

文章编号 1000-2022(2006)03-0371-08

一次强沙尘暴过程中干空气侵入的数值模拟和诊断分析

林良根¹, 寿绍文¹, 沈之林²

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044 2. 南京市浦口区气象局, 江苏 南京 211800)

摘 要 利用非静力 MM5 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进行了数值模拟, 并利用模式输出结果对这次过程进行了干空气侵入的诊断和分析。模拟和诊断分析结果表明, 此次强沙尘暴过程中有明显的干空气侵入, 这种干空气侵入将对流层高层高位涡带入低层, 促进了对流层低层气旋及对流运动的发展, 继而引起强沙尘暴的发生。

关键词 沙尘暴; 干空气侵入; 数值模拟; 诊断分析

中图分类号 P445; P458 **文献标识码** A

Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of Dry Intrusion in a Duststorm Process

LIN Liang-gen¹, SHOU Shao-wen¹, SHEN Zhi-lin²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China ;

2. Pukou District Meteorological Bureau of Nanjing, Nanjing 211800, China)

Abstract The mesoscale numerical model MM5(V3) was used to simulate a strong duststorm process occurred in the northern and central Inner Mongolia during the period from 20 :00BST March 26 to 20 :00BST March 28, 2004. The model outputs were used for detailed diagnostic studies of dry air intrusion. Diagnostic results show that dry air intrusion plays an important role in the development of the duststorm process. Dry air intrusion brings high potential vorticity from the upper level of troposphere to the low level, promoting the development of the cyclone and convective activities at the low level of troposphere, and then the genesis of the strong duststorm.

Key words duststorm; dry intrusion; numerical simulation; diagnostic analysis

0 引 言

2004 年 3 月 26—28 日我国北方地区发生该年强度最强的一次沙尘暴过程, 影响范围波及了 11 个省区的 304 个县市, 造成很大的损失。国外对沙尘

暴的研究相对开展得较早, 从 20 世纪 30 年代就开始对美国中南部和非洲撒哈拉地区沙尘暴的分布进行研究, 目前已基本查明, 全世界有四大沙尘暴多发区, 分别位于中亚、北美、中非和澳大利亚^[1], 均与大沙漠及其边缘地区相联系。Jauregui^[2]对墨西哥

收稿期日 2004-10-12; 改回日期 2005-04-29

基金项目 国家自然科学基金项目(40405009; #0575022; #0205008); 江苏省气象局科技开发项目(200406); 江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050201); 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB48301); 江苏省自然科学基金项目(BK2005141)

作者简介 林良根(1979-), 男, 广东阳江人, 硕士, 研究方向: 中尺度天气动力学. E-mail: llg2002@126.com.

城沙尘暴的时空分布进行了系统研究, Gillette 等^[3]研究了美国由于风蚀所引起的沙尘的时空变化, Snow 等^[4]用详细的观测资料对美国新墨西哥州沙尘暴的时空分布进行了分析研究。我国学者^[5]从 20 世纪 70 年代开始研究沙尘暴, 王式功等^[6-7]分析了我国北方沙尘暴的时空分布及其成因, 徐启运等^[8]对沙尘暴天气的强度进行划分并分析了其空间分布, 周自江^[9]研究了我国近 45 a 沙尘暴和扬沙天气的时空分布特征, 邱新法等^[10]利用地面天气图等资料对我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径进行了研究, 高凤荣等^[11]、陈敏连等^[12]、王式功等^[13]、徐建芬等^[14]、常兆丰等^[15]先后对几次发生在我国西北地区典型特强沙尘暴个例做了分析研究。这些年来我国学者研究沙尘暴机制后总结出, 强风、沙源、大气层结不稳定是沙尘暴发生的 3 个基本条件, 并得出近 50 a 来中国沙尘暴的分布及变化趋势。从前人的研究结果来看, 关于干空气侵入对强沙尘暴过程的作用尚未涉及。

到目前为止, 国内外对干空气侵入的研究主要应用于暴雨研究。20 世纪 60 年代, Danielsen^[16]绘制了干空气侵入气流的三维结构图。90 年代以来, 国外就干空气侵入及其对天气尺度和中尺度系统发生发展的作用进行了大量研究, Browning 等^[17]于 1994 年阐述的干空气侵入和湿上升气流之间相互缠绕关系及其与输送带气流有关的概念模式奠定了干空气侵入理论发展的基础。研究发现, 干空气侵入在温带气旋的发生和发展^[2]、爆发性气旋的快速发展^[18]、锋面降水结构分布及演变特征^[19]等方面都起着重要作用。鉴于此, 本文利用 PSU/NCAR 开发的第 5 代中尺度非静力数值预报模式 MM5(V3) 对 2004 年 3 月 27 日主要发生在内蒙古中部偏北地区的一次大范围的大风、强沙尘暴天气过程进行数值模拟和诊断分析, 试图探讨干空气在这次强沙尘暴天气过程中的作用。

1 天气形势分析

与 2003 年相比, 2004 年沙尘暴来得早、次数多、影响广。究其原因, 首先是内蒙古具备发生沙尘天气 3 个基本条件: 沙尘源丰富、有强风作用、大气层结热力不稳定; 其次, 土壤水分过早流失, 地表干燥。据气象部门统计, 2003 年 12 月 1 日—2004 年 2 月 29 日, 全国平均气温较常年同期偏高 1.06℃, 是 1961 年以来温度第 3 高的暖冬。在这种情况下, 冷空气很难促成降雪。这一期间北方降水普遍偏少,

内蒙古中西部地区的降水比常年少了 3~5 成, 有的地方竟少了 8 成, 上述情况造成沙源地地表疏松, 容易引起沙尘天气。2 月中下旬—3 月下旬, 北方冷空气活动频繁, 且势力较强, 大风天气频繁。

在 26 日 08 时的 500 hPa 形势图上亚欧中高纬为两槽两脊型, 巴尔喀什湖附近为一槽区, 来自西西伯利亚的冷空气由于山脉的阻挡作用分成两股东移南下, 北边的一股从贝加尔湖快速南下, 另一股从新疆北部向东移动影响我国北方。贝加尔湖附近的冷空气从蒙古国东部进入我国东北部, 26 日 08 时地面上锋面气旋生成于蒙古国东部, 14 时气旋中心到达内蒙古东北部边界附近, 内蒙古中部偏北地区、辽宁地区西部出现扬沙天气, 随着这股冷空气的东移, 20 时扬沙天气暂时结束。与此同时, 新疆北部的冷空气开始东移, 到 27 日 02 时, 蒙古国中部偏南地区有气旋发展, 形成一中心值为 1 000 hPa 的锋面气旋, 内蒙古西部、甘肃西部开始出现扬沙天气, 随着冷空气的东移, 气旋越来越强, 到 17 时, 中心值已达 990 hPa, 气旋南侧普遍出现 5~7 级大风, 局地 8 级以上, 甘肃中部、宁夏北部、内蒙古中部、陕西北部以及东北地区西部相继出现扬沙天气, 部分地区出现沙尘暴, 内蒙古中部偏北地区也就是气旋中心附近出现强沙尘暴, 能见度只有 100 m 左右, 到 28 日 17 时左右随着气旋向东北移动到黑龙江西部, 此次沙尘天气过程结束。

图 1 为 2004 年 3 月 27 日 08 时、14 时、20 时和 28 日 02 时地面沙尘暴、扬沙累计分布图。沙尘暴主要出现在 27 日 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。28 日 02 时蒙古

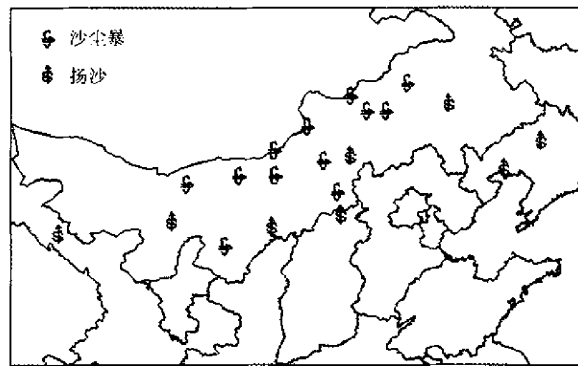


图 1 沙尘暴和扬沙累计分布

Fig. 1 Duststorm distruction in Inner Mongolia and northeast China from 08 00BST 27th to 02 00BST 28th March 2004

气旋的锋面已移出沙源丰富的地区,同时蒙古气旋向我国东北移去。

2 模拟方案选取

利用2004年3月26日20时至28日20时每6 h的NCEP再分析资料(水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)和同时的探空、地面资料,采用MM5模式对这次沙尘暴过程进行数值模拟,从2004年3月26日20时起,积分48 h。格点结构采用双重嵌套网格,区域中心为(109°E , 38°N),粗网格格距45 km,细网格格距15 km,粗细嵌套网格格点数均为 61×61 ,模式顶气压100 hPa,积分步长135 s,每3 h输出一次模拟结果。动力学过程采用流体非静力平衡方案,粗网格采用Grell积云对流参数化方案,细网格采用Anthes-Kuo积云对流参数化方案,两重网格采用Blackadar的边界层参数化方案以及及时变海绵侧边界条件等,地形采用NCAR(30 m)地形资料,经过中尺度客观分析和平滑,插值到45 km网格点上。

3 模拟结果诊断分析

将模式积分24 h(即27日20时)的500 hPa、700 hPa模拟结果与实况相比较,可以看出模拟与实况基本一致,对于实况中所描述的槽及相伴锋区的位置,模式都作出了较好的模拟,说明模式对这次过程模拟的结果是可信的。对每次输出的模式结果进行比较,发现27日20时模拟的天气形势最强。

3.1 西风分量诊断分析

分析200 hPa西风分量(图略),27日08时前在 33°N 附近有一西风大值区,中心达 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。27日11时另一西风急流大值区出现在 42°N 附近,随着时间推移,这一西风急流东移过程中前部稍南压。在沿 114°E 的西风分量垂直剖面图(图2a-b)中可以看出,27日08时(图2a)在 33°N 附近200 hPa上西风急流向北传,27日20时(图2b)在 42°N 附近250 hPa上已经形成一条下传西风急流带,在这西风急流以下各层都对应着西风大值区,也对应着发生沙尘暴的地区,可见影响这次沙尘暴天气的高空急流主要是在250 hPa附近的西风急流,强西风风速通过动量下传导致地面大风,是造成大范围沙尘暴发生的动力条件。从各个时次的300 hPa西风分量(图略)可以看出,在西风急流出口处的左侧对应着地面的蒙古气旋,可见西风急流促进了地面气旋的发生发展,高空急流对地面气旋有较好的指示性。

分析500 hPa、700 hPa和800 hPa风场矢量(图略)可以看出,槽后为一致的西风 and 西北风,因为西风分量很大,蒙古气旋主要向东传,所以这次沙尘暴天气的影响范围不是2004年最大的一次,但它却是2004年最强的一次。

3.2 涡度诊断分析

分析800 hPa涡度的水平分布(图略),27日11时最大正涡度中心在 109°E 、 45°N 附近,中心达 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,在 $105 \sim 108^\circ\text{E}$ 之间有一条正涡度带,与锋区对应很好。27日20时最大正涡度中心在 114°E 、 47°N 附近,涡度增强很大,中心达 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,且锋区对应的正涡度带倾斜加大,呈东北—西南走向。从700 hPa涡度的水平分布(图略)看出,正涡度中心和锋前涡度带的位置与其在800 hPa上的位置基本一致,但涡度值比800 hPa上的值弱。分析各层涡度的水平分布(图略)可以看出,蒙古气旋中心附近的上空都对应着正涡度区,可见蒙古低压具有深厚的辐合上升运动。

3.3 垂直速度诊断分析

沿经过对流层低层位涡中心的经线作垂直速度的垂直剖面,可以看出最大上升速度出现在500 hPa,最大上升速度由27日11时(图略)的 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到27日20时的 $0.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图2c),其中实线($w > 0$)为上升运动。分析500 hPa垂直速度的水平分布,27日14时(图略)在 $106 \sim 113^\circ\text{E}$ 、 $40 \sim 44^\circ\text{N}$ 范围内的上升区对应着主要的沙尘暴区。以上分析表明,沙尘暴爆发期间,有强的垂直上升运动及对流带相伴随。

3.4 不稳定能量分析

通过分析对流层低层的相当位温,可以看出它们的分布大体相同。从每隔3 h输出的700 hPa相当位温(图2d)可以看出,在西南部存在相当位温大值区,在西北部存在相当位温低值区。305 K等相当位温线从27日02时开始向东北方向伸展,同时西北部等相当位温低值线东移南压,使27日20时相当位温在图2d的东北部呈“ Ω ”型,类似于夏季出现强对流天气的湿静力能量分布形状。可见这次沙尘暴在低层存在不稳定的热力条件。

以下从相当位温、相对湿度和垂直速度随高度的变化来看大气的层结分布和锋面的结构。27日20时在靠近气旋中心一侧,沿A(96°E , 48°N)、B(120°E , 42°N)两点连线作垂直剖面(图3a和3b)。从图3a可以看到,在 116°E 附近相当位温线在对流层低层非常陡峭,甚至有点向前倾斜,在 117°E

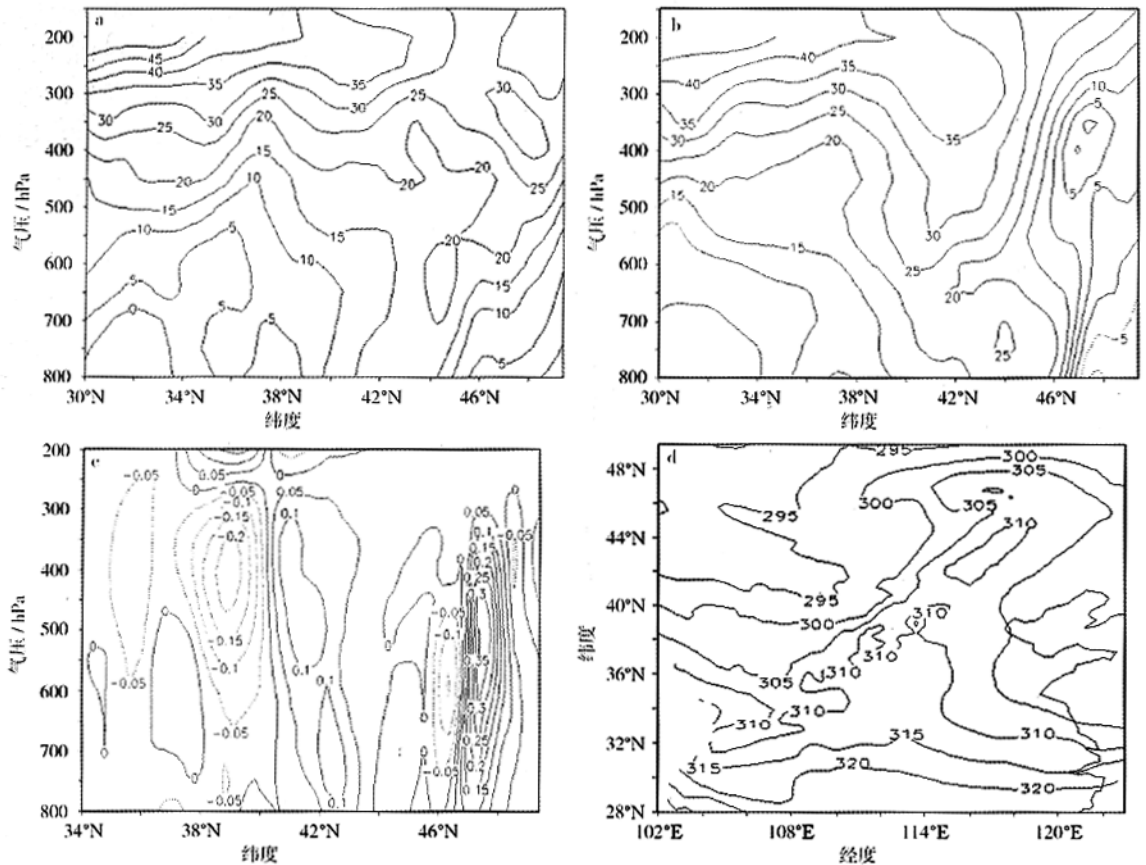


图 2 2004 年 3 月 27 日 08 时 (a)、20 时 (b) 沿 114°E 的西风分量的垂直剖面 (单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 20 时沿 114°E 的垂直速度的垂直剖面 (c, 单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及 20 时 700 hPa 的相当位温分布 (d, 单位 K)

Fig. 2 Latitude-height cross sections of u (units $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08 00BST (a) 20 00BST (b), and vertical velocity (c, units $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 20 00BST along 114°E and the 700 hPa potential temperature distribution (d, units K) at 20 00BST March 27 2004

附近对流层低层相当位温随高度降低,反映了锋前大气的的不稳定性,这种大气层结有利于在这一地区产生对流运动。从相对湿度的分布可以看出,在 115°E 附近有从对流层高层下传的干冷空气,干冷空气迭置于暖湿空气之上,形成位势不稳定状态,容易产生强对流。从图 3 b 来看,在 117°E 附近有强上升运动相对应,最大上升速度为 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。27 日 20 时在远离气旋中心一侧,沿 A(96°E, 48°N)、C(120°E, 34°N) 两点连线作相当位温和相对湿度垂直剖面(图 3c),由图可看出,与锋面对应的相当位温线在对流层低层缓慢倾斜上升,锋前有不稳定能量。从相对湿度的分布可以看出,在 113°E 附近对流层低层有倾斜下沉的干冷空气处在暖湿空气上面,随后暖湿空气爬到冷空气之上沿着锋面上升。从垂直速度的分布(图略)来看,在锋前有弱的上升运动,最大上升速度出现在高层,为 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过以上分析可以看出,在靠近气旋中心一侧的冷锋为下滑冷锋,下滑冷锋很容易发生

强对流,而在远离气旋中心一侧的冷锋为上滑冷锋,对流较弱。这次沙尘暴发生的地区就处在气旋的底部即下滑冷锋的位置。从冷锋的结构可见,与 Danielsen^[16]绘制的干空气侵入气流的三维结构图(图 3d)是非常一致的,图 3d 中的箭头线为源于对流层顶附近沿弯曲等熵面上的气流轨迹,左侧的轨迹线接近地面,右侧轨迹线凌驾于地面锋面之上。

4 位势涡度分析

4.1 位势涡度水平分布特征

位势涡度实际上是表示气块热力和动力属性特征的一个物理量^[20],它将动力和热力两种不稳定机制有机地结合在一起。Hoskins^[21]指出,高位涡区对应气旋性环流,低位涡区对应反气旋性环流,当对流层高层的高值位涡扰动向下伸展时,在对流层低层及地面的斜压区会激发出气旋。

本文用到的位势涡度指等压面上的干位涡,其表达式为

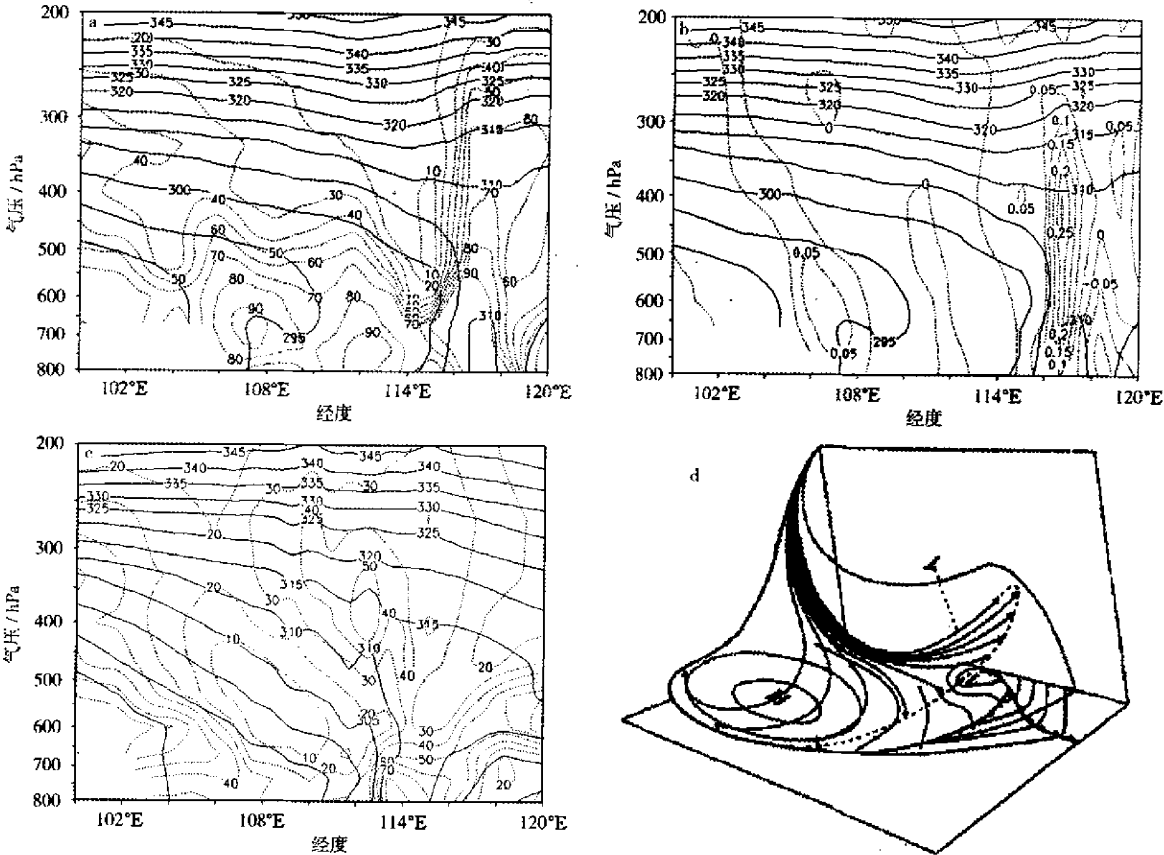


图3 2004年3月27日20时沿A(96°E,48°N)、B(120°E,42°N)两点的相当位温(实线,单位:K)、相对湿度(虚线,单位:%)的垂直剖面(a)、沿A、B两点的相当位温、垂直速度(虚线,单位:m·s⁻¹)的垂直剖面(b)和沿A、C(120°E,34°N)两点的相当位温、相对湿度的垂直剖面(c)以及干侵入气流的三维示意图^[16](d)

Fig.3 Vertical cross sections of potential temperature(solid line units :K) and relative humidity(dash line units :%) (a) , and of potential temperature and vertical velocity(dash line units m · s⁻¹) (b) along straight line A(48°N ,96°E)B(42°N ,120°E) , and of potential temperature and relative humidity(c) along straight line A(48°N ,96°E)C(34°N ,120°E) at 20 :00BST March 27 2004 and the three dimension schematic illustration of dry intrusion(d from [16])

$$\zeta_{PV} = -g(fk + \nabla_p \wedge v) \cdot \nabla_p \theta.$$

忽略ω的水平变化,上式变为

$$\zeta_{PV} = -g(\zeta + f)\frac{\partial \theta}{\partial p} + g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta}{\partial y}\right).$$

式中ζ为相对涡度,f为科氏参数,θ为位温,-g $\frac{\partial \theta}{\partial p}$ 表示静力稳定度。位涡的单位为10⁻⁶ m² · s⁻¹ · K · kg⁻¹。分析对流层低层700 hPa等压面上位势涡度的水平分布(图略),在27日05时,位涡大值区对应着蒙古国西南部的蒙古低压,中心强度为1.0 × 10⁻⁶ m² · s⁻¹ · K · kg⁻¹,锋区对应着正位涡区;27日17时,位涡大值中心移至蒙古国东南部,中心强度增大为1.2 × 10⁻⁶ m² · s⁻¹ · K · kg⁻¹,而此时,地面蒙古低压也位于蒙古国东南部附近;27日20时,位涡大值中心东移,中心强度为1.5 × 10⁻⁶ m² · s⁻¹ · K · kg⁻¹。对比同时次的相对湿度分布(图

略)可以看出,位涡大值中心位于相对湿度的大值中心,可见位涡大值区对应着与沙尘暴爆发相联系的蒙古低压,位涡的正值区反映了冷空气和气旋性环流的活动,这表明了地面冷空气和地面辐合场在沙尘暴天气形成中的重要作用。

分析对流层高层300 hPa等压面上位势涡度的水平分布。从图4a可以看出,27日05时在46°N附近有一位涡大值区,位涡大值中心强度达到5 × 10⁻⁶ m² · s⁻¹ · K · kg⁻¹。从27日05时沿45°N的位势涡度垂直剖面(图略)可知,在对流层高层位涡低值区的位置下方对应着对流层低层的位涡大值区。在对流层中低层有一个相对高位涡区,而对流层高层是一个较强位涡的低值区,有利于形成低层辐合、高层辐散的形势,使气旋附近的上升气流得以维持和加强,从而为强对流和沙尘暴天气的发生提供了必要条件。从图4b可以看出,27日20时位涡

大值区的前部和位涡低值区形成气旋状。分析 500 hPa 等压面上位势涡度的水平分布(图略),27 日 20 时位涡大值区的前部和位涡低值区也形成气旋状,可见干侵入和湿上升气流在气旋中心附近相互缠绕。

4.2 干侵入分析

干侵入(dry intrusion)是指从对流层高层下沉到低层的干空气,可以由高位势涡度(PV,简称位涡)和低相对湿度(RH)两个特征值来表征。图 5a、5b 分别为 27 日 08 时沿 108°E、27 日 20 时沿 114°E 的相对湿度和位涡垂直剖面图。从图 5a 可以看出,27 日 08 时在 42~46°N 上空 350~200 hPa 之间存在相对湿度小于 40% 且随高度向北倾斜的干空气区,对比同时次的位涡分布,在 42°N 以北对流层高层 300~200 hPa 附近为一高值位涡库,对应高空冷槽,呈漏斗状向下伸至 400 hPa 附近;在 45°N 附近对流层中低层有位涡的相对高值区,与低层气旋相对应,中心值达到 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由以上分析可见,对流层高层高值位涡库与相对湿度小于 40% 的干区域相对应,可以认为这是干侵入的源头。

分析各时次相对湿度及位涡经向高度剖面图(图略),可以看出相对湿度低值区与位涡高值区不断向南向下伸展。从图 5b 中可以看出,27 日 20 时对流层高层位涡加强,呈漏斗状向下伸展至 600 hPa 附近,在 47°N 附近对流层中低层有位涡相对高值区;同时,低相对湿度区也随高位涡区一起向南向下伸展,相对湿度为 40% 的等值线由 27 日 08 时(图 5a)的 350 hPa 附近向下伸展至 600 hPa 附近,其中在 27 日 14 时,相对湿度为 40% 的等值线迅速向下伸展到 600 hPa 附近并维持,27 日 20 时

(图 5b)对流层中低层的位涡相对高值区的中心位涡值达到 $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见高层位涡向下注入,对气旋的加深移动所起的作用是显著的。

分析相当位温和位势涡度的垂直分布,27 日 20 时在远离气旋中心一侧沿 A(96°E,48°N)、C(120°E,34°N)两点连线作一垂直剖面图(图略),在靠近气旋中心一侧沿 A(96°E,48°N)、B(120°E,42°N)两点连线作一垂直剖面图(图略)。从图中可以看出,呈漏斗状向下伸展的高值位涡区位于对流层高层等相当位温线密集带上,然后沿着锋面向下伸展,在靠近气旋中心一侧的位涡下传最强。

由图 5c 可以看出,西风急流北侧的水平风切变对应着正位涡区,而水平风切变最大处对应着最大位涡中心。与同时刻 300 hPa 等压面的相对湿度(图略)进行比较,西风急流轴在 42°N 附近,位涡中心轴在 46°N 附近,而相对湿度低值区处在西风急流轴和位涡中心轴之间,可见西风急流北侧的水平风切变产生辐合,引起对流层高层位涡的下传,从而将对流层高层的干冷空气带到低层。

进一步分析西风、位涡的经向垂直剖面图。从 27 日 20 时沿着 114°E 的经向垂直剖面(图 5d)可以看出,高低空的位涡大值区都对应着水平风切变的密集带。分析各时次西风及位涡的经向垂直剖面(图略)可以看出,西风的增强和下压,引起水平风切变的增强和下压,使高空位涡增强下压和低空位涡增强,从而将对流层高层的干冷空气带到对流的低层,干冷空气迭置在暖湿空气上面形成位势不稳定,从而产生强对流。

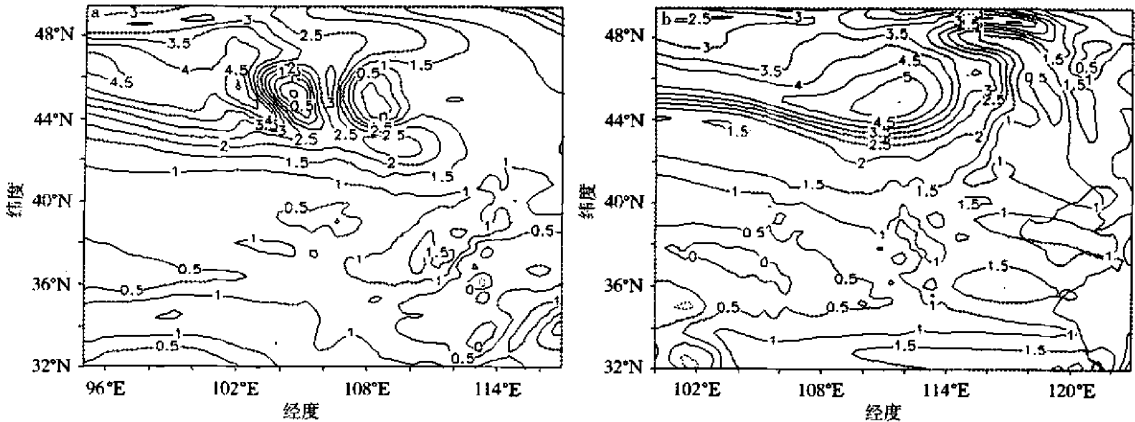


图 4 2004 年 3 月 27 日 05 时(a)和 20 时(b)300 hPa 位势涡度(单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 4. 300 hPa potential vorticity (units: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 05 00BST (a) and 20 00BST March 27, 2004 (b)

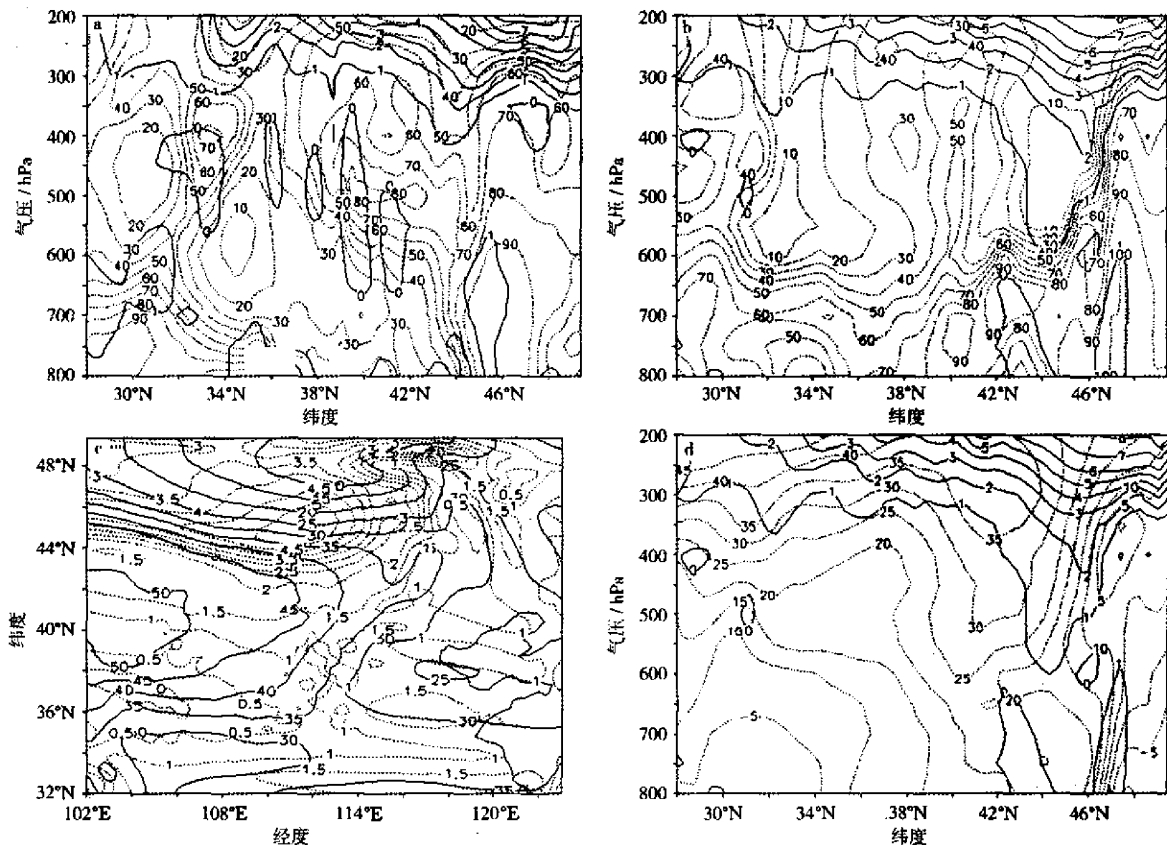


图5 2004年3月27日08时沿108°E(a)、20时沿114°E(b)的相对湿度(虚线,单位:%)、位势涡度(实线,单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)的垂直剖面,20时300 hPa位势涡度(虚线)、西风分量(实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)图(c)以及沿114°E的西风分量(虚线)、位势涡度(实线)的垂直剖面(d)

Fig. 5 Vertical cross sections of relative humidity (dash line, units: %) and potential vorticity (solid line, units: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$) along 108°E at 08 00BST (a) and along 114°E at 20 00BST (b) and of u (dash line, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and potential vorticity (solid line) along 114°E (d) and the 300 hPa potential vorticity (dash line) and u (solid line) (c) at 20 00 BST March 27, 2004 的进一步增强。

5 结 论

(1)在这次沙尘暴过程中,对流层高层干空气自对流层顶折叠附近扇状下沉至地面冷锋后,这股向下传的干空气,同时具有高位涡的特征,一般称其为干空气侵入(dry intrusion)。

(2)对流层高层高值位涡库沿等相当位温密集带向南下传,从而将对流层高层的干空气带到低层,干冷空气迭置在暖湿空气之上很容易引起对流的发生。

(3)高层位涡向下注入,促进了对流层中低层气旋的发展。

(4)高空西风急流右侧的水平风切变为对流层高层干空气和高位涡空气的下传提供了动力条件。

(5)高层干冷空气向下注入,导致地面锋后温度降低,气压升高,风速加大,锋前低层辐合增强,上升速度加大,促进了新的对流运动,继而引起沙尘暴

参考文献:

- [1] 颜宏. 全国沙尘暴天气研讨会会议总结[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 6-11.
- [2] Jauregui E. The dust storms of Mexico City[J]. Int J Climatol, 1989, 9(2): 169-180.
- [3] Gillette D A, Hanson K J. Spatial and temporal variability of dust production caused by wind erosion in the United States[J]. J Geophys Res, 1989, 94(D2): 2197-2206.
- [4] Snow J T, McClelland T M. Dust devils at white sands missile range, New Mexico, I, temporal and spatial distributions[J]. J Geophys Res, 1990, 95(D9): 13707-13721.
- [5] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35.
- [6] 王式功, 杨德保, 金炯. 我国西北地区沙尘暴时空分布及其成因分析[C]. 中国科协第二届青年学术年会论文集: 资源与环境科学分册. 北京: 中国科学技术出版社, 1985: 364-370.
- [7] 王式功, 董光荣, 杨德保. 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.

[8] 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 [C]//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.

[9] 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.

[10] 邱新法 ,曾 燕 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报 2001 ,56(2) 316-322.

[11] 高凤荣 ,李 云. 甘肃河西“ 5. 19 ”黑风分析[J]. 甘肃气象 , 1989 ,7(1) :13-17.

[12] 陈敏连 ,郭清台 ,徐建芬 ,等. 黑风暴天气的研究和探讨[J]. 甘肃气象 ,1993 ,11(3) :16-27.

[13] 王式功 ,杨德保 ,周玉素 ,等. 我国西北地区“ 94. 4 ”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠 ,1995 ,15(4) 332-338.

[14] 徐建芬 ,牛志敏 ,陈伟民 ,等. 我国西北地区 4 · 5 沙尘暴天气研究[J]. 中国沙漠 ,1996 ,16(3) 281-286.

[15] 常兆丰 ,刘虎俊 ,纪永福 ,等. 河西走廊最近一次强沙尘暴的调查分析[J]. 中国沙漠 ,1997 ,17(4) :442-446.

[16] Danielsen E F. Project springfield report[R]. Washington D C : Defense Atomic Support Agency ,1964 :97.

[17] Browning K A ,Roberts N M. Structure of a frontal cyclone[J]. Q J R Meteorol Soc ,1994 ,120(518) :1535-1557.

[18] Wakimoto R M ,Blier W ,Liu C. The frontal structure of an explosive oceanic cyclone :Airborne radar observations of ERICA IOP 4 [J]. Mon Wea Rev ,1992 ,120(7) :1135-1155.

[19] Browning K A ,Monk G. A simple model for the synoptic analysis of cold fronts[J]. Q J R Meteorol Soc ,1982 ,108(456) :435-452.

[20] 寿绍文. 中尺度气象学[M]. 北京 :气象出版社 ,2003 :235-239.

[21] Hoskins B J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability[J]. Q J R Meteorol Soc ,1974 ,100(425) :480-482.