoon related with changing in solar radiation energy and climate condition on the high northern latitudes.

Key words: stalagmites; Asian Monsoon; $\delta^{18}\text{O}$; weak monsoon events; solar activity; Laomu Cave