

赖安伟,马鹤翟,崔春光,等,2021. 雷达反射率反演水汽和温度同化技术在一次飑线过程中的应用研究[J]. 气象,47(8):932-952. Lai A W, Ma H D, Cui C G, et al, 2021. A squall line case study of assimilating the radar data, retrieval of water vapor and in-cloud potential temperature from reflectivity in a 3DVAR framework[J]. Meteor Mon, 47(8):932-952(in Chinese).

雷达反射率反演水汽和温度同化技术在 一次飑线过程中的应用研究^{*}

赖安伟 马鹤翟 崔春光 康兆萍 王志斌 杜牧云 肖艳姣 王珏

中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

提 要: 针对 2020 年 5 月 4 日发生在江南的一次飑线过程, 在逐 15 min 快速更新循环同化预报系统中, 探讨了利用 3DVAR 方法同化雷达径向风、反射率和反演观测对短时降水、大风和冰雹等灾害天气的预报影响, 同时研究了不同冷启动时刻对降水预报的影响。结果表明: 冷启动时刻同化反演水汽和云内温度观测, 观测强回波区的水汽和降水回波区内位温增量为正。随着循环次数的增加, 背景场中虚假对流区的水汽减弱, 对流被抑制; 正的温度增量主要集中在观测回波大于背景模拟回波区, 其增幅明显减小。相对于只同化雷达资料试验, 同化“伪观测”资料能明显改善 0~3 h 内的雷达组合反射率和降水预报, 2~5 km 上升螺旋度路径与大风、冰雹灾害位置更接近; 对 0~6 h 的 1 h 累计降水量在 1、5 和 10 mm 等级的 FSS 评分改善明显, 随着循环同化次数增多, 改进效果先明显增加, 6~8 h 左右改进效果达到顶峰, 随后 FSS 评分相对雷达同化试验有所下降。在 12 时(世界时)更新背景场后, 相对于 05 时冷启动明显提高降水 FSS 评分, 且同化“伪观测”资料的积极贡献预报时效更长。

关键词: 雷达反射率因子, 水汽, 云内温度, 资料同化, 飑线

中图分类号: P458, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.08.003

A Squall Line Case Study of Assimilating the Radar Data, Retrieval of Water Vapor and In-Cloud Potential Temperature from Reflectivity in a 3DVAR Framework

LAI Anwei MA Hedi CUI Chunguang KANG Zhaoping

WANG Zhibin DU Muyun XIAO Yanjiao WANG Jue

Hubei Key Laboratory for Heavy Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: This paper investigates the influence of assimilating radar radial wind and reflectivity, and pseudo observation on the precipitation, gale and hail and other disastrous weather. At the same time, this paper also discusses the effect of different cold start time on precipitation forecast for a squall line event that occurred in the south of the Yangtze River on 4 May 2020. The results indicate that after assimilating the pseudo- water vapor and pseudo- in-cloud potential temperature at the cold start time, the water vapor and potential temperature are increased in the observed strong echo area. As the number of cycle assimilation increases, the negative water vapor increment mainly appears in the spurious convection of background, and the convection is inhibited. The increase in potential temperature mainly concentrates in the area where

^{*} 国家自然科学基金项目(41620104009)、国家重点研发计划(2016YFE0109400 和 2018YFC1507200)、湖北省气象局科技发展基金项目(2021Z03)共同资助

2020 年 8 月 23 日收稿; 2021 年 7 月 7 日收修定稿

第一作者: 赖安伟, 主要从事资料同化和中小尺度数值模拟研究. E-mail: laianwei@whihr.com.cn

通讯作者: 崔春光, 主要从事中小尺度机理与数值预报研究. E-mail: cgcui@whihr.com.cn

the observed echo is larger than the background simulated echo. Compared with only assimilating radar data, the assimilation of pseudo-water vapor and pseudo-in-cloud potential temperature can obviously improve the 0–3 h radar composite reflectivity and precipitation forecast. The simulated 2–5 km updraft helicity path is more consistent with the location of damage wind and hail disaster. The FSS scores at 1, 5, 10 mm threshold of 1 h accumulated precipitation in 0–6 h is significantly improved. With the increase of cycle assimilation times, the FSS score of pseudo observation experiments compared to radar experiments rises significantly at first, reaching the peak after 6–8 h cycle, and then the FSS score declines. In addition, different cold start time experiments show that after the background field is updated at 12:00 UTC, assimilating pseudo observation data has a positive contribution to improving precipitation prediction.

Key words: radar reflectivity, pseudo-water vapor, pseudo-in-cloud potential temperature, data assimilation, squall line

引言

由于常规观测网不能为对流尺度数值预报模式初始化提供精细的观测资料,而雷达探测资料具有高时空分辨率特征,是一种应用于对流尺度数值预报同化系统的理想观测资料。近几十年,国内外科学家利用雷达资料初始化对流尺度数值天气预报模式开展了大量的研究。主要方法包括:物理初始化技术(Yang et al, 2006)和复杂云分析方法(Albers et al, 1996; Zhang, 1999; Ducrocq et al, 2000; 朱立娟等, 2017; 顾春利等, 2018)、三维/四维变分同化方法(Sun and Crook, 1997; 1998; Gao et al, 1999; 2004; Hu et al, 2006a; 2006b; Xiao et al, 2007; Sun and Wang, 2013; Wang, 2013a; 2013b; Wattrelot et al, 2014; 陈明轩等, 2016; 陈锋等, 2020)、集合卡尔曼滤波(Zhang et al, 2004; Tong and Xue, 2005; Yussouf and Stensrud, 2010; Dowell et al, 2011; Johnson et al, 2015),以及变分与集合相结合的混合资料同化方法(Wang et al, 2013c; 2019; Gao and Stensrud, 2014; Gao et al, 2016; Shen et al, 2016; Wang and Wang, 2017)。以上研究表明,在对流尺度数值预报模式中同化多普勒雷达资料,有利于改进强对流天气分析和短期(≤ 6 h)预报。

雷达反射率直接反映了与降水有关的水凝物信息,与水凝物变量之间是非线性关系。但同化雷达反射率仍然面临许多挑战。早期,云分析是一种十分有效的雷达反射率同化方法。在 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 复杂云分析系统中(Zhang, 1999; Hu et al, 2006a; Schenkman et al, 2011)开发了一种算法,可以实现水汽和云内温

度的调整。Hu et al (2006a) 和 Schenkman et al (2011) 利用 3DVAR 同化方法分析雷达径向风和云分析系统同化雷达反射率,结果显示该方法对短期强风暴,包含龙卷和冰雹等的超级单体有一定的预报能力。最近几年,科学家们也发展了其他的方法,同化从云或者降水观测中反演的水汽以改进模式预报能力。Caumont et al (2010) 和 Wattrelot et al (2014) 在法国气象局开发的中尺度模式中实施了一种 1D+3DVAR 同化雷达反射率的方法。利用雷达反射率观测,基于贝叶斯反演技术获得相对湿度廓线作为“伪观测”或者“反演观测”。在云分辨率尺度的数值模式开展了 3DVAR 同化反演相对湿度的研究。结果表明,同化“伪观测”能显著提高降水短时预报。张诚忠等(2012)基于雷达反射率因子反演降水率,以线性化的大尺度凝结方案和简化的对流参数化方案为降水的观测算子,建立大气湿度一维变分同化系统获得水汽廓线,将水汽廓线通过 3DVAR 方法初始化 GRAPES 模式,从而提高降水预报准确率。最近,张诚忠等(2019)利用与 Caumont et al (2010) 相同的贝叶斯反演技术,基于雷达反射率反演出大气相对湿度,并引入 3DVAR 系统进行同化分析,批量试验表明反演相对湿度同化能提高 0~4 h 内 1 h 累计降水在 1 mm 和 5 mm 等级降水的 TS 评分。Wang et al (2013a) 基于 WRF 的同化系统(WRFDA),设计了利用雷达反射率估计云内水汽和云水的方案,并将反演的观测同化到 WRF 模式中。结果表明,同化反演水汽对夏季强对流事件的短时降水预报具有显著的正贡献。范水勇等(2013)将该方法应用到北京市气象局业务运行的快速更新同化预报系统中,4 次强降水同化试验结果表明,同化雷达反射率资料能极大提高短时降

水预报效果,其正预报可延伸至 6 h 左右。该方法基本假设与 ARPS 云分析方案类似,即当雷达反射率大于某个阈值,假设云内饱和。

在云分析或者其他方法中,当观测雷达反射率因子大于某个阈值时,假定区域内的水汽处于饱和状态,其相对湿度被调整为 100%。这种处理存在的问题是,加入过多的水汽或凝结潜热,导致降水等要素预报高估,与反射率有关的大部分变量存在过量估计和正的偏差,导致预报误差快速增长。在高频率的次小时(5~15 min)快速更新循环同化中,不断加入的水汽迅速导致对流的强度和覆盖范围比实际观测过量预报,经过几个云分析循环分析后,预报性能显著下降(Schenkman et al, 2011; Fierro et al, 2016)。除此之外,云分析方法采用的经验算法存在很多不确定性,使得云分析在对流尺度天气数值预报中应用具有一定的局限性(Gao and Stensrud, 2012)。

3DVAR 方法直接同化雷达反射率时主要更新初始场中的水凝物相关变量,而对对流系统发展至关重要的水汽和位温扰动等信息无法被改变或者改变很弱,导致许多情况下预报效果不好(Ge et al, 2013)。在过去的几年中, Fierro et al(2014; 2015; 2016)基于 3DVAR 方法发展了“伪水汽”技术,同化地基闪电和静止卫星闪电观测来提高龙卷等强对流预报水平。Carlin et al(2017)提出一种由双极化差分反射率(Z_{DR})识别深湿对流柱的方法,通过 ARPS 复杂云分析方案中对流方案计算云内水汽和调整云内温度。针对两个超级单体风暴实例,开展了 Z_{DR} “伪水汽”观测同化试验。结果表明,与雷达反射率因子观测相比,1 h 短时临近预报风暴传播速度和移动路径更为合理,能减弱控制试验中风暴向北移动的位置偏差。同化 Z_{DR} 试验的分析场对流核中的上升气流更为连贯,虚假对流更少。与 3DVAR 同化闪电资料(Fierro et al, 2014)和差分反射率 Z_{DR} (Carlin et al, 2017)方法相似, Lai et al(2019)利用雷达反射率计算的垂直积分液态水含量(VIL; Greene and Clark, 1972),分离对流降水与层状降水并识别对流区域(Zhang and Qi, 2010),假设饱和和深对流柱内水汽饱和,由背景场信息反演“伪水汽”。针对两次龙卷天气过程,基于 3DVAR 方法开展了雷达径向风、雷达反射率和“伪水汽”等观测资料同化研究。结果表明,同化“伪水汽”后的对流系统路

径与龙卷发生位置具有更好的对应关系,提高了 0~3 h 内 20、30、40 dBz 的 ETS 定量评分。Lai et al(2020)基于 VIL 的对流云/层状云分离算法,在对流降水区内,采用湿绝热温度初始化方案(Hu et al, 2006a; Carlin et al, 2017),而在层状降水区,采用凝结潜热加热方案(Albers et al, 1996; Zhang, 1999)形成一种新的温度调整方案,并以此获得“伪温度”观测。针对两个梅雨锋暴雨个例,开展了“伪水汽”“伪云内温度”同化方案的对比试验,结果表明,在同化雷达径向风、反射率、“伪水汽”同时引入新的融合温度方案对 0~3 h 的降水改进效果最为明显。

从 Lai et al(2019; 2020)的研究表明,同化“伪水汽”和“伪云内温度”对提高致龙卷强对流、梅雨锋强降水等多个天气个例的预报能力都有正的贡献。该方法在飏线等大风、冰雹天气是否适用呢?此外, Lai et al(2019; 2020)循环同化周期为 3~4 h,那么更长时间的循环同化过程(6~12 h)同化“伪水汽”和“伪云内温度”是否能够持续改善对流的预报呢?因此,本文基于前期的研究成果,针对 2020 年 5 月 4 日发生在我国江南地区伴随有大范围大风、冰雹和短时强降水等天气现象的一次飏线天气过程,基于千米级逐 15 min 高频率的更新循环同化预报系统,开展了雷达资料、雷达反射率反演水汽和云内温度资料的对比同化研究,以探究雷达反射率“伪观测”方法是否适用于飏线强对流过程。同时探讨了在快速更新循环同化系统中,长时间的循环同化“伪观测”是否具有持续的正贡献,为业务应用提供经验和参考。

1 同化方法

1.1 3DVAR 同化系统

3DVAR 同化系统是由美国俄克拉何马大学强风暴中心发展的适合于对流尺度的雷达资料同化系统(Gao et al, 1999; 2004; Hu et al, 2006a; 2006b),随后由 NOAA 强风暴实验室(NSSL)升级与发展(Gao and Stensrud, 2012; Gao et al, 2013; 傅承浩等, 2018; Wang et al, 2019)。目前该同化系统可以初始化 ARPS 模式和 WRF 模式。其代价函数可写

为下列形式:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}[H(x) - y^0]^T \mathbf{R}^{-1}[H(x) - y^0] + J_c(x) \quad (1)$$

式中:代价函数由三项构成,其中右边第一项为分析场与背景场之间的距离, x^b 为背景场, x 为分析变量。分析变量包括了风场的 3 个分量(u, v, w)、位温(θ)、气压(p)、水汽混合比(q_v)、雨水混合比(q_r)、雪混合比(q_s)和冰雹混合比(q_h)。 \mathbf{B} 为背景场误差协方差矩阵, \mathbf{R} 为观测误差协方差矩阵, \mathbf{B} 和 \mathbf{R} 不包括变量间的交叉相关, \mathbf{B} 中空间相关利用递归滤波技术实现(Purser et al, 2003a; 2003b)。第二项为观测项,代表分析场与观测向量之间的距离。 H 为观测算子,其将模式变量映射为观测变量。同化雷达径向风和雷达反射率的观测算子下文简单介绍,详见参考文献(Gao et al, 1999; 2013; 傅承浩等, 2018)。第三项可以是包含质量连续性方程和数值模式方程在内的弱约束项。

观测算子是将非常规观测资料与模式变量相联系起来的纽带,实现模式空间向观测空间的投影。在 ARPS 三维变分同化系统中,实际天气应用中雷达径向风观测算子考虑了地球曲率的影响,波束的传播假定遵循 4/3 地球有效半径模型,其数学表达式为(Doviak and Zrníc, 1993):

$$v_r = \frac{dh}{dr}w + \frac{ds}{dr}(u\sin\phi + v\cos\phi) \quad (2)$$

式中: u, v, w 为大气三维风场, v_r 为雷达径向速度, r 是观测点到雷达位置的距离, h 为雷达观测点离地球表面的高度, s 为雷达射线投影到地面上的距离, ϕ 为雷达观测点的方位角。

在早期的 ARPS 3DVAR 变分同化系统中,不能直接同化反射率,而是利用云分析方法同化(Hu et al, 2006a; 2006b)。Gao and Stensrud (2012)在 3DVAR 系统中增加水凝物变量(主要包括雨、雪、冰雹等)为控制变量,并设计一个利用背景场温度实现水凝物分类的雷达反射率观测算子,在变分框架下发展了直接同化雷达反射率的方法。雷达反射率的观测算子是包括了 q_r, q_s 和 q_h 三者的总贡献,其表达式为:

$$Z_e = Z(q_r) + Z(q_s) + Z(q_h) \quad (3)$$

其中雨水的贡献可表示为(Smith et al, 1975):

$$Z(q_r) = 3.63 \times 10^9 (\rho q_r)^{1.75} \quad (4)$$

如果气温低于 0°C ,干雪的贡献为:

$$Z(q_s) = 9.80 \times 10^8 (\rho q_s)^{1.75} \quad (5)$$

如果气温高于 0°C ,湿雪的贡献为:

$$Z(q_s) = 4.26 \times 10^{11} (\rho q_s)^{1.75} \quad (6)$$

根据 Lin et al(1983)和 Gilmore et al(2004)的研究,冰雹的贡献为:

$$Z(q_h) = 4.33 \times 10^{10} (\rho q_h)^{1.75} \quad (7)$$

因子方程取对数扩大十倍,即为反射率因子。

$$Z_{\text{dbz}} = 10 \log_{10} Z_e \quad (8)$$

Gao and Stensrud(2012)利用背景温度对模式的水凝物进行分类,式(3)可写为:

$$Z_e = \begin{cases} Z(q_r) & T_b > 5^\circ\text{C} \\ Z(q_s) + Z(q_h) & T_b < -5^\circ\text{C} \\ \alpha Z(q_r) + (1 - \alpha)[Z(q_s) + Z(q_h)] & -5^\circ\text{C} \leq T_b \leq 5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Z_e 为雷达反射率; T_b 为背景场温度,用于降水粒子分类; α 是在 $-5 \sim 5^\circ\text{C}$ 线性变换的系数,其在 -5°C 时值为 0,在 5°C 时值为 1。

1.2 雷达反射率“伪观测”同化方法

大量研究表明水汽条件对对流尺度系统的发展至关重要。而高分辨率的温度、湿度观测十分稀少,在 3DVAR 同化系统中同化雷达资料时水凝物间未考虑交叉相关,导致同化回波只能改善水凝物,而无法改善对对流发展与维持至关重要的温度和水汽场,使得模式中的对流不能快速发展,存在 spin-up 问题。Lai et al(2019)针对该问题,发展了一种“伪水汽”反演算法,在直接同化雷达资料的基础上,同化“伪水汽”以提高强对流系统的 0~3 h 预报能力。该方案基于地基雷达反射率观测及其反演的 VIL 分离深对流降水区和层状降水区(Zhang and Qi, 2010),当 VIL 大于某个阈值(默认 $6.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)即为对流降水,否则为层云降水。针对湿深对流区,假设水汽是饱和状态($RH = 100\%$),根据背景场的温度和气压等变量估计饱和水汽压对应的水汽含量,生成“伪水汽”观测。此外如果背景场中存在虚假对流,则降低虚假对流区的相对湿度以抑制或减弱背景场中的虚假对流。应用包括三个步骤:(1)利用经过质量控制后的中国新一代天气雷达组网 CINRAD 的基数据,将雷达反射率插值到三维模式

格点;(2)基于三维模式格点信息,反演“伪水汽”;(3)将“伪水汽”作为观测,利用 ARPS 3DVAR 方法与雷达等观测一起同化。由于“伪水汽”观测资料存在几个不确定性,如背景场的温度和气压误差导致的不确定性;云区可能存在未饱和条件;对流倾斜发展等。因此,其观测误差取为 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Fierro et al, 2016; Lai et al, 2019)。

在 Lai et al(2019)中,并未考虑云内温度调整。Lai et al(2020)提出了充分利用 ARPS 复杂云分析系统中对云内温度的调整方法的优势,考虑层云降水与对流降水区内温度加热廓线不同(Huaman and Schumacher, 2018),基于 VIL 的对流云/层状云分离算法,在对流降水区内,采用湿绝热温度初始化方案,而在层状降水区,采用凝结潜热加热方案,形成一种新的温度调整方案而获得“伪温度”观测。利用 3DVAR 同化云内伪温度观测,相对于直接采用云分析方案,可以通过给定观测误差反映温度调整中的不确定性,使得分析结构更为合理。与“伪水汽”类似,云内温度观测的不确定性主要来源于:背景场中温度、气压等的不确定性,云分析中雷达反射率与水凝物的诊断方程的不确定性,以及由于对流云与层状云分离算法带来的不确定性等。云内的温度观测十分稀少,且对其准确测量也十分的困难,因而误差的确定十分困难,经过测试,将其观测误差设置为 3.5 K 。

2 武汉快速更新循环同化预报系统介绍

为了提高灾害性天气短时预报能力,2019 年中国气象局武汉暴雨研究所建立了千米级高分辨率的快速更新循环同化预报系统(以下简称 WHRUC)。该系统水平分辨率为 1.5 km ,分析更新频率为 15 min ,预报更新频率为 1 h ,预报时效为 12 h 。主要包括观测资料预处理模块、模式前处理模块 WPS4.0、资料同化模块 ARPS 3DVAR、模式模块 WRF V3.7.1(Skamarock et al, 2008)和模式后处理模块 UPP4.0。系统主要参数设置如表 1 所示。模式区域中心位于 31°N 、 112.3°E ,水平格点数为 801×701 ,垂直方向为 51 层,积分时间步长为 10 s 。其主要物理过程有 Thompson 显式微物理方案(Thompson et al, 2008)、YSU 边界层方案(Hong, 2010)、RRTM 长波辐射方案(Mlawer et al, 1997)、

Dudhia 短波辐射方案(Dudhia, 1989),无积云参数化方案(表 1)。系统分别在每日 05:15 和 17:15(世界时,下同)冷启动,其初始场和边界条件由 3 km 水平分辨率的华中区域快速更新同化系统或者 NCEP GFS 最新的前 6 h 或者 12 h 预报场提供,每次预报启动更新模式的侧边界条件。系统可提供逐 15 min 的实时分析场,并在整点提供逐 15 min 间隔的 $0 \sim 12 \text{ h}$ 预报场。

同化的观测资料主要包括地面、飞机报、探空等常规资料和中国新一代天气雷达组网的雷达基数据,其中常规资料同化间隔为 1 h ,雷达径向风和反射率因子同化间隔为 15 min 。在常规观测资料处理方面,首先将原始 GTS 报文数据解码为 Little_r 格式。然后使用 WRFDA 系统中的 obsproc 程序实现极值检查、一致性检查、重复数据剔除、时间窗口和模式区域观测资料筛选等质量控制。最后,将质量控制数据转为 ARPS 同化数据格式。在雷达资料处理方面,采用两步质量控制。第一步,利用中国气象局武汉暴雨研究所开发的短时临近预报子系统的质量控制算法,针对 SA、SB、SC、CC、CD 波段雷达资料进行了质量控制,主要包括速度退模糊、地物杂波、超折射、奇异值纠正、非气象回波等质量控制(肖艳姣等, 2012; 2016; 吴涛等, 2013);统一库长等参数,并将雷达基数据统一输出为 SA 型号雷达格式。第二步,使用 ARPS 3DVAR 系统自带的质量控制算法(Gao et al, 2013)再进行一次质量控制。

表 1 武汉快速更新循环同化预报系统参数特征

Table 1 The main physical processes in the WHRUC system

模式参数	参数特征
中心位置	31°N , 112.3°E
水平分辨率	1.5 km
三维格点数	$801 \times 701 \times 51$
冷启动时间	05:15 UTC, 17:15 UTC
预报频次	$24 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$
预报时效	12 h
模式系统	WRF V3.7.1
同化系统	ARPS 3DVAR 升级版
背景场及边界条件	WHRAP/NCEP GFS 最新预报场
边界条件更新频率	3 h
微物理过程参数化方案	Thompson 显式微物理方案
边界层参数化方案	YSU 边界层方案
短/长波辐射方案	Dudhia 短波辐射方案/ RRTM 长波辐射方案
积云参数化方案	无

3 数值试验设计

3.1 个例介绍

2020年5月4日,受高空低槽东移影响,在重庆、湖北、湖南和江西等地自西向东发生大范围的冰雹、大风和短时强降水等强对流天气过程(图1)。本次强对流过程具有发生范围广、强对流天气类型多等特点。短时强降水主要出现在湖南北部、湖北东南部和安徽等地,上述大部分地区均出现了大于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水,部分站点的降水强度甚至超过了 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。大风天气多出现在湖南中北部,大部分地区极大风速超过 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,局部地区甚至超过了 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本次过程还给湖北、湖南、江西等地带来冰雹天气,冰雹直径多在 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 。雷暴天气范围最为广泛,覆盖了长江中游和江南北部的广大区域。

为了进一步分析本次过程的环流背景,图2a和2b分别给出了5月4日00时和12时的500 hPa高度场叠加850 hPa相对湿度和850 hPa风场。从图中可以看出,5月4日亚洲中纬度呈两槽一脊形势,巴尔喀什湖和日本海各存在一个低槽,蒙古西部地

区有一高压脊,脊前槽后的高空西北气流引导低层干冷空气逐渐向我国南方移动,至12时,在850 hPa风场上蒙古至我国华北可见一反气旋环流,其底部偏东风已抵达黄河以南地区,表明冷空气正在南下,并将与南来的西南气流辐合于长江流域。在中低纬度,副热带高压横亘于西北太平洋至孟加拉湾地区,南支槽活动较为活跃,在高原东侧有一短波槽东移,引导低层低涡和切变线的东移发展,至12时长江流域和江南地区850 hPa相对湿度明显升高。由此可见,这样的环流配置为江南地区的降水、强对流提供了有利的热力、动力和水汽条件。图2c,2d分别给出了5月4日00时的湖南怀化站和12时的湖南长沙探空站的 $T\text{-log}p$ 图。从温度和露点线的演变来看,00—12时,中低层的温度露点差明显减小,表明大气中水汽含量的增加,而在对流层上层(400~300 hPa)则仍存在一个干层,且12时的长沙探空站850 hPa以上存在深厚的不稳定层结,表明江南北部地区大气呈“上干冷、下暖湿”特征,这对于雷暴大风的发生比较有利。此外,12时的风廓线表明对流层中层存在西风急流,使得垂直风切变明显增强,这是强对流天气发生的另一有利条件。

从观测的雷达组合反射率因子演变图来看(图3),此次对流从重庆开始发展,一开始为分散性

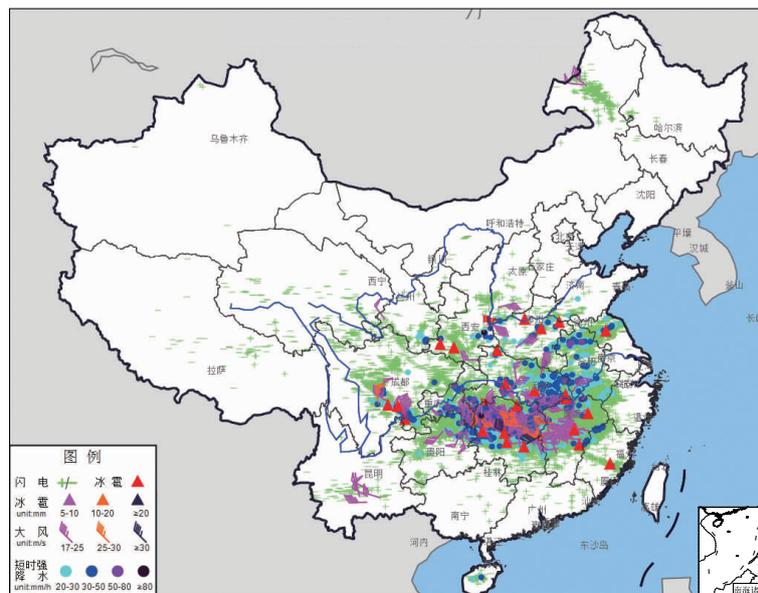


图1 2020年5月4日00时至5日00时强对流天气累积监测结果
(中央气象台天气业务内网)

Fig. 1 Severe convective weather monitoring in China
from 00 UTC 4 to 00 UTC 5 May 2020
(The picture is from the NWC)

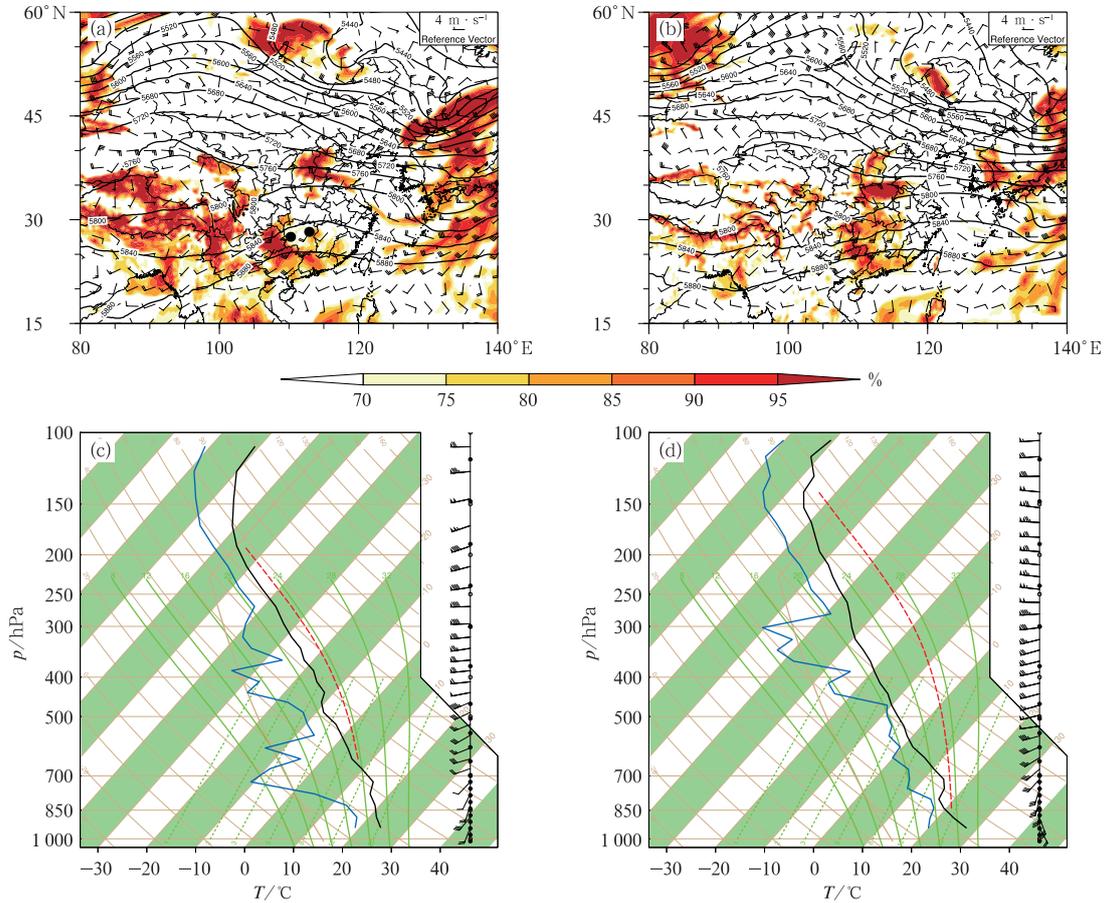


图 2 2020 年 5 月 4 日 00 时(a)和 12 时(b)ERA-Interim 再分析形势场,(c)00 时的湖南怀化站和(d)12 时的湖南长沙站探空斜 T - $\log p$ 图

(图 2a 和 2b 中黑线为 500 hPa 位势高度,等值线间隔为 40 gpm,阴影为 850 hPa 相对湿度;风羽为 850 hPa 水平风场;图 2a 中黑色圆点为探空站的位置)

Fig. 2 ERA-Interim reanalysis data at 00 UTC (a) and 12 UTC (b) 4 May, and the skew T - $\log p$ diagrams for Huaihua Station at 00 UTC (c) and Changsha Station at 12 UTC (d) 4 May 2020

(In Figs. 2a, 2b, black line is for geopotential height at 500 hPa, contour interval is 40 gpm, shaded area is for relative humidity, wind barb is for horizontal wind at 850 hPa; the two black dots in Fig. 2a stand for the locations of Huaihua and Changsha sounding stations)

对流,在 12 时(图 3c)对流增强变得有组织化;随着低涡切变线东移南压,15 时湖南中部飏线特征明显并快速向东移动,由于前期降水形成的地面冷池和低涡后部冷空气与南部的暖湿气流相互作用,切变线的南侧不断形成新的 β 中尺度回波带;18 时系统快速移动至江西与湖南交界处,在湖北省大别山南侧对流也逐渐增强,15—21 时飏线发展最为旺盛(图 3d,3e,3f)。

3.2 数值试验设计

针对 2020 年 5 月 4 日这次强对流天气过程,基于武汉 RUC,开展了雷达资料及雷达反射率因子

“伪观测”资料同化研究。为了减少模式南边界的影响,对比试验模式中心相对于业务试验系统向南移动 2° ,至 29°N 、 112.3°E ,其他物理过程与 WHRUC 相同(表 1),模式区域设置见图 4。

从此次天气演变过程可以发现,过程初期,分散性局地强对流开始在模式区域西侧出现,随后逐渐发展增强变为大范围、长历时飏线过程。首先,为了考察雷达反射率“伪观测”同化方法对强对流预报的影响,设计了雷达资料和“伪观测”资料的同化敏感性试验,分别是雷达资料同化试验(Radar)和“伪观测”资料同化试验(RadPO)。其中 Radar 试验利用 3DVAR 方法直接同化雷达径向风和反射率因子,

RadPO 试验是在 Radar 的基础上同化了“伪水汽” 和“伪云内温度”观测(表2)。该组试验从05时冷

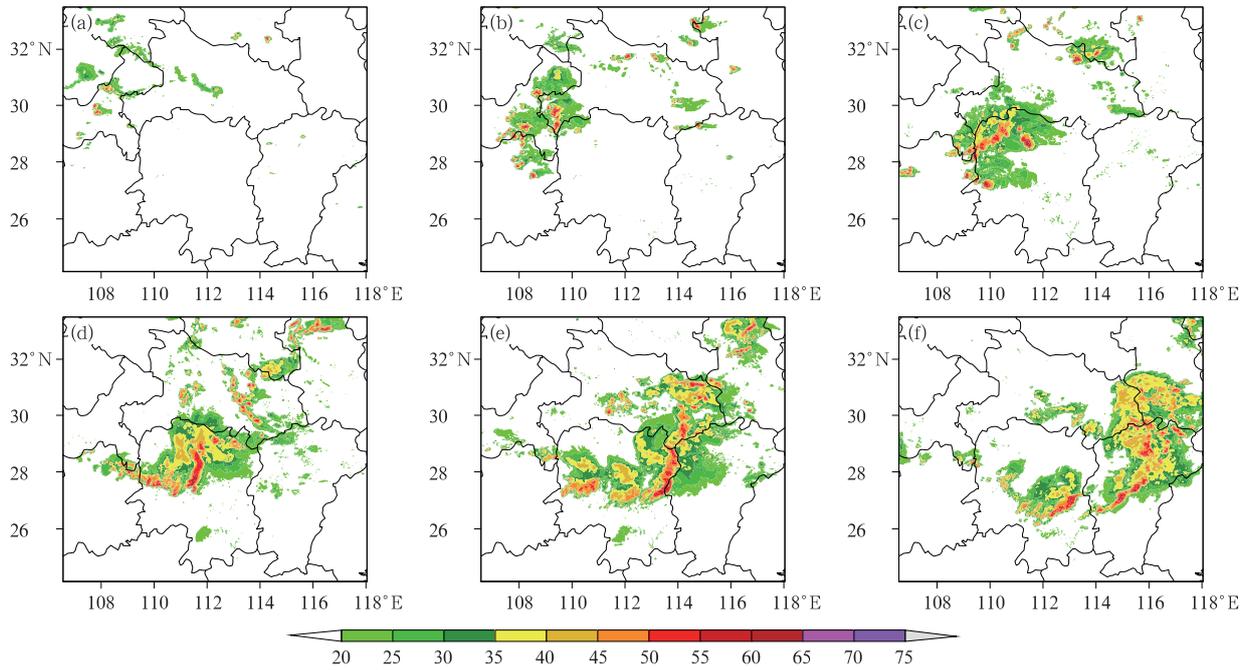


图 3 2020 年 5 月 4 日 06 时(a)、09 时(b)、12 时(c)、15 时(d)、18 时(e)和 21 时(f)观测雷达组合反射率因子拼图
 Fig. 3 Radar reflectivity mosaic images at 06 UTC (a), 09 UTC (b), 12 UTC (c), 15 UTC (d), 18 UTC (e) and 21 UTC (f) 4 May 2020

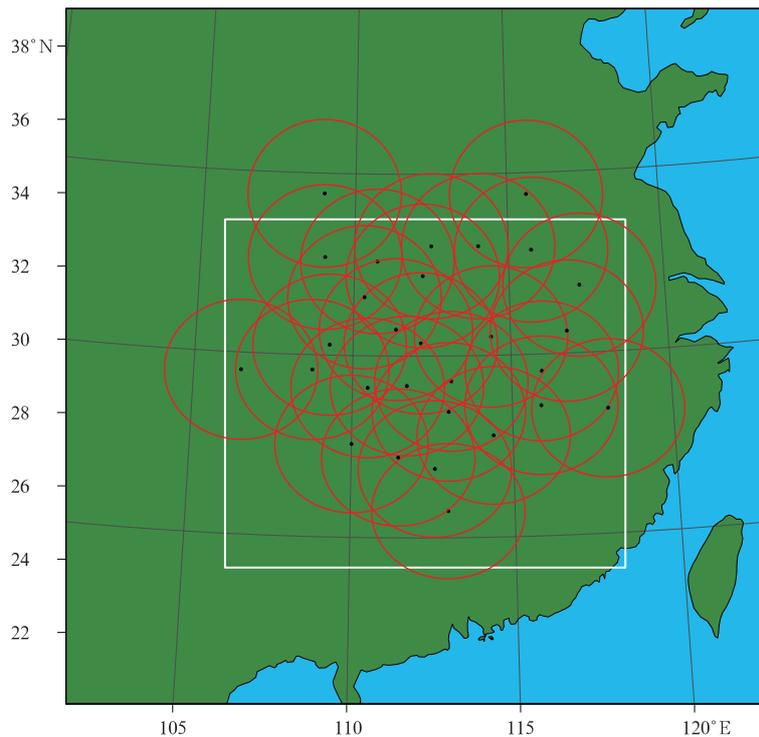


图 4 模式区域及同化雷达分布
 [白色方框为模式积分区域,黑点为雷达站观测点,红色圆圈为雷达最大覆盖范围(230 km),共计 29 部雷达用于同化试验]
 Fig. 4 The model domain and locations of the radar stations
 [White box indicates the model domain, black dots represent locations of radar stations and maximum range (230 km) of each radar is shown by red circle, 29 radars are used for the data assimilation experiments]

启动,逐 15 min 循环同化至 18 时,并且在 06—18 时中的每个整点预报 12 h。进一步,为了考察循环同化时长和不同的冷启动时间对对流系统的预报影响,设计了第二组同化对比试验,冷启动时间为 12 时,分别为雷达同化试验 Radar12 和“伪观测”同化试验 RadPO12(表 2)。两组同化试验,使用 2020 年

5 月 4 日 00 时和 12 时 NCEP GFS 预报的 0~36 h 的 3 h 间隔预报场作为背景场和边界条件。其中 05 时冷启动的背景场为 00 时预报的 3~6 h 时间插值。12 时冷启动的背景为 12 时 NCEP GFS 的 0 h 分析场。

表 2 同化试验设计

Table 2 The acronyms and descriptions of the simulation experiments

试验名称	同化资料种类	冷启动时间/UTC	具体描述
Radar	Radar	05	同化雷达径向风和反射率因子
RadPO	Radar,“伪水汽”和“伪云内温度”	05	同化雷达资料、“伪水汽”和“伪云内温度”
Radar12	Radar	12	同 Radar 同化试验
RadPO12	Radar,“伪水汽”和“伪云内温度”	12	同 RadPO 同化试验

4 结果分析

4.1 分析场

首先分析同化“伪观测”资料(“伪水汽”和“伪云内温度”)后水汽和位温的增量水平分布。图 5 是 2020 年 5 月 4 日 05、06、12 和 18 时观测组合反射率因子、同化试验 RadPO 背景场模拟组合反射率因子、RadPO 试验地面以上 3 km 处水汽增量和位温增量。从图 5 可以看出,05 时在重庆、四川东部有局地的对流单体存在,此时模式冷启动,背景场中无水凝物信息,模拟雷达回波为缺测。同化“伪观测”后,主要有正的水汽增量和温度增量。水汽增量的水平位置与观测强回波对应,范围较小。而温度增量范围与大于 20 dBz 的组合反射率相一致,比水汽增量范围大。这是因为,此刻“伪水汽”观测仅在深对流区获得,而“伪云内温度”在对流区和层状区两部分都有反演。循环同化 1 h 后,重庆中部对流单体有所发展,背景场中的回波在重庆中部与观测接近,相对观测偏弱。此时水汽增量出现正负分布形态,其最大(小)为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($-1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),这是背景场模拟对流与观测对流有细微的位置偏差导致的,同时背景场中出现了虚假对流,“伪水汽”算法为了抑制对流,存在负的水汽增量,符合我们预期的结果。至 12 时,背景场模拟回波与观测比较相似,但是在湖南中部和江西中部存在虚假对流,并且湖南北部的对流单体强度和范围比实况大水汽增量

主要以负增量为主,其最大(小)为 $7.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($-2.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),但在新生强对流区域(如河南西南部),出现较大的正水汽增量。通过引入“伪水汽”观测,对背景场中不存在或强度较弱而观测较强的对流系统有正水汽增量,而在虚假对流区有负水汽增量。温度增量主要以正值为主,3 km 高度最大值为 0.7 K。循环 13 h 后至 18 时,可以发现背景场的回波空间分布形态与观测十分接近,但是爬线强回波的位置相对于观测移动略快而偏东,在湖南中部层状回波比观测弱(图 5m,5n)。此时水汽增量在背景强回波区为较大的负值,观测强回波区为正值,其最大(小)为 $5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($-2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),此时对应正的温度增量在层状回波区。背景场模拟对流系统移动的速度快于观测,导致对流系统的移动前方为负的水汽增量,而移动后方为正的水汽增量。循环同化过程中,新生对流单体区域有正的水汽增量和正的温度增量,同化雷达资料、“伪水汽”和“伪云内温度”后,明显改进了对流的预报。但是模拟的回波强度较观测略强,背景场中的虚假对流也逐渐的增多。通过减少水汽,不能快速地抑制背景场中所有的虚假对流,应该考虑其他方法。

接下来对同化试验 RadPO 在 12 时和 18 时垂直方向上环流特征、水汽增量和温度增量进行分析(图 6)。从垂直环流场来,12 时观测强回波区的后部有较强的上升气流,在前部低层有较强的入流,有利于低层暖湿气流输送到对流区,而在观测的层状云区有较强的下沉运动(图 6a)。从同化雷达径向风后三维风场的增量来看,在对流区和后部层状降水区都有较强的正的垂直速度增量,上升运动增强,

在对流前部层状降水回波区有较强的负的垂直速度,加强了云砧的下沉,下沉运动一直延伸到模式底层(图 6b)。18 时飑线已经发展旺盛,从沿飑线顶点的垂直剖面可以看到,此时的垂直剖面具有标准的飑线结构,存在明显的逆时针垂直环流特征,层状云区的下沉入流侵入对流核区,伴随有对流尺度的下沉,推动阵风锋向前移动,同化雷达径向风增加了锋

前前部入流的风速(图 6c,6d)。从水汽增量场的垂直分布来看,在 12 时,观测回波的高度超过 15 km,背景场模拟回波在观测回波区偏弱,20 dBz 的伸展高度较观测低 3~4 km,在对流前方存在虚假的对流,其最强回波超过 40 dBz。因此,同化“伪水汽”后在观测回波与背景场差异较大的区域有正的水汽增量,在虚假对流区有负的水汽增量。水汽增量主

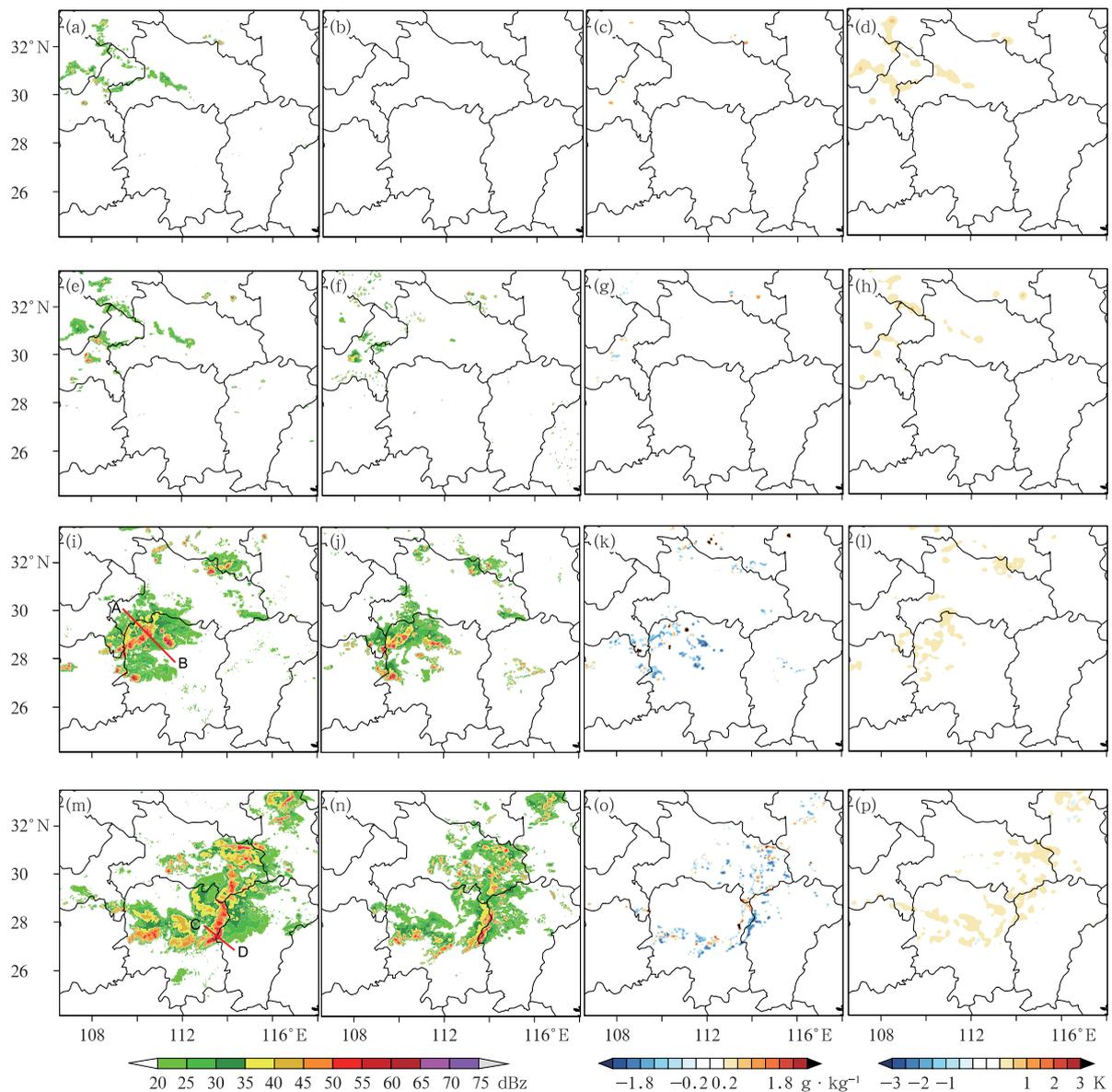


图 5 2020 年 5 月 4 日 05 时(a~d)、06 时(e~h)、12 时(i~l)和 18 时(m~p)观测组合反射率因子(a, e, i, m),同化试验 RadPO 背景场模拟组合反射率因子(b, f, j, n), RadPO 试验地面以上 3 km 处水汽增量(c, g, k, o)和位温增量(d, h, l, p)

Fig. 5 The observed composite radar reflectivity (a, e, i, m), background simulation composite reflectivity (b, f, j, n), analysis increments of water vapor (c, g, k, o), and analysis increments of potential temperature (d, h, l, p) for RadPO at 3 km, 05 UTC (a~d), 06 UTC (e~h), 12 UTC (i~l) and 18 UTC (m~p) 4 May 2020, respectively

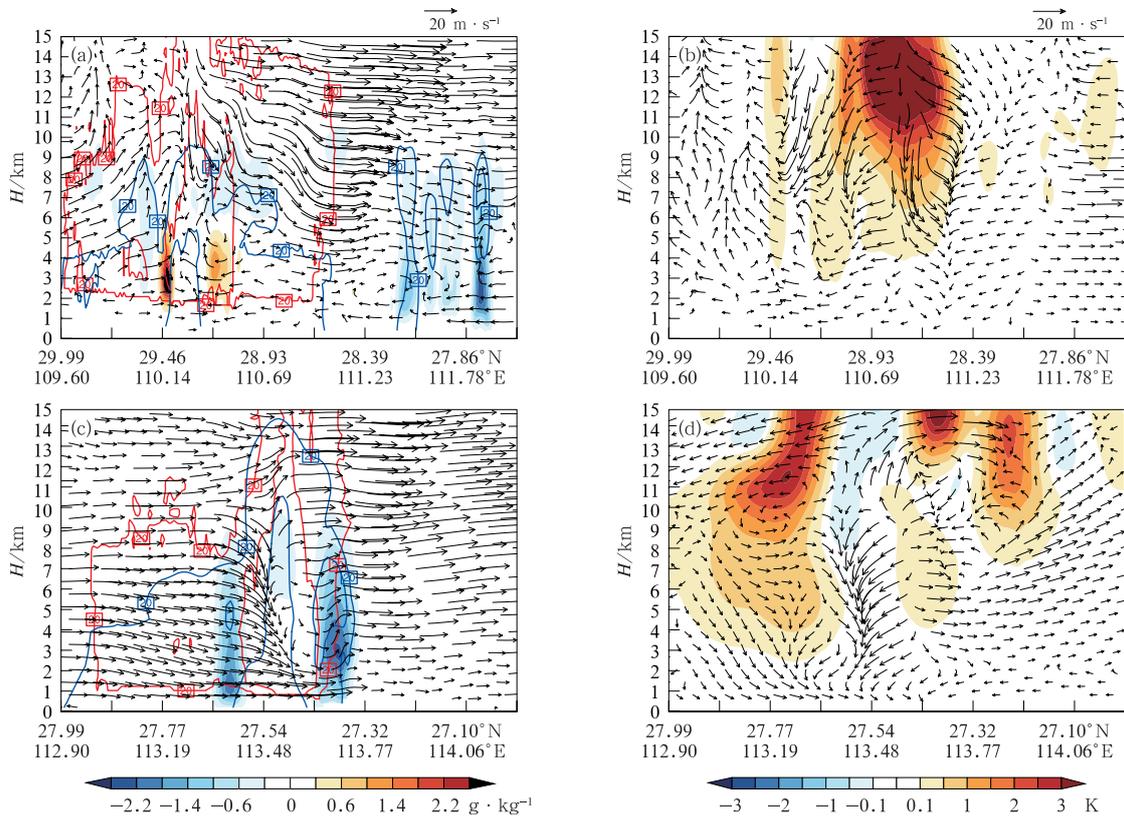


图 6 2020 年 5 月 4 日 12 时(a,b)和 18 时(c,d)同化试验 RadPO 分别沿图 5i 中 AB 直线和图 5 m 中 CD 直线的(a,c)水汽增量(阴影)和 $uv-w$ 垂直环流(风矢量)垂直剖面,(b,d)位温增量(阴影)和 $uv-w$ 风场增量(风矢量)的垂直剖面
图 6a 和 6c 中红色和蓝色等值线分别代表观测雷达和背景场模拟雷达的反射率,单位:dBz; uv 为水平风沿剖面的合成风
Fig. 6 The vertical cross-section of the increment of water vapor (shaded) and $uv-w$ vertical circulation (vector) (a, c), the increment of potential temperature (shaded) and the increment of three-dimensional wind (vector) (b, d) along line AB in Fig. 5i at 12 UTC (a, b) and along line CD in Fig. 5m 18 UTC (c, d) for RadPO experiment
(The red and blue lines in Figs. 6a, 6c represent the observed and simulated reflectivity, respectively, unit: dBz)

要集中在 10 km 以下,数值从低层向高层逐渐减弱(图 6a)。18 时的水汽增量与 12 时类似,背景场模拟的对流快于观测,导致飑线前方有负水汽增量,飑线后侧有正的水汽增量(图 6c)。从温度增量来看,12 时和 18 时温度增量主要出现在对流上部,由于温度增量是由水凝物的增量通过凝结潜热进行调整的,而模式模拟的回波在 110.96°E 附近的伸展高度明显小于观测雷达回波,因此,通过雷达反射率获得正的水凝物贡献,其位温的增量最大值中心也位于 12~15 km,这个极值中心高度和强度与 Huang et al (2018)通过潜热 Nudging 方法的结果类似。尽管存在虚假的雷达回波,当水凝物增量为负时,本温度方案中未调整云内温度。

4.2 降水预报

为了评估同化雷达反射率因子的“伪观测”对降

水预报的影响,首先,比较分析 09 时预报的 0~3 h 两个同化试验模拟回波与观测回波(图 7)。09—12 时观测回波表明对流逐渐增强,并且 12 时在湘西北形成线状对流,其前部不断有新生对流产生(图 7j)。09 时分析时刻,两个同化试验的分析回波与观测较为一致,但 Radar 同化试验在湖南和江西存在多个虚假的对流单体,而 RadPO 试验该处的回波很弱(图 7a~7c)。1~3 h 雷达反射率预报可以发现,同化“伪观测”资料明显有利于西部的对流的组织化,同时抑制了湖南和江西虚假对流。10—11 时,分散性对流组织化为线状对流,Radar 和 RadPO 模拟的对流也发展为线状对流,且 RadPO 与实况更为接近,但是位置较实况偏西偏北。从 09 时预报的 0~3 h 组合反射率来看,两组同化试验对西部的对流具有很好的预报能力,RadPO 具有改进效果。

对比 16 时两组同化试验的模拟回波预报结果。

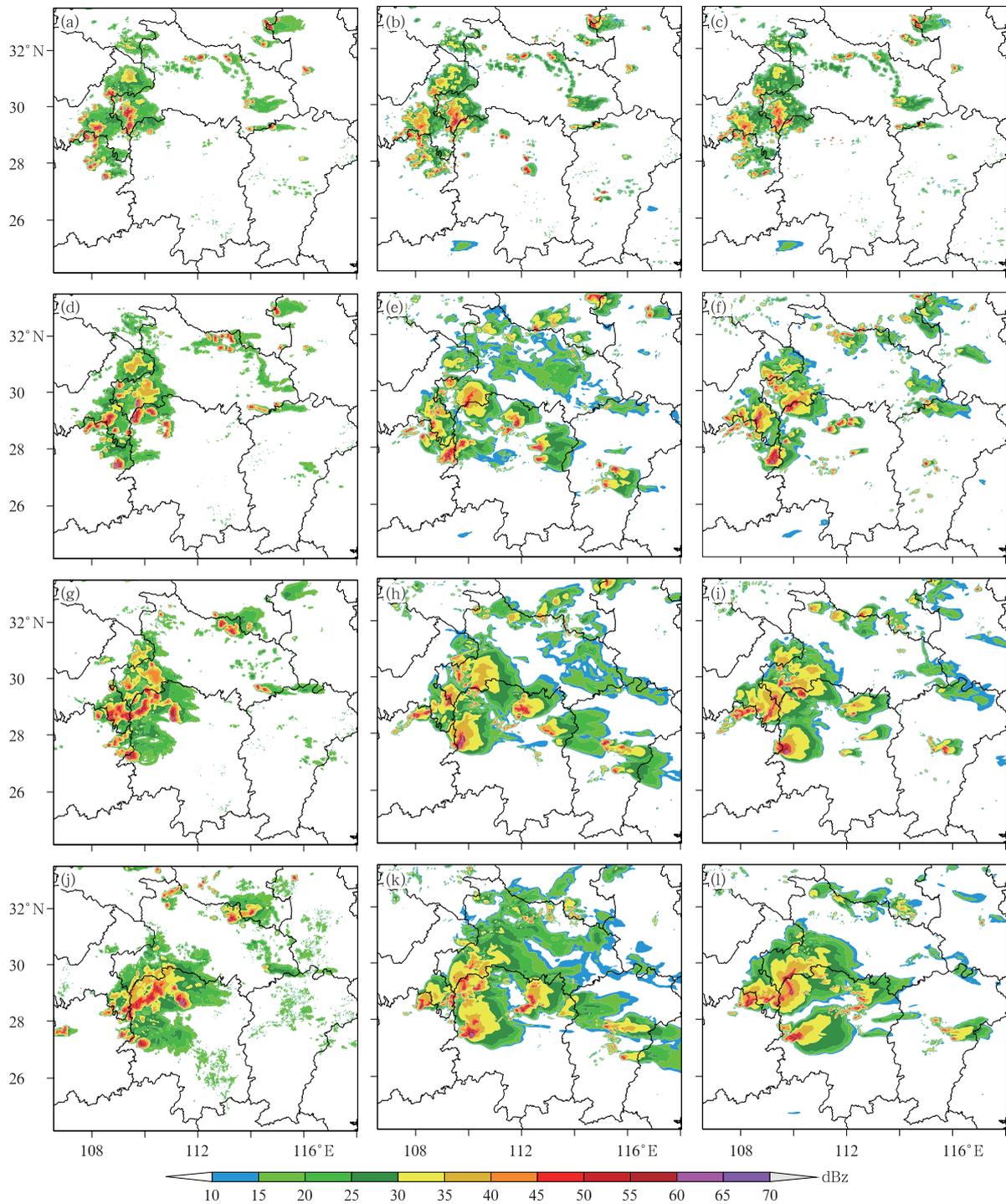


图 7 2020 年 5 月 4 日 09—12 时逐时观测组合反射率因子(a,d,g,j)、同化试验 Radar(b,e,h,k)和 RadPO(c,f,i,l)09 时预报的 0~3 h 组合反射率因子 (a~c)分析时刻(09 时), (d~f) 1 h 预报(10 时), (g~i) 2 h 预报(11 时), (j~l) 3 h 预报(12 时)
 Fig. 7 Horizontal distributions of observed composite reflectivity (a, d, g, j), and corresponding analyses and forecasts from Radar (b, e, h, k) and RadPO (c, f, i, l) for 0-3 h forecasts beginning at 09 UTC 4 May 2020
 (a-c) analysis moment at 09 UTC, (d-f) 1 h forecast at 10 UTC, (g-i) 2 h forecast at 11 UTC, (j-l) 3 h forecast at 12 UTC

从 16—19 时观测回波看(图 8a,8d,8g,8j), 16 时对流进一步增强, 在湖南中部形成飊线, 在 3 h 内对流

系统急速增强, 至 19 时, 湖北东北的分散对流也组织化, 并与南部的飊线合为一个更大范围的线状对

流,在江西境内具有明显的弓形回波特征。在湖南的中部存在两条对流雨带,从两个试验对比来看,对整个系统的发展增强过程模拟较好。同化“伪观测”资料后,其分析时刻在湖北中东部的回波更强,1~3 h 的预报显示,在湖北东部的回波与观测更接近,而 Radar 则为漏报。对流的强飑线段,RadPO 试验模

拟的结构明显优于 Radar 试验(图 8)。

上文定性分析了同化“伪水汽”对 0~3 h 内雷达回波预报的改善作用。下文对不同时刻预报的 0~3 h 累计降水量进行对比分析(图 9)。为了消除模式侧边界对降水模拟的影响,只对子域(25°~33°N、107°~117°E)内的累计降水量进行评价。降水

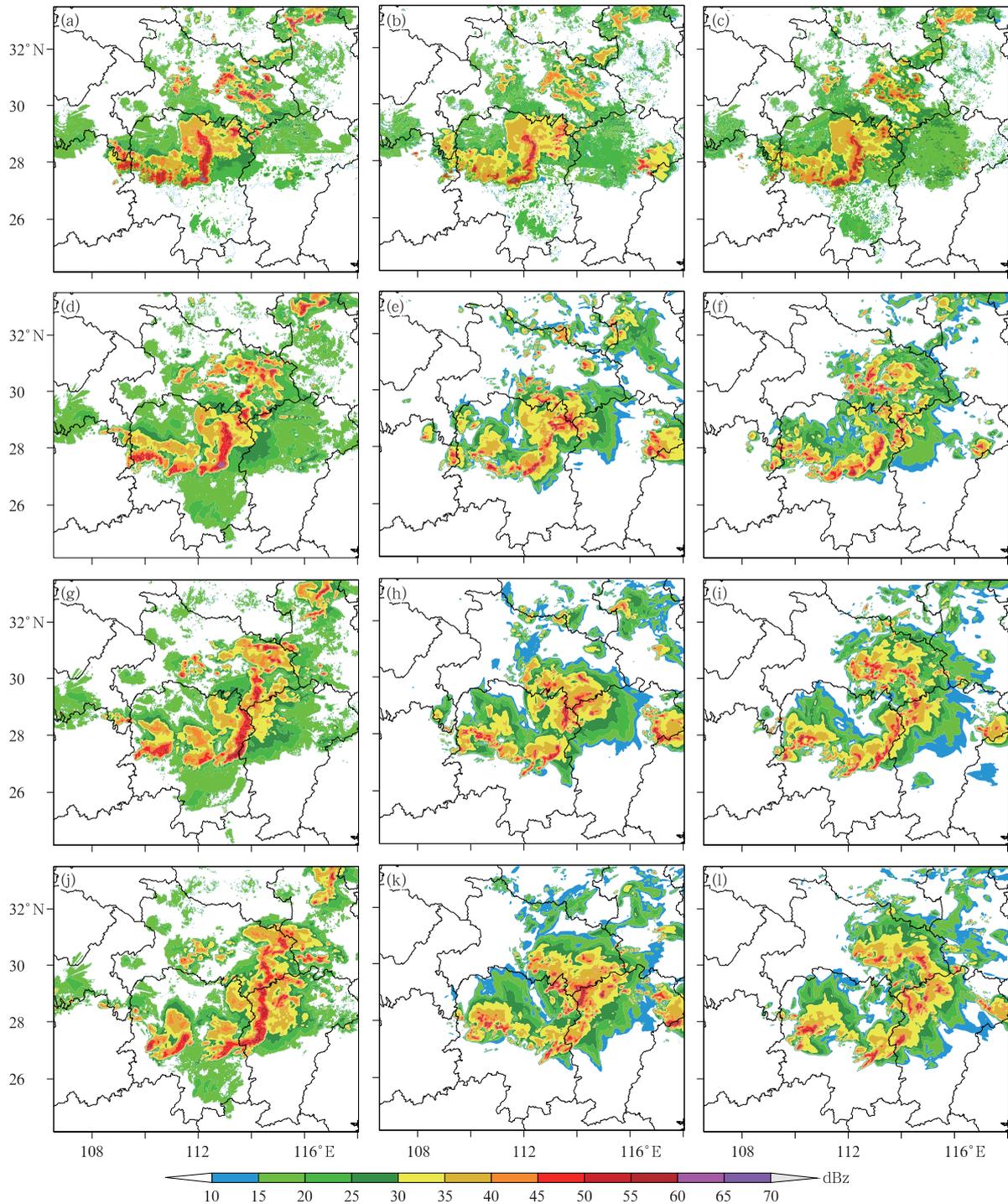


图 8 同图 7,但为 2020 年 5 月 4 日 16—19 时

Fig. 8 Same as Fig. 8, but for 16—19 UTC 4 May 2020

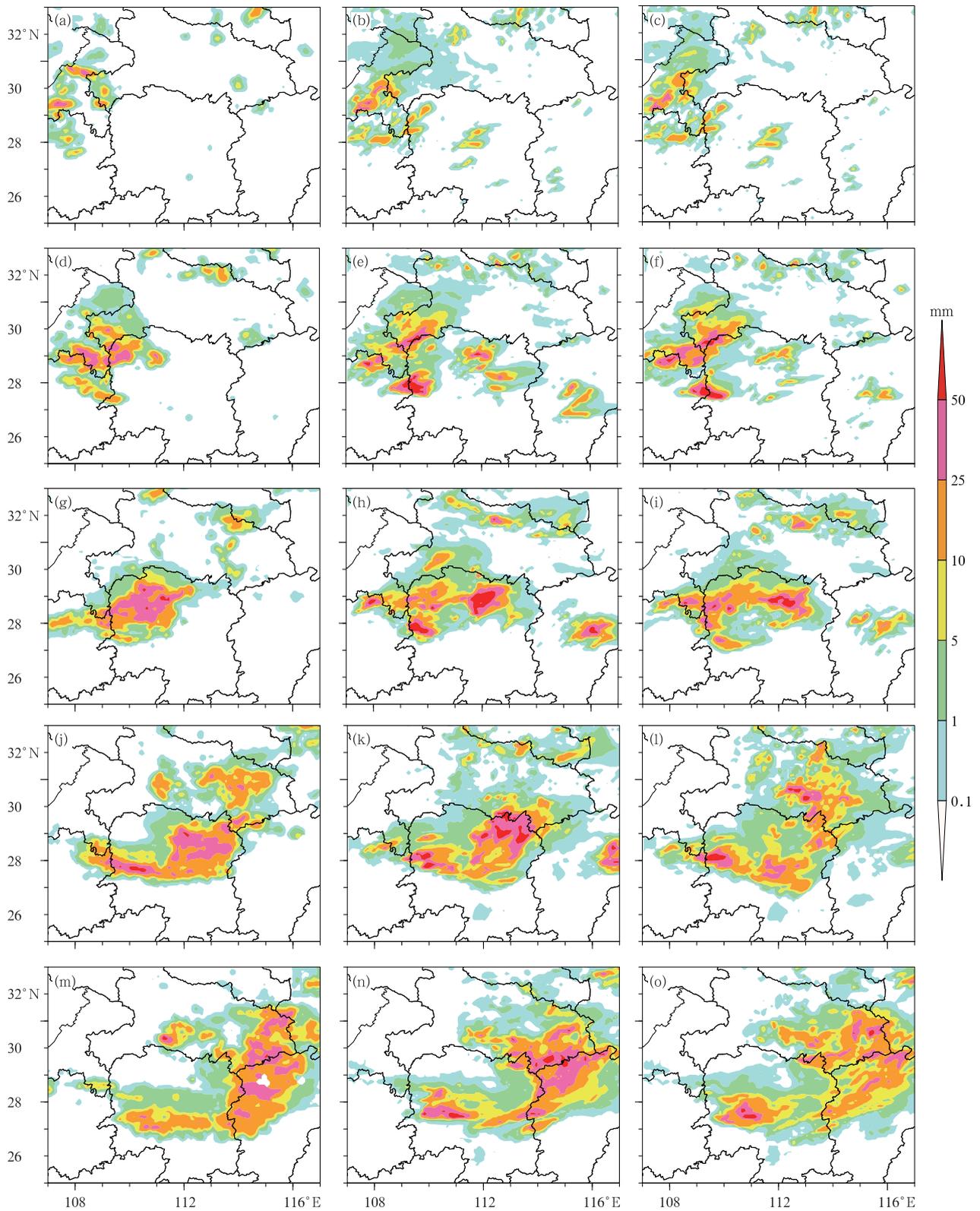


图 9 2020 年 5 月 4 日 06 时(a~c)、09 时(d~f)、12 时(g~i)、15 时(j~l)和 18 时(m~o)未来 0~3 h 观测累计降水(a,d,g,j,m)与同化试验 Radar(b,e,h,k,h)和 RadPO(c,f,i,l,o)对应模拟的 0~3 h 累计降水(阴影)

Fig. 9 Plots of observed 3 h accumulated precipitation (shaded) (a, d, g, j, m) and corresponding simulated precipitation of Radar (b, e, h, k, n) and RadPO (c, f, i, l, o) start from 06 UTC (a-c), 09 UTC (d-f), 12 UTC (g-i), 15 UTC (j-l) and 18 UTC (m-o) 4 May 2020

观测是由国家气象科学数据中心提供的逐时格点降水融合产品 (http://data.cma.cn/data/detail/data-Code/SEVP_CLI_CHN_MERGE_CMP_PRE_HOUR_GRID_0.10.html),其分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (Shen et al, 2014)。在评估时,将模拟降水插值到 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 分辨率的观测降水格点。3 h 累计观测降水表明,降水首先出现在重庆,随着时间推移逐渐向东南移动,强度不断增强、影响范围逐渐变大。18—21 时雨带移动到江西和湖北的东部,3 h 累计最强降水超过 50 mm(图 9m)。同化试验 Radar 和 RadPO 在 06 时预报的 0~3 h 累计降水差异不明显。09 时,同化“伪观测”资料抑制湖南和江西的虚假降水,同时改善了重庆、鄂西南和湘西北的降水,但较实况偏强,此时 RadPO 0~3 h 预报降水优于 Radar。12 时, RadPO 试验相对于 Radar 仍然减弱了湖南和江西的虚假降水,但此时两个同化试验在洞庭湖附近都预报了一个较强的虚假降水中心。至 15 时, Radar 试验在湖南的

东北部降水强度和落区明显优于 RadPO,而在湖北的东部降水漏报。RadPO 和 Radar 试验对湖南中部降水的预报与实况十分吻合,但是均对湖南东北部降水有所低估,且对湖北东部降水的预报比实况偏西偏南。18 时预报的 0~3 h 降水两个试验对实况都有较好的预报能力, RadPO 整体更与实况接近, Radar 对江西北部的强降水模拟较好, RadPO 对湖北的东南部降水模拟更好,但均对江汉平原降水存在高估现象。整体来看,两个同化试验对 0~3 h 内的累计降水具有较好模拟能力,同化“伪观测”资料有利于新生对流发展,同时能抑制虚假对流,可改善降水预报。随着循环同化次数增加,有利于降水预报,但系统移动速度较实况略为偏快。

定量评估各整点预报的 0~12 h 内的 1 h 累计降水的分数技巧评分 (Fractions Skill Score, FSS; Roberts and Lean, 2008)。图 10 是同化试验 Radar 在 06—18 时整点预报的 0~12 h 内 1 h 累计降水在

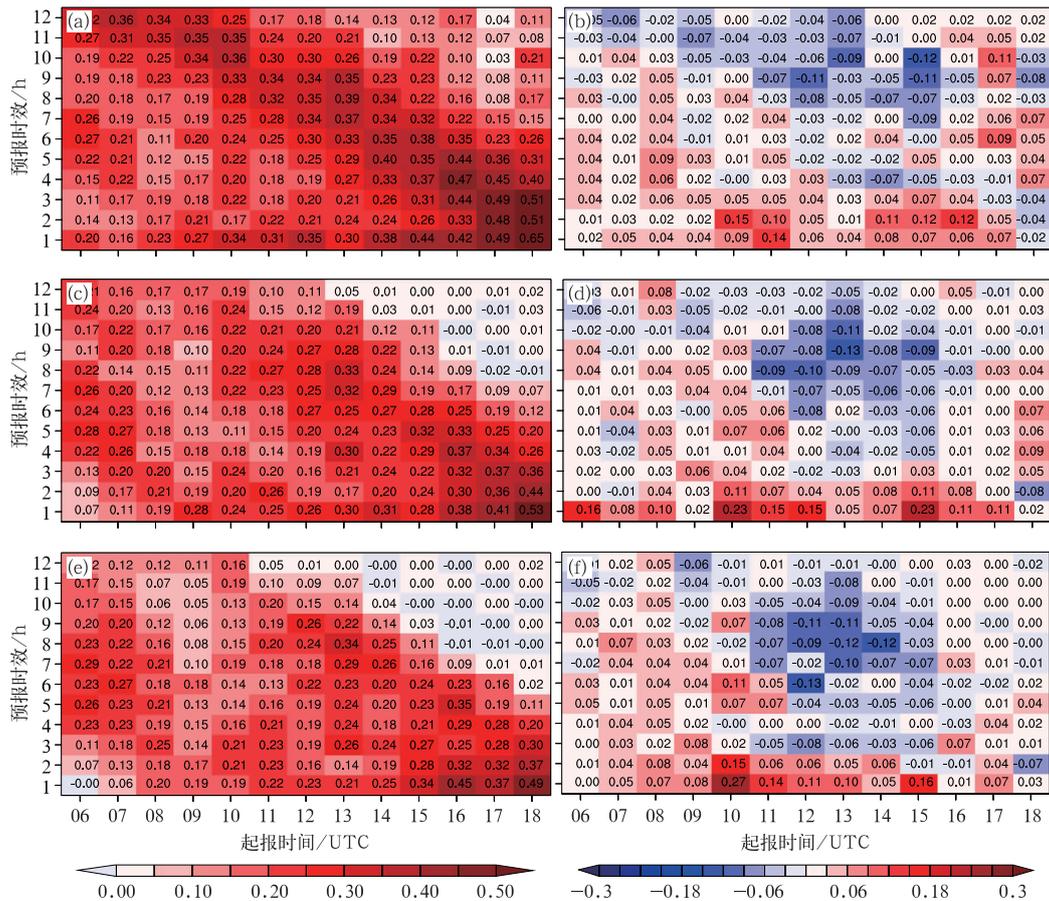


图 10 2020 年 5 月 4 日同化试验在 06—18 时整点预报的 0~12 h 内 1 h 累计降水在 1 mm(a,b)、5 mm(c,d)和 10 mm(e,f)等级的 FSS 评分(阴影,半径为 20 km)

(a, c, e)Radar, (b, d, f)RadPO—Radar

Fig. 10 Fraction skill score (shaded) of 20 km radius for the 12 h forecasts calculated from 1 h accumulated precipitation for Radar and RadPO at 1 mm (a, b), 5 mm (c, d) and 10 mm (e, f) thresholds on 4 May 2020

(a, c, e) Radar, (b, d, f) RadPO—Radar

(The forecasts are released at each hour from 06 UTC to 18 UTC in both experiments)

1、5 和 10 mm 等级邻域半径为 20 km 的 FSS 评分及二者 FSS 评分差。不难发现:总体来说,06—12 时 Radar 同化试验随着系统逐渐增强,FSS 评分逐渐增大,越临近预报降水 FSS 评分越高;RadPO 试验相对于 Radar,在 1 mm 和 5 mm 等级上,明显提高了 0~6 h 内的 FSS 评分,而在 10 mm 等级上,提高了 0~3 h 内的 FSS 值。同化“伪观测”资料后,06—11 时预报的 0~6 h 内降水改进明显;RadPO 试验随着循环同化次数的增多,12—15 时预报的 3~12 h 内降水定量评分相较于 Radar 试验变差,可能原因是在 12—15 时系统从分散性对流向组织化发展过程中的模式模拟较差,RadPO 试验移动过快,导致了空报和漏报。

4.3 灾害天气预报

由于此次天气过程发生了大范围的冰雹、大风

等灾害性天气,而模式模拟的上升螺旋度参数能够部分表征强对流天气(Kain et al, 2008; Lai et al, 2019)。因此分析模式预报的 0~3 h 内 2~5 km 上升螺旋度(UH)移动路径与大风和冰雹灾害的位置关系。将 15 min 间隔预报的 UH 画到一起形成移动路径图(图 11)。从 06 时预报的 2~5 km 的 UH 来看,由于强对流引起的冰雹与大风主要发生在重庆,两个同化试验预报的 UH 对重庆南部和湖北西部的大风与冰雹具有指示作用,特别是冰雹指示性更强。此时刻“伪观测”资料同化 RadPO 改进不明显(图略)。循环同化至 09 时,RadPO 同化试验明显改善了重庆、湖北西部和湖南西部的大风和冰雹落区预报,同时 RadPO 也减弱虚假对流区的 UH,其结果与预报的雷达回波相一致(图 11a, 11b)。16 时也有类似的结论(图 11c, 11d),同化试验 RadPO 预报的 UH 路径与灾害报告的位置更为接近,对大

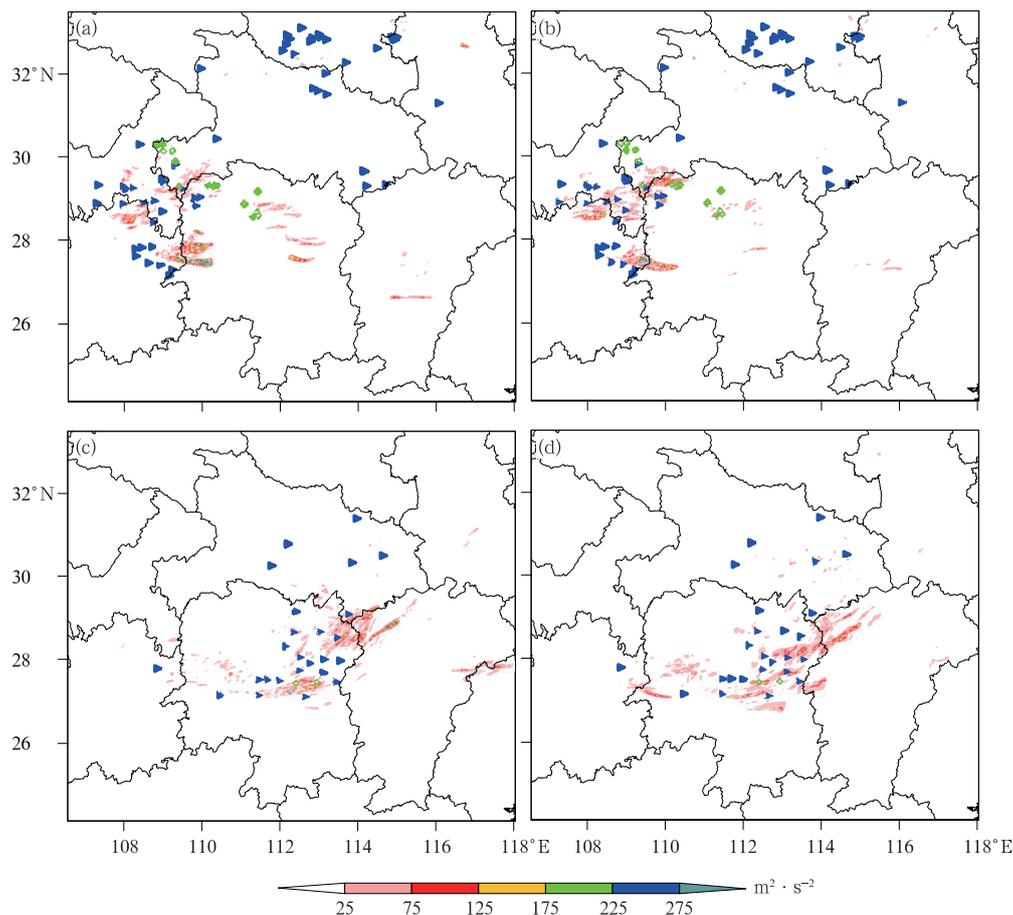


图 11 2020 年 5 月 4 日 09 时(a,b)和 16 时(c,d)同化试验 Radar(a,c)和 RadPO(b,d)预报的 0~3 h 2~5 km 上升螺旋度(阴影)路径

(绿色菱形为冰雹;蓝色三角形为国家站灾害大风,风速 $>17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 11 2~5 km updraft helicity tracks (shaded) of Radar (a, c) and RadPO (b, d) for 0~3 h forecasts beginning at 09 UTC (a, b) and 16 UTC (c, d) 4 May 2020

(Green rhombuses and blue triangles represent the hail and damaging wind $>17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ events, respectively)

风、冰雹的预报具有一定的指示作用。

4.4 不同冷启动降水预报分析

从上文分析可见,随着循环同化次数的增多,雷达资料同化试验 Radar 预报的 1 h 定量降水逐渐改善。而“伪观测”资料同化试验 RadPO 在 12—15 时出现预报结果相对 Radar 试验变差的现象。因此为了考察不同循环同化时次对预报影响,设计了 Radar12 和 RadPO12 试验,从 12 时冷启动,以考察背景场引起的预报差异。

从 1 h 累计降水的 FSS 评分来看(图 10 和图 12), 12—17 时内 Radar12 1 h 累积降水在 1、5 和 10 mm 阈值 FSS 评分高于 Radar 试验,说明更新的背景场对降水改进更为明显。从有、无“伪观测”资料同化的对比来看,在不同的冷启动时间试验表明,同化“伪观测”都能明显提高 0~2 h 的 FSS 评分。RadPO 相对 Radar 在 12—15 时,3~12 h 的 FSS 评分变差(图 10b, 10d, 10f)。而 RadPO12 相对 Radar12,除在 12 时冷启动时,FSS 评分在各个量级都有提高(图 12b, 12d, 12f)。

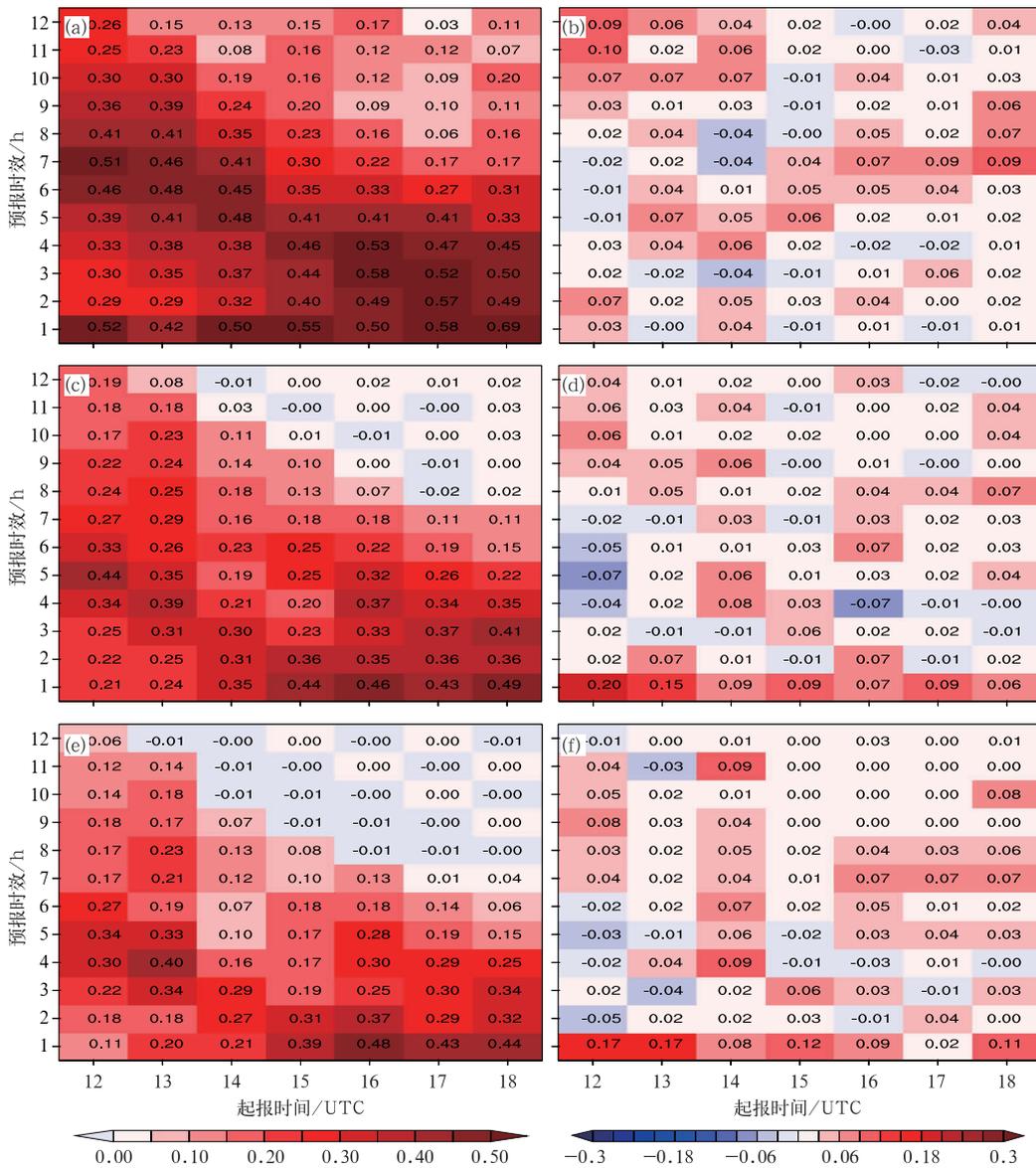


图 12 同图 10, 但为 Radar12(a, c, e) 和 RadPO12(b, d, f) 在 12—18 时
 Fig. 12 Same as Fig. 10, but for Radar12 (a, c, e) and RadPO12 (b, d, f) from 12 UTC to 18 UTC 4 May 2020

两组不同冷启动试验表明,同化“伪观测”资料都能提高降水的 FSS 评分。12 时冷启动试验(Radar12 和 RadPO12)的评分高于 05 时冷启动试验,且同化“伪水汽”的改进作用循环同化时间更长。由于本系统的边界条件是实时更新,05 时和 12 时冷启动试验使用相同的边界条件,边界条件的影响可以忽略,差异主要来源于背景场和循环同化过程中的误差累积。更新背景场对雷达资料未能覆盖区域分析场质量有所改善,对整个雨带模式改善明显,在后续研究中,将考虑同化更多的常规观测资料和卫星数据以改善背景场,提高 6~12 h 预报效果,同时也考虑将现有每日 2 次的冷启动运行,改为 3~4 次带有 partial cycle 功能的冷启动方式,以提高对强对流天气的预报能力。

5 结论与讨论

基于 3DVAR 方法同化雷达反射率时无法改善模式背景场中的水汽和热力变量,模式存在 spin-up 问题。本文利用雷达反射率的反演水汽和云内温度(“伪观测”)方法,在逐 15 min、1.5 km 水平分辨率的快速更新循环同化预报系统中,开展了同化雷达径向风、反射率和“伪观测”资料的研究。针对 2020 年 5 月 4 日江南地区一次飑线强对流个例,进行了有、无“伪观测”同化对比试验,分析了该方法对降水、大风和冰雹等灾害天气的预报影响。主要结论如下:

(1)冷启动时,同化“伪水汽”和“伪云内温度”,能明显增加观测回波区域的水汽和位温。随着循环次数增加,正的水汽增量主要位于新生对流回波区,有利对流发展,负的水汽增量位于背景场中虚假对流区,而抑制虚假对流;同时温度增量主要集中在观测回波大于背景模拟回波区,其增幅明显减小。

(2)不同冷启动时刻的“伪观测”同化试验结果都表明,同化“伪观测”明显改善 0~3 h 内的雷达回波和降水预报,模拟的 2~5 km 上升螺旋度与大风、冰雹灾害位置更接近;0~6 h 的 1 h 累计降水量在 1.5 和 10 mm 等级的 FSS 评分有所改善,可提高降水预报能力。但随着循环同化“伪观测”资料的次数增多,改进效果先明显增加,6~8 h 左右改进效果达到顶峰,随后 FSS 评分相对雷达同化试验有所下降。

(3)更新背景场后的 Radar12 试验优于 Radar,

越临近预报结果越好。同化“伪观测”资料都能提高降水的 FSS 评分。12 时冷启动试验(Radar12 和 RadPO12)的评分高于 05 时冷启动试验,且同化“伪水汽”的改进作用循环同化时间更长。

由于在当前水汽抑制过程中,观测的深对流与模拟对流只允许 1.5 km 的位置偏差,二者细微的位置偏差会产生较大的正负水汽增量分布,可能不利于模拟孤立或者线状对流。“伪观测”资料不断地加入,导致模拟对流系统移动快于观测,随着循环同化次数增多,“伪水汽”在模拟的对流中抑制的水汽越来越多,导致对流发展受到影响,使得模拟的飑线强度减弱,反而不利于模拟。因此,在下一步的研究中,应该考虑背景场与观测对流存在一定的位移偏差(如领域半径为 5~10 km),以改进水汽反演的准确性。05 时和 12 时两组冷启动试验差异的原因主要来源于背景场,因此,更新背景场对雷达资料未能覆盖区域分析场质量有所改善,对整个雨带模式改善明显,在后续的研究中,将考虑同化更多的常规观测资料和卫星数据以改善背景场,提高 6~12 h 降水预报水平,同时考虑将现有每日 2 次的冷启动运行方式,改为 3~4 次带有 partial cycle 功能的冷启动方式,以提高对强对流天气的预报能力。此外,本文工作只评估了一个天气个例,后续还需要评估更多的实例以及在业务系统中的应用情况。

致谢:本工作得到了美国强风暴实验室资料同化专家部吉东研究员的悉心指导,武汉中心气象台王珊珊高级工程师提供了部分大风、冰雹等灾害数据,中国气象局武汉暴雨研究所何邓新在论文修改方面给予了帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈锋,董美莹,苏涛,等,2020. 雷达资料同化对一次浙江初春罕见飑线过程数值模拟的影响分析[J]. 气象,46(4):462-477. Chen F, Dong M Y, Su T, et al, 2020. Influence of radar data assimilation on the numerical simulation of a rare squall line in Zhejiang Province in early spring[J]. Meteor Mon, 46(4):462-477 (in Chinese).
- 陈明轩,肖现,高峰,等,2016. 基于雷达四维变分分析系统的强对流高分辨率模拟个例分析和批量检验[J]. 气象学报,74(3):421-441. Chen M X, Xiao X, Gao F, et al, 2016. A case study and batch verification on high resolution numerical simulations of severe convective events using an analysis system based on rapid-refresh 4-D variational radar data assimilation[J]. Acta Meteor Sin, 74(3):421-441 (in Chinese).
- 范水勇,王洪利,陈敏,等,2013. 雷达反射率资料的三维变分同化研究[J]. 气象学报,71(3):527-537. Fan S Y, Wang H L, Chen M,

- et al, 2013. Study of the data assimilation of radar reflectivity with the WRF 3DVar[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(3): 527-537 (in Chinese).
- 傅承浩, 郜吉东, 王云恒, 等, 2018. 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[J]. *气象科技进展*, 8(3): 19-37. Fu C H, Gao J D, Wang Y H, et al, 2018. Applications of a real time weather-adaptive 3DVAR analysis system in detections and warning of tornado related severe weather[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(3): 19-37 (in Chinese).
- 顾春利, 成巍, 徐幼平, 等, 2018. 雷达资料融合和冷热启动对 AREM 模式强降水预报的影响分析[J]. *暴雨灾害*, 37(6): 574-581. Gu C L, Cheng W, Xu Y P, et al, 2018. Analysis on impacts of radar data integration and cold or hot start on heavy rainfall prediction of AR-EM model[J]. *Torr Rain Dis*, 37(6): 574-581 (in Chinese).
- 吴涛, 万玉发, 沃伟锋, 等, 2013. SWAN 系统中雷达反射率因子质量控制算法及其应用[J]. *气象科技*, 41(5): 809-817. Wu T, Wan Y F, Wo W F, et al, 2013. Design and application of radar reflectivity quality control algorithm in SWAN[J]. *Meteor Sci Technol*, 41(5): 809-817 (in Chinese).
- 肖艳姣, 万玉发, 王珏, 等, 2012. 一种自动多普勒雷达速度退模糊算法研究[J]. *高原气象*, 31(4): 1119-1128. Xiao Y J, Wan Y F, Wang J, et al, 2012. Study of an automated Doppler radar velocity dealiasing algorithm[J]. *Plateau Meteor*, 31(4): 1119-1128 (in Chinese).
- 肖艳姣, 万玉发, 王志斌, 2016. 多普勒天气雷达双 PRF 径向速度资料质量控制[J]. *高原气象*, 35(4): 1112-1122. Xiao Y J, Wan Y F, Wang Z B, 2016. Quality control of dual PRF velocity data for Doppler weather radars[J]. *Plateau Meteor*, 35(4): 1112-1122 (in Chinese).
- 张诚忠, 薛纪善, 冯业荣, 等, 2019. 基于贝叶斯方案的雷达反射率反演水汽及其同化试验[J]. *热带气象学报*, 35(2): 145-153. Zhang C Z, Xue J S, Feng Y R, et al, 2019. Retrieval of water vapor from radar reflectivity based on bayesian scheme and its assimilation test[J]. *J Trop Meteor*, 35(2): 145-153 (in Chinese).
- 张诚忠, 薛纪善, 张林, 等, 2012. 基于雷达反射率反演降水率的一维三维变分同化研究及试验[J]. *气象学报*, 70(5): 1128-1136. Zhang C Z, Xue J S, Zhang L, et al, 2012. Study of the "1D+3D var" assimilation of the rain rate retrieved from radar reflectivity and its experiments[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(5): 1128-1136 (in Chinese).
- 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 38-51 (in Chinese).
- Albers S C, Mcginley J A, Birkenheuer D L, et al, 1996. The local analysis and prediction system (LAPS): analyses of clouds, precipitation, and temperature[J]. *Wea Forecasting*, 11(3): 273-287.
- Carlin J T, Gao J D, Snyder J C, et al, 2017. Assimilation of ZDR columns for improving the spinup and forecast of convective storms in storm-scale models: proof-of-concept experiments[J]. *Mon Wea Rev*, 145(12): 5033-5057.
- Caumont O, Ducrocq V, Wattrelot É, et al, 2010. 1D+3DVar assimilation of radar reflectivity data: a proof of concept[J]. *Tellus A*, 62(2): 173-187.
- Doviak R J, Zrnić D S, 1993. *Doppler Radar and Weather Observations*[M]. 2nd ed. Manhattan: Academic Press; 562.
- Dowell D C, Wicker L J, Snyder C, 2011. Ensemble Kalman filter assimilation of radar observations of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell: influences of reflectivity observations on storm-scale analyses[J]. *Mon Wea Rev*, 139(1): 272-294.
- Ducrocq V, Lapore J P, Redelsperger J L, et al, 2000. Initialization of a fine-scale model for convective-system prediction: a case study [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(570): 3041-3065.
- Dudhia J, 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *J Atmos Sci*, 46(20): 3077-3107.
- Fierro A O, Clark A J, Mansell E R, et al, 2015. Impact of storm-scale lightning data assimilation on WRF-ARW precipitation forecasts during the 2013 warm season over the contiguous United States[J]. *Mon Wea Rev*, 143(3): 757-777.
- Fierro A O, Gao J D, Ziegler C L, et al, 2014. Evaluation of a cloud-scale lightning data assimilation technique and a 3DVAR method for the analysis and short-term forecast of the 29 June 2012 derecho event[J]. *Mon Wea Rev*, 142(1): 183-202.
- Fierro A O, Gao J D, Ziegler C L, et al, 2016. Assimilation of flash extent data in the variational framework at convection-allowing scales: proof-of-concept and evaluation for the short-term forecast of the 24 May 2011 tornado outbreak[J]. *Mon Wea Rev*, 144(11): 4373-4393.
- Gao J D, Fu C H, Stensrud D J, et al, 2016. OSSEs for an ensemble 3DVAR data assimilation system with radar observations of convective storms[J]. *J Atmos Sci*, 73(6): 2403-2426.
- Gao J D, Smith T M, Stensrud D J, et al, 2013. A real-time weather-adaptive 3DVAR analysis system for severe weather detections and warnings[J]. *Wea Forecasting*, 28(3): 727-745.
- Gao J D, Stensrud D J, 2012. Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVAR framework with hydrometeor classification[J]. *J Atmos Sci*, 69(3): 1054-1065.
- Gao J D, Stensrud D J, 2014. Some observing system simulation experiments with a hybrid 3DVAR system for storm-scale radar data assimilation[J]. *Mon Wea Rev*, 142(9): 3326-3346.
- Gao J D, Xue M, Brewster K, et al, 2004. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 21(3): 457-469.
- Gao J D, Xue M, Shapiro A, et al, 1999. A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars[J]. *Mon Wea Rev*, 127(9): 2128-2142.
- Ge G Q, Gao J D, Xue M, 2013. Impacts of assimilating measurements of different state variables with a simulated supercell

- storm and three-dimensional variational method[J]. *Mon Wea Rev*, 141(8):2759-2777.
- Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N, 2004. Precipitation and evolution sensitivity in simulated deep convective storms; comparisons between liquid-only and simple ice and liquid phase microphysics[J]. *Mon Wea Rev*, 132(8):1897-1916.
- Greene D R, Clark R A, 1972. Vertically integrated liquid water-a new analysis tool[J]. *Mon Wea Rev*, 100(7):548-552.
- Hong S Y, 2010. A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(651):1481-1496.
- Hu M, Xue M, Brewster K, 2006a. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II 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.
- Hu M, Xue M, Gao J D, et al, 2006b. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of the fort worth, texas, tornadic thunderstorms. Part II: impact of radial velocity analysis via 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 134(2):699-721.
- Huaman L, Schumacher C, 2018. Assessing the vertical latent heating structure of the East Pacific ITCZ using the CloudSat CPR and TRMM PR[J]. *J Climate*, 31(7):2563-2577.
- Huang Y J, Liu Y B, Xu M, et al, 2018. Forecasting severe convective storms with WRF-based RTFDDA radar data assimilation in Guangdong, China[J]. *Atmos Res*, 209:131-143.
- Johnson A, Wang X G, Carley J R, et al, 2015. A Comparison of multiscale GSI-Based EnKF and 3DVar data assimilation using radar and conventional observations for midlatitude convective-scale precipitation forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 143(8):3087-3108.
- Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al, 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP[J]. *Wea Forecasting*, 23(5):931-952.
- Lai A W, Gao J D, Koch S E, et al, 2019. Assimilation of radar radial velocity, reflectivity, and pseudo-water vapor for convective-scale NWP in a variational framework[J]. *Mon Wea Rev*, 147(8):2877-2900.
- Lai, A W, Min J Z, Gao J D, et al, 2020. Assimilation of radar data, pseudowater vapor, and potential temperature in a 3DVAR framework for improving precipitation forecast of severe weather events[J]. *Atmosphere*, 11(2):182.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D, 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 22(6):1065-1092.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J Geophys Res Atmos*, 102(D14):16663-16682.
- Purser R J, Wu W S, Parrish D F, et al, 2003a. Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis. Part I: spatially homogeneous and isotropic Gaussian covariances [J]. *Mon Wea Rev*, 131(8):1524-1535.
- Purser R J, Wu W S, Parrish D F, et al, 2003b. Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis. Part II: spatially inhomogeneous and anisotropic general covariances[J]. *Mon Wea Rev*, 131(8):1536-1548.
- 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.
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, et al, 2011. The analysis and prediction of the 8-9 May 2007 Oklahoma tornadic mesoscale convective system by assimilating WSR-88D and CASA radar data using 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 139(1):224-246.
- Shen F F, Min J Z, Xue D M, 2016. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF Hybrid ETKF-3DVAR system for the prediction of Hurricane Ike(2008)[J]. *Atmos Res*, 169:127-138.
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al, 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(6):3063-3075.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A description of the advanced research WRF version 3[R]. Boulder: University Corporation for Atmospheric Research.
- Smith P L Jr, Myers C G, Orville H D, 1975. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 14(6):1156-1165.
- Sun J Z, Crook N A, 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: model development and simulated data experiments [J]. *J Atmos Sci*, 54(12):1642-1661.
- Sun J Z, Crook N A, 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: retrieval experiments of an observed Florida convective storm[J]. *J Atmos Sci*, 55(5):835-852.
- Sun J Z, Wang H L, 2013. Radar data assimilation with WRF 4D-Var. Part II: comparison with 3D-Var for a squall line over the U. S. Great Plains[J]. *Mon Wea Rev*, 141(7):2245-2264.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12):5095-5115.
- Tong M J, Xue M, 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments[J]. *Mon Wea Rev*, 133(7):1789-1807.
- Wang H L, Sun J Z, Fan S Y, et al, 2013a. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-Var and its impact on prediction of four summertime convective events[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(4):889-902.
- Wang H L, Sun J Z, Zhang X, et al, 2013b. Radar data assimilation with WRF 4D-Var. Part I: system development and preliminary testing[J]. *Mon Wea Rev*, 141(7):2224-2244.

- Wang X G, Parrish D, Kleist D, et al, 2013c. GSI 3DVar-based ensemble-variational hybrid data assimilation for NCEP global forecast system: single-resolution experiments [J]. *Mon Wea Rev*, 141(11):4098-4117.
- Wang Y H, Gao J D, Skinner P S, et al, 2019. Test of a Weather-adaptive dual-resolution hybrid warn-on-forecast analysis and forecast system for several severe weather events[J]. *Wea Forecasting*, 34(6):1807-1827.
- Wang Y M, Wang X G, 2017. Direct assimilation of radar reflectivity without tangent linear and adjoint of the nonlinear observation operator in the GSI-based EnVar system: methodology and experiment with the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell [J]. *Mon Wea Rev*, 145(4):1447-1471.
- Wattrelot E, Caumont O, Mahfouf J F, 2014. Operational implementation of the 1D+3D-Var assimilation method of radar reflectivity data in the AROME model[J]. *Mon Wea Rev*, 142(5):1852-1873.
- Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J Z, et al, 2007. An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at landfall[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46(1):14-22.
- Yang Y, Qiu C J, Gong J D, 2006. Physical initialization applied in WRF-Var for assimilation of Doppler radar data[J]. *Geophys Res Lett*, 33(22):L22807.
- Yussouf N, Stensrud D J, 2010. Impact of phased-array radar observations over a short assimilation period: observing system simulation experiments using an ensemble Kalman filter[J]. *Mon Wea Rev*, 138(2):517-538.
- Zhang F, Snyder C, Sun J Z, 2004. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter[J]. *Mon Wea Rev*, 132(5):1238-1253.
- Zhang J, 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations[D]. Norman: The University of Oklahoma.
- Zhang J, Qi Y C, 2010. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE[J]. *J Hydrometeorol*, 11(5):1157-1171.