

李力,李彦霖,杨静,等,2025. FY-4A/4B 温湿廓线检验及在贵州冰雹过程中的应用分析[J]. 气象,51(8):964-977. Li L, Li Y L, Yang J, et al, 2025. Verification of FY-4A/4B temperature and humidity profiles and its application in the hail process in Guizhou[J]. Meteor Mon, 51(8):964-977(in Chinese).

FY-4A/4B 温湿廓线检验及在贵州冰雹 过程中的应用分析^{*}

李 力 李彦霖 杨 静 周永水 周明飞

贵州省气象台, 贵阳 550002

提 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 温湿廓线进行了检验。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℃、0.96℃,FY-4B 温度分别增加 1.52℃、1.21℃,比湿分别增加 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。与不同季节贵阳和威宁实况探空对比表明,卫星反演的温湿廓线能较好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 FY-4A/4B GIIRS 产品应用效果,结果表明 GIIRS 产品与贵阳和威宁两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 2 m 温度和露点温度订正后,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参考作用。

关键词: FY-4A/4B GIIRS 产品,温湿廓线,对比检验,冰雹预报

中图分类号: P412, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.041302

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 Observatory, 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 temperature and humidity profiles are verified against sounding observations at Guiyang and Weining stations and ERA5 reanalysis data. The results indicate that, in practical operations, it is considered that only the unusable data can be eliminated, while the data with the best and better quality can be retained so as to maximize the integrity of the temperature and humidity profiles. Clouds significantly degrade GIIRS retrieval performance. Under cloudy conditions, the root mean square error of FY-4A temperature increases by 1.19℃ (clear sky) and 0.96℃ (cloud edge), FY-4B temperature increases by 1.52℃ (clear sky) and 1.21℃ (cloud edge), and specific

^{*} 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)和风云卫星先行计划-天气预报应用专项(FY-APP-ZX-2023.01)共同资助

2024年8月13日收稿; 2025年6月3日收修定稿

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

通讯作者:杨静,主要从事天气预报相关研究. E-mail:sunying_yj@sina.com

humidity increases by $1.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (clear sky) and $0.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (cloud edge), respectively. Moreover, cloud cover also amplifies vertical data dispersion. Seasonal comparisons between sounding and satellite profiles demonstrate that FY-4A/4B captures terrain-induced differences in atmospheric stratification between Guiyang and Weining. For three regional hail events in 2023, GIIRS products agree well with sounding observations. The high-resolution profiles reveal pre-hail instability, which is “upper dry and lower wet”, offering valuable forecast indicators. However, the near-surface layer retrieval errors lead to the underestimation of convective available potential energy (CAPE) and distort low-level sounding structures. After the surface 2 m temperature and dew point temperature corrections, a large CAPE and a sounding structure conducive to the occurrence of thunderstorms and strong winds are displayed. This is a good support for the short-time forecasting and nowcasting of severe convections.

Key words: FY-4A/4B GIIRS product, temperature and humidity profile, comparative verification, hail forecast

引 言

大气温湿层结数据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温湿廓线最常用的业务化手段,能直接探测大气温湿信息,具有较高的代表性和可信度(钱媛等,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(刘红燕等,2009;周雪松等,2023),这给需要及时捕捉大气温湿状态变化的应用场景,如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都具有重要作用(杨雨晗等,2018)。

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 星(FY-4A)和 B 星(FY-4B)上搭载的静止轨道干涉式红外探测器(GIIRS)是主要载荷之一,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为 2.1 K,有云时误差为 3.7 K,对于大多数云类型,温度误差范围为 2.5~3.0 K,晴空时湿度廓线误差为 18%,有云时误差为 21%。张鹏等(2022)对比了地基微波辐射计和 FY-4A 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)利用人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,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 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。

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 针对台风个例开展研究(Yin et al,2021;Feng et al,2022;官莉等,2023);牛宁等(2023)评估了 FY-4A GIIRS 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,但仍然缺乏 GIIRS 在实际业务中的应用评估。使用 10 km 分辨率、逐 2 h 更新的 GIIRS 资料,可以得到预报预警亟需的高时空分辨率大气温湿廓线,可有效弥补探空资料时空分辨率不足的问题,将成为监测灾害性天气潜势的新型观测手段之一。

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%,海拔高度在 147.8~2900.6 m (图 1)。由于地理位置特殊,贵州(特别是西部地区)是对流云团的初生源地,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;2023)。贵州省内共有三个探空站,分别为贵阳站、威宁站和普安站(2025 年 3 月新建),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),无法全面反映全省温湿水平(垂直)分布,也不能及时捕捉大气温湿层结的变化,因此 GIIRS 产品提供的覆盖面广的全天候高时空分辨率大气温湿廓线,可为贵州灾害性天气,特别是午后强对流天气的预报预警提供强有力支撑。同时研究也表明,云给 GIIRS 反演精度带来很大不确定性(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 的影响。因此本文基于贵阳站(海拔 1223 m)和威宁站(海拔 2238 m)探空资料,检验 FY-4A/4B 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,探讨 GIIRS 高时空分辨率的温湿廓线在冰雹短临时临近预报中的作用,以期评估 GIIRS 产品在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。

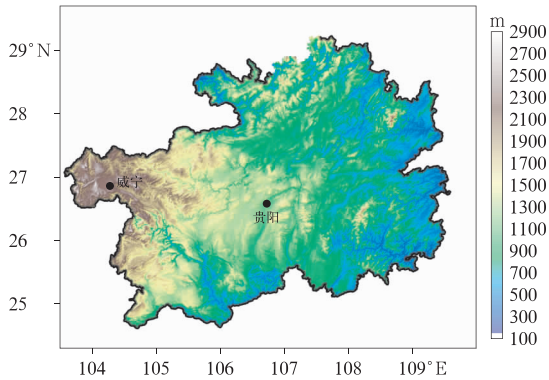


图 1 贵州探空站(黑点)和地形(填色)分布
Fig. 1 Distribution of radiosonde stations (black dot) and terrain (colored) in Guizhou Province

1 数据和方法

1.1 数据来源

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,数据来源于国家卫星气象中心 (<https://satellite.nsmc.org.cn/Portal-Site/Data/Satellite.aspx>),FY-4A 温度廓线检验时间为 2022 年 1—12 月,FY-4B GIIRS 数据于 2023 年 3 月上线,因此 FY-4B 温湿廓线检验时间为 2023 年 3—11 月。实况资料为同时时间段的贵阳和威宁探空站数据、欧洲中期天气预报中心 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规数据、人工影响天气炮站上报的冰雹观测数据。

1.2 数据处理方法

1.2.1 时空匹配

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 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。

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 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的雷暴天气中能够代表大气层结的有效范围为 30 km,因此本文考虑将探空站周围 25 km 范围内的 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

表 1 不同探测资料参数

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 观测)	2 h(00:00 开始观测)	2 h(01:00 开始观测)	1 h
空间分辨率	≥ 200 km	星下点 16 km	星下点 12 km	0.25°
垂直层数	约 90	101	101	37

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 温度廓线数据 1217 条, FY-4B 温度、湿度廓线数据各 1069 条。

1.2.2 质量控制和检验方法

FY-4A/4B 的 GIIRS 产品对每一层数据都提供了质量码:0 为最优、1 为较好、2 为较差、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、剔除质量码 2 的数据、剔除质量码 2 和 3 的数据进行比较,希望能最大程度保留在业务中可使用的数据,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 值等于 0 为无云,等于 1 为有云。为开展量化检验分析,参考覃皓等(2023)的方法,引入统计参数:平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、平均误差标准差(STD),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散程度。

2 检验结果分析

2.1 不同质量码数据误差分析

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,分为三类:不做质量控制的所有数据

(以下简称为 ALL)、只剔除质量码 3 的数据(以下简称为 D_3)、剔除质量码 2 和 3 的数据(以下简称为 D_{23})。图 2~图 4 分别为 FY-4A 温度、FY-4B 温度、FY-4B 湿度廓线与实况的平均误差及误差范围垂直分布, FY-4A 温度廓线在 600~150 hPa 小于实况,其余层结均大于实况; FY-4B 温度廓线在 800~100 hPa 小于实况,其余层结略大于实况;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 400 hPa 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 FY-4A 温度廓线的三类数据检验结果来看(图 2), ALL 的误差较大,其 ME 为 $-5.0 \sim 5.4^\circ\text{C}$, 平均为 -0.45°C , D_3 的 ME 较 ALL 明显减小,为 $-1.9 \sim 1.8^\circ\text{C}$, 平均为 -0.08°C , D_{23} 各层平均 ME 继续减小,为 $-1.2 \sim 1.3^\circ\text{C}$, 平均为 -0.05°C 。可以看出,去除质量码 3 的数据后数据质量的改善是显著的,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。进一步比较 D_3 和 D_{23} 样本, D_{23} 较 D_3 的 ME 减小 0.03°C , STD 减小 0.2°C , 误差减小并不明显。

FY-4B 温度廓线误差与 FY-4A 类似(图 3), D_3 与 ALL 相比,整层 ME 减小 0.98°C , STD 减小 3.91°C , 离散度明显降低; D_{23} 与 D_3 相比,整层 ME 减小 0.49°C , STD 减小 0.31°C 。FY-4B 比湿廓线经过质量控制后, D_3 与 ALL 相比整层 ME 减小 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, STD 减小 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, D_{23} 与 D_3 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。

表 2 给出了 FY-4A/4B 各类质量控制数据样本的误差统计, D_3 和 D_{23} 温度的 ME、MAE、RMSE、

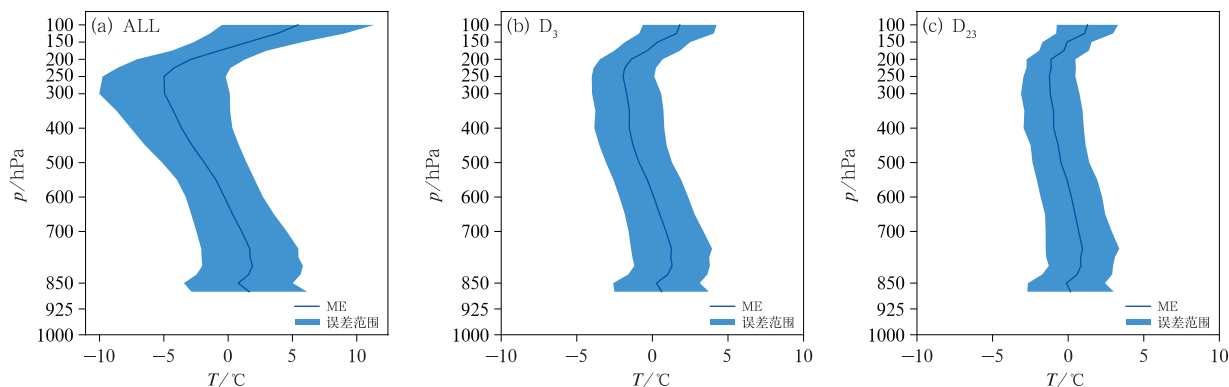


图 2 2022 年贵州 FY-4A 温度廓线三类数据相对于探空观测的误差垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of errors for three type data of FY-4A temperature profiles relative to sounding observations in Guizhou Province in 2022

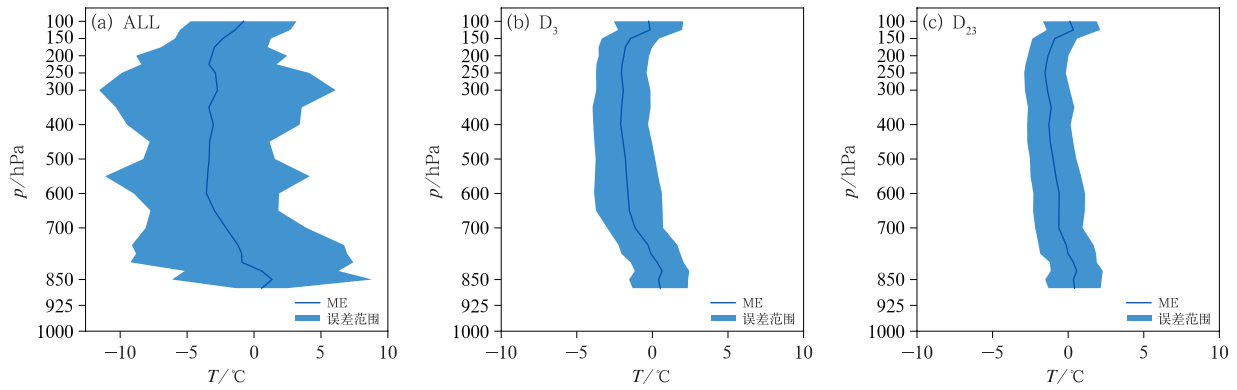


图 3 2023 年 3—11 月贵州 FY-4B 温度廓线三类数据相对于 ERA5 的误差垂直分布
Fig. 3 Vertical distribution of errors for three type data of FY-4B temperature profiles relative to ERA5 data in Guizhou Province from March to November 2023

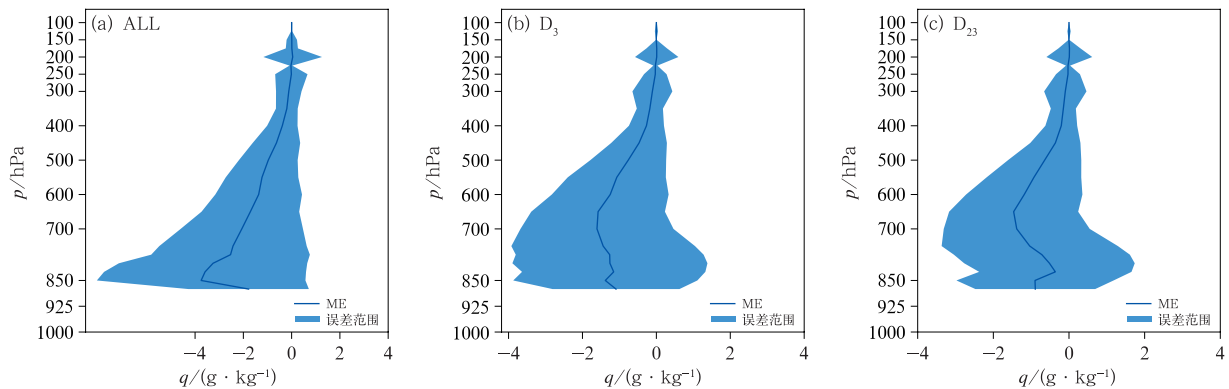


图 4 2023 年 3—11 月贵州 FY-4B 湿度廓线三类数据相对于 ERA5 的误差垂直分布
Fig. 4 Vertical distribution of errors for three type data of FY-4B humidity profiles relative to ERA5 data in Guizhou Province from March to November 2023

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 D_3 和 D_{23} 与实况相关系数均为 1; 比湿廓线的 D_3 与实况相关系数为 0.94, D_{23} 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, D_3 与 ALL 相比误差明显减小, 但 D_{23} 和 D_3 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 D_3 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 for FY-4A/4B different quality control data						
要素	样本类型	样本数占比/%	ME	MAE	RMSE	STD
FY-4A 温度廓线/ $^{\circ}\text{C}$	D_3	55	-0.08	2.12	2.67	2.38
	D_{23}	45	-0.05	1.72	2.18	2.02
FY-4B 温度廓线/ $^{\circ}\text{C}$	D_3	49	-1.08	1.93	2.39	1.91
	D_{23}	38	-0.59	1.48	1.85	1.60
FY-4B 湿度廓线/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	D_3	66	-0.68	0.96	1.36	1.16
	D_{23}	62	-0.49	0.81	1.19	1.06

2.2 云对卫星反演温湿廓线的影响

云的存在会影响地表和大气吸收气体发射的红

外辐射, 一方面云会阻挡下方 CO_2 发射的红外辐射, 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 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 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 平均值在无云和云边界条件下分别为 1.76°C 、 1.99°C ,受云吸收红外辐射的影响,有云时 RMSE 比无云和云边界分别增加了 1.19°C 、 0.96°C 。FY-4B 温度廓线 RMSE 平均值在无云和云边界条件下分别为 1.26°C 、 1.57°C ,有云比无云和云边界分别增加了 1.52°C 、 1.21°C ,两者的差距在 $700\sim 200\text{ hPa}$ 更为显著。由于比湿在高层大气接近于 $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这里只讨论 400 hPa 以下 FY-4B 湿度廓线的误差特征。无云和云边界条件下比湿的 RMSE 平均值分别为 $1.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有云时为 $2.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $400\sim 700\text{ hPa}$ 随着高度的降低, RMSE 几乎是线性增加的, 700 hPa 以下无云和有云的 RMSE 差距最为显著,无云时平均值为 $1.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有云时可达 $3.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是无云的 2.2 倍。

结合业务应用习惯,进一步分析不同层次的误差分布特征,用近地层至 700 hPa 、 $700\sim 500\text{ hPa}$ 、 $500\sim 200\text{ hPa}$ 分别代表大气的低、中、高层。FY-4A 温度在无云条件下,高层和高层超过 95% 的 RMSE 小于 2.5°C (图 6a),峰值为 1°C ,几乎很少超过 3°C ,而有云时 RMSE 的中位数和密度峰值都为 3°C ,且绝大部分

在 2°C 以上,表明无云和有云时误差分布差异较大,几乎没有重合。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 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 有重合,但无云时仍然有 25% 的 RMSE 低于 1.5°C ,有云时有极端的 RMSE 出现,最大可达 6°C 。

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,两者的数据分布几乎没有重合 (图 6b),90% 的 RMSE 在无云时小于 2°C ,峰值为 1°C ,有云时分布在 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。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 在无云和有云时有较少部分重合 (图 6c),无云绝大部分小于 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分布较均匀,有云的离散度显著增加,50% 以上均大于 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。低层有云的 RMSE 更大,50% 大于 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,峰值为 $2.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且有超过 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的极端值存在。

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云时更大,温度的这种差别在大气高层和中层较明显,低层的差别减小,这表明低层温度反演不仅受云的影响,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,有云时误差分布范围更广,尤其是 700 hPa 以下湿度误差加大,且容易出现极端值。因此在使用该湿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,使用时应更注重温湿廓线结构的变化趋势。

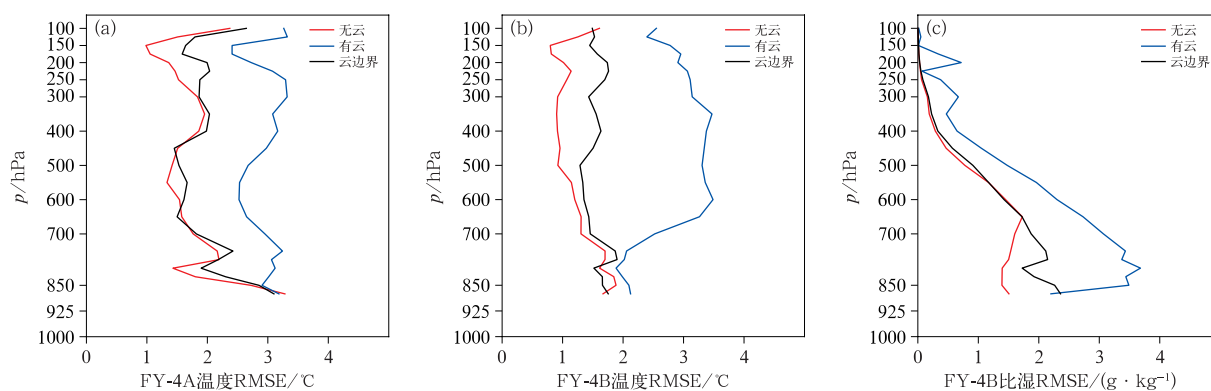
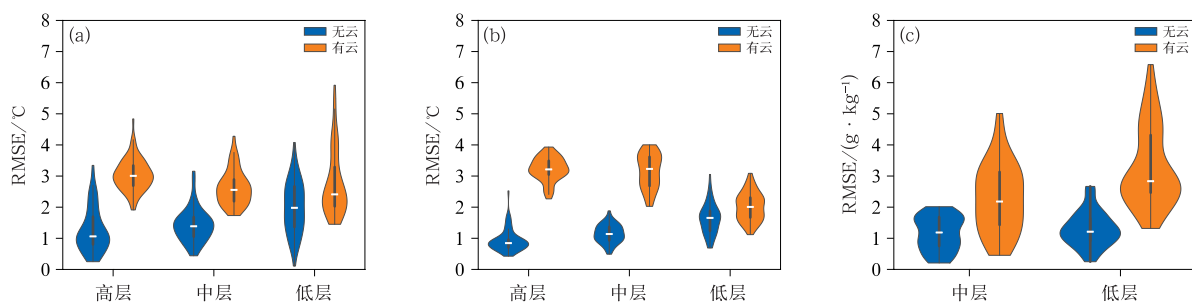


图 5 贵州 (a) 2022 年 FY-4A 温度廓线相对于探空观测的 RMSE, (b, c) 2023 年 3—11 月

FY-4B (b) 温度廓线和 (c) 湿度廓线相对于 ERA5 的 RMSE

Fig. 5 (a) RMSE of FY-4A temperature profiles relative to sounding observations in 2022, (b, c) RMSE of FY-4B (b) temperature profiles and (c) humidity profiles relative to ERA5 data from March to November 2023 in Guizhou Province



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,箱体上下边界分别为第 75% 和第 25% 分位数,箱内横线为中位数。

图 6 贵州(a)2022 年 FY-4A 温度,(b,c)2023 年 3—11 月 FY-4B(b)温度和(c)比湿 RMSE 小提琴图

Fig. 6 Violin plots of RMSE of (a) FY-4A temperature in 2022, (b) FY-4B temperature and (c) FY-4B specific humidity from March to November 2023 in Guizhou Province

2.3 不同季节卫星反演温湿廓线特征

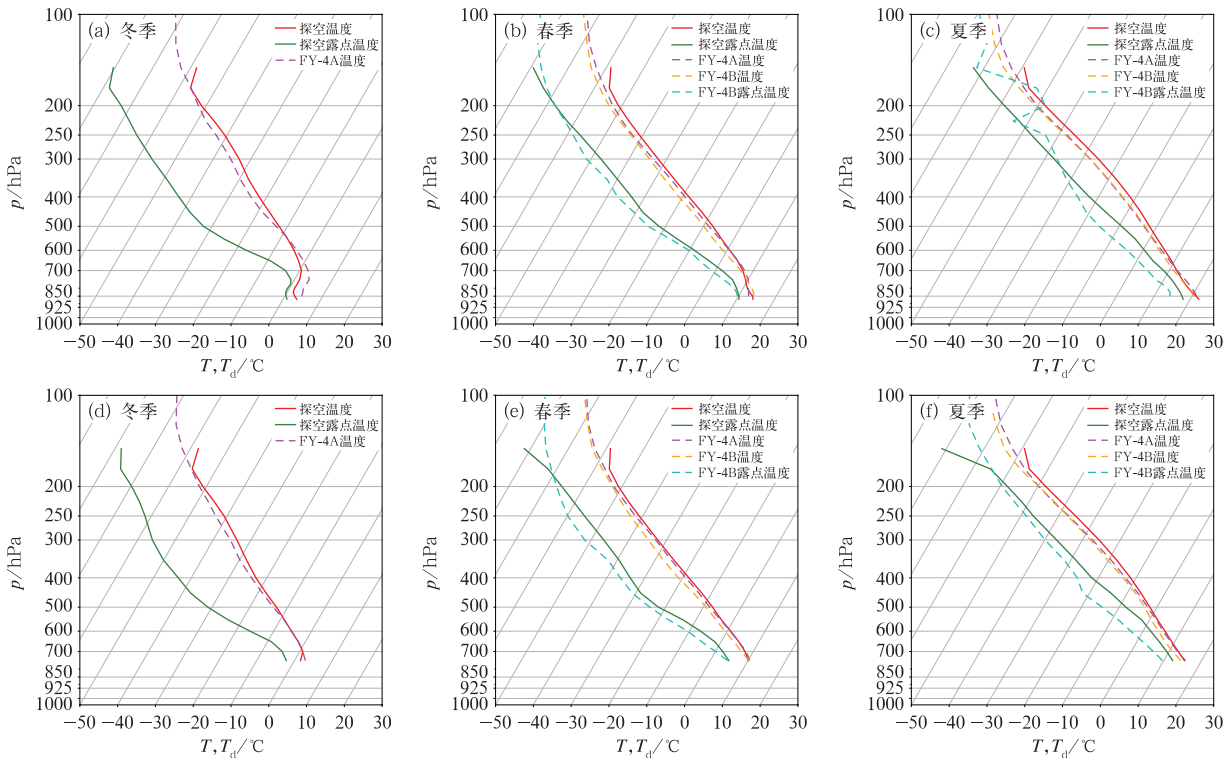
不同季节影响贵州的天气系统不同,大气温湿层结特征也有所不同。由于贵州“西高东低”的地形,云贵准静止锋造成贵州长时间低温阴雨天气,大气低层存在锋面逆温易形成锋面雾(杨静等,2020;李力等,2024);春季低层南风增强,温湿增长比高层快,大气层结趋向“上干下湿”的不稳定层结,0℃层高度适宜,结合动力抬升和不稳定能量条件,易在贵州中西部发生冰雹天气(周永水等,2013);夏季西太平洋副热带高压北抬,其外侧的偏南急流带来充足水汽,大气整层相对湿度升高。威宁站与贵阳站相距约 246 km,海拔高度相差约 1015 m,两地地形差异较大,因此本节将贵阳和威宁不同季节的温湿廓线分开讨论,探讨卫星反演的温湿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

结合贵州灾害性天气发生季节,对比冬季(2022 年 1 月、2 月、12 月)以及春季(2022 年和 2023 年 3—5 月)、夏季(2022 年和 2023 年 6—8 月)贵阳和威宁实况探空、FY-4A 平均温度廓线、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。冬季贵阳和威宁在低层均存在逆温层,贵阳常位于静止锋后,距离锋面较远,因此贵阳的逆温层较高,位于 800~700 hPa,即为脱地的悬浮逆温,这与闵昌红等(2022)的研究一致。威宁常位于静止锋附近,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 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存在一定程度的“上干下湿”结构,500 hPa 以上相对湿度逐渐减小,但由于威宁海拔比贵阳高,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。贵阳 800 hPa 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 1 h 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,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于实况,因此夏季卫星反演的大气层结较实况更“干”。

3 个例应用

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 年贵州三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。



注:露点温度由比湿换算得到。

图 7 2022—2023 年不同季节(a~c)贵阳和(d~f)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 from sounding, FY-4A, and FY-4B at (a–c) Guiyang and (d–f) Weining in different seasons during 2022–2023

3.1 2023 年 3 月 16 日冰雹过程

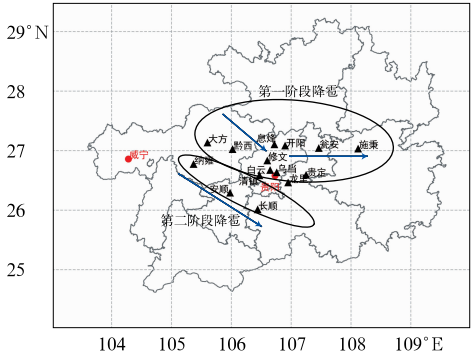
3.1.1 实况

2023 年 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 30 mm。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 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 左右对流云团进入贵阳并维持近 2 h, 造成贵阳、黔南北部大范围降雹, 20:00 后东移减弱; 第二阶段为 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、长顺降雹。

3.1.2 GIIRS 与实况探空对比

图 9 为 3 月 16 日 FY-4B 温湿廓线与威宁探空的对比, 由图可见, 08:00 威宁探空在 600~500 hPa 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 威宁探空有三段干层, FY-4B 温湿廓线在 250、400、700 hPa 附近同样表现出三段干层, 虽然干层位置与实况略有偏差, 但温湿廓线结构相近。08:00、20:00 探空对流有效位能(CAPE)分别为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $261.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 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, 尤其湿度廓线突变信息的表现力较差, 这与张晓芸(2020)的分析一致。重构探空计算出的 CAPE 较实况偏高, 没有反演出近地层



注: 黑色三角为降雹的县, 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 of Guizhou Province on 16 March 2023

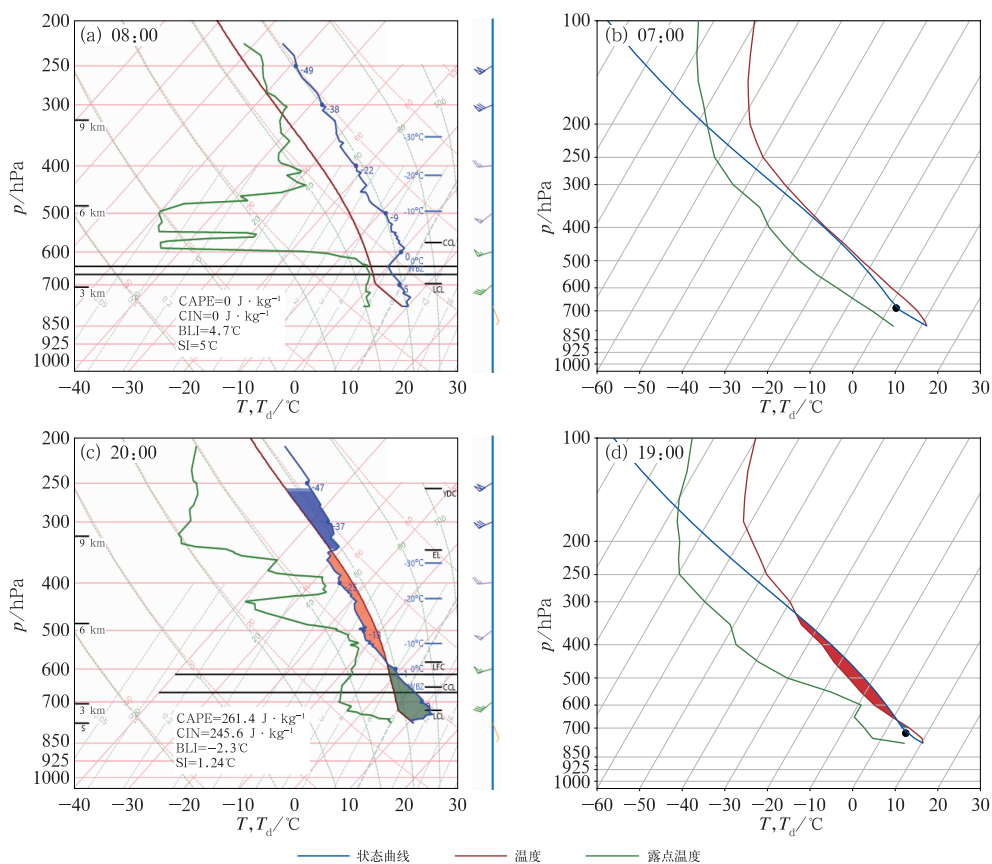


图 9 2023 年 3 月 16 日 (a,c) 威宁探空和 (b,d) FY-4B 温湿廓线
Fig. 9 Comparison of (a, c) sounding at Weining and (b, d) FY-4B temperature and humidity profiles on 16 March 2023

逆温层, 导致对流抑制能量(CIN)的低估。

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。

从威宁 FY-4B 温湿廓线演变来看(图 10a, 10b), 13:00—15:00 600 hPa 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”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, 但低层大气较干, 不适合对流发展, 对流生成之后很快消散。

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°C , 表现为“上干下湿”的不稳定层结(图 10d), 有一定的 CAPE ($127 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但 CIN 较大($368 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), 如果对

流发展能突破 CIN 则有可能降雹。威宁附近的初生回波东移接近贵阳时, 15:30 对流迅速增强并旺盛发展, 16:00 大方、黔西降雹。17:00 贵阳温度廓线低层逆温消失(图 10e), 说明 CIN 减弱, 对流更易发展加强。17:00—19:00 贵阳温湿廓线“上干下湿”层结较 15:00 更明显(图 11e, 11f), 15:00—17:00 400 hPa 的温度露点差从 7°C 增加至 12°C , 21:00 继续升到 26°C , K 指数从 30°C 增加至 36°C , 对流不稳定性显著增加。17:00 回波进入贵阳息烽后强度增强, 组合反射率由 40 dBz 跃增到 55 dBz (图略), 17:00—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 20~30 mm 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 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $166 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与观测到大冰雹的事实不相符, 这与近地层反演温湿误差较大有关, 后文会重点讨论。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

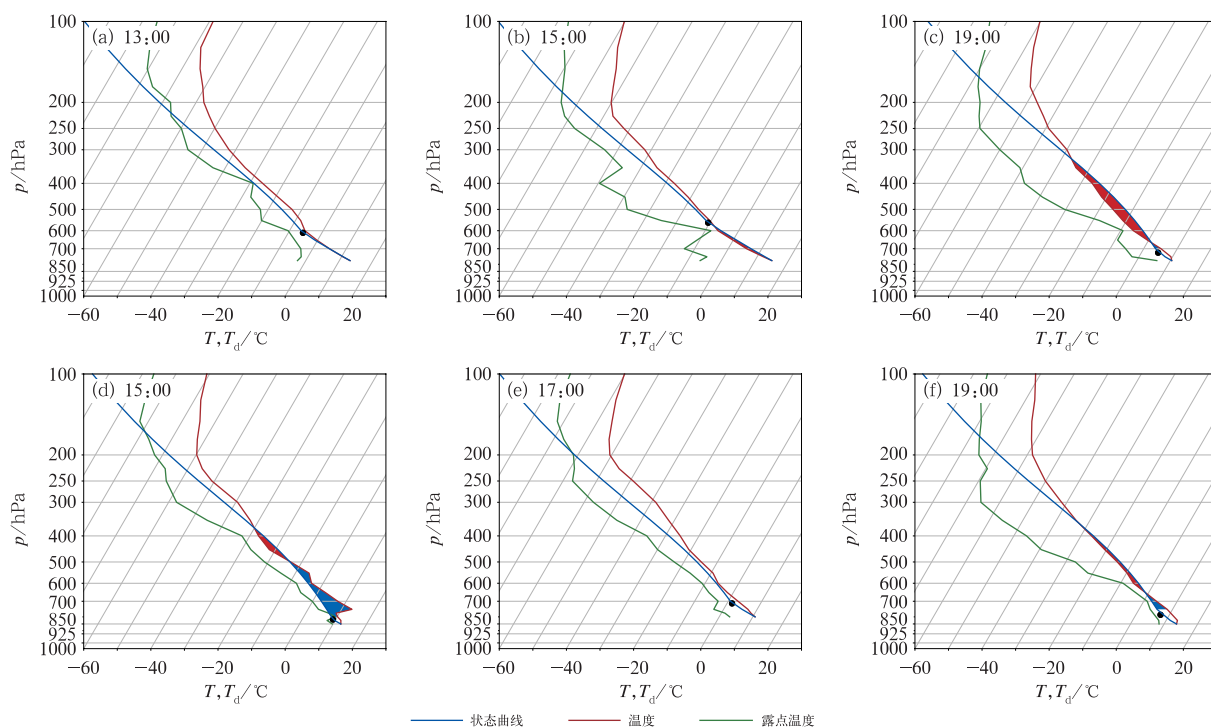


图 10 2023 年 3 月 16 日 (a~c) 威宁和 (d~f) 贵阳 FY-4B 温湿廓线

Fig. 10 FY-4B temperature and humidity profiles at (a~c) Weining and (d~f) Guiyang on 16 March 2023

不同的是, 19:00 威宁 600 hPa 以下的温度露点差显著降低(图 10c), 地面露点温度增加至 5°C , 形成了有利于降雹的“上干下湿”层结, CAPE 增大至 $560 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

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为 3, 质量控制后导致湿度廓线不全, 无法计算 CAPE、CIN 等参数, 对判断对流不稳定潜势造成一定困难, 有待进一步研究提高数据质量, 减小云的影响。

3.2 低层温湿反演偏差对重构探空的影响

环境湿度廓线低层的值作为抬升气块的露点温度, 对 CAPE 和 CIN 的计算影响较大, 湿度廓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)。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 FY-4B 近地层温湿反演偏差对强对流预报的影响。

3.2.1 2023 年 4 月 20 日冰雹过程

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 30 mm。

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, 850 hPa 和 500 hPa 温度差为 21°C , 有一定的不稳定潜势(图 11a)。09:00 FY-4B 反演的贵阳附近温湿廓线表现出了 500 hPa 以上的干层和 700~600 hPa 的湿层, 但由于反演的近地层露点温度偏低, 导致 800 hPa 以下相对湿度低估(图 11b)。由地面自动站观测数据可知, 09:00—15:00 贵阳站地面 2 m 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 , 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(图 11b~11d)。要出现直径 30 mm 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和相对湿度偏小, 导致 CAPE 计算显著偏小, 17:00 CAPE 仅为 $197 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 11e), 这显然与发生大冰雹的事实不符。因此, 采用冰雹发生前 15:00

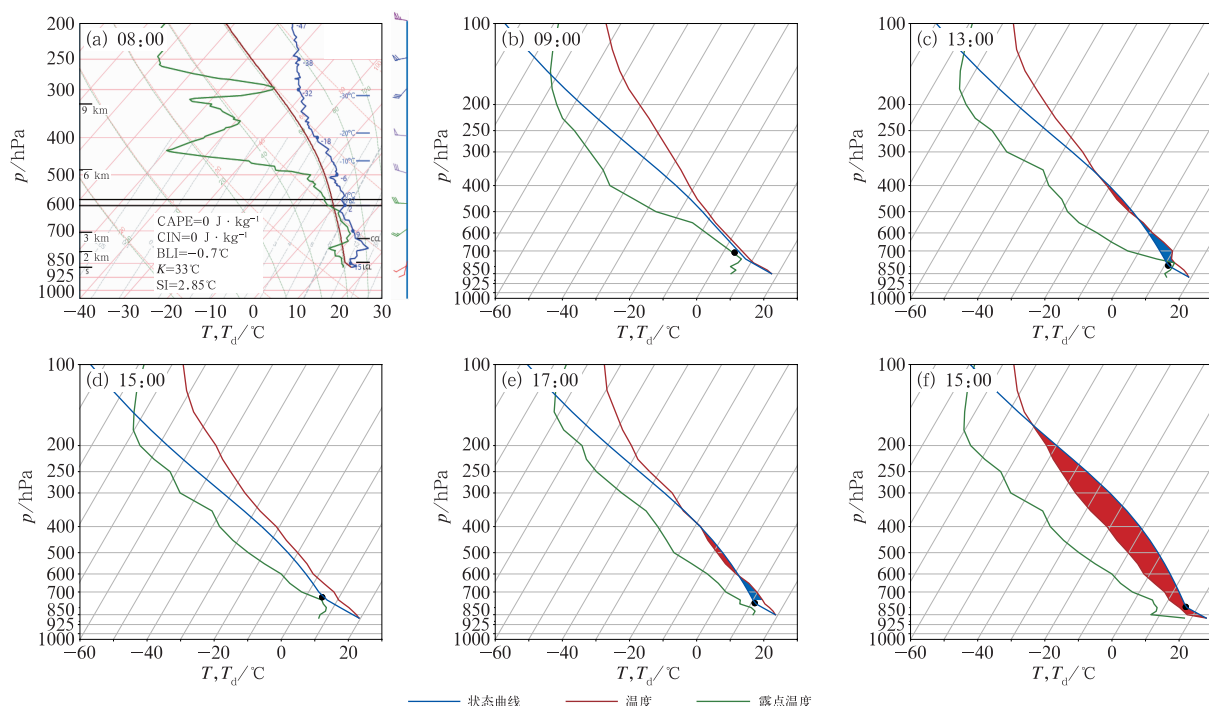


图 11 2023 年 4 月 20 日贵阳(a)探空,(b~e)FY-4B 温湿廓线和(f)经地面温度和露点温度订正后的 FY-4B 温湿廓线

Fig. 11 (a) Sounding, (b~e) FY-4B temperature and humidity profiles and (f) FY-4B temperature and humidity profiles corrected by surface temperature and dew-point temperature at Guiyang on 20 April 2023

贵阳地面站观测的 2 m 温度(24.4°C)和露点温度(17.9°C)代替 FY-4B 最底层的温度和露点温度订正后(图 11f),近地层温度递减率增大,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,但这不失为业务中快速订正的一种方式。

3.2.2 2023 年 5 月 5 日冰雹过程

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 个县境内出现冰雹,20:56 在遵义市播州区铁厂镇出现直径 40 mm 的大冰雹,并有 26 个观测站出现 8 级以上雷暴大风,最大风速为 $32.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (余庆县花山站)。

5 日 08:00,贵阳探空显示为“上干下湿”层结(图 12a),CAPE 为 $399.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,是较有利于强对流天气发生的环境条件。07:00 FY-4B 反演的贵阳附近温湿廓线同样表现出“上干下湿”层结(图 12c),CAPE 为 $556 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,能较好反映实况大气温湿结构,但温湿廓线细节略有偏差,实况探空在 400 hPa 附近相对较湿,而 FY-4B 反演相对较湿的层结在 500 hPa 附近,实况探空 CAPE 位于

500~300 hPa,FY-4B 反演则位于 700~400 hPa,说明反演的温度递减率在中层偏大,在高层偏小。由于最大冰雹发生地距离贵阳探空站较远,因此重点分析播州附近 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 迅速增强,从 13:00 的 $669 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 12d)到 17:00 增加至 $1114 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略),为对流生成发展提供了能量条件。但在大冰雹发生前的 19:00,反演的 CAPE 却减小到了 $444 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 12e),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 明显低估。利用 2 m 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,订正之后的 CAPE 显著增加,13:00 订正后 CAPE 增加到 $2917 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略),19:00 增加到 $1159 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 12f),有利于大冰雹形成。

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 12b)可以看到,500 hPa 以上有明显的干层,700~500 hPa 为湿层,700 hPa 以下温度露点差较 08:00 有所增大,形成“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)。实况显示 21:03 铁厂镇附近出

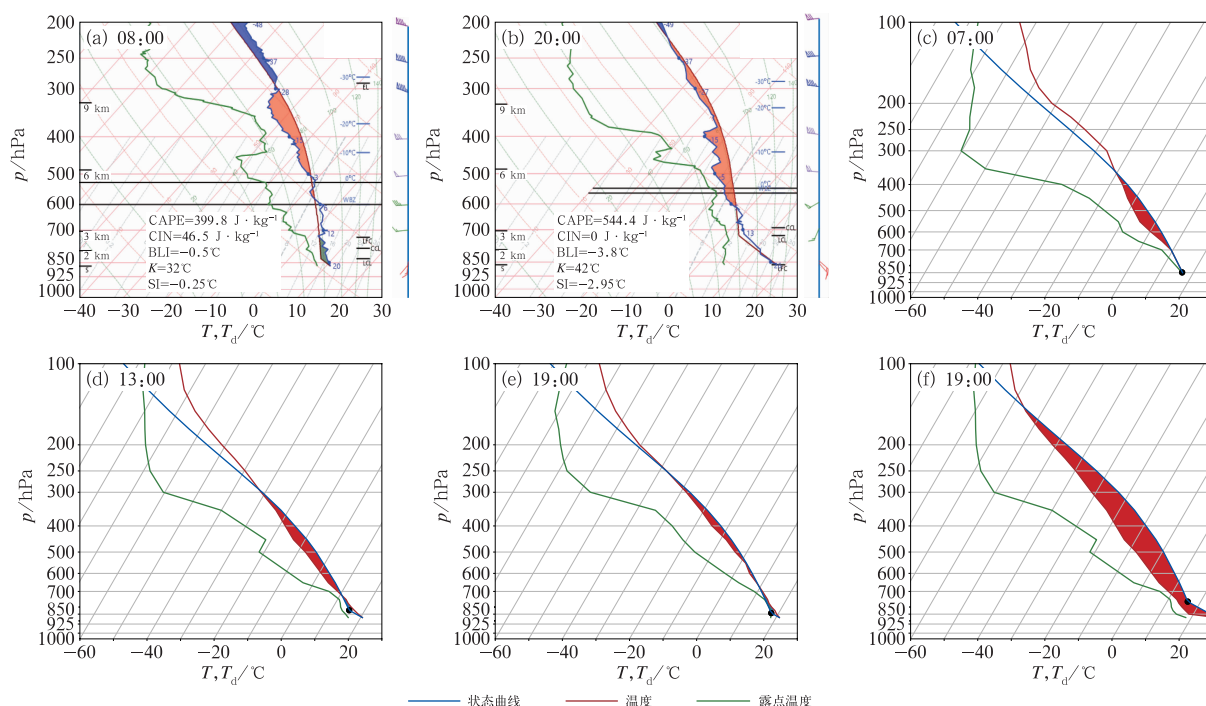


图 12 2023 年 5 月 5 日 (a,b) 贵阳探空, (c) 贵阳、(d,e) 播州 FY-4B 温湿廓线, (f) 播州经地面温度和露点温度订正后的 FY-4B 温湿廓线

Fig. 12 (a, b) Sounding at Guiyang, (c–e) FY-4B temperature and humidity profiles at (c) Guiyang and (d, e) Bozhou, (f) FY-4B temperature and humidity profiles corrected by surface temperature and dew-point temperature at Bozhou on 5 May 2023

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有 500 hPa 以上的干层, 并没有表现出 700 hPa 以下的干层, 温度递减率接近于湿绝热 (图 12e), 而不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力的误判。因此, 采用 2 m 温度和露点温度订正后, 19:00 800 hPa 以下的温度露点差增大 (图 12f), 形成“倒 V”型, 是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分类强对流的短时临近预报。

4 结 论

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、威宁两站实况探空和 ERA5 再分析资料为基准, 检验了 FY-4A 温度廓线、FY-4B 温湿廓线, 并选取了 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, 得到主要结论如下:

(1) 对 GIIRS 的不同质量码进行误差分析, D_3

与 ALL 相比误差和离散度明显减小, 但 D_{23} 和 D_3 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。

(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, 低层的差别减小。比湿 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, 且容易出现极端值, 700 hPa 以下比湿在无云和有云的 RMSE 差距最为显著, 无云时平均值为 $1.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 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。

(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地反映出“上干下湿”的大气层结,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,但反演的露点温度廓线比实况略低。夏季卫星反演温湿廓线能较好地体现湿层伸展较春季更高的特征,湿度廓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“干”。

(4)评估 GIIRS 温湿廓线在 2023 年三次贵州区域性冰雹过程中的应用效果:3 月 16 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“上干下湿”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 日的冰雹过程中也发现,由于 GIIRS 对近地层温湿反演误差较大,温度和露点温度较实况偏小,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 2 m 温度和露点温度进行订正后,可以显示出较大的 CAPE,以及利于雷暴大风发生的探空形态,为预报员进行分类强对流短时临近预报有较好的参考作用。

参考文献

- 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]. 气象科学,43(4):561-568. Guan L, Han J, Xue Q M, 2023. Temperature and humidity retrieval of FY-4A GIIRS with high temporal resolution and its application in typhoon[J]. J Meteor Sci, 43(4):561-568(in Chinese).
- 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, 2018. Geostationary interferometric-type infrared sounder (GIIRS) on Fengyun No. 4 meteorological satellite[J]. Science, 70(1):24-29(in Chinese).
- 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 temperature profile retrieved from GIIRS/FY-4A over the East and South China Sea[J]. J Trop Meteor, 37(2):277-288(in Chinese).
- 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素分析[J]. 气象与环境科学,47(2):36-45. Li L, Yang J, Xu K, et al, 2024. Characteristics of frontal fog in eastern Yunnan-Guizhou Plateau and the analysis of meteorological impact factors[J]. Meteor Environ Sci, 47(2):36-45(in Chinese).
- 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. Lin D, 2015. Temporal and spatial distribution and change trend of cloud water of different types clouds in Southwest China[J]. J Arid Meteor, 33(5):748-755,801(in Chinese).
- 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):568-580. Lin X M, Wei Y H, Zhang N, et al, 2022. Construction of air-sounding-profile system based on foundation-remote-sensing equipment[J]. J Appl Meteor Sci, 33(5):568-580(in Chinese).
- 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]. 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 of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 33(2):388-396(in Chinese).
- 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]. 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 sounder onboard FY-4A satellite for data assimilation[J]. Chin J Atmos Sci, 46(2):275-292(in Chinese).
- 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):1-12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al, 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects[J]. J Marine Meteor, 37(2):1-12(in Chinese).
- 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]. 红外与毫米波学报,38(6):765-776. Luo S, Di D, Cui L L, 2019. Study on FY-4A/GIIRS infrared spectrum detection capability based on information content[J]. J Infrared Millim Waves, 38(6):765-776(in Chinese).
- 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):66-70. Min C H, Huang S Q, Wu Y H, 2022. Analysis of atmospheric boundary layer inversion characteristics from 2003 to 2017 in Guiyang[J]. Adv Meteor Sci Technol, 12(3):66-70(in Chinese).
- 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, Ren S L, Xia Y, et al, 2023. Application of Fengyun meteorological satellites in monitoring cold wave disaster weather[J]. Satellite Appl, (6):33-37(in Chinese).
- 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,45(10):1464-1475. Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al, 2019. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields[J]. Meteor Mon, 45(10):1464-1475(in Chinese).
- 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,51(1):1-13. Qin H, Huang M C, Nong M S, et al, 2023. Comparative verification of sounding data of strong convective processes based on FY-4A temperature and humidity profiles[J]. Meteor Sci Technol, 51(1):1-13(in Chinese).
- 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 Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon, 38(2):164-173(in Chinese).
- 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):295-308. Wang H, Zhou H

- F, Wang C, et al, 2023. Accuracy validation of FY-4A temperature profile based on microwave radiometer and radiosonde[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(3): 295-308(in Chinese).
- 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响[J]. *气象*, 50(2): 159-169.
- Wang J C, Wang D, Wang R W, et al, 2024. Assimilation of round-trip horizontal drift radiosonde data in CMA-MESO 3DVar and its impact on model forecast[J]. *Meteor Mon*, 50(2): 159-169(in Chinese).
- 咸迪, 2021. 风云四号 B 星[J]. *卫星应用*, (7): 68.
- Xian D, 2021. Fengyun-4B satellite[J]. *Satellite Appl*, (7): 68(in Chinese).
- 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): 1249-1260.
- Yang J, Du X L, Qi D P, et al, 2015. MCC survey and rainfall characteristic in east mountain of Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 34(5): 1249-1260(in Chinese).
- 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 Guizhou and influence of stationary front on its generation and elimination[J]. *Torr Rain Dis*, 39(5): 496-507(in Chinese).
- 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]. *高原气象*, 42(2): 374-385.
- Yang J, Yao X P, Li Y L, et al, 2023. Structural characteristics and developmental analysis of the rare hail supercell in the Northeast Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 42(2): 374-385(in Chinese).
- 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*, 37(5): 545-552.
- Yang Y H, Yin Q, Shu J, 2018. Channel selection of atmosphere vertical sounder (GIIRS) on board the FY-4A geostationary satellite[J]. *J Infrared Millim Waves*, 37(5): 545-552(in Chinese).
- 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 M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorms and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 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]. *气象科技*, 50(4): 485-493.
- Zhang P, Xian D, Sun X Q, et al, 2022. Comparison and verification of vertical temperature profiles in Winter Olympic venue based on satellite and ground microwave observation data[J]. *Meteor Sci Technol*, 50(4): 485-493(in Chinese).
- 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]. *气象*, 47(12): 1512-1524.
- Zhang X P, Guo Q Y, Yang R K, et al, 2021. Assimilation experiment of rainstorm in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on “up-drift-down” sounding data[J]. *Meteor Mon*, 47(12): 1512-1524(in Chinese).
- 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. Application of the FY-4 data products in sever convection monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 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判识中的应用[J]. *气象*, 50(1): 59-70.
- Zhao Y M, Sun J, Qi L B, et al, 2024. Evaluation of FY-4A cloud top temperature product based on L-band radiosonde data and its application in winter precipitation type identification[J]. *Meteor Mon*, 50(1): 59-70(in Chinese).
- 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*, 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 horizontal drift round-trip sounding data[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(1): 52-64(in Chinese).
- 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.
- Zhou Y S, Yuan Y, Mu K L, et al, 2013. Hail potential trend forecast based on convection parameters in Guizhou[J]. *Trop Geogr*, 33(1): 9-12, 62(in Chinese).
- 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]. *热带气象学报*, 36(2): 199-207.
- Zhou Y S, Yuan Y, Wan X L, 2020. Analysis of effective detection distance of ground-based microwave radiometer in thunderstorm weather in complex mountainous terrains[J]. *J Trop Meteor*, 36(2): 199-207(in Chinese).
- Cai X, Bao Y S, Petropoulos G P, et al, 2020. Temperature and humidity profile retrieval from FY4-GIIRS hyperspectral data using artificial neural networks[J]. *Remote Sens*, 12(11): 1872.
- Feng J, Qin X H, Wu C Q, et al, 2022. Improving typhoon predictions by assimilating the retrieval of atmospheric temperature profiles from the FengYun-4A's geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS)[J]. *Soc Sci Electr Publish*, 280: 106391.
- He M, Wang D H, Ding W Y, et al, 2019. A validation of Fengyun 4A temperature and humidity profile products by radiosonde observations[J]. *Remote Sens*, 11(17): 2039.
- Ren S L, Jiang J Y, Fang X, et al, 2022. FY-4A/GIIRS temperature validation in winter and application to cold wave monitoring[J]. *J Meteor Res*, 36(4): 658-676.
- Yin R Y, Han W, Gao Z Q, et al, 2021. Impact of high temporal resolution FY-4A geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) radiance measurements on typhoon forecasts: Maria (2018) case with GRAPES global 4D-var assimilation system[J]. *Geophys Res Lett*, 48(15): e2021GL093672.

(本文责编: 张芳)