

强沙尘暴的数值模拟及 PM₁₀ 浓度的时空变化分析

周旭^{1,2}, 张镭^{1*}, 郭琪¹, 衣娜娜¹, 田鹏飞¹, 陈丽晶¹ (1.兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2.中国气象局, 云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 为研究沙尘暴期间沙尘排放、干沉降过程以及 PM₁₀ 浓度的时空变化, 采用考虑了多种起沙物理机制的起沙参数化方案与 WRF/Chem 模式相结合的沙尘集成预报系统, 模拟了发生在 2010 年 4 月 24 日中国西北地区的黑风暴过程, 分析近地表 PM₁₀ 的排放及浓度变化, 并与实际观测进行了对比, 发现该系统能够很好地模拟此次过程; 分析了黑风暴过程中不同地区的沙尘排放及干沉降, 其中敦煌地区的排放和沉降分别为 4.01 和 6.23 mg/m², 民勤的排放和沉降分别为 5040.79 和 231.74 mg/m²; 发现黑风暴过程中沙尘排放源地主要为民勤地区, 黑风暴过程中民勤地区 PM₁₀ 排放为 5.04 t/km²; 分析 PM₁₀ 不同地区的垂直浓度分布情况, 发现 PM₁₀ 主要分布在 1000 m 以下的大气中, 并能够扩散到 3000 m 以上的高空进行远距离的输送, 扩散到高空的 PM₁₀ 可以输送到几千公里外的地区。

关键词: 强沙尘暴; 可吸入颗粒物(PM₁₀); 数值模拟; 时空分布

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2017)01-0001-12

Numerical simulation of a strong dust storm and the spatial-temporal distribution of PM₁₀ concentration. ZHOU Xu^{1,2}, ZHANG Lei^{1*}, GUO Qi¹, Yi Na-na¹, TIAN Peng-fei¹, CHEN Li-jing¹ (1.Key Laboratory of Semi-Arid Climate Changes, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Key Laboratory for Cloud Physics, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10081, China). *China Environmental Science*, 2017,37(1): 1~12

Abstract: An integrated dust forecasting system, which is based on the WRF/Chem and a dust emission scheme with physical mechanisms, was used to better understand dust emission, dry deposition and the evolution of spatial-temporal distribution of PM₁₀ concentration. The dust emission and near-surface PM₁₀ concentration in the black dust storm occurred on April 24, 2010 in northwest Chinawere simulated and compared with in situ observations. The black dust stormwas well captured by the integrated dust forecasting system. Mingqinwas found to be the main dust source regionaccording to the dust emission and dry deposition in the black dust storm. The dust emission and dry deposition in Dunhuang were 0.01 and 6.23 mg/m², while those of Mingqin were 5040.79 and 231.74mg/m², respectively. The dust emission of Minqin was 5.04t/km² during the black dust storm. According to the vertical distribution of PM₁₀ concentration in different regions, we found that PM₁₀ were mainly distributed within 1000m above the ground. Dust can also be diffused to the height of 3000m or higher, and then be transported to thousands of kilometers downstream.

Key words: strong dust storm; PM₁₀; numerical modeling; spatial-temporal distribution

沙尘暴作为自然界中沙尘气溶胶的主要来源,可以通过直接^[1-3]、半直接^[4-6],或者间接^[7-9]作用影响地球气候系统,反之,气候因素对沙尘暴也存在一定的影响^[10-11].沙尘气溶胶是大气中颗粒物主要成分之一,其粒径分布、数浓度往往与天气条件存在着一定的联系^[12-13].

近年来,全球沙尘暴频发,对人们的生产、生活以及大气环境带来巨大的影响^[14].大量的学者从沙尘暴的起沙机制^[15-19]、光学厚度^[20-22]、带

电效应^[23-24]、形成发展及输送、沉降等方面进行研究^[25-28],也有学者从沙漠陆面过程^[29-30]、沙尘暴的成因^[31]、变化特征^[32]、气候特征^[33]及气候因素对沙尘暴的影响^[34-35]等方面进行了广泛的研究.为遏制沙尘暴的发生,有些学者从沙漠治理入手对沙漠防风林进行了研究^[36].

收稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955302)

* 责任作者, 教授, zhanglei@lzu.edu.cn

对于西北地区的干旱和沙尘暴相继建立了一些监测系统^[37-38],国内外也出现了很多沙尘暴的预测系统,迄今已形成了多个沙尘预报模式,其中耦合了区域大气模式的沙尘模式有CFORS^[39]、COAMPS^[40]、DREAM^[41]、CEMSYS5^[42]等,与全球大气模式相耦合的沙尘模式包括了GOCART^[43]、DEAD^[44]、MASINGAR^[45]等.不同的沙尘预测系统结合经验的或者基于物理模型的起沙参数化方案对沙尘天气都有一定的模拟能力,都能够很好的模拟出沙尘暴这种天气现象,但是仍然存在很多的不确定性^[46],不同的起沙参数化方案对于沙尘暴期间沙尘排放、输送存在很大的差异^[47].

起沙参数化方案的根本不同点在于垂直沙尘通量的计算,因此,垂直沙尘通量的计算成为了关键.本文利用耦合了Shao 2004年提出的起沙参数化方案的WRF/Chem模式,通过数值模拟和实验观测的方法,研究民勤地区黑风暴过程中的沙尘排放、PM₁₀的浓度时空演变特征、沙尘干沉降分布以及输送特征,并根据数值模拟结果确定沙源地.通过本文的研究,为建立准确的沙尘预报系统以及完善的监测系统提供了依据,便于定量的预测沙尘天气发生的范围和程度,也为防灾减灾提供有效的服务.

1 模式简介及检验

1.1 研究区概况

民勤县位于甘肃省河西走廊中部,位于巴丹吉林与腾格里沙漠的交界处,能够很好地代表沙漠地区的地形、地貌以及地表状况等特征,该地区长年降水稀少,年平均降水量为113.6mm,是我国春季沙尘暴多发区.Koven等利用包含了地貌、归一化的植被指数(NDVI)、地表粗糙度及水文状况等不同土壤风蚀指数来确定的全球沙源地,其中中国西北地区是全球主要的沙源地之一^[48].

实验场地位于民勤治沙综合试验站3号塔(38.62°N,102.92°E)及其附近的区域,该地区位于绿洲外的流动沙地(沙漠)内,属于半流动、流动风沙地貌类型,荒漠植被以白刺、梭梭为主,植被衰

败和退化现象较为严重,生态环境非常脆弱,是我国干旱区荒漠化最严重的地区之一^[49].由于干燥的气候、不稳定的空气状态、稀疏的植被、丰富的沙源、因缺水和滥垦造成的疏松的地表物质使该区域成为我国境内的强沙源区中心之一,也是入境沙尘暴的必经之路^[50].

2010年4月24日,受冷空气影响西北地区自西向东发生了一次沙尘过程,其中河西走廊遭受了强沙尘暴的侵袭,特别是在甘肃的酒泉、民勤等地出现了能见度为0m的黑风暴.赵旋等^[51]对此次沙尘暴过程中地面气象要素和近地面沙尘浓度的变化,以及大气动力、热力学参数进行了计算和分析,郭萍萍等^[52]进行了天气成因分析.

PM₁₀浓度的观测数据为西部灾害与环境力学重点实验室在民勤地区观测点的资料,观测仪器采用美国TSI公司的Dust Trak8520型智能粉尘检测仪,采样频率0.2Hz,采样高度分别为0.5、1、8、16m,观测时间为2010年4~5月,本文所采用数据为16m高度处,2010年4月24日16:00~2010年4月25日00:00的观测结果.激光雷达能非常好地观测沙尘气溶胶^[53],兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)的NIES激光雷达观测数据.该激光雷达在SACOL有2009年~2012年的连续观测.其垂直分辨率为6m,时间分辨率为15min.本文用激光雷达的532nm波长的距离订正回波信号来分析沙尘气溶胶垂直分布.文中采用2010年4月25~26日的激光雷达数据,并通过Tian等^[54]的方法做了信号降噪处理.

1.2 沙尘模式简介

Shao^[55]提出的沙尘暴的集成预报系统包含地理信息系统、大气模式、风蚀过程、陆面过程以及沙尘的输送过程等(如图1所示).

本文采用的大气模块是WRF中尺度天气预报模式,起沙参数化方案采用Shao给出的参数化方法.该方案的跃移水平沙通量表示为:

$$Q = c \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}}{u_*}\right) \left(1 + \left(\frac{u_{*t}}{u_*}\right)^2\right) \quad (1)$$

式中: c 为系数; ρ 为空气密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²;分别表示摩阻风速和临界摩阻风速,m/s.则沙尘垂向通量表示为式(2).

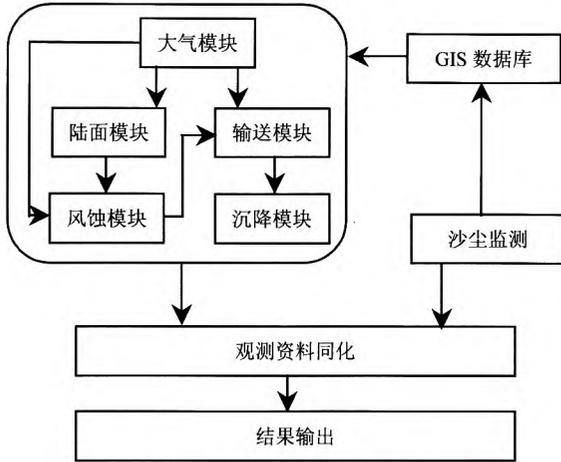


图 1 沙尘集成预报系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the integrated dust forecasting system

$$f(i, j) = c_\gamma [(1 - \gamma) + \gamma \frac{p_m(d_j)}{p_f(d_j)}] \frac{Q_s(i)g}{u_*^2} (1 + \sigma_m) \quad (2)$$

式中： c_γ 是比例系数； γ 是表示沙尘粒径分布的权重因子； $p_m(d_j)$ 和 $p_f(d_j)$ 分别表示为粒径的全分布和最小分布； g 表示重力加速度； u_* 表示摩擦速度； p 表示土壤塑型压力； $Q_s(i)$ 为沙尘粒径为 d_i 的沙粒的通量 σ_m 沙尘粒子的轰击效率。根据 Shao^[55]给出的结果其表达式为：

$$\sigma_m = 12u_*^2 \frac{\rho_s}{p} (1 + 14u_* \sqrt{\frac{\rho_s}{p}}) \quad (3)$$

式中： ρ_s 表示沙尘密度，通常取常取 2650kg/m^3 ，式(2)中， γ 为一权重使得

$$\gamma = \exp[-(u_* - u_{*c})^3] \quad (4)$$

$$p(d) = \gamma p_m(d) + (1 - \gamma)p_f(d) \quad (5)$$

将上述方程离散化便可以耦合到 WRF/Chem 中。

1.3 沙尘集成预报系统检验

利用该沙尘预报系统分别模拟了 2010 年 3 月 29~31 日；4 月 8~10 日；4 月 24~26 日的沙尘天气，模拟区域的中心取在(35°N,105°E)，模式的水平分辨率为 30km，纬向共有 200 个格点，经向有 150 个格点，垂直方向分为 27 层，时间步长为 3min，边界层方案选取 YSU 方案。模拟的范围主要包括蒙古、内蒙古以及华北和东北地区。气象模式的初始场和驱动场采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的 NCEP 再分析数据，并且每 6h 更新一次，下垫面土壤类型信息采用 Shao^[55]给出的土壤信息(图 2)，其中越接近 1.0 表示越容易风蚀，可以看出在塔克拉玛干、巴丹吉林、腾格里等沙漠地区是极易风蚀的区域。吴成来等^[56]利用该土壤类型信息和植被覆盖度资料，对 2002 年 3 月 19~22 日发生在东亚地区的强沙尘暴过程进行模拟，模拟的沙尘浓度与观测较为一致。周旭等^[57]研究了该模式的敏感性因子，并给出了适用于中国西北地区的起沙参数化方案中的参数值。

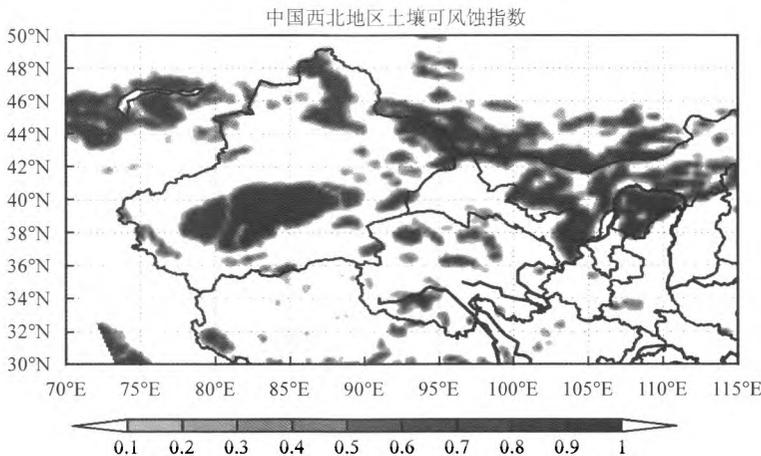


图 2 Shao^[55]给出的中国西北地区土壤可风蚀指数

Fig.2 The erosion index of soil in northwest China by Shao^[55]

图 3a、b、c 分别给出了 2010 年 3 月 29~31 日、4 月 21~23 日、4 月 24~26 日的沙尘天气过

程中,民勤观测站模拟的 PM_{10} 浓度随时间的变化情况.可以看出该沙尘集成预报系统能够模拟出沙尘天气的发生和演变过程.

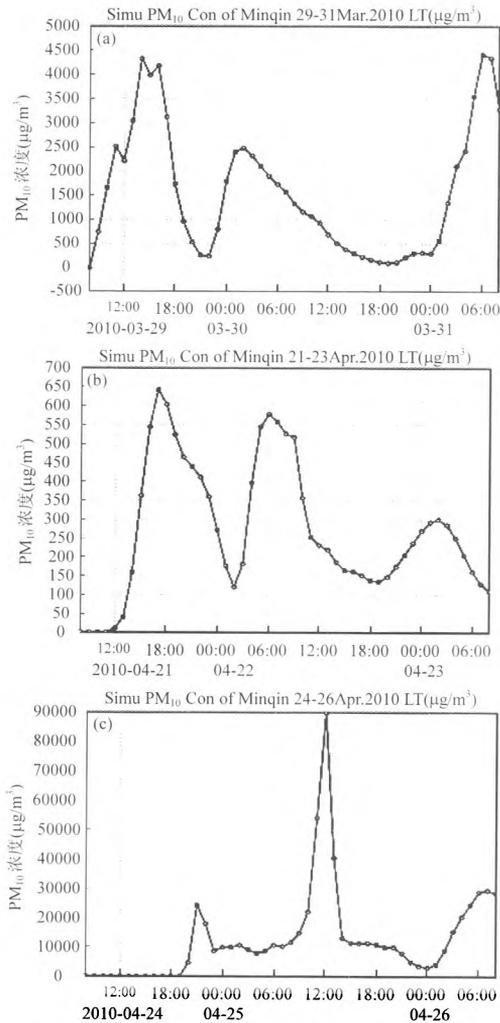


图3 民勤地区不同场次沙尘暴模拟的 PM_{10} 浓度
Fig.3 Simulated PM_{10} concentration during different dust storms in Minqin

图4给出了3次沙尘天气过程中民勤观测点 PM_{10} 浓度的变化与模拟值的对比情况,其中观测值为 Dust Trak 在民勤治沙站3号塔的观测数值,发现模式能够很好的模拟出沙尘天气的趋势,包括:开始、结束时间和峰值浓度,特别是发生在3月29日的沙尘天气过程中 PM_{10} 的变化情况.由此可见该模式能够较准确的模拟出沙尘天气过程中 PM_{10} 浓度变化情况.

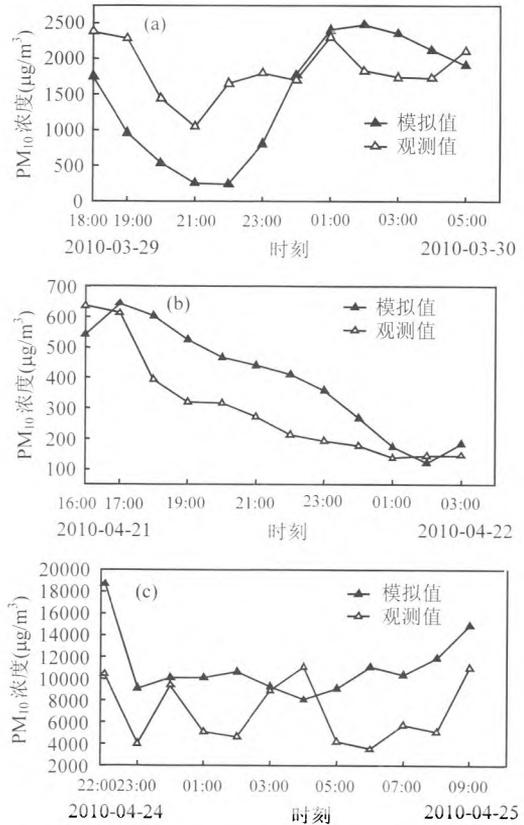


图4 民勤观测的 PM_{10} 浓度与模拟值对比
Fig.4 Comparison between the observed and simulated PM_{10} concentration in Minqin

此外,为检验模式模拟的沙尘分布区域,将模拟结果与FY-3A气象卫星的监测结果进行了对比,如图5所示,其中图5a为模式模拟25日12:00时 PM_{10} 的分布情况,图5b为FY-3A气象卫星25日12:10的监测实况,可以看出卫星监测到沙尘区域主要分布在甘肃北部的张掖-武威-民勤一带、宁夏中部和南部、陕西西北部以及内蒙古中部偏南地区,这些沙尘分布的区域,模式都能够很好的模拟出来,充分说明了模式在模拟沙尘的时空分布具有很强的模拟能力.

为进一步说明模式在垂直方向上的模拟能力,将SACOL PM_{10} 垂直分布的模拟结果与532nm激光雷达的观测结果进行了对比,其中激光雷达观测结果处理采用Huang等^[58]的方法,如图6所示,对比沙尘在垂直方向分布,发现模拟结果与观测结果比较一致,25日15:00左右 PM_{10} 浓

度出现峰值,高度达到3km左右,说明模式能够很好的模拟沙尘在垂直方向的分布情况.

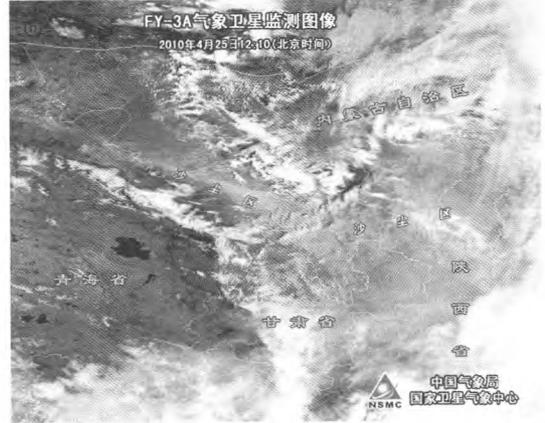
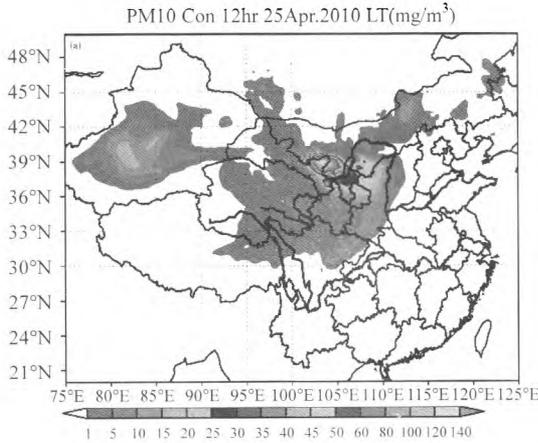


图 5 4月25日 12:00PM₁₀ 模拟分布和FY-3A 气象卫星监测实况

Fig.5 Distribution of simulated PM₁₀ concentration and monitored by FY-3A on April 25

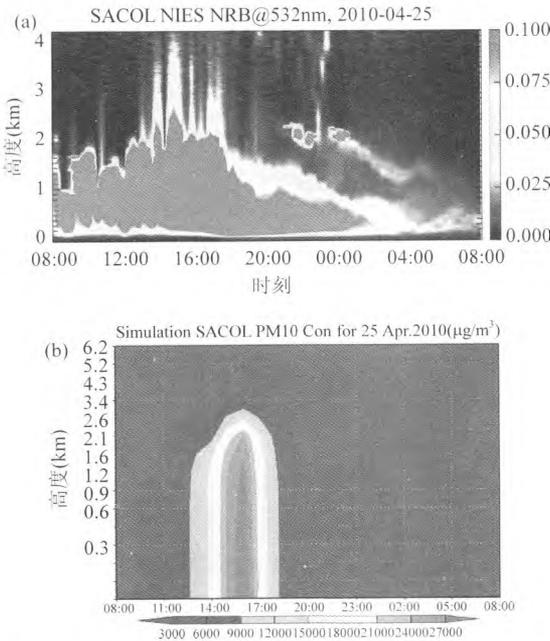


图 6 4月25日 SACOL 测站激光雷达观测与模拟 PM₁₀ 浓度对比

Fig.6 Comparison between simulated PM₁₀ concentration and lidar observation at SACOL on April 25

综上所述,通过与观测结果的对比,本文所采用的模式能够很好地模拟沙尘天气过程中 PM₁₀ 的分布和时空变化情况.

2 沙尘 PM₁₀ 的排放、沉降及时空分布

2.1 4月24日天气过程

2010年4月24~26日,受冷锋和蒙古气旋共同影响,南疆盆地和新疆东部、青海西北部、内蒙古西部、甘肃河西地区和宁夏等地出现大风天气,并伴有沙尘,部分地区出现了沙尘暴.此次沙尘暴过程甘肃全省有 16 个观测站出现大风沙尘暴天气,其中鼎新、临泽、张掖、民乐、民勤、酒泉出现特强沙尘暴,酒泉、民勤最小能见度为 0m^[59].

图 7 给出了此次沙尘天气过程模拟的 500hPa 天气形势的演变过程,图 7a 中可以看出 24日 08:00 500hPa 低压槽位于新疆中东部,14:00 锋面东移到达酒泉,锋前张掖以东大部分地区均处在低压中.随后,冷锋继续东移,河西走廊中部自西向东出现强沙尘暴,张掖于 16:30 前后爆发了能见度几乎为 0 的特强沙尘暴.到 17:00,冷锋移至张掖和武威之间,锋前低压中心值降低到 1000hPa.图 7b 给出了 24日 20:00 500hPa 天气形势图,此时 3h 变压增强到 9.0hPa,形成了一强气压梯度带,民勤出现了 8~9 级大风,导致民勤于 19:09 和 20:00 出现两次“黑风”.图 7c 给出了 25日 08:00 500hPa 天气形势,可以看出低压槽抵达

甘肃东部,此时宁夏大部分地区 and 兰州出现了沙尘天气.图 7d 给出了 25 日 20:00 500hPa 天气形

势,此时低压槽转竖,大风源源不断的将河西地区的沙尘输送到华中地区.

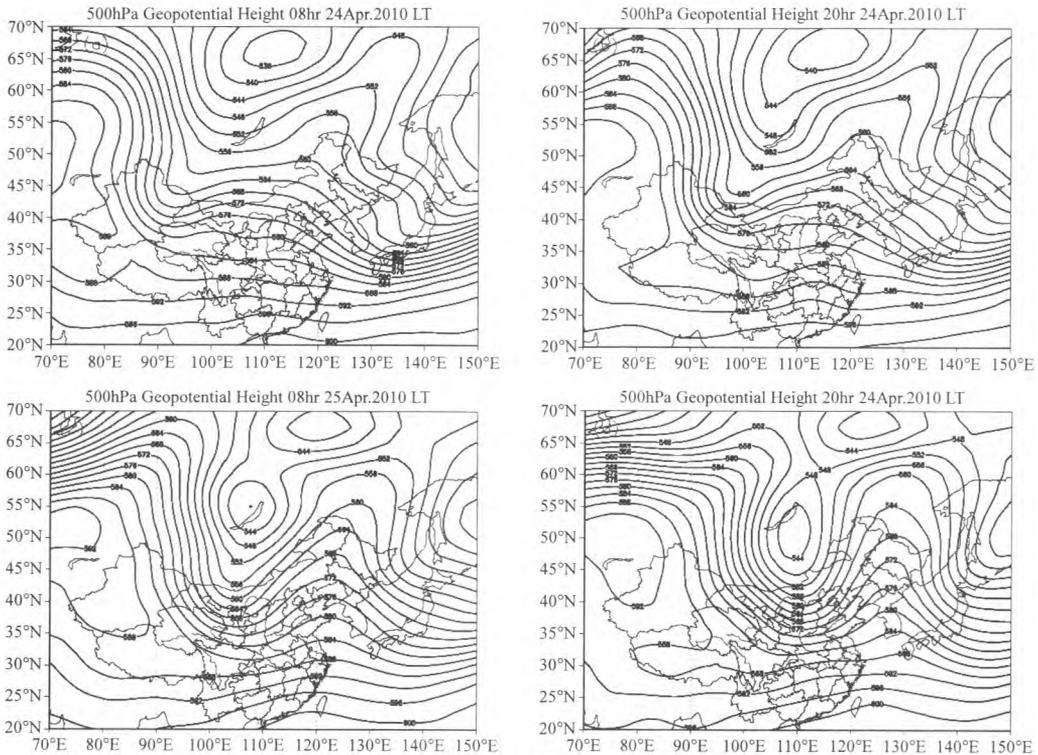


图 7 2010 年 4 月 24~26 日 500hPa 天气形势

Fig.7 500hpa geopotential height on April 24~26, 2010

2.2 沙尘天气过程的沙尘排放

图 8 给出了模拟区域 4 月 24 日沙尘暴期间每 6h 的沙尘排放总量.首先在 24 日 11:00,新疆中东部地区低空存在一个风切变的区域,此时沙尘排放位于新疆中东部地区(图 8a);随着高空低压中心的南移,到了 24 日 17:00 低空大风区域东移到了新疆、甘肃、青海交界的区域,此时新疆东部、甘肃中部、青海北部地区出现起沙(图 8b),19:00 左右民勤一度出现强沙尘暴,随着冷空气东移,到了 24 日 23:00,低压中心分裂成两个,此时新疆地区的起沙过程基本结束,甘肃地区的起沙区域继续东移到达了金昌地区(图 8c);到了 25 日 08:00 前后新疆地区、青海北部地区起沙过程结束,此时沙尘排放区域主要位于甘肃中部和内蒙古东部地区(图 8d);甘肃中西部地区出现了起沙,6h 起沙量约为 $70\text{g}/\text{m}^2$,随着蒙古气旋的东移,25 日 08:00

前后张掖-金昌-武威-民勤一线再次出现大面积大量起沙,一直维持到 26 日 08:00(图 8e-h),该地区都有沙尘排放,说明影响我国大部的沙尘天气过程的沙尘源地主要为该地区.

2.3 模拟区域的 PM_{10} 的排放与干沉降

图 9 给出了模拟区域 4 月 24~26 日沙尘排放量与干沉降的分布图,从图 9a 可以看出沙尘排放的区域主要分布在新疆中部、青海北部、甘肃从西向东的大部分地区以及内蒙古东部地区,这一模拟结果与赵庆云等^[58]给出的观测沙尘暴事件的观测事实比较一致.

图 9b 给出了沙尘干沉降的分布情况,干沉降主要分布在新疆南部地区、甘肃自金昌向东到民勤地区、内蒙古东部、宁夏中西部地区,对比沙尘排放与干沉降,发现沙尘排放远远大于干沉降,说明起沙后大颗粒的沙尘很快就通过干沉降的

方式沉降到地表,其余的则通过大气边界层中的 湍流输送到高空随着冷空气进行远距离输送.

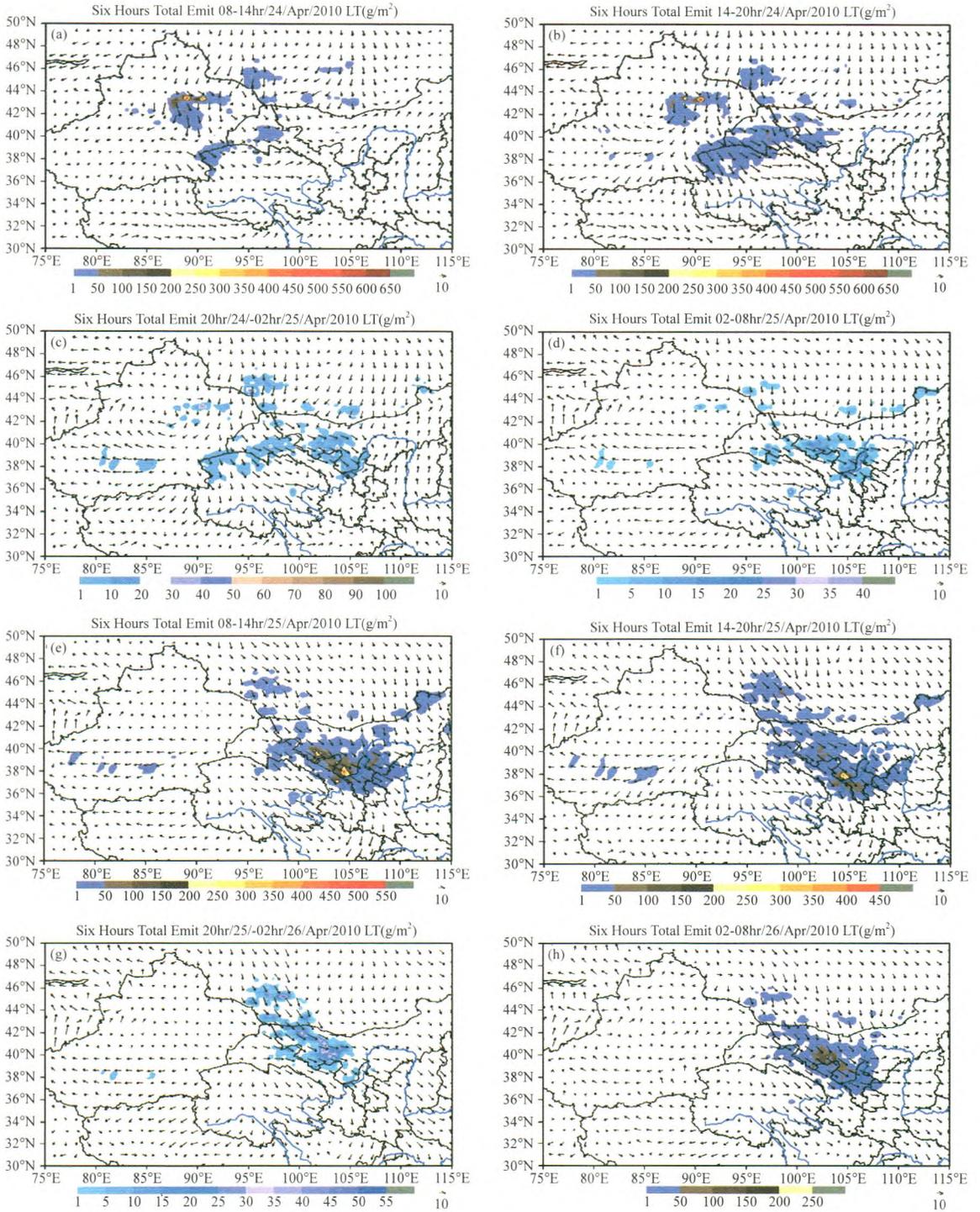


图 8 模拟区域每 6h 沙尘排放

Fig.8 Dust emission in the simulation region for every six hours

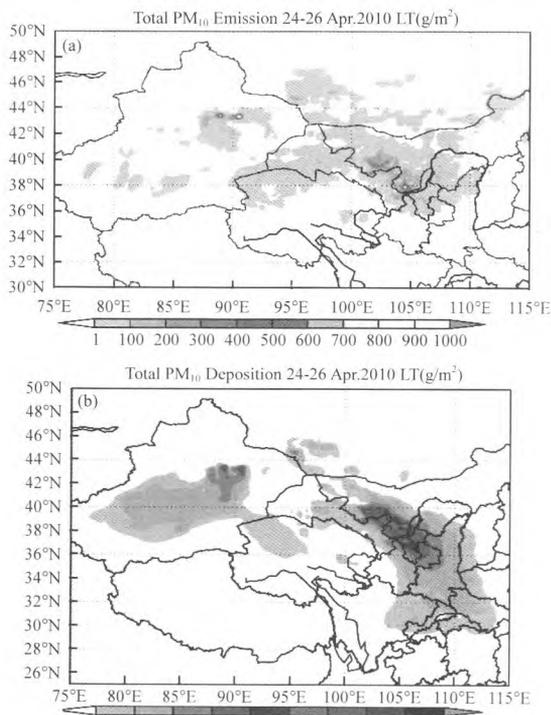


图9 模拟区域沙尘排放量与干沉降

Fig.9 Dust emission and dry deposition inthesimulation region

2.4 PM₁₀ 地表浓度分布

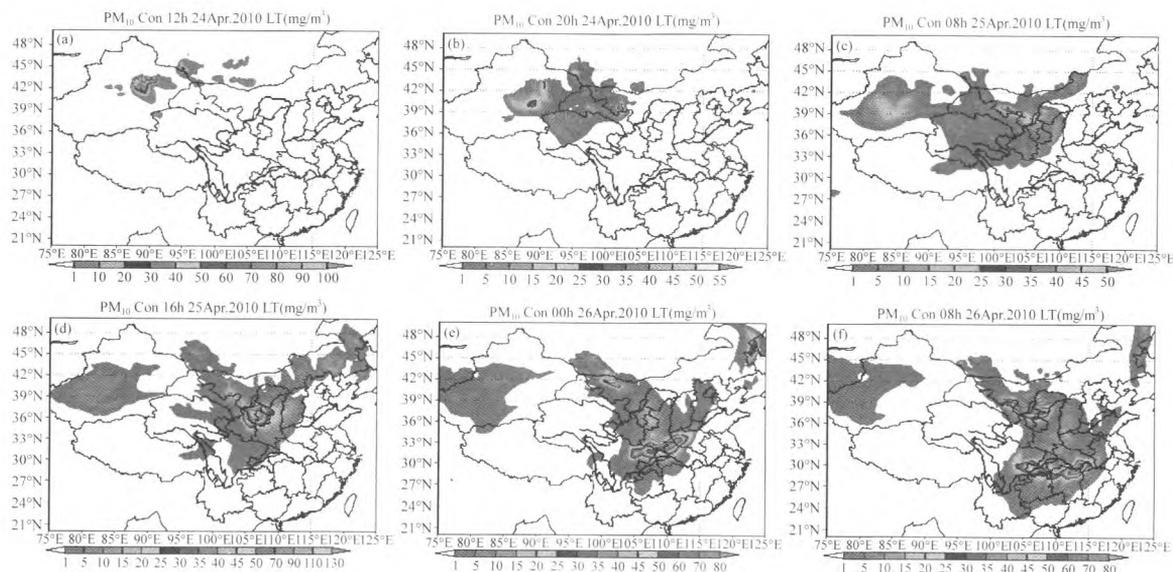


图10 4月24~26日沙尘天气过程地表PM₁₀浓度分布

Fig.10 The distribution of near-surface PM₁₀ concentration during dust storm on April 24~26

图11给出了24~26日沙尘天气过程不同时间段地表PM₁₀的平均浓度分布,可以看出整个过程

万方数据

图10a 4月24日12:00,PM₁₀主要分布在新疆中东部地区、青海北部地区和甘肃西部部分地区;24日20:00,PM₁₀分布区域扩大到新疆中东南部、青海省北部、甘肃的中西部区域和内蒙古西部,其中民勤地区的PM₁₀平均浓度达到了90mg/m³;25日08:00新疆地区的PM₁₀分布区域向西南方向移动,到达新疆西南部,青海北部的沙尘向南扩散覆盖青海省的大部分地区,甘肃中西部PM₁₀分布区域向东南方向移动,到达了四川北部、宁夏大部区域(如图10c);25日16:00由PM₁₀浓度分布可以看出,此时沙尘主要分布在甘肃中东部地区、宁夏、内蒙古西部、陕西大部和四川北部地区(如图10d);26日00:00随着冷空气迁移的PM₁₀向东南地区扩散到达四川、陕西、湖北、河南等地(如图10e).26日08:00PM₁₀浓度出现2个大值中心,一个位于湖北与湖南交接至重庆的地区,该地区的PM₁₀是由于24~25日甘肃-武威-民勤一线排放的沙尘输送而来,一个位于民勤-中卫-银川地区,此地区是由于26日08:00该地区再次出现沙尘暴导致的(如图10f).

中民勤地区地表 PM₁₀ 的平均浓度最大,达到了 90mg/m³,从另一个侧面也说明了民勤地区是此次沙尘天气的沙源地.与李耀辉等^[60]指出民勤为河西走廊中沙尘暴最为严重区域的研究结果是一致的.

不剧烈,表明此时已混合均匀,较大粒径的沙尘颗粒的干沉降已经结束,其余则是可以进行悬移的沙尘颗粒,并随着冷空气进行远距离输送.

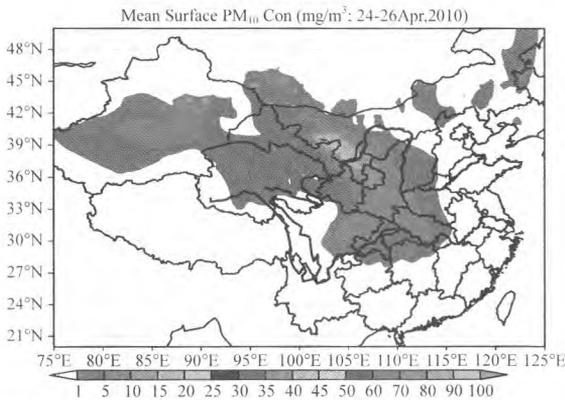


图 11 24~26 日沙尘天气过程地表 PM₁₀ 的平均浓度分布
Fig.11 Distribution of the average PM₁₀ concentration during the dust storm on 24~26April

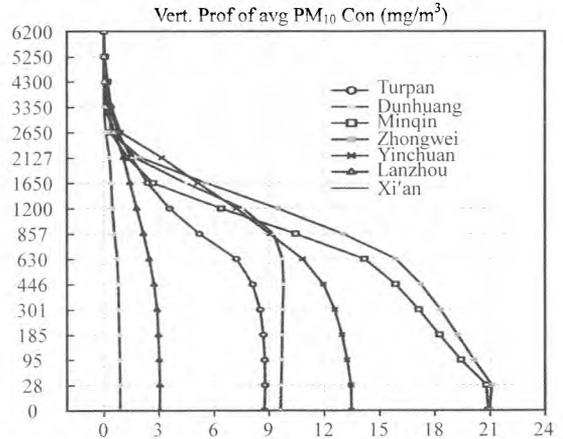


图 12 沙尘过程中不同区域的 PM₁₀ 浓度的垂直分布
Fig.12 Vertical distribution of PM₁₀ concentration in different regions during the dust storm

综上,2010 年 4 月 24 日沙尘天气过程分为两个阶段,第一阶段为 24 日 08:00~25 日 00:00,该阶段沙尘排放分布在新疆中东部和甘肃中部两个区域,并分别向西南方向和东南方向输送,第二阶段为 25 日 06:00 开始,沙尘排放区域只有民勤地区.此次沙尘天气 PM₁₀ 的输送路径有 2 条,第一为新疆中东部起沙向西南方向输送,到达新疆西南部地区;第二为甘肃中东部地区,特别是民勤地区起沙向东南方向输送,到达四川、陕西、湖北、河南、安徽等地,并继续东移影响我国大部分地区.

2.5 PM₁₀ 的垂直分布

由图 12 看出 PM₁₀ 主要分布在 3000m 以下,该垂直分布的高度与柳丹等^[61]基于卫星遥感分析的沙尘气溶胶分布的高度是一致的.敦煌的 PM₁₀ 浓度明显小于其他地区,说明敦煌地区沙尘排放小;民勤的 PM₁₀ 浓度最大,随高度的增加 PM₁₀ 浓度减小很快,说明民勤的沙尘颗粒较大干沉降迅速,伴随着大风的夹卷作用,沙尘排放源区 PM₁₀ 不断的向大气中排放,并向上扩散,而沙尘输送的下游地区 PM₁₀ 浓度随着高度变化很小,如兰州、银川、西安地区 PM₁₀ 浓度随高度变化

3 PM₁₀ 的排放和干沉降特征

图 13a 给出了吐鲁番、敦煌、民勤、中卫、银川、兰州地区 24~26 日沙尘过程中 PM₁₀ 的沙尘排放随着时间的变化,可以看出民勤和中卫地区的 PM₁₀ 排放远远大于其它地区的沙尘排放,其中民勤的 PM₁₀ 沙尘排放最大值超过了每小时 55000mg/m²,出现在 25 日 11:00 左右,而中卫地区的沙尘排放也达到了每小时 45000mg/m²,出现在 25 日 14:00,由此可见冷空气的上游沙尘排放远大于侧风向的沙尘排放,中卫峰值落后于民勤,因为随着冷空气迁移,沙尘不断向前输送.

根据图 13b 中地表 PM₁₀ 干沉降随着时间变化,可见民勤和中卫地区的 PM₁₀ 干沉降远大于吐鲁番、敦煌、兰州、西安等地,最大沉降值分别超过了 2400 和 3600mg/(m²·h),其中民勤干沉降最大值出现在 25 日 12:00,中卫则出现在 25 日 15:00,两者峰值出现的时间均比排放峰值出现的晚 1h,说明沙尘排放后并没有直接干沉降,而是与空气间进行了相互作用,最终在重力作用下才沉降到地面.对于西安而言,25 日 21:00 干沉降达到最大值,其沉降的沙尘是由上游地区

输送而来,可见沙尘已随着大气进行远距离的 输送.

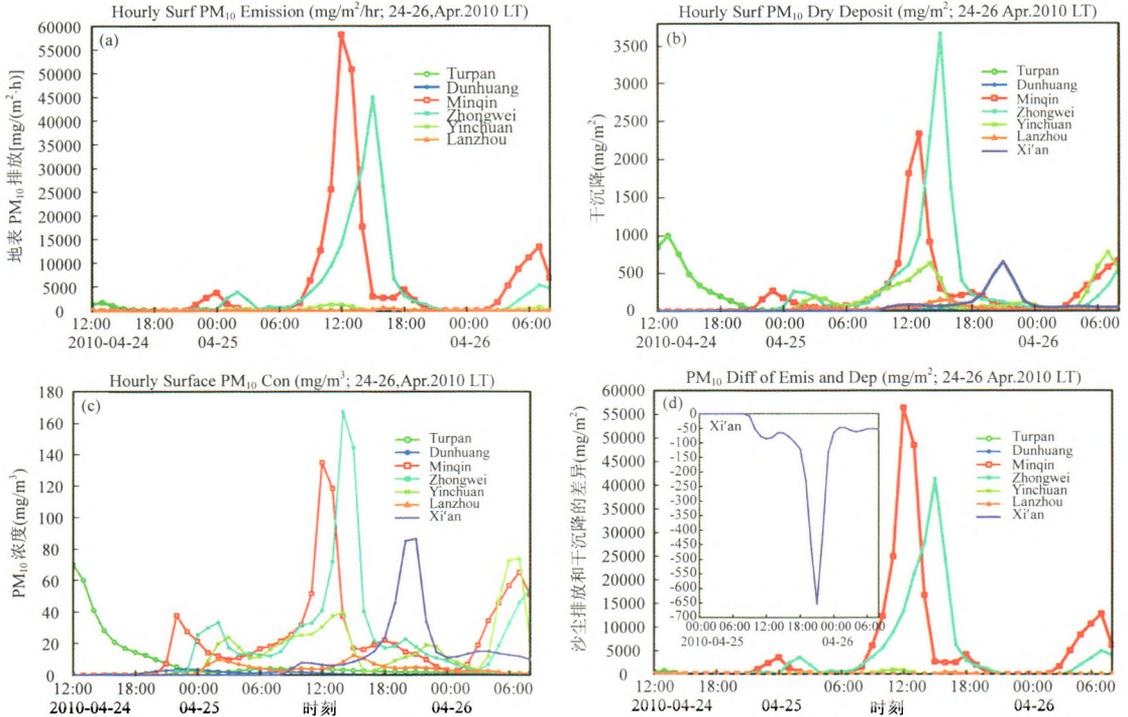


图 13 不同地点 PM₁₀ 排放、干沉降及浓度时间变化

Fig.13 Evolution of emission, dry deposition and concentration of PM₁₀ in different regions

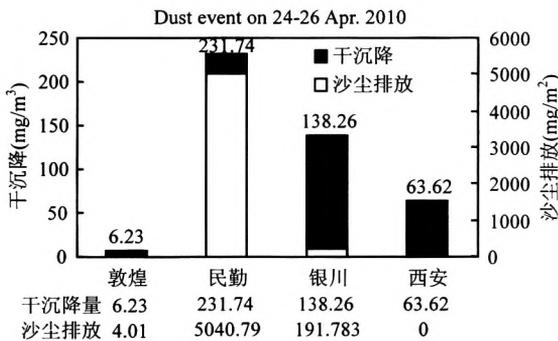


图 14 不同地区沙尘排放和干沉降

Fig.14 Dust emission and dry deposition in different regions

图 13c 给出了吐鲁番、敦煌、民勤、中卫、银川、兰州、西安等地地面 PM₁₀ 浓度的变化,可以看出西安的 PM₁₀ 峰值出现在民勤地区出现峰值之后,说明西安地区的 PM₁₀ 由上游输送而来,图 13d 给出了沙尘排放和干沉降之差,民勤地区最大,西安地区为负值,说明西安地区只有沙尘

的沉降.

图 14 给出了不同地区沙尘排放和干沉降,其中民勤地区干沉降约占沙尘排放量的 5%,银川地区干沉降量占沙尘排放量的 72%;敦煌地区的沙尘排放和沉降非常小,沙尘排放仅为 4.01mg/m²,民勤地区的为 5040.79mg/m²,西安地区仅有沙尘的干沉降,为 63.62mg/m²,远超过敦煌地区的 6.23mg/m²,约是民勤地区干沉降的四分之一.充分说明了,民勤是沙尘源地,沙尘排放沿着主风向进行了远距离的输送.

论文仅采用民勤和 SACOL 的观测资料,还需要更多站点观测资料,并借助更多的卫星遥感资料对模拟结果进行更大范围、更为详细的验证,这些需要在今后的工作进一步研究.

4 结果

4.1 通过对 2010 年 4 月 24 日发生在民勤地区的黑风暴进行了模拟,并与实际观测值进行了对

比,揭示了此次沙尘天气的发生、发展和输送过程,初步分析了 PM₁₀ 在此次过程中的排放、沉降和分布情况.分析此次沙尘暴过程中不同地区的沙尘排放,发现此次沙尘天气过程存在两个沙尘排放区,一个是新疆中部的吐鲁番地区,另一个为张掖-武威-民勤一线,而张掖-武威-民勤一线的沙尘排放随着冷空气向西南方向输送,可以确定影响全国大部分地区的沙尘天气的沙尘主要源地为张掖-武威-民勤地区,其中在 4 月 24-26 日沙尘过程中 PM₁₀ 排放为 5.04t/km².

4.2 通过分析 PM₁₀ 浓度的时空变化,给出了沙尘天气过程中 PM₁₀ 的扩散输送过程.研究沙尘过程中 PM₁₀ 的垂直分布情况发现,民勤的 PM₁₀ 浓度最大,大部分地区的 PM₁₀ 主要分布在 3000m 以下,PM₁₀ 排放源区的浓度随高度减小剧烈,而 PM₁₀ 输送的区域 PM₁₀ 随高度变化很小,1000m 以下几乎是均匀分布的.

4.3 通过分析 PM₁₀ 的时空分布状况,发现 PM₁₀ 能够随着冷空气的入侵,扩散到高空并进行远距离的输送,民勤地区 24 日 19:00 排放的沙尘,在 26 日便可以随着气流输送到北京地区.

参考文献:

- [1] Miller R L, and Tegen I. Climate response to soil dust aerosols [J]. *Journal of Climate*, 1998,11(12):3247-3267.
- [2] Saeed T M, Al-Deshti H, and Spyrou C. Aerosol's optical and physical characteristics and direct radiative forcing during a shamaldust storm, a case study [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014,14:3751-3769.
- [3] Sarra AD, Fua D, Meloni D. Estimate of surface direct radiative forcing of desert dust from atmospheric modulation of the aerosol optical depth [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2013,13:527-548.
- [4] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. *J. Geophysical Research*, 1997,102(D6):6831-6864.
- [5] Huang J P, Lin B, Minnis P et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006,33:L19802.
- [6] Helmlert J, Heinold B, Tegen I, Hellmuth O, et al. On the direct and semi-direct effects of Saharan dust over Europe: a modeling study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007,112:D13208.
- [7] Liou K N, and Ou S C. The role of cloud microphysical processes in climate: an assessment from a one-dimensional perspective [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989,94(D6):8599-8607.
- [8] Su J, Huang J P, Fu Q, et al. Estimation of Asian dust aerosol effect on cloud radiation forcing using Fu-Liou radiative model and CERES measurements [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008,8(10):2763-2771.
- [9] Konwar M, Maheskumar R S, Kulkarni J R, and et al. Suppression of warm rain by aerosols in rain-shadow areas of India [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics & Discussions*, 2010, 10(7):17009-17027.
- [10] Qian W, Quan L, Shi S. Variations of the Dust Storm in China and its Climatic Control [J]. *Journal of Climate*, 2002,15(10): 1216-1229.
- [11] Xu Y, Wang H, Hong L, et al. Simulation of dust aerosol radiative feedback using the GMOD: 2. Dust-climate interactions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010,115(4):288-303.
- [12] 陈勇航,毛晓琴,黄建平,等.一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(5):449-454.
- [13] 刘立忠,么 远,韩 婧,等.西安市大气颗粒物数浓度分布及典型天气条件特征变化 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(12):3588-3594.
- [14] Zheng X. *Mechanics of Wind-blown Sand Movement* [M]. Springer, 2009,309pp.
- [15] Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995,100(D8):16415-16430.
- [16] Shao Y P, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region [J]. *Soil Research*, 1996,34(3):309-342.
- [17] Lu H, Shao Y P. A new model for dust emission by saltation bombardment [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999,1041(D14):16827-16842.
- [18] Shao Y P. A model for mineral dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001,106(D17):20239-20254.
- [19] Shao Y P. *Physics and modelling of wind erosion* [M]. Springer, 2008:452.
- [20] 周 碧,张 镭,蒋德明,等.利用激光雷达观测资料研究兰州气溶胶光学厚度 [J]. *干旱气象*, 2013,31(4):666-671.
- [21] 韩 霄,张美根,韩志伟,等.东亚地区气溶胶光学厚度时空分布模拟与分析 [J]. *中国科学:地球科学*, 2010,40(10):1446-1465.
- [22] 张志薇,王宏斌,张 镭,等.中国 3 个 AERONET 站点气溶胶微物理特性分析及比较 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(8):1927-1937.
- [23] 郑晓静,黄 宁,周又和.风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展 [J]. *力学进展*, 2004,34(1):76-86.
- [24] Kok J F, Renno N O. Electrostatics in wind-blown sand [J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(1):145-150.
- [25] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness [J]. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 1994,99(D11):22897-22914.
- [26] Uno I, Eguchi K, Yumimoto K, et al. Asian dust transported one full circuit around the globe [J]. *Nature Geosci.*, 2009,2(8):557-560.
- [27] Ginoux P, Prospero J M, Gill T E, et al. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates

- based on MODIS Deep Blue aerosol products [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012,50(3):70-83.
- [28] Yue X, Wang H, Wang Z, et al. Simulation of dust aerosol radiative feedback using the Global Transport Model of Dust: 1. Dust cycle and validation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009,114(D10):895-896.
- [29] 郑辉,刘树华.沙漠陆面过程参数化与模拟 [J]. *地球物理学报*, 2013,56(7):2207-2217.
- [30] 赵采玲,吕世华,李照国,等.夏季巴丹吉林沙漠陆面热状况对边界层高度影响的模拟实验 [J]. *高原气象*, 2014,33(6):1526-1533.
- [31] 杨先荣,王劲松,何玉春,等.甘肃中部强沙尘暴成因分析 [J]. *中国沙漠*, 2008,28(3):567-571.
- [32] 王存忠,牛生杰,王兰宇.中国 50a 来沙尘暴变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2010,30(4):933-939.
- [33] 冯鑫媛,王式功,程一帆,等.中国北方中西部沙尘暴气候特征 [J]. *中国沙漠*, 2010,30(2):394-399.
- [34] 李智勇.西北地区气候因素对沙尘暴影响的模型研究 [J]. *中国沙漠*, 2009,29(3):415-420.
- [35] 张宇,王素萍,冯建英.2015 年秋季全国干旱状况及其影响与成因 [J]. *干旱气象*, 2015,33(3):528-534.
- [36] Liu B, Qu J, Zhang W, et al. Numerical evaluation of the scale problem on the wind flow of a windbreak [J]. *Scientific Reports*, 2014,4:6619-6619.
- [37] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(2):196-213.
- [38] 赵明,方峨天,詹科杰,等.民勤地区近地面沙尘监测系统的建立及其运行的初步评价 [J]. *中国沙漠*, 2008,28(6):1163-1168.
- [39] Uno I, Carmichael G R, Streets D G, et al. Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003,108(23):1147-1164.
- [40] Liu M, Westphal D L, Wang S, et al. A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003,108(1):147-53.
- [41] Nickovic S, Kallos G, Papadopoulos A, et al. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere [J]. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2001,106(D16):18113-18130.
- [42] Shao Y P, Jung E, Leslie L M. Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(24):AAC 21-1-AAC 21-23.
- [43] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model [J]. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2001,106(D17):20255-20273.
- [44] Zender C S, Bian H, Newman D. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology [J]. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D14):4416.
- [45] Tanaka T Y, Orito K, Sekiyama T T, et al. MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98GCM: Model description: Model description [J]. *Papers in Meteorology & Geophysics*, 2003,53(4):119-138.
- [46] Shinoda M, Gillies J A, Mikami M, et al. Temperate grasslands as a dust source: Knowledge, uncertainties, and challenges [J]. *Aeolian Research*, 2011,3(3):271-293.
- [47] Uno I, Wang Z, Chiba M, et al. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview [J]. *J. Geophysical Research*, 2006,111(D12):2503-2511.
- [48] Koven C D, Inez F. Identifying global dust source areas using high-resolution land surface form [J]. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2008,113(D22):1971-1976.
- [49] 张克存,屈建军,马中华.近 50a 来民勤沙尘暴的环境特征 [J]. *中国沙漠*, 2004,24(3):257-260.
- [50] 邱新法,曾燕,缪启龙.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和地移动路径 [J]. *地理学报*, 2001,56(3):316-322.
- [51] 赵旋,李耀辉,康富贵,等.“4.24”民勤特强沙尘暴过程初步分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012,26(6):40-46.
- [52] 郭萍萍,殷雪莲,刘秀兰,等.河西走廊中部一次特强沙尘暴天气特征及预报方法研究 [J]. *干旱气象*, 2011,29(1):110-115.
- [53] Sugimoto N, Huang Z. Lidar Methods for Observing Mineral Dust [J]. *J. Meteorological Research*, 2014,28(2):173-184.
- [54] Tian P, Cao X, Liang J, et al. Improved empirical mode decomposition based denoising method for lidar signals [J]. *Optics Communications*, 2014,325(325):54-59.
- [55] Shao Y P. Simplification of dust emission scheme and comparison with data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(10):, D10202,doi:10.1029/2003JD004372.
- [56] 吴成来,林朝晖.WRF/Chem 模式中两种起沙参数化方案对东亚地区一次强沙尘暴过程模拟的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2014,19(4):419-436.
- [57] 周旭,吴成来,林朝晖,等.沙尘模式地表起沙参数不确定性分析 [J]. *中国沙漠*, 2011,31(3):575-582.
- [58] 赵庆云,张武,吕萍,等.河西走廊“2010.04.24”特强沙尘暴特征分析 [J]. *高原气象*, 2012,31(3):688-696.
- [59] 李耀辉,沈洁,赵建华,等.地形对民勤沙尘暴发生发展影响的模拟研究—以一次特强沙尘暴为例 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3):849-860.
- [60] 柳丹,张武,陈艳,等.基于卫星遥感的中国西北地区沙尘天气发生机理及传输路径分析 [J]. *中国沙漠*, 2014,34(6): 1605-1616.

作者简介: 周旭(1984-),男,安徽宿州人,兰州大学博士研究生,主要从事沙尘模式中起沙参数化、沙尘气溶胶数值模拟研究。