

# 1998 年“4.18”强沙尘暴分析及数值模拟<sup>①</sup>

许东蓓<sup>1</sup> 康凤琴<sup>2</sup> 郑新江<sup>3</sup>

(1. 兰州中心气象台 730020 2. 兰州干旱气象研究所 3. 国家卫星气象中心)

## 提 要

对 1998 年 4 月 18~19 日发生在新疆、甘肃、宁夏、内蒙古等地的一次强沙尘暴天气过程从天气事实、天气学成因等方面进行了分析和诊断,然后利用非静力 MM5 模式对这次沙尘暴天气进行了数值模拟。结果表明,西西伯利亚强冷空气迅速东移,在新疆西部上空形成强锋区,对应的地面冷锋东移至前期增暖显著的新疆、内蒙古、甘肃、宁夏等地形成了本次大风、强沙尘暴天气。用非静力 MM5 模式较好地模拟出了此次强沙尘暴天气过程的地面强风系统、高空锋区的发生发展。

关键词: 沙尘暴 成因分析 数值模拟

## 引 言

西北地区处在欧亚大陆的内部,远离海洋,气候十分干燥。由于降水偏少,植被稀疏,沙漠戈壁众多,为沙尘暴的发生提供了大量的沙源。同时,西北地区风多风大,尤其在一些山隘、峡谷风口地带更是风力强,大风日数多。在春季,西北大部分地区干旱少雨,因而沙尘暴发生的频率为全年最高<sup>[1,2]</sup>。

1998 年 4 月 18~19 日,在新疆、甘肃、宁夏、内蒙古等省区发生了一次大范围的大风、强沙尘暴天气,并影响到河北省及东北的部分地方。这是整个西北区 1998 年强度最大、影响范围最广、持续时间最长的一次沙尘暴天气。与历年沙尘暴相比,本次过程在其发生发展以及影响范围、形成机制上有一定的独特性。本文首先利用国家气象中心 T106 实时分析资料和地面、探空观测资料对这次沙尘暴的成因进行了天气诊断分析,然后利用非静力 MM5 模式对这次沙尘暴天气的地面强风等系统进行了数值模拟。

## 1 天气事实

4 月 18 日以前,扬沙、大风天气在准葛

尔沙漠以西出现,随后迅速东移。18 日 17 时至 20 时,新疆天山以北及蒙古高原西部出现了大范围的大风、沙尘暴天气,最大风速达到  $39\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最小能见度小于 100m。19 日 02 时,甘肃河西的敦煌、安西等站出现浮尘、扬沙天气,马鬃山、鼎新等站出现了沙尘暴天气。19 日 05 时,沙尘暴、浮尘区扩展到最大,笼罩了新疆东部、蒙古高原的中西部、巴丹吉林沙漠、甘肃河西及腾格里沙漠的部分地区。这片区域内,大部分地区水平能见度都在 1000m 以下,风力在 8 级以上。此时,沙尘暴区明显出现南北分支,北支主力继续东移,在其后 24 小时内造成蒙古国、我国内蒙古及宁夏北部的沙尘暴天气,并向东延伸至河北和东北的部分地方。南支沙尘暴向东南方向移动过程中逐渐减弱为扬沙、浮尘。

## 2 天气学成因分析

### 2.1 前期亚洲上空大气异常增暖

在强沙尘暴出现前 4~5 天,我国西北地区出现了明显的增暖现象。暖空气异常深厚,从地面直到 500hPa 高空,这可以从乌鲁木齐等站的高空温度-时间曲线图上清楚看

<sup>①</sup> 资助项目:科技部项目“西北干旱区沙尘暴预警服务系统研究”;甘肃省气象局 98-01 项目“中国气象局青年科技基金项目”“西北地区灾害性天气机理研究及中尺度数值模拟”。

出(图略)。17~18日为暖浪的鼎盛时期,东西横跨近30个经距,笼罩了整个西北地区、内蒙古和蒙古国西部。在700hPa,乌鲁木齐17日比13日温度上升了11℃,哈密和酒泉的温度也分别上升了10℃和9℃。沙尘暴过程前地面也出现了异常增温,增温多在8~12℃之间,一些站增温最强时比历年4月中旬地面平均温度高出6~8℃。由此看出,此次过程前,西北地区大气整层增温明显,温度最高时也是此次沙尘暴爆发之时。

## 2.2 高空环流形势特点

在欧亚500hPa高空上,中高纬4月中旬前期基本为二槽一脊型。东欧平原至乌拉尔山为一暖高压脊,其西侧冰岛以南有一冷槽,西西伯利亚地区则为另一深厚的冷槽。随后几天在向北发展的乌拉尔山高压脊的推动下,西西伯利亚冷槽逐渐向南加深。高空锋区不断加强。4月18日08时,西西伯利亚冷槽底部有小槽分裂东移,小槽在强西风急流内(500hPa风速为 $36 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )发展形成一迅速东移的冷槽,18日20时已移过哈密,接近甘肃省河西走廊西部,高空锋区位于蒙古至天山一线,700hPa图上阿勒泰至哈密的温差达22℃,此时,北疆出现了大范围的沙尘暴天气。然后,高空锋区出现南北分支。北支锋区强度维持并向东北方向移动,南支锋区强度减弱东南下,影响到甘肃中东部和宁夏等地区。19~21日,我国西北大部分地区以及河北、东北的部分地区先后出现了大风、强沙尘暴、浮尘天气。

## 2.3 地面影响系统

此次强沙尘暴天气过程属于冷锋后偏西大风引起的沙尘暴类型。4月中旬前期,在巴尔喀什湖有一低压生成,并有冷锋与之配合东移,低压后部的西伯利亚冷高压也逐渐加强东移。4月18日08时低压中心值为995hPa。18日20时,冷空气翻过天山后得到加强,低压中心值达985hPa。位于冷锋后部的准葛尔盆地出现了正3小时变压区,中心

值为+18.4hPa,由此可见冷空气强度之大。当冷空气与前期异常增暖的暖空气交汇时,形成了此次强沙尘暴天气。此后,随着冷锋东移沙尘暴区也向东扩展。19日08时位于蒙古的低压进一步发展,中心值为983hPa,冷锋转竖,从蒙古高原经腾格里沙漠,接近宁夏自治区,锋后的沙尘暴、浮尘发展到鼎盛阶段。从变压图上可看出,此时冷空气已南北分支。冷空气主力向东北方向继续移动,冷锋后沙尘暴区范围减小,但强度维持。4月20日20时移至我国东北,高空锋区减弱,转变为吹风天气。

## 3 动力诊断分析

### 3.1 高空西风急流的演变

沿90°E作4月18日20时风速 $u$ 分量的经向剖面图(图1a),可以看出,在沙尘暴

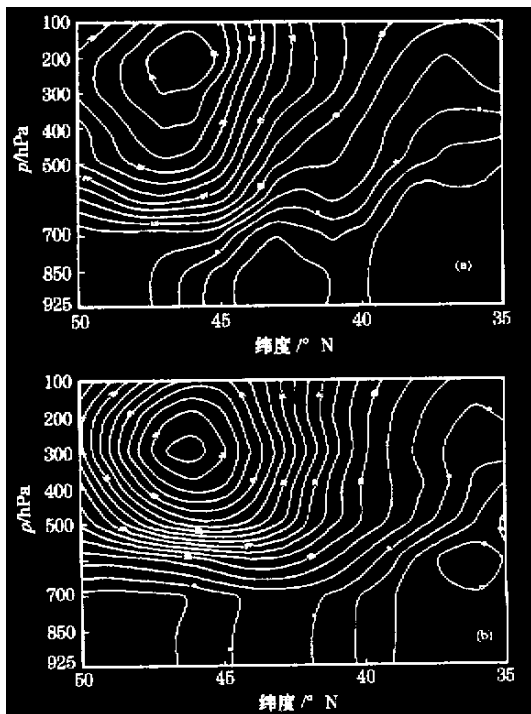


图1 4月18日20时沿90°E(a)和19日20时沿106°E(b)的 $u$ 分量经向剖面图

出现的纬度范围内,850hPa以上有一支较强的西风急流,急流中心位于45~48°N之间,高度在200hPa附近。而沿106°E的19日20时风速 $u$ 分量经向剖面图(图1b)显示,急流

中心仍位于  $45 \sim 48^{\circ}\text{N}$  之间,但范围比前一日有所扩大,中心强度也由 18 日的  $45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  增至  $57\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高度降至 300hPa 附近。由此可见,此次沙尘暴天气过程有一定的高空西风动量下传作用,且冷空气主力以东移为主,南压不明显。因此,最强沙尘暴天气主要出现在新疆、甘肃北部、宁夏北部以及内蒙古等地,而甘肃中部、陇东地区以及河西走廊东部则以浮尘、扬沙天气为主。

### 3.2 沙尘暴的垂直环流特征

4 月 18 日 20 时沿  $43^{\circ}\text{N}$  的垂直速度剖面图(图略)显示,在 850hPa 以上,  $87^{\circ}\text{E}$  以东为上升运动区,最大上升速度出现在 700hPa 附近,  $87^{\circ}\text{E}$  以西为下沉运动区,最大下沉速度出现在 500hPa 附近。上升区和下沉区随高度向西倾斜。当日锋区位于  $87^{\circ}\text{E}$  附近,可见冷锋前为上升运动,冷锋后为下沉运动。冷锋后的强下沉气流再次证明导致这次沙尘暴过程的冷空气强度大,它推动其前部暖气团强烈抬升,造成本次强沙尘暴天气。

图 2 是 4 月 18 日 20 时处于冷锋后的北塔山和冷锋前的敦煌两站的散度和垂直速度廓线图。分析得,锋后的北塔山站,除了近地面层有弱的上升运动外,其它各层均为下沉运动,最大下沉速度为  $28\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,无辐散层位于 370hPa 附近,它以下是辐散区,以上是辐合区。而同一时刻冷锋前的敦煌站,垂直速度与散度廓线就完全不同。从地面至 290hPa 为深厚的上升运动区,最大上升运动在 700hPa 附近,上升速度为  $-15.2\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,只在高空有下沉运动存在。两个无辐散层分别位于 750hPa 和 600hPa 附近,两层之间为辐合区。由此可见,临近强沙尘暴天气出现前,大气为上升运动,沙尘暴天气出现后,大气转为下沉运动。

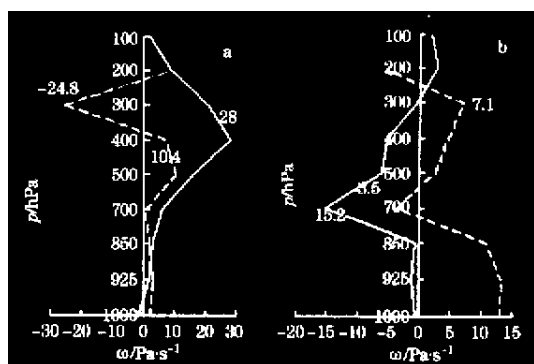


图 2 1998 年 4 月 18 日北塔山站(左)敦煌(右)站散度和垂直速度廓线图

实线 垂直速度 虚线 散度

### 3.3 大气层结状态分析

以往的研究指出,沙尘暴发生时,大气层结多表现为不稳定状态<sup>[3]</sup>,但在这次强沙尘暴过程中,通过对 4 月 18 日 20 时到 4 月 19 日 20 时  $35 \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $80 \sim 100^{\circ}\text{E}$  的压能( $E$ )、位温( $\theta$ )计算表明,从 700hPa 到 500hPa,  $\frac{\partial E}{\partial z} \geq 0$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial z} \geq 0$ 。由此可见,18、19 日大气层结基本稳定,本次强沙尘暴过程的最强时段,出现在基本稳定的大气层结之中。

另外,通过分析乌鲁木齐、哈密、敦煌、安西等站 18 日 08 时及 20 时、19 日 08 时及 20 时的  $T-\ln p$  图变化特征可以看出,随着这次沙尘暴过程的临近,大气层结变化不大,基本呈稳定形式。许宝玉、钱正安<sup>[4]</sup>等人提出,热力条件是区分不同强度沙尘暴的一个重要因素。当冷空气在夜间经过河西地区,由于热力条件不利,会在一定程度上削弱沙尘暴的强度。这与本次沙尘暴过程所造成的天气事实基本符合。

## 4 数值模拟

### 4.1 模式简介、试验设计及资料

用非静力 MM5 模式进行模拟。水平方向格距 60km,格点数  $55 \times 51$ ,中心点选( $40^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}$ );模式顶层为 100hPa,垂直方向取  $\sigma$  坐标,为不等距 24 层。初始场和侧边界值均取自中国气象局 T106 模式  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  经纬网格

点资料和探空资料。模拟过程从 1998 年 4 月 17 日 20 时到 19 日 20 时,积分 48h,每 3h 输出一次结果。模拟采用干过程。

## 4.2 模拟结果分析

### 4.2.1 风场模拟

在每隔 3 小时的地面风场图上,模拟初期几小时,内蒙古中部、山西和河北北部有较大风速中心,它处于一气旋性流场底部,该气旋性环流是造成前期 4 月 15 日宁夏、内蒙古强沙尘暴天气的地面强风系统。在模拟过程中发现,来自北疆的偏西风和西北风连续向偏东和东南方向移动发展,并在蒙古国西部及我国甘肃西北部、内蒙古西部不断形成地面强风中心。

图 3a~d 是模拟 6 小时(18 日 02 时)、模拟 15 小时(18 日 11 时)、24 小时(18 日 20

时)、36 小时(19 日 08 时)(48 小时 19 日 20 时略)的地面风场。18 日 02 时(图 3a),北疆和蒙古国西部出现 5~6 级的风速中心,并迅速发展,范围扩大,到 18 日 11 时(图 3b),最大风速达到 6~7 级。此后直到 18 日 20 时(图 3c),风速有所减弱。19 日 02 时,风速再次加大,其程度、范围远超过上一次,从北疆到河北的我国北方 115°E 以西大部地方为 6~7 级大风。另外发现,大风开始向东南方向出现分支。19 日 08 时(图 3d),上述范围内的风速大多在  $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上,部分地方出现 8~9 级大风,同时,东南分支沿甘肃河西走廊也迅速发展、南压。大范围的地面强风持续到 19 日 11 时以后开始明显减弱,到 19 日 20 时,风速中心已明显东移。

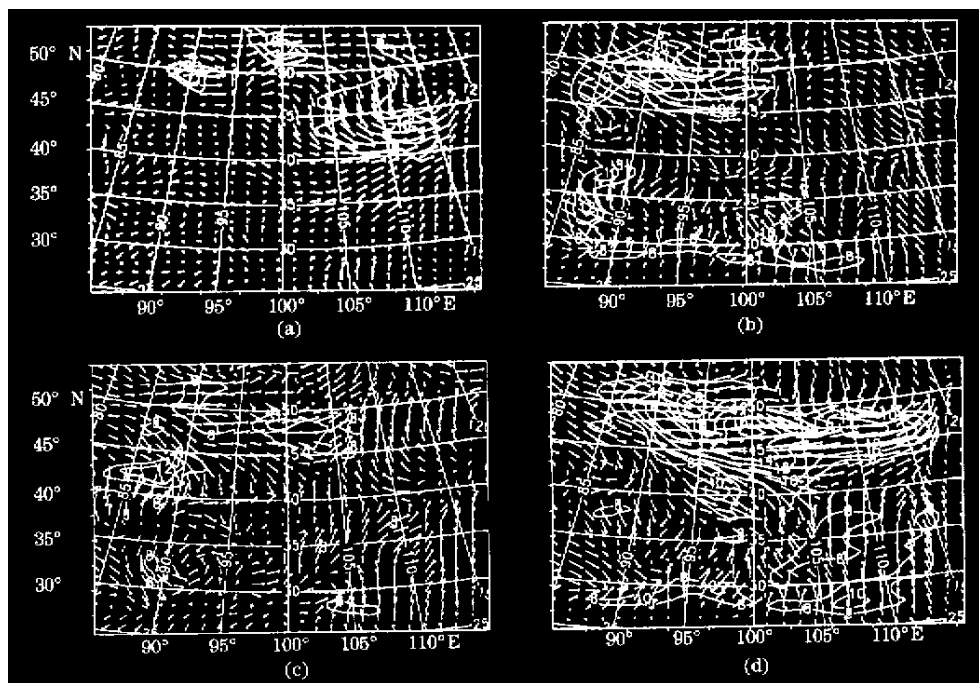


图 3 模拟的地面风场

(a 18 日 02 时 b 18 日 11 时 c 18 日 20 时 d 19 日 08 时)

从以上分析可以看出,在 17 日 20 时到 19 日 20 时的 48 小时模拟时段内,地面风速出现了两次明显的发展阶段:18 日 05 时~15 时和 19 日 02 时~11 时,后一阶段的发展更

为强盛,并且出现了强风中心的南、北分支。这些结果与前文中的天气事实是非常接近的。这表明,MM5 模式比较成功地模拟出了造成这次沙尘暴天气的地面强风系统及其发

展演变过程。

600hPa 等风场的模拟结果(图略)表明:受青藏高原的影响,除模拟范围的 40°N 以南、110°E 以东的区域外,其它区域均由来自于北疆的偏西和西北风控制,并影响到我国华北地区。至 18 日 20 时,40°N 以北为一致的偏西风,且在甘肃、宁夏以北形成风速大值中心,随着模拟时间的推移逐渐向西移出模拟范围。

#### 4.2.2 850hPa 形势场模拟特征

由模拟的 850hPa 位势高度场、温度场(图 4a~d)可以看出造成此次沙尘暴天气的低压槽及锋区的演变特征。18 日 02 时(图

4a),西北地区东部 110°E 有一低压槽,它与相同位置的地面风速大值中心相对应,是造成前期 4 月 15 日我国北方沙尘暴天气的高空影响系统,低压槽以西的 40°N 以北基本为西北气流。18 日 05 时(图 4b),95°~100°E 出现低压槽,此低压槽随后发展并缓慢东移,于 18 日 23 时形成闭合低涡(见图 4c),并不断加强东移,19 日 08 时达到最强(图 4d),此后在蒙古国东部减弱成东西向的低压槽。该低压槽(涡)底部的偏西气流和后部的西北气流与地面强风中心位置一致,是造成 18~19 日大范围强沙尘暴天气的高空影响系统。

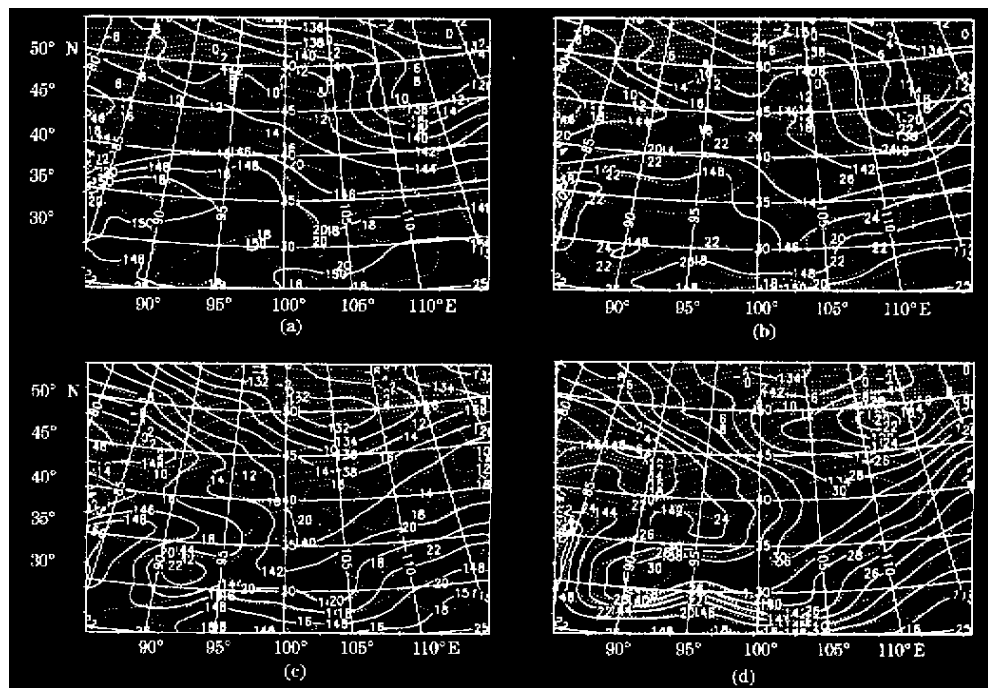


图 4 模拟的 850hPa 温、压场

虚线为等温线,实线为等高线

(a 18 日 02 时, b 18 日 05 时, c 18 日 23 时, d 19 日 08 时)

从温度场演变特征看到,19 日 08 时之前,40°N 以北,100°E 以西范围内东北—西南向等温线密集区即高空锋区长时间维持,并不断加强南压,它与同范围的西北气流相配合,构成了西北地区上空强冷平流输送;19 日 08 时之后,锋区似乎出现南北分离的迹

象,南支锋区于 19 日 14 时(图略)在 40°~45°N,95°E 形成温度槽,并不断向南扩展;而北支强锋区依然维持东西走向。高空强锋区的这种变化可能促使了地面强风的南北分支。

因此,从 850hPa 的模拟形势场看出,高空较强的冷平流长时间输送是造成此次沙尘

暴天气的重要因素,地面大风的南北分支与高空锋区的南北分支有关。

## 5 小 结

通过对 1998 年的一次沙尘暴过程的天气成因分析及数值模拟,得出以下结论:

(1)强沙尘暴天气出现前,500hPa 高空上,乌拉尔山或其西侧有高压脊发展,同时,在西西伯利亚形成深厚的冷槽。随着冷槽或其前部小槽沿强西风急流迅速东移,与前期西北地区上空暖空气相遇,形成高空强锋区。对应在地面上有冷锋东移,锋后有较大的正 3 小时变压。本次强沙尘暴天气以东移为主。

(2)强沙尘暴天气发生前,西北地区有异常回暖现象;本次强沙尘暴天气出现在基本

稳定的大气层结之中。

(3)利用 MM5 模式能比较准确模拟出地面强风系统和高空锋区及其演变,说明模式对预测沙尘暴天气的发生、发展有较好的指导作用。

## 参考文献

- 1 赵性存.西北地区是我国沙尘暴的多发区.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社,1996:27~30.
- 2 陈敏连,王锡稳.西北地区强沙尘暴研究的进展.甘肃气象,1996,14(1):8~10.
- 3 陈敏连,郭清台,徐建芬等.黑风暴天气的研究和探讨.甘肃气象,1993,11(3):16~27.
- 4 许宝玉,钱正安,焦彦军.西北地区五次强沙尘暴前期形势和要素的综合分析与预报.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社,1996:44~51.

# Analysis and Numerical Simulation for a Strong Dust Devil Occurred on 18 April, 1998 in Northwest China

Xu Dongbei

(Lanzhou Central Meteorological Observatory, Gansu 730020)

Kang Fengqin

(Lanzhou Arid Meteorological Institute)

Zheng Xinjiang

(National Satellite Meteorological Center)

## Abstract

Based on weather facts and synoptic cause of formation, a strong dust devil weather case occurred on 18th to 19th April, 1998 is analyzed and diagnosed, and then numerical simulation with nonhydrostatic MM5 model for this case is made. The result shows that cold air from the western Siberian moves rapidly eastward and forms strong frontal zone over the western Xinjiang, which corresponding surface cold front moves to such special underlying surface as desert, gobi in Xinjiang, Inner Mongolia, Gansu and Ningxia provinces where were heated, and as a result, gale, strong dust devil weather would form. The MM5 model can successfully simulate the formation and development of this surface severe gale and upper air front zone.

**Key Words:** dust devil formation analysis numerical simulation