

曲维政, 黄 菲, 杜 凌等. 火山活动的周期性及其在若干气候要素中的反映. 地球物理学报, 2011, 54(3): 643~655, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 003

Qu W Z, Huang F, Du L, et al. The periodicity of volcano activity and its reflection in some climate factors. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(3): 643~655, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 003

火山活动的周期性及其在若干 气候要素中的反映

曲维政, 黄 菲, 杜 凌, 赵进平, 秦 婷, 曹 勇

中国海洋大学, 青岛 266003

摘 要 根据六百多年全球 VEI 5 级以上火山活动资料分析和谱分析以及与北半球地面气温、西太平洋高压 SLP、北大西洋高压 SLP 和北大西洋西风漂流区 SSTA 对比分析得知: (1) 全球强火山活动存在显著的 88 年左右和 100 年左右世纪尺度周期循环, 二者对于 VEI(i) 原序列方差贡献率达到 21.64%。还存在 33 年左右年代际尺度周期循环以及与太阳活动相联系的准 11 年周期; (2) 夏季七月西太平洋副热带高压 SLP 存在与火山活动基本一致的准 33 年周期波动, 分析认为这可能是对于火山活动准 33 年周期的响应; (3) 在北大西洋, 火山活动激发了夏季北大西洋副高 88 年周期波动、冬季 1 月北大西洋西风漂流区 SSTA 100 年周期振荡和夏季 7 月 SSTA 88 年周期振荡; (4) 分析认为北半球地面温度 88 年周期波动可能是对火山活动 88 年周期的响应。

关键词 火山活动, 周期性, 气候, 地面气温, 副热带高压, SST

DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 003

中图分类号 P468

收稿日期 2009-09-24, 2011-02-11 收修定稿

The periodicity of volcano activity and its reflection in some climate factors

QU Wei-Zheng, HUANG Fei, DU Ling, ZHAO Jin-Ping, QIN Ting, CAO Yong

Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract Based on the data analysis and spectra analysis of 600 years global VEI5 volcano activity and the comparison of the northern hemispheric ground temperature, the western pacific high pressure SLP, the northern Atlantic high pressure SLP and the northern Atlantic west wind drift SSTA, it is showed that: (1) the global strong volcano activities have an obvious cycle about 88-year and 100-year on century scale, a cycle about 33-year on decade scale and an 11-year cycle associated with solar activity; (2) the summer July west Pacific sub-tropic high pressure SLP has a 33-year period fluctuation accordant to the volcanic activity, it is considered to be the reflection of 33-year volcanic activity; (3) in the northern Atlantic, the volcanic activities inspire summer northern Atlantic sub-tropic high pressure 88-year cycle fluctuation, winter January northern Atlantic west wind drift SSTA 100-year fluctuation and summer July SSTA 88-year fluctuation; (4) analysis shows that the northern hemispheric ground temperature is the reflection of the 88-year cycle of volcanic activity.

Keywords Volcanic activity, Periodicity, Climate, Ground temperature, Sub-tropic high pressure, SST

1 引言

本文所说火山活动的准周期性是指全球 VEI 5 级以上火山爆发频率所呈现出的活跃期和沉寂期有规律地交替出现现象. 在研究火山活动气候效应的时候, 人们已经注意到 20 世纪 20~40 年代火山活动沉寂期对应着全球显著变暖, 而 50~70 年代全球火山活动较频繁时期对应着地球气温下降时期^[1~3], 甚至认为过去 200 万年间几乎每次冰期的建立和急剧变冷都和大规模火山爆发有关^[4], 就是说火山活动存在比较明显的活跃期和沉寂期, 阶段性比较清楚. 这个现象提示作者对六百多年来全球火山活动资料进行系统分析, 考察类似上述火山活动活跃期和沉寂期是否具有普遍性, 活跃期和沉寂期是否有规律地交替出现? 如果情况如此, 那么, 火山活动可能存在准周期性? 尽管火山爆发随机性很大, 可是大量随机事件也可能呈现周期现象, 正如单个光子落点是随机的, 而大量光子落点则呈现为概率波. 如果火山活动存在准周期性, 那么这种准周期性在近代地球气候变化中会有什么样反映? 本文将根据数百年全球火山活动资料就这个问题进行初步分析探索.

2 火山活动的周期成分

2.1 资料及资料处理

全球地面月平均气温距时间平序列是根据文献^[4]和美国国家大气研究中心和国家环境预报中心 NCAR/NCEP 再分析的全球垂直 17 个层次的月平均温度场格点资料构建. 海平面气压场资料和北大西洋表层水温资料取自英国哈得来中心网站(<http://hadobs.metoffice.com/hadslp2/>). 火山活动资料的处理: 为了便于把火山活动与温度序列进行比较和分析, 需要把离散的火山资料处理为连续的火山信息时间序列. 根据美国斯密森火山研究(Smithsonian Institution)所公布的 1000 年的火山活动年鉴(Volcanoes of the World Chronology)^[5]和美国地球物理数据中心火山爆发数据库(DUNBAR P. National geophysical data center volcano eruption database)以及美国海洋大气局地球物理的数据中心(NOAA, colorado USA: National geophysical data center, world data center A, 2006)等火山活动资料, 并且与一些文献资料作了比较核对, 确保资料的可靠性. 在斯密森研究

所公布的 1000 年的火山活动年鉴中, 读取 1400 年以来的火山尘幕指数 VEI(Volcano Explosivity Index)^[6~8] 大于等于 5 级的火山, 按火山活动指数 VEI 级别记录, VEI 5 级记为 5、VEI 6 级记为 6、VEI 7 级记为 7, 从而建立起火山活动指数时间序列^[8]. 为了突出低频振荡特征滤除随机扰动和低频振荡, 本文将火山活动指数距平序列作了连续 17 年滑动平均处理, 最后形成的火山活动指数时间序列记为 $VEI(i)$.

作者和一些研究均发现^[9,10], 火山活动记录越久远越不完全. 与冰芯分析资料对比发现, 古代火山记录有缺漏现象, 比如冰芯分析显示的 1810 年、1816 年和 1836 年等多次火山活动记录, 在火山年表中没有记载. 随着观测手段完备和通讯技术现代化, 以及对于火山活动关注程度提高, 20 世纪以后, 特别是 20 世纪 60 年代以后, 卫星遥感和雷达遥感构成了遍布全球的比较密集的观测网, 火山活动观测记录详细准确, 火山活动记录特别是中小火山活动记录明显增多. 本文采用如下方程滤除了记录中这种非火山活动自然原因的增长趋势:

$$VEI(i) = VEI(i) + 0.2, \quad i = 1, 2, \dots, 401;$$

$$VEI(i) = VEI(i) - 0.18, \quad i = 402, 403, \dots, 605.$$

2.2 火山活动的周期成分

根据 1400 年以来六百多年全球 5 级以上火山活动资料分析, 火山活动周期分布频域宽广, 世纪际尺度周期、年代际尺度周期、以及与太阳活动相联系的 22 年和 11 年左右周期都存在. 虽然作者手头有 1000 多年火山活动年鉴(Volcanoes of the World Chronology)资料, 考虑到年代越远中小火山活动资料可靠性越差, 所以本文的分析以 VEI 5 级以上火山爆发为主, VEI 4 级及以下火山活动资料作为较长周期分析的参考资料.

2.2.1 全球火山活动世纪际周期现象

为了考察全球 5 级以上火山活动周期性, 首先对 1400~2000 年年平均火山活动指数时间序列进行了功率谱分析, 并且完成信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验^[9]. 可以按如下计算公式计算各频域的周期谱 T_i 、振幅谱 A_i 和相谱 θ_i :

$$T_i = \frac{2m}{l}, \quad (1)$$

$$a_i = \frac{2}{T_i} \sum_{i=1}^n x_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}(i-1)\right), \quad (2)$$

$$b_i = \frac{2}{T_i} \sum_{i=1}^n x_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}(i-1)\right), \quad (3)$$

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad (4)$$

$$\theta_i = \text{tg}^{-1} \left(\frac{a_i}{b_i} \right), \quad (5)$$

式中 x_i 为样本资料,即年平均 VEI 距平值, i 为时间序号. 谱分析结果列于表 1.

表 1 1400~2000 年 5 级以上火山活动指数时间序列谱分析结果

Table 1 Results of spectra time analysis of the time sequence the volcanic activities with VEI grade over than 5 in 1400~2000 year

波数	功率谱	检验谱	振幅谱	周期谱	初相角
0	0.0006	3.6834	2.0000	∞	0.000
1	0.4740	0.1508	0.4054	88.0	2.200
2	0.1092	0.0389	0.1386	44.0	1.381
3	0.1531	0.0174	0.1715	29.0	0.599
4	0.0720	0.0099	0.0944	22.0	-0.060
5	0.0184	0.0063	0.0762	17.0	0.302
6	0.0218	0.0044	0.0338	14.0	0.013
7	0.0062	0.0033	0.0250	12.0	1.060
8	0.0099	0.0025	0.0144	11.0	-0.430
9	0.0082	0.0020	0.0041	9.0	-1.044
10	0.0080	0.0016	0.0043	8.0	0.627

由表 1 可以看到,1 波所对应的 88 年周期功率谱 0.4740 显著大于红噪声检验谱 0.1508,就是说 88 年周期通过了信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,并且谱值为全频域最大值,在谱图上显示为最高谱峰(图略),所以 88 年左右的周期是全球 5 级以上火山活动的世纪际尺度显著周期. 另外,3 波对应的 29 年周期和 8 波对应的 11 年周期也通过了信度 $\alpha=0.05$ 显著性检验,并且为谱峰,为年代际尺度显著性周期,就是说火山活动中蕴涵着太阳活动周期成分,说明太阳活动对火山活动存在一定程度激发作用.

由表 1 可知,88 年周期的振幅 $A=0.405$,初相角 $\theta_1=2.2$ (弧度,以下不再说明),则周期函数 $BO_{88}(i)$ 为

$$BO_{88}(i) = 0.405 \sin \left(\frac{2\pi}{88} i + 2.2 \right) \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, 601.$

根据(6)式求得准 88 年周期曲线,绘于图 1. 由图 1 可以看到,准 88 年周期曲线与火山活动指数实况波峰波谷基本吻合,六百多年来全球强火山活动经历 6 次多发期,均出现在 88 年周期曲线波峰及其附近,波谷均与火山活动沉寂期对应,表明全球 5 级以上火山活动确实存在 88 年左右世纪际尺度周期循环.

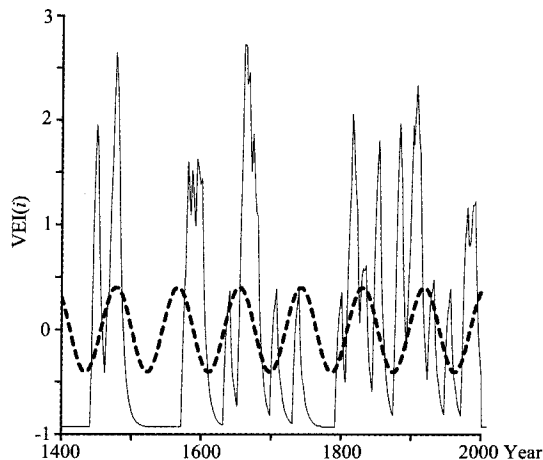


图 1 1400~2000 年全球 5 级以上火山活动指数 17 年滑动平均曲线(细实线)与 88 年准周期曲线(粗虚线)

Fig. 1 17 year glide average curve and 88 year quasi cycle curve (dashed line) of Global volcanic activities with VEI over than 5, in 1400~2000

从 1400~2000 年火山活动指数时间序列 $VEI(i)$ 中滤除 88 年周期以后,获得不含 88 年周期的新序列 $VEI_2(i)$,即:

$$VEI_2(i) = VEI(i) - BO_{88}(i).$$

对火山活动指数时间序列 $VEI_2(i)$ 进行功率谱分析和方差分析,并且完成信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验. 参照(12)~(13)式求得强火山活动准 88 年周期方差贡献率为 9.4%.

$VEI_2(i)$ 谱分析结果表明,新序列 $VEI_2(i)$ 还具有显著的 100 年左右周期,振幅 $A=0.429$,初相角 $\theta_1=2.50$,则周期函数 $BO_{100}(i)$ 为:

$$BO_{100}(i) = 0.429 \sin \left(\frac{2\pi}{100} i + 2.50 \right), \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, 601.$

根据(7)式求得准 100 年周期曲线,绘于图 2. 由图 2 可以看到,准 100 年周期曲线与滤除 88 年周期以后的火山活动指数曲线波峰波谷基本吻合,大部分波峰与全球强火山活动活跃期对应,波谷均与火山活动沉寂期对应,表明全球 5 级以上火山活动确实存在 100 年左右世纪际尺度周期循环.

图 1、2 用火山活动指数 $VEI(i)$ 实况曲线检验了谱分析结果的正确性,即全球 5 级以上强火山活动确实存在 88 年左右和 100 年左右世纪际尺度周期循环. 方差分析说明,88 年和 100 年左右周期对于 1400~2000 年 $VEI(i)$ 序列方差贡献率达到 21.64%,是火山活动的重要特征.

2.2.2 全球火山活动年代际周期现象

一般年代际尺度和年际周期总是迭加在更长的

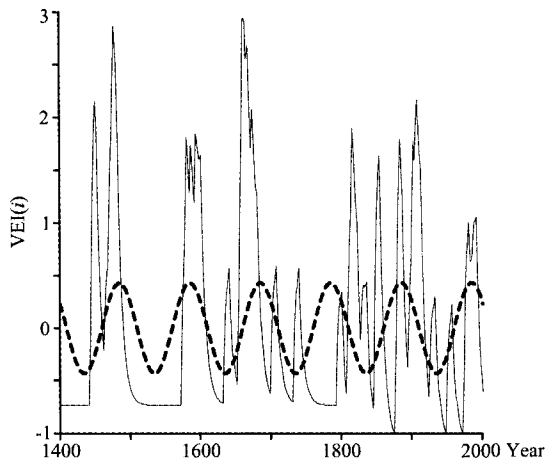


图2 1400~2000年5级以上火山活动 $VEI(i)$ 距平(滤除88年周期以后)(细实线)与100年周期曲线(粗虚线)
Fig. 2 Average curve of global $VEI(i)$ over 5 (sieved out 88-years cycle) and 100 year cycle curve, in 1400~2000

世纪际尺度周期之上,使得世纪际尺度周期波动不够平滑甚至难以辨认,而年代际尺度和年际周期,由于振幅相对较小,波长较短,迭加在世纪际尺度周期之上起起伏伏,难以准确分析,所以本文首先从序列中过滤掉世纪际尺度周期波动,把年代际尺度周期置于同一水平线上进行分析,以突出其本身特点.首先从原始 $VEI(i)$ 序列中滤除88年和100年周期,获得不含88年周期和100年周期的新序列 $VEI_3(i)$,即

$$\begin{aligned} VEI_3(i) &= VEI(i) - BO_{88}(i) - BO_{100}(i) \\ &= VEI(i) - 0.405\sin\left(\frac{2\pi}{88}i + 2.200\right) \\ &\quad - 0.429\sin\left(\frac{2\pi}{100}i + 2.50\right) \\ &\quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (8)$$

对1400~2000年新火山活动指数时间序列 $VEI_3(i)$ 进行了功率谱分析,并且完成信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验^[9],结果列于表2.

由表2可以看到,3波对应的33年周期功率谱0.1584显著大于红噪声检验谱0.0287,通过了信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,并且是全频域次高谱峰(图略),所以33年左右周期乃全球5级以上强火山活动年代际尺度显著周期;另外,1波所对应的100年左右周期功率谱也显著大于红噪声检验谱,通过了信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,说明序列 $VEI_3(i)$ 中仍然可见100年左右周期的影子,只是它的振幅只有0.037,比33年周期的振幅0.158小很多,不足其五分之一,是一种勉强可以辨认的振动幅度很小的波动,不足以干扰33年周期分析.8波对应的12年周期也通过了信度 $\alpha=0.05$ 显著性

表2 1400~2000年5级以上火山活动指数
时间序列 $VEI_3(i)$ 谱分析结果

Table 2 Analysis results of $VEI_3(i)$ of volcanic activities with $VEI_3(i)$ over 5 in 1400~2000

波数	功率谱	检验谱	振幅谱	周期谱	相角
0	0.0014	2.2339	2.0000	∞	0.000
1	0.3391	0.2336	0.0367	100.0	-1.115
2	0.1442	0.0634	0.0455	50.0	-1.567
3	0.1584	0.0287	0.1575	33.0	-2.400
4	0.1507	0.0163	0.2023	25.0	1.462
5	0.0307	0.0105	0.0913	20.0	-0.984
6	0.0384	0.0073	0.1313	16.0	0.498
7	0.0058	0.0054	0.0324	14.0	0.036
8	0.0088	0.0042	0.0241	12.0	1.156
9	0.0018	0.0033	0.0127	11.0	0.019
10	0.0037	0.0027	0.0141	10.0	-0.985

检验,并且为谱峰,为年代际尺度显著性周期,就是说火山活动中蕴涵着太阳活动周期成分.

由表2可知,33年左右周期振幅 $A=0.158$,初相角 $\theta_1=-2.40$,则周期函数 $BO_{33}(i)$ 为:

$$\begin{aligned} BO_{33}(i) &= 0.158\sin\left(\frac{2\pi}{33}i - 2.4\right), \\ &\quad i = 1, 2, \dots, 601. \end{aligned} \quad (9)$$

根据(9)式求得1400~2000年准33年周期序列,为了清楚比较周期曲线与实况拟合情况,仅截取最近200年即1800~2000年绘于图3.由图3可以

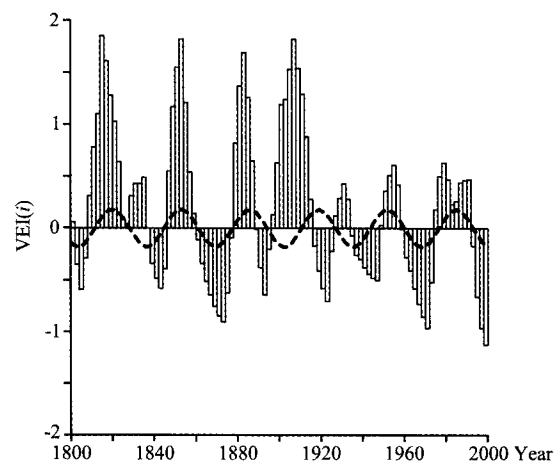


图3 1800~2000年5级以上火山活动 $VEI(i)$ 距平(滤除88年周期、100年周期以后)(细实线)与33年周期曲线(粗虚线)

Fig. 3 The curve of VEI over 5 (after filtering out the 88 year and 100 year cycle) and 33 year cycle curve in 1800~2000

看到,准 33 年周期曲线与滤除 88 年、100 周期以后的火山活动指数曲线波峰波谷基本吻合,大部分波峰与全球强火山活动活跃期对应,波谷均与火山活动沉寂期对应,表明全球 5 级以上火山活动确实存在 33 年左右年代际尺度周期循环。方差分析说明,33 年左右周期对于 1400~2000 年 VEI(i) 序列方差贡献率达到 18.93%,是火山活动十分重要的特征和周期成分。

表 1 中显示的周期长度与最大落后长度 M 的选择有关,当我们考察 88 年周期的显著性时, M 取值 44。 M 值选定以后,后面较小尺度的周期长度随之确定,分别为 44、29、22、17、14、12、11、9、..., 这样 33 年周期就不在考察范围之内,而考察了 33 年周期附近的 29 年周期的情况,表 1 显示 29 年周期也通过了显著性检验。那么到底是 33 年周期还是 29 年周期? 为此作者分别考察了 36、33、32、30、29 年周期情况,结果表明,33 年周期谱值最大,方差贡献率最大,所以 33 年左右周期是最显著的年代际尺度周期。图 3 也清楚地表明,33 年周期基本反映了火山活动年代际尺度周期循环特点。

表 1 显示 11 年周期通过了显著性检验,在表 2 中是 12 年周期通过了显著性检验,并且都是不太突出的峰值,那么到底 11 年周期显著还是 12 年周期显著? 沃尔夫(J. Rudolf Wolf)根据 150 年的太阳黑子数历史资料分析发现太阳黑子大约有一个校正后的 11.1 年的平均周期,也有的研究指出了太阳活动 11.2 年周期,并且认为随太阳活动程度不同太阳活动周期也发生相应变化^[11~14]。如果认为这是与太阳活动相联系的火山活动的周期现象,则既不是严格的 11 年周期也不是严格的 12 年周期,应该说这是一个 11~12 年周期,或者采用一般说法,即 11 年左右周期。

3 火山活动周期性在气候和气候要素变化中的反映

火山活动气候效应研究表明,火山活动是地球气候异常变化十分重要的影响因子^[15~51],特别是 VEI 5 级以上的强火山活动,其影响是全球性的。那么,火山活动周期性在气候变化中是否有相应反映? 答案是肯定的。以下分别从北半球两个重要的副热带高压系统—北太平洋高压和北大西洋亚速尔高压海平面气压场 SLP 年代际异常变化、北半球地面气温变化和北大西洋西风漂流区表层水温 SSTA

异常变化等方面进行讨论。

3.1 火山活动的周期性与北半球副热带高压异常变化

北半球副热带地区(20°N~40°N)是副热带高压主要活动区域,这里最重要的是北大西洋副热带高压和北太平洋副热带高压。夏季北太平洋副热带高压呈东西向长轴分布,最强中心位于夏威夷群岛以北海域,其西部经常存在一个次高中心,一般称为西太平洋副高。一方面西太平洋副热带高压强度和进退不仅决定了东亚及中国东部雨带强度和雨带位置,还决定了热带气旋或台风移动路径和影响范围,另一方面西太平洋副高观测资料相对大洋深处较为密集详细,年代较远,所以本文选择西太平洋副高 1000 hPa 位势高度分析。从 1920 年以后 SLP 资料来看,西太平洋副高与北太平洋副热带高压中心区域变化趋势基本一致,就是说西太平洋副高分析能够代表北太平洋高压特点。

3.1.1 西太平洋副热带高压

完成了 1850~2000 年 7 月西太平洋副高活动区(25°~40°N,130°~170°E)海平面气压场 SLP 时间序列 $p(i)$ 功率谱分析和信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,分析获知 2 波所对应的 45 年左右周期功率谱值 0.7151 显著大于红噪声检验谱 0.1112,通过了信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,并且是全频域最高谱峰(图略),说明序列具有 45 年左右周期,只是火山活动没有与之对应的周期。从序列中滤除这个周期分量,做进一步分析。按(1)~(5)式求得 45 年周期振幅 $A=0.26$,初相角 $\theta_1=3.0$,则按下式完成滤波 $BO_{45}(i)$ 为:

$$p(i) - BO_{45}(i) = y(i) - 0.26 \sin\left(\frac{2\pi}{45}i + 3\right),$$

$$i = 1, 2, \dots, 151. \quad (10)$$

滤波后的 SLP 时间序列谱分析结果如图 4 所示。4 波所对应的 33 年左右周期功率谱值 0.5017 显著大于红噪声检验谱 0.0970,通过了信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,并且是全频域最高谱峰,说明序列具有显著的 33 年左右周期,该周期与强火山活动 33 年周期对应。按(1)~(5)式求得准 33 年周期振幅 $A=0.151$,初相角 $\theta_1=0.5$,则波函数 $BO_{33}(i)$ 为:

$$BO_{33}(i) = 0.151 \sin\left(\frac{2\pi}{33}i + 0.5\right),$$

$$i = 1, 2, \dots, 151. \quad (11)$$

把滤波后的 SLP 时间序列与准 33 年周期分量绘于图 5。从图 5 看到,1900 年以后一百多年来准

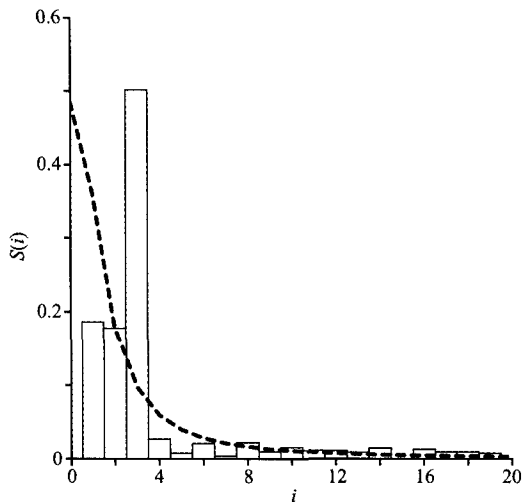


图4 滤除45年周期后北太平洋副高SLP 7月谱图
 $S(i)$ 为谱密度, i 是波数.

Fig. 4 The SLP spectra of northern Pacific subtropical high after filtering out the 45 year cycle

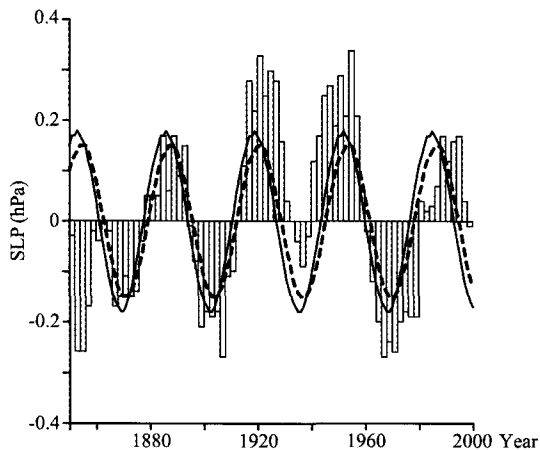


图5 夏季7月西太平洋副高SLP(滤除45年周期)与火山活动指数VEI 33年周期(实线)、SLP 33年周期(虚线)
 Fig. 5 SLP of western Pacific subtropical high pressure (filtered out the 45 year cycle), VEI of the 33 years cycle (solid line) and SLP of the 33 year cycle (dash line) in July

33年周期分量(虚线)波峰波谷与滤波后的7月西太平洋副高活动区($25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$)海平面气压场SLP波峰波谷十分一致,从SLP实况角度证明了西太平洋副高确实盛行33年左右的年代际周期变化.那么,前面所说火山活动33年周期与西太平洋副高33年周期有什么联系呢?我们根据火山活动33年周期表达式(9),求得1850~2000年33年周期序列,相当于从601年火山活动33年周期序列中截取最近151年波动曲线绘于图5.由图5可以看到,火山活动33年周期曲线(实线)与西太平洋副高33年周期曲线(虚线)波峰波谷十分吻合并

略有超前,同样,与西太平洋副高海平面气压场SLP峰谷也十分吻合并略有超前.求得1850~2000年西太平洋副高33年周期与火山活动33年周期相关函数 $R(i)$,列于表3第2列,第1列是落后年数.由表3可以看到,同期相关函数 $R(i) = 0.9340$,副高落后2年相关函数 $R(i) = 0.9840$,达到最大,就是说火山活动33年周期分量与西太平洋副高33年周期显著相关,并且副高33年周期波峰波谷落后火山两年,毋庸置疑地显示了全球强火山活动年代际周期性振荡在大气运动中激发了同样频率的周期波动.求得西太平洋副高SLP 17年滑动平均时间序列 $p(i)$ 的方差:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p(i) - \bar{p})^2 = 0.0603, \quad (12)$$

式中 \bar{p} 为1850~2000年7月西太平洋副高SLP平均值.

滤除45年周期和33年周期以后,SLP序列的方差 $S_2^2 = 0.0164$,则45年周期和33年周期对于西太平洋副高SLP的方差贡献率SS为:

$$\begin{aligned} SS &= ((S^2 - S_2^2) / S^2) \times 100\% \\ &= ((0.0603 - 0.0164) / 0.0603) \\ &\quad \times 100\% = 72.76\%. \end{aligned} \quad (13)$$

用同样方法已经求得45年周期的方差贡献率为54.04%,所以33年周期的方差贡献率应为:

$$72.76\% - 54.04\% = 18.72\%.$$

就是说强火山活动所激发的西太平洋副高SLP 33年周期分量的方差贡献率超过百分之十八!

3.1.2 北大西洋副热带高压

初步分析夏季7月北大西洋副高海平面气压场SLP时间序列 $p(i)$ 具有120年左右周期,只是火山活动没有与之对应的周期,将从序列中滤除这个周期分量,做进一步分析.按(1)~(5)式求得120年周期振幅、初相角,则按下式完成滤波 $BO_{120}(i)$ 为:

$$p(i) - BO_{120}(i) = p(i) - 0.27 \sin\left(\frac{2\pi}{120}i + 2.31\right), \quad i = 1, 2, \dots, 151. \quad (14)$$

滤波后的SLP时间序列谱分析结果如图6所示.从图6可知,1波所对应的88年左右周期功率谱值0.7339显著大于红噪声检验谱0.3737,通过了信度 $\alpha = 0.05$ 红噪声谱显著性检验,并且是全频域最高谱峰,说明序列具有显著的88年左右周期,该周期与强火山活动88年周期对应.按(1)~(5)式求得准88年周期振幅 $A = 0.202$,初相角 $\theta_i = -3.47$,则波函数 $BO_{88}(i)$ 为:

$$BO_{88}(i) = 0.202 \sin\left(\frac{2\pi}{88}i - 3.47\right), \quad i = 1, 2, \dots, 151. \quad (15)$$

把滤波后的 SLP 时间序列与准 88 年周期分量绘于图 7。从图 7 看到,1850 年以后一百多年来准 88 年周期分量(虚线)波峰波谷与滤波后的 7 月北大西洋副高活动区(25~40°N,10~40°W)海平面气压场 SLP 波峰波谷十分一致,从 SLP 实况角度证明了北大西洋副高确实盛行 88 年左右的年代际周期变化。那么,前面所说火山活动 88 年周期与北大西洋副高 88 年周期有什么联系呢? 我们根据火山活动 88 年周期表达式(6),求得 1850~2000 年 88

年周期序列,相当于从 601 年火山活动 88 年周期序列中截取最近 151 年波动曲线绘于图 7。由图 7 可以看到,火山活动 88 年周期曲线(实线)与北大西洋副高 88 年周期曲线(虚线)波峰波谷十分吻合并略有超前,同样,与北大西洋副高海平面气压场 SLP 峰谷也十分吻合并略有超前。求得 1850~2000 年北大西洋副高 88 年周期与火山活动 88 年周期相关函数 $R(i)$,列于表 3 第 3 列,第 1 列是落后年数。由表 3 可以看到,同期相关函数 $R(i) = 0.98$,副高

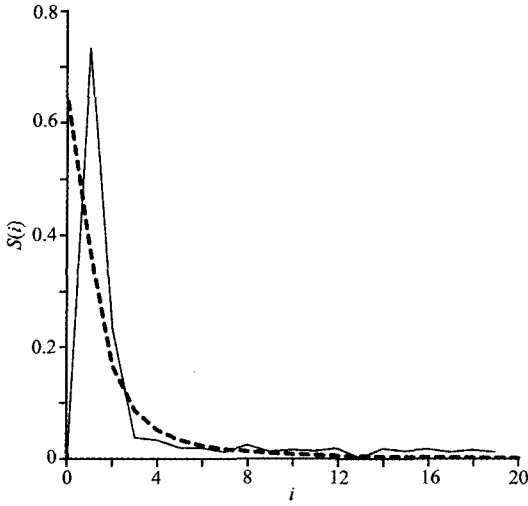


图 6 滤除 120 年周期后北大西洋副高 SLP 7 月谱图
Fig. 6 SLP spectra of northern Atlantic subtropical high pressure after filtering out the 120 year cycle

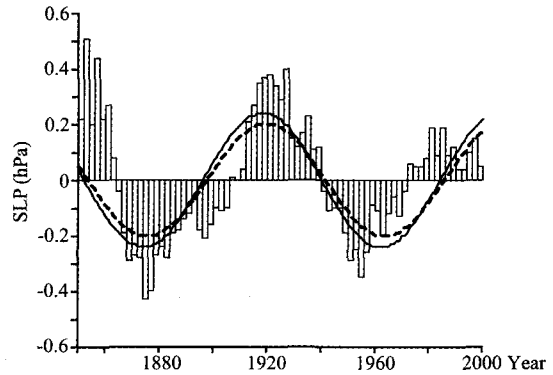


图 7 北大西洋副高 SLP(滤除 120 年周期)与火山活动指数 VEI 88 年周期(实线)、SLP 88 年周期(虚线)
Fig. 7 SLP of northern Atlantic subtropical high pressure (filtered out the 120 year cycle), VEI of the 88-years cycle (solid line) and SLP of the 88 year cycle (dash line)

表 3 强火山活动 VEI(i)周期与气候要素周期相关函数 $R(i)$

Table 3 The correlation function $R(i)$ between strong volcanic activities cycle and climate factors

落后时间 (年)	VEI 与西太平洋副高 33 年周期 $R(i)$	VEI 与北大西洋副高 100 年周期 $R(i)$	VEI 与北大西洋 1 月 SST 100 年周期 $R(i)$	VEI 与北大西洋 7 月 SST 88 年周期 $R(i)$	VEI 与北半球气温 88 年周期 $R(i)$
0	0.93	0.98	-0.61	-0.34	0.31
1	0.98	0.99	-0.66	-0.27	0.38
2	0.98	0.99	-0.70	-0.20	0.44
3	0.96	0.99	-0.74	-0.13	0.50
4	0.90	0.98	-0.77	-0.06	0.56
5	0.80	0.96	-0.80	0.01	0.62
6	0.68	0.95	-0.83	0.08	0.67
7	0.53	0.92	-0.86	0.16	0.72
8	0.36	0.89	-0.88	0.23	0.77
9	0.18	0.86	-0.90	0.30	0.81
10	-0.01	0.82	-0.92	0.36	0.85
11	-0.19	0.78	-0.93	0.43	0.89
12	-0.37	0.74	-0.94	0.49	0.92
13	-0.54	0.69	-0.94	0.55	0.94
14	-0.69	0.64	-0.94	0.61	0.96
15	-0.81	0.58	-0.94	0.67	0.98
16	-0.90	0.52	-0.93	0.72	0.99
17	-0.96	0.46	-0.92	0.77	0.99
18	-0.99	0.40	-0.91	0.82	0.99
19	-0.98	0.33	-0.89	0.86	0.99
20	-0.93	0.27	-0.87	0.89	0.98
21	-0.85	0.20	-0.85	0.92	0.96
22	-0.74	0.13	-0.82	0.95	0.94
23	-0.60	0.06	-0.79	0.97	0.92
24	-0.45	-0.01	-0.75	0.99	0.89
25	-0.27	-0.08	-0.71	1.00	0.86
26	-0.09	-0.15	-0.68	1.00	0.82

落后 2 年相关函数 $R(i) = 0.99$, 达到最大, 就是说火山活动 88 年周期分量与北大西洋副高 88 年周期显著相关, 并且副高 88 年周期波峰波谷落后火山两年. 上述分析显示了全球强火山活动世纪际周期性振荡激发了北大西洋副高 SLP 同样频率的周期波动. 仿照(12)、(13)式同样方法求得 88 年周期的方差贡献率为 25.94%, 就是说强火山活动所激发的北大西洋副高 SLP 88 年周期分量的方差贡献率超过 25%!

3.2 火山活动周期性与北大西洋西风漂流区表层海温异常变化

北大西洋海温尤其北大西洋西风漂流区海温异常变化不仅对北大西洋气候、北欧气候、北大西洋涛动 NAO、北大西洋高纬度海冰和极区海冰以及这些区域的环境生态系统产生影响, 对北半球气候也有明显影响, 所以北大西洋海温场作为地球气候系统重要成员一直发挥着重要作用并受到关注^[52~62]. 本文完成了 1850~2000 年 1 月和 7 月北大西洋西风漂流区(47.5~67.5°N, 7.5~52.5°W)表层海温距平 17 年滑动平均时间序列 $SSTA(i)$ 功率谱分析和信度 $\alpha = 0.05$ 红噪声谱显著性检验. 下面就 1 月和 7 月谱分析结果分别叙述之.

3.2.1 冬季 1 月

分析获知 1 月北大西洋西风漂流区表层海温 $SSTA(i)$ 序列自 1850 年以来呈持续升温过程, 升温趋势方程为: $k(i) = -0.12 + 0.0015i$, 滤除升温趋势: $SSTA_1(i) = SSTA(i) - k(i)$, 之后, $SSTA_1(i)$ 谱分析结果显示 2 波所对应的 56 年左右周期功率谱值 0.4287 显著大于红噪声检验谱 0.1834, 通过了信度 $\alpha = 0.05$ 红噪声谱显著性检验, 并且是全频域最高谱峰(图略), 说明序列具有 56 年左右周期, 只是火山活动没有与之对应的周期. 从序列中滤除这个周期分量, 做进一步分析. 按(1)~(5)式求得 56 年周期振幅 $A = 0.172$, 初相角 $\theta_l = 2.83$, 按下式完成滤波 $BO_{56}(i)$ 为:

$$\begin{aligned} SSTA_2(i) &= SSTA_1(i) - BO_{56}(i) \\ &= SSTA_1(i) - 0.172 \sin\left(\frac{2\pi}{56}i + 2.83\right), \\ i &= 1, 2, \dots, 151. \end{aligned} \quad (16)$$

滤波后的 $SSTA_2(i)$ 时间序列谱分析结果所示: 1 波所对应的 100 年左右周期功率谱值 0.4727 显著大于红噪声检验谱 0.3064, 通过了信度 $\alpha = 0.05$ 红噪声谱显著性检验, 并且是全频域最高谱峰(图略), 说明序列具有 100 年左右周期, 按(1)~(5)式求得

100 年周期振幅 $A = 0.154$, 初相角 $\theta_l = 1.60$, 则波 $BO_{100}(i)$ 为:

$$\begin{aligned} BO_{100}(i) &= 0.154 \sin\left(\frac{2\pi}{100}i + 1.6\right), \\ i &= 1, 2, \dots, 151. \end{aligned} \quad (17)$$

把滤波后的 $SSTA_2(i)$ 时间序列与准 100 年周期分量绘于图 8. 从图 8 看到, 1850 年以后一百多年来准 100 年周期分量(虚线)波峰波谷与滤波后的 1 月北大西洋西风漂流区(47.5~67.5°N, 7.5~52.5°W)表层海温场波峰波谷十分一致, 从 $SSTA(i)$ 实况角度证明了北大西洋西风漂流区 $SSTA(i)$ 确实盛行 100 年左右的世纪际周期变化. 那么, 前面所说火山活动 100 年周期与北大西洋西风漂流区 $SSTA(i)$ 100 年周期有什么联系呢? 我们根据火山活动 100 年周期表达式(7)式, 求得 1850~2000 年 100 年周期序列, 相当于从 601 年火山活动 100 年周期序列中截取最近 151 年波动曲线绘于图 8. 由图 8 可以看到, 火山活动 100 年周期曲线(实线)与北大西洋西风漂流区 $SSTA(i)$ 100 年周期曲线(虚线)呈相反的变化趋势. 同样, 与北大西洋西风漂流区 $SSTA(i)$ 场峰谷也呈相反的变化趋势, 波峰波谷有大于 50° 的位相差, 就是说火山活动达到最强以后, 海温场没有立即降到最低, 而是在若干年以后才降到波谷, 这一方面由于强火山爆发所形成的火山气溶胶和火山尘幕将在平流层大气滞留数年, 对低层大气和表层海洋产生持久的‘阳伞效应’, 另一方面, 强火山活动的‘阳

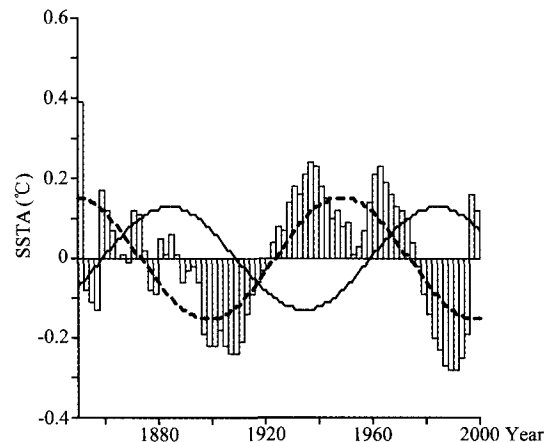


图 8 大西洋西风漂流区 1 月 1850~2000 SSTA(滤除 56 年周期)与 SSTA 100 年周期(虚线)、火山活动 VEI 100 年周期(实线)

Fig. 8 SSTA LP of Atlantic west wind drift area (filtered out the 56 year cycle), VEI of the 100 year cycle (solid line) and SSTA of the 100 year cycle (dashed line) in January

伞效应'所引起的低层大气运动状态变化将在海洋环流方面有所反映从而改变海温场分布,所以海温场的变化总是滞后于火山活动.求得 1850~2000 年 1 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)100 年周期与火山活动 100 年周期相关函数 $R(i)$,列于表 3 第 4 列,第 1 列是落后年数.由表 3 可以看到,同期相关函数 $R(i) = -0.61$,海温落后 14 年相关函数 $R(i) = -0.94$,达到最大,就是说火山活动 100 年周期分量与 1 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)100 年周期显著反相关,并且海温 100 年周期波峰波谷落后火山 14 年.上述分析显示了全球强火山活动世纪际周期性振荡激发了 1 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)同样频率的周期波动.

3.2.2 夏季 7 月

7 月北大西洋西风漂流区表层海温 SSTA(i)时间序列谱分析结果显示:1 波所对应的 88 年左右周期功率谱值 0.6034 显著大于红噪声检验谱 0.378,通过了信度 $\alpha=0.05$ 红噪声谱显著性检验,并且是全频域最高谱峰(图略),说明序列具有 88 年左右周期,按(1)~(5)式求得 88 年周期振幅 $A=0.16$,初相角 $\theta_1=1.05$,则波 $BO_{88}(i)$ 为:

$$BO_{88}(i) = 0.16 \sin\left(\frac{2\pi}{88}i + 1.05\right),$$

$$i = 1, 2, \dots, 151. \quad (18)$$

把 SSTA(i)时间序列与准 88 年周期分量绘于图 9,从图 9 看到,1850 年以后一百多年来准 88 年周期分量(虚线)波峰波谷与的 7 月北大西洋西风漂流区(47.5~67.5°N,7.5~52.5°W)表层海温场波峰波谷十分一致,从 SSTA(i)实况角度证明了北大西洋西风漂流区 SSTA(i)确实盛行 88 年左右的世纪际周期变化.那么,前面所说火山活动 88 年周期与北大西洋西风漂流区 SSTA(i)88 年周期有什么联系呢?我们根据火山活动 88 年周期表达式(6),求得 1850~2000 年 88 年周期序列,相当于从 601 年火山活动 88 年周期序列中截取最近 151 年波动曲线绘于图 10.由图 10 可以看到,火山活动 88 年周期曲线(实线)与北大西洋西风漂流区 SSTA(i)88 年周期曲线(虚线)呈相反的变化趋势,同样,与北大西洋西风漂流区 SSTA(i)场峰谷也呈相反的变化趋势,波峰波谷超前 SSTA(i)波峰波谷.求得 1850~2000 年 7 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)88 年周期与火山活动 88 年周期相关函数 $R(i)$,列于表 3 第 5 列.由表 3 看到,同期相关函数 $R(i) = -0.34$,海温落后 26 年相关函数 $R(i) = 1.0$,达到最大,就

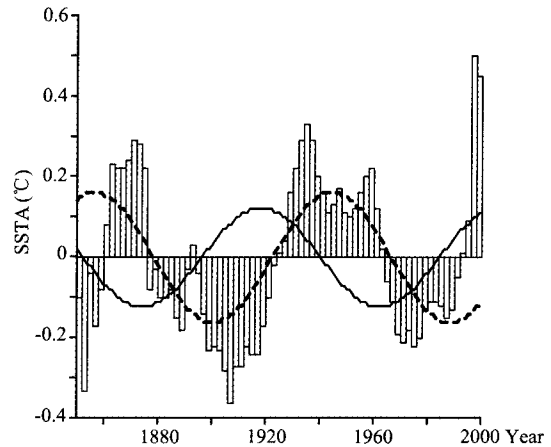


图 9 大西洋西风漂流区 7 月 SSTA 与 SSTA 88 年周期(虚线)、火山活动 88 年周期(实线)

Fig. 9 SSTA of the Atlantic west wind drift area, the 88 year cycle of VEI (solid line) and the 88 year cycle SSTA of (dash line) in July

是说火山活动 88 年周期分量与 7 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)88 年周期同期显著反相关,海温落后 5 年时转变为正相关,至 26 年时正相关达到最大,说明海温 88 年周期波峰波谷落后火山 26 年.上述分析显示了全球强火山活动世纪际周期性振荡激发了 7 月北大西洋西风漂流区 SSTA 同样频率的周期波动.与 1 月份相比,世纪际周期尺度变短,与 SSTA(i)波峰波谷相对位置有所变化,显示出海温场季节变化的差异,或者说,海温场对于火山活动的响应方式冬季和夏季是不尽相同的.

3.3 火山活动周期性与北半球地面气温异常变化

许多研究认为,工业革命以来人类活动造成大气中温室气体浓度明显增加,特别是 CO_2 浓度增加的温室效应导致全球气温持续上升.1841~2000 年北半球地面温度 5 年滑动平均曲线显示出地面升温趋势与 CO_2 浓度增加趋势基本一致^[63,64].有文献^[65,66]也指出了北半球地面升温过程不象 CO_2 浓度一样线性增加,其中还伴随几次自然因素启动的降温波动,最显著的两次是 20 世纪初期和 20 世纪 60~70 年代的两次明显降温过程.所以作者推测北半球地面气温不仅具有长期的升温趋势,迭加于升温趋势之上还存在周期性波动.

本文假设,如果没有其他强迫源干涉的情况下,北半球地面升温趋势与 CO_2 浓度增加趋势一致.这样我们就可以将 CO_2 浓度线作为北半球地面升温趋势线,从地面气温距平序列中滤除,即从原始温度序列 $t(i)$ 中减去以 CO_2 浓度线表征的气候趋势 $l(i)$,即可得到不含气候趋势的或者说基本不含

CO₂ 影响的温度序列 $t_1(i)$:

$$t_1(i) = t(i) - l(i), (i = 1, 2, \dots, n). \quad (19)$$

仿照(12)式求得原始温度序列 $t(i)$ 的方差 $S^2 = 0.05$, 滤除 CO₂ 浓度线表征的气候趋势变化以后温度序列的方差 $S_1^2 = 0.02$, 则趋势项, 即 CO₂ 浓度对于温度场的方差贡献率 SS 为:

$$\begin{aligned} SS &= ((S^2 - S_1^2)/S^2) \times 100\% \\ &= ((0.05 - 0.02)/0.05) \times 100\% = 60\%. \end{aligned}$$

就是说, 趋势变化即 CO₂ 浓度增加对于北半球地面温度场的方差贡献率为 60%。由图 1 可以看到, 从 19 世纪至 20 世纪全球 5 级以上强火山活动呈减弱趋势, 特别从 19 世纪末 20 世纪初开始至今, 全球 3 级以上火山活动减弱趋势更为明显。火山活动减弱趋势与 CO₂ 浓度增加趋势呈显著反相关关系。火山活动的‘阳伞效应’和 CO₂ 浓度增加的‘温室效应’共同造成了近一百多年来北半球地面气温持续增加趋势, 所以 60% 的方差贡献率中应该包含 CO₂ 浓度增加和火山活动的共同贡献^[63,64]。

从原始温度序列中减去以 CO₂ 浓度线表征的气候趋势, 即可得到不含气候趋势的或者说基本不含 CO₂ 影响的温度序列。滤波后的温度时间序列谱分析结果显示, 1 波所对应的 88 年左右周期功率谱值 0.5567 大于红噪声检验谱 0.3417, 通过了信度 $\alpha = 0.05$ 红噪声谱显著性检验, 并且是全频域最高谱峰, 说明序列具有显著的 88 年左右周期, 该周期与强火山活动 88 年周期对应。按(1)~(5)式求得准 88 年周期振幅 $A = 0.12$, 初相角 $\theta_1 = 1.0$, 则北半球地面温度 88 年波函数 $BO_{88}(i)$ 为:

$$\begin{aligned} BO_{88}(i) &= 0.12 \sin\left(\frac{2\pi}{88}i + 1\right), \\ i &= 1, 2, \dots, 151. \end{aligned} \quad (20)$$

把滤波后的北半球地面温度时间序列与准 88 年周期分量绘于图 9。从图 9 看到, 1850 年以后一百多年来准 88 年周期分量(虚线)波峰波谷与滤波后的北半球地面温度场波峰波谷十分一致, 从气温实况角度证明了北半球地面温度确实盛行 88 年左右的世纪际周期变化。那么, 前面所说火山活动 88 年周期与北半球地面温度 88 年周期有什么联系呢? 我们根据火山活动 88 年周期表达式(6), 求得 1850~2000 年 88 年周期序列, 相当于从 601 年火山活动 88 年周期序列中截取最近 151 年波动曲线绘于图 10。由图 10 可以看到, 火山活动 88 年周期曲线(实线, $\times 0.7$)比北半球地面温度 88 年周期曲线(虚线)波峰波谷超前大约 20 年。同样, 与北半球地面温度

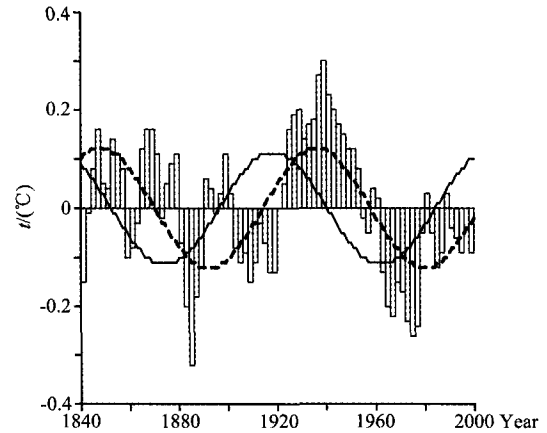


图 10 1841~2000 年北半球地面温度 5 年滑动平均 (滤除 CO₂ 浓度影响(除 100-0.13))与火山 VEI 88 年周期分量(实线)、气温 88 年周期(虚线)曲线

Fig. 10 Northern hemispheric ground temperature, the 88 year cycle of VEI (solid line) and the 88 year cycle of SSTA (dash line) in 1841~2000

波峰波谷也超前大约 20 年。求得 1850~2000 年北半球地面温度 88 年周期与火山活动 88 年周期相关函数 $R(i)$, 列于表 3 第 6 列。由表 3 可以看到, 气温落后 17 年相关函数 $R(i) = 0.99$, 达到最大, 就是说北半球地面温度 88 年周期波峰波谷落后火山活动 88 年周期分量波峰波谷 17 年, 火山活动 88 年周期分量波峰与地面温度低值对应, 波谷与地面温度高值对应, 显示了强火山活动对于地面温度的显著影响。

从原始温度序列中减去以 CO₂ 浓度影响和 88 年周期, 进一步谱分析结果显示, 北半球地面温度还存在 50 年左右周期。由于火山活动没有相应周期与之对应, 本文将不做进一步讨论。林振山等^[65]利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD), 由 1600~2000 年 400 年北半球地面温度资料分析、江志红等北半球气温年代际变化分析^[66,67]都得到序列存在 80 年左右周期和 40~50 年左右周期, 与本文得到的 88 年左右周期和 50 年左右周期大致对应, 证明了北半球地面温度确实存在世纪尺度和年代际尺度周期性变化。

4 结 论

根据六百多年全球 VEI 5 级以上火山活动资料分析和谱分析以及与北半球地面气温、西太平洋高压 SLP、北大西洋高压 SLP 和北大西洋西风漂流区 SSTA 对比分析得知:

(1) 全球强火山活动存在显著的 88 年左右和

100 年左右世纪尺度周期循环,二者对于 VEI(i)原序列方差贡献率达到 21.64%。还存在 33 年左右年代际尺度周期循环以及与太阳活动相联系的准 11 年周期;

(2)夏季 7 月西太平洋副热带高压 SLP 存在显著的 33 年左右年代际尺度周期振荡,与全球强火山活动准 33 年周期波峰波谷基本一致稍微落后一些。分析认为西太平洋副高 33 年周期可能是对于火山活动准 33 年周期的响应;

(3)火山活动 88 年周期曲线与夏季 7 月北大西洋副高 88 年周期曲线波峰波谷十分吻合并略有超前,分析认为北大西洋副高 88 年周期可能是对于火山活动准 88 年周期的响应;

(4)火山活动 100 年周期曲线与冬季 1 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)100 年周期曲线呈相反的变化趋势,波峰波谷大致反相,并且火山波峰波谷超前 SSTA(i)波谷波峰;火山活动 88 年周期曲线与夏季 7 月北大西洋西风漂流区 SSTA(i)88 年周期曲线呈相反的变化趋势,波峰波谷大致反相,并且火山波峰波谷超前 SSTA(i)波峰波谷;

(5)火山活动 88 年周期曲线比北半球地面温度 88 年周期曲线具有基本一致的取向,火山活动波峰波谷超前。

分析表明,火山活动周期性在气候系统各要素中均有反映,只是气候系统各要素对于火山活动的响应频域不尽相同,响应方式存在差异。

参考文献(References)

- [1] 李晓东,王绍武,刘若新.火山气候学的研究进展.地震地磁观测与研究,2004,17(4):74~80
Li X D, Wang S W, Liu R X. Advances in volcano-climatology. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 2004, 17(4): 74~79
- [2] 曲维政,朱小洁,赵进平等.火山活动对于北大西洋涛动的激发作用.海洋学报,2010,32(2):54~65
Qu W Z, Zhu X J, Zhao J P, et al. Stimulation of the north Atlantic oscillation by volcano activities. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2010, 32(2): 54~65
- [3] 李靖,张德二.火山活动对气候的影响.气象科技,2005,33(3):193~199
Li J, Zhang D E. Impact of volcanic eruptions on climate. *Meteorological Sciences*, 2005, 33(3): 193~198
- [4] Vinnikov K Y, Groisman P Y, Lugina K M, et al. Variations in northern hemisphere mean surface air temperature over 1841~1985. *Meteorology and Hydrology*, 1987, 1: 45~52
- [5] Smithsonian Institution. *Volcanoes of the World Chronology*. Second edition. Published in Association with the Smithsonian Institution, Geoscience Press, Inc, 1993. 211~251
- [6] Newhall C G, Self S. The volcanic explosivity index(VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 1231~1238
- [7] 曲维政,白燕,黄菲等.火山活动对热带高空温度的影响.地球物理学报,2006,49(5):1308~1315
Qu W Z, Bai Y, Huang F, et al. Effect of volcanic activity on the temperature in the tropical upper atmosphere. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2006, 49(4): 408~416
- [8] Deng S G, Huang F, Qu W Z, et al. Influence of volcanic explosivities and VEI time sequence on climate. *Proceedings of the China Association for Science and Technology*, 2006, 2(1): 100~106
- [9] 曲维政,刘应辰,黄菲等.平流层火山气溶胶传播规律及其气候效应初步研究.应用气象学报,2010,21(5):627~631
Qu W Z, Liu Y C, Huang F, et al. The space-time propagation rules of the stratospheric volcanic aerosols and the preliminary analysis of their climate effect. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2010, 21(5): 627~631
- [10] Alekseev B A. The Periodicity of Volcanic Activities. *Geochemistry*, 1990, 4: 599~603
- [11] 曲维政,邓声贵,黄菲等.太阳磁场磁性指数异常变化对北半球中纬度气候的影响.地球物理学报,2004,47(3):398~404
Qu W Z, Deng S G, Huang F, et al. The influence of magnetic index abnormal change in solar magnetic field on climate at middle latitude of North Hemisphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3): 448~456
- [12] 曲维政,黄菲,赵进平等.太阳磁场方向变化对于地球大气温度异常变化的意义.地球物理学报,2007,50(5):1123~1129
Qu W Z, Huang F, Zhao Z P, et al. The significance of solar magnetic field direction variation on anomalous variability of the atmosphere temperature on the earth. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1304~1310
- [13] 曲维政,秦婷,邓声贵等.太阳黑子磁场极性指数时间序列.地球物理学进展,2008,23(6):1727~1735
Qu W Z, Qin T, Deng S G, et al. The time sequence of the magnetic index of the sunspot magnetic field. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(6): 1727~1735
- [14] 曲维政,黄菲,赵进平等.北太平洋年代际涛动与太阳活动的联系.海洋与湖沼,2008,39(6):552~560
Qu W Z, Huang F, Zhao J P, et al. Solar activity and the North Pacific decadal oscillation. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 2008, 39(6): 552~560
- [15] Zhang M J, Li Z Q, Qin D H, et al. A continuous 250-year record of volcanic activity from Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Antarctic Science*, 2002, 14(1): 55~60
- [16] Kodera K. Solar cycle modulation of the North Atlantic

- Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(8):101029~101035
- [17] 徐群. 皮纳图博火山云对1992年大范围气候的影响. *应用气象学报*, 1995, **6**(1):76~87
Xu Q. The assessment of volcanic dust veil index of northern temperate zone in the recent 100 years. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1985, **28**(6):558~568
- [18] 刘若新, 李继泰, 魏海泉. 长白山天池火山——一座具潜在喷发危险的近代火山. *地球物理学报*, 1992, **35**(5):661~665
Liu R X, Li J T, Wei H Q. Changbaishan Tianchi volcano—one of modern volcano with potential eruption danger. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, **35**(5):661~665
- [19] Michael Chenoweth. Two major volcanic cooling episodes derived from global marine air temperature, AD 1807~1827. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(15):2963~2966
- [20] Yu S C, Saxena V K, Zhao Z C. A comparison of signals of regional aerosol-induced forcing in eastern China and the southeastern United States. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(4):713~716
- [21] Qu W Z, Huang F, Zhao J P, et al. The AO and the AAO oscillation modes in the atmospheric stratosphere. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, **24**(6):1~7
- [22] Coledai J, Mosley T E, Thompson L G. Annually resolved southern hemisphere volcanic history from two Antarctic ice cores. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**:16761~16771
- [23] Coledai J, Mosley T E, Wight S P, et al. A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**:24431~24441
- [24] McCormick M P, Thomason L W, Trepte C R. Atmospheric effects of the Mt. Pinatubo eruption. *Nature*, 1995, **373**:399~403
- [25] Randel W J, Wu F, Russell I J, et al. Ozone and temperature changes in the stratosphere following the eruption of Mount Pinatubo. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**:16753~16764
- [26] Robock A. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 2000, **38**(2):191~219
- [27] Robock A, Mao J. The volcanic signal in surface temperature observations. *Journal of Climate*, 1995, **8**:1086~1103
- [28] Lamoureux S F. Avarve record of increased 'Little Ice Age' rainfall associated with volcanic activity. *Arctic Archipelago, Canada, The Holocene*, 2001, **11**:243~249
- [29] Shen Y P. Key results from summary for policymakers of IPCC WGI AR4. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(1):9~25
- [30] Kerr R A. It's official: Humans are behind most of global warming. *Science*, 2001, **291**:566
- [31] Adams T B, Mann M E, Ammann C M. Proxy evidence for an El Nino like response to volcanic forcing. *Nature*, 2003, **426**:274~278
- [32] Cobb K M, Charles C D, Edwards R L, et al. El Nino southern oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature*, 2003, **424**:271~276
- [33] Xu Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. Detection of climate change in the 20th century by the BCC-AGCM1.0 model. *Special Report on Climate Change*, 2005, **6**:7~12
- [34] Chen X, Liu J, Wang S M. Climate simulation of little ice age over eastern Asia. *Scien Tia Meteorolo Gica Sinica*, 2005, **25**(1):1~8
- [35] Wang J S, Chen F H, Yang B, et al. New advances in research on the little ice age climate change. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2**(1):21~27
- [36] Legrand M R, Mayewski P A. Glaciochemistry of polar ice cores: a review. *Review Geophysics*, 1997, **35**(3):219~243
- [37] 徐群. 近百年北半球中纬度火山灰尘幕指数的估量. *地球物理学报*, 1985, **28**(6):558~568
Xu Q. The assessment of volcanic dust veil index of northern temperate zone in the recent 100 years. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1985, **28**(6):558~568
- [38] Yu F W, Nie B F, Mu D W. Environmental and resourceful effects of volcanic activities. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, **24**(12):124~127
- [39] Zhang M J, Ren J W, Sun J Y. Progress in the studies of SO_2^- concentrations recorded in Antarctic ice sheets. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, **16**(1):65~77
- [40] 石广玉, 许黎. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测. *大气科学*, 1996, **20**(4):401~407
Shi G Y, Xu L. The high altitude balloon survey of vertical structure of the ozone and aerosol. *Atmospherica Sinica*, 1996, **20**(4):401~407
- [41] 李霓. 火山喷发的气体灾害. *自然灾害学报*, 2000, **9**(3):127~132
Li N. Gases disaster from volcano eruption. *Journal of Natural Disasters*, 2000, **9**(3):127~132
- [42] Li G C. Cause analysis global climate warming. *Journal of Natural Disasters*, 2005, **14**(5):38~45
- [43] Ma X Y, Guo Y F, Shi G Y, et al. Numerical simulations of global temperature change over the 20th century with IAP/LASG GOALS model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**:234~242
- [44] 郭正府, 刘嘉麒. 火山气体的成分和总量研究. *地学前缘*, 2002, **9**(2):359~364
Guo Z F, Liu J Q. On composition of volcanic gases erupted and total volatile loss. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9**(2):359~364
- [45] Lamb H H. Update of the chronology of assessments of the volcanic dust veil index. *Climate Monthly*, 1983, **12**:79~90
- [46] 陈洪滨, 王普才, 许立生. 利用 SAGE II 资料分析皮纳图博火山爆发前后平流层气溶胶的变化特征. *应用气象学报*, 1995, **6**(5):240~246
Chen H B, Wang P C, Xu L S. A study of the distribution

- and evolution characteristics of stratospheric ozone over China using SAGE data. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1995, **6**(5):240~246
- [47] 曲维政,赵进平,赵雪等.火山活动对南半球平流层温度距平变化的影响. *地学前缘*,2004,**11**(2):579~588
Qu W Z, Zhao J P, Zhao X, et al. The influence of volcanic activities on the abnormal changes of climate in stratosphere at the Southern Hemisphere. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004,**11**(2): 579~588
- [48] 曲维政,王丽楠,刘应辰等.北半球平流层气候异常变化探索. *青岛海洋大学学报*,2003,**33**(3): 329~336
Qu W Z, Wang L N, Liu Y C, et al. Research of variation of stratospheric climate anomaly in Northern hemisphere. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 2003, **33**(3):229~336
- [49] 曲维政,黄菲,赵进平等.火山活动对北半球平流层气候异常变化的影响. *地球物理学进展*,2006,**21**(2): 650~659
Qu W Z, Huang F, Zhao J P, et al. The influence of volcanic activities on the abnormal changes of climate in stratosphere of the Northern Hemisphere. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(2): 650~659
- [50] 曲维政,赵进平,黄菲等.高空大气涛动现象与太阳活动的联系. *地球物理学进展*,2007,**22**(4):1057~1065
Qu W Z, Zhao J P, Huang F, et al. The oscillation modes in the atmospheric stratosphere and its relationship with solar activity. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007,**22**(4): 1057~1065
- [51] Minobe S. Climate variability with periodicity of 50~70 years over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **24**:683~686
- [52] Wang S W, Luo Y, Zao Z C. Will the global warming bring chilling. *Science & Technology Review*, 2004, **7**(3):20~25
- [53] Wang D W, Yang X Q. Temporal and spatial patterns of arctic sea ice variations. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002,**2**(1):50~61
- [54] Kushnir Y. Inter-decadal variations in North Atlantic Sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J. Climate*,1994,**7**:141~157
- [55] Wohlleben T M, Weaver A J. Interdecadal climate variability in the subpolar North Atlantic. *Clim. Dyn.*, 1995,**11**:459~467
- [56] Bersch M. North Atlantic Oscillation-induced changes of the upper layer circulation in the northern North Atlantic Ocean. *J Geophys Res*, 2002, **107**:31~56
- [57] Wu L X, Liu Z Y. Is tropical Atlantic variability driven by the north Atlantic oscillation? *Geophys Res Lett*, 2002, **29**: 16~53
- [58] Czaja A, Frankignoul C. Observed impact of North Atlantic SST anomalies on the North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, 2002,**15**:606~623
- [59] Zhou T J, Wang S W. Preliminary evaluation on the decadal scale variability of the North Atlantic thermohaline circulation during 20th Century. *Climatic and Environmental Research*, 2001,**6**(3): 294~305
- [60] Xu M X, Yan M, Kang J C. Progress in studies on mass balance of glaciers, svalbard Arctic. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007,**29**(5):173~180
- [61] Kushnir Y. Inter-decadal variations in North Atlantic Sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J. Climate*, 1994, **7**:141~157
- [62] Fang X M. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in west China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, **45**(4):289~299
- [63] Qu W Z, Qin T, Huang F. Information retrieval about the contribution of volcanic activity and CO₂ concentration increase to the climate variability. 2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering (CSIE 2009), 157~162
- [64] 曲维政,刘应辰,黄菲等.CO₂浓度和太阳活动对北半球夏季平流层中部气温异常变化的影响. *自然科学进展*,2008,**18**(12): 1418~1425
Qu W Z, Liu Y C, Huang F, et al. The effect of CO₂ concentration on summer temperature in middle stratosphere, North Hemisphere. *Progress in Natural Science*, 2008, **18**(12): 1418~1425
- [65] Lin Z S, Wang S G. EMD analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004,**20**(1):90~96
- [66] Jiang Z H, Li J P, Tu Q P. Regional characteristics of the decadal and interdecadal variations for global temperature field during the Last Century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, **28**(4):435~443
- [67] Minobe S. Climate variability with periodicity of 50~70 years over the North Pacific and North America. *Geophys Res Lett*, 1996, **24**:683~686

(本文编辑 胡素芳)