

田莹,姚秀萍,2024. 华南切变线研究的现状与展望[J]. 气象,50(3):275-290. Tian Y, Yao X P, 2024. Research advances and prospects of the South China shear line[J]. Meteor Mon, 50(3):275-290(in Chinese).

华南切变线研究的现状与展望*

田 莹^{1,2,3} 姚秀萍³

1 山东省气象台, 济南 250031

2 山东省防灾减灾重点实验室, 济南 250031

3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 华南前汛期暴雨研究一直是大气科学领域的研究热点,也是难点。华南切变线是华南地区最为重要的天气系统之一,与华南前汛期降水密切相关。为了提高华南地区暴雨的预报能力,深化对华南切变线的认识,文章从华南切变线的定义、结构、发展机制、影响作用、与其他天气系统相互作用等方面,回顾了华南切变线的相关研究及其成果。同时,结合预报业务实际,展望了在多源大气探测资料不断出现的当今,华南切变线研究值得进一步深入的科学问题。

关键词: 华南切变线, 研究进展, 展望

中图分类号: P404, P448

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.011301

Research Advances and Prospects of the South China Shear Line

TIAN Ying^{1,2,3} YAO Xiuping³

1 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

2 Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Jinan 250031

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Research on the South China rainstorms in the first rainy season is not only a hot spot but also a difficulty in atmospheric science field. The South China shear line is an important weather system in South China, which is closely related to rainstorms in the South China first rainy season. In order to improve the forecasting ability of rainstorm in South China, deepen the understanding of the South China shear line, this paper systematically reviews the related researches on the South China shear line, including the definition, structure, formation and developing mechanisms, influence and interaction with other weather systems of the South China shear line. Meanwhile, by combining the reviews with the actual forecasting operation, we also propose some scientific issues worthy of further research.

Key words: South China shear line, research advance, prospect

引 言

华南地处中国南部,北邻南岭山脉和武夷山山

脉,南邻南海,有着曲折的海陆边界,位于东亚季风爆发区最前沿。因特殊的地理位置和地形地势,华南地区大气高温、高湿,湿层深厚,潜在不稳定能量大。在有利的大气环流形势影响下,华南暴雨的数

* 国家自然科学基金项目(42375014,42275013)、山东省自然科学基金项目(ZR2022QD011)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-071)和中国气象局重点创新团队(CMA2022ZD04)共同资助

2023年2月3日收稿; 2024年1月13日收修定稿

第一作者:田莹,主要从事定量降水预报研究. E-mail:305300204@qq.com

通讯作者:姚秀萍,主要从事中尺度气象学、暴雨等灾害性天气研究. E-mail:yaoxp@cma.gov.cn

量、强度和时长均位于全国前列,前、后汛期降水非常突出(鹿世瑾,1990;王坚红等,2014;袁媛等,2012)。

华南前汛期的研究取得了很多成果,明确了华南前汛期雨季的发生多与冷空气的活动和季风涌的北上密切相关,是在一定的大尺度环流背景下产生于气旋性天气尺度系统内部的中尺度现象(Luo et al,2017;梁巧倩等,2019;林晓霞等,2017;曾智琳等,2019;张亚妮等,2019;陈涛等,2020b),引起华南前汛期暴雨的天气系统主要是切变线及其上的低涡(吴丽姬等,2007;伍志方等,2011;Luo et al,2020)。所以华南切变线是产生华南暴雨、强对流等灾害性天气的重要天气尺度系统,其水平尺度可达上千千米,传统意义上的华南切变线主要位于锋面的偏北一侧,与锋面一起,在向南移动的过程中,为华南暴雨的产生提供天气尺度的辐合(陈杨瑞雪,2018)。

根据热力性质的不同,影响华南前汛期的切变线既有暖式切变也有冷式切变。由于切变线结构和造成暴雨机制的差异,不同类型切变线影响下的暴雨频数有所差异。夏季风爆发前,冷式和暖式切变影响下的暖区暴雨次数大致相当,夏季风爆发之后,暖式切变线的影响要明显大于冷式切变(陈翔翔等,2012)。

虽然华南切变线对前汛期暴雨有重要作用,但是对华南切变线的系统性研究工作并不多,多是作为暴雨发生发展的一个影响天气系统进行描述,而不是作为主要的研究对象。对华南切变系统的分析及预报,早期主要通过实况资料诊断方法进行,后来,环流合成分析(柳崇健和赵深铭,1985)、EOF分解方法(郭恒和张庆云,2016)、位涡反演(吴国雄,2001;蒙伟光等,2004;Gao et al,2005)等都多次应用于华南切变线的研究当中,促进预报员理解不同尺度天气系统的动力特征,及分析切变线等天气尺度系统与其他不同尺度系统之间的相互作用。如今,在全球气候变化背景下,我国各地切变线及其降水研究备受关注(姚秀萍等,2014;2017;马嘉理和姚秀萍,2015;Yan and Yao,2019;韦志刚,2021;Yao et al,2020b),加上华南汛期暴雨强度和暴雨日数的增加(李晓娟等,2012;伍红雨等,2017;韦志刚,2021),有必要以华南切变线为主要研究对象,回顾梳理华南切变线的研究进展。

本文拟系统回顾华南切变线的相关研究,从华

南切变线的定义、结构、形成发展机制、影响作用以及与其他天气系统相互作用等方面梳理相关研究成果。在此基础上,展望在多源大气探测资料不断出现的当今,华南切变线研究中值得进一步深入的科学问题。

1 华南切变线定义

切变线是低空风场上具有气旋式切变的的不连续线。《华南前汛期暴雨文集》(《华南前汛期暴雨文集》编写组,1982)和《华南前汛期暴雨》(《华南前汛期暴雨》编写组,1986)中就曾多次指出华南地区的切变线及沿切变线发展、移动的低涡系统是造成华南前汛期暴雨的重要影响系统,并指出传统意义上华南切变线为天气尺度的天气系统,通常是冷暖空气的交界线,多为纬向分布,伴随地面锋从北向南移动,位于地面锋的北侧并与地面锋保持一定的距离,当其移到南岭附近时,850 hPa 切变与地面锋线的位置很接近,尤其是西段,东段则后倾较明显。《大气科学词典》(《大气科学词典》编委会,1994)给出了华南切变线的明确定义:华南切变线是位于长江以南到南海之间切变线的统称,是华南(准)静止锋在低空的反映,是造成华南暴雨等灾害性天气的主要天气系统之一。

关于华南地区的界定,不同研究略有不同,但大部分研究中界定的区域基本一致:华南地区通常为($18^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $106^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)范围内的区域(图 1)。

2 华南切变线分类

切变线在世界各地、各季节均可出现,其涉及的天气系统多,性质也不同,会引起不同程度的降水。梳理近年来关于我国各地切变线的研究成果(姚秀萍等,2014;2017;2019;马嘉理和姚秀萍,2015;Yao et al,2020a;2020b),发现:按照风场特征切变线可分为四类,即暖切变线、冷切变线、准静止切变线和低涡切变线,按照切变线走向可以分为两类,即横切变线和竖切变线。而国外的研究中对于切变线则没有完全一致的定义,只有一些类似的词汇,如“shear line”“convergence line”等被定义和应用,其按照高度可以分为低层 shear line 和高层 shear line,而低层的 shear line 也分为三种,分别为季风 shear line(Yoshida and Ishikawa,2013),锋面

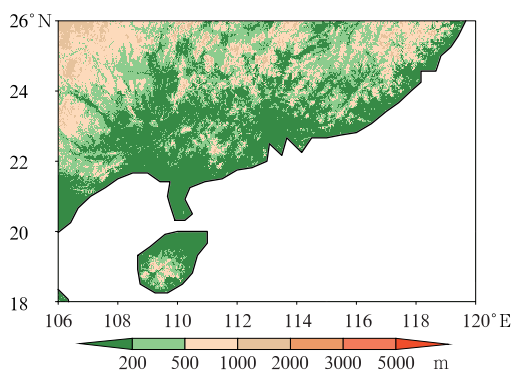


图1 华南研究区域地形高度

Fig. 1 Terrain height of the study area in South China

shear line (Schmid et al, 2000) 和地形 shear line (Lane et al, 2006)。

对于华南切变线的分类,《华南前汛期暴雨文集》(《华南前汛期暴雨文集》编写组, 1982)曾根据1977年5月27日至6月1日的华南暴雨过程,给出了几种华南切变线的形式:冷锋前暖切变线、静止锋后切变线、高压后部切变线和海陆风效应切变线。在之后的研究中,就鲜有学者再对华南切变线进行系统分类,多根据我国传统切变线的分类方法研究不同类型切变线影响下的华南地区灾害性天气发生发展的特征和机理。如,傅慎明等(2010)、林宗桂等(2014)、杨艺亚(2016)和陈翔翔等(2012)分别针对低涡切变型、准静止锋型、季风槽型和切变类暖区暴雨过程进行了总结分析。

通过对华南切变线过程的定义及其个例分析,我们发现,按照中国地区传统切变线的划分来对华南切变线进行分类更符合研究需要。根据切变线走向来划分,华南切变线多为准东西向的切变线。根据切变线热力特征来划分,华南切变线可分为暖切变线、冷切变线和准静止切变线(陈翔翔等, 2012; 傅慎明等, 2010; Luo et al, 2020; 林宗桂等, 2014)三类。在华南前汛期,华南切变线上常有低涡发生和移动,故在天气预报业务中,常把低涡和切变线合称为“低涡切变线”来讨论。独立出现的暖式切变线多生成于华南沿海地区,与季风环流紧密相联系,通常存在季风槽。华南准静止切变线多由冷式切变线南下转变而成,当南下冷空气受地形、非绝热加热等影响而势力减弱,并与南方暖空气势力相当时,即可形成准静止切变,一般与华南准静止锋相配合出现,也可以由华南本地锋生作用而成(林宗桂等, 2014)。

3 华南切变线结构和移动

在不同类型切变线的不同阶段,大气环流场的结构特征往往存在很大的不同,针对华南切变线的研究是一个认识逐渐深化和演进的复杂过程。

20世纪70年代中期以前的研究重点是大气环流、水汽来源和输送、天气尺度降水系统和重大暴雨过程的个例分析。根据这些研究结果,学者们对华南地区暴雨的环流型、主要影响系统及暴雨发生和维持的条件有了基本的了解,认识到切变线固然是低空天气系统,但其与整个对流层的高空流场结构有密切联系(王作述, 1963)。

1977—1982年,华南前汛期暴雨试验共进行了1次预演试验、2次正式试验和1次边界层试验,研究内容囊括了华南前汛期暴雨的环流系统、中尺度特征、暖区暴雨的特征及产生条件等,并形成了《华南前汛期暴雨》(《华南前汛期暴雨》编写组, 1986)和《华南前汛期暴雨文集》(《华南前汛期暴雨文集》编写组, 1982)两本研究成果集。研究发现影响华南的斜压结构切变线系统的环流形势主要有两脊一槽型,两槽一脊型和多波型,此类切变斜压性明显,随高度向北倾斜。若有低涡沿切变线发展和东移,低涡两侧切变线的上空基本均为上升运动,仅有的下沉气流也极弱,范围很窄,冷式切变线的上升运动强度更大,最大垂直速度出现在500~400 hPa,暖式切变线的上升运动略偏弱(柳崇健和赵深铭, 1985; 图2a)。低涡中心附近的上升运动由水汽凝结潜热释放所造成,冷式切变线的上升运动主要由对流层低层切变线与槽线的动力辐合作用所造成,水汽辐合凝结的作用很小,而暖式切变线上的上升运动除了凝结潜热的作用外,温度平流的水平分布的作用同样重要。东南亚夏季风与印度季风在华南暴雨过程中,尤其是5月下旬到6月的前汛期暴雨过程中的作用不能忽略。随着季风槽的建立,在25°N以南,出现一条由西南向东北的水汽输送带,一条天气尺度的雨带随之出现,雨区在槽轴附近呈带状分布,当有强的偏南季风出现时,华南就伴有一次大雨到暴雨过程,槽线南侧的强西南气流中常有暴雨发生(图2b)。对于华南准静止锋的研究表明,华南准静止锋坡度相对较平,因此低层华南准静止切变与华南准静止锋之间的距离相对较远,较强降水多出现于700 hPa切变线南侧,有时在850~700 hPa降水

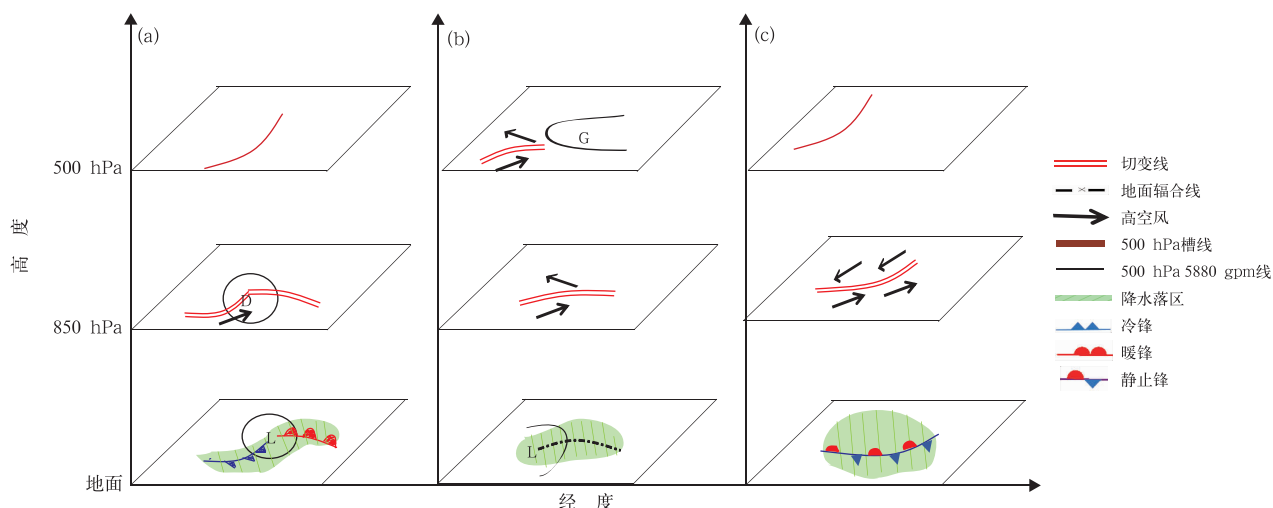


图 2 华南 (a) 低涡伴随冷、暖式切变线, (b) 暖式切变线, (c) 准静止式切变线的垂直结构及其与降水落区的配置示意图

Fig. 2 Vertical structure of the (a) cold and warm, (b) warm and (c) quasi-stationary shear lines and the related rainfall areas

更加明显, 与其相配合的降水范围比冷式切变要大很多。但华南前汛期降水中, 对流性降水和大规模雷雨为其显著特点, 雨强大, 暴雨时间短, 有明显的雨峰波动, 所以主要的暴雨区位于静止锋附近及其前侧暖区, 而锋后稳定性降水中达到暴雨以上程度的并不多见(图 2c)。

20 世纪 90 年代至今, 在华南地区又陆续开展了 3 次与暴雨相关的外场观测试验(周秀骥等, 2003; Zhang et al, 2011; Luo et al, 2017)。针对季风槽切变线的深入研究发现, 此类系统一般有相对独立的空间结构。西南季风的加强可引起季风槽北侧气旋性辐合增强并引发暴雨(杨辉等, 2011)。此时, 暴雨区往往处于一致的偏南气流中, 由于水汽充沛, 对流不稳定能量大, 降水引起的凝结潜热的正反馈效应可导致暴雨区上空形成暖心结构进而拉伸气柱, 而且由于受高层暖平流的共同影响, 根据位涡守恒原理, 这一结构特征对维持暴雨的辐合切变线及上升气流均有增强作用(陈翔翔等, 2012; 王坚红等, 2017; 图 2b)。西南季风的进一步增强, 还可引发季风槽内部发展出季风低压。有研究表明季风低压具有上暖下冷的热力层结分布, 对流层中低层具有对流不稳定特征。动力结构方面则表现出低层辐合且伴有气旋性涡度、高层辐散并伴有反气旋性涡度的特点(蒋建莹等, 2007; 图 3)。分析还发现季风低压中心的轴线随高度向东南方向倾斜, 这一结构特征与南亚季风低压和梅雨锋低压均有较大不同(王东

海等, 2022)。此外, 针对低压暴雨强度和演变特征的研究指出, 强盛的季风低压可产生不亚于热带气旋的暴雨强度(曾智琳等, 2020; 图 4)。在低压环流发展演变过程中, 尽管低压强度与暴雨落区范围大小的逐日变化是同步的, 但从逐日最大降水量演变看, 仅在低压加强阶段与低压的强度变化保持一致

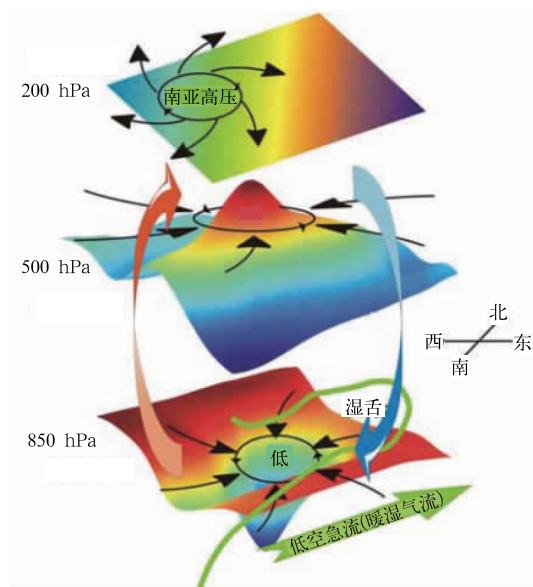


图 3 2005 年 8 月 19—20 日华南季风低压的三维结构概略模型(蒋建莹等, 2007)

Fig. 3 Schematic of the three-dimensional concept model for the monsoon depression over South China in 19—20 August 2005 (Jiang et al, 2007)

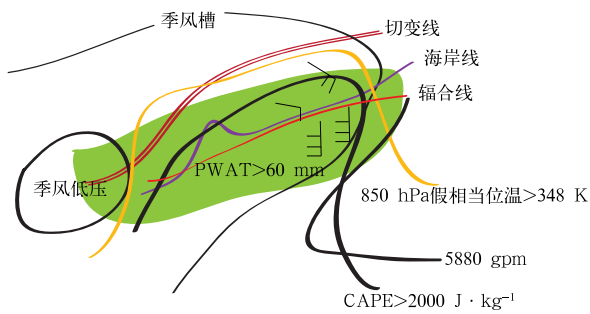


图4 2018年8月30—31日与南海季风低压相关的华南极端降水事件的多尺度概念模型(曾智琳等,2020)

Fig. 4 Schematic diagram of multiscale concept model for the extreme rainfall event in South China associated with the monsoon depression over the South China Sea during 30-31 August 2018 (Zeng et al., 2020)

(蔡景就等,2019)。

20世纪90年代以来,在华南准静止切变的研究中也取得了一定的成果。研究发现与华南准静止切变相伴随的华南准静止锋具有类似于广义梅雨锋的动力、热力结构,主要表现为位于700 hPa以下弱的锋区呈相当正压垂直结构,大气层结是弱对流不稳定性的,700~400 hPa为近似中性层结,但随高度并不表现出向北倾斜的特征,暖心结构明显。华南准静止切变两侧南北风对吹,但北风十分微弱,南侧对流层中低层为强盛的偏南风,风场水平切变强而垂直切变弱是华南准静止锋区别于一般锋面的显著结构特征之一。华南准静止切变上,低层为假相当位温等值线的密集带,暖湿区主要位于华南准静止切变南侧(何立富,2006)。

总体来说,华南斜压切变线强降水和季风槽强降水的环流特征具有明显不同。斜压切变线类对流活动的抬升凝结高度约在900~850 hPa,南北向的温度梯度提供了斜压不稳定能量,0~3 km强垂直风切变使对流易于维持和发展,对流区有较强的水汽通量辐合,风暴相对螺旋度较大,对流的旋转性和沿着旋转方向的移动性特征明显,而季风槽强降水抬升凝结高度更低,对流活动具有正压的热带对流性质,可以在弱的水汽通量辐合和弱的垂直风切变环境中维持,但对流强度不如前者(梁巧倩等,2019)。斜压切变线降水中尺度雨团在一条西南—东北走向的雨带上不断向东南方向合并发展,潜热加热中心有两个(张艳霞等,2020),而季风槽降水中

尺度雨团沿海岸线自西向东移动发展,潜热加热中心为单峰值。

华南切变线的移动与南北两侧冷暖空气的活动密不可分,当冷空气势力强盛时,切变线逐渐向南移动,当西南季风加强,则切变线向北推进,两者势力相当时,切变线维持准静止。但在讨论华南切变线的移动及其造成的灾害时,不能忽略大气环流、切变线本身结构、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)、季风的强弱以及特殊地形的影响。另外,华南切变线以及与之配合的锋区的移动,并非只有原来的平流,也有着新陈代谢。在冷式切变附近,湿度的铅直输送往往大于平流(顾震潮和叶笃正,1955),而假相当位温的梯度又多半由湿度差异造成,铅直环流对锋区及切变线的移动和演变有着重要的作用(王作述,1963)。冬季,寒潮冷锋有不断生消的情况(顾震潮等,1958),而在夏季,由于冷空气变性更大,锋面及切变线平移的成分更少,因而新陈代谢对其移动就更重要(王作述,1963)。近期研究发现,凝结潜热加热通常发生在涡旋东侧的暖切变及暖区附近,因此位于涡旋东边的非绝热加热的垂直非均匀性不仅制造了正位涡,使得局地的垂直涡度增强,还产生了关于涡旋中心非对称的垂直涡度倾向而使得低涡随之东移,而与之相伴随的华南切变线也随之北抬或南压(郑永骏等,2013)。

4 华南切变线的发生发展机制

4.1 华南切变线发生机制

华南斜压切变线的生成多是西风带系统与西太副高相互作用的产物,每次切变线活动在500 hPa中高纬和低纬几乎都有低槽活动,两者结合可以产生较强的切变线系统,中高纬环流形势主要有两槽一脊型、两脊一槽型和多波型三类。在第一种类型的环流形势下,亚洲东岸槽底可南伸至25°N以南地区,冷空气势力强盛,长驱直下,从东路侵入华南,而后两者低槽振幅较小,但南支波动频繁,北方低槽后侧冷空气与南支槽前暖湿气流在华南相遇形成切变线,冷暖空气势力相当时,切变线维持准静止。在有利的环流形势下,一些西南涡可以东移影响华南,但为数甚少,该类型低涡移入华南后受到明显的中、低纬系统相互作用影响,在季风槽输送充沛的水汽的作用下,西南涡可以再度加强,在华南形成强盛的

低涡切变(傅慎明等,2010)。

季风槽与华南准正压切变线的关系已被普遍认可。季风槽最初是指西南季风期间位于印度半岛中部的低气压槽,此槽一般呈东东南—西西北走向,西南季风的活跃与中断与此槽位置有密切关系,季风槽发展明显时,向东可扩展到中南半岛,并与菲律宾一带的近赤道槽连接,此时华南经常出现西南季风和东南季风的辐合切变,我国预报员则称之为季风槽。自开展南海季风试验以来,我国的气象学家在南海夏季风爆发的特征、演变规律及其与海洋的相互作用等方面进行了细致的研究,发现季风槽切变线多为准正压结构的暖式切变线,此类华南切变线处于一致的偏南气流中。该类华南切变系统在低层季风暖湿空气和北侧干暖空气交界面上,区别于中高纬度斜压锋生,其触发机制可以是一个斜压性很弱的高空短波槽,触发方式是一片中高层正涡度平流滑过低层干湿气团交界带,在这个交界带的南侧 $\partial^2 \theta_c / \partial y^2$ 负值最大轴附近最先出现第二类条件不稳定(CISK)过程(胡伯威,1996)。

华南地形复杂,对天气系统有非线性作用。复杂的地形差异会造成下垫面加热不均匀,进而产生局地环流与大尺度环流相互作用并形成华南切变线(陶诗言,1980)。另外,华南地区毗邻南海,海岸线漫长且曲折,海陆分布差异造成加热不均匀,产生的海风活动可导致两条海风锋的交点处产生切变系统,这类切变线和静止锋切变线很类似,所不同的是:静止锋切变两侧有明显的温差,中尺度系统更为活跃、雨团更强。华南沿海切变线的日变化常存在断裂的现象,这也与地形密切相关,切变断裂处,多出现在水网平原区,这与气候暴雨区颇为一致。

另外,在华南切变线的形成过程中,青藏高原的动力和热力作用、西太平洋暖池、高(低)空急流和地面冷池等都起到重要作用(钱维宏等,2016; Luo, 2017; 任倩等, 2018; 赵玉春和王叶红, 2009; Tu et al, 2014; Wu and Luo, 2016; Du and Chen, 2018; 2019; 胡宁等, 2020)。

4.2 华南切变线发展机制

切变线的强弱变化与降水量直接相关,所以学者们对于切变线发展或减弱的机制进行了诸多研究。

4.2.1 动力机制

动力机制在华南切变线的发展中起关键作用。

当北方有冷空气补充南下或者南方有暖空气北抬时,将引起切变线辐合加强,冷暖空气的强烈辐合引起大气锋生,大气锋生直接驱动了垂直涡度的发展(吴国雄和刘还珠,1999),有利于华南切变线的发展。冷空气的活动与高原两侧的西风带低槽关系密切,高原北侧东移南下的低槽系统在北方冷空气较强时对华南地区冷式、准静止式甚至是低涡切变线的发展影响较大,而南支槽的发展东移则与所有华南切变线的发展都有着密切的关系。当高原南侧、甚至高原上空有短波槽东移时,槽前正涡度平流的作用引起低层气流辐合上升和切变线系统的发展,在合适的流场背景下,甚至可以形成低涡系统(曾智琳等,2020)。根据刘式适和刘式达(1991)的研究,水平风场除了具有旋转和膨胀的性质之外,也具有变形的特点,在切变线上,气流往往做变形或者旋转运动,做变形运动时更有利于切变线的生成和维持。

华南切变线的强烈发展与其不稳定发展机制有密切关系。曾有学者分别利用正压不稳定理论和斜压不稳定理论成功解释了切变线和锋面上不稳定的发展(胡伯威,1996; Charney, 1947)。如果一个区域是正压不稳定的,则一定有平均纬向动能向扰动动能的转换,以提供正压不稳定增长的能量,但正压不稳定的出现要求扰动的波长至少要达到风切变区域的 7.5 倍(Hoover, 2015),当波长达不到时,系统发展的能量不是来自正压扰动,而是来自其他的能量转换。斜压不稳定扰动产生的基本原因是在等压面上气温随纬度增加而降低,根据热成风关系,基本气流的西风分量则会随着高度而增加,在行星边界层斜压不稳定的发展尤其强盛。这是因为与切变系统相伴随的重要天气系统还有低空急流和高空急流,低空急流主要位于行星边界层,具有很大的垂直风切变,使边界层处于强斜压不稳定的状态。低空急流的发展与高空急流入口区的质量和动量调整的耦合过程有关。斜压不稳定理论可以很好地解释中纬度西风带天气尺度系统的发生、发展与其能量转换的关系,谢义炳(1980)提出了湿斜压不稳定是导致季风区大面积暴雨的天气系统发生发展的重要机制。根据湿空气动力学方程组,吴国雄等(2005)提出了湿位涡守恒定律,湿位涡不稳定判据在华南切变线暴雨预报中得到了广泛的应用,这与 Callies and Ferrari(2018)的研究保持了很好的一致性。切变线的维持可以造成华南地区持续性降水,在切变线上经常形成类似涡街的中尺度低值系统,凡是中

尺度低值系统形成的地方,降水强度明显加大,使得切变线上的降水呈现出明显的非均匀性特点,这种低值系统的产生可以归结为切变线上的涡层不稳定。涡层不稳定的发生对环境场有较高要求,体现了系统发生发展过程中不同尺度系统之间的相互作用(高守亭和周玉淑,2001),有利于切变线的发展加强。

4.2.2 暖湿季风气流的作用

暖湿气流输送带可以为华南切变线系统输送水汽、热量和不稳定能量,使得切变线附近大气垂直层结表现为深厚暖层、深厚湿层,并有持续的对流不稳定层结。切变线或风场上的辐合触发对流,形成强降水,降水释放凝结潜热,增高气柱温度,引起低层减压和辐合增强,铅直运动进一步增强,水汽输送也随之增强,这就完成了一个正的反馈循环。与引起台风发展的 CISK 机制类似,这种正反馈循环是低层切变系统自激增长的原因之一。这与 Berry and Reeder(2016)和 Ditchek et al(2016)对澳大利亚季风环流发展的研究是一致的。由此可见,降水热力反馈机制对于切变线的维持和发展起作用(蒋建莹等,2007)。对于准正压结构的华南切变线,陈秋士(1986)提出的天气尺度触发场与较小尺度的热力场耦合决定发展尺度的机制用于解释上述切变线发展机制更加合适,对于斜压切变系统,涡旋中非均匀的非绝热加热在垂直和水平方向的非对称分布同样对涡旋发展和移动产生重要影响,加强了对流层低层大气的气旋性环流(郑永骏等,2013)。

暖湿输送带中的低空急流在输送水汽和热量的同时也使边界层垂直风切变增强,水平涡度倾斜部分转化为垂直涡度发展,与切变线上的垂直涡度叠加,是造成切变线发展的一个重要因素(曾智琳等,2019)。暖湿输送带中强的水汽输送诱发相当位涡异常,在特定条件下,能激发垂直涡度的快速变化,水汽输送位置离切变线越近、水汽供应越充足、水汽柱越深厚,则高低空散度发展耦合越充分,垂直上升运动越旺盛,切变线强度越强,切变线上低涡越活跃(张雪蓉等,2021)。

4.2.3 地形作用

华南独特的地形与切变线之间的非线性相互作用可使切变系统强度产生明显变化。中尺度地形可能引起大气不稳定(翟国庆等,1995)和地形槽,对气旋加深有显著影响,当背风坡重力波与小尺度对流系统或者更大尺度的切变线系统相互作用时,能加

大上升速度,释放不稳定能量,从而产生更加强烈的辐合,使原本存在的天气系统加强(湘中中,1988)。大量的数值模拟和地形敏感性试验研究了华南复杂地形对暴雨的影响(赵玉春,2007)。地形的阻挡有利于华南夜间低空急流的形成,在海陆风效应的基础上,沿海白天的向岸风入夜后在科里奥利力作用下顺时针旋转并与地转风叠加,也是造成夜间边界层急流发展的重要原因(Du et al,2014)。发展的边界层急流在华南沿海海陆边界及两支山脉的地形摩擦差异影响下,引起水平风切变和垂直风切变增强,增强的垂直风切变引起水平涡度发展,在上升气流的作用下部分转化为垂直涡度,引起切变系统发展(曾智琳等,2019;图5)。

除受到华南地区本身地形影响外,华南以外的地形也对华南切变线的发展有重要影响。数值试验表明青藏高原在华南切变线的形成和维持上发挥着重要的作用。在高原对气流的绕流作用下,南支气流转换为西南气流,源源不断地为华南地区输送暖湿气流,切变和降水更易出现在华南地区(何钰和李国平,2013)。青藏高原上春季感热通量的高低对季风环流的强弱有明显作用,进而对华南切变线的生成和发展产生影响(梁潇云等,2005;Wan and Wu,2007;Duan et al,2013;姚秀萍等,2019;Fang et al,2012)。我国近海西太平洋暖池区附近,存在一个稳定影响华南前汛期降水的负相关区,冷水年,西太副高强度异常偏强,有利于西南风的增强,并将暖湿气

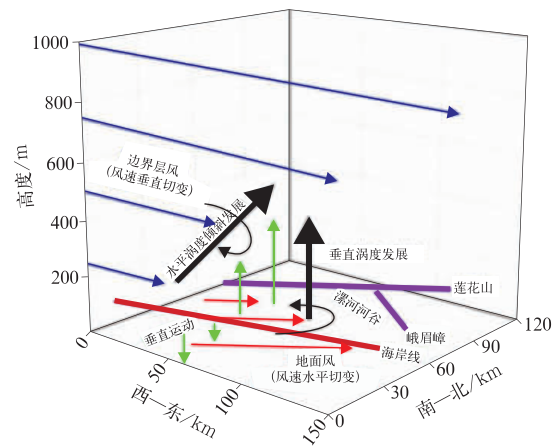


图5 2017年6月16日沿海持续性强降雨和对流维持的动力模型(曾智琳等,2019)

Fig. 5 Schematic diagram of dynamic model depicting the convective maintenance for long-duration torrential rainfall along the coast on 16 June 2017 (Zeng et al, 2019)

流不断输送到华南地区,我国中北部地区出现异常偏北风,导致冷空气的不断南下,两者在华南地区相遇,有利于锋生和气旋式切变增强(任倩等,2018)。

综上所述,影响华南的各种天气和环流系统是相互作用的,大尺度系统制约和孕育中小系统的发生发展,中小系统产生以后能成长壮大,反过来对大尺度系统起到反馈作用。华南地区独特的地理位置使得其既受西风带系统又受热带季风系统影响,而且其纬度低,天气尺度运动已经不具有准地转平衡关系,所以华南切变线的形成和发展既受斜压不稳定机制的影响,又与正压不稳定及中尺度不稳定有密切的关系。同时,青藏高原、西太平洋暖池以及华南独特的地形特点在华南切变线的生成与发展中也起着至关重要的作用(梁潇云等,2005;任倩等,2018;赵玉春,2007)。这与我国和世界其他地区相比既有相似之处又有着明显的区别(姚秀萍等,2014;2017;2019;Moise and Colman,2010;Karam et al,2009;Lane et al,2006;Peters and Schumacher,2015)。与江淮切变线相比,两者都受到西风带系统和热带季风系统的共同影响,而且青藏高原在两地切变线的生成和发展中都起到了关键作用。但江淮切变线主要形成于受高原北侧绕流作用而形成的兰州小高压与副热带高压之间,而且江淮地区纬度高,受冷空气影响更加频繁,所以江淮切变线系统多具有斜压性质。而与其他热带地区的切变线相比,两者都可以利用正压切变的能量,以正压方式增长(Hoover,2015),同时澳大利亚等地也受到季风的影响(Berry and Reeder,2016;Ditchev et al,2016),当冷空气强盛时,斜压不稳定机制也在切变线发生发展中发挥重要作用(Callies and Ferrari,2018),但华南地区由于具有独特的地理地形而受到青藏高原的影响,导致华南地区切变线系统多发、降水甚至极端降水频繁(龙彦羲,2022)。

5 华南切变线与天气尺度系统

5.1 华南准静止锋

华南准静止锋是由北方南下冷空气从低层侵入华南,并在华南一带长时间停滞,与来自低纬海洋的西南暖湿气流交汇而形成,具有广义的梅雨锋结构特征。由于华南纬度较低,冷锋抵达时坡度变缓,冷空气非常浅薄,锋区只有在边界层才能出现,边界层

内的能量锋区与中尺度扰动有密切关系。华南准静止锋的东段与西段的特征截然不同,东段因为纬度较高,所以具有明显的斜压性质,西段因为纬度低,所以斜压性弱,但有明显的水平风切变(Chen and Chang,1980)。

华南准静止锋锋区与经向风零风速线相重合,由低到高分别表现为华南准静止锋锋面和华南切变线,锋区南(北)侧分别为偏南(北)风,静止锋北侧的北风较弱,静止锋南侧对流层中低层为强盛的偏南风(何立富,2006),上升运动主要在锋前与锋面以上。华南准静止锋锋面两边密度差较小,但是锋面附近水平风切变却反而更大,这是因为冷空气在向南移动的过程中由于摩擦和纬度的原因逐渐下沉辐散,最南侧的冷空气与暖空气之间的风向切变就会更明显,维持时间也更久(顾震潮,1953)。华南静止锋区内风场水平切变强而垂直切变弱是其区别于一般锋面的显著结构特征之一,锋生函数计算表明,水平风速的辐合变形是静止锋形成的主要原因之一,华南准静止锋因切变线上的锋生作用而逐渐增强。

在华南准静止锋影响下,锋后降水一般是连续性的,但静止锋及锋前常触发强对流天气,引起严重的灾害。华南静止锋锋前,高温、高湿,若有一定的抬升机制存在,如弱冷空气渗透或地形抬升,就会触发暖区暴雨(夏茹娣等,2006)。华南前汛期区域性极端降水与准静止锋密切相关(Huang et al,2018),季风爆发前、后都以准静止锋锋面型和天气尺度系统弱强迫下的暖区型极端降水为主(Luo et al,2020)。这些天气尺度扰动的形成和增强可以得到青藏高原地表强感热加热的正贡献(Wang et al,2013;吴国雄等,2005),也与青藏高原对西风的阻挡和分流作用密切相关(Wu and Chen,1985)。

5.2 低空急流

华南地区从地面到 500 hPa 高度上有多重强风中心,这些低空和超低空急流与中高纬度的高空西风急流一样,都具有明显的轴状结构和较强的垂直切变区与水平切变区。从发生高度上划分,可以分为与天气系统(或次天气系统)相关的低空急流(SLLJ,多出现在 1~4 km 高度)和边界层急流(BLJ,多出现在 1 km 高度以下)两类(Du and Chen,2018;Liu et al,2014;Zhang and Meng,2019;何立富等,2016;朱乾根等,1985;李佳,2021)。

不同类型的低空急流的发生、发展与华南切变

线及暴雨活动之间都存在着相互作用。西南低空急流一般属于天气尺度系统,其发生、发展和移动多与大气环流形势和潜热释放所引起的气压梯度力的变化有关,包括西太副高与西侧低值系统的发展相互作用和西南季风的加强两类,两者均与华南切变线存在强相互作用(蔡景就等,2019;孙建华和赵思雄,2000;陈翔翔等,2012;吴乃庚等,2020;伍志方等,2018;蒙伟光等,2014)。华南边界层急流常出现在高大山脉附近或沿海地区,具有明显的日变化特征,最大风速出现在夜间和清晨,与局地热力差异的日变化(朱乾根等,1985)、边界层内非地转风惯性振荡(Blackadar,1957)、斜压不稳定(Holton,1967)、季风槽南侧西南季风加强(赵平等,2003;Zhao et al,2003)和沿海地形有关。

低空急流是华南汛期大部分暴雨和强对流等天气,尤其是暖区暴雨的重要影响系统(赵玉春和王叶红,2009;吴乃庚等,2020;张艳霞等,2020)。华南持续性暴雨过程中,天气形势上均有利于北方冷空气南下和低层西南暖湿急流维持,冷暖空气在华南地区容易稳定对峙形成切变线,从而造成持续多日的暴雨天气(刘国忠等,2023)。局地极端降水与中尺度环境条件关系更为密切,例如大气层结不稳定、持续水汽输送及不稳定能量的补充,其中局地对流的触发对大气湿度极为敏感(吴亚丽等,2018),大多数极端降水事件都伴随有中尺度对流组织化的特征,而这都与强盛西南或偏南季风急流有密切的关系(Luo et al,2013;曾智琳等,2020;Wu et al,2020)。Du and Chen(2018;2019)提出了双低空急流的概念(图6),其中内陆强降水雨带往往与华南切变线和天气尺度低空急流相关,而远离切变系统的暖区降水则与BLJ相关。双低空急流现象在暖区暴雨事件中较为普遍(Luo et al,2020),双低空急流及两者之间耦合作用在对流触发中发挥了关键的作用,可能产生较强的降水,甚至极端性的局地暴雨(Li et al,2020;Wang et al,2014;蒲义良等,2023;Wu and Luo,2016;Du and Chen,2019)。

6 华南切变线研究和预报技术手段

总结前期对于华南切变线的研究内容,发现其中很少是专门针对华南切变,多数将华南切变作为某种天气现象的大尺度或中尺度的触发机制来做研究。

学者们从大尺度的角度研究华南切变线的发生、发展及其对华南暴雨的影响,并指出切变线等天气尺度系统与中小尺度系统之间存在明显的相互作用(朱乾根等,2000;刘国忠等,2023)。随着卫星及雷达等非常规观测资料的应用,华南暴雨中小尺度对流系统的形成、发展原因及演变特征的分析研究工作也相继开展(蒙伟光等,2012;曾智琳等,2020)。在华南切变线的研究工作当中,除了常规物理量诊断分析外,以下物理量也常被用做辅助研究:位涡、各种不稳定理论、 Q 矢量和螺旋度等(吴国雄,2001;蒙伟光等,2004;Gao,2000;高守亭和周玉淑,2001;岳彩军,2008)。

随着大型机和并行计算理论的发展,对华南切变线发生发展及移动机理的研究也越来越深入。时空分辨率的提升使得全球数值模式和中尺度数值模式的界限越来越模糊(尹剑,2019),对华南切变线等系统的预报时效和精细化程度均有裨益(高守亭等,2018;陈涛等,2020a)。随着卫星、雷达、GPS-MET和加密气象观测站等新型观测资料的应用,中尺度数值模式对华南切变线形成、发展及其对中小尺度对流系统的分析研究工作也有显著进展(尹剑,2019),在对华南切变线暴雨两个例的数值模拟研究和诊断分析的基础上,可以获得华南切变线生成、发展和消亡的机理以及华南切变线上不同尺度天气系统之间相互作用的机制(王坚红等,2017),其中华南区

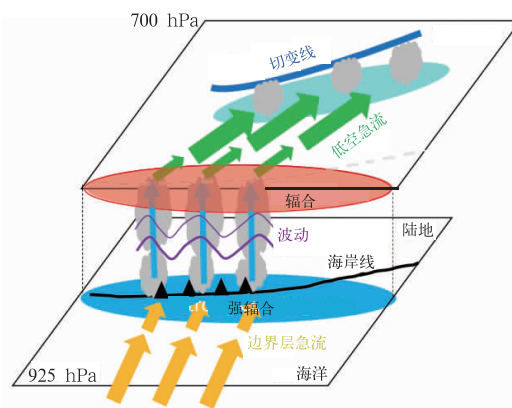


图6 双低空急流(边界层急流和天气尺度急流)对华南海岸暖区暴雨影响的天气概念模型:对流发生时(Du and Chen, 2019)

Fig. 6 Schematic diagram of concept model depicting the convective initiation of warm-sector rainstorm near the coast in South China associated with double low-level jets during convection (Du and Chen, 2019)

域对流可分辨集合预报系统可揭示不同扰动来源相互作用特征及其对华南前汛期暴雨预报的作用(Zhang and Meng, 2019; 苏冉等, 2019)。

人工智能技术迎来了第三次发展浪潮且在一些领域得到推广和应用, 集合预报已经成为预报的一个主流方向。研究人员积极发展主客观融合的预报技术方法对集合预报产品进行释用, 发展了包括天气环流分型和历史相似样本分析(Neal et al, 2016)等聚类分析、反演和可视化技术, 用于快速提取可以被有效利用的切变线等天气尺度系统的预报信息, 以帮助预报员利用海量的集合预报数据进行天气分析和预报(罗亚丽等, 2020)。这为人工智能技术与天气预报结合提供了契机, 一些气象学者已经将智能学习技术用于数值模式的初值生成、预报和数值模式释用中(许小峰, 2018; 孙健等, 2021), 如何把人工智能技术与天气预报业务相结合以提高天气预报准确率还有很长的路要走, 是气象科研和业务人员面临的紧迫任务。

7 总结与展望

华南切变线作为华南地区的主要天气系统, 影响着中国华南地区以及邻近地区的天气, 对华南切变线的研究一直倍受关注, 有关华南切变线的研究是天气预报业务中一个重要着眼点, 并且在实际天气预报应用中成效显著。本文对华南切变线的研究进展进行了综述, 在华南切变线的定义、分类、结构和移动、发生发展机制以及华南切变线与其他天气尺度系统的相互作用等方面, 都取得了不少成果。

(1) 目前对华南切变线尚未有系统的定义和分类标准, 但根据前期研究成果可知, 导致华南前汛期暴雨的切变线既有独立存在的冷式、暖式和准静止式切变线, 也有与低涡相联系的切变线。

(2) 在不同类型切变线的不同阶段, 环流场的结构特征往往也存在很大不同。华南切变线的移动及其造成的灾害与大气环流、切变线本身结构、西太副高、季风的强弱、特殊地形、锋生、锋消、多尺度天气系统相互作用和非绝热加热的影响有关。

(3) 华南切变线的生成和发展过程既与西风槽的活动有关, 又与副高和季风的的活动有密切关系, 同时青藏高原的动力和热力作用、高低空急流、华南准静止锋、热低压、热力和动力不稳定、中尺度辐合、中尺度急流、降水凝结潜热以及地形都起到重要作用。

华南暴雨是在有利的大尺度环流背景下, 多尺度天气系统相互作用的结果, 天气尺度的华南切变线只有在与各种尺度系统的相互作用下才能造成严重的降水事件。

华南切变线相关研究已经取得了很多进展, 以下对华南切变线研究进行展望。

(1) 华南切变线与周边天气系统之间相互作用方面的研究需要进一步加强。有必要以华南切变线为主要研究对象, 进一步研究不同天气系统以及中尺度对流系统等对华南切变线的影响作用以及华南切变线对这些系统的反作用。

(2) 在如今多源观测资料的不断发展的前提下, 华南切变线的发生、发展和移动机制及影响因子方面, 尤其是动力学理论的研究仍需进一步深入。目前的研究分析方法多在天气学统计分析、切变线暴雨个例的物理量诊断方面, 仍然需要加强对非线性和涡旋方面的动力、热力机理研究。

(3) 华南切变线影响下的暴雨时空分布, 尤其是中尺度对流系统嵌入华南切变线其中的暴雨预报仍存在很大的进步空间, 另外, 数值模式对华南切变线系统精细结构和发展机理的模拟也还需要进一步研究。

最后, 本文所列参考文献可能不能够涵盖华南切变线研究的所有工作, 仅提供给有兴趣的读者进行查阅。

参考文献

- 蔡景就, 伍志方, 陈晓庆, 等, 2019. “18·8”广东季风低压持续性特大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 38(6): 576-586. Cai J J, Wu Z F, Chen X Q, et al, 2019. Cause analysis of persistent torrential rain associated with monsoon depression occurred in Guangdong on August 2018[J]. Torr Rain Dis, 38(6): 576-586(in Chinese).
- 陈秋士, 1986. 重力惯性波的不稳定与台风和中纬度次天气尺度系统发生发展关系[M]//中国气象学天气专业委员会. 天气学的新进展. 北京: 气象出版社: 189-198. Chen Q S, 1986. The relationship between instability of inertial gravity waves and development of typhoons and midlatitude sub synoptic scale systems [M]//China Meteorological Weather Professional Committee. New Progress in Synoptic Science. Beijing: China Meteorological Press: 189-198(in Chinese).
- 陈涛, 陈博宇, 于超, 等, 2020a. 华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J]. 气象, 46(9): 1129-1142. Chen T, Chen B Y, Yu C, et al, 2020a. Analysis of multiscale features and ensemble forecast sensitivity for MCSs in front-zone and warm sector during pre-summer rainy season in South China[J]. Meteor Mon, 46(9): 1129-1142(in Chinese).

- 陈涛,张芳华,符娇兰,等,2020b. 2014年5月8—9日引发珠江口区域强降水的两个长生命史 MCS 特征分析[J]. 气象,46(4):449-461. Chen T, Zhang F H, Fu J L, et al, 2020b. Analysis of two successive rainstorm-induced long-lived mesoscale convective systems struck Pearl River estuary during 8—9 May 2014[J]. Meteor Mon, 46(4):449-461(in Chinese).
- 陈翔翔,丁治英,刘彩虹,等,2012. 2000—2009年5、6月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报,28(5):707-718. Chen X X, Ding Z Y, Liu C H, et al, 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000—2009[J]. J Trop Meteor, 28(5):707-718(in Chinese).
- 陈杨瑞雪,2018. 华南前汛期极端降水多尺度特征的统计分析与个例研究[D]. 北京:中国科学院大学. Chen Y R X, 2018. Multiple-scale characteristics of the extreme rainfall over South China during the presummer rainy season: statistic analysis and a case study[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese).
- 《大气科学词典》编委会,1994. 大气科学词典[M]. 北京:气象出版社. Editorial Committee of 'Atmospheric Science Dictionary', 1994. Atmospheric Science Dictionary[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 傅慎明,赵思雄,孙建华,等,2010. 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究[J]. 大气科学,34(2):235-252. Fu S M, Zhao S X, Sun J H, et al, 2010. One kind of vortex causing heavy rainfall during pre-rainy season in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2):235-252(in Chinese).
- 高守亭,周玉淑,2001. 水平切变线上涡层不稳定性理论[J]. 气象学报,59(4):393-404. Gao S T, Zhou Y S, 2001. The instability of the vortex sheet along the horizontal shear line[J]. Acta Meteor Sin, 59(4):393-404(in Chinese).
- 高守亭,周玉淑,冉令坤,2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学,42(4):833-846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K, 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4):833-846(in Chinese).
- 顾震潮,1953. 论锋面在副热带里的性质和华中华南锋面分析问题[J]. 气象学报,24(1):28-32. Gu Z C, 1953. On the nature of frontal surface in subtropical zone and the analysis of Central and South China fronts[J]. Acta Meteor Sin, 24(1):28-32(in Chinese).
- 顾震潮,陈雄山,许有丰,1958. 锋面假相当位温图和它对我国寒潮冷锋上界变化分析的应用[J]. 气象学报,29(1):44-56. Gu Z C, Chen X S, Xu Y F, 1958. Frontal θ_{se} chart and its application to the analysis of upper boundary of cold-wave front in China[J]. Acta Meteor Sin, 29(1):44-56(in Chinese).
- 顾震潮,叶笃正,1955. 关于我国天气过程大地形影响的几个事实和计算[J]. 气象学报,26(3):167-181. Gu Z C, Ye D Z, 1955. Calculation and a few facts of the influence of topography on weather process in China[J]. Acta Meteor Sin, 26(3):167-181(in Chinese).
- 郭恒,张庆云,2016. 华南前汛期盛期中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析[J]. 气候与环境研究,21(6):633-652. Guo H, Zhang Q Y, 2016. The dominant modes of precipitation anomalies in eastern China during the peak of pre-rainy season in South China and possible causes[J]. Climatic Environ Res, 21(6):633-652(in Chinese).
- 何立富,2006. “05.6”华南暴雨形成机理与中尺度对流系统研究[D]. 南京:南京信息工程大学. He L F, 2006. Study on the physical mechanisms and MCSs of the sustained heavy rainfall event in South China in June 2005[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 何立富,陈涛,孔期,2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报,27(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):559-569(in Chinese).
- 何钰,李国平,2013. 青藏高原大地形对华南持续性暴雨影响的数值试验[J]. 大气科学,37(4):933-944. He Y, Li G P, 2013. Numerical experiments on influence of Tibetan Plateau on persistent heavy rain in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(4):933-944(in Chinese).
- 胡伯威,1996. 夏季副热带相当正压切变线的动力学性质[J]. 大气科学,20(3):326-336. Hu B W, 1996. The dynamic characters of equivalent-barotropic shear-line in summer subtropics[J]. Sci Atmos Sin, 20(3):326-336(in Chinese).
- 胡宁,符娇兰,汪会,2020. 华南前汛期强降水个例模式降水预报误差成因初探[J]. 气象,46(8):1026-1038. Hu N, Fu J L, Wang H, 2020. Analysis of the source of model precipitation prediction bias for a heavy rainfall event in the pre-flood season in South China[J]. Meteor Mon, 46(8):1026-1038(in Chinese).
- 《华南前汛期暴雨》编写组,1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社. Editorial Committee of “Preflood Season Rainfall in South China”, 1986. Preflood Season Rainfall in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Technology Press(in Chinese).
- 《华南前汛期暴雨文集》编写组,1982. 华南前汛期暴雨文集[M]. 北京:气象出版社. Editorial Committee of Collected Works of “Preflood Season Rainfall in South China”, 1982. Collected Works of Preflood Season Rainfall in South China[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 蒋建莹,江吉喜,布亚林,等,2007. 华南季风低压暴雨及其结构分析[J]. 气象学报,65(4):537-549. Jiang J Y, Jiang J X, Bu Y L, et al, 2007. Heavy rainfall associated with monsoon depression in South China: structure analysis[J]. Acta Meteor Sin, 65(4):537-549(in Chinese).
- 李佳,2021. 初夏华南低空急流及其日变化对华南降水的影响[D]. 南京:南京信息工程大学. Li J, 2021. The influence of the diurnal cycles of low level jets on precipitation over South China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 李晓娟,简茂球,方一川,等,2012. 广东省前汛期大到暴雨频数的时空变化特征[J]. 气象,38(11):1339-1347. Li X J, Jian M Q, Fang Y C, et al, 2012. Spatiotemporal variations of heavy rain's

- frequency in the early rainy season in Guangdong[J]. Meteor Mon, 38(11):1339-1347(in Chinese).
- 梁巧倩, 蒙伟光, 孙喜艳, 等, 2019. 广东前汛期锋面强降水和后汛期季风强降水特征对比分析[J]. 热带气象学报, 35(1):51-62. Liang Q Q, Meng W G, Sun X Y, et al, 2019. Contrastive analysis of frontal rainstorm vs monsoon rainstorm processes during the April-May-June raining season vs July-August-September raining season[J]. J Trop Meteor, 35(1):51-62(in Chinese).
- 梁潇云, 刘屹崧, 吴国雄, 2005. 青藏高原隆升对春、夏季亚洲大气环流的影响[J]. 高原气象, 24(6):837-845. Liang X Y, Liu Y M, Wu G X, 2005. The impact of Qinghai-Xizang Plateau uplift on Asian general circulation in spring and summer[J]. Plateau Meteor, 24(6):837-845(in Chinese).
- 林晓霞, 冯业荣, 张诚忠, 等, 2017. 华南一次暴雨过程热力和动力特征的诊断分析[J]. 热带气象学报, 33(6):975-984. Lin X X, Feng Y R, Zhang C Z, et al, 2017. Diagnostic analysis of thermal and dynamic characteristics of a rainstorm process in Southern China[J]. J Trop Meteor, 33(6):975-984(in Chinese).
- 林宗桂, 林墨, 林开平, 等, 2014. 一股高原南下弱冷空气触发准静止锋对流过程分析[J]. 热带气象学报, 30(1):111-118. Lin Z G, Lin M, Lin K P, et al, 2014. A convective process of quasi-stationary front triggered by southward-moving weak cold air from Tibetan Plateau[J]. J Trop Meteor, 30(1):111-118(in Chinese).
- 柳崇健, 赵深铭, 1985. 华南前汛期合成低涡风场的结构特征[J]. 大气科学, 9(2):205-210. Liu C J, Zhao S M, 1985. The structure characteristic of composite wind field in vortices during pre-flood period in South China[J]. Sci Atmos Sin, 9(2):205-210(in Chinese).
- 刘国忠, 覃月凤, 覃卫坚, 等, 2023. 2022 年广西极端“龙舟水”暴雨过程环境场特征分析[J]. 气象研究与应用, 44(1):7-13. Liu G Z, Qin Y F, Qin W J, et al, 2023. Analysis of environmental field characteristics of an extreme dragon-boat precipitation process in Guangxi in 2022[J]. J Meteor Res Appl, 44(1):7-13(in Chinese).
- 刘式适, 刘式达, 1991. 大气动力学(上)[M]. 北京:北京大学出版社:536. Liu S S, Liu S D, 1991. Atmospheric Dynamics(1st volume)[M]. Beijing:Peking University Press:536(in Chinese).
- 龙彦羲, 2022. 中国东部极端降水发生时间特征及其与大气环流异常的关系[D]. 南京:南京信息工程大学. Long Y X, 2022. Relationship between time characteristics of extreme precipitation in East China and anomaly of atmospheric circulation[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 鹿世瑾, 1990. 华南气候[M]. 北京:气象出版社:42. Lu S J, 1990. Climate in South China[M]. Beijing:China Meteorological Press:42(in Chinese).
- 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等, 2020. 中国暴雨的科学 with 预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报, 78(3):419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):419-450(in Chinese).
- 马嘉理, 姚秀萍, 2015. 1981—2013 年 6—7 月江淮地区切变线及暴雨统计分析[J]. 气象学报, 73(5):883-894. Ma J L, Yao X P, 2015. Statistical analysis of the shear lines and torrential rains over the Yangtze-Huaihe River region during June-July in 1981-2013[J]. Acta Meteor Sin, 73(5):883-894(in Chinese).
- 蒙伟光, 戴光丰, 张艳霞, 等, 2012. 华南局地锋生及对流系统发展的模拟分析研究[J]. 气象学报, 70(3):387-401. Meng W G, Dai G F, Zhang Y X, et al, 2012. Analysis and simulative study of the local frontogenesis and convection development over South China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):387-401(in Chinese).
- 蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等, 2004. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J]. 大气科学, 28(3):330-341. Meng W G, Wang A Y, Li J N, et al, 2004. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective systems in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 28(3):330-341(in Chinese).
- 蒙伟光, 张艳霞, 袁金南, 等, 2014. 华南沿海 2011 年 7 月 15—18 日持续暴雨过程中的季风槽与中尺度对流系统相互作用[J]. 气象学报, 72(3):508-525. Meng W G, Zhang Y X, Yuan J N, et al, 2014. Monsoon trough and MCSs interactions during the persistent torrential rainfall event of 15—18 July 2011 along the South China coast[J]. Acta Meteor Sin, 72(3):508-525(in Chinese).
- 蒲义良, 卢翔诗, 胡胜, 等, 2023. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. 气象, 49(2):201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2):201-212(in Chinese).
- 钱维宏, 蒋宁, 杜钧, 2016. 中国东部 7 类暴雨异常环流型[J]. 气象, 42(6):674-685. Qian W H, Jiang N, Du J, 2016. Seven anomalous synoptic patterns of regional heavy rain in eastern China[J]. Meteor Mon, 42(6):674-685(in Chinese).
- 任倩, 祁莉, 詹丰兴, 等, 2018. 江南雨季降水与前期西太平洋暖池热含量异常的关系及其可能机制[J]. 大气科学学报, 41(6):762-774. Ren Q, Qi L, Zhan F X, et al, 2018. Relationship between the precipitation during the Jiangnan rainy seasons (JRS) and the preceding heat content anomalies over the western Pacific Ocean warm pool and its possible mechanism[J]. Trans Atmos Sci, 41(6):762-774(in Chinese).
- 苏冉, 廖菲, 齐彦斌, 2019. 华南暖区暴雨过程集合动力因子的诊断分析[J]. 气象, 45(11):1517-1526. Su R, Liao F, Qi Y B, 2019. Diagnostic analysis of ensemble dynamic factors during the warm-sector torrential rain in South China[J]. Meteor Mon, 45(11):1517-1526(in Chinese).
- 孙健, 曹卓, 李恒, 等, 2021. 人工智能技术在数值天气预报中的应用[J]. 应用气象学报, 32(1):1-11. Sun J, Cao Z, Li H, et al, 2021. Application of artificial intelligence technology to numerical weather prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 32(1):1-11(in Chinese).

- 孙建华,赵思雄,2000.一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究[J].大气科学,24(3):381-392. Sun J H, Zhao S X, 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 24(3):381-392(in Chinese).
- 陶诗言,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:255. Tao S Y, 1980. Rainstorm in China[M]. Beijing: Science Press: 255 (in Chinese).
- 王东海,曾智琳,张春燕,等,2022.南海暖季天气系统与中尺度对流过程研究进展[J].大气科学,46(2):419-439. Wang D H, Zeng Z L, Zhang C Y, et al, 2022. Advances in synoptic systems and mesoscale convective processes during the warm season over the South China Sea[J]. Chin J Atmos Sci, 46(2):419-439(in Chinese).
- 王坚红,徐碧裕,刘刚,等,2014.华南前汛期广东暴雨分区动力特征及特大暴雨分析[J].气象与环境学报,30(6):43-51. Wang J H, Xu B Y, Liu G, et al, 2014. Dynamics characteristics of rainstorm division in Guangdong Province and analysis of a severe rainstorm process[J]. J Meteor Environ, 30(6):43-51(in Chinese).
- 王坚红,杨艺亚,苗春生,等,2017.华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J].大气科学,41(4):784-796. Wang J H, Yang Y Y, Miao C S, et al, 2017. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China coast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):784-796 (in Chinese).
- 王作述,1963.一次江淮流域切变线过程的研究[J].气象学报,33(2):189-205. Wang Z S, 1963. A case study of low level shear line over Yangtze-HWIA valley in China[J]. Acta Meteor Sin, 33(2):189-205(in Chinese).
- 韦志刚,李娟娟,刘雨佳,等,2021.1961—2018年华南年和各季极端降水变化特征的比较分析[J].高原气象,40(6):1513-1530. Wei Z G, Li X R, Liu Y J, et al, 2021. Comparative analysis of the characteristics of annual and seasonal extreme precipitation in South China during 1961—2018[J]. Plateau Meteor, 40(6):1513-1530(in Chinese).
- 吴国雄,2001.全型涡度方程和经典涡度方程比较[J].气象学报,59(4):385-392. Wu G X, 2001. Comparison between the complete-form vorticity equation and the traditional vorticity equation[J]. Acta Meteor Sin, 59(4):385-392(in Chinese).
- 吴国雄,刘还珠,1999.全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J].气象学报,57(1):1-15. Wu G X, Liu H Z, 1999. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteor Sin, 57(1):1-15(in Chinese).
- 吴国雄,刘屹岷,刘新,等,2005.青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局[J].大气科学,29(1):47-56. Wu G X, Liu Y M, Liu X, et al, 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer[J]. Chin J Atmos Sci, 29(1):47-56 (in Chinese).
- 吴丽姬,温之平,贺海晏,等,2007.华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型[J].中山大学学报(自然科学版),46(6):108-113. Wu L J, Wen Z P, He H Y, et al, 2007. The distribution features and patterns of regional durative rainstorm during pre-rainy season over South China[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 46(6):108-113(in Chinese).
- 吴乃庚,温之平,邓文剑,等,2020.华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J].气象科学,40(5):605-616. Wu N G, Wen Z P, Deng W J, et al, 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China[J]. J Meteor Sci, 40(5):605-616(in Chinese).
- 吴亚丽,蒙伟光,陈德辉,等,2018.一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究[J].气象学报,76(3):323-342. Wu Y L, Meng W G, Chen D H, et al, 2018. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China[J]. Acta Meteor Sin, 76(3):323-342(in Chinese).
- 伍红雨,李春梅,刘蔚琴,2017.1961—2014年广东小时强降水的变化特征[J].气象,43(3):305-314. Wu H Y, Li C M, Liu W Q, 2017. Variation characteristics of hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014[J]. Meteor Mon, 43(3):305-314 (in Chinese).
- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018.2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 伍志方,曾沁,吴乃庚,等,2011.广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前大暴雨过程对比分析[J].气象,37(7):838-846. Wu Z F, Zeng Q, Wu N G, et al, 2011. Contrast analysis of two torrential rain processes under the 7 May post-trough and the 14 May prior-trough in 2010 in Guangzhou[J]. Meteor Mon, 37(7):838-846 (in Chinese).
- 夏茹娣,赵思雄,孙建华,2006.一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究[J].大气科学,30(5):988-1008. Xia R D, Zhao S X, Sun J H, 2006. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 30(5):988-1008(in Chinese).
- 湘中中,1988.中尺度暴雨分析和预报[M].北京:气象出版社. Xiang Z Z, 1988. Mesoscale Analysis and Forecast of Heavy Rainstorm Events[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 谢义炳,1980.湿斜压大气的天气动力学问题[M].长春:吉林出版社:1-15. Xie Y B, 1980. Synoptic Dynamics of Moist Baroclinic Atmosphere[M]. Changchun: Jilin Press: 1-15(in Chinese).
- 许小峰,2018.从物理模型到智能分析——降低天气预报不确定性的新探索[J].气象,44(3):341-350. Xu X F, 2018. From physical model to intelligent analysis: a new exploration to reduce the uncertainty of weather forecast[J]. Meteor Mon, 44(3):341-350 (in Chinese).
- 杨辉,李崇银,潘静,2011.一次引发华南大暴雨的南海季风槽异常特征及其原因分析[J].气候与环境研究,16(1):1-14. Yang H, Li C Y, Pan J, 2011. Cause and anomalous characteristics of the South China Sea monsoon trough producing heavy rainfall in South China[J]. Climatic Environ Res, 16(1):1-14(in Chinese).
- 杨艺亚,2016.两类华南沿海暖区辐合线暴雨特征与发展机制对比研

- 究[D]. 南京:南京信息工程大学. Yang Y Y, 2016. Comparative study of characteristics and development mechanism on two types of heavy rainfall of warm area convergence line in South China coast[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 姚秀萍, 孙建元, 康岚, 等, 2014. 高原切变线研究的若干进展[J]. 高原气象, 33(1): 294-300. Yao X P, Sun J Y, Kang L, et al, 2014. Advances on research of shear convergence line over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 33(1): 294-300(in Chinese).
- 姚秀萍, 孙建元, 马嘉理, 2017. 江淮切变线研究的回顾与展望[J]. 高原气象, 36(4): 1138-1151. Yao X P, Sun J Y, Ma J L, 2017. Advances on research of Yangtze-Huaihe shear line[J]. Plateau Meteor, 36(4): 1138-1151(in Chinese).
- 姚秀萍, 闫丽朱, 张硕, 2019. 大气非绝热加热作用的研究进展与展望[J]. 气象, 45(1): 1-16. Yao X P, Yan L Z, Zhang S, 2019. Research progresses and prospects of atmospheric diabatic heating[J]. Meteor Mon, 45(1): 1-16(in Chinese).
- 尹剑, 2019. 雷达径向风资料在 GRAPES 高分辨率数值模式中的同化应用[D]. 南京:南京信息工程大学. Yin J, 2019. Application of radar radial wind data assimilation in GRAPES high resolution numerical model[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 袁媛, 任福民, 王艳姣, 等, 2012. 2012 年华南前汛期降水特征及环流异常分析[J]. 气象, 38(10): 1247-1254. Yuan Y, Ren F M, Wang Y J, et al, 2012. Analysis of the precipitation feature and general circulation anomaly during the pre-flood season in South China in 2012[J]. Meteor Mon, 38(10): 1247-1254(in Chinese).
- 岳彩军, 2008. 梅雨锋气旋暴雨的 Q 矢量分析: 个例研究[J]. 气象学报, 66(1): 35-49. Yue C J, 2008. The Q vector analysis of the heavy rainfall from Meiyu front cyclone: a case study[J]. Acta Meteor Sin, 66(1): 35-49(in Chinese).
- 曾智琳, 谌芸, 王东海, 2020. 2018 年 8 月华南超历史极值降水事件的观测分析与机理研究[J]. 大气科学, 44(4): 695-715. Zeng Z L, Chen Y, Wang D H, 2020. Observation and mechanism analysis for a record-breaking heavy rainfall event over Southern China in August 2018[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 695-715(in Chinese).
- 曾智琳, 谌芸, 朱克云, 2019. 2017 年 6 月一次华南沿海强降水的对流性特征及热动力机制研究[J]. 大气科学, 43(6): 1295-1312. Zeng Z L, Chen Y, Zhu K Y, 2019. Convective characteristics and thermal dynamic mechanisms for coastal torrential rainfall over South China during June 2017[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6): 1295-1312(in Chinese).
- 翟国庆, 高坤, 俞樟孝, 等, 1995. 暴雨过程中中尺度地形作用的数值试验[J]. 大气科学, 19(4): 475-480. Zhai G Q, Gao K, Yu Z X, et al, 1995. Numerical simulation of the effects of mesoscale topography in a heavy rain process[J]. Sci Atmos Sin, 19(4): 475-480(in Chinese).
- 张雪蓉, 李晓容, 廖一帆, 等, 2021. 水汽对梅雨期切变线大暴雨影响的数值试验[J]. 气象科学, 41(5): 617-630. Zhang X R, Li X R, Liao Y F, et al, 2021. A numerical study on the effect of water vapor on a rainstorm related to shear line during Mei-yu period[J]. J Meteor Sci, 41(5): 617-630(in Chinese).
- 张亚妮, 姚秀萍, 于超, 2019. 高层动力强迫对回流型华南暖区暴雨影响的个例研究[J]. 热带气象学报, 35(2): 166-176. Zhang Y N, Yao X P, Yu C, 2019. A case study on the effect of upper dynamics forcing on warm vector rainstorm over the South of China[J]. J Trop Meteor, 35(2): 166-176(in Chinese).
- 张艳霞, 蒙伟光, 徐道生, 等, 2020. 华南锋面和季风降水环流特征及加热结构对比分析[J]. 热带气象学报, 36(1): 1-12. Zhang Y X, Meng W G, Xu D S, et al, 2020. Comparative analysis of frontal and monsoonal precipitation circulation characteristics and heating structure[J]. J Trop Meteor, 36(1): 1-12(in Chinese).
- 赵平, 孙健, 周秀骥, 2003. 1998 年春夏南海低空急流形成机制研究[J]. 科学通报, 48(6): 623-627. Zhao P, Sun J, Zhou X J, 2003. Mechanism of formation of low level jets in the South China Sea during spring and summer of 1998[J]. Chin Sci Bull, 48(6): 623-627(in Chinese).
- 赵玉春, 2007. 热带扰动引发华南前汛期暴雨的机理研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Zhao Y C, 2007. Study on the mechanism of early-summer rainstorms in southern China triggered by tropical disturbances[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 赵玉春, 王叶红, 2009. 近 30 年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害, 28(3): 193-202, 228. Zhao Y C, Wang Y H, 2009. A review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980's[J]. Torr Rain Dis, 28(3): 193-202, 228(in Chinese).
- 郑骏, 吴国雄, 刘屹岷, 2013. 涡旋发展和移动的动力和热力问题 I: PV-Q 观点[J]. 气象学报, 71(2): 185-197. Zheng Y J, Wu G X, Liu Y M, 2013. Dynamical and thermal problems in vortex development and movement. Part I: a PV-Q view[J]. Acta Meteor Sin, 71(2): 185-197(in Chinese).
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等, 2003. 98 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京:气象出版社: 220. Zhou X J, Xue J S, Tao Z Y, et al, 2003. The Study on the Scientific Experiment of Rainstorm in South China in 1998[M]. Beijing: China Meteorological Press: 220(in Chinese).
- 朱乾根, 洪永庭, 周军, 1985. 大尺度低空急流附近的水汽输送与暴雨[J]. 大气科学学报, 8(2): 131-139. Zhu Q G, Hong Y T, Zhou J, 1985. Moisture transfer and rainstorms around the large scale low level jet stream[J]. Trans Atmos Sci, 8(2): 131-139(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理和方法: 第 3 版[M]. 北京:气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. Principle and Method of Synoptic Meteorology[M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Berry G J, Reeder M J, 2016. The dynamics of australian monsoon bursts[J]. J Atmos Sci, 73(1): 55-69.
- Blackadar A K, 1957. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions[J]. Bull Amer

- Meteor Soc, 38(5):283-290.
- Callies J, Ferrari R, 2018. Baroclinic instability in the presence of convection[J]. *J Phys Oceanogr*, 48(1):45-60.
- Charney J G, 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current[J]. *J Atmos Sci*, 4(5):136-162.
- Chen T J G, Chang C P, 1980. The structure and vorticity budget of an early summer monsoon trough (Mei-Yu) over southeastern China and Japan[J]. *Mon Wea Rev*, 108(7):942-953.
- Ditchek S D, Boos W R, Camargo S J, et al, 2016. A genesis index for monsoon disturbances[J]. *J Climate*, 29(14):5189-5203.
- Du Y, Chen G X, 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis [J]. *Mon Wea Rev*, 146(11):3827-3844.
- Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: convection initiation[J]. *Mon Wea Rev*, 147(2):543-565.
- Du Y, Zhang Q H, Chen Y L, et al, 2014. Numerical simulations of spatial distributions and diurnal variations of low-level jets in China during early summer[J]. *J Climate*, 27(15):5747-5767.
- Duan A M, Wang M R, Lei Y H, et al, 2013. Trends in summer rainfall over China associated with the Tibetan Plateau sensible heat source during 1980-2008[J]. *J Climate*, 26(1):261-275.
- Fang Y, Chen W, Zhou W, 2012. Analysis of the role played by circulation in the persistent precipitation over South China in June 2010[J]. *Adv Atmos Sci*, 29(4):769-781.
- Gao S T, 2000. The instability of the vortex sheet along the shear line[J]. *Adv Atmos Sci*, 17(4):525-537.
- Gao S T, Cui X P, Zhou Y S, et al, 2005. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with two-dimensional tropical convection [J]. *J Geophys Res Atmos*, 110 (D17): D17104.
- Holton J R, 1967. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain[J]. *Tellus*, 19(2):200-205.
- Hoover B T, 2015. Identifying a barotropic growth mechanism in east pacific tropical cyclogenesis using adjoint-derived sensitivity gradients[J]. *J Atmos Sci*, 72(3):1215-1234.
- Huang L, Luo Y L, Zhang D L, 2018. The relationship between anomalous presummer extreme rainfall over South China and synoptic disturbances[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(7):3395-3413.
- Karam D B, Flamant C, Tulet P, et al, 2009. Dry cyclogenesis and dust mobilization in the intertropical discontinuity of the West African monsoon: a case study[J]. *J Geophys Res Atmos*, 114 (D5):D05115.
- Lane T P, Sharman R D, Frehlich R G, et al, 2006. Numerical simulations of the wake of Kauai[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(9):1313-1331.
- Li Z H, Luo Y L, Du Y, et al, 2020. Statistical characteristics of pre-summer rainfall over South China and associated synoptic conditions[J]. *J Meteor Soc Japan*, 98(1):213-233.
- Liu H B, He M Y, Wang B, et al, 2014. Advances in low-level jet research and future prospects[J]. *J Meteor Res*, 28(1):57-75.
- Luo Y L, 2017. Advances in understanding the early-summer heavy rainfall over South China[M]//Chang C P, Lau N G, Johnson R H, et al. *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, 3rd ed. 215-226.
- Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al, 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River Basin[J]. *J Climate*, 26(1):110-132.
- Luo Y L, Xia R D, Chan J C L, 2020. Characteristics, physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: research progress during 2008-2019[J]. *J Meteor Soc Japan*, 98 (1):19-42.
- Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al, 2017. The southern China monsoon rainfall experiment(SCMREX)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(5):999-1013.
- Moise A, Colman R, 2010. Tropical Australia and the Australian monsoon: general assessment and projected changes[C]//Managing Climate Change: Papers from the Greenhouse 2009 Conference. Perth:CSIRO Publishing:2042-2048.
- Neal R, Fereday D, Crocker R, et al, 2016. A flexible approach to defining weather patterns and their application in weather forecasting over Europe[J]. *Meteor Appl*, 23(3):389-400.
- Peters J M, Schumacher R S, 2015. The simulated structure and evolution of a quasi-idealized warm-season convective system with a training convective line[J]. *J Atmos Sci*, 72(5):1987-2010.
- Schmid W, Schiesser H H, Furger M, et al, 2000. The origin of severe winds in a tornadic bow-echo storm over Northern Switzerland [J]. *Mon Wea Rev*, 128(1):192-207.
- Tu C C, Chen Y L, Chen C S, et al, 2014. A comparison of two heavy rainfall events during the terrain-influenced monsoon rainfall experiment(TiMREX) 2008 [J]. *Mon Wea Rev*, 142 (7): 2436-2463.
- Wan R J, Wu G X, 2007. Mechanism of the spring persistent rains over southeastern China[J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 50(1):130-144.
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D, 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: observational analysis[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119 (23):13206-13232.
- Wang Z Q, Duan A M, Wu G X, 2013. Time-lagged impact of spring sensible heat over the Tibetan Plateau on the summer rainfall anomaly in East China: case studies using the WRF model[J]. *Climate Dyn*, 42(11):2885-2898.
- Wu G X, Chen S J, 1985. The effect of mechanical forcing on the formation of a mesoscale vortex[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 111 (470):1049-1070.
- Wu M W, Luo Y L, 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer

- rainy season of 2015[J]. *J Meteor Res*, 30(5):719-736.
- Wu N G, Ding X, Wen Z P, et al, 2020. Contrasting frontal and warm-sector heavy rainfalls over South China during the early-summer rainy season[J]. *Atmos Res*, 235:104693.
- Yan L Z, Yao X P, 2019. Structural characteristics of the Yangtze-Huaihe cold shear line over Eastern China in summer[J]. *Atmosphere*, 10(4):207.
- Yao X P, Ma J L, Zhang D L, et al, 2020a. A 33-yr Mei-Yu-Season climatology of shear lines over the Yangtze-Huai River Basin in Eastern China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 59(6):1125-1137, doi:10.1175/JAMC-D-19-0229.1.
- Yao X P, Zhang X, Ma J L, 2020b. Characteristics of the meridionally oriented shear lines over the Tibetan Plateau and its relationship with rainstorms in the boreal summer half-year [J]. *J Trop Meteor*, 26(1):93-102.
- Yoshida R, Ishikawa H, 2013. Environmental factors contributing to tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. *Mon Wea Rev*, 141(2):451-467.
- Zhang M R, Meng Z Y, 2019. Warm-sector heavy rainfall in southern China and its WRF simulation evaluation: a low-level-jet perspective[J]. *Mon Wea Rev*, 147(12):4461-4480.
- Zhang R H, Ni Y Q, Liu L P, et al, 2011. South China heavy rainfall experiments (SChEX) [J]. *J Meteor Soc Japan*, 89A:153-166.
- Zhao P, Sun J, Zhou X J, 2003. Mechanism of formation of low level jets in the South China Sea during spring and summer of 1998 [J]. *Chin Sci Bull*, 48(12):1265-1270.

(本文责编:戴洋)