

# 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫 及其温度响应\*

王喜红 石广玉 马晓燕

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要** 利用区域气候模式对东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫及其温度响应进行了数值研究。结果表明:(1)人为硫酸盐直接辐射强迫具有明显的季节变化和地理分布特征,辐射强迫的这种变化特征不仅强烈地依赖于硫酸盐柱含量的季节变化和地理分布,而且取决于云量季节变化和地理分布。(2)就年平均而言,由于硫酸盐辐射强迫的影响,模拟区域内大部分地区普遍降温。降温比较明显的区域位于 $110^{\circ}\text{E}$ 以东, $40^{\circ}\text{N}$ 以南的中国大陆地区,超过 $-0.1^{\circ}\text{C}$ 。其中华北平原和长江中游的湖南、湖北形成两个降温大值中心,幅度超过 $-0.2^{\circ}\text{C}$ 。(3)地面温度响应呈现出明显的区域季节变化特征。冬春季节,温度响应与辐射强迫之间满足较好的对应关系;夏秋季节,二者呈现出复杂的非线性关系。

**关键词:** 东亚地区; 区域气候模式; 辐射强迫; 温度响应

## 1 引言

随着社会经济的飞速发展,人类活动对地球气候系统的影响越来越大。20世纪以来,由于大量化石燃料燃烧,大面积森林砍伐以及化学肥料的使用等使得大气中温室气体尤其是 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和氮氧化物( $\text{N}_2\text{O}$ )的浓度显著增加,造成全球气候增暖。与此同时,在人类活动的影响下,许多地区人为硫排放也在快速地增长,结果导致大气中硫酸盐气溶胶浓度大幅度增加。目前全球大气中硫酸盐气溶胶浓度已明显高于工业革命前的水平<sup>[1]</sup>。高浓度的硫酸盐气溶胶,一方面直接散射和吸收太阳辐射,从而改变地气系统的能量平衡,直接影响气候;另一方面以云凝结核(CCN)的形式改变云的光学特性和生命期,从而间接影响气候。据估计,自工业革命以来的1765年至1992年间,由温室气体增加所引起的全球平均辐射强迫约为 $+2.45\text{W m}^{-2}$ <sup>[1]</sup>,而硫酸盐气溶胶产生的直接辐射强迫约为 $-0.3\sim-0.9\text{W m}^{-2}$ ,间接辐射强迫约为 $0\sim-1.6\text{W m}^{-2}$ <sup>[1~6]</sup>。由此可见,对流层人为硫酸盐气溶胶产生的辐射强迫幅度可以与大气中温室气体相比拟,但符号相反。因此,科学地定量评估人为硫酸盐对气候的影响,对于可靠地预测未来气候变化具有十分重要的意义。

早在20世纪70~80年代,科学家们就已经注意到硫酸盐气溶胶对地气系统的辐射收支有着重要影响,但是真正对其辐射强迫进行量化研究是最近10年的事。20世纪

2000-12-22收到,2001-05-31收到修改稿

\* 中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向性项目KZCX2-305,国家重点基础研究发展规划项目G2000048703和国家自然科学基金资助项目49875012共同资助

90年代以来,随着全球三维硫循环模式的不断完善,硫酸盐辐射强迫及其气候效应的定量化研究发展很快,并已取得了一系列有意义的结果<sup>[1~7]</sup>。概括起来,这些研究主要是针对全球尺度,其研究思路大多是将全球三维化学输送模式(CTMs)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CTMs和GCMs所能达到的水平精度基本上都在几百公里的量级,仅仅能够提供气溶胶分布以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。近10年来,随着区域气候变化研究的不断开展,许多国家开始研制区域气候模式。与此同时,基于对区域环境和酸雨的重视,区域酸沉降模式得到了长足发展。但是直到目前为止,国际上将区域酸沉降模式同区域气候模式有机地结合起来进行气溶胶辐射强迫及其气候效应的研究为数甚少。

我国对硫酸盐气溶胶气候效应的研究起步较晚,胡荣明和石广玉<sup>[8]</sup>、钱云和符淙斌<sup>[9]</sup>以及王喜红等<sup>[10]</sup>在这方面进行了一些有意义的探索,但这些研究基本上都是借助于简单两层辐射模式和二维能量平衡模式,模式考虑的物理过程比较简单。最近Qian和Giorgi<sup>[11]</sup>利用一个耦合的硫输送-区域气候模式进行了研究,取得了一些非常有意义的结果,也为本文的工作提供了有益的参考。但Qian和Giorgi仅模拟了1994年10月和1995年7月两个不同月份的情景,没能给出东亚地区人为硫酸盐气溶胶辐射强迫和气候响应的季节变化规律,也没能给出年平均总体分布状况。另外,该耦合模式中将SO<sub>2</sub>化学转化效率固定为55%,忽略了温度、水汽、光强、云量及其他化学物种对化学转化效率的影响,化学过程的这种简化处理必然会极大地影响硫酸盐的时空分布。本文利用较复杂的东亚区域硫化学模式输出的二维硫酸盐时空分布资料,结合区域气候模式深入分析人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应的地理分布特征,分析其季节演变规律。

## 2 模式描述和实验设计

### 2.1 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(1996版本)。该模式的动力框架源于NCAR和美国宾州大学联合发展的有限区域模式MM4。为了适合区域气候研究的需要,模式引入了全球大气环流模式CCM2中描述气候过程的物理参数化。关于该模式的详细说明,可参阅文献[12]和[13]。

为了更好地反映气溶胶对辐射收支的影响,本文对其辐射参数化进行了改进,短波部分采用NCAR第三代大气环流模式CCM3<sup>[14]</sup>中的有关处理方法。与原方案相比(原方案采用CCM2辐射参数化),CCM3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,增加了冰云和气溶胶的散射效应。其中短波(0.2~5 μm)分为18个波段,采用δ-Eddington方法计算。水云的短波辐射特性采用Slingo<sup>[15]</sup>的方法进行参数化,海洋上空水云云滴有效半径取为10 μm,陆地上空表征为温度的函数。冰云的短波辐射特性采用Ebert和Curry<sup>[16]</sup>的方法进行参数化,冰云覆盖份数表征为温度的函数,冰云有效半径参数化为气压的函数。考虑到大气柱内存在各层云的重叠现象,本文采用随机重叠的方法。

## 2.2 人为硫酸盐资料及其短波辐射性质

CCM3 短波辐射方案尽管引入了气溶胶的影响。但是仅仅包含了背景气溶胶, 而且将气溶胶固定在大气边界层内, 没能考虑气溶胶地理分布和时空演变。为了能够更好地反映硫酸盐气溶胶的辐射气候效应, 本文引入三维人为硫酸盐气溶胶时空分布资料, 同时引入硫酸盐气溶胶的辐射特性。

人为硫酸盐资料来自于东亚地区三维区域硫化学输送模式<sup>[17~20]</sup>的模拟结果。该模式比较全面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。模拟表明<sup>[19,20]</sup>模式具有较好的灵敏度和可信度, 可以较好地反映污染物的时空分布、季节变化及其柱特性。有关人为硫酸盐分布的模拟结果参阅文献[18,19]。

气溶胶的辐射特性是连接化学输送模式和气候模式中辐射参数化的关键因子。本文硫酸盐气溶胶辐射特性采用 Kiehl 和 Briegleb<sup>[3]</sup>提供的资料, 该值是在假定硫酸盐满足对数正态分布的情形下, 通过 Mie 散射理论计算得到。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依据 Kiehl 和 Briegleb 发展的多项式函数形式。

## 2.3 模拟方案总体设计

以往的研究表明, 东亚地区人为硫酸盐气溶胶主要集中在 100°E 以东的广大区域, 为此本文选取的模拟区域大约为 (16°N~50°N, 100°E~150°E), 包括东亚大部分地区及西北太平洋, 区域中心位于 (35°N, 119°E)、水平分辨率为 80 km。垂直方向分为 17 层, 顶部取在 10 hPa。模式积分时间从 1995 年 12 月 16 日 00 时到 1997 年 1 月 1 日 00 时, 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 小时更新一次, 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 月平均 1°×1° 资料。模式陆面过程采用 Dickinson 等<sup>[21]</sup>发展的 BATS1E 参数化方案, 行星边界层物理采用 Holstlag 等<sup>[22]</sup>近年来发展的非局地参数化方案。对不可分辨的积云降水, 采用 Grell 积云对流参数化方案<sup>[23]</sup>。模式选用的时间步长为 240 s。

为了检验改进后的模式模拟区域气候的能力, 我们分别将模拟的地面温度场、降水场及云量与台站的观测资料及 NCEP / NCAR 再分析资料进行了对比。结果表明改进后的区域气候模式尽管依然存在一些不足之处, 但模式能够成功地模拟出强降水带的主要特征 (包括降水带的走向, 强降水中心位置等等)。此外, 模式也能成功地模拟出地表温度空间分布特征和若干局地冷暖中心, 同时能够比较成功地模拟出云覆盖份数, 包括云带的走向及云覆盖大值中心位置等等。所有这些模拟表明, 改进后的区域气候模式具有良好的模拟能力。有关详细的比较结果参阅文献[19]。

## 3 人为硫酸盐辐射强迫

当地气系统外部影响因子如入射太阳辐射, 大气成分及行星表面特性等发生变化时, 行星辐射平衡也将随之发生变化, 而这种变化国际上称为辐射强迫。IPCC 给出了两种辐射强迫的定义<sup>[24]</sup>: 一种是瞬时辐射强迫, 即对流层顶净辐射通量的瞬时变化, 不考虑平流层温度调整; 另一种是调整辐射强迫, 也就是在保持地面和对流层温度不变

的前提下,使平流层温度调整到辐射平衡后,对流层顶净辐射通量的变化。Hansen 等<sup>[25]</sup>研究表明硫酸盐气溶胶的瞬时辐射强迫值和调整辐射强迫值非常接近。Myhre 和 Stordal<sup>[26]</sup>及 Myhre 等<sup>[27]</sup>研究指出,硫酸盐瞬时辐射强迫比调整辐射强迫仅大 1% 左右。由此可见,硫酸盐气溶胶瞬时辐射强迫与其调整辐射强迫之间差别很小。因此,本文采用瞬时辐射强迫的概念。

为了诊断硫酸盐气溶胶的瞬时辐射强迫,本文在模式积分过程中共设计了四种辐射参数化方案,如表 1 所示。其中只有 Bas 方案参与模式积分,其他三种方案主要用于诊断云和气溶胶的辐射强迫,并不影响气候模式的短波辐射加热率。Bas-Exp1 就可以估算气溶胶的瞬时辐射强迫,Exp2-Exp3 可估算出完全晴空时气溶胶的瞬时辐射强迫,而 Exp1-Exp3 估算云的瞬时辐射强迫。由于四种辐射程序在模式积分过程中同时调用,因此上述强迫估算不包括任何气候系统的反馈。

表 1 试验设计

| 方案名称 | Bas     | Exp1 | Exp2   | Exp3       |
|------|---------|------|--------|------------|
| 方案设计 | 考虑气溶胶和云 | 仅考虑云 | 仅考虑气溶胶 | 完全晴空不考虑气溶胶 |

图 1 分别给出冬季(12~2月)和夏季(6~8月)人为硫酸盐直接辐射强迫的地理分布(Bas-Exp1)。可以看出,辐射强迫具有明显的区域分布及季节变化特征。冬季,辐射强迫的高值区主要位于我国沿海工业发达地区,超过 $-2 \text{ W m}^{-2}$ 。其中长江中下游地区和珠江三角洲地区最大,接近 $-3.0 \text{ W m}^{-2}$ 。与冬季相比,夏季强迫高值区位置明显北移,主要位于山东半岛和环渤海湾地区,最大值达 $-4.5 \text{ W m}^{-2}$ 。与此同时,四川盆地出现较为明显的强迫中心,中心值达 $-3.3 \text{ W m}^{-2}$ 。近年来一系列研究表明,当前年平均

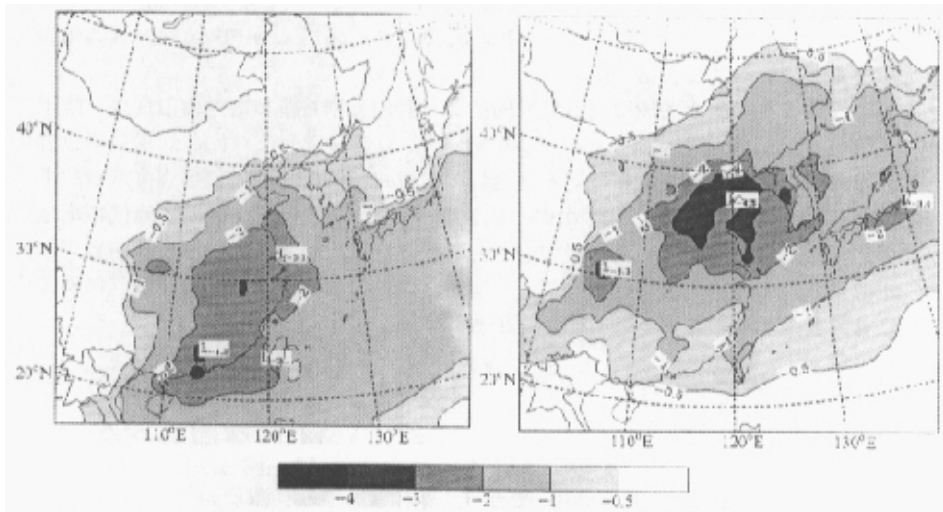


图 1 人为硫酸盐瞬时直接辐射强迫的地理分布(单位:  $\text{W m}^{-2}$ )  
(a) 冬季; (b) 夏季

温室气体辐射强迫在东亚地区接近 $+2.5 \text{ W m}^{-2}$  [3,28], 而我国的长江三角洲地区、山东半岛、环渤海湾及四川盆地等广大地区仅直接辐射强迫就超过了 $-2.0 \text{ W m}^{-2}$ , 夏季最大值甚至达到 $-4.5 \text{ W m}^{-2}$ 。这表明, 人为硫酸盐对东亚地区的辐射收支施加着重要影响。在污染严重的工业区域, 对流层人为硫酸盐气溶胶产生的辐射强迫可以与大气温室气体相比拟, 但符号相反。

图2给出区域平均的人为硫酸盐瞬时辐射强迫的季节变化。由图可见, 辐射强迫的季节变化类型呈双峰结构, 其中9月最大, 为 $-1.5 \text{ W m}^{-2}$ , 5月次大, 为 $-1 \text{ W m}^{-2}$ 。

为了揭示上述直接辐射强迫的这种区域分布和季节变化的主要成因, 本文诊断了完全晴空时硫酸盐的直接辐射强迫分布 (Exp2-Exp3) (如图3所示)。将图3同文献[18]中硫酸盐柱含量地理分布比较后发现, 无论是分布类型还是高值区位置, 晴空直接辐射强迫与其柱含量之间有着很好的对应关系。为了更清楚地表明二者之间的关系, 图4给出整个模拟区域内年平均晴空辐射强迫随硫酸盐光学厚度的变化。由图4可见, 晴空辐射强迫与硫酸盐光学厚度之间呈现出很好的线性对应关系。这表明直接辐射强迫强烈地依赖于硫酸盐柱含量。

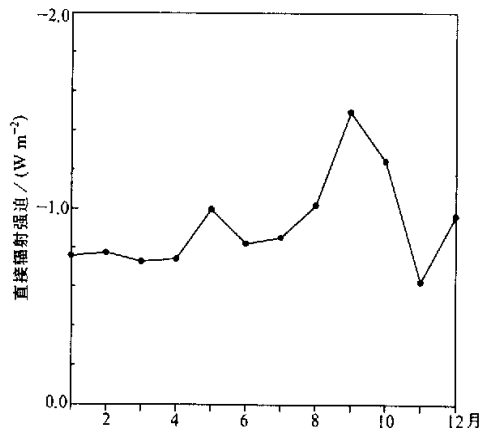


图2 区域平均人为硫酸盐瞬时直接辐射强迫的季节变化

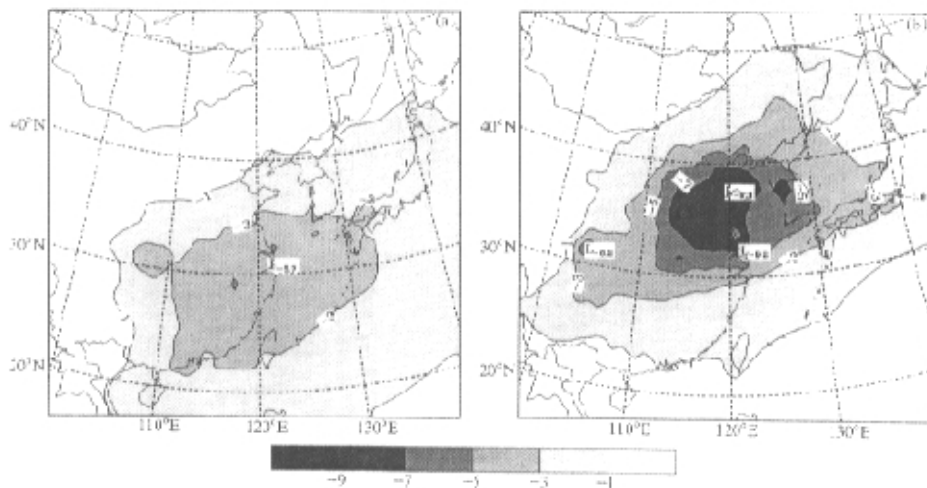


图3 完全晴空时人为硫酸盐瞬时直接辐射强迫的地理分布 (单位:  $\text{W m}^{-2}$ )

(a) 冬季; (b) 夏季

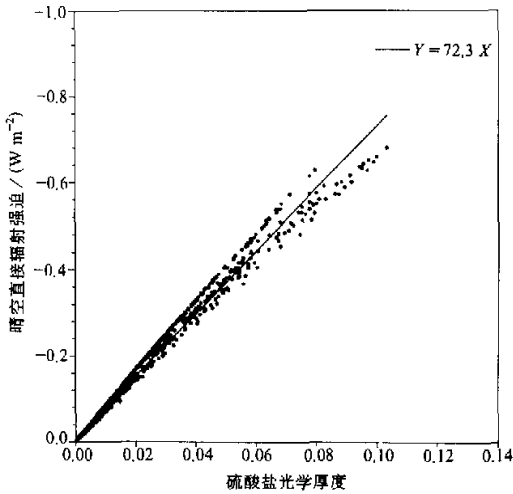


图4 模拟区域内年平均晴空辐射强迫随硫酸盐光学厚度变化

有着很明显的季节变化特征。因此,不同区域不同季节,云对直接辐射强迫的影响程度不同。综上所述,直接辐射强迫的地理和季节变化不仅取决于柱含量的区域分布和季节变化,而且取决于云覆盖的地理分布和季节变化。

#### 4 地面温度响应

以上分析表明,人为硫酸盐对地气系统的辐射平衡产生重要扰动,辐射平衡的这种扰动必然会影响到地气系统的气候变化,为了能够反映人为硫酸盐对气候系统的这种影响,本文设计了两个实验:case 1 不包含硫酸盐,case 2 包含硫酸盐。两种方案独立积分1年,其差值(case 2-case 1)即代表人为硫酸盐引起的气候变化。由于两种方案是独立运算,因此case 2-case 1 中包含了气候系统的各种反馈过程。

图5给出人为硫酸盐引起的年平均地面温度变化,图中阴影区表示降温区域,等值线间隔为 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。可以看出,由于硫酸盐的影响,模拟区域内大部分地区普遍降温。降温比较明显的区域位于 $110^{\circ}\text{E}$ 以东, $40^{\circ}\text{N}$ 以南的中国大陆地区,超过 $-0.1^{\circ}\text{C}$ 。其

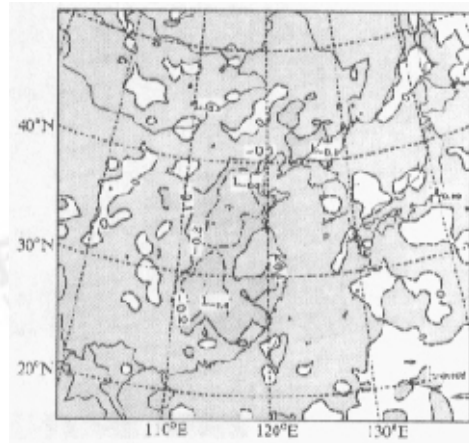


图5 人为硫酸盐引起的年平均地面温度响应  
等值线间隔为 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,阴影区为降温区

中华北平原和长江中游的湖南、湖北形成两个降温大值中心, 幅度超过 $-0.2^{\circ}\text{C}$ 。

近年来, 一系列观测研究表明, 在全球变暖的大背景下, 我国南方大部分地区年平均气温呈下降趋势。Li 等<sup>[29]</sup>研究表明 20 世纪 80 年代以来我国南方大部分地区普遍降温, 并分析指出这种变冷可能与硫酸盐含量的增加有关。陈隆勋等<sup>[30]</sup>利用 400 个台站的月平均资料, 对 45 年来中国气候变化特征作了更全面的分析, 结果发现中国现代的气温变暖主要发生在  $35^{\circ}\text{N}$  以北地区, 变暖最大在新疆和黑龙江北部。与此同时, 在  $(35^{\circ}\text{N}\sim 23^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E})$  以东地区存在一个更加广阔的变冷区。而本文模拟的  $40^{\circ}\text{N}$  以北, 降温幅度非常小, 主要降温区位于  $40^{\circ}\text{N}$  以南,  $110^{\circ}\text{E}$  以东的广大地区, 模拟与观测分析的主要降温区域基本接近。这表明我国近几十年气温的变化与硫酸盐含量之间可能存在着一定关系。

图 6 分别给出冬季和夏季季平均地面温度变化, 图中阴影区表示降温区域, 点区表示升温区域。由图可见, 地面温度响应呈现出明显的区域季节变化特征。冬季, 模拟区域内大部分地区普遍降温, 其中长江中下游地区降温比较明显, 超过 $-0.2^{\circ}\text{C}$ 。与冬季相比, 夏季情况比较复杂, 模拟域内有降温也有升温。比较图 6 和图 1 可以看出, 冬季温度响应与辐射强迫之间满足较好的对应关系。中国大陆, 辐射强迫大值区基本对应降温高值区, 海洋由于其巨大的热容量, 响应较小。而夏季, 辐射强迫与温度响应之间呈现出复杂的非线性关系, 部分地区甚至出现升温情况。上述模拟结果与 Qian 和 Giorgi<sup>[11]</sup>结果基本接近。其模拟的 1994 年 10 月直接辐射强迫与其温度响应之间有较好的对应关系, 但 1995 年 7 月模拟结果显示中国中部和南部地区地面出现升温, 表明夏季辐射强迫与其温度响应之间存在非线性对应关系。

为了进一步认识这种非线性关系, 我们对云量、云光学厚度、地面辐射平衡及降水

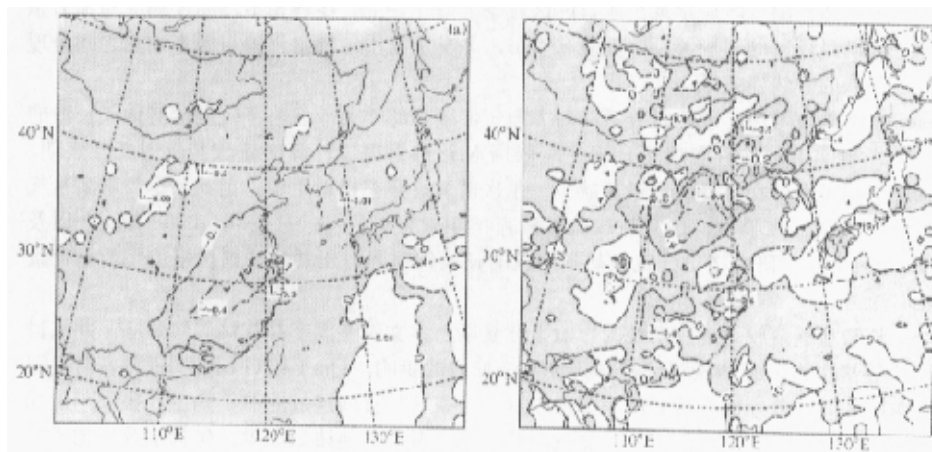


图 6 人为硫酸盐引起的地面温度响应

(阴影区为降温区, 点区为升温区)

(a) 冬季, 等值线间隔为  $0.1^{\circ}\text{C}$ ; (b) 夏季, 等值线间隔为  $0.2^{\circ}\text{C}$

场等的变化进行了一系列分析<sup>1)</sup>。结果表明:硫酸盐直接辐射强迫对地表辐射平衡产生重要影响,使地表净短波辐射减少,减少的幅度与模式顶直接辐射强迫幅度几乎相当,从而使地表冷却。冬季,云和降水相对较少,加入硫酸盐后引起地面降温,使得大气层结更加稳定,云量和降水变化较小,因此辐射强迫与温度响应之间呈现出较好的对应关系。夏季,加入硫酸盐后,地面降温从而抑制对流活动,使得云量和降水减少;而云量减少又使到达地面的太阳辐射量增加,地表温度开始上升,对流活动加强,降水增多。而降水的增加又进一步影响云量的变化。因此夏季辐射强迫与其温度响应之间呈现出更复杂的非线性关系,而这种非线性关系主要取决于模式物理过程之间复杂的非线性相互作用。

## 5 结论和讨论

本文在模拟得到的对流层人为硫酸盐时空分布的基础上,结合业已改进的RegCM2模式对东亚地区20世纪90年代中期人为硫酸盐的直接辐射强迫及其温度响应进行数值研究,并分析其地理分布和季节变化特征。其主要结论可归纳如下:

(1) 人为硫酸盐直接辐射强迫具有明显的季节变化和地理分布特征,辐射强迫的这种变化特征不仅强烈地依赖于硫酸盐柱含量的季节变化和地理分布,而且取决于云量的季节变化和地理分布。区域平均直接辐射强迫的逐月变化呈双峰结构,其中9月最大,为 $-1.5 \text{ W m}^{-2}$ ,5月次大,为 $-1 \text{ W m}^{-2}$ 。

(2) 就年平均而言,由于硫酸盐辐射强迫的影响,模拟区域内大部分地区普遍降温。降温比较明显的区域位于 $110^{\circ}\text{E}$ 以东, $40^{\circ}\text{N}$ 以南的中国大陆地区,超过 $-0.1^{\circ}\text{C}$ 。其中华北平原和长江中游的湖南、湖北形成两个降温大值中心,幅度超过 $-0.2^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 地面温度响应呈现出明显的区域季节变化特征。冬春季节,温度响应与辐射强迫之间满足较好的对应关系。而夏秋季节,尤其是夏季,辐射强迫与温度响应之间呈现出更复杂的非线性关系。

本文重点考虑了硫酸盐气溶胶对太阳短波辐射的作用,忽略了硫酸盐对地气长波的作用。事实上,这种忽略是合理的。依据Mie散射理论计算的硫酸盐辐射特性表明,其质量消光系数在红外波段迅速减少,单次散射反照率趋近于零。因此,尽管硫酸盐气溶胶对长波存在吸收,但其造成的长波直接辐射强迫很小。Haywood和Shine<sup>[31]</sup>以及Haywood等<sup>[32]</sup>研究指出,硫酸盐气溶胶的长波辐射强迫比其短波辐射强迫小两个量级左右。

硫酸盐气溶胶对地气系统的影响十分复杂,本文仅考虑了其直接气候效应,并未讨论硫酸盐作为云凝结核对云光学特性及云形成的影响,Qian和Giorgi<sup>[11]</sup>研究表明我国西南区间间接效应比直接效应大2倍左右,这表明尽管间接效应的不确定性很大,但却不能忽视。同时本文仅考虑硫酸盐气溶胶,没有考虑其他诸如烟尘、矿物尘及生物质燃烧的气溶胶等的影响,一些研究显示这类气溶胶的影响也不能忽视。因此要进一步了解气溶胶对气候的影响,深入了解我国南部降温的真正原因,除了考虑温室气体及硫酸盐

1) 王喜红,石广玉,云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响,已投气象学报。



的变化以外, 还必须考虑其他种类气溶胶及地表类型的改变等等。

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

- 1 Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 572pp.
- 2 Charlson, R. J., J. Langner, H. Rodhe, C. B. Leovy and S. G. Warren, Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols, *Tellus*, 1991, **43A**, 152~163.
- 3 Kiehl, J. T. and B. P. Briegleb, The relative roles of sulfate aerosol and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 1993, **260**, 311~314.
- 4 Boucher, O. and T. L. Anderson, General circulation model assessment of the sensitivity of direct climate forcing by anthropogenic sulfate aerosols to aerosol size and chemistry, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 26117~26134.
- 5 Haywood, J. M. and V. Ramaswamy, Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**, 6043~6058.
- 6 Chuang, C. C., J. E. Penner, K. E. Taylor, A. S. Grossman and J. J. Walton, An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 3761~3778.
- 7 Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory and S. F. B. Tett, Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulfate aerosols, *Nature*, 1995, **376**, 501~504.
- 8 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**, 919~925.
- 9 钱云、符深斌、胡荣明、王自发, 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, **2**, 143~149.
- 10 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, **20**(3), 258~263.
- 11 Qian Y. and F. Giorgi, Interaction coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia, *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 6477~6499.
- 12 Giorgi, F., Marinucci M. R. and G. T. Bates, Development of a second generation regional climate model (RegCM2): Boundary layer and radiative transfer processes, *Mon. Wea. Rev.*, 1993c, **121**, 2794~2813.
- 13 Giorgi, F., Marinucci M. R., De Canio, G. and G. T. Bates, Development of a second generation regional climate model (RegCM2): Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, *Mon. Wea. Rev.*, 1993d, **121**, 2814~2823.
- 14 Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Briegleb, D. L. Williamson and P. J. Rasch, Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). Near Tech. Note, NCAR / TN-420+STR, 1996, 152pp.
- 15 Slingo, A., A GCM Parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds, *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**, 1419~1427.
- 16 Ebert, E. E. and J. A. Curry, A parameterization of ice cloud optical properties for climate models, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 3831~3836.
- 17 黄美元、王自发、何东阳、徐华英、周玲, 我国冬夏硫污染物沉降与跨地区输送模拟研究, *科学通报*, 1996, **41**, 1013~1016.
- 18 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.
- 19 王喜红, 东亚地区人为硫酸盐气溶胶气候效应的数值研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000, 15~56.
- 20 王自发, 我国和东亚地区硫化物与黄沙输送研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1997.
- 21 Dickinson, R. E., P. J. Kennedy, A. Henderson-Sellers and M. Wilson, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, NCAR Tech. Note, NCAR / TN-275+STR, 1986, 69pp.
- 22 Holtslag, A. A. M. and B. A. Boville, Local versus nonlocal boundary layer diffusion in a global climate model, *J. Climate*, 1993, **6**, 1825~1842.
- 23 Grell, G. A., Y.-H. Kuo and R. Pasch, Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus

- parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 764~787.
- 24 Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B. A. Callander, E. F. Haites, N. Harris and K. Maskell, *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), U. K., Cambridge, Cambridge University Press, 1994, 131~162.
- 25 Hasen, J., M. Sato and R. Ruedy, Radiative forcing and climate response, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 6831~6864.
- 26 Myhre, G. and F. Stordal, Role of spatial and temporal variations in the computation of radiative forcing and GWP, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 11,181~11,200.
- 27 Myhre, G., F. Stordal, K., Restad and I. S. A. Isaksen, Estimation of the direct forcing due to sulfate and soot aerosols using a column model, *Tellus*, 1998c, **50B**, 463~477.
- 28 Shine, K. P. and P. M. de F. Forster, The effect of human activity on radiative forcing of climate change: a review of recent developments, *Global and Planetary Change*, 1999, **20**, 205~225.
- 29 Li Xiaowen, Zhou Xiuji, Li Weiliang and Chen Longxun, The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms, *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, **9**, 57~68.
- 30 陈隆勋, 朱文琴, 王文, 周秀敏, 李维亮, 中国近45年来气候变化的研究, 气象学报, 1998, **56**, 257~271.
- 31 Haywood, J. M. and K. P. Shine, Multi-spectral calculations of the radiative forcing of tropospheric sulfate and soot aerosols using a column model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1997a, **123**, 1907~1930.
- 32 Haywood, J. M., D. L. Roberts, A. Slingo, J. M. Edwards and K. P. Shine, General circulation model calculations of the direct radiative forcing by anthropogenic sulfate and fossil-fuel soot aerosols, *J. Climate*, 1997b, **10**, 1562~1577.

## The Direct Radiative Forcing of Anthropogenic Sulfate and Its Temperature Response over the Eastern Asia

Wang Xihong, Shi Guangyu and Ma Xiaoyan

(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 (RegCM2-1996) is used to assess the direct radiative forcing (DRF) and its temperature effect due to tropospheric anthropogenic sulfate over the eastern Asia. The simulated results indicate: (1) the calculated DRF due to anthropogenic sulfate appears to be of obviously geographical and seasonal patterns, which mainly depend on the geographical and seasonal variations of sulfate loadings and cloud cover. (2) In the annual mean, the DRF of sulfate produces a widespread cooling throughout the simulated domain. The higher cooling is mainly localized in the eastern China of 100°E and the southern China of 40°N, where the annual mean temperature change exceeds -0.1°C. The maximum cooling centers are found in North China, Hunan and Hubei provinces where the value of cooling exceed -0.2°C. (3) The pattern of temperature response exhibits a strongly spatial and seasonal variations. During winter and spring, the pattern of response reflects the pattern of the forcing. But during summer and autumn, the temperature response to the DRF at the sub-regional scale is generally nonlinear.

**Key words:** eastern Asia; regional climate model; radiative forcing; temperature response