

中国地区气溶胶的辐射强迫 及其气候响应试验

胡荣明 石广玉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 根据国内测定的排放因子数据和国家、部委及各省市统计年鉴公布的排放源数据, 得到的中国大陆的 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格精度的 SO_2 的排放分布, 计算了中国地区人为扰动气溶胶的辐射强迫。应用近期开发的二维能量平衡模式计算了由该种气溶胶所引起的中国地区地面温度变化。模式结果表明, 最大辐射强迫和最大地面温度变化都集中在中国的沿海和四川地区。最大辐射强迫达 3 W m^{-2} 。

关键词 二氧化硫排放 硫酸盐气溶胶 辐射强迫 气候响应

1 引言

Charlson 等^[1]发现海洋中的浮游植物产生大量的二甲基硫 (DMS)。DMS 扩散到大气中氧化产生 SO_2 , 如有云滴存在的话, 将很快转化为云凝结核 (CCN)。他们估计海洋上 CCN 的增加可以抵消太阳常数增加 2% 或 CO_2 加倍的增暖效应。Schwartz^[2]指出人类活动释放的 SO_2 (由化石燃料燃烧和生物圈释放) 要比海洋上的 DMS 释放的 SO_2 大二倍以上, 并且 SO_2 产生的效应并不局限于其源区的北半球。Charlson 等^[1]在 1990 年首先对人为释放的气溶胶作了初步估计。北半球产生的人为扰动 SO_4^{2-} 的平均值为 $6.6 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2}$, 根据 $\alpha(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $f(H_R)$ 的估计, 北半球由人为扰动 SO_4^{2-} 产生的平均光学厚度为 0.066。

SO_2 对温室效应起多大的“补偿”作用, 这种效应将来是否一直存在? 是人们近年来一直关注的焦点之一。

估计人类活动释放 SO_2 所产生的辐射和气候效应是一个非常复杂的问题。过去把这种人为的扰动效应一直看成是一个全球背景气溶胶的扰动。虽然全球化学模式, 如硫循环模式, 允许加入人为扰动气溶胶, 对酸沉降问题产生较好的模拟, 但很少耦合气溶胶的物理特性以估计气溶胶扰动产生的气候效应。根据中国地区 SO_2 人为源的排放数据所计算得到的人为扰动的硫酸气溶胶量, 利用近期开发的线性二维能量平衡模式来分析这种人为扰动气溶胶产生的直接辐射气候效应。

2 模式的简要描述

如果考虑热容量的局地变化和太阳辐射的季节变化, 则二维能量平衡模式的方程

为^[3]

$$C(\vec{r}) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - \nabla [D(\vec{r}) \nabla T(\vec{r}, t)] + A + BT(\vec{r}, t) = QS(\vec{r}, t)[1 - \alpha_p(\vec{r})]. \quad (1)$$

式中 $T(\vec{r}, t)$ 为地面温度, $\vec{r}, t$ 分别为位置矢量和时间, $C(\vec{r})$ 为单位面积的有效热容量, 与下垫面的状况有关。它取决于季节循环加热质量的多少, 即陆地上为空气柱的一半, 海洋上为被风驱动的混合质量(约75 m深), 冰上取多年海冰地区的平均值(陆地: 常年海冰: 海水 $\approx 1:9:60$)。 $D(\vec{r})$ 为扩散系数, 下面是改进的动力扩散参数化结果:

$$D(\vec{r}) = \begin{cases} V_{a0}(1 - x^2) + U_{a0} + D_m(x), & \varphi < \varphi_H \\ U_{a0} + D_m(x), & \varphi \geq \varphi_H \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_{a0} 为 Hadley 环流的平均风速, U_{a0} 为平均纬向西风风速, x 为纬度 φ 的正弦, $D_m(x)$ 是热扩散输送系数。

(1)式中 A 、 B 系数都与辐射率有关, 即取决于不同的大气状况, A 的变化可以引起辐射强迫变化。根据比较精确的辐射计算得到 A 、 B 参数的数值^[4]。

(1)式中 Q 为太阳常数, S 为到达各纬度太阳辐射通量分布, α_p 为行星反照率。为了考虑有云情况下对流层气溶胶的气候效应, 我们对 α_p 进行了比较细致的参数化。首先利用二流近似和累加法计算有云情况下和无云情况下气溶胶所产生的宽带大气反射率和透过率, 然后再应用累加法计算大气和地表之间的多次散射作用。这样可以得到行星反照率(α_p)的计算公式:

$$\alpha_p = A_c \left(r_{\text{cloudy}} + \frac{t_{\text{cloudy}}^2 r_s}{1 - r_{\text{cloudy}} r_s} \right) + (1 - A_c) \left(r_{\text{clear}} + \frac{t_{\text{clear}}^2 r_s}{1 - r_{\text{clear}} r_s} \right), \quad (3)$$

式中 A_c 为云量, r_s 为地表反射率, r_{cloudy} 和 t_{cloudy} 分别为有云情况下整层大气宽带的反射率和透过率, 而 r_{clear} 和 t_{clear} 分别为晴空条件下的整层大气的宽带反射率和透过率:

$$t_{\text{cloudy}} = t_0 + \Delta t_{\text{cloud}} + \Delta t_{\text{aerosol}} + \Delta t_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta t_{\text{CO}_2}, \quad (4)$$

$$r_{\text{cloudy}} = r_0 + \Delta r_{\text{cloud}} + \Delta r_{\text{aerosol}} + \Delta r_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta r_{\text{CO}_2}, \quad (5)$$

$$t_{\text{clear}} = t_0 + \Delta t_{\text{aerosol}} + \Delta t_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta t_{\text{CO}_2}, \quad (6)$$

$$r_{\text{clear}} = r_0 + \Delta r_{\text{aerosol}} + \Delta r_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta r_{\text{CO}_2}, \quad (7)$$

式中 t_0 和 r_0 为整层大气透过率和反射率的气候值, Δt_{cloud} 和 Δr_{cloud} 分别为云变化引起的整层大气透过率和反射率的变化, $\Delta t_{\text{aerosol}}$ 和 $\Delta r_{\text{aerosol}}$ 分别为气溶胶含量变化引起的透过率和反射率的变化。

本模式在求解方法上使用谱展开的方法。不过与一般谱模式不同的是, 对于时间微商, 由于用时间积分方法求解, 需化很长时间, 所以采用 Fourier 级数展开方法求解。这样可以大大节省计算时间。

3 中国地区人为扰动气溶胶的辐射强迫

对流层气溶胶的时间和空间变化非常大。本文不拟对各种气溶胶的垂直分布进行不

同的参数化, 仅应用一种典型的气溶胶垂直分布进行参数化。根据过去的中国地区的观测资料以及近年来高空气球观测资料总结分析得到气溶胶光学厚度垂直分布函数:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-a\gamma z}, \quad (8)$$

式中 τ_0 为总的光学厚度, τ 为不同高度的气溶胶光学厚度, z 为高度, a 为回归系数。

根据上述气溶胶的垂直分布函数, 我们首先计算了不同气溶胶光学厚度所引起的宽带反射率和透过率的变化。然后应用单纯形法进行拟合得到气溶胶的宽带反射率和透过率随光学厚度改变的计算公式:

$$\Delta T_r = -0.357891\delta_A, \quad (9)$$

$$\Delta R = 0.194824\delta_A, \quad (10)$$

式中 T_r 、 ΔR 为宽带透过率和反射率的改变, δ_A 为对流层气溶胶的光学厚度。

根据(3)式可以求得行星反照率的变化。于是, 辐射强迫为

$$\Delta F = -QS(\bar{r}, t)\Delta x(\bar{r}). \quad (11)$$

由于辐射强迫的变化与地表反照率和云量的水平变化有关, 为简单计, 本文取地表反照率和云量的年平均气候值。图 1a、b 为地表反照率和云量随经度和纬度的变化。

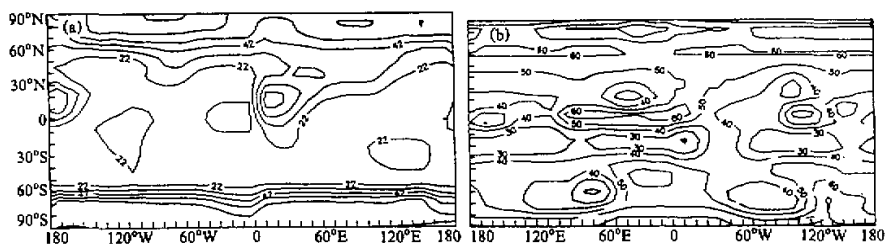


图 1 地表反照率的年平均分布 (a) 和云量的年平均分布 (b)

根据国内观测数据和国家、部委及省市统计年鉴公布的排放源数据得到中国大陆 SO_2 的排放分布^[5], 计算人为扰动引起的硫气溶胶的年平均释放量以及光学厚度。然后, 计算人为扰动气溶胶所产生的辐射强迫。

图 2a 为中國大陸 SO_2 的排放分布。根据 (12) 式可以计算中国地区人为扰动引起的硫气溶胶的年平均释放量。图 2b 为人为扰动硫气溶胶年平均释放量的水平分布。

$$\bar{B}_{\text{SO}_4^{2-}} = Q_{\text{SO}_2} Y_{\text{SO}_4^{2-}} \tau_{\text{SO}_4^{2-}} / A, \quad (12)$$

式中 $\bar{B}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 为人类扰动产生的硫酸盐气溶胶的年平均释放量, Q_{SO_2} 为 SO_2 的年排放量, $Y_{\text{SO}_4^{2-}}$ 为硫酸盐气溶胶的转化率, $\tau_{\text{SO}_4^{2-}}$ 为大气中的硫寿命, A 为硫排放总面积。

由图 2 可见, 中国地区硫释放的高值区主要分布在沿海地区和四川地区。高值中心在长江中下游地区。西北地区的硫释放量比较小。根据这样的释放估计, 可以根据下式计算中国地区人为扰动产生的气溶胶的光学厚度分布:

$$\bar{\delta}_{\text{SO}_4^{2-}} = \alpha_{\text{SO}_4^{2-}} f(H_R) \bar{B}_{\text{SO}_4^{2-}}, \quad (13)$$

式中 $\alpha(\text{SO}_4^{2-})$ 为参考相对温度下的分子散射截面、 $f(H_R)$ 为由于相对湿度变化引起的散射的变化。

图 3 为计算所得的中国地区人为扰动产生的气溶胶的年平均光学厚度分布。根据气

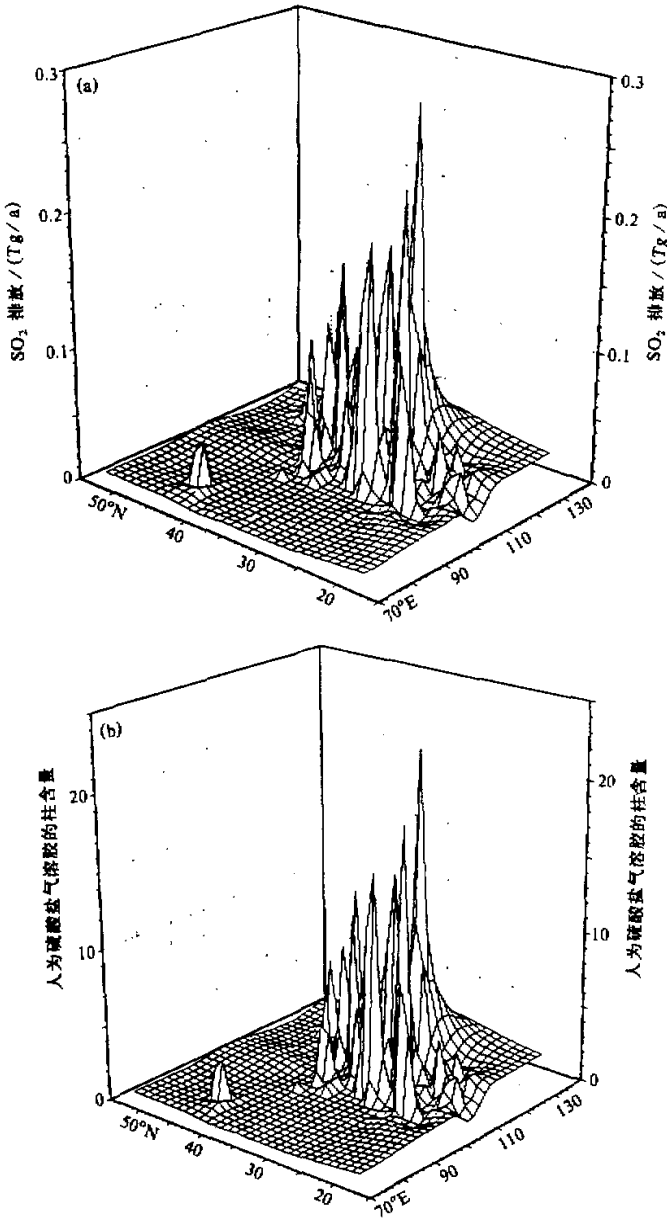


图 2 中国大陆 SO₂ 的排放分布 (a) 和人为扰动引起的硫酸气溶胶的年平均释放量 (b)

溶胶的光学厚度值, 我们运用改进的辐射参数化方案计算了人类扰动产生的硫气溶胶直接效应的辐射强迫值。图 4 为中国地区人为硫气溶胶产生的辐射强迫分布。由图可见, 最大的负辐射强迫是中国的东南地区, 达 -3 W m^{-2} 。其次是西南地区。西北地区比较小。基本上经济发达地区气溶胶的影响较大, 而经济不发达地区气溶胶的影响较小。

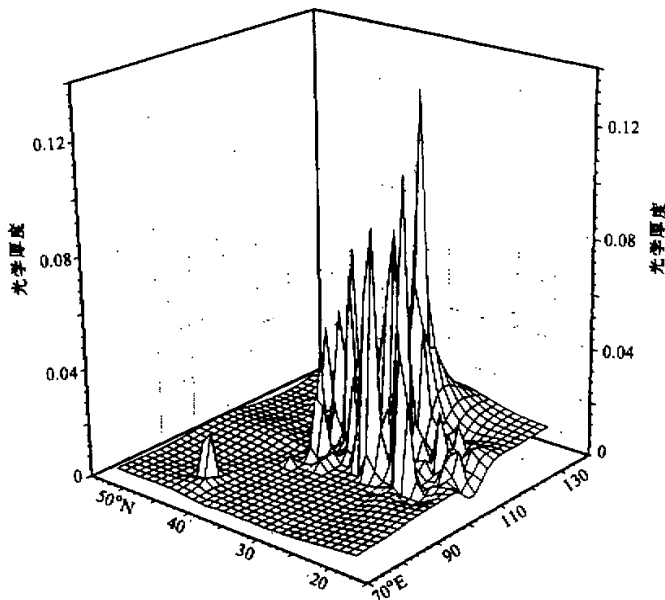


图 3 中国地区人为扰动产生的气溶胶的年平均光学厚度分布

4 中国地区人为扰动气溶胶的直接气候效应

根据上面的辐射强迫值, 可以计算由人为扰动气溶胶引起的直接气候效应。首先我们把模式原来的 $7.5^\circ \times 4.5^\circ$ 的网格精度改进为 $1^\circ \times 1^\circ$, 然后加入中国地区人为扰动气溶胶所产生的辐射强迫, 计算气溶胶所带来的地面温度变化。图 5 为中国地区人为扰动气溶胶所引起地面温度变化。由图可见, 如果只是中国地区有 SO_2 的排放, 则人为扰动气溶胶所引起地面温度变化将很小。

为了进一步考察 SO_2 在全球排放情景下, 中国地区人为扰动硫气溶胶对地面温度的影响, 我们对中国地区以外的北美、欧洲等其他地区的硫释放引用了文献[6]的全球硫循环模式结果, 然后一起加入到模式中计算。图 6 为全球硫释放对中国地区地面温度的影响。从图上可以看出在考虑欧美等其他地区的硫释放后, 人为扰动气溶胶所引起地面温度变化比较大。最大降温在长江中下游地区, 达 -0.8°C , 造成这种结果的原因是不难理解的。因为如果只有中国地区有 SO_2 排放, 虽然产生的辐射强迫对中国地区来说较大, 但对全球平均来说很小。而同时考虑欧美等地区硫排放后, 全球平均的辐射强迫将大大增加, 所以降温较大。

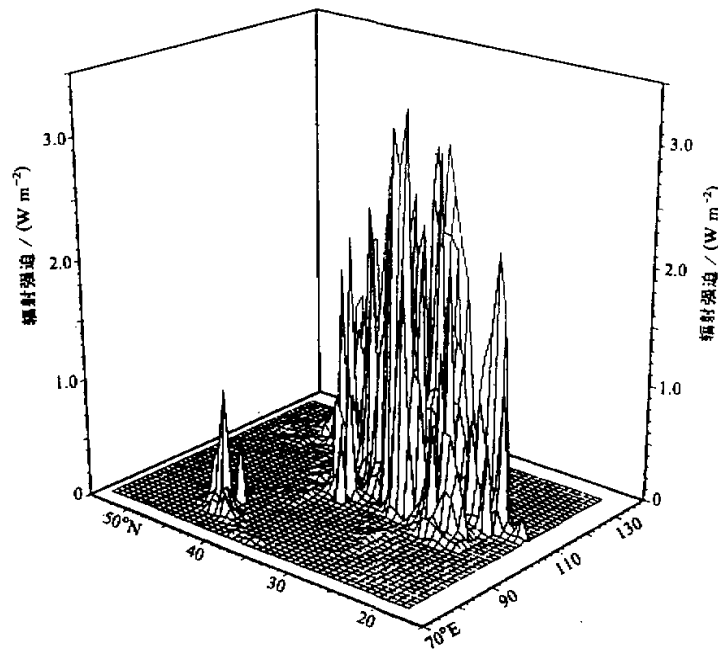


图 4 中国地区人为硫气溶胶产生辐射强迫的全球分布

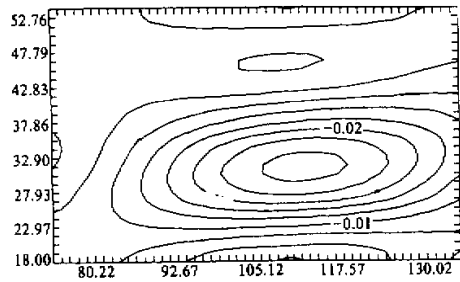


图 5 中国地区人为扰动气溶胶引起的地面温度变化

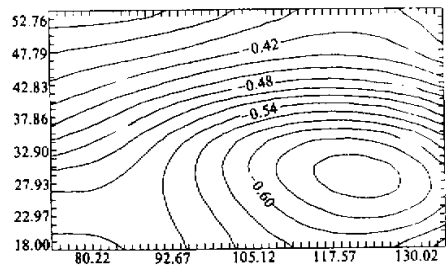


图 6 全球人为扰动气溶胶引起的中国地区的地面温度变化

当然，以上的估计是初步的，有很多的不确定因素。真实估计这种人为扰动气溶胶所引起的与 CO_2 温室效应相反的反照率效应，有待于资料的进一步完善，以及对气粒转化等的准确估计。

5 结论

近年来，气溶胶的辐射气候效应越来越受到人们的关注。人们发现人类活动释放的

二氧化硫转化的硫酸盐气溶胶, 引起了与温室气体相反的气候效应。甚至有人认为这种冷却效应足以抵偿温室气体浓度增加引起的温室效应。因此, 国际社会极为关注中国地区的二氧化硫排放。从本文的研究来看, 可以得到以下结论:

(1) 中国地区人为扰动所产生的硫酸盐气溶胶的柱含量, 在沿海地区比较大, 在西北地区比较小。

(2) 硫酸盐气溶胶所产生的辐射强迫地区性差别比较大, 最大值在长江中下游地区, 达 -3 W m^{-2} 。

(3) 尽管硫酸盐气溶胶产生与温室气体相反的气候效应, 但这种影响是局部的。由于近百年来大气温室气体浓度增加所产生的辐射强迫大约是 2.3 W m^{-2} [7], 所以, 全球平均而言, 硫酸盐气溶胶的气候效应不足以抵偿温室气体引起的温室效应。

参 考 文 献

- 1 Charlson, R. J., J. E. Lovelock, M. O. and S. G. Warren, 1987, Oceanic photo-plankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, **326**, 655~661.
- 2 Schwartz, S. E., 1988, Are global cloud albedo and climate controlled by marine photo-plankton? *Nature*, **336**, 441~445.
- 3 North, G. R., J. G. Mengel and D. A. Short, 1983, Simple energy balance model resolving the seasons and the continents: application to the astronomical theory of the ice age, *J. Geophys. Res.*, **88**, 6576~6586.
- 4 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*, **7**, 776~784.
- 5 白乃彬, 1996, 中国大陆 CO_2 , SO_2 和 NO_x $1^\circ \times 1^\circ$ 网格排放估计, 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响, 周秀骥主编, 北京: 气象出版社, 145~150.
- 6 Langer, J. and H. Rodhe, 1991, A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle, *J. Atmos. Chem.*, **13**, 225~263.
- 7 Shi Guangyu and Fan Xiaobiao, 1992, Past, present and future climatic forcing due to greenhouse gases, *Adv. in Atmos. Sci.*, **9**, 279~286.

The Radiative Forcing and Climate Effect due to Anthropogenic Sulfate Aerosols over China

Hu Rongming and Shi Guangyu

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

Abstract We have calculated the radiative forcing due to anthropogenic sulfate aerosols over China in this paper, based on the emission data of SO_2 published in the National Statistics Annals. Also, the surface temperature change induced by this kind of aerosol has been calculated by use of a two-dimensional energy balance model developed recently. The results show that there is large radiative forcing and temperature change along the coast of China and Sichuan area. The largest radiative forcing cloud be up to -3 W m^{-2} .

Key words emission of SO_2 sulfate aerosol radiative forcing climate effect