

双偏振雷达资料同化对一次台风降雨模拟的影响

王德立^{1, 2} 孔凡铀³ 王洪⁴ 陈训来^{1, 2}

(1 深圳市气象局, 深圳 518040; 2 深圳南方强天气研究重点实验室, 深圳 518040;

3 美国俄克拉荷马大学风暴分析和预报中心, 诺曼 73072, 美国;

4 中国气象局广州热带海洋气象研究所/中国气象局广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510640)

摘要: 双偏振雷达同时或交替进行水平偏振和垂直偏振方向的观测, 其观测量可以更加准确描述降水云微物理特征。这些云微物理特征与强对流系统发生发展密切相关。因此利用雷达偏振量观测来改进强对流天气数值预报具有非常重要的现实意义。在利用包含非标准遮挡去除、水凝物分类筛选、偏振量阈值检查、杂波剔除和平滑等步骤的质量控制模块实现双偏振雷达资料质量控制基础上, 使用改进的ARPS云分析模块实现双偏振雷达资料的同化。改进的ARPS云分析模块主要通过基于T-matrix方法的雷达算子以及水凝物分类算法实现偏振量的同化。首先利用水平反射率因子(Z_h)、差分反射率(Z_{DR})、差传播相移率(K_{DP})、零滞后互相关系数(ρ_{HV})和模式背景场气温进行水凝物模糊逻辑分类从而确定三种主要水凝物类型(雨、雪、雹/霰)各自占比, 然后根据基于T-matrix方法的雷达算子分析出这三种水凝物的混合比。利用广州、清远、韶关和阳江等四部S波段双偏振雷达资料对2018年台风天鸽个例进行同化分析模拟试验。结果表明, 偏振量同化使得该台风初始分析场的水凝物分布更加合理, 水汽混合比减小, 700 hPa台风周围出现干舌; 偏振量同化对这次台风强降雨短时预报有一定正影响。

关键词: 双偏振雷达, 资料同化, 云分析, 台风

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.022

Effect of the Dual-Polarization Radar Data Assimilation on Rainfall Simulation of Typhoon Hato

Wang Deli^{1, 2}, Kong Fanyou³, Wang Hong⁴, Chen Xunlai^{1, 2}

(1 Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040 2 Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in

South China, Shenzhen, 518040 3 Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, Norman 73072

4 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology/Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction of CMA, Guangzhou 510640)

Abstract: The polarimetric variables from dual-polarization radar can more accurately describe the microphysical states in a convective storm. These microphysical states are closely related to the occurrence and development of severe convection systems. Therefore, it is great practical significance to improve the numerical forecast of severe convection weather by using radar dual-polarization measurements. Based on the quality control of polarimetric radar measurements (including non-standard blockage removal, hydrometeor classification, polarization threshold test, and clutter removal and smoothing), the S-band dual-polarization radar data are assimilated by the improved ARPS cloud analysis system. The improved ARPS cloud analysis system makes the polarization assimilation mainly by the hydrometeor classification algorithm and the radar operator based on T-matrix method, based on the principles of fuzzy logic, polarimetric radar measurements (including horizontal reflectivity (Z_h), differential reflectivity (Z_{DR}), specific differential phase (K_{DP}), correlation coefficient (ρ_{HV}) and background temperature) are used to classify hydrometeors and determine the ratios among the three main hydrometeor types (rain, snow, hail/graupel). And then the mixing ratio of each type is analyzed using the reflectivity operator which based on T-matrix method to comply with the Z_h observation. The S-band dual-polarization radar data of Guangzhou, Qingyuan, Shaoguan and Yangjiang are assimilated in Typhoon Hato (No. 1713). The results show that the initial hydrometeors distribution is improved when the polarimetric variables are assimilated. The water-vapor mixing ratio is decreased, and a dry tongue appears around the typhoon at 700 hPa. Moreover, there are less false alarms for heavy rainfall. Significant positive impacts on the short-term forecast of heavy rainfall are obtained in the typhoon case.

Keywords: dual-polarization radar, data assimilation, cloud analysis, typhoon

收稿日期: 2018年12月6日; 修回日期: 2019年3月26日

第一作者: 王德立(1985—), Email: wangdeli85@126.com

资助信息: 广东省气象局科研面上项目(GRMC2017M29);
中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-081)

0 引言

相比于常规的多普勒天气雷达只进行单一方向(通常为水平方向)的偏振观测, 双偏振雷达通过交替或同时进行水平偏振和垂直偏振方向观测, 可以额

外探测到降水系统的差分反射率 (Z_{DR})、差传播相移率 (K_{DP})、零滞后互相关系数 (ρ_{HV}) 等偏振物理量。许多研究表明这些偏振量能够更加准确地描述降水云微物理特征^[1-2]，因而能改进雷达资料质量控制^[3]、雷达定量降水估测^[4]、降水相态分类^[5]和冰雹识别^[6]等，为灾害天气临近预警预报提供更强有力的支持。如何利用双偏振雷达资料提高灾害天气预警预报和防灾减灾水平，已成为摆在我们面前的重大课题。

目前国内对双偏振雷达资料研究主要集中在雷达资料质量控制^[7-10]、定量降雨估测^[11-13]、灾害天气分析^[14-18]、降水相态识别^[19]等方面，对双偏振雷达资料同化研究方面则涉及非常少。常规雷达资料（反射率、径向风）的同化对中尺度数值预报效果改进已经被众多的研究和业务应用所证明^[20-22]。深圳目前业务运行的实时同化预报系统（Hourly Assimilation Prediction System, HAPS）和雷暴尺度集合预报系统都利用三维变分（3DVAR）同化径向风，而采用云分析同化反射率。既然双偏振雷达资料可以提供跟强对流系统发生发展紧密联系的云微物理信息，那么同化双偏振雷达资料能否进一步提升数值预报对强天气的预报技巧呢？Jung等^[23]利用集合卡尔曼滤波方法实现了对双偏振雷达偏振量同化，其研究表明同时同化 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 可以获得最大的正影响，主要改进在于对流风暴分析场的垂直速度、水汽混合比和雨水混合比等变量。Li等^[24]利用WRF-3DVAR系统实现C波段双偏振雷达 Z_{DR} 、 K_{DP} 等偏振量的同化，改进了降雨短时临近预报。Tong^[25]则通过改进ARPS-3DVAR的云分析模块实现双偏振雷达资料同化，可以得出更加合理真实的水凝物分析。

卡尔曼滤波同化技术需要巨大的计算量，目前还无法在业务上使用。而ARPS-3DVAR和云分析技术已经十分成熟，并且已经在深圳市气象局业务运行多年。因此，本文将选用Tong等^[25]改进的ARPS-3DVAR云分析模块进行双偏振雷达资料同化试验，通过2017年第13号台风天鸽个例考察同化双偏振雷达资料对台风降雨模拟的影响。

1 双偏振雷达资料同化方案简介

1.1 双偏振雷达资料质量控制方案

雷达回波观测中包含着大量电磁干扰、鸟类昆虫、地物、波在特定温湿环境的异常传播等引起^[26]的非气象回波，如果不将这些非气象回波识别并剔除将严重影响资料同化的准确性。本试验采用王洪等^[27]基于广东省S波段双偏振雷达网研发建立的面向资料同化的双偏振雷达质量控制方案。该方案包含非标准遮

挡去除、水凝物分类筛选、偏振量阈值检查、杂波剔除和平滑等五个质量控制步骤。

1) 非标准遮挡去除。由树木或其他人造物体（建筑物、通信塔等）带来的波束遮挡称为非标准遮挡（NSB）。若雷达存在NSB，则会在PPI和其他相关产品中出现径向不连续。通过累计一段时间内反射率因子，找到雷达切向的梯度不连续区，建立NSB静态文件（需要定期更新）作为识别NSB的依据。NSB方位角小于 5° ，则通过线性插值补齐；若NSB方位角在 $5\sim 180^\circ$ ，则将相应偏振量设为缺省；若NSB方位角大于 180° ，则舍弃该仰角资料。

2) 水凝物分类筛选。为了识别并剔除非气象回波，本方案引入了Park等^[5]基于模糊逻辑建立的水凝物分类算法（HCA），并利用Wu等^[28]基于珠海双偏振雷达资料研究结果更新相关隶属函数阈值和加入数值模式背景场温度（用于确定融化层顶的高度）等进行本地化应用。HCA算法将雷达回波划分为10类：地物杂波（GC/AP）、生物回波（BS）、干雪（DS）、湿雪（WS）、冰晶（CR）、霰（GR）、“大滴”（BD）、小雨和中雨（RA）、大雨（HR）和雨-雹混合物（RH）。BD是指其粒子谱分布趋于大粒子端的回波。首先利用隶属函数计算水平反射率因子（Zh）、差分反射率（ Z_{DR} ）、差传播相移率（ K_{DP} ）、零滞后互相关系数（ ρ_{HV} ）、Zh标准差和差分相位（ ϕ_{DP} ）的标准差在各回波类型内的概率，然后将概率值做加权求和，得到每个回波类型的集合概率值；再根据经验和模式温度抑制不合理类型的概率；最后将集合概率最大对应的类型作为该库的回波类型，并剔除被识别为GC/AP或BS的观测。

3) 偏振阈值检查。根据已有的研究和经验，对双偏振观测资料进行阈值检查，剔除不可信的观测资料。包括当 $\rho_{HV}>1.0$ 或者 $\rho_{HV}<0.8$ 或者信噪比SNR小于10 dB时，剔除对应库的偏振观测资料；当 $K_{DP}<0.01^\circ/\text{km}$ 时，剔除相应库的 K_{DP} 。

4) 杂波剔除。基于常规多普勒雷达资料处理经验，定义在临近9个库内，该偏振观测的有效库数少于3个，则该点为孤立回波点（即杂波），将杂波点对应的偏振观测设为缺省值。

5) 平滑。目前广东省偏振雷达距离库分辨率为250 m，较模式分辨率高出许多。因而有必要对偏振观测做滤波处理，以保证观测和模式分辨率相互匹配。平衡包括九点中值滤波和九点径向滤波。

在进行资料同化前，每部双偏振雷达观测资料都分别经过上述资料质量控制步骤后才进入资料同化的

环节。图1给出2017年5月8日10时（北京时，下同）广州双偏振雷达量0.48°仰角通过质量控制前后偏振量

分布对比，可以看出质量控制方案能有效去除非标准遮挡和剔除非气象回波。

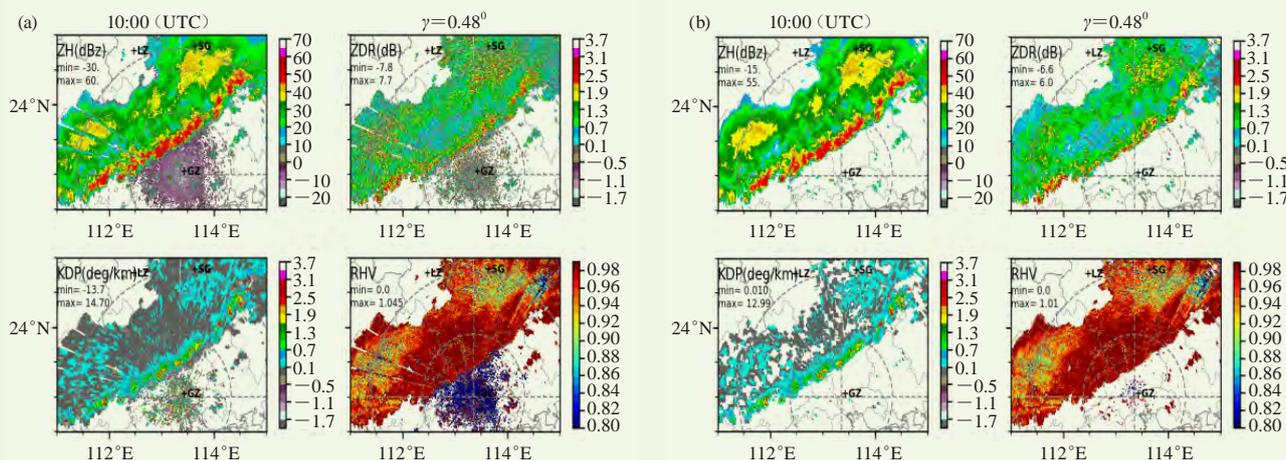


图1 2017年5月8日10时广州双偏振雷达量0.48°仰角质量控制前 (a) 和后 (b) 偏振量分布

Fig. 1 Measurements before (a) and after (b) quality control for Guangzhou polarimetric radar of 0.48° elevation at 10:00 8 May 2017

1.2 双偏振雷达资料同化方案

本文使用Tong^[25]改进的ARPS云分析模块来实现双偏振雷达资料的同化。传统的ARPS云分析采用的是基于常规多普勒雷达的相对较简单的雷达反射率因子与水凝物混合比的关系公式，水凝物类别由反射率因子和环境气温确定，同一个格点只允许一种水凝物存在（这显然与真实云内情况不同），由Zh反演出Qx（如雨水Qr、雪Qs、冰雹Qh）。

改进的云分析模块结合Jung等^[29]的基于T-matrix方法的雷达算子以及Park等^[5]水凝物分类算法（HCA）实现。首先利用HCA算法对回波进行分类识别。这里跟质量控制步骤不同的，由于双偏振雷达资料已经经过质量控制，只使用Zh、ZDR、KDP和ρ_{HV}和背景场气温进行识别，并且不再对地物杂波和生物回波类型计算。通过HCA算法获得各类气象回波集合概率值后，将其中8个气象回波类别归为三个主要水凝物种类：雨（BD、RA、HR）、雪（DS、WS、CR）、雹/霰（GR、RH），将每种水凝物中的最大集合概率值作为该种类所占份额，即在一个格点上允许不同的水凝物共存。由于双偏振雷达观测到的反射率为雨、雪、雹/霰分别贡献的反射率之和，因此可以根据基于T-matrix的雷达算子、三种水凝物所占相应份额和观测的反射率分别分析出各水凝物混合比。

除了上述提到的改进外，改进的云分析模块还新增加了融冰模式，冰相粒子落入零度层以下后不是立即全部融化，而是由密度控制融化快慢，从而允许水与冰共存。值得指出的是，为了实现高效快速同化，

模块对大粒子如冰雹采用了瑞利散射近似。对S波段雷达来说，直径超过1 cm的冰雹的非瑞利散射效应已经较明显了^[29]，因此改进后的云分析模块仅适用于波长较长的气象雷达（如S波段雷达）。

2 试验设计

为了考察雷达偏振量同化对数值模拟的影响，设计了两个试验DP和nDP，DP试验是利用ARPS三维变分和新修改后的云分析模块同化雷达径向风、水平反射率、差分反射率、差传播相移率、相关系数，nDP试验则只同化雷达径向风和水平反射率。

试验个例选取2017年第13号台风天鸽个例，起报时间为2017年8月23日14时（即台风登陆后1 h左右），模拟时长6 h。背景场采用ECMWF的0.125分辨率的2017年8月23日00时起报的预报场。数值模式采用WRF-ARW 3.5.1版本，模式水平分辨率为4 km，水平格点为420×360，垂直层数为50，模式区域为（103.20°—120.84°E，17.27°—30.56°N）；微物理方案采用新Thompson方案，边界层方案采用MYJ方案，陆面方案采用Noah方案。参与同化的雷达资料为广州、清远、韶关和阳江等4部S波段双偏振雷达在2017年8月23日13时54分观测。图2给出2017年8月23日13时54分由这4部双偏振雷达观测经过质控程序处理后插值到4 km分辨率网格的组合反射率拼图，红点表示雷达位置。

3 试验结果分析

3.1 初始场

首先比较DP试验和nDP的分析场差异。图3是两

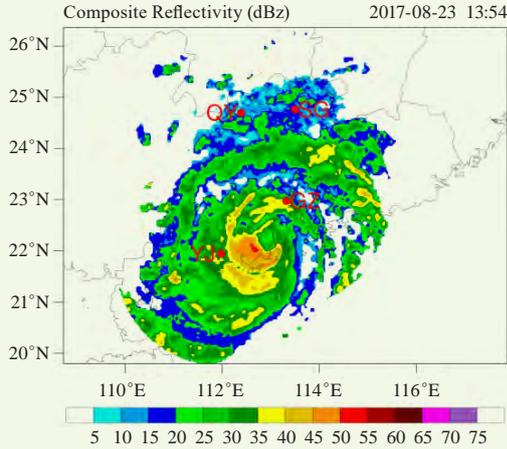


图2 2017年8月23日13时54分组合反射率
(红点表示双偏振雷达站位置: QY表示清远雷达, SG表示韶
关雷达, YJ表示阳江雷达, GZ表示广州雷达)
Fig. 2 The composite reflectivity at 13:54 BT on 23 August
2017

(The red dots represented the position of the dual-
polarization radar stations, where QY, SG, YJ and GZ
refers to radar of Qingyuan, Shaoguan, Yangjiang and
Guangzhou respectively)

个试验分析的垂直气柱累计冰相水量(包括冰雹、
雪、冰)以及垂直气柱累计总凝水量(包括冰雹、
雪、冰、云水、雨水、软雹)。可以看到两者分布形
态非常相近,但是大小有显著区别。DP试验分析的
垂直气柱累计冰相含量最大值 1.09 kg/m^2 ,明显小于
nDP试验的 2.10 kg/m^2 ; DP试验分析的垂直气柱累计
总凝水量比nDP试验小一个量级, DP试验最大只有
 1.82 kg/m^2 , nDP试验则达到 15.5 kg/m^2 。图4是沿台
风中心南北向剖面上的初始冰雹、雨、雪混合比分布。
一个显著差别是该剖面上nDP无雹分布而DP试验则存
在着雹分布,这是由于该例观测到水平反射率因子基
本未超过 50 dBz (图2)没有达到原云分析方案出现
雹的标准,新云分析方法(DP)允许不同水凝物类
别甚至融冰共存,基于HCA算法获得与对流活跃区域
对应的雹(也包括小的雹粒)的分布。另一个较显著
差别是DP同化分析得到雨混合比要比nDP的小约一
个量级,其原因是前者允许不同水凝物类别共存,同
时DP同化分析采用到的融冰模式计入了融化水物
质(湿雪、湿雹)对反射率因子的贡献,而这种贡献
是隐形的,并不体现为额外的水凝物混合比^[25]。

双偏振雷达资料的同化对初始水汽也产生了较大
的影响。图5给出两个试验分析的 700 hPa 水汽混合
比分布,可以看出两者差别主要出现在广东省以及沿
海即雷达资料覆盖的范围。DP分析的水汽混合比小
于nDP试验,且有干舌从台风东北侧经西北气旋性
伸入

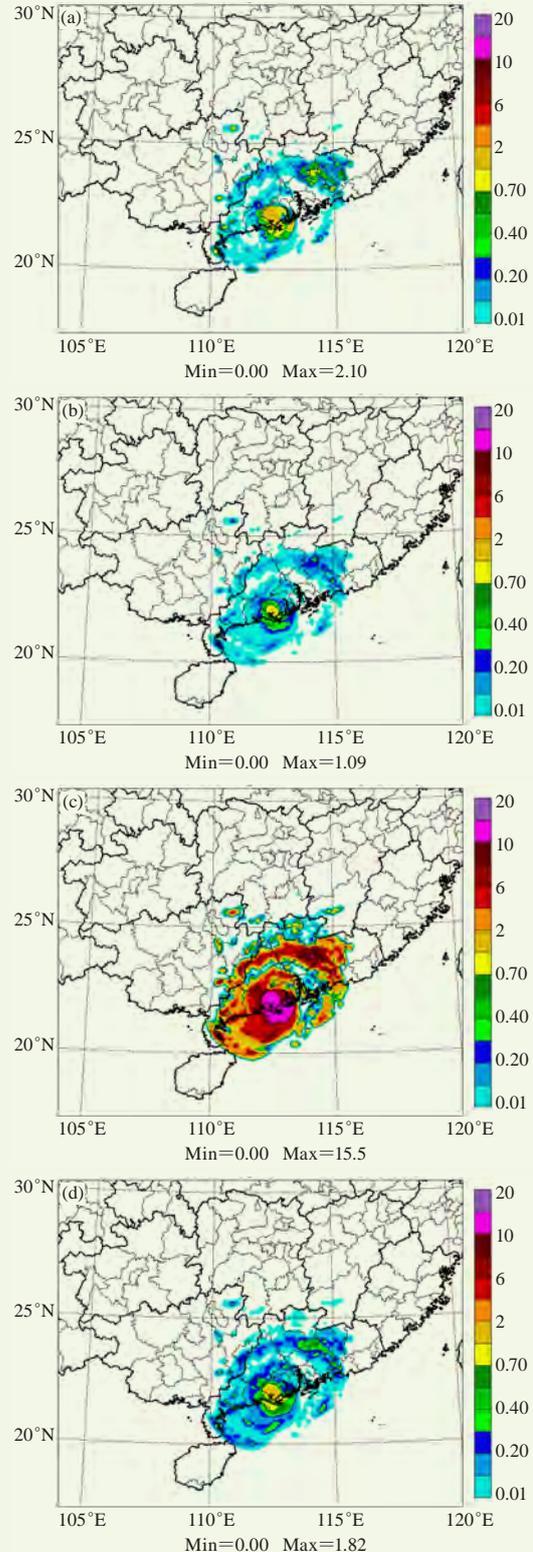


图3 2017年8月23日14时同化分析的垂直气柱累计冰相水
量(a, b),垂直气柱累计总凝水量(c, d),其中a、c为
nDP, b、d为DP

Fig. 3 Fig.3 The vertical column accumulated water
amount of ice phase (a, b), and the vertical column
accumulated total water amount of condensation (c, d)
at 14:00 on 23 August 2017, a and c for nDP, b and d for DP

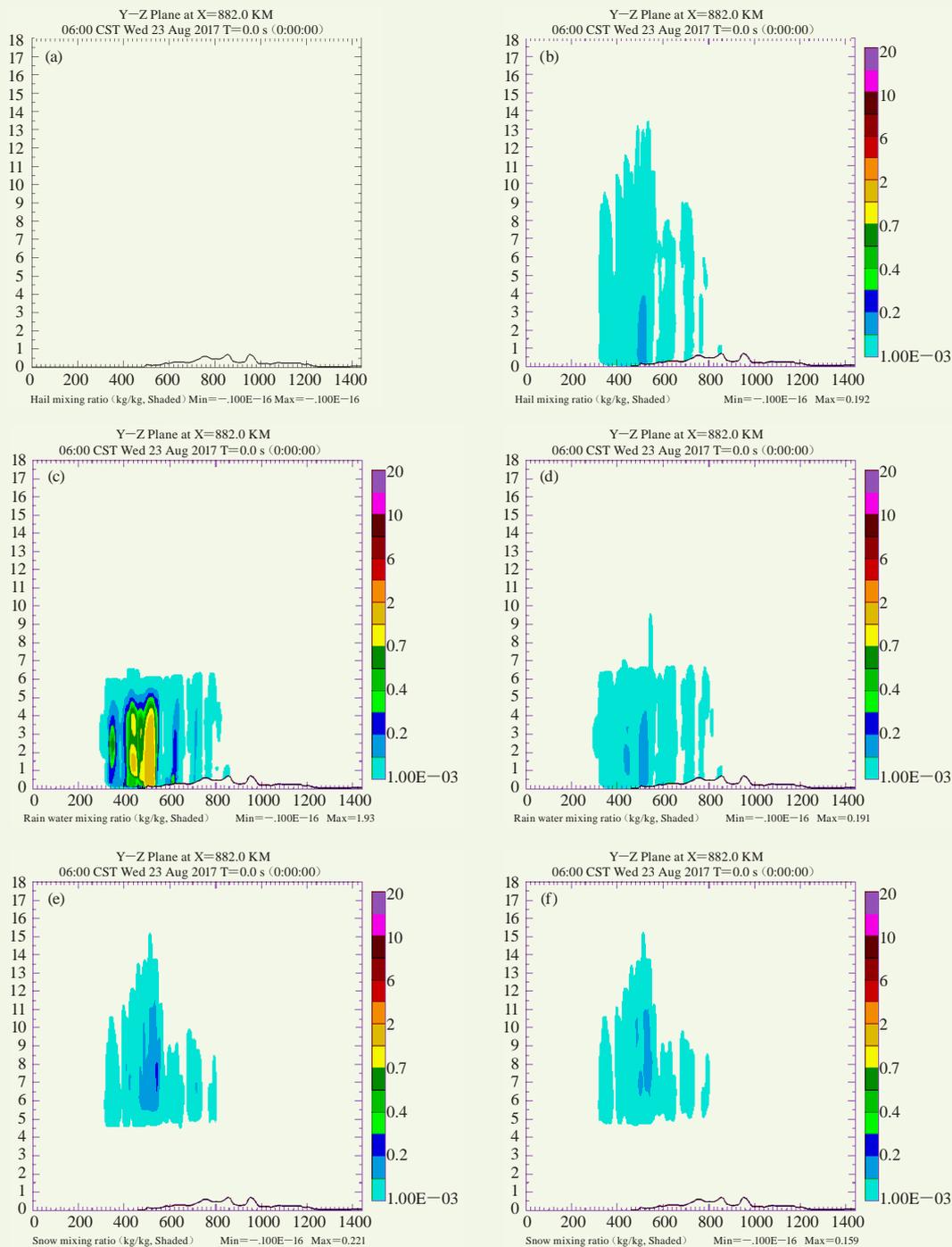


图4 2017年8月23日14时雷达同化分析的雹 (a, b)、雨 (c, d)、雪 (e, f) 沿台风中心南北向剖面分布: 左列为nDP, 右列为DP

Fig. 4 Mixing ratio (g/kg) analyses for hydrometeor along the north-south cross section of the typhoon center at 14:00 BT on 23 August 2017: hail (a, b), rain (c, d) and snow (e, f): nDP(left), DP(right)

台风东南侧, 使得台风湿区范围显著减小。

3.2 对台风降雨模拟影响分析

图6给出了两个试验模拟23日20时的6 h累计雨量和对应的降雨观测资料。降雨观测资料是由中国国家气象信息中心基于“计雨量(概率密度函数)+BMA

(贝叶斯模式平均)+OI(最优插值)”方法研制的中国区域地面自动站、卫星、雷达三源降雨融合数据产品(格点分辨率为 0.05°)^[30-32]。

从图6可以看出, DP试验模拟的23日20时6 h累计雨量最大值达到238.1mm比nDP的195.7 mm更接近观

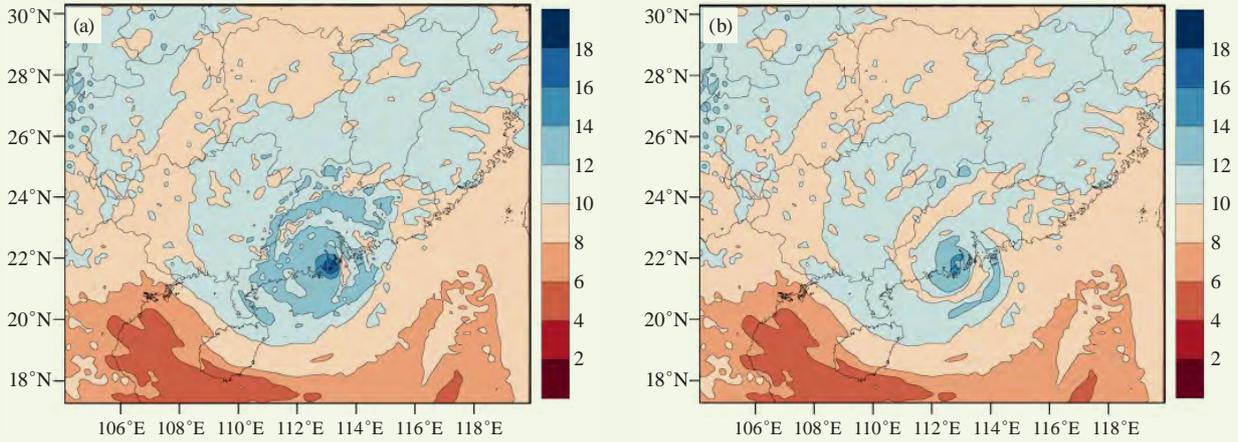


图5 2017年8月23日14时雷达同化分析结果：700 hPa水汽混合比（单位：g/kg）
(a) nDP, (b) DP

Fig. 5 700 hPa water-vapor mixing ratio (g/kg) analyses at 14:00 BT on 23 August 2017: nDP (a), DP (b)

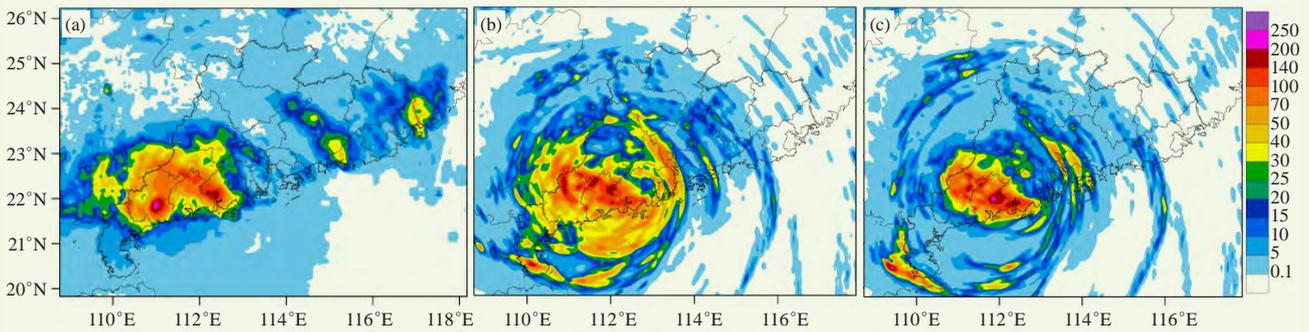


图6 2017年8月23日20时的6 h累计降雨量（单位：mm）
(a) 融合观测降水, (b) nDP, (c) DP

Fig. 6 6 h precipitation (unit: mm) at 20:00 BT on 23 August 2017
(a) merge precipitation, (b) nDP, (c) DP

测的237.3 mm，同时DP模拟的强降雨范围小于nDP，避免了雷州半岛和广东沿海地区强降雨空报。nDP和DP试验模拟降雨差异可能跟同化分析引起的水汽差异有较大关系，水汽混合比和干舌存在可能是DP试验模拟广东沿海降雨较弱的原因，由同化分析引起的水汽混合比差异可以持续到第6 h。

为了定量评价偏振量同化对这次台风降雨模拟影响，利用降雨融合资料对（108.73—118.19°E，19.80—26.279°N）范围内6 h累计降雨模拟进行ETS评分和偏差检验（图7）。DP试验的小雨、中雨和大暴雨的ETS评分虽然低于nDP试验，但是大雨和暴雨的ETS评分高于nDP试验，且DP试验的降雨模拟偏差更接近1，而nDP对中雨以上量级降雨模拟的偏差普遍都大于1.5，这说明nDP试验模拟（强）降雨范围明显偏大。综合来看偏振量同化对强降雨的临近预报有一定正影响。

4 小结

本文利用面向资料同化的双偏振雷达质量控制方

案和改进的ARPS云分析模块实现了雷达偏振量包括差分反射率（ Z_{DR} ）、差传播相移率（ K_{DP} ）、相关系数（ ρ_{HV} ）的同化，并利用广东省广州、阳江、清远和韶关4部S波段双偏振雷达资料对2017年第13号台风天鸽个例进行了雷达偏振量同化试验，获得以下结论：

1) 双偏振雷达资料质量方案包含非标准遮挡去除、水凝物分类筛选、阈值检查、杂波剔除和平滑等五个质量控制步骤，能有效去除非标准阻塞和剔除非气象回波。

2) 改进的ARPS云分析模块能有效地同化雷达偏振量。在这次台风个例中，偏振量同化使得初始场的雨水混合比显著减小、雹混合比增加，垂直气柱累计总凝水量显著变小，同时低层的水汽混合比变小，台风外围出现明显干舌（干区）。

3) 雷达偏振量资料同化对这次台风强降雨短时预报有一定正影响。由于初始场中水汽混合比减小以及台风外围出现的干舌，在0~6 h内，DP试验预报的强降雨范围明显缩小，减少了nDP试验中强降雨空报

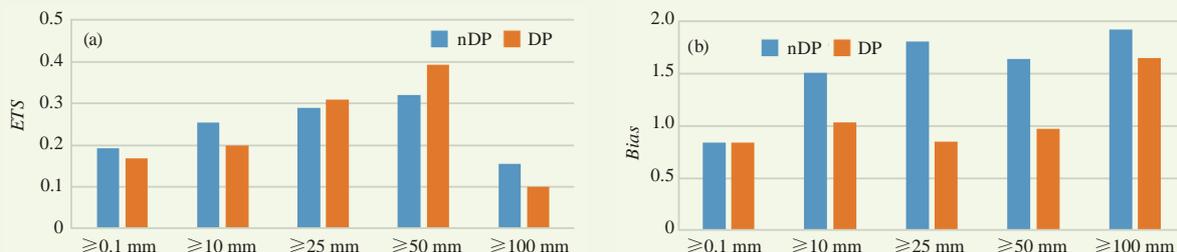


图7 2017年8月23日20时 6 h累计雨量模拟的ETS评分 (a) 和偏差 (b)
Fig. 7 ETS score (a) and BIAS (b) of 6 h precipitation simulation at 20:00 BT on 23 August 2017

现象, 因此DP试验对大雨和暴雨模拟要优于不同化偏振量的nDP试验。

实际上, 正如孙娟珍等^[20]指出那样, 双偏振雷达资料同化研究正处于起步阶段, 有许多问题需要解决进一步解决, 双偏振雷达资料同化对中尺度数值模拟或预报的影响也需要更多研究和个例验证。

参考文献

- [1] Aydin K, Giridhar V. C-band dual-polarization radar observables in rain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1992, 9(4): 383-390.
- [2] Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 830-841.
- [3] 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.
- [4] Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44: 502-515.
- [5] Park H, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(3): 730-748.
- [6] Heinselman P L, Ryzhkov A V. Validation of polarimetric hail detection. *Weather and Forecasting*, 2006, 21(5): 839-850.
- [7] 杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 双线偏振多普勒雷达资料质量的定量评估. *气象学报*, 2013, 71(4): 754-768.
- [8] 宗蓉, 陈超, 潘国盛. 基于模糊逻辑的双偏振多普勒雷达地物杂波抑制方法的初步应用. *广东气象*, 2017, 39(6): 56-59.
- [9] 陈超, 胡志群, 胡胜, 等. 广州S波段双偏振雷达数据质量初步分析. *热带气象学报*, 2018, 34(1): 59-67.
- [10] 张林, 杨洪平. S波段WSR-88D双偏振雷达观测非降水回波识别方法研究. *气象*, 2018, 44(5): 665-675.
- [11] 高玉芳, 陈耀登, Gochis D, 等. JOPL算法结合双偏振雷达在不同降水过程中的测雨效果分析. *热带气象学报*, 2014, 30(2): 361-367.
- [12] 郑佳锋, 张杰, 朱克云, 等. 双偏振天气雷达测雨误差及水凝物识别分析. *气象科技*, 2014, 42(3): 364-372.
- [13] 黄浩. 基于最优化理论的双偏振雷达降雨参数反演研究. 南京: 南京大学, 2018.
- [14] 王洪, 吴乃庚, 万齐林, 等. 一次华南超级单体风暴的S波段偏振雷达观测分析. *气象学报*, 2018, 76(1): 92-103.
- [15] 李晓敏, 周筠珺, 肖辉, 等. 基于X波段双偏振雷达对雷暴单体中水成物粒子演变特征的研究. *大气科学*, 2017, 41(6): 1246-1263.
- [16] 张建云, 张持岸, 葛元, 等. 1522号台风外围佛山强龙卷X波段双偏振多普勒雷达反射率因子特征. *气象科技*, 2018, 46(1): 163-169.
- [17] 郑启康, 何敏玲, 李兆明, 等. 一次强对流天气过程双偏振雷达产品特征分析. *广东气象*, 2018(5): 15-18.
- [18] 于明慧. 相控阵及双偏振天气雷达在华南强对流天气过程中的应用. 北京: 中国气象科学研究院, 2018.
- [19] 冯亮, 肖辉, 孙跃. X波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究. *气候与环境研究*, 2018, 23(3): 366-386.
- [20] 孙娟珍, 陈明轩, 范水勇. 雷达资料同化方法: 回顾与前瞻. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 17-27.
- [21] 张云济, 张福青. 集合资料同化方法在强雷暴天气预报中的应用. *气象科技进展*, 2018, 8(3): 38-52.
- [22] 傅承浩, 郜吉东, 王云恒, 等. 雷达资料同化在可致龙卷的强暴雨系统分析中的一些应用. *气象科技进展*, 2018, 8(3): 19-37.
- [23] Jung Y, Xue M, Zhang G, et al. Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part II: impact of polarimetric data on storm analysis. *Monthly Weather Review*, 2006, 136(6): 2228-2245.
- [24] Li X, Mecikalski J R. Impact of the dual-polarization Doppler radar data on two convective storms with a warm-rain radar forward operator. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1989, 115(7): S282-S283.
- [25] Tong C. Limitations and potential of complex cloud analysis and its improvement for radar reflectivity data assimilation using OSSES. University of Oklahoma, 2015.
- [26] Lakshmanan V, Zhang J. Censoring biological echoes in weather radar images// Sixth International Conference on Fuzzy Systems & Knowledge Discovery. IEEE Computer Society, 2009.
- [27] 王洪, 孔凡铀, Youngsun J, 等. 面向资料同化的S波段双偏振雷达质量控制. *应用气象学报*, 2018, 29 (5): 546-558.
- [28] Wu C, Liu L P, Wei M, et al. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(3): 296-316.
- [29] Jung Y, Zhang G, Xue M. Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part I: observation operators for reflectivity and polarimetric variables. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(6): 2228-2245.
- [30] Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [31] 潘昶, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面一卫星一雷达三源降水融合试验. *气象学报*, 2015, 73(1): 177-186.
- [32] 潘昶, 谷军霞, 徐宾, 等. 多源降水数据融合研究及应用进展. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 143-152.