山东地区一次夏季极端暴雨中尺度系统发展演变过程及机理分析

龚琬丁^{1,2},周玉淑^{2,3},钟珊珊^{1*},沈新勇^{1,4},李小凡⁵,邓国^{6,7}

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 云降水物理与强风暴院重点实验室(LACS),中国科学院大气物理研究所,北京 100029
- 3 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049
- 4 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082
- 5 浙江大学地球科学学院,杭州 310027
- 6 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081
- 7 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要:对 2020 年 7 月 22 日山东半岛一次极端暴雨天气过程开展观测分析,并利用中尺度模式 WRF 对此 次局地降水过程进行了高分辨率数值模拟,对暴雨过程进行了天气背景和中尺度降雨的诊断。WRF 模式 较好地再现了此次极端暴雨过程,结果表明:此次极端暴雨过程短时降水强度大且局地性强,在时空上具 有明显中尺度特征。降水发生在北抬副高与华北低涡底部之间的西南气流中,强低涡与低空急流是影响此 次降水的重要天气系统。西南急流为本次暴雨过程极端水汽的主要输送载体;在弱高空辐散场下,从地表 延伸至 500 hPa 高空的深厚低涡是造成本次暴雨的主要影响因子,其时空演变特征与中尺度云团变化一致, 与暴雨的发生直接相关。低涡、低空急流和副高之间的相互作用使低涡加强发展,低涡南部有暖湿气流入 流,北部有干冷气流流入,比湿梯度基本呈现为自南向北递减分布,是典型的伴有低空急流的中尺度低涡 流场分布;低涡辐合及其与副高边缘强风速带的共同作用,导致强垂直运动发展并维持,是该次造成本次 山东半岛极端暴雨的重要原因。

关键词:山东半岛,极端暴雨,中尺度低涡,低空急流,发展演变过程

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2208.21261



作者简介 龚琬丁,女,1997年出生,硕士研究生,主要从事暴雨诊断及机理分析研究。E-mail: 18362095371@163.com 通讯作者 钟珊珊, E-mail: zhongshanshan@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(42175012, 41975137, 41875056, 41930967), 国家重点研发计划(2019YFC1510400) Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 42175012, 41975137, 41875056, 41930967), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2019YFC1510400)

Evolution Process and Mechanism Analysis of the Mesoscale System of an Extreme Summer Rainstorm in Shandong Province

GONG Wanding^{1,2}, ZHOU Yushu^{2,3}, ZHONG Shanshan¹, SHEN Xinyong^{1,4}, LI Xiaofan⁵, Deng Guo^{6,7}

 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry 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
Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics (LACS), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082
School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027
CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081
Yate Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Beijing 100081

Abstract Synoptic circulation pattern and mesoscale system associated with the extreme torrential rain occurring in Shandong Peninsula on July 22, 2020 are analyzed based on conventional observational data and high resolution numerical simulation by using the mesoscale model WRF. The simulation was verified to agree well with the precipitation process. The results show that the rainstorm process has the characteristics of mesoscale features spatially and temporally, represent in its high intensity of short-term rainfall, severe locality, etc. Precipitation occurs in the southwest airflow between the subtropical north elevation and the bottom of the low vortex. Strong vortex and low-level jets are important weather systems that affect this precipitation. The southwest jet stream is the main carrier of extreme water vapor during this heavy precipitation. Under the high-level weak divergent field, the main influencing factor of this rainstorm is the deep low vortex extending from the surface to the 500hPa high altitude. Its temporal and spatial evolution characteristics are consistent with the mesoscale cloud cluster changes shown by the FY-2E hourly TBB data. It is directly related to the occurrence of heavy rain. The interaction between the vortex, the low-level jet and the subtropical high strengthens the development of the low

vortex. There are warm; wet air flows in from the north and cold dry air flows from the south of the low vortex. The specific humidity gradient is roughly distributed from south to north, which is a typical flow field distribution of the vortex accompanied by a low-level jet. Convergence of low vortex and its interaction with the strong wind speed belt at the edge of the subtropical high together lead to the development and maintenance of strong vertical motion, together contributed to the persistence of extreme rainstorm.

Keywords Shandong Peninsula, extreme rainstorm, low vortex, low-level jet, developmental process

1 引言

我国暴雨频发,常引发洪涝灾害。暴雨形成物理机制复杂,降水强度和时空分布往往存在着很强的不均匀性,预报难度大,一直是气象工作者关注的重点和难点。对于暴雨的研究,主要基于实测资料和数值 模拟结果进行分析(章国材,2004)。近年来,很多研究利用各种探测资料和多种模式输出资料,对暴雨 天气过程进行的数值模拟和诊断分析,获得了一些新的认识。陶诗言(1980)、丁一汇等(2005)指出: 暴雨虽然是中尺度现象,是由不同尺度天气系统相互作用的结果,直接造成暴雨的中尺度系统空间尺度一 般在 25~250km,发展于有利的天气尺度环流背景下。华北东北地区最常见的暴雨类型有高空槽(伴冷锋) 暴雨,冷涡暴雨等暴雨天气型(陶诗言,1980;丁一汇,2005;孙建华,2005)。华北东北暴雨过程中通 常伴随有明显的由非均匀饱和引起的局部湿度集中,中高层干冷空气入侵引起的不稳定和动量下传及高空 中尺度急流增强引发的高层局地辐散增强,这三类背景场对暴雨发生有重要作用(高守亭,2018)。

山东半岛处于黄海和渤海之间,三面环海,中部为山地,由于特殊的地理位置和较复杂的地形,夏季 经常出现小范围的暴雨。山东暴雨频次统计及天气学物理量的时空分布特征显示,暴雨天气是山东夏季的 主要灾害性天气之一,全年一半以上的暴雨出现在 6~8 月,并且主要集中在 7 月下旬至 8 月上旬(周雪松 等,2014)。虽然山东暴雨降水次数较江渐和福建两广一带偏少,但降雨强度并不弱,预报难度也很大, 突发性的强降水极易给当地人民的生产生活带来严重损失。山东暴雨一般以西太平洋副热带高压(以下简 称副高)脊线到达 25 N 以北为山东雨季开始的标志,是影响山东暴雨一般以西太平洋副热带高压(以下简 称副高)脊线到达 25 N 以北为山东雨季开始的标志,是影响山东暴雨的重要天气系统,副高的强弱、进 退与中国东部的天气及旱涝等的关系极其密切,是夏半年天气预报中需要着重分析研究的天气系统之一 (曹钢锋等,1986)。山东暴雨影响系统主要有低槽冷锋、气旋、台风(含东风扰动)、切变线和静止锋 等(蒋伯仁等,2005)。山东雨季的暴雨过程,常常受副高边缘和 500hPa 高空槽前西南暖湿气流及低空 冷涡的共同影响,其中低涡是重要的暴雨影响系统(曹钢锋等,1986)。在有锋面系统影响时,降水位置 可能远离低涡中心,而是位于副高压边缘的高温湿舌内(孙兴池等,2015)。同时,中高层的干冷空气入 侵对山东暴雨有重要影响,在济南"7.18"暴雨过程中,济南以北一直存在干冷空气侵入,主要表现形式 为对流层顶附近向下的干冷空气侵入和对流层低层由北向南的冷空气侵入。暴雨发生前 1~2 天,干空气侵 入达到峰值,有利于对流层中上层的对流有效位能的产生、积聚和释放,为暴雨的发生和维持提供强对流 上升运动,同时对锋区的形成和移动具有重要作用(刘会荣等,2010)。

统计意义上,随着副高第二次西伸北跳,雨带相应地由江淮地区北抬至华北和东北区域。可在山东半岛停留并引发极端暴雨过程的情况并不多见,预报难度大;且相对而言,水汽和热力因子对山东暴雨的贡献要高于动力因子(周雪松等,2014)。2020年7月22日,山东半岛出现一次由低涡和副高共同影响下的区域性暴雨过程,降水持续时间短、强度大、范围广,具有明显的中尺度特征,并伴有短时雷雨大风等强对流天气,其中日照7月22日24小时降水243mm,打破了当地最大单日降雨量纪录,属于山东地区的极端暴雨过程。为了揭示此次山东极端暴雨的机理,本文利用再分析资料和中尺度数值模拟,结合观测资料进行诊断分析,以揭示此次山东极端暴雨形成原因,为今后山东地区的极端暴雨预报服务提供支持。

2 资料和方法

本文所用资料包括: ERA5 提供的全球分辨率为 0.25 % 0.25 % 小时再分析资料 (Hersbach et al, 2020); 中国气象局提供的中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集 (Shen et al, 2010; 沈艳, 2013; 许时光, 2014),水平分辨率为 0.1 % 0.1 % 空间范围为 15 % 60 N, 70 % 140 E; 国家气象中心 FY-2E 逐时 TBB 资料 (水平分辨率 0.1 % 0.1 %; 美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 GFS 再分析资料,水平 分辨率为 0.5 % 0.5 % 垂直分辨率为 26 层,时间分辨率为 6 小时,包含温、压、湿、风等基本气象要素, 提供天气环流分析及 WRF 模式初始场及侧边界条件;中尺度数值模式 Weather Research and Forecast(WRF) 高分辨模拟输出资料。利用 WRF 模式对该次暴雨过程进行时空高分辨模拟,在实况与模拟对比基础上, 分析造成 2020 年 7 月 22 日山东地区极端暴雨的中尺度系统结构演变及发展过程。

由于近地面的中尺度低涡对此次极端暴雨有重要作用,本文采用涡度方程对低涡发展过进行分析。不 考虑摩擦及积云对涡度的垂直输送效应,应用"P"坐标中的垂直涡度方程求解局地涡度的变化为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = A + B + C + D, \quad \exists t \doteq A = -\left(u * \frac{\partial(\zeta + f)}{\partial x} + v * \frac{\partial(\zeta + f)}{\partial y}\right), \quad B = -\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}, \quad C = \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p},$$
$$D = -\left(f + \zeta\right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right).$$

A 为涡度平流项,表明由绝对涡的水平分布不均引起的涡度局地变化,包含相对涡度平流和地转涡度 平流。当相对涡度分布不均匀时,沿气流方向相对涡度减小,则存在正涡度平流,局地涡度增加,反之有 局地涡度减小。同理,地转涡度分布不均匀时大气水平运动也会引起的局地涡度变化。北半球风从低纬吹 向高纬度时,气块减小,局地相对涡度减小,当气团由高纬向低纬移动时,局地相对涡度增加; B 项为涡 度垂直输送项,表明非均匀涡度场中由于垂直运动造成的涡度局地变化,当相对涡度随高度减小时,如果存在上升运动即ω<0时,则有局地涡度增加;若存在下沉运动,ω>0时,则有局地涡度减小。当相对涡度随高度增加时,若有上升运动ω<0,则局地涡度减小;若有下沉运动ω>0,则局地涡度增加;C为倾侧项,表示有涡度存在时,垂直运动的水平分布不均所引起的涡度局地变化,即垂直速度在水平方向分布不均匀时,涡度水平分量会转化为铅直分量;D为辐散项,表示由水平的辐合(辐散)引起的垂直涡度增加(减小),主要体现了大气的斜压性的贡献,其中包含两个部分,相对涡度与水平散度和地转涡与水平散度,在辐散时有气旋性涡旋减少,辐合时有气旋性涡旋增加。

3 降水过程观测分析

3.1 降水实况



2020年7月21日20时~23日00时(协调世界时,下同),山东半岛南部及苏皖北部地区出现了一次区域性大暴雨天气过程(图1),50mm以上的强降水集中在鲁中南山地以南与江苏省北部之间,呈东北—西南走向,强降水落区西起河南、安徽、山东和江苏四省交界处,东至胶东半岛;降水过程存在2个主要暴雨中心,临沂市与日照市累计雨量均超过150mm,最大雨量为青岛崂山太清站的352.7mm。安徽宿州、江苏响水出现龙卷。此次降水过程特征之一为短时强降水,最强降水时段为7月22日11~12时,临沂市降雨量超过每小时40mm,具有很强的局地性,在空间和时间上都具有明显的中尺度特征。这次降水过程与2020年江淮流域的超长梅雨期给国内的防洪抗灾带来巨大压力和经济损失。



图 1 2020 年 7 月 22 日 24 小时累积降水量(阴影,单位 mm) Fig. 1 24 h accumulative precipitation on 22 July, 2020 (shading, unit mm)

3.2 环流背景及降水量极端性分析

山东雨季开始的平均日期为6月底7月初,主要标志是副高脊线北跳到25 N 以北且稳定少动(周雪松,2014)。2020年7月20日,200 hPa上,山东地区位于较为平直的西风气流中,高层辐散流抽吸作用

不强。从图 2 可见,2020 年 7 月 22 日 00 时,200 hPa 中高纬度环流形势为"两脊一槽",西部槽线位于 新疆北部约 75°E处,脊线位于蒙古国约 110°E处,东部槽线位于中国东北约 127°E处;槽脊线以约 7° 每 24 小时的速度东移。整个暴雨过程中山东半岛上空高层无高空急流,高层的辐散抽吸作用并不明显。 500 hPa 上,7月 22 日 00 时,槽脊位置与 200 hPa 高度场类似,副高脊线北跳至 27°N,中纬度地区内蒙 中部存在一个低压,00 时至 12 时,低压加强东移至山东半岛上空,在中低层深厚低涡作用下,山东开始 出现暴雨过程。7月 22 日 850 hPa(图 2b、图 3),山东半岛上空低涡的旋转和辐合造成强上升运动,暴 雨中心的移动和雨强的变化与低涡移动路径较为一致。综合高低空气压场环流形势,本次极端降水在高空 弱辐散抽吸条件下,暴雨的发生发展主要是低层低涡发展和维持造成,低涡可能对本次极端暴雨过程起了 主要作用。

850 hPa上,稳定维持的副高和大陆低压带之间存在一支从低纬一直延伸到 35 N 附近的西南气流,这 支气流将水汽从南海输送到山东南部。副高西侧、经南海转向北的水汽输送带和副高北侧 40 N 附近由太 平洋向西的水汽输送带(图 4),是本次大暴雨过程的主要水汽源。从 7 月 22 日 18 时(图 4a)、23 日 00 时(图 4b) 850 hPa 等压面上的水汽通量分布可以看出,两条水汽通量高值区分别形成了两个 10 g cm⁻¹ hPa⁻¹ s⁻¹ 以上的水汽辐合中心,为山东地区极端暴雨的产生提供了充沛的水汽条件。大陆高压底部与 副高西伸到东南沿海地区的高压中心之间低压区,导致气压梯度力加强引起风速大值区在此发展,并伴随 有短波槽活动,也有利于降水的发生和维持。在东部槽线移至日本海附近,东亚槽脊完成一次置换后,850 hPa上中纬度地区位于山东半岛的低涡以约 2 每 6h 的速度东移至渤海洋面上。22 日 18 时至 23 日 00 时, 低涡移至朝鲜半岛附近,其主体远离山东半岛后,强水汽通量辐合区出现在黄海海域上,而整个山东区域 变为水汽通量和涡度的辐散区,降水过程结束。

2020年22日08时~23日08时,山东日照24小时降水243mm,打破了自1967年8月15日以来的当地观测史最大单日降雨纪录。图5给出了本次降水过程,2020年7月22日的700hPa比湿,与1991至2020年30年7月平均700hPa比湿差值的对比(图5a、b),本次山东降水过程的水汽通量散度远高于气候平均状态,降水过程确有较为充足的水汽支持。与山东历史极端灾害降水,2007年7月18日、2009年5月20日、2012年7月25日、9月21日、2018年8月17至20日降水过程的700hPa比湿对比(图略),山东省本次降水过程的水汽状态在几次极端降水过程中也是较为突出的,在没有台风引导的水汽输送的情况下,整个山东省上空700hPa比湿大于10gkg⁻¹,整层水汽通量散度小于-26×10⁻⁵kgm⁻²s⁻¹,强于2009年5月20日、2012年7月25日,9月21日,2018年8月17至20日三次降水过程,因此可以判断本次降水过程具有较强的极端性。



图 2 2020 年 7 月 22 日 00 时 850 hPa (a)、500 hPa (c) 和 200 hPa (e) 和 12 时 850 hPa (b)、500 hPa (d) 和 200 hPa (f)等位势高度线(黑色实线,单位: dagpm)、风场(箭头)分布,阴影为大于 3500m 地形

Fig. 2 Distribution of geopotential height (black solid lines, units: dagpm), wind (vectors), at 850 hPa (a, b), 500 hPa (c, d) and 200 hPa (e, f) at 0000 UTC (a, c, e) and 1200 UTC (b, d, f) on 22 July, 2020, the grey shading is the terrain larger than 3500m



图 3 7月22日18时(a)、23日00时(b)850 hPa等位势高度线(黑色实线,单位: dagpm)、等温线(红色虚线,单位: ℃)、>1.5m s⁻¹的风场(黑色箭头)、相对涡度(彩色阴影,单位: 10⁻⁴s⁻¹),灰 色阴影所示为地形(单位: m)

Fig. 3 Distribution of geopotential height (black solid lines, units: dagpm), temperature (red solid lines, units: $^{\circ}$), wind faster than 1.5m s⁻¹ (black vectors), relative vorticity (color shading, units: 10^{-4} s⁻¹) at 850 hPa at 0018 UTC (a) and 2300 UTC (b) on 22 July, 2020, the grey shading shows the terrain (units: m)



图 4 850 hPa 水汽通量(黑色流线)和水汽通量散度(a)7月22日18时,(b)23日00时(彩色阴影, 单位:10⁻⁸ kg m⁻¹ s⁻¹ hPa⁻¹),灰色阴影所示为地形(单位:m)

Fig. 4 The moisture flux (black streamline) and the divergence of moisture flux (color shading, units: 10⁻⁸kg

m⁻¹s⁻¹hPa⁻¹) at 850 hPa at 0018 UTC (a) and 2300 UTC (b) on 22 July, 2020, the grey shading shows the terrain (units: m)



图 5 2020 年 7 月 22 日 700 hPa 比湿(a)、2020 年 7 月 22 日与 1991 至 2020 年 7 月平均 700 hPa 比湿差(b)(阴影,单位 g kg⁻¹)

Fig. 5 700 hPa specific humidity on 22 July 2020 (a), difference in 700 hPa specific humidity between 22 July 2020 and the average specific humidity of July 1991 to 2020 (b) (shading, units: g kg⁻¹)

4 中尺度云团活动

本次降水与中尺度对流云团的发生发展有关,本节利用国家卫星气象中心提供的 FY-2E 逐时 TBB 资料分析中尺度对流云团的活动和演变。7月21日 18时,山东省中南部上空出现多个 TBB 低值中心,表示 对流云团开始发展,云团中心强度都在-47℃以下,对应山东省西南边缘区域开始出现弱降水。7月22日 04时,首个 TBB 强度≤-57℃的对流云团(即图中的云团 A)生成(图 6a),7月22日 06时至 07时,本 次降水过程中起最主要作用的云团 B 出现(图 6b),此时,850 hPa 上空有低涡生成,使得对流云团不断 加强,并与低涡 A 同时向东北移动。09时,山东省西南方向的云团 C 生成,并于 12时与云团 B 开始合并, 在 09时后,雨带西端不再有对流云团形成,表明上游的能源供应减少。尽管没有新云团生成,合并后的 云团 B 在 22日 11时发展达到最强,此时的云顶温度在-62℃以下,云团位置位于低涡中心附近。受此对 流云团发展影响,云团 B 所对应的济宁及其周边地区出现强度较大的对流性降水,降水强度达到每小时 100 mm 以上。此后,云团 B 继续东北向移动,强度有所减弱,在22日 13时,云团 B 达到最大覆盖范围, 山东省西部大部分地区、江苏省北部受其影响出现降水。14时,云团 B 分裂,其北部分裂生成一个中心 TBB 强度≤57℃的对流云团 D,在缓慢北移过程中减弱消失。而云团 B 南部仍然与低涡区域重合,受低层 低涡发展影响,云团 B 再次加强,中心强度重新加强到-62℃以下,对流增强,导致山东沿海青岛、日照 涡中心,强度逐渐减弱。7月22日19时以后,减弱的云团B主体移至黄海洋面上(图略),山东半岛只 在东部地区存在零星降水。可见,对流云团的生消演变与此次强降水天气的发生发展紧密相关,期间不同 云团的新生发展主要受低涡影响,同时可能与前期强降水造成的地面冷池出流触发对流新生发展加强有

关,相关分析将在下面的数值模拟中展开。

5 数值模拟方案及验证

5.1 模拟区域及微物理方案

为详细分析此次极端暴雨过程的中尺度过程,利用 WRF(4.2版本)对此次极端暴雨过程开展了高分 辨率数值模拟。模拟时段为 2020 年 7 月 20 日 12 时至 2020 年 7 月 23 日 12 时,共 48h,背景场使用美国 国家环境预报中心(NCEP)提供的 GFS 分析资料,模拟采用两层嵌套,中心点位于(36 N, 118 E), 大区格距 15km, 小区格距 3km, 水平方向格点数分别为 155×130 和 571×521, 垂直层数取 51 层, 积分步 长为90s,具体模式设置与微物理方案如下表中所示。

	表1 主要参数列表	
Table 1 The main arguments list of simulation		
区域	模拟区域1	模拟区域2
分辨率	15000m	3000m
各点数	155×130	571×521
微物理方案	Thompson Graupel Scheme	Thompson Graupel Scheme
	(Thompson et al, 2008)	(Thompson et al, 2008)
对流参数化方案	Grell 3D Ensemble Scheme	Grell 3D Ensemble Scheme
	(Grell et al, 2002)	(Grell et al, 2002)
长波辐射方案	RRTMG Scheme (Iacono et	RRTMG Scheme (Iacono et
	al, 2008)	al, 2008)
短波辐射方案	RRTMG Scheme (CloughS,	RRTMG Scheme (CloughS,
	1997)	1997)
近地表方案	Monin-Obukhov (Janjic	Monin-Obukhov (Janjic
	Eta) Similarity Scheme	Eta) Similarity Scheme
	(Monin et al, 1954; Janjic,	(Monin et al, 1954; Janjic,
	1996)	1996)
陆地过程方案	Noah Land-Surface Model	Noah Land-Surface Model
	(Chen et al, 2001)	(Chen et al, 2001)



图 6 7月22日04时至23日00时850hPa等位势高度线(黑色实线,单位: dagpm)和TBB 逐小时分布(阴影,单位: ℃),灰色阴影所示为地形(单位: m) Fig. 6 The hourly brightness temperature from FY-2E satllite (color shading, units: ℃) and distribution of geopotential height (black solid lines, units: dagpm) at 850 hPa from 0004 UTC on 22 July to 0000 UTC on 23

July, 2020, the grey shading shows the terrain (units: m)

5.2 模拟降水验证

模拟 24h 累积降水量和实况对比显示(图 7),模拟的雨带(图 7a、c、e、g)为东北-西南向分布, 其走向和落区与实况(图 7b、d、f、h)较为一致。模拟的两个暴雨中心分别位于山东省临淄市附近和日 照市至青岛市沿海区域,虽然细节上与实况存在一些差距,但是基本模拟出了此次极端暴雨过程的强度和 落区,模拟结果可用以分析此次极端暴雨的中尺度系统结构和机理。

6h 累积降水量及演变对比显示,7月22日00~06时(图8a、b),山东省西南部、江苏省北部、河 南省东部和安徽省北部部分区域开始出现带状强降水,6h 累积降水落区呈西南一东北向分布,模拟的强降 水带(图8b)也体现了这一特征。22日06~12时(图8c、d)的降水范围由西南一东北的带状转变为团状, 形成了本次降水过程中的第一个强降水中心,位于约(35.1 N,118 E),即临沂市区域的强降水中心,6h 累积的降水量在125mm以上,模拟结果很好的再现了这个降水中心,其所在区域与实际观测区域及量级 均较为接近。22日12~18时(图8e、f),导致强降水的云团继续东北移,云团中心开始入海,陆上的降 水区域主要分布于山东半岛和江苏省北部沿海一带,模拟结果与实际观测也较为符合,呈现出江苏省北部 和日照至青岛沿海区域的降水中心,即第二个强降水中心,6h 累积中心降水也超过125mm。7月22日18 时至23日00时(图8g、h),雨带进一步东移减弱,只有山东半岛南侧沿海区域局部区域有弱降水,本 次极端暴雨过程基本结束。



图 7 7月 22日 00 时至 23日 00 时的 24h 累计降水量(a) 实测、(b) 模拟(阴影,单位:mm)

Fig. 7 24 h accumulative precipitation from 0000 UTC 22 July, 2020 to 0000 UTC 23 July, 2020 (shadow, unit mm): (a) Simulation; (b) Observation







图 8 7月22日00时至06时(a、b);06时至12时(c、d);12时至18时(e、f);18时至00时6h 累计降水(g、h)(阴影,单位:mm),左列为实况,右列为模拟 Fig. 8 The accumulated 6 h precipitation for 0000 UTC to 0600 UTC July 22, 2020 (a, b),0600 UTC to 1200

UTC 22 July, 2020 (c, d), 1200 UTC to 1800 UTC 22 July, 2020 (e, f), 1800 UTC 22 July to 0000 UTC 23 July, 2020 (g, h) (shadow, unit mm): (a, c, e, g) Simulation; (b, d, f, h) Observation

5.3 模拟探空与实况探空对比验证

选取暴雨区中心的青岛探空站(站号 54857),对比模拟与实测(图 9)。可见,虽然存在一些细节的差异,但是模拟结果还是反映出实况探空的基本特征。

强降水发生前的 22 日 00 时(图 9a),青岛站上空 850 hPa 以下为弱偏东风,其上至 500 hPa 基本 为西南气流,900 hPa 至 500 hPa 露点温度较低,暴雨区大气已经形成强不稳定层结状态;7月 22 日 12 时, 900 hPa 至 500 hPa 露点温度较 12 h 前增加,大气更为接近饱和,山东半岛 850 hPa 层上的低涡中心位于 临沂附近,不稳定能量得到释放,强降水发生。虽然强降水消耗了大量水汽和能量,但由于低涡对水汽的 辐合作用,大气可降水量(PWAT)值仍然从 12 h 前的 36 mm 增加到 59 mm,为此后第二个降水中心的出 现提供了水汽储备。结合模拟与实况的降水和探空对比分析可见,虽然模拟和实况存在一些偏差,但总体 看来,模拟结果较好地反映了此次极端暴雨过程的雨带和强度演变以及大气层结及水汽条件等。因此,该 模拟能基本表征这次大暴雨过程的变化,可以利用模式输出的高时空分辨率资料对这次大暴雨的中尺度结 构和动热力过程进行分析。



图 9 2020 年 7 月 22 日山东青岛站 00 时、12 时探空曲线, a、c 为实测, b、d 为模拟结果。绿色粗实线为露点; 红色粗实线代表层结曲线

Fig. 9 The sounding of Qingdao station at 0000 UTC(a), 1200 UTC(b), 22 July, 2020. Green heavy line is dew point temperature; red heavy line is stratification curve

6 模拟结果分析

从 TBB 分析可知,中尺度对流云团产生于山东省西南部,在向东北方向移动过程中受低涡环流影响 得以发展加强,模拟降水过程的发生时间和降水区域与 TBB 资料中的强对流云云团出现的区域有较好对 应关系,本节利用 WRF 模拟结果对暴雨过程中尺度系统的热动力结构和发生发展过程进行分析。

6.1 动力结构

首先分析对中尺度对流系统发生时近地面物理量的变化。山东夏季降水主要与偏东风急流轴左侧的气流辐合有关。当副高迅速加强西伸时,其西北边缘的东南风增大,产生一支低空东北风急流,急流的产生与加强能促进急流轴前的动力辐合过程(孙继松,2005),若此急流处于正涡度区内,则有大雨和暴雨以上天气发生(梁萍,2007)。由 850 hPa 风场和低空急流分布图(图 10)可见,7月22日00时,在河北东北部有气旋性涡旋生成,在其左前方和副高西南侧存在有一支低空急流,最大风速12 m s⁻¹,达到低空急流标准,低涡生成于山东省西南侧,此后随引导气流东北移动,在此低涡发生发展阶段,其位置总体位于急流轴前方。急流区左前侧的切变涡度较大,为低涡提供了正涡度平流。00 时至 07 时,低涡稳定少动并增强,低涡中心的气压降低,导致其与副高之间的气压梯度加大,低空急流也得到加强,急流覆盖区域由 00 时的河北省安徽省的东北交界处略向东北方向移动至山东省境内。低空急流的加强和移动有利于低涡的持续发展和水汽输送辐合,为本次降水过程提供了动力和水汽条件。21 日 07 时至 14 时,低空急流同时向东北方向移动加强,低涡也开始向东北方向移动,14 时低涡移动临沂附近,低涡西南侧的低空急流中心强度加强至 18 m s⁻¹以上,导致临沂附近的强降水中心。14 至 18 时,低涡继续东北移动,在 18 时移动到青岛附近,即降水的另一个大值中心,随后东移入海,对陆面的影响减弱,降水过程也随之减弱结束。

低涡在生成东北移动的过程中,其涡度存在明显变化。下面对临沂市附近的暴雨中心区域 (35.25 N-35.75 N、118.75 E-119.25 E),统计7月22日逐小时涡度方程在850 hPa上的各项收支及逐小 时累积降水量进行分析。

ケ





图 10 7月 22日 07时 (a);14时 (b);18时 (c)800 hPa 流场和低空急流 (阴影,风速≥12 m s⁻¹)分布

Fig. 10 Distribution of geopotential height (black solid lines, units: hPa) at 800hPa and the low-level jet (shadow, wind speed $\geq 12 \text{ m s}^{-1}$) at 0700 UTC(a), 1400 UTC(a), 1800 UTC(a), on 22 July

从 850 hPa 各收支项随时间变化(图 11)可以看出,涡度平流项A、涡度垂直输送项B、涡度侧倾项 C 和辐合辐散项D 均对本次低涡存在较大影响。从 7 月 22 日 00 时至 22 日 15 时,涡度局地变化项为正, 且随时间逐渐增大,对应暴雨区低层涡度增加、辐合加强,有利于垂直上升运动加强。15 时区域内逐小时 累积降水达到极值,涡度局地变化也达到极大值,此后,涡度局变化项减小,并出现负值,对应区域内的 降水过程结束。在暴雨过程中涡度平流项、涡度侧倾项为正,垂直输送项、辐合辐散项为负,此四项的数 值都随时间逐渐加强,在 15 时,即涡度局地变化项和逐小时累积降水的峰值时刻达到最值。涡度平流的 变化表明暴雨发生区域存在较强的正涡度输送,使气旋性环流加强,气旋性环流利于低层辐合加强,从而 造成了本次暴雨过程中的强上升运动。本次天气系统的强上升运动也体现在涡度侧倾项和垂直输送项上, 垂直输送项则为负值,将低层的涡度向高层输送的过程,而涡度侧倾项是的涡度和散度的乘积,体现了区 域内涡度场与散度场的配合情况。受大中尺度背景场影响,850 hPa 上低涡中心始终为辐合,这种动力配 置使得涡度方程中这一项始终保持正值,促使相应区域涡度增大,对低涡起正贡献。辐合辐散项在暴雨发 生发展阶段为负,表明底层上升输送涡度。涡度方程各收支项中,涡度平流项、涡度侧倾项对涡度局地变 化表现出正反馈作用,而垂直输送项、辐合辐散项起着负反馈作用。总体而言正反馈大于负反馈,涡度局 地变化项为正,对极端降水的发生起到主要的贡献。



图 11 7月22日00时至23时850hPa上暴雨中心涡度方程各项收支随时间变化(10*8s-1)及逐小时累积 降水量(mm)

Fig. 11 The budget of the each part of vorticity equation in the rainstorm center at 850 hPa with time $(10^{-8}s^{-1})$ and the hourly cumulative precipitation (units: mm) from 00:00 to 23:00 on July 22

过低涡中心(图 10 红线)画涡度的垂直剖面图(图 12)可见,22 日 00 时,涡度变化较强的区域集中在 118 ℃以西地区,正负涡度变化不明显,在 700~500 hPa 高度层,虽然存在两处大于 5×10⁻³s⁻¹的正涡度中心,但中心值都还比较小。到了 04 时,由于低空急流发展引起的切变涡度加强,,低涡发展,正涡度从地面向上延伸达到 300 hPa,中心强度大于 5×10⁻³s⁻¹,正涡度中心区域相比 00 时面积更大。此后,低涡主体向东北方向移动,14 时(图 12c)低涡的正涡度中心位于约 35.5 N 处,强度达到最强,大于 5×10⁻³s⁻¹ 正涡度中心在垂直高度上从 900 hPa 延伸至 200 hPa,此时的降水也存在着对应的极大值。18 时,低涡中心减弱入海,在垂直高度上,大于 5×10⁻³s⁻¹正涡度中心高度缩减至 400 hPa,由于降水的拖曳作用,正涡度中心主体的西南部,800~900 hPa 处存在一个较大的小于-5×10⁻³s⁻¹负涡度中心,低涡从此减弱消散。整个低涡的生成、移动、减弱与降水过程基本吻合。

中尺度最显著的特征为其内部的垂直运动显著强于大尺度运动。垂直速度是反映大气对流运动发生发展过程中的一个非常重要的物理量(高守亭等,2019)。本次强降水高层辐散抽吸作用不明显,主要系统为中低层的中尺度低涡,副高西北侧的低空急流为降水区附近提供了上升运动的环流背景,为对流系统的发生发展提供了动力条件。从垂直速度场的剖面(图 13a)可以看出,22 日 00 时上升气流并不强烈。10 时(图 13b)及以后,低涡和其左前侧的低空急流强度明显增强后,低涡辐合中心伴随的大于 12 m s⁻¹的上升运动到达约 400 hPa 高度,气流上升强烈,伴随高层偏北风低层偏南风的环境风垂直切变加大,垂直运动增强,就会有中尺度对流形成发展(高守亭,2019),低涡切变线上对流发展导致不稳定能量释放,是本次强降水过程对流不稳定能量释放的重要机制。此后,垂直速度中心随低涡系统向东北方向移动,在 13~14 时达到最强,大于 12 m s⁻¹的上升运动达到 200 hPa 高度。17 时后(图 13d),随着低涡内气流辐合混合,北方干冷气流进入低涡中心并控制山东半岛大部分区域,加之降水物质下落的拖曳作用,对流逐渐减弱表现为 35.5 %,119 °E 东北侧,600 hPa 以下全部转下沉气流。可见,在本次降水过程中,低涡发生发

展引起的强烈上升运动对降水形成有重要作用。



图 12 经低涡中心(图 9 红线所示位置)的相对涡度剖面图(a)7月22日00时;(b)04时;(c)14时;(d)18时(彩色阴影,单位:10⁻⁵s⁻¹),灰色阴影为地形,红色三角所示为近地面低涡中心 Fig. 12 Vertical cross sections of the relative vorticity (color shading, units: 10⁻⁵s⁻¹) cross the low-vortex center (red line in Fig. 9): (a) 0000 UTC; (b) 0400 UTC; (c) 1400 UTC; (d) 1800 UTC on 22 July, 2020, the grey shading indicates the terrain, the red triangle indicates the low-vortex center in surface layer



图 13 2020 年 7 月 22 日 00 时 (a); 10 时 (b); 13 时 (c); 17 时 (d) 垂直速度 (阴影, 单位: 10⁻⁵m s⁻¹) 与风矢量经低涡中心沿图 7 红线的垂直剖面分布, 灰色阴影为地形, 红色三角所示为近地面低涡中心 Fig. 13 Vertical cross sections of the vertical velocity (color shading, units: 10⁻⁵m s⁻¹) and wind vector cross the low-vortex center (red line in Fig. 7): (a) 0000 UTC; (b) 1000 UTC; (c) 1300 UTC; (d) 1700 UTC on 22 July, 2020, the grey shading indicates the terrain, the red triangle indicates the low-vortex center in surface layer

6.2 热力结构

暴雨的发生通常伴随有冷暖空气的辐合对峙,通过计算温度的纬向平均,然后用同一纬度上的温度值 减去其平均值得到温度扰动,可以表示冷暖空气的活动,并分析冷暖空气活动造成的温度扰动在暴雨过程 中的分布及变化。6月22日00时(图14a),低涡生成初期,800hPa高度层上低涡中心温度低于周边温 度,为冷涡,其南部为低空急流输送带来的暖湿气流。00时至18时,低涡与低空急流均发展加强,急流 的加强使暖湿气流北上,低涡的旋转辐合作用使南方暖湿空气、北方干冷气流卷入低涡环流中,低涡中心 出现冷暖空气的剧烈交汇,过低涡中心形成一条明显的冷暖分界线(图 14b),南部暖湿空气与东北路冷 空气持续交汇对峙,低涡北侧为负温度扰动,南侧基本为正温度扰动,正负温度扰动的分界线伴随着低涡 移动,造成此时段的持续强降水。由于降水释放的潜热造成降水区上空增温,配合暖湿气流的持续输送, 800 hPa 高度层上日照附近的低涡中心西南侧地面 2m 首次出现大于 18℃的正温度中心。22 日 20 时,低 涡移至海面,低涡东北侧海面上入侵的冷空气增强,23 时,陆面原降水区由冷暖气流交汇区转为干冷空气 控制区,山东半岛降水过程结束,可见,由低涡环流加剧的冷暖空气辐合对降水有重要作用。



图 14 7月 22日 07时 (a); 18时 (b); 23时 (c) 800 hPa 温度扰动 (阴影,单位: ℃); 风场 (黑 色流线,单位: m s⁻¹); 地面 2m 温度场 (红色实线,单位: ℃), 灰色阴影所示为地形 (单位: m) Fig .14 The horizontal distribution of the temperature perturbation (shadow, units: ℃) and wind (streamline) at 800hPa: (a) 0700 UTC; (b) 1800 UTC; (c) 2300 UTC on 22 July, 2020, the grey shadow shows the terrain (units: m)

相当位温表征了大气的温度、气压及相关湿度状况,能综合体现大气的温湿特性,及大气能量的分布 情况,其分布对降水产生也有指示意义。过低涡中心冷暖空气交汇形成切变线(图 14 中红色线)的温度、 相当位温和温度扰动垂直剖面(图 15)显示,00 时至 07 时,仅有底层存在不稳定层结,不稳定能量较小, 热力层结的贡献相对不大,暴雨形成以动力作用为主。低空急流发展刀子低涡加强移至低涡环流内的冷暖 空气差异加大后,低涡环流内的辐合使南方低空急流带来的暖湿气流与北下的干冷气流在低涡内交汇且垂 直方向叠加,造成低涡内的正位温扰动,出现了温度脊,同时由于暖湿空气剧烈抬升,水汽凝结潜热持续 被释放,降水产生后,其释放的潜热造成降水区上空增温,等温线在 35 N,118.5 E 以东以北出现明显的温 度脊起伏形状(图 15c)。随着低涡东移入海,山东半岛上空转为干冷空气控制(图 14c)降水减弱并逐步 结束,降水区因积水蒸发冷却产生降温,因此沿图 14 a 中红色线,出现了沿气流方向前暖后冷的局地温度 梯度。



图 15 经低涡中心沿线(图 11 红线所示位置),7月22日03时(a);07时(b);18时(c);22时(d)温度扰动(彩色阴影,单位:℃);温度(红色实线,单位:°C);相当位温(蓝色实线,单位:K)垂直剖面图,灰色阴影为地形,红色三角所示为近地面低涡中心

Fig. 15 Vertical cross sections of temperature perturbation (color shadow, units: °C); temperature (red solid lines, units: °C); equivalent potential temperature (blue solid lines, units: K) cross the low-vortex center (red line in Fig. 11): (a) 03000 UTC; (b) 0700 UTC; (c) 1800 UTC; (d) 2200 UTC on 22 July, grey shadow indicates terrain, the red triangle indicates the low-vortex center in surface layer

6.3 水汽条件

充分的水汽持续供应是暴雨发生的必要条件,从 850 hPa 水汽通量(图 3)分布可知,本次暴雨过程 的水汽来源主要有两支,分别是来源于副高西侧经南海转向北的水汽输送带和副高北侧 40 N 附近由太平 洋向西的水汽输送带。暴雨的发生伴随着水汽相变过程,而对湿大气水汽状态的准确描述是暴雨预报的一 个关键点(高守亭, 2013)。过低涡中心和暴雨中心的相对湿度和比湿垂直剖面(图 16)可见,在降水 初期,22日00时(图16a),山东省上空暖湿空气聚集,近地面相对湿度达到90%以上,比湿达15gkg⁻¹ 以上。低涡西南部的相对湿度大,东北部相对湿度小,存在相对湿度大值区从低层向高层出现向东北方向 倾斜分布的非对称特征。80%以上的高湿区延伸到 300 hPa,临沂市(35.25 N,117.25 E)附近 900~700 hPa 高度上甚至达到湿度为100%的完全饱和凝结区。05时低空急流控制范围扩大,近地面比湿至高达17gkg-1 以上(图 16b),低空急流发展引起的上升速度增强,强烈上升气流把水汽输送到高空,相对湿度达到100% 的高湿区从地面延伸至 500 hPa,对流层中低层比湿垂直梯度增大。到 14 时,低空急流伴随着低涡系统东 北移动,相对湿度和比湿大值区也进一步向东北方向移动,随着降水发生,相对湿度为 100%的高湿区范 围减小, 80%以上的高湿区降低至 500~300 hPa 高度,此时正处于降水过程较强的阶段,降水物质下落蒸 发,吸收热量,使近地面温度降低,垂直上升运动使暴雨区上空水汽含量增加,比湿向上伸展突起形成水 汽脊。22时,由于低涡对北方干冷空气辐合,北方干冷空气被卷入低涡中心的南部,从地面至 700hPa 高 度层出现干冷空气空洞(图 16d),表明低涡内部由冷暖空气交汇变为干冷空气占据涡度中心,低涡中心 上空的水汽含量减少,降水将逐步减弱并结束,这与 Browning (2010)的研究中出现的干侵入对降水影 响的过程一致。

7 结论与讨论

本文利用多种观测资料以及 WRF4.2 模式对 2020 年 7 月发生在山东地区的一次极端暴雨过程进行了 数值模拟,模拟雨带分布、降水中心和降水强度较好地再现了本次暴雨过程,基本反映出了本次过程的降 水分布及变化特点。利用模式输出结果,对本次暴雨过程的动力条件、热力条件和水汽条件进行分析,得 到以下结论:

(1)此次降水为短时强降水过程,强降水主要发生在东亚大槽替换,中高纬度为"两脊一槽"环流的形势期间,副高北抬控制长江流域,为此次暴雨过程的发生创造有利条件。

(2)副高外围的西南急流为本次暴雨过程水汽的主要输送载体,强劲的低空偏南暖湿气流输送为此次暴雨提供了充足的水汽。前期山东半岛上空低层高温高湿大气随着上升运动抬升,暴雨发生发展,后期 北方干冷气流入侵造成山东半岛上空降温和水汽减少,中低层主要受下沉运动控制,暴雨过程逐渐结束。



图 16 2020 年 7 月 22 日 00 时 (a); 05 时 (b); 14 时 (c); 22 时 (d) 相对湿度(彩色阴影,单位:%); 比湿(蓝色实线,单位:g kg⁻¹)在过低涡中心的图 9 红线位置的垂直剖面图,灰色阴影为地形,红色三角 所示为近地面低涡中心

Fig. 16 Vertical cross sections of the relative humidity (color shading, units: %) and specific humidity (blue solid lines, units: g kg⁻¹) cross the low-vortex center (red line in Fig. 9): (a) 0000 UTC; (b) 0500 UTC; (c) 1400 UTC; (d) 2200 UTC on 22 July, 2020, the grey shadow indicates the terrain, the red triangle indicates the low-vortex center in surface layer

(3)此次暴雨过程以动力作用为主,低涡是直接影响本次暴雨过程的中尺度系统。低空急流引起中尺度辐合和气旋性曲率涡度增强,使低层中尺度涡旋发展,低涡发展加剧了南北冷暖空气在低涡环流内的 混合,在低涡内形成了明显的温度扰动和风场切变,又加强了辐合抬升。同时,低涡与副高之间增强的气 压梯度使低空急流及急流前端上空的上升运动加强,强上升运动使低涡辐合加剧并使急流带来的暖湿气流 向上抬升,直接引起极端暴雨的发展。因此低涡的时空演变特征与暴雨中心的移动和雨强的变化相一致。

本文只是对此次山东极端暴雨过程模拟的初步诊断分析,后续工作重点将进一步揭示造成此次暴雨过 程的中尺度系统的精细结构特征和发展演变机理。鉴于本次降水的极端性,云微物理过程在其中的影响也 十分重要,云微物理过程对降水极端性的影响在本文中没有提及,未来将进行后续工作。此外,分析得到 的环流形势和天气系统的演变特征在山东附近地区夏季的降水过程中可能会常常出现,对理解和认识夏季 华北附近的强降水过程机理可能具有一定普适性,但不是每次类似的形势都能发生极端暴雨,未来工作还 应在此基础上开展深入分析,以加强此类山东极端暴雨机理认识,最终服务于山东此类极端暴雨预报。

参考文献

Browning, K. A. 2010. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development [J]. Meteor. Appl., 4: 317-324. 曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 1986. 山东天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 180-192. Cao Gangfeng, Zhang Sahnjun, Zhu Guanzhong, et al. 1986. Weather analysis and forecast in Shangdong [M]. Beijing: China Meteorological Press (in China), 180-192

- CloughS A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneousatmospheres: RRTM, a validated correlated-kmodel for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research, 102(D14), 16663–16682.
- Chen F , Dudhia J . 2001. Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity[J]. Monthly Weather Review, 129(4):569-585.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 309-315. Ding Yihui. 2005. Advanced synoptic meteorology [M]. Beijing: Science Press (in China), 309-315.
- Grell G A, Devenyi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques Geophys[J]. Res. Lett., 29 (14), pp. 1-438.
- 高守亭,冉令坤,李娜,等. 2013. 集合动力因子暴雨预报方法研究[J].暴雨灾害, 32(4): 289-302. Gao Shouting, Ran Lingkun, Li Na, et al. The "Ensemble Dynamic Factors" approach to predict rainstorm [J]. Torrential Rain and Disasters, 32(4): 289-302

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 Shouting, Zhou Yushu, Ran Lingkun. 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 833-846.

- 高守亭,周玉淑.2019. 近年来中尺度涡动力学研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5): 431-439. Gao Shouting, Zhou Yushu. 2019. Progress in dynamics of mesoscale vortex in recent years [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(5): 431-439.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146:1999-2049.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, Shephard M W, Clough S A. and Collins W D. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. Journal of Geophysical Research, 113, D13103.
- 蒋伯仁, 孙兴池, 张少林. 2005. 山东主汛期暴雨分析及预报研究综述[J]. 山东气象, 25(2): 4. Jiang Boren, Sun Xingchi, Zhang Shaolin, 2005, Review of Analysis and Forecast Research on Rainstorm during Monsoon Season in Shangdong Province [J]. Journal of Shangdong Meteorology, 25(2): 4.
- Janjic Z I. 1996. "The surface layer in the NCEP Eta Model," in Proceedings of the 11th Conference on Numerical Weather Prediction[C]. American Meteorological Society, Norfolk, Va, USA, pp. 354–355.
- 梁萍, 汤绪, 柯晓新, 等. 2007. 中国梅雨影响因子的研究综述 [J]. 气象科学, 27(4): 464-471. Liang Ping, Tang Xu, Ke Xiaoxin, et al. 2007. Review of study on influencing factors of China Meiyu [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 27(4): 464-471.
- 刘会荣, 李崇银. 2010. 干侵入对济南" 7.18" 暴雨的作用[J]. 大气科学, 34(2): 374-386. Liu Huirong, Li Chongyin, 2010. Impacts of the dry intrusion on Ji'nan torrential rain occurring on 18 July 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4):374-386.
- Monin A S and Obukhov A M. 1954. "Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere," Contributions of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences, vol. 24, no. 151, pp. 163–187.
- 孙继松. 2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学, 29(3): 445-452. Sun Jisong. 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(3): 445-452.
- 孙建华,张小玲,卫捷,等. 2005. 20世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 10(3): 492-506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei jie, et al. 2005. A Study on Severe Heavy Rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research. 2005, 10(3): 492-506.
- Skamarock W C, et al.2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 NCAR tech. note TN-475_STR[Z] 113
- Shen Y , Xiong A , Ying W , et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D2).
- 沈艳,潘旸,宇婧婧,等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 36(1): 37-46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jing-jing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J], Trans Atmos Sci, 36(1): 37-46.

- 孙兴池, 郭俊建, 王业宏, 等. 2015. 低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析[J]. 气象, 41(4): 401-408. Sun Xingchi, Guo Junjian, Wang Yehong, et al. 2015. Analysis of the Common Effect of Vortex and Subtropical High on Rainstorm Fall Area [J]. Meteorological Monthly (in China), 41(4): 401-408.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in China [M]. Beijing: Science Press (in China), 255p.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, & Hall W D. 2008. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization[J], Monthly Weather Review, 136(12), 5095-5115.
- 许时光,牛铮,沈艳,旷达. 2014. CMORPH 卫星降水数据在中国区域的误差特征研究[J].遥感技术与应用, 29(02):189-194.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 40(1): 86-93. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principles and Methods of Weather (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in China), 40(1): 86-93.
- 章国材. 2004. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 30(12): 27-31. Zhang Guocai. 2004. Progress of Weather Research and Forecast (WRF) Model and Application in the United States [J]. Meteorological Monthly (in China), 30(12): 27-31.
- 赵宇, 崔晓鹏, 高守亭.2011.引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究[J]. 大气科学, 35(5): 945-962. Zhao Yu, Cui Xiaopeng, Gao Shou ting. 2011. A study of structure of mesoscale systems producing a heavy rainfall event in North China [J], Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(5): 945-962.
- 周雪松, 吴炜, 孙兴池. 2014. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J]. 气象, 40(6): 744-753. Zhou Xuesong, Wu Wei, Sun Xingchi. 2014. Statistic on Physical Indicators of Rain storms in Shangdong Province [J]. Meteorological Monthly (in China), 40(6): 744-753.





