

吴蓁, 俞小鼎, 席世平, 等. 基于配料法的“08. 6. 3”河南强对流天气分析和短时预报[J]. 气象, 2011, 37(1): 48-58.

基于配料法的“08. 6. 3”河南 强对流天气分析和短时预报^{*1}

吴 蓁¹ 俞小鼎² 席世平¹ 徐文明¹

1 河南省气象台, 郑州 450003

2 中国气象局培训中心, 北京 100081

提 要: 采用基于构成要素的预报方法(配料法), 使用业务中能够及时获取的常规观测资料、静止气象卫星云图和多普勒天气雷达资料, 对 2008 年 6 月 3 日下午发生在河南大部的以雷暴大风为主的强对流天气进行分析。针对 2008 年 6 月 3 日 08 时 500、700、850 hPa 和地面图上温、湿、风等的配置, 结合探空、水汽云图和多普勒天气雷达回波图, 对构成强对流天气的几个主要因素: 层结稳定度、水汽、触发机制、垂直风切变、对流层干层等进行分析, 结果表明: 河南大部处于较强的条件不稳定、强烈的深层(地面到 500 hPa)垂直风切变和明显的高空干平流的环境中, 这种环境有利于高度组织性的超级单体风暴的产生和发展, 导致雷暴大风和冰雹天气。而地面冷锋、辐合线和高空次天气尺度涡旋伴随的正涡度平流共同作用产生的上升气流导致雷暴在山西中南部生成, 然后向东南方向移下太行山, 进入河南有利的环境下获得猛烈发展。在充分利用“配料法”的主要思路和现有观测资料条件下, 结合预报经验, 2008 年 6 月 3 日强对流过程可以提前数小时进行正确的短时预报。

关键词: 配料法, 强对流, 潜势预报

Analysis of the 3 June 2008 Henan Severe Convection Event with Ingredients Based Method

WU Zhen¹ YU Xiaoding² XI Shiping¹ XU Wenming¹

1 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

2 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

Abstract: By using conventional observation data, orbit meteorological satellite cloud pictures, Doppler weather radar and NCEP data the paper adopted forecast method (ingredients method) based on component to analyze severe convective weather of thunderstorm and gale that happened in the afternoon of June 3, 2008 in east central Henan. Combined with sounding, vapor cloud map and Doppler weather radar echo maps that based on the distribution of temperature, moisture and wind on the 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa and surface map in the morning of June 3, 2008 the paper analyzed several severe convective weather components of stratification stability, water vapor, lifting triggered, vertical wind shear and tropospheric dry layer. The results show that Henan convective weather area was in the environment of stronger conditional instability, intense deep layer (from surface to 500 hPa) vertical wind shear and obvious high dry stratospheric layer. The environment was in favor of producing and developing highly organized super cell that leading to thunderstorm, strong wind and hail weather. The combined action of surface front, mesoscale convergence line and sub-synoptic scale cold vortex accompanied with positive vorticity advection resulted in rising airflow which made thunderstorm produce first in south central Shanxi. The thunderstorm moved towards southeast from the Taihang Mountain to Henan and developed vigorously in the advantageous environment. Full of using the main thinking of ingredients method the short-time forecasting of the severe convective process can forecast correctly ahead of several hours which is supported by current observation

* 2009 年度公益性行业(气象)科研专项 GYHY(QX)200906003 和 2010 年预报员专项 CMATG2010Y12 共同资助

2010 年 2 月 8 日收稿; 2010 年 8 月 10 日收修定稿

第一作者: 吴 蓁, 主要从事天气预报和服务. Email: qxtwz@yahoo.com.cn

conditions together with the forecaster's experiences.

Key words: ingredients-based forecasting, severe convection, potential forecast

引 言

对于高影响天气(寒潮、暴雪、热浪、暴雨、强对流等)的预报,流型辨识(天气形势分型)方法是被预报员广泛采用的一种方法^[1-2],这种方法对于频繁出现在同一流型下的高影响天气是简便实用的预报技术,但也存在明显缺陷,主要是:(1)在天气形势满足某种高影响天气流型时,高影响天气未必出现;(2)在天气形势不满足天气流型时,该高影响天气有时仍会出现。针对流型辨识方法的缺陷,Doswell等^[3]提出基于构成要素(Ingredients Based)的预报方法,即所谓“配料法”。基于构成要素的预报方法与其说是一种具体的预报技术,不如说是一种天气预报的分析思路或思想方法,其核心思想是“回归常识”。对于某一高影响天气预报,配料法的要点为:(1)首先确定某一种高影响天气发生的构成要素是什么;(2)判断何时何地上述构成要素能够全部出现和满足;(3)预报在上述构成要素满足的区域和时间段该高影响天气出现。这种基于构成要素的预报方法自提出以后,在天气预报领域产生了广泛和深入的影响^[4-6]。李俊等^[7]将“配料法”应用于梅雨锋强降水预报,指出无论形成暴雨的天气形势如何不同,都具有共同的基本配料,使用“配料法”的关键在于合适因子的选取和对这些因子正确搭配的预测,该思路也可应用于冰雹、雷暴大风等强对流天气的预报。近两年对于强对流天气的分析和预报,多基于对雷达资料的分析^[8-10],还有应用统计方法^[11]的。本文则尝试应用这种基于构成要素的配料法对2008年6月3日河南出现的区域性的强对流天气(以下简称为“08.6.3”)进行短时预报分析。

2008年6月3日14:20—17:40(北京时,下同),河南省北部、中东部地区自北向南陆续出现雷阵雨、短时大风、局部冰雹(图1),共有20余站出现7级以上大风,其中15站瞬时风速 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大为许昌地区的鄢陵(风速 $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,15:54)和周口地区的西华黄泛区农场($27.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,16:39),两站均突破历史极值,新乡原阳、郑州中牟、许昌鄢陵等地出现了冰雹。此次强对流天气造成严重的经济损失。

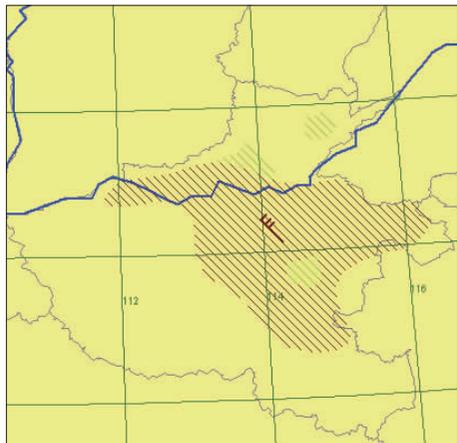


图1 2008年6月3日强对流天气影响区域
棕色阴影:大风区;绿色阴影:冰雹落点
Fig. 1 Severe convective weather
influenced area on June 3, 2008
brown shadow: strong wind area,
green shadows: hail landing point

强对流天气突发性强、危害大,一直是天气预报的难点。为了深入了解强对流天气的形成机制,提高其预报能力,气象工作者做了许多的研究^[12-17,24-26]。本文的主要目的是从预报实际出发,使用预报员能够及时获取的观测资料,包括高空地面观测、静止气象卫星云图和多普勒天气雷达资料,采用基于构成要素的配料法,重点分析“08.6.3”从08时开始到14时这一时段各要素的演变,并根据要素的演变趋势提前数小时对此次强对流过程进行短时预报,为河南的强对流天气预报提供关注点。

强对流天气如区域性雷暴大风和强冰雹天气的形成要素除了普通雷暴形成的三要素即层结不稳定、水汽和触发机制外,还需要有较强的垂直风切变。而产生雷暴大风的附加条件包括导致雷暴内强烈下沉气流的有利条件,绝大多数雷暴大风都是由雷暴内的强烈下沉气流所导致的^[18-19]。有利于强烈下沉气流形成的条件是对流层中层有相对干的环境空气和对流层中低层较大的环境温度直减率。因为相对干的环境空气夹卷进入由降水导致的雷暴下沉气流内部,促使雨滴迅速蒸发而降温,使下沉气流内的温度低于环境温度而产生向下的负浮力。在下沉气流向下运动过程中,由于压缩而增温,如果环境温度的直减率较大,则雷暴的下沉气流下沉增温的幅度不超过环境空气的增温幅度,其与环境空气之间的负温差得以扩大,负浮力在下降过程中进一步增

大,导致强的下沉气流和雷暴大风^[18-19]。而导致强冰雹的有利条件^[18]除了较大的对流有效位能和比较强的深层(地面到 500 hPa)垂直风切变外,还包括适宜的零度层高度(使得冰雹不至于在下降过程中过多融化)。因此,对于区域性雷暴大风和强冰雹的预报需要从层结不稳定、水汽、触发机制、垂直风切变、干空气层和零度层高度几个方面进行考虑。

1 “08.6.3”强对流天气的形成及应用“配料法”的潜势分析

首先从强对流发生的几个关键要素,即层结稳定度、水汽、触发机制和垂直风切变等方面讨论强对流天气的潜势。图 2 为分析上述关键要素所绘制的

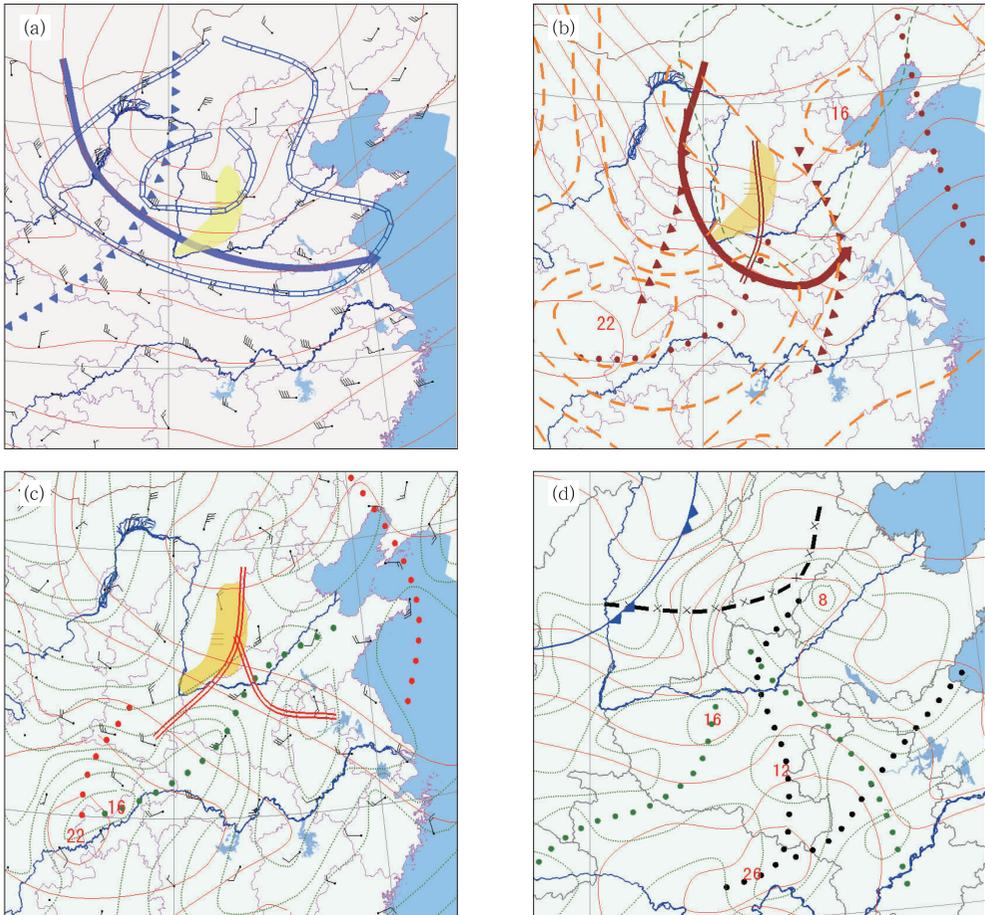


图 2 2008 年 6 月 3 日 08 时 500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa(c)和地面温、湿、风分析图(d) 红细线代表等温线,绿细点线为等露点温度线,黄色阴影区为太行山东边界,三角断线为温度槽,双线表示低槽或切变线,粗箭头表示大风速轴。500 hPa:红线等温线,间隔 2 °C 一条;蓝色箭头表示风速 $\geq 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风速轴;蓝色空心线为 24 小时等变高线,间隔 4 dagpm 一条,中心 -7 dagpm。700 hPa:绿色虚线代表 $(T - T_d) \leq 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 湿区;黄色虚线代表 $T_{700} - T_{500}$ 等值线,间隔 2 °C 一条,两个中心分别为 22 °C、16 °C;箭头表示风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流;圆点线为温度脊。850 hPa:红色圆点线代表温度脊;绿色圆点线为露点脊,等露点温度最大值 16 °C。地面:绿色圆点线为露点脊;黑圆点线代表温度脊;蓝色锯齿线代表冷锋;黑断线为辐合线

Fig. 2 Analysis pictures of 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c) and the surface air temperature, humidity and wind (d) at 08:00 BT 3 June 2008

Red thin lines stand for isothermal line. Green thin dot lines are isodrosthem temperature line. Yellow shadow area indicates east boundary of Taihang Mountain. Triangle break line is thermal trough. Double lines are trough-lines or shear lines. Thick arrow shows strong wind axle. 500 hPa: Red lines stand for isothermal lines at interval of 2 °C. Blue arrow stands for strong wind axle which wind speed $\geq 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Blue hollow lines show 24 hours' isallohypse lines at intervals of 4 dagpm and the centre is -7 dagpm. 700 hPa: Green dashed line indicates the humidity area of $(T - T_d) \leq 5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Yellow dashed lines are isopleths of $T_{700} - T_{500}$ at intervals of 2 °C and the two centers are 22 °C and 16 °C, respectively. Arrow stands for jet with wind speed $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Brown bold dot lines are thermal ridges. 850 hPa: Red bold dot lines are thermal ridges. Green bold dot line indicates dew point ridge with max-value of dew-point temperature being 16 °C. Surface: Green bold dot lines indicate dew point ridges. Black bold dot lines are thermal ridges. Blue hackle line stands for cold front. Black dashed line shows convergence line

“08.6.3”08 时 500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa (c)和地面图(d)。

1.1 层结稳定度

首先分析层结稳定度及其演变。大气层结不稳定可以用 850~500 hPa 或 700~500 hPa 之间的温差来表示,该温差越大,表示条件不稳定越明显。因河南上游的陕西中部和山西海拔较高,850 hPa 受下垫面影响较大,故本文使用 700~500 hPa 的温差表示条件不稳定。图 2 中 700 hPa 图上黄色虚线显示的是 700 hPa 和 500 hPa 之间的温差分布,可以看到,08 时河南大部分地区 and 河南上游的陕西东南部和山西大部都位于 700 hPa 与 500 hPa 温差超过 18 °C 的区域,已属于较显著的条件不稳定。

分析平流过程对大气层结演变的可能影响。高空图(图略)上,6 月 2 日 20 时到 6 月 3 日 08 时,500 hPa 东北到华北北部有一冷涡,涡后部位于中蒙边界的横槽旋转南下,引导槽后冷空气影响山西和河南;925 hPa 和 850 hPa 上,山西、河南均有暖平流输送。因此推测未来几小时山西、河南两省上冷下暖的热力结构将趋于加强,温度直减率会加大,大气不稳定进一步加强。由于河南低层暖平流输送更明显,因此河南大气层结不稳定的程度亦将更明显。

根据间隔 6 小时 1°×1°的 NCEP 再分析资料计算的“08.6.3”温、湿平流(图略)也显示,在山西中南部和河南大部,低层有暖平流,高层有冷平流,低层有湿平流,高层有干平流,与天气图上反映的特征是一致的。

3 日 08 时地面图上(图略),2 日夜间影响河南的降雨带已东移出省,预计随着云量减少,天空状况转好,太阳的辐射作用将导致河南地面温度升高,河南的对流抑制将趋于减小,而对流有效位能会显著增大。该判断从订正后的探空图上得到了证实,图 3c、3d 是采用 11、14 时地面温度制作的探空,对比分析图 3b、3d 可以看出:08 时郑州上空的逆温层和对流抑制到 14 时均已消失,对流有效位能明显增加,从 56 J·kg⁻¹ 猛升至 1673 J·kg⁻¹,升幅达 1617 J·kg⁻¹。太原探空也显示出这一特点(图 3a、3c),但对流有效位能从 143 J·kg⁻¹ 升至 790 J·kg⁻¹,升幅为 647 J·kg⁻¹ 小于郑州。从 1°×1° NCEP 再分析资料计算的 $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial P}$ (图略)上,发现“08.6.3”08—14 时,6 小时内在河南对流发生区上空, $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial P}$ 从负值转为正值,且中心值的变化幅度达 12 × 10⁻² K·hPa⁻¹,表明了大气层结由位势稳定迅

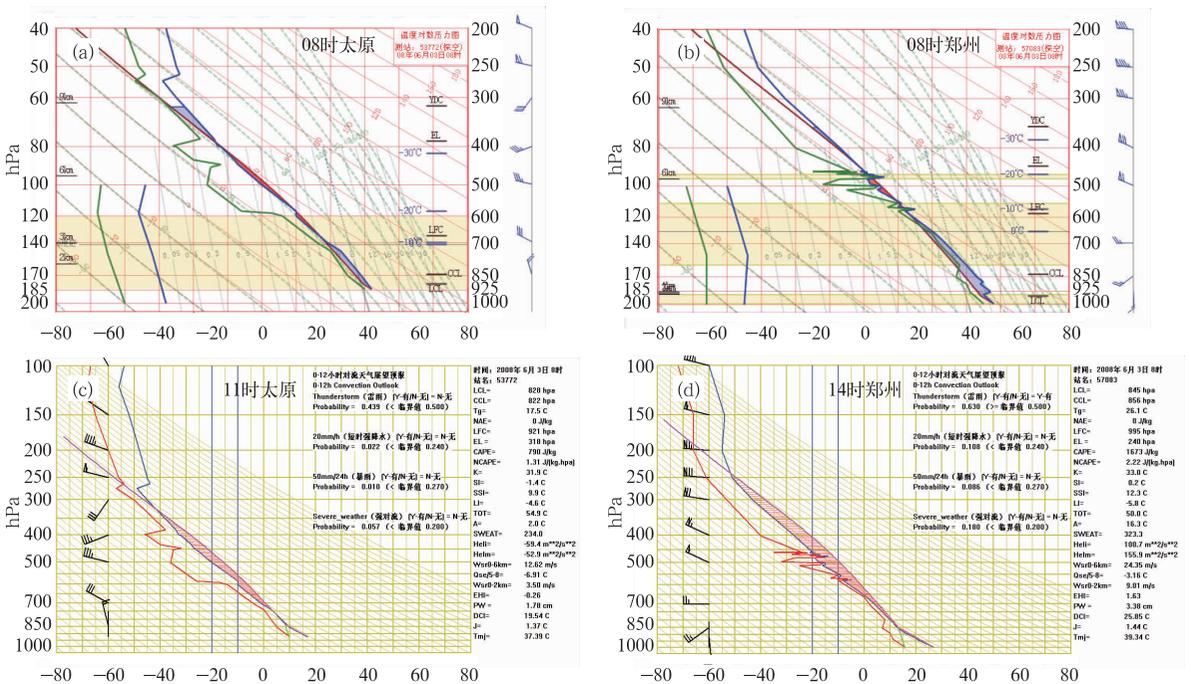


图 3 2008 年 6 月 3 日太原(a,c)和郑州(b,d)探空曲线

Fig. 3 The radio sounding curves on June 3, 2008 at (a) 08:00 BT, Taiyuan,

(b) 08:00 BT, Zhengzhou, (c) 11:00 BT, Taiyuan, and (d) 14:00 BT, Zhengzhou

速转为位势不稳定。

以上分析充分说明,正是这种高低层温、湿平流的输送和太阳辐射的增温作用,使山西中南部、河南上干冷下暖湿的大气不稳定层结迅速趋于加强,强对流潜势愈来愈大,环境场的演变非常有利于强对流的发生发展。

1.2 近地层水汽条件

如前所述,由于 2 日夜间河南刚出现过降水,因此低层湿度较大,水汽条件较好。从 08 时郑州探空曲线(图 3b)可以看到,500 hPa 以下大气为近饱和状态。地面图上(图 2),湿度较大的区域位于山西南部 and 河南的大部地区(露点温度脊所示),太原和郑州地面露点分别为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$;河南中东部地区 $(T - T_d) \leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。850 hPa(图 2)上,从河南西南到东北存在明显的湿平流输送。因此,预计未来几小时河南低层水汽不会有太大的变化,即水汽条件能够满足雷暴和强对流产生的需要。

1.3 垂直风切变

强对流天气产生的另一个关键因素是垂直风切变,图 2 中 500 hPa 等压面上风速超过 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域自西北向东南覆盖甘肃大部、陕西中部、山西南

部、河南和安徽大部地区,其中河南北中部和安徽西北部上空的风速超过 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (蓝色箭头所示)。而地面图上述地区的风速基本上在 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此在山西南部、河南和安徽西北部 $0\sim 6\text{ km}$ 之间存在着很强的垂直风切变。从图 3b 也可看出位于对流区中的郑州,风向随高度顺时针旋转,风矢量由地面 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东风,随高度演变为 925 hPa 上 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的南风、850 hPa 上 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风、700 hPa 上 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西风 and 500 hPa 上 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风。地面到 500 hPa 等压面之间的垂直风切变值大约为 $4.5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,属于强的垂直风切变。由于 500 hPa 河南上游地区的风速也很大,而地面系统稳定少变,因此预计 08 时之后的几小时内,上述地区强的垂直风切变特征不会明显改变,有利于强对流的出现。

应用间隔 6 小时 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料计算的垂直风切变表明,河南对流区上空 $0\sim 6\text{ km}$ (图 4)垂直风切变 $\geq 4\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, $0\sim 2\text{ km}$ (图略)垂直风切变 $\geq 3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,最强处甚至达到了 $(8\sim 9)\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。说明此次过程无论低层 $0\sim 2\text{ km}$ 还是 $0\sim 6\text{ km}$ 均存在强烈的垂直风切变,非常有利于强对流风暴,特别是超级单体风暴的出现^[18-20]。

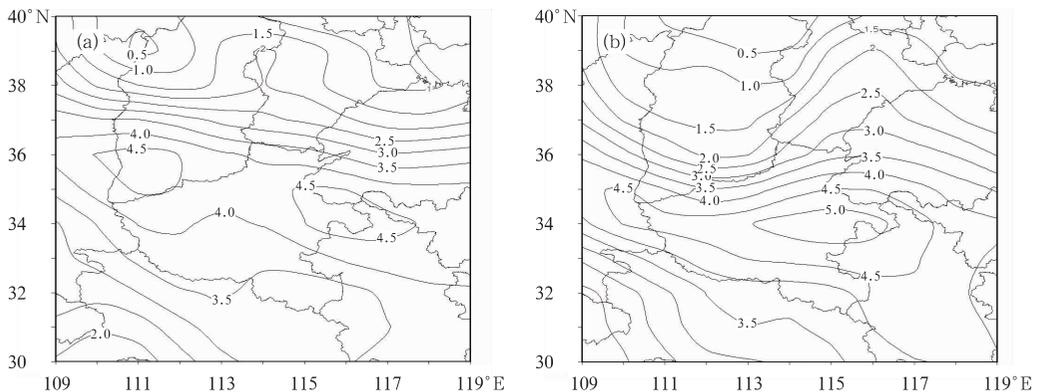


图 4 2008 年 6 月 3 日 08 时(a)和 14 时(b)0~6 km 垂直风切变

Fig. 4 The 0~6 km vertical wind shears over Henan at (a) 08:00 BT 3 June, and (b) 14:00 BT 3 June 2008

1.4 触发机制

3 日 08 时太原站(图 3a)700~500 hPa 之间的温差为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,有明显的条件不稳定。从间隔 30 分钟的 FY2C 水汽图上可以清晰地看出 08 时在河套北部到山西中部有一个狭长的边缘整齐明显暗区

(图 5 中箭头所示),代表着高空的干冷气流,干冷空气是沿着等熵面移动的(干绝热过程),其在向东南方向移动过程中高度逐渐降低。11 时当干冷气流影响到山西南部时(图 5),使这里的不稳定得到加强,一旦有触发机制将导致强对流产生。

08 时地面图上(图 2),河北到山西中南部有一

条边界层辐合线(黑色断线),山西到陕西有一条呈东北—西南走向的冷锋。08 时之后随着冷空气南下冷锋的北段明显南移,11 时冷锋呈东东北—西西南走向逼近相对稳定在山西中南部的辐合线(图 8)。此外,08 时 700 hPa(图略)在陕西、内蒙古和山西交界处还有一个次天气尺度的涡旋,该涡旋受 500 hPa 高空气流的引导,将向东南方向即山西南部移动,预计其在东南移过程中,会在山西南部与地面冷锋和辐合线汇合,加强那里的上升运动,触发对流发生。事实上图 5 显示该涡旋 08—14 时确实是向东南方向移动的,11 时其中心(“+”所示)到达山西中部的静乐县城上空,14 时到达晋豫交界处。据郑州新一代多普勒天气雷达观测,10 时 33 分在山西南部临汾以北大约 100 km 的介休附近最先出现了雷暴回波。因此地面冷锋、中尺度辐合线和高空次天气尺度涡旋三者是此次强对流天气的触发机制。

1.5 雷暴大风和冰雹形成条件的分析

以上分析表明,在山西南部、河南大部都存在强对流天气产生和发展的有利条件,然而一旦对流发生,最可能出现哪种强对流天气呢?

500 hPa、700 hPa 高空图上,3 日 08 时河南处于冷锅底后部 NW 气流中,说明在河南上空有干冷空气,有可能存在 θ_{se} 小值区,这是产生雷暴大风的一个重要特征^[21]。水汽云图(图 5)上显示:在次天气尺度涡旋西南侧的一支暗带(干冷空气带),很有规律地随涡旋中心向 SE 方向移动,11 时到达晋豫交界处。根据外推,11 时之后干冷空气带将影响河南北中部地区,预示着有利于雷暴大风的产生。应用间隔 6 小时 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料作 θ_{se} 垂直剖面(图略),从沿 $34^\circ N$ 即过强对流天气区的垂直剖面可以看到,08 时对流区上空 700~500 hPa 确实存在着中心值为 314 K 的 θ_{se} 小值区,表明中空

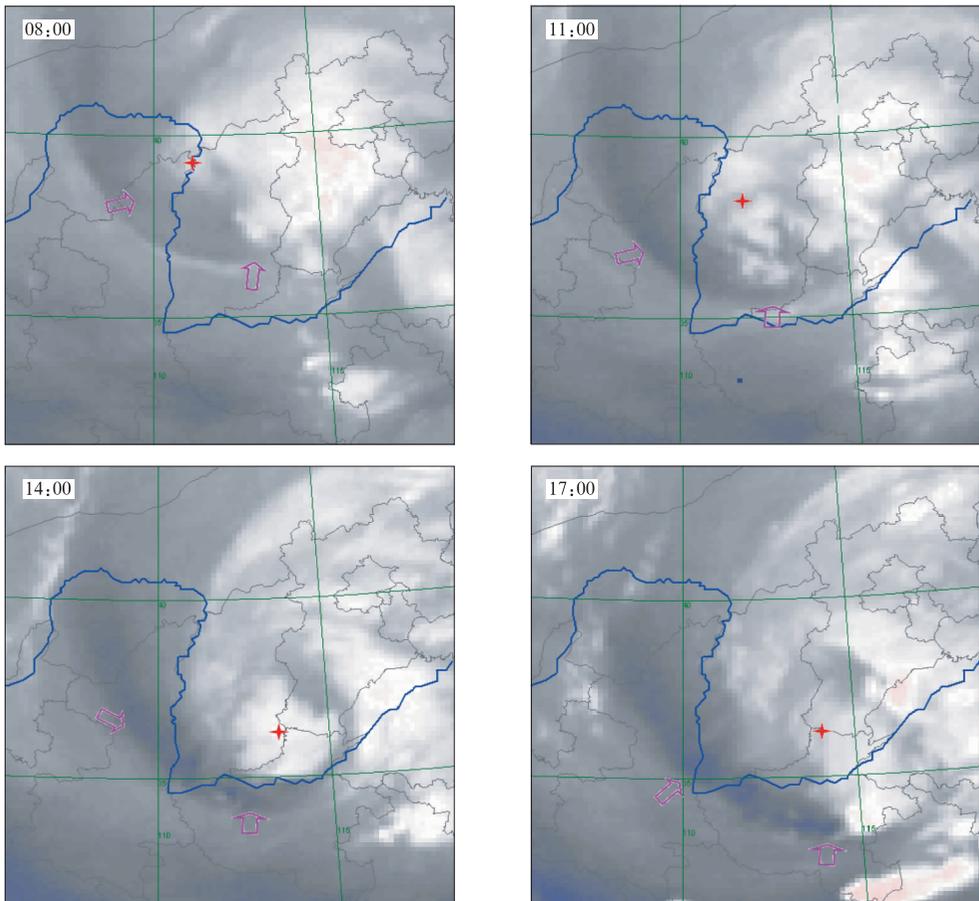


图 5 2008 年 6 月 3 日 FY2C 卫星水汽图像

红星为涡旋中心,箭头所指为干冷空气

Fig. 5 FY2C satellite vapor images

Red star is vortex center, arrow directs to dry and cold air at different times on June 3, 2008

的确存在干冷气层,是有利于雷暴大风产生的环境场。事实上,水汽云图(图 5)上的干冷空气带于 14—17 时影响河南中部,正好对应着雷暴大风出现的时段。

另据分析 $1^\circ \times 1^\circ$ 每 6 小时间隔的 NCEP 再分析资料计算得到的下沉对流有效位能 DCAPE 和大风

指数(图 6),在河南中东部地区,从 08 时到 14 时下沉对流有效位能从 $200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大至 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,大风指数(WINDEX)从 $\leq 10 \times 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的小值区转变为 $\geq 10 \times 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大值区,且据此估算的 14 时地面风力可达 $20 \sim 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [22],均表明对流区的环境条件及其演变有利于雷暴大风的出现。

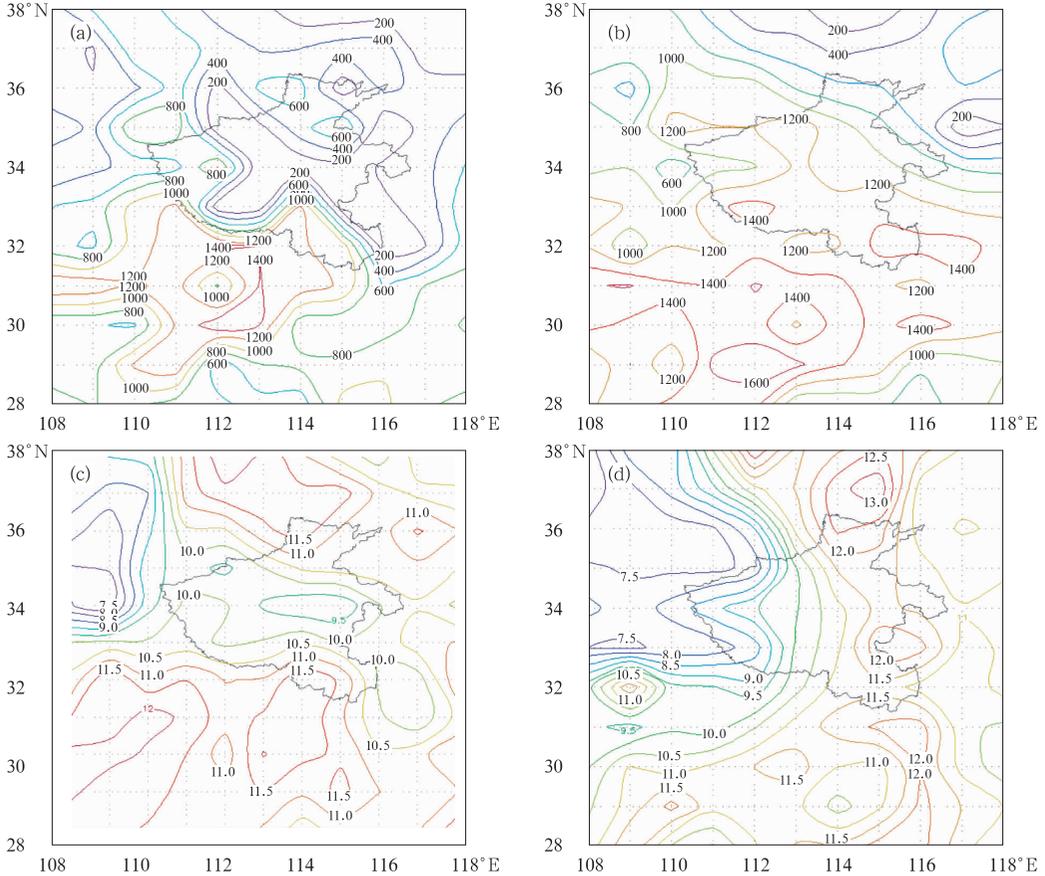


图 6 2008 年 6 月 3 日下沉对流有效位能(a,b,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)和大风指数(c,d,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 08 时 DCAPE; (b) 14 时 DCAPE; (c) 08 时 WINDEX; (d) 14 时 WINDEX

Fig. 6 DCAPE (a,b,unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) and WINDEX (c,d,unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on 3 June 2008
(a) DCAPE at 08:00 BT, (b) DCAPE at 14:00 BT, (c) WINDEX at 08:00 BT, WINDEX at 14:00 BT

此外,据对 1995—2004 年东北(华北)低涡形势下河南冰雹个例的统计分析,得出该型下产生冰雹时 0°C 层高度位于 $3.8 \sim 4.7 \text{ km}$, -20°C 层高度位于 $6.7 \sim 7.6 \text{ km}$ 。6 月 3 日 08 时在郑州探空图上, 0°C 和 -20°C 层的高度分别为 3.6 km 和 6.4 km , 接近于上述东北(华北)低涡形势下河南产生冰雹的高度,因此也存在着出现冰雹的可能。

1.6 对流区与非对流区对流潜势的差异

应用美国 NOAA 下属 ESRL (Earth System Research Laboratory) 实验室研究开发的 LAPS 系统 (Local Analysis and Prediction System), 将

“08.6.3”地面、高空、雷达资料融合分析到一个高分辨率的网格上,输出 LAPS 分析场的中尺度信息,据此计算出一些物理参数。本文所选取的 LAPS 输出区域为 $25^\circ \sim 40^\circ\text{N}$, $100^\circ \sim 120^\circ\text{E}$, 分析中心为 35°N , 105°E , 格距为 1 km , 覆盖河南省及周边区域。LAPS 分析场采用 00:00 和 12:00 (世界时)、精度 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP/NCAR 再分析资料作为背景场。输出时间分辨率为 6 h, 空间分辨率 1 km 的分析场。

计算的一些物理参数显示,“08.6.3”08 时对流区与非对流区的对流潜势差异并不明显(图略),但到了 14 时差异就显现出来了。如河南的西部、西南部是非对流区,该区域内 SI 指数是正值区, K 指

数和风暴强度指数 SSI 的值明显小于对流发生区 (图 7a、7b、7c); 而强对流发生区域内 K 指数和风暴强度指数 SSI 都是大值、SI 指数是负值区, 有利于强对流的产生。特别是 K 指数、风暴强度指数 SSI 的大值区与 SI 指数绝对值大值区相重合的区域正好是强对流发生的区域。

另外应用间隔 6 小时 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料计算“08. 6. 3”08 时的风矢端图 (图 7d、7e) 可以看出, 处于对流区中的郑州, 其上空风速随高度逐层增大, 垂直风切变强于非对流区中的南阳, 但是两站

的差异并不是很明显。到 14 时, 位于对流区与非对流区站点的风矢端图显示出极大的差异, 如位于强对流区中的许昌、太康两站的风矢端图 (图 7f、7g) 具有出现超级单体风暴的明显特征, 而非对流区的站点则没有此特征。

由此看来, 东北冷涡形势下, 对流区与非对流区的对流潜势差异在 08 时并不清楚, 而到 14 时才显现出来。因此可依据数值模式预报产品, 计算 14 时物理参数或对流指数, 通过分析这些参数的场分布特征判断强对流天气的易发区域。

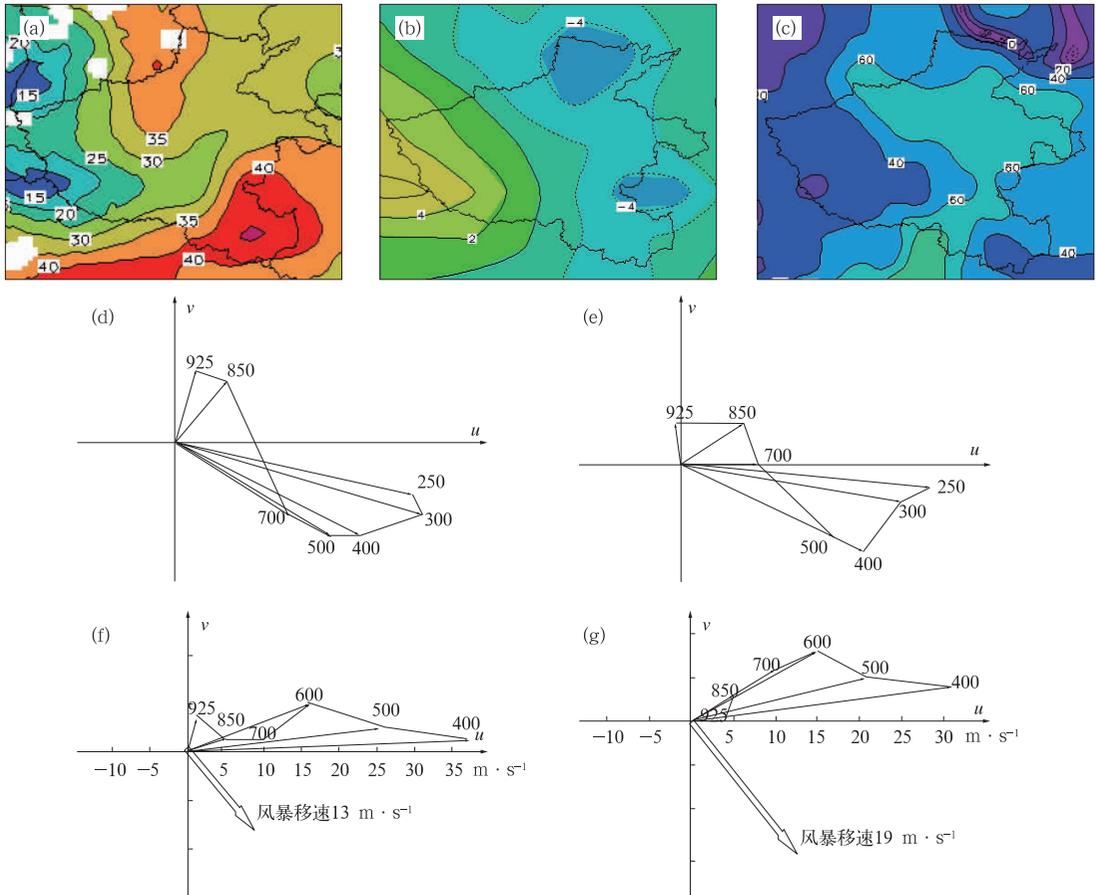


图 7 “08. 6. 3”对流参数与风矢端图

(a) 14 时 K 指数; (b) 14 时 SI 指数; (c) 14 时 SSI; (d) 08 时南阳风矢端图; (e) 08 时郑州风矢端图; (f) 14 时许昌风矢端图; (g) 14 时太康风矢端图

Fig. 7 The convective parameters and wind hodographs on June 3, 2008 for (a) KI at 14:00 BT, (b) SI at 14:00 BT, (c) SSI at 14:00 BT, (d) wind hodograph at 08:00 BT in Nanyang, (e) wind hodograph at 08:00 BT in Zhengzhou, (f) wind hodograph at 14:00 BT in Xuchang, (g) wind hodograph at 14:00 BT in Taikang

1.7 “08. 6. 3”强对流短时预报

根据配料法的基本思想, 强对流天气的主要构成要素有: 层结不稳定、垂直风切变、触发机制和低层水汽条件。前面分析了“08. 6. 3”上述特征量 08 时的状况和其后的演变特征。“08. 6. 3”08 时, 700

hPa 与 500 hPa 温差 $\geq 18^{\circ}\text{C}$ 的区域覆盖了河南大部、陕西东南部和山西大部, 表明这些区域已处于较显著的条件不稳定状态。而高低空的平流过程和太阳辐射作用, 进一步加强了上述地区的大气不稳定程度, 使对流抑制减小、对流有效位能增大, 热力结构和环境场更有利于对流发生。用 08 时 500 hPa

风速 $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域与其相对应地面风速的差,估计深层(0~6 km)垂直风切变的强弱,确定山西南部、河南和安徽西北部为垂直风切变较明显的区域,且根据高低空天气系统的变化,预计 08 时以后,山西南部、河南大部仍保持较强的垂直风切变,有利于对流产生和发展。水汽条件则重点分析了地面和 850 hPa 的露点温度和湿度脊线,以及湿平流的输送,表明河南低层水汽条件短时间内不会明显减弱,能够满足强对流发生的需要。触发机制主要分析了地面锋面和中尺度辐合线以及高空次天气尺度涡旋的移动。根据 08—11 时地面图上冷锋、中尺度辐合线和 700 hPa 高空次天气尺度涡旋的移动,以及雷暴最先产生的时间和地点,判断地面锋面和中尺度辐合线以及高空次天气尺度涡旋三者共同作用,在山西南部大气不稳定区触发了雷暴,成为此次强对流天气的触发机制。

此后的预报关键是在山西境内产生的雷暴回波是否能影响河南。根据多年的预报实践,东北低涡(华北低涡)形势下,河南的强对流多由在山西生成的雷暴翻越太行山进入河南发展起来的。根据 08—11 时地面冷锋、高空次天气尺度涡旋等影响系统的动态外推,11 时后冷锋和次天气尺度涡旋将继续向东南方向移动,因此判断雷暴也将随影响系统东南移,翻越太行山进入河南。此时另一个预报关键点是雷暴进入河南后是否会强烈发展?将出现哪种强对流天气?前面的分析已经表明,河南的大气处于较强的不稳定状态、具有较强的垂直风切变,11 时地面图上高湿区移到了河南的北部和中部偏东的区域(图 8),水汽云图上 11 时干空气也移到山西南部即将进入河南北中部,因此山西南部的雷暴在翻越太行山进入河南后,就进入到大气层结不稳定、强垂直风切变、中层干冷空气共存的区域,因此极有利于雷暴发展加强为多单体强风暴和超级单体风暴,并且产生雷暴大风。因此在综合分析构成强对流天气各要素演变趋势的基础上,结合 11 时各种实时信息,可以预报午后河南将要发生以雷暴大风为主的强对流天气,在河南的北部和中部偏东区域尤为有利。

从郑州雷达回波观测及强对流天气实况可以看出,10 时 33 分在山西南部出现的雷暴回波很快发展为一个雷暴群,整体向东南方向移动。约 13 时 40 分左右进入河南北部,并迅速加强和发展,最强反射率因子达 65 dBz。14 时以后形成一个弧形带状强回波带,沿着回波带有两个超级单体风暴发展,

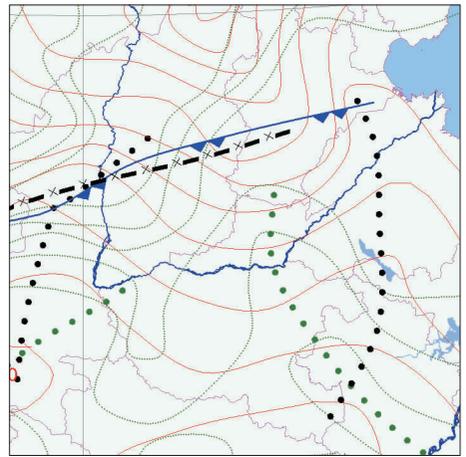


图 8 2008 年 6 月 3 日 11 时地面分析图
红线代表等温线,南边第一条为 30 °C;绿线代表等露点温度线,南边第一条为 18 °C;均为间隔 2 °C 一条。黑断线为辐合线,蓝锯齿线为冷锋,黑圆点线为温度脊,绿圆点线为湿度脊

Fig. 8 Surface analysis chart at 11:00
BT 3 June 2008

Red lines show isothermal lines and the first from south is 30 °C. Green lines are isodrothems temperature lines and the first from south is 18 °C. Both of the intervals are 2 °C. Black dashed line indicates convergence line. Blue sawtooth line stands for cold front. Black bold dot lines show thermal ridges. Green bold dot lines are humidity ridges

强风暴带先后影响新乡、郑州、开封、许昌和周口地区,一路产生雷暴大风和冰雹。14 时 44 分新乡原阳出现冰雹,15 时 54 分许昌鄢陵出现了 $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极端大风。16 时 27 分雷达回波呈现典型的超级单体结构(图 9),低层反射率因子图上,从东南方向指向西北方向的入流缺口和从主回波体向东南方向伸出的钩状回波清晰可见,低层和中层的径向速度场上中气旋特征明显,其在 0.5° 仰角的旋转速度达到 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (有速度模糊需要主观退模糊),确定中气旋为强中气旋级别,而 4.3° 仰角径向速度(中心高度 10 km)显示强烈风暴顶辐散。 1.5° 仰角径向速度除了中气旋,还呈现了中层径向辐合 MARC^[23] 这一表征雷暴大风的典型特征。此时,最强的地面辐合,即超级单体后侧下沉气流的出流和底层来自东南的暖湿入流之间的边界——阵风锋的最强一段,正要经过周口的西华,16 时 39 分西华观测到 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的历史极值。此后上述对流风暴继续向东南方向移动,陆续影响周口的其他县市和商

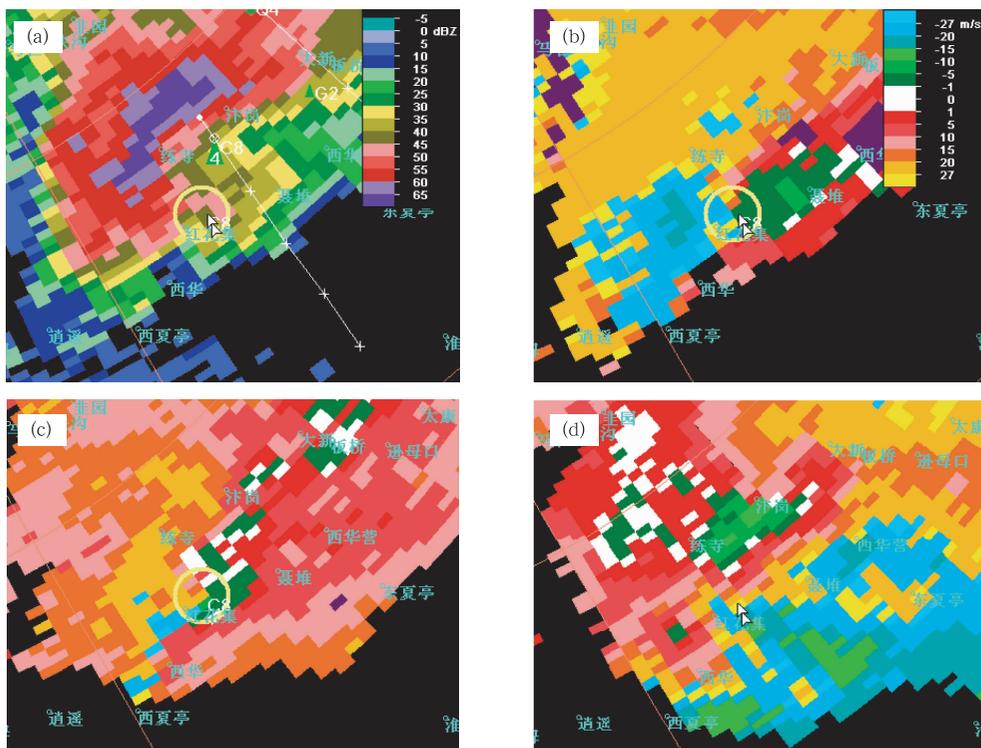


图 9 2008 年 6 月 3 日 16:27 BT 郑州雷达 0.5°仰角基本反射率因子、0.5°、1.5°和 4.3°仰角径向速度图
黄色圆圈指示中气旋

Fig. 9 The base reflectivity factor at 0.5° angle of elevation (a) and the base radial velocity at 0.5°(b), 1.5°(c) and 4.3°(d) angle of elevation (yellow circle shows mesocyclone) from Zhengzhou Doppler Radar at 16:27 BT 3 June 2008

丘部分地区,于 19 时前后进入安徽西北部。

在前面的分析中已经提到,距鄯陵和西华最近的许昌和太康两站 14 时风矢端图(图 7f、7g)显示出有产生超级单体风暴的特征,雷达回波也监测到超级单体出现。鄯陵和西华这两个站在 15 时 54 分、16 时 39 分分别出现了突破历史极值的大风。说明用中尺度模式预报产品制作的风矢图可以帮助预报员判断超级单体和强天气的发生发展。

2 讨论和结论

本文的主要目的是采用配料法对一次预报不太理想的强对流天气进行短时预报再分析,探讨强对流天气短时临近预报的可能途径。

根据天气形势分型(流型辨识)预报天气,预报指标多为统计固定时次的实况资料所得,未考虑天气形势的变化趋势,有一定的局限性。特别是对于华北(东北)低涡形势下产生的强对流天气,若以 08 时作为起报场,该时次的预报指标往往达不到预报

强对流的起报值,指示性不强,容易漏报强对流天气。如“08.6.3”08 时的强对流预报特征就不是很明显,以对流天气区中的郑州为例,08 时探空显示,有明显的对流抑制,其对流抑制能量 $CIN^{[27]}$ 达 $363 J \cdot kg^{-1}$,对流有效位能 $CAPE^{[27]}$ 很小仅 $56 J \cdot kg^{-1}$,沙氏指数 SI 为正的 $0.1 \text{ } ^\circ C$,因此用 08 时上述各量很难预报午后有如此强的对流发生。但若应用配料法,重点考虑强对流天气产生的几个构成要素,则预报针对性更强。特别是借助于数值预报产品计算强对流构成要素及相关的强对流参数,分析其量值、空间分布特征及演变趋势,同时综合考虑 14 时强对流参数的场分布特征,可以提早确定强对流出现的时间、区域和天气类型,比天气形势分型预报有明显的优势。

运用配料法的基本思想,通过“08.6.3”08 时的观测资料分析构成强对流天气的关键要素——大气层结不稳定、低层水汽、垂直风切变和抬升触发机制,确定河南、山西等地存在着强对流潜势。然后通过分析天气形势的变化,对上述各量的演变趋势进

行预测,表明未来几小时河南、山西等地大气层结更加不稳定,而低层水汽、垂直风切变变化较小,环境场有利于强对流天气发生。而对垂直风切变和对流层干冷空气层的演变分析,说明将要产生的强对流天气以雷暴大风为主。此外通过对运用数值预报产品计算的有关物理量和对流参数进行诊断分析,证实了上述各强对流构成要素演变趋势预测的正确性。

另外,分析结果还表明河南大部处于较强的位势不稳定、强烈的垂直风切变和明显的高空干冷平流的环境中。这种环境有利于高度组织性的超级单体风暴的发生和发展,并产生雷暴大风。此外,预示此次强对流天气可能发生的时间、地点以及随后演变趋势的重要线索有地面冷锋、中尺度辐合线及静止气象卫星水汽图像上“干侵入”的演变。此次高空干冷空气在 FY2C 静止气象卫星 6.7 μm 通道的水汽图像上非常清晰地表现为一个边缘整齐的暗区,随次天气尺度涡旋向东南方向移动,导致所经路线上正涡度发展,在山西南部与地面冷锋和辐合线共同作用触发雷暴产生。

根据“配料法”的主要思路,在充分应用现有观测资料和分析工具的条件下,分析雷暴天气产生的构成要素及其演变趋势,并结合预报经验和最新实况,“08.6.3”强对流过程可以提前约 3 小时做出较正确的短时预报。这种分析有助于预报员掌握强对流天气的预报着眼点,理清预报思路,改进强对流天气的短时预报。若将数值预报产品应用于配料法,可有效提高强对流天气的预报水平。

参考文献

[1] Maddox R A, Chappell C F, and Hoxit L R. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events[J]. B A M S, 1979, 60:115-123.

[2] Schaefer J T. Severe thunderstorm forecasting-A historical perspective[J]. Wea Forecasting, 1986,1: 164-189.

[3] Doswell C A, III, H E Brooks, and R A Maddox. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 1996,11: 560-581.

[4] Moller A R. Severe local storms forecasting, severe convective storms[J]. Meteor Monogr No. 50, Amer Meteor Soc, 2001, 433-480.

[5] Kain J S, Janish P R, Weiss S J, et al. Collaboration be-

tween forecasters and research scientists at the NSSL and SPC[J]. B A M S, 2003:1797-1806.

[6] 张小玲,陶诗言,孙建华. “配料法”暴雨预报[J]. 大气科学, 2010,34(4):754-766.

[7] 李俊,李武阶,廖穆山. 基于“配料”的梅雨锋强降水预报方法[J]. 气象,2006,32(9): 3-8.

[8] 吕江津,刘一玮,王彦. 用多普勒雷达对三次强对流天气的短时预报对比分析[J]. 气象,2009,35(1): 48-54.

[9] 吴芳芳,王慧,韦莹莹,等. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象,2009,35(1):55-64.

[10] 王彦,唐熠,赵金霞,等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象,2009, 35(1): 91-96.

[11] 廖晓农,于波,丽华. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象,2009, 35(9): 18-28.

[12] 王伏村,李耀辉,牛金龙,等. 甘肃河西走廊两次强对流天气对比分析[J]. 气象,2008,34(1):48-54.

[13] 王令,康玉霞,焦热光,等. 北京地区强对流天气雷达回波特征[J]. 气象,2004,30(7):31-36.

[14] 鲁丹,王令军,崔建云. 潍坊 2003 年 5 月 19 日强对流天气过程分析[J]. 气象,2003,29(10):38-41.

[15] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等. 山东省 2006 年 4 月 28 日飚线天气过程[J]. 气象,2007,33(1): 74-80.

[16] 廖晓农,俞小鼎. 14 时探空在改进北京地区对流天气潜势预报中的作用[J]. 气象,2007,33(3):28-32.

[17] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学,2008,32(3):508-522.

[18] Johns and Doswell. Severe local storm forecasting[J]. Wea Forecasting, 1992,7: 588-612.

[19] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17(4):385-393.

[20] 俞小鼎、姚秀萍、熊庭南,等. 多普勒天气雷达与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:314.

[21] 陆汉城. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2000:270.

[22] 寿绍文,励申申,姚秀萍,等. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:354.

[23] 俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等. 多普勒天气雷达与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006.

[24] 赵培娟,吴蓁,郑世林,等. 河南省强对流天气诊断分析预报系统[J]. 气象,2010,36(2):33-38.

[25] 郑永光,张小玲,周庆亮,等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,2010,36(7):33-42.

[26] 张德林,马雷鸣.“0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象,2010,36(3):62-69.

[27] 刘建文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社,2006:91-141.