

西北地区一次斜压槽引发的强沙尘暴研究

徐建芬, 孙兰东, 许东蓓, 王宝鉴

(兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用 T106 数值预报及常规气象资料, 对 1998 年 4 月 15 日西北地区强沙尘暴进行分析, 分析结果表明, 这是一次由斜压槽及冷锋锋生触发的沙尘暴, 高空急流及其下部的 Ferrel 环流对沙尘暴发生起到重要作用; 强沙尘暴发生在高空急流出口区右侧、500hPa 正涡度中心下风方和次级反环流的上升运动区内。

关键词:沙尘暴; 斜压槽; 次级环流

中图分类号:P425.5⁺5:P458 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7639(2001)-02-Q40-05

前 言

1998 年春季, 西北地区大风沙尘暴频繁发生, 据统计 3~5 月出现 6 次区域性大风沙尘天气, 其中 4 次伴有强沙尘暴。尤其是 4 月中旬连续发生 2 次强沙尘暴(4 月 14~16 日, 18~19 日), 持续时间长, 波及范围广, 为近年来所罕见。沙尘暴所经之处不同程度遭受灾害: 甘肃省的酒泉、金塔等地部分农田遭沙埋, 受灾面积为 1 333.3 万 hm^2 。内蒙古乌海和包头市部分果树受灾损失达 6 千余万元; 阿拉善盟、巴颜淖尔盟等地造成 9 万人受灾, 同时给生态环境造成严重的影响。

文中对 1998 年 4 月 14~16 日西北地区强沙尘暴特征及天气成因分析的同时, 重点利用 T106 数值预报资料, 从沙尘暴天气形成的动力、热力机制和物理结构进行深入探讨, 以提高对西北地区沙尘暴天气的认识和落区预报能力。

1 沙尘暴概况

1.1 沙尘暴演变特征

1998 年 4 月 14~16 日沙尘暴是当年我国北方地区发生的一次最大范围大风、沙尘暴天气, 内蒙古中西部、甘肃北部、宁夏和陕

西北部以及山西等省区均出现 8 级以上西北大风, 并伴有强沙尘暴。沙尘暴覆盖了 35~50°N、90~115°E 范围内约 250 万 km^2 的广大区域, 浮尘扩散范围更广(图略)。

14 日 08 时沙尘暴在蒙古国西部形成, 14 时影响蒙古国的阿尔泰、巴颜洪格尔等地出现强沙尘暴。20 时开始影响到内蒙古中、西部和甘肃河西地区。15 日冷空气东移南压, 沙尘暴扩展到甘肃北部、宁夏及陕北等地, 风速普遍达 20m/s 以上, 15 日下午沙尘暴发展到最强, 覆盖面积最广。15 日 20 时沙尘暴区逐渐向东扩至陕北、山西和内蒙古中东部, 甘肃、宁夏等地的沙尘暴仍维持, 但强度明显减弱。

1.2 沙尘暴强中心分布

从 4 月 14~16 日沙尘暴期间能见度看出, 有两个明显的强沙尘暴中心。一个中心在蒙古国中、西部的阿尔泰和乌兰巴托之间, 能见度 < 200m, 阿尔泰最大风速达 34m/s,

收稿日期: 2000-08-18

作者简介: 徐建芬(1945-), 女, 山东济南人, 高级工程师, 曾从事天气预报及西北灾害天气研究。

这一中心主要发生在 14 日 14 时至 15 日 02 时, 另一强沙尘暴中心位于民勤、巴彦毛道、吉兰太、银川、乌海、榆林之间, 最强中心在巴彦毛道, 能见度为 100m, 最大风速 27m/s。最强沙尘暴出现在 15 日 14 时至 20 时, 也是午后地面增温最强时段。可见, 沙尘暴日变化极为显著。这次沙尘暴主要集中在 14 日 14 时至 15 日 20 时, 持续时间一般为 3~12h, 额济纳旗维持长达 21h, 巴彦毛道持续 6~9h。因此这次沙尘暴天气具有强度大、持续时间长、影响范围广、日变化显著的特点。

2 沙尘暴天气成因分析

2.1 环流形势调整

分析 1998 年 4 月上、中旬北半球 500hPa 候平均高度场和欧亚西风指数演变曲线(图略), 4 月上旬前期, 北半球 500hPa 中高纬度为纬向环流, 欧亚西风指数均呈上升趋势, 上旬后期, 格陵兰、冰岛一带高压脊发展, 北欧西岸低压槽加深并东移, 由于上游能量频散效应, 导致亚洲环流发生调整。4 月中旬初北半球呈 4 波型, 极涡中心均匀分布, 其中欧洲和北美的低涡较强。北欧低槽移至乌拉尔山以东地区向南加深, 西西伯利亚大低压形成并稳定, 欧洲由槽区转为高脊控制, 欧亚范围内经向环流加强。4 月中旬, 东半球极涡东、西向打通, 不断分裂冷空气从新地岛沿欧洲脊前南下, 使西西伯利亚低压加强, 并向东扩展, 新地岛以东、以南至贝加尔湖的广大区域被强冷空气控制。至此, 欧亚中高纬地区完成了一次由纬向环流向经向环流调整过程。

从西风指数演变情况看, 4 月上旬为高指数, 中旬西风指数一直呈下降趋势, 14 日出现低点, 19 日降到最低值(-0.04), 明显反应了这次环流调整过程。4 月 14~16 日沙尘暴就是发生在高空纬向环流向经向环流调整过程中。

2.2 斜压槽与强锋区

图 1 是 4 月 15 日 850、700 和 500hPa 温

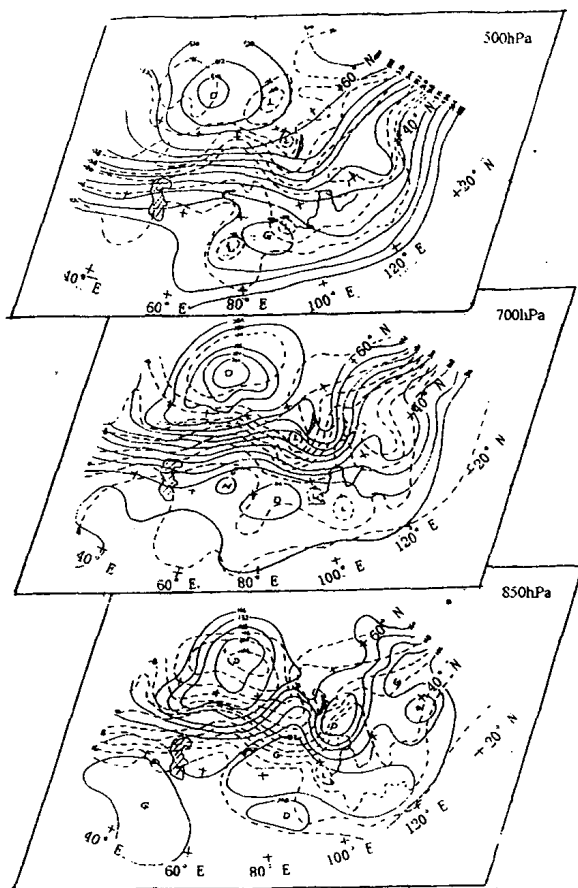


图 1 1998 年 4 月 15 日 08 时 850~500hPa 温压形势图
压形势图, 由图可见, 新地岛以南西西伯利亚上空自下而上形成一个深厚的大低压。分析 500hPa 天气图, 13 日西西伯利亚低压稳定之后, 在 50°N 以北地区维持一支强锋区, 14 日锋区加强南压, 槽后有 -44℃ 冷中心配合, 与此同时, 中低纬伊朗高压经新疆向东北方发展, 脊顶暖平流向蒙新高原输送, 促使新疆高压脊迅速发展, 脊前形成一支 $\geq 20\text{m/s}$ 的西北强风带。北部冷空气沿脊前快速南下。15 日 500hPa 冷槽移至贝加尔湖附近, 温度槽明显落后于流场槽, 西北地区东部为冷平流和强风带所控制。

对应 700 和 850hPa 图(图 1. b c)上, 15 日 08 时冷低压槽快速南下, 并切断于蒙古国东部上空。同样具有温度槽明显落后于流场槽的特点。而且等高线与等温线交角几乎呈

90°,形成强力管,强锋区南压至 40°N 附近。700hPa 比 850hPa 锋区略偏后,在河套西北方的蒙古高原一带,低压槽从 850~500hPa 随高度向西北偏北方向倾斜,伴随低压槽有一支强锋区,越到低层锋区越强。强冷平流向河套及以南地区输送,与此同时地面增温强烈,15 日 08 时银川、民勤 24h 增温 7~8℃。可见,大气斜压性很强,处于极度不稳定状态。扰动动能加强,导致甘肃西北地区的沙尘暴天气。斜压槽与强锋区是激发这次沙尘暴的重要动力机制。16 日锋区东移南压至 115°E 以东,35°N 以南地区,沙尘暴减弱为浮尘。

2.3 蒙古低压的形成与发展

蒙古低压强烈发展是造成这次沙尘暴的重要地面天气系统。从地面冷空气移动路径(图略)可以看出,致使这次大面积大风沙尘暴的触发系统,源于西西伯利亚堆积的冷空气。13 日 20 时,西西伯利亚气旋形成,14 日 08 时,气旋及其冷锋东移至蒙古国西部,锋前动力和平流减压均显著,出现大片负变压区,△P3 为 -4.6hPa,锋后△P3 为 9.4hPa,冷锋前后变压差达 14hPa,低压中心为 993hPa,说明低压加深,气压梯度加强。14 日 20 时,低压快速东移并分为两个中心,南部的低压移至蒙古国中部乌兰巴托附近,强度为 998hPa,冷锋穿越巴丹吉林大沙漠东南移,锋后蒙古国西部形成强沙尘暴区,同时内蒙古和甘肃也开始出现大风扬沙天气。15 日 08 时,蒙古低压后部又有一条冷锋生成并迅速南下进入低压,蒙古气旋再次加深,低压附近△P24 达 -26hPa。15 日 14 时,锋生引起我国西北东部大风和强沙尘暴。15 日 20 时,蒙古低压稳定,气压梯度还在加强,加压区和最大变压梯度位于西北区 40~50°N 之间,使西北地区内蒙古、甘肃强沙尘暴维持。

16 日蒙古气旋及冷锋东移减弱。由此可见,蒙古国沙尘暴中心形成于冷锋加强的过程中;西北区强沙尘暴中心则是由于蒙古

气旋冷锋锋生引发的。

3 强沙尘暴区诊断

3.1 斜压大气的扰动动能与沙尘暴

如前所述,两个沙尘暴中心分别是由冷锋过境和蒙古气旋冷锋锋生引发的。冷锋所对应的是一个温度槽落后于高度槽,斜压性很强的扰动波。Michaelides 等人^[1]研究认为,基本气流动能始终向气旋扰动动能转换是中纬度气旋发展的主要特征。孙力也指出^[2]斜压性增强造成大量有效位能(A_p)转换成扰动动能(K_p),从 A_p 到 K_p 转换是冷涡迅速发展的重要原因。扰动有效位能与扰动动能间的转换项为:

$$\{A_p, K_p\} = \int_0^{P_0} \int_{Y_1}^{Y_2} \omega' \frac{\partial \Phi'}{\partial P} - \int_0^{P_0} \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{R}{P} T' \omega' \delta y \delta p$$

式中 T' , ω' 为温度和垂直速度扰动场,从式中看出,扰动有效位能与扰动有效动能的转换与 T' , ω' 有关,当 $T'\omega' < 0$ 时 $\{A_p, K_p\} > 0$,则有效位能转换为扰动动能,形成不稳定。利用上式讨论这次斜压槽及其冷锋锋生的扰动能量转换。计算 14~15 日 850~500hPa 低槽前后 T 和 ω 扰动场,结果见(附表)。

附表 斜压槽前后 T' (℃), ω' (10^{-4} hPa/s)中心值

hPa	14 日				15 日			
	槽前		槽后		槽前		槽后	
	T'	ω'	T'	ω'	T'	ω'	T'	ω'
500	0.3	-3.5	-0.5	15.2	0.5	-5.6	-0.5	6.3
700	1.0	-4.2	-1.0	15.4	0.8	-8.8	-0.3	3.6
850	0.8	-4.5	-0.5	3.4	0.5	-3.4	-0.8	4.3

$$\text{其中 } T' = T - \bar{T} \quad \omega' = \omega - \bar{\omega}$$

T' , ω' 采用五点平滑公式计算。由表可知,流场槽前 850hPa~500hPa 温度扰动均为正值($T' > 0$),垂直速度扰动为负值($\omega' < 0$),槽前增暖上升, $T'\omega' < 0$;槽后各层 T' 为负值 ω' 为正值,冷空气下沉,同样 $T'\omega' < 0$,因此低槽前后均为 $\{A_p, K_p\} > 0$,表明低槽前后上升、下沉过程加剧,大量扰动有效位能转换为扰动动能,形成斜压不稳定,扰动系统得以迅速发展,地面气旋加强并出现锋生,从而引发 14~15 日两个强沙尘暴中心。

3.2 高空急流与沙尘暴落区

沙尘暴期间,高空急流对沙尘暴的发生发展起到重要作用。分析沙尘暴期间 200hPa U 分量分布图可以看出,200hPa 高空有一支强风速带,急流位于 40~55°N 之间,急流轴线呈西北、东南向,随西风急流的移动,14~15 日分别出现了两个强沙尘暴区(图 2)。

14 日沙尘暴区位于 200hPa 高空急流附近的 40m/s 等风速线所包围的区域内,强沙尘暴(能见度<200m)位于 200hPa 急流中心的右前方 3~5 个纬距内,这与风的垂直切变增加,热力的间接环流发展有着直接关系。15 日高空急流南移,沙尘暴区也随之南下至西北地区东部即出现第二个强沙尘暴中心。沙尘暴同样发生在高空急流右侧,但包围在

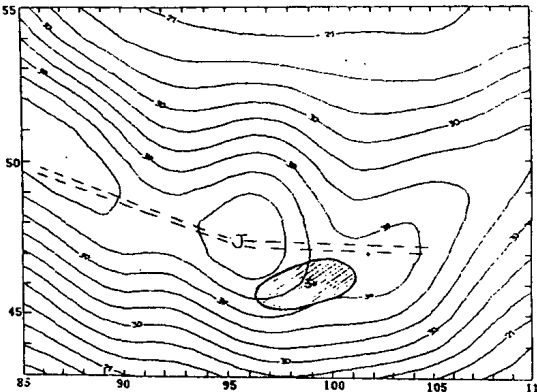


图 2 4 月 14 日 20 时 200hPa 高空 U 分量及强沙尘暴中心分布图

>30m/s 的等风速线内。因此可以认为,发生大风、沙尘暴时,对流层中、上部有一支较强的西风急流,沙尘暴区位于高空急流 >30m/s 等风速线包围区内,而强沙尘暴中心

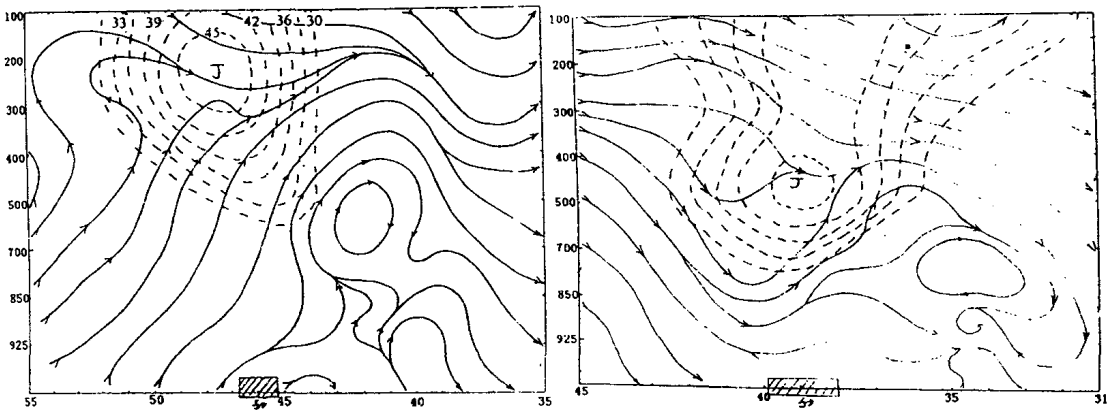


图 3 沿 96°E 和 105°E 经向垂直环流分布

发生在 200hPa 急流出口区的右侧。

3.3 垂直环流特征及其对沙尘暴的作用

图 3 是沙尘暴上空的经向环流和高空急流垂直分布图。从图中可知,14 日高空急流位于 200~250hPa,中心在 47°N 附近达 48m/s,急流以下,北部为强的上升气流,最大上升运动区域位于 43~50°N 之间,上升速度达 $-8.83 \times 10^{-3} \text{hPa/s}$,43°N 以南是下沉气流。在高空急流下方形成了一个北部上升,南部下沉的反环流,环流中心位于急流中心以南约 3~4 个经距,其高度在 500~600hPa 附近。在急流上部北面下沉、南面上

升,形成弱的 hadley 环流。我们知道,高空急流以下的反环流是与非地转热成风相联系的。下式是热成风平衡式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial v}{\partial \beta} \right) = f u_T$$

式中 u_T 表示非地转热成风。由上式可知,在急流下部,流场上热成风大于温度场的热成风,即 $u_T > 0$ 时,西风随高度的增大大于南北温差所对应的温度场上的热成风,则 $-f u_T < 0$,从而产生和加强高纬上升、低纬下沉的反环流。所以急流以下的反环流有两方面的作用:一方面调整高低空垂直切变,使西风

随高度增大的流场切变减小,高层动量向低层传递;另一方面,由于北部上升绝热降温,南部下沉增温作用,导致南北水平温度梯度加大,锋区加强。两者共同作用的结果,使非地转热成风向热成风平衡,热成风平衡过程也就是环流加速制造动能的过程。因此,沙尘暴期间高空急流以下的反环流的形成与发展起到输送动量和加强锋区的作用。反环流是诱发大风、沙尘暴重要的动力和热力机制,强沙尘暴区位于上升运动区内。15日08时至20时,随着锋区加强南下,甘肃、宁夏、内蒙等地沙尘暴强烈发展。至15日20时急流中心降至400~500hPa附近,急流中心以下的反环流随急流的南移至40°N以南,40°N以北转为下沉气流,36~40°N之间为上升气流,激发沙尘暴的反环流开始减弱,沙尘暴区仍发生在上升气流中。

3.4 涡度、散度等物理量分布特征

利用 T106 数值预报 0 时刻 $1^\circ \times 1^\circ$ 格距、1 000~100hPa, 9 层资料进行诊断分析。

分析 500hPa 涡度图(图略), 14 日与高空低压槽相对应在 43~55°N 范围内为大片

正涡度区, 涡度中心位于 52°N、92°E 附近, 中心值达 $11 \times 10^{-6}/s$, 15 日正涡度中心向东南方向移至河套北部, 正涡度明显加强为 $15.4 \times 10^{-6}/s$, 涡度中心与 500hPa 急流移动方向一致, 沙尘暴区位于正涡度中心的下风方, 等涡度线梯度较大的区域, 即正涡度平流中心附近。

从散度和垂直速度廓线分布看, 散度的垂直分布除 700hPa 附近为辐合气流外, 整层以辐散为主, 但高层辐散远大于低层辐散, 有利于上升运动的发展。因此, 14 日 300hPa 以下均为上升运动, 最大上升速度层位于 700hPa, 达 $-8.39 \times 10^{-3} hPa/s$ 。4 月 15 日 20 时上升气流主要在对流层中、下部, 500hPa 以上转为下沉运动, 比 14 日 20 时上升气流明显减弱, 近地面层转为弱的辐散下沉气流。

参考文献:

- [1] Michalides SC. Limited area energetics of Genoa cyclogenesis[J]. Mon Wearev, 1987, 115:13-26.
- [2] 孙力. 一次东北冷涡发展过程中的能量学研究[J]. 气象学报, 56(3):349-361.

Study of a Dust-devil caused by tilted trough in Northwest China

XU Jian-fen, SUN Lan-dong, XU Dong-bei, WANG Bao-jian

(Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou GanSu 730020, China)

Abstract: A severe dust-devil, happened in northwest China on April 15 in 1998, was analyzed by using the normal meteorological data and NWP data of T106. The result shows the severe dust-devil caused by tilted trough and frontgenesins of cold front, high jet and Ferrel circulation are the main thermodynamics reason, severe dust-devil happened at the south side of high jet exit region and downwind of vorticity centre of 500hPa and ascending region of sub-circulation.

Keywords: dust-devil; tilted trough; sub-circulation

