

千年尺度上冷暖变化的自相似特征研究*

葛全胜^{1,2} 方修琦^{2,3} 郑景云²

1. 兰州大学地理系, 兰州 730000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875

摘要 从历史文献和自然证据两方面的信息证明, 中国历史时期的冷暖变化在千年尺度上具有自相似特征, 其落后自相关在 1350 a 左右的长度上最为显著, 此 1350 a 重现周期包括了 4 个长度在百年以上的冷暖期: 持续 200~250 a 的暖期、150~200 a 的冷期、300~350 a 的暖期、550~600 a 的冷期, 每个冷暖期中包含若干个相对冷暖事件. 相对于 550~600 a 的冷期, 另 3 个阶段可合并为总体上以温暖为主的阶段, 这两大冷暖阶段之间以大幅度的快速升温或降温的方式实现状态的转换. 根据冷暖变化的 1350 a 的重现周期推断, 20 世纪暖期属持续时间长度为 200 多年的暖期, 在位相上与 570's~770's 的隋唐暖期相同, 其变化过程与 570's~770's 暖期十分相近, 但升温速率更快一些, 特别是 1980's~1990's 年的温度明显高于 1500's~1990's 的温度距平与 150's~650's 的温度距平的回归曲线, 这可能反映了人类活动对 20 世纪增暖的影响.

关键词 2000 a 冷暖变化 自相似特征 1350 a 周期 全球变暖

全球变化研究把十年至百年尺度上变化作为研究重点^[1], 但气候变化是不同尺度的周期变化相互叠加的结果. 因而要认识十年至百年尺度变化的特点, 必须以千年尺度上的变化为背景. 由于大多数高分辨率信息的序列长度相对较短, 而长序列的信息在分辨率上又相对较粗, 因此, 比较而言, 有关千年周期的研究在历史时期气候变化的研究中一直是一个薄弱环节. 最近国外学者分别从格陵兰的 GISP2 冰芯和 GRIP 冰芯、南极的东方站、北大西洋沉积、以及阿拉伯海沉积中发现 1450~1500 a 周期的存在, 并分别用岁差周期的谐波周期、大洋温盐环流、太阳活动等对此千年尺度周期进行解释^[2~7]. 上述有关千年周期的证据主要来自数万年的深海沉积和极地冰芯记录. 而陆地上有关此尺度周期的报道尚不多见.

利用历史文献记载, 作者最近重建了过去 2000 年我国东部地区冬半年分辨率为 30 a 的温度距平序列, 并据此对中国东部过去 2000 年冬半年的温度变化过程进行了初步分析^[8,9]; 作者还在综合分析过去 3000 年中国冷暖变化自然证据的基础上对过

去 3000 年中国的冷暖变化过程 and 变化阶段进行了定性划分^[10]. 本文拟以上述两项工作为基础, 分析我国历史时期的冷暖变化在千年尺度上的自相似特征, 为千年周期的存在提供进一步的佐证, 并探讨其对认识现代全球变暖的意义.

1 百年尺度冷暖阶段显示的千年自相似特征

从冷暖阶段认识千年尺度的自相似特征, 百年尺度的冷暖变化阶段是基础.

利用最近整理的历史文献记载, 作者重建了过去 2000 年我国东部地区冬半年分辨率为 30 a 的温度距平序列 (图 1)^[8,9], 据此将过去 2000 年划分为 7 个持续时间长度在百年以上的冷暖阶段. 其中温度高于 1951~1980 年的平均值、且持续时间超过百年的暖期有 4 个: 0's~200's, 570's~770's, 930's~1310's 及 1920's 以后; 较 1951~1980 年冷、且持续时间超过百年的冷期有 3 个: 210's~560's, 780's~920's, 1320's~1910's. 而且每个冷暖期也存在较明显的冷暖振动, 特别在 930's~1310's 的暖期还包含了 1110's~1190's 持续时间达

2002-04-29 收稿, 2002-06-18 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-314)及中国科学院地理科学与资源研究所创新前沿领域项目(CXI0G-A00-02)资助

E-mail: geqs@igsrr.ac.cn

90 a 的冷谷. 与竺可桢先生的结论对比^[11], 竺可桢先生所指出的魏晋南北朝冷期和明清小冰期分别对应于 210's~560's, 1320's~1910's 的冷期; 竺先生所指出的 1200AD 前后的南宋冷期则与 1110's~1190's 的冷谷相对应, 属中世纪暖期中的寒冷阶段; 780's~920's 的冷期为竺先生的序列所没有, 但有大量证据证明此冷期在中国东部是存在的, 且较为寒冷^{[8,12]1)}. 在公元前的 1000 年中, 受史料详细程度的限制, 尚难以准确地划分冷暖时段, 但已有的研究表明, 除文献 [11] 指出的西周 (1000BC 前后)冷期外, 在战国至西汉初 (350BC 前后)也存在一个冷期^{[13],1)}.

距今 3100~2700 a(1150~750BC)为冷期; 距今 2700~2500 a(750~550BC)为暖期; 距今 2500~2300 a(550~350 BC)为冷期; 距今 2300~1950 a 暖期(350~1 BC); 距今 1950~1400 a(1~550 AD)为冷期; 距今 1400~1150 a(550~800 AD)为暖期; 距今 1150~950 a(800~1000 AD)为冷期; 距今 950~650 a(1000~1300 AD)为暖期; 650~50 a(1300~1900 AD)为冷期; 此后进入 20 世纪暖期. 每个冷期和暖期中又可以进一步识别出相对温暖或寒冷事件(图 1)^[10].

将根据自然证据划分的冷暖期与根据历史文献重建的东部地区温度序列所划分的冷暖期相对比, 可以看出, 被依据历史文献确定为暖期的 0's~200's 时段, 在自然证据中表现为冷期中的温暖事件. 因此, 如果将根据文献序列所确定的 0's~200's 暖期作为冷期中的温暖事件来处理, 则应根据文献序列所确定的 210's~560's 冷期提前到 0's. 那么根据历史文献证据所划分的冷暖期与根据自然证据所划分的结果完全对应, 只是因自然证据的分辨率偏低而在起止时间上略有出入, 两个序列冷暖期中的暖事件或冷事件在时间上也基本相对应.

按表 1 所列方式对过去 3000 年的冷暖阶段进行归纳, 可以看出, 历史文献和自然证据均显示过去 3000 年的冷暖变化阶段存在显著的千年尺度的自相似特征, 其重现周期长度为 1300~1380a(表 1). 当然由于公元前 1000 年的证据在时间分辨率和定年准确性上存在一定的误差, 因此由历史文献和自然证据所确定的冷暖期的时间间隔存在微小差别.

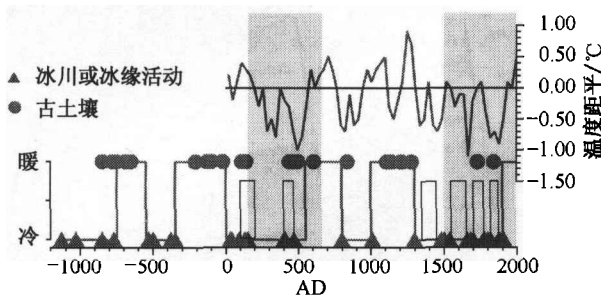


图 1 根据历史文献重建的中国东部地区过去 2000 年冬半年温度变化(上)^[8]与根据自然信息划分的中国过去 3000 年冷暖变化阶段(下)^[10]

根据最近 20 年发表的有关过去 3000 年中国冷暖变化的自然证据, 作者对过去 3000 年中国的冷暖变化过程和变化阶段进行了定性划分, 结果表明:

表 1 过去 3000 年我国冷暖阶段的划分^{a)}

冷暖阶段	时段/AD						各时段间隔
	自然证据 ^[10]	历史文献 ^[8,13]	自然证据 ^[10]	历史文献 ^[8,13]	自然证据 ^[10]	历史文献 ^[8,13]	
冷期	-1350~-750	-1000's 前后	1~550	0's~560's	1300~1900	1320's~1910's	1300~1350a
冷期			150 前后	0's~200's	1450 前后	1380's~1400's	1300~1380a
中暖事件	-1050 前后		450 前后	360's~380's	1600 前后	1500's~1550's	
暖期	-850 前后		450 前后	360's~380's	1750 前后	1710's~1760's	1300a
暖期	-750~-550	-600's 前后	550~800	570's~770's	1900~	1920's~	1300~1350a
暖期	-650 前后		650 前后	600's~620's	1960's	1950's~1970's	1300~1350a
中冷事件							
冷期	-550~-350	-350's 前后	800~1000	780's~920's			1350a
冷期	-420 前后		950 前后	840's~860's			1370a
中暖事件							
暖期	-350~1	-200's~0's	1000~1300	930's~1310's			1300~1350a
暖期	-310 前后		1070 前后	990's~1010's			1380a
中冷事件	-250 前后		1130 前后	1110's~1190's			1380a
事件	-150 前后		1200 前后				1350a

a) 根据历史文献证据划分的 0's~200's 的暖期按冷期的温暖事件处理

1) 满志敏. 中国历史时期气候变化研究. 济南: 山东教育出版社, 2002(待出版)

2 中国东部冬季温度变化过程显示的千年自相似特征

进一步分析过去 2000 年我国东部地区冬半年分辨率为 30 a 的温度距平序列(图 1), 可发现一个重要现象, 即该序列最后 510 a(1500's~1990's)的波动过程与 150's~650's 之间的波动过程十分相似(图 2), 两个时段相距时间间隔为 1350 a.

为定量估算这种相似程度, 本文计算了该序列的落后自相关系数. 具体做法为, 分别以从现代开始向前的 20 个时段数据(1410's~1990's, 600 a), 17 个时段数据(1500's~1990's, 即 510 a)和 13 个时段数据(1620's~1990's, 即 390 a)为子序列, 逐点(即每 30 a 间隔)向前滑动计算落后相关系数. 结果发现: 由上述 3 组数据生成的落后自相关系数序

列均在落后 1350 a 左右处的自相关系数达到最大. 其中 1500's~1990's 和 1620's~1990's 两个子序列落后 1350 a 处的相关系数分别达 0.72 和 0.71, 相关显著性超过 0.01% 的检验水平; 1410's~1990's 子序列在落后 1350 a 和 1380 a 处的相关系数为 0.45 和 0.47, 达到 0.05% 的显著性检验水平(图 3). 这种现象可能暗示着冷暖变化存在 1350 a 的周期, 但由于受序列长度只有 2000 a 的局限, 因此, 它无法被常规的周期识别方法(如功率谱分析方法)所揭示. 此外, 自相关系数序列在落后 210~240 a, 450~480 a, 690~720 a, 960~990 a 分别出现峰值, 虽然它们的自相关系数均未达到 0.05 的显著性检验水平, 但也说明: 在气候的百年际波动上, 双世纪(及其倍数)波动是最为突出的.

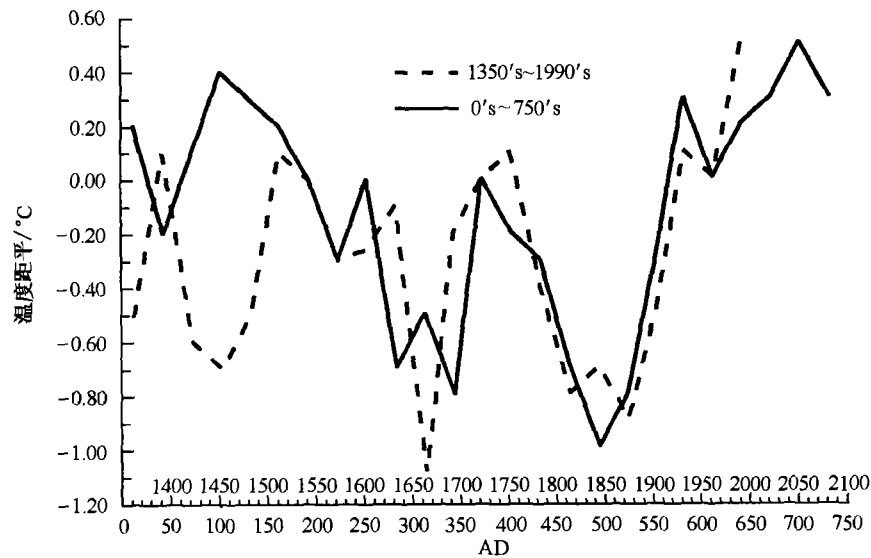


图 2 中国东部 1350's~1990's 的温度变化与 0's~640's 温度变化的对比

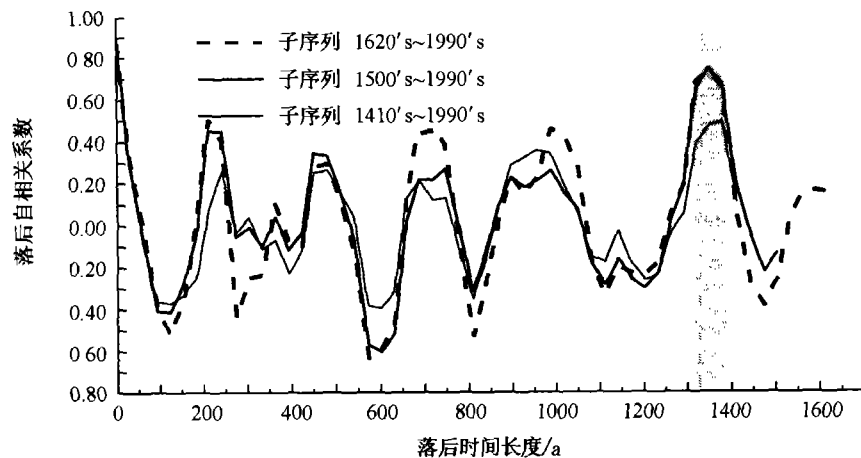


图 3 过去 2000 年中国东部温度变化的落后自相关系数序列

3 1350 a 自相似周期的结构

中国东部地区过去 2000 年冬半年的温度序列和根据自然证据所划分的过去 3000 年我国冷暖变化阶段均显示, 1350 a 的重现周期包括了 4 个长度在百年以上的冷暖期: 持续 200~250 a 的暖期、150~200 a 的冷期、350~400 a 的暖期和 550~600 a 的冷期, 每个冷暖期中包含若干个年代际的

相对冷暖事件. 中国东部地区过去 2000 年冬半年的温度序列覆盖了 1 个半周期的长度, 其中从 570's 到 1910's 构成了一个完整的 1350 a 周期旋回: 570's~770's 为暖期, 长度为 210 a; 780's~920's 为冷期, 长度为 150 a; 930's~1310's 为暖期, 长度为 390 a; 1320's~1910's, 长度为 600 a. 各冷暖期的气候基本特征如表 2.

表 2 1350 a 冷暖变化周期的结构及基本变化特征

冷暖期	起始时间	较 1950's~1970's 平均距平(°C)	气候基本特征
暖期	570's~770's (210 a)	+0.23	温暖, 冷暖振动幅度较小, 最冷 30 a 与最暖 30 a 相差 0.5°C. 在 600's~620's 存在一较弱的冷事件将暖期分为前后两阶段, 其中后一阶段的温暖程度及持续时间均超过前一阶段
冷期	780's~920's (150 a)	-0.50	寒冷, 含 760's~830's 和 870's~920's 两个冷谷, 850's 前后有短暂回暖; 冷暖振动幅度相对较小, 最冷 30 a 与最暖 30 a 相差 0.6°C
暖期	930's~1310's (390 a)	+0.18	温暖, 冷暖振动幅度相对较大, 最冷 30 a 与最暖 30 a 相差 1.4°C. 其中在 1110's~1190's 存在明显的冷谷, 暖期中不含此冷谷的平均温度距平为 0.33°C, 1020's~1100's 和 1200's~1280's 2 个温暖阶段的平均温度距平分别为 0.4 和 0.57°C. 1230's~1250's 为过去 2000 年中最暖的 30 a. 此外在 990's~1010's 存在弱冷谷
冷期	1320's~1910's (600 a)	-0.39	寒冷, 含 1320's~1370's, 1410's~1490's, 1560's~1700's, 1770's~1910's 四个冷谷, 寒冷程度呈逐渐增强的趋势; 但 1380's~1400's, 1500's~1550's, 1710's~1760's 相对偏暖. 冷暖振动幅度相对较大, 最冷 30 a 与最暖 30 a 相差 1.2°C

如果考虑 780's~920's 的冷期在寒冷程度上明显较 1320's~1910's 的冷期轻, 而把 780's~920's 看作前后两个暖期之间的波动, 则从 570's 到 1310's 的 750 a 以温暖为主, 而 1320's 到 1910's 的 600 a 以寒冷为主. 570's~1310's 期间包括 4 个主要暖峰和 3 个主要冷谷, 温度在波动中呈上升趋势, 增温率为 0.25°C/1000 a; 1320's~1910's 期间包括 3 个主要暖峰和 4 个主要冷谷, 温度在波动中呈下降趋势, 1320's~1910's 的降温率为 0.37°C/1000 a. 两大冷暖阶段以大幅度的快速升温或降温的方式实现状态的转换. 其中从冷阶段转为暖阶段的过程中, 480's~500's 至 570's~590's 的 90 a 内升高 1.3°C, 相当于 1.44°C/100 a; 1860's~1880's 至 1920's~1940's 的 60 a 内升高 1.0°C, 相当于 1.67°C/100 a; 在从暖阶段转为冷阶段的过程中, 1230's~1250's 至 1320's~1340's 的 90 a 之内出现了 1.4°C 的降温, 相当于 1.56°C/100 a.

4 从千年尺度的自相似特征看现代气候变暖

研究过去气候变化的重要目的之一是要从长期变化的角度来认识正在进行的全球变暖的程度及其原因. 1350 a 左右的冷暖变化重现周期为从长尺度气候

变化背景认识现代气候变暖问题提供了一个重要的途径.

过去气候变化中的暖期常被用作预测未来变暖的历史相似型. 在以往的研究中, 许多学者都注意到了 9~13 世纪的中世纪暖期, 并把它看作是未来气候变暖的最可能相似型. 但根据冷暖变化的 1350a 周期推断, 开始于 20 世纪初的这个暖期与 570's~770's AD 的隋唐暖期在变化过程上可能与中世纪暖期更相似, 属持续时间长度为 200 多年的暖期.

将 20 世纪暖期与 570's~770's 的暖期相对比可以发现, 两者存在相似的变化过程(图 2). 20 世纪初的增暖实质上是从寒冷阶段向温暖阶段转变的快速升温期, 它与 5 世纪末至 6 世纪的气候快速回暖是极为相似的, 只是 20 世纪初的升温速率更大一些. 1950's~1970's 的降温与 1980's 以来的迅速升温均有自然波动的背景. 根据 570's~770's 的变化趋势推断, 未来 50 年我国东部地区冬半年的温度还将进一步上升. 但 1980's~1990's 年的升温极其迅速, 其距平已与 570's~770's 暖期的最高值相当. 从 1500's~1990's 的温度距平(y)与 150's~650's 的温度距平(x)之间的散点图来看(图 4), 1980's~1990's 的温度值明显高于回归曲线:

$$y = 0.762118x - 0.0426837 (r = 0.72)$$

如果将回归曲线看作是温度自然变化的基准值的话,那么这种明显高于回归曲线的现象可能反映了人类活动所导致的温室效应对气候自然变化的影响,与IPCC的最新评估报告根据模式模拟得到的结果一致,即:因人类活动导致的温室效应作用在1950's以后日益增大^[14].

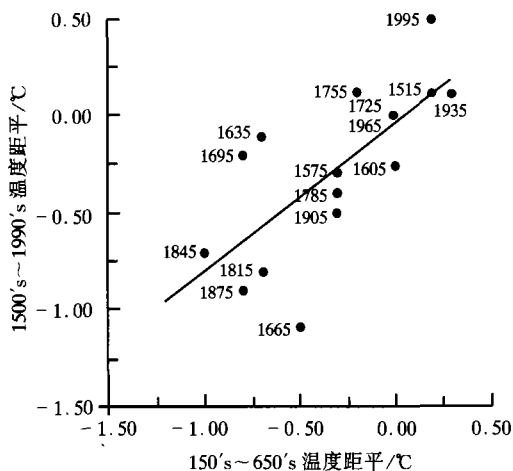


图4 1500's~1990's与150's~650's之间温度距平变化的相关关系

5 结论

(1) 从历史文献和自然证据两方面的信息均证明中国历史时期的冷暖变化在千年尺度上表现出明显的自相似特征,自相似的落后时间长度为1350 a左右(1300~1380 a),这种自相似性可能是千年长度变化周期的表现,与国外学者所讨论的1400~1450 a周期相对应,造成两者在时间上存在约50~100 a差别的原因有待进一步分析.其中值得注意的因素是,国外学者的1400~1450 a周期所依据的资料绝大多数是覆盖整个全新世、甚至10多万年的高分辨率自然信息,但其序列定年的精度不如本文所采用的根据历史文献重建的温度距平序列高;同时,作为一种准周期,其长度存在一定的变异,1400~1450 a周期是整个序列的平均值,如格陵兰GISP2冰芯中的1450 a周期,在全新世段(过去10000 a)记录中为 $(1374 \pm 502) \text{a}$ ^[3,6],与本文的分析结果基本一致.

(2) 1350 a的重现周期包括了相继出现的4个长度在百年以上的冷暖期:持续200~250 a的暖期、150~200 a的冷期、300~350 a的暖期、550~600 a的冷期,其中每个冷暖期中还包含若干个年代际的相对冷暖事件.进一步归并,则可将其分为2个长度为

600~700 a的冷暖阶段:其中在温暖阶段中,温度在波动中呈上升趋势,在寒冷阶段中,温度在波动中呈下降趋势,两大冷暖阶段以大幅度的快速升降温方式实现状态转换.转换速率为 $(1.44 \sim 1.67)^\circ\text{C}/100 \text{ a}$.

(3) 根据冷暖变化的1350 a的重现周期推断,开始于20世纪初的这个暖期与570's~770'sAD的隋唐暖期相同,属持续时间长度为200多年的暖期.20世纪暖期与570's~770's的暖期的变化过程十分相近.但可能是由于受到1950's以后因人类活动导致的温室效应作用日益增大的影响,1980's以后的升温速率明显加快.1980's~1990's年的温度已与570's~770's暖期温度的最高值相当,明显高于1500's~1990's的温度距平与150's~650's的温度距平的回归曲线.

参考文献

- Eddy J A. Past global changes project: Proposed implementation plans for research activities. Global Change Report No. 19, International Geosphere-Biosphere Programme. Sweden: Stockholm, 1992. 112
- Kerr A R. Climate: Ice rhythms—Core reveals a plethora of climate cycles. *Science*, 1996, 274: 499
- Mayewski P, et al. Major features and forcing of high-latitude northern hemisphere atmosphere circulation using a 110000-year-long glacioclimatic series. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 26345
- Sirocko F, et al. Teleconnection between the subtropical monsoon and high latitude climate during the last deglaciation. *Science*, 1996, 272: 526
- Burroughs W J. *Weather Cycles: Real or Imaginary?* Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 207
- Bond G, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257
- Gauthier J H. Unified structure in Quaternary climate. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(6): 763
- 葛全胜, 等. 过去2000年中国东部冬半年温度变化序列重建及初步分析. *地学前缘*, 2001, 9(1): 169
- 葛全胜, 等. 过去2000年中国东部冬半年的温度变化幅度研究. *第四纪研究*, 2002, 22(2): 166
- 葛全胜, 等. 中国过去3000年冷暖千年周期变化的自然证据及其集成分析. *地球科学进展*, 2002, 17(1): 96
- 竺可桢. 中国近5000年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 1973, 1: 168
- 满志敏. 关于唐代气候冷暖问题的讨论. *第四纪研究*, 1998, 1: 20
- 张丕远. *中国历史气候变化*. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 197~440
- Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/pub/tar/index.htm>.