

沈新勇,张笑妍,黄伟,等.2023.初值场水汽含量对华南飑线升尺度增长过程的影响研究[J].暴雨灾害,42(6):628–639. SHEN Xinyong, ZHANG Xiaoyan, HUANG Wei, et al. 2023. Impact of initial water vapor on the upscale growing process of a squall line in South China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(6):628–639 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–241

初值场水汽含量对华南飑线升尺度增长过程的影响研究

沈新勇¹,张笑妍¹,黄伟²,盛杰³,李小凡⁴,翟国庆⁴

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044;2. 浙江省岱山县气象局,岱山 316200;3. 国家气象中心,北京 100081;4. 浙江大学地球科学学院,杭州 310027)

摘要:春夏季我国华南地区水汽充足,飑线可以在短时间尺度迅速增长。为探究水汽含量对飑线升尺度增长过程的影响,利用WRF模式对2020年5月11日华南地区的一次飑线进行数值模拟,分析华南飑线系统升尺度增长机制,并研究不同层次水汽的变化对其强度及结构的影响。分析显示此次飑线发生在“上干下湿”的不稳定层结中,存在高空急流与低层切变相互配合。模拟结果显示,前期广东省西南部的最大对流有效位能(MCAPE)较大,利于不稳定能量在此积累,同时此处的低层垂直风切变较大,飑线线性结构能更好地维持,随后南移与暖区对流合并,尺度进一步增长。水汽试验表明,MCAPE值主要受低层水汽的影响,低层水汽越多,雷暴高压更强,较大的MCAPE值及低层垂直风切变使得对流后向新生尺度增长,维持时间更长。减小中层水汽后地面强降水减少,对流强度减弱且很快分散为对流单体,但当飑线移动到MCAPE值大值区时又一次发展形成线性结构。因此增加低层水汽或减少中层水汽后的环境利于对流新生,但减少中层水汽后中层干空气相对而言使得线性结构难以维持。进一步研究飑线内部结构表明,垂直运动及后向入流也能影响飑线的尺度增长,此次对流系统中较强的后向入流增强了上升运动,同时形成向前的出流,造成地面大风天气。增强低层水汽后,对流后部层状云区范围更大,系统中的上升运动更强,且保持垂直,利于对流长时间维持;减小中层水汽后,对流强度减弱,回波顶高度降低。发展阶段后向入流增强,干冷空气迅速下沉,地面冷池增强,向前的出流形成大风天气。

关键词:飑线;水汽;后部入流;升尺度增长;数值模拟

中图法分类号: P444

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–241

Impact of initial water vapor on the upscale growing process of a squall line in South China

SHEN Xinyong¹, ZHANG Xiaoyan¹, HUANG Wei², SHENG Jie³, LI Xiaofan⁴, ZHAI Guoqing⁴

(1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*; 2. *Daishan Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Daishan 316200*; 3. *National Meteorological Center, Beijing 100081*; 4. *School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Abstract: During the spring and summer seasons, in the South China region where abundant water vapor is present, squall lines can rapidly develop into larger scales within a short period of time. In order to explore the influence of water vapor content on the process of squall line scale growth in South China, using the WRF model, a numerical simulation was conducted for a squall line system in South China on 11 May 2020. We investigated the effect of the variation of water vapor at different levels on its intensity and structure, and discussed the growth mechanism of the squall line system. This squall line occurred with the presence of high-level jet and low-level wind shear complementing each other, within an unstable layer of "dry at the high level and wet at the low level". The simulation showed that, in the early stage of the squall line development, a large maximum convective available potential energy (MCAPE) was observed in the southern part of the convection and coastal warm areas, which is beneficial for the accumulation of unstable energy here. Meanwhile, with the high low-level wind shear, the linear structure of the convection was well maintained. Subsequently, the squall line propagated southward and merged with warm region convection, resulting a further scale growth. Water vapor experiments showed that the MCAPE values are primarily influenced by the

收稿日期: 2022-01-25; 定稿日期: 2023-06-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41975054, 41930967); 国家重点研发计划项目(2019YFC1510400); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)

第一作者: 沈新勇, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

moisture content in the low-level atmosphere. More low-level moisture content causes stronger thunderstorm high pressure. Additionally, the presence of higher MCAPE values and larger low-level vertical wind shear contribute to the growth of convective cells in the post-convective stage, prolonging their existence. Reducing the mid-level water vapor content results in a decrease in intense surface precipitation, a weakening of convective intensity, and a quick dissipation into individual convective cells. But when the squall line moves into the area with high MCAPE values, it once again develops into a linear structure. Therefore, an increase in low-level moisture or a decrease in mid-level moisture favors the genesis of convection. However, reducing mid-level moisture results in relatively drier air at mid-levels, making it difficult for the linear structure to be sustained. Further investigation into the internal structure of the squall line reveals that vertical motion and rear inflow also influence the scale growth of the squall line. In the convective system analyzed in this study, the strong rearward inflow enhances the upward motion and generates forward outflow, leading to severe surface wind. Strengthening low-level moisture not only increases the size of the stratiform cloud region at the rear of the convection, but also leads to a stronger upward motion sustaining vertically, which promotes prolonged convective activity. On the other hand, reducing mid-level moisture weakens convective intensity and lowers the height of the echo tops. During the development stage, the rearward inflow intensifies, and dry cold air descends rapidly, leading to the strengthening of the surface cold pool, and causing strong winds due to the forward outflow.

Key words: squall line; moisture; rear inflow; upscale growing; numerical simulation

引言

飑线是一种由雷暴单体侧向排列而成的传播性线状激烈对流,其水平尺度在几十到几百千米,一般可持续4~10 h。飑线的发生通常会伴随着地面风向、气温、气压等气象要素的突变现象,所经之处会带来强风、雷暴、暴雨和冰雹等强对流天气。由于飑线的突发性强,持续时间短,造成的灾害性严重,往往给人们的生产生活带来严重威胁,因此一直是预报的重点和难点。

20世纪中期对飑线系统的研究已经开始,Fujita (1955, 1963)详细总结了飑线系统的天气学结构模型,将飑线的生命期分为五个阶段,并指出飑线系统发展时常伴随的气压场变化。Haertel和Johnson (2000)的研究将飑线内层状云降水导致的低层降温与中高压和尾流低压相联系。Parker和Johnson (2000)按照飑线的发展过程将其组织形态分为尾部层状云型、前部层状云型和平行层状云型。Fujita (1978)指出,由于强后部入流的存在,飑线的雷达回波通常表现为“弓形”结构。Smull和Houze (1985, 1987)认为后部干冷空气入流将给下沉气流带来较高的动量,并增强冷池的强度。但随着飑线的发展后部入流也会导致系统的衰亡,较强的后侧入流下沉,阻碍了前部低层暖湿空气供应,使系统强度减弱(Yin et al., 2018)。还有研究表明,地面冷池强度和低层垂直风切变的动态平衡是维持飑线结构的重要因子,即“RKW理论”(Rotunno et al., 1988; Weisman and Rotunno, 2004; Stensrud et al., 2005)。环境场也影响着飑线的形成过程,丁一汇等(1982)统计了我国18次飑线过程,按照其发展的环流背景特点,将飑线分为槽前型、槽后型、高后型、倒槽型四种类型。Meng等(2013)指出,相较于美国,我国东部地区的飑线过程更容易发生在更弱、更湿的环境条件中。樊李苗和俞小鼎(2013)总结了易发生飑线的环境参数特征。

沈新勇等(2016)研究表明边界层的热量输送、感热、潜热均会影响飑线的发展过程。王林等(2021)也认为较强的后部入流会使得飑线内部垂直运动加强,促进飑线发展。随着模式的发展,一些研究通过数值试验探究影响飑线的其他环境因素。Takemi (2007)通过数值试验证明了静力稳定性将显著影响中尺度对流系统的组织方式,同时指出大气可降水量和对流有效位能(CAPE)大小决定飑线的强度和组织性。陈明轩和王迎春(2012)利用三维数值云模式,证实了“RKW理论”在我国华北地区一次飑线过程中的适用性。朱娟等(2022)对发生在盛夏季节的一次飑线过程进行数值模拟,证明其内部存在多尺度系统相互作用,从热力、动力的角度影响飑线的过程。竹利等(2018)对发生在川北地区一次飑线的成熟阶段进行研究,证实后部入流急流与冷池、地面大风存在密切关系。屈梅芳等(2021)研究发现,在垂直风切变较小的情况下,当地面辐合抬升作用强并配合有后部干冷入流时,仍有较强的飑线生成发展。同时,也有部分研究表明水汽条件对飑线也有着重要影响。张弛等(2019)采用CM1模式模拟了一次东北冷涡飑线,提出了在东北冷涡背景下一般飑线形成的条件,以及温度和水汽对其产生的影响。刘靓珂等(2018)利用CM1模式对水汽方程中的各项因子进行尺度分析,结果发现飑线发生过程中,水汽输送及系统内部的垂直运动很大程度上影响对流的发展。孙建华等(2014)通过水汽数值试验指出,在上干下湿条件下发生的线状对流强度更强,对应的雷暴高压也更强,但对流系统并不能长时间维持。张建军等(2016)进行了多种环境条件的数值试验,结果显示低层环境垂直风切变影响飑线的移动速度和飑线的系统强度,水汽会影响飑线内的垂直速度。

目前,对于水汽影响飑线过程的研究集中在中纬度地区较干环境条件下,主要关注水汽含量对飑线成

熟阶段强度和结构的影响,而我国华南地区位临西北太平洋,受季风的影响常有水汽向北输送,因此中低层往往水汽含量较高。为了探究华南飊线短时间内尺度迅速发展及充足的中低层水汽的关系,本文针对发生在华南地区的一次升尺度飊线过程进行数值模拟,从而分析其尺度增长机制,并在此基础上改变不同层次的水汽含量进行水汽数值试验,探讨水汽及其垂直分布对华南飊线发展阶段尺度增长过程的影响,以期提高对突发飊线的预报水平。

1 资料与模拟方案设计

1.1 资料说明

本文使用的资料包括:2020年5月11日08时—12日08时(北京时,下同)6 min间隔的全国雷达组合反射率数据、12 h间隔的站点探空数据;5月11—12日美国国家环境预报中心(NCEP)提供的分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 6 h间隔的FNL全球再分析资料、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 6 h间隔的ERA5再分析资料。

1.2 模式配置

本文选用NCEP和美国国家大气研究中心(NCAR)等机构合作研发的中尺度高分辨率非静力天气预报模式WRF 4.0版本对该过程进行数值模拟,模拟嵌套设置为四层(图1),网格距从最外层到最内层分别取为27、9、3和1 km,每一层格点数分别为 100×90 、 226×190 、 514×430 和 1198×838 ,采用双向嵌套方案。模拟区域中心为(111.81°E , 24.76°N),垂直方向上的层数设置为34层,模式层顶为50 hPa。数值模式模拟设置的参数化方案如下:微物理过程方案采用WSM6类冰雹方案,积云参数化方案外两层采用Betts-Miller-Janjic

方案,内两层不使用积云参数化方案,陆面过程采用Noah Land Surface Model方案,长波辐射方案采用RRTM方案,短波辐射方案采用MM5 shortwave(Dudhia)方案,边界层方案采用YSU PBL方案。模拟时段为2020年5月11日02时—12日02时,共积分24 h。模拟采用的初始场为NCEP分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的FNL资料与ECMWF分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的ERA5资料。

1.3 模式初值场

模拟试验发现,单独使用FNL资料不能很好地模拟飊线第一次后向新生的升尺度过程,暖区分散对流单体强度也较小。只使用ERA5资料,甚至只能模拟出一些分散对流单体,不能很好地模拟出飊线的线性结构(图略)。在飊线的模拟中,初始场水汽很大程度上影响系统中的最大上升运动强度和地面大风,从而影响最后的模拟效果(Wandishin et al., 2008),特别是华南地区春夏温度回暖时,偏南风将南海大量的水汽运输至大陆,因此水汽可能是华南飊线短时间内尺度迅速增长的重要因素。已有试验表明在对华南飊线的模拟中,初始水汽场中ERA5再分析资料占比越大,飊线模拟越接近实况(鲁蓉等, 2019)。分析两种资料在2020年5月11日的大气可降水量表明,其差值在广东和广西的交界处最大(图2),而此处正是飊线发展且尺度增长的区域。由于FNL与ERA5资料中的水汽场存在较大差异,而有研究认为ERA5再分析资料中,低层温度场和湿度场更接近于实际观测(朱彦良等, 2012; 支星等, 2014),为了让水汽条件更接近于实况以便于进行水汽模拟试验,且使得模拟效果达到最好,截取ERA5资料中与FNL资料相同层次的水汽变量作为模式模拟的初始水汽场,而其他变量则来自于FNL资料。

1.4 水汽试验设计

为了探究这次短时间内尺度迅速增长的飊线过程中水汽条件起到的作用,将上述模拟结果定义为控制试验(CTRL),其他设定保持不变,在此基础上修改初始场的水汽含量,设计一系列敏感性试验。此次华南飊线过程中低层的水汽充足,为了研究不同层次水汽对其升尺度增长过程的影响,分别将对流层低层(850 hPa以下)的比湿修改为原来的90%和110%,设置为试验LQ90和LQ110;分别将对流层中层(500—700 hPa)的比湿修改至原来的90%和110%,设置为试验MQ90和MQ110。

2 天气个例实况

2020年5月11日下午,弱冷空气南下越过南岭,在两广一带与暖湿空气相遇,产生大范围雷暴大风及

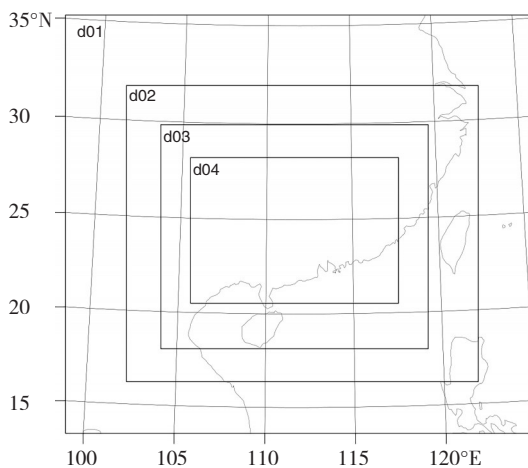


图1 数值模式选取的模拟区域

(d01—d04 分别表示第1—4层模拟嵌套)

Fig. 1 Area selected for model simulation (d01—d04 represents the simulation nesting of layers 1—4, respectively)

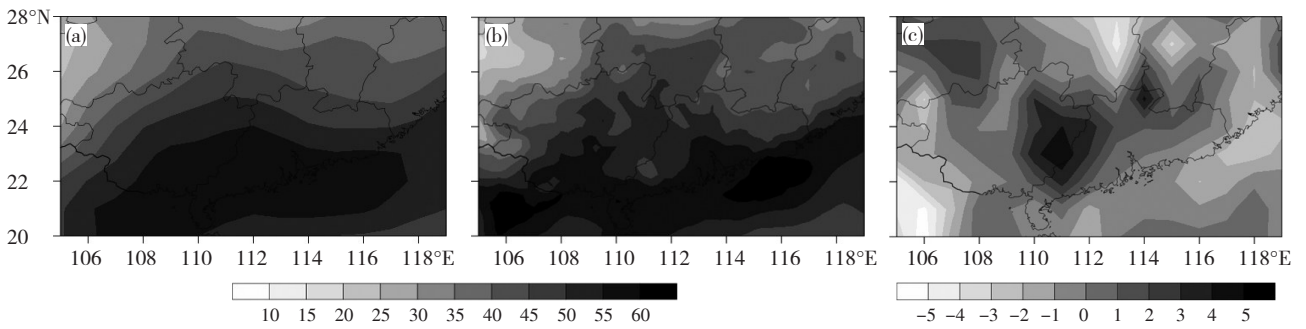


图2 2020年5月11日12时FNL (a)和ERA5 (b)大气可降水量以及二者大气降水量的差值(c)(单位: mm)

Fig. 2 Precipitable Water (PWAT) from (a) FNL and (b) ERA5, and (c) the PWAT difference between FNL and ERA5 at 12:00 BT on 11 May 2020 (unit: mm)

降雨天气。傍晚时分,部分站点出现了短时强降水和雷雨大风天气,伴有8~10级瞬时大风,其中佛山高明区荷城街道小时降水量达到70 mm,多地观测到闪电发生。此次雷暴天气主要由在华南地区形成的一次强飊线过程引起,历时9 h,给广东省带来较大的影响。分析实况雷达回波图(图3)可知,5月11日13时(图3a),对流在广西东北部形成,对流单体呈线状排列,中心强度达到45 dBz以上,14时(图3b)其南部对流单体不断新生,于15时增长为 α 中尺度飊线(图3c)。同时,在广西南部以及广东沿海地区一带有分散的对流单体存在。随着飊线向东南方向移动,暖区分散

对流单体也逐渐发展。到16时(图3d),飊线移至两广交界处,并与广西南部的对流单体合并,形成一条东北—西南走向的中 α 尺度飊线系统。飊线主体继续向东南方向移动,同时线性结构更加显著,到17时(图3e),飊线长度达700~800 km,且弓形结构更加明显,系统强度达到强盛状态。随着飊线继续南移,其北部部分逐渐与广东沿海地区的对流单体汇合,整个对流系统尺度继续增大,并逐渐形成“人字形”回波(图3f)。到19时(图略),飊线北部及其尾部的对流逐渐发生断裂,随后飊线的线状结构逐渐消散,强度也开始减弱。

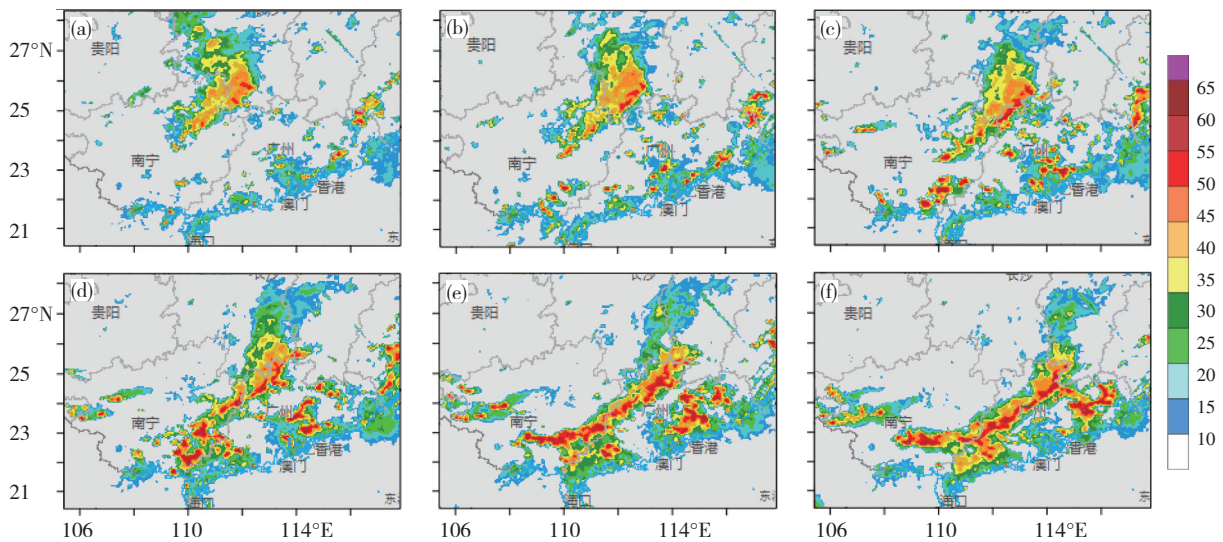


图3 观测的2020年5月11日13时(a)、14时(b)、15时(c)、16时(d)、17时(e)、18时(f)华南地区雷达组合反射率(单位: dBz)

Fig. 3 Observed composite radar reflectivity in South China at (a) 13:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 15:00 BT, (d) 16:00 BT, (e) 17:00 BT, (f) 18:00 BT on 11 May 2020 (unit: dBz)

3 大气环流和环境参数

3.1 大气环流

由NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的FNL资料分析可知,对流发生前,华中地区高空200 hPa上(图4a)存在一个风速急流带,而两广地区均位于急流入口区右侧,有正涡度平流,故存在高空辐散,有利于空气垂直上升运动。500 hPa

中层(图4b)两广一带位于副热带高压(以下简称副高)边缘,随着副高南撤,飊线也向东南移动(漆梁波和陈永林,2004)。850 hPa上(图4c)沿海地区位于槽前西南暖湿气流中,风速虽未达到急流水平,但有较强暖湿平流叠加至高空弱冷平流之下,有利于位势不稳定层结的建立和维持。在广东、广西地区北部存在东北—西南向冷式切变,有冷暖空气的辐合。在地面(图4d)

有一倒槽伸至两广一带,同时存在一地面辐合带,附近的空气辐合抬升,有利于飊线的触发。整体来看,

此次过程的大气环流高低层配合较好,为飊线过程的发生提供了不稳定能量积累和抬升条件。

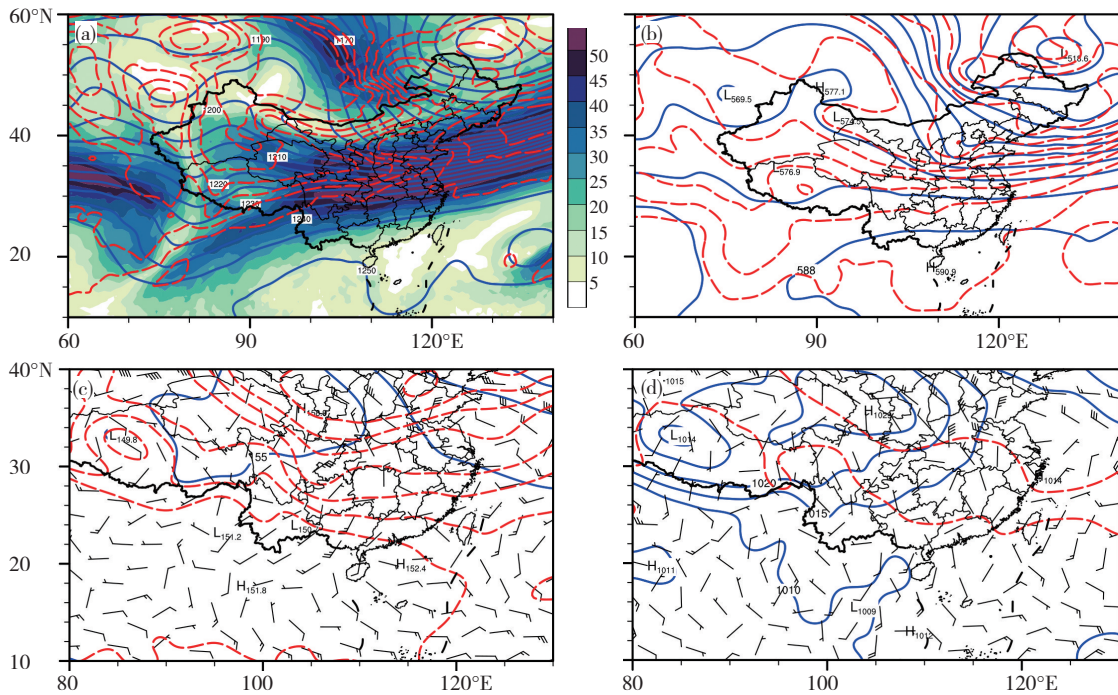


图4 2020年5月11日08时200 hPa高度场(蓝线,单位: dagpm)、风速场(阴影,单位: $m \cdot s^{-1}$)和温度场(红线,单位: $^{\circ}C$) (a), 500 hPa高度场(蓝线,单位: dagpm)和温度场(红线,单位: $^{\circ}C$) (b), 850 hPa高度场(蓝线,单位: dagpm)、温度场(红线,单位: $^{\circ}C$)和风场(c) (矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$,一杆代表风速为 $12 m \cdot s^{-1}$),以及地面气压场(蓝线,单位: dagpm)、温度场(红线,单位: $^{\circ}C$)和风场(d) (矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$,一杆代表风速为 $5 m \cdot s^{-1}$)。图4b、c、d中H代表高压中心,L代表低压中心

Fig. 4 (a) Geopotential height (blue line, unit: dagpm), horizontal wind (shaded, unit: $m \cdot s^{-1}$), and temperature (red line, unit: $^{\circ}C$) at 200 hPa, (b) geopotential height (blue line, unit: dagpm) and temperature (red line, unit: $^{\circ}C$) at 500 hPa, (c) geopotential height (blue line, unit: dagpm), temperature (red line, unit: $^{\circ}C$), and wind field at 850 hPa (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$, the wind bar represents $12 m \cdot s^{-1}$), (d) surface level pressure (blue line, unit: dagpm), temperature (red line, unit: $^{\circ}C$), and wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$, the wind bar represents $5 m \cdot s^{-1}$) at 08:00 BT on 11 May 2020. The H and L in the diagram stand for the high pressure center and low pressure center in Fig.4b, Fig.4c, Fig.4d

3.2 环境参数

图5为清远站和河源站2020年5月11日14时温度对数压力图,从中可见,清远站500 hPa以下大气中温度露点差较低,水汽几乎达到饱和,而500 hPa以上迅速变干。河源站700 hPa以下中低层大气水汽含量

较高,也大致形成上干下湿的不稳定层结,有利于对流发生。两站近地面附近存在一个干空气层,这可能是由于飊线系统中的垂直运动较强,高空干冷气流下沉而形成。清远站CAPE值达到 $4\ 408.8 J \cdot kg^{-1}$,河源站为 $2\ 424.7 J \cdot kg^{-1}$,不稳定能量较高,自由对流高度

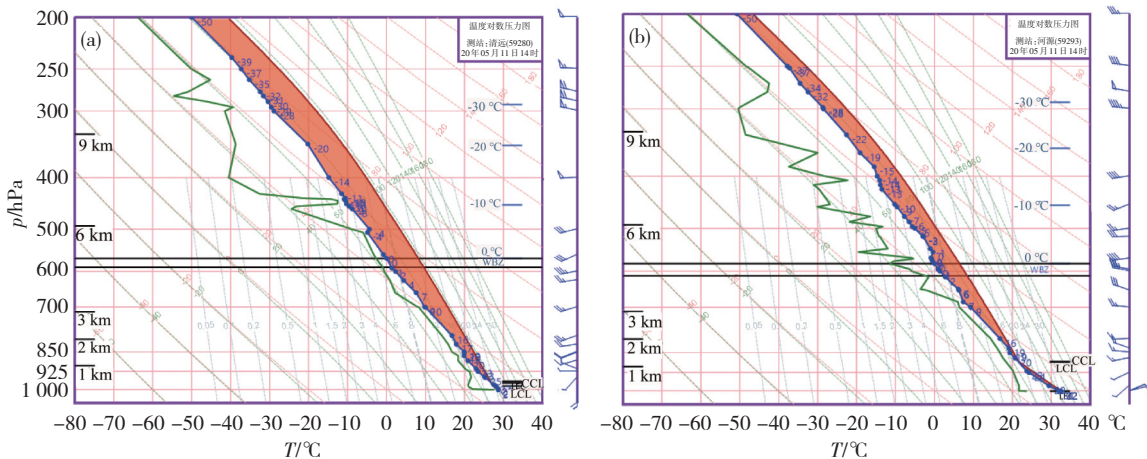


图5 2020年5月11日14:00清远站(a)和河源站(b) T - $\log p$ 图
Fig. 5 T - $\log p$ diagram at (a) Qingyuan station and (b) Heyuan station at 14:00 BT on 11 May 2020

(LFC)接近地面,较低 LFC 也更有利于对流生成发展。此外,两站 3 km 以下均有较大的垂直风切变,这种较大垂直风切变、大 CAPE 值及上干冷下湿暖的垂直不稳定层结有利于飊线的形成和发展(丁一汇等,1982)。

4 数值模拟及验证

将模拟的雷达组合反射率与实况进行对比,检验此次飊线的模拟效果。从模拟场(图 6)可见,11 日 11 时(图 6a)广西东北部已经形成线性对流,同时东南沿

海存在分散对流,强度比实况略强,范围也更大。随后分散对流发展,形成几个块状对流(图 6b—e),于 17 时(图 6f)与飊线前部汇合形成了“人”字形回波,雷达组合反射率的范围和形状与实况基本一致。整体来看,模拟的飊线虽比实况早发生 2 h,移动速度比实况稍快,但二者的移动路径大致相同,生命周期一致,强度和形状及影响范围相差不大,仅在部分地区的强度有所差异,因此模拟较好还原了飊线的发展和成熟阶段。

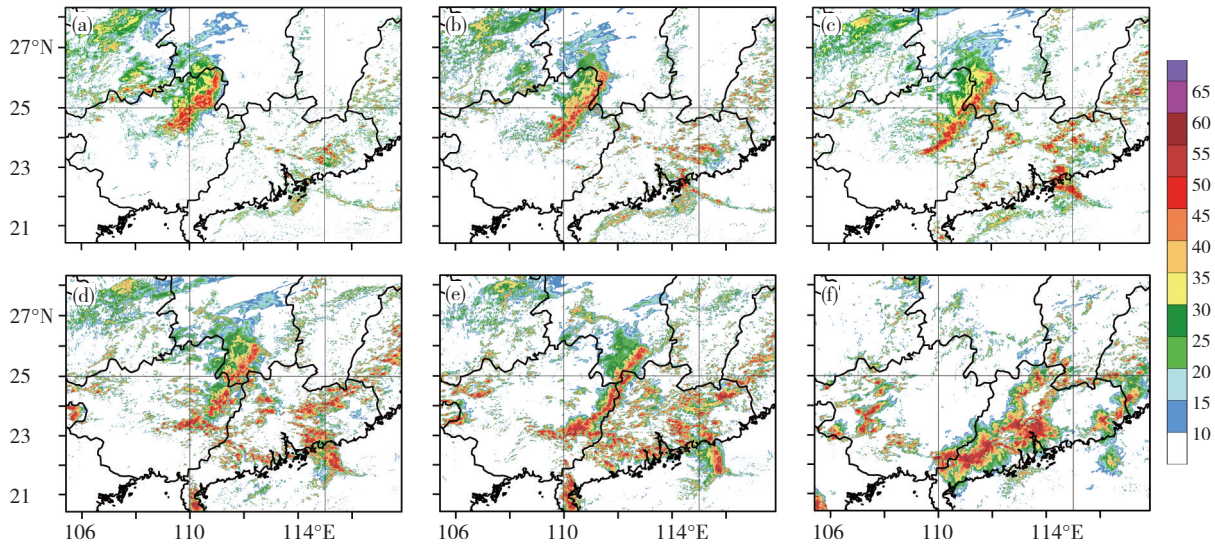


图 6 CTRL 试验模拟的 2020 年 5 月 11 日 11 时(a)、12 时(b)、13 时(c)、14 时(d)、15 时(e)、17 时(f)的华南地区雷达组合反射率(单位: dBZ)

Fig. 6 Simulated composite radar reflectivity in South China in CTRL experiment at (a) 11:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 13:00 BT, (d) 14:00 BT, (e) 15:00 BT, (f) 17:00 BT on 11 May 2020 (unit: dBZ)

5 水汽试验结果

5.1 飊线演变特征

此次过程为一次较为典型的冷锋前飊线南下过程,为研究水汽含量对飊线升尺度增长过程中不同阶段的影响,结合实况和模拟结果,将此次飊线的生命历程划分为形成阶段(11—12 时)、发展阶段(13—15 时)、成熟阶段(16—18 时)和消亡阶段(19—21 时)。飊线分别经历了后向新生(发展阶段)及与暖区对流合并(成熟阶段)这两个升尺度过程,最后开始消亡。当水汽条件改变后,飊线系统的移速和强度均有所不同。表 1 给出观测及各试验中飊线形成、发展、成熟、消亡阶段时间划分。分析可知,CTRL 飊线过程比实况早 2 h,与 CTRL 相比,低层水汽减小后,飊线生成减慢约 1 h,消散加快,反之,飊线生成更早,维持时间更长。而减小中层水汽后飊线形成过程与减小低层水汽时相差不大,但飊线维持的时间更长,增加中层水汽对飊线生命历程影响较小。

5.2 飊线强度、组织结构特征

对比发现水汽条件的改变会影响飊线的生命历

表 1 观测及各试验中飊线形成、发展、成熟、消亡阶段时间划分

Table 1 The time division of formation, development, maturity, and decay stages of squall line during different experiments

试验名称	形成阶段	发展阶段	成熟阶段	消亡阶段
观测	13—14 时	15—17 时	18—19 时	20—22 时
CTRL	11—13 时	14—15 时	16—18 时	19—21 时
LQ90	12—14 时	15—16 时	17—18 时	19—20 时
LQ110	10—13 时	14—15 时	16—18 时	19—22 时
MQ90	12—13 时	14—16 时	17—18 时	19—21 时
MQ110	11—13 时	14—15 时	16—18 时	19—21 时

注:CTRL 表示控制试验,LQ90、LQ110 分别表示 850 hPa 以下的比湿修改为原来的 90%、110% 的试验,MQ90、MQ110 分别表示 500—700 hPa 的比湿修改为原来的 90%、110% 的试验。

程,为进一步探究水汽是否会对其强度和组织形态产生影响,图 7 给出各试验中飊线不同阶段雷达反射率及地面大风、降水,图 8 为地面扰动气压和地面 10 m 风场,分别展示了不同水汽条件下飊线各个阶段的组

织形态、扰动气压场及伴随的天气现象。

5.2.1 形成阶段

分析形成阶段的特征(图7a)可知,块状对流首先在广西东北部触发,随后向南移动逐渐形成飏线,同时广东省有分散的较弱对流活动。LQ90试验(图7d)和MQ90试验(图7c)比CTRL试验晚约1 h形成线状结构,且强度更小。LQ110试验(图7e)中,飏线强度更强,后部层状云区范围更大,MQ110(图7b)中形成的对流与控制试验差别不大。

5.2.2 发展阶段

CTRL试验中对流发展,向南延伸至广西南部,于15时形成“弓状”回波带,在地面以吹向对流弓状结构的大风为主,风速达到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,部分地区小时降水量达到 20 mm 以上,同时广东省的分散对流单体的强度也有所增强(图7f)。飏线向东南引导气流方向移动,南部的西南暖气流与北部的东北冷气流在飏线后部相遇后空气辐合使得偏南暖湿气流被抬升,触发不稳定能量的释放,对流后向新生,飏线经历第一次尺度增长。扰动气压场(图8a)显示,负扰动气压主要集中在飏线以南暖湿气流中,而飏线中的扰动气压较小,

并未形成明显的雷暴高压结构。

对比发现MQ110试验(图7g)中对流强度及结构变化不大,但大风天气减弱。减少中层和低层水汽后(图7h、i)对流组织性不强,南部很快变为分散对流单体。其中LQ90试验中对流强度较小,未经历后向新生过程,同时前部暖区对流也较弱。MQ90试验中对流强度较强,已经形成了雷暴高压、飏前低压和尾流低压的结构,较强的飏前低压可能是因为对流在飏线前激起的对流中上层下沉运动增强(图8b)。同时在该处有短时强降水产生,其南部也有新生分散对流形成,但并未与飏线合并。但增加或减小水汽后飏线向前移动的速度几乎不变。LQ110试验中(图7j),增加低层水汽,暖区对流强度增强,已经与飏线前部对流相联结。地面大风减弱,地面负扰动气压范围更大(图8c)。

5.2.3 成熟阶段

CTRL试验中沿海一带暖区分散对流单体继续发展并逐渐聚集,合并为块状对流,同时飏线向东南移动并与前部块状对流结合,整体对流范围扩大,尺度进一步增长(图7k)。飏线南部地面向南的大风和流中向北的大风形成辐合,降水强度增加,到17时大于

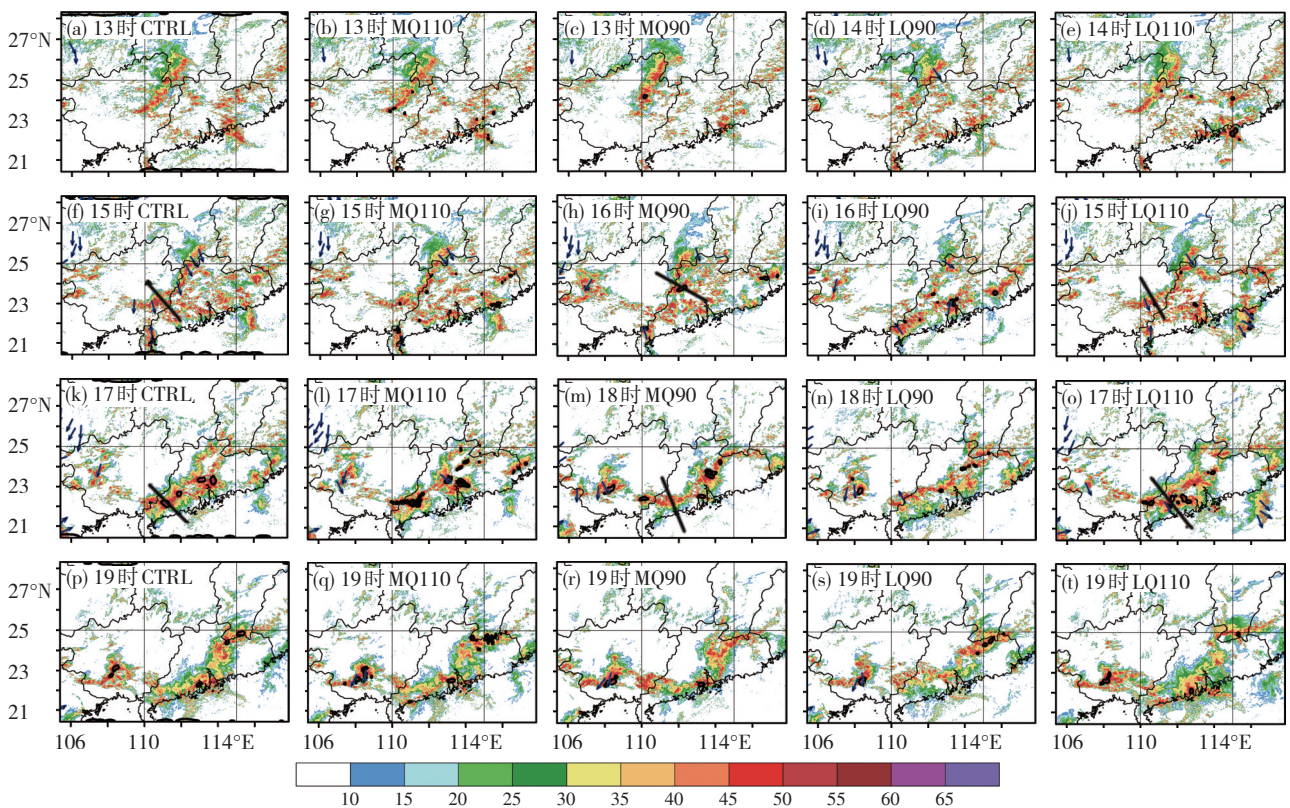


图7 CTRL (a, f, k, p)、MQ110 (b, g, l, q)、MQ90 (c, h, m, r)、LQ90 (d, i, n, s)、LQ110 (e, j, o, t)试验飏线形成阶段(a—e)、发展阶段(f—j)、成熟阶段(k—o)、消亡阶段(p—t)的雷达组合反射率因子(阴影,单位: dBz)、地面 10 m 大于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风(蓝色箭头)

和 $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降水量(黑色实线,单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) (黑色直线代表图11中剖面线位置)

Fig. 7 The composite radar reflectivity (shaded, unit: dBz), $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wind at 10 m above ground (blue vector), $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ precipitation (black solid line, unit: mm) in (a—e) formation, (f—j) development, (k—o) maturity and (p—t) decay stages in (a, f, k, p) CTRL, (b, g, l, q) LQ90, (c, h, m, r)

LQ110, (d, i, n, s) MQ90, (e, j, o, t) MQ110 experiments. The black line represents the location of the cross-section in Fig.11

50 dBz 的地区降水达到 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,出现短时强降水天气,此时尾流低压也发展至最强,形成尾流低压-雷暴高压-飊前低压的结构(图 8d)。

MQ110 (图 7l) 中回波强度变化不大,但降水强度增加。LQ110 (图 7o) 与 CTRL 相比,暖区分散对流强度更强,飊线与其合并后尺度更大,强降水发生在其南部靠海地区。对比发现 LQ90 和 MQ90 试验的飊线生命历程相似(图 7m、n),随着对流向东南移动后与暖区对流合并,于 18 时再次发展为线状结构,但由于水汽含量减少,其强度及水平尺度较小。其中减小中层水汽后对流强度更大,并形成了“弓形”结构,同时飊线北部有 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水天气。MQ90 中雷暴高压强度也更强,而在 LQ90 试验中雷暴高压及飊前低压强度更小,同时降水强度减小。LQ110 短时强降水范围较大,雷暴高压也较强(图 8e、f、g)。

5.2.4 消亡阶段

到 19 时 CTRL 试验飊线中部发生断裂,南部对流强度减弱并向东南移动入海。同时飊线南部强降水减弱(图 7p)。由降水的拖曳作用带来的下沉气流减弱,对应的绝热增温效应减小,使得尾流低压消失,逐渐转变为正的气压扰动(图 8h)。

增加中层水汽后(图 7q),对流也从中部发生断裂,分散对流逐渐消散。LQ110 (图 7t) 相较于 CTRL,强回波区范围更大,且由于海上对流单体的存在,飊线断裂东移入海后仍能维持一段时间,强降水也集中在沿海一带,21 时才开始逐渐消散。图 7r、s 对比发现 LQ90 试验中,18 时起南部的对流迅速减弱,还未入海便转变为层状云区,地面转变为负变压,雷暴高压消失(图 8i)。但 MQ90 试验中,飊线维持的时间更长,直至 19 时仍有线性结构存在。

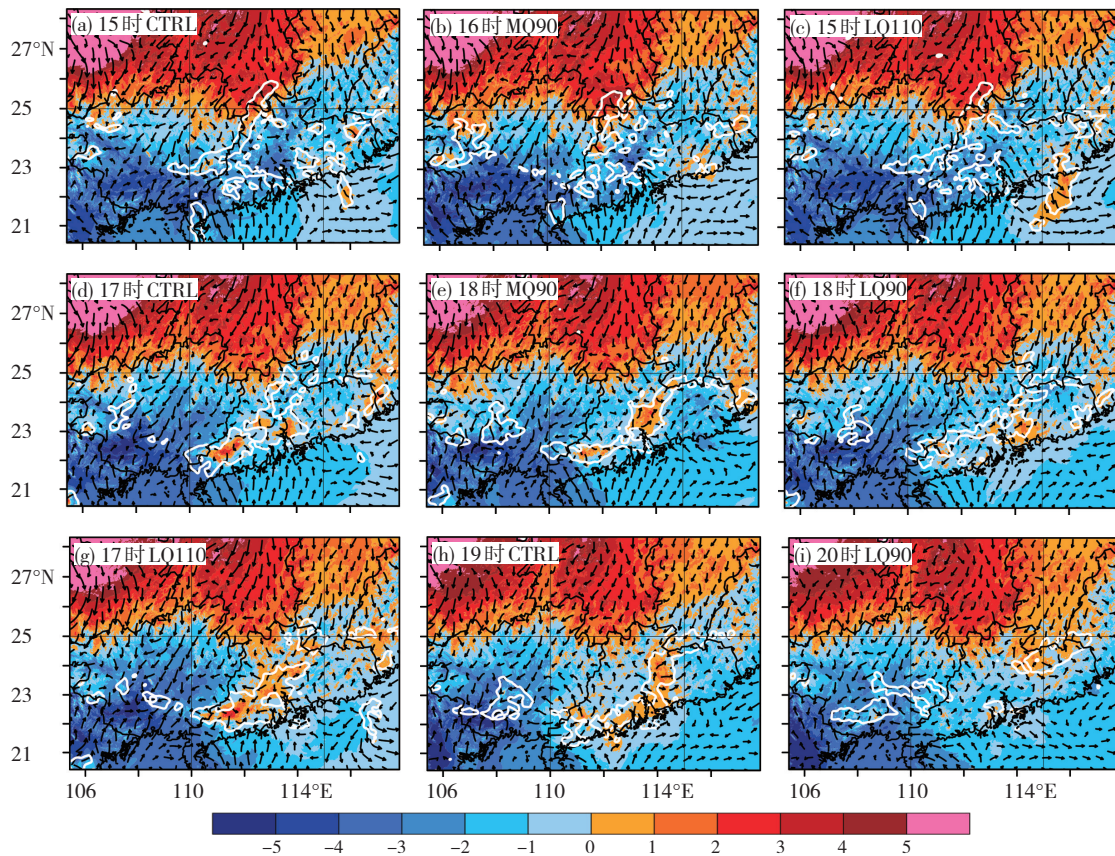


图 8 CTRL (a, d, h)、MQ90 (b, e)、LQ110 (c, g)、LQ90 (f, i) 试验飊线形成阶段(a—c)、发展阶段(d—g)、成熟阶段(h—i) $\geq 30 \text{ dBz}$ 雷达组合反射率因子(白色等值线,单位: dBz)、扰动气压(阴影,单位: hPa)和地面 10 m 风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 $\geq 30 \text{ dBz}$ radar reflectivity (white solid line, unit: dBz), disturbance pressure (shaded, unit: hPa) and wind at 10 m above ground (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in (a—c) formation, (d—g) development and (h—i) maturity stages in (a, d, h) CTRL, (b, e) MQ90, (c, g) LQ110, (f, i) LQ90 experiments

6 水汽影响飊线升尺度过程的原因

根据前文对飊线的模拟和改变水汽条件后对飊线发展过程和组织形态的分析,增加或减小各层水汽后,对对流强度、飊中系统的形成及尺度增长均产生

较大影响,下面从动力、热力条件及垂直结构等方面进一步分析水汽影响飊线发展过程的原因。

6.1 最大对流有效位能

对流发生初期,系统内部的冷池和垂直风切变还未达到平衡状态时,较高 CAPE 可促进飊线的发展和

组织性增强,因此CAPE是影响飊线发展的重要环境条件参数,CAPE值越大,可释放的不稳定能量越多,越容易激发对流,在模拟结果中用最大对流有效位能(MCAPE)表示。图9a为CTRL下飊线形成初期MCAPE值的分布,可见在飊线形成前期,其南部的MCAPE值在 $2000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,达到发生强对流的条件,随着飊线南移到此,利于对流向后新生,飊线尺度迅速增长。同时广东省南部的MCAPE达到 $3000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,为东南沿海暖区分散对流的发展提供能量,暖区对流迅速增强,使得飊线后期与之合并后尺度进一步增加。

在水汽试验中,由图9a、b、c对比可知MQ90与MQ110试验的MCAPE值和地面风场与CTRL试验差别不大,即保持低层湿度相同的情况下,改变中层

水汽对对流有效位能积累的影响较小,因此飊线后部仍会形成新生对流单体。LQ110的MCAPE值大于 $3500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域最大,对流不稳定能量最多,更快触发对流且对流强度更强,与模拟结果一致(图9e),而LQ90中MCAPE值明显较小,因此对流形成更慢(图9d)。从地面风场来看,除LQ90试验以外,其他试验在MCAPE大值区均有显著的风场辐合,其中LQ110试验中风场辐合区更大,更有利于产生上升运动从而触发不稳定能量形成对流。结合MCAPE值的分布和地面2 m的 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水汽混合比等值线来看,MCAPE大值区与水汽高值区的分布是一致的,即MCAPE随着水汽的增加而增加,因此增加低层水汽,有利于CAPE的积累,从而能触发更强的初始对流。

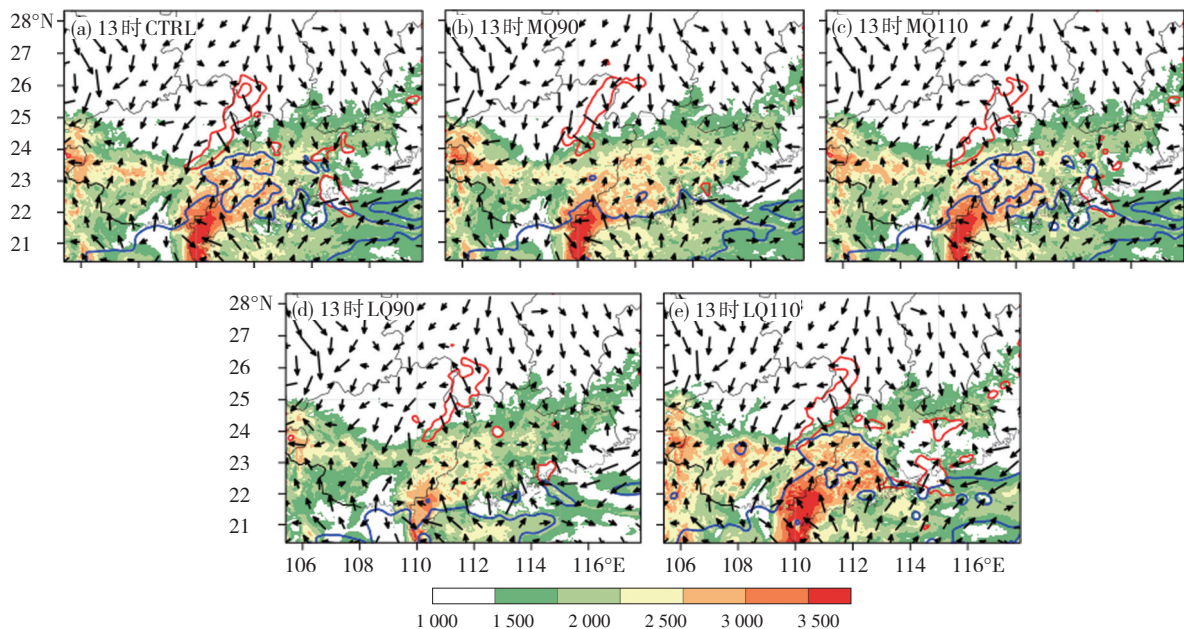


图9 CTRL (a)、MQ90 (b)、MQ110 (c)、LQ90 (d)、LQ110 (e)试验中2020年5月13时最大对流有效位能(MCAPE) (阴影,单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)、地面10 m风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水汽混合比等值线 (蓝线,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和30 dBz的雷达组合反射率因子(红线,单位: dBz)

Fig. 9 MCAPE (shaded, unit: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$), wind at 10 m above ground (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ water vapor mixing ratio (blue line, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), the 30 dBz composite radar reflectivity (red line, unit: dBz) in (a) CTRL, (b) MQ90, (c) MQ110, (d) LQ90, (e) LQ110 experiments at 12:00 BT on 11 May 2020

6.2 低层垂直风切变

除了MCAPE值外,低层垂直风切变也是影响飊线过程的重要因子(Bluestein and Jain, 1985; 王周鹤等, 2020)。在具有强热力不稳定的环境中,垂直风切变较强时,对流内垂直运动增强,同时飊线系统更具有组织性,从而有助于延长生命期,发展为强对流天气。一般认为,0—6 km的垂直切变大于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 认定为强切变环境,在飊线发展阶段,CTRL试验中飊线及其后侧的1—3 km风的垂直切变在 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上(图10a),若按照线性变化推测0—6 km的垂直切变在 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,适合强雷暴的发展。15时飊线南部的

垂直风切变最大达到 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且强切变区位于对流尾部右侧,产生流体动力学压力,有利于尾部新对流单体的生成,使得飊线发展,尺度增加。

改变水汽后,由于凝结潜热的释放及地面蒸发冷却效应等原因温度场发生变化,因此发生对流的地区垂直风切变有所不同,将影响飊线的维持和发展。研究证明(Thorpe et al., 1982; 俞小鼎等, 2012),垂直于飊线的低层垂直风切变可以阻止雷暴下沉气流出流,从而更好的维持雷暴内的上升气流,延长飊线的生命史,并且有利于弓形回波的形成。图10b、c表明发展阶段减小水汽的试验中,飊线后部垂直风切变方向与

之近乎平行,对流分散为小的单体,从而很快消散,但MQ90与LQ90相比,18时飊线中段后部的切变方向更加垂直,飊线形成“弓形”结构(图10f、g)。LQ110试验中,15时位于飊线南部前沿的风切变更大,对流新生,风向也更垂直,后部新生对流与飊线结合,促进了其尺度增长。而成熟阶段飊线与前部分散对流合并后,其后部垂直切变较大,线性结构也得以维持

(图10d、h)。上述试验证明,增加低层水汽后飊线尾部垂直风切变增强,有利于对流单体新生,且风向更加垂直于飊线,对流的组织性增强。反之,减小水汽后,低层垂直风切变与飊线更加平行,对流很快消散。但对于减小水汽的试验,当“中干下湿”时,飊线与南部对流合并后低层垂直风切变较大,且方向也更垂直于飊线,有利于形成“弓形”结构。

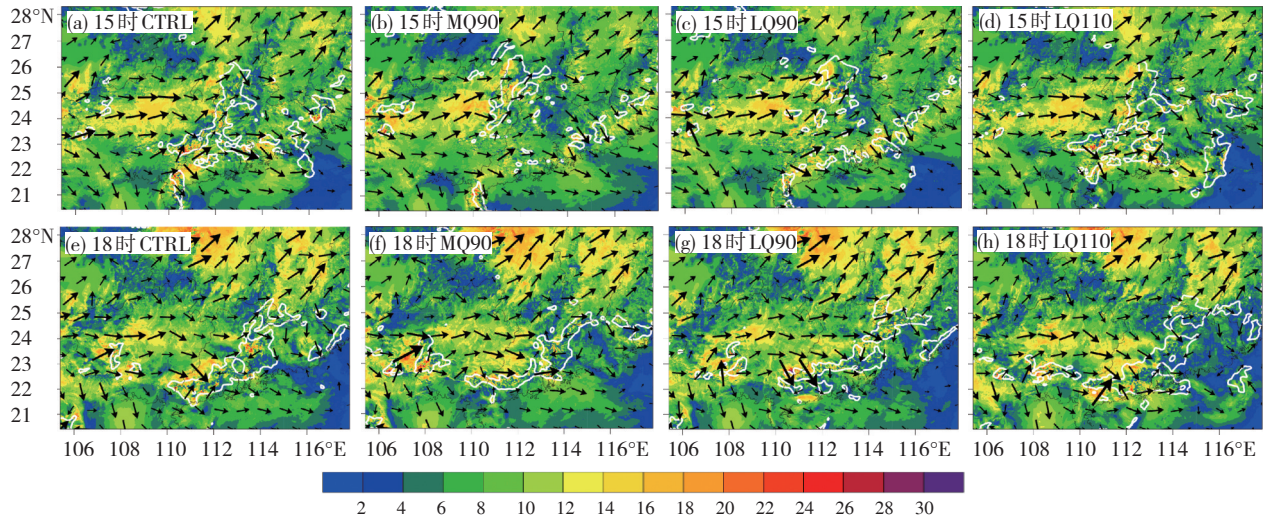


图10 CTRL (a, e)、MQ90 (b, f)、LQ90 (c, g)、LQ110 (d, h)试验中2020年5月15时(a—d)和18时(e—h)3 km的30 dBz 雷达组合反射率因子(白色等值线,单位: dBz)、1—3 km垂直风切变(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及其垂直风切变大小(阴影,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.10 The 30 dBz radar reflectivity at 3 km (white solid line, unit: dBz), 1—3 km wind shear (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), the value of the 1—3 km wind shear (shaded, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in (a, e) CTRL, (b, f) MQ90, (c, g) LQ90, (d, h) LQ110 experiments at 15:00 BT and 18:00 BT on 11 May 2020

6.3 后部入流和垂直运动

由上述分析可知,水汽条件对飊线内部的垂直运动及地面冷池的形成有很大影响。为了更好地研究不同试验中飊线的发展机制,绘制了CTRL试验、LQ110试验及MQ90试验中经飊线发展和成熟阶段对流中心(图7黑斜线)的垂直剖面(图略)。从CTRL试验可见,本次过程强对流系统较为深厚,其中30 dBz以上回波向上延伸至15 km处,最大回波强度达55 dBz。冷池前沿为整层上升运动,前侧有新生单体被激发。对流后部0—7 km有明显的后部入流,将干冷空气带入对流系统,云体中液态水蒸发加强,空气迅速冷却,产生强烈下沉,到达地面后向外辐散,形成雷暴大风。MQ90试验中最大回波强度与控制试验相当,但大于40 dBz的对流核高度更低,水平尺度更大。减小中层空气湿度后,对流的后部入流增强,向上延伸至10 km处,且入流更加干冷,被卷入对流系统中后迅速下沉,到达地面后形成降温,−1 K变温线向上延伸至4 km处,形成的冷池强度比CTRL试验略大。对流中4 km以上为上升运动,运动方向向前倾斜,在上空形成大范围出流,不

利于雷暴的维持。LQ110试验中回波强度和范围与CTRL试验相当,但垂直上升运动更强烈,高度达到16 km以上,大于40 dBz的对流核也伸展至16 km。飊线前部新生对流单体中上升运动更强烈,有利于其进一步发展并于后方对流结合,使得飊线尺度增长。

成熟阶段,CTRL试验低层存在前部入流,前后均有层状云区。LQ110试验的层状云区主要集中在对流后部,且范围较CTRL试验更大,有较弱的下沉运动。大于40 dBz的对流核水平尺度更大且对流顶更高,垂直运动也更加强烈,−1 K变温线向上延伸至5 km处,地面冷池强度更强。MQ90试验对流强度和水平尺度减小,对流核顶高度降低。垂直运动减弱,5 km以上为上升运动,且向对流前方倾斜。后部层状云区无明显下沉运动,产生的降水较少。上述分析说明,减小中层水汽后,对流强度减弱,回波顶高度降低。且发展阶段中后向入流增强,干冷空气迅速下沉形成向前的出流,形成大风天气。雷暴中的上升气流倾斜,使得对流组织性减弱并很快消散,16时后飊线逐渐分散为小的对流单体。增加低层水汽后,系统中的垂直

运动更强,回波高度更高,且上升运动保持垂直,利于对流的长时间维持,对流后部层状云区范围更大,有利于产生降水。成熟阶段中下沉运动强烈,低层大气中的水汽蒸发冷却加强,导致地面冷池增强(图8g)。

7 结论与讨论

2020年5月11日发生在华南地区的飊线过程产生了大范围的降水和雷暴天气,本文利用WRF模式进行高分辨率的模拟,很好再现了此次飊线的升尺度增长的过程。在此基础上改变低层和中层水汽,设计了一系列水汽试验,进一步探讨不同层次水汽改变对飊线强度、维持时间及尺度增长过程产生的影响,得到以下主要结论:

(1) 此次飊线经历了后向新生、向南移动与前部对流合并的升尺度增长过程。对流形成在两广地区,位于高空急流入口区右侧,与地面倒槽相配合,同时有较强暖平流叠加至高空弱冷平流之下,为飊线过程的发生提供了不稳定能量积累和抬升条件。探空资料显示,飊线发生前主要站点的CAPE值高,低层垂直切变较大,容易发生强对流天气。

(2) 飊线形成前期,对流南部及广东沿海地区MCAPE值较大,利于暖区对流生成,飊线移至此处时再次发展,尺度迅速增长。同时低层垂直风切变较强,因此飊线可以较长时间维持线性结构。分析其垂直结构发现,对流后部有较强的后向入流,一方面增强对流中上升运动,一方面使得对流中水汽迅速蒸发,造成强烈下沉运动,利于对流的发展。

(3) 不同层次水汽含量及其垂直分布对飊线的形成过程产生重要影响。“中干下湿”的环境(减小中层水汽或增加低层水汽)有利于对流的新生及雷暴高压的增强。低层水汽越多,MCAPE值越大,地面风向辐合更加显著,飊线移动到此处时尺度快速增长且强度更强。飊线中垂直运动增强,对流云顶更高,对流后部层状云区范围更大,同时地面产生的冷池和雷暴高压强度也较强。低层水汽减小时,地面降水、对流的强度和范围均会减小,且很快消散。

(4) 减小中层水汽时,对前期MCAPE值影响不大,仍有新生对流生成,但垂直风切变较小且垂直上升逆垂直风切变方向倾斜,新生对流产生后变为分散单体,后期与前部分散对流合并后才又重新发展为飊线。同时后部入流强度增加,中层干冷空气进入对流内部,造成降水蒸发降温并迅速下沉,地面冷池和雷暴高压范围更大。

此次华南飊线升尺度过程中水汽影响数值试验结果表明,不同层次的水汽含量变化将通过环境

MCAPE值和垂直风切变等影响地面冷池、雷暴高压及对流内部垂直运动,从而影响新生对流的强度以及组织性,进而影响飊线的升尺度过程及垂直结构。因此在对飊线的预报中,应当充分考虑水汽分布对飊线发生发展及地面大风、强降水天气的影响。此外,本文的研究仅探讨了水汽垂直分布对飊线内部结构产生的影响,而水汽的空间分布同样影响飊线的发生。后期可借助相应的数值试验,进一步探讨影响飊线升尺度过程的因素。

参考文献(References):

- 陈明轩,王迎春.2012.低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飊线过程发展维持的数值模拟[J].气象学报,70(3):371-386. Chen M X, Wang Y C. 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(3): 371-386 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2012.033
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等.1982.我国飊线发生条件的研究[J].大气科学,6(1):18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al. 1982. A study on the genesis conditions of squall lines in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,6(1):18-27 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.01.03
- 樊李苗,俞小鼎.2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D. 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China [J]. Plateau Meteorology, 32(1):156-165 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00016
- 刘靛珂,张弛,沈新勇,等.2018.一次飊线理想试验的水汽方程尺度分析[J].暴雨灾害,37(6):522-527. Liu L K, Zhang C, Shen X Y, et al. 2018. Scale analysis of water vapor equations for a squall line ideal experiment [J]. Torrential Rain and Disasters,37(6):522-527 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.06.004
- 鲁蓉,孙建华,李德帅.2019.初值水汽场对华南春季一次强飊线触发和维持影响的数值试验[J].热带气象学报,35(1):37-50. Lu R, Sun J H, Li D S. 2019. Numerical simulation of the influence of initial water vapor on the trigger and maintenance of a sever spring squall line in South China [J]. Journal of Tropical Meteorology,35(1):37-50 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.004
- 漆梁波,陈永林.2004.一次长江三角洲飊线的综合分析[J].应用气象学报,4(2):162-173. Qi L B, Chen Y L. 2004. Synthetic analysis of a squall in Yangtze River Delta [J]. Journal of Applied Meteorological Science,4(2):162-173 (in Chinese)
- 屈梅芳,俞小鼎,农孟松,等.2021.一次弱垂直风切变环境下飊线发展维持的成因分析[J].暴雨灾害,40(5):466-473. Qu M F, Yu X D, Nong M S, et al. 2021. Development and maintenance of squall line in a weak vertical wind shear environment [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(5):466-473 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.003
- 沈新勇,岳裕甲,刘佳,等.2016.凝结潜热释放和地表热通量对一次飊线过程的影响[J].气象科学,36(6):709-720. Shen X Y, Yue S J, Liu J, et al. 2016. Effects of latent heating and surface heat fluxes on a squall line process [J]. Journal of the Meteorological Sciences,36(6):709-720

- (in Chinese). doi:10.3969/2016jms.0013
- 孙建华,郑淋淋,赵思雄.2014.水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验[J].大气科学,38(4):742–755. Sun J H, Zheng L L, Zhao S X. 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(4):742–755 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2013.13187
- 王林,沈新勇,王勇,等.2021.华南一次飑线升尺度增长过程的机制分析[J].高原气象,40(1):145–158. Wang L, Shen X Y, Wang Y Q, et al. 2021. Mechanism analysis of a squall line upscale growing process in South China [J]. Plateau Meteorology,40(1):145–158 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2019.00127
- 王鹤鸢,赵建伟,高兵.2020.利用风廓线雷达资料分析大理机场飑线天气过程的风垂直变化特征[J].沙漠与绿洲气象,14(2):75–80. Wang Z H, Zhao J W, Gao B. 2020. Vertical wind characteristics of two squall lines at Dali airport based on wind profiler radar [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(4):64–71 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2020.02.010
- 俞小鼎,周小刚,王秀明.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311–337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(3):311–337 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.030
- 张弛,王咏青,廖玥,等.2019.初始场与云微物理参数方案在飑线数值模拟中的对比研究[J].高原气象,38(2):410–420. Zhang C, Wang Y Q, Liao Y, et al. 2019. The comparative study of initial field and cloud microphysics parameter scheme in the numerical simulation of squall line [J]. Plateau Meteorology,38(2):410–420 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2018.00084
- 张建军,王咏青,钟玮.2016.飑线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J].大气科学,40(4):689–702. Zhang J J, Wang Y Q, Zhong W. 2016. Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,40(4):689–702 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1505.14337
- 支星,徐海明,米卫红,等.2014.中国东北和西北区域三种再分析资料与探空资料的温度对比[J].气象与环境学报,30(6):147–157. Zhi X, Xu H M, Mi W H, et al. Comparative analysis of atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in northeast and northwest of China [J]. Journal of Meteorology and Environment,30(6):147–157 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2014.06.022
- 竹利,陈朝平,陈茂强,等.2018.川北飑线成熟阶段灾害性大风成因个例分析[J].暴雨灾害,37(2):164–173. Zhu L, Chen C P, Chen M Q, et al. 2018. Cause analysis of a disastrous gale event induced by squall line in the mature stage in northern Sichuan [J]. Torrential Rain and Disasters,37(2):164–173 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2018.02.008
- 朱娟,张立凤,张铭.2022.盛夏苏北地区一次飑线过程的数值模拟研究[J].暴雨灾害,41(1):15–23. Zhu J, Zhang L F, Zhang M. 2022. Numerical simulation and study of a squall in the north of Jiangsu in mid-summer [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):15–23 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.01.002
- 朱彦良,凌超,陈洪滨,等.2012.两种再分析资料与RS92探空资料的比较分析[J].气候与环境研究,17(3):381–391. Zhu Y L, Ling C, Chen H B, et al. 2012. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radio-sonde data [J]. Climatic and Environmental Research,17(3):381–391 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2011.10138
- Bluestein H B, Jain M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,42(16):1711–1732. doi:10.1175/1520–0469(1985)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2
- Fujita T. 1955. Results of detailed synoptic studies of squall lines [J]. Tellus,7(4):405–436. doi:10.3402/tellusa.v7i4.8920
- Fujita T. 1963. Analytical meso-meteorology: A review [J]. Meteorological Monographs,5(27):77–125. doi:10.1007/978–1–940033–56–3_5
- Fujita T. 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD: Satellite and Meteorology Res. Paper No.156 [R]. Chicago:The University of Chicago:103–104
- Haertel P T, Johnson R H. 2000. The linear dynamics of squall line meso-high and wake lows [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,57(1):93–107. doi:10.1175/1520–0469(2000)057<0093:TLDOSL>2.0.CO;2
- Meng Z, Yan D, Zhang Y. 2013. General features of squall lines in East China [J]. Monthly Weather Review,141(5):1629–1647. doi:10.1175/MWR–D–12–00208.1
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude meso-scale convective systems [J]. American Meteorological Society,128(10):3413–3436. doi:10.1175/1520–0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,45(3):463–485. doi:10.1175/1520–0469(1988)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2
- Smull B F, Houze R A. 1985. A midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain: radar and satellite observations [J]. Monthly Weather Review,113(1):117–133. doi:10.1175/1520–0493(1985)113<0117:AMSLWA>2.0.CO;2
- Smull B F, Houze R A. 1987. Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation [J]. American Meteorological Society,115(12):2869–2889. doi:10.1175/1520–0493(1987)115<2869:RIISLW>2.0.CO;2
- Stensrud D J, Coniglio M C, Davies–Jones R P, et al. 2005. Comments on “A theory for strong long-lived squall lines revisited” [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,62(8):289–296. doi:10.1175/JAS3514.1
- Takemi T. 2007. Environmental stability control of the intensity of squall line under low-level shear conditions [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,84(4):374–389. doi:10.1029/2007JD008793
- Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W. 1982. Two-dimensional convection in non-constant shear a model of mid-latitude squall lines [J]. Royal Meteorological Society,108(458):739–762. doi:10.1002/qj.49710845802
- Weisman M L, Rotunno R. 2004. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,61(4):361–382. doi:10.1175/1520–0469(2004)061<0361:ATFSL>2.0.CO;2
- Yin Y, Levin Z, Reislin T, et al. 2000. Seeding convective clouds with hygroscopic flares: numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics [J]. Journal of Applied Meteorology,39(9):1460–1472. doi:10.1175/1520–0450(2000)039<1460:SCCWHF>2.0.CO;2