

鲁亚斌,李华宏,闵颖,等,2018.一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析[J].气象,44(5):645-654.

一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析^{*}

鲁亚斌 李华宏 闵颖 胡娟 许迎杰 杨竹云

云南省气象台,昆明 650034

提 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析资料及常规观测资料与雷达、卫星等非常规观测资料,综合分析了 2014 年 6 月 6 日云南暴雨过程的天气成因及中尺度对流系统特征。结果表明:500 hPa 前倾槽、700 hPa 切变线及地面冷锋是此次暴雨过程的天气尺度影响系统;高能高湿的对流不稳定层结、明显的垂直风向切变是强对流天气形成的有利条件;在 Q 矢量辐合区内多个 β 中尺度对流系统(MCS)发生发展,短时强降水主要出现在 MCS 移动方前沿对流活跃的云顶亮温(TBB)等值线密集区,雨强变化与 TBB 等值线梯度变化密切相关;多普勒雷达及地闪资料显示多个 γ 中尺度对流系统是强对流暴雨产生的直接影响系统,雷暴易发生于回波强度在 35~45 dBz、回波顶高超过 10 km 的区域,中尺度辐合线、第二类 γ 中尺度辐合区附近负地闪密集区与短时强降水、雷暴天气有很好的对应关系。

关键词: 强对流暴雨,诊断分析,MCS,多普勒雷达特征

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.005

Analysis of Mesoscale Weather System Characteristics of a Severe Convective Rainstorm in Yunnan

LU Yabin LI Huahong MIN Ying HU Juan XU Yingjie YANG Zhuyun

Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

Abstract: Based on the NCEP/NCAR reanalysis data, conventional observation data, Doppler radar data, meteorological satellite data and ground lightning observation data, the synoptic causes and the mesoscale weather system characteristics of a severe convective rainstorm which occurred in Yunnan on 6 June 2014 are investigated. The results indicate that the forward-tilted trough at 500 hPa, the shear line at 700 hPa and the ground cold front were the crucial synoptic scale systems in this case. High energy and high humidity convective unstable stratification, and obviously vertical wind direction shear were the favorable conditions for the formation of severe convective weather. Many meso- β scale convective systems occurred and developed in the Q vector convergence field. Short-time heavy rainfall often appears around the area with the densest black body temperature (TBB) contour by the side of meso- β scale convective systems moving direction. The variation of rainfall intensity is closely related to the variation of TBB contour gradient. By analyzing the Doppler radar and ground lightning data, we found that meso- γ scale convective system was the direct influence system for the severe convective rainstorm in this case. Thunderstorm usually occurs in area where the echo intensity is between 35—45 dBz and the echo height is more than 10 km. The mesoscale convergence line and the densest negative lightning flash area near the second kind of meso- γ scale convergence zone correspond to short-time heavy rainfall and thunderstorm weather.

Key words: severe convective rainstorm, diagnostic analysis, mesoscale convective system (MCS), characteristics of Doppler weather radar

^{*} 国家自然科学基金项目(41565004)和云南省科技惠民专项(2016RA096)共同资助

2017 年 2 月 27 日收稿; 2018 年 3 月 1 日收修定稿

第一作者:鲁亚斌,主要从事天气预报及强对流天气研究。Email:lybll65@163.com

引 言

暴雨是造成洪涝、滑坡和泥石流等地质灾害的重要气象诱因,也是天气预报业务的难点和重点。影响暴雨的天气系统较为复杂,其中中低层切变线暴雨是较为重要的一种类型,国内气象学者已有较丰富的研究成果,指出中低层切变线往往受高空槽引导南移,配置不稳定层结和垂直风切变引发强对流和暴雨天气(黄明策等,2010;王晓芳等,2011;孙兴池等,2013;何光碧和师锐,2014)。对云南切变线暴雨的研究已有一些积累,许美玲等(2011)和张腾飞等(2013)指出地面冷锋与 700 hPa 切变线共同作用是云南暴雨过程和强对流天气的重要类型,据统计造成云南短时强降水的天气类型中,冷锋切变型占 81%。以往的研究揭示了冷锋切变的大尺度环流及水汽输送和一些中尺度特征(何华和孙绩华,2003;张秀年和段旭,2006;鲁亚斌等,2005;2006;尹丽云等,2012;周泓等,2015),然而对冷锋切变型暴雨中强对流和短时强降水的中尺度特征研究还不够丰富,随着卫星观测和多普勒雷达及地闪资料的业务应用,可以对暴雨特别是短时强降水天气的发生、发展进行深入研究,以利于提高暴雨及强对流天气的监测和预报预警能力。

2014 年 6 月 6 日云南受冷锋和切变线共同影响,出现年内首次全省性暴雨过程,云南雨季随之全面开始,暴雨区集中分布在丽江市、楚雄州、昆明市、玉溪市、红河州一带,暴雨中心滇中地区的易门县、禄丰县和元江县出现大暴雨,日雨量分别为 134.3、122.8 和 111.9 mm,另有 13 个县出现暴雨,强降水引发了局地洪涝和地质灾害,虽然云南省气象台短期预报发布了大雨重要天气消息,但雨量预报量级仍显得偏小,尤其是对强对流暴雨和短时强降水的落区预报存在较大偏差,因而借助雷达和卫星等非非常规观测资料对此类强对流灾害性天气进行深入分析变得十分必要。本文应用 NCEP/NCAR 逐 6 h $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、常规观测资料、FY-2E 卫星观测资料及 CINRAD-CC 雷达回波资料和闪电定位仪数据,通过诊断分析,深入分析冷锋切变型暴雨天气成因及强对流天气的中尺度特征,进一步认识强对流天气的前兆信号,为该类灾害性天气的业务预警提供借鉴。

1 暴雨过程概况

2014 年春季及初夏云南出现异常高温干旱,雨季开始期普遍偏晚至特晚,直至 6 月 6 日开始伴随着首场强降水在云南出现才正式进入雨季。2014 年 6 月 6 日 08 时至 7 日 08 时(北京时,下同),云南国家级气象观测站出现 3 站大暴雨、13 站暴雨、16 站大雨、21 站中雨和 38 站小雨;区域自动站监测出现大暴雨 24 站、暴雨 172 站、大雨 318 站、中雨 391 站、小雨 917 站,暴雨雨带呈西北—东南向分布(图 1a),降水主要时段集中在 6 日 20 时至 7 日 08 时,分析滇中暴雨中心小时雨强看出(图 1b),暴雨区主要为对流性降水,伴有短时强降水,降水最大为禄丰县国家气象观测站,小时雨量达 92.9 mm,普查 1951—2013 年以来云南的国家气象观测站小时雨量,最大为江城 99.7 mm,而禄丰站的小时雨量历史极值为 51.9 mm,此次过程突破了禄丰站历史纪录,可见降雨强度之大。另外,出现大范围雷暴天气(图 1c),对比强降水分布与地闪活动(图 1d)看出,地闪回击数大值区内雷暴密集与暴雨区对应较好,这种特征与张义军等(1995)和周筠君等(1999)研究指出强烈的地闪活动与对流性强降水有很好的相关性和较好对应关系的结论相符合。

2 主要影响天气系统

2014 年 6 月 6 日 08 时 500 hPa 形势图上,内蒙古中部到四川西北部有一低槽,温度槽落后于高度槽,青藏高原东部为槽后脊前西北气流并有一 -8.0°C 的冷平流区,14 时高空槽快速东移,到 20 时移过 110°E ,形成前倾槽形势,云南比湿为 $2\sim 4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为槽后干冷西北气流控制,表明有干侵入。700 hPa 上,6 日 08 时川滇之间有一条西北—东南向切变线位于云南东北部金沙江流域,14 时后切变线开始南压西移,20 时切变线移到滇中维持少动,云南比湿为 $12\sim 14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,具备产生强降水的水汽条件,切变线前方为暖湿气团、后部为冷气团,两侧有 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的温差,7 日 08 时切变线减弱。地面冷锋 6 日 08 时位于滇东,14 时移进滇中,17 时全面影响到滇西北东部、滇中及滇东南一带,之后向西移到哀牢山东部停止,7 日 08 时明显减弱(图 2)。

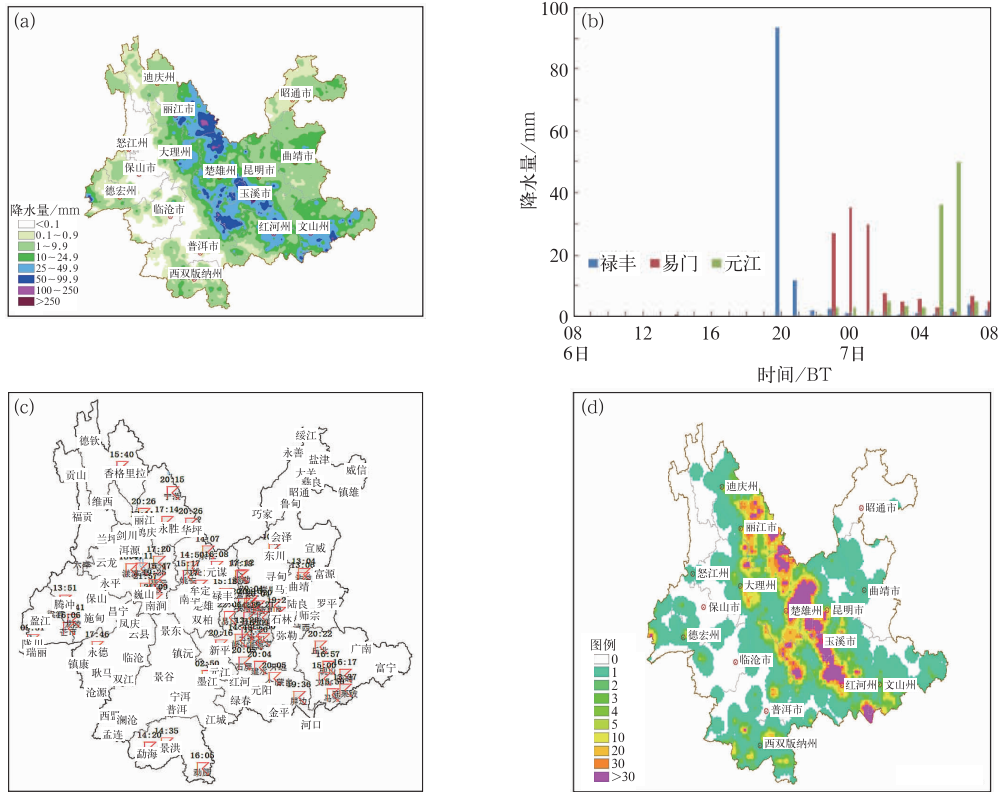


图 1 2014 年 6 月 6 日 08 时至 7 日 08 时区域站雨量(a)，暴雨区代表站小时雨量(b)，雷暴分布(c)，和地闪回击(d,单位:次·km⁻²)

Fig. 1 Accumulated precipitation of regional automatic station (a), temporal evolution of 1 h accumulated precipitation at typical station in rainstorm area (b), thunderstorm (c), and lightning return stroke (d, unit: times · km⁻²) from 08:00 BT 6 to 08:00 BT 7 June 2014

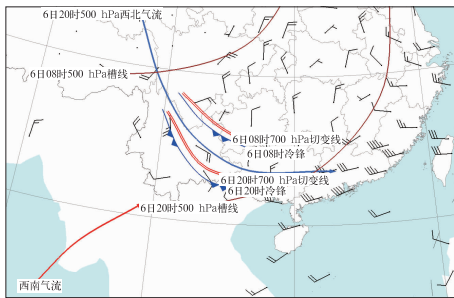


图 2 2014 年 6 月 6 日天气形势综合配置图 (风矢为 6 日 20 时 700 hPa 风场)

Fig. 2 Integrated configuration of weather situation at 20:00 BT 6 June 2014 (700 hPa wind field, wind bar)

在 500 hPa 干冷西北气流背景下,地面冷锋及 700 hPa 切变线共同影响,造成此次云南暴雨天气过程,强降水落区与 700 hPa 切变线和冷锋走向一致,此次暴雨过程中切变线与冷锋没有越过哀牢山,

持续时间 12 h 左右,没有低空急流参与,因而降水强度虽大但持续时间短。

3 物理量诊断分析

强对流暴雨天气的发生主要是由充足的水汽条件、强烈的大气不稳定层结和动力抬升运动综合作用形成,在满足暴雨发生的必要水汽条件后,强大的上升运动和强烈的大气不稳定层结尤为重要。

3.1 水汽条件

2014 年 6 月初孟加拉湾季风低压建立,已出现活跃的季风云系,云南水汽条件明显改善,6 月 6 日 20 时 700 hPa 上云南比湿达 12~14 g · kg⁻¹, 850 hPa 上云南比湿高达 14~16 g · kg⁻¹,已经具备强降水的必要水汽条件。在对流层 700 hPa 水汽输送及辐合在降水机制上起着重要作用,应用

NCEP 再分析资料计算水汽通量矢量和水汽通量散度分析发现,水汽通量矢量清楚地反映出水汽输送主要是孟加拉湾季风低压前部的西南气流,在云南西南方向水汽通量高达 $12\sim 16\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,从水汽通量散度时间演变看(图 3a),6 日 08 时 700 hPa 切变线没有大举南下时,云南水汽辐合很弱,只在切变线附近的金沙江流域有 $-5\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽辐合,随着下午切变线南下,水汽辐合在切变线附近明显增强,至 20 时暴雨开始发展时,水汽通量散度已快速增强至 $-35\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,7 日 02 时(图 3b)水汽通量散度达最强至 $-65\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,水汽辐合区与切变线走向一致,暴雨就发生在水汽通量散度辐合区内。

3.2 上升运动

在达到强降水必要的水汽条件后,强烈的上升

运动必不可少。已有研究表明,非地转湿 Q 矢量散度对诊断中尺度垂直运动及暴雨有较好的物理意义,并取得较好效果(姚秀萍和于玉斌,2000;李英等,2002;岳彩军等,2005;鲁亚斌等,2009)。计算非地转湿 Q 矢量散度分析得出,在本次暴雨过程中湿 Q 矢量散度辐合区同样经历了由弱到强的演变(图 4a)。在暴雨出现前,湿 Q 矢量散度辐合区迅速增长,到 6 日 20 时(图 4b)700 hPa 湿 Q 矢量散度场加强为一条中尺度的带状辐合区,滇中暴雨区处于湿 Q 矢量散度辐合中心附近,湿 Q 矢量散度中心值达 $-8\times 10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$, Q 矢量散度激发次级环流,辐合区对应次级环流的上升气流区,可见云南中部处于较强的气流上升区,强烈的上升运动为对流的发生发展提供了有利的动力条件,极有利于触发中尺度对流系统 MCS 发生发展,实况显示暴雨区多个 MCS 发生发展,暴雨区与湿 Q 矢量散度辐合大值区有较好的对应关系。

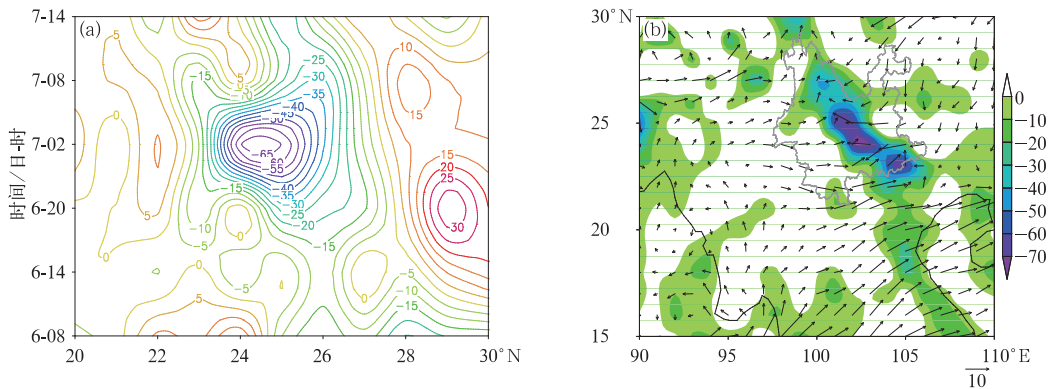


图 3 (a) 过暴雨区 700 hPa 水汽通量散度(等值线,单位: $10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)沿 102°E 经向时间演变, (b)2014 年 6 月 7 日 02 时 700 hPa 水汽通量矢量和水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)合成
Fig. 3 (a) Time evolution of 700 hPa water vapor flux divergence (contour, unit: $10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) across rainstorm area along 102°E , (b) composite of 700 hPa water vapor flux vector and water vapor flux divergence (shaded, unit: $10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) at 02:00 BT 7 June 2014

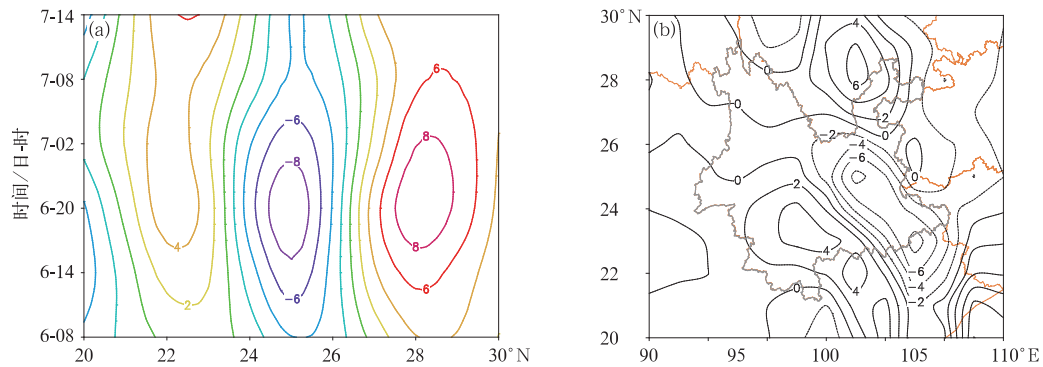


图 4 (a) 过暴雨区 700 hPa 湿 Q 矢量散度(等值线,单位: $10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)沿 102°E 经向时间演变, (b)2014 年 6 月 6 日 20 时 700 hPa 湿 Q 矢量散度(等值线,单位: $10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)分布

Fig. 4 (a) Time evolution of 700 hPa wet Q vector divergence across rainstorm area along 102°E (contour, unit: $10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$), (b) distribution of 700 hPa wet Q vector divergence (contour, unit: $10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$) at 20:00 BT 6 June 2014

3.3 能量及大气稳定度条件

云南雨季平均在 5 月中下旬陆续开始,2014 年春季及初夏云南出现异常高温干旱,雨季开始期明显偏晚,5 月 1 日至 6 月 5 日持续高温少雨天气,多地最高气温先后刷新了历史纪录,低层大气已积累了大量能量,随着 6 月初孟加拉湾季风爆发,云南湿度猛增,大气不稳定环境明显改善。

K 指数能表征大气稳定度及中低层水汽含量和饱和程度,K 指数高值区综合反映出该区域的气团较周围大气暖湿而不稳定,利于该区域产生较强对流及降水。在业务工作中发现,云南区域内 K 指数对雷暴天气的预报指示意义较好,分析 K 指数的演变,发现在此次强降水前的 08 时,云南 K 指数就高达 $34\sim 38^{\circ}\text{C}$,已达到成片雷雨指标($K>35^{\circ}\text{C}$),14 时 K 指数增长到 $36\sim 40^{\circ}\text{C}$,20 时(图 5a)达最强,K 指数高达 $36\sim 44^{\circ}\text{C}$ 。另在 700 hPa 上 θ_{se} 场(图略)云南暴雨区处于高能湿舌前端 θ_{se} 锋区前方暖区一侧,20 时 θ_{se} 值高达 $351\sim 357\text{ K}$,云南已处于高能高湿的环境中。重点分析主要暴雨区内位于滇中的昆明探空站 $T\text{-ln}p$ 图(图 5b)看出,在暴雨全面发展前,昆明站已转为对流性不稳定层结,CAPE 值达到 $1050\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,且 $\theta_{\text{se}500}-\theta_{\text{se}800}$ 为 -9°C ;风矢图上,700 hPa 是东南风为暖湿层,高层 500~400 hPa 为偏北风表明有干冷平流入侵,低层湿而中高层干冷,上层 300~200 hPa 风向顺转为偏西风,风向垂直切变明显,这种配置结构十分有利于强对流发生,在冷锋及切变线触发下,强大的不稳定能量得以释放,沿冷锋切变线有多个 MCS 对流云团生成发展,这是此次强对流暴雨伴随强烈雷暴的最重要原因。

4 地面辐合线

孙继松和陶祖钰(2012)指出地面辐合线是触发对流的重要因子,地面辐合线的运动与雷暴移动方向一致;徐珺等(2014)、孙建华等(2015)、孔凡超等(2016)研究发现地面辐合线在中尺度对流系统的触发和维持方面起着重要作用。为此通过跟踪经过观测质量控制的地面自动站风场(其中风速的质量控制采用界限值检查、范围值检查、内部一致性检查和持续性检查等方法,风向的质量控制采用界限值检查、持续性检查等方法)来进一步认识地面辐合线对中尺度对流系统的触发作用。2014 年 6 月 6 日 08—14 时云南几乎没有对流活动,14 时(图 6a)开始,地面偏东风携带的冷空气沿两个方向向暴雨区推进,一支沿四川南部的金沙江河谷向丽江东部移来,另一支从云南东部向西推进到楚雄、昆明、玉溪、红河一带,由此形成的辐合线后部对应冷平流,其前方为暖湿区,地面辐合线触发对流发生,在其附近有对流泡生成,17—20 时(图 6b,6c),丽江的地面辐合线向南移动,而滇中的地面辐合线向西移动,此时段对流发展明显,已有降水出现,地面辐合线维持到 7 日 05 时(图 6d),05 时后地面辐合线断裂破碎趋于减弱,08 时后消失。由于受西北—东南走向的哀牢山阻挡,地面辐合线未能越过哀牢山,但在地面辐合线西移过程中,其后部的偏东气流沿哀牢山东坡爬升,哀牢山东坡的地形强迫抬升同时加强了对流发展。可见地面辐合线先于 700 hPa 切变线影响云南,是触发对流系统生成的重要因素,随后南下的切变线加强并维持了对流活动,造成强降水天气。

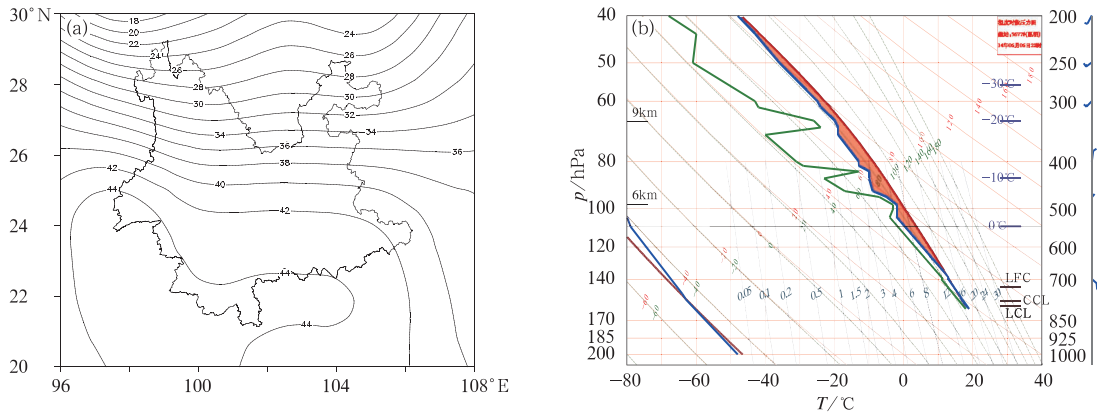


图 5 2014 年 6 月 6 日 20 时 K 指数分布(a,单位: $^{\circ}\text{C}$)和昆明探空站 $T\text{-ln}p$ 图(b)

Fig. 5 K-index (a, unit: $^{\circ}\text{C}$) and $T\text{-ln}p$ at Kunming Station (b) at 20:00 BT 6 June 2014

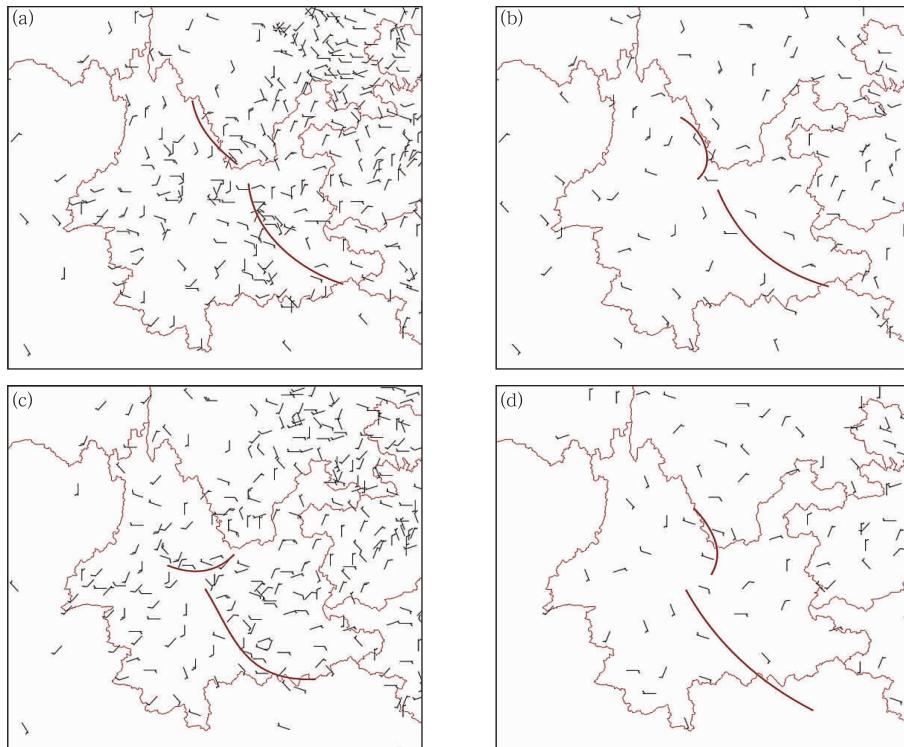


图 6 2014 年 6 月 6 日(a)14 时,(b)17 时,(c)20 时,(d)7 日 05 时地面实测风场
(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 实线为地面辐合线)

Fig. 6 Observed wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on surface at 14:00 BT 6 (a),
17:00 BT 6 (b), 20:00 BT 6 (c), 05:00 BT 7(d) June 2014
(Solid line indicates surface convergence line)

5 卫星云图的中尺度特征

在有利的天气环境条件下,强对流暴雨天气是中尺度天气系统造成的。卫星云图能体现出各种天气尺度系统的发生、发展和消亡过程。根据通用的 Orlandi(1975)尺度划分标准,中尺度天气系统从 2~2000 km。其中 200~2000 km 为 α 中尺度系统,20~200 km 为 β 中尺度系统,2~20 km 为 γ 中尺度系统。为便于在云图中确认中尺度对流系统,依据杨舒楠等(2017)的定义方法,定义 $\text{TBB} \leq -32^\circ\text{C}$ 为冷云罩, $\text{TBB} \leq -52^\circ\text{C}$ 为冷云区。本文通过分析 FY-2E 卫星逐时红外云图及反演的 TBB 资料,找出这次暴雨过程的中尺度对流系统。

2014 年 6 月 6 日下午,随着地面冷锋先期南下西移,受其触发,在锋面附近有多个对流单体生成。17 时位于丽江的 A 云团和位于楚雄的 B 云团发展迅速,云顶亮温下降,对流单体发展成 $\text{M}\beta\text{CS}$, $\text{TBB} \leq -32^\circ\text{C}$ 的冷云罩面积约 $3.0 \times 10^4 \sim 4.9 \times$

10^4 km^2 , A、B 云团都向南发展移动, A 云团最低云顶亮温 -52°C ,冷云区位于云团西南部边缘, B 云团最低云顶亮温 -61°C ,冷中心位于云团南部边缘(图 7a)。到 19 时, $\text{TBB} \leq -32^\circ\text{C}$ 的冷云罩面积进一步增大, A、B 云团云顶亮温急速下降到 -57 和 -71°C (图 7b)。在两个 $\text{M}\beta\text{CS}$ 南移方向的前沿 TBB 等值线密集区梯度最大处产生了短时强降水, 18—19 时丽江市宁蒗县宁利乡小时雨量为 55 mm, 19—20 时楚雄市禄丰县大监站小时雨量 92.9 mm, 成为其小时雨量历史极值。同一时期位于玉溪市的 $\text{M}\beta\text{CS}$ 对流云团 C 和位于红河州的 $\text{M}\beta\text{CS}$ 对流云团 D 也在发展,但移动不明显,呈准静止状态,云顶亮温分别为 -52 和 -56°C ,且都处于 $\text{M}\beta\text{CS}$ 云团靠中心的部位,但 TBB 等值线梯度不如 A、B 云团大,虽然出现雷阵雨,但小时雨量只在 5~10 mm,雨强不算太大。

20 时后(图 7d, 7e),随 700 hPa 切变线南移到滇中一线,中尺度对流系统最终被组织起来。A 云团缓慢发展, B 云团继续南移发展, $\text{TBB} \leq -32^\circ\text{C}$ 的冷云盖面积继续增大,其前沿的 TBB 密集区南移进

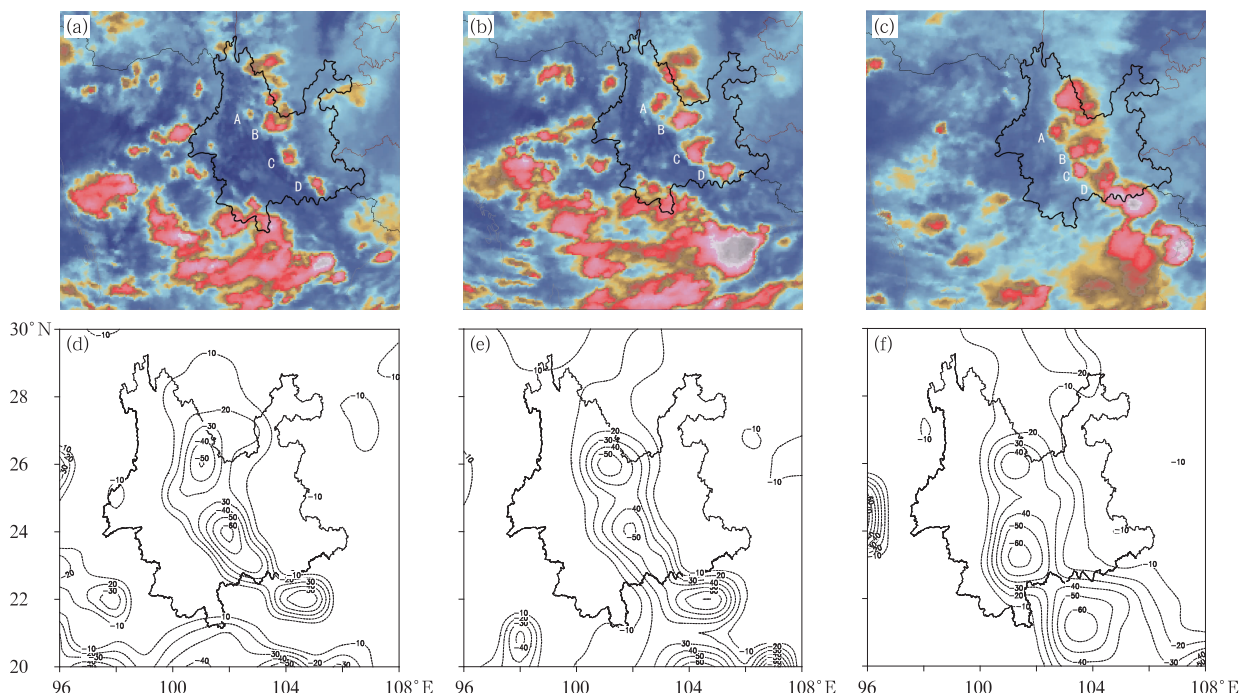


图 7 2014 年 6 月(a)6 日 17 时,(b)6 日 19 时,(c)7 日 00 时 FY-2Z 红外云图和 (d)6 日 20 时,(e)6 日 23 时,(f)7 日 04 时 TBB(单位: °C)分布

Fig. 7 Infrared cloud images of FY-2E at 17:00 BT 6 (a), 19:00 BT 6 (b), 00:00 BT 7 (c), and TBB (unit: °C) at 20:00 BT 6 (d), 23:00 BT 6 (e), 04:00 BT 7 (f) June 2014

入玉溪市北部的易门县, $M\beta CS$ 对流云团边缘整齐, 到 23 时, 各个 $M\beta CS$ 都相对独立, 但都处于明显发展期, 最低云顶亮温多降低到 $-70^{\circ}C$ 左右, 冷云罩面积增大, TBB 梯度加大, 此期间强降水全面发展, 强降水面积增大, 到 7 日 00 时(图 7c), 冷锋切变附近的 $M\beta CS$ 基本连为一体, 最终被组织成一条西北—东南向的中尺度对流系统, 发展到成熟阶段并维持了 2 h, 从快速发展到成熟期间, 频繁出现短时强降水, 如暴雨中心的易门县大监站出现连续 3 h 的短时强降水, 22 时小时雨量为 26.5 mm, 23 时为 34.9 mm, 7 日 00 时为 29.6 mm, 对照此阶段雨量分析看出, $M\beta CS$ 的 $TBB \leq -52^{\circ}C$ 的冷云区范围与暴雨区对应较好。7 日 02 时后带状对流系统分裂, 云顶亮温升高, 冷云罩面积减小, 对流系统总体有所减弱, 03 时后虽然带状对流系统北段分裂减弱, 但南段 C、D 云团合并后(图 7f), 在其结合部 TBB 等值线密集区梯度大处出现短时强降水, 云团合并使另一暴雨中心的玉溪市元江县 7 日 04 时及 05 时出现小时雨量分别为 35.8 和 49.7 mm 的短时强降水。

综上所述, 冷锋触发不稳定能量爆发, $M\beta CS$ 发生发展, 切变线进一步发展加强了 $M\beta CS$, 最终组织

成中尺度对流系统, 从而造成强降水天气, $M\beta CS$ 的 $TBB \leq -52^{\circ}C$ 的冷云区范围与暴雨对应较好。强对流暴雨易发生在 TBB 等值线密集区梯度最大处, 短时强降水易发生在 $M\beta CS$ 移动方前沿的对流活跃区, 对流云团最低云顶亮温愈靠近云团边缘, TBB 等值线梯度愈大, 其移动发展方向前沿的区域与短时强降水区域对应较好, 雨强变化与 TBB 等值线梯度变化密切相关。

6 多普勒雷达回波特征与地闪活动

卫星云图能较好地追踪 α 中尺度及 β 中尺度的 MCS, 但对于 γ 中尺度的 MCS, 由于其时空尺度更小, 目前卫星的时空分辨率还难以对其进行追踪。多普勒雷达是目前比较先进的高灵敏度的大气探测设备, 它除了能够提供降水粒子的反射率因子(强度)的大小, 还提供了降水粒子沿雷达径向的运动信息, 对揭示云体内部的中小尺度天气系统的活动具有明显的优越性。另外闪电定位仪观测资料也投入业务应用, 为对流系统的追踪又多了一种有利工具。分析云南 6 部 CINRAD/CC 多普勒天气雷达反射

率因子拼图资料及单部雷达体扫资料综合看出, 2014 年 6 月 6 日下午随冷锋南下, 锋线附近出现分散的对流回波, 并沿锋线逐步组织及发展, 丽江东南部金沙江沿岸的对流单体率先发展起来, 从 6 日 14 时丽江探空站测风(图略)看出, 500~300 hPa 都为西北气流, 风暴承载层平均风向为西北风, 到 20 时昆明探空站测风也显示出风暴承载层平均风向为偏北风, 由于对流单体生成后沿风暴承载层的平均气流移动(俞小鼎, 2012), 跟踪回波显示对流单体以 $30\sim 40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度朝东南方向移动, 并不断发展(图 8a)。伴随 700 hPa 切变线南移到滇中一线, 对流回波持续发展并加强, 最终被组织成带状多单体群(图 8b), 回波强度在 35~45 dBz, 最强回波 49 dBz 对应禄丰县 92.9 mm 的短时强降水, 强回波多集中在 4~6 km 高度, 回波结构质心低, 强回波多处于 0°C 层上下, 以液态水粒子为主, 因而降水效率高, 这是此次暴雨过程多短时强降水发生的重要原因; 另外, 强回波顶高普遍超过 12 km, 因而出现大范围强雷暴, 然而没有出现回波悬垂, 三体散射等结构, 这是没有出现冰雹的重要原因。

以昆明多普勒雷达体扫资料结合地闪资料, 重点分析滇中暴雨区中小尺度对流活动看出, 18 时楚雄境内径向速度场显示出存在风的辐合, 此时已有多个中小尺度对流泡生成, 回波强度在 35~45 dBz, 回波顶高超过 10 km, 相应出现负地闪且地闪次数呈增加趋势, 如暴雨中心禄丰县出现负地闪 645 次, 此时禄丰还未降水, 但指示出风暴处于强烈发展阶段。发展较强的中小尺度天气系统往往与风场的旋转或辐合有关, 辐合流场对积云对流活动有明显的增强作用(张培昌等, 2001)。可见回波还会发展, 19:01—19:46, 楚雄市禄丰县出现短时强降水, 19:28 径向速度场显示有一条 15 km 的 γ 中尺

度辐合线形成(图 9a 白色箭头所指), 此辐合线附近回波增强到 49 dBz 达最强, 回波顶高进一步抬升到 16 km, 此小尺度雷暴单体已发展成成熟, 对应负地闪呈密集的团状分布(图 9b), 19 时禄丰负地闪频数猛增到 1629 次达峰值, 可见强烈的上升气流触发不稳定能量迅猛释放使得地闪活动异常激烈, 形成负地闪密集区, 短时强降水和雷电就发生在中尺度辐合线附近。20 时后, 负地闪随强回波南移进入易门县, 到 22:02, 在易门县有多条 10~15 km 的 γ 中尺度辐合线形成, 到 22:43(图 9c)同样对应着一团负地闪密集区形成, 22 时易门负地闪多达 248 次, 7 日 01 时后负地闪频数有所下降。易门境内中尺度辐合线及负地闪密集区维持了 3 h, 对应易门出现雷电天气和连续 3 h 的短时强降水, 分析期间 22:43 过易门暴雨区的反射率因子垂直剖面图(图 9d)发现, 与雷暴对应的强降水回波顶高达 13 km, 而强降水回波达 45 dBz, 强回波分布在 6 km 高度以下, 显示出低质心结构特征, 因而降水效率高。7 日 01 时后, 易门的中尺度辐合线消失, 对应出现正地闪, 短时强降水转为一般性对流降水, 雷电活动也趋于减弱。

总体看来, 这次中尺度强对流系统造成暴雨过程, 期间伴随着多个 γ 中尺度辐合线及第二类 γ 中尺度辐合区活动, 回波强度在 35~45 dBz, 回波顶高普遍超过 10 km, 最高达 16 km 左右, 这是雷暴发生的重要雷达指标, 也可作为短时临近预报雷电预警的参考依据, 强回波区域质心低, 中尺度辐合线附近负地闪密集区对应短时强降水, 在短时临近预报时也可作为判识暴雨落区的预报指标。此外, 对流回波反射率因子减弱, 回波顶高下降到 10 km 以下, 负地闪锐减或其附近出现少量正地闪, 指示着对流系统减弱。

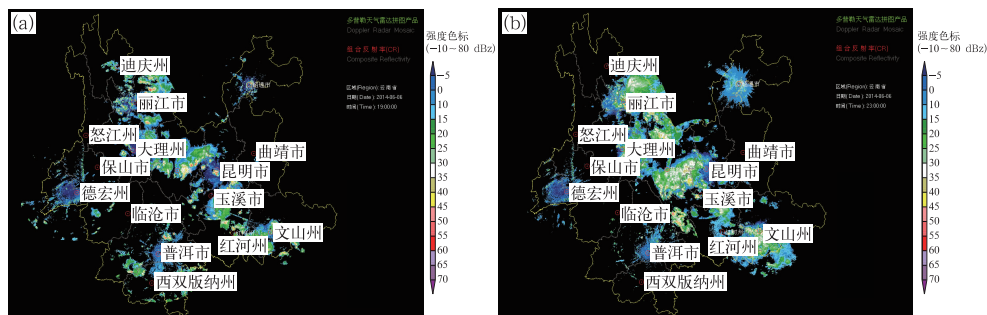


图 8 2014 年 6 月 6 日(a)19 时和(b)23 时云南省组合反射率因子雷达拼图

Fig. 8 Combined reflectivity in Yunnan at 19:00 BT (a) and 23:00 BT (b) 6 June 2014

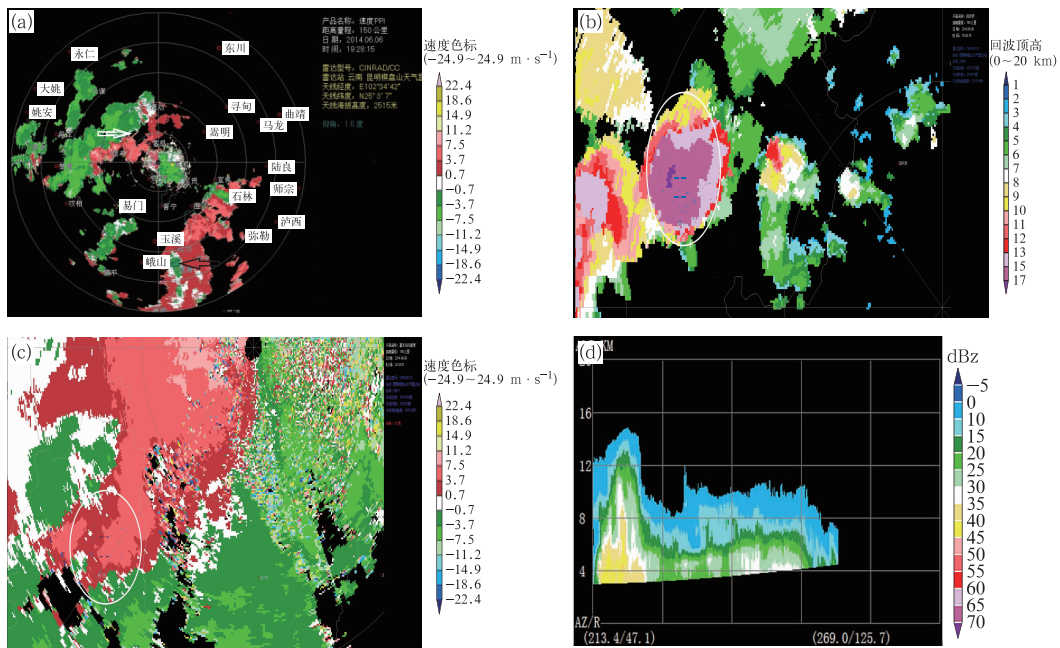


图 9 2014 年 6 月 6 日 19:28 昆明雷达 (a) 径向速度 (白色箭头所指为中尺度辐合线, 黑色箭头所指为第二类 γ 中尺度辐合区), (b) 回波顶高与地闪 (蓝色小横线为负地闪) 叠加 (椭圆圈内为禄丰暴雨区); (c) 6 日 22:43 昆明雷达径向速度与地闪叠加 (椭圆圈内为易门暴雨区), (d) 6 日 22:43 过易门暴雨区反射率因子垂直剖面

Fig. 9 (a) Radial velocity at Kunming at 19:28 BT 6 (White arrow is the mesoscale convergence, black arrow is the second kind of meso- γ scale convergence), (b) echo tops and ground flash at Kunming at 19:28 BT 6 (Oval circle is rainstorm at Lufeng, blue horizontal line is the negative lightning flash), (c) radial velocity and ground flash at Kunming at 22:43 BT 6 (Oval circle is rainstorm at Yimen), (d) rainstorm area vertical profile of reflectivity factor along Yimen at 22:43 BT 6 June 2014

7 结 论

(1) 500 hPa 前倾槽形势下, 地面冷锋及 700 hPa 切变线的共同作用引发此次云南强对流暴雨过程, 强降水落区与 700 hPa 切变线和冷锋走向一致。此次暴雨过程切变线与冷锋没有越过哀牢山, 系统移速快、持续时间短, 没有低空急流参与, 降水强度大但持续时间较短。

(2) 在满足暴雨必需的水汽条件下, 异常强的高能高湿环境及有利的垂直风切变配置促成强烈的对流不稳定层结, 地面冷锋、700 hPa 切变线的剧烈抬升触发不稳定能量释放形成强降水, 水汽通量散度及湿 Q 矢量散度辐合区与暴雨区对应较好。

(3) 卫星云图上多个 $M\beta CS$ 单体沿冷锋切变线

发生发展, 最终组织成带状中尺度对流系统, 从而造成强降水天气, $M\beta CS$ 的 $TBB \leq -52^\circ C$ 的冷云区范围与暴雨对应较好。短时强降水易发生在 $M\beta CS$ 移动方向前沿的对流活跃的 TBB 等值线密集区, 其移动发展方向前沿的区域与短时强降水区域对应较好, 雨强变化与 TBB 等值线梯度变化密切相关。

(4) 在 β 中尺度对流系统背景下, 多普勒雷达速度图上先后出现的多个 γ 中尺度对流系统如中尺度辐合线、第二类 γ 中尺度辐合区等, 是暴雨产生的直接影响系统。回波强度在 35~45 dBz, 回波顶高超过 10 km, 强回波集中在中层, 中尺度辐合线附近及第二类 γ 中尺度辐合区配置的负地闪密集区对应短时强降水和雷暴天气。

(5) 在业务预报中, 结合非常规观测资料的综合分析有助于提高强对流暴雨的临近预报水平, 如

地面辐合线触发 MCS 生成发展后,地闪观测资料与卫星雷达资料结合分析,在冷云区内中尺度辐合线、第二类 γ 中尺度辐合区附近负地闪密集区往往指示着暴雨落区。

参考文献

- 何光碧,师锐,2014. 三次高原切变线过程演变特征及其对降水的影响[J]. 高原气象,33(3):615-625.
- 何华,孙绩华,2003. 云南冷锋切变暴雨过程的环流及水汽输送特征[J]. 气象,29(4):48-52.
- 黄明策,李江南,农孟松,等,2010. 一次华南西部低涡切变特大暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象学报,68(5):748-762.
- 孔凡超,赵庆海,李江波,2016. 2013年7月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J]. 气象,42(5):578-588.
- 李英,张腾飞,郭荣芬,2002. 云南一次持续性暴雨过程的非地转湿 Q 矢量分析[J]. 南京气象学院学报,25(2):259-264.
- 鲁亚斌,郭荣芬,张腾飞,等,2005. 一次滇中暴雨中尺度对流系统特征分析[J]. 气象科学,25(4):376-384.
- 鲁亚斌,普贵明,赵宁坤,等,2009. “2006.10”云南严重秋季连阴雨水汽输送特征和湿 Q 矢量分析[J]. 气象科学,29(1):64-70.
- 鲁亚斌,张腾飞,徐八林,等,2006. 一次孟加拉湾风暴和冷空气影响下滇西大暴雨中尺度分析[J]. 应用气象学报,17(2):201-206.
- 孙继松,陶祖钰,2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象,38(2):164-173.
- 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[J]. 气象,41(5):533-543.
- 孙兴池,吴炜,周雪松,等,2013. 经向切变线暴雨落区分析[J]. 气象,39(7):832-841.
- 王晓芳,黄华丽,黄治勇,2011. 2010年5—6月南方持续性暴雨的成因分析[J]. 气象,37(10):1206-1215.
- 徐珺,杨舒楠,孙军,等,2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J]. 气象,40(12):1455-1463.
- 许美玲,段旭,杞明辉,等,2011. 云南省天气预报员手册[M]. 北京:气象出版社:102-109.
- 杨舒楠,路屹雄,于超,2017. 一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统及低层风场影响分析[J]. 气象,43(1):21-33.
- 姚秀萍,于玉斌,2000. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用[J]. 气象学报,58(4):436-446.
- 尹丽云,普贵明,张腾飞,等,2012. 滇东一次局地特大暴雨的中尺度特征和地闪特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),34(4):425-431,436.
- 俞小鼎,2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象,38(11):1313-1329.
- 岳彩军,寿宜萱,姚秀萍,等,2005. 中国 Q 矢量分析方法的应用与研究[J]. 高原气象,24(3):450-455.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社:284-381.
- 张腾飞,尹丽云,张杰,等,2013. 低纬高原地区雷电监测预警方法研究与应用[M]. 北京:气象出版社:43-51.
- 张秀年,段旭,2006. 云南冷锋切变型暴雨的中尺度特征分析[J]. 南京气象学院学报,29(1):114-121.
- 张义军,华贵义,言穆弘,等,1995. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析[J]. 高原气象,14(4):396-405.
- 周泓,杨若文,钟爱华,等,2015. 云南省一次切变冷锋型暴雨过程的中尺度对流系统分析[J]. 气象,41(8):953-963.
- 周筠君,郗秀书,张义军,等,1999. 地闪与对流性天气系统中降水关系的分析[J]. 气象学报,57(1):103-111.
- Orlanski I, 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes[J]. Bull Am Meteor Soc,56:527-530.