

强沙尘暴天气形成机制个例分析

张海霞¹ 尤凤春² 周伟灿³ 王连喜⁴

(1 河北省邯郸市气象台, 邯郸 056001; 2 河北省气象台, 石家庄 050021; 3 南京信息工程大学, 南京 210044; 4 宁夏自治区气象科学研究所, 银川 750002)

摘要 从气候背景、天气形势、地形作用、沙尘形成热力和动力学机制等方面, 分别对 2005 年 4 月 19、20 日两天发生在冀南地区的扬沙、沙尘暴天气进行分析。结果表明: 对流层低层横切变线和华北地形槽的存在使冀南地区沙尘天气加剧; 沙尘发生前冀南弱辐合上升运动和上冷下暖的不稳定垂直结构可以迫使当地沙尘向空中扬起, 上游地区较强的上升运动将当地的沙尘垂直输送到空中, 在高空强西北气流的引导下将沙尘水平输送到下游地区; 沙尘天气发生在上游地区对流层螺旋度最大正值区的下游, 对流层螺旋度大小对沙尘暴预报有一定的指示意义。

关键词 冀南地区 沙尘天气 动力和热力学机制 螺旋度

引言

国外在 20 世纪 20 年代就开始了沙尘暴的研究, 主要总结了沙尘暴的特征及天气类型^[1]。我国对沙尘暴的研究从 20 世纪 70 年代后期开始, 许多气象工作者对发生在西北地区的沙尘暴天气个例进行了分析, 指出了沙尘暴天气的发生往往与强对流相伴, 热力因子和中尺度天气系统在沙尘暴形成中的重要作用^[2~4]。螺旋度作为强对流天气分析的一个重要物理量, 在暴雨研究中已有广泛应用^[5~7], 但在沙尘暴研究中却应用很少。申红喜等人指出 z 螺旋度分布对发生在北京地区的沙尘暴天气预报具有一定的指示意义^[8]。这些研究对深入认识我国西北地区和冀北地区沙尘暴天气的发生机理提供了帮助。

冀南地区发生强沙尘暴的几率不大, 一旦发生仍对人们的生活、工农业生产等造成很大的危害。本文通过对发生在河北省南部连续两天受同一冷空气影响, 气候背景相同, 剧烈程度却不同的沙尘(暴)天气过程进行对比分析, 从天气形势、地形、物理量场诊断等来分析冀南地区沙尘天气的成因, 旨在探寻影响冀南地区沙尘(暴)天气过程的动力和热力学

机制, 为以后的沙尘预报提供参考。

1 沙尘天气过程简述

受较强冷空气影响, 2005 年 4 月 19 日冀南大部分地区出现大风扬沙天气, 河北省北部有 4 个县出现沙尘暴, 1 个县出现强沙尘暴天气。受补充南下的冷空气影响, 20 日冀南大部分地区又出现大风沙尘(沙尘暴)天气(图 1), 其中有 20 个县市出现沙尘暴, 能见度不足 1 km, 饶阳、宁晋、无极、新河、阜城、景县、故城、威县、邱县等 9 个县市出现强沙尘暴, 能见度在 500 m 以下。这是河北省近 6 年来出现的范围最大、强度最强的沙尘暴天气。

2 天气气候成因分析

2.1 前期气候条件

2005 年 2~3 月冀南地区冷空气活动比较频繁, 平均气温比常年同期偏低, 严寒的天气使得冻土层加厚, 导致解冻后疏松土质偏厚, 而且 3 月大风日数较多, 月内基本上无有效降水, 大部分地区出现了旱象, 植被长势较差, 为沙尘暴的发生提供了沙源。

4 月 15~17 日冀南地区日平均气温 3 天净升高 9 ℃左右。17、18 日两天最高气温达 30 ℃左右,

国家自然科学基金(40365002)资助

作者简介: 张海霞, 女, 1971 年生, 硕士, 工程师, 从事中短期天气预报工作, Email: haixazhang@163.com

收稿日期: 2005 年 8 月 22 日; 定稿日期: 2006 年 1 月 28 日

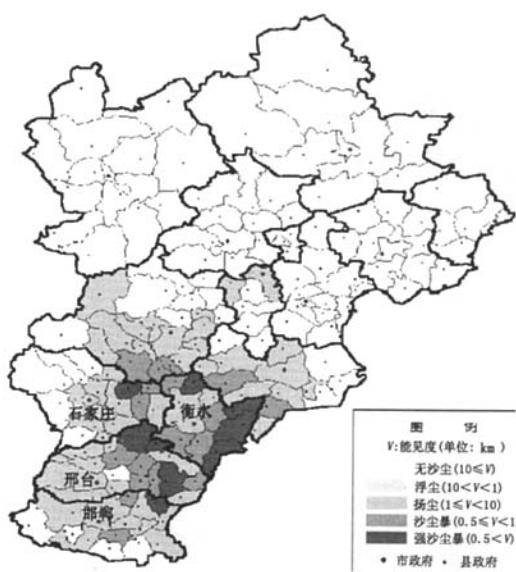


图1 2005年4月20日冀南地区沙尘暴天气分布

在中低空华北为一暖脊,850 hPa等压面上河北中南部处于15℃的暖脊里,地面持续增温,中低空维持较高温度,不断积蓄热能,而高层气温没有明显变化,因此当冷空气入侵时,形成大气的极端不稳定,加速地面扰动,有强烈的上升气流将地面沙土卷入空中,导致扬沙、沙尘暴天气发生。沙尘天气过后,气温下降6℃左右,升温幅度远大于降温幅度。沙尘前期冀南上空暖舌的形成,为沙尘暴的产生提供了有利的热力条件。

2.2 高空环流形势

4月19日冀南地区大范围扬沙天气主要是由偏西路径冷空气和东蒙冷涡共同影响造成的,4月20日冀南地区大范围沙尘暴、强沙尘暴天气主要是由补充南下的偏北路径冷空气、华北地形槽和对流层横切变的共同影响所致,且都有较明显高空偏西风动量下传的作用。

4月19日08:00 500 hPa图上,东蒙冷涡已经存在且比较深厚,其底部有一阶梯槽(后倾槽)分别位于内蒙和陕西山西交界处,温度槽落后于高度槽,从高层到低层槽后冷平流都比较明显,在(41°N、108°E)附近有一-36℃的冷中心,在内蒙西部到宁夏有一强西北风高空急流,中心风速达48 m/s,该急流到宁夏南部后转为偏西风向东伸展到山西南部。19日20:00低槽东移出河北,急流中心减弱为40 m/s,并向东南方向移动到山西南部,冷空气减弱

向东南移动,500、700、850 hPa 3层降温幅度达6~8℃,有明显西风动量下传的作用。

20日08:00随着东蒙冷涡东移到东北,位于内蒙中部的高空急流中心风速加大到52 m/s,强度明显加强,且该急流的位置较19日08:00偏北偏东,环流经向度较19日08:00加大,同时又从贝加尔湖分裂出一股冷空气在张家口附近形成-35℃的冷中心,并配合有横切变线,切变线从高层到低层向南倾斜,到850 hPa高度时切变线位于河北中南部。在河北南部、山西南部低层气温均上升3℃左右,而在河北北部及内蒙古附近气温继续下降,北部冷平流加强,南部暖平流加强,使得河北南部和北部温度梯度加大,温差达10℃以上。20日20:00强西北风急流中心减弱到44 m/s,并东移到河北南部。

2.3 地面影响系统

4月19日、20日的沙尘天气都有明显的日变化,都发生在午后气温明显上升时段,冷锋过境时引起的地面大风是沙尘产生的重要条件。

19日08:00地面图上蒙古气旋已经形成,西西伯利亚有一强大的高气压,在河北中东部有一冷锋,冷锋两侧气压差很大,并有明显的西北风、东南风辐合。11:00(沙尘出现前3 h左右,图2a)冀南地区有一干暖中心,3 h变压不明显,到13:00在山西北部有一+3.0 hPa的变压中心。到14:00锋面已过境,冀南出现大范围的西西北大风,并伴有沙尘天气,个别县出现沙尘暴。到19日20:00,影响系统减弱南移,但在贝加尔湖附近又分裂出一高压中心,并加强南下。

20日08:00副冷锋位于承德、北京、太原一带,冷锋后3 h变压为+4.7 hPa,冀南处于锋前弱西南气流里,蒙古气旋发展、东移到东北附近,在华北形成地形槽。20日11:00与19日11:00相同(图2b),冀南也为一干暖区,在衡水—邢台一带有明显的风向辐合,在石家庄附近有一+4.0 hPa的3 h变压中心,与19日11:00不同的是有南、北风的辐合,冷空气路径较19日偏北,而且3 h变压、气压梯度等均明显大于19日11:00,所以20日白天的风速较19日大,有利于出现强沙尘暴。当副冷锋经过河北中南部,两侧变压梯度逐渐增强,加上华北地形槽的作用,促使锋前地面辐合加强,产生强的上升运动,地面沙尘向空中卷起,从而产生沙尘暴。

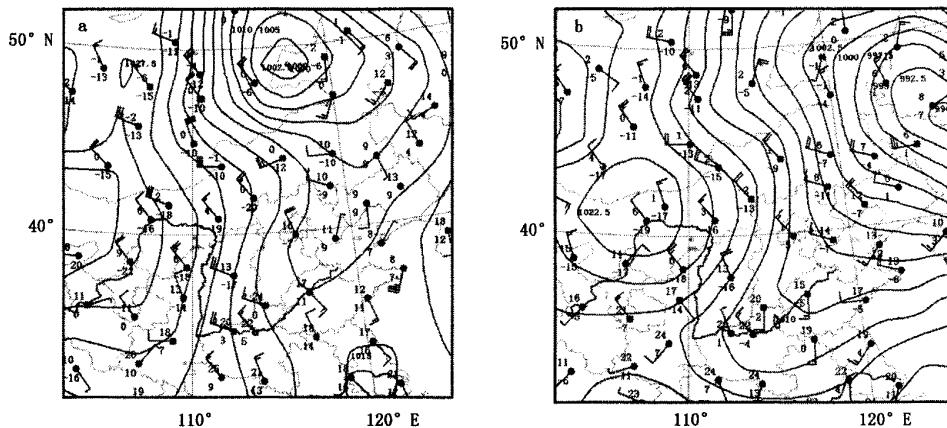


图2 沙尘发生前3 h左右的地面形势场:(a) 4月19日11:00,(b) 4月20日11:00(单位:hPa)

3 不同路径冷空气的影响分析

冀南西部为山区丘陵地带,东部为平原地区,此次沙尘天气主要出现在东部平原地区,这与西部太行山地形的作用密切相关。通过对出现强沙尘暴的9个县站19日14:00与20日14:00的地面气象要素进行对比分析可以发现:随着冷空气的到来,地面气温有明显下降。19日冷空气为西来路径,由于太行山焚风作用的影响,平均气温降1℃左右,冀南出现西北或偏西大风,加上18日晚上零星降水的影响,只出现了扬沙天气。由于太行山地形的影响,使得冷锋过后,低层前期积蓄的热能没有完全释放。20日的冷空气为西北路径,副冷锋过境后,形成华北地形槽,使得20日14:00的地面气压均低于19日14:00,而地面风速均大于19日14:00,风向为西北或偏北风,低层热能释放,平均气温下降到14.9℃,降幅达5.7℃。

4 物理量诊断分析

为了研究这两次沙尘天气过程的热力学、动力学特点,本文应用MICAPS物理量诊断场资料(水平分辨率 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$)对一些物理量场进行诊断分析,从中找出异同。

4.1 热力因子

图3为沿116°E温度平流垂直剖面图。从图上可以看出,19日08:00(图3a)在32°N以北400 hPa以下有明显的冷平流,最低值出现在43°N上空600 hPa附近,达 $-20 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,400 hPa以上暖平流为主,属于稳定性垂直结构。19日20:00(图3b),冷平流区加强南移,在36°N上空从地面到200 hPa均为冷平流区。20日08:00(图3c),在36°N上空从地面到300 hPa为暖平流,向上向北倾斜,300 hPa以上为冷平流,这种上冷下暖的结构极不稳定,有利于产生对流运动,而且在40°N上空低层800 hPa附近有一明

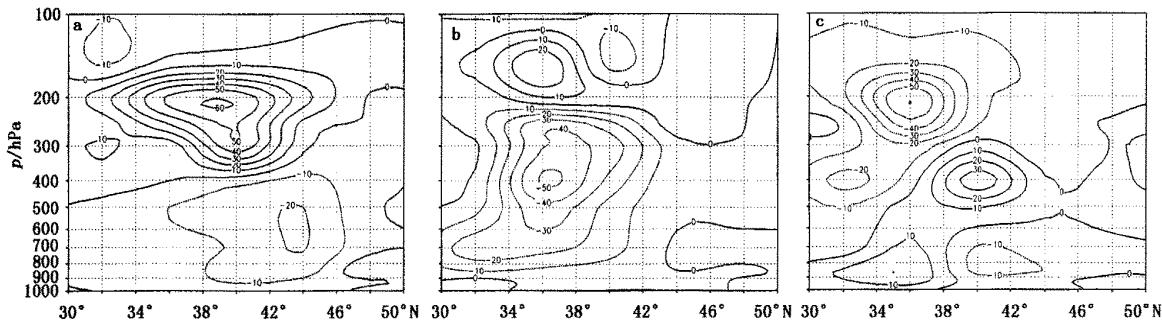


图3 沿116°E温度平流垂直剖面图:(a)19日08:00,(b)19日20:00,(c)20日08:00(单位: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

显的冷平流入侵,使得对流不稳定加剧。由上面分析可知:19 日 08:00 的冷平流明显强于 20 日 08:00,19 日 08:00 冀南地区上空为稳定的垂直结构,而 20 日 08:00 为上冷下暖的不稳定垂直结构,这也是 20 日沙尘天气比 19 日剧烈的原因之一。

4.2 动力因子

4.2.1 涡度平流

在 500 hPa 涡度平流图上,4 月 19 日 08:00 在山西北部(图 4a)存在一个较强的正涡度平流中心(最大涡度平流为 $15 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$),此时 850 hPa 的相

应位置处在东蒙冷涡后部的西北风急流前部,这预示着急流将进一步发展,19 日 20:00 正涡度平流加强东移到黄海;20 日 08:00 随着补充冷空气南下,东蒙冷涡已东移到东北地区,在冀南地区北部(横切变线附近),500 hPa 出现正涡度平流中心,中心强度为 $20 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,涡度平流明显大于 19 日 08:00,此时最大正涡度平流位于 850 hPa 新生成的西北风急流前部,20 日 20:00 正涡度平流加强东移到朝鲜半岛。

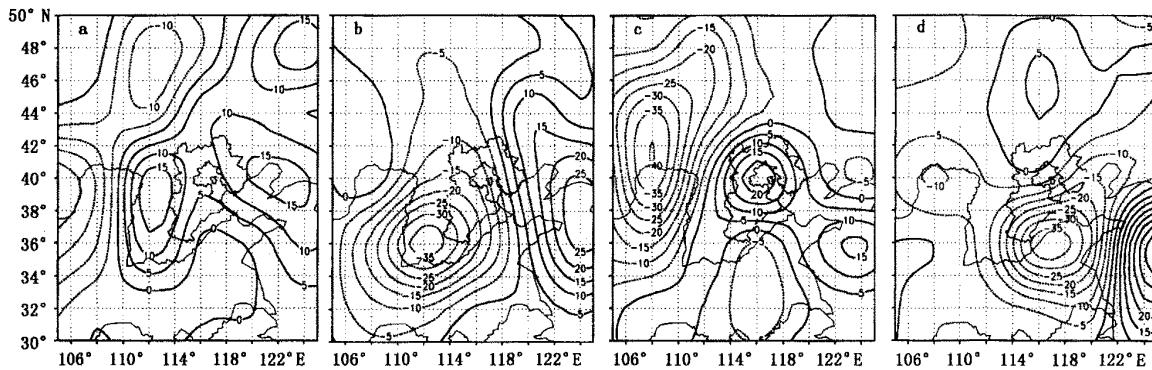


图 4 500 hPa 涡度平流:(a)19 日 08:00,(b)19 日 20:00,(c)20 日 08:00,(d)20 日 20:00(单位: 10^{-9} s^{-2})

对比分析表明,东蒙低涡后部的西北风急流非常有利于冀南地区产生沙尘天气,低层横切变线的存在会使沙尘天气加剧,沙尘发生前上游地区 500 hPa 最大正涡度平流位置和强度与沙尘天气的剧烈程度有很大关系。

4.2.2 散度场

19 日和 20 日的沙尘天气均发生在高空为强辐散区,低层为辐合、辐散交界处附近。19 日冀南地区的扬沙天气只有本地的沙尘由于大风向空中扬起,而 20 日的沙尘暴不但有本地的沙尘扬起,而且还有上游地区沙尘向本地输送的影响。

19 日 08:00 高空西北风急流已经存在并维持,位于黄河流域附近,在其出口区左侧为大范围的干暖区,并且在河北上空为强辐散区,其强迫形成的对流上升运动是沙尘向高空输送的动力机制。

19 日 08:00 在河北东南部中低空散度为负值,高空为正值,而在其西北方向的上游地区低层散度为正值,高空为负值,可见 19 日的扬沙天气发生前河北东南部存在上升运动,可以迫使本地的沙尘向高空扬起,而上游为下沉运动,不易将浮尘向下游输

送。到了 20 日 08:00,冀南地区在低层散度为负,700 hPa 以上散度为正值,可见在冀南地区存在弱上升运动,而在其上游西北方向,从低层到 500 hPa 散度为负值,高层为正值,为强上升运动区,可迫使上游地区沙尘向空中扬起,通过高空西北气流向下游输送,造成 20 日冀南地区的强沙尘暴天气。

4.2.3 螺旋度

螺旋度从物理本质上反映了流体涡管扭结的程度,其大小反映了旋转与沿旋转方向运动的强弱程度,其定义为:风矢量与涡度点积的体积分^[8]:

$$H = \iiint_{\tau} \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) d\tau$$

考虑实际应用,本文定义 ρ 坐标系的垂直螺旋度 H_p 为(简称螺旋度)^[9]:

$$H_p = - \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega = - \zeta \omega$$

根据上式,分别计算了沙尘天气发生前即 4 月 19 日 08:00 和 4 月 20 日 08:00 850~100 hPa 冀南上游地区的螺旋度(仅计算有上升运动,即 $\omega < 0$ 的区域)。分别找出两时刻冀南地区上游最大螺旋度的层次。由计算结果(图 5)发现,4 月 19 日 08:00

冀南上游地区最大螺旋度位于300 hPa等压面附近,有两个正值中心,较大值位于东蒙地区,与高空东蒙冷涡相配合,中心值大于 $15 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,并且向南伸展,这正好处于19日河北北部发生沙尘区域的上游;次大值位于河套($40^{\circ}\text{N}, 108^{\circ}\text{E}$)附近,正值中心大于 $9 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,处于高空300 hPa河套低槽后部西北风急流里,冀南地区(扬沙天气)位于西北风急流前部。而20日08:00冀南上游地区

最大螺旋度位于500 hPa等压面附近山西北部与内蒙古交界处,中心值大于 $18 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,位于高空500 hPa西北风急流前部,冀南地区(沙尘暴、强沙尘暴天气)的上游。通过比较可以看出,20日08:00冀南地区上游对流层螺旋度最大正值中心较19日08:00大得多,由此造成的沙尘天气也比19日剧烈。

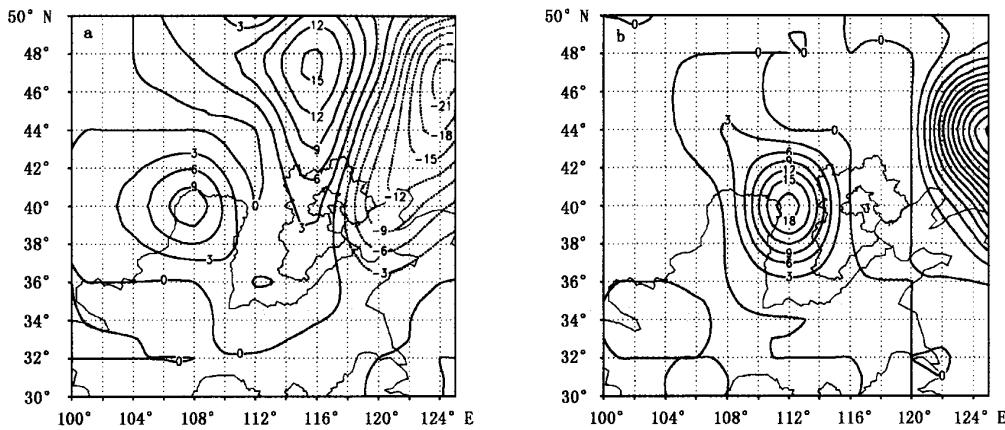


图5 沙尘发生前对流层最大螺旋度水平分布:

(a)19日08:00 300 hPa, (b)20日08:00 500 hPa(单位: $10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$)

通过以上分析可知,20日08:00冀南沙尘区上游的对流层最大正螺旋度无论是面积还是强度均较19日08:00大,且位置偏东,螺旋度正值区位置和强弱与冷空气的路径、强度有很大关系,沙尘暴区位于对流层螺旋度最大正值区的下游,对流层螺旋度大小对沙尘暴预报有一定的指示意义。

为了弄清楚沙尘天气发生前螺旋度的垂直结构特征,分别对19日08:00和20日08:00冀南沙尘天气区域及其上游区域作螺旋度垂直剖面图(图略),19日08:00冀南上空螺旋度为明显上负下正分布,500 hPa以下为正值区,500~300 hPa之间为负值区,在其西北300 hPa等压面附近还有一正值区域,这种垂直结构十分有利于对流运动发展,这与陶健红等的分析比较一致^[7]。到20日08:00,冀南地区强沙尘暴区域上空螺旋度无明显的上负下正分布,为弱正值区,这与陶健红等的分析不太一致,但在其上游西北地区上空螺旋度值很大,500 hPa等压面附近达 $20 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,较19日08:00螺旋度值大得多。由于常规观测资料的时空分辨率太粗,无法看到沙尘天气发生时螺旋度的垂直结构特

征,有待今后利用更细致的观测或者热、动力协调的精细中尺度模式资料,对这次过程进行更深入的剖析。

5 结论

(1)沙尘天气发生前期本地的干暖形势为沙尘的发生提供了有利的热力条件和沙尘来源。

(2)蒙古气旋是造成19日冀南地区扬沙天气的重要影响系统,对流层低层横切变线和华北地形槽的存在使得20日冀南地区的沙尘天气加剧形成强沙尘暴。

(3)沙尘天气的强弱很大程度上与冷空气的强弱有关,受太行山地形的影响,冀南地区沙尘天气的强弱和冷空气的路径也有很大关系。对冀南地区沙尘暴预报不能忽略副冷锋的作用。

(4)19日冀南地区上空为稳定垂直结构,而20日为上冷下暖的不稳定结构,有利于产生对流运动,40°N上空低层冷平流的入侵,使得对流不稳定加剧。在沙尘天气发生前,有不稳定能量聚积,而不稳定能量释放与冷空气的路径有很大关系。

(5) 沙尘发生前当地弱辐合上升运动可以迫使当地沙尘向空中扬起,而 20 日上游地区较强的上升运动将当地的沙尘垂直输送到空中,在高空强西北气流的引导下将沙尘水平输送到下游地区,使下游地区出现强沙尘暴天气。

(6) 沙尘暴发生前其上空或上游地区螺旋度的垂直分布为上负下正分布或对流层正值分布;沙尘暴天气发生在其上游地区对流层螺旋度最大正值区的下游,对流层螺旋度大小对沙尘暴预报有一定的指示意义。

参考文献

[1] 丁一汇,王守荣.中国西北地区气候与生态环境概论[M].北京:气象出版社,2001:145-146.

- [2] 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙暴分析[J].气象学报,1979,37(4):26-35.
- [3] 高风荣,李云.甘肃河西“5.19”黑风分析[J].甘肃气象,1989,7(1):13-17.
- [4] 王式功,扬德保,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.
- [5] 杨越奎.“91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度研究[J].气象学报,1994,52(3):379-383.
- [6] 吴宝俊,许晨海,刘岩英,等.螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用[J].应用气象学报,1996,7(1):108-112.
- [7] 陶健红,王劲松,冯建英.螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用[J].中国沙漠,2004,24(1):83-87.
- [8] 申红喜,李秀连,石步鸿.北京地区两次沙尘(暴)天气过程的对比分析[J].气象,2004,30(2):12-16.
- [9] 王淑静.螺旋度与区域暴雨落区[R].数值预报产品评价公报,1995,(9-10):27-28.

Dynamical and Thermodynamic Mechanisms of a Severe Dust Storm

Zhang Haixia¹ You Fengchun² Zhou Weican³ Wang Lianxi⁴

(1 Handan Meteorological Bureau, Hebei Province, Handan 056001; 2 Hebei Provincial Meteorological Office, Shijiazhuang 050021; 3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;
4 Ningxia Autonomous Regional Institute of Meteorology Municipality, Yinchuan 750002)

Abstract: A case study is made of the dust storm occurred on 19, 20 April 2005 in the southern Hebei Province from the aspects of the climatic background, synoptic features, orographic effect and dynamical and thermodynamic mechanisms. The results indicate that before the occurrence of the storm, the local weak convergence, upward motion and unstable vertical structure drew local dusts up; the upstream strong upward motion drew dusts up and then the upper-air strong northwesterly transported the dusts to the downstream area horizontally; the dust storm occurred at the downstream area of the maximum positive helicity zone in the troposphere. The magnitude of the helicity in the troposphere is useful for the prediction of dust storms.

Key words: southern Hebei Province, dust storm, dynamical and thermodynamic mechanism, helicity