

中国近百年地面温度变化自然因子的因果链分析

朱玉祥¹ 赵亮²

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 61741部队, 北京 100094)

摘要: 采用格兰杰 (Granger) 因果检验法, 从自然因素的角度, 即从天文因子 (太阳黑子数SSN) 和地球运动因子 (地极移动 X 方向和 Y 方向) 的角度, 对我国近百年地面温度 (TC) 的变化进行了归因分析。所得结果如下: 滞后1~11年内, SSN都不是TC的Granger原因; 对于TC和极移 X 方向, 当滞后6年时信度最高, 此时极移 X 方向是TC的Granger原因 (87%信度)。研究结果可能暗示, 极移 X 方向的变化可能会导致6年后中国地面气温的变化。

关键词: 天文因子, 地球运动因子, 气候变化归因, 中国地面温度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.006

The Causal Chain Analysis of Natural Factors for China Surface Temperature Variation during the Recent 100 Years

Zhu Yuxiang¹, Zhao Liang²

(1 China Meteorological Administration (CMA) Training Center, Beijing 100081
2 61741 Troops of PLA, Beijing 100094)

Abstract: The attribution analysis of China surface temperature(TC) in the recent 100 years is done from the angle of the astronomical factor(sunspot number, SSN) and the earth movement factor(polar shift x direction and y direction) by using Granger causality test. The results are as follows: (1) SSN is not the Granger cause of TC in all of 1 to 11 years lags; (2) when the lag is 6 years, confidence is the highest, at this time polar shift x direction is the Granger cause of TC (87% confidence); (3) when the lag is 12 years, TC is the Granger cause of the polar shift y direction, the confidence is 86%. The research results of the paper suggest that the change of polar shift x direction possibly results in the change of TC, and the change of TC possibly influences the change of the polar shift y direction.

Keywords: astronomical factor, earth movement factor, the attribution of climate change, China surface temperature

1 引言

气候变化归因是以某种程度的显著性水平, 建立有关因子变量与气候变量之间的因果关系的过程^[1]。在气候变化归因研究中最受关注的气候变量是温度, 特别是地面温度。近百年来全球气候变暖是一个不争的事实, 但有研究称近十几年全球气候变暖趋势明显减缓^[2-5]。IPCC第五次评估报告第一工作组科学报告^[6]称, 近10多年观测的平均温度落在气候模拟5%~95%包络线之下, 并称1998年以来气候变暖减缓的原因可以被近几年的低太阳活动、气候内部变率和模式响应误差的联合作用来解释。我国的温度变化既有与全球地面温度相一致的部分, 也有其自身特点, 因此, 有

必要重点对我国近百年气温变化原因进行研究。

近年来, 关于气候变化检测和归因的研究有了很大进展。从数学原理上发展了检测、归因技术, 还发展了针对气候系统特点的检测方法, 以期寻找气候变化的指纹。这些检测、归因技术大致可分为多元分析和贝叶斯推断两大类, 前者包括回归法、模态相关法等, 后者因能容纳不同来源的资料而受到重视, 两类方法各有优缺点^[7-8]。当用这两类方法做检测归因分析时, 需同时使用观测资料和数值模拟资料。由于没有足够长的受温室气体影响的观测资料来估算气候变量以及数值模拟的不确定性, 检测归因的结果常引发争议。而且这两类方法在对两个变量进行分析时并没有同时考虑其自身变化。

天文和地球运动因子是影响气候系统的基本因素。太阳作为离地球最近的恒星, 向地球提供着光和热, 是地球气候系统最基本的能量源, 其长期 (万年以上) 变化对地球气候的形成和演变有着重要影响, 这已达成广泛共识, 但在百年和十年这样相对较短的

收稿日期: 2013年11月25日; 修回日期: 2014年4月3日

第一作者: 朱玉祥 (1976—), Email: zhuyx@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB957804);

国家公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201406020);

国家自然科学基金资助项目 (41305131, 41375105)

时间尺度上,对气候的影响,尤其是对近100年来温度的影响和贡献,却存在较大争议^[9]。地球运动因子通过地球轨道的变化和摄动、地球自转速率变化、地极移动(简称极移)、地磁变化和火山活动等多种方式也会对气候变化产生影响。由于地球轨道参数的变化比较缓慢,一般被视为不变的因子,但如果处于其长时间尺度周期变化的临界点,则有可能在百年尺度、甚至年代际尺度上对气候产生显著影响。地极移动的年际变化也不大,但极移变形力势转换成单位质点的动能,其值可能远远超过单位质量大气的动能^[10]。地转速度的变化通过与大气和海洋的角动量交换可以影响天气气候,有研究表明地球自转与大范围地区大气活动中心、降水、气温、厄尔尼诺事件有密切联系^[11-15]。

过去的研究一般认为,天文与地球运动因子在一个非常长的时间尺度上才可能发生明显变化并且影响气候。因此在考虑近百年来全球气候急剧变暖的过程和归因时,一般把这些自然因子的影响作为一个小量不予考虑^[16-18]。然而,最近的一些研究表明,天文与地球运动因子对目前全球气温和降水有重要影响,不能忽略^[19-20],其变化有可能通过气候系统响应的非线性过程而放大其效能。那么对于中国近百年来地面温度的变化,天文和地球运动因子有没有影响呢?这是一个尚待阐明的问题。

关于人类活动对气候变化的影响,已经有了很多研究^[1]。因此,本文拟采用最近几年才开始在气候变化归因研究中使用的新方法——格兰杰因果分析法^[7-8],从自然因素的角度,主要是天文因子(太阳黑子数SSN)和地球运动因子(极移 x 方向和 y 方向)的角度,对中国近百年来地面温度的变化进行归因分析。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用的中国地面年平均温度资料(TC)由唐国利提供,时间为1880—2011年,资料建立方法可参考文献^[21]。所选的因子为太阳黑子数(SSN,时间为1880—2011年)和地球极移(x 和 y 方向,时间为1893—2011年)。它们的时间序列见图1。

2.2 方法

本文采用的方法是最近几年才开始在气候变化归因研究中使用的格兰杰因果分析法^[7]。相比于其他归因方法,格兰杰因果检验(Granger causality test)既考虑变量间的相互关系又考虑其自身变化。这种对两个事件序列之间因果关系的检验是由Granger在经济学中提出的^[22],因此称为格兰杰因果分析法,格兰杰也

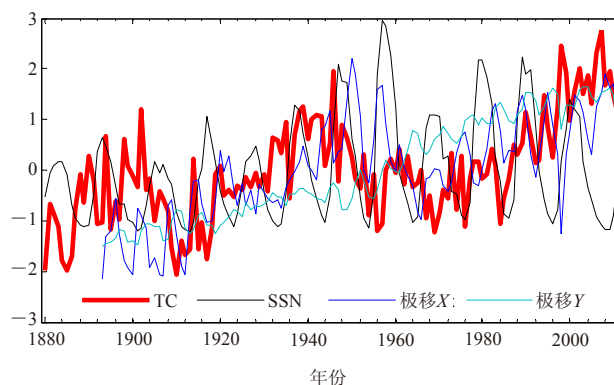


图1 中国地面年平均温度TC与SSN极移(x 方向)和极移(y 方向)标准化序列

因此或得了诺贝尔经济奖。

格兰杰检验的基本出发点是两个变量 x 与 y 高度相关,但不一定存在因果关系。它们之间可能有其它因素存在,使 x 与 y 之间表现出协同变化趋势,如小树生长与小孩长高。因此,需要对相关变量进行因果关系检验。

格兰杰因果分析法的基本原理如下:

从统计学的角度,因果关系可以用概率密度或概率分布函数来表示:在所有其他事件不变的条件下,如果一个事件A的发生或不发生对另一个事件B发生的概率有影响,并且这两个事件在时间上又有先后顺序(A前,B后),那么可以说A是B的原因。

设两个时间序列为 $X=\{x_t\}$ 和 $Y=\{y_t\}$, $t=1,2,\dots,N$, N 为所用资料的样本量。格兰杰因果分析法可以判断变量 X 是否能影响变量 Y 。若能,则认为 X 能导致 Y , X 是 Y 的原因;反之,则认为 X 不能导致 Y , X 不是 Y 的原因。检验标准是判断F统计量的计算值 P 是否大于某个显著性水平 α 下F标准分布的临界值。在统计检验中,一般来说,原假设 H_0 和备择假设 H_1 是不对等的, H_0 是受保护的假设,没有充分证据是否定不了的,或者说没有充分证据是不会接受备择假设 H_1 的。因此,往往把常规的,已存在的现象写在受保护的原假设 H_0 中,而把要研究的看法或猜想写成备择假设 H_1 。所以,在本研究中原假设为 X 不能导致 Y ,即 X 不是 Y 的格兰杰原因。若 $P<\alpha$,则拒绝原假设,即 X 不能导致 Y 的原假设不成立, X 是 Y 的格兰杰原因。

要严格确定因果关系,必须针对完整的信息集进行研究,也就是说,要得出“ A 是 B 的原因”,必须考虑论域中的所有事件。因此,格兰杰最早提出的因果关系定义,是建立在完整信息集以及发生时间的先后顺序基础上,根据条件分布函数进行判断。由于众所周知的原因,根据样本来估计分布函数是非常困难

的, 于是退而求其次, 只验证变量的数学期望是否相等, 即:

$$E(Y_{n+1} | \Omega_n) \neq E(Y_{n+1} | (\Omega_n - X_n)) \quad (1)$$

式中, E 为数学期望, Ω_n 为到 n 时刻为止能获得的所有因子集, X_n 为到 n 时刻为止所有的 X_t , 则 $\Omega_n - X_n$ 为到 n 时刻为止除 X_n 之外的所有因子。称满足(1)式的 X 和 Y 为均值因果关系。还有一种方法是考察预报误差, 其思路与Akaike信息量准则^[23]类似, 验证 X 的出现是否能减小对 Y_{n+1} 的预报误差, 即:

$$\sigma^2(Y_{n+1} | \Omega_n) < \sigma^2(Y_{n+1} | (\Omega_n - X_n)) \quad (2)$$

式中, $\sigma^2(Y | \Omega_n)$ 为在给定信息集下, 对 Y 的预测误差的方差, $\sigma^2(Y | (\Omega_n - X_n))$ 为没有 X 情况下对 Y 的预测误差。

如果式(2)成立, 变量 X_n 的存在能够显著的减少对 Y_{n+1} 预测误差的方差(或者说能够显著的改变对 Y_{n+1} 的预测精度), 那么就可以认为 X 对 Y 有因果性。

统计学上常用残差平方和来表示预报误差, 建立 X 和 Y 的回归方程, 通过假设检验(F检验)来检验 X 的回归系数为零的原假设是否成立, 这就是格兰杰因果检验的常用方法。

所建立的回归方程为:

$$y_t = \sum_{i=1}^k \alpha_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^k \beta_i x_{t-i} + e_t \quad (3)$$

式中, k 为最大滞后阶数, e_t 为误差项, α_i 和 β_i 分别为 X 和 Y 的回归系数。上式包括自回归和多元线性回归, 而实际上只包含一个因变量和一个自变量。

原假设 H_0 为: X 不构成对 Y 的因果性, 即 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$

在原假设成立的条件下,

$$F = \frac{(SSE_r - SSE_m)/k}{SSE_m/(N-2k)} \sim F(k, N-2k) \quad (4)$$

式中, SSE_r 为不考虑 X 情况下建立 Y 的自回归时的残差平方和, SSE_m 为考虑 X 情况下建立 Y 的自回归时的残差平方和。

若 $F > F_a$, 则否定原假设, 认为 X 能导致 Y , 即 X 是 Y 的原因。其中, F_a 为显著水平取 a 时的 F 值。

其实, 格兰杰因果分析法主要看现在的 Y 能够在多大程度上被过去的 Y 解释, 然后再看加入 X 的滞后值是否能提高解释程度。如果加入 X 后能对 Y 的解释程度有显著提高, 那么就说 X 是 Y 的格兰杰原因。

需要指出的是, 随机变量只有为平稳时间序列时才能进行格兰杰因果检验。因为如果随机变量为非平稳序列, 进行格兰杰检验做回归时有可能出现伪回归, 从而可能导致错误结论。因此, 做格兰杰因果检

验之前应当先对时间序列的平稳性进行检验。如果变量是非平稳序列, 需要对变量进行差分或对数变换, 把变量变为平稳序列。

3 平稳性分析

首先必须检验被分析序列是否平稳即是否存在单位根。判别的常用方法是ADF (Augmented Dickey-Fuller) 检验。在ADF检验中, 单位根检验的回归方程为:

$$\text{模型1: } \Delta x_t = \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t$$

$$\text{模型2: } \Delta x_t = \alpha + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t$$

$$\text{模型3: } \Delta x_t = \alpha + \beta t + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t$$

模型3中的 t 是时间变量, 代表了时间序列随时间变化的某种趋势(如果有的话)。原假设都是 $H_0: \delta=0$, 即存在一个单位根。模型1与另两种模型的差别在于是否包含有常数项和趋势项。

实际检验时从模型3开始, 然后是模型2, 模型1。何时检验拒绝零假设, 即原序列不存在单位根, 为平稳序列, 何时停止检验。否则, 就要继续检验, 直到检验完模型1为止。一个简单的检验是同时估计出上述三个模型的适当形式, 然后通过ADF临界值表检验原假设 $H_0: \delta=0$ 。只要其中有一个模型的检验结果拒绝了原假设, 就可以认为时间序列是平稳的。当三个模型的检验结果都不能拒绝原假设时, 则认为时间序列是非平稳的。这里所谓的模型的适当形式就是在每个模型中选取适当的滞后差分项, 以使模型的残差项是一个白噪声, 本文ADF检验的实际操作中滞后差分项个数的选择是以Durbin-Watson (DW) 值接近2为标准的。DW统计量通过确定两个相邻误差项的相关性是否为零来检验回归残差是否存在自相关, 越接近2, 说明自相关越小。

(1) TC的ADF检验: 对1880—2011年的TC进行ADF检验, 结果表明, $P=0.3218$, 所以接受原假设,

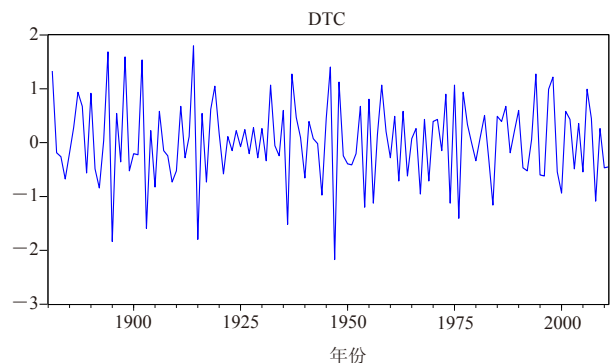


图2 TC的一阶差分 (DTC) 标准化序列

即序列TC有一个单位根，为非平稳序列。于是，对TC进行一阶差分（DTC），如图2所示。对DTC进行ADF检验，结果表明DTC是平稳的。

(2) SSN的ADF检验：检验结果表明，SSN是平稳的。

(3) 极移 x 方向和 y 方向的ADF检验：极移 x 方向和 y 方向都为非平稳序列，故对它们做一阶差分，再进行ADF平稳性检验，结果表明它们的一阶差分都变为平稳序列。

4 格兰杰因果检验结果分析

4.1 DTC与SSN

因为TC的一阶差分（DTC）和SSN是平稳的，所以对DTC与SSN做格兰杰因果检验。图3是它们的标准化时间序列。对格兰杰检验结果进行分析，发现滞后1~11年内， P 值都未小于0.05，所以，滞后1~11年内SSN都不是DTC的格兰杰原因。

4.2 TC与极移 x 方向和 y 方向的格兰杰因果检验结果分析

TC与极移 x 方向和极移 y 方向的Pearson相关系数分别为0.45和0.49。但这种高相关并没有考虑因子间的时序性，也并不能说明它们之间一定存在因果关系，因为不能排除有别的因素存在，使它们之间显示出协同变化趋势^[7]，况且，Pearson相关系数本身也存在很大的局限性^[24]。这种情况下，可以采用格兰杰因果检验来检测它们之间的因果关系。

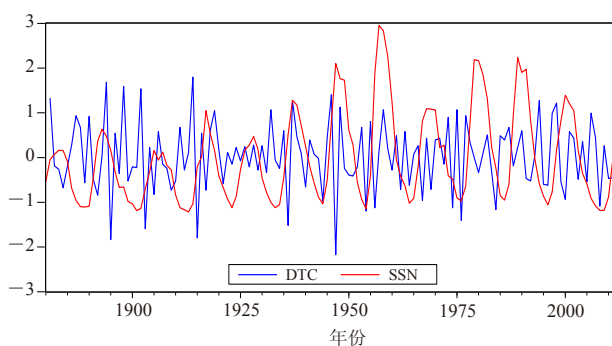


图3 DTC与SSN标准化序列

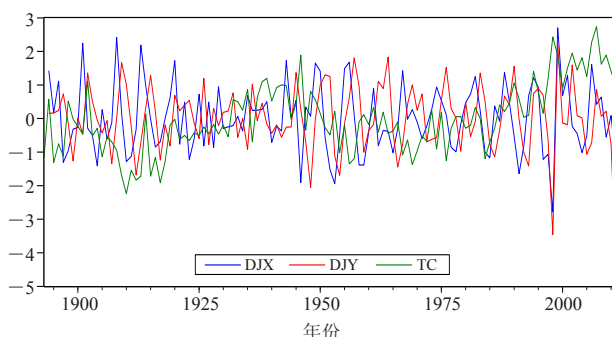


图4 极移一阶差分（DJX和DJY）和TC标准化序列

表1 极移与TC的格兰杰因果检验最优滞后期 P 值

| 原假设 | 最优滞后期/年 | 样本数 | F统计量 | P值 |
|---------------|--------------|-----|------|------|
| DJX不是TC的格兰杰原因 | 6 | 112 | 1.70 | 0.13 |
| TC不是DJX的格兰杰原因 | 无通过信度检验的F统计量 | | | |
| DJY不是TC的格兰杰原因 | 无通过信度检验的F统计量 | | | |
| TC不是DJY的格兰杰原因 | 无通过信度检验的F统计量 | | | |

经ADF检验，1893—2011年，TC为平稳序列，极移 x 方向和 y 方向都为非平稳序列，后两者一阶差分（DJX和DJY）都变为平稳序列。图4是DJX、DJY和TC时间序列。故对DJX和DJY分别与TC做格兰杰因果检验（表1），可以看出，TC滞后极移 x 方向（DJX）6年时是最优滞后期，这时“DJX不是TC的格兰杰原因”的可能性最低（ $P=0.13$ ），即在13%的显著性水平下拒绝原假设，这表明在年际尺度上，DJX是TC的格兰杰原因（信度87%）；另一方面，TC不是DJX的格兰杰原因，因为没有通过检验的F统计量。而极移 y 方向（DJY）不是TC的格兰杰原因，因为无通过检验的F统计量；反过来，TC不是DJY的格兰杰原因，因为在DJY滞后TC 1~11年内，没有通过检验的F统计量。因此，格兰杰因果检验暗示极移 x 方向的变化在可能会导致6年后中国气温变化。

地极移动属于地球物理因素，亦称地学因素，受地球的构造及其运动的特点所制约。地极坐标总是不断变化的，围绕其“平均极”描述螺旋状的复杂曲线。综合的地极移动振幅周期为6~7年，有“极潮”之称^[25]。地极移动对天气气候变化的影响机制，目前的研究还不够成熟。一种理解是，当地极发生变化时，引起了地球离心力的变化，其积分值是相当大的，因而造成了地球上大气环流和空气质量输送的变化，于是天气气候也产生相应的变化。也有研究从地极移动引起地球变形力的角度考察其对大气运动的影响。总之，地极移动可以看作大气环流变化的外在动力因子之一，它与热力因子和其他动力因子共同作用于大气，并影响大气的变化。影响中国气温的直接因素是大气环流，地极移动如何影响大气环流，并最终影响中国气温，需要进一步深入研究。

5 结论与讨论

本文采用格兰杰因果检验法，从天文因子（太阳黑子数SSN）和地球运动因子（极移 x 方向和 y 方向）的角度，对我国近百年地面温度（TC）的变化进行了归因分析，结果如下：

(1) SSN不是中国近百年地面温度变化的格兰杰原因；

(2) 对于TC和极移 x 方向，当滞后6年时信度最高，此时极移 x 方向是TC的Granger原因（87%信

度)，而TC不是极移 x 方向的Granger原因。

本文的研究结果可能暗示，极移 x 方向的变化可能会导致6年后中国气温变化。需要指出的是， P 值是用观测值计算得到的检验统计量（本文中为 F 统计量）的特定概率，为不利于原假设 H_0 （或与原假设相反）的全部其他可能值发生的概率。给出一个假设检验的 P 值而不只是在一个特定检验水平拒绝/不拒绝的决策包含更多的信息，因为 P 值传递了原假设被拒绝或不被拒绝的信心^[24]。本文中在13%的显著性水平上拒绝原假设（DJX不是TC的格兰杰原因），意指拒绝这个原假设犯错误的可能性为13%。

已经有不少研究证实了格兰杰因果分析法用于气候变化归因的有效性^[1, 7, 26]。本研究从天文和地球运动因子的角度，采用格兰杰分析法对中国近百年温度变化的原因进行了分析，也得到了创新性结论。但需要指出的是，为了满足实际计算的可行性，目前实际使用的格兰杰因果检验的计算操作与Granger最初的定义已有所偏离，实际观测资料也不可能完全满足所要求的统计条件，因此得到的结果可能存在一定程度的不确定性。换言之，本文所得到的格兰杰因果关系还需从物理机理角度进行深入分析，将来还需要进行数值模拟研究。另外，影响我国地面温度变化的原因是极为复杂的，还有很多其他因子对我国地面温度变化产生影响，比如人类活动（CO₂、气溶胶等）、火山爆发等，本文的分析中没有涉及这些因子。但无论如何，本文用格兰杰因果分析法，从天文和地球运动因子的角度，对中国近百年地面温度变化的归因分析，对认识我国气候变化的原因提供了有益的线索。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Fyfe J C, Gillett N P, Zwiers F W. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 767-769.
- [3] Kerr R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit. *Science*, 2009, 326: 28-29.
- [4] Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? In state of the climate in 2008. *BAMS*, 2009, 90 (8): S22-S23.
- [5] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 501: 403-407.
- [6] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [7] 曹鸿兴, 郑艳, 虞海燕, 等. 气候检测与归因的格兰杰检验法. *气候变化研究进展*, 2008, 4(1): 37-41
- [8] 孙颖, 尹红, 田沁花, 等. 全球和中国区域近50年气候变化检测归因研究进展. *气候变化研究进展*, 2013, 9(4): 235-245
- [9] 赵亮, 徐影, 王劲松, 等. 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展. *气象科技进展*, 2011, 1(4): 37-48
- [10] 彭公炳, 陆巍, 殷延珍. 气候及其环流因子对地球自转速度变化的若干响应. *气象学报*, 1982, 40(2): 209-218.
- [11] 彭公炳, 陆巍. 大气环流演变与地球转动不均匀性. *中国科学A辑*, 1981, 24(9): 1126-1136.
- [12] 彭公炳, 陆巍. 气压场和大气活动中心对地极移动的若干响应. *地理学报*, 1981, 36(1): 59-69.
- [13] 黄玫, 彭公炳, 沙万英. 地球自转速率变化影响大气环流的事实及机制探讨. *地理研究*, 1999, 18(3): 254-259.
- [14] 韩延本, 赵娟, 李志安. 地球自转速率的年际变化与厄尔尼诺事件. *科学通报*, 2001, 46(22), 1858-1861.
- [15] 钱维宏, 丑纪范. 地气角动量交换与循环. *中国科学D辑*, 1996, 26(1), 80-86.
- [16] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289: 270-277.
- [17] Cubasch U, Voss R. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Science Reviews*, 2000, 94(1-2): 185-198.
- [18] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, et al. Solar forcing of regional climate change during the maunder minimum. *Science*, 2001, 294 (5549): 2149-2152.
- [19] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar Influences on Climate. *Rev Geophys*, 2010, 48: 1-53.
- [20] Zhao L, Wang J S. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. *J Climate*, 2014, 27(8): 3043-3051.
- [21] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. *气候与环境研究*. 2005, 10(4): 791-798.
- [22] Granger C W. Developments in the study of co-integrated economic variables. *Oxford Bull Economics and Statistics*, 1986, 8 (3): 213-228.
- [23] Akaike H. A new look at the statistical identification model. *IEEE Trans Auto Control*, 1974, 19: 716-723.
- [24] Wilks D S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2nd Edition). Burlington, MA; London: Academic Press, Elsevier, 2006.
- [25] 彭公炳. 地极移动对气候变化的影响及其在气候预测中的应用. *气象科技资料*, 1973, 3(3): 54-58.
- [26] 郑祚芳, 张秀丽, 高华. 北京气候变暖与主要极端气温指数的归因分析. *热带气象学报*, 2012, 28(2): 277-282.