

杨冰韵,任素玲,毛冬艳,等,2024.四川盆地及川西高原地区 FY-3D/VASS 温湿度廓线检验[J].气象,50(9):1043-1056. Yang B Y, Ren S L, Mao D Y, et al, 2024. Validation of FY-3D/VASS retrieved temperature and humidity profiles in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau[J]. Meteor Mon, 50(9):1043-1056 (in Chinese).

四川盆地及川西高原地区 FY-3D/VASS 温湿度廓线检验*

杨冰韵^{1,2,3} 任素玲^{1,2,3} 毛冬艳^{1,2,3} 覃丹宇^{1,2,3} 廖 蜜^{1,2,3}

1 国家卫星气象中心,北京 100081

2 许健民气象卫星创新中心,北京 100081

3 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081

提 要: 利用 2020—2021 年探空站及 ERA5 再分析资料,对 FY-3D 大气垂直探测系统(VASS)温湿度廓线在四川盆地及川西高原地区的精度进行检验。结果表明:与 ERA5 数据相比,FY-3D/VASS 温度在盆地和高原地区不同季节的平均偏差分别为 $-0.631\sim 0.500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-2.230\sim -1.234\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差分别为 $2.117\sim 3.222\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3.077\sim 3.460\text{ }^{\circ}\text{C}$,高原比盆地地区大,在垂直高度上,盆地地区的精度在 $800\sim 700\text{ hPa}$ 较低,高原地区的精度随高度的减小逐渐降低;FY-3D/VASS 比湿呈现一致的负偏差,平均偏差在盆地和高原地区分别为 $-0.775\sim -0.525\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $-1.096\sim -0.347\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均方根误差分别为 $1.251\sim 2.367\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.696\sim 1.991\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 $700\sim 600\text{ hPa}$ 的精度较低;通过将两组检验的平均偏差相加,间接建立 FY-3D/VASS 基于探空温湿度数据的检验结果,其中 FY-3D/VASS 温度在盆地地区的平均偏差较小,高原地区平均偏低 $2.440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,比湿在盆地和高原地区平均偏低 $0.612\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。上述结果可提升 FY-3D/VASS 温湿度反演产品在四川盆地及川西高原地区的天气气候应用能力。

关键词: FY-3D/VASS,温湿度廓线,四川盆地,川西高原

中图分类号: P414,P405

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.042401

Validation of FY-3D/VASS Retrieved Temperature and Humidity Profiles in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau

YANG Bingyun^{1,2,3} REN Suling^{1,2,3} MAO Dongyan^{1,2,3} QIN Danyu^{1,2,3} LIAO Mi^{1,2,3}

1 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081

3 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081

Abstract: FY-3D Vertical Atmospheric Sounding System (VASS) temperature and humidity profile products are evaluated using radiosonde observations and ERA5 reanalysis dataset in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau. The results show that relative to ERA5 data, the average bias of FY-3D/VASS temperature in different seasons is from -0.631 to $0.500\text{ }^{\circ}\text{C}$ and from -2.230 to $-1.234\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively, and the root mean square error is from 2.117 to $3.222\text{ }^{\circ}\text{C}$ and from 3.077 to $3.460\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the basin and the plateau area respectively. Vertically, the accuracy of temperature is low at $800\sim 700\text{ hPa}$ in the basin area and gradually decreases as the height decreases in the plateau area. The average bias of FY-3D/VASS specific

* 国家自然科学基金项目(42175014)、风云卫星应用先行计划(FY-APP-ZX-2023.01、FY-APP-2022.0112)共同资助

2023 年 1 月 17 日收稿; 2024 年 7 月 15 日收修定稿

第一作者:杨冰韵,主要从事卫星资料分析与应用研究. E-mail: yangby@cma.gov.cn

通讯作者:任素玲,主要从事卫星资料在天气和气候分析中的应用研究. E-mail: rensli@cma.gov.cn

humidity relative to ERA5 data is generally negative, while the average bias in different seasons is from -0.775 to $-0.525 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and from -1.096 to $-0.347 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, and the root mean square error is from 1.251 to $2.367 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and from 0.696 to $1.991 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at the basin and the plateau area respectively. The accuracy of specific humidity is relatively low at $700-600 \text{ hPa}$. In consideration of the small diurnal difference in the accuracy of FY-3D/VASS temperature and humidity, the average biases of the two groups of evaluations are properly added. As a result, the average biases of FY-3D/VASS temperature and specific humidity can be indirectly obtained based on the radiosonde observations. Relative to radiosonde observations, the average bias of FY-3D/VASS temperature in the basin area is relatively small and the average bias in the plateau area is lower by about 2.440°C . The average bias of FY-3D/VASS specific humidity in the basin and plateau area is lower by about $0.612 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The above-mentioned results are significant for improving the weather and climate application ability of FY-3D/VASS temperature and humidity profile products in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau.

Key words: FY-3D/VASS, temperature and humidity profile, Sichuan Basin, Western Sichuan Plateau

引 言

大气温湿度廓线在强对流天气预报、数值模式、地气系统辐射以及气候变化等领域都有着广泛应用(王秀明等, 2013; Caumont et al, 2016; 孙囡等, 2019; 赖安伟等, 2021)。目前, 温湿度廓线资料主要通过气象探空站或卫星遥感观测, 以及再分析资料等方式获取(王梦晓等, 2019; 孔凡超等, 2021; 杜明斌等, 2022)。探空站观测是大气温湿度廓线最直接的获取方式, 其数据精度较高, 但观测时间通常只有每日的 00 时和 12 时(世界时, 下同), 同时受地理局限性的影响, 很多地区观测站点稀缺。再分析资料同化了地面、高空、卫星等多种观测资料, 具有时间序列长、覆盖范围广、时间频次高的优点(Hersbach et al, 2020; 王传辉等, 2018), 然而时效性不高, 无法满足实时的天气监测需求。卫星遥感观测覆盖范围广(杨冰韵等, 2019; 2020; 曹广真等, 2023), 可以在一定程度上弥补探空观测在空间上的局限性以及再分析资料在时效上的滞后性。

四川盆地及川西高原地区的地形条件十分复杂, 不仅常常发生高原涡和西南涡等灾害性天气(肖递祥等, 2017; 孙芳等, 2022; 周春花等, 2022), 还会对东亚乃至全球的天气气候产生重要影响(马振锋等, 2006)。目前已经有不少学者围绕卫星观测的大气温湿度廓线开展了精度检验(Wu et al, 2005; 程海艳等, 2018; 顾雅茹等, 2018; Ren et al, 2022), 针对青藏高原及西南地区的验证工作也在开展, 如倪成诚等(2013)通过对比大气红外探测器(AIRS)卫

星资料与西南涡观测试验的探空资料, 发现 AIRS 温度廓线资料在川藏地区具有较好的适用性; 徐桂荣等(2016)通过将青藏高原地区 COSMIC 掩星反演的大气廓线资料与 GPS 探空加密观测资料进行对比, 发现近地层的偏差较大; 蔡宏珂等(2021)利用 AIRS 月尺度湿度廓线资料, 分析了我国西南地区水汽的时空分布特征。随着我国风云气象卫星综合观测能力的逐步提升(杨军等, 2009; 唐世浩等, 2016; 王新等, 2020; 马博源等, 2022), 基于风云卫星观测的大气温湿度廓线产品广泛应用于灾害性天气和气候研究等方面(漆成莉等, 2016; 牛宁等, 2024), 其中风云三号 D 星(FY-3D)大气垂直探测系统(VASS)反演的温湿度廓线资料可以在天气监测中发挥重要作用(任素玲等, 2022), 然而目前针对其开展的检验工作仍然比较欠缺。因此, 利用气象探空站点数据及 ERA5 再分析资料, 对 2020—2021 年 FY-3D/VASS 温湿度廓线数据在四川盆地及川西高原地区的精度进行检验评估, 以期提升风云卫星温湿度廓线在天气分析中的应用能力, 同时为改进数值模式初始场提供了一定的参考依据。

1 资料和方法

1.1 探空数据

研究区域包括四川及重庆地区, 从地形来看整体分为川西高原和四川盆地两个主要区域, 其中川西高原指的是四川省西部与青海、西藏交界的高海拔区, 它是青藏高原东南方的延伸区域; 四川盆地包

括四川省中东部和重庆地区,由青藏高原、大巴山、华蓥山、云贵高原环绕而成,分为边缘山地和盆地底部两大部分。为了区分两种地形下温湿度产品的精度差异,选取的探空站点包括位于四川盆地低海拔地区的重庆、温江、宜宾、达州探空站,海拔高度为 344.9~547.7 m,以及位于川西高原高海拔地区的甘孜、红原、巴塘探空站,海拔高度为 2581.8~3496.8 m(图 1)。其中,各探空站温湿度廓线数据来源于国家气象信息中心,该数据集经过严格的数据补录和质量控制,有较好的完整性和连续性。时间为 2020—2021 年逐日的 00 时及 12 时,数据选取 1000~200 hPa 各个层次的位势高度、气压、温度和比湿等。

1.2 FY-3D/VASS 数据

FY-3D 是我国第二代极轨气象卫星,于 2017 年 11 月 15 日发射,2019 年 1 月 1 日正式投入业务运行。FY-3D/VASS(Vertical Atmospheric Sounding System)温湿度廓线产品是基于红外高光谱大气探测仪(HIRAS)、微波温度计(MWTS)和微波湿度计(MWHS)数据联合反演得到的全球逐轨道产品。其中,HIRAS 光谱覆盖 1370 个通道,光谱通道比前期的红外分光计增加了 70 倍,光谱分辨率最高达 0.625 cm^{-1} ,可以更精确地探测到更高垂直分辨率的大气温度和水汽信息;MWTS 具有 13 个地表和氧气探测通道,频率位于 50~60 GHz,具有穿透非降水云的能力,可以配合 HIRAS 获取有云情况下的大气温度廓线;MWHS 具有 15 个探测通

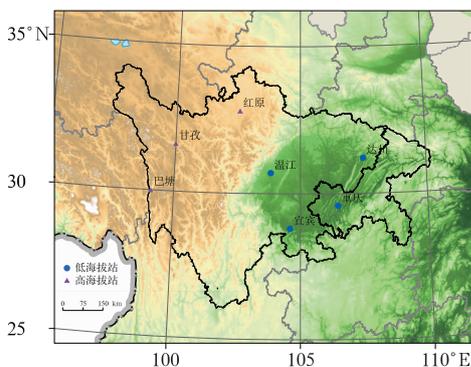
道,在 183.31 GHz 水汽吸收线附近的 5 个探测通道可以获得有云情况下的大气湿度廓线。大气探测仪设计二氧化碳、氧气、水汽等的红外或者微波吸收谱带上的一系列探测通道,其中吸收带的中心位置主要获取大气层高层信息,吸收带的翼区主要获取大气层底层信息,根据吸收带强吸收中心到弱吸收翼区的光谱变化,可以反演出大气垂直方向的温度和湿度廓线(张鹏等,2012)。FY-3D/VASS 大气温湿度廓线产品的反演主要包括以下 4 步:(1)云和降水检测;(2)VASS 仪器偏差校正;(3)回归反演过程;(4)非线性迭代物理反演。产品的水平分辨率在星下点约 16 km,垂直高度上从 1013.25 hPa 至 0.1 hPa 共 43 层,轨道数据间隔为 1 小时 42 分。本文选取的是 1000~200 hPa 大气温度和比湿垂直廓线数据,时间为 2020—2021 年。

1.3 ERA5 再分析数据

ERA5 为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代全球大气再分析资料(Hersbach et al, 2020),本文使用 2020—2021 年 ERA5 逐小时温度和比湿数据,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直分辨率为 43 层(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp>),选取 1000~200 hPa(即 1000、975、950、925、900、875、850、825、800、775、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、225、200 hPa)共 23 层的数据。

1.4 检验方法

由于 FY-3D 在四川盆地及川西高原的过境时间在下午(06 时前后)和夜间(18 时前后),且每日轨道观测时间也存在差异,而探空观测的时间是 00 时和 12 时,无法直接将 FY-3D/VASS 和探空资料进行时间匹配。ERA5 再分析资料具有时间频次高(逐小时)且空间分布广的优势,通过选取 ERA5 资料作为中间变量,首先利用探空资料对时空匹配上的 ERA5 数据进行检验,再基于 ERA5 数据对时空匹配的 FY-3D/VASS 数据进行检验,可以分别获取两组检验的偏差分析结果。进一步分析 FY-3D/VASS 温湿度数据精度在白天和夜间的日变化特征,评估其在每日不同时间段的误差是否稳定,如果误差的日变化整体较小,说明两组检验误差受不同时间段的影响较小,可以将两组检验的平均偏差相加,间接地建立 FY-3D/VASS 基于探空数据的偏差



注:黑线所示区域为研究区域。

图 1 研究区域探空站点分布
Fig. 1 Distribution of radiosonde stations in the study area

检验结果。

两组检验需要进行样本点的时空匹配,由于 ERA5 与探空数据均为整点,匹配的时间间隔为 0 h, FY-3D/VASS 与 ERA5 数据匹配的时间间隔小于 1 h。在水平方向选取最邻近点匹配,垂直方向上首先通过线性插值的方法,将探空和 FY-3D/VASS 数据分别插值到 ERA5 数据的高度层,然后进行 ERA5 与探空、FY-3D/VASS 与 ERA5 两组数据的检验。定量检验指标选取了 1000~200 hPa 整层的相关系数、平均偏差和均方根误差,同时计算了不同垂直高度上的平均偏差和均方根误差。

2 结果与分析

2.1 FY-3D/VASS 温度廓线检验

2.1.1 基于探空的 ERA5 温度检验

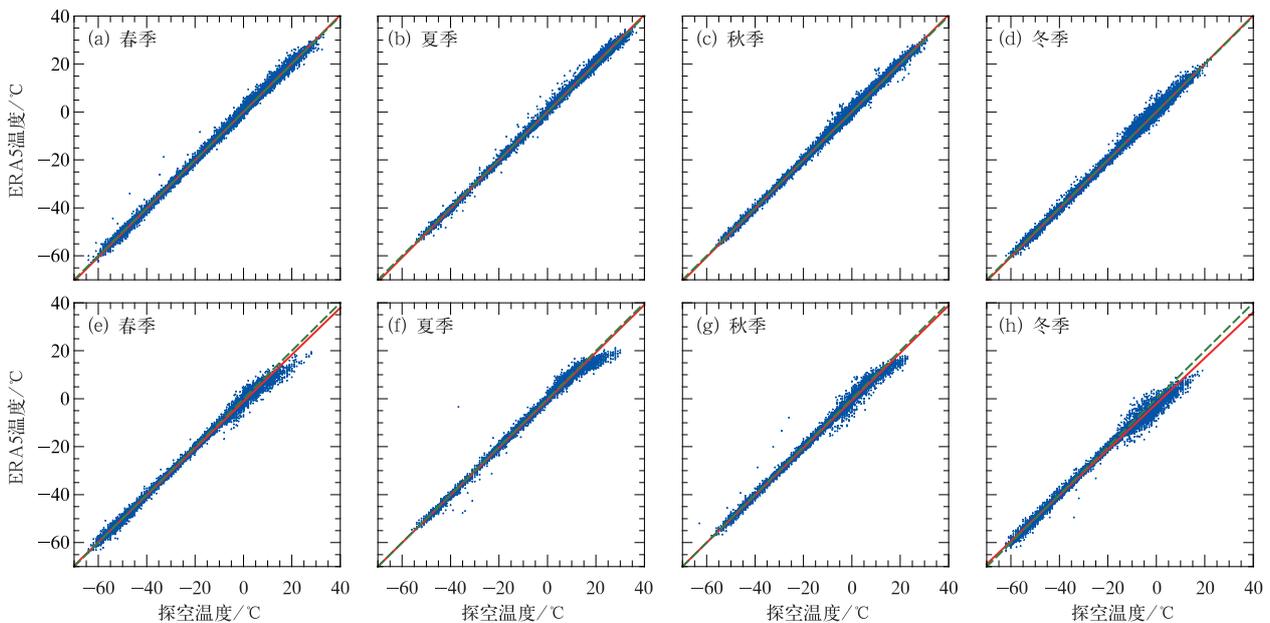
ERA5 与探空温度散点图显示(图 2),两种数据具有较高的聚集度,呈现出明显的线性分布,回归模型通过了 0.01 的显著性水平检验,其中盆地的拟合效果比高原好,高原在高值区略有发散。定量检验结果显示(表 1):在盆地,不同季节的样本数为 29344~30450,高原比盆地少,为 11188~12308,相

关系数均达到 0.996 及以上。从误差分析来看,均方根误差在盆地为 0.895~1.095℃,高原为 1.361~1.970℃,高原比盆地大;平均偏差在盆地为 -0.120~0.107℃,高原为 -0.929~-0.430℃,高原偏大且不同季节均为负偏差。

从样本的垂直分布来看(图 3),盆地除近地层受不同站点气压波动的影响样本数偏低外,不同季节的样本数在垂直高度上没有明显差异,而高原除夏季外,样本数在 400 hPa 以上随高度递减,说明对流层中高层存在缺测(图 3a,3d)。从平均偏差的垂直变化来看(图 3b,3e),盆地基本为 -0.5~0.9℃,除冬季以外,500 hPa 高度层以下以正偏差为主,500 hPa 以上以负偏差为主;高原的平均偏差为 -3.7~0.0℃,垂直高度上基本为负偏差,500 hPa 以下平均偏差绝对值随高度降低逐渐增大。从均方根误差的垂直变化来看(图 3c,3f),盆地为 0.6~1.8℃,冬季在 850~500 hPa 偏大;高原为 0.6~4.6℃,500 hPa 以下随高度降低逐渐增大。

2.1.2 基于 ERA5 的 FY-3D/VASS 温度检验

FY-3D/VASS 与 ERA5 温度散点图显示(图 4),两者呈现出明显的线性分布,回归模型通过了 0.01 的显著性水平检验;散点的聚集度较好,高值区略有发散,与高原相比,盆地的线性拟合线与 1:1 线更



注:红色实线为线性拟合线,绿色虚线为 1:1 线。

图 2 2020—2021 年(a~d)四川盆地和(e~h)川西高原 ERA5 与探空温度散点图

Fig. 2 Scatter plots of ERA5 and radiosonde temperatures in

(a~d) Sichuan Basin and (e~h) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

表 1 2020—2021 年四川盆地和川西高原基于探空的 ERA5 温度统计检验
Table 1 Statistical test of ERA5 temperature based on radiosonde data in
Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

区域	季节	样本数	相关系数	均方根误差/℃	平均偏差/℃
盆地	春季	30450	0.999	0.962	-0.050
	夏季	29344	0.999	0.895	0.107
	秋季	30390	0.999	0.919	0.061
	冬季	30425	0.998	1.095	-0.120
高原	春季	12016	0.998	1.545	-0.661
	夏季	12308	0.998	1.424	-0.430
	秋季	11875	0.998	1.361	-0.494
	冬季	11188	0.996	1.970	-0.929

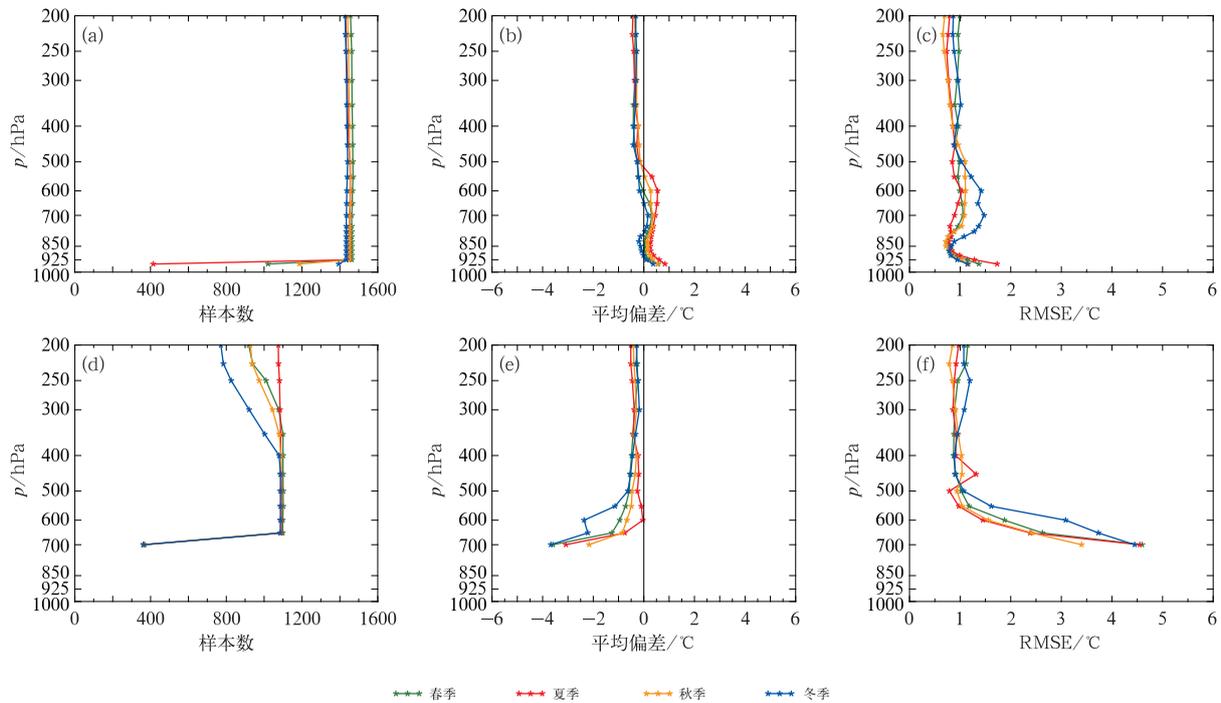


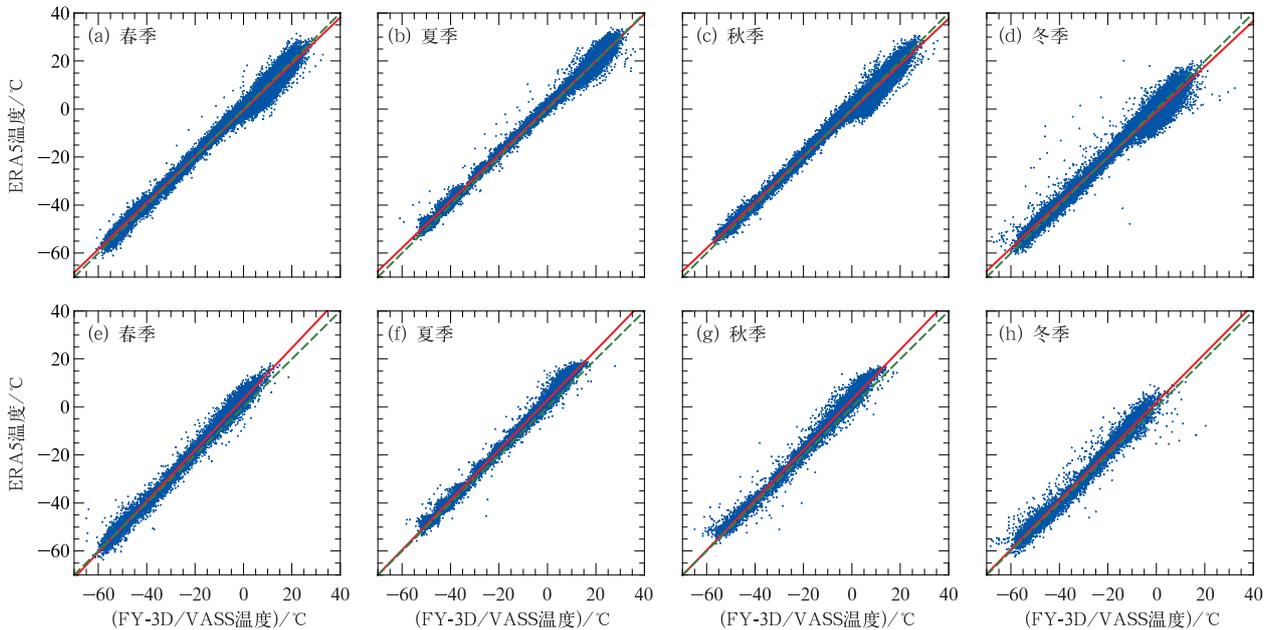
图 3 2020—2021 年(a~c)四川盆地和(d~f)川西高原 ERA5 与探空温度的
(a,d)样本数,(b,e)平均偏差及(c,f)均方根误差的垂直变化

Fig. 3 Vertical variation of (a, d) sample number, (b, e) average bias and
(c, f) root mean square error of ERA5 and radiosonde temperatures in
(a-c) Sichuan Basin and (d-f) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

接近。定量检验结果显示(表 2):在盆地,不同季节的样本数为 22751~25521,高原为 6405~10905,两个地区相关系数均达到 0.983 以上;从误差分析来看,均方根误差在盆地为 2.117~3.222℃,高原为 3.077~3.460℃,其中夏季最小,冬季最大,高原比盆地大;平均偏差在盆地为-0.631~0.500℃,高原为-2.230~-1.234℃,高原比盆地大,盆地除夏季外均为正偏差,高原为一致的负偏差。

除近地面附近外,盆地在垂直高度上的样本数在春、夏、秋、冬季分别为 1093、1259、1135、1087,高

原为 837、962、749、569,夏季样本数最多,冬季最少,高原比盆地少(图 5a,5d)。从平均偏差垂直变化来看(图 5b,5e),盆地为-1.6~3.2℃,600 hPa 以上以负偏差为主(除冬季在 400~320 hPa 为正偏差),600 hPa 以下以正偏差为主,其中冬季正偏差最大,夏季最小,最大值均出现在 800~700 hPa;高原在-5.4~0.9℃,除冬季在 400~300 hPa 为正偏差外,其余所有高度上均为负偏差,低层较大。从均方根误差垂直变化看(图 5c,5f),盆地为 1.5~4.3℃,冬季较大,其中春、秋、冬季均在 800~700 hPa 附近



注:红色实线为线性拟合线,绿色虚线为1:1线。

图 4 2020—2021 年(a~d)四川盆地和(e~h)川西高原 FY-3D/VASS 与 ERA5 温度散点图

Fig. 4 Scatter plots of FY-3D/VASS and ERA5 temperatures in (a—d) Sichuan Basin and (e—h) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

表 2 2020—2021 年四川盆地和川西高原基于 ERA5 的 FY-3D/VASS 温度统计检验

Table 2 Statistical test of FY-3D/VASS temperature based on ERA5 data in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

区域	季节	样本数	相关系数	均方根误差/°C	平均偏差/°C
盆地	春季	22751	0.994	2.597	0.242
	夏季	25521	0.996	2.117	-0.631
	秋季	23762	0.994	2.547	0.369
	冬季	23034	0.988	3.222	0.500
高原	春季	9482	0.993	3.217	-1.684
	夏季	10905	0.995	3.077	-2.230
	秋季	8464	0.992	3.336	-2.098
	冬季	6405	0.983	3.460	-1.234

达到最大值,400 hPa 以下随高度降低逐渐增大;高原为 2.0~6.1°C,400 hPa 以上为 2.0~3.2°C 且冬季较大,400 hPa 以下随高度降低逐渐增大。整体来看,除夏季外盆地在 800~700 hPa 高度上的平均偏差和均方根误差较大,高原在 400 hPa 以下的平均偏差绝对值和均方根误差均随高度的减小逐渐增大。

2.1.3 FY-3D/VASS 相对于探空温度的精度分析

从 FY-3D/VASS 与 ERA5 温度的均方根误差、平均偏差在白天和夜间的差异来看(表 3),FY-3D/VASS 温度的误差在白天和夜间的差异较小,其中均方根误差昼夜差值的季节平均在盆地和高原

分别为 0.048°C 和 -0.562°C,平均偏差昼夜差值的季节平均分别为 0.373°C 和 0.719°C。

鉴于 FY-3D/VASS 温度的检验误差在白天和夜间轨道的日变化较小,可以将两组检验的平均偏差相加,间接地建立 FY-3D/VASS 基于探空温度数据的偏差检验结果。在盆地,FY-3D/VASS 相对于探空温度的平均偏差为 -0.524~0.430°C(表 4),其中夏季为负偏差,其余季节为正偏差;而在高原,FY-3D/VASS 相对于探空温度的平均偏差为 -2.660~-2.163°C,均为负偏差。总体来看,相对于探空数据,FY-3D/VASS 温度的偏差在盆地整体较小,高原温度比盆地偏低 2.440°C 左右。

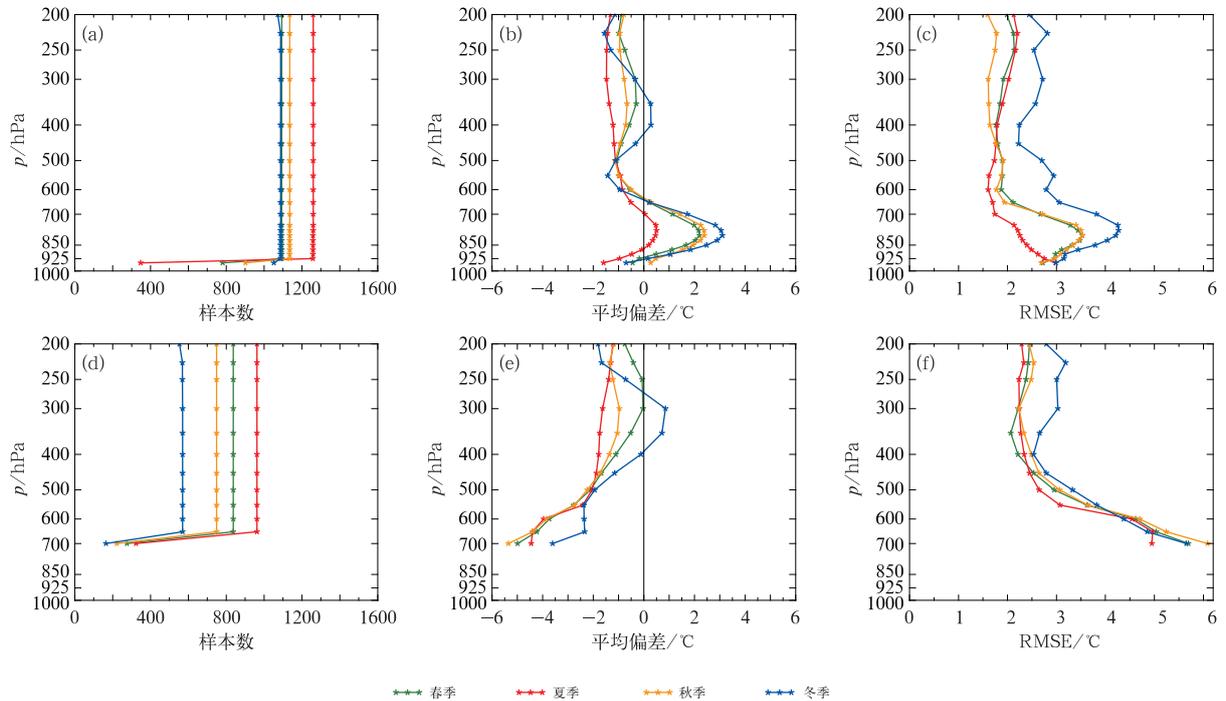


图 5 2020—2021 年(a~c)四川盆地和(d~f)川西高原 FY-3D/VASS 与 ERA5 温度的 (a, d)样本数,(b, e)平均偏差及(c, f)均方根误差的垂直变化

Fig. 5 Vertical variation of (a, d) sample number, (b, e) average bias and (c, f) root mean square error of FY-3D/VASS and ERA5 temperatures in (a—c) Sichuan Basin and (d—f) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

表 3 2020—2021 年四川盆地和川西高原 FY-3D/VASS 与 ERA5 温度检验 误差在白天和夜间差值(单位:°C)

Table 3 Difference of the test errors between FY-3D/VASS and ERA5 temperatures in day and night in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021 (unit: °C)

区域	季节	均方根误差	平均偏差
盆地	春季	0.133	0.594
	夏季	-0.336	0.270
	秋季	0.127	0.565
	冬季	0.268	0.062
高原	春季	-0.302	0.481
	夏季	-0.317	0.373
	秋季	-0.837	0.958
	冬季	-0.790	1.062

表 4 2020—2021 年四川盆地和川西高原 FY-3D/VASS 相对探空温度的平均偏差(单位:°C)

Table 4 Average bias of FY-3D/VASS temperature relative to radiosonde in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021 (unit: °C)

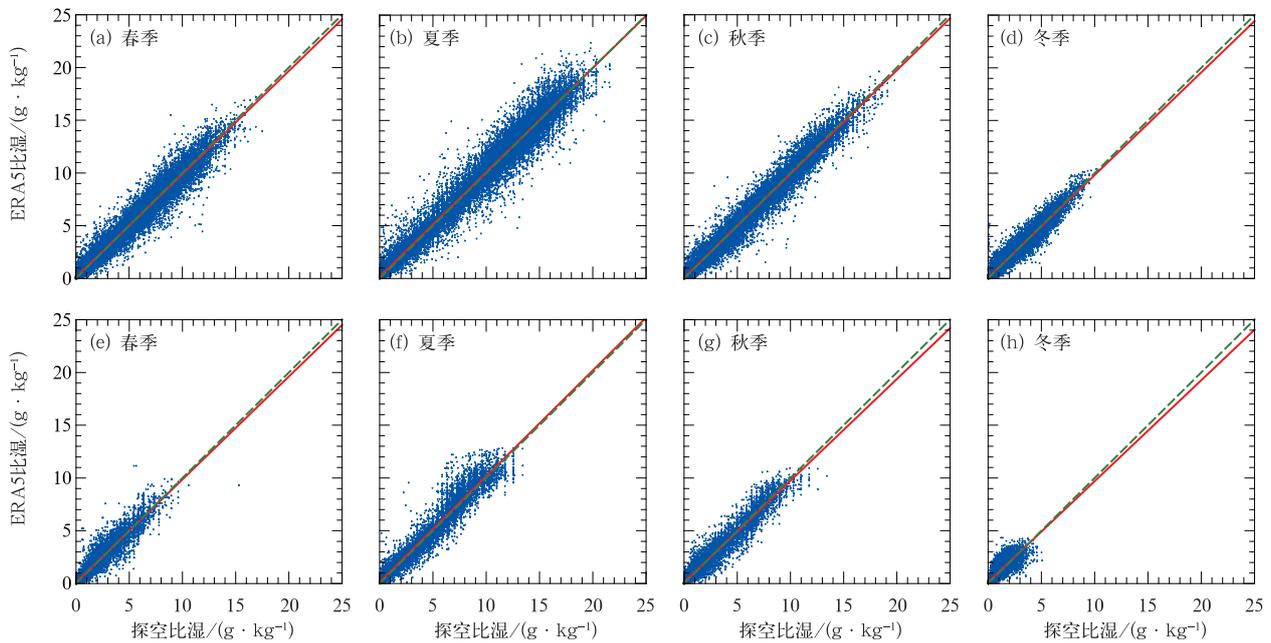
季节	盆地	高原
春季	0.192	-2.345
夏季	-0.524	-2.660
秋季	0.430	-2.592
冬季	0.380	-2.163

2.2 FY-3D/VASS 比湿廓线检验

2.2.1 基于探空的 ERA5 比湿检验

ERA5 比湿与探空比湿同样具有较高的聚集度(图 6),与温度相比略有发散,线性拟合通过了 0.01 的显著性水平检验,盆地的拟合效果比高原好。从线性拟合线与 1:1 线的对比来看,两条直线在夏季

重合度最好,盆地重合度更好。定量检验结果显示(表 5):在盆地,不同季节的检验样本数为 29332~30396,高原为 11104~12307,相关系数除高原的冬季为 0.880 外,其余均在 0.950 以上,说明两种数据的相关性很高。从误差分析来看,均方根误差在盆地和高原分别为 0.551~0.939 $g \cdot kg^{-1}$ 、0.428~0.744 $g \cdot kg^{-1}$,盆地偏大;平均偏差分别为 -0.011~0.097 $g \cdot kg^{-1}$ 、0.033~0.138 $g \cdot kg^{-1}$,高原偏大。川西高原的比湿基本出现在 700 hPa 高度以上,整层比湿的分布区间较小,而四川盆地的比湿分布区间较大,均方根误差也相对较大。



注:红色实线为线性拟合线,绿色虚线为1:1线。

图 6 2020—2021 年(a~d)四川盆地和(e~h)川西高原 ERA5 与探空比湿散点图

Fig. 6 Scatter plots of ERA5 and radiosonde specific humidities in (a—d) Sichuan Basin and (e—h) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

表 5 2020—2021 年四川盆地和川西高原基于探空的 ERA5 比湿统计检验

Table 5 Statistical test of ERA5 specific humidity based on radiosonde data in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

区域	季节	样本数	相关系数	均方根误差/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均偏差/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
盆地	春季	30363	0.984	0.657	0.008
	夏季	29332	0.987	0.939	0.097
	秋季	30370	0.989	0.633	-0.011
	冬季	30396	0.967	0.551	0.009
高原	春季	11856	0.957	0.535	0.069
	夏季	12307	0.978	0.744	0.138
	秋季	11874	0.976	0.566	0.033
	冬季	11104	0.880	0.428	0.107

在垂直方向上,比湿样本数与温度相比差异不大,高原样本数在对流层中高层偏少(图 7a,7d);从平均偏差垂直变化来看,盆地除近地层外基本在零线附近(近地层为 $-0.4 \sim 1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),高原 400 hPa 以上在零线附近,400 hPa 以下在 $-0.4 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7b,7e);盆地和高原的均方根误差均在 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,随高度减小逐渐增大,其中夏季最大,冬季最小(图 7c,7f)。

2.2.2 基于 ERA5 的 FY-3D/VASS 比湿检验

FY-3D/VASS 与 ERA5 比湿的聚集度较好(图 8),线性拟合通过了 0.01 的显著性水平检验,盆地的线性拟合线与 1:1 线更接近。定量检验结

果显示(表 6):盆地和高原不同季节的样本数分别为 19732~23948、7613~9534,相关系数除高原冬季为 0.726 外,其余均在 0.853 以上,盆地的相关性比高原好;均方根误差在盆地为 $1.251 \sim 2.367 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高原为 $0.696 \sim 1.991 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中夏季最大,冬季最小,盆地较大;平均偏差在盆地为 $-0.775 \sim -0.525 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高原为 $-1.096 \sim -0.347 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,呈现一致的负偏差,高原的季节差异较大。

除近地面附近外,盆地在垂直高度上的样本数在春、夏、秋、冬季分别为 1123、980、1036、1132,高原分别为 845、823、734、680,高原比盆地的样本数少(图 9a,9d);从平均偏差垂直变化来看,盆地和高

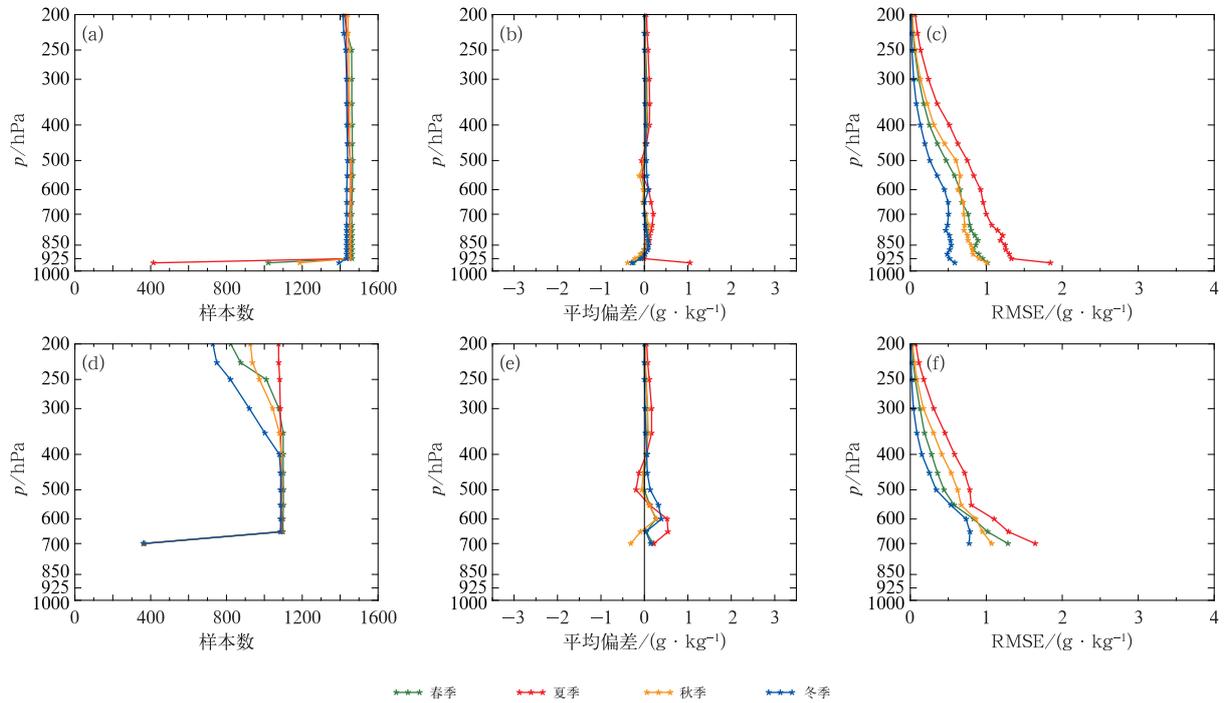
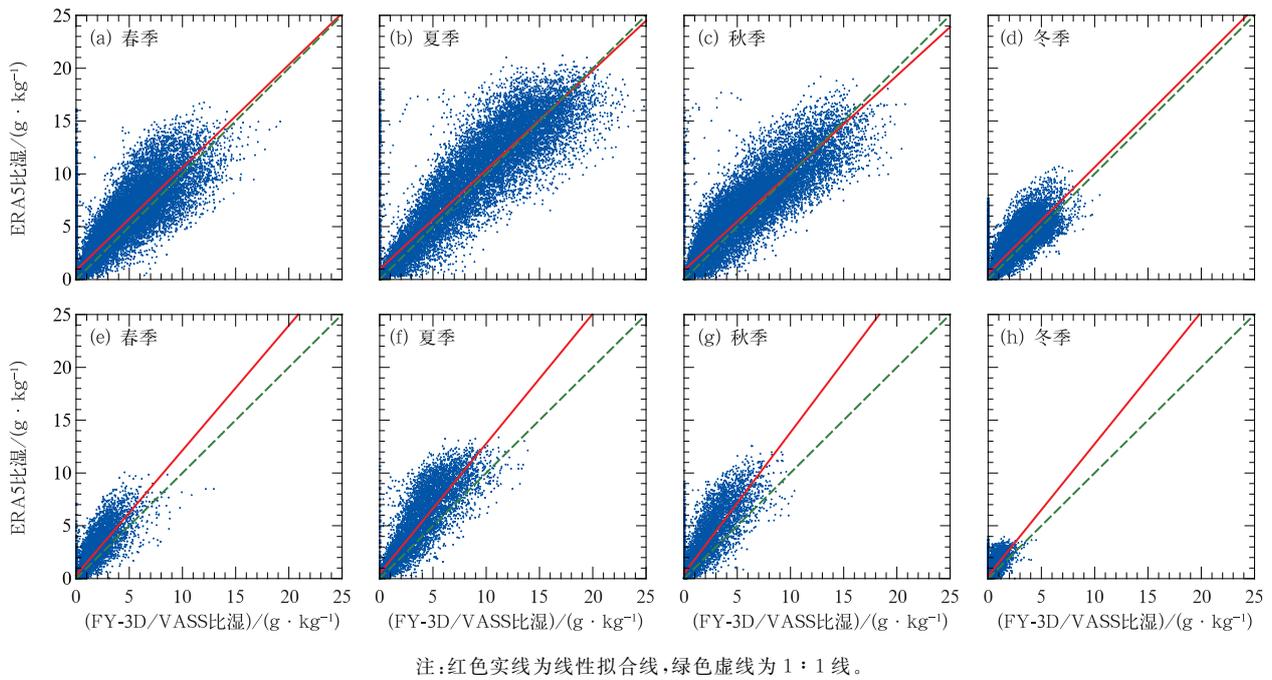


图 7 2020—2021 年(a~c)四川盆地和(d~f)川西高原 ERA5 与探空比湿的
(a,d)样本数,(b,e)平均偏差及(c,f)均方根误差的垂直变化
Fig. 7 Vertical variation of (a, d) sample number, (b, e) average bias and
(c, f) root mean square error of ERA5 and radiosonde specific humidities in
(a—c) Sichuan Basin and (d—f) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021



注:红色实线为线性拟合线,绿色虚线为 1:1 线。

图 8 2020—2021 年(a~d)四川盆地和(e~h)川西高原 FY-3D/VASS 与 ERA5 比湿散点图
Fig. 8 Scatter plots of FY-3D/VASS and ERA5 specific humidities in
(a—d) Sichuan Basin and (e—h) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

表 6 2020—2021 年四川盆地和川西高原基于 ERA5 数据的 FY-3D/VASS 比湿统计检验
Table 6 Statistical test of FY-3D/VASS specific humidity based on ERA5 data in
Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

地区	季节	样本数	相关系数	均方根误差/(g·kg ⁻¹)	平均偏差/(g·kg ⁻¹)
盆地	春季	23316	0.871	1.980	-0.775
	夏季	19732	0.919	2.367	-0.553
	秋季	21618	0.907	1.913	-0.525
	冬季	23948	0.853	1.251	-0.585
高原	春季	9534	0.857	1.112	-0.514
	夏季	9308	0.896	1.991	-1.096
	秋季	8220	0.868	1.765	-0.950
	冬季	7613	0.726	0.696	-0.347

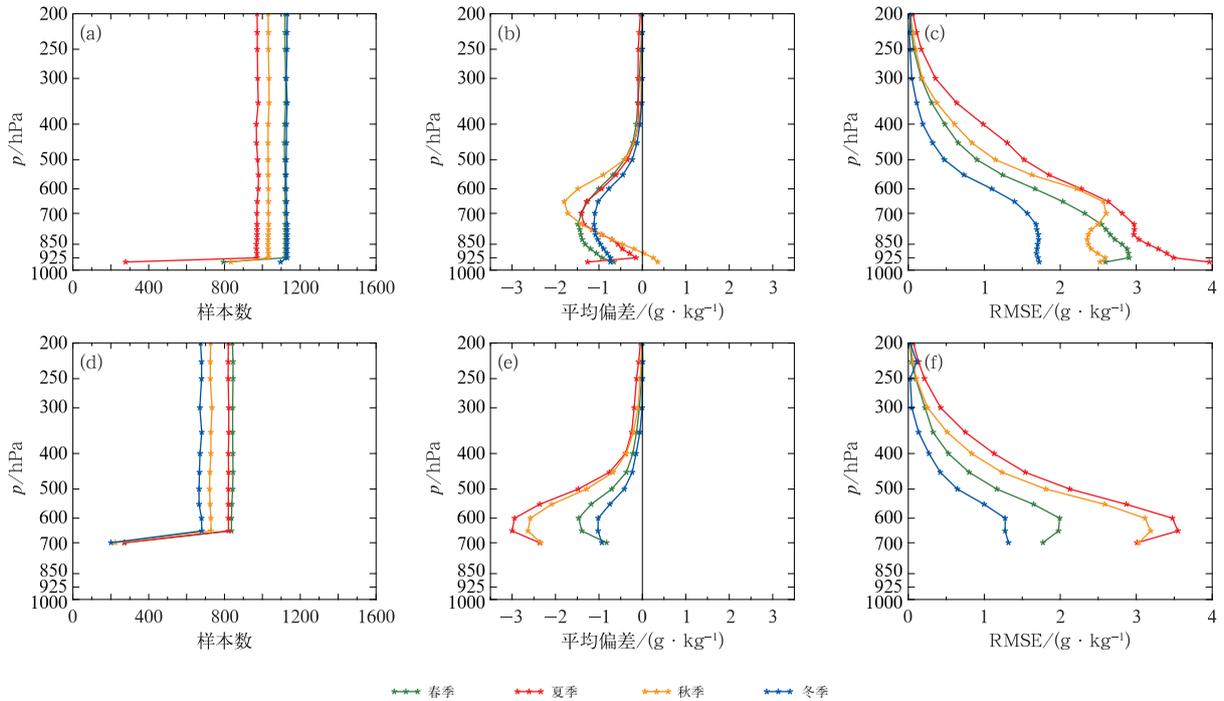


图 9 2020—2021 年(a~c)四川盆地和(d~f)川西高原 FY-3D/VASS 与 ERA5 比湿的
(a,d)样本数,(b,e)平均偏差及(c,f)均方根误差的垂直变化

Fig. 9 Vertical variation of (a, d) sample number, (b, e) average bias and (c, f) root mean square error of FY-3D/VASS and ERA5 specific humidities in (a~c) Sichuan Basin and (d~f) Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021

原在垂直高度上基本为负偏差,其中盆地为-1.8~0.4 g·kg⁻¹,高原为-3.0~0 g·kg⁻¹,负偏差的绝对值均在 700~600 hPa 较大;盆地均方根误差在 4.0 g·kg⁻¹ 以下,近地层较大,高原在 3.6 g·kg⁻¹ 以下,其中在 700~600 hPa 较大,盆地和高原的均方根误差均为夏季最大,冬季最小。

2.2.3 FY-3D/VASS 相对于探空比湿的精度分析

从 FY-3D/VASS 与 ERA5 比湿的均方根误差、平均偏差在白天和夜间的差异来看(表 7),FY-3D/VASS 比湿的误差在白天和夜间的差异较小,

均方根误差昼夜差值的季节平均在盆地和高原分别为-0.050 g·kg⁻¹和-0.300 g·kg⁻¹,平均偏差昼夜差值的季节平均分别为 0.078 g·kg⁻¹和 0.292 g·kg⁻¹。

通过将两组检验的平均偏差相加,间接地建立 FY-3D/VASS 基于探空比湿数据的偏差检验结果(表 8)。在盆地,FY-3D/VASS 相对于探空比湿数据的平均偏差为-0.767~-0.456 g·kg⁻¹;在高原,则为-0.958~-0.240 g·kg⁻¹,二者均为负偏差。总体来看,相对于探空数据,FY-3D/VASS 比

湿在盆地和高原平均偏低 $0.612 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,其中高原的季节差异较大。

表7 2020—2021年四川盆地和川西高原 FY-3D/VASS 与 ERA5 比湿检验误差在白天和夜间的差值(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 7 Difference of the test errors between FY-3D/VASS and ERA5 specific humidities in day and night in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

区域	季节	均方根误差	平均偏差
盆地	春季	0.155	0.151
	夏季	-0.367	0.078
	秋季	-0.063	0.129
	冬季	0.074	-0.047
高原	春季	-0.268	0.289
	夏季	-0.440	0.501
	秋季	-0.436	0.363
	冬季	-0.039	0.014

表8 2020—2021年四川盆地和川西高原 FY-3D/VASS 相对探空比湿的平均偏差(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 8 Average bias of FY-3D/VASS specific humidity relative to radiosonde data in Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau from 2020 to 2021 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

季节	盆地	高原
春季	-0.767	-0.445
夏季	-0.456	-0.958
秋季	-0.536	-0.917
冬季	-0.576	-0.240

3 结论

本文选取四川盆地和川西高原的特殊下垫面地区,对2020—2021年FY-3D/VASS反演的温湿度廓线的精度进行了检验。针对探空和FY-3D/VASS观测时间的不对应问题,利用ERA5再分析资料作为中间变量,间接地评估了FY-3D/VASS相对于探空观测的误差,结果发现:

(1)与探空温度相比,ERA5温度的平均偏差绝对值小于 0.929°C ,均方根误差小于 1.970°C ,ERA5比湿的平均偏差绝对值小于 $0.138 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均方根误差小于 $0.939 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可以用于FY-3D/VASS温湿度精度评估。

(2)与ERA5温度相比,FY-3D/VASS温度在盆地不同季节的平均偏差为 $-0.631 \sim 0.500^\circ\text{C}$,均方根误差为 $2.117 \sim 3.222^\circ\text{C}$,在高原的平均偏差为 $-2.230 \sim -1.234^\circ\text{C}$,均方根误差为 $3.077 \sim$

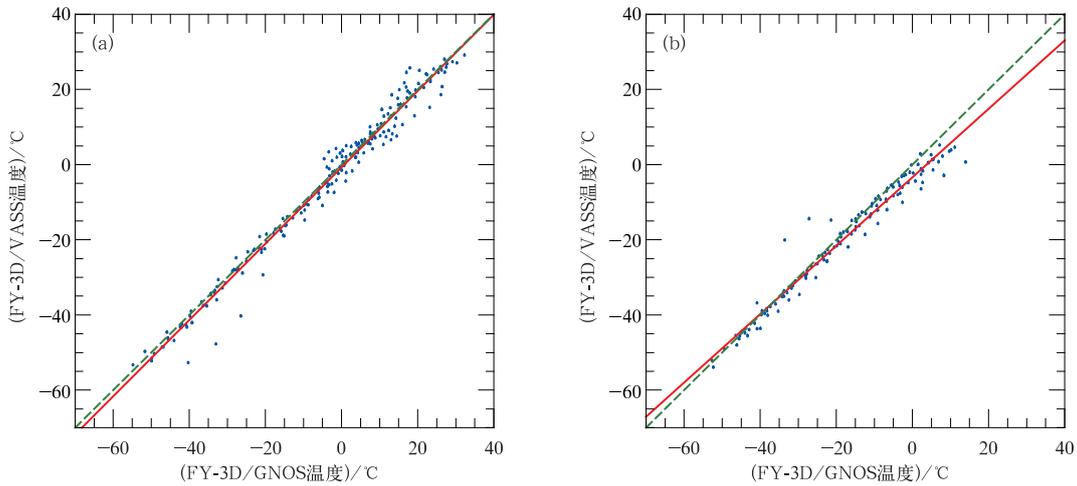
3.460°C ,高原的误差整体比盆地大;在垂直高度上,除夏季外,盆地在 $800 \sim 700 \text{ hPa}$ 的精度较低,高原在 400 hPa 以下的精度随高度的减小逐渐降低。

(3)与ERA5比湿相比,FY-3D/VASS比湿呈现一致的负偏差,不同季节的平均偏差在盆地和高原分别为 $-0.775 \sim -0.525 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $-1.096 \sim -0.347 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均方根误差分别为 $1.251 \sim 2.367 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.696 \sim 1.991 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,盆地的均方根误差比高原大;在垂直高度上, $700 \sim 600 \text{ hPa}$ 的精度较低。

(4)鉴于FY-3D/VASS温湿度精度在白天和夜间的差异均较小,可以将两组检验的平均偏差相加,间接建立FY-3D/VASS基于探空温湿度数据的检验结果;相对于探空数据,FY-3D/VASS温度在盆地的偏差较小,在高原温度平均偏低 2.440°C 左右,比湿在盆地和高原平均偏低 $0.612 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,其中高原的季节差异较大。

4 讨论

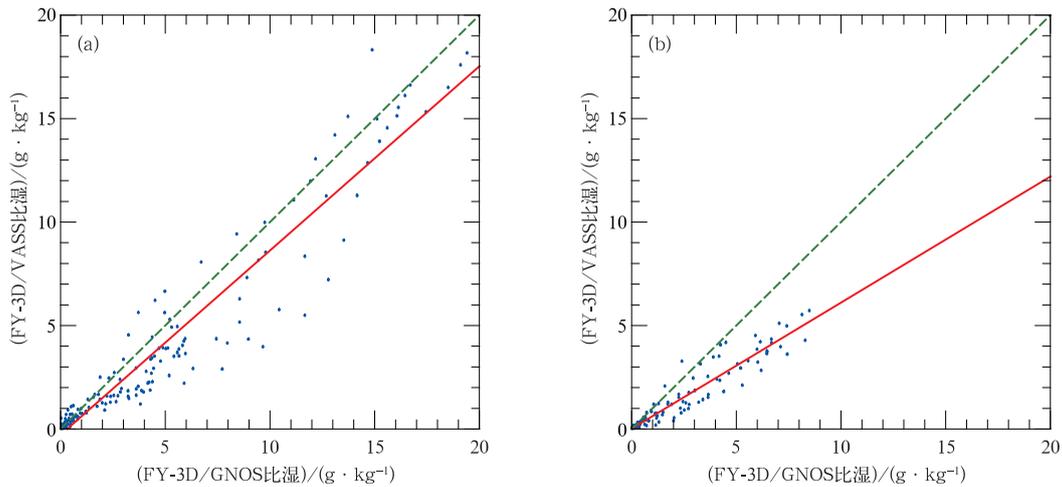
风云卫星目前提供多种温湿度廓线产品,由于探测仪器和反演算法不同,不同产品的精度存在差异。如FY-3D的VASS和GNOS掩星探测数据各有特点,其中VASS的水平覆盖面积较大,每天可以对相同区域进行升轨和降轨两次观测,GNOS的精度、稳定性和垂直分辨率较高(廖蜜等,2015),可以很好地应用于数值模式,然而水平覆盖面积和分辨率较小,在日常的天气业务中很难进行直接应用。通过将两种卫星产品对比,可以更加完整地反映VASS产品相对于其他卫星观测产品的精度水平。基于GNOS的VASS温湿度廓线检验结果如下所示(图10,图11):2021年盆地和高原匹配到的温度廓线分别为10条和12条,比湿廓线为9条和10条;温度的相关系数在盆地和高原分别达到0.990和0.983,均方根误差为 3.219°C 和 3.637°C ,平均偏差为 -0.823°C 和 -1.777°C ,盆地的精度较高,其中 $700 \sim 600 \text{ hPa}$ 的负偏差较大;比湿的相关系数分别为0.959和0.948,均方根误差为 $1.581 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.404 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均偏差为 $-0.741 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $-0.917 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中低层的偏差相对较大。在下一步研究中,将综合利用风云极轨和静止卫星多种温湿度廓线产品,发挥不同产品的优势,同时结合地基观测及模式等多源数据,进一步提升风云卫星温湿度廓线产品的应用能力。



注:红色实线为线性拟合线,绿色虚线为 1:1 线。

图 10 2021 年(a)四川盆地和(b)川西高原 FY-3D/VASS 与 FY-3D/GNOS 温度散点图

Fig. 10 Scatter plots of FY-3D/VASS and FY-3D/GNOS temperatures in
(a) Sichuan Basin and (b) Western Sichuan Plateau in 2021



注:红色实线为线性拟合线,绿色虚线为 1:1 线。

图 11 2021 年(a)四川盆地和(b)川西高原 FY-3D/VASS 与 FY-3D/GNOS 比湿散点图

Fig. 11 Scatter plots of FY-3D/VASS and FY-3D/GNOS specific humidities in
(a) Sichuan Basin and (b) Western Sichuan Plateau in 2021

参考文献

- 蔡宏珂,赵漾,陈欢欢,等,2021. AIRS 探测的我国西南地区水汽时空分布特征[J]. 西南大学学报(自然科学版),43(5):152-161.
Cai H K,Zhao Y,Chen H H,et al,2021. Characteristics of spatial and temporal distribution of water vapor in Southwest China based on AIRS satellite retrieval[J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed),43(5):152-161(in Chinese).
曹广真,周芳成,郑照军,等,2023. 静止和极轨卫星陆表温度产品的改进方法[J]. 气象,49(3):318-326. Cao G Z,Zhou F C,Zheng Z J,et al,2023. Improvement method of land surface temperature

- remotely sensed by geostationary and polar orbiting meteorological satellites[J]. Meteor Mon,49(3):318-326(in Chinese).
程海艳,余晔,陈晋北,等,2018. 大气红外探测器 (ARIS) 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, Chen 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).
杜明斌,梁宏,吴春强,等,2022. GNSS/PWV 与风云四号 A 星 GI-IRS 水汽廓线融合应用研究[J]. 气象学报,80(6):940-952. Du M B, Liang H, Wu C Q, et al,2022. An application study of

- merging GNSS/PWV and FY-4A/GIIRS water vapor profiles [J]. *Acta Meteor Sin*, 80(6):940-952(in Chinese).
- 顾雅茹,刘延安,刘朝顺,等,2018. 高光谱红外探测仪温湿度廓线在华东地区的真实性检验[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, (3):146-156. Gu Y R, Liu Y A, Liu C S, et al, 2018. Validation of temperature and relative humidity profiles with satellite hyperspectral infrared sounder over East China[J]. *J East China Norm Univ (Nat Sci)*, (3):146-156(in Chinese).
- 孔凡超,李江波,王颖,2021. 北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气温湿度廓线分析[J]. *气象*, 47(9):1062-1072. Kong F C, Li J B, Wang Y, 2021. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at Genting Venue of Beijing Olympic Winter Games[J]. *Meteor Mon*, 47(9):1062-1072(in Chinese).
- 赖安伟,马鹤程,崔春光,等,2021. 雷达反射率反演水汽和温度同化技术在一次飑线过程中的应用研究[J]. *气象*, 47(8):932-952. Lai A W, Ma H D, Cui C G, et al, 2021. A squall line case study of assimilating the radar data, retrieval of water vapor and in-cloud potential temperature from reflectivity in a 3DVAR framework[J]. *Meteor Mon*, 47(8):932-952(in Chinese).
- 廖蜜,张鹏,毕研盟,等,2015. 风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验[J]. *气象学报*, 73(6):1131-1140. Liao M, Zhang P, Bi Y M, et al, 2015. A preliminary estimation of the radio occultation products accuracy from the Fengyun-3C meteorological satellite[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(6):1131-1140(in Chinese).
- 马博源,唐世浩,胡菊肠,2022. FY-2H 大气可降水产品在“一带一路”区域的检验与应用[J]. *气象*, 48(5):595-604. Ma B Y, Tang S H, Hu J Y, 2022. Validation and application of FY-2H total precipitable water products in the Belt and Road Region[J]. *Meteor Mon*, 48(5):595-604(in Chinese).
- 马振锋,彭骏,高文良,等,2006. 近 40 年西南地区的气候变化事实[J]. *高原气象*, 25(4):633-642. Ma Z F, Peng J, Gao W L, et al, 2006. Climate variation of Southwest China in recent 40 years [J]. *Plateau Meteor*, 25(4):633-642(in Chinese).
- 倪成诚,李国平,熊效振,2013. AIRS 资料在川藏地区适用性的验证[J]. *山地学报*, 31(6):656-663. Ni C C, Li G P, Xiong X Z, 2013. Validation of the applicability of AIRS data in Sichuan-Tibet Region of China[J]. *J Mountain Sci*, 31(6):656-663(in Chinese).
- 牛宁,任素玲,覃丹宇,2024. FY-4A 数据在 2021 年 1 月 6—8 日寒潮监测中应用[J]. *气象*, 50(6):661-674. Niu N, Ren S L, Qin D Y, 2024. Application of FY-4A satellite data in monitoring of the cold wave from 6 to 8 January 2021[J]. *Meteor Mon*, 50(6):661-674(in Chinese).
- 漆成莉,顾明剑,胡秀清,等,2016. 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用[J]. *气象科技进展*, 6(1):88-93. Qi C L, Gu M J, Hu X Q, et al, 2016. FY-3 satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 6(1):88-93(in Chinese).
- 任素玲,牛宁,覃丹宇,等,2022. 2021 年 2 月北美极端低温暴雪的卫星遥感监测[J]. *应用气象学报*, 33(6):696-710. Ren S L, Niu N, Qin D Y, et al, 2022. Extreme cold and snowstorm event in North America in February 2021 based on satellite data[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(6):696-710(in Chinese).
- 孙芳,周顺武,王美蓉,等,2022. 初夏东北移高原低涡活动特征[J]. *气象*, 48(3):324-333. Sun F, Zhou S W, Wang M R, et al, 2022. Activity characteristics of the northeast-moving Tibetan Plateau vortices in early summer[J]. *Meteor Mon*, 48(3):324-333(in Chinese).
- 孙因,陈逸伦,傅云飞,2019. 中国东部大气温湿廓线特征及其对辐射收支计算影响的分析[J]. *气象学报*, 77(3):563-578. Sun N, Chen Y L, Fu Y F, 2019. Characteristics of temperature and humidity profiles in eastern China and their impacts on radiation budget[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3):563-578(in Chinese).
- 唐世浩,邱红,马刚,2016. 风云气象卫星主要技术进展[J]. *遥感学报*, 20(5):842-849. Tang S H, Qiu H, Ma G, 2016. Review on progress of the Fengyun meteorological satellite[J]. *J Remote Sens*, 20(5):842-849(in Chinese).
- 王传辉,姚叶青,时刚,2018. 江淮地区 ERA-Interim 再分析与观测温湿度资料对比分析[J]. *气象*, 44(9):1220-1228. Wang C H, Yao Y Q, Shi G, 2018. Comparative analysis of ERA-Interim temperature reanalysis data and observations over Jianghuai Region[J]. *Meteor Mon*, 44(9):1220-1228(in Chinese).
- 王梦晓,王瑞,傅云飞,2019. 利用 TRMM PR 和 IGRA 探测分析的拉萨降水云内大气温湿廓线特征[J]. *高原气象*, 38(3):539-551. Wang M X, Wang R, Fu Y F, 2019. Analysis of atmospheric temperature and humidity profiles within precipitation cloud in Lhasa measured by TRMM PR and IGRA[J]. *Plateau Meteor*, 38(3):539-551(in Chinese).
- 王新,唐世浩,曹治强,2020. 风云气象卫星“一带一路”热带气旋监测能力与最新进展[J]. *海洋气象学报*, 40(2):10-18. Wang X, Tang S H, Cao Z Q, 2020. Capability and latest progress of tropical cyclone monitoring over the Belt and Road Area by Fengyun meteorological satellites[J]. *J Mar Meteor*, 40(2):10-18(in Chinese).
- 王秀明,周小刚,俞小鼎,2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. *气象学报*, 71(5):839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D, 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures [J]. *Acta Meteor Sin*, 71(5):839-852(in Chinese).
- 肖逸祥,杨康权,俞小鼎,等,2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. *气象*, 43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. *Meteor Mon*, 43(10):1165-1175(in Chinese).
- 徐桂荣,乐新安,张文刚,等,2016. COSMIC 掩星资料反演青藏高原大气廓线与探空观测的对比分析[J]. *暴雨灾害*, 35(4):315-325. Xu G R, Yue X A, Zhang W G, et al, 2016. Comparison of atmospheric profiles between COSMIC radio occultation and radiosonde observations in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Torr Rain Dis*, 35(4):315-325(in Chinese).
- 杨冰韵,刘健,贾煦,2020. 基于 CALIPSO 卫星资料的京津冀地区 MODIS 卷云顶高度订正[J]. *大气科学*, 44(5):1013-1022.

- Yang B Y, Liu J, Jia X, 2020. Correction for cirrus cloud top height of MODIS based on CALIPSO dataset in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *J Atmos Sci*, 44(5): 1013-1022 (in Chinese).
- 杨冰韵, 吴晓京, 王曦, 2019. 基于 CloudSat, FY-2E 资料的中国海域及周边地区深对流和穿透性对流特征[J]. *气象学报*, 77(2): 256-267. Yang B Y, Wu X J, Wang X, 2019. The sea-land characteristics of deep convections and convective overshootings over China sea and surrounding areas based on the CloudSat and FY-2E datasets[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(2): 256-267 (in Chinese).
- 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等, 2009. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号[J]. *气象学报*, 67(4): 501-509. Yang J, Dong C H, Lu N M, et al, 2009. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(4): 501-509 (in Chinese).
- 张鹏, 杨虎, 邱红, 等, 2012. 风云三号卫星的定量遥感应用能力[J]. *气象科技进展*, 2(4): 6-11. Zhang P, Yang H, Qiu H, et al, 2012. Quantitative remote sensing from the current Fengyun 3 satellites[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 2(4): 6-11 (in Chinese).
- 周春花, 肖递祥, 郁淑华, 2022. 诱发四川盆地极端暴雨的西南涡环流背景和结构特征[J]. *气象*, 48(12): 1577-1589. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H, 2022. Circulation background and structural characteristics of the southwest vortex inducing extreme rainstorm in Sichuan Basin[J]. *Meteor Mon*, 48(12): 1577-1589 (in Chinese).
- Caumont O, Cimini D, Löhnert U, et al, 2016. Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based microwave radiometers into a convective-scale NWP model[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(700): 2692-2704.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999-2049.
- 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.
- Wu X B, Li J, Zhang W J, et al, 2005. Atmospheric profile retrieval with AIRS data and validation at the ARM CART site[J]. *Adv Atmos Sci*, 22(5): 647-654.

(本文责编:何晓欢)