

马 乐,肖海燕,张 鑫,等. 福建仙云洞石笋记录的 Termination I 事件缓变特征[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(5): 604-612.
MA Le, XIAO Hai-yan, ZHANG Xin, et al. Gradual Changes of the Termination I Inferred from Stalagmite Records in Xianyun Cave of Fujian, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(5): 604-612.

福建仙云洞石笋记录的 Termination I 事件缓变特征

马 乐¹, 肖海燕¹, 张 鑫¹, 姜修洋^{1,2,3*}, 蔡炳贵^{1,2,3}

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 福建师范大学 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007; 3. 福建师范大学 地理研究所, 福建 福州 350007)

摘 要: 末次冰期终止事件(Termination I, 简称 TI)是发生在末次冰消期约 14.7 ka B. P. 北半球最显著的一次快速升温事件, 其气候突变的全球响应及转型特征是末次冰消期研究的重点。基于中国东南地区福建西部仙云洞两支石笋(样品编号为 XY11 和 XY III-21)17 个高精度²³⁰Th 年龄和 567 个氧同位素数据, 建立了 12.67~16.10 ka B. P. 时段内平均分辨率达十年际的东亚夏季风强度演变序列, 捕捉到了 Termination I 转型缓变特征。仙云洞石笋记录揭示 Termination I 事件缓变特征持续时间达 800 a, 明显比也门(约 13 a)以及中国西南地区(约 35 a)和长江中下游地区(约 200 a)石笋记录的转型时间长很多, 存在显著的区域差异。仙云洞石笋记录的 Termination I 转型时段季风开始增强响应于北高纬气候, 但仙云洞石笋记录的 Termination I 缓变特征指示其可能受到热带低纬西太平洋暖池水文循环过程的影响。

关键词: Termination I 事件; 东亚季风; 石笋; 转型特征; 区域差异; 驱动机制; 仙云洞; 福建

中图分类号: P532

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2019)05-0604-09

Gradual Changes of the Termination I Inferred from Stalagmite Records in Xianyun Cave of Fujian, China

MA Le¹, XIAO Hai-yan¹, ZHANG Xin¹, JIANG Xiu-yang^{1,2,3*}, CAI Bing-gui^{1,2,3}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China;

2. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Processes of Ministry of Education,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 3. Institute of Geography,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: The Termination I (TI) is the most significant abrupt warming event in the northern hemisphere during the last deglaciation of about 14.7 ka B. P., and its transitional characteristics and global response to climate change are the focus of the research. Based on 17 high-resolution ²³⁰Th ages and 567 oxygen isotope data from two stalagmites (XY11 and XY III-21) in Xianyun cave of western Fujian, southeastern China, the East Asian summer monsoon intensity evolution sequence with an average resolution of ten years covering the period of 12.67-16.10 ka B. P. was established. It is characterized by slow transitional process over 800 a, which is much longer than

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-05-28 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672170); 福建省自然科学基金项目(2017J01654); 福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 马 乐(1995-), 男, 山西孝义人, 理学硕士研究生, E-mail: 1372350526@qq.com.

* 通讯作者: 姜修洋(1981-), 男, 山东临沂人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: xyjiang@fjnu.edu.cn.

that in Yemen(~ 13 a), the southwestern China(~ 35 a) and the middle-lower reaches of Yangtze River, China(~ 200 a), showing obvious regional differences. The onset of intensified monsoon mainly responses to the north high latitude climate during the Termination I inferred from stalagmite records in Xianyun cave. The slow transitional characteristic implies that the hydrology processes over the tropical low latitude West Pacific warm pool may exert significant impact on the monsoon climate.

Key words: Termination I; East Asian monsoon; stalagmite; transitional characteristic; regional difference; driving mechanism; Xianyun cave; Fujian

0 引言

末次冰期终止事件(Termination I,简称 TI)是末次冰期向全新世气候转变的时间节点^[1],其气候变化的全球响应及转型特征是末次冰消期研究的重点。Termination I事件开始于14.7 ka B. P.左右,是末次冰消期北半球最显著的一次升温事件。此时全球海-气系统发生大规模重组,各地气候变化明显,全球CO₂含量突然快速增高,海平面在短时间内显著升高^[2-3]。伴随着北大西洋淡水注入的减弱,北大西洋经向环流(AMOC)快速恢复^[4],北大西洋和格陵兰地区温度快速上升^[5-6]。热带辐合带(ITCZ)向北移动^[7-8],亚洲夏季风增强^[9],而南美夏季风减弱^[10]。南极出现冷逆转^[1],南、北半球气候呈现为“See-saw”模式。

Termination I事件是一个全球性的气候变化事件,但在不同区域的气候响应存在较大差异。格陵兰冰芯记录的 Termination I事件转型过程非常迅速,转型时间仅为3 a^[11];也门 Moomi 洞石笋记录的转型时间为十多年^[12];中国西南地区洞穴记录显示在几十年内完成转变^[13-14],长江中下游地区石笋记录的转型特征则相对缓慢,约为200 a^[15-16];而热带低纬地区的马来西亚 Borneo 洞石笋记录则揭示出更为缓慢的转型过程, Termination I转型长达千年之久^[17]。转型持续时间的差异有可能说明石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信号在响应气候敏感性上存在区域差异,也可能是气候突变信号的传播机制导致的。目前关于 Termination I事件已有的石笋记录大都来自于中国西南和长江中下游地区,东南沿海地区记录的严重缺失限制了对这一气候事件区域响应的全面了解,进而制约了对 Termination I事件区域差异背后存在可能机制的理解。因此,有必要从这一区域获取定年精确和分辨率高的古气候记录进行进一步研究。

本文选取位于中国东南地区典型东亚夏季风影响前沿地带的福建西部仙云洞的两支石笋(样品编

号分别为 XY11 和 XYⅢ-21)作为研究对象,建立了12.67~16.10 ka B. P.时段内平均分辨率达十年际的东亚夏季风强度的演变序列,并通过与亚洲季风区已有的高分辨率石笋记录和高、低纬度古气候记录的对比,探讨 Termination I事件转型特征的区域差异及可能的影响机制。

1 样品采集与分析方法

本文研究的石笋样品采自福建连城地区东南15 km处的仙云洞(25°33'N,116°59'E),洞口海拔约为968 m(图1)。溶洞发育于二叠系栖霞组石灰岩中,自洞口向内呈阶梯状下延,全长约2 500 m。洞穴封闭性较好,实测湿度常年接近100%。洞内有若干大小不等的洞厅,且滴水点众多,次生碳酸盐发育良好。洞穴上覆土壤为黄壤,植被繁茂,主要以毛竹林、林下草本植物为主。仙云洞所在的连城地区地理上处于浙闽丘陵,受典型东亚夏季风的影响,因地形因素兼具山地气候特征,全年气候温和,降水充沛,多年平均气温为19℃~21℃,平均降水量为1 600~1 800 mm,降水集中在4月至10月,占全年70%以上。仙云洞洞内实测气温为17℃,与洞外年平均气温相近。

样品 XY11 和 XYⅢ-21 采自仙云洞底部,整体外形均呈圆柱状,分别长538 mm和270 mm,底部直径分别约为80 mm和60 mm(图2)。将石笋沿着中心生长轴切开、抛光。样品的抛光面均光滑且无溶孔,不同生长阶段颜色呈现明暗更替。样品 XY11 在本文研究层段80~538 mm内存在一暗色间断面,有可能为沉积间断(图2)。

在石笋抛光面上用直径为0.9 mm的牙钻沿着生长轴钻取17个样品用于²³⁰Th定年,每个样品质量为30~40 mg,测试工作在台湾大学高精度质谱与环境变迁实验室(HISPEC)完成。分析仪器为MC-ICP-MS Neptune,样品处理及测试方法参考文献[18],年龄误差类型为 $\pm 2\sigma$,年龄分析结果见表

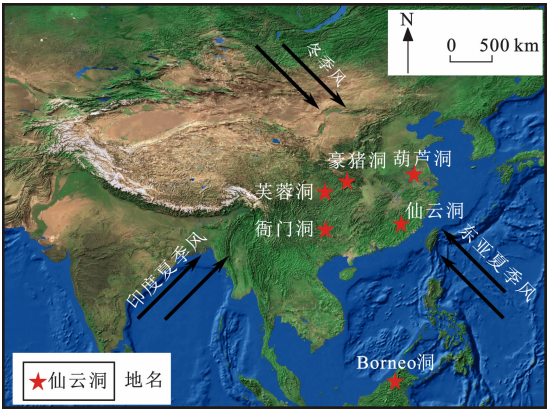


图 1 福建连城地区仙云洞地理位置

Fig. 1 Location of Xianyun Cave in Liancheng Area of Fujian

1。用直径为 0.5 mm 的牙钻沿着石笋中心生长轴以 1 mm 为间隔取样,共获取 567 个氧同位素样品。测试工作在福建师范大学地理科学学院稳定同位素中心完成,使用碳酸盐自动进样装置 Kiel IV 与 Finnigan MAT-253 型质谱仪联机完成测试,每 9 个样品插入 1 个标准样品(NBS-19),分析误差($\pm 2\sigma$)优于 0.06‰,结果以 $\delta^{18}\text{O}(\text{VPDB})$ 标准表示。

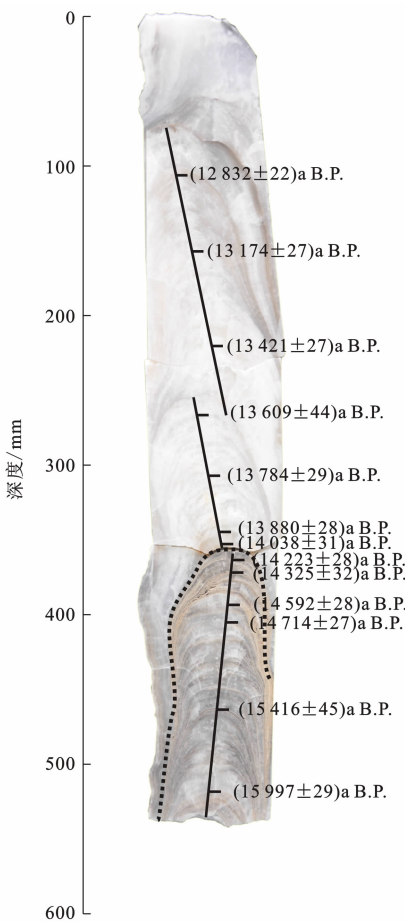
2 结果分析

2.1 年龄模式

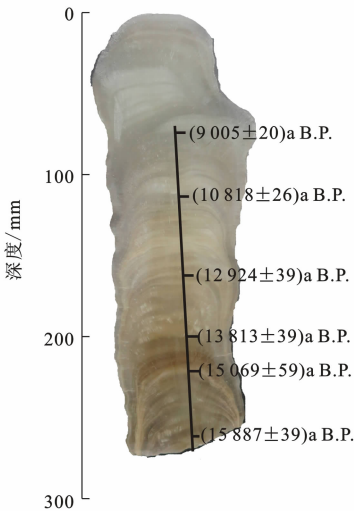
表 1 给出了石笋样品 XY11 和 XYⅢ-21 的 17 个 ^{230}Th 实测年龄及其误差范围。年龄分析结果显示,样品 XY11 的 ^{238}U 含量(质量分数,下同)高,为 $(16\sim 22)\times 10^{-6}$,而 ^{232}Th 含量较低,为 $(0.1\sim 23.0)\times 10^{-9}$;样品 XYⅢ-21 的 ^{238}U 含量更高,为 $(20\sim 60)\times 10^{-6}$,而 ^{232}Th 含量也较低,为 $(0.1\sim 1.0)\times 10^{-9}$;两支石笋的测年精度都较高,年龄误差为 $(\pm 22\sim \pm 59)\text{a}$ 。年龄分析结果表明样品 XY11 在 365 mm 确实存在沉积间断,石笋停止生长了约 170 a。根据定年点以线性内插法和外推法建立两支石笋的年代标尺。从石笋的年龄-深度曲线(图 3)可以看出,样品 XY11 以沉积间断为界在距顶 106~360 mm 层段的生长速率约为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,平均分辨率为 4.7 a,与该层段石笋抛光面呈现出色泽透明、纹层稀疏相一致;在距顶 366~538 mm 层段的生长速率约为 $0.08\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,平均分辨率为 11.3 a,与该层段石笋抛光面呈现出颜色偏暗、纹层致密相一致。样品 XYⅢ-21 的沉积速率相对较慢,研究层段平均分辨率约为 30 a。

2.2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录变化特征

福建仙云洞石笋样品 XY11 和 XYⅢ-21 的氧



(a) 样品XY11



(b) 样品XYⅢ-21

黑色短线为定年点及定年结果,黑色虚曲线表示沉积间断;
a B. P. 为相对于公元 1950 年

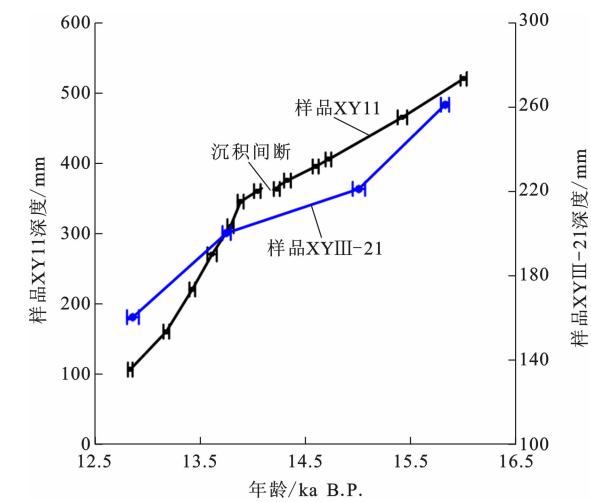
图 2 仙云洞石笋抛光面

Fig. 2 Photographs of Stalagmites in Xianyun Cave
同位素记录随时间的变化序列如图 4 所示,其记录整体上分为 3 个阶段。样品 XY11 记录在 14.68~16.10 ka B. P. 时段, $\delta^{18}\text{O}$ 值整体上更偏正,其值为

表 1 ²³⁰Th 年龄分析结果
Tab. 1 Analysis Results of ²³⁰Th Ages

分析点	深度/cm	$w(^{238}\text{U})/10^{-9}$	$w(^{232}\text{Th})/10^{-12}$	$\delta^{234}\text{U}$ 测量值	$\delta^{234}\text{U}$ 初始值	²³⁰ Th/ ²³⁸ U 值	²³⁰ Th 未校正 年龄/a	²³⁰ Th 校正 年龄/a B. P.
XY11-106	10.6	16 109±16	68±11	1 405±2	1 457±2	0.271±0.001	12 901±22	12 832±22
XY11-160	16.0	18 527±21	181±16	1 386±2	14 382±3	0.275±0.001	13 243±27	13 174±27
XY11-220	22.0	18 606±20	154±13	1 394±2	1 448±3	0.281±0.002	13 490±27	13 421±27
XY11-270	27.0	19 539±27	2 390±18	1 361±3	1 414±4	0.281±0.002	13 679±44	13 609±44
XY11-310	31.0	19 833±20	46±14	1 370±2	1 425±3	0.285±0.001	13 853±29	13 784±29
XY11-345	34.5	20 527±25	781±19	1 335±3	1 389±3	0.284±0.001	13 949±28	13 880±28
XY11-360	36.0	18 431±19	27±15	1 252±3	1 303±3	0.276±0.001	14 107±31	14 038±31
XY11-366	36.6	19 385±21	1 044±19	1 236±2	1 287±2	0.278±0.001	14 293±28	14 223±28
XY11-375	37.5	21 179±22	5 140±19	1 253±2	1 305±3	0.282±0.001	14 397±32	14 325±32
XY11-395	39.5	20 799±24	656±20	1 241±3	1 293±3	0.285±0.001	14 662±28	14 592±28
XY11-405	40.5	22 776±22	112±16	1 252±2	1 305±3	0.288±0.001	14 782±27	14 714±27
XY11-460	46.0	18 001±17	23 285±47	1 256±2	1 312±2	0.302±0.002	15 500±45	15 416±45
XY11-520	52.0	20 294±20	267±12	267±2	1 302±2	0.311±0.001	16 066±29	15 997±29
XYⅢ 21-160	16.0	63 434±152	278±26	18±3	19±3	0.114±0.001	12 924±56	12 858±56
XYⅢ 21-200	20.0	40 853±64	35±10	-11±2	-11±2	0.118±0.001	13 813±39	13 747±39
XYⅢ 21-225	22.5	23 016±50	923±13	-2±3	-2±3	0.129±0.001	15 069±59	15 003±59
XYⅢ 21-261	26.1	53 615±64	489±10	4±2	4±2	0.136±0.001	15 887±39	15 821±39

注: $w(\cdot)$ 为元素含量;²³⁰Th/²³⁸U 值为活度比; $\delta^{234}\text{U}$ 初始值是根据 U-Th 年龄获得,U-Th 年龄校正假设初始的²³⁰Th/²³²Th 原子比为 $(4\pm 2)\times 10^{-6}$ 。



误差棒表示石笋²³⁰Th 年龄分析点及年龄分析误差(±2σ)

图 3 年龄-深度曲线

Fig. 3 Curves of Age-depth

-5.88‰~-5.23‰,平均值为-5.58‰,对应于 Heinrich 1(H1)阶段;在 13.85~14.68 ka B. P. 时段, $\delta^{18}\text{O}$ 值从整体偏正状态缓慢地转换为整体偏负状态,由-5.34‰偏负至-7.06‰,偏负约 1.72‰,对应于 Termination I 转型阶段,根据内插年龄和定年数据判断此转型过程持续时间为 $(830\pm 27)\text{a}$;在 12.67~13.85 ka B. P. 时段, $\delta^{18}\text{O}$ 值整体偏负,为

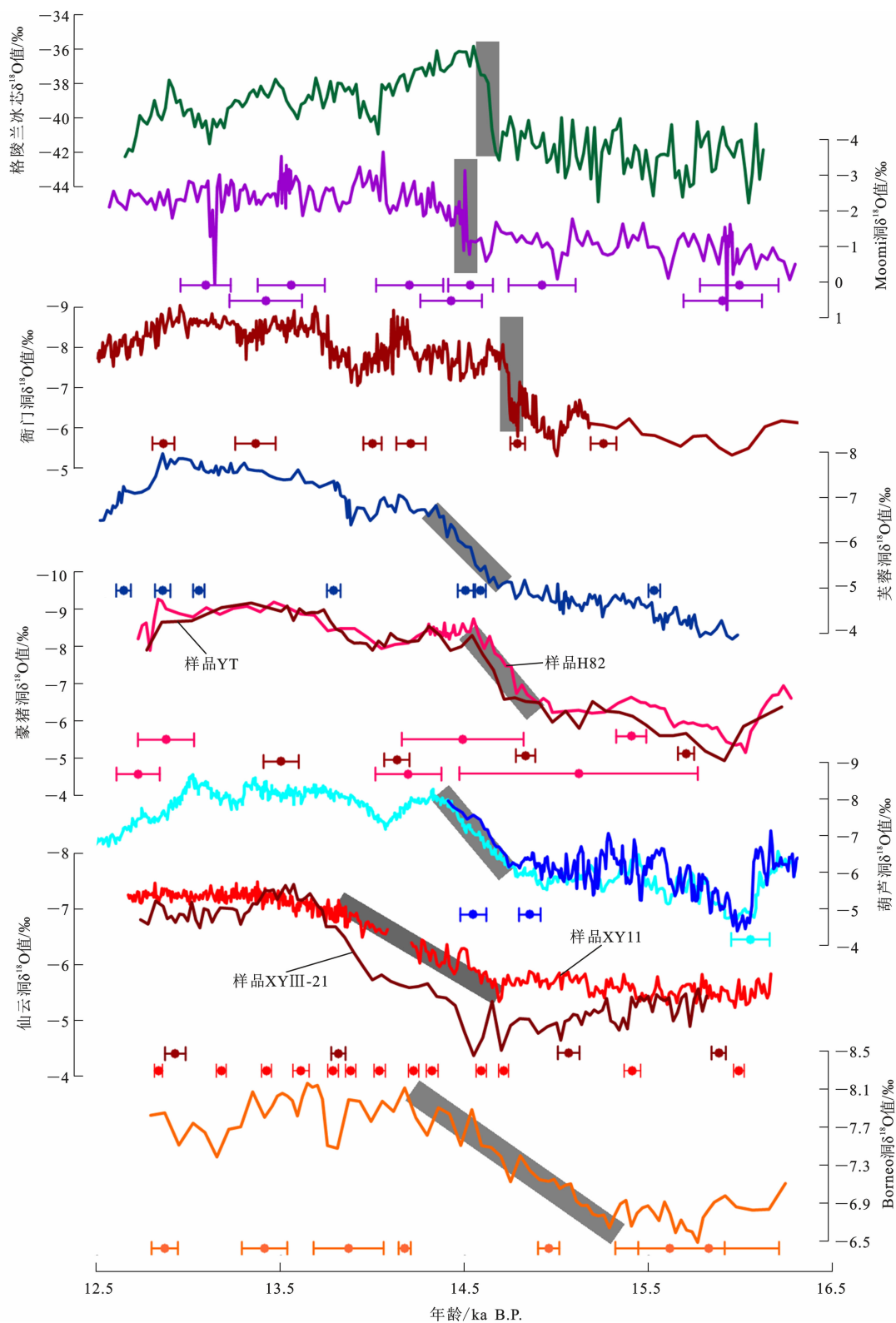
-7.51‰~-6.70‰,平均值为-7.22‰,对应于 Bolling-Allerod(BA)阶段。样品 XYⅢ-21 记录在整体趋势上一致于样品 XY11,显示了长达 $(850\pm 50)\text{a}$ 缓慢的 Termination I 转型过程,但在细节变化上存在一定差异。已有研究表明洞穴对气候外部的响应和洞穴内部环境都可能对具体的气候信号产生一定影响^[7,14],这可能是仙云洞两支石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录出现偏差的原因。

3 讨论

尽管亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示意义存在诸多的争议,但是在轨道到千年尺度上的变化通常被解释为反映夏季风强度的变化^[7,19-22]。正如 Cheng 等提出的亚洲季风区石笋记录反映了平均状态下的夏季风强度,而石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在轨道到千年尺度上大范围的区域一致性也可很好地佐证^[23-24]。本文跟随先前仙云洞石笋记录的解释^[25-27],将石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值作为季风强度的代用指标,即石笋氧同位素值偏负指示季风增强,反之则季风减弱。

3.1 仙云洞记录 Termination I 转型的缓变特征

此前研究已经表明,石笋记录的末次冰消期亚洲季风在千年、百年尺度事件上与格陵兰冰芯记录具



格陵兰冰芯数据引自文献[11];也门 Moomi 洞数据引自文献[12];中国贵州衙门洞数据引自文献[13],重庆芙蓉洞数据引自文献[15],湖北豪猪洞数据引自文献[16],江苏葫芦洞数据引自文献[7],福建仙云洞数据来自本文;马来西亚 Borneo 洞数据引自文献[17]。其中,格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 值采用 SMOW 标准;其余洞穴 $\delta^{18}\text{O}$ 值采用 VPDB 标准。不同颜色的误差棒为各自石笋记录的年龄分析点及误差($\pm 2\sigma$);灰色阴影部分涉及 Termination I 转型过程

图 4 格陵兰冰芯和不同洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比

Fig. 4 Comparison Among $\delta^{18}\text{O}$ Records of Greenland Ice Core and Stalagmites in Different Caves

有较好的一致性,表明亚洲季风变化与北高纬气候异常紧密耦合^[7,28]。但是,涉及到千年尺度事件的转型过程以及事件内部百年尺度振荡等方面尚存在较大的差异^[29]。针对 Termination I 事件,各地记录的事件开始时间在误差范围内具有同步性,但其转型过程的持续时间却有明显差异。基于 GICC05 年层时标的格陵兰冰芯(NGRIP) $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 Termination I 转型过程非常迅速,在 1~3 a 内即可完成^[11](图 4)。亚洲季风区也门 Moomi 洞石笋记录在 13 a 内完成 Termination I 转型^[12](图 4),印度 Mawmluh 洞^[30]和 Bittoo 洞^[31]记录与之类似。中国西南地区的贵州衙门洞记录显示在约 35 a 内完成事件转型^[13],邻近的董哥洞与之相似^[14];而长江中下游地区的石笋记录表明 Termination I 转型所需的时间超过百年,重庆芙蓉洞^[15]、湖北豪猪洞^[16]和江苏葫芦洞^[7]完成 Termination I 转型分别需要约 160、170 和 180 a(图 4)。相比上述记录,中国福建仙云洞石笋记录的 Termination I 转型过程表现出更为缓慢的特点,约 800 a 左右(图 4)。样品 XY11 在 Termination I 转型阶段共有 5 个²³⁰Th 定年点,尽管在这一过程中样品 XY11 的记录存在约 170 a 的沉积间断,但样品 XYⅢ-21 记录同样呈现出约 800 a 的缓变特征,这说明仙云洞石笋记录的 Termination I 事件缓变特征是可靠的。中国福建仙云洞 Termination I 事件缓变特征与低纬马来西亚 Borneo 洞石笋的记录^[17]较相似(图 4)。亚洲季风区 Termination I 事件响应模式的差异有可能说明石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在响应气候的敏感性上存在区域差异,也可能与气候突变信号传播路径及强度的影响有关。气候突变事件的缓变特征在仙云洞此前研究的 Younger Dryas 和 Heinrich 1 事件的结束阶段也同样出现^[21],具有显著的区域特性。

3.2 仙云洞 Termination I 事件缓变特征的机制

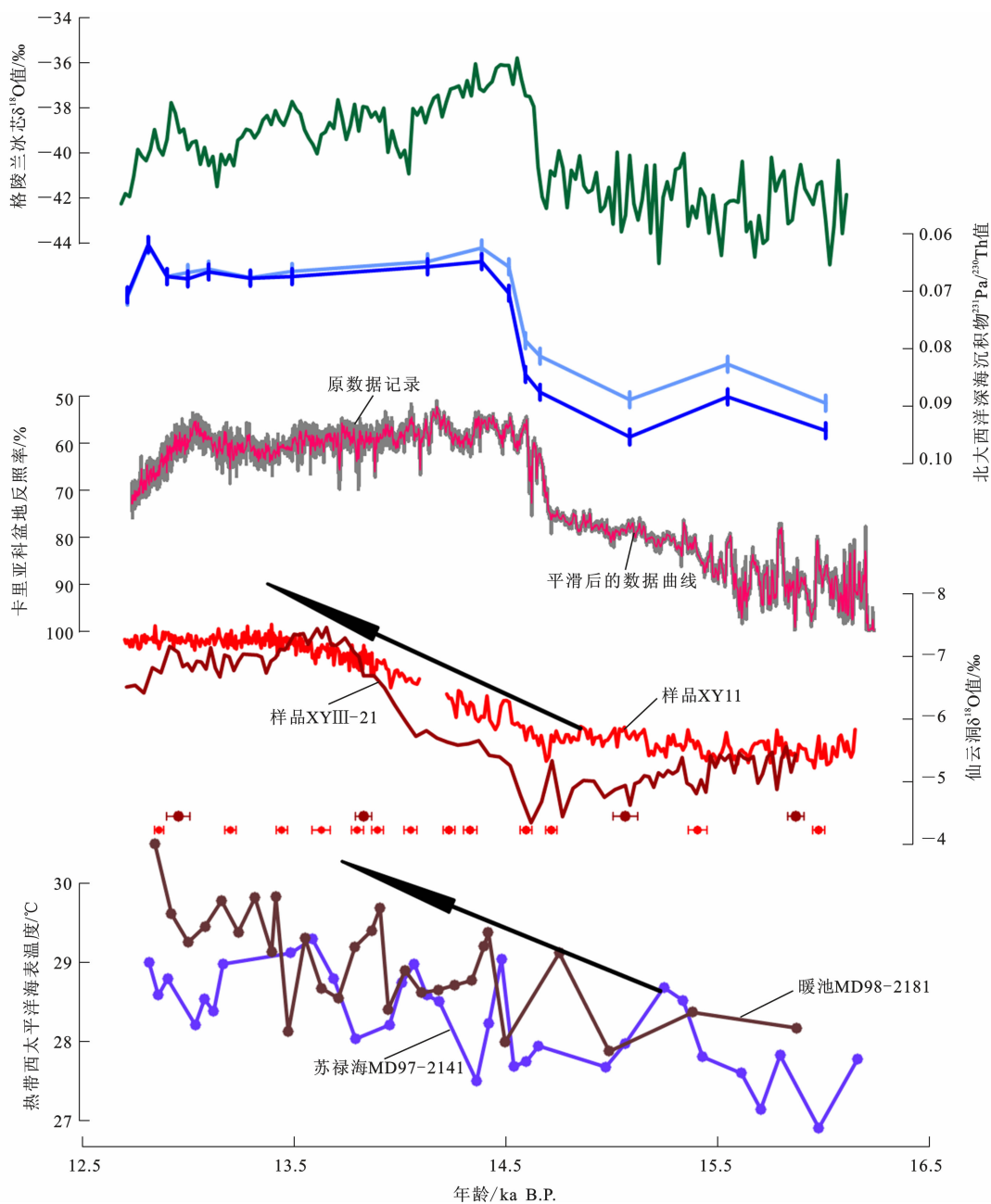
前人研究表明末次冰消期亚洲季风千年尺度的变化受控于北大西洋气候变化,北大西洋经向环流变化引起全球大气环流的重组是季风突变事件的主要驱动力^[32]。北大西洋深海沉积物²³¹Pa/²³⁰Th 记录表明 Termination I 事件开始时北大西洋经向环流恢复并快速增强^[2],北向热量传输的加强使得北大西洋和格陵兰地区温度迅速升高^[3-4](图 5)。大西洋海表温度(SST)变化引起的经向梯度差致使热带辐合带的平均位置向北偏移,进而调节亚洲季风强度^[5-6]。石笋氧同位素记录的负偏开始时间在定年误差范围内与卡里亚科(Cariaco)盆地反照率记

录指示的热带辐合带北向偏转时间一致(图 5),这进一步支持北大西洋经向环流通过控制热带辐合带位置间接影响亚洲季风。因此,包括仙云洞在内的亚洲季风区石笋记录的 Termination I 转型时段季风开始增强主要响应于北高纬气候变化。

不同区域对各种气候胁迫的响应具有复杂性,特别是在远离北大西洋的地区。仙云洞石笋记录所揭示出的 Termination I 事件缓变特征说明存在北高纬驱动外的其他因子影响中国东南地区石笋氧同位素的变化。位于西太平洋暖池中央的 Borneo 洞 Termination I 转型过程^[17]同样表现出与仙云洞一致的缓变特征。另外,在西太平洋暖池边缘的 Tangga 洞^[33]和 Palawan 洞^[34]石笋记录的 Younger Dryas 事件的结束也呈现出有别于北大西洋气候突变的缓变特征。这说明仙云洞与低纬地区洞穴石笋记录对源于北大西洋突变事件的响应均呈现出缓变特征。此前,Partin 等的模型模拟也表明受热带西太平洋水文气候影响的低纬地区对气候突变信号的响应更缓慢,低纬水文气候受半球尺度温度变化影响,比受海冰变化影响大的高纬地区需要更长的调整时间^[34]。婆罗洲石笋记录研究发现热带西太平洋水文气候对北高纬 DO 信号响应微弱^[35],这也说明了热带西太平洋对于高纬气候突变信号具有一定的反制和抵消作用。仙云洞石笋记录的 Termination I 事件缓变特征与热带西太平洋深海沉积物 Mg/Ca 值海表温度记录(图 5)的缓慢增温^[36-37]一致。Griffiths 等研究表明,热带太平洋海-气系统对冰盖变化不敏感,主要响应于太阳辐射的岁差周期,而此时北半球太阳辐射强度正处于缓慢增强的趋势^[38]。热带西太平洋处于众多水文气候的交汇点,是东亚季风区重要的热量和水汽来源,其海表温度和海平面气压的变化对大尺度大气环流和全球水文影响很大^[39]。现代气象数据和模型模拟表明西太平洋暖池中高的海表温度会加强上层对流,改变副热带高压带的位置和强度,进而对东亚季风产生影响^[40]。因而,推断仙云洞 Termination I 事件缓变特征有可能受到了热带低纬海-气耦合的影响。

4 结 语

(1)中国东南地区福建仙云洞石笋样品 XY11 和 XYⅢ-21 记录了 12.67~16.10 ka B. P. 时段定年精度优于 50 a、平均分辨率达 7 a 的东亚夏季风强度变化,清晰地捕捉到了该区 Termination I 转型的详细变化过程。Termination I 转型阶段,仙云洞



格陵兰冰芯数据引自文献[11], $\delta^{18}\text{O}$ 值采用 SMOW 标准; 福建仙云洞数据来自本文, $\delta^{18}\text{O}$ 值采用 VPDB 标准; 北大西洋深海沉积物 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 值引自文献[2]; 卡里亚科盆地反照率记录引自文献[6]; 海表温度记录来自西太平洋暖池 MD98-2181^[31]和苏禄海 MD97-2141^[32]。不同颜色的误差棒为各自石笋记录的年龄分析点及误差($\pm 2\sigma$); 黑色箭头指示缓慢上升趋势

图 5 仙云洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与其他古气候记录对比

Fig. 5 Comparison Among $\delta^{18}\text{O}$ Records of Stalagmites in Xianyun Cave and Other Climate Records

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在约 800 a 的时间内从 -5.0‰ 缓慢偏负至 -7.0‰ , 振幅约为 2‰ 。

(2) 中国福建仙云洞石笋记录的 Termination I 事件缓变过程(约 800 a)比也门 Moomi 洞(约 13 a)以及中国贵州衙门洞(约 35 a)、重庆芙蓉洞(约 160 a)、湖北豪猪洞(约 170 a)和江苏葫芦洞(约 180 a)的记录长很多。在定年误差范围内, 仙云洞石笋记录的 Termination I 事件开始时间与格陵兰冰芯记

录一致, 表明 Termination I 转型时段东亚夏季风的开始增强响应于北高纬气候变化。仙云洞石笋揭示出的 Termination I 事件缓变特征明显有别于北高纬的突变特征, 但这一缓变特征与热带西太平洋海表温度记录相似。因此, 仙云洞 Termination I 事件缓变特征可能受到了热带低纬海-气耦合的影响。

台湾大学高精度质谱与环境变迁实验室沈川洲教授和周於蓁研究助理测试了本文 ^{230}Th 年龄, 在此

表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] BLUNIER T, BROOK E J. Timing of Millennial-scale Climate Change in Antarctica and Greenland During the Last Glacial Period[J]. *Science*, 2001, 291: 109-112.
- [2] LEMIEUX-DUDON B, BLAYO E, PETIT J R, et al. Consistent Dating for Antarctic and Greenland Ice Cores [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(1): 8-20.
- [3] PELTIER W R, FAIRBANKS R G. Global Glacial Ice Volume and Last Glacial Maximum Duration from an Extended Barbados Sea Level Record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23/24): 3322-3337.
- [4] MACMANUS J F, FRANCOIS R, GHERARDI J M, et al. Collapse and Rapid Resumption of Atlantic Meridional Circulation Linked to Deglacial Climate Changes[J]. *Nature*, 2004, 428: 834-837.
- [5] GRACHEV A M, SEVERINGHAUS J P. Determining the Thermal Diffusion Factor for $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ in Air to Aid Paleoreconstruction of Abrupt Climate Change [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2003, 107(23): 4636-4642.
- [6] LOWE J J, RASMUSSEN S O, BJORCK S, et al. Synchronisation of Palaeoenvironmental Events in the North Atlantic Region During the Last Termination: A Revised Protocol Recommended by the INTIMATE Group[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(1/2): 6-17.
- [7] BROCCOLI A J, DAHL K A, STOUFFER R J. Response of the ITCZ to Northern Hemisphere Cooling[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(1): 1010-1029.
- [8] DEPLAZES G, LUCKGE 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.
- [9] 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: 2345-2348.
- [10] STRIKIS N M, CHIESSI C M, CRUZ F W, et al. Timing and Structure of Mega-SACZ Events During Heinrich Stadial 1[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5477-5484.
- [11] STEFFENSEN J P, ANDERSEN K K, BIGLER M, et al. High-resolution Greenland Ice Core Data Show Abrupt Climate Change Happens in Few Years[J]. *Science*, 2008, 321: 680-684.
- [12] SHAKUN J D, BURNS S J, FLEITMANN D, et al. A High-resolution, Absolute-dated Deglacial Speleothem Record of Indian Ocean Climate from Socotra Island, Yemen [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(3/4): 442-456.
- [13] 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: 地球科学*, 2010, 40(2): 199-210.
YANG Yan, YUAN Dao-xian, 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: Earth Sciences*, 2010, 40(2): 199-210.
- [14] YUAN D X, CHENG H, EDWARDS R L, et al. Timing, Duration and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 2004, 304: 575-578.
- [15] LI T Y, SHEN C C, LI H C, et al. Oxygen and Carbon Isotopic Systematics of Aragonite Speleothems and Water in Furong Cave, Chongqing, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(15): 4140-4156.
- [16] ZHANG H, GRIFFITHS M L, HUANG J, et al. Antarctic Link with East Asian Summer Monsoon Variability During the Heinrich Stadial-Bolling Interstadial Transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 453: 243-251.
- [17] 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: 452-456.
- [18] 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.
- [19] ZHANG P, CHENG H, EDWARDS R L, et al. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1 810-year Chinese Cave Record [J]. *Science*, 2008, 322: 940-942.
- [20] JIANG X Y, WANG X Y, HE Y Q, et al. Precisely Dated Multidecadally Resolved Asian Summer Monsoon Dynamics 113.5-86.6 Thousand Years Ago[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 143: 1-12.
- [21] DUAN F C, WANG Y J, LIAO Z B, et al. Divergent Influences of the Greenland and Antarctica Climates on the Asian Monsoon During a Stadial to Interstadial Cycle[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 159: 69-73.
- [22] 孙喜利, 杨勋林, 史志超, 等. 石笋记录的西南地区

- MIS4 阶段夏季风的演化[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6):1370-1380.
- SUN Xi-li, YANG Xun-Lin, SHI Zhi-chao, et al. The Evolution of Summer Monsoon in Southwest China During MIS4 as Revealed by Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Record [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6):1370-1380.
- [23] CHENG H, SINHA A, WANG X, et al. The Global Paleomonsoon as Seen Through Speleothem Records from Asia and the Americas[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5):1045-1062.
- [24] CHENG H, EDWARDS R L, SINHA A, et al. The Asian Monsoon over the Past 640 000 Years and Ice Age Terminations[J]. *Nature*, 2016, 534:640-646.
- [25] 崔梦月, 肖海燕, 孙晓双, 等. 福建仙云洞石笋记录的 Heinrich 1 事件突变特征[J]. 科学通报, 2017, 62(26):3078-3088.
- CUI Meng-yue, XIAO Hai-yan, SUN Xiao-shuang, et al. Characteristics of the Heinrich 1 Abrupt Climate Event Inferred from a Speleothem Record from Xianyun Cave, Fujian Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(26):3078-3088.
- [26] 崔梦月, 洪 晖, 孙晓双, 等. 福建仙云洞石笋记录的新仙女木突变事件结束时的缓变特征[J]. 第四纪研究, 2018, 38(3):711-719
- CUI Meng-yue, HONG Hui, SUN Xiao-shuang, et al. The Gradual Change Characteristics at the End of the Younger Dryas Event Inferred from a Speleothem Record from Xianyun Cave, Fujian Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(3):711-719.
- [27] 车印平, 肖海燕, 崔梦月, 等. 闽西仙云洞石笋记录的 Heinrich 2 事件年龄及亚旋回特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(6):1139-1147.
- CHE Yin-ping, XIAO Hai-yan, CUI Meng-yue, et al. Timing and Structure of the Heinrich 2 Abrupt Event Inferred from a Speleothem Record from Xianyun Cave, Western Fujian Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(6):1139-1147.
- [28] DYKOSKI C A, EDWARDS R L, CHENG H, et al. A High-resolution, Absolute-dated Holocene and Deglacial Asian Monsoon Record from Dongge Cave, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2):71-86.
- [29] LIU D P, WANG Y J, CHENG H, et al. A Detailed Comparison of Asian Monsoon Intensity and Greenland Temperature During the Allerod and Younger Dryas Events[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(3/4):691-697.
- [30] DUTT S, GUPTA A K, CLEMENS S C, et al. Abrupt Changes in Indian Summer Monsoon Strength During 33 800 to 5 500 Years B. P. [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13):5526-5532.
- [31] KATHAYAT G, CHENG H, SINHA A, et al. Indian Monsoon Variability on Millennial-orbital Time Scales [J]. *Scientific Reports*, 2016, DOI:10. 1038/srep24374.
- [32] SUN Y B, CLEMENS S C, MORRILL C, et al. Influence of Atlantic Meridional Overturning Circulation on the East Asian Winter Monsoon[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(1):46-49.
- [33] WURTZEL J B, ABRAM N J, LEWIS S C, et al. Tropical Indo-Pacific Hydro Climate Response to North Atlantic Forcing During the Last Deglaciation as Recorded by a Speleothem from Sumatra, Indonesia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 492:264-278.
- [34] PARTIN J W, QUINN T M, SHEN C C, et al. Gradual Onset and Recovery of the Younger Dryas Abrupt Climate Event in the Tropics[J]. *Nature Communications*, 2015, DOI:10. 1038/ncomms9061.
- [35] CAROLIN S A, COBB K M, ADKINS J F, et al. Varied Response of Western Pacific Hydrology to Climate Forcings over the Last Glacial Period[J]. *Science*, 2013, 340:1564-1566.
- [36] STOTT L, TIMMERMAN A, THUNELL R. Southern Hemisphere and Deep-sea Warming Led Deglacial Atmospheric CO_2 Rise and Tropical Warming[J]. *Science*, 2007, 318:435-438.
- [37] ROSENTHAL Y, OPPO D W, LINSLEY B K. The Amplitude and Phasing of Climate Change During the Last Deglaciation in the Sulu Sea, Western Equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(8):1-4.
- [38] GRIFFITHS M L, KIMBROUGH A K, GAGAN M K, et al. Western Pacific Hydroclimate Linked to Global Climate Variability over the Past Two Millennia[J]. *Nature Communications*, 2016, DOI:10. 1038/ncomms11719.
- [39] DING X, ZHENG L, LI D, et al. Lacustrine Record of Centennial- and Millennial-scale Rainfall Variability of the East Asian Summer Monsoon During the Last Deglaciation: Multi-proxy Evidence from Taiwan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 450:38-49.
- [40] HUANG R H, HUANG G, WEI Z G. Climate Variations of the Summer Monsoon over China[M]//CHANG C P. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Ltd., 2004:213-270.