

Reprint 984

《小渦旋》臨近預報系統在 2010 上海世博會的應用

鄭子路、戴建華\* & 楊漢賢

第 28 屆中國氣象學會年會

中國廈門，2011 年 11 月 2-4 日

\*上海市氣象局

## 《小涡旋》临近预报系统在 2010 上海世博会的应用

郑子路<sup>1</sup> 戴建华<sup>2</sup> 杨汉贤<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>香港天文台 <sup>2</sup>上海市气象局)

### 摘 要

香港天文台《小涡旋》临近预报系统继 2008 年支援北京奥运会后,在 2010 年再次参与世界气象组织(简称 WMO)的另一项示范项目—上海世博会短时临近预报服务示范项目(简称 WENS),联同国内外其它 5 个自动天气预报系统,携手为 2010 上海世博会提供包括暴雨、冰雹、闪电、狂风等恶劣天气预报服务。在 WENS 项目中,香港天文台与上海市气象局紧密合作,把《小涡旋》软件移植至上海市气象局内运行,并利用当局特别提供的实时气象观测资料,按照 WMO 的标准及世博会的需要,制作所需的临近预报产品。本文重点介绍上海版《小涡旋》系统的操作、预报算法、数据产品及其于世博会的一些应用例子。

**关键词:** 临近预报, 世博会, 定量降水预报, 闪电, 狂风, 冰雹, 雷达。

### 1 引言

香港天文台的《小涡旋》SWIRLS(即 Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems)临近预报系统,自 1999 年起已投入业务运作。当时的设计重点是在于 1 至 3 小时的定量降水预报(QPF),以支持相关的灾害预警,包括暴雨、水浸及山泥倾泻等。经过在 2005 至 2009 年期间的不断改进和反复试验后,第二代《小涡旋》正式在 2010 年投入业务运作。在新版本中,不但融合数值模式资料以增长 QPF 的预报时效至 6 小时,更加入恶劣天气分析和预报,包括强雷暴、狂风(即雷暴产生的强烈阵风)、闪电及冰雹。发展第二代系统的一个重要里程碑,是参与 WMO 为支持 2008 年北京奥运会而举行的《北京 2008 天气预报示范项目》(Beijing 2008 Forecast Demonstration Project,简称 B08FDP)[1]。透过同时在香港实时测试及到北京实地演练,第二代系统的各项新预报技术及产品得以充分测试及不断改良,所有成果最终回馈到香港应用。

在 B08FDP 的成功基础上,WMO 继而为历时更长、人流更广的 2010 年上海世界博览会举行了《上海世博会短时临近预报服务示范项目》(Shanghai World EXPO 2010 Nowcasting Service Demonstration Project,简称 WENS),重点在于应用临近预报资料上。曾参与 B08FDP 的其中三个系统,即香港天文台的《小涡旋》、北京城市气象研究所的 BJANC 及澳大利亚气象局的 STEPS 系统,在 2009 年再次获 WMO 邀请参与 WENS 项目。加上中国气象局的 SWAN、上海市气象局的 NoCAWS、以及上海台风研究所的 WRF 预报系统,一同于世博会举行期间的五月至十月,实地在上海运行,生产短时临近预报数据,供上海市气象局制作切合世博会园区需要的精细预报。

相对于 B08FDP,WENS 项目的时间表可说十分紧逼。在香港天文台与上海市气象局的紧密合作下,以及省略了需要大量历史数据及耗时调教的融合降雨预报模块后,上海版本的《小涡旋》系统得以赶及在世博会开幕前完成。由于有 B08FDP 所开发的特别版本为基础,发展上海版本所牵涉的技术转移、软件安装及系统调教等环节,可说相对较容易完成。透过前期的系统培训,辅以电邮及

虚拟私人网络遥距支持，绝大部分的安装程序都有赖上海市气象局的技术人员进行。

除了软、硬体的问题，运行《小涡旋》的其中一个大挑战在于雷达数据的处理。下文第 2 节会交待当中牵涉的技术问题。下文第 3、4 节将分别介绍《小涡旋》在 WENS 运作期间的 QPF 及其它恶劣天气的算法。至于《小涡旋》的产品及应用例子则会在第 5、6 节有所阐述。最后第 7 节会总结经验并展望未来的发展。

## 2 雷达数据处理

按照《小涡旋》各算法的要求（详见下文第 3、4 节），成功运算各个有关模块所需的雷达数据必须如表一所述。为满足这些要求，上海市气象局特别开发一套数据格式转换软件，该软件将中国气象局 SWAN 短临预报系统生成的实时等高反射率（CAPPI）资料，转换成《小涡旋》所需的 IRIS 格式，同时利用 SWAN 的 CAPPI 资料生成了 IRIS 格式的垂直累积液态水（VIL）及回波顶高度（TOP）等产品，具体参数详见表一。

## 3 定量降水估计及预报

《小涡旋》的 QPF 算法建基于利用雷达反射率的定量降水估计（QPE）上。而雷达 QPE 算法中的降雨率主要是透过 Marshall-Palmer 雷达反射率  $Z$  与降雨率  $R$  关系式  $Z=aR^b$  求得。 $Z-R$  方程中的  $a$ 、 $b$  参数可利用自动雨量器数据及 2 公里等高反射率，以线性回归法实时校正[2]、[3]。在降雨刚开始或雨量器数据不足的情况下， $a$ 、 $b$  参数会采用合符本地气候的默认值。上海版《小涡旋》QPE 算法中的  $a$ 、 $b$  默认值分别为 200、1.46，是由上海市气象局提供。

雷达回波追踪方面，同样是应用 2 公里等高反射率资料，以 TREC (Tracking of Radar Echoes by Correlation) 算法求得[4]。没有回波的分析格点上的移动矢量，则以 Cressman 插值法填补[5]。时间上的外推主要是采用半拉格朗日平流 (semi-Lagrangian advection, 简称 SLA) 方案[6]。上海版《小涡旋》的 QPF 算法以上述雷达 QPE 及 TREC 移动矢量作为初始场，配合 SLA 方案外推，提供 1 至 3 小时的定量降水预报。利用时间后延集合的方法，同时亦提供不同降水阈值的概率预报。

## 4 恶劣天气分析及预报

《小涡旋》主要运用 GTrack 算法[7]来识别雷暴单体及分析相关恶劣天气的影响范围。简单来说，GTrack 在个别雷达产品网格上识别出所有大于特定阈值的连续区域，逐一进行椭圆分析，并以椭圆的几何属性代表雷暴单体的位置、面积等特征及计算其走向和移动速度。《小涡旋》系统的恶劣天气模块会按照表二的触发条件分别筛选有可能出现强降水、云地闪、下击暴流及冰雹等四种恶劣天气的雷暴单体，并发出合适的预警信息。各算法的技术细节可参考文献 [1] 及 [7] 至 [11]，在此不赘。以下概括介绍有关的概念模型及算法所需的主要输入数据。

《小涡旋》的 DELITE (Detection of cloud Electrification and Lightning based on Isothermal Thunderstorm Echoes) 云地闪预报算法，主要建基于对流云起电和电荷分离的一个简单概念模型，透过雷达观测识别出以下闪电启动的前兆特征：(i) 在零度或以下等温层上的雷达反

射率偏高,表示有湿软雹存在;(ii)回波顶偏高,表示有强大上升气流;(iii)垂直累积液态水明显较多,表明存在充足的云水,有利云冰及软雹形成。同样的雷达特征,对云地闪的强度也起指示作用,利用多元回归分析可预报云地闪单体的强度[8]、[9]。此外,透过外推零下 10 度等温反射率及利用时间后延集合的方法,亦可估算一至三小时的闪电概率。

《小涡旋》的 BLAAST (Buoyancy contribution and Loading effect of rain water to Air parcel Acceleration in Squally Thunderstorms) 下击暴流及狂风预报算法,是建立于高空移动气块受降水负荷及蒸发冷却因素影响,而出现负浮力及向下加速的概念模型。通过分析探空资料及雷达垂直累积液态水数据,可判断下击暴流会否出现,并算出所牵涉的能量转换,从而估计地面可能出现的最大阵风[10]。

《小涡旋》的 BRINGO (Buoyancy-supported Rimed Ice Nugget and Graupel Overhang) 冰雹预报算法,原理极其简单,是建基于雹暴单体内会出现悬浮雾凇冰或霰这种物理现象及其在雷达扫描下所呈现的强烈高悬回波 (overhang echo)。算法的成功关键在于能否正确判别强烈回波是否真正高悬。BRINGO 算法中,对应每一个识别出的强烈回波单体,进一步检验其下方贴近地面的空域所蕴含的液态水是否保持在一个较低水平[11]。

由于雨区或雷暴单体的移动受多重天气尺度的影响,第二代《小涡旋》的其中一项重要成果,是发展出 MOVA (Multi-scale Optical flow by Variational Analysis) 多尺度光流变分回波追踪法。在上海版《小涡旋》中,这种新技术应用到雷暴单体及恶劣天气的预报路径上。有关 MOVA 算法的详细技术资料及其在 QPF 上的应用,可参阅文献[12-14]。

## 5 产品及服务

按照 WENS 规定,预报产品可选择在三个以世博园区为中心的预报区域上制作,覆盖范围详见图一。上海版《小涡旋》直接输出的产品主要有四类:(i) 2 公里分辨率网格预报:雷达 QPE、QPF、降水概率预报及闪电概率预报;(ii) 雷暴单体路径及恶劣天气预报:强降水、云地闪、下击暴流及冰雹;(iii) 固定范围的狂风预警:因下击暴流而可能出现的最大阵风;(iv) 特色图像产品:TREC 移动矢量图、雷达反射率预测图及恶劣天气预测图。产品规格详见表三。图二展示《小涡旋》分别在 2010 年 8 月 4 日及 16 日发出的两个恶劣天气预测图例子。在这些特色图像产品中,《小涡旋》特别设定世博园区(图中央红色小方框)为警报范围,如果预计该范围受雷暴及其它恶劣天气吹袭,会在预测图下方额外贴出文字警报信息。

《小涡旋》预报产品的更新频率为每六分钟一次,与雷达体扫周期同步,时间滞后约十二分钟。所有参与 WENS 的预报系统的产品生成后会传送至上海市气象局的产品服务器,统一制作 WENS 标准产品及预警信息。根据大会规定,除特色产品外,所有产品皆需要按照 B08FDP 制定的 NetCDF 和 XML 格式生产,以配合下游的处理程序。WENS 标准产品更新后,会上载到上海市气象局的内联网,方便局内预报员及世博气象馆驻场人员参考。世博举行期间,部份精选临近预报产品更发放到世博天气专门网站给公众及特别用户使用 (<http://www.expoweather.com/wens/>),网页外观详见图三。

## 6 应用例子与评价

2010 年 9 月 1 日上海市区发生大暴雨。当日华东至华南沿海分别受台风圆规及强烈热带风暴狮子山影响。上海东南部逐渐转吹东南风，而西北部仍维持偏北风，在上海中部形成了一条准东西向的辐合线，这条辐合线是由圆规西南侧一股偏北气流（相对于冷空气）与狮子山倒槽中的东南气流汇合而成。傍晚时，辐合线更为明显，雷达回波开始发展并向西南缓慢伸展而且强度增强，最终导致上海市区的暴雨过程。

当天中午开始，上海中西部多处出现 30 至 60 毫米的降水，雨区基本呈南北向。下午 4 时起，上海东北部有对流回波生成，并缓慢向西南方向发展。6 时起上海市区暴雨如注，徐家汇观测站在下午 6 时至 10 时的雨量累积达 100 毫米，单是 7 时至 8 时的 1 小时雨量已有 41.2 毫米。而徐家汇公园的 1 小时雨量为 62.0 毫米。晚上 9 时后，回波逐渐北抬减弱，暴雨过程结束，这段降水的雨区分布呈东西向分布。图四（a）至（c）总括上述三个时段上海地区降水分布实况。当天下午 5 时 46 分上海市气象局发布雷电黄色预警。至 5 时 57 分增发暴雨黄色预警，7 时 13 分暴雨预警信号更新为橙色，8 时 15 分再更新为红色。直至晚上 10 时 05 分解除雷电黄色和暴雨红色预警。

由于数值模式对两个热带气旋的预报路径与强度均有偏差，所以事前对上述因中尺度辐合线而导致的强降水过程未能准确掌握。正因如此，临近预报在当天下午便发挥决定性的作用。图五（a）至（c）显示《小涡旋》分别在下午 5 时 30 分发出的三小时定量降水预报、6 时 30 分发出的二小时定量降水预报及 7 时正发出的一小时定量降水预报。而图五（d）至（f）则显示对应的降水概率预报（50 毫米或以上）。无论定量或概率上，《小涡旋》在暴雨发生前的数小时都贯彻预警有超过 50 毫米的威胁。而且时间掌握上，亦给出足够充裕的预报时效。这次过程中，《小涡旋》提供了及时且有效的信息，帮助预报员作出正确的警告决定。

为了评价 WENS 示范项目中各个临近系统及其产品的应用价值，上海市气象局组织短临预报岗位预报业务人员对 WENS 产品进行了为期一个半月的日常评价（routine evaluation），评价过程主要针对 WENS 临近预报产品在对强对流天气或降水的强度、落区及其业务作用等三个方面，采用业务人员主观评价计分形式，逐日记录当天各个系统主要产品的表现。经统计，《小涡旋》在六个参加系统中综合排名第一，其恶劣天气分析产品也列 WENS 产品单项评价第一。

## 7 总结

透过与上海市气象局多方位、长时间的紧密合作，香港天文台得以顺利完成 WENS 任务，而《小涡旋》的预报表现亦得到预报员的肯定。在参与过程中，双方对雷达数据的处理、质量控制以及数据规范和管理等，都有了更深入的共识。通过人员互访及讨论，各临近预报的算法和产品都得以调校至理想水平。WENS 的业务期为时 6 个月，相当于 B08FDP 的 6 倍，对临近预报系统是一次极大考验，所累积的经验和预报实例，对临近预报系统的未来发展以及人员培训均极具参考价值。如上文第 2 节所述，《小涡旋》透过 WENS 项目首次应用了 SWAN 系统的雷达产品，效果理想。承先启后，这次经验为未来各方共同发展更完备、更具实用价值的临近预报系统写下了重要的一章。

## 鸣谢

本文作者感谢郑楚明博士及陈世偶先生对文章提出宝贵意见。

## 参考文献

- 1 H.Y. Yeung, W.K. Wong, K.Y. Chan and S.T. Lai, 2009: Applications of the Hong Kong Observatory Nowcasting System Swirls-2 in Support of the 2008 Beijing Olympic Games, *WMO Symposium on Nowcasting*, Whistler, B.C. Canada, 30 Aug - 4 Sep 2009.
- 2 Li, P.W., W.K. Wong, K.Y. Chan & Edwin S.T. Lai, 2000: SWIRLS — An Evolving Nowcasting System. Hong Kong Observatory Technical Note No.100.
- 3 黄伟健、黎守德、李炳华, 1998: 从雷达回波的移动趋势预报短期的降雨情况。粤港澳中尺度天气预测分析会, 深圳, 1998年8月10-11日。
- 4 Tuttle, J.D. and G.B. Foote, 1990: Determination of the Boundary Layer Airflow from a Single Doppler Radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **7**, 218-232.
- 5 Cressman, G.P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **87**, 367-374.
- 6 Robert, A., 1982: A semi-Lagrangian and semi-implicit numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **60**, 319-325.
- 7 Li, P.W. and E.S.T. Lai, 2004: Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong, *J. Hydrology*, **288**, 189-209.
- 8 Yeung, L.H.Y., E.S.T. Lai and S.K.S. Chiu, 2007: Lightning Initiation and Intensity Nowcasting based on Isothermal Radar Reflectivity – a Conceptual Model, *The 33rd International Conference on Radar Meteorology*, Cairns, Australia, 6-10 August 2007.
- 9 杨汉贤、黎守德, 2007: 利用等温雷达反射率的闪电临近预报方案, 中国气象学会 2007 年年会, 中国, 广州, 2007 年 11 月 23-25 日。
- 10 H.Y. Yeung, S.T. Lai, K.Y. Chan: 2008, Thunderstorm Downburst and Radar-based Nowcasting of Squalls. *Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Helsinki, Finland, 30 June - 4 July 2008.
- 11 龚颖恒、杨汉贤, 2009: 香港一次夏季雹暴的天气过程分析及临近预报系统的应用, 第二十三届粤港澳气象科技研讨会, 澳门, 2009 年 2 月 18-20 日。
- 12 W.K. Wong, Linus H.Y. Yeung Y.C. Wang and M. Chen, 2009: Towards the Blending of NWP with Nowcast - Operation Experience in B08FDP, *WMO Symposium on Nowcasting*, Whistler, B.C. Canada, 30 Aug - 4 Sep 2009.
- 13 杨汉贤、黄伟健、郑子路, 2010: 《多尺度光流变分法》在临近降雨预报的应用和表现, 第二十四届粤港澳气象科技研讨会, 深圳, 2010 年 1 月 20-22 日。
- 14 Aubert, G., R. Deriche, and P. Kornprobst, 1999 : Computing optical flow via variational techniques, *SIAM J. Appl. Math.*, **60**, 156-182.

表一：《小涡旋》临近预报系统雷达产品数据输入要求

雷达产品类别	雷达参数		用途
	观测量	空间取样	
CAPPI	等高反射率	单层，于海拔 2 公里	QPE QPF
		单层，于海拔 3 公里	雷暴回波追踪
VIL	垂直累积液态含水量	从地面积分至海拔 5 公里	下击暴流 /狂风预报
CAPPI	等高反射率	多层，分别于海拔 1、2、… 18 公里	云地闪预报
TOP	10-dBZ 回波顶高度	10-dBZ 等值反射率的最高面	云地闪预报
VIL	对流层垂直累积 液态含水量	从地面积分至海拔 18 公里	云地闪预报
TOP	60-dBZ 回波顶高度	60-dBZ 等值反射率的最高面	冰雹预报
VIL	近地面垂直累积 液态含水量	从地面积分至海拔 2 公里	冰雹预报

注意:所有雷达产品的数据格式须为 IRIS 格式,详细规格见 <ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/program/3data.pdf>

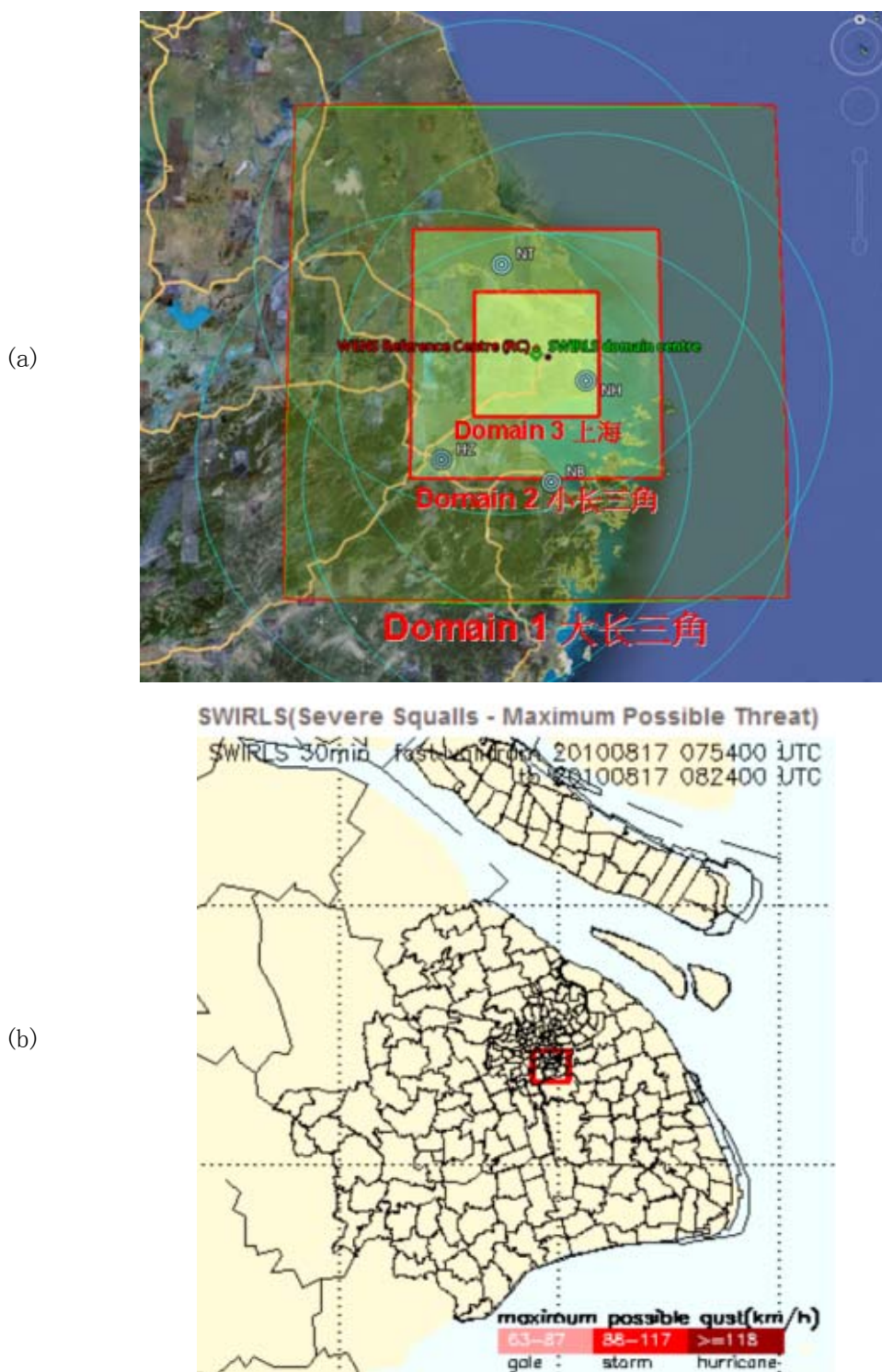
表二: 《小涡旋》恶劣天气预警触发条件

天气种类	预警信息	意义及强度指标	触发条件
强降水	"Amber"(黄色)	降雨率 $\geq 30$ 毫米/小时 及 $< 50$ 毫米/小时	单体内 3 公里 CAPPI $\geq 34$ dBZ, 而平均值经动态 Z-R 转换后的降 雨率分别达左列指标。
	"Red"(红色)	降雨率 $\geq 50$ 毫米/小时 及 $< 70$ 毫米/小时	
	"Black"(黑色)	降雨率 $\geq 70$ 毫米/小时	
云地闪	"I"(一级)	强度 $< 10$ 次云地闪/6 分钟	单体内 3 公里 CAPPI $\geq 25$ dBZ, 而 且同时满足以下条件: 1. 10-dBZ TOP $> 7.62$ 公里 2. 0-18 公里 VIL $> 5.98$ 毫米 3. 零度等温反射率 $> 47.15$ dBZ 4. 零下 10 度等温反射率 $> 17.30$ dBZ 5. 零下 20 度等温反射率 $> 0.1$ dBZ 并且根据 DELITE 算法达至左列的 云地闪强度指标。
	"II"(二级)	强度 $\geq 10$ 次云地闪/6 分钟 及 $< 100$ 次云地闪/6 分钟	
	"III"(三级)	强度 $\geq 100$ 次云地闪/6 分钟	
下击暴流	"severe - potential wind gust of gale force or higher"	阵风达烈风或以上程度。	单体内的 0-5 公里 VIL $> 5$ 毫米, 而且根据 BLAAST 算法, 下击暴流 有可达地面并产生达左列风速指 标的狂风。
	"damaging - potential wind gust of hurricane force"	阵风达飓风或以上程度。	
冰雹	"hail of any size"	任何大小的冰雹	单体特征同时满足以下条件: 1. 60-dBZ TOP $> 3$ 公里 2. 0-2 公里 VIL $< 5$ 毫米
狂风	风速数值	最大可能出现的强烈阵风	当预报有下击暴流单体的路径会 触及警报范围(世博园区)。

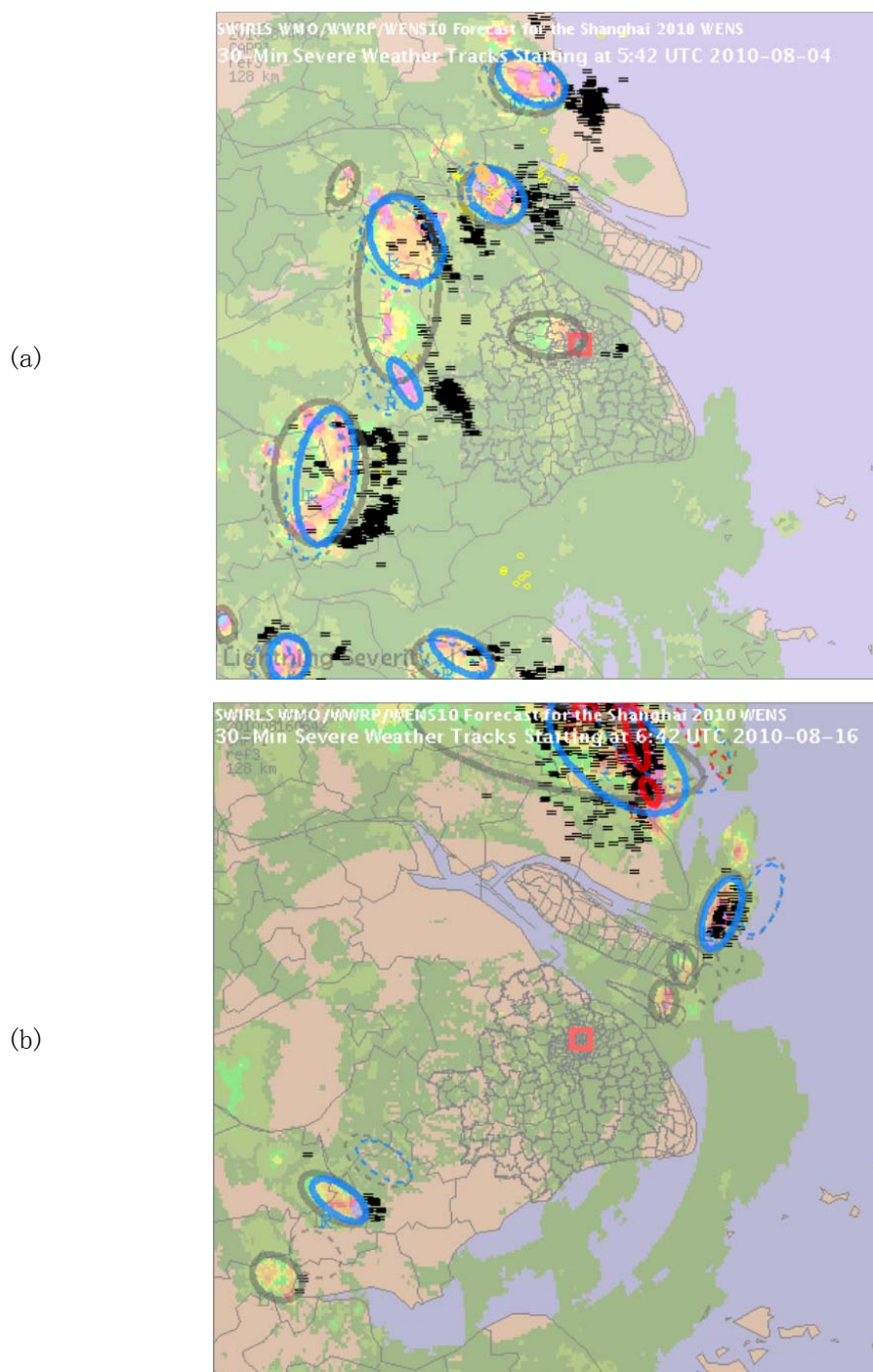


表三：《小涡旋》在 WENS 业务运作期间为 2010 上海世博会提供的预报产品

产品	空间分类 (格式)	预报 区域	分辨率	预报时效	更新 频率
雷达 QPE	网格点 (NetCDF)	Domain 2	2 km	0-30 分钟、 0-60 分钟、 0-180 分钟	6 分钟
雷达 QPF	网格点 (NetCDF)	Domain 2	2 km	0-1 小时、 0-2 小时、 0-3 小时	6 分钟
降水概率 (60 分钟达 0.1, 1, 10 及 20 毫米或以上； 120 分钟达 0.1, 1, 10, 20 及 50 毫米或以上； 180 分钟达 0.1, 1, 10, 20 及 50 毫米或以上)	网格点 (NetCDF)	Domain 2	2 km	0-1 小时、 0-2 小时、 0-3 小时	6 分钟
闪电概率	网格点 (NetCDF)	Domain 2	2 km	0-1 小时、 0-2 小时、 0-3 小时	6 分钟
雷暴单体路径及属性 (反射率达 34 dBZ 或更强)	单体 (XML)	Domain 1	--	0-1 小时	6 分钟
强降水、云地闪、下击暴流 及冰雹等恶劣天气	单体 (XML)	Domain 2	--	0-30 分钟	6 分钟
狂风预警 (最大阵风)	固定范围 (XML)	Domain 3	--	0-30 分钟	6 分钟
TREC 移动矢量图	固定范围 (PNG 图像)	Domain 1	--	--	6 分钟
雷达反射率预测图	固定范围 (PNG 图像)	Domain 2	--	0-6 小时，每 6 分 钟间隔	6 分钟
恶劣天气预测图	固定范围 (PNG 图像)	Domain 2	--	0-30 分钟	6 分钟

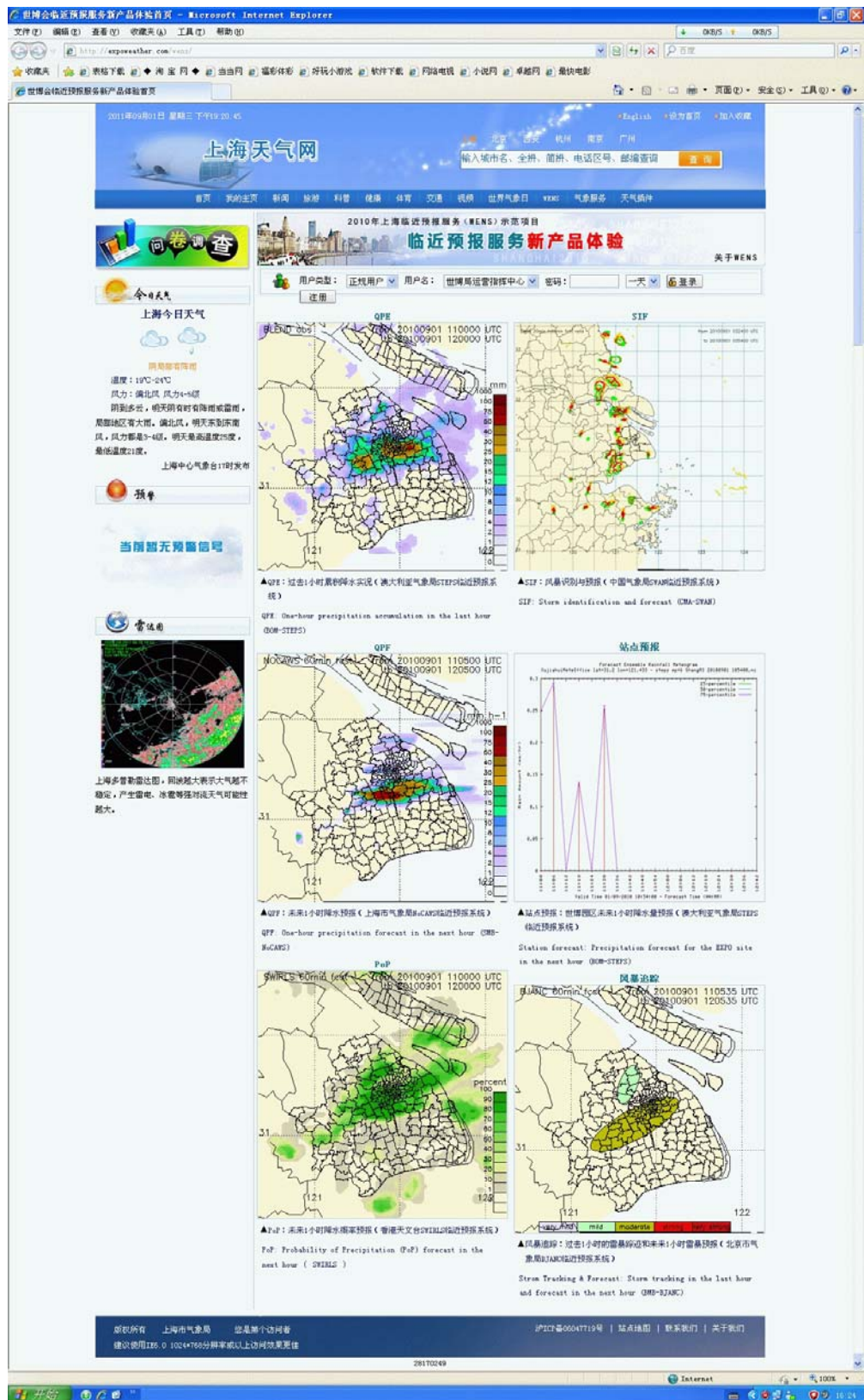


图一 上海版《小涡旋》产品覆盖范围：(a) WENS 大长三角 (Domain 1)、小长三角 (Domain 2)、上海 (Domain 3) 预报区域；(b) 世博园区 (图中央红色小方框)。

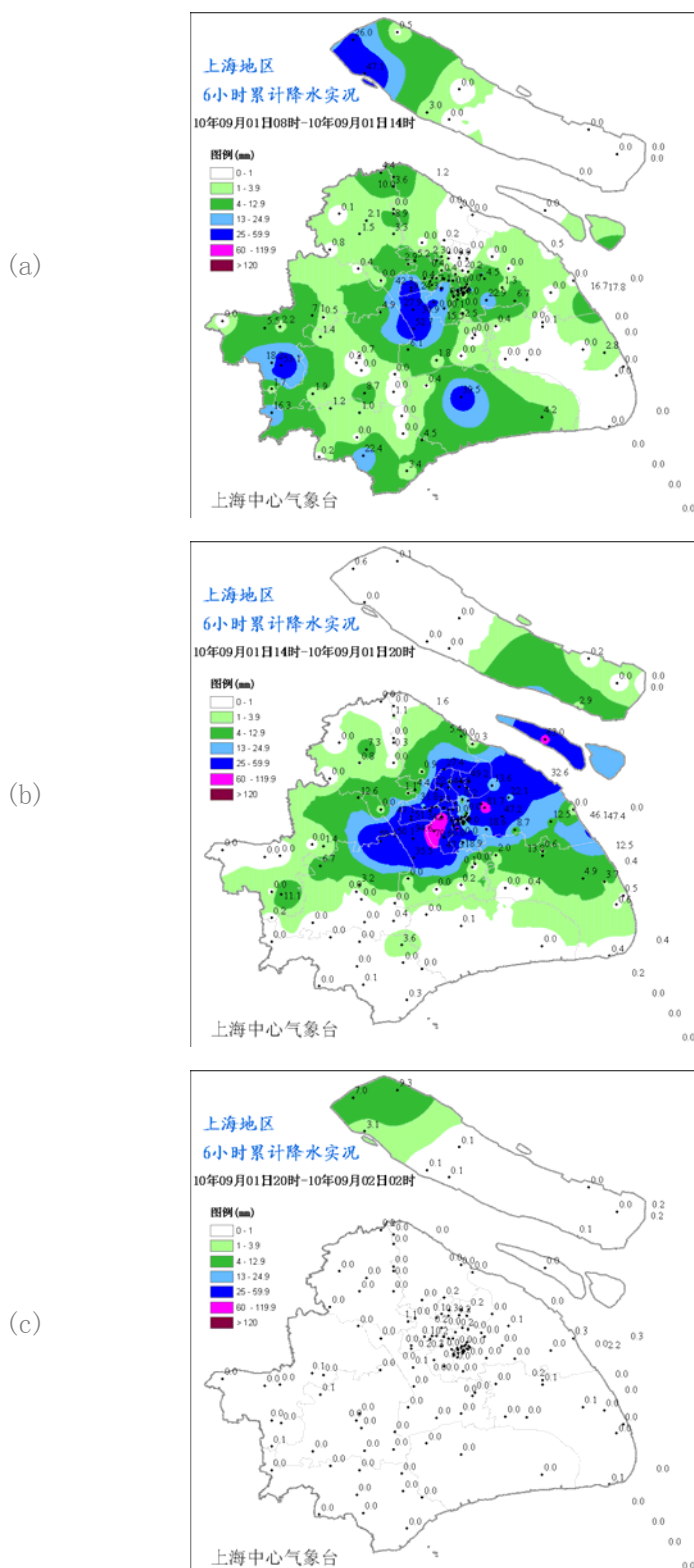


图二 上海版《小涡旋》系统实时制作的恶劣天气预测图：(a) 2010 年 8 月 4 日下午 1 时 42 分发出；(b) 2010 年 8 月 16 日下午 2 时 42 分发出。地图上蓝、灰、红及橙色椭圆分别代表未来半小时预测有强降水、云地闪、下击暴流及冰雹的区域，而黄色及黑色符号分别标示实测的云间与云对地闪电位置。中央红色小方框标示上海世博园区的警报范围。

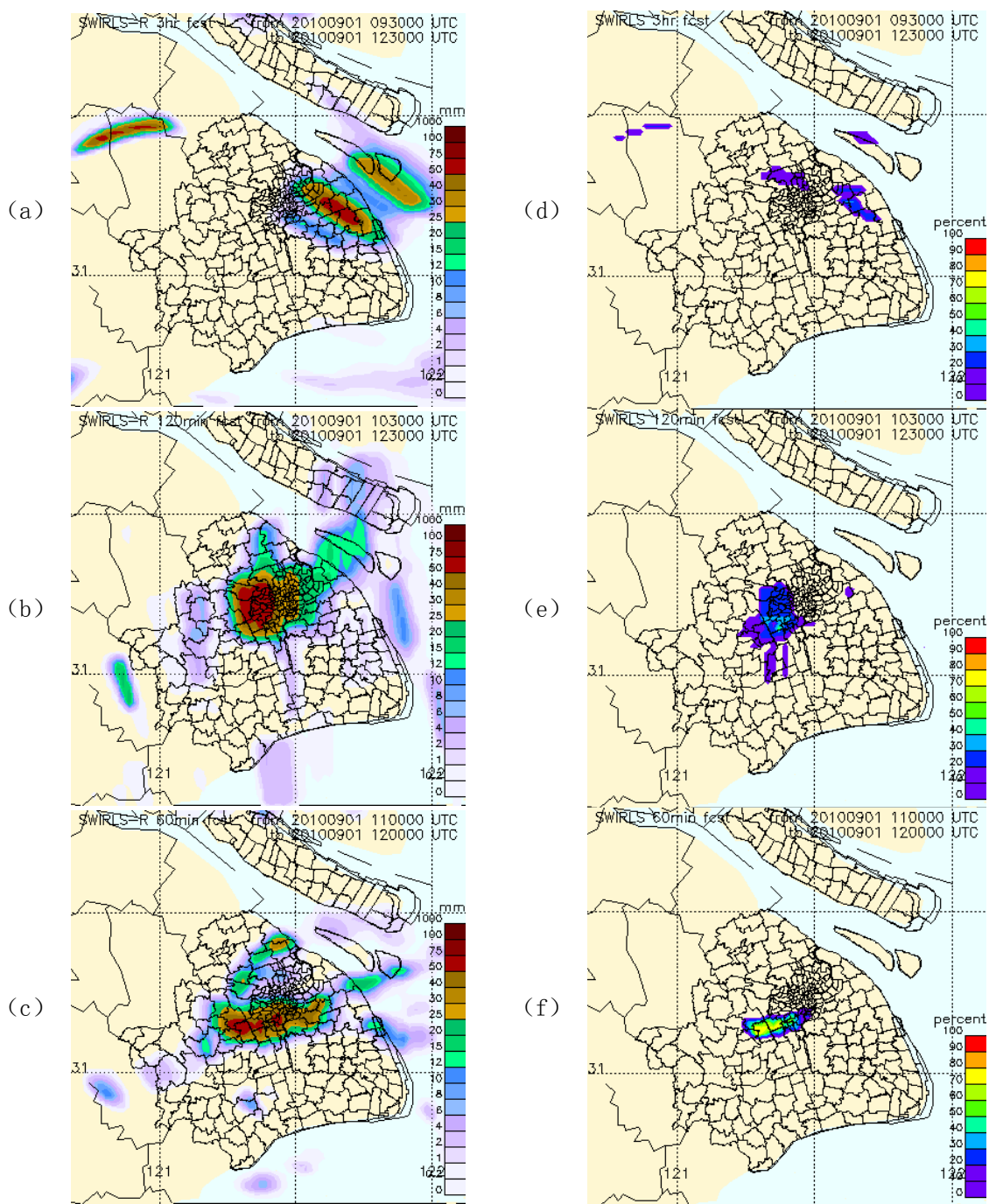
中国气象学会 2011 年年会  
(分会场编号: S3)



图三 上海气象信息网上链接的 2010 年上海世博会临近预报服务(WENS)示范项目产品体验网页, 左下角显示《小涡旋》的降水概率预测图。



图四 2010年9月1日上海市区降水分布实况：(a) 上午8时至下午2时；(b) 下午2时至晚上8时；(c) 晚上8时至翌日上午2时。



图五 《小涡旋》于 2010 年 9 月 1 日下午发出的降水预报产品：(a) 下午 5 时 30 分发出的三小时定量降水预报；(b) 下午 6 时 30 分发出的二小时定量降水预报；(c) 下午 7 时正发出的一小时定量降水预报；(d) 下午 5 时 30 分发出的三小时降水概率预报；(e) 下午 6 时 30 分发出的二小时降水概率预报；(f) 下午 7 时正发出的一小时降水概率预报。（注意：雨量图中，深红色表示 50 毫米或以上；降水概率的阈值为 50 毫米；概率图中，浅蓝色、黄色分别表示百分之 30、70 或以上。）