过去640ka亚洲季风变化的多尺度分析

曾雅兰^{1,2,3}, 陈仕涛^{1,2,3*}, 杨少华^{1,2,3}, 梁怡佳^{1,2,3}, 汪永进^{1,2,3}

1. 南京师范大学地理科学学院, 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023;

2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023;

3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

* 通讯作者, E-mail: chenshitao@njnu.edu.cn

收稿日期: 2018-06-25; 收修改稿日期: 2018-09-10; 接受日期: 2018-12-10; 网络版发表日期: 2019-02-20

国家自然科学基金项目(批准号: 41572340)和江苏高校优势学科建设工程项目(编号: 164320H116)资助

摘要 高分辨率、高精度定年的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录现已扩展到640ka, 这为研究亚洲季风多尺度特征与驱动机制提供了新的契机. 基于经验模态分解法(EMD), 文章分析了该序列的轨道和千年尺度的特征、贡献及其控制因素. 在轨道尺度上, 四个主要周期(11.6、23.3、42.4和95.5ka)对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的贡献率为76.3%, 其中岁差和半岁差周期的贡献率分别为31.1%和30.7%. 交叉谱分析显示, 显著的半岁差周期信号与南北半球30°太阳辐射极大值变化(BHI)的半岁差周期基本吻合, 由此认为低纬降雨和温度变率对半球间低纬太阳辐射放大响应, 进而影响亚洲季风的强度变化. 在千年尺度上, 分别有5ka和1~2ka的显著周期, 大致对应于经典的Bond和Dansgaard-Oeschger旋回. 海洋沉积和石笋记录交叉谱分析显示, 二者在千年尺度上的变化呈现出强烈的相关性, 特别是5ka周期稳定贯穿两个记录始终且信号明显, 说明5ka周期是中晚更新世以来冰期-间冰期旋回的特征周期, 可能是全球冰盖和太阳辐射共同作用的结果.

关键词 经验模态分解(EMD), 亚洲季风, 石笋氧同位素, 半岁差周期, 5ka周期

1 引言

理解气候变化成因机制的方法有很多, 其中最有效的方法之一是分析气候记录的频谱特征, 探讨其随时间演变的规律性. 早在1976年, Hays通过深海 $\delta^{18}\text{O}$ 的频谱分析, 发现过去40多万年的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化中存在显著的10万年、4万年和2万年周期, 与轨道周期高度吻合, 这是科学家第一次在古气候记录里清晰地检测出地球轨道的周期信号, 证实了米兰科维奇理论关于地

球轨道参数的变化对第四纪气候的控制作用(Hays等, 1976). 随后, 在湖泊(Kashiwaya等, 2003; An等, 2011)、黄土(余志伟和丁仲礼, 2003; Ding等, 2002; Li等, 2015)、冰芯(Petit等, 1999; Shackleton, 2000)等记录的频谱分析中都获得了类似的结果. 特别是南极EDC冰芯(European project for ice coring in Antarctica Dome C), 将高分辨率记录扩展到涵盖最近8个冰期-间冰期旋回的74万年, 发现不仅是温度, 包括大气中的温室气体(CH_4 、 CO_2)含量以及大气气溶胶含量等在内

中文引用格式: 曾雅兰, 陈仕涛, 杨少华, 梁怡佳, 汪永进. 2019. 过去640ka亚洲季风变化的多尺度分析. 中国科学: 地球科学, 49: 864-874, doi: 10.1360/N072018-00178

英文引用格式: Zeng Y, Chen S, Yang S, Liang Y, Wang Y. 2019. Multiscale analysis of Asian Monsoon over the past 640 ka. Science China Earth Sciences, 62: 843-852, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9322-0>

的指标都存在地球轨道参数变化的周期(Jouzel等, 2007; Loulergue等, 2008). 然而上述研究数据的时间标尺大多采用轨道调谐建立, 缺乏完整的绝对年龄控制, 限制了对气候变化规律和成因机制的进一步分析. 最近报道的中国南方石笋记录(Cheng等, 2016), 结合其他几条石笋记录(Wang等, 2001, 2008; Yuan等, 2004; Dykoski等, 2005; Cheng等, 2009)共同重建了平均分辨率达120a、有563个精确年龄控制的亚洲夏季风演化历史, 为我们分析气候的多尺度变化及其成因机制提供了新的契机.

传统的时间序列谱分析方法多建立在适合平稳数据的傅里叶谱分析的基础上(Cooper等, 2000; McDermott等, 2001; Rousse等, 2006; Kirsten等, 2018), 其优点是可以在频域内获得非常高的分辨率, 但在时域内却失去了分辨能力. 小波分析尽管在保留信号时域特征的同时也具有一定的频域分辨率, 但是其时域和频域精度很难提高(曹杰等, 2012), 同时会产生很多虚假的谐波(Torrence和Compo, 1998), 因而依此进行的分析也可能失去其原有的物理意义. Guo等(2012)用多窗谱(Multi-taper spectrum, MTM)方法将南极EDC和Vostok冰芯的CH₄记录分解成冰期-间冰期旋回、半岁差和千年等三个尺度的信号, 通过这些信号的成因机制分析, 从而探索了不同时间尺度全球CH₄的来源及其贡献. An等(2015)系统总结了近年来季风研究成果, 发现不同尺度的季风驱动因素并非唯一. 这些成果启发我们需要采用新的方法对数据进行多尺度分析. 经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法可以根据数据固有的特点把数据分解成若干个内在模函数(intrinsic mode function, IMF), 每个IMF分量产生一个瞬时的频率, 允许任何两个不同的时间序列瞬时频率局部比较(Lin和Wang, 2006; Lin和Sun, 2007; Solé等, 2007), 可以用来识别驱动气候变化的主控因素及其贡献率. Liu等(2012)用EMD方法对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和 ^{10}Be 、 $\Delta^{14}\text{C}$ 序列进行分解, 揭示了亚洲季风与太阳活动之间的关系. Li等(2015)基于EMD方法分解了中国黄土粒度与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列, 发现在轨道和千年尺度上有不同的信号, 进而对成因机制提出了不同的认识.

本文基于EMD方法对过去640ka的石笋氧同位素记录进行分解, 以探讨亚洲季风变化的多尺度特征及其在不同时间尺度上的主控因素.

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文研究数据来自最近报道的中国南方石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 该记录重现了640ka以来6个冰期-间冰期旋回的亚洲季风气候变化(Cheng等, 2016). 石笋数据如图1所示, 在轨道尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 序列呈现出和65°N太阳辐射一致的变化趋势, 同时叠加了一系列千年尺度的变化.

和同时段的冰芯和海洋等信息载体的数据相比, 本文采用的中国南方石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录至少具有两大优势: (1) 定年. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录一共由563个U-Th年龄控制, 其中全新世的年龄误差均在0.1ka以内, 450ka以来年龄误差在1~2ka、450~600ka期间误差仅4ka左右, 在600~640ka部分误差约6~7ka(Wang等, 2001, 2008; Yuan等, 2004; Dykoski等, 2005; Cheng等, 2009, 2016); 而EDC冰芯的EDC3时标虽在全新世时标年代误差在0.2ka内, 但是末次冰期误差达2ka, 100~400ka期间维持在4ka, 从400ka开始年龄误差就达到并维持在6ka且仅有少数几个年龄控制点(Parrenin等, 2007). 特别地, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在每个冰消期至少有5个左右的U-Th年龄控制, 这是其他任何一个气候记录无法比拟的. (2) 分辨率. 目前跨越6个冰期/间冰期旋回的最高分辨率当属南极EDC冰芯的 δD 记录(图1e), 该记录在全新世的分辨率高达0.018ka, 但年代越久, 分辨率越低, 倒数第6个冰期/间冰期旋回的分辨率仅为0.402ka(Jouzel等, 2007). 同样的问题也出现在广泛使用的深海LR04底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(图1f), 该记录由57支海洋岩芯记录复合而成(Lisiecki和Raymo, 2005), 其在全新世的分辨率为0.923ka, 而在倒数第6个冰期/间冰期旋回的分辨率仅为1.156ka. 而本文采用的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据, 在全新世的分辨率为0.026ka, 倒数第6个冰期/间冰期旋回的分辨率也高达0.184ka, 整个记录的平均分辨率为0.120ka, 也高于EDC冰芯(平均0.138ka)和LR04海洋记录(平均2.515ka).

当然石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也存在一些缺点, 其主要问题在于该记录不是一支完整的石笋, 而是由多洞穴多支石笋拼接而成. 但该石笋记录在重复时段具有很好的重现性, 证实了石笋记录的可靠性. 根据Cheng等(2016)对数据处理的结果, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在过去640ka呈显著的连续性, 且在不同的时间尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现明显不同的特点, 适合用EMD方法对其进行分解.

图1 640ka不同气候记录与地球轨道参数

(a)~(c) 轨道参数变化(Berger, 1978). (a) 斜率; (b) 偏心率; (c) 岁差; (d) 65°N太阳辐射(红色; Berger, 1978). 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(绿色, 原始数据, Cheng等, 2016; 黑色, 100a内插数据); (e) 南极EDC冰芯 δD 记录(Parrenin等, 2007); (f) 深海LR04底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(Lisiecki和Raymo, 2005)

2.2 研究方法

经验模态分解(EMD)方法是Huang等人在1998年提出的一种新型自适应信号时频处理方法(Huang等, 1998). 假设一个时间序列的各瞬时点是由不同时间尺度的内在振荡模态叠加而成, EMD方法能根据数据自身的瞬时特征, 将原始的时间序列信号分解成频率从高到低的若干个本征模函数(IMF), 每个IMF具有高还原性特征, 变化规律符合自然非线性变化过程. 这样原始信号在不同尺度的物理意义得以保留, 并很好地被提取和表达. 而最低频的分量(res)则代表原始信号的总趋势或均值.

EMD的本质是对一个信号进行平滑化处理. 具体方法是: 找出一时间序列 $X(t)$ 的所有极大值点, 并用三次样条曲线拟合成原始数据的上包络线; 找出 $X(t)$ 的所有极小值点并拟合成下包络线; 上、下包络线的平均值为原始数据的平均包络线 m_1 ; 将原时间序列 $X(t)$ 减去平均包络线 m_1 得到一个去掉低频的 h_1 , 即

$$h_1 = X(t) - m_1, \quad (1)$$

然而 h_1 并非平稳的, 因此, 需要重复上述过程, 用 h_2 取代 $X(t)$, m_2 作为 h_1 的平均包络线, 则有

$$h_2 = h_1 - m_2, \quad (2)$$

多次迭代后,

$$h_i - m_{i+1} = h_{i+1}, i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (3)$$

直到终止条件被满足: SD 临界值通常界定于0.2~0.3 (或略小). 本文中 SD 取值为0.05.

$$SD = \sum_{i=0}^T \left[\frac{[h_{i-1}(t) - h_i(t)]^2}{h_{i-1}^2(t)} \right]. \quad (4)$$

由此得到第一个本征函数 imf_1 :

$$imf_1 = h_{k+1}, \quad (5)$$

分离出数据中最高频组分 imf_1 后,

$$r_1 = X(t) - imf_1, \quad (6)$$

由于 r_1 仍然包含着较长周期分量的信息, 仍被视为新的数据重复以上过程, 得到 imf_2 . 重复这个过程:

$$r_2 = r_1 - imf_2, \dots, r_n = r_{n-1} - imf_n, \quad (7)$$

直到最后 r_n 不能再分解为止. 那么最终原始数据被分解为

$$X(t) = \sum_{i=1}^n imf_i + r_{(n)}. \quad (8)$$

EMD方法不必预先设定任何基函数, 只需根据原始数据自身时间尺度的特征进行信号分解, 在本质上

区别于需建立基函数的傅里叶分解和小波分解方法, 因此, EMD方法被认为是以傅里叶变换为基础的线性和平稳序列频谱分析的一个重大突破.

3 结果

利用三次样条法(Liu等, 2010)将过去640ka石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列进行100a等间距内插处理, 并对内插前后的数据作对比分析(见图1d). 检验发现内插后的数据能较好地保留了原始数据的细节特征, 内插前后的数据具有较好的一致性($R=0.999$). 插值后的数据用EMD方法进行多尺度分析, 得到10个本征模分量(IMF)及其趋势分量(res)(图2). 从这些本征模分量(IMF)中, 识别出三个时间尺度的波动: 百年尺度(0.5ka)、千年尺度(1.1、2.3、4.9ka)和轨道尺度(11.6、23.3、42.4、95.5、187.5、661.4ka). 根据IMF的零交叉定义, IMF中的每个周期组分只涉及一种振荡模式, 不允许复杂骑行波的出现(Huang等, 1998). 每个IMF分量能代表不同的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 特征信号, 反映不同的波动周期和振幅. 考虑到数据的处理可能导致产生没有明确物理气候意义的虚假数字信号, 对此我们也进行了相应的数据分析, 发现在千年和轨道尺度序列的周期并无改变, 因此建立在此基础上的经验模态分析反应了千年和轨道尺度气候信号特征和规律.

每个分量信号对原始数据总体特征的影响程度可用方差贡献率表示出来. 方差贡献率可以帮助我们准确判断不同尺度信号的影响程度, 以便有效理解气候变化的成因机制. Cheng等(2016)曾对过去640ka石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列在太阳辐射轨道尺度上进行了23/19、41和100ka等三个主导周期的功率谱分析. 本文的研究和上述结果一致, 并进一步给出了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列每个周期组分的方差贡献率. 从表1中可以看出23.3、42.4、95.5ka这3个分量的方差贡献率之和为45.6%, 几乎占一半, 揭示了亚洲季风变化对轨道参数控制的太阳辐射变化的响应, 即IMF6分量对应的23.3ka(岁差周期), IMF7对应的42.4ka(地轴倾斜度周期)以及IMF8对应的95.5ka(偏心率周期). 在轨道尺度上, 天文因素变化导致地球轨道三参数周期性的变化, 进而引起地球大气圈顶部太阳辐射纬度配置和季节配置的周期变化, 从而驱动气候波动(Berger, 1988; Maslov, 2015).

值得关注的是IMF5对应的11.6ka周期的贡献率为30.7%, 几乎和IMF6分量对应的23.3ka周期相当. 南京葫芦洞绝对定年的高分辨石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录重建了75~11ka时段的亚洲季风强度记录, 发现在轨道尺度上亚洲季风直接响应于北半球夏季太阳辐射(Wang等, 2001). 三宝洞石笋记录(Wang等, 2008)进一步将亚洲季风记录扩展到224ka, 功率谱分析结果表明, 23ka周期是控制季风强度变化的主导因素. 本次研究结果显

图2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列EMD分析结果

表1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列IMF分量的方差贡献率

$\delta^{18}\text{O}$	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10
周期(ka)	0.5	1.1	2.3	4.9	11.6	23.3	42.4	95.5	187.5	661.4
贡献率(%)	0.4	1.6	3.9	9.5	30.7	31.1	5.0	9.5	7.6	0.7
贡献率排名	10	8	7	4	2	1	6	3	5	9

示, 类似于11.6ka的半岁差周期可能是控制季风变化的另一主导因素.

在亚轨道尺度中, IMF5对应的4.9ka周期最为显著, 贡献率为9.5%, 排名并列第三. 千年尺度的变化一般叠加在轨道趋势中, 在长时段的频谱分析中, 千年周期往往被轨道周期所掩盖(Siddall等, 2010), 难以准确识别. 本文用EMD方法对过去640ka石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列分解得到的4.9ka周期, 和表征冰量的95.5ka周期的贡献率一致, 都是9.5%, 说明5ka周期的千年变化可能是控制季风变化一个非常重要的因素.

4 讨论

4.1 亚洲季风变化的半岁差周期及其成因机制

尽管在数个冰期-间冰期旋回的气候记录中检测出贡献率高达30%的半岁差周期尚属首次(表1), 但一些研究已经观测到气候系统对半岁差振荡的响应. 早期的半岁差周期研究成果主要集中在低纬地区, 如Verschuren等(2009)通过对非洲东部Challa湖泊沉积物中的有机生物指标记录的分析, 揭示了该区域季风降雨变化的半岁差周期, 表明东非赤道附近的水文循环变化响应于多个尺度的低纬太阳辐射变化. 南非Buffalo洞穴的流石沉积 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 发现亚热带季风降雨除了显著的约21ka左右的岁差周期外, 还存在10.7ka的半岁差周期, 只不过由于该记录分辨率低、年龄误差大等原因, 10.7ka周期并没有引起作者的关注(Hopley等, 2007). 在中国南海海域, 不同站点沉积岩芯的黏土矿物(刘志飞等, 2007)、深层水变化指标 $\delta^{13}\text{C}$ (Wei等, 2006)、总有机碳含量(Wei等, 2006)、孢粉记录(Sun等, 2003; Luo等, 2005)的谱分析均显示出半岁差周期. 随后, 许多研究在热带以外地区的记录中均识别出半岁差周期, 比如Ferretti等(2010)在北大西洋U1313站点沉积物中底栖和浮游有孔虫的氧同位素的频谱分析, 发现了显著的10ka左右的周期, 与赤道地区太阳辐

射产生的半岁差信号有着良好的对应关系. Emanuele等(2015)在同样站点新采集的岩芯中, 发现海表生产率指标也有很强的半岁差振荡信号. 最近报道的新西兰南岛Foulden Maar古火山湖, 其湖泊沉积物的密度和磁化率的谱分析以及小波分析均显示出很强的约11ka的半岁差周期, 研究推测该周期对南半球中纬度地区的降水模式有重要影响(Fox等, 2017). 这些研究表明半岁差周期不仅广泛存在于中低纬度地区的地质记录中, 在北半球高纬地区和南半球也可能出现.

早在1991年, Short等(1991)就通过模型推测出10~12ka的半岁差周期, 这和Berger等(2006)通过赤道地区的太阳辐射量计算出的半岁差周期基本一致. 那么, 半岁差的天文周期是如何转化为气候信号的? 低纬地区降雨和温度变率对半球间低纬太阳辐射变化放大响应或许是季风系统中半岁差周期产生的潜在动力机制(Verschuren等, 2009; Vleeschouwer等, 2012). 南北半球的岁差呈180°的反相位关系, 因此南半球的岁差信号传输到北半球, 会在北半球形成一个半岁差信号, 从而引发半岁差尺度的气候变化(Rutherford和D'Hondt, 2000). Hagelberg等(1994)推测10~12ka周期可能表示快速峰值事件, 并认为太阳辐射极小值没有敏感性, 因而仅保留两半球夏季太阳辐射的最大值, 由此产生半岁差周期. 据此, Guo等(2012)利用30°N(6月)与30°S(12月)夏季太阳辐射极大值定义半球间太阳辐射极大值变化(Bi-hemispheric insolation, BHI), 发现其与这个尺度上 CH_4 峰谷变化一一对应. 我们用同样的方法计算了BHI, 并与石笋EMD分解的IMF5分量做交叉谱分析(图3b), 结果显示, 二者在亚轨道尺度的变化上呈现显著相关性, 特别是11.5ka左右的相关性最为强烈并且贯穿始终(如图3b粗虚线所示). 半球间热力差异通过海气耦合及其反馈机制控制季风强度(Diaz和Bradley, 2004), 且南北半球季风在轨道尺度上呈反相位变化(Wang等, 2007; Wang等, 2008), 因此相邻两个太阳辐射峰值分别对应于北(南)半球季风增强

图3 石笋IMF5分量(绿色)与半球间太阳辐射极大值变化(红色)对比(a)及交叉谱分析(b)
BHI由30°N(6月)与30°S(12月)夏季太阳辐射极大值定义, 据Berger(1978)

期. 这和大气/海洋/植被耦合模型的模拟结果基本一致 (Tuenter等, 2007).

本文用EMD方法对从640ka石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列分解出半岁差周期, 其贡献率为30.7%, 与岁差周期(贡献率为31.1%)的贡献率之和超过60%, 进一步突出了中低纬地区在全球气候演化中的重要地位. 岁差和半岁差的谐波虽然受限于低纬度地区, 但是这种气候响应可以通过大气和海洋循环传播到其他地区(Short等, 1991; Weirauch等, 2008). 古气候记录揭示平流模式在将低纬热量和能量传递到高纬度的过程中所起的重要作用, 并通过海汽耦合模式维持全球能量平衡(Mcintyre, 1989; Ferretti等, 2015).

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列EMD分析结果显示的半岁差周期(30.7%)与岁差周期(31.1%)贡献率相当, 但在原始

数据序列中为何仅能识别强烈的岁差信号呢? 可能的原因: 其一是亚米兰科维奇尺度的气候变化振幅比米兰科维奇尺度的振幅小得多, 从而造成前者被后者所掩盖(Hagelberg等, 1994). 本文石笋EMD分解结果也显示, IMF5对应的半岁差周期振幅为4, 而IMF6岁差周期的振幅为10, 是半岁差周期振幅的2.5倍. 其二是季风系统的半岁差周期受到北半球与南半球各自太阳辐射最大值的共同影响, 并与岁差周期同相位(Hagelberg等, 1994; Rutherford和D'Hondt, 2000). 半球间行星波信号传输的有效性可能会在重力波的作用下削弱(Forbes等, 1995), 也导致半岁差信号偏弱.

4.2 亚洲季风变化的千年周期及其成因机制

在亚轨道尺度上, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 共分解出0.5、1.1、

2.3、4.9ka四个周期, 贡献率一共为15.4%。其中4.9ka周期大致对应于经典的Bond旋回, 其贡献率最大(9.5%), 与95.5ka周期的贡献率相当。其他千年周期(1.1ka、2.3ka)对应于Dansgaard-Oeschger振荡及其次级变化。从图2石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列EMD分析结果可以看出, 约5ka周期的振荡(IMF4)在整个序列中振幅和疏密变化均较为稳定, 即5ka周期贯穿始终且信号明显。事实上, 5ka周期在很多地区都有记录: 比如南北两极冰芯的 CH_4 记录(Delmotte等, 2004), 伊比利亚半岛沉积物的Ca/Ti比率(Hodell等, 2013), 欧洲西南部站点U1358沉积物中的孢粉记录、浮游有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录、深海有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录以及海表温的生物指标(Goñi等, 2016), 佛罗里达Tulane湖的松树孢粉记录(Grimm等, 1993)等。在北大西洋地区, 研究者不仅在深海沉积物中的有孔虫氧同位素中发现约5ka左右的周期(Weirauch等, 2008; Ferretti等, 2010), 北大西洋的冰漂碎屑(Ice Rafted Debris, IRD)也同样记录了约5ka的周期(Bond等, 1997)。

北大西洋深海沉积物Ca/Sr比率通常作为北大西洋冰漂碎屑事件或温盐环流的代用指标, 因此我们将

去除气候背景的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列($\Delta\delta^{18}\text{O}$)与北大西洋深海沉积物Ca/Sr记录(Channell等, 2012)进行对比(图4a), 从而判断亚洲季风千年尺度特征与北大西洋冰漂碎屑事件的联系。从图4a可以看出, 石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 曲线的峰谷变化与北大西洋深海沉积物Ca/Sr比率具有良好的对应关系, 即石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 变大, 季风减弱, 对应于北大西洋深海沉积物Ca/Sr比率变大, 温盐环流减弱, 反之亦然。同时, 我们也对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列($\Delta\delta^{18}\text{O}$)与北大西洋深海沉积物Ca/Sr记录进行交叉谱分析(图4b), 结果显示, 二者千年尺度的变化呈现出明显的相关性, 特别是在5ka周期左右的相关性最为强烈(见图4b粗虚线所示)。

同时我们也对北大西洋Ca/Sr序列进行了EMD分解(表2), 得到10个本征模分量, 其中千年尺度上3个周期组分(1.2、2.0、5.1ka)与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的EMD分解结果(1.1、2.3、4.9ka)基本一致, 表明在千年尺度上低纬季风变化与北大西洋气候的遥相关。而IMF4分量表征的5ka周期在整个Ca/Sr序列的EMD分解中的贡献率最大, 高达46.3%, 几乎占到总贡献率的一半, 说明5ka周期组分是北大西洋冰漂事件的主导周期。过去500ka的ODP980 IRD序列(McManus等, 1999)EMD分解同样获

图4 石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 序列(绿色)与北大西洋Ca/Sr序列(橙色)对比(a)及交叉谱分析(b)

Ca/Sr序列据Channell等(2012)

表 2 Ca/Sr序列IMF分量的方差贡献率

Ca/Sr	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9
周期(ka)	0.7	1.2	2.0	5.1	11.3	20.2	39.5	91.4	182.9
贡献率(%)	2.4	4.1	2.0	46.3	15.0	14.0	7.8	4.3	0.9
贡献率排名	7	6	8	1	2	3	4	5	9

得了5ka周期, 进一步证实了5ka周期的重要性和广泛性. 在中国黄土粒度资料的谱分析和EMD分解中也发现类似的周期, 并认为这些周期揭示了亚洲季风千年尺度事件与北大西洋气候的联系(Li等, 2015).

亚洲季风千年变化与北大西洋气候的联系最早来自末次冰期特别是同位素3阶段的研究结果. Porter和An(1995)通过研究中国黄土高原粉尘堆积层序中粒度指标, 首先揭示了北大西洋地区冰漂碎屑事件与亚洲冬季风强弱变化的耦合关系. 阿拉伯海钻孔岩芯总有机碳含量变化证实了印度洋季风降水与北高纬度温度在千年尺度上存在机制上的联系(Schulz等, 1998). Wang等(2001)通过葫芦洞石笋U-Th定年和方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 序列, 发现千年尺度亚洲夏季风强弱与格陵兰地区DO事件紧密联系, 奠定了北半球高低纬之间同步变化的基础. 气候模型也模拟出北高纬与印度洋季风区/欧亚大陆季风区气候的紧密联系, 认为西风带可能发挥了至关重要的作用(Chiang和Friedman, 2012; Sun等, 2012). 640ka以来石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 序列与北大西洋Ca/Sr序列交叉谱分析, 及其二者的EMD分解结果, 说明北高纬气候变化和千年尺度季风气候事件的耦合关系不仅发生在末次冰期, 而且稳定持续在最近数个冰期旋回.

Cheng等(2016)对640ka以来石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 序列谱分析显示, 千年尺度变化呈现出很强的岁差周期, 揭示太阳辐射对季风事件的调制作用. 仔细观察发现, 主要的弱季风事件对轨道强迫的响应比较明显, 换句话说千年季风对太阳辐射的响应并非线性关系. 同样的事实出现在北大西洋冰漂事件与全球冰量的关系中, 虽然北大西洋深海沉积物记录的Heinrich-like碎屑层与LR04底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 变化密切相关, 指示全球冰量对大西洋冰漂碎屑事件控制作用(Channell等, 2012), 但千年事件与冰量变化其实存在复杂的响应关系(Ganopolski和Roche, 2009). 这暗示无论是冰漂碎屑事件还是弱季风事件都不是受单一因素控制. Guo等(2012)用多窗谱方法将南极EDC和Vostok冰芯的 CH_4 记录分析

发现, 千年尺度的 CH_4 变化源自多种轨道强迫. 石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 序列与北大西洋Ca/Sr序列交叉谱分析显示, 二者在千年尺度上(特别是5ka周期)的变化呈现出强烈的相关性, 一方面说明5ka周期具有全球广泛性特征和一致性成因机制, 另一方面也可能暗示千年尺度气候变化是全球冰量和太阳辐射共同作用的结果.

5 结论

通过640ka以来石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的EMD分解, 共获得10个本征模分量(IMF), 识别出三个时间尺度的波动: 百年尺度(0.5ka)、千年尺度(1.1、2.3、4.9ka)和轨道尺度(11.6、23.3、42.4、95.5、187.5、661.4ka). 结合每个周期组分的方差贡献率的分析结果, 并与半球间太阳辐射、北大西洋Ca/Sr序列进行对比, 获得以下结论:

(1) 在10个本征模分量中, 11ka半岁差周期对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的贡献率为30.7%, 与23ka岁差周期的贡献率(31.1%)几乎相当, 指示半岁差周期可能是控制季风变化的另一主导因素. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 半岁差分量与半球间太阳辐射极大值BHI的交叉谱结果显示, 二者具有强烈的相关性, 指示低纬降雨和温度变率对两半球间低纬太阳辐射放大响应, 进而影响亚洲季风的强度变化.

(2) 在千年尺度上, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的EMD分解结果(1.1、2.3、4.9ka)与北大西洋Ca/Sr序列的分解结果(1.2、2.0、5.1ka)基本一致, 表明在千年尺度上低纬季风变化与北大西洋气候的遥相关. 海洋沉积和石笋记录交叉谱分析显示, 二者在千年尺度上的变化呈现出很强的相关性, 特别是5ka周期稳定贯穿两个记录始终且贡献率较高, 说明5ka周期是中晚更新世以来冰期-间冰期旋回的特征周期, 一方面说明5ka周期具有全球广泛性特征和一致性成因机制, 另一方面也可能暗示千年尺度气候变化是全球冰盖和太阳辐射的共同作用结果.

参考文献

- 曹杰, 温之平, 常有礼, 李湘瑞. 2012. 热带大气对流耦合波动的小波分析. *中国科学: 地球科学*, 42: 577–586
- 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, Colin C. 2007. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化. *中国科学D辑: 地球科学*, 37: 1176–1185
- 余志伟, 丁仲礼. 2003. 黄土古气候记录中100ka周期与岁差、半岁差周期的非线性耦合关系. *中国科学D辑: 地球科学*, 33: 520–528
- An Z, Clemens S C, Shen J, Qiang X, Jin Z, Sun Y, Prell W L, Luo J, Wang S, Xu H, Cai Y, Zhou W, Liu X, Liu W, Shi Z, Yan L, Xiao X, Chang H, Wu F, Ai L, Lu F. 2011. Glacial-interglacial Indian Summer Monsoon dynamics. *Science*, 333: 719–723
- An Z, Wu G, Li J, Sun Y, Liu Y, Zhou W, Cai Y, Duan A, Li L, Mao J, Cheng H, Shi Z, Tan L, Yan H, Ao H, Chang H, Feng J. 2015. Global monsoon dynamics and climate change. *J Earth Env*, 43: 29–63
- Berger A L. 1978. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quat Res*, 9: 139–167
- Berger A. 1988. Milankovitch theory and climate. *Rev Geophys*, 26: 624–657
- Berger A, Loutre M F, Mélice J L. 2006. Equatorial insolation: From precession harmonics to eccentricity frequencies. *Clim Past*, 2: 131–136
- Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, Demenocal P, Priore P, Cullen H, Hajdas I, Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278: 1257–1266
- Channell J E T, Hodell D A, Romero O, Hillaire-Marcel C, de Vernal A, Stoner J S, Mazaud A, Röhl U. 2012. A 750-kyr detrital-layer stratigraphy for the North Atlantic (IODP sites U1302–U1303, Orphan Knoll, Labrador Sea). *Earth Planet Sci Lett*, 317–318: 218–230
- Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, Denton G H, Kong X, Wang Y, Zhang R, Wang X. 2009. Ice age terminations. *Science*, 326: 248–252
- Cheng H, Edwards R L, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S, Kelly M, Kathayat G, Wang X, Li X, Kong X, Wang Y, Ning Y, Zhang H. 2016. The Asian Monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 534: 640–646
- Chiang J C H, Friedman A R. 2012. Extratropical cooling, interhemispheric thermal gradients, and tropical climate change. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 40: 383–412
- Cooper M C, O'Sullivan P E, Shine A J. 2000. Climate and solar variability recorded in Holocene laminated sediments—A preliminary assessment. *Quat Int*, 68–71: 363–371
- Delmotte M, Chappellaz J, Brook E, Yiou P, Barnola J M, Goujon C, Raynaud D, Lipenkov V I. 2004. Atmospheric methane during the last four glacial-interglacial cycles: Rapid changes and their link with Antarctic temperature. *J Geophys Res*, 109: 1–13
- Diaz H F, Bradley R S. 2004. *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Dordrecht: Springer. 21: 1–5
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, Yu Z W, Xiong S F, Liu T S. 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 17: 5–1–5–21
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, Yuan D, Cai Y, Zhang M, Lin Y, Qing J, An Z, Revenaugh J. 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian Monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 71–86
- Emanuele D, Ferretti P, Palumbo E, Amore F O. 2015. Sea-surface dynamics and palaeoenvironmental changes in the North Atlantic Ocean (IODP site U1313) during marine isotope stage 19 inferred from coccolithophore assemblages. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 430: 104–117
- Ferretti P, Crowhurst S J, Hall M A, Cacho I. 2010. North Atlantic millennial-scale climate variability 910 to 790 ka and the role of the equatorial insolation forcing. *Earth Planet Sci Lett*, 293: 28–41
- Ferretti P, Crowhurst S J, Naafs B D A, Barbante C. 2015. The marine isotope stage 19 in the mid-latitude North Atlantic Ocean: Astronomical signature and intra-interglacial variability. *Quat Sci Rev*, 108: 95–110
- Forbes J M, Hagan M E, Miyahara S, Vial F, Manson A H, Meek C E, Portnyagin Y I. 1995. Quasi 16-day oscillation in the mesosphere and lower thermosphere. *J Geophys Res*, 100: 9149–9163
- Fox B R S, D'Andrea W J, Wilson G S, Lee D E, Wartho J A. 2017. Interaction of polar and tropical influences in the mid-latitudes of the southern hemisphere during the Mi-1 deglaciation. *Glob Planet Change*, 155: 109–120
- Ganopolski A, Roche D M. 2009. On the nature of lead-lag relationships during glacial-interglacial climate transitions. *Quat Sci Rev*, 28: 3361–3378
- Goñi M F S, Rodrigues T, Hodell D A, Polanco-Martínez J M, Alonso-García M, Hernández-Almeida I, Desprat S, Ferretti P. 2016. Tropically-driven climate shifts in Southwestern Europe during MIS 19, a low eccentricity interglacial. *Earth Planet Sci Lett*, 448: 81–93
- Grimm E C, Jacobson Jr. G L, Watts W A, Hansen B C S, Maasch K A. 1993. A 50000-year record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events. *Science*, 261: 198–200
- Guo Z, Zhou X, Wu H. 2012. Glacial-interglacial water cycle, global monsoon and atmospheric methane changes. *Clim Dyn*, 39: 1073–

1092

- Hagelberg T K, Bond G, Demenocal P. 1994. Milankovitch band forcing of sub-Milankovitch climate variability during the Pleistocene. *Paleoceanography*, 9: 545–558
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. 1976. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194: 1121–1132
- Hodell D, Crowhurst S, Skinner L, Tzedakis P C, Margari V, Channell J E T, Kamenov G, MacLachlan S, Rothwell G. 2013. Response of Iberian margin sediments to orbital and suborbital forcing over the past 420 ka. *Paleoceanography*, 28: 185–199
- Hopley P J, Weedon G P, Marshall J D, Herries A I R, Latham A G, Kuykendall K L. 2007. High- and low-latitude orbital forcing of early hominin habitats in South Africa. *Earth Planet Sci Lett*, 256: 419–432
- Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q, Yen N C, Tung C C, Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc Lond Ser A-Math Phys Eng Sci*, 454: 903–995
- Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, Dreyfus G, Falourd S, Hoffmann G, Minster B, Nouet J, Barnola J M, Chappellaz J, Fischer H, Gallet J C, Johnsen S, Leuenberger M, Loulergue L, Luethi D, Oerter H, Parrenin F, Raisbeck G, Raynaud D, Schilt A, Schwander J, Selmo E, Souchez R, Spahni R, Stauffer B, Steffensen J P, Stenni B, Stocker T F, Tison J L, Werner M, Wolff E W. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800000 years. *Science*, 317: 793–796
- Kashiwaya K, Ochiai S, Sakai H, Kawai T. 2003. Onset of current Milankovitch-type climatic oscillations in Lake Baikal sediments at around 4 Ma. *Earth Planet Sci Lett*, 213: 185–190
- Kirsten K L, Haberzettl T, Wüdsch M, Frenzel P, Meschner S, Smit A J, Quick L J, Mäusbacher R, Meadows M E. 2018. A multiproxy study of the ocean-atmospheric forcing and the impact of sea-level changes on the Southern Cape Coast, South Africa during the Holocene. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 496: 282–291
- Li Y, Su N, Liang L, Ma L, Yan Y, Sun Y. 2015. Multiscale monsoon variability during the last two climatic cycles revealed by spectral signals in Chinese loess and speleothem records. *Clim Past*, 11: 1067–1075
- Lin Z S, Sun X. 2007. Multi-scale analysis of global temperature changes and trend of a drop in temperature in the next 20 years. *Meteorol Atmos Phys*, 95: 115–121
- Lin Z S, Wang S G. 2006. EMD analysis of solar insolation. *Meteorol Atmos Phys*, 93: 123–128
- Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20: 1–17
- Liu H Y, Lin Z S, Qi X Z, Li Y X, Yu M T, Yang H, Shen J. 2012. Possible link between Holocene East Asian Monsoon and solar activity obtained from the EMD method. *Nonlin Processes Geophys*, 19: 421–430
- Liu H, Lin Z, Qi X, Zhang M, Zhang Z, Du J. 2010. Multiple analysis of variation of the East Asian Monsoon during the Holocene. *Quat Int*, 213: 74–78
- Loulergue L, Schilt A, Spahni R, Masson-Delmotte V, Blunier T, Lemieux B, Barnola J M, Raynaud D, Stocker T F, Chappellaz J. 2008. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH_4 over the past 800000 years. *Nature*, 453: 383–386
- Luo Y, Sun X, Jian Z. 2005. Environmental change during the penultimate glacial cycle: A high-resolution pollen record from ODP site 1144, South China Sea. *Mar Micropaleontol*, 54: 107–123
- Maslov L A. 2015. Self-organization of the Earth's climate system versus Milankovitch-Berger astronomical cycles. *J Adv Model Earth Sy*, 6: 650–657
- McDermott F, Matthey D P, Hawkesworth C. 2001. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from SW Ireland. *Science*, 294: 1328–1331
- Mcintyre M E. 1989. On dynamics and transport near the polar mesopause in summer. *J Geophys Res*, 94: 14617–14628
- McManus J F, Oppo D W, Cullen J L. 1999. A 0.5-million-year record of millennial-scale climate variability in the North Atlantic. *Science*, 283: 971–975
- Parrenin F, Barnola J M, Beer J, Blunier T, Castellano E, Chappellaz J, Dreyfus G, Fischer H, Fujita S, Jouzel J, Kawamura K, Lemieux-Dudon B, Loulergue L, Masson-Delmotte V, Narcisi B, Petit J R, Raisbeck G, Raynaud D, Ruth U, Schwander J, Severi M, Spahni R, Steffensen J P, Svensson A, Udisti R, Waelbroeck C, Wolff E. 2007. The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core. *Clim Past*, 3: 485–497
- Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429–436
- Porter S C, An Z. 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375: 305–308
- Rousse S, Kissel C, Laj C, Eiriksson J, Knudsen K. 2006. Holocene centennial to millennial-scale climatic variability: Evidence from high-resolution magnetic analyses of the last 10 cal kyr off North Iceland (core MD99-2275). *Earth Planet Sci Lett*, 242: 390–405
- Rutherford S, D'Hondt S. 2000. Early onset and tropical forcing of 100000-year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 408: 72–75

- Schulz H, von Rad, U, Erlenkeuser, H, von Rad, U. 1998. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110000 years. *Nature*, 393: 54–57
- Shackleton N J. 2000. The 100000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 289: 1897–1902
- Short D A, Mengel J G, Crowley T J, Hyde W T, North G R. 1991. Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography. *Quat Res*, 35: 157–173
- Siddall M, Rohling E J, Blunier T, Spahni R. 2010. Patterns of millennial variability over the last 500 ka. *Clim Past*, 6: 295–303
- Solé J, Turiel A, Llebó J E. 2007. Using empirical mode decomposition to correlate paleoclimatic time series. *Nat Hazard Earth Sys*, 7: 299–307
- Sun X, Luo Y, Huang F, Tian J, Wang P. 2003. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian Monsoon. *Mar Geol*, 201: 97–118
- Sun Y, Clemens S C, Morrill C, Lin X, Wang X, An Z. 2012. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon. *Nat Geosci*, 5: 46–49
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 79: 61–78
- Tuenter E, Weber S L, Hilgen F J, Lourens L J. 2007. Simulating sub-Milankovitch climate variations associated with vegetation dynamics. *Clim Past*, 3: 169–180
- Verschuren D, Sinninghe Damsté J S, Moernaut J, Kristen I, Blaauw M, Fagot M, Haug G H, Haug G H. 2009. Half-precessional dynamics of monsoon rainfall near the east African equator. *Nature*, 462: 637–641
- Vleeschouwer D, da Silva A C, Boulvain F, Crucifix M, Claeys P. 2012. Precessional and half-precessional climate forcing of mid-Devonian monsoon-like dynamics. *Clim Past*, 8: 337–351
- Wang X, Auler A S, Edwards R L, Cheng H, Ito E, Wang Y, Kong X, Solheid M. 2007. Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90000 years. *Geophys Res Lett*, 34: 135–147
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294: 2345–2348
- Wang Y, Cheng H, Edwards R L, Kong X, Shao X, Chen S, Wu J, Jiang X, Wang X, An Z. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 451: 1090–1093
- Wei G J, Huang C Y, Wang C C, Lee M Y, Wei K Y. 2006. High-resolution benthic foraminifer $\delta^{13}\text{C}$ records in the South China Sea during the last 150 ka. *Mar Geol*, 232: 227–235
- Weirauch D, Billups K, Martin P. 2008. Evolution of millennial-scale climate variability during the mid-Pleistocene. *Paleoceanography*, 23: PA3216–16
- Yuan D, Cheng H, Edwards R L, Dykoski C A, Kelly M J, Zhang M, Qing J, Lin Y, Wang Y, Wu J, Dorale J A, An Z, Cai Y. 2004. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian Monsoon. *Science*, 304: 575–578

(责任编辑: 翦知潜)