

喻谦花, 郑士林, 吴 蓁, 等. 2016. 局部大暴雨形成的机理与中尺度分析. 气象, 42(6): 686-695.

局部大暴雨形成的机理与中尺度分析^{*}

喻谦花^{1,2} 郑士林^{1,3} 吴 蓁^{1,3} 吕哲源²

1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

2 河南省开封市气象局, 开封 475004

3 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 利用常规气象观测资料、区域自动站加密观测资料、NCEP 逐 6 h 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料和 FY-2C 卫星逐时 TBB 资料、多普勒雷达探测资料, 对 2012 年 7 月 7—8 日河南商丘地区大暴雨天气过程形成机理和中尺度系统活动特征进行了研究, 结果表明: 500 hPa 低槽与低层东西向切变线和低空急流相互配合、共同作用是此次大暴雨形成的大尺度环境条件。中尺度分析显示: 多个中尺度雨团的活动形成了 4 个大暴雨中心, 中尺度雨团与 $M\alpha CS$ 相伴, 而 $M\alpha CS$ 是由多个 $M\gamma CS$ 和 $M\beta CS$ 合并、加强的结果。这些 $M\gamma CS$ 和 $M\beta CS$ 是由地面中尺度辐合线或辐合中心触发产生并发展, $M\alpha CS$ 覆盖区下强降水回波的移动和发展与地面中尺度辐合系统对应较好, 大暴雨出现在地面辐合系统形成后的 1~2 h 内; 而暖平流导致的局地升温, 是地面中尺度辐合系统形成的主要原因。TBB 梯度与降水强度成正比, 当 $\nabla TBB/0.5^\circ E \geq 34^\circ C$, 并且 $TBB \leq -63^\circ C$ 时, 将产生 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水; 当 MCS 发展成熟时强降水发生在中尺度对流云团 TBB 低值中心附近, 当 TBB 在 1 h 内降低 $31^\circ C$ 以上时, 1~2 h 后该地将出现雨强为 50 mm 的短时强降水。因此, 地面热力不均匀导致的局地升温是此次地面中尺度辐合系统形成的主要原因, 而地面中尺度辐合系统的发生发展触发了中小尺度对流系统的发生发展, 导致了局部大暴雨的产生。根据中小尺度对流云团的 TBB 强度及变幅, 可提前 1~2 h 预报短时强降水。

关键词: 大暴雨, 中尺度雨团, $M\gamma CS$, $M\beta CS$, 地面中尺度辐合系统

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.004

The Forming Mechanism and Mesoscale Analysis of Local Heavy Rainfall

YU Qianhua^{1,2} ZHENG Shilin^{1,3} WU Zhen^{1,3} LÜ Zheyuan²

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Ensuring and Applied Technique of CMA, Zhengzhou 450003

2 Kaifeng Meteorological Office of Henan Province, Kaifeng 475004

3 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: By using regular meteorological observations data, regional automatic station observation data, Doppler radar data, $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP 6 h interval reanalysis data and hourly FY-2C satellite TBB data, the forming mechanism and mesoscale system activity feature of the heavy rainstorm seen in Shangqiu in 7—8 July 2012 are analyzed. The results show that the trough at 500 hPa and east-west shear line in the low level are compatible with the low-level jet stream, forming the large-scale circulation for the rainstorm. Mesoscale analysis shows that several convective cells develop into four rainfall centers, and the convective cells accompany the $M\alpha CS$, which is merged and strengthened by some $M\gamma CS$ and $M\beta CS$. The $M\gamma CS$ and $M\beta CS$ are triggered, generated and developed by the ground mesoscale convergent systems or convergence center. The movement and development of heavy precipitation echoes correspond better with ground

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306012)资助

2015 年 2 月 10 日收稿; 2016 年 1 月 26 日收修定稿

第一作者: 喻谦花, 主要从事天气预报业务和灾害性天气机理研究. Email: qfxy.y@163.com

通信作者: 吴蓁, 主要从事天气预报与灾害性天气机理研究. Email: hnsqxwz@163.com

moderate convergence systems. The rainstorm occurs after the formation of ground convergence system within 1–2 hours. The warming in some local areas caused by warm advection is the main cause for the formation of surface mesoscale convergence system. Rainfall intensity is proportional to the TBB gradient. When $\nabla TBB/0.5^\circ E \geq 34^\circ C$, and $TBB \leq -63^\circ C$, severe rainfall of $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ would occur. When MCS (mesoscale convective system) gets matured, heavy precipitation occurs near the low TBB center of the mesoscale convective clouds and when TBB is lower than $31^\circ C$ in one hour, short-time severe rainstorm of 50 mm intensity would appear in 1–2 hours. Therefore, the uneven local ground heat warming is the main cause of this moderate convergence system. Moreover, the development of ground moderate convergence systems trigger the evolution of mesoscale convective systems, leading to the generation of local heavy rainstorm. So according to the TBB intensity and the variation of mesoscale convective clouds, forecast of short-time heavy rainfall can be made in advance of 1–2 hours.

Key words: severe rainstorm, mesoscale rain cluster, $M\gamma CS$ (meso- γ scale convective system), $M\beta CS$ (meso- β scale convective system), surface mesoscale convergence system

引言

一些研究表明(陶诗言,1980;丁一汇等,1978,薛秋芳等,1997,余志豪等,2008;孙建华等,2015;王淑莉等,2015;支树林等,2015),暴雨是一种中尺度现象,是几种不同尺度天气系统相互作用的结果,其发生、发展受到大尺度环境条件的制约,而本身的强度和出现地点又与中尺度扰动有十分密切的关系,暴雨出现后反过来又影响大尺度气象要素的分布。孙淑清等(1979;1980)研究了大尺度、中尺度低空急流与暴雨发生的关系指出:低空急流附近有无暴雨发生与其本身结构特征有关,除了低空要有强风速带,还要具备有利于暴雨发生的热力和动力条件。伍志芳等(2006)和何彩芬等(2006)研究指出暴雨通常与中尺度系统密切相关,在有利的环境场中,中尺度系统的停滞或缓移往往会产生暴雨,当中小尺度的对流扰动在适当的天气背景下快速有效地将富含水汽的气流组织起来并在短时间内将能量释放则会导致短时暴雨。程麟生等(2000)对中纬度中尺度对流系统的研究做了较为全面的综述。廖移山等(2006)通过数值模拟分析研究了发生在河南的一次特强暴雨 β 中尺度流场的发展机理,指出对流层低层非地转涡度的强烈发展是 β 中尺度气旋形成的重要原因。徐珺等(2014)对北方一次暖区大暴雨强降水成因分析表明,天气及以下尺度的抬升条件,如地面辐合线、925和850 hPa切变和低空急流出口区的风速辐合等均可导致强降水,降水落区一般位于低层多层风速辐合的叠置区。

随着新一代天气雷达网、区域自动气象站的布设、大气监测和遥感技术的广泛应用,使产生局地暴雨天气系统活动的监测能力得到较大提高,这对揭示暴雨的发生、发展有很大作用。如陈永仁等(2013)研究发现,短时强降雨通常由MCS中的深对流特征造成,水平尺度多为 β 中尺度或更小的 γ 中尺度系统,具有云顶亮温低、雷达反射率因子大和垂直累积液态水含量高等特点。王啸华等(2012)指出,短时暴雨的中尺度特征在云图TBB资料上表现为对流云团合并后强度和范围显著增强,移速缓慢,TBB梯度大值区停留;在地面风场上体现为南移的中尺度辐合线与局地生成的中尺度辐合中心合并,使得地面风场辐合显著增强。杜倩等(2013)研究表明,在局地要素满足暴雨发生的必要条件下,监测卫星多通道亮温的急剧下降,可作为重要指标提前2~3 h预警强降雨的发生。郭虎等(2008)和慕建利等(2011)对暴雨的中小尺度特征分析指出,近地面辐合对大暴雨落区和强降雨的发生具有重要作用。李晓容等(2012)对发生在江苏沿江地区的一次大暴雨过程进行诊断和中尺度分析表明,地面中尺度辐合系统与雨团的发生发展关系十分密切,且对雨团的发生发展具有一定的预示作用。盛日锋等(2011)对济南“7.18”大暴雨进行的中尺度分析表明,边界层中尺度辐合中心或辐合线的生成和发展,是这次大暴雨产生的启动机制,大暴雨的分布与地面辐合线的走向基本一致,并随其移动而移动。

本文利用河南省区域自动站逐时资料、FY-2C卫星逐时TBB资料、多普勒雷达资料以及 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP再分析等资料,详细分析2012年7月7—8

日发生在河南东部商丘地区的这次大暴雨过程。以揭示造成此次大暴雨的中尺度对流系统的活动特征,并通过对对流系统活动环境场条件的分析,加深对局部大暴雨形成机理的认识。

1 暴雨概况

2012 年 7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时(北京时,下同),河南东部商丘地区出现大暴雨过程,强降水主要集中在 7 日 11—14 时、7 日 18 时至 8 日 08 时两个时段,均为对流性降水。经统计:在商丘地区 177 个自动雨量站中,110 站降水量 ≥ 50 mm,56 站降水量 ≥ 100 mm,有 4 站降水量超过 250 mm 均集中在虞城谷熟附近(图 1)。此次过程出现 1 个特大暴雨中心(364 mm,虞城谷熟)和 3 个大暴雨中心(商丘新城 222 mm、永城城厢 184 mm 和宁陵逻岗 168 mm)(图 1)。最大雨强达 $94 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (商丘郭村),其次为 $81 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (永城城关)和 $79 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (虞城谷熟)。从强降水的演变来看,第一个时段最强的降水出现在商丘东南部永城城厢,历时短而强(图 2),由 1 个强降雨团活动产生;第二个时段强降水由两个强降雨团活动产生,这两个雨团均产生于商丘西北部,在自西北向东南移动过程中,先后经过中西部,形成宁陵逻岗、商丘新城和虞城谷熟 3 个暴雨中心(图 1、图 2)。综上,此次降水的特点是强度大、短时强降水持续时间长和降水时段集中,造成京九铁路商丘车站附近 4 个区间遭受水害影响,十几对列车晚点;大暴雨使商丘地区几十万人受灾,造成了严

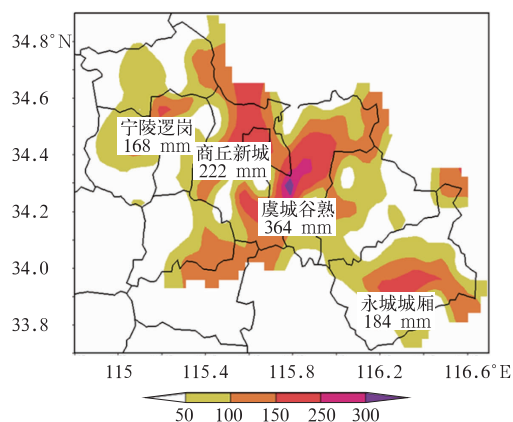


图 1 2012 年 7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时
商丘地区降水量

Fig. 1 Precipitation in Shangqiu from
08:00 BT 7 to 08:00 BT 8 July 2012

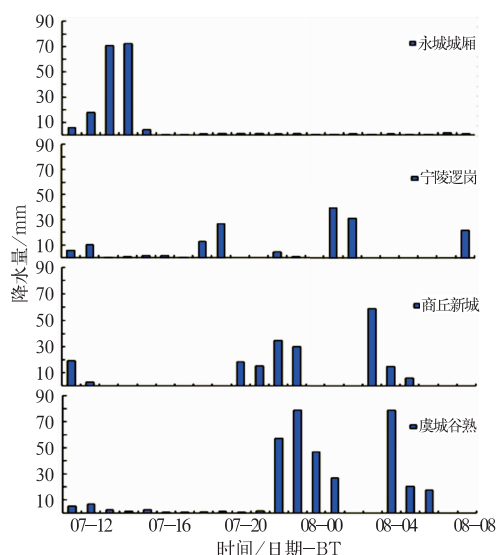


图 2 2012 年 7 月 7 日 11 时至 8 日 08 时
商丘 4 个暴雨中心逐时降水量演变

Fig. 2 Evolutions of hourly precipitation of
four rainstorm centers of Shangqiu from
11:00 BT 7 to 08:00 BT 8 July 2012

重的经济损失。

2 环流形势演变特征和主要影响系统

7 月 5—6 日,欧亚中高纬度为两槽一脊的环流型,两槽分别位于贝加尔湖西部和日本海,我国华北为高压脊;贝加尔湖西部有一深厚稳定的低涡,自低涡中心南伸的低槽到达我国青海;副热带高压呈东西带状,稳定控制浙江、福建两省,河南处于副热带高压边沿受西南暖湿气流影响,中低层湿度不断增大,有利于不稳定能力累积。7 日 08—20 时,贝加尔湖西部低涡减弱东北移,其中心南伸的低槽随之收缩东移至华北,槽底伸至河南北部;副热带高压略有东退南压,河南处在华北低槽底部与副热带高压外围,槽后南下的冷空气与副热带高压西北边沿暖湿气流在河南上空交汇,形成有利于暴雨产生的环流背景。

由图 3a 可见,7 日 08 时 700 和 850 hPa 高空图上,35°N 附近即商丘北部有东西向暖式切变线,850 hPa 有一支风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风急流伸展到安徽北部,商丘地区位于低空急流出口区的左前方,风向切变与较强的风速辐合在商丘一带形成有利的辐合上升条件。850 hPa 上 $T_d \geq 18^\circ\text{C}$ 的区域由我国西南部伸向河南(图 3a,绿色细线),且商丘

地区位于 700 和 500 hPa 上 $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$ 的区域(图 3a, 绿色齿线), 水汽通量散度显示, 河南东部到安徽北部为水汽辐合区(图略); 应用 11 和 14 时地面温度与露点温度对距商丘地区最近的徐州站进行探空订正, 并与 08 时比较发现: 该站对流有效位能 08 时为 $477 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 11 时增大到 $1020 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 即 08—11 时 3 h 对流有效位能增幅达 $543 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明大气不稳定能量迅速增加, 对应着商丘地区第一阶段(11—14 时)的强降水。14 时强降水结束, 能量得到释放, 对流有效位能减小至 $297 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。7 日 20 时(图 3b) 850 和 700 hPa 的切变线略向南压, 更加接近商丘, 850 hPa 低空急流维持且商丘仍处于 $T_d \geq 18^\circ\text{C}$ 的高湿区和 700、500 hPa 上 $(T - T_d) \leq$

2°C 的区域, 水汽近于饱和, 且湿层深厚; 同时, 暴雨区处于 500 hPa 24 h 负变温区、850 hPa 24 h 正变温区, $\partial\theta_{se}/\partial z < 0$ 变大, 大气层结更趋不稳定。由上, 商丘位于 700 和 850 hPa 切变线南侧与低空急流出口区左侧辐合区及对流不稳定区中, 表明大气环境场非常有利于对流性降水的发生发展。8 日 08 时, 500 hPa 低槽减弱东移, 中低层切变线消失, 此次强降水过程结束。

7 日 08 时地面图上, 四川生成一低压, 其逐渐加强并向东扩展而控制了河南, 河南处在倒槽之中, 暴雨期间商丘地区处于该倒槽顶部, 地面辐合较明显, 有利于强降水发生。

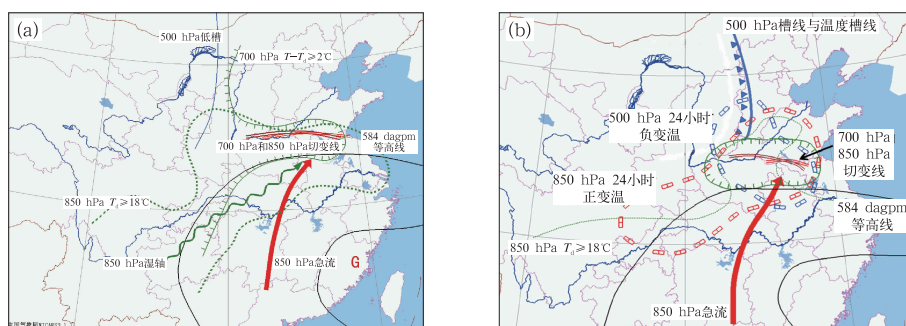


图 3 2012 年 7 月 7 日 08 时(a)和 20 时(b)天气系统与要素配置分析

Fig. 3 The analysis of synoptic system and element configuration at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 7 July 2012

3 中尺度分析

3.1 中尺度雨团活动特征

首先分析雨团的活动, 牛淑贞等(2006)将相邻 3 站 1 h 雨量 $\geq 10 \text{ mm}$ 称为一中尺度雨团; 胡雯等(2009)将逐时雨量大于 10 mm 、生命史大于 2 h、空间尺度不超过 200 km 的雨团, 定义为中尺度雨团; 慕建利等(2011)将在 30 km^2 的范围内, 连续 2 h 有 2 站或以上降水量 $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水定义为中尺度雨团, 其中 $25 \text{ mm} \leq 1 \text{ h}$ 降水量 $< 50 \text{ mm}$ 的降水称为强降雨团, 1 h 降水量 $\geq 50 \text{ mm}$ 的降水称为特强降雨团。综合以上参考文献, 本文将中尺度雨团定义为: 水平尺度 20 km 以上, 连续 2 h 雨强 $\geq 10 \text{ mm}$ 的降水区(以下简称雨团)和雨强 $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水区(以下简称强降雨团)。据此分析, 整个暴雨过程共出现 6 个中尺度雨团, 其中 1~3 号雨团

(图 4a)持续时间较短, 雨强相对小, 对此次大暴雨贡献不大。而 4 号雨团(图 4a)是第一阶段商丘东南部大暴雨的主要成因, 其产生于商丘永城, 与安徽北部移来的雨团合并后加强为强降雨团, 并在永城附近维持 2 h(图 4a), 造成永城城厢的大暴雨; 7 日傍晚到夜里, 第二阶段的强降水由 5、6 号雨团活动产生(图 4b), 这两个雨团在商丘西北部形成, 在商丘中部的移动路径相近, 均自西北向东南方向移动; 5 号雨团 17 时出现在商丘西北部, 生命史为 9 h, 其中强降雨团持续 5 h; 6 号雨团 00 时出现在商丘西北部, 生命史为 8 h, 其中强降雨团持续 4 h; 2 个雨团先后经过宁陵逻岗、商丘新城和虞城谷熟, 是 3 个大暴雨中心形成的主要贡献者。

3.2 MCS 分析

对 FY-2C 逐小时红外卫星云图及黑体辐射亮温(TBB)分析发现, 在 α 中尺度的冷云罩下降水分布极不均匀, 出现强降水的区域多为 β 或 γ 尺度。7

日 05 时,副热带高压(584 dagpm 线)边沿,在河南中部许昌有一 γ 中尺度的对流云团生成,09—10 时该云团向东北方向移动,并发展成 β 中尺度(图略),

其东北部影响到商丘,在商丘中西部出现分散的中尺度雨团(即地面 1、2、3 号雨团,图 5a)。11—14 时,河南东部有 $M\gamma$ CS 生成并与其东侧由安徽北部

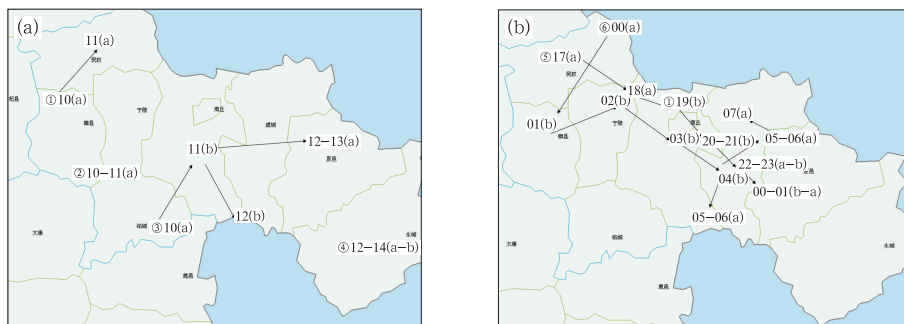


图 4 2012 年 7 月 7—8 日中尺度雨团移动路径

(a) 1~4 号雨团移动路径(7 日 10—12 时), (b) 5、6 号雨团移动路径(7 日 17 时至 8 日 06 时)
(带圈标识为雨团编号;数字为北京时;括号中 a 为雨团, b 为强降雨团)

Fig. 4 The moving path of rain clusters in 7—8 July 2012

(a) moving paths of No. 1—4 rain clusters (10:00—12:00 BT 7 July 2012),
(b) moving paths of No. 5—6 rain clusters (17:00 BT 7 to 06:00 BT 8 July 2012)
(Circled number is the number of rain clusters; the digit is the Beijing time;
a denotes rain clusters; b denotes heavy rain clusters)

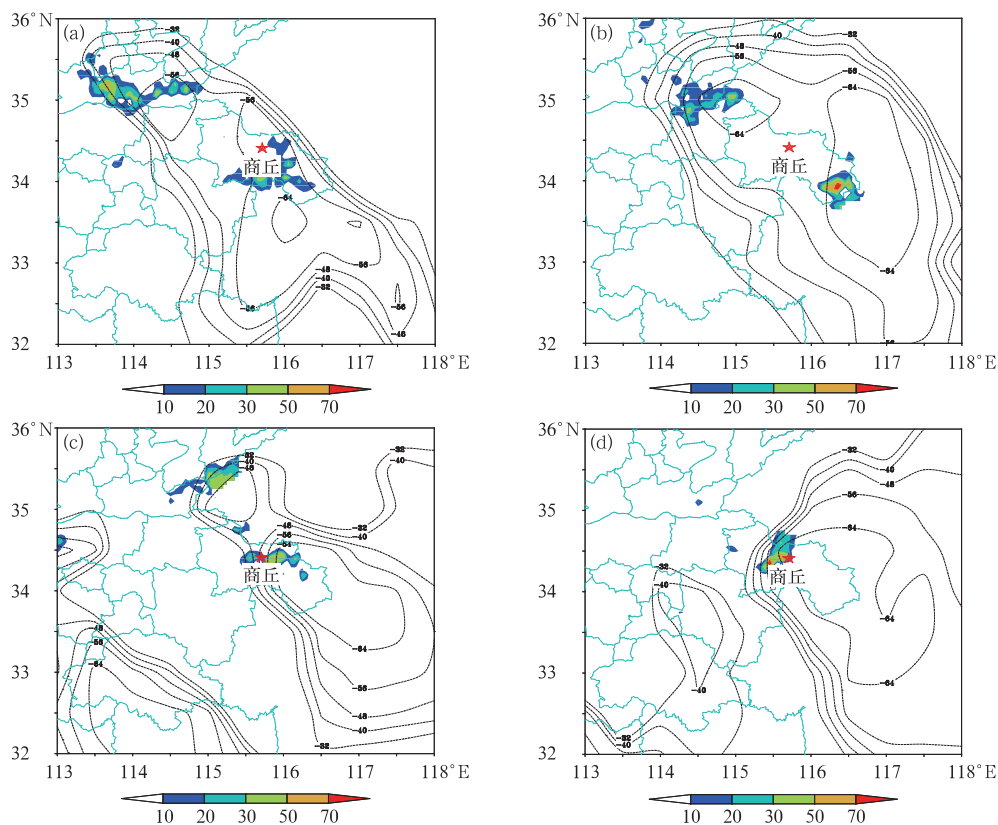


图 5 2012 年 7 月 7—8 日 MCS 的 TBB 和其后 1 h 降水量(色斑区)

(a) 7 日 11 时, (b) 7 日 13 时, (c) 7 日 22 时, (d) 8 日 02 时

Fig. 5 TBB distributions of MCS and the subsequent precipitation after one hour
from 11:00 BT 7 to 02:00 BT 8 July 2012 (stain figure)

(a) 11:00 BT 7, (b) 13:00 BT 7, (c) 22:00 BT 7, (d) 02:00 BT 8

移向河南的 $M\beta CS$ 合并,形成一 $M\alpha CS$,表现为西北—东南向的椭圆带状,其小于 $-52^{\circ}C$ 的面积约 9 万 km^2 (图 5b), 12—13 时 $M\alpha CS$ 的 TBB 低值中心位于商丘永城上空,温度达 $-69^{\circ}C$ 以下,云团发展达到最强,对应着 4 号雨团的形成与发展,13—14 时 4 号雨团带来的降水达到鼎盛,永城城厢 1 h 雨强达 72.5 mm。并且强降水与 $-69^{\circ}C$ β 中尺度 TBB 低中心几乎重合,15—17 时, $M\alpha CS$ 减弱为 $M\beta CS$,第一阶段的强降水结束。18 时在商丘地区西北部有 $M\beta CS$ 强烈发展,其中心 TBB 降至 $-70^{\circ}C$ 以下,随着 $M\beta CS$ 向东南方向移动,第二阶段的强降水开始。当新生 $M\beta CS$ 的 TBB 梯度密集区移经商丘中西部时致该处降水猛增(5 号雨团轨迹)。20:30—23:00,商丘上游西北方又有新的对流云团生成,并与位于商丘中部对应 5 号雨团的 $M\beta CS$ 合并,使之发展成为 $M\alpha CS$,两云团合并处 TBB 梯度增大(图 5c), $\nabla TBB/0.5^{\circ}E$ 达到 $42^{\circ}C$,对应地面 1 h 降水量达 79 mm(虞城谷熟);23 时到 00 时商丘中部 TBB 梯度减小,由 5 号雨团产生的降水逐渐减弱。此时在 $M\alpha CS$ 西部并入的云团开始强烈发展,00—01 时商丘西部 TBB 值迅速下降 $32^{\circ}C$,致 $M\alpha CS$ 尾部的 TBB 梯度加强, $\nabla TBB/0.5^{\circ}E$ 达到 $50^{\circ}C$,商丘西部的宁陵逻岗降水量由 $0.7 mm \cdot h^{-1}$ 猛增到 $39.6 mm \cdot h^{-1}$;8 日 00—05 时(图 5d), $M\alpha CS$ 继续向东南方向移动,其尾部梯度最密集带由西北向东南移动经过商丘中西部(6 号雨团),致商丘新城 03 时 1 h 降水量 58.4 mm,虞城谷熟 04 时 1 h 降水量 78.5 mm。06 时以后,云体南移对商丘的影响逐渐消失。

利用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ TBB 格点资料,将商丘境内及周边邻近 7 个格点值的变化与相对应站点 1 h 后短时强降水实况进行了分析,得出 TBB 变化与短时强降水间的关系(表 1~表 3),如表 1~表 3 所示,雨强 50 mm 以上的降水出现前 1~2 h,与之对应的 TBB 1 h 降幅都在 $30^{\circ}C$ 以上,最大可达 $46^{\circ}C$ 。而在前面的分析中可知,此次强降水过程的第二个集中时段,强降水发生在 TBB 的密集带即梯度区,为此统计分析了雨强与 TBB 梯度间的关系(表 4)。由表 4 可见, $\nabla TBB/0.5^{\circ}E$ 在 $34 \sim 58^{\circ}C$ 时,对应的 1 h 雨强最小 33.9 mm,最大达 94.3 mm。在这次过程中,当 $\nabla TBB/0.5^{\circ}E \geq 34^{\circ}C$,并且 $TBB \leq -63^{\circ}C$ 时,出现 $50 mm \cdot h^{-1}$ 降水量的几率达到 72%, $30 mm \cdot h^{-1}$ 降水量的几率达到 90%。因此当 TBB 强度增强或梯度增大时对强降水的出现有很好的指示意

表 1 永城西 TBB 小时强度变化与雨强关系

Table 1 Hourly variation of TBB intensity and the rain intensity in Yongcheng West

时间/BT	TBB/ $^{\circ}C$	($\nabla TBB/1 h$)/ $^{\circ}C$	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$
7 日 09 时	-6		
7 日 10 时	-52	-46	
7 日 11 时	-62		
7 日 12 时	-65		50.7
7 日 13 时	-58	7	

表 2 永城东 TBB 小时强度变化与雨强关系

Table 2 Hourly variation of TBB intensity and the rain intensity in Yongcheng East

时间/BT	TBB/ $^{\circ}C$	($\nabla TBB/1 h$)/ $^{\circ}C$	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$
7 日 10 时	-21		
7 日 11 时	-52	-31	
7 日 12 时	-69		
7 日 13 时	-72		72

表 3 睢县 TBB 小时强度变化与雨强关系

Table 3 Hourly variation of TBB intensity and the rain intensity in Suixian County

时间/BT	TBB/ $^{\circ}C$	($\nabla TBB/1 h$)/ $^{\circ}C$	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$
7 日 23 时	-1		
8 日 00 时	-33	-32	
8 日 01 时	-15		55.3

表 4 TBB 梯度与雨强关系

Table 4 Relationship between TBB gradient and rain intensity

时间	($\nabla TBB/0.5^{\circ}E$)/ $^{\circ}C$	TBB/ $^{\circ}C$	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$
7 日 18 时	35	-65	53.9
7 日 19 时	46	-67	41
7 日 20 时	36	-70	59.6
7 日 21 时	58	-67	57.6
7 日 22 时	34	-69	78.6
7 日 23 时	43	-66	75
8 日 00 时	37	-67	36
8 日 01 时	53	-68	65.7
8 日 02 时	58	-63	94.3
8 日 03 时	39	-70	78.5
8 日 04 时	56	-49	33.9

义,可以作为短时强降水的临近预报指标。

这次大暴雨过程由 $M\alpha CS$ 的活动造成,伴随着其生成—增强—减弱, $M\alpha CS$ 的形成是由多次 $M\gamma CS$ 、 $M\beta CS$ 合并发展的结果,而这些 $M\gamma CS$ 、 $M\beta CS$ 系统发生于商丘的不同区域,经移动、发展加强后影响商丘。强降水多发生在云顶亮温低值中心偏向温度梯度最大的区域, TBB 梯度与降水强度成

正比。当 MCS 发展成熟时强降水发生在中尺度对流云团 TBB 低值中心附近;降水的猛烈增强多发生在 MCS 合并加强时期,同期 TBB 值下降迅猛,当 $\nabla \text{TBB}/1 \text{ h} \leq -31^\circ\text{C}$ 时,1~2 h 后易产生 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的强降水。当 TBB 强度变化达到 1 h 内下降 30°C 以上或梯度达到在 $34^\circ\text{C}/0.5^\circ\text{E}$ 时,预示较强的降水产生。

3.3 触发机制

由上述分析可见,造成短时强降水的中尺度对流系统活动多为 γ 或 β 尺度,它们影响的只是 M_αCS 覆盖下很小的区域。为探索冷云盖下形成大暴雨的中尺度对流云团的产生及其演变规律,从而进一步判断中尺度对流云团可能出现及影响的区域,应用多普勒雷达资料,结合地面 1 h 风场进行分析,以判定中尺度对流产生的关键因素及触发机制。

如上所述,大尺度天气形势和环境场为中尺度对流系统的生成提供了有利的环境条件,但是中尺度对流系统发生最关键的因素是触发条件(陶诗言,1980)。地面的中尺度辐合可能在对流系统的连续发展过程中有更加直接的触发作用(张晓美等,2009)。对河南强对流天气的分析得出,提前 1~3 h 出现的地面中尺度辐合线是对流性天气发生的触发机制(吴蓁等,2008)。

第一阶段强降水产生在 7 月 7 日 11—14 时,位于商丘东部永城。从地面逐时风场上可以看到,11 时(图 6a),永城西部边界有一 β 中尺度辐合线,对应雷达反射率因子图上,11:04(图 7a)该辐合线西端有 γ 中尺度的回波生成,回波沿辐合线向东移动,逐渐与位于辐合线南部的回波回并,强度增强,11:28 回波区域增大,中心达 50 dBz 。12 时(图 6b) β 中尺度辐合线演变为东北—西南向,其东侧东风由 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,辐合加强,与此同时,在永城东部出现一 γ 中尺度辐合线。对应雷达反射率因子图上(图 7b), γ 中尺度辐合线附近回波发展迅速,并与 β 中尺度辐合线上回波合并,在永城上空形成 β 中尺度的块状强回波区,回波中心强度达 55 dBz 以上,持续影响永城近 2 h,致永城城厢 12—14 时降水量达 143 mm ,最大雨强达 $81 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由此,永城西边 β 中尺度辐合线和中东部 γ 尺度辐合线为第一阶段强降水的触发机制。

7 日傍晚到夜里,是第二个强降水时段,商丘地

区自西向东出现了宁陵逻岗、商丘新城和虞城谷熟 3 个大暴雨中心。从这一时段的地面风场可以看到,17 时,商丘地区西部有一 β 中尺度辐合线(图略),19 时,该辐合线东移至商丘市,辐合线发展延伸,由商丘市区东北伸向其南部(图略);20 时该辐合线中部出现气旋性辐合(图 6c);21 时加强为气旋性辐合中心,其两侧的辐合线减弱消失(图略);22 时辐合中心加强并向北移动,在谷熟附近形成 β 中尺度气旋性涡旋(图 6d)。与之相对应雷达回波显示,20:29 商丘市区辐合线南端出现回波,回波沿辐合线向东移动并迅速发展,21:17(图 7c)回波移至地面辐合中心处,中心强度增至 55 dBz ,大于 45 dBz 的块状强回波在虞城谷熟一带持续影响近 14 个体扫;径向速度图上(图略),21:05 商丘市区东南部有中气旋产生,该中气旋随地面中尺度涡旋向北移动,持续达 9 个体扫。可以看出,地面中尺度辐合线的出现与 β 中尺度气旋性涡旋的形成,触发对流并使其强烈发展,致谷熟 21—23 时降水量达 136 mm ,形成大暴雨中心。

23 时,商丘地区西部再次出现 β 中尺度辐合线,8 日 00 时(图 6e),该辐合线向东北方向扩展,位于民权中部到睢县北部。23 时雷达显示,在睢县北部有多个 γ 中尺度的弱降水回波沿 β 中尺度辐合线形成;00:18(图 7d)回波沿辐合线不断增强,中心达到 55 dBz ,之后该强回波带缓慢向东移动,影响宁陵逻岗,致逻岗 00—02 时降水量达 71.1 mm 。8 日 02 时(图 6f)该辐合线移过宁陵逻岗,其中段出现辐合中心,风场呈气旋式旋转。对应雷达回波上,影响逻岗的回波带随辐合线向东移动,并随地面辐合中心的产生而增强,中心达 60 dBz ,径向速度图上(图略),8 日 01:36 宁陵东南部出现中气旋,并持续 7 个体扫;02—03 时,大片块状强回波区维持在辐合中心附近(图 7e),造成商丘新城 02—03 时 1 h 降水量为 $58.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,商丘郭村达 $94 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。8 日 03 时以后,强回波随地面辐合中心东移,缓慢经过虞城谷熟,致谷熟 04 时降水量 $78.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。04 时以后随着地面中尺度辐合中心消失,降水趋于减弱。由上分析可知,在商丘地区出现的多个地面中尺度辐合系统是第二阶段强降水的触发机制。地面中尺度辐合系统使其附近地面暖湿气流辐合抬升,触发对流强烈发展。而对流回波的移动与加强

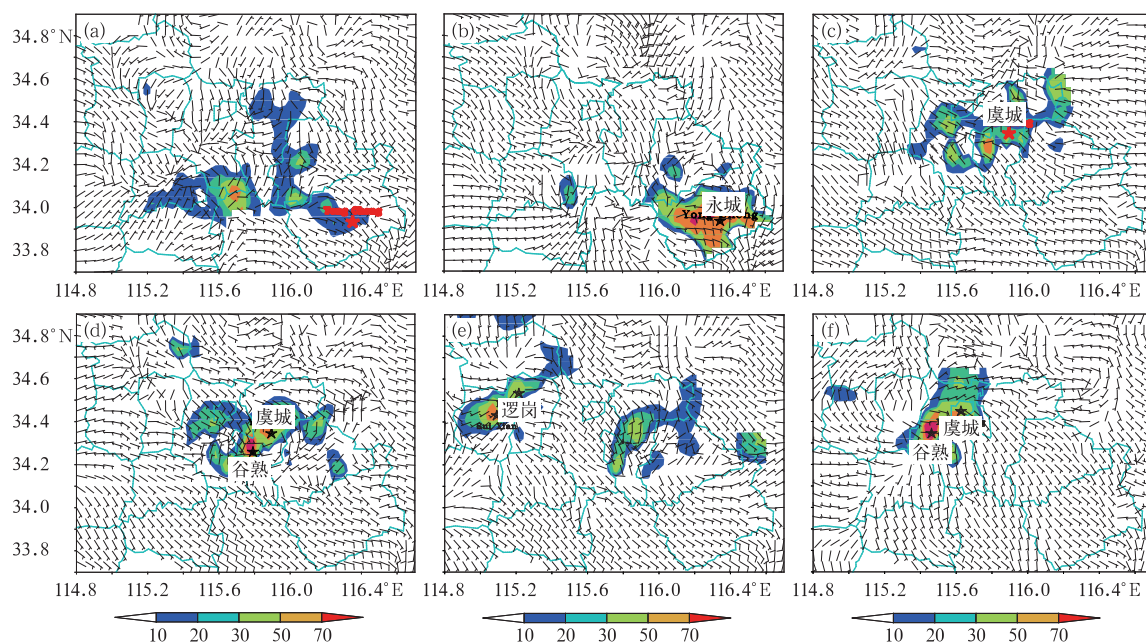


图 6 2012 年 7 月 7—8 日地面风场及其后 1 h 降水量 (色斑图)

(a) 7 日 11 时, (b) 7 日 12 时, (c) 7 日 20 时, (d) 7 日 22 时, (e) 8 日 00 时, (f) 8 日 02 时

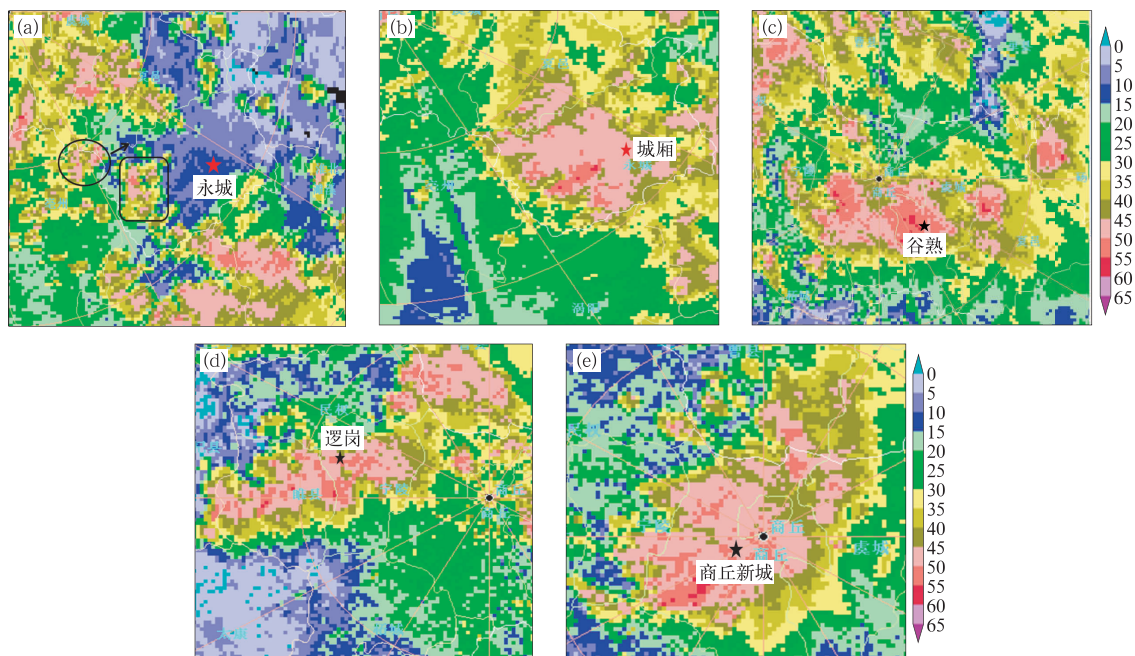
Fig. 6 Surface wind fields and subsequent precipitation after one hour from
11:00 BT 7 to 02:00 BT 8 July 2012 (stain figure)(a) 11:00 BT 7, (b) 12:00 BT 7, (c) 20:00 BT 7, (d) 22:00 BT 7,
(e) 00:00 BT 8, (f) 02:00 BT 8

图 7 2012 年 7 月 7—8 日组合反射率因子 (单位: dBZ)

(a) 7 日 11:04, (b) 7 日 12:40, (c) 7 日 21:17, (d) 8 日 00:18, (e) 8 日 02:24

Fig. 7 Composite reflectivity factor from 11:04 BT 7 to 02:24 BT 8 July 2012 (unit: dBZ)

(a) 11:04 BT 7, (b) 12:40 BT 7, (c) 21:17 BT 7, (d) 00:18 BT 8, (e) 02:24 BT 8

与地面中尺度辐合系统的演变相对应。

3.4 地面中尺度辐合系统的形成

地面中尺度辐合系统在此次强降水中起着非常关键的作用,并对局地强降水具有较好的指示性。下面尝试通过地面加密资料分析,寻找中小尺度辐合系统形成的可能原因。

冷暖平流的不均匀,致使地面气温升高或降低,形成中尺度温度梯度,进而造成地面辐合或辐散。利用地面 1 h 加密资料计算温度平流与温度,分析其变化场发现:地面中尺度辐合系统生成之前,该区域不断有暖平流输送。如 7 日 10 时,永城西边界有暖平流输送且中心值达 $60 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,11 时该区暖平流继续增强、范围增大,中心值达 $120 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8a),随后该地有 β 中尺度辐合线生成(图 6a);同时在永城中东部有暖平流区,中心值达 $90 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,随之该地出现 γ 中尺度的辐合线(图 6b)。分析 09—11 时温度变化(图略),地面中尺度辐合线附近都有 $1 \sim 1.5^\circ \text{C}$ 的升温。7 日傍晚第二阶段强降水,主要是由 7 日 17 与 23 时在商丘地区西部两次出现的地面中尺度辐合线自西北向东南

移动过程中产生,由图 2 可以看出,最强降水产生在 7 日 21—23 时和 8 日 02—04 时,由 3.3 节分析是由两个中尺度辐合中心触发产生;温度平流场上发现,7 日 20 时商丘中部有一暖平流中心 $60 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,20—22 时变温场上,中尺度辐合中心区有 1°C 左右的升温;7 日 23 至 8 日 01 时,商丘中部偏西地区的辐合中心附近持续有暖平流,至 8 日 01 时暖平流中心值达到 $210 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,造成该地区短时间内升温达到 2°C 。暖平流导致局地温度上升,引起地面气压下降,温压场不平衡,在气压梯度力的作用下,该处地面空气辐合上升,触发对流强烈发展,导致局地短时强降水。

由上分析,在商丘地面陆续出现的暖平流,所引起的局地升温,是这次过程地面中尺度辐合系统形成的主要原因。而地面中尺度辐合系统对暴雨落区和强度有较好的指示意义,通常强降水出现在辐合系统形成后的 $1 \sim 2 \text{ h}$ 内。

将对流云团、雷达回波与地面加密风场对比后得出:MCS 范围明显大于雷达强回波区域,而 MCS 范围下雷达强回波的发展和中气旋的产生与地面中尺度扰动及强降水区域有很好对应关系。

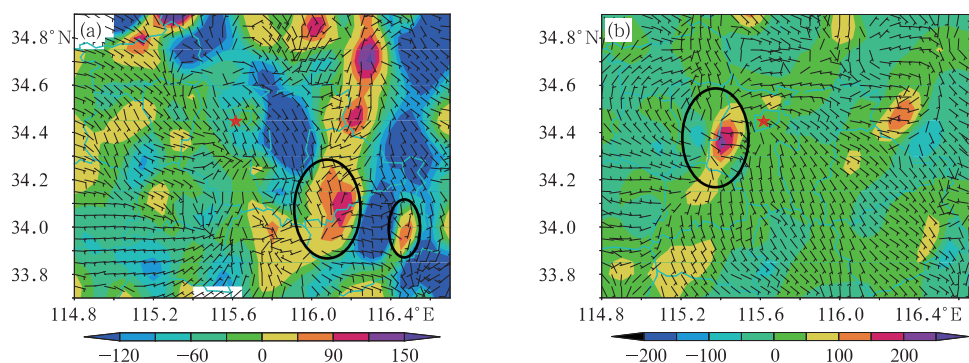


图 8 2012 年 7 月 7 日 11 时(a)和 8 日 01 时(b)地面温度平流、温度变化与风场叠加图

(色斑图为温度平流场,圆形实线框为中尺度辐合系统所在位置)

Fig. 8 Surface temperature advection, temperature variation and wind overlay chart (a) 11:00 BT 7, (b) 01:00 BT 8 July 2012

(Stain figure denotes temperature advection, round solid box denotes MCS)

4 结 论

(1) 500 hPa 低槽与中低层东西向切变线和低空西南急流相互配合、共同作用是此次大暴雨形成的大尺度环境条件。地面热力不均匀导致的局地升温是此次地面中尺度辐合系统生成的主要原因,而地

面中尺度辐合系统的发生发展触发了中小尺度对流系统的发生发展,导致了局部大暴雨的产生。

(2) 多个中尺度雨团的活动形成了 4 个大暴雨中心,暴雨中心的出现与 MCS 的生成—增强—减弱过程相伴,每次降水的强烈增幅都发生在 MCS 合并加强时期。强降水多发生在云顶亮温低值中心偏向温度梯度最大的区域,TBB 梯度与降水强度成

正比,当 $\nabla TBB/0.5^{\circ}E \geq 34^{\circ}C$,并且 $TBB \leq -63^{\circ}C$ 时,产生 $50\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的几率达到72%, $30\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水几率达到90%。当MCS发展成熟时强降水发生在中尺度对流云团TBB低值中心附近;降水的猛烈增强发生在MCS合并加强时期,这个时期TBB值下降迅猛,当TBB在1h内降低 $31^{\circ}C$ 以上时,1~2h后该地将出现雨强为 50 mm 的短时强降水。

(3) 对流回波沿地面中尺度辐合系统移动、发展并加强,强降水出现在辐合系统形成后的1~2h内,因此地面中尺度辐合系统对暴雨落区和强度有较好的指示意义。根据中小尺度对流云团的TBB强度及变幅,可提前1~2h预报短时强降水。

参考文献

- 陈永仁,李跃清. 2013. “12.7.22”四川暴雨的MCS特征及对短时强降雨的影响. 气象,39(7):848-860.
- 程麟生,冯伍虎. 2000. 中纬度中尺度对流系统研究的若干进展. 高原气象,21(4):337-347.
- 丁一汇,蔡则怡,李吉顺. 1978. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学,2(3):276-289.
- 杜倩,覃丹宇,张鹏. 2013. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的FY-2卫星观测分析. 气象,39(7):821-831.
- 郭虎,段丽,杨波,等. 2008. 0679香山局地大暴雨的中小尺度天气分析. 应用气象学报,19(3):265-275.
- 何彩芬,朱龙彪,董杏燕,等. 2006. 宁波夏季强对流和台风短时暴雨雷达回波特征及数值试验分析. 气象,32(11):67-73.
- 胡雯,张晓红,周昆,等. 2009. 淮河流域一次致洪大暴雨的中尺度特征分析. 自然灾害学报,18(2):62-72.
- 李晓容,濮梅娟,王啸华,等. 2012. 江苏一次大暴雨过程的诊断与中尺度分析. 气象科学,32(1):53-61.
- 廖移山,张兵,李俊,等. 2006. 河南特强暴雨 β 中尺度流场发展机理的数值模拟研究. 气象学报,64(4):500-509.
- 慕建利,李泽椿,湛芸. 2011. 2007年8月8—9日陕西关中短历时强降雨环境条件及中尺度系统分析. 第28届中国气象学会年会.
- 牛淑贞,张一平,王国安,等. 2006. “海棠”影响河南降水雷达回波和中尺度雨团对比分析. 气象,32(8):30-35.
- 孙建华,李娟,沈新勇,等. 2015. 2013年7月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征. 气象,41(5):533-543.
- 孙淑清,马廷标,孙纪改. 1979. 低空急流与暴雨相互关系的对比分析. 气象学报,37(4):36-44.
- 孙淑清,翟国庆. 1980. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用. 大气科学,4(4):327-337.
- 盛日锋,王俊,龚佃利,等. 2011. 济南“7.18”大暴雨中尺度分析. 高原气象,30(6):1554-1565.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,1-255.
- 吴蓁,赵培娟,席世平,等. 2008. 郑州局地强对流天气的形成机制与预报方法. 气象科技,36(5):515-519.
- 伍志芳,易爱民,叶爱芬,等. 2006. 广州短时大暴雨多普勒特征和成因分析. 气象科技,31(4):455-459.
- 王淑莉,康红文,谷湘潜,等. 2015. 北京7·21暴雨暖区中尺度对流系统的数值模拟. 气象,41(5):544-553.
- 王啸华,吴海英,唐红昇,等. 2012. 2009年7月7日南京短时暴雨的中尺度特征分析. 气象,38(9):1060-1069.
- 徐珏,杨舒楠,孙军,等. 2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨. 气象,40(12):1455-1463.
- 薛秋芳,刘金良,丁一汇. 1997. 一次暴雨过程中天气尺度与次天气尺度系统的相互作用. 应用气象学报,8(1):114-118.
- 余志豪,陆汉城. 2008. 梅雨锋暴雨中的中尺度雨团和雨峰团. 气象,34(4):61-70.
- 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等. 2009. 华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析. 热带气象学报,25(5):551-560.
- 支树林,陈娟,包慧濛. 2015. 一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析. 气象,41(10):1203-1214.