

## 沙尘天气定量分级方法研究与应用

矫梅燕<sup>1,2,3</sup> 赵琳娜<sup>3</sup> 卢晶晶<sup>4</sup> 王超<sup>3</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 国家气象中心, 北京 100081

4 宁波市气象局, 宁波 315012

**摘要** 利用已有的关于能见度与沙尘浓度统计反演关系的研究成果, 对沙尘天气进行了定量分级研究。利用2004、2005年春季3~5月沙尘天气地面气象观测资料, 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、沙尘暴和强沙尘暴)对应的沙尘浓度等级, 并通过对2006年沙尘天气的实例分析, 验证了该种分级方法的可用性。通过由能见度反演的观测结果与沙尘数值预报模式的对比分析, 探讨了沙尘数值预报业务模式产品的天气学释用方法, 建立了不同强度沙尘天气与沙尘数值模式输出的浓度之间的定量分级关系。

**关键词** 沙尘天气 定量分级 天气学释用

**文章编号** 1006-9585 (2007) 03-0350-08 **中图分类号** P445+.4 **文献标识码** A

## Quantitative Classification of Northeast Asian Dust Weather and Its Applications

JIAO Mei-Yan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Lin-Na<sup>3</sup>, LU Jing-Jing<sup>4</sup>, and WANG Chao<sup>3</sup>

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

4 *Ningbo Municipal Meteorological Bureau, Ningbo 315012*

**Abstract** A classification based on dust concentration for operational usage is studied. A method to classify the dust weather (e. g., severe dust storm, dust storm and blowing dust) based on the retrieved dust concentration was set up by employing a statistic formulation between observed visibilities and the dust concentration. These results were derived from the dust cases from March to May, 2004 and 2005. The dust model output was verified by using the observational-derived dust concentration. The good agreement between them can be found. It shows that the numerical dust prediction model has the skill in modeling the dust event, however, there still exist the bias between them. Therefore, it is necessary to explore a new statistical relationship to utilize the model output in order to reduce the bias. According to the same statistic formulation above, a revised statistical relationship is proposed in which the predicted dust concentration from model, rather than observation one, was classified to match the dust weather classification. The significance of the new classification of the dust concentration is to make the model pre-

**收稿日期** 2007-04-01 收到, 2007-04-20 收到修定稿

**资助项目** 科技部科研院所社会公益研究专项 2004DIB1J031 和国家财政部资助项目 Y0101

**作者简介** 矫梅燕, 女, 1962年出生, 正研级高级工程师, 主要从事天气预报、沙尘暴预报技术研究。

E-mail: jiaomy@cma.gov.cn

diction to be used better in dust weather forecast.

**Key words** dust weather, classification on dust concentration, interpretation of numerical prediction

## 1 引言

根据沙尘暴等级国家标准<sup>[1]</sup>定义, 沙尘天气是指强风把地面大量沙尘卷入空中, 使空气特别混浊, 地面水平能见度变低的天气现象。该标准主要根据水平能见度的大小定义了沙尘天气的分级: 当水平能见度在 1~10 km 为扬沙天气, 当水平能见度小于 1 km 时为沙尘暴天气, 当水平能见度小于 500 m 时为强沙尘暴天气。然而, 对沙尘天气的监测和预报需要更加量化的分级。2006 年 4 月 18 日的一场影响北京地区的沙尘天气过程, 一夜之间在北京地区降下了 30 多万吨的尘土, 对这种“下土”的沙尘天气预报, 基于现在的以水平能见度为标准的沙尘天气监测和预报是难以满足要求的。因此提出了关于沙尘含量的定量化监测和预报问题。

由于水平能见度难于与其他表征沙尘的物理量作直接比较, 也难以与沙尘传输量的计算和模拟建立定量的数学关系, 因此, 国内外的学者相继开展了一些关于沙尘暴强度标准的研究工作, Joseph 等<sup>[2]</sup>、Middleton<sup>[3]</sup>曾根据能见度和风力将印度的沙尘暴进行分级, 给出一般、中和强标准; 基于沙尘物质的定量观测, 国内的学者<sup>[4]</sup>提出了根据规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, 拓宽了对沙尘天气定量监测和预报的思路。

近年来, 随着对沙尘天气发生发展动力机制的深入认识, 包含风沙动力学过程的沙尘暴数值模式逐渐发展成熟并开始应用于业务预报<sup>[5~8]</sup>。2002 年由国内多家科研、业务部门合作, 与澳大利亚新南威尔士大学联合组成沙尘暴监测预警项目攻关小组, 在国家气象中心建成了沙尘暴数值预报集成业务系统<sup>[9]</sup>, 并开始在国家气象中心的沙尘天气预报业务中应用。然而, 由于沙尘模式输出的沙尘物质浓度与实际预报中的沙尘天气分类 (强沙尘暴、沙尘暴、扬沙和浮尘) 是不同的分类方法, 这样就提出了如何对沙尘数值模式进行解释应用的问题, 即: 将沙尘浓度的预报产品

应用于实际业务中基于水平能见度的沙尘天气分级预报业务中。另一方面, 对于沙尘数值模式预报 (沙尘浓度) 的检验大都是与基于水平能见度观测到的天气现象作定性对比, 并不能定量的比较, 难以准确的分析沙尘数值模式的预报性能。我国近年来建立的沙尘暴监测网, 已可以获得沙尘天气中关于大气光学厚度, TSP 质量浓度, PM10 浓度等观测资料, Shao 和 Wang<sup>[10]</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, 并运用到沙尘数值预报模式的检验分析上, 这项工作也为沙尘暴的定量分析和预报提供了可借鉴的思路。

本文试图在前人工作的基础上, 探讨建立沙尘天气定量分级方法, 并利用这种方法建立沙尘数值模式的浓度预报与沙尘天气预报业务中不同等级沙尘天气 (扬沙、沙尘暴和强沙尘暴) 之间的统计释用关系, 从而为预报员定量应用沙尘数值模式产品提供支持。

## 2 能见度与沙尘浓度的统计关系

虽然能见度主要受大气中的水汽和气溶胶二者影响较大, 但在沙尘天气期间, 沙尘气溶胶成为影响能见度的决定性因子。对于大范围的、长时间的统计来讲, 地面观测的能见度资料是能够满足要求的最好选择。Shao 和 Wang<sup>[10]</sup>曾根据大量观测的 TSP (总悬浮颗粒物浓度) 与能见度的统计结果提出了能见度与 TSP 浓度之间的统计反演关系, 并采用此关系将 2000~2002 年 3~5 月的地面气象观测能见度转化的沙尘物质浓度对亚洲的沙尘浓度空间分布情况进行了分析, 取得了合理的结果。本文采用 Shao 和 Wang<sup>[10]</sup>提出的水平能见度与沙尘浓度的如下转换关系表达式:

$$C = \begin{cases} 3802.29D_v^{0.84} & \text{当 } D_v < 3.5 \text{ km,} \\ \exp(-0.11D_v + 7.62) & \text{当 } D_v \geq 3.5 \text{ km,} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $D_v$  是能见度, 单位为 km;  $C$  是 TSP 浓度, 在沙尘天气时, 也即地面的沙尘浓度, 单位为  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。公式 (1) 表明能见度小于 3.5 km 时, 能见度与沙尘浓度呈负幂指数关系, 能见度

大于 3.5 km 时能见度与沙尘浓度呈  $e$  指数关系。利用上述公式可以将地面观测的能见度转化为沙尘浓度, 作为相应的地面沙尘浓度的观测资料。

利用上述统计关系, 本文使用东亚地区 (25~55°N, 80~130°E) 2004、2005 年 3~5 月 2 200 多个地面气象台站每 3 h 的天气现象以及能见度的观测数据, 分析在有沙尘天气出现时, 计算基于能见度的沙尘浓度。

将沙尘浓度由小到大分为  $D$  个等级区间, 针对实际观测的强沙尘暴、沙尘暴、扬沙 3 类沙尘天气, 分别定义  $C_{i,d}$  表示某一种沙尘天气 (如沙尘暴) 发生时, 第  $i$  站的地面平均沙尘含量在  $d$  等级范围的沙尘浓度为

$$C_{i,d} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K C_{i,d,k}, \quad (2)$$

$i$  是东亚地区各个测站,  $k$  是 2004~2005 春季沙尘天气发生的时次,  $K$  是沙尘天气总的时次 (对于不同测站, 不同类的沙尘天气,  $K$  不相同)。

设  $M_d$  为出现该类沙尘天气时, 包含站点数权重的所有测站在沙尘含量为  $d$  等级浓度范围内的浓度之和:

$$M_d = \sum_{i=1}^n C_{i,d} \times w_d, \quad (3)$$

$$w_d = \frac{N_d}{\sum_{d=1}^D N_d}, \quad (4)$$

$N_d$  是出现  $d$  等级沙尘浓度的测站数,  $w_d$  表示沙尘浓度在  $d$  等级内出现的站点数所占的比例。那么

$$f_d = \frac{M_d}{\sum_{d=1}^D M_d} \times 100\%, \quad (5)$$

$f_d$  是表示在出现某一类沙尘天气时,  $d$  等级沙尘浓度占总沙尘浓度的比例。根据公式 (5) 统计的某段浓度范围内的沙尘浓度所占的百分比最大, 就认为某种沙尘天气的沙尘含量在该浓度范围内。

### 3 基于沙尘浓度的沙尘天气分级

虽然在有沙尘天气发生时, 能见度状况主要受沙尘气溶胶影响, 但也有水汽等与能见度相关的其他因子的影响, 能见度与沙尘气溶胶的浓度不是单一的对对应关系。因此, 由式 (1) 式反演的沙尘浓度, 对于同一类强度的沙尘天气, 不同沙

尘过程对应的沙尘浓度是不同的<sup>[11]</sup>, 因此分级的原则是沙尘浓度越高对应的沙尘天气也越强。对某类沙尘天气来说, 根据公式 (5) 统计的某浓度等级的沙尘浓度所占的百分比最大, 就认为某种沙尘天气在该浓度范围内。所选的沙尘浓度等级分档范围参考了有关研究<sup>[4]</sup>。

分别针对强沙尘暴、沙尘暴和扬沙 3 类沙尘天气, 将沙尘浓度分为如图 1 所示的 7 个不同的等级, 根据公式 (5) 反演计算得到关于强沙尘暴、沙尘暴和扬沙天气对应的浓度等级。从图 1a 中得知: 强沙尘暴天气的沙尘浓度主要在 9 000~15 000  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内, 占 45.0%; 沙尘浓度在 15 000  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上范围内的浓度值次之, 占

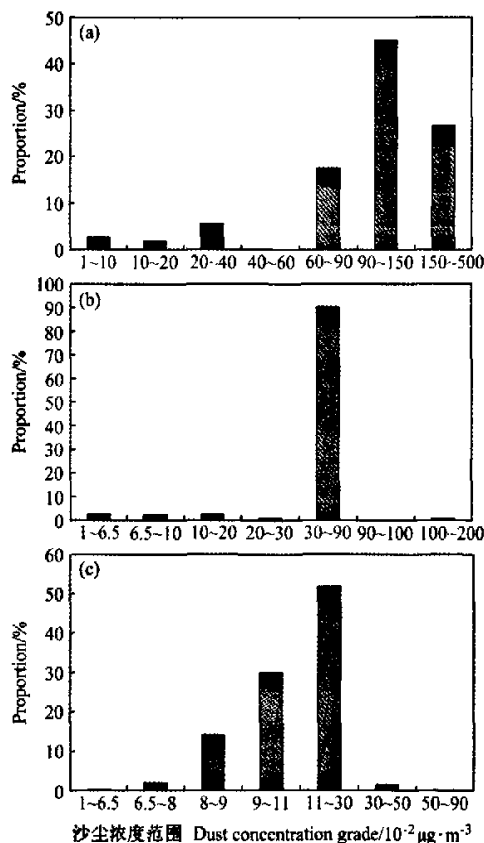


图 1 2004~2005 年春季沙尘天气过程反演的沙尘浓度分级分布的百分比: (a) 强沙尘暴; (b) 沙尘暴; (c) 扬沙

Fig. 1 The percentages of calculated dust concentration in the ranges for different dust weather cases from Mar to May of 2004 and 2005: (a) severe dust storm; (b) dust storm; (c) blowing dust

26.9%; 其他浓度范围内的沙尘浓度占总浓度的比重较低。因此我们认为强沙尘暴天气浓度级为大于等于  $9\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从沙尘暴的浓度比例分布来看(图 1b), 沙尘暴天气浓度主要在  $3\ 000 \sim 9\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内, 占总浓度的 90.0%, 其他浓度范围内的浓度值所占比例较小, 基本可以忽略, 很明显沙尘暴天气浓度等级可以认为是  $3\ 000 \sim 9\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。图 1c 是出现扬沙天气时各等级沙尘浓度所占的百分比分布, 可以看到, 扬沙天气沙尘浓度主要在  $800 \sim 3\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此可以认为扬沙天气的浓度分级为  $800\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上, 即某站沙尘浓度达到  $800\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  则被认为是发生扬沙天气。

通过上述分级分析得到强沙尘暴的沙尘分级浓度范围为  $9\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上, 沙尘暴天气的浓

度分级范围为  $3\ 000 \sim 9\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 扬沙天气的浓度分级范围为  $800 \sim 3\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。本章分析的沙尘浓度等级与文献<sup>[4]</sup>提出的基于颗粒物浓度(TSP)观测数据分析得出的沙尘天气分级标准相比, 强沙尘暴天气的沙尘浓度分级标准是一致的, 但沙尘暴和扬沙天气的沙尘浓度等级范围大。由于本文所统计的沙尘天气包括了整个东北亚地区, 沙尘暴和扬沙天气的沙尘浓度等级范围大, 实际上也是沙尘天气地域差别的反映。

为了检验这种沙尘天气按浓度分级的适用性, 本文将 2004~2005 年 3~5 月沙尘过程的地面天气观测与由能见度反演的沙尘浓度分级进行了对比分析。图 2 给出 2006 年 4 月 10 日 8 时到 17 时(北京时, 下同)能见度转化沙尘浓度分级及地面的沙尘天气观测。从能见度反演的沙尘浓度分布

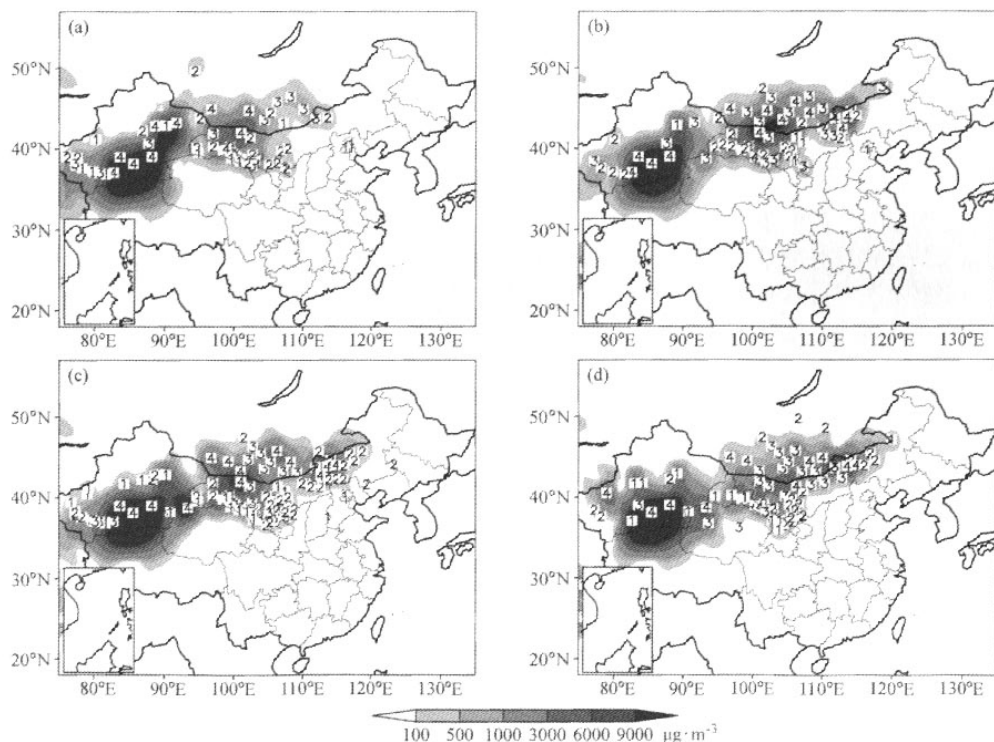


图 2 2006 年 4 月 10 日地面天气观测(数字: 2 代表扬沙, 3 代表沙尘暴, 4 代表强沙尘暴)与反演的沙尘浓度(阴影): (a) 8 时; (b) 11 时; (c) 14 时; (d) 17 时

Fig. 2 The retrieved dust concentration (in shaded) and the dust weather observation on 10 Apr 2006 (numbers 2, 3 and 4 represent blowing dust, dust storm and severe dust storm, respectively); (a) 0800 LST; (b) 1100 LST; (c) 1400 LST; (d) 1700 LST

范围来看,各浓度等级与沙尘天气观测现象等级对应的很好,特别是强沙尘暴和沙尘暴过程。由图2可见,地面观测为强沙尘暴天气的站点沙尘浓度大部分都在  $9\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,为沙尘暴天气的站点基本都在  $3\ 000\sim 9\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  浓度范围内。这表明能见度转化沙尘天气分级方法对这次沙尘天气过程是适用的。但是,也应该指出其中某些站点不符合分级范围,主要是有些扬沙天气与沙尘浓度的分级标准没有完全对应,其原因可能有两点:一是由公式(3)的统计分级算法可知,该算法难以有效地反映出沙尘浓度较低的扬沙天气;二是已有分析表明,国外站点的能见度观测标准可能略有差别<sup>[10]</sup>。

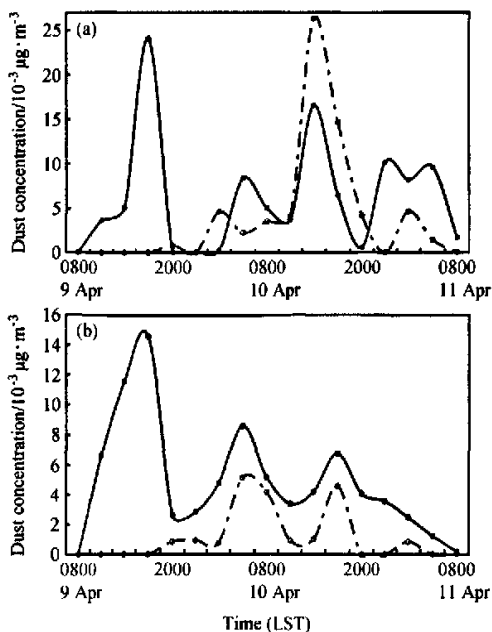
## 4 基于模式输出的沙尘浓度等级划分及应用

### 4.1 模式输出沙尘浓度的定量分级

沙尘数值预报模式的业务应用,给预报员提供了关于沙尘浓度的预报产品。国家气象中心的沙尘暴集成预报业务系统的应用表明,对典型沙尘天气过程,模式能够较好地模拟出沙尘天气的发生和输送过程。本文选取了2006年4月9~11日的沙尘天气过程,对单个站点上模式预报的沙尘浓度与根据上述方法由能见度统计反演的沙尘浓度作为观测结果作对比分析,验证模式对沙尘天气的预报能力。

选取酒泉和马鬃山2个站,分析单点上的模式预报和观测反演的沙尘浓度结果。两个站点的位置是:酒泉(52533)( $39^{\circ}46'\text{N}$ ,  $98^{\circ}29'\text{E}$ );马鬃山(52323)( $41^{\circ}48'\text{N}$ ,  $97^{\circ}02'\text{E}$ )。实况观测中,酒泉在4月9~10日出现了沙尘暴和浮尘天气,马鬃山在4月9~10出现了扬沙和沙尘暴天气。

图3a、b分别是酒泉和马鬃山站的模式沙尘浓度预报与观测反演沙尘浓度的对比。从图中可以看出,除了在模式预报的起始阶段外,模式预报的沙尘浓度与由能见度反演出的沙尘浓度变化趋势一致,在预报时段内预报的沙尘浓度峰、谷值与观测计算出的结果较好地吻合,表明模式将这次沙尘过程的发生、强度和变化趋势都预报出来了。但是,比较模式输出的预报浓度与由观测反演计算出的沙尘浓度,可以



— 预报沙尘浓度 Predicted dust concentration  
- - 能见度反演沙尘浓度 Dust concentration converted from visibility

图3 2006年4月9~11日沙尘模式输出的地面沙尘浓度预报与能见度反演沙尘浓度的对比:(a)酒泉;(b)马鬃山

Fig. 3 The comparison of model output of surface dust concentration prediction with retrieved dust concentration from visibility observation during 9-11 Apr 2006: (a) Jiuquan, (b) Mazongshan

看到,模式输出的沙尘浓度与能见度反演得到的沙尘浓度并不是完全的对对应关系,预报的沙尘浓度量值存在一定的偏差,也可以认为是模式的预报误差。由于这种误差的存在,也就难以按照前述的沙尘浓度标准直接对预报的沙尘浓度做出天气学的分级处理。因此,需要对模式输出产品作统计释用。

上一节已讨论了利用沙尘浓度来对沙尘天气分级的方法,并验证了该分级方法的可用性。下面,在此基础上,利用公式(5),采取类似的统计方法,讨论模式输出沙尘浓度分级与沙尘天气强度的分级关系,建立基于沙尘浓度数值预报的天气学分级方法。

选取2006年沙尘天气较为集中的时段,统计了3月14日~4月12日模式预报地面沙尘浓度,以及该时段对应的天气观测中出现沙尘天气,分别针对强沙尘暴、沙尘暴、扬沙和浮尘等沙尘天

气类型, 将模式预报的地面沙尘浓度按照图 4 所示划分浓度等级, 按照某种浓度段内数值预报浓度所占比例的大小对模式预报的沙尘浓度进行天气学分级, 所占比例最大的沙尘浓度范围划定为模式预报的该类沙尘天气沙尘浓度范围。

图 4 是对 2006 年春季模式预报的地面沙尘浓度进行分级的结果。由于在强沙尘暴和沙尘暴期间、扬沙和浮尘期间, 模式预报的地面浓度没有明显的差别, 难以区别, 故将二者分别按两两放在一起统计。图 4a 为强沙尘暴和沙尘暴期间预报的沙尘浓度的分布范围, 其中浓度在  $10\ 000 \sim 50\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的沙尘浓度所占比重最大, 为 53.68%, 因此沙尘暴和强沙尘暴天气预报的地面沙尘浓度主要在  $10\ 000 \sim 50\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内。图 4b 表示扬沙和浮尘天气的模式预报沙尘浓度的分布, 可见扬沙和浮尘天气过程预报的地面沙尘浓度集中在  $10 \sim 3\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围, 占总浓度的 80.39%。

从以上分析可以看出沙尘暴和强沙尘暴天气期间, 模式预报的地面沙尘浓度多在  $(1 \sim 5) \times$

$10^4\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  之间, 所以当预报浓度达到此浓度范围内时, 认为发生沙尘暴和强沙尘暴天气的机率较大。扬沙预报浓度很明显主要在  $10 \sim 3\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内, 当预报浓度值达到此浓度范围内时, 可以认为该地区发生扬沙天气的机率较大。沙尘浓度在二者之间时, 当考虑更多的其他影响因子加以决定, 这也是今后要继续研究改进的地方。

#### 4.2 应用实例

利用 2006 年春季统计建立的沙尘浓度与沙尘天气等级之间的关系, 对 2006 年 4 月 9~11 日的一次沙尘天气进行分级, 检验此分级方法在沙尘天气预报中的适用性, 该次过程中发生沙尘天气范围最大、沙尘最强时段出现在 4 月 10 日。具体分析 4 月 10 日的预报浓度与沙尘天气观测的对应情况, 从图 5 中所示的预报浓度分布范围来看, 各浓度等级所在的浓度范围与观测现象对应的较好, 特别是 4 月 10 日 14 时、17 时对应情况很好, 地面观测有强沙尘暴和沙尘暴天气的站点基本处于浓度范围在  $10^4\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的区域, 地面观测有扬沙和浮尘天气的站点也有绝大多数处于  $10 \sim 3000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  浓度范围内。由图 5 也可以看出, 并不是所有的站点都能够很好地对应相应的浓度等级, 在模式预报的沙尘浓度区, 有预报偏强和预报偏弱的小区域, 这也为沙尘数值预报模式的进一步改进提供了线索。

## 5 结论和讨论

对于沙尘数值预报模式在沙尘天气预报中应用, 提出了建立基于沙尘浓度的天气学分级问题。本文对沙尘观测能见度反演沙尘浓度的沙尘天气量化分级做了简要的研究, 以能见度与沙尘浓度的统计反演关系为基础, 初步提出了针对强沙尘暴、沙尘暴和扬沙的沙尘浓度分级标准, 建立了基于能见度的沙尘天气学分类与基于沙尘物质浓度分类的对应关系。对沙尘天气过程的实例分析计算表明, 这种基于沙尘浓度的天气学分级方法是可用的。

由能见度反演的沙尘浓度与沙尘数值模式预报的结果相比较发现, 两者的相关性十分一致, 表明了模式对沙尘天气过程有相当好的模拟能力;

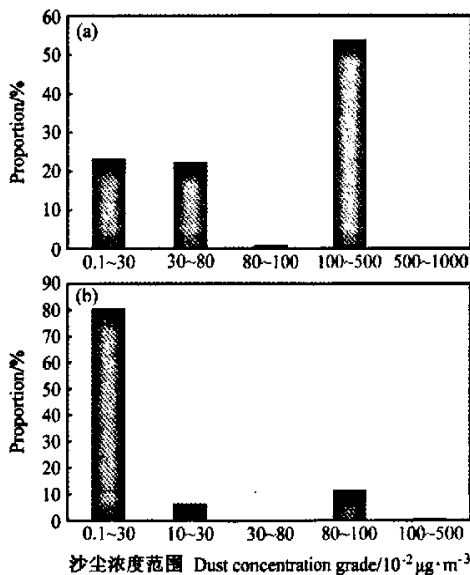


图 4 2006 年春季沙尘天气过程对应的模式预报的地面沙尘浓度分级分布百分比: (a) 强沙尘暴和沙尘暴; (b) 扬沙和浮尘  
Fig. 4 The percentages of predicted dust concentration in the ranges for different dust weather cases during spring of 2006: (a) severe dust storm and dust storm; (b) blowing dust and suspended dust

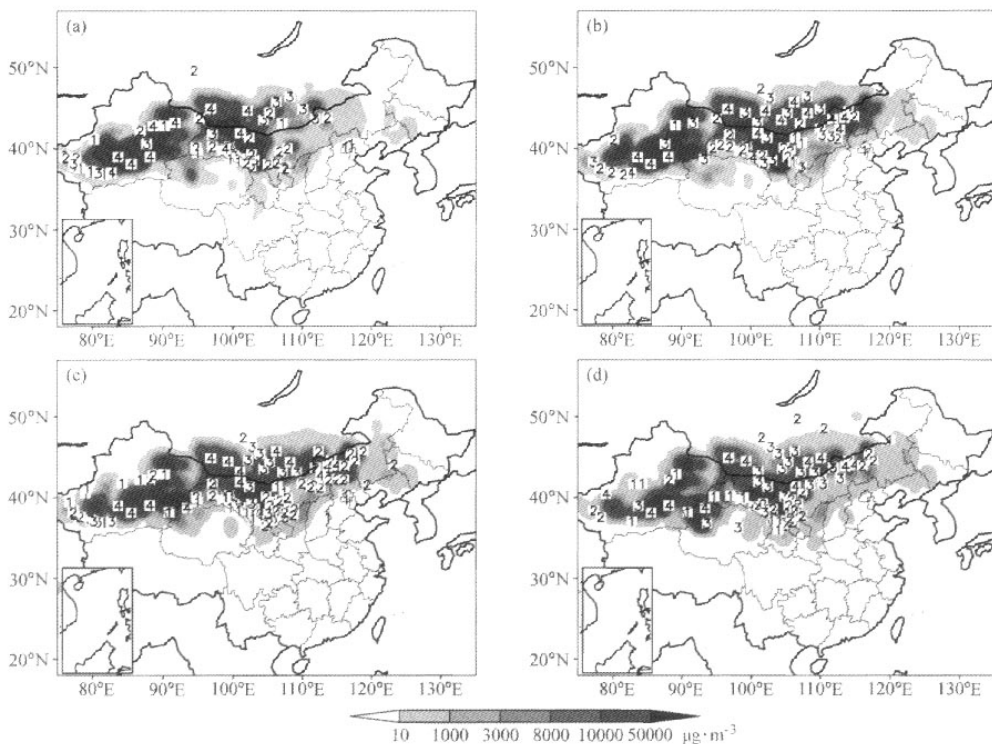


图5 2006年4月9日08时模式预报的沙尘浓度分级(阴影)与地面沙尘天气观测(数字:1代表浮尘,2代表扬沙,3代表沙尘暴,4代表强沙尘暴)对比;(a)08时;(b)11时;(c)14时;(d)17时

Fig. 5 The predicted dust concentration graded (in shaded) and the dust weather observation on April 9, 2006 (numbers 1, 2, 3, 4 represent suspended dust, blowing dust, dust storm and severe dust storm respectively); (a) 0800 LST; (b) 1100 LST; (c) 1400 LST; (d) 1700 LST

比较也发现,模式输出的沙尘浓度相对于反演的观测值存在一定的偏差。这种偏差的存在使得我们难于直接将模式关于沙尘浓度的预报应用于沙尘天气强度的预报。本文作为对沙尘数值模式释用的初步尝试,采用模式输出沙尘浓度分级统计方法,建立了模式输出浓度与沙尘天气强度间的统计关系,使沙尘数值预报模式输出结果能够应用于沙尘天气的强度预报业务。

#### 参考文献 (References)

- [1] 中国气象局. 沙尘暴国家标准——沙尘暴天气等级 (GB/T 20480—2006). 北京: 气象出版社, 2006. 1~4  
China Meteorological Administration. *Dust Storm National Criterion—Grade of sand Dust Storm Weather (GB/T 20480—2006)*. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [2] Joseph P V, Raipal D K, Deka S N. “Andhi”, the convective duststorm of northwest India. *J. Mausam*, 1980, 31, 431~442
- [3] Middleton N J. A geography of dust storms in south-west Asia. *J. Climatol.* 1986, 6, 183~196
- [4] 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. *中国环境监测*, 2004, 20 (3): 9~11  
Wan Bentai, Kang Xiaofeng, Zhang Jianhui, et al. Research on classification of dust and sand storm base on particle concentration. *Environmental Monitoring in China (in Chinese)*, 2004, 20 (3): 9~11
- [5] Shao Y, Jung E J, Leslie L M. Numerical prediction of Northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, 4814~4836
- [6] Shao Y, Yang Y, Wang J, et al. Real-time numerical prediction of Northeast Asian dust storms using an inte-

- grated modeling system. 2003, *J. Geophys. Res.*, **108** (D22), 4691~4724
- [7] 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** (3): 279~294  
Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of dust emission in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (3): 279~294
- [8] 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. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 125~142  
Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to North China and its applications. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (2): 125~142
- [9] Zhang Guocai, Song Zhenxin. Operational duststorm prediction in China—an overview. *WMO Bull*, 2004, **53** (4): 333~336
- [10] Shao Y, Wang J J. A climatology of Northeast Asian dust events. *Meteor. Z.*, 2003, **12** (4): 187~196
- [11] 宋振鑫, 王金艳. 东亚地区沙尘天气的分级量化. 中国气象学会 2005 年年会——气象科技与社会经济可持续发展. 北京: 气象出版社. 6414~6430  
Song Zhenxin, Wang Jinyan. Quantitative classification of northeast Asian dust events. *The 2005 Anniversary of Chinese Meteorological Society—Meteorological Science and Technology and Social Economic Continuable Development* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005, 6414~6430