

# 硫酸盐气溶胶直接辐射效应在线 与离线模拟方法的比较\*

吴 润

(云南大学资源环境与地球科学学院大气科学系, 昆明, 650091; 南京大学大气科学系, 南京, 210093)

蒋维楣 刘红年

王卫国 罗 燕

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

(云南大学资源环境与地球科学学院大气科学系, 昆明, 650091)

## 摘 要

利用区域气候模式 RegCM2 与大气化学模式连接的模拟系统, 比较了硫酸盐气溶胶辐射强迫的在线、离线模拟方法的硫酸盐柱含量、大气顶直接辐射强迫及地表温度响应。发现: 在线与离线模拟方法得到的硫酸盐柱含量、有无反馈大气顶直接辐射强迫和地表温度响应在许多地区有很大差异, 这种差异在较小区域平均的尺度上更显著, 在全区域平均尺度上也较为明显, 是不能被忽略的; 结果显示从硫酸盐含量到辐射强迫和地表温度响应逐渐加大的差异, 说明硫酸盐气溶胶的辐射强迫与模拟方法有关, 显示出较大的不确定性。

关键词: 硫酸盐气溶胶, 直接辐射强迫, 地表温度响应, 模拟方法比较。

## 1 引 言

全球平均硫酸盐直接辐射强迫比较公认的范围是  $-0.26 \sim -0.82 \text{ W/m}^2$ <sup>[1]</sup>, 虽然变化幅度较小, 但不同地区的离散度仍较大, 单位硫酸盐柱含量所引起的辐射强迫也存在明显差别, 说明人为硫酸盐辐射强迫模拟工作中还含有诸多不确定因素, 应当进行深入分析。影响结果的因素除排放源资料、模式之外, 还有硫化物模式与气候模式之间的连接方式。常见的模式连接方式有“在线”和“离线”<sup>[2]</sup>。在线连接指气候模式与硫化物模式之间是实时相互反馈的, 离线连接指利用已经计算出的硫化物浓度输入到气候模式辐射方案中, 用于计算辐射强迫, 不含气候模式对硫化物模式的反馈过程。Koch<sup>[3]</sup>利用全球模式研究表明: 离线和在线计算的直接辐射强迫的全球平均值差别很小, 但在一些地区差别较大, 尤其是污染较严重的大陆地区可达 10%。对在线与离线方法的差异还需在区域尺度进行更广泛深入的比较研究和观测验证。本文利用区域气候模式 RegCM2 和一个包含有 CBM4 大气化学反应机制的化学模式, 对在线和离线两种模拟方法得到的中国

地区人为硫酸盐直接辐射强迫进行比较, 认识由于模拟方法不同导致的中国地区的直接辐射强迫差异。

## 2 模式、资料和方法

区域气候模式 RegCM2 是在中尺度模式 MM4 的基础上发展起来的, 具有很好的模拟能力<sup>[4~6]</sup>, 采用 CCM3 辐射方案<sup>[7]</sup>。所用的化学模式采用 CBM4 大气化学反应机制, 已用于模拟硫酸盐、臭氧等分布<sup>[8~11]</sup>, 采用大气化学模式单独积分 24 h 得到的结果作为各物种浓度的初始场, 物种浓度侧边界固定。利用 2000 年 1, 4, 7, 10 月的 NCEP 资料为气候模式提供初始场和 6 h 一次的侧边界, 每个例子的积分时间为 45 d, 分析后 30 d 的结果。模式水平网格距 90 km, 垂直方向分 15 层, 模式顶在 100 hPa。化学物种排放资料采用 TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific) 计划中 2000 年  $1^\circ \times 1^\circ$  的年平均全球污染排放资料<sup>[12]</sup>, 不考虑季节变化。排放资料不同会导致硫酸盐及其辐射强迫的模拟误差, 但本文重点比较在线与离线模拟方法所得结果的差异, 因此排放源的不确定性对研究的问题是

\* 初稿时间: 2003 年 6 月 9 日; 修改稿时间: 2004 年 5 月 19 日。

资助课题: 国家自然科学基金资助项目(40205016 和 40165001); 云南省自然科学基金资助项目(2003D0011)。

可以忽略的。

对 1, 4, 7, 10 月的气象场分别进行 3 个例子的模拟, 第 1 个只积分气候模式, 另外 2 个分别采用在线和离线的方式连接上大气化学模式模拟, 其结果与第 1 个的差就是包含气候系统响应的人为硫酸盐直接辐射效应。其中离线连接时所用的已知硫酸盐气溶胶浓度分布是利用模式在不考虑人为硫酸盐气溶胶对气象场影响的情况下事先计算好的硫酸盐分布。在气候模式进行辐射计算时, 设计了 2 个方案按顺序调用并输出, 第 1 个方案不含人为硫酸盐, 第 2 个包含人为硫酸盐, 两者结果之差为不含气候系统响应的人为硫酸盐辐射效应<sup>[13]</sup>。

### 3 模拟结果分析

本文全区域的 4 个月平均值与文献<sup>[14~24]</sup>对比表明: 全球年平均硫酸盐柱含量大约在 1.7~ 4.0 mg/m<sup>2</sup>, 本文在线与离线硫酸盐含量分别为 2.418, 2.432 mg/m<sup>2</sup>; 全球平均直接辐射强迫范围是 -0.26 ~ -0.82 W/m<sup>2</sup>, 且多数结果集中在 -0.26 ~ -0.4 W/m<sup>2</sup>, 本文在线和离线结果分别为 -0.38, -0.39 W/m<sup>2</sup>; 全球平均标准化硫酸盐直接辐射强迫为 -110

~ -460 W/m<sup>2</sup>, 且多集中在 -110 ~ -200 W/m<sup>2</sup>, 本文为 -155, -159 W/m<sup>2</sup>。由此说明本文模拟的硫酸盐含量和辐射强迫结果是可信的。另外, 本文的硫酸盐含量和辐射强迫数值及分布特征与前人在东亚区域尺度上已经开展的工作也很接近<sup>[13, 25~27]</sup>, 说明本文的模拟结果应该是可信的。

图 1 给出在线模拟的硫酸盐柱含量减去离线含量的差。1 月份在华北地区, 尤其是山东在线模拟的含量明显比离线含量低 0.01~ 0.02 mg/m<sup>2</sup>, 在四川、长江流域和华南地区在线含量偏高 0.01 mg/m<sup>2</sup> 以上。4 月份在线含量在华南北部、华东南部、渤海湾偏低 0.1~ 0.4 mg/m<sup>2</sup>, 华南南部较高。7 月份在线含量在四川偏低 1~ 3 mg/m<sup>2</sup>, 约占该地区柱含量的 21%, 华中地区也偏低 1 mg/m<sup>2</sup>, 在华北和华东北部地区偏高 1~ 3 mg/m<sup>2</sup>。7 月份在线与离线含量的差别为最大。10 月份四川地区在线含量仍然偏低 0.6 ~ 1.5 mg/m<sup>2</sup>, 华中、华北地区偏低 0.3~ 0.6 mg/m<sup>2</sup>, 广东、福建沿海偏低 0.3~ 1.2 mg/m<sup>2</sup>。广东、福建沿海外的南方地区偏高 0.3~ 0.6 mg/m<sup>2</sup>。

表 1 中对全模拟区域平均状况而言, 在线与离线的含量差别小于 0.1 mg/m<sup>2</sup>, 这样的差别占在线含量

表 1 在线与离线主要差异

Table 1 Comparison of main results of on-line and off-line methods

区域	月份	在线硫酸盐含量 (mg/m <sup>2</sup> )	在线与离线含量差与在线含量之比 (%)	在线辐射强迫 (W/m <sup>2</sup> )	在线离线辐射强迫差与在线辐射强迫之比 (%)	含气候反馈在线离线辐射强迫差与在线之比 (%)	在线离线温度变化差与在线温度变化之比 (%)
全模拟区域平均	1月	1.632	0.12	-0.234	-1.71	5.6	28.6
	4月	3.030	2.97	-0.471	-3.61	-58.4	38.1
	7月	2.759	-0.22	-0.511	1.57	554.2	1080.0
	10月	2.252	-2.71	-0.306	-11.44	0.46	-100.0
北部地区平均	1月	0.997	-0.30	-0.074	-33.78	-482.5	37.5
	4月	3.626	0.11	-0.514	-5.25	-58.5	-5.1
	7月	8.598	7.15	-1.568	10.84	-91.0	34.7
	10月	3.308	-3.57	-0.435	-19.77	-113.1	-200.0
中部地区平均	1月	2.672	0.30	-0.143	-13.99	-215.7	40.0
	4月	4.423	0.97	-0.560	6.25	26.2	43.3
	7月	4.968	-13.02	-0.851	-12.22	41.3	56.0
	10月	4.633	-3.11	-0.442	-19.23	155.5	-95.8
南部地区平均	1月	5.143	0.31	-0.824	0.36	-9.6	6.1
	4月	10.004	-1.33	-1.347	-4.31	-40.0	12.3
	7月	3.993	5.68	-0.729	10.56	-75.9	301.1
	10月	7.188	3.70	-1.041	4.23	-159.5	-63.0

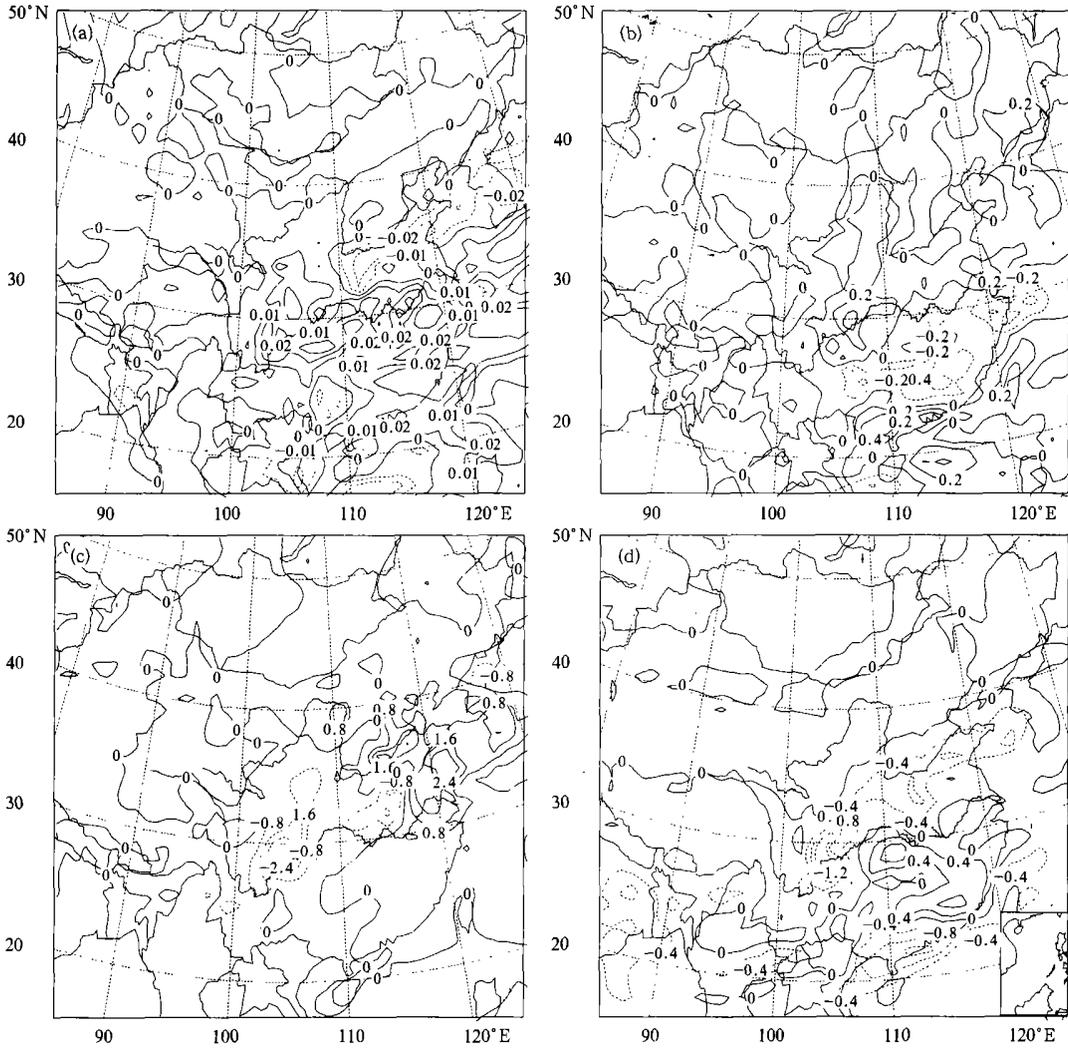


图1 在线与离线硫酸盐含量差

(a. 1月, b. 4月, c. 7月, d. 10月; 单位:  $\text{mg}/\text{m}^2$ )

Fig. 1 Difference of sulfate burden between on-line and off-line

(a. January, b. April, c. July, d. October; Unit:  $\text{mg}/\text{m}^2$ )

的比例在4月最高,也仅为2.97%,应当可以忽略。但对不同地区硫酸盐含量的差别却有不同。如7月份中部地区含量的差别为 $0.647 \text{ mg}/\text{m}^2$ ,占在线含量的13%,如此大的硫酸盐含量差异将对辐射强迫的模拟造成影响。

图2为在线模拟与离线模拟大气顶辐射强迫的差异。1月份差异很小,为 $-0.1 \sim 0.1 \text{ W}/\text{m}^2$ ,华中地区为 $0.03 \sim 0.09 \text{ W}/\text{m}^2$ 的显著正值区,华南地区为 $-0.09 \sim -0.03 \text{ W}/\text{m}^2$ 的负值。这与在华中地区在线含量低,而华南地区在线含量高是一致的。4月份强迫差异为 $-0.2 \sim 0.4 \text{ W}/\text{m}^2$ 范围,四川北部、京津地区为显著负值区,华南、长江中下游为正值区,其中上海附近为正值中心。7月份差异最明显,四川地区

为 $0.2 \sim 0.6 \text{ W}/\text{m}^2$ 的正值区,长江中下游普遍也为正。江苏沿海向北延伸至渤海湾为显著负值区,其最大差异出现在山东半岛以南,达到了 $-1 \text{ W}/\text{m}^2$ 。河北和京津地区为 $-0.2 \sim -0.6 \text{ W}/\text{m}^2$ 的负值区。10月在福建和江西为显著的负值区,其余地区基本为正值。总之,由于在线离线模拟的硫酸盐含量存在差异,导致大气顶的辐射强迫也出现差异,在含量差异为正的区产生的辐射强迫差异为负,含量差异为负的区域产生的辐射强迫差异为正;并且随季节不同,模拟区域内辐射强迫最大差异为 $-1 \sim 0.6 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

分析在线与离线辐射强迫差占在线辐射强迫的比例分布图可以看到:不论何月许多地区的比例都能

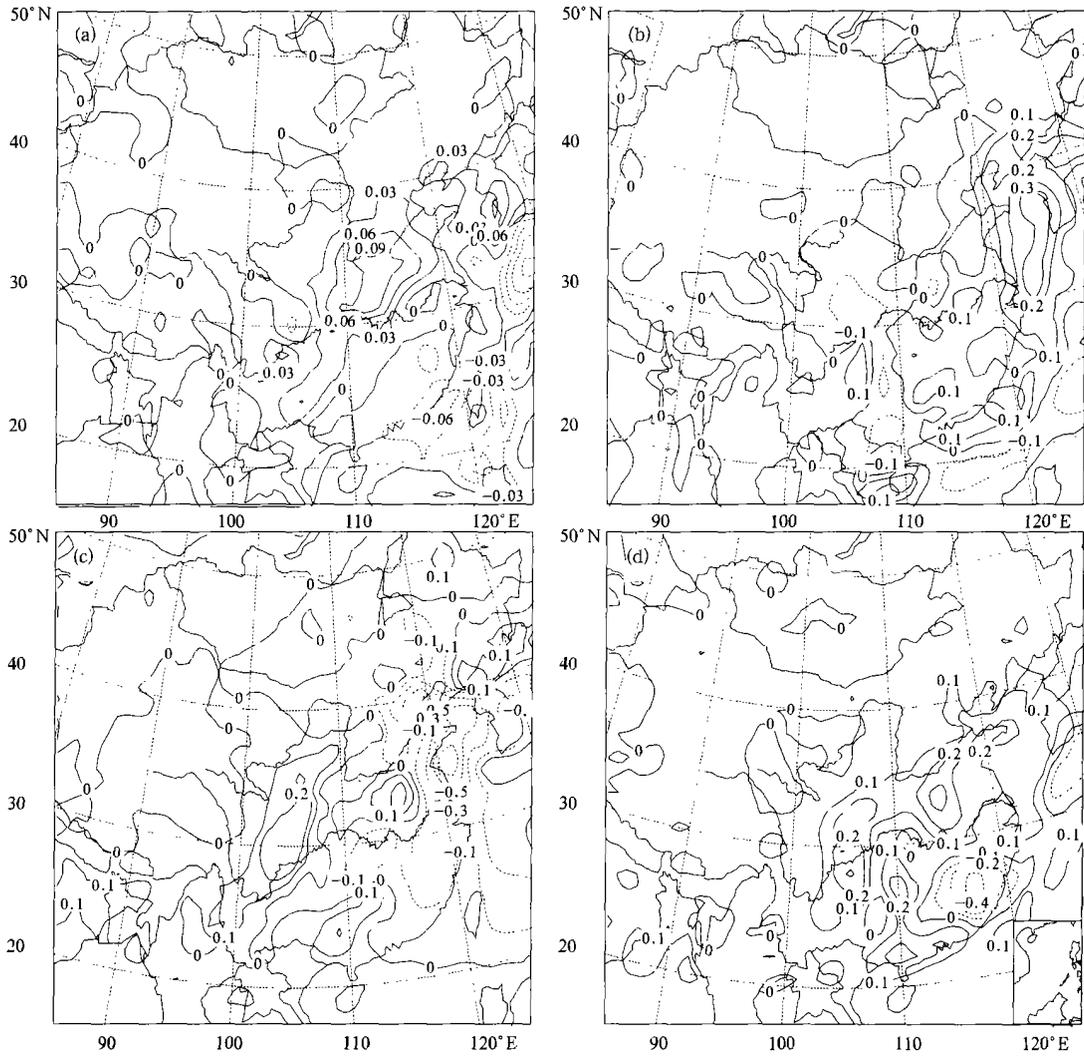


图 2 在线与离线大气顶辐射强迫差(a. 1 月, b. 4 月, c. 7 月, d. 10 月; 单位:  $W/m^2$ )

Fig. 2 Difference of TOA radiative forcing between on-line and off-line

(a. January, b. April, c. July, d. October; Unit:  $W/m^2$ )

超过 50%，甚至一些地区的相对差异能达到 100%~200%，并且多数地区为负值。北方差异比较显著的是华北和东北地区，相对差异在 7 月为正值，其余月份为负值。南方差异最显著地区是四川附近，7、10 月该地区偏差值为 -30%~-50%。就较大范围分布看，中部和南部地区相对差异在 7 月份最大，北部地区在 1 月份最大。表 1 中在线和离线模拟的全区域平均辐射强迫差别很小，最大为 10 月份的  $0.035 W/m^2$ ，占在线辐射强迫的 11.44%。但是，各地区都有多次超过此比例，而且北部和中部的差别大于南部。值得注意的是在线与离线的辐射强迫相对差异要大于硫酸盐柱含量的相对差异，说明气候系统对硫酸盐辐射扰动具有放大的作用。

表 1 所示包含气候反馈的辐射强迫即使对全模拟区域平均，在线与离线方法结果也存在很大的差异，最大已经达到 554%，各大区域平均值也有类似现象，并且没有很显著的规律性。有反馈辐射强迫差异加大的主要原因是由于硫酸盐气溶胶直接辐射强迫影响了地气系统的辐射收支，导致大气加热率发生变化，由此使温度、大气层结稳定度、垂直运动、云分布状况等发生变化。尽管云对硫酸盐直接辐射强迫具有很强的减弱作用<sup>[28]</sup>，但是辐射传输过程对云量变化远比对硫酸盐含量变化敏感，造成在云量增加的地区大气顶辐射强迫减小，而在云量减少的地区大气顶辐射强迫增大。

无论对任何区域平均地表温度变化的幅度也非

常大,由于气溶胶对气候的反馈作用,在线和离线模拟的硫酸盐含量的差异能导致较大的地表温度响应差异,这种差异在全区域也比较显著,不可忽略。如果将所模拟4个月的硫酸盐含量、无反馈辐射强迫、有反馈辐射强迫、地表温度响应的全区域相对差异绝对值做平均,可以看出从硫酸盐含量到无气候反馈的辐射强迫、有气候反馈的辐射强迫、到地表温度响应,在线与离线模拟方法结果之间的相对差异有逐渐加大的趋势。

总的来说,在线与离线模拟方法得到的辐射强迫和地表温度变化在许多地区有很大差异,这种差异在较小区域平均的尺度上更显著,并且在全区域平均尺度上也体现得非常明显,是不能被忽略的,它导致有反馈的硫酸盐直接辐射强迫和地表温度响应的结果较强地依赖于气候模式与硫化物模式的连接方式,具有很大的不确定性。在线与离线结果差异的原因比较复杂。在线方法包含硫酸盐对气象要素变化的影响,已经获得的一些结果表明硫酸盐辐射强迫能使地-气系统辐射传输过程受到扰动,导致大气加热率产生波动,由此可以影响到大气层结稳定度、垂直运动,从而导致气象要素和云分布状况的改变。气象要素很小的变化将对硫化物大气化学过程和大气输送过程产生比较显著的影响,导致硫酸盐分布的变化,而这种气象要素对硫酸盐生消和输送过程的反馈作用只有通过在线反馈的模式才能获得。

## 4 结 论

本文进行了人为硫酸盐直接辐射效应两种模拟方法的比较研究,分析了硫酸盐柱含量、大气顶辐射

强迫和地表温度变化的差异,主要的一些结果可以归纳如下:

(1) 在线与离线模拟的硫酸盐柱含量存在差异,1,4,7,10月中,7月份的差异最大,一些地区可以达到 $1\sim 3\text{ mg/m}^2$ ,并且这种差异对全区域平均是很小的,不超过3%,但在一些地区能达到13%。

(2) 大气顶处无反馈的硫酸盐直接辐射强迫最大差异为 $-1.5\sim 1\text{ W/m}^2$ ,在含量差异为正的区产生的辐射强迫差异为负,含量差异为负的区域产生的辐射强迫差异为正;在线与离线模拟的大气顶辐射强迫差异对全区域平均最大不超过11%,北部和中部地区的差异要大于南部地区,辐射强迫差异在许多地区可以达到30%以上。在较小范围内,硫酸盐辐射强迫的模拟结果强烈地依赖于气候模式与硫化物模式的连接方式,具有较大的不确定性。

(3) 大气顶有反馈的硫酸盐直接辐射强迫最大差异为 $-10\sim 10\text{ W/m}^2$ ,有反馈的辐射强迫差异大于无反馈的辐射强迫差异。在线与离线模拟的硫酸盐含量的差异能导致地表温度的响应产生较大的差异,其中7月份差异最大,达 $0.054\text{ K}$ ,相对差异为108%;10月份差异次之,达 $0.015\text{ K}$ ,相对差异为-100%;1月份差异最小,为 $-0.002\text{ K}$ ,相对差异28.6%。

(4) 模式的在线和离线连接方法得到的硫酸盐含量的相对差异,无反馈辐射强迫的相对差异,有反馈辐射强迫的相对差异,地表温度响应的相对差异有逐渐加大的趋势,模拟结果显示了逐渐加大的不确定性,使结果显著依赖于模式连接方法。

## 参考文献

- 1 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). Climate Change 2001. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 944pp
- 2 Wang C, Ronald G P, Andrei Sokolov. A global interactive chemistry and climate model: Formulation and testing. J Geophys Res, 1998, 103(3): 3399~3417
- 3 Koch D, Jacob D, Tegen I, et al. Tropospheric sulfur simulation and sulfate direct radiative forcing in the Goddard Institute for Space Studies general circulation model. J Geophys Res., 1999, 104: 23799~ 23822
- 4 吕世华, 陈玉春. 区域气候模式对华北夏季降水的气候模拟. 高原气象, 1999, 18(4): 632~ 640
- 5 潘劲松, 翟国庆, 高坤. 区域气候模拟中多种对流参数化方案的比较研究. 大气科学, 2002, 26(2): 206~ 220
- 6 范广洲, 吕世华. 高分辨嵌套区域气候模式对我国中、东部地区夏季气候的数值模拟. 高原气象, 1999, 18(4): 641~ 647
- 7 Bruce P B. Delta Eddington approximation for solar radiation in the NCAR community climate model. J Geophys Res, 1992, 97(7): 7603~ 7612
- 8 吴润, 蒋维楣, 陈新梅等. 生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究. 环境科学, 2004, 25(2): 1~ 6
- 9 吴润, 蒋维楣, 刘红年等. 区域气候模式和大气化学模式对中国地区气候变化和对流层臭氧分布的模拟. 南京大学学报, 2002, 38(4): 572~ 582
- 10 吴润, 蒋维楣, 刘红年等. 硫酸盐直接和间接辐射气候效应的模拟研究. 环境科学学报, 2002, 22(2): 129~ 134
- 11 刘红年, 蒋维楣, 汤剑平等. 中国对流层二氧化硫光化学氧化过程的数值研究. 环境科学学报, 2001, 21(3): 358~ 363
- 12 Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. J Geophys Res., 2003, 08

(D21), 8809, doi10.1029/2002JD003093

- 13 王喜红, 石广玉, 马晓燕. 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应. *大气科学*, 2002, 26(6): 751~ 760
- 14 Graf H-F, Feichter J, Langmann B. Volcanic sulfur emissions: Estimates of source strength and its contribution to the global sulfate distribution. *J Geophys Res*, 1997, 102: 10727~ 10738
- 15 van Dorland R, Dentener F J, Lelieveld J. Radiative forcing due to tropospheric ozone and sulfate aerosols. *J Geophys Res*, 1997, 102: 28079~ 28100
- 16 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, 103: 6043~ 6058
- 17 Kasibhatla P, Chameides W L, St. John J. A three-dimensional global model investigation of the seasonal variation in the atmospheric burden of anthropogenic sulfate aerosols. *J Geophys Res*, 1997, 102: 3737~ 3759
- 18 Boucher O, Anderson T L. GCM assessment of the sensitivity of direct climate forcing by anthropogenic sulfate aerosols to aerosol size and chemistry. *J Geophys Res*, 1995, 100: 26117~ 26134
- 19 Langner J, Rodhe H. A global three dimensional model of the tropospheric sulfate cycle. *J Atmos Chem*, 1991, 13: 225~ 263
- 20 Kiehl J T, Briegleb B P. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 1993, 260: 311~ 314
- 21 Ghan S J, Easter R C, Chapman E, et al. A physically based estimate of radiative forcing by anthropogenic sulfate aerosol. *J Geophys Res*, 2001, 106: 5279~ 5293
- 22 Jacobson M Z. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols. *J Geophys Res*, 2001, 106: 1551~ 1568
- 23 Chuang C C, Penner J E, Taylor K E, et al. An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate. *J Geophys Res*, 1997, 102: 3761~ 3778
- 24 Kiehl J T, Schneider T L, Rasch P J, et al. Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3. *J Geophys Res*, 2000, 105: 1441~ 1457
- 25 王自发, 黄美元, 高会旺等. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究II: 硫化物浓度空间分布特征及季节变化. *大气科学*, 1998, 22(5): 693~ 700
- 26 王喜红, 石广玉. 东亚地区对流层人为硫酸盐气溶胶柱含量变化数值研究. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 58~ 66
- 27 王体健, 闵锦忠, 孙照渤等. 中国地区硫酸盐气溶胶的分布特征. *气候与环境研究*, 2000, 5(2): 165~ 173
- 28 王喜红, 石广玉. 东亚地区云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响. *气象学报*, 2002, 60(6): 758~ 765

# COMPARISON OF ON-LINE AND OFF-LINE SIMULATION METHODS FOR DIRECT RADIATIVE FORCING OF ANTHROPOGENIC SULFATE

Wu Jian

(*Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091;*  
*Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Jiang Weimei Liu Hongnian

(*Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Wang Weiguo Luo Yan

(*Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091*)

## Abstract

An on-line coupled regional climate and atmospheric chemical model system has been modified and used to compare the on-line and off-line methods for direct radiative forcing and climate response simulation of sulfate aerosol over China area under the same model system and the same pollutant release inventory condition. The differences between sulfate column burden and TOA radiative forcing without climate response have been discussed based on four-month simulation, i. e. January, April, July and October in 2000. The results reveals the maximum difference of sulfate burden between on-line and off-line methods emerges in July, and the percentage ratio to on-line burden of the difference is less than 3% at the whole modeling area average scale, but there are about 13% to some regions. It has been concluded that the sulfate burden has less difference at large scale, but is obvious at regional scale. The radiative forcing at TOA without climate response has a variable range between  $-1.5 \text{ W/m}^2$  and  $1 \text{ W/m}^2$  in the two methods, and positive value locates in the negative sulfate burden difference region. At the whole average scale, the difference of radiative forcing is about 11% to that of on-line result, but the difference is more than 30% to that of on-line result in the central and northern region. At the regional scale, the radiative forcing has been effected deeply by the model linking methods, and there is indeterminacy in regional scale radiative forcing. If climate response has been considered in the modeling, there would be  $-10 \sim 10 \text{ W/m}^2$  difference between two TOA radiative forcing. Surface temperature response over China area have also been compared. The following results can be figured out based on the comparison: (1) It has been clarified that there is difference in most region between results of the on-line and off-line methods both in sulfate burden and in radiative forcing at TOA and in surface temperature response. The differences on each regional averaged results are more obvious than that of large scale averaged results, which is clear and cannot be neglected. (2) The percentage deviation of sulfate burden between the two methods is smaller than that of radiative forcing at TOA, which is smaller than that of surface temperature response. The results show indeterminacy in radiative forcing of anthropogenic sulfate and climate responses when different model linking methods have been used. The modeling results depend on the model linking methods deeply at regional scale level even, which should be emphasized in the future research work.

**Key words:** Sulfate aerosol, Direct radiative forcing, Surface temperature response, Comparison of simulation methods.