

马月枝,章征茂,王新红,等.豫北一次区域性大暴雨的数值模拟分析.暴雨灾害,2009,28(1):21-28

# 豫北一次区域性大暴雨的数值模拟分析

马月枝<sup>1</sup>,章征茂<sup>2</sup>,王新红<sup>1</sup>,田春娜<sup>1</sup>,李吉洲<sup>3</sup>

(1.河南省新乡市气象局,新乡 453003;2.湖北省黄石市气象局,黄石 435002;  
3.河南省辉县市气象局,辉县 453601)

**摘要:**利用 NECP  $1^\circ \times 1^\circ$  6 h 再分析资料和 WRF 中尺度数值模式对 2006 年 7 月 2—3 日豫北区域性大暴雨过程进行数值模拟,并用模拟结果对该过程作中尺度分析。结果表明:暴雨中尺度系统发展和维持期间,基本上是强辐合区对应强辐合区,使得垂直对流运动发生发展,为强降水发生和持续提供了动力条件; $\theta_{se}$  值大小和实况降水强弱演变对应关系很好, $\theta_{se}$  值越大,实况降水越强,反之,实况降水越弱;豫北地区出现强降水时,水汽通量中心位于豫南且分布在西南急流轴上,豫中南部始终维持一条明显的水汽输送带,水汽被源源不断地输送到豫北地区;豫北地区处于明显的水汽辐合区,强辐合区有一自西向东的移动过程,与实况强降水过程演变趋势一致;大暴雨区域上空从低层到对流层顶层垂直螺旋度均为正值,且强降水时段与螺旋度最强时段对应关系很好,降水峰值与正螺旋度中心出现时间吻合。

**关键词:**大暴雨;WRF 模式;数值模拟;中尺度分析

中图分类号:P458.1\*21.1 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2008)01-0021-08

## 1 引言

夏季是豫北地区的降水集中季,该地区汛期降水量与同期暴雨日存在较大关系。对豫北地区近 10 年降水资料统计分析发现,该地区 72% 的暴雨以上降水过程出现在 7—8 月份,其中直接受副热带高压影响的占 46%。国内气象工作者对该地区暴雨天气过程做了大量研究,并获得许多有意义的成果。牛淑贞等<sup>[1]</sup>利用郑州 714CD 多普勒天气雷达探测资料,结合河南省地面逐时雨量、风场、郑州探空、省区域小图等资料,分析了 2000 年 7 月 5—6 日新乡、郑州等地特大暴雨成因,发现特大暴雨中心出现在能量锋区后侧低能中心及其前部、温度密集区后侧的冷区中心;程海霞等<sup>[2]</sup>分析了 2003 年 7 月 28 日晋东南和豫北区域暴雨过程的大尺度环流背景和物理量场,发现该暴雨过程是在中纬度西风槽与中低空切变线相互作用下产生的;刘朝亮等<sup>[3]</sup>从环流形势、单站气象要素及中尺度滤波等方面,对 2004 年 7 月 28 日发生在河南新乡市的一次大暴雨过程进行了分析,认为副热带高压西伸北抬的“突变”过程是触发大暴雨的直接原因;刘朝亮等<sup>[4]</sup>利用常规气象资料,对新乡市 2005 年 5 月 16 日大到暴雨过程进行天气动力学分析,结果表明,该过程是由西南低涡、低空急流和地面冷锋共同作用造成的。

然而,在豫北地区暴雨发生发展规律和机理上还存在不少有待深化的认识,加强对该地区典型暴雨的

研究仍有必要。2006 年 7 月 2 日 20 时(北京时,下同)至 3 日 20 时豫北地区出现一次区域性大暴雨过程,其降水时间短、强度大,具有明显中尺度特征。对此过程的成因和机制,文献[5]虽有研究,但其采用的常规资料时空分辨率较低,诊断结果对了解暴雨过程存在一定局限性。因此,本文采用美国新一代非静力平衡、高分辨率中尺度预报和资料同化模式(WRF 模式)对此过程进行数值模拟,利用模式输出的逐时高分辨率资料,分析其中尺度结构特征及演变过程,希望能揭示一些有规律性的特征,进一步提高此类暴雨天气的预报水平,为做好气象防灾减灾工作服务。

## 2 降水实况及主要影响系统分析

### 2.1 降水时空分布

2006 年 7 月 2 日 20 时至 3 日 20 时豫北区域性大暴雨过程,有 15 个县(市)24 h 降水量超过 50 mm,13 个县(市)在 100 mm 以上。由此过程降水实况可知(图 1),24 h 累积降水达到大暴雨的区域主要集中在黄河以北沿河地区,大暴雨区呈东西向带状分布,长约 200 km、宽为 100 km 左右。分析各时段 6 h 累积降水资料发现,整个降水有一个自西向东发展的过程,且主要降水时段集中在 3 日 02 时至 3 日 08 时;当天 08 时后,强降水东移至豫北东部(114°E 以东)与山东省交界地带;3 日 14 时后,降水结束。其中,新乡站(35.32°N、113.88°E) 24 h 累积雨量达 158 mm,其强

收稿日期:2008-11-05;定稿日期:2009-02-14

基金项目:中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室基金项目(2006LASW01)资助

作者简介:马月枝,女,1976 年生,硕士研究生,主要从事中尺度天气动力学研究。E-mail: 459917170@qq.com

降水主要集中在 3 日 02—08 时,6 h 降水量达 121 mm,1 h 最大雨量 54 mm,出现在 3 日 05—06 时。综

上可知,这次豫北区域性大暴雨过程的降水时间短、强度大,具有明显中尺度特征。

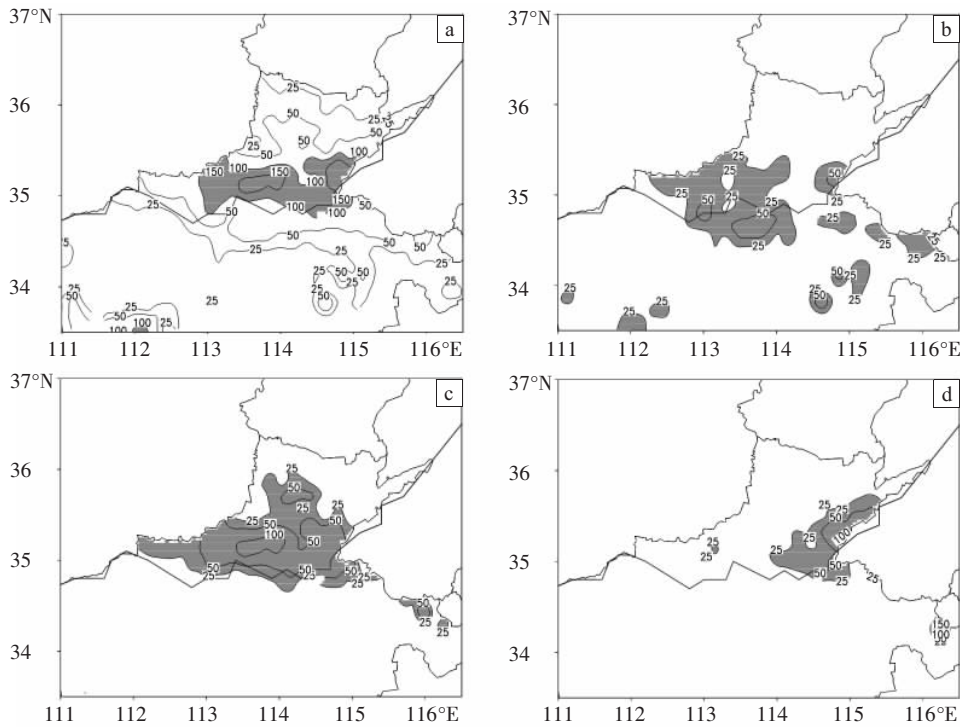


图 1 2006 年 7 月 2 日 20 时至 3 日 20 时 24 h (a)、2 日 20 时至 3 日 02 时 6 h (b)、3 日 02—08 时 6 h (c)、3 日 08—14 时 6 h (d) 实况累积降水量

图 a 中阴影区为大于 100 mm 降水区;图 b、c、d 中阴影区为大于 25 mm 降水区域;黑色粗实线所示为黄河

### 2.2 大暴雨主要影响系统及其演变

区域性暴雨总是出现在有利的大尺度环流背景下<sup>[6]</sup>。分析此次豫北区域性大暴雨发生前和期间 500 hPa 天气图发现(图略),暴雨前欧亚大陆中高纬上空维持两槽一脊型,位于巴尔喀什湖北部的高空冷涡不断分裂出短波槽携带冷空气东移影响华北地区。低纬地区副热带高压呈东西向带状分布,588 dagpm 线北边界位于 31°N,西伸脊点位于 110°E,直到 2 日 20 时,副热带高压始终强盛且稳定少动。7 月 2 日 08 时,中高纬地区两长波槽之间纬向型环流向经向型环流转变,贝加尔湖东部 115°E 附近生成一低槽南伸至 45°N 附近,同时在河套西部兰州至成都、丽江一线生成一西风槽并缓慢东移。直到 3 日 08 时,贝加尔湖东部低槽不断分裂出小槽东移南下并入河套地区西风槽,使其不断加强、经向度加大,迫使副热带高压明显减弱,南压约 2 个纬度,东退 5 个经度,豫北大暴雨正是出现在其东退南压过程中。

7 月 2 日 20 时(图略),700 hPa 在银川附近有一中尺度低涡形成;850 hPa 沿副热带高压外围(26°—33°N)形成中尺度低空急流,豫北地区西部位于西南风和东南风的暖切变中;地面图上(图略),江淮倒槽已生成,豫北正好处于倒槽北侧的东北气流中,此时降水开始发生。3 日 02 时(图略),850 hPa 低空急流加强北

抬,急流核中心最大风速达 20 m·s<sup>-1</sup>,整个豫北地区位于明显的风速风向辐合带内,此时豫北地区西部降水开始加剧,平均雨强达到 10 mm·h<sup>-1</sup>。3 日 08 时(图 2),700 hPa 低压环流明显东移南压至豫晋交界地带,切变线正好位于豫北黄河流域;850 hPa 低空急流略减弱东移,主要辐合区东移至豫北东部地区。当日 02—08 时豫北中西部地区一直受切变线和中尺度低空急流影响,大部地区出现暴雨,部分地区出现大暴雨。08

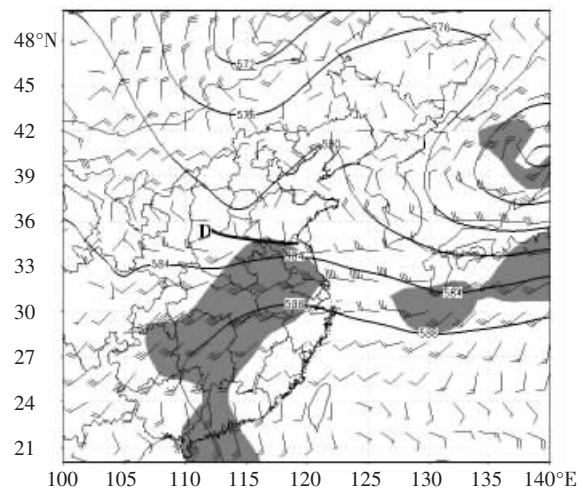


图 2 2006 年 7 月 3 日 08 时高空环流形势和影响系统  
细实线为 500 hPa 等高线,单位: dagpm;粗实线为 700 hPa 切变线;  
阴影区为 850 hPa 风速大于等于 12 m·s<sup>-1</sup> 区;  
风向杆为 700 hPa 风场

时以后,随着切变线和低空急流东移,豫北西部地区降水逐渐减弱,东部地区强降水开始加强,截止 3 日 14 时,豫北地区东部普降暴雨到大暴雨。3 日 14 时(图略),与 500 hPa 豫北地区转受槽后西北气流影响相对应,中低层豫北地区转受低涡后部偏北气流影响,降水结束。

综上所述,切变线、中尺度低涡以及中尺度低空急流是造成此次豫北大暴雨的中尺度天气系统。

### 3 数值模拟方案设计与检验

#### 3.1 数值模拟设计

本文采用双向两重嵌套方案,在对多种积分时间及物理过程方案进行多次模拟的基础上,选取相对最优的结果,其方案如下。

1)模拟区域中心为 114°E、35.5°N,使用双向两重嵌套网格,粗网格点数为 70×70,水平分辨率为 45 km,细网格点数为 52×49,水平分辨率为 15 km。模式顶层气压为 100 hPa,垂直分层为 19 层。

2)WRF 所有网格均使用 Lin 等(水汽、雨、雪、云水、冰、冰雹)微物理过程方案,Betts-Miller-Janjic 积云

对流参数方案,RRTM 长波辐射方案和 Dudhia 短波辐射方案,MRF PBL 边界层方案以及 Noah 模式陆面过程方案,土壤采用 Noah 模式,地表层物理过程为基于 Monin-Obukhov 方案。由于 2006 年 7 月 2 日 20 时存在较强降水,考虑到模式的 spin up 时间,选取 2 日 08 时作为初始时间。模拟时间从 7 月 2 日 08 时至 3 日 20 时共 36 h,所有网格均从模拟的初始时刻同时启动,并采用 120 s 时间步长,每小时输出一次积分结果。

#### 3.2 降水模拟与实况对比

图 3a 是细网格模拟的 7 月 2 日 20 时至 3 日 20 时豫北地区 24 h 降水量分布。模拟雨带总的分布与实况非常接近,模拟结果 100 mm 以上降水带呈东西向分布,主要分布在 34.8°—35.6°N 之间,其北部比实况范围略大 30 km。实况图中(图 1a)位于 113.4°—114.1°E 之间的强降水区域在模拟图中可清楚地看出,只是其范围比实况偏大,位置偏北 40 km、偏东 50 km,实况东部的降水中心未被模拟出来,量级比实况偏小 20 mm,模拟结果在河南西部出现一个虚假强降水中心。总的来说,模式还是较好地再现了豫北地区强降水过程。

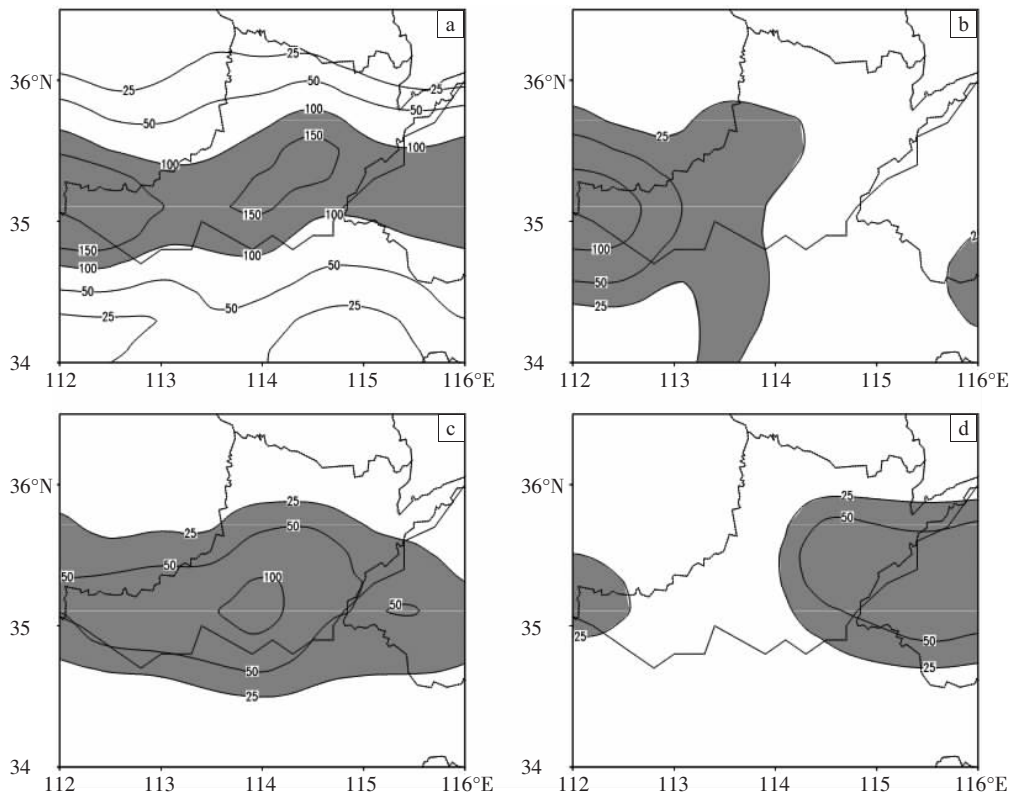


图 3 2006 年 7 月 2 日 20 时至 3 日 20 时 24 h (a)、2 日 20 时至 3 日 02 时 6 h 模拟降水量(b), 以及 3 日 02—08 时(c)、08—14 时(d) 6 h 模拟降水量(单位: mm)

另外,模式对于每 6 h 的累积降水模拟也有一定的准确性。分析图 3b 发现,2 日 20 时至 3 日 02 时模拟结果较实况有些出入,实况中(图 1b)主要降雨带位于黄河以南,降水区域位于 113.4°—140.0°E、34.5°—

34.7°N 之间,其中心降水量达到 70 mm,而模拟结果中心偏西,50 mm 以上降水区域位于 113°E 以西,且西部出现一个大暴雨中心,这造成 24 h 模拟结果西部出现一个虚假中心。3 日 02—08 时,模拟结果(图

3c)无论雨区分布还是降水量级与实况(图 1c)都比较吻合,实况与模拟图上的最大降水中心均位于 114°E、35.2°N,模拟结果中心值为 110 mm,比实况偏少 10 mm 左右。3 日 08—14 时,模拟结果(图 3d)表明,雨区有一个向东移动的过程,且降水强度趋于减弱;模拟降水中心的雨量与实况(图 1d)大小比较一致,只是其中心偏西 30 km、偏北 20 km。14 时以后(图略),模拟结果显示,雨区已移出豫北地区,与实况相同。

综上模拟降水结果分析表明,此次降水过程是一个自西向东推进的过程,主要降水时段集中在 3 日 02—08 时,14 时以后降水停止,降水模拟结果与实况比较一致,说明 WRF 模式对每 6 h 降水分布也有一定的模拟能力。

### 3.3 高低空不同天气尺度系统模拟检验

利用模拟结果得到的对流层各层各时次的风场和高度场叠加图与再分析场进行对比分析发现(图略),模拟 500 hPa 副热带高压强度和脊线位置,与再分析场基本相同;模拟对流层低层的西南急流和切变

线以及中尺度低涡等,尤其是低空急流和低层中尺度低涡的发展和移动,在模拟结果中有比较清晰的体现。可见,模式对大尺度背景场和中尺度系统有较强的模拟能力。

总体看来,模拟结果较为成功地描述了这次强降水过程的发生发展;模式对这次强降水过程的高、低空环流形势模拟较好;对引起强降水的低空急流和中尺度低涡等主要中尺度系统的发生、发展在模拟结果中有很好描述。因此,应用该模拟结果对这次强降水过程进行深入研究是可信的。

## 4 物理量场诊断分析

### 4.1 动力场分析

本文通过高时空分辨率的数值模拟结果对产生强暴雨的各个中尺度系统及其相互作用机制进行了深入研究。首先,利用模式输出的间隔为 1 h 的模拟数据,分析这次强降水期间有关物理量场的时空演变和分布特征,以便了解中尺度暴雨系统更为细微的结构。

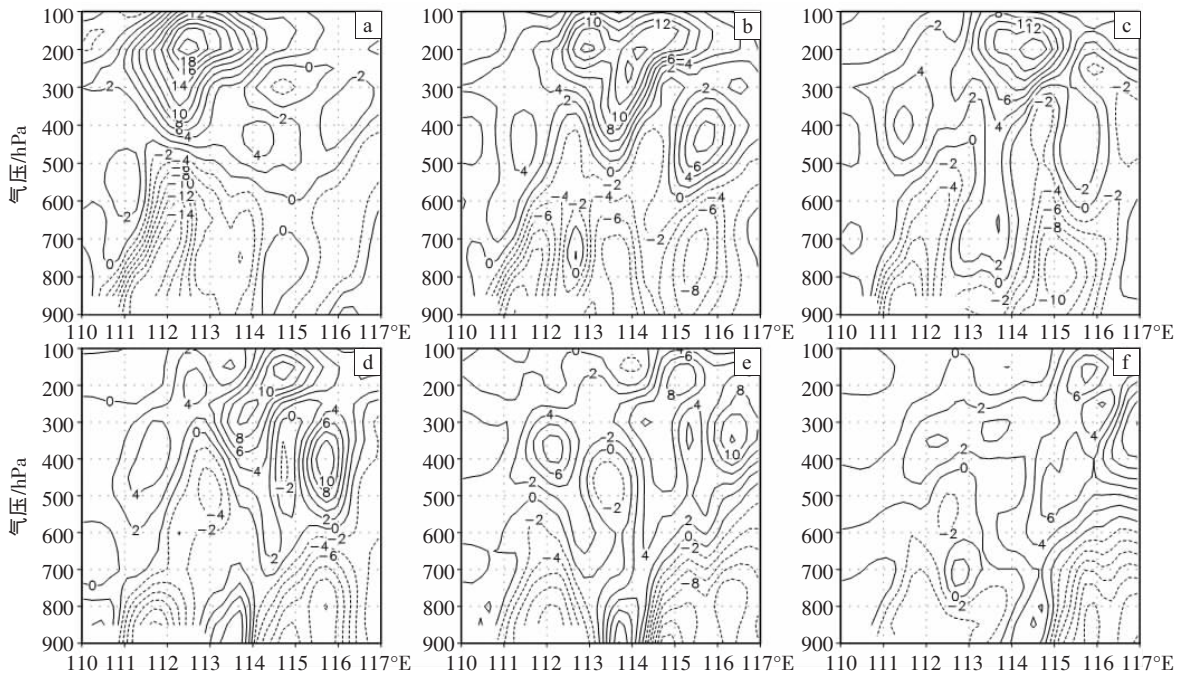


图 4 2006 年 7 月 3 日 02 时(a)、04 时(b)、06 时(c)、08 时(d)、10 时(e)、12 时(f)沿 35.2°N 经暴雨中心的散度纬向剖面图(单位:  $10^{-5} s^{-1}$ )

#### 4.1.1 散度场垂直分布特征

由上节分析所述,造成豫北区域性大暴雨的主要时段集中在 3 日 03—11 时,且大暴雨中心东西轴线主要位于 35.2°N,所以本文着重分析该时段沿 35.2°N 对应的散度场垂直结构。图 4 给出了 7 月 3 日不同时刻沿 35.2°N 经暴雨中心的散度纬向剖面图。

从图 4 中可见,3 日 02 时(图 4a),对流层中低层辐合中心位于 111.5°E 附近,辐合层向上伸展至 500 hPa,在辐合柱上空 200 hPa 有一量值为  $20 \times 10^{-5} s^{-1}$  的

辐散中心;3 日 04 时(图 4b),中高层均发展为辐散层,且强辐散区位置集中在 113—114°E 之间,这种高层辐散形成的抽吸效应有利于低层辐合和对流上升运动加强;3 日 05 时(图略),114°E 附近中高层出现狭窄的辐散柱,辐散中心位于 300 hPa,其中心量值为  $18 \times 10^{-5} s^{-1}$ ,对应地面辐合中心位于 900 hPa,其中心量值为  $-12 \times 10^{-5} s^{-1}$ ,这种从地面延伸至对流层顶的正负散度柱耦合的典型结构十分有利于强上升气流维持和加强,对暴雨的维持和加强有重要意义,位于 114°E

附近的新乡站(35.32°N、113.88°E) 3 日 05—06 时 1 h 降水量达到 54 mm;3 日 06 时(图 4c),辐散层向下延伸至 800 hPa 附近,中低层辐合区分裂为东西两个,一个位于 112°E 附近,一个位于 115°E 附近,高低层辐合辐散柱对应关系较好的是后者,因此造成强降水区东移;3 日 08 时以后(图 4d、e),大暴雨区中部上空基本上都转化为辐散层,降水趋于结束,但其西部(112°E 附近)和东部(115°E 附近)上空高低层仍为辐散辐合配置结构,所以实况这两个区域仍有降水,特别是东部 115°E 附近,截止至 11 时,中低层始终稳定维

持强辐合区,其中心位于 900 hPa 附近,对应这一时段东部出现强降水。3 日 12 时后(图 4f),随着东部上空强辐合辐散区快速东移,豫北上空辐合辐散强度迅速减弱,降水趋于结束。

4.1.2 涡度场分析

分析 7 月 3 日 02—12 时 850 hPa 逐时涡度场发现(图略),豫北地区始终处于正涡度区,且正涡度中心沿着 35.2°N 附近自西向东移动,与 850 hPa 低涡演变十分吻合。图 5 给出了 7 月 3 日不同时刻沿 35.2°N 经暴雨中心的涡度纬向剖面图。

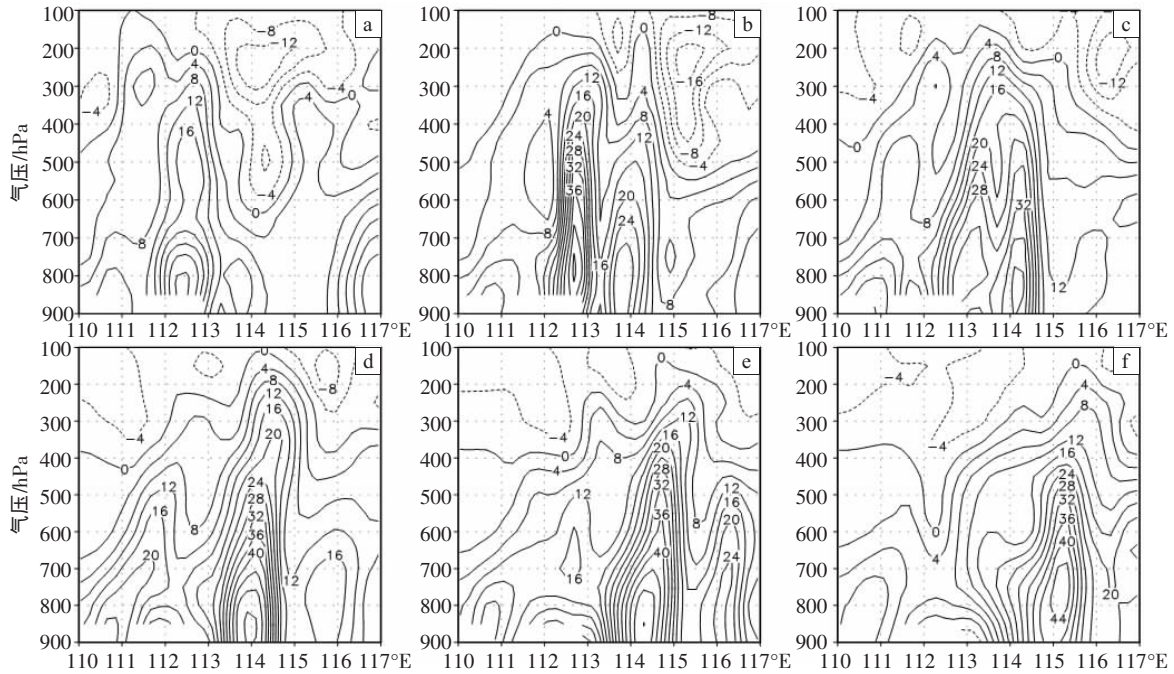


图 5 2006 年 7 月 3 日 02 时(a)、04 时(b)、06 时(c)、08 时(d)、10 时(e)、12 时(f)沿 35.2°N 经暴雨中心的涡度纬向剖面图(单位:  $10^{-5} s^{-1}$ )

从图 5 中可见,3 日 02 时(图 5a),112—113°E 之间其上空整个对流层均为正涡度,正涡度中心位于 800 hPa 以下,其最大值为  $32 \times 10^{-5} s^{-1}$ ;3 日 03—04 时(图 5b),正涡度柱加强并缓慢东移,正涡度中心抬升至 750 hPa 附近,其中心值增至  $44 \times 10^{-5} s^{-1}$ ,此时位于正涡度中心附近的月山站(35.21°N、113.05°E)1 h 降水量达到峰值(37.9 mm),同时在 113.8°E 附近上空又出现另一正涡度柱;3 日 06 时(图 5c),以上东西两个正涡度柱在东移过程中,随着西边正涡度柱减弱,东边正涡度柱逐渐加强,西部强降水逐渐减弱,中部降水达到最大,此时新乡出现  $54 mm \cdot h^{-1}$  的强降水;3 日 08 时以后(图 5d、e),上述正涡度柱移至 114°E 以东地区,这与东部出现的强降水有很好的对应关系;到了 3 日 12 时(图 5f),伴随正涡度柱继续东移,豫北地区降水趋于结束。

4.2 热力场分析

假相当位温( $\theta_{sc}$ )反映了大气的温湿状况。应用  $\theta_{sc}$

的水平分布和垂直分布可以分析大气中的能量分布、垂直稳定度状况和大气湿斜压性<sup>[7]</sup>。为此,对这次豫北区域性大暴雨过程中  $\theta_{sc}$  值大小与实况降水强弱演变的对应关系进行了分析。

分析 850 hPa  $\theta_{sc}$  逐时分布图发现(图略),7 月 2 日 20 时,豫西南存在一量值为  $87^\circ C$  的  $\theta_{sc}$  中心,其高值区主要位于豫中南部,呈准东西向分布;随着时间推移, $\theta_{sc}$  高值中心逐渐北抬东移,截止 3 日 02 时,从豫西南至豫北沿黄河西部地区存在一条  $\theta_{sc}$  高能舌自西南向东北方向伸展, $\theta_{sc} \geq 85^\circ C$  的等值线主要影响豫北沿黄河西部地区;从 3 日 03—07 时, $\theta_{sc} \geq 85^\circ C$  的等值线呈舌状自西向东移至 114.5°E 附近;3 日 08—10 时, $\theta_{sc}$  高能舌继续东移至 115°E 附近,主要影响豫北沿黄河东部地区,该时段豫北中西部由于能量得以释放,逐渐转为  $\theta_{sc}$  低值区;3 日 11 时后, $\theta_{sc}$  高能舌快速东移出河南,豫北地区转为  $\theta_{sc}$  低值区,雨势随之逐渐减弱,说明强降水过程有不稳定能量释放。

沿 35.2°N 自西向东选择豫北区域 4 个有代表性站点进行分析,即大暴雨区西部的月山站(35.21°N、113.05°E,24 h 降水量 162 mm)、中部的大辛站(35.18°N、113.66°E,24 h 降水量 198.4 mm)和新乡站(35.32°N、113.88°E,24 h 降水量 155mm)以及大暴雨区东部的方里站(35.32°N、114.85°E,24 h 降水量 229.6mm)。首先,分析 850 hPa 沿 35.2°N 过大暴雨中心东西轴线的  $\theta_{se}$  时间演变图发现(图 6a),月山站  $\theta_{se}$  值为 84 °C 的时段集中在 3 日 02—06 时;大辛站  $\theta_{se}$  值为 84 °C 的时段

集中在 3 日 03—06 时;新乡站  $\theta_{se}$  为 84 °C 的时段集中在 3 日 03—07 时,其中 05—06 时  $\theta_{se}$  值达到最大(85 °C),对应实况新乡站出现 1 h 降水峰值(54 mm·h<sup>-1</sup>);方里站  $\theta_{se}$  值为 83 °C 的时段集中在 3 日 02—10 时。对比各站降水实况演变发现, $\theta_{se}$  值大小和实况降水强弱演变有着很好的对应关系, $\theta_{se}$  值越大,对应实况降水越强,反之,实况降水越弱。另外,从图 6a 中还可看出,随时间推移, $\theta_{se}$  大值区是一个自西向东移动的过程,这与实况降水强度随时间演变趋势一致。

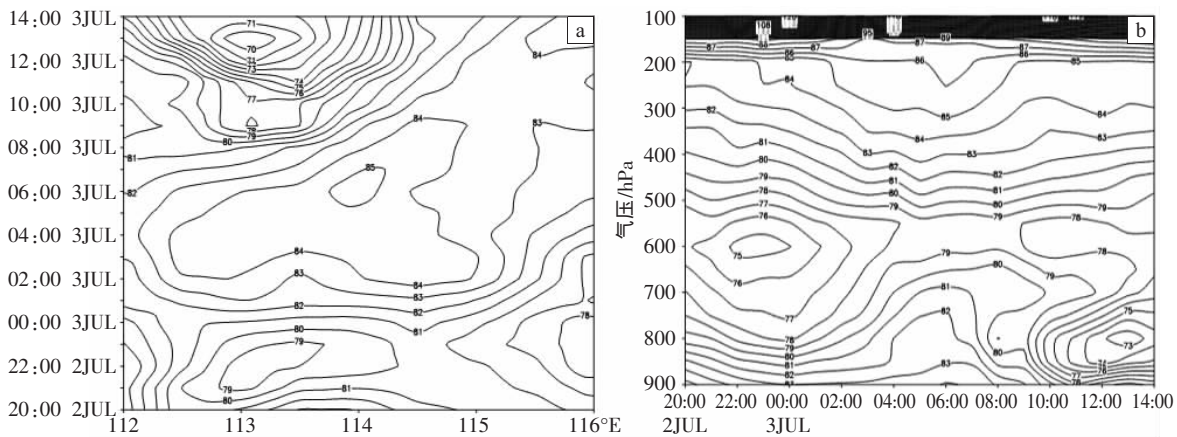


图 6 2006 年 7 月 2 日 20 时至 3 日 14 时 850 hPa 沿 35.2°N 的  $\theta_{se}$  时间演变(a, 间隔 1 h)以及新乡站(35.32°N、113.88°E)  $\theta_{se}$  时间垂直剖面图(b) (单位: °C)

分析新乡站  $\theta_{se}$  时间垂直剖面图发现(图6b),7 月 2 日 02 时,800 hPa 以下新乡上空聚集了大量不稳定能量;之后,随着辐合层不断抬高,暖湿气流向上扩展,不稳定的高能高湿层逐渐加厚;到 3 日 06 时,对流不稳定层达到 600 hPa 附近,而 600 hPa 以上大气处于对流稳定状态,阻挡了暖湿气流向上扩散,使得不稳定能量在低层不断聚积,为强降水发生积累了能量,新乡站在该时次降水也达到最强;随着强降水的发生,不稳定能量得到逐步释放,到 08 时以后不稳定层降低;到了 12 时,大暴雨区上空大气层结趋于稳定,降水结束。上述分析结果表明,此次大暴雨过程是一个不稳定能量迅速释放、大气层结从不稳定转向稳定的过程。

4.3 水汽条件分析

本文取相对湿度( $f$ ) $\geq 90\%$ 作为湿度饱和区,湿层即指饱和层,一般湿层越厚,降水越强,湿层厚度可作为降水预报的指标之一。分析此次豫北大暴雨区上空相对湿度垂直剖面图发现(图略),从 7 月 2 日 20 时至 3 日 14 时,大暴雨区上空有着深厚的湿层,湿层高达 400 hPa,最高时则达到 350 hPa 附近。暴雨的形成除高空具有深厚的湿层外,还需要有水汽从源地通过大规模水平气流源源不断地输送到降水区并在该地区汇集,一般其输送量大小用水汽通量表示,水汽辐合

强度用水汽通量散度表示。分析 7 月 3 日 850 hPa 逐时水汽通量和水汽通量散度图可知(图略),当豫北地区出现强降水时,水汽通量中心位于豫南,且分布在西南急流轴上,豫中南部始终维持一条明显的水汽输送带,西南急流将南海海上水汽源源不断地输送到豫北地区,使整个暴雨期都有充沛的水汽供应;同时,豫北地区处于明显的水汽辐合区,强辐合区存在一个自西向东移动的过程,这与实况强降水过程的演变趋势一致。

5 垂直螺旋度特征分析

垂直螺旋度对暴雨是一个相关性较强的参数,作为一种动力触发机制,其量值大小、分布特征的变化对天气系统的移动、发展及暴雨的落区、强度有很好的指示意义<sup>[8-9]</sup>。图 7 显示的是经过豫北大暴雨区中心自西向东月山、大辛、新乡、方里四个站的垂直螺旋度的时间剖面图。

从图 7a 中可见,7 月 3 日 03—06 时,月山站上空垂直螺旋度均在  $30 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$  以上,正螺旋度中心主要分布在 600—300 hPa 之间,其中 04 时左右,在 400 hPa 附近有一量值为  $60 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$  的螺旋度中心。对应月山站实况降水,10 mm·h<sup>-1</sup> 以上强降水时段主要集中在 3 日 03—06 时,其中 03—04 时降水达到

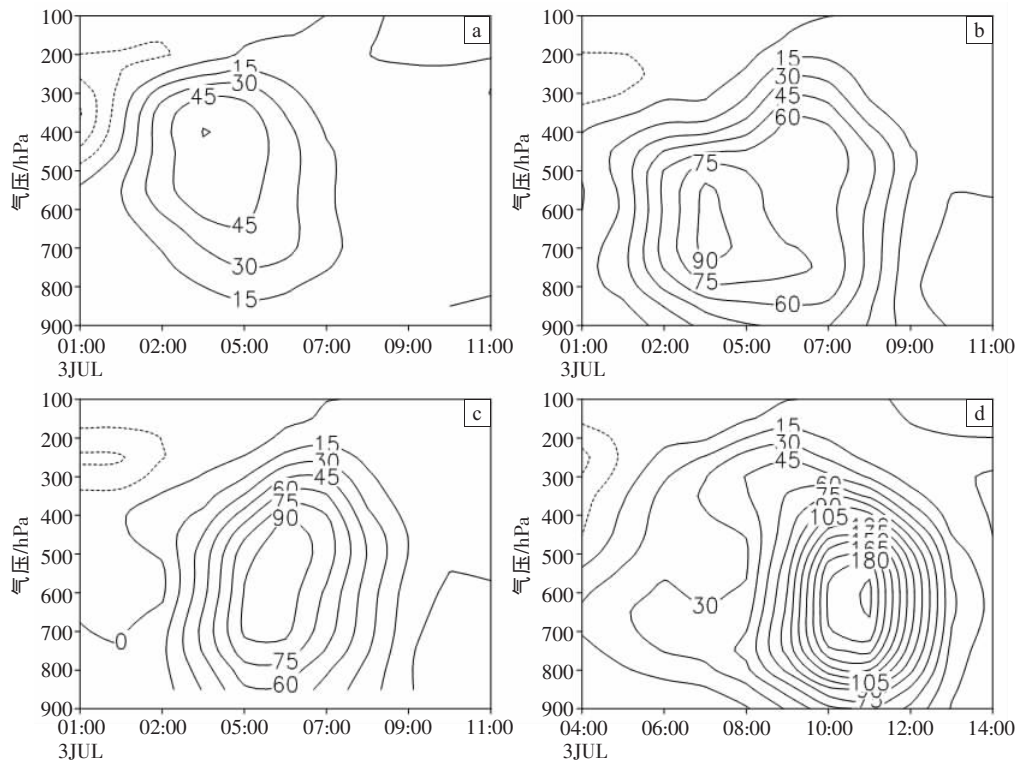


图 7 2006 年 7 月 3 日不同时段豫北的月山(a)、大辛(b)、新乡(c)、方里(d) 四站垂直螺旋度时间垂直剖面图(单位:  $10^{-6}$  hPa $\cdot$ s $^{-2}$ )

峰值( $37.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )。同样,从图 7b 中可见,3 日 03—07 时大辛站上空 850—400 hPa 之间螺旋度均在  $60\times 10^{-6}$  hPa $\cdot$ s $^{-2}$  以上,其中 04—05 时在 700—550hPa 之间出现量值为  $90\times 10^{-6}$  hPa $\cdot$ s $^{-2}$  的螺旋度正中心,06 时螺旋度强度略有减弱,07 时其量值为  $60\times 10^{-6}$  hPa $\cdot$ s $^{-2}$  的螺旋度等值线又回升至 400 hPa 以上。对应大辛站实况降水,20 mm $\cdot$ h $^{-1}$  以上强降水主要集中在 04—07 时之间,其中 04—05 时降水达到峰值( $40.3 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),05—06 时降水强度有所减弱,其 1 h 降水量 24.9 mm,但 06—07 时降水强度又有所回升,达到  $34.3 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,09 时以后降水趋于结束。前文分析表明,新乡站降水时间短、强度大,具有明显的中尺度特征。分析图 7c 可看到,正螺旋度强中心呈狭长的柱状且主要集中出现在 05—07 时,其中 06 时螺旋度强中心量值达到  $90\times 10^{-6}$  hPa $\cdot$ s $^{-2}$ ,并主要位于 700—400 hPa 之间。对应新乡站实况降水,其强降水时段与螺旋度强中心分布时段一致,且主要集中在 05—07 时,04—05 时、05—06 时、06—07 时雨强分别为 28.1、51.0、23.6 mm $\cdot$ h $^{-1}$ ,09 时以后,新乡站降水趋于结束。大方站位于豫北大暴雨区的偏东位置,分析图 7d 可见,从 3 日 08 时后大方站上空正螺旋度迅速增大,10—11 时达到最大( $195\times 10^{-6}$  hPa $\cdot$ s $^{-2}$ ),对应该站实况 20 mm $\cdot$ h $^{-1}$  以上强降水主要集中在 08—11 时,其 1 h 降水量分别为 22.9、36.5、40.0、24.1 mm。

综合以上分析可知,此次豫北大暴雨上空从低层一直到对流层顶层垂直螺旋度均为正值,且强降水时段与螺旋度最强时段有很好的对应关系,降水峰值往往出现在正螺旋度中心出现时段。

## 6 结论

本文采用 WRF 中尺度数值模式对这次豫北区域性大暴雨过程进行了数值模拟,模拟结果较为成功地描述了这次强降水过程的发生发展。模式对强降水过程的高、低空环流形势有比较好的模拟;对引起强降水的低空急流和中尺度低涡等主要暴雨中尺度系统的发生、发展在模拟结果中都有很好的描述。在此基础上,使用数值模拟结果对该过程进行了中尺度特征的诊断分析和研究,得到如下结论。

(1)此次豫北区域性大暴雨过程是在极为有利的天气形势下发生的。北方冷空气南下、副热带高压稳定少动形成了有利的降水形势。副热带高压外围强盛西南急流将水汽和能量源源不断地输送到豫北地区,西风槽携带冷空气与西南暖湿气流在此交汇,冷暖气交绥造成豫北地区强降水。

(2)在此次暴雨中尺度系统发展和维持期间,基本上是强涡度区对应着强辐合区。在斜压性大气条件下,这种涡度、散度垂直结构的动力场配置是促进辐合强上升运动和强暴雨过程产生和持续的重要动力

机制。同时,这种对应关系又能加强垂直对流运动发生发展,为强降水发生和持续提供动力条件。

(3) $\theta_{sc}$  值大小与实况降水强弱演变有着很好的对应关系, $\theta_{sc}$  越大,对应实况降水越强,反之,实况降水越弱。 $\theta_{sc}$  大值区有一个自西向东的移动过程,与实况降水过程的时间演变一致。此次大暴雨过程是一个不稳定能量迅速释放,大气层结从不稳定转向稳定的过程。

(4)强降水时段大暴雨区上空有着深厚的湿层,同时西南急流将南海海上水汽源源不断地输送到豫北地区,使整个暴雨期有充沛的水汽供应,保证了强降水过程中水汽的补充和维持。同时,低层丰富的水汽输送,增加了大气的的不稳定性,在强对流系统的触发机制作用下,大暴雨过程得以发生并维持。

(5)大暴雨区域上空从低层一直到对流层顶层垂直螺旋度均为正值,且强降水时段和螺旋度最强时段有很好的对应关系,降水峰值往往出现在正螺旋度中心出现时段。螺旋度的强度变化对暴雨发生有一定的指示意义。

#### 参考文献:

- [1] 牛淑贞,张素芬,席世平,等.河南一次特大暴雨过程的中尺度分析[J].气象,2001,27(11):31-34.
- [2] 程海霞,帅克杰,李毓富.2003年7月28日晋东南及豫北区域暴雨天气分析[J].山西气象,2004(2):5-7.
- [3] 刘朝亮,王新红,钟兴华,等.2004-07-28新乡市大暴雨成因分析[J].河南气象,2006(1):28-30.
- [4] 刘朝亮,王新红,钟兴华,等.新乡2005年5月16日大到暴雨天气过程分析[J].气象与环境科学,2008(S1):115-118.
- [5] 鲁坦,乔春贵,梁钰,等.2006年7月1-4日河南省区域暴雨过程分析[J].气象与环境科学,2007,30(9):42-44.
- [6] 张广周,靖春悦,王红燕,等.物理量场配置对豫中地区暴雨落区的影响分析[J].暴雨灾害,2008,27(3):225-230.
- [7] 郑仙照,寿绍文,沈新勇,等.一次暴雨天气过程的物理量分析[J].气象,2006,32(1):102-106.
- [8] 尤红,姜丽萍,彭端,等.2005年6月广东特大暴雨垂直螺旋度分析[J].气象,2007,33(4):71-76.
- [9] 章征茂,沈桐立,马月枝,等.“05.8”十堰大暴雨的数值模拟与诊断分析[J].暴雨灾害,2008,27(1):24-31.

## Numerical Simulation Analysis of a Regional Rainstorm Process Over Northern Henan

MA Yue-zhi<sup>1</sup>, ZHANG Zheng-mao<sup>2</sup>, WANG Xin-hong<sup>1</sup>, TIAN Chun-na<sup>1</sup>, LI Ji-zhou<sup>3</sup>

(1.Xinxiang Meteorological Bureau of Henan Province, Xinxiang 453003;

2.Huangshi Meteorological Bureau of Hubei Province, Huangshi 435002;

3.Huixian Meteorological Bureau of Henan Province, Huixian 453601)

**Abstract:** With the  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP reanalysis data and WRF mesoscale model, the heavy rainstorm in Northern Henan from 2 to 3 July 2006 is simulated to study the formation mechanism of the mesoscale rainstorm system. In the period of the system progress and maintenance, it shows that the zone of strong positive vorticity corresponds to the zone of strong convergence. Obviously the corresponding relation can enhance the occurrence and progress of vertical convection and provide dynamical condition for the heavy rainstorm. It is found that the value of  $\theta_{sc}$  commendably corresponds to precipitation of the heavy rainstorm. The bigger the value of  $\theta_{sc}$ , the heavier the precipitation, and vice versa. During the heavy rainstorm over Northern Henan, the center of vapor flux locates Southern Henan and the axis of the southwest jet, an obvious vapor transporting belt always maintains over the south central Henan and water vapor is carried to Northern Henan constantly. A clear convergence zone of water vapor over Northern Henan moves from west to east just as the evolution tendency of the heavy rainstorm. The heavy rainfall period is closely related with the higher positive vertical helicity, the appearance of the peak value of precipitation is synchronized with that at the center of the positive vertical helicity.

**Key words:** Heavy rainstorm; WRF model; Numerical simulation; Mesoscale analysis