

Analysis of the Severe Convective Weather Characteristics of a Heavy Rain Process in Xinxiang Area

Xiangyi Meng

Xinxiang Meteorological Office, Xinxiang Henan
Email: 67706953@qq.com

Received: Sep. 2nd, 2019; accepted: Sep. 13th, 2019; published: Sep. 20th, 2019

Abstract

Using the data of conventional observation, satellite, Doppler radar, regional automatic station and reanalysis data of NCEP FNL, analyzed the severe convective characteristics and their causes of a heavy rainstorm process in Xinxiang area during the 29 - 30 days of July 2014. The results showed that the rainstorm is produced under the common action of upper forward trough, low level shear line, high and low-level jet and surface diffusion southward cold air and surface convergence line etc. affect the system, and are accompanied by a short time strong precipitation, thunderstorm, tornado and other strong convective weather. High altitude low trough and upper-lower shear line provide a favorable convergence ascending field, high and low-level jet constitute the dry and cold, warm and wet the unstable stratification. Low-level southerly jet provided sufficient water vapor, and the surface convergence line is an important trigger mechanism of the strong convective weather. The terrain features of Xinxiang also contributed to the development of the strong convection. Doppler radar data has a good indication to the middle cyclone.

Keywords

Strong Convention, Heavy Rain, Mesoanalysis, Cyclone Wave, Vertical Helicity, Radar Echo

新乡一次大暴雨过程的强对流特征

孟祥翼

新乡市气象局, 河南 新乡
Email: 67706953@qq.com

收稿日期: 2019年9月2日; 录用日期: 2019年9月13日; 发布日期: 2019年9月20日

摘要

利用常规观测、卫星、多普勒雷达、区域自动站及NCEP FNL再分析资料,对2014年7月29~30日发生在新乡地区的一次大暴雨过程的强对流特征及其成因进行了综合分析。结果表明:此次大暴雨过程是在高空前倾槽、低空切变线、高低空急流、地面扩散南下冷空气及地面辐合线等影响系统的共同作用下产生的,并伴有短时强降水、雷暴大风、龙卷等强对流天气。高空低槽和中低空切变线提供了有利的辐合上升环境场,高低空急流构成了“上干冷、下暖湿”的不稳定层结。低空偏南急流提供了充分的水汽,而地面辐合线是此次强对流天气的重要触发机制。新乡的地形特征也促进了此次强对流的发生发展。多普勒雷达资料对中气旋有较好的指示意义。

关键词

强对流, 暴雨, 中分析, 气旋波, 垂直螺旋度, 雷达回波

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

强对流天气(短时强降水、雷暴大风、冰雹、龙卷等)具有突发性、局地性、预报预警难度大等特征,极易引发严重的自然灾害。近年来,国内外学者对于不同类型强对流天气形成发展的环境背景、物理量特征、云团发展演变及雷达回波特征等进行了较系统的分析和研究,普遍认为强的垂直风切变、低的抬升凝结高度及地面阵风锋、中尺度辐合线的存在有利于强对流天气的形成发展[1] [2] [3],地形影响将加强水平风速的垂直切变,进而激发山区地形附近强对流单体的产生[4],下湿中干、强的垂直风切变以及地形条件等有利于局地龙卷的产生[5]。此外,在强对流天气预报预警指标、概念模型及客观预报方法方面也开展了较多研究[5]-[10],针对河南的强对流天气,苏爱芳等基于卫星、雷达等非常规监测产品建立了河南省对流性暴雨概念模型,指出低槽(涡)切变型和低槽型过程中干冷气团对对流性暴雨的形成发展起触发作用[11],赵培娟等基于物理量阈值诊断分析和“配料法”建立了河南省强对流天气诊断分析预报系统[5]。雷达在监测中小尺度强对流天气系统的形成和发展方面有着重要作用,中气旋与超级单体的形成发展关系密切,Lemon和Doswell [10]指出超级单体初生阶段的中气旋是一个旋转的上升气流,成熟阶段中气旋由旋转的上升气流与下沉气流共同构成。俞小鼎等[12]认为超级单体龙卷产生于其母气旋——中气旋中,探测到较强中气旋是超级单体龙卷预警主要基础,根据这一特征,预报员有可能提前10~30分钟预报此类龙卷的发生。郑媛媛等[13]对比分析了安徽3次强烈龙卷过程,指出F2-F3级超级单体龙卷产生在中等大小的对流有效位能和强垂直风切变条件下,环境抬升凝结高度较低,龙卷发生前、发生时多普勒雷达都能探测到强中气旋和龙卷涡旋特征TVS。

2014年7月29日~30日,新乡地区出现大暴雨天气,暴雨发生时伴有强雷电、大风、龙卷等强对流天气。其中,延津和长垣灾情严重,房屋、树木大面积受损、蔬菜大棚和部分养殖场损毁严重,经济损失分别达到4487.1万元和4406万元。此外,延津的龙卷还造成1幢企业标准化厂房5000平方米整体倒塌,43,000平方米厂房严重受损,厂区临建房屋50间共2300平方米严重受损,造成1人重伤,1人轻

伤。本文将利用常规观测资料、区域自动站资料、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 逐6小时再分析资料、卫星以及多普勒天气雷达资料，分析此次过程的形成原因，探讨对此类强对流天气的监测及预报预警方法。

2. 天气概况

2014年7月29午后到30日凌晨，新乡市出现暴雨、大暴雨天气，局部伴有雷暴大风和龙卷。全市157个区域自动站，其中66个站的过程降水量超过50 mm，26个站的降水量超过100 mm，长垣县孟岗镇降水量最大，达到183 mm(图1(a))。此外，获嘉县后李村和延津县农场分别在在13时左右和17时58分出现了 $25.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $21.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的灾害性大风，延津县产业集聚区食品园区在18时还出现了龙卷，根据房屋、树木受损程度和目击者拍到的龙卷风的视频，初步确定龙卷级别为是F0级(图1(b))。

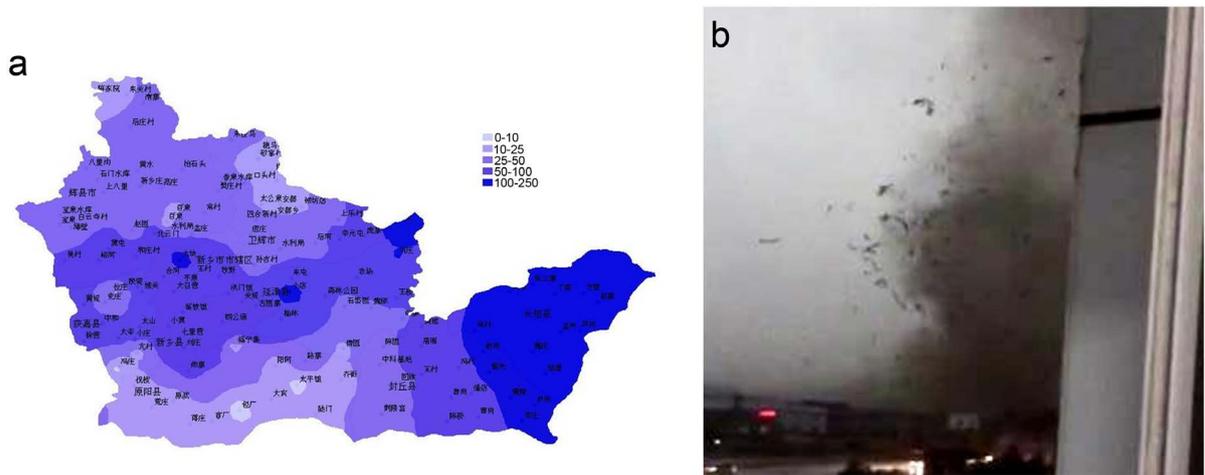


Figure 1. Precipitation map (a) of Xinxiang district from 08:00 on 29 July 2014 to 08:00 on 30 July 2014 and video screenshot (b) of tornado occurring at 18:00 on 29 July 2014

图 1. 2014年7月29日08时~30日08时新乡地区降水量图(a)和29日18时龙卷发生时的视频截图(b)

图2(a)，图2(b)分别为2014年7月29日08时~20时和29日20时~30日08时新乡地区各区域自动站最大雨强分布图。结果显示，20时前降水强度大，全区大部分站点降水强度均超过 $10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，新乡市东部、延津北部、卫辉南部以及长垣的中北部地区的降水强度超过 $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，延津县农场站18~19时的降水强度最大，达 $75.6 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。20时之后，降水强度减弱，超过 $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水范围明显减小，主要位于新乡县和长垣县境内，孟岗站29日23时至30日00时降水强度最大，为 $62.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

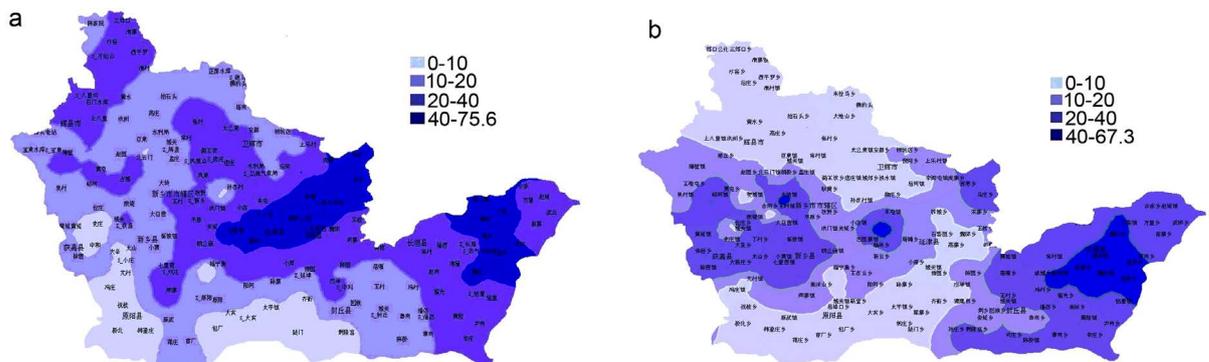


Figure 2. Distribution maps of maximum hourly rainfall intensity in Xinxiang area from 08:00 to 20:00 (a) on 29 July 2014 and from 20:00 to 08:00 (b) on 29 July 2014

图 2. 2014年7月29日08时~20时(a)、29日20时~30日08时(b)新乡地区最大小时雨强分布图

图3是部分站点29日08时~30日08时逐小时降水量图,图上所示站点过程雨量均超过150 mm,其中东部长垣孟岗村过程降水量最大,达183 mm。从图上可以看出,此次降水过程分为两个阶段:19~20时为第一阶段,该阶段的降水具有突发性、持续时间短、雨强强等特征,其中延津的农场19时小时降水量达到了75.6 mm。同时,雷暴大风、龙卷等强对流天气均发生在这一时段内;而29日00时~30日04时的降水持续时间相对长,累积雨量较大,此外,降水强度仍较大,如长垣的孟岗00时小时降水量为62.1 mm,延津丰庄02时小时降水量为61.3 mm。综上,该过程是一次伴有短时强降水、雷暴大风和龙卷等强对流天气特征的大暴雨过程。

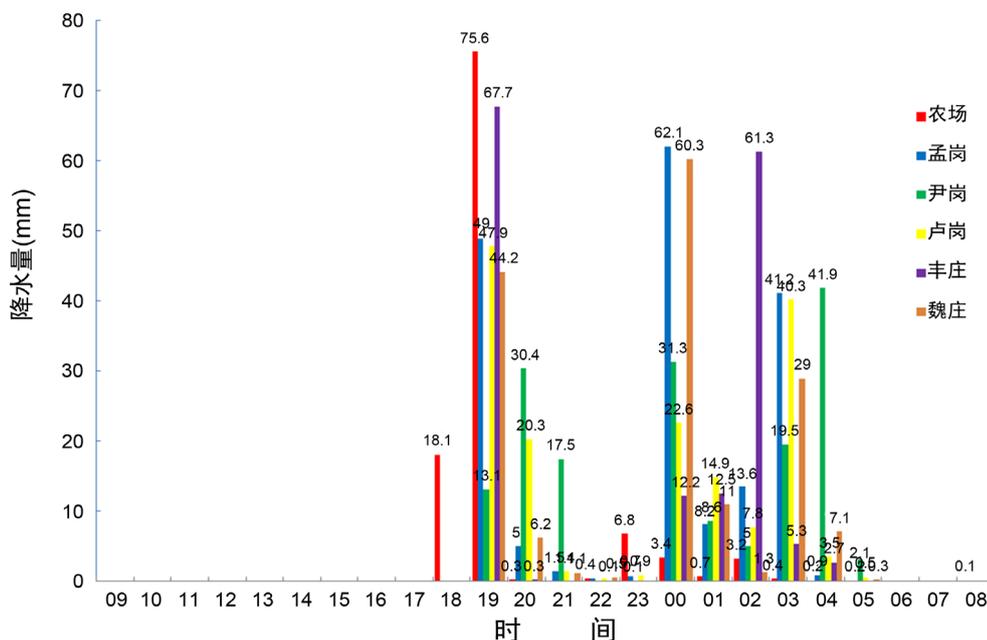


Figure 3. Hourly precipitation map of some stations from 08:00 on 29 July 2014 to 08:00 on 30 July 2014
图3. 2014年7月29日08时~30日08时部分站点逐小时降水量图

3. 环流背景分析

2014年7月29日08时高空中分析(图4)显示,河套附近为一具有前倾结构的中纬度东移低槽,500 hPa槽已东移至110°E附近,并超前于700 hPa槽,同时,500 hPa温度槽位于700 hPa槽前,其后部的干区(T-Td \geq 15°C)伸展至700 hPa槽前,说明高层槽在东移的过程中引导干冷空气东移并叠加在700 hPa槽前的西南暖湿气流内,形成“上干冷、下暖湿”的较不稳定的层结结构。此时,新乡西部地区受850 hPa西南气流(最大风速8 m·s⁻¹)影响,处于低层高湿区范围内和东伸的暖脊前部,较暖湿,与500 hPa的温度差已经超过25°C,若500 hPa低槽东移过后,带动其后部干冷空气东移叠加并叠加在850 hPa更加暖湿的空气之上,势必导致“上干冷、下暖湿”的差异加大,对流不稳定条件加强,有利于强对流天气的形成发展,对应地面图上,河南省处于入海高压后部的偏东气流中,有弱冷空气向西扩散。另外河南北部大部分地区出现了轻雾,说明边界层层结稳定,有利于不稳定能量的积累。29日午后,随着高空中纬度前倾槽东移及边界层北方冷空气的扩散南下,在新乡中部地区出现了一条东北西南向的地面辐合线,傍晚前后,对流首先在新乡地区中部开始出现并向西向东扩展,新乡市大部分地区均出现了强雷电、短时强降水以及局地大风和龙卷灾害性天气。29日20时,500 hPa低槽移至新乡东部,槽后西北气流发展,新乡上空形成风速超过20 m·s⁻¹的西北急流(急流轴风速>20 m·s⁻¹),此时,700 hPa低槽移至新乡地区西

部, 受扩散南下冷空气影响, 850 hPa 新乡北部形成一条东西向切变线, 切变线南侧西南气流发展, 郑州站风速加大到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 形成西南急流, 925 hPa 上东南气流发展, 郑州站的风速也由 08 时的 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加大至 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两支急流的建立为新乡中东部低空提供了充沛的水汽条件有利于后期降水强度的维持。根据系统演变, 从 08 时到 20 时, 新乡地区中低层由受一致的西南气流转为中层受西北急流控制、低层受西南和东南急流影响, 垂直风切变明显加强, “上干冷、下暖湿”的对比程度逐步加强, 导致傍晚前后强降水伴雷暴大风、局地龙卷天气的出现; 强对流天气的出现导致不稳定能量有所释放, 但低层暖湿条件发展, 对能量具有补充作用, 由于低层暖湿空气占据主导地位, 29 日 23 时至 30 日 04 时新乡地区出现了持续时间较强的强降水, 而未见雷暴大风类强对流天气报告。

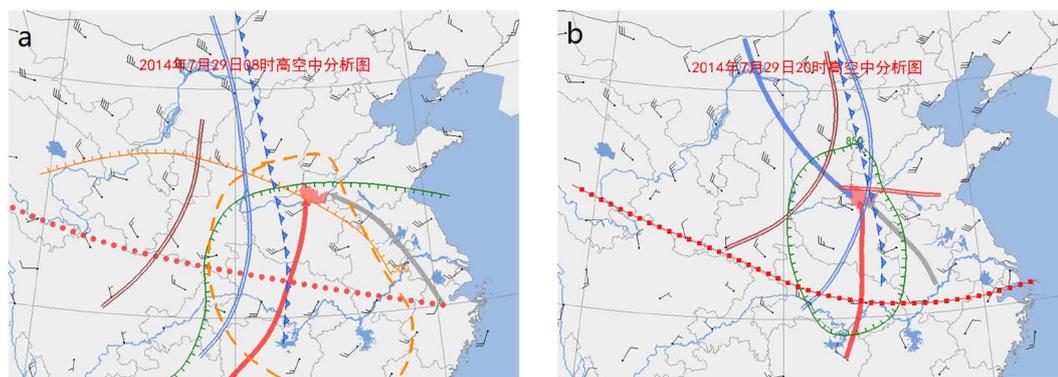


Figure 4. Aerial analysis charts at 08:00 (a) and 20:00 (b) on 29 July 2014; — 500 hPa groove/shear line, — 700 hPa groove/shear line, - - 850 hPa groove/shear line, - - 850 hPa wet tongue ($t-t_d < 5^\circ\text{C}$), - - 500 hPa dry area ($t-t_d > 15^\circ\text{C}$), ···· 850 hPa warm temperature ridge, ▲▲ 500 hPa cold temperature trough, - - 850 hPa and 500 hPa temperature difference ($>25^\circ\text{C}$), → 500 hPa high wind speed axis, → 850 hPa high wind speed axis, → 925 hPa high wind speed axis

图 4. 2014 年 7 月 29 日 08 时(a)和 20 时(b)高空分析图; — 500 hPa 槽线/切变线, — 700 hPa 槽线/切变线, - - 850 hPa 槽线/切变线, - - 850 hPa 湿舌($t-t_d \leq 5^\circ\text{C}$), - - 500 hPa 干区($t-t_d > 15^\circ\text{C}$), ···· 850 hPa 暖温度脊, ▲▲ 500 hPa 冷温度槽, - - 850 hPa 与 500 hPa 温度差 $\geq 25^\circ\text{C}$, → 500 hPa 大风速轴, → 850 hPa 大风速轴, → 925 hPa 大风速轴

综上所述, 此次伴有雷暴大风、局地龙卷的强降水过程是在高空前倾槽、低空切变线、高空西北急流和低空西南、东南急流及地面冷空气、地面辐合线等影响系统的共同作用下形成的, 新乡地区上空“上干冷、下暖湿”的对流不稳定层结有利于强降水及雷暴大风、龙卷天气的形成, 而低空西南急流和东南急流的建立为第二阶段的强降水提供了充分的水汽条件, 700 hPa 高空低槽前的气流辐合和低空切变线为强降水的形成发展提供了有利的动力辐合条件, 扩散南下的冷空气和地面辐合线是强对流天气的重要触发机制[14]。

4. 物理量分析

4.1. 探空物理量特征

郑州探空站距离新乡站的水平直线距离在 100 公里以内, 采用探空订正技术, 利用郑州站 08 时的探空资料和新乡市 29 日 14 时、20 时和 30 日 02 时的地面温度和露点温度构建新乡地区探空(图 5)。结果显示: 14 时, 大气呈“上干下湿”的“喇叭口”形状, 低层有暖平流, 中高层有冷平流(700 hPa 以下风随高度顺转, 以上风随高度逆转), 有利于对流不稳定性加强, 此时 CAPE 值达 $3138 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 指数达到了 36°C , 而低空逆温层的存在有利于能量的进一步积聚, 可为午后到傍晚强对流的形成发展提供能量支持。29 日 20 时, 尽管傍晚前后强对流的形成发展致使不稳定能量有所释放, CAPE 值降到了 $395 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,

但整层湿度增加；同时，低层暖平流维持，有利于不稳定能量的重新积累，有利于强降水的再次发展。30日02时的探空订正图上，“上干下湿”的不稳定层结再次形成，K指数达到了44℃，沙氏指数也达到了-4.8℃，大气不稳定度再次加强，强对流天气持续到30日4时左右，随后，不稳定能量迅速减小，强降水过程结束。

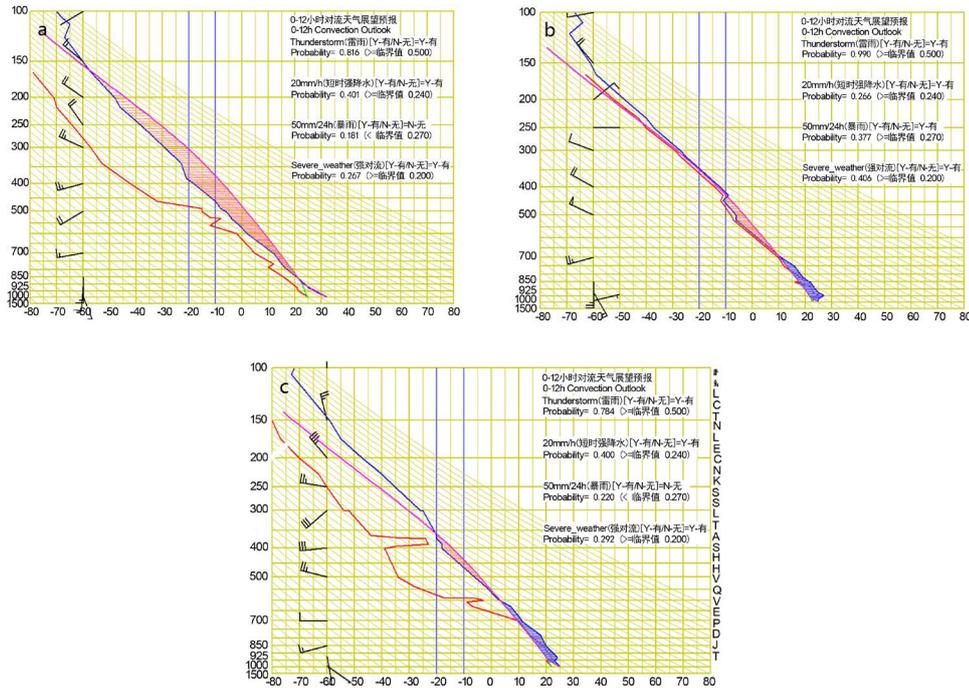


Figure 5. Revised sounding data of Xinxiang City at 14:00 (a), 20:00 (b) and 02:00 (c) on 29 July 2014
图 5. 2014 年 7 月 29 日 14 时(a)、20 时(b)、02 时(c)新乡市订正探空资料

4.2. 水汽条件

图 6(a)、图 6(b)分别为 2014 年 7 月 29 日 20 时比湿的水平分布(925 hPa)和垂直分布(沿 35°N)。图上可以看出，925 hPa 上在河南省西北部有一 $18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的比湿高值中心并呈东北-西南向，表明河南西部和北中部地区湿度大，水汽充沛。垂直分布(图 6(b))显示， $18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的比湿大值区向上伸展至 850 hPa 附近，表明强对流区域近地面层空气湿层深厚，可为强降水提供良好的水汽条件。700 hPa 以上等比湿线向下凹陷，表明强对流区中层大气相对干燥，“上干下湿”的垂直分布使大气具有潜在的对流不稳定特征，在一定的动力触发条件下，有利于强对流天气的形成和迅速发展，而边界层充沛的水汽，可谓强降水的发生提供有力支持。

4.3. 大气稳定度

如果低层大气接近饱和和湿空气，那么我们就可以通过 θ_{se} 随高度的变化来判断大气稳定度。图 7 是利用 NCEP 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点资料计算出的 2014 年 7 月 29 日 14 时和 20 时 θ_{se} 沿 113.5°E 空间剖面图，新乡位于 35°N 附近。可以看出，底层大气近于饱和，同时在 500 hPa 以下 θ_{se} 随高度迅速减小，低值中心位于 550 hPa 附近，为 335 K，大气对流不稳定。29 日 14 时，800 hPa 以下为 350 K 的高位温区，950 hPa 在 34.5°N 附近有一个 360 K 的暖中心，320 K 的干冷中心位于 600 hPa、 37°N 附近并向南伸展，大气变现为上干冷下暖湿的对流不稳定性层结特征，与探空曲线的分析结果一致，此时正是第一阶段强对流发

生发展的时期。到 29 日 20 时, 850 hPa 以下, θ_{se} 增大到 355 K, 并向北伸展到 35.5°N 附近, 925 hPa 上在 35°N 附近出现了一个 360 K 的高值区。同时高层向南伸展的干冷舌分裂为一个 320 K 的冷中心并移动到 35.5°N 附近。表明高温高湿的不稳定层结稳定维持, 并向北扩展, 而冷空气表现为向南、向低层扩展的趋势, 使大气对流不稳定性继续加强, 只要存在抬升触发机制的条件, 就有可能出现对流性天气。

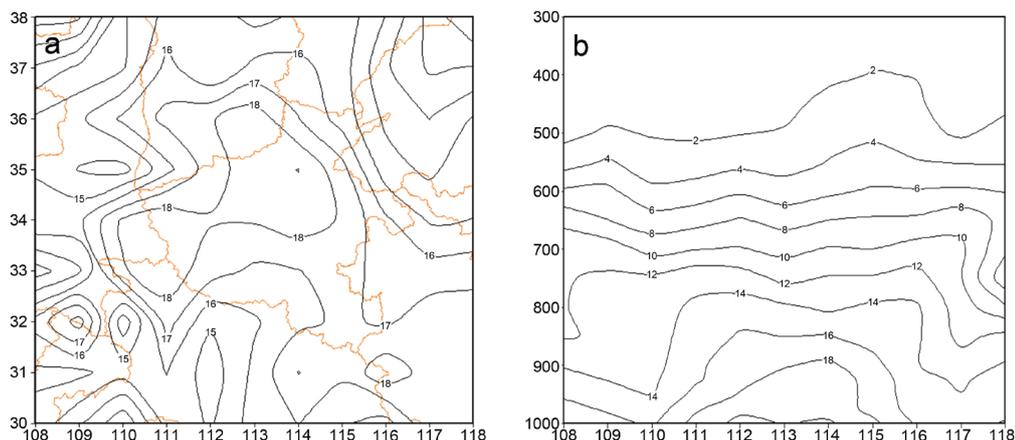


Figure 6. Specific humidity (a) and vertical distribution (b) (g/kg) along 35°N at 20:00 925 hPa on 29 July 2014
图 6. 2014 年 7 月 29 日 20 时 925 hPa 比湿(a)和沿 35°N 的垂直分布(b) (g/kg)

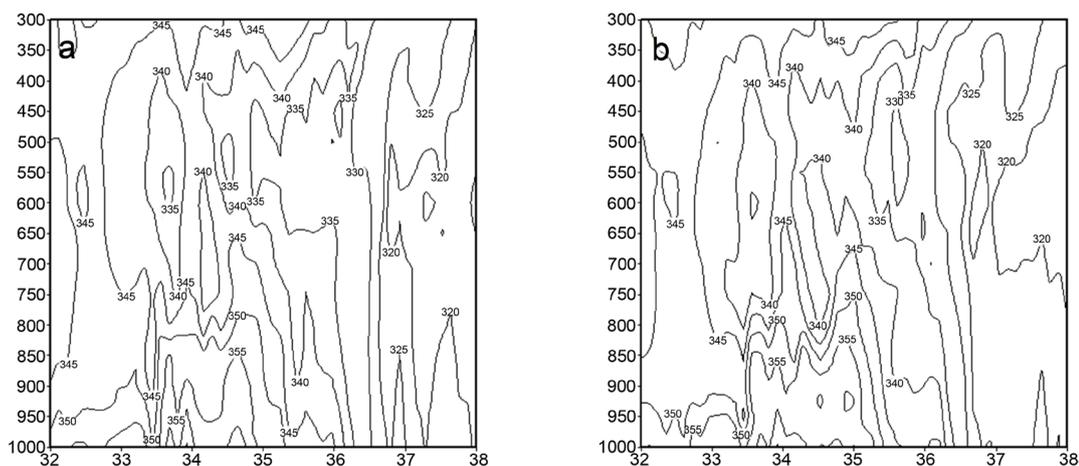


Figure 7. θ_{se} Spatial distribution along 113.5°E (K) at 14:00 (a) and 20:00 (b) on 29 July 2014
图 7. 2014 年 7 月 29 日 14 时(a)、29 日 20 时(b)沿 113.5°E θ_{se} 空间分布(K)

5. 对流触发条件

5.1. 地面辐合线的对流触发作用

地面辐合线在此次强对流过程的形成和发展中起重要的触发作用。14 时河南省北中部沿黄河地区有一条东北—西南向的地面辐合线, 辐合线附近有零散的对流云团开始生成, 对流云团沿辐合线向东北方向移动, 并不断加强, 第一阶段强对流开始发生发展。到 20 时强的对流云团移到山东西部, 新乡市第一阶段强对流天气已经结束。但在新乡中东部地区, 仍有一条地面辐合线在维持, 21 时 30 分在此地面辐合线尾段的北部, 又有弱的对流云团形成, 此云团在未来强烈发展加强, 并且稳定少动, 造成了第二阶段强对流天气的产生。

图 8 是 2014 年 7 月 29 日~30 日加密自动站风场资料与红外卫星的叠加图, 29 日 14 时, 河南北部沿黄一线有辐合线开始生成, 在辐合线北部的获嘉地区有一块初始云团开始发展, 实况上 14 时获嘉开始出现强对流天气, 徐营站一小时最大降水量达到了 28 毫米。29 日 15 时, 地面辐合线的北端演变成了一个地面中尺度气旋性辐合中心, 辐合中心向东北方向移动, 对应红外卫星资料上, 14 时的初始云团已经发展成为了一整块对流云团, 强度逐渐加大。到 16 时, 在地面辐合线上已经有大量的对流云发展连接成了片状结构。17 时, 地面辐合线中段又发展出一个地面中尺度辐合中心, 并不断向东北方向移动, 而在卫星云图上可以看到大片的对流云系在不断发展加强。到 20 时, 随着系统不断向东北方向移动, 新乡地区的降水强度开始减弱, 地面辐合中心也已经消失, 演变成一条东北-西南向的辐合线, 此时, 第一阶段强对流天气结束。22 时 15 分, 风场上出现了一个小尺度的气旋性涡旋结构, 并逐渐生成几条地面辐合线, 对流系统在辐合线上不断的发展加强。云图上对应的有一块对流云团开始发展加强, 随着时间的推移, 这块云团开始不断发展, 并不断加强, 位置稳定少动, 形成了第二阶段的强对流天气, 到 30 日 02 时, 随着地面辐合线不断地向东移动, 系统减弱东移, 强对流逐渐减弱, 降水也趋于结束。从云顶亮温上看(图略), 在 29 日 17 时, 焦作东部出现 -52°C 以下的云顶亮温区, 随着对流系统不断加强并向东移动, -52°C 以下的云顶亮温区也在不断地加强并向东移动, 范围逐渐扩大, 云顶亮温最低达到了 -61°C 。到 20 时, -52°C 以下的云顶亮温区减弱消失, 第一阶段强对流结束。从 22 时开始, 新乡中东部地区又出现了 -52°C 以下的云顶亮温区, 并稳定维持, 到 30 日 02 时减弱消失, 第二阶段强对流过程结束。综上我们可以得出结论, 地面辐合线和地面辐合中心是此次强对流天气的重要触发机制。

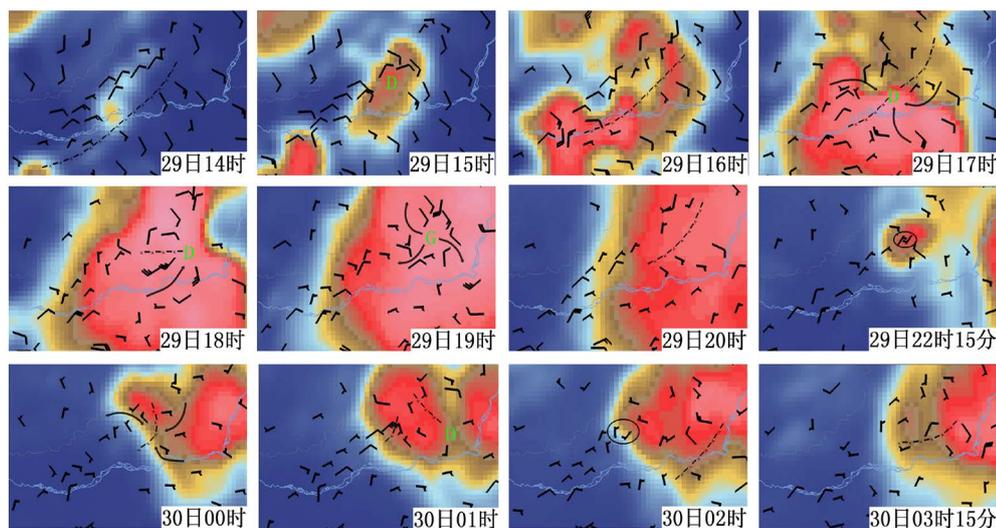


Figure 8. Wind field data superimposed by infrared satellite data from encrypted automatic station from 29 to 30 July 2014
图 8. 2014 年 7 月 29 日~30 日加密自动站风场资料与红外卫星资料叠加

5.2. 地形抬升作用

地形抬升作用对降水的影响主要表现在大气底层离地面 1~2 公里的边界层附近。图 9(a)为河南省 925 hPa 风场与地形水平叠加图, 从图上可以看出, 河南省的大地形以西高东低为主, 新乡地区(圆角矩形内)地形高度较低, 平均海拔高度在 40~80 m, 西北部为太行山脉余脉, 平均海拔高度在 1000 m 以上, 当边界层为偏东到东南风时, 新乡地区处山脉迎风坡, 地形抬升加强了垂直上升运动, 有利于强对流和短时强降水的发展。29 日 14 时, 925 hPa 上, 河南省以偏南到东南风为主, 在新乡地区有风速辐合, 底层的东南气流沿山脉迎风坡爬升, 垂直上升运动得到了加强, 图 9(b)是沿 35°N 垂直风场和地形的叠加图, 新

乡位于 113°E 附近,从图上可以看出,在 113°E 附近,700 hPa 以下均为上升运动,低层气流爬坡运动明显,其中在 850 hPa 附近有一个 $-20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的垂直气流上升中心。地形引起的上升运动强烈,对强对流天气的产生起到了触发作用。到 30 日 02 时,925 hPa 转为西南风,在新乡地区有一条低空辐合线,风速风向辐合强烈,强对流继续维持发展。综上所述地形作用对强对流的发生发展造成的影响。

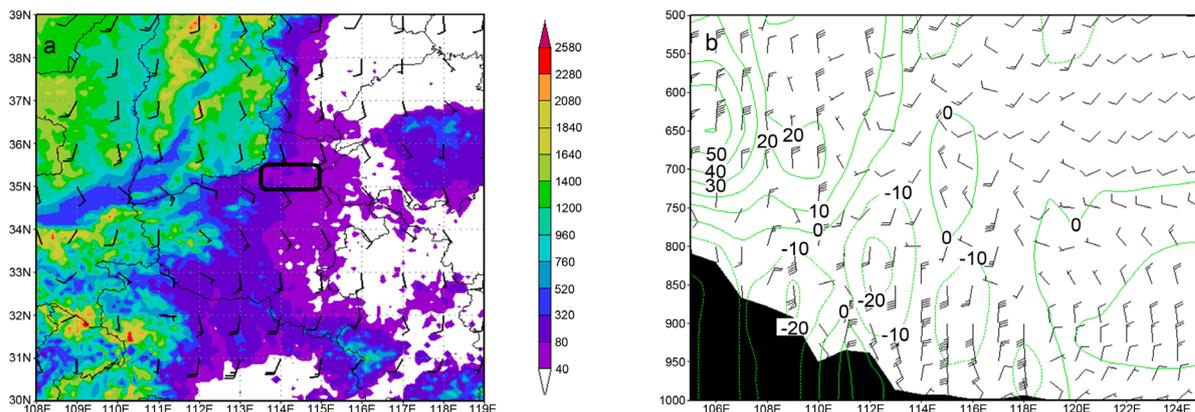


Figure 9. 925 hPa Wind field and topographic overlay maps (a) and vertical wind field and topographic overlay maps along 35 degrees N (b) at 20:00 on 29 July 2014

图 9. 2014 年 7 月 29 日 20 时 925 hPa 风场和地形水平叠加图(a)和沿 35°N 垂直风场和地形叠加图(b)

通过对以上各种资料的分析表明:强对流过程的水汽、不稳定能量和抬升触发机制三条件在此次过程中配合较好,是造成此次伴有强对流天气特征的大暴雨过程发生发展的主要原因。

6. 强降水过程中的龙卷及成因

在此次强对流过程中,延津县的产业集聚区食品园区(延津西北部 10 公里左右)在 18 时左右观测到了龙卷,图 10~12 为 18 时前三个体扫时段内的雷达产品图。在 17 时 48 分(图 10(a)),延津县上游有大量的降水回波向东移动,图 10(d)的反射率因子剖面图(图 10(a)中黑色箭头区域)上可以看出,回波在垂直方向发展旺盛,回波顶的高度在 15 公里处,最大回波强度达到了 65 dBZ,在大约 6 公里高度,另外中低层包含有悬垂回波和有界弱回波区。图 10(b)和图 10(c)分别为 1.5°和 2.4°仰角的径向速度图,图中黑色椭圆区域包含有一个中气旋,水平尺度大约在 10 公里左右,旋转速度在 25 m/s 左右。通过图 11,我们可以确定此次龙卷发生在一个超级单体风暴中。到 17 时 54 分(图 11),回波进一步东移,垂直剖面上强回波中心降低到 4 公里高度,强度维持 65 dBZ,中气旋尺度开始减小,表明中气旋的旋转速度继续增大,强度变强,此时雷达中气旋产品在延津西部识别出了一个中气旋,位置与速度图相比略偏西,龙卷 TVS 产品没有识别出龙卷涡旋特征。到 18 时 00 分(图 12,龙卷发生时段),回波进一步增强,并连成了片状,在垂直剖面上(图略)已经不能识别出悬垂回波和有界弱回波,速度图上,中层(1.5°仰角)已经不能识别出中气旋,高层的中气旋继续维持。而在低层(图 12(d),0.5°仰角)相对风暴径向速度图上出现了中气旋,表明中气旋高度开始下降。中气旋高度的下降对龙卷的产生有重要的指示意义。此时在中气旋产品上仍然可以识别出一个中气旋,位置与上一体扫相似,在龙卷 TVS 产品上也是识别出了龙卷涡旋,但是雷达产品识别出的中气旋和龙卷 TVS 的位置,与实际发生龙卷的位置(图 12(c)中黄色椭圆区域内)有一定的偏差。

此次龙卷预警具有一定的难度。17 时 48 分虽然识别出了超级单体风暴,但是在 0.5°仰角上没有发现中气旋,很难判定是否会产生龙卷。到 17 时 54 分,强回波中心的高度开始下降,中气旋的尺度较小,表明了此中气旋旋转强度大,有龙卷发生的可能性,但雷达仍未识别出龙卷涡旋特征,18 时 00 分,中气旋高度继续下降,同时雷达识别出龙卷涡旋特征,但此时龙卷已经发生。目前,以现有的手段和方法,

对于龙卷的监测预警能做到 10 分钟左右的预警提前量, 发生位置还不能确定, 这对于龙卷的防范是远远不够的。因此, 在未识别出龙卷涡旋特征的情况下, 以分辨出旋转加强并不断下降的中气旋为标准, 在追踪龙卷发生前中气旋发展演变与龙卷发生的相关关系的基础上, 实施龙卷预警具有一定的意义。

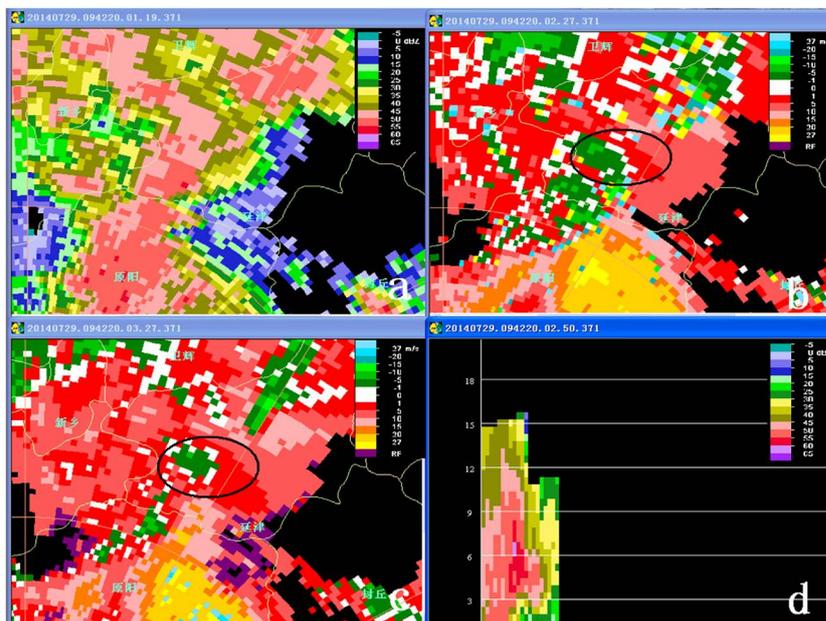


Figure 10. Radar products at 17:48 on 29 July 2014; a: 0.5 elevation reflectance factor, b: 1.5 elevation radial velocity, c: 2.4 elevation radial velocity, d: reflectance factor profile

图 10. 2014 年 7 月 29 日 17 时 48 分雷达产品; a: 0.5°仰角反射率因子, b: 1.5°仰角径向速度, c: 2.4°仰角径向速度, d: 反射率因子剖面图

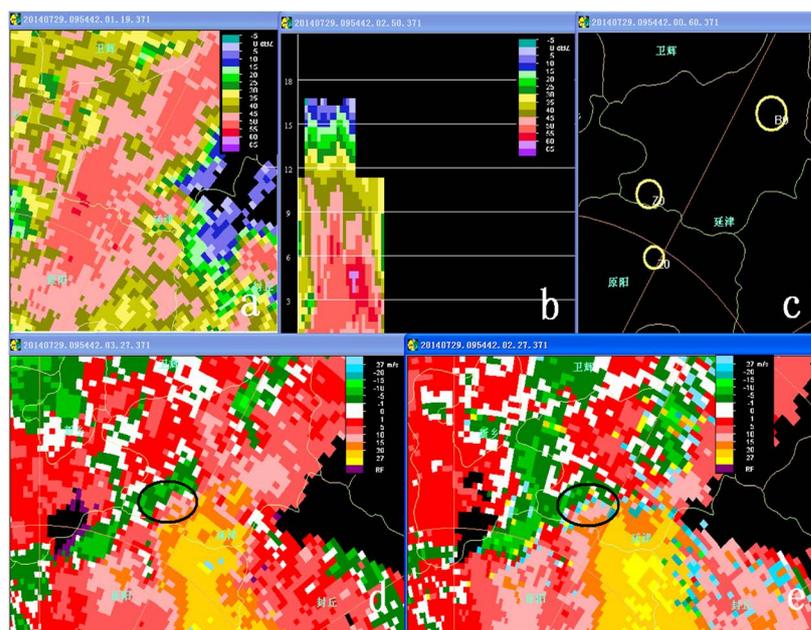


Figure 11. Radar products at 17:54 on July 29, 2014; a: 0.5 elevation reflectance factor, b: reflectance factor profile, c: radar mesocyclone products, d: 1.5 elevation radial velocity, e: 2.4 elevation radial velocity

图 11. 2014 年 7 月 29 日 17 时 54 分雷达产品; a: 0.5°仰角反射率因子, b: 反射率因子剖面图, c: 雷达中气旋产品, d: 1.5°仰角径向速度, e: 2.4°仰角径向速度

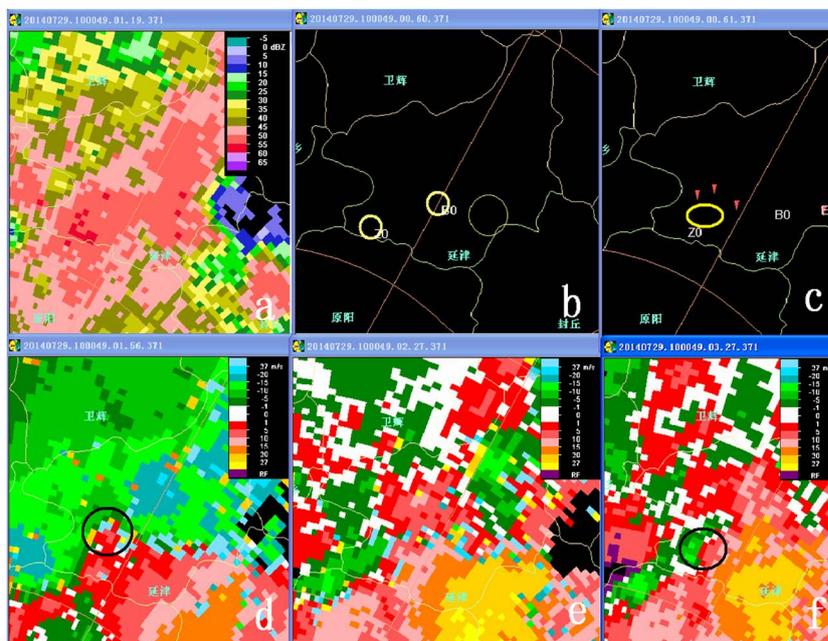


Figure 12. Radar products at 18:00 on 29 July 2014; a: 0.5° elevation reflectivity factor, b: radar mesocyclone product, c: radar tornado TVS characteristic product, d: 0.5° elevation relative storm radial velocity, e: 1.5° elevation radial velocity, f: 2.4° elevation radial velocity

图 12. 2014 年 7 月 29 日 18 时 00 分雷达产品；a: 0.5° 仰角反射率因子，b: 雷达中气旋产品，c: 雷达龙卷 TVS 特征产品，d: 0.5° 仰角相对风暴径向速度，e: 1.5° 仰角径向速度，f: 2.4° 仰角径向速度

7. 结论

本文利用常规观测资料、区域自动站资料、NCEP 再分析资料、卫星以及多普勒天气雷达资料，对 2014 年 7 月 29 日新乡大暴雨过程的强对流特征和形成原因进行了分析研究，得到以下主要结论：

1) 高空低槽和中低空切变线是此次伴有短时强降水、雷暴大风和龙卷强对流天气特征的大暴雨过程的主要影响系统，高低空急流构成了“上干冷、下暖湿”的不稳定层结。低空偏南急流提供了充分的水汽，地面辐合线和地面辐合中心是此次强对流天气的重要触发机制。

2) 通过对物理量和加密风场资料的分析表明：此次强对流过程的水汽供应充分、前期储存了大量的不稳定能量并得到了充分的释放，地面辐合中心和辐合线以及地形作用提供了良好的抬升触发机制。强对流的三条件在此次过程中配合较好，是造成此次暴雨、大暴雨并伴有强对流天气过程发生发展的主要原因。

3) 新乡地区的地形对此次过程的发生发展产生了重要的影响，迎风坡使得系统在地形强迫抬升中得到不断地加强，使系统不断发展，并在新乡地区长期维持，使降水持续，产生列车效应。从而形成了大范围的暴雨天气。

4) 通过对多普勒天气雷达资料的分析可以判断此次过程的龙卷发生在一个超级单体内。速度图上的中气旋对龙卷的产生有一定的指示作用。中气旋的发展演变和龙卷的相互关系对提高龙卷监测的时效性具有一定的指示意义。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 915-924.
- [2] 阎访, 陈静, 卞韬, 等. 一次雷暴大风的物理环境场和多普勒雷达回波特征[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(1):

33-39.

- [3] 王彦, 吕江津, 王庆元, 等. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 75-80.
- [4] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学, 2005, 29(2): 445-452.
- [5] 苏爱芳, 孙景兰, 谷秀杰, 等. 河南省对流性暴雨云系特征和概念模型[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 219-229.
- [6] 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.
- [7] 李德俊, 唐仁茂, 熊守权, 等. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象, 2011, 37(4): 474-480.
- [8] 郝莹, 姚叶青, 郑媛媛, 等. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象, 2012, 38(8): 903-912.
- [9] 张一平, 乔春贵, 梁俊平. 淮河上游短时强降水天气学分型与物理诊断量阈值初探[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(2): 129-138.
- [10] Lemon, R.L. and Doswell, C.A. (1979) Severe Thunderstorm Evolution and Mesocyclone Structure as Related to Tornadoogenesis. *Monthly Weather Review*, **107**, 1184-1197.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2)
- [11] 何彩芬, 姚秀萍, 胡春蕾, 等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 气象应用学报, 2006, 17(3): 370-375.
- [12] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [13] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [14] 朱乾根, 林锦瑞, 寿邵文, 等. 天气学原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992.