

气溶胶与气候*

王明星

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 气溶胶粒子对气候系统的辐射平衡有重要影响。气溶胶对气候的影响可分为两大方面, 即直接影响和间接影响。直接影响指大气中的气溶胶粒子吸收和散射太阳辐射和地面射出长波辐射从而影响到地-气辐射收支。模式计算表明, 人类活动引起大气气溶胶增加倾向于使地球表面降温, 工业化以来, 气溶胶增加引起的地面变冷趋势可部分抵销温室气体增加引起的地表温度上升。气溶胶对气候的间接影响是指气溶胶浓度变化会影响云的形成, 而云的变化反过来对气候有巨大影响, 这方面至今还没有定量结果。

关键词: 气溶胶; 气候; 辐射

1 引言

气溶胶粒子是指悬浮在大气中的直径为 $10^{-3} \sim 10 \mu\text{m}$ 的固体、液体粒子。大气中的气溶胶粒子的自然来源主要是海洋、土壤和生物圈以及火山等。工业化以来, 人类活动不仅直接向大气排放大量粒子, 更主要的是向大气大量排放 SO_2 , SO_2 在大气中逐渐转化成硫酸盐粒子。污染气体形成的大气气溶胶粒子自工业化以来有较大幅度增加, 气溶胶粒子增加的直接效应是影响大气水循环和辐射平衡, 这两种过程都会引起气候变化^[1]。一般来说, 气溶胶粒子能吸收散射太阳辐射和地-气长波辐射, 但对太阳辐射的影响较大, 因而气溶胶增加对气候的影响主要表现为使地表降温, 气溶胶粒子增加对水循环的影响, 一般也表现为使云滴数量增加, 其气候效应也是使地表降温^[2]。近代一些模式研究表明^[3], 人类活动造成的气溶胶粒子增加的气候变冷效应可以大部分抵销人类活动造成的温室气体增加引起的气候变暖效应。但是, 大气气溶胶的气候效应比温室气体复杂得多, 气溶胶对辐射的影响取决于其分布, 其自身的物理化学性质(包括粒子尺度、谱分布、化学成分等)以及下垫面的光学性质, 而这些因子都有极大的时间和空间变率, 这给模式计算带来很大困难。到目前为止, 还没有好的模式来准确计算气溶胶的气候效应。气溶胶的气候效应, 仍然是人类活动引起的气候变化预测中最不确定的一个因素。

2 气溶胶的增加趋势

在工业化以来的 200 年里, 人类活动排放的气溶胶确实有较大幅度增加, 但是, 我们仍然没有足够的观测数据来证明大气气溶胶浓度的增加趋势。因此, 大气气溶胶浓度

的时间和空间变化非常巨大, 而且其寿命相对较短, 其长期变化趋势比温室气体更难监测。

许多观测事实都证明, 气溶胶粒子可以输送到很远的地方。例如, 美国西海岸太平洋中的气溶胶被证明有许多来自亚洲大陆。1999 年 4 月 15~20 日, 在中国发生的沙尘暴灾害, 影响面几乎覆盖了我国东部所有地区, 给人民的日常生活和矿工企业、商业造成了极大破坏。在以后的几天时间, 大量浮尘通过大气上层的气流, 先向东北越过阿留申半岛和阿拉斯加, 后向南进入到太平洋彼岸的美国加利福尼亚和洛基山脉的北部。沙尘在空中所形成的“沙云”使号称“阳光之州”的加利福尼亚州从 4 月 25 日至 28 日见不到阳光。

北大西洋上空云凝结核的浓度一般比南半球高 2~3 倍, 这主要是人为排放的结果。在南极大陆过去 20 多年的观测也证明, 凝结核浓度每年约增加 10%。冰岩芯气泡化学成分分析也证明了大气气溶胶浓度逐年增加的趋势。例如, 格陵兰冰盖中硫酸盐的质量分数在过去 100 年里由 20×10^{-9} 增加到 100×10^{-9} , 南极冰盖也有类似的记录。

但是, 由于观测资料不够, 我们现在还不能定量确定全球尺度大气气溶胶的增加趋势。图 1 是过去 200 年中格陵兰冰被中硫酸盐的浓度^[3]。图 2 是 Mauna Loa 观测站观测到的整层大气光学厚度^[3]。从这两种测量很容易得出相反的结论。

3 气溶胶增加对气候的影响

3.1 气溶胶的光学性质

为了定量描述人为活动产生的气溶胶对气候系统的辐射强迫作用, 必须确定 3 个不同空间尺度的光学性质, 即: 气溶胶的微物理性质、气柱积分特性及气溶胶的地理分布、半球和全球积分特性。

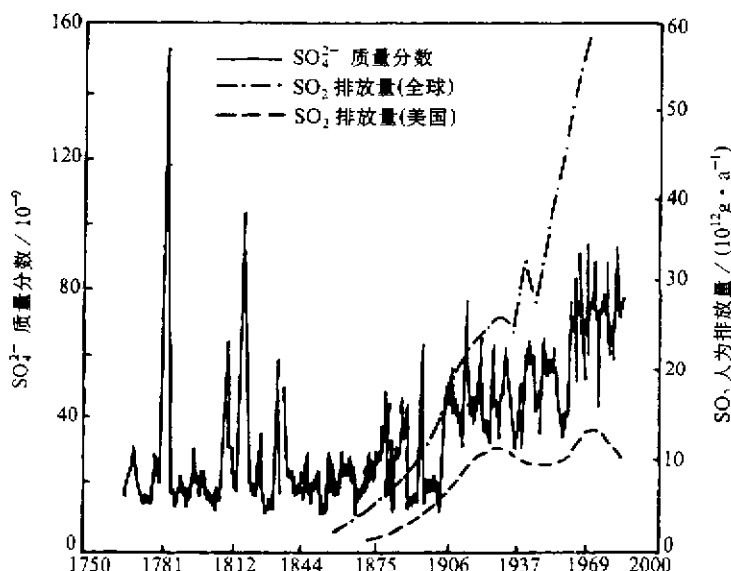


图 1 过去 200 年中格陵兰冰被中硫酸盐的质量分数和 SO_2 的人为排放量

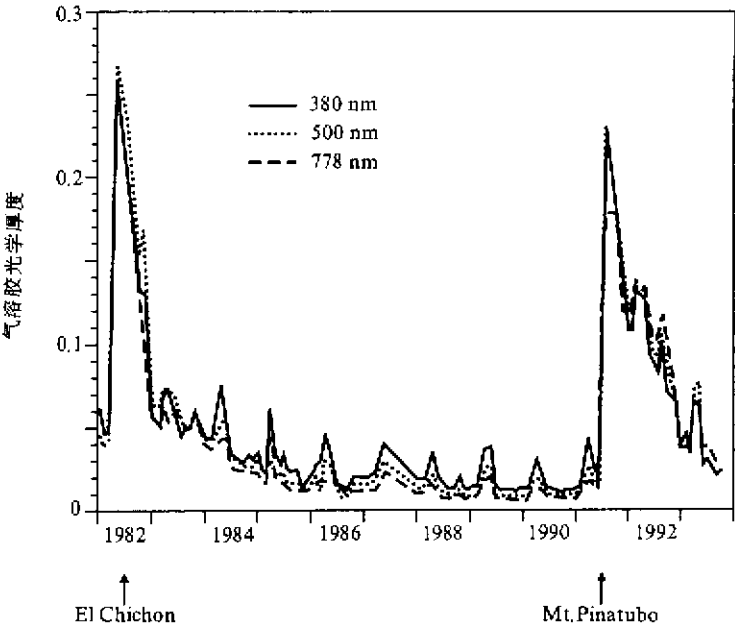


图2 Mauna Loa 观测站观测到的整层大气光学厚度

气溶胶对辐射传输的影响包括散射和吸收，通常假定散射和吸收是两个独立变量，气溶胶粒子的散射和吸收系数可以写成

$$\sigma_{sc} = \alpha_{sf} m_f, \tag{1}$$

$$\sigma_{ac} = \alpha_{af} m_f = \alpha_{ac} m_c, \tag{2}$$

其中， α_{sf} 是散射效率因子， m_f 是气溶胶质量浓度， α_{af} 是气溶胶吸收效率因子；因为气溶胶对可见光的吸收主要是元素碳引起的，故 α_{af} 可改写成 α_{ac} ， m_f 以元素碳的浓度 m_c 来代替。

很显然，气溶胶的光学性质与其尺度谱分布和化学组成相关。原则上，我们有可能由粒子的尺度谱和化学成分计算出气溶胶的光学性质，但是，由于气溶胶的复杂和多变性，这种计算极为困难，难以在气候模式中应用，实用光学性质仍要靠实验测量。图3给出的是对波长为 $0.55\ \mu\text{m}$ 、密度为 $1\ \text{cm}^{-3}$ 的单色散射粒子的散射系数与粒子尺度和复折射指数之间的关系（粒子的复折射指数是化学组成的反映）。

3.2 直接辐射影响

90年代初出现的三维化学/辐射模式成功地计算了整层大气硫酸盐气溶胶的光学厚度随纬度的分布。模式结果是，北半球整层大气中人为硫酸盐气溶胶为 $6.6 \times 10^{-3}\ \text{g}/\text{m}^2$ 。由此得出，北半球整层大气人为硫酸盐气溶胶的光学厚度为0.066。

利用简单的辐射传输模式，地面因人为硫酸盐气溶胶而损失的太阳辐照可以写成：

$$L = (1 - C_o)R(2d), \tag{3}$$

其中， C_o 为平均云量， R 为后向散射比， d 为气溶胶光学厚度。利用测量的有关参数可以得出 $L = 0.8\%$ ，就是说，因人为硫酸盐气溶胶的存在地面损失太阳辐射约为1.6

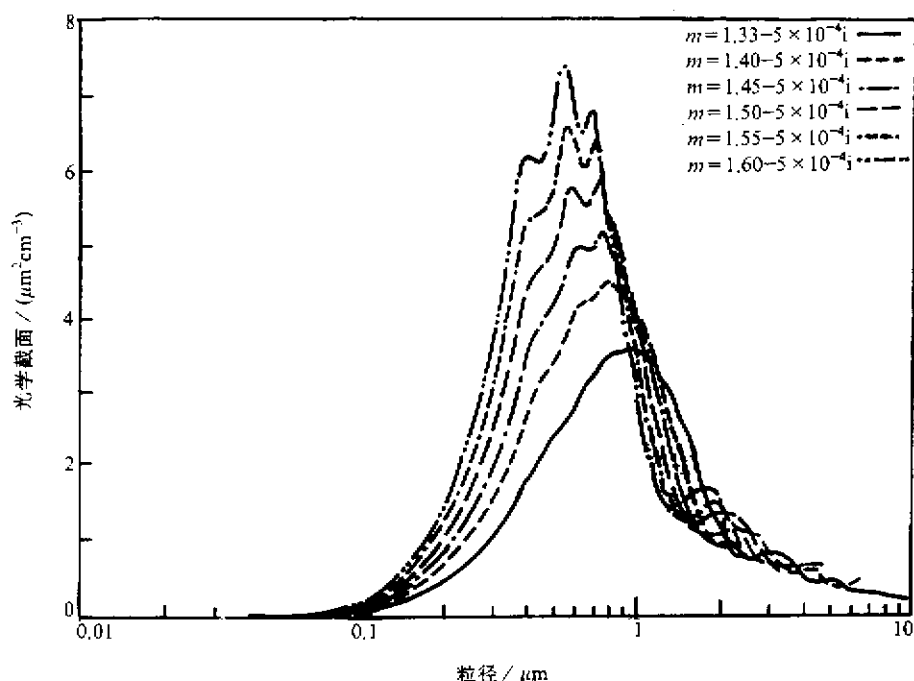


图3 气溶胶散射系数与其尺寸和复折射指数的关系

W/m^2 。应当承认, 这种计算是很粗的, 误差很大, 更复杂的模式还在发展中。

3.3 间接影响

气溶胶粒子的存在是云形成的前提, 在现代地球大气的温湿条件下, 如果没有气溶胶粒子, 将永远不会形成云。因此, 气溶胶粒子增加的一个最直接的影响是使云滴数量增加, 云的增加总的来说是使地表降温, 当然云增加可能引起降水增加, 进而影响地表湿度和植被从而改变地表反照率进一步影响气候, 这一连串的间接影响至今尚无定量计算, 是研究气溶胶对气候影响的一个重要的, 也是极为困难的课题。

利用对北半球气溶胶粒度谱和浓度的观测资料推算, 北半球人为产生的气溶胶可能使云滴数浓度增加 15%, 这将使北半球辐射强迫改变 $0.8 W/m^2$ 。

应当强调指出, 尽管气溶胶对气候的影响与温室效应气体的影响是反向的, 但二者不能简单抵消, 这是因为:

(1) 二者寿命不同: 对流层气溶胶的寿命只有几天到几周, 它的辐射强迫作用集中在排放源附近, 而且基本只影响北半球, 而温室气体的寿命是十年和百年的尺度, 已经在全世界范围内产生影响。

(2) 从影响的时间看, 气溶胶的影响主要是对白天的太阳辐射, 而且夏季低纬度影响较大, 而温室气体则昼夜都有影响, 冬季和中高纬度影响大。

(3) 从与下垫面的关系看, 气溶胶对辐射的影响与下垫面的光学性质关系极大, 同样一层气溶胶, 下垫面光学性质不同时, 它产生的辐射强迫会有很大差别, 甚至引起符号相反的影响, 而温室气体的影响则基本与下垫面性质无关。

研究气溶胶对地球气候的辐射强迫可归结为对地面有效反射率的影响。地表有效反

射率定义为未被地表吸收的辐射与入射辐射之比, 设想太阳辐射穿过透过率为 t 、反射率为 r 的气溶胶层到达反射率为 A 的地面, 则地-气系统的有效反射率为

$$\sigma = r + t^2 A(1 + Ar + Ar^2 + \dots) \quad (4)$$

考虑到实际大气中气溶胶反射率 r 一般很小, 不考虑多次散射, 则(4)式可简化成

$$\sigma = r + \frac{t^2 A}{1 - Ar} \quad (5)$$

若 $\sigma > A$, 则气溶胶层的作用是使地表降温; 反之, 使地表增温。显然, 在这一判据中地表的反射率 A 起很大作用, 而不只是由气溶胶光学性质决定。

参 考 文 献

- 1 王明星, 大气化学(第二版), 北京: 气象出版社, 1999, 467p.
- 2 Houghton, J. T., 全球变暖, 戴晓苏、石广玉等译, 北京: 气象出版社, 1998, 239p.
- 3 Houghton, J. T. ed., Climate Change 1994, Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission sciences, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1995, 339p.
- 4 刘毅, 王明星, 张仁健, 中国气溶胶研究进展, 气候与环境研究, 1999, 4(4), 406~414.

Aerosol in Relation to Climate Change

Wang Mingxing

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Anthropogenic aerosol may account for a large part of the discrepancy between observed climate change over the industrial era and model calculations based on anthropogenic greenhouse gases only. Aerosols in general, and anthropogenic aerosols in particular have the significant potential to influence the radiative transfer through the atmosphere and the atmospheric water cycle, thus influence the Earth's climate directly and indirectly. Although some aerosol particles may absorb thermal radiation and hence have greenhouse effect, the major influence of aerosols is scattering the incoming solar radiation, thereby increasing the planetary albedo and cooling the Earth's surface. Anthropogenic aerosols acting as cloud condensation nuclei are believed to increase the number concentration of cloud droplets, and thereby influence the radiation balance. Model calculations show that the increase of anthropogenic aerosols may partly compensate the warming effect of the increasing greenhouse gases. However, climate effects of aerosol are critically dependent on the size distribution, rather than on the mass loading, and the geographical distribution, rather than on the regional or global mean values. These make the climate assessment more difficult. In fact, the climate effects of aerosol present the largest source of uncertainty in calculating the anthropogenic climate forcing over the industrial period.

Key words: aerosol; climate; radiation