

文章编号: 2096-1618(2025)03-0329-10

2106 号台风“烟花”影响下苏南地区中尺度对流系统的诊断分析

许一洲¹, 李国平¹, 张晓玉², 谢新¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 浙江省青田县气象局, 浙江 青田 323900)

摘要:为揭示登陆台风外围中尺度对流系统的发展机制和结构特征,利用 ERA5 再分析资料、雷达、卫星、自动站等多源监测数据对 2021 年 7 月 28 日午后发生在台风“烟花”外围环流内苏南一次强对流过程的环流背景、物理量特征进行分析。研究得出:中尺度对流系统在“烟花”外围偏西北气流下发展,于苏西南形成地面辐合线。发展全过程均呈低层辐合,高层辐散,强盛阶段上升运动达 200 hPa。絮状回波合并与强对流始发相关联,云团膨胀机制与强对流迅速发展对应,带状回波纵向加强对应中尺度对流云团点状膨胀。稳定度指数对本次过程有较好前兆指示。降水发生前, α -螺旋度与湿 α -螺旋度负值中心已出现于 MCS 始发区,降水与负螺旋度对应,负值中心位于降水中心西北,湿 α -螺旋度较 α -螺旋度更能反映 MCS 消亡阶段特征,螺旋度中心位于 800~900 hPa。系统始发区湿正压项呈负值,强盛阶段湿位涡正压项 MPV1 负值中心与降水中心重合。湿位涡斜压项 MPV2 随系统发展正值逐渐增强,降水发生在 MPV2 正值中心和正负 MPV2 交界处。近地面负 MPV1 与正 MPV2 的配置,对 MCS 降水产生与加强有较好指示。

关键词:台风外围;中尺度对流系统;诊断分析;螺旋度;湿位涡

中图分类号:P458.2

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.013

0 引言

中国是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一。研究表明,西北太平洋季风槽的强弱直接影响西北太平洋台风的生成位置、强度及其群发性^[1];绝大多数台风生成于季风槽偏强或开始偏强的时段^[2]。厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)作为热带海气相互作用年际变化的最强信号,其不同位相相对台风的生成起调制作用^[3];ENSO 暖相位即厄尔尼诺年不利于台风频数的增多,拉尼娜年西太地区台风活动增加。

台风环流强盛,水热条件充足,登陆前的倒槽降雨^[4-5],登陆时带来的系统性大范围强降水^[6]及后期与高空槽结合产生的冷暖交汇型暴雨^[7]都严重威胁生命财产安全。台风逐渐北上填塞的发展后期,需注意由于西南侧冷空气侵入,触发的具有螺旋状锋面气旋结构的暴雨系统^[8]。

2106 号台风“烟花”强度大、影响范围广,移动路径复杂多变、移速缓慢,对江浙地区影响时间较长。研究发现^[9],该次台风中地形对降水的增幅作用明显,累积雨量大的站点位于浙江省海拔较高的山区,地形增水作用下站点的雨量可达其他站点的 2~3 倍。对“烟花”路径偏差及强度多变等异常特征的研究^[10]表明,700 hPa 引导气流、副热带高压、环境场垂直风切变

等因素对该台风的路径及强度影响较大。也有研究发现^[11],浙北山区中尺度辐合带长时间维持,导致 MCS 不断发展,产生“列车效应”。

近年来,强对流天气分析和预报是气象业务的重难点。过去研究结果^[12-13]表明,热带气旋边缘或外围有时出现强对流天气。2021 年 7 月 28 日午后至夜间,江苏中南部多地受“烟花”外围强对流云团影响,出现强雷电、雷暴大风、短时强降水等强对流天气。28 日,江苏省 6 个县(市、区)日雨量超有气象记录以来极值(泗阳 322.3 mm、江都 319.0 mm、高邮 287.1 mm、洪泽 263.7 mm、淮安区 226.0 mm、金湖 208.2 mm)。此次强降水以短时为主,降水时间集中在 3~4 h,28 日 20~21 时,丹阳导墅镇雨量达 104.0 mm/h,内陆最大风力普遍达 7~9 级,多地出现城市内涝、山体滑坡等灾害。

对 2106 号台风的研究多集中于由“烟花”间接导致的 7.20 河南暴雨,对其登陆后,外围环流内江浙出现的局地致灾性强对流天气研究较少。因此,为进一步揭示登陆台风外围中尺度对流系统的形成发展机制和结构特征,本文运用地面自动站观测资料、FY4A 卫星资料、雷达反射率资料、ERA5 再分析资料,对台风南侧出现的突发性强对流事件进行诊断分析,以期对日后预报提供参考。

1 台风“烟花”概况

2021 年第 6 号台风“烟花”于 7 月 18 日 02 时在

收稿日期:2023-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42175002);四川省中央引导地方科技发展资助项目(2024ZYD0175)

通信作者:李国平. E-mail:liguoping@cuit.edu.cn

西北太平洋洋面生成(图1),在向西移动的过程中逐渐增强,中心气压由132 °E时的998 hPa开始降低,至125 °E时降至955 hPa;在向西北移动的过程中逐步增压,25日12时30分于浙江省舟山市普陀沿海登陆,登陆时中心气压增至965 hPa,26日09时50分在浙江省平湖市沿海再次登陆。26日17时进入苏州市吴江区,此时中心气压为985 hPa,经过吴中、宜兴、溧阳、高淳、溧水、江宁、浦口,28日01时进入滁州市,并以“热带风暴”强度在江苏省停留32 h,28日03时减弱为热带低压,29日05时从安徽进入江苏徐州市丰县,10时前后进入山东,此时中心气压增至988 hPa。

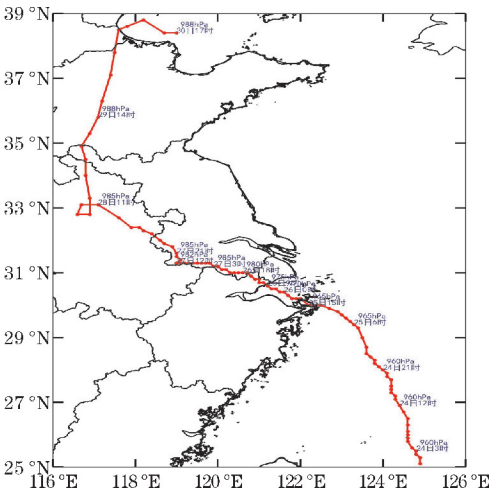


图1 2106号台风“烟花”中心移动路径图

台风在浙江沿海登陆后迅速西北向移动,降水主要分布于江苏、上海。7月24日受台风外围环流影响,中国东部降水主要发生于浙江沿海(图2);25日随着台风在浙北登陆北上,上海全境出现日降水量大于100 mm的暴雨天气,主要降水区逐步北上;26日东

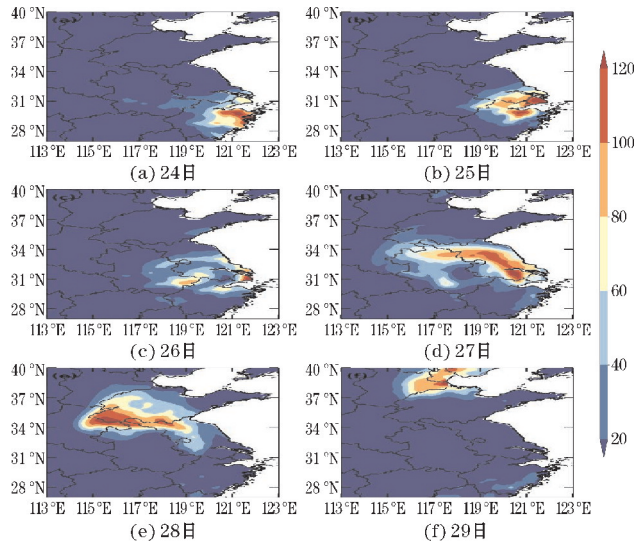


图2 2106号台风“烟花”降水演变图

部地区降水呈环形分布,降水强度有所减弱;27日台风降水主要位于江苏,江苏全境基本处于暴雨天气;28日即本文研究的强对流发生时段,台风主雨带北移至山东,苏南地区受台风外围减弱的螺旋雨带影响,出现少量降水;但午后受强对流影响,该日江苏降水量显著。29日台风主体移至山东北部及天津一带,华东地区受台风及其螺旋雨带的影响逐步结束。

2 大尺度环流背景及影响系统分析

2.1 高度场配置及其演变

2021年7月26日09时50分,台风“烟花”在浙江省平湖市沿海登陆,登陆时减弱为强热带风暴,继续向北偏西方向移动。“烟花”东侧的西太平洋有一热带扰动“尼伯特”,主体位于日本东南部,北上并逐渐减弱。据27日08时500 hPa高度场(图3a),鞍型场^[14]中的台风“烟花”由于受弱引导气流影响,移动缓慢;同时,热带扰动“尼伯特”逐渐北上,使“烟花”东侧的西太平洋副热带高压减弱东退。受藤原效应^[12]影响,“尼伯特”迅速北上,“烟花”移动缓慢并在江浙一带停滞打转。此时“烟花”处于西部大陆高压和北部西风槽之间,引导气流较弱,移动缓慢。

27日14时,热带扰动“尼伯特”北侧的西太副高呈带状分布延伸至“烟花”东北侧,“烟花”处于鞍型场内,受高压坝影响,高层引导气流微弱,移动持续缓慢。28日08时(图3b),西风槽持续南伸,与“烟花”北侧相接,冷暖交汇,在北侧形成强降水。28日20时,“尼伯特”减弱明显,移至日本西北沿海。在其与“烟花”之间,形成高压带。随后,北部西风槽加深,“烟花”缓慢北上。29日凌晨,“烟花”逐渐与西风槽结合,降水处于气旋中心北侧和东侧,移速加快,路径也转为东北向。

28日17-20时,700 hPa、850 hPa高度场上,扬州、常州形成一条南北向切变线,29日与“烟花”北部云区相连,进一步东北行,并持续南伸。850 hPa高度场上,28日夜间台风中心附近有一支东南向低空急流,急流轴位于暴雨区东北侧,通过低层暖湿平流从东南部海面输送水汽和能量。暴雨区位于左前方的正切变涡度区,有利于强对流发生发展。28日20时地面图上(图略),台风中心东南侧存在风向突变,台风外围等压线向东南方向凸出,形成地面辐合线并促进对流云团的发展。江浙沿海持续的东南风使水汽不断输送至对流云团内部,底层有来自海面的暖湿空气供给强对流系统的维持与发展。

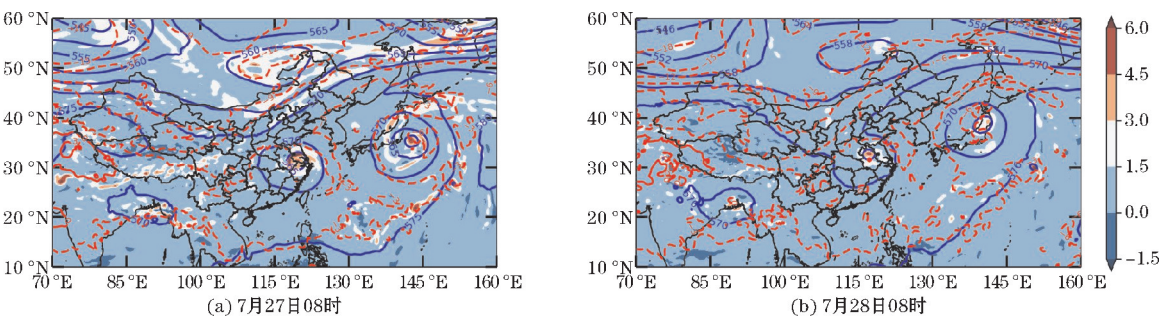


图3 500 hPa 位势高度(蓝实线)、温度(红虚线)、位涡(填色)

2.2 速度场和流场特征

相关研究^[15-16]表明,地面中小尺度辐合线也是触发对流的重要条件。28日15时(图4),在地面风场南部存在中小尺度辐合线,东南气流与西南气流在江苏西南部的南京、镇江一带辐合,该辐合线与小尺度对流云团的发展对应较好,也对应低层700~850 hPa切变线。28日16-18时,地面辐合线逐渐东移,18时位于镇江与常州交界处,此后中尺度对流云团逐渐向东北方向发展移动。地面辐合线对强对流的发展有较好的指示意义。

垂直速度反映强对流系统的位置、强弱和发展高度,散度场表征区域辐合辐散状况,对强对流系统的发展起重要作用^[17],针对地面辐合线处即119°E的垂直剖面分析,以期对这次强对流过程的影响系统进行初步阐述。

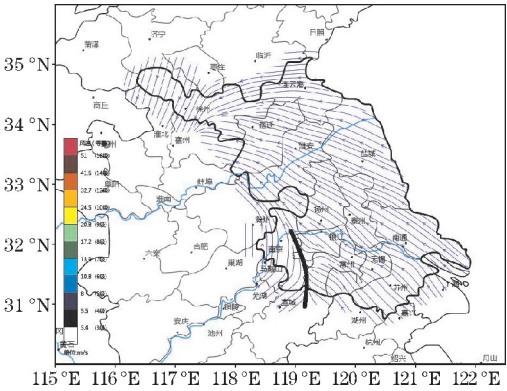


图4 2021年7月28日14:50-15:00江苏省10 min 流线图(黑实线为辐合线)

位于31°N~32.5°N的苏南地区是受本次MCS影响最大的区域,对该范围内垂直剖面(图5)分析可知:28日12时,苏南地区925~650 hPa存在弱且浅薄

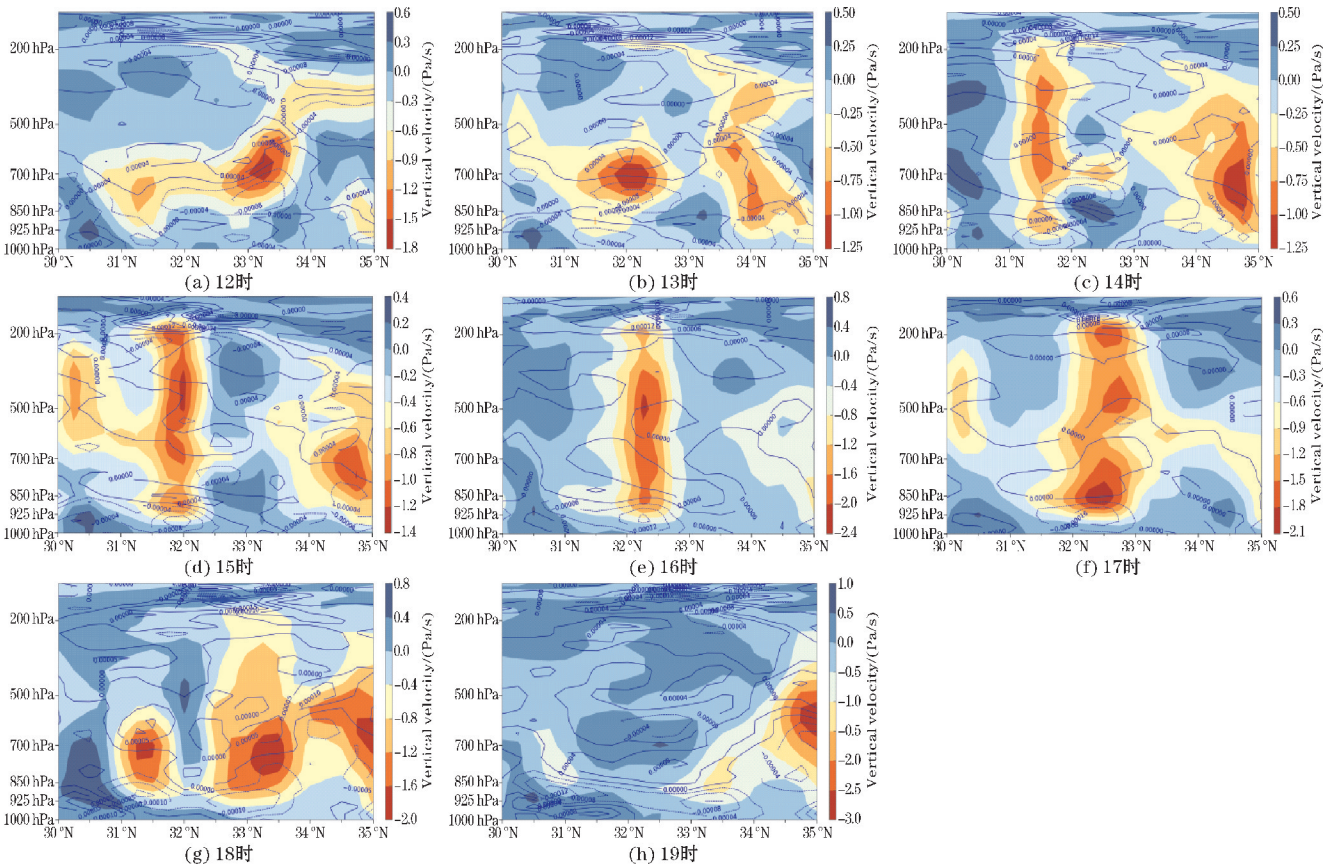


图5 7月28日垂直速度及散度分布

的系统,同时,33 °N的700 hPa附近存在另一强垂直风速中心。12 时起,32 °N附近的 MCS 逐渐增强,垂直速度大值区伸展高度由 13 时的600 hPa延伸至 14 时的200 hPa,后续时段一直维持强垂直运动。17 时该系统发展最为强盛,垂直速度大于-2 Pa/s的上升运动一直延伸至200 hPa 以上。18 时、19 时 MCS 迅速减弱消失,本次苏南地区的强对流过程也趋于结束。此外,在 MCS 垂直方向发展加强的同时,也逐步向北移动,17 时 MCS 垂直运动中心移至32.5 °N。对散度场的分析可知,MCS 未充分发展的 12、13 时,31 °N~32 °N处的850 hPa至地面均出现辐合,200 hPa以上均为辐散,这种低层辐合,高层辐散的配置,有利于 MCS 的垂直发展。这种散度场配置,一直持续至本次强对流过程结束。该日 18、19 时,苏南地区地面1000 hPa出现辐散流场,与 MCS 的减弱消亡相对应。

3 遥感特征分析

3.1 雷达回波特征

对中小尺度系统雷达回波的分析,有助于识别强对流系统内部构造和发展变化,实现对强对流天气的预测预警^[18]。7 月 28 日正值台风登陆后,回波强度不对称,云区在台风北侧发展较强烈(中心北侧回波紧密、强度大),其他方位回波较弱,相对松散。

7 月 28 日 12:00 起,南京中西部地形复杂地区不断有片絮状弱回波生成,存在大面积丝缕状结构(基本反射率在15 dBZ左右),并在此过程中不断生消。13:18-13:48 前后(图 6a),南京上空零散的絮状回波,汇合形成一带状回波,基本反射率在 15~25 dBZ。此后,带状回波不断加强并逐步向东移动,至 14:30(图 6b),强回波中心基本反射率达50 dBZ以上,周边出现极少量层状

云降水回波,降水中心有块状对流云形成,且强回波不断向南北两侧发展,南至安徽宣城,北至淮安南部。随后,回波带随台风环流呈气旋式向内旋转,东北方向移动;在此期间,不断与路径上絮状回波合并、壮大。28 日 16:00 前后(图 6c),大于50 dBZ的强回波区域,移至扬州、镇江一带,并给当地带来短时强降水、雷暴大风天气(镇江市丹徒区高资码头站点 28 日 16 时-28 日 17 时雨量达62.2 mm,镇江丹阳市导墅镇雨量达104.0 mm,15-17 时镇江市累计雨量超过30 mm的有 7 个站)。28 日 17 时(图 6d),带状回波北端发展至宿迁,南端至常州南部,回波中心基本反射率高于55 dBZ;同时,位于台风中心南部的带状回波与台风中心北部回波区部分相连,对流雨带持续沿东北方向移动。7 月 28 日 18:30 后,带状回波向南迅速发展,于 19:00 前后(图 6e),发展至无锡市南边界及宣城境内,其原因可能是由于此时回波区刚好东移至无锡市南部的太湖流域,水汽充足,并受沿海吹来的偏东气流影响,在辐合条件下,云系发展更为迅速、强烈。28 日 19 时,强回波北段外围已经完全合并于台风北部回波区;20 时,回波区已向南延伸至安徽宣城北部部分地区。带状回波向北的移速分量逐渐增加,但由于强对流雨带跨越多个纬度,影响区域依旧集中于泰州、常州及周边地区,造成当地近7 h的持续降水。南端新回波生成后,由于回波整体随台风呈气旋性旋转,新回波又位于其边界处,所以即便对流雨带正向北缓慢移动,回波区域依旧覆盖常州、泰州及附近地区,常州与无锡西南部的交界处持续受强降水影响。28 日 20:00 后(图 6f),带状回波的北段逐渐减弱,此时系统内呈现对流云和层状云同时存在的回波区,基本反射率从>45 dBZ,减弱至 35~40 dBZ;而南段回波强度减弱缓慢,回波中心基本反射率一直维持在50 dBZ左右,这可能与该地河湖较多,水汽相对充足有关。

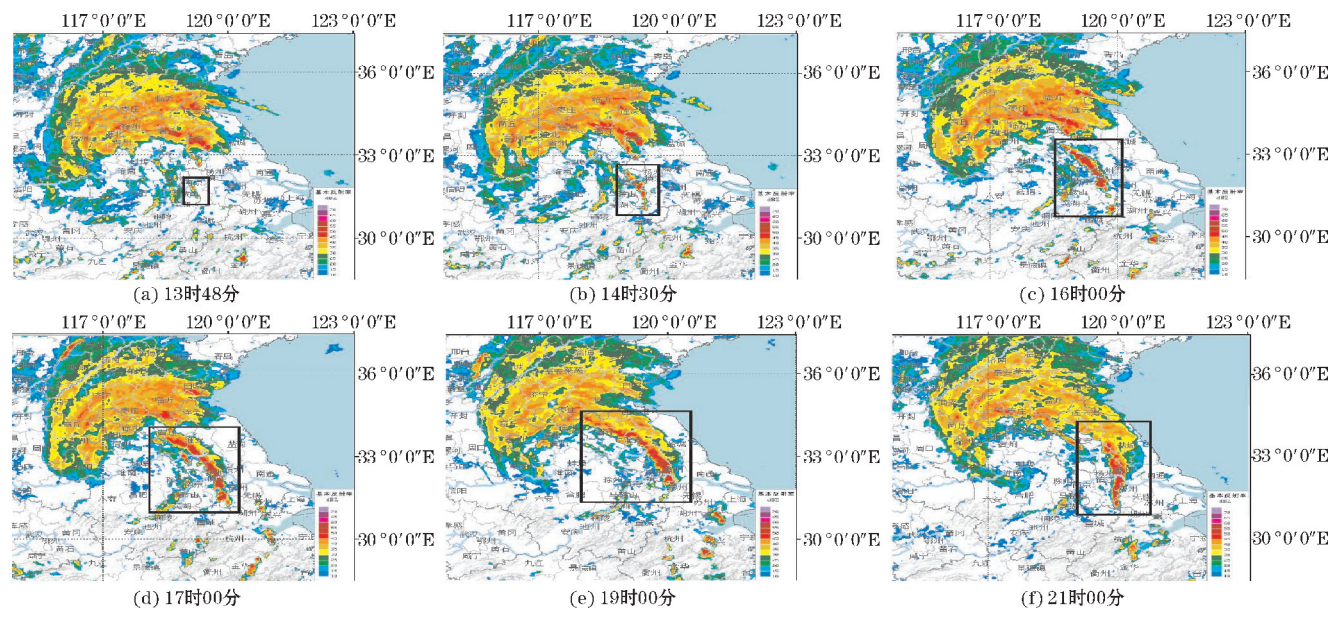


图6 2021 年 7 月 28 日华东地区雷达回波图

3.2 卫星云图特征

利用数字化处理的逐小时 FY-4A 红外卫星云图资料,对这次突发性强对流事件进行初步分析^[19],进一步揭示台风外围中尺度对流系统发生发展时段的云图特征。

7 月 28 日 15:00 (图 7a),南京境内山区有一辐合线生成,于辐合线附近触发出对流云团;据相应时段的红外云图,为一中小尺度带状云系生成。16:00~17:00 (图 7b,c),云团发展迅速,云区逐渐覆盖南京北部、淮安南部及镇江、扬州西部,且云顶亮度呈增大趋势,说明云层正不断增厚,对流不断发展。17:30 (图 8),积雨云云顶温度低于 200 K,与其对应的高云顶(折合云顶高度 16 km 以上)是对流剧烈发展的有力证明。

28 日 18:00~18:30 (图 7d),强对流云系覆盖江苏省大部,南北横跨约 4 个纬度,东西横跨约 3 个经

度,呈向东发展趋势,期间不断有位于中尺度云团移动路径、扩张区域上的弱对流云团与其合并加强。此时,云团亮度均匀,表现为一片白亮的密实云区,说明云系厚密、对流强盛。28 日 20:00 后,强对流云系与台风中心东北侧螺旋云带完全相连,后续随着台风螺旋云带东北向移动。该过程发生时,云系发展位置恰好处于低层切变线附近,气流的垂直运动触发了空气中不稳定能量的释放而产生雷暴等短时强烈天气。

总结此次强对流天气过程的云系发展规律,云系的发展首先从一带状云线(长宽比接近 4:1,宽度小于一个纬距)开始。在其生长壮大过程中不断膨胀,白亮程度逐步增加,积雨云云顶高度上升,云顶温度渐趋 200 K,云系向四周扩展;29 日凌晨,当云区不再扩张膨胀时,小时雨强逐步减弱,MCS 也趋于消亡。由此不难看出,在云图分析中,强对流系统的发展过程会伴随云团的膨胀,而一旦膨胀停止,伴随的往往是系统减弱消亡。

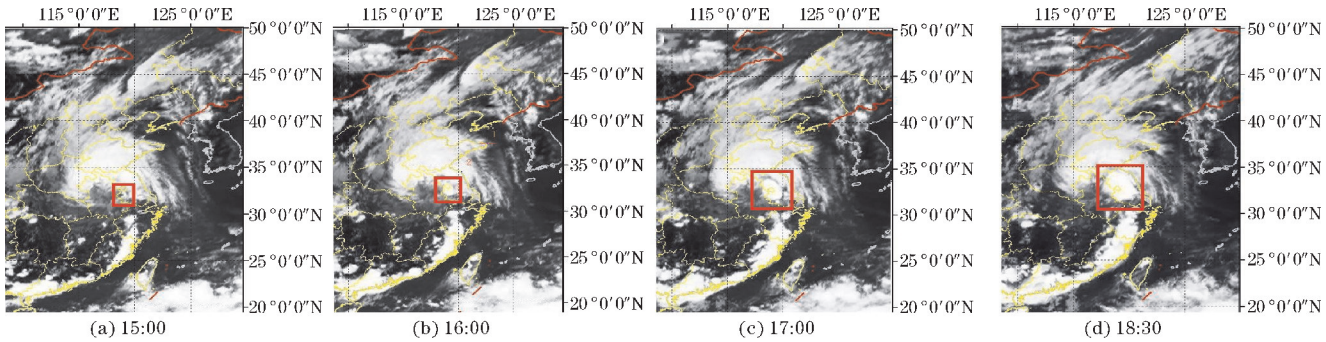


图 7 2021 年 7 月 28 日 FY4A 红外卫星云图

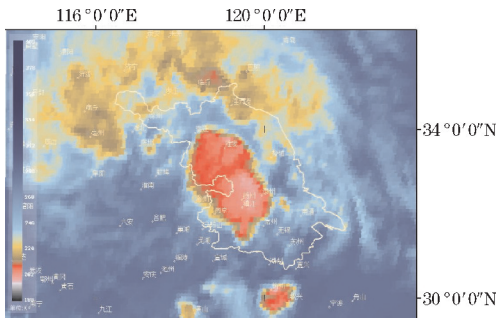


图 8 2021 年 7 月 28 日 17:30 FY4A IR1 云顶亮温

4 物理量诊断分析

4.1 稳定度指数和相当位温

CAPE 指数(对流有效位能)是评估垂直大气是否稳定、对流是否容易发展的指标之一^[20]。28 日 14 时(图 9a),在南京、扬州、镇江、无锡、苏州,均有大于 1600 J/kg 的 CAPE 指数分布,而在镇江、无锡、常州的部分地区,CAPE 指数大于 2400 J/kg,峰值出现在该地区,其余江苏中南部地区均在 800~1600 J/kg。此外,浙江宁波、台州、温州的南北向带状区域内也有大于

4800 J/kg 的分布。

按照大气稳定度的气块法判据,随着 K 指数的增加,雷暴出现的可能性也在增加^[21-22];当 K 指数 >35 ℃ 时,可能有成片雷雨出现。28 日 14 时,江苏几乎全境 K 指数都大于 36 ℃ (图 9b);除西部少数地区外均高于 38 ℃;在南通、淮安、宿迁等地,K 指数大于 40 ℃,达到峰值。午后至 17 时,强对流云系发展到强盛阶段,江苏东部大部,K 指数高于 40 ℃。表征这次强对流天气发生时,大气处于极度不稳定状态。

沙瓦特指数简称沙氏指数,当 SI>0 表示气层稳定,SI<0 表示不稳定,且负值越大,不稳定程度也越大^[23],可用于预报局地对流性天气。分析 28 日 20 时江苏各地 SI 指数场(图略),江苏中部和东南部沿海,SI 指数均小于零,在南通附近 SI 指数达到峰值,小于 -2 ℃。29 日 08 时,对流雨带移至江苏东部海区,SI 指数负值与雨带位置对应较好。

相当位温(θ_e)是表征大气温湿特征的物理量,其大小反映显热能和潜热能的强弱,大气能量的累积可以通过 θ_e 大值区表示。层结稳定度状况也可通过 θ_e 随高度的变化来确定: $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ 时,对流不稳定, $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$,

对流稳定。由28日14时相当位温垂直分布(图9c)可知,31°N~32°N的1000 hPa处存在 θ_e 正值中心,中心强度可达376 K,随高度逐渐降低至700 hPa附近,表明不稳定层结范围由地面一直伸至600 hPa

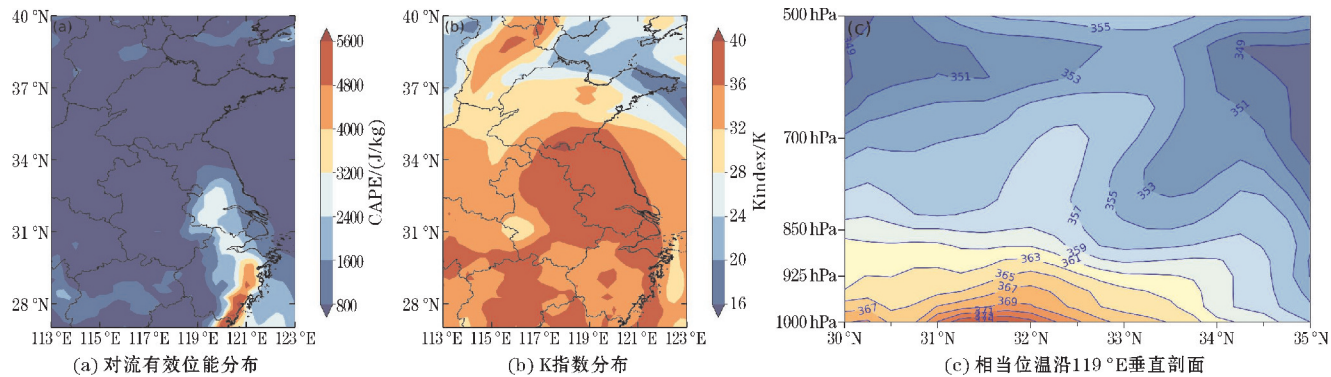


图9 2021年7月28日14时各物理量分布

4.2 螺旋度分析

螺旋度是强对流天气分析中一个常用物理量,在国内外暴雨研究中已有广泛应用^[24-26]。上升运动 $\omega>0$ 的情况下,Z坐标系下z-螺旋度计算公式为

$$h=\omega\zeta$$

上升运动($\omega>0$)时,且 $\zeta>0$ 即正涡度,为正螺旋度;反之 $\zeta<0$ 为负涡度,螺旋度为负值。由于螺旋度不含水汽因子,且不考虑水平方向的作用,用于诊断降水尚有不足之处,因此再利用加入水汽因子的湿z-螺旋度对本次MCS过程进行诊断。湿z-螺旋度公式为

$$F=\omega\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial q u}{\partial x}+\frac{\partial q v}{\partial y}\right)$$

式中: F 表示湿垂直螺旋度; q 表示水汽比湿,单位是g/g; ω 表示垂直速度,单位m/s,但量级比水平风速低

一级; u,v 表示水平风速,单位是m/s。结合z-螺旋度与湿z-螺旋度对本次台风环流内的强对流天气进行诊断,揭示MCS过程与z-螺旋度、湿z-螺旋度之间的关系及二者应用于MCS暴雨诊断的异同。

据28日13时即对流开始发生以前850 hPa的螺旋度水平分布可知(图10),13时,南京西边界附近出现z-螺旋度高值中心与湿z-螺旋度负值中心,此时无明显降水出现,但仍出现z-螺旋度及湿z-螺旋度中心,表明z-螺旋度与湿z-螺旋度对此类台风环流内MCS降水的预报有指示性。15时,南京出现明显降水,两种螺旋度等值线密集区与降水落区相联系,螺旋度高值中心位于1 h降水中心的西北侧。17时即对流发展强盛时段,螺旋度高值位于1 h降水量高值西北侧,与15时类似。夜间19时系统中上升运动已明显减弱(上文垂直风场分析),体现在螺旋度等值线稀疏,数值减小;但1 h降水依

据28日13时即对流开始发生以前850 hPa的螺旋度水平分布可知(图10),13时,南京西边界附近出现z-螺旋度高值中心与湿z-螺旋度负值中心,此时无明显降水出现,但仍出现z-螺旋度及湿z-螺旋度中心,表明z-螺旋度与湿z-螺旋度对此类台风环流内MCS降水的预报有指示性。15时,南京出现明显降水,两种螺旋度等值线密集区与降水落区相联系,螺旋度高值中心位于1 h降水中心的西北侧。17时即对流发展强盛时段,螺旋度高值位于1 h降水量高值西北侧,与15时类似。夜间19时系统中上升运动已明显减弱(上文垂直风场分析),体现在螺旋度等值线稀疏,数值减小;但1 h降水依

据28日13时即对流开始发生以前850 hPa的螺旋度水平分布可知(图10),13时,南京西边界附近出现z-螺旋度高值中心与湿z-螺旋度负值中心,此时无明显降水出现,但仍出现z-螺旋度及湿z-螺旋度中心,表明z-螺旋度与湿z-螺旋度对此类台风环流内MCS降水的预报有指示性。15时,南京出现明显降水,两种螺旋度等值线密集区与降水落区相联系,螺旋度高值中心位于1 h降水中心的西北侧。17时即对流发展强盛时段,螺旋度高值位于1 h降水量高值西北侧,与15时类似。夜间19时系统中上升运动已明显减弱(上文垂直风场分析),体现在螺旋度等值线稀疏,数值减小;但1 h降水依

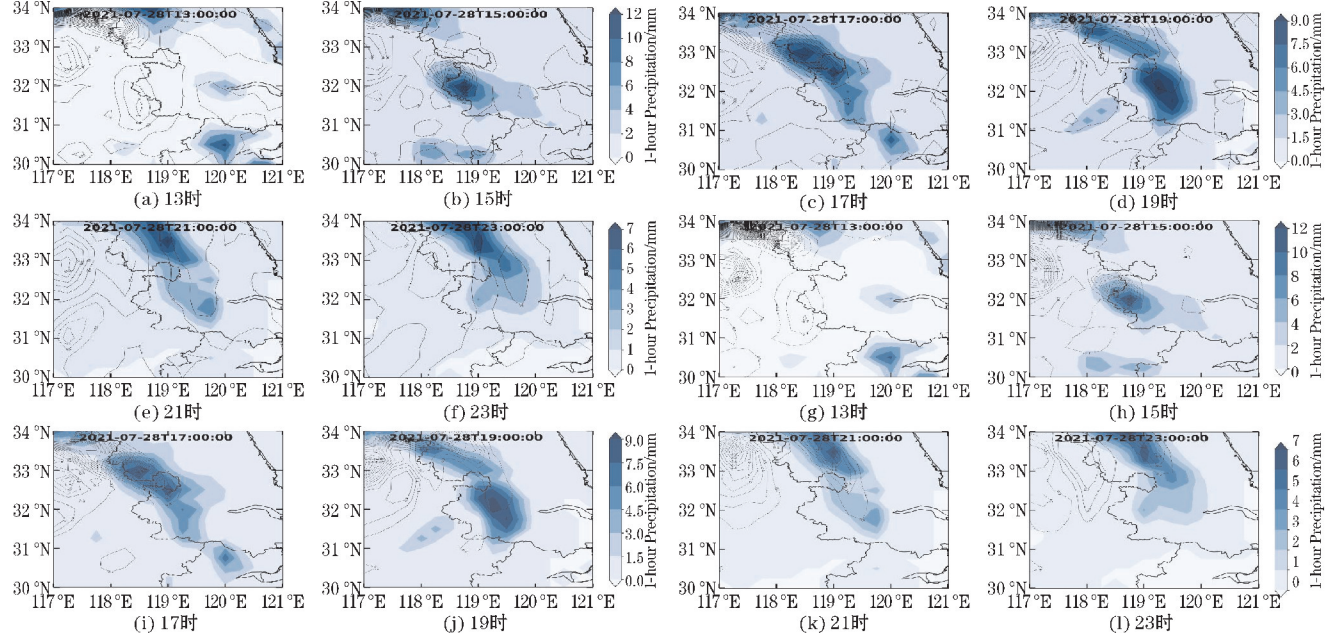


图10 7月28日850 hPa 1小时降水量分布和z-螺旋度及湿z-螺旋度

然维持高值,这主要由系统内整体下沉运动带来降水。21-23时系统减弱消亡阶段,z-螺旋度为正值,但数值已大幅减弱,1小时降水落区与z-螺旋度密集区的位置关系不明显;相反,湿z-螺旋度与降水的关联性仍显著,湿z-螺旋度负值中心与雨强中心重合,降水落区也与等值线范围吻合。因此,湿z-螺旋度较z-螺旋度更能反映MCS消亡阶段的降水。

28日15时(图11a),32°N~33°N存在950~450 hPa的z-螺旋度高值中心,最大z-螺旋度出现在800 hPa,中心强度大于 $450\times10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;在z-螺旋度正值区上方300 hPa附近,有z-螺旋度负值区存在,但绝对值均小于 $50\times10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。17时与15时相似(图11b),仍存在由950 hPa延伸至对流层中高层的z-螺旋度大值,但伸展高度更高,至350 hPa均为高值,中心强度与15

时一致,大于 $450\times10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。高值区正上方,也存在 $-50\times10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的负值区,高度在250 hPa附近。两个时刻低层正螺旋度远大于高层负螺旋度,即低层正涡度辐合产生的旋转上升运动远大于高层负涡度辐散,这为暴雨提供了强大的动力条件。

湿z-螺旋度负值区位置与z-螺旋度一致(图11c、d),但伸展高度较低,至650 hPa就转为正值,水汽辐合主要集中于大气低层。雨强中心与湿z-螺旋度负值中心重合,湿z-螺旋度与z-螺旋度中心位于800~900 hPa,可见MCS低层涡旋上升运动较强,具有正涡度水汽辐合上升和高层负涡度辐散下沉的配置,为短时强降水的发生提供了有利的动力条件。两类螺旋度剖面均能较好反映MCS内部特征,结合分析可得更好的诊断结果。

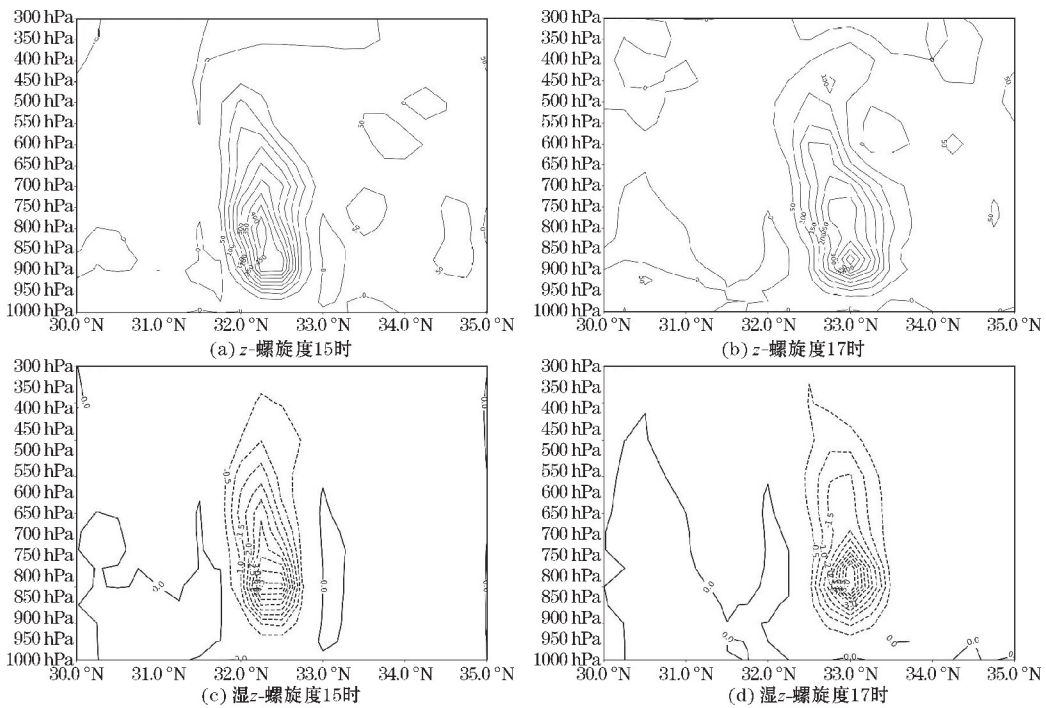


图11 7月28日沿118.5°E垂直剖面z-螺旋度、湿z-螺旋度

4.3 湿位涡分析

湿位涡作为一个综合物理量,能同时表征大气动力、热力和水汽性质^[26-27]。等压面上湿位涡表达式为:

$$MPV = -g(\zeta+f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)$$

湿位涡MPV又可以分为湿正压项MPV1和湿斜压项MPV2:

$$MPV1 = -g(\zeta+f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$$
$$MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)$$

式中:MPV1是湿位涡的第一分量,即垂直分量;MPV2是湿位涡的第二分量,即水平分量,包含湿斜压性和水

平风垂直切变的作用。大气中,绝对涡度多为正值,因此当 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$,即对流稳定时,湿正压项 $MPV1 > 0$,这时只有湿斜压项 $MPV2 < 0$ 时才会使垂直涡度增长较大,湿斜压项负值越大则大气斜压性越强。反之,当 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$,即对流不稳定时,湿正压项小于0,当湿斜压项大于0时,垂直涡度才会出现较大增长。

28日14时900 hPa上(图12a、b),浙江北部及江苏全境均为MPV1负值,中心位于无锡、湖州一带,接近-0.2 PVU,该区域近地面为对流不稳定层结,有利于对流发展,这与上文对相当位温的分析一致。湿斜压项在南京、滁州为正值中心,另一正值中心位于南京、镇江南部至宣城一带;除上述正值分布外,东部沿

海均为 MPV2 负值。该时刻苏南地区降水较弱,主要降水出现在浙江北部,但由于该地接近 MPV2 负值中心,不利于垂直涡度增长,此后浙北的对流系统也逐步减弱,与实况相符。

MCS 强盛阶段为 28 日 17 时(图 12c、d),该时刻 MPV1 负值中心与 1 h 降水中心重合,达到 -0.25 PVU,表明对流不稳定存在于大气低层,并有增强的趋势。MPV2 正值中心与降水中心重合较好,峰值接近 0.1 PVU,也有部分降水出现于 MPV2 正、负等值线密集的交界处,但降水较弱。此外, 120°E 以东的 MPV2 负值区内不存在降水。以上分析表明,MPV2 量级相对于 MPV1 较小,但它表征了垂直风切变和低层暖湿气流输送,即反映低空急流的作用。

28 日 14、17 时对流层中高层 MPV1、MPV2 均接近于 0,本文重点对近地面 750 hPa 以下的湿位涡分布特征进行阐述。该日 14 时, $31^{\circ}\text{N} \sim 32^{\circ}\text{N}$ 近地面存在 MPV1 负值,中心强度达 -0.35 PVU,负值一直延伸至 800 hPa ,湿正压项绝对值随高度的增加逐渐减小,有

利于对流不稳定能量的储存和释放。MPV2 在 $31^{\circ}\text{N} \sim 31.5^{\circ}\text{N}$ 地面处存在负值中心, $32^{\circ}\text{N} \sim 32.5^{\circ}\text{N}$ 附近出现正值中心,地面以上大多呈现正值 MPV2。可见,在 MCS 得到迅速发展前,该处低层对流不稳定层结就已出现,MPV2 在 32°N 附近的正值中心也与 1 小时后(15 时)在 119°E , 32°N 出现的降水中心对应,表明 MPV2 正值中心对未来降水的产生和发展有一定指示作用。

28 日 17 时降水范围明显扩大, $31^{\circ}\text{N} \sim 33^{\circ}\text{N}$ 存在降水。MPV1 在该区域近地层仍为负值且范围和强度有所扩大, 32.5°N 附近极值接近 -0.46 PVU,对流不稳定强度维持并有所增长。MPV2 高值区集中于 33°N 附近,中心可达 0.34 PVU。此外, 31.5°N 也存在接近 0.1 PVU 的正中心,这与降水出现的区域吻合。整体而言,该时刻 MCS 受 $\text{MPV1} < 0$, $\text{MPV2} > 0$ 的配置影响,降水强度达到较高水平,降水范围也有所扩大, MCS 有持续加强的趋势,也与该日 18 时、19 时 1 小时降水量持续增强的实况相符。

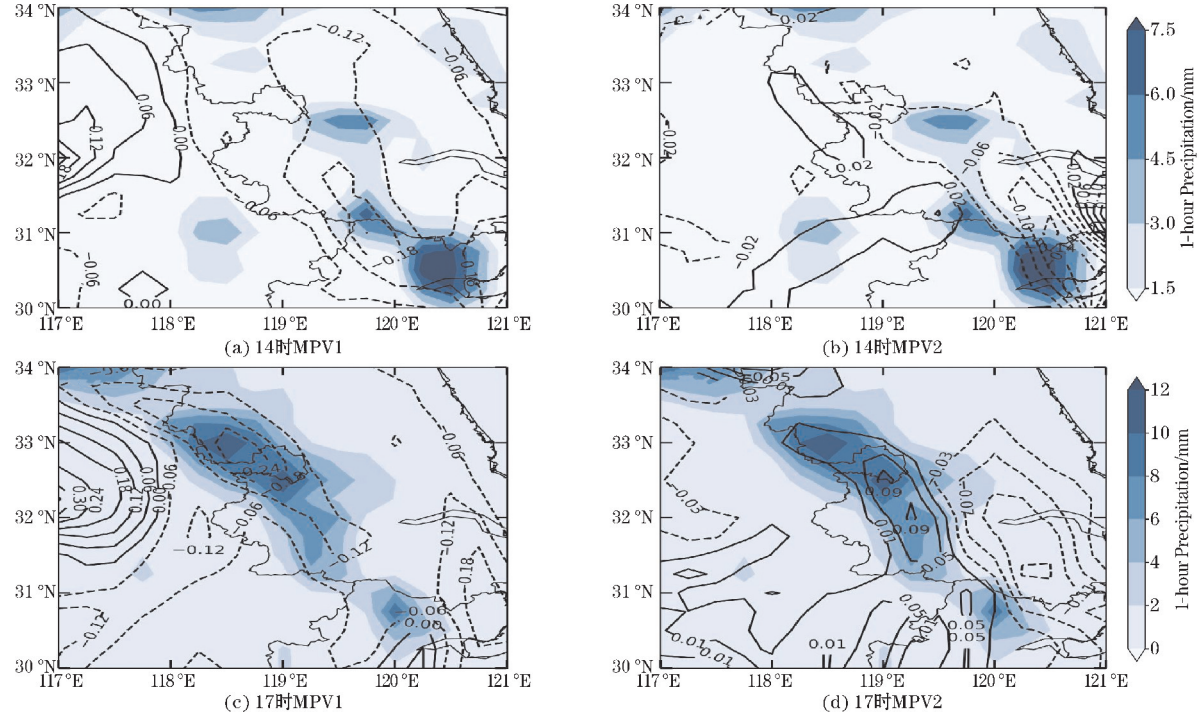


图 12 7 月 28 日 900 hPa MPV1、MPV2 及 1 h 降水量

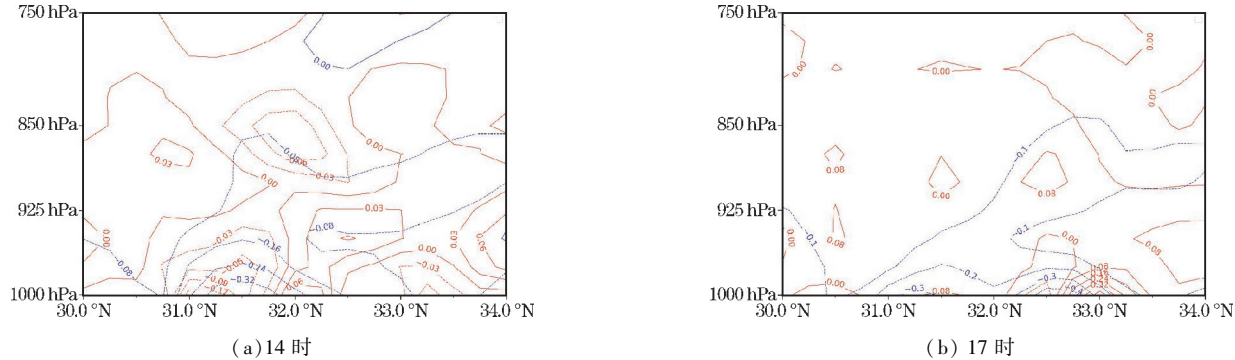


图 13 7 月 28 日 MPV1、MPV2 沿 119°E 垂直剖面(蓝线:MPV1;红线:MPV2)

5 结论与讨论

本文利用自动站观测资料、FY4A 卫星资料、雷达反射率资料、ERA5 再分析资料,通过对台风外围 MCS 遥感特征的阐述和特色物理量的诊断分析,得到主要结论如下:

(1)中尺度对流系统是在台风“烟花”外围环流的偏西北气流下发展的,受热带扰动“尼伯特”北上影响,西太副高减弱东退,“烟花”北侧高空槽南伸,冷暖气团略有交汇,是 MCS 发展的大环流背景。两侧不同性质的气流,在江苏西南部汇合,形成地面辐合线。发展全过程中,均呈低层辐合,高层辐散配置,强盛阶段上升运动达200 hPa。

(2)絮状回波的合并、壮大与强对流的始发相关;云团的膨胀机制与强对流的迅速发展对应;带状回波的纵向加强对应中尺度对流云团的点状膨胀。

(3)有利的 CAPE、K 指数、SI 指数分布对本次强对流过程有较好的前兆指示。近地层相当位温随高度递减,对流不稳定层结延伸至600 hPa、500 hPa以上呈弱的对流稳定。

(4)螺旋度对 MCS 降水有一定指示作用,降水发生前, α -螺旋度与湿 α -螺旋度负值中心已出现于 MCS 始发区。小时降水与螺旋度负值对应,负值中心位于降水中心西北侧,湿 α -螺旋度较 α -螺旋度更能反映 MCS 消亡阶段的降水特征。两类螺旋度中心均位于800~900 hPa,MCS 低层螺旋上升运动较强。

(5)降水发生前,MCS 发生区内湿正压顶出现负值,强盛阶段 MPV1 负值中心与降水中心重合,对流不稳定伴随整个过程时段。湿斜压项在 MCS 发展阶段正值中心逐渐增强,降水发生在 MPV2 正值中心与正负 MPV2 交界处。近地面 MPV1 负值与 MPV2 正值中心的配置,对 MCS 降水产生与加强有较好指示性。

致谢:感谢成都信息工程大学科技创新能力提升计划重大项目(KYTD202201)对本文的支持

参考文献:

- [1] 黄荣辉,皇甫静亮,武亮,等.关于西北太平洋季风槽年际和年代际变异及其对热带气旋生成影响和机理的研究[J].热带气象学报,2016,32(6):767-785.
- [2] 池艳珍,何芬,唐振飞.2016年登陆和影响福建台风成因分析及预测[J].气象,2017,43(10):1287-1295.
- [3] 何敏,宋文玲.厄尔尼诺和反厄尔尼诺事件与西北太平洋台风活动[J].热带气象学报,1999,15(1):17-25.
- [4] 楼茂园.9012 台风倒槽结构与暴雨中尺度系统[J].气象,1993,19(3):7-12.
- [5] 陈小芸,黄姚钦,炎利军.台风倒槽局地性强降雨分析[J].气象科技,2004,32(2):71-75.
- [6] 赵宇,杨晓霞,孙兴池.影响山东的台风暴雨天气的湿位涡诊断分析[J].气象,2004,30(4):15-19.
- [7] 李英,陈联寿,雷小途.高空槽对 9711 号台风变性加强影响的数值研究[J].气象学报,2006,64(5):552-563.
- [8] 张秋庆,丁一汇.登陆台风变性为温带气旋过程的物理机制初步分析[J].海洋学报,1990,12(6):704-713.
- [9] 项素清,韩兴,方鹤鸣,等.2106 号台风“烟花”的路径及降水特点分析[J].海洋预报,2023,40(3):75-84.
- [10] 章梦臻,刘敏,张纯,等.2106 号台风“烟花”路径移速等异常特征分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2022,14(9):167-173.
- [11] 沈晓玲,李锋.台风“烟花”浙江极端降水成因分析[J].海洋预报,2022,39(5):37-47.
- [12] 蓝秋萍,饶灶鑫,程思.“米雷”外围大范围强对流天气成因分析[J].农业灾害研究,2016,6(6):8-12.
- [13] 李彩玲,炎利军,张广彦,等.台风外围偏北气流下两次强对流天气的对比分析[J].广东气象,2015,37(5):5-9.
- [14] 曾欣欣,丛黎强.9012 号台风打转的成因分析[J].气象,1991,17(8):29-32.
- [15] 刘跃红,司福意.地面辐合线与强对流天气落区[J].河南气象,2003,26(3):16-17.
- [16] 董杏燕.2007 强对流天气对比分析[C].中国气象学会会.2008.
- [17] 戴晓燕,过仲阳,吴健平,等.1998 年夏季青藏高原上东移 MCS 环境场特征的聚类分析[J].高原气象,2007,26(4):701-707.
- [18] 王令,康玉霞,焦热光,等.北京地区强对流天气雷达回波特征[J].气象,2004,30(7):31-35.
- [19] 林毅,刘爱鸣,林新彬.台风中尺度对流云团与中尺度暴雨相互关系的综合分析[J].热带气象学报,2002,18(4):393-398.
- [20] 叶爱芬,伍志方,肖伟军,等.对流有效位能在强对流预报中的应用研究[J].热带气象学报,

- 2006,22(5):484-490.
- [21] 何金海,郭品文,银燕. 大气科学概论[M]. 北京:气象出版社,2012.
- [22] 孟妙志. K指数在暴雨分析预报中的应用[J]. 气象,2003,29(8):1-2.
- [23] 黄小培,韦革宁. 百色地区“94·6”大暴雨前期沙氏指数(SI)的演变特征及风的垂直变化特点[J]. 广西气象,1994,15(3):168-169.
- [24] 李耀东,刘健文,高守亭. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展[J]. 气象科技,2005,33(1):7-11.
- [25] 王璐思,顾洪国,吴沛锋. 一次高原低涡切变东移引发的持续性特大暴雨过程分析[J]. 高原山地气象研究,2015,35(3):39-44.
- [26] 李慧芹,李江南,于艳,等. 一次海南秋季台风暴雨的特征和成因分析[J]. 热带气象学报,2018,34(1):133-144.
- [27] 蒙伟光,王安宇,李江南,等. 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,2004,28(3):330-341.

Diagnostic Analysis of Mesoscale Convective System in Southern Jiangsu under the Influence of Typhoon “In-fa” (No. 2106)

XU Yizhou¹, LI Guoping¹, ZHANG Xiaoyu², XIE Xin¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Qingtian County Meteorological Bureau, Qingtian 323900, China)

Abstract: To investigate the development mechanism and structural characteristics of the mesoscale convective system outside the landing typhoon, a comprehensive analysis was conducted using multiple data sources, including ERA5 reanalysis data, radar, satellite, and automatic stations. The focus was on examining the circulation background and physical features of a strong convective event that occurred in southern Jiangsu on July 28, 2021, during the outer circulation of Typhoon “In-fa”. The findings reveal that the MCS developed under northwest airflow outside the typhoon’s influence, resulting in the formation of a surface convergence line in southwest Jiangsu. Throughout its development, this system exhibited lower-level convergence and higher-level divergence. The intense upward motion extended up to 200 hPa. The combination of flocculent echoes is associated with the initiation of MCS, and cloud mass expansion corresponds to rapid convection development. Additionally, The longitudinal intensification of the band radar echo corresponds to the point expansion of the mesoscale convective cloud cluster. The stability index serves as an effective precursor for this process. Prior to precipitation occurrence, the negative centers of z-helicity and wet z-helicity appeared in the initiation area of MCS, which coincided with subsequent precipitation centers located northwestwardly from them. Wet z-helicity better reflects characteristics during the MCS extinction stage compared to z-helicity. Helicity centers are situated between 800–900 hPa. Before precipitation, MPV1 in the initial region of MCS was negative, and the negative MPV1 center coincided with the precipitation center during the system’s robust phase. The MPV2 incrementally increases alongside the development of MCS, resulting in precipitation at the positive MPV2 center and the conjunction of positive and negative MPV2. The configuration of negative MPV1 and positive MPV2 near the ground provides a promising indication for the generation and intensification of MCS precipitation.

Keywords: typhoon periphery; mesoscale convective system; diagnostic analysis; helicity; moist potential vorticity