

1 风云三号 C 星微波湿度计资料全天候同化在台风“玛莉
2 亚”预报中的影响研究

3 陈贞璇¹, 陈科艺*¹, 冼智鹏^{2,3}, 希爽^{4,5}

4
5 1 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225

6 2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

7 3 中国科学院大学, 北京 100049

8 4 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

9 5 国家卫星气象中心, 北京 100081

10
11 **摘要** 随着风云三号系列卫星的成功发射, 越来越多的卫星微波直接观测资料应用于数值
12 天气预报的资料同化系统。并且由于卫星微波全天候同化技术可以充分利用晴天及云雨区
13 微波观测资料, 在增加同化使用的观测数据的基础上, 有效提高数值天气预报准确率, 该
14 技术在卫星资料同化领域也颇受瞩目。本研究选取 2018 年 7 月的台风“玛莉亚”, 利用
15 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式及其同化系统 WRFDA (WRF Data
16 Assimilation) 中三维变分方法, 探讨风云三号 C 星微波湿度计观测资料的全天候同化技术
17 在区域模式中的适用性, 以及其在不同模式驱动场中的预报表现。通过对比仅同化晴空区
18 域卫星资料的试验和全天候同化的试验结果发现, 全天候条件下更多的云雨区域观测资料
19 被有效利用, 能够更好地模拟出台风“玛莉亚”核心区域的暖心和对称风速结构, 有效改善
20 湿度场的预报, 对台风路径的预报误差平均降低了大约 34~62%, 且这种正面影响均能在
21 不同模式驱动场中得到体现。

22
23 **关键词** 风云三号 C 星, 微波湿度计资料, 全天候同化, 台风预报

24 **文章编号** **中图分类号** **文献标识码**

25 **doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2302.22085

26
27
28

收稿日期 2022-05-24; **网络预出版日期**

作者简介 陈贞璇, 女, 1998 年出生, 硕士研究生, 主要从事卫星资料同化及数值模拟。E-mail:
992264297@qq.com

通讯作者 陈科艺, E-mail: ckydlt@aliyun.com

资助项目 国家自然科学基金 41905031, 国家自然科学基金 41875039, 国家重点研发计划项目
SQ2017YFC150064

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41905031), National Natural Science
Foundation of China (NSFC) (Grant 41875039), National Key Research and Development
Program of China (Grant SQ2017YFC150064),

29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61

The Impacts of assimilating FengYun-3C/MWHS-2 Observations under All-Sky Conditions on the Forecasts of Typhoon Maria

Chen Zhen-xuan¹, Chen Ke-yi*¹, Xian Zhi-peng^{2,3}, Xi Shuang^{4,5}

1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China
2. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Center for Earth System Modelling and Prediction of CMA, Beijing 100081, China
5. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract With the successful launch of FengYun-3, more satellite observations of radiances are directly assimilated. The satellite microwave all-sky assimilation technology can make better use of the microwave observation data in clear, cloudy and precipitating conditions. It can not only increase assimilated radiances, but also show positive impacts on numerical weather prediction. As a result, the all-sky approach gets a lot of attention now. In this study, a typhoon case called Maria in July 2018 is selected and all-sky assimilation of FY-3C/MWHS-2 data were used in Weather Research and Forecasting Model, based on the 3-dimensional variational data assimilation technique within the WRFDA (WRF data assimilation) system, in order to study the impacts of assimilating FY-3C/MWHS-2 data under the all-sky conditions and using different data types of the initial fields on the forecasts in the regional numerical model. The comparison of the clear-sky and all-sky assimilation experiments shows that under the all-sky conditions, more clouds and precipitation data are assimilated and the data usage is increased. Improvements are displayed in the analysis of the vertical structures of Maria, such as the warm core and the symmetric wind speed structures, and the humidity fields. The average reduction rates of the track error are about 34% to 62%. These positive impacts can be demonstrated in all the all-sky experiments with different data types for initializing WRF.

Keywords FengYun-3C, Microwave humidity sounders, All-sky data assimilation, forecasts of Typhoon

62

63 1 引言

64 数值天气预报是一个有关初值和边界值的问题：若给出当前大气状态（初值）、下边界
65 以及侧边界的信息，模式可以预测大气的演变（Eugenia et al., 2005）。若初值和边界条件与
66 大气真实状态越接近，模式模拟大气演变的效果则应该变得更好。在现有的技术水平下，
67 可以通过增加观测的数量、提高观测的质量，并结合先进的同化技术来获得对初值更精确
68 的估计（Talagrand et al., 1997）。

69 相较于常规观测资料和雷达资料，卫星观测资料具有时空分辨率高，能有效弥补海洋
70 上空观测资料的匮乏等优势，在提升初始场质量（Rabier et al., 2005）以及提高数值预报准
71 确率（Bauer P et al., 2006）方面有不可替代的作用。得益于卫星资料同化技术的发展，主
72 流卫星资料同化方法从间接同化（Eyre et al., 1993）逐渐转变为直接同化（Derber and Wu,
73 1998），南半球的预报准确率大幅度提升，与北半球之间的差距有了明显减小（Simmons
74 and Hollingsworth, 2002）。然而，欧洲中期天气预报中心（European Centre for Mdiun-
75 Range Weather Forecasts, ECMWF）的统计结果显示，约 75% 的卫星资料由于陆面条件以
76 及云和降水的影响被剔除（Bauer et al., 2006），这是由于云雨在时空上是不连续的，他们
77 的形成过程十分复杂，目前不能很好地被模拟（Ohring et al., 2011）。所以，大部分数值预
78 报业务中心使用晴空条件下的卫星资料同化技术。而这些被舍弃的云雨区域的资料与天气
79 系统的发生发展是密切相关的，因此全天候同化技术的应用和发展是十分重要的。近年
80 来，一些数值预报业务中心开始使用能够模拟云和降水的模式和观测算子（Bauer et al.,
81 2010），尝试同化云雨区域的卫星观测资料。2009 年，ECWFM 直接同化全天候条件下的卫
82 星观测资料(Bauer et al., 2010)，并将其应用到业务模式中。大量试验结果表明：同化系统
83 能够从云雨区域观测资料当中，得到更加准确的温度、湿度以及风场信息（Geer et al.,
84 2014; Lien et al., 2016），有效提高了短期天气预报的准确率（Geer et al., 2017）。2016 年，
85 美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）也开始同化
86 全天候条件下的 AMSU-A（Advanced Microwave Sounding Unit-A）资料，试验结果表明云
87 的预报误差明显减小（Zhu et al., 2016）。至此，各国数值预报中心均开始大力发展全天候
88 同化技术，希望能够将其业务化使用(Geer et al., 2018)。

89 云雨对辐射的吸收与散射和辐射的波长和云雨粒子的大小密切相关，在红外波段情况
90 下云几乎是不透明的。所以红外波段虽然优点很多，但是却无法探测到除云顶以外的云和
91 降水的信息（薛纪善等，2009）。而微波辐射波段有散射小，衰减弱以及波长较长等特点，
92 能够穿透非降水云，从而探测云中的液态水以及云下的大气状态，提供更多的云区信息，
93 是目前全天候同化的理想观测资料。ECWFM 在全天候条件下成功同化 MHS（Microwave
94 Humidity Sounding）、SSMIS（Special Sensor Microwave - Imager/Sounder）、GMI（Global
95 Precipitation Measurement Microwave Imager）、SAPHIR（Sondeur Atmospherique du Profil

96 d'Humidite Intertropicale par Radiometrie) 以及 MWHS-2 (Micro-Wave Humidity Sounder-
97 2) 等微波湿度计资料以及 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2)、GMI 以
98 及 SSMIS 微波成像仪资料。其中同化微波湿度计资料能够通过提供大气层垂直方向上湿度
99 信息, 改善矢量风场和湿度场的预报 (Geer et al., 2014) 从而提高中短期天气预报准确率
100 (Cardinali et al., 2010)。我国第二代业务极轨气象卫星风云三号 C 星 (FY-3C) 上搭载的
101 微波湿度计 II 型 (MWHS-2) 相比第一代微波湿度计 MWHS (Micro-Wave Humidity
102 Sounder) 新增了 10 个通道, 能够更加详细地提供大气垂直方向上的温湿度信息
103 (Lawrence et al., 2015)。全天候条件下同化其观测资料在改善双台风 (Xian et al., 2019)、
104 梅雨 (Li et al., 2021) 等重大天气过程的预报结果方面具有显著优势。而混沌理论指出,
105 两种不同的初始场在混沌的大气动力学函数中进行迭代, 会产生两种截然不同的结果
106 (Peitgen et al., 1990), 因此数值天气预报模式驱动场资料的选择同样直接影响分析场的准
107 准确率。对于同化相同卫星资料且确定的数值模式而言, 分析场与模式选取的驱动场数据密
108 切相关 (Wandishin et al., 2007; 2010, 袁有林等, 2017; 张懿等, 2020; 王思祺等,
109 2022)。而 FNL (National Center for Environmental Prediction, global final analysis) 资料作为
110 目前流行的驱动场数据, 包括了同化了大量各类观测资料的分析场数据以及基于分析时刻
111 数据进行预报而不包含任何观测资料同化的预报场数据。根据混沌理论, 以上两种不同的
112 驱动场条件必然会导致不同的预报结果。另外, 进入到同化系统中的观测数据量也直接影
113 响分析场的质量 (王业桂等, 2018)。目前, 在卫星资料同化过程中利用不同的驱动场和不
114 同扫描轨道数的观测资料对于同化及预报影响的研究还不全面, 因此, 为了深入探讨全天
115 候条件下同化 FY-3C/MWHS-2 观测资料的同化及预报影响, 本研究分别利用 FNL 分析场
116 和预报场资料作为模式驱动场数据, 进行了晴空和全天候条件下的同化及预报试验, 分析
117 和讨论其同化和预报影响, 并进一步使用更加接近业务流程的同化方案来验证 FY-
118 3C/MWHS-2 资料同化对于预报结果的影响, 为全天候条件下 FY-3C/MWHS-2 资料的有效
119 利用提供重要参考。

120 2 资料和方法

121 2.1 卫星观测资料及模式驱动场资料

122 2.1.1 FY-3C/MWHS-2 观测资料

123 风云三号系列星载微波湿度计能够全天候全天时地探测全球大气湿度及温度的垂直分
124 布信息, 目前分别为搭载于风云三号 A 星 (FY-3A)、B 星 (FY-3B) 上的 MWHS 以及风云
125 三号 C 星 (FY-3C)、D (FY-3D) 星上的 MWHS-2。本研究选用风云三号 C 星 MWHS-2 观
126 测资料进行晴空和全天候条件下的同化试验。MWHS-2 包括 183.31GHz 以及 118.75GHz 两
127 个主探测频点, 分别设置 5 个和 8 个探测通道, 以及位于大气窗区的 89GHz 和 150GHz 两
128 个辅助探测频点 (表 1) (Lawrence et al., 2015, 杨军等, 2018)。183.31GHz 水汽吸收线附
129 近的 5 个探测通道主要获取大气不同高度上的水汽信息, 118.75GHz 氧气吸收线附近的 8

130 个通道对垂直高度上的温度比较敏感，并且由于液态水的吸收和发射以及冰和降水的散
 131 射，该频段对云和降水也比较敏感 (Michele et al., 2005)。其中，通道 2-4 峰值能量高度过
 132 高，对云和水汽不敏感，属于温度探测通道；而通道 5-7 的峰值能量高度足够低，对云层
 133 敏感；通道 7 则对水汽较敏感 (Lawrence et al., 2018)。此外，118.75GHz 也是全球首次应
 134 用在极轨卫星上的频段，其能够辅助提高大气湿度探测精度 (谷松岩等, 2016)。Lawrence
 135 等人 (Lawrence et al., 2018) 对 FY-3C/MWHS-2 的研究表明，MWHS-2 的特殊通道设置能
 136 够有效提供同一时刻大气垂直方向上的温湿度信息，有效改善了常规观测资料对流层中高
 137 层信息探测精度低的问题。

138 表 1 微波湿度计 (MWHS-2) 参数设置

139 Table 1 Characteristics of MWHS-2 channels

序号	中心频率 (GHz)	极化带	带宽 (MHz)	峰值能量高 度 (hPa)	空间分辨率 (km)
1	89.0	V	1500	/	29
2	118.75±0.08	H	20	20	29
3	118.75±0.2	H	100	60	29
4	118.75±0.3	H	165	100	29
5	118.75±0.8	H	200	250	29
6	118.75±1.1	H	200	300	29
7	118.75±2.5	H	200	700	29
8	118.75±3.0	H	1000	/	29
9	118.75±5.0	H	2000	/	29
10	150.0	V	1500	/	16
11	183.31±1	H	500	350	16
12	183.31±1.8	H	700	400	16
13	183.31±3	H	1000	500	16
14	183.31±4.5	H	2000	550	16
15	183.31±7	H	2000	650	16

140

141 2.1.2 驱动场资料

142 GDAS/FNL (Final) 分析数据是由美国气象环境预报中心 (National Centers for
 143 Environmental Prediction, NCEP) 和美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric
 144 Research, NCAR) 联合采用全球资料同化系统 Global Data Assimilation System (GDAS), 对
 145 全球电信系统 (Global Telecommunications System, GTS) 及其他来源 (地面站、探空气
 146 球、船舶、飞机报和卫星等) 的观测资料进行质量控制和同化处理, 利用全球预报系统
 147 (Global Forecast System, GFS) 所获得的一套完整的分析资料集。它具有包含的要素多、
 148 时空分辨率高等特点, 目前广泛应用于数值模式和天气过程分析研究中 (邓伟等, 2009)。
 149 其要素场主要包括, 温度、相对湿度、位势高度场、矢量风场、气压等
 150 (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/#!description> [2022-10-10])。垂直方向上, 涵盖了地表
 151 从 1000hPa 到 10hPa 的 26 层标准等压层、地表边界层和对流层顶等各层次信息。

152 FNL 资料不仅包括 FNL 分析场数据 (数据文件以 f00 结尾), 还包括基于分析场时刻
 153 数据的 3 小时、6 小时以及 9 小时预报场数据 (数据文件分别以 f03、f06、f09 结尾,

154 <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/docs/FNLvGFS.pdf>)。为了对比数值天气预报模式在使用
 155 不同驱动场资料同化全天候条件下的 MWHS-2 观测资料所产生的影响, 本研究选取空间分
 156 辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间间隔为 6 小时的同一时刻 FNL 分析场资料和预报场资料分
 157 别作为模式的驱动场数据。不同时期 FNL 分析资料中所包含的同化所用观测资料是不同的
 158 (邓伟等, 2009), 截至目前 FNL 资料中暂未包含 FY-3C/MWHS-2 的观测资料信息, 亦不
 159 包含风云三号系列卫星任何观测仪器资料信息
 160 (https://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/prepbuftr.doc/document.htm [2022-10-
 161 10]), 因此同化试验结果具有客观参考意义。

162 2.2 模式介绍

163 本研究使用由 NCAR 开发的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式 (3.9.1.1 版
 164 本) 进行模拟, 使用其资料同化模块 WRFDA (Weather Research and Forecasting data
 165 assimilation) 系统中的三维变分方法进行同化。三维变分方法是通过最小化目标函数获取
 166 分析场的方法, 其目标函数定义为:

$$167 \quad J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x})) \quad (1)$$

168 其中 \mathbf{x} 是分析场, \mathbf{x}_b 是背景场, \mathbf{B} 是 $N \times N$ 维背景场误差协方差矩阵 (N 是背景场自由
 169 度), \mathbf{y} 是观测场, H 是观测算子 (实现将模式变量投影到观测空间的非线性算子), \mathbf{R} 是
 170 $M \times M$ 维观测场误差协方差矩阵 (M 是观测场自由度)。

171 在 WRFDA 系统中, 为了要线性化代价函数、简化极小化过程并且减小误差, 真正使用
 172 的是代价函数的增量形式来得到最接近真实大气状态的分析场。背景场 \mathbf{x}_b 和分析增量
 173 $\delta\mathbf{x}$ 表示为: $\mathbf{x} = \mathbf{x}_b + \delta\mathbf{x}$ 。则变化量向量表示为 $\mathbf{d} = \mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$ 。此时,
 174 代价函数的增量形式表示为:

$$175 \quad J(\delta\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\delta\mathbf{x} - \delta\mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\delta\mathbf{x} - \delta\mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(H\delta\mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1}(H\delta\mathbf{x} - \mathbf{d}) \quad (2)$$

176 其中 $\delta\mathbf{x} = \mathbf{x}^b - \mathbf{x}$, $\delta\mathbf{x}^g = \mathbf{x}^b - \mathbf{x}^g$ 。且 H 为非线性观测资料的切线性算子, 也称为雅可
 177 比矩阵, 可以表示为:

$$178 \quad H = \nabla H = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \quad (3)$$

179 由于观测场的观测点的密度远远小于背景场的格点密度, 增量形式可以使代价函数的
 180 极小化计算在观测场的空间维度进行, 大大降低了计算量。并且在此引入的非平衡量的量
 181 级很小, 所以通过求增量和平衡背景场之和得到的分析场能够使同化结果更为稳定。

182 而背景误差协方差矩阵可以定义为:

$$183 \quad \mathbf{B} = \langle \varepsilon \varepsilon^T \rangle \langle (\mathbf{x} - \mathbf{x}^t)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^t)^T \rangle \quad (4)$$

184 其中 ε 是预报误差, \mathbf{x}^t 是真实大气状态。在实际应用中, 一般使用 NMC (National

185 Meteorology Cent) 方法或集成方法来得到 $\mathbf{x}-\mathbf{x}'$ 的近似值, 主要还是通过使用大量的观测和
 186 数值预报样本来估计背景误差协方差矩阵。而 Parrish 等人提出的 NMC 方法 (Parrish and
 187 Derber, 1992), 能够通过计算同一时刻不同时效的预报结果之差得到背景误差协方差矩
 188 阵。其样本一般是一个月或更长的, 所以用 NMC 方法得到的背景场信息是不随天气形势
 189 而改变的, 不具有流依赖特征, 是气候态的。

190 2.3 动态地表发射率反演

191 受复杂的陆地地形和陆表温度日变化大等因素影响, 陆地表面的地表发射率精度较海
 192 洋表面的地表发射率精度偏低。为了使用更接近真实情况的地表发射率, 可以利用由卫星
 193 微波观测 89GHz 窗区通道资料, 通过卡曼滤波算法反演地表发射率的月平均场, 得到地表
 194 发射率图谱, 但发射率图谱并不能反映真实的地表发射率情况。因此, 还可以通过反演动
 195 态地表发射率 (Karbou et al., 2010) 的方法来获取更为准确的地表发射率。Chen 等人
 196 (Chen et al., 2018) 的试验结果表明, MWHS-2 89GHz 通道对中低纬度的地表更为敏感,
 197 而 150GHz 通道对中高纬度, 尤其是冰雪覆盖的地表更为敏感, 而本研究的研究区域更多
 198 地位于中低纬度地区。并且, 由于全天候条件下大量云雨区域的观测资料会影响地表发射
 199 率的精度, 并且 183GHz 通道对湿度敏感, 所以对其影响尤为明显。因此, 本研究将在晴
 200 空和全天候同化试验中均利用 89GHz 通道来进行动态地表发射率反演。

201 假设大气平行于一个平坦的非散射平面, 若给定天顶角 (θ) 以及频率 (ν), 那么卫
 202 星搭载的传感器上接收到的观测亮温可以表示为:

$$203 \quad T_b = \varepsilon_{(\theta, \nu)} T_s \Gamma_{(\theta, \nu)} + (1 - \varepsilon_{(\theta, \nu)}) T_{(\theta, \nu)}^{\downarrow} \Gamma_{(\theta, \nu)} + T_{(\theta, \nu)}^{\uparrow} \quad (5)$$

204 其中, $\varepsilon_{(\theta, \nu)}$ 为地表发射率、 T_s 为背景场中的地表温度、 $T_{(\theta, \nu)}^{\downarrow}, T_{(\theta, \nu)}^{\uparrow}$ 为观测算子反演的
 205 大气向下、向上发射的辐射, $\Gamma_{(\theta, \nu)}$ 为大气净透过率。而地表发射率可以表示为:

$$206 \quad \varepsilon_{(\theta, \nu)} = \frac{T_b - (T_{(\theta, \nu)}^{\uparrow} + T_{(\theta, \nu)}^{\downarrow} \Gamma_{(\theta, \nu)})}{(T_s + T_{(\theta, \nu)}^{\downarrow}) \Gamma_{(\theta, \nu)}} \quad (6)$$

207 在晴空条件下, 当 89GHz 通道的地表到空间的透射率 Γ 大于 0.5, 并且其反演的发射
 208 率 ε 与陆地表面发射率气候态地图集 TELSEM (the Tool to Estimate Land Surface Emissivity
 209 at Microwaves and Millimeter wave atlas) 中 90GHz 的发射率之差小于 0.2 时, 则使用动态
 210 地表发射率 (Chen et al., 2018)。在全天候条件下, 若 89GHz 通道反演的发射率介于 0.55
 211 到 1 之间, 并且其反演的发射率 ε 与 TELSEM 上 90GHz 的发射率之差小于 0.09, 则使用动
 212 态地表发射率 (Xian et al., 2019)。反之, 则使用陆地表面发射率气候态地图集 TELSEM 中
 213 的发射率值作为模拟亮温时的地表发射率值。

214 2.4 观测误差

215 由于全天候条件下同化卫星观测资料时，观测背景误差（OMB, Observation-minus-
 216 background）概率分布出现的非高斯性不满足同化理论的基本假设，而这种代表性误差业
 217 务中将其归类为观测误差。因此，本研究使用基于对称云量模型（Geer et al., 2011, Geer et
 218 al. 2010）建立的观测误差模型，能够定量的计算云雨区域观测资料的误差，从而使得观测
 219 背景误差更加满足高斯分布。其原理是将散射指数 SI （Baordo et al., 2012）用于观测和背
 220 景场中云量的计算，由于降水尺度的冰粒子在 150GHz 通道和 90GHz 通道的散射效应不
 221 同， SI 可以定义为： $SI = TB_{90} - TB_{150}$ ，其中 TB_{90} 表示 90GHz 通道观测亮温， TB_{150} 则表
 222 示 150GHz 通道观测亮温。计算观测场和背景场的散射指数 SI_{obs} 、 SI_{FG} ，对称云观测算
 223 子可以表示为：

$$224 \quad C_{SYM} = \frac{SI_{OBS} + SI_{FG}}{2} \quad (7)$$

225 则对称云量模型可以表示为：

$$226 \quad t(C_{SYM}) = \begin{cases} t_{clr} & \in C_{SYM} \leq C_{clr} \\ t_{clr} + (t_{cld} - t_{clr}) \left(\frac{C_{SYM} - C_{clr}}{C_{cld} - C_{clr}} \right)^2 & \in C_{clr} \leq C_{SYM} \leq C_{cld} \\ t_{cld} & \in C_{SYM} \geq C_{cld} \end{cases} \quad (8)$$

227 其中 t_{clr} 和 t_{cld} 分别为晴空和全天候条件下的观测误差， C_{clr} 和 C_{cld} 分别为对称云量预
 228 测算子的最小最大值。FY-3C/MWHS-2 部分通道的观测背景误差标准差以及对应的观测误
 229 差模型见 Xian et al. (2019) 的图。

230 3 试验设计

231 3.1 台风“玛莉亚”简况

232 本研究选取 2018 年第 8 号超强台风“玛莉亚”作为试验个例，2018 年 7 月 4 日热带气
 233 旋在美国关岛以东洋面生成，同日 13 时（UTC，下同）日本气象厅将其命名为“玛莉亚”
 234 （热带风暴级），5 日 6 时中央气象台将其升级为台风，并且在当日 21 时升级为超强台
 235 风。7 月 6 日 00 时台风“玛莉亚”（超强台风级）的中心位于距离日本冲绳县那霸市东南
 236 方向约 1870 公里的洋面上，中心最低气压为 925 百帕。8 日 00 时，“玛莉亚”以每小时 30
 237 公里左右的速度向西北方向移动，逐渐向台湾以东洋面靠近。11 日 01 时 10 分“玛莉亚”
 238 登陆福建省连江县黄岐半岛沿岸，此时“玛莉亚”为强台风级，台风附近最大风速约为
 239 42m/s，中心气压约为 960hPa，随后移动到江西境内逐渐减弱至消亡。

240 超强台风“玛莉亚”具有移速快、强度增加迅速的特点，直接经济损失近 30 亿元，
 241 117.2 万人受灾。受“玛莉亚”登陆影响，福建省、浙江省、湖南省和江西省多地受灾严
 242 重。其中，福建省损失惨重，约有 71.8 万人受灾，造成直接经济损失 22.6 亿元。

243 3.2 模式参数设置

244 本研究采用 WRF 模式 3.9.1.1 版本，使用兰伯特投影单层嵌套网格，模拟区域中心定
 245 为 (25° N, 135° E)，水平方向网格数为 540×480，空间分辨率为 15km，时间积分步长
 246 为 60s。试验所用的物理参数化方案如表 2 所示：

247
 248 表 2 试验参数化方案

249 Table 2 the main physical parameterization schemes of the experiments

参数化方案	
微物理过程	WSM6 方案 (Lim and Hong, 2010)
积云参数化	Kain-Fritsch 方案 (Kain, 2004)
长波辐射	RRTMG 方案(Iacono et al., 2008)
短波辐射	RRTMG 方案(Iacono et al., 2008)
行星边界层	MYNN 2 方案(Nakanishi and Niino, 2006)
近地面层	MYNN 方案(Nakanishi and Niino, 2006)
陆面层	unified Noah land-surface 方案(Mukul et al., 2004)

250

251 3.3 质量控制和偏差订正

252 本研究使用扩展后的 WRFDA 系统，能够直接读取 FY-3C/MWHS-2 亮温资料，作为观
 253 测场信息与背景场进行比较。其中为了保证试验结果的客观准确性，FY-3C/MWHS-2 的质
 254 量控制方案除常规质量控制外还包括了针对仪器特有的质量控制方案：

255 剔除 FY3C/MWHS-2 观测资料中小于 50K 或大于 550K 的观测亮温数据；

256 剔除 FY3C/MWHS-2 观测资料中地表类型为混合地表的观测亮温数据；

257 剔除 FY3C/MWHS-2 观测资料中误差较大的前 5 条扫描线的观测亮温数据；

258 剔除 FY3C/MWHS-2 观测资料中偏差订正后 OMB 大于 3 倍观测误差的观测亮温数
 259 据；

260 剔除 FY3C/MWHS-2 观测资料中 183.31GHz 通道超出对应地表高度阈值，即通道 11
 261 中高于 1500m、通道 12-13 中高于 1000m 以及通道 14-15 中高于 800m 的陆地上空亮温数据
 262 (Chen et al., 2021)；

263 剔除 FY3C/MWHS-2 观测资料中通道 14 和通道 15 高于南北纬 60° 的观测亮温数据。

264 而受云雨影响观测资料的判断标准是通过计算云水总量 (CLWP, Cloud Liquid Water
 265 Path, 背景场中大气两点之间液态水含量的积分) 实现，即 CLWP 大于 0.2 的数据被认为
 266 是受云雨影响的观测资料 (Xian et al., 2019)。

267 本文使用变分偏差订正方法 (Auligné et al., 2007) 对 MWHS-2 资料进行偏差订正，来
 268 减小观测算子的误差以及观测资料的系统性偏差。

269 3.4 同化试验设计

270 基于 Lawrence 等人对 FY-3C/MWHS-2 的评估结果，本研究在 4 组同化试验中选择与
 271 ECMWF 一致的通道选择方案，即同化 2-6 号通道、11-12 号通道、15 号通道的观测亮温资

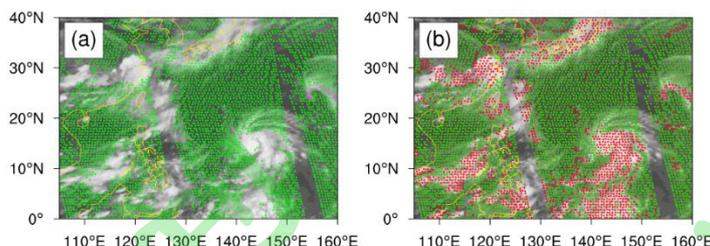
272 料以及 7 号通道海洋上空的观测资料。

273 为了研究在全天候条件下同化 FY-3C/MWHS-2 观测资料以及不同的初值边值设置对台
274 风预报的影响, 本研究设置了 8 组试验进行讨论, 分别使用 FNL 分析场资料 (FNL-00) 以
275 及由前一时次积分 6 小时后得到的与 F00 同时刻的预报场资料 (FNL-06) 作为模式的驱动
276 场数据, 并且均设置一组不同化任何资料的控制试验 (FNL-00-CON、FNL-06-CON)、一
277 组只同化晴空区域观测的同化试验 (FNL-00-CLEAR、FNL-06-CLEAR)、一组同化包括云
278 雨区和非云雨区资料的全天候同化试验 (FNL-00-ALLSKY、FNL-06-ALLSKY), 并且使用
279 同化时间窗区内所有扫描轨道观测数据。另外, 在 FNL-06-CLEAR 和 FNL-06-ALLSKY 基
280 础上进行只同化一条扫描轨道资料的两组同化试验, 分别记为 FNL-06-1-CLEAR、FNL-06-
281 1-ALLSKY。本文所有同化试验均只同化 FY-3C/MWHS-2 观测资料 (未同化常规观测资
282 料), 其中晴空同化试验使用的观测算子是 RTTOV (Saunders et al., 2013), 而全天候同化试
283 验则使用的是能够模拟云雨条件下微波散射率的模块 RTTOV_SCATT (Bauer et al., 2006b)。

284 控制试验的模拟起始时间为 2018 年 7 月 5 日 12 时 (UTC) 至 2018 年 7 月 12 日 00 时
285 (UTC, 下同), 并且将起始时间之前 12 小时作为模式的 spin-up 时间 (2018 年 7 月 5 日
286 00 时-2018 年 7 月 5 日 12 时), 同化试验组和控制试验组的模拟起始时间保持一致。

287 由于 FY-3C 星通过模拟区域上空的时间大约为每日 00 时及 12 时, 所以循环同化时间
288 间隔设置为 12 小时, 同化窗区为 6 小时。也就是说, 同化试验均进行 12 次同化, 2018 年
289 7 月 5 日 12 时进行第一次同化, 而 2018 年 7 月 11 日 12 时进行最后一次同化。具体的循环
290 同化方案为: 在进行第一次同化时, 使用 FNL 资料作为模式的驱动场数据进行 12 小时积
291 分, 将预报结果作为该分析时刻的背景场, 同化一次 FY3C/MWHS-2 观测资料, 得到该时
292 刻的分析场数据, 更新模式边界场, 再进行 12 小时积分, 以此类推。除第一次同化外, 同
293 化所需的背景场均由前 12 小时的模式预报结果提供。此外, 为了进一步验证同化 FY-
294 3C/MWHS-2 资料的预报影响, 本研究采用更接近业务流程的方案, 另外设置 6 组试验用于
295 检验, 即进行三天半 (7 次) 的循环同化后, 直接做 72 小时预报, 分别记为 FNL-00-
296 CLEAR-72h、FNL-06-CLEAR-72h、FNL-06-1-CLEAR-72h、FNL-00-ALLSKY-72h、FNL-
297 06-ALLSKY-72h、FNL-06-1-ALLSKY-72h。

298 以 FNL-06 试验为例, 各组试验同化所使用的卫星观测资料空间分布如图 1 所示。很
299 明显, 全天候同化试验的资料利用率更高, 所增加的观测数据大多位于台风眼墙与螺旋云
300 带及其它厚云区域。含有丰富云雨区域信息的观测资料被同化后, 对于提高台风及降水的
301 预报效果具有潜在的正面影响。

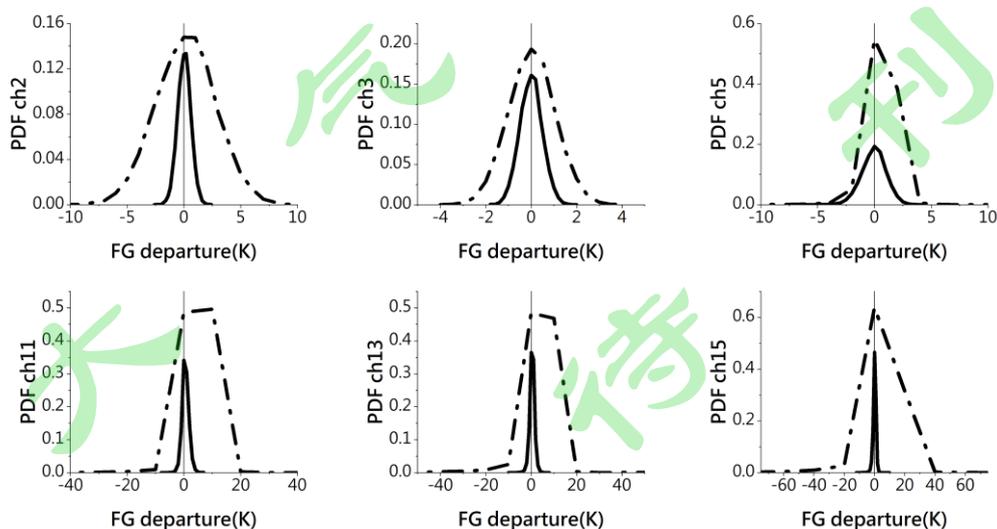


302
 303 图 1 FNL-06-CLEAR (a) 和 FNL-06-ALLSKY (b) 中 FY-3C/MWHS-2 同化所使用的观测数据空间分布图 (红色点
 304 为全天候试验中增加的观测点), 底图为 2018 年 7 月 5 日 12 时 FY-2G 卫星长波红外通道 L2 亮温产品资料
 305 Fig.1 The coverage of the FY-3C/MWHS-2 observations in FNL-06-CLEAR(a) and in FNL-06-ALLSKY(b)(red point is extra
 306 data in ALL-SKY). The background is FY-2G satellite brightness temperature product from the Stretched Visible and Infrared
 307 Spin Scan Radiometer at 1200 UTC 5 July 2018

308 4 同化及预报结果分析

309 4.1 同化影响

310 各组同化试验的 OMB 概率分布结果相近, 以 FNL-06 为例, 图 2 表明了该组 FY-
 311 3C/MWHS-2 通道 2、3、5、11、12、15 由观测误差模型标准化前 (点划线) 和标准化后
 312 (实线) 的 OMB 概率分布情况。在统计学中, 峰度和偏度常被用来描述分布曲线的形
 313 状, 其中用峰度描述分布曲线相比高斯分布曲线的尖平程度 (刘玉超等, 2012), 用偏度描
 314 述分布曲线相比高斯分布曲线的对称程度。可以看到标准化前 OMB 概率分布有较强的非
 315 高斯性, 而标准化处理后其数据分布平缓, 峰度绝对值减小, 更加近似高斯分布, 满足三
 316 维变分同化理论需要观测背景误差满足高斯分布的基本假设。各通道峰度都有明显减小,
 317 并且偏度也有一定程度减小。除此之外从图中也可以看到对云雨更为敏感的 183GHz 通道
 318 (通道 11、13、15) 在标准化前的观测背景误差最大值偏大约在 $\pm 40K$ 至 $\pm 60K$ 之间, 但
 319 标准化后的观测背景误差则大大减小, 均在 $\pm 10K$ 以内。

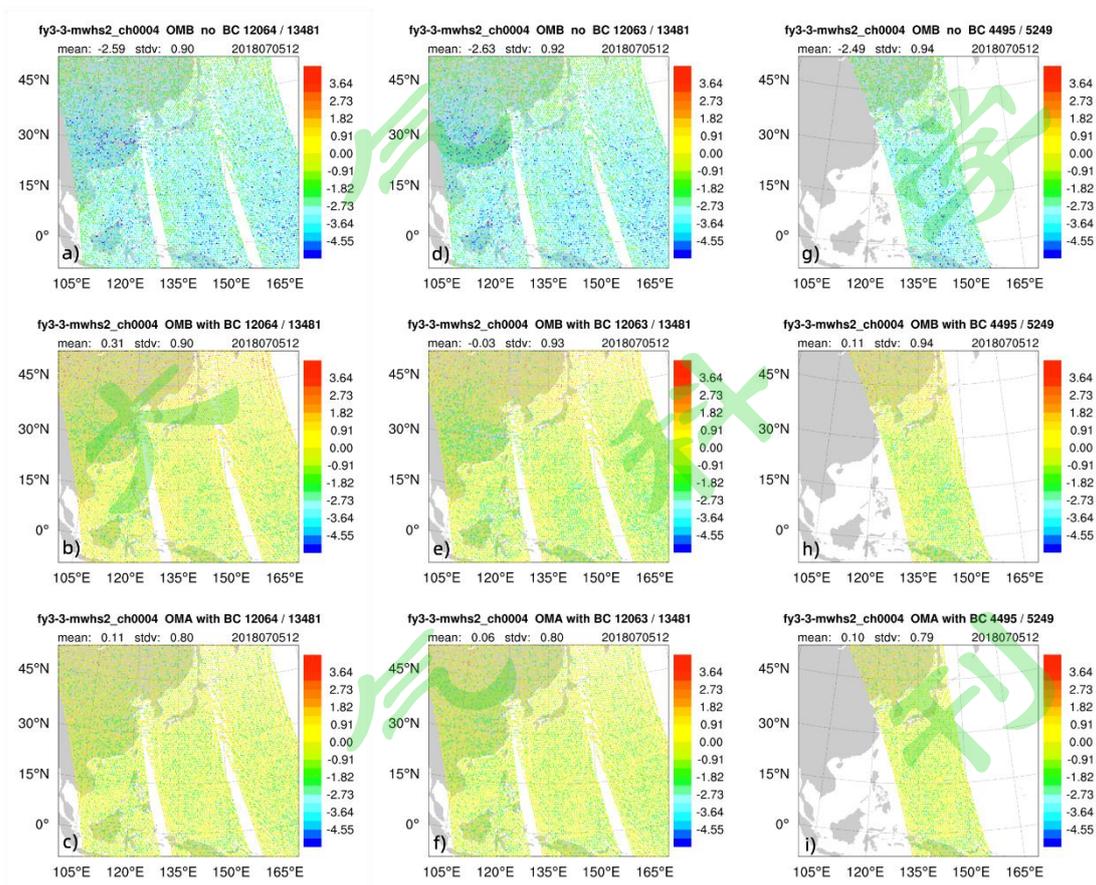


320

321 图2 通道 2、3、5、11、13 和 15 由观测误差模型标准化前后观测背景误差概率分布函数图（实线为标准化后，虚
 322 线为标准化前）

323 Fig. 2 The PDFs of OMB with normalized (solid lines) and without normalized (dashed lines) by the observation error
 324 model
 325

326 图3 为 2018 年 7 月 5 日 12 时 FY-3C/MWHS-2 通道 5 的观测背景误差和分析残差的空间分布图，图 a-c、d-f、g-i 分别为 FNL-00、FNL-06 和 FNL-06-1 扫描轨道组中全天候同化
 327 试验的同化结果。其中图 a、d、g 为偏差订正前的观测背景误差，图 b、e、h 为偏差订正后的观测背景误差，图 c、f、i 为偏差订正后的分析残差（OMA, Observation-minus-
 328 analysis）。由图 4a 到图 4f 中可以看到，该同化时次的时间窗区内共有三条扫描轨道覆盖本
 329 试验的模拟区域。2018 年 7 月 5 日 12 时，在质量控制前进入同化系统的观测数据量大约为
 330 13481 个，而全天候条件下质量控制后 FNL-00-ALLSKY 组的观测数据量为 12064 个、
 331 FNL-06-ALLSKY 组的观测数据量为 12063 个。
 332
 333



334
 335 图3 2018 年 7 月 5 日 12 时(UTC)FY-3C/MWHS-2 通道 4 偏差订正前的观测背景误差 (a、d、g)、偏差订正后的观
 336 测背景误差 (b、e、h) 以及偏差订正后的分析残差 (c、f、i) 的空间分布图 (图 a-c 为 FNL-00-ALLSKY、图 d-f 为
 337 FNL-06-ALLSKY、图 g-i 为 FNL-06-1-ALLSKY)，其中圆点的颜色为卫星观测资料扫描点 OMB, OMA 的值（单位：
 338 K）

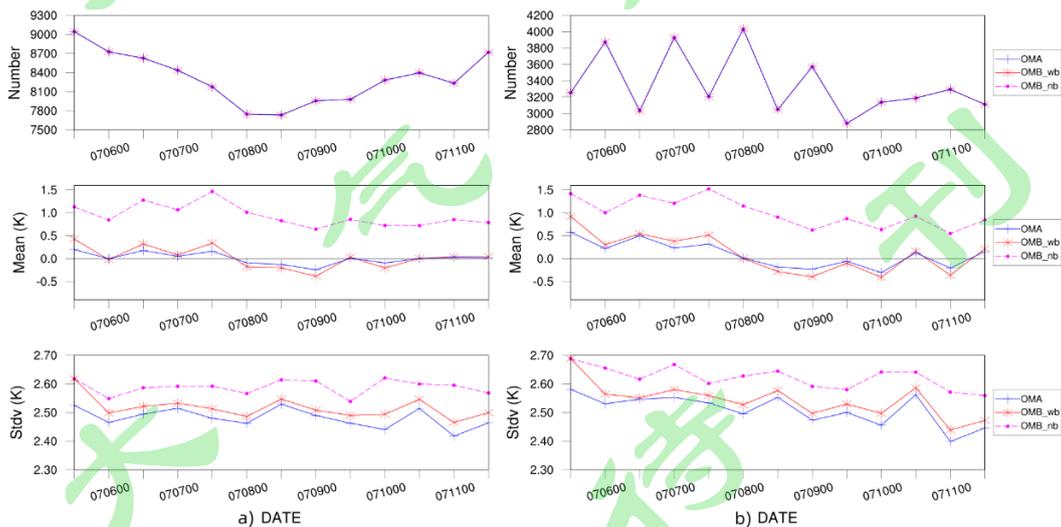
339 Fig. 3 Distributions of OMB (no bias correction, a, d, g), OMB (with bias correction, b, e, h) and OMA (with bias correction,
 340 c, f, i) of FY-3C/MWHS-2 channel 4 at 1200 UTC 5 July 2018 in FNL-00-ALLSKY (a-c), FNL-06-ALLSKY (d-f) and FNL-06-
 341 1-ALLSKY (g-h). The colors of dots represent the values of the OMB and OMA of FY-3C/MWHS-2 observations in the scan

342

points.

343 如图 3a、d 所示，FNL-00-ALLSKY、FNL-06-ALLSKY 中通道 2 在偏差订正前观测背
 344 景误差存在较明显的负偏差，而偏差订正后（图 3b、e、h）OMB 平均值绝对值明显减
 345 小。此外，偏差订正后的分析残差（图 3c、f、i）的标准差绝对值减小，说明偏差订正一
 346 定程度地改善了分析场质量，并且这种改善在每个分析时刻都是存在的，晴空条件下亦然
 347 （图略）。

348 进入同化系统的数据量直接影响 OMB 的值，并且一定程度上会对分析场产生影响。
 349 并且，对于三维变分方法来说，背景场的时刻是固定的，即分析时刻的模式预报结果，若
 350 同化多条扫描轨道，则是同化三到四个不同时刻的观测场资料。所以在同一分析时刻，同
 351 时同化更多扫描轨道资料不一定能提升数值预报效果，特别是在晴空条件下。因此，设置
 352 FNL-06-1-CLEAR 和 FNL-06-1-ALLSKY 两组试验，研究只同化一条轨道观测资料对台风
 353 预报的影响。从图 4d 可以看到，第二条扫描轨道基本覆盖台风“玛莉亚”的移动路径，并
 354 且和同化分析时刻最为接近，故选用该轨道数据进行单扫描轨道同化试验。2018 年 7 月 5
 355 日 12 时，FNL-06-1-ALLSKY 在质量控制之前进入同化系统的观测数据量有 5249 个，质量
 356 控制后的观测数据量为 4495 个（图 3g-i）。从 FNL-06-CLEAR（图 4a）和 FNL-06-1-
 357 CLEAR（图 4b）通道 2 的 OMB 和 OMA 的时间序列图（图 4）可见，减少进入同化系统
 358 的观测数据量，大部分时刻的 OMB 和 OMA 的平均值和标准差略微增加。这是由于，增加
 359 同化的观测数据数量一定程度上能够更好地约束真值，使得 OMB 和 OMA 的平均值和标准
 360 差更小。但是，这并不影响订正的效果，也就是说，晴空和全天候条件下同化 FY-
 361 3C/MWHS-2 观测资料在质量控制、偏差订正后都能够为模式提供一个更加接近真实值的
 362 初始场资料，均有利于提升模式预报效果。



363

364

364 图 4 试验 FNL-06-CLEAR (a) 和 FNL-06-1-CLEAR (b) 中 FY-3C/MWHS-2 通道 2 的 OMB、OMA 平均值和标准差以
 365 及同化数据量的时间序列图

365

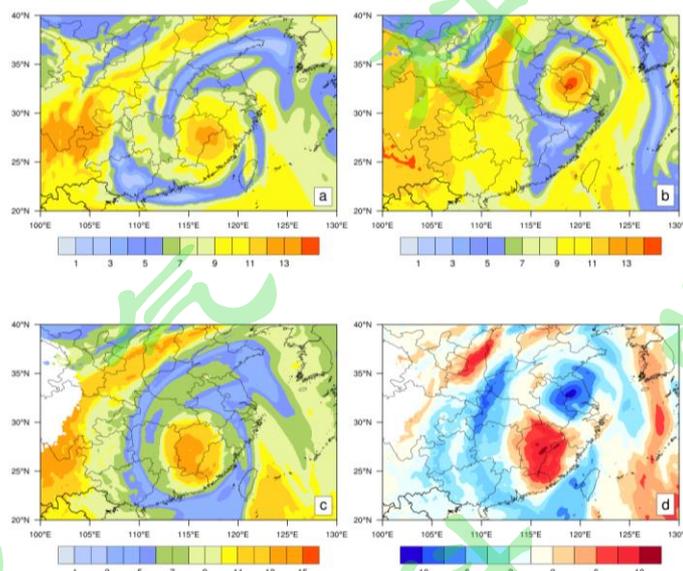
366

366 Fig. 4 The time series of OMB, OMA and the observation numbers of channel 2 of FY-3C/MWHS-2 for experiments FNL-
 367 06-CLEAR (a) and FNL-06-1-CLEAR (b), respectively

367

368

369 由于全天候条件下同化了大量的云雨区域信息，理论上可以进一步改善温、湿、风场
370 的初始值 (Geer et al., 2018)。以 700hPa 比湿 (单位: g/kg) 为例, 选用国际公认质量可靠的
371 的分析场 ERA5 资料 (Belmonte et al., 2019, Xu et al., 2019) 作为参考。第一次同化后, 即
372 2018 年 7 月 5 日 12 时 (UTC), FNL-06-ALLSKY 分析场与 FNL-06-CON 初始场比湿差值
373 的大值中心出现在中国东南沿海一带及台湾海峡的台风云区附近, 约 $\pm 1\text{g/kg}$ 以内, 两组试
374 验的比湿场在初始时刻的差异并不明显 (图略)。随着同化次数的增加, FNL-06-ALLSKY
375 分析场比湿的改善优势愈发显著。特别是台风登陆后, FNL-06-ALLSKY 能够明显订正台
376 风内部的比湿分布 (图 5c), 台湾东部洋面上的比湿大值区以及台风西部内陆地区的大值
377 区均与 ERA5 (图 5a) 更为接近。说明 FNL-06-ALLSKY 能够为模式提供更优的水汽初始
378 场, 可为进一步提高降水预报准确率提供支持。



379

380 图 5 2018 年 7 月 11 日 12 时 700hPa ERA5 (a)、FNL-06-CON 初始场 (b)、FNL-06-ALLSKY (c) 分析场比湿 (单
381 位: g/kg) 空间分布, FNL-06-ALLSKY 分析场与 FNL-06-CON 比湿之差 (d)

382 Fig. 5 The specific humidity at 1200 UTC 11 July 2018 from ERA5 (a), the FNL-06-CON initial fields (b), the analyzed
383 fields of FNL-06-ALLSKY (c, unit: g/kg) and the specific humidity differences between the analyses of FNL-06-ALLSKY and
384 FNL-06-CON initial conditions (d).

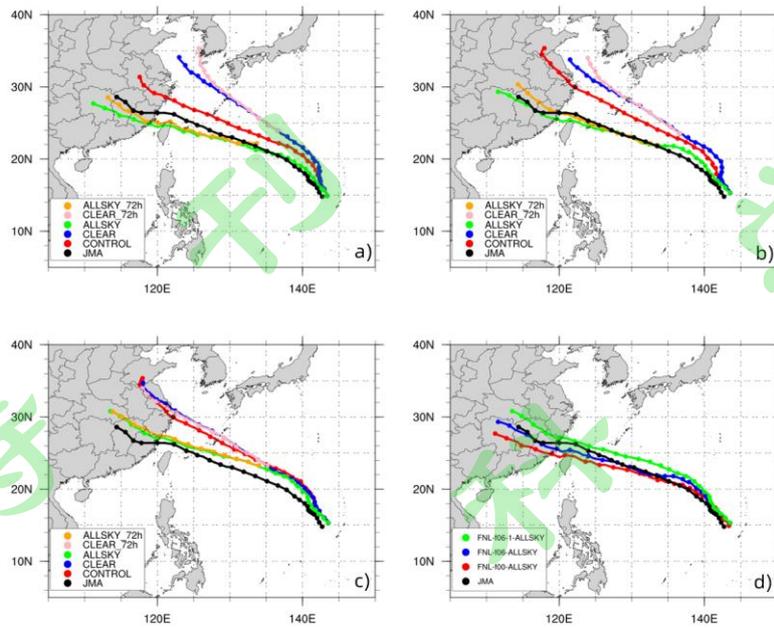
385 4.2 预报影响

386 4.2.1 台风路径和强度预报

387 台风最佳路径数据集一般是使用多种资料综合分析得出, 提供了台风中心位置、最低
388 气压以及强度等信息, 具有更高的准确性 (狄迪等, 2022), 常被用作“真值”对预报方法
389 进行评估 (褚萌等, 2022)。本研究选取日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA)
390 发布的台风最佳路径数据集, 对 8 组试验的台风路径预报情况进行了评估, 并且计算了各
391 组试验对台风“玛莉亚”的路径预报结果与最佳路径资料的误差。从 JMA 的最佳路径数据
392 可以看到, “玛莉亚”是向西北方向移动的台风, 并且于 11 日在福建省登陆。如图 6a,
393 FNL-00-CON (红色) 和 FNL-00-ALLSKY (绿色) 对“玛莉亚”移动路径的预报结果与最
394 佳路径 (黑色) 较接近, 但二者相比, FNL-00-ALLSKY 对台风登陆时间和登陆地点的预

395 报更准确。并且在预报前期，FNL-00-ALLSKY 对移动方向的预报与最佳路径基本一致。
396 从图 7a 中也可以看到，FNL-00-ALLSKY（绿色）的误差较其余两组都更小，基本维持在
397 200km 左右。从图 6b 中可以看到 FNL-06-CON 对台风路径的预报与最佳路径有一定偏差，
398 但 FNL-06-ALLSKY 却能更准确地预报台风地登陆地点，整体看来 FNL-06-ALLSKY 对台
399 风移动方向的预报基本和最佳路径保持一致。从图 7b 中可以看到 FNL-06-ALLSKY 的路径
400 误差也是基本维持在 200km 以内，且预报结果更优于 FNL-00-ALLSKY。而其产生的原因
401 可能与驱动场数据的影响有关，正如 2.1.2 节所示，FNL 分析场资料（即 FNL-00 所使用的
402 驱动场）是包含多种观测资料同化的分析数据，而 FNL 预报场资料（即 FNL-06 所使用的
403 驱动场）则是未同化任何观测资料的预报数据。FNL-00-CLEAR 和 FNL-00-ALLSKY 在分
404 析资料的基础上增加同化 FY-3C/MWHS-2，多种资料共同作用，导致 MWHS-2 资料的影响
405 有所减弱，出现 FNL-00-ALLSKY 的预报虽然表现出明显的正面效果，却没有 FNL-06-
406 ALLSKY 的预报效果好的结果。此外，ALLSKY-72h（图 6a、b、c 橙色线）所预报的台风
407 路径随着预报时效增加，均存在较 ALLSKY（图 6a、b、c 绿色线）来说略偏东的情况。但
408 整体来说，六组验证试验 CLEAR-72h（图 6a、b、c 粉色线）、ALLSKY-72h（图 6a、b、c
409 橙色线）和六组同化试验 CLEAR（图 6a、b、c 蓝色线）、ALLSKY（图 6a、b、c 绿色
410 线）的台风路径预报结果差别并不大，说明在本研究中同化 FY-3C/MWHS-2 资料对于改善
411 台风预报起主导作用。

412 但是 FNL-00-CLEAR 和 FNL-06-CLEAR 两组晴空同化试验的预报结果都不太理想（图
413 6a、b），而 FNL-06-1-CLEAR 对台风路径预报的影响则为中性（图 6c），可能与同化使用
414 的数据量较少有关。从图 7c 中也可以看到，FNL-06-1-CLEAR 的路径误差和 FNL-06-CON
415 相当，甚至预报初期时其误差更低。然而 FNL-06-1-ALLSKY 的预报效果反而没有 FNL-
416 06-ALLSKY 的预报效果好，这也恰好证明了，全天候条件下尽可能地使用更多云雨区域资
417 料对于改善台风路径预报有重要意义。



418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

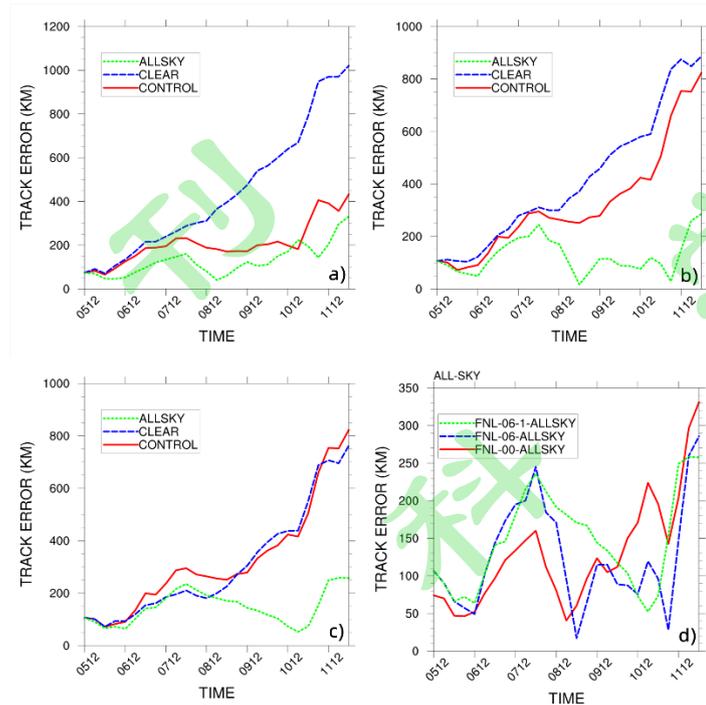
429

430

图 6 试验时间内 FNL-00 (a)、FNL-06 (b) 和 FNL-06-1 (c) (红色线: CON、蓝色线: CLEAR、绿色线: ALLSKY、粉色线: CLEAR-72h、橙色线: ALLSKY-72h), 以及三组全天候试验 (d) 对台风“玛莉亚”路径预报 (红色线: FNL-00-ALLSKY、蓝色线: FNL-06-ALLSKY、绿色线: FNL-06-1-ALLSKY)

Fig. 6 The track forecast of the typhoon ‘Maria’ from FNL-00 (a), FNL-06 (b), FNL-06-1(c) (red line: CON expts, blue line: CLEAR expts, green line: ALLSKY expts, pink line: CLEAR-72h expts, orange line: ALLSKY-72h expts) and the three all-sky expts(d) (red line: FNL-00-ALLSKY expts, blue line: FNL-06-ALLSKY expts, green line: FNL-06-1-ALLSKY expts)

此外, 随着预报时效的增加, 控制试验和晴空同化试验在台风路径预报方面所产生的误差基本呈上升趋势, 而全天候同化的误差相对更加稳定 (图 7a-c)。总的来说, 全天候同化试验能够明显改善台风路径预报, 并且较控制试验预报误差平均降低 25%~49%, 较晴空同化试验平均降低 34%~62%。而 FNL-06-ALLSKY 则是三组全天候试验中平均路径误差最小的一组, 约为 125.24km (图 6d、图 7d)。



431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

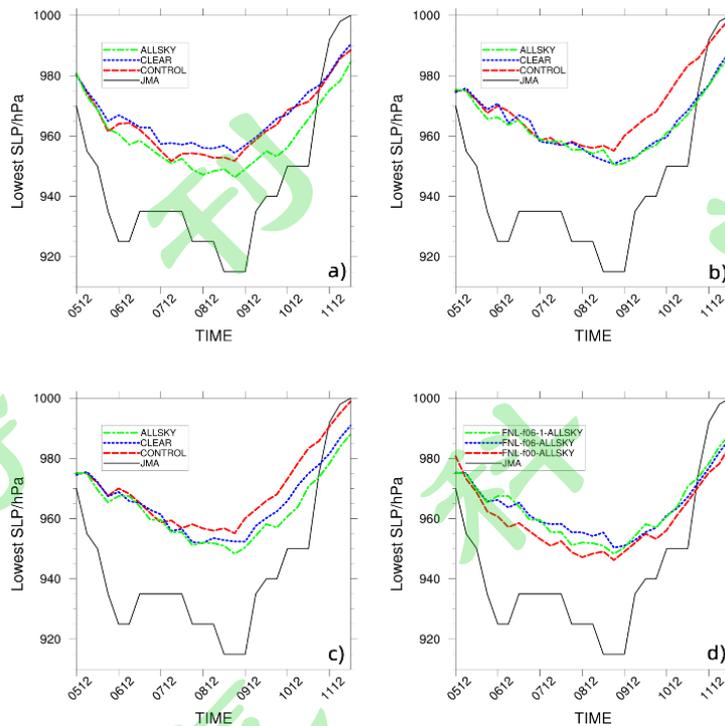
442

443

图 7 试验时间内 FNL-00 (a)、FNL-06 (b)、FNL-06-1 (c) (红色线: CON、蓝色线: CLEAR、绿色线: ALLSKY) 以及三组全天候同化试验 (d) (红色线: FNL-00-ALLSKY、蓝色线: FNL-06-ALLSKY、绿色线: FNL-06-1-ALLSKY) 的预报路径与最佳路径集的误差

Fig. 7 absolute error form FNL-00(a), FNL-06(b), FNL-06-1(c) (red line: CON expts, blue line: CLEAR expts, green line: ALLSKY expts), the tree all-sky expts(d) (red line: FNL-00-ALLSKY expts, blue line: FNL-06-ALLSKY expts, green line: FNL-06-1-ALLSKY expts)and best track data

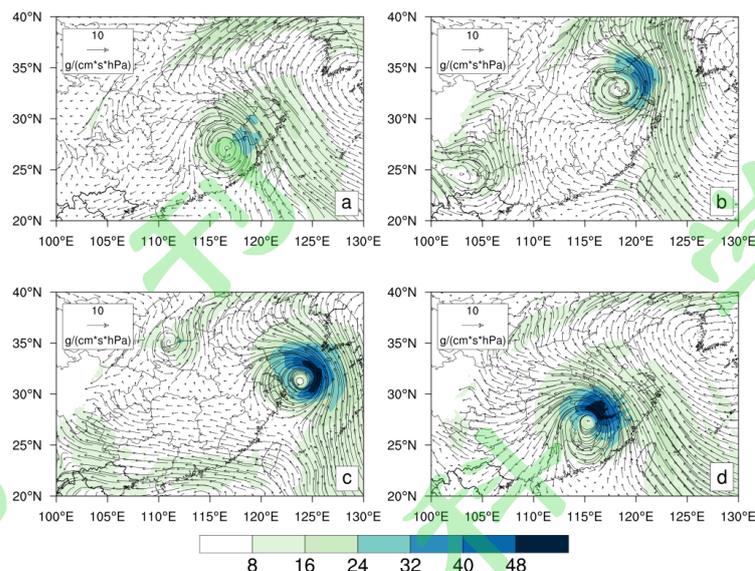
从台风强度的预报结果中可以看到 (图 8), 11 日之前各组试验都低估了台风的强度, 但强度的整体变化趋势与最佳路径保持一致。FNL-06-CLEAR、FNL-06-ALLSKY、FNL-06-1-CLEAR 以及 FNL-06-1-ALLSKY 四组同化试验相对于 FNL-06-CON 有稳定优势。而 FNL-00-ALLSKY、FNL-06-ALLSKY 以及 FNL-06-1-ALLSKY 三组全天候试验依然是呈中性偏正面的影响。整体看来, 全天候条件下同化 FY-3C/MWHS-2 资料能够一定程度提升台风强度的预报效果。



444 图 8 试验时间内 FNL-00 (a)、FNL-06 (b) 和 FNL-06-1 (c) (红色线: CON、蓝色线: CLEAR、绿色线:
 445 ALLSKY) 以及三组全天候同化试验 (d) (红色线: FNL-00-ALLSKY、蓝色线: FNL-06-ALLSKY、绿色线: FNL-06-
 446 1-ALLSKY) 的最低海平面气压
 447

448 Fig.8 lowest central sea level pressure form FNL-00(a), FNL-06(b), FNL-06-1(c) (red line: CON expts, blue line: CLEAR
 449 expts, green line: ALLSKY expts), the tree all-sky expts(d) (red line: FNL-00-ALLSKY expts, blue line: FNL-06-ALLSKY
 450 expts, green line: FNL-06-1-ALLSKY expts)

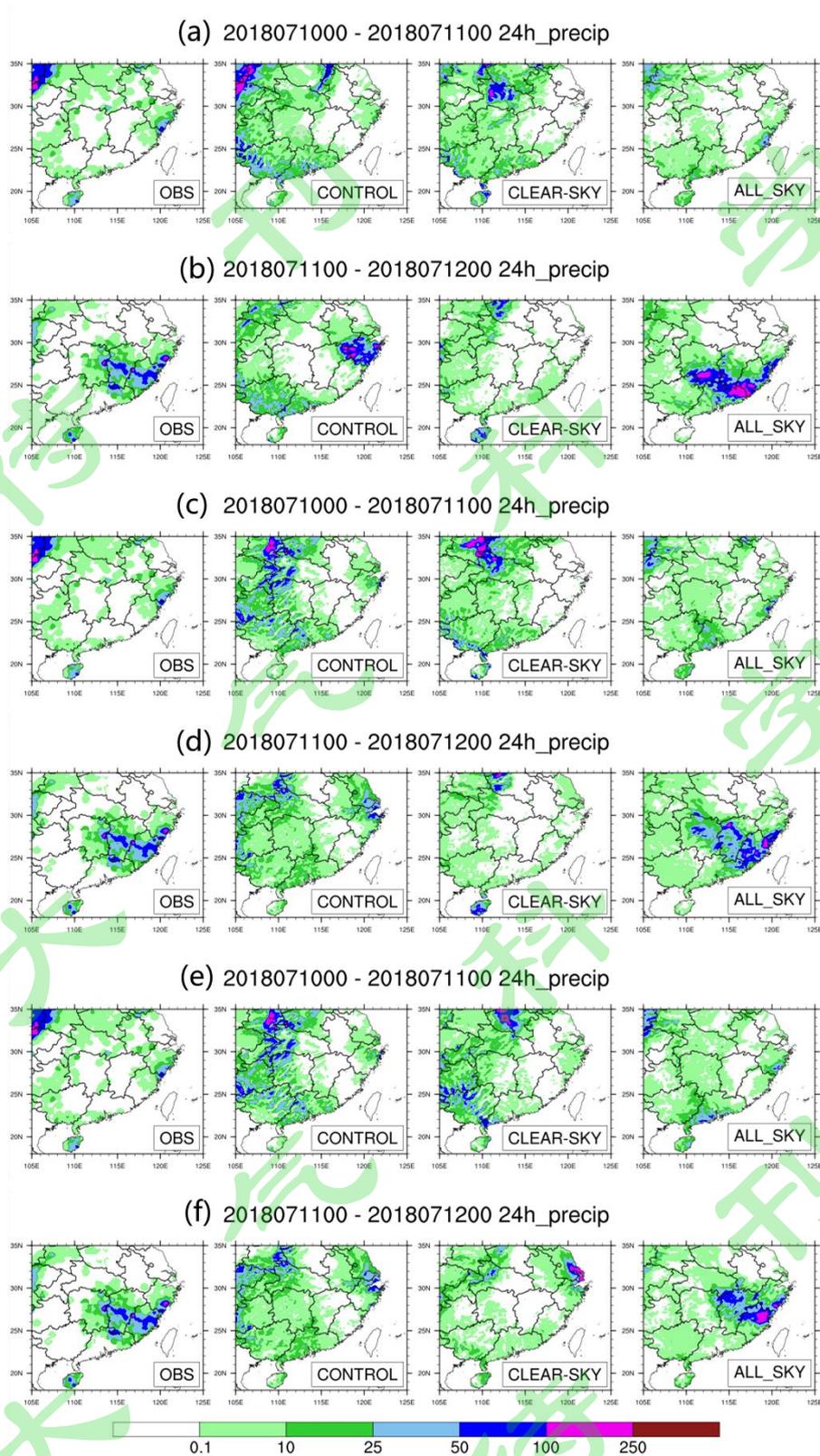
451 从水汽输送角度来看, 将 ERA5 再分析资料视作水汽通量的实况与各组试验的预报场
 452 进行对比, 2018 年 7 月 11 日 12 时, 台风“玛莉亚”东北部存在一个水汽通量大值中心
 453 (图 9a 填色), 各组试验均预报出了该中心, 但中心值均较 ERA5 数据偏大。此外, 水汽
 454 主要自东南方向从西太平洋输送到江浙一带 (图 9a 矢量), FNL-06-CON 和 FNL-06-
 455 CLEAR 中该水汽输送中心都更加偏北或偏西, 而 FNL-06-ALLSKY 试验中的水汽输送带位
 456 置与 ERA5 基本吻合, FNL-00-ALLSKY 试验情况也与此类似, 说明全天候同化试验能够
 457 改善水汽输送情况, 对于改善台风路径、强度以及累计降水预报具有重要意义, 但水汽大
 458 值中心较 ERA5 资料偏大, 也可能造成降水预报较实况偏大的情况出现。



459 图9 2018年7月11日12时700hPa ERA5 (a)、FNL-06-CON (b)、FNL-06-CLEAR (c)、FNL-06-ALLSKY (d)
460 预报水汽通量(单位: $g/(cm*s*hPa)$) 空间分布图
461

462 Fig. 9 The water vapor flux distributions at 1200 UTC 11 July 2018 from ERA5 (a), FNL-06-CON forecasts(b), FNL-06-
463 CLEAR forecasts (c), and FNL-06-ALLSKY forecasts(d) (unit: $g/(cm*s*hPa)$).
464

465 本研究使用插值后的国家站站点资料作为降水的实况与各组试验进行对比, 从 11、12
466 日两天的 24 小时累计降水图(图 10)可以看出, 降水预报的效果和台风路径的预报效果
467 类似。7月10日00时(UTC, 下同)至7月11日00时, 台风“玛莉亚”已经移动到东海
468 一带, 导致我国浙江福建等地开始出现暴雨量级的降水, 而福建省南部以及江西省等地没
469 有发生降水。7月11日00时至7月12日00时, 台风“玛莉亚”在我国福建省登陆, 并且
470 向江西省方向继续移动。这就导致福建省江西省附近, 沿台风移动方向出现了量级较强的
471 带状雨带, 并且在江西西部、福建西部以及浙江南部都出现了大暴雨量级降水。



472
473
474
475
476

图 10 2018 年 7 月 10 日和 2018 年 7 月 11 日陆地上 FNL-00 (a-b)、FNL-06 (c-d)、FNL-06-1 (e-f) 24 小时累计降水 (单位: mm)

Fig. 10 The 24-hour accumulated precipitation (unit: mm) over land on July 10th and July 11th from FNL-00 (a-b), FNL-06(c-d), FNL-06-1(e-f)

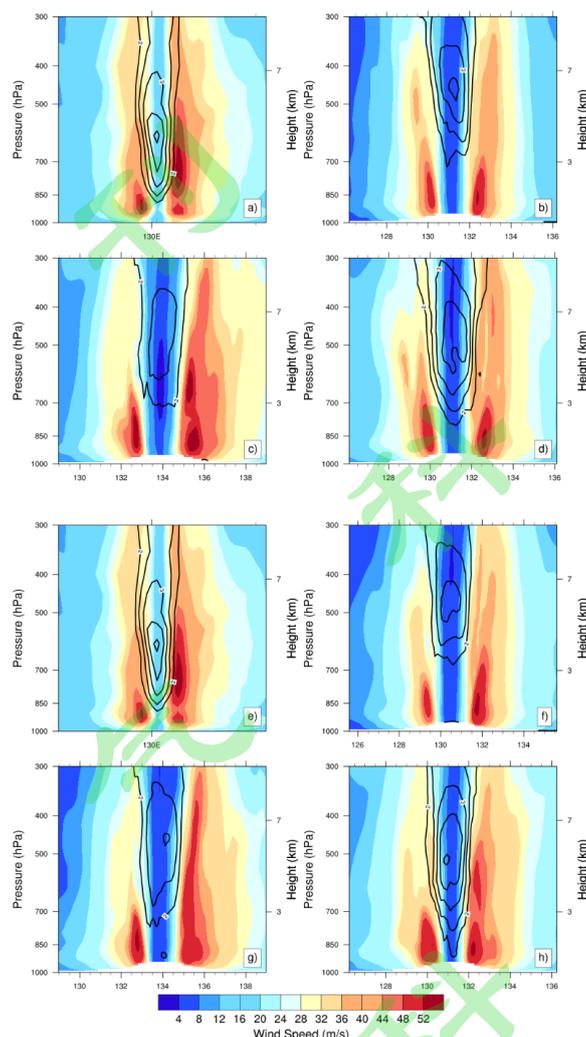
477 从图 10 中可以看到，数值模拟结果均出现较明显的虚假降水的情况。其中 FNL-06-
478 ALLSKY 的预报结果是最接近实况的，较好地将福建江西附近的带状雨带的落区和强度模
479 拟出来。三组 ALLSKY 的预报结果较其他试验表现出明显的优势，其原因除了 ALLSKY
480 对台风“玛莉亚”的路径预报效果最好外，全天候条件下同化的丰富的云雨区域的资料也
481 为改善累计降水预报效果提供支持。

482 4.2.2 台风要素场预报

483 ERA5 资料作为世界先进的数值业务中心 ECMWF 提供的国际公认质量可靠的分析场
484 资料 (Belmonte et al., 2019, Xu et al., 2019)，其在中国近海适用性较好 (李爱莲等，
485 2021)，常被用于评估高空环流的预报质量 (谢漪云等，2021)。因此，本研究选取 ERA5
486 数据作为参考，来评估各组试验对各要素场的预报情况。根据台风“玛莉亚”的强度变化
487 情况可以看到，在 9 日 12 时左右其中心气压是最低的，强度是最强的。基于此，以 9 日
488 12 时各组试验预报的“玛莉亚”的中心为基准，作东西向 (各 5 个经度距离) 垂直剖面
489 图。三组试验的预报效果依然与台风路径的预报效果基本一致，为研究 FNL 6 小时预报场
490 资料的预报效果更佳的原因，以 FNL-00 和 FNL-06 试验组为例，图 11 中黑色等值线为台
491 风中心垂直方向上的纬向温度距平，填色则为台风中心纬度的风场分布情况，其中温度距
492 平是通过计算模式区域内格点温度减去纬向方向上各格点的平均值之差 (曾智华等，
493 2009)，再除以纬向方向上各格点的标准差得到的。

494 从 ERA5 的数据结果 (图 11a) 中可以看到，台风“玛莉亚”中心存在一个较明显的
495 正距平中心，说明其暖心结构强度较强，且中心位于 500hPa 以下位置。六组试验的预报结
496 果均能显示该暖心结构，而 FNL-00-CON (图 11b)、FNL-00-CLEAR (图 11c)、FNL-00-
497 ALLSKY (图 11d)、FNL-06-CON (图 11f) 和 FNL-06-CLEAR (图 11g) 的预报结果中，
498 正温度距平中心强度偏弱，且暖心结构位置偏高。FNL-06-ALLSKY 则较好地模拟了该暖
499 心结构的位置，且中心温度也与 ERA5 更为接近。

500 此外，台风中心存在一个垂直方向的低风速区域 (图 11a)，其周围出现风速大值区，
501 并且大风区域的高度延伸也较高。六组试验均模拟出了台风中心周围明显对称的风场结
502 构，但中心区域的风速普遍较 ERA5 偏低。并且最大风速区域 (即风速大于 52m/s) 偏
503 低，范围偏小，这也是各组实验的台风强度预报结果偏弱的原因之一。而 FNL-06-
504 ALLSKY (图 11d) 则更好的预报了台风中心以东大风区域的梯度，并且大风区域的高度
505 也与 ERA5 数据更为接近。



506

507

508

509

510

511

512

图 11 2018 年 7 月 9 日 12 时 (UTC) ERA5 (a, e)、FNL-00-CON (b)、FNL-00-CLEAR (c) 和 FNL-00-ALLSKY (d)、FNL-06-CON (f)、FNL-06-CLEAR (g) 和 FNL-06-ALLSKY (h) 预报场的温度距平 (黑色实线, 等值线间隔: 0.5°C) 和风速 (填色, 单位: m/s)

Fig. 11 The west-east cross sections of temperature anomalies (black line, interval: 0.5°C) and horizontal wind speed(contour;unit: m/s) at 1200 UTC 9 July from the forecast of ERA5(a), FNL-06-CON(b), FNL-06-CLEAR(c) and FNL-06-ALLSKY(d)

513

514

515

516

517

518

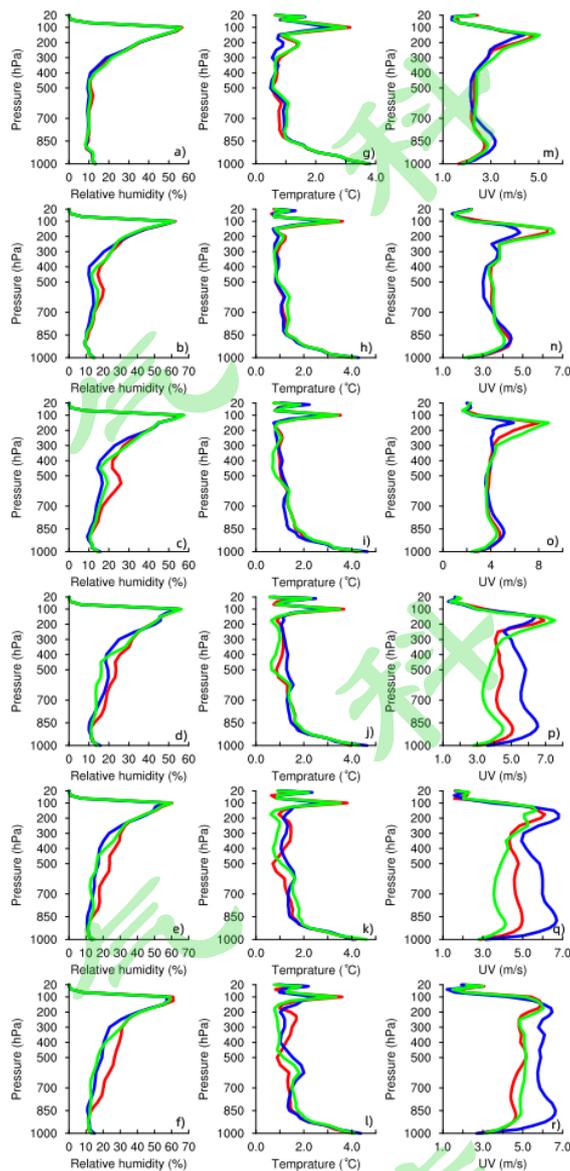
519

520

521

为了能够定量地分析各组试验的预报效果, 以 ERA5 再分析数据作为参考, 分别计算了台风“玛莉亚”移动区域 ($110^{\circ}\text{E}-145^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$) 内, 7 月 6 日至 7 月 11 日的日平均温、湿、风场预报结果的均方根误差 (root mean square error, RMSE)。从图 11 中可以看到, 同化试验 FNL-06-CLEAR 和 FNL-06-ALLSKY 较控制实验 FNL-06-CON 有效改善了湿度场的预报。随着预报时效的增加, 对湿度场的正面影响逐渐从 300hPa 高度层向下传递到 850hPa 高度层, 最大改善接近 10%(图 12a-f)。并且, 随着预报时效的增加, 两组同化试验也逐渐改善了 500hPa 到 150hPa 高度层温度场的预报, 而 500hPa 以下高度层 FNL-06-ALLSKY 却出现了负面影响 (图 12g-l)。此外, FNL-06-ALLSKY 对风速预报的提高逐渐在 350hPa 以下高度层体现, 这种正面影响到 7 月 11 日停止。而 FNL-06-CLEAR 却逐渐

522 表现出较为明显的负效应（图 12m-r）。整体来说，FNL-06-ALLSKY 有效且持续地改善了
 523 台风周围湿度场的预报，而对中高层温度场和中低层风场预报有一定改善。FNL-00-
 524 ALLSKY（图略）对台风移动区域要素场的影响和 FNL-06-ALLSKY 类似，但其 500hPa 以
 525 上高度层的湿度场 RMSE 依然略偏大，对 400hPa 以下高度层温度场产生的负面影响也偏
 526 大，而对风场的正面影响也整体不如 FNL-06-ALLSKY。这种台风周围物理场的预报误差
 527 可能是 FNL-00-ALLSKY 台风路径预报误差更大的原因之一。



528
 529 图 12 2018 年 7 月 6 日至 7 月 11 日 FNL-06 基于 ERA5 资料的湿度 (a-f)、温度 (g-l)、(m-r) 风场预报的平均均方
 530 根误差垂直廓线图 (红色线: FNL-06-CON, 蓝色线: FNL-06-CLEAR, 绿色线: FNL-06-ALLSKY)

531 Fig. 12 The vertical mean RMSEs of relative humidity(a-d), temperature(e-h), wind forecasts versus the ERA5 data from
 532 July 6th to July 9th (red line: FNL-06-CON, blue line: FNL-06-CLEAR, green line: FNL-06-ALLSKY)

533 **5 总结与讨论**

534 为了实现全天候条件下微波湿度计观测资料在同化系统中的有效应用，进一步增加我
535 国风云卫星观测资料的利用率，提高数值天气预报对台风等重大天气过程的预报准确率，
536 本文基于全天候同化理论，使用扩展后的 WRFDA 系统中卫星辐射同化模块，分析检验同
537 化 FY-3C/MWHS-2 对台风“玛莉亚”预报结果产生的影响。得到以下结论：

538 本研究通过质量控制和偏差订正，确保了进入同化系统资料的客观准确性，有效减小
539 了观测背景误差，提高了分析场质量。此外，全天候条件下的数据利用率较晴空条件下更
540 高，丰富的云雨区域观测资料的使用，对提高台风的预报效果有显著的积极作用。

541 相对使用 FNL 分析场数据作为初（边）值数据，使用 FNL 6 小时预报场数据时同化
542 FY-3C/MWHS-2 观测资料对台风“玛莉亚”的预报结果改善更加明显，其原因可能与驱动
543 场影响有关。全天候条件下同化更多扫描轨道数据，提高了台风“玛莉亚”的预报准确
544 率，而晴空条件下反而增加了预报误差。说明，有效利用更多的云雨区域观测资料对于提
545 高台风等重大天气的预报准确率有重要作用。

546 全天候同化试验相较晴空同化试验和控制试验，能够更好地模拟台风“玛莉亚”的垂
547 直方向上的暖心结构以及风场结构，并且一定程度减小了台风“玛莉亚”周围湿度场，温
548 度场、风场的预报误差，这对于提高台风移动路径、强度以及降水的预报有积极作用。

549 本研究利用 FY-3C/MWHS-2 观测资料完成了对台风“玛莉亚”的同化试验，个例预报
550 结果也表明全天候条件下同化 FY-3C/MWHS-2 观测资料对台风预报具有正面影响。而晴空
551 条件下同化 FY-3C/MWHS-2 多条扫描轨道观测资料会产生负面影响，同化一条轨道却能够
552 有效改善该误差，未来可以从模式动力过程入手，尝试使用更加先进的同化方案以及集合
553 变分混合同化方法来详细地研究该误差产生的原因。在模拟范围较大的前提下，目前受到
554 计算资源限制，模式分辨率设为 15km，未来考虑提高模式分辨率后进行同化分析及预报试
555 验。此外，除全天候同化试验外，本研究台风路径预报误差整体依然偏大，未来将引入涡
556 旋初始化问题进行进一步研究。

557 风云三号 D 星（我国第二代极轨气象卫星）和风云三号 E 星（全球第一颗民用黎明轨
558 道气象卫星）所搭载的 MWHS-2 仪器均为继承载荷，其配置与 C 星相同，却能够提供不同
559 扫描轨道的观测信息（Carminati et al., 2021, Zhang et al., 2022）。FY-3C、FY-3D 以及 FY-
560 3E 三星组网运行，能够在每 6 小时的同化窗区内提供覆盖全球的观测数据，这将对提高快
561 速演变的天气系统的预报准确率有显著影响（Zhang et al., 2022）。而在未来的研究当中可
562 以将本研究中的全天候同化技术推广应用于 FY-3D/MWHS-2 以及 FY-3E/MWHS-2 上，实
563 现多星组网全天候同化，这也将是我们未来的主要研究方向。

564
565
566
567
568

569 参考文献

- 570 Auligné T, McNally A P, Dee D P. 2007. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical
571 weather prediction system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of
572 the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography , 133(624): 631-642.
- 573 Baordo F, Geer A J, English S. 2012. SSMI/S radiances over land in the all-sky framework: One year
574 report[M]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- 575 Bauer P, Moreau E, Chevallier F, et al. 2006. Multiple-scattering microwave radiative transfer for data
576 assimilation applications[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of
577 the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography, 132(617): 1259-1281.
- 578 Bauer P, Geer A J, Lopez P, et al. 2010. Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I:
579 Implementation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(652): 1868-1885.
- 580 Belmonte Rivas M, Stoffelen A. 2019. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases
581 using ASCAT[J]. Ocean Science, 15(3): 831-852.
- 582 Cardinali C. 2010. Adjoint diagnostics of data assimilation systems[J]. This volume.
- 583 Carminati F, Atkinson N, Candy B, et al. 2021. Insights into the microwave instruments onboard the
584 Fengyun 3D satellite: Data quality and assimilation in the Met Office NWP system[J]. Advances
585 in Atmospheric Sciences, 38(8): 1379-1396.
- 586 Chen K, Fan J, Xian Z. 2021. Assimilation of MWHS-2/FY-3C 183 GHz Channels Using a Dynamic
587 Emissivity Retrieval and Its Impacts on Precipitation Forecasts: A Southwest Vortex Case[J].
588 Advances in Meteorology, 2021.
- 589 Chen K, Bormann N, English S, et al. 2018. Assimilation of Feng-Yun-3B satellite microwave
590 humidity sounder data over land[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 35(3): 268-275.
- 591 褚萌,雷小途,陈国民.热带气旋路径预报“真实”误差分析[J].大气科学学报,2022,45(01):22-29. Chu
592 Meng, Lei Xiaotu, Chen Guoming. 2022. Analysis of “real” errors of tropical cyclone track
593 forecasts [J]. Trans Atmos Sci(in Chinese), 45(1): 22-29.
- 594 邓伟,陈海波,马振升,等. 2009. NCEP FNL 全球分析资料的解码及其图形显示[J].气象与环境科
595 学 ,32(03):78-82.DOI:10.16765/j.cnki.1673-7148.2009.03.009. Deng Wei, Chen Haibo, Ma
596 Zhensheng et al. 2009. Decoding and Graphic Display of the NCEP FNL Global Analysis Data [J].
597 Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese),32(03):78-
598 82.DOI:10.16765/j.cnki.1673-7148.2009.03.009.
- 599 狄迪,周镭连,赖睿泽. 2022.基于风云四号成像仪云产品的视场偏差订正和影响分析[J].气象学
600 报,80(04):632-642. Di Di, Zhou Ronglian, Lai Ruize. 2022. Parallax shift effect correction and
601 analysis based on Fengyun-4A advanced imager. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 80
602 (4) :632-642

603 Derber J C, Wu W S. 1998. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis
604 system[J]. *Monthly Weather Review*, 126(8): 2287-2299.

605 董佩明,薛纪善,黄兵,等. 2008. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J]. *气象科*
606 *技*,2008(01):1-7.DOI:10.19517/j.1671-6345.2008.01.001. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing,
607 et al. 2008. Application Status and Development of Satellite Data Assimilation in Numerical
608 Weather Forecast [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2008(01):1-
609 7.DOI:10.19517/j.1671-6345.2008.01.001.

610 Eugenia,Kalnay 著. 2005. 大气模式、资料同化和可预报性[M]. 北京: 气象出版社. Kalnay E. 2003.
611 Atmospheric modeling, data assimilation and predictability[M]. Beijing: Meteorological Press (in
612 Chinese).

613 Eyre J R, Kelly G A, McNally A P, et al. 1993. Assimilation of TOVS radiance information through
614 one-dimensional variational analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,
615 119(514): 1427-1463.

616 Fabry F, Sun J. 2010. For how long should what data be assimilated for the mesoscale forecasting of
617 convection and why? Part I: On the propagation of initial condition errors and their implications
618 for data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 138(1): 242-255.

619 Geer A J, Bauer P. 2010. Enhanced use of all-sky microwave observations sensitive to water vapour,
620 cloud and precipitation[M]. Reading, UK: ECMWF.

621 Geer A J, Bauer P. 2011. Observation errors in all - sky data assimilation[J]. *Quarterly Journal of the*
622 *Royal Meteorological Society*, 137(661): 2024-2037.

623 Geer A J, Fabrizio B, Bormann N, et al. 2014. All-sky assimilation of microwave humidity
624 sounders[M]. Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

625 Geer A J, Lonitz K, Weston P, et al. 2018. All-sky satellite data assimilation at operational weather
626 forecasting centres[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(713): 1191-
627 1217.

628 谷松岩,郭杨,游然,等. 2016. 风云三号 C 星微波大气探测载荷性能分析[J]. *气象科技进展*,6(01):76-
629 82. Gu Songyan, Guo Yang, You Ran, et al. 2016. The Performance of Microwave Sounders
630 Board on FY-3C Satellite [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in*
631 *Chinese)*,6(01):76-82.

632 Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. *J.*
633 *Korean Meteor. Soc.*, 42: 129-151.

634 Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases:
635 Calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research:*
636 *Atmospheres*, 113(D13).

637 Kain J S. 2004. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update[J]. Journal of applied
638 meteorology, 43(1): 170-181.

639 Karbou F, Gérard E, Rabier F. 2010. Global 4DVAR assimilation and forecast experiments using
640 AMSU observations over land. Part I: Impacts of various land surface emissivity
641 parameterizations[J]. Weather and Forecasting, 25(1): 5-19.

642 Lawrence H, Bormann N, Geer A J, et al. Evaluation and assimilation of the microwave sounder
643 MWHS-2 onboard FY-3C in the ECMWF numerical weather prediction system[J]. IEEE
644 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(6): 3333-3349.

645 Lawrence H, Bormann N, Lu Q, et al. 2015. An evaluation of FY-3C MWHS-2 at ECMWF[J].
646 EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report, 37.

647 李爱莲,刘泽,洪新,等. 2021.台风条件下 ERA5 再分析数据对中国近海适用性评估[J].海洋科
648 学,45(10):71-80. Li Ailian, Liu Ze, Hong Xin, et al., 2021. Applicability of the ERA5 reanalysis
649 data to China adjacent Sea under typhoon condition [j]. Marine Sciences (in Chinese) ,45(10):71-
650 80.

651 Li Y, Chen K, Xian Z. 2021. Evaluation of All-Sky Assimilation of FY-3C/MWHS-2 on Mei-yu
652 Precipitation Forecasts over the Yangtze-Huaihe River Basin[J]. Advances in Atmospheric
653 Sciences, 38(8): 1397-1414.

654 Lien G Y, Miyoshi T, Kalnay E. 2016. Assimilation of TRMM multisatellite precipitation analysis with
655 a low-resolution NCEP global forecast system[J]. Monthly Weather Review, 144(2): 643-661.

656 刘玉超,马于涛,张海粟等. 2012. 高阶高斯分布迭代的云模型及其数学性质研究[J].电子学
657 报,40(10):1913-1919. Liu Yuchao, Ma Yutao, Zhang Haili, et al. 2012. Study on Characters of
658 Cloud Model Based on High-Order Gaussian Distribution with Iterations [J]. Acta Electronica
659 Sinica (in Chinese) ,40(10):1913-1919.

660 Michele S D, Bauer P. 2006. Passive microwave radiometer channel selection
661 based on cloud and precipitation information content[J]. Quarterly Journal of the Royal
662 Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical
663 oceanography, 132(617): 1299-1323.

664 Mukul Tewari N, Tewari M, Chen F, et al. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA
665 land surface model in the WRF model (Formerly Paper Number 17.5)[C]//Proceedings of the 20th
666 Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather
667 Prediction, Seattle, WA, USA. 14.

668 Nakanishi M, Niino H. 2006. An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and
669 application to a regional prediction of advection fog[J]. Boundary-Layer Meteorology, 119(2):
670 397-407.

671 Ohring G, Bauer P. 2011. The use of cloud and precipitation observations in data assimilation[J].
672 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(661): 1933-2046.

673 Parrish D F, Derber J C. 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation
674 analysis system[J]. Monthly Weather Review, 120(8): 1747-1763.

675 Peitgen H O, Jürgens H, Saupe D, et al. 1990. Fractals: An Animated Discussion. Videocassette[J].

676 Rabier F. 2005. Overview of global data assimilation developments in numerical weather-prediction
677 centres[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric
678 sciences, applied meteorology and physical oceanography, 131(613): 3215-3233.

679 Simmons A J, Hollingsworth A. 2002. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather
680 prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric
681 sciences, applied meteorology and physical oceanography, 128(580): 647-677.

682 Talagrand O. 1997. Assimilation of observations, an introduction (gtspecial issue\data assimilation in
683 meteorology and oceanography: Theory and practice)[J]. Journal of the Meteorological Society of
684 Japan. Ser. II, 75(1B): 191-209.

685 Wandishin M S, Stensrud D J, Mullen S L, et al. 2008. On the predictability of mesoscale convective
686 systems: Two-dimensional simulations[J]. Weather and forecasting, 23(5): 773-785.

687 Wandishin M S, Stensrud D J, Mullen S L, et al. 2010. On the predictability of mesoscale convective
688 systems: Three-dimensional simulations[J]. Monthly weather review, 138(3): 863-885.

689 王思祺,张文韬,王澄海. 2022. 不同初边界场对一次超级单体过程模拟影响的研究[J/OL].高原气
690 象:1-13. Wang Siqi, Zhang Wentao, Wang Chenghai. 2022. Effects of Initial-Boundary Conditions
691 on the Simulation of a Supercell Storm [J/OL]. Plateau Meteorology: 1-13.

692 王业桂,张斌,蔡其发等. 2018.不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响[J].大气科
693 学,42(02):398-410. Wang Yegui, Zhang Bin, Cai Qifa et al. 2018. Effects of assimilating
694 microwave remote sensing data of different satellite on the simulation of typhoon track [J].
695 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 398-410

696 Xian Z, Chen K, Zhu J. 2019. All-sky assimilation of the MWHS-2 observations and evaluation the
697 impacts on the analyses and forecasts of binary typhoons[J]. Journal of Geophysical Research:
698 Atmospheres, 124(12): 6359-6378.

699 谢漪云,王建捷. 2021. GRAPES 千米尺度模式在西南复杂地形区降水预报偏差与成因初探[J].气
700 象学报,79(05):732-749. Xie Yiyun, Wang Jianjie. 2021. Preliminary study on the deviation and
701 cause of precipitation prediction of GRAPES kilometer scale model in southwest complex terrain
702 area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese) ,79(05):732-749.

703 Xu X, Frey S K, Boluwade A, et al. 2019. Evaluation of variability among different precipitation
704 products in the Northern Great Plains[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 24: 100608.

705 薛纪善. 2009. 气象卫星资料同化的科学问题与前景[J]. 气象学报, 67(6): 903-911. Xue Jishan.
706 2009. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data [J]. Acta
707 Meteorologica Sinica (in Chinese) , 67(6): 903-911.

708 杨军,咸迪,唐世浩.2018. 风云系列气象卫星最新进展及应用[J].卫星应用,2018(11):8-14. Yang Jun,
709 Xian Di, Tang Shihao. 2018. Latest progress and application of FengYun satellites [J]. Satellite
710 Application (in Chinese), 2018(11):8-14.

711 袁有林,杨秀洪,杨必华,等. 2017. 不同初始场及其扰动对 WRF 模拟暴雨的影响[J].沙漠与绿洲气
712 象,11(01):67-75. Yuan Youlin, Yang Xiuhong, Yang Bihua, et al. 2017. Effects of Different Initial
713 Fields and Initial Perturbations on Simulation of a Heavy Rainfall by WRF [J]. Desert and Oasis
714 Meteorology (in Chinese),11(01):67-75.

715 曾智华,陈联寿,王玉清,等.2009.2006 年超级台风“桑美”强度与结构变化的数值模拟研究[J].气象
716 学报,67(05):750-763. Zheng Zhihua, Chen Lianshou, Wang Yuqing et al., 2009. A numerical
717 simulation study of super Typhoon Saomei (2006) intensity and structure changes [J]. Acta
718 Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(05):750-763.

719 Zhang Peng, Hu Xiuqing, Lu Qifeng,Aijun et al. 2022. FY-3E:The First Operational Meteorological
720 Satellite Mission in an Early Morning Orbit[J].Advances in Atmospheric Sciences ,39(01):1-8.

721 张飞民,王澄海. 2014. 利用 WRF-3DVAR 同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验[J].高
722 原气象,33(03):675-685. Zhang Feiming, Wang Chenghai. 2014. Experiment of Surface-Layer
723 Wind Forecast Improvement by Assimilation Conventional Data with WRF-3DVAR [J]. Plateau
724 Meteorology (in Chinese),33(03):675-685.

725 张懿,陈军辉,唐斌雁,等. 2020. 基于两种再分析资料的一次四川盆地大气污染过程气象要素数值
726 模拟研究[J].环境科学学报,40(09):3093-3102.DOI:10.13671/j.hjkxxb.2020.0135. Zhang Yi,
727 Chen Junhui, Tang Banyan, et al. 2020. Numerical simulation of meteorological elements of a
728 pollution episode in Sichuan Basin based on two reanalysis datasets [J]. Acta Scientiae
729 Circumstantiae (in Chinese) ,40(09):3093-3102.DOI:10.13671/j.hjkxxb.2020.0135.

730 Zhu Y, Liu E, Mahajan R, et al. 2016. All-sky microwave radiance assimilation in NCEP's GSI analysis
731 system[J]. Monthly Weather Review, 144(12): 4709-4735.