

文章编号: 1000-0534(2007)05-1031-08

一次强沙尘暴和雪暴天气过程的 诊断及模拟分析

韩经纬¹, 沈建国², 孙永刚¹, 宋桂英¹

(1. 内蒙古气象台, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 利用基本气象资料和 T213 数值预报产品资料, 对发生在内蒙古大部分地区的一次强风、强沙尘暴、强雪暴和强降温天气过程进行了动力诊断和模拟分析。结果表明, 强冷空气活动是造成多种灾害的主要动力, 高空急流是强风的动量来源, 蒙古气旋强烈发展造成的气压梯度风加剧了地面大风和沙尘暴。强烈的冷、暖平流空间配置使大风、沙尘暴和降温更为剧烈。散度场的空间配置有利于沙尘暴、暴风雪的发展。高空西风急流对低空西南急流具有耦合和触发作用, 低空西南急流的建立和长距离的水汽输送与辐合, 成为内蒙古东部产生暴雪的重要条件, 低层东风切变带中的正涡度平流的输送, 叠加到了较好的水汽输送及辐合区域, 加大了降雪。后期低层西北急流的形成, 是产生暴风雪的重要原因。数值模拟结果表明, 模拟高压、低压中心位置和强度与实况较为吻合, 气旋的气压梯度强度与实况较为接近; 冷暖平流在分布区域、输送方向、强中心位置上也与实况具有较相似的特征, 但是温度平流模拟的结果在量值上略大于实况。

关键词: 沙尘暴; 雪暴; 数值模拟; 动力诊断

中图分类号: P445⁺.4 **文献标识码:** A

1 引言

2004 年 3 月 9~10 日, 受西伯利亚强冷空气的影响, 内蒙古大部分地区 24 h 内自西向东先后出现大风、沙尘暴、暴雪、雪暴(暴风雪)和强寒潮天气。多种灾害性天气(特别是强沙尘暴和强雪暴)交织在一起影响内蒙古, 影响范围和强度之大, 为近年来少见。

有关强沙尘暴和暴雪影响过程的个例国内已有许多研究, 刘景涛等^[1]对中国特强沙尘暴的天气系统进行了分型研究, 指出了强沙尘暴天气高低层系统的配置情况和蒙古气旋强烈加深在地面强风形成中的重要作用。张高英等^[2]研究了近年来强沙尘暴天气特征, 还有不少作者^[3~10]对沙尘暴的气候成因做了分析。

在暴雪和雪暴研究方面, 王文辉等^[11]对内蒙古锡林郭勒盟“77.10”暴雪进行了天气学分析研究。王建忠等^[12]、张小玲等^[13]、姜学恭等^[14]、胡中明

等^[15]对我国的强降雪个例做了数值模拟。宫德吉等^[16]、赵俊荣等^[17]、马禹等^[18]、胡胜利等^[19]则对内蒙古、新疆及南极的雪暴天气进行了分析。

上述研究中, 大多只是针对强沙尘暴或暴雪天气, 仅局限于天气系统、环流演变的分析, 详细的诊断分析尚显不足。本文针对一次强沙尘暴和强雪暴天气进行动力诊断和数值模拟分析, 试图揭示此类天气的形成机理, 总结出它们的预报着眼点。

2 天气概况及灾情

此次天气过程是强风、强沙尘暴、强降温、强雪暴的综合灾害过程, 其中, 前两者灾害主要出现在内蒙古中西部, 强降雪主要出现在内蒙古东北部。内蒙古出现地面瞬时风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的占总测站的 83%, 最大地面瞬时风速为 $\geq 37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 许多测站 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风持续时间超过了 24 h; 出现扬沙或沙尘暴的测站占总测站的 87%, 特别是内蒙古中西部偏北地区、东部偏南地区和东北部均

收稿日期: 2006-09-24; 改回日期: 2007-07-12

基金项目: 科技部公益项目(2005DIB3J108); 国家自然科学基金项目(40565003)共同资助

作者简介: 韩经纬(1961—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 高级工程师, 主要从事天气预报应用研究。E-mail: hjwhan@126.com

出现了能见度 ≤ 100 m 的强或特强沙尘暴；全区 36% 的测站出现了降雪，达到大雪和暴雪的有 7 个旗(县)市，大多数集中在 6 h 内，最大降雪量出现在大兴安岭站为 13 mm，其次是图里河站为 12 mm。

全区有 27 个观测站交替出现了沙尘暴、降雪和雪暴，其中呼伦贝尔市、兴安盟和通辽市北部出现了极强雪暴和沙尘暴。内蒙古中部、东部地区降温达到了寒潮天气(标准)以上，部分地区日平均气温降温幅度达 12℃ 以上。此次天气过程在内蒙古造成了十分严重的灾害。内蒙古呼伦贝尔草原遭受暴风雪、沙尘暴袭击，能见度不足 5 m，积雪深度平均达 30 cm，一些地方积雪达 2.5 m，公路、铁路严重阻断，从俄罗斯入境的 18 列国际列车被阻停开，数十辆汽车被困。这次强沙尘暴、强雪暴天气对畜牧业生产、接羔保育、道路交通造成极大的影响，据初步统计，受灾牧户约 3500 户、15000 余人，受灾牲畜 60 余万头只，给人民生命及财产造成重大损失。

3 环流及直接影响系统

2004 年 3 月 9 日 08:00(北京时，下同)700 hPa 高空图上(图略)，欧亚大陆为两脊一槽，乌拉尔山以西为一高压脊，中西伯利亚到贝加尔湖为另一高压脊，两高压脊之间的槽线及较强的锋区位于西西伯利亚，并有一 -40°C 闭合冷中心存在。由于乌拉尔山高脊少动，东亚中纬度地区为纬向环流，冷空气在蒙古西部堆积，向东偏南方向移动。在同时次 850 hPa 高空图上(图略)，蒙古西部等温线密集，槽后锋区冷平流强烈，斜压性很强。我国东部低空西南急流强。在 20:00 700 hPa 高空图上，冷槽急速发展成为一个中心为 268 gpdm 的低涡。在 850 hPa 高空图上，形成了 <117 gpdm 的低涡中心，西南急流风速最大中心位于渤海湾附近为 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，急流区延伸到内蒙东部偏北地区。在 9 日 08:00 300 hPa 高空图上(图略)，高空急流核($\geq 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 45°N 自西北向东南快速移动，到 20:00 高空急流核出口区位于地面蒙古气旋左前方。

本次过程的直接影响系统是地面蒙古气旋。9 日 02:00，蒙古国中部为低压中心，中心值为 992.5 hPa，此时低压前部 3 h 负变压中心值达到 -5.8 hPa，低压后部 3 h 变压中心值为 $+5.9$ hPa；08:00 冷空气进入低压后，在冷锋前暖倒槽强烈发展形成蒙古气旋，中心值为 990.0 hPa，此时气旋后部 3 h

变压中心值为 $+8.3$ hPa；14:00~23:00，气旋中心值在 985.5 hPa 以下，在 $110^{\circ}\text{E}, 47^{\circ}\text{N}$ 附近少动，此期间内蒙古北部许多站风速 $> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，中西部有 8 个测站能见度 < 100 m。另外，冷锋前低空西南急流强风使东部偏南地区的赤峰市、通辽市产生了偏南大风，沙尘暴进一步加强(强沙尘暴站数增加)。这一时期是气旋的发展快速期，气旋中心的气压在 6 h 内就加深 15 hPa 以上，远高于 12 h 平均为 8.8 hPa 的特强沙尘暴的平均水平^[1]。沙尘暴区范围和强度都达到了最大。

9 日 23:00 以后蒙古气旋东移并再次发展增强，10 日 02:00 中心值在 977.5 hPa 以下，位于 $120^{\circ}\text{E}, 44^{\circ}\text{N}$ ，气旋中心的气压 3 h 加深到 8 hPa 以上，气旋发展程度也达到最强(图 1)，并一直维持到 17:00。这一期间沙尘暴区东移，内蒙古东部也出现了较强的沙尘暴，赤峰、通辽、呼伦贝尔市、兴安盟等地能见度 < 100 m；呼伦贝尔市、兴安盟等转为沙尘暴、暴雪交替出现的天气。以后气旋东移并减弱，沙尘暴区开始缩小，但内蒙古东部偏北地区仍持续暴风雪，10 日 20:00 之前内蒙古中部大部分地区的降温达到或超过了寒潮标准。

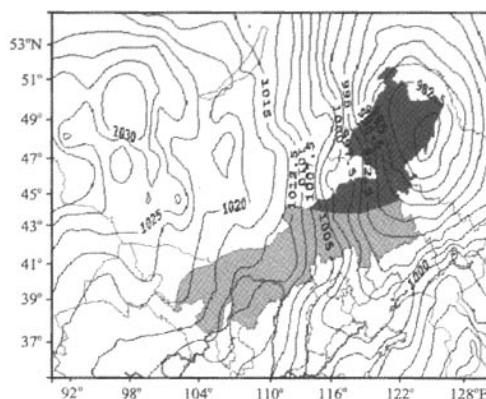


图 1 2004 年 3 月 10 日 02:00 海平面气压
浅色阴影区为沙尘暴，深色阴影区为大雪及暴风雪区域

Fig. 1 Surface observations at 02:00 on March 10, 2004. Light shaded area for sandstorm,
black one for snowstorm

4 强沙尘暴及暴雪天气的动力诊断

沙尘暴、雪暴共同影响的天气即具有强风寒潮的环流特征，又具有产生大雪的某些环流演变特点。研究表明^[20]，强风天气主要由蒙古气旋和强冷锋锋区系统造成，高空急流动量下传和锋面次级

环流对西风急流的增强，对沙尘暴、雪暴的形成有重要作用^[21~22]；而中纬度的高空强锋区和对流层中低层华北沿海高压脊(或下游高压脊)的建立与维持，则是内蒙古地区产生强降雪的重要条件^[23~25]。

4.1 强风、沙尘暴及强降温分析

强风是这次天气过程的主要灾害，也是沙尘暴、雪暴的主要动力源。高空强冷空气活动和地面蒙古气旋的强烈发展是造成大风的主要成因之一。在这次冷空气东南下的过程中，乌拉尔山高压脊始终少动，没有跟随槽线东移，东亚中纬度地区处于纬向环流控制下， $40^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$ 为西风急流区。从8日08:00到10日20:00， $300\text{ hPa}\geqslant60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流核一直沿 $40^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$ 移动，地面蒙古气旋中心一直处于高空急流出口区的左前侧，剧烈的高空辐散，促进了蒙古气旋的急剧发展。同时，也有利于加强低层强风带和气旋性涡度切变^[2]。高空急流出口区的右侧，叠加在地面冷锋后面，高低空急流的动量下传风以及层结因素都对强风的产生起了重要作用。

此外，蒙古气旋强烈发展的梯度风也是造成大部地区地面大风的重要原因。在整个蒙古气旋的发生发展过程中，气旋前部的-3 h变压中心值和气旋后部的+3 h变压中心值之差一直保持在7.3~14 hPa之间，地面气压等压线十分密集，气压梯度的增大使地面风速不断加大。

研究表明，平流过程(涡度平流及分布不均匀的温度平流)是使地转平衡破坏的原因。对流层中低层的暖平流引起高层等压面升高，低层等压面降

低，造成高层辐散、低层辐合，从而产生热力强迫上升运动。这种因平流引起的次级环流在大气层结不稳定时导致大气扰动的不稳定发展。蒙古气旋引发的沙尘天气也是在这种动力、热力强迫下引起的大气扰动^[26~27]，这与蒙古气旋的发展过程是相对应的，蒙古气旋的发展又直接导致了强风、沙尘暴和强降温天气。

在气旋爆发前期，高空气流较平直，有浅的短波槽位于地面气旋的上游。到9日14:00，对流层低层已经存在较强的暖平流，对流层中高层也有非常强的冷平流。图2为2004年3月9日14:00 850 hPa和500 hPa的温度平流图。由图2可见，在850 hPa内蒙古中部和蒙古国东部的低槽前暖锋区内各有一个很强的暖平流中心，为 $245\times10^{-6}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $221\times10^{-6}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在500 hPa上的蒙古国西部和东部的阴影区中则存在两个很强的冷平流中心，达 $-575\times10^{-6}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-449\times10^{-6}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这一量值超过了一般强冷空气过程的强度，表明此时大气中低层存在非常强的斜压性。对流层中下层的暖平流输送是其主要热力强迫因子和沙尘天气的热力诱发因素^[28~29]，这一时刻的涡度垂直分布(图略)也显示此时低层涡度及其涡度增长明显强于高层。这种高低空强烈的冷、暖平流的空间配置和低层的斜压不稳定是蒙古低槽发展和加强的主要动力原因，也是造成强风、强沙尘暴和强降温的直接原因。

涡度平流在这次强冷空气中起到了非常重要的作用。2004年3月9日20:00 500 hPa 涡度平

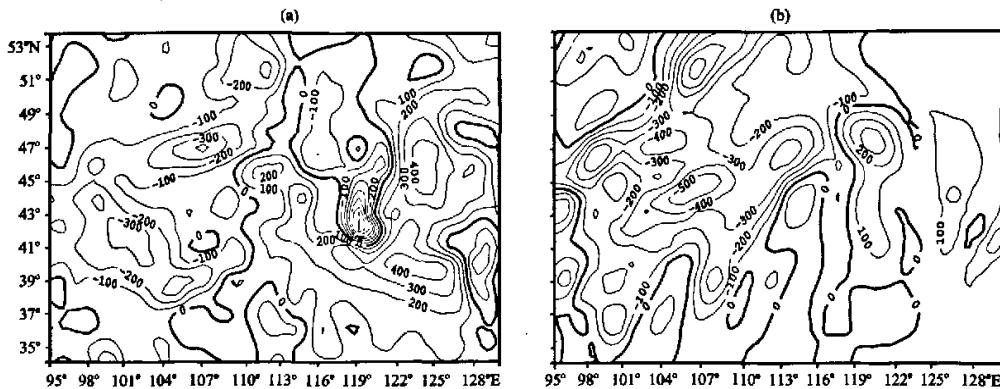


图2 2004年3月9日14:00 850 hPa(a)和500 hPa(b)温度平流

等值线间隔为100，单位： $10^{-6}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 2 850 hPa (a) and 500 hPa (b) temperature advections at 14:00 on 9 March 2004.

Interval of isopleth: 100. Unit: $10^{-6}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

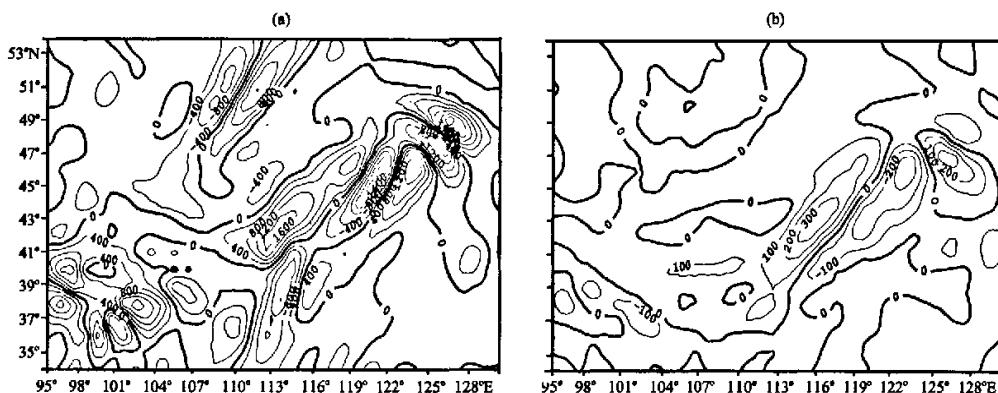


图 3 2004年3月9日20:00(a)500 hPa 涡度平流(单位: $10^{-11} \cdot s^{-2}$)和(b)700 hPa
水汽通量散度(单位: $10^{-7} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$)

Fig. 3 (a) 500 hPa vorticity advection (unit: $10^{-11} \cdot s^{-2}$) and (b) 700 hPa vapor flux divergence
(unit: $10^{-7} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$) at 20:00 on 9 March 2004

流图上(图3a),在冷槽前部的蒙古国和内蒙古中西部地区为强的正涡度平流,两个中心分别达到 $1531 \times 10^{-11} \cdot s^{-2}$ 和 $1242 \times 10^{-11} \cdot s^{-2}$,这两个中心是和内蒙古中西部的锋区配置的。对流层中高层的正涡度平流输送,使槽前等压面下降,冷槽加深,急流加强;高层系统的发展,强迫地面气旋进一步发展,使地面气压梯度加大,强风和沙尘暴进一步加强。

对于强降温而言,主要是由极强的冷温度平流造成的。对流层中高层强冷平流的作用十分显著,而对流层低层较强的暖平流的增温效应,使降温幅度更为剧烈。我们以同一层次冷、暖平流绝对值之和表示降温强度(图略),可以看出,无论是在850 hPa,还是在500 hPa上降温都相当明显。

4.2 暴雪和雪暴的天气成因分析

此次强冷空气过程除了造成内蒙古大部的强风和强沙尘暴外,在内蒙古东北部还造成了暴雪和强雪暴天气。相关研究表明^[12-13],散度、涡度及其变率和空间配置与暴雪的关系密切。暴雪过程是高空西风急流和低空西南风急流上下耦合作用的结果,暴雪区是北支锋区南压的结果^[15]。暴雪天气的产生,是以上分析的动力、热力因素叠加了较好的水汽输送及辐合条件。而雪暴天气则是即具有寒潮的动力特征,又具有暴雪环流特点的复合天气。

高空西风急流对于此次内蒙古东部的降雪过程是十分重要的,不仅耦合出低空西南急流,急流的次级环流还触发了潜在不稳定的释放。从3月8日08:00开始,一支高空急流就从巴尔喀什湖以西沿

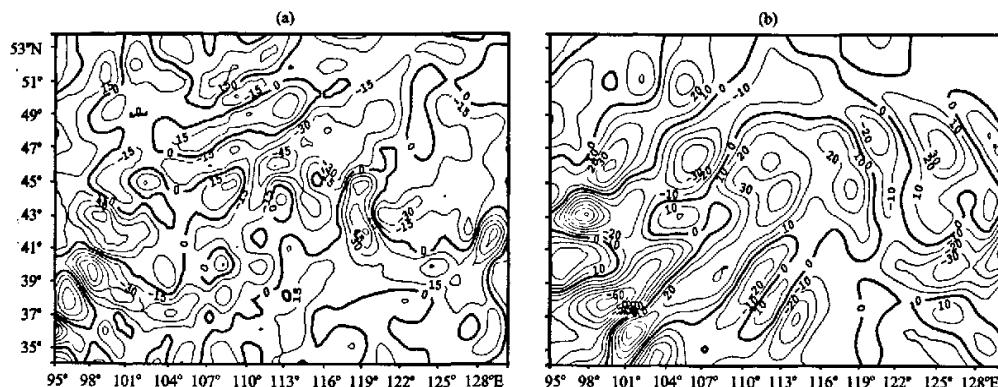


图 4 2004年3月9日14:00 850 hPa(a)和200 hPa(b)散度(单位: $10^{-6} \cdot s^{-1}$)

Fig. 4 850 hPa (a) and 200 hPa (b) divergences at 14:00 on 9 March 2004. Unit: $10^{-6} \cdot s^{-1}$

40°~45°N 开始东移, 到 9 日 20:00 已经移到内蒙古中部, 在高空西风急流东移时, 内蒙古东部处于高空急流出口区的左前侧, 激发了垂直于急流轴的横向反环流, 急流出口区左侧上升、右侧下降, 导致了出口区低层西南急流的形成。从 2004 年 3 月 9 日 20:00 850 hPa 风矢图(图略)可以看出, 在内蒙古东部的呼伦贝尔市、兴安盟形成了一个完整的风场辐合中心, 一支极强的低空西南急流从低纬地区一直伸向内蒙古东部的偏北地区, 进入辐合中心区域, 形成了一个较长距离的水汽输送带。由于下游华北沿海高压脊稳定, 低空西南急流得以维持, 将水汽源源不断地输送到 45°N 以北的内蒙古东部地区, 为暴雪的产生提供了较好的水汽条件, 高、低层急流的干冷、暖湿耦合, 造成了大气强的潜在不稳定, 从西风急流轴空间剖面图(图略)分析可知, 次级环流上升支对应着一个强的上升运动区, 内蒙古东北部在东南风、偏东风辐合切变线的影响作用下, 产生了暴雪天气。

图 4 给出了 2004 年 3 月 9 日 14:00 850 hPa 和 200 hPa 散度图。从图中可以看出, 在 200 hPa 上, 内蒙古中西部和蒙古国东部存在一个极强的高层辐散区域, 3 个中心分别位于内蒙古鄂尔多斯南部、锡林郭勒盟西部和锡林郭勒盟东部地区, 中心值分别为 $50 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$, $47 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$ 和 $57 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$ 。而在 850 hPa 的这一区域内, 对应着一个较强的辐合区, 3 个强中心分别位于鄂尔多斯、锡林郭勒盟中东部和蒙古国东部, 中心值分别为 $-50 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$, $-50 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$ 和 $-80 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$, 在内蒙古构成了高层辐散、低层气旋前部辐合的空间结构, 内蒙古大部高层受大气强烈辐散的作用, 促使了低层系统的快速发展和降雪天气的形成, 也使沙尘暴影响区域东移并不断加强。

在 2004 年 3 月 9 日 20:00 700 hPa 水汽通量散度图上(图 3b), 有两个水汽输送带和辐合中心, 一个是和西南急流对应的水汽通量散度辐合区, 其中心位于内蒙古兴安盟和呼伦贝尔市南部, 中心数值达 $-3.78 \times 10^{-7} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$; 另一个水汽通量散度辐合区位于呼伦贝尔市以东地区, 在辐合区域的东风带中, 中心数值达 $-2.99 \times 10^{-7} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$, 这一区域和图 3a 中东风带中的另一个正涡度平流输送中心区域相对应, 其中心数值达 $1993 \times 10^{-11} \cdot s^{-2}$ 。这与图 4a 中低层辐合区域相对应, 成为降雪出现在这一地区的主要原因。东风带中正涡度平流的输送使气旋前部辐合加

强, 气旋加深。两个水汽通量辐合中心在偏南气流和偏东气流的作用下, 逐步靠近并影响内蒙古东北部, 暴雪区域主要出现在东风切变的北侧。低空西南急流的建立和长距离的水汽输送与辐合成为内蒙古冬季产生暴雪的重要条件。

对流层中高层强的正涡度平流输送是内蒙古中西部地区强沙尘天气和东部暴风雪天气有利的动力强迫因子, 这一对动力因子所引起的低层辐合和高层辐散产生动力强上升运动, 是内蒙古东北地区大风、暴雪和暴风雪天气的动力强迫机制。

以上分析了高空西风急流和低空西南急流对气旋加强、沙尘暴和暴雪产生的作用。还需指出, 从 9 日 20:00 到 10 日 08:00, 另有一低空西北急流(700 hPa 以下)由贝加尔湖快速影响了内蒙古呼伦贝尔及兴安盟暴雪区域, 这支西北低空急流是产生雪暴最重要的动力原因。导致蒙古气旋强烈发展的诸多动力作用, 形成了内蒙古这次短时间内大风、沙尘暴、暴雪和强降温共同影响的恶劣天气。

5 数值模拟试验和诊断分析

为了进一步讨论此次沙尘暴、暴雪天气的系统结构特征, 我们对这次过程进行了数值模拟分析。

数值模拟选用的是 MM5V3 中尺度预报模式。模式区域以 45°N, 110°E 为中心, 采用二重嵌套, 模式水平分辨率为粗网格采用 54 km 水平格距、细网格采用 18 km 水平格距, 垂直 23 层, 模式层顶为 100 hPa。湿过程采用显式水汽方案和 Grell 积云对流参数化方案; 行星边界层采用 MRF 高分辨率参数化方案; 采用云辐射方案和多层次土壤模式。模式积分 48 h, 积分步长 150 s。使用 8 日 20:00 的 T213 分析场和预报场做初始场和侧边界, 资料水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 从 100~1000 hPa 总计 13 层。

模拟结果分析表明, 地面气压中心位置、强度, 冷锋位置, 高空急流位置、强度, 降雪区域等均与实况较接近。图 5 为 2004 年 3 月 10 日 02:00 海平面气压模拟试验图。从图 5 中可看出, 模拟气旋的中心位置和强度与同期实况图(见图 1)相当吻合, 其中心闭合等压线强度均为 982.5 hPa。模拟高压中心强度达到 1032.5 hPa, 实况为 1030.0 hPa, 冷高压中心的位置和强度与实况也基本吻合。由于高低压中心位置及强度与实况接近。由此可以得出, 高低压间的气压梯度与实况应十分接近, 由此产生的气压梯度强风也应与实况相近。

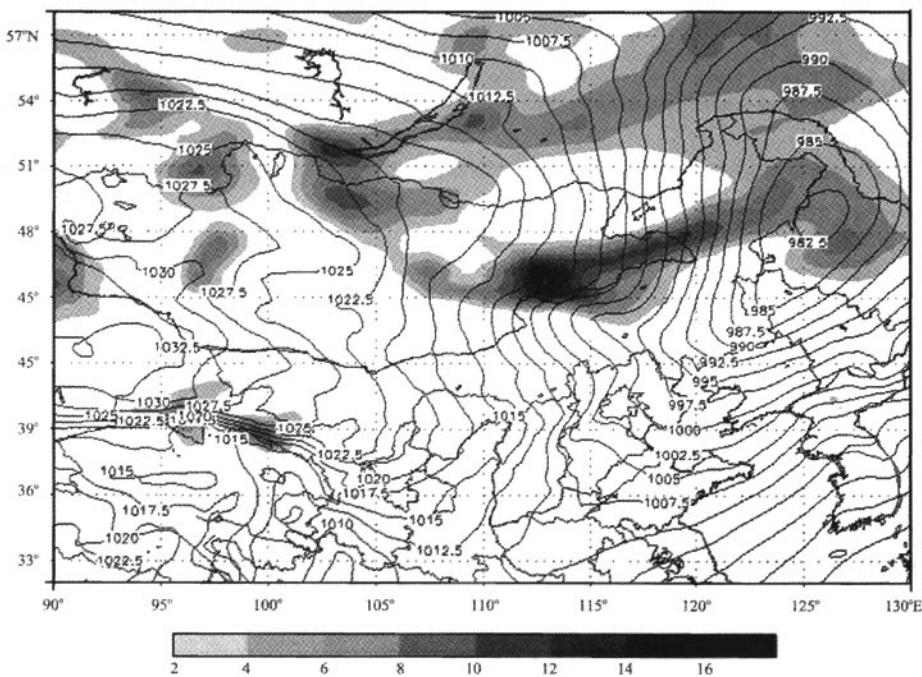


图 5 模拟的 2004 年 3 月 10 日 02:00 海平面气压
阴影区为降雪区域，实线为海平面气压

Fig. 5 The simulated pressure field at sea level at 02:00 on 10 March 2004.
The shaded area is snowfall area, solid lines are isobars

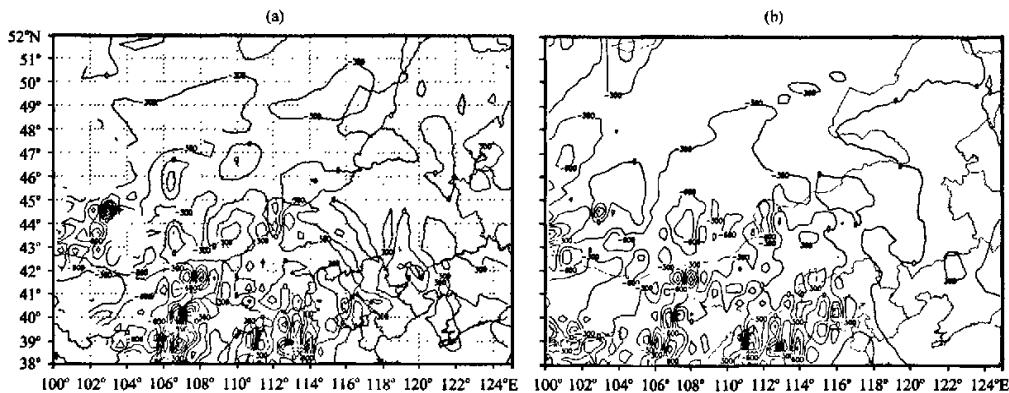


图 6 模拟的 2004 年 3 月 9 日 14:00 850 hPa(a) 和 500 hPa(b) 温度平流

Fig. 6 850 hPa (a) and 500 hPa (b) temperature advections
at 14:00 on 9 March 2004

图 6 给出了 3 月 9 日 14:00 850 hPa 和 500 hPa 温度平流模拟图。在 850 hPa 模拟图上(图 6a)，在蒙古国中部和内蒙古锡林郭勒盟西北部存在一个正温度平流区域，方向呈东南—西北向，暖

区量值范围在 $300 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，在同期实况图上(见图 2a)，在这一区域也有一个暖平流带，暖舌中心量值范围在 $250 \sim 300 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ，中心区域与实况相符。在 500 hPa 模拟图上(图 6b)，

$-300 \sim -600 \times 10^{-6} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域与实况更接近，最强中心位于蒙古国西部，中心强度在 $-600 \sim 900 \times 10^{-6} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围，同期实况图上（见图 2b），中心值则在 $-500 \sim -700 \times 10^{-6} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围。因此，在 850 hPa 上模拟的暖平流分布区域、输送方向、强中心位置上均接近实况，与实况具有相似的特征；在 500 hPa 上模拟的冷平流分布区域、输送方向、强中心位置也与实况具有较相似的特征。但无论是暖平流还是冷平流，模拟的结果在量值上均大于实况。

6 结论

根据上述分析，得到以下结论：

(1) 强冷空气是造成多种灾害的主要动力，高空急流是强风的动量来源，蒙古气旋强烈发展造成的气压梯度风也加剧了地面大风。对流层中低层的温度平流输送和较强的斜压强迫是蒙古气旋发展和内蒙古沙尘天气发展的原因，高层的涡度平流则对蒙古气旋中后期强度的维持加深以及暴雪的形成起着重要的作用。强烈的冷、暖平流的空间配置使强风、强沙尘暴和强降温更为剧烈。

(2) 散度场的垂直分布表明，在内蒙古构成了大范围的高层辐散、低层气旋前部辐合的空间结构，蒙古气旋上空大部地区处于大气强烈抽吸作用下，使气旋强烈发展，加速了沙尘暴和暴风雪天气的发展，是沙尘暴天气不断加强的一个重要原因。

(3) 高空西风急流耦合出低空西南急流，急流的次级环流还触发了潜在不稳定的释放。低空西南急流的建立和长距离的水汽输送与辐合成为内蒙古冬季产生暴雪的重要条件。低层东风切变线中的正涡度平流叠加到了较好的水汽输送及辐合区域，使降雪增大。过程后期 700 hPa 以下，另一支低空西北急流由贝加尔湖快速影响内蒙古呼伦贝尔及兴安盟暴雪区域，这支西北低空急流是产生暴雪最重要的动力原因。

(4) 对于东亚中纬度地区纬向环流下的冷空气活动，低层巴尔喀什湖以西高压脊沿 45°N 快速水平东移，且脊线保持东西向，是蒙古气旋大风、沙尘暴天气的前期预报指标。气旋中心气压加深率和气压梯度风指标，是沙尘暴强度和大风有效的预报指标。而在暴雪区域上游，低空西北急流的快速建立与影响，成为雪暴天气预报重要的着眼点。

(5) 数值模拟结果分析表明，模拟气旋的中心位置和强度与同期实况图较为吻合，冷高压中心

的位置和强度与实况也基本吻合，气压梯度强度与实况较为接近；模拟的冷、暖平流在分布区域、输送方向、强中心位置上也与实况具有较相似的特征，但无论是暖平流还是冷平流，模拟的结果在量值上均明显大于实况。

参考文献

- [1] 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, 2004, 23(4): 540—547
- [2] 张高英, 赵思雄, 孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 101—115
- [3] 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析[J]. 第四纪研究, 2002, 22(4): 375—380
- [4] 杨民, 蔡玉琴, 王式功, 等. 2000 年春季中国北方沙尘暴天气气候成因研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(增刊): 7—10
- [5] 牛若芸, 薛建军, 周自江. 2002 年我国沙尘暴天气特征分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 513—520
- [6] 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): 178—184
- [7] 林朝晖, 陈红, 张时煌, 等. 2003 年春季中国沙尘天气异常的气候及环境背景[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 191—202
- [8] 李艳春, 赵光平, 胡文东, 等. 宁夏中北部沙尘暴过程中气象要素变化特征及成因分析[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 212—217
- [9] 尤莉, 王革丽, 吴学宏, 等. 内蒙古阿拉善地区沙尘暴的气候特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 382—386
- [10] 刘景涛, 郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 51—64
- [11] 王文辉, 徐祥德. 锡盟大雪过程和“77.10”暴雪分析[J]. 气象学报, 1979, 37(3): 80—86
- [12] 王建中, 丁一汇. 一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 451—460
- [13] 张小玲, 程麟生. “96.1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断Ⅱ：散度和散度变率诊断[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 459—466
- [14] 姜学恭, 李彭俊, 廉玲, 等. 北方一次强降雪过程的中尺度数值模拟[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 476—483
- [15] 胡中明, 周伟灿. 我国东北地区暴雪形成机理的个例研究[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 679—684
- [16] 宫德吉. 内蒙古的暴风雪灾害及其形成过程的研究[J]. 气象, 2001, 8: 19—24
- [17] 赵俊荣, 李春芳, 沈坤玲, 等. 寒潮暴风雪天气过程中数值预报产品的检验分析[J]. 新疆气象, 2002, 25(4): 12—14
- [18] 马禹, 包斌, 王旭. 新疆雪暴天气的气候特征[J]. 新疆气象, 2001, 24(6): 16—18
- [19] 胡胜利. 长城站极地气旋与暴风雪天气[J]. 海洋预报, 2004, 21(4): 35—39
- [20] 宫德吉. 高空西北急流在季强风寒潮形成中的作用[J]. 内蒙古气象, 1984, 8(1): 14—21
- [21] 姜学恭, 沈建国. 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—620

- [22] 姜学恭, 沈建国. 地形影响蒙古气旋发展的观测和模拟研究 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 601—610
- [23] 汪厚基.“77.10”暴雪的环流背景[J]. 内蒙古气象, 1980, 4(1): 12—14
- [24] 韩经纬, 李影俊, 石少宏, 等. 内蒙古大(暴)雪天气的卫星云图特征[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 250—259
- [25] 项续康, 江吉喜. 西北地区强沙尘暴成因的中尺度分析[J]. 高原气象, 1996, 15(4): 448—455
- [26] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(2): 177—184
- [27] 肖贤俊, 刘还珠. 2002年3月19日沙尘暴爆发条件分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(1): 1—9
- [28] 胡隐德, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飑线—黑风暴形成的一个机理分析[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178—185
- [29] 胡隐德, 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

Dynamic Diagnoses and Simulating Analysis of a Severe Sandstorm and Snowstorm Weather Process

HAN Jing-wei¹, SHENG Jian-guo², SUN Yong-gang¹, SONG Gui-yi¹

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Huhhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Bureau, Huhhot 010051, China)

Abstract: Adopting the basic meteorological data and T213 numerical prediction productions, the dynamic diagnoses and simulating analysis of weather process mixed with strong wind, sandstorm, severe snowstorm and temperature decreasing in Inner Mongolia. The results shows that the strong cold air action is the main dynamics factor and the upper jet stream is the momentum source of the wind. Pressure gradient wind caused by developing Mongolia cyclone strengthen the wind and sandstorm. The space allocation of intense cold, worm advections intensify the strong wind, sandstorm and temperature decreasing. The space allocation of divergence helps the sandstorm and snowstorm developing. There is trigger and coupling actions for upper westerly jet to lower southwest jet. The establish of lower southwest jet and long distance vapour transportation and convergence are the important condition for east Inner Mongolia occurring snowstorm. The positive vortex advection transport in lower east wind shear zone superpose - better vapor transportation and convergence area which enhances the snowfall. The later formation of northwest jet at bottom is important reason of the snowstorm. Numerical simulation shows that the location and intensity of the modeled high and low pressure centers is consistent with the observation. The pressure gradient intensity of cyclone closes to observation. The regional distribution, transportation direction, centers of the cold, worm advections have similar characters with fact. On the other hand, the temperature stratosphere simulation result is slightly bigger than the fact.

Key words: Sandstorm; Snowstorm; Numerical simulation; Dynamic diagnosis