

安林昌,张恒德,桂海林,等,2018. 2015年春季华北黄淮等地一次沙尘天气过程分析[J]. 气象,44(1):180-188.

2015年春季华北黄淮等地一次沙尘天气过程分析^{*}

安林昌^{1,2,3} 张恒德¹ 桂海林¹ 张天航¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 中国科学院大学,北京 100049

提 要: 利用常规气象观测资料、环境观测资料和 ECMWF 预报模式、CUACE/dust 沙尘模式等资料和预报结果,对 2015 年 3 月 27—30 日华北、黄淮等地沙尘天气过程的天气形势、形成原因和模式预报等结果进行了分析,结果表明:此次沙尘天气过程由东北气旋快速变化引起的冷空气南下造成了华北、黄淮等地的沙尘天气,而后活跃的暖空气盛行一支南风把沙尘又携带返回传输至华北、黄淮一带地区;预报员对这种天气形势的快速变化预计不够充分,加之数值模式对正北路径的漏报,致使对 28 日的华北、黄淮等地大面积沙尘强度及区域预报偏弱,而后预报员和模式也没有充分考虑南风造成的沙尘从南向北回流传输情况的影响,特别是霾天气的同步发展更容易造成对沙尘天气的忽略,所以春季应通过 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度的同时检测来辨识沙尘、霾和混合型天气,通过首要污染物是否为 PM₁₀ 来判断主要污染类型。

关键词: 沙尘天气, PM₁₀, 回流传输, 污染物

中图分类号: P456, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.016

Analysis of a Sand and Dust Weather Process Affecting North China and Huanghuai in Spring 2015

AN Linchang^{1,2,3} ZHANG Hengde¹ GUI Hailin¹ ZHANG Tianhang¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: By using conventional data and simulation results from models of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and Chinese Unified Atmospheric Chemistry Environment Dust (CUACE/Dust), the weather situation, causes and forecasting results of the sand and dust weather process from 27 to 30 March 2015 were analyzed. This sand and dust weather in North China and Huanghuai Region of China resulted from the southward moving of cold air caused by rapid changes of northeast cyclone. And then, active warm air from southern regions brought the dust back to the north. Forecasters' inadequate estimation to the rapid changes of weather situation and the missing forecasting of the dust from the northern path by numerical models led to the underestimation of the strength and coverage area of the dust storm in North China and Huanghuai Region of China on 28 March. Moreover, the back transport of dust from south to north was not fully considered by both forecasters and models, especially in haze days. Thus, dusty, hazy, and the mixed weathers should be identified by observing the concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in spring, and pollution types could be judged by whether the primary pollutants

^{*} 国家重点研发计划专项(2016YFC0203301)、国家自然科学基金重大研究计划项目(91644223)和国家气象中心预报员专项(Y201514)共同资助

2017年2月21日收稿; 2017年8月3日收修定稿

第一作者:安林昌,主要从事环境气象预报工作. Email:alc.8@163.com

were PM_{10} or not.

Key words: sand and dust weather, PM_{10} , return transmission, pollutant

引言

沙尘天气发生时,大量沙尘颗粒进入大气,造成空气混浊、能见度低等现象,会造成严重的空气污染,还会对交通、人体呼吸系统有明确而严重的不利影响;此外,沙尘天气造成的风蚀土壤、破坏植被、掩埋农田等还会加剧沙尘天气的发生和发展(叶笃正等,2000;陈辉等,2012;徐文帅等,2012;王天舒和牛生杰,2017)。在春季,我国华北、黄淮、江淮以及东北地区南部经常受到沙尘天气的侵袭,沙尘气溶胶特征一直以来都受到广泛关注(全林生等,2001;陈广庭,2001;杨东贞等,2002)。影响华北特别是北京的沙尘天气会引起社会的更大关注,多年来很多学者对影响北方地区沙尘天气的源地、发生的主要季节和传输路径等进行过分析,并对沙尘的高空传输和沉降特性进行了总结(杨东贞等,1991;张志刚等,2007;张钦仁等,2012;贺哲,2012;张亚妮等,2013;徐文帅等,2014)。

沙尘天气出现时的气象条件一般为,前期大气层结稳定,有较强的逆温层,不利于污染物扩散;随着冷锋过境,沙尘伴随大风到达,低空出现急流,边界层各气象要素有利于污染物的扩散;在沙尘天气影响时段,呈现 PM_{10} 浓度上升速度远大于 $PM_{2.5}$ 浓度上升速度的变化特征(张强和王胜,2005;孙建华等,2003;延昊等,2006;彭珍等,2007;李国翠等,2007)。在沙尘暴天气多发的我国西北地区,很多学者进行了大量的深入研究,分析了沙尘的粒子谱、光学特性、化学组分等,还通过分析空气动力学特征得出了大气水平、垂直螺旋度等参数,使得沙尘天气的预报有了很多参考(杨东贞等,1995;牛生杰和孙照渤,2005;李岩璞等,2008;李岩璞和张强,2012;韩兰英等,2012)。近些年新型观测仪器如星载激光雷达、激光空气动力学气溶胶粒子谱仪和激光云高仪等的应用,使得对沙尘的垂直分布特征以及沙尘的高空传输有了很好的研究(牛生杰等,2013;姜学恭等,2014;钱莉等,2015;郭伟等,2016),但应用于预报业务的却非常有限。尽管研究人员使用多种方法对影响空气质量的沙尘天气进行了大量研究,同时使用区域或全国的沙尘模式对沙尘过程进行模拟研

究(赵琳娜等,2002;康凤琴等,2009;王益柏等,2009;赵建华等,2009;黄乾等,2012),但这些研究仍大多集中于沙尘直接输送对空气质量影响等方面,针对外来沙尘随着气流经过后又回流的二次影响研究非常少。

2015年3月27—30日华北、黄淮等地出现了沙尘天气过程,这次沙尘天气过程具有影响范围广、局地能见度偏低、空气污染等级高、沙尘与霾交替、沙尘粒子在过程后期自南向北回流传输出现等特点,沙尘路径变化和沙尘回流传输等复杂现象使得预报十分困难,同时对预警发布提出了很高的挑战。本文利用常规气象观测资料、环境观测资料和欧州中期天气预报中心预报模式(以下简称EC模式)、亚洲沙尘模式(CUACE/Dust)等资料和预报结果,对这次沙尘天气过程的天气形势、形成原因和模式预报等结果进行了分析,着重研究沙尘回流发生的天气形势和移动路径,比较沙尘正面输送与回流之间的差异,探究沙尘回流过程中的传输规律,以期为更好地服务于空气质量预报和沙尘天气预报预警工作提供经验。

1 沙尘概况及预报

1.1 沙尘概况

受较强冷空气影响,2015年3月27—30日内蒙古中东部、黑龙江南部、北京、天津、河北、河南、山东、江苏等11省(区、市)出现了沙尘天气过程,沙尘影响面积达110万 km^2 ,其中华北、黄淮等地能见度普遍低于8 km。这次沙尘天气过程具有沙尘范围广、能见度偏低、空气污染等级高、沙尘与霾交替、沙尘粒子在过程后期自南向北回流传输出现等特点。27日,内蒙古中部地区出现扬沙浮尘天气,但 PM_{10} 浓度较低(图1a)。28日,受偏北气流影响,随上升气流进入高空的沙尘向南输送后出现沉降,导致华北、黄淮等地出现大范围沙尘天气,部分地区 PM_{10} 浓度超过 $350 \mu g \cdot m^{-3}$ (图1b);而后,东北地区中南部、华北、黄淮等地出现大范围能见度不足5 km的霾。29—30日受偏南风影响,传输至华北南部、黄淮、江淮东部等地的沙尘出现了罕见的回流输送

现象,北京、河北等地在出现霾的同时再次经历沙尘天气,首要污染物为 PM_{10} (图 1c 和 1d)。本次沙尘天气过程起源于蒙古国和我国内蒙古中部以及东北地区西部等地,受偏北气流引导,影响西北地区东部、华北大部、东北地区南部、黄淮和江淮东部等地,属于偏北路径型沙尘天气过程。

从京津冀主要城市 PM_{10} 浓度时间序列图来看,北京沙尘浓度的最高时段在 3 月 28 日 07—14 时, PM_{10} 峰值浓度接近 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 28 日 18 时至 29 日 06 时, PM_{10} 稳定在约 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 29 日 08 时开始, PM_{10} 浓度再次突然上升,在 29 日 12 时, PM_{10} 浓度达到 $531 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这是由于偏南风将华北南部、黄淮等地的沙尘向北回流传输再次经过北京造成的。天津的 PM_{10} 峰值浓度出现时间较北京晚约 2 h,但从 28 日 13 时至 29 日 03 时天津的 PM_{10} 浓度持续在 $500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,持续时间比北京长很多, PM_{10} 浓度于 29 日 05 时下降至 $250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近后,在 12 时开始回升,至 16 时再次达到峰值 $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,可见天津受沙尘回流影响比北京小(图 2a)。徐州、连云港、淮安、盐城、宿迁等地 PM_{10} 浓度突然上升的时间比较一致,3 月 29 日 10 时附近上述五城市的 PM_{10} 浓度突然上升,于 13 时附近达到峰值,浓度为 $400 \sim 800 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这些城市的 PM_{10} 峰值浓度较北京、天津要小很多(图 2b)。

1.2 实时预报结果

本次过程从 3 月 26 日开始进行重点预报,预报结果不断被调整,直至 4 月 1 日过程结束。3 月 26 日,中国气象局上报的《重大气象信息专报》第 11 期中明确预报出“27 日夜间至 28 日白天北京将有扬沙或浮尘”。3 月 26 日 18 时,中央气象台发布沙尘暴蓝色预警,此后持续发布沙尘暴蓝色预警直至 27 日 18 时解除沙尘暴蓝色预警。3 月 30 日 18 时,中央气象台再次发布沙尘暴蓝色预警。至 4 月 1 日 06 时解除。北京的预报服务情况是,3 月 27 日 17 时,北京市气象台向公众发布预报指出:27 日夜间到 28 日有沙尘天气;28 日 10 时,北京市气象台发布沙尘蓝色预警信号,下午 16 时解除沙尘蓝色预警;29 日 11 时,北京市气象台再次发布沙尘蓝色预警信号,在 30 日 08 时解除沙尘蓝色预警。

3 月 26 日对本次沙尘过程的预报结论是:26—28 日,受冷空气和蒙古气旋共同影响,西北及华北北部将有一次大风沙尘天气过程。新疆南疆盆地、

内蒙古中西部、甘肃河西、宁夏北部、陕西北部、华北北部将有扬沙或浮尘,其中新疆南疆盆地东部、内蒙古西部局地有沙尘暴。可见,在本次过程最初的预报中,只考虑了内蒙古中西部、甘肃河西、宁夏北部等地的沙尘天气向华北、黄淮等地的输送,而实况显示这一路径的沙尘对华北、黄淮等地后几天的沙尘天气影响非常小(图 3a)。3 月 27 日的预报将 27 日 08 时至 29 日 08 时的沙尘暴和扬沙浮尘的落区向西调整,但对华北、黄淮等地的沙尘天气预报不够准确(图 3b)。

3 月 28 日预报 28 日 08 时至 29 日 08 时沙尘天气影响华北北部地区,之后逐渐减弱消失。从实况来看,对沙尘天气的范围预报严重偏小。并且,预报员对 29 日之后的沙尘天气回流现象,没有做出准确预报(图 4)。

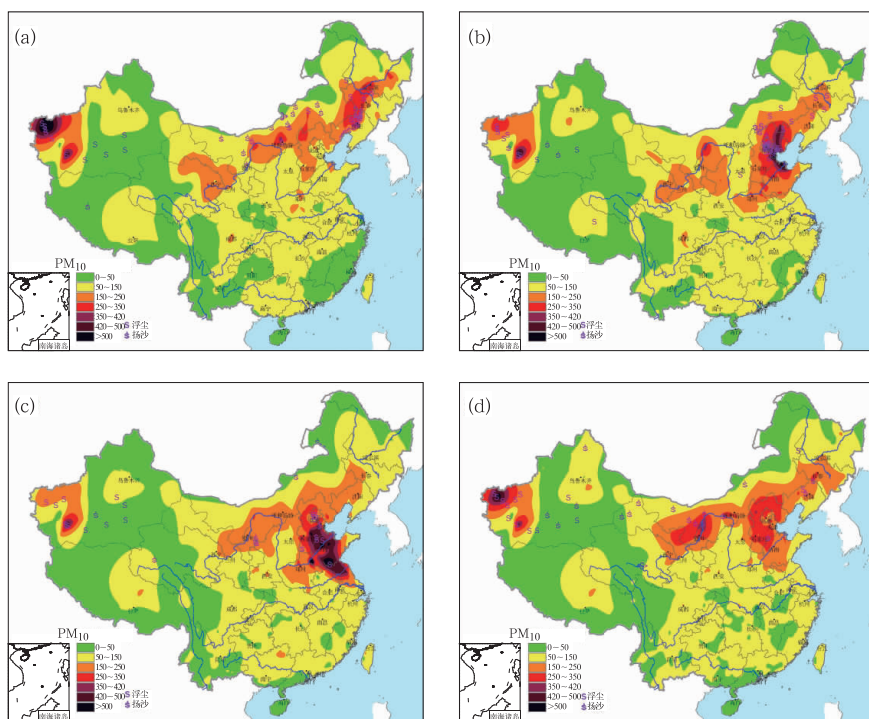
2 地面形式演变特征

从 2015 年 3 月 28 日 08 时地面天气图(图 5a)可以看到,较弱的东北气旋快速东移,带下一股冷空气,从东北地区中南部到华北、黄淮西部有一明显冷锋,等压线密集,气压梯度大,冷锋后部有较强西北风,是沙尘天气侵袭华北、黄淮地区的主要原因。该冷锋移动和减弱的速度很快;28 日 20 时上述范围气压梯度减弱,地面风速同时减弱(图 5b)。29 日原东北气旋快速东移减弱,在偏北地区又生成一个新的蒙古气旋且东移速度也很快,气旋后部的冷高压快速东移,同时北缩减弱(图 5c),位于河套地区的低压发展加强,表明这里的暖空气活跃,低压前部到出海高压后部盛行一支较强的南风(图 5d),导致华北南部、黄淮等地的沙尘向北回流传输再次影响河北中部、北京、天津等地。预报员对这种天气形势的快速变化预计不力,加之受数值预报结果的影响,致使对天气形势特别是地面风速的快速转变没有较好把握。

3 数值预报结果分析

3.1 EC 模式对 10 m 风场的预报分析

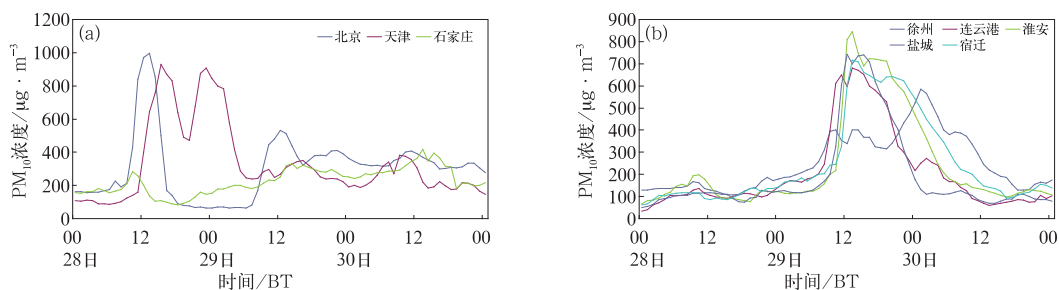
由 EC 模式 3 月 26 日 08 和 20 时及 27 日 08 时分别起报的 28 日 08 时 10 m 风场(图 6)对比可以看到,内蒙古中部有比较一致的较强西北风,但进入

图 1 2015 年 3 月 27—30 日 PM_{10} 最高浓度(单位: $\mu g \cdot m^{-3}$)及沙尘天气分布图

(a)27 日,(b)28 日,(c)29 日,(d)30 日

Fig. 1 Distribution of maximum PM_{10} concentration (unit: $\mu g \cdot m^{-3}$) and dust weather in 27—30 March 2015

(a) 27, (b) 28, (c) 29, (d) 30 March

图 2 2015 年 3 月 28—30 日 北京、天津、石家庄(a)和徐州、连云港、淮安、盐城、宿迁(b) PM_{10} 浓度时间序列图Fig. 2 Concentration time series of PM_{10} in 28—30 March 2015

(a) Beijing, Tianjin and Shijiazhuang; (b) Xuzhou, Lianyungang, Huai'an, Yancheng and Suqian

河北北部后风速迅速减小,预报员考虑从内蒙古西部和蒙古西部输送的沙尘颗粒,经过长距离的传输和沉降,沙尘浓度会有大幅度的降低,加之到河北北部后风速减小传输作用减弱,由此路径而来的沙尘对华北、黄淮的影响会较小,故对 28 日华北、黄淮可能产生沙尘天气的可能性没有引起足够重视。但是,在内蒙古中部偏东和河北北部的位置,EC 模式 3 月 26 日 08 时起报的 28 日 08 时 10 m 风场风速较小,而 26 日 20 时和 27 日 08 时起报的 28 日 08

时 10 m 风场向偏强方向调整,从 27 日 20 时起报的 28 日 08 时 10 m 风场中看到,此处的 10 m 风速并没有达到非常强的情况(图 6d)。28 日影响华北、黄淮等地的沙尘天气主要是经过高空传输经过此区域到华北、黄淮等地突然“空降”的沙尘。

3.2 CUACE/Dust 对沙尘天气的预报分析

CUACE/Dust 是中国气象局环境气象中心对沙尘天气预报业务的一个重要参考,该模式综合了

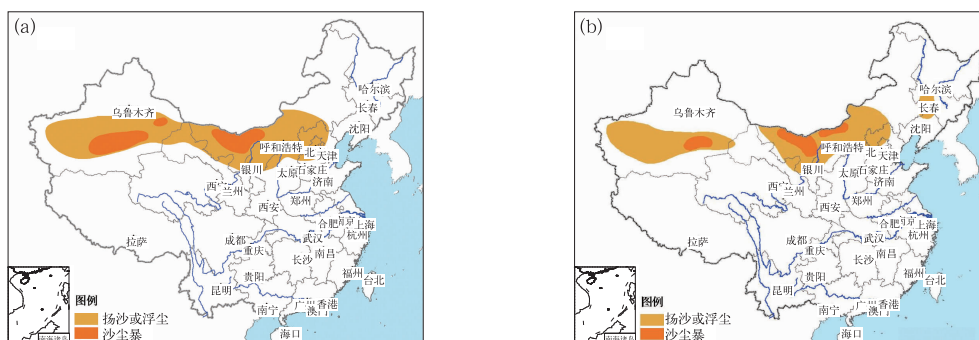


图3 2015年3月(a)26日10时发布的26日08时至28日08时和(b)

27日06时发布的27日08时至28日08时全国沙尘落区预报图

Fig. 3 (a) The 08:00 BT 26—08:00 BT 28 March dust forecast issued

at 10:00 BT 26 March 2015 and (b) the 08:00 BT 27—08:00 BT

28 March dust forecast issued at 06:00 BT 27 March 2015

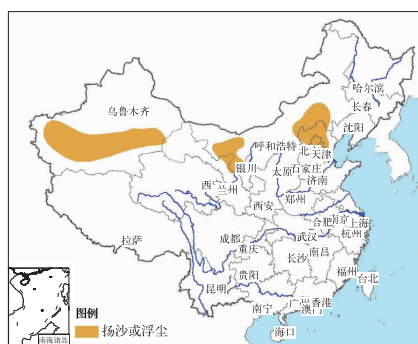


图4 2015年3月28日06时发布的

28日08时至29日08时全国

沙尘落区预报图

Fig. 4 The 08:00 BT 28—08:00 BT

29 March dust forecast issued

at 06:00 BT 28 March 2015

排放,干、湿沉降和其他大气动力过程建立分粒径多组分气溶胶模型,并使用中国气象局地面观测数据和中国地球同步卫星数据结合的同化系统(Gong and Zhang, 2008),每日两次提供24、48和72 h的亚洲区域沙尘天气预测,在与地面气象观测资料的检验后,24 h预报的TS评分可以达到0.31,48和72 h分别为0.23和0.21(Zhou et al, 2008)。由亚洲沙尘模式2016年3月25日20时起报(3月26日早间使用)的地面沙尘浓度分布图(图7)可以看到,27日下午至夜间,内蒙古西部出现的较大范围的沙尘浓度高值区(图7a),至28日早上影响甘肃东部、宁夏北部、陕西北部、山西、北京、天津、河北、河南北部等地。经过程结束后的检验,此时次起报的28日

沙尘浓度考虑了对华北地区的影响,但是与实况的影响路径有误,对黄淮等地的沙尘天气也无有效的预报结果(图7b)。

CUACE/Dust2016年3月26日20时起报(3月27日早间使用)的地面沙尘浓度分布图显示,亚洲沙尘模式对27日下午至夜间内蒙古西部的沙尘浓度向低的方向调整,相应地对28日华北、黄淮等地的沙尘天气调整为影响很小(图8)。这样的模式调整对预报员造成一种错觉,认为沙尘天气不会在28日对华北、黄淮等地产生较为明显的影响。但是模式对正北路径沙尘的漏报,引导预报员忽略了对此路径沙尘影响的考虑,致使对28日华北、黄淮等地大面积沙尘天气预报偏弱。

4 拉格朗日混合单粒子轨道模型后向轨迹分析

拉格朗日混合单粒子轨道模型(hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式,已经被广泛地应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中。使用HYSPLIT-4模型分别对3月28日13时和29日13时100、500和1000 m高度的污染物进行后向轨迹分析(图9),其中气象数据使用的是

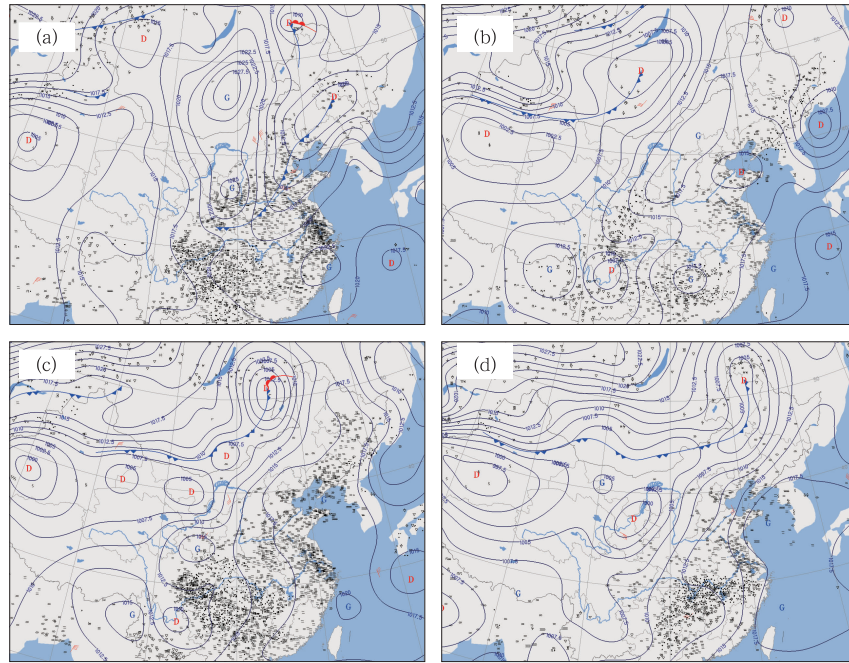


图 5 2015 年 3 月 28 日 08 时(a)、20 时(b)和 29 日 08 时(c)、20 时(d)地面天气图

Fig. 5 Surface synoptic charts at (a) 08:00 BT 28, (b) 20:00 BT 28, (c) 08:00 BT 29, and (d) 20:00 BT 29 March 2015

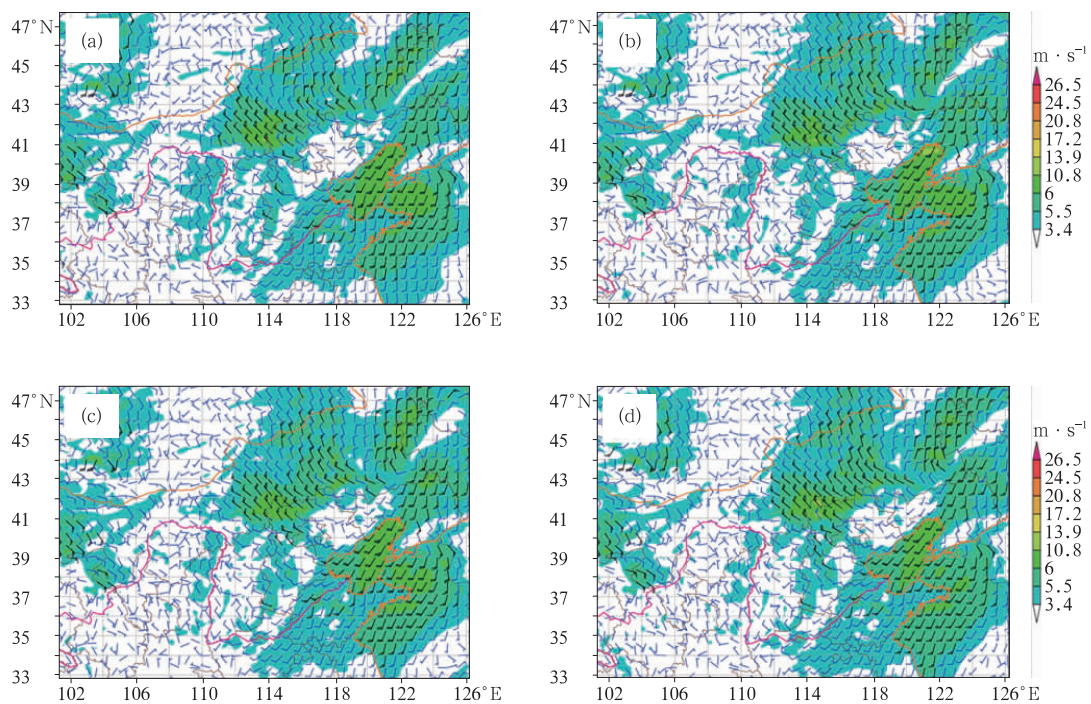


图 6 2015 年 3 月 26 日 08 时(a)和 20 时(b)、27 日 08 时(c)和 20 时(d)分别起报的 28 日 08 时 10 m 风场

Fig. 6 The 10 m wind forecast by EC at 08:00 BT 28 March 2015 issued at (a) 08:00 BT 26, (b) 20:00 BT 26, (c) 08:00 BT 27, and (d) 20:00 BT 27 March 2015

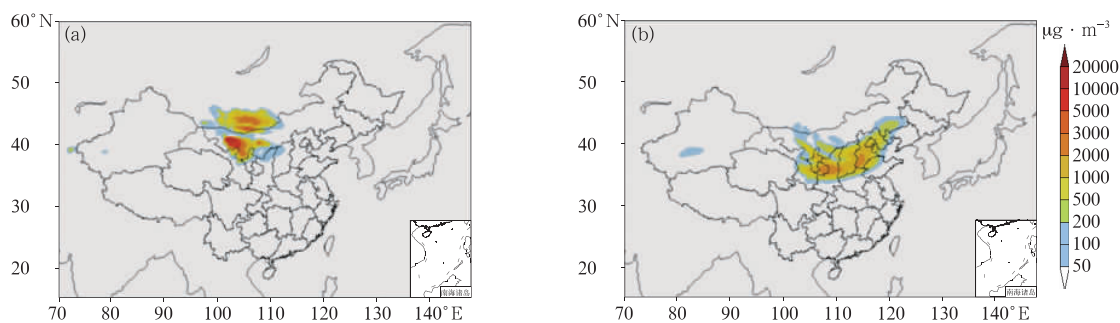


图 7 2015 年 3 月 25 日 20 时起报的 27 日 14 时(a)和 28 日 05 时(b)地面沙尘浓度分布

Fig. 7 Surface dust concentration at (a) 14:00 BT 27 and (b) 05:00 BT
28 March issued at 20:00 BT 25 March 2015

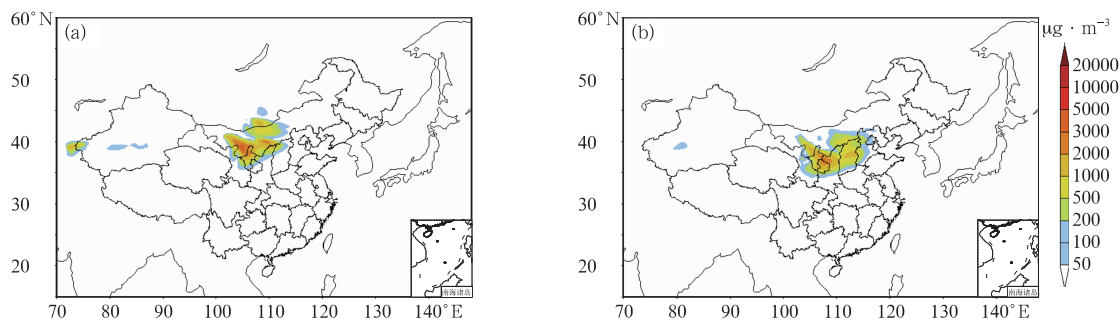


图 8 2015 年 3 月 26 日 20 时起报的 27 日 20 时(a)和 28 日 02 时(b)地面沙尘浓度分布

Fig. 8 Surface dust concentration at (a) 20:00 BT 27 and (b) 02:00 BT
28 March issued at 20:00 BT 26 March 2015

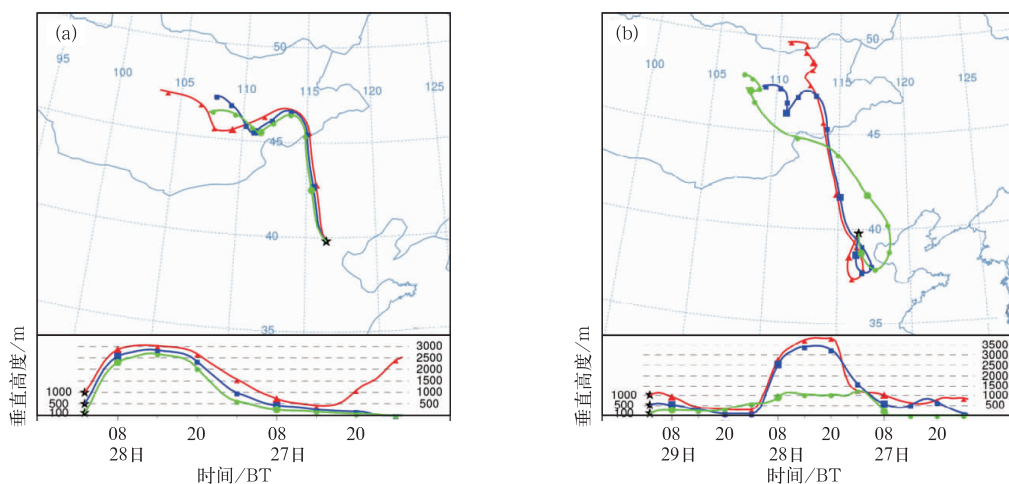


图 9 2015 年 3 月 28 日 13 时(a)和 29 日 13 时(b)的北京污染物后向轨迹分析

Fig. 9 Analysis of backward trajectory of pollutants in Beijing
at (a) 13:00 BT 28, and (b) 13:00 BT 29 March 2015

NCEP GDAS 再分析资料。

北京第一次 PM_{10} 峰值对应的时次在 3 月 28 日 13 时,使用 HYSPLIT 模型对该时次的污染物进行后向轨迹分析,可以看到这个时次的沙尘主要是在

27 日 08 时附近从蒙古国东南部近地面大风吹起的沙尘,随着上升气流升至高空,输送至我国境内,经过内蒙古中部和河北北部,沙尘在 28 日 08 时之后随着下沉气流,沉降于北京(图 9a);而北京第二次

PM₁₀ 浓度峰值对应的时次在 29 日 13 时使用 HYSPLIT 模型对该时次的污染物进行后向轨迹分析, 可以看到这个时次的沙尘主要是在 28 日上午近地面开始传输而来(图 9b)。

5 沙尘回流和混合污染

29 日早晨, 沙尘污染物已经传输至华北东南部、黄淮东部和江淮东部等地, 此时上述大部分地区 10 m 风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 处于静风状态, 霾天气开始有所发展。29 日中午上述地区出现持续的偏南风, 沙尘等污染物向北传输至华北中南部, 出现了罕见的沙尘回流输送现象(图 10)。

华北中南部的主要沙尘天气出现在 28 日白天, 夜间随着沙尘颗粒物的向南输送, PM₁₀ 浓度和 PM_{2.5} 浓度均有明显下降, 空气质量以优或良为主。29 日上午华北中南部污染物浓度再次上升, 在 PM_{2.5} 上升的同时, PM₁₀ 浓度上升也尤为明显, 特别是在 29 日 12 时, PM₁₀ 浓度达到 $531 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{2.5} 浓度为 $139 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 可见粒径较大的沙尘颗

粒物在总颗粒物中占的比例更大一些。29 日首要污染物为 PM₁₀, 所以在这一沙尘和霾的混合型污染天气中, 沙尘污染占主要地位(图 11)。

6 结论与讨论

通过对 2015 年 3 月 27—30 日华北、黄淮等地沙尘天气过程的分析, 可得到以下主要结论和启示:

(1) 在沙尘天气的预报中, 要密切关注数值模式对风场、沙尘落区、强度和输送路径的预报结果调整的缘由。在本次沙尘天气的预报过程中, 数值模式对西北路径沙尘输送的动力条件向减弱调整, 则使沙尘对华北、黄淮等地影响较小; 但不能忽略北方路径沙尘的动力传输条件, 否则对北方路径的沙尘天气过程容易漏报。

(2) 在此次沙尘天气过程中, 源于蒙古国东南部戈壁沙漠的沙尘被大风扬向空中, 并沿空中偏北大风经内蒙古中部偏东地区及河北北部地区顺势南下, 而后沉降在华北、黄淮等地区。因高空、地面风场的差异, 导致地面观测的沙尘天气沿路径方向有

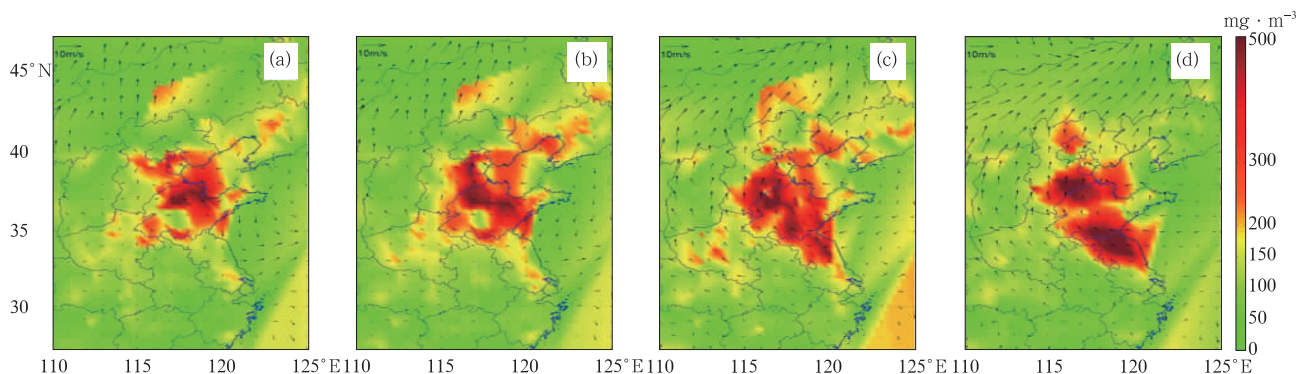


图 10 2015 年 3 月 29 日 05 时(a)、06 时(b)、11 时(c)和 14 时(d)AQI 分布及 EC 预报 10 m 风场图

Fig. 10 Distribution of AQI and 10 m wind at

(a) 05:00 BT, (b) 06:00 BT, (c) 11:00 BT and (d) 14:00 BT 29 March 2015

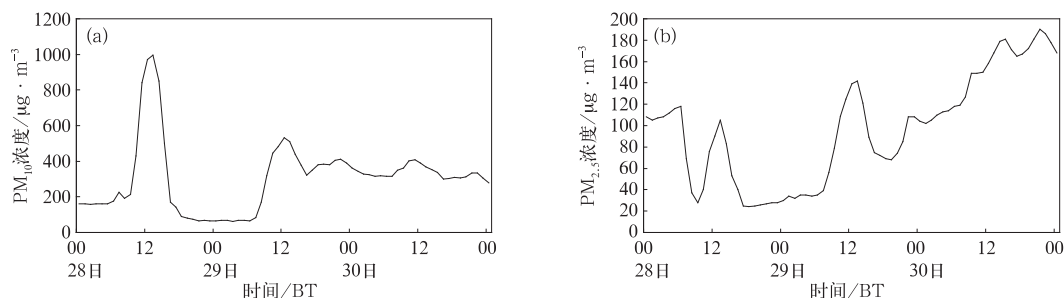


图 11 2015 年 3 月 28—30 日北京 PM₁₀ (a) 和 PM_{2.5} (b) 平均浓度时间序列图

Fig. 11 Time series of particulate concentration of PM₁₀ (a) and PM_{2.5} (b) in 28—30 March 2015

不连续性,易于造成对沙尘天气在地面观测中中断的现象,误以为沙尘天气结束了。故在沙尘天气的预报中,应注重于对近地层风场、沙源地和重点服务保障区域之间的高空风场进行分析和监测,同时分析逐层大气的垂直运动状况,了解沙尘的动力传输条件。

(3) 在偏北大风携带沙尘东移南下时,要关注风场的突然变化,尤其是春季的偏南大风会造成沙尘向北回流输送,致使沙尘天气再现。此外,PM₁₀浓度是区分沙尘和霾的一个好的辨识量,首要污染物指示出污染物中的主要成分,对污染源的分析及污染预报可提供一些参考依据。特别是在霾天气的同步发展时更容易造成对沙尘天气的忽略,所以春季应通过PM₁₀和PM_{2.5}浓度的同时检测来辨识沙尘、霾及混合型天气,通过首要污染物是否为PM₁₀来判断主要污染类型。

另外,由于本文着重分析了沙尘天气对华北、黄淮等地影响的传输路径、沙尘回流等特征,总结了沙尘天气对非沙源地区域影响的预报预警经验,而对沙源地的起沙环境、起沙机制等分析不够深入,所以在今后的沙尘天气过程预报预警和总结分析中还应加强对我国西北地区、蒙古国等沙源地气象条件的分析。

参考文献

- 陈广庭,2001.近50年北京的沙尘天气及治理对策[J].中国沙漠,21(4):402-407.
- 陈辉,赵琳娜,赵鲁强,等,2012.沙尘天气过程对北京空气质量的影响[J].环境科学研究,25(6):609-614.
- 郭伟,卜令兵,贾小芳,等,2016.基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析[J].气象,42(12):1540-1546.
- 韩兰英,张强,郭妮,等,2012.中国西北地区沙尘天气的时空位移特征[J].中国沙漠,32(2):454-457.
- 贺哲,2012.2006年3月末河南一次沙尘暴过程的天气成因分析[J].气象,38(8):932-942.
- 黄乾,姚素香,张耀存,2012.区域气候模式对中国沙尘天气气候特征的模拟研究[J].中国沙漠,32(1):188-197.
- 姜学恭,陈受钧,云静波,2014.基于CALIPSO资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分析[J].气象,40(3):269-279.
- 康凤琴,银燕,张逸轩,2009.中国北方沙尘气溶胶对云和降水影响的数值模拟研究[J].气象,35(6):36-45.
- 李国翠,王建国,连志鸾,等,2007.2006年春季石家庄市沙尘天气与PM₁₀污染[J].中国环境监测,23(6):57-60.
- 李岩瑛,张强,2012.水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用[J].气象学报,70(1):144-154.
- 李岩瑛,张强,李耀辉,等,2008.水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系研究[J].地球物理学报,51(3):692-703.
- 牛生杰,吕晶晶,岳平,2013.半干旱荒漠化草原春季边界层特征的一次综合探测[J].中国沙漠,33(6):1858-1865.
- 牛生杰,孙照渤,2005.春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测[J].高原气象,24(4):604-610.
- 彭珍,刘熙明,洪钟祥,等,2007.北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征[J].气候与环境研究,12(3):267-276.
- 钱莉,滕杰,胡津革,2015.“14.4.23”河西走廊特强沙尘暴演变过程特征分析[J].气象,41(6):745-754.
- 全林生,时少英,朱亚芬,等,2001.中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J].地理学报,56(4):477-485.
- 孙建华,赵琳娜,赵思雄,2003.一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,8(2):125-142.
- 王天舒,牛生杰,2017.内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与PM₁₀、能见度相关性分析[J].大气科学,41(1):121-131.
- 王益柏,费建芳,黄小刚,2009.应用Models-3/CMAQ模式对华北地区一次强沙尘天气的研究初探[J].气象,35(6):46-53.
- 徐文帅,李云婷,孙瑞雯,等,2014.典型沙尘回流天气过程对北京市空气质量影响的特征分析[J].环境科学学报,34(2):297-302.
- 徐文帅,魏强,冯鹏,等,2012.2010年春季沙尘天气对北京市空气质量的影响及其天气类型分析[J].中国环境监测,28(6):19-26.
- 延昊,刘桂清,宋振鑫,等,2006.一次向西输送的亚洲沙尘过程[J].中国沙漠,26(5):759-762.
- 杨东贞,纪湘明,徐晓斌,等,1991.一次黄沙天气过程的分析[J].气象学报,49(3):334-342.
- 杨东贞,王超,温玉璞,等,1995.1990年春季两次沙尘暴特征分析[J].应用气象学报,6(1):18-26.
- 杨东贞,颜鹏,徐祥德,2002.北京风沙天气的气溶胶特征[J].应用气象学报,13(S1):185-194.
- 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等,2000.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,55(5):513-521.
- 张强,王胜,2005.论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J].中国沙漠,25(5):675-681.
- 张钦仁,张明伟,蒋建堂,2012.近60年北京地区沙尘天气变化及路径分析[J].高原气象,31(2):487-491.
- 张亚妮,张碧辉,宗志平,等,2013.影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析[J].气象,39(7):911-922.
- 张志刚,高庆先,矫梅燕,等,2007.影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析[J].环境科学研究,20(4):21-27.
- 赵建华,张强,李耀辉,等,2009.“7.17”西北夏季沙尘暴数值模拟[J].中国沙漠,29(6):1221-1228.
- 赵琳娜,孙建华,赵思雄,2002.一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究[J].气候与环境研究,7(3):279-294.
- Gong S L, Zhang X Y, 2008. CUACE/Dust—an integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia[J]. Atmos Chem Phys, 8(9):2333-2340.
- Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al, 2008. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust[J]. Atmos Chem Phys, 8(4):787-798.