

FY-4A/4B 温湿廓线检验及在贵州冰雹过程中的应用分析¹

李力 李彦霖 杨静* 周永水 周明飞

贵州省气象台, 贵阳 550002

摘要: 为评估 FY-4A/4B 静止轨道干涉式红外探测器 (GIIRS) 反演的温湿廓线产品在贵州的精度和业务应用效果, 以贵阳、威宁两站实况探空和 ERA5 再分析资料为基准, 对 FY-4A 温度廓线、FY-4B 温度和湿度廓线进行了检验, 结果表明: 实际业务中可以考虑只剔除不可用数据, 而保留质量最优和较好数据, 最大程度保留温湿廓线的完整性。云对 GIIRS 探测温湿廓线影响较大, 有云时 FY-4A 温度均方根误差比无云和云边界时分别增加 1.19°C、0.96°C, FY-4B 温度分别增加 1.52°C、1.21°C, 湿度分别增加 1.28 g·kg⁻¹、0.95 g·kg⁻¹, 且有云时不同高度的数据分布离散度增大。对比不同季节贵阳和威宁实况探空、卫星反演的平均温湿廓线, 表明卫星反演的温湿廓线能较好地体现贵阳和威宁由于地形不同而表现出的不同季节大气层结特征。选取 2023 年贵州三次区域性冰雹过程评估 FY4A/4B GIIRS 产品应用效果, 结果表明 GIIRS 产品与贵阳和威宁站的实况探空较为一致, 高时空分辨率的温湿廓线有助于追踪大气层结变化, 冰雹发生前“上冷下暖”、“上干下湿”的不稳定度增加, 对冰雹天气的潜势预报有较强指示意义。但对近地层大气温湿度反演误差较大, 导致对流有效位能低估、低层探空形态改变, 使用地面气象观测站 2m 温度和露点订正后, 可以显示出较大的对流有效位能, 以及有利于雷暴大风发生的探空结构, 对预报员进行分类强对流短时临近预报有较好的支撑作用。

关键词: FY-4A/4B GIIRS 产品, 温湿廓线, 对比检验, 冰雹预报

Verification of FY-4A/4B Temperature and Humidity Profiles and Its Application in the Hail Process in Guizhou

Li Li Li Yanlin Yang Jing * Zhou Yongshui Zhou Mingfei

Guizhou Meteorological Observation, Guiyang 550002

Abstract: To evaluate the accuracy and operational applicability of FY-4A/4B GIIRS-retrieved temperature and humidity profiles in Guizhou, the FY-4A temperature profile and FY-4B

贵州气象局省市联合基金 (SS-KF[2024]14 号)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J029)、贵州省科技厅项目 (黔科合支撑[2023]一般 236), 风云卫星先行计划-天气预报应用专项 (FY-APP-ZX-2023.01) 共同资助

第一作者: 李力, 主要从事灾害性天气预报预警研究.905102548@qq.com

*通讯作者: 杨静, 主要从事天气预报相关研究.sunyjing_yj@sina.com

28 temperature and humidity profiles are verified against radiosonde observations at Guiyang and
29 Weining stations and ERA5 reanalysis data. The results indicate that, in practical operations, it is
30 considered that only the unusable data can be eliminated, while the data with the best and better
31 quality can be retained so as to maximize the integrity of the temperature and humidity profiles.
32 Clouds significantly degrade GIIRS retrieval performance. Under cloudy conditions, the RMSE
33 of FY-4A temperature increases by 1.19 °C (clear skies) and 0.96 °C (cloud edges), FY-4B
34 temperature increases by 1.52 °C and 1.21 °C, and humidity increases by 1.28 g•kg⁻¹ and 0.95
35 g•kg⁻¹, respectively. Moreover, cloud cover also amplifies vertical data dispersion. A
36 systematic bias exists in FY-4A/4B profiles. Linear bias correction reduces the mean error (ME)
37 to near zero under clear skies and improves cloudy conditions more markedly. Seasonal
38 comparisons between sounding and satellite profiles demonstrate that FY-4A/4B captures
39 terrain-induced differences in atmospheric stratification between Guiyang and Weining. For
40 three regional hail events in 2023, GIIRS products agree well with radiosonde observations. The
41 high-resolution profiles reveal pre-hail instability, which is "upper cold and lower warm" and
42 "upper dry and lower wet", offering valuable forecast indicators. However, the near-surface layer
43 retrieval errors lead to the underestimation of CAPE and distort low-level sounding structures.
44 After the surface 2 m temperature and dew point corrections, a large convective available
45 potential energy (CAPE) and a sounding structure conducive to the occurrence of thunderstorms
46 and strong winds is displayed. This is a good support for the short-time forecasting and
47 nowcasting of severe convections.

48 **Key words :** FY-4A/4B GIIRS product, temperature and humidity profiles, comparative
49 verification, hail forecast

51 引 言

52 大气温湿层结是描述大气热力状态不可或缺的资料,在天气预报、数值模式、人工影响
53 天气、飞行安全等方面都有重要应用,探测全天候、高精度的大气温湿垂直分布具有重要意
54 义(张旭鹏等,2021;王金成等,2024;赵渊明等,2024)。目前无线电探空是探测大气
55 温湿廓线最常用的业务化手段,能直接探测大气温湿度信息,具有较高的代表性和可信度(钱
56 媛等,2019;林晓萌等,2022),但也有单次探测成本较昂贵,数据时空分辨率较低的缺点(刘

57 红燕等, 2009; 周雪松等, 2023), 这对于需要及时捕捉大气温湿状态变化的应用场景, 如
58 灾害性天气的预报预警带来一定困难, 因此为解决探空数据不足的问题, 必须发展高时空分
59 辨率的全天候大气温湿廓线产品, 对做好短时临近天气预报和提高中尺度数值模式预报性能
60 都有重要作用(杨雨晗等, 2018)。

61 随着卫星遥感技术的发展, 气象卫星成为高时空分辨率大气垂直探测的有效方式。风云
62 四号系列卫星设计目的是满足天气预报业务应用和服务需求(陆风等, 2017), 风云四号 A
63 星(FY-4A)和B星(FY-4B)上搭载的静止轨道干涉式红外探测仪(GIIRS)是主要载荷之
64 一, 通过迈克尔逊干涉分光方式观测不同谱段的红外辐射, 在国际上首次实现了大气高光谱
65 垂直探测, 能够获取大气温度和湿度的垂直分布, 为天气预报提供大范围、连续、快速、准
66 确的遥感信息, 实现了在静止轨道上从二维观测进入三维综合观测, 具有突破性意义(华建
67 文和毛建华, 2018; 咸迪, 2021)。学者们针对 GIIRS 资料的质量检验和精度评估开展了很
68 多工作。Ren et al(2022)发现 FY-4A GIIRS 温度误差在对流层上部或下部较大, 对流层中
69 部相对较小。He et al(2019)研究发现 FY-4A 温湿廓线精度和云相关, 晴空时温度廓线误差
70 为 2.1K, 有云时误差为 3.7K, 对于大多数云类型, 温度误差范围为 2.5~3.0K, 晴空时湿
71 度廓线误差为 18%, 有云时误差为 21%。张鹏等(2022)对比验证了地基微波辐射计和 FY-4A
72 GIIRS, 表明晴空条件下低层大气和较高层大气探测结果的一致性较好, 卫星探测在空间覆
73 盖和时间分辨率上具备一定优势, 可以与地基微波辐射计互相补充。Cai et al(2020)用人
74 工神经网络方法对比了 FY-4A GIIRS 与 AIRS 产品的温湿反演结果。这些研究主要基于 FY-4A,
75 对 FY-4B GIIRS 产品检验和评估还较少, FY-4B GIIRS 在空间分辨率和光谱范围上较 FY-4A
76 有所改进(罗双等, 2019; 咸迪, 2021), 因此对其精度的评估也很有必要。

77 此外, 围绕 GIIRS 资料的应用也开展了相关研究。例如刘娟娟等(2022)分析了面向资料
78 同化的 FY-4A GIIRS 偏差特征; 基于高时空分辨率的 FY-4A GIIRS 针对台风个例开展的研究
79 较多(Yin et al, 2021; Feng et al, 2022; 官莉等, 2023); 牛宁等(2023)评估了 FY-4A GIIRS
80 在寒潮过程中的应用; 覃皓等(2023)评估了 FY-4A GIIRS 在强对流过程中的应用, 但仍然缺
81 乏 GIIRS 在实际业务中的应用评估。使用 10km 级分辨率逐 2 h 更新的 GIIRS 资料, 可以得
82 到预报预警亟需的高时空分辨率大气温湿廓线, 有效弥补探空资料时空分辨率不足的问题,
83 将成为监测灾害性天气潜势的新型观测手段之一。

84 贵州地处较低纬度的云贵高原东部, 位于长江以南、横断山脉以东, 地势西高东低, 自
85 中部向北、东、南三面倾斜, 地形、地貌极其复杂, 山地和丘陵占全省总面积的 92%, 海拔
86 高度在 147.8~2900.6m(图 1)。由于地理位置特殊, 贵州(特别是西部地区)是对流云团

87 的初生源地，受气象灾害影响严重，暴雨、强对流等灾害性天气易发突发(杨静等，2015；
88 2023)。贵州省内共有 3 个探空站，分别为贵阳站、威宁站和普安站（2025 年 3 月新建），
89 由于站点较少，且一天仅有两次观测（08:00 和 20:00，北京时，下同），无法全面反映全
90 省温湿水平（垂直）空间分布，也不能及时捕捉大气温湿层结的变化，因此 GIIRS 产品提供
91 的覆盖面广的全天候高时空分辨率大气温湿廓线，将为贵州灾害性天气，特别是午后强对流
92 天气的预报预警提供强有力支撑。同时研究也表明，云对 GIIRS 反演精度带来很大不确定性
93 （王洪等，2023；黄艺伟等，2021），贵州常年受云贵静止锋、南支槽等天气系统影响，云
94 量较多(林丹，2015)，为更好地使用 GIIRS 资料，特别需要关注复杂山地条件下云对 GIIRS
95 的影响。因此本文将基于贵阳站(海拔 1223m)和威宁(海拔 2238m)站探空资料，检验 FY-4A/4B
96 的 GIIRS 产品在贵州无云和有云条件下的精度，并选取贵州 2023 年三次区域性冰雹过程，
97 探讨 GIIRS 高时空分辨率的温湿廓线在冰雹短时临近预报中的作用，以期评估 GIIRS 产品在
98 天气预报业务中的应用能力，为其在分类强对流预报中的应用提供参考。

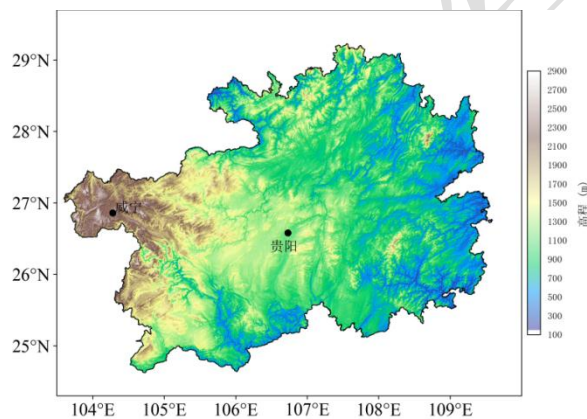


图 1 贵州探空站（黑点）和地形（填色）分布

Fig. 1 Distribution of sounding stations (black dots) and terrain (colored) in Guizhou Province

99
100
101
102
103

1 数据和方法

1.1 数据来源

106 本文检验的数据为 FY-4A/4B 的 GIIRS L2 级大气温湿廓线区域合成产品 (AVP)，数据
107 来源于国家气象卫星中心
108 (<https://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/Satellite.aspx>)，FY-4A 温度廓线
109 检验时间为 2022 年 1—12 月，FY-4B GIIRS 数据于 2023 年 3 月上线，因此 FY-4B 温度、湿
110 度廓线检验时间为 2023 年 3—11 月。实况资料为同时段的贵阳和威宁探空站数据、欧洲
111 中心 ERA5 再分析资料（分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ）。个例分析选取 2023 年贵州三次区域性

112 冰雹过程，除探空和 FY-4A/4B 反演的温湿廓线之外，其他数据包括地面自动气象观测站常
113 规数据、人影炮站上报的冰雹观测数据。

114 1.2 数据处理方法

115 1.2.1 时空匹配

116 如表 1 所示，检验所用到的资料时空分辨率各不相同，因此需要将各种资料进行时空匹
117 配。在观测时间上，将 FY-4A GIIRS 和探空的时间直接匹配，而 FY-4B GIIRS 与探空间隔 1
118 h，无法直接匹配，因此选取 09:00、21:00 的 FY-4B GIIRS 与同时次的 ERA5 资料进行匹配。

119 在空间上，各种资料的水平和垂直分辨率也不同，因此需要分别对 FY-4A 和探空、FY-4B
120 和 ERA5 进行空间匹配。周永水等（2020）研究得到贵阳微波辐射计在复杂山地地形条件下
121 的雷暴天气中能够代表大气层结的有效范围为 30km，因此本文考虑将探空站周围 25km 范围
122 内的 GIIRS 资料纳入检验。结合 He et al（2019）以及覃皓等（2023）的方法，以探空站
123 的经纬度为标准，首先将 ERA5 资料以邻近点插值方法插值到探空站上，再以探空站点水平
124 距离偏差 $\pm 0.25^\circ$ 的范围与 GIIRS 样本在各高度层上的均值进行匹配。垂直方向上，分别将
125 GIIRS、探空、ERA5 插值到标准等压面层，共 26 层。时空匹配完成后，共得到 FY-4A 温度
126 廓线数据 1217 条，FY-4B 温度、湿度廓线数据各 1069 条。

127 **表 1 不同探测资料参数**

128 Table 1 Parameters of different detection data

观测参数	无线电探空	FY-4A/GIIRS	FY-4B/GIIRS	ERA5
时间分辨率	12 h (08: 00、20:00)	2 h (00:00 开始观测)	2 h (01:00 开始观测)	1 h
空间分辨率	$\geq 200\text{km}$	星下点 16km	星下点 12km	0.25°
垂直层数	约 90	101	101	37

129

130 1.2.2 质量控制和检验方法

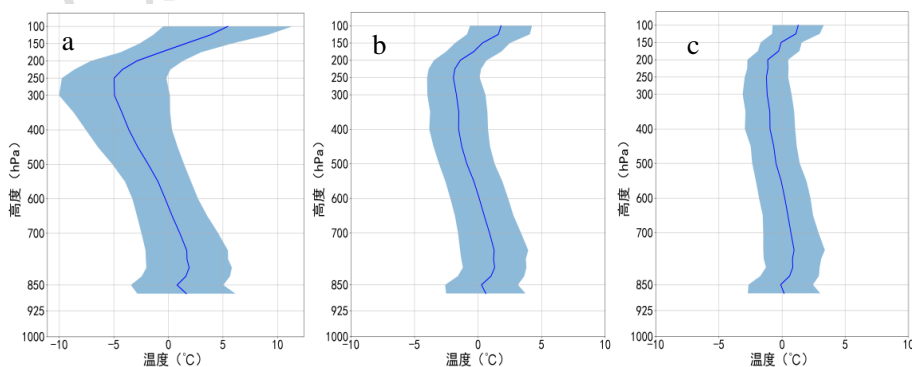
131 FY-4A/4B 的 GIIRS 产品对每一层数据都提供了质量标识码：0 为最优、1 为较好、2 为
132 较差、3 为不可用、NAN 为无效值。本文在剔除了无效值之后，分别对所有数据、剔除质量
133 码 2 的数据、剔除质量码 2 和 3 的数据进行检验比较，希望能最大程度保留在业务中可使用的
134 的数据，避免数据浪费。GIIRS 资料自带的云检测产品（CLM）可用来判断有云或无云，CLM
135 值 0 为无云，1 为有云。为开展定量化检验分析，参考覃皓等（2023）的方法，引入统计参
136 数：平均误差（ME）、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE），平均误差的标准差（STD），
137 分别检验无云和有云条件下各个高度层上卫星反演的温湿廓线与实况廓线的偏差程度和离
138 散程度。

139 2. 检验结果分析

140 2.1 不同质量码数据误差分析

141 覃皓等(2023)对不同质量样本数据给出误差统计,表明有云时 GIIRS 可利用的高质量产
142 品明显减少,有效数据也同样减少,而贵州地区云量常年较多,尤其引发灾害性天气的往往
143 是深厚对流云,因此如果在业务中只使用质量码 0 和 1 的数据,会导致数据大量缺失,温湿
144 廓线不完整。为评估不同质量的数据精度,分别对 FY-4A/4B 不同质量码的温湿廓线做检验,
145 分为三类:不做质控的所有数据(以下简称为 ALL)、只剔除质量码 3 的数据(以下简称为
146 D3)、剔除质量码 2 和 3 的数据(以下简称为 D23)。图 2~图 4 分别为 FY-4A 温度、FY-4B
147 温度、FY-4B 湿度廓线与实况的平均误差及平均误差标准差垂直分布, FY-4A 温度在
148 600~150hPa 小于实况,其余层结均大于实况; FY-4B 温度廓线在 800~100hPa 小于实况,其
149 余层结略大于实况;由于高层大气比湿很小,比湿廓线误差随高度降低而逐渐增大,在
150 400hPa 以下均小于实况,说明大部分温湿廓线样本中, FY-4A/4B 相较于实况有负偏差。从
151 FY-4A 温度的三类质控数据检验结果来看(图 2), ALL 的误差较大,其 ME 为 $-5.0^{\circ}\text{C}\sim 5.4^{\circ}\text{C}$,
152 平均为 -0.45°C , D3 的 ME 较 ALL 明显减小,为 $-1.9^{\circ}\text{C}\sim 1.8^{\circ}\text{C}$,平均为 -0.08°C , D23 各层平
153 均 ME 继续减小为 $-1.2^{\circ}\text{C}\sim 1.3^{\circ}\text{C}$,平均为 -0.05°C 。可以看出,去除质量码 3 后数据质量的改
154 善是显著的,整层平均 ME 减小 0.37°C , STD 减小 2.8°C ,说明离散程度大大下降。进一步
155 比较 D3 和 D23 样本, D23 较 D3 的 ME 减小 0.03°C , STD 减小 0.2°C ,误差减小并不明显。

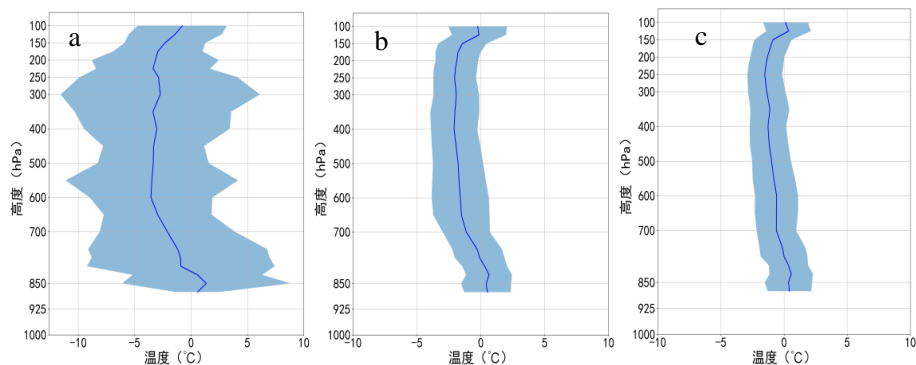
156 FY-4B 温度廓线误差与 FY-4A 类似(图 3), D3 与 ALL 相比,整层 ME 减小 0.98°C , std
157 减小 3.91°C ,离散度明显降低; D23 与 D3 相比,整层 ME 减小 0.49°C , STD 减小 0.31°C 。
158 FY-4B 比湿廓线经过质控后, D3 与 ALL 相比整层 ME 减小 $0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, STD 减小 $0.45\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,
159 D23 与 D3 相比整层 ME 仅减小 $0.19\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,离散程度基本没有变化。



160

161 图 2 2022 年贵州 FY-4A 温度廓线三类数据相对于探空的误差垂直分布

162 Fig. 2 Vertical distribution of errors of three types of data in FY-4A temperature profiles relative to radiosonde
163 observations in Guizhou Province in 2022



164

165

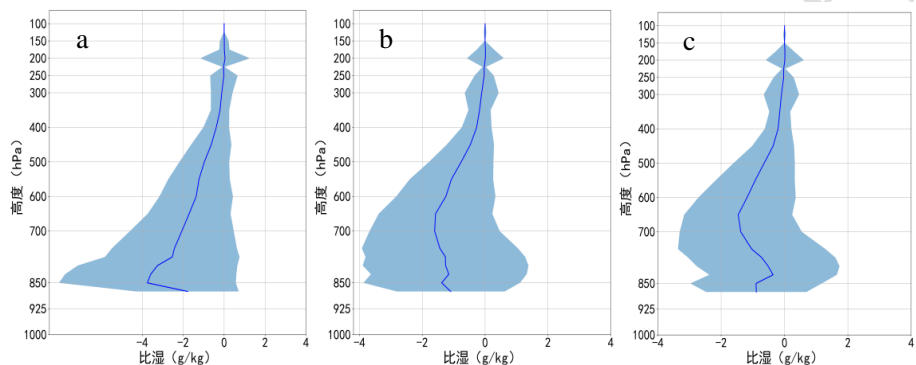
166

167

168

图3 2023年3—11月贵州FY-4B温度廓线三类数据相对于ERA5的误差垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of errors of three types of data in FY-4B temperature profiles relative to radiosonde observations in Guizhou Province from March to November in 2023



169

170

171

172

173

图4 2023年3—11月贵州FY-4B湿度廓线三类数据相对于ERA5的误差垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of errors of three types of data in FY-4B humidity profiles relative to radiosonde observations in Guizhou Province from March to November in 2023

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

表2给出了FY-4A/4B各类质量控制数据样本的误差统计，D3和D23温度的ME、MAE、RMSE、STD相差均小于 1°C ，比湿相差均小于 $0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。经计算，温度廓线的D3和D23与实况相关系数均为1。比湿廓线的D3与实况相关系数为0.94、D23与实况相关系数为0.95，相关性有一定提升，但并不显著。综上所述，D3与ALL相比误差明显减小，但D23和D3相比各类误差下降并不明显，若保留质量码为2的数据，在本次检验样本中可以增加近10%的样本，但对于比湿，是否保留质量码2的数据对样本总量影响不大。因此在实际业务中可以考虑使用质量码2的数据，最大程度保留温湿廓线的完整性，对重构探空后计算对流参数有重要作用，后文将基于D3数据做进一步分析。

表2 FY-4A/4B各类质量控制样本误差平均值统计

Table 2 The statistics of error averages of different FY-4A/4B quality control data

要素	样本类型	样本数占比	ME	MAE	RMSE	STD
----	------	-------	----	-----	------	-----

FY-4A 温度廓线	D3	55%	-0.08	2.12	2.67	2.38
(单位: °C)	D23	45%	-0.05	1.72	2.18	2.02
FY-4B 温度廓线	D3	49%	-1.08	1.93	2.39	1.91
(单位: °C)	D23	38%	-0.59	1.48	1.85	1.60
FY-4B 湿度廓线	D3	66%	-0.68	0.96	1.36	1.16
(单位: $g \cdot kg^{-1}$)	D23	62%	-0.49	0.81	1.19	1.06

184

185 2.2 云对卫星反演温湿廓线的影响

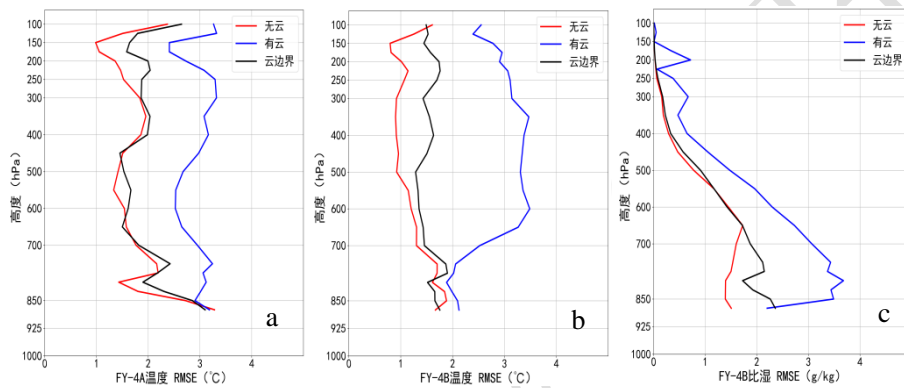
186 云的存在会影响地表和大气吸收气体发射的红外信号,一方面云会阻挡下方 CO_2 发射的
 187 红外辐射,另一方面云自身也会发射红外辐射使得辐射加强(He et al, 2019),因此 GIIRS
 188 接收地表及大气吸收气体发射的红外辐射会受到云的干扰。本文依据 GIIRS 自带的云检测
 189 (CLM) 将样本分为有云和无云,定义检验区域所有样本的 CLM 等于 0 为无云,等于 1 为有
 190 云,既有 0 也有 1 定义为云边界。由图 5 可见, FY-4A 温度、FY-4B 温度和湿度的 RMSE 廓线
 191 在无云时最小,有云时最大,云边界介于无云和有云之间。FY-4A 温度 RMSE 平均值在无云
 192 和云边界条件下分别为 $1.76^{\circ}C$ 、 $1.99^{\circ}C$,有云条件下为 $2.95^{\circ}C$,受云吸收红外辐射的影响,
 193 有云时 RMSE 比无云和云边界分别增加了 $1.19^{\circ}C$ 、 $0.96^{\circ}C$ 。FY-4B 温度廓线 RMSE 平均值在无
 194 云和云边界条件下分别为 $1.26^{\circ}C$ 、 $1.57^{\circ}C$,有云时为 $2.78^{\circ}C$,比无云和云边界分别增加了
 195 $1.52^{\circ}C$ 、 $1.21^{\circ}C$,两者的差距在 700~200hPa 更为显著。由于比湿在高层大气接近于 $0 g \cdot kg^{-1}$,
 196 这里只讨论 400hPa 以下 FY-4B 比湿廓线的误差特征。无云和云边界条件下比湿的 RMSE 平均
 197 值分别为 $1.25 g \cdot kg^{-1}$ 、 $1.58 g \cdot kg^{-1}$,有云时为 $2.53 g \cdot kg^{-1}$,400~700hPa 随着高度的降低,
 198 RMSE 几乎是线性增加的,700hPa 以下无云和有云的 RMSE 差距最为显著,无云时平均值为
 199 $1.47 g \cdot kg^{-1}$,有云时可达 $3.24 g \cdot kg^{-1}$,是无云的 2.2 倍。

200 结合业务应用习惯,进一步分析不同层次的误差分布特征,用 200~500hPa、500~700hPa、
 201 700hPa 至近地层分别代表大气的高、中、低层。FY-4A 温度在无云条件下,高层和高层超过
 202 95%的 RMSE 小于 $2.5^{\circ}C$ (图 6a),峰值为 $1^{\circ}C$,几乎很少超过 $3^{\circ}C$,而有云时 RMSE 的中位数
 203 和密度峰值都为 $3^{\circ}C$,且绝大部分在 $2^{\circ}C$ 以上,表明无云和有云时误差分布差异较大,几乎
 204 没有重合。低层的 RMSE 分布范围和离散度都有所增大,无云和有云的 RMSE 在 $2\sim 3^{\circ}C$ 有重合,
 205 但无云时仍然有 25%的 RMSE 低于 $1.5^{\circ}C$,有云时有极端的 RMSE 出现,最大可达 $6^{\circ}C$ 。

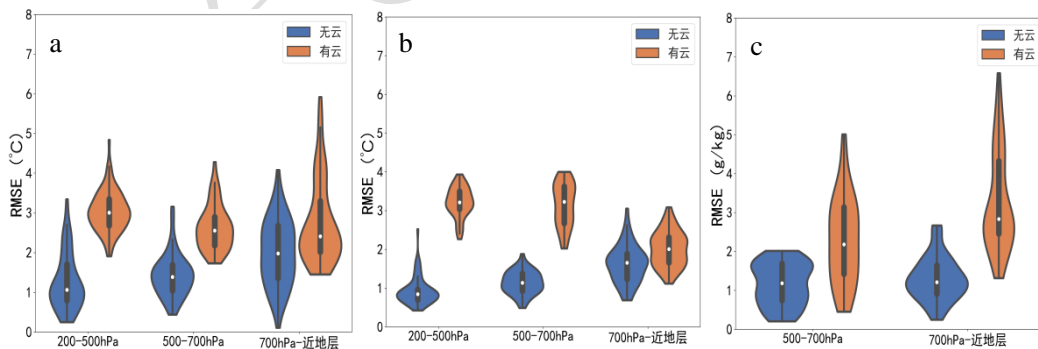
206 高层和低层 FY-4B 温度的 RMSE 同样在无云和有云条件下区分显著,两者的数据分布几
 207 乎没有重合(图 6b),90%的 RMSE 在无云时小于 $2^{\circ}C$,峰值为 $1^{\circ}C$,有云时分布在 $2\sim 4^{\circ}C$ 。
 208 低层无云和有云的 RMSE 大部分重合,无云的 RMSE 更小。中低层 FY-4B 湿度 RMSE 在无云和
 209 有云时有较少部分重合(图 6c),无云绝大部分小于 $2 g \cdot kg^{-1}$,分布较均匀,有云的离散度

210 显著增加,50%以上均大于 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。低层有云的 RMSE 更大,50%大于 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,
 211 且有超过 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的极端值存在。

212 综上所述,云对卫星反演温湿度的影响是显著的,有云时 RMSE 的数值和离散度都比无
 213 云时更大,温度的这种差别在大气高层和高层较明显,低层的差别减小,这表明低层温度反
 214 演不仅受云的影响,下垫面对反演精度的影响也较大,近地层缺测数据较多样本较少,也可
 215 能导致误差增大(王洪等, 2023)。湿度 RMSE 在有云和无云时的差异比温度更大,有云时误
 216 差分布范围更广,尤其是 700hPa 以下湿度误差加大,且容易出现极端值。因此在使用该湿
 217 度产品时要充分考虑误差较大的问题,如预报业务中关注大气低层的湿层和高层的干冷空气,
 218 使用时应更注重温湿廓线结构的变化趋势。



219
 220 图 5 贵州 (a) 2022 年 FY-4A 温度廓线相对于探空的 RMSE, (b, c) 2023 年 3—11 月 (b) FY-4B 温度廓
 221 线相对于 ERA5 的 RMSE 和 (c) FY-4B 湿度廓线相对于 ERA5 的 RMSE
 222 Fig. 5 (a) RMSE of FY-4A temperature profiles relative to radiosonde observations in 2022, and (b,c) RMSE of
 223 (b) FY-4B temperature profiles and (c) FY-4B humidity profiles relative to ERA5 reanalysis in Guizhou
 224 Province from March to November in 2023



226
 227 注: 小提琴外形表示数据的核密度估计概率分布,宽度表示数据密度,其内部箱线图表示统计量,箱体边界为第一四分位数和
 228 第三四分位数,箱内横线为中位数。

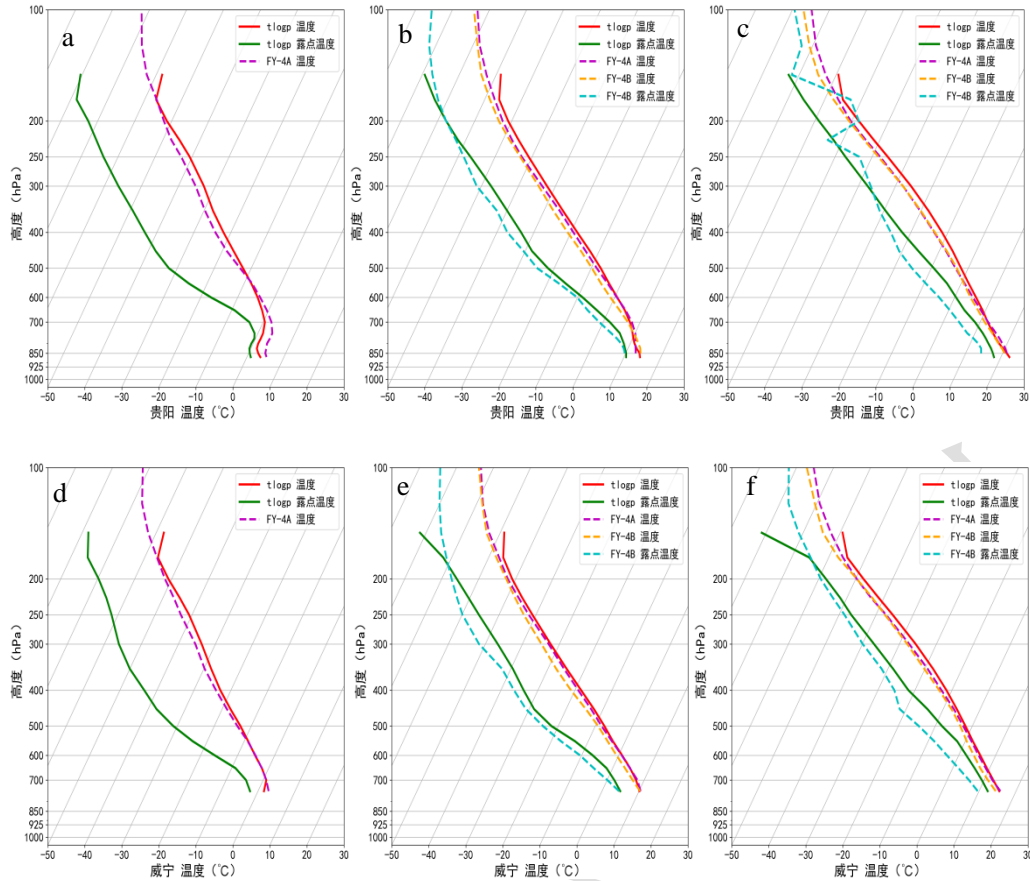
229 图 6 贵州 (a) 2022 年 FY-4A 温度、(b, c) 2023 年 3—11 月 (b) FY-4B 温度和 (c) FY-4B 比湿不同高
 230 度 RMSE 小提琴图
 231 Fig. 6 Violin plots of RMSE of (a) FY-4A temperature in 2022, and (b) FY-4B temperature and (c) FY-4B
 232 specific humidity at different altitudes in Guizhou Province from March to November in 2023

233

234 2.3 不同季节卫星反演温湿廓线特征

235 不同季节影响贵州的天气系统不同，大气温湿层结特征也有所不同。由于贵州“西高东
236 低”的地形，云贵准静止锋造成贵州长时间低温阴雨天气，大气低层存在锋面逆温易形成锋
237 面雾（杨静等，2020；李力等，2024）；春季低层南风增强，温湿增长比高层快，大气层结
238 趋向“上干下湿”的不稳定层结，0℃层高度适宜，结合动力抬升和不稳定能量条件，易在
239 贵州中西部发生冰雹天气（周永水等，2013）；夏季西太平洋副热带高压北抬，其外侧的偏
240 南急流带来充足水汽，大气整层相对湿度升高。威宁站与贵阳站相距约 246km，海拔高度相
241 差 1015m，两地地形差异较大，因此本节将贵阳和威宁不同季节的温湿廓线分开讨论，探讨
242 卫星反演的温湿廓线是否能反映不同季节的层结特征。

243 结合贵州灾害性天气发生季节，对比 2022 年冬季（12 月、1 月、2 月、）以及 2022 年
244 和 2023 年春季（3—5 月）、夏季（6—8 月）贵阳和威宁实况探空、FY-4A 平均温度廓线、
245 FY-4B 平均温度和湿度廓线（图 7），其中湿度廓线中的露点温度由比湿换算而来。冬季贵
246 阳和威宁在低层都存在逆温层，贵阳常位于静止锋后，距离锋面较远，因此贵阳的逆温层较
247 高，位于 800~700hPa，即脱地的悬浮逆温，这与闵昌红等（2022）的研究一致。威宁常位
248 于静止锋附近，更靠近锋面，边界层内存在弱的浅薄锋面逆温结构。FY-4A 的温度廓线能体
249 现出贵阳逆温，但逆温层顶略低于实况，逆温层厚度较实况薄，近地层温度高于实况（图
250 7a），不能表现出威宁较浅薄的贴地逆温层（图 7d）。春季贵阳和威宁的实况温湿廓线均
251 存在一定程度的“上干下湿”结构，500hPa 以下相对湿度逐渐减小，但由于威宁海拔比贵
252 阳高，高原地形阻挡了一部分水汽，威宁近地层相对湿度较贵阳低，湿层厚度也较贵阳浅薄。
253 贵阳 800hPa 以下温度和湿度递减率较小，这是由于春季静止锋仍活跃，贵阳仍常存在锋面
254 逆温。FY-4A 和 FY-4B 的温度廓线与实况较接近，两者均能够反映出贵阳近地层温度递减率
255 较小的特征，在近地层 FY-4A 更接近实况的温度廓线，这可能和 FY-4B 观测与实况相差 1h
256 有关。FY-4B 湿度廓线能反映出“上干下湿”的特征，虽然露点温度较实况略低，但仍能表
257 现出贵阳湿层比威宁深厚这一特征。相较于春季，夏季贵阳和威宁的大气整层相对湿度更大，
258 湿层伸展更高，FY-4B 湿度廓线在中低层比实况低，FY-4A 和 FY-4B 的温度廓线接近但略低
259 于实况，因此夏季卫星反演的大气层结较实况更“干”。



260

261

262

263

264

265

图 7 2022—2023 年不同季节贵阳和威宁探空、FY-4A、FY-4B 温度和湿度廓线对比

Fig. 7 Comparison of temperature and humidity profiles of radiosondes, FY-4A and FY-4B in Guiyang and Weining in different seasons of 2022–2023

266

3 个例应用

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

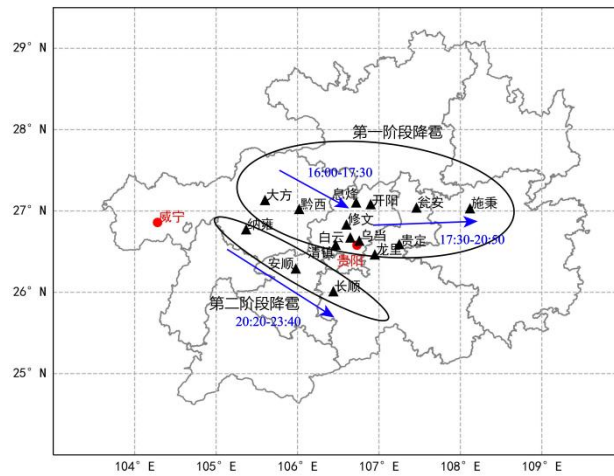
为进一步考察 FY-4A/4B 反演温湿廓线在强对流天气中的应用,选取 2023 年贵州 3 次区域性冰雹过程作为个例,讨论 FY-4A/4B 反演温湿廓线对冰雹预报的作用。选取个例时间分别为 3 月 16 日、4 月 20 日、5 月 5 日。3 月 16 日的冰雹过程范围最大,影响最广,重点对这次过程进行讨论,其余两次过程将讨论近地层温湿反演误差对重构探空的影响,这里将 GIIRS 反演比湿换算成露点温度进行分析。

3.1 2023 年 3 月 16 日冰雹过程

3.1.1 强对流实况

3 月 16 日 15:00—23:00,贵州中西部地区出现了大范围冰雹天气,23 个县境内出现冰雹,最大冰雹直径为 30mm。本次降雹过程分为两个阶段(图 8):第一阶段为 15:40–19:30,14:30 开始贵州西部有中尺度对流云团生成,缓慢东移到大方、黔西开始降雹,17:00 右对流云团进入贵阳并维持近 2 小时,造成贵阳、黔南北部大范围降雹,20:00 后东移减弱;第

278 二阶段为 20:00-23:45, 20:00 贵州西部有新对流云团生成, 东南移过程中造成纳雍、安顺、
 279 长顺降雹。



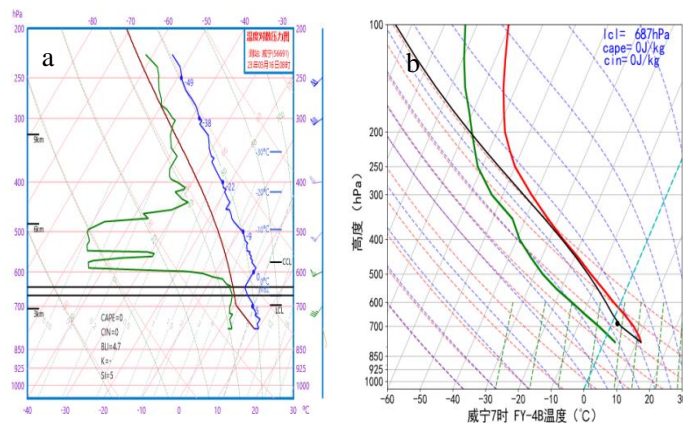
注: △为降雹地点, 红色圆点为贵阳和威宁探空站, 椭圆为降雹范围, 箭头指示路径。

图 8 2023 年 3 月 16 日贵州冰雹路径

Fig. 8 Hailstorm trajectory in Guizhou Province on 16 March 2023

3.1.2 GIIRS 与实况探空对比

280 图 9 为 3 月 16 日 FY-4B 温湿廓线威宁探空的对比, 由图可见, 威宁探空 08:00 在
 281 500~600hPa 有明显的干层, 但 FY-4B 温湿廓线并没有表现出这一显著特征; 20:00 威宁探空
 282 有三段干层, FY-4B 温湿廓线在 250、400、700hPa 附近同样表现出三段干层, 虽然干层位
 283 置与实况略有偏差, 但温湿廓线结构相近。08:00、20:00 对流不稳定能量 (CAPE) 分别为
 284 $0\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $261.4\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, FY-4B 重构探空计算的 CAPE 分别为 $0\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $560\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整体
 285 而言, FY-4B 温湿廓线基本可以体现出大气层结状况, 但相较探空更平滑, 尤其湿度廓线突
 286 变信息的表现力较差, 这点和张晓芸 (2020) 的分析一致。重构探空计算出的 CAPE 较实况
 287 偏高, 没有反演出近地层逆温层, 这导致对流抑制能量 (CIN) 的低估。
 288
 289
 290
 291
 292
 293



294

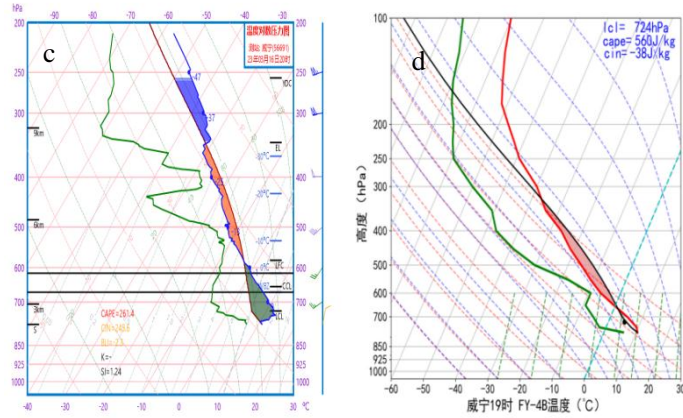


图 9 2023 年 3 月 16 日威宁探空和 FY-4B 温湿廓线对比

Fig. 9 Comparison of temperature and humidity profiles of Weining radiosonde and FY-4B on 16 March 2023

3.1.3 温湿层结演变

从 08:00 的探空分析可知，大气中层有干空气存在，CAPE 为 $0\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，随着午后地面升温，CAPE 可能增加，大气层结演变是否将有利于冰雹发生？下面采用 GIIRS 高时空分辨率温湿廓线跟踪大气状态演变，为预报员判断午后大气温湿状况是否有利于强对流天气发生提供参考。

图 10 为贵阳和威宁 FY-4A 温度廓线变化，14:00—20:00 贵阳 500hPa 以下逐渐增温，500~300hPa 逐渐降温。14:00—16:00 威宁 700hPa 以下逐渐增温，500~200hPa 温度变化不大，700hPa 和 500hPa 的温差从 13:00 的 18°C 增加到 24°C 。即贵阳和威宁上空温度垂直递减率不断增大，“上冷下暖”的不稳定程度增加，有利于触发强对流天气。

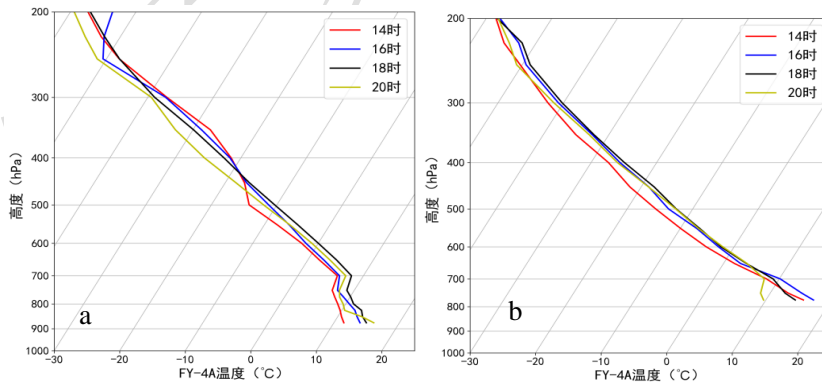


图 10 2023 年 3 月 16 日 (a) 贵阳和 (b) 威宁 FY-4A 温度廓线演变

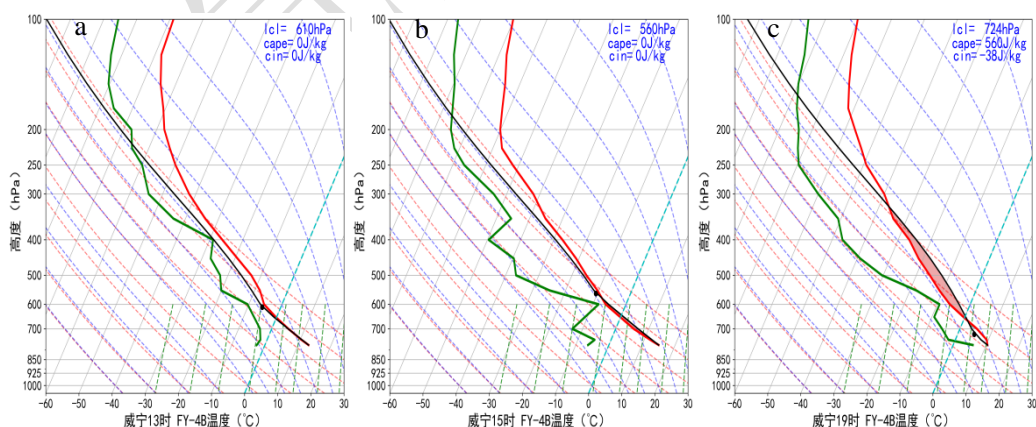
Fig. 10 Evolution of FY-4A temperature profiles in (a) Guiyang and (b) Weining on 16 March 2023

从威宁 FY-4B 温湿廓线演变来看（图 11a，11b），13:00—15:00 600hPa 以下温度廓线和干绝热线基本平行，表明低层趋于绝对不稳定，但温度露点差增大，形成“倒 V 字”形，地面自动站观测到露点温度仅 3°C ，因此，虽然 14:00 威宁附近地面辐合线上有对流触发，

315 但低层大气较干，不适合对流发展，对流生成之后很快消散。

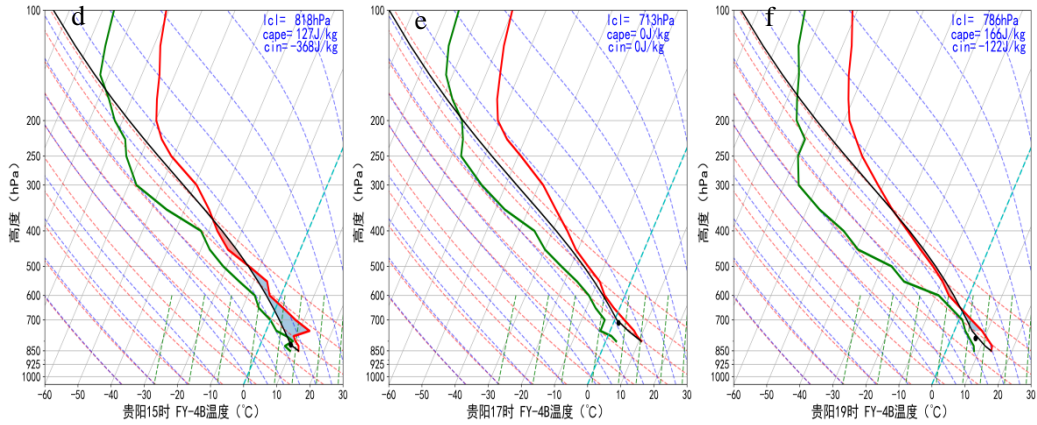
316 对比 15:00 贵阳温湿廓线，近地层比威宁湿度大，贵阳地面观测的露点温度为 12℃，
317 表现为“上干下湿”的不稳定层结（图 11d），有一定的 CAPE（119J·kg⁻¹），但 CIN 较大
318 （427J·kg⁻¹），如果对流发展能突破对流抑制能量则有可能降雹。威宁附近的初生回波东
319 移接近贵阳时，15:30 对流迅速增强并旺盛发展，16:00 大方、黔西降雹。17:00 贵阳温度
320 廓线低层逆温消失（图 11e），说明对流抑制能量减弱，对流更易发展加强。17:00—19:00
321 贵阳温湿廓线“上干下湿”层结较 15:00 更明显，15:00—17:00 400hPa 的温度露点差从 7℃
322 增至 12℃，21:00 继续升高到 26℃，K 指数从 30℃增加到 36℃，对流不稳定性显著增加。
323 17:00 回波进入贵阳市息烽县后强度增强，组合反射率由 40dBz 跃增到 55dBz（图略），17:00
324 —19:00 也是降雹最为集中的时刻，贵阳 75%的县均出现降雹，修文、清镇等地出现直径为
325 20~30mm 的大冰雹。但 17:00 和 19:00 通过 FY-4B 反演温湿廓线计算得到 CAPE 仅为 132J·kg⁻¹，
326 甚至是 0J·kg⁻¹，与观测到大冰雹的事实不相符，这与近地层反演温湿度误差较大有关，后
327 文会重点讨论。此后对流云团东移出贵阳，在瓮安、施秉降雹，21:00 左右第一阶段降雹基
328 本结束。19:00 威宁附近有强对流触发，第二阶段降雹开始。与 15:00 不同的是，19:00 威
329 宁 600hPa 以下的温度露点差显著降低（图 11c），地面露点温度增加至 5℃，形成了有利于
330 降雹的“上干下湿”层结，CAPE 增大到 644J·kg⁻¹，并在东南移的过程中产生了第二轮降雹。

331 值得注意的是在本次个例中受到云的影响，多个时次的 FY-4B 湿度数据在近地层质量码
332 为 3，质控后导致湿度廓线不全，无法计算 CAPE、CIN 等对流参数，对判断对流不稳定潜势
333 造成一定困难，有待进一步研究提高数据质量，减小云的影响。



334

335



336

337

338

图 11 2023 年 3 月 16 日 FY-4B 威宁温湿廓线

339

Fig. 11 Temperature and humidity profiles of FY-4B in Weining on 16 March 2023

340

341 3.2 低层温湿反演偏差对重构探空的影响

342 环境湿度廓线低层的值作为抬升气块的露点，对 CAPE 和 CIN 的计算影响较大，湿度廓
343 线的细节对于可能发展起来的雷暴的动力学和微物理过程都有重要影响(俞小鼎等,2020)。

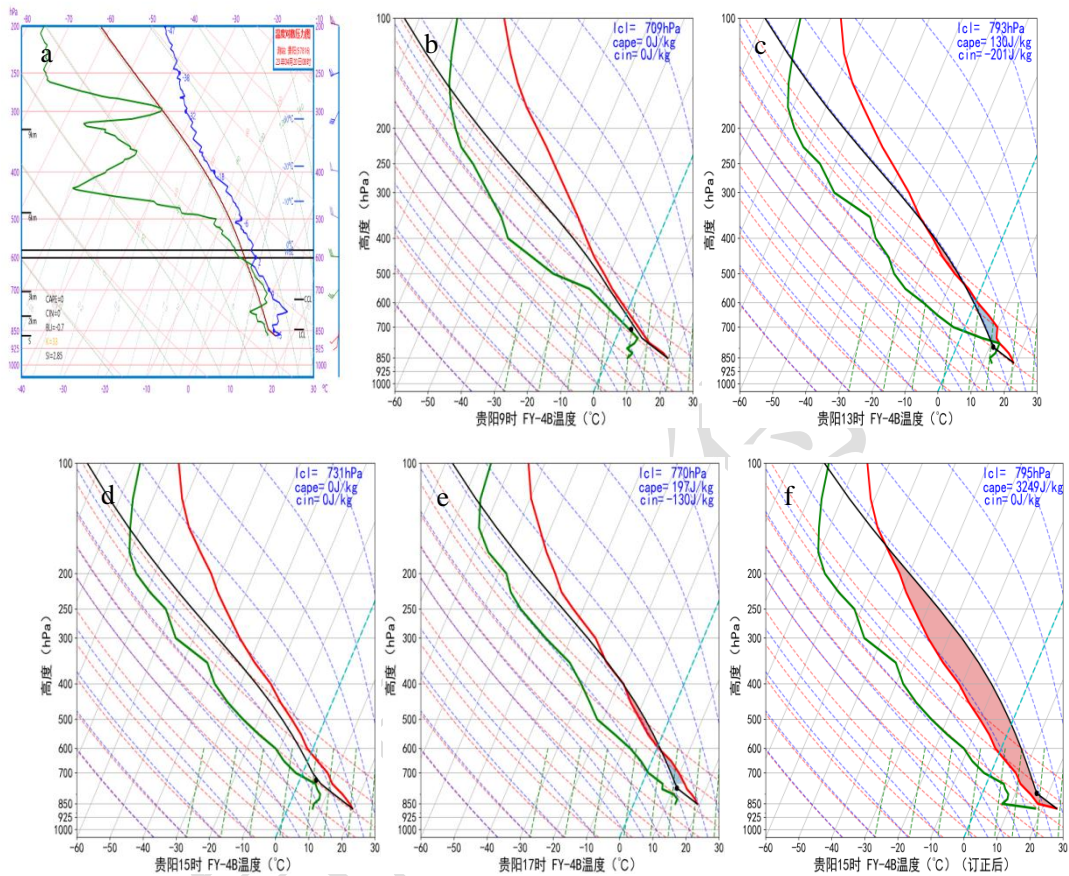
344 由以上分析可知，近地层的温度和湿度对 CAPE 计算起到至关重要的作用，但 GIIRS 对近地
345 层温湿反演偏差较大，这对强对流潜势和分类预报有一定影响，下面以两个个例详细说明
346 FY-4B 近地层温湿反演偏差对强对流预报的影响。

347 3.2.1 2023 年 4 月 20 日冰雹过程

348 2023 年 4 月 20 日，贵州中西部地区出现较大范围的冰雹过程（图略），13:30 对流云
349 团在贵州西部生成，东移过程中逐渐发展为线状多单体风暴，造成贵州西部 16 个县境内出
350 现冰雹，17:00—18:00 在织金和清镇出现本次过程最大冰雹，直径达 30mm。

351 08:00 贵阳探空显示为静力稳定层结，CAPE 为 $0\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，但整体为“上干下湿”结构，
352 850hPa 和 500hPa 温度差 (T_{85}) 为 21°C ，有一定的不稳定潜势（图 12a）。09:00FY-4B 反演
353 的贵阳附近温湿廓线表现出了 500hPa 以上的干层和 700~600hPa 的湿层，但由于反演的近
354 地层露点温度偏低，导致 800hPa 以下相对湿度低估。由地面自动站观测数据可知，09:00
355 —15:00 贵阳站地面 2 米温度从 18.4°C 升高至 24.4°C ，露点温度从 14.9°C 升高至 17.9°C ，
356 对比 09:00—17:00 FY-4B 反演的地面温度一直维持在 20°C 附近，没有明显升高，露点温度
357 变化跳跃不连续，且较实况偏低 $3\sim 6^\circ\text{C}$ 左右，近地层相对湿度仍然严重偏小。要出现直径 30mm
358 的大冰雹，必须有较大的 CAPE 值（俞小鼎等，2020），但 FY-4B 反演的近地层温度递减率
359 和相对湿度偏小，导致 CAPE 计算显著偏小，17:00CAPE 仅为 $141\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，这显然与发生大冰

360 雹的事实不符。因此，采用冰雹发生前 15:00 贵阳地面站观测的 2m 温度 (24.4°C) 和露点
 361 温度 (17.9°C) 代替 FY-4B 最底层的温度和露点温度订正后 (图 12f)，近地层温度递减率
 362 增大，抬升凝结高度降低，CAPE 增加至 $3249\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，是十分有利于强对流特别是大冰雹发
 363 生的，虽然仅用地面温度、露点温度订正廓线，存在 CAPE 偏大的可能，但这不失为业务中
 364 快速订正的一种方式。



365

366

367 图 12 2023 年 4 月 20 日 (a) 贵阳探空，(b~e) FY-4B 反演温湿廓线 (f) 经地面温度和露点订正过的
 368 FY-4B 反演温湿廓线

369 Fig. 12 (a) Guiyang sounding, (b-e) retrieved temperature and humidity profiles by FY-4B, and (f) inversed
 370 temperature and humidity profiles of FY-4B corrected by surface temperature and dew-point in Guiyang on
 371 20 April 2023

372

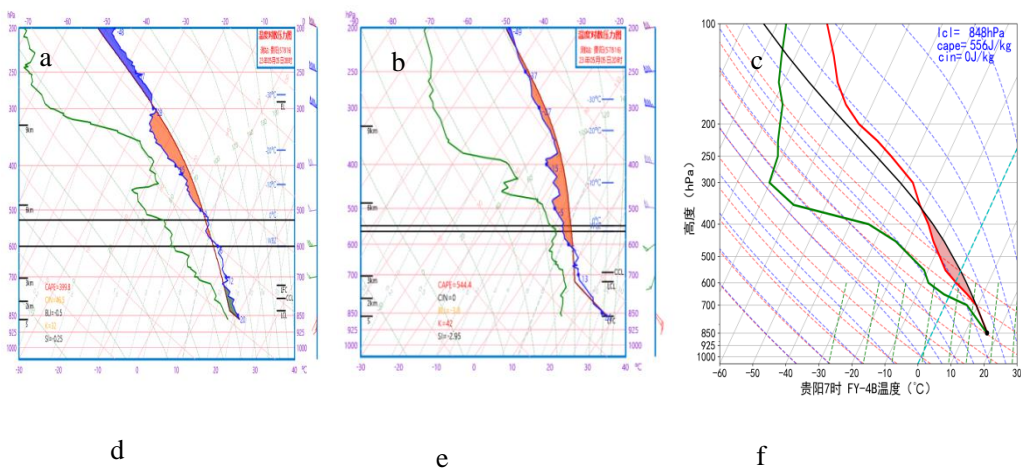
373 3.2.2 2023 年 5 月 5 日冰雹过程

374 2023 年 5 月 5 日午后至夜间，贵州中北部发生极端强对流及暴雨天气，16 个县境内出
 375 现冰雹，20:56 在遵义市播州区铁厂镇出现直径 40mm 的大冰雹，并有 26 个观测站出现 8 级
 376 以上雷暴大风，最大风速为余庆县花山站 $32.9\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

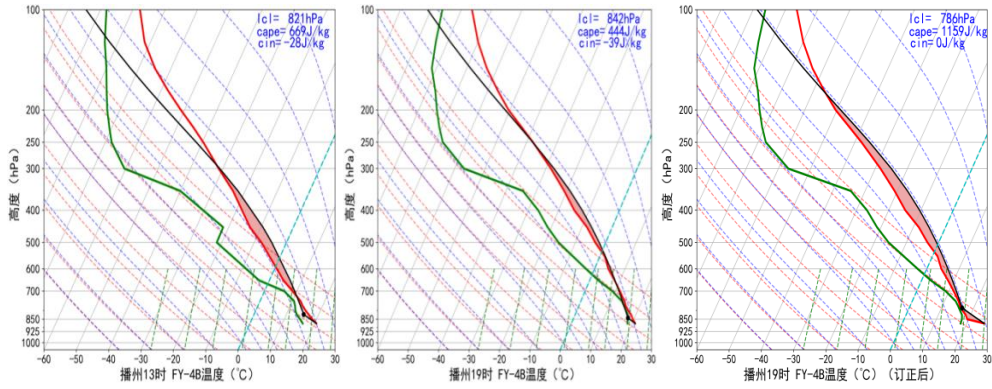
377 5 日 08:00，贵阳探空显示为“上干下湿”层结 (图 13a)，CAPE 为 $399.8\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，是
 378 较有利于强对流天气发生的环境条件。07:00FY-4B 反演的贵阳附近温湿廓线同样表现出“上

379 干下湿”层结(图 13b), CAPE 为 $556\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 能较好反映实况大气温湿结构, 但温湿廓线
 380 细节略有偏差, 实况探空在 400hPa 附近相对较湿, 而 FY-4B 反演相对较湿的层结在 500hPa
 381 附近, 实况探空 CAPE 位于 500~300hPa, FY-4B 反演则位于 700~400hPa, 说明反演的温度递
 382 减率在中层偏大, 在高层偏小。由于最大冰雹发生地距离贵阳探空站约 150km, 因此重点分
 383 析播州附近 FY-4B 反演的大气温湿结构。随着午后地面增温, 13:00—17:00 播州 CAPE 迅速
 384 增强, 从 13:00 的 $582\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 17:00 增加至 $1114\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略), 为对流生成发展提供
 385 了能量条件。但在大冰雹前的 19:00, 反演的 CAPE 却减小到了 $334\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 13d, 13e),
 386 同样与大冰雹形成所需的能量条件不符, 对比地面温度, 反演温度明显偏低, 因此对 CAPE
 387 明显低估。利用 2m 温度和露点温度订正 FY-4B 温湿廓线最底层的温度和露点温度, 订正之
 388 后的 CAPE 显著增加, 13:00 订正后 CAPE 增加到 $2895\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 19:00 增加到 $1041\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图
 389 13f), 有利于大冰雹形成。

390 本次过程的另一个特点是雷暴大风较多, 从 20:00 贵阳探空(图 13b)可以看到, 500hPa
 391 以上有明显的干层, 700~500hPa 为湿层, 700hPa 以下露点温度差较 08:00 有所增大, 形成
 392 “倒 V 型”, 温度递减率接近干绝热, 十分有利于雷暴大风的发生(孙继松和陶祖钰, 2012)。
 393 实况显示 21:03 铁厂镇附近出现了 $28.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷暴大风, 但 19:00 反演的播州温湿廓线只
 394 有 500hPa 以上的干层, 并没有表现出 700hPa 以下的干层, 温度递减率接近于湿绝热, 而不
 395 是利于发生雷暴大风的干绝热, 若用此温湿廓线, 可能会导致预报员对雷暴大风发生潜势的
 396 误判。因此, 采用 2m 温度和露点温度订正后, 19:00 800hPa 以下的温度露点差增大, 形成
 397 “倒 V 型”, 有利于冰雹和雷暴大风的结构, 可见, 订正后的探空可以较好地辅助预报员对
 398 分类强对流的短临预报。



399



400

401

402 图 13 2023 年 5 月 5 日 (a, b) 贵阳探空, FY-4B 反演 (c) 贵阳、(d, e) 播州温湿廓线, (f) 经地面
403 温度和露点温度订正过的 FY-4B 反演温湿廓线

404 Fig. 13 (a, b) Guiyang sounding, (c, d, e) retrieved temperature and humidity profiles by FY-4B
405 in (c) Guiyang and (d, e) Bozhou, and (f) retrieved temperature and humidity profiles of FY-4B
406 corrected by surface temperature and dew-point in Bozhou on 5 May 2023

407 4 结论

408 为评估 FY-4A/4B 的 GIIRS 产品在贵州的精度和业务应用效果, 以贵阳、威宁两站实况
409 探空和 ERA5 再分析资料为基准, 检验了 FY-4A 温度廓线、FY-4B 温度和湿度廓线, 并选取
410 了 2023 年三次区域性冰雹过程对卫星反演温湿廓线的应用效果进行分析, 得到主要结论如
411 下:

412 (1) 对 GIIRS 的不同质量码进行误差分析, D3 与 ALLALL 相比误差和离散度明显减小,
413 但 D23 和 D3 相比误差下降并不明显, 实际业务中可以考虑使用质量码 2 的数据, 最大程度
414 保留温湿廓线的完整性, 对重构探空后计算对流参数有重要作用。

415 (2) 云对 GIIRS 探测温湿廓线有较大的影响, 有云的天空状况下, FY-4A 温度 RMSE 比
416 无云和云边界时分别增加了 1.19°C、0.96°C, FY-4B 温度分别增加了 1.52°C、1.21°C。有
417 云时 RMSE 的数值和离散度都比无云时更大, 温度的这种差别在高层和中层较明显, 低层的
418 差别减小。湿度 RMSE 在有云和无云时差异比温度更大, 有云时误差分布范围更广, 且容易
419 出现极端值, 700hPa 以下湿度在无云和有云的 RMSE 差距最为显著, 无云时平均值为
420 $1.47\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有云时可达 $3.24\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是无云的 2.2 倍。因此在使用该湿度产品时要充分
421 考虑误差较大的问题, 使用时应更注重温湿廓线结构的变化趋势。

422 (3) 对比不同季节贵阳和威宁实况探空和卫星反演的平均温湿廓线, 冬季由于乌蒙山
423 地形阻挡形成云贵静止锋, 卫星温度廓线能较好反映出贵阳的脱地悬浮锋面逆温, 而没有反
424 映出威宁的边界层浅薄锋面逆温。春季卫星温湿廓线能较好的反映出“上干下湿”的大气层

425 结,也能体现出威宁由于海拔较高,大气低层相对湿度比贵阳低的特征,但反演的露点温度
426 廓线比实况略低。夏季卫星反演温湿廓线能较好的体现湿层伸展较春季更高的特征,湿度廓
427 线在中低层比实况低,温度廓线接近但略低于实况,因此夏季卫星反演的大气层结较实况更
428 “干”。

429 (4) 评估 GIIRS 温湿廓线在 2023 年 3 次贵州区域性冰雹过程中的应用效果: 3 月 16
430 日贵州中西部的大范围冰雹过程中, GIIRS 与贵阳和威宁站的实况探空较为一致, 高时空分
431 辨率的温湿廓线有助于追踪大气层结发生的变化, 在冰雹发生前“上冷下暖”、“上干下湿”
432 的不稳定度增加, 对冰雹天气的潜势预报有较强的指示意义。但在 4 月 20 日和 5 月 5 日的
433 冰雹过程中也发现, 由于 GIIRS 对近地层温湿度反演误差较大, 温度和露点温度较实况偏小,
434 导致计算的 CAPE 偏小, 不符合观测到大冰雹的事实。利用地面观测的 2m 温度和露点温度进
435 行订正后, 可以显示出较大的 CAPE, 以及利于雷暴大风发生的探空形态, 为预报员进行分
436 类强对流短临预报有较好的支撑作用。

437

438 参考文献

439 官莉, 韩静, 薛秋蒙, 2023. FY-4A GIIRS 高时间分辨率温湿度廓线反演及其在台风中的应用[J]. 气象科
440 学, 43(4): 561-568. Guan L, Han J, Xue Q M, 2023. Temperature and humidity retrieval of FY-4A GIIRS with
441 high temporal resolution and its application in typhoon[J]. J Meteor Sci, 43(4): 561-568 (in Chinese).

442 华建文, 毛建华, 2018. “风云四号”气象卫星大气垂直探测仪[J]. 科学, 70(1): 24-29. Hua J W, Mao J H,
443 2018. Geostationary interferometric-type infrared sounder (GIIRS) on Fengyun No.4 metrological satellite[J].
444 Science, 70(1): 24-29 (in Chinese).

445 黄艺伟, 陈淑仪, 何敏, 等, 2021. 我国台风高发期东海和南海海区 GIIRS/FY-4A 温度反演廓线精度研
446 究[J]. 热带气象学报, 37(2): 277-288. Huang Y W, Chen S Y, He M, et al, 2021. A study on the accuracy of
447 temperature profile retrieved from GIIRS/FY-4A over the east and south China sea[J]. J Trop Meteor, 37(2):
448 277-288 (in Chinese).

449 李力, 杨静, 许可, 等, 2024. 云贵高原东部锋面雾的特征及气象影响因子分析[J]. 气象与环境科学,
450 47(2): 36-45. Li L, Yang J, Xu K, et al, 2024. Characteristics of frontal fog in eastern Yunnan-Guizhou Plateau
451 and the analysis of meteorological impact factors[J]. Meteor Environ Sci, 47(2): 36-45 (in Chinese).

452 林丹, 2015. 西南地区不同类型云的云水含量时空分布和变化趋势[J]. 干旱气象, 33(5): 748-755, 801.
453 Lin D, 2015. Temporal and spatial distribution and change trend of cloud water of different types clouds in
454 Southwest China[J]. J Arid Meteor, 33(5): 748-755, 801 (in Chinese).

455 林晓萌, 尉英华, 张楠, 等, 2022. 基于地基遥感设备构建遥感探空廓线[J]. 应用气象学报, 33(5):
456 568-580. Lin X M, Wei Y H, Zhang N, et al, 2022. Construction of air-sounding-profile system based on

457 foundation-remote-sensing equipment[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(5): 568-580 (in Chinese).

458 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等, 2009. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J].
459 大气科学, 33(2): 388-396. Liu H Y, Wang Y C, Wang J L, et al, 2009. Preliminary analysis of the characteristics
460 of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing[J]. *Chin J*
461 *Atmos Sci*, 33(2): 388-396 (in Chinese).

462 刘娟娟, 徐兰, 成巍, 等, 2022. 面向资料同化的FY-4A卫星GIIRS探测仪偏差特征分析和偏差订正[J].
463 大气科学, 46(2): 275-292. Liu J J, Xu L, Cheng W, et al, 2022. Bias characteristics and bias correction of GIIRS
464 sounder onboard FY-4A satellite for data assimilation[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(2): 275-292 (in Chinese).

465 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等, 2017. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. *海洋气象学报*, 37(2):
466 1-12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al, 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics
467 and its application prospects[J]. *J Marine Meteor*, 37(2): 1-12 (in Chinese).

468 罗双, 狄迪, 崔林丽, 2019. 基于信息容量的FY-4A/GIIRS红外光谱探测能力研究[J]. *红外与毫米波学*
469 *报*, 38(6): 765-776. Luo S, Di D, Cui L L, 2019. Study on FY-4A/GIIRS infrared spectrum detection capability
470 based on information content[J]. *J Infrared Millim Waves*, 38(6): 765-776 (in Chinese).

471 闵昌红, 黄世芹, 吴有恒, 2022. 2003—2017年贵阳大气边界层的逆温特征[J]. *气象科技进展*, 12(3):
472 66-70. Min C H, Huang S Q, Wu Y H, 2022. Analysis of atmospheric boundary layer inversion characteristics
473 from 2003 to 2017 in Guiyang[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 12(3): 66-70 (in Chinese).

474 牛宁, 任素玲, 夏扬, 等, 2023. 风云气象卫星寒潮灾害天气监测应用[J]. *卫星应用*, (6): 33-37. Niu N,
475 Ren S L, Xia Y, et al, 2023. Application of Fengyun Meteorological Satellites in Monitoring Cold Wave Disaster
476 Weather[J]. *Satellite Application*, (6): 33-37 (in Chinese).

477 钱媛, 马旭林, 郭启云, 等, 2019. 基于FNL和GRAPES分析场的探空温度数据的误差分析[J]. *气象*,
478 45(10): 1464-1475. Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al, 2019. Error analysis of sounding temperature data based on
479 the FNL and GRAPES analysis fields[J]. *Meteor Mon*, 45(10): 1464-1475 (in Chinese).

480 覃皓, 黄明策, 农孟松, 等, 2023. 基于FY-4A温湿廓线的强对流过程探空检验及应用分析[J]. *气象科技*,
481 51(1): 1-13. Qin H, Huang M C, Nong M S, et al, 2023. Comparative verification of sounding data of strong
482 convective processes based on FY-4A temperature and humidity profiles[J]. *Meteor Sci Technol*, 51(1): 1-13 (in
483 Chinese).

484 孙继松, 陶祖钰, 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. *气象*, 38(2): 164-173. Sun J S, Tao
485 Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. *Meteor Mon*,
486 38(2): 164-173 (in Chinese).

487 王洪, 周后福, 王琛, 等, 2023. 基于微波辐射计和探空的FY-4A温度廓线检验[J]. *应用气象学报*, 34(3):
488 295-308. Wang H, Zhou H F, Wang C, et al, 2023. Accuracy validation of FY-4A temperature profile based on
489 microwave radiometer and radiosonde[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(3): 295-308 (in Chinese).

490 王金成, 王丹, 王瑞文, 等, 2024. 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
491 响[J]. *气象*, 50(2): 159-169. Wang J C, Wang D, Wang R W, et al, 2024. Assimilation of round-trip horizontal
492 drift radiosonde data in CMA-MESO 3DVar and its impact on model forecast[J]. *Meteor Mon*, 50(2): 159-169 (in

493 Chinese).

494 咸迪, 2021. 风云四号B星[J]. 卫星应用, (7): 68. Xian D, 2021. Fengyun-4B Satellite[J]. Satellite

495 Application, (7): 68 (in Chinese).

496 杨静, 杜小玲, 齐大鹏, 等, 2015. 云贵高原东段山地MCC的普查和降水特征[J]. 高原气象, 34(5):

497 1249-1260. Yang J, Du X L, Qi D P, et al, 2015. MCC survey and rainfall characteristic in East mountain of

498 Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Plateau Meteor, 34(5): 1249-1260 (in Chinese).

499 杨静, 杜小玲, 朱文达, 等, 2020. 贵州锋面雾的基本特征及静止锋进退对其生消的影响分析[J]. 暴雨

500 灾害, 39(5): 496-507. Yang J, Du X L, Zhu W D, et al, 2020. Analysis on basic characteristics of frontal fog in

501 Guizhou and influence of stationary front on its generation and elimination[J]. Torr Rain Dis, 39(5): 496-507 (in

502 Chinese).

503 杨静, 姚秀萍, 李彦霖, 等, 2023. 云贵高原东北部一次罕见冰雹超级单体结构特征与发展分析[J]. 高

504 原气象, 42(2): 374-385. Yang J, Yao X P, Li Y L, et al, 2023. Structural characteristics and developmental

505 analysis of the rare hail supercell in the Northeast Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Plateau Meteor, 42(2): 374-385 (in

506 Chinese).

507 杨雨晗, 尹球, 束炯, 2018. FY-4A大气垂直探测仪(GIIRS)温度探测通道优选[J]. 红外与毫米波学报,

508 37(5): 545-552. Yang Y H, Yin Q, Shu J, 2018. Channel selection of atmosphere vertical sounder (GIIRS) on

509 board the FY-4A geostationary satellite[J]. J Infrared Millim Waves, 37(5): 545-552 (in Chinese).

510 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Wang X

511 M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorms and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological

512 Press (in Chinese).

513 张鹏, 咸迪, 孙雪琪, 等, 2022. 冬奥赛场卫星和地基微波辐射计气温廓线观测对比和验证[J]. 气象科

514 技, 50(4): 485-493. Zhang P, Xian D, Sun X Q, et al, 2022. Comparison and verification of vertical temperature

515 profiles in winter olympic venue based on satellite and ground microwave observation data[J]. Meteor Sci Technol,

516 50(4): 485-493 (in Chinese).

517 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化试验[J]. 气

518 象, 47(12): 1512-1524. Zhang X P, Guo Q Y, Yang R K, et al, 2021. Assimilation experiment of rainstorm in the

519 middle and lower reaches of the Yangtze River based on "up-drift-down" sounding data[J]. Meteor Mon, 47(12):

520 1512-1524 (in Chinese).

521 张晓芸, 2020. FY-4数据产品在强对流监测中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学. Zhang X Y, 2020.

522 Application of the FY-4 data products in sever convection monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University of

523 Information Science and Technology (in Chinese).

524 赵渊明, 孙静, 漆梁波, 等, 2024. 基于L波段探空观测的FY-4A云顶温度产品评估及其在冬季降水相态

525 判别中的应用[J]. 气象, 50(1):59-70. Zhao Y M. Sun J. Qi L B, et al. 2024. Evaluation of FY-4A cloud top

526 temperature product based on L-band radiosonde data and its application in winter precipitation type

527 identification[J]. Meteor Mon,50(1):59-70(in Chinese).

528 周雪松, 郭启云, 夏元彩, 等, 2023. 基于往返式平漂探空的FY-3D卫星反演温度检验[J]. 应用气象学报,
529 34(1): 52-64. Zhou X S, Guo Q Y, Xia Y C, et al, 2023. Inspection of FY-3D satellite temperature data based on
530 horizontal drift round-trip sounding data[J]. J Appl Meteor Sci, 34(1): 52-64 (in Chinese).

531 周永水, 原野, 牟克林, 等, 2013. 基于对流参数的贵州春季冰雹潜势预报[J]. 热带地理, 33(1): 9-12, 62.
532 Zhou Y S, Yuan Y, Mu K L, et al, 2013. Hail potential trend forecast based on convection parameters in
533 Guizhou[J]. Trop Geogr, 33(1): 9-12, 62 (in Chinese).

534 周永水, 原野, 万雪丽, 2020. 复杂山地环境下雷暴天气中的地基微波辐射计影响距离分析[J]. 热带气
535 象学报, 36(2): 199-207. Zhou Y S, Yuan Y, Wan X L, 2020. Analysis of effective detection distance of
536 ground-based microwave radiometer in thunderstorm weather in complex mountainous terrains[J]. J Trop Meteor,
537 36(2): 199-207 (in Chinese).

538 Cai X, Bao Y S, Petropoulos G P, et al, 2020. Temperature and humidity profile retrieval from FY4-GIIRS
539 hyperspectral data using artificial neural networks[J]. Remote Sens, 12(11): 1872.

540 Feng J, Qin X H, Wu C Q, et al, 2022. Improving typhoon predictions by assimilating the retrieval of
541 atmospheric temperature profiles from the FengYun-4A's geostationary interferometric infrared sounder
542 (GIIRS)[J]. Soc Sci Electr Publish, 280: 106391.

543 He M, Wang D H, Ding W Y, et al, 2019. A validation of Fengyun4A temperature and humidity profile
544 products by radiosonde observations[J]. Remote Sens, 11(17): 2039.

545 Ren S L, Jiang J Y, Fang X, et al, 2022. FY-4A/GIIRS temperature validation in winter and application to
546 cold wave monitoring[J]. J Meteor Res, 36(4): 658-676.

547 Yin R Y, Han W, Gao Z Q, et al, 2021. Impact of high temporal resolution FY-4A geostationary
548 interferometric infrared sounder (GIIRS) radiance measurements on typhoon forecasts: Maria (2018) case with
549 GRAPES global 4D-var assimilation system[J]. Geophys Res Lett, 48(15): e2021GL093672.