

2001 年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析

王可丽¹, 江灝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 年春季发生在我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

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

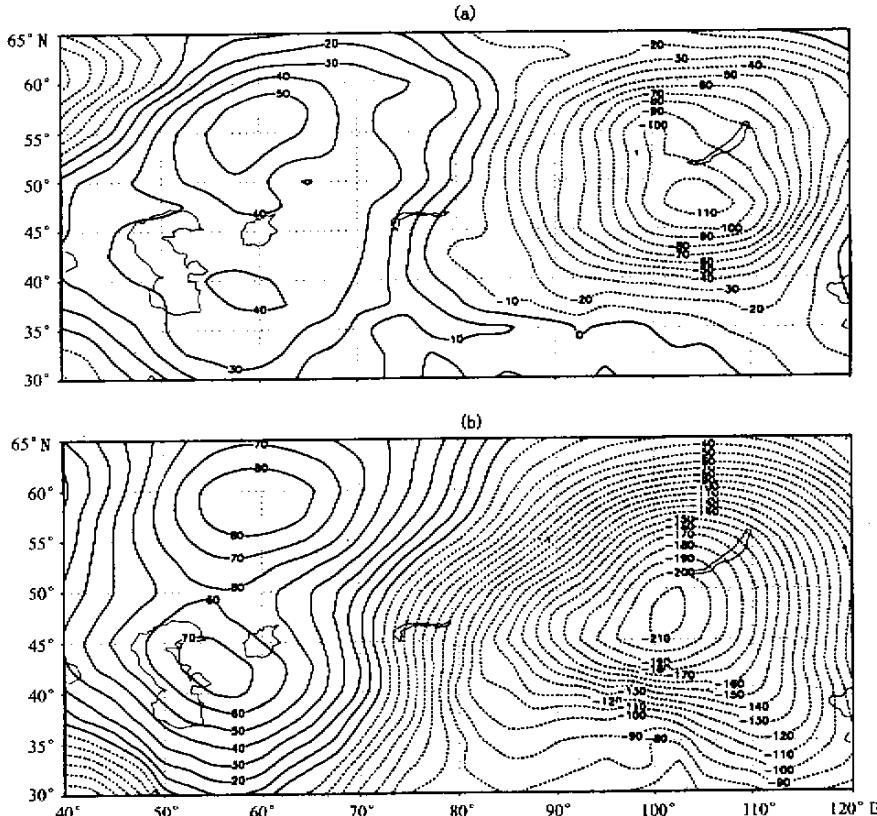


图 1 合成的位势高度距平(gpm)场

(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

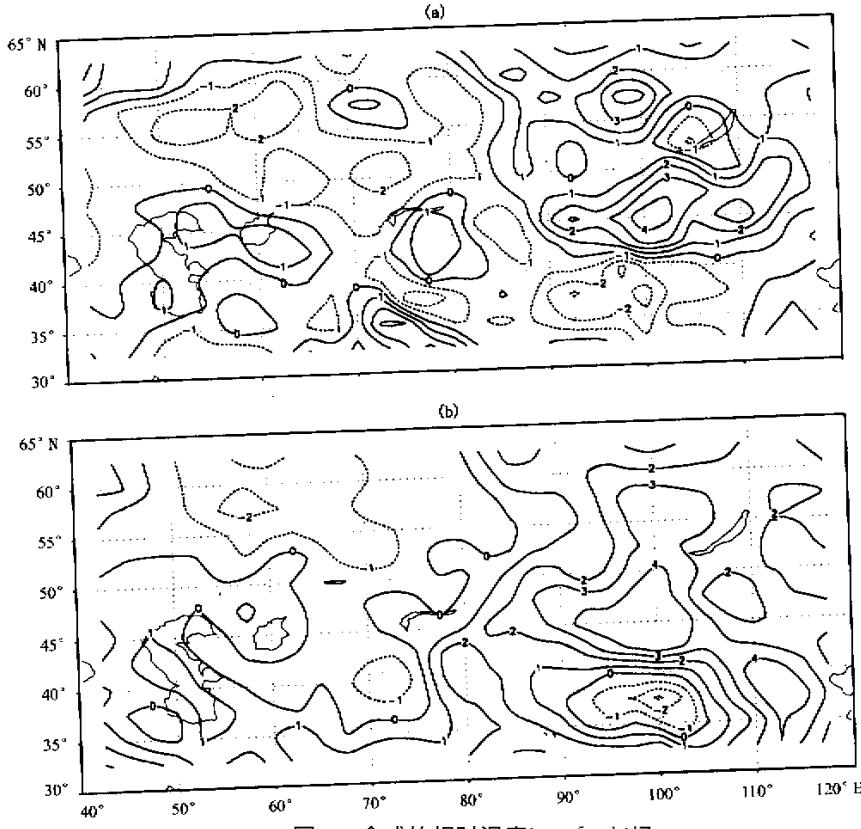


图2 合成的相对涡度(10^{-5} s^{-1})场

(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

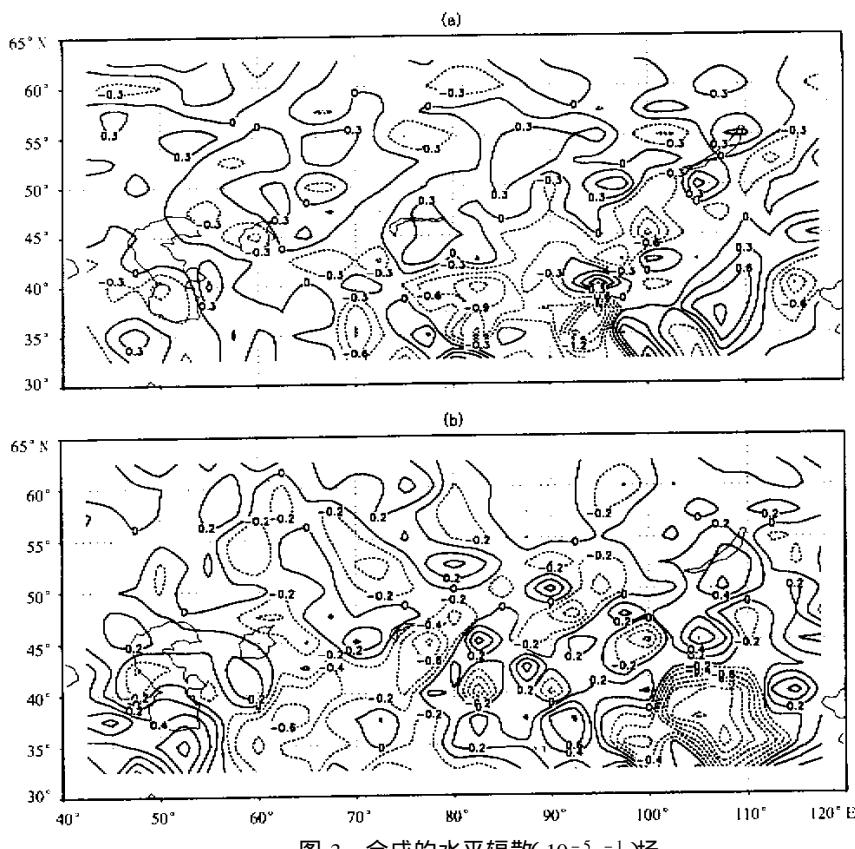
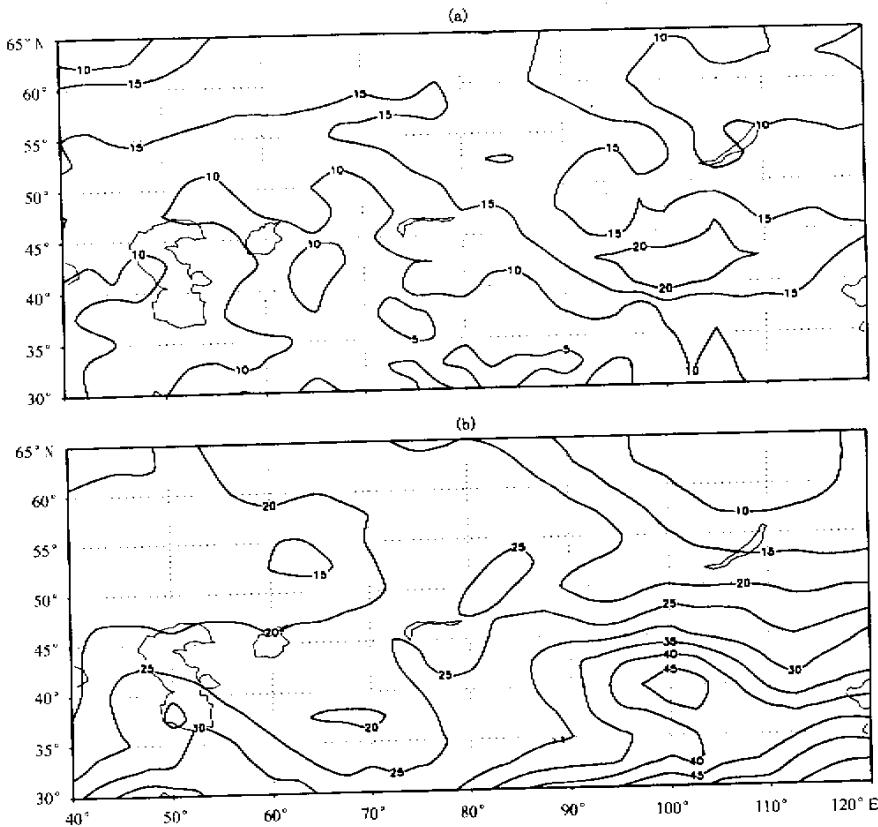


图3 合成的水平辐散(10^{-5} s^{-1})场

(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。

万方数据

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