

天气雷达定量估测降水研究进展

谷军霞 师春香 潘咏

(国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 天气雷达探测资料具有时空分辨率高的特点, 对于中小尺度天气监测、气候分析以及高时空分辨率的气象服务具有重要意义。自20世纪末起, 随着IT技术发展和多普勒天气雷达网布设, 多个国家相继研制了各自的雷达定量估测降水产品。从业务上应用的雷达定量估测降水关键技术与产品两方面对国内外相关研究进展进行归纳, 着重解析了美国最新业务化的MRMS (Multi-Radar Multi-Sensor System) 系统及关键技术。从雷达QPE (Quantitative Precipitation Estimation) 技术发展来看, 双偏振量质量控制、反射率垂直廓线订正、波束阻挡补偿、降水类型分类、双偏振量降水估计、雨量计偏差订正等新方法已在业务产品中应用。从雷达QPE业务产品发展来看, 产品空间分辨率已达到1 km以下 (甚至百米), 时间分辨率达到小时尺度以下 (甚至分钟级)。美国还在持续推进雷达QPE产品重处理, 以期形成长序列高时空分辨率产品。我国雷达QPE业务产品研制普遍采用Z-R关系估测降水率, 并由地面降水进行偏差订正的方法, 产品时空分辨也已达1 km/分钟-小时。但由于我国天气雷达型号多、标定不均一、存储计算能力限制等问题, 还未形成长序列的雷达QPE产品。因此, “气象资料质量控制及多源数据融合与再分析” 攻关任务提出了我国雷达QPE产品重处理计划, 拟利用长序列多源降水资料, 通过局部偏差订正技术、波束补偿技术等降低不同雷达空间不均一性, 最终生成全国组网的雷达QPE历史产品数据集。

关键词: 天气雷达, 定量估测降水, MRMS, 研究进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.008

Advances in Research of the Weather Radar Quantitative Precipitation Estimation

Gu Junxia, Shi Chunxiang, Pan Yang

(National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

Abstract: High-resolution weather radar data are needful for a wide range of use in meso-scale and micro-scale meteorology, in climatological applications and in high-resolution meteorological service. Since the last century, several countries have researched and developed multiple radar quantitative precipitation estimation (QPE) technologies and operation products, with the development of IT infrastructure and Doppler weather radar network. The recent advances in radar QPE researches and operation products are reviewed in this paper. There are some significant advances such as Multi-Radar Multi-Sensor System (MRMS) that was developed at NSSL(National Severe Storms Laboratory) and went into NWS (National Weather Service) operations in USA in 2014. Then, QPE methods and operation products are compared between in China and abroad. Finally, the research plan of our radar QPE reanalysis is outlined.

Keywords: weather radar, quantitative precipitation estimation, MRMS, research advances

0 引言

在高时空分辨率降水产品研制中, 天气雷达探测资料以其特有的优势变得举足轻重。自上世纪末起, 随着计算机技术、存储技术、通信设施及数字化天气雷达技术的发展, 使得利用计算机处理海量天气雷达探测资料成为可能, 美国^[1-2]、法国^[3-4]、德国、澳大

利亚等国家先后研制并发展了多种雷达定量估测降水 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 业务产品。目前, 雷达QPE业务产品的空间分辨率可达到数百米至1 km, 时间分辨率达到分钟-小时。近期, 美国等发达国家还开展了雷达QPE产品重处理项目, 研制时间上均一的长序列、高质量、高时空分辨率的降水产品。

我国于20世纪初开始雷达QPE产品研发, 研制出全国或区域组网的多种雷达QPE产品^[5-8]。自2013年底起, 中国气象局气象探测中心的“天气雷达基数据拼图系统”可实时生成全国组网的、1 km/h分辨率的雷

收稿日期: 2017年9月8日; 修回日期: 2017年12月15日

第一作者: 谷军霞 (1981—), Email: gujx@cma.gov.cn

资助信息: 国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”攻关任务

达QPE产品。

本文分别介绍了业务应用的国内外雷达QPE研制技术及产品进展，分析比较了国内外产品的不同。在此基础上，概述了我国雷达QPE产品重处理的研究计划。

1 国外雷达QPE业务产品研究进展

1.1 发展概况

表1列出了国外主要雷达QPE业务产品及相应关

键研制技术。从雷达QPE业务产品的时空属性来看，其分辨率已达到1 km、分钟级，空间覆盖一般为局地组网，序列长度最长的为美国StageII产品，已达20多年。从雷达QPE技术发展来看，反射率垂直廓线（Vertical Profile of Reflectivity, VPR）订正、降水类型分类、双偏振量质量控制（Dual-Polarization Radar Quality Control, dpQC）、双偏振量降水估计、雨量计偏差订正等新方法已在业务产品研制应用。

近年来，国际上多个国家进行了多普勒天气雷

表1 国外主要雷达QPE业务产品及研制技术列表
Table 1 Comparison of QPE products and methods among abroad countries

国家	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起始时间	时空分辨率	
美国	StageII ^[1]	地面杂波、异常回波、固定地面目标去除；零度层亮带检测；静态Z-R关系 ^[9-11]	降水量	美国本土	1994年	4 km, 1 h	
	StageIV ^[11]	地面雨量计偏差订正、人工质控、卫星填补、组网 ^[12-14]	降水量	美国本土	2001年	4 km, 1 h	
	Q3 ^[2]	dpQC、无缝混合扫描、波束阻挡订正、VPR订正、降水类型分类、Mountain Mapper、基于降水类型Z-R关系、雨量计偏差订正 ^[15-27]	降水率、降水量、误差	美国本土	2014年	1 km, 2 min	
法国	业务雷达降水	第1代	地物杂波抑制	降水	单部雷达	1997年	1 km, 15 min
		第2代 ^[3]	地物杂波抑制、VPR订正、波束阻挡订正	降水	法国组网	2007年	1 km, 5 min
		第3代 ^[4]	地物杂波抑制、VPR订正、波束阻挡订正、地面雨量计校准、偏振晴空回波去除及降水估计	降水	法国组网	2013年	1 km, 5 min
澳大利亚	雷达QPE产品	去除地面杂波、海量杂波；降水类型分类；基于卡尔曼滤波方法的地面雨量计校准	降水量	单部雷达		6 min	

达的双偏振技术升级。如，2013年4月，美国气象局（NWS）完成了122部雷达站的双偏振升级，2014年，美国联邦航空管理局（FAA）和美国国防部（DOD）的37部雷达也完成了双偏振升级。德国、法国等欧洲国家也正在进行双偏振雷达升级工作。利用双偏振量，可以提高对粒子类型的识别能力，从而提高区别非天气目标与雨、雪、冰雹等天气现象能力^[9]，并提高雷达定量降水估测的精度。目前，利用双偏振数据的进行质量控制及降水率估测成为一个重要的发展方向。

1.2 美国 MRMS 系统的雷达 QPE 产品

Q3产品是美国最新业务化的MRMS系统研制的雷达QPE产品，下文以此为代表，详细介绍国际上雷达QPE业务产品研制的先进技术。

MRMS系统由NSSL研制，并于2014年在NWS业务化运行^[2, 24]。MRMS系统中雷达QPE产品制作的输入数据包括：约180部雷达基数据、RAP模式数据、约10000站HADS地面雨量计数据、PRISM^[28]气候背景场数据等；输出降水产品包括：基于雷达QPE（Q3RAD）产品、基于雨量计QPE（Q3Gauge）产品、雨量计偏差订正后雷达QPE（Q3GC）产品、雨量计和降水气候场融合山区降水（Q3MM）产品等4类。其关键技术包括：无缝混合扫描反射率生成、降

水类型分类、降水率估测、地面雨量计订正技术等。

1) 无缝混合扫描反射率生成技术

混合扫描反射率（Hybrid Scan Reflectivity, HSR）指最低有效仰角（未被严重遮挡最低仰角）的反射率，是雷达定量估测降水的基础^[10]。MRMS系统无缝混合扫描反射率（Seamless HSR, SHSR）是根据地形对雷达波束的阻挡选择最低有效仰角而生成的，并进行了无缝处理，以解决高空间分辨率下的波束缝隙问题，同时进行了雷达反射率因子质量控制去除非气象回波，并利用波速阻挡补偿、垂直廓线订正方法提高回波的均一性，详见表2。

2) 降水类型分类技术

MRMS系统中，利用来自模式的环境变量（地表温度、湿球温度、结冰层的高度）、强天气产品（-10℃的反射率、VIL、冰雹最大期望尺寸）、无缝混合扫描反射率、AVPR、暖雨概率等多源数据，基于决策树方法将降水分为7类。分类技术流程见图1，其关键算法包括热带气旋检测^[23]、暖雨概率计算^[16]等。输出的降水类型场每2 min更新一次。

3) 降水率估测技术及Q3RAD产品

天气雷达间接测量降水率，需由Z-R经验公式将反射率因子（Z）反演为降水率（R）。不同类型降水粒子相态、大小不同，对雷达波散射能力不同，所以

表2 MRMS的SHSR算法步骤表
Table 2 Algorithm of SHSR in MRMS

输入数据	单部雷达基数据（反射率因子、相关系数）、回波顶高、雷达波束阻挡率、雷达站温度廓线
输出数据	美国大陆（CONUS）组网的无缝混合扫描反射率场及其高度场（直角坐标系，1kmx1km，更新周期：2 min）
关键技术步骤	<p>dpQC^[19]/QCNN^[17]：质量控制，利用“相关系数滤波+启发式规则”方法去除非降水回波。</p> <p>CPBB（compensation for partial beam blockage）^[15]：根据波束阻挡率计算补偿因子，对阻挡率小于50%波束进行功率补偿。</p> <p>CSPS（convective/stratiform precipitation separation）^[18]：基于垂直液态水含量（vertically integrated liquid water, VIL）等特征、利用“决策树”方法进行对流云和层状云降水区域分类。</p> <p>TiltAVPR：对融化层影响的层状云降水区域进行似垂直廓线订正^[2, 25-26]。</p> <p>HSR：根据地形计算波束阻挡率及最低有效仰角，生成单部雷达极坐标下混合扫描反射率^[29]。</p> <p>SHSR^[20]：利用插值、领域替换等方法进行无缝处理，生成无缝混合扫描反射率场。</p> <p>Mosaic：进行坐标系转换、组网拼图，生成组网的无缝混合扫描反射率场及其高度场。</p>

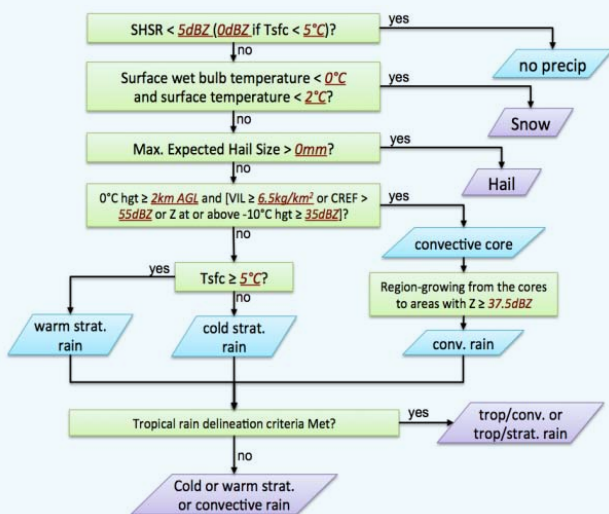


图1 MRMS的地表降水分类技术流程图^[2]

Fig. 1 Precipitation classification analysis in MRMS^[2]

应采用不同Z-R关系式。MRMS系统中根据降水类型场，采用相应Z-R关系计算瞬时降水率^[2]，降水率场每2 min更新一次。表3为MRMS系统除热带气旋类降水外其他降水类型的Z-R计算公式。热带气旋类降水的Z-R关系式与暖雨概率值^[16]、空间位置、季节等因素相关。

表3 MRMS系统的Z-R关系式（除热带气旋类降水）

Table 3 The Z-R equations in MEMS (except tropical rain)

地表降水类型	Z-R关系式	降水率上限值	反射率上限值
暖层云降水	$Z = 75 * R^{2.0}$ $Z \leq 40$ dBz $Z = 200 * R^{1.6}$ $Z > 40$ dBz	1.9 in/h	50 dBz
冷层云降水			
对流降水	$Z = 300 * R^{1.4}$	4.1 in/h	53 dBz
冰雹	$Z = 300 * R^{1.4}$	2.1 in/h	49 dBz
雪	$Z = 75 * R^{2.0}$	—	—

Q3RAD为小时累积降水量场产品，由前60 min得到的降水率场积分而得，每2 min更新一次。在Q3RAD产品中，去除了小于0.01 in的降水，以降低小降水的空报率。

4) 双偏振量的降水估测

目前，虽然MRMS业务系统中的降水率估测还未

使用双偏振量，但利用差分反射率因子 Z_{DR} ^[30-31]、比差分相位 K_{DP} ^[32-36]、比衰减因子 A ^[37-38]等双偏振量进行降水率估测的算法已进行了多年的研究。 $R-Z_{DR}$ 关系在某些区域呈现出降水估测的优势^[2]，但 $R-Z_{DR}$ 关系对雷达标定的偏差比较敏感； K_{DP} 和 R 对雷达标定偏差及由于波速阻挡造成的偏差较不敏感，但对于不同降水类型的估测性能不稳定^[2]。因此，MRMS系统计划在业务系统中集成多种双偏振雷达QPE算法（表4）。

5) 局地雨量计订正技术及Q3GC产品

由于Z-R经验公式的准确性、雷达扫描与地面降水的差别等问题，使得雷达QPE产品与地面观测降水之间存在偏差，一般使用地面雨量计进行订正。MRMS系统利用质控后HADS雨量计小时降水量订正Q3RAD产品^[22]。首先，将CONUS分成多个子区域，在每个子区域，利用IDW（Inverse Distance Weighting）方法^[39]进行雨量计订正，参数通过交叉检验方法选择。之后，将各子区域订正后的雷达QPE合并，得到局部偏差订正的Q3GC（Local Gauge Bias Corrected Radar QPE）产品。Q3GC产品每小时更新一次，时效滞后约1.5 h。

6) 山区降水产品生成技术及Q3MM产品

山区的地形遮挡影响了雷达QPE产品质量。为解决这一问题，MRMS提出Mountain Mapper方法^[21]。利用质控后的站点雨量计小时降水量和气候降水背景月值数据生成西部山区QPE产品，称为Q3MM（Mountain Mapper QPE）产品。

7) 雨量计插值降水产品生成技术及Q3Gauge产品

小时雨量计插值降水产品（Q3Gauge）使用质控后的HADS雨量站数据，利用IDW插值方法而生成。

8) 产品初步评估

以雨—冰雹—雪社区协作网（CoCoRaHS，<http://www.cocorahs.org/>）^[40]的雨量计日降水量作为参考真值，Chen等^[41]评估比较了四种雷达QPE产品的质量（表5），评估时间段为2014年全年，空间范围为CONUS。Stage II和Stage IV为美国天气局早期业务化的雷达定量估测降水产品，输入数据源包括雷达、

表4 主要双偏振雷达降水估测算法比较
Table 4 Polarimetric radar QPE methods

计算关系	使用变量	优点	缺点	在集合QPE中的应用
$R-A$	比衰减因子	对标定偏差和部分波束阻挡的影响不敏感	不能用于结冰和混合相态；对于小降水和零散降水的效果不如大范围的强降水	大范围降水
$R-K_{DP}$	比差分相位			冰雹或雨雹混合降水
VPR订正的 $R-Z$	反射率因子	解决零度层附近的估测偏差问题	对雷达标定偏差敏感	结冰或混合相态降水

表5 四种雷达QPE产品的输入数据源及时空分辨率比较^[41]
Table 5 Input data and temporal-spatial resolutions for four radar QPE products

产品	雷达输入	雨量计输入	卫星输入	模式输入	气候输入	人工输入	分辨率
Stage II	Yes	No	No	No	No	No	4 km, 1 h
Stage IV	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	4 km, 1 h
Q3Rad	Yes	No	No	Yes	No	No	1 km, 2 min
Q3GC	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	1 km, 1 h

雨量计、卫星和人工（质控），产品的空间分辨率为4 km。此外，Stage IV产品由各区域进行了人工质控，其数据源可能包括CoCoRaHS，所以评估结果可能不独立。

这四种雷达QPE产品的平均绝对误差时间序列曲线见图2，由此图可见：

① Q3RAD全年日降水量产品质量一致好于Stage II。

表6比较了美国两代QPE算法的不同，与Stage II产品相

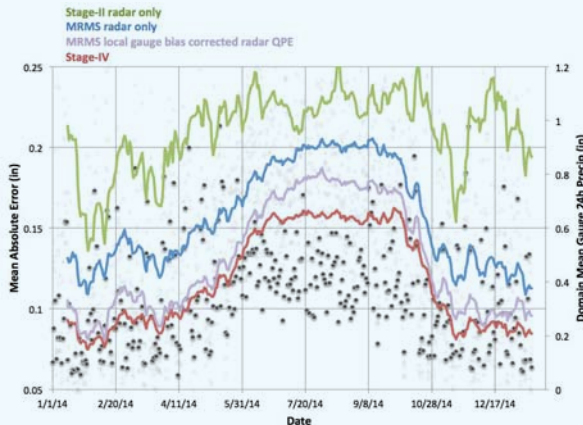


图2 美国雷达QPE产品的平均绝对误差时间序列图^[2]

Fig. 2 Variation of the mean-absolute-errors of four QPE products in USA^[2]

表6 美国两代雷达QPE产品算法比较

Table 6 Two generations of radar QPE methods in USA

QPE产品	Stage II (radar only)	Q3Rad (radar only)
质量控制方法	单偏振量质控	双偏振量质控
混合扫描反射率生成方法	基于地形	基于地形+无缝处理
Z-R关系计算方法	每部雷达一个Z-R关系	基于降水类型的Z-R关系，参数自适应选择
融化层处理方法	无	融化层检测及垂直廓线订正
组网方法	反距离加权平均	距离、高度的负指数加权平均

比，新一代的Q3RAD产品在质量控制、混合扫描反射率生成、降水类型分类、Z-R关系、融化层处理、组网方法等方面都有所改进。算法的改进带来了产品质量的改进。

② 冷季，Q3GC的日降水量产品质量与Stage IV产品相近；暖季，Q3GC的日降水量产品的平均绝对误差要高于Stage IV。

另外，与CoCoRaHS相比，MRMS系统雷达QPE产品在夏季表现为高估。一方面可能是对流降水误判为热带气旋；另一方面可能是在风速较高时，地面雨量计对降水测量不准确。

2 国内雷达QPE业务产品进展

2.1 发展概述

20世纪90年代中期，中国气象局正式将全相干多普勒天气雷达作为新一代天气雷达列入气象业务探测系统的发展规划，计划布设S波段和C波段多普勒天气雷达，构建国家新一代天气雷达站网。截至2016年底已经完成了全国233部新一代天气雷达建设。

2005年，随着中国气象局宽带网（CMAnet）的建设开通，新一代天气雷达站的基数据和产品数据开始由雷达站传输至国家气象信息中心并存档。之后，国内开展了天气雷达组网产品研发工作，研制出多种雷达定量估测降水产品。如气象探测中心“天气雷达基数据拼图系统”的全国组网MQPE产品、灾害天气短时临近预报系统（Severe Weather Automatically Nowcast System, SWAN）的区域组网QPE产品、部分省局研制的区域组网QPE产品（表7）。

表7 国内主要雷达QPE业务产品列表

Table 7 Domestic operational QPE products and methods

产品	雷达输入	雨量计输入	卫星输入	模式输入	气候输入	人工输入	分辨率	序列长度
气象探测中心MQPE	Yes	Yes	No	No	No	No	1 km, 1 h	2013年起
气象中心SWAN QPE	Yes	Yes	No	No	No	No	1 km, 6 min	实时
中国气象局武汉暴雨研究所、武汉中心气象台QPE ^[8]	Yes	Yes	No	No	No	No	1 km, 6 min	实时
安徽区域MQPE ^[7]	Yes	Yes	Yes	No	No	No	1 km, 1 h	实时

国内雷达QPE业务产品研制方面普遍采用Z-R关系估测降水率，并由地面降水进行偏差订正。产品空

间分辨率达到1 km、时间分辨率达到1 h，区域组网的产品时间分辨率可达到分钟级。但产品序列长度普遍较短，且输入数据源比较单一。

香港天文台2005年业务试运行“激流”系统（Rainstorm Analysis And Prediction Integrated Data Processing System, RAPIDS）^[42-44]利用高频雨量计资料动态校正 Z-I 关系来估测雷达降水，并实现了雷达外推临近预报和数值预报的定量降水预报融合，利用相位订正技术修正模式预报雨带的位置，并根据实况观测的雨量调整模式的降水强度，提高了0~6 h的定量降水预报效果。北京城市气象研究所引起了RAPIDS系统框架，并进一步发展了对数值模式定量降水预报所进行的强度和相位修正^[45]。

在雷达QPE技术研究方面，波束阻挡^[46-47]、融化层及反射率垂直廓线订正^[48]、降水类型分类Z-R关系^[49-51]、利用双偏振量估测降水^[52-54]等技术方法已取得一系列研究成果。另外，针对国内天气雷达的特殊问题，如C波段雨区衰减^[55]、青藏高原复杂地形^[56]、雷达标定不均^[57]也开展了相应的研究。随着我国双偏振雷达升级，以及这些先进方法鲁棒性、稳定性的不断提高和向业务转换，将有助于进一步提高国内雷达QPE业务产品的精度。

2.2 天气雷达基数据拼图系统的雷达 QPE 产品

中国气象局气象探测中心研发的“天气雷达基数据拼图系统”输入数据为雷达基数据和雨量计数据，输出OHP（单部雷达的一小时降水）、MQPE（全国组网定量估测降水）等单站或组网产品。系统整体数据流程为：雷达基数据和地面雨量数据推送到数据服务器，雨量计数据导入数据库供降水校正使用；之后，雷达基数据通过网络下载到各服务器进行单站产品生成；最后，单站产品生成后上传到组网服务器进行拼图，生成拼图产品。

该系统降水产品生成的关键技术包括：反射率因子质量控制、混合扫描反射率生成、降水率估测、雨量计校准等（图3）。反射率质控算法主要来自ROSE项目，主要质控处理包括：超折射回波消除（地物）、电磁径向干扰消除、海浪回波消除、晴空回波消除、孤立点回波消除、故障异常回波消除（圆饼、扇面）。混合扫描反射率则是取最低4个仰角层按距离组合得到，未采用地形阻挡信息^[58]。每部雷达实时统计四个季节Z-R关系，由Z-R关系将反射率转换为降水率。同时，用各时次地面雨量数据进行集成校正，采用的校正算法包括：平均值法、卡尔曼滤波和最优插值法。组网MQPE产品由时段内1 h降水累加得

到，目前提供1 h、3 h、6 h、12 h和24 h的降水估测。

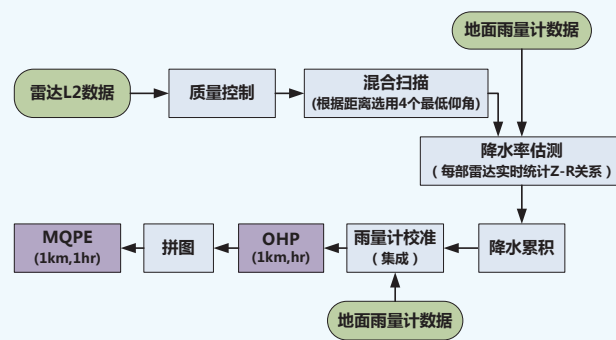


图3 天气雷达基数据拼图系统中雷达降水产品生成流程图

Fig. 3 Sketch map of radar QPE in China

2.3 SWAN 系统的雷达 QPE 产品

中国气象局2008年组织国家气象中心、广东、湖北、安徽等地联合研制SWAN系统，建立了全国通用的短时临近预报业务平台^[6]，可生成质量控制后的三维雷达组网产品、定量降水估测产品等。

SWAN系统中雷达定量估测降水关键技术包括：雷达体扫资料的质量控制技术^[59]、基于地形的混合扫描填充技术^[60]、雷达和雨量计实时同步积分结合降水估计技术^[61]。

雷达体扫资料质量控制技术主要包括数据预处理、孤立噪声回波过滤、超折射回波抑制。数据预处理将原始雷达资料转换为统一数据结构。孤立噪声回波过滤包括双向搜索、回波特征量过滤法。超折射回波抑制采用了模糊逻辑方法。

混合扫描反射率生成采用了基于地形方法。首先，利用高分辨地形数据、雷达位置信息、雷达波束高斯分布模式和标准大气情况下波束传播路径，计算雷达波束阻挡率；之后，根据波束阻挡率阈值得到不受地形阻挡的最小扫描仰角在同一平面上的投影，即混合扫描仰角；然后，根据混合扫描仰角，利用标准大气情况下的雷达测高公式计算等射束高度，把来自雷达网中各雷达的等射束高度进行拼接得到等射束高度拼图，其中在雷达重叠覆盖区，取最小的等射束高度；最后，利用新一代天气雷达网三维拼图反射率因子数据以及等射束高度拼图数据，得到混合扫描反射率因子。

降水率估测采用实时拟合Z-R经验公式方法^[62]，即Smith等^[61]提出的雷达和雨量计实时同步积分结合的RASIM方法（Radar-Gauge Synchronous Integration Method）。这种方法的特点是在一定区域内各站点的雨量计测量降水总量和雷达估算降水的总量相等。

3 国内外雷达QPE业务产品比较分析

由上述调研可见，我国和美国雷达QPE产品研制技术及产品都有所不同，比较结果见表8。从质量控制方法来看，美国Q3产品采用双偏振变量进行非降水回波去除，可基本消除天气雷达的超折射回波、飞机/昆虫/船只/鸟回波、海浪回波、噪声回波、电磁干扰回波等。我国天气雷达未实现双偏振技术升级，无法利用双偏振量在质量控制、相态识别及定量估测降水方面的优势，与美国等发达国家相比存在一定差距。从混合扫描生成技术来看，美国Q3产品中采用基于地形和无缝处理结合方法，并进行融化层检测和垂直廓线订正。我国SWAN系统中采用基于地形方法，

而天气雷达基数据拼图系统则采用较传统的基于距离方法。从降水率的估测方法来看，这几种雷达QPE产品都采用了Z-R关系方法。美国StageII及我国QPE产品都是每部雷达设置一个Z-R关系。美国Q3产品则采用了不同方法，即根据降水类型自动选择Z-R关系。虽然降水类型分布具有局域性的特点，美国的降水类型和我国不同，但降水粒子对雷达波散射的原理是相同的，美国Q3中降水分类的思想对于我国QPE产品研制还是具有借鉴意义的。从输入数据源来看，我国雷达QPE业务产品研制的输入数据源较单一，未引入模式数据、气候数据等。从产品的时空属性来看，美国Q3产品实现了2 min更新，我国雷达QPE产品时间分辨率为1 h。

表8 国内外业务雷达QPE研制技术及产品比较
Table 8 Comparison of radar QPE products and methods in China with that abroad

关键技术	产品	NSSL: Q3	NCEP: StageII/StageIV	探测中心: MQPE	SWAN QPE
质量控制方法		双偏振量质控: 简单滤波+启发式规则	单偏振量质控	单偏振量质控: 滤波+模糊逻辑	单偏振量质控: 滤波+模糊逻辑
混合扫描反射率生成方法		基于地形+无缝处理	基于地形	基于距离	基于地形
融化层处理方法		融化层检测、VPR订正	无	无	无
降水率估测方法		基于降水类型Z-R关系	每部雷达一个Z-R关系, 预设若干Z-R关系供选择	每部雷达一个Z-R关系; 实时拟合	每部雷达一个Z-R关系; 实时拟合
组网方法		与波束阻挡率、融化层等相关的负指数加权平均	反距离加权平均	加权	加权
数据源		雷达+雨量计+模式+气候值	雷达+雨量计+卫星+气候值+人工质控	雷达+雨量计	雷达+雨量计
产品时空属性		1 km/2 min, CONUS组网	4 km/h, CONUS组网	1 km/h, 全国组网	1 km/6 min, 区域组网

从整体来看，我国业务应用的雷达QPE算法与美国NCEP的StageII算法较为接近，与国际先进方法相比，在质量控制、融化层处理、降水类型分类、多源资料融合等方向需进一步改进。而一些研究中雷达QPE先进技术，如：融化层及反射率垂直廓线订正、降水类型分类Z-R关系、双偏振量降水估测、C波段雨区衰减、青藏高原复杂地形、雷达标定不均一也急需等的研究业务转化。随着我国双偏振雷达升级，以及这些先进方法鲁棒性、稳定性的不断提高和向业务转换，将有助于进一步提高国内雷达QPE业务产品的精度。

4 我国雷达QPE产品重处理研究计划

除了实时雷达QPE业务产品之外，美国还启动了雷达定量估测降水重处理项目（NEXRAD reanalysis），以期为中小尺度气候分析和气候检测研究提供一套长序列、高时空分辨率、高精度的降水产品。该项目使用美国新一代QPE技术（Q2/Q3技术），重处理1996年至今约300 TB雷达基数据。与雷达QPE实时产品生成系统相比，雷达降水重处理系统可利用长期数据进行质量控制，同时可以使用更多数

据源进行融合，提高产品质量。在美国雷达重处理预研项目中，就利用长序列数据进行平均场偏差订正，降低不同雷达间不一致性问题，并利用局地偏差订正技术解决由于波束遮挡、异常传播、零度层亮带等引起的局部偏差问题，最后利用自适应优化参数的融合技术将地面降水与雷达估测降水进行融合^[63]。

目前，我国还没有时间上均一的长序列、全国组网的雷达QPE历史产品。研制长序列、高时空分辨率、全国组网的雷达QPE产品对于我国中小尺度的气候分析以及高时空分辨率数值天气预报偏差订正及检验评估是非常必要的，也是国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”攻关任务的一项重要研发任务。

我国雷达QPE产品重处理研究内容主要包括：收集整理长序列的天气雷达基数据，对各种格式的基数据^[64]进行统一数据结构处理；基于国内现有的单部雷达QPE生成技术，利用长序列的雷达数据、地面观测数据和卫星资料，重点解决单部雷达定量估测降水局部偏差问题；最终研制我国长序列高精度的雷达定量估测降水历史产品数据集（2008年起，1 km/h分辨

率), 生成技术接近美国StageII业务产品。

5 结语

鉴于国际研发先进经验, 在高时空分辨率降水产品研制中, 雷达探测资料极为重要。本文主要从业务应用的雷达QPE研制技术和产品两方面, 对近年国内外有关进展进行了归纳和综述。从雷达QPE业务产品的研制技术发展来看, 雨量计偏差订正、融化层检测与反射率垂直廓线订正、降水类型分类、双偏振量质量控制、双偏振量降水估计等新方法已业务应用。从雷达QPE业务产品发展来看, 产品空间分辨率已达到1 km甚至数百米, 时间分辨率达到分钟级。从国内外的雷达QPE对比来看, 我国雷达QPE产品研制方法与美国StageII算法较为接近, 与美国最新业务化Q3产品研制方法相比还有较大不同。研发时间上均一的长序列、高时空分辨率雷达QPE重处理产品也是雷达QPE产品发展的一个趋势。综合考虑国内现有系统基础和先进算法等因素, 预期了我国QPE产品重处理的研制方法。

参考文献

- [1] Lin Y, Mitchell K E. The NCEP Stage II/IV hourly precipitation analyses: development and applications. 19th Conference on Hydrology, American Meteorological Society, 2005.
- [2] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(4): 621-638.
- [3] Tabary P. The new French operational radar rainfall product. Part I: Methodology. Weather and Forecasting, 2007, 22: 393-408.
- [4] Figueras i Ventura J, Tabary P. The new French operational polarimetric radar rainfall rate product. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(8): 1817-1835.
- [5] 刘晓阳, 杨洪平, 李建通, 等. 新一代天气雷达定量降水估测集成系统. 气象, 2010, 36(4): 90-95.
- [6] Feng YR. Introduction to SWAN system and its application. 26th Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, 2010.
- [7] 黄勇, 胡雯, 何永健, 等. 多部雷达联合估算淮河流域降水. 气象科学, 2010, 30(2): 268-273.
- [8] 王叶红. 定量降水估计(QPE)和短期定量降水预报(QPF). 中国科技成果, 2014(16): 76-78.
- [9] 张鹏锐. 美国下一代多普勒天气雷达网双极化技术升级情况简介. 气象科技合作动态, 2014(2): 30-32.
- [10] Fulton R, Breidenbach J, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. Weather and Forecasting, 1997, 13: 377-395.
- [11] Kitzmiller D, Miller D, Fulton R, et al. Radar and multisensor precipitation estimation techniques in national weather service hydrologic operations. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(2): 133-142.
- [12] Kondragunta C, Kitzmiller D, Seo D J, et al. Objective integration of satellite, rain gauge, and radar precipitation estimates in the multisensor precipitation estimator algorithm. 19th Hydrology Conf, American Meteorological Society, 2005.
- [13] Seo D J, Breidenbach J, Johnson E. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data. Journal of Hydrology, 1999, 223(3-4): 131-147.
- [14] Seo D J. Real-time estimation of rainfall fields using rain gauge data under fractional coverage conditions. Journal of Hydrology, 1998, 208(1-2): 25-36.
- [15] Doviak R J, Zrnić D S. Doppler radar and weather observations. Courier Dover Publications, 1993.
- [16] Grams H M, Jian Zhang J, Elmore K L. Automated identification of enhanced rainfall rates using the near-storm environment for radar precipitation estimates. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(3): 1238-1254.
- [17] Lakshmanan V, Christopher C, Krause J, et al. Quality control of weather radar data using polarimetric variables. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31: 1234-1249.
- [18] Qi Y C, Zhang J, Zhang P F. A real-time automated convective and stratiform precipitation segregation algorithm in native radar coordinates. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013: 2233-2240.
- [19] Tang L, Zhang J, Langston C, et al. A physically based precipitation-nonprecipitation radar echo classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system. Weather and Forecasting, 2014, 29(5): 1106-1119.
- [20] Tang L, Zhang J, Qi Y, et al. Non-standard blockage mitigation for national radar QPE products. The 36th Conf on Radar Meteorology, American Meteorological Society, 2013.
- [21] Schaake J, Henkel A, Cong S. Application of PRISM climatologies for hydrologic modeling and forecasting in the western U.S. Preprints. 18th Conf on Hydrology, American Meteorological Society, 2004.
- [22] Ware E C. Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. M.S. thesis, Cornell University, 2005.
- [23] Xu X, Howard K, Zhang J. An automated radar technique for the identification of tropical precipitation. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9: 885-902.
- [24] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92: 1321-1338.
- [25] Zhang J, Qi Y. A real-time algorithm for the correction of bright band effects in radar-derived QPE. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11: 1157-1171.
- [26] 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. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(6): 1836-1854.
- [27] Zhang J, Qi Y, Langston C, et al. Radar Quality Index (RQI) - a combined measure for beam blockage and VPR effects in a national network. Weather Radar and Hydrology, 2012, 351: 388-393.
- [28] Daly C, Neilson R P, Phillips D L. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation for mountainous terrain. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 140-158.
- [29] O'Bannon. Using a 'terrain-based' hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates. 28th Conf on Radar Meteorology, American Meteorological Society, 1997.
- [30] Steven V. Vasiloff. AWIPS local application for visualizing WSR-88D PPS hybrid scan bin heights. Interactive Symposium on AWIPS, 2002.
- [31] Giangrande S E, Ryzhkov A V. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification. J Appl Meteor Climatol, 2008, 47: 2445-2462.
- [32] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler weather radar: Principles and applications. Cambridge University Press, 2001.
- [33] Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess B W, et al. The Joint Polarization Experiment polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. Bull Amer Meteor Soc, 2005, 86: 809-824.
- [34] Matrosov S Y. Evaluating polarimetric X-band radar rainfall estimators during HMT. J Atmos Oceanic Technol, 2009, 27: 122-134.
- [35] Wang Y, Chandrasekar V. Quantitative precipitation estimation in the CASA X-band dual-polarization radar network. J Atmos Oceanic Technol, 2010, 27: 1665-1676.
- [36] Lim S, Cifelli R, Chandrasekar V, et al. Precipitation classification and quantification using X-band dual-polarization weather radar: Application in the Hydrometeorology Testbed. J Atmos Oceanic

- Technol, 2013, 30: 2108 – 2120.
- [37] Ryzhkov Z, Diederich M, Zhang P, et al. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31: 599-619.
- [38] Wang Y, Zhang P, Ryzhkov A, et al. Utilization of specific attenuation for tropical rainfall estimation in complex terrain. *J Hydrometeorol*, 2013, 15, 2250–2266.
- [39] Simanton J R, Osborn H B. Reciprocal distance estimate of point rainfall. *Journal of the Hydraulics Division*, 1980, 106: 1242–1246.
- [40] Cifelli R, Doesken N, Kennedy P, et al. The community collaborative rain, hail, and snow network: Informal education for scientists and citizens. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86: 1069–1077.
- [41] Chen S, Gourley J J, Hong Y, et al. Evaluation and uncertainty estimation of NOAA/NSSL next generation national mosaic QPE (Q2) over the Continental United States. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14 (4): 1308–1322.
- [42] LI P W, Lai E S T. Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong. *Journal of Hydrology*, 2004, 288: 189–209.
- [43] Li P W, Wong W K, Lai E S T. RAPIDS—A new rainstorm nowcasting system in Hong Kong. *WMO/WWRP International Symposium on Nowcasting and Very-short-range Forecasting*, 5–9 September 2005 Toulouse, France.
- [44] LI P W, Wong W K, Cheung P, et al. An overview of nowcasting development, applications, and services in the Hong Kong observatory. *J Meteor Res*, 2014, 28(5): 859–876.
- [45] 程丛兰, 陈明轩, 王建捷, 等. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. *气象学报*, 2013, 71(3): 397–415.
- [46] 杨澆, 刘黎平, 王红艳. 利用反射率因子垂直廓线填补雷达波束遮挡区的方法研究. *气象科技*, 2015, 43(5): 788–793.
- [47] 勾亚彬, 汪章维, 刘黎平, 等. 雷达波束部分遮挡识别应用及效果评估. *高原气象*, 2017, 36(1): 229–240.
- [48] 戚友存. 通过VPR订正技术提高雷达定量降水估计能力. 南京信息工程大学博士学位论文, 2011.
- [49] 勾亚彬, 刘黎平, 王丹, 等. 基于云团的分组Z-R关系拟合方案及效果评估. *暴雨灾害*, 2015, 34(1): 1–8.
- [50] 杨杰, 刘黎平, 赵城城, 等. 雷达估测对流性降水的误差空间分布及Z-R关系的优化. *高原气象*, 2015, 34(6): 1785–1796.
- [51] 勾亚彬, 刘黎平, 杨杰, 等. 基于雷达组网拼图定量降水估测算法业务应用及效果评估. *气象学报*, 2014, 72(4): 731–748.
- [52] 唐顺仙, 吕达仁, 何建新, 等. 天气雷达技术研究进展及其在我国天气探测中的应用. *遥感技术与应用*, 2017, 32(1): 1–13.
- [53] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析. *大气科学*, 1996, 20(5): 613–619.
- [54] 刘黎平, 葛润生, 张沛源. 双线偏振多普勒天气雷达遥测降水强度和液态含水量的方法和精度研究. *大气科学*, 2002, 26(5): 709–719.
- [55] 刘黎平, 徐宝祥. 双线偏振雷达雨区衰减订正问题的模拟计算与讨论. *高原气象*, 1992, 11(3): 235–240.
- [56] 庄薇, 刘黎平, 王改利, 等. 青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究. *高原气象*, 2013, 32(5): 1224–1235.
- [57] 朱艺青. CINRAD/SA天气雷达与TRMM PR探测数据的一致性对比研究. 南京信息工程大学硕士学位论文. 2016.
- [58] 王红艳, 刘黎平. 新一代天气雷达降水估算的区域覆盖能力评估. *高原气象*, 2015, 34(6): 1772–1784.
- [59] 吴涛, 万玉发, 沃伟锋, 等. SWAN系统中雷达反射率因子质量控制算法及其应用. *气象科技*, 2013, 41(5): 809–817.
- [60] 肖艳姣, 刘黎平, 杨洪平. 基于天气雷达网三维拼图的混合反射率因子生成技术. *气象学报*, 2008, 66(3): 470–473.
- [61] Smith P L, Joss J. Use of a fixed exponent in “adjustable” Z-R relationships. *Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology, American Meteorological Society*, 1997.
- [62] 王珏, 冷亮, 吴涛. SWAN系统中QPE产品的应用评估. *气象科技*, 2015, 43(3): 380–386.
- [63] Nelson B R, Seo D J, Kim D. Multisensor precipitation reanalysis. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11: 666–682.
- [64] 楚志刚, 银燕, 顾松山. 新一代天气雷达基数据文件格式自动识别方法研究. *计算机与现代化*, 2013(7): 180–184.

(上接70页)

景数据产品。信息中心计划依托现代信息技术，安全、科学、高质量地进行气象资料数字化拯救和产品研发，在已推出的国家级气象观测站降水、风要素长序列逐小时数据产品外，进一步加强气温、气压、相对湿度等常规要素的长年代历史观测数字化成果转化和产品研制；同时推动数字化业务收集、质量检查、整合集成、归档存储、安全备份、在线管理服务一系列全流程标准化规范化建设，保障数字化质量，积极响应用户需求不断丰富数字化成果服务内容、改进服务方式，持续提升用户体验以满足气象预报预测研究、应对气候变化能力建设、决策服务分析、预防灾害风险及其他业务科研领域方方面面的需求。

参考文献

- [1] 臧海佳, 吴显中, 李星玉, 等. 气象资料拯救指南. 推荐性行标. QX/T 201-2013.
- [2] 吴忠义. 中国气候资料工作概况. 北京: 气象出版社, 2005.
- [3] 臧海佳, 吴显中. 气象记录档案数字化工作实践与分析. *中国档案*, 2008(5): 34–36.
- [4] 中国气象局预测减灾司. 常规气象资料信息化模式文本汇编. 北京: 气象出版社, 2001.
- [5] 王伯民, 吕勇平, 张强. 降水自记纸彩色扫描数字化处理系统. *应用气象学报*, 2004, 15(16): 737–744.
- [6] 兰平, 臧海佳. 历史纸质气象档案数字化技术策略初步分析. *应用气象学报*, 2006, 17(4): 478–482.
- [7] 王伯民. 彩色扫描图形数字化处理技术的研究—气象历史档案拯救技术探索之一. *应用气象学报*, 2003, 14(6): 763–768.
- [8] 熊安元, 王伯民, 王颖, 等. 气象资料分类与编码. 推荐性行标. QX/T 102-2009.
- [9] 任国玉, 任王玉, 李庆祥, 等. 全球陆地表面气温变化研究现状、问题和展望. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 934–946.
- [10] Cao L, Zhao P, Yan Z, et al. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century. *J Geophys Res*, 2013, 118: 8197–8207.
- [11] 张强, 赵煜飞, 范邵华. 中国国家级气象台站小时降水数据集研制. *暴雨灾害*, 2016, 35(2): 182–186.
- [12] 赵煜飞, 张强, 余予, 等. 中国小时风速数据集研制及在青藏高原地区的应用. *高原气象*, 2017, 36(4): 930–938.