

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).

# 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\*

赵渊明<sup>1</sup> 孙 静<sup>2</sup> 漆梁波<sup>1</sup> 张燕燕<sup>3</sup>

1 上海中心气象台,上海 200030

2 清华大学,北京 100084

3 上海市宝山区气象局,上海 201901

**提 要:** 利用 2019—2021 年冬季上海宝山站 L 波段探空资料对 FY-4A 云顶温度(CTT)产品进行评估,分析发现,FY-4A 的云顶温度产品能够较好地反映单层云的云顶温度,对双层云或多层云的云顶温度则普遍高估(平均高估幅度超过 14℃);当探空观测到的云顶高度不超过 6 km 或云顶温度不低于 -20℃时,FY-4A 云顶温度产品误差较小,平均偏差约为 3℃。根据 2021—2022 年冬季长三角地区地面站观测的降水现象统计云顶温度与降水相态的关系,并对典型个例进行分析,结果表明,云顶温度低是出现降雪的必要条件之一,绝大部分降雪出现在云顶温度低于 -12℃的情况下。FY-4A 的云顶温度产品时空分辨率高、精度尚可,可以辅助预报员判识雨雪落区,在雨雪转换过程的预报服务中有较大的应用潜力。

**关键词:** 秒级探空, FY-4A, 云顶温度产品, 降水相态, 冬季

**中图分类号:** P457, P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.092101

## Evaluation of FY-4A Cloud Top Temperature Product Based on L-Band Radiosonde Data and Its Application in Winter Precipitation Type Identification

ZHAO Yuanming<sup>1</sup> SUN Jing<sup>2</sup> QI Liangbo<sup>1</sup> ZHANG Yanyan<sup>3</sup>

1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

2 Tsinghua University, Beijing 100084

3 Baoshan Meteorological Office of Shanghai, Shanghai 201901

**Abstract:** By using the L-band radiosonde data of Shanghai Baoshan Station during the winter from 2019 to 2021, the FY-4A cloud top temperature (CTT) product is evaluated. The results indicate that the CTT of the single-layer cloud can be reflected well by the FY-4A CTT product, while the CTT of multi-layer clouds is generally overestimated with the mean bias larger than 14℃. And the FY-4A CTT product has a small mean bias of approximately 3℃ compared to the sounding observation when the observed cloud top height is below 6 km or the observed cloud top temperature is higher than -20℃. Moreover, based on the surface observation in the Yangtze River Delta Region in the winter of 2021 and 2022, the relationship between CTT and precipitation types in winter seasons is statistically analyzed and further verified by typical

\* 上海市自然科学基金项目(21ZR1462700)资助

2022 年 11 月 8 日收稿; 2023 年 9 月 21 日收修定稿

第一作者:赵渊明,主要从事天气预报及相关技术研究. E-mail: zhaoy\_msmc@163.com

通讯作者:漆梁波,主要从事天气预报及相关技术研究. E-mail: qlb1999@hotmail.com

cases. The results reveal that a low CTT is one of the main necessary conditions for snowfall, as most snowfall events occur when the CTT is below  $-12^{\circ}\text{C}$ . As the FY-4A CTT product has a certain accuracy with a high spatial and temporal resolution, this product could have great application potential in identifying precipitation types.

**Key words:** second-level radiosonde data, FY-4A, cloud top temperature (CTT) product, precipitation type, winter

## 引 言

云常年覆盖地球表面的 70% 以上, 作为大气水循环的重要组成部分, 显著影响着地球的辐射收支以及能量、水汽、动量平衡, 在短期天气过程乃至全球气候变化中起着关键作用 (Cess et al, 1989)。云顶温度作为云的基本参数, 可以用来诊断天气系统和对流发展的强度, 在降水估计、数值预报及气候评估等方面均具有重要价值 (Taylor et al, 2017; Lao et al, 2021)。

FY-4A 气象卫星是我国新一代对地静止气象卫星, 配备了先进的成像仪, 用于天气气候相关的监测、预警和预报。多通道扫描成像辐射计 (AGRI) 是 FY-4A 卫星平台搭载的关键辐射成像仪器, 重点用于云观测, 并利用高时间分辨率的特性进行天气过程追踪 (Hu et al, 2021)。FY4A-AGRI 的稳定运行全天候监测云顶温度 (高度) 提供基础, 然而, 云顶产品的反演结果不仅受限于辐射计硬件, 还与反演方法、假定大气廓线、云层三维结构、云顶粒子散射特性等有关 (Hamann et al, 2014; Huang et al, 2019), 需要对其反演精度进行详细评估。Tan et al (2019) 和崔林丽等 (2020) 先后针对 FY-4A 卫星云顶高度 (CTH)、云顶温度 (CTT) 等产品, 与美国 EOS/MODIS 和日本 Himawari-8 等同类产品进行交叉检验, 评估了 FY-4A 云顶参数的精度和可靠性。Liu et al (2021) 利用地基毫米波雷达对 FY-4A 和 Himawari-8 云顶高度产品开展了定量对比研究, 并揭示了高薄云云顶高度误差与地表温度的关系。这些研究表明 FY-4A 云顶产品的精度和可靠性达到国际同类产品先进水平, 同时也提示云的层数或垂直分布、地表温度均会影响云顶温度或云顶高度反演精度, 应针对不同季节、不同地点开展进一步评估。

探空观测是对垂直大气的直接观测, 可以用来对遥感产品进行检验评估。如程海艳等 (2018) 和 Osei et al (2020) 利用探空资料检验大气红外探测器

反演的温湿廓线, 宋云帆和闵文彬 (2019) 利用探空资料评估了 FY-2F 湿度产品在四川地区的适用性。L 波段雷达测量精度和灵敏度高, 能够更好地描述大气的垂直复杂结构, 黄艺伟等 (2019) 利用 L 波段探空检验了 2018 年台风季 FY-4A 温度廓线的反演精度。虽然 L 波段探空观测间隔时间长、观测点较稀疏, 但其提供的大气垂直方向上的高密度观测, 可以作为评估 FY-4A 云顶产品精度的重要依据。

云顶温度与大气温湿廓线决定着云中冰相粒子存在与否, 和地面降水相态类型关系密切。Huffman and Norman (1988) 和漆梁波 (2012) 研究指出, 一般情况下, 只有当云顶温度低于  $-10^{\circ}\text{C}$  时, 云中冰相粒子才可能存在, 进而才有可能出现降雪、雨夹雪或冰粒天气, 故监测云顶温度对冬季降水相态识别十分重要。封秋娟等 (2021) 利用机载云物理设备研究了山西地区一次降雪云的微观特征, 发现冰雪晶数浓度最大值出现在  $-9.3^{\circ}\text{C}$ ; 郭巧红 (2016) 指出云顶温度较低有利于冰晶与雪花的形成, 即使在地面气温较高时仍可能出现固态降水; 陈双等 (2019) 将云顶温度纳入我国中东部相态预报决策树判别模型的预报因子, 是相态预报的重要参考; 荆浩等 (2022) 指出云顶温度  $\leq -14^{\circ}\text{C}$  是云中能够产生充足雪花等冰相粒子的重要阈值, 是降雪的必要条件。长三角地区冬季雨雪过程多、降水相态复杂, 有必要利用高时空分辨率的卫星产品对云顶温度与降水相态关系进行研究分析。

本文利用冬季上海宝山站 L 波段探空资料评估 FY-4A 云顶温度产品在长三角地区的适用性, 并分析云顶温度产品在长三角冬季降水相态识别中的应用潜力。

## 1 数据和方法

### 1.1 探空数据

L 波段雷达探空测量精度和灵敏度更高, 目前已基本覆盖全国。我国业务布网的 L 波段高空气

象探测系统是由 GFE(L)1 型二次测风雷达和 GTS1 型数字探空仪组成,观测的气象要素包括气压、气温、相对湿度、风速和风向等。GTS1 型数字探空仪采用高分子热敏电阻传感器,直接测量相对湿度值,然后反算露点温度;采样周期为 1.2 s(因此其数据也被称为秒级探空数据),每分钟的采样频率约为 50 次,具有高分辨率和实时采集的能力。

本文选取上海宝山站 08:00 和 20:00(北京时,下同)的秒级探空资料,该探空资料可以显示雷达方位和仰角值,具备在放球过程中查看温、压、湿曲线以及求坐标曲线的秒级数据能力。研究时段为 2019 年 12 月至 2020 年 2 月和 2020 年 12 月至 2021 年 2 月。高精度的秒级探空资料可以精细化描述云的垂直结构,能对多层云的云底、云顶及云夹层进行观测分析,有利于更准确地理解认识云垂直结构和天气过程。

地面观测资料,研究时段为 2021 年 12 月至 2022 年 2 月,时间间隔为 3 h,相态观测结果为人工质量控制后的自动观测,其在冬季可识别的降水现象结果为雨(阵雨、毛毛雨)、雪(阵雪、米雪)、雨夹雪和无降水等。

## 1.2 卫星云顶温度产品

FY-4A 是我国 2016 年发射的第二代静止气象卫星,定位于距地约 36 000 km 的地球同步轨道。相比于第一代静止气象卫星,FY-4A 产品在时间和空间分辨率上都有了显著的提升。其上搭载的 AGRI 每 15 min 生成一副全圆盘影像观测,拥有 14 个通道,覆盖了可见光、短波红外、中波红外和长波红外等波段。本文采用的 FY-4A 云顶温度产品来自于国家卫星气象中心,反演原理综合考虑了 FY-2 可见光红外扫描仪和 GOES-R 的算法(Schmit et al,2005;Min et al,2017),产品空间分辨率为 4 km,最高时间分辨率为 15 min。

为区分探空云顶温度和 FY-4A 云顶温度产品,下文中将利用探空数据计算的云顶温度简称为探空 CTT,将 FY-4A 反演的云顶温度简称为 FY4A-CCTT。

## 1.3 研究方法

根据图 1 所示流程,利用探空数据确定是否有云并计算探空 CTT,再利用 FY-4A 全圆盘数据、探空仪经纬度数据来匹配 FY4A-CCTT,并进而对其进

行检验评估,具体方法如下。

### 1.3.1 探空云顶温度的确定方法

不少学者提出了利用探空分析云垂直结构的方法,大多基于三类判据:温度露点差、湿度以及二者的结合。Poore et al(1995)提出的温度露点差阈值法简单实用,在业务中被广泛使用,以下简称 P95 方法。该方法的判别依据如下:温度  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  时,温度露点差  $\leq 1.7^{\circ}\text{C}$  认为是云内;当  $-20^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} < 0^{\circ}\text{C}$  时,温度露点差  $\leq 3.4^{\circ}\text{C}$  认为是云内;当温度  $< -20^{\circ}\text{C}$  时,温度露点差  $\leq 5.2^{\circ}\text{C}$  认为是云内。Zhang et al(2010)提出的相对湿度阈值法在科研中被广泛应用,以下简称 Z10 方法。该方法主要包括以下几个部分:首先是不同温度下相对湿度的合理计算,当气温低于  $0^{\circ}\text{C}$  时,要按照冰面饱和水汽压计算相对湿度,即利用实际水汽压除以冰面的饱和水汽压得到新的相对湿度。其次,云层中的相对湿度阈

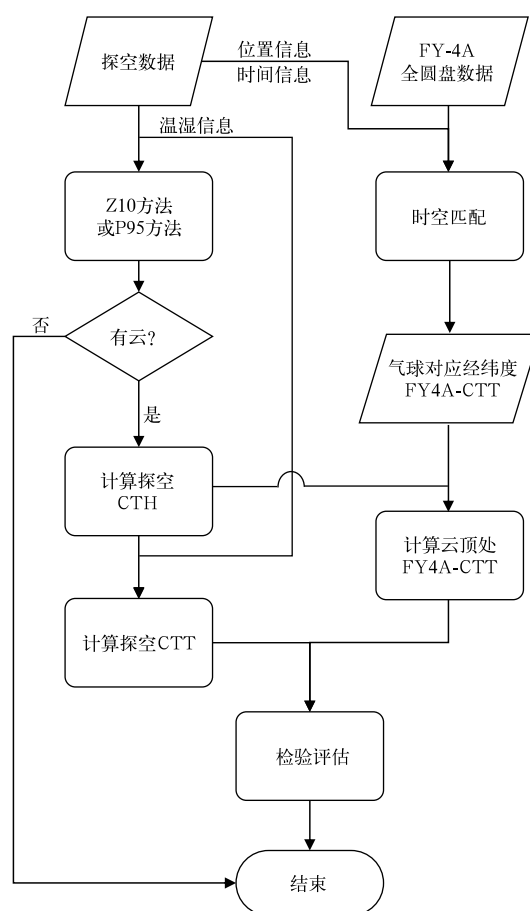


图 1 探空 CTT 和 FY4A-CCTT 计算、检验流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation and verification of sounding CTT and FY4A-CCTT

值(min-RH, max-RH, inter-RH)随高度线性变化,当大气中某层相对湿度大于 min-RH 时,则认为其为湿度层,若该湿度层中最大值超过 max-RH,则认为其为云层,反之则不是云层。

### 1.3.2 FY4A-CTT 的时空匹配与误差评估

探空气球每天施放 2 次,分别在 07:15 和 19:15,因气球上升至爆炸需要一定时间,且气球随高度升高有相当程度飘移,需要对探空资料与 FY4A-CTT 产品资料进行时空匹配。

时间匹配上,探空气球上升速度约为  $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,冬季长三角地区云顶一般不超过对流层顶高度(200 hPa 左右),气球从释放至 200 hPa 高度用时在 35 min 左右,对应时间在 07:50 或 19:50 前后,选取邻近时段 FY-4A 的全圆盘产品与之匹配,即 07:45—08:00 和 19:45—20:00 的产品。空间匹配上,首先根据上海宝山站所提供的 L 波段(1 型)数据处理软件,计算、读取探空气球飘移轨迹,然后根据气球飘移的经纬度,采用最邻近点匹配方法提取对应格点的 FY4A-CTT 数据。利用 1.3.1 节中计算的云顶高度,求云顶处对应经纬度的 FY4A-CTT 值(图 1)。

利用平均偏差(MB)、均方根误差(RMSE)和相关系数(R)来定量地评估 FY-4A 云顶温度产品的性能。

## 2 L 波段探空判别云的垂直结构及与 FY-4A 云顶温度产品比较

利用探空资料观测到的大气温湿度廓线,分析 P95 和 Z10 方法对判断云的垂直结构的影响,确定云顶高度和温度。进而以探空数据确定的云顶温度评估 FY-4A 云顶温度产品精度和适用度。因 P95 法与 Z10 法识别的云顶高度有所不同,有时云顶处对应探空仪经纬度未识别出 CTT,故两种方法的个例数略有差别。

根据云的层数,可将云分为单层云、双层云和多层云,P95 法识别出单层云 84 例,双层云和多层云均为 59 例。图 2 给出了两个典型的单层云的垂直结构,分别是 2019 年 12 月 18 日 08:00 和 2020 年 12 月 15 日 20:00 探空观测到的大气温湿廓线,图 2b、2d 红线表示探空仪上升过程中,由于气球飘

移、经纬度变化导致对应 FY4A-CTT 变化,该 CTT 值实际上由气球所在高度对应的经纬度决定,红三角对应探空云顶所在经纬度的 FY4A-CTT。整体看来,Z10 与 P95 两种方法判断出的云顶(绿色阴影顶部)高度与温度基本一致,并且均能够分析出云的垂直结构。2019 年 12 月 18 日,Z10 法和 P95 法都分析出单层云结构,判识云底高度分别为 1.6 km 和 0.7 km 左右,云顶高度均在 5 km 左右,在 1~5 km 高度水汽近于饱和,为云层位置(图 2a、2b)。2020 年 12 月 15 日,这两种方法均分析出在 4.5~5.5 km 高度存在单层云(图 2c、2d)。对比红三角代表的 FY4A-CTT(图 2b、2d),可以看到 FY4A-CTT 和 Z10、P95 两种方法得到的云顶温度基本吻合,表明 FY-4A 卫星对于单层云的云顶温度反演效果良好。

但是当大气中出现双层或多层云时,FY4A-CTT 与实测出现了较大程度不一致。图 3 展示了两个典型的双层云或多层云的垂直结构,分别是 2020 年 1 月 11 日和 13 日 20:00 探空观测到的垂直廓线。11 日 Z10 法和 P95 法都分析出双层云结构,分别在 6~7 km 和 0.5~4.5 km 高度(图 3a、3b),高层云很薄,而低层云较厚。若将探空云顶定为高层云顶的话,则 FY4A-CTT 偏高,但如果将探空云顶定为低层云顶,则与观测基本吻合。13 日则观测到多层云结构(图 3c、3d),云厚分布与 11 日不同,高层云较厚,而中低层云较薄。FY4A-CTT 较探空 CTT 偏高,介于高层云顶温度与中低层云顶温度之间;另外,图 3d 红三角处 FY4A-CTT 值与地面对应值差别很大,如果不考虑飘移,只用站点对应经纬度的 FY4A-CTT 来检验评估就会造成很大误差,故在评估前进行时空匹配是相当必要的。以上结果表明当出现双层云或多层云时,FY-4A 卫星反演的云顶温度往往比实际观测偏高。

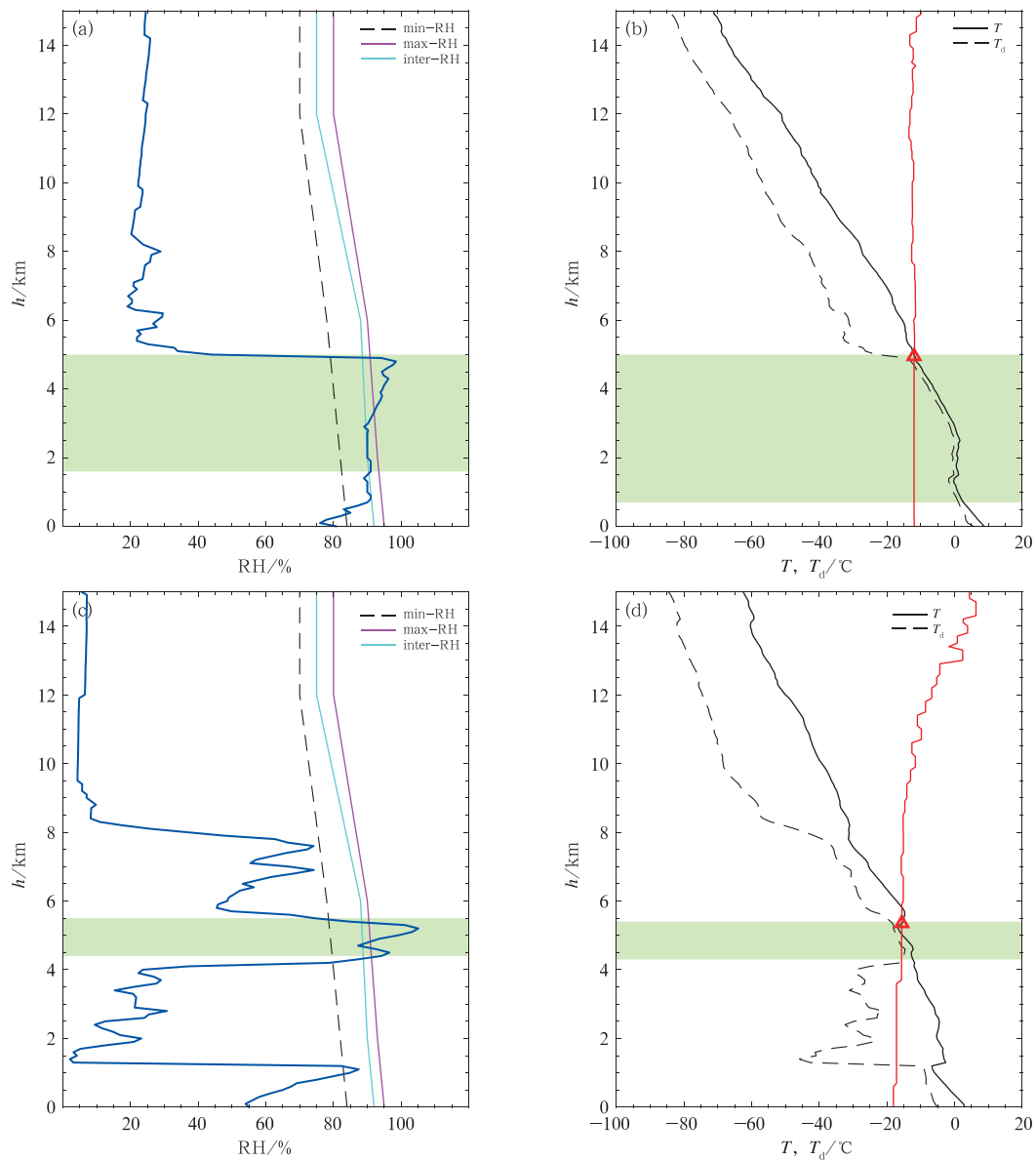
## 3 FY-4A 云顶温度产品评估

上述结果表明,P95 和 Z10 阈值法判断出的探空观测到的云顶温度以及云垂直结构基本一致,可以作为实际探测的真值来评估 FY-4A 云顶温度产品的精度和可靠性。

比较 2019—2021 年冬季上海宝山探空 CTT 与

FY4A-CTT(图 4)可以发现, FY4A-CTT 与探空 CTT 的相关系数达到 0.6 左右, 具有较高的相关

性;同时,散点基本分布在对角线左上侧,这表明与探空观测相比, FY4A-CTT 普遍偏高, 平均偏差为



注:绿色阴影为云层位置。

图 2 (a,b)2019 年 12 月 18 日 08:00,(c,d)2020 年 12 月 15 日 20:00 宝山村

探空观测到的温湿廓线和对应的 FY4A-CTT

(a,c)探空相对湿度(蓝实线)、Z10 法阈值线、云层位置,

(b,d)探空温度、露点温度、探空仪经纬度对应 FY4A-CTT(红实线)、

P95 法云顶高度对应的 FY4A-CTT(红三角)、云层位置

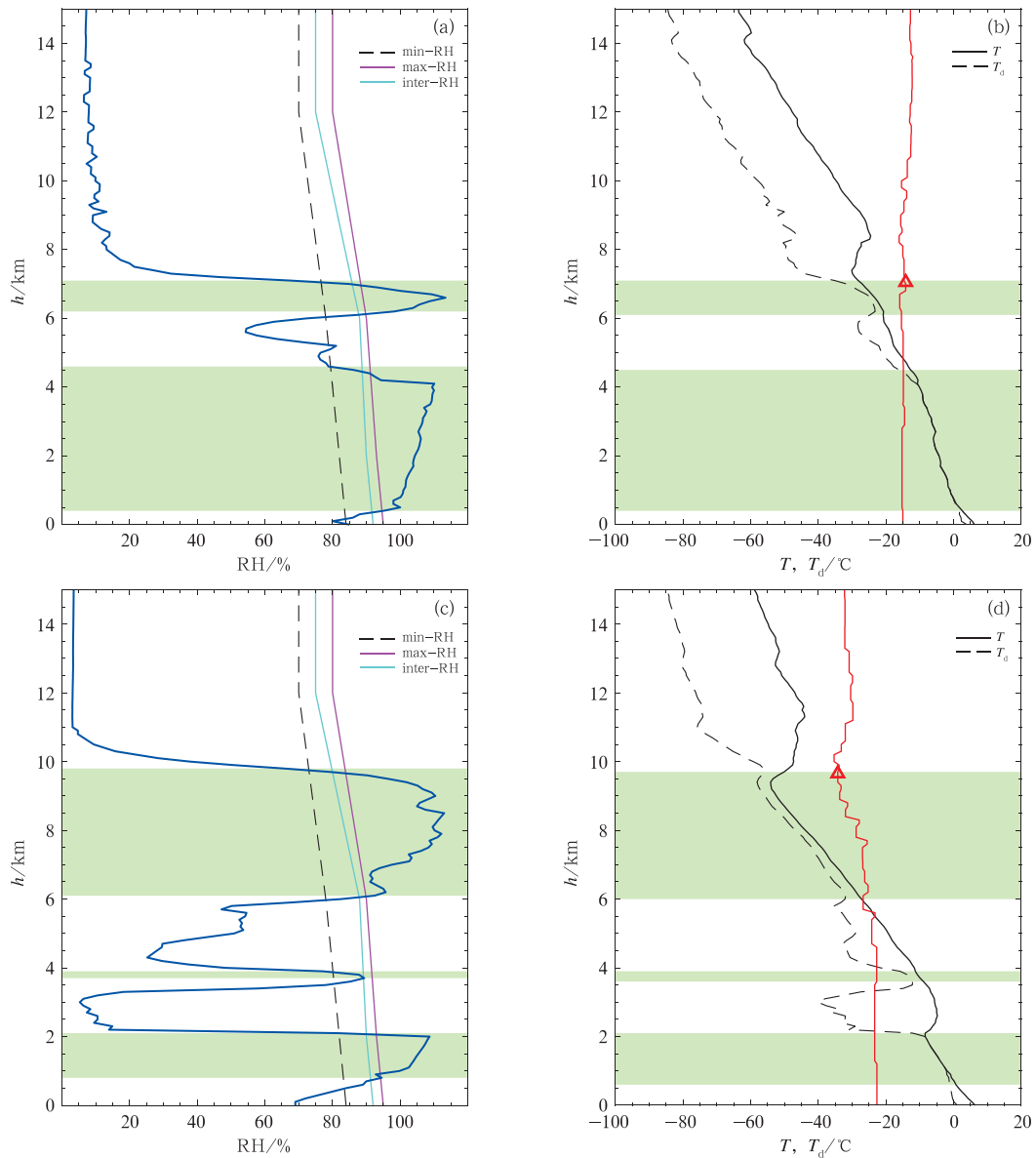
Fig. 2 Sounding profiles at Baoshan Station and FY4A-CTT at (a, b) 08:00 BT

18 December 2019, (c, d) 20:00 BT 15 December 2020

(a, c) sounding relative humidity (blue solid line), threshold of Z10, cloud layer;

(b, d) sounding temperature, dew point temperature, FY4A-CTT at corresponding position

(red solid line), FY4A-CTT certified by P95 CTH (red triangle), cloud layer



注:绿色阴影为云层位置。

图 3 2020 年 1 月(a,b)11 日 20:00,(c,d)13 日 20:00 宝山站

探空观测到的温湿廓线和对应的 FY4A-CTT

(a,c)探空相对湿度(蓝实线)、Z10 法阈值线、云层位置,

(b,d)探空温度、露点温度、探空仪经纬度对应 FY4A-CTT(红实线)、

P95 法云顶高度对应的 FY4A-CTT(红三角)、云层位置

Fig. 3 Sounding profiles at Baoshan Station and FY4A-CTT at (a, b) 20:00 BT

11 and (c, d) 20:00 BT 13 January 2020

(a, c) sounding relative humidity (blue solid line), threshold of Z10,

cloud layer; (b, d) sounding temperature, dew point temperature,

FY4A-CTT at corresponding position (red solid line), FY4A-CTT

certained by P95 CTH (red triangle), cloud layer

14.3℃,均方根误差高达 20.2℃(图 4a),利用 Z10 相对湿度阈值法也可得到类似结论,卫星反演的云

顶温度较实况整体偏暖(图 4b)。另外,当探空云顶温度不低于-20℃时,散点大多分布于对角线附近,

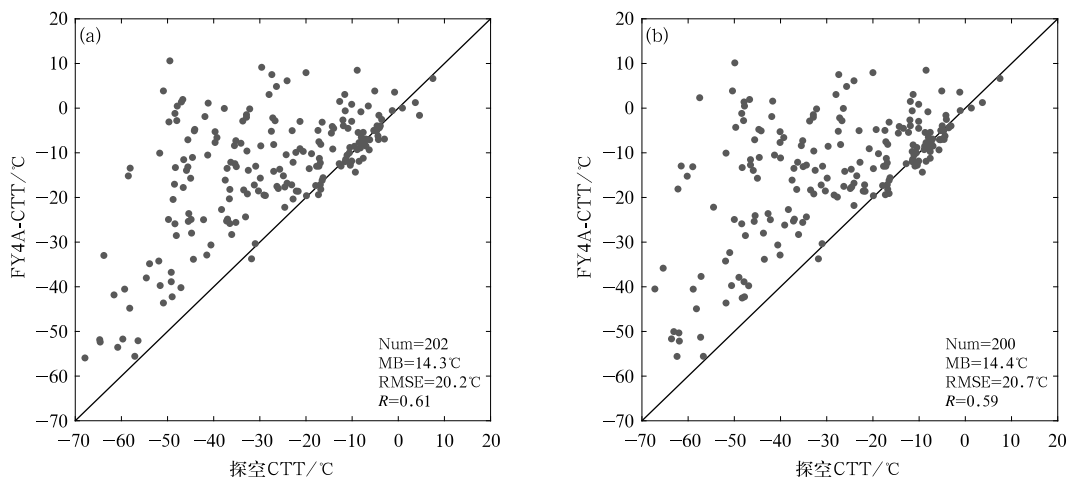


图 4 2019—2021 年冬季宝山站探空 CTT 和 FY4A-CTT 比较

(a)P95 法,(b)Z10 法

Fig. 4 Comparison of sounding CTT and FY4A-CTT

at Baoshan Station in winter from 2019 to 2021

(a) P95, (b) Z10

当云顶温度进一步下降,偏差随之快速增大。

进一步比较 FY4A-CTT 偏差与云顶高度 (CTH)和层数之间的关系。依据云顶高度进行分类评估,从图 5 中可以看到,与探空 CTT(P95 法)相比,FY-4A 对中低云(CTH 不超过 6 km)的云顶温度反演结果较好,散点基本分布于对角线附近,平均偏差仅为 3.1°C,均方根误差为 6.3°C(图 5a);对于高云(CTH 超过 6 km)效果较差,散点几乎均位于对角线左上侧,平均偏差超过 20°C,均方根误差超过 25°C(图 5b、5c)。这主要是由于高云下往往还有中低云存在,多层云的不同云层之间温差较大,下

层云会影响 FY-4A 接收的辐射信息,导致 FY4A-CTT 偏暖;而中低云往往对应单层云,或者即使是多层云,不同云层间的温差也很小,对云顶温度反演影响小。同样地,若依据探空云顶温度进行分类评估,当云顶温度不高于 -20°C 时,FY4A-CTT 平均偏差仅为 3.0°C;但是当云顶温度低于 -20°C 时,误差较大,平均偏差在 20°C 左右(图略)。

比较单层云、双层云以及多层云(三层及以上)的反演结果(图 6),单层云的 FY4A-CTT 平均偏差为 8.9°C(图 6a),明显小于双层云的 14.2°C(图 6b)以及多层云的 22.2°C(图 6c),可见偏差随着层数增

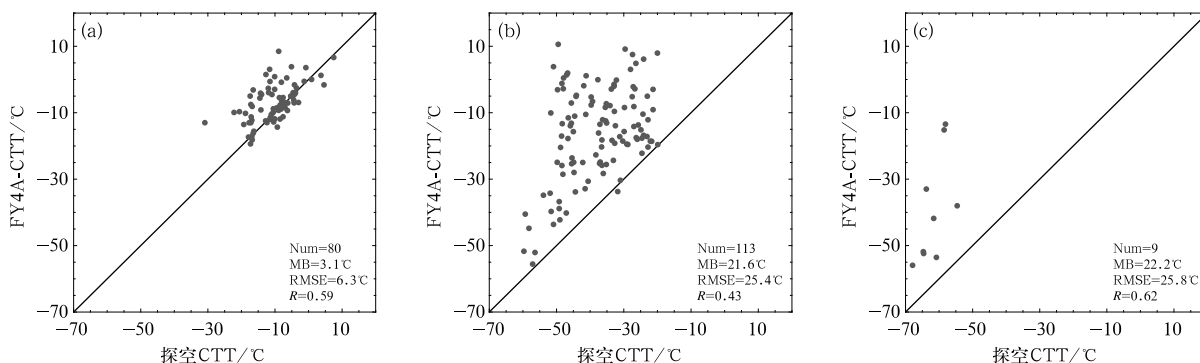


图 5 2019—2021 年冬季宝山站不同云顶高度情况下探空 CTT(P95 法)和 FY4A-CTT 的比较

(a) 云顶高度不高于 6 km,(b)云顶高度在 6~12 km,(c)云顶高度高于 12 km

Fig. 5 Comparison of sounding CTT (P95) and FY4A-CTT with different cloud top heights

at Baoshan Station in winter from 2019 to 2021

(a) cloud top height < 6 km, (b) 6 km ≤ cloud top height ≤ 12 km, (c) cloud top height > 12 km

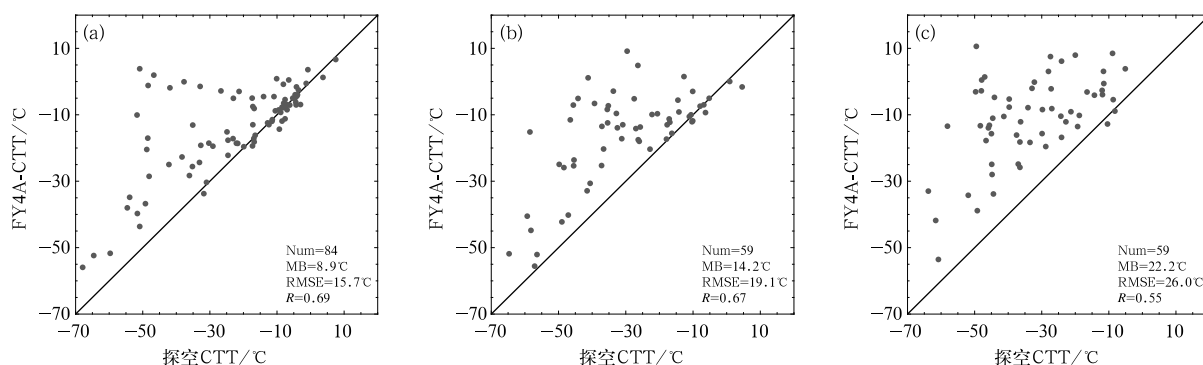


图 6 2019—2021 年冬季宝山站不同云层数情况下探空 CTT(P95 法)和 FY4A-CTT 的比较

(a) 单层云, (b) 双层云, (c) 多层云

Fig. 6 Comparison of sounding CTT (P95) and FY4A-CTT with different cloud layer numbers

at Baoshan Station in winter from 2019 to 2021

(a) single-layer cloud, (b) double-layer cloud, (c) multiple-layer cloud

加而快速增大;多层云情况下, FY4A-CTT 与探空 CTT 的相关系数为 0.55, 也明显小于单层云和双层云的 0.69 和 0.67, 提示业务人员在利用 FY-4A 的云顶温度产品时应当考虑当天云顶高度和层数, 在云顶高度大于 6 km、云层数量大于两层时建议宜定性而非定量地使用 CTT 产品。

#### 4 FY-4A 云顶温度在冬季降水相态判识中的应用

第 3 节的结果显示, FY4A-CTT 与探空 CTT 的相关性较好, 能够较准确地反映单层云的云顶温度, 尽管对双层云或多层云的云顶温度普遍高估, 但当精度需求不高时仍可以使用, 下面就利用 FY4A-CTT 产品研究云顶温度与地面站观测的降水现象之间的关系。

冬季降水由于涉及相态变化, 是冬季天气预报的难点所在, 特别是在  $0^{\circ}\text{C}$  左右的临界温度(指地面 2 m, 下同), 既可出现固态降水, 也可出现液态降水, 地面降水相态取决于云层特征和大气温湿廓线(Casellas et al, 2021)。分析 2021 年 12 月 1 日至 2022 年 2 月 28 日, 长三角地区地面温度  $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$  时降水相态与 FY4A-CTT 之间的关系(图 7), 可以发现, 降雨时 FY4A-CTT 中位数为  $-15.4^{\circ}\text{C}$ , 显著高于雨夹雪的  $-22.5^{\circ}\text{C}$  和降雪的  $-23.0^{\circ}\text{C}$ , 说明不同相态降水对应的云顶温度存在差异, 降雪情况下 FY4A-CTT 的 90% 分位数为  $-12.4^{\circ}\text{C}$ , 考虑到产品在云顶温度较低时整体偏暖的特点, 绝大部分的

降雪均出现在云顶温度低于  $-12^{\circ}\text{C}$  的情况下, 这与漆梁波(2012)提出的  $-10^{\circ}\text{C}$ 、荆浩等(2022)提出的  $-14^{\circ}\text{C}$  阈值大致相吻合。阈值之所以有所差别, 一方面是由于后两者的云顶温度来自探空资料的计算, 另一方面, 云顶的确认规则也略有差别, 漆梁波(2012)采用的是类似 P95 方法, 而荆浩等(2022)采用的是相对湿度阈值法。Wu et al(2022)在华北地区的观测也表明, 混合相温度区间内 ( $-40\sim 0^{\circ}\text{C}$ ), 云内冰相、混合相、液相粒子共存, 且冰相粒子随温度上升比例迅速降低, 当然, 冬季降雪的云顶温度在不同气候区, 也会存在一些差异。若不考虑地面临界温度约束条件, 则降雨对应的 CTT 区间范围要比

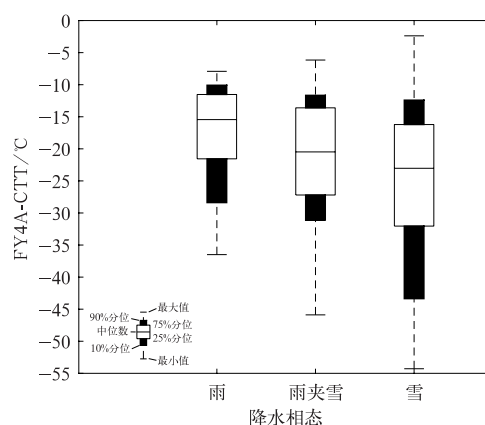


图 7 临界温度条件下 ( $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ) 雨、雨夹雪、雪发生时 FY4A-CTT 分布箱线图

Fig. 7 Box-whisker of FY4A-CTT for rain, sleet, snow occurring under critical surface air temperature condition ( $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ )



降雪大得多,即降雨的云物理过程既可以是冷云过程也可以是暖云过程,而降雪只对应冷云过程,2021—2022 年长三角地区 10 轮雨雪天气过程中降雪个例对应的 FY4A-CTT 超过 90% 是低于  $-12^{\circ}\text{C}$  的,其他个例有两种情况,一种是发生在降水过程趋于结束之际,地面观测往往略滞后于云体本身的变化,在降水停止之前仍有可能观测到短暂的降雪发生,另一种情况是目前地面观测自动判识本身的误差(周坤论等,2022)。

为充分说明 FY-4A 云顶温度产品在降水相态预报中的应用潜力,选取 2022 年 1 月 29 日 23:00 和 2 月 7 日 20:00 FY4A-CTT、地面气温和地面降水类型观测进行比较(图 8)。1 月 29 日夜间安徽中南部、江苏南部、浙江北部部分地区出现雨雪天气(图 8a,标记地面降水相态的站点气温均  $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ),其中安徽中南部大部地区地面气温在  $0.0\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,从 20:00 安庆站探空(图 8b)可以发现,皖南地区 500 hPa 高度以下大气的温度均在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,满足降

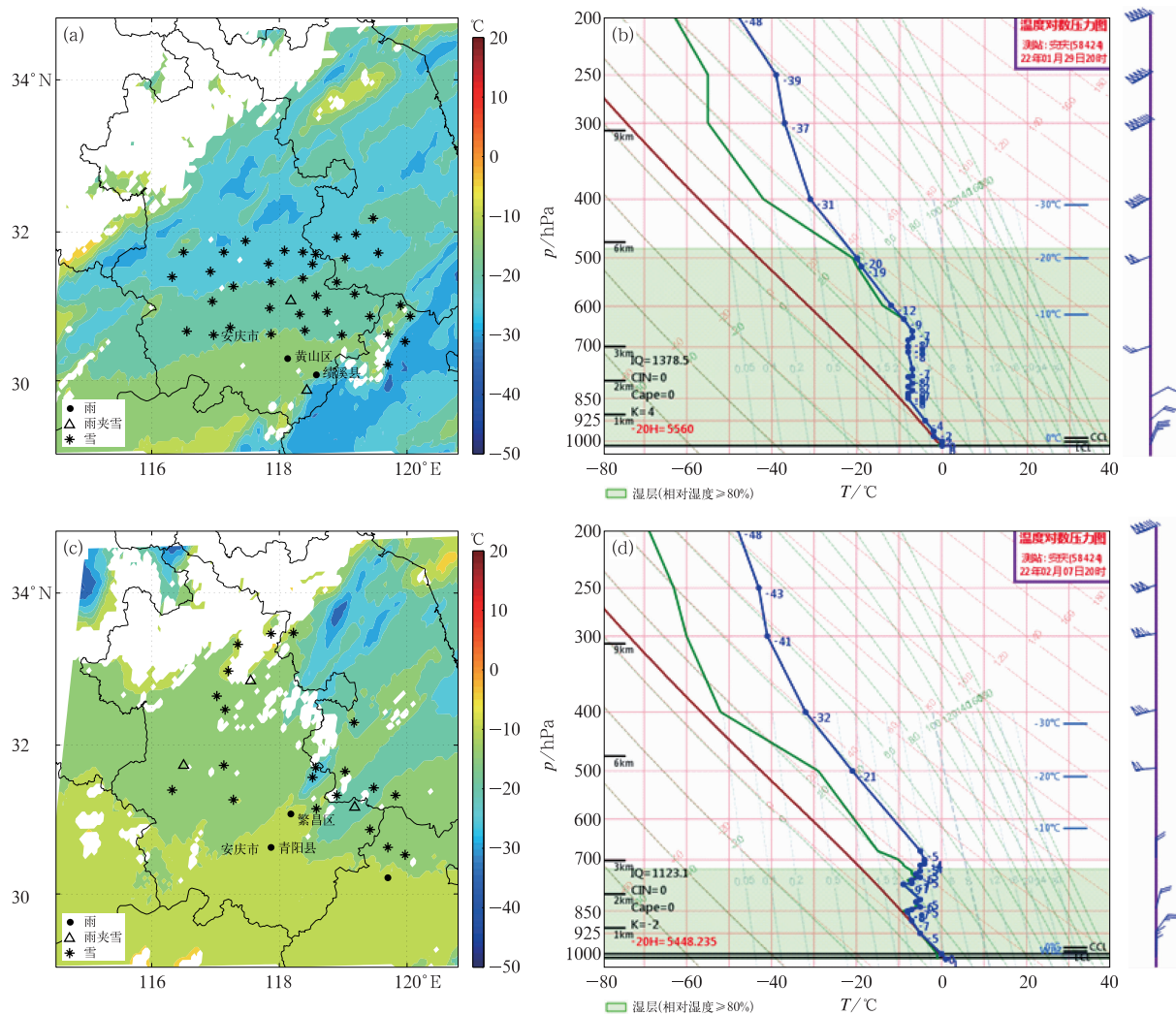


图 8 2022 年 1 月 29 日(a)23:00 地面气温  $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$  的站点降水相态(图标)、FY4A-CTT(填色)和(b)20:00 安庆站探空,2 月 7 日 20:00(c)地面气温  $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$  的站点降水相态(图标)、FY4A-CTT(填色)和(d)安庆站探空

Fig. 8 (a) Precipitation types (icon) and FY4A-CTT (colored) at 23:00 BT, (b) sounding profile at Anqing Station at 20:00 BT 29 January; (c) precipitation types (icon) and FY4A-CTT (colored), (d) sounding profile at Anqing Station at 20:00 BT 7 February 2022

雪的条件,但黄山区(海拔为 194 m)、绩溪县(海拔为 192 m)等地观测到的相态均是雨(图 8a)。分析探空和 FY4A-CTT 数据可以发现,安庆站上空云顶温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$ ,云内有充分的冰雪晶,中层暖层不明显,边界层湿球温度亦均低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,故降落地面的为固态降水,而黄山区、绩溪县等地上空云顶高度较低,FY4A-CTT 在  $-15\sim-10^{\circ}\text{C}$ ,云内仍以过冷水滴为主,又因近地面气温略高于  $0^{\circ}\text{C}$ ,少量冰晶和雪花粒子不容易保持完整的造型降落至地面,以致地面观测降水类型识别为雨。2月7日的过程也有类似情况,在地面气温  $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$  的情况下,繁昌区、青阳县等地仍以降雨为主(图 8c),安庆探空(图 8d)也显示了云顶高度低(700 hPa 以下)、云顶温度高( $-10^{\circ}\text{C}$  以上),不利于雪花、冰晶的形成,与之形成对比的是,在周边云顶温度较低的区域均出现了降雪。

选取 2022 年 1 月 28—30 日雨雪过程中出现明显雨雪转换的黄山区站进行分析(图 9),29 日 02:00 以前,地面气温在  $1^{\circ}\text{C}$  以上,FY4A-CTT 在  $-20^{\circ}\text{C}$

左右,云内已有较多冰晶和雪花粒子,但边界层气温较高,雪花粒子在边界层快速融化,地面观测为降雨。05:00 以后,随着地面冷空气渗透,气温逐渐降低,边界层融化层高度进一步降低,地面转为降雪,冰晶及雪花下沉过程的融化吸热和粒子拖曳作用使地面气温进一步降低至  $0.1^{\circ}\text{C}$ (刘梅等,2021;胡宁等,2021)。至 23:00 黄山区上空的 FY4A-CTT 值由 20:00 的  $-26.9^{\circ}\text{C}$  变为  $-12.4^{\circ}\text{C}$ ,此后一直维持在  $-13^{\circ}\text{C}$  左右的较暖水平。由于云内的冰晶或雪花粒子含量显著降低,即使地面气温很低( $-0.1^{\circ}\text{C}$ ),地面始终未能出现明显降雪时段,天气现象维持雨夹雪甚至降雨的状态。这也提示我们在监测预报服务中,除了要关心逆温层、边界层层结以外,还要充分考虑云顶温度的演变,因为云顶温度的演变会反映降水云的云顶高度和云层厚度的变化,影响云中雪花形成的效率,进而影响地面的降水粒子相态。上述个例的分析也表明,FY-4A 云顶温度产品时空分辨率高,也具备一定的观测精度,在降水相态识别或预判中有很好的应用潜力。

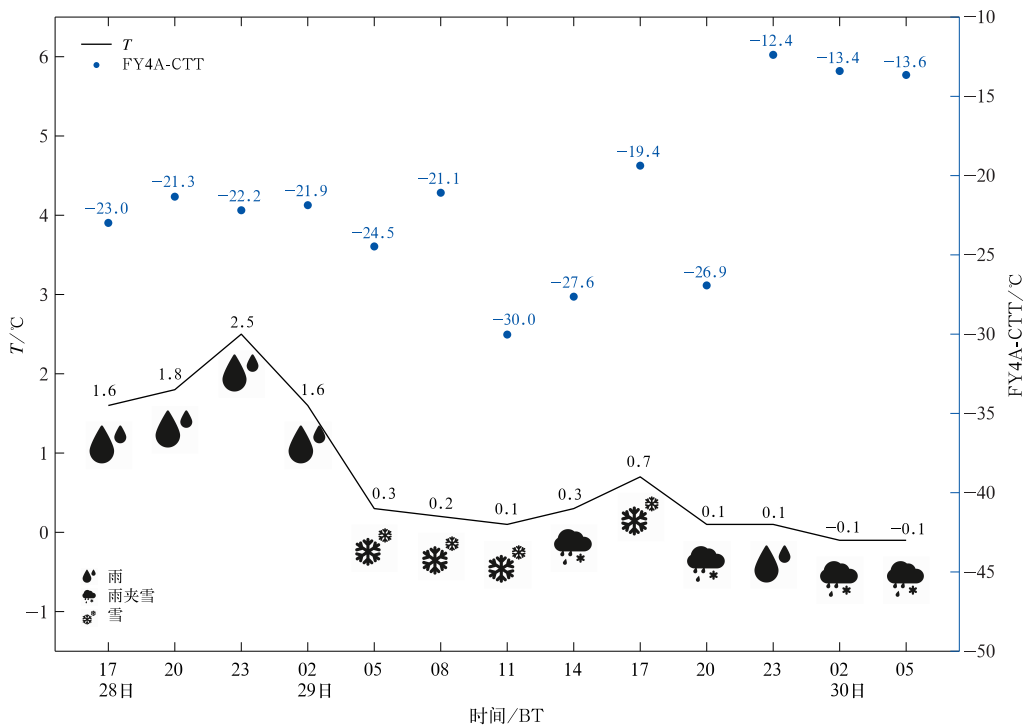


图 9 2022 年 1 月 28 日 17:00 至 30 日 05:00 黄山区地面气温、FY4A-CTT、天气现象(图标)演变

Fig. 9 The 3 h change of temperature, FY4A-CTT and precipitation types (icon) at Huangshan District from 17:00 BT 28 to 05:00 BT 30 January 2022

## 5 结论与讨论

本研究利用冬季上海宝山站 L 波段探空资料从多方面评估了 FY-4A 云顶温度产品,并将云顶温度产品应用于长三角冬季降水相态判识中,得到的结论主要包括以下几点:

(1)P95 温度露点差阈值法和 Z10 相对湿度阈值法判别云的垂直分布基本一致。

(2)FY-4A 对单层云的云顶温度反演效果较好,而对双层云、多层云的云顶温度普遍出现高估(平均高估幅度超过  $14^{\circ}\text{C}$ ),双(多)层云中高云较薄时,FY-4A 受低层云的云顶辐射信息影响大;当探空观测到的云顶高度不超过 6 km(或云顶温度不低于  $-20^{\circ}\text{C}$ )时,FY-4A 的云顶温度产品在该区域的误差较小,平均偏差约为  $3^{\circ}\text{C}$ 。

(3)长三角冬季降水相态与云顶温度存在关联,云顶温度低是出现降雪的必要条件之一,绝大部分降雪出现在云顶温度低于  $-12^{\circ}\text{C}$  的情况下,FY-4A 的云顶温度产品可以作为降水相态识别的辅助判据。

总之,FY-4A 的云顶温度产品在长三角地区与实况相关性较好、精度尚可,因其时空分辨率较高,能与常规观测形成互补,具有广阔的应用前景,特别是应用于冬季降水相态监测、预报与服务中。Gao et al(2022)在评估 FY4A-GIIRS 大气温度廓线产品的同时,研究了其在 2021—2022 年南方地区降雪天气过程中的应用,提及云顶信息在云贵地区冻雨发生时的作用。地面雨雪相态取决于播撒、淞附、碰并、融化、再冻结等一系列复杂变化,绝非单一因子所能决定,云顶温度确是降雪的必要条件,但也仅仅是管中窥豹之一斑,云层厚度以及降水强度对地面降水相态的影响仍有待进一步研究。本研究对 2019—2021 年冬季上海地区样本进行统计,获得的有效样本是 202 个(P95 法)和 200 个(Z10 法),样本量较少的原因一方面在于探空的时间分辨率低,上海在冬季一般只进行两次探空,有时探空对应经纬度没有云顶温度数据(无云或无数据),另一方面在于 FY-4A 业务运行时间不长,可得到的云顶温度产品数据仅自 2019 年始,以致积累的数据还不够多,因此本研究仅是基于历史产品的初步评估,待产品频次增加、数据量丰富以后,可对相关产品进行更加细致的评估。另外,本文仅对长三角地区冬季云

顶温度产品进行检验和应用;而夏季对流活动较强,云内结构相当复杂,云顶均匀性不如冬季,检验难度更大;同时,冬季降雪的云顶温度在不同气候区,也会存在差异,因此本论文的结果未必对其他区域具有普适性。这些方面的研究有待进一步开展,期待更加丰富的卫星产品给预报员带来更多认识上的更新。

**致谢:**感谢上海市生态气象和卫星遥感中心崔林丽博士在 FY-4A 资料读取方法上的指导。

## 参考文献

- 陈双,谌芸,何立富,等,2019.我国中东部平原地区临界气温条件下降水相态判别分析[J].气象,45(8):1037-1051. Chen S, Chen Y, He L F, et al, 2019. Discrimination analysis of snow and rain occurring under critical temperature conditions in central and eastern China[J]. Meteor Mon, 45(8):1037-1051(in Chinese).
- 程海艳,余晔,陈晋北,等,2018.大气红外探测器(AIRS)温、湿廓线反演产品及边界层高度在黄土高原的验证[J].高原气象,37(2):432-442. Cheng H Y, Yu Y, Cheng J B, et al, 2018. Validation of AIRS retrieved temperature and moisture products and its applicability for boundary layer height estimation in Loess Plateau[J]. Plateau Meteor, 37(2):432-442(in Chinese).
- 崔林丽,郭巍,葛伟强,等,2020. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究[J].高原气象,39(1):196-203. Cui L L, Guo W, Ge W Q, et al, 2020. Comparisons of cloud top parameter of FY-4A satellite and its typhoon application research[J]. Plateau Meteor, 39(1):196-203(in Chinese).
- 封秋娟,牛生杰,侯团结,等,2021.山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究[J].大气科学,45(5):1146-1160. Feng Q J, Niu S J, Hou T J, et al, 2021. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall cloud in Shanxi Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5):1146-1160(in Chinese).
- 郭巧红,2016.两次雨转大到暴雪过程的降水相态变化分析[J].浙江气象,37(3):1-6. Guo Q H, 2016. Analysis of precipitation phase change during two rain to heavy snow processes[J]. J Zhejiang Meteor, 37(3):1-6(in Chinese).
- 胡宁,符娇兰,孙军,等,2021.北京一次冬季极端降水过程中相态转换预报的误差分析[J].气象学报,79(2):328-339. Hu N, Fu J L, Sun J, et al, 2021. Errors in the forecast of precipitation type transition in an extreme winter precipitation event in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 79(2):328-339(in Chinese).
- 黄艺伟,刘琼,何敏,等,2019.基于探空资料的上海台风季 GIIRS/FY-4A 卫星温度廓线反演精度研究[J].红外,40(9):28-38. Huang Y W, Liu Q, He M, et al, 2019. Research on inversion precision of temperature profile of GIIRS/FY-4A satellite in Shanghai typhoon season based on radiosonde data[J]. Infrared, 40(9):28-38(in Chinese).
- 荆浩,于波,张琳娜,等,2022.北京及周边地区冬季降水相态的判别指标研究[J].气象,48(6):746-759. Jing H, Yu B, Zhang L N,

- et al, 2022. Discrimination criteria of winter precipitation types in and around Beijing[J]. Meteor Mon, 48(6):746-759(in Chinese).
- 刘梅, 俞剑蔚, 蒋义芳, 等, 2021. 2020 年 3 月 28 日沿江和苏南突发降雪多源监测特征及成因分析[J]. 气象, 47(10):1169-1181.
- Liu M, Yu J W, Jiang Y F, et al, 2021. Multi-source monitoring characteristics and causes of abrupt snowfall in southern Jiangsu on 28 March 2020[J]. Meteor Mon, 47(10):1169-1181(in Chinese).
- 漆梁波, 2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J]. 气象, 38(7):769-778.
- Qi L B, 2012. Formation mechanism and forecast on freezing rain and ice pellet in winter of China[J]. Meteor Mon, 38(7):769-778(in Chinese).
- 宋云帆, 闵文彬, 2019. 四川区域 FY-2F 卫星和探空相对湿度数据的对比分析[J]. 高原山地气象研究, 39(2):70-75.
- Song Y F, Min W B, 2019. A comparison analysis of FY-2F satellite humidity data and sounding data of Sichuan[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(2):70-75(in Chinese).
- 周坤论, 黄剑钊, 陶伟, 等, 2022. 降水类天气现象自动与人工观测质量对比分析[J]. 气象研究与应用, 43(1):112-117.
- Zhou K L, Huang J Z, Tao W, et al, 2022. Quality analysis of automatic and manual observation data of precipitation weather phenomenon instrument[J]. J Meteor Res Appl, 43(1):112-117(in Chinese).
- Casellas E, Bech J, Veciana R, et al, 2021. Surface precipitation phase discrimination in complex terrain[J]. J Hydrol, 592:125780.
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al, 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models[J]. Science, 245(4917):513-516.
- Gao Y, Mao D Y, Wang X, et al, 2022. Evaluation of FY-4A temperature profile products and application to winter precipitation type diagnosis in Southern China[J]. Remote Sens, 14(10):2363.
- Hamann U, Walther A, Baum B, et al, 2014. Remote sensing of cloud top pressure/height from SEVIRI: analysis of ten current retrieval algorithms[J]. Atmos Meas Tech, 7(9):2839-2867.
- Hu Y H, Zhang Y, Yan L, et al, 2021. Evaluation of the radiometric calibration of FY4A-AGRI thermal infrared data using lake Qinghai[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 59(9):8040-8050.
- Huang Y, Siems S, Manton M, et al, 2019. Evaluating Himawari-8 cloud products using shipborne and CALIPSO observations: cloud-top height and cloud-top temperature[J]. J Atmos Ocean Technol, 36(12):2327-2347.
- Huffman G J, Norman Jr G A, 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon Wea Rev, 116(11):2172-2182.
- Lao P, Liu Q, Ding Y H, et al, 2021. Rainrate estimation from FY-4A cloud top temperature for mesoscale convective systems by using machine learning algorithm[J]. Remote Sens, 13(16):3273.
- Liu B, Huo J, Lyu D, et al, 2021. Assessment of FY-4A and Himawari-8 cloud top height retrieval through comparison with ground-based millimeter radar at sites in Tibet and Beijing[J]. Adv Atmos Sci, 38(8):1334-1350.
- Min M, Wu C Q, Li C, et al, 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series[J]. J Meteorol Res, 31(4):708-719.
- Osei M A, Amekudzi L K, Ferguson C R, et al, 2020. Inter-comparison of AIRS temperature and relative humidity profiles with AMMA and DACCIIWA radiosonde observations over West Africa[J]. Remote Sens, 12(16):2631.
- Poore K D, Wang J H, Rossow W B, 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations[J]. J Climate, 8(3):550-568.
- Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, et al, 2005. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R[J]. Bull Am Meteor Soc, 86(8):1079-1096.
- Tan Z H, Ma S, Zhao X B, et al, 2019. Evaluation of cloud top height retrievals from China's next-generation geostationary meteorological satellite FY-4A[J]. J Meteor Res, 33(3):553-562.
- Taylor S, Stier P, White B, et al, 2017. Evaluating the diurnal cycle in cloud top temperature from SEVIRI[J]. Atmos Chem Phys, 17(11):7035-7053.
- Wu X X, Wang M H, Zhao D L, et al, 2022. The microphysical characteristics of wintertime cold clouds in North China[J]. Adv Atmos Sci, 39(12):2056-2070.
- Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, et al, 2010. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar[J]. J Geophys Res: Atmos, 115(D7):D00K30.

(本文责编:戴洋 王婷波)