

2001 年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析

王可丽¹, 江 灏¹, 吴 虹²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000 ;

2. 兰州市气象局, 甘肃 兰州 730020)

摘 要 : 通过对 2001 年春季中国北方 5 次沙尘暴的高度场、涡度场、散度场和风场的分析, 研究了沙尘暴强盛期的环流动力结构。结果表明, 在 5 次沙尘暴强盛期有相似的环流动力结构特征。在沙尘暴强盛期的高度场上, 蒙古国有深厚的低值系统, 乌拉尔高压发展, 其间的强气压梯度是沙尘暴的动力源; 低值系统有正涡度中心支持, 外围是负涡度区, 其间有强涡度梯度带; 低值中心伴随有低层辐合高层辐散的垂直结构, 易于发生近地面大风和上升气流, 有利于地面起沙上扬, 形成沙尘暴; 大风区与强涡度梯度带一致, 强风速切变形成的涡度输送有利于加强低值系统, 进而增强风场。

关键词 : 沙尘暴; 动力结构; 高度场; 涡度场; 散度场; 风场

中图分类号 : P 文献标识码 : A

1 引言

中国北方地区是沙尘暴天气的多发区。由于沙尘暴过程对工农业生产和人们的日常生活有直接的不良影响, 尤其是强沙尘暴过程对人类的生存环境产生致命的破坏, 故沙尘暴现象近年来成为全社会关注的焦点问题之一^[1~14]。为减轻沙尘暴过程造成的损失, 研究沙尘暴天气的客观预报方法, 提高预测准确率, 无疑是关系人类自身生存环境质量的急需解决的问题。但从目前的现状来看, 对沙尘暴天气的预测仍主要靠经验预报, 预报准确率不能满足社会需求, 其原因是对这种天气现象的研究目前大多还处于个例分析阶段, 对沙尘暴形成的动力和热力条件的共同点和差异还缺乏充分的了解, 对存在共同点和差异的机理还缺乏足够的认识。本文利用气象台站观测资料和 NCEP/NCAR 再分析格点资料(每日 4 次, 其经向格点为 94 个高斯纬度, 纬向分辨率为 1.875°)^[15], 分析了 2001 年春季发生在中国北方地区的几次大范围沙尘暴的高度场、涡度场、散度场和风场特征, 在个例分析的基础上, 讨论了沙尘暴强盛期环流动力结构的共同特点, 对进一步研究这种环流动力结构形成的原因及其变化规

律、提高沙尘暴天气的客观预测准确率有现实意义。

2 2001 年春季几次大范围的沙尘暴

与 2000 年相比, 2001 年中国北方沙尘天气的频率和强度有增无减^[1~2], 几次大范围的沙尘暴天气令人瞩目。本文将这几次大范围的沙尘暴天气挑选出: 其中 3 月份 2 次, 4 月份 2 次, 5 月份 1 次。表 1 给出了沙尘暴强盛期当日下午 06 时(GMT)的能见度小于 1000 m 的测站数。根据各月沙尘暴发生的站天数统计结果(图表略)也可以看出, 2001 年的沙尘暴过程在 3、4 月份较强, 5 月份稍弱。

表 1 沙尘暴发生(日期)的站数

Table 1 The station number occurring dust storm

日期(月-日)	站数
03-05	26
03-21	19
04-08	15
04-29	11
05-03	9

收稿日期 : 2002-03-21 ; 改回日期 : 2002-05-20

基金项目 : 国家重点基础研究发展规划项目(G2000048703); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(210035)资助

作者简介 : 王可丽(1957—), 女, 河北唐山人, 研究员, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail : klwang@ns.lzb.ac.cn

大范围沙尘暴的发生与系统性天气过程有关。为了了解沙尘暴发生时的环流动力结构，对沙尘暴强盛期的一些物理量作了分析，包括 600 hPa 和 200 hPa 高度场、高度距平场、相对涡度场、散度场和风速场等。由于地面大风区与 600 hPa 大风区的分布较一致，所以这里未给出地面大风区的分布。

从这 5 次沙尘暴发生时的环流动力结构上看，有很多共同点，在 5 次合成的物理量场分布图中，这些共同的特点都表现得很清楚。

2.1 高度场

在 40 年平均的春季 600 hPa 和 200 hPa 高度场上(图略)，等高线较平直，西北偏西气流稳定。而 2001 年的几次大范围沙尘暴发生时的 600 hPa 高度场上，在蒙古国地区都有低值系统。3 月 5 日，600 hPa 高度场上蒙古国地区为一大横槽，高度距平场上为一负距平涡旋，其中心在蒙古国东部；与其对应的 200 hPa 上，负距平涡旋中心偏西。3 月 21 日，600 hPa 槽线偏东，高度距平场上负距平涡旋中心在蒙古国东部；对应的 200 hPa 上，负距平槽略偏

西。4 月 8 日，600 hPa 高度场在中高纬为双涡旋形势，偏西的涡旋中心在蒙古国西部，高度距平场上为一负距平涡旋；对应的 200 hPa 上，负距平涡旋中心偏西。4 月 29 日，600 hPa 低槽和负距平涡旋中心均在蒙古国中部；200 hPa 负距平涡旋中心在其西南方中蒙边境上。5 月 3 日，600 hPa 槽线偏东，负距平涡旋中心在蒙古国中部偏东地区；200 hPa 负距平槽在蒙古中部。

3 月份和 5 月份的 3 次过程中，低值系统的中心偏东，所以主要的沙尘暴区在华北北部的内蒙古等地，4 月份的 2 次中心位置偏西，主要沙尘暴区在西北地区。其中 4 月初开始的过程不仅时间长，范围也延伸到新疆西部至境外地区。

5 次过程的高度场有一些共同的特点，其距平低涡都在蒙古国。图 1 为合成的高度距平图。从图中可看到，600 hPa 高度场上，在蒙古国地区有低值系统，负距平涡旋位于蒙古国中部地区；200 hPa 上依然有深的距平低涡存在，表明这是一个深厚系统。而乌拉尔山地区为一距平高脊，由于其间强大

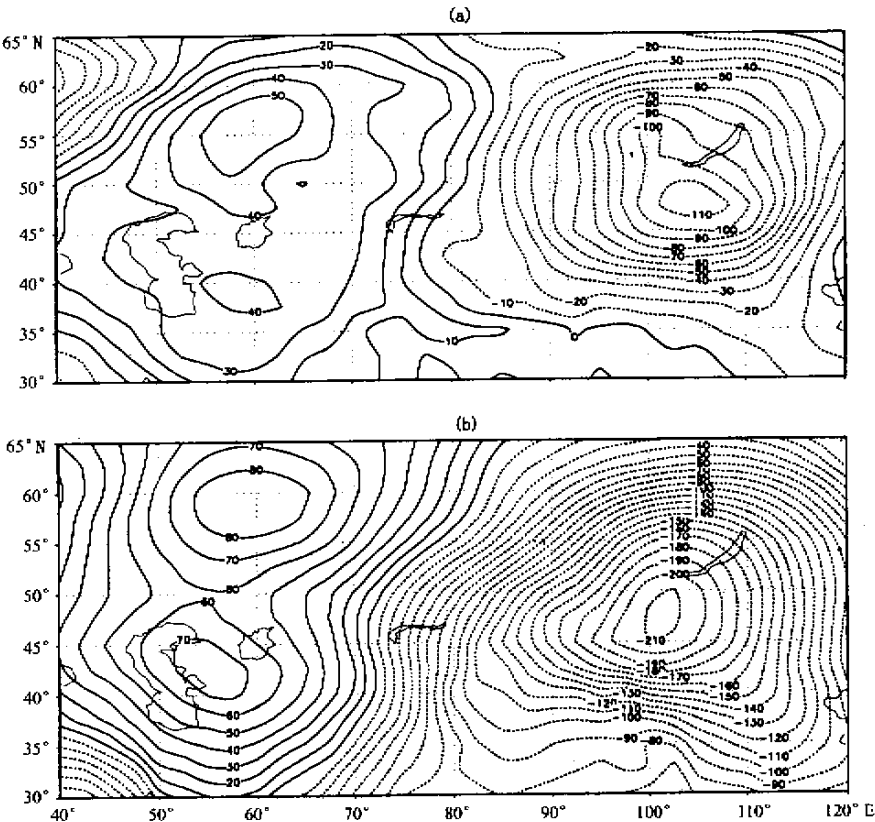


图 1 合成的位势高度距平(gpm)场
(a) 600 hPa, (b) 200 hPa

Fig. 1 Composite field of geopotential height anomaly (gpm) at 600 hPa (a) and 200 hPa (b)

的气压梯度,平直的西北气流被破坏,环流的经向度加大,槽后的偏北气流引导北方冷空气南下,地面出现大范围大风。这种乌拉尔高脊和蒙古低槽的配置形势曾多次出现在沙尘暴过程中^[5~7],是一种典型的环流背景。

2.2 涡度场

这几次沙尘暴发生时,涡度场上都有明显表现。3月5日,600 hPa 相对涡度场上蒙古国境内为东西向长条形正涡度带,中国境内为对应的东西向负涡度带,长度达数千公里;200 hPa 上,蒙古国西部仍有正涡度中心。3月21日,600 hPa 上正涡度中心位于蒙古国东部,与高度距平涡旋中心对应。涡度0线从蒙古国西部至我国境内呈西北东南走向。我国内蒙古西部、甘肃西部至新疆为负涡度区。这种分布形势到200 hPa 仍然存在。4月8日,600 hPa 的正涡度中心位于蒙古国西部,与高度场的低值中心一致,同时与高度场的槽线对应的有一西偏南方向的正涡度带,伸向新疆西南部。它的南

边是一条负涡度带。200 hPa 也有类似的分布。4月29日,与600 hPa 高度场的低中心对应,蒙古国中部有一强的正涡度中心,其南边有负涡度带配合。200 hPa 上正涡度中心则偏西,在中蒙边境上。5月3日,600 hPa 正涡度区在蒙古国东部至我国华北,周围是负涡度区。涡度0线呈西北—东南向。200 hPa 上正涡度区在110°E 以东,负涡度区在其以西。

5次沙尘暴过程的涡度场与高度场对应的都较好,图2为合成的相对涡度场。由图可以看出,中蒙边境中部蒙古国一侧为正涡度区,中部的正涡度中心较强,与之对应的在我国境内则为一负涡度中心,其间形成一强涡度梯度带。从涡度的垂直分布可以看到,其垂直延伸可达200 hPa 以上,表明这是一个强大、深厚的系统。

2.3 散度场

3月5日,600 hPa 散度场上中蒙边境两侧均为大范围负散度,表明低层有辐合;而200 hPa 上

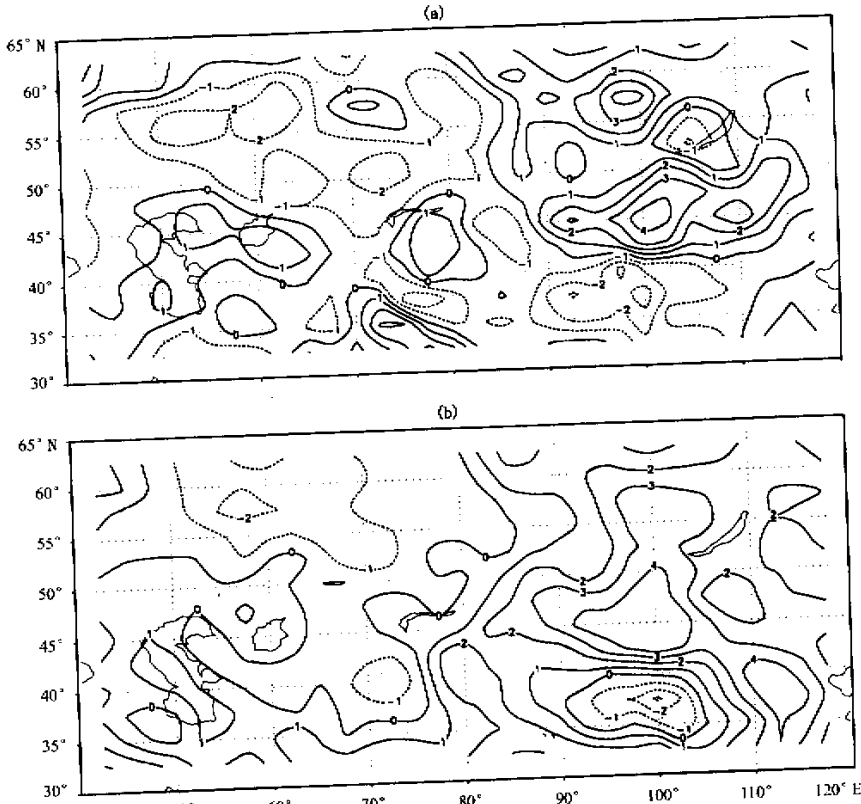


图2 合成的相对涡度($10^{-5} s^{-1}$)场
(a) 600 hPa, (b) 200 hPa

Fig. 2 Composite field of relative vorticity ($10^{-5} s^{-1}$) at 600 hPa (a) and 200 hPa (b)

沿中蒙边境为正散度,表明高层有辐散。3月21日,600 hPa在蒙古国中、东部有弱辐合与高度场的低值系统对应,我国的内蒙古西部为辐散区;200 hPa则相反,低值系统的中心区为辐散区,其以西和以南为辐合区。4月8日,600 hPa在蒙古国中部有辐合,周围有弱辐散区;200 hPa辐散区从蒙古国中部延伸至我国境内。4月29日,600 hPa在蒙古国中部至我国境内有大范围强辐合,200 hPa有一东北—西南向的辐散区。5月3日,600 hPa蒙古国东部为辐合区,散度0线大致沿国境线走向,我国境内为辐散区;200 hPa上东部国境线大部分为辐散区。

5次过程的共同点是,在高度场上低值系统的中心地区,低层是辐合区,高层是辐散区,周围则相反。这种低层辐合高层辐散的结构易于发生近地面大风和上升气流,有利于地面起沙和向上扩散形成沙尘暴。

图3为合成的散度场,蒙古国一侧有一辐合中心。由于散度受风向、风速切变的复杂影响,其分布较细微,所以合成后不如单次图清晰,强度也会削弱,但大致的位置还是能看出来的。

2.4 风速场

沙尘暴发生的最主要的动力条件是大风,所以风速场是沙尘暴研究的重要内容。由于地面风速场与600 hPa风速场的分布很一致,因此这里只分析600 hPa的情况。3月5日,600 hPa上新疆北部的偏北气流与青藏高原北部的偏西气流会合,在新疆北部、甘肃北部和内蒙古西北部,形成长达数千公里的 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上急流。对比涡度场可以看出,大风区发生在正、负涡度区的交接部位,也即强涡度梯度区。这表明急流两侧的强风速切变是形成强涡度梯度的原因。强风速通过动量下传导致地面大风,造成大范围沙尘暴发生的动力条件。3月21日,600 hPa上 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速中心位于中蒙边

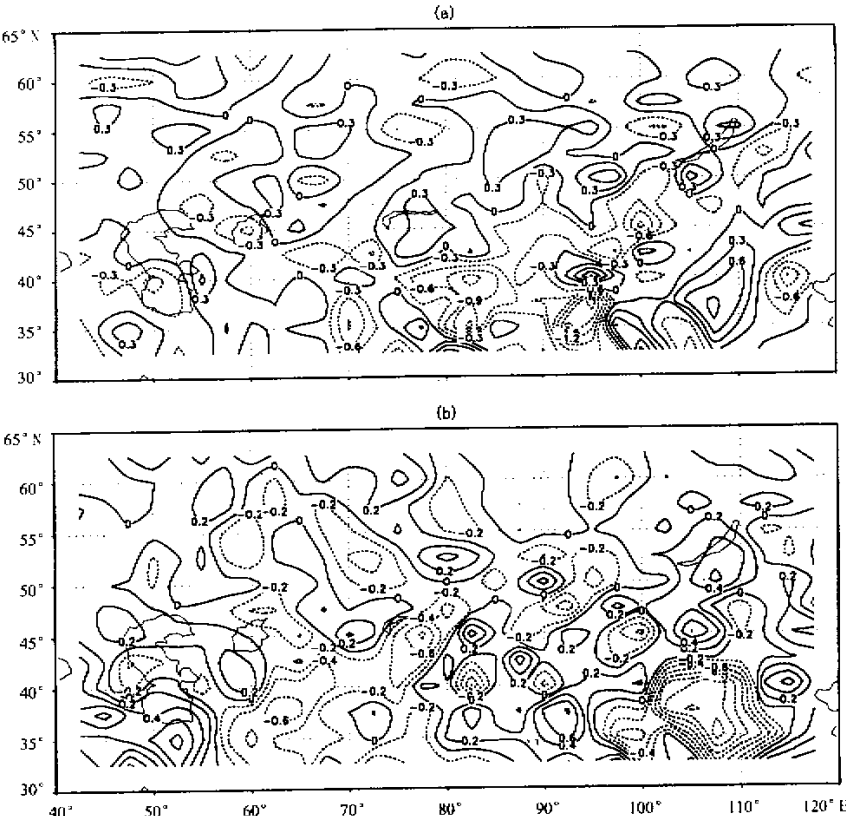


图3 合成的水平辐散(10^{-5} s^{-1})场
(a) 600 hPa,(b) 200 hPa

Fig. 3 Composite field of horizontal divergence(10^{-5} s^{-1}) at 600 hPa(a) and 200 hPa(b)

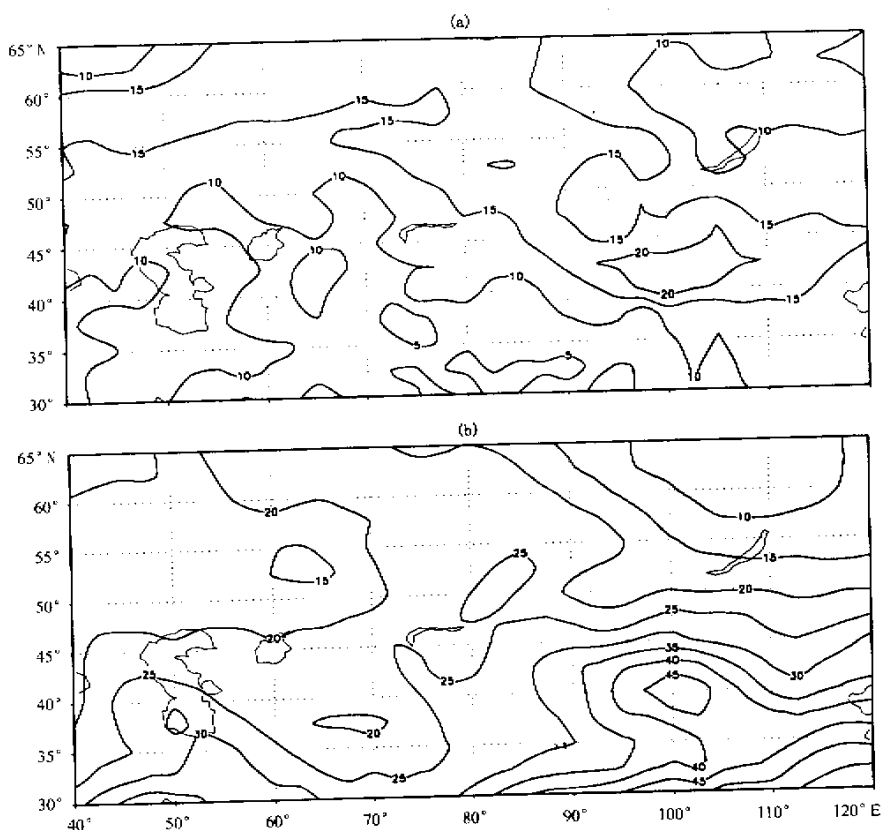


图 4 合成的风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)场

(a) 600 hPa, (b) 200 hPa

Fig. 4 Composite field of wind speed($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 600 hPa (a) and 200 hPa (b)

境中部偏东段,大风带呈西北—东南走向,与强涡度梯度带一致。4月8日,600 hPa上双涡旋的东部涡旋形成的大风区在我国东北中部地区,为东西向的条状。西部涡旋形成的大风区在中蒙边境中部偏西,并且向西南延伸至新疆西部,与涡度场上的强梯度带以及散度场上的辐合区一致。200 hPa上从内蒙古西部至新疆西部也有强风速区。4月29日,600 hPa大风中心在中蒙边境中部偏西,与强涡度梯度和辐合区一致,200 hPa有强风速中心配合。5月3日,600 hPa大风区在蒙古国中部至中蒙边境,呈西北—东南向,与涡度0线走向一致。200 hPa大风中心偏南。

5次沙尘暴过程中大风区与强涡度梯度区都很一致。图4为合成的风速场。由图可以看到,中蒙边境中段有 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的大风区,与涡度场上的强梯度带一致。这一共同特点表明,强风速切变产生的切变涡度可使正、负涡度区增强,而涡度变化又加深了高度场上的低值系统,继而使风场进一步增强。风场、涡度场、高度场之间的协调互动是大范围大风形成的动力特征。

3 结论

综上所述,2001年春季我国北方沙尘暴天气的环流动力结构有以下几点主要特征:

(1) 高度场上蒙古国有深厚的低值系统,乌拉尔地区有高脊,其间的强气压梯度是沙尘暴的动力源。

(2) 低值系统有正涡度中心支持,外围是负涡度区,其间有强涡度梯度带。

(3) 低值中心伴随有低层辐合高层辐散的垂直结构,易于发生近地面大风和上升气流,有利于地面起沙上扬,形成沙尘暴。

(4) 大风区与强涡度梯度带一致,强风速切变形成的涡度输送有利于加强低值系统,进而增强风场。

参考文献

- [1] 叶笃正,丑纪范. 关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521
- [2] 中国气象局. 2001年度气候特征及主要气候事件[N]. 科学时

报, 2002, 总第 2510 期

[3] 朱福康, 江吉喜, 郑新江等. 沙尘暴天气研究现状和未来[J]. 气象科技, 1999, (4): 1 - 8

[4] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“ 4. 22 ”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26 - 35

[5] 许宝玉, 钱正安, 焦彦军. 西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析与预报[M]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 44 - 51

[6] 王式功, 杨德保, 孟梅芝等. 甘肃河西“ 5. 5 ”黑风天气系统结构特征及其成因分析[M]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 62 - 64

[7] 赵光平, 王凡, 杨勤. 宁夏区域特强沙尘暴天气成因及其预报方法研究[M]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 52 - 58

[8] 杨东贞, 纪湘明, 徐小斌等. 一次黄沙天气过程的分析[J]. 气象学报, 1991, 49(3): 334 - 342

[9] 江吉喜. 1993 年 5 月 5 日甘肃等地特大沙尘暴成因分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(2): 177 - 184

[10] 刘景涛, 杨耀芳, 李远锦等. 中国西北地区 1993 年 5 月 5 日黑风暴的机理探讨[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 371 - 376

[11] 张小玲, 程麟生. “ 93. 5 ”黑风暴期间中尺度涡旋发生发展的涡源诊断[J]. 兰州大学学报, 1997, 44(4): 123 - 131

[12] McTainsh G H. Climatic controls upon dust storm occurrence in eastern Australia[J]. J Arid Environments, 1998, 457 - 466

[13] 张宁, 倾继祖, 倪童等. 930505 特大沙尘暴沙尘在甘肃沉降状况研究[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 46 - 51

[14] 郑新江, 徐建芬, 罗敬宁等. 1998 年 4 月 14 - 15 日强沙尘暴过程分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 180 - 185

[15] Kalnay E, M Kanamitsu, R Kistler et al. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77 : 437 - 471

Circulation Dynamical Structure in Course of Dust Storm Occurrence
in North China in Spring of 2001

WANG Ke-li¹, JIANG Hao¹, WU Hong²

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China ; 2. Lanzhou Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China)

Abstract : The fields of geopotential height, vorticity, divergence and wind speed as the circulation dynamical structure in course of the dust storm occurrence in north China in spring of 2001 are analyzed based on the NCEP/NCAR data. The results show that there are some similar circulation dynamical structure features in strong stage of the dust storms. There is a deep low-pressure system over Mongolia and a well-developed high-pressure ridge system over Ural, and a strong pressure gradient between the both. It is the dynamical source driving dust. The low-pressure system is supported by positive center of vorticity, the minus vorticity area around it and strong gradient zone between both. There is a vertical structure with convergence at lower-level and divergence at upper-level in the center of system, it is favorable for occurring strong wind near ground and rising air stream which raise dust into the dust storm. The strong wind region is consistent with the strong vorticity gradient zone. The vorticity transfer made by the strong wind shear strengthens the low-pressure system and then enhances the wind speed further.

Key words : Dust storm ; Dynamical structure ; Geopotential height ; Vorticity ; Divergence ; Wind speed