

杨克明 韩建钢 顾秋瑾 赵梅*

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

利用实测资料,采用有限区数值预报模式计算的物理参数,对1993年5月5日特大黑风暴天气过程形成的物理条件及成因进行了诊断分析研究。探讨了变温梯度、动量下传、地形特征等因子的重要作用,给出了诸物理量的分布特征和黑风暴形成条件的模型及具有预报意义的一些判据。

关键词: 黑风暴 物理条件 诊断分析

引 言

黑风暴系指瞬间风速 $\geq 25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、能见度 $< 50\text{m}$ 的强沙暴天气。它是春季发生在我国西北和内蒙西部地区的一种危害极大的灾害性天气,具有突发性强、影响范围广、破坏力大的特点。本文主要从“5·5”黑风暴出现时的大尺度环流形势、影响系统、形成的物理机制及成因进行初步分析,以求得到一些有意义的结果和启示。

1 概 况

1993年5月4—7日,一股强冷空气侵袭了我国北方地区。4日夜至6日晨,一场历史上罕见的特大黑风暴席卷新疆的准噶尔盆地、吐鲁番、哈密,经甘肃的河西走廊、宁夏中北部,直到内蒙古的阿拉善盟和伊克昭盟的近18个地市、72个县(图1)。自西北向东南相继出现了大风沙暴天气,平均风力为6—7级,最大风力9级,其中金昌市的瞬时最大风速达 $34\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,能见度陡降为零。风沙形成的沙暴壁高达300—400m,有三层结构,每层有一球状尘团滚动,最下层呈黑色,中上部红黄相间,以平均每小时90km的速度自西向东移动,黑风暴天气一直持续到6日凌晨才结束。沙暴过后上述各地还出现了剧烈的降温,最低气温一般在 -2°C — -2°C ,野马街的温度达 -9°C 。

这次黑风暴天气过程属自1927年有气象

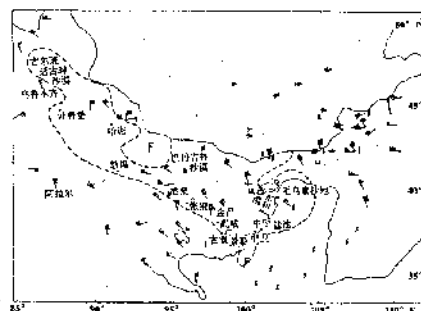


图1 1993年5月4—7日强沙暴过程实况
断线区为强沙暴或黑风暴区

记录以来最强的一次,造成了上述地区房屋倒塌、人员伤亡、交通电讯中断、大面积农田埋没,经济损失十分惨重。

2 环流形势演变及主要影响系统

2.1 环流形势演变

由5月5日08时500hPa图(图略)可见,亚欧中高纬呈两脊一槽型,两脊分别位于西欧和东亚地区,长波槽在 90°E 附近。4月30日,当短波小槽位于新地岛时,大西洋中部低槽前的强暖平流促使平浅的欧洲高压脊迅速发展成为强大的高压脊。在脊前强西北气流的引导下,短波槽快速地向南加深。相应700hPa有一中心强度为 -13°C 的负变温中心从巴伦支海南下,与蒙古国西部到我国新疆北部的中纬度锋区合并,使之明显加强。5日,原新地岛短波槽在中亚地区发展成为有

* 马立群参加了部分物理量的计算工作

强锋区配合的长波槽。与此同时,亚洲东部中高纬地区也建立了一个长波脊,脊后偏南气流增强,导致冷暖空气的剧烈交汇和相互作用。地面图上,与高空锋区相对应的蒙古高压发展完整,中心达1033hPa。处于冷锋前部的我国西北地区东部到蒙古国中部有一中心为998hPa的暖低压发展,我国西北地区呈西高东低的形势。

2.2 影响系统

4日,中亚冷空气开始分股,较弱的一股沿萨彦岭北麓东移,主力则从蒙古国的西部经北疆东移南下。5日冷锋移入低压区中,其后部强冷空气大举南下,造成北疆7—9级、山口地区12级的西北大风。冷锋的东移触发青海西部新生一个直径约为300km的中尺度低压。14时,当低压移至青海刚察附近时,发展最深,中心强度达997hPa。6日02时移至朱日和附近减弱消失。与此同时,冷锋移入蒙古低压后,5日14时发展成为气旋。这两个低压

的发展,导致高低压间10hPa/100km的强气压梯度,使河西走廊、内蒙西部出现了强西北风和沙尘暴。6日,随着青海湖低压和蒙古气旋东移减弱,黑风暴过程结束。

3 黑风暴形成的物理条件分析

3.1 黑风暴的二维流场结构

从图2可看出,“5·5”黑风暴冷暖空气在500hPa以下交汇,冷空气较为浅薄。冷锋后400hPa以下盛行下沉气流,并与南疆东部的上升运动在中低层构成一个反环流圈。100—105°E大约500km的范围内,锋前暖区中低层盛行一支上升气流,在500hPa以上同高层辐散气流汇合,向下下沉。上升气流配合有较强的上升运动区,500hPa上最大上升速度为 $6 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,对应中低层亦达 $3 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,较一般大尺度的垂直速度大一个量级,它对于抬升沙尘起了重要作用,黑风产生在上升运动区中偏于低层弱下沉区一侧。

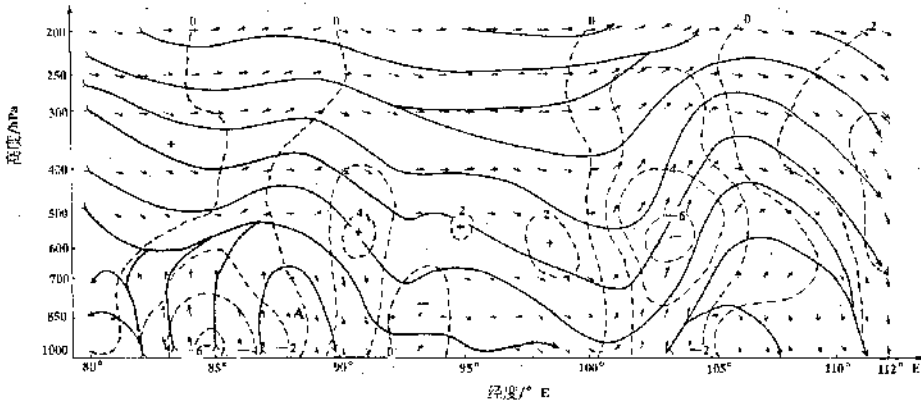


图2 5日20时沿黑风暴区(39°N)的垂直剖面
实线为流线,虚线为 ω 等值线(单位: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

3.2 温度场特征

从图3a看,伊宁到哈密400hPa以下等温线下凹,在马鬃山以西的中低层有一强锋区,南下冷空气正在马鬃山处于“爬山”阶段,锋面坡度大。从 θ_{se} 场看,5日08时,马鬃山以西较以东中低层要小得多,且梯度大,以东对应的偏南气流温度高,湿度小。5日20时,酒泉到银川450hPa以下等温线下凹显著,600hPa以下水平温度梯度很大,达 $20^\circ\text{C}/700\text{km}$,形

成一支强锋区,锋面坡度陡峭,锋面两侧风速差值大;酒泉至巴音毛道之间 θ_{se} 小,梯度大;民勤至临河500—850hPa之间存在一个 θ_{se} 小值舌区,其下 θ_{se} 很大,形成一个较强的不稳定层,黑风暴就出现在 θ_{se} 密集区中的宁夏西部及中北部一带。

3.3 涡度和散度的垂直分布

3.3.1 涡度垂直分布

如图4所示,在80—115°E上空,500hPa

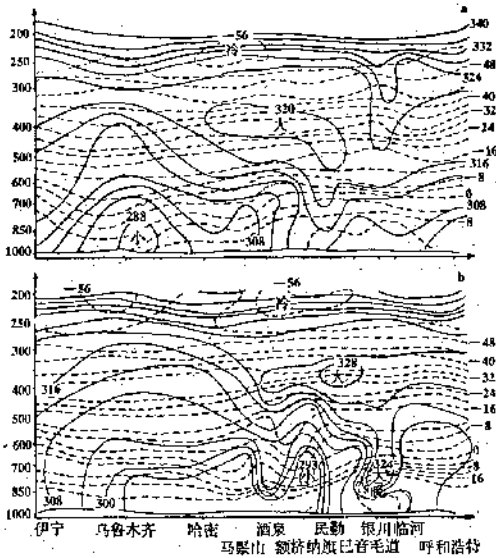


图3 5日08时(a)和20时(b)垂直剖面
实线为等 θ_{se} 线,虚线为等温线

以下垂直涡度呈正负相间分布,以上为负正相邻两涡度区。高层负涡度基本上呈西北—东南向由高层向低层延伸。显然,这与锋后高空一致的西北气流相对应,最大中心位于张掖—民勤的中低空,700hPa上极值达 $-3.7 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$,以东的850hPa及以下为气旋性涡度,最大值在1000hPa上,为 $1.0 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$,其上层至400hPa为负涡度,400hPa以上是较强的正涡度区。故锋前整层气流走向比较复杂,低层为WSW气流。黑风暴产生在正负涡度梯度最大处,偏于正涡度一侧。

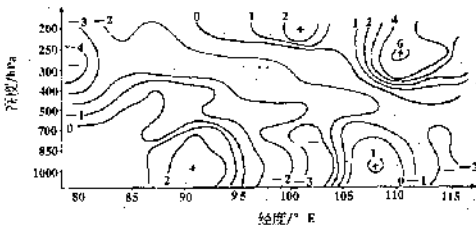


图4 5日20时黑风暴区涡度垂直分布(沿39°N,
单位: $10^{-5} \cdot s^{-1}$)

3.3.2 散度垂直分布

由图5可知,在黑风暴发生阶段,700hPa层以下辐合,以上辐散较为明显,无辐散层约在600hPa附近,在1000—850hPa之间的低空出现一个较强辐合中心,极值达 $-3.1 \times$

$10^{-5} \cdot s^{-1}$,500hPa上的辐散中心值为 $1.8 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ 。另外,82—98°E700hPa以下为冷空气下沉辐散区,辐散中心最大值为 $2.9 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$,位于1000—850hPa层,其上部是较弱的辐合区,黑风暴出现在低层负散度中心附近的上升区里。

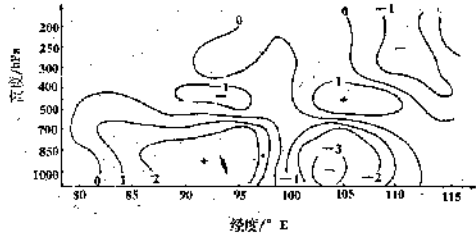


图5 5日20时黑风暴区散度垂直分布(沿39°N,
单位: $10^{-5} \cdot s^{-1}$)

4 黑风暴成因分析

4.1 动力作用

强的气压梯度和变压梯度的动力作用,是造成地面强风的重要原因之一。由地面高低压中心移动路径(图略)可以看出,强冷空气以 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的速度,向东南方向直冲河西走廊。锋前青海热低压向东北方向移动并发展,两者间形成了很大的气压梯度(表1),除5日08时外,其它时段 $+\Delta P_{24}$ 中心值均在20hPa以上,6日02时最大为29.7hPa。锋面前后24小时正负变压中心的差值都在35hPa以上,最大出现在黑风发生前一小时的14时,达43.8hPa,实属罕见。另外,经对地面 ΔP_3 分析可知,5日05时在与冷空气相对应的南北向正变压区中,有两个中心分别位于阿勒泰和哈密附近,中心值为3.3和2.2hPa,08时哈密的中心移到马鬃山附近,中心值达4.7hPa。11时冷锋前负变压中心范围扩大,冷锋前后变压差达5.1hPa,14时酒泉—民勤变压差达8hPa;17时张掖—银川变压差高达13hPa。通常冷锋前后 ΔP_3 差达3—4hPa就可出现大风,而这样强的变压差必然会导致很大的地转偏差,使空气具有大的加速度,在变压梯度最大的区域造成强风。从图6看出,等变压线密集带所经地区的时间与黑风暴的时空分布完全一致,且其密集带略超前于冷锋。这揭示了黑风在强变压梯度中形成,强梯度出现在

冷锋和热低压之间,青海低压的发展加深是造成“5·5”黑风暴的重要因素。

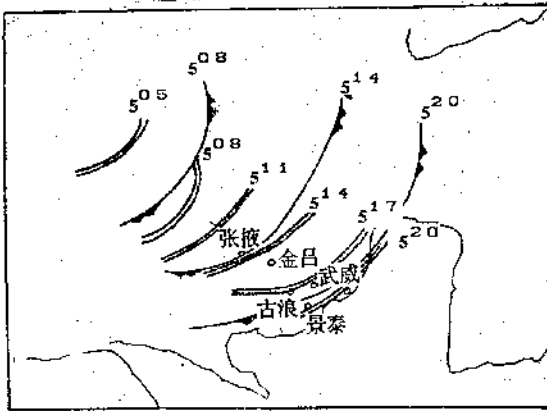


图6 3小时等变压线密集带和冷锋动态

表1 锋后 $\pm\Delta P_{24}$ 中心和锋面前后最大 $\pm\Delta P_{24}$ 差值/hPa

	5日					6日
	08时	11时	14时	17时	20时	02时 05时
锋后 $\pm\Delta P_{24}$ 中心值	19.1	23.0	26.1	24.4	25.3	29.7 26.5
锋前后最大正负变压差	35.2	38.3	43.8	41.5	40.8	41.4 /

利用地转偏差公式,在不考虑摩擦的条件下,计算了5日11、14和17时的偏差风(表2)。从表中可看出风速水平平流和风速垂直切变引起的偏差风的量级较小,3小时变压梯度造成的变压风的量级较大,它们差1—2个量级,偏差风中以变压风起主导作用,地转偏差则是由3小时变压梯度造成的,强3小时变压梯度是空气获得加速度形成黑风暴的动力因素。14时酒泉和刚察、17时张掖和银川之间形成了非常强的3小时变压梯度,计算得到的变压风分别为 $26.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $26.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,接近黑风暴的瞬时风速。位于强变压梯度中的张掖、金昌、武威和古浪等地依次在14时后、15时42分、16时40分和17时遭到了黑风暴的袭击。由此可见,3小时变压梯度对黑风暴的生成具有一定的预报指示意义。

4.2 热力作用

强的温度梯度也是导致风速增大的原因之一。从5日08、11和14时地面图上可以看出,24小时变温普遍在 13°C 以上;5日14时,马鬃山 ΔT_{24} 达 -18°C ,酒泉 ΔT_{24} 达 -13°C ,敦煌 ΔT_{24} 竟达 -20°C 。在冷锋前,暖平流向热低压

区输送,地面增温显著。另外,河西走廊地势平坦,多为沙漠,受热快,并正值日最高气温出现的时间,锋前增温更为剧烈。如民勤,5日08时气温为 12°C ,14时增高至 26°C ,24小时增温为 6°C ,银川5日08时气温为 15°C ,14时为 26°C ,24小时增温 7°C 。使冷锋前后形成很大的温度梯度,如5日08时位于冷锋前后的马鬃山与民勤之间的温度差为 13°C ,温度梯度为 $2.2^{\circ}\text{C}/100\text{km}$;11时为 25°C ,温度梯度达 $4.2^{\circ}\text{C}/100\text{km}$,14时达 30°C ,温度梯度增大到 $5^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ 以上。温度梯度的增大必然导致偏差风加大。同时温度梯度的增大也使大气斜压性加强,增大了斜压不稳定性,促使位能释放转化成为动能。其结果是风速加大。不仅如此,有人研究认为^[1],锋后浓密沙尘使太阳辐射几乎不能到达地面,严重阻碍了锋后的辐射增温;锋面前后温度梯度随着锋前暖空气的日射增温而逐渐加大,黑风也逐渐加大,沙尘变浓,又使温度梯度进一步加大,黑风强度亦加强。

表2 计算的偏差风/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

时间/时	站名和变压差	变压梯度造成的偏差风	水平平流造成的偏差风	风垂直切变造成的偏差风 $h(z)$	$h(s)$
11	敦煌—张掖 (4.6)	9.3	0.0	0.1	-0.1
14	酒泉—刚察 (6.9)	26.7	-0.9	-0.5	-2.5
14	酒泉—民勤 (8.0)	20.4	-1.5	-0.6	-1.9
17	张掖—银川 (12.6)	26.8	-1.0	0.0	-0.7
17	张掖—马鬃岭 (11.7)	48.9	-3.0	0.9	-2.1

4.3 动量下传作用

对流层上下层的动量交换是造成地面强风的原因之一,它是通过西风急流自上向下传递的。4—5日,在冷空气东移南下过程中,西西伯利亚到北疆的中低层逐步建立了一支北风急流,700hPa上风速达 $20\text{—}30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。槽前相应也形成一支偏南风气流,700hPa风速为 $10\text{—}16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,并与黄淮经渭水向西北流动的一支干暖偏南气流相联结,强沙尘暴发生在强风轴附近地区。经对强风轴附近地区11个站4日—6日垂直风变化的分析表明,北风和南风急流自西向东先后表现出明显的超地转特征。由表3可看出,5日08—20时,强沙尘暴

区中低层超出地转风速达3—12m·s⁻¹。这种超地转现象出现在黑风暴发生前后,超地转现象消失,黑风随之减弱。

表3 500—850hPa的地转偏差风/m·s⁻¹

站名	时间	高度/hPa			时间	高度/hPa		
		500	700	850		500	700	850
伊宁	5 ⁰⁸	1	1	17	5 ²⁰	3	-1	-7
乌鲁木齐	5 ⁰⁸	3	-4	5	5 ²⁰	-3	5	8
哈密	5 ⁰⁸	-1	6	3	5 ²⁰	1	4	10
马鬃山	5 ⁰⁸	-1	4	5	5 ²⁰	-3	12	4
酒泉	5 ⁰⁸	-1	4	3	5 ²⁰	-3	6	13
额济纳旗	5 ⁰⁸	-3	-2	3	5 ²⁰	-6	7	2
民勤	5 ⁰⁸	-2	-1	1	5 ²⁰	-6	2	-2
巴音毛道	5 ⁰⁸	-2	-3	-1	5 ²⁰	-7	4	-4
银川	5 ⁰⁸	0	-2	-4	5 ²⁰	0	-1	0
临河	5 ⁰⁸	-1	-2	-2	5 ²⁰	-2	-1	1
呼和浩特	5 ⁰⁸	1	1	-3	5 ²⁰	3	0	4

经分析还发现,对同一站点高层风速减小与中低层风速加大是同时出现;不同站点上游风的变化先于下游,且具有从高层向中低层传递的特征,现以哈密、马鬃山、酒泉和民勤4站的垂直风速变化加以说明。由图7a、b中可看出,哈密、马鬃山两站4日20时和5日08时,200hPa及以上风速减小、以下风速增大;4日08时—5日08时最大风速从200hPa下传到300hPa,最大风速增值中心从250—300hPa(15m·s⁻¹)移到400—500hPa(18m·s⁻¹),700hPa风速也增大了8m·s⁻¹;马鬃山从300hPa(17m·s⁻¹)下传到400hPa(14m·s⁻¹)。从图7c、d中也可看到类似现象,但时间滞后12小时,且5日20时酒泉250hPa—700hPa之间风速加大尤为显著,达15—20m·s⁻¹;而民勤500hPa及以下风速普遍加大到10—14m·s⁻¹。由此可推断,中低空南北风急流的形成和加强不仅与低槽东移、欧洲高压和东亚高压加强的地转适应过程相联系,而且与高空动量下传有关,动量下传对中低空急流加强起了重要作用。5日白天,锋前天气晴好,地面辐射增温十分强烈,空气层结相当不稳定,铅直交换强,空气的动量下传也较强,因而使地面风速明显加大。

4.4 地形影响

特殊的地形对强风的形成也有一定的影响。甘肃河西地区北有马鬃山、合黎山和龙首

山等,南有祁连山,组成一走廊狭管,当西来冷空气入侵时,这种地形的狭管效应使风速明显增大。经验证明,玉门镇的偏西大风常比周围大1—2级。因此,地处狭管中的酒泉、张掖、金昌等地出现的强沙尘暴及黑风暴是与这一作用分不开的。另外,冷空气越山沿坡下滑,伴随着位能向动能转换,亦是使风速加大的因素。利用牟惟丰先生研究的计算过山冷空气造成风速增量公式:

$$\Delta v = \sqrt{\frac{2gh}{T} \Delta \theta}$$

式中, T 是地面空气温度, g 是重力加速度, h 是冷空气下降的垂直距离, $\Delta \theta$ 是地面位温与越山冷空气位温之差;假定冷空气由天山、马鬃山翻山下滑,选择山东边哈密和酒泉为代表站。经计算得到,5日08时,哈密风增量为11.6m·s⁻¹,酒泉风增量达17.8m·s⁻¹。

4.5 下垫面影响

下垫面的属性及久旱少雨、高温低湿的

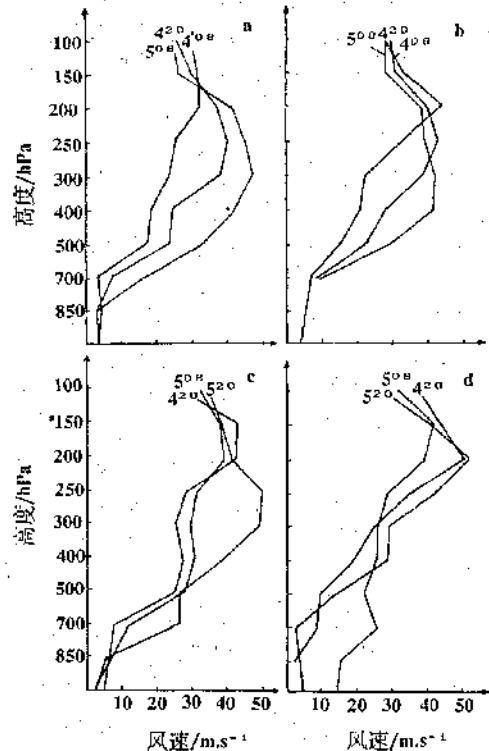


图7 强沙尘暴区域4站风速垂直廓线
a: 哈密, b: 马鬃山, c: 酒泉, d: 民勤

天气是黑风暴形成的必要条件。西北地区是风沙天气最多的地区之一,直接原因是广阔戈壁沙漠所提供丰富的物质条件,只需风速达 $8-10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 就可尘土飞扬。而1993年春西北地区干旱少雨、高温低湿、地表干燥、沙尘浮起,为这场黑风暴提供了极为有利的条件。4月份甘肃、宁夏、内蒙西部降水较稀少,从拐子湖到银川一带降水量不足 2mm ,3—5月降水总量不足 20mm ,降水量距平百分率低于 -50% 。4月中下旬,西北大部地区气温回升,温度比常年偏高 $2-5^{\circ}\text{C}$,空气相对湿度很小,土壤中水分蒸发很快。直到5月中旬以后,上述地区旱情才有所缓和。表4是张掖、武威、定西4月各旬的 10cm 深处的土壤相对湿度。由表4可知,从4月上旬一下旬,土壤湿度明显降低,这些地区由于旱区变成重旱区(10cm 深处的土壤湿度在 60% 以下为干旱区, 40% 以下为重旱区),土壤失墒严重,地表极为干燥,尤其是沙漠砾漠地区更是如此。在气温高、日照强的情况下,地面强烈增温,往往使近地面层的温度垂直递减率超过干绝热直减率而造成绝对静力不稳定。若有扰动,就引起强烈的垂直运动,将地面沙土吹向空中,为黑风准备了条件。

表4 4月各旬 10cm 处的土壤相对湿度(%)

时间	张掖	武威	定西
上旬	67	76	55
中旬	58	70	48
下旬	39	64	43

5 结 语

5.1 这场黑风暴是在欧亚中高纬环流经向

发展、 500hPa 以下层强冷暖空气交绥而发生的。是冷锋、蒙古地面冷高压、蒙古气旋和青海暖低压等主要天气系统共同影响的结果,它们东移减弱后,过程中止。

5.2 锋面附近中低层的水平温度梯度很大($20^{\circ}\text{C}/700\text{km}$),存在强的不稳定层,冷锋前后有较强的上升下沉气流, ω 比大尺度的垂直速度大一个量级,中低层涡度呈西负东正分布。黑风暴即产生在中低层 θ_{se} 密集区中,低层辐合高层辐散的上升运动区偏在低层弱下沉区一侧,并位于正负涡度梯度最大处偏于正涡度区。

5.3 黑风暴是地转偏差风,其风速理论计算结果表明,偏差风中变压风起主导作用,强3小时变压梯度和变压对黑风暴形成有重要作用。本次过程 ΔP_3 梯度达 $2\text{hPa}/1$ 个纬距及以上,锋后 $+\Delta P_{24} \geq 20\text{hPa}$,锋前后最大正负压差达 35hPa 以上,具有一定预报指示意义。强的温度梯度(大于 $5^{\circ}\text{C}/100\text{km}$)增大大气斜压不稳定性,促使偏差风加强,有利于黑风暴维持和发展。

5.4 动量下传造成中低层北风和南风急流具有超地转特征,加大低层和地面风力。河西走廊的狭管效应和冷空气翻山下滑引起地面风速增强的作用是应注意的。

5.5 3—5月初,西北地区持续高温低湿、地表干燥是形成黑风暴必要的气候条件。

参考文献

- 1 徐国昌等人,甘肃省“4·22”特大沙尘暴分析,甘肃气象资料文集,1981.

A Study of “5·5” Severe Black Storm

Yang Keming Han Jiangang Gu Qiujin Zhaomei

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract

Based on observations and physical parameters calculated with a limited-area numerical prediction model, an analysis of a severe black storm on May 5, 1993 is made. The results show that the temperature variation gradient, down-momentum and topography played important roles. The distribution of physical parameters, the formation conditions of the black storm and some criterions are given.

Key Words: black storm physical condition diagnosis