

何斌,范晓红,盛文斌,等. 2015. “2013·7·21”杭州湾北岸短时大暴雨的中尺度分析. 气象, 41(7):842-851.

“2013·7·21”杭州湾北岸短时大暴雨的中尺度分析^{*1}

何 斌 范晓红 盛文斌 潘士雄 范玉芬

浙江省嘉兴市气象局, 嘉兴 314050

提 要: 利用 FY-2E 卫星的 TBB 资料、多普勒雷达资料、中尺度自动站资料以及基于 WRF 模式的 5 km 全程同化数据, 对 2013 年 7 月 21 日杭州湾北岸短时大暴雨天气进行了中尺度分析, 结果表明: 此次对流性暴雨发生与近地面西南偏西气流和东南偏东气流的辐合作用密切相关, 湖州东部地区由局地热对流引起的偏西气流出流增强了嘉兴西部地区的偏西气流强度, 从而触发两股气流间的辐合扰动并产生对流运动, 当对流运动发展到一定程度时, 在对流层低层出现了下沉气流, 其中一部分气流向东切入近地面的偏东气流内, 致使此处的辐合抬升运动加强, 从而在对流层中层形成了新的垂直上升运动。此外, 在对流性暴雨发生前 0~3 km 的环境风垂直切变较小, 导致这次短时大暴雨过程中强对流单体的维持时间较短。暴雨区附近的近地面存在较为浅薄的中性或稳定层结, 其上相对位温垂直递减明显, 大气层结极不稳定。

关键词: 短时强降雨, 中尺度分析, 触发机制, 垂直风切变

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 07. 006

Mesoscale Analysis on a Short-Time Severe Rainstorm in the North of Hangzhou Bay on 21 July 2013

HE Bin FAN Xiaohong SHENG Wenbin PAN Shixiong FAN Yufen

Jiaxing Meteorological Office of Zhejiang, Jiaxing 314050

Abstract: By using TBB data retrieved from FY-2E satellite, Doppler radar data, mesoscale automatic observation data and fully assimilated model data with 5 km resolution from WRF model, a short-time severe rainstorm in the north of Hangzhou Bay on 21 July 2013 is analyzed. The results indicate that the occurrence of the convective storm is related to the convergence of west-southwest and east-southeast flows near the surface. The westerly outflow caused by local thermal convection in the east of Huzhou enhances the original intensity of the westerly flow in the west of Jiaxing, which is a very important factor to trigger the convection. When the convection develops to some extent, the downward current emerges in the lower troposphere. Part of it flows into east current near the surface and induces enhanced convergence in the lower troposphere and new updraft in the mid-troposphere. Because of the weak vertical shear of horizontal wind from surface to 3 km above ground surface prior to the convection, the lifetime of cell thunderstorm in this event is short. In the vicinity of rainstorm the state of atmosphere near surface is neural or stable and the equivalent potential temperature is decreasing significantly above the lower atmosphere.

Key words: short-time severe rainfall, mesoscale analysis, trigger mechanism, vertical shear of horizontal wind

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406024)资助
2014 年 4 月 28 日收稿; 2015 年 3 月 11 日收修定稿
第一作者: 何斌, 主要从事天气预报业务和技术研究. Email: zjuhb@126. com

引言

夏季是对流性暴雨的多发季节,副热带高压(以下简称副高)西北侧的对流层低层的空气较为暖湿,常常存储大量的不稳定能量,为暴雨的产生提供了较好的大尺度环境场条件。当受较明显系统如锋面、低压、高空槽、切变线等影响时或副高明显东退时,就会触发不稳定能量的释放,从而引起较大范围的系统性雷暴天气(朱乾根等,1992)。顾清源等(2009)研究了台风外围强劲东南低空急流在副高西北侧持续性暴雨中的触发作用。周雨华等(2006)分析了低槽、冷式切变线、暖式切变线等不同天气系统引发的副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征。但是当天气系统较弱时,等压线十分稀疏,边界层内的气流扰动往往会成为触发副高边缘暴雨的重要机制,而气流扰动与本地区特定的地形或是下垫面特征有着密切关系。此类暴雨的分布较为分散,系统性先兆特征并不明显,因此实际业务中预报此类暴雨的难度较大,通常使用的中尺度综合天气图分析以及各种物理量诊断分析(张小玲等,2010)很难获得较好的预报效果,更多地还是要依赖于雷达回波外推和雷达与数值模式的融合预报(俞小鼎,2012;龙清怡等,2014)。目前国内有关副高边缘暴雨的研究主要还是集中于前一类系统性的对流性暴雨,而对后一类局地性较强的对流性暴雨的机理研究还不够深入,而此类暴雨是目前短时强对流天气预报的重点和难点。2013年7月21日傍晚在杭州湾北岸的嘉兴地区出现了短时大暴雨天气过程,局地最大雨强近 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,城区出现严重积水,给交通造成极大影响,因此本文将利用FY-2E卫星的TBB资料、多普勒雷达资料、中尺度自动站资料以及基于WRF模式的5 km全程同化数据,对这次过程进行中尺度分析,探讨中尺度天气系统活动特征及与强降雨的关系,以揭示对流性暴雨发生发展的物理机制,为短时暴雨的预报预警提供有参考价值的信息。

1 暴雨概况

2013年7月21日17—21时(北京时,下同)杭州湾北岸的嘉兴部分地区出现了一次对流性暴雨天气过程。从降雨实况分布图中可以看到(图1),强降雨中心主要有两个,一个位于嘉兴的中部,另一个

则位于嘉兴东北部地区,最大降雨量出现在油车港,达到了121.1 mm,其中19—20时1 h累计降雨量就达98.9 mm。由于雨强大,降雨时段集中,因此市区内许多路段都出现了严重积水,给交通高峰时段造成了极大的压力。嘉兴以外地区30 mm以上雨区呈零散分布且范围较小,因此这次对流性暴雨过程的最显著特点是具有很强的局地性且降雨强度很大。此外分析极大风速分布可以发现(图略),强对流发生时风速多在6级,且呈零散分布,风向也并不一致,这与许多系统性较强的强对流天气如飑线的移动方向前部出现的大风区有很大的不同。

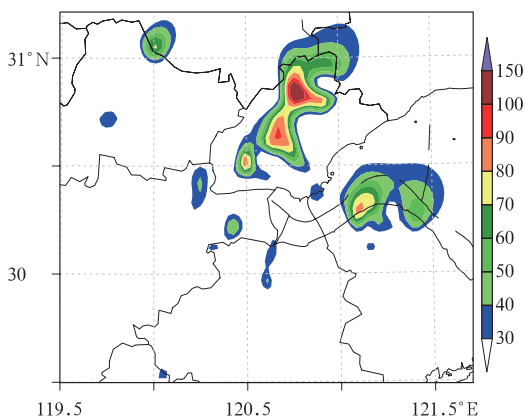


图1 2013年7月21日17—21时
实况降雨分布(单位: mm)

Fig. 1 The observed rainfall from 17:00 to
21:00 BT 21 July 2013 (unit: mm)

2 暴雨的天气尺度和中尺度分析

2.1 天气尺度环流演变特征及影响系统

使用NCEP的FNL资料,分析此次对流性暴雨发生前的大尺度环流形势。在2013年7月20日之前,西太平洋副高呈块状分布于我国大陆以东的洋面上,其环流南北径向度较大,脊线在 28°N 附近,位置偏北;而584 dagpm线(以下简称584线)形成的高压环流则控制着我国中南部广大地区,导致该地区持续出现晴热高温天气;副高西北部的西风带环流较为平直,在 35°N 以北地区则多西风槽活动,引发我国北方地区频现阵性降雨。19日08时,在500 hPa上贝加尔湖到我国黄河上游有一低槽并逐日向东移动,致使副高东退减弱,584线也随其南移。此后从该低槽内分裂出东西两段小槽,其中东

段低槽向浙江北部地区发展,表明有弱冷空气向南扩散(图略),致嘉兴午后局部地区出现阵雨,但降雨强度不大。21 日副高西伸加强(图 2a),尤以 584 线西伸北抬明显,东段低槽和西段低槽合并加强,其在东移过程中,受副高阻挡移速缓慢,在黄淮至江汉地区的中低层逐渐形成一条东北—西南向的切变线,成为大暴雨的主要影响系统之一。19—21 日对流

层中低层风速逐渐增大,部分地区出现低空急流,将南海的水汽、动量和能量源源不断向浙江输送,杭州湾地区 850 hPa 上的水汽通量达到了 $20\sim 30\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ (图 2b)。而对流层中上层受低槽后干冷空气的影响,水汽输送逐渐减弱,这种低层暖湿、中高层干冷的大气不稳定层结有利于对流性暴雨的产生。

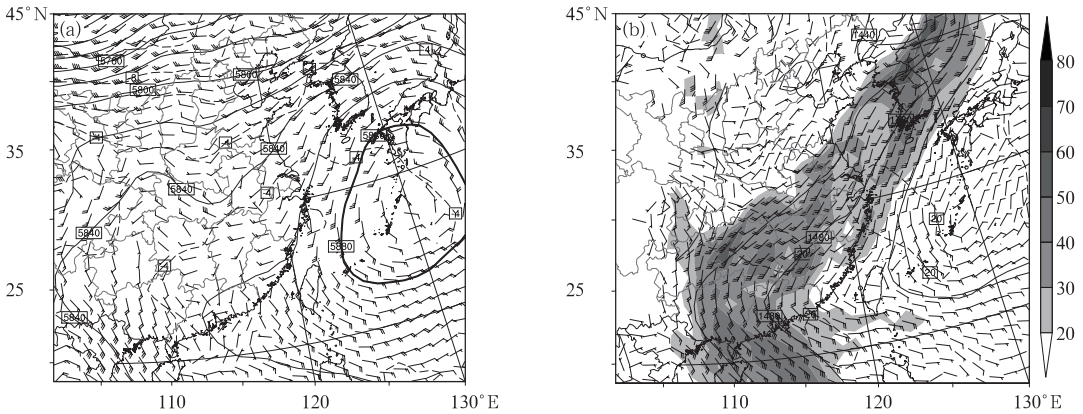


图 2 2013 年 7 月 21 日 08 时(a)500 hPa 位势高度(单位:gpm)、温度(单位:℃)和风场(风羽,单位: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)及(b)850 hPa 位势高度(单位:gpm)、温度(单位:℃)、风场(风羽,单位: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和水汽通量场(阴影区,单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)

Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential height (unit: gpm), temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind (barb, unit: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) 850 hPa geopotential height (unit: gpm), temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), wind (barb, unit: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and water vapor flux (shaded, unit: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) at 08:00 BT 21 July 2013

2.2 暴雨触发机制及对流演变特征分析

对流性暴雨天气的发生除了需要具备一定的水汽条件和热力不稳定的大气层结以外,还需要有一个动力抬升机制,以使不稳定能量得以释放。抬升机制有许多,比如天气系统造成的系统性上升运动,但是通常此类上升运动的量级并不大,如果没有较长时间的维持,其抬升作用有限,本例中高空槽在东移过程中受副高的作用移动非常缓慢,浙江中北部地区处在高空槽和副高间的过渡带内,没有明显的天气系统触发上升运动。局地热对流抬升也是造成产生夏季对流的原因之一。嘉兴地区 7 月 21 日白天最高气温在 $35\sim 36^{\circ}\text{C}$,地面温度也在 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$,应该说温度条件是可以的,但是局地热对流的一个重要条件是近地层要形成绝对不稳定层结,即某处的温度要明显高于周边,而从自动站温度分布来看(图略),整个嘉兴地区的气温和地温分布还是比较

均匀的。此外由局地热对流造成的对流天气的范围较为有限,而本例中强对流虽然主要局限于嘉兴中北部地区,但其范围显然也已超过热对流的界限。

高分辨率的中尺度地面流场能够提供边界层低层的大气运动状况,边界层辐合线往往是强对流天气发生的重要触发机制(徐亚钦等,2011,沈杭锋等,2010,许爱华等,2014;郑永光等,2010;易笑园等,2014)。本文将地面流场和 0.5° 仰角上的宁波多普勒雷达反射率因子进行叠加(地面流场的分析时次比雷达观测时次提前约 1 h),分析此次对流性暴雨的发展演变过程及地面辐合线对强对流发生发展的指示作用。图 3a 可以看到 21 日 16 时整个嘉兴东部地区以东南气流为主,西部地区以西南和偏西气流为主,两股气流在嘉兴的中部偏西地区形成辐合,主要辐合区段在高桥至桐乡、八联至东进、嘉善的东北地区。17 时八联到嘉兴段、东进附近已出现小块回波,与其对应的对流云团顶温度在 $-40\sim -30^{\circ}\text{C}$

(图略),这都表明对流云团处于初始发展阶段。17 时地面流场(图 3b)显示嘉兴中部地区的辐合运动较之前更加清晰,两侧的辐合气流也有所加强,对比 18 时雷达回波可以看到,在辐合线附近已经出现强对流云团,最大回波强度达到了 50~55 dBz,相应地嘉兴中部和东北部地区上空的对流云团进一步发展,云顶温度达到了-50~-40℃(图 3f)。

(图 3c),强对流云团的范围明显扩大,最低云顶温度更是达到了-80~-70℃(图 3g),这说明云团内部对流运动发展非常旺盛,而 18 时辐合线的位置较 17 时有所变动,略向西移动,且较之前也显得凌乱,出现了辐散气流,这表明对流云团内已经出现了下沉运动,对流运动已达成熟阶段。油车港附近出现了很强的气流辐合中心,这也预示着该地区将出现

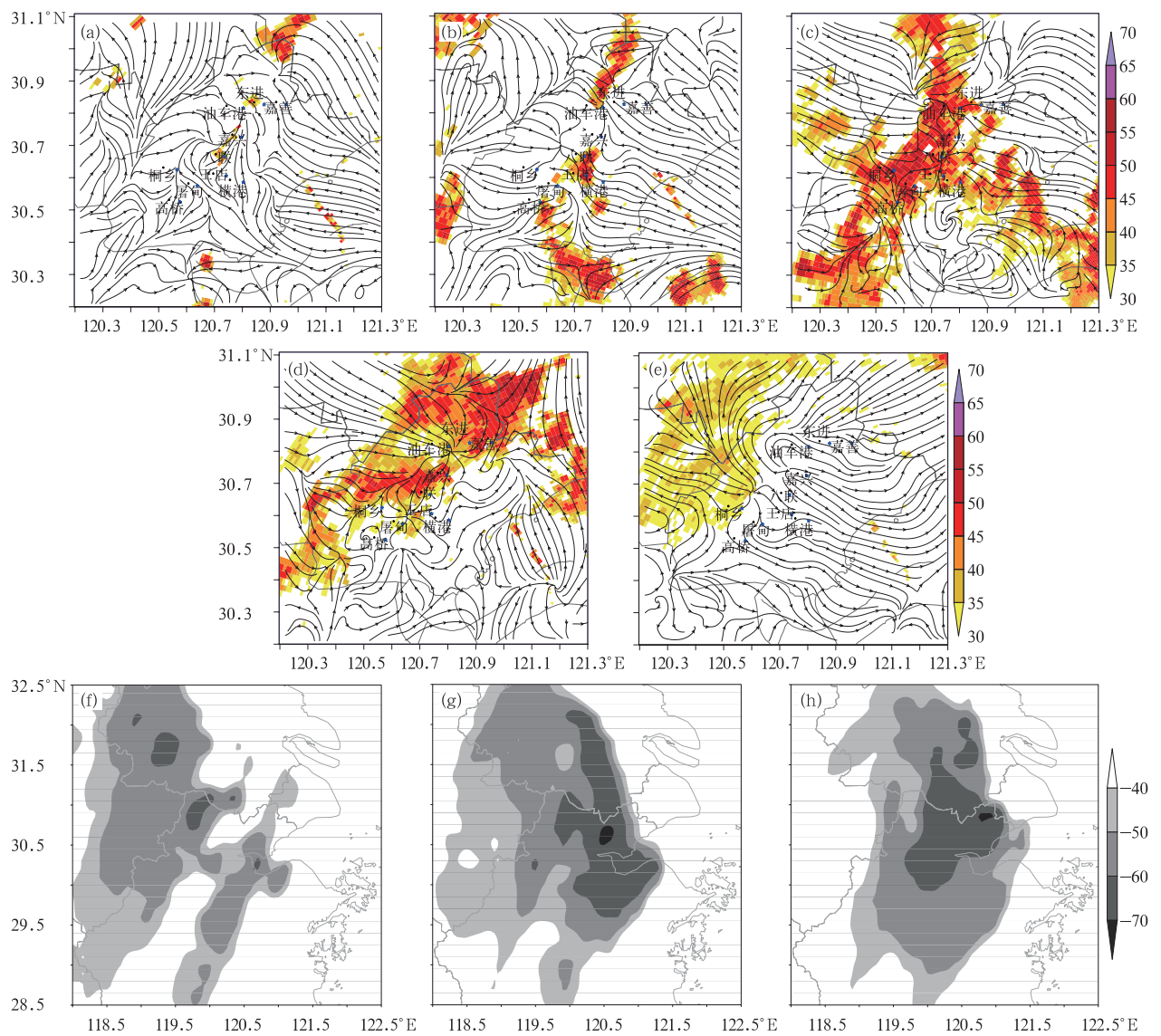


图 3 2013 年 7 月 21 日地面流场和雷达反射率(单位: dBz)

(a) 16:00 地面流场和 17:02 雷达反射率, (b) 17:00 地面流场和 17:58 雷达反射率, (c) 18:00 地面流场和 19:00 雷达反射率, (d) 19:00 地面流场和 19:57 雷达反射率, (e) 20:00 地面流场和 20:59 雷达反射率; (f) 18:00、(g) 19:00 和 (h) 20:00

FY-2E 卫星反演的云顶亮温(TBB,单位: ℃)分布

Fig. 3 Surface streamline field and radar reflectivity (unit: dBz) at (a) 16:00 and 17:02 BT, (b) 17:00 and 17:58 BT, (c) 18:00 and 19:00 BT, (d) 19:00 and 19:57 BT, (e) 20:00 and 20:59 BT; the distribution of TBB retrieved from FY-2E satellite (unit: ℃) at (f) 18:00, (g) 19:00, (h) 20:00 BT

非常强的上升运动。与前一时次类似,19 时地面层上辐合气流和辐散气流并存,但辐合辐散区域的中心位置有所改变(图 3d),而 20 时对流云团顶温度也与 19 时接近,只是进一步向东北方向发展(图 3h)。20 时地面流场已经完全为辐散气流控制(图 3e),表明对流云团已开始处于消亡阶段。20—21 时的雷达反射率演变可以清楚地看到这种情况。

从以上的分析可以发现,此次对流性暴雨的产生与地面辐合线的触发作用密切相关。辐合线附近区域有较强的上升运动,配合该地区上空一定的水汽条件和不稳定能量条件,就可以产生强烈发展的积云,从而形成雷暴天气,同时也可以发现嘉兴东部沿海东南气流的存在是此次嘉兴地区地面辐合线形成的重要因素。另外也可以看到地面辐合线对强对流云团的发展有较好的预示作用,本例中其提前时间量可达 1 h,因此通过分析,高分辨率地面流场有助于及时监测到对流发展的初始特征,这对于强天气短临预报具有重要意义。

2.3 地面散度场和强降雨特征分析

孙淑清(1982)认为对于中尺度系统而言散度是构成系统发生发展的一个重要因素,与暴雨的发生有着密切的关系。本文使用高分辨率的风场格点资料计算地面散度场,以深入了解强对流天气发生时边界层低层气流辐合辐散的分布状况及强度,进而对边界层内气流的垂直运动状况有更加客观的认识。此外在地面散度场上还叠加了 1 h 的累积降雨

量,以揭示降雨场和散度场之间的内在联系。图 4a 为 18—19 时 1 h 累积降雨量和 18:30 地面散度场,可以看到此时段内强降雨区域主要有两块,较大一块位于王店—屠甸—横港,而另一块位于高桥西部,强降雨中心并不对应强辐合中心,而是位于辐合中心边缘辐合梯度较大的地区或是辐散区内,强降雨附近都有较强的水平辐合和辐散运动,两者的绝对强度都达到了,这也表明中心附近具有较强的垂直运动。另一方面辐合辐散中心对的出现表明,尽管降雨区域表现出很强的局地性,但是其上升气流也并不是完全垂直发展的,而是存在一定的倾斜角度,这样的结构对于维持该地区强对流的发展有一定的作用。19—20 时强降雨区的位置有所移动(图 4b),最强中心位于油车港附近,与其对应的是强的辐散场,与其相邻的东部地区仍有强辐合场存在,预示着这些地区可能仍有对流云团在发展。从逐小时的降雨落区分布可以发现,降雨落区的空间连续性较差,这表明此次降雨过程中强对流云团的系统性移动特征不明显,表现得更为“局地性”,这也使得目前预报此类强天气的难度明显加大,但通过分析地面辐合辐散中心的位置及强度,可以大致估测出强降雨中心的落区范围及强度。

2.4 近地面辐合气流形成原因分析

从上面的分析可以看到,近地面层东西两股气流在嘉兴中部地区的辐合是触发此次对流性暴雨过程的重要因素。为了进一步分析这两股气流的形成

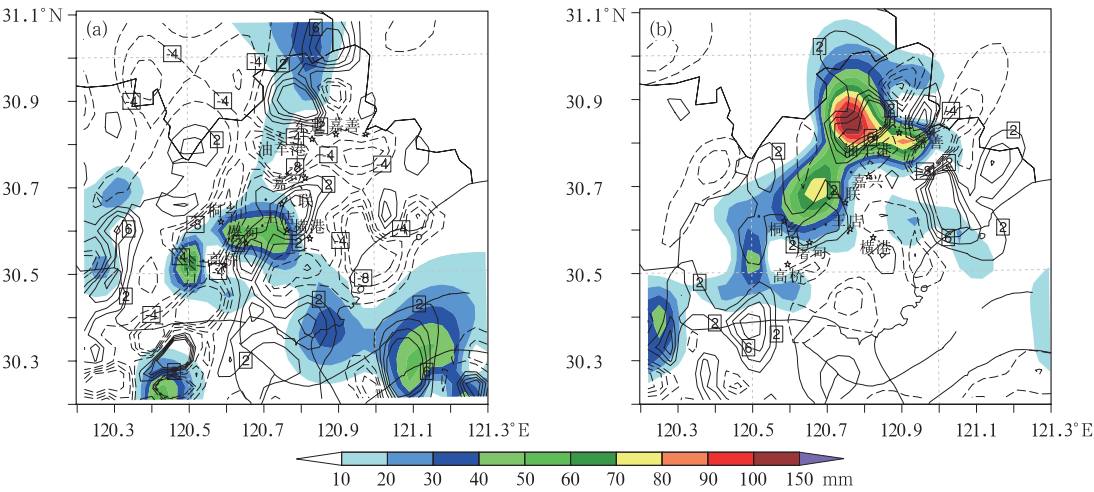


图 4 2013 年 7 月 21 日 18—19 时 1 h 累积降雨量(单位:mm)和 18:30 地面散度场(单位: 10^{-4} s^{-1})(a), 19—20 时 1 h 累积降雨量和 19:30 地面散度场 (b)

Fig. 4 (a) Accumulated rainfall (unit: mm) from 18:00 to 19:00 BT and surface divergence (unit: 10^{-4} s^{-1}) at 18:30 BT, (b) accumulated rainfall from 19:00 to 20:00 BT and surface divergence at 19:30 BT 21 July 2013

原因,将地面温度场、流场和纬向风速场进行叠加。21 日 15:00 浙江北部地区近地面层主要为西南气流所控制,但强度不大,而嘉兴东部沿海地区则存在明显的温度梯度,在海陆热力差异的作用下出现东南气流(图 5a)。16:00 纬向风速的零线南北穿越嘉兴中部地区,其左侧的偏西气流较弱,风速值在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,而其右侧的偏东气流已逐渐深入内陆,东部地区的风速值达到了 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上(图 5b)。根据多普勒雷达反射率因子和中尺度自动站的雨量观测(图略),可以看到自 16:00 开始靠近嘉兴的湖州东部和杭州东北部的部分地区由于受到热力作用出现了短时阵雨天气,致使该地区 16:30 的气温明显低于周边地区,从而形成了一个局地的

冷空气堆,在其右侧偏西风速有明显的增强,并出现向下游的扩散趋势,此时偏东气流的影响范围和 30 min 前相差不大,但其陆地上的强度进一步增加(图 5c)。17:00 冷空气堆引起的偏西风出流区已进入嘉兴西部地区,中心值达到了 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,使得嘉兴西部和北部地区原有的偏西气流有所增强,而此刻偏东气流的强度和范围较 16:30 变化不大,两股气流在强度上非常接近,因此在嘉兴中部地区出现了较为明显的辐合。以上分析表明,湖州东部地区由于局地热对流引起的偏西气流出流对辐合的形成至关重要,因为它增强了嘉兴地区原有偏西气流的强度,使得东西两股气流可以在嘉兴中部地区形成辐合。

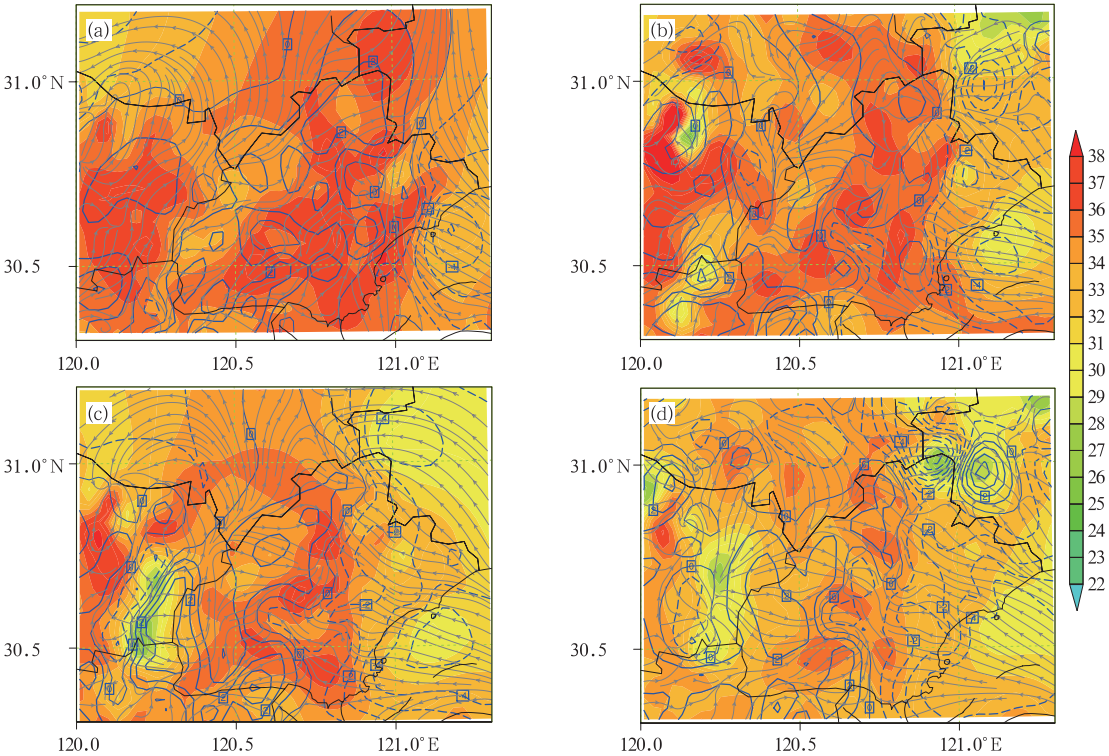


图 5 2013 年 7 月 21 日地面温度场(阴影区)、流场以及纬向风速(等值线)分布图
(a) 15:00, (b) 16:00, (c) 16:30, (d) 17:00

Fig. 5 Distribution of temperature (shaded), streamline and zontal wind speed (contour line) at 15:00 BT (a), 16:00 BT (b), 16:30 BT (c), 17:00 BT (d) 21 July 2013

3 单站气象要素变化

为了深入分析此次对流性雷暴天气过程的时间演变特征,绘制 10 min 间隔的降雨、温度、湿度、风速和风向等气象要素变化曲线,时间范围为 7 月 21

日 12:00 时至 22 日 02:00。嘉兴站(58452)21 日 12:00 的气压为 1004.5 hPa,整个午后气压几乎一直在下降,17:00 达到最低值 1002.3 hPa(图 6b),而从 FNL 再分析资料的海平面气压场的变化发现(图略),14:00—20:00 嘉兴站的气压总体呈上升趋势,因此午后出现的气压明显下降应与本地地区的近

地面辐合上升运动有关。17:00 起气压出现小幅反弹,气温下降,湿度增大,但没有降雨出现(图 6a, 6c, 6d),这说明本站周边地区已有对流性降雨出现(图 2a),下沉的湿冷空气外流并开始影响本站,风速突增,风向转为偏西(图 6e, 6f)。18:30 本站开始出现降雨,19:00 之前降雨强度还不是很大,之后雨强迅速增大,10 min 累积降雨量达到了 20 mm 的峰值,气压蹿升,气温进一步下降,这可能是由于强降雨导致下沉气流增强,雨滴在下沉过程中部分蒸发

导致气温下降,此时风速再次出现跃升,风向也迅速转为偏西风。19:50 雨势已明显减弱,但 10 min 以后又开始增强,并达到了 8 mm 左右的次高峰值,其他气象要素的变化已没有先前这么剧烈。另外,21:00 雨停以后气压并没有回落,而是逐渐稳定在 1006 hPa 附近,22 日 02:00 以后开始缓慢上升,这和一般对流过程发生之后气压迅速回落之前水平有所不同,表明此次对流性暴雨天气发生在副高逐渐增强的过程中。

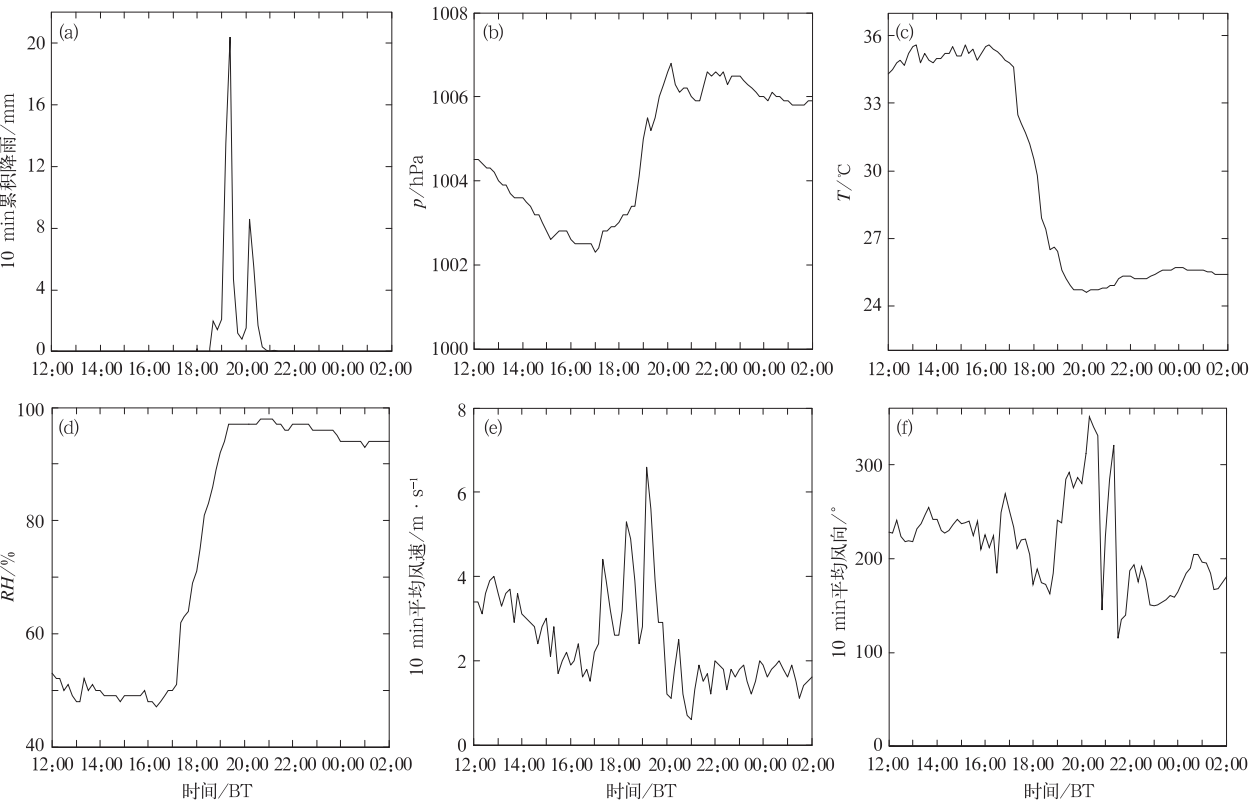


图 6 2013 年 7 月 21 日 12:00 时至 22 日 02:00 嘉兴站(58452)气象要素时间演变
(观测抽样频率为 10 min)

Fig. 6 Time evolution of meteorological elements at Jiaxing Station
from 12:00 BT 21 to 02:00 BT 22 July 2013
(The frequency of observation sampling is 10 minutes)

4 高分辨率数值模式分析

为了深入地分析此次对流性暴雨过程的发生发展机制,有必要借助于高分辨率的中尺度数值模式。模式产品的使用首先要保证模拟能否较好地再现此次“局地性”较强的暴雨天气过程,因此必须采用同化技术以确保模拟质量。本文使用 NCAR 的 WRF

模式对此次暴雨过程进行全程同化模拟,模拟采用两重嵌套,外层区域 15 km,内层区域 5 km,外层采用四维格点同化方案,同化的格点场来自于 NCEP 的 FNL 资料(1°×1°同化了各种卫星和常规观测资料),内层采用四维测站同化方案,仅同化 1 h 间隔的浙江省中尺度自动站资料。采用这样的方案理由是,外层格点同化可以有效控制模拟过程中产生的 α 中尺度的误差,从而为内层提供高质量的侧边界

条件。从前面的分析可以看到本次过程中,地面辐合场对于对流天气的触发至关重要,因此内层同化中尺度自动站资料就是要把重要的地面场(风场和温度场)信息传递到模式中去,从而提高模式边界层的模拟质量。模拟的起始时间为 2013 年 7 月 21 日 08 时,积分时长 24 h。图 7 为 2013 年 7 月 21 日 14—20 时嘉兴及周边地区的模拟降雨分布,对比实况可以看到嘉兴中北部地区的强降雨区较好地模拟了出来,只是在强度上要稍微小一些,基于此下面将使用高分辨率模式结果对此次强对流天气过程做进一步分析。

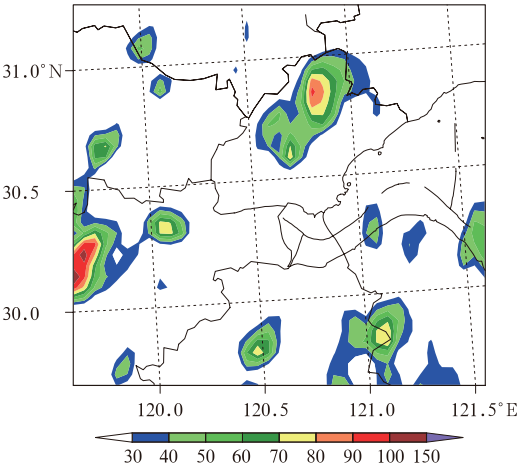


图 7 2013 年 7 月 21 日 14—20 时模拟降雨分布(单位: mm)
Fig. 7 The simulated rainfall from 14:00 to 20:00 BT 21 July 2013 (unit: mm)

4.1 垂直环流特征分析

模式强降雨时段主要集中在 2013 年 7 月 21 日 16—18 时,比实况约提前了 1~2h,但是降雨分布

形态和实况较为一致(图 7),因此本文通过研究穿过强降雨中心的纬向上流场、垂直速度场以及湿度场的剖面图来分析强对流天气的垂直环流演变特征。16 时(图 8a)950 hPa 近地面层上有东西两股气流在 120.6°~121.0°E 产生辐合上升运动,但此时上升运动发展得还不是很强烈,主要的上升运动区位于 700 hPa 以下,对流层低层的偏西气流一侧相对湿度在 60% 以下,而偏东气流一侧的相对湿度较大,接近 80%,尽管对流层低层为上湿下干相对稳定的层结结构,但中层以上则为明显的上干下湿的不稳定结构,一旦对流运动在近地面层得到触发,在其上升过程中就会获得较大的不稳定能量,从而有利于强对流的发展。17 时辐合上升运动明显加强,最大上升速度达到了 2~3 m·s⁻¹,且已发展到了 500 hPa 高度,上升气流在 700 hPa 以下表现出很大的倾斜特征,这可能与近地面层偏东气流的减弱有关(图 8b)。从图 3a 和 3b 也可以看到,16 时地面流场中嘉兴地区偏西气流相对偏东气流其影响范围明显要小一些,且较为凌乱,17 时地面辐合线较前一时次表现得更为清晰,且向嘉兴东部地区推进,这可能与降雨引起的沿海温度梯度减小进而使得偏东气流减弱有关。此外从图 8 中还可以看到随着上升运动的发展,500 hPa 以下几乎都为深厚的湿层所控制,特别是在上升气流右侧的偏东气流中,近地面层几乎都为高湿区所控制,而偏西气流一侧则相对干一些。18 时(图 8c)之前对流层低层的强倾斜上升运动已不是很清楚,但中高层上仍存在偏西气流和偏东气流的辐合区,但强度和范围已明显减弱,不过,在辐合上升气流区中自低层到高层建立起一个相对湿度>90%向西倾斜的高湿柱,使得对流运动虽已发展到对流层高层,仍有利于强降雨产生。

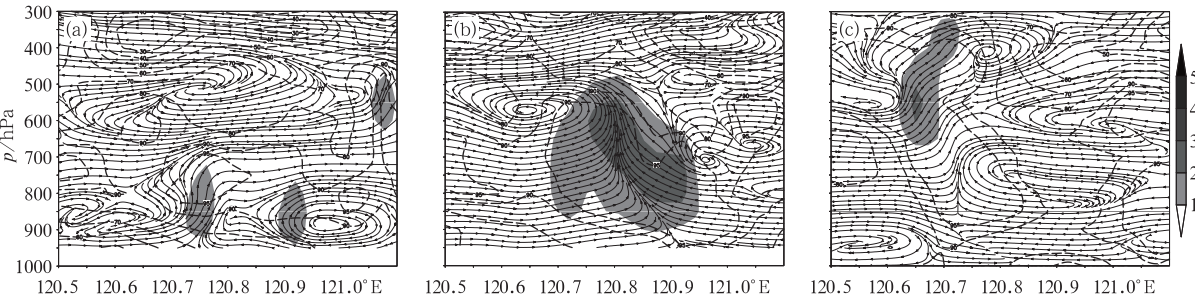


图 8 2013 年 7 月 21 日 16 时(a)、17 时(b)和 18 时(c)沿(30.85°N,120.5°~121.1°E)流场、湿度场和垂直速度场(阴影,单位: m·s⁻¹)剖面图

Fig. 8 Vertical cross-section of streamline, relative humidity and vertical velocity (shaded, unit: m·s⁻¹) along (30.85°N,120.5°~121.1°E) at 16:00 BT (a), 17:00 BT (b), 18:00 BT (c) 21 July 2013

此外可以看到中高层强上升区的下方850 hPa以下出现了较为明显的下沉气流,其中一部分气流向东契入近地面的偏东气流内,致使此处的辐合抬升运动加强,从而在 850~650 hPa 的对流层中低层形成了另一股垂直上升气流。

4.2 对流性暴雨环境条件分析

图 9a 和 9b 是暴雨中心附近的探空曲线,可以看到 16 时抬升凝结高度仅在 956 hPa 处,说明对流层低层大气的湿度非常大,同时近地面层还存在较为浅薄的逆温层,而自由对流高度以上大气中的不稳定能量非常大,CAPE 值达到了 $2838\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,这表明一旦近地面气团在地面辐合气流的抬升作用下冲破逆温层,就可以得到迅速的发展(图 9a)。17 时

近地面的逆温层已经消失,状态曲线已向下延伸到近地面层,说明在近地面辐合上升气流的作用下,整个对流层都处在不稳定的状态之中,而此时的不稳定能量仍有 $2842\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此对流运动将获得更加强烈的发展(图 9b),这从 1 h 降雨量也可以看到(图略),17—18 时降雨强度明显要大于 16—17 时。从风向的垂直廓线可以发现,两个时次上 0~3 km 风速垂直切变大约都为 $1.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,相对较弱,这并不有利于强对流天气的持续发展。对比雷达实况监测也可以发现,本次对流性暴雨过程中,尽管单个对流云团的回波强度较大,但其生命史并不是很长,这可能与缺少强的环境风垂直切变有关。计算得到 16 时的可降水量为 7 cm,这说明对流发生前大气柱中的水汽含量相当高,这也是产生局地暴雨

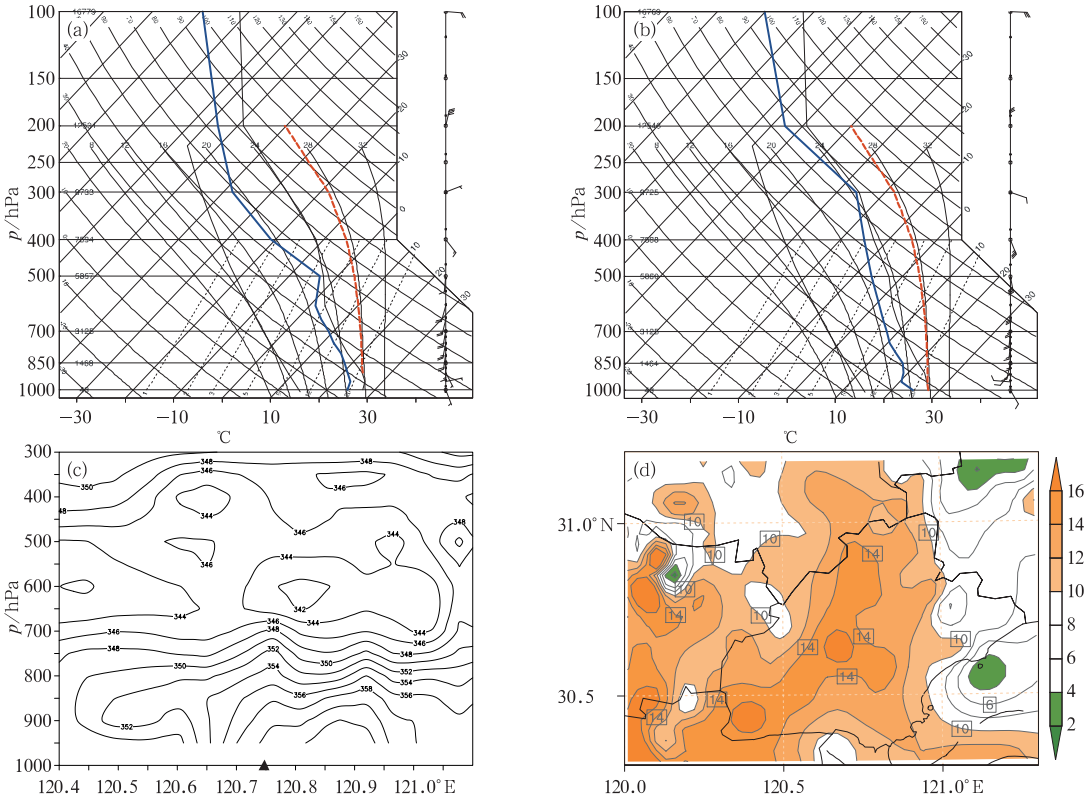


图 9 2013 年 7 月 21 日 16 时(a)和 17 时(b)暴雨中心附近(30.85°N、120.8°E)探空曲线(红色虚线为状态变化曲线,蓝线为环境露点变化曲线,黑线为环境温度变化曲线);(c)沿(30.85°N、120.4°~121.1°E)16 时相对位温(单位:K)的垂直剖面(黑色三角表示模拟暴雨中心);(d) 16 时地面 2 m 处的温度露点差实况分布(单位:K)

Fig. 9 The sounding profile near the rainstorm center at (30.85°N,120.8°E; the red dash line represents the state profile, the blue line represents the profile of environmental dew point and the black line represents the profile of environmental temperature) at (a) 16:00 BT, (b) 17:00 BT 21 July 2013; (c) vertical cross-section of equivalent potential temperature (unit: K) along (30.85°N,120.4°—121.1°E) at 16:00 (the black triangle represents the simulated rainstorm center); (d) depression of dew point near surface (unit: K) at 16:00

的重要原因之一。从16时模拟暴雨区附近的相对位温垂直分布可以看到(图9c),暴雨区左侧对流层低层850 hPa以下大气为中性层结或稳定层结,850 hPa以上层结变得极不稳定,而暴雨区低层主要为弱的不稳定层结控制。但从对流暴雨发生前2 m温度露点差的实况分布可以看到(图9d),嘉兴及西部周边地区的温度露点差基本都在10 K以上,说明近地面大气的水汽含量较低,而一条14 K以上的狭长干区带东北—西南向穿越嘉兴中部地区,与暴雨带分布位置极为接近。对比模拟的近地面水汽条件可以发现(图略),模拟暴雨区近地面层水汽含量偏大,因此可以推测实况暴雨区内近地面大气层结应更加稳定,而暴雨区内近地面辐合气流的作用就是将近地面层的干热空气带至近地面浅薄的中性或稳定层结之上,从而获得有利于对流强烈发展的不稳定能量。

5 结 论

本文利用FY-2E卫星的TBB资料、多普勒雷达资料、中尺度自动站资料以及基于WRF模式的5 km全程同化数据对2013年7月21日杭州湾北岸短时大暴雨天气进行了中尺度分析,得到以下结论:

(1)暴雨发生前杭州湾地区处在西风槽和副高之间的过渡带内,天气系统较弱;对流层低层为一致的西南暖湿气流,而中高层为干冷空气,不稳定的垂直温湿结构有利于暴雨的产生。

(2)近地面层上西南偏西气流和东南偏东气流间的辐合抬升作用是触发此次暴雨的重要机制。湖州东部地区由局地热对流引起的偏西气流出流增强了嘉兴西部地区的偏西气流强度,从而引发两股气流间的辐合扰动并产生对流运动。

(3)强降雨中心并不对应强辐合中心,而是位

于辐合中心边缘辐合梯度较大的地区或是辐散区内,强降雨附近都有较强的水平辐合和辐散运动,这表明其中心附近具有较强的垂直运动。辐合辐散中心对的出现表明,尽管降雨区域表现出很强的局地性,但是其上升气流也并不是完全垂直发展的,而是存在一定的倾斜角度。当对流运动发展到一定程度时,在对流层低层出现了下沉气流,其中一部分气流向东契入近地面的偏东气流内,致使此处的辐合抬升运动加强,从而在对流层中低层形成新的垂直上升气流。这样的结构对于维持该地区强对流的发展有一定的作用。

参考文献

- 顾清源,肖递祥,黄楚惠,等.2009.低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用.气象,35(4):59-67.
- 龙清怡,刘海文,顾建峰,等.2014.雷达资料与中尺度数值预报的融合方法研究及其在临近预报中的应用.气象,40(10):1247-1258.
- 沈杭锋,翟国庆,朱补全,等.2010.浙江沿海中尺度辐合线对飑线发展影响的数值试验.大气科学,34(6):1127-1140.
- 孙淑清.1986.低层风场在暴雨发生中的动力作用.大气科学,6(4):394-404.
- 徐亚钦,翟国庆,黄旋旋,等.2011.基于雷达和自动站资料研究风暴演变规律.大气科学,35(1):134-146.
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等.2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征.气象,40(4):400-411.
- 易笑园,刘一玮,孙密娜,等.2014.海风辐合线对雷暴系统触发、合并的动热力过程.气象,40(12):1539-1548.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,等.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展.气象学报,70(3):311-337.
- 张小玲,张涛,刘鑫华,等.2010.中尺度天气的高空地面综合分析.气象,36(7):143-150.
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等.2010.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战.气象,36(7):33-42.
- 周雨华,黄小玉,黎祖贤,等.2006.副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征.气象,32(1):12-17.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.1992.天气学原理和方法(修订版).北京:气象出版社,676-678.