

平流层火山气溶胶对长波辐射的影响

赵高祥 汪宏七

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘要 通过辐射传输计算, 对不同大气状况下平流层火山气溶胶对地面和大气顶长波辐射收支及大气中长波辐射冷却率的影响进行了分析. 发现它的显著加热作用发生在平流层, 与对太阳辐射的影响相比, 平流层火山气溶胶对长波辐射的影响是比较小的.

关键词 火山气溶胶, 长波辐射, 冷却率.

引言

强火山喷发可使很宽纬度带平流层气溶胶显著增加, 其光学厚度的增加与平流层背景气溶胶相比, 可达2个数量级, 强火山喷发后还观测到平流层温度升高和全球平均对流层及地面的温度下降^[1,2], 这种温度变化是与平流层形成的高浓度火山气溶胶密切相关的. 火山气溶胶使地气系统的行星反照率增加, 从而使地气系统接收的太阳辐射能减少, 起到冷却地气系统的作用, 但在平流层中吸收的太阳辐射能反而是增加的, 对平流层有加热作用^[3]. 对长波辐射而言, 平流层火山气溶胶的温室效应起加热地气系统的作用, 但在不同的纬度和季节以及不同的大气状况下, 火山气溶胶对长波辐射的影响是不同的. 为了考察火山气溶胶对长波辐射的影响, 我们对平流层为背景气溶胶和火山气溶胶模式, 在大气无云和有云的不同状况下, 利用LOWTRAN7^[4]进行了长波辐射传输及长波辐射冷却率的计算, 所取波长范围为4~30 μm .

1 计算结果

1.1 晴空大气

表1列出了热带和中纬度冬季模式大气中不同气溶胶的计算结果. 表1中BR1和BR2表示在0~2km大气层中地面能见度分别为23km和5km时的大陆气溶胶模式; BSA、VSA1和VSA2分别表示10~30km大气层中为平流层背景的气溶胶, 1~5年和1年之内的平流层火山气溶胶模式^[4], F_i 表示大气顶向上的长波辐射, N_i 为地面净长波辐射, F_{10} 为到达10km高度的大气向下的长波辐射, $Z_1 \sim Z_2$ 表示由平流层火山气溶胶影响造成的长波辐射冷却率变化最大的层, H 为该层中的加热率, 正值为加热, 负值为冷却, ΔH 为平流层火

山气溶胶造成的该层中加热率变化. 由表 1 可见, 当平流层为 1~5 年的火山气溶胶时, 相对于平流层背景气溶胶, F_{\downarrow} 、 N_{\downarrow} 和 F_{10} 都没有变化或变化很小, 最大的加热率变化 ΔH 也很小; 但当平流层为 1 年之内的火山气溶胶时, 与背景气溶胶情况相比, 在热带和中纬度冬季大气中, 大气顶向上辐射分别减少 4.4W/m^2 和 2.1W/m^2 , 地面净辐射分别减少 0.43W/m^2 和 0.76W/m^2 , F_{10} 分别增加 1.99W/m^2 和 1.52W/m^2 , 平流层中最大加热率变化分别为 0.300K/d 和 0.054K/d . 在热带大气中平流层火山气溶胶在大气顶造成 4.4W/m^2 的辐射强迫作用可与 CO_2 加倍的作用相比, 但火山气溶胶的这种影响在不同的季节和纬度是不同的. 到达 10km 高度, 向下辐射的增加和地面净辐射的减少则表明火山气溶胶对对流层和地面有加热的作用, 但由于大气质量主要集中在下层大气, 故在对流层中加热率的变化并不明显. 图 1 为在平流层背景气溶胶(BSA)和平流层火山气溶胶(VSA2)时, 热带(T)和中纬度冬季(M)大气中长波辐射加热率, 实线为背景气溶胶时的加热率, 虚线为火山气溶胶时的加热率. 平流层火山气溶胶有加热平流层的作用, 加热率变化显著的区域与火山气溶胶浓度有明显增加的区域是一致的, 此外, 它还与平流层温度本身有关, 热带大气中平流层的加热作用比中纬度冬季大气中更明显. 热带大气中在 $18\sim 19\text{km}$ 层中加热率增加最大, 达到 0.3K/d , 而在中纬度冬季大气中最大变化只有 0.054K/d , 出现在 $17\sim 18\text{km}$ 层中, 在对流层以及平流层高层以上的大气中, 火山气溶胶造成的加热率变化不明显, 在平流层上层以及更高的层上还可出现弱的冷却作用.

表 1 平流层火山气溶胶对长波辐射的影响
Table 1 The effects of stratospheric volcanic aerosols on long-wave radiation

大气	云	气溶胶	F_{\downarrow} (W/m^2)	N_{\downarrow} (W/m^2)	F_{10} (W/m^2)	Z_1-Z_2 (km)	H (K/d)	ΔH (k/d)	
热带	无	BR2+BSA	258.2	55.91	33.07	18-19	0.0861		
		BR2+BSA	(258.5)	(55.95)	(32.97)	(18-19)	(0.0739)	(-0.012)	
		BR2+VSA1	258.2	55.91	33.11	18-19	0.0877	0.0016	
		BR2+VSA2	253.8	55.48	35.06	18-19	0.386	0.300	
	C_i	BR2+BSA	240.1	54.77	44.04	18-19	0.0870		
		BR2+VSA2	236.1	54.42	45.71	18-19	0.350	0.263	
	C_i	BR1+BSA	240.7	58.46	44.04	18-19	0.0871		
		BR1+VSA1	236.7	58.07	45.72	18-19	0.353	0.266	
	A_c	BR1+BSA	226.5	18.26	35.62	18-20	0.0279		
		BR1+VSA2	223.2	18.26	37.34	18-20	0.220	0.192	
	S_c	BR1+BSA	246.6	3.82	35.62	18-20	0.0291		
		BR1+VSA2	242.7	3.82	37.48	18-20	0.0272	0.243	
	中纬度(冬季)	无	BR1+BSA	199.9	84.71	21.23	17-18	-0.413	
			BR1+VSA1	199.9	84.70	21.27	17-18	-0.412	0.001
			BR1+VSA2	197.8	83.95	22.75	17-18	-0.359	0.054
			BR1+VSA2	(198.1)	(84.03)	(22.64)	(17-18)	(-0.366)	(0.047)
C_i		BR1+BSA	189.8	81.14	21.27	17-18	-0.417		
		BR1+VSA1	189.7	81.13	21.31	17-18	-0.417	0.000	
		BR1+VSA2	187.9	80.49	22.75	17-18	-0.377	0.040	
S_c		BR1+BSA	189.9	2.32	22.28	16-18	-0.384		
		BR1+VSA1	189.9	2.32	22.31	16-18	-0.384	0.000	
		BR1+VSA2	188.1	2.32	23.70	16-18	-0.353	0.031	

1.2 有云大气

表 1 给出了大气中有层云(S_c), 高层云(A_c)和卷云(C_i)时的结果, 云的存在可使云下面

大气中的向下辐射和云上面大气中的向上辐射与晴空时相比有明显的改变,从而造成平流层火山气溶胶对大气中长波辐射加热率的影响与晴空时不同,对作为黑体的云(如 S_c, A_c),火山气溶胶引起平流层长波辐射加热率的变化值随云高的增加和云顶温度的降低而减小,但加热率变化极大的层的位置并不改变;半透明的卷云也有使到达平流层的向上长波辐射减少的作用,因而也使火山气溶胶在平流层的加热作用变小,但它的影响比黑体云小。

由表 1 可见,在热带有卷云(C_c)大气中,当近地面 0~2km 层中的气溶胶不同(由 BR1 和 BR2 表示)时,到达地面和大气顶向上长波辐射都不同,对平流层火山气溶胶造成的长波辐射加热率也有影响,但从平流层加热率变化的极大值看,它们分别为 0.266 和 0.263K/d,说明近地面层中不同气溶胶产生的影响很小. 图 2 是 0~2km 大陆气溶胶模式,能见度为 23km,平流层分别为背景气溶胶(BSA)和火山气溶胶(VSA2)时,大气中长波辐射加热率。

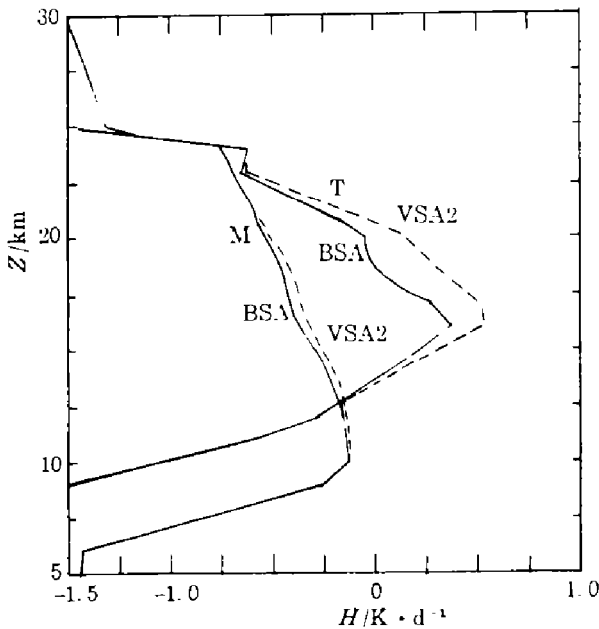


图 1 平流层火山气溶胶对长波辐射加热率的影响
Fig. 1 The effect of stratospheric aerosols on longwave heating rate

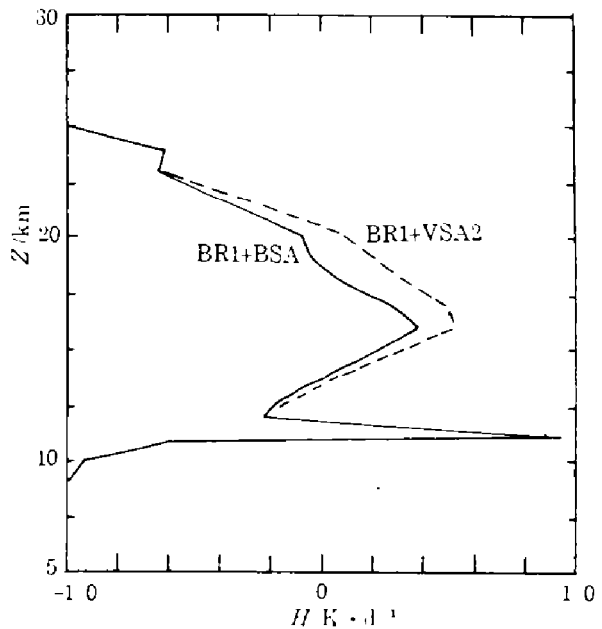


图 2 热带卷云大气长波辐射加热率
Fig. 2 Longwave radiation heating rates in tropical atmosphere with cirrus

图 3 为中纬度冬季有卷云大气中的长波辐射加热率,与图 2 相比可见,火山气溶胶引起的平流层加热率的变化比有卷云的热带大气中要小,这与晴空情况类似. 火山气溶胶还影响到卷云中的加热率,在热带和中纬度冬季大气中,卷云中加热率增加分别为 0.068K/d 和 0.036 K/d. 图 4 和图 5 表明在大气中有层云和高层云时火山气溶胶对大气中长波辐射加热率的影响,这时加热率变化最明显的区域仍在平流层中,与火山喷发造成的平流层气溶胶显著增加的区域是一致的. 图 4 中曲线 1、2 为中纬度冬季大气情况,曲线 3、4 为热带大气情况,实线为平流层背景气溶胶(BSA),虚线为火山气溶胶(VSA2)由于把层云和高层云作为黑体处理,与卷云时不同,这时火山气溶胶并不影响云中的加热率,但邻近云顶的大气层的冷却率都是减小的。

1.3 8-12.5 μm 窗区

在长波区域的不同波段,平流层火山气溶胶的作用是不同的,图 6 中给出了 8-12.5 μm

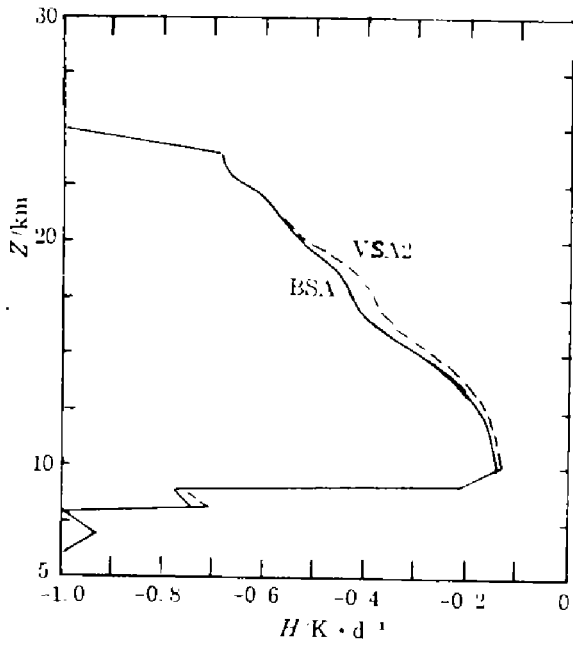


图 3 中纬度冬季有卷云大气的长波辐射加热率
 Fig. 3 Longwave-heating rates in midlatitude winter atmosphere with cirrus

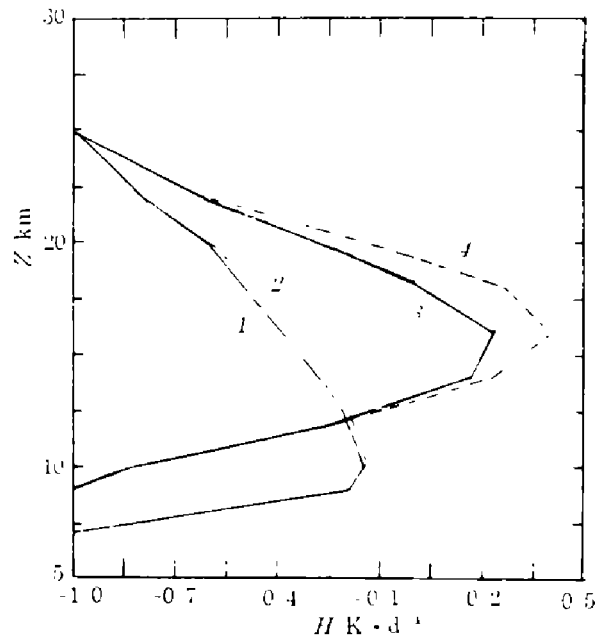


图 4 有层云大气的长波辐射加热率
 Fig. 4 Longwave-heating rates in the atmosphere with stratus

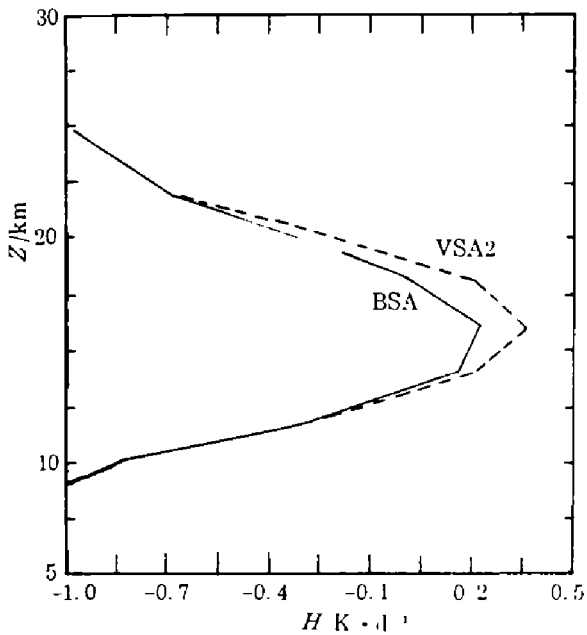


图 5 有高层云热带大气长波辐射加热率
 Fig. 5 Longwave heating rates in tropical atmosphere with altostratus

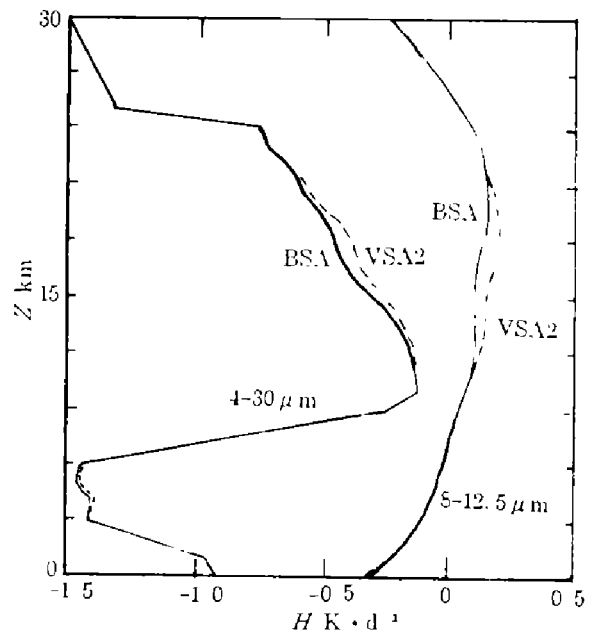


图 6 8-12.5 μm 和 4-30 μm 光谱区火山气溶胶对中纬度冬季大气中长波辐射加热率影响的比较
 Fig. 6 Comparison of the effects of volcanical stratospheric aerosols(VSA2) on longwave heating rates between 8-12.5 μm and 4-30 μm regions in the midlatitude winter atmosphere

大气窗区和包括了绝大部分地球长波辐射能的 4-30 μm 光谱区中,平流层火山气溶胶对中纬度冬季大气中长波辐射加热率的影响.可以看出,与只存在背景平流层气溶胶时相比,火山气溶胶造成的总的长波辐射加热率的增加主要是由 8-12.5 μm 大气窗区的贡献造成的.与窗区的情况相反,在大气气体(H_2O , CO_2 等)的强吸收带,平流层火山气溶胶有冷却平流层的作用.

2 对太阳辐射的影响

对热带和中纬度冬季大气,在地表反照率为 0.1 时,平流层火山气溶胶对太阳辐射影响的计算结果见表 2,其中 θ_0 为太阳天顶角, O_3 为大气柱中的臭氧总量, F_{10} 和 F_s 分别为到达 10km 和地面的太阳辐射通量, F_{DIR} 和 F_{DIF} 分别为到达地面的直射和漫射太阳辐射, F_r 为大气顶反射的太阳辐射通量, Z 为平流层中火山气溶胶相对于背景平流层气溶胶加热率变化最大的高度, H 为该层的太阳辐射加热率, ΔH 为相应的加热率变化,比较表 1 和表 2 可见,平流层火山气溶胶对直接太阳辐射有很强的削弱作用,对向下漫射辐射则有增强作用,但到达地面的总的太阳辐射仍有显著的减小,它远比火山气溶胶造成的到达地面的长波辐射增加要大;对大气顶反射太阳辐射,火山气溶胶有增强作用.

表 2 平流层火山气溶胶对太阳辐射的影响
Table 2 The effects of stratospheric volcanic aerosols on solar radiation

大气	θ_0 ($^\circ$)	气溶胶	O_3^* (atm. cm)	F_{10} (W/m^2)	F_{DIR} (W/m^2)	F_{DIF} (W/m^2)	F_r^\dagger (W/m^2)	F_s^\dagger (W/m^2)	Z (km)	H_s (k/d)	ΔH_s (K/d)
热带	35	BR1+BSA	0.2773	1060.0	579.5	214.5	794.0	139.8	20	0.6933	
		BR1+VSA2	0.2773	1039.0	519.2	258.5	777.7	141.5	20	2.705	2.012
		BR2+VSA2	0.2773	1040.0	260.5	417.1	677.6	177.7	20	2.773	2.080
热带	71	BR2+BSA	0.2773	404.4	31.23	134.57	165.8	125.0	20	0.4274	
		BR2+VSA2	0.2773	373.8	23.71	131.79	155.5	128.2	20	2.546	2.119
		BR2+VSA2	0.252	374.5	23.72	132.18	155.9	128.9	20	2.524	2.097
中纬度 (冬季)	77	BR1+BSA	0.3768	274.1	75.04	79.66	154.7	79.6	19	0.6115	
		BR1+VSA2	0.3768	247.1	54.93	86.37	141.3	85.9	19	1.997	1.386
		BR1+VSA2	0.3438	248.0	55.05	86.75	141.8	86.5	19	1.960	1.349

* latm=101325 Pa

图 7 和图 8 是晴空热带和中纬度冬季大气中火山气溶胶(VSA2)造成的长波辐射(LW)和太阳辐射(SW)加热率变化的比较.图 7、图 8 和表 2 都表明,对太阳辐射,火山气溶胶造成的平流层加热作用远比对长波辐射要强,其加热率变化出现极大的高度则比长波辐射时略高,这意味着在强火山喷发后观测到的平流层增温中,火山气溶胶对太阳辐射的吸收加热起主要作用;在对流层中,则可造成太阳辐射加热率减小.

3 臭氧变化的辐射影响

强火山喷发后,可造成平流层臭氧明显减少.臭氧在平流层加热中有重要作用,为了考察平流层臭氧减少的影响,考虑了在热带和中纬度冬季大气中,12km 以上的 O_3 浓度比模式大气给定的值小 10% 的情况,这时,对长波辐射的计算结果见表 1 中带括号的数值,对太阳辐射的结果在表 2 中给出,在其它条件相同时, O_3 的减少使到达对流层和地面的向下长波辐射减少,大气顶射出的长波辐射增加,平流层中吸收的长波辐射减少,冷却率增加;对太阳辐射则造成向下太阳辐射和大气顶反射太阳辐射增加,平流层吸收太阳辐射减少,有冷却作用,但与火山气溶胶造成的平流层加热作用相比,它们都要小得多.图 7 和图 8 中的点线表示平流层有火山气溶胶和 O_3 浓度减少 10% 时大气中的太阳辐射加热率,可见平流层 O_3 的减少可部分抵消火山气溶胶引起的平流层太阳辐射加热率增加的作用.

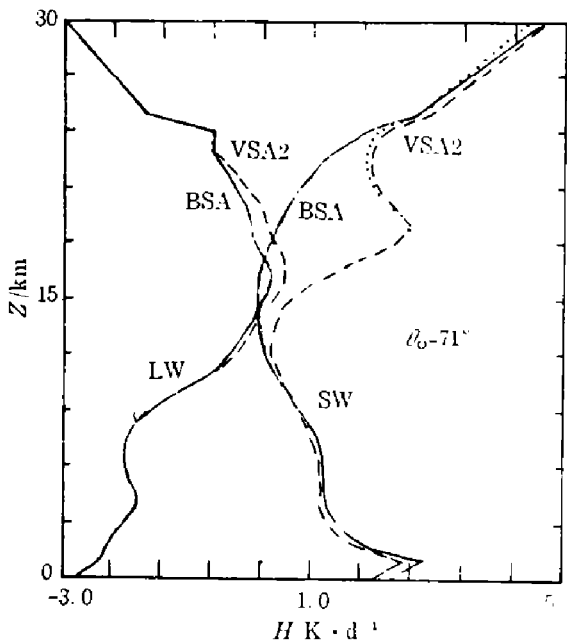


图 7 平流层火山气溶胶对热带大气中长波和太阳辐射加热率的影响

Fig. 7 The effects of stratospheric volcanic aerosol on longwave and solar radiation heating rates in the tropical atmosphere

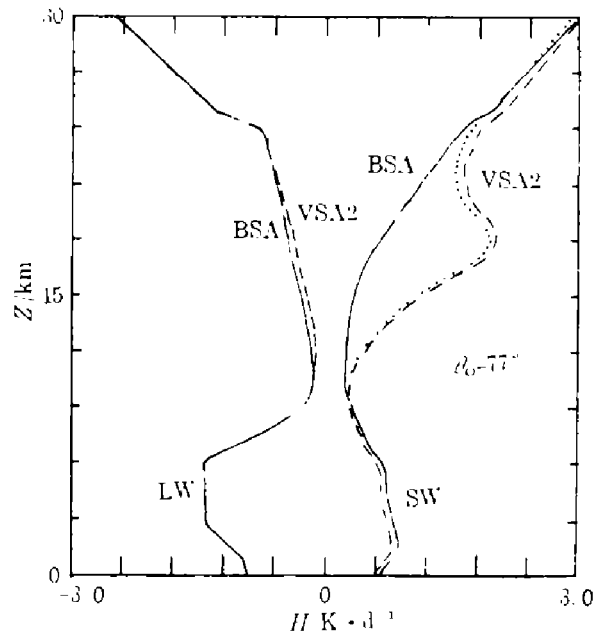


图 8 平流层火山气溶胶对中纬度冬季在大气中长波和太阳辐射加热率的影响

Fig. 8 The effects of stratospheric volcanic aerosol on longwave and solar radiation heating rates in the midlatitude winter atmosphere

4 结语

强火山喷发形成的高浓度的平流层火山气溶胶通过对辐射传输的影响可改变地气系统辐射能收支,改变系统内部辐射能量的分配.平流层火山气溶胶的长波辐射温室效应可与 CO_2 加倍的作用相比,它造成的地气系统长波辐射损失的减少可对大气和地面有加热作用,

但从长波辐射加热率的变化可见,在平流层中的加热作用最为明显,这与高浓度的火山气溶胶所在的位置是一致的.但这种平流层加热作用的大小除了与火山气溶胶本身有关外,还与大气的温度结构有关,如在热带大气中平流层加热作用要明显大于中纬度冬季的加热作用.火山气溶胶对长波辐射的影响还与大气中的云有关,云的类型和高度不同,其影响也不同.对黑体云来说,火山气溶胶造成的平流层长波辐射加热率的变化随云高度的增加而减小.

平流层火山气溶胶对长波辐射的影响与它对太阳辐射的影响相比是比较小的,平流层火山气溶胶造成到达对流层和地面的太阳辐射能的减少可远比长波辐射能的增加要大;在平流层中太阳辐射加热率的增加远大于长波辐射加热率的增加,但无论对太阳还是长波辐射,火山气溶胶对平流层都有加热作用.这与强火山喷发后观测到的平流层增温和对流层及地面降温的现象是一致的.

强火山喷发后平流层 O_3 明显减少可导致平流层长波辐射冷却率增大,太阳辐射加热率变小,但臭氧减少使平流层冷却的作用比火山气溶胶造成的平流层太阳和长波辐射加热的作用要小得多.

参考文献

- 1 Mukherjee B K, Indira K, Kulkarni C P. *IAMAP. IAHS' 93 Abstracts*, 1993; M7, M7-7
- 2 Kawamata M, Yamada S, Kudoh T, Takano K. *IAMAP. IAHS' 93 Abstracts*, 1993; M7, M7-5
- 3 汪宏七, 赵高祥. *大气科学*, 1992; 16(6): 755-760
- 4 Kneizys F X, et al. *User's Guide to LOWTRAN7*, AFGL-TR-88-0177, 1988; P137

THE EFFECTS OF STRATOSPHERIC VOLCANIC AEROSOLS ON LONGWAVE RADIATION

Zhao Gaoxiang, Wang Hongqi

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract In this paper the effects of stratospheric volcanic aerosols on longwave radiation budgets at the top of the atmosphere and on the surface and the infrared cooling rates in the atmosphere were investigated through radiative transfer calculations for different atmospheres under clear and cloudy conditions. It was found that the most pronounced heating role of the stratospheric volcanic aerosol occurs in the stratosphere. Compared with the effect of stratospheric volcanic aerosols on solar radiation, its effect on longwave radiation is relatively small.

Key words volcanic aerosols, longwave radiation, cooling rate