

# 豫中地区一次雷雨过程特征分析

赵芳 侯振奎 侯曾译

(民航河南空管分局, 郑州 450000)

**摘要:** 利用ERA再分析资料和郑州机场多普勒雷达及风廓线雷达资料等, 对2019年8月6日导致郑州机场大面积航班延误的一次雷雨过程进行特征分析。结果表明, 本次雷雨是一次低涡雷雨过程, 受蒙古冷涡后部的干冷空气东移南下和中层伴有切变辐合共同影响。水汽来源主要通过西南暖湿气流和台风外围气流输入。高空冷槽叠加低层暖空气之上造成较强的层结不稳定性, 地面辐合线和流出边界是本次过程的触发条件。本地的多普勒雷达和风廓线雷达产品可以较好地反应出短时强对流天气的降水和风切变的变化信息。

**关键词:** 雷雨天气, 郑州机场, 水汽, 风廓线雷达

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.005

## Analysis of the Characteristics of a Thunderstorm in the Central Henan Province

Zhao Fang, Hou Zhengkui, Hou Zengyi

(Henan Air Traffic Management Bureau, Zhengzhou 450000)

**Abstract:** Using ERA reanalysis data, Doppler radar data and wind profile radar from Zhengzhou Airport, we analyzed a thunderstorm that occurred in Zhengzhou Airport which caused extensive flight delays on 6 August 2017. The results showed that this was a low-vortex thunderstorm process. It affected by the dry cold air in the rear of the Mongolian cold vortex moving eastward and southward and the middle layer with shear convergence. Southwest warm and humid air currents and water vapor around the typhoon became water vapor sources. Cold trough at high levels and warm air in lower levels lead to unstable stratification, the surface convergence line and outflow boundary triggered this process. The Doppler radar data and the wind profile radar data could well reflect the change information of precipitation and wind shear in short-term strong convective weather.

**Keywords:** thunderstorm, Zhengzhou Airport, water vapor, wind profile radar

### 0 引言

雷雨是夏季影响飞行安全最主要的天气之一。雷雨天气出现的强对流和大风具有强度大、空间尺度小、突发性强等特点, 对于航空运输来说, 容易造成飞行中、起飞和着陆的航空器遭遇低空风切变和雷击, 对航空器和地面设备设施带来损害<sup>[1-2]</sup>。目前关于雷雨天气的特点和成因分析已经很成熟<sup>[3-6]</sup>。随着探测技术的发展, 越来越多的非常规资料也被应用于研究中。多普勒双偏振雷达<sup>[7-8]</sup>、微波辐射计<sup>[8]</sup>、闪电定位仪、风廓线雷达<sup>[9-11]</sup>等都对近时强对流天气的变化和发展有一定的预报意义。

郑州机场2019年共发生雷雨天气总计14次, 气候年平均次数为17次, 2019年雷雨次数略低于气候平均。大部分雷雨天气是发生在下午至前半夜, 正是

航班量的高峰期, 雷雨天气从发生到结束对机场安全运行的影响一般约为3~5 h, 这就要求预报员需准确把握雷雨发生和结束时间, 移动速度和方向及强度变化情况, 并将这些信息及时准确地传递给管制部门及机场相关单位, 为雷雨天气的飞行保障做好充分的准备。通过分析总结夏季雷雨爆发的天气形势和天气特征, 提前对雷雨天气造成影响做出预判和预警, 有效的提高民航气象保障服务, 提升航班准点率。2019年郑州机场因雷雨启动大面积航班延误颜色预警(MDRS)共2次。

2019年8月6日16—19时郑州机场受雷雨天气影响, 自观采集降水量为43 mm, 最大阵风达15 m/s。郑州机场启动大面积航班延误(MDRS)黄色预警, 因为天气原因致使135架次航班受到影响, 返航114架次, 备降21架次。但是此次雷雨天气过程预报员前期准备工作充足, 预报结论准确, 服务和通报及时, 大大缩减了预期受影响的航班量, 出色地完成了气象保

收稿日期: 2020年2月6日; 修回日期: 2020年6月13日  
第一作者: 赵芳, Email: 66359636@qq.com

障工作。将本次雷雨过程进行特征分析和总结，为今后雷雨天气预报工作提供参考依据和经验，提高极端天气的预报和预警能力。

## 1 资料说明

本次过程的分析资料采用ERA再分析资料，空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，时间间隔为1 h。多普勒雷达为郑州机场S波段多普勒雷达仰角 $0.5^{\circ}$ ，探测范围300 km，时间间隔为6 min。风廓线雷达为郑州机场对流层风廓线雷达，探测高度为5 km，时间间隔为5 min。

## 2 降水过程成因分析

### 2.1 降水环流特征

2019年8月6日08时，500 hPa中高纬地区的天气形势为两槽一脊，西部槽在巴尔克什湖附近，缓慢东移，东部槽位于鄂霍次克海西侧并有逐渐加强的趋势。由于冷空气的堆积，两槽之间中高纬大范围地区为阻塞高压，中心位置位于贝加尔湖附近。高压底部有两个明显的切断冷涡（图1）。一个位于新疆西北部，另一个位于内蒙古中部形成蒙古气旋，气旋位置

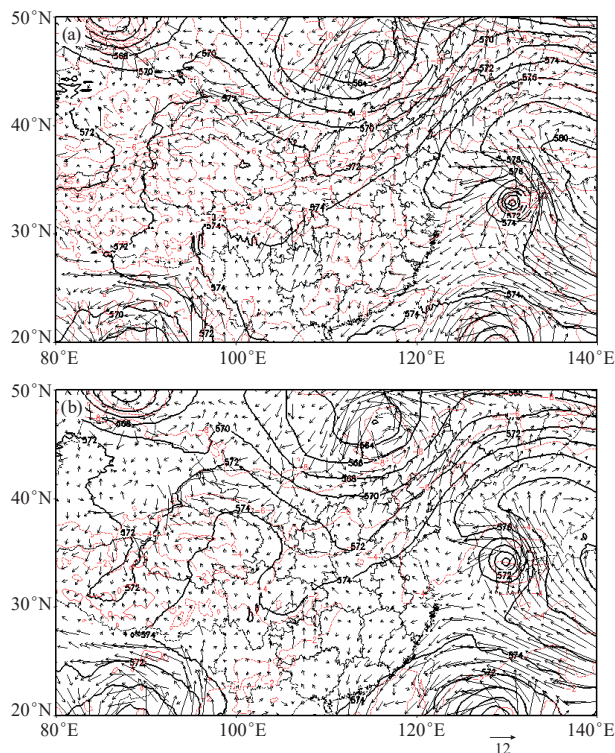


图1 2019年8月6日08时(a, 北京时, 下同)及14时(b) 500 hPa位势高度(黑色实线, 单位: dagpm)、温度(红色虚线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、850 hPa风场(箭头, 单位: m/s)  
Fig. 1 Geopotential height (black solid lines, unit: dagpm) and temperature (red solid lines, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 500 hPa, 850 hPa wind (arrows, unit: m/s) at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) on 6 August 2019

少动，其后部的横槽不断引导冷空气南下，横槽北部有明显的冷平流。气旋南部位于山西与陕西省界至秦岭附近有一南支短波槽；在700 hPa表现为明显的风切变辐合区（图略），河南省上空为暖脊控制；850 hPa河南北部到陕西南部有弱的低涡切变存在，河南位于暖中心附近。6日14时，500 hPa中高纬地区仍然是两槽一脊的形势，受台风利奇马和范斯高外围气流的共同影响，位于内蒙古中部的冷涡中心位置少动，强度略有加强，短波槽缓慢东移至河南省西部，冷空气跟随南下；700 hPa上的风切变辐合区位置也随之缓慢东移，移动到河南省西部。切变线两侧的风速比08时明显增大。河南省东部仍为暖脊控制；850 hPa低涡切变和位置变化不明显。显著湿区的位置偏南，稳定在江南附近，北方水汽条件较差。

这次过程主要影响系统为高空蒙古冷涡后部的干冷空气，它随短波槽东移南下，河南省位于槽前上升气流控制区。底层存在切变辐合，并伴有暖空气，但是暖空气湿度较小，所以本次过程造成河南地区的雷暴大风天气而非强降水为主的强对流天气。

### 2.2 触发条件

雷暴的抬升触发多位于地面附近，地面气象要素场的变化对触发雷暴有重要的指示意义。地面要素场变化主要为高温乱流和地面辐合线的影响。对6日白天，由于辐射增温，中午陕西、河南局部地区的气温已达 $30^{\circ}\text{C}$ ，位于切变线和低压槽区的陕西东部、河南西部由于局地加热作用开始产生零散的局地对流。郑州机场6日早上出现轻雾天气，底层层结和湿度条件较好。白天辐射增温明显，温度从06时 $25.5^{\circ}\text{C}$ 增加至14时的 $31^{\circ}\text{C}$ ，从郑州站加密探空资料发现，14时郑州站的K指数为 $39^{\circ}\text{C}$ ，沙氏指数为 $-11.4^{\circ}\text{C}$ ，CAPE值为 $1099.7\text{ J/kg}$ ，这表明测站上空已经聚集较强的不稳定能量，热力条件较好，陕西东部和豫西地区的雷暴随引导气流东移。14时的地面风场及温度露点差分布（图2）图上可以看出，在豫西洛阳、三门峡附近有明显的风场辐合，并且辐合区又处在高湿区内，高温高湿利于不稳定能量增加，地面辐合线促成了雷雨的爆发。

### 2.3 水汽和动力条件

水汽在对流天气形成中起着非常重要的作用，一方面有利于强对流天气的不稳定能量增加，另一方面充足的水汽会形成强对流天气下的强降水。从850 hPa水汽输送（图3）可以看出，6日低纬的西南气流从我国的西南地区北上通过在四川到陕西省附近形成较大的水汽辐合区，并且呈加强的趋势。另一方

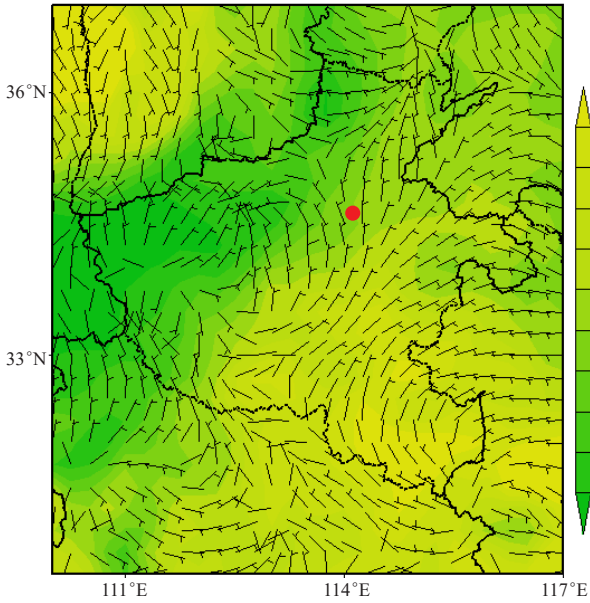


图2 2019年8月6日14时地面风场(风向杆,单位:m/s)及温度露点差(阴影,单位:°C)分布  
Fig. 2 The surface wind (wind vane, unit: m/s) and the depression of the dew point (shaded, unit: °C) at 14:00 BT on 6 August 2019

面台风利奇马和范斯高汇聚西太平洋上空的水汽,通过偏北和偏东气流由黄海经山东半岛流入河南,使得洋面上的水汽向河南北中部输送,两股水汽通道在河南西部、北部汇合,形成较强的水汽辐合区。对比两个时次可以发现,高湿区和水汽输送通量辐合区有很好的对应关系。08时(图3a)陕西和河南西部地区湿度都超过90%,且在西安附近出现了水汽通量散度中心,西南气流的水汽供应较强。由于湿度条件较好,过程在西部三门峡、南阳附近产生了较强的降水。14时(图3b),湿度略有减弱,高湿区的范围也有所减小,西南的水汽输送减缓,但是来自洋面的水汽输送加强,高湿区也随之向东发展,水汽通量散度中心也东移至三门峡附近,同时在郑州附近对流运动加强,水汽通量散度明显增加。

对流天气除了由强的水汽输送给和辐合外,还要有低层的动力触发条件及维持机制。大气层结、冷暖平流及高低空辐合辐散的配合都可以成为触发上升运动的原因。在垂直速度(图略)的分布上,可见河南省中西部大部分地区中底层有明显的上升运动。从6日郑州机场(34.5°N, 113.5°E)的散度和涡度的时间(UTC)剖面图可见(图4),前期垂直运动和辐合辐散均不明显,04时(UTC)也就是北京时12时之后整体表现为低层辐合高层辐散的形势。900 hPa以下上升运动开始加强,在雷雨天气的发展阶段存在850 hPa一下辐合、700~850 hPa辐散、700~500 hPa辐合,

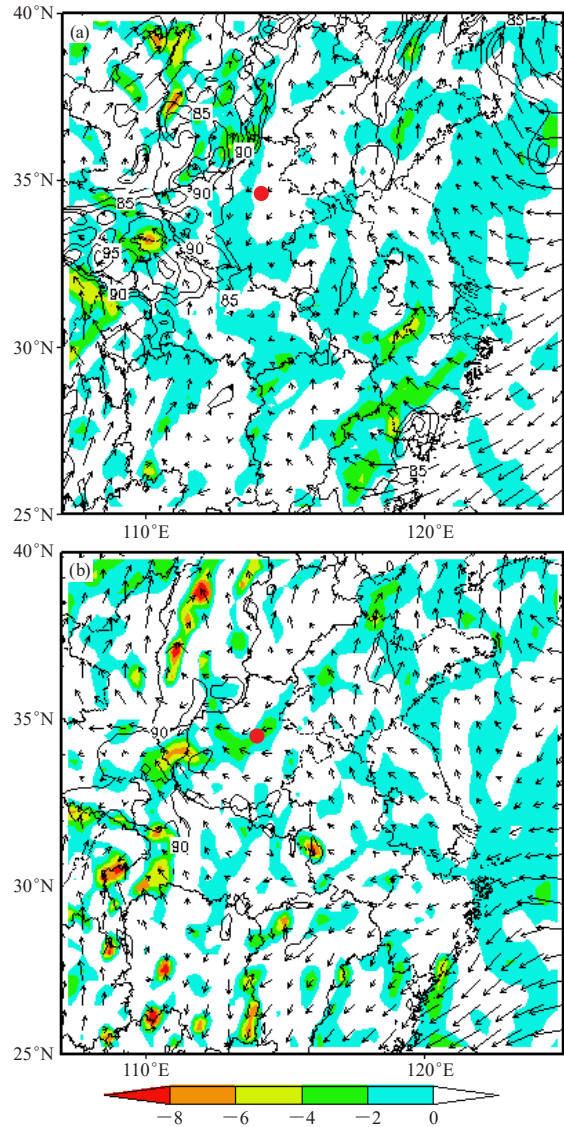


图3 2019年8月6日08时(a)和14时(b)850 hPa水汽输送通量(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,红点为郑州机场位置)和相对湿度(黑色实线,单位:%)  
Fig. 3 Water vapor transport fluxes (arrows, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and, water vapor flux divergences (shaded, units:  $10^{-7} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and relative humidity (black solid lines, units: %) at 850 hPa at 08:00 BT(a) and 14:00 BT (b) on 6 August (Red point is Zhengzhou Airport)

500 hPa以上辐散的两个辐合辐散中心。在雷雨过程后期则是850 hPa以下辐合、850 hPa以上辐散的单值中心。同时雷雨期间900 hPa有两个最大值中心,第一次最大中心对应雷雨的发展到旺盛阶段,低层均是强的上升气流促使雷雨发展形成,此时郑州机场正是强雷雨天气覆盖。第二次最大值中心对应郑州机场中雨阶段,低层辐合更加剧烈,有利于地层水汽的整体辐合抬升。

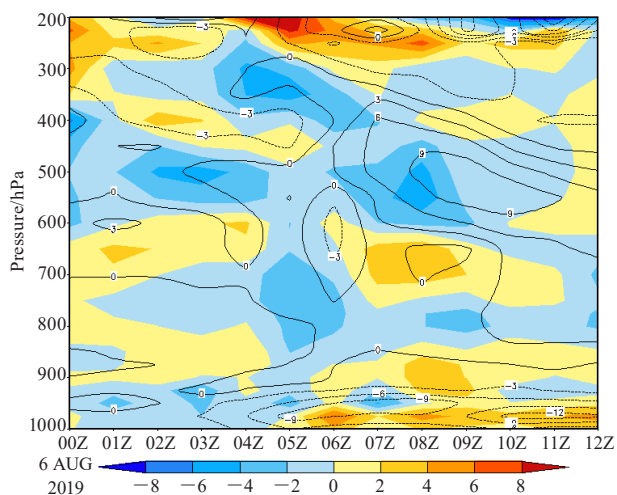


图4 2019年8月6日郑州机场散度(阴影,单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )、涡度(等值线,单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )的高度-时间剖面图(UTC)

Fig. 3 Divergence (shaded, unit:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ) and vorticity (contours, unit:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ) height-time cross section in Zhengzhou Airport on 6 August 2019 (UTC)

### 3 雷达产品的应用

郑州机场夏季对流天气临近预报主要采用机场多普勒雷达和风廓线雷达。14时的反射率因子雷达图上(图略),豫西地区辐合线前沿和漯河附近开始有分散性的雷暴单体陆续发展成熟,豫西主要在洛阳、济源、登封等地形成,中心强度都在55 dBz以上,造成这些地区强雷雨天气。随着地面辐合线东移和引导气流的共同影响下,在15时左右,在荥阳附近回波发展合并成西北东南走向距离10~15 km的两个强回波中心,并以40~50 km/h的速度向郑州机场移动,此时前端的雷暴单体发展出阵风锋,并逐渐加强扩大,在雷达图上为一条明显的出流边界。下午16:00(图5a),位于雷暴单体前部20~30 km处的阵风锋到达郑州机场,风向变化大,郑州机场出现强风切变,风向由南风(2 m/s)转为西北大风,风速迅速增加至7 m/s,阵风为14 m/s,强烈的低层风切变触发了不稳定能量。16:10郑州机场开始出现强对流天气,上空闻雷,随即出现中雨天气。郑州机场最大反射率(图5b)此时的最大反射率超过60 dBz,回波顶高在12 km以上,回波移速30~40 km/h略有减慢,南部漯河市附近的雷暴单体加强并北上至长葛附近,回波中心强度也在60 dBz以上。16:47郑州机场的雷达回波强度减弱缓慢东移,机场本场也开始转为小雨天气,风速降至5 m/s。南部的雷暴单体强度也明显减弱,位置移动至机场西南4 km处。17:10南部的雷暴单体开始两个合并,低层强烈的风场辐合抬升使得合并后的回波强度迅速加强,移速降为25~30 km/h,本

场东侧又出现中雨天气。19:00郑州机场转为小雨天气,本次雷雨天气过程结束。多普勒雷达很好的显示了在雷雨到达前地面阵风锋的变化和触发过程,强中心的变化也反映了降水的强度的变化规律及雷暴合并发展的过程。

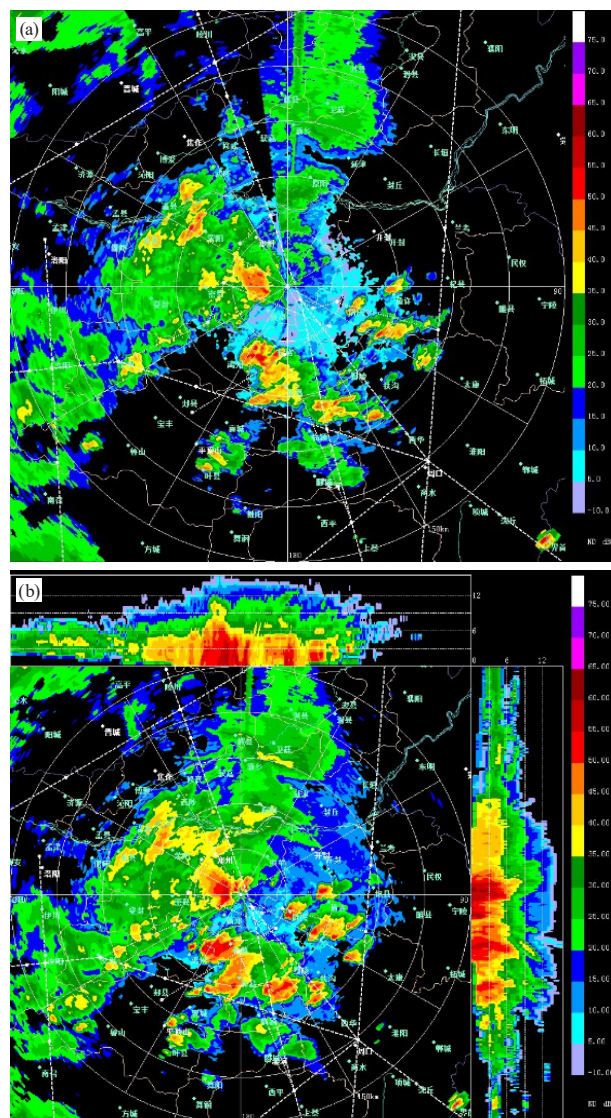


图5 2019年8月6日郑州机场多普勒雷达15:58 0.5°仰角基本反射率因子(a)和16:10最大反射率因子(b)

Fig. 5 Radar products of Zhengzhou Airport at 0.5° elevation angle

(a) base reflectivity at 15:58 BT, (b) max reflectivity at 16:10 BT on 6 August 2019

风廓线雷达可以探测对流层中各层的风,从风的垂直分布和其随时间的演变可以判断温度和湿度平流状况;根据垂直风切变的变化和大小可以估算对流天气的发展和强弱变化<sup>[10-11]</sup>。郑州机场的风廓线雷达是CFL-03边界层雷达,是监测5000 m以下的风场变化,从垂直风廓线图(图6)可以看

出,在雷雨阶段4000 m以上的风场基本是西南或偏西气流,郑州机场处在高空的槽前正涡度平流区,与高空形势场一致。如图在08:00—10:30 UTC (16:00—18:30 BT),位于高空2500~3500 m (约700 hPa附近),水平风场由偏南气流转为西北或偏北气流,说明此时上空有短波槽过境。高空1500 m附近在中雨期间,西南气流加强带来部分水汽,但是未达到急流强度,也说明本次降水过程主要是短时的中雨。在雷暴阶段风廓线雷达出现缺测,但是在09:00—09:20 UTC (17:00—17:20 BT),高空1000 m以下出现强的垂直风切变,红色框内标示出了在出现强扰动切变时的情况,此时两个雷暴单体在郑州机场合并,遂出现复杂的风场分布情况。这对雷暴的内部风场结构起到一定的指示作用。

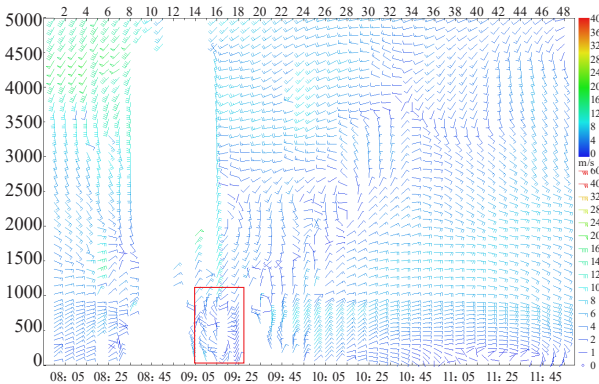


图6 郑州机场2019年8月6日08—12 UTC风廓线雷达水平风时间序列图(红框显示强扰动切变区)

Fig. 6 Horizontal wind time series from 08:00–12:00 UTC on 6 August 2019 of wind profile radar of Zhengzhou Airport (Red box is the strongly disturbed shear region)

## 4 结论

对2019年8月6日河南省雷雨过程进行环流背景、水汽条件、常规动热力变量及多普勒雷达和风廓线雷达等多种资料特征分析,得到以下结论:

1) 本次过程500 hPa天气形势为两槽一脊,河南省位于槽前的不稳定区,主要天气系统有缓慢东移加强的蒙古低涡、西太平洋热带气旋。蒙古冷涡后部的干冷空气东移南下,700 hPa有切变辐合,并伴有暖平流,但是暖空气湿度较小,850 hPa配合有弱的低涡切

变。由于水汽条件较差,郑州机场主要以雷暴大风为主,而非强降水为主的一次低涡雷雨过程。

2) 水汽输送路径主要是西南暖湿气流直接沿西侧、西南侧流入河南省和台风外围水汽越山东半岛东侧流入河南省。水汽辐合中心位于河南省西侧,提供了水汽条件。郑州机场雷雨阶段垂直方向上呈现出两个辐合辐散中心,低层辐合明显。

3) 地面辐合线和出流边界是本次过程的触发条件。前期弱冷空气入侵形成地面辐合线,使其近地面温湿条件较好地区产生的局地热对流向东移动。而后期雷暴单体发展前部产生出流边界,与另一单体相互作用,合并发展,造成郑州机场短时中雨和大风天气。

4) 风廓线雷达对研究雷雨的垂直结构效果较好。风廓线雷达可以反映高层气流变化趋势和低层垂直运动发展状态,从而可以更准确地预计雷雨后续发展。

通过结合多种资料对不同天气型产生的雷雨进行特征分析,总结其生成发展的变化规律,提高预报预警的提前量,有效的提供航空气象保障服务,从而提高航班的准点率。

## 参考文献

- [1] 黄奕铭,郑炳智,邹松佐.广州白云机场雷雨大风天气的特点及雷达回波特征分析.广东气象,2015,37(5):35-39.
- [2] 吴风波,李岩松.白云机场一次大雾伴雷暴天气数值模拟.气象科技,2016,44(2):297-304.
- [3] 万雪丽,朱文达,曾莉萍,等.2015年一次强对流天气中尺度特征及水汽输送.贵州气象,2016,40(6):13-19.
- [4] 刘勇,刘子臣,马廷标,等.一次飚线过程中龙卷及飑锋生成的中尺度分析.大气科学,1998,22(3):326-335.
- [5] 梁俊平,张一平.2013年8月河南三次西南气流型强对流天气分析.气象,2015,41(11):1328-1340.
- [6] 王小晴,周玉淑,平凡,等.2015年7月中旬京津冀持续性夜间雷雨天气成因初步分析.大气科学,2017,41(6):1284-1299.
- [7] 庞古乾,伍志方,谌志刚,等.两次龙舟降水过程中不同类型的天气雷达特征分析.广东气象,2014,36(6):1-5.
- [8] 王彦,赵金霞.天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析.气象,2009,35(5):91-96.
- [9] 王敏仲,何清,魏文寿,等.新疆百里风区风廓线观测分析.气象科技,2010,38(4):413-417.
- [10] 杨波,魏东.二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用.气象科技,2010,38(4):413-417.
- [11] 许长义,易笑园,段丽瑶,等.多种观测资料在一次弱降水雷暴大风分析中的综合应用.气象科技,2017,45(2):355-363.