

贺芳芳,徐卫忠,周坤,等,2018. 基于雷达资料的上海地区暴雨面雨量计算及应用[J]. 气象,44(7):944-951.

基于雷达资料的上海地区暴雨 面雨量计算及应用*

贺芳芳 徐卫忠 周 坤 穆海振

上海市气候中心,上海 200030

提 要: 根据上海地区小时雷达资料的定量降水估测(quantitative precipitation estimation, QPE)网格产品和经过质量控制的自动站雨量资料进行暴雨面雨量计算方法研究,计算方法为:将暴雨区内自动站周围 9 个网格点的 QPE 平均值作为自动站的雷达估测雨量,计算各测站雨量与雷达估测雨量的差值,用克里金插值方法将差值场插值到雷达降水估算产品相同的网格点上,再将网格点上残差插值数据加上网格点上雷达估测雨量,得到各网格点用自动站订正后的雷达估测小时雨量资料。文中 24 个典型暴雨各测站订正后 QPE 与实测雨量的平均绝对误差比订正前减小了 27%;两个典型暴雨主要降水阶段经国家气象站资料订正后 QPE 与实测雨量的平均误差比订正前减小了 33%~39%,暴雨过程总雨量经国家气象站资料订正后减小了 34%~59%。根据以上方法得到的网格点雨量计算和绘制上海地区 2007—2015 年 24 个典型暴雨降水区域的小时面雨量值和图、过程面雨量值和图、行政区和水利片面雨量值和图。最后基于 .NET Framework 4.0 基础架构软件开发平台,使用 Microsoft Visual Studio 2012 和 Microsoft Visual Studio 软件开发工具制作“基于雷达资料暴雨面雨量自动化计算查询系统”,供业务科研人员实时查询和计算。

关键词: 上海地区,定量降水估测(QPE),暴雨面雨量

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.010

Computation and Application of Rainstorm Surface Rainfall Based on Radar Data in Shanghai

HE Fangfang XU Weizhong ZHOU Kun MU Haizhen

Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

Abstract: The computing method of rainstorm surface rainfall is studied based on the grid product of hourly quantitative precipitation estimation (QPE) of radar data and the automatic weather station (AWS) quality control rainfall data in Shanghai. The computing method is that the radar estimated rainfall of the AWS in rainstorm area, which was obtained from the radar QPE mean of 9 grid points around the AWS, is used to calculate the difference between the rainfall and the radar estimated rainfall of the AWS. The difference field is interpolated into the same grid point of radar precipitation estimation using Kriging interpolation method. The hourly rainfall of grid points is the sum of the residual interpolation data and the radar rainfall estimation of grid points. The average absolute error of QPE and measured rainfall of 24 typical rainstorm cases of all stations is reduced by 27% after correction. The average error of QPE and measured rainfall of main precipitation sections and process rainfall of national weather stations for two typical rainstorms are reduced by 33%—39% and 34%—59% respectively after correction. The value and graph of hourly and process surface rainfall and administrative district as well as water conservancy one-sided

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506014)和上海市气象局研究性专项(YJ201508)共同资助

2017 年 9 月 21 日收稿; 2018 年 4 月 28 日收修定稿

第一作者:贺芳芳,主要从事气候影响评估分析与研究. Email:heff@climate.sh.cn

rainfall of the 24 typical rainstorms from 2007 to 2015 are calculated and drawn according to the rainfall of grid points using above computing method. Finally, the automated computing inquiry system of rainstorm surface rainfall based on radar data is produced using the development tools of Visual Studio Microsoft 2012 and Microsoft Visual Studio software relying on .NET Framework. 4.0 Software development platform. This system will be used for realtime querying and calculation.

Key words: Shanghai, quantitative precipitation estimation (QPE), rainstorm surface rainfall

引 言

气象站点的雨量往往代表某一点或较小范围的降水情况,由于降水的地点、强度、时间等要素的随机性很强,因此降水分布是不均匀的,能代表该地区平均降水情况的面雨量计算方法研究越来越被重视,算术平均法、泰森多边形法和雨量等值线是最早的面雨量计算方法(郁淑华, 2001; 方慈安等, 2003),后来发展了距离加权平均网格法(翟家瑞, 1990; 张行南和程晓红, 2005),近年来,又有利用雷达回波与 GIS 技术反演面雨量(何健等, 2006)、利用卫星云图估算地区平均面雨量(杨扬和戚建国, 1995; 潘永地和姚益平, 2005)等新技术方法的出现。面雨量是洪水预报和防汛决策的重要依据,如何准确计算面雨量关系到防汛服务的有效性,许多气象工作者就气象业务服务中面雨量计算方法进行应用研究,徐晶等(2001)建立了适用于不同流域站点变化的泰森多边形面雨量计算系统,实现面雨量实况和预报在 MICAPS 下的显示,并在全国的七大江河流域面雨量计算中应用,取得了较好的效果;史玉光等(2008)将自然正交分解和数字高程模型相结合,计算得到新疆区域面雨量年、季分布特征和变化规律;近年来,还有学者通过分析降水天气环流型出现概率及主导环流型变化特征,探讨主导环流型对流域总面雨量和子流域面雨量的贡献率(钟利华等, 2017)。

暴雨是上海地区夏半年最主要的气象灾害,近年来全球气候变化和城市热岛的双重影响使得暴雨洪涝灾害加剧,汛期防洪抗灾一直是上海政府最为关注的问题。关于上海地区暴雨的天气气候分析和研究工作已有很多,如上海地区暴雨强度公式研制(徐卫忠等, 2013),近 30 年上海地区暴雨的气候变化特征(贺芳芳和赵兵科, 2009)等,但以上研究所用资料为上海地区气象站或自动站的雨量资料,鉴于暴雨的不均匀分布性,能代表该地区平均降水情况

的面雨量计算方法的研究越来越受到重视。

近年来,国内许多学者利用雷达资料并结合其他资料对全国各地暴雨的天气特征进行分析,如甘肃陇东南暖区暴雨多普勒雷达特征分析(傅朝等, 2015),赣西地区致灾大暴雨的中尺度对流条件和对流系统的演变特征分析(支树林等, 2015),上海地区远距离台风大暴雨的影响分析(曹晓岗和王慧, 2016),河南局部大暴雨天气过程形成机理和中尺度系统活动特征研究分析(喻谦花等, 2016),冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析(孔凡超等, 2016),得出了有利于提高暴雨预报效果的结论;还有学者进行雷达资料的一致性分析和订正,提升其降水监测的能力(朱艺青等, 2016)。但利用雷达资料进行暴雨面雨量计算的研究较少。

上海地区目前有两部 S 波段雷达(位于东南部沿海南汇的 WSR-88D 多普勒天气雷达和位于西部青浦的 CINRAD/SA 新一代天气雷达),雷达资料可覆盖整个上海地区,利用雷达降水估算信息能够弥补采用站点雨量资料计算面雨量的不足,同时上海有 138 个自动气象站(包括 11 个国家气象站)的雨量记录,可以对雷达降水估算产品进行实时订正。因此,根据资料研究上海地区基于自动气象站、雷达回波资料的暴雨面雨量计算方法,并建立上海地区暴雨面雨量自动化查询计算系统,为更好地做好暴雨预报打下重要基础,也可为上海市政府制定更加有效的防汛抗洪决策提供重要依据。

1 资料来源

1.1 自动站降雨观测资料

上海地区有 138 个自动气象站(包括 11 个国家气象站)的雨量记录,在具体分析中,每个典型过程自动气象站雨量资料都按以下标准剔除有明显误差的站点:(1)年降水量明显偏小的自动站(和邻近站相比年降水量偏小 50%以上);(2)剔除小时降水量

超过国家气象站 2 倍标准差的自动站值;(3)过程降水量与相邻的周边几个自动站相比非常小(有的为 0)和暴雨过程雨量明显过大(和邻近站相比明显过大)的自动站值;(4)剔除缺测比较多的自动站值。

1.2 雷达定量降水估测产品

本文使用由上海中心气象台整理的基于雷达资料的定量降水估测(quantitative precipitation estimation, QPE)产品。此产品产生过程如下:经过反射率因子预处理、CAPPI 格点资料生成、降水类型划分、反射率因子转换为降水量 4 个技术处理步骤,将 1 小时内连续 10 次的每 6 分钟雷达降水估测值进行累加得到 1 小时雷达 QPE 网格产品(网格间距为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$)。文中的 24 个暴雨过程中的雷达资料基本采用南汇雷达资料,当南汇雷达资料缺测时使用青浦雷达资料,为此只有 2010 年 9 月 1 日 05 时至 2 日 04 时的台风暴雨过程使用青浦雷达资料,其他均采用南汇雷达资料。由于这两部雷达都是 S 波段雷达,故资料处理方法一致。

1.3 暴雨个例

首先根据上海地区暴雨标准(由 11 个国家气象站 12 h 滑动雨量 $\geq 30\text{ mm}$ 及产生暴雨的天气型判断)确定 2007—2015 年上海地区暴雨过程(包括暴雨起止时间、过程雨量等),结合相应的积水报警点密集分布情况(包括报警时间、报警地点、报警时的受灾情况及报警地点地理信息坐标)和气象灾情普查库资料灾情情况(包括灾情发生地点、起始时间、灾害影响、经济损失及房屋受损等),确定两类典型暴雨对上海地区影响较大:(1)梅雨暴雨和台风暴雨(持续时间长、范围广、过程雨量大的暴雨),(2)短历时强降水(暴雨强度大);共选取 24 个暴雨过程个例(表 1)。

2 基于雷达资料的上海地区暴雨面雨量计算方法确定

2.1 雷达产品本身误差的再订正

考虑到雷达资料来自空中,而自动站资料来自地面,有云系移动等误差,经与上海中心气象台雷达专家讨论并制定订正此类误差方法:某个网格点值使用周围 N 个网格点的算术平均值代替,为此,将

自动站站点周围(1,5,9 个等)雷达估测降水网格点值用权重法计算到自动站站点的经纬度位置,并与自动站雨量比较,取误差最小的值,用这种验证方法计算所有暴雨个例相关系数和绝对误差,最后得出以网格点周围 9 个点的平均值作为某个网格点值为最佳。

表 1 2007—2015 年典型暴雨个例
Table 1 The typical examples of rainstorm
in 2007—2015

年份	起止时间/BT	暴雨类型	自动站/个
2007	8月5日15—23时	强降水	78
2007	10月7日14至9日07时	台风暴雨	78
2008	6月7日15至8日03时	梅雨暴雨	94
2008	6月9日13至11日11时	梅雨暴雨	89
2008	6月13日18至14日19时	梅雨暴雨	95
2008	6月27日05至28日03时	梅雨暴雨	93
2008	8月25日03—16时	强降水	82
2009	7月6日05至7日02时	强降水	103
2009	7月30日05—24时	强降水	101
2009	8月9日16至10日18时	台风暴雨	99
2010	8月15日18至16日01时	强降水	125
2010	9月1日05至2日04时	台风暴雨	131
2011	8月11日18至12日14时	强降水	122
2011	8月13日14至13日20时	强降水	128
2012	6月17日10至18日15时	梅雨暴雨	127
2012	7月6日17至7日02时	强降水	121
2012	8月7日19至9日05时	台风暴雨	113
2012	8月20日13—24时	强降水	123
2013	7月31日19时至8月1日19时	强降水	117
2013	9月13日16至14日02时	强降水	125
2013	10月6日20至8日22时	台风暴雨	120
2015	6月15日11至17日17时	梅雨暴雨	78
2015	7月10日21至12日05时	台风暴雨	79
2015	8月21日22至24日17时	台风暴雨	79

2.2 用暴雨区域内自动站雨量订正雷达估测雨量

2.2.1 流程及总体误差订正分析

将自动站周围 9 个网格点的雷达 QPE 平均值作为自动站的雷达估测雨量,计算各测站小时雨量与雷达估测小时雨量的差值,再将差值场插值到雷达降水估算产品相同的网格点上(网格点共 464×464 个,网格间距为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$),在选取插值方法时,本研究试用了回归法、比值法、最近距离自动站雨量和雷达估测雨量加权平均法及 Sufer 中的插值法(包括克里金、加权反距离、最小曲率、改进谢别德、自然邻点、最近邻点和多项式回归等插值法),然后用全市自动站的数据进行了检验(步骤如图 1),

发现用 Sufer 中的插值法进行插值,效果明显好于其他方法,由于用 Sufer 中的插值法订正每网格点上数据效果差异不大,考虑克里金插值法比较常用,所以最后选择了克里金插值法(表 2),用其得到网格点上残差插值,然后再将各网格点上的残差插值数据加上各网格点上的雷达估测降水值,得到了各网格点用自动站订正后的雷达估测小时雨量资料。

表 2 为 24 个暴雨过程所挑选的自动站实测雨量分别与原始 QPE 和订正 QPE 的相关系数、平均绝对误差和最大绝对误差。从表 2 中可见,用克里金插值法订正误差最小,相关系数最大。订正前后,相关系数提高了 23%,平均绝对误差减小了 27%,最大绝对误差减小了 22%。

2.2.2 典型暴雨个例误差订正分析

选择 2 个个例(分别是短历时强降水和台风暴雨),根据此 2 个典型暴雨过程中出现暴雨的国家气象站原始 QPE、订正 QPE 与实测雨量之间的误差,进行典型暴雨个例误差订正分析。短历时强降水起止时间为 2008 年 8 月 25 日 03—16 时,降水主要出现在 06—11 时,全市 11 个国家气象站中有 7 个出现暴雨(宝山、嘉定、崇明、徐家汇、南汇、浦东和青

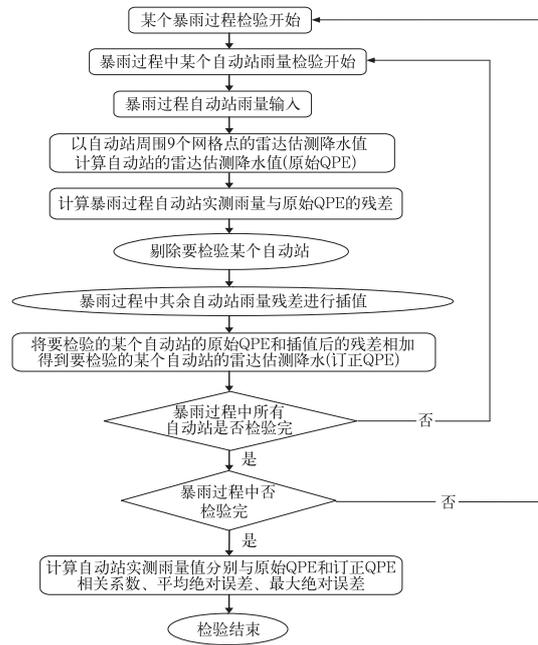


图 1 用自动站雨量值订正雷达估测降水的检验流程

Fig. 1 The testing process of correcting radar-estimated precipitation with rainfall value from automatic weather station

表 2 订正前后的雨量与 QPE 的相关系数、平均绝对误差和最大绝对误差

Table 2 The correlation coefficient, mean absolute error, maximum absolute error of rainfall and QPE before and after corrections

	订正前	订正后			
		回归法	比值法	加权平均法	克里金插值法
相关系数	0.66	0.66	0.66	0.77	0.81
平均绝对误差/mm	1.5	1.7	1.8	1.2	1.1
最大绝对误差/mm	117.5	117.5	116.7	91.2	91.2

浦);台风暴雨起止时间为 2013 年 10 月 6 日 20 时至 8 日 22 时,降水主要出现在 7 日 20 时至 8 日 11 时,11 个国家气象站中都有暴雨记录。图 2 为 2 个典型暴雨国家气象站实测雨量平均值、原始 QPE 平均值、订正 QPE 平均值逐时变化图。

从图 2a 可以看出,在雨量较大的 06—11 时,7 个国家气象站原始 QPE 平均值与实测雨量平均值相差较大,订正后的 QPE 平均值比较接近实测雨量平均值。06—11 时原始 QPE 平均值、订正后 QPE 平均值与实测雨量平均值误差分别为 56%和 17%,误差减小了 39%;暴雨过程(03—16 时)的原始

QPE 平均值、订正后 QPE 平均值与实测雨量平均值误差分别为 64%和 5%,减小了 59%。

从图 2b 可以看出,整个降水过程,11 个国家气象站原始 QPE 平均值与实测雨量平均值差异较 2008 年 8 月 25 日过程小,订正后 QPE 平均值更接近实测雨量平均值。雨量较大的 7 日 20 时至 8 日 11 时原始 QPE 平均值、订正后 QPE 平均值与实测雨量平均值误差分别为 47%和 14%,误差减小了 33%;暴雨过程(6 日 20 时至 8 日 22 时)的原始 QPE 平均值、订正后 QPE 平均值与实测雨量平均值误差分别为 45%和 11%,减小了 34%。

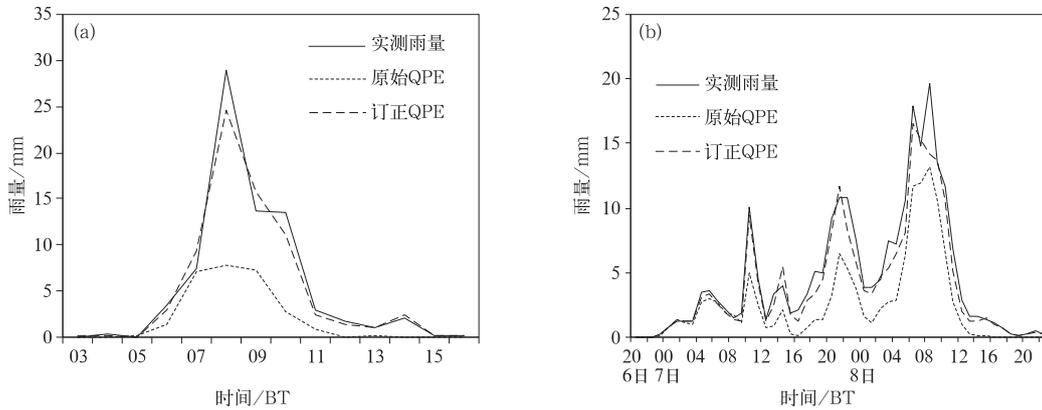


图 2 典型暴雨国家气象站实测雨量平均值、原始 QPE 平均值、订正 QPE 平均值逐时变化
(a) 2008 年 8 月 25 日强降雨暴雨, (b) 2013 年 10 月 6—8 日台风暴雨

Fig. 2 Hourly changes of average values of rainfall, original QPE and corrected QPE about typical rainstorm at national meteorological stations

(a) rainstorm of heavy precipitation process on 25 August 2008, (b) typhoon rainstorm in 6—8 October 2013

2.3 面雨量计算

(1) 计算降水区域面雨量:根据各网格点用自动站订正后的雷达估测小时雨量资料计算各网格点过程雨量,接着用各网格点的小时雨量和过程雨量计算降水区域的平均雨量(网格点总雨量/网格数),可以得到降水区域逐时(网格点上雨量 ≥ 0.1 mm)面雨量值和过程降水(网格点上雨量 $\geq 5, 10, 30, 50, 60, 100$ mm)的各等级面雨量值,并用 Surfer 软件绘制小时面雨量图和网格点上雨量 $\geq 5, 10, 30, 50, 60, 100$ mm 的各等级面雨量图(网格点面雨量图),同样可以根据各网格的过程总雨量绘制过程面雨量等

值线图(总面雨量图)。

(2) 计算行政区面雨量:利用多边形判断分析计算落在上海 11 个行政区域的网格点(表 3)(网格间距为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$),同样用网格点的小时雨量计算各网格点过程雨量(网格点上雨量 ≥ 0.1 mm),再求各区网格点过程雨量的合计,最后计算各区平均雨量(各区网格点过程总雨量/各区网格数),得到上海 24 个暴雨过程 11 个行政区的面雨量值,并用 Surfer 软件绘制行政区面雨量图。

(3) 计算水利片面雨量:用同样方法(表 4)得到上海 24 个暴雨过程 14 个水利片的面雨量值和图。

表 3 上海各区网格点数(单位:个)

Table 3 Grid points in districts of Shanghai (unit: number)

闵行	宝山	嘉定	崇明	市区	南汇	浦东	金山	青浦	松江	奉贤
345	274	431	1262	268	683	501	552	624	572	663

表 4 上海各水利片网格点数(单位:个)

Table 4 Grid points in water resources of Shanghai (unit: number)

崇明片	长兴片	淀北片	淀南片	嘉宝北片	浦东片	浦南东片	浦南西片	青松大控片	商榻	市中心	太北片	太南片	蕴南片
1232	76	139	155	671	1914	439	283	756	29	44	90	83	166

3 计算结果

本文以 2008 年 8 月 25 日为例,给出各种不同区域的面雨量分布图。2008 年 8 月 25 日上海遭遇百年一遇的突发强降雨,造成道路瘫痪、航班延误和家中进水等危害。此次短历时强降雨过程主要发生

06—10 时,最大降水强度达 $119.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降水范围为全市大部分地区。

3.1 降水区域面雨量

图 3 给出的是 2008 年 8 月 25 日强降雨影响明显时的(06—07 和 07—08 时)面雨量和过程降水(网格点上雨量 ≥ 30 mm 和 ≥ 60 mm)面雨量。从中

看出,面雨量的大小不仅与网格点雨量累加值(降水区域总雨量大小)有关,还与网格点数量(降水面积大小)有关。一般情况,网格点雨量累加值增大或变化不大,网格点数量减少,面雨量值相对大;相反,网格点雨量累加值减小,网格点数量增加或变化不大,面雨量值相对小,但网格点雨量累加值增大幅度较大,即使网格点数量增加,面雨量值也会增大(图 3a 与 3b 比较);各等级面雨量图中,高等级的网格点数量少,网格点雨量值大,面雨量值则大(图 3c 与 3d 比较)。

3.2 行政区和水利片面雨量

图 4 为 2008 年 8 月 25 日强降水行政区和水利片面雨量分布情况,从图 4 可以看出:2008 年 8 月 25 日强降水东北部各区或各片面雨量较大,西南部各区或各片面雨量较小,有明显的局地性差异。(注:上海市行政区和水利片边界有所区别,行政区边界源于上海地图,水利片边界源于上海水利设计

院,江苏淀山湖部分属上海商榻水利片)。

4 基于雷达资料暴雨面雨量自动化计算查询系统制作

根据基于雷达资料暴雨面雨量计算方法和表 1 中 24 个暴雨典型个例的计算结果制作基于雷达资料暴雨面雨量自动化计算查询系统。此系统是一个网页产品,基于 .NET Framework 4.0 基础架构软件开发平台下开发,使用的开发工具为 Microsoft Visual Studio 2012 和 Microsoft Visual Studio(简称 VS),根据系统模型运算和界面显示等方面的特点和要求,采用 C# 语言开发,系统的地图显示基于 OpenLayers,系统中的原始 QPE 图、QPE 修正图、小时面雨量图、总面雨量图、网格点面雨量图、行政区雨量图,以及水利片面雨量图是基于 Surfer 软件绘制而成,系统开发模块如图 5。

基于雷达资料暴雨面雨量自动化计算查询系统

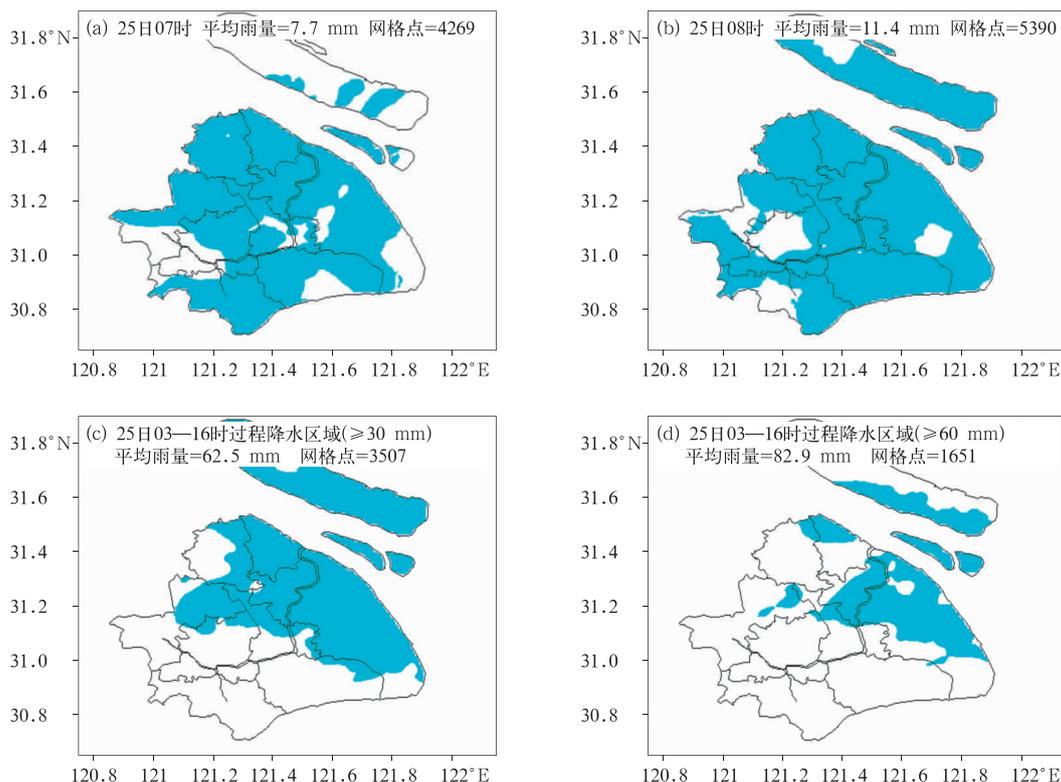


图 3 2008 年 8 月 25 日典型强降水个例降水等级面雨量(阴影,单位:mm)

(a)06—07 时, (b)07—08 时, (c)网格点上雨量 ≥ 30 mm, (d)网格点上雨量 ≥ 60 mm

Fig. 3 Typical hourly and process surface rainfall (shaded, unit: mm) of heavy precipitation on 25 August 2008

(a) 06:00—07:00 BT, (b) 07:00—08:00 BT, (c) grid point rainfall ≥ 30 mm in 03:00—16:00 BT,

(d) grid point rainfall ≥ 60 mm in 03:00—16:00 BT

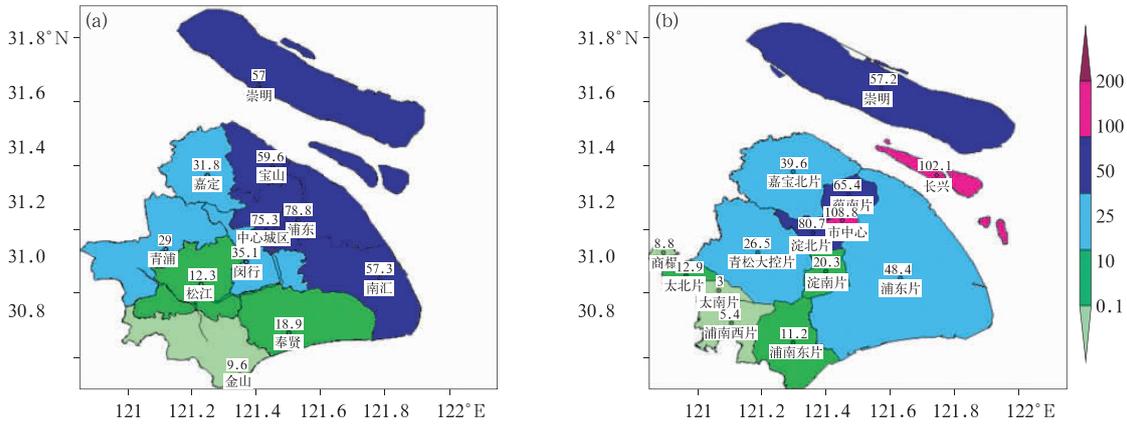


图 4 2008 年 8 月 25 日强降水行政区(a)和水利片(b)面雨量(单位: mm)
Fig. 4 The administrative district (a) and water conservancy (b) one-sided rainfall (unit: mm) of heavy precipitation on 25 August 2008

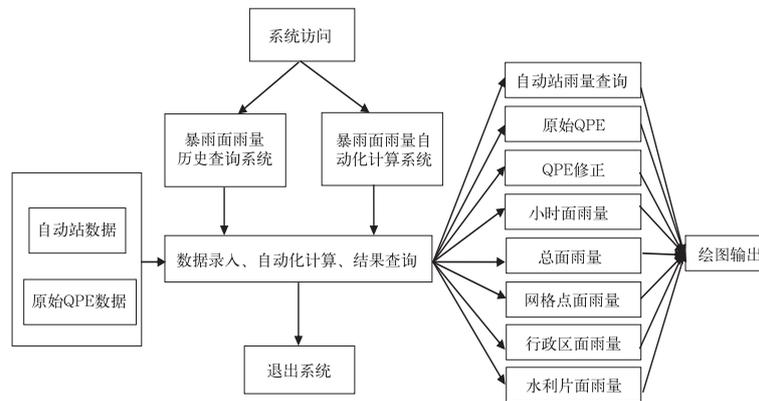


图 5 系统开发模块
Fig. 5 Developed module of system

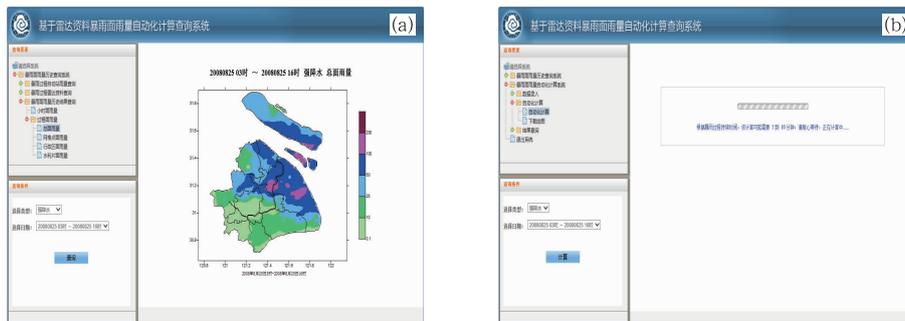


图 6 基于雷达资料暴雨面雨量自动化计算查询系统
(a)历史查询系统页面.(b)自动化计算系统页面
Fig. 6 The automated computing inquiry system of rainstorm surface rainfall based on radar data
(a) history inquiry system page, (b) automated computing system page

包含暴雨面雨量历史查询系统和暴雨面雨量自动化计算系统两个子系统(图 6a 和 6b)。暴雨面雨量历史查询系统包含“暴雨过程自动站雨量查询”“暴雨过程雷达资料查询”和“暴雨面雨量历史结果查询”三部分,“暴雨过程雷达资料查询”包含“原始 QPE”和“QPE 修正”两部分,“暴雨面雨量历史结果

查询”中把前面计算的结果(小时面雨量图、总面雨量图、网格点面雨量图、行政区雨量图及水利片雨量图)都显示出来,图 6a 显示的为短时强降水 2008 年 8 月 25 日过程总面雨量等值线图。暴雨面雨量自动化计算系统包含“数据录入”“自动化计算”和“结果查询”,“数据录入”中自动站雨量文件通过点击对应浏

览按钮选择,原始 QPE 文件通过点击对应浏览按钮选择通过压缩包的形式进行上传(图略),数据录入成功后,则进入“自动化计算”菜单进行计算,图 6b 为短时强降水 2008 年 8 月 25 日各种面雨量图计算过程,计算完成后,可进入“结果查询”菜单对计算结果进行查询,查询方式同“暴雨面雨量历史查询系统”,同时点击“下载绘图”浏览器的底部会出来一个下载的提示信息(可以选择保存的路径等),下载计算结果。要永久保存计算结果,则通过管理员入口中的“暴雨过程录入”进行计算(方式同上),将暴雨面雨量计算结果转到“暴雨面雨量历史查询系统”供查询。

此系统已在上海市气象局一体化平台中天气预报工作区 F-9 板块(气候风险管理平台)历史查询分析中使用。

5 结论与讨论

(1) 本文根据上海地区小时雷达 QPE 网格产品和经过质量控制的自动站小时雨量资料进行暴雨面雨量计算方法研究,研制计算方法为:首先对上海地区小时雷达 QPE 网格产品(1 km×1 km)进行本身误差的再订正,而后用暴雨区域内经过质量控制的自动站小时雨量订正雷达估测雨量,订正步骤为:将自动站周围 9 个网格点的雷达降水估测平均值作为自动站的雷达估测雨量,计算各测站小时雨量与雷达小时估测雨量的差值,选定用克里金插值方法将差值场插值到雷达降水估算产品相同的网格点上,最后将各网格点的残差插值数据加上各网格点的雷达估测雨量,得到了各网格点用自动站订正后的雷达估测小时雨量资料。

(2) 采用以上方法订正 24 个典型暴雨的 QPE,订正后 QPE 与实测雨量平均绝对误差比订正前(原始 QPE 与实测雨量平均绝对误差)减小了 27%,最大绝对误差比订正前减小了 22%。从两个典型暴雨两个例来看,主要降水段订正后 QPE 与实测雨量平均误差比订正前(原始 QPE 与实测雨量平均误差)减小了 33%~39%,暴雨过程总雨量的订正后 QPE 与实测雨量平均误差比订正前减小了 34%~59%,订正后的逐时 QPE 比较接近逐时实测雨量。

(3) 根据以上方法得到的网格点雨量计算绘制上海地区 24 个典型暴雨个例的降水区域小时面雨量值和图、过程面雨量值和图、行政区和水利片面雨量值和图。最后根据以上确定的计算方法和 2007—2015 年 24 个暴雨个例面雨量计算结果,基于 .NET Framework 4.0 基础架构软件开发平台,

使用 Microsoft Visual Studio 2012 和 Microsoft Visual Studio 软件开发工具制作“基于雷达资料暴雨面雨量自动化计算查询系统”,系统包含暴雨面雨量历史查询系统和暴雨面雨量自动化计算系统,可供业务科研人员实时查询计算使用。

(4) 以网格雨量代替测站雨量将是今后精确计算暴雨区域面雨量的主要发展方向。但是暴雨区域内雷达网格估测雨量与实际雨量相比,存在着一定误差,在雨量较大的小时段这种情况更显著,通过订正经过质量控制的实测雨量资料,也只能尽可能地减小误差,还不能完全消除。今后在雷达估算雨量综合修正方面还有许多工作可以深入研究。

致谢:上海中心气象台戴建华和陶岚提供的 24 个典型暴雨雷达定量降水估测(QPE)产品。

参考文献

- 曹晓岗,王慧,2016.“8·23-24”上海远距离台风大暴雨影响分析[J].气象,42(10):1184-1196.
- 方慈安,潘志祥,叶成志,等,2003.几种流域面雨量计算方法的比较[J].气象,29(7):23-27.
- 傅朝,杨晓军,周晓军,等,2015.2013年6月19—20日甘肃陇东南暖区暴雨多普勒雷达特征分析[J].气象,41(9):1095-1103.
- 贺芳芳,赵兵科,2009.近30年上海地区暴雨的气候变化特征[J].地球科学进展,24(11):1260-1267.
- 何健,王春林,毛夏,等,2006.利用雷达回波与GIS技术反演面雨量研究[J].气象科技,34(3):336-339.
- 孔凡超,赵庆海,李江波,2016.2013年7月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J].气象,42(5):578-588.
- 潘永地,姚益平,2005.地面雨量计结合卫星水汽通道资料估算面降水量[J].气象,30(9):28-30.
- 史玉光,孙照渤,杨青,2008.新疆区域面雨量分布特征及其变化规律[J].应用气象学报,19(3):326-332.
- 徐晶,林建,姚学祥,等,2001.七大江河流域面雨量计算方法及应用[J].气象,27(11):13-16,51.
- 徐卫忠,史军,徐家良,2013.上海短历时设计暴雨强度的时空分布特征[J].上海水务,(2):1-4.
- 杨扬,戚建国,1995.数字卫星云图估算面雨量的应用试验[J].气象,21(3):35-39.
- 喻谦花,郑士林,吴葵,等,2016.局部大暴雨形成的机理与中尺度分析[J].气象,42(6):686-695.
- 郁淑华,2001.面雨量计算方法的比较分析[J].四川气象,21(3):3-5.
- 翟家瑞,1990.网格点计算面平均雨量的方法及其改进[J].人民黄河,(4):26-28.
- 张行南,程晓红,2005.网格法在流域面雨量计算中的应用研究[J].东北水利水电,22(5):16-17,46.
- 支树林,陈娟,包慧濛,2015.一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析[J].气象,41(10):1203-1214.
- 钟利华,曾鹏,史彩霞,等,2017.西江流域面雨量与区域大气环流型关系[J].应用气象学报,28(4):470-480.
- 朱艺青,王振会,李南,等,2016.南京雷达数据的一致性分析和订正[J].气象学报,74(2):298-308.