

一次沙尘暴过程锋生函数和地表热通量的数值诊断

孙军¹, 姚秀萍²

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 北京气象学院, 北京 100081)

摘要: 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。本文利用国家气象中心改进的PSU/NCAR的非静力中尺度模式MM5, 对1995年5月16日我国西北地区发生的一次沙尘暴天气个例进行了锋生函数和地表热通量的诊断分析。结果表明, 沙尘暴过程是冷锋在移至我国西北地区时产生的一种强烈锋生过程; 地表感热通量明显大于地表潜热通量; 有无地面热通量对比试验表明, 热力因子在沙尘暴产生过程中具有重要作用。

关键词: 沙尘暴; 锋生; 强风; 沙源; 热力不稳定; 数值模拟; 感热通量; 潜热通量

中图分类号:P445⁺.4 文献标识码:A

1 引言

我国西北地区是沙尘暴的多发地, 春季3~5月份更是其集中发生的时段。沙尘暴虽为一种小概率天气事件, 但近40余年来的统计分析发现^[1], 其发生频数不仅增多, 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。它不但能造成直接的经济损失, 同时也能造成无法估量的严重环境问题, 有些甚至比我国东部台风和暴雨灾害造成的损失还要大。因此对其进行更为深入的研究和探讨, 更好地实施西部大开发, 对防灾减灾、趋利避害都具有极为重要的意义。

对这种天气过程, 我国学者曾进行了广泛的研究, 取得了一些重要的研究成果。沙尘暴是和冷锋系统密切相关的, 引起沙尘暴的冷锋强度明显强于一般的冷锋, 锋前后的变压(高)变温梯度都比较大^[2]。对沙尘暴产生的天气学成因上基本都认为离不开强风、沙源和热力不稳定这三个因子^[3,4]。徐国昌等^[5]认为, 地转偏差在黑风过程中起着决定性的作用, 实际风基本上是由偏差风决定的。许宝玉等^[2]通过对历史上出现在甘肃河西和南疆盆地南缘地区的5次特强沙尘暴个例形势和要素的共同特征

进行了综合分析, 进一步指出了热力因子的重要性, 认为是区分特强沙尘暴和一般风沙天气的重要方面。赵光平等^[6]强调了锋前中尺度系统的作用。项续康等^[7]利用静止卫星TBB资料对沙尘暴进行了切实可行的中尺度分析, 发现了三种强沙尘暴中尺度系统。胡隐樵等^[8]则指出冷锋前干飑线的影响。程麟生等^[9]、陈伟民等^[10]利用MM4模式成功地对“93.5.5”黑风暴个例进行了数值模拟。王文等^[11]则应用线性和非线性对称不稳定的判据对“93.5.5”强沙尘暴天气过程进行了数值诊断分析。本文在前人研究的基础上, 从锋生和地表热通量两方面来对沙尘暴作进一步地探讨。

2 个例介绍与形势分析

1995年5月16日, 内蒙古、宁夏和甘肃的部分地区发生了一次较强的沙尘暴天气过程。15:02(北京时, 下同)内蒙古阿拉善盟广大地区首先遭受了强沙尘暴袭击; 15:40沙尘暴开始袭击宁夏银川及固原以北广大地区, 其中银川市瞬时最大风速达 $29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 能见度仅10m; 惠农县最大风速达 $31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 能见度也陡降到100m以下。这次沙尘暴过程给上述地区均造成一定的经济损失, 其中宁夏受灾最严

收稿日期: 2001-04-09; 改回日期: 2001-09-18

基金项目: 国家气象中心(ZX95-02)课题资助

作者简介: 孙军(1966—), 男, 黑龙江人, 硕士, 高级工程师, 主要从事中短期天气预报方法方面的研究。E-mail: sjun123@hotmail.com

重。以下就以这次沙尘暴过程发生前的大尺度形势场进行分析。

1995年5月16日08:00，在500 hPa图上(图略)，乌拉尔山以西地区的高压脊发展得很强，脊前为强西北气流带，在脊前50°N以北地区为一宽广的低值区，在蒙古高原以西及贝加尔湖西南方各有一个低压中心，并各配以-28°C的冷中心，西边的低压系统较东边的强。中纬度的西风带上相应有两个浅槽，西边浅槽处在西北偏西气流上，没有明显的锋区配合；而东边的浅槽稍深，槽前有一弱脊向东北方向伸展，并配有一暖舌，温度槽落后于高度槽，槽后有明显的冷平流。我国西北地区的内蒙古西部、甘肃和宁夏处于该槽底的偏西气流中。在700 hPa高度上(图1)，两个槽的性质基本没变，只是东边的槽区配以更深的冷温度槽，锋区也更加明显，槽后也有较强的冷平流。特别值得注意的是在槽前的暖舌中有一+8°C的暖中心位于宁夏与甘

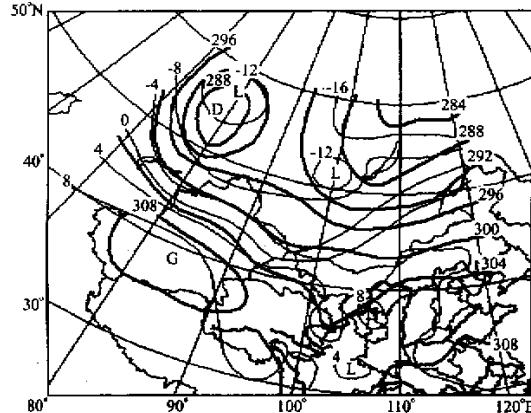


图1 1995年5月16日08:00 700 hPa形势图

Fig. 1 Synoptic chart of 700 hPa at 08 00

on May 5 , 1995

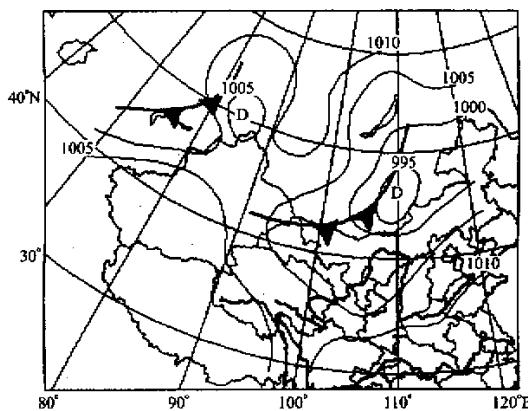


图2 1995年5月16日08:00 地面形势图

石方数据
Fig. 2 Synoptic chart of surface at 08 00

on May 5 , 1995

肃两省交界处，该暖中心与沙尘暴的发生位置区域极为接近。这个暖中心在更低层的850 hPa图上也表现出来(图略)，只是位置稍偏北一些。在地面图上(图2)，冷高压主体位于新地岛附近，对应高空两个槽有两个地面冷锋分别位于新疆西部和蒙古高原中部一带，锋后冷高压中心分别位于50°N、65°E和50°N、95°E附近，强度分别为1024 hPa和1011 hPa，冷锋后最大3 h正变压和24 h负变温分别为西边冷锋 $\Delta P_3 = +2.3 \text{ hPa}$, $\Delta T_{24} = -7^\circ\text{C}$ ；东边冷锋 $\Delta P = +2.8 \text{ hPa}$, $\Delta T_{24} = -8^\circ\text{C}$ ，即东边冷锋在移向我国西北地区时加强得比较快，锋生作用明显。从主体冷高压中分裂出的冷空气分别沿西北方和北方路径侵入我国。这次沙尘暴主要由东边的冷锋引起，冷空气从贝加尔湖以西向南入侵。产生这次沙尘暴的高空形势与一般冷空气的天气形势相比，并没有十分特殊之处，之所以产生沙尘暴，极有可能是因为有锋前暖区的存在，加强了该处的水平温度梯度，引起强烈的锋生，有利于地转偏差风的加大，并把沙尘吹起，即所谓的起沙机制。同时由于锋前地面增温明显，增加了大气的层结不稳定，有利于湍流和干对流作用加强，引起沙尘上扬，即所谓的扬沙机制，也就是说热力因子在这里起了极其重要的作用。而处于新疆等地的冷锋之所以没有引起新疆等地的沙尘暴天气，很有可能是因为受前面冷锋的降温影响，热力作用不明显。为了说明锋生和热力的作用，我们对锋生函数和地表热通量作了诊断分析。

3 锋生函数和地表热通量

在沙尘暴发生时，均已观测到了锋前明显的增温及锋后明显的降温过程。为了说明，我们选取温度作为衡量锋生强度的因子。锋生函数的诊断方程采用 \vec{Q} 矢量表示的准地转锋生函数^[12]，其表达式为

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) |\nabla T|^2 = \frac{2P}{R} \vec{Q} \cdot \nabla T,$$

其中

$$\vec{Q} = (\vec{Q}_1, \vec{Q}_2)$$

$$= \left(-\frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial p} \right), -\frac{\partial V_g}{\partial y} \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial p} \right) \right),$$

φ 为位势高度。

进入大气的地表热通量可分为地表感热通量和地表潜热通量，在MM5模式所用的Blackadar高分辨率边界层方案中，近地面层的感热通量和水汽通

量是由相似理论推得的，其表达式分别为

地表感热通量：

$$H_s = -c_{pm}\rho_a \kappa u_* T_*.$$

地表水汽通量：

$$E_s = M \rho_a I^{-1} [q_v(T_g) - q_{va}],$$

则潜热通量为 $L_v E_s$, L_v 为蒸发潜热。其中

$$I^{-1} = \kappa u_* \left[\ln \left(\frac{\kappa u_* z_a}{K_a} + \frac{z_a}{z_l} \right) - \psi_h \right]^{-1},$$

这里， c_{pm} 是湿空气定压比容， ρ_a 是模式最低位面处的密度， κ 为 karman 常数， M 为水汽有效率参数， u_* 为摩擦速度， T_* 为“摩擦温度”，分别由下式确定：

$$u_* = \max \left(\frac{\kappa V}{\ln \frac{z_a}{z_0} - \psi_m}, u_{*0} \right),$$

$$T_* = \frac{\theta_a - \theta_g}{\ln \frac{z_a}{z_0} - \psi_h},$$

式中 ψ_h 为无量纲稳定度参数。其它参数说明和参数化方法见文献 [13]。

为了诊断沙尘暴发展阶段的锋生和热力作用，用常规气象观测资料是无法做到的，因为该沙尘暴主要突发于 5 月 16 日下午 15:00 左右，已经过了下午 14:00 的常规观测时间。但用国家气象中心改进的非静力中尺度模式 MM5 可以对其进行较成功的 24 h 控制模拟试验，用其输出资料则可实现任何时刻的各种诊断。为了进一步了解模拟结果，这里首先对控制模拟设计和部分模拟结果予以简要说明。

4 模拟设计及结果简述

为了说明锋生过程和地表增温加热作用对沙尘暴产生的重要影响，我们设计了两组数值试验，试验 1 是控制模拟试验，考虑全物理过程；试验 2 仅去掉地表通量，其它物理过程不变。

4.1 控制模拟设计^[12]

(1) 模式基本参量：模式是非静力 MM5，采用二重双向嵌套方案，粗细网格分辨率分别为 $d_1 = 45 \text{ km}$, $d_2 = 15 \text{ km}$ ，格点数分别为 101×101 、 103×103 ，垂直分辨率 $K_\sigma = 25$ ，模式顶 $P_t = 10 \text{ hPa}$ ，水平域中心为 38°N 、 106°E 。

(2) 初始条件：T63 全球分析 + 地面、探空资料。

(3) 模式顶边界条件：辐射边界条件。

(4) 万向边界条件：域一采用时变侧边界条件，

大尺度趋势由线性时间内插 12 h 观测资料获得；域二采用张弛侧边界条件。

(5) 行星边界层物理过程：采用修正版的 Blackadar 高分辨率 PBL 参数化。

(6) 地面物理过程：包括有非均一地面的感热通量、水汽通量和动量通量，地表感热通量及水汽通量从相似理论计算而得（见上）。

(7) 地面温度：考虑了辐射和热交换过程，根据强迫 – 恢复薄层模式，通过地面能量收支方程预报获得。

(8) 大气辐射：采用 Dulhia 的云辐射方案，考虑长波、短波与云及晴空水汽的相互作用。

(9) 可分辨的降水物理过程：采用显式水汽方案，考虑冰相过程，增加云水、雨水等预报方程，计入凝结、蒸发等相变过程，允许过冷却水的存在。

(10) 不可分辨的降水物理过程：采用 Kain – Fritsch 积云对流参数化方案。

(11) 模拟时间：24 h，即 1995 年 5 月 15 日 20:00 ~ 16 日 20:00，积分时间步长 90 s。

以下用二重嵌套的模拟结果予以分析。

4.2 模拟结果可信性分析

本文采用统计检验的方法来验证模拟结果的可信性，包括形势场检验和单站要素检验。形势场检验是对模式模拟的 850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 的高度场、温度场和风场的 24 h 模拟量来进行的。检验量包括：平均误差、均方根误差和倾向相关系数。该方法对试验结果的整体客观对比是很有帮助的，但对沙尘暴这种中尺度气象场仍存在这种可能性，即尽管模式对天气系统的位相、振幅和结构有较准确的模拟，但在个别时间和空间上仍可能出现大的局地误差。因此，仍需要单站要素检验方法。这里我们选取了最靠近沙尘暴主要发生地之一的银川站（ 38.29°N 、 106.13°E ）的模式格点（ 38.30°N 、 106.15°E ）为代表，进一步检验模式模拟这次沙尘暴的能力及沙尘暴爆发前后地面气压、气温及风速等气象要素演变情况的预报与实际观测值相吻合的程度。

从统计检验结果来看，最大平均误差位势高度为 $+8.523 \text{ gpm}$ 、温度为 -2.982°C 、风速为 $+0.714 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。天气图上等值线间隔一般高度为 40 gpm，温度为 4°C ，以上误差均未超过一个等值线间隔范围。均方根误差和倾向相关系数也达到令人比较满意的结果。从单站（银川）检验结果来看，地面气压、气温、风速的时间变化曲线与实况吻合的较

好，气压先降后升，温度在沙尘暴爆发前1~2 h 达到最高，风速逐渐加大，在沙尘暴发生前(下午15:00)南风达到最大，沙尘暴爆发时(16:00左右) u 分量达到最大， v 分量渐渐由南风转为北风。所有这些要素变化特征均与冷锋过境以及沙尘暴爆发前后各要素观测的变化结果相一致。这些说明了模式输出结果是可信的，该模式对沙尘暴具有一定的预报能力。

5 诊断结果分析

5.1 锋生函数分析

从锋生函数早中晚的时间演变过程图上可以看到(图3)，锋生函数从早到晚有一个弱—强—弱的过程，且锋生主要发生在750 hPa以下，即边界层内。在沙尘暴爆发的当天早上08:00，高空锋区(500 hPa上)位于100°E附近，地面冷锋位于40°N以北地区，整个剖面区域(39°N、100°~112°E)都位于地面冷锋前。从此时的锋生函数图上可看出(图3a)，在对流层底层只有较弱的锋生锋消区。至中午11:00，随着冷锋不断向东推进(冷锋尾部已达100°E附近)，以及地表面增温对边界层大气的加热作用，在冷锋前的107°~108°E之间、800 hPa以下开始出现明显的锋生过程，在其西边则有锋消过程(图略)。下午14:00，冷锋已移到河套附近，其前106°~108°E之间的锋生过程明显加强，锋生函数达到这一时段内的最大值($2400 \times 10^{-16} \text{ k}^2 \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (图3b)。锋生过程在下午15:00~16:00时强度虽有所减弱，但仍维持着 $1200 \times 10^{-16} \text{ k}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 强锋生区，且范围也扩大了，从105°~109°E都为锋生区(图略)。下午15:00~16:00时正是沙尘暴发生的主要时段，沙尘暴发生区与该时段内锋生区基本吻合。说明锋生过程对沙尘暴的产生起着重要作用，即当冷锋移到这一地区时，由于强烈的局地锋生，无疑会加大冷锋前后的变压和变温梯度，锋生次级环流和地转偏差风也会不断加大，并把沙尘吹起，引起沙尘暴的发生。下午17:00~18:00，边界层内的锋生锋消过程明显减弱(图3c)，对流层底层基本上没有明显的锋生过程，沙尘暴也减弱直至消失。陈伟民等^[10]也模拟出了同沙尘暴飑线相联系的水平气压和温度梯度的增强。钱正安等^[3]从两站气象要素分析中，指出了冷锋过境前后温、压、湿、风要素的变化。这些都说明了强锋生过程

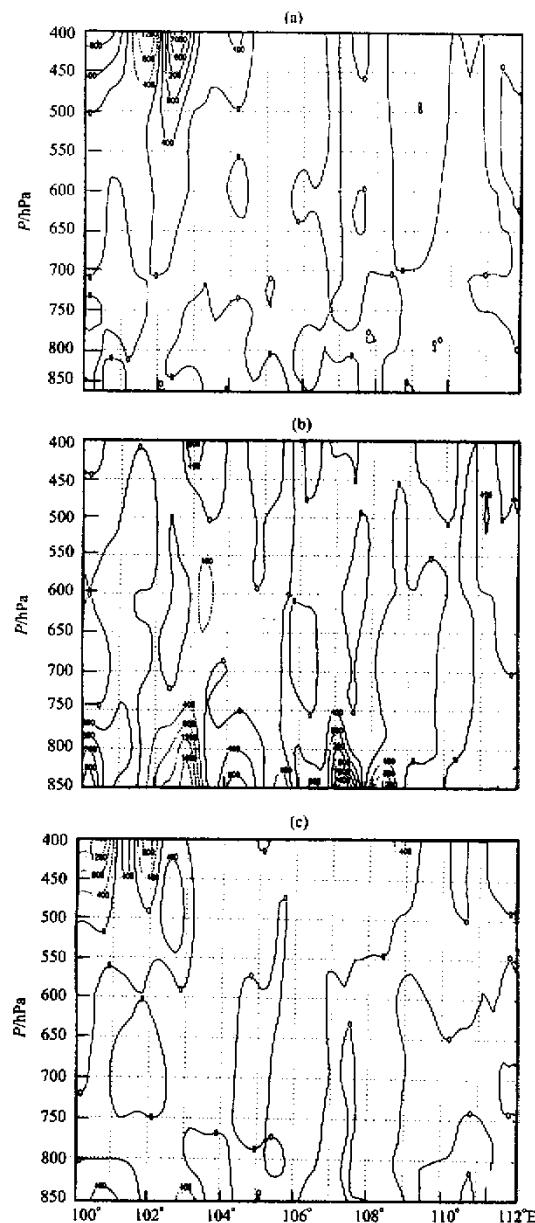


图3 沿39°N的锋生函数经度—高度剖面

(a) 08:00, (b) 14:00, (c) 20:00

Fig. 3 The vertical cross section of frontogenesis function along 39°N. (a) 08:00, (b) 14:00, (c) 20:00

的存在，与本文结果相一致。

5.2 地表热通量分析

研究指出^[2]，产生沙尘暴的三大因子之一的热力因子，对沙尘暴的产生具有重要影响，甚至是区分沙尘暴与一般风沙天气的重要因素。这种热力因子的具体体现就是地面的强烈辐射增温作用。从银

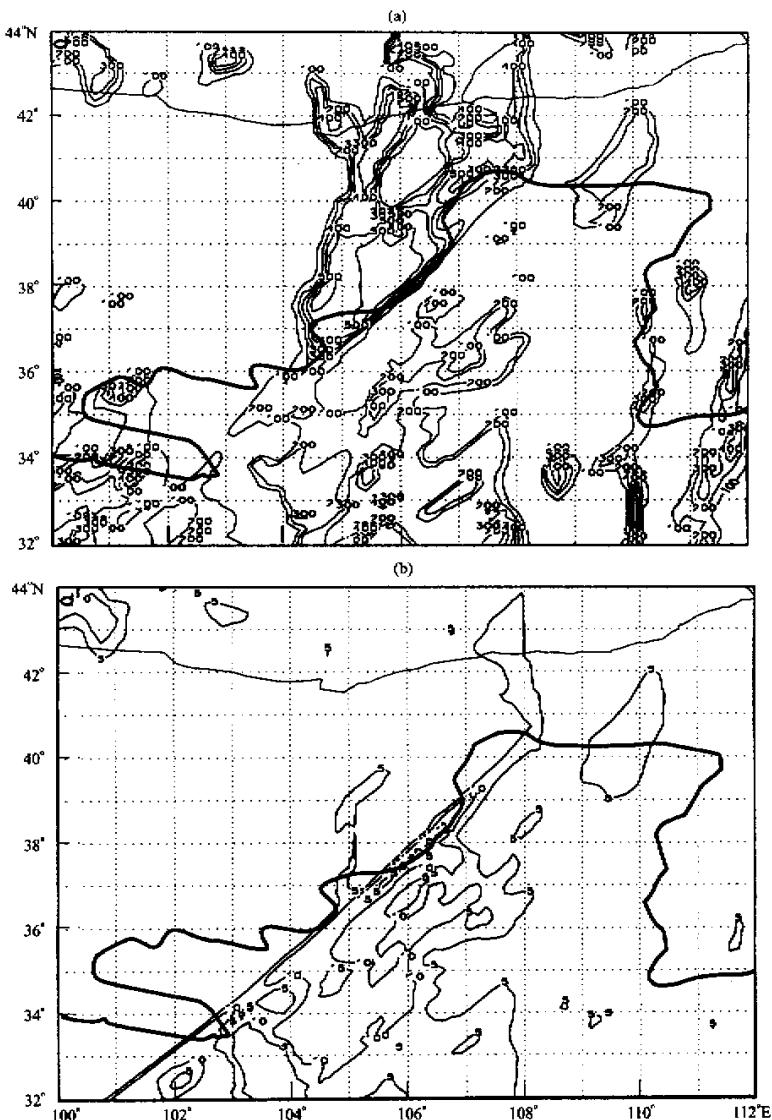


图 4 15:00 地表热通量的分布

(a) 地表感热通量,(b) 地表潜热通量

Fig. 4 Horizontal distribution of (a) the surface sensibleheat flux and (b) the surface latent heat flux at 15:00

川站沙尘暴爆发日前几天下午 14:00 的气温变化来看 , 气温从 13~16 日一直处于增温阶段 , 由 13 日的 19℃ 升到 16 日的 26℃ , 增温达 7℃ 。模式模拟输出的结果也显示出沙尘暴爆发前一时刻 (15:00) 银川站及其以北地区有一超过 24℃ 的高温区。

从地表感热通量和潜热通量的分布图上可看出 (图 4) , 地表感热通量的量级为 $10^2 \text{ Jm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 4a) , 而地表潜热通量的量级为 $10^{-4} \text{ Jm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 4b) 。因此 , 地表潜热通量可以忽略不计 , 对边界层大气的

加热主要来自于地表感热通量的输送 , 而这种差别越大 , 说明地表水分含量越少 , 地表也就越干燥 , 沙尘暴也就越容易发生。从地表感热通量的时间演变来看 , 中午 11:00 主要感热通量区位于银川以东 (图略) , 至 14:00 开始 , 便西移至银川及周围地区 (图 4a) , 量值从 $300 \text{ Jm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 增至 $500 \text{ Jm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 爆发沙尘暴的上述几个台站基本上都位于 $500 \text{ Jm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区域范围内 , 即沙尘暴基本上爆发于感热通量大值区 , 可见感热加热对沙尘暴的产生

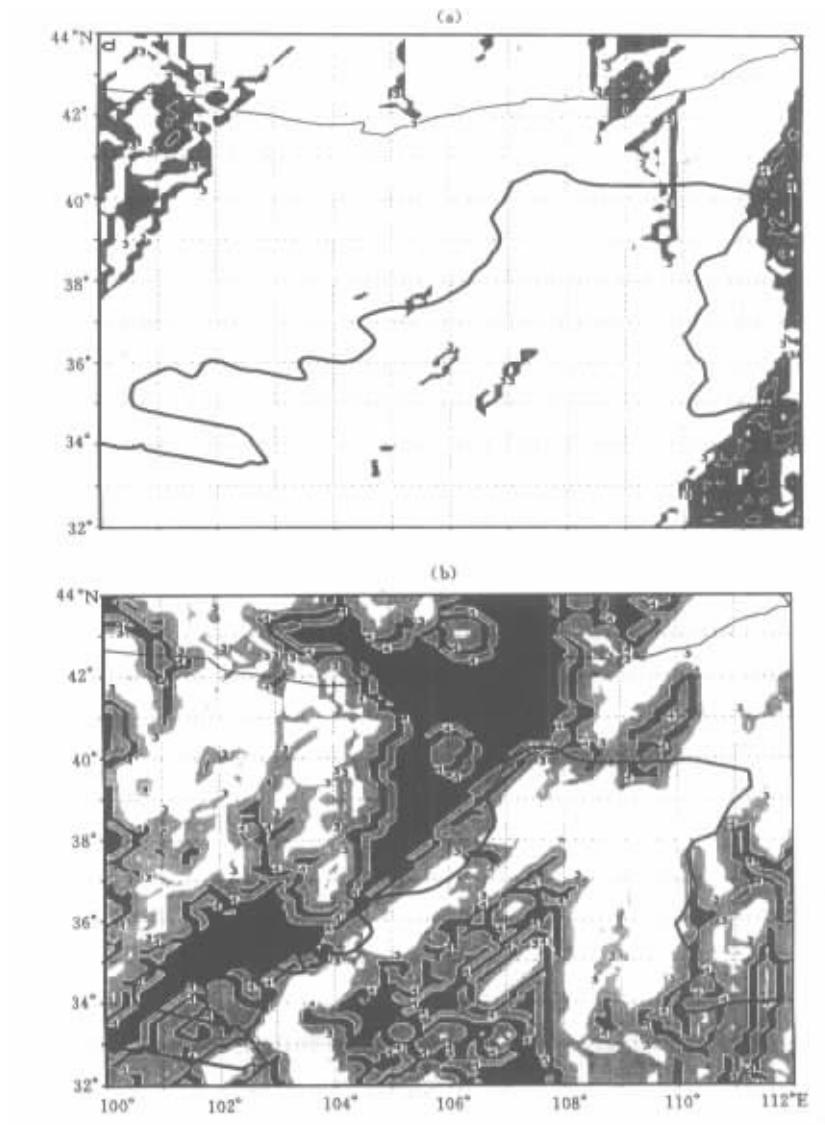


图 5 15:00 边界层稳定性状况分布

(a) 无地面热通量时,(b)有地面热通量时

Fig. 5a The PBL stability regime without (a) and with (b) surface heat fluxes at 15:00

有一定的作用。感热通量到下午 17:00 以后减小了许多,因为这时的太阳辐射对地表加热作用开始减弱。

地表感热加热边界层大气,增加大气的不稳定性,并影响锋生的强度及锋生环流,进而对边界层结稳定性状况产生影响。因此,这里我们设计了一个无地面热通量的模拟方案,以说明它的重要性。无地面热通量指略去地面感热和潜热通量。上述计算表明,地表潜热通量很小,可以略去不计。因此,无地面热通量主要就是不考虑地表感热通量,这样就能够对产生沙尘暴的热力因子进行考查。

从无地面热通量边界层稳定性状况分布图来看

(图 5a),14:00~17:00,沙尘暴爆发时段,边界层只有零散分布的不稳定,且主要为强迫对流不稳定(浅色区域),沙尘暴区内无自由对流不稳定(深色区域)出现,比全物理过程模拟的边界层稳定性状况分布范围明显要小(图 5b)。这样,在边界层是稳定的情况下,要产生沙尘暴是很难的。由此可见,热力因子对边界层稳定性产生重要的影响,因而对沙尘暴的产生起着重要的作用。

6 结论和讨论

通过以上分析,得出以下主要结论:

(1) 沙尘暴是冷锋在移动过程中出现的一种强烈锋生过程，沙尘暴比最强锋生出现时间晚1个小时左右。

(2) 地面热通量以感热通量为主，无地面通量试验时，大气边界层变成稳定的，说明热力因子对沙尘暴的产生具有重要作用。

(3) 本模拟只是应用了常规客观分析及观测资料，由于西北地区本身站点稀疏，在数值模拟中若加进卫星及雷达观测资料是否能得到更好的模拟结果仍有待进一步研究。

(4) 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个例进行研究，以期找到其发生发展的共同特征和规律。

参考文献

- [1] 钱正安, 贺慧霞, 翟章等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征 [M]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 1~10
- [2] 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与预报 [M]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 44~51
- [3] 钱正安, 胡隐樵, 龚乃虎等. "93.5.5" 特强沙尘暴的调查报告
- [4] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制 [J]. 大气科学, 1997, 21(5): 581~589
- [5] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省"4.22"特大沙尘暴分析 [J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26~35
- [6] 赵光平, 王凡, 杨勤等. 宁夏区域性强沙尘暴天气成因及其预报方法研究 [M]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 52~58
- [7] 项续康, 江吉喜. 西北地区沙尘暴成因的中尺度分析 [J]. 高原气象, 1996, 15(4): 448~455
- [8] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飑线, —黑风暴形成的机理分析 [J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178~185
- [9] 程麟生, 马艳. "95.5" 黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验 [J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 385~394
- [10] 陈伟民, 王强, 陈敏连等. "5.5" 黑风暴中 β 尺度飑线的初步数值模拟 [J]. 气象学报, 1996, 54(6): 684~692
- [11] 王文, 程麟生. "93.5" 黑风暴的对称不稳定诊断分析 [J]. 高原气象, 1999, 18(2): 127~137
- [12] 白乐生. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用 [J]. 气象, 1988, 14(8): 25~30
- [13] Grell G A, J Dudhia, D R Stffer. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [R]. NCAR/TN - 398 + STR NCAR TECHNICAL NOTE, 1994. 89~93
- [14] 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 [Z]. 科技年报 A 册(气象类). 北京: 国家气象中心, 1996. 240~249

Simulating Diagnostic Analyses for Frontogenesis and Surface Sensible Heat Flux of a Sand-Dust Storm Process

SUN Jun¹, YAO Xiu-ping²

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. Beijing Meteorological Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The sand and dust storm is a disastrous weather phenomenon which often occurs in the northwest of China spring. The diagnostic analysis of a sand-dust storm case, which occurred on 16 May 1995, is studied by using of the PSU/NCAR non-hydrostatic mesoscale model MM5 improved by NMC. The results show that the dust storm is a process of strong frontogenesis when the cold front move to the northwest China region. The sensible heat flux is very greater than the latent heat flux in the PBL air. The case study also indicates that the thermal factor play an important role on the producing process of the dust storm through removing the surface flux from the MM5.

Key words: Sand-dust storm; frontogenesis; Strong wind; Dust source; Thermal instability; Numerical simulation; Sensible heat flux; Latent heat flux