

平流层火山气溶胶时空传播规律及其气候效应^{*1}

曲维政 刘应辰 黄菲 曹勇 秦婷 白燕

(中国海洋大学, 青岛 266100)

摘 要

根据平流层火山气溶胶传播规律研究, 该文构建了反映火山喷发强度、平流层火山气溶胶相对浓度、火山气溶胶扩散速率和反映火山爆发地理位置并且按 e 指数规律衰减的火山活动指数 (VEI) 时空分布函数, 进一步建立了北半球中高纬度、南北半球低纬度和南半球中高纬度 3 个 1945—2008 年逐月火山活动指数时间序列。根据 3 个逐月火山活动指数时间序列分别分析了北半球中高纬度、南北半球低纬度和南半球中高纬度火山活动对于相应纬度带地面气温的影响。研究表明: 无论南北半球还是热带, 火山活动强时地面气温下降, 火山活动弱时地面气温上升, 并且地面气温对于火山活动的响应明显滞后。

关键词: 火山活动; 气候效应; 火山活动指数; 时间序列; 火山气溶胶

引 言

火山爆发对气候的影响, 主要通过高空火山气溶胶层的阳伞效应, 减少了到达低空的太阳辐射, 引起低层大气较大幅度降温^[1-2], 所以火山气溶胶时空传播分布特征, 是火山活动气候效应研究的重要内容。由于强火山爆发能够将大量含硫气体和火山灰送进平流层, 形成的火山气溶胶层将在平流层漂浮数月甚至数年, 并且向两极扩散, 最终覆盖地球表面^[3], 所以火山爆发虽然呈现很大的随机性、离散性、不连贯性, 但是不同地点、不同时间火山爆发形成的火山气溶胶层仍可能相互连接和叠加, 为构建以月为单位的连续的火山活动特征指数时间序列提供了可能。本文在前期工作^[4-6]基础上根据美国斯密森尼研究所公布的世界火山活动指数 VEI (Volcanic Explosivity Index) 资料, 进一步考虑了火山爆发纬度对于火山气溶胶扩散分布的影响以及火山喷发物质中能形成硫酸盐气溶胶的 SO₂ 气体含量对火山活动气候效应的影响^[7-9], 构建了新的 VEI 时间序列。另外, 为了历史资料前后连贯性和可比较性, 避免 20 世纪 60 年代以后火山定级偏高现象^[10], 本文对 20 世纪 50 年代以后的美国斯密森尼研究所公布的世界火山活动资料与美国海洋大气局 (NOAA) 的火山年表等资料^[11-12]进行了比较分析和订正。

月平均气温距平取自 NCAR/NCEP 再分析资料的全球月平均温度场格点资料, 所用数据均作了连续 17 个月滑动平均处理, 以滤除短波扰动。

1 火山活动影响范围和火山气溶胶总量

一些研究认为火山气溶胶的传播以半球为限, 不大可能进入另一半球^[13-15]。进一步研究显示, 凡是能够将火山气溶胶送进平流层的火山爆发, 即 4 级以上中强火山爆发, 对于另一半球的影响都不可忽视。如图 1 所示, 1974—1983 年是北半球火山多发期, 5 次中强火山爆发, 如 1974 年危地马拉 Fuego 火山、1976 年美国 Augustine 火山、1979 年俄罗斯 Bezymianny 火山、1980 年美国 St-Helens 火山、1982 年墨西哥 Ei-Chichon 火山爆发, 这几次火山活动均发生于北半球, 导致北半球中纬度地面气温持续偏低, 大部分时间低于多年平均值。南半球中纬度地面气温受到的影响比北半球小很多, 始终高于多年平均值, 不过也能清楚看到与北半球火山活动对应的幅度较大的波动, 比如危地马拉 Fuego 火山爆发和美国 Augustine 火山爆发导致南半球气温持续下降; St-Helens 火山爆发和 Ei-Chichon 火山爆发, 有效遏止了南半球持续升温趋势并且转变为持续下降。同样, 发生于南半球的两次火山活动, 如 1982 年 4 月印度尼西亚 Java-Galunggung 火山爆发和 1983 年 7 月印度尼西亚 Colo 火山

* 国家自然科学基金项目 (40875041, 40631006, 40975038) 资助。
2009-11-27 收到, 2010-07-01 收到再改稿。

爆发,不仅引起了南半球气温持续下降,也十分显著地引起北半球气温大幅度下降,显示了中强火山活动气候效应的全球性。

由于历次火山爆发喷发物质中 SO_2 气体含量不同,所形成的火山气溶胶厚度密度及其在大气层中滞留时间都有很大差异,其气候效应显然不同。本文根据 1945 年以来火山气溶胶资料^[11-12],分别求得 4 级、5 级和 6 级火山喷发平流层气溶胶质量 $m(k)$ 平均值

\bar{m} ,按公式

$$q(k) = \frac{m(k)}{\bar{m}}, \quad (1)$$

求得历次火山爆发火山气溶胶权重系数 $q(k)$ 。

3 级火山活动喷发高度在 10 km 之下,喷发物大部分没有进入平流层,其气溶胶受盛行气流影响仅限于该纬度带传播,在构建 VEI 时间序列时,只对本纬度带有影响。

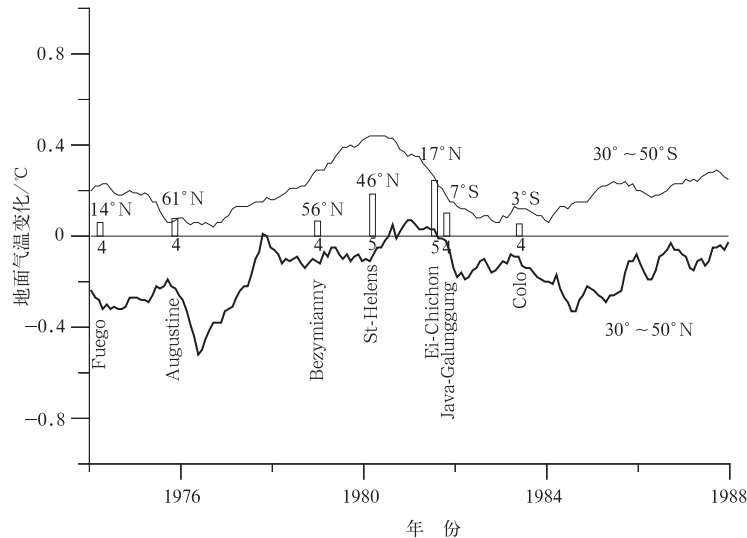


图 1 1974—1987 年 4 级以上火山活动(立柱)与南半球 30°~50°S 地面气温(细线)和北半球 30°~50°N 地面气温(粗线)变化
Fig. 1 The volcanic activities above grade 4 of 1974—1987 (column), the ground surface temperature in 30°—50°S (thin line) and the ground surface temperature in 30°—50°N (thick line)

2 火山活动指数时空分布函数和时间序列的建立

2.1 火山活动指数时空分布函数

根据 Agung 火山、St-Helens 火山、Hekla 火山、Ei-Chichon 火山和 Pinatubo 火山爆发资料分析,借鉴文献^[13-19]研究结果和上述讨论,本文建立的 VEI 时空分布函数 $a(i)$ 是由反映火山喷发强度、范围、能量释放率和破坏程度的火山活动指数 $v(k)$ 、反映平流层火山气溶胶相对浓度的火山气溶胶权重系数 $q(k)$ 、反映火山气溶胶扩散速率的特征时间 t 及反映火山爆发地理位置的纬度系数 $\varphi(j)$ 所决定的并且按 e 指数律衰减,即

$$a(k+i) = \begin{cases} \varphi_1(j)q(k)v(k)\exp\left(-\frac{i}{t} - \frac{2.5}{i+2}\right), & 0 < i \leq 15; \\ \varphi_2(j)q(k)v(k)\exp\left(\frac{29.3-i}{18.0}\right), & 16 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (2)$$

火山活动序号 k 从 1945 年 1 月算起,按月依次向后排列,分别为 1, 2, 3, ...。1945 年 1 月俄罗斯堪察加半岛 Kliuchevskoi 火山序号为 1; n 表示一次火山爆发之后火山气溶胶在大气中最大滞留时间,本文取 180 个月; i 是火山气溶胶形成和滞留时间,从火山爆发当月算起到火山气溶胶散尽结束, $i=1, 2, \dots, n$; $\varphi_1(j)$ 是火山爆发当月至 15 个月以内的纬度系数, $j=1, 2, 3$ 分别表示火山所在纬度带、相邻纬度带和隔纬度带,对应于火山所在纬度带 $\varphi_1(1)$ 、相邻纬度带 $\varphi_1(2)$ 和隔纬度带 $\varphi_1(3)$ 实验数据分别为 2.5952, 2.3875 和 1.7474; 纬度系数 $\varphi_2(j)$ 是火山爆发 15 个月以后,对应于火山所在纬度带 $\varphi_2(1)$ 、相邻纬度带 $\varphi_2(2)$ 和隔纬度带 $\varphi_2(3)$ 实验数据分别为 0.3979, 0.3633 和 0.2526; $q(k)$ 为第 k 个火山气溶胶的权重系数,目前无法确定 $q(k)$ 值的火山活动, $q(k)$ 取值 1; 火山活动指数 $v(k)$ 是相应火山活动的 VEI 等级; 特征时间 $t=16.3$ 。

本文建立的 VEI 时空分布函数 $a(i)$ 相比现存火山喷发物质或者火山气溶胶传播分布模型有如下

几点改进:① 通过纬度系数 $\varphi_1(j), \varphi_2(j), j=1, 2, 3$, 将中强火山活动影响扩展到了全球, 与观测结果取得一致;② 通过火山气溶胶权重系数 $q(k)$ 将具体火山喷发物质中对于火山气候效应有重要影响的硫化物含量差异纳入分布函数;③ 考虑了 3 级火山活动的区域性影响。

如果不考虑纬度因素, 不计火山气溶胶权重和喷发级别, 则式(2)简化为一般的火山气溶胶扩散函数, 其中火山尘幕即火山灰扩散分布函数

$$a_1(i) = 0.5128 \exp\left(\frac{6-i}{5.7}\right), i = 1, 2, \dots, 80. \quad (3)$$

火山气溶胶扩散规律

$$a_2(i) = \begin{cases} 1.5385 \exp\left(-\frac{i}{16.3} - \frac{1.45}{i}\right), & 0 < i \leq 15; \\ 0.2436 \exp\left(\frac{31.0-i}{18.0}\right), & 16 \leq i \leq 80. \end{cases} \quad (4)$$

火山尘幕和火山气溶胶联合扩散函数

$$a_3(i) = \begin{cases} 2.5952 \exp\left(-\frac{i}{16.3} - \frac{2.5}{i+2}\right), & 0 < i \leq 15; \\ 0.3979 \exp\left(\frac{29.3-i}{18.0}\right), & 16 \leq i \leq 80. \end{cases} \quad (5)$$

根据式(3)、(4)、(5)求得火山尘幕扩散曲线、火山气溶胶扩散曲线、火山尘幕和火山气溶胶扩散曲线绘于图 2。由火山尘幕扩散曲线 $a_1(i)$ 看到, 大气中火山尘埃在火山喷发当月就达到最大值, 在火山尘埃很快扩展为火山尘幕的同时, 其衰减也很迅速, 一年之后就几乎全部降落离开大气; 由火山气溶胶扩散曲线 $a_2(i)$ 看到, 随火山爆发将大量含硫气体、水汽和火山灰送进平流层, 在 10~30 km 高空形火山气溶胶层, 并且向两极扩散。火山气溶胶浓度大约

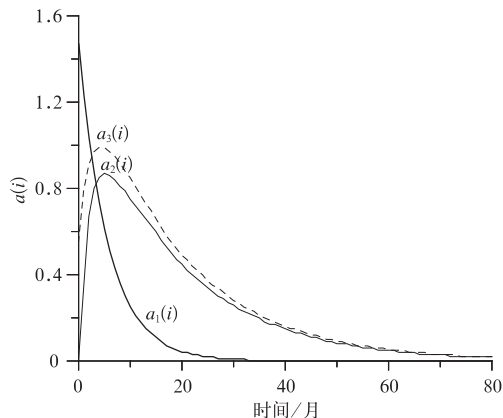


图 2 火山气溶胶和火山尘幕扩散规律

Fig. 2 The diffusing rules of volcanic aerosols and volcanic dust curtain

在喷发后 4~6 个月时达到最大, 之后按 e 指数规律缓慢衰减, 在大气中可存留数年之久; 对大气辐射平衡产生影响的是火山气溶胶和火山尘幕联合作用, 火山气溶胶和火山尘幕扩散曲线 $a_3(i)$ 则显示了这个特点, 其最大值出现在火山喷发后 5 个月左右, 然后按 e 指数规律衰减。火山喷发头两个月送进平流层火山物质虽然量很大, 但是没有扩散开来, 对气温的影响不是最大。

2.2 不同纬度带逐月火山活动指数时间序列建立

首先根据火山活动指数时空分布函数以北半球 $30^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ 纬度带逐月火山活动特征指数时间序列建立为例, 说明时间序列建立过程。北半球中高纬度 VEI 时间序列是由发生于北半球中高纬度、南北半球低纬度和南半球中高纬度 3 个纬度带火山活动决定的。3 个纬度带的影响分 3 个方程组计算, 对于本纬度带, 即北半球 $30^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ 纬度带, 根据 VEI 时空分布函数 $a(i)$ 式(2), 将火山所在纬度带纬度系数 $\varphi_1(1) = 2.5952, \varphi_2(1) = 0.3979$, 火山气溶胶权重系数 $q(k)$, 火山活动等级 $v(k)$, 代进式(2), 得到本纬度带 VEI 时空分布函数

$$a_{11}(k+i) = \begin{cases} 2.5952q(k)v(k) \exp\left(-\frac{i}{16.3} - \frac{2.5}{i+2}\right), & 0 < i \leq 15; \\ 0.3979q(k)v(k) \exp\left(\frac{29.3-i}{18.0}\right), & 16 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (6)$$

对于相邻纬度带, 即 $30^\circ \text{S} \sim 30^\circ \text{N}$ 纬度带, 根据 VEI 时空分布函数 $a(i)$ 式(2), 将相邻纬度带火山纬度系数 $\varphi_1(2) = 2.3875, \varphi_2(2) = 0.3633$, 火山气溶胶权重系数 $q(k)$, 火山活动等级 $v(k)$, 代进式(2), 得到相邻纬度带 VEI 时空分布函数

$$a_{22}(k+i) = \begin{cases} 2.3875q(k)v(k) \exp\left(-\frac{i}{16.3} + \frac{2.0}{i}\right), & 0 < i \leq 15; \\ 0.3633q(k)v(k) \exp\left(\frac{29.3-i}{18.0}\right), & 16 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (7)$$

对于隔纬度带, 即南半球 $30^\circ \sim 90^\circ \text{S}$ 纬度带, 根据 VEI 时空分布函数 $a(i)$ 式(2), 将火山隔纬度带纬度系数 $\varphi_1(3) = 1.7474, \varphi_2(3) = 0.2526$, 火山气溶胶权重系数 $q(k)$, 火山活动等级 $v(k)$, 代进式(2) 得到隔纬度带 VEI 时空分布函数

$$a_{33}(k+i) = \begin{cases} 1.7474q(k)v(k) \exp\left(-\frac{i}{16.3} + \frac{2.7}{i}\right), & 0 < i \leq 15; \\ 0.2526q(k)v(k) \exp\left(\frac{29.3-i}{18.0}\right), & 16 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (8)$$

从 1945 年 1 月开始的每一次火山爆发,按其序号、所在纬度,根据式(6)~(8)进行计算,依次相加,获得北半球 30°~90°N 纬度带逐月火山活动特征指数时间序列。同样方法,可获得南半球 30°~90°S 纬度带和南北半球 30°S~30°N 纬度带逐月火山活动特征指数时间序列。

3 火山活动气候效应初步分析

3.1 南北半球中高纬度火山活动与中纬度和极区域地面气温异常

选择 1955—1958 年时段进行对比分析。1955—1956 年为火山活动活跃期,其中 1956 年 3 月俄罗斯堪察加半岛的 Bezymianny 5 级火山喷发、1955 年 7 月南半球智利 Carran-Los 4 级火山爆发、阿拉斯加—勘察加—千岛群岛一带还有 4 次 3 级火山活动,构成了火山活动多发期;而 1957—1958 年北半球中高纬度只有 2 次 3 级火山活动,全球其他地区没有 4 级及其以上火山活动,构成了火山活动沉寂期。由表 1 看到的最显著特点是,1955—1956 年火山活动多发期对应着北半球中纬度地面气温偏低时期;1957—1958 年火山活动沉寂期对应着落后 6 个

月左右的北半球中纬度地面气温偏高时期。

另外,1950—2000 年南半球中高纬度火山活动与南半球中纬度地面气温的相关分析显示,南北半球中高纬度火山活动与南半球中纬度地面气温的关系并不密切,而与南半球高纬度地面气温呈显著反相关关系,最大反相关函数值出现在第 15 个月前后,为 -0.236。

3.2 南北半球低纬度火山活动与热带地面气温异常

以 1990—1994 年时段为例,其中 1990—1991 年 5 月只有 1990 年爪哇 Kelut 1 次 4 级火山爆发和 3 次 3 级火山活动,构成了火山活动少发期,对应着热带地面气温偏高时期,而且火山活动进入低谷之后 5—6 个月热带气温才升到高峰;而 1991 年 6 月—1993 年 4 月是火山活动活跃期,其间有 1 次 20 世纪最强的火山爆发即菲律宾 Pinatubo 火山 1991 年 6 月大喷发,其次是 1993 年 4 月智利北部 Lascar 火山、智利南部 1991 年 8 月 Hudson 火山、1992 年 6 月美国 Spurr 等 4 级火山爆发,火山活动多发期对应着其后热带地面气温偏低时期,而且火山活动进入高峰之后 1 年多热带气温才降到波谷,气温滞后特点十分显著。

表 1 1955—1958 年北半球中高纬度 VEI 时间序列与北半球中纬度地面气温距平 Δt

Table 1 The VEI time series in Northern Hemisphere in middle and high latitudes of 1955—1958 and the ground surface temperature anomaly in the middle latitudes of Northern Hemisphere

月份	1955 年		1956 年		1957 年		1958 年	
	VEI	$\Delta t/^\circ\text{C}$	VEI	$\Delta t/^\circ\text{C}$	VEI	$\Delta t/^\circ\text{C}$	VEI	$\Delta t/^\circ\text{C}$
1	6	-0.5	36	-0.5	5	-0.3	-12	0.1
2	7	-0.5	38	-0.5	0	-0.3	-12	0.1
3	13	-0.6	30	-0.5	-6	-0.2	-12	0.1
4	11	-0.6	24	-0.5	-9	-0.2	-11	0.1
5	11	-0.5	22	-0.4	-11	-0.1	-11	0.1
6	12	-0.5	21	-0.4	-13	-0.1	-10	0.1
7	13	-0.4	22	-0.3	-15	0.0	-10	0.2
8	21	-0.4	15	-0.3	-15	0.0	-10	0.2
9	23	-0.4	13	-0.2	-16	0.0	-10	0.2
10	30	-0.4	12	-0.2	-16	0.1	-9	0.2
11	32	-0.4	11	-0.1	-16	0.1	-9	0.1
12	35	-0.5	11	-0.1	-13	0.1	-8	0.1

4 小 结

本文根据火山喷发高度和强度、平流层火山气溶胶相对浓度和火山爆发地理位置对于火山气溶胶传播分布的影响,研究并建立了按 e 指数规律衰减的 VEI 时空分布函数。进一步由 VEI 时空分布函数分别建立了北半球中高纬度、南北半球低纬度和

南半球中高纬度 3 个 1945—2008 年逐月火山活动指数时间序列。

根据 3 个逐月火山活动指数时间序列分别分析了南北半球不同纬度火山活动对于相应纬度带地面气温的影响。研究表明,火山活动强时地面气温下降,火山活动弱时地面气温上升,并且地面气温对于火山活动的响应明显滞后。

参 考 文 献

- [1] 王绍武. 全球温度变暖的检测及成因分析. 应用气象学报, 1993, 4(2): 226-233.
- [2] 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.
- [3] McCormick M P, Thomason L W, Trepte C R. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 1995, 373: 399-404.
- [4] 曲维政, 赵进平, 赵雪, 等. 火山活动对南半球平流层大气温度异常变化的影响. 地学前缘, 2004, 11(2): 144-152.
- [5] 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.
- [6] Qu Weizheng, Bai Yan, Huang Fei, et al. Effect of volcanic activity on the temperature in the tropical upper atmosphere. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 408-416.
- [7] Bluth G J, Doiron S D, Schnetzler C, et al. Global tracking of the SO₂ clouds from the June 1991 Mount Pinatubo eruptions. *Geophys Res Lett*, 1992, 19(2): 151-154.
- [8] Krueger A J. Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer instruments. *Geophys Res Lett*, 1995, 100, D7: 14057-14076.
- [9] Cole-Dai J, Mosley-Thompson E, Thompson L G. Quantifying the Pinatubo volcanic in south polar snow. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(21): 2679-2682.
- [10] Deshler T, Hofmann D J, Johnson B J, et al. Balloonborne measurements of the Pinatubo aerosol size distribution and volatility at Laramie, Wyoming during the summer of 1991. *Geophys Res Lett*, 1992, 19(2): 199-202.
- [11] Hmelevtsov S S. Aerosol and modern climate change. *Meteorology and Hydrology*, 1987, 11: 59-63.
- [12] Xu Qun. The assessment of volcanic dust veil index of northern temperate zone in the recent 100 years. *Acta Geophysica Sinica*, 1985, 28(6): 558-568.
- [13] Lamoureux S F, England J H, Sharp M J, et al. A varve record of increased Little Ice Age rainfall associated with volcanic activity, Arctic Archipelago, Canada. *The Holocene*, 2001, 11: 243-249.
- [14] Zhang Chengyuan, Xi Daoying, Liu Xiaoyan, et al. A theoretical model for diffusion of volcanic eruptive sediment. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 109-107.
- [15] Lwasaka Y, Shibata T. Lidar measurements at Alaska(1991—1994)—Pinatubo volcanic effect on stratospheric aerosol layer. *The Review of Laser Engineering*, 1995, 23(2): 166-170.
- [16] Lambert R J, Schlesinger M E, Hammitt J K. The impact of potential abrupt climate changes on nearterm policy choices. *Clim Change*, 1994, 26: 351-376.
- [17] 胡荣明, 石广玉. 平流层气溶胶的辐射强迫及其气候响应的水平二维分析. 大气科学, 1998, 22(1): 18-22.
- [18] 徐晓斌, 刘希文, 林伟立. 输送对区域本底站痕量气体浓度的影响. 应用气象学报, 2009, 20(6): 656-664.
- [19] 胡婷, 孙照渤, 张海东. 我国 380 nm 波长气溶胶光学厚度分布特征和演变趋势. 应用气象学报, 2008, 19(5): 513-520.

The Space-time Propagation Patterns of the Stratospheric Volcanic Aerosols and the Preliminary Analysis of Their Climate Effect

Qu Weizheng Liu Yingchen Huang Fei Cao Yong Qin Ting Bai Yan

(Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract

Based on the research of the propagation patterns of the stratospheric volcanic aerosols, the space-time distribution function of Volcanic Explosivity Index (VEI) with the exponential decay is constructed which can reflect the volcano eruption intensity, the relative concentration, the propagation rate of the stratospheric volcanic aerosols and the volcano eruption location. Furthermore, time series of the volcanic activity indexes (1945—2008) every 3 months at middle and high latitudes of the Northern Hemisphere, the low latitudes of the Northern and Southern Hemisphere and the middle and high latitudes of the Southern Hemisphere are built up.

Based on the time series of volcanic activity indexes, the influences of the volcano activity on the surface temperature at middle and high latitudes of the Northern Hemisphere, at low latitudes of the Northern and Southern Hemisphere and at middle and high latitudes of the Southern Hemisphere, are analyzed separately. The results indicate that either at the Northern and Southern hemisphere or at the tropical zone the ground layer air temperature decreases when the volcanic activity is strong, while it increases when the volcanic activity is weak. At the same time, the variations of the ground layer air temperature lag behind those of the volcanic activity.

Key words: volcanic activity; climate effects; VEI; time series; volcanic aerosols