

不同动力热力条件下蒙古气旋引发 沙尘天气过程的对比分析

赵琳娜¹ 屠妮妮² 矫梅燕^{1,3,4}

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 通过分析不同环流背景下蒙古气旋引发的两次沙尘天气过程发现, 大尺度环流形势 500 hPa 上的冷空气和冷涡主体的位置不同, 造成地面蒙古气旋的强度和气旋的生命周期也有所不同; 强的斜压大气有利于蒙古气旋的发展, 斜压大气中的温度平流和涡度平流的输送促进了气旋的快速发展, 伴随着地面温、压、风等气象要素的急剧变化, 产生强沙尘天气过程; 大气行星边界层稳定度的理查孙数 (Ri) 有可能较好地描述沙尘天气过程的强度, 强的沙尘天气过程中, Ri 小于 1 并持续较长时间, 有利于动力乱流发展; 弱的沙尘天气过程中, 只有短时出现负 Ri 。因此, Ri 的强度以及持续时间的长短可以作为沙尘天气预报中的一个参考的预报因子。

关键词 环流特征 蒙古气旋 沙尘 理查孙数

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0329-10 **中图分类号** P445+.4 **文献标识码** A

Comparison of Two Types Duststorms Weather on Different Dynamical and Thermal Background Condition

ZHAO Lin-Na¹, TU Ni-Ni², and JIAO Mei-Yan^{1,3,4}

1 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Two types dust storm process (during 6—8 April 2002 and 13—15 April 2003) on different dynamical and thermal background condition were analyzed based on the circulation background, weather and dynamic and thermodynamic factors. The results showing that different intensity and duration of cyclone would be different location and intensity of cold air mass. The strong baroclinicity is signification for development cyclone. The advection of thermal and vorticity are important factors for cyclone rapid development with the drastical variety of temperature, pressure, wind and dust storm. The Richardson number (Ri) may be indicative factor for dust intensity and duration. The Richardson number less than 1 and keeping duration is propitious to the development of turbulence in planetary boundary layer (PBL).

收稿日期 2007-03-15 收到, 2007-04-10 收到修定稿

资助项目 国家财政部资助项目 Y0101 和科技部科研院所社会公益研究专项 2004DIB1J031

作者简介 赵琳娜, 女, 1966 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事沙尘暴天气机理、预测及数值模式研究。

E-mail: zhaoln@cma.gov.cn

Key words circulation characteristics, Mongolian cyclone, dust weather, Richardson number

1 引言

沙尘暴的产生通常要满足以下 3 个条件:丰富的沙尘源、强风和不稳定的大气层结。强风是沙尘暴产生的动力,沙源是物质基础,不稳定的热力条件更利于风力加大、对流发展。而蒙古气旋的活动范围正是东亚地区几大沙漠、沙地、戈壁之所在,这里有丰富的沙源,且由于春季北方地面升温迅速、大气干燥,使得地表土质疏松,起沙要求的临界摩擦速度降低,因此,只要在气旋发展过程中配合有利的物理条件就可能引发沙尘暴。目前,对于蒙古气旋已有一些研究的结果表明,造成不同强度沙尘天气的原因比较复杂。陈豫英和赵光平^[1]指出环流形势、冷空气强度等差异的不同可引发强度不同的沙尘天气。申红喜等^[2]和矫梅燕等^[3]指出沙尘天气的强弱很大程度上与冷空气的强弱有关。刘景涛等^[4]分析了 2001 年 4 月 6~7 日中国北方的强沙尘暴过程,指出蒙古气旋的爆发性发展和冷锋后大风是起沙的主要动力。吕梅和濮江平^[5]分析了 2000 年 4 月 4~6 日两次沙尘暴过程,结果表明这两次过程是蒙古气旋由蒙古地区进入东北后强烈发展,在华北、东北、内蒙古南部地区形成大范围的强西北风所致。薛建军等^[6]分析 2002 年 3 月 18~22 日强沙尘暴过程后指出:由于冷高压和蒙古气旋均很强,二者之间气压梯度强,蒙古气旋停滞少动形成此次强沙尘暴过程。刘景涛等^[7]对影响中国北方特强沙尘暴的环流系统进行分型研究,将形成特强沙尘暴的天气系统归纳概括为纯强干冷锋型、蒙古气旋与干冷锋混合型、蒙古冷高压南部倒槽型和干飑线与冷锋混合型 4 种类型,其中,第二种类型对我国华北及东北地区影响最大,说明不同的天气系统造成的沙尘天气强度不同。但是我们也发现,同样的影响系统造成的沙尘天气强度也会存在差异。例如:2002 年 4 月 5~8 日是强蒙古气旋引发的强沙尘暴过程;2003 年 4 月 13~15 日是强蒙古气旋引发的弱沙尘天气过程(扬沙天气)。本文选取这两次过程进行对比,从蒙古气旋的动力特征、沙尘天气发生地的局地气象条件的

差异中找出造成沙尘天气强度差异的原因。

2 蒙古气旋引发的沙尘天气概况

2.1 两次沙尘天气的概况

2002 年 4 月 5~8 日受蒙古气旋和冷锋的影响,我国出现一次持续时间长、强度大和影响范围广的强沙尘暴过程(以下简称“过程一”),其影响范围包括我国青海西北部、内蒙古中东部偏南地区、河北北部、辽宁中部,强沙尘暴区集中在内蒙古中东部,6 日和 7 日沙尘暴强度最强。周自江和章国材^[8]统计本次过程中强沙尘暴站数达 11 个,中等强度沙尘暴站数 7 个,沙尘暴总站数为 35 个。从图 1a 中可以看出,6 日 20 时(北京时间,下同)蒙古气旋位于我国北部,气旋中心的西南方即内蒙古中东部(包括二连浩特、朱日和和巴林左旗等站)能见度小于 500 m,达到强沙尘暴级别,低能见度区的风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,强风速中心位于内蒙古阿巴嘎旗附近,风速超过了 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,总体来说大风区与沙尘区域相配合。2003 年 4 月 13~15 日影响系统也为蒙古气旋和冷锋,在我国仅造成扬沙天气,只在内蒙古中东部的个别站有沙尘暴(以下简称“过程二”)。14 日 14 时和 17 时是该过程沙尘天气最强的时刻,但此时蒙古气旋仍处在发展阶段。根据逐日 8 个时次地面天气图统计,14 时在我国共有 9 个站出现扬沙天气,17 时达到扬沙天气的有 11 个站,其中仅有一个站是沙尘暴天气。扬沙天气主要集中在内蒙古中东部和辽宁、吉林西部,且每个站沙尘天气持续时间短,均不超过 12 h。从图 1b 中可以看出,14 日 14 时气旋中心位于我国内蒙古呼伦贝尔附近,能见度较高,仅在苏尼特左旗和辽宁存在能见度的相对低值区,对应两个较大风速中心,风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。14 日 20 时蒙古气旋发展到最强,但此时仅有 5 个站出现扬沙天气。

2.2 大尺度环流特征分析

对于过程一,2002 年 4 月东亚地区主要为两槽一脊型,高空槽呈东北西南走向,槽前(后)暖(冷)平流强盛。中纬度西风气流由纬向型调整为经向型,高纬极涡呈单极型且重心偏东强度

较强，极涡的偏心结构使极锋锋区位置相对偏南，中纬度短波槽脊活动频繁；低纬南支槽偏强，经向度大有利于西南暖湿气流输送。2002年4月6日02时在(48°N, 107°E)处有冷涡形成，强度为5 240 gpm(图略)。此时，乌拉尔山的高压脊强盛，冷空气沿脊前西北气流向中纬地区堆积，使得脊前槽后等温线等高线密集，槽前高压脊也相当强盛，极涡中心位于东半球，来源于极地的冷空气沿着冷槽后西北气流南下堆积在蒙古国。

到6日14时(图2a)冷涡东移，强度维持在5 240 gpm，高空槽前疏散槽后汇合，中纬度西风槽与南支槽汇合，且温度槽赶上高度槽，槽前的暖脊向北伸展到60°N以北。

对过程二而言，2003年4月500 hPa极涡为偶极型，东亚北部的极涡中心呈纬向分布，中纬度东亚地区为两槽两脊型，副高稳定少动位于25°N以南。14日14时500 hPa东亚地区表现为弱槽脊(图2b)，在巴尔喀什湖以北为一横槽，冷

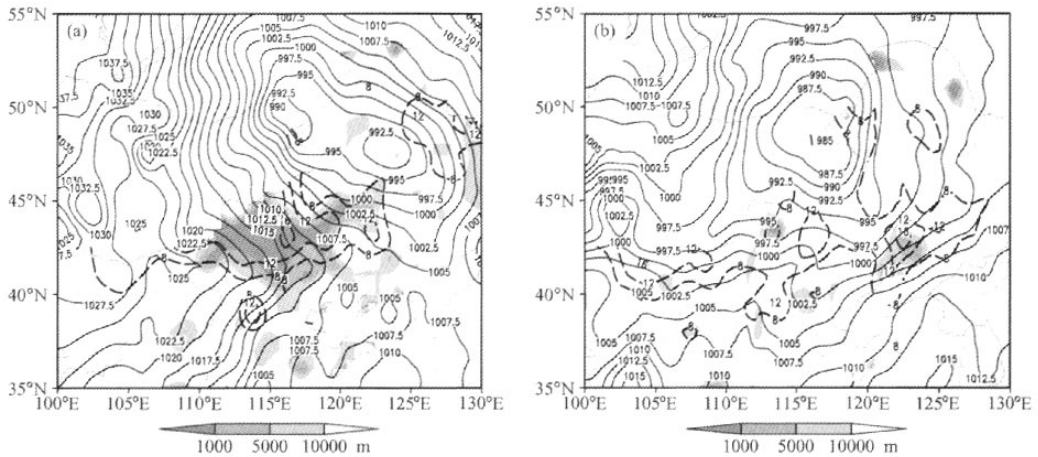


图1 海平面气压(实线, hPa)和我国境内各测站最小能见度(阴影)、地面等风速线(虚线, 大于 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布; (a) 2002年4月6日20时; (b) 2003年4月14日14时

Fig. 1 Sea level pressure (solid line, in hPa), minimum visibility (shaded, in m), surface isotach (dashed lines, wind speed more than $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) for the observation stations in China; (a) 2000 LST 06 Apr 2002; (b) 1400 LST 14 Apr 2003

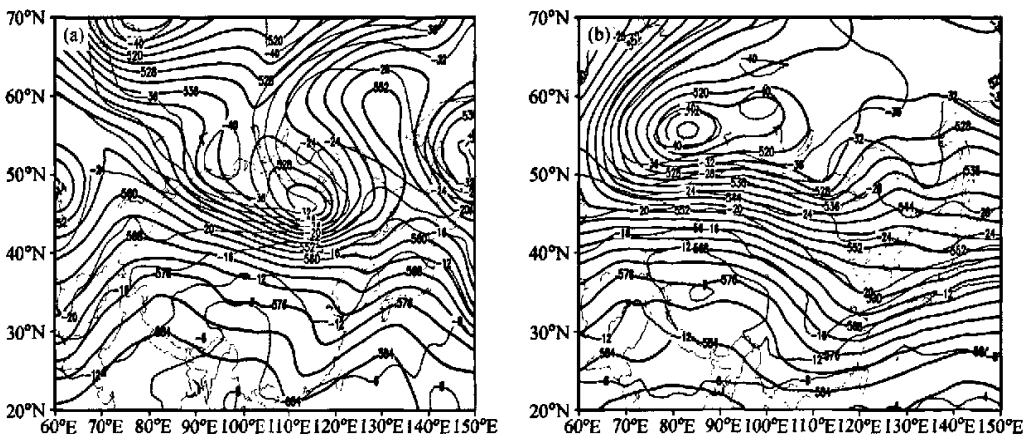


图2 500 hPa高度场(实线, 单位: 10 gpm)和温度场(虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$); (a) 2002年4月6日14时; (b) 2003年4月14日14时
Fig. 2 The geopotential height (solid lines, units: 10 gpm) and temperature (dashed lines, units: $^{\circ}\text{C}$) at 500 hPa (a) 1400 LST 06 Apr 2002; (b) 1400 LST 14 Apr 2003

空气主体位于 80°E 横槽处, 强度为 $5\ 080\ \text{gpm}$, 在地面气旋的上空为浅槽。14 日 20 时在 (50°N , 115°E) 生成高空冷涡 (图略), 强度为 $5\ 240\ \text{gpm}$, 高空冷涡性质与过程一不同, 这里是小股冷空气从 80°E 主体中东移, 槽前是弱脊, 中纬度气流较为平直, 槽后冷平流, 槽前强暖平流。从等高线的分布来看, 等高线密集带集中在 80°E , 西风槽附近等高线相对稀疏, 槽移速快。

比较这两次过程的环流形势可见: 在气旋的发展阶段, 西风槽从极涡中分裂, 位于我国南部的槽与中纬度西风槽形成阶梯槽, 有利于槽向南加深, 引导冷空气扩散南下; 气旋减弱阶段西风槽与南支槽合并。二者区别表现在, 冷空气主体位置不同, 冷涡西南方的等高线梯度也不同, 反映大气斜压性强度不同。过程一中不断地有来自极地冷空气南下补充, 在蒙古地区堆积促使气旋得以维持较长的时间; 过程二中来自极地的冷空气堆积在 80°E 的冷涡中, 西风低槽引导小股冷空气扩散南下。

3 蒙古气旋与沙尘天气特征

3.1 蒙古气旋的发展与沙尘天气过程

在过程一中, 蒙古气旋初生于蒙古国东部, 按文献 [9] 的分类方法, 属东部型。该系统深厚, 甚至在 $200\ \text{hPa}$ 高空也有闭合环流, 锋区位置偏北。高空冷涡及冷涡后部的冷空气东移引导蒙古气旋东移并快速发展, 由于冷空气强, 地面冷高压与蒙古气旋之间形成了较强的气压梯度, 强沙尘暴天气出现在气旋后部强气压梯度区内。4 日 14 时在蒙古国中部有低压生成, 中心气压 $1\ 000\ \text{hPa}$, 冷锋位于低压后部, 介于乌拉尔山的地面冷高压与蒙古气旋之间。气旋缓慢移动, 气旋后部的冷锋与冷高压也相应东移, 中纬度气压场变为西高东低, 气压梯度增大, 风力 5 级左右、局地最大风力 8 级以上。6 日 14 时气旋强度最强 (图 1a), 中心气压 $988\ \text{hPa}$, 气旋中心附近最大 24 小时变压为 $-15\ \text{hPa}$, 气旋前部 24 h 变温为 $-10\ ^{\circ}\text{C}$, 气旋 24 h 东移 7 个经距, 气旋后部的西北风将高纬冷空气向蒙古东部和我国内蒙古中部输送, 且地面风速加大, 风力达到 5~7 级, 水平能见度下降到 $100\ \text{m}$, 造成沙尘暴范围扩大到我国

内蒙古中、东部, 强度达到强沙尘暴。其中朱日和、二连浩特和多伦等站的沙尘天气持续到 8 日 08 时, 最大风速均超过 $16\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。朝鲜半岛的东北方虽然也存在大风区, 但为从海上吹来的东南大风, 与西北来的冷空气相遇造成降水。之后气旋有所减弱, 东移进入我国东北地区, 此时沙尘暴强度维持并进一步扩大到内蒙古锡林郭勒盟东部, 又在河北北部、北京、辽宁西部相继出现了沙尘天气。8 日 02 时, 沙尘天气强度开始减弱, 主要以浮尘扬沙天气为主, 各地能见度明显增加且风速减小。到 8 日 08 时横扫我国华北、东北的强沙尘暴过程告停。7 日 08 时以前地面气旋始终位于 $500\ \text{hPa}$ 高空槽前, 这里既是热力减压区又是动力减压区, 有利于地面气旋的发生发展; 7 日 08 时地面气旋位于高空槽后, 气旋位于西北风控制区。

过程二中, 气旋初生于蒙古国中部, 锋区位置偏北。由于高空冷空气主体稳定偏西, 因此蒙古气旋东移过程中其后部的冷高压偏西且稳定少动, 未在蒙古气旋后部形成强烈的气压梯度, 沙尘天气主要出现在冷锋前部暖区内。13 日 14 时在蒙古国中部出现闭合环流, 地面气压中心强度为 $995\ \text{hPa}$, 气旋北部为强冷中心。气旋生成后移动迅速, 24 h 东移了 13 个经距, 气旋发展以及东移速度都快于过程一。14 日 14 时气旋位于内蒙古的呼伦湖附近、强度为 $985\ \text{hPa}$ (图 1b), 气旋中心附近最大为 ΔP_{24} 为 $-17.5\ \text{hPa}$, 与过程一不同的是在气旋前部为正变温, 气旋南部区域有 5~6 级大风, 局地风力超过 7 级, 风速强度弱于过程一; 由地面天气图还可以看出位于欧洲的高压没有随锋面气旋东移, 此时在我国内蒙古的东部地区和辽宁西部出现扬沙天气。14 日 14 时和 17 时扬沙天气最强、出现扬沙天气的测站最多, 在气旋南部区域的苏尼特左旗 (43.86°N , 113.63°E) 有沙尘暴天气出现, 风力达 5~7 级, 能见度下降到 $1\ \text{km}$; 在冷锋前暖锋后的吉林和辽宁西部地区出现扬沙天气, 究其原因可能是在 32°N 存在一高压, 这一区域内气压梯度大使得局地风速增大。14 日 20 时, 气旋进入锢囚阶段位于满洲里以北, 移动缓慢, 地面中心气压为 $982.5\ \text{hPa}$; 由于高空冷空气主体的作用使得在蒙古国西部 (47°N , 93°E) 有新低压生成, 东亚地区 $40\sim 60^{\circ}\text{N}$ 范围内是低压

控制区,气压梯度小,气旋中心风力4~6级;内蒙古中东部风力3~5级,该区域沙尘天气过程结束;吉林和辽宁西部风力5~6级,这一地区维持扬沙天气。15日14时开始蒙古西部的气旋迅速发展,导致东部的蒙古气旋迅速减弱消亡,因而到17时本次扬沙天气过程结束。气旋发生发展阶段始终位于500 hPa高空槽前,15日20时地面气旋与高空槽处在同一经纬度上气旋发展停止。总的来说这次过程历时短、强度弱、影响范围小。

上述分析表明:两次过程的共同特点是:主要的影响系统都是蒙古气旋,在气旋发展过程中 ΔP_{24} 都很大。它们的差异表现在以下几个方面:1)与蒙古气旋相伴的沙尘区出现在气旋发展气压梯度最大处,可能出现在冷锋后部冷区内(过程一)也可能出现在冷锋前部的暖区内(过程二)。2)气旋的生命史不同造成沙尘天气不同。过程一中蒙古气旋的发生发展持续6天,伴随沙尘天气持续时间长、范围大;过程二中蒙古气旋的发生发展消亡历时3天伴随沙尘天气范围小持续时间短,过程二的蒙古气旋移速较快。3)过程一中气旋东移同时地面冷高压随之东移,致使二者之间存在强烈的气压梯度;过程二蒙古气旋东移过程中,有新的蒙古气旋生成于蒙古国,导致前一蒙古气旋后部的气压梯度小,进而使得过程二的地面风速比过程一要小。

3.2 温度平流与涡度平流特征

研究表明^[7]在引发沙尘天气的蒙古气旋快速发展的因子中,对流层中下层的温度平流有重要的作用^[10]。为了进一步了解蒙古气旋动力热力特征,分析了通过气旋中心的温度平流和涡度平流的垂直剖面。过程一中冷暖平流和涡度平流都很强(图3a),暖平流位于110°E(500 hPa高空槽附近)以东,最大值在300 hPa达 $7 \times 10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;槽后为宽广的冷平流区,最大值在850 hPa达 $-6 \times 10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$,其上为暖平流区,反映大气斜压性较强,有利于气压系统的发展。与温度平流的作用相比,正涡度平流主要集中在槽前300 hPa附近(图3b),最大值为 $12 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;负涡度平流最大值位于750 hPa附近强度为 $-12 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,但负涡度平流与冷平流相对应有利于地面气旋后部冷高压的发展,从而导致冷高压与蒙古气旋间的气压梯度加大,这有利于大风

和沙尘天气的发展维持。在过程二中温度平流与涡度平流的配置与过程一不同,温度、涡度中心都集中在对流层高层,槽前暖平流强盛(图3c),最大值在300 hPa达 $9 \times 10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$;而槽后冷平流相对比较弱,最大值在350 hPa达 $-7 \times 10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 。正涡度平流最大值在300 hPa附近(图3d),强度为 $24 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;负涡度平流最大值位于300 hPa附近,强度为 $-15 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,从垂直分布特征来看斜压性较弱,不利于地面气旋发展,因此气旋较快减弱、消失。由此可见,过程二的温度平流和涡度平流强度都大于过程一,但在过程一中暖平流和正涡度平流主要位于对流层中高层,而冷平流和负涡度平流集中在较低的层次,这反映过程一不仅是一次强斜压过程,同时槽后的负涡度平流亦有利于地面冷高压的发展;过程二中冷暖平流都由地面延伸到200 hPa高空,且冷平流主要集中在对流层中层,对流层内有正负涡度平流柱,但槽前的正涡度平流水平范围小于过程一,在高空槽后没有大范围强负涡度平流存在,不利于地面冷高压的发展,这使得地面气压梯度较小,风速也弱于过程一。

3.3 沙尘天气的单站气象要素特征

从单站气象要素的变化也可以看出气旋对局地气象条件的影响以及沙尘天气发生时各要素的变化特征。图4是两次过程单站每3 h地面气象要素随时间变化图,选取过程一的两连浩特和过程二的阜新两站进行比较。由图可见,过程一中二连浩特站各物理量变化显著。5日20时气压降到最低,之后气压回升,温度急剧下降,能见度降低到0.1 km,风向由西南风转变为西北风同时风速达 $18 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;7日23时能见度开始回升,风速减弱。过程二中阜新站于14日08时能见度下降,到15日08时能见度维持在8 km左右,能见度较好;15日14时蒙古气旋位于阜新站正北,整个过程海平面气压下降近10 hPa,没有出现过程一中气压回升的现象,反映蒙古气旋后部没有高压活动,气压梯度小;在扬沙过程中气温升高,风向转变,风速增大到 $11 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于该站主要处在气旋东南部所以风速相对过程一小并以南风为主。过程二中阜新站中各物理量变化平缓,地面温度无急剧下降过程,且整个过程的风速明显小于过程一,强风持续时间短,不利于大范围的

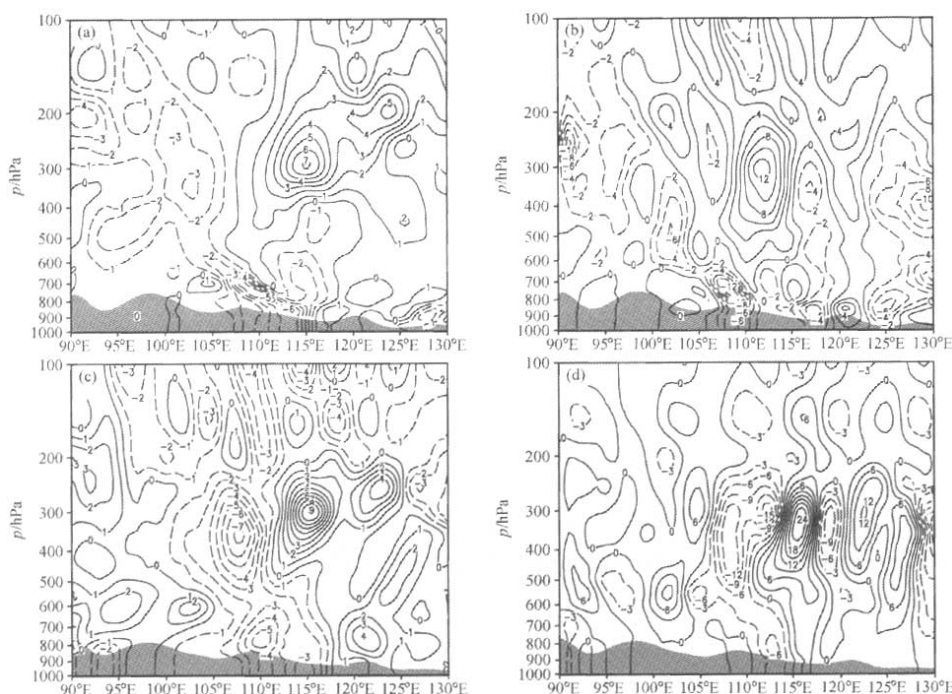


图 3 2002 年 4 月 6 日 08 时沿 48°N 的 (a) 温度平流 (单位: $10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (b) 涡度平流 (单位: $10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) 剖面以及 2003 年 4 月 14 日 14 时沿 49°N 的 (c) 温度平流 (单位: $10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (d) 涡度平流 (单位: $10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) 剖面。阴影为地形

Fig. 3 Vertical cross section of thermal advection (a, c, in $10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) and vorticity advection (b, d, in $10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) along 48°N at 0800 LST 06 Apr 2002 (a, b) and along 49°N at 0800 LST 14 Apr 2003 (c, d), respectively. The shaded represents the topographic height

起沙。这也从一个侧面反映过程二不利于大范围出现沙尘暴天气。张平等^[11]指出风是影响沙尘天气发生的最主要的气象要素,从单站要素分布特点来看,过程二中风速小,不利于激发沙尘暴天气。

3.4 变压场特征分析

分析 3 h 变压可以了解气旋强度的变化。对于过程一从气旋初生到 2002 年 4 月 5 日 17 时,气旋中心始终为负变压区,并在 5 日 14 时气压下降超过 4 hPa,表明它处于气旋强烈发展的阶段,5 日 20 时开始气旋位于两变压零线之间的正变压区域,气旋发展减弱。3 h 以后气旋中心位于变压零线上,这时气旋并未填塞;6 日 02 时气旋中心又位于负变压区内,气旋加深发展并持续到 6 日 11 时,6 日 14 时气旋中心再次位于变压零线,此

时气旋发展到最强盛的阶段,开始填塞;7 日 02 时后气压显著回升,之后气旋中心气压又经历了幅度很小的增减过程,但由于减压幅度太小,所以气旋总的趋势是减弱的。2003 年 4 月气旋生成后位于负变压区,14 日 14 时,正负变压中心相差 7 hPa,局地风速达 5~7 级,20 时气旋处在变压零线,15 日 08 时开始气旋中心位于正变压区,气旋减弱。

从 3 h 变压线与气旋中心位置可以看出气旋强度变化趋势,根据上面的分析我们可以发现变压零线与气旋强度有一定关系,即变压零线落后于系统中心较远,则系统加强;当变压零线位于系统中心之前,则系统减弱;在变压零线接近系统中心则强度无变化,预示气旋可能填塞。此外 3 h 变压也可在一定程度上反映地面大风的情况,

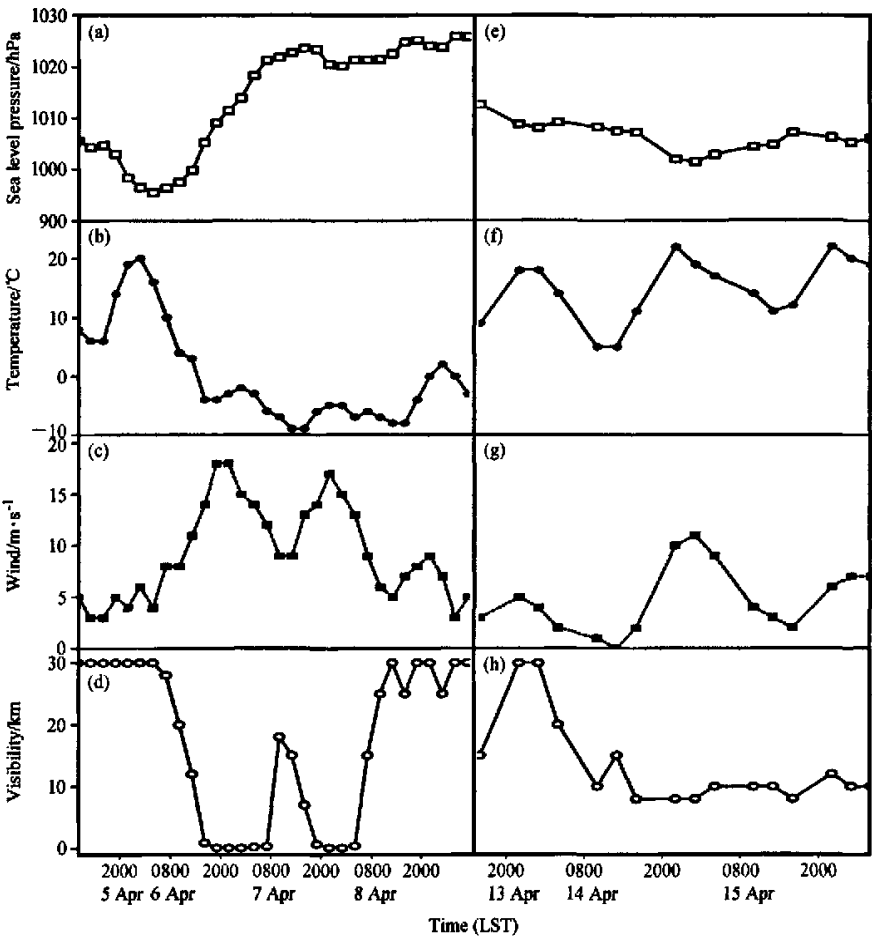


图4 单站地面气象要素随时间的演变：(a) ~ (d) 2002年4月5~8日二连浩特站；(e) ~ (h) 2003年4月13~15日阜新站。(a)、(e) 海平面气压，(b)、(f) 温度，(c) (g) 风速，(d)、(h) 能见度

Fig. 4 The temporal evolution of meteorological elements at the Erenhot Station during 5 to 8 Apr 2002 (a~d) and the Fuxin Station during 13 to 15 Apr 2003 (e~h). (a), (e) Sea level pressure; (b), (f) temperature; (c), (g) wind; (d), (h) visibility

冷锋前后 3 h 变压正负中心的差值越大，则风力越强，大风区位于正变压中心附近变压梯度最大的地方。

4 沙尘天气动力场特征分析

沙尘暴常发生在冷空气活动过程中，并伴随强烈锋生，可以用起沙和扬沙两种机制来概括沙尘暴的产生。沙尘暴产生时大气边界层是极不稳定的（包括静力和动力不稳定），湍流发展旺盛。起沙过程表明边界层内可能有较强的风速垂直切变存在即动力不稳定，可用 $\partial V / \partial Z$ 表示；扬沙过程表明边界层可能存在浮力上升运动即静

力不稳定，可用 $\partial \theta / \partial Z$ 表示。将垂直动量锋生（即风速垂直切变加大）和垂直温度锋生（即大气层结趋于更加不稳定）结合起来考虑，就形成一个判定行星边界层稳定与否的一个重要参数，即 Richardson 数 (Ri)^[12]：

$$Ri = \frac{R_d \bar{p}}{\bar{p}} \left(\Delta T_p - \frac{R_d \bar{T}}{c_{pd}} \frac{\Delta p}{\bar{p}} \right) / (\Delta u_p^2 + \Delta v_p^2),$$

其中， R_d 是干空气比气体常数， Δp 为两层气压差， $\bar{p}$ 为两层平均气压， ΔT_p 为两层温度差， $\bar{T}$ 为两层平均温度， c_{pd} 为干空气的定压比热， Δu_p 和 Δv_p 为两等压面之间的风速分量差。 Ri 表示了静力稳定度与风速垂直切变的关系，既包括热力不稳定又包括由于垂直切变造成的动力不稳定。 Ri

为负值表示的是静力和动力不稳定气流,有利于湍流运动的发展,此种情况最有利于沙尘暴的产生,也有利于沙尘上扬到高空^[12~13]; $1 > Ri > 0$,则表示易有动力乱流发展; $Ri > 1$ 则表示不易有乱流发展。

由以上分析可知,大气层结不稳定、风的垂直切变强有利于对流的发展,也是大气边界层起沙和低层扬沙的主要动力机制。沙尘暴过程中大气的不稳定性主要表现在 700 hPa 以下,最为突出的是 850 hPa 以下^[14],因此我们分析了与沙尘暴有关的朱日和站(该站在过程一中有持续的强沙尘暴过程)和阜新站(该站是在过程二中冷锋前出现沙尘天气的站点)附近的 850 hPa Ri 和风切变的演变特征(见图 5)。

从过程一的 Ri 随时间的演变曲线(图 5a)发现,6 日 08 时 Ri 已下降到小于 1,当 Ri 突然减

小,说明湍流运动加强,这时朱日和站首先出现扬沙天气,从 6 日 08 时到 8 日 02 时 Ri 都小于 1,甚至在 7 日 14 时出现负值,8 日 08 时 Ri 回升对应地面无沙尘天气,但 3 h 以后 Ri 迅速减弱为负值对应地面有扬沙天气,从 8 日 20 时 Ri 开始回升,沙尘天气过程结束;在 Ri 绝对值较小的时段内,对应 850 hPa 风垂直切变明显变大,对流层低层冷空气势力强、地面强温压梯度引发地面强风,产生动力乱流,由此引发沙尘暴天气过程发生。过程二中 Ri 也存在弱波动(图 5b),尽管 Ri 小于 4 并在气旋的发展阶段甚至出现负值,但在 14 日以前未出现沙尘天气,14 日 14 时 Ri 下降且 850 hPa 风垂直切变开始迅速增大,此时伴有扬沙天气,与过程一不同。正是这些区别使得上述二次沙尘天气的强度不同。

过程一中沙尘暴天气阶段 Ri 与风垂直切变的

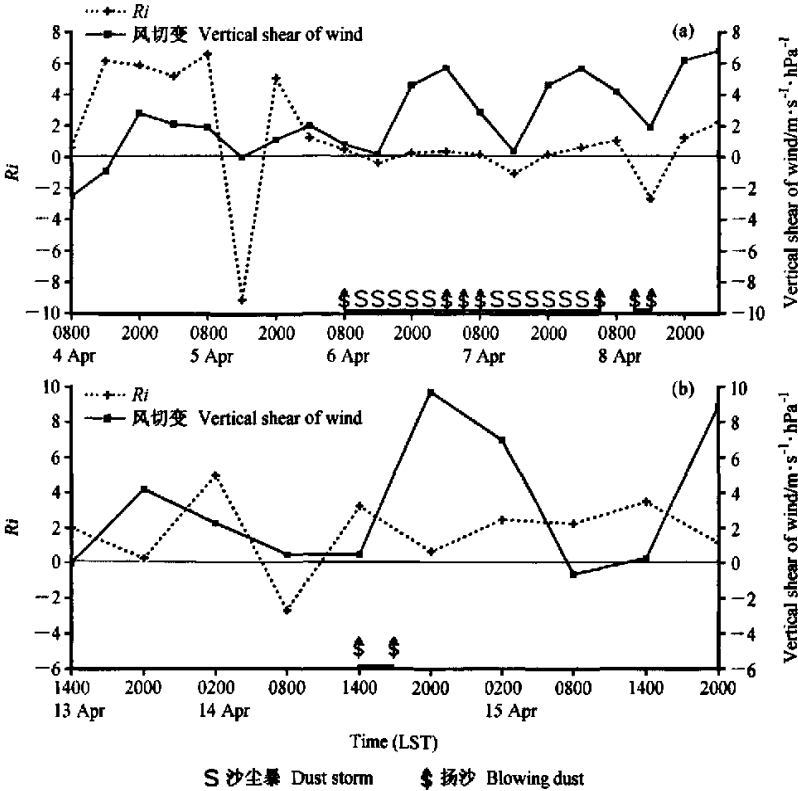


图 5 850~800 hPa Ri 和 850 hPa 风切变随时间的演变: (a) 2002 年 4 月 4 日 08 时~9 日 02 时朱日和站; (b) 2003 年 4 月 13 日 08 时~15 日 20 时阜新站

Fig. 5 The temporal evolution of Ri between 850 hPa and 800 hPa near surface station and wind shear at 850 hPa: (a) Zhurihe Station during 0800 LST 04 Apr to 0200 LST 08 Apr 2002; (b) Fuxin Station during 0800 LST 13 Apr to 2000 LST 15 Apr 2003

走势一致, Ri 减小对应风垂直切变减小, 从 6 日 06 时起 Ri 与风垂直切变同位相变化。过程二中的沙尘天气阶段风垂直切变大小与 Ri 相关性弱。通过比较发现, 以上两个物理量与沙尘暴天气有密切的对应关系, 在 Ri 下降并维持低值, 风垂直切变增大, 对流层低层为冷平流的条件下通常有沙尘天气现象的出现; 图 5a 说明低空有小的 Ri 值, 强风垂直切变, 大气的层结不稳定的条件下, 易激发沙尘暴的发生和向下游的传输。

5 小结

本文通过分析环流背景下两次由蒙古气旋引发的沙尘天气过程, 分析了与蒙古气旋系统相应的环流场及其动力热力场结构, 尤其是它们对沙尘天气发生发展的影响, 得到如下结果:

(1) 从大尺度环流形势看, 500 hPa 上的冷空气和冷涡主体的位置不同, 造成地面蒙古气旋的强度和气旋的生命周期也有所不同。位于乌拉尔山的高空冷涡东移发展, 引导蒙古气旋快速发展, 地面冷高压与蒙古气旋之间的气压梯度加强, 地面风速加大, 是形成(强)沙尘暴的重要天气条件。

(2) 对两次沙尘天气过程中蒙古气旋温度平流和涡度平流特征的对比分析表明, 强的斜压大气有利于蒙古气旋的发展, 斜压大气中的温度平流和涡度平流的输送促进了气旋的快速发展, 伴随着地面温、压、风等气象要素的急剧变化, 产生强沙尘天气过程。

(3) 对沙尘天气的动力场特征分析表明, 表征大气行星边界层稳定度的 Ri 有可能较好地描述沙尘天气过程的强度, 强的沙尘天气过程中, Ri 小于 1 并持续较长时间, 有利于动力乱流发展; 弱的沙尘天气过程中, 只有短时出现负 Ri 。因此, Ri 的强度以及持续时间的长短可以作为沙尘天气预报中的一个参考的预报因子。

参考文献 (References)

- [1] 陈豫英, 赵光平. 两次典型强沙尘暴过程的对比分析. 气象, 2003, 29 (9): 18~22
Chen Yuying, Zhao Guangping. Comparative Analysis of

Two Typical Severe Sandstorm Events. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2003, 29 (9): 18~22

- [2] 申红喜, 李秀连, 石步旭. 北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析. 气象, 2004, 30 (2): 12~16
Shen Hongxi, Li Xiulian, Shi Buxu. Comparison Analysis of Two Dust Devil Events in Beijing Area. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2004, 30 (2): 12~16
- [3] 矫海燕, 牛若芸, 赵琳娜, 等. 沙尘天气影响因子的对比分析. 中国沙漠, 2004, 24 (6): 696~700
Jiao Meiyan, Niu Ruoyun, Zhao Linna, et al. Comparative Analysis on Causing Factors of Dust Events. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2004, 24 (6): 696~700
- [4] 刘景涛, 郑新江, 康玲, 等. 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究. 气候与环境研究, 2003, 8 (2): 218~228
Liu Jingtao, Zheng Xinjiang, Kang Ling, et al. A Case Study of a Severe Dust Storm Resulted from a Explosive Mongolia Cyclone. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (2): 218~228
- [5] 吕梅, 濮江平. 2000 年两次沙尘暴天气过程的分析研究. 气象科学, 2002, 22 (2): 210~217
Lu Mei, Pu Jiangping. The Analysis of Two Synoptic Process of Sand Storm in 2000. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, 22 (2): 210~217
- [6] 薛建军, 刘月巍, 牛若芸, 等. 2002 年 3 月 18~22 日强沙尘暴过程分析. 气象, 2004, 30 (9): 39~44
Xue Jianjun, Liu Yuewei, Niu Ruoyun, et al. Synoptic Analysis of Severe Dust Storm on March 18~22 2002. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2004, 30 (9): 39~44
- [7] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究. 高原气象, 2004, 23 (4): 540~547
Liu jingtao, Qian Zheng'an, Jiang Xuegong, et al. A Study on Weather Types of Super Severe Dust Storms in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, 23 (4): 540~547
- [8] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954~2002 年). 科学通报, 2003, 48 (11): 1224~1228
Zhou Zijiang, Zhang Guocai. Typical severe dust storms in northern China during 1954~2002. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, 48 (11): 1224~1228
- [9] 张高英, 赵思雄, 孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究. 气候与环境研究, 2004, 9 (1): 101~115
Zhang Gaoying, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Analysis of climatological characteristics of severe dust storms in recent years in the Northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, 9 (1): 101~115
- [10] 赵琳娜, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘天气的快速发展气旋的诊断研究. 大气科学, 2004, 28 (5): 722~734
Zhao Linna, Zhao Sixiong. A diagnostic study of rapid developing cyclone in North China. *Chinese Journal of At-*

- mospheric Sciences (in Chinese), 2004, **28** (5): 722~734
- [11] 张平, 杨德保, 尚可政, 等. 2002 年春季中国沙尘天气与物理量场的相关分析. 中国沙漠, 2003, **23** (6): 675~680
- Zhang Ping, Yang Debao, Shang Kezheng et al. Correlative Analyses between Meteorological Elements and Dust-stormy Weather Occurred in China during the Spring of 2002. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2003, **23** (6): 675~680
- [12] 孙军, 李泽椿. 西北地区沙尘暴预测方法初步研究. 气象, 2001, **27** (1): 19~24
- Sun Jun, Li Zhechun. A Tentative Study of the Forecasting Method of the Dust Storms in the Northwest of China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, **27** (1): 19~24
- [13] 保广裕, 高顺年, 戴升, 等. 西宁地区沙尘暴天气的环流特征及其预报. 气象, 2002, **28** (5): 27~31
- Bao Guangyu, Gao Shunnian, Dai Sheng et al. Forecasting of Dust Storm Weather in Xining Region. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2002, **28** (5): 27~31
- [14] 郑广芬, 赵光平, 李艳春等. 宁夏中北部地区沙尘暴天气发生过程中的不稳定条件分析. 中国沙漠, 2004, **24** (6): 701~705
- Zheng Guangfen, Zhao Guangping, Li Yanchun et al. Analysis on Unstable Condition in Sandstorm Processes in Middle and North Area of Ningxia. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2004, **24** (6): 701~705