

# 美国国家强风暴实验室定量降水估算系统简介

王斌<sup>1</sup> 张健<sup>2</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2 美国国家强风暴实验室, 美国)

**摘要:** 介绍了美国国家强风暴实验室 (NSSL) 研究开发的定量降水估算系统——全国拼图和多途径定量降水估算系统。对该系统的基本情况、各种产品模块和涉及的算法技术等进行了详细介绍, 也简单介绍了该系统的评估结果、应用效益和今后需要开展进一步研究的技术挑战。

**关键词:** 美国国家强风暴实验室, 定量降水估算, 天气雷达

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.005

## An Introduction to Quantitative Precipitation Estimation System in National Severe Storms Laboratory

Wang Bin<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>2</sup>

(1 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 National Severe Storms Laboratory, USA)

**Abstract:** The National Mosaic and Multi-sensor QPE (NMQ) system, developed and operated by the National Severe Storms Laboratory, is introduced in detail. This paper presents an overview of the NMQ system, and its main components. Some algorithms and techniques related to each module of the system are described. In addition, some evaluation results, applications and future technological challenges are mentioned simply.

**Keywords:** NSSL, QPE, weather radar

### 1 引言

美国国家强风暴实验室 (National Severe Storms Laboratory, NSSL), 是美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 直属的七个实验室之一。该实验室位于美国中部的俄克拉荷马州诺曼市 (Norman City, Oklahoma State), 主要致力于强烈天气的预警和预报研究。NSSL在科学研究和技术开发上主要涉及3个研究方向, 分别为气象雷达研究和开发、灾害天气研究以及水文气象研究, 其中水文气象研究主要包括定量降水估算技术开发和洪水、泥石流等预测预警技术开发。本文即对NSSL近几年研究开发的定量降水估算 (QPE) 系统进行介绍。

### 2 全国拼图和多途径定量降水估算系统概况

作为NSSL进行定量降水估算实时运行和评估的综合技术集成平台, 全国拼图和多途径定量降水估算系统 (National Mosaic and Multi-sensor QPE system,

简称NMQ系统) 于2006年开始准业务运行<sup>[1]</sup>。NMQ系统以美国天气局业务雷达CRAFT数据网络为基础<sup>[2]</sup>, 融合不同观测网络的数据, 形成: (1) 高分辨率的全国多途径探测定量降水估算 (QPE) 产品, 应用于突发性洪水、大范围洪水的预警和水资源管理等; (2) 高分辨率全国3D网格化雷达反射率产品, 应用于资料同化、数值预报模式检验以及航空气象产品开发等。该系统集成了美国140部WSR-88D雷达和加拿大31部C波段天气雷达的基数据。此外, NMQ系统使用快速循环更新 (RUC) 模式分析场和水文气象自动化数据系统 (HADS) 等产品用于QPE计算和评估。

NMQ系统是完全自动化和实时运行的。该系统生成高分辨率3D反射率拼图格点数据 (31个垂直层) 和一系列强天气和QPE产品, 区域为美国大陆和加拿大南部, 时间分辨率为2.5min, 空间分辨率1km。目前, 该系统还保存了3年的产品归档文件。系统产品提供给政府部门、大学、研究机构和私人单位, 实时地用于各种气象、航空和水文气象需求。此外, NMQ系统有一个基于WEB网页形式的评估工具箱, 集成了许多业务化的QPE产品, 如雷达、雨量计和卫星QPE等, 与NMQ产品进行比较, 还可以实时地与独立雨量计数据进行比较。该WEB形式的评估系统也对美国天

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年2月17日  
 第一作者: 王斌 (1972—), Email: wangbin@whihr.com.cn  
 资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201006042; GYHY20130604)

气象局预报员和公众开放使用。经多年发展，NMQ系统已成为一个获得广泛应用的雷达资料和QPE产品的服务和试验平台，在促进科研和业务的融合上发挥了良好的作用。

### 3 NMQ系统模块构成及主要技术

NMQ系统由4个模块构成，采用分布式计算设计（服务器节点数40），系统框架和运行流程如图1所示<sup>[1]</sup>。该系统运行中使用了多个数据来源，包括美国天气局雷达基数据（level-2），加拿大天气雷达网资料，RUC模式小时分析产品，闪电资料，HADS，区域雨量计网等。四个模块分别为单雷达处理、3D和2D雷达拼图、新一代QPE<sup>[3]</sup>和误差评估。

#### 3.1 单雷达数据处理模块

该模块基于单部雷达数据进行相应的处理，以此作为后续模块运行的基础。主要的数据处理包括反射率数据质量控制（QC），垂直反射率廓线（VPR）生成，单雷达直角坐标网格转换，以及单雷达混合扫描反射率（SHSR）生成。

##### 3.1.1 反射率数据质量控制

单雷达数据的质量控制（QC）包括前处理、神经网络算法和后处理，能够基本去除非降水回波，如晴空回波、生物回波（鸟、蝙蝠和昆虫）、太阳干扰、地面杂波、电子干扰和异常传输回波（AP）等。神经网络QC方法基于反射率数据的3D空间特征<sup>[4-5]</sup>，例如强度、梯度、纹理和雷达回波厚度等，经过人机交互的训练优化过程，建立起降水回波和非降水回波的识别机制。为更好地发挥神经网络的功能，雷达数据需要进行前处理和后处理，尽量减少观测质量差的数据对QC的干扰，以及对QC后的数据进一步做出过滤和判断，去除一些特定的难以简单去除的非降水回

波。在前处理中，首先去除那些雷达库数据中受到明显遮挡或太接近地物的数据（例如高于地面不到50m的库数据）。基于雷达扫描模式和气象环境数据，利用时间和空间图像过滤器和启发式判断法<sup>[6]</sup>，去除特定的非降水回波，如斑点、太阳干扰、晴空回波、生物回波等。例如，通过比较两个连续的雷达体扫数据中大于某个强度的回波总面积，如果发现两者的差值超出了设定的阈值（突然增大），那么就认为第二个体扫有误，数据将被忽略。

NMQ系统针对不同类型雷达采用的质控方法也有差别，以保证有良好质量的反射率数据生成拼图格点数据。例如，针对加拿大C波段雷达开发了一个统计式的杂波去除模块，以移除低仰角回波的固定地物杂波<sup>[7]</sup>。

##### 3.1.2 单雷达直角坐标网格转换

经过质量控制后，雷达数据从初始的球坐标系插值到直角坐标系统中，雷达站为坐标中心点，投影方式为等距圆柱地图投影。对于WSR-88D雷达，直角坐标网格水平范围从460（海岸雷达）~300km（内陆雷达）；水平分辨率为0.01°（大约1km×1km）；垂直方向31层，海拔高度从500m~18km。插值方法在方位—距离平面采用最近邻居法，在仰角方向采用指数权重法<sup>[8-9]</sup>。坐标转换时在雷达体扫的最低和最高仰角处，当网格点位置超过（低于或高于）波束宽度一半时，则不做外推插值。

##### 3.1.3 垂直反射率廓线生成

垂直反射率廓线（VPR）由质控后的极坐标数据反演而来，在雷达较近的距离区间内，对一个环形区域的雷达体扫所有仰角数据进行各高度上的平均，获得VPR<sup>[10]</sup>。VPR在判别暖性降水过程时很有作用，可以生成更准确的QPE产品<sup>[11]</sup>。不同降水方案类型的VPR如图2所示<sup>[1]</sup>。对流降水的VPR显示最大反射率位于抬升凝结高度（大约1.5km，由探空计算而来），表明大雨滴在云中出現碰并增长。该高度之下反射率随高度降低而减少，表明雨滴在蒸发<sup>[1]</sup>。暖性降水VPR显示反射率随着高度降低而逐渐增加，表明云中有大量中等大小的雨滴在潮湿环境中持续增长<sup>[11]</sup>。图2b显示层状降水VPR曲线的亮带特征明显。在冷季层状降水中，雷达QPE经常表现出明显的高估，这是因为即使最低仰角的雷达波束也常处于亮带区域，获得的是被高估的反射率值。当雷达波束在相对更远距离位于亮带区域高度以上，由于是云中冰粒子区，获得的是被低估的反射率值，因此导致低估降水。在NMQ系统中，订正由于回波亮带造成的QPE误差方法见文

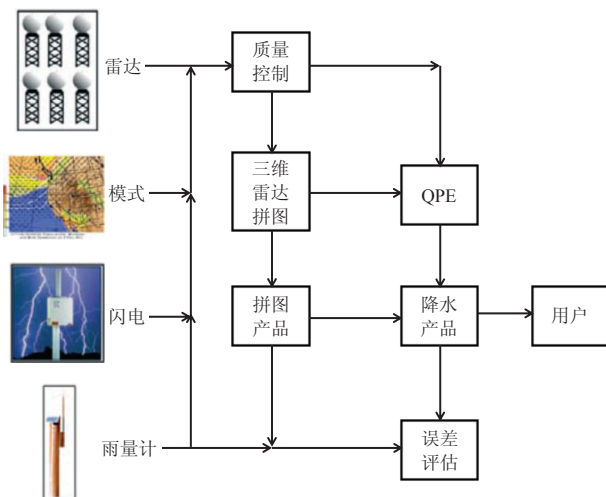


图1 NMQ系统构成框架和运行流程图

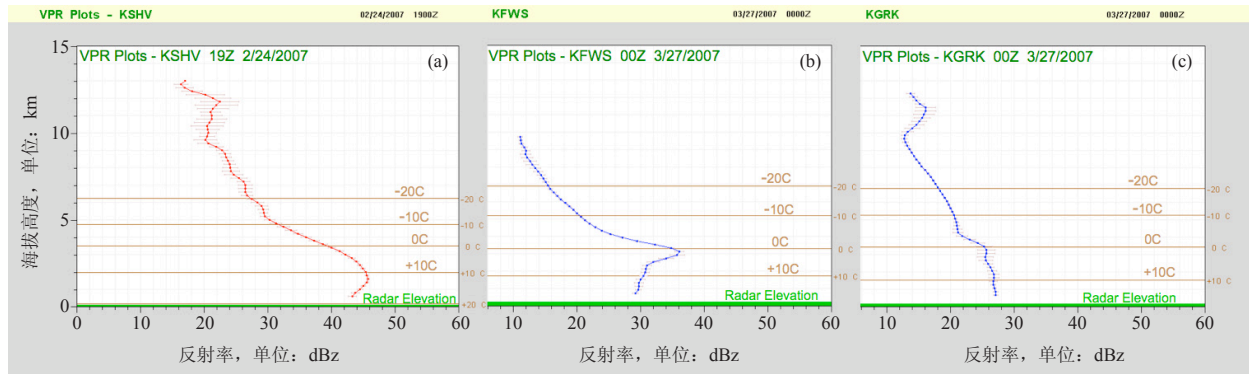


图2 不同降水类型的VPR曲线图(水平线代表环境气温,单位:°C)

(a) 对流降水; (b) 层状降水; (c) 暖性降水

献[12],且实现了实时运行。

在冬季融化层回波亮带高度较低,尤其在山地,容易被地形遮挡,导致WSR-88D雷达无法探测到亮带底,使得VPR的计算有很大误差。要获得冬季层状降水(雪)正确的VPR,还需要配合使用其他探测手段对雷达VPR进行订正。Wen等<sup>[13]</sup>、Qi等<sup>[14]</sup>尝试使用TRMM卫星的PR雷达反演的VPR,将其转换为S波段雷达VPR,并与地基雷达VPR相融合,获得新的雷达VPR。经过大量个例检验表明该方法能有效地减少雷达QPE高估的现象。Qi等<sup>[15]</sup>还将这种方法应用到中尺度对流系统(MCS)的VPR订正中,改善了雷达定量估算MCS大范围降雨的误差。

### 3.1.4 单雷达混合扫描反射率

单部雷达反射率数据经过QC后,将能够有效获取的最低海拔高度上雷达反射率库数据构成一个二维的混合扫描反射率场,即“Single radar Hybrid Scan Reflectivity (SHSR)”<sup>[16-17]</sup>。因为雷达波束高度随距离增加而增大,而且波束遮挡程度和地形高度也随空间而变化,因此SHSR场在不同地点的波束高度也不同。通常因为反射率的垂直变化,SHSR中某一个雷达库的高度越高,则单雷达反演的QPE准确度就越低。

## 3.2 三维反射率拼图和强天气产品

多部雷达的独立三维直角坐标网格反射率数据通过合并最终形成反射率三维拼图,该产品覆盖美国大陆和加拿大南部。拼图区域为130°—60°W,北纬20°—55°N。网格为等距圆柱地图投影,分辨率为0.01°×0.01°。东西方向的分辨率在南部边界大约为1.045km,北部边界大约为0.638km。南北方向的分辨率大约为1.112km。当某一个网格单元有多部雷达都能有效观测时,则采用指数距离加权平均<sup>[8]</sup>。NMQ系统可以灵活地集成不同雷达网的数据。目前的实时数据除美国WSR-88D雷达外,还有31部加拿大雷达、2

部TDWR雷达和1部电视台雷达。目前正在研究如何将移动雷达观测数据也纳入NMQ系统中,例如CASA雷达网<sup>[18]</sup>。

NMQ系统还生成一系列强天气产品,包括强烈冰雹概率(POSH)<sup>[19]</sup>,最大期望冰雹尺寸(直径)(MEHS)<sup>[19]</sup>,18dBz回波顶(ETP),垂直积分液态水(VIL)<sup>[20]</sup>,VIL密度(VILD)<sup>[21]</sup>等。所有产品都结合三维拼图数据和RUC系统的三维温度分析场数据进行计算。

## 3.3 新一代QPE产品

NMQ系统的关键组成部分就是新一代QPE产品,简称Q2<sup>[3]</sup>,它包括降水类型自动分类和多途径QPE产品,时间跨度从瞬时雨强到72h累积雨量。多途径QPE产品包括单纯基于雷达QPE、经过雨量计订正的雷达QPE、单纯基于雨量计QPE、基于雨量计、地形和降水气候分布的QPE。

### 3.3.1 混合扫描反射率拼图

基于单雷达SHSR,经过组合而成HSR拼图。HSR拼图由SHSR加权获得,具体公式为:

$$HSR = \frac{\sum_i W_L^i \times W_H^i \times SHSR^i}{\sum_i W_L^i \times W_H^i} \quad (1)$$

$$W_L = e^{\left(-\frac{d^2}{L^2}\right)} \quad (2)$$

$$W_H = e^{\left(-\frac{h}{H^2}\right)} \quad (3)$$

其中, $W_L$ 为水平权重函数, $W_H$ 为垂直权重函数, $i$ 表示雷达标识号。水平权重函数中变量 $d$ 表示格点与雷达之间的距离,垂直权重函数中变量 $h$ 表示SHSR库所在的海拔高度。 $L$ 和 $H$ 分别为水平和垂直方向的尺度因子。因为两部雷达由于标定问题、波束采样特征不同而造成在同一位置上的观测会出现不同。NMQ系统使用的插值方法与最近邻居法相比,能够保证QPE场的

水平连续性，而后者在插值与两部雷达成等距离的中间位置回波时会有反射率值不连续现象的出现。

### 3.3.2 降水类型的分类

雷达估算降水的准确性非常依赖于Z-R关系的正确与否。即使降水时间、地点都一样，Z-R关系的不同也会导致QPE的误差。目前WSR-88D雷达业务降雨估算算法中，使用的是单一Z-R关系，范围为230km×230km<sup>[17]</sup>。在同一降水事件中，在单雷达观测范围内，多种降水类型的同时存在是经常出现的现象。如果只采用单一的Z-R关系，QPE的误差就难以避免。因此若要较好地解决此类问题，就有必要采用自动化的降雨分类算法，采用组合式的Z-R关系来估算降水。NMQ系统的降水分类算法包括一系列的物理判断依据，针对每个网格点，总共分为5种降水类型而进行识别，包括层状降水，对流降水，暖性降水，降雹和降雪。算法流程如图3所示<sup>[1]</sup>。

在相对温暖和潮湿的环境中，降水强度很高，往往造成突发性洪水，这种降水类型即为暖性降水（或热带降水）。由于这种类型降水效率很高，常用的Z-R关系倾向于低估降雨量，所以需要针对这一降水类型，采用不同的Z-R关系，而使用的前提就是能够正确识别。NMQ系统的暖性降水识别的做法是检查每部雷达生成的小时平均VPR曲线，如果在冻结层高度以下的VPR斜率为负（即反射率随高度降低而增大），即判断为暖性降水<sup>[11]</sup>。如果回波强度大于设定阈值（缺省为30dBz），且地面气温大于10℃，雷达观测范围无降雪或降雹，则该处回波被标识为暖性降水。与该回波位置相邻并且超过强度阈值的回波也都被标识为暖性降水。

对流降水的分类条件为（1）垂直方向上任何高度上只要出现回波强度大于50dBz；（2）-10℃所在高度上回波强度大于30dBz；（3）在最近的5min内，

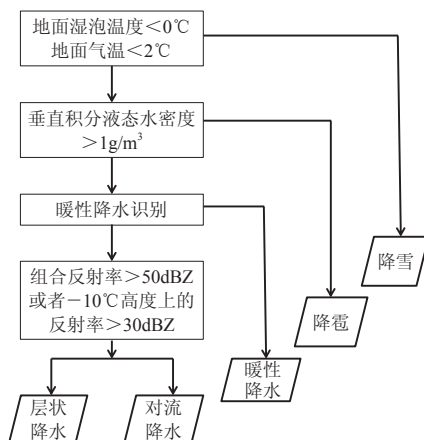


图3 NMQ系统降水分类算法

有一个或多个云对地闪电发生。上述条件有一项成立即可<sup>[10]</sup>。经过暖性和对流降水识别后，如果某一处回波既不是这两类降水，也不是降雪或降雹，那么就是层状降水。在分类识别时使用到的温度廓线来自于RUC小时分析数据。

### 3.3.3 单纯基于雷达 QPE

经过降水分类后，单纯基于雷达QPE相应分别采用4种Z-R关系。公式分别为：

$$\text{对流降水}^{[17]}: Z=300R^{1.4} \quad (4)$$

$$\text{层状降水}^{[22]}: Z=200R^{1.6} \quad (5)$$

$$\text{暖性降水}^{[23]}: Z=230R^{1.25} \quad (6)$$

$$\text{地面降雪}^{[24]}: Z=75R^{2.0} \quad (7)$$

式中，Z为反射率因子，单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ，R为降雨率或雪水当量，单位为 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。为了避免雷达QPE不合理地过高估计降雨率，系统对降水估算设定了回波强度的截取值，超过截取值的回波强度人为将其减少到等于截取值。其中对流降水的截取值为53dBz；如果有降雹发生时，则截取值为49dBz。对于暖性降水，截取值为50dBz。降雨率每隔2.5min计算一次，1和3h累积雨量每隔5min计算1次，使用2.5min降水进行累积。1h累积雨量则用来直接计算6、12、24、48和72h累积雨量。

### 3.3.4 经过雨量计订正的雷达 QPE

NMQ系统计算经过雨量计订正的雷达QPE的方法为：第一步计算雷达QPE对应每一个雨量计所在点的误差；第二步将误差插值到雷达QPE整个区域，得出每个雷达回波像素点上的QPE误差<sup>[25]</sup>。该方法的关键为插值权重系数的计算，NMQ系统采用的是距离反比权重计算方法<sup>[26]</sup>，但为了避免由于雨量点的稀疏导致远距离的雨量点权重较高这一现象，进行了一定的修正，即人为地将误差分布调整为正态分布，减少远距离雨量点的误差在订正时权重过高的现象。具体做法是在权重计算时引进了一个修正因子

$$\alpha = \sum_{i=1}^n e^{\frac{-d_i^2}{(D/2)^2}} \quad (8)$$

其中D表示误差计算的影响半径，n为在某一个雷达回波像素点周围影响半径D范围内的雨量点个数， $d_i$ 为雷达像素点与第i个雨量点之间的距离。如果 $\alpha$ 大于1，则表示在该范围内有足够的雨量点用于误差的插值。如果 $\alpha$ 小于1，则每一个权重系数都要乘以 $\alpha$ 。权重计算时距离的指数和影响半径的确定采用了交叉检验的最小二乘法进行计算<sup>[1]</sup>。在订正雷达QPE时还对雨量计数据进行了质量控制，避免异常高或低的雨量计数据影响误差分布的正确计算。

### 3.3.5 QPE 产品在山地区域的订正

在复杂地形里, 雷达QPE的准确性受限于几个因素, 如波束遮挡和波束越顶<sup>[27]</sup>、垂直反射率廓线变化<sup>[28-29]</sup>, 以及地形增强降雨作用等<sup>[30]</sup>。这些因素对山地冬季层状降水的影响更大, 因为云顶高度较低, 雷达波束的最低有效仰角容易受地形遮挡。为解决这一难题, NMQ系统采用了一种山地订正方法用于计算该区域的QPE产品<sup>[31]</sup>。该方法基于实时雨量计观测, 以及当地降水气候分布数据集<sup>[32]</sup>。该数据集是将山地上的降水、温度、数字化高程模型和复杂气候特征等多种因素集成在一起, 经过分析后得到连续的、数字网格化的关于降水的月、年和过程的气候分布。NMQ系统在订正时, 首先将山地降水月分布数据降尺度到小时雨量分布, 然后计算每个雨量点上实时小时雨量与气候分布降尺度后的小时雨量之比, 再将这个比值插值到NMQ系统的QPE网格上, 权重计算为距离平方反比法, 最后将插值后的比值分布场乘以降尺度的山地降水气候小时雨量分布场, 即得到经过订正的QPE产品。这种订正方法在那些雨量点稀疏或降水局地性很强的区域, 适用性还不高, 因为实际降水与气候分布之间的差异太大, 导致订正的误差比较大。

为了解决这一问题, Zhang等<sup>[33]</sup>针对美国西部复杂地形区域业务雷达QPE误差来源进行分析, 并开发出一个新的雷达QPE方法。新雷达QPE方案包括去除降水回波, 构建无缝隙混合扫描反射率场, 应用VPR订正反射率, 采用可调整的Z-R关系式计算降雨率等步骤。新的雷达QPE方法经过2005—2006年冬季6个月数据的检验, 结果表明相比目前的业务雷达QPE, 准确度提升明显, 误差降低43%, 均方根误差降低30%, 降水产品的空间连续性也更好。Cao等<sup>[34]</sup>统计了美国西部山区11年的由TRMM卫星降水雷达(PR)观测反演的美国西部山区降水垂直结构特征, 研究发现: 在山地区域, 降水类型是决定VPR特征最显著的因素; VPR的形状也影响到地面降雨强度; VPR特征存在季节依赖性, 春季和秋季具有很相似的特征; VPR特征的空间变化显示地形对垂直结构有作用。结果也说明VPR订正方法有助于改善复杂地形上的降水估算。Qi等<sup>[35]</sup>开发了一个新算法, 使用S波段降水廓线雷达(S-PROF), 计算出两套降雨垂直廓线作为参考标准, 一个针对海岸山地区域, 另一个针对锡拉山脉。使用降水廓线雷达VPR用来订正WSR-88D雷达QPE, 经测试表明对误差改善明显。

目前面临的最大问题是在典型山地的迎风坡上, 雷达QPE的误差还是难以显著降低, 这是因为业务雷达无法观测到局地降水增强现象, 导致雷达QPE的低

估。因此在这些区域增加探测设备的空间密度来提高QPE的准确度是解决上述问题的可能途径之一。

### 3.4 NMQ 系统评估和应用

NMQ系统一个非常有特色的模块就是进行实时数据显示和产品评估检验, 即NMQ检验系统(QVS)。该系统可以实时显示所有的产品(网址: <http://nmq.ou.edu>), 包括图形和地理信息(行政边界、雷达站、距离圈、地形、气象业务部门预警范围等)。QVS中用来检验QPE产品的数据包括各种雨量计观测网, 如美国天气局水文气象自动数据系统HADS、社区辅助降水(雪、冰雹)观测点、中尺度雨量站网Mesonet等。评估统计量包括QPE产品与独立雨量计观测数据之间的雨量比值、相关系数、均方根误差等, 这些量都是实时计算的。此外, 一些美国天气局下发的业务QPE产品也能在QVS中与NMQ系统的QPE产品进行相互比较, 如Stage II、Stage IV等<sup>[36]</sup>。通过多种QPE产品之间的对比, 以及QPE产品与独立雨量计观测数据的检验, 可以更好地了解QPE误差的不确定性, 以及不同类型的QPE产品的误差表现差异, 这为融合多种产品形成优化的多途径QPE产品提供了一种便捷的技术手段。Chen等<sup>[37]</sup>对比统计了2009年12月—2010年11月期间Q2产品与美国天气局业务雷达QPE产品Stage II和Stage IV的差异。结果表明Q2的雷达QPE产品的日降水量与Stage II的同类产品相比年平均偏差>8%, 但Stage II的随机误差更高。日降水量的均方根误差Stage II为4.5mm, Q2为1.1mm, 相关系数Stage II为0.20, Q2为0.73。Q2的降水分类和可调整的Z-R关系算法有效地减少了一些地区的误差, 如美国阿帕拉契山脉东部地区。

QVS中还归档保存了近3年的NMQ系统的主要产品, 以供用户下载使用。目前NMQ系统的用户包括政府部门、大学科研机构 and 私人单位, 如3D雷达反射率拼图产品在NCEP中用于RUC模式的数据同化, 显著提高了0~6h定量降水的预报准确率<sup>[38]</sup>。3D雷达反射率拼图产品在航空结冰威胁预警中也得到使用<sup>[39]</sup>。

### 3.5 NMQ 系统中的双偏振雷达产品

自2010年以来, 美国开展了WSR-88D雷达网的双偏振功能全面升级。以NSSL为主的科研团队开发出一系列的双偏振雷达资料应用产品, 并在2012年开始准业务运行。目前NMQ系统上也集成了一些双偏振雷达产品实时运行。这些产品包括: (1) QC后的4个仰角的双偏振基数据; (2) 降水粒子分类<sup>[40]</sup>, 共分为8种, 有小一中雨、暴雨、雨雹混合、大雨滴、湿雪、干雪、冰晶和霰; (3) 双偏振雷达QPE<sup>[41]</sup>, 包括雨强

和1h、24h累积雨量。这些产品在QVS系统经过充分评估后将被整合到新一代NMQ系统中。

#### 4 结论

美国国家强风暴实验室开发并运行的全国拼图和多途径定量降水估算系统经过多年发展,已实现高时空分辨率的雷达三维拼图和定量降水估算产品实时运行,与常规的业务雷达QPE相比,也有明显的改善,在科研和业务应用上取得了良好的效益。目前存在的待解决的问题主要包括反射率质量控制的进一步改进,如何完善业务雷达网无法覆盖区域的拼图方法,在山地地区如何实时订正由于垂直反射率廓线变化导致的QPE误差,如何结合双偏振雷达技术,进一步完善降水分类方法和更好地选择合适的Z-R关系等。这些问题的解决将成为NMQ系统未来研发计划的重点目标。

#### 参考文献

- [1] Zhang J, et al. National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) System: Description, results, and future plans. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92: 1321-1338.
- [2] Kelleher K E, et al. A supplement to project CRAFT: A Real-Time Delivery System for Nexrad Level Via The Internet. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: s5-s9.
- [3] Vasiloff S V, et al. Improving QPE and very short term QPF: An initiative for a community-wide integrated approach. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 1899-1911.
- [4] Lakshmanan V, Fritz A, Smith T, et al. An Automated technique to quality control radar reflectivity data. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46: 288-305.
- [5] Lakshmanan V, Zhang J, Howard K. A technique to censor biological echoes in radar reflectivity data. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49: 453-462.
- [6] Zhang J, Wang S, Clarke B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure. 11<sup>th</sup> Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA. *Amer Meteor Soc*, 2004.
- [7] Lakshmanan V, Zhang J, Hondl K, et al. A statistical approach to mitigating persistent clutter in radar reflectivity data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 652-662.
- [8] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *J Atmos Oceanic Technol*, 2005, 22: 30-42.
- [9] Lakshmanan V, Smith T, Hondl K, et al. A real-time, three-dimensional, rapidly updating, heterogeneous radar merger technique for reflectivity, velocity, and derived products. *Wea Forecasting*, 2006, 21: 802-823.
- [10] Zhang J, Langston C, Howard K. Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D. *J Atmos Oceanic Technol*, 2008, 25: 1859-1872.
- [11] Xu X Y, Howard K, Zhang J. An automated radar technique for the identification of tropical precipitation. *J Hydrometeorol*, 2008, 9: 885-902.
- [12] Zhang J, Qi Y C. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE. *J Hydrometeorol*, 2010, 11: 1157-1171.
- [13] Wen Y X, Cao Q, Kirstetter P E, et al. Incorporating NASA spaceborne radar data into NOAA national mosaic QPE system for improved precipitation measurement: A physically based VPR identification and enhancement method. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1293-1307.
- [14] Qi Y C, Zhang J. Correction of radar QPE errors associated with low and partially observed brightband layers. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1933-1943.
- [15] Qi Y C, Zhang J, Cao Q, et al. Correction of radar QPE errors for nonuniform VPRs in mesoscale convective systems using TRMM observations. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1672-1682.
- [16] O'Bannon T. Using a 'terrain-based' hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates. 28th Conf on Radar Meteorology, Austin, TX. *Amer Meteor Soc*, 1997.
- [17] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 377-395.
- [18] McLaughlin D J, et al. Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for improved detection, understanding and prediction of atmospheric hazards. Proc Ninth Symp on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), San Diego, CA. *Amer Meteor Soc*, 2005.
- [19] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 286-303.
- [20] Greene D R, Clark R A. Vertically integrated liquid water: A new analysis tool. *Mon Wea Rev*, 1972, 100: 548-552.
- [21] Amburn S A, Wolf P L. VIL density as a hail indicator. *Wea Forecasting*, 1997, 12: 473-478.
- [22] Marshall J S, Hirschfeld W, Gunn K L S. Advances in radar weather. *Adv Geoph*, 1955, 2: 1-56.
- [23] Rosenfeld D, Wolff D B, Atlas D. General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. *J Appl Meteorol*, 1993, 32: 50-72.
- [24] Radar Operations Center. Guidance on selecting Z-R relationships. 1999. [http://www.roc.noaa.gov/ops/z2r\\_osf5.asp](http://www.roc.noaa.gov/ops/z2r_osf5.asp)
- [25] Ware E C. Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. New York: Cornell University, 2005.
- [26] Simanton J R, Osborn H B. Reciprocal distance estimate of point rainfall. *J Hydraul Div Amer Soc Civ Eng*, 1980, 106: 1242-1246.
- [27] Maddox R A, Zhang J, Gourley J J, et al. Weather radar coverage over the contiguous United States. *Wea Forecasting*, 2002, 17: 927-934.
- [28] Joss J, Waldvogel A. Precipitation measurements and hydrology. In: Atlas D. *Radar in meteorology*. *Amer Meteor Soc*, 1990.
- [29] Germann U, Joss J. Mesobeta profiles to extrapolate radar precipitation measurements above the alps to the ground level. *J Appl Meteorol*, 2002, 41: 542-557.
- [30] Kitchen M, Brown R, Davies A G. Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation. *QJR Meteorol Soc*, 1994, 120: 1231-1254.
- [31] Schaake J, Henkel A, Cong S. Application of PRISM climatologies for hydrologic modeling and forecasting in the western U.S. 18<sup>th</sup> Conf on Hydrology, Seattle, WA. *Amer Meteor Soc*, 2004.
- [32] Daly C, Neilson R P, Phillips D L. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *J Appl Meteorol*, 1994, 33: 140-158.
- [33] Zhang J, Qi Y C, Kingsmill D, et al. Radar-based quantitative precipitation estimation for the cool season in complex terrain: case studies from the NOAA hydrometeorology testbed. *J Hydrometeorol*, 2012, 13: 1836-1854.
- [34] Cao Q, Hong Y, Gourley J J, et al. Statistical and physical analysis of the vertical structure of precipitation in the mountainous west region of the united states using 11+ years of spaceborne observations from TRMM precipitation radar. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52: 408-424.
- [35] Qi Y C, Zhang J, Kaney B, et al. Improving WSR-88D Radar QPE for Orographic Precipitation Using Profiler Observations. *J Hydrometeorol*, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-13-0131.1>
- [36] Lin Y, Mitchell K E. The NCEP stage II/IV hourly precipitation analyses: Development and applications. 19<sup>th</sup> Conf on Hydrology, San Diego, CA. *Amer Meteor Soc*, 2005.
- [37] Chen S, et al. Evaluation and uncertainty estimation of NOAA/NSSL next-generation national mosaic quantitative precipitation estimation product (q2) over the continental united states. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1308-1322.
- [38] Weygandt S S, Benjamin S G, Brown J M. Radar reflectivity-based initialization of precipitation systems using a diabatic digital filter. 33<sup>rd</sup> Int Radar Conf, Carins QLD, Australia. *Amer Meteor Soc*, 2007.

- [39] Serke D, McDonough F, Politovich M K. Analysis of 3-D NEXRAD mosaic reflectivity data collocated with research aircraft and satellite data: Implications on in-flight icing. 13<sup>th</sup> Conf on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, New Orleans, LA. Amer Meteor Soc, 2008.
- [40] Vivekanandan J, Ellis S M, Oye R, et al. Cloud microphysics

- retrieval using S-band dual-polarization radar measurements. Bull Amer Meteor Soc, 1999, 80: 381-388.
- [41] Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. Bull Amer Meteor Soc, 2005, 86: 809-824.

## 编辑走台站：广西气象之声

### ■ 本刊编辑部

【编者按】2014年4月初，恰逢今年华南前汛期首次大范围强对流天气过程发生后，编辑部的3位编辑应邀走访了广西中东部的4个地级气象局、2个县级局和2个观测站。所到之处，尽览基层气象工作人员坚守自己的岗位，尽职尽责。他们也坦然谈到气象现代化事业建设，亮出了自己的观点和看法。我们在这里编辑、整理，与读者一起思考。

——“目前的气象类期刊不少，论文产量颇丰，但是我们很难看到针对某些特定的高影响天气的理论和经验性的研究，这类研究其实更具有启发性，也是实际业务工作中更需要的。”

from 地局首席预报员

——“推动基层的科研，不仅可行而且很必要。我们建议，气象系统应该组织一些针对基层业务难点的科研课题，联合县、地局业务人员开展针对性强的研究，并在业务预报中随时进行验证。这样的研究还能系列给出基层预报能力提高的主要科学问题，吸引更多的科学家开展有效地促进业务进步的研究。”

from 县气象局局长

——“就此次前汛期强降水过程来说，各种模式的预测虽然大都给出了降水区，但是24h以上的预报，往往给出雨区和时间“插花”（各不相同）的结果而且雨量预报不足。我们希望专家能够指导我们，不断认识各种模式针对不同类型的过程其预测能力的差别，当然，更期待模式与本地地形和观测数据更多的融合，能力不断改进。”

from 地局预报员

——“2014年3月末，两广地区前汛期这场暴雨，雨量之大，几乎所有模式48h都没预报出来。我们认为这种暖区强降水一直是业务预报的难点，希望中国局能够组织专家开展科技攻关，让我们依靠自己的模式或手段，能够比较从容地开展预报服务。”

from 地局气象台台长



——“我们提出的‘无缝隙’理念，目前在地面探测上通过密集自动气象站初步获得实现，但这也带来了挑战。一方面目前的自动探测仪器，需要解决，如，防水技术，从而减轻维护仪器的负担和减少缺测率；另一方面，我们期待加密的观测记录能在预报业务中获得充分的利用，体现“无缝隙”资料的价值和尽快带来预报的‘无缝隙’。”

from 观测站站长、地局气象台台长

——“现在业务上精细化预报，还需要研究成果的支撑，例如，要给出每个6h预报结果，模式就要从目前的形势预报，向针对天气过程量化预报倾斜，而且不仅仅是第一个6h，还要给出之后若干时间段内的天气转化或新过程的预报结果。”

from 地局主管业务局长

——“地市局的预报员工作很繁忙，几乎每个值班人员都要同时负责好几个岗位的工作，但是他们却忙而不乱，每天需要完成的工作都规范的记录在一个本子上。我来体验基层预报工作，最想了解当地汛期气候特征，希望能多经历几次让当地预报员最为头疼的暖区降水和台风登陆过程，和这里的预报员合作把收获总结出来。”

from 中央气象台到广西地局交流的年轻预报员