

文章编号：1006-4354 (2009) 03-0008-04

一次沙尘暴过程的数值模拟和层结条件分析

王 锐¹, 严 东², 施健康¹

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 69040 部队, 乌鲁木齐 830092)

摘要：层结条件是沙尘暴形成的重要因素。利用非静力 MM5V3 模式对 2004 年 3 月 26—28 日主要发生在内蒙古中部偏北地区的强沙尘暴天气数值模拟，并利用模式结果对沙尘暴爆发的层结条件进行分析。结果表明，混合层能够反映我国内蒙古地区沙尘暴爆发时的大气层结特征，其形成是本次沙尘暴产生的重要原因。蒙古气旋冷锋是本次沙尘暴天气形成的触发条件之一。

关键词：沙尘暴；混合层；锋生函数

中图分类号：P445.4

文献标识码：A

2004 年, 我国共出现了 18 次沙尘天气过程, 其中 3 月 26—28 日的沙尘暴天气是最强的一次, 其影响范围波及了 11 个省区的 304 个县, 造成了很大的损失。

我国学者从 20 世纪 70 年代开始对沙尘暴进行研究^[1-4]。研究表明, 强风、沙源和大气层结不稳定是沙尘暴爆发的基本条件。

大风过程并不总与沙尘暴过程相伴^[5], 表明还有其他因素影响沙尘暴的形成。沙尘暴多发于午后至傍晚, 说明热力不稳定对沙尘暴形成有重要作用。Barenblatt^[6]研究表明, 在稳定层结条件下沙尘浓度随高度指数减小(假定沙尘粒径相同), 而在对流状态下, 沙尘浓度随高度保持不变。Takemi^[7]研究发现, 1993 年 5 月 5 日黑风暴形成的重要原因是地面加热形成的深厚混合层减小了将气块从混合层顶抬升到自由对流高度所需的能量。由此可知, 层结条件是影响沙尘暴形成的重要因素。本文利用数值模拟的方法, 对 2004 年 3 月 26—28 日的强沙尘暴过程分析研究, 了解层结条件在沙尘暴过程中的作用, 为沙尘暴天气的深入研究提供一些参考。

1 天气概况

3 月 26 日 08 时, 有锋面气旋生成于蒙古国东部, 14 时气旋中心在内蒙古东北部边界附近,

内蒙古偏北地区出现扬沙天气, 随着这股冷空气的东移, 20 时扬沙天气结束。与此同时新疆北部的冷空气开始东移。27 日 02 时, 有冷空气越过蒙西山地, 出现明显的气旋冷锋, 蒙古气旋生成。之后, 气旋发展加速, 11 时中心气压为 997 hPa, 气旋后部、底部地面风速增大, 出现大范围扬沙和沙尘暴天气, 内蒙古阿盟中北部、巴彦淖尔市北部有沙尘暴, 海力素能见度小于 900 m。14 时气旋东移缓慢, 强度不断增强, 中心气压降至 993 hPa, 沙尘暴范围进一步增大, 在巴彦淖尔市北部、包头北部、乌兰察布市北部、锡盟北部均有沙尘暴出现, 其中海力素、二连浩特、东苏旗能见度小于 400 m(图 1)。17 时中心气压达 990 hPa, 气旋南侧出现 5~7 级大风, 沙尘暴达到最强, 范围也最大。内蒙古中部、甘肃中部、宁夏北部地区开始出现扬沙天气, 部分地区出现沙尘暴。内蒙古中部偏北地区位于此气旋的中心附近, 出现强沙尘暴天气, 能见度只有 100 m 左右。20 时气旋东移明显, 中心值为 994 hPa, 此时沙尘天气随之东移并有所减弱; 23 时气旋东移, 中心值为 997 hPa, 沙尘暴范围开始减小。28 日 17 时左右, 随着气旋的进一步东移, 沙尘天气结束。

图 2 为 3 月 27 日 08 时—28 日 02 时地面沙尘暴和扬沙累计分布图。沙尘暴主要出现在 27 日

收稿日期：2008-09-11

作者简介：王 锐 (1983—), 男, 山东日照人, 在读硕士, 主要从事数值模拟方面研究。

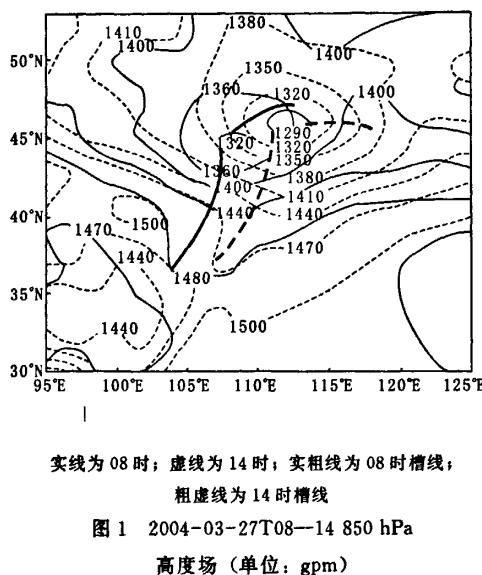


图 1 2004-03-27T08—14 850 hPa
高度场 (单位: gpm)

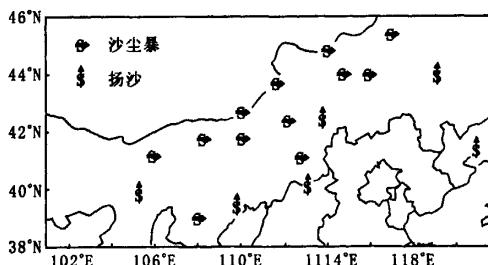


图 2 2004-03-27T08—28T02 沙尘暴
和扬沙累计分布 (引自文献 [4])

14—20时，这一时段蒙古气旋的锋面途经沙源丰富的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙漠、库布齐沙漠和浑善达克沙漠，发生沙尘暴的区域随着蒙古气旋自西向东移动。本文主要分析这一时段的层结条件。

2 中尺度模式设计及结果验证

利用每日 4 次的 NCEP 分析资料（水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ），采用 PSU/NCAR 非静力中尺度有限区域 MM5V3 模式对这次沙尘暴天气进行数值模拟，每 3 h 输出一次结果。从 3 月 26 日 08 时（BST）起积分 48 h。模式参数设计如下。

(1) 双向双重嵌套区域：粗细网格分辨率分别为 45 km 和 15 km，格点数分别为： 61×61 、 94×94 。

$\times 94$, 中心经纬度 (44°N , 115°E); 垂直方向均取 σ 坐标, 为不等距 23 层。

(2) 侧边界条件：粗网格区域为张弛边界条件，细网格区域为时变边界条件。

(3) 各种物理参数化方案：显式水汽方案均为简单冰方案；积云对流参数化方案均采用 KF 方案；行星边界层方案均采用 Blackadar 高分辨率方案；上边界条件为辐射上边界条件。

由影响系统分析可知，蒙古气旋是造成本次沙尘暴天气的主要天气系统。将模拟的蒙古气旋中心强度变化和移动状况(图3)与天气概况相比可以看出，二者存在较高的一致性，可认为本次模拟较好地抓住了沙尘暴天气的主要影响系统。对比实际槽的位置和强度以及主要天气形势等(图略)，可看出模式的模拟较好，说明模拟结果可信。

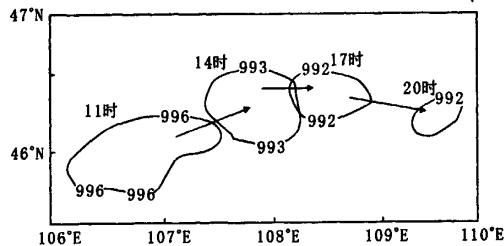


图3 模式模拟的2004-03-27气旋中心强度(单位:hPa)和移动变化图

3 层结条件分析

3.1 混合层

采用 $-\partial/\partial p$ 表示层结稳定状况，其值越小，代表层结越不稳定。热力不稳定层结，即在近地面层形成超绝热层($-\partial/\partial p < 0$)是沙尘暴发生的有利层结条件。从图4a发现，超绝热层在垂直方向上仅能达到 $\sigma = 0.97$ 高度(地面以上约200m)，最大值仅为 -0.02 K/hPa 。因此，出现的超绝热层有几百米的高度，强度也较小，与经常出现的沙尘粒子几千米左右的扩展高度相比，并不具有非常显著的天气意义。

在干燥环境下，由于缺乏充足的水汽以及水汽的平流，地面加热将全部用于加热空气，且对空气的加热是以热泡的方式将热量输送至边界层

上层，形成具有中性层结特征的混合层，这是干燥环境下行星边界层的突出特点。在中性层结下，抬升气块耗费较小的能量，因此深厚混合层将有利于深厚对流的产生^[7]。

27日14时(图4a)， $-\partial\theta/\partial p=0$ 的等值线在垂直方向出现延伸。此时，巴彦淖尔市北部、包头北部、乌兰察布市北部、锡盟北部均有沙尘暴出现，这些区域大都位于 112°E 以西，而其上空的等值线在垂直方向已向上延伸到较大高度(图略)。17时(图4b)， $-\partial\theta/\partial p=0$ 等值线的范围有较大幅度增加，垂直方向上接近 $\sigma=0.75$ 高度。此时，最大范围和强度的沙尘暴爆发，范围扩大到内蒙古中部地区，其中心位置大约为 112°E ，并不断向东扩展。20时(图4c)， $-\partial\theta/\partial p \leq 0$ 的区域出现在 σ 为 $0.80\sim 0.95$ 范围内，地面附近变为较稳定层结，抬升气块需要耗费较大能量，不利于沙尘的垂直输送，沙尘天气也开始逐渐变弱。

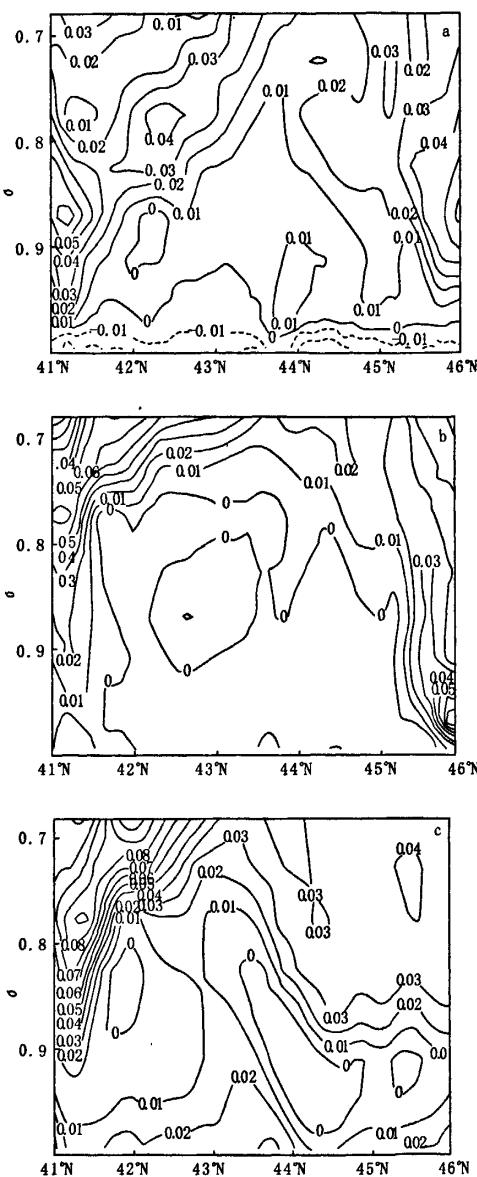
分析表明，随着沙尘天气的发展，混合层的范围不断增大。最大范围沙尘暴爆发时，混合层范围和强度也达到最大。之后，由于地表附近层结趋于稳定，不利于沙尘的垂直输送，沙尘天气也开始减弱。因此，在本例中，混合层的变化与沙尘天气的发展有良好的对应关系，能够用来表征沙尘天气爆发时大气层结的特征。

此外，决定混合层高度的重要因素是地面加热时间(也受天空云量等状况的影响)。研究表明^[8]，日间混合层高度与加热时间(从日出到该时刻)的幂指数成正比(晴空条件下与 ∇T^2 成正比)。因此，混合层多形成于下午或傍晚时分。本次大范围混合层的形成时间为傍晚。

3.2 触发条件

Barenblatt^[6]揭示了沙尘暴发生时强干对流产生的充分混合是沙尘浓度上下均匀分布这一动力本质。尽管混合层的中性层结不等同于对流态，但也能够达到充分混合的状态，能够体现出沙尘暴发生的动力学本质。

沙尘暴的产生，除层结因素外，还要求有较大颗粒和高浓度的沙尘，冷锋能达到这一要求^[9]。沙尘暴天气过程，是一个几乎没有降水出现的干过程，对流层低层水汽的作用是很有限的。因此，



纵坐标为 sigma 坐标
图 4 2004-03-27- $-\partial\theta/\partial p$ 沿 112°E 的垂直剖面图(单位: K/hPa; a、b、c 分别为 14、17、20 时)

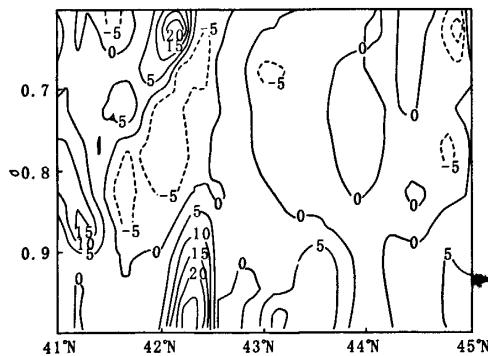
根据位温在干过程中的保守性来计算锋生函数。二维绝热过程的锋生方程为^[10]:

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla_H \theta| = |\nabla_H \theta|^{-1} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \left[-\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] + \right.$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[-\frac{\partial u \partial \theta}{\partial y \partial x} - \frac{\partial v \partial \theta}{\partial y \partial y} - \frac{\partial w \partial \theta}{\partial y \partial p} \right]$$

利用 MM5V3 模式输出的水平分辨率为 15 km 的模拟结果, 计算 3 月 27 日 17 时的锋生函数。由于内蒙古地区海拔高度平均在 1 km 以上, 850 hPa 槽线位置与地面锋线的位置相近, 因此可以根据该高度槽线位置判断近地面锋区。由图 1 可知, 在 27 日 14 时 850 hPa 槽线已经到达 110°E 左右。根据图中气旋和槽线的移动方向和速度, 可知 17 时槽线位于 112°E 左右。由图 5 可知, 地面附近区域均有锋生过程, 锋生函数最大值出现在 42.5°N 左右, 为 $25 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外, 近地面锋生区域的上空有强度较小的锋消区域; 在 42°N 锋消区域的上空和南侧存在一定范围强度较弱锋生过程。

通过与相应时刻的层结条件对比发现, 地面附近的锋生区域与混合层高度范围(图 4b)对应较好。由于冷锋上空对应混合层, 其产生的强地面风和强抬升能够轻易将沙尘粒子输送到较高的高度, 为沙尘暴的形成提供了必要条件。因此, 蒙古气旋冷锋是此次沙尘暴天气的触发条件之一。



单位为 $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 纵坐标为 sigma 坐标
图 5 2004-03-27T17 沿 112°E 锋生函数的垂直剖面

4 结论

4.1 分析发现, 混合层的变化与沙尘暴天气的发展有良好的对应关系, 能够用来表征我国内蒙古

地区沙尘暴天气爆发过程中的大气层结特征。

4.2 通过分析锋生函数可知, 沙尘暴爆发时其近地面附近伴有锋生过程, 并与混合层在时空上对应性较好。因此, 蒙古气旋冷锋是此次沙尘暴天气的触发条件之一。

沙尘暴天气与层结状况密切相关, 但由于资料有限, 以上仅是初步分析。统计发现, 强沙尘暴还可能出现在夜间, 其原因还需深入研究。

参考文献:

- [1] 王式功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探 [J]. 自然灾害学报, 1996, 5 (2): 86-94.
- [2] 徐启运, 胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征分析 [M] //方宗义, 朱福康, 江吉良, 等. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 11-15.
- [3] 周自江. 近 45 年中国沙尘暴和扬沙天气 [J]. 第四纪研究, 2001, 21 (1): 9-17.
- [4] 林良根, 寿绍文, 沈之林. 一次强沙尘暴过程中干空气侵入的数值模拟和诊断分析 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29 (3): 371-378.
- [5] 龚章, 许宝玉. 93.5.5 沙尘暴的若干启示 [J]. 干旱与地理, 1994, 17: 63-67.
- [6] Barenblatt G I, Goltsyn G S. Local structure of mature dust storms [J]. J Atmos Sci, 1974, 31: 1917-1933.
- [7] Takemi T. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China [J]. Mon Wea Rev, 1999, 127: 1301-1309.
- [8] Crespi S N, Artinano B, Cabal H. Synoptic classification of the mixed layer height Evolution [J]. J Atmos Sci, 1995, 52: 1666-1676.
- [9] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛, 等. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究 [J]. 气象学报, 2003, 61 (5), 606-619.
- [10] Miller James E. On the concept of frontogenesis [J]. J Meroro, 1948, 5 (4): 169-171.