

联合静止气象卫星成像仪和高光谱红外大气探测仪观测的三维水平风场反演

张玉荣^{1,2} 姚晓娟³ 狄迪^{*4} 李博⁵ 周镭连⁶

1 南京信息工程大学, 大气科学学院, 南京 210044

2 内蒙古巴彦淖尔市气象局, 临河 015000

3 内蒙古自治区气象局, 呼和浩特 010000

4 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

5 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081

6 中国气象科学研究院, 中国气象局, 北京 100081

摘要: 风云四号 A 星 (FY-4A) 上搭载的干涉式红外探测仪 (GIIRS) 是首个地球静止轨道上的红外高光谱大气探测仪, 它可以提供连续的三维大气温度和水汽的观测, 通过追踪水汽的移动可以反演得到不同高度的大气水平风场。本研究利用台风玛丽亚 (2018 年) 期间 FY-4A 加密观测 (15 分钟间隔) 的 GIIRS 数据开展晴空和部分云区的三维水平风场算法研究, 重点研究如何联合同一卫星平台的多光谱成像仪 (AGRI) 改进 GIIRS 部分云视场区的三维风场反演结果。利用 ERA5 独立测试集、CRA40 再分析和空投探空数据开展对晴空和云区的三维风场反演结果的检验, 基于该个例的反演结果表明: (1) 基于 GIIRS 亮温信息反演得到对流层水平风场, 在晴空区均方根误差小于 1.5m/s, 方向绝对差基本在 15° 左右, 在部分云视场区, 均方根误差为 1.5~1.7m/s, 方向绝对差基本在 20° 左右。与光流法相比, 基于 GIIRS 亮温的直接反演表现出更好的优势, 其均方根误差和方向绝对差明显小于光流法的结果; (2) 按云量和云顶高度分类后, 表现出云量越多、云顶高度越高则 RMSE 越大。在部分云视场区, 进一步在反演模型输入中加入来自同平台上成像仪 (AGRI) 云量和云高信息后, RMSE 有所减小, 表明更高空间分辨率的 AGRI 产品可以改进 GIIRS 部分云覆盖区的风场反演精度; (3) 基于 GIIRS

亮温信息反演的风廓线与 CRA40 再分析、空投探测风廓线有较好的一致性，表明利用静止卫星红外高光谱大气探测仪观测亮温反演风场的合理性和可行性。

关键词：GIIRS，AGRI，三维风场反演，云量，云顶高度

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22093

收稿日期 2022-05-31；**网络预出版日期**

作者简介 张玉荣，女，1989 年生，硕士在读，主要从事预报预测、卫星资料应用研究。Email: bsqxj_zyr@163.com

通讯作者 狄迪，Email: didi@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金-联合基金（编号 U2142201）

Funded by the National Natural Science Foundation of China - Joint Fund (No. U2142201)

3D wind field retrieval by combining measurements from imager and hyperspectral infrared sounder onboard the same geostationary platform

Yurong Zhang^{1,2} Xiaojuan Yao³ Di Di^{*4} Bo Li⁵ Ronglian Zhou⁶

1 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010000, China

3 Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Prediction and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

4 Bayannur Meteorological Bureau, Linhe 015000, Inner Mongolia, China

5 National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China

6 Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081, China

Abstract The Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) onboard the Fengyun-4A (FY-4A) is the first geostationary hyperspectral infrared sounder. It can provide

continuous three-dimensional(3D) information of atmospheric temperature and water vapor, and the atmospheric horizontal wind field at different heights through tracking the movement of water vapor. In this study, GIIRS data from FY-4A observations with 30-minute intervals during Typhoon Maria (2018) were used to test 3D horizontal wind field algorithm in both clear and partially cloudy skies, with the focus on how to improve the 3D wind field retrieval from partially cloud filled GIIRS footprints by including the collocated high spatial resolution cloud products from Advanced Geostationary Radiation Imager (AGRI) onboard the same platform. Independent ERA5, CRA40 analysis and radiosonde data were used as reference data to verify the 3D horizontal wind field retrievals in both clear and partially cloudy skies. Results indicated that: (1) the tropospheric wind field could be obtained from GIIRS brightness temperature(BT) measurements from two consecutive times. In the clear skies, RMSE was less than 1.5m/s, and the absolute direction difference between retrievals and reference data was about 15° in this particular case; under some clear skies, RMSE was 1.5~1.7m/s, and the absolute direction difference was about 20° . Compared with the traditional optical flow(OF) method, GIIRS BT based direct retrieval shows better accuracy with RMSE and direction absolute difference smaller than those from the OF method. (2) When classified by cloud coverage (CC) and cloud-top pressure (CTP), it is shown that the more cloud cover or the higher cloud top, results in the greater RMSE. When CC and CTP are included as additional input parameters, the GIIRS BT based 3D wind retrievals reduced RMSE decreases, indicating that high spatial resolution AGRI cloud products can improve wind field retrieval accuracy in some cloud covered areas. (3) The wind profile retrievals from GIIRS BT based method consistent with the wind profiles of CRA40 analysis and dropsonde data, indicating the feasibility of deriving 3D horizontal wind fields from geostationary hyperspectral infrared BT measurements.

Keywords GIIRS, AGRI, 3D wind retrieval, CC, CTP

1 引言

风场起着独特的动力学作用, 迫使质量场在各尺度上进行调整。精确的三维(3D)风场信息可有效改善数值天气预报的初始场, 并改进对重要大气成分的水平 and 垂直传输估计(曾庆存, 1997; 许健民和张其松, 2006)。然而, 目前获取精密时空覆盖的大气风场的手段和方式十分有限。探空仪可直接探测大气风场, 探测精度高, 是研究天气变化的重要数据来源, 也可作为风场产品的检验源(Faccani et al., 2009; 王丹等, 2020)。但探

空站点存在区域分布较不均匀、时间分辨率低等问题，尤其是在海上，探空数据严重不足。星载遥感仪器观测范围广，空间分辨率高，可有效弥补探空观测资料时空覆盖不足的问题（杨春,1997;隋新秀等,2018;耿晓雯等,2020）。目前基于星载仪器测量得到风场信息的手段可分为两大类，一类是主动遥感测风，如利用欧洲空间局（ESA）发射的“风神”卫星上搭载的激光雷达测风以及星载的微波散射计测风；第二类是利用被动遥感测风，如利用红外窗区通道（IR-W）或水汽吸收通道（WV）的连续观测图像得到云导风和水汽导风，其导风技术的原理主要是通过跟踪场景中的移动物体（即云或水汽），从连续的卫星成像仪图像中提取大气运动矢量（AMV）（Velden et al.,1997; Velden et al., 2005; Sears and Velden, 2012）。追踪法作为卫星导风技术被广泛应用。早在 1980 年代初期，研究人员就开始用人工辅助的方式通过美国威斯康星大学开发的人机交互系统（McIDAS）从连续的地球静止卫星图像中得到风场。1992 年，该大学的空间科学与工程中心（SSEC）开发的自动导风软件系统正式被业务应用于美国国家海洋和大气管理局，随即也被世界各卫星业务中心采用。2000 年代初期，美国开始基于搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪（MODIS）红外窗区和水汽观测开发极区 AMV 产品，其中红外窗区图像可用于推导整个对流层中多云区域的运动矢量，水汽图像可用于获取无云环境中的对流层上层运动（Key et al., 2003）。近几年，地球同步卫星和极轨卫星的组合被用于中高纬度和极地地区的 AMV 反演中（Lazzara et al., 2014）。虽然 AMV 推导是获取大气风场的有效方法，但其高度反演的不确定性仍是待研究和解决的难题（Nieman et al.,1993;Nieman et al.,1997; Velden and Bedka, 2009; Roebeling et al.,2013; Velden et al.,2017），特别是在薄的半透明云区（如卷云）场景下，高度误差较大。已有研究指出，基于目前性能较高的新一代静止卫星成像仪可获取相对精确的大气水平风场信息，如基于美国环境卫星（GOES 系列）上的先进基线成像仪（ABI），其全盘扫描时间仅为 15 分钟，空间分辨率可达 2km（Schmit et al.,2005），可一定程度上改进天气预报水平，但远不能满足当前天气预报模式所需的垂直维度。而红外高光谱探测仪通常有上千个通道同时观测大气，可以测量大气温度和湿度的垂直结构。因此，科学家开始基于红外高光谱大气探测资料获取三维风，如 Santek et al.（2019）利用连续时刻的大气红外探测仪（AIRS）水汽反演廓线得到了三维风场产品，但风场的误差依赖于水汽廓线反演误差，并且考虑到极轨卫星的观测方式，该方法仅适用于观测间隔较短的高纬地区大气，由于高纬地区大气水汽较少，这也进一步影响了该方法的精度和适用性。

搭载于风云四号 A 星（FY-4A）的地球同步干涉式红外探测仪（GIIRS）是首个在

轨的静止红外高光谱探测仪，它兼具高时间和高光谱分辨率辐射测量优势（Yang et al.,2017），其辐射值包含了三维大气温湿连续变化信息，可以获得连续时刻、不同高度的大气温湿度产品（Huang et al.,2021），同时也隐含了三维风场信息，因此可从观测数据中获取风场产品。Ma et al.（2021）利用 GIIRS 高光谱红外探测数据，结合深度神经网络（DNN）得到了 3D 水平风场定量信息，但其研究未能深入讨论以下两个问题：（1）同一卫星平台的多光谱扫描成像仪（AGRI）的观测信息是否能对 GIIRS 的风场反演提供帮助？由于红外观测极易受到云的影响，而 FY-4A 上的 GIIRS 星下点视场为 16 公里（后续计划的风云四号卫星 GIIRS 星下点视场为 12 公里或更高），仅很少一部分的视场完全为晴空，因此研究受部分云覆盖视场的风廓线反演对于提高产品的空间覆盖范围极为重要；（2）光流法是否适用于低空间分辨率的红外高光谱探测资料？对相关问题的初步研究已发表在 Li et al.（2022）文章中，本研究也在 Li et al.（2022）的基础上进一步完善算法过程、增加检验结果和分析。

通过反演搭载于同平台上的高空间分辨率成像仪 AGRI 观测，能够反演得到云物理和光学特性产品，如晴空检测（云检测）和云量、云顶气压、云光学厚度和等效粒子半径等产品，并且其 4 公里的空间分辨率远高于 GIIRS，因此可以提供 GIIRS 亚视场内的云特性信息。本研究主要尝试联合 AGRI 和 GIIRS 来改进部分云覆盖区（视场）风场反演精度，以更好的获取大气风场垂直剖面信息。需要说明的是，本文所指 3D 风场是指三维水平风场，垂直方向速度分量并不包含在本研究范围内。

2 资料和方法

2.1 数据

GIIRS 红外窗区通道和水汽吸收通道的亮温数据被用于深度神经网络（DNN）模型的输入，其来源于 2018 年 7 月 4 日台风“玛丽亚”的加密观测，“玛丽亚”生成于美国关岛以东洋面，最大瞬时风速达 195 km/h，最低气压 915 hPa，7 月 10 日穿越 Yaeyama 岛屿和台湾北部后，在福建登陆。期间，GIIRS 针对台风周边区域（13.7~34.5° N、108.9~136.29° E）开展了高频次的时间加密观测在整点的 00、15、30 和 45 分别启动观测，每次扫描持续 10 分钟，其余 5 分钟用于校准。整个观测覆盖 10 日 00:00 UTC（世界时）至 18:00 UTC、21:00 UTC 至 23:00 UTC 以及 11 日 00:00 UTC 至 12:00 UTC 时间段。

本文使用了 ERA5 作为 DNN 模型的标签（训练真值）。ERA5 再分析数据来自于

欧洲中期天气预报中心（ECMWF），其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，时间分辨率为 1 小时。它同化了来自地面风观测、无线电探空仪、空投探空仪、飞机测量以及气象卫星等数据（Hersbach et al., 2020）（尚未同化 GIIRS 观测），其大气廓线信息相对于 GIIRS 观测是独立的。ERA5 垂直高度有 37 层，文中选取了 20 个高度层（300~1000 hPa）的 u 、 v 风场作为 DNN 模型的标签。同时，独立于模型开发的 ERA5 风场也被用于检验算法。由于 ERA5 和 GIIRS 时空分辨率不同，因此利用最邻近值方法做空间匹配，将 ERA5 数据匹配到 GIIRS 格点数据上，同时利用插值方法进行时间匹配，确保数据的时空一致性。

本文也使用了中国第一代全球大气再分析数据（CRA40）来检验 3D 风场反演结果。CRA40 是全球首个具有“东亚（中国）区域特色”的高质量、高分辨率再分析资料，基于国际前沿的模式与同化系统，融合了东亚（中国）区域各种来源和类型的观测资料，在循环同化过程中实现了考虑背景场的在线质量控制和卫星辐射率、飞机报、探空变分偏差订正（王旻燕等, 2018; 叶梦姝, 2008; 刘梦杰等, 2021）。CRA40 再分析数据的时间分辨率为 6 小时，分别为每天的 00:00、06:00、12:00、18:00 UTC，空间分辨率为 34 km。本文选用了与 DNN 模型标签相匹配的 20 个高度层的风场信息作为模型的检验数据集。同样利用最邻近值方法将 CRA40 数据匹配到 GIIRS 格点数据上，具体的匹配方法在 5.2 节中有介绍。

2.2 GIIRS 通道选择

反演风廓线首先需要选择具有不同高度的温湿度观测能力且观测误差较小的通道，由于不同大气层的中波红外（MW - IR）辐射对水汽变化的敏感性不同，因此基于水汽变化可以推导得到大气运动，这是风场反演的重要信息来源。而长波红外（LW - IR）辐射可提供边界层的温度信息和水汽信息，这些通道可以提供风廓线跟踪的额外信息，也可作为风场反演的重要数据来源。本文首先基于信息熵方法在长波红外和中波红外都选择一组备选通道，然后基于 O-B（观测 BT 减去背景模拟 BT）阈值（2.5K）剔除观测误差较大的通道（Di et al., 2021; 刘娟娟等, 2022），从而最终选取 166 个中波红外通道和 127 个长波红外通道。其中，166 个中红外通道为水汽吸收区通道，每个通道的权重函数峰值所对应的大气层即为该通道的水汽“最佳信息层”（曾庆存, 1974; Di et al., 2018），每一个通道对应不同的“最佳信息层”，因而基于该通道得到的二维水汽导风也基本对应该大气层水汽的移动信息。总体来说，中波红外通道用于追踪水汽而得到风场，长波红外用于风场高度的确定。通道选择结果见 Li et al. (2022) 文章的图 2。

2.3 AGRI 和 GIIRS 的时空匹配

由于 GIIRS 视场较大，视场很难完全不受云影响，而同平台上多光谱成像仪的空间分辨率为 4km，利用其高精度的云检测（CLM）和云顶气压（CTP）等云特性产品，可以得到探测仪亚像元的云特性信息（Li et al. 2004）。与一级观测资料相同，成像仪的 CLM 和 CTP 产品的星下点空间分辨率均为 4km（Min et al.,2017）。本文利用 AGRI 的云检测产品来确定对应的 GIIRS 视场内的云覆盖（CC）情况，利用 AGRI 的云顶气压产品来分析 GIIRS 视场内的云高情况。其中，GIIRS 与 AGRI 的空间匹配算法主要参考 Wang et al.（2016），并在其基础上做了一定的修改，以适应实际情况。该空间匹配算法将空间分辨率较粗的仪器（即 GIIRS）观测地球的三维视场认为是一个圆锥，通过考虑空间分辨率较细的仪器（即 AGRI）与地面观测点的连线是否在圆锥内达到二者空间匹配的效果。该算法能适应在较大的卫星天顶角条件下因地球曲率引起的视场投影形变，且不需要考虑地球表面二者像元的大小和形状，其匹配精度比直接的经纬度匹配更高，下面简要介绍一下该算法。

本算法主要基于 GIIRS 和 AGRI 视线矢量（LOS）之间的夹角大小判断 AGRI 的观测像元是否落在 GIIRS 的观测视场内。LOS 的计算包括以下几个步骤：

（1）确定一个公共坐标系。以地球的质量中心为原点 $O(0,0,0)$ ，X 轴指向赤道与本初子午线的交点，Z 轴与地轴平行指向北极点，Y 轴与 XOZ 平面垂直，满足右手螺旋法则，该坐标系被称为地球固定坐标系（ECEF）；

（2）经纬度坐标转换为 ECEF 坐标。根据已有的 AGRI 和 GIIRS 观测点的地理数据（于国家卫星中心官方网站下载），将经纬度坐标转换为用 (x,y,z) 表示的 ECEF 坐标，根据该坐标即可得到从地球中心指向卫星测量位置的矢量 G ；

（3）利用矢量关系求解 LOS 。卫星 LOS 矢量是从卫星位置指向地球椭球表面上的卫星测量位置的矢量。已知 FY-4A 位于 $(104.7^\circ \text{ E}, 0^\circ \text{ N})$ ，距地表 35790 km，由此可以得到从地球中心指向卫星的矢量 P 。

图 1a 中显示了三个向量。在数学上，这三个向量之间的关系可以表示为：

$$LOS = G - P \quad (1)$$

根据式（1）可以计算出 LOS_{GIIRS} 和 LOS_{AGRI} 。由向量的夹角公式：

$$\frac{(G_{GIIRS}-P) \cdot (G_{AGRI}-P)}{\|G_{GIIRS}-P\| \cdot \|G_{AGRI}-P\|} = \frac{LOS_{GIIRS} \cdot LOS_{AGRI}}{\|LOS_{GIIRS}\| \cdot \|LOS_{AGRI}\|} > \cos \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

已知 GIIRS 探元的观测张角 $\varphi=0.0266^\circ$ ，根据式（2）即可判断 AGRI 像元是否落在 GI

IRS 的观测范围内。

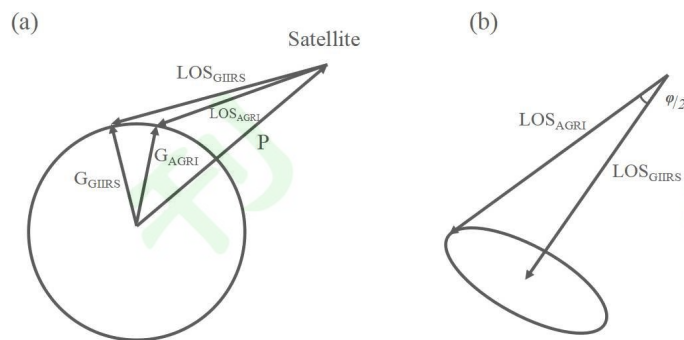


图 1 (a) 在 ECEF 坐标系中计算 GIIRS 和 AGRI 的 LOS 矢量。(b) 检验 GIIRS 和 AGRI 的 LOS 矢量之间的角度。其中 $\varphi = 0.0266^\circ$ 是 GIIRS 探元的观测张角

Fig.1 (a) Calculate the LOS vectors of GIIRS and AGRI in the ECEF coordinate system. (b) verify the angles between the LOS vectors of GIIRS and AGRI. $\varphi = 0.0266^\circ$ is the observation opening Angle of GIIRS probe

以该空间匹配方法为基础，能很好的捕捉到 GIIRS 视场内的 CC 和 CTP。图 2 展示了 2018 年 7 月 10 日 02 时 GIIRS 观测视场与 AGRI 观测视场的匹配图，左图是 AGRI 视场中的 CLM，中间的图是匹配到 GIIRS 亚视场中的 CLM，右图是 GIIRS 亚视场中的 CC。

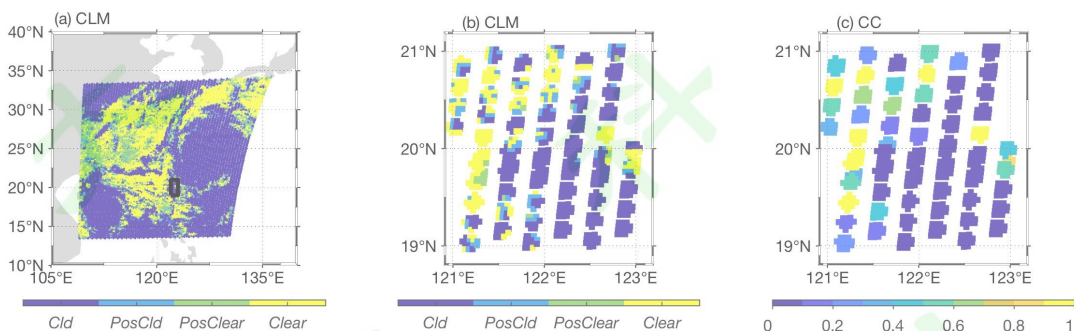


图 2 2018 年 7 月 10 日 02 时 (a) AGRI 视场中的 CLM，(b) 匹配到 GIIRS 亚视场中的 CLM，(c) GIIRS 亚视场中的 CC

Fig.2 (a) CLM in AGRI FOV, (b) CLM within GIIRS sub-FOV, and (c) CC within GIIRS sub-FOV at 2 o'clock on July 10, 2018.

3 GIIRS 三维风场反演

3.1 利用光流法估算水汽移动速度

光流算法作为一个广泛而活跃的领域在计算机视觉中得到了广泛的应用，并取得了快速进展（Barron et al,1994;Farneback 2002, 2003）。光流的基本概念是指图像上运动目标的像素点运动后所产生的速度，也就是说是在图像上的光学信息发生变化的过程而产

生了矢量场 (Lucas et al.,1981;Abidi and Gonzalez 1988; Vega-Riveros and Jabbour 1989)。光流是一种二维概念的瞬时间的速度场,是三维的速度矢量投射在一个平面上所产生的二维矢量。光流法在气象领域应用广泛,如:强对流天气临近预报(韩雷等,2008),图像外推预报(王敏等,2010),多普勒雷达风场反演(韩丰等,2013)以及数值预报模式检验(Marzban et al.,2009;Marzban and Sandgathe,2010)。

本文利用 GIIRS 所选中波通道的亮温图像,基于 Horn-Schunck 光流算法(简称 HS 光流算法)来获取三维风场信息,HS 光流算法用一种基于灰度不变假设和光流场平滑假设的全局方法估计图像的稠密光流场,是最早的光流算法之一(Horn and Schunck,1981)。HS 光流法是微分法的光流计算方法,只适用于图像间运动较小的情况,卫星云图的灰度值是连续可微的,且相对运动较小,因此 HS 光流算法在处理卫星云图方面具有明显优势(Pinto et al.,2013)。

值得注意的是,光流法只能用于连续时刻的单一通道图像观测,因此将光流法应用于所选 GIIRS 通道观测时,我们得到的是 166 个二维水平风场,需要将这些风场逐视场重新组合到固定气压层上(本研究中采用 20 个固定气压层),成为具有高度的三维水平风场,这就需要引入另外一个技术——机器学习,来确定风场的高度。

3.2 基于 DNN 的风廓线反演方法

FY-4A 高光谱红外探测仪观测数据风场(风向与风速)反演是采用深度学习算法,其机理在于通过设置更多的隐藏层来提高神经网络对复杂数据映射的求解能力,但其预测精度依赖于输入数据的特性(Hinton et al.,2006),本文是基于静止轨道高光谱观测的时空间特征来提取输入数据。DNN 模型采用四层网络结构,基于最小泛化误差选择最佳隐藏神经元数量,隐藏层节点数由下式确定:

$$N = (N_{in} + \sqrt{N_p})/L \quad (3)$$

其中, N_{in} 是输入神经元的数量, N_p 是输入样本的数量, L 是隐藏层的数量(Madhi arasan and Deepa,2017),其中第一个隐藏层节点为 2364 个,第二个隐藏层节点为 1182 个。以修正线性函数(ReLU)作为输入层和隐层之间的激活函数,利用激活函数加入非线性因素,可以提高模型的表达能力。使用 Adam 优化器通过反向传播优化权重和偏置(Kingma and Ba,2017)。用均方误差(MSE)作为损失函数,用于最小化预测值和“真值”之间的误差。利用 Dropout 函数和提前终止迭代(Early stopping)来减小过拟合问题(Prechelt,1998;Doan and Liong,2004)。另外,在训练前对输入层节点参数进行

了归一化处理，排除因输入参数量级间差异所导致在迭代过程中不收敛现象或者收敛时间过长的现象。

模型输入层分为以下三类：

1. 输入为光流结果，即基于 **GIIRS** 所选的中波通道获取的光流风场作为模型输入，共 332 个输入节点，记为方法一（**OF 方法**）；
2. 输入为 **GIIRS** 观测亮温以及其转换量；直接基于 **GIIRS** 所选通道（长波红外和中波红外）的亮温观测，提取亮温的时空变化信息作为模型输入，即：**GIIRS** 所选通道前一时刻 **BT**、当前时刻 **BT** 及当前时刻 **BT** 的空间信息（主像元东、西、南、北四个方向），共 1758 个输入节点，记为方法二（**GIIRS 亮温法**）；
3. 输入为 **GIIRS** 视场内的云信息；由于红外观测易受云影响的本质特性，且辐射传输模型在云亮温模拟中存在不确定性（**Li and Zou, 2017**），考虑在 **GIIRS** 方法的基础上加入 **GIIRS** 视场内云信息作为模型输入，包括视场内的云量和云顶高度，共 1760 个输入节点，记为方法三（**GIIRS+AGRI 法**）。

输出层为 300~1000 hPa 之间的 20 个气压层的 **U**、**V** 分量，共 40 个输出节点，与 **ERA5** 标签（真值）数据的气压层一致。使用每小时 00 分开始的扫描作为测试数据，而每小时的其余三个时刻的扫描（15、30、45 分钟开始）作为训练数据，训练集和测试集数据量比例为 3:1。另外，将训练集随机分为 80% 的训练子集和 20% 的验证子集，前者用于模型的训练，后者用于性能监控和模型优化，同时利用独立测试集对模型的性能进行评价。风场反演流程图如图 3 所示：

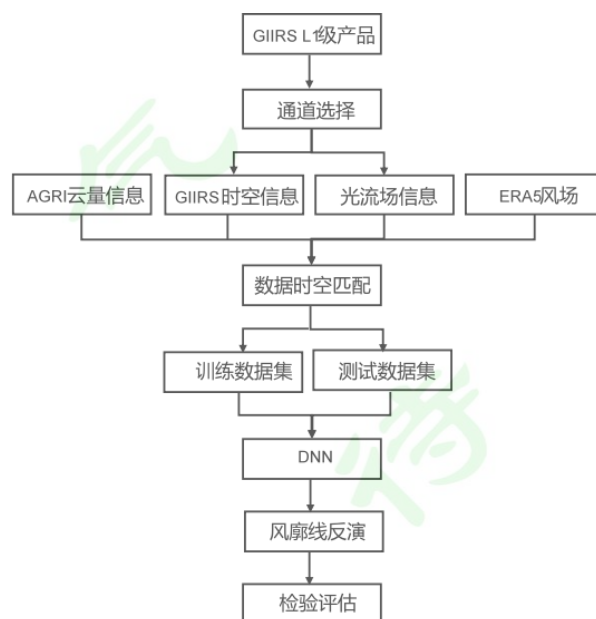


图 3 风场反演流程图

Fig.3 Flow chart of wind field retrieval

另外，本研究的算法仅适用于晴空和部分云区。由于红外辐射不能透过密实的厚云区，其反演产品没有物理基础，因此 DNN 模型的输入样本仅使用 GIIRS 晴空（Clear）或部分晴空（Partly clear）视场的 BT，即选取 $0 \leq CC < 100\%$ 的样本，剔除 $CC = 100\%$ 的样本。图 4 展示了 2018 年 7 月 10 日 20 时的数据区域和总样本量，其中红点为晴空或部分晴空，蓝点为厚云区（ $CC=100\%$ ）。

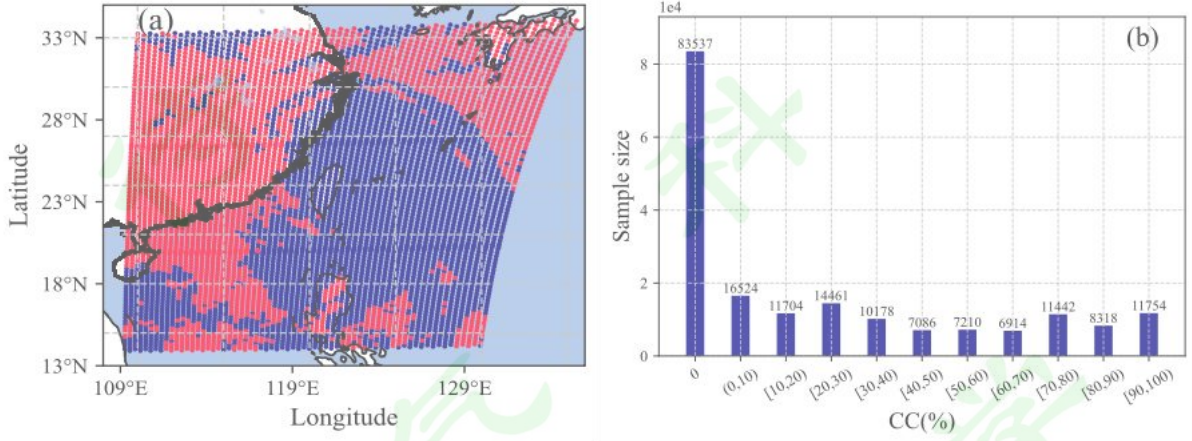


图 4 (a) 2018 年 7 月 10 日 20 时的 GIIRS 数据区域，红点为晴空或部分晴空区，蓝点为云区。

(b) DNN 模型输入数据按 CC 划分后的样本量

Fig.4 (a) GIIRS data area at 20:00 on July 10, 2018, red dots are clear or partially clear skies and blue dots are clouds.(b) Sample size of DNN model input data divided by CC

3.3 使用独立数据集验证模型

研究采用均方根误差 (Root Mean Square Error, 简称 RMSE)、方向绝对差 (Direction Absolute Difference, 简称 DD)，作为精度评估指标 (Nieman et al., 1997)，公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (V_a - V_b)^2}{n}} \quad (4)$$

$$DD = \arccos \left(\frac{u_a u_b + v_a v_b}{\sqrt{u_a^2 + v_a^2} \sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \right) \quad (5)$$

其中， V_a 是模型预测风向量，而 V_b 是参考风向量， n 是样本数， u 和 v 是风矢量的两个水平分量， DD 是 V_a 和 V_b 之间夹角的绝对值，范围在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间。RMSE 指标体现了所反演的风矢量（风向和风速）整体误差，DD 指标更多体现了反演风场方向上的误差。

本研究除使用 ERA5 独立验证集外，还使用了 CRA40 再分析数据和空投探空仪 (Drosonde) 数据进行独立检验，需要强调的是此处所说的独立检验是指该数据未参与模

型的训练和测试，因而称为“独立检验”，这将排除使用同一类型的数据进行训练和验证处理中可能存在的相关性影响。空投探测仪是从包机上释放的，配备了 GPS 天线、GPS 接收机、压力、温度和湿度传感器，数据通过卫星电话传回地面，使用大气研究公司提供的大气探测处理环境软件进行分析和质量控制。探空仪在下降的过程中，在水平位置和高度上的变化可以得到三维风廓线，与常规探空观测数据一样，具有很高的精度，已经在一些研究中被广泛使用（Chen et al.,2021; Liu et al.,2020）。

4 反演结果验证和讨论

4.1 使用独立 ERA5 检验集对 OF 和 GIIRS 反演结果进行验证

本文首先利用独立的 ERA5 测试数据集对 OF 方法和 GIIRS 亮温方法反演结果进行验证，即对 3.2 节的方法一和方法二的风场反演结果进行分析验证，图 5a 和 5b 分别为晴空和部分晴空下风场反演的 RMSE，可以看出，在晴空视场下，方法二的 RMSE 在 1.4~1.6m/s 之间，但方法一的 RMSE 在 3~4m/s 之间；在部分晴空视场下，方法二的 RMSE 在 1.7~2.0m/s 之间，方法一在 3.5~4.5m/s 之间。图 5c 和 5d 分别为晴空和部分晴空下风场反演的方法绝对差（DD）。在晴空区，方法二的 DD 误差在 15~30° 之间，方法一在 30~50° 之间；在部分晴空区，方法二的 DD 在 20~30° 之间，方法一在 35~50° 之间。这说明了无论晴空还是部分晴空，光流法反演风场的风速和风向效果远不如直接提取 GIIRS 亮温观测时空信息有效。

考虑到光流法没有加入 GIIRS 长波红外亮温信息，所以也开展了以下试验：（1）在光流信息的基础上加入 GIIRS 长波红外亮温信息作为模型的输入（记为 GIIRS_LW+OF）；（2）在光流信息的基础上加入 GIIRS 长波红外和中波红外亮温信息，即方法一+方法二（记为 GIIRS+OF）。虽然后者的反演精度有明显的提升，但其反演结果依然没有单独使用 GIIRS 亮温法更优，这说明了基于图像处理的光流法并没有改进风场反演的精度。这可能与 GIIRS 探测仪的空间分辨率较低有关，基于图像的光流法依赖于更高空间分辨率的图像信息，因此基于成像仪的光流法可能会有更大的优势（Sun et al.,2018）。当红外高光谱仪器有更高的空间分辨率时，仍可考虑采用光流法这一反演方法开展风场反演，如欧洲计划发射的 MTG-S 卫星将携带红外高光谱 IRS 仪器。基于以上结论，接下来的 4.2 节及第 5 节将不再对 OF 方法进行分析和讨论。

考虑红外辐射易受云影响，图 5 的结果也证实了晴空区风场反演结果更好，这亦是开展方法三（加入 GIIRS 视场内云特征信息）研究的重要依据。

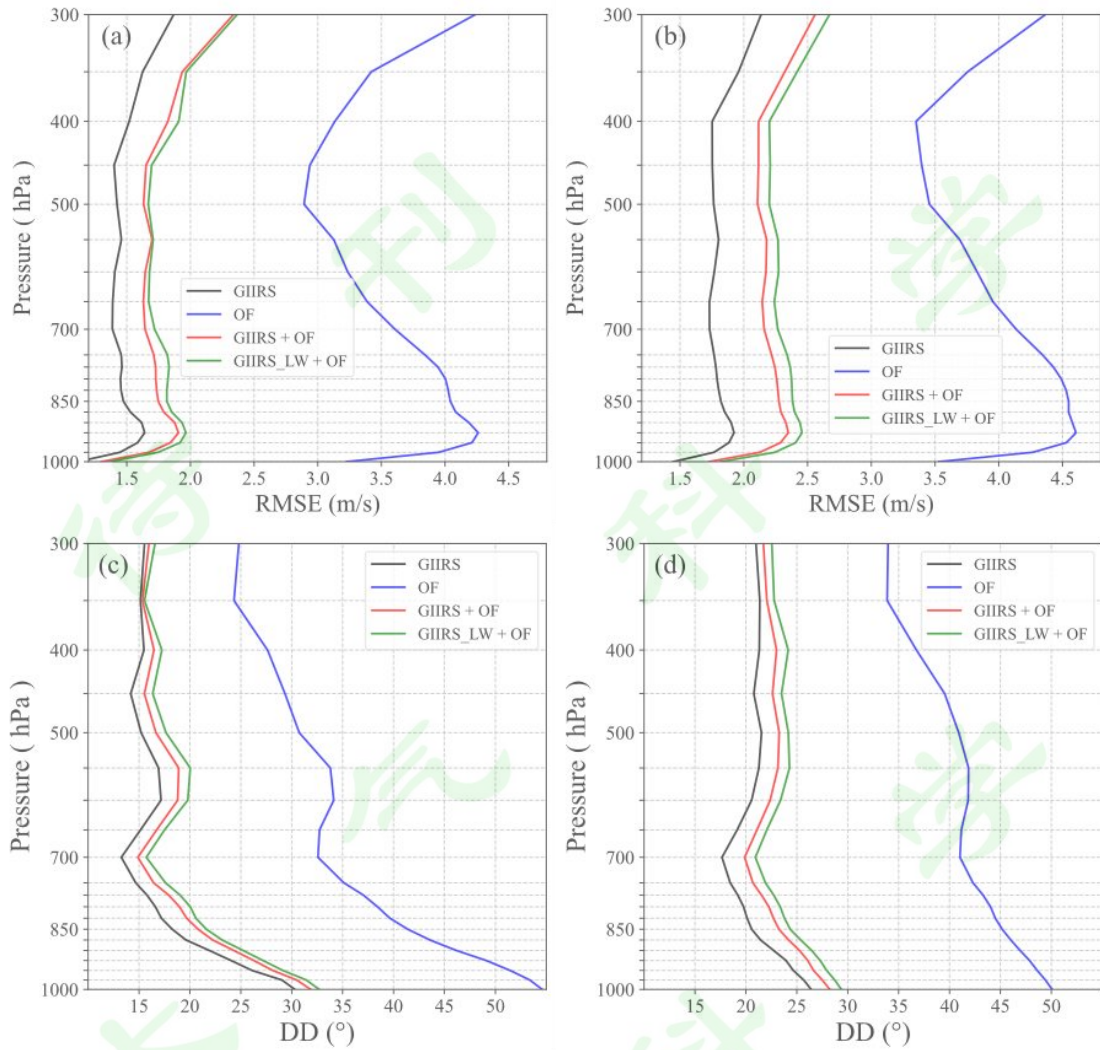


图 5 (a, c) 晴空和 (b, d) 部分晴空视场下以 GIIRS、OF、GIIRS+OF 和 GIIRS_LW+OF 四种模型输入下反演风场的 RMSE 和 DD。第一行为均方根误差，第二行为方向绝对差

Fig.5 The RMSE and DD of the retrieval wind field in clear skies(a,c) and partially clear skies(b,d) using GIIRS, OF, GIIRS+OF and GIIRS_LW+OF models. The first line is mean square error, the second line is direction absolute difference.

4.2 联合 AGRI 云产品改进部分晴空区风场反演

从上一节讨论可知，GIIRS 方法（方法二）较 OF 方法（方法一）更优，但考虑到视场中的云量会直接影响红外辐射对云下特征的检测能力，为了得到不同的云覆盖率对方法二的影响，将训练数据集划分为：Clear（晴空）、 $0 < CC < 20\%$ 、 $20 \leq CC < 50\%$ 、 $50 \leq CC < 80\%$ 、 $80 \leq CC < 100\%$ ，图 6a 给出了按云覆盖率分类后的结果。可以看出 CC 越小 RMSE 越小， $CC < 50\%$ 时风场反演的 RMSE 小于 1.7m/s，当 $CC > 50\%$ 时，RMSE 明显增大，尤其是在 $CC > 80\%$ 时，RMSE 增大到 2.3m/s 左右。

为了分析不同云顶高度对风场反演的影响，将训练数据集划分为 Clear、CTP $\leq$

700hPa、 $700\text{hPa} < \text{CTP} \leq 400\text{hPa}$ 和 $\text{CTP} > 400\text{hPa}$ ，图 6b 给出了按云高分类后的结果。从图中可以看出云顶高度越低，风场反演的 RMSE 越小，当云顶高度低于 400hPa 时，RMSE 大于 2.4m/s。对比图 6a 和图 6b 可见，按云高和云覆盖率细分后，晴空区风场反演的 RMSE 最小，而部分晴空区风场反演的 RMSE 明显增大。这主要是因为云顶高度越高、云覆盖率越大时，红外辐射能够获取的云下信息越少，风场反演就越困难。

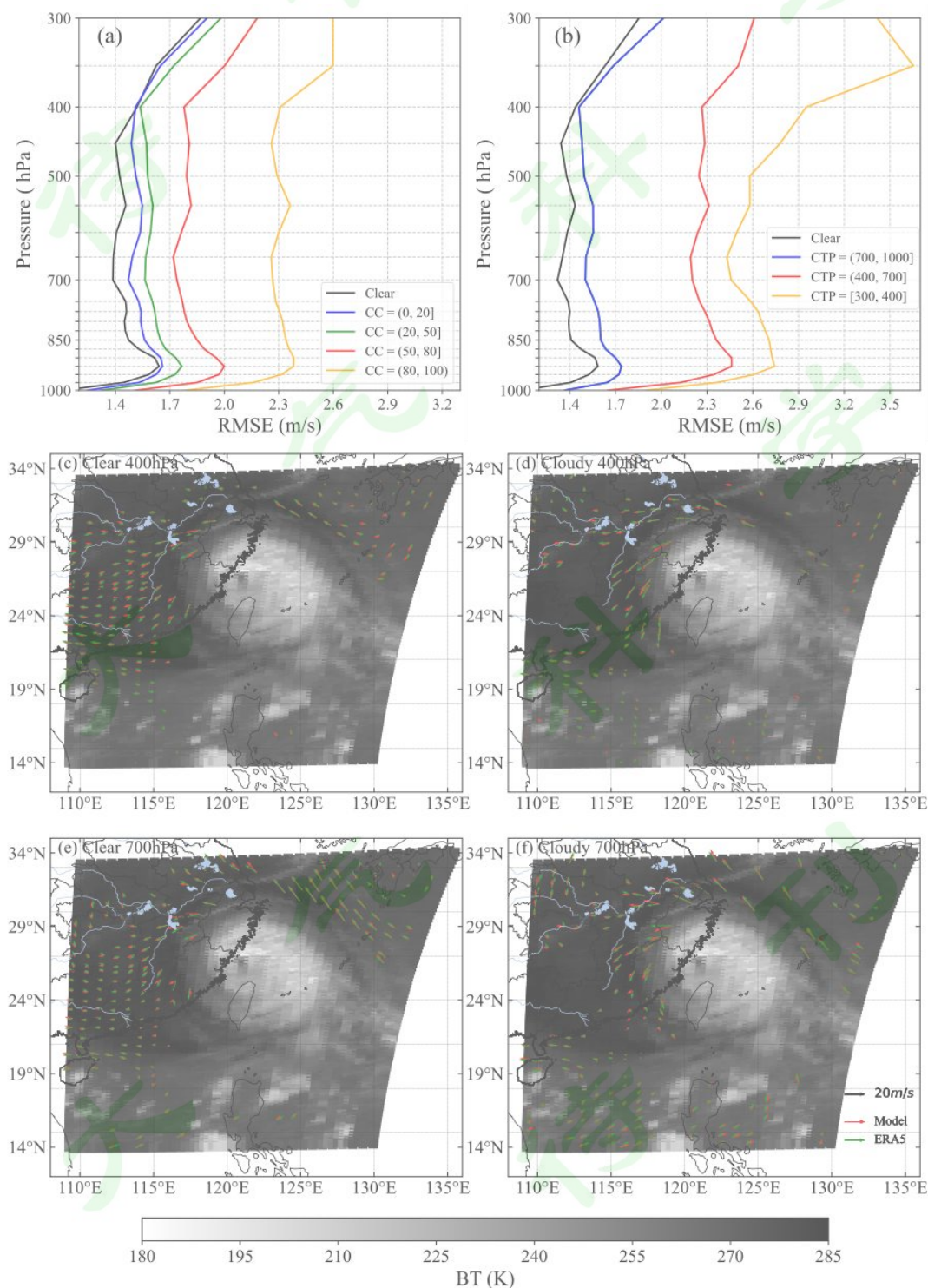


图 6 (a) 将 CC 按 0 (clear)、0~20%、20~50%、50~80%、80~100%划分情况下风场反演的 RMSE，

(b) 将 CTP 按 Clear、700~1000hPa、400~700hPa、300~400hPa 划分情况下风场反演的 RMSE。2018 年 7 月 10 日 20 时 400 hPa (c) 晴空、(d) 部分云场景下及 700 hPa (e) 晴空、(f) 部分云场景下 GIIRS 329 通道 ($\sim 11\mu\text{m}$) BT 图像 (阴影) 及反演风场和 ERA5 风场。绿色风矢量表示 ERA5 风场, 红色风矢量表示反演风场

Fig.6 (a) RMSE of wind field retrievals under CC is divided into 0 (clear), 0~20%, 20~50%, 50~80% and 80~100%. (b) RMSE of wind field retrievals under CTP is divided into Clear, 700-1000hPa, 400-700hPa and 300-400hPa. At 20:00 on July 10, 2018, GIIRS channel 329 ($\sim 11\mu\text{m}$) BT image (shadow) and retrieval wind fields and ERA5 wind fields under 400 hPa (c) clear skies and (d) partially cloudy scenes respectively, 700 hPa (e) clear skies and (f) partially cloudy scenes respectively. The green wind vector represents the ERA5 wind fields, and the red wind vector represents the retrieval wind fields.

另外, 为了从图像上直观比较晴空和部分云场景下 GIIRS 反演风场和 ERA5 风场结果, 图 6c-6f 分别展示了 2018 年 7 月 10 日 20 时 GIIRS $11\mu\text{m}$ 通道 BT 图像叠加 GIIRS 反演的中层 (400 hPa)、低层 (700 hPa) 风场 (红线) 以及 ERA5 风场 (绿线)。左侧为晴空结果; 右侧为部分云结果, 视场内云量高于 0 且低于 100% 下的结果。从图中可以看出无论是在晴空区还是在部分云视场区, 反演风场与 ERA5 风场都具有较好的一致性。但显而易见的是在晴空视场区, 反演风场与 ERA5 风场矢量的重合度更高, 这也进一步验证了晴空区风场反演的精度更高。

由图 6 可见, 红外辐射在部分晴空区反演结果的精度明显低于晴空区。因此为了改进部分晴空区的风场反演, 本文考虑在模型的输入层加入 GIIRS 视场内的云特这个信息, 如 CC 和 CTP。本研究主要采用三种不同的处理方法在模型中加入 CC 和 CTP。

第一类模型: 直接加入云量或云高原始数据, 相当于在输入层加入了一个特征值, 模型训练前将该特征值与所有其它特征值同时进行归一化处理。

第二类模型: 将 CC 和 CTP 作为分类依据, 采用不同的模型分别训练; 按前述分类方式将 CC 分为五类, (即: Clear、 $0 < \text{CC} < 20\%$ 、 $20 \leq \text{CC} < 50\%$ 、 $50 \leq \text{CC} < 80\%$ 、 $80 \leq \text{CC} < 100\%$), 分别由 1 到 5 的整数指定; 将 CTP 分为四类 (即: Clear、 $\text{CTP} \leq 700\text{hPa}$ 、 $700\text{hPa} < \text{CTP} \leq 400\text{hPa}$ 和 $\text{CTP} > 400\text{hPa}$), 分别由 1 到 4 的整数指定, 也相当于在输入层加入了一个特征值, 为了保证该特征值能更好的代表输入特征的类别, 模型训练前该特征值不进行归一化处理, 但整数可能会歪曲不同变量之间的物理差异。

第三类模型: 为了避免使用单个整数带来的影响, 模型 3 与模型 2 相似, 将单个整数使用一个二进制变量替代。更具体地说, 如果云量或云高是第 n 类, 那么该类将被定义为 1, 而所有其他类都为 0。

这三种模型仅在如何考虑输入的云量或云高的类型上有所不同, 而所有其他输入特

征值、DNN 模型和观测数据集都保持相同。三类模型对应的模型标记名和模式输入数据的描述见表 1。

表 1 CC 和 CTP 的三种不同输入方式
Table 1 Three different input methods for CC and CTP

模型标记名		模型输入数据描述
CC	CC_m1	CC 原数据
	CC_m2	将 CC 原始数据划分为 Clear、 $0 < CC < 20\%$ 、 $20 \leq CC < 50\%$ 、 $50 \leq CC < 80\%$ 、 $80 \leq CC < 100\%$ 五类，并设为 1 到 5 的整数
	CC_m3	在 CC_m2 的基础上将 1 到 5 的整数，设为二进制数（即：00001、00010、00100、01000、10000）
	CTP_m1	CTP 原数据
CTP	CTP_m2	将 CTP 原始数据划分成为 Clear、 $CTP \leq 700\text{hPa}$ 、 $700\text{hPa} < CTP \leq 400\text{hPa}$ 和 $CTP > 400\text{hPa}$ 四类，并设为 1 到 4 的整数
	CTP_m3	在 CTP_m2 的基础上将 1 到 4 的整数设为二进制数（即：0001、0010、0100、1000）

从图 7a 的结果可以看出在 GIIRS 亮温方法的基础上加入云量信息，并将 CC 以三种不同的方式处理后相较方法二 RMSE 都减小，其中将 CC 以原数据加入 RMSE 误差最小，说明云检测产品可以改进 GIIRS 风场反演的精度。另外由图 7a 也可以确定 CC 的最佳输入方式为 GIIRS+CC_m1（即 RMSE 最小）。为了进一步验证云高信息对风场反演精度的影响，在 GIIRS+CC_m1 模型输入基础上继续加入 CTP，从图 7b 的结果可以看出在 GIIRS+CC_m1 的基础上加入 CTP_m1 和 CTP_m2，RMSE 进一步减小，其中加入 CTP_m1 对 700-400hPa 的改进最明显，而加入 CTP_m2 对 850hPa 以下和 400hPa 以下的风场反演精度改进较为显著，体现了 CTP 对于部分晴空区的 GIIRS 风场反演精度有一定的改进效果。

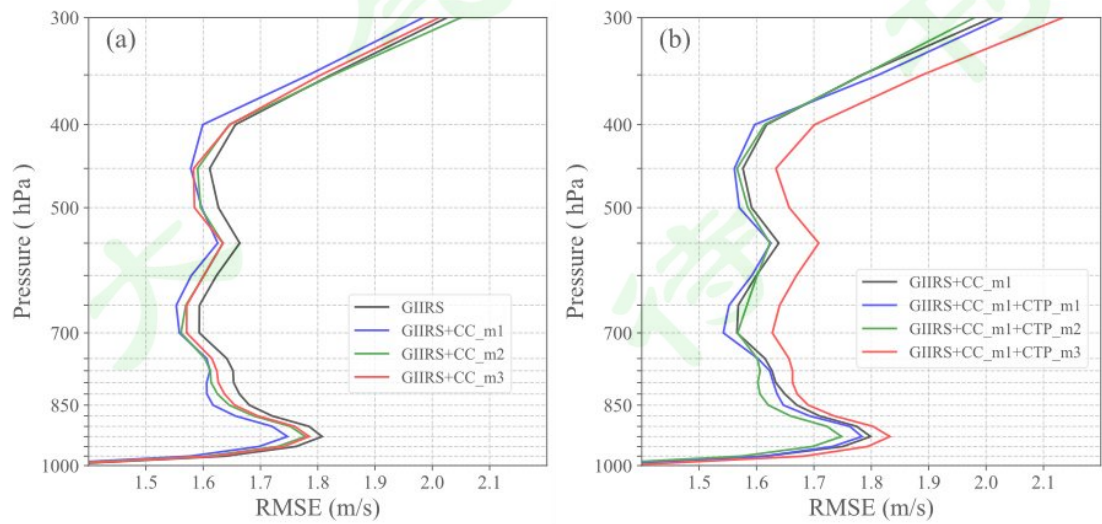


图 7(a)在 GIIRS、GIIRS+CC_m1、GIIRS+CC_m2、GIIRS+CC_m3 四种输入情况下风场反演的 RMSE。
(b)在 GIIRS+CC_m1、GIIRS+CC_m1+CTP_m1、GIIRS+CC_m1+CTP_m2、GIIRS+CC_m1+CTP_m3
四种输入情况下风场反演的 RMSE

Fig. 7 (a) RMSE of wind field retrievals from GIIRS, GIIRS+CC_m1, GIIRS+CC_m2 and GIIRS+CC_m3, respectively.(b) wind field retrievals from GIIRS+CC_m1, GIIRS+CC_m1+CTP_m1, GIIRS+CC_m1+CTP_m2, GIIRS+CC_m1+CTP_m3, respectively.

5 应用其他数据源的独立检验

5.1 利用探空资料进行独立检验

使用空投探空数据 (Dropsonde) 对加入了 AGRI 的云产品后的风场反演结果做进一步的评估是必要的。在检验中, 将 GIIRS+AGRI 方法的反演结果记为反演风场。为满足 Dropsonde 数据在垂直维度上与反演风场的 20 层数据相匹配, 且数据点具有代表性, 选取了 7 月 10 日 20 时 Dropsonde 数据, 该时次共有 8 个观测点数据可用于检验, 覆盖海面 and 陆地区域, 评估检验使用 8 个点的统计平均值。以选取的 Dropsonde 观测点的经纬度为中心, 选取距离半径为 60km 的 GIIRS 数据进行匹配, 匹配后站点分布如图 8a 所示。

图 8b 和 8c 分别为反演风场、Dropsonde 及 ERA5 的 u、v 风廓线, 由图可见, 反演风场的垂直廓线与 Dropsonde 及 ERA5 风廓线有较好的一致性, 尽管反演风场的 v 分量在 700hPa 以上与 Dropsonde 的误差较大 (在 4m/s 左右), 但仍然体现了利用红外高光谱亮温反演风场的合理性和可靠性。图 8d 和 8e 分别为反演风场与 Dropsonde 及 ERA5 的 RMSE 和 DD, 可以看出反演风场风速的均方根误差和方向的绝对差与 ERA5 的变化趋势基本一致。

另外, 我们也分别对比了 8 个检验点, 结果表明, 风场反演结果与 ERA5 风场一致性较好, 与探空观测相比, 各层风场整体趋势一致, 但数值上有明显的差异, 且在个别观测点更为显著 (图略)。

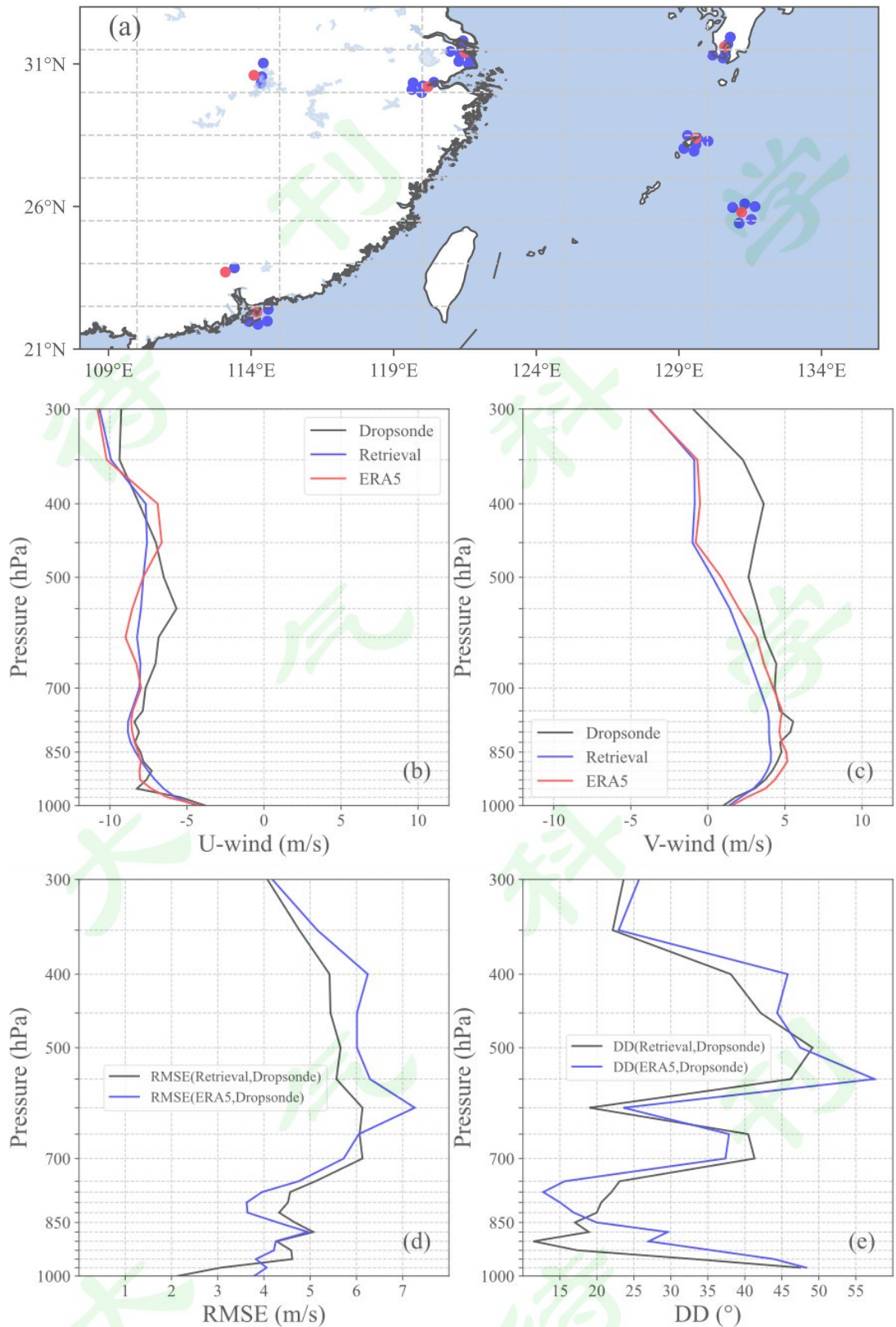


图 8 (a) 反演风场 (蓝点) 匹配到 Dropsonde (红点) 的数据点分布图。 (b, c) 反演风场 (蓝线)、Dropsonde (黑线) 及 ERA5 (红线) 的 u、v 风廓线, (d, e) 反演风场与 Dropsonde 及 ERA5 与 Dropsonde 的 RMSE 和 DD

Fig.8 (a) wind field retrievals (blue dots) matches the regional distribution of Dropsonde (red dots).

(b,c) u and v wind profiles from retrievals(blue), Dropsonde(black) and ERA5(red), respectively. (d,e) RMSE and DD, respectively for retrievals and ERA5 when Dropsonde data are used as reference.

5.2 应用 CRA40 进行独立检验

由于探空数据为站点数据，虽然垂直分辨率较高，但可利用的数据点稀疏，检验能力较为局限，为更加全面的检验风场反演能力，本文还引入了 CRA40 独立数据集作为 GIIRS+AGRI 方法反演结果的另一个检验数据集，同样将 GIIRS+AGRI 方法风场反演结果记为反演风场。CRA40 数据为格点数据，在 $13 \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $109 \sim 138^{\circ} \text{E}$ 区域内共有 6231 个格点。为了使 CRA40 数据的检验更具有代表性，以 GIIRS 数据点为原点，在 CRA40 格点数据较原点距离小于等于 25km 的基础上，利用最邻近值匹配法将 CRA40 数据匹配到 GIIRS 数据点上，其中满足匹配条件的检验数据点为 1362 个。

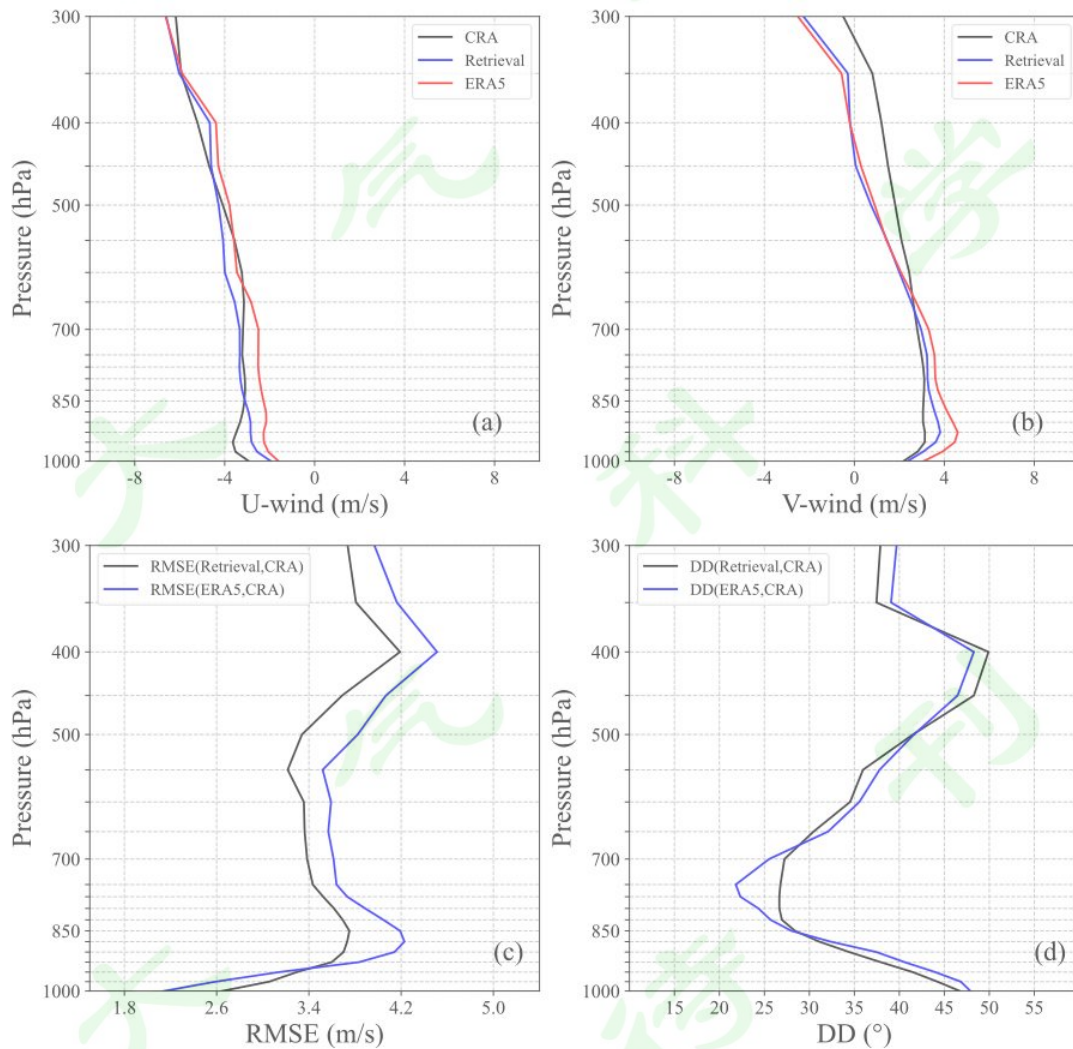


图 9 (a, b) 反演风场 (蓝线)、CRA40 (黑线) 及 ERA5 (红线) 的 u、v 风廓线。(c, d) CRA40 与反演风场及 CRA40 与 ERA5 风场的 RMSE 和 DD

Fig.9 (a,b) u and v wind profiles from retrievals(blue), CRA40 (black) and ERA5(red), respectively. (c,d)

RMSE and DD, respectively for retrievals and ERA5 when CRA40 data are used as reference.

图 9a 和 9b 分别为反演风场、CRA40 及 ERA5 的 u 、 v 风廓线，从 u 分量可以看出在整个气压层反演风场、CRA 及 ERA5 的风廓线较为一致，他们之间的风速相差基本在 2m/s 以内。 v 分量在 700hPa 以上 CRA40 偏离反演风场和 ERA5 稍大一些，但误差仍在 2m/s 以内。以 CRA40 作为真值，图 9c 和 9d 给出了反演风场与 CRA40 及反演风场与 ERA5 的 RMSE 和 DD，可以看出 ERA5 与 CRA40 的 RMSE 在 $2.6\sim 4.3$ 之间，DD 在 $25^\circ\sim 50^\circ$ 之间，说明反演风场与 CRA40 的 RMSE 较 ERA5 与 CRA40 的 RMSE 更小。值得一提的是，虽然本文使用了独立的 ERA5 数据集进行模型检验，但部分数据参与了训练，数据之间的潜在关系不能完全避免。由于 CRA40 没有参与训练，因此其结果更具独立性和代表性，这进一步证明了风场反演的可靠性。

6 总结和讨论

本研究从静止轨道红外高光谱的观测特征和优势出发，基于深度学习模型，通过提取了与风场反演相关的不同观测特征信息作为模型输入，开发了适用于晴空和部分云区风场反演算法，并利用探空数据和 CRA 再分析资料作为独立检验源对风场反演结果进行了独立检验，探讨了如何联合利用成像仪和探测仪改进云区反演精度。研究结果表明：

(1) 高时间分辨率的 GIIRS 观测数据可以反演得到三维风场，表明了静止卫星轨道高光谱数据提供风场动态信息的独特价值。

(2) 无论在晴空还是部分晴空视场下，GIIRS 亮温方法反演风场的 RMSE 和 DD 均小于光流方法，说明 GIIRS 亮温观测较光流法有更大的优势，主要原因可能是 GIIRS 空间分辨率比较粗，光流法并不适用。

(3) 联合利用成像仪和探测仪，即在 GIIRS 亮温方法反演风场的基础上加入视场内的云量和云高信息，可以有效改进有云视场的风场反演。

(4) 应用 Dropsond 数据和 CRA40 再分析进行独立检验的结果表明，加入 AGRI 的云观测信息后，GIIRS 亮温方法反演的风场与探空数据和 CRA40 分析场具有较好的一致性，说明了风场反演得可行性。

本文从试验上证明了高频次观测的地球静止高光谱探测仪资料可以得到 3D 水平风场，利用高光谱探测仪亚视场内云特性信息可以进一步提高云区风的场反演精度。本文的研究表明红外高光谱视场内云的高低和云量都会影响风场反演产品的结果，这说明了红外高光谱视场内的云特征信息可以作为其风场反演产品的质量控制依据之一。如涉及对风场产品的应用中需要谨慎使用深厚云区的风场产品。另外，红外高光谱视场内的云

特征信息也可以直接或间接地做为风场产品的质量标记码。

本研究尚存在一些不足，后续会进一步开展研究。首先，DNN 模型训练数据集局仅限于一个台风个例，虽然数据量很大，但观测数据覆盖的时间相对较短，因此训练数据的代表性有限。但截止目前，GIIRS 只能提供台风玛丽亚期间的 15 分钟加密观测数据用于本研究，还需要借助 GIIRS 的后续的加密观测结果进行更多个例的研究和分析。另外，风云四号 B 星的 GIIRS 空间分辨率是 12 公里，分辨率的提高对风场反演带来哪些改进也值得研究。

参考文献 (References) :

- Abidi M A, Gonzalez R C. 1988. Cloud motion measurement from radar image sequences. Digital Image Processing and Visual Communications Technologies in Meteorology, P. Janota, Ed., International Society for Optical Engineering (SPIE Proceedings, Vol. 0846), 54. doi:10.1117/12.942644.
- Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S. 1994. Performance of optical flow techniques. International Journal of Computer Vision, 12:43-77. doi:10.1007/BF01420984.
- Chen S Y, Liu C Y, Huang C Y, et al. 2021. An analysis study of FORMOSAT-7/COSMIC-2 radio occultation data in the troposphere. Remote Sensing, 13(4):717.
- Di D, Li J, Han W, et al. 2018. Enhancing the fast radiative transfer model for FengYun-4 GIIRS by using local training profiles. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(22):12-583. <https://doi.org/10.1029/2018jd029089>
- Di D, Li J, Han W, et al. 2021. Geostationary hyperspectral infrared sounder channel selection for capturing Fast-Changing atmospheric information. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1-10. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3078829>
- Doan C D, Liong S Y. 2004. Generalization for multilayer neural network bayesian regularization or early stopping. In Proceedings of Asia Pacific association of hydrology and water resources 2nd conference (pp. 5-8).
- Farnebäck G. 2002. Polynomial expansion for orientation and motion estimation. Ph.D. thesis, Dept. of Electrical Engineering, Computer Vision, Linköping University, 182 pp.
- Farnebäck G. 2003. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion. Image Analysis: 13th Scandinavian Conference, J. Bigun and T. Gustavsson, Eds., Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2749, Springer-Verlag, 363-370.

- Faccani C, Rabier F, Fourrié N. 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system [J]. *Weather and Forecasting*, 24(5):1268-1286.
- 耿晓雯, 闵锦忠, 杨春, 等. 2020. FY-4A AGRI 辐射率资料偏差特征分析及订正试验[J]. *大气科学*, 44(4): 679-694. Geng X W, Min J Z, Yang C, et al. 2020. Analysis of FY-4A AGRI radiance data bias characteristics and a correction experiment [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(4): 679-694.
- Horn B K P, Schunck B G. 1981. Determining optical flow. *Artif. Intell.* 17:185-203.
- Hinton G E, Salakhutdinov R R. 2006. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks[J]. *Science*, 313(5786). doi:10.1126/science.1127647
- 韩雷, 王洪庆, 林隐静. 2008. 光流法在强对流天气临近预报中的应用. *北京大学学报: 自然科学版*, 44(5):751-755. Han L, Wang H Q, Lin Y J. Application of optical flow method to nowcasting convective weather. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 44(5):751-755.
- 韩丰, 魏鸣, 李南, 等. 2013. 反射率因子和径向速度共同约束反演多普勒雷达风场. *遥感学报*, 17(3):584-589. Han F, Wei M, Li N, et al. 2013. Doppler radar wind retrieval using reflectivity and radar velocity data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 17(3): 584-589.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999-2049.
- Huang P Y, Guo Q, Han C P, et al. 2021. An improved method combining ANN and 1D-Var for the retrieval of atmospheric temperature profiles from FY-4A/GIIRS hyperspectral data[J]. *Remote Sensing*, 13(3): 481.
- Key J R, Santek D, Velden C S, et al. 2003. Cloud-drift and water vapor winds in the polar regions from MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2). doi: 10.1109/tgrs.2002.808238.
- Kingma D P, Ba J. 2017. Adam: A method for stochastic optimization. *ArXiv*:1412.6980 [Cs]. <http://arxiv.org/abs/1412.6980>
- Lucas B D, Kanade T. 1981. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. In *Proceedings of the 7th Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, Vancouver, BC, Canada, 24-28 August 1981; pp. 674-679.
- Li J, Menzel W P, Sun F, et al. 2004. AIRS subpixel cloud characterization using MODIS cloud products. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(8), pp.1083-1094.

- Lazzara M A, Dworak R, Santek D A, et al. 2014. High-latitude atmospheric motion vectors from composite satellite data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(2):534-547.
- Li X, Zou X L. 2017. Bias characterization of CrIS radiances at 399 selected channels with respect to NWP model simulations. *Atmospheric Research*, 196:164-181.
- Liu C Y, Chiu C H, Lin P H, et al. 2020. Comparison of cloud-top property retrievals from advanced himawari imager, MODIS, CloudSat/CPR, CALIPSO/CALIOP, and radiosonde. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(15):e2020JD032683. <https://doi.org/10.1029/2020jd032683>
- Li J, Zhang Y R, Di D, et al. 2022. The influence of sub-footprint cloudiness on three-dimensional horizontal wind from geostationary hyperspectral infrared sounder observations. *Geophysical Research Letters*, DOI:10.1029/2022GL098460.
- 刘梦杰, 张卫星, 张镇驿, 等. 2021. CRA40 在中国地区 GNSS 水汽反演中的适用性评估与分析 [J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 13(02):138-144. Liu M J, Zhang W X, Zhang Z Y, et al. 2021. Applicability evaluation and analysis of CRA40 in GNSS water vapor retrieval in China [J]. *Journal of nanjing information engineering university (natural science edition)(in Chinese)*, 13 (02):138-144.
- 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]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46 (2): 275-292.
- Marzban C, Sandgathe S, Lyons H, et al. 2009. Three spatial verification techniques: cluster analysis, variogram, and optical flow. *Weather and Forecasting*, 24:1457-1471.
- Marzban C, Sandgathe S. 2010. Optical flow for verification. *Weather and Forecasting*, 25: 1479-1494. Madhwarasan M, Deepa S N. 2017. Comparative analysis on hidden neurons estimation in multi layer perceptron neural networks for wind speed forecasting. *Artificial Intelligence Review*, 48:4. <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9506-6>
- 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. *Journal of Meteorological Research*, 31(4):708-719.

- Ma Z, Li J, Han W, et al. 2021. Four-dimensional wind fields from geostationary hyperspectral infrared sounder radiance measurements with high temporal resolution. *Geophysical Research Letters*, 48(14). e2021GL093794.
- Nieman S J, Schmetz J, Menzel W P, et al. 1993. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 32(9):1559-1568.
- Nieman S J, Menzel W P, Hayden C M, et al. 1997. Fully automated cloud drift winds in NESDIS operations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:1121-1133. doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1121:FACDWL>2.0.CO;2.
- Prechelt L. 1998. Automatic early stopping using cross validation: quantifying the criteria. *Neural Networks*, 11(4):761-767.
- Pinto A M G, Moreira A, Costa P, et al. 2013. Revisiting Lucas-Kanade and Horn-Schunck. *Journal of Computer Engineering and Informatics*, 1:23-29.
- Roebeling R, Baum B, Bennartz R. et al. 2013. Evaluating and Improving Cloud Parameter Retrievals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(4):ES41-ES44.
- Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, et al. 2005. Introducing the next-generation Advanced Baseline Imager (ABI) on GOES-R. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:1079-1096.
- Sears J, & Velden C S. 2012. Validation of Satellite-Derived Atmospheric Motion Vectors and Analyses around Tropical Disturbances. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(10):1823-1834.
- 隋新秀, 王振会, 鲍艳松, 等. 2018. FY-2E 晴空风矢同化对台风分析和预报的影响研究[J]. *热带气象学报*, 34(6):819-831. Sui X X, Wang Z H, Bao Y S, et al. 2018. Effects of FY-2E clear sky wind vector assimilation on typhoon analysis and forecast. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 34(6): 819-831.
- Sun F, Min M, Qin D, et al. 2018. Refined typhoon geometric center derived from a high spatiotemporal resolution geostationary satellite imaging system. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(4):499-503.
- Santek D, Nebuda S, & Stettner D. 2019. Demonstration and evaluation of 3D winds generated by tracking features in moisture and ozone fields derived from AIRS sounding retrievals. *Remote Sensing*, 11(22):2597. <https://doi.org/10.3390/rs11222597>
- Vega-Riveros J F, and Jabbour K. 1989. Review of motion analysis techniques. *IEE Proceedings I-Communications, Speech and Vision*, 136(6):397-404.

- Velden C S, Hayden C M, Nieman S J, et al.1997. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(2):173-196.
- Velden C S, Daniels J, Stettner D, et al. 2005. Recent innovations in deriving tropospheric winds from meteorological satellites.Bulletin of the American Meteorological Society, 86(2), 205-224.
- Velden C S, & Bedka K M. 2009. Identifying the uncertainty in determining Satellite-Derived atmospheric motion vector height attribution.Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48(3), 450-463.
- Velden C, Lewis W E, Bresky W, et al. 2017. Assimilation of High-Resolution Satellite-Derived Atmospheric Motion Vectors: Impact on HWRF Forecasts of Tropical Cyclone Track and Intensity.Monthly Weather Review, 145(3), 1107-1125.
- 王敏,葛苏慧.2010.插值拟合方法在雷达图像外推预报中的应用.科技信息,27: 464,422.Wang M,Ge S H.The application of interpolation method in Radar image extrapolation.Science and Information Technology(in Chinese),27:464,422
- Wang L K, Tremblay D, Zhang B, et al. 2016.Fast and accurate collocation of the visible infrared imaging radiometer suite measurements with cross-track infrared sounder[J]. Remote Sensing, 8(1): 76.
- 王旻燕,姚爽,姜立鹏,等.2018.我国全球大气再分析(CRA-40)卫星遥感资料的收集和预处理[J].气象科技进展,8(01):158-163.Wang M Y, Yao S, Jiang L P, et al.2018. Collection and pretreatment of CRA-40 satellite remote sensing data in China [J]. Progress in Meteorological Science and Technology (in Chinese),8(01):158-163.
- 王丹,王金成,田伟红,等. 2020.往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析[J].大气科学,44(4): 865-884. Wang D, Wang J C, Tian W H, et al. 2020. Quality Control and Uncertainty Analysis of Return Radiosonde Data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 865-884.
- 许健民,张其松.2006.卫星风推导和应用综述[J].应用气象学报,5:574-582.Xu J M, Zhang Q S.2006.A review on the derivation and application of satellite wind [J]. Journal of Applied Meteorology(in Chinese),5:574-582.
- Yang J, Zhang Z, Wei C, et al. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Feng yun-4. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(8):1637-1658. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0065.1>

- 叶梦姝.2018.中国大气再分析资料降水产品在天气和气候中的适用性研究[D].兰州大学.Ye M S.2018. Applicability of precipitation products to weather and climate in China atmospheric reanalysis data [D]. Lanzhou University(in Chinese).
- 杨春, 闵锦忠, 刘志权. 2017. AMSR2 辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究[J]. 大气科学, 41(2): 372-384. Yang C, Min J Z, Liu Z Q. 2017. The impact of AMSR2 radiance data assimilation on the analysis and forecast of typhoon Son-Tinh [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 41(2): 372-384.
- 曾庆存.1997.实测风场在数值天气预报中的应用[J].大气科学,3:165-173.Zeng Q C. Application of measured wind field in numerical weather forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese),3:165-173.
- 曾庆存.1978.大气红外遥感探测的一些理论问题[J].中国科学,5:552-559. Zeng Q C.1978. Some theoretical problems of atmospheric infrared remote sensing [J]. Science in China(in Chinese),5:552-559.