

气溶胶气候效应的一维模式分析

赵凤生 石广玉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文首先采用一维辐射对流模式, 分析了乡村型、城市型气溶胶和平流层气溶胶含量增加对全球地表气温的直接影响以及硫酸盐粒子含量增加对全球地表气温的间接影响。然后利用考虑了海洋热惯性作用的 EBM/BD* 模式, 模拟了近百年来由于大气中硫酸盐粒子含量变化、火山爆发和大气温室气体浓度增加共同引起的全球地表平均气温变化。结果表明: 气溶胶的气候效应在地气系统辐射收支和全球气温变化研究中起着非常重要的作用。

关键词: 气溶胶; 硫酸盐粒子; 气候效应。

一、引 言

全球气候变化问题是目前受到人类普遍关注的三大环境问题之一。观测结果表明, 近百年来全球地表平均气温上升 $0.4-0.6^{\circ}\text{C}$, 这一气温上升幅度与温室理论结果是不矛盾的^[1]。但是, 观测得到的全球气温变化, 特别是本世纪 40 年代的气温上升和下降趋势与温室气候理论模拟的全球气温连续上升的趋势有明显的不同。造成这种模式估计和观测结果不一致的原因无疑是相当复杂的, 其中一个主要原因极有可能是气溶胶含量变化对全球气温的影响。

大气气溶胶对气候的影响可分为直接效应和间接效应两个方面。直接效应指的是气溶胶通过对太阳辐射和热辐射的散射和吸收, 造成地气系统辐射收支的改变。间接效应则指气溶胶可通过改变云的微物理特性(如云滴半径和吸收特性), 从而影响全球地表平均气温。在本文第二部分, 我们将用石广玉开发的一维辐射对流模式^[1,2]进行气溶胶直接气候效应的数值分析。第三部分则将 Twomey 关于气溶胶对云的微物理特性影响的理论^[3]嵌入一维辐射对流模式, 分析由于云的凝结核 (CCN) 浓度增加所引起的辐射强迫及其对应的全球地表平均气温变化。最后, 利用 EBM/BD* 模式^[4]模拟了近百年来由于大气中硫酸盐粒子浓度变化、火山爆发和温室气体浓度增加引起的全球气温变化。

1992年8月12日收到, 1994年5月30日收到修改稿

1) 赵凤生、石广玉, 1994, 温室气体诱导的渐变气候效应, 地理学报, 待发表。

二、气溶胶对地表气温的直接影响

大气气溶胶与辐射的相互作用取决于气溶胶的光学特性。对流层气溶胶在大气中的寿命较短(一般只有几天), 故气溶胶的光学特性与其释放源密切相关。在本文的数值分析中, 我们采用 Shettle 和 Fann 给出的对流层乡村和城市气溶胶模式^[4], 其模式参数如表 1 所示。气溶胶的垂直分布取自标准辐射大气模式。(SRA models)^[5]。由表 1 可以看

表 1 气溶胶光学模式参数^[4]
 ω : 单次散射反照率 g : 不对称因子

波长 $\lambda(\mu\text{m})$	乡 村 型		城 市 型	
	ω	g	ω	g
0.337	0.934	0.684	0.653	0.713
0.550	0.949	0.676	0.648	0.669
0.694	0.943	0.654	0.635	0.648
1.060	0.865	0.622	0.567	0.623
1.536	0.798	0.637	0.489	0.634
2.000	0.870	0.767	0.436	0.692
2.250	0.849	0.728	0.422	0.711
2.500	0.832	0.748	0.411	0.729
2.700	0.576	0.782	0.356	0.744
3.000	0.646	0.776	0.358	0.745
3.392	0.866	0.741	0.420	0.739
3.750	0.914	0.731	0.429	0.739

出两个模式的不对称因子基本相同, 主要差别在于城市气溶胶含有较多的对太阳辐射具有较强吸收作用的碳粒子, 因而具有较小的单次散射反照率值。图 1—2 给出了采用一维辐射对流模式^[1,2]计算的两种不同类型的气溶胶粒子含量增加所引起的辐射强迫和全球地表平均气温变化。由图 1 可以看出, 乡村型气溶胶粒子含量增加引起地表气温下降, 且气温的减小值与气溶胶光学厚度的增加线性相关。在图 2 中, 我们采用城市污染区的面积增加来表示城市型气溶胶粒子含量增加。全球平均气溶胶光学厚度由乡村型和城市型

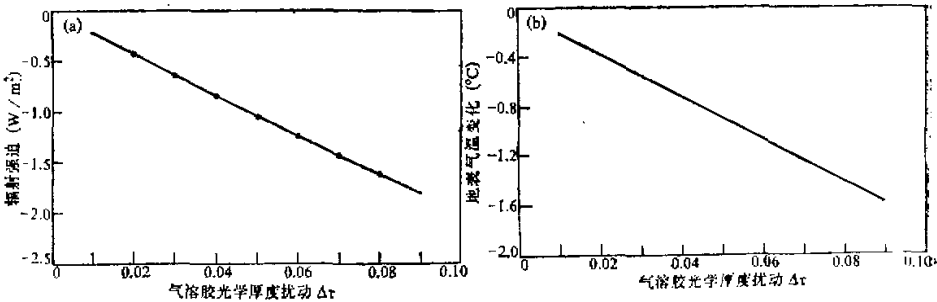


图 1 乡村型气溶胶含量增加引起的辐射强迫(a)和全球平均地表气温变化(b)

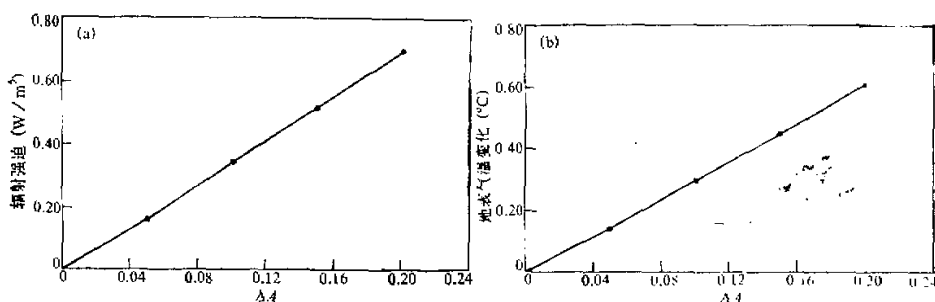


图2 同图1,但系城市型气溶胶的有关结果, ΔA 为城市面积与地球表面积之比

气溶胶光学厚度对面积加权平均求得。由图可以看出,当城市气溶胶粒子增加时,全球平均气温略有上升。图1和图2的比较表明,乡村型和城市型气溶胶所可能产生的气候效应是完全不同的。由于这两种气溶胶模式中不对称因子基本相同,故造成城市气溶胶粒

子增加引起全球平均气温上升的主要原因在于城市气溶胶中含有较多的吸收性很强的碳粒子。碳粒子的增加使得地球大气的反照率降低,从而减少了地球大气对太阳辐射的反射,引起正的辐射强迫(图2(a))。与此相反,当乡村型气溶胶粒子浓度增加时,由于其中所含的碳粒子较少,气溶胶的散射作用增强,地球大气对太阳辐射的反射通量亦增加,引起负的辐射强迫,导致地面气温下降(图1(a))。

以上,我们讨论了对流层气溶胶含量增加对地面平均气温所带来的影响。那么,平流层气溶胶的情况又如何呢?

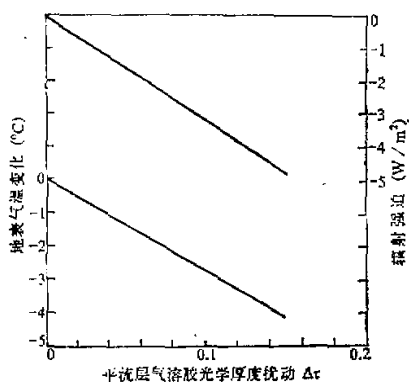


图3 平流层气溶胶含量增加引起的辐射强迫和地面气温变化

当火山爆发时,大量的火山尘埃粒子喷射到平流层,引起平流层气溶胶含量增加。同时,火山爆发产生大量的 SO_2 气体,通过气-粒转化过程也引起平流层气溶胶含量增加。图3给出了采用一维辐射对流模式计算的辐射强迫和地面气温对平流层气溶胶光学厚度增加的平衡响应。由图可以看出,平流层气溶胶含量增加引起的辐射强迫为负值,地面气温下降,且辐射强迫和地面气温变化与平流层气溶胶光学厚度的增加接近于线性关系。平流层气溶胶含量增加引起地面气温下降的主要原因是由于气溶胶对太阳辐射的散射(也有少量的吸收),使得到达对流层顶的太阳辐射通量减小。

三、气溶胶的间接气候效应

除了上述直接气候效应之外,人类活动(如化石燃料燃烧)所释放出的大量 SO_2 气体

可以通过气粒转换过程形成硫酸盐粒子, 由于硫酸盐粒子可以作为云的凝结核 (CCN), 所以其浓度的增加会改变云的微物理特性, 从而影响地气系统的辐射收支。

根据米氏散射理论, 具有厚度 h 的水平均匀层状云的光学厚度可写为

$$\tau = \int_0^h k_e dz = \pi \int_0^h \int_0^\infty r^2 Q_e(r/\lambda) n(r, z) dr dz, \quad (1)$$

式中 r 为云滴半径, λ 为光波长, $Q_e(r/\lambda)$ 为消光效率因子, $n(r, z)$ 为高度 z 的云滴谱分布。对于太阳辐射, Q_e 近似等于 2。因此(1)式可以重写为

$$\tau = 2\pi N \bar{r}^2 h, \quad (2)$$

式中 N 为云滴浓度 (数密度), $\bar{r}$ 为云滴谱的模式半径 (或有效半径)。 N 和大气中 CCN 浓度 C 之间的系关可以近似表达为

$$N = C^{0.5}, \quad (3)$$

按照 Twomey 的假定, CCN 浓度增加不改变云的几何厚度和含水量, 即

$$N' \bar{r}'^3 = N \bar{r}^3, \quad (4)$$

由(2)–(4)式可以推出

$$\tau' = (C'/C)^{4/3} \tau, \quad (5)$$

式中带撇和不带撇的量分别表示受人类活动影响以后和未受人类活动影响的云的有关参数。

此外, 人类活动在释放大量 SO_2 的同时, 也释放出对太阳辐射具有较强吸收的碳粒子。Twomey 对大量的观测结果进行了统计分析, 指出云的单次散射反照率随着 CCN 浓度的增加而改变, 并推导出云的单次散射反照率与 CCN 浓度的关系^[3]

$$\omega' = \left\{ 1 + \left(\frac{k_s}{k_e} \right) \left(\frac{C}{C'} \right)^{4/3} (1 - \omega) \right\}^{-1} \omega, \quad (6)$$

式中 ω' 和 ω 分别表示受人类活动影响和未受人类活动影响的云的单次散射反照率, k_s 和 k_e 表示相应的吸收系数, 其比值可以用下式近似:

$$k_s'/k_s = \left(\frac{N'}{N} \right)^{2/3}, \quad (7)$$

将(3)–(7)式嵌入一维辐射对流模式中进行数值分析, 结果如图 4 所示。在数值分析中, 云的高度取 4.5–5.7 km, 云量取 4.6。由图 4 可以看出, 地气系统的辐射收支和地面平均气温对 CCN 浓度的变化非常敏感。当 CCN 浓度增加一倍时, 辐射强迫和地面平均气温变化分别为 -5.39 W/m^2 和 -4.7°C 。大气中气溶胶粒子含量的增加主要来自于化石燃料释放和森林砍伐, 与大气中主要的温室气体 CO_2 浓度增加的来源基本相同。上述结果说明, 由化石燃料燃烧和森林砍伐产生的气候效应同时包含了使地面气温上升的正温效应 (CO_2 诱导的温室效

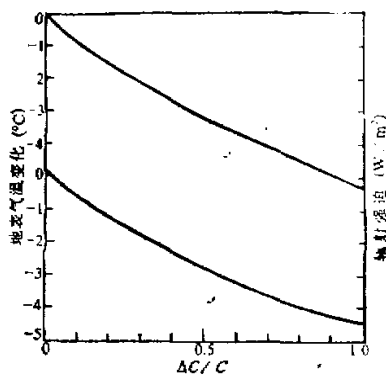


图 4 CCN 浓度增加引起的辐射强迫和地面气温变化, $\Delta C/C$ 表示 CCN 浓度的相对变化

应)和上述使地面气温下降的负温效应。两者相互抵消的程度主要取决于各自的释放量及其在大气中的寿命。

四、火山爆发、硫酸盐粒子和温室气体对近百年全球气温的影响

上述数值计算结果表明,大气中气溶胶含量的变化对全球气温具有重要的影响。为了进一步说明气溶胶气候效应的重要性,同时也为了对上述模式计算结果做进一步的检

验,我们根据现有的观测资料对近百年来由于火山爆发、硫酸盐粒子浓度变化和温室气体浓度增加引起的全球地面平均气温变化进行了数值模拟(由于缺乏可靠的对流层气溶胶光学特性观测资料,我们在数值模拟中略去了对流层气溶胶直接气候效应)。在数值模拟中,大气温室气体浓度变化产生的辐射强迫取自文献[6]。火山爆发的资料取自 Lamb 利用太阳辐射衰减定义的火山尘幕指数^[7],我

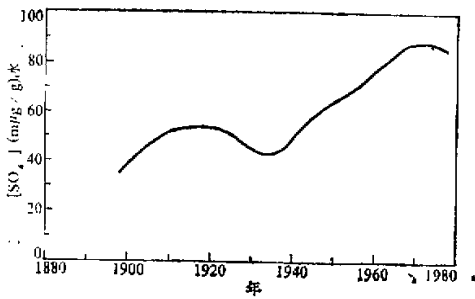


图5 根据格陵兰冰床资料分析取得的非海盐硫酸盐粒子浓度

们按照 Pollack 等人^[8]描述的方法,将尘幕指数转换为平流层气溶胶光学厚度,然后利用

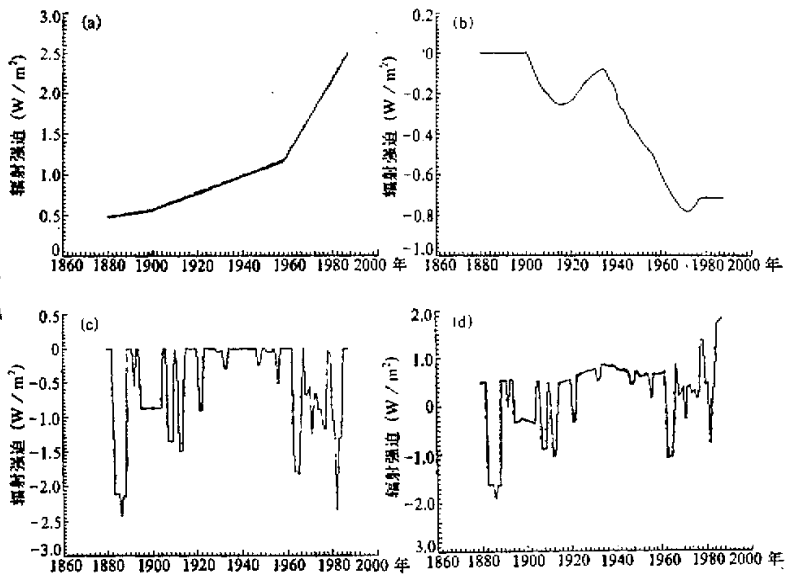


图6 近百年来温室气体(a)、硫酸盐粒子(b)和火山爆发(c)引起的辐射强迫以及总的辐射强迫(d)

一维辐射对流模式,计算出相应的辐射强迫。Neftel 等人^[9]给出了通过分析格陵兰冰芯资料得到的硫酸盐粒子的浓度,如图 5 所示。应该指出的是,大气中云的凝结核不仅仅是硫酸盐粒子,并且大气中硫酸盐粒子浓度的空间分布是不均匀的。在数值分析中,我们根据 Wigley 关于硫酸盐粒子的气候效应的讨论^[10],取 80 年代由硫酸盐粒子浓度变化引起的辐射强迫值为 -0.73 W/m^2 ,然后假定近百年来大气中硫酸盐粒子浓度变化趋势与图 5 所示的格陵兰冰芯硫酸盐粒子浓度变化趋势相同,由此计算出近百年来硫酸盐粒子浓度变化引起的辐射强迫。

图 6(a)~(d) 分别给出了近百年来温室气体、硫酸盐粒子和火山爆发产生的辐射强迫以及总的辐射强迫值。将图 6(d) 给出的辐射强迫和气候敏感度 (CO_2 加倍引起的平衡态地表气温变化值)代入能量平衡模式并与我们自己建立的 BD* 模式耦合起来模拟全球地面气温变化,结果如图 7 所示。在图 7 中,虚线表示模拟的全球地面气温变化,实线表示 Boden 等人给出的观测结果^[11]。为了比较,我们将模拟和观测

的 1880—1890 年期间全球地表气温变化的平均值调节到 0°C 。由图 7 可以看出,虽然模拟的全球气温变化与观测结果有一定的差别,但总的来说,模拟与观测的地面气温变化趋势还是比较一致的。同时参照图 6 和图 7 可以看出在 1880—1890 年期间,温室气体产生的辐射强迫较小,火山爆发是引起全球地面气温下降的主要原因。

在大约 1888—1922 年期间,温室气体产生的正的辐射强迫与火山爆发和硫酸盐粒子浓度增加引起的负的辐射强迫基本抵消,在这一时期虽然全球地表平均气温有一定的起伏变化,但没有明显的增加或减小趋势。在大约 1922—1960 年期间,只有几次小的火山爆发,由此引起的辐射强迫较小。温室气体产生的正的辐射强迫在此期间连续增大。硫酸盐粒子产生的负的辐射强迫在 30 年代中期达到极小值以后迅速增大。在相当程度上抵消了温室气体产生的正的辐射强迫。在辐射强迫和海洋热惯性的共同作用之下,大约 1922 年以后全球地表气温缓慢升高,在大约 1944—1960 年期间,全球地表气温变化不大。1962 年发生了大的火山爆发,由此产生的负的辐射强迫与硫酸盐粒子产生的负的辐射强迫之和超过了温室气体产生的正的辐射强迫,使得全球地表气温下降。此后至 1978 年,随着温室气体产生的正的辐射强迫不断增大,尽管硫酸盐粒子产生的负的辐射强迫也在不断增大且有几次火山爆发产生了负的辐射强迫,但总的来说,温室气体产生的正的辐射强迫占主导作用,因此,全球地面平均气温呈上升趋势。在大约 1978—1984 年期间,由于在 1978 年、1980 年和 1982 年也出现了三次较大的火山爆发,在此期间全球平均气温呈下降趋势,此后至 1986 年,由于温室气体产生的正的辐射强迫迅速增大,全球地面平均气温不断上升。

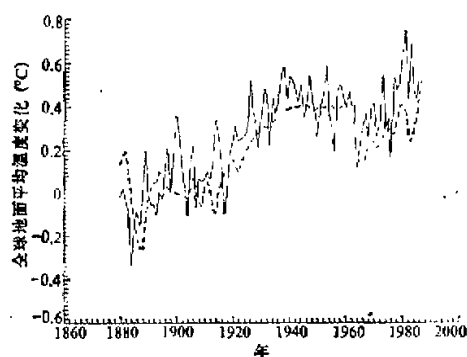


图 7 近百年来全球地表气温变化,实线:观测结果;虚线:模拟结果

应该指出,造成全球气温变化的原因是相当复杂的。完整地解释近百年来全球地面气温变化还有待于今后更进一步地探索和研究。不管怎样,上述结果和讨论说明了气溶胶的气候效应对于全球地面气温有着重要的影响。尤其值得注意的是大气中硫酸盐粒子浓度的增加和大气中 CO_2 浓度的增加主要都来源于化石燃料燃烧和森林砍伐,上述结果说明在未来的为保护地球大气环境而制定的温室气体释放量的限制方案中,应当仔细地考虑硫酸盐粒子的负温效应。

五、小 结

气溶胶通过对太阳辐射的散射和吸收引起地球大气系统辐射收支的改变,从而影响全球地面气温。当乡村型气溶胶粒子含量增加时,由于其单次散射反照率值较大,其含量的增加使得地球大气对太阳辐射的反射通量增大,引起负的辐射强迫并导致全球地面气温下降。数值分析结果表明由气溶胶含量变化引起的辐射强迫和全球气温变化与其光学厚度的扰动量呈线性关系。当城市型气溶胶粒子含量增加时,由于城市型气溶胶中含有较多对太阳辐射具有较强吸收作用的碳粒子,从而减小了地球大气系统对太阳辐射的反射通量,引起正的辐射强迫并使全球地面气温略有上升。

除了上述气溶胶的直接气候效应之外,硫酸盐粒子可以作为云的凝结核,其含量的增加会改变云的微物理和光学特性,从而改变地球大气系统的辐射平衡。数值分析结果表明,硫酸盐粒子含量增加可以引起负的辐射强迫和全球气温下降。并且,地球大气系统辐射收支和全球地面气温对硫酸盐粒子含量变化非常敏感。当硫酸盐粒子含量增加一倍时,引起的辐射强迫和全球地面气温变化分别为 -5.39W/m^2 和 -4.7°C 。

火山爆发引起平流层气溶胶粒子含量增加。由于平流层气溶胶粒子对太阳辐射的散射和吸收(一般说来吸收作用较小),使得到达对流层顶的太阳辐射通量减小。数值分析结果表明由平流层气溶胶粒子含量增加引起的辐射强迫和全球地面气温下降与平流层气溶胶光学厚度的扰动呈线性关系。

根据现有的火山爆发、硫酸盐粒子含量变化观测资料,采用一维辐射对流模式计算出相应的辐射强迫值,并将其与温室气体浓度增加引起的辐射强迫一起代入 EBM/BD 模式模拟了近百年来全球地面气温变化。模拟结果与观测结果有一定的差别,但考虑到引起全球气温变化原因的复杂性和观测以及模拟都存在一定不确定性,我们认为模拟与观测的近百年来全球地面气温变化趋势的一致性还是比较令人满意的。这一结果明确表示了气溶胶的气候效应在地球大气辐射平衡和全球气温变化中起着非常重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 石广玉,1991,大气微量气体的辐射强迫与温室气候效应,中国科学(B),7,776—785.
- [2] 石广玉,1992,CFCs及其代用品的全球增温潜能,大气科学,16,345—352.
- [3] Twomey, S.A., M. Piepgrass and T.L. Wolfe, 1984, An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo, *Tellus*, 36B, 356—366.
- [4] Shettle, E.P. and R.W. Fenn, 1979, Models for the lower atmosphere and effects of humidity variations on their optical properties, Rep. AFGL-TR-79-0214, 94pp.

- [5] Deepak, A. and H.E. Gerber (Eds.), 1983, Report of the Experts Meeting on aerosols and their climatic effects, WCP-55, World Meteorological Organization, 77-103.
- [6] Shine, K.P., R.G. derwent and D.J. Wuebbles et al., 1990, Radiative forcing of climate. In *Climate Change The IPCC Scientific Assessment*, (Eds. Houghton, J.J., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums), Cambridge University Press, 1990, 41-68.
- [7] Lamb, H.H., 1985, Volcanic Loading: The dust veil index, NDP-013.
- [8] Pollack, J.B., O.B. Toon and C. Sagan et al., 1976, Volcanic explosions and climate change: a theoretical assesment, *J. Geophys. Res.*, **81**, 1071-1083.
- [9] Neftel, A., J. Beer and H. Oeschger et al., 1985, Sulfate and nitrate concentrations in snow from south greenland 1895-1978, *Nature*, **314**, 611-613.
- [10] Wigley, T.M.L. 1989, Possible climate change due to SO₂-derived cloud condensation nuclei, *Nature*, **339**, 365-367.
- [11] Boden, T.A., P. Kanciruk and M.P. Farrell, 1990, Trends'90, A compendium of data on global change ORNL/CDIAC-36. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, Tennessee.

One Dimensional Model Analysis of Aerosol Climate Effect

Zhao Fengsheng and Shi Guangyu

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

Abstract

Aerosols can affect the global radiation budget and climate directly through their scattering and absorption of solar and thermal radiation and indirectly through their modification of cloud microphysical properties. In this paper, a radiative-convective model is used to analyze the sensitivity of the global surface mean temperature to an increase in the atmospheric burden of aerosols. The global surface temperature variation in the past century is simulated by using a coupled EBM/BD* model with considering the radiative forcings caused by volcanic aerosols, non-sea-salt sulphate aerosols and greenhouse gases. The comparison between the simulated and observed global surface temperature variation shows that the aerosols play a very important role in the global climate variation over the past century.

Key word: aerosols; sulphate particles; climate effect.