

西北地区沙尘暴预报方法的初步研究

孙 军 李泽椿

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

沙尘暴是我国西北地区春季常发生的一种灾害性天气现象,也是气象业务预报工作中的一个难点。作者首先建立一个沙尘暴产生的天气学概念模型;据此模型,设计了用摩擦速度和大气边界层稳定度状况来对沙尘暴进行预报的数值方法;用 PSU/NCAR 的非静力中尺度模式 MM5 对该天气学模型的检验结果表明了该模型的合理性。最后给出了运用天气学原理和数值预报方法相结合来对沙尘暴进行预报的流程图。

关键词: 沙尘暴 边界层状况 摩擦速度 Richardson 数 预报方法

引 言

我国西北地区是沙尘暴的多发地,春季 3、4、5 月份是沙尘暴的多发时段。沙尘暴虽为一种小概率天气事件,但从近 40 余年中每 10 年间强和特强沙尘暴产生频率的年代变化来看^[1],从 50 年代至 90 年代沙尘暴出现的频率有增加趋势,特别是从 60 年代到 70 年代,这种增加更加明显。不仅频数增高,而且涉及范围扩大,严重程度也大为增强,这就不能不引起人们的广泛关注。如 1993 年 5 月 5 日,我国西北就发生了一场罕见的黑风暴天气,甘肃省金昌、永昌、民勤、武威等台站能见度相继降为 0m,黑风所经之地普遍出现了 $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上(风力 8 级以上)的大风。这次沙尘暴造成的直接经济损失和严重环境问题,比我国东部有些台风、暴雨灾害造成的损失还要大,因此对其作出准确的预报,对防灾减灾、趋利避害具有极为重要的意义。

以前对沙尘暴的预报主要是天气学方法^[2~6],这种方法的优点是易于操作,但主观性强。现在数值预报技术日臻完善,各种中尺度模式发展得也较快,对各种物理过程考虑得也比较周全,对一些中小尺度天气过程可以完全做到量化的客观预报。这样的模式现在有很多,像 PSU/NCAR 的非静力模式 MM5 是一个比较好用的工具,本文就利用了该模式。因此,怎样把传统的天气学方法同现代数值预报技术完美地结合起来,探索一种新的天气预报方法,乃是今后需要深入研究的一个关键课题。本文就是基于以上观点尝试建立我国西北地区沙尘暴预报方法。

1 预报方法设计原理

专家研究已经指出^[7,8],沙尘暴的产生主要是受三大因子支配:强风因子、热力因子和沙源因子。因此,在对沙尘暴进行预报时,也必须综合考虑这三个因子及其相互作用问题。沙源因子是个地理条件,相对来说比较固定,本文着眼点就是在考虑对沙尘暴有重要影响的前两要素,强风和热力不稳定的基础上,来制作沙尘暴的预报方法。

对“93.5.5”沙尘暴的调查结果指出^[7]:沙尘暴前沿有一道高约 300~400m 的黄色沙尘壁。从用卫星观测到的沙尘暴顶的温度^[9],求得得到沙尘暴影响高度大约在 1000~3200m 之间,而边界层的高度也就在 100~3000m 之间,因此,可以说沙尘暴也是一种边界层现象,这样就可以用描述边界层的一些特征量来对沙尘暴进行预报。根据沙尘暴产生的天气学概念模型,可以用起沙和扬沙两种机制来概括其产生,同时沙尘暴是冷空气在移动过程中出现的一种强烈锋生过程,并且沙尘暴在其中产生的大气边界层是极其不稳定的(包括静力和动力不稳定),湍流发展旺盛。起沙说明边界层内必有较强的风速垂直切变存在(动力不稳定),并可用 $\partial v/\partial z$ 表示;扬沙说明边界层必然存在浮力上升运动(静力不稳定),并可用 $\partial \theta/\partial z$ 表示。我们再把垂直动量锋生(即风速垂直切变加大)和垂直温度锋生(即大气层结趋于更加不稳定)结合起来考虑,就形成一个判定行星边界层稳定和不安定的一个重要参数:梯度 Richardson 数, R_i, R_i 定义如下:

$$R_i = \frac{\frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

$\theta_v = (1 + 0.608q)\theta$ 为虚位温。为了便于模式计算,分别用 $\Delta\theta_v/\Delta z$ 近似 $\partial\theta_v/\partial z$,用 $\Delta u/\Delta z$ 去近似 $\partial u/\partial z$, $\Delta v/\Delta z$ 去近似 $\partial v/\partial z$,那么就能确定一个叫做总体 Richardson 数 R_{ib} 的新比值:

$$R_{ib} = \frac{g\Delta\theta_v\Delta z}{\theta_v[(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2]} \quad (2)$$

上式应用到模式最低层,有:

$$R_{ib} = \frac{gz_a(\theta_{va} - \theta_{vg})}{\theta_a V^2} \quad (3)$$

$$\text{式中 } V = (V_a^2 + V_c^2)^{1/2} \quad (4)$$

其中 V_a 是模式最低位面 z_a 上的风速; V_c 是一个对流速度,并由下式确定

$$V_c = 2(\theta_g - \theta_a)^{1/2} \quad (5)$$

θ_a 和 θ_g 分别为 z_a 和地面上的位温, θ_{va} 、 θ_{vg} 分别为 z_a 和地面上的虚位温。

负 Richardson 数表示的是静力和动力不稳定气流,这种气流肯定是湍流,此种情况最有利于沙尘暴的产生,更具体些就是最有利于沙尘上扬到高空。另外,我们又综合考虑和边界层状况有关的另一因子 h/L (h 为边界层高度, L 为 Monin—Obukhov 长度) 的绝对值大小,以此来反映整个边界层的稳定度状况。按照文献[10], $R_{ib} < 0$ 且, $|h/L| < 1.5$ 的情况即为强迫对流不稳定; $R_{ib} < 0$ 且 $|h/L| \geq 1.5$ 的情况即为自由对流不稳定,并把前者定为情形 3,后者定为情形 4(情形 1、2 为 $R_{ib} > 0$ 时的大气状况,不利于沙尘暴的产生,在此不予考虑)。显然最有利于沙尘暴产生的为情形 4,因为它最有利于扬沙。这样,影响沙尘暴产生的热力和动力不稳定因子便由此确定。在此种不稳定条件具备前提下,沙尘暴的产生还要考虑风速大小的问题,即起沙问题,很显然,起沙要有一定的临界风速,经实验表明^[11],沙物质起动的风速是不同的,由于戈壁表层被 5~15cm 厚的砾石层所覆盖,因而其起沙风速较之流沙要大。如在酒泉所采集的洪积戈壁试样起沙风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而在敦煌东 40km 处采集的冲洪积戈壁试样起沙风速为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而流沙试样 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 即可起沙。Westphal 认为起沙不仅

与近地面风速有关,还与边界层的稳定性有关^[12]。因此,从起沙风速这一角度再把稳定度因子考虑进来,采用摩擦速度代替临界风速应更合理些,因为摩擦速度表示的是雷诺应力(水平动量的垂直输送)的大小,是表示近地层大气湍流的一个主要特征量,具有速度的量级,用它对沙尘暴的行为进行描述比较合适,其一般表达式为:

$$u_*^2 = |\tau_{\text{雷诺}}|/\rho = [u'w'^2 + v'w'^2]^{1/2}$$

采用相似理论可推得

$$u_* = \text{MAX} \left(kV \cdot \left(\ln \frac{z_a}{z_0} - \Psi_m \right)^{-1}, u_{*0} \right) \quad (6)$$

u_{*0} 是定义的一个背景值(地面取 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,水面取 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), V 同上, k 为 Karman 常数,本模式中取为 0.4, z_0 为粗糙长度, Ψ_m 为无量纲动量稳定度参数, Ψ_m 的选取要根据边界层的状态而定。

在边界层过程中,湍流既可由浮力对流过程(热空气上升而形成的热泡)产生,也可由机械过程(即风的切变)产生。当浮力对流过程是主要的时候,则称边界层处于自由对流状态;当机械过程是主要时,则称边界层处于强迫对流状态。对沙尘暴过程而言,两种状态都是主要的。当强迫对流不稳定相对主要时,取为 0;当自由对流不稳定相对主要时,采用如下参数化形式^[10]:

$$\Psi_m = -1.86 \left(\frac{z_a}{L} \right) - 10.7 \left(\frac{z_a}{L} \right)^2 - 0.249 \left(\frac{z_a}{L} \right)^3 \quad (7)$$

式中 z_a/L 限定在该近似中不小于 -2.0,对 $z_a/L = -2.0$ 时, $\Psi_m = 1.43$ 。

通常, z_a/L 是 Ψ_m 的函数,而且上式是一个要作迭代求解的方程,为节约机时,可把 z_a/L 作为如下 R_{ib} 的函数,即:

$$\frac{z_a}{L} = R_{ib} \ln \left(\frac{z_a}{z_0} \right) \quad (8)$$

该方案可确保对所有 R_{ib} 值的连续性。摩擦速度 u_* 的计算公式中的风速 V 即包含了边界层底层的水平风速又包括了不稳定情形产生的对流速度,因此用它很好地反映产生沙尘暴的强风因子。

通过以上分析可知, u_* 和 R_{ib} 把起沙和扬沙两种机制都概括进来,因此,用 u_* 和 R_{ib} 来对沙尘暴进行预报具有明确的物理意义。

2 结果简要分析

通过用 MM5 模式对 1995 年 5 月 16 日沙尘暴个例的模拟,结果发现爆发沙尘暴的几个地点无论在发生时间上还是在演变趋势上都与不稳定区及摩擦速度的大值区相一致,说明了用该方法来对沙尘暴进行预报是可行的,为此我们在预报方面作了进一步的尝试。

1998 年 4 月 15~16 日,在内蒙古西部和中部、宁夏、陕北、山西等地发生了一次区域性沙尘暴天气过程,这些地区的沙尘被卷扬到高空后,在西北气流引导下向东南方向扩散,华北中部到长江中下游以北大部分地区出现了浮尘天气,华北等地还降了“泥雨”。

我们对这次过程进行了预报。首先,这次过程具有典型的沙尘暴天气特征。如图(1),700hPa 温度槽明显落后于高度槽,冷平流及锋区相当明显,西北地区处于暖脊中,850hPa 图上还有一个+12℃的暖中心处于西北地区。地面图上(图略),蒙古气旋东移发展,冷高压位于蒙古西部,中心值已达 1032hPa,冷锋东移南压,其前后变压、变温都非常明显。所有这些特征为沙尘暴的爆发准备了大尺度天气形势条件。

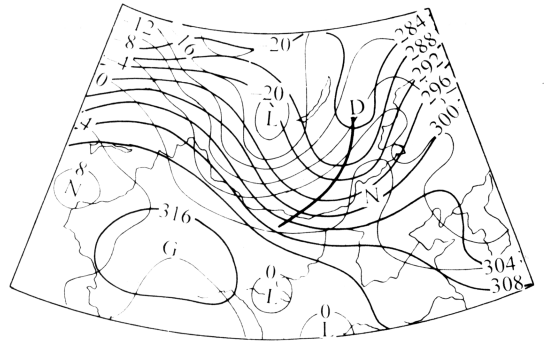


图 1 1998 年 4 月 15 日 08 时 700hPa 形势图
(粗线为高度场,细线为温度场)

用 MM5 模式^[13],从 14 日 12UTC 起报,得到每 3 小时一次的边界层稳定度状况和摩擦速度,并同实况沙尘暴发生区(以地面天气图为准)相比较,图 2 为稳定度状况分布图,从图中可以看出,除了 20 时外(图略),整个区域基本上都为不稳定区所覆盖,说明了白天大气边界层基本上都是不稳定的,湍流发展旺盛,容易引起气流上升,这就为沙尘上扬提供了动力条件。从 u_* 的预报结果来看(图 3), u_* 的大值区($>0.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)主要在 37°N 以北,同实际沙尘暴区的范围(图 4)基

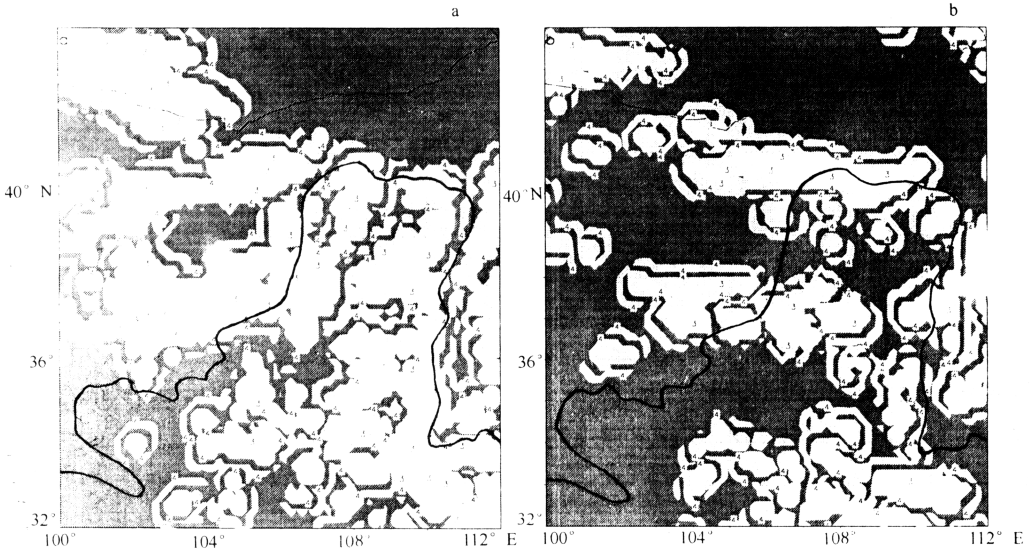


图 2 稳定度状况(a 4 月 15 日 11 时,b 4 月 15 日 14 时)

(3,4 分别表示强迫对流不稳定区和自由对流不稳定区,颜色越暗表示越不稳定)

本一致。从 u_* 的演变来看,11时,大值区($> 1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)位于 41°N 附近、 108°E 以西,至14时,大值区范围扩大,已南伸东扩到 38°N 和 110°E ,17时同11时相比变化不大,至20时, u_* 的大小和范围明显减小,这同实际沙

尘暴的演变趋势相一致,即11时沙尘暴首先在西北部爆发,然后向东南方向推进,强度和范围也同时扩大,至傍晚开始减弱下来(图4)。因此可以说模式基本上预报出了沙尘暴的爆发和向东发展的过程。

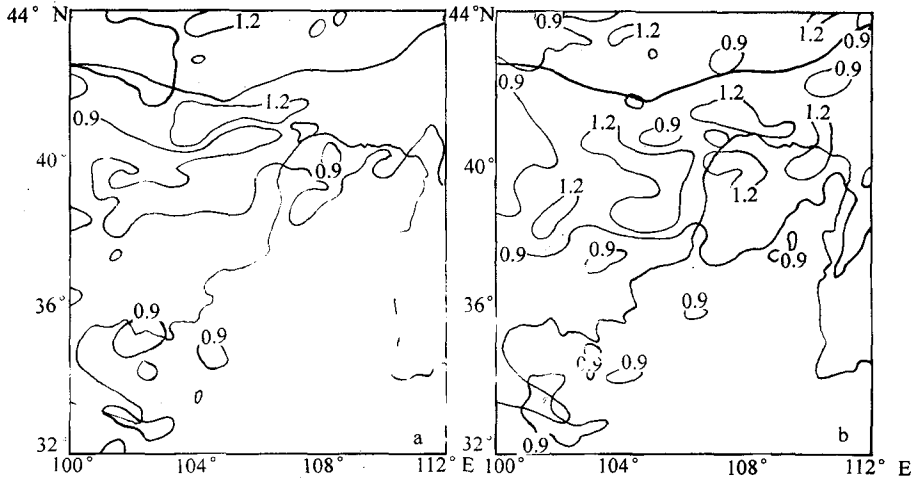


图3 1998年4月15日摩擦速度(a 11时,b 14时)

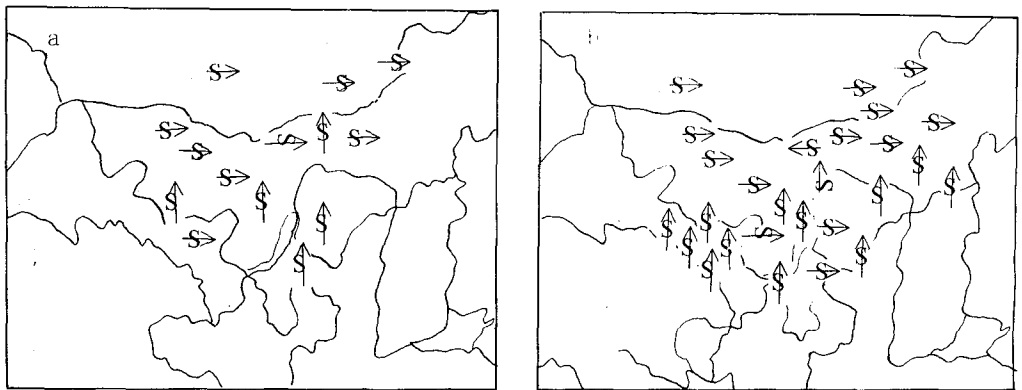


图4 1998年4月15日发生沙尘暴和扬沙天气的测站分布 a 11时,b 14时

3 沙尘暴短期预报流程

综合以上分析,概括出天气学和数值预报相结合沙尘暴短期预报方法流程图见图5。

4 结论和讨论

通过以上分析,得出以下主要结论:

(1)沙尘暴是一种大气边界层天气现象,其产生和边界层的性质有很大的关系,因此用边界层的一些特征量可以对其进行预报。

(2)设计了沙尘暴的预报方法,即沙尘暴出现在摩擦速度大值区(一般 $> 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)及边界层稳定性情形为强迫对流不稳定(情

形 3) 和自由对流不稳定(情形 4) 情况下。

(3) 冷空气只是产生沙尘暴最常见的天气系统, 沙尘暴的产生模式也不可能都一样, 因此, 仍需对其它类型的沙尘暴进行研究, 以

期找到其发生发展的共同特征和规律。

(4) 本方法操作起来仍有些不便, 还需进一步探索, 真正做到量化。

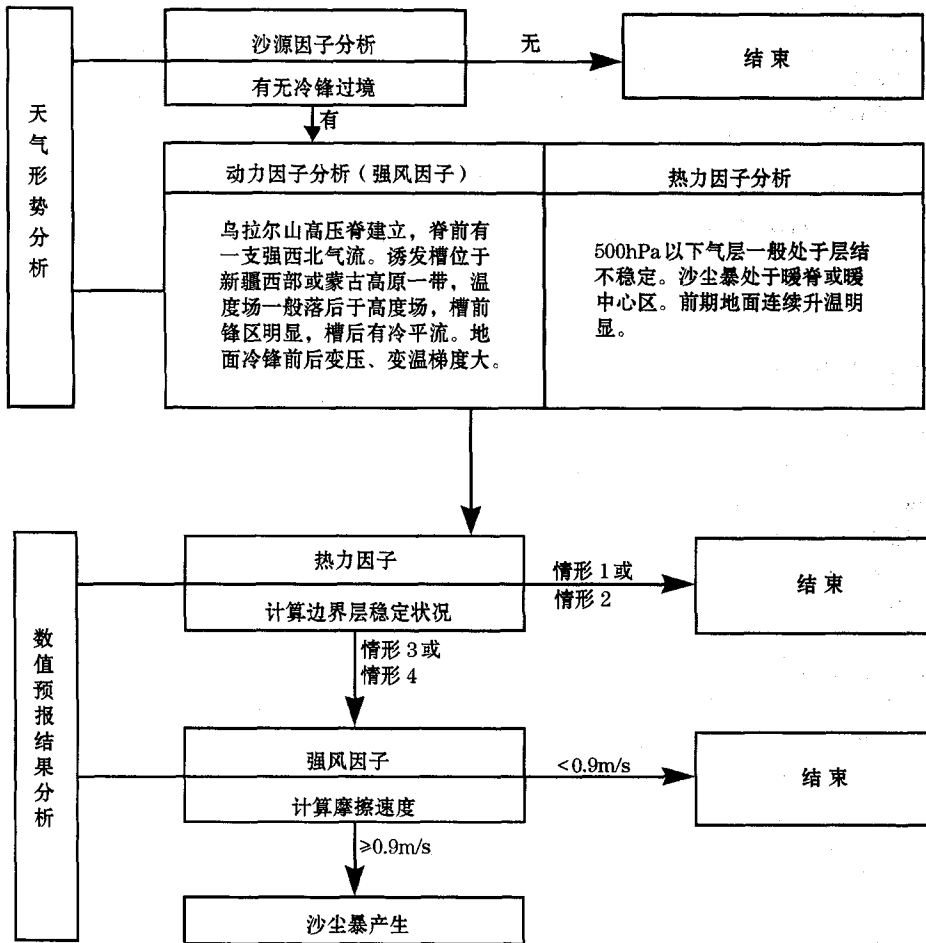


图 5 沙尘暴短期预报流程

参考文献

- 1 钱正安, 翟章, 陈敏连等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 1~10.
- 2 赵光平等. 宁夏区域性强沙尘暴天气成因及其预报方法研究. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 52~58.
- 3 马元仓. 1992年4月28日青海沙尘暴分析. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 59~61.
- 4 陕西省气象台. 陕西北部春季沙尘暴的气候特征及预报初探. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 22~26.
- 5 许宝玉, 钱正安, 焦彦军. 西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析及预报. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 44~51.
- 6 张钦仁. 西北地区“黑风”成因及预报方法探讨. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 70~74.

- 7 钱正安等. 关于甘、宁部分地区“93. 5. 5”特强沙尘暴灾害的调查报告. 大气情报, 1993, 30(4): 1~13.
- 8 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学, 1997, 21(5): 581~589.
- 9 郑新江等. 沙尘暴监测方法研究. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 82~87.
- 10 Grell G A, J Dudhia and D R Stauffer. A Description of the Fifth-Generation Penn Stute/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR/TN - 398 + STR NCAR TECHNICAL NOTE.
- 11 胡孟春, 屈建军. 甘肃河西走廊地区扬尘量的初步估算. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 118~120
- 12 Westphal D L, O B Toon and T N Carlson. A two dimensional numerical investigation of the dynamics and Microphysics of Saharan dust storms. J. geophys. Res. , 1988, 92: 3027~3049.
- 13 崔波, 郭肖容等. 中尺度模式 MM5 在国家气象中心的移植与开发研究. 科技年报 (A 册, 气象类). 国家气象中心, 1996: 240~249.

A Tentative Study of the Forecasting Method of the Dust Storms in the Northwest of China

Sun Jun Li Zechun

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

The dust storm is a disastrous weather phenomenon which often occurs in spring in the Northwest of China and is difficult to forecast. Firstly, a synoptic concept model about its happening was developed. According to this model, a numerical forecasting method was designed by means of the calculation of the PBL regimes (stable, mechanically driven turbulence, forced convection and the free-convection regime) and friction velocity. The rationality is shown by a verification on the model with the PSU/NCAR numerical model MM5. Finally, a flowing chart of short-range forecasting method, which combining the synoptic principle and numerical forecasting technology, was given.

Key Words: dust storm PBL regimes friction velocity Richardson number forecasting method