

文章编号:1000-0550(2008)01-0139-05

## 末次间冰期东亚季风气候不稳定的 神农架洞穴石笋记录<sup>①</sup>

姜修洋<sup>1</sup> 汪永进<sup>1</sup> 孔兴功<sup>1</sup> 陈仕涛<sup>1</sup> 李明霞<sup>1</sup> 程海<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院 南京 210097;

2. Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota MN 55455, USA)

**摘 要** 基于神农架永兴洞石笋(YX21)4 个<sup>230</sup>Th 年龄和 303 个  $\delta^{18}\text{O}$  测试数据,建立了东亚季风末次间冰期持续时间约 2 ka(127.32  $\pm$  1.23 ~ 124.95  $\pm$  1.16 kaBP)的洞穴石笋高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  的时间序列。该洞穴末次间冰期  $\delta^{18}\text{O}$  变化曲线表现出高频振荡特征,表明东亚季风末次间冰期降水的不稳定性,并识别出该时段 4 个季风冷事件,这种冷事件可能与北大西洋冰漂碎屑事件有关。谱分析结果显示百年和十年际尺度的季风降水变化响应于太阳活动周期。

**关键词** 神农架 末次间冰期 石笋 不稳定性

**第一作者简介** 姜修洋 男 1981 年出生 博士研究生 第四纪年代学及环境演变 E-mail: strawjxy@msn.com

**中图分类号** P534.63 P532 **文献标识码** A

### 0 引言

末次间冰期被认为可以与目前的间冰期(全新世)进行对比,从而有助于我们理解和预测当前的气候变化过程。东亚季风是联系陆地、海洋和大气的纽带,是建立海—陆—气—冰相互作用的重要载体<sup>[1]</sup>,东亚季风区为研究古气候的热点地区。目前东亚季风全新世研究结果<sup>[2]</sup>表明季风存在诸多百年尺度的冷事件,且这种冷事件与北大西洋冰漂碎屑事件相对应;另外太阳活动可能驱动了季风气候变化。季风这种冷事件和太阳活动对季风的影响是否为全新世所特有或是为所有间冰期所共有的特征,需要其他间冰期记录予以验证。青藏高原东部若尔盖盆地 RM 孔记录<sup>[3]</sup>表明 129 ~ 115 kaBP 之间的 Eemian 总体上表现为高湖面,但分别约在 123 ~ 119 kaBP 和 119 ~ 116 kaBP 期间出现了快速打断 Eemian 高湖面的事件,显示了 Eemian 气候的不稳定性。涂霞等<sup>[4]</sup>研究结果表明末次间冰期(5 e)内发生过一次表层海水突然降温的事件,冬季海温下降幅度可达 7.5  $^{\circ}\text{C}$ 。但上述记录由于受到定年、所用样品以及样品分辨率的限制,尚不能揭示出东亚季风末次间冰期内部细节的气候变化特征。<sup>230</sup>Th 定年的董哥洞石笋记录<sup>[5]</sup>表明末次间冰期  $\delta^{18}\text{O}$  具有百年际和十年际的波动特征,但由于石笋氧同位素在百年尺度上的变幅仅为 1‰,其百

年—十年际尺度上细节的气候变化信息并不显著。本文选取位于典型东亚季风区的湖北神农架永兴洞石笋 YX21 作为研究材料,获得了东亚季风末次间冰期持续约 2 ka、平均分辨率达 8 a 的季风降水演化序列,揭示出在百年—十年际尺度上季风降水高频振荡特征,表明东亚季风末次间冰期气候的不稳定性。

### 1 材料和方法

湖北神农架是由大巴山脉东延的余脉组成的中高山地貌,山脉呈近东西方向延伸,区内总地势西南高东北低,由南向北逐渐降低,山峰海拔多在 1 500 m 以上,由于神农架山脉西南部高海拔的地势阻挡了低空西南暖湿气流,位于北坡的地区大多盛行东南风,且降水集中在 5 ~ 10 月,该区具有典型的东亚季风气候特征(图 1a)。永兴洞位于保康县南部歇马镇南郊 8 km 处的张家山,洞深 800 余米,洞口海拔约 1 400 m,洞内温度为 12  $^{\circ}\text{C}$ (2004 年 4 月测),洞内湿度为 90%(2005 年 5 月测)。洞穴上覆植被发育良好以灌木和草本为主。采自洞内一石笋(编号: YX21)高约 320 mm,呈圆柱状,外表皮呈白色,沿中心部分切成长约 56 mm 宽约 30 mm 的柱体并抛光,在距顶 15 mm 处存在一明显的自然断面,其上下岩性发生明显变化,上部为透明层和白色层相见分布,下部为致密的带油质光泽的方解石(图 1b)。

①全国优秀博士学位论文作者专项资金(批准号:200227);国家杰出青年科学基金(批准号:40225007)以及江苏省研究生培养创新工程(编号: CX07B-0512)资助。

收稿日期:2007-03-14;收修改稿日期:2007-04-12

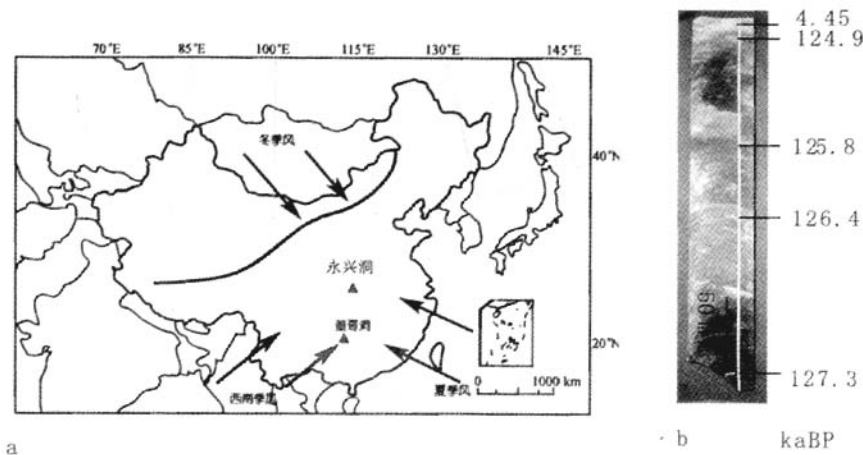


图 1 地理位置与石笋抛光面图  
Fig. 1 The location of the Yongxing cave and polished profile of YX21 stalagmite  
a 图中三角处为洞穴位置;箭头方向代表了西南季风、夏季风和冬季风的方向  
b 图为石笋 YX21 的抛光面图

沿平行生长面方向获取 5 个铀系年代样品(图 1b),分析仪器为 ICP-MS,按 Shen 等方法<sup>[6]</sup>,由美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室测试完成,年龄误差为  $\pm 2\sigma$  测量统计误差。用直径为 0.3 mm 的牙钻沿石笋生长中心轴钻取同位素样品,每毫米钻取 1 个样,共获取 320 个样品,采用碳酸盐自动进样装置(KIEL CARBONATE DEVICE)与 Finnigan MAT-253 型质谱仪联机测试,每 9 个样品插一个标准样品(NBS-19:  $\delta^{18}\text{O} = -2.2\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C} = 1.95\text{‰}$ ),分析误差小于  $\pm 0.1\text{‰}$ , VPDB 标准,由南京师范大学同位素实验室完成。

2 结果分析

表 1 给出石笋 YX21 的实测年代及其误差范围。从表 1 实测年代数据可以看出 15 mm 处自然断面以

上部分生长于全新世时期,以下生长于末次间冰期,本文主要研究此断面以下时段。表 1 表明 YX21 石笋在 15 mm 以下部分生长时段覆盖了  $127.32 \pm 1.23 \sim 124.95 \pm 1.16$  kaBP。样品  $^{238}\text{U}$  含量在 855 ~ 1 180 ng/g 之间,由于  $^{232}\text{Th}$  含量较大(332 ~ 580 pg/g),结果导致测年误差偏大,误差为 10% 左右。尽管 YX21 的测年误差较大,但是所有的年龄数据都按石笋沉积先后秩序正常排列,没有出现年龄倒序,说明数据是可信的。使用相邻测年点间线性内插获得时标,其氧同位素平均分辨率约为 8 a。

图 2 给出了  $\delta^{18}\text{O}$  随时间的变化曲线,其最显著的特征是具有高频振荡性,其  $\delta^{18}\text{O}$  变化范围为  $-8.9\text{‰} \sim -10.8\text{‰}$ ,振幅约为 1.9‰。石笋  $\delta^{18}\text{O}$  变化主要取决于大气降水的同位素组成和洞穴地表年均温<sup>[7]</sup>。

表 1 石笋 YX21 的 ICP-MS 测年结果<sup>a)</sup>  
Table 1 The results of ICP-MS  $^{230}\text{Th}$  dating for YX21<sup>a)</sup>

Sample NO.	$^{232}\text{Th}$ / ( $\times 10^{-12}$ )	$^{238}\text{U}$ / ( $\times 10^{-9}$ )	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (原子数/ $10^{-6}$ )	$^{234}\text{U}$ (测量值)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (活度比)	$^{230}\text{Th}$ Age/a (未校正年龄)	$^{230}\text{Th}$ Age/a (校正年龄)	$^{234}\text{U}$ 初始值 (校正值)
YX21-4	125.2	343.6	2853.7	571.4	0.063	4457.7	$4451 \pm 61$	578.6
YX21-17	532.3	913.0	27475.2	365.0	0.9702	124958.8	$124947 \pm 1160$	519.6
yx21-113	580.2	854.7	23510.6	356.1	0.9667	125769.7	$125757 \pm 1266$	508.1
YX21-173	332.8	1179.9	56305.4	347.0	0.9620	126365.4	$126359 \pm 1260$	495.9
YX21-305	546.6	1123.5	33218.4	362.9	0.9789	127333.2	$127323 \pm 1230$	520.1

a)  $\lambda_{230} = 9.1599 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ;  $\lambda_{234} = 2.8263 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ;  $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ;  $^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{活度比}} - 1) \times 1000$ ;  $^{234}\text{U}$  初始值是据  $^{230}\text{Th}$  年龄获得,即  $^{234}\text{U}_{\text{初始值}} = ^{234}\text{U}_{\text{测量值}} \times e^{\lambda_{234} \times T}$ ;校正  $^{230}\text{Th}$  年龄假设初始的  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  原子比为  $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$

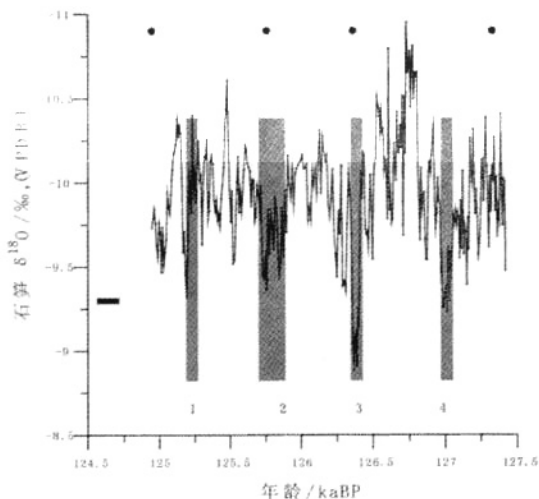


图2 石笋 YX21 氧同位素曲线

Fig. 2 The  $\delta^{18}\text{O}$  curve of the YX21

黑色长方形为 4 500 a 左右氧同位素值,灰色阴影代表弱季风事件,  
图上部四个黑点为测年点位置

按 O'Neil 方解石与水之间的同位素平衡分馏方程 ( $-0.24\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ )<sup>[8]</sup> 计算,永兴洞石笋氧同位素  $1.9\text{‰}$  的振幅其年均温波动达  $7.9^{\circ}\text{C}$ 。由于冰芯记录的冰期与间冰期之间的温度变化幅度才约为  $10^{\circ}\text{C}$ <sup>[9]</sup>,因此石笋  $\delta^{18}\text{O}$  主要反映了降水量的变化,即降雨量愈大,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  愈偏负<sup>[2,10-12]</sup>。图2中黑色的长方体表示全新世 4 500 a 左右的氧同位素值,其绝对值和末次间冰期冷谷值较为接近,这表明东亚季风末次间冰期 127.32 ~ 124.95 kaBP 时段比全新世 4 500 aBP 时要温暖湿润的多。

### 3 讨论

#### 3.1 东亚季风末次间冰期的不稳定性

从图2可以看出末次间冰期石笋记录表现出百年一十年际尺度的波动特征,而这种波动特征同样体现在季风高分辨率全新世石笋记录中<sup>[2,13]</sup>,这有可能说明百年一十年际尺度的季风变动为间冰期所共有的特征。末次冰期最显著的特征就是其气候的不稳定性,存在一系列的 D/O 暖事件以及北大西洋冰漂碎屑冷事件,东亚季风区的石笋记录表明末次冰期中 D/O 事件、H 事件其氧同位素振荡幅度约为  $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ <sup>[11]</sup>。董哥洞石笋记录<sup>[2]</sup>表明全新世中至少含有 8 个持续时间约 100 ~ 500 a 的弱季风事件,其氧同位素振幅约为  $0.6\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ ,表明全新世东亚季风降

水的不稳定性。氧同位素分辨率达 8 年的 YX21 石笋记录也存在诸如末次冰期以及全新世时期的冷暖事件。图2中阴影标注出 4 个持续时间为 60 ~ 200 a,氧同位素振幅  $0.6\text{‰} \sim 1.2\text{‰}$  的冷事件,表明东亚季风末次间冰期与全新世气候变化十分类似,指示了东亚季风降水的不稳定性。董哥洞石笋记录<sup>[2]</sup>表明全新世的弱季风事件与北大西洋冰漂碎屑有关。而在末次间冰期北大西洋 Nordic 海以及 Labrador 海同样存在快速的气候变化<sup>[14]</sup>,尽管由于定年原因以及样品分辨率的不同,这种冷事件不能与季风石笋记录——相对,但末次间冰期石笋记录的弱季风事件可能与北大西洋冷事件相关。在弱季风事件之间也存在季风降水增强时期,其中降水最强的时期出现在 126.75 kaBP 左右,持续时间约有 80 a;其氧同位素峰值平均值约为  $-10.8\text{‰}$ ,比末次间冰期整个序列氧同位素平均值  $-9.6\text{‰}$  负偏约  $1.2\text{‰}$ ,反映了百年时间尺度上季风降水的特强事件。

#### 3.2 太阳活动对东亚季风末次间冰期的影响

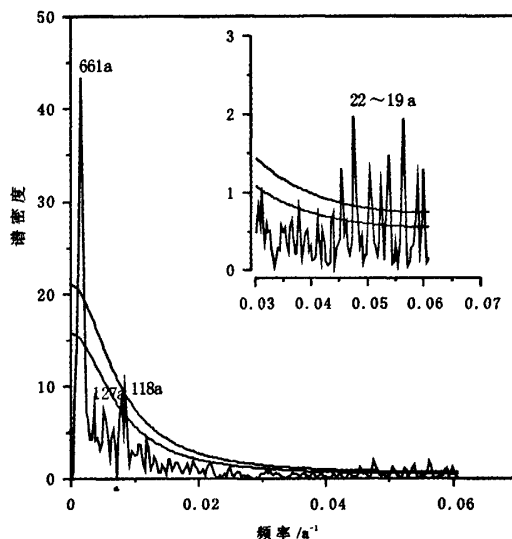


图3 石笋氧同位素谱分析结果

Fig. 3 Power spectral analysis of the YX21  $\delta^{18}\text{O}$  record

灰线为 80% 置信度线,黑线为 90% 置信度线

从 YX21 石笋 127.5 ~ 124.9 kaBP 功率谱分析(图3)可以识别出较强的周期成分有 661 a, 127 a, 118 a, 19 ~ 22 a, 其中 661 a, 118 a 和 19 ~ 22 a 的周期还通过了 90% 的置信度检验。19 ~ 22 a 为双黑子周期, 127 a 和 118 a 的周期也类似于全新世大气  $\delta^{14}\text{C}$  残差百年尺度周期<sup>[15]</sup>。贵州董哥洞全新世石笋氧同

位素记录与树轮  $\delta^{14}\text{C}$  交叉功率谱分析表明 129 a 和 116 a 为其共同的周期<sup>[2]</sup>。上述表明太阳活动强弱变化对东亚季风末次间冰期和全新世气候变化都起着重要的作用,但是太阳活动的变化通过何种机制来影响季风气候目前尚不清楚。一种可能的机制是银河宇宙射线强度的变化能引起云凝结核数 (cloud condensation nuclei) 的变化,而平均云量覆盖的变化又引起了地球的气候变化;另一种可能的机制为紫外线的变化影响臭氧层的变动,从而引起平流层的温度和风的变化,进而影响对流层的气候变化<sup>[16-18]</sup>。由于太阳辐射背景的不同使得末次间冰期与全新世不能进行细节对比,但是季风全新世<sup>[2]</sup>和末次间冰期 YX21 研究结果表明百年际和十年际太阳活动对季风的影响是确实存在的,有可能为所有间冰期所共有的特征,因此在未来的气候变化中这种影响有可能依然存在。

#### 4 结论

本文通过对神农架永兴洞石笋 (YX21) 4 个  $^{230}\text{Th}$  年龄和 303 个氧同位素分析获得了末次间冰期平均分辨率达 8 a 的东亚季风降水记录。十年际尺度高分辨率的氧同位素记录表明末次间冰期东亚季风气候的不稳定性。谱分析结果表明末次间冰期季风降水受太阳活动的影响。

#### 参考文献 (References)

- 1 An Zhisheng, Porter S C. Millennial scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China[J]. *Geology*, 1997, 25: 603-606
- 2 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* The holocene asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308: 854-857
- 3 张平中,王先彬,王苏民,等. 青藏高原东部末次间冰期气候不稳定性分析[J]. *科学通报*, 1998, 43(1): 17-21 [Zhang Pingzhong, Wang Xianbing, Wang Sumin, *et al.* Climate instability of the east Tibetan Plateau during the Last Interglacial[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(1): 17-21]
- 4 涂震,郑范,王吉良,等. 南海北部末次间冰期早期的突然降温事件[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(10): 823-827 [Tu Xia, Zheng Fan, Wang Jiliang, *et al.* An abrupt cooling event early in the last glacial in the northern South China Sea[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(10): 865-870]
- 5 Kelly M J, Edwards L R, Cheng H, *et al.* High resolution characterization of the asian monsoon between 146 000 and 99 000 years B P from Dongge Cave, China and global correlation of events surrounding Termination II[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2006, 236: 20-38
- 6 Shen Chuanchen, Edwards L R, Cheng H. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 2002, 185: 165-178
- 7 Bar-Matthews M, Ayalon A, Marrews A, *et al.* Carbon and oxygen isotope study of the active water-carbonate system in a Karstic Mediterranean cave: implications for paleoclimate research in semiarid regions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 337-347
- 8 HENDY C H, Wilson A T. Paleoclimatic data from speleothems[J]. *Nature*, 1968, 219: 48-51
- 9 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, *et al.* Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399: 429-436
- 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: 575-578
- 11 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
- 12 刘殿兵,汪永进,陈仕涛. 神农架天鹅洞石笋 76 ~ 58 kaB. P. 时段 DO 事件[J]. *沉积学报*, 2007, 25(1): 131-138 [Liu Dianbing, Wang Yongjin, Chen Shitao. DO events during 76-58 ka B. P. from a stalagmite in Tian'e Cave, Shennongjia Area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 131-138]
- 13 张美良,程海,林玉石,等. 贵州荔波地区 2000 年来石笋高分辨率的气候记录[J]. *沉积学报*, 2006, 24(3): 339-348 [Zhang Meiliang, Chen Hai, Lin Yushi, *et al.* High-resolution climatic record from a stalagmite in the past 2000 years in Libo, Guizhou Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(3): 339-348]
- 14 Fronval T, Jansen E. Rapid changes in ocean circulation and heat flux in the Nordic seas during the last interglacial period[J]. *Nature*, 1996, 383: 806-810
- 15 Stuiver M, Braziunas T F. Sun, ocean, climate and atmospheric  $^{14}\text{CO}_2$ : an evaluation of causal and spectral relationships[J]. *The Holocene*, 1993, 3(4): 289-305
- 16 Geel B V, Raspopov O M, Renssen H, *et al.* The role of solar forcing upon climate change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18: 331-338
- 17 Rind D. The sun's role in climate variations[J]. *Science*, 2002, 296: 673-677
- 18 Carslaw K S, Harrison G, Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate[J]. *Science*, 2002, 298: 1732-1737

## Climate Variability in Shennongjia During the Last Interglacial Inferred from a High-resolution Stalagmite Record

JIANG Xiu-yang<sup>1</sup> WANG Yong-jin<sup>1</sup> KONG Xing-gong<sup>1</sup>

CHEN Shi-tao<sup>1</sup> LI Ming-xia<sup>1</sup> CHENG Hai<sup>2</sup>

(1 College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097;

2. Department of Geology and Geophysics, Minnesota University MN 55455, USA)

**Abstract** Speleothem studies have the potential to considerably improve our knowledge of climate changes of the past 500 000 a. Above all, this is due to the independent and reliable calendar year chronology provided by uranium-series dating techniques and to the multitude of paleoclimate proxy records preserved in speleothems. Here we present an absolute-dated and high-resolution stable oxygen record from a stalagmite (No. YX21) in Yongxing Cave, Shennongjia natural reservation, central China, giving the details on climatic fluctuations during the Last Interglacial periods. Based on 4 <sup>230</sup>Th dates and 303 oxygen isotope data, an averaged 8 a East Asian Monsoon precipitation series was established through 127.32 to 124.95 thousand years before present (ka BP). This detailed record uncovered that the  $\delta^{18}\text{O}$  have the high-frequency variability characteristic, indicating the instability of the East Asian Monsoon during the Last Interglacial. During this interval, the YX21 record has 4 Asian Monsoon weak events, possibly related to the interglacial ice-rafting events in the North Atlantic. Power spectral analysis of the record shows statistically significant periodicities centered on 661 a, 127 a, 118 a, 19 ~ 22 a. These periodicities are close to significant periods of the  $\delta^{14}\text{C}$  record, indicates that solar changes are also responsible for changes of Asian Monsoon intensity.

**Key words** Shennongjia, the Last Interglacial, stalagmite, instability