

公里尺度区域变分同化中引入大尺度约束的影响研究

王瑞春^{1,2} 龚建东^{1,2} 王皓^{1,2}

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

摘要 公里尺度资料同化系统的框架设计和资料选择均侧重于中小尺度分析, 常存在大尺度分析能力不足的问题。本研究在 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 区域 3km 三维变分同化目标泛函中增加大尺度约束, 将全球系统的大尺度信息引入到分析框架中去, 研究其对公里尺度同化预报的影响。一个月的数值试验结果表明, 引入大尺度约束可以显著改进大尺度形势场的分析和预报, 提高降水预报评分, 减少 2m 温度和 10m 风场的分析预报误差。进一步的, 定量降水敏感性试验结果表明, 大尺度湿度场和温度场约束对于改进降水评分十分重要。这其中, 湿度场约束对于减少降水空报以及提高短时临近降水的 TS 评分重要, 而温度场约束对于改进较长时效的 TS 降水评分重要。此外, 在均引入大尺度约束的条件下, 采用完全循环 (一个月中间无冷启) 方案运行的试验获得了与局部循环 (每日冷启) 相当的分析预报结果。这为 GRAPES 区域公里尺度系统采用完全循环方案, 进一步简化流程, 减少计算消耗奠定了很好的基础。

关键词 资料同化 三维变分 大尺度约束

文章编号 2020176B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20176

Impact Studies of Introducing the Large-Scale Constraint into Km-Scale Regional Variational Data Assimilation

Abstract Since the framework design and observation selection are mainly for meso- and small-scale analysis, kilometer-scale data assimilation (DA) systems often suffer from insufficient large-scale analysis capabilities. This work adds an extra large-scale constraint to the cost-function of the GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) regional 3km variational

收稿日期 2020-07-06; **网络预出版日期**

作者简介 王瑞春, 男, 1987 年出生, 高级工程师, 主要从事大气资料同化研究。E-mail: wangrc@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41705085, 国家重点研发计划项目 2017YFC1502000, 中国气象局数值预报 (GRAPES) 发展专项

Funded by National Nature Science Foundation of China (41705085), National Key Research and Development Program of China (2017YFC1502000), China Meteorological Administration Special Fund for the Development of Numerical Weather Prediction (GRAPES)

27 DA framework, to study the impacts of introducing the large-scale information of the global
28 system on the kilometer-scale DA and forecast. The results of numerical experiments in one month
29 show that, the introduction of large-scale constraint can significantly improve the analysis and
30 forecast capabilities of the synoptic situation field, increase the precipitation forecast scores, and
31 reduce analysis and forecast error of 2m temperature and 10m wind. Furthermore, results of the
32 quantitative precipitation sensitivity tests show that the large-scale constraint of the temperature
33 and humidity field is a very important factor for improving the precipitation scores. The results
34 also indicate that the humidity field constraint is important for reducing precipitation false alarm
35 and improving the TS scores for short-term precipitation forecast, while the temperature field
36 constraint is important for improving the TS scores for longer forecast ranges. In addition, under
37 the condition of introducing the large-scale constraint, the analysis and prediction results of the
38 experiment with the full cycling scheme (no cold start during one month cycling) are equivalent to
39 that of the experiment with partial cycle (daily cold start). This laid a good foundation for the
40 GRAPES kilometer-scale system to adopt the full cycling scheme to further simplify the cycle
41 process and reduce the calculation consumption.

42 **Keywords** Data assimilation, 3DVar, Large-scale constraint

43

44 1 引言

45 随着高性能计算机的不断发展, 水平分辨率在 1-4km 的公里尺度区域数值预报系统
46 (Numerical Weather Prediction system, 简称 NWP) 近年来发展迅速(Gustafsson et al., 2018)。
47 由于中小尺度系统生命史短、误差增长迅速、可预报性差, 发展好相应的公里尺度资料同化
48 系统(kilometer-scale Data Assimilation system, 以下简称 km-DA) 及时更新模式预报轨迹十
49 分重要(Sun et al., 2014; Yano et al., 2018)。

50 在 km-DA 发展研究中, 大尺度环流分析能力不足是制约其效用充分发挥的重要瓶颈之
51 一(Guidard and Fischer, 2008; Gustafsson et al., 2018)。其原因主要源于以下几个方面: 1) 模
52 式范围限制以及侧边界条件带来的误差; 2) km-DA 的框架设计和资料应用更加侧重中小尺
53 度; 3) km-DA 发展时间尚短, 框架发展和卫星资料应用等方面滞后于全球同化系统(Guidard
54 and Fischer, 2008)。然而, 大气运动本身是多尺度共同作用的结果, 大尺度环流分析能力不
55 足会使得同化预报循环过程中误差不断累积, 影响系统整体性能。

56 相比于区域 NWP, 全球 NWP 主要关注中长期天气系统的模拟和预报, 大尺度环流的
57 描述能力要好得多。为此, 许多区域系统常采用所谓的局部循环(Partial Cycling)的运行方
58 式, 也即同化预报循环过程中每隔一段时间引入全球模式场降尺度冷启系统(徐枝芳等, 2013;
59 Benjamin et al., 2016; Milbrandt et al., 2016)。这样的方式虽然能通过重置大尺度环流消除循

60 环过程中累积的误差，但同时也丢失了宝贵的中小尺度信息(Schraff et al., 2016)。为此，业
61 务局部循环中常引入一段时间的预热，也即在循环流程提供业务产品之前，让其先通过几次
62 同化预报循环 spin-up 出合理的中小尺度信息(Benjamin et al., 2016)，这显然大大增加了计算
63 消耗。

64 为了能将全球 NWP 在大尺度环流模拟方面的优势与区域 NWP 在中小尺度环流模拟方
65 面的优势更好的结合，研究者们开发了多种融合方案。这些融合方案大致可以分为两类：第
66 一类融合操作独立于区域同化模块，在同化分析之后（或之前）将区域模式场与全球场相融
67 合（以下称为“独立融合方案”）(Hsiao et al., 2015; Yue et al., 2018; 庄照荣等, 2018; Yang et al.,
68 2019; Feng et al., 2020)。第二类是在区域变分同化框架中引入全球大尺度环流信息，将其作
69 为一种独立的约束信息引入到最优化分析框架中（以下简称“变分融合方案”）。与独立融合
70 方案相比，变分融合方案与资料同化最优控制理论相结合，减少了融合方案的经验性，并同
71 观测资料的同化应用联系在一起，可以促进雷达径向风等空间代表性十分局地的资料应用
72 (Guidard and Fischer, 2008; Dahlgren and Gustafsson, 2012; Dahlgren et al., 2016; Vendrasco et
73 al., 2016)。Guidard and Fischer (2008)将法国全球数值预报系统的分析场作为约束信息引入到
74 ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique développement International) 同化框架中。
75 Dahlgren and Gustafsson (2012); Dahlgren et al. (2016)在上述方法基础上做了进一步简化，并
76 将其应用到了欧洲高分辨率再分析项目中，以避免再分析过程中大尺度环流的漂移。
77 Vendrasco et al. (2016)在 WRFDA (Data Assimilation system of the Weather Research and
78 Forecast model) 中引入 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) GFS (Global
79 Forecast System) 分析场，改善了大尺度环流分析，还促进了雷达资料的同化应用。

80 本研究在我国自主研发的 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System)
81 区域公里尺度三维变分同化系统 (GRAPES km-3DVar) 中引入基于变分融合的大尺度约束
82 方案，研究其对公里尺度同化预报的影响，并希望借助该方案进一步提高系统整体同化预报
83 性能。考虑到前述国内外研究多是基于个例试验或者局部循环方案展开，未进一步分析引入
84 大尺度约束后是否能帮助系统实现完全循环 (Full Cycling, 也即同化预报循环过程中不再采
85 用全球场进行冷启)。而如果能采用完全循环方式运行，就可以在更好保留中小尺度信息的
86 同时减少预热的计算消耗，因此本文数值试验同时分析了大尺度约束对局部循环和完全循环
87 运行的影响。另外，已有研究只评估了有、无大尺度约束对于同化预报的影响，而约束中不
88 同变量所起作用的大小尚不明确。为此，本研究针对公里尺度 NWP 十分关注的定量降水预
89 报，进一步对比分析了大尺度约束中不同变量的作用大小。

90 文章结构如下：第 1 节为引言；第 2 节给出采用变分融合方案引入大尺度约束的理论推
91 导和实施方案；第 3 节通过数值试验分析大尺度约束对公里尺度预报的影响，并对比局部循
92 环和完全循环运行结果的差异；第 4 节通过敏感性试验分析了大尺度约束中不同变量对定量
93 降水预报的影响；最后第 5 节给出全文小结。

94 2 大尺度约束的引入

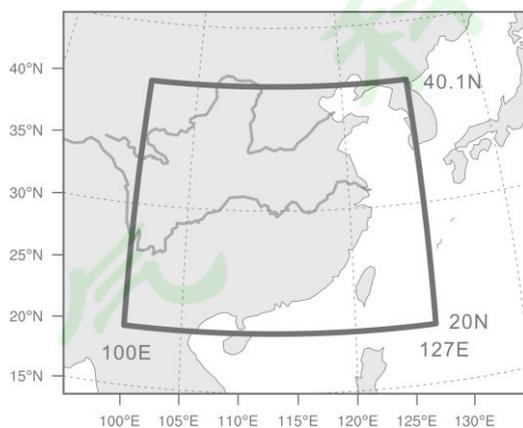
95 2.1 GRAPES 公里尺度系统介绍

96 本研究基于我国自主研发的 GRAPES 区域 3km 系统开展,该系统是基于区域 10km 系统
97 (黄丽萍等, 2017)发展而来。在该系统中,非静力大气预报模式水平分辨率为 3km,垂直层
98 次为 50 层(模式顶为 10hPa),陆面过程采用 Noah 模型。预报模式包含主要参数化方案为:
99 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 长波辐射方案(Mlawer et al., 1997)、Dudhia 短波辐
100 射方案(Dudhia, 1989)、WSM6 (WRF Single-moment 6-class Microphysics) 微物理方案(Hong,
101 2006)、改进的 MRF (Medium-Range Forecast) 边界层方案(Hong and Pan, 1996; Lock et al.,
102 2000)、Monin-Obukhov 近地面层方案等(Pielke, 2013)。

103 公里尺度系统的同化方案采用 GRAPES 3km 3DVar,它是基于 GRAPES 全球区域一体
104 化变分同化系统(张华等, 2004; 庄世宇等, 2005; 薛纪善等, 2008)发展而来。基于该一体化系
105 统,全球采用四维变分同化 4DVar 选项(Zhang et al., 2019),区域采用 3DVar 选项(马旭林等,
106 2009)。在将一体化系统应用到公里尺度分辨率时,我们对其做了一系列针对性研发,包块
107 框架改进、参数统计、以及时空稠密观测资料的应用等。本文主要给出在同化框架中引入大
108 尺度约束的研究结果,其它方面的研究将另文给出。

109 采用上述 GRAPES 公里尺度系统,本文设定的模式区域如图 1 所示,水平位置为
110 20N-40.1N, 100E-127E,东西方向格点数为 901,南北方向格点数为 671。

111



112

113 图 1 本研究选取的模式范围示意图(黑色框线: 20N-40.1N, 100E-127E)

114 Fig. 1 The model domain (within the black box: 20N-40.1N, 100E-127E) in this research.

115

116 2.2 大尺度约束方案推导

117 根据 Guidard and Fischer (2008)的研究,全球数值预报系统提供的大尺度环流场可以作

118 为有限区域同化系统中额外的信息来源。那么变分同化中原有包含背景场 \mathbf{x}_b 和观测场 \mathbf{y}_o 的
 119 信息向量 $\mathbf{Z} = [\mathbf{x}_b, \mathbf{y}_o]^T$ 可以进一步扩充为: $\mathbf{Z} = [\mathbf{x}_b, \mathbf{y}_o, \mathbf{x}_L]^T$, 这里 \mathbf{x}_L 表征大尺度环流信息。
 120 信息向量 \mathbf{Z} 对应的误差协方差矩阵为:

$$121 \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} E(\boldsymbol{\varepsilon}_b \boldsymbol{\varepsilon}_b^T) & E(\boldsymbol{\varepsilon}_b \boldsymbol{\varepsilon}_o^T) & E(\boldsymbol{\varepsilon}_b \boldsymbol{\varepsilon}_L^T) \\ E(\boldsymbol{\varepsilon}_o \boldsymbol{\varepsilon}_b^T) & E(\boldsymbol{\varepsilon}_o \boldsymbol{\varepsilon}_o^T) & E(\boldsymbol{\varepsilon}_o \boldsymbol{\varepsilon}_L^T) \\ E(\boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\varepsilon}_b^T) & E(\boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\varepsilon}_o^T) & E(\boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\varepsilon}_L^T) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

122 式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_b$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_o$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 分别是代表背景场、观测场、大尺度环流场的误差向量, 算子 $E(\cdot)$ 表示
 123 期望。

124 此时, 变分目标泛函可以定义为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}, H_o(\mathbf{x}), H_L(\mathbf{x})]^T$ 与信息向量 \mathbf{Z} 之间的距离,
 125 距离权重为误差协方差矩阵 \mathbf{W} , 也即写为如下形式:

$$126 \quad J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{X} - \mathbf{Z})^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{Z}) \quad (2)$$

127 式中, $H_o(\cdot)$ 为将分析场投影到观测空间的观测算子, $H_L(\cdot)$ 为将分析场投影到大尺度环流
 128 场所在空间的算子。

129 为简化式(2), 背景场(模式短期预报场)的误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_b$ 与观测误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_o$ 之间通常被假设为相
 130 互独立, 两者在式(1)中的误差交叉协相关为零(Lorenc, 1986; Daley, 1991; Kalnay, 2003)。进
 131 一步的, 如果采用全球分析场提供大尺度约束, 但全球分析和区域分析所用观测差异较大时,
 132 或者直接使用全球预报场提供大尺度环流信息, 那么 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}_o$ 之间的误差交叉协相关也可以
 133 假设为零(Guidard and Fischer, 2008; Dahlgren and Gustafsson, 2012; Vendraasco et al., 2016)。而
 134 对于 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}_b$ 之间的误差交叉协相关, Guidard and Fischer (2008)和 Dahlgren and Gustafsson
 135 (2012)通过预报误差样本的计算结果均表明, 它与 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_b$ 本身的误差自协方差相比很小, 可
 136 以忽略。通过上述简化假设, 式(1)中 \mathbf{W} 矩阵就变为了块对角阵。此时, 令:

137 $\mathbf{B} = E(\boldsymbol{\varepsilon}_b \boldsymbol{\varepsilon}_b^T)$, $\mathbf{R} = E(\boldsymbol{\varepsilon}_o \boldsymbol{\varepsilon}_o^T)$, $\mathbf{L} = E(\boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\varepsilon}_L^T)$, 分别为背景场、观测场、以及大尺度环流场的误差自
 138 协方差矩阵, 式(2)的目标泛函可以展开为背景场项 J_b 、观测场项 J_o 以及大尺度约束项 J_L
 139 三项之和:

$$140 \quad \begin{aligned} J(\mathbf{x}) &= J_b + J_o + J_L \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} (H_o(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_o)^T \mathbf{R}^{-1} (H_o(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_o) \\ &\quad + \frac{1}{2} (H_L(\mathbf{x}) - \mathbf{x}_L)^T \mathbf{L}^{-1} (H_L(\mathbf{x}) - \mathbf{x}_L). \end{aligned} \quad (3)$$

141 与经典变分目标函数相比, 式(3)中增加了大尺度约束项 J_L , 以帮助公里尺度区域同化

142 框架更好的描述大尺度环流。

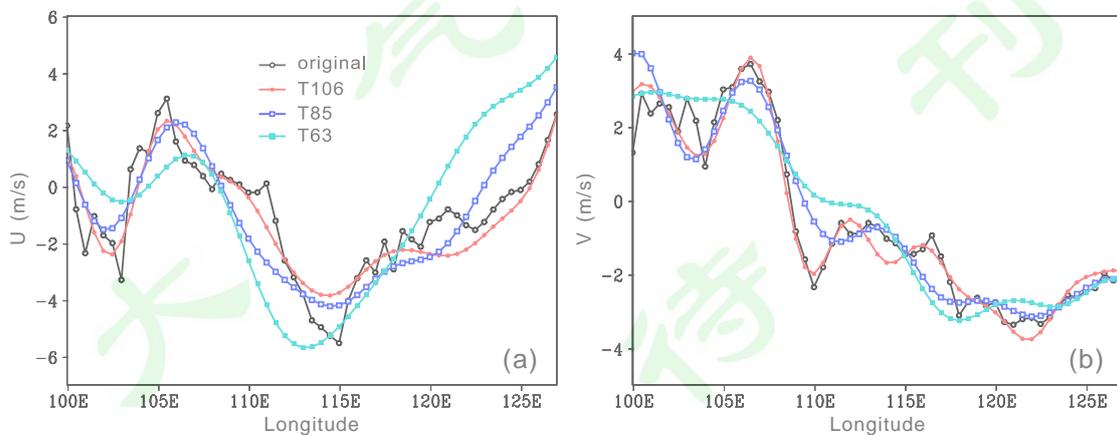
143 2.3 大尺度环流信息的获取

144 目标泛函式(3)中, 大尺度信息 \mathbf{x}_L 来源为与区域数值预报系统相耦合, 提供侧边界条件的
145 的全球数值预报场。GRAPES 3km 区域模式可以采用不同的全球模式作为侧边界驱动, 本
146 研究选用与当前业务运行系统一致的 NCEP GFS (以下简称 GFS) 作为耦合场 (水平分辨率
147 0.5 度, 垂直层次 26 层)。本研究中, \mathbf{x}_L 中包含的变量为水平风场 (u, v)、温度场 T 和相对
148 湿度 μ 。

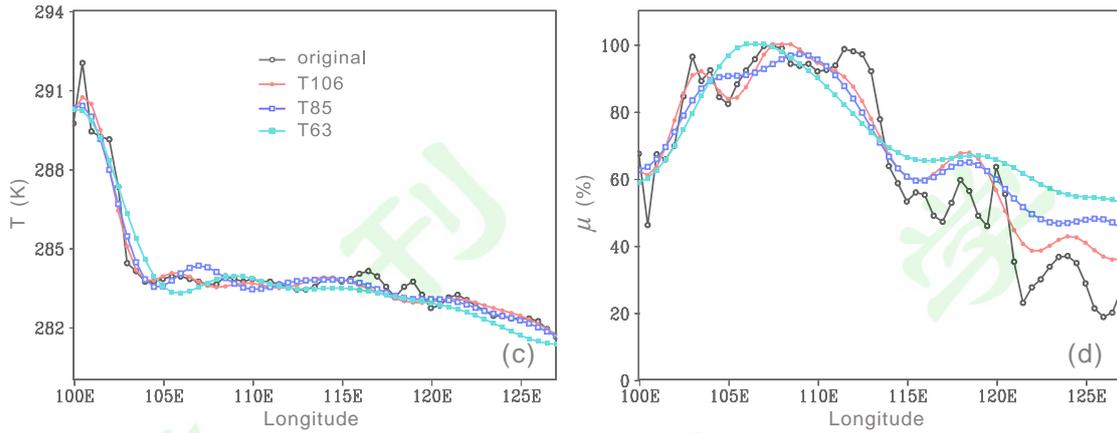
149 为了使得 \mathbf{x}_L 更好反映大尺度环流信息, 需要对全球变量场做低通滤波。对于滤波截断
150 波长的选择, 我们从以下几个方面考虑。首先, 受模式时间积分方案, 水平、垂直耗散机制
151 等因素的影响, 数值模式实际有效分辨率为其水平格距的 5 到 7 倍(Skamarock, 2004; 郑永
152 骏等, 2008)。当前 GFS 动力框架水平分辨率为 13 公里, 其能有效分辨的最短波长应为
153 65km~91km。其次, 根据采样定理(Bogges and Narcowich, 2009), 研究采用的 0.5 度 GFS
154 场能分辨的最短波长为 1.0 度 (2 倍格距)。综合以上两点, 对 GFS 全球变量场做低通滤波
155 的截断波长应不小于 1.0 度。

156 在以上理论上, 本研究通过试验测试了不同的截波方案, 包括: T106 (“T” 表示
157 三角形截断, 106 表示截断波数, 下同)、T85 和 T63 等, 对应的截断波长分别为 1.125 度、
158 1.39 度和 1.875 度。个例和批量试验结果表明, 采用 T106 截断的低通滤波场效果最好。图
159 2 给出了不同截断波数情形下, 各变量场在滤波前后的差异示例。从图中可以看出, T106
160 截断一方面滤除了原场中的高频扰动, 另一方面未像 T85 和 T63 滤波那样过于远离原有形
161 势场。综合以上考虑, 本研究选用 T106 作为低通滤波截断波数, 也即在 \mathbf{x}_L 中保留波长大于
162 1.125 度的波动。这里的设置与 Vendrasco et al. (2016)选用的 1.0 度的截断以及 Dahlgren et al.
163 (2016)使用的 115km 的截断十分接近。

164



165



166

167 图 2 2019 年 6 月 10 日 12 时 (UTC) 700hPa 上, 位于 28N 的 GFS 场 (a) u 风、(b) v 风、
 168 (c) 温度 T 以及 (d) 相对湿度 μ 在不同截断的低通滤波前后的对比示意, 黑色为原始场,
 169 红色为 T106 截断, 深蓝色为 T85 截断, 浅蓝色为 T63 截断

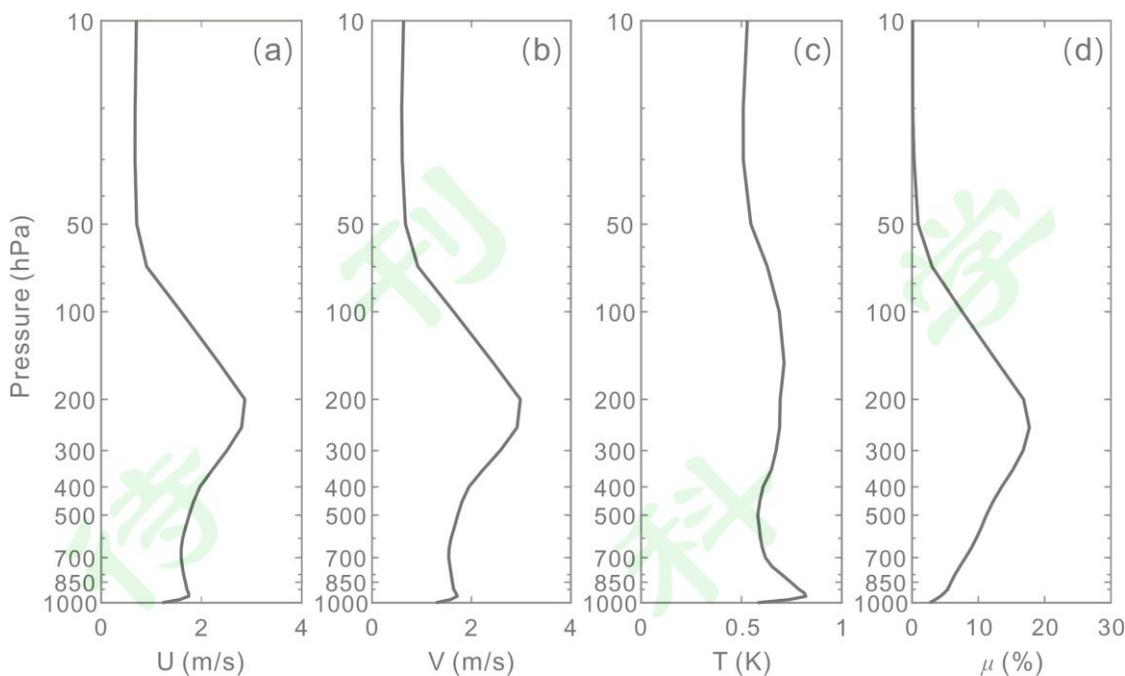
170 Fig. 2 Difference before and after low-pass filtering of GFS fields at 700hPa for (a) u wind, (b) v
 171 wind, (c) temperature T , and relative (d) humidity μ at 28N, valid for 12UTC 10 June 2019, black
 172 for the original field, red for the T106 truncation, dark blue for the T85 truncation, and light blue
 173 for the T63 truncation

174 2.4 大尺度环流信息的误差给定

175 在式(3)目标泛函中, 新增 J_L 项还需确定大尺度环流信息的误差协方差矩阵 L 。为简化
 176 计算, 这里与 Vendrasco et al. (2016)和 Yang et al. (2019)等研究一致, 将其简化为对角阵, 也
 177 即暂不考虑误差的空间相关以及不同变量误差之间的交叉协相关。对于矩阵 L 对角线上的
 178 误差均方差值, 本研究采用 NMC (the National Meteorological Center) 方法进行统计。具体
 179 的, 采用预报到同一时刻, 预报时效分别为 24h 和 48h 的 GFS 场的差值作为误差近似样本。
 180 生成样本的时间段为 2018 年 7 月, 为减小日变化对统计结果的影响, 每日生成四次样本
 181 (00UTC、06UTC、12UTC、18UTC, 这里 UTC 表征世界时, 下同), 共计 124 个样本。

182 图 3 给出了统计得到了大尺度环流信息中四个变量误差均方差的垂直廓线。风场误差的
 183 最大值约为 3m/s, 位于 200hPa 附近的西风急流轴区域。温度场误差在整层介于 0.5-1.0K 之
 184 间, 两个极大值位于在近地面 925hPa 以及对流层高层。相对湿度误差最大值位于对流层中
 185 上层, 数值在 20%左右。这些统计得到的误差量值和结构与 Kleist and Ide (2015b, 2015a)对
 186 于 NCEP GFS 分析和预报误差的诊断结果相近。

187



188
 189 图 3 大尺度环流信息 (a) u 风、(b) v 风、(c) 温度 T 以及 (d) 相对湿度 μ 的误差均方差
 190 的垂直廓线图
 191 Fig. 3 Vertical profiles of root mean square error for large scale information, (a) u (b) v , (c) T and
 192 (d) μ

193 3 大尺度约束的影响

194 3.1 试验设计

195 为了充分利用时空稠密观测资料,更好捕捉和预报中小尺度系统,公里尺度数值预报一
 196 般均采用快速同化预报循环更新的方式运行(Gustafsson et al., 2018)。本研究数值试验也采用
 197 与业务一致的 3h 同化预报循环,循环流程如图 4 所示。在试验中,GRAPES 3km 3DVar 同
 198 化目前所有业务可用的常规和非常规资料,包括探空报、地面报、飞机报、船舶报、云导风、
 199 雷达径向风、风廓线雷达、地基 GPS (Global Positioning System) 大气可降水量、GNSSRO
 200 (全球导航卫星系统掩星) 资料、FY4A 红外水汽资料等。在此基础上,采用云分析系统基
 201 于雷达反射率和卫星云产品更新模式水物质变量信息,并引入数字滤波滤除同化噪音。为了
 202 验证引入大尺度信息弱约束后对公里尺度变分同化的影响,进行了为期一个月的批量试验,
 203 试验时段为 2019 年 6 月 10 日至 2019 年 7 月 10 日。该试验时段为长江流域梅雨期,图 1
 204 所示模式范围内降水频繁。

205

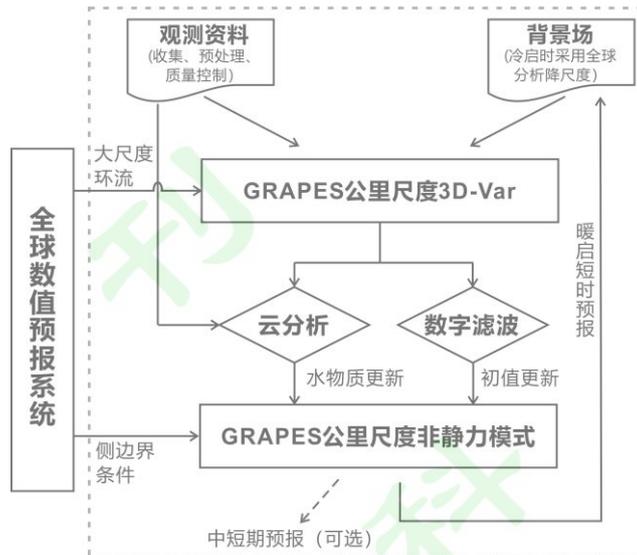
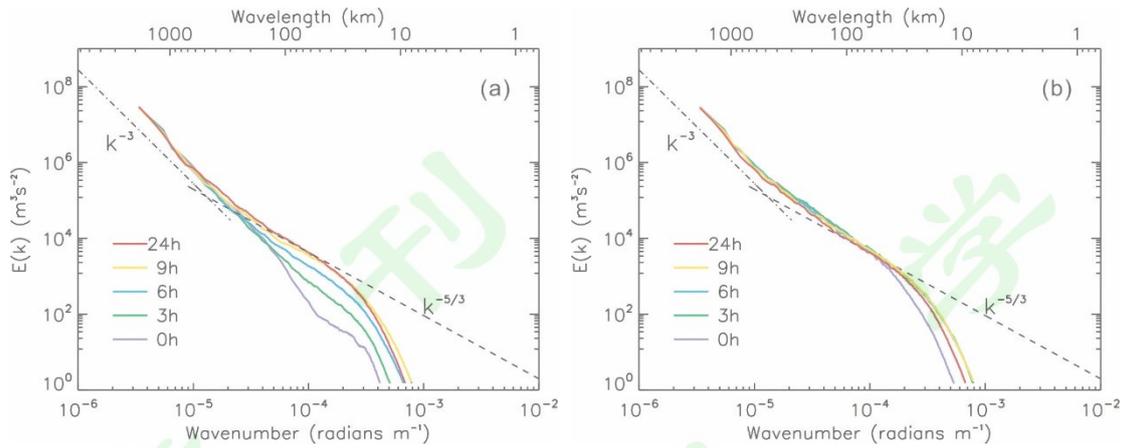


图 4 数值试验同化预报循环流程示意图

Fig. 4 Scheme of the analysis and forecast cycle for numerical experiments

引言中提到，为了克服 km-DA 对大尺度环流分析能力的不足，业务运行方案中常采用局部循环的运行方式，也即每隔一段时间采用全球数值预报场降尺度冷启动驱动系统。图 5 (a) 给出了采用全球场降尺度冷启动驱动 GRAPES 3km 模式时，动能谱随预报时长的变化情况(动能谱计算方案参见郑永骏等(2008))。可以看到，预报初始时刻中小尺度能量明显缺失，需要大致 9 个小时的 spin up 才能达到合理水平。因而局部循环情形下，系统需要一段时间预热。在预热阶段，同化分析场仅做短时预报，提供下一次同化所需背景场，不做更长时间的业务预报。这就意味着，局部循环在很多时候需要维护两组同化预报循环（一组进行预热，一组业务运行）。美国 1h 间隔快速循环更新系统 RAP (Rapid Reflash) 就引入了 6h 预热流程(Benjamin et al., 2016)，这大大增加了计算消耗。图 5 (b) 给出了 GRAPES 3km 系统在降尺度冷启动后做 4 次同化预报循环（同化间隔 3h）后暖启动模式的情形，初始时刻动能谱在中小尺度表现要好得多。因而，能否通过引入大尺度约束减少局部循环冷启动频率，甚至实现完全循环运行也是本文研究的重点之一。



223
224 图 5 (a) 降尺度冷启与 (b) 经 4 次同化暖启情形下 GRAPES 3km 模式动能谱随预报时长的
225 的变化情况

226 Fig. 5 Simulated kinetic energy spectra for different forecast lengths derived from the GRAPES
227 3km model with (a) downscaling cold start and (b) warm start after four assimilation cycles

228
229 本研究分别在局部循环和完全循环情形下,对比分析了大尺度约束对公里尺度循环同化
230 预报的影响,两种循环方式见图 6 所示。局部循环情形下,系统在每日 00UTC 由 GFS 6h
231 预报场降尺度提供背景场启动同化,进行 3h 同化预报循环,至每日 12UTC 同化分析后做
232 24h 预报, Pctl 和 Pbid 分别为该情形下的无约束和有约束试验。完全循环情形下,系统从
233 2019 年 06 月 10 日 00UTC 开始由 GFS 预报场降尺度启动,进行 3h 同化预报循环直至 2019
234 年 07 月 10 日 12UTC,并取每日 12UTC 分析场做 24h 预报, Fctl 和 Fbid 分别为该情形下的
235 无约束和有约束试验。这里之所以选择对比 12UTC 的 24h 预报,目的是从一个比较好的控制
236 控制试验出发,更加充分的研究和分析大尺度约束对于公里尺度同化的影响。对于 Pctl 而言,
237 一方面,通过从 00UTC 开始的五次同化和四次 3h 短时预报,已经能充分 spin up 出较为合理
238 的中小尺度信息(见图 5 分析);另一方面,与进一步循环到 15UTC、18UTC 等时次的模式
239 模式场相比,12UTC 受大尺度误差累积相对较小(这可以从下文 Pctl 和 Fctl 试验结果对比中
240 清楚看到)。

241 四组试验所用观测完全一致,设置差异总结于表 1 中。对于有约束的 Pbid 和 Fbid 试验,
242 这里与 Guidard and Fischer (2008); VendraSCO et al. (2016)研究一致,在 00UTC、06UTC、
243 12UTC 和 18UTC 采用全球分析作为大尺度约束,而在 03UTC、09UTC、15UTC 和 21UTC
244 这些没有全球分析的时刻采用 GFS 3h 预报场作为大尺度约束。

245

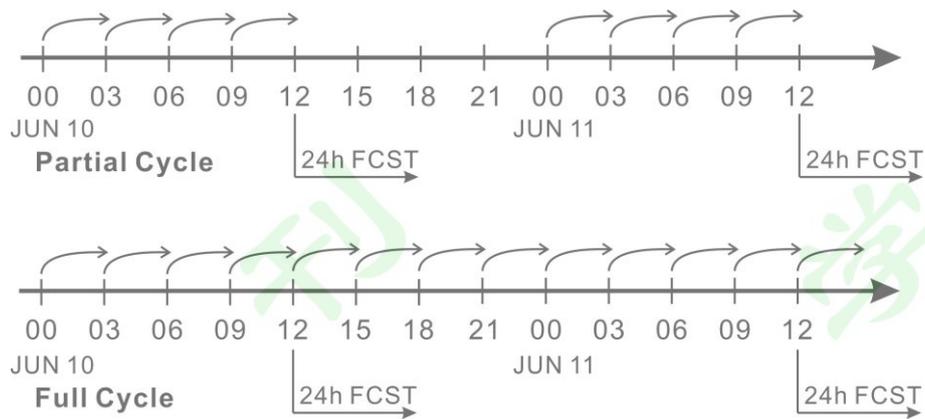


图 6 数值试验采用的局部循环（上方）和完全循环（下方）方式示意图

Fig. 6 The scheme of the partial cycle (top) and the full cycle (bottom)

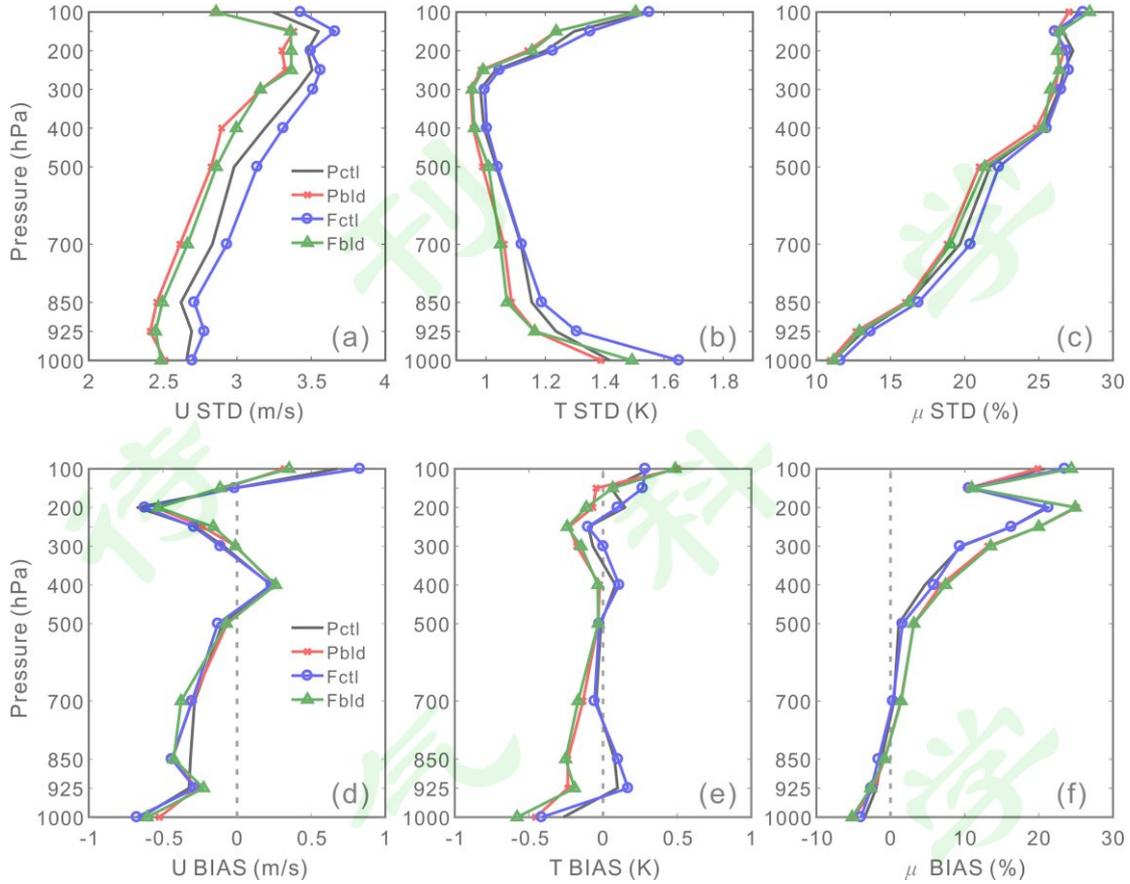
表 1 大尺度约束影响试验设置

Table 1 Large-scale constraint experiment descriptions

试验名称	运行方式	是否有大尺度约束
Pctl	局部循环	否
Pbld	局部循环	是
Fctl	完全循环	否
Fbld	完全循环	是

3.2 形势场检验

为了考察引入大尺度约束对大尺度形势场分析预报的影响，图 7 给出了试验时段内 12UTC 同化背景场（上一时刻分析的 3h 预报场）中风场、温度场和湿度场与探空观测相比（背景场减去观测）的标准差和偏差情况。由于风场两个分量—— u 风和 v 风与观测对比结论十分相近，图中只给出了 u 风对比结果。根据图 7，相比于无约束的试验，引入大尺度约束的两组试验的形势场的标准差有明显减小，这在 Pbld 和 Pctl 的对比，以及 Fbld 和 Fctl 的对比中均表现一致。对于风场而言，改进在整个对流层表现均十分显著；对于温度场和湿度场而言，改进在对流层中下层表现更为明显。Guidard and Fischer (2008)在其研究中也报告了类似的结论。而从与观测对比的偏差来看，引入大尺度约束后对于风场的偏差影响较小；温度场在对流层低层与观测相比数值略偏低；相对湿度在对流层中高层与观测相比数值偏高。初步研究表明，这里偏差的变化，一方面可能与大尺度约束引入的 GFS 本身偏差特征导致，另一方面也与探空观测本身的误差特征有关。例如，郝民等(2015)研究指出我国 L 波段探空湿度资料存在明显偏干现象。



267

268

269 图 7 2019 年 6 月 10 日至 7 月 10 日的 12UTC 同化背景场中 u 风、温度 T 以及相对湿度 μ 与
 270 探空观测值相比的 (a、b、c) STD 和 (d、e、f) BIAS 的整层平均廓线，试验设置见表 1

271 Fig. 7 The averaged (a, b, c) standard deviation and (d, e, f) bias fit of the forecast background
 272 against to radiosonde observations verifying daily 12UTC from 10 June 2019 through 10 July
 273 2019 for u (left), T (middle) and μ (right), the experiment setting are shown in Table 1

274

275 在利用探空观测检验基础上，我们还将各个试验的分析预报结果与欧洲中期数值预报中
 276 心的 ERA5 再分析资料（水平分辨率 25km）进行了对比。图 8 以 700hPa 为例，给出了逐
 277 6h 对比的 RMSE 结果。从图中可以明显看出，引入大尺度约束之后，形势场各个变量的分析
 278 预报都得到了明显改进。对流层其它层次上的结果与这里 700hPa 结果类似。

279

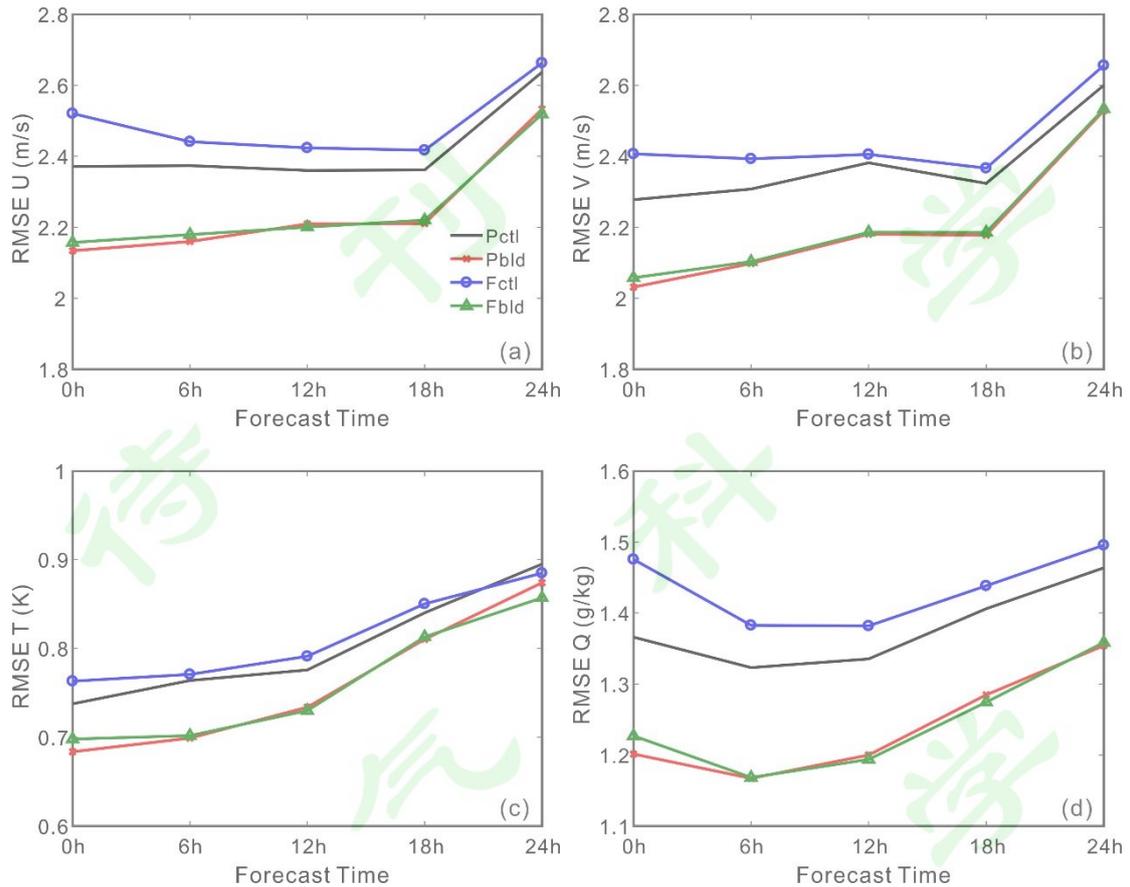


图 8 700hPa 上各试验的分析和预报结果与 ERA5 再分析资料相比的 RMSE

(a) u 风, (b) v 风, (c) 温度 T 和 (d) 比湿 q , 试验设置见表 1

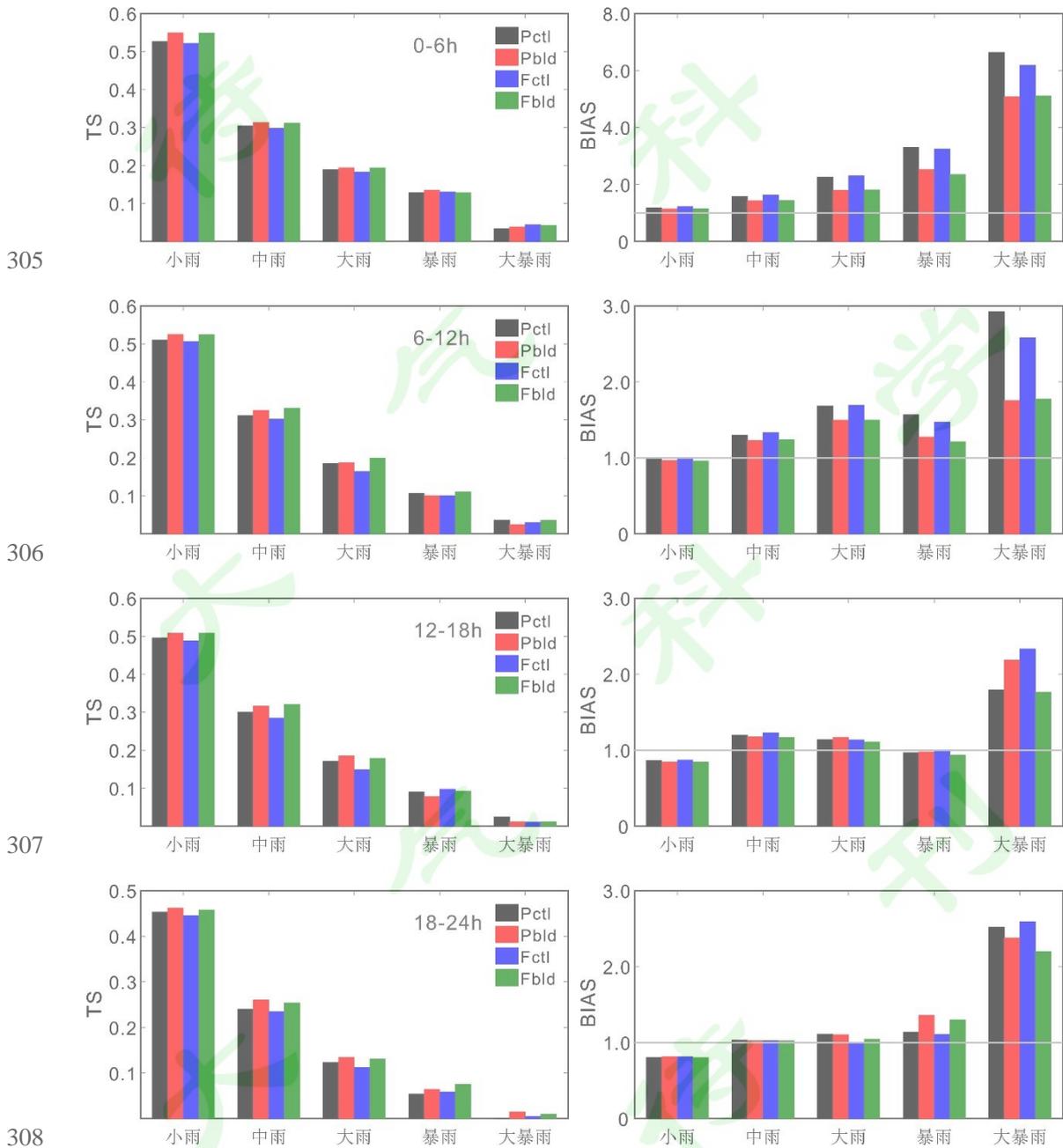
Fig. 8 Horizontal averaged RMSE for analysis and forecast results of different experiments compared with ERA5 reanalysis data at 700hPa for (a) u , (b) v , (c) T and (d) specific humidity q , the experiment setting are shown in Table 1

进一步地, 对于均没有大尺度约束的局部循环 Pctl 和完全循环 Fctl 试验, Pctl 的形势场误差明显更小, 不同变量的情形均是如此。这也是许多业务中心选择局部循环, 定时采用全球降尺度冷启重置大尺度环流的重要原因(Hsiao et al., 2012)。但正如前面所讨论的, 由于冷启会存在 spin-up 问题, 系统需要增加额外的循环进行预热。而从图 7 和图 8 中可以看到, 对于形势场而言, 引入大尺度约束之后的完全循环试验 Fbld 的结果显著好于无约束的局部循环 Pctl, 并且已与有约束的 Pbld 的结果十分接近。这就为在业务中实现完全循环的运行, 更好的保留中小尺度信息的同时避免额外计算消耗提供了可能。

3.3 定量降水检验

对于高分辨率公里尺度系统而言, 地面定量降水预报一直是关注的重点。图 9 给出了四组试验逐 6h 累积降水的 TS 和 BIAS 评分, 检验资料为国家基本气象站的地面降水观测。这

298 里将 6h 累积降水划分为 5 个量级：小雨 (>0.1mm)、中雨 (>4.0mm)、大雨 (>13.0mm)，
 299 暴雨 (>25.0mm)、以及大暴雨 (>60.0mm)。从图中可以看出，相比于无约束的 Pctl 和 Fctl
 300 试验，两组有约束的 Pbld 和 Fbld 试验的 TS 评分均有明显提高，与形势场检验相互印证。
 301 Bei and Zhang (2007)基于 1998 年梅雨期降水个例的研究表明，模式初值中的大尺度误差对
 302 降水预报的不确定性贡献很大，减小大尺度误差可以明显提高降水预报评分。本研究一个月
 303 的批量试验结果进一步证明了该结论。
 304



305
306
307
308
309 图 9 逐 6h 检验的地面累积降水 TS 评分(左侧)和 BIAS 评分(右侧), 从上至下依次为 0-6h,
 310 6-12h, 12-18h, 18-24h 的累积降水评分, 检验资料为地面气象站观测值, 试验设置见表 1

311 Fig. 9 TS (left) and BIAS (right), calculated against rain gauges of surface stations for 6h

312 cumulated rainfall, from top to bottom for 0-6h, 6-12h, 12-18h, 18-24h forecast, the experiment
313 setting are shown in Table 1

314

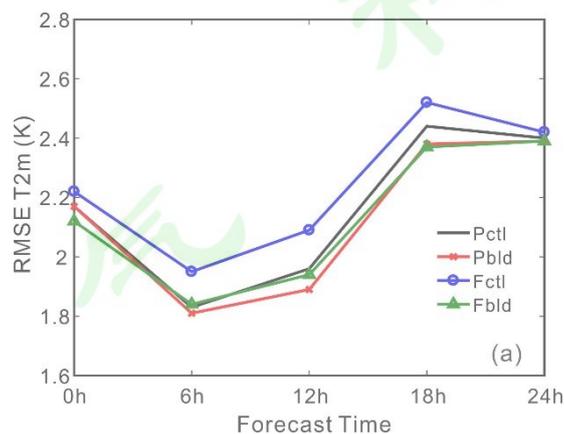
315 在公里尺度数值预报系统的研发和业务运行中,经常容易出现的一个问题是短时预报偏
316 强,空报明显(Schumacher and Herman, 2016; Tong et al., 2016; Krajewski et al., 2018)。该问题
317 与观测、同化方案以及模式物理过程等多种因素相关。而从图 9 的 BIAS 评分对比可以看出,
318 Pblid 和 Fblid 两组引入全球大尺度约束的方案可以显著减小预报在 0-12h 降水中的空报现象。
319 这也从侧面说明,通过改进同化分析不断提高模式初值的合理性,将是解决降水空报问题的
320 重要途径之一。

321 此外,与形势场检验结果相一致,引入大尺度约束后完全循环 Fblid 的降水评分得以显
322 著改善,TS 和 BIAS 评分结果均好于 Pctl 和 Fctl,并与引入约束的局部循环 Pblid 的结果相
323 当。

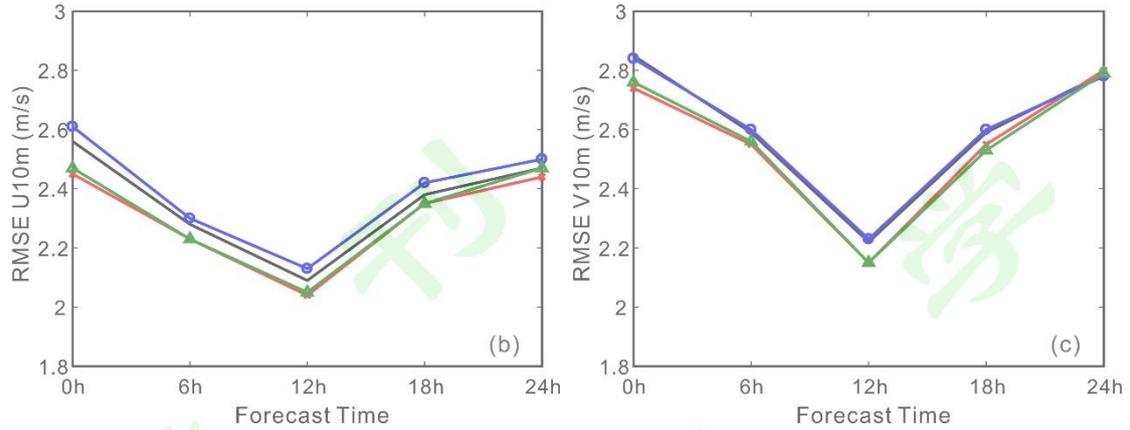
324 3.4 近地面要素检验

325 图 10 进一步给出了针对不同试验 2m 温度和 10m 风场的分析预报的检验情况,检验资
326 料同样为国家基本气象站的观测值。从图中可以看到,不管是局部循环还是完全循环,引入
327 大尺度约束的两组试验的近地面温度和风场的分析和预报误差均明显减小。此外,与前面结
328 论相一致的是,引入大尺度约束的完全循环试验(Fblid)对近地面要素的分析预报能力与有
329 约束的局部循环试验(Pblid)相当。

330



331



332

333 图 10 逐 6h 检验的地面 (a) 2m 温度、(b) 10m u 风、以及 (c) 10m v 风的 RMSE 结果，
334 检验资料为地面气象站观测值，试验设置见表 1

335 Fig. 10 Horizontal averaged RMSE for analysis and forecast results of different experiments
336 compared with surface observations for (a) 2m T , (b) 10m u and (c) 10m v , the experiment setting
337 are shown in Table 1

338 4 定量降水预报敏感性试验

339 前述试验中，大尺度约束中包含了水平风场、温度场和湿度场，引入后对形势场、定量
340 降水、以及地面要素的分析和预报均有正贡献。进一步试验表明，对于形势场和近地面要素
341 而言，引入对应的大尺度变量约束对于该变量场的分析和预报最为重要。例如，引入大尺度
342 u 、 v 变量约束对于改进风场分析和预报最为重要。而对于多种因素共同影响的定量降水而
343 言，不同变量的影响如何，本节通过敏感性试验进行诊断分析。

344 4.1 敏感性试验设计

345 根据前述试验结果，相比于局部循环，完全循环中的大尺度约束的重要性更加凸显。因
346 此，这里针对不同变量重要性的敏感性试验也采用完全循环的运行方式。具体的，在表 1
347 中有约束的完全循环试验 Fbld 基础上，分别剔除风场、温度场和湿度场约束。不同敏感性
348 试验的差异如表 2 所示，试验其它设置与 3.1 节所述相一致。

349

350 表 2 敏感性试验设计，√表示大尺度约束中包含该变量场，×表示不包含

351 Table 2 Sensitivity experiment descriptions, “√” indicates that the large scale constraint includes
352 that variable field, “×” indicates that it does not

试验名称	水平风场 (u, v)	温度场 (T)	湿度场 (μ)
Fbld	√	√	√

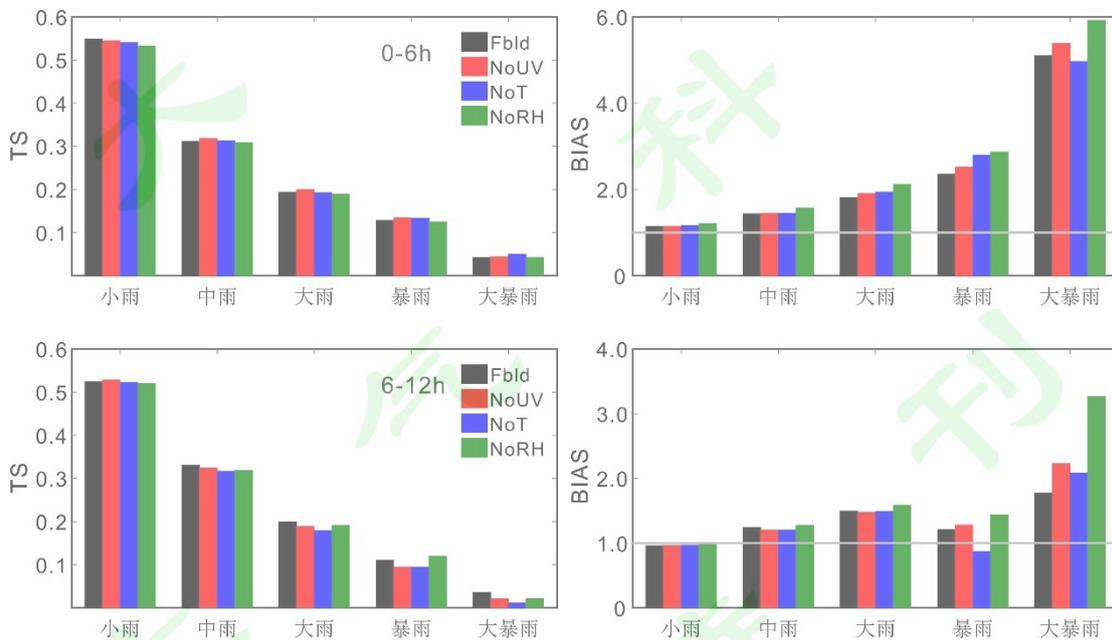
NoUV	×	√	√
NoT	√	×	√
NoRH	√	√	×

353

354 4.2 月平均检验

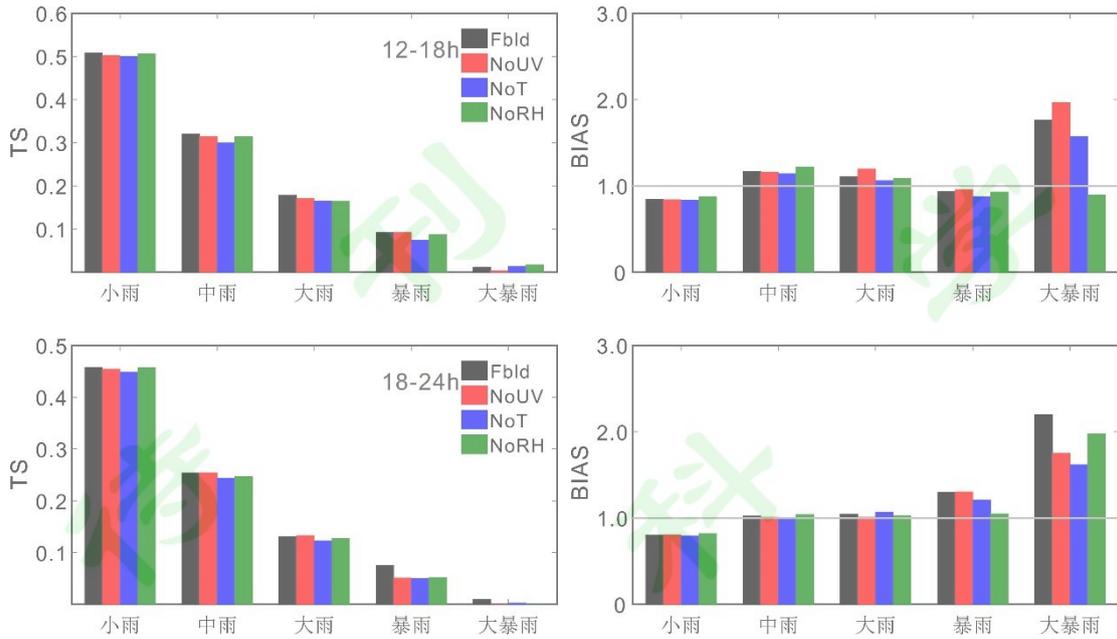
355 图 11 给出了敏感性试验一个月降水的 TS 和 BIAS 评分情况。综合各个时段 TS 评分来
 356 看，包含风场、温度场和湿度场全部变量约束的 Fbld 的降水评分最高，说明不同变量约束
 357 的引入均能提高系统总体降水评分。与之相比，剔除不同约束的敏感性试验如果评分下降越
 358 多，说明该变量约束对于定量降水预报越重要。根据图 11，大尺度湿度场约束对降水的提
 359 高最为重要，其对不同时间段的降水均有正贡献，且在 0-6h 的短时临近降水中作用更加明
 360 显。温度场对于 6h 之后较长时间预报降水评分也有明显作用，而风场的作用相对稍小。这
 361 可能与湿度初值与降水的关系更为直接，而温度场需要通过模式动力和物理过程相互作用才
 362 能最终影响降水(曾智琳等, 2019; 张景等, 2019; 张文龙等, 2019)有关。Schädler and Schlüter
 363 (2010); Yang and Smith (2018); 刘晶等(2019)等基于重点个例的研究也表明大尺度湿度场和
 364 温度场的初值对于高分辨率模式的降水预报十分重要。

365



366

367



368

369

370 图 11 逐 6h 检验的地面累积降水 TS 评分（左侧）和 BIAS 评分（右侧），从上至下依次为
 371 0-6h, 6-12h, 12-18h, 18-24h 的累积降水评分，试验设置见表 2

372 Fig. 11 TS (left) and BIAS (right), calculated against rain gauges of surface stations for 6h
 373 cumulated rainfall, from top to bottom for 0-6h, 6-12h, 12-18h, 18-24h forecast, the experiment
 374 setting are shown in Table 2

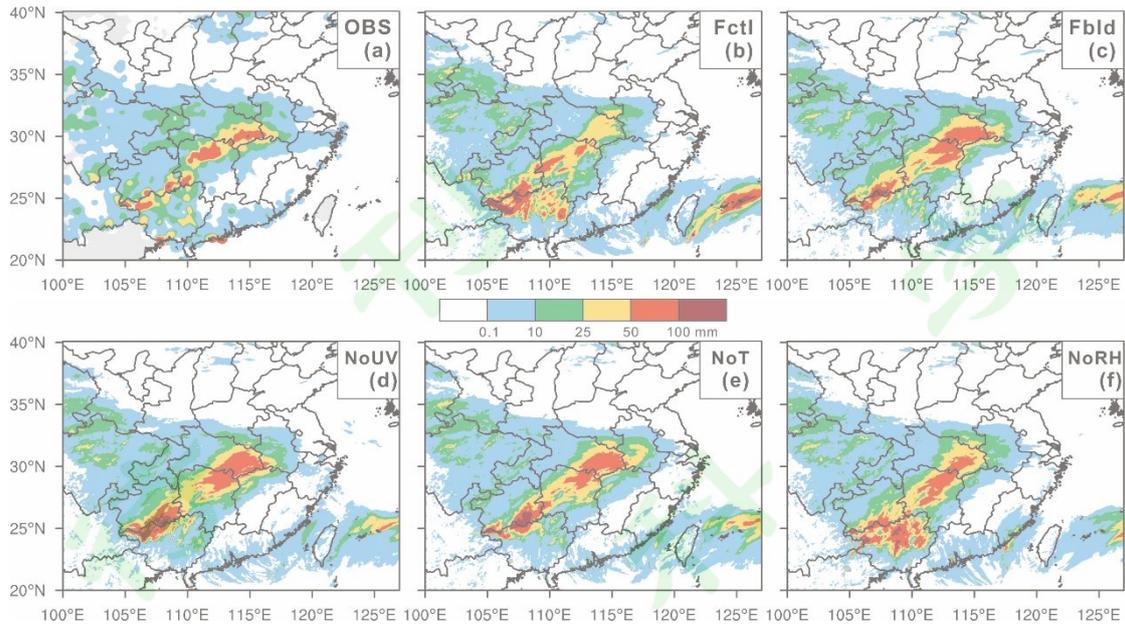
375

376 根据图 11 给出的敏感性试验降水 BIAS 评分的情况，大尺度湿度场约束对于改进降水
 377 预报的偏差作用明显。对于前 12h 的降水，剔除大尺度湿度场约束后，空报现象明显增加。
 378 此外，图中也可以看出温度场和风场约束对于改善前 6h 的降水空报也有一定作用，其它时
 379 刻作用较小。

380 4.3 个例分析

381 图 12 给出了批量试验中的一个典型个例——2019 年 6 月 16 日 12UTC 起报的 24h 累积
 382 降水分布。如图所示，无约束的完全循环 Fctl 的降水预报与观测实况相比存在较大差距。
 383 Fctl 对于从湖南北部到湖北东南部的大范围暴雨区存在明显漏报，而广西北部则出现暴雨空
 384 报，且长三角附近的小雨也存在漏报现象。与之相对比，引入大尺度约束的完全循环 Fbld
 385 的降水预报效果显著提高，前述暴雨的漏报和空报现象均有明显改善，且长三角附近小量级
 386 降水预报也更加接近观测。而从三组敏感性试验的降水结果来看，剔除风场变量约束的
 387 NoUV 的结果与 Fbld 相比变化较小，但暴雨的区的范围相比观测有所扩大。剔除温度约束
 388 的 NoT 的变化也较小，但广西北部的零散大雨和暴雨预报与观测相比有所减弱。而剔除
 389 湿度约束的 NoRH 试验降水变差最为明显，大量级降水的漏报和空报均显著增加。

390



391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

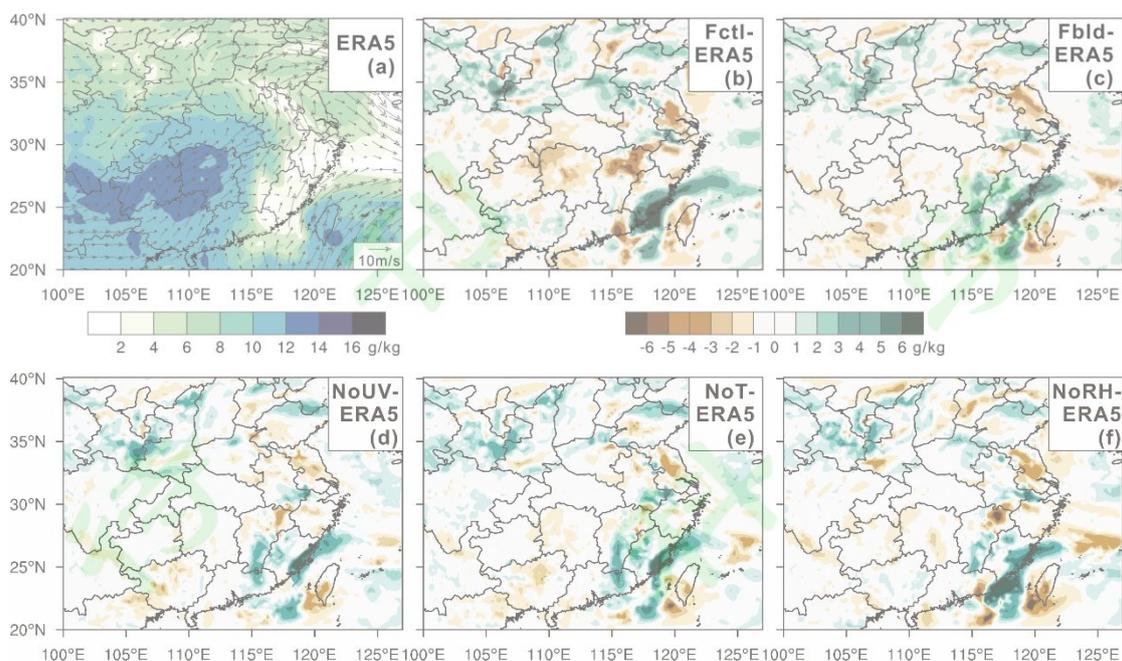
411

412

图 12 2019 年 6 月 16 日 12UTC-17 日 12UTC 的 24h 累积降水量 (单位 mm), (a) 是地面观测实况, (b-f) 为不同试验预报结果, 试验设置见表 1 和表 2

Fig. 12 (a) Observed and (b-f) different experiments forecast accumulated rainfall (units: mm) from 12 UTC 16 June 2019 to 12 UTC 17 June 2019, the experiment setting are shown in Table 1 and Table 2

图 13 进一步给出了该个例中不同试验的比湿场初值 (同化分析场) 与 ERA5 再分析资料的对比情况。从图中可以看出, 该时刻我国西南地区 700hPa 存在一个大范围的高湿度区, 极大值位于湖南、贵州、云南以及广西北部地区。同时, 该地区还存在很强的西南-东北向水平风场, 将水汽向湖北东南部地区输送。无约束的 Fctl 的比湿初值在上述湿度极大值区出现了明显的干偏差, 可能导致了图 12 (b) 中湖南北部以及湖北东南部地区暴雨的漏报。进一步的, Fctl 的比湿初值在江西北部地区也存在很强的干偏差, 其与偏北的气流相结合也可能导致湖北东南部的暴雨漏报。此外, Fctl 试验在广西地区出现了明显的湿偏差, 可能导致了该地区暴雨空报现象。引入大尺度约束的 Fbld 试验的湿度偏差显著减小, 使得其降水预报更加接近实况。而对于三组敏感性试验结果而言, 它们的湿度偏差相较于 Fctl 试验均有所减小, 说明引入不同变量的大尺度约束均能不同程度改进湿度分析, 从而改进降水预报。这其中, 剔除湿度场约束的 NoRH 试验的湿度偏差与 Fctl 最为接近, 这也导致图 12 中其降水预报的空间分布更加远离实况。这与之前月平均试验分析结果相一致, 说明大尺度湿度场约束对于提高公里尺度系统定量降水预报十分重要。



413

414

415 图 13 2019 年 6 月 16 日 12UTC 700hPa 上 (a) ERA5 再分析资料比湿场 (阴影, 单位: g/kg)
 416 和水平风场 (矢量, 单位: m/s) 以及 (b-f) 不同试验的同化分析的比湿场与 ERA5 结果的
 417 差值 (单位: g/kg), 试验设置见表 1 和表 2

418

419

420

421

Fig. 13 (a) ERA5 reanalysis specific humidity (shaded, units: g/kg) and horizontal wind (vector, units: m/s) at 700hPa at 12UTC 16 June 2019, and (b-f) the difference (units: g/kg) between analysis specific humidity from experiments and ERA5 result, the experiment setting are shown in Table 1 and Table 2

422

5 小结

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

公里尺度同化系统大尺度环流分析能力不足会使得同化预报循环过程中误差不断累积, 影响系统整体效果的提升。本研究在 GRAPES 3km 3D-Var 框架中通过变分融合技术引入大尺度约束, 帮助系统在分析好中小尺度信息的同时能更好维持大尺度环流场。研究在变分目标泛函中增加大尺度约束项, 将经低通滤波 (截断波数 T106) 后的全球大尺度水平风场、温度场和湿度场信息引入到同化分析中去。研究通过 2019 年 6 月 10 日-7 月 10 日一个月的连续试验, 验证分析了大尺度约束分别在局部循环和完全循环 (循环中间无冷启) 情形下, 对 GRAPES 公里尺度系统同化和预报的影响。并在此基础上, 通过敏感性试验研究分析了不同大尺度约束变量对定量降水预报的贡献大小。研究主要得到以下结论:

(1) 大尺度约束引入之后, 可以改进同化预报循环中大尺度形势场的分析和预报, 风场、温度场和湿度场均有所改进, 逐 6h 累积降水预报评分提高, 降水空报显著减少, 2m 温度和 10m 风的误差也明显减小, 且正效果在分析和预报各时段内均有所表现。这样的改进在局部循环和完全循环中均有较好体现。

(2) 引入大尺度约束后的完全循环结果不仅明显优于无约束的完全循环结果, 也好于

436 无约束的局部循环结果,并与有约束的局部循环结果相当。这为在业务运行中使用完全循环,
437 进一步简化公里尺度系统同化预报循环流程,避免冷启带来的中小尺度信息丢失和计算消耗
438 提供了很好的基础。

439 (3) 不同变量的大尺度约束对于改进降水预报均有不同程度的正贡献。这其中,大尺
440 度湿度场约束对降水预报最为重要,其对提高降水 TS 评分(尤其是前 6h 的临近预报),减
441 小降水空报均有明显作用;大尺度温度场对于提高 6h 之后的较长时间降水预报的 TS 评分
442 重要,且对改进临近降水空报也有一定贡献;大尺度风场约束的作用相比而言稍小。

443 包含本文大尺度约束方案的 GRAPES 3km 3DVar 在不同试验情形下均表现出了较好的
444 改进效果,已于 2020 年 6 月在中国气象局数值预报中心 GRAPES MESO 5.0 系统中实现业
445 务运用。不过,目前业务化方案仍采用了局部循环方案,进一步工作中有必要基于本研究结
446 果对完全循环方案做进一步研究。此外,现有方案中针对全球场的低通滤波采用了固定阈值,
447 未能随层次以及不同的天气流型变化。Feng et al. (2020)最近在将全球和区域短期预报场做
448 动力混合时,提出了一种基于天气流型动态确定滤波系数的方案,改进了预报效果。下一步
449 工作中也将在这方面做进一步细化研究。

450

451 **致谢:** 感谢中国气象局数值预报中心张林博士、庄照荣博士、黄丽萍博士、以及邓莲堂
452 博士等针对本研究做的十分有益的指导和讨论。

453 参考文献 (References)

- 454 Bei N, Zhang F. 2007. Impacts of initial condition errors on mesoscale predictability of heavy
455 precipitation along the Mei-Yu front of China [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133(622): 83-99. doi:
456 10.1002/qj.20
- 457 Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2016. A North American hourly assimilation and
458 model forecast cycle: the rapid refresh [J]. *Mon. Weather. Rev.*, 144(4): 1669-1694. doi:
459 10.1175/mwr-d-15-0242.1
- 460 Boggess A, Narcowich F J. 2009. *A first course in wavelets with Fourier analysis* [M]. Canda: Wiley,
461 315 pp.
- 462 Dahlgren P, Gustafsson N. 2012. Assimilating host model information into a limited area model [J].
463 *Tellus A*, 64: 15836. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.15836
- 464 Dahlgren P, Landelius T, Kållberg P, et al. 2016. A high-resolution regional reanalysis for Europe. Part
465 1: Three-dimensional reanalysis with the regional HIgh-Resolution Limited-Area Model
466 (HIRLAM) [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142(698): 2119-2131. doi: 10.1002/qj.2807
- 467 Daley R. 1991. *Atmospheric data analysis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 457 pp.
- 468 Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using
469 a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46(20): 3077-3107. doi:
470 10.1175/1520-0469(1989)046<3077:nsocod>2.0.co;2
- 471 Feng J, Sun J, Zhang Y. 2020. A dynamic blending scheme to mitigate large-scale bias in regional
472 models [J]. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12(3): 001754. doi: 10.1029/2019ms001754

473 Guidard V, Fischer C. 2008. Introducing the coupling information in a limited-area variational
474 assimilation [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(632): 723-735. doi: 10.1002/qj.215

475 Gustafsson N, Janjić T, Schraff C, et al. 2018. Survey of data assimilation methods for convective-scale
476 numerical weather prediction at operational centres [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 144(713):
477 1218-1256. doi: 10.1002/qj.3179

478 郝民, 龚建东, 王瑞文, 等. 2015. 中国 L 波段探空湿度观测资料的质量评估及偏差订正 [J]. *气
479 象学报*, 73(1): 187-199. Hao Min, Gong Jiandong, Wang Ruiwen, et al. 2015. The quality
480 assessment and correction of the radiosonde humidity data biases of L-band in China [J]. *Acta.
481 Meteorologica. Sinica.* (in Chinese), 73(1): 187-199. doi: 10.11676/qxxb2015.002

482 Hong S Y. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *J. Korean Med.
483 Sci.*, 46(2): 129-151.

484 Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast
485 model [J]. *Mon. Weather. Rev.*, 124(10): 2322-2339. doi:
486 10.1175/1520-0493(1996)124<2322:nblvdi>2.0.co;2

487 Hsiao L F, Chen D S, Kuo Y H, et al. 2012. Application of WRF 3DVAR to operational typhoon
488 prediction in taiwan: impact of outer loop and partial cycling approaches [J]. *Wea. Forecasting*,
489 27(5): 1249-1263. doi: 10.1175/waf-d-11-00131.1

490 Hsiao L F, Huang X Y, Kuo Y H, et al. 2015. Blending of global and regional analyses with a spatial
491 filter: application to typhoon prediction over the western North Pacific Ocean [J]. *Wea.
492 Forecasting*, 30(3): 754-770. doi: 10.1175/waf-d-14-00047.1

493 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. 2017. GRAPES_MesoV4.0 主要技术改进和预报效果检验 [J]. *应用
494 气象学报*, 28(1): 25-37. Huang Liping, Chen Dehui, Deng Liantang, et al. 2017. Main technical
495 improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification [J]. *Journal of Applied Meteorological
496 Science* (in Chinese), 28(1): 25-37. doi: 10.11898/1001-7313.20170103

497 Kalnay E. 2003. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability [M]. Cambridge:
498 Cambridge University Press, 341 pp.

499 Kleist D T, Ide K. 2015a. An osse-based evaluation of hybrid variational–ensemble data assimilation
500 for the NCEP GFS. Part II: 4DVar and hybrid variants [J]. *Mon. Weather. Rev.*, 143(2): 452-470.
501 doi: 10.1175/mwr-d-13-00350.1

502 Kleist D T. 2015b. An OSSE-based evaluation of hybrid variational–ensemble data assimilation for the
503 NCEP GFS. Part I: system description and 3D-hybrid results [J]. *Mon. Weather. Rev.*, 143(2):
504 433-451. doi: 10.1175/mwr-d-13-00351.1

505 Krajewski W F, Quintero F, Seo B C. 2018. High-resolution QPF uncertainty and its implications for
506 flood prediction: a case study for the Eastern Iowa flood of 2016 [J]. *J. Hydrometeorol.*, 19(8):
507 1289-1304. doi: 10.1175/jhm-d-18-0046.1

508 刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等. 2019. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析 [J]. *大气科学*,
509 43(5): 959-974. Liu Jing, Zhou Yushu, Yang Lianmei, et al. 2019. A diagnostic study of water
510 vapor during an extreme precipitation event in the Yili River valley [J]. *Chinese Journal of
511 Atmospheric Sciences* (in Chinese), 43(5): 959-974. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18114

512 Lock A P, Brown A R, Bush M R, et al. 2000. A new boundary layer mixing scheme. part i: scheme
513 description and single-column model tests [J]. *Mon. Weather. Rev.*, 128(9): 3187-3199. doi:
514 10.1175/1520-0493(2000)128<3187:anblms>2.0.co;2

515 Lorenc A C. 1986. Analysis methods for numerical weather prediction [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*,
516 112(474): 1177-1194. doi: 10.1002/qj.49711247414

517 马旭林, 庄照荣, 薛纪善, 等. 2009. GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发
518 展 [J]. 气象学报, 67(1): 50-60. Ma Xulin, Zhuang Zhaorong, Xue Jishan, et al. 2009.
519 Development of 3-D variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical
520 weather prediction model-GRAPES [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(1): 50-60. doi:
521 10.11676/qxxb2009.006

522 Milbrandt J A, Bélair S, Faucher M, et al. 2016. The Pan-Canadian high resolution (2.5 km)
523 deterministic prediction system [J]. Wea. Forecasting, 31(6): 1791-1816. doi:
524 10.1175/waf-d-16-0035.1

525 Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres:
526 RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. J. Geophys. Res., 102(D14):
527 16663-16682. doi: 10.1029/97jd00237

528 Pielke R A. 2013. Mesoscale meteorological modelling [M]. San Diego, CA: Academic Press, 760 pp.

529 Schädler G, Schlüter I. 2010. Sensitivity of heavy precipitation forecasts to small modifications of
530 large-scale weather patterns for the Elbe River [J]. J. Hydrometeorol., 11(3): 770-780. doi:
531 10.1175/2010jhm1186.1

532 Schraff C, Reich H, Rhodin A, et al. 2016. Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO
533 model (KENDA) [J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 142(696): 1453-1472. doi: 10.1002/qj.2748

534 Schumacher R S, Herman G R. 2016. Extreme precipitation in models: an evaluation [J]. Wea.
535 Forecasting, 31(6): 1853-1879. doi: 10.1175/waf-d-16-0093.1

536 Skamarock W C. 2004. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra [J]. Mon.
537 Weather. Rev., 132(12): 3019-3032. doi: 10.1175/mwr2830.1

538 Sun J, Xue M, Wilson J W, et al. 2014. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent
539 progress and challenges [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95(3): 409-426. doi:
540 10.1175/bams-d-11-00263.1

541 Tong W, Li G, Sun J, et al. 2016. Design strategies of an hourly update 3DVAR data assimilation
542 system for improved convective forecasting [J]. Wea. Forecasting, 31(5): 1673-1695. doi:
543 10.1175/waf-d-16-0041.1

544 Vendrasco E P, Sun J, Herdies D L, et al. 2016. Constraining a 3DVAR radar data assimilation system
545 with large-scale analysis to improve short-range precipitation forecasts [J]. J. Appl. Meteor.
546 Climatol., 55(3): 673-690. doi: 10.1175/jamc-d-15-0010.1

547 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等. 2013. GRAPES_RAFS 系统研发 [J]. 气象, 39(4): 466-477. Xu Zhifang,
548 Hao Min, Zhu Lijuan et al. On the research and development of GRAPES_RAFS [J].
549 Meteorological Monthly (in Chinese), 39(4): 466-477. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.009

550 薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究 [J]. 科学通报,
551 53(20): 2408-2417. Xue Jishan, Zhuang Shiyu, Zhu Guofu, et al. 2008. A study of GRAPES new
552 generation global/regional variational data assimilation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese),
553 53(20): 2408-2417. doi: 10.1360/csb2008-53-20-2408

554 Yang L, Smith J. 2018. Sensitivity of extreme rainfall to atmospheric moisture content in the
555 Arid/Semiarid Southwestern United States: implications for probable maximum precipitation
556 estimates [J]. J. Geophys. Res., 123(3): 1638-1656. doi: 10.1002/2017jd027850

557 Yang M, Gong J, Wang R, et al. 2019. A comparison of the blending and constraining methods to
558 introduce large-scale information into GRAPES mesoscale analysis [J]. J. Trop. Meteor., 25(2):
559 227-244. doi: 1006-8775(2019)02-0227-18

560 Yano J I, Ziemiański M Z, Cullen M, et al. 2018. Scientific challenges of convective-scale numerical

561 weather prediction [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99(4): 699-710. doi: 10.1175/bams-d-17-0125.1

562 Yue X, Shao A, Fang X, et al. 2018. Incorporating a large-scale constraint into radar data assimilation
563 to mitigate the effects of large-scale bias on the analysis and forecast of a squall line over the
564 Yangtze-Huaihe River basin [J]. *J. Geophys. Res.*, 123(16): 8581-8598. doi:
565 10.1029/2018jd028362

566 曾智琳, 谌芸, 朱克云. 2019. 2017年6月一次华南沿海强降水的对流性特征及热力机制研究
567 [J]. *大气科学*, 43(6): 1295-1312. Zeng Zhilin, Chen Yun, Zhu Keyun. 2019. Convective
568 characteristics and thermal dynamic mechanisms for coastal torrential rainfall over South China
569 during June 2017 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(6): 1295-1312.
570 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18207

571 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. 2004. GRAPeS 三维变分同化系统的理想试验 [J]. *气象学报*, 62(1):
572 31-41. Zhang Hua, Xue Jishan, Zhuang Shiyu, et al. 2004. Ideal experiments of GRAPeS
573 three-dimensional variational data assimilation system [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*,
574 62(1): 31-41. doi: 10.11676/qxxb2004.004

575 张景, 周玉淑, 沈新勇, 等. 2019. 2016年“7.19”京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条
576 件分析 [J]. *大气科学*, 43(4): 930-942. Zhang Jing, Zhou Yushu, Shen Xinyong, et al. 2019.
577 Evolution of dynamic and thermal structure and instability condition analysis of the extreme
578 precipitation system in Beijing-Tianjin-Hebei on July 19 2016 [J]. *Chinese Journal of*
579 *Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(4): 930-942. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18231

580 Zhang L, Liu Y, Liu Y, et al. 2019. The operational global four - dimensional variational data
581 assimilation system at the China Meteorological Administration [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*,
582 145(722): 1882-1896. doi: 10.1002/qj.3533

583 张文龙, 崔晓鹏, 黄荣, 等. 2019. 北京“623”大暴雨的强降水超级单体特征和成因研究 [J]. *大*
584 *气科学*, 43(5): 1171-1190. Zhang Wenlong, Cui Xiaopeng, Huang Rong, et al. 2019. An
585 investigation of the characteristics and mechanism of the high precipitation supercell in the
586 Beijing “623” severe rainstorm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(5):
587 1171-1190. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1905.18230

588 郑永骏, 金之燕, 陈德辉. 2008. 半隐式半拉格朗日动力框架的动能谱分析 [J]. *气象学报*, 66(2):
589 143-157. Zheng Yongjun, Jin Zhiyan, Chen Dehui. 2008. Kinetic energy spectrum analysis in a
590 semi implicit semi Lagrangian dynamical framework [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*,
591 66(2): 143-157. doi: 10.11676/qxxb2008.015

592 庄世宇, 薛纪善, 朱国富, 等. 2005. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试
593 验 [J]. *大气科学*, 29(6): 872-884. Zhuang Shiyu, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. 2005. GRAPES
594 global 3D-Var system--basic scheme design and single observation test [J]. *Chinese Journal of*
595 *Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29(6): 872-884. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.04

596 庄照荣, 陈静, 黄丽萍, 等. 2018. 全球和区域分析的混合方案对区域预报的影响试验 [J].
597 *气象*, 44(12): 1517-1525. Zhuang Zhaorong, Chen Jing, Huang Liping, et al. 2018. Impact
598 experiments for regional forecast using blending method of global and regional analyses [J].
599 *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 44(12): 1509-1517. doi:
600 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.12.001