

# 往返平飘式探空在 CMA-MESO 三维变分中的同化及对模式预报的影响\*

王金成<sup>1,2</sup>, 王丹<sup>1,2</sup>, 王瑞文<sup>1,2</sup>, 谭娟<sup>3</sup>, 容娜<sup>4</sup>

1 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

2 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081

4 新疆克拉玛依气象局, 克拉玛依 834000

**摘要:** 往返平飘式探空通过一次探空气球施放实现“上升段-平飘段-下降段”三段观测, 其下降段能实现在 06UTC 和 18UTC 时刻自动垂直加密观测大气, 具备提升区域高分辨率快速同化循环预报系统在 06UTC 和 18UTC 时刻的预报技巧潜力。为了实现往返平飘式探空在区域高分辨率模式中的同化, 分析其对预报的影响, 本文初步提出了“选取模式层最接近观测”的垂直稀疏化方法来预处理资料, 深入分析了稀疏化对同化效果的影响, 论证了资料垂直稀疏化对于同化应用的必要性; 在此基础上, 开展了为期 1 个月的批量同化影响试验, 着重分析了往返平飘式探空在长江中下游区域的组网观测对 CMA-MESO 模式预报技巧的影响。稀疏化敏感性试验结果表明, 同化不稀疏化的往返平飘式探空相比同化传统业务探空, 分析和预报误差显著增加, 降水预报评分也显著降低, 相反, “选取最接近模式层”数据的垂直稀疏化方案能提高模式的分析和预报技巧, 表明往返平飘式探空同化前必须进行垂直稀疏化。批量同化试验结果表明, 在冷启动时刻(00UTC 和 12UTC, 为常规探空释放时刻), 同化往返平飘式探空(上升段)相对同化传

\* 国家重点研发计划(2018YFC1506205)资助

---

27 统业务探空，分析误差和预报误差变化较小。但在暖启动时刻（03UTC、06UTC、  
28 09UTC、15UTC、18UTC、21UTC，无常规探空释放时刻），增加往返平飘式探空  
29 下降段数据，相比控制试验，分析场精度提高了约 0.4%。此外，0-12h 累积降水  
30 预报的 ETS 评分变化较小，但 12-24h 累积降水预报在 0.1 mm、1.0 mm、5.0 mm、  
31 10.0 mm 以及 25.0 mm 量级降水 ETS 评分提高约 0.5%，50.00 mm 量级的降水 ETS  
32 评分提高约 2.3%。总体而言，同化往返平飘式探空对于区域高分辨率快速同化  
33 循环预报系统在暖启动时刻的降水预报技巧有正贡献。

34

35 **关键词：**往返平飘式探空，CMA-MESO，垂直稀疏化，三维变分，资料同化

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  
62

# The assimilation of round-trip horizontal drift radiosonde data in CMA-MESO 3DVar and its impact on model forecast

WANG Jincheng<sup>1,2</sup>, WANG Dan<sup>1,2</sup>, WANG Ruiwen<sup>1,2</sup>, TAN Juan<sup>3</sup>, RONG Na<sup>4</sup>

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological  
Sciences, Beijing 100081

3 CMA Institute for Development and Programme Design, Beijing 100081

4 Karamay Meteorological Bureau, Karamay 834000

## **Abstract:**

The round-trip horizontal drift radiosonde can do the three-stage observation of 'ascending-drifting-descending stages' by releasing a sounding balloon at only once time. In particular, the descending stage increases the vertical observation of the atmosphere at 06UTC and 18UTC respectively, which has the potential to significantly improve the prediction skills of the regional high-resolution rapid assimilation cycle prediction system at 06UTC and 18UTC. In order to realize the assimilation of the round-trip horizontal drift sounding in the high-resolution regional model and analyze its impacts on the forecast, one vertical thinning method by 'selecting the closest observation according to the model layer' for assimilation is preliminarily proposed, and the influence of this thinning method on model analysis is deeply analyzed. On this basis, a one-month batch assimilation impact experiments are carried out by using the networked observations in the middle and lower reaches

---

86 of the Yangtze River and the impacts on model forecasts are detailed investigated.  
87 The results of the thinning sensitivity tests show that compared with the assimilation  
88 of traditional operational soundings, the analysis and prediction root mean squared  
89 errors (RMSE) of the assimilation of non-thinning round-trip horizontal drift  
90 radiosonde observations are significantly increased, and the precipitation prediction  
91 scores are also significantly declined. On the contrary, the performance of analysis  
92 and prediction fields are improved by assimilating the data after thinning, which  
93 indicate that the vertical sparsity of round-trip horizontal drift radiosonde observations  
94 must be carried out before assimilation. The results of batch experiments show that at  
95 the cold start time (00UTC and 12UTC, time with conventional radiosonde), the  
96 assimilation of round-trip horizontal drift sounding (ascending stage) observations has  
97 little change in analysis error and prediction error than assimilation of traditional  
98 operational radiosonde data. At the warm start time (03UTC, 06UTC, 09UTC, 15UTC,  
99 18UTC, 21UTC, time without conventional radiosonde), compared with the control  
100 experiment, the accuracy of the analysis field is improved by about 0.4 % by  
101 assimilating the descending section of the horizontal drift sounding data . The ETS  
102 scores of the 12-hour cumulative precipitation forecast of 0-12 hours change little,  
103 and the ETS scores of the 12-hour cumulative precipitation forecast at 0.1 mm, 1.0  
104 mm, 5.0 mm, 10.0 mm and 25.0 mm threshold increase by about 0.5 %. Moreover, the  
105 ETS scores at 50.00 mm threshold increased by about 2.3 %. All above results show  
106 that the round-trip horizontal drift sounding must be thinned before assimilation, and  
107 the assimilation of the round-trip horizontal drift sounding can improve the  
108 precipitation forecast skill of the regional high-resolution rapid assimilation cycle  
109 forecast system at the warm start time.

110 **Key words:** Round-trip horizontal drift radiosonde, CMA-MESO, Vertical Thinning  
111 Scheme, 3DVar, Data Assimilation

112  
113  
114  
115

116

117

118

## 119 1. 引言

120 探空观测是目前全球唯一能够同时直接观测高空大气质量场（气压、温度、  
121 湿度）和运动场（风场）的观测系统，并且其资料质量稳定可靠、垂直分辨率高  
122 （于晓晶等, 2018），使其成为了数值同化应用的基础核心观测资料(Radnóti et al.,  
123 2012; 郝民等, 2014; Ingleby et al, 2016)。在资料同化中，探空资料还是卫星辐  
124 射率和飞机报温度等资料偏差订正的锚定资料（Cucurull et al, 2014; 王瑞文等,  
125 2017; 吴琼等, 2020）。但受限于人力物力，全球约三分之二的探空仍采用每日定  
126 常 00 时和 12 时(世界时，下同)两次的传统观测模式（Choi et al, 2015），时间  
127 分辨率低，且远不能满足中小尺度灾害天气系统的监测和预测需求。为此，近年  
128 来我国在汛期或重大天气过程中启用了 06 时探空加密观测模式，并且实现了探  
129 空加密观测在区域高分辨率模式中的同化应用（高笃鸣等, 2018; 王丹等, 2019;  
130 李秋阳等, 2022），显著提高了区域模式在 06 时起报的强降水预报技巧。但是，  
131 06 时探空加密观测成本巨大，不能维持长久观测。为了在不显著增加成本的情  
132 况下，实现对 06 时和 18 时探空的连续观测，满足数值天气预报对探空观测的需  
133 求，提高数值天气预报对中小尺度灾害性天气的预报技巧，中国气象局气象探测  
134 中心创新性地提出了往返平飘式探空探测技术和观测模式，即通过一次探空气球  
135 施放，获取“上升段 1h-平飘段 4h-下降段 1h”三段观测（曹晓钟等, 2019），实  
136 现了探空观测的间接时空加密，获得的探测垂直廓线数量加倍，同时能获取平流  
137 层大气高频次连续观测资料。为了推动往返平飘式探空观测系统的发展，开展了  
138 模拟观测系统影响试验（Observing System Simulation Experiments, OSSEs），试验  
139 结果表明，往返平飘式探空在全国组网的情况下，其增加的下降段模拟探空观测，  
140 能够有效提高 CMA-MESO 在 06 时和 18 时起报的降水预报技巧，不同降水量级  
141 的 ETS 评分提高约 2%~5%（王瑞文等, 2023），这一结论夯实了往返平飘式探空  
142 观测站网建设的重要性。

143 自 2018 年以来，中国气象局气象探测中心在长江中下游地区建设了包含 6

144 个站的往返平飘式探空区域观测网，并于 2018 年、2019 年和 2021 年开展了不  
145 同时间长度的区域组网观测试验，获取了大量的观测资料。王丹等（2020）针对  
146 往返平飘式探空观测特点，设计了往返平飘式探空质量控制方案，并利用 2018  
147 年试验观测数据评估了质量控制的效果，分析了往返平飘式探空各变量各阶段的  
148 不确定性，试验数据的不确定性分析结果表明往返平飘式探空探测精度达到了  
149 WMO（World Meteorological Organization）规定的突破目标，部分探测要素甚至实  
150 现了理想目标，探测资料具有良好的可用性，具备很好的应用前景，以上研究为  
151 往返平飘式探空在数值天气预报中的同化应用奠定了基础。

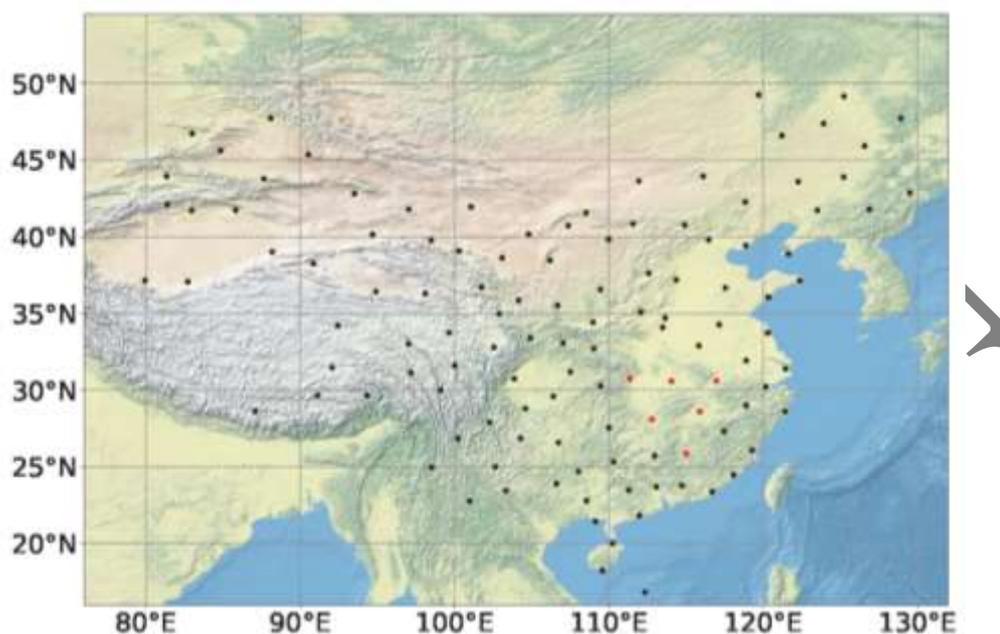
152 然而，往返平飘式探空获得的高垂直分辨率秒级观测数据的同化技术和实际  
153 试验观测数据同化对数值天气预报的影响和效益究竟如何？目前而言，这方面的  
154 研究相对较少。张旭鹏等（2021）利用 WRF（Weather Research and Forecast）模  
155 式及 WRFDA（WRF Data Assimilation）同化系统针对长江中下游一次暴雨个例开  
156 展了同化往返平飘式探空下降段数据试验，结果表明同化往返平飘式探空下降段  
157 观测数据能够提高暴雨的预报技巧。但该研究仍然采用了传统探空观测数据的稀  
158 疏化方案（李庆雷等, 2018），并未结合模式本身的垂直分层特点。为了深入认识  
159 往返平飘式探空下降段数据对数值预报的影响，并实现往返平飘式探空在数值天  
160 气预报中的业务应用，还需要更多的数值试验来评估和验证往返平飘式探空下降  
161 段观测数据同化对数值预报技巧的影响，且在同化过程中考虑资料的处理策略，  
162 特别是结合模式分层的垂直稀疏化方案。因此，本文首先结合理论分析和数值试  
163 验探讨了往返平飘式探空同化前开展垂直稀疏化的必要性，提出了一种“选取模  
164 式层最接近观测”的稀疏化方案。进而，利用 CMA-MESO 快速同化循环预报系  
165 统开展了一个月的批量试验，系统性评估了往返平飘式探空下降段资料同化对区  
166 域高分辨率数值天气预报的影响。

## 167 2. 观测资料与模式介绍

168 选取 2021 年 7 月 1 日~7 月 31 日的往返平飘式探空试验观测数据，共有 6  
169 个观测站，分别是安庆、长沙、武汉、赣州、南昌和宜昌，其位置分布如图 1  
170 所示。2021 年 7 月，每个站共计开展了 62 次往返平飘式探空观测，共成功开展  
171 下降段观测 243 次，平均单站成功实施观测约 41 次。但每次下降段的有效观测

172 数据相对上升段明显偏少，主要原因是由于在现有区域组网条件下，接收站密度  
173 不足，加之山地等因素影响导致了下降段信号丢失的高度比较高，最终导致从地  
174 面到对流层中层（500 hPa）的下降段观测较少。

175



176

177 图 1: 往返平飘式探空组网观测现状分布（红色点）与传统业务探空站点分布（黑点和  
178 红点）

179

Fig.1 Round-trip horizontal drift radiosonde network distribution (only red dots) and  
180 operational radiosonde network distribution (both red and black dots)

181

182 利用 CMA-MESO V5.1 区域快速同化循环预报系统开展往返平飘式探空同化  
183 试验，采用的同化方法是三维变分同化技术（3DVar）。该模式目前可同化的观测  
184 资料包括常规探空、地面、飞机报、船舶、云导风、雷达径向风、风廓线雷达资  
185 料以及 GPS/PW 观测。CMA-MESO V5.1 版本的同化循环间隔为 3 h，空间分辨率  
186 3 Km，垂直层次 50 层，模式层顶高 33000 m。模式积分时间步长设置为 30 s，  
187 采用 3 h 循环同化，每 12 h 冷启动一次，冷启动背景场是由美国 NCEP GFS  
188 (<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>) 模式提供的 6 小时预报场。模  
189 式技术细节可参考黄丽萍等（2022）。

---

## 190 3. 质量控制、观测误差和垂直稀疏化

### 191 3.1 质量控制

192 往返探空的质控方案包含两部分：一是采用王丹等（2020）研发的面向往返  
193 平飘式探空资料本身的质量控制方法，目的是在观测资料端对试验资料进行严格  
194 的质量控制，剔除异常数据和不能满足同化要求的数据；二是在同化系统内采用背  
195 景场检查方案对质量做进一步约束，具体方案如下：

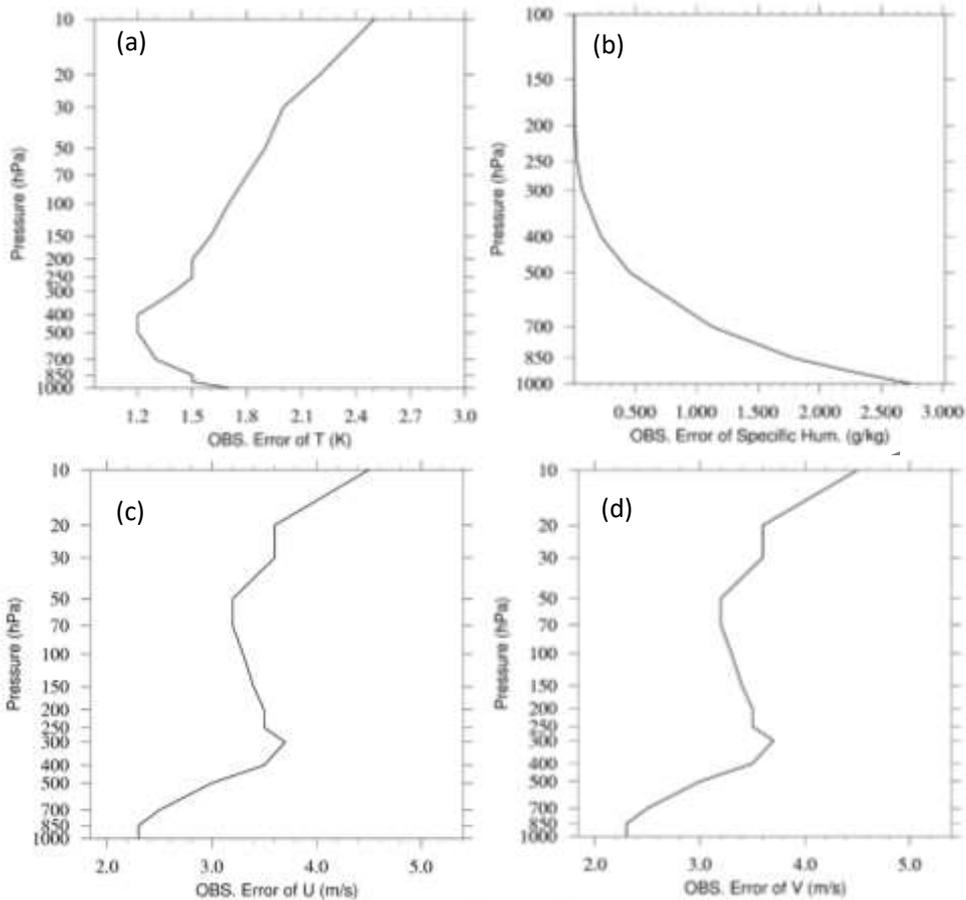
$$196 \quad [y - H(x_b)]^2 \geq \alpha(\sigma_o^2 + \sigma_b^2) \quad (1)$$

197 其中， $y$  是观测变量，在本文中为温度、气压、湿度和风； $x_b$  是分析变量的背  
198 景值； $H$  是观测算子，表示模式格点向观测点的水平和垂直插值算法； $\sigma_o$  是  
199 观测误差均方根； $\sigma_b$  是观测变量的背景误差均方根； $\alpha$  表示阈值参数。

200  $[y - H(x_b)]$  称为新息增量，一般也用 O-B 表示。当前，CMA-MESO V5.1 3DVar  
201 中的背景检查质控中没有考虑  $\sigma_b$  的影响，其中，风场的阈值参数  $\alpha=4.0$ ，温  
202 度的阈值参数  $\alpha=2.5$ ，湿度的阈值参数  $\alpha=3.5$ 。

### 203 3.2 观测误差设置

204 观测误差是变分资料同化中的核心关键参数之一，观测误差设置对模式分  
205 析场的精度具有很大的影响。由于目前往返平飘式探空只有 6 个站的区域组网  
206 观测资料，尚无法采用精度较高的 H-L 方法（王金成等，2015）估计其观测误  
207 差，但已有研究表明往返平飘式探空上升段和下降段各变量的不确定性与传统  
208 探空资料相当（王丹等，2020）。因此本研究仍然采用 CMA-MESO 3DVar 系统中  
209 业务探空资料的观测误差设置，观测误差如图 2 所示。



210

211

212 图 2: CMA-MESO\_3KM V5.1 3DVAR 同化系统中探空观测资料的观测误差, (a) 温度, (b)  
 213 湿度, (c) 纬向风, (d) 经向风

214 Fig.2 Observation error of radiosonde in 3Dvar of CMA-MESO\_3KM V5.1,  
 215 (a) Temperature (b) Humidity (c) Zonal Wind (d) Meridional wind

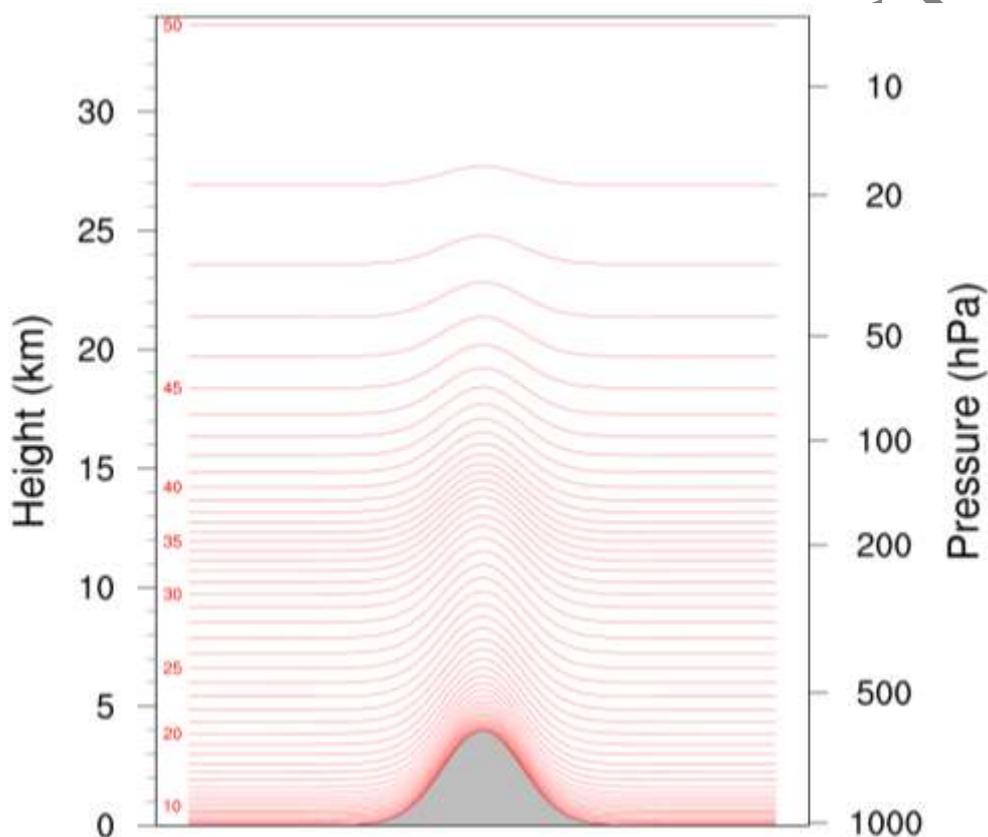
216

### 217 3.3 垂直稀疏化

218

219 往返平飘式探空同化前需要进行垂直稀疏化。一方面, 往返平飘式探空垂直  
 220 分辨率与模式分辨率差异较大。往返平飘式探空采用卫星导航定位系统 (北斗  
 221 +GPS) 定位探空所在空间位置, 其位置观测精度大幅度提高, 可以提供秒级的探  
 222 空定位和观测数据, 其上升段和下降段垂直分辨率为平均约为 15 m。目前而言,  
 223 数值模式垂直分辨率相对较低, 以 CMA-MESO V5.1 版本为例, 其垂直共有 50 层,  
 224 模式层顶高度 33000 m, 模式层厚度从地面向高空逐渐增大 (如图 3 所示), 近  
 225 地面垂直层厚度约 50m~100 m, 模式层顶附近模式层厚度增大到 6.7 km 附近。

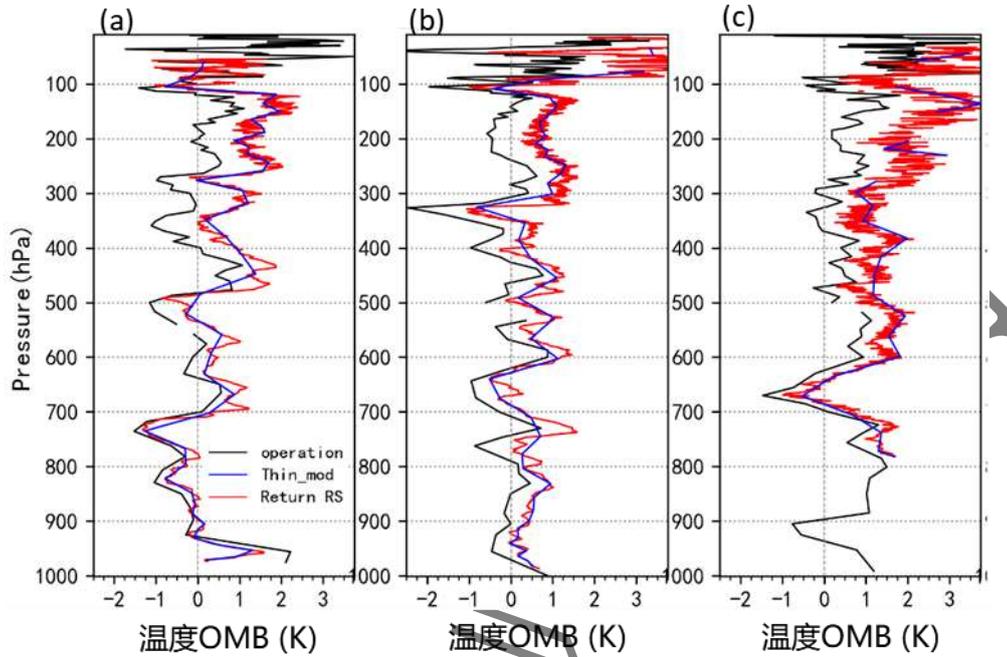
226 二者相差两个数量级。如果不对观测进行垂直稀疏化，观测中相对较高分辨率的  
227 垂直信息在模式中将被视为噪音，与模式不协调，造成模式变量间的不协调，影  
228 响预报效果，也可能引起模式积分不稳定。另一方面，往返平飘式探空高垂直分  
229 辨率观测的观测误差存在明显垂直相关性，而当前主流业务同化系统中并未考虑  
230 观测误差垂直相关的影响。因此如果往返平飘式探空不进行垂直稀疏化，将在同  
231 化系统中过高估计往返平飘式探空的作用，相当于显著减小观测误差，这将导致  
232 背景误差与实际观测误差不协调，分析增量中观测权重过高，引起分析误差增大，  
233 也会加重分析场与模式不协调，引起预报误差显著增加。



234  
235 图 3: CMA-MESO V5.1 垂直层次分布示意图 (共 50 层), 模式垂直坐标为高度地形追随坐标  
236 Fig.3 Vertical layers of CMA-MESO V5.1 Model (totally 50 layers) with height-based  
237 terrain-following coordinate

238 图 4 是宜昌、武汉和长沙站稀疏化后业务探空资料 (黑线)、原始往返平飘  
239 式探空(红线)和稀疏化后往返平飘式探空(蓝线)温度与模式背景差(Observation  
240 minus background,OMB) 的垂直廓线。从图中可以发现,往返平飘式探空原始资  
241 料的 OMB 相比业务探空和稀疏化后的往返平飘式探空 OMB,高频噪音明显较大,  
242 特别是高层;此外,往返平飘式探空原始资料 OMB 在对流层内有模式不可分辨

243 的信号，如图 4(c)中 500~700 hPa 之间，未进行稀疏化的资料（红线）明显存在  
244 很多高频信号，这些信号并不是观测噪音，而是观测中存在模式背景场无法分辨  
245 的高频信号。无论是从模式的理论特征分析，还是结合实际分析，结论均认为同  
246 化往返平飘式探空前必须进行垂直稀疏化。湿度和风场情况与温度相同(图略)。



247  
248 图 4: 探空资料温度观测与模式背景场温度的 OMB 垂直廓线，黑色为业务探空资料，红色  
249 线为往返平飘式探空原始观测资料，蓝色为往返平飘式探空稀疏化后得的资料，(a) 宜昌  
250 (57461)，(b) 武汉 (57494)，(c) 长沙 (57687)

251 Fig.4 Vertical distribution of OMB between radiosonde and model background,black lines indicate  
252 operational radisonde,red lines mean original round-trip horizontal drift radiosonde,blue lines  
253 represent round-trip horizontal drift radiosonde after thinning,(a) Yichang station,57461 (b)  
254 Wuhan station,57494 (c) Changsha station,57687

255  
256 为了更深入地理解垂直稀疏化的必要性和对预报的影响，采用数值试验方法  
257 来进一步定量化验证垂直稀疏化的重要作用。在模式物理过程和其他参数不变的情况  
258 下，初始场的精度和协调性对降水预报具有决定性作用，因此，稀疏化作用  
259 可以通过分析场误差和降水预报技巧来体现。为此设计了三组个例试验，具体试  
260 验方案如表 1 所示。本文借鉴掩星观测 (GNSS RO) 资料垂直稀疏化的常用方法，  
261 即根据模式层高度，“选取最接近每个模式层”的往返平飘式观测数据，因为该  
262 稀疏化方法能避免模式层间观测资料高频信息对模式造成初始场造成的不协调  
263 问题，因此，在 GNSS RO 折射率和弯角同化中广泛采用 (Liu et al, 2014; Wang et

264 al, 2021)。

265

266

表 1: 数值试验方案设计

267

Table1. Numerical test schemes

试验名称	试验说明
CTRL	GRAPES-MESO V5.1 业务中同化的资料, 含业务探空资料
ALL	将往返平飘式探空上升段原始资料替换相应站点的业务探空资料
THIN	将稀疏化后的往返平飘式探空上升段资料替换相应站点的业务探空资料

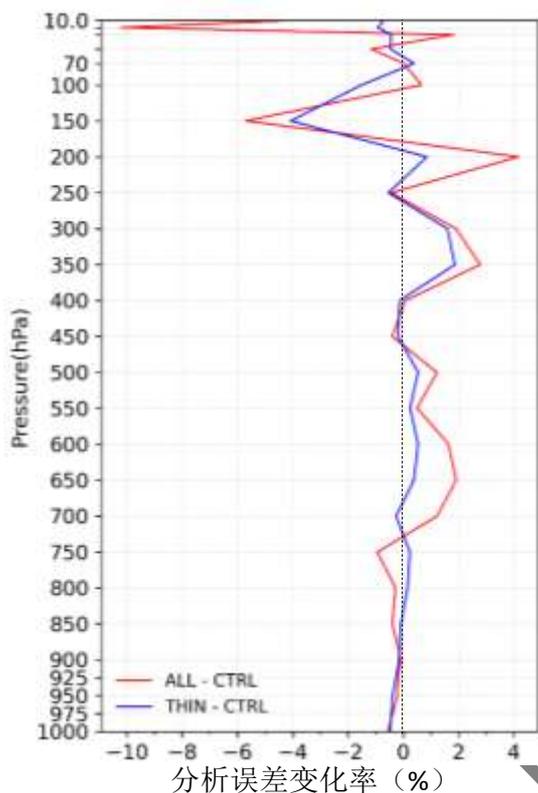
268

269 利用欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料作为参考, 计算三组试验在  
270 往返平飘式探空的组网周边区域 (20°N-37°N, 105°E-125°E) 的分析场的均方根  
271 误差, 比较三组试验分析误差的差异。图 5 是 2021 年 7 月 2 日 00 时所选区域内,  
272 试验 ALL 与 THIN 的温度分析场的均方根误差与试验 CTRL 的相对差异。从图 5 中  
273 可以发现, 试验 ALL 温度分析误差在 750~450 hPa 和 250 hPa 以上明显大于控制  
274 试验, 相对增大 2%左右, 而试验 THIN 温度分析误差与控制试验 CTRL 的分析基  
275 本相当。结果表明, 同化原始高垂直分辨率的往返平飘式探空, 分析误差会有不  
276 同程度的增大; 然而, 对往返平飘式探空进行稀疏化后, 温度分析误差会有明显  
277 减小。其他变量结果与温度变量结果相同, 在此不赘述。上述结果进一步说明往  
278 返平飘式探空高垂直分辨率资料同化前需要进行垂直稀疏化。

279 采用全国 10796 个国家级自动观测站的降水观测数据, 对上述三组试验进行  
280 降水评分检验, 降水检验区域与误差分析的区域相同。图 6 是三组试验在 2021  
281 年 7 月 2 日 00 时起报的 24 h 累积降水 ETS 评分。从图中可以发现, 试验 ALL 预  
282 报的 24 h 累积降水 ETS 评分明显低于试验 CTRL 和 THIN, 而试验 THIN 与 CTRL 预  
283 报的 24 h 累积降水 ETS 评分基本相当。该结果表明, 往返平飘式探空不进行垂  
284 直稀疏化会明显降低模式降水评分, 进一步佐证了理论分析结果, 说明往返平飘  
285 式探空这类高垂直分辨率观测资料同化前需要进行垂直稀疏化。

286 此外, “选取与模式层接近” 的往返平飘式探空观测资料用于同化的稀疏化  
287 方案效果明显, 可以用于往返平飘式探空上升段和下降段资料同化。基于此, 在  
288 CMA-MESO V5.1 3DVar 同化系统中采用该稀疏化方案, 对往返平飘式探空开展批  
289 量同化试验, 评估往返平飘式探空下降段资料对数值天气预报的影响, 为实现其

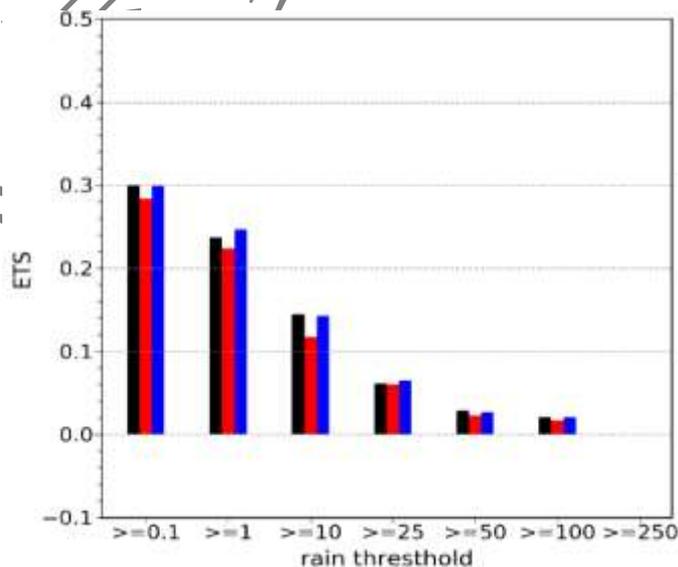
290 在业务中的应用提供量化支撑。



291

292 图5: 在区域(20°N-37°N, 105°E-125°E)内, 试验ALL(红线)和THIN(蓝线)的温度分析  
293 场的均方根误差相对于控制试验温度分析场的均方根误差改进率的垂直分布。黑色虚线是  
294 参考线。

295 Fig.5 The improvement rate of root mean square error(RMSE) of temperature analysis field of  
296 ALL test (red line) and THIN test (blue line) against control test, the verify domain is  
297 20°N-37°N, 105°E-125°E



298

299 图6: CTRL(黑色)、ALL(红色)与THIN(蓝色)三组试验的24h累积降水ETS评分, 模  
300 式起报时间为2021年7月2日00时

301 Fig.6 The 24-hour cumulative precipitation's ETS score of CTRL (black), ALL (red) and THIN (blue)  
302 tests, the model starts at 00:00 on July 2, 2021

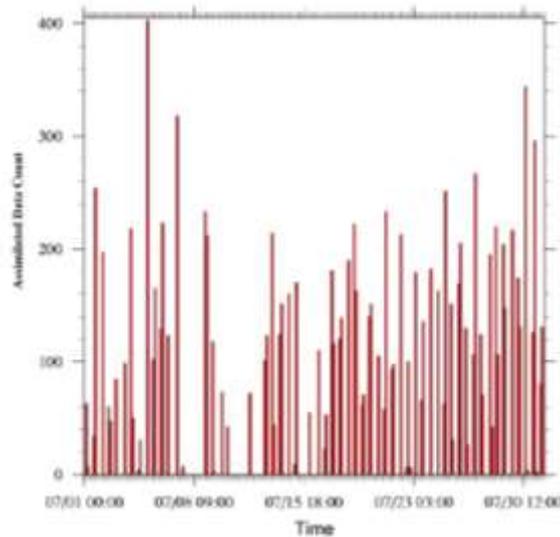
303

#### 304 4. 批量试验结果分析

305 为了明确往返探空资料同化为数值天气预报带来的效益,本文进行了 1 个月  
306 的批量试验。采用第 3 节中的质量控制、稀疏化和观测误差,利用 CMA-MESO V5.1  
307 快速循环同化预报系统,进行了 2021 年 7 月 1 日-31 日一个月的批量试验。具  
308 体试验设计分别为表 1 中的控制试验 CTRL 和影响试验 THIN。

309 对比分析 00UTC 时刻和 12UTC 时刻,同化往返平飘式探空和同化业务探空  
310 的分析和预报结果非常接近,两者差异在 0.1%以内,这从侧面表明往返平飘式  
311 探空上升段资料(00UTC 和 12UTC 对应上升段观测)的观测精度和业务探空相当。  
312 由于往返平飘式探空相比业务探空增加了下降段廓线观测,因此本研究中着重分  
313 析下降段往返平飘式探空对分析和预报的影响。

314 图 7 是 CMA-MESO V5.1 暖启动时刻(03,06,09,15,18,21UTC)同化的往返式  
315 探空观测数据量,分别对应 3 小时同化时间窗内往返平飘式探空下降段数据量。  
316 从图 7 中可以发现,经过稀疏化和质量控制后,能够同化的往返平飘段下降段数  
317 据十分有限,每 3 小时平均同化数据量仅有 64 个数据,也即相比业务探空,每  
318 天增加的数据量平均为 384 个数据,基本相当于 2 条完整探空站的同化的观测数  
319 量。经过分析,这是由于两个方面造成的:一是 7 月观测实验中 6 个站共成功下  
320 降观测仅有 243 次,也就是成功下降观测的比率为 65.3%,二是下降段观测的数  
321 据结束高度较高,平均仅到 500 hPa 附近高度。目前 CMA-MESO V5.1 的模式垂直  
322 层次设计呈现“低层密集、高层稀疏”的特点,低层探测数据不足加上稀疏化策  
323 略的影响,最终导致经过稀疏化后的观测数据量就变的十分有限。



324

325 图 7: 暖启动时刻(03,06,09,15,18,21UTC)每 3 小时同化的往返平飘式探空数据量, 包括  
326 温度、湿度、U 风和 V 风场

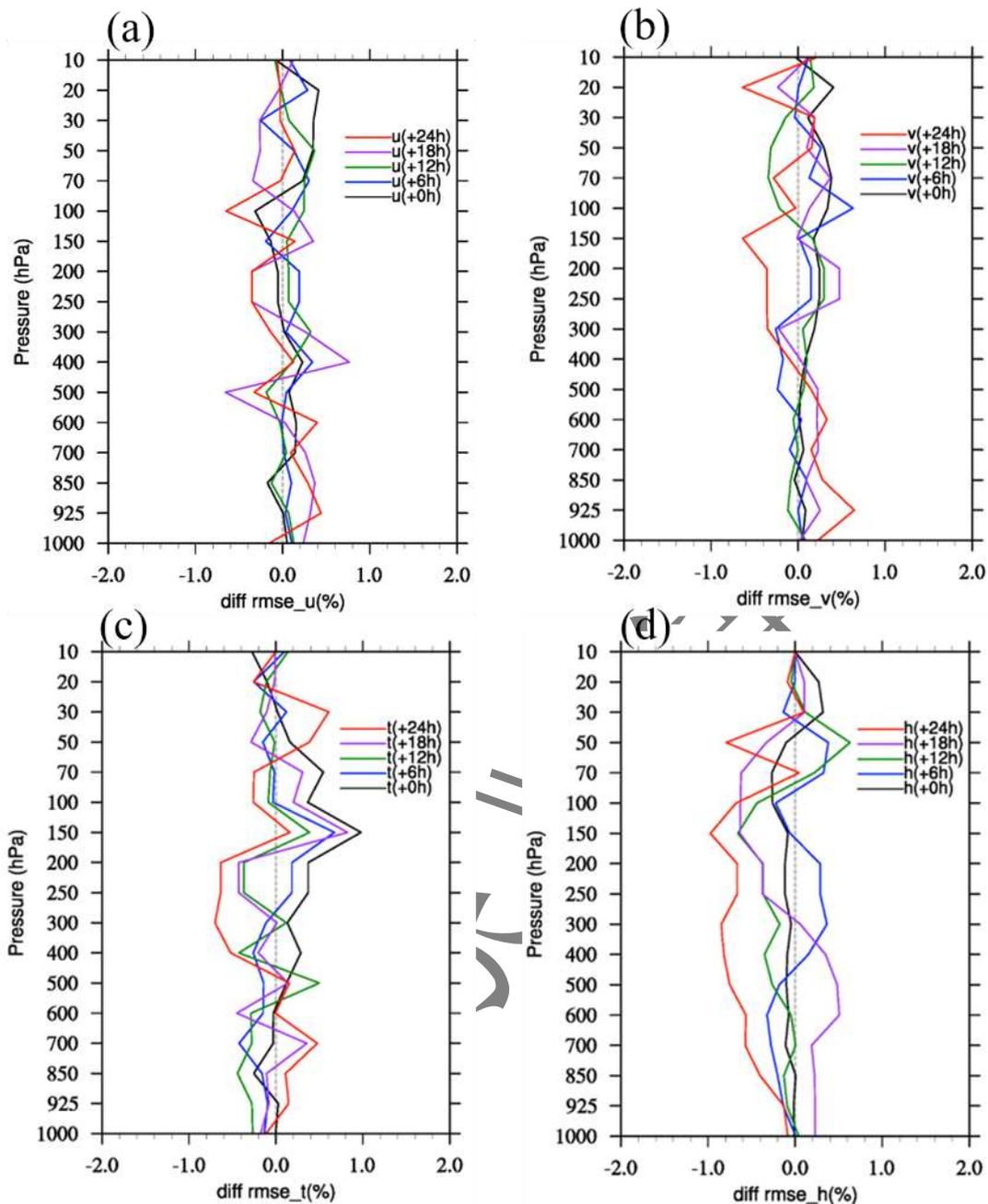
327 Fig.7 Assimilated observation number of round-trip horizontal drift sounding data every 3

328 hours in 3DVar, including temperature, humidity, U and V wind fields at warm start

329 time(03,06,09,15,18,21UTC)

#### 330 4.1 往返平飘式探空同化对高空预报的影响

331 图 8 是 06UTC 时刻试验 THIN 高空场分析和预报均方根误差相对试验 CTRL  
332 的分析和预报均方根误差的减小率, 负值表示 THIN 的均方根误差相比 CTRL 减小,  
333 正值表示 THIN 的均方根误差相比 CTRL 增大。从图中可以看出, 试验 THIN 各变  
334 量分析和预报误差与 CTRL 相比差异非常小, 差异仅在-0.5%~0.5%之间。并且试  
335 验 THIN 相比 CTRL 分析和预报误差差异较大的层次在 600 hPa 以上, 这和往返平  
336 飘式探空下降段数据主要在 500 hPa 以上有关。其他时刻结果与 06UTC 的结果十  
337 分相似, 此处图略。结果表明, 往返平飘式探空下降段对 CMA-MESO 高空场分  
338 析和预报的影响相对较小, 整体误差减小率仅为 0.1%。



339

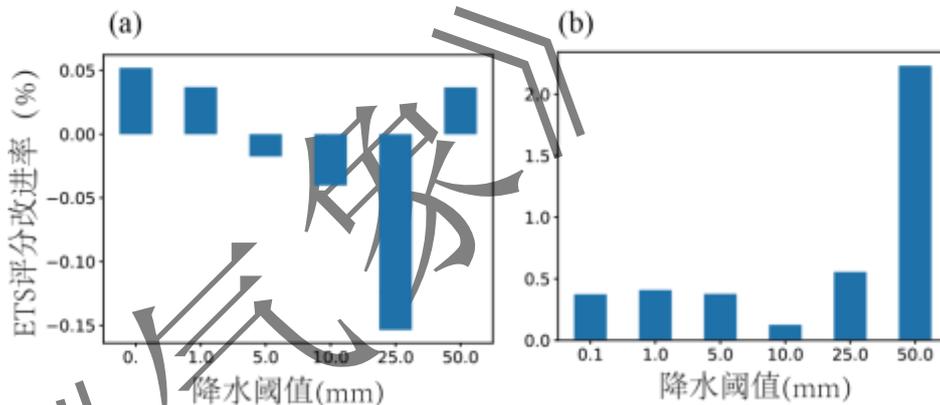
340 图 8: THIN 试验相对于 CTRL 试验的高空分析场和预报场的均方根误差减小率的垂直分布,  
 341 负值表示误差减小, 正值表示误差增大, 黑线是分析时刻, 其他颜色代表不同预报时次, 此  
 342 处为 06UTC 时刻起报结果。(a) U 风场, (b) V 风场, (c) 温度, (d) 位势高度

343 Fig.8 The vertical distribution of reduction rate of RMSE at analysis field and prediction field of  
 344 THIN test against CTRL test, a negative value indicates that the error is reduced, a positive value  
 345 indicates that the error is increased, the black line indicates the analysis time, and other colors  
 346 represent different prediction times. Model start at 06UTC, (a) U wind field, b) V wind field, (c)  
 347 Temperature, (d) Geopotential height

348

## 349 4.2 往返平飘式探空同化对降水预报的影响

350 图 9 是暖启动时刻 (03,06,09,15,18,21UTC) 起报的结果, 计算了试验 THIN  
351 预报的 12h 累积降水 ETS 评分相比试验 CTRL 的提高率, 正值表示 THIN 相比 CTRL  
352 试验降水预报技巧有提高, 负值则为降低。从图 9a 中可以发现, 暖启动时刻起  
353 报的 0-12h 累积降水, 试验 THIN 在量级为 0.1 mm, 1 mm 和 50 mm 的降水预报  
354 ETS 评分虽有改善, 但是变化幅度平均小于 0.04%, 在 5.0 mm, 10.0 mm 和 25.0  
355 mm 的降水预报 ETS 评分则略有降低, 变化幅度仅为 0.07%。总体而言, 同化往  
356 返平飘式探空 6 个站的试验数据对 0-12h 的降水预报影响非常小。查看暖启动时  
357 刻起报的 12-24 h 累积降水评分结果, 从图 9b 结果来看: 同化往返平飘式探空 6  
358 个站的试验数据对 12-24 h 累积降水预报在所有量级降水预报 ETS 评分有所增加,  
359 ETS 评分平均提高 0.7%, 特别是在 50.0 mm 降水量级, 12-24 h 降水的 ETS 评分  
360 提高 2.2%。整体而言, 往返探空资料同化的正贡献在模式暖启动的 12-24h 预报  
361 时段更为明显。



362 图 9: 试验 THIN 预报的 12h 累积降水 ETS 评分相对于试验 CTRL 的提高率, 正值表示降水预  
363 报技巧有提高, 负值则为降低, 模式暖启动时刻 (03,06,09,15,18,21UTC) 起报, (a) 0-12h  
364 累积降水预报; (b) 12-24h 累积降水预报

366 Fig.9 The improvement rate of ETS score of 12h cumulative precipitation predicted of THIN test  
367 against CTRL test. A positive value indicates an improvement in precipitation prediction skills,  
368 while a negative value indicates decline, the model start at warm time (03,06,09,15,18,21  
369 UTC), (a) 0-12h cumulative precipitation prediction; (b) 12-24h cumulative precipitation forecast

## 370 5. 小结和讨论

371 通过理论分析和个例试验, 本文论证了往返平飘式探空同化前必须进行垂直

372 稀疏化，并初步提出了“选取模式层最近观测数据”的稀疏化方法。利用  
373 CMA-MESO V5.1 快速循环同化预报同，开展了 2021 年 7 月 1 日-2021 年 7 月 31  
374 日为期一个月的同化预报影响试验，重点分析了同化 2021 年 7 月长江中下游 6  
375 个试验站网的下降段观测数据对 CMA-MESO V5.1 暖启动时刻分析和预报的影响。  
376 主要结论如下：

377 (1) 无论从理论分析还是实际同化角度，往返平飘式探空同化前需要进行  
378 垂直稀疏化。“选取距离模式层最接近的观测”是一种相对简洁、有效的稀疏化  
379 方案。

380 (2) 由于试验数据在下降段相对较少，同化增加的观测数量相对有限。具  
381 体表现为：2021 年 7 月长江中下游地区往返平飘式探空试验观测数据下降段成  
382 功观测率约为 65%，下降段观测的结束高度较高，经过稀疏化和质量控制，相比  
383 业务探空，平均每天同化数据量增加 384 个数据，仅相当于 2 条上升段廓线数量。

384 (3) 在同化往返平飘式探空资料量相对稀少的下降段观测数据条件下，对  
385 暖启动时刻高空场的分析和预报影响相对较小，误差变化率在-0.5%~0.5%之间。

386 (4) 在同化往返平飘式探空资料量相对稀少的下降段观测数据条件下，暖  
387 启动时刻 0-12 h 累积降水 ETS 评分变化较小（略减小 0.07%），12-24 h 不同量级  
388 累积降水 ETS 评分均有提高，平均提高 0.7%，50.0 mm 以上降水 ETS 评分提高  
389 2.2%。

390 上述研究结果表明，在目前观测试验下降段资料量有限和当前稀疏化策略下，  
391 尽管同化往返平飘式探空的下降段观测数据量有限，但是还能在一定程度上提高  
392 高分辨率区域模式的降水预报技巧。结合往返平飘式探空观测系统模拟试验  
393 (OSSEs)结果(王瑞文等, 2023)，一旦实现往返平飘式探空组网观测，CMA-MESO  
394 快速循环同化预报系统暖启动时刻的降水预报技巧还能更为进步。

395 目前而言，往返平飘式探空还未完全发挥在数值天气预报方面的效益，在观  
396 测和同化技术角度还有很多方面需要改进，主要包括三个方面：

397 (1) 提高往返平飘式探空下降段观测成功率，布设更为完备的信号接收网，  
398 尽可能的接收到下降段探空从高空到地面的完整的廓线观测数据；

399 (2) 研发更优的垂直稀疏化方案，最大限度的提高同化往返平飘式数据量，  
400 从而同化更多的下降段数据。在导航卫星掩星观测同化中，已有学者提出了较好

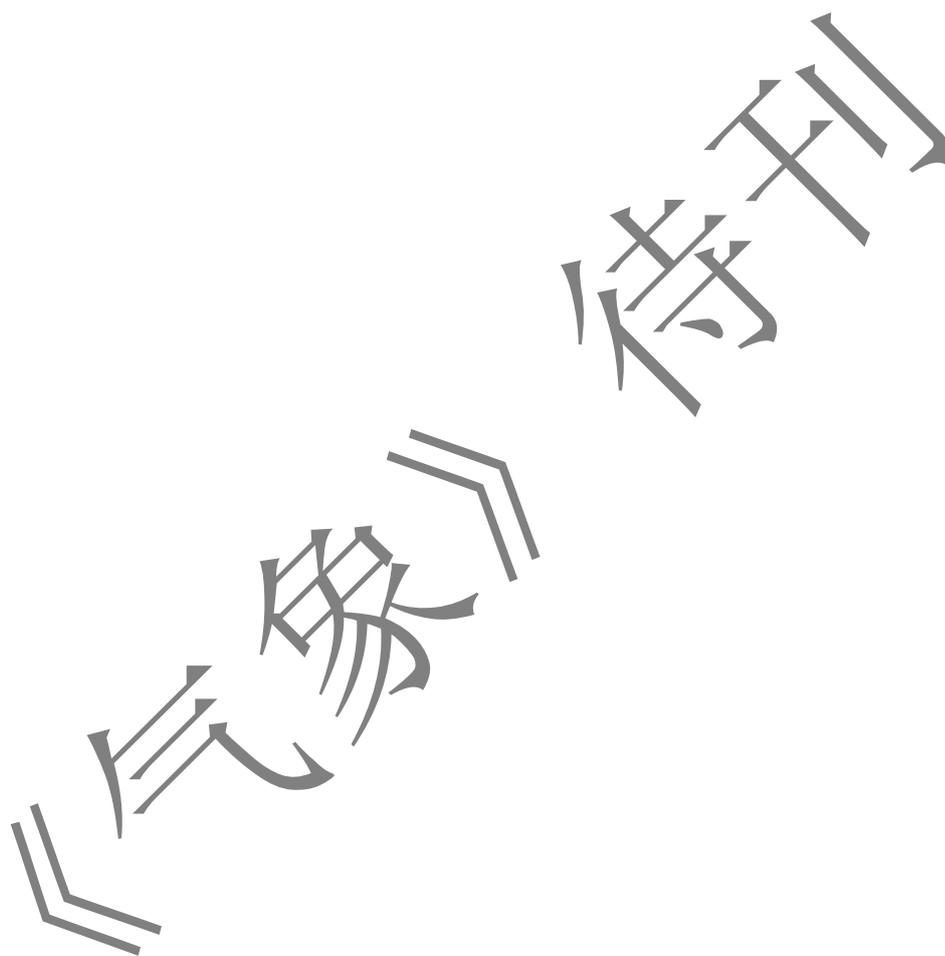
---

401 的稀疏化方案, 这为往返平飘式探空稀疏化提供了很多参考, 如马旭林等(2019)  
402 针对 GPS 掩星反演资料同化提出了一种适应数值模式垂直坐标的稀疏化方案, 取  
403 得了很好的效果, 后续将在往返平飘式探空同化中尝试该方法并分析评估该方法  
404 的效果。

405 (3) 研究往返平飘式探空观测误差高精度估计方法, 提高往返平飘式探空  
406 同化中的观测误差的精度, 进一步提高资料的同化效果。

407

408



---

409 参考文献

- 410 曹晓钟, 郭启云, 杨荣康, 2019. 基于长时平漂间隔的上下二次探空研究[J]. 仪器仪表学报,  
411 40(2): 198-204. Cao X Z, Guo Q Y, Yang R K, 2019. Research of rising and falling twice  
412 sounding based on long-time interval of flat-floating[J]. Chin J Sci Instrum, 40(2): 198-204  
413 (in Chinese).
- 414 高笃鸣, 李跃清, 程晓龙, 2018. 基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大  
415 暴雨数值模拟研究[J]. 气象学报, 76(3): 343-360. Gao D M, Li Y Q, Cheng X L, 2018. A  
416 numerical study on a heavy rainfall caused by an abnormal-path coupling vortex with the  
417 assimilation of southwest China vortex scientific experiment data[J]. Acta Meteor Sin, 76(3):  
418 343-360 (in Chinese).
- 419 郝民, 田伟红, 龚建东, 2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J]. 气  
420 象, 40(2): 158-165. Hao M, Tian W H, Gong J D, 2014. Study of L-band second-level  
421 radiosonde data applied in GRAPES assimilation system[J]. Meteor Mon, 40(2): 158-165 (in  
422 Chinese).
- 423 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等, 2022. CMA-MESO 关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报,  
424 33(6): 641-654. Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al, 2022. Key technologies of  
425 CMA-MESO and application to operational forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 33(6): 641-654,  
426 doi: 10.11898/1001-7313.20220601 (in Chinese).
- 427 李庆雷, 远芳, 杨贵, 等, 2018. L 波段探空秒级资料稀疏化方案及检验方法[J]. 气象科技进  
428 展, 8(1): 127-132. Li Q L, Yuan F, Yang G, et al, 2018. A sparsification scheme and  
429 evaluation of the L-band radiosonde high-resolution data[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):  
430 127-132 (in Chinese).
- 431 李秋阳, 王成刚, 王旻燕, 2022. 加密探空资料同化对北京地区边界层数值模拟的影响[J].  
432 气象, 48(5): 580-594. Li Q Y, Wang C G, Wang M Y, 2022. Influence of densely-observed  
433 radiosonde data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary layer in  
434 Beijing area[J]. Meteor Mon, 48(5): 580-594 (in Chinese).
- 435 马旭林, 郭欢, 和杰, 等, 2019. 适应数值模式垂直坐标的 GPS 掩星反演资料稀疏化方案[J].  
436 大气科学学报, 42(3): 380-389. Ma X L, Guo H, He J, et al, 2019. A new thinning scheme of  
437 GPS occultation retrieved data for the vertical coordinates of a numerical model[J]. Trans  
438 Atmos Sci, 42(3): 380-389, doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161111001 (in Chinese).

---

439 王丹, 徐枝芳, 王瑞文, 等, 2019. 14: 00 加密探空对区域数值预报系统的影响研究[J]. 高原  
440 气象, 38(4): 872-886. Wang D, Xu Z F, Wang R W, et al, 2019. Intensive radiosonde  
441 observations at 14: 00 in China mainland and their impact study on mesoscale numerical  
442 weather prediction[J]. Plateau Meteorol, 38(4): 872-886, doi:  
443 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00121 (in Chinese).

444 王丹, 王金成, 田伟红, 等, 2020. 往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析[J]. 大气  
445 科学, 44(4): 865-884. Wang D, Wang J C, Tian W H, et al, 2020. Quality control and  
446 uncertainty analysis of return radiosonde data[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 865-884, doi:  
447 10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19203 (in Chinese).

448 王金成, 龚建东, 赵滨, 2015. 一种新的COSMIC大气折射率资料观测误差估计方法及在  
449 GRAPES全球三维变分同化中的应用[J]. 气象学报, 73(1): 142-158. Wang J C, Gong J D,  
450 Zhao B, 2015. A new method for estimating observation error of the COSMIC refractivity  
451 data and its impacts on GRAPES-GFS model weather forecasts[J]. Acta Meteor Sin, 73(1):  
452 142-158 (in Chinese).

453 王瑞文, 龚建东, 韩威, 等, 2017. AMDAR 温度资料的偏差订正及对 GRAPES 系统的影响[J].  
454 高原气象, 36(5): 1346-1356. Wang R W, Gong J D, Han W, et al, 2017. Bias correction of  
455 AMDAR temperature data and its impact on GRAPES system[J]. Plateau Meteorol, 36(5):  
456 1346-1356 (in Chinese).

457 王瑞文, 王金成, 王丹, 等, 2023. 往返平飘式探空观测系统对 CMA-MESO 的影响研究[J].  
458 气象, 49(1): 52-61. Wang R W, Wang J C, Wang D, et al, 2023. Study on the influence of  
459 return sounding observation system based on CMA-MESO[J]. Meteor Mon, 49(1): 52-61 (in  
460 Chinese).

461 吴琼, 窦芳丽, 郭杨, 等, 2020. FY-3C 微波成像仪海上大气可降水产品质量检验[J]. 气象,  
462 46(1): 73-79. Wu Q, Dou F L, Guo Y, et al, 2020. Validation of FY-3C MWRI total  
463 precipitable water products[J]. Meteor Mon, 46(1): 73-79 (in Chinese).

464 于晓晶, 杜娟, 王敏仲, 等, 2018. 青藏高原新增探空资料同化对南疆夏季降水预报的影响  
465 [J]. 高原气象, 37(1): 13-27. Yu X J, Du J, Wang M Z, et al, 2018. Impact of assimilating the  
466 new radiosonde data on Qinghai-Tibetan Plateau on summer rainfall forecast over Southern  
467 Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 37(1): 13-27 (in Chinese).

468 张旭鹏, 郭启云, 杨荣康, 等, 2021. 基于“上升-平漂-下降”探空资料的长江中下游暴雨同

---

469 化试验[J]. 气象, 47(12): 1512-1524. Zhang X P, Guo Q Y, Yang R K, et al, 2021.  
470 Assimilation experiment of rainstorm in the middle and lower reaches of the Yangtze River  
471 based on “up-drift-down” sounding data[J]. Meteor Mon, 47(12): 1512-1524 (in Chinese).  
472 Choi Y, Ha J C, Lim G H, 2015. Investigation of the effects of considering balloon drift  
473 information on radiosonde data assimilation using the four-dimensional variational method[J].  
474 Wea Forecasting, 30(3): 809-826, doi: 10.1175/WAF-D-14-00161.1.  
475 Cucurull L, Anthes R A, Tsao L L, 2014. Radio occultation observations as Anchor Observations  
476 in numerical weather prediction models and associated reduction of bias corrections in  
477 microwave and infrared satellite observations[J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(1): 20-32.  
478  
479 Ingleby B, Rodwell M J, Isaksen L, 2016. Global radiosonde network under pressure[R], ECMWF  
480 newsletter, issue 149, pp. 25-30. DOI: 10.21957/cblxtg.  
481 Liu Y, Xue J S, 2014. Assimilation of global Navigation Satellite Radio Occultation observations  
482 in GRAPES: operational implementation[J]. J Meteorol Res, 28(6): 1061-1074.  
483 Radnóti G, Bauer P, McNally A, et al, 2012. ECMWF study to quantify the interaction between  
484 terrestrial and space-based observing systems on Numerical Weather Prediction skill[R].  
485 ECMWF Technical Memorandum No. 679, 10.21957/yvf1ceq7i.  
486 Wang J C, Gong J D, Han W, 2020. The impact of assimilating FY-3C GNOS GPS radio  
487 occultation observations on GRAPES forecasts[J]. J Trop Meteor, 26(4): 390-401, doi:  
488 10.46267/j.1006-8775.2020.034.