

全球环境大气输送模式(GEATM) 的建立及其验证

罗 淦^{1, 2} 王自发¹

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 初步建立了以二氧化硫、硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶等作为主要研究对象的全球环境大气输送模式(Global Environmental Atmospheric Transport Model, GEATM), 其水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向分为 20 层, 采用地形追随坐标系, 考虑了上述大气化学成分的地面源排放、平流与扩散、化学转化以及干沉降、湿清除等过程。利用 NCEP/NCAR 再分析资料作为驱动气象场, 对 2004 年进行长期模拟, 分析了二氧化硫、硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶的浓度分布和输送态势。与观测的比较表明, 模式对于大气化学成分分布状况具有较强的模拟能力, 在欧洲的 Jarczew 和 Leba 观测站, 二氧化硫日平均浓度的相关系数分别达到了 0.69 和 0.66; 在中国, 有 47 个站点的二氧化硫日平均浓度相关系数高于 0.50, 其中北京、天津、上海等 28 个站点的浓度相关系数达到了 0.60 以上。同时, 模拟的沙尘气溶胶总体柱浓度分布状况与卫星观测输出的气溶胶光学厚度具有很好的一致性, 体现了气溶胶粒子的输送态势和分布特征。模拟结果显示二氧化硫、硫酸盐、黑碳的浓度高值区主要位于污染排放较大的欧洲、东亚和北美地区, 二氧化硫地面最大年均浓度值为 1500×10^{-12} , 硫酸盐为 500×10^{-12} , 黑碳气溶胶为 1000 ng/m^3 。沙尘浓度与下垫面土壤类型以及地面气象条件关系密切, 全球沙尘浓度主要分布在撒哈拉沙漠、阿拉伯半岛、中亚地区、澳大利亚西部以及拉丁美洲南部地区, 并且呈现了较为显著的季节变化特征, 撒哈拉沙漠输送最强时期是在 6~8 月, 影响范围覆盖了整个赤道大西洋, 最西端伸展到了北美的加勒比海地区; 阿拉伯半岛沙尘输送最强时期是 3~8 月, 影响范围包括阿拉伯海和孟加拉湾地区; 亚洲在 3~5 月有非常强烈的沙尘东传过程, 浓度输送带一直贯穿了整个北太平洋地区。

关键词 全球化学输送模式 大气化学 气溶胶 起沙机制

文章编号 1006-9895(2006)03-0504-15

中图分类号 P402

文献标识码 A

A Global Environmental Atmospheric Transport Model (GEATM): Model Description and Validation

LUO Gan^{1, 2} and WANG Zi-Fa¹

1 Nansen-Zhu International Research Center, State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract A global environmental atmospheric transport model (GEATM) with $1^\circ \times 1^\circ$ horizontal resolution and 20 layers vertical resolution is developed to study atmospheric components such as sulfur dioxide, sulfate, black carbon and dust aerosol on a global scale. This model uses a terrain following altitude coordinate and adequately considers a

收稿日期 2005-03-24, 2005-09-06 收修定稿

资助项目 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目“气候系统模式研发及应用研究”, 中国科学院“百人计划”“沙尘输送及其气候环境影响的数值模拟”, 国家自然科学基金资助项目 40305018

作者简介 罗淦, 男, 1980 年出生, 博士生, 研究方向: 大气化学。E-mail: gymluo@china.com.cn

series of complex processes including emission, advection, diffusion, chemistry, and deposition. By taking NCEP/NCAR reanalysis data as metrological driver, the GEATM simulated the global distributions and the transport patterns of sulfur dioxide, sulfate, black carbon and dust aerosol in 2004. The comparison with observation indicates that GEATM has good ability in modeling spatial and temporal distribution of these atmospheric species. At Jarczew and Leba, local stations in Europe, the correlation coefficients of observed and simulated daily mean concentration of sulfur dioxide are 0.69 and 0.66, respectively. In China, there are 47 stations' correlation coefficients beyond 0.50. And the correlations of 28 stations, such as Beijing, Tianjin, Shanghai and so on, are high up to 0.60. The comparison with satellite also shows that the distribution of dust aerosol column is consistent with the aerosol optical depth of MOD08_M3. Simulated results indicate that the high concentration regions of sulfur dioxide, sulfate and black carbon mainly are located in Europe, East Asia and North America, accompanied with large emission of pollutants. The maximal surface concentration of sulfur dioxide, sulfate and black carbon is 1500×10^{-12} , 500×10^{-12} and 1000 ng/m^3 , respectively. Dust aerosol distribution has remarkable relationship with underlying surface soil type and metrological condition. The major high dust aerosol concentration centers are located over Sahara, Arabia, Middle Asia, Australia and the southern part of Latin America. These high dust centers exhibit distinct seasonal cycle. The maximum transport of the Sahara dust is from June to August, transporting westward along the equator to the Atlantic Ocean, even reaching to Caribbean. The transport of the Arabia dust is mainly from March to August and has dominant impacts on the North India Ocean. In Asia, the strong eastward dust transport usually breaks out in March and ends in May, with high concentration zone transporting over the North Pacific Ocean.

Key words global chemical transport model, atmospheric chemistry, aerosols, dust deflation scheme

1 引言

大气化学过程在全球变化的研究中正扮演着越来越重要的角色。大气化学物质可以通过直接效应与间接效应影响气候与环境^[1]。直接效应主要表现为大气化学成分的吸收特性所导致的辐射强迫和自身化学特性所带来的环境效应,如二氧化碳、甲烷、臭氧等温室气体的浓度的改变会直接影响到地球系统的辐射收支平衡,温室气体通过吸收地表发射的热辐射,在一定程度上阻止了地球系统的热量散失,这一过程使得地表温度比大气中仅含有氧气与氮气时的温度高出 21 K。SO_x、NO_x等致酸物质会对大气中气粒转化过程产生影响,其直接辐射强迫为 $-0.3 \sim -1.0 \text{ W/m}^2$,同时,它们也会改变降水的 PH 值,导致酸雨等环境问题。大气化学物质的间接效应更为复杂,气溶胶粒子可作为云凝结核来决定云量、云型、云寿命和云反照率,通过云的散射吸收特性作用于地球系统的辐射收支。

为量化大气化学物质对气候环境系统产生的影响,合理反映全球大气化学物质的浓度及分布状况就成为当前气候环境研究的核心问题。为解决这一问题,我们可以采取多种研究手段:(1)外场观测研究,通过组织大型的观测计划,运用地基观测与航测相结合的方法,可以较为准确地了解局地大气

中主要化学物质的浓度及化学变化规律,ACE-Asia^[2]、TRACE-P^[3]等研究计划的工作在这方面取得了一系列引人注目的成果;(2)卫星遥感研究,通过卫星遥感技术,根据不同化学物质的吸收特性反演大气主要化学物质的浓度及分布状况,TOMS、SeaWiFS 和 MODIS 卫星的输出资料,正被广泛地应用到全球大气化学物质的研究中,2004 年美国制定了地球观测系统计划,EOS-CHEM 卫星将主要应用于大气化学物质的观测;(3)数值模拟研究,通过数值求解大气基本的物理和化学方程组,模拟大气中各化学物质的浓度分布和时空变化。外场观测、卫星遥感都可以获得关于大气化学物质的较为可靠的数据,但是,观测资料往往只能给出一个特定时段和特定地点的大气环境状况,因此缺乏时空上的连续性,而卫星遥感资料虽能较好地反映整层大气的平均状况,但在垂直廓线的反演上存在困难,且数据质量容易受到大气条件的影响,具有很大的局限性。数值模拟是近年迅速发展起来的一种新的研究方法,它对于了解大气化学过程的发生机制及其气候环境效应具有重要作用,它不但可以量化众多物理化学过程的综合作用,还可以给出大气化学物质细致的时空分布及不同物理化学过程贡献的相对大小。因此,采用数值模拟来研究大气化学物质浓度的分布、演变及讨论各种物理

化学过程的贡献就显得十分重要。

自 20 世纪 90 年代以来,世界上许多研究机构都积极致力于全球大气化学模式的研究:Brasseur 等^[4]开发了水平 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ 、垂直 25 层的 MOZART 模式;Wang 等^[5]建立了水平 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、垂直 20 层的 GEOS-CHEM 模式;Sudo 等^[6]发展了水平 $5.6^{\circ} \times 5.6^{\circ}$ 、垂直 32 层的 CHASER 模式;Rotman 等^[7]研发了水平 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ 、垂直 52 层的 IMPACT 模式。这些模式大多以臭氧及其相关痕量气体作为研究的主要对象来考虑它们的气候环境效应,而对于具有极强的辐射强迫效应的气溶胶粒子则考虑较少,未包括气溶胶化学过程。当前,关于气溶胶及其相关成分的全球模式研究主要集中在单一气溶胶及其相关物种的研究上,Roelofs 等^[8]利用一个与气候模式耦合的光化学硫循环模式模拟全球硫分布以及硫酸盐浓度与云降滴数浓度的关系,Chin 等^[9]设计了 GOCART 模式并对全球大气硫循环进行了模拟研究;Tegen 和 Fung^[10]将 $0.1 \sim 50 \mu\text{m}$ 的沙尘分为四个模态并总结了它们的起沙和分布规律,Zender 等^[11]设计了 DEAD 模式并对 20 世纪 90 年代全球沙尘分布规律进行了研究。目前,国内在全球化学输送模式的研究尚处于起步阶段,刘煜等利用 OSLO-CTM2 对青藏高原夏季臭氧低谷形成机制^[12]、印度人为源排放增加对臭氧和氢氧自由基的作用^[13],以及中国地区氮氧化物变化及影响^[14]等科学问题进行了研究;马晓燕等^[15]将德国马普气象研究所化学输送模式模拟的全球三维硫酸盐浓度分布引入 GOALS 4.0 中,模拟了全球硫酸盐气溶胶辐射强迫;王宏等^[16]利用加拿大 Gong 的 CAM 模式模拟的沙尘气溶胶日平均浓度,对 2001 年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫进行了研究。

综上所述,在现阶段发展中国科学院大气物理研究所全球环境大气输送模式极具现实意义:(1)全球大气化学模式是地球模式系统的重要组成部分,要正确认识气候环境系统的变化规律,就必须对全球化学物质的演化规律有更深刻的理解,从而促进我国在该领域的研究;(2)青藏高原大地形作用使得西风绕流之后在我国形成了北半球最强的风带之一,具有非常强的远程输送能力,因此,这一地区的污染问题不再仅仅局限为区域污染问题,而是需要借助全球模式来研究其在全球大气化学过程

中的作用;(3)区域污染模式能够细致地刻画中尺度污染特征,但受其边界条件的局限,难以解决大尺度的洲际输送问题,通过建立全球环境大气输送模式,可以合理分析上游地区污染输送对中国地区的影响以及中国地区污染出流的作用范围及其规律特征,并与世界其他地区的情况进行比较研究。

本文在借鉴当前国际全球大气化学数值模拟最新成果的基础上,结合亚洲地区自身特点,初步开发研制了以二氧化硫、硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶等物质作为主要研究对象的全球环境大气输送模式(Global Environmental Atmospheric Transport Model, GEATM)。文中第 2 节为模式介绍,详细讨论 GEATM 模式采用的动力框架、输送过程、化学处理以及沉降算法。第 3 节为源排放处理,介绍 GEATM 的地面排放数据来源和设定,并对沙尘气溶胶起沙机制进行讨论,在 Wang 等^[17]的工作基础上发展了一套适用于全球的大尺度起沙算法。第 4 节为模式验证,将模拟结果与全球温室气体数据中心(World Data Centre for Greenhouse Gases, WDCGG)观测站以及中国环境监测站的资料进行了日平均浓度相关性检验,同时将模拟的沙尘气溶胶总体柱浓度分布状况与 MODIS 卫星输出的气溶胶、云、水汽及臭氧全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点月平均资料数据产品(MODIS/Terra Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Monthly L3 Global 1Deg CMG, MOD08_M3)中的气溶胶光学厚度进行了比对分析。第 5 节为模式比较,与国外同类模式(Model for Integrated Research on Atmospheric Global Exchanges, MIRAGE)的输出结果进行了比较,发现两个模式模拟的浓度分布状况基本一致,但在细节刻画上 GEATM 展现出更强的能力。

2 模式介绍

全球环境大气输送模式 GEATM 采用开放式气象驱动场,可利用美国国家环境预报中心的 NCEP/NCAR 再分析数据、欧洲数值预报中心的 ECMWF 数据或全球大气模式 GCMs 输出的气象场作为物理驱动,对大气中多种化学物质的分布状况、输送态势进行数值模拟。

2.1 动力框架

GEATM 采用的动力框架为地形追随球坐标下的三维大气化学物质输送方程:

$$\frac{\partial(\Delta H c)}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} (u \Delta H c) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} (v \Delta H c) +$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} (W c) = \frac{K_{\varphi}}{R^2 \cos^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\Delta H \frac{\partial c}{\partial \varphi} \right) +$$

$$\frac{K_{\theta}}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Delta H \frac{\partial c}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_{\sigma}}{\Delta H} \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) +$$

$$S \Delta H + P \Delta H - R_d \Delta H - W_{\text{ash}} \Delta H, \quad (1)$$

式中, c 为化学物质的浓度, t 为时间, R 为地球半径, K_{φ} 、 K_{θ} 、 K_{σ} 为经向、纬向、垂直方向上的湍流扩散系数, u 、 v 为水平风速, P 为化学转化项, S 为源排放速率, R_d 为干沉降项, W_{ash} 为湿清除项。

为考虑地形变化对于输送过程带来的影响, 合理导入研究对象的源排放, 模式在垂直方向上采用地形追随等 σ 面坐标:

$$\sigma(\varphi, \theta) = \frac{z - h(\varphi, \theta)}{H(\varphi, \theta) - h(\varphi, \theta)} = \frac{z - h}{\Delta H}, \quad (2)$$

式中, $H(\varphi, \theta)$ 为对流层的高度, $h(\varphi, \theta)$ 为地形高度。在这一垂直坐标下, 通过空气质量守恒方程可求得等效垂直速度:

$$W = \omega - \frac{u}{R \cos \theta} \left(\frac{\partial h}{\partial \varphi} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial \varphi} \right) - \frac{v}{R} \left(\frac{\partial h}{\partial \theta} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial \theta} \right). \quad (3)$$

垂直方向分为 20 层, 模式高度取为对流层顶层高度, σ 值分别取为 0.005, 0.019, 0.042, 0.069, 0.097, 0.125, 0.153, 0.181, 0.208, 0.250, 0.306, 0.361, 0.417, 0.472, 0.528, 0.583, 0.639, 0.722, 0.833, 0.944。

2.2 输送过程

输送过程包括平流与湍流扩散两部分, 对于大气化学物质的时空分布起着关键性的作用。GEATM 处理大气平流与扩散过程采用的是交错 C 网格方法。运用质量平衡算法, 保证了差分格式的质量守恒。整体时间步长选为 10 min, 在极地根据最大风速确定时间变步长, 使得方程满足 CFL 条件, 即 $u \Delta t / \Delta x$ 远小于 1, 通过该处理, 大大提高了模式计算效率与稳定性。输送方程采用如下差分形式:

$$\frac{\Delta H(c^{i+1} - c^i)}{\Delta t} = - \frac{1}{R \cos \theta} \frac{F_{i+1/2} - F_{i-1/2}}{\Delta \varphi} -$$

$$\frac{F_{j+1/2} - F_{j-1/2}}{R \Delta \theta} - \frac{F_k - F_{k-1}}{\Delta \sigma} + \frac{K_{\varphi}}{R^2 \cos^2 \theta_i} \cdot$$

$$\frac{\Delta H_i(c_{i+1} - c_i) - \Delta H_{i-1}(c_i - c_{i-1})}{\Delta \varphi^2} +$$

$$\frac{K_{\theta}}{R^2} \frac{\Delta H_j(c_{j+1} - c_j) - \Delta H_{j-1}(c_j - c_{j-1})}{\Delta \theta^2} \cdot$$

$$\frac{1}{\Delta \sigma_k} \left[\frac{K_{\sigma}}{\Delta H} \frac{(c_{k+1} - c_k)}{\Delta \sigma_k} + \frac{K_{\sigma}}{\Delta H} \frac{(c_k - c_{k-1})}{\Delta \sigma_k} \right] +$$

$$S \Delta H + P \Delta H - R_d \Delta H - W_{\text{ash}} \Delta H, \quad (4)$$

式中, F 为平流输送通量。根据网格上风速的分布, F 可通过下式求得:

$$F_i = \begin{cases} \Delta H_i \cdot U_i \cdot c_i, & U_i \geq 0, \\ \Delta H_i \cdot U_i \cdot c_{i+1}, & U_i < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$F_j = \begin{cases} \Delta H_j \cdot V_j \cdot \cos \theta \cdot c_j, & V_j \geq 0, \\ \Delta H_j \cdot V_j \cdot \cos \theta \cdot c_{j+1}, & V_j < 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$F_k = \begin{cases} W_k \cdot c_k, & W_k \geq 0, \\ W_k \cdot c_{k+1}, & W_k < 0. \end{cases} \quad (7)$$

在全球模式中, 同平流输送过程相比, 湍流输送作用较小, 故对湍流输送项采用简化的 K 理论处理, 在水平方向上扩散系数取为 $45 \text{ m}^2/\text{s}$, 垂直方向上分为两层, 1 km 以下的垂直扩散系数取为 $10 \text{ m}^2/\text{s}$, 1 km 以上的垂直扩散系数取为 $12 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.3 化学过程

GEATM 将能够引起较强辐射强迫效应的硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶(包括飘尘、浮尘和降尘三个模态)与二氧化硫气体作为主要研究对象。由于该模式是全球化学输送模式, 为了提高计算效率, 对主要化学过程采取参数化计算处理。SO₂ 通过氧化作用向硫酸盐的转化是诸多化学转化过程中最为核心的部分, 这一过程会造成大气中 SO₂ 的化学损耗, 增加 SO₄²⁻ 的浓度, 从而对硫酸盐的浓度分布产生影响。

SO₂ 氧化过程包括气相转化与液相转化。GEATM 根据网格的云覆盖率以及大气温度, 分别计算这两个过程所造成的总化学转化率。

$$K_{\text{chem}} = \alpha K_{\text{cliq}} + (1 + \alpha) K_{\text{cgas}}, \quad (8)$$

式中, K_{chem} 是 SO₂ 总化学转化率, 单位是 s⁻¹; K_{cgas} 是气相转化率; K_{cliq} 是液相转化率; α 是网格的云覆盖率。 K_{cliq} 采用温度参数方案, K_{cgas} 采用 Tarra-son^[18] 的参数化方案:

$$K_{\text{cliq}} = 0.1 e^{\frac{T-273}{\Delta T}}, \quad (9)$$

式中, T 为气温; ΔT 为氧化反应温度区间, 模式中取为 35 K。

$$K_{\text{cgas}} = K \left[1 - 0.4 \cos \left(\frac{2\pi H}{24} \right) \right], \quad (10)$$

$$K = K_{\text{EQ}} + \frac{|\lambda|}{90} (K_{\text{POLE}} - K_{\text{EQ}}), \quad (11)$$

$$K_{\text{EQ}} = 4.0 \times 10^{-6}, \quad (12)$$

$$K_{\text{POLE}} = 1.3 \times 10^{-6} + 1.1 \times 10^{-6} \sin \gamma, \quad (13)$$

$$\gamma = \begin{cases} \frac{2\pi(J-91)}{365} & \lambda \geq 0, \\ \frac{2\pi(J+91)}{365} & \lambda < 0, \end{cases} \quad (14)$$

式中, H 为当地时间, J 为儒略日, λ 为纬度。

2.4 沉降过程

沉降过程会对大气化学物质的时空分布产生显著影响, 它也是大气化学物质主要的清除机制, 同时湿沉降量还直接决定了地面的酸碱度。

2.4.1 干沉降

基于 Wesely^[19] 的沉降机制, 通过干沉降速度计算出各化学物质的干沉降量。干沉降速度可通过下述公式求得:

$$V_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_c} + V_g, \quad (5)$$

式中, V_d 为干沉降速度, r_a 为空气动力学阻抗系数, r_b 为粘附层阻抗系数, r_c 为表面阻抗系数, V_g 为重力沉降速度。

2.4.2 湿沉降

湿沉降是一个复杂的物理化学过程, 在 GEATM 中主要考虑由于雨冲刷导致的湿沉降。模式可利用 NCEP 再分析资料及 CMAP 降水资料中的降水强度来进行湿沉降计算。GEATM 将雨冲刷过程定义为

$$W_{\text{ash}} = W_a c, \quad (16)$$

式中, W_a 是湿沉降系数, 该系数与降水强度、雨滴粒径谱分布以及化学物质的浓度、化学特性、粒径分布等因子有关, 模式中简单地将二氧化硫、硫酸盐、黑碳以及三档沙尘气溶胶的湿沉降系数分别取为 $2.0 \times 10^{-5} P_r$, $5.5 \times 10^{-5} P_r^{0.88}$, $1.0 \times 10^{-5} P_r$, $1.0 \times 10^{-5} P_r$, $6.0 \times 10^{-5} P_r^{0.83}$, $6.0 \times 10^{-5} P_r^{0.83}$, P_r 为小时降水量(单位: mm/h)。

3 源排放处理

模式使用的源排放由两类数据构成, 一类是准静态源排放数据, 主要包括硫氧化物、黑碳等化学物质, 这类污染排放量随时间变化较小, 故可将它们视作准静态的, 它们的排放量主要根据全球大气研究源排放数据库(Emission Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)^[20]、全球散发物质名录行动(Global Emissions Inventory Activity,

GEIA)^[21]、全球与区域环境研究中心(Center for Global and Regional Environmental Research, CGRER)^[22]等组织提供的排放清单制定。另一类是动态源排放数据, 主要是沙尘气溶胶, 由于气象要素的变化会导致起沙量的显著改变, 因此需要对这类源排放进行实时计算。

3.1 硫氧化物

GEATM 使用的 SO_x 源排放数据为 1995 年 Oliver 等^[20] 为 EDGAR 制定的 SO_x $1^\circ \times 1^\circ$ 全球年度总排放量数据, 它包括化石燃料、生物燃料、农业废料燃烧、森林砍伐以及工业过程产生的 SO_x 。对于亚洲地区, 为了提高源排放的信度, 合理反映亚洲地区的排放特征, 在东亚地区, 模式采用 2000 年 Streets 等^[22] 为 CGRER 制定的排放数据。通常情况下, GEATM 将 SO_x 排放率取为年度平均排放率(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。Benkovitz 等^[21] 的研究工作表明, 硫酸盐的直接排放率约占 SO_x 总排放量的 1.4%~5%, 因此, 模式假定欧洲地区的硫酸盐直接排放率占总排放率的 5%, 而其他地区的硫酸盐直接排放率约占总排放量的 3%。Sandnes 与 Styve^[23] 指出, 冬季取暖会导致 SO_x 排放量的季节性变化, 因此, GEATM 对于欧洲以及中国北方地区设置了 SO_x 源排放的季节变化, 使得冬季排放率较年均排放率高出 25%, 而夏季排放率则比年均排放率低了 25%。Chin 等^[9] 和 Rotstajn 等^[24] 的工作中运用了上述处理方法, 取得了很好的效果。

3.2 沙尘气溶胶

当前, 起沙机制主要是以地面风速或摩擦速度作为起沙判据, 认为当地面风速大于临界风速或摩擦速度大于临界摩擦速度时地表会起沙, 而起沙量则由地表植被覆盖、土壤状况等因子共同决定。

Gillette^[25] 于 1978 年分析了起沙通量与地面风速的关系:

$$F = A(u - u_0)u^2, \quad (17)$$

其中, A 为起沙系数。White^[26] 于 1979 年提出了基于摩擦速度的起沙通量计算公式:

$$F = A \times 2.61 \times \frac{\rho_a}{g} u^{*3} \left(1 + \frac{u_0^*}{u^*}\right) \left(1 - \frac{u_0^{*2}}{u^{*2}}\right). \quad (18)$$

Tegen 和 Fung^[10] 在 Gillette^[25] 的工作基础上对全球起沙进行了详细的讨论, 定义粘土($r < 1 \mu\text{m}$)、细粉尘($1 \mu\text{m} < r < 10 \mu\text{m}$)、粗粉尘($10 \mu\text{m} < r <$

25 μm)、细沙($r > 25 \mu\text{m}$)等四档沙尘气溶胶, 认为起沙量由地表植被、土壤类型以及土壤含水量共同决定, 起沙临界风速为 6.5 m/s。Lunt 和 Valdes^[27]发展了 White^[26]的起沙机制, 加入了地表植被、冰雪覆盖、土壤含水量和土壤粒径分布对于起沙作用的考虑, 将临界起沙摩擦速度定义为 0.4 m/s。Shao 等^[28]和 Zender 等^[11]认为, 按照经验方法分配不同粒径沙尘的起沙量难以反映起沙的实际情况, 因此, 需要运用微观物理运动规律来处理侵蚀环境的起沙过程, 通过考虑沙粒跃动、撞击、聚合、破碎等过程, 建立基于微物理过程的起沙机制。

Wang^[17]在 2000 年提出了新的起沙机制, 综合考虑了天气系统、摩擦速度以及下垫面湿度状况对起沙的作用。GEATM 以此为基础选取摩擦速度作为起沙主要判据, 同时综合考虑了地表植被覆盖状况、土壤类型、冰雪覆盖、近地面湿度以及天气系统对于起沙过程的影响。在全球模式中, 与微物理起沙机制有关的许多参数具有很大的不确定性, 直接计算会导致较大的误差, 因此对于不同粒径沙粒的起沙通量, 模式仍按照经验系数分配。在 GEATM 中, 沙尘气溶胶分为飘尘($r < 2.5 \mu\text{m}$)、浮尘($2.5 \mu\text{m} < r < 10 \mu\text{m}$)和降尘($r > 10 \mu\text{m}$)三个模态, 根据 Zender 等^[11]提供的经验系数, 起沙通量分别占总体起沙通量的 16%、70%和 14%。

GEATM 中, 起沙通量可由下式求得:

$$F_{i,j} = A_1 A_2 E u_{i,j}^{*2} \left(1 - \frac{u_{0,i,j}^*}{u_{i,j}^*}\right) \left(1 - \frac{R_H}{R_{H0}}\right), \quad (19)$$

式中, F 是起沙通量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); A_1 为起沙标准系数, 本文取为 1.28×10^4 ; A_2 为实验得到的常数, 取为 2.9×10^{-11} ; E 是起沙权重系数; $u_{i,j}^*$ 是摩擦速度; $u_{0,i,j}^*$ 是临界摩擦速度; R_H 是相对湿度; R_{H0} 是临界相对湿度。

起沙权重系数 E 由地表植被覆盖、土壤类型及冰雪覆盖等因子共同决定,

$$E = A_{\text{vege}} \cdot A_{\text{soil}} \cdot A_{\text{snow}}, \quad (20)$$

其中, A_{vege} 是植被系数, 可根据 Matthews^[29]提供的 NASA 全球 32 种土地利用类型和 LDAS 提供的 UMD 月平均植被参数中的绿叶指数 G_{reen} 计算:

$$A_{\text{vege}} = 1 - G_{\text{reen}}. \quad (21)$$

A_{soil} 是土壤参数, Zobler^[30]为 NASA 提供了全球 27 种土壤类型。模式认为除了石质土不能起沙外, 其他各类型的土壤都具备一定的起沙能力, 其中漠境

土和干旱土是最主要的起沙土壤类型。 A_{snow} 是地表冰雪覆盖系数, 可由下式求得:

$$A_{\text{snow}} = 1 - \frac{S_{\text{now}}}{5}, \quad (22)$$

S_{now} 是冰雪覆盖量(单位: kg/m^2), 取自 NCEP 再分析资料。Wiscombe 和 Warren^[31]的研究表明新雪的密度约为 $100 \text{ kg}/\text{m}^3$, Bonan^[32]认为当地面完全被冰雪覆盖时, 冰雪厚度为 0.05 m, 因此, 模式采用当冰雪覆盖量大于 $5 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时不起沙。

4 模式验证

为检验模式运行的稳定性及其模拟能力, GEATM 利用 NCEP 再分析资料作为气象场驱动, 对 2003 年 12 月至 2004 年 11 月全球二氧化硫、硫酸盐、黑碳以及沙尘气溶胶的时空变化进行了模拟研究, 检验内容包括单站浓度变化趋势和区域浓度分布状况。2003 年 9~11 月用于调整模式初始场浓度。模式采用的 NCEP 再分析资料水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向 21 层, 最低层气压为 1000 hPa, 最高层气压为 100 hPa, 模式根据各层所对应的位势高度进行线性差值, 以获得各等 σ 面上的气象要素值。

4.1 单站浓度变化趋势

4.1.1 与 WDCGG 测站的比较

全球温室气体数据中心 WDCGG 始建于 1990 年, 它从全球大气观测网(Global Atmosphere Watch, GAW)、世界各大研究机构以及合作计划中收集了大量温室气体及其相关气体的浓度资料。WDCGG 关于 SO_2 的观测数据现阶段主要集中在欧洲地区, 本文选取了欧洲内陆地区的 Jarczew 观测站(51.82°N , 22°E)和沿海地区的 Leba 观测站(54.75°N , 17.5°E)的观测数据与模式结果进行比较。

由于模式输出结果代表的是网格所在区域的平均浓度状况, 而测站的观测数据代表的则是观测点单点的浓度状况, 观测值会受到观测点的地理位置及其周边环境因素的影响, 因此两者必然存在数值上的差异。但是另一方面, 测站观测数据的浓度变化是局地浓度变化与区域浓度变化共同作用的结果, 测站观测数据的浓度变化能够在一定程度上反映区域浓度的变化特征, 因此, 测站观测数据的浓度距平与模式输出结果的浓度距平具有较强的可比性。

将测站观测的 SO_2 日平均浓度值与年平均浓度作距平, 建立 SO_2 观测浓度距平曲线, 同时对模式中相应格点的浓度输出结果作相同处理, 构建 SO_2 模拟浓度距平曲线。通过比较 GEATM 模拟的 SO_2 浓度距平曲线与测站观测的 SO_2 浓度距平曲线, 发现模式能很好地反映 Jarczew 观测站和 Leba 观测站的 SO_2 浓度变化趋势。

在 Jarczew 观测站, 2003 年 12 月至 2004 年 10 月有效的 SO_2 日平均浓度观测数据为 332 个, 观测浓度距平曲线与模拟浓度距平曲线的相关系数达到了 0.694。图 1a 显示 Jarczew 观测站浓度观测距平曲线的主要特征表现为: 2003 年 12 月至 2004 年 3 月该地区主要是正距平, 浓度波动较为剧烈, 最大正距平值为 $14.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 出现在 1 月 29 日, 最大负距平值为 $-3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 出现在 12 月 31 日; 2004 年 4~8 月, 该地区主要是浓度负距平, 但在 6 月 20~25 日, 出现了一次较大的浓度增加过程, 最高距平值达到了 $7.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2004 年 8 月下旬至 10 月, 正负距平基本持平, 变化幅度较大。GEATM 模拟的浓度距平曲线与观测的浓度距平曲线符合较好, 显示出模式对于 SO_2 的浓度增减趋势具有较强的模拟能力, 基本上抓住了这一地区主要的浓度演变过程。特别是 2003 年 12 月至 2004

年 3 月的浓度距平变化和 6 月下旬的浓度增加过程得到了很好的体现。在 Leba 观测站, 同一时期有效的 SO_2 日平均浓度观测数据为 336 个, SO_2 观测浓度距平曲线与模拟浓度距平曲线的相关系数达到了 0.663。图 1b 显示 Leba 地区的最大正距平出现在 2004 年 1 月上旬和下旬, 最大距平值分别达到了 $20.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $22.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2003 年 12 月, 该地区有 4 次浓度增加过程, 这几次峰值在模式结果中均有较好反映。2004 年 2 月底至 5 月初, 该地区浓度距平逐渐减低, 5 月 7 日后距平值基本持平约为 $-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 7 月下旬浓度开始回升。模拟的浓度距平曲线变化与观测结果有很好的匹配, 距平峰值与谷值分布基本合理, 体现了该地区主要的浓度变化特征。

4.1.2 与中国站点观测数据的比较

为检验模式在中国地区的模拟能力, 将 GEATM 模拟的 2004 年 SO_2 日平均浓度与中国 117 个地市级环境监测站的观测数据进行浓度相关性分析。 SO_2 日平均观测浓度 (2004 年 1 月至 11 月) 由中国环境监测总站提供。表 1 显示, 模拟结果与站点观测值具有很好的相关性, SO_2 日平均浓度相关系数高于 0.50 的监测站有 47 个, 其中在北京、天津、上海等 28 个监测站, 两者的相关系数达

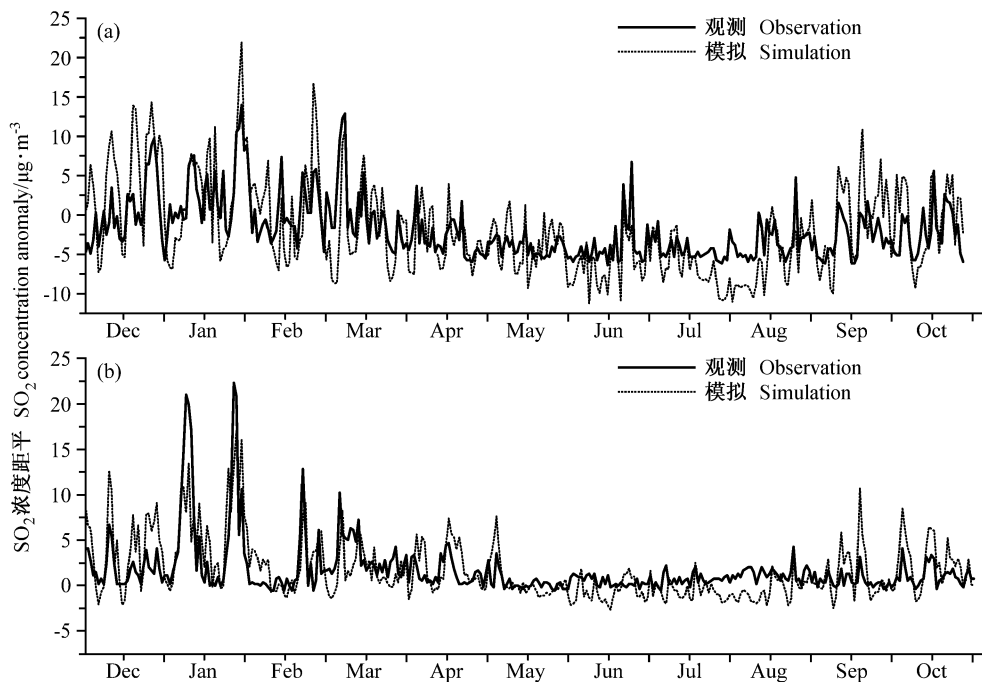


图 1 WDCGG 测站与 GEATM 模式的 SO_2 浓度距平曲线: (a) Jarczew 观测站; (b) Leba 观测站

Fig. 1 The SO_2 concentration anomaly curves of WDCGG sites and GEATM: (a) Results at Jarczew; (b) results at Leba

表 1 中国站点观测的 SO₂ 日平均浓度与 GEATM 模式输出结果相关系数

Table 1 The correlation coefficients (CC) of SO₂ daily mean concentration observed by Chinese stations and simulated by GEATM

测站 Station	相关系数 CC	测站 Station	相关系数 CC	测站 Station	相关系数 CC	测站 Station	相关系数 CC	测站 Station	相关系数 CC
北京 Beijing	0.720	青岛 Qingdao	0.631	济宁 Jining	0.695	宝鸡 Baoji	0.606	郑州 Zhengzhou	0.698
天津 Tianjin	0.724	保定 Baoding	0.576	淄博 Zibo	0.633	武汉 Wuhan	0.528	牡丹江 Mudanjiang	0.532
唐山 Tangshan	0.576	鞍山 Anshan	0.650	无锡 Wuxi	0.500	珠海 Zhuhai	0.587	长春 Changchun	0.547
长治 Changzhi	0.738	抚顺 Fushun	0.571	本溪 Benxi	0.631	焦作 Jiaozuo	0.538	三门峡 Sanmenxia	0.522
南通 Nantong	0.620	赤峰 Chifeng	0.506	泰安 Taian	0.701	徐州 Xuzhou	0.677	中山 Zhongshan	0.554
扬州 Yangzhou	0.489	安阳 Anyang	0.684	济南 Jinan	0.645	潍坊 Weifang	0.666	枣庄 Zaozhuang	0.692
长沙 Changsha	0.503	开封 Kaifeng	0.482	烟台 Yantai	0.700	大同 Datong	0.500	平顶山 Pingdingshan	0.690
阳泉 Yangquan	0.640	柳州 Liuzhou	0.501	大连 Dalian	0.697	太原 Taiyuan	0.482	秦皇岛 Qinhuangdao	0.610
上海 Shanghai	0.659	海口 Haikou	0.607	遵义 Zunyi	0.515	渭南 Weinan	0.617	连云港 Lianyungang	0.692
哈尔滨 Harbin	0.558	日照 Rizhao	0.643	临汾 Linfen	0.523	宁波 Ningbo	0.504	乌鲁木齐 Ürümqi	0.711

到了 0.60 以上。模拟结果与观测值的最高相关系数为 0.738，出现在长治监测站。同时，分析结果显示模式结果与北方站点观测值的相关系数要大于与南方站点观测值的相关系数，与沿海地区测站结果的相关系数要高于与内陆地区测站结果的相关系数。这主要是地面源排放变化的不确定性、测站地形、下垫面及其周边环境因子等综合作用的结果。一方面，模拟结果与观测结果相关系数反映的是两者变化趋势的一致程度，是测站局地污染排放量变化与局地环流场变化共同作用的结果；另一方面，由于本文比较的测站均为地市级环境观测站，其污染浓度背景值很高，因此污染源排放不确定性和改变导致的误差作用相对受到削弱，其浓度变化更多受局地流场变化和降水的影响。由于模式输出结果代表的是网格地区的平均浓度状况，而测站的观测数据代表的则是观测点单点的浓度状况，观测值会受到观测点的地理位置及其周边环境因素的影响。因此，如果观测站点所在地区地势起伏较大、下垫面类型较为复杂，则该站点的区域代表能力就会十分有限。通过进一步检查模式结果，发现模拟值和

观测值相关系数的大小不仅与测站地理位置有关，还与测站对应在网格中的位置有很大关联：当测站接近网格中心时，其相关系数是较大的，当测站位于网格边缘时，其相关系数是较小的。上述研究表明，模拟结果与观测结果相关系数的大小，可能更多取决于测站对于其所在网格的代表能力。

4.2 区域浓度分布状况

通过对比模式模拟的沙尘气溶胶总体柱浓度(包括飘尘、浮尘和降尘三个模态)结果与 MOD08_M3 输出的气溶胶光学厚度资料，可以验证 GEATM 模式对于大气化学物质区域分布状况的模拟能力。MOD08_M3 是 MODIS 格点大气月平均资料数据产品，它包括 MODIS 卫星遥感系统提供的与大气气溶胶、臭氧总量、水汽含量、云的光学和物理特性等相关的大气参数的资料信息。结果显示 GEATM 在模拟区域分布方面具有很好的能力。

2003 年 12 月至 2004 年 2 月，GEATM 模拟的沙尘气溶胶柱浓度高值区主要集中在南部撒哈拉地区、中国北部及其沿海地区、南部非洲、澳大利亚以及拉丁美洲南部地区(图 2a)，与此相应的是在

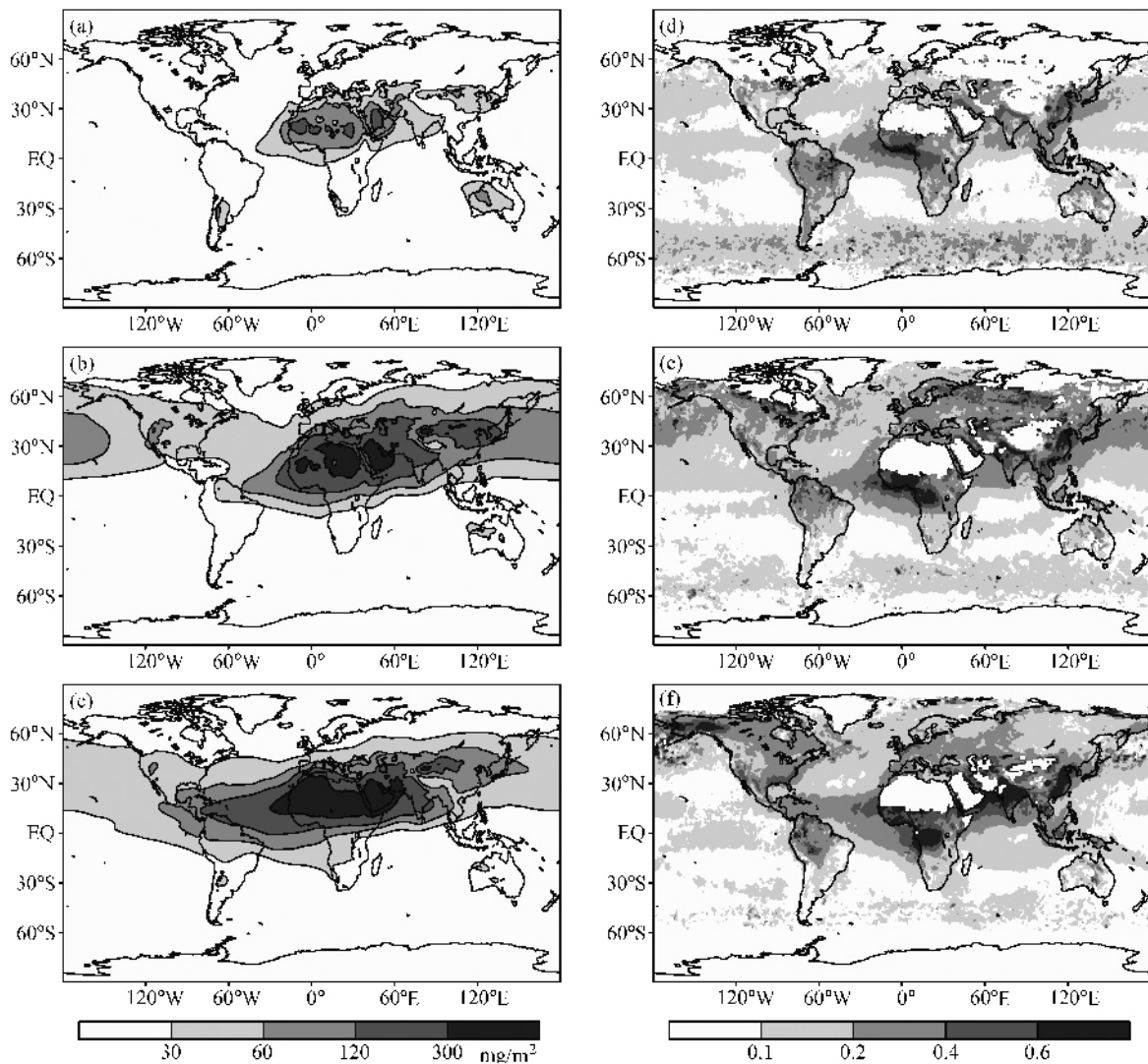


图2 GEATM 模拟的矿物气溶胶柱浓度(a、b、c)与 MOD08_M3 气溶胶光学厚度(d、e、f): (a)冬季平均柱浓度; (b)春季平均柱浓度; (c)秋季平均柱浓度; (d)冬季平均光学厚度; (e)春季平均光学厚度; (f)秋季平均光学厚度

Fig. 2 Mineral aerosol column of GEATM (a, b, c) and aerosol optical depth of MOD08_M3 (d, e, f): (a) Mineral aerosol column in winter; (b) mineral aerosol column in spring; (c) mineral aerosol column in summer; (d) aerosol optical depth in winter; (e) aerosol optical depth in spring; (f) aerosol optical depth in summer

MOD08_M3 输出结果中,上述地区都存在着大于 0.3 的光学厚度(图 2d)。但是,模式没能模拟出 MOD08_M3 中位于 $40^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{S}$ 的环极地气溶胶高浓度带,这可能与模式未考虑海盐气溶胶有关。

2004 年 3~5 月,模拟的柱浓度高值中心出现在非洲北部及阿拉伯半岛地区,中心柱浓度都超过了 400 mg/m^2 ,在撒哈拉沙漠下风向的几内亚高原地区出现了向赤道延伸的输送带,柱浓度在 100 mg/m^2 以上(图 2b)。这一时期,东亚地区的气溶胶柱浓度显著上升,中国西北部和蒙古地区的浓度增幅最

大,由冬季的 50 mg/m^2 增至 200 mg/m^2 ,在春季强劲的西风带作用下,气溶胶向东输送,在 $30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 太平洋北部地区上空形成了柱浓度高达 50 mg/m^2 以上的浓度输送带,该输送带一直延伸到太平洋东岸的落基山脉地区,这一现象在 MOD08_M3 气溶胶光学厚度输出结果中得到了很好的体现(图 2e)。同时,北印度洋阿拉伯海地区的浓度高值区也被很好地模拟出来。

2004 年 6~8 月,模拟的柱浓度中心没有改变,但是强度和范围明显增加,撒哈拉地区向下风向的

输送作用更加显著，中心带的气溶胶柱浓度超过了 100 mg/m^2 ，这条浓度高值带沿着赤道一直向西伸展到了美洲中部的加勒比海地区。北印度洋地区的气溶胶浓度和范围都有所增加，其浓度值由春季的 50 mg/m^2 上升到了这一时期的 100 mg/m^2 ，其高值区由阿拉伯海扩展到了孟加拉湾地区。东亚的春季出流输送带在这一时期也基本结束，浓度影响范围只覆盖东北亚地区，浓度不足 100 mg/m^2 。由于模式输出的是沙尘气溶胶总体柱浓度，也由于不同的气溶胶其光学厚度是不同的，而 MOD08_M3 观测到的非洲中部刚果盆地地区、南美洲北部地区、印度尼西亚地区以及中国东部地区高于 0.6 的光学厚度大值，主要是由于火山爆发和燃烧排放产生的高浓度硫酸盐、黑碳气溶胶造成的，而在模式结果中这些地区的沙尘气溶胶总体柱浓度不是很高。

5 与 MIRAGE 模式的比较

Easter 等^[33]开发研制了 MIRAGE 模式系统，该模式主要用于研究气溶胶对全球大气环境的作用，模拟的对象包括痕量气体、硫酸盐气溶胶、

DMS、MSA、有机质、黑碳、海盐以及沙尘矿物气溶胶等大气成分，是一套考虑物种比较全面、模拟过程较为细致的全球大气化学输送模式。MIRAGE 利用欧洲中心 ECMWF 的风场和温度场数据对 1994 年 6 月至 1995 年 5 月进行了模拟研究，模式结果与大量的地面观测和飞机航测进行了比较，结果表明 MIRAGE 模式基本上能够反映研究物种的全球分布特征。

5.1 对二氧化硫的模拟结果比较

图 3 中两模式模拟结果比较显示，GEATM 模式与 MIRAGE 模式对于 SO_2 全球分布状况的模拟具有许多共同之处。首先，这两个模式模拟的 SO_2 高值中心都主要集中在欧洲、亚洲以及北美等污染排放较为严重的地区，在安第斯山西侧、非洲南部以及澳大利亚东南部也分布着一些高值点；其次，两个模式的模拟结果同时显示 1 月的 SO_2 浓度要明显高于 7 月，1 月 SO_2 浓度分布范围更广、中心浓度更高，浓度值大多超过了 1000×10^{-12} ，7 月浓度分布范围大幅缩小，主要集中在排放源区，中心值也降至了 300×10^{-12} ；同时，这两个模式还很好地模拟了 1 月东

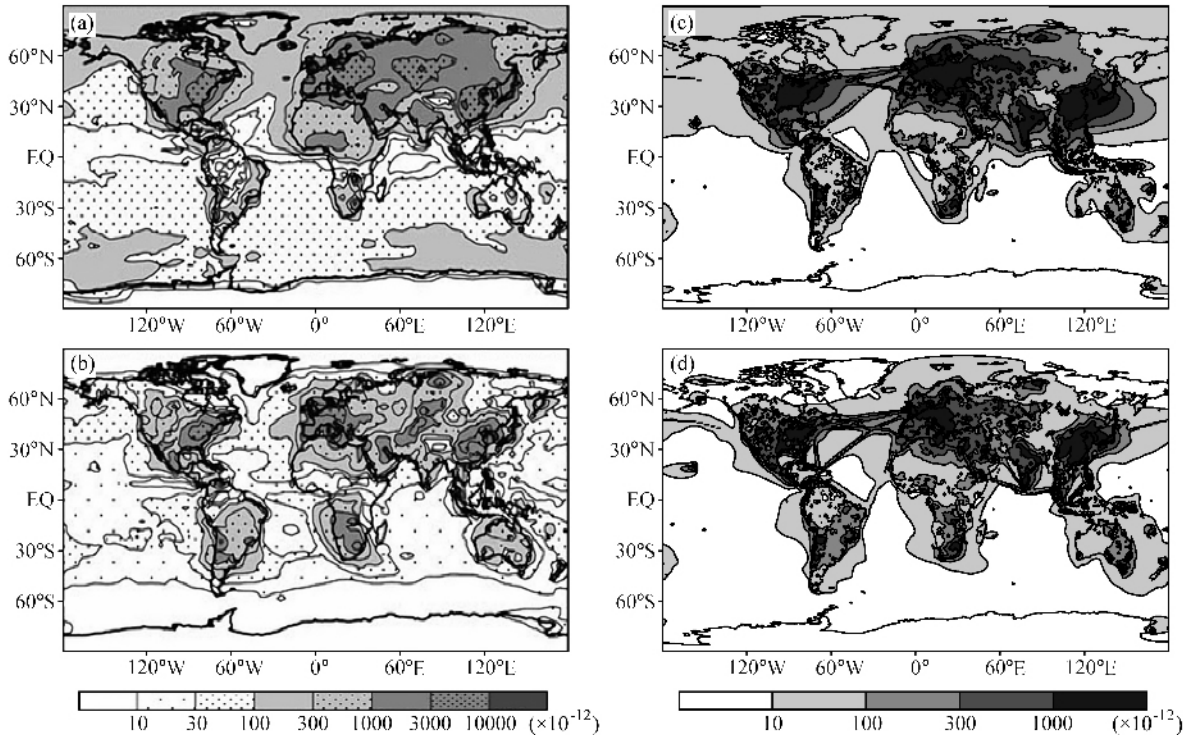


图 3 MIRAGE 模式^[33]与 GEATM 模式模拟的二氧化硫地面浓度：(a)MIRAGE 1 月结果；(b)MIRAGE 6 月结果；(c)GEATM 1 月结果；(d)GEATM 6 月结果

Fig. 3 Results of surface SO_2 given by MIRAGE^[33] and GEATM: (a) MIRAGE in Jan; (b) MIRAGE in Jul; (c) GEATM in Jan; (d) GEATM in Jul

亚地区 SO_2 的东传过程, 该过程在西太平洋 $20^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 地区上空造成 100×10^{-12} 以上的浓度分布带, 7 月该浓度带基本消散。另一方面需要指出的是, GEATM 与 MIRAGE 对于海上 SO_2 浓度的模拟存在较大差异, GEATM 模拟的海上 SO_2 浓度要明显低于 MIRAGE 模式, MIRAGE 的模拟值在 $10 \times 10^{-12} \sim 100 \times 10^{-12}$ 之间, 而 GEATM 结果大多低于 30×10^{-12} , 特别是在赤道以南海域, 浓度更是不足 10×10^{-12} 。参考 Chin 等^[9] 的 GOCART 模式、Berlgen 等^[34] 的 OSLO-CTM2 模式结果, 发现 GEATM 与上述模式的海上 SO_2 浓度分布有很好的一致性。另外, GEATM 模式模拟出了 1 月格陵兰岛西侧的 SO_2 低谷, 中心浓度低于 10×10^{-12} 。这一低谷在 GOCART 和 OSLO-CTM2 模式中均有体现, 而 MIRAGE 模式对这一现象则没有反映。

5.2 对硫酸盐的模拟结果比较

与二氧化硫的模拟情况类似, 除了海上浓度 MIRAGE 模式结果仍然偏高外, 两个模式模拟的硫酸盐输送态势基本一致(图 4)。1 月东亚硫酸盐沿赤道向东输送过程、1 月北印度洋地区输送过

程、7 月北美地区与非洲大陆之间输送过程、7 月南美洲向赤道太平洋输送过程、7 月南部非洲向赤道大西洋输送等过程都得到了很好的体现。在 MIRAGE 模式的 1 月模拟结果中, 北极地区出现了一片浓度高于 200×10^{-12} 的硫酸盐浓度带, 而在 GEATM 中没有模拟出这一浓度高值, 其模拟浓度仅为 $10 \times 10^{-12} \sim 100 \times 10^{-12}$, Barth 等^[35]、Chin 等^[9] 和 Berlgen 等^[34] 的模式中也均未出现过这一冬季极地硫酸盐高浓度带, 这表明 GEATM 对硫酸盐的模拟效果较之 MIRAGE 模式更加合理。

通过二氧化硫和硫酸盐分布状况模拟结果的比较发现, GEATM 模式与 MIRAGE 模式在硫化物全球整体分布形式和输送态势上十分相似, 但在海上污染物浓度模拟等方面, MIRAGE 模式结果明显偏高, GEATM 模式的结果与 GOCART 模式、OSLO-CTM2 模式更为接近, 模拟总体效果要好于 MIRAGE 模式。

5.3 对黑碳气溶胶的模拟结果比较

GEATM 模式对黑碳气溶胶的模拟结果与 MIRAGE 模式十分相似(图 5)。1 月, 全球黑碳气溶

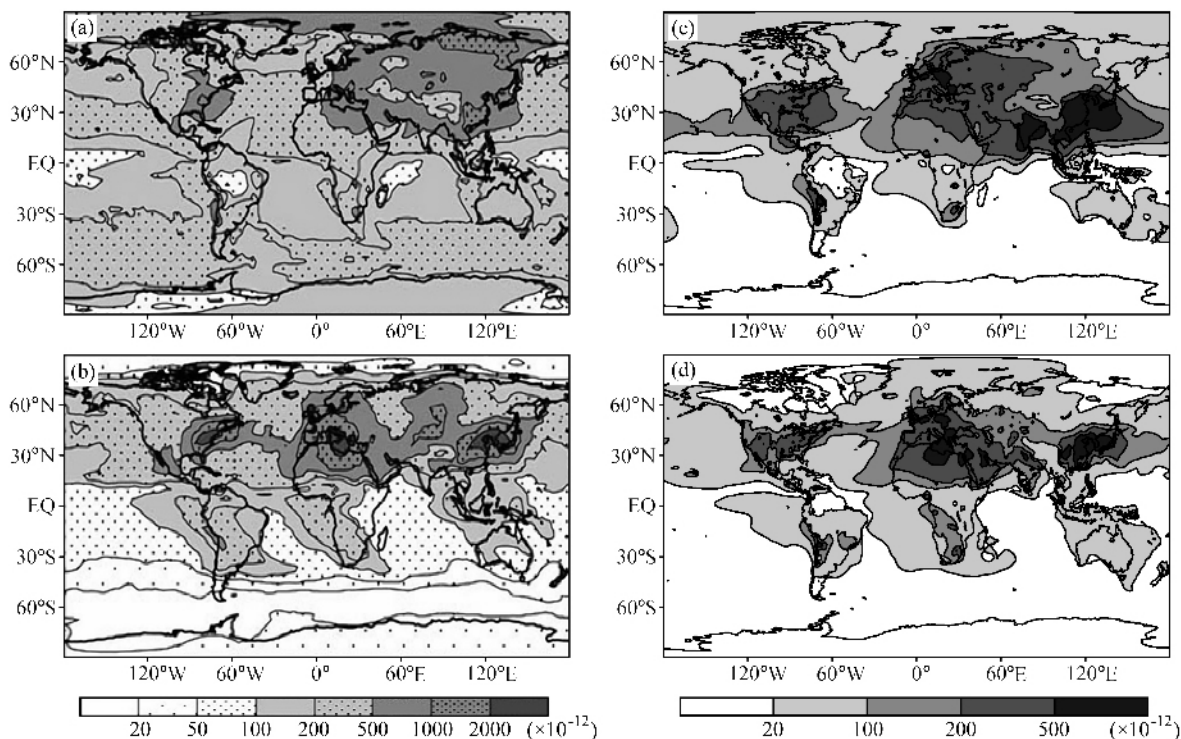


图 4 MIRAGE 模式^[33]与 GEATM 模式模拟的硫酸盐地面浓度: (a)MIRAGE 1 月结果; (b)MIRAGE 6 月结果; (c)GEATM 1 月结果; (d)GEATM 6 月结果

Fig. 4 Results of surface sulfate given by MIRAGE^[33]and GEATM; (a) MIRAGE in Jan; (b) MIRAGE in Jul; (c) GEATM in Jan; (d) GEATM in Jul

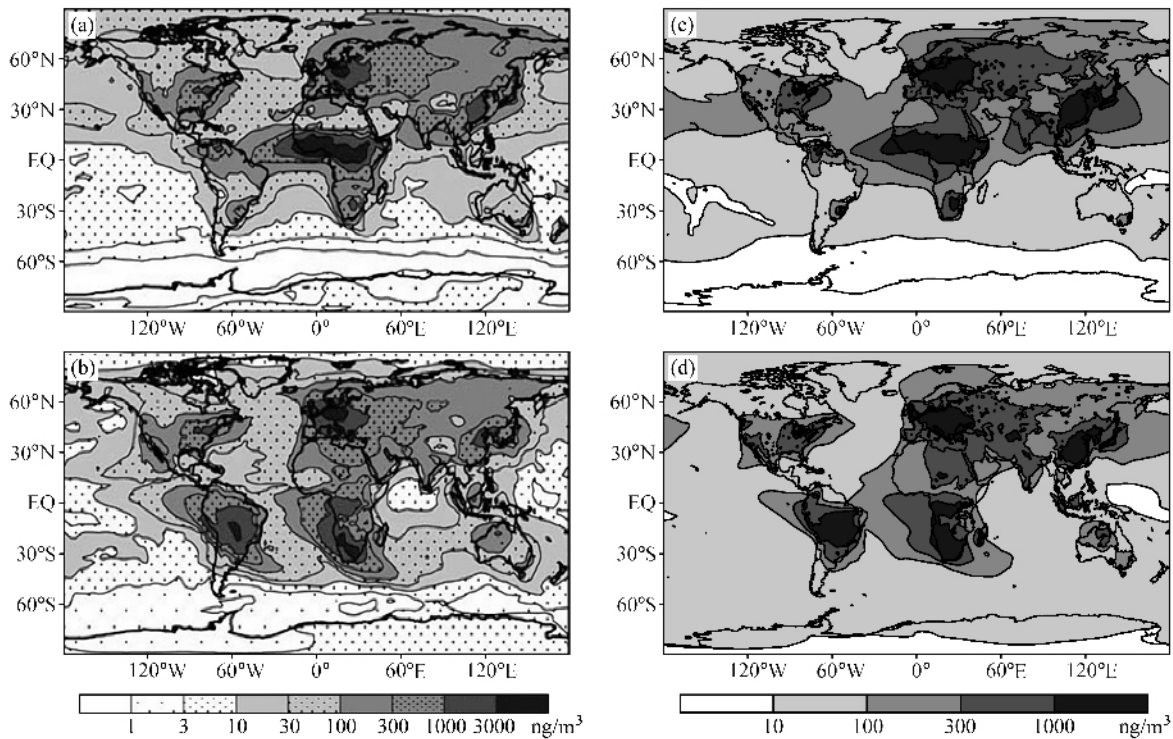


图5 MIRAGE模式^[33]与GEATM模式模拟的黑碳气溶胶地面浓度：(a) MIRAGE 1月结果；(b) MIRAGE 6月结果；(c) GEATM 1月结果；(d) GEATM 6月结果

Fig. 5 Results of surface black carbon given by MIRAGE^[33] and GEATM: (a) MIRAGE in Jan; (b) MIRAGE in Jul; (c) GEATM in Jan; (d) GEATM in Jul

胶分布状况符合较好，欧洲、北美、东亚、非洲北部、南美洲西北部 and 东南部的浓度中心位置基本相同，中心浓度都超过了 1000 ng/m^3 ，这一时期西太平洋上的高浓度带也由这两个模式模拟出来。7月，MIRAGE模式模拟的南美洲和非洲南部的输送带均在GEATM模式中得到体现。同期，由于非洲北部进入雨季，使得生物质燃烧产生的黑碳气溶胶大量减少，二者在几内亚湾地区的浓度均较1月有显著下降。在南半球海域，GEATM模式与MIRAGE模式模拟结果存在一定差异，GEATM模式模拟的浓度要略高于MIRAGE模式。Tie等^[36]的研究表明，MIRAGE模式结果更为合理。

5.4 对沙尘气溶胶的模拟

GEATM模式与MIRAGE模式对于沙尘气溶胶的分布状况和形态变化的模拟具有较好的一致性，模式结果(图6为MIRAGE模式结果，图7为GEATM模式结果)显示全球有七大沙尘中心，它们分别是撒哈拉沙漠、阿拉伯半岛、中亚地区、美国西部地区、南部非洲、澳大利亚西部以及拉丁美

洲南部地区，这些沙尘中心大致位于南北纬 30° 附近，中心沙尘浓度均超过了 $50 \mu\text{g/m}^3$ 。比较结果表明GEATM模式在沙尘分布上刻画更精细，充分体现了沙尘气溶胶分布的季节变化特征。MIRAGE模式准确地模拟了撒哈拉地区沙尘输送的形态变化、春季东亚地区的沙尘跨洲输送过程，但是对于其他地区沙尘输送状况的季节变化上表现不明显，基本没有体现南半球三个沙尘中心的浓度季节变化特征，浓度一直维持在 $0.1 \sim 2 \mu\text{g/m}^3$ 之间，形态没有显著改变；也没有模拟出阿拉伯海、孟加拉湾地区的沙尘分布变化，各时期的浓度与分布基本一致。而GEATM模式结果则很好地反映了上述地区的沙尘浓度季节变化特征：在南半球的模拟结果中，可以看出澳大利亚等三个沙尘中心均有比较明显的季节循环，9~11月浓度分布范围最大，除南极地区外，沙尘浓度均达到了 $0.3 \mu\text{g/m}^3$ 以上，6~8月浓度分布范围最小，赤道以南海域沙尘浓度不超过 $1 \mu\text{g/m}^3$ ；在北印度洋地区，GEATM模式模拟了该地区2003年12月至2004年8月沙

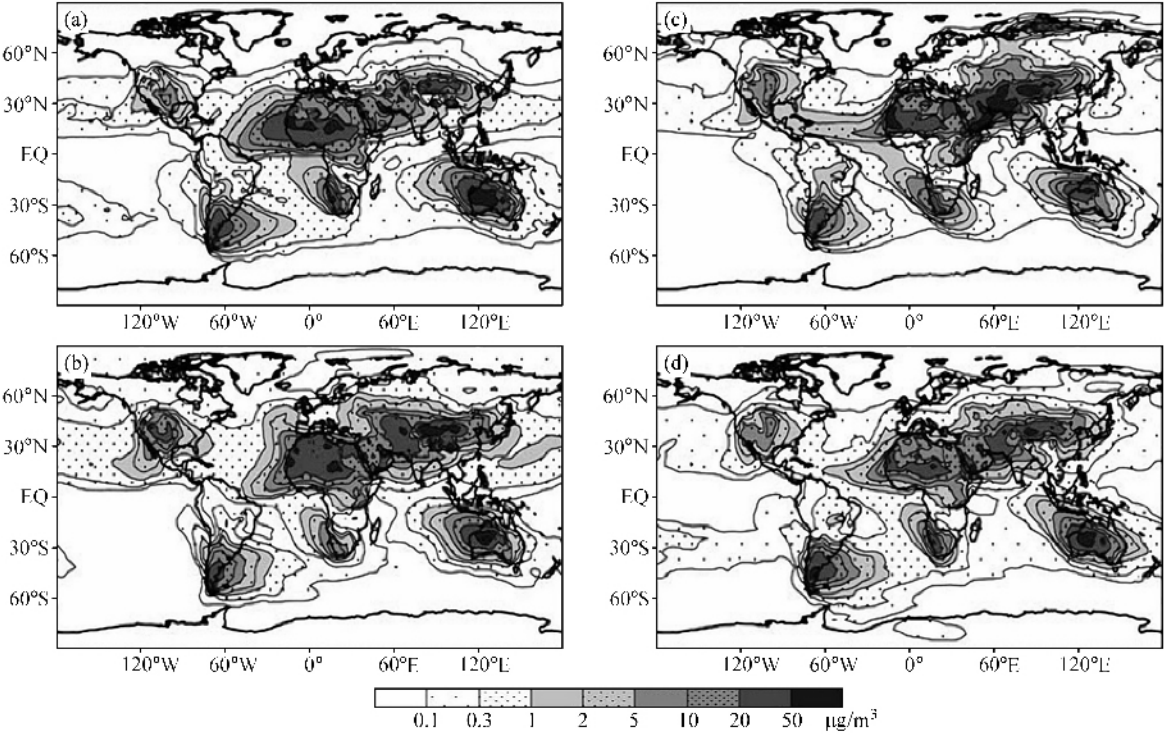


图 6 MIRAGE 模式^[33]模拟的沙尘气溶胶地面浓度: (a)冬季; (b)春季; (c)夏季; (d)秋季
Fig. 6 Results of surface dust given by MIRAGE^[33]; (a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

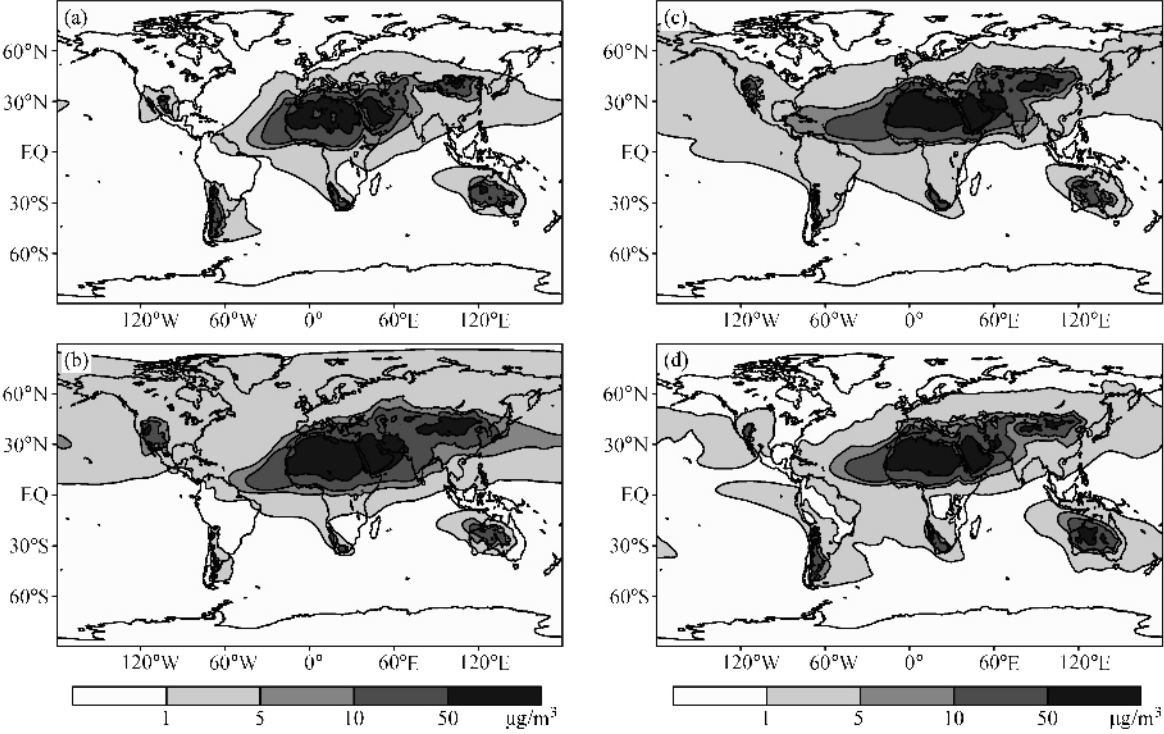


图 7 GEATM 模式模拟的沙尘气溶胶地面浓度: (a)冬季; (b)春季; (c)夏季; (d)秋季
Fig. 7 Results of surface dust given by GEATM; (a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

尘由陆地向海洋的东南走向的输送过程, 沙尘浓度由 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 增至 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 这一结果得到了 MOD08_M3 卫星资料的验证。

6 总结

初步建立了全球环境大气输送模式 GEATM, 对二氧化硫、硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶等大气化学成分进行了模拟研究。GEATM 在模式设计方面充分考虑了物理化学过程的处理和数值计算方案的选择, 具有较好的稳定性和计算效率。同时, 模式具有以下特点:

(1) 较高的模式分辨率, 模式水平方向分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向分为 20 层;

(2) 采用地形追随等 σ 面坐标, 可以很好地反映地形对于大气化学物质输送的影响;

(3) 采用质量守恒算法, 保证了输送方程的守恒性;

(4) 在 Wang 等^[17]的工作基础上发展了适用于全球尺度的起沙机制, 充分考虑地表植被覆盖状况、土壤类型、冰雪覆盖、近地面湿度、摩擦速度以及天气系统对于起沙过程的影响, 合理反映了起沙过程的季节特征。

对 2003 年 12 月至 2004 年 11 月的模拟结果进行单站浓度变化趋势和区域浓度分布状况的验证, 结果显示在欧洲 Jarczew 观测站浓度距平曲线的相关系数达到 0.69, 在 Leba 观测站相关系数达到 0.66, 在中国有 47 个站点的浓度相关系数超过了 0.50。同时, 模式输出的气溶胶总体柱浓度分布状况与 MOD08_M3 输出的气溶胶光学厚度具有很好的一致性。单站浓度变化趋势的验证研究表明, 模式能够很好地模拟出局地浓度变化特征; 区域浓度分布状况的验证研究则体现出模式在刻画大气化学物质区域分布状况方面具有很强的能力。通过对比国外同类模式 MIRAGE 模拟的二氧化硫、硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶的全球分布状况结果, 表明 GEATM 模式基本达到了相应的模拟水平, 并且由于该模式采用较高的网格分辨率和更为科学的起沙过程处理方法, 模式在沙尘气溶胶分布状况、输送态势方面得到了更精细的体现。模式在现阶段只对主要的气溶胶物质进行模拟, 化学方案采用的是较为简单的参数化方案, 下一步模式并行化以后, 将引入包含复杂化学机理的计算, 研究对象也将由大

气气溶胶扩展到影响气候环境的其他主要大气成分, 并实现和气候系统模式的耦合, 以研究东亚剧烈人为活动与区域及全球气候环境的相互作用。

参考文献 (References)

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis is the most comprehensive and up-to-date scientific assessment of past, present and future climate change. IPCC, 2001
- [2] Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 8633~8652
- [3] Jacob D J, Crawford H J, Kleb M M, et al. Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: Design, execution, and first results. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 9000~9018
- [4] Brasseur G P, Hauglustaine D A, Walters S, et al. MOZART, a global chemical transport model for ozone and related chemical tracers, 1. Model description. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 28265~28289
- [5] Wang Y, Jacob D J, Logan J A. Global simulation of tropospheric O_3 -NO $_x$ -hydrocarbon chemistry, 1. Model formulation. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 10713~10725
- [6] Sudo K, Takahashi M, Kurokawa J, et al. CHASER: A global chemical model of the troposphere, 1. Model description. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: 4339~4358
- [7] Rotman D A, Atherton C S, Bergmann D J, et al. IMPACT, the LLNL 3-D global atmospheric chemical transport model for the combined troposphere and stratosphere; Model description and analysis of ozone and other trace gases. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D04303~D04344
- [8] Roelofs G-J, Lelieveld J, Ganzeveld L. Simulation of global sulfate distribution and the influence of effective cloud drop radii with a coupled photochemistry-sulfur cycle model. *Tellus*, 1998, **50B**: 224~242
- [9] Chin M, Rood R B, Lin S-J, et al. Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 24671~24687
- [10] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 22897~22914
- [11] Zender C S, Bian H, Newman D. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 4416~4435
- [12] Liu Y, Li W L, Zhou X J, et al. Mechanism of formation of the ozone valley over the Tibetan Plateau in summer: Transport and chemical process of ozone. *Adv. Atmos. Sci.*,

- 2003, **20**: 103~109
- [13] Liu Y, Li W L, Zhou X J, et al. The possible influences of the increasing anthropogenic emissions in India on tropospheric ozone and OH. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 968~977
- [14] Liu Y, Isaksen I S A, Sundet J K, et al. NO_x change over China and its influences. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 132~140
- [15] 马晓燕, 石广玉, 郭裕福, 等. 硫酸盐气溶胶辐射强迫的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2004, **9**: 454~464
Ma X Y, Shi G Y, Guo Y F, et al. Simulation of radiative forcing by sulfate aerosols. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**: 454~464
- [16] 王宏, 石广玉, Aoki T, 等. 2001年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫. 科学通报, 2004, **49**: 1993~2000
Wang H, Shi G Y, Aoki T, et al. Radiative forcing of dust aerosol over East Asia and North Pacific during the spring of 2001. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49**: 1993~2000
- [17] Wang Z F, Ueda H, Huang M Y. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 26947~26959
- [18] Tarrason L. Dispersion of sulfur in the north hemisphere. A study with a 3-dimensional time-resolved model. Ph. D. dissertation, University of Oslo, Norway, 1995
- [19] Wesely M L. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmos. Environ.*, 1989, **23**: 1293~1304
- [20] Oliver J G, Boudowman A F, Maas C, et al. Description of EDGAR Version 2.0: A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone-depleting substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on 1°×1°. RIVM/TNO Rep, 771060 002, 1996
- [21] Benkovitz C M, Scholtz M T, Pacyna, J. et al. Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 29239~29254
- [22] 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, **108**: 8809~8831
- [23] Sandnes H, Styve H. Calculated budgets for airborne acidifying components in Europe, 1985, 1987, 1988, 1989, 1990 and 1991. EMEP/MS-CW Rep. 1/92, Norw. Meteorol. Inst., Oslo, Norway, 1992
- [24] Rotstajn L D, Lohmann U. Simulation of the tropospheric sulfur cycle in a global model with a physically based cloud scheme. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: 4592~4612
- [25] Gillette D. A wind tunnel simulation of the erosion of soil: Effect of soil texture, sandblasting, wind speed, and soil consolidation on dust production. *Atmospheric Environment*, 1978, **12**: 1735~1743
- [26] White B R. Soil transport by winds on Mars. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 4643~4651
- [27] Lunt D J, Valdes P J. The modern dust cycle: Comparison of model results with observations and study of sensitivities. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: 4669~4684
- [28] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Aust. J. Soil Res.*, 1996, **34**: 309~342
- [29] Matthews E. Prescription of Land-surface Boundary Conditions in GISS GCM II: A Simple Method Based on High-Resolution Vegetation Data Sets. NASA TM-86096. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. 1984
- [30] Zobler L. A world soil file for global climate modeling. NASA TM-87802. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. 1986
- [31] Wiscombe W J, Warren S G. A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 2712~2733
- [32] Bonan G B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies; Technical description and user's guide. Tech. Rep. NCAR TN 417 + STR, Natl. Cent. For Atmos. Res., Boulder, Colo., 1996
- [33] Easter R C, Ghan S J, Zhang Y, et al. MIRAGE: Model description and evaluation of aerosols and trace gases. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D20210~D20255
- [34] Berglen T F, Berntsen T K, Isaksen I S A, et al. A global model of the coupled sulfur/oxidant chemistry in the troposphere: The sulfur cycle. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D19310~19336
- [35] Barth M C, Rasch P J, Kiehl J T, et al. Sulfur chemistry in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: Description, evaluation, features, and sensitivity to aqueous chemistry. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 1387~1415
- [36] Tie X, Madronich S, Walters S, et al. Assessment of the global impact of aerosols on tropospheric oxidants. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D03204~D03235