

# 基于定量监测的沙尘暴定量预报方法

孙永刚 孟雪峰 宋桂英 孙 鑫 云静波

(内蒙古自治区气象台, 呼和浩特市 010051)

**提 要:** 近年来, 内蒙古自治区建立了6个沙尘暴监测站, 对沙尘天气进行了连续、定量观测, 在预报业务工作中可以得到器测能见度、 $PM_{10}$ 、TSP等定量数据, 为沙尘暴的定量分析和预报提供了基础条件。选取了2004—2007年间内蒙古地区10次较强沙尘暴天气过程, 利用内蒙古自治区的6个沙尘暴监测站器测资料, 结合常规观测资料进行了分析。分析表明: 器测数据具有连续、稳定、定量的优势; 但器测数据与现行沙尘天气业务标准存在很大差异, 需要新的分级标准。在现有数据条件下, 初步确定了器测能见度、 $PM_{10}$ 的沙尘天气分级标准; 讨论了沙尘暴形成的定量条件和机制, 以沙尘综合指数、摩擦速度等为预报因子建立了器测能见度、 $PM_{10}$ 的沙尘暴定量预报方程。该预报方法在2008年的业务试用中预报效果较好。

**关键词:** 沙尘暴 定量预报 器测能见度  $PM_{10}$

## Sand Storm Quantitative Forecast Method Based on Quantitative Monitoring

Sun Yonggang Meng Xuefeng Song Guiying Sun Xing Yun Jingbo

(Inner Mongolia Autonomous Meteorological Observatory, Huhhot 010051)

**Abstract:** In recent years, the Inner Mongolia Autonomous Region has established 6 sand storm inspection stations. A series of quantitative data, such as the instrument-measured visibility,  $PM_{10}$ , TSP was obtained from the continuously quantitative observation in the sand dust weather. It provides the basic requirement for the sand storm quantitative analysis and forecast. Ten strong sand storm processes in Inner Mongolian during 2004—2007 are chosen, and the instrument-measured data of 6 sand storm inspection stations combining with the observations are analyzed. The analysis indicates that the instrument-measured data has superiority in continuation, stability and quantification. But it is different from the view of point of the present sand weather service standard. The new grading standard is needed. Under the existing data condition, A sand dust weather grading standards is determined initially based on the instrument-measured visibility and  $PM_{10}$ . The quantitative condition

and the mechanism of the sand storm formation are discussed. The instrument-measured visibility,  $PM_{10}$  sand storm quantitative prognostic equation is established on the predictor of sand dust composite index, the friction speed and so on. This sand storm forecast method is used in quantitative sand forecast in 2008 and obtained good effect.

**Key Words:** sand storm quota forecast instrument-measured visibility  $PM_{10}$

## 引 言

内蒙古自治区地处我国北方,是沙尘暴多发地区之一,在干旱的春季沙尘暴发生尤为频繁。给受灾地区农业生产、城市交通和人民生活造成了严重的危害。沙尘暴已成为我国北方地区严重的环境问题之一,受到国际和国内的广泛关注。对沙尘暴成因的相关研究表明,强冷空气爆发南下是沙尘暴天气形成的主要原因,蒙古气旋和冷锋<sup>[1-7]</sup>是引起大范围沙尘暴天气的天气尺度系统,干飚线<sup>[8]</sup>、副冷锋<sup>[9]</sup>是产生局地强沙尘暴和起沙的重要中尺度系统。沙尘天气的发生取决与沙源分布、地面大风和不稳定层结等条件。

近年来,随着沙尘暴定量监测业务的开展,预报业务中可以获得 TSP 质量浓度、 $PM_{10}$  浓度、器测能见度等沙尘暴监测资料。为进一步深入、定量分析沙尘暴成因和沙尘暴定量预报提供了基础数据。目前,对沙尘天气的定量监测、分析与预报刚起步。现行沙尘暴等级国家标准<sup>[10]</sup>,是根据人工观测水平能见度的大小定义沙尘天气的分级。关于沙尘暴的分级标准问题,国内外学者做了很多研究和讨论<sup>[11-15]</sup>。万本太<sup>[16]</sup>提出了根据一定时间内大气中总悬浮颗粒物(TSP)的浓度来确定沙尘暴强、中、弱的标准。Shao 和 Wang<sup>[17]</sup>基于 TSP 浓度的观测,建立了沙尘能见度与 TSP 浓度的统计反演关系,并应用到沙尘数值预报模式的检验分析上。牛生杰<sup>[18]</sup>对 TSP 的研究,在巴丹吉林和腾格里等沙漠边缘区春季的观察取样,背景大气、浮尘天气、扬沙天气和沙尘暴天气下,沙尘气溶胶的 TSP 浓度分别为  $82.8\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、

$356.4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1205.8\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和  $3955.3\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从这些数据中可以看出,浮尘天气是背景大气的 4.35 倍,扬沙天气是浮尘天气的 3.38 倍,沙尘暴天气是扬沙天气的 3.28 倍。矫梅燕、赵琳娜<sup>[19]</sup>利用地面观测资料,采用沙尘天气的强度分类与反演的沙尘浓度分级的统计方法,建立了不同沙尘天气(扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)对应的沙尘浓度等级,并建立了不同沙尘天气与沙尘数值预报模式输出浓度之间的定量分级关系。

本文对沙尘暴 TSP 质量浓度、 $PM_{10}$  浓度、器测能见度等器测资料与地面常规观测资料进行统计和对比分析,确定不同沙尘天气(扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)对应的  $PM_{10}$  浓度、器测能见度的等级划分,进而分析形成沙尘天气的定量化指标。应用数值预报产品释用技术,建立沙尘天气的  $PM_{10}$  浓度、器测能见度的定量预报方程,在业务中对沙尘暴定量监测数据进行预报和检验,提高对沙尘暴预报服务的定量化水平。

## 1 资料

选取了 2004—2007 年间,发生在内蒙古自治区的 10 次较强沙尘暴天气过程。

针对 10 次过程,整理了内蒙古自治区六个沙尘暴监测站(乌拉特中旗、额济纳旗、东胜、朱日和、锡林浩特、通辽)的器测能见度、 $PM_{10}$  浓度、TSP 质量浓度的连续观测资料;同时,整理了常规观测资料,得到 3 小时一次的天气现象、能见度等观测数据。

收集整理了 10 次较强沙尘暴天气过程的 NCEP 再分析资料,用于分析沙尘天气成因和定量预报指标。

## 2 沙尘暴定量监测数据分析与沙尘分级标准讨论

目前对沙尘暴强度和分级是基于人工观测的天气现象和能见度定义的,而能见度的观测明显存在一些缺陷,一方面,能见度的观测受人为主观的影响很大,如人的习惯、人的视力,环境光线照度等;另一方面,能见度的观测取值不连续、不定量,对沙尘暴的精细化定量分析是不利的。因此,在沙尘暴的分析、预报和服务中应用连续、定量的器测资料是迫切之需。

### 2.1 能见度与 $PM_{10}$ 的统计关系

$PM_{10}$  能较好地反映沙尘暴的强度和沙尘粒子浓度,是定量分析沙尘暴的重要指标。比较  $PM_{10}$ 、能见度的相关关系(图 1a)与  $PM_{10}$ 、器测能见度的相关关系(图 1b):能见度的各点相对较分散,连续性较差;而器测能见度各点相对较集中,连续性较好。与  $PM_{10}$  的相关系数器测能见度为  $R = -0.8896$ ,能见度为  $R = -0.7432$ 。可见器测能见度较能见度具有连续、稳定、定量的优势。

### 2.2 能见度与器测能见度的统计关系

从能见度与器测能见度散点图中(图 2)可以分析出:(1)两种观测数据的正相关是明显的,相关系数:  $R = 0.8190$ ,通过了相关性检验。(2)两种观测存在明显差异,各点较分散。(3)能见度、器测能见度观测的目标是一个,理想情况下应趋于“理想线”(图 2 中对角线)。而实际各点趋势线为图中的曲线。说明器测能见度有系统差异。(4)能见度较小时,各点集中于“理想线”下方,器测能见度值大于能见度值;能见度较大时,各点集中于“理想线”上方,器测能见度值小于能见度值。从趋势线与“理想线”的相交也可以分析出这一特点。说明了以目前业务中使用的能见度为标准,器测能见度观测是“不准确的”,在能

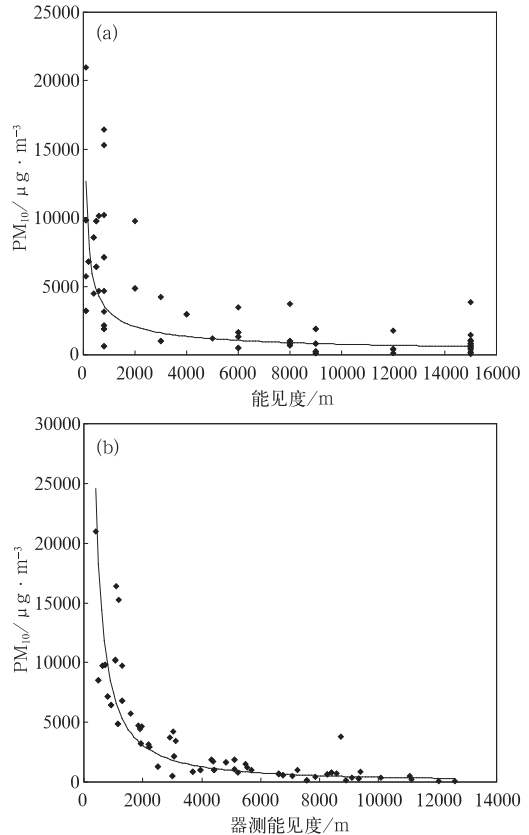


图 1 (a)  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 与能见度 (m) 散点分布图; (b)  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 与器测能见度 (m) 散点分布图

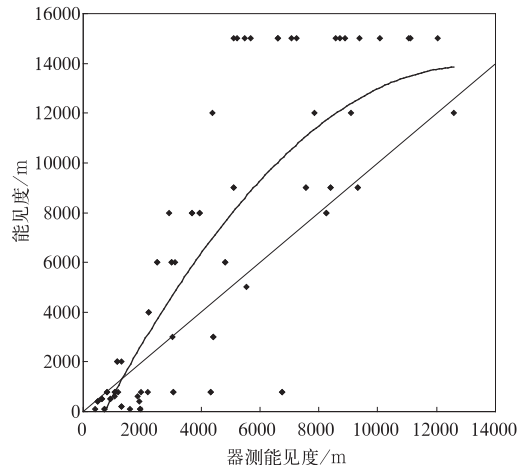


图 2 器测能见度 (m) 与能见度 (m) 散点分布图

能见度较小时(小于 2000m),器测能见度观测值偏高;相反,在能见度较大时(大于

2000m), 器测能见度观测值偏低。器测能见度要应用到业务工作中需要进行订正(修正)或重新划定其对不同沙尘天气的分级标准。

### 2.3 沙尘暴的分级标准

重点讨论, 在现有沙尘暴的分级标准基础上, 确定不同沙尘天气(扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)对应的  $PM_{10}$  浓度、器测能见度的等级划分, 使新的沙尘暴监测资料能够应用在预报业务中, 为进一步定量预报沙尘天气打好基础。

应用器测数据与业务沙尘天气分级标准进行统计和对比分析, 得出  $PM_{10}$  沙尘天气分级统计结果(表 1)、器测能见度沙尘天气分级统计结果(表 2)。根据统计结果可以确定:

表 1  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 沙尘天气分级统计结果

沙尘分类	强沙尘暴	沙尘暴	扬沙浮尘
$PM_{10}$ 范围	22985.8— 4447.7	12422.8— 2189.0	6765.3— 221.2
$PM_{10}$ 均值	8545.7	6527.0	2518.1
样本数	17	25	67
$PM_{10}$ 域值	$PM_{10} \geq 7000$	$4000 \leq PM_{10} < 7000$	$600 \leq PM_{10} < 4000$
覆盖率	76.4%	80.0%	83.6%

表 2 器测能见度 VIS(m) 沙尘天气分级统计结果

沙尘分类	强沙尘暴	沙尘暴	扬沙浮尘
VIS 范围	195—1946	592—4339	1159—21474
VIS 均值	801.25	1634.05	4309.60
样本数	16	$1800 \geq VIS > 1000$	40
VIS 域值	20	$VIS \leq 1000$	$7000 \geq VIS > 1800$
覆盖率	75.0%	80.0%	83.6%

不同沙尘天气  $PM_{10}$  沙尘天气分级:

强沙尘暴:  $PM_{10} \geq 7000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

沙尘暴:  $4000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \leq PM_{10} < 7000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

扬沙浮尘:  $600 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \leq PM_{10} < 4000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

不同沙尘天气器测能见度的等级划分:

强沙尘暴: 器测能见度值  $\leq 1000\text{m}$

沙尘暴:  $1000\text{m} < \text{器测能见度值} \leq 1800\text{m}$

扬沙浮尘:  $1800\text{m} < \text{器测能见度值} \leq 7000\text{m}$

## 3 沙尘暴的定量预报

目前的业务中, 沙尘暴天气预报还是以主观预报为主, 仅有沙尘暴模式输出一些沙尘浓度预报产品指导业务, 真正意义的沙尘暴定量预报还没有开展。应用先进仪器对沙尘暴天气进行全面、连续、定量观测, 为定量分析、预报沙尘暴天气打下基础。基于上述的定量分级标准, 尝试应用中尺度数值预报模式输出量, 根据沙尘暴形成的基本原理和条件, 构造预报因子, 建立预报方程, 对器测能见度和  $PM_{10}$  进行业务预报, 并进行业务检验。

### 3.1 沙尘暴成因的定量分析

我国北方的沙尘暴天气主要是受蒙古冷涡、强冷锋系统影响形成的。强冷空气南下, 斜压大气中的温度平流和涡度平流的输送有利与蒙古冷涡和强冷锋系统的强烈发展, 伴随着地面温、压、风等气象要事的剧烈变化, 产生强沙尘暴天气。对选取的 10 次较强沙尘暴天气过程进行动力、热力诊断分析表明, 存在着几点共同的定量特征。

#### 3.1.1 沙尘暴发生区域都对应着对流层低层的大风急流区, 以西风和西北风为主

蒙古冷涡和强冷锋系统的强烈发展, 在对流层低层产生大风急流区, 是沙尘暴形成的动力条件。2007 年 3 月 30 日 14 时, 内蒙古中西部地区发生沙尘暴天气, 从 WRF 模拟该时刻的 10m 风速预报图(图 3a)可以看到沙尘暴发生区都在 10m 风速大于  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大风急流区中。从 10 次沙尘过程  $PM_{10}$  与 10m 风速散点图(图 3b)中可以看到  $PM_{10}$  大值区(沙尘暴天气)对应的 10m 风速集中在较大的风速区中。

#### 3.1.2 沙尘暴发生区非常干燥, 其相对湿度在 40% 以下

值得注意的是在分析相对湿度特征时,

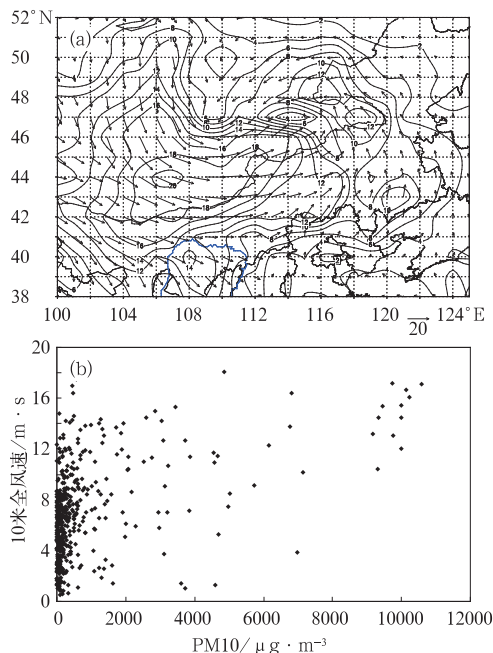


图3 (a) 2007年3月30日14时10m风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )预报图, (b) 10次沙尘过程  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )与10m风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )散点图

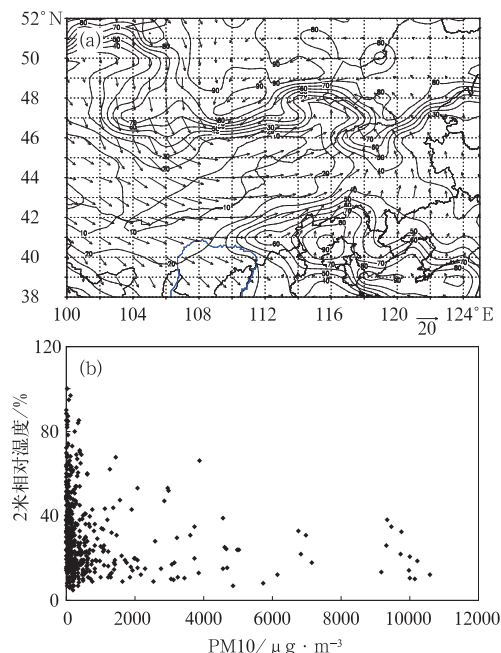


图4 (a) 2007年3月30日14时2m RH(%)预报图, (b) 10次沙尘过程  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )与2m RH(%)散点图

上述的大风急流配合一支干舌,“干急流”特征明显。从2007年3月30日14时WRF模拟的2m相对湿度预报图(图4a)可以看到沙尘暴发生区都在2m相对湿度小于40%的“干急流”区域中。从10次沙尘过程  $\text{PM}_{10}$ 与2m相对湿度散点图(图4b)中可以看到  $\text{PM}_{10}$ 大值区(沙尘暴天气)对应的2m相对湿度集中在较小值的区域中。

### 3.1.3 沙尘暴发生在850hPa与700hPa温度差的高值区中

沙尘暴的发生需要不稳定条件,850hPa与700hPa温度差可以反映出层结的不稳定性,从2007年3月30日14时WRF模拟的850hPa与700hPa温度差预报图(图5a)可以看到沙尘暴发生区都在850hPa与700hPa温度差大值区域中。从10次沙尘过程  $\text{PM}_{10}$ 与850hPa与700hPa温度差散点图(图5b)中可以看到  $\text{PM}_{10}$ 大值区(沙尘暴天气)对应的850hPa与700hPa温度差集中在较大值的区域中。

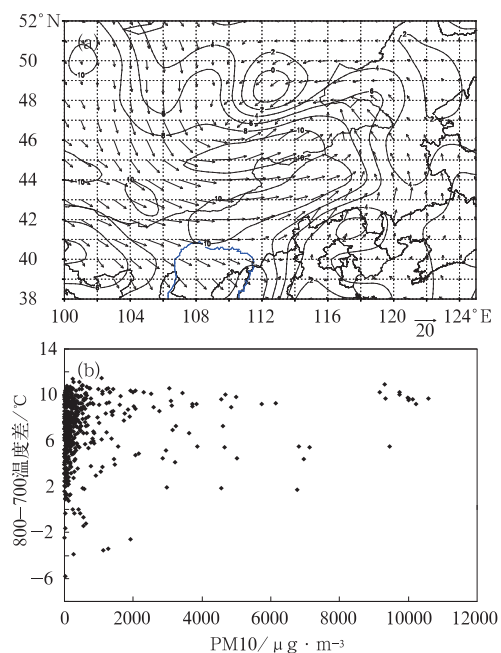


图5 (a) 2007年3月30日14时  $T_{850}-T_{700}$  预报图, (b) 10次沙尘过程  $\text{PM}_{10}$ 与  $T_{850}-T_{700}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )散点图

### 3.1.4 沙尘暴发生在摩擦速度 UST 的高值区中

摩擦速度 UST 反映了大气对地表的作用力,从 2007 年 3 月 30 日 14 时 WRF 模拟的摩擦速度 UST 预报图(图 6)可以看到沙尘暴发生区都在摩擦速度 UST 大值区域中。

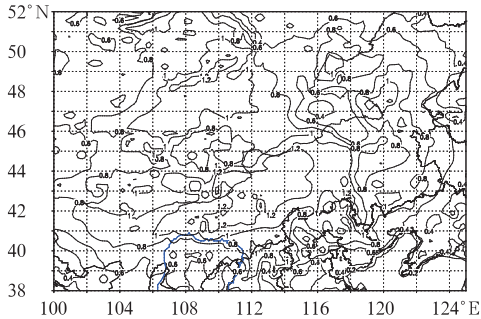


图 6 2007 年 3 月 30 日 14 时摩擦速度 UST( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )预报图

### 3.2 沙尘暴预报因子

沙尘天气与对流层低层的大风急流、干燥区、850hPa 与 700hPa 温度差(层结的不稳定)都有很好的定量关系,其中大风急流条件是关键,起决定作用,没有大风条件,干燥区和不稳定区中并不能发生沙尘天气。在具备大风的条件下,干燥区和不稳定区才会起重要作用。因此,干燥条件和不稳定条件单独作为预报因子是不合适的,综合考虑这 3 个条件,建立了沙尘综合指数:

$$X_1 = V_{10} \cdot \left[ 1 + \frac{(T_{850} - T_{700}) - a}{b} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{(1 - RH_{2m})}{c} \right]$$

式中  $X_1$  为沙尘综合指数,  $V_{10}$  为 10m 的全风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T_{850} - T_{700}$  为 850hPa 与 700hPa 温度差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),  $RH_{2m}$  为 2m 相对湿度,  $a, b, c$  为经验系数( $a=5.0; b=20.0; c=4.0$ )。指数综合考虑了沙尘暴天气发生时,低层配合一支干急流的特征,同时考虑了层结不稳定条件。另外选取了 850hPa 全风速作为对流层低层的动力因子;摩擦速度项 UST 作为沙尘暴起沙条件因子。

### 3.3 沙尘暴预报方程

应用 10 次沙尘天气过程的观测资料、WRF 中尺度模式输出产品,计算上述沙尘暴预报因子,建立统计样本序列。应用统计方法建立器测能见度和  $\text{PM}_{10}$  的 PP 定量预报方程。

$$\text{PM}_{10} = -4310.913 + 474.253X_1 + 62.666X_2 + 619.908X_3$$

$$r^2 = 0.674$$

$$\text{VIS} = 10741.74 - 182.63X_1 - 89.437X_2 - 3675.54X_3$$

$$r^2 = 0.638$$

方程中:  $X_1$ : 沙尘综合指数;  $X_2$ : 850hPa 全风速;  $X_3$ : 摩擦速度;  $r$ : 相关系数

### 3.4 预报效果检验

2008 年 5 月 28 日 11 时至夜间,内蒙古自治区中西部地区出现扬沙和沙尘暴天气过程。此次沙尘天气过程发生时间晚(在 5 月底)、强度大、影响范围广、是往年少见的。对此次沙尘天气过程,定量预报方法作出了较好的预报,对比 2008 年 5 月 27 日 20 时 24 小时  $\text{PM}_{10}$ (见图 7)、器测能见度(图略)预报与 2008 年 5 月 28 日 20 时实况可以看出:总体来说预报是成功的,准确地报出了锡林郭勒盟西部、乌兰察布市北部、鄂尔多斯市北部的沙尘暴区,扬沙区域也预报准确。但对呼和浩特市的预报偏弱,将沙尘暴报为扬沙。

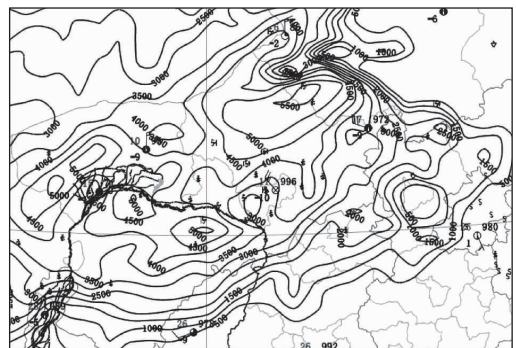


图 7 2008 年 5 月 27 日 20 时 24 小时沙尘暴  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 预报与 2008 年 5 月 28 日 20 时实况叠加图



## 4 小结

(1) 统计分析表明,沙尘天气的仪器观测数据与目前常规业务应用的沙尘天气观测数据,相关关系显著,都可以通过显著性检验。同时可以得出器测数据具有连续、稳定、定量优势的结论,有很好的业务应用前景。

(2) 仪器能见度存在系统误差,在能见度较小时(小于2000m),器测能见度观测值偏高;相反,在能见度较大时(大于2000m),器测能见度观测值偏低。因此,器测能见度在业务应用中需要进行订正(修正)。

(3) 确定了对不同沙尘天气,器测能见度的等级划分。强沙尘暴:器测能见度值 $\leq 1000\text{m}$ ;沙尘暴: $1000\text{m} < \text{器测能见度值} \leq 1800\text{m}$ ;扬沙浮尘: $1800\text{m} < \text{器测能见度值} \leq 7000\text{m}$ 。

(4) 确定了对不同沙尘天气, $\text{PM}_{10}$ 的等级划分。强沙尘暴, $\text{PM}_{10} \geq 7000\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;沙尘暴, $4000\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \leq \text{PM}_{10} < 7000\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;扬沙浮尘, $600\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \leq \text{PM}_{10} < 4000\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(5) 对10次沙尘天气诊断分析表明,10m大风急流、2m相对湿度干燥区、850hPa与700hPa温度差、与沙尘区有很好的定量关系,三者综合建立的“沙尘综合指数”作为预报因子效果更好。

(6) 在确定不同沙尘天气仪器观测数据等级划分基础上,开展沙尘天气仪器观测数据的业务应用是切实可行的。建立的沙尘器测数据定量预报方法在业务实践中取得了很好的效果,是沙尘天气定量预报的有益尝试。

## 参考文献

- [1] 钱正安,蔡英,刘景涛,等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 83-92.
- [2] 刘景涛,杨耀芳,李运锦,等. 中国西北地区1993年5月5日黑风暴的机理探讨[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 371-376.
- [3] 王革丽,吕达仁,李鸿洲. 2000年4月5—7日浑善达克沙地沙尘暴天气过程分析[J]. 气象, 2002, 28(7): 13-17.
- [4] 刘景涛,郑新江,康玲,等. 蒙古气旋爆发性发展导致强沙尘暴的个例研究[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(2): 218-229.
- [5] 刘景涛,钱正安,姜学恭,等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象, 23(4): 540-547.
- [6] 陆均天,邹旭恺,王锦贵. 近3年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 107-113.
- [7] 赵琳娜,孙建华,赵思雄. 2002年3月20日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 72-80.
- [8] 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线2黑风暴形成的一个机理分析[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178-185.
- [9] 方宗义,王炜. 2002年我国沙尘暴的若干特征分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 513-521.
- [10] 中国气象局. 沙尘暴国家标准—沙尘暴天气等级(GB/T 20480—2006)[S]. 北京:气象出版社, 2006, 1-4.
- [11] Joseph P V, Raipal D K, Deka S N. “Andhi”, the convective duststorm of northwest India [J]. J. Mausam, 1980, 31, 431-442.
- [12] Middleton N J. A geography of dust storms in southwest Asia[J]. J. Climatology, 1986, 6: 183-196.
- [13] 王式功,董光荣. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356.
- [14] 徐国昌,陈敏连. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35.
- [15] 钱正安,贺慧霞. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[J]. 中国沙尘暴研究,北京:气象出版社, 1997.
- [16] 万本太,康晓风,张建辉,等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3): 8-11.
- [17] Shao Y, Wang J J. A climatology of Northeast Asian dust events[J]. Meteor. Z. 2003, 12(4): 187-196.
- [18] 牛生杰,孙继明. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象, 2001, 21(1): 1-3.
- [19] 矫梅燕,赵琳娜. 沙尘天气定量分级方法研究与应用[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(3): 350-357.