新一代沙尘天气预报系统 GRAPES_CUACE/Dust: 模式建立、检验和数值模拟

王宏^{①②}, 龚山陵^①, 张红亮^②, 陈勇^{②③}, 沈学顺^②, 陈德辉^②, 薛纪善^②, 沈元芳^①, 伍湘君^②, 金之雁^②

① 中国气象科学研究院大气成分中心, 北京 100081;

② 中国气象科学研究院, 灾害性天气国家重点实验室/数值中心, 北京 100081;

③ 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京 100029

E-mail: wangh@cma.gov.cn

2009-02-20 收稿, 2009-06-22 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB403705)、公益性行业科研专项(编号: GYHY(QX)2007-6-36)和国家科技支撑计划(编号: 2008BAC40B02)资助项目

摘要 基于中国气象局数值预报基地研发的新一代全球/区域同化、预报系统(GRAPES)的中尺度预报模式(GRAPES_meso)和中国气象科学研究院大气成分中心开发的大气化学模块(CUACE/dust), 建立了中国沙尘天气预报系统(GRAPES-CUACE/Dust). 该系统引入了中国地区最新的土地沙漠化资料、中国沙漠沙尘气溶胶的光学特性资料、逐日变化的土壤湿度和雪盖资料. 模式质量守恒性能良好. 将批量实时预报结果与地面天气观测和臭氧分光计反演的气溶胶指数(TOMS AI)的对比表明: 模式能够比较准确地预报中国以及东亚地区沙尘天气发生、发展、输送以及消亡过程, 能够对起沙量、干、湿沉降量、沙尘浓度以及沙尘光学厚度等一系列要素进行实时定量预报. 以 2006 年 4 月 7 次主要沙尘天气为例, 分析了起沙和干、湿沉降以及沙尘大气载荷的时空分布等特征. 结果表明, 2006 年 4 月东亚地区沙漠向大气中注入沙尘总量约为 2.25 亿吨, 沙尘排放以下面三大源区为主: 中国北部内蒙古和中蒙边界附近沙漠为东亚沙尘最重要的排放源, 沙尘排放量为 1.53 亿吨, 占排放总量的 68%. 塔克拉玛干沙漠沙尘排放量位居第二, 将近 4000 万吨, 占沙尘排放总量的 17%, 浑善达克沙地排放量约为 1500 万吨, 占排放总量的 7%. 其他地区的沙漠、沙地以及废弃的耕地等的沙尘排放量之和只占沙尘排放总量的 8%. 2006 年 4 月东亚地区沙尘沉降总量为 1.36 亿吨. 沙尘沉降的区域分布表明, 三大沙漠源区同时也是沙尘的主要沉降区, 三大源区的沉降量大约占沉降总量 78%, 共 1.35 亿吨的沙尘在三大沙漠源区沉降, 其次是源区下游的中国大陆地区, 沙尘沉降为沉降总量的 16%, 大约 200 多万吨. 120°E 以东的中国近海、韩国、日本以及西太平洋地区沉降量只占总沉降量的 6% 左右, 约 85 万吨. 干、湿沉降的分析表明, 由于 4 月中国北方地区干燥少雨, 在 2007 年 4 月的沙尘沉降总量中, 以干沉降为主, 大约占沉降总量的 94%, 湿沉降只占沉降总量的 6% 左右.

关键词

中尺度
沙尘预报系统
气溶胶
干沉降
湿沉降

引用格式: 王宏, 龚山陵, 张红亮, 等. 新一代沙尘天气预报系统 GRAPES_CUACE/Dust: 模式建立、检验和数值模拟. 科学通报, 2009, 54: 3878~3891
Wang H, Gong S L, Zhang H L, et al. A new-generation sand and dust storm forecasting system GRAPES_CUACE/Dust: Model development, verification and numerical simulation. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0481-z

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-24-3878>

在地球上的干旱和半干旱地区,每年都有大量的沙尘气溶胶在特定的天气条件下注入大气中.伴随沙尘天气飘浮于大气中的沙尘粒子对大气环境^[1]、交通运输、海洋生态(沙尘粒子在海洋上沉降之后)^[2]、酸雨核化^[3]等都具有明显影响.而且,沙尘粒子还通过吸收和散射太阳辐射和大气长波辐射改变地气辐射平衡、加热或冷却大气改变大气的温度场从而对短期天气系统和长期气候变化都造成重要影响^[4~11].准确的预测、预报沙尘天气的发生和发展过程不仅是灾害性天气预报的要求,也是评估沙尘气溶胶直接及其间接天气、气候效应的前提和基础.

包括沙尘排放、输送以及沉降等物理过程的数值模式在研究和预报沙尘天气过程中扮演着重要角色.全球大气环流模式和区域气候模式在描述沙尘粒子在大气中的循环过程以及其区域或全球气候效应方面具有其特有的优势^[12~16].但是,由于全球模式在时间、空间分辨率以及物理过程精细程度等方面的限制,制约了它对局地沙尘事件的预报和描述能力,而沙尘天气本身是一种中尺度天气现象.就特定地区沙尘天气的预测、预报而言,中尺度模式在描述天气系统演变、预报时空精细程度、实时资料的应用等方面具有全球模式不可比拟的优势.20世纪80年代末期开始,一些科学家开始尝试利用中尺度数值模式来研究和预测撒哈拉和澳大利亚沙尘天气^[17~19],针对东亚地区沙尘天气的研究开展比较晚^[20~26].但是,近年来的研究表明,源于中国西部、北部和中蒙边界沙漠、戈壁和被破坏耕地的东亚沙尘在全球沙尘的排放中占有重要地位.这一地区沙尘的年排放估算为8亿吨^[27],与全球沙尘年排放量10~30^[10]或10~50^[8]亿吨相比,所占份额相当可观,对全球大气中沙尘载荷的贡献明显大于撒哈拉沙漠,特别是对于北半球中纬度(25°~40°N)大气中的沙尘载荷的贡献非常显著,对于下游的韩国、日本、太平洋北部甚至美国西海岸的影响更是引起了人们的普遍关注^[20,21,25].从20世纪末到21世纪初,这一地区多次发生沙尘的远距离输送事件,越来越引起社会和地球科学界的重视.目前,相对于地球上的其他沙漠源区而言,专门针对东亚地区沙尘天气数值模式的研究还亟待提高和改进.由于观测资料的匮乏,从早期模式地表状况的处理、摩擦速度以及起沙参数化方案到近年的一些沙尘的光学特性和

辐射参数的设置等等,很多方面都直接借鉴了撒哈拉和澳大利亚等沙漠的研究成果.而东亚沙漠源区的地表状况复杂多样,地表类型涉及沙漠、戈壁、被破坏的耕地,土壤粒子的粒度分布也比较复杂,而且沙尘天气出现的季节和对应的天气系统也与其他沙漠地区有所不同,直接引用其他沙漠的观测资料和参数化方案必然给模式带来一些不确定性因素.近年来,随着对东亚特别是中国沙漠的大规模观测的展开,已经积累了丰富的观测结果^[1,26],如何将这些最新的观测数据引入数值模式以提高模式性能,更为精确地预报和描述发生在东亚地区的沙尘天气是目前东亚沙尘模式研究中非常有意义的课题.

本文基于中国新一代全球/区域同化、预报系统(GRAPES)的区域预报模式(GRAPES_meso),将一个针对东亚地区的沙尘气溶胶模型CUACE/dust与之进行双向耦合,建立了一个针对东亚地区的中尺度沙尘天气预报系统,用于预报和研究发生在中国和东亚地区的沙尘暴事件.在该系统中,引用了21世纪中国地区最新的陆面、土地沙漠化、土壤粒度以及沙尘气溶胶光学特性等资料,力求系统对东亚地区沙尘天气更具针对性.系统能够实时预报沙尘气溶胶的浓度、光学厚度、起沙量、沉降量等物理量.

1 模式介绍

中尺度沙尘预报系统(GRAPES-CUACE/Dust)的主体框架包含两个部分:中尺度天气预报模式和沙尘气溶胶模型.驱动气溶胶模型的天气模式采用中国气象局开发研制的中国新一代全球/区域同化、预报系统(GRAPES)的区域预报模式GRAPES_Meso^[28~30].沙尘气溶胶模型采用中国气象科学研究院大气成分中心研发的CUACE/Dust气溶胶模式.本文的主要工作是对以上两个模块进行了在线嵌套,并在此基础上,对模式的输送、垂直扩散等方案根据GRAPES_meso的动力框架和物理过程进行了改进,从而建立了新一代沙尘天气预报系统(GRAPES-CUACE/Dust).有关这部分的详细工作将在下面两个小节分别进行介绍.

1.1 中尺度区域天气模式GRAPES_Meso

中国新一代全球/区域同化、预报系统GRAPES模式采用了多尺度统一的动力框架,即水平分辨率可调,垂直运动静力近似和非静力近

似方案可选. GRAPES_Meso 的核心部分为三维变分资料同化系统、预报模式动力框架以及经过优化和改进的物理过程参数化方案^[29,30]. GRAPES_Meso 是按照中尺度预报的要求设置, 水平分辨率一般设置比较高, 垂直采用非静力近似方案. 模式的时间离散采用半隐式-半拉格朗日时间平流方案^[30]. 模式网格采用经纬度格点划分, 水平空间离散采用 Arakawa_C 格点变量分布和二阶精度的中央差分格式^[31]. 为克服球面坐标下高纬度地区拉格朗日轨迹的计算误差, 垂直坐标采用兼有自然高度坐标性质的地形追随坐标, 垂直离散采用有助于提高垂直气压梯度力运算精度的 Charney-Phillips 垂直隔层变量放置^[32].

GRAPES-CUACE/Dust 沙尘气溶胶的输送项(包括水平和垂直输送项)由 GRAPES_Meso 动力框架计算, 在模式的每个网格点上采用 QMSL 半隐式半拉格朗日方案^[30], 沙尘总量在整个计算中保持守恒. 半拉格朗日方案的稳定性和质量守恒的轨迹追踪计算在沙尘的输送项的计算中具有其特有的优势. 模式积分过程中, 每一个网格点上第 $n+1$ 个时步的沙尘浓度按照如下的轨迹差值得到:

$$C_i^{n+1} = C_{i*}^n + \Delta t[(S+D)_i^{n+1}\alpha + (S+D)_{i*}^n\alpha], \quad (1)$$

其中, C 代表沙尘气溶胶的质量浓度, $n+1$ 和 n 表示第 $n+1$ 和 n 个时步, i 表示 12 档沙尘粒子中的第 i 档, S 和 D 分别为沙尘的源、汇项, 带*的项为上游点项, α 表示上游点和计算点的权重系数, Δt 为时间步长.

以沙尘天气预报为目的, 在对中国以及东亚地区中尺度预报模式物理过程方案进行充分调研的基础上, 充分考虑我国受东亚季风影响的天气气候特点, 通过大量的数值试验和对比分析, 我们对 GRAPES-CUACE/Dust 物理过程方案进行了优化和选择. 目前模式物理过程包含积云对流、微物理、边界层、辐射和陆面等物理过程. 本文云降水方案采用了经过中国气象科学院科学家改进的包含冰相过程的降水方案, 许多数值试验的结果表明, 采用该方案模式在中国大陆的降水强度更接近观测结果. 辐射方案采用的是 ECWMF 辐射方案, 该方案在模拟青藏高原地表辐射场与地形, 500 hPa 形式以及降水场的相互关系反映地非常细致合理. 边界层方案的选取直接影响沙尘气溶胶的垂直扩散, 进而影响沙尘的输送和时空分布, 数值试验的结果表明, MRF

边界层方案^[33]计算沙尘粒子的垂直扩散优于其他边界层方案. 计算垂直扩散项的公式为

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_h \left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) \right], \quad (2)$$

其中, C_i 沙尘气溶胶浓度, t 表示时间, z 为高度, K_h 为由 MRF 边界层方案计算的热量涡流扩散系数, γ_c 是局地湍流对 GRAPES_Meso 大尺度湍流扩散通量的贡献. 有关该模式水平和垂直输送等动力框架特点、边界层扩散等物理过程以及模式性能等更为详细介绍, 请参考文献^[34].

1.2 沙尘气溶胶模型 CUACE/Dust

本文所用沙尘气溶胶模型 CUACE/Dust 是由中国气象科学研究院大气成分中心研发的气溶胶模式的沙尘气溶胶部分^[35]. 该模型包含了气溶胶的源、输送、干、湿沉降、云中和云下清除等详细的气溶胶过程, 并显式地计算了气溶胶和云的相互作用. 气溶胶的质量平衡方程为^[36]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} = & \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} \Big|_{TRANSPORT} + \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} \Big|_{SOURCES} \\ & + \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} \Big|_{CLEAR...AIR} + \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} \Big|_{DRY} \\ & + \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} \Big|_{IN_CLOUD} + \frac{\partial \chi_{ip}}{\partial t} \Big|_{BELOW...CLOUD}, \end{aligned} \quad (3)$$

方程右边第一项为气溶胶的输送项, 包括平流输送、次网格的湍流扩散和对流过程, 该项的计算在本系统的动力框架中完成. 第二项表示气溶胶的源项, 一方面包括自然源和人为因素的源排放过程, 同时也考虑了气溶胶的二次形成过程. 第三项为清洁大气过程, 包括核化、凝结、聚合等过程. 第四项为干沉降(dry)过程, 包括气体和气溶胶粒子的干沉降. 第五项为云内清除过程, 主要包括云滴活化, 气溶胶、云和雨滴粒子之间的相互作用以及云化学过程. 最后一项为云下清除过程, 指的是云层以下到地面之间的降水清除. 在目前沙尘气溶胶的预报系统中, 被激活的主要气溶胶过程有: 沙尘起沙(源)、输送、凝结、聚合、干沉降、和云下清除几个部分.

根据中国沙漠土壤粒径分布的观测结果, 将模式中沙尘气溶胶粒子分为 12 档, 粒子直径分别为 0.01~0.02, 0.02~0.04, 0.04~0.08, 0.08~0.16, 0.16~0.32, 0.32~0.64, 0.64~1.28, 1.28~2.56, 2.56~5.12, 5.12~

10.24, 10.24~20.48 和 20.48~40.96 μm . 该模型已与美国 NCAR 的中尺度模式 MM5 耦合, 成功地模拟了东北亚地区的沙尘暴过程^[36].

为了能够实时计算沙尘气溶胶的光学厚度等辐射参数, 也作为进一步计算沙尘辐射效应的准备工作, 在上述工作的基础上, 本文作者在 GRAPES-CUACE/Dust 中加入了详细的气溶胶辐射参数化模块. 辐射参数化模块最基本的因素是折射指数资料的选取, 它直接影响光学厚度等参数的计算, 最新研究表明, 中国地区沙尘气溶胶的折射指数与撒哈拉沙漠等具有明显差异, 因此本文选用了最新的中国沙漠沙尘气溶胶的复折射指数^[6](图 1)来计算光学厚度等辐射参数. 这一计算方案的主要思路为: 首先参照 GRAPES-CUACE/Dust 沙尘粒子的尺度谱分布, 假设粒子为球型, 根据 MIE 散射理论利用折射指数计算得出沙尘气溶胶的主要光学特性, 包括随波长和粒子半径变化的消光效率, 单次散射反照率和非对称因子. 然后再根据这 3 组参数和模式预报的沙尘浓度计算模式网格点上随波长和粒子半径变化的质量消光系数、光学厚度, 最后利用对所有粒子档加权平均的方法计算代表整个沙尘气溶胶的随波长变化的光学厚度、单次散射反照率和非对称因子. 具体的计算公式请参考文献^[6].

1.3 模式的输入参数

影响模式起沙和干沉降的主要地面参数有地面风速、土地覆盖、土壤粒度、土壤湿度和雪盖等物理参数, 土地覆盖状况是决定起沙是否准确的最基本因素之一. 目前模式考虑了 15 种土地覆盖情况, 计算这 15 种土地覆盖的地表粗糙度采用的是生物圈-

大气传输计划(BATS)^[37] 1 km×1 km 的陆面土地利用资料, 但在中国地区, 采用了目前最新的反应了 20 世纪 80 年代到 21 世纪初中国土地沙漠化进程的中国沙漠覆盖地图. 考虑到起沙过程对土壤湿度资料非常敏感, 土壤湿度的细微变化就可能引起模式起沙通量计算的显著差异, 本文气溶胶模型起沙方案计算需要 0~10 cm 土壤的体积含水量(w_v). 大量的数值模拟和对比分析的结果表明, NCEP 1°×1°再分析资料中的 0~10 cm 质量含水量(w_g)资料在本模式中预报具有持续、稳定的预报效果. w_g 和 w_v 的换算公式为

$$w_v = \frac{w_g}{\rho_s}, \quad (4)$$

其中, ρ_s 为根据每一个网格点上的土壤类型加权平均得到土壤密度. 目前, 土壤湿度资料在模式开始积分时输入, 在模式积分的过程中保持不变. 理论上, 这样处理没能考虑模式预报过程中因降水等因素所造成的土壤湿度的变化, 会给模式预报造成一定误差. 但是, 考虑到中国到东亚地区的主要沙尘源区集中在海拔 1500 m 以上中纬度沙漠地带, 年降水量非常低, 该地区沙尘天气的爆发呈现出显著的季节性特点, 大部分沙尘天气都出现在干燥少雨的春季, 而且 GRAPES-CUACE/Dust 的预报时效一般只考虑 72 h, 在此期间因土壤湿度造成的误差影响不会太大. 春季开始, 中国中纬度地区的冬天的积雪开始逐渐融化, 适时雪盖资料的输入对提高模式的预报精度至关重要, 本文同时引用了 NOAA 1 km×1 km 中国地区的卫星遥感雪盖资料. 模式初始气象场和每 6 h 一次的侧边界条件采用了 NCEP 1°×1°再分析资料.

图 1 中国沙漠沙尘气溶胶复折射指数

2 模式检验和模拟结果分析

GRAPES-CUACE/Dust 为等网格模式, 本文研究所采用的水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 从地面到 30 km 共设 31 个垂直层, 模式模拟区域取 $70^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$, $15^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$. 这一区域包含了蒙古国南部、中国和下游的韩国、日本以及太平洋西部部分地区等东亚沙尘源地和受其影响的主要区域. 从 2006 年 3 月 1 日到 5 月 31 日, GRAPES-CUACE/Dust 开始进行了业务试运行. 模式每天运行两次, 初始运行时刻分别采用格林威治时间 00 时和 12 两个时次, 预报时效为 72 h. 本文研究选用了其中发生沙尘天气最为频繁的 4 月 1~30 日一个月 00 时的实时预报结果. 首先进行了模式的质量守恒检验, 然后将模式预报 72 h 之内的沙尘浓度、光学厚度与地面观测、TOMS 气溶胶指数(TOMS AI)进行了对比以检验模式性能, 在此基础上分析了 2006 年 4 月 7 次典型沙尘天气发生期间起沙、输送和沉降等沙尘的时空分布及其特征.

2.1 模式检验

如前所述, GRAPES-CUACE/Dust 输送方案为半隐式半拉格朗日方案, 该方案的正定保型性的优势在于积分过程中能够很好保持输送物质量的质量守恒. 按照质量守恒的原则, 模式侧边界流入量与模拟域内的起沙累计量之和应该与从模式边界的流出总量、累积沉降总量与大气中悬浮沙尘总量之和相等. 由于本模式只考虑了模拟域内的沙尘源, 所以模式边界没有沙尘流入量, 因此, 本文对 2006 年 4 月共 30 天模式积分 72 h 之内累计起总沙量(吨)与干湿沉降总量(吨)、飘浮在大气中的沙尘总量(吨)以及沙尘从模式边界的累计流出总量(吨)三者之和进行了计算, 通过累计起沙总量与累计沉降总量、浮尘总量和累计流出总量三者之和进行对比(图 2)发现, 在 72 h 的积分过程中, 两者之差保持在 5%之内, 考虑到计算物质总量过程中体积计算等造成的误差, 这一结果表明模式在积分过程中的保持了很好的质量守恒.

2.2 沙尘 AOD 和地面沙尘浓度

对 2006 年春季沙尘天气的研究表明^[38,39], 2006 年 4 月东亚地区共有 3 次典型强沙尘暴(SDS)过程, 分别发生于 4 月 5~7 日(SDS1)、9~12 日(SDS2)、16~18 日(SDS3)和 4 次沙尘暴(DS)过程, 分别发生于 4 月 8

图 2 累计起沙总量与沉降总量、浮尘总量和流出总量之和的对比

日(DS1)、21~23 日(DS2)、24~25 日(DS3)以及 28~30 日(DS4). 这几次沙尘天气对中国乃至东亚地区造成了重要影响. 以下主要针对这 7 次沙尘天气的预报结果进行了检验和分析.

光学厚度代表了沙尘粒子对地面到大气顶的整层大气的消光强弱. 为了检验模式对沙尘天气过程中沙尘大气柱含量的总体预报能力, 本文分别计算了上述 7 次典型沙尘暴天气过程平均的随波长变化的光学厚度. 理论上认为波长在 $0.55 \mu\text{m}$ 处的光学厚度能够代表气溶胶在整个短波谱段的消光情况, 所以本文选择波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 处的 AOD 为代表, 与 TOMS AI 气溶胶指数进行了对比(图 3). 需要注意的是, 模式计算的 AOD 代表了从地面到 30 km 大气中沙尘气溶胶对大气的总体消光效应. 而 TOMS AI 对地面到 2 km 之内气溶胶的探测有一定的局限性, 而且 TOMS AI 对吸收性大气气溶胶的探测更为敏感^[40], 沙尘气溶胶散射作用相对比较强, 特别是源于东亚地区沙漠的沙尘粒子^[6]的散射性比其他沙漠地区更强, 这是两者含义的不同之处. 但是, 考虑到沙尘天气爆发时, 沙漠以及邻近的下游地区, 大气气溶胶中沙尘的含量可以达到 70%以上, TOMS AI 仍然在很大程度上代表了沙尘气溶胶的大气中整体的消光效应, 距离沙尘源地越近, 这种代表性越强. 因而在东亚地区, 模式预报的沙尘光学厚度与 TOMS AI 还是具有很好的可对比性.

图3 2006年4月7次沙尘暴过程平均光学厚度($0.55\ \mu\text{m}$)和TOMS AI的对比
阴影部分为模式输出结果,等值线为TOMS AI

通过对2006年4月7次沙尘暴天气过程平均光学厚度(以 $0.55\ \mu\text{m}$)和同一时段TOMS AI对比分析,可以看出,在东亚以及邻近的西太平洋地区,模式模拟的光学厚度和TOMS AI显示了非常好的一致性.模式模拟AOD和TOMS AI数据都显示,SDS3是2006年4月强度最大和输送距离最远、影响区域最大的一次强沙尘暴过程.这次强沙尘暴天气对蒙古国南部、内蒙古北部和东北部、中国中东部以及以东到日本岛地区造成重要影响.就整个沙尘天气过程平均状况来看,包括北京在内的中国东部地区的沙尘光学厚度超过了3,日本岛南部及以西地区沙尘气溶胶的光学厚度也达到1,这些地区AOD与TOMS AI的区域和中心具有比较好的一致性.同时,分析SDS3和DS4我们发现,在中国西部的塔克拉玛干沙漠地区,模式模拟的沙尘光学厚度中心偏弱的现象非常明显,而TOMS AI在该地区却表现了一个较强的大值中心,由于该地区为沙漠源区,而且远离中国内陆地区,受其他类型气溶胶影响的可能性很小,地面天气现象观测(图4)结果表明,该次沙尘暴过程期间该地区一直持续长时间的浮尘天气,并没有出现扬沙和沙尘暴天气.结合TOMS AI和地面观测两者的结果分析,该地区气溶胶的垂直高度偏高,不是本地起沙造成,TOMS AI大值中心可能是从中国境外上游的中亚沙漠地区的输送而来,而并非本地起沙.由于GRAPES-CUACE/Dust的模拟区域没有包含中亚地区沙漠,可能是导致中国西部塔克拉玛干浮沉天气漏报的主要原因,而不是模式本身起沙机制的问题.SDS2的模拟结果进一步证明了模式起沙方案在塔克拉玛干地区的有效性,对于这次强沙尘暴过程而言,模式模拟AOD中心与TOMS AI气溶胶指数大值区一致表明塔克拉玛干沙漠是沙尘气溶胶消光效应最强的地区.地面观测结果(图4)也显示4月9~10日期间,该地区多个站点首先出现了沙尘暴和强沙尘暴天气,模式模拟的过程平均垂直起沙通量(图6)分析也表明,塔克拉玛干地区是这次强沙尘暴天气最为重要的沙尘源地,进一步说明模式起沙方案在这一地区是适用地.就起沙量和沙尘暴强度而言,SDS2与SDS3相当,但与SDS3相比,SDS2对下游地区的影响显著偏弱,输送的距离也比较短.其主要原因在于,塔克拉玛干沙漠位于盆地之中,周围都是海拔3000 m以上的

山脉,该地的沙尘越过高山向下游传播的难度较大.DS2的情况与SDS2有类似之处,但是强度比SDS2明显偏弱,模式模拟光学厚度和TOMS AI同样一致显示了塔克拉玛干沙漠是该次沙尘暴过程的主要源地和影响中心,这进一步表明,对于发生于塔克拉玛干地区的较弱的沙尘暴过程,模式仍然具有很好的模拟能力.模式模拟的SDS1,DS1,DS3,DS4(图3)4次沙尘天气过程平均的AOD与TOMS AI同样表现出了非常好的一致性.由此可见,对于强沙尘暴和强度相对弱一些的沙尘暴过程,GRAPES-CUACE/Dust对其时间和空间尺度上的整体描述都与观测比较吻合,模式预报结果是可以接受的.

由于如上所述TOMS AI对近地层气溶胶探测的限制,也因为人们对模式近地面沙尘天气的预报能力以及预报时效的准确性更为关心.我们将模式预报2006年4月7次沙尘暴过程72 h之内的地面沙尘浓度和每隔3 h一次的地面天气现象观测进行了详细的对比分析,在此,为了更为详细地说明模式对沙尘暴天气开始、加强、输送过程和路径以及逐渐减弱直至消失这一过程的预报和描述能力,本文以2006年4月最强的一次沙尘暴SDS3为主进行分析(图4).从图4中可以看出,4月16日上午格林威治时间03时,该次强沙尘暴天气开始于 $95^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 的蒙古南部、中蒙边界和内蒙古中北部地区,模式对沙尘暴过程开始的时间和出现的区域均做出了准确预报,在随后的03~12时内,沙尘天气逐渐加强并向下游输送,09时蒙古国南部、中蒙边界和内蒙北部的多个台站地面天气观测为沙尘暴和强沙尘暴天气,模式预报地面的沙尘浓度也在这一时间达到最大,而且大于 $5000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域与观测的强沙尘暴地区吻合得非常好.12时以后,受到地面风场日夜变化的影响,地面观测显示沙尘天气明显减弱,区域缩小.模式模拟16日18时到17日00时地面沙尘浓度也比16日白天明显降低、沙尘覆盖区域缩小,表明模式的起沙和沉降过程能够跟随动力过程一起很好地描述沙尘天气的日夜变化,16日夜沙尘暴在减弱的同时继续向东南方向输送,17日00时模式预报和观测都显示沙尘天气已经输送到中国东部地区,中国中、东部部分地区出现了浮尘和扬沙天气.17日白天,观测显示,沙尘天气又有所加强,中国中部部分地区

图 4 地面沙尘浓度(阴影部分)与天气现象观测(数字)的对比

图中数字: 1, 浮尘; 2, 扬沙; 3, 沙尘暴; 4, 强沙尘暴

出现了沙尘暴和扬沙天气. 模拟结果在这些区域的地面沙尘浓度也于 17 日白天有所加强, 观测和模拟均显示沙尘输送至中国东部沿海和朝鲜半岛的西部. 17 日夜到 18 日, 沙尘天气继续向东输送, 18 日 03 时到 06 时, 朝鲜半岛和日本岛均出现浮尘天气, 模式预报 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的沙尘区也到达该地区. 通过以上对比分析可以看出, 模式很好地预报了 2006 年 4 月 16~18 日这次沙尘暴过程发生、发展、向下游输送以及减弱直到逐渐消失的过程. 模式预报沙尘天气的时效、输送路径和昼夜周期变化都与观测非常一致. 对于其他几次沙尘天气, 我们同样对比了模式模拟地面沙尘浓度和地面观测, 得到了与 2006 年 4 月 16~18 日相似的结果. 从地面沙尘预报来看, 72 h 之内 GRAPES-CUACE/Dust 对沙尘天气预报与观测具有非常高的一致性, 模式预报性能良好.

同时, 我们也应该注意到, 无论是与 TOMS AI 气溶胶指数的对比还是与地面天气观测的对比, 都显示模式存在如下方面的不足之处. 首先, 模式对中国西部地区的浮尘天气存在漏报, 这种漏报现象在模式启动早期其他地区也偶有出现(图略), 表现为与 TOMS AI 气溶胶和地面观测的对比光学厚度在该地区明显偏小. 由于目前模式沙尘浓度初始场为零, 在模式起报的时候如果某些地区已经或正处于浮尘天气, 这些浮尘天气就会漏报. 对这种情况的改进和处理实际上就是如何给定合理的沙尘浓度初始场的问题. 利用卫星反演的沙尘指数同化沙尘浓度是解决该问题的一个合理方案. 有关这部分工作, 我们将在下一篇文章中给出详细的讨论和效果检验. 其次, 为了提高模式的定量预报精度, 我们还应该在模式预报地面浓度与 PM_{10} 定量对比以及与雷达资料对比沙尘的垂直分布两方面作更多工作.

2.3 沙尘排放源

按照所在地理位置和对下游的影响, 可将东亚地区的主要沙尘源区分为 3 部分, 即蒙古国南部、中蒙边界和内蒙古中部的戈壁沙漠地区(沙尘源 1)、新疆塔克拉玛干沙漠(沙尘源 2)和内蒙古东北部的浑善达克沙地附近地区(沙尘源 3)(图 5). 这些地区的海拔高度和周边地区地形差异都比较大. 中蒙边界及附近地区海拔高度在 1000~2000 m 之间, 周边为开阔的草原、戈壁, 这一地区位于蒙古气旋的主要生成地和移动路径上, 是东亚地区最重要的沙尘源地. 塔克

图 5 沙尘源区和地形高度(阴影)

拉玛干沙漠面积远大于中蒙边界沙漠, 位于新疆盆地, 海拔高度比较低, 且周边都是海拔在 3000~5000 m 的高山, 只有东北部地势略低, 有一条狭窄的通道与下游相通. 这样的地形限制了沙尘向下游地区输送. 与以上两个沙尘源相比, 浑善达克沙地是面积最小的沙漠, 它距离下游地区最近, 虽然海拔高度也仅在 1000 m 左右, 但是与下游地区的地形高度落差很大, 加之该沙漠位于西北和偏北路径冷空气的交叉处, 很容易起沙, 给下游地区造成显著影响.

本文计算了 2006 年 4 月 7 次沙尘天气过程平均的垂直起沙通量(图 6). 从中可以看出, 7 次沙尘暴和强沙尘暴天气中, SDS 1, SDS 3, DS 1, DS 3 和 DS 4 等 5 次沙尘天气的主要源区均为沙尘源 1, 表明 2006 年 4 月, 位于蒙古国、中蒙边界和内蒙古的沙漠戈壁是东亚地区的主要沙尘排放源. 过程平均的气溶胶指数和光学厚度(图 1)也一致显示这几次沙尘天气对下游地区的影响也都非常大, 说明沙尘源 1 不仅是最为重要的沙尘源地, 而且源于该地区的沙尘对下游的影响也最为严重. 从图 6 中可以看出, 强沙尘暴 SDS 2 的沙尘源区是沙尘源 1 和沙尘源 2 共同组成. 从过程平均的起沙通量来看, 对这次尘暴过程沙尘源 2 的贡献明显大于沙尘源 1, 沙尘源 3 对这次沙尘暴过程也有部分影响. 从起沙强度考虑, 虽然这次沙尘暴的强度和 SDS1 相当, 但是由于该次尘暴最主要的沙尘排放源位于塔克拉玛干沙漠, 由于四周山脉阻挡了沙尘向下游地区输送, 地面观测到的强沙尘暴天气(图 4)、TOMS AI 气溶胶指数和模式预报的气溶胶光学厚度(图 3)的大值区都一致集中

图 6 2006 年 4 月 7 次主要沙尘天气过程平均起沙通量($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{s})$)

在塔克拉玛干沙漠. 与 SDS 1 相比, SDS 2 对下游地区的影响相对较小. 值得注意的是, 位于内蒙古东北部的浑善达克沙地(沙尘源 3), 虽然它的面积很小, 但它对 SDS 1, SDS 2, SDS 3 三次强沙尘暴和 DS 2 与 DS 4 两次沙尘暴过程的沙尘排放都有贡献, 而且起沙强度比较大. 由于它与中国东部下游地区的距离很近, 对下游的影响不可忽视. 从模式对这 7 次沙尘暴过程平均起沙通量的分析来看, 3 次强沙尘暴过程, 其中两次沙尘过程的主要排放源是沙尘源 1, 一次沙尘过程沙尘源 1 和沙尘源 2 是共同的源地. 沙尘源 3 虽然面积很小, 但对 3 次强沙尘暴过程的起沙量都有一定贡献.

为了进一步评估 2006 年 4 月东亚地区沙尘的排放情况以及 3 个沙尘源区对 2006 年 4 月 7 次主要沙尘天气的贡献, 本文计算了这 3 个地区 7 次沙尘天气累计起沙通量以及它们各自所占整体沙尘排放量的百分比, 结果表明, 2006 年 4 月东亚地区的主要沙漠共向大气中注入沙尘总量约为 2.25 亿吨, 考虑春季是全年沙尘天气爆发的主要季节, 而 4 月又是春季沙尘天气发生最为频繁和严重的时段, 这一估算值与文献[27]中对同一地区 8 亿吨每年排放量的估算结果相比, 比较一致. 在 2006 年 4 月的 2.25 亿吨沙尘排放量中, 蒙古国、中蒙边界和内蒙古的沙漠、沙地向大气中排放的沙尘量最大, 为 1.53 亿吨, 大约占总排放量的 68%, 塔克拉玛干沙漠第二, 约为 3800 万吨, 占排放总量的 17%, 浑善达克沙地排放最少, 约 1500 万吨, 占 7%. 其他地区沙漠和废弃的耕地等仅占排放总量的 8%.

由此可见, 无论从沙尘天气发生的频率还是沙尘排放总量来看, 位于中国北部及中蒙边界的沙尘源区都是东亚地区最为重要的沙尘源地, 而且该地区刚好位于引起沙尘暴天气的蒙古气旋的移动路径上, 是西北和偏北路径的冷空气必经之地, 加之与下游地区的地形落差, 源于此地的沙尘粒子很容易伴随冷空气东移南下, 造成中国中东部甚至更远的下游地区的沙尘天气, 是中国乃至东亚地区最为重要的沙尘排放源. 塔克拉玛干作为世界第二大沙漠, 中国和东亚地区的第一大沙漠, 2006 年 4 月向大气中排放的沙尘量只占东亚地区沙尘排放总量的 17%, 可能是由于该地区盆地地形的影响, 冷空气爆发的频率低、强度比较弱, 地面风速也比较小, 特别是该地

区以及周边地形不利于沙尘向下游输送, 发生在该地区的沙尘天气主要是对新疆盆地及其附近地区造成较大影响, 只有当天气系统能够将沙尘粒子输送到 3000 m 以上的高空, 沙尘粒子才可能越过其东部的山脉, 影响到下游地区. 在本文分析的 3 个沙尘源中, 浑善达克沙地的沙尘排放量最低, 仅为沙尘总排放量的 7%, 但是其起沙的频率很高, 从起沙通量来看, 起沙强度大, 排放总量低的主要原因是因为它的沙漠面积小, 考虑该地位于偏北和东北冷空气移动路径的交叉口, 且与下游地区的距离近, 地形落差大, 对下游地区特别是中国东部的影响应该引起重视.

图 7 三个沙尘源起沙量所占起沙总量的百分比

2.4 干、湿沉降

沙尘沉降量表示沙尘粒子在一定时间和区域内从大气中沉积到地面的状况. 它最为直接地体现了沙尘天气对近地面大气层的影响和沙尘粒子在大气中的输送距离, 是最受关注的物理量之一. 但是, 由于各种技术上的原因, 目前的观测和模拟都很少描述东亚地区沙尘沉降的整体情况以及其时空分布概念. 气溶胶的沉降过程包括干沉降、云中清除和降水冲刷(湿沉降)两部分. 有关这部分气溶胶过程详细计算方案的描述, 请参考文献[25,35]. 本文计算了模式模拟域内 2006 年 4 月 7 次主要沙尘天气干、湿沉降和沉降量的总和, 并分析了它们的空间分布特征, 希望籍此对东亚地区沙尘天气发生最为频繁的 4 月的沙尘沉降给出一个初步的概念模型.

计算结果表明, 2006 年 4 月在 $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 的东亚地区, 沙尘沉降总量为 1.36 亿吨, 其中干沉降为 1.27 亿吨, 大约占总沉降的 94%, 湿沉降量只有 800 多万吨, 仅占沉降总量的 6% 左右. 可见, 干沉降基本能够代表沉降总量的分布状况. 分析干沉降的空间分布图(图 8(a))发现, 中国和东亚地区的沙

尘绝大部分集中沉降在 3 个主要的沙尘源地, 在中国中东部以及近海地区也具有比较明显的沉降, 中国海以东地区的沉降非常小. 进一步对不同地区的沉降量计算表明(图(9)), 3 个沙尘源地的沉降总量为 1.35 亿吨, 占到了沉降总量的 78%左右, 其次, 120 °E 以西沙尘源地以外的中国大陆地区, 沉降量为 200 多万吨, 占沉降总量的 16%, 只有大约 85 万吨的沙尘在 120 °~140 °E 之间的中国东部沿海、韩国日本, 以及太平洋西部洋面沉降, 仅占模拟域内沉降总量的 6%左右. 由此可见, 2006 年 4 月, 大约 94%的沙尘粒子沉降在 120 °E 以西的中国大陆地区, 东亚沙尘对 120 °E 以东下游地区和洋面的影响相对比较小.

由于 4 月中国北方大部分地区正好处于春季干旱季节, 云量和降水都非常小, 特别是沙漠及其附近地区, 大部分地区月降水总量不足 1 mm, 所以与干沉降相比, 湿沉降量非常小, 仅占沉降总量的 6%左右. 湿沉降与干沉降呈现出完全不同的分布特点(图 8(b)), 出现两个湿沉降中心, 一个位于中国东北部到朝鲜半岛以及日本以西海面, 这主要是因为这一地区比北部沙漠源区空气湿度大, 云量相对周边地区偏多, 而且在 4 月 16~18 日该地区还出现了小雨天气, 导致湿沉降的发生. 在新疆盆地附近地区也出现了一个湿沉降中心, 可能主要是由于塔里木地区盆地云的存在导致湿沉降的产生. 关于湿沉降及其成因的进一步分析, 将在后续文章中进行更为详细的讨论.

3 总结和讨论

本文基于中国新一代全球/区域同化、预报系统(Grapes)的区域预报模式(Grapes_meso)和中国气象科

图 9 不同地区沉降量比例饼图

学研究院大气成分中心研发的 CUACE/Dust 大气化学模块, 建立了中尺度沙尘预报系统 GRAPES-CUACE/Dust. 模式采用了正定保型性能良好的半隐式-半拉格朗日输送方案. 质量守恒检验表明模式在积分过程中的质量守恒性能良好. 本文针对东亚地区的天气、气候背景, 对模式的物理过程方案进行了优化和选择. 模式包含了非常详细的气溶胶过程. 最新中国地区土地沙漠化资料、实时卫星反演雪盖资料的引入使得模式起沙过程更为合理. 将 2006 年 4 月主要沙尘天气的模拟结果与地面天气观测和 TOMS AI 气溶胶指数进行对比表明, 模式整体性能良好, 能够很好描述沙尘暴过程发生、发展、向下游输送以及减弱直到逐渐消失的整个过程. 预报沙尘天气的时效、输送路径以及沙尘天气的昼夜强弱的周期变化都与观测非常一致.

基于 GRAPES-CUACE/Dust 沙尘预报系统对 2006 年 4 月的主要沙尘天气以及起沙和沉降等过程进行分析, 结果表明: 2006 年 4 月共发生 7 次主要沙尘天气, 这 7 次沙尘天气共向大气中注入沙尘总量约为 2.25 亿吨, 其中以中蒙边界附近沙漠为主, 约

图 8 2006 年 4 月干(a)、湿沉降(b)的分布(kg/m²)

为 1.53 亿吨, 占沙尘排放总量的 68%, 塔克拉玛干沙漠第二, 3800 万吨, 占沙尘排放总量的 17%, 浑善达克沙地约 1500 万吨, 仅占沙尘排放总量的 7%, 其他地区的沙尘排放共占 8%。沙漠源区同时也是沙尘的主要沉降区, 三大源区的沙尘沉降大约占据沉降总量的 78%, 源区下游的中国大陆地区, 占沙尘沉降总量的 16%, 120°E 以东的中国近海、韩国、日本以及西太平洋地区沉降量很小, 只占总沉降量的 6% 左右。由于中国北部 4 月干燥少雨, 在 2007 年 4 月的沙尘沉降量中, 以干沉降为主, 占沉降总量的 94%, 湿沉降很少, 只占沉降总量的 6%, 主要集中在新疆盆地附近和中国东北部到朝鲜半岛以及日本以西海面。

同时, GRAPES-CUACE/Dust 也存在如下方面的不足: 模式在启动初期对中国西部地区和其他个别地区的浮尘天气存在漏报情况。这主要是因为模式

采用零初始场, 不包括新疆西部境外沙尘源, 因此在模式启动初期, 对于模式启动时就已经存在的或模式启动后由模拟域以外上游地区输送而造成的浮尘天气势必会出现漏报, 解决此问题的关键是在模式启动时将有关沙尘天气的观测资料同化到模式的初始场代替沙尘浓度的零初始场。目前, 将适时卫星资料进行同化并引用到模式预报系统的工作正在进行, 相关计算方案和结果将在另外一篇论文中进行详细说明。另外, 对于模式预报结果定量观测的检验仍然欠缺, 特别模式预报地面沙尘浓度与 PM₁₀ 和激光雷达资料的对比以进一步优化和改进模式对地面沙尘浓度以及沙尘垂直分布的预报能力的工作急需进行, 与此相关的工作不仅能够提高和改进模式的预报精度, 也是准确计算沙尘辐射效应以及评估沙尘辐射效应对短期天气系统反馈机制的前提和基础。

参考文献

- 1 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响. 科学通报, 2001, 46: 191—197
- 2 韩永翔, 宋连春, 赵天良, 等. 北太平洋地区沙尘沉降与海洋生物兴衰的关系对海洋生物的影响. 中国环境科学, 2006, 26: 157—160
- 3 Wang Z, Akimoto H, Uno I. Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: Observations and model results. J Geophys Res, 2002, 107: 4389[doi]
- 4 Carlson T N, Benjamin S. Radiative heating rates for Sahara dust. J Atmos Sci, 1980, 37: 193—197 [doi]
- 5 王宏, 石广玉, 王标, 等. 中国沙漠沙尘气溶胶以及北太平洋地区大气的辐射加热特征. 大气科学, 2007, 31: 515—526
- 6 王宏, 石广玉, Teruo A, 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
- 7 Claquin T. Uncertainties in assessing the radiative forcing by mineral dust. Tellus Ser B, 2000, 50: 491—505[doi]
- 8 Duce R A. Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. In: Charlson R J, Heintzenberg J, eds. Aerosol Forcing of Climate. New York: John Wiley, 1995. 43—72
- 9 Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Forcing and chaos in interannual to decadal climate change. J Geophys Res, 1997, 102: 25679—25720[doi]
- 10 Sokolik I N, Winber D M, Bergametti G, et al. Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust. J Geophys Res, 2001, 106: 18015—18027[doi]
- 11 Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. Nature, 1996, 380: 419—422[doi]
- 12 Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the Atmosphere: Sources transport and optical thickness. J Geophys Res, 1994, 99: 22897—22914[doi]
- 13 Tegen I, Hollrig P, Chin M, et al. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. J Geophys Res, 1997, 102: 23895—23916[doi]
- 14 Takemura T, Nakajima T. Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. J Clim, 2002, 4: 333—352[doi]
- 15 Toon O B, Turco R P, Westphal D, et al. A multidimensional model for aerosols, description of computational analogs. J Atmos Sci, 1998, 45: 2123—243[doi]
- 16 Nickovic S, Dobricic S. A model for long-range transport of desert dust. Mon Weather Rev, 1996, 124: 2337—2345
- 17 Westphal D, Toon O B, Carlson T N. A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms. J Geophys Res, 1987, 92: 327—3049
- 18 Prospero J M. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the Southeastern United States. Proc Natl Acad Sci USA, 1999, 99: 3396—3403[doi]

- 19 Kalma J D, Speight J G, Wasson R J. Potential wind erosion in Australia: A continental perspective. *J Atmos Sci*, 1988, 8: 411—428
- 20 Husar R B. Asian dust events of April 1998. *J Geophys Res*, 2001, 106: 18317—18330[[doi](#)]
- 21 Wang Z, Ueda H, Huang M. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia. *J Geophys Res*, 2000, 105: 26947—26960[[doi](#)]
- 22 Lasserrea F, Cautenera G, Alfarob S C, et al. Development and validation of a simple mineral dust source inventory suitable for modelling in North Central China. *Atmos Environ*, 2005, 39: 3831—3841[[doi](#)]
- 23 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究. *气候与环境研究*, 2002, 7: 279—294
- 24 成丛兰, 王迎春, 刘维东, 等. 与动力场相耦合的区域沙尘分档模式及个例模拟. *科学通报*, 2004, 49: 2007—2013
- 25 Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia:2. Model simulation and validation. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4262 [[doi](#)]
- 26 Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification Asian dust emission. *J Geophys Res*, 2003, 30: 2272 [[doi](#)]
- 27 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积. 第四纪研究. 2001, 21: 29—40
- 28 杨学胜, 陈嘉滨, 胡江林, 等. 全球非静力半隐式半拉格朗日模式及其极区离散处理. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 1267—1272
- 29 庄世宇, 薛纪善, 朱国富, 等. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验. *大气科学*, 2005, 29: 872—884
- 30 Staniforth A, Cote J. Semi-Lagrangian integration scheme for atmospheric models——A review. *Mon weather Rev*, 1991, 119: 2206—2223[[doi](#)]
- 31 Arakawa A, Lamb V R. Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Model. *Methods in Computational Physics, General Circulation Models of the Atmosphere*. New York: Academic Press, 1997. 1—17
- 32 Charney J L, Philips N A. Numerical Integration of the quasi-geostrophic equations for barotropic and simple barotropic flow. *J Meteorol*, 1953, 10: 71—99
- 33 Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon Weather Rev*, 1996, 124: 2322—2339[[doi](#)]
- 34 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. GRAPES 新一代全球/区域尺度统一数值预报模式总体设计研究. *科学通报*, 2008, 53: 2396—2407
- 35 Gong S L, Zhang X Y. CUACE/Dust — An integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 2333—2340
- 36 Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 787—798
- 37 Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model. *NCAR Technical*, 1993. 1—69
- 38 Yang Y Q, Hou Q, Zhou C H, et al. Sand/dust storm processes in Northeast Asia and associated large-scale circulations. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 25—33
- 39 张小曳, 龚山陵. 2006 年春季的东北亚沙尘暴. 北京: 气象出版社, 2006. 1—118
- 40 Herman J R, Bhartia P K, Torres O, et al. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16911—16922[[doi](#)]