

# 2021年岳阳一次混合强对流天气过程成因分析

陈姣荣<sup>1, 2, 3</sup> 阮能<sup>1, 2, 3</sup> 尹依雯<sup>1, 2, 3</sup> 许丽丽<sup>1, 2, 3</sup> 袁泉<sup>1, 2, 3</sup> 黄天赐<sup>1, 2, 3</sup>

(1 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; 2 洞庭湖国家气候观象台, 岳阳 414000; 3 岳阳市气象局, 岳阳 414000)

**摘要:** 应用常规气象资料、NCEP逐6 h、逐3 h (空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ) 再分析资料和雷达资料等, 对2021年5月15日湖南省岳阳市的一次混合型强对流天气过程演变及特征进行分析, 并对极大风与强降水中心位置不同进行了简要分析。结果表明: 两槽一脊的环流形势下, 南支槽、低涡、切变线、冷空气渗入地面倒槽等是天气尺度影响系统; 水汽的强烈输送和辐合、“上干冷、下暖湿”的不稳定层结、强垂直风切变是这次强对流天气的有利环境条件。雷达回波的形态特征如三体散射、中气旋、“V”型缺口、中层径向辐合(MARC)、VIL跃增、列车效应等特征对分析和识别强对流天气的种类及强对流天气预警的发布具有重要指示意义。极大风与强降水中心出现位置的不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件差异有关, 与洞庭湖大型水体和临湘东部山区地形的阻挡作用关系密切。

**关键词:** 强对流, 环流形势, 环境条件, 雷达回波特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.006

## Cause Analysis of a Mixed Severe Convective Weather Process in Yueyang in 2021

Chen Jiaorong<sup>1, 2, 3</sup>, Ruan Neng<sup>1, 2, 3</sup>, Yin Yiwen<sup>1, 2, 3</sup>, Xu Lili<sup>1, 2, 3</sup>, Yuan Quan<sup>1, 2, 3</sup>, Huang Tianci<sup>1, 2, 3</sup>

(1 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118; 2 Dongting Lake National Climate Observatory, Yueyang 414000; 3 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

**Abstract:** Using conventional meteorological data, NCEP 6-h and 3-h reanalysis data (spatial resolution of  $1^\circ \times 1^\circ$ ) and radar data, the evolution and characteristics of a mixed severe convective weather process in Yueyang City, Hunan Province on 15 May 2021 are analyzed, and a brief analysis of different locations for the extreme wind speed and the heavy rainfall center is carried out. The results show that, under the circulation situation of two troughs and one ridge, the southern branch trough, the low vortex, the shear line, and the cold air infiltration into the ground inverted trough are the synoptic-scale influence systems; the strong transportation and convergence of water vapor, the “upper dry and cold, lower warm and wet” unstable stratification, and strong vertical wind shear are the favorable environmental conditions for this strong convective weather. The morphological characteristics of radar echo, such as three body scattering, mesocyclone, V-notch, mid-level radial convergence (MARC), VIL jump, and train effect are of great significance for the analysis and identification of different types of severe convective weather as well as for the release of severe convective weather warning. The fact that the extreme wind speed and the heavy rainfall center occur at different positions is related to the central position of water vapor convergence, the vertical motion intensity and the difference in the unstable energy conditions. It is also connected to the blocking effect of Dongting Lake, the large water body, and the eastern mountainous areas of Linxiang.

**Keywords:** severe convection, circulation situation, environmental conditions, radar echo characteristics

## 0 引言

强对流天气春夏多发, 具有突发性强、发展迅速、极端性强、致灾风险大等特点, 容易导致各类灾害的发生, 是预报员在业务工作中面临的挑战和难题<sup>[1-3]</sup>。近年来, 在强对流预报预警方面有大量的分析与研究<sup>[4-6]</sup>, 气象工作者在短时临近预报预警服务中积累了不少经验, 特别是从雷达回波特征及卫星云图特

征等方面提炼总结, 从天气学角度分析探讨, 并在动力、水汽、不稳定能量等方面开展潜势预报<sup>[7-10]</sup>。许爱华等<sup>[11]</sup>、郑媛媛等<sup>[12]</sup>、庞古乾等<sup>[13]</sup>在概念模型、卫星云图特征、形成机理、物理量诊断、潜势预报等方面进行了研究和提炼, 还有不少学者对强对流天气的发展演变过程开展了数值模拟研究<sup>[14-19]</sup>。

春夏季是湖南强对流天气多发的季节, 强对流天气的地域特征明显, 各地发生强对流天气过程时, 大气对流参数阈值也有明显差异。混合强对流天气的预报更是预报员面临的难题和挑战, 对于混合强对流的预报预警提前量和准确率均有待提高<sup>[1, 2, 3]</sup>。因此,

收稿日期: 2022年8月18日; 修回日期: 2023年2月13日

第一作者: 陈姣荣(1976—), Email: 55062510@qq.com

资助信息: 湖南省气象局2020年重点课题(XQKJ20CA005)

很有必要针对本区域的强对流天气进行分析和研究。2021年5月15日湖南岳阳出现了冰雹、雷雨大风和短时强降水3种不同类型的强对流天气，点多面广、极端性强，造成该次如此剧烈天气的环境条件如何？可能的成因是什么？本文将利用常规气象资料、NCEP逐6 h（空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ）再分析资料及雷达资料，对此次强对流天气过程的天气形势演变、物理量条件进行分析，以期增强对强对流天气成因的认识，并对冰雹、雷暴大风、短时强降水3种强对流天气的雷达回波特征进行探讨，旨在为本地强对流天气监测、预报、预警和服务提供参考依据。

## 1 天气实况和灾情

此次影响岳阳的强对流天气过程出现在2021年5月15日08时—16日08时（北京时，下同）。根据强对流发展演变，可分为三个阶段：第一阶段为5月15日13—15时，以冰雹和雷暴大风为主，主要影响区域为岳阳市中北部的岳阳市区、云溪区、临湘市中南部等地；第二阶段为5月15日15—19时，仍以雷暴大风和冰雹为主，强对流自西向东影响岳阳县全境及临湘市大

部，部分站点出现短时强降水；第三阶段为5月15日19时—16日02时（最强为15日19—22时），强对流从沅江附近的东洞庭湖面开始向东北和东南两个方向发展，以雷暴大风和短时强降水为主，强对流再次影响岳阳县全境和临湘中南部，湘阴县、汨罗市、平江西部也受到不同程度的影响。

根据区域站监测及收集的实况统计（图1），此次过程岳阳市共有19站次极大风速达 $17.2 \text{ m/s}$ （风力等级8级）以上，6站次达 $20.8 \text{ m/s}$ （9级）以上，3站达 $24.5 \text{ m/s}$ （10级）以上，其中最大风力达12级（岳阳县中洲站，风速为 $36.9 \text{ m/s}$ ），创岳阳市有气象观测记录以来历史极值，湖南省第二大值；临湘市、岳阳县、云溪区、君山区、湘阴县均出现冰雹，最大冰雹直径达 $3 \text{ cm}$ （岳阳县公田镇，发生时间为15日17时）；24 h全市累计降水量 $\geq 100 \text{ mm}$ 的有13站， $\geq 50 \text{ mm}$ 的有103站，最大累计降水量达 $168.2 \text{ mm}$ （临湘龙源站），全市有152个站达到短时强降水标准，最大小时雨强为 $58.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ （君山穆湖铺，发生时间为15日18—19时）。

气象灾害管理系统的灾情统计数据（来源于岳阳

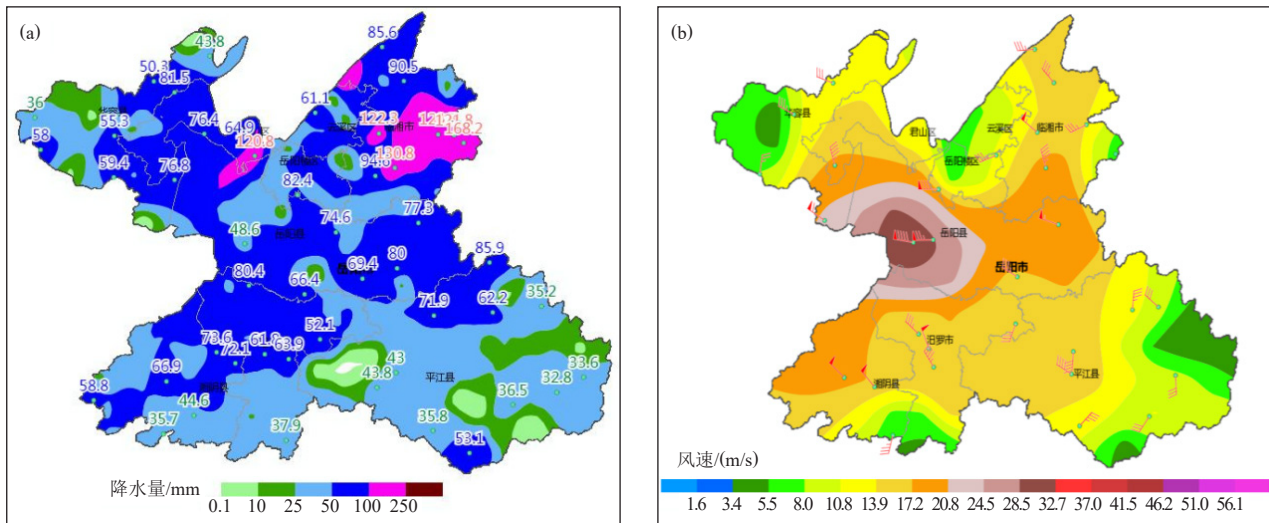


图1 2021年5月15日08时—16日08时岳阳降水量(a)和极大风速(b)分布

Fig. 1 Distribution of precipitation (a) and extreme wind speed (b) in Yueyang from 08: 00 BT on May 15 to 08: 00 BT on May 16, 2021

市应急管理局)显示，此次过程受灾严重，特别是受大风、冰雹灾害影响严重，以房屋倒塌、农作物及树木受损为主。

## 2 环流形势演变

图2a和图2b分别为5月15日08时和5月15日20时500 hPa高度场叠加风场的环流形势。15日08时，500 hPa欧亚中高纬为两槽一脊，中低纬南支槽东出，副热带高压（以下简称副高）西伸脊点达到 $95^{\circ}\text{E}$ 附近，具有东高西低的形势，是湖南容易出现强对流天气的

形势之一，到15日20时，副高西脊点有所东撤，北支和南支槽均有增强加深，北支槽带来的冷平流与南支槽前、副高西北侧的西南风带来的暖湿气流在湖北和湖南的交界区有明显交汇。图3a和图3b分别为5月15日08时和5月15日20时各层影响系统综合图。15日08—20时，700 hPa和850 hPa都存在明显的西南风急流（最大超过 $24 \text{ m/s}$ ），为两湖地区持续输送不稳定能量和充沛的水汽，700 hPa低涡位置较为偏北，但850 hPa低涡的位置由川渝地区南掉至贵州地区，湘北

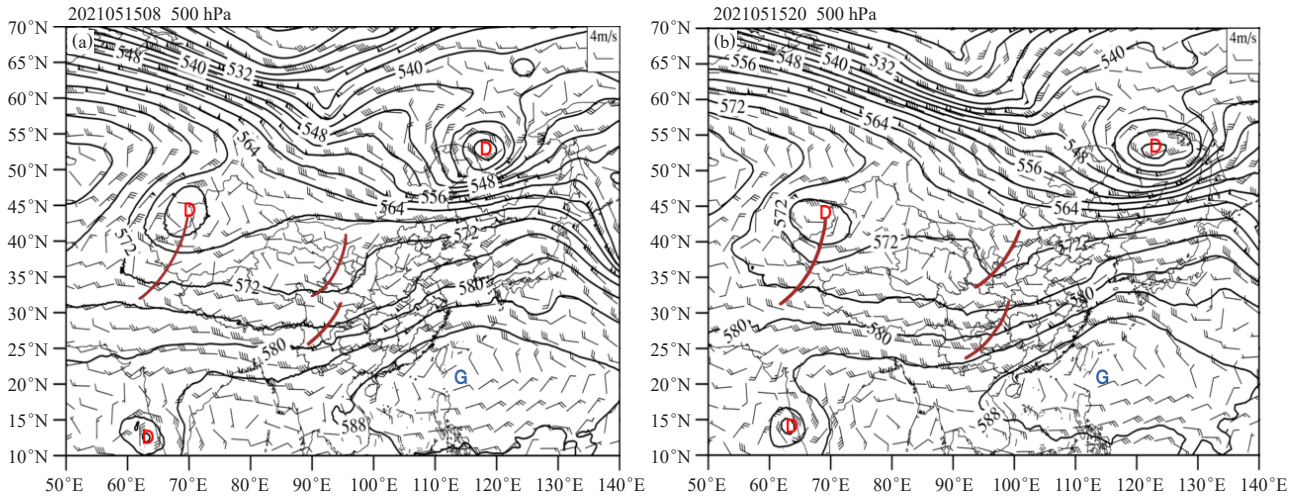


图2 2021年5月15日08时 (a) 和20时 (b) 500 hPa环流形势  
Fig. 2 500 hPa circulation situation at 08: 00 BT (a) and 20: 00 BT (b) on May 15, 2021

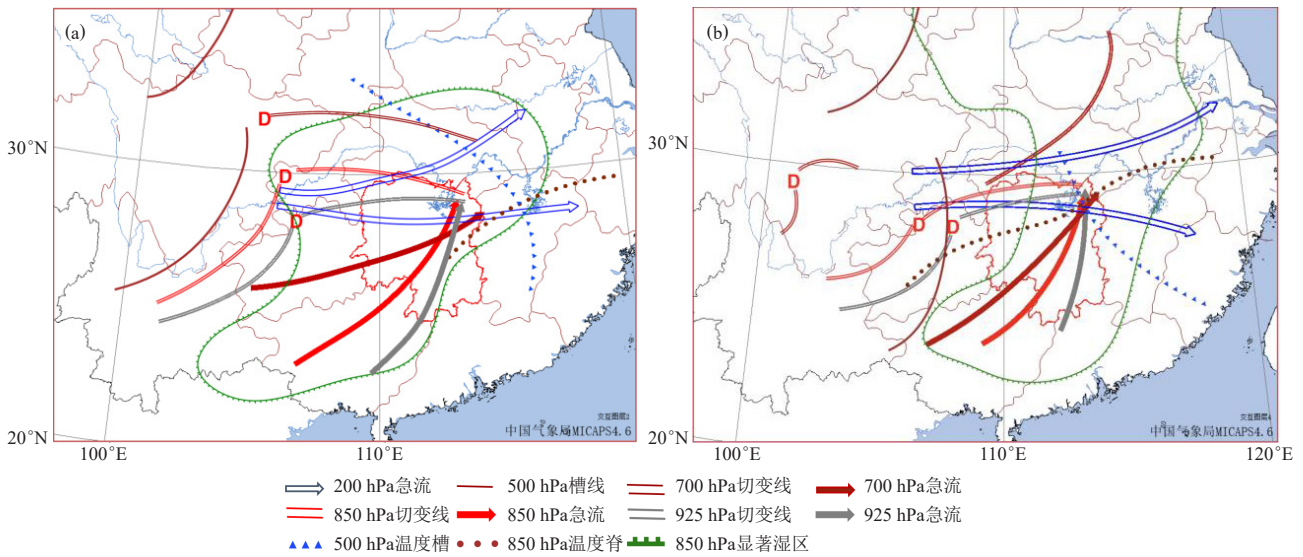


图3 2021年5月15日08时 (a) 和20时 (b) 各层影响系统综合图  
Fig. 3 Comprehensive diagram of each layer's impact system at 08: 00 BT (a) and 20: 00 BT (b) on May 15, 2021

地区位于切变南侧的西南急流中，且中低层切变位置较为重合，进一步增强了上升运动。925 hPa，15日08时江淮地区为低值系统影响，超低空南风急流建立，长沙站最大风速超过18 m/s，为湘北地区持续输送不稳定能量，来自南海的水汽通道带来了充沛的水汽供应，低涡切变东伸至湘北地区，整个湘北地区处于风速风向辐合区；到15日20时，虽然江南地区仍为低值系统影响，但淮河及江北地区已有明显的北风入侵，由等温线也可以看出有冷平流的影响（图略），超低空南风急流强盛（长沙为18 m/s）且维持，而武汉站仅为4 m/s的东南风，风向风速的强烈辐合维持在湘北—鄂东南地区，且从安徽—湖北、贵州—湘北地区有宽广的切变维持，强烈的上升运动加之充沛的水

汽及不稳定能量输送，有利于强对流的发生发展。此外，200 hPa高空急流分流区从15日08—20时，自湘北—鄂南地区东移到湘东北—赣北上空，且随着时间推移分流辐散更加明显，强烈的抽吸作用有利于上升运动的加强和维持。

从地面气压场可知（图略），15日08时江淮流域为低压倒槽影响，14时前晴空辐射增温明显，地面气温升至34℃，大气不稳定能量聚集，到15日20时，川渝—湖北地区等压线明显变密，北部冷高压向东南方向移动，湘北一带开始有冷空气渗透影响，地面倒槽锋生。根据NCEP逐3 h再分析资料（空间分辨率为1°×1°）分析地面辐合线的演变可知（图4），5月15日14时左右，在常德—华容地区已有弱的辐合线生成，

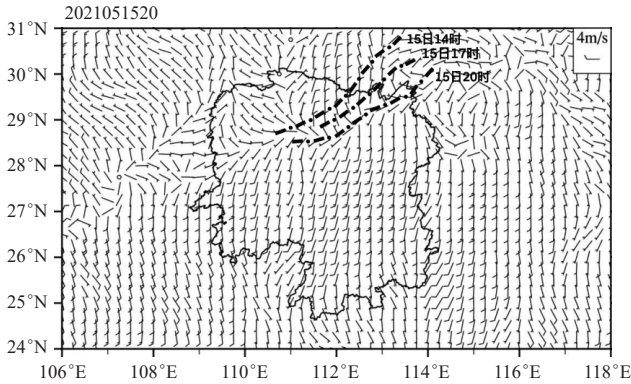


图4 2021年5月15日14—20时地面辐合线演变和20时风场  
Fig. 4 Evolution of the ground convergence line from 14: 00 BT to 20: 00 BT and wind field at 20: 00 BT on May 15, 2021

实况证明此区域在14时前后有局地对流的发生，而15日17—20时地面辐合线稳定维持在洞庭湖地区，此时段也是强对流发生发展最强烈的时段。

### 3 物理量诊断

利用NCEP逐6 h再分析资料（空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ）对5月15日强对流天气过程水汽、动力以及层结等进行物理量诊断分析。下文中，物理量的时

间-高度图均选取出现多种强对流天气的临湘市龙源站（ $113.0^\circ\text{E}$ ， $29.0^\circ\text{N}$ ）进行分析。

#### 3.1 水汽条件

5月15日08时随着西南急流的加强，低层（850 hPa、925 hPa）水汽通量不断加强，岳阳市上空的水汽通量辐合区也逐渐加强。分析925 hPa的水汽通量和水汽通量散度（图5）可见，5月15日14—20时岳阳市处于水汽通量的大值区，最大可达 $30 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ，水汽通量的辐合也明显增强，14—20时水汽通量辐合达到最大，为 $-5 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ，对应岳阳市中北部强对流发生的最强时段。15日20时后，随着冷空气的渗透，水汽通量大值区和辐合区开始逐渐南压；15日20时—16日02时强水汽通量辐合区仍位于岳阳市中南部，与晚上强对流发生的区域对应；16日02时后水汽通量大值区已南压至长沙一带，系统南压，岳阳市强降水天气减弱。

从临湘市龙源站相对湿度的时间-高度图（图略）上可知，500 hPa以下是相对湿度 $>60\%$ 的湿区，特别是5月15日08—20时850 hPa相对湿度 $>70\%$ ，而500 hPa以上存在相对湿度低值区（最小仅为30%），表

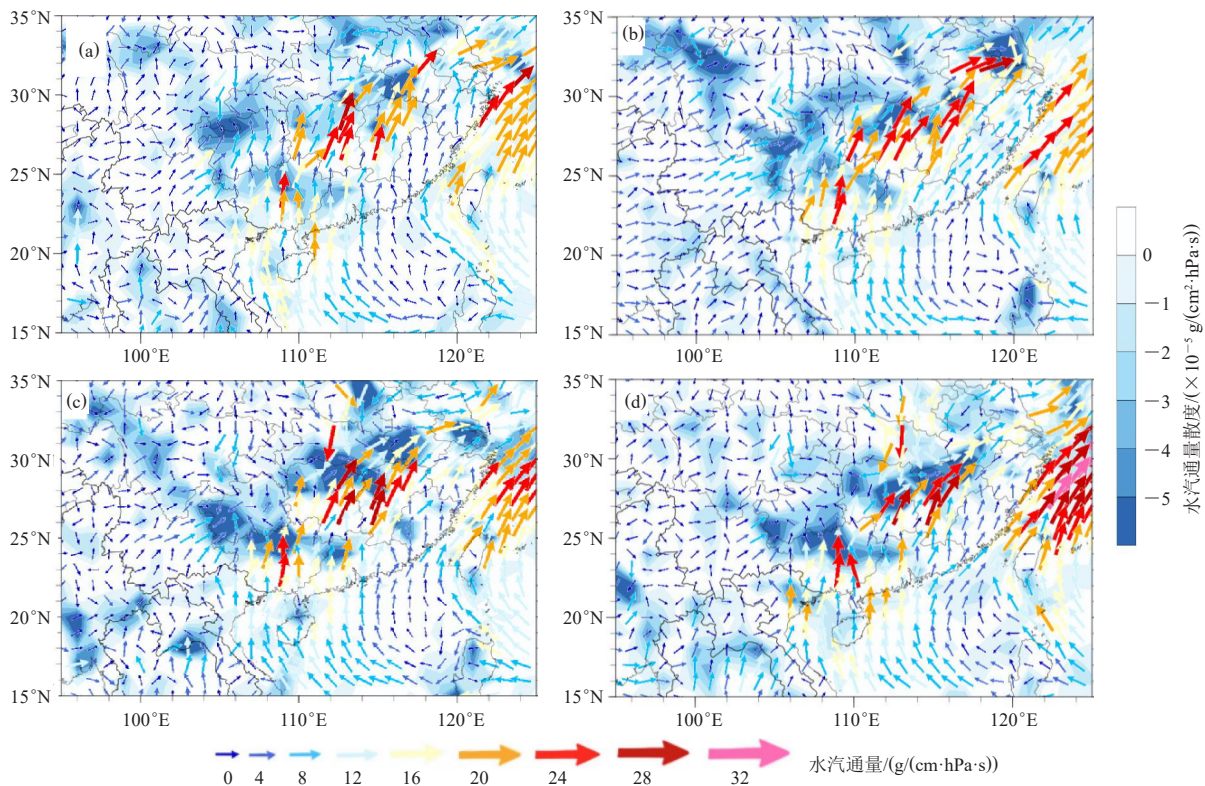


图5 2021年5月15日08时—16日02时925 hPa水汽通量和水汽通量散度叠加图  
(a) 5月15日08时；(b) 5月15日14时；(c) 5月15日20时；(d) 5月16日02时

Fig. 5 Superposition diagram of 925 hPa water vapor flux and water vapor flux divergence from 08: 00 BT on May 15, to 02: 00 BT on May 16, 2021

(a) 08: 00 BT on May 15; (b) 14: 00 BT on May 15; (c) 20: 00 BT on May 15; (d) 02: 00 BT on May 16

明上层相对干、低层相对湿的层结分布有利于不稳定层结的建立，对应时段也出现了雷暴大风，14时之后转为整层湿，对应短时强降水天气。从5月15日14时沿113.0°E的比湿纬度-高度垂直剖面图可知，700 hPa以下比湿均>8 g/kg，850 hPa比湿>13 g/kg，且湿层增厚，是临湘龙源一带产生暴雨及大暴雨的主要原因之一。

### 3.2 动力条件

图6为此次岳阳强对流天气过程垂直速度和散度时间垂直剖面图。龙源站垂直运动的时间-高度图(图6a)显示，5月15日08时开始，低层逐渐转为负值区，表明转为上升运动，14时后上升运动进一步加强，对应地面的对流天气开始发展；15日14—20时从低层至100 hPa附近均为负值区，强烈的上升运动有利于强对流的维持和发展，该时段对应此次过程的最强时段，岳阳市上空垂直上升运动达-1.0 Pa/s；16

日02时，虽然高层上升运动达到最强，但是低层逐渐转为正值区，表明有下沉运动，对应实况强对流天气减弱。从散度的时间-高度图(图6b)可见，14日白天开始地面倒槽不断发展，对应低层负值区不断增大，辐合不断加强；15日08时，倒槽进一步发展，低层850 hPa附近及以下辐合区进一步增大，有利于上升运动的加强，14—20时近地面辐合达到最强，而400 hPa以上为辐散，低层辐合、高层辐散，动力抬升条件好，有利于垂直上升运动加强和维持。

### 3.3 层结条件

本文选取长沙站5月15日08时探空图(图7a)，从层结曲线的形状可以看出，呈向上开口的“喇叭状”，为“上干冷、下暖湿”的特征；0~6 km有较强的垂直风切变，达30.4 m/s，0~1 km同样存在较强的垂直风切变，同时抬升凝结高度较低，为798.2 m，有利于雷暴大风的发生；经订正后的CAPE值为1320.4 J/kg，热

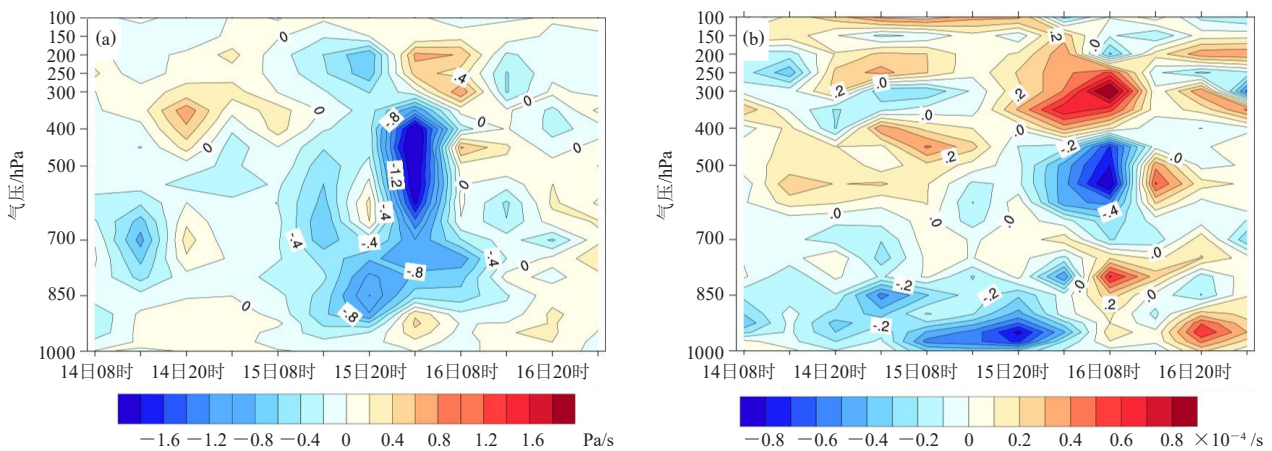


图6 2021年5月14—16日的垂直运动(a)和散度(b)沿113.0°E、29.0°N的时间-高度剖面图

Fig. 6 Time-height profile of vertical motion (a) and divergence (b) along 113.0°E and 29.0°N from May 14 to 16, 2021

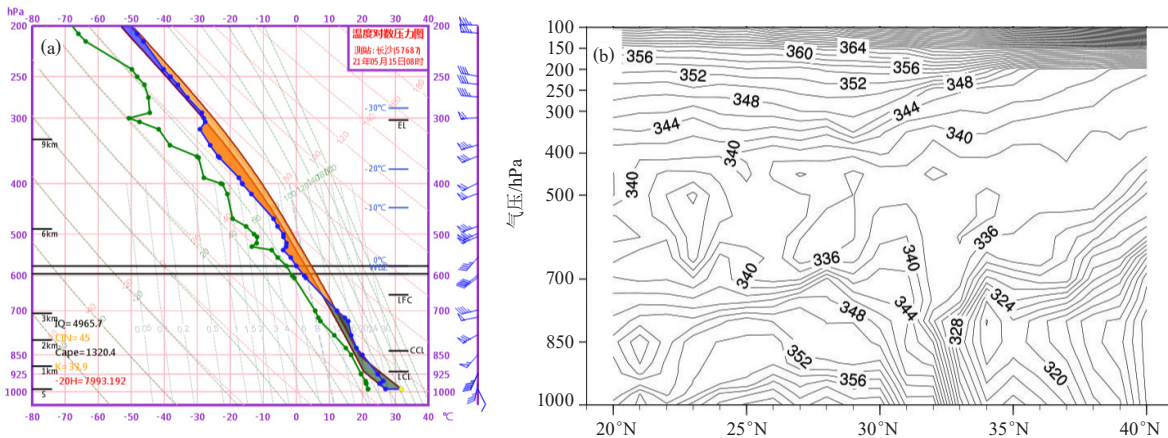


图7 2021年5月15日08时长沙站探空图(a)和5月15日14时假相当位温(b, 单位: K)沿113.0°E的纬度-高度图

Fig. 7 Sounding map (a) of Changsha Station at 08:00 BT on May 15, 2021 and latitude-altitude map of pseudo equivalent potential temperature (b, unit: K) along 113.0°E at 14:00 BT on May 15, 2021

力不稳定条件较好;同时0℃层和-20℃层高度合适,有利于冰雹的发生。由于上干下湿的层结、强垂直风切变和热力不稳定条件,20时前后,整层湿度加大(图略),不稳定条件维持,实况上先后出现了雷暴大风、冰雹、短时强降水等混合强对流天气<sup>[20-21]</sup>。

5月14日白天开始,岳阳市上空假相当位温( $\theta_{se}$ )随高度递减,条件不稳定层结逐渐形成。至15日14时(图7b),假相当位温线密集且随高度递减至500 hPa附近,条件不稳定特征明显。同时32°—33°N附近同样存在等温线密集区但是温度偏低,而32°N以南的温度高,表明该处为冷暖气团的交界面,即锋面所在的位置,由此可见此次过程发生在冷锋来之前的暖区中。

## 4 雷达回波特征

### 4.1 冰雹的回波特征

5月15日岳阳市多县市出现了冰雹,冰雹出现时段主要集中在14—18时,此时段内降雹点主要集中在岳阳市中部的岳阳县和东北部的临湘市,最大冰雹直

径达3 cm(岳阳县公田镇,发生于17时)。根据前文综合分析,大气环境条件满足的条件下,强回波垂直结构和上升气流强度等特征对冰雹天气很关键<sup>[21]</sup>。因此,主要从基本反射率、反射率垂直结构和垂直液态水含量(VIL)等方面进行分析。

从5月15日16时30分1.5°基本反射率(图8a)来看,岳阳县东部甘田乡的强回波最大反射率达69.5 dBZ,三体散射(TBSS)特征明显,同时,VIL>64.5 kg/m<sup>2</sup>,且在16时42分和16时47分超过70 kg/m<sup>2</sup>(图略)。对16时30分的单体作反射率垂直剖面(图8b),发现高悬垂的穹窿结构和有界弱回波区特征明显,而强的垂直风切变正是对流风暴悬垂结构的动力因子。-20℃层高度上的强回波对大冰雹的增长至关重要,从图8b可知,65 dBZ强回波扩展高度超过10 km,即-20℃层高度(由图7a可知,约为7.9 km),有利于大冰雹的产生。实况上,17时岳阳县公田镇出现了直径3 cm的大冰雹。

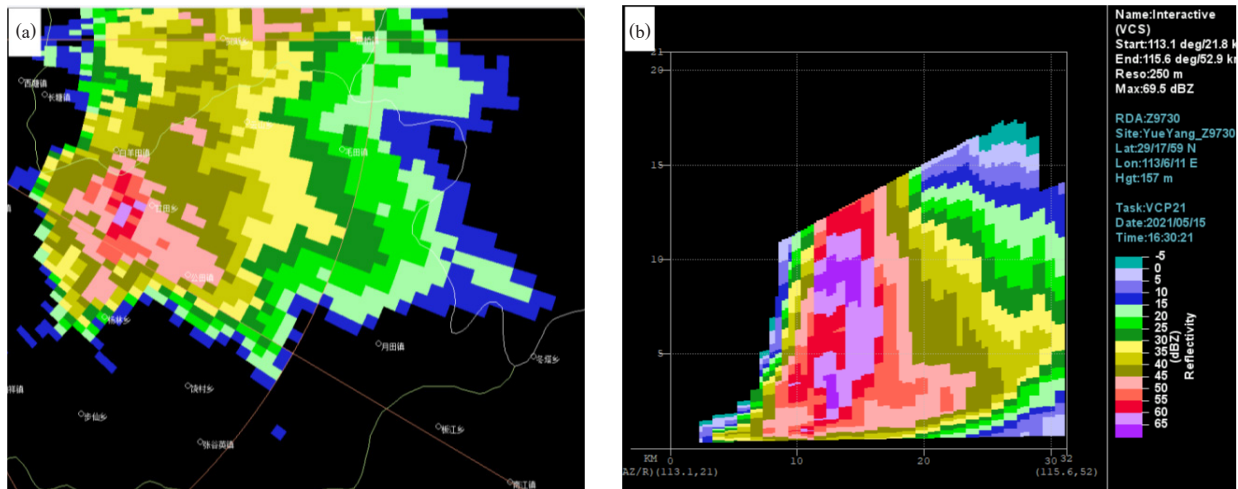


图8 2021年5月15日16时30分岳阳雷达1.5°基本反射率(a)和反射率垂直剖面(b)

Fig. 8 1.5° basic reflectivity (a) and reflectivity vertical section (b) of Yueyang Radar at 16:30 BT on May 15, 2021

### 4.2 雷暴大风的回波特征

本次过程雷暴大风最强时段主要出现在5月15日20—21时,自西向东席卷岳阳市大部分地区。19时位于洞庭湖西岸的安乡、南县—汉寿一线等多个回波单体逐渐合并,强回波带已初步形成一条东北—西南向的弓形回波,并快速东移,在移至洞庭湖面时进一步激发增强,19时30分形成飊线,从1.5°径向速度(图略)看到,沅江一带中低层西南急流旺盛,风速超过27 m/s,有多个中气旋存在,回波前部边缘清晰,有“V”型缺口。其中从益阳沅江发展东移的强回波伴有中气旋,从19时54分到20时12分共持续了4个体扫,

为飊线内嵌的一个经典的超级单体。

从5月15日20时06分岳阳雷达站的径向速度(图9)可见,此时回波进一步加强,东移进入岳阳境内,飊线头部的强回波区猛烈发展,气旋性环流愈发清晰明显,中气旋垂直厚度约为7 km,中心最大风速超过45 m/s,对流组织性强。同时,从岳阳雷达组合反射率(图10a)看回波呈“S”型分布,飊线南段的前部和后部都有一个“V”型缺口,前部的“V”型缺口(A处)为暖湿入流,进入飊线主上升气流,后部的“V”型缺口(B处)为起源于飊线后侧中高层的后侧下沉气流,此两股气流在中层强烈辐合,导致下沉气流

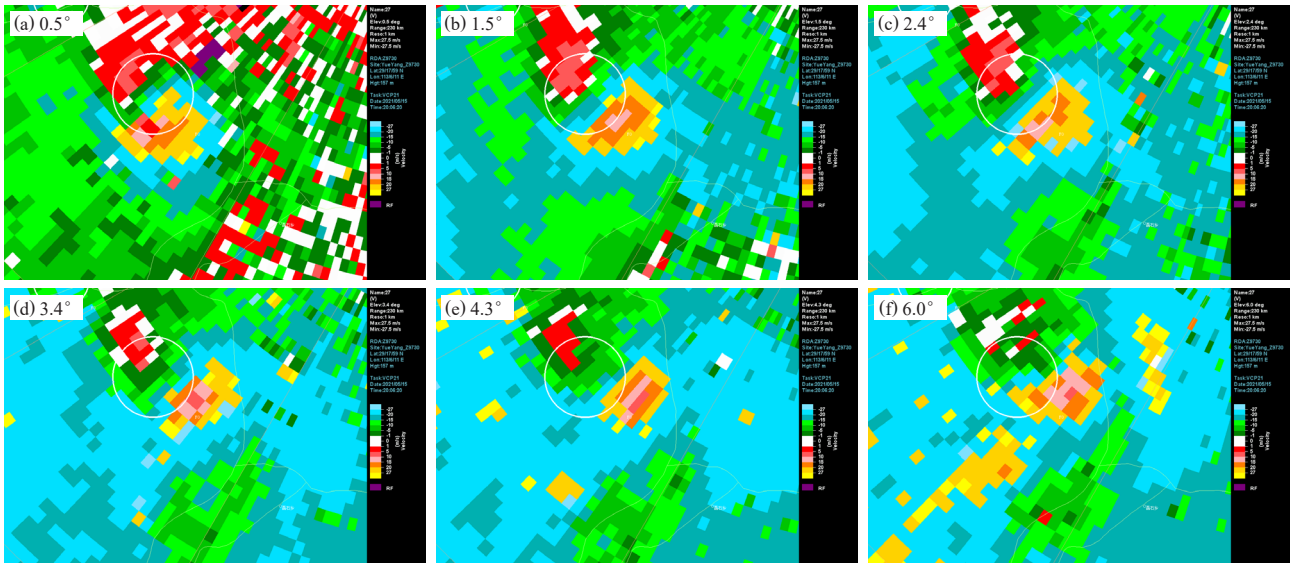


图9 2021年5月15日20时06分岳阳雷达0.5°~6.0°各仰角径向速度 (白色圆圈为中气旋)

Fig. 9 Radial velocities of 0.5°—6.0° elevation angles of Yueyang Radar at 20: 06 BT on May 15, 2021 (the white circle: mesocyclone)

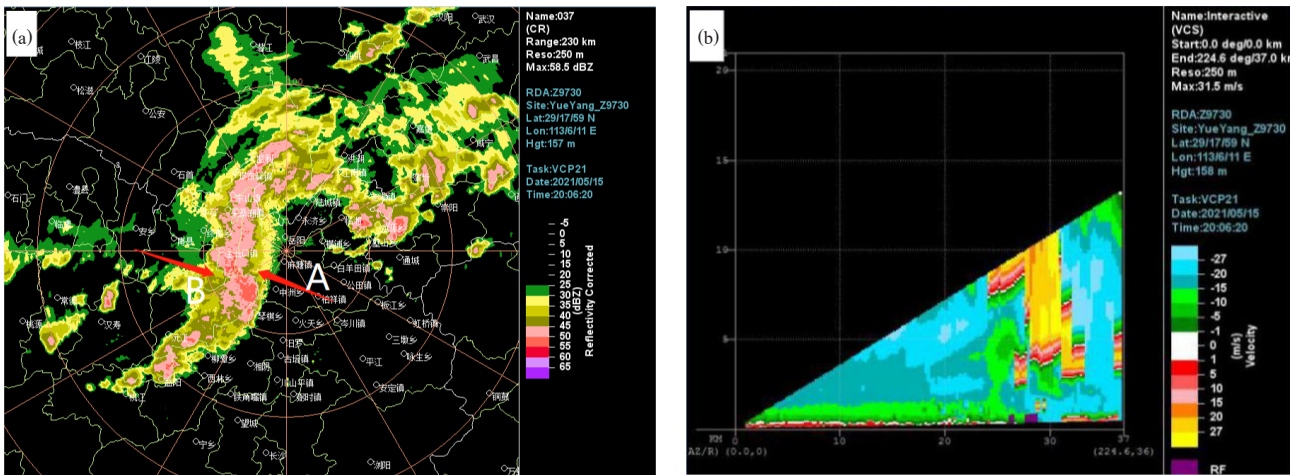


图10 2021年5月15日20时06分岳阳雷达组合反射率 (a) 和沿224°、36 km的径向速度垂直剖面 (b) (红色箭头所指为“V”型缺口区)

Fig. 10 Combined reflectivity (a) of Yueyang Radar and the vertical profile of radial velocity (b) along 224° and 36 km at 20: 06 BT on May 15, 2021 (the red arrow: pointing to “V” notch)

加速下沉, 在飊线低层前沿形成辐散风<sup>[22-23]</sup>。再看岳阳雷达站20时06分沿径向(起点为岳阳雷达站, 剖面终点方位角为224°, 径向距离为36 km)的速度剖面(图10b), 也可以看出, 离雷达约27~28 km内近地面风力较弱, 为东北风, 风速为5 m/s, 岳阳北部地区地面有辐合线存在, 地面辐合线的抬升触发使飊线维持发展。距离雷达28~30 km处, 3~5 km高度处为强烈辐合, 中层辐合高层辐散, 抽吸作用明显, 上升运动剧烈。距离雷达30 km附近为该垂直环流的下沉支, 强烈的下沉气流形成猛烈的下击暴流, 带来了影响岳阳东部县市的短时强降水和雷暴大风。受其影响, 20时23分岳阳县中洲站出现了极大风速达36.9 m/s (12

级)的极端大风, 创下岳阳有气象记录以来的大风极值。随后飊线向东快速移动, 大风影响岳阳县全境、岳阳市区以及临湘市南部, 历时1.5 h, 21时开始减弱, 21时30分东移出岳阳境内。

本次出现的极端大风, 发生在强垂直风切变环境下, 且有中层冷空气的卷入, 岳阳县境内深厚的中气旋、较强的下沉气流与高空动量下传相结合, 是岳阳县中洲站出现极端灾害性大风的重要原因。

### 4.3 短时强降水的回波特征

本次过程的强降水时段主要集中在5月15日15—22时, 强降水落区主要集中在岳阳市中北部地区, 其中临湘市强度最大。从5月15日19时13分组合

反射率(图11a)可见,影响岳阳市中北部地区的对流系统为多单体风暴,单体呈西南—东北向排列并向东北方向移动,具有明显的“列车效应”。从5月15日19时13分反射率垂直剖面(图11b)可见,多个单体具有

回波悬垂的特征,且单体的质心低,加上临湘东部山区地形的增幅作用,在临湘造成较长时间的强降水,15—22时临湘全市7小时累计降水量普遍>50 mm, >100 mm的有7个站, >150 mm的有2个站。

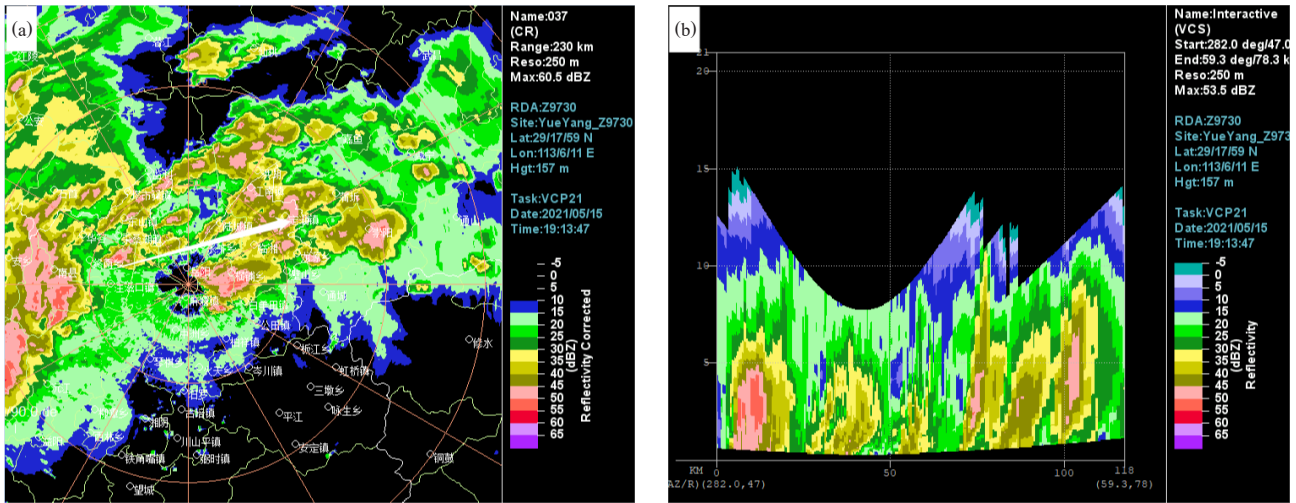


图11 2021年5月15日19时13分岳阳雷达组合反射率(a)和沿图a中白色箭头的反射率垂直剖面(b)

Fig. 11 Combined reflectivity (a) of Yueyang Radar and reflectivity vertical section (b) along the white arrow in Fig. 11a at 19: 13 BT on May 15, 2021

临湘的短时强降水是在“上干下湿”环境下转为“整层高湿”环境的条件下发生的,且临湘站处于低层强辐合、高层强辐散的区域,具备产生“列车效应”的环流配置,同时西南风从洞庭湖上源源不断地向其东北方向的临湘提供了水汽和不稳定能量,加上临湘东部山区地形的增幅作用,导致临湘境内出现了大范围大暴雨。此次强对流天气过程,前期的对流活动以冰雹和雷暴大风为主,后期以短时强降水为主,这种强对流天气类型的演变与水汽、温度等气象要素在垂直方向的层结变化有密切关系。

## 5 极大风与强降水中心位置偏差分析

从图1可知,本次过程的强降水中心出现在岳阳市东北部的临湘市龙源站,而极大风速中心出现在岳阳县西部的中洲站。根据前文分析可以发现,极大风速与强降水中心位置不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件偏差有关。

水汽辐合的强中心在岳阳市东北部的临湘市,特别是5月15日14时之后水汽通量复合中心明显加强,湿层增厚扩展到600 hPa附近,且高层辐散与低层辐合形成抽吸作用,是临湘市产生暴雨的主要原因之一。除此之外,地形的增幅作用也是临湘市产生强降水的重要原因。位于临湘市东侧龙源乡的药姑山,海拔高度为1260 m,药姑山区范围广,坡度平缓,非常有利于气流的上升运动,加之洞庭湖蒸发的水汽正好由西南气流输送到药姑山区,因此临湘成为岳阳市暴雨最

易产生和暴雨强度最大的区域<sup>[24]</sup>。本次过程西南气流强盛,水汽经洞庭湖进一步增强,源源不断地向东北方向输送,持续的上升运动和水汽辐合导致临湘龙源成为强降水的中心。

岳阳县中洲站出现极端灾害性大风的主要原因是强的垂直风切变和热力不稳定条件下,中层有冷空气的卷入,且有深厚的中气旋、较强的下沉气流与高空动量下传相结合。同时,极端大风也与洞庭湖大型水体有重要关系。由于中洲西靠洞庭湖,湖面摩擦力小,从益阳沅江境内生成的强风暴在湖面上快速东移,长驱直入进入中洲境内,加上湖陆热力的差异,对流在进入中洲境内时进一步激发和增强,故中洲站为本次过程极大风中心。风暴上岸后,在继续东移过程中由于能量的释放和陆地下垫面摩擦力增大,风力逐渐减弱。

## 6 结论

分析天气系统演变及其高低层配置、水汽条件、垂直运动、层结条件等对强对流天气潜势预报有指示意义;分析雷达回波特征对识别风暴发展阶段、强对流类型及发布预警信号有指示意义。

1) 本次强降水、强对流天气过程是发生在欧亚中高纬两槽一脊的环流形势下,南支槽、低涡、切变线、冷空气渗入地面倒槽等是天气尺度影响系统。水汽的强烈输送和辐合、“上干冷、下暖湿”的不稳定层

(下转53页)

## 参考文献

- [1] 杨昂, 孙波, 赵其国. 中国酸雨的分布、成因及其对土壤环境的影响[J]. 土壤, 1993, 31(1): 13-18.
- [2] 王德春, 赵殿五. 中国酸雨概述[J]. 世界环境, 1998(2): 8-10.
- [3] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.
- [4] 中国生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中国生态环境部, 2021.
- [5] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 1032-1042.
- [6] 刘新春, 何清, 钟玉婷. 新疆城市酸雨分布特征及变化趋势分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 115-120.
- [7] 李晓燕, 钟玉婷, 侯俊. 新疆降水pH值得时空分布及变化趋势初步分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(5): 24-26.
- [8] 王彩萍. 伊宁市大气环境污染特征及防治对策[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(4): 64-67.
- [9] 尚毅林, 迟洪蕾. 伊宁市空气质量特征分析及对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(12): 55-58.
- [10] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [11] 张山清, 任泉, 刘振新, 等. 乌鲁木齐市城区大气降水酸碱度及电导率变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(2): 11-14.
- [12] 苗运玲, 张军, 郑玉萍, 等. 乌鲁木齐市酸雨变化特征及其与气象因子的关系[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 62-68.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.

- [14] 李帅, 刘丹, 于成龙, 等. 1991—2012年黑龙江省酸雨变化特征[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 105-111.
- [15] 乔晓燕, 尹佳莉, 李林, 等. 2003—2015年北京市观象台酸雨特征及长期趋势分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(4): 52-57.
- [16] 王桂芳, 何云, 马强, 等. 固原市酸雨变化特征及影响因素分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(2): 31-36.
- [17] 蒲维维, 张小玲, 徐敬, 等. 北京地区酸雨特征及影响因素[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 464-471.
- [18] 宋佰春, 李斌, 徐传凯. 2003—2007年日照市酸雨变化特征与成因研究[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(6): 49-52.
- [19] 李倩, 杨旭, 马梁臣, 等. 长春市酸雨变化特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(4): 48-55.
- [20] 李亚军. 2006—2019年山西省酸雨变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 134-138.
- [21] 张良玉, 魏丽欣, 赵春雷, 等. 2012—2017年京津冀区域酸雨变化特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 47-54.
- [22] 王苗, 吕槐槐, 王凯, 等. 武汉市酸雨变化特征及影响因素分析[J]. 气象, 2019, 45(2): 282-289.
- [23] 于文革, 梁铁军, 孙莹, 等. 丹东市酸雨特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(4): 77-82.
- [24] 黄磊, 王庆国. 广西南宁市酸雨特征及影响因素分析[J]. 贵州气象, 2014, 38(6): 52-54.

(编辑: 郑秋红)

(上接45页)

结、强的垂直风切变是此次强对流天气的有利环境条件。地面辐合线是主要触发机制, 强对流触发后, 在850 hPa切变线南侧, 低空急流出口区自西向东组织化发展。

2) 冰雹发生时雷达回波具有三体散射特征, VII跃增; 雷暴大风发生时为飚线中内嵌超级单体, 含有深厚的中气旋, 加上动量下传共同作用, 有利于出现极端灾害性大风; 而短时强降水发生时“列车效应”特征明显, 低质心、高效率的回波有利于强降水的发生。另外, “V”型缺口、弱回波区、中气旋、中层径向辐合(MARC)等特征对分析风暴发展所处阶段及发布强对流天气预警具有重要指示意义。

3) 极端大风与强降水中心出现位置的不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件差异有关, 与洞庭湖大型水体和临湘东部山区地形的阻挡作用有较大关系。洞庭湖水体对强对流的激发作用使得洞庭湖东部沿岸一带强对流更为剧烈, 导致出现极端大风; 洞庭湖水汽随着西南气流源源不断地向东北方向输送, 以及临湘东部山区地形的阻挡对临湘市出现强降水中心有一定的增幅作用。洞庭湖水体对岳阳市强对流的影响作用有待进一步分析和研究。

## 参考文献

- [1] 姚蓉, 唐佳, 兰明才, 等. 一次混合强对流天气的环境条件及演变特征分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 217-226.
- [2] 唐佳, 姚蓉, 王晓雷, 等. 2015年春季湖南两次混合对流天气过程对比分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 250-259.
- [3] 王起唤, 姚蓉, 周长青, 等. 湖南春夏季混合强对流天气过程对比分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(19): 65-74.
- [4] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气

- 象, 2012, 38(2): 164-173.
- [5] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [6] 叶成志, 唐明晖, 陈红专, 等. 2013年湖南首场致灾性强对流天气过程成因分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 1-10.
- [7] 章丽娜, 王秀明, 熊秋芬, 等. “6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 1-9.
- [8] 周后福, 余政, 袁业畅, 等. 2013年4月29日皖西南强风暴天气雷达资料分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 80-86.
- [9] 王丛梅, 俞小鼎. 2013年7月1日河北宁晋极端短时强降水成因研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 105-116.
- [10] 翟丽萍, 农孟松, 屈梅芳, 等. 相同大尺度环流背景下不同类型强对流天气个例分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(4): 346-353.
- [11] 许爱华, 马中元, 叶小峰. 江西8种强对流天气形势与云型特征分析[J]. 气象, 2011, 37(10): 1185-1195.
- [12] 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 2011, 37(7): 795-801.
- [13] 庞古乾, 伍志方, 叶爱芬, 等. 珠三角地区前汛期强对流潜势预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 564-568.
- [14] 马明, 林锦冰, 傅云飞. 一次强对流活动中雷电与降水廓线特征研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 797-805.
- [15] 姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 207-219.
- [16] 卢冰, 史永强. 2012年7月中旬克拉玛依罕见强对流天气的数值模拟分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 949-956.
- [17] 吴丹娃, 潘益农, 吴林林, 等. 2011年6月23日沿淮强对流天气中尺度辐合特征模拟研究[J]. 热带气象学报, 2013, 29(4): 672-680.
- [18] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [19] 孙继松. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [20] 许爱华, 陈云辉, 陈涛, 等. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 197-206.
- [21] 盛杰, 毛冬艳, 蓝渝. 春季我国冷锋后部的高架雷暴天气特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058-1065.
- [22] 俞小鼎. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [23] 丁青兰, 刘武, 朱晓虎, 等. 一次飚线天气过程多普勒雷达产品分析及临近预报[J]. 气象科技, 2008, 36(2): 160-163.
- [24] 喻长建, 陈姣荣, 喻宇. 近3 a岳阳暴雨时空分布规律及形势特征分析[J]. 贵州气象, 2019, 43(4): 46-50.

(编辑: 郑秋红)