

# 东亚地区云和地表反照率对硫酸盐 直接辐射强迫的影响

王喜红 石广玉

(中国科学院大气科学和地球流体力学数值模拟国家实验室, 北京, 100029)

## 摘 要

文中利用区域气候模式深入探讨了东亚地区云及地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响, 同时定量估算了东亚地区云区气溶胶的直接辐射强迫, 讨论了硫酸盐对地表和大气短波辐射平衡产生的不同影响。研究表明: 云对气溶胶的直接辐射强迫具有很强的减弱作用, 这种减弱作用不仅取决于云覆盖份数, 而且取决于云的光学厚度。就区域平均而言, 文中模拟的东亚地区气溶胶直接辐射强迫为  $-0.097 \text{ W/m}^2$ , 占总直接辐射强迫的 10.4% 左右。表明云对硫酸盐直接辐射具有很强的减弱作用, 在估算其总的直接辐射强迫时, 云区的贡献不可忽视。较高的地表反照率会减弱硫酸盐的直接辐射强迫, 而较低地表反照率则会增加硫酸盐的辐射强迫。硫酸盐气溶胶对大气辐射平衡影响非常小, 但对地表辐射平衡产生重要影响, 影响程度与大气几乎一致。

关键词: 云和地表反照率, 硫酸盐, 直接辐射强迫。

## 1 引 言

硫酸盐气溶胶尽管在大气中含量很少, 但却是地气系统的重要成份。它的浓度变化一方面影响着对流层化学循环和化学平衡, 另一方面影响着区域环境和地表生态系统。尤其是 20 世纪 90 年代以来, 越来越多的研究者发现硫酸盐气溶胶对地表系统的辐射收支有着重要影响, 并进而影响气候变化。研究表明<sup>[1]</sup>, 在局部地区硫酸盐气溶胶产生的负辐射强迫与温室气体产生的正辐射强迫大小几乎相当。因此, 近年来硫酸盐气溶胶的研究备受科学界的关注。但是, 由于问题本身的复杂性, 目前有关其气候强迫的量化估计仍存在相当的不确定性。为了深入研究造成这种不确定的原因, 一些研究者在评估气候强迫的同时, 开始注重探讨气溶胶化学特性(主要是化学构成)、物理特性(包括尺度谱分布、粒子有效半径等)、辐射特性(质量消光效率、单次散射反照率和非对称因子)以及云量、大气相对湿度和地表反照率等因子对直接辐射强迫的敏感性。Boucher 和 Anderson<sup>[2]</sup>, Nemessure 等<sup>[3]</sup>对近年来不

同研究中所采用的尺度谱分布假定进行了系统分析, 结果发现采用不同的假定造成辐射强迫相差 20% ~ 30% 左右。Charlson 等<sup>[4]</sup> 和 Heintzenberg 等<sup>[5]</sup> 分别对近年来不同研究中所采用的质量消光系数和单次散射反照率进行了系统总结和比较, 结果发现不同研究者所采用的数值间存在着较大差异, 尤其是当考虑了相对湿度影响以后差别更大。分析指出, 在确定辐射强迫时, 相对湿度和云的处理相当重要。Haywood 等<sup>[6]</sup>, Boucher 和 Anderson<sup>[2]</sup>, Haywood 和 Ramaswamy<sup>[7]</sup> 及 Myhre 等<sup>[8]</sup> 分别利用复杂的 GCMs 模式研究了云对硫酸盐直接辐射强迫的影响, 研究指出就全球平均而言, 云区气溶胶的直接辐射强迫不可忽视。但由于采用的云参数化方案不同, 不同作者的模拟结果间差别较大。他们模拟得到全球平均云区气溶胶直接辐射强迫的贡献分别为 5%, 22%, 11% 和 27% 左右。最近, Haywood 和 Shine<sup>[9]</sup>, Liao 和 Seinfeld<sup>[10]</sup> 分别利用高精度的单气柱模式进行了一些敏感性研究, 试图进一步探讨云对硫酸盐直接辐射强迫影响的物理实质。总之, 国际上在硫酸盐辐射强迫的量化估算方面

还存在着相当的不确定性, 而且在定量分析造成不确定性成因方面也存在着许多争议。

90 年代中期以来, 中国对硫酸盐气溶胶气候效应问题也开展了一些研究<sup>[11~14]</sup>, 并取得了一系列有意义的结果。但是大部分研究主要集中于探讨气溶胶辐射强迫及响应的时空分布和季节变化规律, 对不确定性成因的分析相对较少。最近, 杨军等<sup>[15]</sup>李子华等<sup>[16]</sup>利用一维晴空大气边界层模式, 详细研究了相对湿度对边界层气溶胶太阳短波辐射特性的影响, 同时探讨了相对湿度和气溶胶浓度变化对边界层温度场的影响。张立盛和石广玉<sup>[17]</sup>利用三维 GCM 模式研究了相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响。本文研究的主要目的就在于利用区域气候模式重点讨论东亚区云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响, 同时结合理论分析尽可能揭示其内在的物理实质, 以期为准确定量评估东亚地区硫酸盐辐射强迫提供依据。

## 2 区域气候模式

模拟采用的是美国大气研究中心(NCAR)建立的第二代区域气候模式 RegCM2<sup>[18,19]</sup>。模式陆面过程、积云对流、边界层过程和辐射过程分别采用 BATSIE 方案, Grell 单云参数化方案, Holstlag 方案和 CCM2 辐射方案。为了能够反映气溶胶对辐射收支的影响。本文对其短波辐射参数化进行了改进, 引入 CCM3<sup>[20]</sup>中的有关处理方法。其最大的改进在于新方案在考虑气体吸收(主要包括 CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> 等气体)、分子散射、水云的吸收及散射作用的同时, 增加冰云和气溶胶的散射效应。太阳短波(0.2~5 μm)分为 18 个波段, 采用 Eddington 方法计算。水云的光学特性采用 Slingo<sup>[21]</sup>的方法进行参数化。冰云的光学特性采用 Ebert 和 Curry<sup>[22]</sup>的方法进行参数化。硫酸盐气溶胶的光学特性采用 Kiehl 和 Briegleb<sup>[23]</sup>提供的资料, 文中同时考虑了相对湿度对粒子辐射特性的影响, 其中湿度影响因子同样采用 Kiehl 和 Briegleb 发展的多项式函数形式。

根据东亚地区硫酸盐地理分布特点, 我们将模拟区域设置在 16~50°N, 100~150°E, 覆盖东亚大部分地区及西北太平洋, 区域中心位于(35°N, 119°E), 水平分辨为 80 km。垂直方向为 17 层, 顶部取在 10 hPa。模式连续积分 1 a, 模拟所需的初始场与边界场采用 NCAR/NCEP 提供的逐日两次(00 时

和 12 时)再分析资料, 侧边界每 12 h 更新一次, 采用指数张弛边界条件进行嵌套, 缓冲区取为 12 层。海温采用 NCAR 提供的月平均 1°×1°资料。模式选用的时间步长为 240 s。模拟的气候场与实测资料进行了比较, 结果表明改进后的区域气候模式具有较好的模拟能力。

人为硫酸盐时空分布资料来自于东亚地区三维区域硫化学输送模式的模拟结果<sup>[24,25]</sup>。该模式比较详细地考虑了整个对流层中输送、化学转化、干湿沉降和源排放过程。气相化学过程采用分裂查表法处理。气象场选用 NCAR/NCEP 的逐日两次再分析资料。人为 SO<sub>2</sub> 排放源中国大陆部分采用白乃彬等<sup>[26]</sup>近年来估计的 1°×1°结果, 其它部分采用 Akimoto 的资料<sup>[27]</sup>。模拟表明模式一方面具有较好的灵敏度和可信度, 可以较好地反映东亚地区污染物的时空分布、季节变化及其柱特性, 另一方面又能满足现有的计算资源, 可以方便地计算长时间(月、季、年)尺度的污染物输送和分布。

## 3 人为硫酸盐直接辐射强迫

当前, 有关对流层人为硫酸盐辐射强迫的研究主要针对全球尺度。研究的基本思路大都是将全球三维化学输送模式同全球大气环流模式(AGCMs)或海-气耦合模式(CGCMs)通过不同的方式有机地结合起来进行长时间的数值模拟。但是, 现有的全球三维化学输送模式和 GCMs 所能达到的水平分辨率基本上都在几百公里的量级, 仅仅能够提供气溶胶分布及气候效应的全球大尺度分布状况, 很难细致地分辨出区域及局地信息。本文将区域化学模式同区域气候模式有机地结合起来, 试图更加详细地刻画东亚地区对流层人为硫酸盐的辐射强迫特点。图 1 给出年平均人为硫酸盐直接辐射强迫的地理分布。由图可见, 中国东部的广大地区直接辐射强迫超过 $-1.0 \text{ W/m}^2$ , 而且波及到中国近海的广大海域, 这表明人为硫酸盐对东亚地区的辐射收支有着重要影响。辐射强迫的高值区主要位于中国长江中下游、山东半岛以及黄海和渤海海域, 幅度超过 $-2 \text{ W/m}^2$ , 其中最大值超过 $-3.0 \text{ W/m}^2$ 。另外, 珠江三角洲和四川盆地呈现出范围较小的强迫中心。

## 4 云对硫酸盐直接辐射强迫的影响

### 4.1 云覆盖的影响

图 2 给出完全晴空时人为硫酸盐的直接辐射强

迫的分布。与图 1 比较可以看出,完全晴空(图 2)和有云(图 1)时辐射强迫总体分布类型基本一致,但辐射强迫幅度相差较大,模拟区域有大部分地区晴空比有云时辐射强迫大 2 倍左右。这表明云对气

溶胶的直接辐射强迫具有很强的减弱作用。因此,硫酸盐直接辐射强迫的大小不仅与其柱含量有关而且与云的覆盖程度有关。

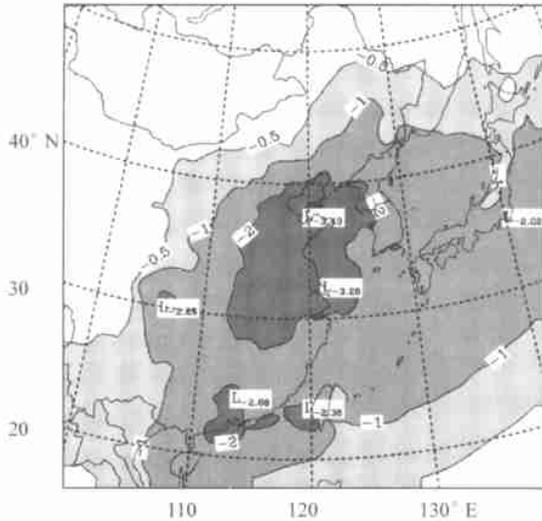


图 1 人为硫酸盐直接辐射强迫的年平均分布  
(单位:  $W/m^2$ )

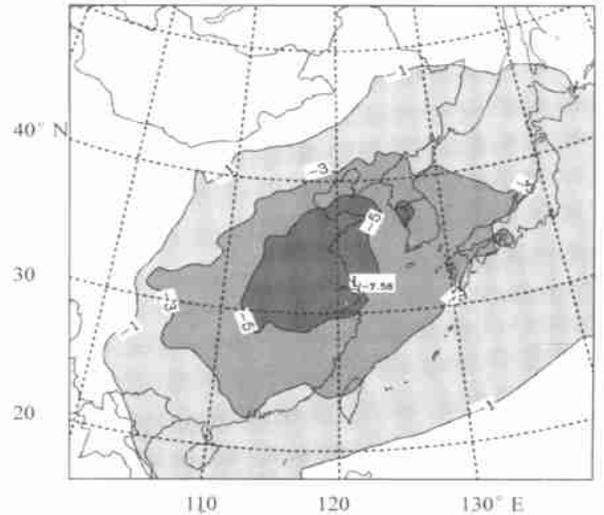


图 2 完全晴空时人为硫酸盐在直接辐射强迫的年平均分布  
(单位:  $W/m^2$ )

#### 4.2 云光学厚度的影响

云对硫酸盐直接辐射强迫的减弱幅度除了与云覆盖程度有关外,与云光学厚度之间存在怎样的关系呢?图 3 给出模拟域内水体上空年平均归一化直接辐射强迫(直接辐射强迫与硫酸盐柱含量之比,单位为  $W/g$ )随云光学厚度的变化。之所以选择归一化直接辐射强迫,主要是为了避免不同地区间由于气溶胶柱含量的不同而引起的变化。下垫面统一选取水体是为了避免由于表面反照率的不同而引起的变化。由图可见,随着云光学厚度的增大,云区硫酸盐的直接辐射强迫迅速减少,图中点的离散情况主要是由于气溶胶层与云层的相对位置不同所致,换句话说,即使云的光学厚度相同,但如果气溶胶层位于云层以上、以下或云中,其造成的影响程度也不尽相同。

通过以上分析,我们可以确信云对气溶胶直接辐射强迫确实具有明显的减弱作用,那么云以何种方式减弱气溶胶直接辐射强迫?其内在的物理依据又如何呢? Haywood 和 Shine<sup>[9]</sup>, Liao 和 Seinfeld<sup>[10]</sup> 曾分别利用高分辨率的单气柱模式进行了敏感性研究。

##### 4.2.1 气溶胶层位于液态水云层以下

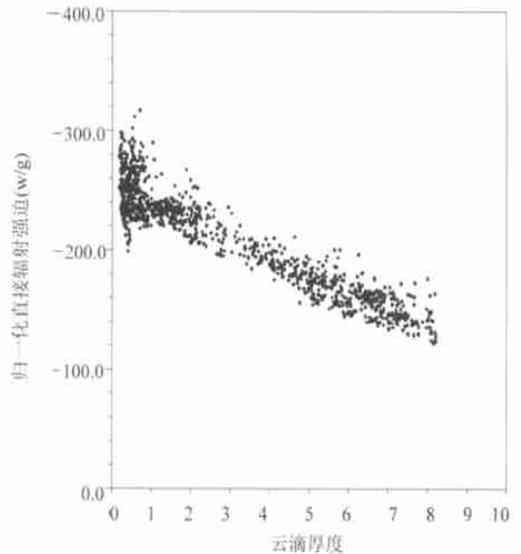


图 3 模拟区域内水体上空年平均归一化直接辐射强迫随云光学厚度变化

若气溶胶位于云层以下,随着云光学厚度的增加,透过云层的入射太阳辐射减少,因此气溶胶层对于大气顶的直接辐射强迫减弱,甚至可以忽略。

##### 4.2.2 气溶胶层位于液态水云层以上

若气溶胶层位于云层以上,采用累加法加以解

释。让  $R_a$  和  $T_a$  分别表示气溶胶层的反照率和总透过率函数(包括直接辐射和散射辐射),  $R_c$  和  $T_c$  分别表示云层的反照率和总透过率函数。则气溶胶层与云层总的反照率  $R_{a+c}$  可表示为<sup>[28]</sup>,

$$R_{a+c} = R_a + R_c \frac{T_a^2}{1 - R_a R_c} \quad (1)$$

由于硫酸盐对太阳辐射几乎不吸收, 因此  $R_a + T_a = 1$ , 则上式变为

$$R_{a+c} = R_a + R_c \frac{(1 - R_a)^2}{1 - R_a R_c} \quad (2)$$

又由于  $0 < R_a < 1$ ,  $0 < R_c < 1$ , 则  $R_a + R_c < 2$ , 因此,

$$\frac{(1 - R_a)^2}{1 - R_a R_c} < 1 \quad (3)$$

则:

$$R_{a+c} < R_a + R_c \quad (4)$$

这就是说, 云与气溶胶层合成后的总反照率小于气溶胶层反照率的简单之和。其原因就在于云层与气溶胶层之间存在多次散射过程, 从而减弱合成后总的反照率。将式(4)改写成如下形式

$$R_{a+c} - R_c < R_a \quad (5)$$

这表明当气溶胶层位于液态水云上时, 云区气溶胶层的反照率小于晴空时气溶胶层的反照率。我们知道, 云天情况下大气顶气溶胶层总的直接辐射强迫为

$$F_{Tot} = F_T T^2 (R_{a+c} - R_c) \quad (6)$$

而晴空时大气顶气溶胶的直接辐射强迫为

$$F_{Clear} = F_T T^2 R_a \quad (7)$$

这里  $F_T$  为大气顶太阳入射辐射通量密度,  $T$  为气溶胶层以上的总大气透过率, 由此可以推得

$$F_{Tot} < F_{Clear} \quad (8)$$

因此, 云光学厚度越大, 大气顶硫酸盐总辐射强迫越小。

#### 4.2.3 气溶胶层位于液态水云层中

当气溶胶位于云层内时, 如果不考虑硫酸盐对云滴有效半径及云形成的影响, Liao 和 Seinfeld 等<sup>[10]</sup> 研究发现其造成的直接辐射强迫非常小。

以上我们比较系统地讨论了液态水云对气溶胶直接辐射强迫的影响, 结果表明无论气溶胶层位于云下、云中还是云上, 其直接辐射强迫都随着云的光学厚度的增加而减少。对于冰云存在的条件下, 其情形则不同。Liao 和 Seinfeld<sup>[10]</sup> 研究发现卷云可以增强硫酸盐的直接辐射强迫。原因是卷云冰水含量

比层云的液态水含量小得多, 因此其光学厚度比水云小。这表明在卷云存在的情况下, 不可忽视气溶胶的直接辐射强迫。

#### 4.3 模拟区域内云区气溶胶直接辐射强迫

以上分析表明, 云对气溶胶的直接辐射强迫影响很大, 然而这仅仅是定性分析, 对整个模拟区域而言其影响程度究竟如何? 也就是说云区气溶胶的贡献究竟是多少? 为此我们对整个模拟区域内云区直接辐射强迫的贡献进行定量估计。对每一个模式网格点而言, 气溶胶的直接辐射强迫  $F_{Tot}$  可表示为:

$$F_{Tot} = (1 - f_c) F_{Clear} + f_c F_{Cloudy} \quad (9)$$

其中  $F_{Tot}$  为总的硫酸盐直接辐射强迫,  $F_{Clear}$  为完全晴空时的直接辐射强迫, 而  $F_{Cloudy}$  为网格点全部被云覆盖时气溶胶的直接辐射强迫,  $f_c$  为云覆盖份数。式(9)表示任一网格点上, 总的直接辐射强迫可以表示为晴空部分辐射强迫  $(1 - f_c) F_{Clear}$  和云区部分气溶胶辐射强迫  $f_c F_{Cloudy}$  之和。本文模拟的模式区域总年平均  $F_{Tot} = -0.93 \text{ W/m}^2$ ,  $f_c F_{Cloudy} = -0.097 \text{ W/m}^2$ , 因此就区域平均而言, 年平均云区硫酸盐的直接辐射强迫占总直接辐射强迫的 10.4% 左右。

以往许多利用箱式模式在估算总的直接辐射强迫时, 往往忽略云区气溶胶贡献<sup>[29~31]</sup>。上述模拟表明, 尽管云对硫酸盐辐射强迫具有减弱作用, 但在估算其总的直接辐射强迫时, 云区的贡献不可忽视。上述估算方法对云覆盖十分敏感, 不同的模式由于采用的云覆盖参数化方案不同, 其结果也不同。因此进一步改进云覆盖参数化精度, 对于精确估计云对气溶胶直接辐射强迫的影响程度十分重要。值得一提的是, 这里讨论的云对气溶胶辐射强迫的影响, 仅仅是指对其接辐射强迫的影响, 也就是说不考虑硫酸盐对云微物理特性的改变及对云形成的影响。

#### 5 表面反照率影响

图 4 给出归一化晴空辐射强迫的年平均分布。这里的归一化采用硫酸盐的光学厚度, 即图中的等值线为  $F_{Clear}/\text{SO}_4^{2-}$ , 单位为  $\text{W/m}^2$ 。由于本文在处理硫酸盐的消光系数时考虑了相对湿度的影响, 因此采用光学厚度而不是硫酸盐含量归一化就可以排除由于相对湿度变化带来的影响。采用晴空辐射强迫而不是总辐射强迫的目的是排除云的影响。因此,  $F_{Clear}/\text{SO}_4^{2-}$  尽管仍然是太阳天顶角及气溶胶

垂直分布的函数,但相比之下,受表面反照率的影响更大。由图可见,归一化的辐射强迫海洋区域最大,陆地均小于海洋。这表明反照率大的地区,归一化硫酸盐晴空辐射强迫小;而反照率小的地区,归一化硫酸盐晴空强迫就大。换句话说就是较高的地表反照率会减弱硫酸盐的辐射强迫,而较低地表反照率则会增加硫酸盐辐射强迫。这主要是由于:(1)当气溶胶层存在时,表面反照率越大,表面反射的太阳辐射就越多,气溶胶层向表面的后向散射辐射增多,表

面和气溶胶层之间的多次反射过程增强表面吸收效率,使大气顶辐射强迫减弱;(2)当气溶胶层存在时,表面反照率越大,由于表面和气溶胶层之间的多次反射过程,增加了太阳辐射的光学路径,从而导致大气中气体的额外吸收,造成大气顶直接辐射强迫减弱。

### 6 地表短波净辐射通量的变化

众所周知,地球表面的辐射平衡直接决定着大气的动力和热力过程,当这种辐射平衡发生变化时,必然影响地气系统气候状况。那么,硫酸盐气溶胶对地球表面短波辐射平衡产生怎样的影响呢?图5和图6分别给出有云和完全晴空时年平均地表太阳辐射通量的变化。比较图5、图6和图1、图2可以看出,无论云天还是晴空,加入硫酸盐气溶胶后,表面净太阳辐射通量减少。这种减少量的分布与相应的模式顶辐射强迫的分布类型完全一致,而且减少的幅度与模式顶辐射强迫幅度也几乎一致。表明硫酸盐气溶胶对大气辐射平衡影响非常小,但对地表辐射平衡产生重要影响,影响程度与大气顶几乎一致。

为了定量说明硫酸盐对地表及大气辐射平衡的影响程度,我们对整个模式域进行平均。完全晴空时,硫酸盐造成地面太阳辐射通量变化为 $-1.765 \text{ W/m}^2$ ,而模式顶辐射强迫为 $-1.775 \text{ W/m}^2$ ,二者仅相差 $0.01 \text{ W/m}^2$ ,地面太阳辐射通量变化比模式顶

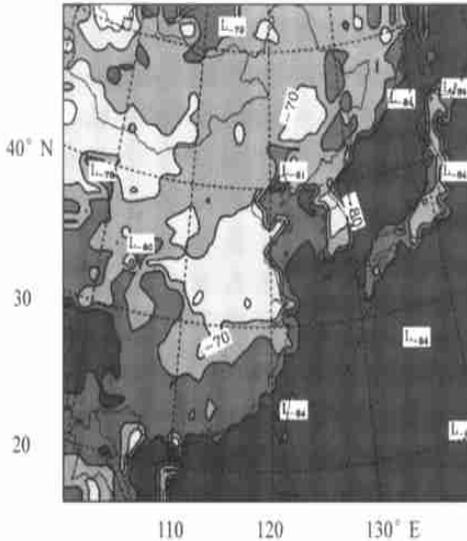


图4 归一化晴空辐射强迫的平均分布  
( $F_{\text{clear}}/SO_4^{2-}$ , 单位:  $\text{W/m}^2$ )

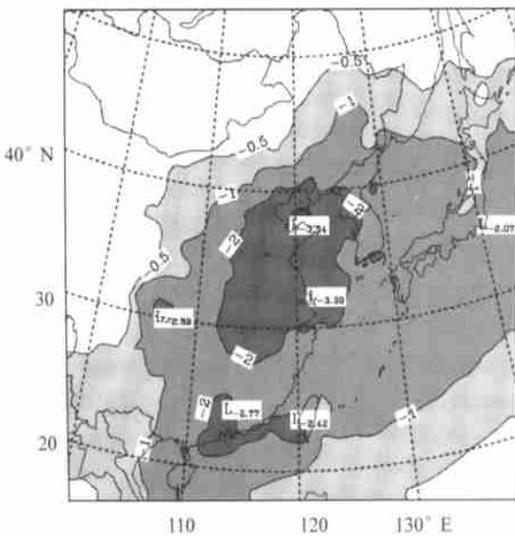


图5 年平均地表太阳辐射通量的变化  
(单位:  $\text{W/m}^2$ )

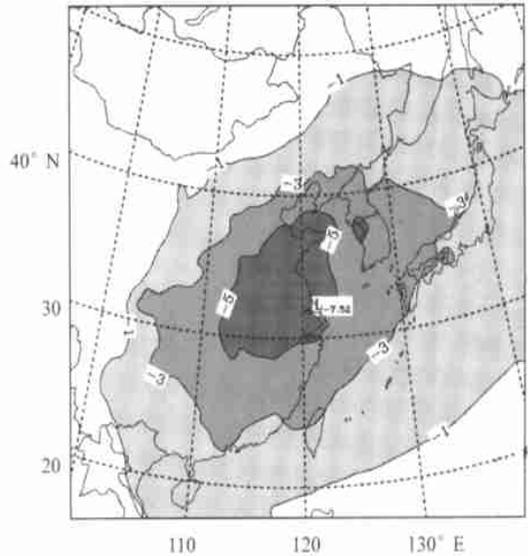


图6 完全晴空时年平均地表太阳辐射通量的变化  
(单位:  $\text{W/m}^2$ )

晴空辐射强迫偏小 0.56% 左右。这就是说加入硫酸盐后, 晴空条件下大气对太阳辐射的吸收增加了 0.56%, 从而增强大气短波加热率。这可能主要由于地表和气溶胶层之间的多次反射过程增加了太阳辐射的光学路径, 从而导致大气中气体的额外吸收, 造成大气对短波辐射的吸收增加。以上计算表明硫酸盐气溶胶对大气辐射平衡影响很小。

## 7 结 论

本文在模拟得到的对流层人为硫酸盐时空分布的基础上, 结合改进的区域气候模式对东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫进行了数值研究。在此基础上, 重点探讨了云及地表反照率对硫酸盐直接辐射的影响, 同时结合理论分析尽可能揭示其内在的物理实质。最后, 定量估算了东亚地区云区气溶胶对直接辐射强迫的贡献, 讨论了硫酸盐对地表和大气短波辐射平衡产生的不同影响。主要结论可归纳如下:

(1) 年平均硫酸盐直接辐射强迫的高值区主要位于长江中下游、山东半岛以及黄海和渤海海域, 在  $-2.0 \sim -3.4 \text{ W/m}^2$  之间。同时四川盆地、珠江三角洲及台湾地区也形成范围较小的强迫高值区, 幅度超过  $-2.0 \text{ W/m}^2$ 。

(2) 云对硫酸盐气溶胶的直接辐射强迫具有很强的减弱作用, 这种减弱作用不仅取决于天空云量, 而且取决于云的光学厚度。云光学厚度越大, 云区硫酸盐的直接辐射强迫越小。就区域平均而言, 本文模拟的云区硫酸盐直接辐射强迫为  $-0.097 \text{ W/m}^2$ , 占总直接辐射强迫的 10.4% 左右。这表明尽管云对硫酸盐直接辐射强迫具有很强的减弱作用, 但在估算其总的直接辐射强迫时, 云区贡献不可忽视。

(3) 较高的地表反照率会减弱硫酸盐的直接辐射强迫, 而较低的地表反照率则会增加硫酸盐的辐射强迫。

(4) 硫酸盐气溶胶对大气辐射平衡非常小, 但

对地表辐射平衡产生重要影响, 使地面净短波辐射减少, 减少的幅度与模式顶辐射强迫幅度几乎一致, 从而使地表冷却。

云-气溶胶-辐射相互作用及其气候效应问题是目前全球气候系统变化研究中最重要但又尚未解决的问题之一。本文仅仅讨论了云对硫酸盐气溶胶直接辐射强迫的影响。事实上, 硫酸盐气溶胶对云的微物理特性及云的形成产生影响, 从而间接影响气候变化。硫酸盐气溶胶对云的影响存在两种方式: 一种是在云水含量不变的前提下, 硫酸盐的增加将导致云凝结核 (CCN) 的增加, 从而使云滴数浓度 (CDNC) 增加, 增强云的反照率。这种效应又叫反照率效应。第二种效应是 CDNC 增加将使云滴平均半径减小, 从而抑制降水的发展, 并因此使云含量增加, 云寿命变长, 云覆盖区域增大, 云厚增强。这种效应又叫云生命期效应。这二者共同作用的结果都将使云的短波反照率增强。国际上一系列理论和观测研究表明, 硫酸盐气溶胶的间接效应对辐射收支同样产生重要的影响, 但与直接效应相比, 间接效应的不确定性更大。当前全球平均人为硫酸盐的间接辐射强迫介于  $0 \sim -1.5 \text{ W/m}^2$  之间<sup>[1]</sup>。但由于其可信度较低, 因此无法给出一个合理的中间估计值。难点之一就是硫酸盐气溶胶-云凝结核-云滴谱之间的转化关系还不清楚。目前几乎所有的模式在估计间接效应时, 将硫酸盐质量浓度与云滴谱通过经验关系联系起来。事实上, 云滴浓度和气溶胶浓度间的关系非常复杂, 它不仅依赖于云内上升速度、云和周围环境的混合程度, 而且依赖于可溶性气溶胶转化为 CCN 的能力。与此同时, 并非所有的 CCN 都可以转变为云滴, 这主要取决于气溶胶的化学及物理特征。因此要全面评估气溶胶气候效应, 除了研究对直接效应的影响以外, 还必须深入研究云对气溶胶间接的影响, 研究气溶胶对云物理和光学特性、云寿命以及降水的影响。

致谢: 感谢中国气象局国家气候中心赵宗慈研究员提供了区域气候模式。

## 参考文献

- Houghton J T, et al. Climate Change 1995. The science of climate change. In: IPCC, 1995. New York: Cambridge University Press, 1996. 138pp
- Boucher O, Anderson T L. General circulation model assessment of the sensitivity of direct climate forcing by anthropogenic sulfate aerosols to aerosols to aerosol size and chemistry. *J Geophys Res*, 1995, 100: 26117~ 26134
- Nemesure S, Wagoner R, Schwartz S E. Direct short-wave forcing of climate by the anthropogenic sulfate aerosols: Sensitivity to particle size, composition and relative humidity. *J Geophys Res*, 1995, 100: 26105~ 26116
- Charlson R J, Anderson T L, Rodhe H. Direct climate forcing by anthropogenic aerosols: Quantifying the link between atmospheric sulfate and ra-

- diation. *Contr Atmos Phys*, 1999, 72: 79~ 94
- 5 Heintzenberg J, Charlson R J, Clarke A D, et al. Measurements and modelling of aerosol single-scattering albedo: Progress, problems and prospects. *Beitr Phys Atmos*, 1997, 70: 249~ 263
- 6 Haywood L W, Robert D L, et al. General circulation model calculations of the direct radiative forcing by anthropogenic sulfate and fossil-fuel soot aerosols. *J Climate*, 1997, 10: 1562~ 1577
- 7 Haywood J M, Ramaswamy V. Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols. *J Geophys Res*, 1998, 104: 6043~ 6058
- 8 Myhre G, Stordal F, Restad K, et al. Estimation of the direct forcing due to sulfate and soot aerosols. *Tellus*, 1998, 50B: 463~ 477
- 9 Haywood J M, Shine K P. Multi-spectral calculations of the radiative forcing of tropospheric sulfate and soot aerosols using a column model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997, 123: 1907~ 1930
- 10 Liao H, Seinfeld J H. Effect of clouds on direct aerosol radiative forcing of climate. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3781~ 3788
- 11 胡荣明, 石广玉. 中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应试验. *大气科学*, 1998, 22(6): 919~ 925.
- 12 钱云, 符淙斌, 胡荣明等. 工业 SO<sub>2</sub> 排放对东亚和我国温度变化的影响. *气候与环境研究*, 1996, 1(2): 143~ 149
- 13 王喜红, 石广玉. 东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫. *高原气象*, 2001, 25(2): 231~ 242
- 14 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的模拟估算. *大气科学*, 2001, 25(2): 231~ 242
- 15 杨军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射强迫特性的影响. *大气科学*, 1999, 23(2): 239~ 247
- 16 李子华, 杨军, 黄世鸿. 考虑湿度影响的城市气溶胶粒子白天温度效应. *大气科学*, 2000, 24(1): 87~ 94
- 17 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响. *气象学报*, 2002, 60(2): 230~ 237
- 18 Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second generation regional climate model (RegCM2): Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon Weather Rev*, 1993, 121: 2794~ 2813
- 19 Giorgi F, Marinucci M R, De Canio, G. Development of a second generation regional climate model (RegCM2): Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon Weather Rev*, 1993, 121: 2814~ 2823
- 20 Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B. Description of the NCAR community climate model (CCM3), Near Tech Note, NCAR/TN- 420+ STR, 1996, 152pp
- 21 Slingo A. A GCM Parameterization for the shortwave radiative properties for climate models. *J Geophys Res*, 1989, 94: 1419~ 1427
- 22 Ebert E E, Curry J A. A Parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *J Geophys Res*, 1992, 97: 3831~ 3836
- 23 Kiehl J T, Briegleb B P. The relative roles of sulfate aerosol and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 1993, 260: 311~ 314
- 24 Wang Z F, Huang M Y, He D Y, et al. Sulfur distributions and transport studies in East Asia using Eulerian model. *Adv Atmos Sci*, 1996, 13(3): 399~ 409
- 25 王喜红, 石广玉. 东亚地区人为硫酸盐气溶胶柱含量变化的数值研究. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 58~ 66
- 26 白乃彬. 中国大陆 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 1 1 网格排放估计. 见: 周秀骥主编. 中国地区大气 O<sub>3</sub> 变化及其对气候环境的影响(一). 北京: 气象出版社, 1996. 145~ 150
- 27 Akimoto Hajime, Distribution of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> Emissions from fuel combustion and in Asian with 1 1 resolution. *Atmos Environ*, 1994, 28: 213~ 225
- 28 Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation. San Diego, Calif: Academic Press, 1998. 217pp
- 29 Charlson R J, Langner J, Rodhe H, et al. Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. *Tellus*, 1991, 43AB: 152~ 163
- 30 Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosol. *Science*, 1992, 255: 423~ 430
- 31 Haywood J M, Shine K P. The effect of anthropogenic sulfate and soot on the clear sky planetary radiation budget. *Geophys Res Lett*, 1995, 22, 603~ 606

## EFFECT OF CLOUD AND SURFACE ALBEDO ON DIRECT SULFATE RADIATIVE FORCING OVER EAST ASIA

Wang Xihong Shi Guangyu

(*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

### Abstract

A regional climate model is used to investigate the effect of clouds and surface albedo on direct sulfate radiative forcing over East Asia. The annual direct radiative forcing (DRF) from cloud regions is estimated. In the final, the effects of sulfate upon the surface and atmospheric solar radiation budget are also discussed respectively. The simulated results indicated that the effect of cloud upon the DRF of sulfate is generally to weaken the forcing, this weakening depends on cloud cover and cloud optical depth. The annual cloudy-sky DRF is approximately  $-0.097 \text{ W/m}^2$  for our simulated domain, and the contribution to the total DRF from cloudy-sky regions is approximately 10.4%. It means that the DRF from cloudy-sky regions can not be negligible in spite of cloud strongly weakening the DRF of sulfate aerosol. High surface reflectance tends to enhance the DRF of sulfate, while low surface reflectance tends to weaken the DRF of sulfate. The effect of sulfate on atmospheric radiation balance is very small. However, sulfate aerosol leads to a reduction in the surface solar irradiance and the reduction is very similar in magnitude and spatial distribution to the solar radiative forcing at the top of the model.

**Key words:** Cloud and surface albedo, Sulfate aerosols, Direct radiative forcing.