

# 盛冰期南京石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与年纹层厚度的对比

吴江滢 孔兴功 汪永进

( 南京师范大学地理科学学院 210097 江苏 南京 )

[ 摘要 ] 根据南京葫芦洞一支石笋高精度 $^{230}\text{Th}$ 年龄及纹层计数,建立年际精度时标.在 21 800 ~ 21 180 aBP 时段内,石笋纹层厚度与  $\delta^{18}\text{O}$  的良好相关性,支持纹层厚度反映夏季风降水效应的观点.两种代用指标提供了末次盛冰期持续 620 年的十年际分辨率季风降水信息.年纹层及  $\delta^{18}\text{O}$  序列的功率谱分析结果表明全球冰量最大背景下十年-百年尺度的季风气候变化与太阳活动周期基本一致.

[ 关键词 ] 南京石笋 年层序列  $\delta^{18}\text{O}$  太阳活动 末次盛冰期

[ 中图分类号 ] P54, [ 文献标识码 ] A, [ 文章编号 ] 1001-4616( 2005 )04-0109-05

## Comparison Between Nanjing Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and Annual Layer Thickness Records During the Last Glacial Maximum

Wu Jiangying, Kong Xinggong, Wang Yongjin

( School of Geographical Science, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, China )

**Abstract** Based on high precise  $^{230}\text{Th}$  dates and annual band-counting results, an annual - resolution time scale has been established for one stalagmite from Hulu Cave, Nanjing. Changes in annual layer thickness are negatively related to  $\delta^{18}\text{O}$  record with a high correlation coefficient (  $r = -0.41$  ) during the 21 800 ~ 21 180 aBP, supporting the idea that the variation of annual layer thickness reflects strength of summer monsoon circulation and its precipitation. A 620-year high-resolution precipitation record inferred from the two proxies indicates high frequency climate changes of East Asian monsoon during the Last Glacial Maximum. Fourier power spectrum of the annual banding and  $\delta^{18}\text{O}$  records further display short - term cycles of monsoon climate which are in agreement with the solar cycles of decadal-centennial scale under the conditions of the LGM.

**Key words** Nanjing stalagmite, annual layer sequence,  $\delta^{18}\text{O}$ , solar activity, Last Glacial Maximum

## 0 引言

利用石笋年纹层厚度获取高分辨率气候信息已有很多研究成果<sup>[1~4]</sup>.但不同区域获得的年纹层厚度意义并不相同<sup>[5,6]</sup>.多数研究都通过与气象资料的对比,明确石笋年纹层厚度的指代意义,由此获取的高分辨率气候记录仅限于全新世晚期.近年来也有利用石笋纹层厚度与氧同位素的对比研究,验证  $\delta^{18}\text{O}$  为季风降水指标,并提供了南阿曼地区过去 780 年的降水信息<sup>[7,8]</sup>.但目前国际上还未见能够提供冰期气候的连续纹层厚度记录.本文选择位于典型东亚季风区的汤山葫芦洞石笋,通过年纹层厚度与  $\delta^{18}\text{O}$  的对比分析,证实冰期年纹层厚度可以反映年际-百年尺度的气候变化,并依据纹层厚度与  $\delta^{18}\text{O}$  提供的气候信息,进一步讨论东亚季风气候变化的驱动机制.

## 1 材料与方法

研究石笋( NO 98001 )发现于汤山葫芦洞大厅东侧,顶部缺失,呈圆柱状.总体长约 23 cm,顶、底部直

收稿日期:2005-05-28.

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目( 40225007 )及江苏省博士后科研资助计划资助项目( 111110B151 ).

作者简介:吴江滢,女,1974—,博士,主要从事古气候变迁的学习与研究. E-mail: wujiangying@ njnu. edu. cn

万方数据

径分别为 10.5 cm 和 13 cm. 沿中轴切开后, 抛光面上可见清晰平直的生长纹层, 表现为透明与乳白层段互层. 纹层沿中轴线对称分布, 其直径维持在 6 cm 左右, 表明石笋生长期间水文状态稳定, 适于纹层气候序列的研究. 石笋顶底各采集一薄板状( 层厚在 1 mm )样品, 用于铀系测年. 测试仪器为 FinnMAT262-RPQ 型质谱仪. 化学预处理及测试流程参见 Edwards 等<sup>[9]</sup>, 由美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室完成, 年代误差为  $\pm 2\sigma$  测量统计误差. 沿石笋( 0 ~ 110 mm 层段 )生长面逐层刻取氧碳同位素样品, 1 mm 内共采集 30 个. 为避免混层, 每隔 10 个样品测试一次氧碳同位素值, 共分析样品 280 个. 采用 McCrea ( 1950 )分析方法, 分析仪器为 MAT-251 型质谱仪, 由中国科学院南京地质古生物研究所同位素实验室完成, PDB 标准, 分析误差  $< 0.1\%$ . 利用 Olympus 偏光显微镜 CCD-计算机系统统计石笋纹层数及厚度, 纹层厚度测量误差为  $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 年层序列与绝对年龄的标定

镜下观察, 石笋纹层界面清晰、平直. 不同界面基本平行, 使得纹层厚度在水平方向上变化很小, 由此获得的层厚数据更为准确. 在垂直方向上, 石笋纹层厚度( 简称 Ra, 下同 )变化很大( 图 1 ), 介于 6 ~ 419  $\mu\text{m}$  之间, 以 40 ~ 80  $\mu\text{m}$  为主, 占纹层总数的一半以上. 石笋 98001 的纹层特征相似于北京石花洞石笋中年层<sup>[10]</sup>, 因此推断该石笋纹层具有年层性. 从整个剖面来看, 纹层连续, 未出现任何沉积间断的痕迹, 由顶至底总共计层 2 989 条.

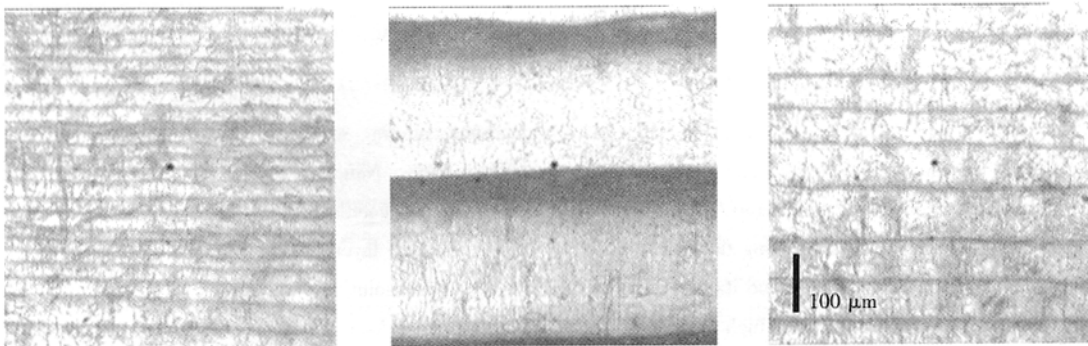


图 1 石笋 98001 不同厚度的年纹层

在石笋 10、222.5 mm 处分别测得两个<sup>230</sup>Th 年龄( 表 1 ). 表中校正年龄与未校正年龄的差值极小( 5 ~ 6 年 ), 说明石笋形成后处于封闭体系, 初始<sup>230</sup>Th 可忽略不计, 由此得到的年龄最接近于真实年龄( 相对于 2000 AD ). 两实测年龄间的时间跨度为  $2\,779 \pm 85$  年, 与两测年点之间的纹层数  $2\,729 \pm 31$  条( 31 条为两测年样品包含纹层条数之和 )基本吻合, 进一步证实该石笋生长连续的年层序列. 以 98001-1 年龄为标准, 按纹层计数分别向上向下计年. 建立年际精度时标. 根据氧同位素的取样层段( 0 ~ 110 mm ), 本文研究时段定为 21 800 ~ 21 180 aBP.

表 1 石笋( NO 98001 )TIMS-U 系年龄

样号	深度 ( mm )	<sup>238</sup> U ( ng · g <sup>-1</sup> )	<sup>232</sup> Th ( ppt )	$\delta^{234}\text{U}$ ( 测量值 )	* <sup>230</sup> Th/ <sup>238</sup> U ( 活度比 )	<sup>230</sup> Th 年龄 ( aBP )( 未校正 )	<sup>230</sup> Th 年龄 ( aBP )( 校正 )	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ ** ( 校正值 )
98001 - 1	10	424.7 $\pm$ 0.6	98 $\pm$ 4	147.5 $\pm$ 2.2	0.204 6 $\pm$ 0.000 6	21 350 $\pm$ 85	21 345 $\pm$ 85	156.7 $\pm$ 2.3
98001 - 2	222.5	884.6 $\pm$ 0.9	273 $\pm$ 4	175.4 $\pm$ 1.1	0.234 2 $\pm$ 0.000 6	24 130 $\pm$ 76	24 124 $\pm$ 76	187.8 $\pm$ 1.2

$\lambda_{230} = 9.157\,7 \times 10^{-6}\text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{234} = 2.826\,3 \times 10^{-6}\text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{238} = 1.551\,25 \times 10^{-10}\text{ y}^{-1}$ .  
\*  $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1\,000$ . \*  $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$  是根据<sup>230</sup>Th 年龄计算获得的( T ), 例如  
 $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{\lambda_{234} \times T}$ . <sup>230</sup>Th 年龄的校正值是假设初始<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th 的原子比为  $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$ .

### 2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Ra 的指代意义

应用 Hendy( 1971 )准则之一, 对石笋  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  进行相关性检验, 结果表明  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  不相关(  $r = 0.15$  ), 说明石笋形成时方解石晶体与洞顶滴水达到同位素平衡交换状态. 洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的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>[11]</sup>. 图 2 给出了  $\delta^{18}\text{O}$ ( 时间分辨率在 2 ~ 5 年 )随时间的变化 — 110 万方数据

曲线,其变化范围介于  $-5.38\text{‰}$  ~  $-7.79\text{‰}$  之间,变幅为  $-2.4\text{‰}$ 。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>[12]</sup>计算,  $10^{\circ}\text{C}$  才能导致石笋  $\delta^{18}\text{O}$   $2.4\text{‰}$  的变幅,而冰期与间冰期之间的温度变幅不过  $10^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>,在冰期内的温度变化更小,不可能达到  $10^{\circ}\text{C}$ 。因此石笋  $\delta^{18}\text{O}$  主要反映了大气降水的同位素组成,而大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  与雨量效应相关:降雨量愈大,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  愈偏负<sup>[14,15]</sup>。

由于  $\text{CaCO}_3$  含量、石笋表面水膜厚度、温度、滴率及溶液分压都会影响石笋纹层的生长速率<sup>[16]</sup>,因此 Ra 的气候意义并不十分明确。本研究认为汤山葫芦洞石笋 Ra 可以作为大气降水的代用指标,理由如下。

首先,尽管石笋的生长速率受温度与降水影响,但 Ra 可能是降水的唯一代用指标<sup>[17]</sup>。博茨瓦纳<sup>[18]</sup>、比利时南部<sup>[1]</sup>、马达加斯加<sup>[19]</sup>、新墨西哥<sup>[20]</sup>洞穴石笋的 Ra 均与年降水量有良好的对应关系。南京属东亚季风区,气温与降水以年为周期同步变化:冬季低温少降水,夏季高温多降水,因此两者都对 Ra 的变化作出贡献。但温度的年际变化单调、平稳,而降水则因季风的不稳定性年际变化很大。近 40 年来的气象资料表明,南京年均温的平均变幅在  $0.5^{\circ}\text{C}$  左右,相邻年最极端的温度变化也仅为  $1.5^{\circ}\text{C}$ 。而年均降水量变幅在  $200\text{ mm}$  左右,最大变化达  $800\text{ mm}$ 。Pocor 等<sup>[3]</sup>指出,年际和较长时间尺度的降水变化大于温度,表明降水可能是控制年生长速率的主要因素。

其次, Ra 可以反映降水量变化,得到了石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录的支持。图 2 给出了  $21\,800 \sim 21\,180\text{ aBP}$  时段内石笋 Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  的对比关系。较厚的纹层对应于负偏的  $\delta^{18}\text{O}$ 。在 600 年的时段内, Ra 表现为 12 个显著峰,与  $\delta^{18}\text{O}$  记录具有一一对应的关系。相关分析结果(图 3)进一步表明, Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  呈显著的负相关( $r = -0.41$ ),类似的相关关系也出现在南阿曼石笋的 Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  记录中<sup>[8]</sup>,支持两代用指标反映季风降水的观点。

再次,其他过程,比如土壤带的蒸发、洞穴内的湿度以及滴率变化都会影响 Ra 信息。然而这些过程均与雨量效应相关。例如较高的雨量导致土壤带蒸发量的减少以及较高的洞内湿度和较大的滴率,从而形成较厚的纹层和负偏的  $\delta^{18}\text{O}$  值<sup>[3]</sup>。

鉴于上述理由,南京葫芦洞石笋 Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  均可以反映季风区域降水量的变化。

## 2.3 盛冰期气候的高频振荡

在  $21\,800 \sim 21\,180\text{ aBP}$  时段内,石笋 Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  没有显示出长期变化趋势,表明季风降水在千年尺度上较为稳定。海平面研究证实全球大陆冰量在  $22 \sim 19\text{ kaBP}$  时段达到最大值<sup>[21]</sup>,该时期称为末次盛冰期(LGM),在冰芯记录中表现为相对稳定的气候态,未显示出升温或降温趋势,这与石笋记录相吻合。在十年~数十年尺度上, Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  则表现出高频振荡特征,反映了季风降水的显著变化。需要指出的是,降水在短时间尺度上的变化表现为突变与渐变两种形式。例如, Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  记录在 4 号降水高峰期结束时,两者在 20 年左右的时间内,分别由  $284\text{ }\mu\text{m}$  降至  $18\text{ }\mu\text{m}$ ,由  $-7.62\text{‰}$  正偏至  $-5.39\text{‰}$ ,表现出降水的快速变化。而此后 Ra 逐渐增厚,在  $21\,211\text{ aBP}$  达到峰值( $286\text{ }\mu\text{m}$ );  $\delta^{18}\text{O}$  逐渐负偏,在  $21\,218\text{ aBP}$  达到最值( $-7.4\text{‰}$ ),表明降水在 100 年左右缓慢增加。

为探讨冰期气候背景下季风降水的周期性特征,对石笋 Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  进行功率谱分析(图 4),并通过置信度水平(95%)检验。Ra 记录中的 125 年周期接近于中国东部泥炭记录的 127 年周期<sup>[22]</sup>,与树轮  $^{14}\text{C}$  记录的太阳活动周期<sup>[23,24]</sup>一致。在高频变化中,以  $41.3 \sim 52.7$  年周期最为显著。Agnihotri 等的研究表明,  $40 \sim 60$  年的太阳周期直接控制了印度夏季风强度的变化<sup>[25]</sup>。在  $\delta^{18}\text{O}$  记录中, 33 年周期类似于上海地区近百年降水量周期( $35 \sim 40$  年)<sup>[26]</sup>。25、16.7 年接近于太阳活动的 22 年双海尔周期。Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  记录中均显示出了 10 年成分,接近于典型的 11 年太阳黑子周期,在意大利北部石笋年纹层厚度<sup>[27]</sup>、东阿拉伯海沉万方数据

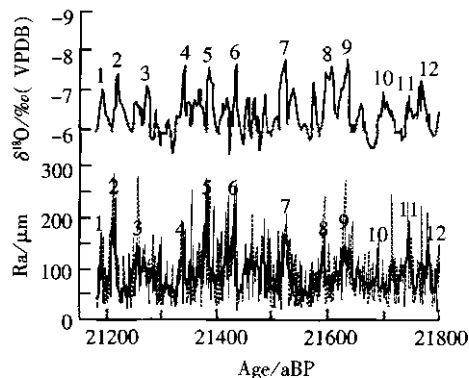


图 2 石笋 98001Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  的对比关系  
图中数字分别代表 Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  一一对应的 12 个峰

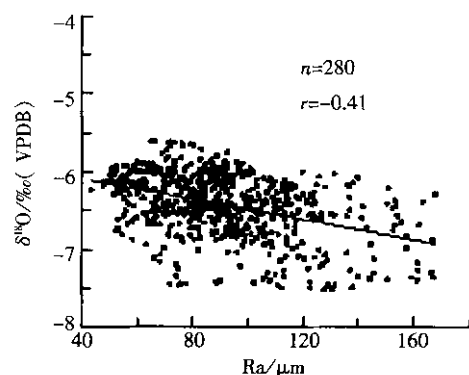


图 3 石笋 98001Ra 与  $\delta^{18}\text{O}$  的相关分析

积岩心<sup>[25]</sup>中也都有记录. 太阳活动周期在石笋记录中的存在充分说明, 太阳不但在全新世<sup>[28, 29]</sup>而且在盛冰期气候条件下对十年-百年尺度的亚洲季风降水变化有着强烈影响. 此外,  $Ra$  与  $\delta^{18}O$  还表现出较强的 10 年尺度以下的周期成分, 这些可能与气候系统的其他要素相关, 例如  $Ra$  中 2~3 年、 $\delta^{18}O$  中 6~7 年的高频降水变化就证实了冰期 ENSO 周期的存在.

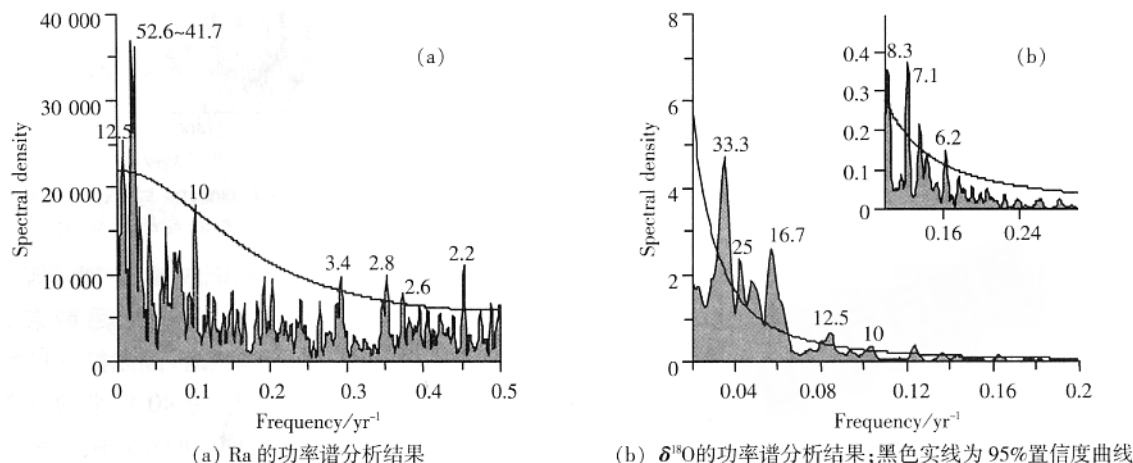


图 4 石笋 98001Ra 与  $\delta^{18}O$  的率谱分析

### 3 结论

(1) 南京葫芦洞石笋  $Ra$  与  $\delta^{18}O$  记录的一致性, 支持  $Ra$  对夏季风降水效应的指示意义. 两记录提供了末次盛冰期连续 620 年的高分辨率季风降水信息. 在 21 800~21 180 aBP 时段, 亚洲季风降水未表现出长期变化趋势, 但在十年-数十年尺度上呈现高频振荡特征.

(2)  $Ra$  与  $\delta^{18}O$  的功率谱分析结果表明太阳活动在十年-百年尺度上强烈影响着盛冰期亚洲季风气候的变化.

致谢 感谢美国明尼苏达大学地质地球物理系同位素实验室程海博士测定 U-TIMS 年龄.

### [ 参考文献 ]

- [ 1 ] Genty D, Quinif Y. Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites-importance for paleoclimatology [ J ]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66( 1 ): 275—288.
- [ 2 ] Tan M, Qin X G, Liu D S. Microbanding of stalagmite and its significance [ J ]. *Journal of Chinese Geography*, 1997, 7: 16—25.
- [ 3 ] Proctor C J, Baker A, Barnes W L, *et al.* A thousand year speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland [ J ]. *Climate Dynamics*, 2000, 16: 815—820.
- [ 4 ] Genty D, Baker A, Vokal B. Intra- and inter-annual growth rate of modern stalagmites [ J ]. *Chemical Geology*, 2001, 176: 191—212.
- [ 5 ] Proctor C J, Baker A, Barnes W L, *et al.* A three thousand year record of North Atlantic climate [ J ]. *Climate Dynamics*, 2002, 19: 449—453.
- [ 6 ] Tan M, Liu D S, Hou J, *et al.* Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2 650-year stalagmite record of warm season temperature [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30( 12 ): 1617—1621.
- [ 7 ] Burns S J, Fleitmann D, Mudelsee M, *et al.* A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107( D20 ): 4434—4442.
- [ 8 ] Fleitmann D, Burns S J, Neff U, *et al.* Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman [ J ]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 935—945.
- [ 9 ] Edwards R L, Chen J H, Wasserburg, G J.  $^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th$  systematics and the precise measurement of time over the past 500 000 years [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 1: 175—192.
- [ 10 ] 谭明, 潘根兴, 王先锋. 石笋与环境——石笋纹层形成的环境机理初探 [ J ]. *中国岩溶*, 1999, 18( 3 ): 197—205.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] Hendy C H , Wilson A T. Paleoclimatic data from speleothems [ J ]. Nature ,1968 ,219 :48—51.
- [ 13 ] 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.
- [ 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 ] 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.
- [ 16 ] Dreybrodt W. The kinetics of calcite precipitation from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems : revisited [ J ]. Chemical Geology ,1981 ,32 :237—245.
- [ 17 ] Baker A , Barnes W L , Smart P L. Variations in the discharge and organic matter content of stalagmite drip waters in Lower Cave , Bristol [ J ]. Hydrological Processes ,1997 ,11( 11 ) :1541—1555.
- [ 18 ] Railsback L B , Brook G A , Chen J , *et al.* Environmental controls on the petrology of a late Holocene speleothem from Botswana with annual layers of aragonite and calcite [ J ]. Journal of Sedimentary Research ,1994 ,64A( 1 ) :147—155.
- [ 19 ] Brook G A , Rafter M A , Railsback L B , *et al.* A high-resolution proxy record of rainfall and ENSO since AD 1550 from layering in stalagmites from Anjohibe Cave , Madagascar [ J ]. The Holocene ,1999 ,9 :695—705.
- [ 20 ] Polyak V , Asmerom Y. Late Holocene climate and cultural changes in the Southwestern United States [ J ]. Science ,2001 ,294 :148—151.
- [ 21 ] Yokoyama Y , Lambeck K , Deckker P D , *et al.* Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima [ J ]. Nature ,2000 ,406( 17 ) :713—716.
- [ 22 ] Hong Y T , Jiang H B , Liu T S *et al.* Response of climate to solar forcing recorded in a 6 000-year  $\delta^{18}\text{O}$  time-series of Chinese peat cellulose [ J ]. The Holocene ,2000 ,10( 1 ) :1—7.
- [ 23 ] Alley R B , Shuman C A , Meese D A , *et al.* Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core : Basis , reproducibility , and application [ J ]. Journal of Geophysical Research ,1997 ,102( C12 ) :26367—26382.
- [ 24 ] Stuiver M , Reimer P J , Bard E , *et al.* INTCAL 98 radiocarbon age calibration ,24000-O cal BP [ J ]. Radiocarbon ,1998 ,40 :1041—1083.
- [ 25 ] Agnihotri R , Dutta K , Bhushan R. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium [ J ]. Earth and Planetary Science Letters ,2002 ,198 :521—527.
- [ 26 ] 王绍武 ,赵宗慈. 我国旱涝 36 年周期及其产生机制 [ J ]. 气象学报 ,1979 ,37( 1 ) :64—73.
- [ 27 ] Frisia S , Borsato A , Preto N , *et al.* Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate [ J ]. Earth and Planetary Science Letters ,2003 ,216 :411—424.
- [ 28 ] 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 :290—293.
- [ 29 ] Bond G , Kromer B , Beer J , *et al.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [ J ]. Science ,2001 ,294 :2130—2136.

[ 责任编辑 陆炳新 ]