

亚洲大陆 2000~2002 年春季大气沙尘时空特征的数值模拟

陈广善^{1,2}, 刘晓东¹, 陈葆德³

(1. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. NASA 戈德达航天中心, 马里兰 20771, 美国)

摘要:将矿物沙尘释放与沉降模式和全球大气化学传输模式相耦合, 建立了一个能够完整描述沙尘的扬起、输送和沉降动态过程的模式系统, 并利用实时气象资料强迫该模式, 对 2000、2001 和 2002 年春季(3~5 月)亚洲大气沙尘时空特征进行了数值模拟研究。结果表明, 模拟的 3 年春季平均大气柱沙尘浓度分布与地面观测的 3 年春季平均沙尘暴频率分布范围基本吻合, 模拟的沙尘气溶胶光学厚度与卫星观测的气溶胶指数具有显著的相关性, 验证了该模式对亚洲沙尘的扬起、传输和沉降过程及大气沙尘载荷时空特征有较好的模拟能力, 并基于模拟的沙尘释放通量与沙尘气溶胶光学厚度的相关分析, 探讨了亚洲沙尘可能的传输路径。

关键词:大气沙尘; 气溶胶指数; 沙尘气溶胶光学厚度; 数值模拟

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2006)01-0001-08

Numerical Simulations of Spatial and Temporal Characteristics of Airborne Dust over Asia During Springs of 2000 to 2002

CHEN Guang-shan^{1,2}, LIU Xiao-dong¹, CHEN Bao-de³

(1. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. NASA Goddard Flight Center, Maryland 20771, USA)

Abstract: Spatial and temporal characteristics of airborne dust over Asia during springs of 2000, 2001 and 2002 were simulated with a mineral dust entrainment and deposition model (DEAD) embedded in a global model of atmospheric transport and chemistry (MATCH) using the real-time meteorological data as forcing fields. The results show a good agreement of the pattern of model-simulated atmospheric dust concentration with the distribution of surface-observed spring dust storm frequency and a significant correlation between the simulated dust aerosol optical depth (DAOD) and satellite-observed aerosol index (AI). These results validate applicability of the integrated model in simulating dust entrainment, transportation and deposition and describing spatial and temporal characteristics of dust loading over the Asian continent. In addition, an attempt was made to explore possible paths of dust transportation by use of correlation analyses between the simulated dust emission flux (DEF) and DAOD.

Key words: airborne dust; aerosol index; dust aerosol optical depth; numerical simulation

沙尘气溶胶是地球气候系统的重要成分, 它不仅对局地大气环境质量有直接影响^[1], 而且通过调节地球热力平衡^[2], 海洋生物生产率^[3], 对全球或区域气候变化有重要贡献。亚洲的干旱半干旱地区是全球除撒哈拉沙漠地区以外最重要的沙尘源地, 而以我国的塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠为主体的沙漠及其周边地区为亚洲沙尘的 2 个主要源区^[4]。大气中沙尘含量的变化与地面沙尘暴活动密切相关。据研究^[5,6], 最近几十年亚洲沙尘暴(主要发生在每年春季)频数总体呈波动下降趋势, 但从 90 年代后期开始回升, 2000~2002 年达到近十几年之最。鉴于沙尘天气的严重危害, 许多科学家已经利用卫星遥感^[7~9]和数值模拟^[10,11]等手段开展了与沙尘暴相关的研究工作。但以往的观测和模拟研究主

要集中在沙尘暴个例的分析研究上, 对沙尘平均状态和时空变化的模拟研究相对较少。

本文利用一个全球大气化学传输模式(Model of Atmospheric Transport and Chemistry, MATCH)^[12]与一个沙尘释放与沉降模式(Dust Entrainment And Deposition model, DEAD)^[13]进行耦合, 建立能够描述沙尘的扬起、输送和沉降动态过程的模式系统 MATCH-DEAD, 利用该模式对 2000~2002 年春季亚洲沙尘气候状况进行模拟, 重点研究亚洲地区大气沙尘时空变化的平均状态。还将模

收稿日期: 2005-01-15; 修订日期: 2005-08-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB720208); 国家自然科学基金项目(40472086, 40121303)

作者简介: 陈广善(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事气候与环境数值模拟研究。

拟输出与地面观测资料和卫星观测的气溶胶指数 (Aerosol Index, AI) 进行对比分析以验证模拟结果, 同时利用模拟的沙尘释放通量 (Dust Emission Flux, DEF) 和沙尘气溶胶光学厚度 (Dust Aerosol Optical Depth, DAOD) 的滞后相关来探讨中国北部关键区大气沙尘可能传输路径。

1 模式与资料

1.1 模式描述

本文所建立的 MATCH-DEAD 模式系统有关

沙尘活动的模拟共有 3 个模块: 起尘模块、输送模块和沉降模块 (图 1)。MATCH 模式为主模式, 提供输送模块。DEAD 模式为子模式, 提供起尘模块和沉降模块。将 DEAD 模式与 MATCH 模式耦合后, 起尘模块、沉降模块和输送模块同步进行积分, 起尘模块根据地形、土壤性质、地表特征等计算出沙尘垂直通量, 并把沙尘垂直通量提供给输送模块, 输送模块根据大气状况进行水平和垂直输送, 并调用沉降模块对所携带的沙尘进行沉降, 同时计算出每个格点的瞬时平均沙尘浓度 (图 1 中虚线所示)。

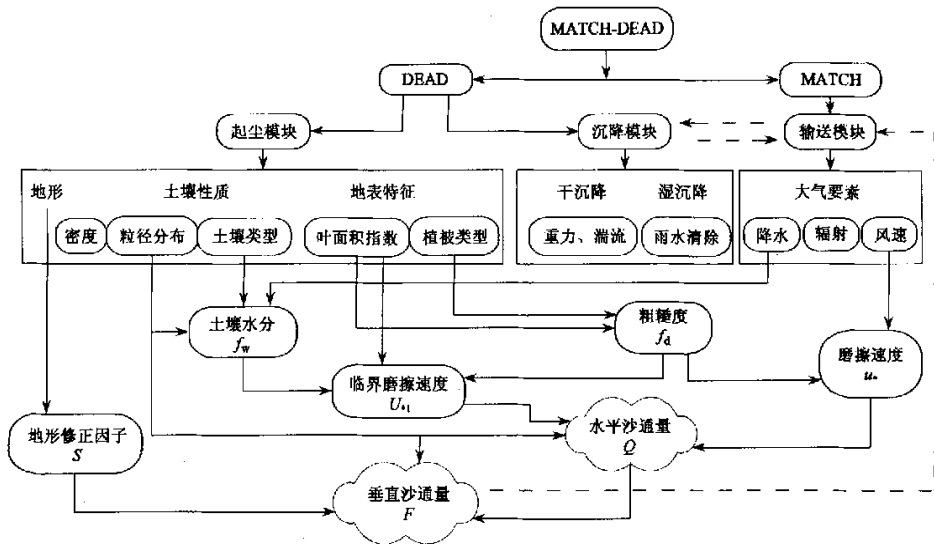


图 1 沙尘模式流程

Fig. 1 The flow chart of the dust model

1.1.1 MATCH 模式

MATCH 模式是一个用来模拟大气化学成分以及其它示踪物在大气中传输的模式。MATCH 模式的主体是一个时间积分模块, 在积分过程中输入的气象和地面数据将被插值到模式时间步长上, 同时完成示踪物在传输过程中的物理和化学过程的参数化, 同时作为主模式也为 DEAD 模式提供一些必要的物理量, 如风场、长波辐射和短波辐射、土壤湿度等。传输过程主要包括与行星边界层的混合过程、浅对流输送过程、深对流输送过程以及平流输送过程。沙尘在 MATCH 模式中被作为一种不与其它成分发生化学反应的示踪物进行传输。由于 MATCH 模式是一个应用较为广泛并成功模拟多种示踪物在大气中传输的模式, 详细介绍可参阅文献[12], 此处不再赘述。

1.1.2 DEAD 模式

DEAD 模式是一个用来模拟与沙尘天气过程相关的沙尘释放和沙尘沉降的模式。模式最大的特点是考虑了地面与大气之间的热、水汽以及动量交换对边界层的动力运动和热运动的影响, 在考虑地形影响时引入了一个地形修正因子 S , S 正比于每一个源区的上游径流面积, 以增强模式的模拟能力。DEAD 模式包括起尘模块和沉降模块, 关于 DEAD 的完整描述参见文献[13], 这里仅作简单介绍。

起尘模块采用 Gillette^[14] 的起沙机制。该机制认为摩擦速度 (u_*) 大于临界摩擦速度 (u_{*c}) 时可以起尘。在本研究中, 临界摩擦速度的计算采用如 (1) 式方法:

$$u_{*c} = u_{*c0} \times f_d \times f_w \quad (1)$$

式中, u_{*c} 为临界摩擦速度, u_{*c0} 为粒径 D 的单一粒子经过裸露、干燥、松散的土壤表面时的临界摩擦速度, f_d 、 f_w 分别代表地表粗糙度和地表含水率对

$u_{s,0}$ 的影响。 $u_{s,0}$ 的计算公式采用 Iversen 和 White^[15]提出的半经验参数化方案。

沙尘源区粒子粒径 D 分布分为 3 个模态^[16], 大气沙尘只考虑了对长距离输送有意义的 4 个粒径

组^[17](表 1)。表 1 中 D_{\min} 、 D_{\max} 表示每粒径组内的粒子粒径的最小值和最大值, \bar{D}_v 为中值粒径, σ_g 为几何标准偏差, φ_s 为雨水的清除系数, φ_e 为消光系数, M_j 为每个粒径组传输沙尘质量百分比。

表 1 输送粒径及各粒径的特征参数

Table 1 Transport bins and sub-bins distribution parameters

分组	$D_{\min}/\mu\text{m}$	$D_{\max}/\mu\text{m}$	$\bar{D}_v/\mu\text{m}$	σ_g	$\varphi_s/\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$	$\varphi_e/\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$	$M_j/\%$
1	0.1	1.0	2.524	2.0	2.834 + 03	2.893 + 03	3.2
2	1.0	2.5	2.524	2.0	7.779 + 02	8.350 + 02	17
3	2.5	5.0	2.524	2.0	3.343 + 02	3.852 + 02	41
4	5.0	10.0	2.524	2.0	1.705 + 02	1.961 + 02	38

当 u_s 大于 $u_{s,t}$ 时,起尘模块针对 3 个源区模态和 4 个输送粒径组利用公式(2)和公式(3)计算出源区沙尘的水平通量 $Q_s[(\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1})]$ 和各粒径组的垂直通量 $F_{d,j}[(\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1})]$:

$$Q_s = \frac{c_s \rho u_s^3}{g} \left(1 - \frac{u_{s,t}}{u_s}\right) \left(1 + \frac{u_{s,t}}{u_s}\right)^2 \quad (2)$$

$$F_{d,j} = TA_m Sa Q_s \sum_{i=1}^j M_{i,j} \quad (3)$$

公式(2)中, $c_s = 2.6$, 为经验常数, ρ 是空气密度, g 为重力加速度。公式(3)中, $F_{d,j}$ 为第 j 粒径组的垂直沙尘通量, $T = 7.0 \times 10^{-4}$ 为模式调整参数, A_m 为某个栅格内裸露地表的百分比, S 为新引入的地形修正因子, $M_{i,j}$ 为第 j 粒径组携带源区第 i 模态粒子的质量百分比, α 为水平跃移的溅射系数^[18]。对 $F_{d,j}$ 进行时间步长积分,便可求得大气柱沙尘浓度 $M_P(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 。下文均称 M_P 为沙尘浓度。

沉降模块包括干沉降过程和湿沉降过程。干沉降过程中沙尘颗粒主要受本身的重力作用和大气湍流作用,干沉降通量 $F_D[(\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1})]$:

$$F_D = \frac{V_d g M_P}{R_d T} \quad (4)$$

式中, V_d 为沙尘的干沉降速度, R_d 为干空气气体常数, T 为绝对温度。

湿沉降过程中沙尘颗粒主要受雨滴成核作用和雨水冲刷作用,湿沉降通量 $F_W[(\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1})]$:

$$F_W = AP_M \bar{A}_M M_P \quad (5)$$

式中, A 为某栅格内发生湿沉降过程的百分比, $P_M[(\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1})]$ 为局地水蒸气转变成水滴的比率, $\bar{A}_M = 0.01 \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$, 为柱状清除系数^[19]。进入 MATCH 输送模块的大气沙尘垂直通量 $F_t = F_{d,j} + F_D + F_W$ 。

此外,模式还输出了沙尘气溶胶在波长 λ 为 $0.63\mu\text{m}$ 波段上的光学厚度 τ_λ , 其计算公式为:

$$\tau_\lambda = \sum_{i=1}^I \varphi_{ei} M_{Pi} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中, $\varphi_{ei}(\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1})$ 为表 1 中所列出的第 i 个输送粒径组的消光系数, $M_{Pi}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 为模式所计算出的第 i 个输送粒径组的沙尘浓度。

1.2 资料

利用 2000~2002 年每年 2~6 月份经过 4 维同化处理的 NCEP/NCAR (National Center for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR) 再分析实时资料作为模式的初始和边界条件,驱动 MATCH-DEAD 模式运行。所用 NCEP/NCAR 资料的水平分辨率为 T62(相当于 1.888° 纬度 $\times 1.875^\circ$ 经度),垂直方向上为 28 层,每 6 h 更新 1 次。

地面观测资料分别为 Shao 和 Wang^[20] 利用 2000~2002 年春季气象记录分析得到的亚洲沙尘暴事件频率分布图。所利用的气象数据为 (72°E , 5°N) 和 (148°E , 55°N) 范围内所有站点每隔 3 h 的气象资料。以及周自江和章国材^[5] 利用 1954~2002 年全国 681 个基本气象站逐日观测资料给出的中国北方典型强沙尘暴事件和强沙尘暴站点资料。

卫星观测资料是由美国宇航局搭载在极轨卫星 Nimbus 7 上的 TOMS 传感器 (Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS) 获得的气溶胶指数 (AI), 气溶胶指数算法见文献[8]。所用 AI 数据水平范围覆盖全球,分辨率为 1° 纬度 $\times 1.25^\circ$ 经度,每日 1 次,所用资料长度为 3 年 (2000-01-01~2002-12-31)。

1.3 试验设计

模式运行时间为每年 02-15~06-01,模式的平衡时间约为 15 d,有效输出结果为每年 03-01~05-31。模式时间步长设计为 30 min,积分过程中每 24 h 输出 1 次,其输出结果为日平均值。将所有输出结果的平均值作为 3 年春季平均值。

2 结果与讨论

2.1 沙尘浓度

由于沙尘浓度没有常规的观测资料,只有一些

点的观测数据,很难与模拟的沙尘浓度分布直接比较,因此,将模拟的3年春季平均沙尘浓度分布与同期由气象记录分析得到的亚洲沙尘暴事件频率分布^[20]进行对比(图2)。

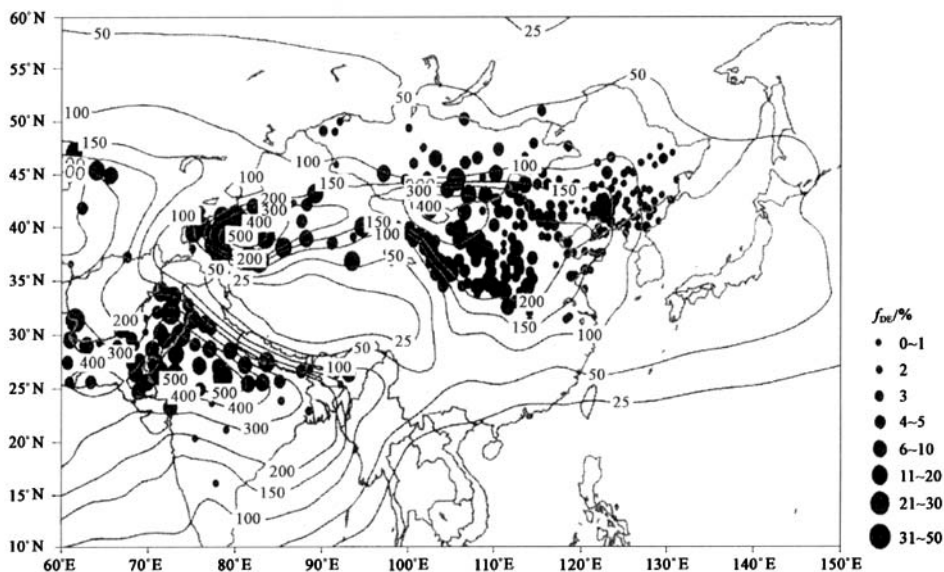


图2 模拟的3年春季平均大气柱沙尘浓度(曲线,单位 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)和实测的沙尘暴发生频率(黑点,据文献^[20]改绘)分布

Fig.2 Simulated column dust concentration (contour, unit: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) and observed distribution of dust-storm frequency (black dots, adapted from ^[20]) averaged for springs of 2000 to 2002

图2是模拟的亚洲3年春季平均沙尘浓度与实测沙尘暴事件频率分布图,图中黑点的大小代表着沙尘暴发生频率值的大小。由黑点的分布情况可以看出亚洲地区沙尘暴多发区大致可分为3个区:塔克拉玛干周边地区,巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠周边地区,印度半岛的北部地区。模拟出的亚洲3年春季平均沙尘浓度曲线也有3个高值区,且这3个高浓度区位置和范围与3个沙尘暴多发区的位置和范围具有很好的一致性,其中印度北部和塔克拉玛干的沙尘浓度中心值超过 $500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠周边地区沙尘浓度中心值稍偏低为 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。需要指出的是,在改绘亚洲沙尘暴频率分布图时,略去了韩国和日本地区的分布情况。因为由于沙尘暴事件的分类标准不同,可能导致了韩国和日本地区记录了过多的沙尘暴事件^[20]。

2.2 沙尘的释放与沉降

图3a为模拟的3年春季平均沙尘释放通量(DEF)。由图3可见,亚洲地区主要沙尘源区有印度半岛北部、以塔克拉玛干沙漠为主的中国西部沙漠

区(1区)、以巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠为主的中国北部沙漠区(2区)。其中中国北部沙漠区DEF值最大,达到 $10 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以上,有效起尘面积也最大。模式模拟的中国西部和北部沙尘释放区与 Zhang 等^[4,21]基于元素示踪和周自江^[5]基于实际观测数据分析得到的中国2个沙尘源区较为一致。

图3b为3年春季平均沙尘沉降通量图,由图可见亚洲沙尘的沉降区主要有塔克拉玛干沙漠周边地区、蒙古与内蒙古的交界地区、黄土高原。对比图3中a、b可以看出,3年春季西部塔克拉玛干沙尘释放源区主要影响塔克拉玛干周边地区及我国西北东部地区^[22],黄土高原的沙尘主要来自于中国北部的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠^[23]。

图3a和图2对比显示,中国北部沙漠区3年春季平均DEF值和有效起尘面积大于中国西部沙漠区,然而3年春季平均大气柱沙尘浓度值却低于中国西部沙漠区。笔者认为主要原因是中国西部沙漠区周边地区被平均海拔 $> 5000 \text{ m}$ 的高山所包围,悬浮沙尘不容易向四周扩散;而中国北部沙漠区靠

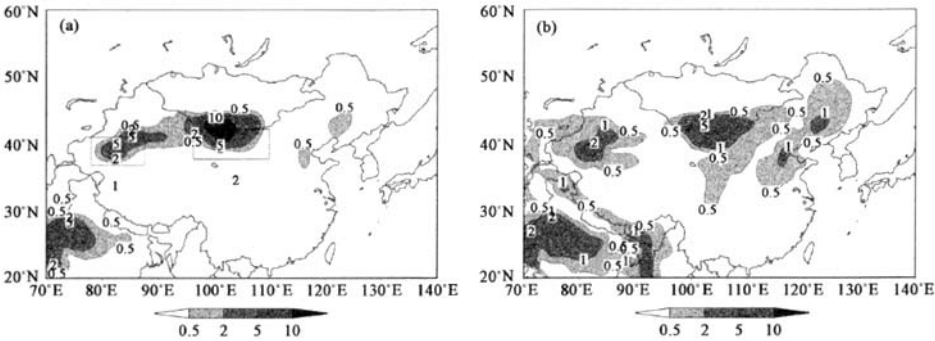


图 3 模拟 3a 春季平均沙尘释放通量[a. 单位 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]和沙尘沉降通量[b. 单位 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]
(1 区和 2 区分别为中国西部沙尘关键区和中国北部沙尘关键区)

Fig. 3 Simulated dust emission flux (a. $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) and dust deposition flux (b. $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) averaged for springs of 2000 to 2002(The box 1 and 2 in Fig.3a indicate the western and northern key regions for dust emission, respectively. See text for details)

近华北平原,地形平坦沙尘相对容易扩散.

2.3 沙尘气溶胶光学厚度(DAOD)

2.3.1 DAOD 与卫星观测的气溶胶指数(AI)

Prospero 等^[9]已利用 TOMS 的 AI 数据分析了全球沙尘源区特征,表明 AI 为正值时才能反映沙尘气溶胶.同时 Herman 等^[8]认为 AI 指数可以用来定量计算气溶胶光学厚度.因此本文仅使用正值 AI 数据和模拟的 DAOD 进行对比,以验证模式的正确性.为了便于研究和更为直观对比 2000、2001、2002 年春季 AI 与 DAOD 时间变化关系,根据已有研

究^[4,5,21]选择 2 个中国沙尘关键区:西部关键区和北部关键区.2 个关键区的具体范围见图 3a.分别求出所选 2 个关键区域内卫星观测 AI 的区域平均值和模拟波长在 $0.63\text{ }\mu\text{m}$ DAOD 的区域平均值,并画出二者每年春季的时间变化曲线图.

图 4 为 2000、2001、2002 年春季 2 个区域内 AI 与 DAOD 区域平均值的逐日变化曲线,做图时分别对 AI 和 DAOD 曲线作了 3d 高斯平滑.总体看来, AI 与 DAOD 的时间变化曲线具有较高相关性,均通过 0.001 显著性水平检验,说明模式模拟的沙尘

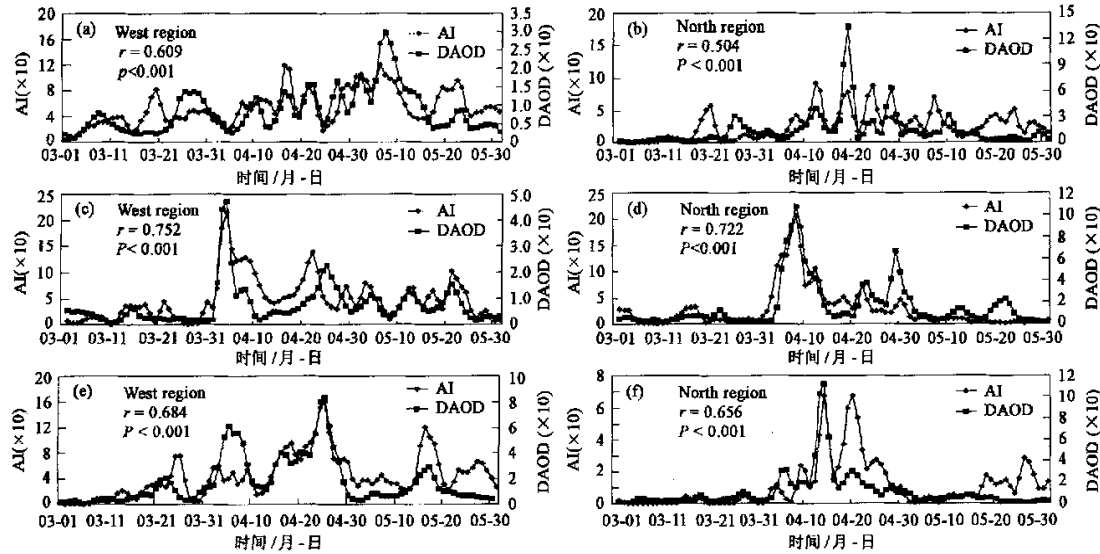


图 4 2000(a-b)、2001(c-d)和 2002(e-f)春季 2 个关键区区域平均 AI($\times 10$)与 DAOD($\times 10$)逐日变化(r 为相关系数)

Fig. 4 Daily variations of aerosol index ($\times 10$) and aerosol optical depth ($\times 10$) averaged for the two key regions during springs of 2000(a b), 2001(c-d) and 2002(e-f)

气溶胶光学厚度与实际情况较吻合。

2.3.2 DAOD 与地面台站观测的沙尘暴事件

沙尘暴暴发时, 沙尘使其所经过地区 AI 值增高, DAOD 显著增加^[7], 因此 DAOD 逐日变化曲线中的峰值与沙尘暴事件存在着时间上的对应关系。

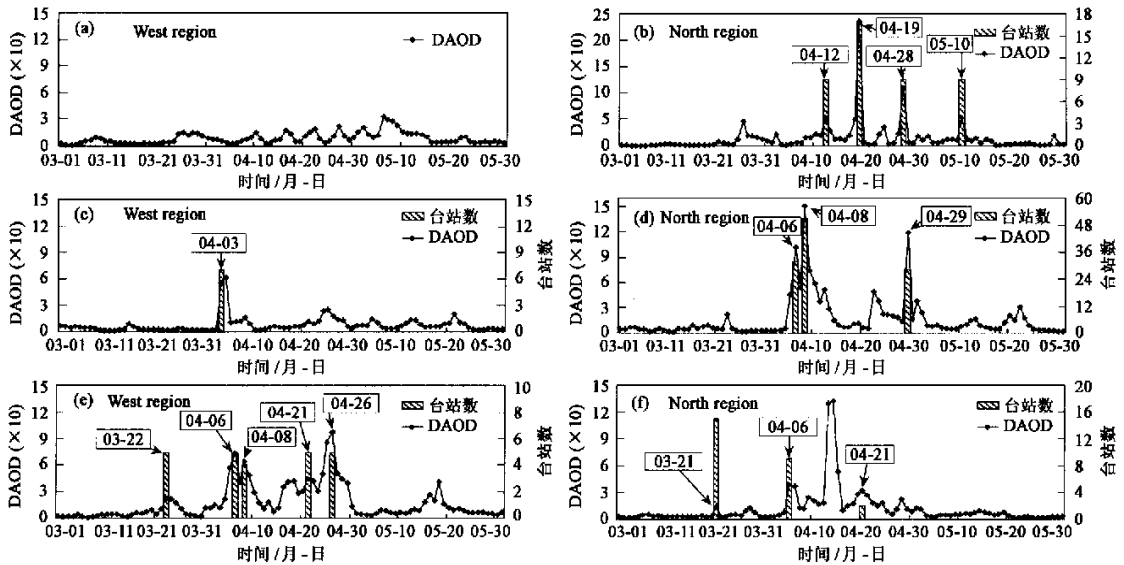


图 5 2000(a-b)、2001(c-d)和 2002(e-f)年春季 2 个关键区区域平均 DAOD (× 10) 的逐日变化

(图中阴影柱表示实际观测的强沙尘暴事件, 其高低代表发生强、中等沙尘暴的总台站数)

Fig. 5 Daily variations of dust aerosol optical depth (× 10) averaged for the two key regions during springs of 2000(a-b),

2001(c-d) and 2002(e-f) (The shaded bars indicate the observed strong dust events and total stations at which dust events were observed)

图 5 表明 2000 年、2001 年和 2002 年春季发生的强沙尘暴事件与相应的 2 个关键区内 DAOD 曲线峰值存在较好对应关系, 因此利用 DAOD 变化曲线可以对强沙尘暴事件进行预测。3a 春季共发生 14 次强沙尘暴事件, 利用 2 个关键区域 DAOD 逐日变化曲线可分辨出 11 次强沙尘暴事件, 分辨准确性达到 79%。未能分辨出的强沙尘暴事件与所选关键区的大小、位置以及该次事件中发生强沙尘暴站点总数有关。

此外, 图 5 还表明 3 年春季强沙尘暴暴发的区域存在着年际变化, 2000 年和 2001 年强沙尘暴主要发生在北部关键区, 而 2002 年北部关键区强沙尘暴强度明显比前 2 年有所减弱, 西部关键区在强度和次数上明显比前 2 年有所增强。

2.4 沙尘输送路径

本文初步尝试利用相关系数分析法分析了模拟的沙尘 DAOD 相对于沙尘 DEF 的时间滞后效应 (图 6), 以此讨论沙尘的传输路径。具体方法: 用春

为此把文献[5]表 1 及沙尘天气年鉴^[24]中 2000、2001、2002 年春季发生的强沙尘暴事件和发生强、中等沙尘暴总台站数分别绘于相应的 DAOD 逐日变化曲线上 (图 5)。图 5 中阴影柱代表实测沙尘暴事件, 高低代表发生强、中等沙尘暴的总台站数。

季 92 d 逐日区域平均 DEF 时间序列与每个格点上 92 d 逐日 DAOD 时间序列求相关, 得到两者当天相关系数分布; 用前 91 d 逐日区域平均 DEF 时间序列与后 91 d 每个格点上逐日 DAOD 时间序列求相关, 得到两者滞后 1 d 的相关系数分布; 滞后 2 d、3 d 的两者相关系数分布以此类推。由本文 2.2 小节讨论知, 北部关键区对我国沙尘气溶胶贡献较大, 因此着重研究了北部区域内沙尘的输送路径。

图 6 为 2000 年春季北部关键区逐日区域平均 DEF 与每个格点上逐日 DAOD 的相关系数分布图。结果表明, 2000 年北部关键区沙尘输送路径为由西北向东南方向输送。2001 年和 2002 年沙尘移动的路径与 2000 年具有相同的规律, 只是影响范围大小有所不同, 具体情况不再详述。

2.5 讨论

利用 MATCH-DEAD 沙尘模式系统对 2000~2002 年春季大气沙尘时空分布作了模拟研究, 并对该模式系统的有效性进行了初步验证, 但限于资料

等原因其中许多问题还有待于深入探讨.例如:利用站点实测的“AOD”资料与该模式系统计算的“AOD”进行详细对比;增加模式描述沙尘粒径组范围及提高所用不同类型土壤组分资料的精确度,以更真地实刻画沙尘活动过程;通过置换大气场的初始条件和下边界条件以检查强沙尘暴暴发区域年际

变化的原因等.最近的分析研究^[25]还表明,中国北方沙尘暴出现频率不仅与风速、降水等气象要素有关,而且与植被、土壤湿度等下垫面状况存在统计上显著的联系.为此,在未来研究中将利用该模式系统进行敏感性试验研究以进一步探讨气候和下垫面因子对亚洲沙尘活动的影响.

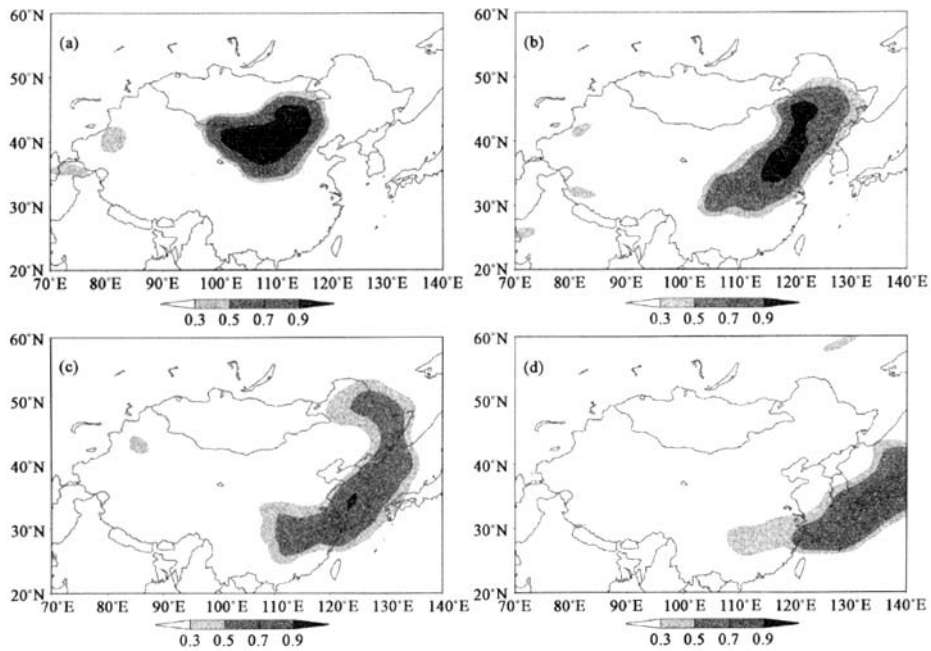


图 6 2000 年春季北方关键区逐日区域平均 DEF 与每个格点上逐日 DAOD 的相关系数分布
[(a) 同时相关, (b) DAOD 滞后 1 d, (c) DAOD 滞后 2 d, (d) DAOD 滞后 3 d]

Fig. 6 Distributions of correlation coefficients between daily dust emission flux (DEF) averaged for the northern key region and daily aerosol optical depth (DAOD) at each grid for Spring of 2000 [(a) Simultaneous, (b) DAOD is lagged for 1 day, (c) DAOD lagged for 2 days, (d) DAOD lagged for 3 days]

3 结论

(1) MATCH-DEAD 模式系统对亚洲沙尘的扬起、输送和沉降过程和大气沙尘载荷时空有较好的模拟能力,可以利用该模式进行亚洲大气沙尘时空分布的研究.

(2) 亚洲大气柱沙尘浓度分布有 3 个高值区:塔克拉玛干及其周边地区,巴丹吉林沙漠-腾格里沙漠一带以及印度半岛北部地区.以塔克拉玛干沙漠为主的西部沙区和以巴丹吉林-腾格里沙漠为主的北部沙区是我国两大沙尘释放源区,其中北部沙区沙尘释放通量较大.

(3) 文中所选的西部和北部 2 个关键区的春季区域平均沙尘气溶胶光学厚度逐日变化曲线,可以

反映出每年春季我国北方发生的强沙尘暴事件. 3a 春季强沙尘暴发生的区域存在明显的年际变化, 2000 年和 2001 年强沙尘暴主要暴发于北部关键区, 2002 年主要暴发于西部关键区.

(4) 通过沙尘光学厚度(DAOD)与沙尘释放通量(DEF)的时间滞后相关分析,可以反应出沙尘输送的路径和影响的范围.北部关键区沙尘输送路径大致由西北向东南传输,先后可影响到内蒙古、河北、北京、天津、山东、上海、韩国、日本等地.

参考文献:

[1] 刘晓东,田良,张小曳.塔克拉玛干沙区春季活动对我国西北部大气 PM₁₀浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24 (5): 528~532.
[2] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosol from disturbed soil [J]. Nature, 1996, 380:

- 419~422.
- [3] Zhuang G S, Yi Z, Duce R A, *et al.* Link between iron and sulphur cycles suggested by detection of Fe (II) in remote marine aerosols [J]. *Nature*, 1992, **355**: 537~539.
- [4] Zhang X Y, Zhang G Y, Zhu G H, *et al.* Elemental tracers for Chinese source dust [J]. *Science in China Series D*, 1996, **395**: 512~521.
- [5] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002) [J]. *科学通报*, 2003, **48** (11): 1224~1228.
- [6] Kurosaki Y, Mikami M. Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (14): 1736.
- [7] 邱金恒, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感分析 [J]. *大气科学*, 1994, **18**(1): 1~10.
- [8] Herman J R, Bhartia P K, Torres O, *et al.* Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D14): 16911~16922.
- [9] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, *et al.* Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. *Rev. Geophys.*, 2002, **40** (1): 1002.
- [10] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验 [J]. *气候与环境研究*, 2003, **8** (2): 125~142.
- [11] Shao Yaping, Yang Yan, Wang Jian, *et al.* Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D22): 4691.
- [12] Rasch P J, Mahowald N M, Eaton B F, *et al.* Representations of transport, convection, and the hydrologic cycle in chemical transport models: Implication for the modeling of short-lived and soluble species [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D23): 28127~28138.
- [13] Zender C S, Bian H, Newman D. The Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) Model: Description and 1990's dust climatology [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D14): 4416.
- [14] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93** (D11): 14233~14242.
- [15] Iversen J D, White B R. Saltation threshold on Earth, Mars, and Venus [J]. *Sedimentology*, 1982, **29**: 111~119.
- [16] D'Almeida G A. On the variability of desert aerosol radiative characteristics [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 3017~3026.
- [17] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Source, transport, and optical thickness [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 22897~22914.
- [18] White B R. Soil transport by winds on Mars [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 4643~4651.
- [19] Rasch P J, Barth M C, Kiehl J T, *et al.* A description of the global sulfur cycle and its controlling processes in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, version 3 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 1367~1386.
- [20] Shao Yaping, Wang Jianjie. A climatology of Northeast Asian dust Events [J]. *Meteorologische Zeitschrift.*, 2003, **12** (4): 187~196.
- [21] Zhang X Y, Arimoto R, Zhu G H, *et al.* Concentration, size-distribution and deposition of mineral aerosol over Chinese desert regions [J]. *Tellus*, 1998, **50B**: 317~330.
- [22] Sun Jimin, Zhang Mingying, Liu Tungsheng. Spatial and temporal characteristic of dust storms in China and its surrounding region, 1960~1999; Relation to source area and climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D10): 10325~10333.
- [23] Liu T S. *Loess and the Environment* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1985. 251.
- [24] 中国气象局. 沙尘天气年鉴 [M]. 北京: 气象出版社, 2002. 41~69.
- [25] Liu Xiaodong, Yin Zhi-Yong, Zhang Xiaoye, *et al.* Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D16210.