

末次盛冰期南京降水记录中 ENSO 的演化

夏志锋, 汪永进, 吴江滢

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 基于南京葫芦洞一支石笋 TIMS-U 系测年和纹层计数的交叉定年, 获得了末次盛冰期在 24170 ~ 21222 aBP 时段石笋年纹层厚度的时间序列, 主要反映了夏季风降水变率. 小波分析揭示末次盛冰期连续 3ka 夏季风降水记录中厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)周期和强度随时间的演化特征, 该记录表明 ENSO 在末次盛冰期并非一直存在, 有着高发期和平缓期, 其爆发的频率和强度逐渐减弱, 支持 ENSO 演化的“冰期阻尼效应”假说.

[关键词] 末次盛冰期, 石笋年纹层厚度, ENSO 演化, 小波分析

[中图分类号] P593 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2006)01-0106-05

The Evolution of ENSO During LGM from Precipitation Record in Nanjing

Xia Zhifeng, Wang Yongjin, Wu Jiangying

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

Abstract: A glacial stalagmite chronology from Nanjing has been established by the TIMS-U series dating and annual band counting methods. The annually layering sequence spanning 3000a from 24170 to 21222 calendar years before present (aBP) was analyzed for evidence of Asian summer monsoon precipitation variability during Last Glacial Maximum (LGM). Wavelet analysis reveals the variations in the frequency of occurrence and amplitude of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) during LGM. We found 5 ENSO blasting times with statistical significance. Decreasing frequency of occurrence and amplitude of ENSO probable support “glacial dampening”, hypothesis of ENSO’s evolvement.

Key words: last glacial maximum, stalagmite annually lamina thickness, ENSO variability, wavelet analysis

0 引言

热带太平洋的海-气耦合深刻影响着年际和年代际尺度的全球气候变化, 目前最为突出的是年际尺度上的 ENSO 作用, 有着 2 ~ 8a 的变化周期. 有关 ENSO 机制方面研究获得了最新进展^[1-4], 然而 ENSO 在周期和强度上的演化特征及原因亟待进一步研究, 如气候边界条件的改变对 ENSO 系统的影响, 尤其在末次盛冰期气候边界条件下, ENSO 系统的演化规律仍存在争议. 末次盛冰期全球大气 CO₂ 浓度为 180 ~ 210 μg/L^[5], 不到现今的 1/2, 该时期赤道太平洋海表温度下降 2 ~ 3℃^[6], 行星尺度的 Hadley 环流和洋盆宽度的 Walker 环流都有别于现今的气候边界条件, 从连续高分辨率地质记录中提取这一时期的 ENSO 演化信息, 可以加深理解 ENSO 循环的海-气耦合过程及其遥相关效应; 尤其在今天和温室效应加强的未来, 对理解 ENSO 的演化规律及其对气候边界条件改变的响应, 以及进一步对 ENSO 的全球影响作出评估至关重要.

基于 Nino3 海区海表温度(SST)距平以及其他一些显著指示 ENSO 的代用指标分析表明了 ENSO 显著的 2 ~ 8a 周期和强度在时间演化上存在着高发期和间歇期^[7]. 由于缺乏足够长的器测资料和其他高分辨率代用指标, 目前对 ENSO 在更长时间尺度上的演化以及古 ENSO 演化方面的研究还比较少, 还无法揭

收稿日期: 2005-09-28.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(40225007), 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200227).

作者简介: 夏志锋, 1981—, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质学的学习与研究. E-mail: zhifengxia@yahoo.com

通讯联系人: 汪永进, 1959—, 教授, 博士生导师, 主要从事洞穴沉积和气候环境演变的教学与研究. E-mail: ygwang@nynu.edu.cn

示出 ENSO 的自然变率及其对全球气候变化的响应. 本文利用高精度的石笋纹层厚度作为夏季风降水替代指标试图揭示 ENSO 在末次盛冰期的演化规律.

1 材料和方法

石笋样品(编号:98001)采自南京汤山葫芦洞(32°10'N,119°10'E),长约23cm,呈平顶圆柱状. 沿中轴切开并制成薄片,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(图1a). 纹层沿中轴线对称分布,表现为稳定的生长核心,镜下观察,剖面从上至下呈现规则的水平状纹理(图1b),纹层生长连续. 石笋顶底各采1个薄板状(层厚在1mm)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^[8],由美国明尼苏达大学同位素实验室完成,年代误差为 $\pm 2\sigma$ 测量统计误差. 纹层计数和厚度测量利用配置 MTV – 1881EX 型 CCD 的 Olympus 偏光显微镜 – 计算机系统,镜下连续摄取石笋纹层图像,利用 Photoshop 统计纹层数及厚度,纹层厚度测量误差为 $\pm 1\mu\text{m}$.

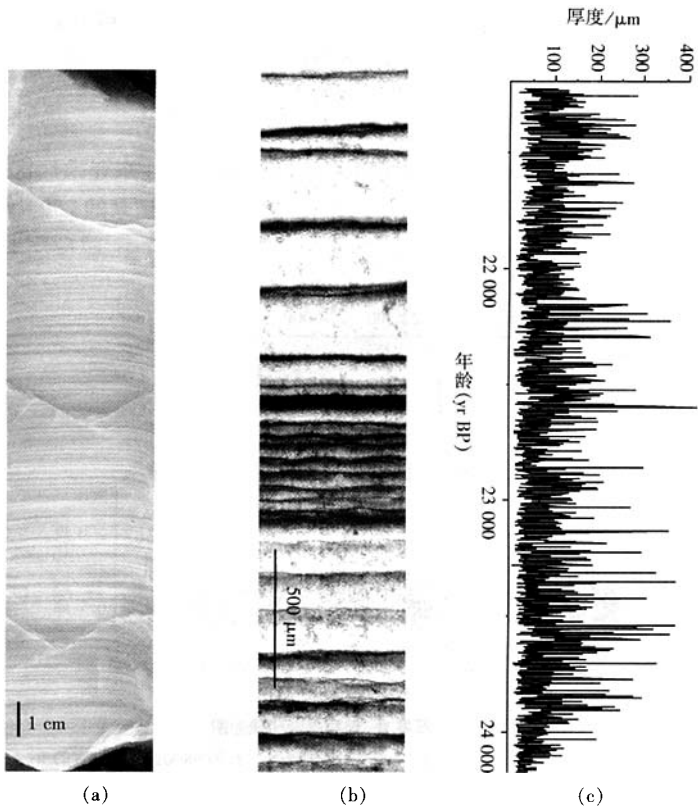


图1 石笋纹层的概况.石笋98001薄片a);镜下拍摄的石笋纹层图片b);石笋Ra时间序列c)

该石笋共测得两个²³⁰Th 年龄(表1). 表中校正年龄与未校正年龄的差值极小(5~6a),说明铀系定年的零假设前提得到满足,由此得到的年龄最接近于真实年龄. 石笋两年龄的时间跨度为2779 \pm 85a. 测年点之间的纹层数为2729 \pm 31条(31条为两测年样品包含纹层条数之和),与实测年龄基本吻合. 纹层计数与实测年龄的一致性证实了石笋纹层的年层性. 以98001-1年龄为标准,结合纹层计数,建立24170~21222 aBP的年际分辨率时标.

表1 石笋(NO:98001)TIMS – U 系年龄

样号	深度 mm	²³⁸ U (ng · g ⁻¹)	²³² Th ppt	$\delta^{234}U^a)$ (测量值)	²³⁰ Th/ ²³⁸ U (活度比)	²³⁰ Th 年龄 (aBP)(未校正)	²³⁰ Th 年龄 (aBP)(校正)	$\delta^{234}U_0^b)$ (校正值)
98001 – 1	10	424.7 \pm 0.6	98 \pm 4	147.5 \pm 2.2	0.2046 \pm 0.0006	21350 \pm 85	21345 \pm 85	156.7 \pm 2.3
98001 – 2	222.5	884.6 \pm 0.9	273 \pm 4	175.4 \pm 1.1	0.2342 \pm 0.0006	24130 \pm 76	24124 \pm 76	187.8 \pm 1.2

$\lambda_{230} = 9.1577 \times 10^{-6} \text{y}^{-1}$, $\lambda_{234} = 2.8263 \times 10^{-6} \text{y}^{-1}$, $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$.
* $\delta^{234}U = ([^{234}U/^{238}U]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$. ** $\delta^{234}U_{\text{initial}}$ 是根据²³⁰Th 年龄计算获得的.

年纹层厚度(下简称 Ra)时间序列(见图 1c)分析主要采用了蒙特卡罗奇异谱分析(MC SSA)^[9,10]和小波分析^[7]的方法. MC SSA(窗口长度 100, 相当于 100 a 长度)利用红噪音原假设, 并进行趋势检验, 得出主要的趋势成分为主成分 1 和 2(PC1 和 PC2), 据此去掉了百年以上的长期趋势; 分析程序为 SSA-MTM-Toolkit^[10], 由美国地球物理协会开发. 应用 Morlet 小波来分析 Ra 及其残差的小波功率谱在时间上的演化, 给出了 95% 的红噪音检验结果^[7].

2 石笋 Ra 的气候指代意义

石笋年生长层可以作为高分辨率的气候代用指标^[11-14]. 研究表明, 在不同条件下, 石笋微生长层既可以反映降水变化^[15-18], 也可以反映温度^[19]变化. 我们认为石笋 98001 的 Ra 时间序列主要反映了夏季风降水的变率. 与石笋 98001 同时段另一支石笋(编号: MSD)的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[20]与 98001 的 Ra 在整体变化趋势上一致, 特别在 24~23.5 kaBP, Ra 显著增加而 $\delta^{18}\text{O}$ 显著负偏时, 这种一致性更为明显. 孔兴功等^[18]研究也表明, 石笋 98001 距顶 0~110 mm 层段的 Ra 与 $\delta^{18}\text{O}$ 间具有良好的负相关关系. 我国南方洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映了降水变化^[21,22], 因此 Ra 应具有相似的指代意义, 主要反映了夏季风的降水效应.

3 结果与讨论

98001 的 Ra 小波功率谱存在显著的 2~8a 周期, 应是 ENSO 周期在东亚季风区的遥相关表现. Ra 记录的 ENSO 周期有着一定的缓和期和高发期, 同时我们也观察到 Ra 所记录的 250~500a 的长期周期成分在整个时段上一直存在, 因本文主要讨论南京降水百年以内尺度上的变率, 故应用 MC SSA 去掉了长期趋势(图 2a), 获得 Ra 残差序列, 如图 2b 所示.

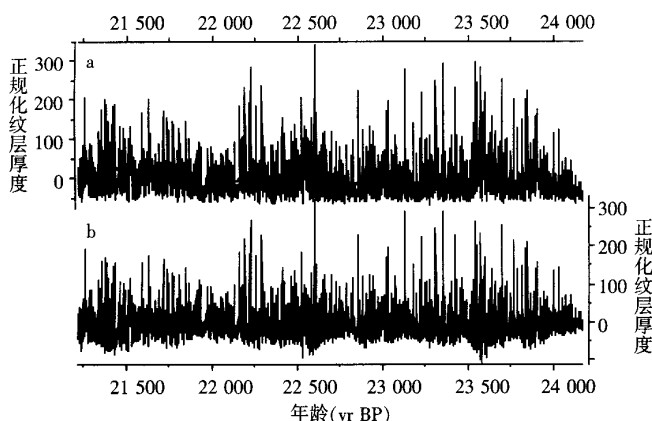


图 2 石笋 Ra 长期趋势和残差图

Ra 百年以上长期趋势 a) 和去除趋势后的残差图 b). 图 2a 中黑线表示石笋 98001 正规化后的 Ra 序列, 蓝线表示根据主成分 1、2 重建得到的石笋 Ra 的长期变化趋势; 图 2b 中黑线表示石笋去趋势后的残差图, 红线为 9 点平滑结果

再次对石笋 Ra 残差序列进行小波功率谱分析(图 3), 并求出在 2~8a ENSO 周期尺度上的小波平均功率谱值(图 4).

对比去趋势之前(未列出)和去趋势之后(图 3)的小波分析功率谱图发现, 两者在百年以下尺度上的小波功率图谱基本一致, 这说明我们成功的去除了百年以上的长期趋势, Ra 序列高频部分的信息没有受到影响, 对 Ra 残差序列进行小波功率谱分析所得的结果是可靠的.

由图 3 可以看出在 24170~21222 aBP 时段 ENSO 由开始的 2~8a 为主的周期逐渐向 2~5a 周期转换, ENSO 发生的频率和能量逐渐减弱. 图 4 进一步给出了 ENSO 周期成分方差贡献显著的 5 个时段: 23908~23533a BP, 23428~23130a BP, 22601~22485a BP, 22295~22158a BP, 21434~21338a BP; 其他时段 ENSO 基本没有发生.

目前关于 ENSO 演化的理论假说主要有“岁差日辐射驱动模型”^[2,3]和“冰期阻尼效应”^[4]. 岁差日辐射模型主要认为太阳辐射在季节分配上的变化引起了岁差周期并对赤道太平洋气候产生强烈影响. 专门开发用于研究 ENSO 的 Zebiak-Cane 型海-气耦合模型, 在末次冰期-间冰期旋回模拟中发现主要由岁差周

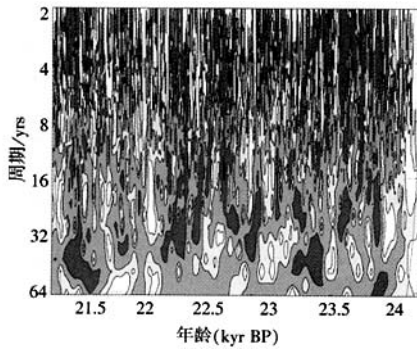


图3 石笋 98001 Ra 序列(去趋势)小波功率谱分析

小波功率谱分析使用 Morlet 小波函数。图中灰色等值线图由浅到深表示小波功率谱能量的增强;蓝色的等值线包围的区域表示小波功率谱能量在红噪音过程(Lag1=0.31)下超过 95%的置信度水平。红色弧线以下区域表示受边缘效应影响的区域

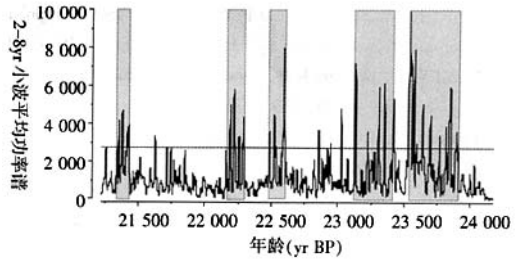


图4 2~8a 尺度上的小波平均功率谱图

石笋 98001Ra 序列(去趋势)在 2~8a 波段尺度上的小波平均功率谱时间序列图(曲线部分,7 点平滑)。图中红线以上部分表示小波功率谱值通过 95%置信度水平线检验(Lag1=0.31),表现出显著的 ENSO 周期;阴影部分标出了 ENSO 周期成分方差贡献显著的 5 个时期

期控制了 ENSO 的变率^[2,3]。这一理论机制主要与近日点出现的时间有关,当近日点处于北半球晚夏早秋时,赤道太平洋经向加热不对称导致赤道西太平洋信风加强,进而减弱 ENSO 的发展,导致类拉尼娜的气候状况的出现。早中全新世 ENSO 的减弱乃至消失支持了 ENSO 演化的岁差日辐射假设^[2]。岁差周期主要通过太平洋本身的内在变化^[2,3]或者通过与赤道大气环流相联系的亚洲季风系统的强度变化引起 ENSO 的演化^[23]。目前对岁差日辐射驱动理论的有利证据有 Ecuador 风暴碎屑流沉积记录^[24]和 Hitchcock 冰川纹泥记录^[25]以及南京石笋 YT 记录^[18]。事实上 Zebiak - Cane 模型并没有考虑大气 CO₂ 浓度在冰期 - 间冰期尺度上的变化以及来自赤道以外地区的气候变化的强迫作用。Tudhope 等人^[4]研究发现珊瑚礁中记录的 ENSO 强度演化并不能单纯用“岁差日辐射理论”来解释,而应该用“冰期阻尼效应”和“岁差日辐射理论”的共同控制来解释。“冰期阻尼效应”认为冰期气候态很可能起了减弱 ENSO 能量的作用。其理论依据是:冰期中赤道太平洋 SST 显著降低,削弱了海 - 气耦合作用,进而抑制了 ENSO 的发展;由此导致的 SST 经向梯度和赤道西太平洋信风的增强也减弱了 ENSO 的发展。

石笋 Ra 所揭示的 ENSO 在末次冰期 24170 ~ 21222 aBP 时段演化支持 ENSO 演化的“冰期阻尼效应”假说。该段时期气候向末次冰期最盛期转化,气候的寒冷化加剧,冰期阻尼效应显著加强,对应的 ENSO 出现的频率和能量也呈现减弱的趋势,对 ENSO 的演化起了主要控制作用;当然我们的记录并不排除岁差日辐射驱动作用在该时段的存在。但在冰期气候中,ENSO 的演化可能更多受控于“冰期阻尼效应”的影响。

4 结论

石笋年纹层厚度提供了末次冰期 24170 ~ 21222 aBP 时段高分辨率夏季风降水信息,小波分析揭示出该时段内南京降水记录所蕴涵的 ENSO 周期及其演化特征。ENSO 发生的周期由 2 ~ 8a 逐渐向 2 ~ 5a 转变,响应于盛冰期气候对 ENSO 的压制作用;在时间演化上 ENSO 存在方差贡献显著的 5 个时段,而其他时段则基本上没有发生 ENSO 事件,说明 ENSO 在时间演化上具有着高发期和平缓期的特征,在 5 个 ENSO 的高发期,ENSO 发生的强度和频率随盛冰期的深入发展而降低。ENSO 周期演化以及在 5 个高发期 ENSO 强度和频率的演化表明在冰期边界气候条件下 ENSO 的演化更多受控于“冰期阻尼效应”。

[参考文献]

- [1] Neelin J D, Battisti D S, Hirst A C, et al. ENSO theory[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(14): 261—290.
- [2] Clement A C, Seager R, Cane M A. Orbital controls on the El Niño/Southern Oscillation and the tropical climate[J]. Paleoceanography, 1999, 14(4): 441—456.
- [3] Clement A C, Seager R, Cane M A. Suppression of El Niño during the mid-Holocene by changes in the Earth's orbit[J]. Paleoceanography, 2000, 15(6): 731—737.

- [4] Tudhope A W, Chilcott C P, McCulloch M T, et al. Variability in the El niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle[J]. *Science*, 2001, 291: 1511—1517.
- [5] Petit J R, Marabe S, Gu D F. Simulated ENSO in a global coupled ocean-atmosphere model: Multidecadal amplitude modulation and CO₂ sensitivity[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(1): 138—161.
- [6] David W L, Dorothy K P, Howard J S. Climate impact of late quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations[J]. *Science*, 2000, 289: 1719—1724.
- [7] Torrance C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61—78.
- [8] Edwards R L, Chen J H, Wasserburg, G J. 238U-234U-230Th-232Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986/1987, 1: 175—192.
- [9] Allen M R, Smith L A. Monte Carlo SSA: detecting irregular oscillations in the presence of coloured noise[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 3373—3404.
- [10] Ghil M, Allen M R, Dettinger M D, et al. Advanced spectral methods for climatic time series[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(1): 1—41.
- [11] 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.
- [12] Tan M, Qin X G, Liu D S. Microbanding of stalagmite and its significance[J]. *Journal of Chinese Geography*, 1997, 7: 16—25.
- [13] 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.
- [14] Genty D, Baker A, Vokal B. Intra-and inter-annual growth rate of modern stalagmites[J]. *Chemical Geology*, 2001, 176: 191—212.
- [15] Qin X G, Tan M, Liu T S, et al. Spectral analysis of the a 1000-year stalagmite lamina-thickness record from Shihua Cavern, Beijing, China, and its climatic significance[J]. *Holocene*, 1999, 9(6): 689—694.
- [16] Polyak V J, Asmerom Y. Late Holocene climate and cultural changes in the Southwestern United States[J]. *Science*, 2001, 294: 148—151.
- [17] 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.
- [18] 孔兴功,汪永进,吴江滢. 末次盛冰期连续 3ka 南京降水记录中 ENSO 周期[J]. *科学通报*, 2002, 48(3): 277—281.
- [19] Tan M, Liu D S, Hou J, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650 - year stalagmite record of warm season temperature[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1617—1621.
- [20] 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.
- [21] Yuan D X, Cheng H, et al. Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 2004, 304: 575—578.
- [22] 程海,艾思本,王先锋,等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 157—163.
- [23] Liu Z, Shin S, Behling P, et al. Dynamical and observational constraints on tropical Pacific sea surface temperatures at the last glacial maximum[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(1): 105—108.
- [24] Rodbell D T, Seltzer G O, Anderson D M, et al. An ~15,000-year record of El niño-driven alluviation in southwestern Ecuador[J]. *Science*, 1999, 283: 516—519.
- [25] Rittenour T M, Crette J B, Mann M E. El niño-like climate teleconnections in New England during the Late Pleistocene[J]. *Science*, 2000, 288: 1039—1042.

[责任编辑:陆炳新]