青藏高原中东部 2485 年来温度变化幅度、速率、周期、原因及未来趋势

刘禹^{①②}, 蔡秋芳^①, 宋慧明^{①③}, 安芷生^①, LINDERHOLM Hans W.^④

① 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

② 西安交通大学人居环境与建筑工程学院环境科学与工程系, 西安 710049;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ Regional Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 40530, Sweden

E-mail: liuyu@loess.llqg.ac.cn

2011-03-08 收稿, 2011-07-14 接受

国家自然科学基金(40890051)、中国科学院“百人计划”、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-01)、国家科技支撑计划(2007BAC30B01)、黄土与第四纪国家重点实验室开放基金和国家杰出青年科学基金(40525004)资助

摘要 分析了根据树木年轮资料重建的青藏高原中东部过去 2485 年来温度变化幅度、速率、周期、原因及未来趋势, 发现研究区极端气候事件与全球同步出现, 如中世纪暖期、小冰期和 20 世纪增温等. 历史上最大的温度变幅和速率都发生在“东晋事件”(343~425 AD)期间, 而非 20 世纪后半期. 过去青藏高原中东部地区温度序列存在显著的 1324, 800, 199, 110, 2~3 a 的准周期 ($P < 0.01$), 其中, 1324, 199 和 110 a 周期与太阳活动有关. 温度变化在很大程度上受控于太阳活动: 千年尺度周期决定了温度变化趋势长期走向, 百年尺度周期控制了温度变化幅度, 而太阳活动极小期对应冷期出现. 预估结果显示未来这一地区温度将下降, 到 2068 AD 前后温度下降到谷底, 2068 AD 后再次升温.

关键词

青藏高原中东部
温度
幅度
速率
周期
原因
未来趋势

不同区域长时间尺度温度变化的特征(幅度、速率、周期和原因)和未来趋势仍然是当前研究的焦点之一. 目前, 在 2000 年全球气候变化研究中还存在很多不确定性, 有许多问题也亟待厘清. 如过去不同冷暖转换过程中温度的变幅如何? 过去温暖期增暖速率如何? 变化的周期如何? 变化的原因是什么? 20 世纪是 1000 年来最暖? 抑或 2000 年来最暖?

地球气候的变化相当多样和复杂, 然而它对太阳辐射驱动作用的响应却很灵敏^[1,2]. 太阳活动具有千年和百年(准 100 年和准 200 年)尺度的变化周期^[1,2], 千年尺度的周期是其重要的周期之一. 众多的地质记录发现全新世以来气候变化也存在显著的千年周期, 其诱发机制与太阳活动相关联(如 1470 ± 532 a)^[3], 这个周期甚至可以追溯到 40 万年以前^[4]. 既然它是气候变化的一个主导周期, 影响持续了这么长时间,

那为什么在我们这个时代就要停止呢?

在 2000 年来温度变化研究中, 不仅强调时间分辨率要高(年或季节), 而且所研究的序列至少要包含 2 个完整的大气候周期, 以促进人类对全球变化的自然过程的认识^[5]. 但是, 目前同时满足这 2 个条件的温度序列不多. 迄今为止, 在最近 2000 年以来高分辨率气候变化研究中, 由于资料长度的限制, 千年尺度的周期没有被提及, 这是 2000 年气候研究中的重大缺憾, 也严重限制了对未来气候变化趋势的准确估测.

用于研究过去 2000 年来气候变化的主要材料有冰芯^[6]、珊瑚^[7]、石笋^[8,9]、湖泊沉积^[10]、历史文献^[11,12]和树木年轮^[13]等资料. 在这些材料中, 树木年轮由于定年准确、分辨率高、指标意义明确、时间序列连续、样本分布广泛等特点, 在过去全球变化研究, 尤

英文版见: Liu Y, Cai Q F, Song H M, et al. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4713-7

其是最近 2000 年气候变化研究中发挥了重要作用. 它是近 1000 年和近 2000 年区域、半球和全球尺度温度重建的主要资料来源^[14], 为认识过去温度变化起到了关键作用.

树轮资料虽然很多, 但是超过 1000 年长度的很少, 超过 2000 年的就更少, 这就制约了对千年尺度周期的认识. 青藏高原中东部 2485 年温度曲线的获得^[13], 为研究千年尺度气候变化周期提供了契机. 本文将对青藏高原 2485 年温度曲线进行深入分析, 探讨温度变化的幅度、变率、速率、周期和可能的变化原因, 并对这一地区未来温度变化进行趋势预测.

1 材料和方法

本文所用温度资料来自文献^[13]. 它不仅代表了青藏高原中东部、还代表了中国中北部广大地区的温度变化, 且与北半球 7 条温度曲线均显著相关^[13], 它甚至与南半球中低纬地区温度变化显著遥相关^[15]. 可以说, 这条温度曲线的区域代表性是明确的. 由于年表的建立过程中采用了负指数函数或线性函数去趋势方法, 因此所建立的年表中保留了一定的低频气候变化信号, 可以捕捉研究区长时间尺度的气候变化信息.

本文使用下列方法计算温度变化特征.

(1) 冷暖期定义: 冷期为, $T < \text{mean} - 0.5\sigma$, 暖期为, $T > \text{mean} + 0.5\sigma$, 其中 mean 为平均值, σ 为标准差.

(2) 温度变幅定义: 采用两个相邻冷暖区间平均温度的差值.

(3) 温度速率定义: 采用某一升温或降温时段线性趋势线的斜率.

(4) 温度变化周期计算: 以红噪声分析软件 Redfit35 计算获得. 分析过程中参数选择如下, $n_{50} = 4$ (WOSA segment: Welch Overlap Segment Averaging procedure); $iwin = 2$ (即选用汉宁—Hanning—平滑系数进行平滑). 其余参数均使用软件默认参数(它们的具体含义见 Schulz 等人^[16]).

(5) 温度变化趋势预测: 采用毛毛虫-奇异谱分析法—Caterpillar-SSA^[17], 通过对 2485 年温度序列进行嵌套、奇异值分解、聚合和对角线平均等 4 个步骤, 进而估测未来 120 年青藏高原温度变化趋势. 整个分析过程详见文献^[18], 在嵌套过程中, 嵌套空间维数 L 取 1700, 这个窗口长度非常重要, 它与显著的 1324 年周期密切相关, Caterpillar-SSA 可以鉴别的周

期长度在 $L/15 \sim L$ 之间. 聚合过程采用 Ward 方法, 以欧氏距离系数进行系统聚类, 逐级归并, 归并过程以枝形图展开. 预测采用周期法(recurrent).

2 结果和讨论

2.1 青藏高原 2485 年来温度变幅、变率和速率

(i) 温度变幅. 本文重点分析千年-百年时间尺度上温度变化特征, 因此在分析温度变幅、变率和速率部分时使用全场的温度平均值和标准差值. 10 年及年际尺度的短时间尺度本文不作分析.

经计算, 本文青藏高原 2485 年温度平均值为 2.12°C , 标准差为 0.40°C . 据此, 我们将 2485 年的温度序列划分为 6 个冷期和 6 个暖期(表 1). 这个划分标准要比文献^[13]中的冷暖时段更精确、更量化.

在过去 2485 年中, 最大的温度变幅发生在“东晋事件”^[13]期间. 这个事件包含前期的降温和后期的急剧升温 2 部分, 即从 C2 冷期的 1.66°C 上升到紧邻暖期 W2 的 2.67°C (表 1), 短短 30 年间平均增温幅度达 1.01°C . “东晋事件”前期平均温度较低(1.66°C), 其寒冷程度超过小冰期极盛期, 最冷年份发生在 362~369 AD 之间, 计算的平均温度仅 1.38°C , 比 20 世纪后期约低 1.5°C . 据记载, “366 AD, 渤海湾从昌黎到营口连续 3 年全部冰冻, 冰上可以来往车马及三四千人的军队”^[19], 这一时期的寒冷程度可见一斑, 青藏高原的树轮准确地抓住了这一短暂的寒冷信号.

从这条曲线来看, 实际上从小冰期以后到 20 世纪后期, 青藏高原的温度一直缓慢上升, 已有的北半球温度曲线也表现出这个特征^[20-22]. 如果我们从小冰期极盛期 C6 到 20 世纪增温期 W6 这一时期的温度变幅来看, 它的平均增温幅度为 0.79°C . 如果仅仅从 20 世纪的温度变化来看, 20 世纪前期(1911~1920 AD)与后期(1991~2000 AD)的温度变幅为 0.79°C , 这 2 个数字与 IPCC 第四次评估报告所得到的近百年地球表面平均温度上升了 0.74°C ^[23]的结果十分接近, 表明青藏高原 17 世纪以来增温速率是稳定的, 且增温趋势与全球同步, 而 20 世纪的增温幅度仅比全球增温幅度高 0.05°C , 20 世纪的增温幅度(0.79°C)远未达到“东晋事件”时期的增温幅度(1.01°C).

竺可桢^[19]认为著名的隋唐暖期发生在 600~1000 AD, 与这个时间相对应, 青藏高原 2485 年温度曲线在 784~1014 AD 出现了 2 个显著的温暖时期 W4 和

表1 青藏高原中东部 2485 年冷暖时段间温度变幅及速率^{a)}

冷期/暖期	时段	平均温度()	变幅()	速率(/10 a)
C1—冷期	-437~-412	1.64	W1-C1 = 0.71	0.03
W1—暖期	-266~-235	2.35	C2-W1 = -0.70	0.00
C2—冷期	343~367	1.66	W2-C2 = 1.01	0.77
W2—暖期	388~425	2.67	C3-W2 = -0.84	-0.17
C3—冷期	460~485	1.83	W3-C3 = 0.61	0.04
W3—暖期	585~640	2.44	C4-W3 = -0.72	-0.08
C4—冷期	682~714	1.72	W4-C4 = 0.78	0.05
W4—暖期	784~900	2.5		
W5—暖期	942~1014	2.5	C5-W5 = -0.67	-0.01
C5—冷期	1268~1306	1.83		
C6—冷期	1595~1713	1.78	W6-C6 = 0.79	0.02
W6—暖期	1960~2000	2.57		
	1911~1920	2.07		
	1990~2000	2.86	0.79	

a) 正值表示从冷期到暖期; 负值表示从暖期到冷期

W5. 有学者认为隋唐暖期就是“中世纪暖期”在中国的表现^[24], 似乎说明中国的中世纪暖期要比西方提前. 但是格陵兰冰芯 GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ 研究结果^[25]中 900~1000 AD 也出现了暖期, 与青藏高原的暖期 W5 出现的时间几乎一致, 表明中世纪暖期具有全球性特点, 至少在中国西部高海拔地区和北半球高纬地区同步出现, 在冷期方面, 2485 年温度曲线中时间跨度最长的冷期出现在 1595~1713 AD 前后, 与公认的小冰期极盛期^[26]时间基本一致.

“东晋事件”后期的平均温度(2.67℃)是 2485 年温度序列中最高的, 甚至超过 20 世纪后半期的平均温度(2.57℃), 也就是说, 20 世纪后半期的增温并不是历史上温度最高时期. 金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示出在 6000 年以来中国温度的变化中, 420 AD 前后的温暖气候并不比历史上其他高温期逊色^[27], 金川地区出现高温的 420 AD 基本与青藏高原温度曲线最高点的 413 AD 相近. 从另一个方面证实了“东晋事件”在较大范围存在的可能性.

(ii) 温度变率. 本文以温度 40 年步长的标准差表示温度变率. 计算表明, 温暖时期温度标准差变化较大(图 1 中细黑线), 如 388~425 AD 和 20 世纪后期 1960~2000 AD. 实际上, “东晋事件”以后的近 600 年时间里, 温度总体呈上升趋势, 相应的这一时期温度标准差变化明显高于其他时段. 而在冷期, 标准差值较小且变化幅度不大, 如 682~714 AD 和小冰期(1595~1713 AD)期间. 上面这个现象可以归结为: 温

暖时期温度变率较大, 表现为温度波动较大, 寒冷时期温度变率较小, 表现为温度波动较小.

(iii) 温度速率. 我们以每 10 年为时间单位考察温度的变化速度, 即温度速率(表 1), 发现在“东晋事件”期间, 即 362~390 AD (C2~W2) 温度速率最大, 达到 0.77℃/10 a. 在 W4 和 W5 两个暖期中间存在 1 次短期温度降低过程 (881~908 AD), 也是温度变化较大的时期, 降温速率达 0.35℃/10 a. 在 228 BC~362 AD 和 1271~1545 AD 两个分别长达 600 年和 270 年的时段内, 温度变幅较小, 在 2485 年平均温度附近波动, 同时温度速率也最小, 为 0 和 0.01℃/10 a. 20 世纪以来青藏高原地区的增温是明显的, 1918~2000 AD 的增温速率为 0.11℃/10 a, 此值与 IPCC 第四次评估报告指出的近 50 a 全球线性增温速率 0.13℃/10 a^[23]相近, 而这两个增温速率比过去 159 年 (1850~2008 AD) 来全球变暖速率 0.44℃/100 a (即 0.044℃/10 a)^[28]要高. 从历史来看, 20 世纪增温速率在过去近 2500 年来并非最大.

2.2 青藏高原 2485 年来温度变化周期

功率谱分析揭示, 在 99% 的信度上, 过去 2485 年青藏高原中东部地区温度序列存在显著的 1324, 800, 199, 110, 2~3 a 的准周期(图 2), 在 95% 的信度上还存在 66 和 38 a 的准周期. 其中 2~3 a 周期是地球系统普遍存在的周期, 也称之为准两年周期振荡 (QBO), 以往研究多有发现^[29~34]. 它是在对流层大气

环流以及地面气象要素的变化中几乎普遍存在的周期振荡现象,它可能是大气环流和气候变化中的一种重要特征^[35]. 38 a 周期接近 Bruckner 周期^[36], 而 66 a 的周期被认为是全球气候系统中一个变化周期^[37].

800 a 是否可以归于千年周期, 尚无法解释. 本文集中分析 1324, 199 和 110 a 这几个周期.

(i) 千年尺度周期. 1324 a 周期在图 2 中表现非常显著, 该周期十分接近著名的全新世以来气候

图 1 青藏高原中东部 2485 年温度序列(灰线)、40 a 滑动平均序列(粗黑线)及 40 a 步长标准差(细黑线)
横线为 2485 年均值线

图 2 青藏高原中东部 2485 年温度序列功率谱分析结果

变化主导周期 $1374 \pm 502 \text{ a}$ ^[3]和末次冰期的 Dansgaard/Oeschger(D-O)旋回中 1470 a 周期, 而这些周期统称为千年尺度气候周期. 考察 2485 年温度曲线, 我们发现它可以划分成 4 个变化阶段: 阶段 I (250 BC~369 AD)经历了约 600 余年温度逐渐下降的过程, 阶段 II (370~999 AD)经历了 600 余年温度上升的过程, 阶段 III (1000~1600 AD)又经历了 600 余年温度逐渐下降过程, 阶段 IV (1601~2000 AD)经历了 400 年的增温过程, 这些过程呈明显的锯齿波状(图 3). 阶段 I 和 II 表现为一个完整的千年周期, 阶段 I~III 则表现为 1.5 个千年周期.

从北美到西欧, 从中东到东亚, 大量地质生物记录揭示了千年尺度周期的存在, 这个周期深刻影响了地球气候系统. 北大西洋深海沉积^[3]、阿拉斯加湖泊^[1]、希腊 Ptolemais 盆地^[38]、中国九洲台黄土^[39]、北太平洋中纬度海表温度^[40]等均记录了 1500 a 的变化周期. 阿拉伯海 74K1 孔还发现了 1450 和 1150 a 的周期^[41]; 欧亚历史气候存在 1200 a 的周期^[42]; 在中国, 若尔盖泥炭记录了 1463 a 的周期^[43]; 全新世以来湖光岩玛珥湖沉积物中存在 1140 a 的周期^[44]; 红原温度序列中包含有 1087~1220 a 周期^[27].

这些来自世界各地的记录表明, 千年尺度的气候周期可能是全新世气候波动的主导周期, 这个周期的具体数值被 Bond 等人^[3]确定为 $1374 \pm 502 \text{ a}$. 这个周期的诱发机制可能与太阳活动存在某种联系^[3,42,45], 它也许就是太阳变化本身的周期^[2,46].

总之, 这个温和的千年尺度的周期持续了这么长时间, 没有在现在消失的理由. 那么为什么在过去 2000 年气候变化研究中这个周期从来没有被提及? 可能的原因是现有序列长度不足以反映出这一完整周期, 因而认识不到这一气候变化的极其重要的规律.

青藏高原 2485 年温度序列清楚地表明这个千年尺度周期控制着气温 600 年左右上升或下降的长期变化趋势, 导致冷期和暖期自然而缓慢地交替出现. 过去是这样, 未来似乎也会继续下去. 343~367 AD 年的“东晋事件”冷期及 1595~1713 AD 出现的小冰期很可能都是这一千年尺度周期中从冷到暖的转折点, 而中世纪暖期则是千年尺度周期控制下由暖向冷变化的转折点.

(ii) 百年尺度周期. 青藏高原 2485 年温度序列中显著的百年尺度周期变化有 199 和 110 a, 这两个周期接近太阳活动的准 200 a 周期(Suess cycle 或 de Vries cycle)^[45]和 70~100 a 的准周期 (Gleissberg cycle)^[46,47]. 来源广泛的地质生物证据确认了这 2 个周期的存在^[34,48~59]. 在全球最近 1000 年气温研究中, 准 200 和 100 a 周期十分显著, 它们被认为与太阳辐射有关^[50].

这些结果凸显出太阳活动 200 和 100 a 周期对地球气候系统的强烈影响, 它们在各种各样的地质生物记录中打上了深深的烙印. 因而本文检测到青藏高原温度变化序列中存在的这两个周期也就不足为奇了, 它再次证明了太阳活动对地球气候系统的主动驱动.

2.3 暖期形成的可能原因

20 世纪后半期暖期的形成被认为是与 21, 64, 179 a 等准周期上升相位叠加的结果^[60]. 从本文结果来看, 除了上述几个周期的影响, 太阳活动的千年尺度周期对这次增温有重要贡献, 而且这个千年周期与历史上几次增温关系密切.

分析近 2500 年来青藏高原中东部地区温度曲线的各个显著周期, 发现 2 个百年尺度的周期控制了温度变化的幅度(图 4(a)). 尤其 110 a 周期的振幅较

图 3 温度变化的千年尺度周期

图4 青藏高原 2485 年温度序列主要周期分解与模拟的正弦函数随时间变化

(a) 青藏高原 2485 年温度序列千、百年尺度周期分解(灰色, 原始序列; 红色, 1324 a 周期; 绿色, 199 a 周期; 蓝色, 110 a 周期); (b) 3 根正弦函数(蓝实线 110 a 周期函数 $y = 1.875 \sin(0.057t + 2.846)$, 绿实线 199 a 周期函数 $y = 1.40 \sin(0.032t - 0.369)$, 红虚线 1324 a 周期函数 $y = 0.848 \sin(0.005t + 0.23)$, 其中 t 是从 484 BC~2000 AD

大(计算的最大振幅 $A = 1.875^{\circ}\text{C}$), 它对于总体温度变化幅度的贡献要大于 199 a (最大振幅 $A = 1.399^{\circ}\text{C}$). 如果百年尺度的 2 个周期同时处于上升相位, 且千年尺度处于顶部附近, 由于能量叠加, 具备最大爆发力, 形成暖期. 从图 4 中 W1~W6 这几次暖事件来看, 它们都处于 199 和 110 a 的周期上升相位叠加的时段, 且千年尺度周期处于顶部附近, 形成的暖期强度均较大. 若百年尺度周期 199 和 110 a 同时处于下行相位, 且处在千年尺度周期的谷底附近, 则形成冷期. 如“东晋事件”前期的冷期和小冰期.

千年尺度的周期对百年尺度的周期有控制作用, 尽管其最大振幅 A 只有 0.848°C , 但是千年尺度的周期决定了温度变化趋势的长期走向, 在千年尺度的周期处于下降相位时, 无论百年尺度周期上升的幅度如何, 它也产生不了暖期. 如在阶段 I (250 BC~

369 AD)和阶段 III(1000~1600 AD) 2 个千年尺度周期下降相位时段, 没有暖期情况出现. 而在阶段 II (370~999 AD)和阶段 IV (1601~2000 AD)千年尺度周期处于上升阶段时, 如果百年尺度周期处于上升相位, 则容易产生暖期, 纵使百年尺度的周期相位在某些时段下降, 但它也影响不了温度整体上升的走势.

用 1324, 199 和 110 a 三个周期性波动函数进行模拟(图 4(b)), 可以看出, 2 个百年尺度周期正相位叠加, 且处于千年尺度顶部附近所产生的暖期都模拟出了(图 4(b)红箭头所示). 同时, 过去 2485 年间其他时间的一些较暖期和冷期也用这 3 个周期可以模拟出来.

值得注意的是, 冷期与太阳黑子活动极小期基本一一对应, 如 1015~1040 AD 对应于 Oort 极小期

(Om, 1010~1080 AD), 1258~1309 AD (C5 冷期)对应于 Wolf 极小期(Wm, 1270~1350 AD), 1451~1539 AD 对应于 Spörer 极小期 (Sm, 1430~1520 AD), 1620~1715 AD (C6 冷期)对应 Maunder 极小期 (Mm, 1620~1710 AD), 1766~1824 AD 对应 Dalton 极小期 (Dm, 1787~1843 AD)^[61](图 4).

实际上, 我们已经发现 2485 年温度变化曲线在低频变化上与太阳辐射曲线比较相似^[13], 结合本文的研究结果, 看来太阳活动是青藏高原中东部(或更大范围)气候变化的外驱动因子, 太阳活动的千年尺度周期决定了温度变化的长期趋势, 而百年尺度周期决定了温度变化的幅度, 太阳活动极小期对应冷期出现. 年-年代际尺度温度变化或许与大气环流有关. 正如竺可桢^[19]所说“地球上气候大的变动是受太阳辐射所控制的, 但气候上小的变动, 则受大气环流所左右”.

2.4 青藏高原中东部未来 120 年温度变化趋势

周期性波动反映的是气候自然变化, 它们过去存在, 在未来的气候变化中将仍然存在, 这将是进行气候预测的主要依据. Caterpillar-SSA 是一新颖的、功能强大的时间序列分析和预测方法. 采用这种方法对贺兰山地区降水预测^[18]的结果已经部分得到气象观测资料的验证, 树轮资料截止后的 1998~2009 AD 的 12 年期间预测的降水趋势与实际观测资料十分吻合(另文论述), 证明了该方法的可靠性. 具体方法见文献[18].

本文以 40 a 滑动平均作为初始序列, 其长度为 2445 a (从 464 BC~1980 AD). 建模时期为 464 BC~834 AD, 校验时期为 835~1980 AD, 预测期为 1981~2134 AD, 观测检验期为 1957~2006 AD (图 5). 在观

测检验期内, 我们使用青藏高原中东部 7 站 (德令哈、都兰、格尔木、拉萨、那曲、大柴旦、班戈) 年平均温度序列对预测的趋势进行对比. 本文用于校验的序列长度近 1200 年, 预测理论一般认为预测原序列的十分之一是可信的^[17], 因此本文选取未来 120 a 作为预测时段, 采取周期法(recurrent)进行, 使预测结果的均方误差达到最小. 计算均方误差为 0.74.

预测结果显示, 青藏高原中东部地区 1980 AD 以后的温度趋势持续上升, 在 2006 AD 前后达到升温最高点, 此后, 温度转为下降趋势, 到 2068 AD 前后温度下降到谷底, 其时温度和 2485 年来的平均温度相当(约 2.12℃). 2068 AD 后再次升温至 2088 AD. 这个预测结果与钱维宏等人^[60]的预测结果有所不同. 后者认为近期开始降温, 至 2035 AD 达到温度的低谷, 之后再次升温, 到 2068 AD 前后到达一个新的温度高度.

本文 1957~2006 AD 期间温度趋势预测序列基本反映了实际观测的年均温度序列的趋势(图 6), 表明预测趋势有一定可靠性.

3 结论

本文主要根据树轮时间序列变化和周期分析获得了青藏高原中东部过去 2485 年来温度变化的幅度、速率、周期和可能原因, 并尝试对未来 120 年温度变化趋势进行预估.

全球性的气候事件(如中世纪暖期、小冰期等)也在青藏高原中东部地区同步出现. 最大的温度变幅和速率都发生在“东晋事件”期间, 而非 20 世纪后半期. 太阳活动的千年尺度周期决定了温度趋势变化的长期走向, 百年尺度周期则控制了温度变化的幅度, 千年尺度周期对百年尺度的周期有调控作用, 太

图 5 青藏高原中东部未来 120 年温度预估序列

蓝色, 初始序列; 橙色, 建模期, 464 BC~834 AD; 紫色, 校验期, 835~1980 AD; 红色, 预估期, 1980~2134 AD

图6 青藏高原7站平均年均温度观测值(灰线)与预估的温度趋势(黑线)对比(1957~2006 AD)

7 站包括: 德令哈、都兰、格尔木、拉萨、那曲、大柴旦、班戈

阳黑子活动极小期对应冷期出现。根据周期分析方法所获得的青藏高原中东部地区温度预估结果显示, 2006 AD 前后达到升温最高点, 此后, 温度转为下降

趋势, 2068 AD 前后温度下降至谷底, 2068 AD 后再次升温。

从图3所示的升温600余年、降温600余年的规律来看, 此次升温从小冰期至现在经历了400年左右, 一个完整的周期还未完成, 也即温度可能还将有200年左右的上升趋势。但这并不排除温度会在百年尺度周期控制下出现阶段性降低。

如此看来, 太阳活动显然对青藏高原中东部地区气温变化有相当重要影响, 但由于青藏高原地区气温与全球均温变化的定量关系尚不清楚; 并考虑到近代温暖期气候控制因子的获得, 除周期分析方法外, 很可能还存在其他不确定的途径和方法。因此, 今后有必要加强工业革命以来大气 CO_2 浓度增加导致的全球增温现象等的控制因子研究。

致谢 感谢许新国、陶建国、辛峰、李特尔等在研究工作中给予的帮助。

参考文献

- 1 Hu F S, Kaufman D, Yongji S, et al. Cyclic variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic. *Science*, 2003, 301: 1890–1893
- 2 Ma L H. Thousand-year cycle signals in solar activity. *Solar Phys*, 2007, 245: 411–414
- 3 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257–1266
- 4 Dansgaard W, Johnsen H B, Clausen D, et al. North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. In: Hansen F E, Takahashi T, eds. *Climate Processes and Climate Sensitivity*. Washington DC: American Geophysical Union, *Geophys Monogr*, 1984, 29: 288–298
- 5 施雅风. 2000 年记录与全球变化研究. *第四纪研究*, 1997, 1: 37–40
- 6 Yao T D, Duan K Q, Thompson L G, et al. Temperature variations over the past millennium on the Tibetan Plateau revealed by four ice cores. *Ann Glaciol*, 2007, 46: 362–366
- 7 Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. U-series dating of dead Porites corals in the South China sea: Evidence for episodic coral mortality over the past two centuries. *Quat Geochronol*, 2006, 1: 129–141
- 8 Tan M, Liu T S, Hou J Z, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1617–1620
- 9 Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record. *Science*, 2008, 322: 940–942
- 10 Xiao J L, Wu J T, Si B, et al. Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai lake of Inner Mongolia. *Holocene*, 2006, 16: 551–560
- 11 张德二, 李红春, 顾德隆, 等. 从降水的时空特征验证季风与中国朝代更替之关联. *科学通报*, 2010, 55: 60–67
- 12 Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, et al. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2006, 17: 579–592
- 13 刘禹, 安芷生, Linderholm H W, 等. 青藏高原中东部过去 2485 年以来温度变化的树轮记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 166–176
- 14 Cook E R, Esper J, D'Arrigo R D. Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 2063–2074
- 15 刘禹. 树轮与冰芯反映的南北半球高海拔地区温度变化之遥相关. *地球环境学报*, 2010, 1: 100–104

- 16 Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers Geosci*, 2002, 28: 421–426
- 17 Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A, et al. *Analysis of Time Series Structure*. Washington DC: CHAPMAN & HALL, CRC, Boca Raton, 2001. 1–305
- 18 刘禹, Vladimir Shishov, 史江峰, 等. 内蒙古西部贺兰山和东部白音敖包未来 20 年降水趋势预测. *科学通报*, 2004, 49: 270–274
- 19 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步探索. *考古学报*, 1972, 1: 168–189
- 20 Briffa K R. Annual climate variability in the Holocene: Interpreting the message of ancient trees. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 87–105
- 21 Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 2002, 295: 2250–2253
- 22 Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 2005, 433: 613–617
- 23 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知. *气候变化研究进展*, 2007, 3: 63–73
- 24 王会昌. 2000 年来中国北方游牧民族南迁与气候变化. *地理科学*, 1996, 16: 274–279
- 25 Grootes P M, Stuiver M. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10-3 to 105-year time resolution. *J Geophys Res*, 1997, 102: 26455–26470
- 26 Mann M E. Little Ice Age. In: Munn T, ed. *Encyclopedia of Global Environmental Change*. London: John Wiley and Sons Ltd, 2002, 1: 504–509
- 27 洪业汤, 刘东生, 姜洪波, 等. 太阳辐射驱动气候变化的泥炭氧同位素证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 527–531
- 28 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在 21 世纪将怎样变化? *科学通报*, 2010, 55: 1532–1537
- 29 Cook E R, Meko D M, Stockton C W. A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bi-decadal drought rhythm in the western United States. *J Clim*, 1997, 10: 1343–1356
- 30 Baldwin M P, Gray L J, Dunkerton T J, et al. The quasi-biennial oscillation. *Rev Geophys*, 2001, 39: 179–229
- 31 刘禹, 马利民, 蔡秋芳, 等. 依据陕西秦岭镇安树木年轮重建 3–4 月份气温序列. *自然科学进展*, 2001, 11: 157–162
- 32 刘禹, 马利民, 蔡秋芳, 等. 采用树轮稳定碳同位素重建贺兰山 1890 年以来夏季(6–8 月)气温. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 667–674
- 33 D'Arrigo R, Mashig E, Frank D, et al. Temperature variability over the past millennium inferred from Northwestern Alaska tree rings. *Clim Dyn*, 2005, 24: 227–236
- 34 勾晓华, 邓洋, 陈发虎, 等. 黄河上游过去 1234 年流量的树轮重建与变化特征分析. *科学通报*, 2010, 55: 3236–3243
- 35 丁裕国, 余锦华, 施能. 近百年全球平均气温年际变率中的 QBO 长期变化特征. *大气科学*, 2001, 25: 89–102
- 36 Raspopov O M, Dergachev V A, Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeo-climatic data in high latitudes. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 209: 127–139
- 37 Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 1994, 367: 723–726
- 38 Kloosterboer-van Hove M L, Steenbrink J, Visscher H, et al. Millennial-scale climatic cycles in the early Pliocene pollen record of Ptolemais, northern Greece. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 229: 321–334
- 39 陈发虎, 吴海斌, 张家武, 等. 末次冰消期以来兰州地区冬季风变化研究. *第四纪研究*, 1999, 4: 306–313
- 40 Isono D, Yamamoto M, Irino T, et al. The 1500-year climate oscillation in the midlatitude North Pacific during the Holocene. *Geology*, 2009, 37: 591–594
- 41 Sirocko F, Garbe-Schönberg D, McIntyre A, et al. Teleconnection between the subtropic monsoons and high-latitude climates during the last Deglaciation. *Science*, 1996, 272: 526–529
- 42 许靖华. 太阳、气候、饥荒与民族大迁移. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 366–384
- 43 Zhou W J, Lu X F, Wu Z K, et al. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoige Plateau and AMS radiocarbon dating. *Chinese Sci Bull*, 2002, 47: 66–70
- 44 刘嘉麒, 吕厚远, Negendank J, 等. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性. *科学通报*, 2000, 45: 1190–1195
- 45 Braun H, Christl M, Rahmstorf S, et al. Possible solar origin of the 1470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature*, 2005, 438: 208–211
- 46 Eddy J A. Climate and the changing sun. *Clim Change*, 1977, 1: 173–190
- 47 Sonett C P, Finney S A, Berger A. The spectrum of radiocarbon. *Phil Trans R Soc London*, 1990, 330: 413–426
- 48 Damon P E, Sonnett C P. Solar and terrestrial components of the atmospheric ^{14}C variation spectrum. In: Sonett C P, ed. *The Sun in Time*. Tucson: Arizona University Press, 1991. 360–388
- 49 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar Geol*, 1999, 156: 245–284

- 50 Cook E R, Buckley B M, D'Arrigo R D, et al. Warm-season temperatures since 1600BC reconstructed from Tasmanian tree rings and their relationship to large-scale sea surface temperature anomalies. *Clim Dyn*, 2000, 16: 79–91
- 51 Hodell D A, Brenner M, Curtis J H, et al. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. *Science*, 2001, 292: 1367–1370
- 52 Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 ka ago. *Nature*, 2001, 411: 290–293
- 53 Agnihotri R, Dutta K, Bhushan R, et al. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 521–527
- 54 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, 300: 1737–1739
- 55 Zhong W, Wang L G, Tyip T, et al. Possible solar forcing of climate variability in the past 4000 years inferred from a proxy record at the southern margin of Tarim Basin. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49: 1190–1195
- 56 Delmonte B, Petit J R, Krinner G, et al. Ice core evidence for secular variability and 2002 year dipolar oscillations in atmospheric circulation over East Antarctica during the Holocene. *Clim Dyn*, 2005, 24: 641–654
- 57 Xu H, Hong Y T, Lin Q H, et al. Temperature responses to quasi-100-yr solar variability during the past 6000 years based on $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose in Hongyuan, eastern Qinghai-Tibet plateau, China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 230: 155–164
- 58 Raspopov O M, Dergachev V A, Esper J, et al. The influence of the de Vries (~200-year) solar cycle on climate variations: Results from the central Asian Mountains and their global link. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2008, 259: 6–16
- 59 Ogurtsov M, Sonninen E, Hiltavuori E, et al. Variations in tree ring stable isotope records from northern Finland and their possible connection to solar activity. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2010, 73: 383–387
- 60 钱维宏, 陆波. 千年全球气温中的周期性变化及其成因. *科学通报*, 2010, 55: 3116–3121
- 61 Usoskin I G, Solanki S K, Schüssler M, et al. Millennium-scale sunspot number reconstruction: evidence for an unusually active sun since the 1940s. *Phys Rev Lett*, 2003, 91, doi: 10.1103/PhysRevLett.91.211101