

文章编号:1006-7639(2007)-03-0048-06

## 2006 年北京一次持续浮尘天气过程的分析

段海霞, 李耀辉

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 使用 NCEP/NCAR 再分析资料对 2006 年 4 月 7~11 日北京浮尘天气过程的持续性进行分析, 指出此次浮尘天气过程主要受 500 hPa 西西伯利亚冷涡、鄂霍次克海暖高压以及青藏高原高压脊影响; 700 hPa 有干冷空气不断向北京地区输送, 冷平流和斜压性都很强, 大风和沙尘暴发生在强冷平流区域; 由于华北南部地区近地面至中低层存在弱的不稳定层结, 容易产生弱的上升运动。在近地面低压前部偏东风的作用下将沙尘粒子向北京地区输送, 北京地区上空大气在中低层基本处于中性或不稳定层结状态, 沙尘粒子不易在北京上空沉降, 造成较长时间的浮尘天气。

**关键词:** 沙尘暴; 浮尘天气; 干冷空气; 稳定性

中图分类号:P458.1+23

文献标识码:A

### 引言

沙尘暴是我国北方地区春季发生的灾害性天气, 往往会造成重大损失。近年来, 我国学者在沙尘暴方面取得了很大的进展<sup>[1-2]</sup>。杨晓玲等<sup>[3]</sup>对武威市 1 次沙尘暴天气过程进行分析指出, 强冷空气的卷入使西伯利亚冷槽强烈发展, 为沙尘暴的发展提供了动力条件, 而西伯利亚冷槽的垂直结构为沙尘暴提供了动量下传机制, 地面冷锋后部形成的大风, 为沙尘暴的形成创造了基本条件。肖贤俊等<sup>[4]</sup>对 2002 年 3 月 1 次特强沙尘暴做诊断分析发现, 该次沙尘暴由蒙古气旋后部冷锋锋生产生的偏西北大风引发, 近地面风速的垂直切变和地面热通量的加大都可使边界层湍流加强扬起地面沙尘, 地面锋区附近风场的强水平切变、锋面垂直环流及锋后斜压转换的作用, 将地面卷起的沙尘带到高空, 引发强沙尘暴。王文等<sup>[5]</sup>利用模式输出资料对一次强沙尘暴进行分析发现, 高空急流在能量转换过程中起到非常重要的作用。王劲松等<sup>[6]</sup>对甘肃河西走廊一次强沙尘暴的强风天气形势和地面风场进行数值模拟指出, 沙尘暴爆发前 3 h 河西走廊出现西北大风, 并有大风向这一地区明显辐合, 沙尘暴发生在地面处于干暖状态的地区。林良根等<sup>[7]</sup>利用模式结果对 1 次强沙尘暴天气分析表明, 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。岳平等<sup>[8]</sup>从大气层结稳定度角度分析了内蒙古西部和河西走廊 1 次沙尘暴过程, 指出大气层结的不稳定起了激发作用, 沙尘暴爆发前风速迅速增大, 为起沙提供了动力条件。江吉喜<sup>[9]</sup>利用卫星云图分析 1993 年 5 月 5 日甘肃、宁夏特大沙尘暴指出, 这场沙尘暴主要由冷锋前部的 1 次飑线活动造成。刘淑梅等<sup>[10]</sup>对 2001 年 4 月兰州 2 次区域性强沙尘暴天气进行了对比分析, 总结出了一定的预报思路和要点。

目前很多研究工作主要针对典型的沙尘暴或强沙尘暴过程, 但对浮尘天气关注很少。浮尘指在无风或风力较小的情况下, 尘土、细沙均匀地浮游在空中, 使水平能见度 < 10 km。本文针对北京 1 次长达 4 天的浮尘天气过程, 使用网格距为  $1^\circ \times 1^\circ$ 、6 h 1 次的 NCEP 再分析资料进行分析, 旨在找出此次浮尘天气维持的原因。

### 1 天气实况

2006 年 4 月 5~6 日, 蒙古气旋带来的冷空气过程自西向东影响蒙古国和我国北方地区, 引发了 1 次大范围的强沙尘暴过程。到 7 日, 该沙尘暴强度有所减弱, 经内蒙古中东部和北京、天津、河北省等地进入辽宁省境内和黄海渤海地区。7 日夜间到

收稿日期:2007-08-30; 改回日期:2007-09-07

基金项目: 中国沙漠气象科学基金(sqj200600)资助

作者简介: 段海霞(1980-), 女, 甘肃金昌人, 硕士, 主要从事天气动力学研究. E-mail: dhx8199@hotmail.com

9日,浮尘区自西北向东南方向覆盖了朝鲜半岛和日本南部,同时在辽东半岛、山东半岛、华北平原北部出现了扬沙或浮尘天气,北京地区的浮尘天气持续到11日结束。这是自2002年北京遭遇强沙尘天气6年来,遭受污染最为严重的1次。7日早晨7~8时,污染程度达到最高峰,空气中可吸入颗粒物浓度超过 $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,致使该市空气质量达到3级。

在地面天气图上(图1),4月8日14时原来辽宁、吉林一带的低压中心迅速减弱消失,被黄海一带出现的高压区取代,内蒙古地区的小高压移到了华

北地区南部,并逐渐合并到前面的高压区中。上游强沙尘暴带来的浮尘也正好到了这个高压区。随着低层华北南部地区的小高压系统向东北方向移动并并入黄海一带高压区,在华北南部地区有一低层低压系统在8日形成,并较长时间盘踞在华北平原地区,直至11日才结束。这个低压系统,使得山东半岛、渤海、辽东半岛以及华北地区北部在低层维持着偏东风,从高空缓慢沉降的浮尘,被偏东风输送回华北地区,就造成了4月7~11日北京地区的较长时期的浮尘天气。

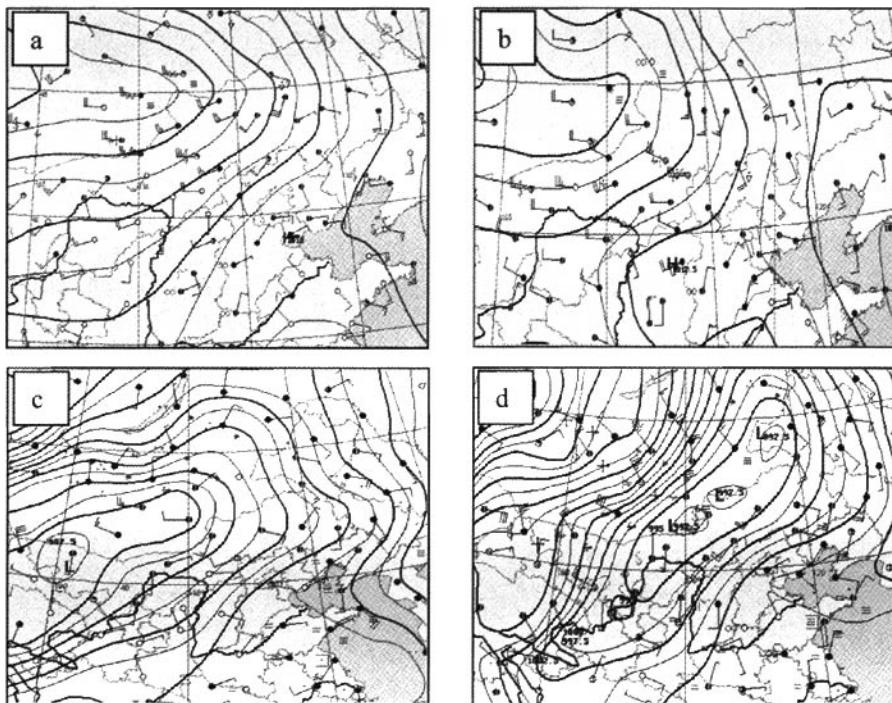


图1 2006年4月地面形势图  
 (a)8日14时;(b)9日11时;(c)9日23时;(d)10日11时  
 Fig. 1 The surface weather situation at 14:00 on April 8 (a), 11:00 on April 9 (b), 23:00 on April 9 (c) and 11:00 on April 10 (d) in 2006

## 2 大尺度环流形势分析

500 hPa 高空主要受西西伯利亚冷涡、鄂霍次克海暖高压以及青藏高原高压脊影响,这些系统使蒙古槽加深,槽前锋区增强、风速增大,从而影响起沙区域和输送路径。4月6日20时,贝加尔湖附近有一个低压中心,低压前部在俄罗斯东南部地区,鄂霍次克海地区为高压脊,随着此高压脊向南收缩并西倾,贝加尔湖低压随之西退,并逐渐形成西西伯利亚

冷涡,至4月9日08时,西西伯利亚冷涡发展最为强盛,中心值达到5 080 gpm。此时冷中心达到230 K,巴尔克什湖形成深低压槽,等温线和等压线斜交,表明冷平流和斜压性很强,系统发展强烈;鄂霍次克海暖高压脊西倾伸向中西伯利亚高原,对西西伯利亚冷涡东移形成阻挡作用,此时青藏高原地区形成青藏高原高压脊,并建立了265 K的暖中心,由暖高压脊向北向东发展以及鄂霍次克海暖高压脊的

阻挡,西西伯利亚冷涡分裂成两个中心,南段槽横扫蒙古国及我国内蒙古地区,槽前锋区强西风产生强烈的沙尘天气。4月9日20时北段槽进入我国新疆北部,使新疆沙尘天气急剧增强。随着冷槽和锋

区东移,甘肃、宁夏、陕西、内蒙等地先后出现沙尘天气。在槽前偏西、西南气流输送下,沙尘天气影响到河南、河北、山西、北京等省市。11日08时以后,随着低槽减弱消失,此次沙尘天气结束。

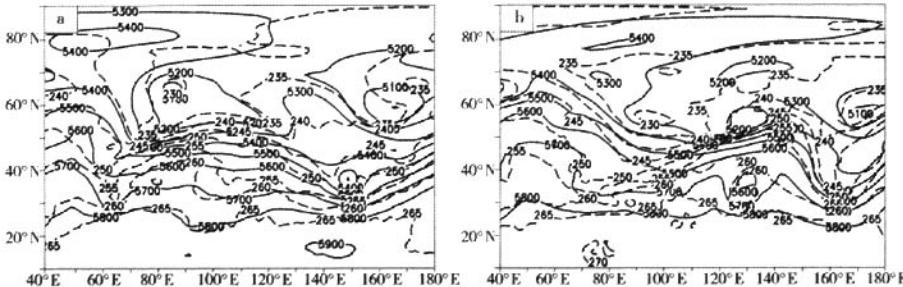


图2 500 hPa位势高度(实线,单位:gpm)与温度(虚线,单位:K)分布

(a)9日08时;(b)11日08时

Fig. 2 The geopotential height (solid lines, Unit:gpm) and temperature (dashed lines, unit:K) distribution at the level of 500 hPa at 08:00 on April 9 (a) and April 11 (b)

### 3 干冷空气分析

沙尘暴的发生与冷空气的作用是不可忽视的。此次沙尘暴过程,冷空气同样起着非常重要的作用。从700 hPa位势高度和温度分布来看(图3a),4月7日14时,河北地区东北部、东北地区南部有一明显

的冷涡存在,北京地区处于冷涡底部,有弱的冷平流(图3b)。随后,冷涡减弱东移,700 hPa上从内蒙古至北京地区为一干舌,冷空气向东南方向延伸,至10日14时,有一股暖湿空气开始从西南方向向东北方向输送,11日08时,湿舌伸向北京地区,北京转为湿空气控制(图3c,d)。

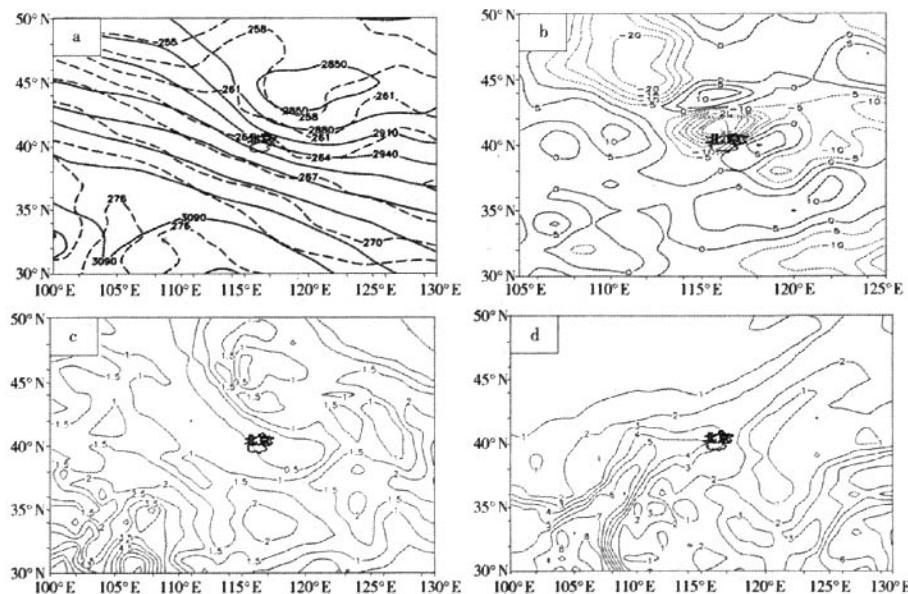


图3 2006年4月7日14时700 hPa形势场及11日02时比湿场

(a)位势高度(实线,单位:gpm)和温度场(虚线,单位:K);(b)温度平流;(c)比湿;(d)11日02时比湿

Fig. 3 The geopotential height (solid lines, Unit:gpm) and temperature (dashed lines, Unit:K) (a), temperature advection (b) and specific humidity (Unit:g/kg) (c) at 14:00 on April 7, the specific humidity at 02:00 on April 11 (d) at the level of 700 hPa

## 4 动力条件分析

从各时刻合成流场的经度—高度剖面来看,在沙尘暴过程初期,北京地区上空存在上升运动,中高层西风分量较为强盛,8日02时开始北京以东地区近地面层出现东风分量,且在近地面层有弱的下沉运动,但在800 hPa以上的中层仍然存在弱的上升运动。从图4a可以明显的看到西风分量带来的沙尘粒子经过北京地区上空在北京以东地区开始下沉,在近地面层东风分量的作用下,沙尘粒子被输送回北京地区。图4b可以看到北京以南地区近地面层存在偏南风分量的下沉气流,850 hPa以上则为南风分量的上升气流,将输送至北京以南地区的沙尘粒子输送回北京地区。

从时间平均的合成流场的垂直剖面(图略)来看,在沙尘暴发生的整个过程中,气流在中高层基本为平直西风,中低层在地形的作用下有弱的波动。从内蒙古方向来的气流经阿拉善高原至太行山脉流向东面,经北京地区时气流在中低层仍为较平直的偏西气流,无明显的上升或下沉运动,而北京以东地区低层及近地面则存在有弱的偏东气流且存在弱的下沉气流;北面来的气流在中高层有弱的上升运动,在中低层垂直运动较为明显。北京地区上空850 hPa以上存在弱的上升运动,而在以南低层存在有弱的下沉运动,这样中高层西北气流携带沙尘粒子在北京以北地区缓慢下沉,在偏东气流的作用下在近地面层向北京地区输送,造成了北京地区长达4天的浮尘和扬沙天气。

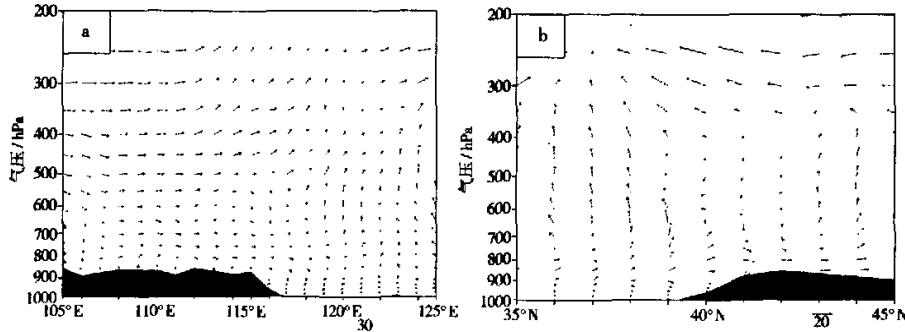


图4 2006年4月9日20时的垂直环流图

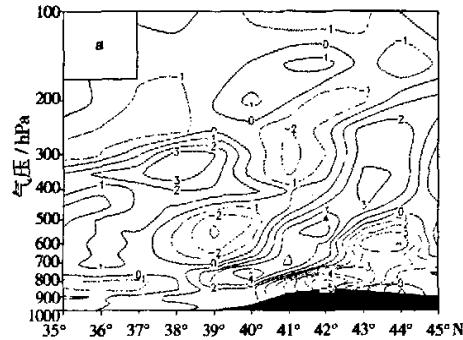
(a) 沿40°N水平速度 $v$ 和垂直速度 $w$ 放大25倍合成流场;(b) 沿116.17°E水平速度 $v$ 和垂直速度 $w$ 放大25倍合成流场

Fig. 4 The vertical circulation at 20:00 on April 9 in 2006

(a) for the synthesize field of 25-fold  $v$  and  $w$  along 40°N, (b) for the synthesize field of 25-fold  $v$  and  $w$  along 116.17°E

从各时次经过116.17°E的散度、涡度和垂直速度剖面(图略)上看,4月8日14时之前,北京地区上空在近地面层至中低层基本为弱的辐合区,中层为辐散区。到8日14时开始(如图5a),近地面层和中低层的弱辐合区转为弱的辐散区,中层变为辐合区,到高层300 hPa~200 hPa之间为辐散区,直至10日20时,北京上空近地面层的辐散转为弱的辐合。涡度变化同散度一样,在8日14时之前,北京地区上空近地面层至中层基本为弱的负涡度区,8日14时以后(图5b),近地面层开始出现正涡度区,当中层仍为负涡度区,高层为正涡度区。垂直速度变化出现在7日20时,在这之前,39°N以北地区从近地面到中高层均为下沉运动,7日20时以后,北

京以南地区开始在中低层出现上升运动,并逐渐向北倾斜扩展到45°N左右,到8日14时,北京上空中



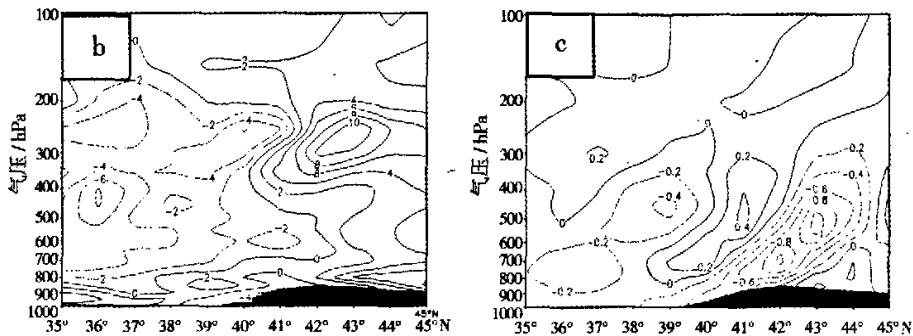


图5 2006年4月8日14时沿116.17°E的垂直剖面

(a) 散度(单位: $10^{-4}s^{-1}$ );(b) 涡度(单位: $10^{-4}s^{-1}$ );(c) 垂直速度(单位: $Pa \cdot s^{-1}$ )

Fig. 5 The vertical section along 116.17°E at 14:00 on April 8

(a) divergence (Unit :  $10^{-4}s^{-1}$ ) ; (b) vorticity (Unit: $10^{-4}s^{-1}$ ); (c) vertical velocity (Unit:  $Pa \cdot s^{-1}$ )

层出现弱的下沉运动(图5c),近地面层的上升运动向北倾斜发展,致使北京上空的沙尘粒子在近地面层缓慢上升沿着倾斜上升气流被输送到北京以北地区的中高层,然后又在倾斜下沉的气流中被缓慢输送回北京上空。由于北京地区近地面层直至10日20时一直存在有弱的上升运动,使沙尘粒子不易沉降,造成了4月7日~11日北京地区较长时间的浮尘天气过程。至10日20时以后,北京地区近地面层弱的上升运动转为下沉运动,沙尘粒子沉降,北京地区的浮尘天气过程结束。

## 5 稳定度分析

从稳定度角度分析这次北京浮尘天气持续的原因,发现在沙尘暴发生初期至4月8日14时期间,华北地区上空基本为稳定层结,但 $\theta_e$ 的水平梯度较大,说明这里大气存在一定的斜压性;8日14时以后,华北上空800 hPa以上的中层转为中性层结,近

地面层仍为稳定层结;10日02时,112°E附近上空850 hPa~700 hPa层之间出现不稳定层结,北京地区上空近地面层仍为稳定层结,中层700 hPa左右出现不稳定层结。10日08时,800 hPa~700 hPa之间的不稳定层结更加明显(图6a);这种不稳定层结和中性层结持续到过程结束。同样分析 $\theta_e$ 的经度—高度垂直剖面发现(图6b),8日08时之前,整个华北地区上空基本为稳定层结,但 $\theta_e$ 的水平梯度较大,大气存在一定的斜压性,有强烈发展的可能;到8日14时以后,华北地区南部36°N左右900 hPa~850 hPa之间开始出现不稳定层结,北京地区上空仍然维持稳定层结, $\theta_e$ 的水平梯度仍然较大;随后华北南部的不稳定层结向北倾斜发展,9日02时北京上空800 hPa~650 hPa之间开始出现不稳定层结,36°N上空的不稳定也向北倾斜伸展至39°N左右,10日08时,华北大部地区在中层基本为中性或不稳定层结,这种状态持续至过程结束。

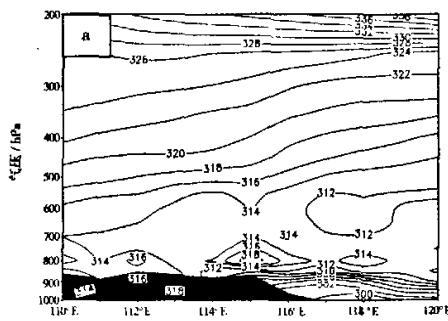
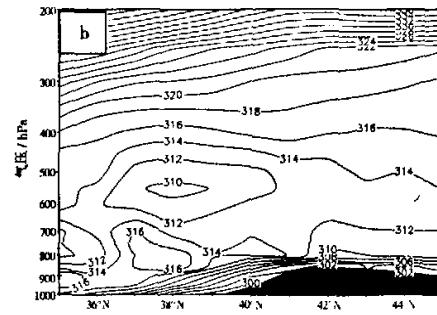


图6 2006年4月10日08时的 $\theta_e$ 垂直剖面(单位:K)(a)沿39.56°N;(b)沿116.17°E

Fig. 6 The vertical section of  $\theta_e$  at 08:00 on April 10 along 39.56°N (a) and 116.17°E(b) (Unit:K)



从时间平均的 $\theta_e$ 的垂直分布(图略)来看,在整个沙尘暴过程中,北京地区上空大气在中低层基本处于中性或不稳定层结状态,近地面层基本为稳定层结。华北南部地区近地面至800 hPa左右存在弱的不稳定层结,此不稳定层结大气产生弱的上升运动,在近地面偏东风的作用下将沙尘粒子向北京地区输送,由于北京及其以南地区 $\theta_e$ 的水平梯度较大,大气存在一定的斜压性,沙尘粒子不易在北京上空沉降,造成较长时间的浮尘天气。

## 6 小结与讨论

本文对北京地区2006年4月7日~11日浮尘天气的分析研究得到以下结论:

(1)此次浮沉天气过程主要受500 hPa西西伯利亚冷涡、鄂霍次克海暖高压以及青藏高原高压脊影响,鄂霍次克暖高压脊阻挡了冷涡东移,冷涡分裂出的南支槽横扫蒙古国及我国内蒙古地区,槽前锋区强西风产生强烈的沙尘天气影响了我国北方大部地区;

(2)700 hPa有干冷空气不断向北京地区输送,冷平流和斜压性都很强,大风和沙尘暴发生在强冷平流区域;

(3)华北南部地区近地面至中低层存在弱的不稳定层结,产生弱的上升运动。在近地面偏东风的作用下将沙尘粒子向北京地区输送,北京地区上空大气在中低层基本处于中性或不稳定层结状态,沙尘粒子不易在北京上空沉降,造成较长时间的浮尘天气。

本文仅从冷空气、风场及不稳定角度分析了这次北京较长时间浮尘天气的持续性原因,仅在初步诊断基础之上,究其具体形成的物理机制还需进一步深入的研究。

### 参考文献:

- [1] 王世功,董光荣,陈惠忠,等.沙尘暴研究的进展[J].中国沙漠,2000,20(4):349~350.
- [2] 李耀辉.近年来我国沙尘暴研究的新进展[J].中国沙漠,2004,24(5):616~622.
- [3] 杨晓玲,丁文魁,钱莉,等.一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J].中国沙漠,2005,25(5):702~705.
- [4] 肖贤俊,刘还珠,宋振鑫,等.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.
- [5] 王文,隆霄,李耀辉,等.“2003.3”强沙尘暴过程的中尺度动力学诊断分析[J].干旱气象,2004,22(3):17~21.
- [6] 王劲松,李耀辉,康凤翠,等.“4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[J].高原气象,2004,23(1):89~96.
- [7] 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.
- [8] 岳平,牛生杰,王连喜,等.一次夏季强沙尘暴形成机理的综合分析[J].中国沙漠,2006,26(3):370~374.
- [9] 江吉喜.1993年5月5日甘肃等地特大沙尘暴成因分析[J].甘肃气象,1993,11(3):35~39.
- [10] 刘淑梅,王学良.2001年兰州地区春季沙尘暴天气的对比分析[J].甘肃气象,2002年,20(2):5~8.
- [11] 张小曳.2006年春季的东北亚沙尘暴[M].北京:气象出版社,2006.46~47.
- [12] 李耀辉,任余龙,寿绍文.一次强沙尘过程起沙与沙尘输送的位涡分析及模拟研究[J].高原气象,2006,25(增刊):22~32.

## Analysis of a Durative Floating Dust over Beijing in 2006

DUAN Haixia, LI Yaohui

(Institute of Arid Meteorology, CMA; Key laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** By using global reanalysis data from NCEP/NCAR, the durative of a floating dust over Beijing during 7~10 in April of 2006 was analyzed. It was found that the impact systems of the floating dust weather were West Siberia cold eddy, Okhotsk warm high and Tibetan Plateau high ridge at the level of 500 hPa; the dry-cold air at the level of 700 hPa transferred to Beijing ceaselessly, and the cold advection and baroclinic instability were strong, the gale and dust storm occurred in the strong cold advection area; the weak instability stratification in surface layer and mid-low level in the south of North China resulted in weak ascending air flow, then transported dust particles to Beijing depending on the easterly wind in front of the surface low pressure. Because of the neutral or instability condition at mid-low level over Beijing, the dust particles were difficult to go down, and the floating dust weather lasted for four days.

**Key words:** dust-storm; floating dust weather; dry cold air; stability