孙敏，戴建华，2019. 强降水和冰雹对流许可尺度集合预报个例试验[J]. 气象，45(11)：1501-1516. Sun M，Dai J H，2019. Convection-allowing ensemble forecasts of intense rainfall and hail：case study[J]. Meteor Mon，45(11)：1501-1516(in Chinese).

强降水和冰雹对流许可尺度集合预报个例试验*

孙　敏[1,2]　戴建华[1]

1 上海中心气象台，上海 200030

2 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室，南京 210023

提　要： 利用对流许可尺度集合预报系统，针对2015年4月28日夜间移动到江苏南部和上海地区，伴随短时强降水和冰雹的一次强对流过程，使用初始多源融合分析场对集合预报结果影响进行了分析。结合上海南汇双偏振雷达基数据观测，对12～14 h预报时效的反射率因子、差分反射率及冰雹集合预报结果进行了定性和定量的评估，分析了改进初始水物质分布，同时增加小尺度信息对于模式预报结果的影响。主要结果为：(1)对反射率因子预报的评估显示，初始场调整了水物质分布且增加了小尺度信息的试验(以下简称ADAS试验)，对降水的范围、分布特征及评分都有明显改进；(2)由于差分反射率在较小的距离内变化剧烈，对其准确预报难度较大，ADAS试验虽然预报强度偏强，但整体的位置和强度与实况更为接近，特别在大粒子预报方面具有更高的技巧，能够对微物理过程相关特征更好地进行描述；(3)使用地面人工观测和双偏振雷达观测对冰雹概率预报评估的结果显示，ADAS试验预报的高概率降雹区与观测落区接近，对冰雹落区预报具有一定的指示意义。通过多源融合分析调整初始水物质分布并增加小尺度信息的集合预报试验改善了较长预报时效的强降水和冰雹概率预报，具有更高的可信度，双偏振变量预报具有区分强降水与冰雹的优势，通过与观测的对比可以更好地评估模式对微物理过程描述的准确性。

关键词： 对流许可尺度集合预报，双偏振雷达，强降水，冰雹，概率预报

中图分类号： P456，P458　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.001

Convection-Allowing Ensemble Forecasts of Intense Rainfall and Hail：Case Study

SUN Min[1,2]　DAI Jianhua[1]

1 Shanghai Central Meteorological Observatory，Shanghai 200030

2 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education and School of Atmospheric Sciences，Nanjing University，Nanjing 210023

Abstract： Convective-allowing ensemble forecasts are analyzed for severe convection associated with short-duration intense rainfall and hail，which occurred in southern Jiangsu Province and Shanghai Region during the night of 28 April 2015. The data integration analysis is conducted at the initial time，using ARPS Data Analysis System (ADAS). The distribution of water substance is adjusted and more small-scale information is added to the initial field by using ADAS. Qualitative and quantitative verifications against Shanghai Nanhui dual-polarization radar observations are performed on the 12－14 h ensemble forecasts，including predicted reflectivity，differential reflectivity and hail. The results show that ADAS ensemble predicts the structure and location of the total and convective precipitation coverage more realistically compared with

* 国家重点研发计划(2018YFC1507405)、国家自然科学基金项目(41775049)、上海市科委科研计划项目(16DZ1206100)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-038)和上海市气象局强对流科技创新团队项目共同资助

2018年10月9日收稿；　2019年1月14日收修定稿

第一作者：孙敏，主要从事中尺度天气研究. Email：sunmin_angela@126.com

通信作者：戴建华，主要从事中尺度天气业务与研究. Email：djhnn@sina.com

observations, and it also has higher forecast skill than the control (CTRL) ensemble. Differential reflectivity varies dramatically within a small distance, thus increasing the difficulty to make accurate predictions. In terms of the simulated differential reflectivity, the ADAS ensemble may produce higher values, but the overall position and intensity are closer to observations. The ADAS ensemble is more skillful for the prediction of large particles, which shows a better description of the microphysics-related features. Compared with ground hail observations and dual-polarization radar observations, the predicted high probability hail location in ADAS ensemble is closer to the observations, which is of great significance to the prediction of hail falling area. Also, the ADAS ensemble improves the long-lead-time hail prediction and has higher confidence than the CTRL ensemble. The predicted dual-polarization variable has the advantage of distinguishing between intense rainfall and hail, providing an effective tool to evaluate the accuracy of the microphysical process description in the numerical model compared with the observation.

Key words: convective-allowing ensemble forecast, dual-polarization radar, intense rainfall, hail, probability forecast

引 言

集合预报与确定性预报相比具有额外的优势，它可以通过概率预报来反映初始条件及模式本身造成的不确定性。随着计算能力和中尺度数值模式的提升，中尺度预报模式的分辨率显著提高，已经有可能分辨积云对流尺度的系统，而不需要传统的积云对流参数化过程。考虑到强对流天气时空尺度小且伴随多尺度系统复杂的非线性相互作用，其不确定性更加突出。因此，将高分辨率模式与集合预报相结合，可以充分发挥两者在强对流天气预报方面的优势，对流尺度集合预报已成为国内外研究的热点(Roebber et al, 2004; Vié et al, 2011; Fang et al, 2011; Clark et al, 2012;谭燕和陈德辉, 2008;庄潇然等, 2016; 陈涛等, 2017)，通常将3～5 km水平网格距的预报称为对流许可尺度，1～2 km水平分辨率的预报称为风暴尺度，而把1 km及更高分辨率(几百米)预报称为对流可分辨尺度。

2014年上海南汇WSR-88D雷达完成了双偏振升级改造(尹春光等, 2015)，双偏振雷达使用水平和垂直极化波束观测大气，比反射率因子包含更多的粒子尺度分布信息(Kumjian and Ryzhkov, 2008)。例如，差分反射率(目标物对水平和垂直偏振波平行分量散射能量的差异)可用来判断采样体积内降水粒子的形状，其值取决于降水粒子的水平和垂直轴比。大雨滴在下落过程中受到自身重力、周围空气压力等作用发生形变，呈近似椭圆型，水平和垂直轴差别较大，因此差分反射率值较大；而干冰雹在下落过程中由于翻滚，呈近似球形，水平和垂直轴接近，差分反射率值较小(Bringi and Chandrasekar, 2001)。

2011—2013年美国WSR-88D的S波段雷达业务网升级为双偏振雷达，国外已有很多研究通过模式双偏振雷达预报量与观测的对比，来评估真实个例中利用数据同化诊断或模式预报的微物理状态(Jung et al, 2012; Li and Mecikalski, 2012; Dawson II et al, 2014; Putnam et al, 2014; Posselt et al, 2015)。Putnam et al(2017a)在灾害性天气春季试验中通过采用风暴尺度(2 km)集合预报系统，研究了不同微物理方案在模拟双偏振雷达特征能力方面的差异，但并未研究其在集合概率预报方面的表现。Putnam et al(2017b)则使用集合卡尔曼滤波初始化和不同微物理参数化方案对一次中尺度对流系统进行了集合概率预报，定性和定量评估了模拟的双偏振变量，研究表明双参数微物理方案的结果与实况更为接近，能更好地区分层云和对流区。然而，国内双偏振雷达(特别是S波段)并未普及，在这方面的研究仍较少。相比其他强对流灾害(如龙卷、雷暴大风和短时强降水)，使用集合预报直接预报冰雹的研究也相对较少，其中一部分原因是由于缺乏高质量高分辨率的冰雹观测数据，而双偏振雷达观测在冰雹的识别上具有显著的优势。Snook et al(2016)利用集合预报提供了冰雹预报的不确定信息，指出在经过同化后的高分辨率(500 m)对流可分辨尺度集合预报能够很好地对冰雹进行预测，同时双偏振雷达观测可以作为冰雹检验的补充信息。

对流尺度数值预报研究显示，其预报效果可以

通过改善初始条件和模式物理参数化得以提高。ARPS(Advanced Regional Prediction)的资料分析系统(ARPS Data Analysis System，ADAS)使用观测资料和模式初始分析场，利用物理定律和经验关系构造网格尺度初始水物质场的云分析方法能够改善初始的水物质分布，同时结合传统的客观分析方法增加中小尺度信息，能够提高模式初始场质量，提升预报的准确性(Xue et al，2003；Hu et al，2006)。

本文利用全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System，GEFS)提供的大尺度扰动信息构造对流许可尺度集合预报，对模式输出的预报结果进行双偏振变量诊断，并与观测进行对比，研究改善初始水物质场，并增加小尺度信息对强对流天气特别是大粒子降水和冰雹预报的影响。本文根据初始条件的差异将对流许可尺度集合预报分为两组对比试验，一组完全采用大尺度 GEFS 场的扰动得到，另一组则通过 ADAS 系统调整初始水物质分布并增加了小尺度信息得到。以 2015 年 4 月 28 日发生在华东地区的一次伴随短时强降水和冰雹的强对流过程为例，结合上海南汇双偏振雷达基数据观测，定性和定量评估了两组试验对反射率因子、差分反射率及冰雹集合预报的结果，分析了通过初始资料客观分析改善水物质分布和增加小尺度信息对预报结果的影响。

1　试验设计及个例选取

1.1　集合预报系统设计

本研究的集合预报基于 WRF_ARW(Weather Research and Forecasting，Advanced Research WRF)模式建立。水平分辨率为 3 km，属于对流许可尺度，垂直层数 50 层，水平格点数为 621×499，采用的 WRF 版本是 V3.9，模式覆盖范围如图 1 所示。

本文设计了两组集合预报系统，均由 1 个控制预报成员和 14 个扰动预报成员组成，采用 1°分辨率的 GEFS 预报场作为模式初始驱动场和侧边界场，两组试验除初始场外，模式的设置及侧边界场均完全相同。其中一组集合预报试验作为控制试验，初始场采用 WRF 前处理系统(WRF Preprocessing System，WPS)直接得到(以下简称 CTRL 试验)，而另一组则采用 ADAS 资料分析系统(以下简称 ADAS 试验)，结合观测资料(地面观测站分布见图 1)对初始场进行调整，采用逐步订正法对常规资料(地面自动站及国家站)进行客观分析，并使用非常规观测(雷达反射率因子观测及 FY-2E 静止气象卫星的红外和可见光通道观测)资料进入复杂云分析系统，对初始场中的水物质量进行调整，从而使得模式的初始场更加接近真实的大气状态。

考虑到物理过程不确定性的重要性，也为使预报系统具有更好的集合离散度，本文对不同成员使用了不同的陆面模式、地表方案和行星边界层方案组合(表 1)。WRF 目前版本的微物理方案包含单参数和双参数方案，其中双参数方案预报量包括粒子的质量浓度和数浓度，利用粒子数浓度的预报可以对双偏振雷达变量进行计算，从而实现对双偏振雷达变量的诊断预报。Milbrandt-Yau 双参数(以下简称 MY2)方案(Milbrandt and Yau，2005)能够区分冰雹和霰，对其分别进行计算，因此本文所有集合成员的微物理参数化方案均使用 MY2 方案。

1.2　个例选取

本研究选取 2015 年 4 月 28 日华东地区的一次

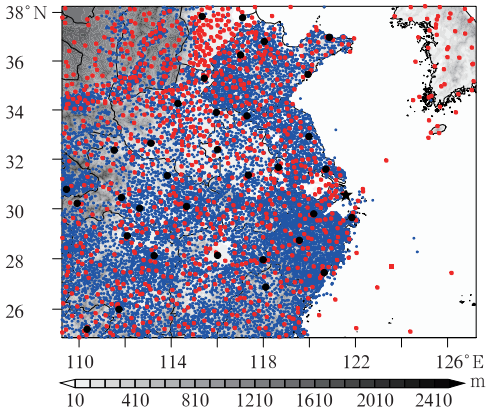

图 1　模式区域、初始客观分析和云分析中使用的地面观测站点分布

(黑点：雷达站，蓝点：地面自动观测站，红点：国家级观测站，黑五角星：上海南汇双偏振雷达位置)

Fig. 1　Model domain, the distribution of ground observations for data analysis

(black dots: radar sites, blue dots: regional automatic weather station sites, red dots: nation-level surface station sites, pentagram: location of Shanghai Nanhui Dual-Polarization Radar)

表 1 对流许可尺度集合预报系统各个成员的参数化配置

Table 1 Parameterization configuration for each member of the convection-allowing ensemble forecasts

成员名称	陆面模式	地表方案	边界层方案
控制预报成员	Noah	MO-Janic	MYJ
成员 1	Noah	Revised MM5	YSU
成员 2	Noah	Revised MM5	ACM2
成员 3	Noah	MYNN	MYNN2
成员 4	Noah	QNSE	QNSE
成员 5	RUC	MO-Janic	MYJ
成员 6	RUC	Revised MM5	Shin-Hong
成员 7	RUC	Revised MM5	ACM2
成员 8	RUC	MYNN	MYNN2
成员 9	RUC	QNSE	QNSE
成员 10	Noah-mp	Revised MM5	Shin-Hong
成员 11	Noah-mp	Revised MM5	YSU
成员 12	Noah-mp	Revised MM5	ACM2
成员 13	Noah-mp	MYNN	MYNN2
成员 14	Noah-mp	Revised MM5	UW

强对流过程作为试验个例，此次过程具有影响范围大、强度强、持续时间长等特点（穆瑞琪等，2015；李佳等，2017；吴海英等，2017）。28 日 00 时（世界时，下同）的高低空天气形势分析显示，深厚的华北冷涡南落，冷涡后部偏北急流伴随干冷平流，叠置于低空的偏南暖湿平流之上，导致上下温差大，形成强的不稳定层结，在地面中尺度辐合区产生强对流天气（图略）。强对流回波从 28 日 05 时起，自山东南部向南移动发展，逐渐影响江苏、上海和浙江北部，过程中伴随出现了雷暴大风、短时强降水和冰雹等多种灾害性天气（图 2），此外，据相关报道，徐州、宿迁、淮安、盐城、南京、扬州、镇江、常州、无锡、苏州以及上海西南的局部地区也出现了冰雹（江苏省 2015 年 4 月气候影响评价，http://www.jsmb.gov.cn/art/2015/5/6/art_69_26898.html；吴海英等，2017）。

试验起报时间为 00 时，两组试验均预报 18 h，由于 12 时起强对流回波开始影响长三角地区，进入上海南汇雷达观测范围之内，且在地面观测到了较大冰雹（图 2），因此本文主要针对 12—14 时的预报结果进行对比分析。

2 数据处理

2.1 雷达反射率因子及双偏振变量的诊断预报

本文的模式后处理采用奥克拉荷马大学风暴分析与预测中心（Center for Analysis and Prediction of Storms，CAPS）研发的 CAPS-PRS_V1.0（CAPS Polarimetric Radar data Simulator），它是一种用于具有显式微物理方案非静力天气预报模型的通用偏振雷达数据模拟器，支持 5 种 WRF 模式的微物理方案：新 Thompson 方案、MY2 方案、Morrison 双参方案、WDM6 方案和 NSSL 双参方案。该模拟器基于雷达气象方程，利用 WRF 模式输出的粒子混合比和数浓度，构建粒子数浓度分布（PSD），结合粒子的密度和形状，通过散射截面加权对 PSD 积分得到水平偏振和垂直偏振的反射率因子，来计算双偏振雷达变量（Vivekanandan et al，1991；Zhang et al，2001；Jung et al，2008；2010）。WRF 模式输出的预报数据通过 CAPS-PRS 计算得到雷达反射率因子及双偏振变量并插值到指定雷达（上海南汇雷达）的指定仰角，本文选择最低的 0.5°仰角（12—14 时观测中强对流回波所在位置的高度约 2～4 km）是因为双偏振变量的特征在低仰角更为显

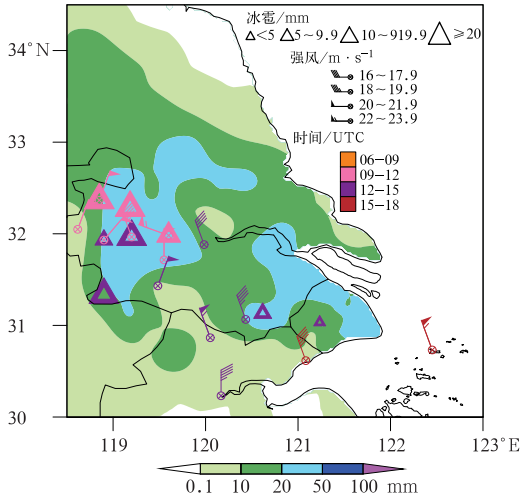

图 2 2015 年 4 月 28 日 00 时至 29 日 00 时灾害性天气分布图

（三角形：产生降雹的站点，大小代表降雹直径，颜色代表发生降雹的时间；风向杆：产生大风的站点，颜色代表发生大风的时间；填色为 24 h 降水量）

Fig. 2 Disaster distribution from 0000 UTC 28 to 0000 UTC 29 April 2015

(Triangles are stations with hail, the size represents hail diameter, color represents the time having hail; wind barbs are stations seeing strong winds and the color represents the time with strong wind; shaded area represents the 24 h rainfall amount)

著，且低仰角受到融化层的影响较小，便于与雷达观测（图 5a～5c 和图 10a～10c）比较。

2.2　初始场扰动的多尺度分布特征

为了对比 CTRL 试验和 ADAS 试验的初始场在不同尺度上的扰动分布特征，分别计算了两组试验中 1 个控制预报成员和 14 个成员初始场在不同尺度上的扰动总能量（E_{DT}），计算式（李俊等，2017）为：

$$E_{DT}=\frac{1}{2}\sum_{i,j,k}\left(u'^{2}_{i,j,k}+v'^{2}_{i,j,k}+\frac{c_p}{T_r}T'^{2}_{i,j,k}\right) \quad (1)$$

式中，u'，v' 和 T' 分别为水平风场扰动及温度扰动，$c_p=1004\ \mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$，$T_r=270$ K。尺度分解采用 Haar 二维小波分解方法，该方法将要素场分解为不同空间尺度的分量，对于 $n>1$ 定义分解的格点区域为 $2^n\times2^n$，原始要素场可以在 $n+1$ 个尺度上逐一进行分量的分解，且最终等于这些分量的总和；其中第 $i(1\leqslant i\leqslant n)$ 个分量计算公式为原始要素场在 $2^{i-1}\times2^{i-1}$ 格点区域的平均场与原始要素场在 $2^i\times2^i$ 格点区域的平均场之差，第 $n+1$ 个分量为整个区域的平均值，对于 3 km 格距的原始要素场，每个分量代表的是空间尺度为 $3\times2^{i-1}$ km 上的变化（Johnson et al，2014），本文将分解后的 3 km（3×2^0）作为小尺度部分的代表，96 km（3×2^5）作为中尺度部分的代表，768 km（3×2^8）作为大尺度部分的代表。

2.3　概率匹配集合平均（PMEM）

概率匹配集合平均是将研究区域内集合平均和全部集合成员的变量值从大到小排列，然后将全部集合成员中变量值的概率密度函数值重新赋值给在集合平均中具有相同秩（顺序）的空间位置（Ebert，2001）。本文中采用概率匹配集合平均而不采用常规的集合平均（算术平均），是由于反射率因子及双偏振变量在较小的范围内变化很快，当集合成员之间预报的对流回波存在微小的位置偏差时，简单的算术平均会导致预报变量值的低估及覆盖范围的偏大，而采用概率匹配集合平均则有利于减轻上述偏差。

3　集合预报结果分析

3.1　初始场水物质和不同尺度扰动总能量分布对比

图 3 对比了模式初始时刻 CTRL 试验和 ADAS 试验中控制预报成员沿着117°E南北向的水物质

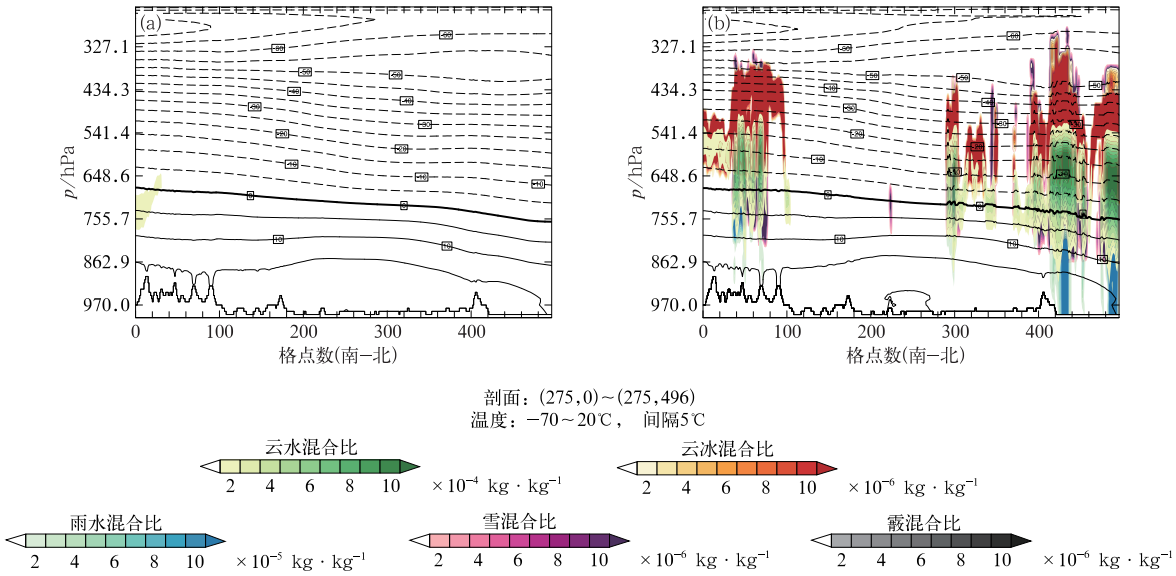

图 3　控制预报成员初始时刻沿 117°E（格点数 275）的水物质南北向垂直分布

（a）CTRL 试验，（b）ADAS 试验

Fig. 3　Water substance distribution along 117°E (grid number 275) cross-section of the control member at the initial time

(a) CTRL ensemble, (b) ADAS ensemble

(云水、云冰、雨水、雪和霰混合比)垂直分布,从图中可以看出,CTRL 试验由于从全球集合预报系统 GEFS 数据插值得到,仅在最南侧的 750 hPa 附近有少量云水分布(图 3a),而经过 ADAS 试验的云分析系统后,由于综合考虑了雷达和卫星观测,在南北两侧 750～400 hPa 均有云水和云冰分布,雷达组合反射率图显示北侧已经有降水产生(图略),因此低层还存在雨水粒子(图 3b),由此可见,CTRL 试验和 ADAS 试验初始水物质分布的差异显著。

控制预报成员和 14 个成员的初始扰动总能量在不同尺度上的分布如图4所示,在中尺度(96 km)上的扰动总能量大于小尺度(3 km)和大尺度(768 km),对比 CTRL 试验和 ADAS 试验可以发现,ADAS 试验(图 4a 中蓝色柱状,图 4b 中实线)在小尺度的扰动总能量大于 CTRL 试验(图 4a 中红色柱状,图 4b 中虚线),而 CTRL 试验则在中尺度和大尺度的扰动总能量分布上大于 ADAS 试验。

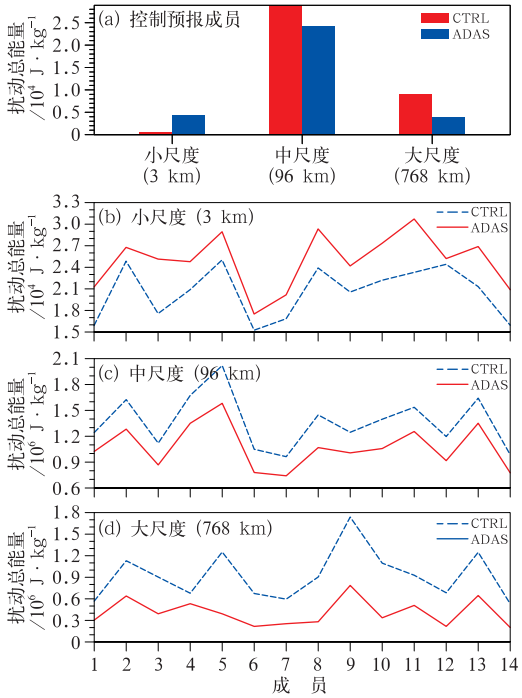

图 4 初始时刻控制预报成员和 14 个集合成员在不同尺度上的扰动总能量分布
(a)控制预报成员在不同尺度上的扰动总能量分布,(b)14 个集合成员小尺度(3 km)的扰动总能量,(c)14 个集合成员中尺度(96 km)的扰动总能量,(d)14 个集合成员大尺度(768 km)的扰动总能量

Fig. 4 Total perturbation energy distribution on different scales of the control member and 14 ensemble members at the initial time
(a) total perturbation energy distribution on different scales of the control member, (b) total perturbation energy distribution on small scale (3 km) of 14 ensemble members, (c) total perturbation energy distribution at mesoscale (96 km) of 14 ensemble members, (d) total perturbation energy distribution on large scale (768 km) of 14 ensemble members

因此,采用 ADAS 试验结合观测资料调整后的初始场增加了小尺度的信息,使得扰动总能量在不同尺度重新进行了分配,增加了小尺度的扰动总能量。

3.2 反射率因子诊断预报

3.2.1 反射率因子概率匹配集合平均的定性评估

为了定性评估造成此次强对流天气的母体风暴预报效果,将两组集合预报试验反射率因子的概率匹配集合平均(PMEM)结果与观测进行了对比。上海南汇雷达 12—14 时的 0.5°仰角反射率因子观测(图 5a～5c)显示,强对流系统向南偏东方向移动发展,强回波范围不断扩大,影响江苏南部、长江口区和上海北部,对流区位于回波移动方向前侧,对流区后侧有大片的层云区。CTRL 试验的 PMEM 结果(图 5d～5f)显示,层状云区的覆盖范围比观测偏小,且与观测不同,CTRL 试验预报的对流区位于层状云区中部,从回波移动速度来看也比观测偏慢,回波仅影响了江苏南部和长江口区的西部地区。ADAS 试验的 PMEM 结果(图 5g～5i)与 CTRL 试验相比,预报的层状云区范围更广更接近观测,且 ADAS 试验预报出的对流区位于回波移动方向的前侧,移动速度也更接近于观测。但 CTRL 试验和 ADAS 试验预报的最强回波中心的强度与位置均与观测存在一定的偏差。

3.2.2 反射率因子的概率预报评估

概率预报可以反映集合预报的不确定性,考虑到对流许可尺度集合预报对于时间和位置误差十分敏感,本文采用邻域集合概率(NEP; Roberts and Lean, 2008),该方法考虑了单个模式格点周围一定范围内的所有格点上所有集合成员的数据生成概率预报,而不仅仅依赖单个格点上的数据,因此 NEP 同时包含了空间和集合不确定性。

对流具有较小的空间尺度,并综合考虑模式 3 km 的格距,选取半径为 6 km 的圆形区域内所有格点来计算 NEP。使用两组集合预报试验得到的上海南汇雷达 12—14 时的 0.5°仰角反射率因子预报值分别计算了反射率因子＞20 dBz(图 6)和

>40 dBz(图 7)的 NEP,并相应叠加了反射率因子观测值 20 和 40 dBz 等值线(红线)。

>20 dBz 的范围反映了包含对流和层云区的总降水覆盖区域,ADAS 试验的 NEP 预报与 CTRL 试验相比,在降水结构和位置预报都有显著改进(图 6)。ADAS 试验(图 6d～6f)的较高概率(>0.6)覆盖区域的位置和形状均与观测 20 dBz 以上的区域近似吻合,而西南侧的移动速度比观测慢,14 时预报的较高概率区域比观测偏北。CTRL 试验(图6a～6c)显示较高概率(>0.6)范围仅覆盖观

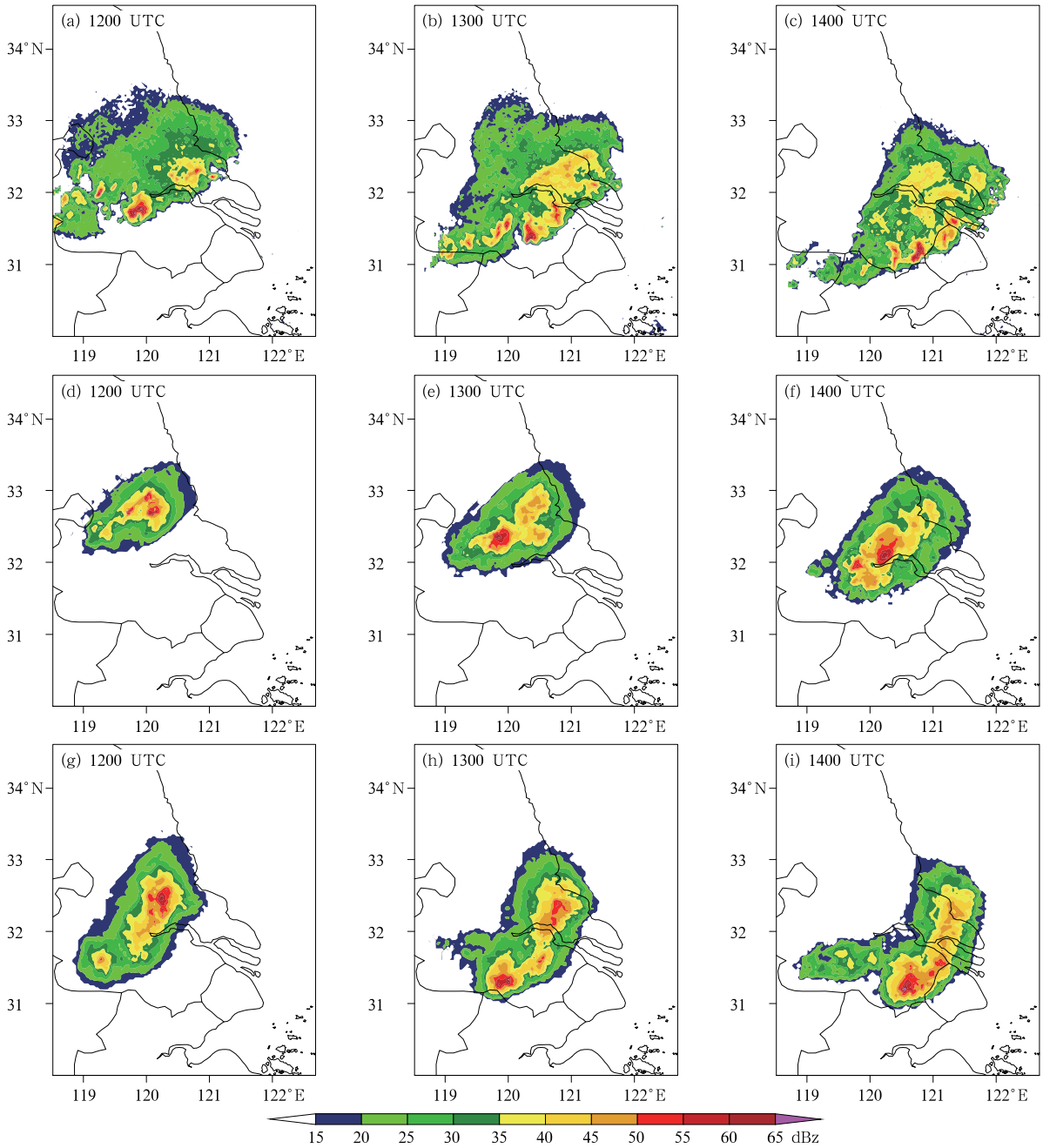

图 5　2015 年 4 月 28 日 12—14 时上海南汇雷达 0.5°仰角反射率因子分布
(a,b,c)观测,(d,e,f)CTRL 试验的概率匹配集合平均(PMEM),
(g,h,i)ADAS 试验的概率匹配集合平均(PMEM)

Fig. 5　Reflectivity (0.5° tilt) distribution of Shanghai Nanhui Radar in 1200—1400 UTC 28 April 2015
(a, b, c) observation, (d, e, f) probability matching ensemble mean of CTRL ensemble,
(g, h, i) probability matching ensemble mean of ADAS ensemble

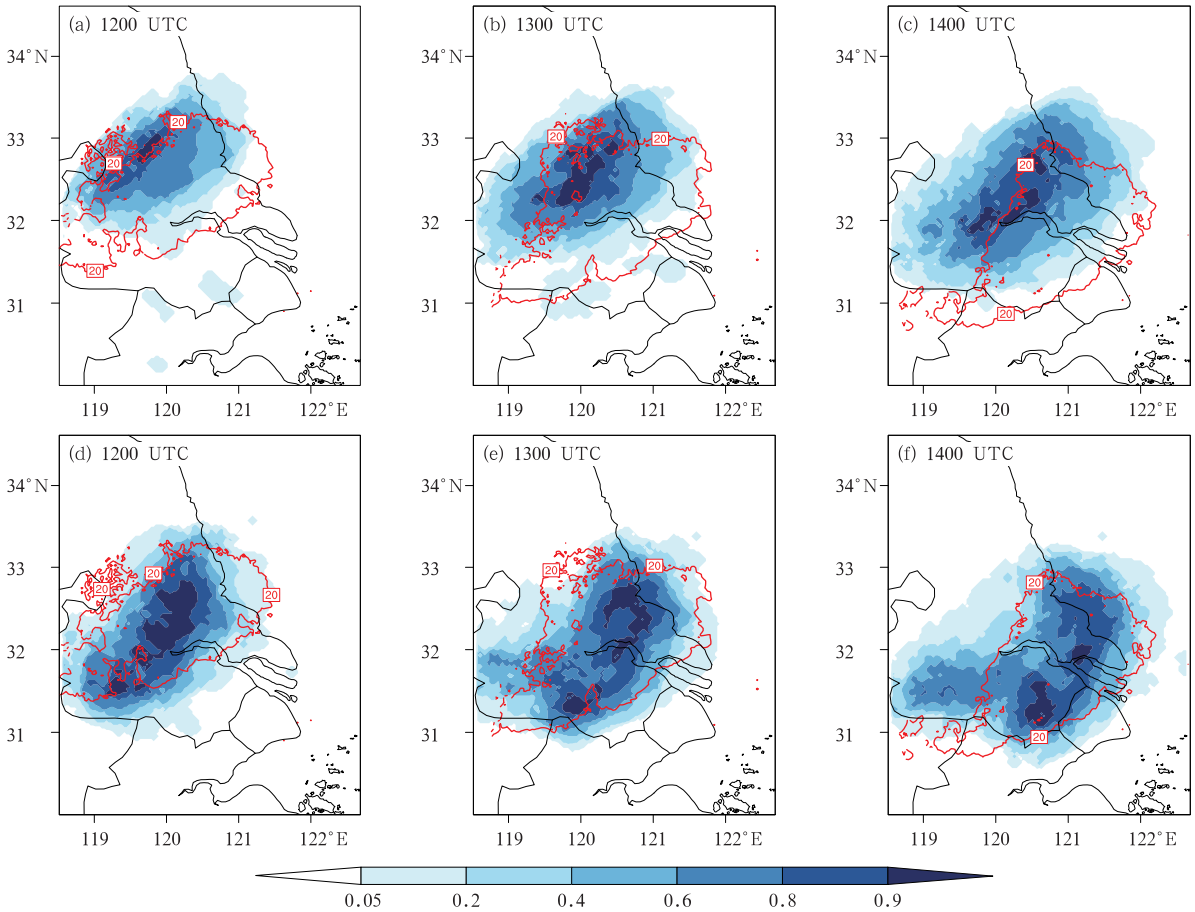

图 6 2015 年 4 月 28 日 12—14 时上海南汇雷达 0.5°仰角反射率因子>20 dBz 的概率预报(填色)和观测反射率因子 20 dBz 的等值线(红线)

(a,b,c)CTRL 试验的邻域集合概率(NEP),(d,e,f)ADAS 试验的邻域集合概率(NEP)

Fig. 6 Neighborhood ensemble probability (shaded) of reflectivity (0.5° tilt) of Shanghai Nanhui Radar exceeding 20 dBz using a 6 km radius in 1200—1400 UTC 28 April 2015

(Thick red line represents observed reflectivity of 20 dBz)

(a, b, c) CTRL ensemble, (d, e, f) ADAS ensemble

测 20 dBz 以上区域的一半,而 14 时预报的高概率(>0.8)区域更是有一部分落在了观测 20 dBz 以上的范围以外。

>40 dBz 的区域用来反映对流降水区域,相比总降水覆盖区域,对流降水区域范围较小且较为分散,因此,对于对流降水区域的概率预报呈现较大的误差。在 CTRL 试验中(图 7a~7c)仅较低概率(0.05~0.4)与观测 40 dBz 以上区域有较小的重合,较大概率的区域均落在观测 40 dBz 以上的区域以外。而 ADAS 试验(图 7d~7f)相比 CTRL 试验与观测 40 dBz 以上的区域有更大的重合,概率也较大(0.4~0.8),但 ADAS 试验中等概率(0.4~0.8)的覆盖范围较观测 40 dBz 以上的区域偏大。

3.2.3 反射率因子的定量评估

为了定量比较反射率因子预报结果,基于图 5 中上海南汇雷达 0.5°仰角反射率因子的 PMEM 预报,分别计算了两组集合预报不同阈值下的 ETS 和偏差(Bias)评分(图 8)。

从 ETS 评分来看(图 8a~8c),ADAS 试验相比 CTRL 试验有了显著的改善,对于 20 dBz 的阈值(反映了包含对流和层云区的总降水),CTRL 试验在 12—14 时三个整点时次的 ETS 在 0.1~0.2,而 ADAS 试验则提高到了 0.4~0.5,对于 40 dBz 的阈值(反映了对流降水区域),CTRL 试验的 ETS 评分均为负值,而ADAS试验则将其提高到了0.1~0.2。

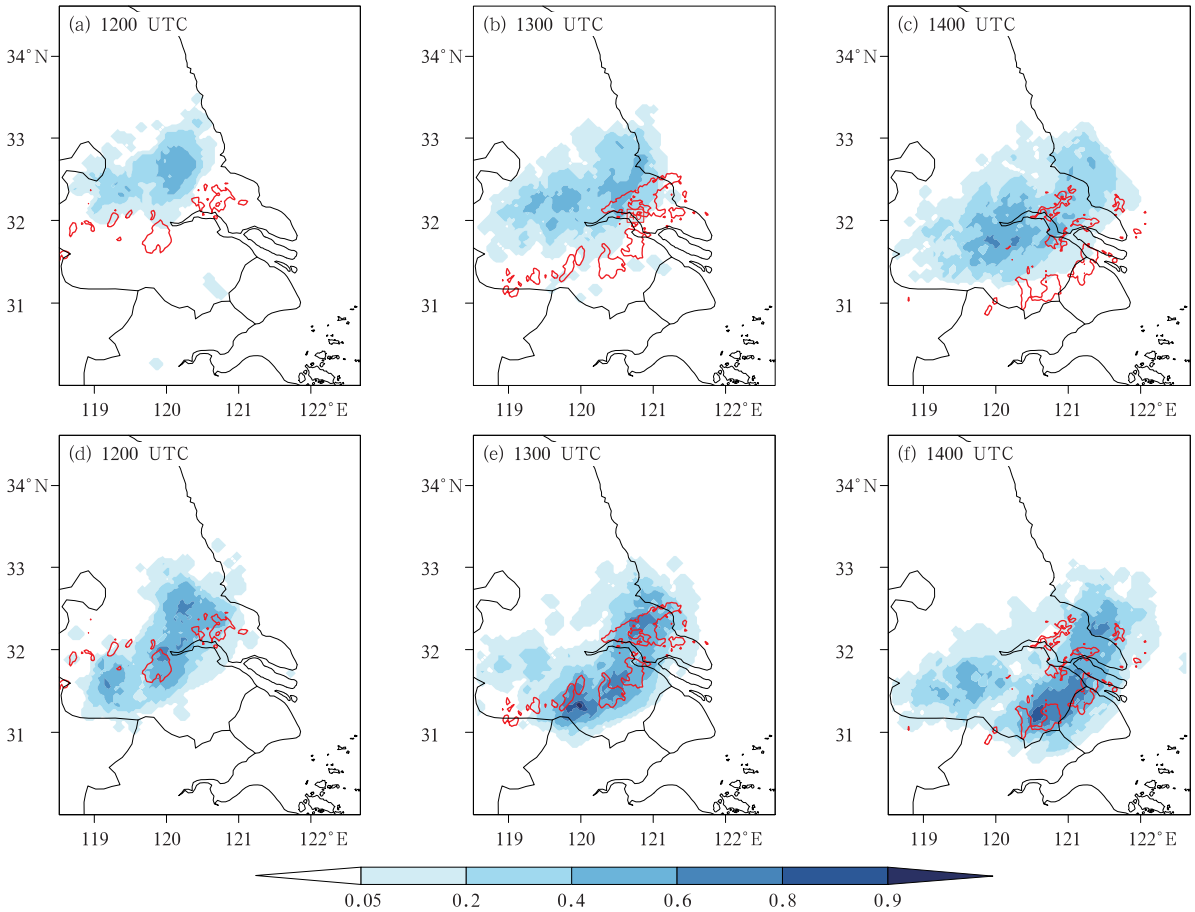

图 7　同图 6,但为反射率因子>40 dBz 的概率预报(填色)和观测反射率因子 40 dBz 的等值线(红线)

Fig. 7　Same as Fig. 6, but for the neighborhood ensemble probability (shaded) of reflectivity (0.5° tilt) of Shanghai Nanhui Radar exceeding 40 dBz

(Thick red line represents observed reflectivity of 40 dBz)

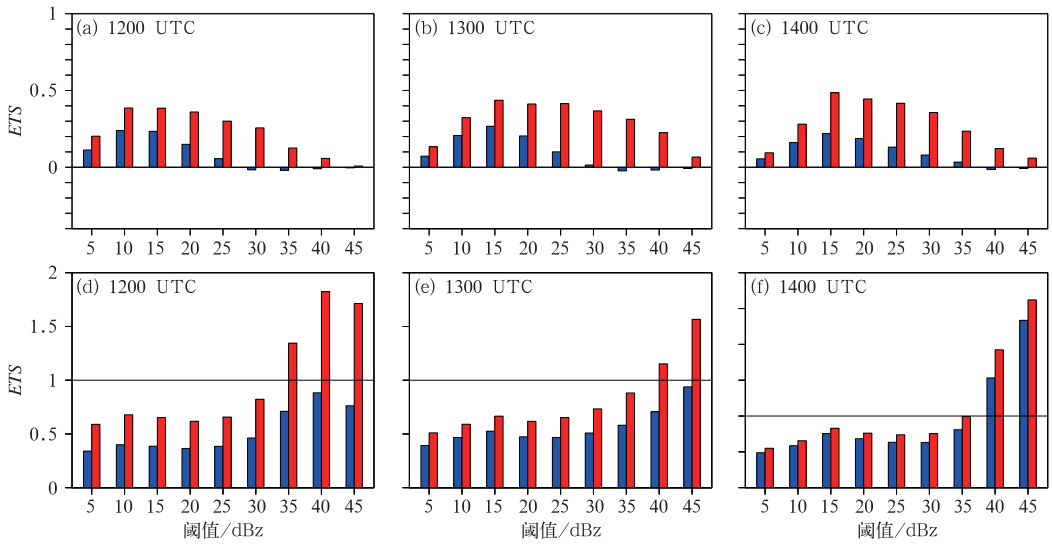

图 8　2015 年 4 月 28 日 12—14 时上海南汇雷达 0.5°仰角不同阈值的反射率因子在 CTRL 试验(蓝色)和 ADAS 试验(红色)的概率匹配集合平均(PMEM)结果中的

(a,b,c)ETS 评分,(d,e,f)Bias 评分

Fig. 8　ETS (a, b, c), Bias (d, e, f) of different reflectivity (0.5° tilt) threshold using probability matching ensemble mean of CTRL (blue) and ADAS (red) ensemble in 1200—1400 UTC 28 April 2015

Bias 评分为预报满足标准的格点数与观测满足标准的格点数之比，当预报无偏差时，$Bias=1$，若 $Bias>1$ 时，该反射率因子阈值以上的预报范围偏大，反之预报范围偏小。图 8d～8f 中 Bias 评分显示，ADAS 试验相比 CTRL 试验在所有反射率因子阈值上的预报范围都有所扩大，但是，两组集合在 30 dBz 阈值以下的预报范围依然比观测偏小。

为了避免由于观测与预报之间存在空间偏差而导致较低的评分，图 9 绘制了 CTRL 试验和 ADAS 试验在不同变量阈值下格点数统计直方图，为了能与观测进行对比，对 CTRL 试验和 ADAS 试验所有成员的预报统计值均除以集合大小，进行归一化得到平均值 CTRL_mean 和 ADAS_mean，而图 9 中的阴影则为对应阈值下成员预报统计得到的最大和最小值所围成的区域 CTRL_member 和 ADAS_member。由于观测的层云区域面积大于模式预报，因此观测的反射率因子直方图存在明显的峰值（图 9a～9c），且随着预报时效的增加，观测的峰值逐渐往更高的反射率因子值移动，12 时和 13 时的观测峰值位于 20～25 dBz，而 14 时的观测峰值移到了 30～35 dBz，CTRL_mean 和 ADAS_mean 不存在明显的峰值，从 15 dBz 起随着反射率因子值的增加格点数逐渐减少，仅 14 时的 ADAS_mean 在 45 dBz 附近存在一个次峰值。由于模式预报的强对流区范围比观测大，因此与观测相比，预报 >40 dBz 的格点数偏多，特别是 ADAS_mean 在 40～50 dBz 范围内偏多显著。从 CTRL_member 和 ADAS_member 来看，有部分成员的峰值达到与观测相当，但强度略有偏差，在观测峰值的范围内，ADAS_member 中的最大值比 CTRL_member 中

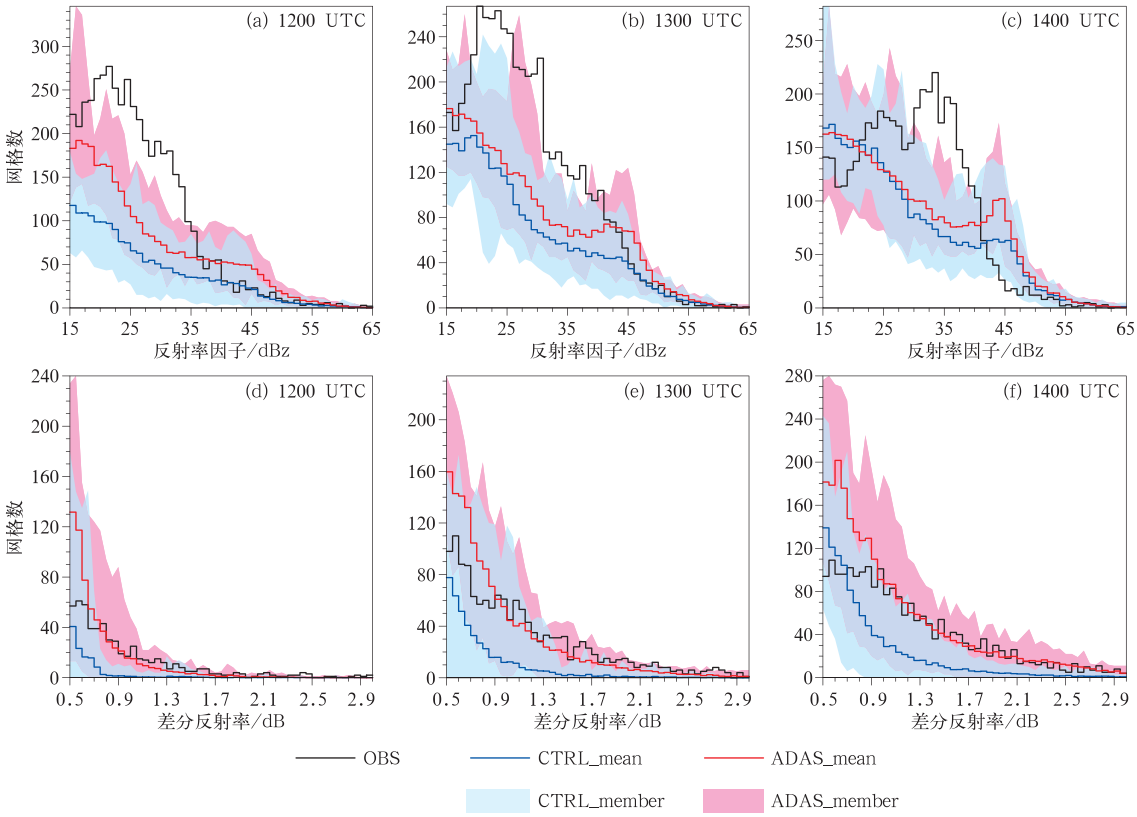

图 9 2015 年 4 月 28 日 12—14 时上海南汇雷达 0.5°仰角观测（黑线）、CTRL 试验平均（蓝线）、ADAS 试验平均（红线）、CTRL 试验成员（蓝色阴影）和 ADAS 试验成员（红色阴影）格点数直方图

（a，b，c）反射率因子，（d，e，f）差分反射率

Fig. 9 Grid number histogram of observation (black line), CTRL ensemble mean (blue line), ADAS ensemble mean (red line), CTRL ensemble member (blue shaded) and ADAS ensemble member (red shaded) at 0.5° tilt of Shanghai Nanhui Radar at 1200—1400 UTC 28 April 2015

(a, b, c) reflectivity, (d, e, f) differential reflectivity

的最大值更为接近观测。

3.3　差分反射率诊断预报

3.3.1　差分反射率概率匹配集合平均的定性评估

图 10 与图 5 相似,但计算的是差分反射率。图 10a～10c 的观测显示,12 时的差分反射率值和分布范围均较小,对应图 5a 中反射率因子观测有两个大值中心,一个位于江苏省的无锡和常州市附近,另一个位于江苏省南通市附近。差分反射率的大值区仅位于南通市附近,因此位于无锡和常州市附近的对流单体对应高反射率因子和低差分反射率,满足出现冰雹的判断标准,而另一个位于南通市附近的对流单体则对应高反射率因子和高差分反射率,满足出现强降水(大粒子)的判断标准。13 时和 14 时的差分反射率值逐渐增大,分布范围逐步扩大,与此对应,强回波的范围也不断扩大(图 5b,

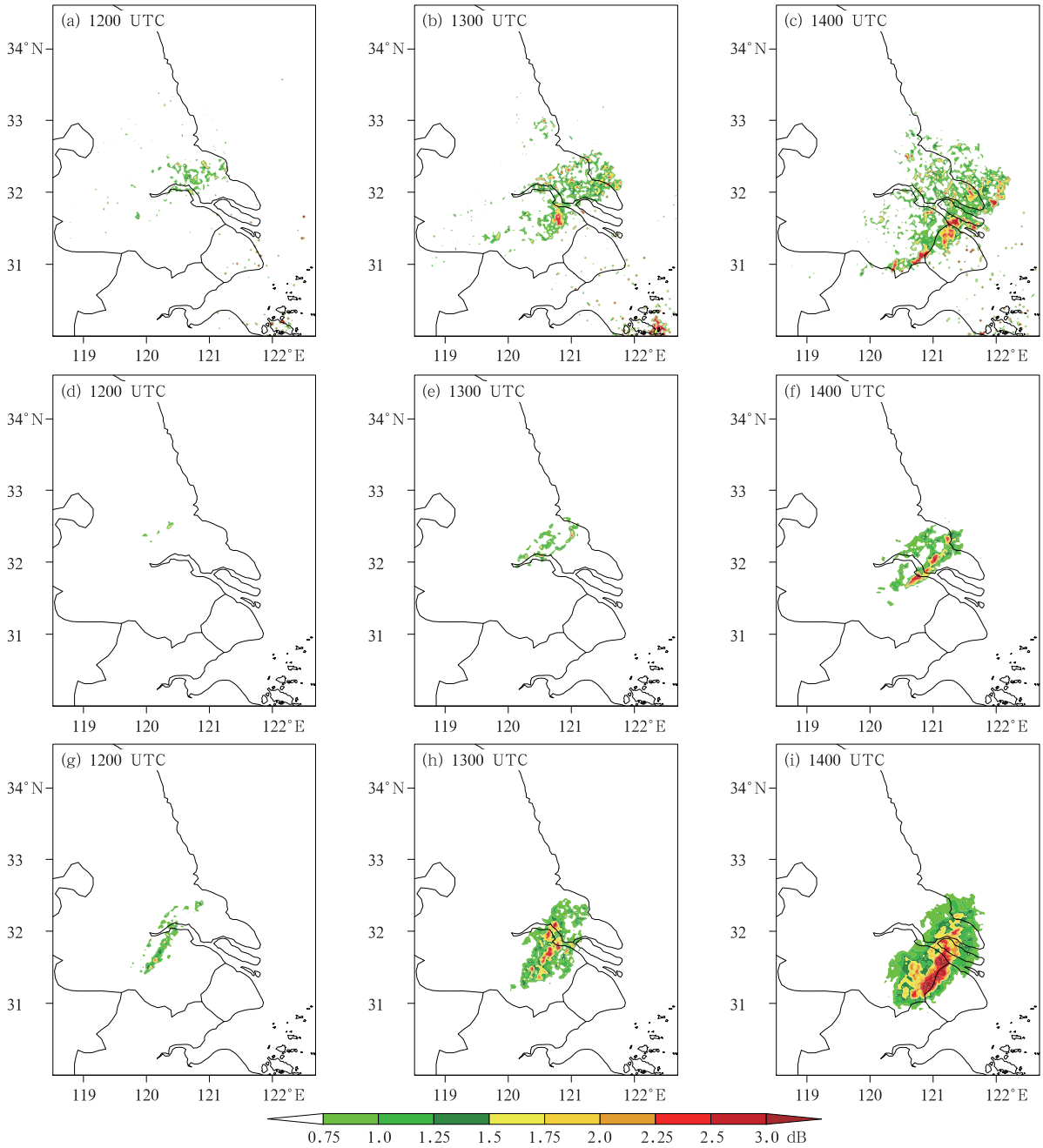

图 10　同图 5,但为差分反射率分布

Fig. 10　Same as Fig. 5, but for differential reflectivity (0.5° tilt) distribution

5c)，表明出现强降水(大粒子)的范围和强度都有所增大，而回波西南侧的高反射率因子依然对应较低的差分反射率值，满足出现冰雹的判断标准。

从两组集合预报试验 PMEM 的结果看，CTRL 试验预报的差分反射率范围和值的大小均比观测偏小(图 10d～10f)，且由于 CTRL 试验预报的回波移动速度比观测偏慢，因此差分反射率的大值区位置比观测偏北，虽然 ADAS 试验预报 14 时的差分反射率与观测相比强度偏强，但整体的预报位置和强度与实况更为接近。

3.3.2 差分反射率的概率预报评估

在 3.2.2 节中，基于 20 和 40 dBz 的阈值对总降水和对流降水分别进行了概率预报评估，而差分反射率的大值可以用来区分强降水中的大粒子，选用 2.0 dB 阈值来计算两组集合预报试验得到的差分反射率 NEP(图 11)，相应叠加了观测值2.0 dB 等值线(红线)。

CTRL 试验预报 2.0 dB 以上差分反射率的概率较低(<0.4)，且位置与观测存在明显的差异，ADAS 试验预报在 12 时低概率(0.05～0.2)区域与观测的 2.0 dB 等值线有一定重合，而在13 时 和 14 时中等概率(0.2～0.6)区域虽然覆盖范围较大，但几乎涵盖了观测的 2.0 dB 等值线范围，且整个区域呈东北—西南向块状，与观测分布型类似。

3.3.3 差分反射率的定量评估

图 9d～9f 中对差分反射率也绘制了两组试验的格点数直方图。CTRL_mean 和 ADAS_mean 在差分反射率预报的直方图分布形态与观测较为接近，无明显峰值，从 0.5 dB 起随着差分反射率值的增加格点数逐渐减少，当冰雹与降水混合时，差分反射率值较小且呈正值，而差分反射率的大值(>2.0 dB)则由强降水中的大粒子所导致。在较小的差分反射率值范围内(0.5～1.5 dB)，ADAS_mean 的预报范围大于观测，而CTRL_mean的预报范围则小

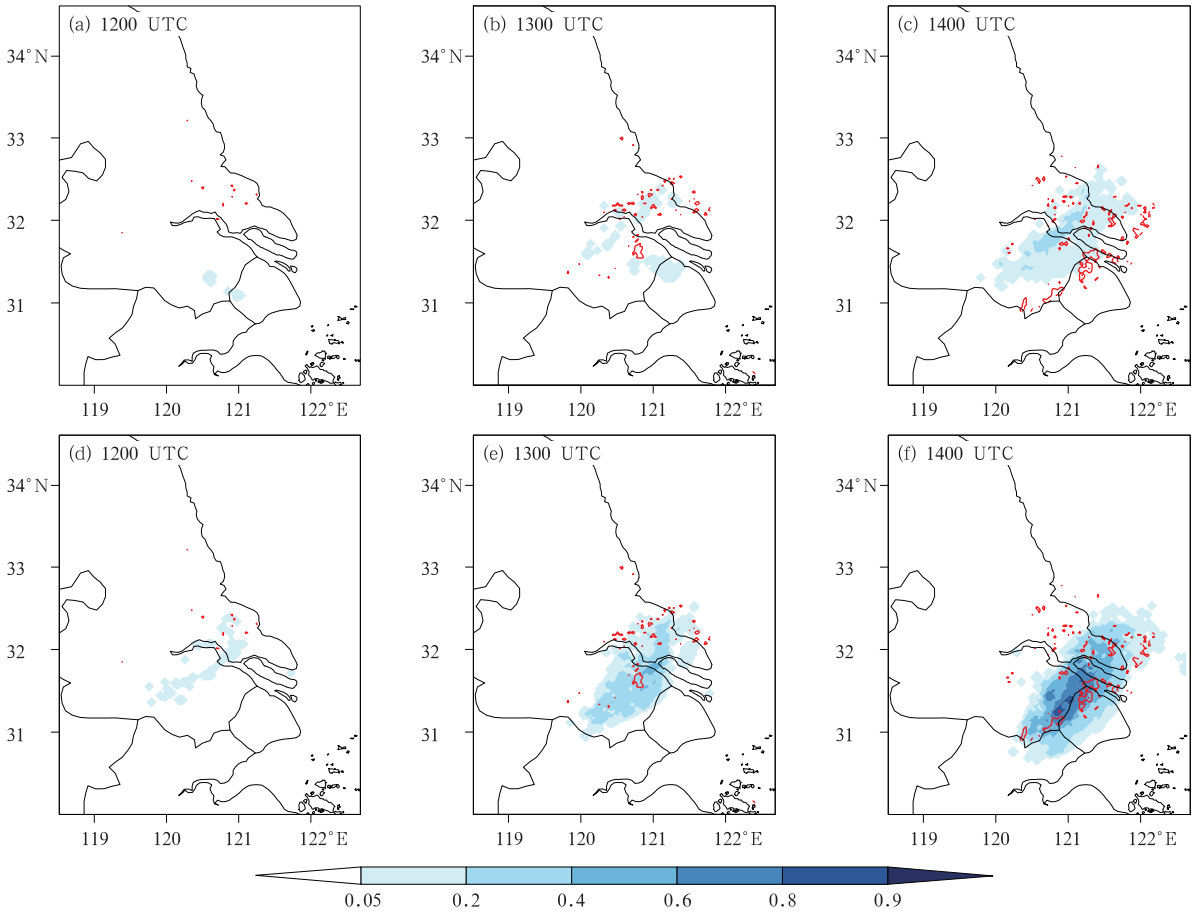

图 11 同图 6，但为差分反射率>2.0 dB 的概率预报(填色)和观测差分反射率 2.0 dB 的等值线(红线)

Fig. 11 Same as Fig. 6, but for neighborhood ensemble probability (shaded) of differential reflectivity (0.5° tilt)

(Thick red line represents observed differential reflectivity of 2.0 dB)

于观测,且 CTRL_member 和 ADAS_member 中的最大值都超过了观测,而在差分反射率的大值区(>2.0 dB)内,ADAS_mean 与观测较为一致,CTRL_mean 的预报范围则小于观测,且 CTRL_member 中的最大值依然小于观测,即 CTRL 试验中所有的成员对差分反射率的大值区预报范围都偏小。

3.4　冰雹最大直径诊断预报

上文根据反射率因子阈值区分了总降水和对流降水区域,根据差分反射率阈值区分了大粒子降水,而在此次强对流过程中还伴随有冰雹。冰雹是一种固态降水物,直径一般为 5～50 mm,大的有时可达 100 mm 以上,28 日 12—14 时具备人工观测的国家级站点中观测到直径>5 mm 冰雹的站点(图 12 中黄点)包括江苏南京站(9 mm)、高淳站(23 mm)和句容站(10 mm)。对两组集合预报分别计算了各个成员冰雹最大直径的预报值(maximum predicted hail diameter, MPHD, 计算方法详见附录),并选取 5 mm 作为阈值,在半径 6 km 的圆形区域内来计算 NEP。图 12 中阴影部分为两组集合预报试验 12—14 时 3 个整点时刻每个格点对应的最大 NEP。由于具备人工观测的国家级站点分布相对稀疏,因此,使用上海南汇雷达 12—14 时的 0.5°仰角观测的反射率因子(图 5a～5c)>55 dBz、差分反射率(图 10a～10c)<1.5 dB 且相关系数(图略)<0.95 的区域来辅助判断冰雹落区(红色等值线)。

通过雷达判定的降雹区主要集中在江苏省南部的常州、无锡和苏州地区,均位于对流区域的西南侧,与 3.3.1 节中对观测差分反射率的分析结果一致。两组集合预报试验 5 mm 阈值的 NEP 分布范围较广,CTRL 试验的概率值较小,多集中在 0.4～0.6,而 ADAS 试验的概率值达到了 0.8 以上,虽然两组集合预报试验在整个对流区域均预报出现冰雹的概率,但西南侧的概率值较大,与观测相符合。观测到冰雹的 3 个站点均落在两组集合试验预报的 NEP 范围内,概率值大小相当。而对于雷达判定的冰雹落区,由于 CTRL 试验中回波移动速度较慢,未预报出苏州的降雹概率,常州和无锡则位于中低概率区(0.2～0.6),且CTRL试验的高概率区无观

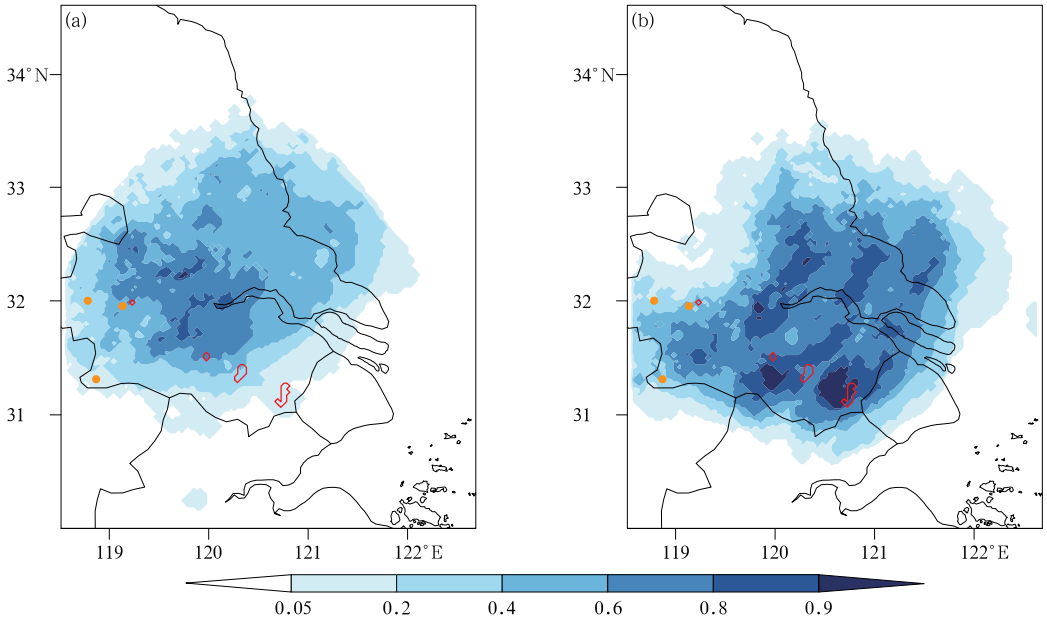

图 12　2015 年 4 月 28 日上海南汇雷达 0.5°仰角冰雹最大直径预报(MPHD)>5 mm 的概率预报(填色)、台站记录的冰雹观测(黄点)和双偏振雷达观测到的冰雹区域(红色等值线)12—14 时 3 个时次 CTRL 试验(a)和 ADAS 试验(b)的邻域集合概率(NEP)最大值

Fig. 12　Neighborhood ensemble probability (shaded) of maximum predicted hail diameter exceeding 5 mm using a 6 km radius in 1200－1400 UTC 28 April 2015

(Yellow dots are ground hail observation records and red thick lines are the hail area observed by dual-polarization radar)

(a) maximum value of CTRL ensemble, (b) maximum value of ADAS ensemble

测对应；而 ADAS 试验中预报常州、无锡和苏州地区出现 5 mm 以上冰雹的概率值高达 0.6～0.9，均落在 ADAS 试验预报的高概率（>0.8）降雹区附近。

4 结论和讨论

针对 2015 年 4 月 28 日发生在华东地区的一次伴随短时强降水和冰雹的强对流天气过程，使用 GEFS 作为模式的初始场和侧边界场，构造了两组水平分辨率 3 km 的集合预报对比试验，其中，CTRL 试验的初始场直接采用 WRF 前处理系统 WPS 得到，ADAS 试验的初始场采用 ADAS 资料分析系统得到，结合了观测资料，更接近真实的大气状态。通过对初始时刻水物质的分布和初始扰动总能量在不同尺度上分解分析显示，与 CTRL 试验相比较，ADAS 试验经过云分析调整了初始时刻的水物质分布，同时采用逐步订正法对常规资料进行了客观分析，增加了初始场的小尺度信息。两组集合预报试验的对比时段选择在回波进入上海南汇双偏振雷达观测范围内，且该时段内发生了短时强降水和冰雹。针对强对流在较小的范围内变化快及对时空误差敏感的特征，文中集合平均采用概率匹配集合平均，概率预报采用 6 km 领域集合概率预报，对两组集合预报试验进行了定性和定量的评估，主要结论如下：

（1）对反射率因子集合平均预报的评估显示，ADAS 试验的对流区与观测一致，位于回波移动方向的前侧，移动速度更接近于实况，而 CTRL 试验的对流区则位于层状云区中部，回波移动速度也比实况偏慢，这些都导致了两组集合预报试验对双偏振变量和冰雹的预报产生较大的差异。对总降水区和对流降水区的集合概率预报进行评估显示，相比总降水覆盖区域，对流降水区域范围较小且较为分散，因此，两组集合预报试验对于对流降水区域的概率预报均呈现较大的误差，但 ADAS 试验对降水结构和位置预报都比 CTRL 试验有显著改进，且 ADAS 试验在基于反射率因子不同阈值 ETS 评分和格点数直方图（不考虑空间偏差）计算的基础上与 CTRL 试验相比具有更高的预报技巧。

（2）由于双偏振变量特征通常可以反映出小尺度的对流系统物理过程，而 ADAS 试验调整了初始水物质分布并在初始场中增加了更多的小尺度信息，对差分反射率的评估显示，ADAS 试验预报的差分反射率预报虽然强度偏强，但整体的位置和强度与实况更为接近。差分反射率的大值可以用来区分强降水中的大粒子，对两组试验>2.0 dB 的集合概率预报进行评估显示，ADAS 试验概率预报几乎涵盖了观测的 2.0 dB 等值线范围，且与观测分布型相似，通过格点数直方图的定量评估也显示出，ADAS 试验在大粒子预报方面具有更高的技巧，对于此次过程强降水的微物理相关特征具有更好的描述。

（3）冰雹概率预报结果表明，预报时效可达 12～14 h，ADAS 试验的概率值大于 CTRL 试验，且通过雷达观测判定的冰雹落区均位于 ADAS 试验预报的高概率降雹区附近，对冰雹落区的预报具有较好的指示意义。

在本个例中，ADAS 试验初始分析场融合了多种观测资料，调整了模式初始水物质分布，并在初始场中增加了更多的小尺度信息，更接近真实的大气状态，使对流许可尺度集合预报具有更高的可信度。

本文仅针对一个强对流个例进行了初步讨论，关于初始多源融合分析场对于对流许可尺度集合预报影响的研究还有待于在下阶段进行更广泛的数值预报试验分析。此外，后续研究可以开展针对更多其他双偏振变量的预报与观测实况的对比检验，例如相关系数、差分传播相位和差分相位系数等，从而进一步评估模式对微物理过程描述的准确性。

附 录

冰雹最大直径的计算方法

许多研究表明 γ 分布是云滴和降水粒子较为合理的近似分布形式，因此在 MY2 微物理方案中假设冰雹粒子的数浓度分布（particle size distribution，PSD）满足 γ 分布函数（Ulbrich，1983）

$$N(D) = N_0 D^{\alpha} \mathrm{e}^{-\lambda D} \tag{1}$$

式中，$N(D)$是给定直径 D 的粒子数，N_0 称为截断参数，α 是形状参数，λ 为斜率参数。由于 MY2 方案中的预报变量为粒子混合比和数浓度，因此，通常将 α 的取值固定为 0，转化为两个未知量 N_0 和 λ 的反演。根据 Milbrandt and Yau（2005）文中可知

$$N_0 = N_{\mathrm{T}} \frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} \lambda^{1+\alpha} \tag{2}$$

式中，N_{T} 为总的数浓度，当 α 的取值固定为 0 时，式(2)简化

为

$$N_0 = N_T \frac{1}{\Gamma(1)}\lambda \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)，且当 α 的取值固定为 0 时，可得

$$N(D) = N_T \frac{1}{\Gamma(1)}\lambda e^{-\lambda D} \tag{4}$$

将大于某个指定粒子直径大小 D^* 的总粒子浓度 $N_h^*\{D^*\}$ 定义为

$$N_h^*\{D^*\} = \int_{D^*}^{\infty} N(D)\mathrm{d}D \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)积分得到

$$N_h^*\{D^*\} = \int_{D^*}^{\infty} N_T \frac{1}{\Gamma(1)}\lambda e^{-\lambda D}\mathrm{d}D = N_T \frac{1}{\Gamma(1)}e^{-\lambda D} \tag{6}$$

通常给定阈值 $N_{\mathrm{CRIT}}^* = 10^{-4}\ \mathrm{m}^{-3}$（Milbrandt and Yau，2006），满足条件 $N_h^*\{D^*\} > N_{CRIT}^*$ 的最小直径 D_{CRIT}^* 定义为数值模式预测的冰雹最大直径。

参考文献

陈涛，林建，张芳华，等，2017. “16·7”华北极端强降水过程对流尺度集合模拟试验不确定性分析[J]. 气象，43(5)：513-527. Chen T，Lin J，Zhang F H，et al，2017. Uncertainty analysis on the July 2016 extreme precipitation event in North China using convection allowing ensemble simulation[J]. Meteor Mon，43(5)：513-527(in Chinese).

李佳，陈葆德，黄伟，等，2017. 对流尺度数值预报中的云物理初始化方法改进及个例试验[J]. 气象学报，75(5)：771-783. Li J，Chen B D，Huang W，et al，2017. Cloud physics initialization for convection-scale NWP：scheme improvements and a case study[J]. Acta Meteor Sin，75(5)：771-783(in Chinese).

李俊，杜钧，刘羽，等，2017. 不同扰动方法集合离散度演变的异同性暨地形扰动初探[J]. 气象学报，75(1)：123-146. Li J，Du J，Liu Y，et al，2017. Similarities and differences in the evolution of ensemble spread using various ensemble perturbation methods including topography perturbation[J]. Acta Meteor Sin，75(1)：123-146(in Chinese).

穆瑞琪，孙建印，吕翔，等，2015. 2015 年 4 月 27 日至 28 日徐州强对流天气过程浅析[C]//第 32 届中国气象学会年会 s1 灾害天气监测、分析与预报. 天津：中国气象学会. Mu R Q，Sun J Y，Lü X，et al，2015. Analysis of the convective weather process happened in Xuzhou during April 27 to 28，2015[C]//Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society s1 Disaster Weather Monitoring，Analysis and Forecast. Tianjin：Chinese Meteorological Society(in Chinese).

谭燕，陈德辉，2008. 河南“75.8”大暴雨的中尺度集合预报试验[J]. 气象，34(9)：10-21. Tan Y，Chen D H，2008. Mesoscale ensemble forecasts on “75.8” heavy rain in Henan[J]. Meteor Mon，34(9)：10-21(in Chinese).

吴海英，陈海山，刘梅，等，2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. 气象，43(2)：141-150. Wu H Y，Chen H S，Liu M，et al，2017. Structure characteristics，formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. Meteor Mon，43(2)：141-150(in Chinese).

尹春光，王勤典，陈浩君，等，2015. 上海 WSR-88D 雷达双偏振升级实施概要[C]//第 32 届中国气象学会年会 s16 地基遥感观测技术与应用. 天津：中国气象学会. Yin C G，Wang Q D，Chen H J，et al，2015. Shanghai WSR-88D radar dual polarization upgrade implementation summary[C]. Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society s16 Ground-based Remote Sensing Observation Technology and Application. Tianjin：Chinese Meteorological Society(in Chinese).

庄潇然，闵锦忠，蔡沅辰，等，2016. 不同大尺度强迫条件下考虑初始场与侧边界条件不确定性的对流尺度集合预报试验[J]. 气象学报，74(2)：244-258. Zhuang X R，Min J Z，Cai Y C，et al，2016. Convective-scale ensemble prediction experiments under different large-scale forcing with consideration of uncertainties in initial and lateral boundary condition[J]. Acta Meteor Sin，74(2)：244-258(in Chinese).

Bringi B N，Chandrasekar V，2001. Polarimetric Doppler Weather Radar[M]. Cambridge：Cambridge University Press：636.

Clark A J，Weiss S J，Kain J S，et al，2012. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment[J]. Bull Amer Meteor Soc，93(1)：55-74.

Dawson II D T，Mansell E R，Jung Y S，et al，2014. Low-level ZDR signatures in supercell forward flanks：the role of size sorting and melting of hail[J]. J Atmos Sci，71(1)：276-299.

Ebert E E，2001. Ability of a poor man’s ensemble to predict the probability and distribution of precipitation[J]. Mon Wea Rev，129(10)：2461-2480.

Fang X Q，Kuo Y H，Wang A Y，2011. The impacts of Taiwan topography on the predictability of typhoon Morakot’s record-breaking rainfall：a high-resolution ensemble simulation[J]. Wea Forecasting，26(5)：613-633.

Hu M，Xue M，Brewster K，2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level－Ⅱ data for the prediction of the Fort Worth，Texas，tornadic thunderstorms. Part Ⅰ：Cloud analysis and its impact[J]. Mon Wea Rev，134(2)：675-698.

Johnson A，Wang X G，Xue M，et al，2014. Multiscale characteristics and evolution of perturbations for warm season convection-allowing precipitation forecasts：dependence on background flow and method of perturbation[J]. Mon Wea Rev，142(3)：1053-1073.

Jung Y，Xue M，Tong M J，2012. Ensemble kalman filter analyses of the 29－30 May 2004 oklahoma tornadic thunderstorm using one- and two-moment bulk microphysics schemes，with verification against polarimetric radar data[J]. Mon Wea Rev，140(5)：1457-1475.

Jung Y，Xue M，Zhang G F，2010. Simulations of polarimetric radar signatures of a supercell storm using a two-moment bulk microphysics scheme[J]. J Appl Meteor Climatol，49(1)：146-163.

Jung Y，Zhang G F，Xue M，2008. Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part Ⅰ：observation operators for reflectivity and

polarimetric variables[J]. Mon Wea Rev,136(6):2228-2245.

Kumjian M R,Ryzhkov A V,2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol,47(7):1940-1961.

Li X L,Mecikalski J R,2012. Impact of the dual-polarization Doppler radar data on two convective storms with a warm-rain radar forward operator[J]. Mon Wea Rev,140(7):2147-2167.

Milbrandt J A,Yau M K,2005. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I:analysis of the role of the spectral shape parameter[J]. J Atmos Sci,62(9):3051-3064.

Milbrandt J A,Yau M K,2006. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part III:control simulation of a hailstorm[J]. J Atmos Sci,2006,63(12):3114-3136.

Posselt D J,Li X L,Tushaus S A,et al,2015. Assimilation of dual-polarization radar observations in mixed- and ice-phase regions of convective storms:information content and forward model errors[J]. Mon Wea Rev,143(7):2611-2636.

Putnam B J,Xue M,Jung Y,et al,2014. The analysis and prediction of microphysical states and polarimetric radar variables in a mesoscale convective system using double-moment microphysics,multinetwork radar data,and the ensemble Kalman filter[J]. Mon Wea Rev,142(1):141-162.

Putnam B J,Xue M,Jung Y,et al,2017a. Simulation of polarimetric radar variables from 2013 CAPS spring experiment storm-scale ensemble forecasts and evaluation of microphysics schemes[J]. Mon Wea Rev,145(1):49-73.

Putnam B J,Xue M,Jung Y,et al,2017b. Ensemble probabilistic prediction of a mesoscale convective system and associated polarimetric radar variables using single-moment and double-moment microphysics schemes and EnKF radar data assimilation[J]. Mon Wea Rev,145(6):2257-2279.

Roberts N M,Lean H W,2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. Mon Wea Rev,136(1):78-97.

Roebber P J,Schultz D M,Colle B A,et al,2004. Toward improved prediction:High-resolution and ensemble modeling systems in operations[J]. Wea Forecasting,19(5):936-949.

Snook N,Jung Y,Brotzge J,et al,2016. Prediction and ensemble forecast verification of hail in the supercell storms of 20 May 2013[J]. Wea Forecasting,31(3):811-825.

Ulbrich C W,1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. J Climate Appl Meteor,22(10):1764-1775.

Vié B,Nuissier O,Ducrocq V,2011. Cloud-resolving ensemble simulations of mediterranean heavy precipitating events:uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions[J]. Mon Wea Rev,139(2):403-423.

Vivekanandan J,Adams W M,Bringi V N,1991. Rigorous approach to polarimetric radar modeling of hydrometeor orientation distributions[J]. J Appl Meteor,30(8):1053-1063.

Xue M,Wang D H,Gao J D,et al,2003. The advanced regional prediction system (ARPS),storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J]. Meteor Atmos Phys,82(1):139-170.

Zhang G F,Vivekanandan J,Brandes E,2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,39(4):830-841.