1	集合变分混合同化方案在快速循环同化系统中的应用研究1
2 3 4 5	 张涵斌^{1,2},李玉焕^{1*},陈敏¹,冯琎¹,范水勇¹,沈海波³ 1. 北京城市气象研究院,北京,100089 2. 天气在线气象应用研究所,无锡,214000 3. 南京信息工程大学,南京,210044
6	摘要:基于北京市气象局快速循环同化系统 RMAPS-ST 以及对流尺度集合预报系统 RMAPS-EN,构建了
7	En-3DVAR 集合变分混合同化系统,将该系统应用到业务快速循环同化系统中并进行试验,分别在冷启动
8	与循环启动环境下对比了混合同化系统(Hybrid)与三维变分(3DVAR)的同化预报效果。获得的结论如下:单
9	点试验结果表明,混合同化系统分析增量的分布与集合预报离散度分布具有较好的对应关系;在冷启动和
10	循环启动中,三维变分的分析增量都表现出各向同性的特点,混合同化分析增量均表现出一定的流依赖特
11	征;降水个例分析表明,在冷启动环境中,Hybrid 与 3DVAR 效果相当,而在循环启动中,Hybrid 的降水
12	预报相对于 3DVAR 有较明显的改进效果;批量试验检验结果表明,冷启动中, Hybrid 与 3DVAR 的评分大
13	致相当,而在循环启动中,Hybrid 相对于 3DVAR 的评分有明显改进;集合离散度和背景场误差的相关性
14	分析表明二者在循环启动环境下具有更好的相关性。
15	关键词 集合变分混合同化 快速循环同化系统 区域集合预报 三维变分
16	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh
16 17	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system
16 17 18 19	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³
16 17 18 19 20	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089
16 17 18 19 20 21 22	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2. WeatherOnline Institute of Meteorological Applications, Wuxi 214000 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
16 17 18 19 20 21 22 23	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2. WeatherOnline Institute of Meteorological Applications, Wuxi 214000 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
 16 17 18 19 20 21 22 23 24 	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2. WeatherOnline Institute of Meteorological Applications, Wuxi 214000 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system Janda State Sta
 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2. WeatherOnline Institute of Meteorological Applications, Wuxi 214000 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 Abstact: The hybrid ensemble-three-dimensional variational data assimilation (En-3DVAR) was constructed based on Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Short Term(RMAPS-ST) and RMAPS-EN(-Ensemble) in Beijing Meteorological Bureau. The Hybrid and 3DVAR schemes were conducted in the state of th
 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 2. WeatherOnline Institute of Meteorological Applications, Wuxi 214000 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 Abstact: The hybrid ensemble-three-dimensional variational data assimilation (En-3DVAR) was constructed based on Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Short Term(RMAPS-ST) and RMAPS-EN(-Ensemble) in Beijing Meteorological Bureau. The Hybrid and 3DVAR schemes were conducted in the cold run and cycle run settings based on RMAPS-ST. We get the following conclusions: single observation test
 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 	Study on the implementation of Hybrid En-3DVAR in Rapid refresh assimilation system ZHANG Hanbin ^{1,2} LI Yuhuan ¹ Chen Min ¹ FENG Jin ¹ FAN Shuiyong ¹ Shen Haibo ³ 1. Institute of Urban Meteorological Administration, Beijing 100089 2. WeatherOnline Institute of Meteorological Administration, Beijing 100089 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 Abstact: The hybrid ensemble-three-dimensional variational data assimilation (En-3DVAR) was constructed based on Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Short Term(RMAPS-ST) and RMAPS-EN(-Ensemble) in Beijing Meteorological Bureau. The Hybrid and 3DVAR schemes were conducted in the cold run and cycle run settings based on RMAPS-ST. We get the following conclusions: single observation test showed that there is a good correspondence distribution between the hybrid DA(Data analysis)-increment and

ensemble spread; the hybrid DA-increment have flow-dependent characteristics in both cold and cycle run but the
3DVAR DA-increment is isotropic; A rainfall case study revealed that Hybrid and 3DVAR have the almost same
influence on the precipitation in cold run,but Hybrid scores are significantly improved compared to 3DVAR in the
cycle run; the analysis from the ensemble spread and background-error show that they have better correlation in
cycle run than the cold run.
Keywords Hybrid En-3DVAR, Rapid-refresh assimilation system, regional ensemble forecast,3DVAR

- 35
- 36 1 引言

资料同化方法经过长期的发展,先后形成了主观分析、逐步订正(Bratserh, 37 1986)、最优插值(Lorenc, 1986)、变分同化(三维变分/四维变分, Parrish and Derber, 38 1992)和集合卡尔曼滤波(Anderson, 2001)等方法。其中, 变分同化是当前国内外 39 数值预报业务中心普遍采用的同化方法,其核心思想是利用最优控制理论,调整 40 分析场与观测场、分析场与背景场之间的距离,使得两者之和达到最小,从而获 41 得质量较好的模式初始场。在变分同化中,背景误差协方差的质量非常重要,决 42 定着观测值订正到背景场的程度,以及观测点上的信息传播到分析格点上的方式 43 (Courtier et al., 1998)。然而三维变分中通常假定背景误差协方差是静态的、均 44 匀的和各项同性的,这与实际大气的预报误差通常随不同天气形势而不断变化的 45 情况相违背(尤其是对于中小尺度天气系统)(Barker et al., 2004); 四维变分虽然 46 通过前向切线性模式的约束隐式的实现了背景误差随天气形势变化的能力,但需 47 要耗费很高的计算资源(Rabier et al., 2000),且四维变分中初始时刻使用的仍是 48 静态的背景误差协方差,这在一定程度上限制了变分同化分析场的质量,从而影 49 响数值天气预报质量的提高。此外,有学者提出了卡尔曼滤波和集合预报相结合 50 的集合卡尔曼滤波同化方法(Ensemble Kalman Filters, EnKF),该方法通过集合 51 预报系统获得一组模式预报集合,以此估计出具有流依赖的背景误差协方差 52 2007),相较于变分同化方法,EnKF不需要发展切线性模式 (Meng and Zhang, 53 和伴随模式,在实际应用中也相对容易,显示出了较好的应用前景(Bishop et al., 54 2001; Whitaker and Hamil, 2002), 但集合卡曼滤波计算耗费较大, 为了降低计算 55 量需要顺序同化观测资料,无法达到全局最优(Tong and Xue, 2005; Zhang et al., 56 2006),因此在实际同化分析应用中受到了很大的限制。鉴于上述原因,气象学 57 者提出了将集合预报提供的背景误差协方差融入到变分同化框架中,实现优势互 58

59 补,从而产生了集合变分混合同化方法(Hybrid)。

自 Lorenc(2003)首次提出将集合估计背景误差协方差矩阵通过扩展控制变 60 量的方式融入到变分同化的框架中,并且证明了其理论可行性之后,混合同化逐 61 渐成为资料同化领域的前沿问题。Hamill and Snyder(2000)利用低分辨率准地转 62 模式,通过线性组合法将气候统计背景误差协方差与集合估计背景误差协方差进 63 行耦合,首次构造了 EnKF-3DVAR 混合同化系统。Wang et al.(2007a, 2007b)等 64 从理论上证明了扩展控制变量和线性组合法两种方法的等价性。Liu et al.(2008, 65 2009), Liu and Xiao(2013)基于 WRF 模式开展混合同化试验, 表明混合同化方法 66 可以很容易应用到基于变分的业务区域模式同化系统中。除此之外,许多学者基 67 于不同的变分同化系统和集合预报方法对混合同化开展了大量的研究(Buehner, 68 2005; Hamill et al., 2011; Wang et al., 2008a, 2008b; Wang, 2011; Buehner et al., 69 2010a, 2010b; Clayton et al., 2012; 马旭林等, 2014, 2015; Chen et al., 2015; 70 张明阳等, 2015; 朱浩楠等, 2016; 沈菲菲等, 2016; 夏宇等, 2018; Xia et al., 71 2019),结果表明引入集合预报背景误差协方差能改善气候统计背景误差协方差 72 存在的不足(Wang et al., 2013),进而改善同化分析的质量和预报效果,且在观测 73 资料稀疏的区域改善效果更为明显。Lorenc(2017)指出,如果集合成员数足够大, 74 在 Hybrid 同化中增加集合预报估计背景误差协方差的权重时所得到的同化分析 75 效果较好,当集合成员数较小时,需要减小集合估计背景误差协方差的权重系数 76 才能取得较好的分析效果。 77

目前,快速循环同化系统在各数值预报中心已成为主要的业务系统 78 (Benjamin et al, 2015), 华北的业务数值预报系统也基于快速循环同化框架搭建, 79 同化技术采用三维变分(陈敏等, 2010)。2018年,北京城市气象研究院已搭建了 80 3km 分辨率的区域集合预报系统,为业务快速循环同化系统引入混合同化技术提 81 供了较好的条件。为了探索混合同化技术在华北快速循环同化系统中的应用效 82 果,寻找高分辨率集合预报与区域快速循环同化系统的最优结合方法,本文基于 83 华北快速循环同化系统和华北区域对流尺度集合预报系统开展了混合同化应用 84 试验,对比分析了混合同化和三维变分在冷启与热启循环设置下的同化预报效 85 果,以期揭示混合同化方法对快速循环同化系统的影响,为华北业务快速循环同 86 化系统以及类似系统日后的改进提供参考。 87

88 2 系统、资料和方法

89 2.1 RMAPS-ST 系统介绍

RMAPS 系统是北京城市气象研究院研发的新一代快速循环同化预报系统, 90 包含若干个子系统,涵盖了短临预报,区域数值预报以及环境预报等。其中, 91 RMAPS-ST(Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System -Short Term) 92 数值预报业务系统是基于 WRF 预报模式和 WRFDA 同化平台搭建而成的区域数 93 值预报系统。目前该系统采取两重嵌套,外层分辨率为9公里(图1 D01),水平 94 格点为 649×550, 覆盖中国区域, 内层分辨率为 3 公里(图 1 D02), 水平格点为 95 550×424,覆盖华北地区,内层和外层的垂直层数均为50层。系统背景场来自于 96 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecast)细网格预报,分辨 97 率 0.125°, 每天启动运行 8次: 00:00UTC、03:00UTC、06:00UTC、09:00UTC、 98 12:00UTC、15:00UTC、18:00UTC 和 21:00UTC, 采用 Partial Cycle 运行方式(何 99 静等, 2019), 即 00:00UTC 由前一天 18:00UTC 的 6 小时的预报场驱动, 03:00、 100 06:00、09:00、12:00、15:00、18:00 和 21:00UTC 由前一个启动时次 3 小时预报 101 场驱动。资料同化模块采用三维变分同化,同化资料包括常规地面探空、飞机报、 102 地基 GPS 以及京津冀 6 部雷达径向风速度和反射率因子等资料。 103



108 RMAPS-EN 是由北京城市气象研究院发展的区域集合预报系统(张涵斌等,
109 2017),该系统采用 WRF 模式 V3.8 版本,模式区域设置为水平分辨率 3km,模
110 拟区域范围为 35.5 ~46.3 N, 105.2 ~122.4 E,与 RMAPS-ST D02 相一致,共

111 550×424 个格点,覆盖华北大部分区域。该集合预报系统包含 21 个集合成员(一
112 个控制预报和 20 个集合扰动成员)系统每天从 00:00、12:00 UTC 起报,预报时
113 效为 24h。系统初值和侧边界条件均由 NCEP 全球集合预报资料 GEFS(Global
114 Ensemble Forecast System)动力降尺度提供,分辨率 1 °×1 °,目前尚无模式扰动方
115 法。

116 2.3 Hybrid En-3DVAR 混合同化方法介绍

117 目前 RMAPS-ST 业务系统中采用三维变分(3DVAR)进行资料同化,传统的
118 3DVAR 通过求解给定目标函数的极小化来实现观测资料和背景信息的最佳拟

120
$$J(\mathbf{x}) = J_b + J_o = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} [\mathbf{y}_o - \mathbf{H}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{y}_o - \mathbf{H}(\mathbf{x})]$$
(1)

121 式中*J_b* 定义了分析场向背景场的拟合程度,*J_o*定义了分析场向观测场的拟
122 合程度, x 为所求分析场, x_b 为背景场, y_o 为观测场, H 是观测算子, B 是背
123 景误差协方差矩阵, R 是观测误差协方差矩阵。

124集合变分混合同化的思想是将基于集合估计的背景误差协方差引入到变分同125化框架中,即传统三维变分框架中的静态协方差 B 由三维变分静态协方差 B_c 与126基于集合估计的集合协方差 B_e 的线性加权组合构成。即(1)式中的 B 用下式代替:127 $B = \beta_c B_c + \beta_e B_e$ (2)

128 β_c 为气候统计背景误差协方差的权重系数, β_e 为集合背景误差协方差的权重 129 系数,且 $\beta_c + \beta_e = 1$ 。本文采用扩展控制变量法,将 RMAPS-EN 系统提供的集合 130 估计背景误差协方差与 RMAPS-ST 中 3DVAR 同化业务系统提供的静态背景误 131 差协方差进行耦合,构建 Hybrid En-3DVAR 混合同化的背景误差协方差。混合 132 同化目标函数可以表示为如下(Wang et al., 2008 a):

133

$$J(\mathbf{x}'_{c}, a) = \beta_{c}^{-1} J_{c} + \beta_{e}^{-1} J_{e} + J_{o}$$

= $\beta_{c}^{-1} \frac{1}{2} \mathbf{x}'_{c}^{T} \mathbf{B}_{c}^{-1} \mathbf{x}'_{c} + \beta_{e}^{-1} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} a_{i}^{T} \mathbf{A}^{-1} a_{i} + \frac{1}{2} (\mathbf{y}'_{o} - \mathbf{H}\mathbf{x}')^{T} \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}'_{o} - \mathbf{H}\mathbf{x}')$ (3)

134 其中, J_c 为与气候统计背景误差协方差 \mathbf{B}_c^{-1} 相关的项, J_e 为与集合估计背 135 景误差协方差矩阵。 \mathbf{x}' 为分析增量,向量 a_i 为与每一个集合成员相关的变量,随 136 集合成员的不同而不同,其协方差即为局地化相关矩阵 **A**。 J_o 是观测项, 137 $\mathbf{y}'_o = \mathbf{y}_o - \mathbf{H}\mathbf{x}_b$ 是观测增量项,系数 $\beta_c \ \beta_e$ 与(2)式相同, \mathbf{x}'_c 是与 3DVAR 静态协方 138 差相关的分析增量, \mathbf{x}'_e 是与集合协方差相关的分析增量,混合同化的分析增量为:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}'_{\mathbf{c}} + \mathbf{x}'_{e} = \mathbf{x}'_{\mathbf{c}} + \sum_{i=1}^{N} a_{io} \mathbf{x}'_{i}$$
(4)

其中 $\mathbf{x}'_i = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}) / \sqrt{N - 1}(i = 1, ..., N)$, \mathbf{x}'_i 为第i个集合成员, \mathbf{x} 为集合平均, N 140 为集合成员数。分析以上三式可见,背景误差协方差B是变分同化方案中的重要 141 组成部分,其构造方法对同化分析场有重要影响,通常在求解(1)式时,由于是 142 一个超大矩阵,无法显式表达,计算中采用了物理变换和空间变换等方法,但这 143 些方法应用的前提是变量之间的空间相关是各向均匀同性的,状态变量之间满足 144 地转关系。分析(2)式可见,混合同化方案中,在利用了 3DVAR 的统计静态预报 145 误差信息的同时,还引入了集合预报得到的预报误差信息,二者的加权平均使得 146 变分同化框架下的背景误差协方差具有了流依赖性(张明阳等, 2015)。 147

148 2.4 试验方案设计

139

为了验证混合同化方法对 RMAPS-ST 预报效果的影响,本文采用了与 149 RMAPS-ST 业务环境相一致的试验配置,其中试验区域设置为两重嵌套的方式 150 (图 1),系统中静态背景误差协方差 \mathbf{B}_{c} 基于 NMC 方法统计获得(Parrish and 151 Derber, 1992)。为保证集合估计背景误差具有足够的发散度, Hybrid En-3DVAR 152 方案中的集合背景误差协方差 \mathbf{B}_{a} 由 RMAPS-EN 系统的 12h 集合预报所提供,并 153 与 RMAPS-ST 系统中静态背景误差协方差 B。相融合构建混合同化方案,考虑到 154 集合成员数有限,本文中的混合同化背景误差协方差B采用集合与静态配比为 155 1:1。此外, 仅对 D02(3km 区域)中采用 Hybrid 方案, 而 D01(9km 区域)不采用混 156 合同化,直接使用 WRF-DA 中的 3DVAR 同化方案。为了进行纯净对比,本文 157 试验仅对常规观测资料进行同化,混合同化预报时效为 24h。本文构建的 RMAPS 158 混合同化系统的具体试验流程如图 2 所示。 159



163 为了对比分析不同背景场对同化结果的影响,验证 Hybrid En-3DVAR 同化方 164 案在不同背景场下的作用效果,本文采用了两种不同的背景场设置方案。方案一 165 为冷启动,即采用 ECMWF 全球细网格分析场作为背景场;方案二按照业务循 166 环同化设置,采用业务逐 3h 循环的预报场作为背景场。在两种设置下,分别针 167 对 D02 进行了 Hybrid En-3DVAR 混合同化预报试验和 3DVAR 同化预报试验(D01 168 始终保持 3DVAR 不变), 检验了 Hybrid 方法在 RMAPS-ST 系统中的应用效果, 169 对比分析 Hybrid 与 3DVAR 的同化预报效果, 四组试验的具体设置如表 1 所示。 170 四组试验的起报时刻均为每天的 00:00UTC, 其中 3DVAR-cold 和 Hybrid-cold 均 171 为在冷启环境中进行试验,即采用 00:00UTC 的 ECMWF 全球分析场作为背景场; 172 3DVAR-cycle 和 Hybrid-cycle 均为在热启循环环境下进行试验,即采用业务 173 RMAPS-ST系统前一天 21:00UTC 启动获得的 3h 预报场作为背景场。其中冷启 174 和热启两种设置下的 3DVAR 同化方案均采用 NMC 方法估计的静态背景误差协 175 方差,而两种设置下的 Hybrid 同化则采用集合与静态相结合的背景误差协方差, 176 集合样本为 RMAPS-EN 区域集合预报系统在 RMAPS-ST 同化时刻(每天的 177 00:00UTC)之前 12h (即前一天 12:00UTC)起报的 12h 预报时效的集合成员。四组 178 试验的时段为 2018 年 7 月 10-30 日连续 20 天。 179 表1 试验设置 180

160

181	Table 1 Test and corresponding Settings					
	试验方案	背景场	背景误差协方差	同化方法		

3DVAR-cold	ECMWF 分析场	NMC 静态	3DVAR
Hybrid-cold	ECMWF 分析场	NMC 静态+集合	Hybrid
3DVAR-cycle	RMAPS-ST 3h 循环预报场	NMC 静态	3DVAR
Hybrid-cycle	RMAPS-ST 3h 循环预报场	NMC 静态+集合	Hybrid

182 3 试验结果分析

183 3.1 背景误差协方差不同集合权重单点试验

K

为了验证华北区域集合预报 RMAP-EN 应用于本文 Hybrid 试验的可行性,
并探索集合估计的背景误差协方差会对分析增量产生何种影响,本节首先进行单
点同化试验,该单点试验以模式第 15 层 U 分量风为同化要素,以分析不同权重
的集合方差对分析增量的影响,其中四组单点试验集合权重分别为 0、1/5、1/2
和 1,同化分析时刻为 2018 年 7 月 16 日 00:00UTC。

由于本节试验需要用到 12h 预报时效的集合预报来估计背景误差协方差,因
此首先对集合预报离散度分布特征进行分析。图 3 给出了区域集合预报 2018 年
7月 15日 12:00UTC 起报的 12h 预报时效 500hPa U 分量风的集合离散度分布以
及业务 RMAPS-ST 系统在对应时刻 D02 分析场位势高度结果,可以看出集合预
报在该预报时刻(即 2018 年 7 月 16 日 00:00UTC)离散度的大值区与天气流型对
应较好,副高脊线边缘离散度较大,局部地区可以达到 6m s⁻¹,说明该地区不确
定性较强。



196 197

图 3 区域集合预报 RMAPS-EN 2018 年 7 月 15 日 12:00UTC 起报 12h 预报时效的 500 hPa U 分量风集
合离散度 (阴影,单位: m s⁻¹)和业务 RMAPS-ST 的 D02 分析场等位势高度线(等值线,单位: gpm)分布
Fig.3 horizontal pattern of 12h Ensemble Spread of Zonal wind U at 500hPa(shades with unit: m s-1) with
ensemble forecast system of RMAPS-EN initiated form 12:00UTC 15 July 2018, as well as corresponding

geopotential height from operational RMAPS-ST analysis of domain 02(solid lines with unit: gpm)

与之相对应,图4是不同集合权重下模式第15层U分量风单点分析增量。 203 首先可以看出,当集合权重为0,即为3DVAR 增量,表现出各项同性的状态, 204 随着集合权重的增加,分析增量形态逐渐产生变化,表现出随流型响应的特征, 205 增量在东北-西南向逐渐增大,增量大值区域与集合离散度大值区相对应,而当 206 集合权重到 100%的时候,分析增量表现出完全的东北-西南向形状。该试验结果 207 说明 RMAPS-EN 集合具有充足的离散度,可以有效应用于 Hybrid 同化中背景误 208 差协方差的估计,且产生的分析增量能够有效的响应集合离散度分布,考虑到本 209 文中集合成员数量有限,因此不宜给予集合太大权重,且集合估计背景误差协方 210 差比重为 1/2 时已具备明显的流依赖效果,本文实际试验中集合背景误差协方差 211 权重选为1/2。 212

213

202



221 3.2.1 分析增量分析

验证了 Hybrid 分析增量的正确性之后,本节开展不同同化方案的真实个例 222 试验,该个例同化分析时刻依然为 2018 年 7 月 16 日 00:00UTC。图 5 给出了四 223 组试验 2018 年 7 月 16 日 00:00UTC 的分析增量。对比图 5a 和图 5b 可以看出, 224 冷启动设置下的 3DVAR 和 Hybrid 增量呈现出一定差别,其中区别最大区域为河 225 北西北部-山西西北部一线,该地区也对应着图 3 中离散度大值区,其中 Hybrid 226 增量呈现出流依赖特征,且增加了许多小尺度增量;对于循环设置下的 3DVAR 227 和 Hybrid(图 5c, d), 其中 Hybrid(图 5d)增量的形态相对于 3DVAR 差异较为明 228 显,也表现出明显的流依赖特征和更多的小尺度增量,尤其是离散度大值区(见 229 图 3)表现出较强的流依赖属性。值得注意的是,相对于冷启动下的 3DVAR 和 230 Hybrid 方案,在循环启动下, 3DVAR 和 Hybrid 均表现出较大的分析增量,如山 231 西、内蒙和陕西交界处存在一个较大的负增量,而对应的冷启动下的两种方案则 232 无此增量大值区。由于观测资料是一致的,造成这种差异的原因在于背景场不一 233 致,其中冷启背景场来自与全球分析场降尺度,其在 ECMWF 全球同化系统中 234 已经经过一次资料同化,因此在同化华北地区观测后,总体增量相对来说不算太 235 大;而热启同化由于采用区域模式自身的高分辨率预报场作为背景场,因此在同 236 化过程中背景场和观测差异略大,但是这从另一个角度也体现了快速循环同化系 237 统的意义,即通过不断吸收观测资料对背景场进行校正,并通过循环同化减少区 238 域模式 spin up 的时间(范水勇等, 2009)。 239









245 246

图 5 2018 年 7 月 16 日 00:00UTC 四种同化方案在模式层第 16 层纬 U 分量风的分析增量(单位: m s⁻¹).(a)3DVAR-cold,(b) Hybrid-cold, (c) 3DVAR-cycle,(d) Hybrid-cycle. Fig.5 Analysis increment of zonal wind at 16th model level for the four schemes in 00:00UTC 16 July 2018(units: m s⁻¹). (a)3DVAR-cold,(b)Hybrid-cold,(c)3DVAR-cycle,(d)Hybrid-cycle

247 3.2.2 低空要素分析

四种方案得到的分析场各不相同,分析场的质量通过模式积分会对预报的质 248 量产生影响,包括动量通量输送以及水汽分布等,从而影响降水等诊断量的预报。 249 本节对该个例四种方案低空要素预报进行分析,以揭示在冷启和循环启动的不同 250 运行环境下,Hybrid 为低空要素分布带来的影响。图 6a、b、c 给出了 3DVAR-cold、 251 Hybrid-cold 两种方案 2018 年 7 月 16 日 00: 00UTC 起报、18h 预报时效的 700hPa 252 高度风场和水汽分布情况以及两种方案的差异,可以看出两种方案下低空急流和 253 水汽分布较为类似,河北地区呈现自南向北的低空急流,水汽分布也成南北向, 254 河北西部相对湿度均可达90%,而两者的差异可以看出,风场和水汽差异主要在 255 河北西北部;图 6d、e、f 给出了相应的 3DVAR-cycle、Hybrid-cycle 两种方案的 256 预报结果以及预报差异,可以看出在热启动设置下的 3DVAR-cycle 和 257 Hybrid-cycle 同化方案水汽分布均与冷启设置下的结果不同, cycle 设置下和冷启 258 设置下水汽输送路径差别较大,多了很多小尺度水汽分布,对比 cycle 设置下的 259 3DVAR 和 Hybrid 方案之差(图 6f),可以看出两者差异明显比在 cold 设置下(图 260 6c)更大,河北范围内风场差异可达 2m/s 以上,相对湿度差异最大值可以 25%以 261 上,且差值场具有很多小尺度分量。以上分析表明在 cycle 设置下, Hybrid 相对 262 于 3DVAR 带来的变化更大。 263



266 图 6 18h 预报时效的不同方案 700hPa 高度风场(矢量)及相对湿度分布(阴影,单位:%),以及在冷启、循环
267 设置下 Hybrid 相对于 3DVAR 方案的差异.(a)3DVAR-cold,(b)Hybrid-cold,(c)3DVAR-cold 和 Hybrid-cold 两种
268 方案的差异,(d)3DVAR-cycle,(e)Hybrid-cycle,(f)3DVAR-cycle 和 Hybrid-cycle 两种方案的差异
269 Fig.6 The distribution of 700hPa wind(vector) and relative humidity(shades, units: %) fields at 18th the
270 forecast hour and the difference in cold and cycle runs. (a) 3DVAR-cold, (b)Hybrid-cold,(c)the difference between
271 3DVAR-cold and Hybrid-cold,(d)3DVAR-cycle,(e)Hybrid-cycle,(f)the difference between 3DVAR-cycle and
272 Hybrid-cycle

273 3.2.3 降水分析

264

265

上文分析了四种方案对要素的预报差异,要素预报影响着大气的动力和热力 274 条件,会进一步影响降水预报效果,本节即对四种方案降水效果进行分析。图7 275 给出了 2018 年 7 月 16 日 18:00UTC-2018 年 7 月 17 日 00:00UTC 时的 6h 累计降 276 水分布实况以四种同化方案的预报(四种方案起报时刻为 2018 年 7 月 16 日 277 00:00UTC)。由实况(图 7a)可以看出,本次降水过程较强,覆盖区域较广,主要 278 集中在河北、山西区域,其中北京-河北南部-山西南部降水较强,局地可达25mm 279 以上。对于 cold 设置下的 3DVAR(图 7b)和 Hybrid(图 7c);对于雨带的把握存在 280 一定的偏差,山西北部降水预报较好,但是山西南部以及北京南部降水中心预报 281 较差,说明在 cold 设置下 Hybrid 对 3DVAR 并无明显改善;在 cycle 设置下, 282 3DVAR(图 7d)对雨带有了较好的预报,尤其是对于山西南部降水中心预报较为 283

准确,但对北京南部强降水预报偏北,而 Hybrid 方案(图 7e)不仅对山西南部降 284 水有很好把握,对于北京地区降水预报也较为准确,有效改进了 3DVAR 的不足。 285 286



scheme,(d)forecast of 3DVAR-cycle scheme,(e)forecast of Hybrid-cycle schemes

图 8 给出了四种方案不同量级的逐 6h 累计降水 TS 评分和 Bias 评分,可以 298 看出对于两种冷启方案,总体评分差别不大,尤其是小雨量级的 TS(图 8a)和 299 Bias(图 8d)差别很小, 而大雨量级(图 8c)3DVAR-cold 和 Hybrid-cold 差别稍大, 300

在 12-18 预报时效 3DVAR 较为占优;冷启设置下两种方案的 Bias 评分来看,各
个量级的表现也十分接近。对于循环启动下的两种同化方案,从 1mm 降水量级
两种方案的 TS 评分即显示出较大差异(图 8b),且 Hybrid-cycle 方案的 TS 评分要
明显高于 3DVAR-cycle 方案,对于 10mm 量级降水结果也类似;对于两种方案
的 Bias 评分来看,差别也较大,对于小雨量级(0.1mm,图 8d, 1mm,图 8e)所
有预报时效 Hybrid-cycle 更接近 1,对于大雨量级降水(10mm), Hybrid-cycle 在
大部分预报时效也占优更接近 1。



图 8 2018 年 7 月 16 日 18:00UTC-2018 年 7 月 17 日 00:00UTC 时的 6h 累计降水四种方案不同量级 TS 评 分.(a)0.1mm TS 评分,(b)1mmTS 评分,(c)10mm TS 评分,(d)0.1mm Bias,(e)1mm Bias,(f)10mm Bias
Fig.8 The threat score (TS) of the forecast precipitation from18:00TUC 16 July 2018 to 00:00UTC 17 July 2018 in four schemes. (a) 0.1mm TS,(b)1mm TS,(c)10mm TS,(d)0.1mm Bias,(e)1mm Bias,(f)10mm Bias

315 3.3 批量试验检验结果

316 为了进一步评估四种方案的表现,对连续试验时段内的高空和地面要素进行
317 检验,采用均方根误差来综合对比四种方案的预报效果,重点强调在冷启和循环
318 设置下,Hybrid 相对于 3DVAR 的改进程度。本节的实况采用地面和探空观测站
319 点进行检验。

8 9 给出了四种方案地面要素 12、24h 预报均方根误差。从 2m 温度预报可
 以看出,两种 cycle 方案预报效果要优于两种 cold 方案,显示了循环同化的效果。
 需要指出的是,对于两种 cold 方案, Hybrid-cold 表现要差于 3DVAR-cold,并未

323 体现出优势;而在 cycle 设置下, Hybrid 方案的表现要好于 3DVAR 方案,在 12h
324 和 24h 预报时效均体现出了较小的误差,对于 10m U 结果也类似,说明在 cycle
325 环境下, Hybrid 方法对于地面要素预报相对于 3DVAR 能够取得更好的改进效果。



Improvements(%)		co	old			cycle		
	06h	12h	18h	24h	06h	12h	18h	24h
U200	2.59	-2.13	-0.58	1.97	10.45	-0.45	1.62	1.18
U500	3.56	0.41	1.44	-0.11	3.34	1.02	0.58	0.79
U850	1.19	0.33	1.29	-2.61	1.24	2.81	2.43	-1.05
V200	3.91	-2.43	-2.87	-0.58	8.61	3.13	-0.27	2.87
V500	1.99	0.82	1.90	1.17	3.22	4.09	6.91	1.04
V850	0.07	0.76	1.00	1.08	0.89	1.20	2.16	-2.32

T500	0.96	-1.77	-0.17	-2.69	3.16	5.04	1.10	-0.78
T850	-0.06	0.19	0.77	-0.81	1.45	4.03	1.44	0.24
GHT500	-0.35	1.55	2.10	2.38	-0.65	2.73	1.43	1.66
RH700	-0.02	2.02	2.69	0.34	1.02	3.15	1.18	0.58
RH850	-0.02	-0.40	0.18	-0.47	1.04	1.26	1.08	1.21

342 3.4 背景场误差-集合离散度相关性分析

³⁴³根据上文的研究结果表明,在冷启设置下,Hybrid 相对于 3DVAR 的改进十
³⁴⁴分有限,而在循环设置下,Hybrid 相对于 3DVAR 的改进非常明显,这说明 Hybrid
³⁴⁵相对于 3DVAR 的优势是有条件的,即使采用同样一套集合来估计背景误差协方
³⁴⁶差,在背景场不同的情况下,Hybrid 相对于 3DVAR 的改进效果也有差异,本节
³⁴⁷主要针对背景场误差与集合离散度之间的相关性进行分析,来深入揭示 Hybrid
³⁴⁸同化方案在何种情况下才具有相对于 3DVAR 的明显优势。

349 混合同化中集合扰动方差是否能准确估计背景场误差方差,对于混合同化的
350 效果至关重要, Tothet et al.(2001)及 Zhu et al.(2002)的研究表明一个集合预报系
351 统能否准确捕捉不同天气形势下的预报不确定性是衡量一个集合预报系统能力
352 的重要指标,如果真实的误差分布在集合扰动附近,集合扰动方差与误差方差的
353 对应较好,二者相关性更高。

对于混合同化而言,我们希望集合扰动方差与逐日变化的背景场误差方差对
应更好。本文中我们采用扰动与误差相关分析(Perturbations versus Error
Correlation Analysis, PECA, Wei and Toth, 2003)衡量背景场误差与集合扰动的相
关性。首先,计算某一层次上某一变量在所有格点上的背景场误差和 12h 集合预
报平均扰动,其中背景场误差:

$$E(i, j) = b(i, j) - o(i, j)$$

(6)

360 式中*b*(*i*, *j*)为背景场, *o*(*i*, *j*)为 fnl 再分析资料插值到模式区域作为真值; 集合平
361 均扰动:

362
$$P(i,j) = \frac{\sum_{k=1}^{N} |f_k(i,j) - f_{mean}(i,j)|}{N}$$
(7)

363 式中 f_k(i, j)为 12h 集合预报中第 k 个成员的预报, f_{mean}(i, j)为集合平均预报, N
364 为集合成员数。求取控制预报误差和集合平均扰动的相关系数可得:

365

$$C_{PE} = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N} (P(i,j) - \overline{P(i,j)})(E(i,j) - \overline{E(i,j)})}{\left[\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N} (P(i,j) - \overline{P(i,j)})^2\right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N} (E(i,j) - \overline{E(i,j)})^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$
(8)

图 10 给出了试验时段内统计平均的,不同层次不同要素的预报误差与集合 366 扰动相关系数分布图。可以看出对于不同的要素,在大部分层次 Hybrid-cycle 方 367 案中背景场误差与集合扰动的相关性要高于 Hybrid-cold 方案,如对于 u 分量风 368 (图 10a),在模式面第 31 层 Hybrid-cycle 方案相关系数最大值可达 0.67 左右,对 369 应层次 Hybrid-cold 方案相关系数值仅为 0.6 左右, 在模式面第 19 层, Hybrid-cycle 370 方案相关系数达 0.6 左右, 对应层次 Hybrid-cold 方案相关系数值仅为 0.53 左右, 371 对于其它要素情况也类似,不再赘述。以上结果说明在快速循环同化系统 372 RMAPS-ST 中,华北区域 D02 的背景场来源于区域模式的短时效预报场,而集 373 合估计的背景误差协方差也来自区域模式积分 12h 的集合预报场,两者区域范 374 围、分辨率都一致,因此 RMAPS-ST 的背景场误差与华北区域集合预报扰动具 375 有更好的对应关系,而采用冷启动方式的背景场来自于全球分析场,其误差与区 376 域集合预报扰动对应不够好。 377

378



Fig.10 the distribution of correlation coefficients between forecast error and ensemble perturbation. (a)zonal
 wind U,(b)meridional wind V,(c)temperature,(d)pressure

384 4 结论和讨论

基于北京市气象局快速循环同化系统 RMAPS-ST 以及华北对流尺度集合预
报系统 RMAPS-EN,构建了 En-3DVAR 集合变分混合同化系统,将该系统应用
到业务快速循环同化系统中,并进行了一系列试验,包括:单点同化试验、在冷
启动与循环启动环境下的真实个例同化试验,以及连续时段内的批量试验。对比
了混合同化与三维变分的同化预报效果,得到以下几点结论:

390 (1) 单点试验结果表明,混合同化系统的分析增量的分布具有流依赖特征,
391 与集合预报离散度分布具有较好的对应关系;集合权重越大,分析增量的流依赖
392 特征越强。

393 (2)不管是在冷启动中,还是在循环启动中,三维变分的分析增量都表现出
394 各向同性的特点,混合同化分析增量均表现出一定的流依赖特征;而鉴于冷启动
395 和循环启动背景场不同,因此分析增量存在显著差异,导致分析场中水汽条件和
396 动力条件有所差异,其中冷启动环境下的混合同化分析场与三维变分分析场差异
397 较小,而循环启动下的混合同化分析场与三维变分分析场差异较大。

398 (3) 降水个例分析表明,采用冷启动设置下的降水预报与实况差距较大,混
399 合同化相对于三维变分也无法取得明显的改进效果;循环启动设置下,混合同化
400 的降水预报相对于三维变分的改进效果较为明显,可以有效修正降水落区的误
401 差,获得较好的评分。

402 (4) 批量试验检验结果表明,在冷启动设置下,混合同化相对于三维变分的
403 改进不够明显;而在循环启动设置下,混合同化对高空等压面要素预报及低空要
404 素预报具有正效果。

405 (5) 集合预报扰动与背景场误差的相关性检验结果表明,在冷启动设置下,
406 集合扰动与背景场误差的相关性不够显著,而在循环启动设置下集合扰动与背景
407 场误差相关性更高。

本文研究结果表明, 当采用区域集合预报结果提供流依赖背景误差协方差进 408 行集合-变分混合同化时,当背景场同样来自区域模式的情况下,能够获得更好 409 的混合同化效果,因为区域集合估计的背景误差协方差与真实的背景误差协方差 410 具有较好的匹配。这也揭示了当我们在发展快速循环同化的过程中,考虑到背景 411 场主要来自区域模式的自身循环预报,因此尽量采用同样来自与区域模式的区域 412 集合预报结果来估计流依赖的背景误差协方差。此外,影响 Hybrid 同化效果的 413 因素较多,本文并未对集合预报的成员数以及预报时效进行更近一步的分析,未 414 来需要进一步研究。 415

416 参考文献(References)

417 Anderson J L.2001. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation[J]. Monthly Weather Review, 129: 2884-2903.

- 418 Bratserh A.1986.Statistical interpolation by means of successive corrections[J].Tellus. 38:439-447.
- Bishop C H, Holt T R, Nachamkin J, et al. 2009. Regional Ensemble Forecasts Using the Ensemble Transform Technique[J]. Monthly
 Weather Review. 137:288-298.
- Bishop C H,Etherton B J, Majundar S J. 2001. Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalmanfilter.Part1:theoretical aspect[J].
 Monthly Weather Review, 129:420-436.
- Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. 2004. A three-dimensional (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: Implementation
 and initial result[J]. Monthly Weather Review, 132:897-914.
- Buehner, M. 2005. Ensemble-derived stationary and flow dependent background error covariances: Evaluation in a quasi-operational
 NWP setting. Quart.J. Roy. Meteor. Soc., 131:1013–1043.
- 427 Buehner M,Houtekamer PL, Charette C, et al. 2010a. Inter-comparison of variational data assimilation and ensemble Kalman filter for
- 428 global deterministic NWP. Part I: Description and single-observation experiments[J]. Monthly Weather Review, 138:1550-1566.
- Buehner M, Houtekamer P L, Charette C, et al.2010b. Inter-comparison of variational data assimilation and ensemble Kalman filter for
 global deterministic NWP. Part I: One-month experiments with real observations[J]. Monthly Weather Review,138:1567-1586.
- Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2015. A North American Hourly Assimilation and Model Forecast Cycle: The Rapid
 Refresh[J]. Monthly Weather Review, 144(4):1669-1693.
- Courtier P, Andersson E, and Heckley W, et al.1998. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation
 (3DVAR)[J]. I: Formulation.Quart J Roy.Meteor.Soc.,124:1783-1807.
- Clayton A M, Lorenc A C, Barker D M. 2012. Operational implementation of a hybrid ensemble/4D-Var global data assimilation system
 at the Met Office[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 39:1445-1461.
- Chen Lianglv, Chen Jing, Xue Jishan, et al. 2015. Development and testing of the GRAPES regional ensemble-3DVAR hybrid data
 assimilation system[J]. J. Meteor. Res., 29:981-996.
- 439 陈敏, 范水勇, 仲跻芹,等.2010.全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验[J]. 气象学报,
- 440 68(4):450-463. Chen Min, Fan Shuiyong, Zhong Jiqin, et al.2010. An experimental study of assimilating the Global Position
- System-precipitable water vapor observations into the rapid updated cycle system for the Beijing area . Acta Meteorologica Sinica,
 68(4): 450-463
- 443 范水勇,陈敏,仲跻芹,等.2009.北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估.暴雨灾害,28(2):119-125.Fan
- Shuiyong, ChenMin, ZhongJiqinet al. 2009. Performance Tests and Evaluations of Beijing Local High-resolution Rapid Update Cycle
 System[J]. Torrential Rain and Disasters, 28(2):119-125.
- 446 Hamill T M and Snyder C. 2000. A Hybrid Ensemble Kalman Filter-3D Variational Analysis Schme[J].Monthly Weather 447 Review,128:2905-2919.
- Hamill T M, Whitaker J S, Fiorino M, et al. 2011. Global ensemble predictions of 2009's tropical cyclones initialized with an ensemble
 Kalmanfilter[J]. Monthly Weather Review, 139: 668-688.
- 450 何静, 陈敏, 仲跻芹,等. 2019.雷达反射率三维拼图观测资料在北方区域数值模式预报系统中的同化应用研究[J]. 气象学报,
- 451 77(02):48-70.He jing, Chen Min, Zhong Jiqin, et al.2019.A study of three-dimensional radar reflectivity mosaic assimilation in the
- 452 regional forecasting model for North China. Acta Meteorologica Sinica, 77(2): 210-232
- 453 Lorenc A.1986. Analysis methods for numerical weather prediction[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112:1177-1194.
- Lorenc A C. 2003. The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—A comparison with 4D-VAR[J]. Quart. J. Roy.
 Meteor.Soc. ,129:3183–3203.
- Lorenc A C. 2017. Improving ensemble covariances in hybrid variational data assimilation without increasing ensemble size[J]. Q. J. R.
 Meteorol. Soc., 143(703):1062-1072.
- Liu C, Xiao Q, Wang B.2008. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme.part 1 : Technical formulation and preliminary test. Monthly Weather Review, 136:3363–3373.
- 460 Liu C, Xiao Q, Wang B. 2009. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme.partII: Observing System
- 461 Simulation Experiments with advanced research WRF (ARW)[J]. Monthly Weather Review, 137:1687–1704.
- Liu, C, and Xiao Q. 2013. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part III: Antarctic applications with
 advanced research WRF using real data[J]. Monthly Weather Review,141:2721–2739.
- 464 Meng Z and Zhang F. 2007. Test of ensemble Kalman filter for mesoscale and regional scale data assimilation. Part II: Imperfect-model
 465 experiments [J]. Monthly Weather Review, 135:1403-1423.
- 466 马旭林,陆续,于月明,等.2014.数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展[J].热带气象学报,30:1188-1195.Ma
- 467 Xulin,Luxu,YuYueming,et al.2014.Progress on hybrid ensemble-variational data assimilation in numerical weather
- 468 prediction[J].Journal of Tropical Meteorology, 30:1188-1195.
- 469 马旭林,李琳琳,周勃旸,等.2015.台风预报误差的流依赖特征及混合资料同化中最优耦合系数[J].大气科学学报,38:766-775.Ma
- 470 Xulin, LiLinlin, ZhouBoyang et al. 2005. Flow-dependent characteristics of typhoon forecasting errors and optimal coupling coefficient

- 471 in hybrid data simulation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38:766-775.
- 472 Parrish D F, Derber J C.1992. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. Monthly Weather
- 473 Review.120:1747-1763.
- 474 Rabier F, Jarvinen H, Klinker E, et al. 2000. The ECMWF operational implementation of four dimensional variational assimilation [J].
- 475 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 126:1143-1170.
- 476 477 Snyder C, Zhang F. 2003. Test of an ensemble Kalman filter for convective-scale data assimilation[J]. Monthly Weather Review,131:1663-1677.
- 478 沈菲菲,闵锦忠,许冬梅,等.2016.Hybrid ETKF-3DVAR 方法同化多普勒雷达速度观测资料 I :模拟资料试验[J].大气科学学
- 479 报,39:81-89. Shen Feifei, Min Jinzhong, Xudongmei, et al.2016.Assimilation of Doppler radar velocity observations with hybrid
- 480 ETKF-3DVAR method partI: Experiments with simulated data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39:81-89.
- 481 Toth Z, Zhu Y, Marchok T.2001. The use of ensembles to identify forecasts with small and large uncertainty[J]. Wea Forecasting,
- 482 16(4):463-477.
- 483 Tong M, Xue M. 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible non-hydrostatic model: OSS 484 experiments [J]. Monthly Weather Review, 133:1789-1807.
- 485 Whitaker J S, Hamil T M. 2002. Ensemble data assimilation without perturbed observation[J]. Monthly Weather Review, 130:1913-1924.
- 486 Wei M and Toth Z. 2003. A new measure of ensemble performance: perturbations versus error correlation analysis (PECA)[J]. Monthly 487 Weather Review,131:1549-156.
- 488 Wang X,Snyder C,Hamill T M. 2007a. On the theoretical equivalence of differently proposed ensemble /3D-Var hybrid analysis
- 489 scheme[J]. Monthly Weather Review, 135: 222-227.
- 490 Wang X, Hamill T M, Whitaker J S, et al. 2007b. A comparison of hybrid ensemble transform Kalman filter-OI and ensemble square-root 491 filter analysis schemes[J]. Monthly Weather Review,135:1055-1076.
- 492 Wang X, Barker D, Snyder C, et al. 2008a. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model Part I: Observing
- 493 system simulation experiment[J]. Monthly Weather Review, 136:5116-5131.
- 494 Wang X, Barker D, Snyder C, et al. 2008b.A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model Part II: Real
- 495 observation experiments[J]. Monthly Weather Review, 136:5132-5147.
- 496 Wang X.2011. Application of the WRF hybrid ETKF-3DVAR data assimilation system for hurricane track forecasts[J]. Wea Forecast, 497 26:868-884.
- 498 Wang X, Parrish D, Kleist D, et al. 2013.GSI 3DVAR-Based Ensemble-Variational Hybrid Data Assimilation for NCEP Global Forecast
- 499 System: Single-Resolution Experiments[J]. Monthly Weather Review,141:4098-4117.
- 500 夏宇,陈静,刘艳,等.2018.混合同化方法在青藏高原区域的初步试验[J].大气科学学报,(41):239-247.Xia Yu, Chen Jing, LiuYan,et
- 501 al.2018. A tentative experiment of GRAPES En-3DVAR hybrid data simulation method over the Tibet Plateau[J]. Chinese Journal
- 502 ofAtmospheric Sciences (in Chinese), 41:239-247.
- 503 Xia Y, Chen J, Du J, ZHI X F, et al. 2019. A Unified Scheme of Physics and Bias Correction in an Ensemble Model to Reduce Both 504 Random and Systematic Errors[J]. Weather and Forecasting, 34:1675-1690.
- 505 ZhuY,TothZ,WobusR,et al.2002.The economic value of ensemble-based weather forecasts[J]. Bull Amer Meteor Soc,83(1):73-83.
- 506 Zhang F, Meng Z, Aksoy A. 2006. Test of ensemble Kalman filter for mesoscale and regional scale data assimilation. Part I: Perfect-model
- 507 experiment [J]. Monthly Weather Review, 134: 722-736.
- 508 张明阳,张立凤,张斌,等.2015.集合变分混合同化背景误差协方差流依赖性分析[J].气象科学,35:728-736.Zhang Mingyang,Zhang
- 509 Lifeng, Zhang Bin, et al. 2015. Flow-dependent characteristics of background error covariance in hybrid variational-ensemble data 510 assimilation[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35:728-736.
- 张涵斌,李玉焕,范水勇,等.2017. 基于动力降尺度的区域集合预报初值扰动构建方法研究[J]. 气象,43(12):11-22. Zhang Hanbin, Li 511
- 512 Yuhuan,Fan Shuiyong,et al. 2017.Study on initial perturbation construction method for regional ensemble forecast based on dynamical 513 downscaling[J].Meteor. Mon. (in Chinese),43 (12):11-22.
- 514
- 朱浩楠,闵锦忠,杜宁珠.2016.HBFNEnKF 混合同化方法设计及检验[J].大气科学,5:995-100.Zhu Haonan,Min Jinzhong,Du
- 515 Yuzhu.2016.Implementation and Testing of a Hybrid Back and Forth Nudging Ensemble Kalman Filter (HBFNEnKF) Data Assimilation
- 516 Method[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 5:995-100.