

中尺度自适应模式对一次沙尘暴天气数值模拟及诊断分析

智 海^{1,2} 沈桐立² 张喜林¹ 方晓红¹

(1. 内蒙古巴彦淖尔市气象局 015000; 2. 南京信息工程大学)

提 要

以实况资料作初始场,利用中尺度自适应模式对西北地区2000年4月12日强沙尘暴的天气形势和风场进行了数值模拟,对此分析得出西部地区沙尘暴的形成、发展机制和中小尺度系统对于沙尘暴发生发展的触发和指示作用。由于模式的输出结果是每3小时一次,比常规资料更能表现出沙尘暴的内在机制及时间和空间尺度较短的系统。结果表明:在沙尘暴发生前河西走廊西部就出现偏西大风,高空急流对沙尘暴发生区有很好的指示作用,强沙尘暴发生在200hPa高空急流入口区右侧,上升运动区内;高空急流发生变异时,导致对流层中下部锋区加强和大气层结不稳定,为中尺度系统的发生、发展和沙尘暴的产生提供了适宜的大尺度环流背景;西北地区干暖舌的形成和维持对沙尘暴的发生区有很好的指示作用,当冷锋过境时,干暖区是沙尘暴发生的最有利的环境。

关键词: 自适应模式 数值模拟 沙尘暴机制 诊断分析

引 言

2000年入春以来,我国西北地区沙尘暴发生频繁,其中4月12日是最强的一次区域性大风沙尘暴天气。甘肃、青海、宁夏等省区风力达8级以上,能见度普遍低于400m,沙尘暴强中心位于甘肃河西走廊中东部和青海省柴达木盆地,其中甘肃的永昌、金昌、武威、民勤、古浪和乌鞘岭等地最低能见度接近0m,沙尘暴覆盖了36~42°N、90~107°E范围内40多平方公里的区域。12日14时42分至21时02分,金昌瞬间最大风速达 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,乌鞘岭 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,能见度0m,达到黑风标准。20时45分沙尘暴过白银后减弱为扬沙东移,之后,扬沙天气向东南扩散,造成甘肃中部、陇东等地出现扬沙天气。浮尘天气随冷锋东移,在高空偏西气流的引导下于13日20时飘至东海上空^[1]。

这次过程与历次过程在发生、发展的机制上有一定共性,将采用中尺度模式MM4的自适应网格技术对这个沙尘暴个例进行模拟并分析沙尘暴的形势场演变、形成机制。在具体的模拟过程中,将利用模式的3小时间隔输出量模拟沙尘暴发生、发展、消亡过程,以分析在一定大尺度背景下中尺度系统的特征,以此揭示西北地区沙尘暴的机制和特性,试图得到发生沙尘暴的一般规律。

1 模式简介

选用2000年4月12日08时高空和地面资料,按模式前处理要求处理成模式初始场,还利用4月13日08时高空与地面资料形成时变边界。用自适应网格的MM4中尺度模式对上述的沙尘暴过程进行数值模拟,由于模拟研究的对象是沙尘暴,为分析其发生机制及中尺度特征,故将水平格距定为60

km, 计算区域中心点为(41.0°N, 105°E), 模拟区域水平格点数为 41×41 , 积分时间步长为3分钟, 水平方向为Arakawa B方案, 垂直分层为10层, 层顶取为 $P_{top} = 100$ hPa, 时间积分方案采用Shuman等提出的蛙跳格式, 侧边界采用时变的海绵边界条件, 行星边界层为总体边界层(PBL)参数化, 积云参数化采用Kuo-Anthes方案, 考虑了地表能量收支、水平扩散、垂直扩散和对流调整, 模式地形采用NCAR的 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 地形资料。起始时间为12日08时, 模拟时段为24 h, 取 $\Delta t = 180$ s, $r = 0.8$, $q = 1.0$, 网格每10分钟更新一次, 每3小时输出一次积分结果。

2 数值模拟

2.1 自适应物理网格的分布

图1为模式积分12 h的情况, 加密的网格区域对应三层平均的正相对涡度中心, 亦即低涡或低槽大致所处的位置, 网格随系统的变化而自动进行调整, 并按给定条件加密关心的区域。从图2(模式积分12 h的700 hPa高度场模拟)可看到, 加密区所对应的700 hPa高度场的低槽或低涡的位置, 位置

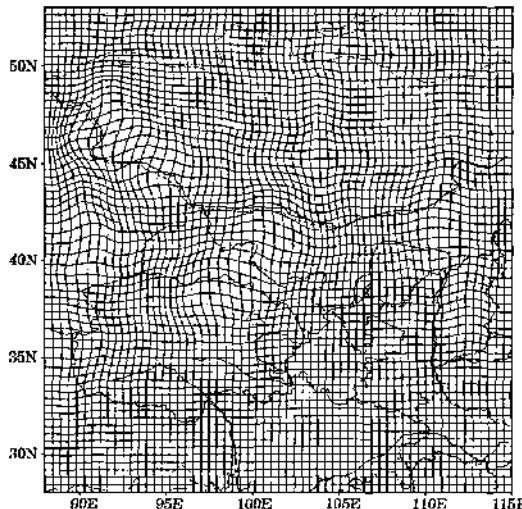
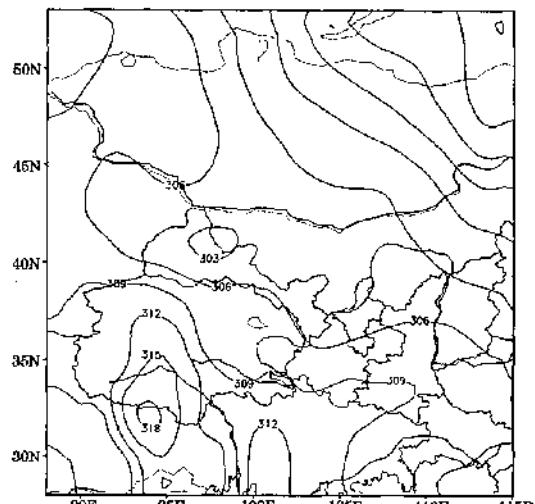


图1 模式积分12 h输出的12日20时对应的物理网格分布图

稍有点偏北, 但也说明此次自适应网格模拟中权函数的选择基本上抓住了过程的特性, 反映出了此次过程的本质。



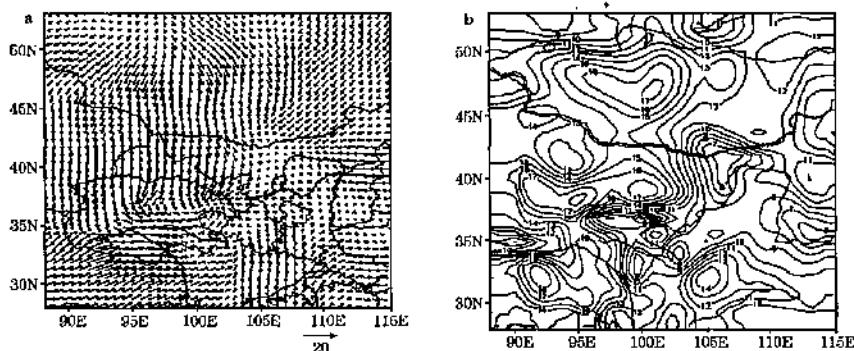


图3 沙尘暴爆发后两小时即模式积分9小时输出的12日17时地面模拟风矢量图(a)和速等值线图(b)
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 等风速线间隔 $1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

图4a是沙尘暴爆发的强盛期地面风矢量图,河西走廊的西北风逐渐转为一致的偏北风,气旋性闭合环流加强移到了银川附近以西附近,气旋性辐合更加明显。从风速等值线图4b上看到,大风范围扩大,风力加强,大风前沿东移,大风区出现在河西走廊的中部,等值线梯度增大,出现了强风中心。此时,极大值中心有两个,一个位于敦煌、酒泉

一带,中心值为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,另一个位于兰州以西地区,中心值为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,分别对应着地面的两个强沙尘暴区。甘肃全境出现了 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大风。风速大值区范围扩大,与实况所对应着的 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速等值线范围内的地区此时都出现了沙尘暴天气。

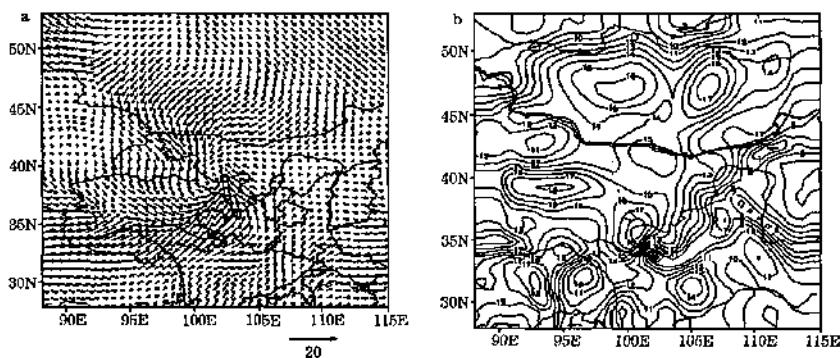


图4 沙尘暴强盛期,即模式积分12 h输出的12日20时地面模拟风矢量场(a)和地面风速等值线图(b)
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 等风速线间隔 $1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

高空风的变化步骤却与地面不一致。我们从模拟中发现(图略),在沙尘暴爆发前西北地区700 hPa上风速并不大,风速中心位于青海西部,西北地区被 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 线控制。在沙尘暴爆发后,700 hPa上的风速猛增,最大风速为 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 位于河西走廊西部,整

个西北地区由 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 线包围。在沙尘暴减弱期,发现在华北地区西北部700 hPa上空仍维持着西北大风,最大风速为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速中心位于内蒙古西部,西北地区此时被 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速线所包围。可以这样认为,在沙尘暴爆发之前高层动量下传过程还

很弱,次级环流还没有建立完整,高层的动量下传还没有到达700 hPa。在各种原因诱发了沙尘暴后,高空与地面强烈地进行热力、动力交换,地面到高空都维持着较大的风速。沙尘暴减弱后,动量下传作用先从地面到高空依次开始减弱,次级环流逐渐脱离地面,但仍在高空存在,所以沙尘暴减弱后在700 hPa仍然维持着大风,这也是此次下游区造成浮尘和扬沙的原因,沙尘由中尺度气旋后部的上升气流带至高空向下游输送。

2.3 形势场的模拟

2.3.1 高空形势场及锋区、低槽模拟

由于阻高和长波槽的调整,高空位于天山以北近乎东北—西南向的槽以及它们各自相配合的强锋区东移南下,造成了这次沙尘暴的发生。可知这次沙尘暴过程是西北路冷空气入侵河西走廊的结果,而低槽则是直接诱发了冷空气的南压,所以高空形势场中的小槽和锋区是模拟过程中的重要对象^[2],同样选择了沙尘暴过程中的发生前期、发生期、盛期、消亡期的高空形势场特征来说明模拟的结果,由模拟的700 hPa位势高度场、温度场可看出造成此次沙尘暴天气的低槽及锋区

的演变特征。

从模式积分9 h的700 hPa形势场模拟图(图略)上看到,低槽分裂东移,主体位于100°E以西,分裂的南支东移至河西的中部,高空锋区已到了40°N,等温线梯度加大,锋区加强,导致位于高空锋区前部的地面冷锋快速移动,地面上对应冷锋区域,河西走廊西部这时发生了沙尘暴;图5为模式积分12 h输出700 hPa形势场,南疆盆地为槽后冷平流输送,形成一闭合的低涡。而此时,地面的中尺度低压上空为暖平流控制,整层增暖显著,高层增温产生质量辐散流出,使低层气压迅速下降,局地气压下降导致低压中心强度加强,低涡得到维持并发展,引起动力减压,地面热低压发展,激发了强沙尘暴天气的发生。高空锋区与同范围的西北气流相配合构成了西北上空的冷平流输送,导致地面的沙尘暴加大。可见,位于高空小槽(或低涡)后部的高空锋区,在其后部的西北气流引导冷锋东移南压,高空锋区的移动和沙尘暴的发生有着密切联系,沙尘暴区位于高空锋区的前部。

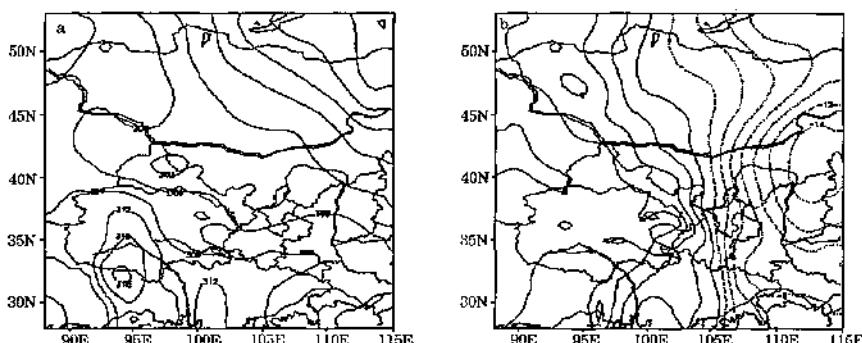


图5 模式积分12 h输出的12日20时的高空700 hPa模拟高度场(a)和温度场(b)

2.3.2 地面形势场——冷锋、中尺度低压、暖舌的模拟

从地面风场模拟中得出沙尘暴在发生过程中始终伴随着一个气旋性涡旋,它的发生、

发展、消亡对应着沙尘暴的各个发展阶段,在模拟地面气压场中也能表现出来它的气压特性——中尺度低压,由于中低压的存在,在它的后部生成一冷锋。冷锋位于物理量梯度极

大值区，前后物理量值对比强烈，伴随着低压东移，在地面气压图上它们的位置和强度成为沙尘暴前沿移动和出现、消亡的一个指示性标志^[3]。

图6a、b为模式积分9 h气压场、流场的输出。首先位于天山以北的冷高压突然加强爆发，冷空气前沿越过天山进入甘肃西北地区，高压东南部的等压线加密，与河西中部正在发展的中低压之间形成了很强的气压梯

度，推动地面冷锋的位置向东南移动，进入了河西走廊的西部。地面冷锋前低压辐合带收缩，气旋性加强，气压场上形成闭合的中尺度低压，水平尺度约200~400 km，低压外围风速也开始加大。低压北部是沙尘暴爆发区。此时正是河西走廊以北地区大风、沙尘暴开始加强的阶段，冷锋对应的位置位于沙尘暴的前沿。

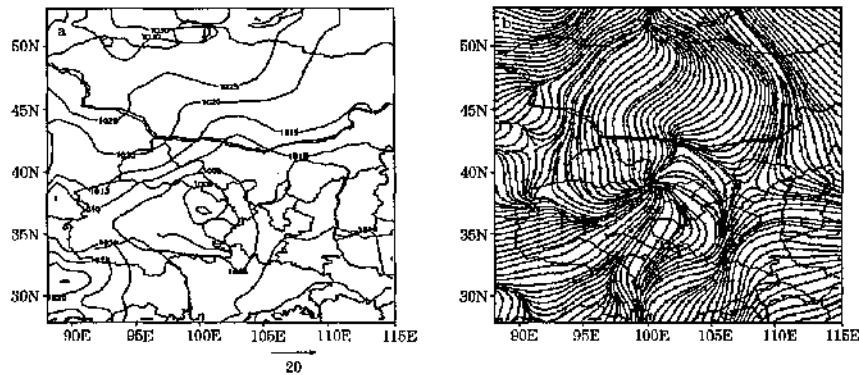


图6 模式积分9 h输出的4月12日17时地面气压场(a)、流场的模拟(b)

从模式积分12 h输出图(图略)上可以看到地面冷高压东扩，影响到了河西走廊地区，因此冷高压与河西热低压之间偏北风加大，沙尘暴加强，冷锋的强度比上一个时段稍有减弱，气压梯度密集带变宽，但这时中尺度低压更加完整，范围收缩，中心位于银川以南，移动速度加快，说明风速大小与气压梯度有关，气压梯度大，风速也大。流场上的中尺度涡旋风向辐合更加强烈，辐合中心位于中低压的前部，周围的风速加大。冷锋的走向由南—北向转为东北—西南向，位于兰州—银川一线。此时青海北部、甘肃的大部分处于冷锋后部的冷高压外围影响。从流场上看，西北地区受到一致的偏北风控制，沙尘暴影响了甘肃的大部分地区，强风区位于冷锋控制的地区。

在模式积分15 h输出图上(图略)，最明显的特征是中尺度低压变形，单体消失，强辐

合中心转变为南—北走向的低气压辐合带，周围风速迅速减弱，低气压带的北端位于河套向南延伸，冷锋减弱东移至兰州以东。由于冷锋在爆发后东移的过程是逐渐减弱的，主要受蒙古高压东南部的冷锋和气压梯度力影响的河西中、东部的大风、沙尘暴随之减弱，也就是说，冷高压与河西中低压相互作用产生大风、沙尘暴，动能的转化是大风、沙尘暴起动的重要机制。

综合以上模拟图，沙尘暴从生成到消亡不足9小时，随着中低压的发生发展，伴随着流场上的强辐合中心的发生、发展，河西出现大风和沙尘暴天气。中低压生成之后发展最强盛的阶段，出现大风沙尘暴天气，随着中低压的减弱消亡，沙尘暴也逐渐减弱为浮尘。因此中低压是激发沙尘暴的重要天气系统。地面流场也从另外一个角度说明了与中尺度低压对应的地面涡旋辐合在沙尘暴的过程中

经历了由弱到强再到弱的特点。

地面温度场与地面气压场一样也发生了变化。从图7看到,沙尘暴爆发的前1小时即模式的06 h地面温度模拟图上的西北地区有一暖区,呈带状从南向北延伸到中蒙边境一带,范围包括新疆东部、青海、甘肃大部,由于低压带暖空气堆积加上午后地面升温,以甘肃与新疆的交界为中心在地面上形成一

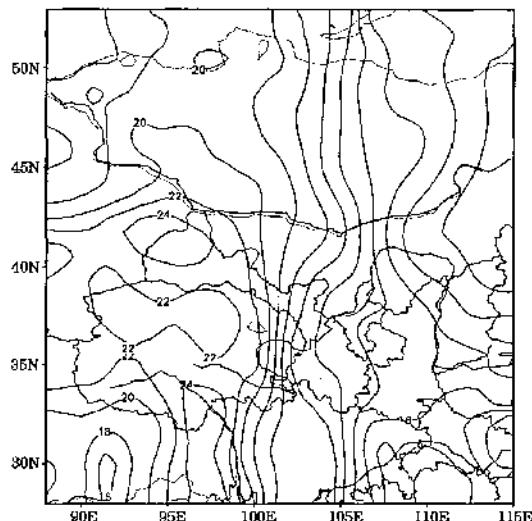


图7 模式积分6 h的12日14时地面温度场模拟输出

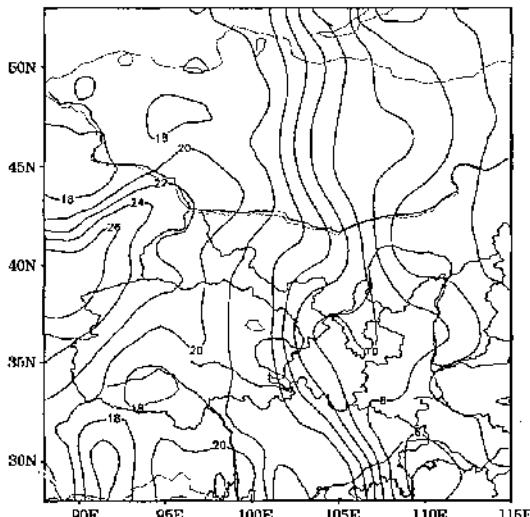


图8 模式积分15 h的12日23时地面温度场模拟输出

暖舌。图8为模式积分15 h的地面温度场模拟输出,冷锋过境后,沙尘暴减弱时的地面温度模拟图,可发现,沙尘暴爆发前控制西北地区的暖舌减弱西移南退,暖中心退出西北地区,整个西北区降温幅度4~6 °C。另外,在沙尘暴出现的前期,西北地区一直干旱少雨,地面处于干暖状态,这种干燥的下垫面有利于大风将地面沙土吹起,暖的下垫面则有利于地面能量的积聚,为沙尘暴爆发提供热力不稳定条件。

2.3.3 高空西风急流的演变诊断分析

图9为模式积分09 h的u分量200 hPa水平分布图,从图上可以看出,有一支强风速带,急流位于40°N附近,急流轴线呈东—西向,此时的沙尘暴位于高空急流附近的30 m·s⁻¹等风速线所包围的区域内,而强沙尘暴位于急流中心的右前方的3~4个纬距内。图10是模式积分12 h的u分量200 hPa水平分布图,可看到,急流中心不断东移,移至河西走廊的中部,强度增强到50 m·s⁻¹,范围不断扩大,它的30 m·s⁻¹的范围线包括了西北地区的大部分地区,35 m·s⁻¹线前沿推动着沙尘暴的前沿东移,这时沙尘暴的范围与35 m·s⁻¹的范围线一致。随着高空急流的继续东移南压,急流轴的35 m·s⁻¹范围线缩至银川以西,与此同时,同样在甘肃的东部至银川地区出现了强沙尘暴天气,发生的区域仍位于急流右侧,可以认为,发生大风、沙尘暴时,对流层中、上部有一支较强西风急流,沙尘暴区位于高空急流大于30 m·s⁻¹的等风速包围区内,而地面强沙尘暴中心发生在200 hPa急流入口区的右侧的前方。这样低层在急流入口区右侧辐合上升,有效位能向动能转换,引起地面低压的发生发展,造成了沙尘暴的发生,这与200 hPa高空流场的形状有直接的关系,流线辐合、辐散产生的弯曲、平流加速度造成了地转偏差及热力的间接环流发展有着直接的关系。从模式积

分9 h、12 h的200 hPa高空流场模拟图(图略),可以看到,在沙尘暴发生后,蒙古西部的200 hPa上空有一急流汇合区,在其东部形成一强风速带,此时地面上对应于高空急流入口区右侧的前方甘肃北部出现了强沙尘暴。高空急流的入口区东移,导致了地面的强沙尘暴区随之移至兰州的西部地区,同样强沙尘暴区对应着高空急流的入口区右侧的

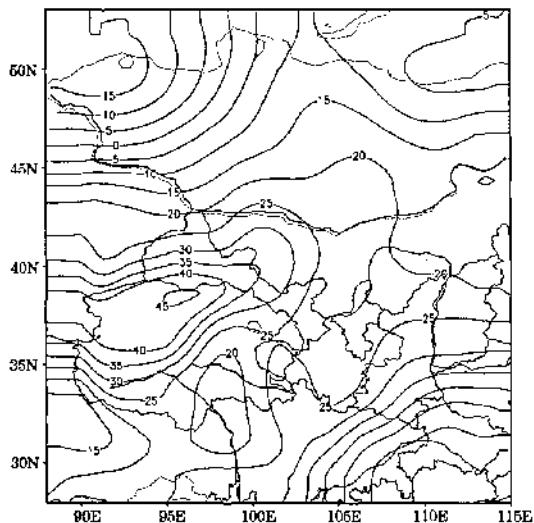


图9 模式积分9 h的12日17时
 u 分量200 hPa水平分布图

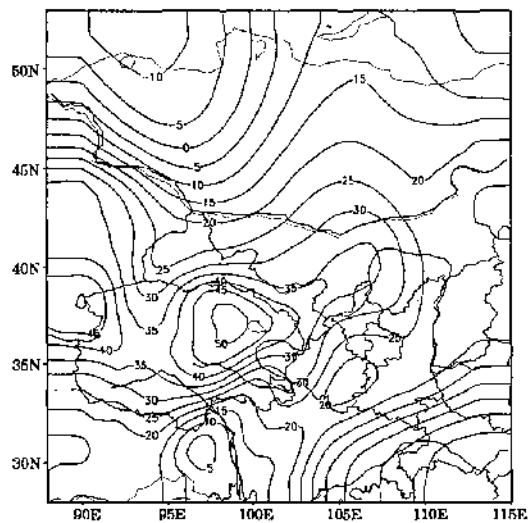


图10 模式积分12 h的12日20时
 u 分量200 hPa水平分布图

前方2~3个纬距的区域。

2.4 垂直运动的分布特征的诊断分析

从积分12 h的700 hPa垂直速度睡平分布图(图略)可以看到,上升运动大值区与地面中尺度低压相对应,范围一致,位于河西走廊中部,整个上升运动区包括了甘肃西部和青海北部地区。负值区对应地面冷高压的前部和冷锋的后部,上升区中心与下沉区中心距离较近,且上升区和下沉区随高度向西倾斜,此时地面冷锋位于90°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,导致沙尘暴天气的冷空气强度加大,它推动其前部暖气团强烈抬升,造成了沙尘暴天气的扬沙。随着沙尘暴的减弱消失,两个正的极大值中心消失,河西走廊强上升运动消失,大部分地区被下沉运动控制,这是沙尘暴过后,造成西北地区扬沙、浮尘天气的成因。

3 小结

(1)从高空形势场模拟及沙尘暴发生的区域分布来看,此次冷空气过程属于西北路冷空气入侵河西走廊的过程,影响沙尘暴的高空天气系统是斜压性很强的低压槽及高空锋区,而高空冷槽直接诱发了冷空气的爆发,扰动能量的释放下传使得系统移动,地面与此相对应的低压带由于冷空气的东移,强烈的冷暖对比形成了中尺度低压和锋生现象,从而激发沙尘暴。

(2)地面影响系统为地面冷锋和中尺度低压。由于中尺度低压的暖性性质使冷锋前后具有强的气压梯度、变压梯度、温度梯度。冷锋过境时,锋面前的抬升作用是必要的触发机制,而中小尺度低压系统的生成与环境场对流不稳定产生的扰动,对沙尘暴的突发、加强起到激发作用。地面流场上,河西气旋性涡旋的生成、发展是激发沙尘暴的中尺度天气系统,前期持续增温和降压为沙尘暴爆发提供了有利的热力条件。中小尺度低压多

发生在地面冷锋前部。冷锋进入中小尺度低压时,大风、沙尘暴天气加剧,与强沙尘暴出现的时间吻合。沙尘暴的发生、发展、减弱消失与中尺度的发展过程密切相关。

(3)次级环流对沙尘暴的能量输送作用。沙尘暴发生时对流层中上部有一支强西风急流,高空急流及其下部存在一个北部上升、南部下沉气流的大型次级环流,它是引发沙尘暴发生的动力、热力机制,起到高层动量下传和加强低压锋区的作用。从模拟的500 hPa、700 hPa、850 hPa风速分布图上可明显看到沙尘暴发生区上空的风速明显加大。

(4)沙尘暴爆发前期,是整个沙尘暴存在期间增温幅度、增温速度最大的时期,导致西北区700 hPa以下为暖区,当高层冷空气侵入时,大气层结极度不稳定,沙尘暴产生在上升运动区和层结不稳定区,沙尘暴发生后,大气层结趋于稳定,沙尘暴转为浮尘天气。

(5)西北地区干暖舌的形成和维持对沙

尘暴的发生以及落区有很好的指示作用,当冷锋过境时,干暖区是沙尘暴发生的最有利的环境和起尘区。

(6)沙尘暴具有很强的日变化,由于地表的午后增温,加剧了地面的热力条件,所以沙尘暴多发生在午后到傍晚增温最强的时段,2000年4月12日沙尘暴就发生在14—22时。

参考文献

- [1] 王劲松,李耀辉,康凤琴,等.“4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[M].西北重要天气成因数值预报方法研究.北京:气象出版社,2002: 45-55.
- [2] 徐建芬,孙兰东,徐东培,等.西北地区一次斜压槽引发的强沙尘暴研究[M].西北重要天气成因及数值预报方法研究,北京:气象出版社,2002: 144-149.
- [3] 陈伟民,王强,牛志敏,等.中国西北部“4.5”沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟[J].中国沙漠,1996,16(2): 140-144.