

文章编号: 1000-0534(2003)06-0590-07

“2001. 4. 6”宁夏沙尘暴过程卫星图像分析

胡文东^{1, 2}, 高晓清³

(1. 南京气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002;
3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用日本 GMS-5 地球同步气象卫星资料, 结合常规气象资料, 对 2001 年 4 月 6 日发生于宁夏的一次沙尘暴天气过程的影响系统、物理机制、运动学特征、发展演变过程和地形作用等进行了分析。结果表明: 在 GMS 卫星图像上, 这次过程有明显的特征, 通过图像处理可以得到更多的细节信息。结合实测资料的分析表明: 这次沙尘暴天气是高空强西北气流和地面急行冷锋共同影响的天气过程, 在卫星云图上其热力与动力过程有明显的反映, 而且随着时间的变化其作用不同。三种不同的地形在这次过程中具有不同的效应。这些结果对深入认识沙尘暴天气过程, 提高监测预报能力有重要意义。

关键词: 卫星图像; 物理机制; 动力、热力影响; 地形作用

中图分类号: P445^{1.4} **文献标识码:** A

1 引言

沙尘暴是我国西北地区春、秋季多发的灾害性天气过程, 其发生发展迅速, 往往给人民的生命财产造成很大损失。对沙尘暴的分析、研究和预报已经取得很大进展^[1~7]。研究结果表明: 利用气象卫星对沙尘暴的发生发展进行监测和预报, 是最有效的方法之一。本文利用日本 GMS-5 卫星 2001 年 4 月 6 日资料, 对卫星云图进行特殊处理, 并结合

常规气象资料研究了这次过程, 得到了一些有意义的结果。

2 过程概述

2001 年 4 月 6 日自中午到夜间, 受蒙古快速东移南下冷空气的影响, 宁夏全区出现大风天气, 最大瞬时风力达 8~9 级(表 1), 并伴有扬沙。平罗、陶乐、银川、吴忠、青铜峡、盐池、麻黄山、兴仁 8 站出现了沙尘暴天气。

表 1 2001 年 4 月 6 日宁夏各站最大瞬时风速($m \cdot s^{-1}$)、沙尘暴及其发生时间
Table 1 Maximum instantaneous wind speed($m \cdot s^{-1}$), sand storm and their
occurring time at various stations, Ningxia on April 6, 2001

站名	惠农	平罗	陶乐	银川	吴忠	青铜峡	中卫	盐池	麻黄山	同心	韦州	兴仁	海原	六盘山	泾源
最大瞬时 风速 ($m \cdot s^{-1}$)	20		17	18	18	17	18		22	17	19	19	19	22	18
出现时间	14:59		14:42	14:44	14:31	13:20	12:39		14:52	13:44	14:13	12:38	13:46	18:32	17:02
沙尘暴		√	√	√	√	√	√		√	√					
沙尘暴		13:28~	15:10~	15:08~	15:17~	13:41~		16:45~	14:23~			12:24~			
起讫时间		17:56	16:08	15:40	16:45	16:51		18:39	18:09			12:29			

收稿日期: 2002-03-11; 改回日期: 2002-11-12
基金项目: 国家重点基础研究发展规划“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”项目(G1998040900); 中国科学院知识创新工程
重大项目“西部生态环境演变规律与水土资源可持续利用研究”项目(KZCX1-10-02)共同资助
作者简介: 胡文东(1966), 男, 宁夏银川人, 高工, 主要从事短期天气预报工作及预报方法研究, E-mail: huwendong@yeah.net

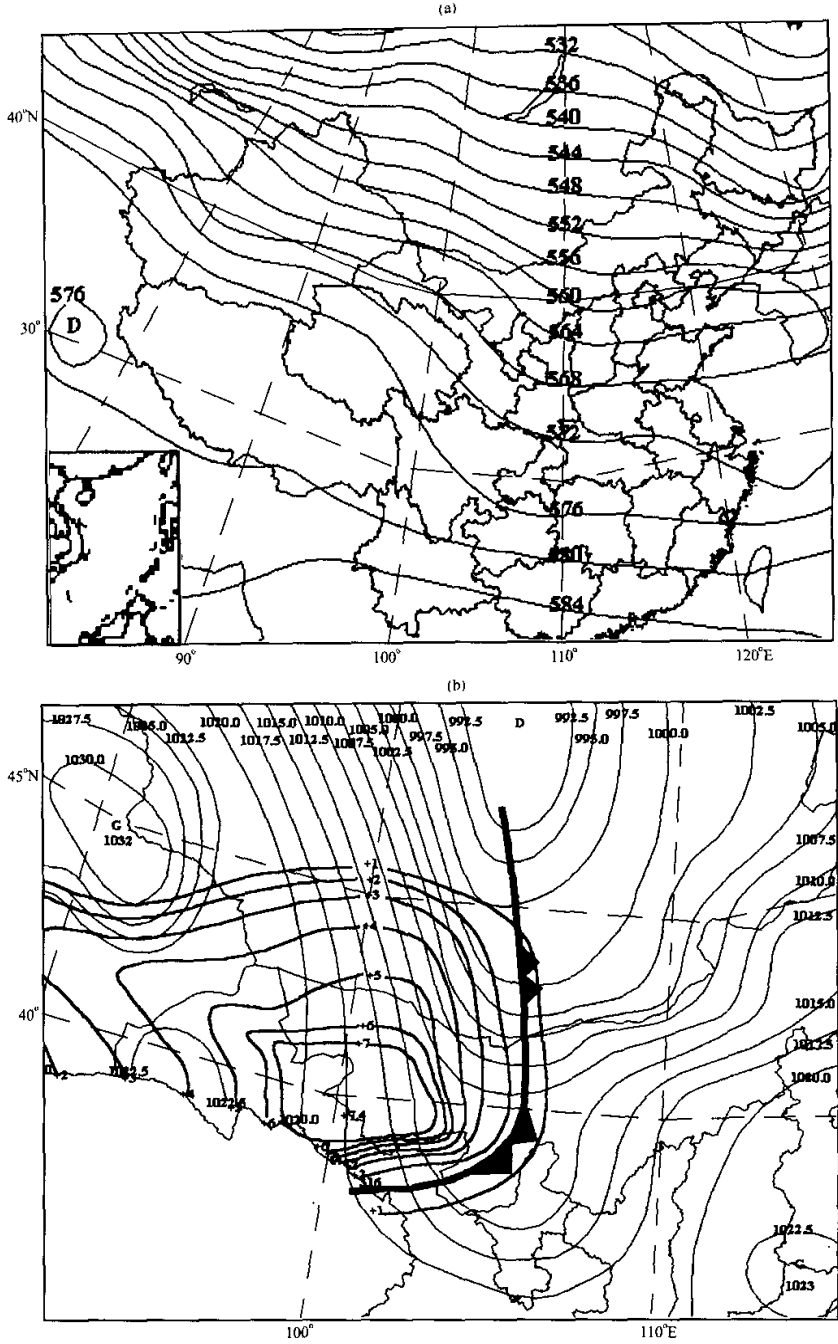


图 1 (a) 2001 年 4 月 5 日 20:00 500 hPa 高度场, (b) 2001 年 4 月 6 日 08:00 地面天气
图 1a 中细实线为位势高度等值线(单位: gpm), 图 1b 中细线为海平面气压, 粗线为 24 h 变压(单位: hPa)
Fig. 1 (a) 500 hPa geopotential height at 20:00 on April 5, 2001, (b) surface weather at 08:00 on April 6, 2001. Thin solid lines in Fig. 1a for isolines of geopotential height(gpm). Thin line in Fig. 1b for sea-level pressure and thick line for 24 h pressure variation(hPa)

3 天气形势分析

3.1 前期特征

在 2001 年 4 月 1 日 08:00(北京时, 除特别说明外, 下同)的 500 hPa 天气图上, 中高纬度欧亚区域为两槽一脊型。东亚大槽位于日本东侧, 自新疆经西西伯利亚到北地群岛是一较强脊区, 脊后新地岛至威海为槽区。

4 月 1~5 日, 宁夏受新疆脊控制, 各地的平均气温明显较多年平均值偏高, 24 个测站平均偏高 5.3℃, 最低的西吉偏高 3.3℃, 最高大武口偏高 6.6℃。除南部山区的 4 个测站外, 降水均较历史同期偏少, 20 个测站平均偏少 1.4 mm, 同心偏少值最大, 为 3.2 mm; 陶乐最少, 为 0.3 mm。缺少降水和偏高的气温使地表缺少水分更为干燥, 因此, 在合适的条件下易于扬起沙尘。

3.2 高空形势

在这次沙尘暴酝酿过程中, 强脊后威海处的冷空气受南下极地冷空气补充, 不断积聚加强, 迫使原位于新疆的脊逐步崩溃东移, 冷空气爆发, 东移南下侵入我国。到 4 月 6 日 08:00, 该冷槽到达甘肃河西地区, 开始造成甘肃河西、内蒙古阿拉善盟以及宁夏的大风、扬沙和沙尘暴天气。当晚 20:00 该槽移到宁夏以东内蒙古伊克昭盟一带, 宁夏的沙尘天气过程趋于结束。

从 500 hPa 天气图上分析(图 1a), 自 4 月 5 日 20:00 起, 宁夏上游的甘肃河西地区、内蒙古阿拉善盟就被强西北气流控制。上游的 10 个测站中, 有 9 个测站的风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 另 1 个站的风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。宁夏位于发散槽的前部, 上游的位势梯度和风速都大于下游。在天气系统总体东移的情况下, 天气系统的演变具有进一步加强的趋势。4 月 6 日 08:00 的 700 hPa 天气图上(图 1b), 宁夏及上游也是处于一致的西北气流之中。

3.3 地面形势

在 4 月 5 日 05:00 的地面天气图上, 地面高压主体在新疆塔城, 锋面位于乌兰巴托西—拐子湖—酒泉一线, 锋前为热倒槽。锋面前后的 24 h 变压、温度梯度、气压都很大。例如锋前的巴音毛道 24 h 变压为 -14 hPa , 锋后乌鲁木齐为 $+15 \text{ hPa}$; 锋前拐子湖、阿拉善右旗温度为 14°C , 锋后马鬃山为 -3°C ; 锋前拐子湖的气压为 1005.9 hPa , 锋后的蔡家湖为 1027.8 hPa 。

从 4 月 6 日 08:00 的天气图上来看(见图 1b),

一股冷空气快速东移南下至冷湖、茫崖, 中心强度为 1023.6 hPa , 锋面推进到黄河西侧, 张掖 3 h 变压达 7.4 hPa , 甘肃河西、内蒙古阿拉善盟的一些站开始出现沙尘天气, 地面风仍以西北方向为主, 鼎新站风速最大达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。气压梯度、变压梯度都保持较大。

研究表明, 沙尘暴多发生于不稳定大气层结构条件下^[8, 9], 但也有些情况产生于稳定大气条件下^[10]。在这次过程中, 从银川及民勤站探空曲线(图 2a, b)上可以看到, 宁夏及上游区域的大气层结均为稳定结构, 不易产生垂直运动。

自大气层中层到低层, 宁夏上游为一致的强劲西北气流, 地面冷锋是这次过程的直接影响因子。

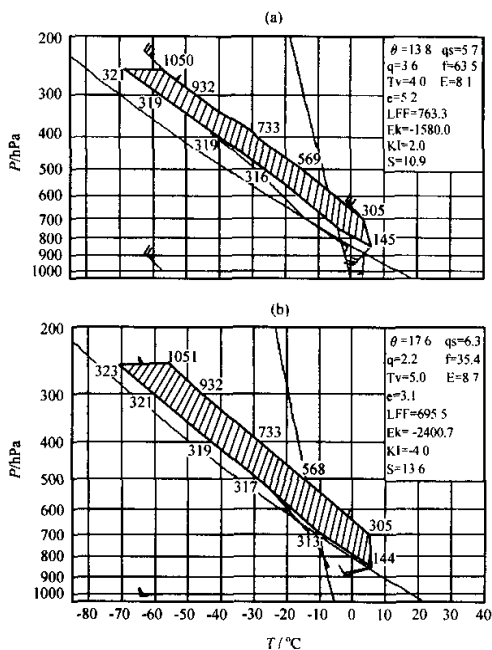


图 2 2001 年 4 月 6 日 08:00 银川(a)及民勤站(b)

温度对数压力

图中斜线区域为稳定层结

Fig. 2 $T-\ln P$ diagram in Yinchuan(a) and Minqin(b) at 08:00 on April 6, 2001. Areas with oblique lines are stable stratification

4 系统的发展演变

在 500 hPa 天气图上, 宁夏上游的强西北气流继续维持。4 月 6 日 08:00, 宁夏上游站点的西北风进一步增大。从地面天气图上可以看到, 此时处于天气下游的宁夏全境天气晴朗, 能见度较好, 能够有效地吸收太阳辐射, 为天气系统的加强与发展

提供能量。到中午时分,由甘肃河西、内蒙古阿拉善盟卷起的沙尘全面侵入宁夏,冷锋过境,宁夏站点的能见度、空气湿度急降,风速骤增。锋面后有扬沙、沙尘暴天气。以银川为例(图3),14:00 锋面过银川,银川气压开始上升,气温下降,干冷空气使相对湿度下降,强气压梯度产生大风,瞬时最大风速达 $18.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大风卷起的沙尘使能见度急剧下降。15:08 到 15:40 达到沙尘暴标准。

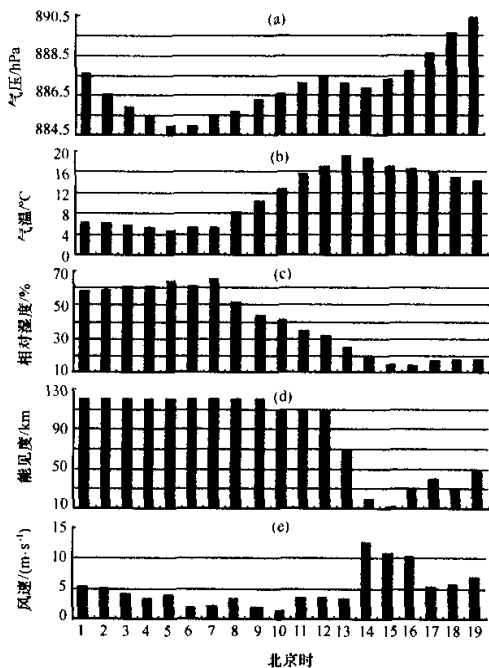


图3 2001年4月6日银川站气压(a)、气温(b)、相对湿度(c)、能见度(d)、风速(e)逐时变化

Fig. 3 Temporal variations of pressure(a), temperature(b), relative humidity(c), visibility(d) and wind speed(e) in Yinchuan on April 6, 2001

4月6日20:00,在500 hPa天气图上,宁夏上游地区出现西南风,对应的700 hPa天气图上出现反气旋环流。地面高压主体进入宁夏,气压梯度大为降低,天气系统的动力条件不再维持。同时由于沙尘到达后使地表能见度锐减,且随辐射的日变化,来自太阳辐射的热力作用减弱。动力与热力机制在消失,故处于能量耗散状态,系统迅速减弱消退。

5 气象卫星云图特征

5.1 卫星云图的初步判识与特征

从上述资料分析可知,这次沙尘过程的低层系

统湿度很小。由地面观测发现,这次沙尘过程中除极个别站外,基本是高云。所以可以推定在卫星云图上,高湿区是高空云系。从卫星水汽通道的图像上,我们可以确定高湿区表示的高空云系所在区域。在红外云图上相对应的这一区域之外,根据多年积累的预报经验,实际目测可以比较容易判识沙尘区域。

从09:00的GMS红外伪彩色云图上,可以看到自阿拉善盟东部到河西的锋面云系,其亮温较低,呈粉红色和白色。陇东、陇南与宁夏交界处有低云。

该地区除有云处以外,亮温较高,呈灰色。结合探空资料,在当时的天气形势、大气垂直分布条件下,层结稳定。沙尘主要在近地层分布,云图上反映亮温比较均一,其温度梯度很小,十分均匀。

5.2 沙尘推进过程

09:00,沿河西走廊一带灰色的沙尘区域比较完整,而阿拉善盟处的沙尘区域完整性略差。结合低层风速可知,河西的风速较大且风向一致性更强,阿拉善盟的风向偏西南。到10:00,沿河西走廊向东南推进的沙尘区发展迅速,北部阿拉善盟的沙尘区移速较慢,其原因在于河西地面为一致的西北风,而阿盟为西南风。10:00,云图上的沙尘区亮度进一步提高,且更为均一。到12:00,甘肃的兰州、白银已经被沙尘所控制。自贺兰山脉到中卫黄河岸边,沙尘区已经全线逼近宁夏边境。13:00沙尘从贺兰山南、北两侧山口进入宁夏,推进速度有所减缓。14:00宁夏中部、北部几乎完全落入沙尘之中。15:00固原地区也被沙尘笼罩(图4)。

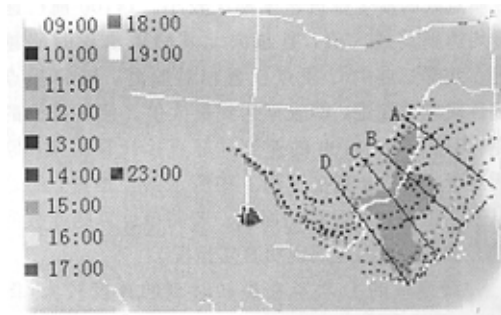


图4 沙尘前缘逐时推进示意图

Fig. 4 Hourly leading edge movement of dust storm

5.3 沙尘推进速度变化

5.3.1 代表点选取与计算

在沙尘区取4个空气质点,在运动中它们分别

通过 A: 宁夏北部的石嘴山区域, B: 贺兰山南部山口青铜峡区域, C: 中宁—中卫之间, D: 经过固原地区的西吉, 以此代表自南向北不同区段的沙尘运动变化, 见图 4 中四条线。

在计算速度前, 先进行地形定位校准。选取 40°N , 110°E 的交点作为各不同时刻间图像的地形校准基点, 以消除卫星摄动引起的图像间的位置误差。上述 4 质点的推进速度变化如图 5 所示。

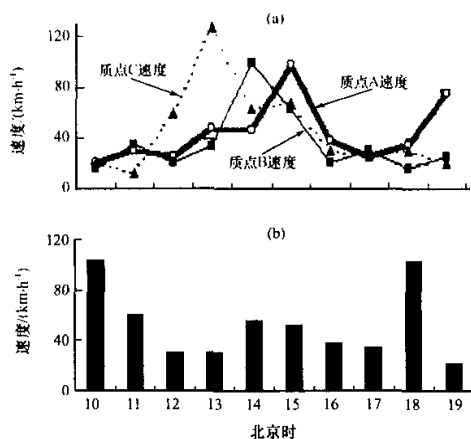


图 5 (a) A、B、C 和 (b) D 四质点的速度
随时间的变化

Fig. 5 Temporal variations of speeds
at A, B, C(a) and D(b)

5.3.2 结果分析

计算结果表明, 北部三个质点处沙尘推进的速度有较高的一致性(图 5a), 即: 最初的几个小时, 三质点处的沙尘推进速度都较小。14:00 前后速度均达到其最大值, 且越向北其峰值出现时间越迟。北部三点中 C 质点位置相对偏南, 与 D 质点的性质较为接近, 即较早达到最大值。值得指出的是: B 质点在 14:00 的速度并非直接计算结果, 原因在于, 它并非直接按图 4 中所示路径推进, 而是从贺兰山南口侧向移动而来。若简单计算则此数值明显偏大, 不能客观说明真实情况。

最南端的 D 质点在最初时刻的速度较大(图 5b), 到后来迅速减小。18:00 其速度突然急剧加快, 原因也在于是地形引起的空气绕流。即前几个时次沙尘从侧面推进, 到 18:00 才在此路径上再次出现, 所以不能机械地认为是其速度剧增。

沙尘推进速度的变化一方面受天气系统演变规律的控制, 在本例中可归结为系统主导能量来源的

转化过程(将在 6.2 中讨论); 另一方面与地形地貌有关, 即北部三质点在下午经过的地区为平原, 易于推进; 而最南端的质点通过的是山区, 前进相对困难。

需要说明的是, 质点的选择与追踪定位是手工进行的, 尽管在数值上会存在误差, 但是, 四质点总的速度变化趋势仍然十分明显。

5.4 云图上沙尘区域结构

在这次沙尘天气的卫星图像上, 有较明显的沙尘运动纹理结构特征。如其中在甘肃河西一带的沙尘, 有突出的西北—东南向强风吹行的痕迹。在这一区域(浅蓝色区域)使用图像光谱自动均衡技术进行增强处理后, 可得到特征加强的图像, 如图 6 所示。

从这些图上可以得到强沙尘区的发展移动方向、强沙尘区内部的分布特征。12:00 云图强中心的连续性更好些, 其发展移动能力更强。13:00 出现了减弱趋势, 其强度分布并不连续, 分别存在两个高值的密实中心, 而且两个中心的区域也在缩小。所以从这些处理过的图像上, 由沙尘区域的纹

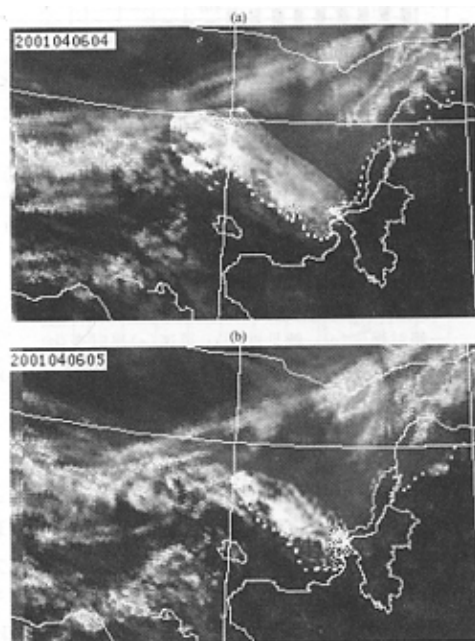


图 6 2001 年 4 月 6 日 12:00(a)和 13:00(b)河西
沙尘区自动均衡后卫星图像
图中标示为世界时

Fig. 6 Equalized images of sand-dust area in
Gansu Corridor at 12:00UTC (a) and 13:00UTC
(b) on April 6, 2001

理连续性、密实度和强中心区域面积变化情况可以分析出甘肃河西的沙尘存在减弱的趋势。其物理机制在后面分析。

6 讨论与分析

6.1 过程天气背景分析

这次沙尘天气是一次较为典型的过程。中低空强西北气流,地面有急行冷锋,锋后有强的正变压和气压梯度,从而产生大风。由于气团十分干燥,所以很难造成降水。时值春季,甘肃河西、内蒙古阿拉善盟的地表干燥,在大风的作用下容易卷起沙尘,形成沙尘天气,能见度较低。

6.2 动力—热力机制讨论

由银川站的相对湿度变化图(见图 3c)中可知,这个锋面十分干燥。由温度对数压力图(见图 2a, b)可知,不存在强烈上升运动的条件及合适的水汽相变条件,所以可以认为,水汽凝结潜热对这一过程没有重要影响。过程的能量来自大气动能(因沙尘主要在低层运动,故地表大气动能更为重要)和太阳辐射的热能。

动力主导期:在上午最初的几个小时,太阳刚刚升起,辐射比较弱,地表大气动能的动力作用远大于太阳辐射的作用。此时哪里的风大,哪里的沙尘就强。故而在强西北风控制下的甘肃河西地区、沙尘活动很强烈,推进的速度很快,卫星云图上带状纹理结构与密实度特征也很明显。内蒙古阿拉善盟地区因风速相对较小,其沙尘活动相对偏弱。

热力增强期:中午时分,原处于晴空区域的宁夏因接受了较好的太阳辐射而积蓄了相当的能量。原在内蒙古阿拉善盟地区的沙尘,通过贺兰山入境后势力大增,速度加快迅速东移。而由河西推进的沙尘因动能的减小而出现减弱的趋势。

全面消退期:下午沙尘覆盖了宁夏大部分地区。从 15:00 的可见光云图上可知,沙尘区的反照率较高,太阳辐射的能量大量被沙尘反射,热力机制受到破坏。而且自急行冷锋过境后,宁夏受到高压主体控制,气压梯度很小,风力减弱,动能也在消失。沙尘发展的机制不复存在,终成强弩之末,无力推进。到当晚 23:00,其前缘基本维持在原地。部分地区由于最后阶段吹起的沙尘较低,风平浪静后回落较快,所以沙尘前缘反而有所倒退。其经过的大片区域,也在能量耗散过程中走向衰亡,逐渐尘埃落定,沙尘天气消退。徐国昌等^[11]指出,白天锋前接受辐射增温与锋后冷空气及沙尘阻挡破坏太

阳辐射,使温度梯度加大从而形成维持机制。入夜辐射增温作用不复存在,系统减弱消亡与这次沙尘过程相吻合。

6.3 地形作用对沙尘暴的影响分析

这次沙尘过程中大气的垂直结构十分稳定,所以沙尘运动主要局限于近地面的表层大气,地形对其有明显的影响,而地形的不同尺度与走向,影响的效果也不同。

青藏高原的地形阻挡作用:从 4 月 6 日 08:00 的地面图上可以看到,锋面一直延伸到青海,而且地面风场也有利于沙尘向青海运动,但除茫崖与冷湖外青海并未出现沙尘天气,其原因就在于青藏高原的地形阻挡。在近地层浅表运动的沙尘无法翻越高耸的青藏高原,所以使青海免受此次沙尘天气的侵袭。

贺兰山脉的迟滞作用:贺兰山脉大致呈南北走向,基本上受到沙尘的正面侵袭,其相对于沙尘活动的高度难以完全阻止沙尘的前进,但它对沙尘的迟滞效果相当明显。从当日云图上看,11:00 沙尘已经逼近贺兰山脉,到 12:00 仍然无法越过,而是在山前积聚。13:00 贺兰山东侧沙尘弥漫,但银川市区域沙尘活动相对较弱。从云图上可以看出,沙尘的主体分别从南北两端绕过山脉,最后两支气流在银川一带汇合。所以贺兰山脉起到了迟滞沙尘运动的作用,大约将其到达时间推后了 1~2 h。

西华山—月亮山—六盘山山系的引导作用:宁夏固原地区的西华山—月亮山—六盘山山系在这次过程中也有明显的地形效应。这一山系基本沿着沙尘运动的方向,故而对沙尘进入其侧面谷地具有引导作用。从 14:00 的云图上就可以看到沙尘的前缘逼近西华山,因无法翻越而被导入清水河河谷。到 16:00 沙尘前锋沿河谷东南向推进,已过固原,临近泾源,但仍然不能到达这一山系之上。

6.4 沙尘活动的高度分析

如果云体发展强盛,高度较高,则在下午的卫星可见光云图上能够发现其后部背光区的阴影。而这次沙尘过程中,沙尘区背光处区域一直没有出现光的阴影区。所以这次沙尘区发展的高度相对不高。把红外卫星云图的亮温资料与地面探空曲线结合,对照宁夏地形图可以发现,沙尘区的移动和发展大致沿 2200 m 等高线进行,即这次沙尘活动基本在海拔 2200 m 以下。

7 结论

本文结合常规气象资料对 2001 年 4 月 6 日的一

次沙尘暴天气进行了卫星图像分析,得到如下结论:

(1) 大气层中、低层的强西北气流和地面具有强气压和变压梯度的急行冷锋是这次过程的基本影响系统。稳定的大气层结使沙尘的活动局限在大气的低层。由卫星图像分析可知,沙尘暴发生的高度大致在海拔 2200 m 以下。

(2) 近地层的大气动力作用和太阳辐射的热力作用是沙尘过程的能量来源。上午以动力作用为主,河西的沙尘推进发展迅速。中午过后热力作用占优,由阿拉善盟移过贺兰山的沙尘区活动加剧。下午两种机制消失,沙尘天气进入消亡阶段。完整地理解和掌握其物理机制,有助于对沙尘过程的细节进行准确的预报。

(3) 卫星云图对沙尘前缘的移动有很好的监测能力,各处质点移动速度与动力机制分析相一致,各时次、各处的沙尘天气强度在卫星云图上都有明显的反映,这对于沙尘暴的预报警报有重要意义。

(4) 卫星云图的进一步处理,可以揭示沙尘天气过程内部的一些详细信息。根据这些信息可以掌握其它方法难以获得的系统移动、发展、演变情况。

(5) 地形对这次过程的发展有重要影响。地形的不同走向、不同尺度对沙尘的运动有不同的作用。大尺度的地形有阻挡作用,受沙尘正面冲击的稍小山脉具有迟滞效果,而沿其方向的山系可将沙尘引入谷地之中。从而造成了不同区域沙尘天气在

进程与强度上的差异。

参考文献

- [1] 赵光平,王凡,杨勤等.宁夏强沙尘暴天气成因及其预报方法研究[M].见:方宗义,朱福康,江吉喜等编.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社,1997.52-58
- [2] 徐希慧.塔里木盆地沙尘暴卫星云图特征[J].新疆气象,1993,16(3):19-23
- [3] 何清,桑长青,唐淑娟等.塔克拉玛干沙漠腹地盛夏沙尘暴天气 NOAA 卫星云图分型分析[M].西北卫星遥感技术应用.北京:气象出版社,1999.288-293
- [4] 倾继祖,刘亚平,龚崇栋等.利用极轨气象卫星资料分析 5.5 黑风暴[M].西北卫星遥感技术应用.北京:气象出版社,1999.276-278
- [5] 郑新江,刘诚,赵亚民等.5.5 沙尘暴天气的云图特征[J].甘肃气象,1993,11(3):32-34
- [6] 江吉喜.一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[J].应用气象学报,1995,5(6):177-183
- [7] 赵光平,贾宏元.1993 年 5.5 西北地区强沙尘暴天气卫星云图分析与研究[M].西北卫星遥感技术应用.北京:气象出版社,1999.279-287
- [8] 陈敏连,郭清台,徐建芬等.黑风暴天气的研究与探讨[J].甘肃气象,1993,11(3):16-27
- [9] 许宝玉,钱正安,焦彦军.西北地区 5 次强沙尘暴前期形势和要素的综合分析与预报[M].见:方宗义,朱福康,江吉喜等编.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社,1997.44-51
- [10] 许东蓓,杨民,孙兰东等.西北地区 4.18 强沙尘暴、浮尘天气成因分析[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,2002.150-154
- [11] 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J].气象学报,1979,37(1):26-35

Satellite Image Analysis on Dust Storm Process in Ningxia on April 6, 2001

HU Wen-dong^{1,2}, GAO Xiao-qing³

(1. Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Preventing and Reducing Meteorological Disaster, Yinchuan 750002, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Combining with conventional synoptic information, and using the GMS-5 geostationary satellite data, the synoptic system, physical mechanics, developing characteristics and topographic effect of dust storm event in Ningxia happened on April 6, 2001 have been analyzed. The results are as follows: (1) This event can be seen clearly on the satellite images, the movement of the leading edge can be easily identified. (2) This case is a combined result of strong northwest wind in higher altitude and a quick moving surface cold front. (3) The dynamical and thermal effects can be identified on the images, and their roles change with time. (4) The topographic effect is a very important fact in the evolution of dust storm. These are of important significance in the prediction of dust storm.

Key words: Satellite image; Dust storm; Dynamical-thermal effects; Topographic effect