

漆梁波,曹晓岗,张吉,等. 2011. 涡旋自组织现象在上海一次暴雨预报中的应用[J]. 大气科学学报,34(1):52-57.

Qi Liang-bo, Cao Xiao-gang, Zhang Ji, et al. 2011. Application of vortex self-organization theory on heavy rainfall forecasting in Shanghai[J]. Trans Atmos Sci, 34(1):52-57.

涡旋自组织现象在上海一次暴雨预报中的应用

漆梁波¹, 曹晓岗¹, 张吉¹, 马革兰², 余晖^{3,4}

(1. 上海中心气象台, 上海 200030; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 中国气象局 上海台风研究所, 上海 200030;
4. 中国气象局 台风预报技术重点开放实验室, 上海 200030)

摘要:根据涡旋自组织理论的研究成果,通过对天气背景以及卫星、雷达等资料的分析发现,在2008年8月25日早晨上海地区发生的一场雨强为百年未遇的强雷电和大暴雨天气过程中,确实存在着涡旋自组织现象。地面中低压的发展与中小尺度涡旋的组织、合并关系密切,而中低压的发展导致了剧烈而集中的降水发生,进而造成了上海地区的这场特大暴雨。此外,详细阐述了在业务预报中预报员如何应用涡旋自组织理论的相关成果来改进和提高暴雨预报的时效和准确度,显示该理论在业务应用中具有广阔前景。

关键词: 涡旋自组织; 暴雨预报; 中小尺度涡旋

中图分类号: P457.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2011)01-0052-06

Application of vortex self-organization theory on heavy rainfall forecasting in Shanghai

QI Liang-bo¹, CAO Xiao-gang¹, ZHANG Ji¹, MA Ge-lan², YU Hui^{3,4}

(1. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030, China;
2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
3. Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030, China; 4. Laboratory of Typhoon Forecast Technique, CMA, Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the analyses on the synoptic situation, satellite image, radar echo and AWS data, it is found that there is a vortex self-organization process during a record-breaking torrential rainfall in Shanghai on 25 August 2008. A surface mesoscale low develops during the heavy rainfall, which has a close connection with the organization and combination of meso- and micro-scale vortices. Growing of the surface low stirs up the intensive precipitation and brings Shanghai city with the record-breaking heavy rainfall. The process that forecasters applied the vortex self-organization theory on the forecast of the heavy rainfall is also detailed, which promises the theory's broad prospect on operational forecasting.

Key words: vortex self-organization; heavy rainfall forecasting; meso- and micro-scale vortex

0 引言

近年来,在强非线性的框架内,不同尺度涡旋之间强耦合的问题,已有一系列的结果给出(Mont-

gomery and Kallenbach, 1997; 周嘉陵等, 2006; 周秀骥等, 2006; Luo and Liu, 2006a, 2006b; Ping et al., 2006; 罗哲贤和李春虎, 2007; Luo, 2007; Luo and Liu, 2007; Ping and Luo, 2007)。在台风相关研究领

收稿日期: 2010-07-18; 改回日期: 2010-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40775038; 40333028); 上海台风基金资助项目(20060601); 上海市气象局科技开发项目(MS200821)

作者简介: 漆梁波(1971—), 男, 江西萍乡人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为天气预报技术研究, qlb1999@hotmail.com.

域,涡旋相互作用的动力学研究也在广泛开展(Enagonio and Montgomery, 2001; 罗哲贤, 2005; Ping et al., 2008; Yu et al., 2010)。

相关研究(Enagonio and Montgomery, 2001; 漆梁波, 2002; 罗哲贤, 2005; 漆梁波等, 2006; Ping et al., 2008; Yu et al., 2010)表明:中尺度暴雨云团的生成和消散,与更小尺度(20~40 km)的云团合并有着非常密切的联系。依据动力学理论,小尺度云团也对应着一定结构的涡旋运动,从这个意义上讲,中尺度暴雨云团的生消也可以看成小涡旋和更大尺度的涡旋之间的组织和分裂。多年以来,半径小于50 km的小涡一直被涡旋动力学领域的国内外同行忽略不计。罗哲贤和李春虎(2007)、周嘉陵等(2006)研究表明:尺度小于50 km的小涡可以构成主涡的微环境场。不同的微环境场导致不同的涡旋自组织结果,一定程度上也决定主涡运动的复杂性。

理论研究已经取得了瞩目的成果,但是,理论结果的应用还很少。本文主要描述涡旋自组织理论在上海地区一次中尺度暴雨中的应用,试图说明该理论在实际业务中的应用具有很好的前景,并且可以在中小尺度天气系统(30~50 km)的预报中得到适用,而不仅仅限于台风的发生和发展(台风是最典型的天气尺度涡旋系统)。

1 天气实况及背景

2008年8月25日早晨,上海中心城区出现了一场雨强百年未遇的强雷电和大暴雨天气,主要降水时段出现在25日05—08时(北京时间,下同)。

徐家汇站1 h最大雨量达117.5 mm,有7个自动站总雨量超过100 mm。突发强降水造成上海大面积道路严重积水,部分交通主干道地道被水淹没,由于正值上班高峰期,大量人员被困上班途中,给城市交通运营和工作生活带来严重影响。

2008年8月下旬初,在东北亚地区有一个稳定而庞大的低压,24日500 hPa上低压中心在蒙古东北部,我国淮河以北地区处在这个大低压南侧纬向性较大的西风带中,08时一支低槽在黄河上游秦岭西侧(图略)。在较低纬度地区,“0812”号台风“鹦鹉”继22日先后在香港和广东中山市登陆后继续西行,24日减弱为低压,其中心在广西境内。与此同时,副热带高压在前期有一个东撤,此后于24日跟随“鹦鹉”西进,588 dagpm等值线在福建沿海。24日20时500 hPa上西风浅槽东移到淮河上游,东南沿海副高略向西挤(图1a)。在低层850 hPa上“鹦鹉”登陆后形成了向东北侧伸展的倒槽,24日20时在此倒槽中,也在500 hPa槽前位置,有诱生低压生成(图1b);地面相应位置上有倒槽。25日凌晨地面低压形成并继续东移和增强,10时30分低压入海,过程结束。

从云图演变(图2)看,自8月25日05时开始,浙江北部和上海北部各有一个云团在发展,并逐渐靠近。到07时前后,两个云团合并成一个更大的云团,强度更强,这一点可以从云团的面积和最大云顶亮温的变化中得到证实。从前人的各种研究成果看,卫星云图上尺度大于30~50 km的云团,往往对应大气中的一个涡旋。很显然,在这次个例中,小涡

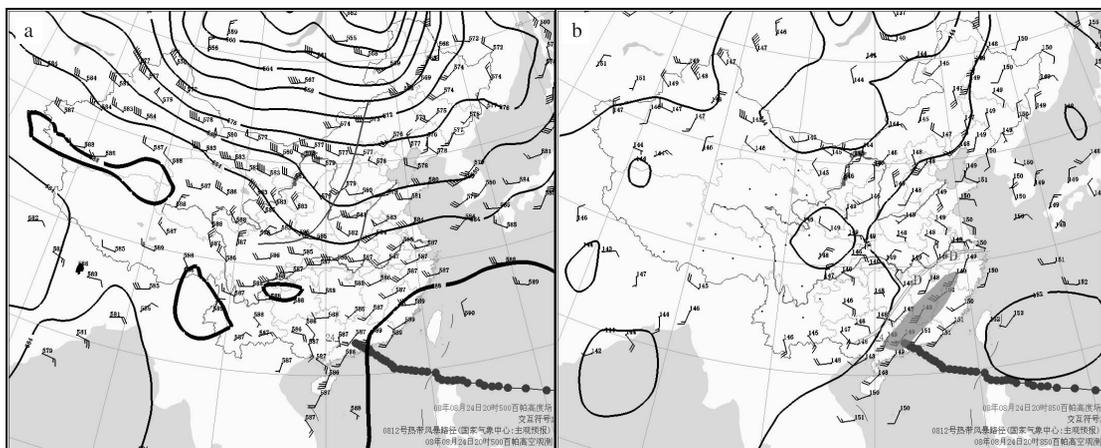


图1 2008年8月24日20时500 hPa(a)和850 hPa(b)形势(图a中棕色线表示槽;图b中双棕色线表示850 hPa高度上的切变,阴影区表示急流(>12 m/s);圆点线表示台风的路径)

Fig. 1 (a) 500 hPa and (b) 850 hPa synoptic situation at 20:00 BST 24 August 2008 (The brown line indicates trough in Fig. 1a. The double line indicates shear line, and the shaded area indicates jet stream (>12 m/s) in Fig. 1. b. The dotted line indicates the typhoon track)

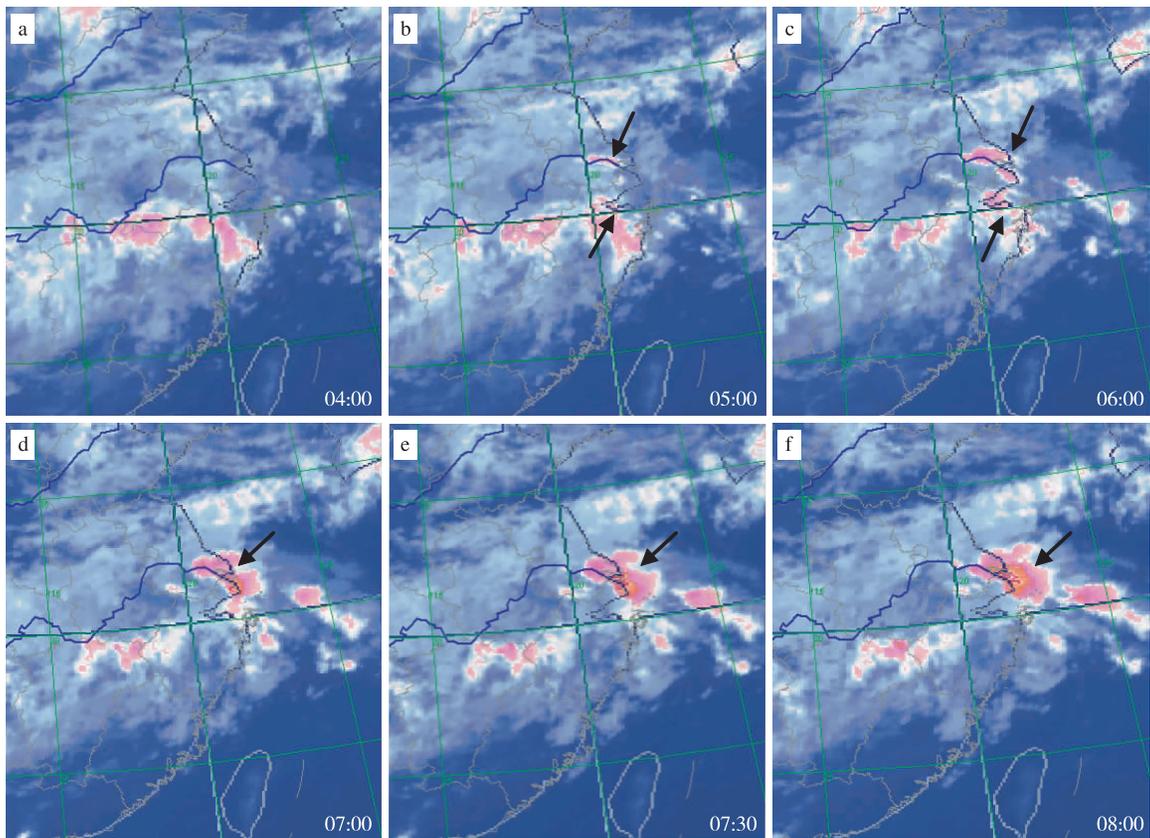


图2 2008年8月25日04—08时的红外云图演变(箭头指示合并之前的小云团和合并后的大云团)
a. 04:00; b. 05:00; c. 06:00; d. 07:00; e. 07:30; f. 08:00

Fig. 2 FY-3C IR image from 04:00 to 08:00 BST 25 August 2008 (Arrows point to small cloud masses before combination and large cloud mass after combination) a. 04:00 BST; b. 05:00 BST; c. 06:00 BST; d. 07:00 BST; e. 07:30 BST; f. 08:00 BST

旋合并导致大涡旋的产生或者加强,并带来了致灾的降水。

2 雷达、地面自动站观测结果分析

由图3可知,8月25日05时02分位于南通、太湖东侧、嘉兴有3个中尺度对流回波单体在形成发展,编号分别为a、b、c,强度为40~50 dBZ。a、b回波单体向东移动,c回波单体向东北移动,其中b回波单体东移加强明显,强中心达50 dBZ。06时30分,b、c回波单体已非常接近;06时59分已开始合并,中心强度进一步加强到55 dBZ。这也是徐家汇站降水开始加大的时候,并且a、b回波也有合并趋势。07时34分,a、b回波也已合并到一起。由于回波的不断合并、加强,最大回波顶高达15 km,加上雷暴云团移动缓慢,有利于局地强降水的发生,最终造成了上海市南洋中学1 min最大雨量为5 mm,徐家汇07:17—07:26的10 min雨量达到30 mm。

图4是上海地区密集自动站网的风场观测。可见,上述回波单体由于尺度较小,从地面自动站的风

场信息中无法得到体现。但是,与上述回波单体有关的尺度较大的涡旋则可以从图中分析出来,对应地面有低气压中心存在。如前所述,小涡旋(雷达回波单体)的合并时间是在07时左右。图4表明,07时的低压环流较06时明显加强,这可以从低压环流中心附近风向的变化得到证明,在07时的地面风场中,低压中心附近的风向辐合(入流)更加明显。此外,低压中心附近最低气压值的变化(图5)也表明了低压环流的加强,即:中心附近最低气压值在07时达到最低。这证明小涡旋合并导致大涡旋加强。

图6为2008年8月25日01:00—08:00徐家汇站(云团合并处附近)的逐时降水变化。由图6可看出,涡旋合并导致降水集中出现(出现时间为07:00—08:00,1 h降水量达117.5 mm),表明该时段有很强的上升气流。这从侧面证实了涡旋合并并且导致更大的涡旋加强或生成,即小涡旋自组织合并导致大涡旋加强,大涡旋加强使得低气压加深,低气压加深带来强上升运动,最终导致强降水的发生。

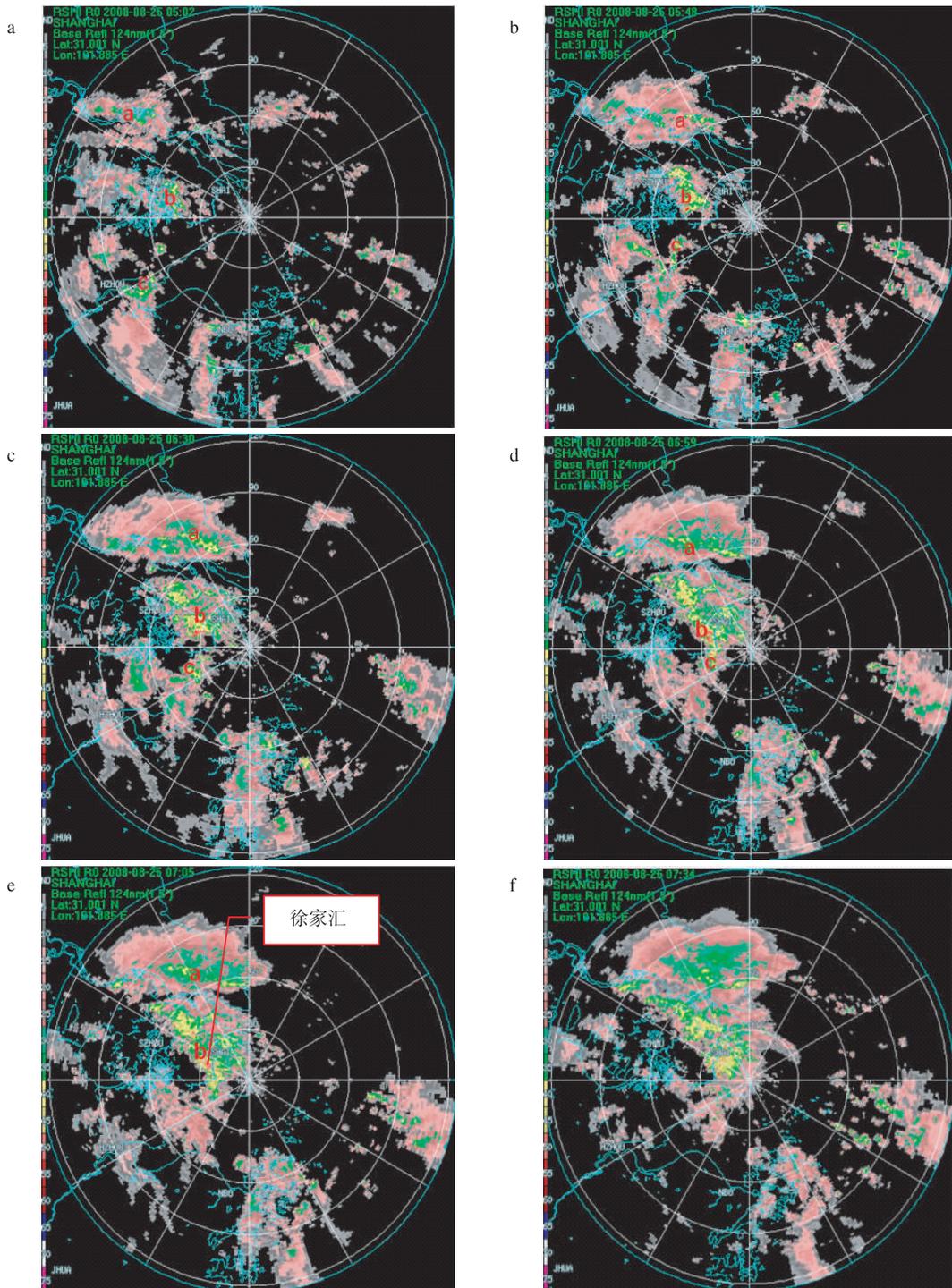


图3 8月25日05时02分—07时34分的雷达回波(图中a、b、c分别表示3个回波单体)
 a. 05:02; b. 05:48; c. 06:30; d. 06:59; e. 07:05; f. 07:34

Fig. 3 Radar echo from 05:02 to 07:34 BST 25 August in Shanghai (a, b and c denote the different echoes, respectively) a. 05:02 BST; b. 05:48 BST; c. 06:30 BST; d. 06:59 BST; e. 07:05 BST; f. 07:34 BST

3 主客观预报过程分析

3.1 数值模式的预报表现

在8月24日17时预报发布之前能参考的主要

数值模式有:23日20时起报的T639模式(分辨率约30 km),23日08时和20时欧洲中心的数值预报(分发产品,分辨率约250 km),以及23日20时起报的日本数值预报(分发产品,分辨率约100 km)。

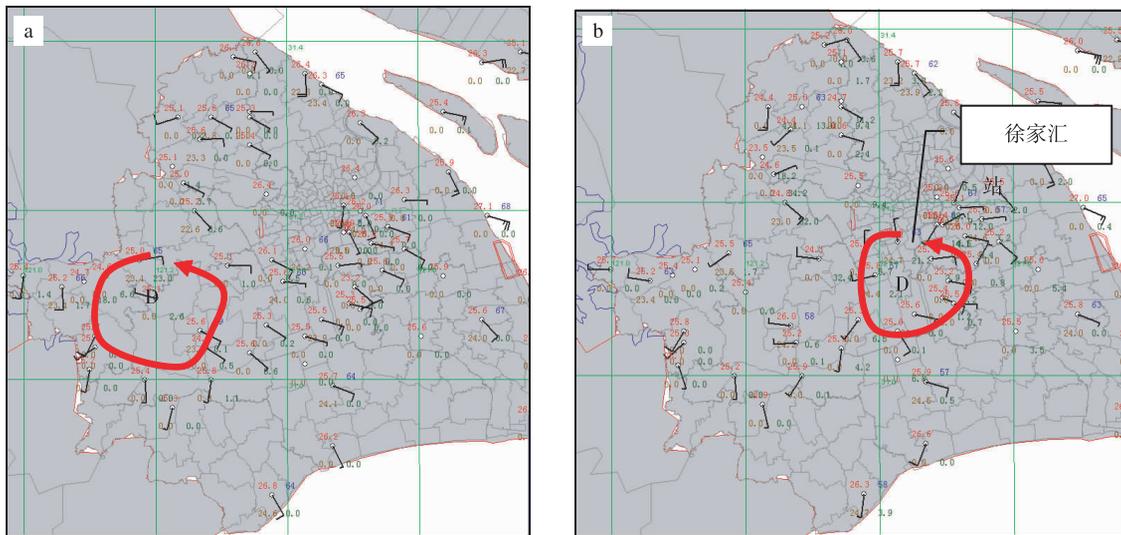


图 4 2008 年 8 月 25 日 06 时(a)和 07 时(b)上海地区地面风场(粗线表示低压环流)

Fig. 4 Surface wind fields at (a) 06:00 and (b) 07:00 BST 25 August 2008 in Shanghai (Thick line denotes low circulation)

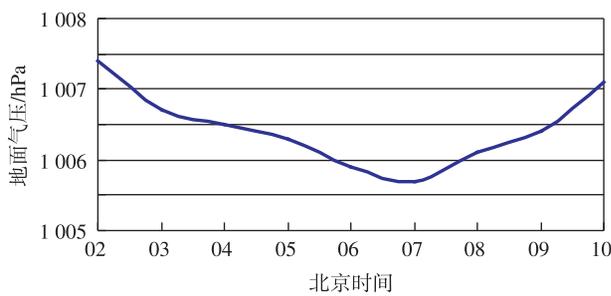


图 5 2008 年 8 月 25 日 02—10 时上海地区低压环流中心附近最低地面气压值的演变

Fig. 5 Evolution of the lowest pressure near low depression in Shanghai from 02:00 to 10:00 BST 25 August 2008

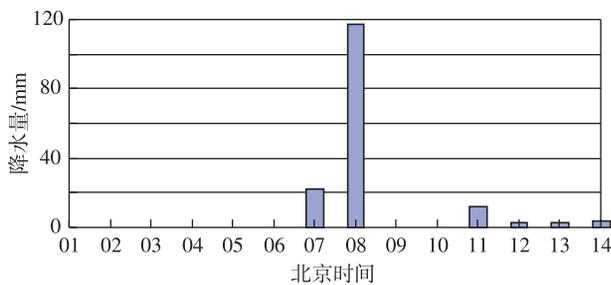


图 6 2008 年 8 月 25 日 01—14 时徐家汇站的逐小时降水量

Fig. 6 Evolution of hourly rainfall at Xujiahui station from 01:00 to 14:00 BST 25 August 2008

通过对各家数值模式预报的检验来看,数值预报在短期时效内能较好地反映出高低空切变、高空槽及低涡等环流形势的特点,但对风场强弱、水汽条件等

的预报能力较差,主要雨带的位置也有偏差。数值预报模式对 25 日清晨发生在上海的强降水过程的预报能力较弱,特别是限于模式输出产品的时间间隔(3 h)和空间分辨率(30 ~ 100 km),对涡旋自组织导致大涡旋加强的过程几乎无法体现。因此,中小尺度涡旋自组织现象的预报,需要高空间分辨率(< 10 km)和高时间分辨率(< 30 min)输出的模式资料来支撑。

3.2 预报员应用涡旋自组织理论的主要过程

8 月 25 日 04 时 30 分开始,当班预报员发现太湖东侧淀山湖地区首先有回波出现,但强度不强;05 时 20 分以后回波加强,西部青浦地区出现雷电和降水,值班预报员根据回波演变情况,于 05 时 54 分发布雷电黄色预警信号。06 时许,雷达上显示浙北有一回波发展,有向东北方向移动趋势,且青浦的降水带也有缓慢东移迹象。当班预报员判断两块回波很可能在市区上空合并,而根据涡旋自组织理论,这种合并将导致更大范围和更强的对流回波—更有组织的环流涡旋的出现,从而带来短时的强降水,因此,在 06 时 25 分发布了暴雨黄色预警信号,以后又根据最新雨情,于 07 时 31 分变更暴雨黄色为暴雨橙色预警信号。

4 结论与讨论

从本次上海大暴雨的预报来看,涡旋自组织理论对预报中小尺度天气系统(30 ~ 100 km)的发生发展有很好的指导意义。在具体工作实践中,观测事实、预报经验与基础理论的相互结合和印证既有

利于预报准确率的提高,也能促进基础理论研究的发展。

从前人的研究和业务实践看,中小尺度天气系统突然生成或发展的预报仍然是个未解决的问题。而对于上海这样的特大城市,中小尺度系统在原地的自组织和加强尤其会带来严重的影响。2001年8月5日,上海发生了类似于本次降水强度的特大暴雨(24 h降水量达到275 mm),其中也涉及到类似的涡旋组织和合并现象(漆梁波,2002;漆梁波等,2006;Yu et al.,2010)。2007年7月18日济南特大暴雨(雨强达到151 mm/h),也造成了严重的人员和财产损失,从相关文献(杨晓霞等,2008;张少林等,2009)看,涡旋自组织现象在那次特大暴雨的产生之前也有所体现。因此,涡旋自组织理论在预报中小尺度天气系统中应用前景是非常广阔的,特别在特大城市突发暴雨的预报中,可以得到很好的应用。

涡旋自组织理论从全新的科学视角揭示了很多实际天气过程背后所蕴藏的科学本质,并能业务应用。但在今后的研究和业务应用中,还有更多的领域需要更加深入的探索,比如:涡旋自组织理论如何更好地指导业务数值模式的研发;如何得到涡旋自组织过程的更精确观测事实(更高的观测分辨率和更多的观测手段);如何得到业务中可以比较实用的涡旋发生发展预报技术或判据等。

参考文献:

罗哲贤. 2005. 多尺度系统中台风自组织的研究[J]. 气象学报, 63(5):672-682.

罗哲贤,李春虎. 2007. 随机分布的小尺度涡对涡旋自组织的影响[J]. 气象学报, 65(6):856-863.

漆梁波. 2002. 特大暴雨非常规资料的初步分析[J]. 气象, 28(1):34-38.

漆梁波,陈春红,刘强军. 2006. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用[J]. 气象学报, 64(1):112-120.

杨晓霞,王建国,杨学斌,等. 2008. 2007年7月18—19日山东省大暴

雨天气分析[J]. 气象, 34(4):61-70.

张少林,王俊,周雪松,等. 2009. 山东“7.18”致灾暴雨成因分析[J]. 气象科技, 37(5):527-532.

周嘉陵,马镜娴,陈联寿,等. 2006. 初始涡的结构与尺度对涡旋自组织影响的研究[J]. 气象学报, 64(5):537-551.

周秀骥,罗哲贤,高守亭. 2006. 涡旋自组织的两类可能机制[J]. 中国科学 D 辑, 36(2):201-208.

Enagonio J, Montgomery M T. 2001. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a shallow-water primitive equation model[J]. J Atmos Sci, 58:685-705.

Luo Z. 2007. A numerical study of multiple vortex self-organization as forced by mesoscale topography[J]. Meteor Atmos Phys, 99(1/2):65-76. doi:10.1007/s00703-007-0269-0.

Luo Z, Liu C. 2006a. An investigation into the sensitivity of idealized vortex interactions to initial conditions and island topography[J]. Geophys Res Lett, 33, L01809, doi:10.1029/2005GL024543.

Luo Z, Liu C. 2006b. Diversity of microenvironments and the complexity of vortex motion[J]. Geophys Res Lett, 33, L024805, doi:10.1029/2006GL027765.

Luo Z, Liu C. 2007. An investigation into axisymmetrization of a vortex embedded in horizontal shearing currents[J]. J Geophys Res, 112, D06103, doi:10.1029/2006JD 007087.

Montgomery M T, Kallenbach R J. 1997. A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 123:435-465.

Ping Fan, Luo Zhexian. 2007. Numerical simulation of Meiyu front and the diagnosis of moist vorticity[J]. Progress in Natural Science, 17(11):1341-1347.

Ping Fan, Luo Zhexian, Ju Jianhua. 2006. The numerical studies of vortices and precipitating clouds merging in the middle latitudes[J]. Chinese Physics Letters, 15(5):784-787.

Ping Fan, Luo Zhexian, Li Xiaofan. 2008. Kinematics, cloud microphysics and spatial structures of tropical cloud clusters: A two-dimensional cloud resolving modeling study[J]. Atmos Res, 88(3/4):323-336.

Yu Zifeng, Liang Xudong, Yu Hui, et al. 2010. Mesoscale vortex generation and merging process: A case study associated with a post-land-fall tropical depression[J]. Adv Atmos Sci, 27(2):356-370.

(责任编辑:倪东鸿)