

张涛,郑永光,毛旭,等,2018.2016年9月4日下午“杭州G20峰会”期间短时阵雨天气成因与预报难点[J].气象,44(1):42-52.

2016年9月4日下午“杭州G20峰会”期间 短时阵雨天气成因与预报难点^{*}

张涛¹ 郑永光¹ 毛旭¹ 郑沛群² 朱文剑¹ 林隐静¹

¹ 国家气象中心,北京 100081

² 杭州市气象局,杭州 310051

提 要: 2016年9月4日下午16时(北京时)左右,发生在杭州市区和西湖及周边区域的一场突发的短时阵雨天气对“杭州G20峰会”相关活动的准备工作造成了极大的影响。本文分析了该次阵雨天气的成因,讨论了定点和定时短时期近预报的局限性和短时临近预报难点。本文分析表明,当时重点监视的杭州东部宁波至绍兴一带的主要对流系统并未直接影响到杭州市区,东移的天气尺度高空槽系统也尚未影响到该区域,该次阵雨天气是在弱的静力不稳定条件下,由午后形成的海风锋与干线在杭州湾西北岸共同触发的浅层对流系统向西南快速移入杭州西湖及其周边区域形成。由于该对流天气系统具有空间尺度小、生命史短、移动快速、发展高度低、反射率因子强度低、短时雨强较大等特点,加之当天杭州及周边区域上空存在大量在静止卫星云图上难以同积云区分的高层卷云,使得天气雷达和静止气象卫星对该系统的监测能力受到显著的影响,以致于仅依赖这两类资料对其做出较长时效的短时临近预报也非常困难,因此使用高时空分辨率的加密自动站资料分析中尺度环境场的要素变化对于此浅对流天气系统的短时临近预报至关重要。

关键词: 短时阵雨,浅对流,配料法,成因,预报难点

中图分类号: P456,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.004

Mechanism and Forecasting Difficulties of the Afternoon Convective Shower on 4 September 2016 During the Period of “Hangzhou G20 Summit”

ZHANG Tao¹ ZHENG Yongguang¹ MAO Xu¹ ZHENG Peiqun²
ZHU Wenjian¹ LIN Yinjing¹

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051

Abstract: At about 16:00 BT 4 September 2016 the urban area of Hangzhou, West Lake and the surrounding area received a sudden convective shower, which caused great impacts on preparation related to “Hangzhou G20 Summit”. This paper analyzes the mechanism of the shower, and discusses limitations of short-time forecasting and difficulties of nowcasting. The results indicate that the mainly focusing convection system at that time over Ningbo, eastern Hangzhou area, and Shaoxing did not directly affect Hangzhou City, and eastward-moving synoptic-scale upper trough system did not affected this area either. However, under the weakly statically unstable conditions, the shower was produced by a shallow convective system

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB430106)和国家自然科学基金项目(41375051)共同资助

2017年6月5日收稿; 2017年10月4日收修定稿

第一作者:张涛,主要从事强对流天气预报和研究. Email: zhangtao@cma.gov.cn

which was triggered by an afternoon sea breeze front with a dry line in the northwest Hangzhou Bay. As this convective system had some characteristics such as small spatial scale, short life, rapid movement, low cloud top, weak reflectivity and intensive rainfall intensity, together with a large number of high-level cirrus clouds which cannot effectively be discriminated from cumulus over Hangzhou and the surrounding area in the satellite images, the ability of weather radar and stationary meteorological satellite monitoring the system was weakened significantly, so that nowcasting the shower is also very difficult if only using these two types of observations. Therefore, it is crucial to use automatic weather station data with high spatio-temporal resolutions to analyze the environmental conditions for nowcasting the type of shallow convective weather systems.

Key words: convective shower, shallow convective system, ingredients-based method, mechanism, forecasting difficulties

引 言

2016年9月上旬在杭州举办的“G20峰会”全球瞩目,该次峰会重要活动多,尤其是计划于9月4日20—22时进行的大型文艺演出,将视天气条件选择优先在西湖湖面举行或备选室内演出。此项服务为典型的决策气象服务,时任浙江省委书记夏宝龙、省长车俊先后亲临峰会气象台视察指导,凸显此次预报服务事关重大。中国气象局高度重视此次峰会的气象保障服务工作,定位为“2016年中国气象局最重要的政治任务”,以“集全部门之力,聚各方面专家之智”的战略部署和不亚于“2008北京奥运”和“2015年9·3阅兵”的保障力度来应对此次活动。中国气象局专项预报服务团队给出了9月4日晚间天气的准确预报,峰会文艺演出活动未受到不利天气的影响。虽然总体上此次“G20峰会”气象预报服务非常成功,但对9月4日下午发生在杭州市区和西湖等地的局地短时小阵雨天气预报存在较多不足,给当日晚间文艺演出的准备工作带来了很大的负面影响,也给后续晚间的短时临近天气预报造成了相当的困扰。这次阵雨天气在总体强度、持续时间和影响范围等方面都很小,并非日常业务关注的灾害性强天气,但由于处于重大活动时间节点,属于典型的“低强度、高影响”天气。

虽然强对流天气已经受到广泛关注,比如2015年6月1日下击暴流导致的“东方之星”号客轮翻沉事件(郑永光等,2016a)、2015年10月4日台风彩虹龙卷事件(朱文剑等,2016;李兆慧等,2017)、2016年6月23日江苏省盐城市EF4级强龙卷事件(郑永光等,2016b)等,但对这种局地小尺度的“低强

度、高影响”天气受到的关注还较少。基于对流发生条件的“配料法”预报思路(Doswell et al, 1996)已被广为接受(俞小鼎, 2011; 俞小鼎等, 2012; 蓝渝等, 2013; 张涛等, 2013; 郑永光等, 2015; 2017; 李琴等, 2016; 陈淑琴等, 2017), 并形成了相应的强对流天气分析规范(蓝渝等, 2013; 张涛等, 2013; 郑永光等, 2015), 但需要指出的是, 这些针对的都是深厚湿对流(业务中通常称为雷暴)和强对流天气。因此, 针对这种“低强度、高影响”阵雨天气的“配料法”分析和预报思路还非常缺乏, 加之其时空尺度通常较小, 有利于其发展的条件也不显著, 从而对其的短期和短时临近预报存在更多困难, 并且引发这次阵雨过程的浅对流天气系统在触发和移动传播上都有很多独特之处, 因此分析总结这次阵雨天气的成因和短时临近预报着眼点对于今后类似的气象保障服务具有借鉴意义和参考价值。

1 天气实况、环流背景和预报情况

1.1 天气实况

9月5日08时(北京时,下同)国家站的24h雨量观测(图1a)显示浙江仅东北部出现了小范围降雨,15站大于0.1mm,5站大于10mm,集中在宁波附近地区,最大为奉化站48mm,其他大部站点无降水或有微量降水,杭州附近降雨实况为杭州本站微量(T)、萧山0.6mm、临安0.2mm,未能反映出9月4日下午杭州市区及西湖的局地阵雨。

但区域加密自动站的9月4日16—17时1h雨量(图1b)显示西湖周边区域有分散性降水发生,最大为龙井山公园12.1mm,西湖湖心亭6.2mm,

自动站分钟雨量资料(图略)显示这些降水持续时间大多在 10 min 以内,虽然总雨量不大,但短历时的雨强还是较强,其中湖心亭 16:10—16:20 降雨 4.8 mm,龙井山公园 16:20—16:30 降雨竟达 10.8 mm;两地相距仅约 4 km,降水发生时间先后间隔仅约 10 min,雷达监测资料分析表明其为同一个中尺度天气系统造成。

9 月 4 日 16:20 的华东区域雷达组合反射率因子拼图(图 2)可以看到三个主要的降水系统(分别为图中红圈内部分),分别是:第一是造成宁波附近中到大雨的对流系统,正处于消亡阶段;第二是造成杭州市区局地阵雨的 γ 中尺度弱对流系统;第三是苏皖中部由于 0°C 度层亮带造成虚假强回波的高空槽弱降水系统,这是因为在最强回波处 24 h 总雨量仅不到 1 mm,且其他大部地区雨量都小于 0.1 mm 的缘故。

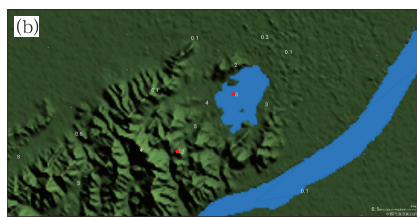
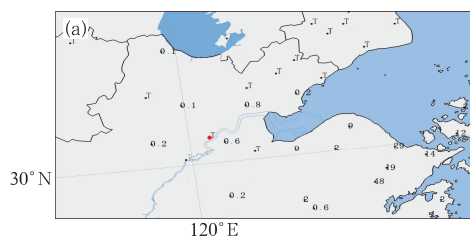


图 1 2016 年 9 月 5 日 08 时 24 h 降水量(a)和 9 月 4 日 17 时 1 h 降水量(b)(单位:mm)

(图 1a 中红圆点表示杭州的地理位置,图 1b 中红圆点:左下表示龙井山公园,右上表示西湖湖心亭)

Fig. 1 The 24 h rainfall at 08:00 BT BT 5 (a) and 1 h rainfall at 17:00 BT

4 (b) September 2016 (unit: mm)

(In Fig. 1a, red dot denotes the location of Hangzhou City; in Fig. 1b, left-lower red dot denotes Longjingshan Park, and right-upper red dot is the Mid Lake Pavilion in the West Lake)

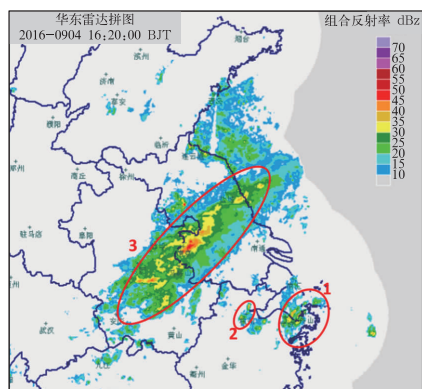


图 2 2016 年 9 月 4 日 16:20 时华东地区雷达组合反射率因子拼图

Fig. 2 Composite reflectivity over East China at 16:20 BT 4 September 2016

1.2 环流背景和对流环境条件

图 3 为 9 月 4 日 08 时的环流背景。500 hPa, 我国北方地区受两脊一槽形势控制,新疆和东北地区东部由高压脊控制,内蒙古东部有弱冷涡系统,584 线在长江以北,杭州位于槽底的弱西风区,我国南方大部处于均压场控制,副热带高压偏东偏南位于海上;低层 925 hPa 风场显示杭州地区和我南方大部都受到东北风向的大陆性干气团控制,层结总体为稳定,该层大尺度切变线位于东南沿海至南海东北部一带,日本西南部海上是北上减弱的热带气旋“南川”,“南川”西侧东海的东北气流指向浙江东北部沿海,温度和湿度分布(图略)显示这支气流相对于华东陆地温湿分布为冷湿性质,并且在浙东沿海转为偏东风,形成指向浙江内陆的较明显的冷湿舌,但尚未影响到杭州地区;最优抬升指数 BLI

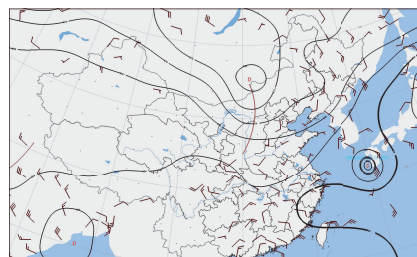


图 3 2016 年 9 月 4 日 08 时环流背景
(等值线为 500 hPa 高度,
风羽为 925 hPa 风场)

Fig. 3 Synoptic situation at 08:00 BT
4 September 2016

(Lines are 500 hPa geopotential height,
and wind barbs are 925 hPa wind field)

(图略)显示浙江东部沿海为弱的潜在不稳定区域,而浙江内陆地区为稳定区域,钱塘江口附近有伸入内陆的弱潜在不稳定区,与低层冷湿舌位置基本对应。

因此,9月4日下午并没有强的天气尺度系统影响杭州,有利于对流天气发展的环境条件也非常不显著。从天气系统配置判断可能影响杭州市区的主要降水天气系统有两个:导致稳定性弱降水天气的东移南下大尺度高空槽系统和浙东沿海西移的 β 中尺度对流天气系统。

1.3 预报情况

自中期时段到短期时段,9月4日的G20峰会现场天气预报结论并没有大的调整,预报结论主要为“杭州地区多云转阴、夜间有小阵雨天气,雨量小于1mm,没有雷电天气,天气条件适宜峰会的户外演出活动”。该预报结论的主要依据和着眼点正是1.2节分析得到的两个天气系统:第一个系统为逐渐逼近的东移高空槽稳定性弱降水系统,会导致多云转阴、夜间小阵雨天气;第二个系统为西移的浙东对流系统,由于浙江内陆地区不利的对流环境条件的影响将会使其减弱消亡,不可能对杭州地区造成影响。这样的预报结论与图2雷达反射率因子观测实况中两个天气系统的发展是一致的。

对于9月4日下午时段杭州地区出现的局地短时阵雨天气(即前述1.1节中的 γ 中尺度降水系统),在短期时效的会商中也有预报员提出“杭州及周边午后可能有阵雨”这样明确的预报意见,但是由于短期时效预报无法给出降雨精细准确的发生时间、地点和雨量量级,且考虑对流天气条件弱、阵雨出现的概率较小,且全球和中尺度数值模式都没有预报出下午的降水,因此为了不给主要的预报结论造成干扰而影响决策服务效果,专项预报服务团队最后并没有采纳这一预报意见。这也反映了此类较小尺度天气的预报在短期预报时效内提高其精细化水平还存在很大的局限性和困难。

从短时临近时效的预报来看,由于导致这次阵雨的浅对流天气系统在天气雷达和静止气象卫星观测资料上都不具备强对流天气系统的相关特征(具体见后文分析),因此专项预报服务团队对此次阵雨天气做出的临近预报可预报时效较短。虽在阵雨发生前十至数十分钟间有口头交流和汇报,但没有给出明确的产品和记录。因此对于峰会的气象服务而言这存在明显的不足。

2 西湖阵雨天气过程回顾及天气背景分析

根据加密自动站(图4)、新一代多普勒天气雷达(图5)等观测资料综合分析,第1节分析的大尺度高空槽稳定性弱降水系统在4日下午并未影响到杭州地区,浙东西移的弱对流降水也在进入到绍兴后向西南移并减弱消失,降水始终未越过图4中红色箭头1所示,并未对阵雨形成直接的影响。影响西湖的阵雨系统是由杭州东北方向移入,如图4中红色箭头2和图5b中所示。另外,杭州市区钱塘江东侧萧山西部也发生了类似杭州西湖周边浅对流系统的天气系统(图4和图5中红圆圈标注位置),并在15:30左右导致了局地短时阵雨天气,但该系统并未向西移动跨越钱塘江,而是移向西南方向并减弱消亡。

2.1 对流天气条件

前述大尺度环流背景分析可知,浙江北部位于大陆稳定气团与东海弱不稳定气团交界附近,杭州处于可能产生弱对流的阵雨区域,出现强对流天气的可能性较低。

分析杭州4日14时探空(图6)可看到:第一,850~700 hPa气层存在一定的弱静力不稳定,抬升凝结高度层与对流凝结高度层都位于850 hPa附近,850 hPa以下为干绝热温度直减率的充分混合边界层(充分混合边界层的形成见2.2节分析),地面温度已经达到对流温度(盛裴轩等,2003;李耀东等,2014;郑永光等,2017),对流抑制能量近乎消



图4 2016年9月4日17时1h降水量(单位:mm)

(红圆点:左下表示龙井山公园,右上表示西湖湖心亭,均位于杭州市内)

Fig. 4 The 1 h rainfall at 17:00 BT 4 September 2016 (unit: mm)

(Left-lower red dot stands for Longjingshan Park, and right-upper red dot is the Mid Lake Pavilion in the West Lake)

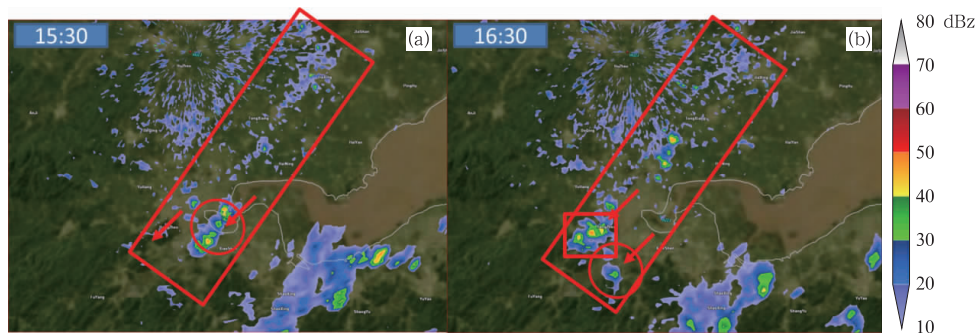


图 5 2016 年 9 月 4 日 15:30(a)及 16:30(b)湖州雷达 0.5°仰角反射率因子分布
(图 5a 中红色圆圈为影响萧山的对流系统;图 5b 中红色的小方框和圆圈分别表示影响杭州西湖
和萧山的阵雨系统;红色箭头表示表示系统移向;斜方框表示该区域内可见辐合线导致的回波)

Fig. 5 Reflectivity at 0.5° elevation of Huzhou Radar at 15:30 BT (a) and
16:30 BT (b) 4 September 2016

(In Fig. 5a, red circle denotes the shower system affecting Xiaoshan; in Fig. 5b, small red box and
red circle represent the shower systems affecting the West Lake and Xiaoshan, respectively;
red arrows indicate the direction of the shower system movements; the slant rectangles
indicate the areas with radar reflectivity caused by a convergence line)

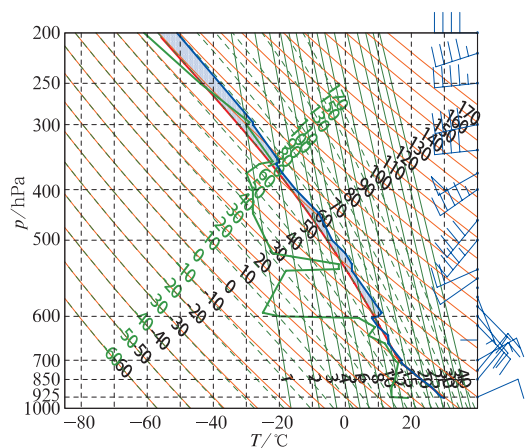


图 6 2016 年 9 月 4 日 14 时杭州探空温度(蓝色
实线)、露点(绿色实线)和风垂直分布
以及地面起始气块抬升曲线(红色实线)

Fig. 6 T-log p diagram of Hangzhou sounding
at 14:00 BT 4 September 2016

(Blue solid line represents temperature, green solid line
is dew point, blue barbs are for vertical distribution
of winds, and red solid line stands for uplift curve)

失(郑永光等,2017),这样的层结非常有利于弱扰动抬升地面空气产生积云对流,并且垂直上升运动会在 850~700 hPa 加速发展。

第二,700 hPa 以上至 400 hPa 之间气层温度相对较高,温度直减率接近湿绝热直减率,对流发生后低层空气即使可以垂直上升到这些层次后也会在负浮力的作用下减速从而受到明显抑制,将使得对流

系统表现为明显的浅对流特点,因此对流天气系统主要位于温度 0℃ 层以下、缺乏冰相粒子,为典型的暖云降水系统,从而不利于雷电天气的发生,但有利于较高的降水效率和较大的雨强,如 1.1 部分所述,最大 10 min 雨量超过了 10 mm。

第三,杭州边界层内湿度较低,平均比湿仅约 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这种湿度条件明显不利于强对流天气发展(Crisp,1979;王秀明等,2014;郑永光等,2017);但在 850~700 hPa 以及 350 hPa 以上气层大气温度露点差 $< 4^\circ\text{C}$,为饱和云区,从 13—14 时的 FY-2E 和 FY-2G 静止气象卫星可见光图像(图略)都可以看到杭州及其周边区域有零散的小尺度云区存在。

第四,850 hPa 以下层次为东北风,风速不大,风向基本一致,温度平流微弱;虽然 700 hPa 附近存在下沉逆温层,但 850、700 和 500 hPa 的风向由东北顺时针转变为东南和西南,表明存在暖平流,根据准地转理论,将有利于产生大尺度上升气流从而抑制大尺度下沉气流。

2.2 对流系统的触发与初生

降雨和雷达资料都反映出阵雨对流系统来自杭州东北方向,分析自动站风场、温度和露点后可以看到 12—14 时(图 7),杭州湾西北岸海宁—嘉兴附近有东北—西南走向并向西移动缓慢推进的海风锋(图 7 黑色线条位置)形成和发展,与之相匹配,湿度场上存在一条露点锋(干线);12 时海风锋还不太显

著,但 14 时海风锋已显著加强,辐合线非常清晰,温度梯度和湿度梯度显著加大。此后至 16 时,辐合线逐渐向西偏南方向移动,并在辐合线南端形成多个弱的浅对流降水系统,以图 5 中所示的西湖系统和萧山系统为最强。

海风锋和干线的形成有三个因素:第一为前述大尺度背景场反映出东侧与浙东沿海低层东风冷湿入流相对应,西侧与陆地边界层干暖气团对应;第二为凌晨起一直存在的浙东北降水系统产生的向西冷湿出流;第三为杭州湾海表与陆表由于太阳短波辐射的加热作用导致陆表升温较海表明显,此因素为形成海风锋的最重要因素。

FY-2E 和 FY-2G 静止气象卫星可见光图像表明在 4 日 11 时之前(图略),杭州地区多为晴空区,太阳短波辐射使得近地面大气快速升温,到 12 时就已经超过了 30°C (图 7a),这使得边界层能够充分混合,并在 13 时左右地面达到对流温度(图 6);

11:30,杭州地区有云顶较低的积云形成(图 8a),这与图 6 给出的杭州探空曲线特征 $850\sim 700\text{ hPa}$ 的温湿特征相一致,不过,12 时以后杭州周边区域也存在大量卷云(图略),亮温低于 -20°C ,这与 350 hPa 上空的温湿分布一致。

由于有如前一部分所述适合浅对流发展的环境条件,当 13 时后(图 6,14 时探空气球实际释放时间在 13 时左右),边界层温度达到对流温度,这时已经几乎没有了对流抑制能量,且海风锋和干线形成后,地面辐合开始逐渐加强,雷达显示 14 时开始辐合线上逐渐出现零散回波(图略),该辐合线回波强度较弱、极不明显,仅靠动态变化才能分辨出线状,从动态及剖面综合分析推测为非降水回波,至 15 时,辐合线回波逐渐明显(图 8b),仍以线状非降水回波为主,但已出现零散浅对流系统,辐合线南端先后发展出图 5 中的西湖和萧山浅对流系统。由于大气对流层中层层结的抑制作用(图 6),其垂直发展高度都

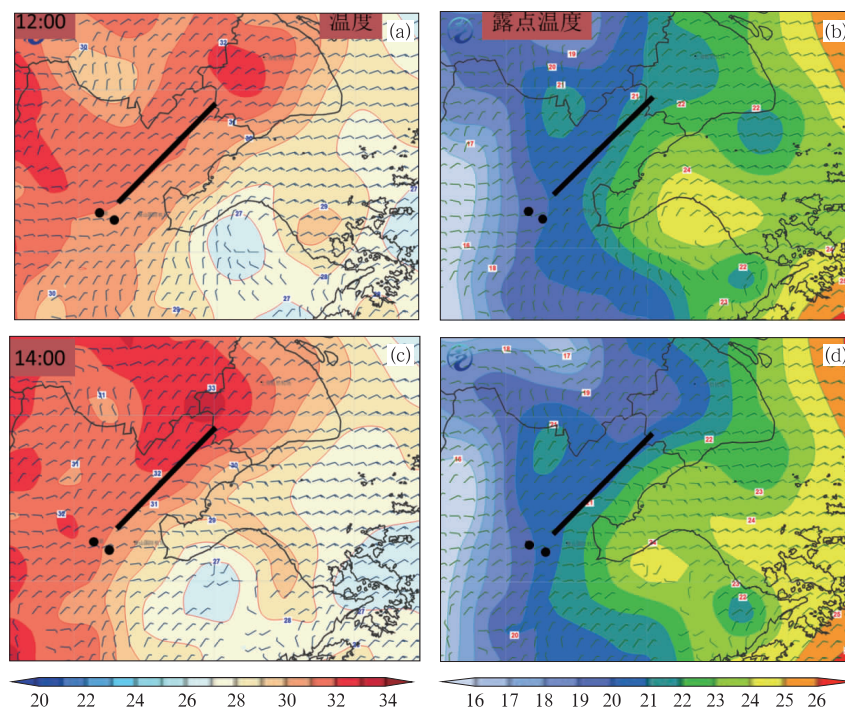


图 7 2016 年 9 月 4 日 12 时(a, b)及 14 时(c, d)区域加密自动站客观分析风场与温度分布(a, c)、风场与露点温度分布(b, d)

(图中黑色圆点,左上表示杭州西湖位置,右下表示位于萧山的杭州市气象局位置,两者相距约 9 km)

Fig. 7 Objective analyses of wind field and temperature (a, c), wind field and dew point temperature (b, d) from automatic weather stations at 12:00 BT (a, b) and 14:00 BT (c, d) 4 September 2016 (Left-upper black dot indicates the West Lake, and right-lower black dot indicates the Hangzhou Municipal Meteorological Bureau)

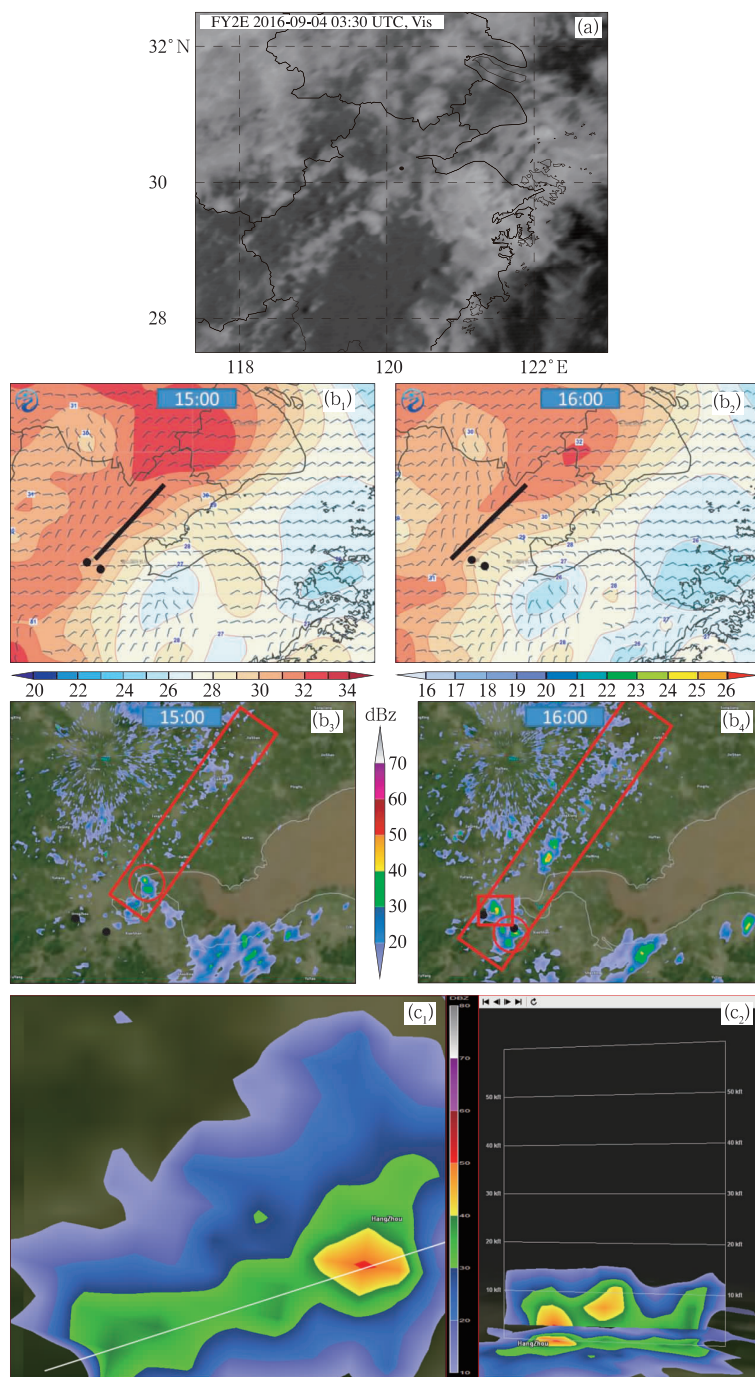


图 8 2016 年 9 月 4 日 FY-2E 静止气象卫星、自动站和雷达观测
(a)11:30 可见光图像(黑色圆点表示杭州地理位置);(b)15 时(b₁, b₃)及 16 时(b₂, b₄)区域加密自动站客观分析风场与温度分布(b₁, b₂)及湖州雷达 0.5°仰角反射率(b₃, b₄)(图中黑色圆点,左上表示杭州西湖位置;右下表示位于萧山的杭州市气象局位置,两者相距约 9 km。红色圆圈和小方框分别表示影响杭州萧山及杭州西湖的阵雨系统,红色箭头表示系统移向,斜方框表示该区域内可见辐合线导致的回波);(c)16:24 西湖阵雨系统雷达反射率因子(c₁)和垂直剖面图(c₂,图中每格高度为 1 万英尺,约 3048 m)

Fig. 8 Observations from FY-2E geostationary meteorological satellite, automatic weather stations and weather radar on 4 September 2016

(a) visible image at 11:30 BT 4 September (Black dot indicates the location of Hangzhou); (b) objective analyses of wind field and temperature (upper) from automatic weather stations at 15:00 BT (b₁, b₃) and 16:00 BT (b₂, b₄) 4 September and reflectivity at 0.5° elevation from Huzhou Radar (Left-upper black dot indicates the West Lake; right-lower black dot indicates the Hangzhou Municipal Meteorological Bureau; red circle and small box indicate the shower systems affecting the Xiaoshan and West Lake, respectively; red arrows indicate the moving direction of the shower system; the slant rectangles indicate the areas with radar reflectivity caused by a convergence line); (c) horizontal and vertical cross-section reflectivity of shower system affecting the West Lake at 16:24 BT 4 September 2016 [The vertical interval is 10000 feet (about 3048 m) in the vertical cross section]

较低;造成西湖阵雨的浅对流系统高度仅达 3 km 左右(图 8c)。

2.3 对流系统的移动和发展

浅对流系统触发后,由于发展高度局限在约 700 hPa 以下,因此其移动主要由低空平均风场引导,图 6 杭州探空风场和 14 时华东地区的上海、南京、衢州等探空站的 850 hPa 风场(图略)均表明该

区域低空盛行东北风,风速 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均约为 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,与 1.1 所述对流系统 10 min 移动 4 km 左右的速度基本相吻合。

萧山风廓线资料(图 9a)也清楚反映了低层东北风驱动浅对流系统的特征,具体表现在:(1)15:30—16:30 主要的降水期间与风场缺失部分相吻合,这是因为通常降雨期间风廓线观测到的运动矢量不能够代表大气中的风矢量的缘故(张小雯

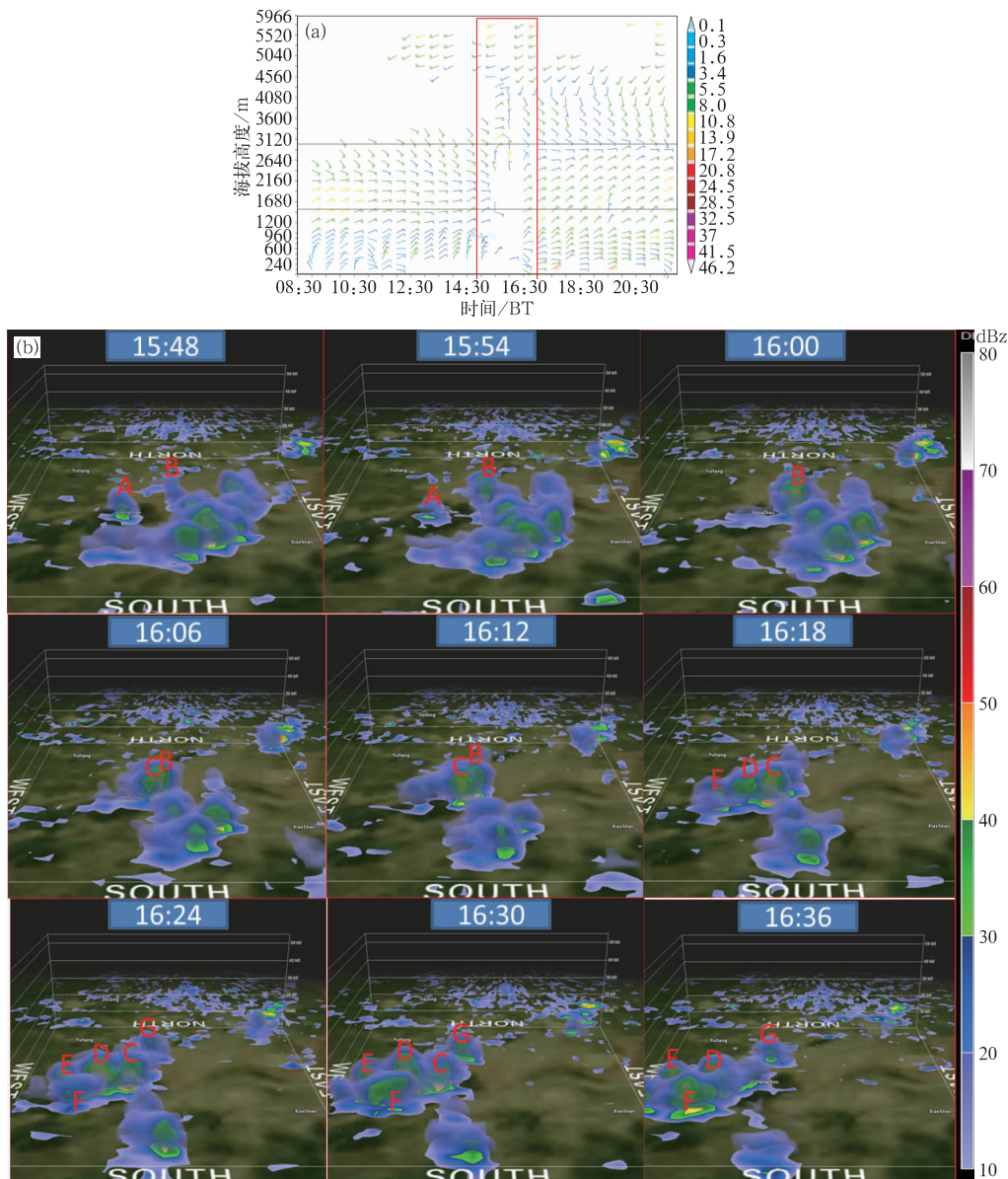


图 9 2016 年 9 月 4 日(a)09—22 时(时间从左向右增加)萧山风廓线(红框内为萧山降水发生时段),(b)导致西湖阵雨的对流系统时间演变

Fig. 9 (a) Wind profile at Xiaoshan from 09:00 BT to 22:00 BT 4 September 2016 (Red rectangle stands for rainfall period at Xiaoshan, time runs from left to right), (b) evolution of the convective system causing the West Lake shower

等,2017);(2)风场缺失或失信部分高度在约 3 km,与杭州探空资料所表征的浅对流可能发展高度 700 hPa 接近;(3)对流系统前部(即红框左侧降水发生之前)低层为东风;(4)对流系统后部 1.2~3 km 层次盛行东北风,这一层次也是浅对流系统的主体所在,因此受此层次东北风引导而移动,4.5 km 以上高空的槽底偏西风对于浅对流系统的移动没有影响。

影响西湖地区的阵雨是一个接近 γ 中尺度的浅对流系统(图 5 及图 8 中的红色方框部分),在其范围最大时的空中回波不超过 $15\text{ km}\times 15\text{ km}$,较小时范围小于 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$,产生地面降雨的范围甚至更小,整个系统在雷达资料可见的生命史为 1 h 左右(约 15:48—17:00)。通过放大的三维图像(图 9b)可以看出,该 γ 中尺度系统由多个更小的快速生消的单体构成,每个单体的生命史在 15 min 至半小时左右,空间尺度小于 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 。主要由 B、C、D、E 和 F 五个单体构成,造成西湖降水的主要是 B、C 和 D 三个单体。整个系统和单体都朝西南方向移动。单体主要在前部新生如 C、D、E 和 F 依次在前方新生;也可以在后部新生,如 B 在 A 后,G 在 B、C、D、E 和 F 后。图 9b 中的 A、B、C、D、E、F 和 G 系统东南方向的未标注单体的系统是造成萧山西部杭州市气象局(峰会气象台所在)附近降水的另一个 γ 中尺度浅对流系统(图 5 和图 8b 中的圆圈部分),其生消移动表现出了与西湖系统相似的特征,由多个更小尺度的快速生消单体构成,整体向西南方向移动,生命史为 90 min 左右(15:00—16:30)

(图略)。

3 短时临近预报难点与着眼点

3.1 宁波附近 β 中尺度对流系统

基于短期预报意见和 4 日早间宁波对流实况的发展,当日短时临近预报的重点放在了密切监视宁波附近弱对流暖云降水系统向西移动和变化的动向上。如图 4、图 5 和图 8 所示,但该对流系统始终未能向西和向北跨越绍兴和萧山之间约 30 km 宽的区域。对于此系统移动和发展的短时临近预报是准确的,其原因正是这一地区不利的环境场对流条件使得西移的对流系统减弱消失,并未向北发展。

3.2 西湖 γ 中尺度浅对流系统的预报难点

如前述第 2 节,由于影响西湖的对流系统很弱,发展高度低,尺度小(成熟阶段小于 $15\text{ km}\times 15\text{ km}$),因此对其监测和预报难度都极大,具体表现在:(1)在其发源地为积云初生阶段时,业务天气雷达尚无法观测到这样的积云系统;(2)由于 4 日杭州地区位于高空槽前底部,中午前后既有高云存在、也有积云存在,由于高云的干扰,难以直接判识积云,使得本可应用于对流初生分析的高分辨率卫星可见光资料的监测能力降低,如图 8a 和图 10 所示,红色矩形框为阵雨浅对流系统发生发展及影响西湖的区域,除了有少量积云外,有大量高空卷云覆盖;图 10 中红色椭圆框内展示了高空卷云和卷层云

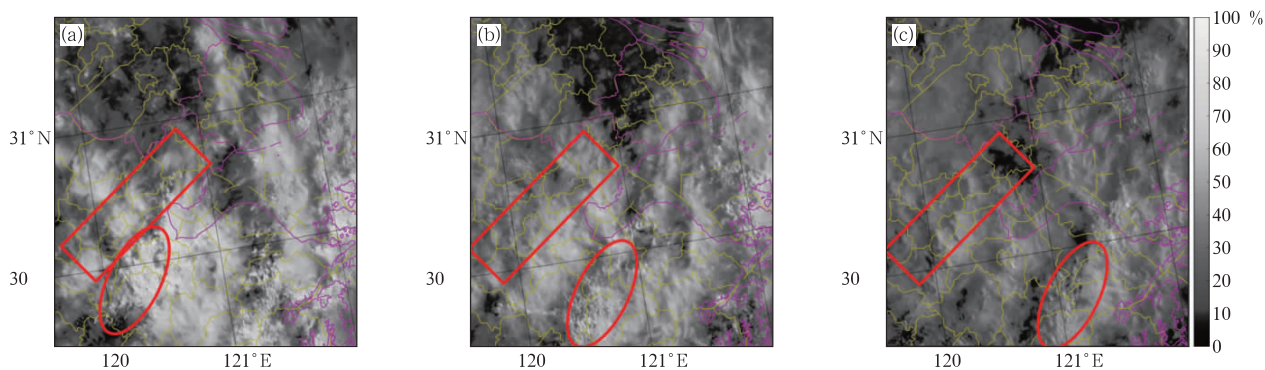


图 10 2016 年 9 月 4 日(a)14 时、(b)15 时和(c)16 时风云 2 号静止气象卫星增强可见光图像
(红色矩形框内为导致降雨的辐合线系统所在区域,红色椭圆框内为东移高云云系)

Fig. 10 The enhanced visible images of FY-2 geostationary meteorological satellite
at 14:00 BT (a), 15:00 BT (b) and 16:00 BT (c) 4 September 2016

(The red rectangle frame indicates the area of the convergence line system which causes the shower,
and the red oval frame indicates the high clouds system)

混合系统东移的动态;(3)对流发展至降水产生的初始阶段时雷达反射率因子所展示的影响西湖的对流系统尺度极小(2~3 个雷达资料像元),强度极弱(<20 dBz),因此极易与杂波相混淆(如图 5 和图 8 所示);(4)当时雷达分析的工具和细致程度,无法与此次事后总结的分析相比。

根据前述 3.2 节的分析,可以推断阵雨系统在雷达不可辨别的积云发展阶段应位于阵风锋辐合线内,即杭州东北方向数十千米处。当系统在向西南方向移动并逐渐增强到可以为雷达资料所观测到时[可见 15:48 时的雷达图(图 9b)中 B 单体],由于基于 2.1 节分析的整体对流条件非常不显著,预报员即使发现了这个微弱的阵雨系统前兆信号也不能断定其一定能发展为降雨(如 A 单体的强度并未在自动站观测到降雨),即便大胆推断回波可造成地面降水也只能基于 15:54 或 16:00 的观测,考虑到雷达资料滞后时间,实际预报员看到雷达资料的时间在 16 时甚至 16:10 之后,而此时降雨已经发生(如 1.1 节所述自动站 10 min 资料显示西湖湖心亭 16:00 开始降雨,主要雨量时段在 16:10—16:20),雷达资料上能够发现的对流系统距西湖的距离已不到 10 km,与降雨发生之间的时间差少于 10 min,因此预报员几乎没有可能对此系统做出有效的临近预报。

这样,当降雨发生时,预报员很容易第一时间错误地认为系统是本地发生发展起来,这种突发性,会给预报员既有的预报思路带来冲击(此前短时临近预报关注的是 20—22 时段西湖演出现场的天气,监视的重点为杭州东部 30 km 外的绍兴对流系统是否西移,西湖地区短时临近预报继续维持多云间阴天的结论),给后续的短时临近预报造成了困难(由于阵雨天气可说是出乎意料突如其来,在未能真正分析清楚其成因之前,无法确定性回答西湖现场在后面的数小时内还会不会下雨这样的问题)。实际上在 17 时后才有部分预报员对阵雨成因及整个中尺度过程有了大致的认识,18 时左右主要基于辐合线西移减弱的理由,给出了西湖在夜间高空槽系统移来之前不会再有降水的短时临近预报结论。

3.3 γ 中尺度浅对流系统的预报着眼点

从前文分析可以看到,依据天气雷达和静止气象卫星资料的监测对该次浅对流天气系统做出超过提前 10 min 的短时临近预报难度极大。若要进一

步提高预报时效,着眼点主要在于:(1)必须在早期对流初生阶段能够准确判断弱对流系统所处对流中尺度环境场条件;(2)捕捉到触发对流的午后才发展起来的海风锋和干线系统;(3)对区域加密自动站风、温、湿、压资料的时空分布和演变进行细致分析;(4)提高对浅对流天气系统的正确和系统的认识;(5)熟悉小区域地形及其相关的局地环流对此类天气的影响;(6)基于上述综合的分析和认识给出概率性而不是确定性的预报意见。

4 结论与讨论

2016 年 9 月 4 日“杭州 G20 峰会”的天气是由东移高空槽、西移暖云对流和东北方向入侵浅对流系统等三种尺度和类型系统共同影响的复杂天气,由于对流条件非常不明显,因此预报服务难度极大,但总体上中国气象局专项预报服务团队圆满完成了气象保障任务。

对于发生在西湖及其周边区域的局地短时阵雨天气,由于数值天气预报表明该日不具有明显的有利于对流天气发展条件,短期预报存在很难克服的局限性。而由于复杂而特殊的天气背景和 γ 中尺度浅对流系统的独有特点,天气雷达和静止气象卫星等业务中短时临近预报最为依赖的观测资料难以提供较长预报时效的相关特征和信号,使得对该对流天气系统的监测和短时临近预报面临极大的困难。

区域加密自动站资料的细致分析是任何其他观测工具都无可替代的重要和基础关键观测资料,可以在此类天气的短时临近预报服务中发挥关键作用。全面而深入的加强对于此类天气机理的认知和理解,以及认识局地地形对较小尺度天气系统的影响是做到细致而准确分析的前提和基础。同时,也需要更为方便和强大的短时临近预报平台来支撑对这些资料的细致和准确分析,从而减少短时临近预报员的繁重业务工作量以提高工作效率和预报准确率。

本次过程的海风锋尺度和强度都较小,基本限于杭州湾西北沿岸,杭州和萧山的阵雨系由此地生成并在低空东北风引导下发展南移所致,由于整体环境场并非具有明显的有利对流发展条件,因此只是出现了局地性的短时阵雨。

预报员在做预报的时候分析使用的资料是业务中能够实时获取的所有资料,区域自动站的分析也

包含在内。当时即使预报员将3.3节总结的内容都考虑周全了,也不能完全肯定一定能够预报出这次弱强度阵雨过程,而只是提高了阵雨预报的可能性。因为这样的分析是定性的、盖然性的,在业务需要给出确定性结论的情况下,是不可能保证必然准确预报的。实际上,大量的天气过程都属于事后分析,知道为什么发生,但是事先做出预报都是难度极大甚至不可能的,根本原因在于天气发生的盖然性和预报所需结论的确定性之间的必然矛盾,本例也是如此,因此,如何在业务中科学地应用概率性的预报结论,是弥补类似缺陷的重要途径。此次杭州局地短时阵雨天气属于典型的弱强度、高影响天气,本文只是从观测的角度分析了该次天气的成因和预报难点,还需要使用高分辨率的数值模拟进行更细致和深入的研究和总结,从而为今后可能面临的重大气象保障任务中的类似天气预报提供更多参考和借鉴。

参考文献

- 陈淑琴,章丽娜,俞小鼎,等,2017. 浙北沿海连续3次飑线演变过程的环境条件[J]. 应用气象学报,28(3):357-368.
- 蓝渝,张涛,郑永光,等,2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展Ⅱ:对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术[J]. 气象,39(7):901-910.
- 李琴,杨帅,崔晓鹏,等,2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J]. 大气科学,40(2):341-356.
- 李耀东,刘健文,吴洪星,等,2014. 对流温度含义阐释及部分示意图隐含悖论成因分析与预报应用[J]. 气象学报,72(3):628-637.
- 李兆慧,王东海,麦雪湖,等,2017. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析[J]. 气象学报,75(2):288-313.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2003. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社:148-150.
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象,40(4):389-399.
- 俞小鼎,2011. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. 气象,37(8):913-918.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337.
- 张涛,蓝渝,毛冬艳,等,2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展Ⅰ:对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术[J]. 气象,39(7):894-900.
- 张小雯,郑永光,吴蕾,等,2017. 风廓线雷达资料在天气业务中的应用现状与展望[J]. 气象科技,45(2):285-297.
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,43(6):641-652.
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象,42(1):1-13.
- 郑永光,周康辉,盛杰,等,2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报,26(6):641-657.
- 郑永光,朱文剑,姚聘,等,2016b. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象,42(11):1289-1303.
- 朱文剑,盛杰,郑永光,等,2016. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害,35(5):403-414.
- Crisp C A,1979. Training guide for severe weather forecasters[R]. United States Air Force, Air Weather Service (Mac) Air Force Global Weather Central.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A,1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting,11(4):560-581.