

贺哲. 2006 年 3 月末河南一次沙尘暴过程的天气成因分析[J]. 气象, 2012, 38(8): 932-942.

2006 年 3 月末河南一次沙尘暴过程 的天气成因分析^{* 1}

贺 哲

河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 利用常规观测资料、地面自动站加密观测资料以及 NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点再分析资料, 对 2006 年 3 月 27 日发生在河南省的一次沙尘暴过程的天气成因进行了分析。结果表明, 这是一次冷锋南下时产生的沙尘暴天气, 高空影响系统是携带冷空气东南移并发展的小槽, 此短波槽最终替代了原有的东亚大槽。前期降水少导致地表干燥, 河南省北部、东部的黄泛平原沙土土层为沙尘暴的发生提供了丰富的沙源。冷锋影响时, 强烈的温度平流作用使得风力加大, 垂直运动加强。锋生作用使冷锋导致的天气现象更为剧烈。冷锋不仅是静力不稳定能量的触发系统, 锋区内还存在对称不稳定, 有利于垂直运动进一步加强, 将沙尘输送至高空。地面中尺度滤波表明, 中尺度低压的形成和发展不仅使得湍流混合加强, 同时也加剧了不稳定能量的释放。沙尘在强风、强湍流混合以及强上升气流作用下最终形成沙尘暴。

关键词: 沙尘暴, 温度平流, 锋生, 对称不稳定, 中尺度低压

The Synoptic Causation Analysis of a Sandstorm over Henan Province at the End of March 2006

HE Zhe

Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: On the basis of the data obtained by conventional observations, ground densified automatic weather stations (AWS), and NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, the synoptic causation of the sandstorm happening over Henan Province on March 27, 2006 was analyzed. The results show that the sandstorm occurred during the passage of a cold front. The upper air affecting synoptic system was a short wave trough which carried cold air, moved southeastward, developed and eventually substituted the former East Asia major trough. The deficient anterior precipitation resulted in the dryness of the surface. The Yellow River Flood Plain in North and East Henan Province provided abundant sand and dust to the occurrence of sandstorm. During the passage of cold front, the powerful temperature advection intensified wind power and vertical motion. The frontogenesis strengthened weather phenomena resulting from cold front. The cold front not only was the triggering system of static instability energy, but also had symmetrical instability inside which played an important role in the further enhancement of vertical motion and sending dust and sand to high levels. Mesoscale filtering of ground densified observations indicated that the formation and development of mesoscale low not only strengthened turbulent mixing, but also intensified the release of instability energy. The sandstorm was eventually formed by the effects of powerful wind, strong turbulent mixing and intensified upward air flow.

Key words: sandstorm, temperature advection, frontogenesis, symmetrical instability, mesoscale low

* 2011 年 10 月 25 日收稿; 2012 年 3 月 11 日收修定稿

作者: 贺哲, 主要从事短期天气预报和研究工作. Email: hz200121@yahoo.com.cn

引 言

沙尘暴是我国北方的灾害性天气之一,尤其在春季发生最为频繁。通常沙尘暴的发生应具备三个条件,即,沙源、强风和不稳定大气^[1]。由于沙尘暴对自然环境以及人们的生活会造成极大的危害和影响,因此,已有诸多学者对沙尘暴开展了研究。在国内,较早的有徐国昌等^[2]对甘肃省 1977 年 4 月 22 日一次特强沙尘暴的分析。之后,在气候方面,冯鑫媛等^[3]利用西北五省(区)及内蒙古沙尘暴历史观测资料,探讨了不同类型沙尘暴时间变化特征及其成因。钱正安等^[4]分析了近 50 年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势。另外,还有牛生杰等^[5]对沙尘暴天气的分析和研究。在天气方面,钱莉等^[6]对河西走廊东部一次飚线引发的大风、强沙尘暴进行了天气动力诊断和中尺度分析,认为飚线引发的强风暴是产生强沙尘暴的根本原因。岳平等^[7]对夏季一次强沙尘暴内部热力、动力特征进行了研究,认为垂直方向巨大的温度梯度有利于干对流发展,激发强沙尘暴的对流体的切向旋转速度和垂直运动速度的大小很大程度上决定了沙尘暴的强弱。姜学恭等^[8]对内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征进行了分析,认为天气系统的稳定少动是这两类沙尘暴在同一地区长时间持续的共同原因。另有张金艳等^[9]、赵俊荣等^[10]、范俊红等^[11]也都对沙尘暴天气进行了详细的分析。随着数值模式的引进和开发,数值模拟分析方法在沙尘暴研究中也得到了应用。王丽娟等^[12]利用沙尘(暴)数值预测系统 IAPS 2.0 对 2009 年一次沙尘暴进行了模拟分析并指出,沙尘浓度具有日变化,沙尘垂直输送的高度在 550 hPa 以下,白天沙尘输送强于晚上。姜学恭等^[13]利用沙尘数值预报模式对 2002 年 3 月的一次沙尘暴过程进行了模拟研究,认为地面热通量能够使沙尘暴明显增强,导致沙尘暴强度的日变化。近年来遥感监测方法也在沙尘暴天气的研究中投入应用并取得了较好的成果^[14]。另外,还有学者利用不同资料建立了沙尘暴预报方法^[15-16]。

河南省地处中原,属南北方气候过渡带,在历史上,河南省北部地区也曾多次发生沙尘暴。从 20 世纪 90 年代以来,河南的沙尘暴日数明显减少。然而 2006 年 3 月 27 日下午,一场较为严重的沙尘天气突袭了河南省北中部地区,由于当时正值下午下班前后的时段,因而给人们的生活产生了极大的影

响。近年来随着自然环境条件的改善,中原地区沙尘暴天气已很少出现,因此从整个社会层面上来说人们的应对显得措手不及,而对于预报员而言,预报沙尘暴天气尤其是较为严重的沙尘暴,确实还存在着较大的难度。前所述及的沙尘暴研究多是集中在我国西北、华北等沙尘暴多发区域,而对中原地区的沙尘暴研究得较少,因而对于此次突发性的沙尘暴天气很有必要进行深入的分析和研究。

本文首先分析了环流形势特征和沙尘暴形成的气候条件,之后进行物理量诊断和稳定度分析,最后采用中尺度滤波的方法揭示了地面中尺度系统的发展演变,研究结果对于沙尘暴天气的分析和预报具有参考作用。

1 资料及过程概况

本文所用资料包括:常规观测资料、地面加密自动站资料、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的格点再分析资料。文中所用时间均为北京时间。

2006 年 3 月 27 日下午,河南省北中部地区突发的沙尘天气中共有 10 个县市达到了沙尘暴的级别(表 1),这 10 个县市大多集中在河南省的黄河下游地区,首先从浚县开始,起始时间是 16:20,之后逐渐向南发展,最终到达民权县。这 10 个站中有 6 个站最低能见度在 500 m 以下,郑州的沙尘暴尤为严重,最低能见度只有 30 m,达到了特强沙尘暴的级别。郑州出现的沙尘暴不但强度强,而且发生极其突然,与之相伴随的还有瞬时大风以及温度的骤降,从 18—19 时,气温从 23.4℃ 急剧下降至 13.1℃。图 1 为沙尘暴区域的动态演变图,图中显

表 1 沙尘暴出现的站点、持续时间、最低能见度和瞬时大风

Table 1 The stations over which sandstorm occurred, duration of sandstorm, minimum visibility and instantaneous gale

站点	沙尘暴持续时间	最低能见度/m	瞬时大风/ $m \cdot s^{-1}$
浚县	16:20—17:25	120	20
长垣	17:12—17:49	50	21
新乡	17:09—18:21	400	20
封丘	17:25—20:00	600	22
中牟	17:55—18:50	600	20
郑州	18:16—19:24	30	19
兰考	17:43—18:25	700	20
通许	18:10—18:35	500	/
杞县	18:10—18:30	600	/
民权	18:40—18:58	300	22

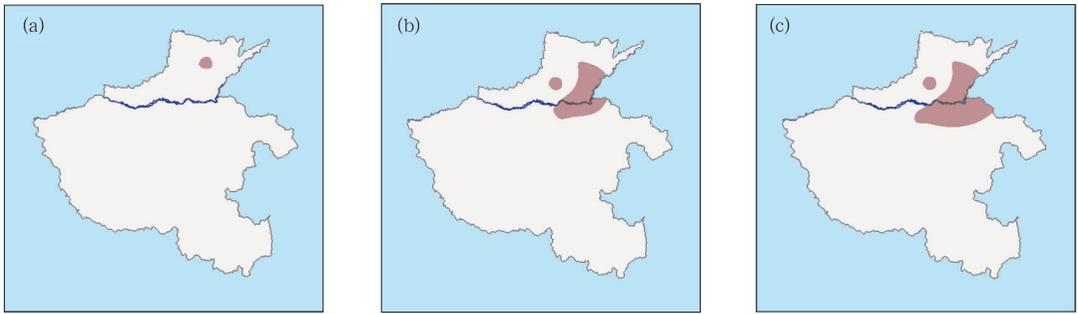


图 1 2006 年 3 月 27 日沙尘暴演变动态图 (阴影区为出现沙尘暴的区域)

(a) 16—17 时, (b) 16—18 时, (c) 16—19 时

Fig. 1 Dynamic graphs of evolution of the sandstorm at

(a) 16:00—17:00 BT, (b) 16:00—18:00 BT, and (c) 16:00—19:00 BT, 27 March 2006

(thaded for areas of sandstorm occurrence)

示, 16—17 时之间, 在豫北局部地区出现了沙尘暴, 17—18 时, 沙尘暴区域突然向南迅速扩展, 且越过黄河, 18—19 时, 沙尘暴区域继续向南推进。

2 环流形势特征分析

2.1 高空形势分析

从 500 hPa 高空实况 (图 2) 可知, 在沙尘过程

发生前的 25 日 08 时, 乌拉尔山东侧为一长波脊, 其下游长波槽区位于 125°E 附近, 而且我国东北地区有一低压环流。在长波脊的东侧 $90^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 之间有一短波槽, 其后有冷舌相配合, 冷中心强度达 -41°C , 短波槽线上有冷平流, 且等高线疏散, 表明槽线上还有正涡度平流, 短波槽将发展。到 26 日 08 时, 短波槽沿长波脊前西北气流下滑, 并在贝加尔湖地区转变为一横槽, 槽后冷中心为 -43°C , 表明冷空气有所加强, 同时, 原位于 125°E 附近的长波槽

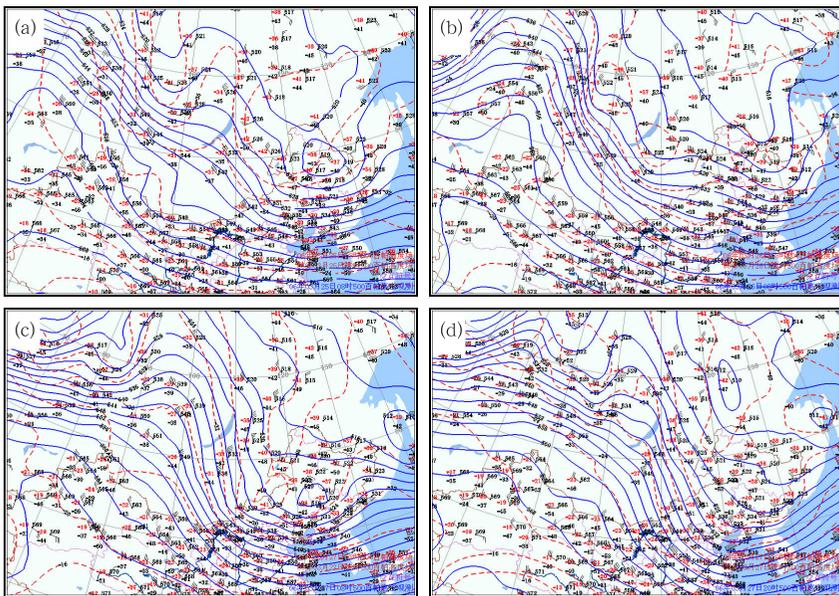


图 2 2006 年 3 月 25—27 日 500 hPa 高空环流形势

(a) 25 日 08 时, (b) 26 日 08 时, (c) 27 日 08 时, (d) 27 日 20 时

Fig. 2 Synoptic charts of 500 hPa at (a) 08:00 BT 25 March 2006,

(b) 08:00 BT 26 March 2006, (c) 08:00 BT 27 March 2006,

and (d) 20:00 BT 27 March 2006

东移。27 日 08 时,长波脊已东移至贝加尔湖以西 $90^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 之间,横槽转竖且东南移,并在我国东北地区产生一新的低涡,其后伴有东北—西南向冷舌,新的低涡替代了原位于此处的东北低压,到 27 日 20 时,冷舌东南移,此时冷空气已经大举南下影响了我国北方大部分地区。之后低槽进一步东移发展,成为新的东亚大槽。由此可知,造成此次大风沙尘过程的主要高空系统是东南移并发展的小槽,且最终替代了原来的东亚大槽。

2.2 地面形势分析

冷锋是此次沙尘暴过程的主要地面影响系统。在 25 日 08 时(图略),蒙古国西部及其以西地区即存在一冷高压,其中心强度为 1042.6 hPa,之后的 12 小时内基本在原地稳定少动,然后向东北方向缓慢移动,到 26 日 08 时(图略)形成东北—西南向高压,其东部位于贝加尔湖西侧,与高空冷空气相配合,同时蒙古东部有一气旋在发展东移。此后冷高压与气旋继续向东移动,到 27 日 08 时(图略),气旋已经移至我国东北地区南部,冷高压占据了贝加尔湖及其周边地区,冷高压与气旋之间的锋区显著加强,并有冷空气前锋在气旋后部向南移动。至 27 日 14 时(图 3),河南省处于暖低压区中,温度高且空气干燥,此时冷锋已经到达华北中南部,之后冷锋继续东南移并引发了河南省的沙尘暴天气。

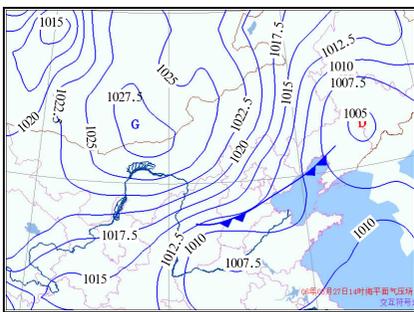


图 3 2006 年 3 月 27 日 14 时地面天气形势
Fig. 3 Surface weather chart at 14:00 BT 27 March 2006

3 沙尘暴形成的气候条件

3.1 前期降水特征

河南省地处中纬度地带,四季分明,春季是冬季

向夏季转换的季节,气温开始回升,但降水量仍然较少,干燥多大风是河南省春季大部分地区的气候特点。分析此次沙尘暴过程的前期降水可知,从 3 月 1—27 日,上述发生沙尘暴的区域降水量均不足 10 mm,其中大部分地区降水量在 5 mm 以下,甚至还有部分区域基本无降水。郑州站 27 日 14 时温度露点差高达 29.9°C ,由此可知,降水少使得地表干燥,沙土易于被风扬起。

3.2 地表特征

河南省北部、东部一带大部分地区属于黄泛平原,是黄河冲积形成的,历史上黄河多次决口泛滥、甚至改道留下的沙土都为沙尘暴的发生提供了丰富的沙源。在春季干燥少雨,蒸发强烈的条件下,气温回升快,土质疏松,若有较强冷空气南下,出现大风等天气,则易将沙土扬起,形成沙尘暴,此次沙尘暴天气就是产生在河南省黄河下游地区,而河南省中南部则沙化土地较少,即使较强冷空气到达,通常也不易产生沙尘暴。

4 沙尘暴的成因分析

4.1 温度平流的作用

由于温度平流对于天气系统的发展非常重要,因而首先对温度平流进行分析。图 4 为 26 日 20 时

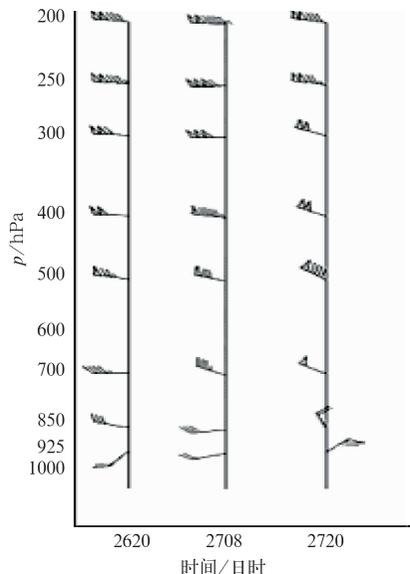


图 4 2006 年 3 月 26 日 20 时至 27 日 20 时郑州站风廓线演变
Fig. 4 Wind profiles over Zhengzhou Station from 20:00 BT 26 March 2006 to 20:00 BT 27 March 2006

至27日20时郑州站高空风廓线的演变。风向的变化显示,700 hPa以上,三个时次的风向变化均不明显,表明在700 hPa以上温度平流不显著,而在700 hPa以下,26日20时,850 hPa以下为暖平流,850~700 hPa之间为冷平流,27日08时,850 hPa以下温度平流不显著,而850~700 hPa之间为暖平流,至27日20时,700 hPa以下则转变为一致的冷平流,而且925 hPa风速加大至 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明已有较强冷空气入侵。

定量计算了27日08、14、20时各个层次的温度平流,可知,27日08时(图略),700和850 hPa河南省大部分地区均为暖平流所控制,而500 hPa河南省北中部为暖平流区,至14时,500 hPa(图5a)河南

省北中部已转为冷平流,700 hPa(图5b)山西大部以及河北北部已经被较强冷平流所控制,尤其是河套北部至山西中部一带冷平流中心强度 $\leq -4.5 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,河南省以及河北东南部为暖平流区,且河北东南部暖平流加强,并产生一强度为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖平流中心。850 hPa(图5c)与之相似,从河套北部至山东北部为强冷平流区,中心强度 $\leq -5.5 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,河南省北部则暖平流加强,达 $1.0 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。至20时,500 hPa(图5d)河南省大部分地区已被冷平流所控制,且冷平流大值区南压,表明冷空气前锋已经移过了河南省北部地区,700 hPa(图5e)河南省北部、东部地区为冷平流,而在850 hPa(图5f)河南省除东南部外,

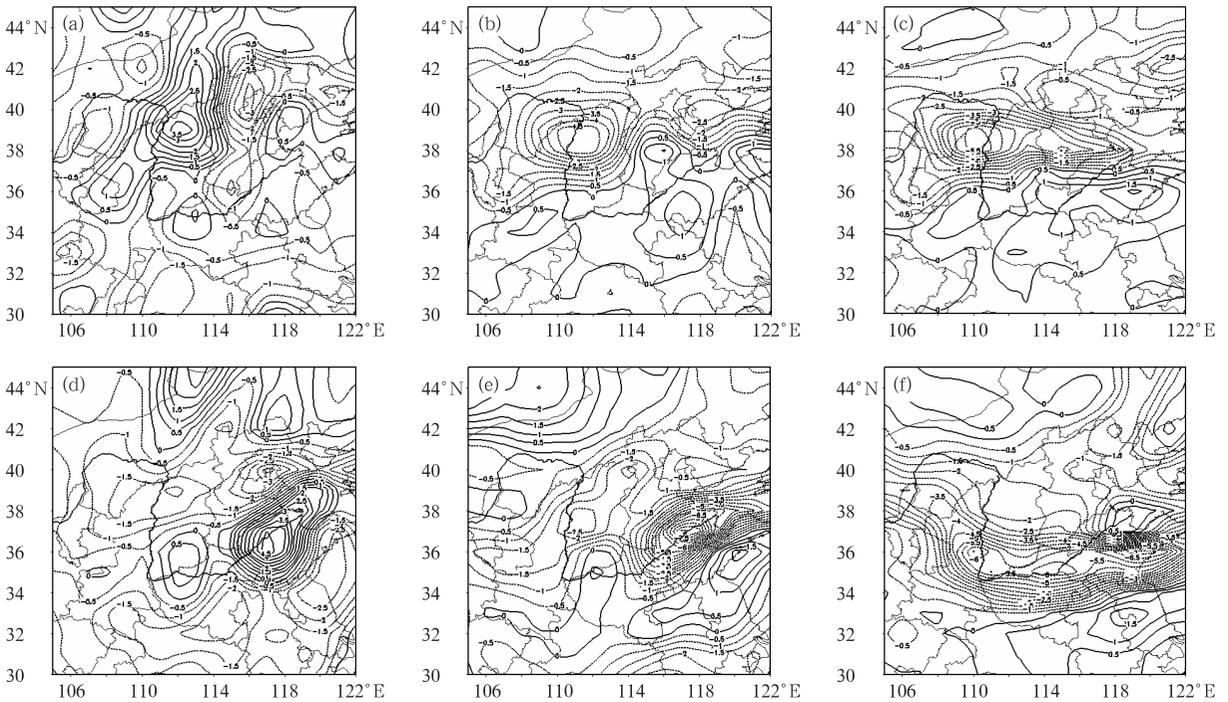


图5 2006年3月27日温度平流(单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a)14时500 hPa, (b)14时700 hPa, (c)14时850 hPa, (d)20时500 hPa,
(e)20时700 hPa, (f)20时850 hPa

Fig. 5 Temperature advection charts on 27 March 2006 (unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) at
(a) 500 hPa at 14:00 BT, (b) 700 hPa at 14:00 BT, (c) 850 hPa at 14:00 BT,
(d) 500 hPa at 20:00 BT, (e) 700 hPa at 20:00 BT, (f) 850 hPa at 20:00 BT

其他地区均为冷平流所控制。

上述分析表明,随着高空小槽的东南移并逐渐发展,所携带冷空气在贝加尔湖地区停滞并加强,之后横槽转竖,冷空气大举南下,偏北风加大,产生强烈的冷平流。另外,在低层,冷空气南下之前,暖平流加强,冷空气影响时,强烈的冷平流导致温度急剧

下降,其过程对于沙尘天气产生的作用可根据气压倾向方程和 ω 方程来说明。由气压倾向方程:

$$\frac{\partial p_{z_0}}{\partial t} = - \int_0^{\infty} g \left(u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz - \int_0^{\infty} g \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz$$

和 ω 方程:

$$\left(\sigma \nabla^2 + f^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2}\right) \omega = f \frac{\partial}{\partial p} [\mathbf{V}_g \cdot \nabla (f + \zeta_g)] - \nabla^2 \left[\mathbf{V}_g \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial p} \right] - \frac{R}{c_p p} \nabla^2 \frac{dQ}{dt}$$

可知,有冷平流时地面气压将上升,有暖平流时地面气压将下降;在暖平流区有上升运动,冷平流区有下沉运动。因而冷暖平流的急剧转化不但会引发地面气压骤变,产生变压风,导致风力加大,而且还能够在锋面附近激发出气流垂直运动,二者相结合,促进了湍流混合加强,成为将地面沙尘吹起上扬的有利条件。

4.2 垂直运动分析

图 6 为 27 日 08—20 时沿 114.5°E 的流场与垂直速度剖面,图中显示,08 时(图 6a),700~800 hPa

之间 39°N 附近有一垂直上升运动中心,其值 $\leq -0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,14 时(图 6b),随着冷空气前锋的南移,强上升运动中心也南压至 38°N,高度上升到 700 hPa 附近,且其值 $\leq -1.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,说明此时上升运动显著增强。而且,在 35°~37°N,800 hPa 以下有一方向近于朝东的涡管,其底部有偏南气流向北运动,与 37°N 以北的北风之间形成辐合并抬升,也有利于上升运动进一步加强。到 20 时(图 6c),35°~42°N 之间的区域基本为下沉气流所控制。

另外,将图 6b 与图 8b 相比较可知,上升气流位于锋区及其两侧,强上升中心位于锋区内部偏于暖区一侧。由此可知,冷空气前锋影响时,锋区及其两侧附近存在着强烈的气流上升运动,对于将沙尘上扬到高空具有重要作用。这也进一步说明了冷锋是此次沙尘暴过程的主要天气尺度影响系统。

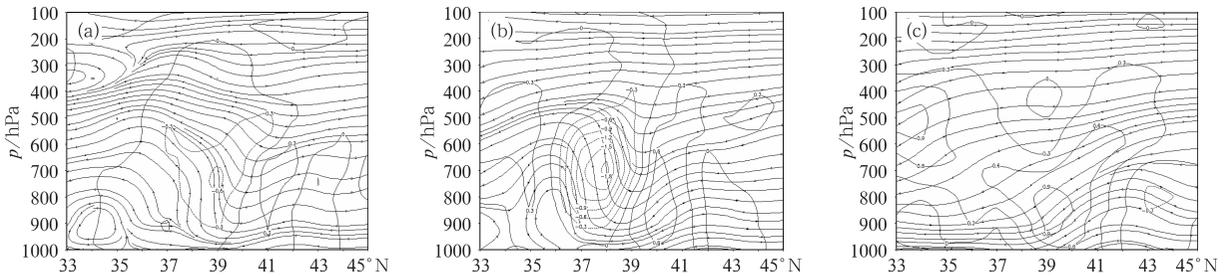


图 6 2006 年 3 月 27 日 08—20 时垂直速度及流场沿 114.5°E 剖面图

(a)08 时, (b)14 时, (c)20 时

[流场为垂直方向流场(垂直速度放大 25 倍),细实线和虚线为等 ω 线(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)]

Fig. 6 The cross sections along 114.5°E of vertical speed and flow field from 08:00 BT to 20:00 BT 27 March 2006

(a)08:00 BT, (b)14:00 BT, and (c)20:00 BT

[Streamlines stand for vertical flow field (vertical speed is magnified by 25 times), thin solid lines and dashed lines stand for ω lines (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)]

4.3 锋生作用分析

天气学分析已经表明,这是一次冷锋南下时引发的沙尘暴天气过程,因而分析冷锋在南下过程中的锋生强度以了解其特点及作用。由文献[17]可知, Q 矢量锋生函数可以表示为

$$F = \frac{\mathbf{Q} \cdot \nabla \theta}{|\nabla \theta|}$$

当 $\mathbf{Q} \cdot \nabla \theta > 0$,即 Q 矢量指向暖空气时,将增加原有的温度梯度,因而有利于锋生,当 $\mathbf{Q} \cdot \nabla \theta < 0$,即 Q 矢量指向冷空气时,将减小原有的温度梯度,因而有利于锋消。因此将 $\mathbf{Q} \cdot \nabla \theta$ 作为锋生和锋消的判据,计算了此次过程中的锋生强度。

由计算结果可知,27 日 08 时,500 hPa 河南至华北一带锋生并不明显(图略),700 hPa,内蒙古中部到河北北部有一西北—东南向的锋生带,中心强度达 $20 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上(图 7a),850 hPa 锋生带特征与 700 hPa 相似,只是位置稍偏南(图略)。925 hPa,虽然也有一条西北—东南向的锋生带,但其值较小,尚未达到 $10 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 7b),表明此时低层锋生作用并不显著。至 14 时,500 hPa,山西中部到河北中南部以及河南北部一带为锋消区,其中心强度 $\leq -35 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 7c),700 hPa,山西东北部至河北中部为强锋生带,大致呈东西向,中心强度达 $25 \times$

$10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,比 08 时大约增大了 $5 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,表明锋生作用加强,而位置较为稳定略偏南,说明冷空气前锋在此略有停滞并加强。同时,在河北南部为锋消区(图略)。850 hPa 锋生带与 700 hPa 相似略偏南。925 hPa 与 08 时相比,锋生强中心东南移,且明显加强,增大为 $20 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右(图 7d)。到 20 时,500 hPa 锋消区继续东南移,河南省北部、东部也为锋消区控制(图略)。700 和 850 hPa(图 7e)锋生带也东南移,强度继续加强。尤其需要注意的是 925 hPa 的锋生强度增加迅速,从 14 时的 20×10^{-15} 增加到 $85 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上(图 7f)。

以上分析说明了过程中的锋生作用。由于锋生能引起水平温度梯度增大,导致热成风平衡破坏,强迫出垂直于锋面的地转偏差和次级环流,而次级环流又反过来使得水平温度梯度进一步加大。此次过程中低层的强烈锋生使冷暖空气的性质差异更为显著,锋面前后气象要素对比也更为悬殊,因而冷锋在南下过程中所导致的天气现象也更为剧烈。由此可知,锋生作用可以使得大风和沙尘天气进一步加剧并维持。另外,需要注意的是,中层 500 hPa 主要表现为锋消,说明冷暖空气均未达到饱和,因此这是一次干对流过程。

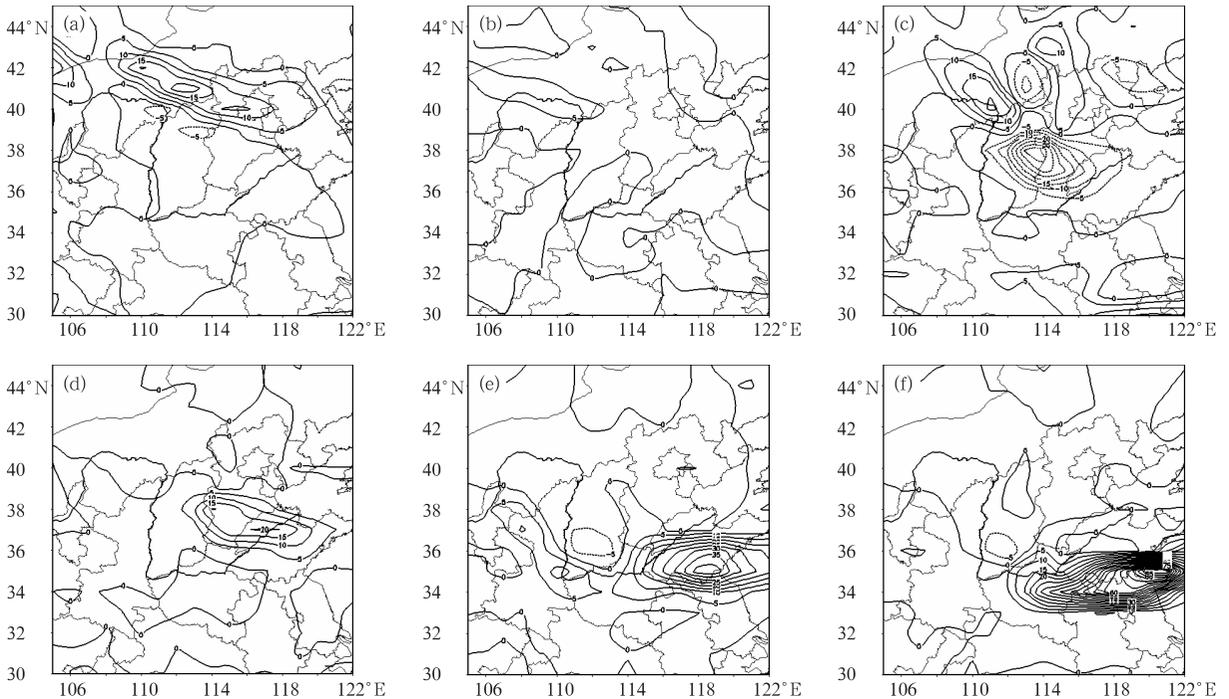


图 7 2006 年 3 月 27 日锋生过程演变(单位: $10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

(a)08 时 700 hPa, (b)08 时 925 hPa, (c)14 时 500 hPa, (d)14 时 925 hPa, (e)20 时 850 hPa, (f)20 时 925 hPa

Fig. 7 Frontogenesis process on 27 March 2006 (unit: $10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) at

(a) 700 hPa at 08:00 BT, (b) 925 hPa at 08:00 BT, (c) 500 hPa at 14:00 BT, (d) 925 hPa at 14:00 BT,

(e) 850 hPa at 20:00 BT, and (f) 925 hPa at 20:00 BT

4.4 稳定度分析

气象要素观测表明,沙尘暴的发生往往表现出中小尺度特征^[18],而对称不稳定是一种中尺度不稳定,对于灾害性天气的分析具有重要作用^[19-21]。由文献^[22]可知,对称稳定度是大气中垂直方向上的静力稳定度与水平方向上的惯性稳定度相结合而产生的一种大气在倾斜方向运动的稳定度判据。

Hoskins^[23]指出,对称不稳定的条件是等绝对角动量面(等 M 面)的坡度小于等位温面(等 θ 面)的坡度。由于此次沙尘暴为干对流过程,根据 Schultz 等^[24]提出的,应将 θ 用于分析干对称不稳定,因此,对此次过程的等 M 面和等 θ 面进行分析。

绝对角动量 M 定义^[22]为:

$$M = u - fy$$

因此干对称不稳定的判据可表示为:

$$\frac{\partial z}{\partial y} \Big|_M / \frac{\partial z}{\partial y} \Big|_\theta \begin{cases} > 1 & \text{对称稳定} \\ = 1 & \text{中性} \\ < 1 & \text{对称不稳定} \end{cases}$$

对 27 日 08—20 时的等 M 面和等 θ 面进行分析,并沿 114.5°E 作垂直剖面可知,08 时(图 8a),等 θ 面坡度很小,等 M 面则近于竖直状态,远大于等 θ 面的坡度,因此整层大气基本上不存在对称不稳定。而到了 14 时(图 8b), $37^\circ\sim 39^\circ\text{N}$ 之间大约在 650 hPa 以下等 θ 线密集而且陡立,其间出现了层次较

为深厚的等 M 面坡度小于等 θ 面坡度的区域(图 8b 中的椭圆形区域),表明此时在锋生过程中锋区内产生了对称不稳定。此区域的水平尺度属于中尺度范围,因而属于中尺度不稳定。20 时(图 8c),对称不稳定逐渐减弱并消失。

另外,将图 8b 与图 6b 相比较可知,强上升气流中心出现在对称不稳定向对称稳定转变的区域,这足以说明对称不稳定对于强上升气流的产生所具有的重要作用。

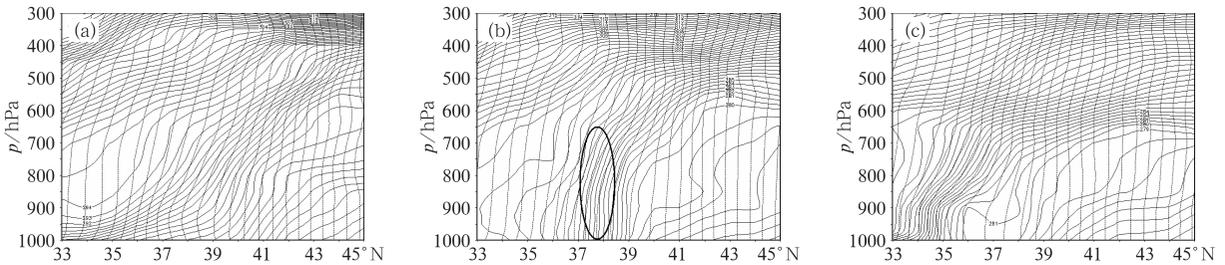


图 8 2006 年 3 月 27 日 08—20 时对称不稳定分析(沿 114.5°E 剖面)
(a)08 时, (b)14 时, (c)20 时

[实线为等 θ 线(单位:K),虚线为等 M 线(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)]

Fig. 8 Symmetrical instability analyses (cross sections along 114.5°E) at

(a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, and (c) 20:00 BT 27 March 2006

[Solid lines stand for θ (unit:K), and dashed lines stand for M (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)]

上述分析表明,在此次过程中,大约在 650 hPa 以下的锋区中产生了对称不稳定,并随着锋区逐渐南移。当有适当的触发条件作用时就可以使得不稳定能量释放,导致垂直运动强烈发展。

对 14 时等 θ 线进一步分析可知,在锋前近地面存在有静力不稳定层结,这是由于太阳辐射以及锋前暖平流等热力因子所引起的锋前暖低压发展,在静力不稳定层之上则为稳定层,抑制了湍流混合的向上发展,在锋区内部 650 hPa 以下等 θ 线基本处于陡立状态,表明此区域内混合层已经强烈发展,因此当冷锋南下影响时,触发了静力不稳定能量的释放,同时冷锋内部还蕴含着对称不稳定的能量,与冷锋相伴随的大风将沙尘吹起,通过近地面湍流向上输送,进入深厚的对称不稳定层中,在对称不稳定的作用下,沙尘被向上输送到更高的层次。

5 地面中尺度系统分析

如前所述,沙尘暴往往具有中小尺度特征。因此利用时间和空间分辨率均较高的地面加密自动站

观测资料对此次沙尘暴过程进行中尺度滤波,以分析其中存在的中小尺度天气系统。

5.1 中尺度滤波方案简介

根据 Shuman-Shapiro 方法,采用 25 点二维滤波方案^[25],即在 x 和 y 方向均为 5 个格点,并取滤波算子在 x 和 y 方向的滤波特性相同,对地面风场进行中尺度滤波。滤波算子为:

$$\begin{aligned} \bar{f}_0 = & [(1 - S_1)(1 - S_2) + \frac{S_1 S_2}{2}]^2 f_0 + \frac{1}{2} [S_1(1 - S_2) + S_2(1 - S_1)] [(1 - S_1)(1 - S_2) + \frac{S_1 S_2}{2}] \sum_{i=1}^4 f_i + \frac{1}{4} [S_1(1 - S_2) + S_2(1 - S_1)]^2 \sum_{i=5}^8 f_i + \frac{S_1 S_2}{4} [(1 - S_1)(1 - S_2) + \frac{S_1 S_2}{2}]^2 \sum_{i=9}^{12} f_i + \frac{S_1 S_2}{8} [S_1(1 - S_2) + S_2(1 - S_1)] \sum_{i=13}^{20} f_i + (\frac{S_1 S_2}{4})^2 \sum_{i=21}^{24} f_i \end{aligned}$$

其响应函数为^[26]:

$$R = \prod_{m=1}^2 [1 - 2S_m \sin^2(\pi \Delta x / L_x)] \times \prod_{m=1}^2 [1 - 2S_m \sin^2(\pi \Delta y / L_y)]$$

其中 S_1, S_2 为滤波系数, L_x, L_y 分别为 x 和 y 方向的波长, $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x 和 y 方向的格距, 用中尺度等间距网格, 并令 $\Delta x = \Delta y = 45 \text{ km}$, 取 $S_1 = \frac{1}{2}$, $S_2 = \frac{2}{3}$, 根据文献[25], 由滤波系数 S 与波数 n 的关系可知, 此时采用一次滤波即可滤去二维场中的两个短波分量, 即 2 倍和 3 倍格距的短波, 且其响应函数 $R=0$ 。从滤波前的风场, 减去低通滤波后的风场, 即得到中尺度扰动的风场。

5.2 中尺度系统分析

图 9 为 27 日 15—20 时逐小时中尺度滤波前后

的风场比较, 在 14 时(图略), 滤波前后的风场在河南与河北交界处都存在一辐合线, 位置基本相同, 只是中尺度风场的风速较小, 而且辐合线南侧的南风分量比北侧的北风分量要大, 表明此时暖气团发展得较为强盛。到 15 时(图 9a₁、a₂), 滤波后的中尺度辐合线位置稳定, 只是西段稍稍南移, 西段北侧的偏北风加强, 表明冷空气的势力加强, 16 时(图 9b₁、b₂), 滤波后的中尺度辐合线南压显著, 且转变为“人”字形, 而且在辐合线西段, 北侧的偏北风继续增大, 显著大于其南侧的偏南风, 而在辐合线东段, 南侧的偏南风则显著大于北侧的偏北风, 说明在中尺度辐合线上由于冷空气的侵入, 斜压性增强, 预示着系统将会进一步发展。另外, 15 和 16 时, 滤波前后的风场辐合均是以辐合线的形式存在, 而到了 17 时(图 9c₁、c₂), 滤波前后的风场则明显不同, 滤波前, 地面辐合线继续南压, 滤波后则产生了一中尺度低

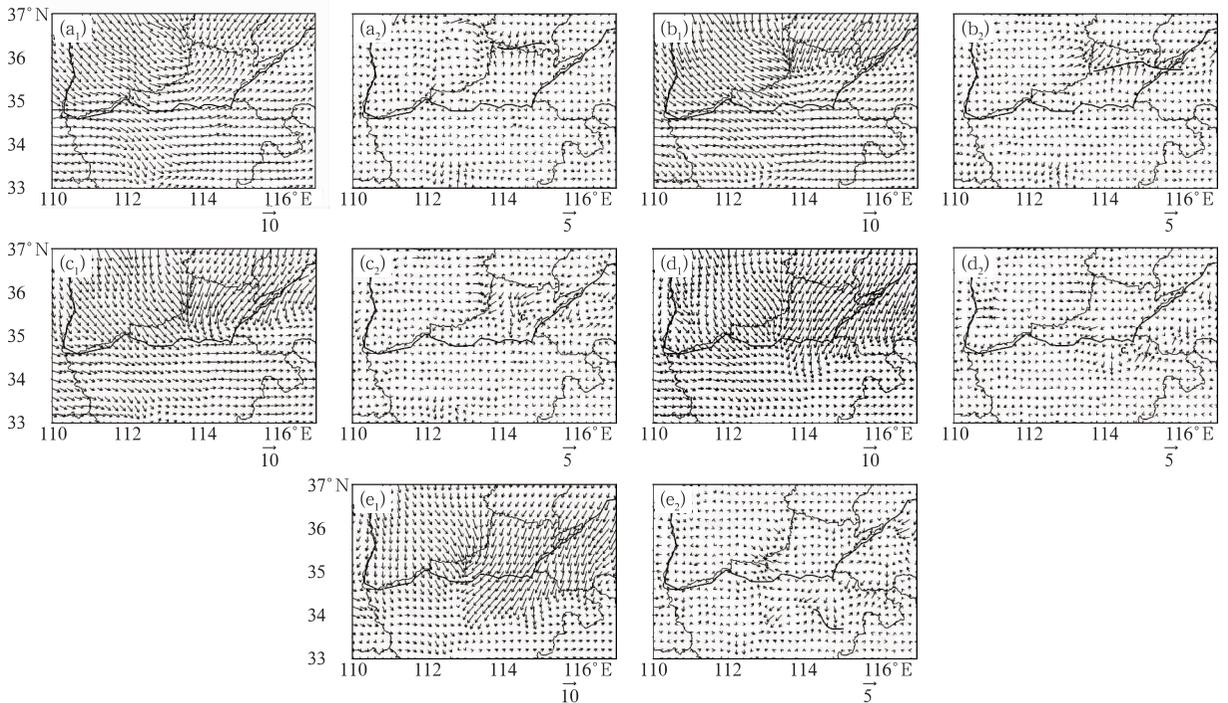


图 9 2006 年 3 月 27 日 15—19 时逐小时地面风场中尺度滤波分析

(a₁)15 时滤波前, (a₂)15 时滤波后, (b₁)16 时滤波前, (b₂)16 时滤波后, (c₁)17 时滤波前, (c₂)17 时滤波后, (d₁)18 时滤波前, (d₂)18 时滤波后, (e₁)19 时滤波前, (e₂)19 时滤波后
(图中粗实线为中尺度辐合线, “C”为中尺度低压中心)

Fig. 9 Mesoscale filtering of hourly surface wind from 15:00 BT to 19:00 BT 27 March 2006

(a₁) before filtering at 15:00 BT, (a₂) after filtering at 15:00 BT, (b₁) before filtering at 16:00 BT, (b₂) after filtering at 16:00 BT, (c₁) before filtering at 17:00 BT, (c₂) after filtering at 17:00 BT, (d₁) before filtering at 18:00 BT, (d₂) after filtering at 18:00 BT, (e₁) before filtering at 19:00 BT, (e₂) after filtering at 19:00 BT

(Thick solid lines stand for mesoscale convergence lines. “C” is the center of mesoscale low)

压环流,其中心大约位于(35.5°N、114.8°E)附近,表明,中尺度辐合线在南压过程中,随着斜压性增强,逐渐发展成为中尺度低压,导致近地面辐合抬升显著加强,而且,与表1中沙尘暴发生区域以及时间相比较可知,此中尺度低压与沙尘暴发生的区域及时间相吻合。至18时(图9d₁、d₂),中尺度低压中心移至(34.5°N、114.5°E)附近,与之相应的沙尘暴发生区也随之南压。19时(图9e₁、e₂),虽然滤波前的风场辐合仍很强,且继续向南移动,但滤波后,中尺度低压减弱消失,并再次转变为辐合线的形式。从实况观测可知,此时已没有新的沙尘暴区域产生。

综上所述,经过中尺度滤波,从大尺度风场中分离出了中尺度低压,并且逐时分析显示了其发展过程,由最初的中尺度辐合线,随着冷空气侵入,斜压性增强,转变为“人”字形切变,并最终发展成为中尺度低压。其过程特点与天气尺度气旋有一定的相似之处,只是尺度小,且仅维持了两个多小时。将此中尺度低压所经的区域和时间与沙尘暴发生的区域和时间相比较可以得知,两者极其吻合,这足以说明此中尺度低压所产生的强烈辐合以及抬升效果,不仅使得近地面湍流混合作用更强,同时也加剧了不稳定能量的释放,使上升运动更为强烈。沙尘在强风、强湍流混合以及强上升气流的作用下,最终形成了沙尘暴。

6 结 语

通过以上分析,可以得出以下结论:

(1) 此次沙尘暴天气是在冷锋南下过程中产生的,高空影响系统是携带冷空气东南移并发展的小槽,此短波槽最终替代了原有的东亚大槽。

(2) 前期降水量小使得地面干燥,气温回升快,土质疏松,而河南省北部、东部一带黄泛平原的沙土地表又为沙尘暴的形成提供了丰富的沙源。

(3) 冷锋影响时,强烈的温度平流导致大风的产生以及垂直运动的加强,促进了湍流混合,有利于沙尘天气产生。

(4) 中层的锋消表明这是一次干对流过程。锋生作用随着高度的降低显著加强,锋生使得冷锋所导致的天气现象更为剧烈。

(5) 冷锋不仅是静力不稳定能量的触发系统,同时锋区内部还蕴含着对称不稳定能量,有利于垂直运动的强烈发展,对于将地面尘沙上扬并输送至

高空具有重要作用。

(6) 地面中尺度滤波表明,此沙尘暴过程中有中尺度低压产生发展,其形成过程与天气尺度气旋有一定的相似之处。中尺度低压所经区域和时间与沙尘暴的发生区域和时间极其吻合,说明中尺度低压所产生的强烈辐合和抬升不仅使得近地面湍流混合作用更强,同时也加剧了不稳定能量的释放,使上升运动更为强烈,沙尘在强风、强湍流混合以及强上升气流的作用下,最终形成了沙尘暴。

许多学者的研究都表明了沙源、强风和不稳定大气对于沙尘暴的必要性,此次过程也同样具备了这三个条件。与西北、华北等地的沙尘暴相比较,此次过程的主要地面影响系统是冷锋,因此可归为冷锋型。高空影响系统则是引导冷空气东移南下并发展的小槽,其最终完成了一次东亚大槽的替代过程。通常的冷锋型沙尘暴,由于热力因子的作用,锋前往往有热低压发展并导致热力不稳定层结,此次过程中,除了锋前近地面的静力不稳定层结外,锋区中还存在着干对称不稳定,层次也较为深厚。中尺度滤波也揭示了冷锋南下过程中所引发的中尺度低压的存在。通过对此次过程的分析可以得知,强沙尘暴天气的产生往往是多种因素综合作用的结果。河南省也是沙尘暴能够影响到的区域,但与之相关的研究仍相对较少,因而还有更多的工作需要开展。

参考文献

- [1] 方宗义,朱福康,江吉喜,等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京:气象出版社,1997:1-10.
- [2] 徐国昌,陈敏莲,吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报,1979,37(4):26-35.
- [3] 冯鑫媛,王武功,程一帆,等. 中国北方中西部沙尘暴气候特征[J]. 中国沙漠,2010,30(2):394-399.
- [4] 钱正安,宋敏红,李万元. 近50年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠,2002,22(2):106-111.
- [5] 牛生杰,孙继明,桑建人. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J]. 中国沙漠,2000,20(1):55-58.
- [6] 钱莉,杨永龙,殷玉春,等. 一次飊线引发的大风强沙尘暴诊断分析[J]. 气象,2009,35(3):42-48.
- [7] 岳平,牛生杰,张强,等. 夏季强沙尘暴内部热力动力特征的个例研究[J]. 中国沙漠,2008,28(3):509-513.
- [8] 姜学恭,沈建国. 内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征[J]. 气候与环境研究,2006,11(6):702-712.
- [9] 张金艳,李勇,蔡芴宁,等. 2006年春季我国沙尘天气特征及成因分析[J]. 气象,2010,36(1):59-65.
- [10] 赵俊荣,刘振新. 准噶尔盆地南缘一次强沙尘暴成因分析[J]. 干旱气象,2009,27(4):362-366.

- [11] 范俊红,郭树军,李宗涛. 河北省中南部一次沙尘暴的动力条件分析[J]. 高原气象,2009,28(4):795-802.
- [12] 王丽娟,赵琳娜,寿绍文,等. 2009年4月北方一次强沙尘暴过程的特征分析和数值模拟[J]. 气象,2011,37(3):309-317.
- [13] 姜学恭,李彰俊,程丛兰,等. 地面加热对沙尘暴数值模拟结果的影响研究[J]. 中国沙漠,2010,30(1):182-192.
- [14] 郭铤,蔡迪花,韩兰英,等. MODIS沙尘暴判识方法与业务系统[J]. 气象,2009,35(1):102-107.
- [15] 梁钰,布亚林,贺哲,等. 用卡尔曼滤波制作河南省冬春季沙尘天气短期预报[J]. 气象,2006,32(1):62-67.
- [16] 孙永刚,孟雪峰,宋桂英,等. 基于定量监测的沙尘暴定量预报方法[J]. 气象,2009,35(3):87-93.
- [17] 岳彩军,曹钰,寿绍文. Q矢量研究进展[J]. 暴雨灾害,2010,29(4):297-306.
- [18] 王锡稳,李宗义,王宝鉴. “4.12”强沙尘暴中小尺度天气分析[J]. 甘肃气象,2001,19(2):27-30.
- [19] 费建芳,伍荣生,宋金杰. 对称不稳定理论的天气分析与预报应用研究进展[J]. 南京大学学报(自然科学),2009,45(3):323-333.
- [20] 宋清芝,孙景兰,吕晓娜. 河南省一次暴雪伴雷电天气的形成机理[J]. 气象,2011,37(5):583-589.
- [21] 侯瑞钦,张迎新,范俊红,等. 2009年深秋河北省特大暴雪天气成因分析[J]. 气象,2011,37(7):1352-1359.
- [22] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理与方法(第三版)[M]. 北京:气象出版社,2000:392-395.
- [23] Hoskins B J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1974,100(425):480-482.
- [24] Schultz D M,Schumacher P N. The use and misuse of conditional symmetric instability[J]. Monthly Weather Review,1999,127(12):2709-2732.
- [25] 陆汉城,杨国祥. 中尺度天气原理和预报(第二版)[M]. 北京:气象出版社,2004:190-194.
- [26] 连志鸾,王春彦,王丽荣. “96·8”特大暴雨中低层流场的滤波分析[J]. 气象,1999,25(8):50-53.