

基于 CALIPSO 数据的 FY-3D/HIRAS 云检测方法评估

田少龙¹ 肖贤俊² 徐忠燕³ 李玉鹏⁴ 平凡⁵

1 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京210044

2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京100081

3 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京210044

4 吉林省气象科学研究所长白山气象与气候变化重点实验室, 长春130062

5 中国科学院大气物理研究所/云降水与强风暴重点实验室, 北京100029

摘要: 云检测是红外高光谱辐射观测应用中的一个关键步骤, 云检测的优劣直接关系到卫星数据的应用效果。

McNally 于 2003 年提出了一种基于观测和模拟亮温差值进行通道云检测的方法, 目前其广泛应用在数值天气预报的卫星资料质量控制。基于 McNally 通道云检测方法, 本文首次利用 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 云分类数据产品, 采用精确度 (Precision) 和召回率 (Recall) 两种验证指标, 实现了 FY-3D HIRAS (High Spectral Infrared Atmospheric Sounder) 通道云检测效果的定量评估, 提升了 FY-3D HIRAS 产品的质量及可同化数据量。本研究结果表明: (1) FY-3D HIRAS 通道云检测的精确度为 97.19%, 召回率为 93.74%, 且虚假晴空通道 (将有云通道检测为晴空通道) 导致的 O-B (观测亮温减背景亮温) 的均方根误差 (RSM) 为 0.984 K, 基本在数值预报中观测误差方差范围内。由此证明该云检测方法不会影响观测资料质量, 可以有效应用于数值天气预报中。(2) 根据 CALIPSO 的不同云类型分析, 层云 (St)、层积云 (Sc)、碎积云 (Cu fra) 都具有很高的精确度, 但召回率比较低。高积云 (Ac)、高层云 (As) 和深对流云 (DC) 都具有较高精确度与召回率。卷云 (Ci) 的精确度比较低, 而召回率较高。

关键词: HIRAS; 云检测; 精确度; 召回率

文章编号

中图分类号

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2407.24057

Evaluation of cloud detection method for FY-3D/HIRAS based on CALIPSO data

Tian Shaolong¹, Xiao Xianjun², Xu Zhongyan³, Li Yupeng⁴, PING Fan⁵

1.School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;3.

2.China Meteorological Administration, Earth System Numerical Weather Prediction Center, Beijing 100081.

3.School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;3.

4 Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology and Climate Change, Jilin Institute of Meteorological Science, Changchun 130062.

5. Key Laboratory of Cloud Precipitation and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: Cloud detection is a critical step in the application of infrared high-spectral radiance observations, directly impacting the effectiveness of satellite data utilization. McNally proposed a method in 2003 based on observed and simulated

收稿日期 2024-7-10; 网络预出版日期

作者简介 田少龙, 男, 1998年出生, 硕士研究生, 主要从事风云卫星红外高光谱数据的云检测研究。E-mail: ts1980608@126.com

通讯作者 平凡, 男, 研究员、博导, E-mail: pingf@mail.iap.ac.cn

brightness temperature differences for channel cloud detection, widely applied in satellite data quality control for numerical weather forecasting. Building upon McNally's method, this study utilizes Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) cloud classification data products to quantitatively assess the cloud detection performance of FY-3D High Spectral Infrared Atmospheric Sounder (HIRAS), using precision and recall as validation metrics. This enhances the quality and assimilated data volume of FY-3D HIRAS products. Results show: (1) The precision of FY-3D HIRAS channel cloud detection is 97.19%, with a recall of 93.74%, and the Root Mean Square (RMS) error of O-B (observed brightness temperature minus background brightness temperature) caused by false clear-sky channels (cloud channels detected as clear-sky) is 0.984 K, generally within observational error variance in numerical forecasting. This confirms the method does not compromise data quality and can effectively apply to numerical weather forecasting. (2) According to CALIPSO's analysis of different cloud types, stratocumulus (St), stratocumulus (Sc), and fractured cumulus (Cu fra) exhibit high precision but lower recall. Altostratus (As), and deep convective clouds (DC) demonstrate high precision and recall. Cirrus (Ci) shows lower precision but higher recall.

Keywords: HIRAS; cloud detection; precision; recall

1、引言

红外高光谱探测仪的引入和应用,在气象学和气候科学领域产生了革命性的影响。红外高光谱探测资料具有信息量大、覆盖面广、高时空分辨率、高精度的优点,尤其是在难以进行常规观测的地区(如海洋和沙漠)(黄静等,2005;姚姝含等,2022)。红外高光谱探测仪在红外波段设置了数千个光谱通道,能够捕捉到大气中温度、湿度等参数的细微变化。红外高光谱探测资料对于数值预报尤为重要。根据欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Center for Medium Weather Forecasting) 的统计,进入同化业务系统的观测资料中有高达 91.41%来自卫星资料,其中红外高光谱资料对预报误差减小和同化效果改善的贡献最大(Bouttier et al., 2002; 董佩明等, 2008)。

近年来,随着高光谱探测技术的快速发展和数据处理能力不断提高。高光谱大气探测仪器的研发和应用越来越受到各国的广泛关注,如光栅式红外大气探测仪 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)、干涉式红外大气探测仪 CrIS (Cross-track Infrared Sounder) 和欧洲的 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) (Pagano et al., 2023; Han et al., 2013; Siméoni et al., 1997)。

2017年11月15日2时35分风云三号D星(FY-3D卫星)在太原发射中心成功发射,其搭载的红外高光谱大气垂直探测仪(HIRAS)是中国首个上天的干涉式红外高光谱探测仪器。它可实现地气系统的高光谱分辨率红外高精度观测,光谱覆盖1370个通道。相较于前期的低光谱分辨率通道式红外分光计,光谱通道数量增加了70倍,光谱分辨率达 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(陆其峰等,2019;漆成莉等,2019)。其主要用于反演更高精度的大气温度(精度提高0.5K)和大气湿度廓线(精度提高10%),已经在各个数值天气预报模式中迅速得到应用(胡秀清等,2018; Carminati et al., 2019)。

在数值天气预报 NWP (Numerical Weather Prediction) 同化应用中,红外高光谱探测仪器通过观测大气发射/吸收光谱得到高垂直分辨率、高精度的大气温湿度廓线信息,作为 NWP 的初始场(郑祚芳等,2001;高浩等,2021)。然而,红外高光谱仪器在观测数据同化中面临着云检测的挑战,对于红外波段的光谱来说,云几乎不可穿透,云中的水和冰晶都对红外波段具有极强的吸收和

散射作用，就像完全的黑体一样，造成卫星的传感器不能探测来自地面和云顶以下的大气辐射，而只能测量到云顶上方的大气辐射。因此，在红外高光谱仪器的预处理中，云检测成为至关重要的一步（邹晓蕾，2009）。

常规的云检测方法都是基于像元的，对于被识别为云的像元，通常会将其所有通道的数据舍弃。这样一来，经过云检测后，留下的晴空数据就相对较少。红外高光谱仪器有上千通道，其光谱权重函数相对于宽带的仪器尖锐得多，理论上对大气探测的垂直分辨率在 1~3 公里。在有云的地方，卫星虽然无法接收到云层以下的大气信息，但是云层上的信息不受云的影响。因此权重函数峰值高于云层的通道，在有云的地方仍然可用。由此对于每一个通道都可定义一个通道高度，在此高度之下的云，不会影响卫星接收这个通道的辐射信息。McNally and Watts（2003）提出了一种通道云检测的方法（Eresmaa et al., 2014; Letertre-Danczak et al., 2016）。通过设定一个 O-B(观测亮温和模拟的晴空亮温之差)的阈值，逐个通道进行分析，找到不受云影响的通道，也即通道高度在云层上的通道。这样的通道称为晴空通道，可以用于数值天气预报的同化之中。如此，在有云的像元上仍然可以同化高层不受云污染的通道，成倍的增加了可同化的观测资料数量。目前此方法已应用于 ECMWF 的 AIRS 和 IASI 辐射的业务同化（Dragani et al., 2013; 许冬梅等，2022）。

由于云的遮挡造成的 O-B 的差值一般较大，McNally 的云检测方法对晴空通道的检测理论上成功率是很高的。但是不可避免的模式背景误差和观测资料偏差对云检测质量也有影响，特别是对于一些部分有云的像元或者是薄云像元。实际应用中，真实数据偏差到底对云检测有多大影响，这种影响在多大程度上能对数值预报产生影响。对于实际带有随机误差和偏差的背景场和观测数据，这种云检测方法对不同云类型的检测是否有较大差异，这些问题至今无人用实际数据进行评估。要全面评估同化的观测资料质量，云检测的不确定性也需要考虑。在实际应用中对云检测方案的定量评估，有利于确定更为准确的观测误差矩阵，同时也有利于分析同化质量的影响因子，从而进一步改进云检测或其他同化方案。

2003 年 McNally 提出这个云检测方法的时候，没有合适的云观测资料对其方法进行验证。2006 年，美国国家航空航天局 NASA（National Aeronautics and Space Administration）和法国国家宇航中心 CNES（National Centre for Space Studies）合作发射了 CALIPSO 卫星，其上搭载的正交偏振云-气溶胶激光雷达 CALIOP Lidar（Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization）可用于全球云和气溶胶的探测（Winker et al., 2004; Hunt et al., 2009; Winker et al., 2007）。本文利用 CALIPSO 的云分类产品评估 McNally 云检测方法在 FY-3D HIRAS 中的应用，一方面可以定量评估云检测数据的质量，另一方面也分析了这个云检测方法的应用优劣特征，为后续进一步的方法改进提供参考。

2、资料和辐射传输模式

2.1 辐射传输模式

本文采用 RTTOV13 快速传输模式对 ERA5（ECMWF Reanalysis v5）数据进行辐射模拟。RTTOV 是 90 年代初 ECMWF 为同化 TOVS 仪器所开发，随后原始代码经过 Saunders（2020）等人的进一步发展，目前最新的版本已升级到了 RTTOV V13 版本。RTTOV 允许对卫星搭载的可见光、红外以及微波波段的星载仪器的辐射量进行快速模拟，可进行模拟的仪器达 107 种以上。RTTOV

作为快速模式，其采用统计和物理相结合方法，即 ODPS (Optical Depth at Pressure Space) 方案，核心为透过率的快速计算 (刘乐等, 2016; Saunders et al., 2020)。基于 LBLRTM 模式和有代表性的大气廓线库，在 RTTOV 系数文件中建立所选仪器各通道光学厚度与大气状态变量之前的映射关系。输入所需参数及所选系数文件后，由线性回归计算快速计算出各模式层大气的光学厚度，将结果代入到辐射传输方程中得到卫星接收到的辐射 (Geer et al., 2020)。RTTOV 模式综合考虑了吸收气体的辐射、各种类型水成物和气溶胶粒子的吸收和散射 (在计算水成物散射特性时输入的是不同高度层上各类水成物的垂直含量)，海洋、陆地及冰雪覆盖地表的发射和辐射效应，因此可以快速、准确的模拟各种大气和地表条件下 (包括云、雨区的模拟) 微波和红外的卫星观测辐射值。该辐射传输模式除了常规的前向算子，还具备相应的切线性算子及其伴随和 K 矩阵 (Jacobian 矩阵) (周校立等, 2023)。观测算子对云和降水、气溶胶粒子的吸收和散射效应的考虑将使全天候条件下卫星资料的同化应用成为可能。

2.2 FY-3D HIRAS 资料

FY-3D 红外高光谱大气探测仪 (HIRAS) 是搭载在 FY-3 极轨气象卫星系列上的首个高光谱红外探测仪器。HIRAS 每行跨轨扫描序列共有 33 次干涉仪扫描，每条扫描行的扫描时间为 10 s，其中每一条扫描行中包含 29 个驻留视场 FOR (Field of Regard)，每一个驻留视场中包含 2×2 排列的四个像素视场 FOV (Field of View)，星下点瞬时视场的直径约为 16 km，对地张角约为 1.1° (Qi et al., 2020)。本文选择 HIRAS 全光谱分辨率 FSR (Full Spectral Resolution) 开展研究，光谱本身未经过切趾处理，共 2287 个通道。利用 Hamming 切趾函数做滑动平均滤波处理后的光谱分辨率为 0.625 cm⁻¹，共 2275 个通道，表 1 为 HIRAS 光谱通道特征参数。本文采用 HIRAS Level 1 级数据，其数据的格式为 HDF5，其核心数据集包括辐射数据集、地理定位数据集和产品质量码数据集。实验数据来自国家卫星气象中心提供的 2022 年 03 月 01 日至 2022 年 03 月 31 日 HIRAS Level 1 辐射数据。

表 1 HIRAS 光谱通道特征参数表

Table.1 Characteristics of HIRAS spectral channel parameters.

波段	光谱范围/(cm ⁻¹)	光谱分辨率/(cm ⁻¹)	灵敏度 NEΔT@280K	动态范围/(K)	通道数目
长波 IR	650-1135	0.625	0.15-0.4K	180-335	777
中波 IR	1210-1750	1.25	0.1-0.7K	180-335	433
短波 IR	2155-2550	2.5	0.3-1.2K	180-335	159

2.3 ERA5 再分析资料

ECMWF 推出了从 1950 年 1 月起至今的第五代全球再分析资料 ERA5，该数据由 ECMWF 的哥白尼气候变化服务中心 C3S (Copernicus Climate Change Service) 研发。ERA5 再分析资料将模式预测的数据与来自世界各地的观测数据相结合，通过将历史的预报值与新获得的观测资料进行同化，获得新的大气状态的最佳估算，ERA5 不但可以提供大气温度、湿度和臭氧廓线，还可以提供近地面风场、大气云量、降雪量、特定的液水云含水量等气象要素 (Hersbach et al., 2020)。本文使用全球格点网格上的逐小时 ERA5 再分析资料，其水平分辨率为 0.25°×0.25°，垂直高度上将 1000 hPa 到 1 hPa 的高度上分为了 37 层，时间分辨率为 1 小时。本文利用 ERA5 数据进行 FY-3D HIRAS 的晴空辐射模拟，辐射传输模式采用 RTTOV13，输入参数来自 ERA5 再分析资料和 HIRAS Level 1 数据，具体变量如表 2 所示。在辐射模拟时候，通过线性插值方法将 ERA5 网格数据插值到 FY-3D

HIRAS 的观测位置。

表 2 RTTOV 晴空模拟的输入参数信息

Table.2 Input Parameter Information for RTTOV Clear-Sky Simulation.

数据类型	参数信息	数据单位	数据来源
大气参数	温度	K	ERA5 再分析资料 (37 层)
	水汽	ppmv	
	臭氧	ppmv	
	气压	hPa	
地表信息	2 m 温度	K	ERA5 再分析资料 (37 层)
	2 m 水汽	ppmv	
	2 m 气压	hPa	
	10 m UV 风速	m/s	
	地表温度	K	FY-3D HIRAS Level 1 数据
	地表类型		
	经纬度	°	
仪器信息	海拔高度	km	FY-3D HIRAS Level 1 数据
	卫星天顶角	°	
	卫星方位角	°	
	太阳天顶角	°	
	太阳方位角	°	

2.4 CALIPSO 云资料

CALIPSO 的主要任务是观测大气中的云和气溶胶，以及它们的垂直分布和特性。其中搭载的正交偏振云-气溶胶激光雷达 CALIOP，是第一款提供全球大气测量的极化激光雷达，为国际科学界提供了新的观测能力。CALIOP 包含一个测量 1064 nm 反向散射强度和两个测量 532 nm 反向散射信号的正交偏振分量的通道，用于观测气溶胶和微米级的云粒 (Winker et al., 2006)。本文采用 CALIOP 的 Level 2 级产品 (VFM)，其数据集包括云类型、云层高、空间和时间等，该产品可提供云的高分辨率垂直剖面，表 3 给出了 Level 2 产品的水平分辨率与垂直分辨率 (Winker et al., 2009)。该产品提供了各种云类型的云顶高，并将云类型划分为 4 族 8 类，其中高云为卷云 (Ci)，中云族包括高层云 (As) 和高积云 (Ac)，低云族包括层积云 (Sc)、碎积云 (Cu fra) 和层云 (St)，厚云族包括雨层云 (Ns) 和深对流云 (DC) (Weisz et al., 2007)。

表 3 CALIOP 的 Level 2 产品的水平分辨率与垂直分辨率

Table.3 Horizontal and Vertical Resolutions of CALIOP Level 2 Products.

高度 (km)	层数	水平分辨率 (km)	532nm 垂直分辨率 (m)	1064nm 垂直分辨率 (m)
20.2~30.1	34-88	5/3	180	180
8.3~20.2	89-288	1	60	60
-0.5~8.3	289-578	1/3	30	60

3、云检测方案

McNally 的云检测方法是基于观测的红外高光谱辐射和模拟的晴空辐射之间差值来识别大气中的云。该方法假设模式的亮温和实际观测的亮温之差主要源于云的影响，将受云污染的通道标记为有云通道，不受云污染的通道标记为晴空通道。在现实中仪器噪声、模式误差等因素都会引起偏差，这些噪声使得云检测过程变得复杂。为了将有云通道挑选出来，首先需要根据通道高度对通道进行排序。然而这个排序并没有考虑到红外光谱中各波段的云发射率不同，因此将红外光谱按不同的波段分成五个光谱带分别排序，同时采用滑动平均滤波消除仪器噪声。图 1 为晴空通道云检测技术流程图，云检测具体步骤如下：

(1) 根据通道对云的敏感性定义通道高度，这里的通道高度定义为在瞬时视场中的某一高度上放置一层完全不透明云（视为黑体），计算得出全云辐射值 (R_{cloudy}) 和晴空辐射值 (R_{clear}) 之差与晴空辐射值 (R_{clear}) 的比值刚好超过某一指定的阈值时（一般取 0.01）(McNally et al.,2003)，此时不透明云的高度就是该通道的通道高度，即：

$$\left| \frac{R_{clear} - R_{cloudy}}{R_{clear}} \right| > 0.01 \quad (1)$$

(2) 将 HIRAS 光谱分为五个光谱带：长波 CO_2 ($650\sim770\text{ cm}^{-1}$)、 O_3 ($770\sim980\text{ cm}^{-1}$)、水汽 ($1210\sim1650\text{ cm}^{-1}$)、 $4.5\ \mu\text{m}\ CO_2$ ($2150\sim2250\text{ cm}^{-1}$) 和 $4.2\ \mu\text{m}\ CO_2$ ($2350\sim2420\text{ cm}^{-1}$)，根据通道高度对每个光谱带的偏差进行排序；

(3) 采用平滑滤波方法以降低辐射率偏差中的误差，从而减少对云信号的影响。在具体实施上，滤波器沿着数据序列滑动，每次移动一个时间步长，通过对窗口内数据进行平均处理来获得平滑后的结果，即：

$$d_k = \frac{1}{p} \sum_{i=0}^p d_{k+i} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中， d 为一维数组（向量长度为 n ）， p 为窗口宽度， m 为滤波后数组长度， k 为对应位置的滑动平均值。

(4) 在每个光谱带中从低到高的搜索在梯度和差值上都满足阈值的通道，即：

$$\begin{cases} grad(d_{LP}^i) < grad_{max} \\ d_{LP}^i < d_{max} \end{cases} \quad (3)$$

式中， d_{max} 为偏差阈值 (2.0K)， $grad_{max}$ 为梯度阈值 (0.4K)， d_{LP} 滑动平均滤波后的一维数组 (邓松等, 2017)。

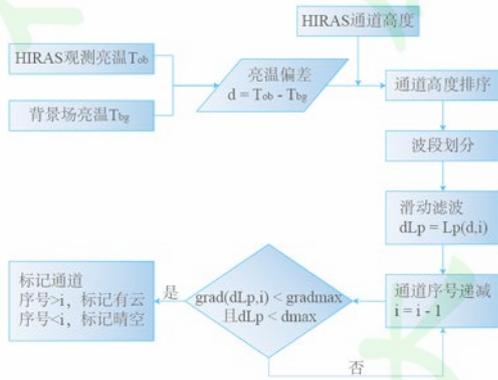


图 1 云检测技术流程图

Fig.1 Flowchart of Cloud Detection Technology.

本文参考 Eresmaa (2020) CADs 软件，选用了 FY-3D HIRAS 的 137 个长波通道进行云检测试验，这些通道的高度覆盖了从 0~1000hPa 的整个大气柱高度 (图 2 (a))，通道波数范围为 $651.25\sim1093.75\text{ cm}^{-1}$ 。图 2 (b) 为晴空通道检测结果，图中给出了一条廓线的云检测情况，红色虚线为 ERA5 提供的边界层高，绿色虚线为对流层顶高，其对流层顶高根据 WMO (1957) 对热力对流层顶的定义计算而来。由此图可以看到晴空通道的 O-B 值及其梯度远小于受云污染通道。自下而上，晴空通道为搜索到的第一个达到阈值的通道之上的所有通道。

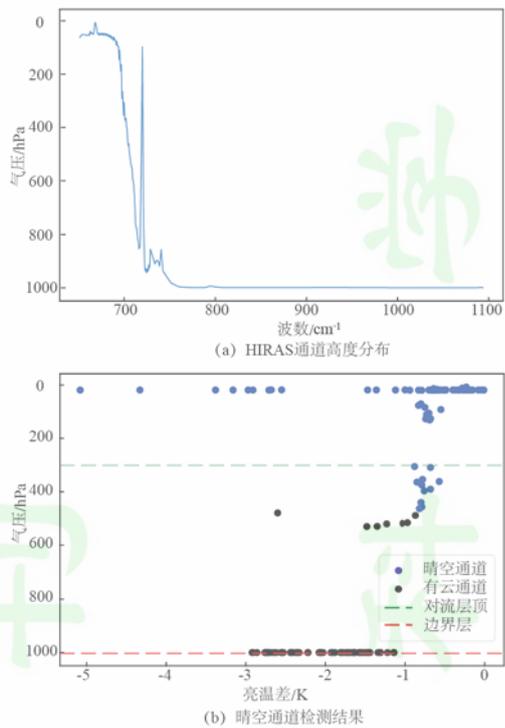


图2 HIRAS 通道高度分布及晴空通道检测结果图。(a) HIRAS 选定波束的通道高度分布图；(b) 晴空通道检测结果图。

Figure 2. HIRAS channel height distribution and clear-sky channel detection results. (a) Channel height distribution diagram of selected beams for HIRAS; (b) Clear-sky channel detection results diagram.

4、云检测结果评估

4.1 云检测结果评估方法

本文首先将 CALIPSO 和 HIRAS 进行时空匹配。由于 HIRAS 的像元分辨率为 16 公里，CALIPSO 的 VFM 数据分辨率为 5 公里，因此空间匹配距离为 11 公里，时间匹配为 10 分钟。图 3 可以看到匹配后的观测点空间分布。

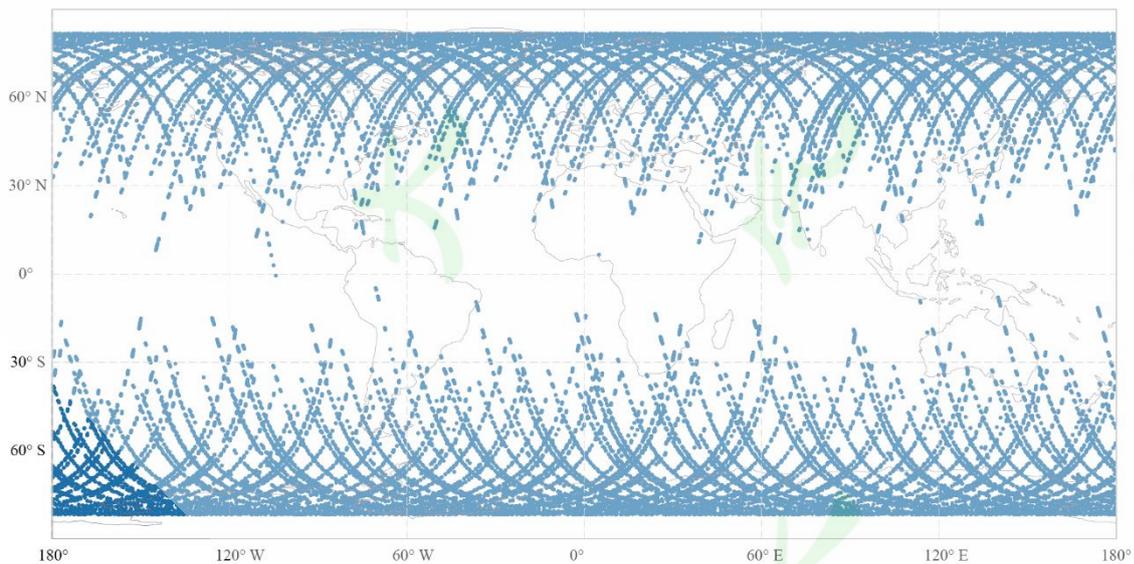


图3 HIRAS 与 CALIPSO 时空匹配的观测点空间分布

Figure 3 Spatial distribution of observation points from the temporal and spatial matching of HIRAS and CALIPSO.

本文借用二分类算法的评价指标，采用精确度和召回率，对 HIRAS 的通道云检测结果进行评

估。精确度衡量了预测为晴空通道中有多少是真实的晴空通道，而召回率则衡量了云检测正确找出的晴空通道占有所有真实晴空通道的比例。同时，计算检测错误的晴空通道的亮温均方根误差，以评估观测亮温偏离背景场亮温的程度。HIRAS 云检测结果定义为预测值，CALIPSO 云观测信息定义为真实值，可以将预测值和真实值分为以下四类样本，如表 4 所示。

表 4 云检测样本分类

Table.4 Classification of Cloud Detection Samples.

HIRAS 晴空通道 云检测结果	CALIPSO 云分类产品	
	晴空通道	有云通道
晴空通道	TP	FP
有云通道	FN	TN

- 1) 正样本真值 (TP) 表示：该通道在 HIRAS 通道云检测后标记为晴空通道，同时，通道高度在 CALIPSO 最高云顶气压上方，为真实晴空通道；
- 2) 正样本虚假值 (FP) 表示：该通道在 HIRAS 通道云检测后标记为晴空通道，但是通道高度在 CALIPSO 最高云顶气压下方，为虚假晴空通道；
- 3) 负样本虚假值 (FN) 表示：该通道在 HIRAS 通道云检测后标记为有云通道，但是通道高度在 CALIPSO 最高云顶气压上方，为虚假有云通道；
- 4) 负样本真值 (TN) 表示：该通道在 HIRAS 通道云检测后标记为有云通道，但是通道高度在 CALIPSO 最高云顶气压下方，为真实有云通道。

在对 HIRAS 的通道云检测结果进行样本划分时，需要对 HIRAS 云检测的最高有云通道高度和 CALIPSO 的云顶高进行比较。当该观测点有云时，图 4 给出了存在的两种情况。第一种情况是 HIRAS 云检测中最高有云通道高于 CALIPSO 的真实云顶气压高，此时 HIRAS 通道云检测的晴空通道为 TP，在 CALIPSO 真实云顶气压高下方所有通道为 TN，在 CALIPSO 真实云顶高上方的 HIRAS 云检测有云通道为 FN。第二种情况是 HIRAS 云检测中最高有云通道低于 CALIPSO 真实云顶气压高，此时 CALIPSO 真实云顶上方的晴空通道为 TP，在 HIRAS 云检测的有云通道为 TN，在 CALIPSO 真实云顶高下方的 HIRAS 云检测晴空通道为 FP。

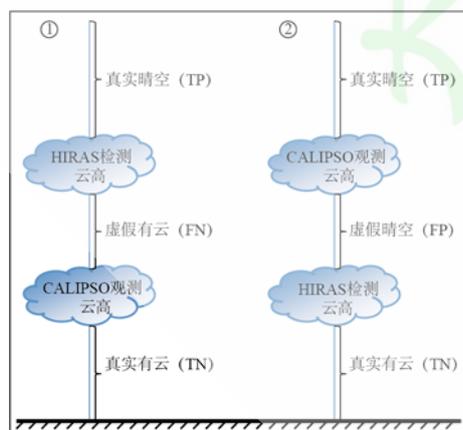


图 4 HIRAS 的云检测结果评估的四类样本垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of four types of samples for cloud detection evaluation by HIRAS.

精确度 (Precision): 在所有检测为晴空的通道中，检测正确的通道所占的比例。

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

式（4）中：P 为精确度，TP 为真实晴空的通道个数；FP 为虚假晴空的通道个数。

召回率（Recall）：检测出的晴空通道占有晴空通道的比例。

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

式（5）中：R 为召回率，TP 为真实晴空的通道个数；FN 为虚假有云的通道个数。

均方根误差（RMSE）：观测亮温与背景亮温偏差的平方和与通道数比值的平方根，反映观测亮温偏离背景场亮温的程度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{ob,i} - T_{bg,i})^2}{n}} \quad (6)$$

式（6）中：RMSE 为均方根误差， T_{ob} 为通道观测亮温； T_{bg} 为通道背景场亮温，n 为通道数。

4.2 云检测总体情况分析

本次实验不考虑 HIARS 检测为晴空和 CALIPSO 为晴空的观测站点数据，共有 49665 观测点。通过云检测指标评定方法计算得到 HIARS 的精确度（Precision）为 97.19%，召回率（Recall）为 93.74%，TP 的通道个数是 3759057，FP 的通道个数是 107214，FN 的通道个数是 254356，TN 的通道个数是 2683478。CALIPSO 资料中包含 8 种云类型，表 5 给出本次实验中 CALIPSO 的不同云类型的占比，可以看出本次观测资料中主要以层云、高积云和卷云为主。由于 CALIPSO 的卫星资料在本次实验中没有观测到雨层云的数据，所以雨层云占比为 0%。

表 5 精度评估实验中 CALIPSO 观测不同云类型占比情况

Table 5: The proportion of different cloud types observed by CALIPSO in the accuracy evaluation experiment

云类型	层云	雨层云	层积云	碎积云	高积云	高层云	卷云	深对流云
占比	39.89%	0%	6.96%	4.5%	29.35%	0.44%	18.7%	0.16%

图 5 为 TP、FP、TN、FN 等四类情况下的通道统计结果，图 6 为 CALIPSO 云产品中各云类型云顶气压统计结果。图 5 可以看出 TP 的晴空通道数量分布情况，其晴空通道分布波数为 651.25~721.25 cm^{-1} 的通道（通道号为 1~90）。其中在波数 651.25~696.875 cm^{-1} 和波数为 720 cm^{-1} 的通道（通道号为 1~62 和 89）数量最多，通道高度在 10~250hPa，该部分通道数量占总的真实晴空通道的 81.15%。因为该部分的通道高度在对流层的边界或对流层上空，此高度云量非常少，因此该部分的通道大部分为晴空通道。在波数为 697.5~708.75 cm^{-1} 和 718.75 cm^{-1} 的通道（通道号为 63~79 和 88），通道高度在 250~550 hPa。图 6（e）可看出此高度主要以卷云为主，该部分通道数量占总的真实晴空通道的 15.22%。在波数为 709.375~713.75 cm^{-1} 和 721.25 cm^{-1} 的通道（通道号为 80~85 和 90），通道高度在 550~750 hPa。图 6（d）可看出此高度主要以高积云为主，该部分通道数量占总真实晴空通道的 2.14%。随着高度的不断下降，HIRAS 的晴空通道，受到不同云的影响，晴空通道数量越来越少。

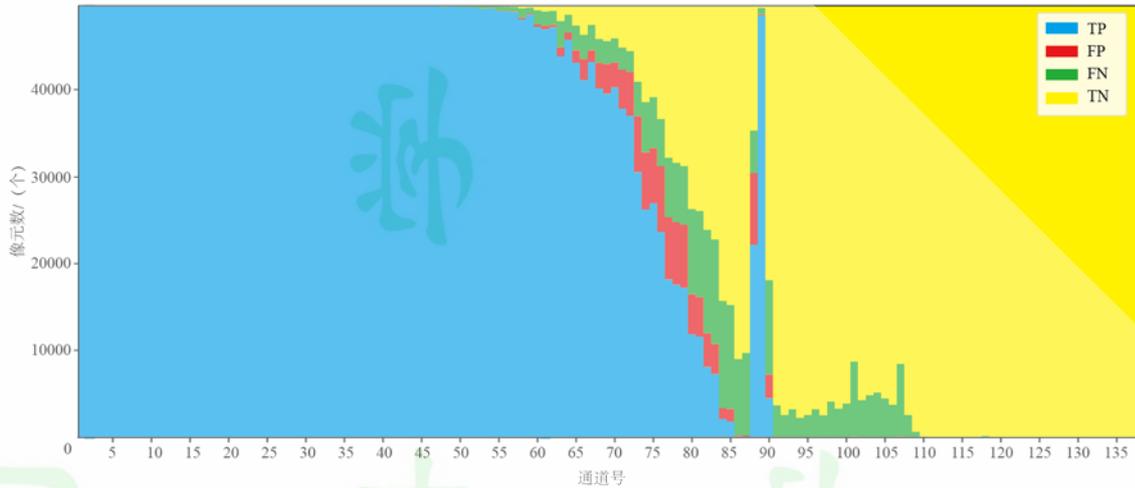


图 5 TP、FP、FN、TN 的通道统计情况图。

Figure.5 Statistical Overview of TP, FP, FN, TN Channels.

虚假晴空通道分布在波数为 $697.5\sim 721.25\text{ cm}^{-1}$ 的通道 (通道号为 63~90)，其通道高度主要分布在 $250\sim 800\text{ hPa}$ 。在波数 $697.5\sim 708.75\text{ cm}^{-1}$ (通道号为 63~79)，该部分通道高度在 $250\sim 550\text{ hPa}$ 。图 6 (e) 可看出此高度主要以卷云为主，该部分通道数量占总虚假晴空通道的 68.47%。在波数为 $709.375\sim 713.75\text{ cm}^{-1}$ 、 718.75 cm^{-1} 和 721.25 cm^{-1} (通道号为 80~85、88 和 90) 的通道，通道高度在 $600\sim 750\text{ hPa}$ 。图 6 (d) 可看出此高度的云以高积云为主，该部分通道数量占总的虚假晴空通道的 27.69%。虚假晴空情况主要由卷云和高积云导致的，其中卷云占比更高。这是由于卷云的云层薄，云中多以非球形冰晶等特征导致，在云检测时敏感度低，误判为晴空通道。在资料同化中，FP 作为同化数据的一部分，其亮温偏差直接影响同化效果。由于 FP 的均方根误差为 0.984 K ，观测亮温与背景亮温的偏差基本小于 1K ，对数值预报的影响较小。

虚假有云通道分布在波数为 $690\sim 740.625\text{ cm}^{-1}$ 的通道 (通道号为 51~107)，其通道高度分布在 $50\sim 900\text{ hPa}$ ，此高度范围几乎包含所有云类型。其中在波数为 $695.625\sim 708.125\text{ cm}^{-1}$ 和 718.75 cm^{-1} 的通道 (通道号为 60~78 和 88)，通道高度在 $150\sim 550\text{ hPa}$ ，图 6 (e) 可以看出此高度主要为卷云，该部分通道数量占总的虚假有云通道的 28.17%。波数在 $708.75\sim 712.5\text{ cm}^{-1}$ 和波数为 721.25 cm^{-1} 的通道 (通道号为 79~84 和 90)，该部分通道高度在 $550\sim 750\text{ hPa}$ ，图 6 (d) 可看出此高度主要以高积云为主，该部分通道数量占总的虚假有云通道的 27.87%。波数在 $716.25\sim 717.5\text{ cm}^{-1}$ 和波数在 $722.5\sim 742.5\text{ cm}^{-1}$ 的通道 (通道号为 86~87 和 91~108)，该部分通道高度在 $750\sim 950\text{ hPa}$ ，图 6 (a)、(b)、(c) 可看出此高度的云以层云和层积云为主，该部分通道数量占总的虚假有云通道的 40.48%。虚假有云的情况主要发生在低云、卷云和高积云，其中低云的占比最高。



图 6 CALIPSO 不同云类型的云顶气压分布情况图。图 (a) 层云云顶气压统计结果；图 (b) 层积云云顶气压统计结果；图 (c) 碎积云云顶气压统计结果；图 (d) 高积云云顶气压统计结果；图 (e) 高层云云顶气压统计结果；图 (f) 卷云云顶气压统计结果；图 (g) 深对流云云顶气压统计结果。

Fig.6 Distribution of Cloud Top Heights for Various Cloud Types. (a) Statistical Results of Cloud Top Heights for StratoCu framulus; (b) Statistical Results of Cloud Top Heights for StratoCu framulus; (c) Statistical Results of Cloud Top Heights for Cu framulus; (d) Statistical Results of Cloud Top Heights for AltoCu framulus; (e) Statistical Results of Cloud Top Heights for Cirrus; (f) Statistical Results of Cloud Top Heights for Cirrus; (g) Statistical Results of Cloud Top Heights for Deep Convective Clouds.

真实有云通道主要分布在波数为 $697.5\sim 1093.75\text{ cm}^{-1}$ 的通道 (通道号为 63~137), 不包含波数为 720 cm^{-1} 的通道, 其通道高度在 $250\sim 1000\text{ hPa}$, 几乎覆盖了所有云的高度。波数在 $751.25\sim 1093.75\text{ cm}^{-1}$ 的通道 (通道号为 109~137), 其通道高度在 1000 hPa 左右, 该部分通道数量占总的真实有云通道的 53.56% 。此高度的通道在各类云顶的下方, 因此这些通道在所有观测点均为有云通道。波数在 $722.5\sim 742.5\text{ cm}^{-1}$ 、 716.25 cm^{-1} 和 717.5 cm^{-1} 的通道 (通道号为 91~108、86 和 87), 通道高度在 $750\sim 950\text{ hPa}$, 图 6 (a)、(b)、(c) 可看出此高度的云以低云为主, 该部分通道数量占总的真实有云通道的 32.38% 。波数在 $707.5\sim 713.75\text{ cm}^{-1}$ 和 721.25 cm^{-1} 的通道 (通道号为 77~85 和 90), 高度在 $550\sim 750\text{ hPa}$, 图 6 (d) 可看出此高度主要以高积云为主, 该部分通道数量占总的真实有云通道的 9.88% 。在波数为 $697.5\sim 705.625\text{ cm}^{-1}$ 和 718.75 cm^{-1} 的通道 (通道号为 63~76 和 88), 通道高度在 $250\sim 550\text{ hPa}$, 图 6 (e) 可看出此高度主要以卷云为主, 该部分通道数量占总的真实有云通道的 3.32% 。随着检测的各云类型的高度下降, 其受云污染通道的数量不断增加。通道高度越低, 其数量越多。

4.3 不同云类型的云检测差异分析

CALIPSO 资料包含八种云类型，各云类型在结构和特征上都有明显的差异。因此在 HIRAS 的通道云检测时，各云类型检测结果的精确度和召回率存在明显的不同。



图 7 不同云类型的精确度和召回率。

Fig.7 Precision and Recall for Each Cloud Type

层云的精确度为 99.98%，召回率为 88.01%。层云的特征为云层较厚，云层比较均匀呈幕状，灰白色，好似浓雾，通常能够遮蔽太阳或月亮的光芒，其云顶气压分布在 750~1000hpa。

层积云的精确度为 99.96%，召回率为 87.36%。层积云通常出现在大气较为稳定的条件下，云顶气压分布在 750~1000hpa，其特征为云体大小、厚薄不匀，形状有较大差异，有条状、片状或团状，呈灰白色和暗灰色。

碎积云的精确度为 99.89%，召回率为 86.05%。碎积云的轮廓分明，顶部凸起，云顶气压分布在 750~1000hpa，云底平坦，云体很小，比较零散分布在天空，形状多变，为白色碎块，多为破碎了或初生的积云，其不像层积云或层云那样形成连续的云层，而是分布在天空的不同位置。

层云、层积云和碎积云的精确度确实非常高，接近 100%。而召回率相对较低，在 87%左右，这与图 5 中 FN 通道分布情况中低云的占比高是一致的。低云的精确度高而召回率低，是由于低云距地面较近，一般低于 750hPa，其受地面辐射影响大，导致在云检测时云上方通道误判为有云。而层云、层积云和碎积云的召回率依次减小，这是由于云体形态不同，云体越大、云层越厚其地面辐射影响越小。反之，地面辐射影响就越大。

高积云的精确度为 98.74%，召回率为 95.38%。高积云的特征呈薄而小的白色斑点，云顶气压主要分布在 550~800hPa，通常排列成云层，类似于鱼鳞或羽毛。高积云的云块相对较小，通常较透明，允许部分阳光透过。

高层云的精确度为 99.89%，召回率为 92.71%。高层云的云层较厚，云层均匀，顶部起伏不平，云顶气压主要分布在 550~750hPa，云底呈灰色或深灰色。由于云层很厚，在地面观测不到太阳和月亮。

高积云与高层云都属于中云，两者精确度相近，高层云的精确度略高于高积云。这是因为高层云比高积云在红外波段的透明性更低。而召回率上高层云低于高积云，这是因为高层云的云顶起伏不平，高层云的云顶辐射比高积云更强，在云检测时云顶上方通道受云顶辐射影响误判为有云通道。

卷云的精确度为 94.1%，召回率为 97.88%。卷云是由非球状冰晶组成，常呈水平层状，云顶气压主要分布在 200~550hPa，通常没有明显的垂直发展，在红外波段一般是透明的。由于卷云的对于红外波段透明性较高，红外波段能够穿透卷云，导致其精确度较低。

深对流云的精确度为 98.98%，召回率为 94.87%。深对流云云体从低层逐渐延伸至高层，云顶气压很高，云顶气压主要分布在 250~550hPa，常伴随着强烈的对流活动和剧烈的降水。由于深对流云的云层很厚，透明性低等特点，在云检测是具有较高的精确度。而召回率低是因为深对流云的云顶辐射强，导致云层上的通道受云辐射影响，将晴空通道误判为有云通道。

4.4 单层云与多层云对比分析

CALIPSO 云产品提供垂直剖面的云信息，其 CALIPSO 观测点中云信息分为单层云（观测点仅包含一种云且在垂直剖面上为连续云层）和多层云（观测点包含多种云类型），统计表明，单层云的观测点占比为 34.55%，多层云的观测点占比为 65.45%。这里多层云的云类型用多层云中最高云类型表示。表 6 给出 CALIPSO 观测中各云类型在单层云和多层云中的占比。单层云的精确度为 97.47%，单层云的召回率为 91.71%，多层云的精确度为 97.03%，多层云的召回率为 94.89%。

表 6 云类型单层云与多层云中的占比

Table.6 Percentage of single-layer and multi-layer clouds by cloud type.

云类型	层云	层积云	碎积云	高积云	高层云	卷云	深对流云
单层云	65.51%	43.49%	72.78%	40.47%	4.90%	22.24%	3.24%
多层云	34.49%	56.51%	27.22%	59.53%	95.10%	77.76%	96.76%

图 8 可以看出，层云、层积云和碎积云在单层与多层时精确度相当，但在召回率上多层云的召回率高于单层云。这是因为层云、层积云和碎积云都属于低云，距离地面近，在多层云时，下层云的出现，遮挡了来自地面辐射，从而提高了召回率。

高积云的单层与多层云精确度相当，而多层云的召回率低于单层云。高层云的单层云精确度低于多层云，单层云的召回率高于多层云。这主要是因为中云相较于低云的云顶更高，距离地面更远，受地面辐射影响更小。多层云时，下层云的出现遮挡了地面的辐射，同时受下层云辐射影响，导致多层云的召回率降低。

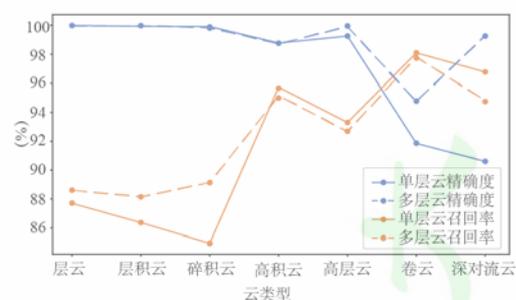


图 8 不同单层和多层云类型的精确率与召回率。

Figure.8 Precision and Recall Rates for Different Single-Layer and Multi-Layer Cloud Types.

卷云：主要以多层卷云为主，其多层云结构由卷云、中云和低云相互组合而成。多层云的精确度高于单层云的精确度，是因为卷云的透明性高，多层云时受下层云的辐射影响，提高了多层云的精确度，同时下层云的云辐射降低了多层云的召回率。

深对流云：以多层云为主，多层云的精确度高于单层云精确度，而召回率低于单层云。多层云时其透明性更低，从而提高了精确度。然而多层云时，深对流云云顶辐射强度更大，导致其召回率低于单层云。

5、结论与讨论

利用 CALIPSO 云分类数据产品对 FY3D-HIRAS 的通道云检测结果进行评估分析，得出如下结论：

(1) FY-3D HIRAS 的通道云检测的精确度为 97.19%，召回率为 93.74%，而且 FP 的亮温背景偏差的均方根误差为 0.984 K。可见 HIRAS 通道云检测，可以筛选出准确的晴空通道，为卫星资料同化提供准确的晴空信息。

(2) 根据 CALIPSO 的不同云类型分析，在精确度上中、低云和深对流云具有良好的精确度，而卷云的精确度较低。在召回率上，卷云最高，深对流云和中云次之，低云最低。在云检测时云层厚度、云层高度和对红外波段的透明性都影响着云检测结果的精确度与召回率。

(3) 对单层云与多层云分析，单层云时的精确度为 97.47%，多层云精确度为 97.03%。相较于单层云，在中、高云时，多层云的精确度得到明显提高，尤其是卷云和深对流云。单层云的召回率为 91.71%，多层云的召回率为 94.89%。多层云时低云的召回率高于单层云，而在中、高云时多层云的召回率略低于单层云。多层云在精确度和召回率不同于单层云的主要原因是在多层云时下层云遮挡了地面辐射，同时也受下层云顶辐射的影响。

本研究采用 CALIPSO 的云分类产品进行评估，受到数据时空匹配的限制，数据区域集中在中高纬度，对于云检测效果具有空间局限性。在空间匹配过程中一个 HIRAS 像元可能包含一个或多个 CALIPSO 像元。统计表明，HIRAS 像元匹配后平均包含 3.7 个 CALIPSO 像元，其中仅包含一个 CALIPSO 像元占比 5.45%，包含三个及以上像元的占比 82.34%，非混合像元（HIRAS 像元匹配一个或多个 CALIPSO 像元为相同云类型）占比 67.90%，混合像元（HIRAS 像元匹配多个 CALIPSO 像元为不同云类型）占比 32.10%。由于亮温偏差（O-B）信息在 HIRAS 像元上，因此，非混合像元的云信息为匹配后的多个 CALIPSO 像元的云叠加在一起。对于混合像元，其最终的云顶高判断结果偏向于云顶最高的云类型。这种判断方法有利于得到更为完全的晴空通道，虽然在一定程度上损失了云顶高的判断精度，但是可以为卫星资料同化提供更准确的晴空通道信息。本文虽然对云检测进行评估，但是在实际的同化系统中的应用效果还没有检验，后续将选取个例实现 HIRAS 晴空通道云检测的同化效果检验。

参考文献(References)

- 黄静, 邱崇践, 张艳武, 等. 2005. 晴空卫星红外模拟资料反演大气温度廓线的研究[J]. 高原气象, (06):913-919. Huang Jing, Qiu Chongjian, Zhang Yanwu, et al. 2005. Research on Retrieving Atmospheric Temperature Profiles from Clear Sky Satellite Infrared Simulated Data[J]. Plateau Meteorology, (06):913-919.
- 姚姝含, 官莉, 等. 2022. 基于星载红外高光谱观测用机器学习算法反演大气温度廓线[J]. 红外与激光工程, 51(08):461-472. Yao Shuhan, Guan Li, et al. 2022. Retrieval of Atmospheric Temperature and Humidity Profiles Using Machine Learning Algorithms Based on Spaceborne Infrared Hyperspectral Observations[J]. Infrared and Laser Engineering, 51(08):461-472.
- 董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 2008. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J]. 气象科技, (01):1-7. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, et al. 2008. Current Status and Development of Satellite Data Assimilation in Numerical Weather Prediction[J]. Meteorological Science and Technology, (01):1-7.
- 郑祚芳, 沈桐立, 张秀丽, 等. 2001. 气象卫星探测资料在数值天气预报中的应用[J]. 气象, 27(09): 3-8. Zheng Zuofang, Shen Tongli, Zhang Xiuli, et al. 2001. Application of Meteorological Satellite Observation Data in Numerical Weather Prediction[J]. Meteorology, 27(09): 3-8.
- 高浩, 唐世浩, 韩秀珍, 等. 2021. 风云气象卫星发展及其应用[J]. 科技导报, 39(15): 9-22. Gao Hao, Tang Shihao, Han Xiuzhen, et al. 2021. Development and Application of Fengyun Meteorological Satellites[J]. Science & Technology Review, 39(15): 9-22.
- Bouttier F, Courtier P. Data assimilation concepts and methods[M]. ECMWF, 2002.
- Pagano T S, Manning E M, Broberg S E, et al. Updates to the radiometric calibration of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)[C]//Earth Observing Systems XXVIII. SPIE, 2023, 12685: 121-133.
- Han Y, Revercomb H, Crompt M, et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(22): 12,734-12,748.
- Siméoni D, Singer C, Chalon G. Infrared atmospheric sounding interferometer[J]. Acta astronautica, 1997, 40(2-8): 113-118.
- 陆其峰, 周方, 漆成莉, 胡秀清, 徐寒列, 吴春强, 等. 2019. FY-3D 星红外高光谱大气探测仪的在轨光谱精度评估[J]. 光学精密工程, 27(10):2105-2115. Lu Qifeng, Zhou Fang, Qi Chengli, Hu Xiuqing, Xu Hanlie, Wu Chunqiang, et al. (2019). In-orbit spectral accuracy evaluation of the FY-3D infrared hyperspectral atmospheric sounding instrument [J]. *Optics and Precision Engineering*, 27(10), 2105-2115.
- 漆成莉, 周方, 吴春强, 胡秀清, 顾明剑, 等. 2019. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 27(04):747-755. Qi Chengli, Zhou Fang, Wu Chunqiang, Hu Xiuqing, Gu Mingjian, et al. (2019). Spectral calibration of the FY-3 infrared hyperspectral detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 27(04), 747-755.
- 胡秀清, 漆成莉, 吴春强, 等. 2018. FY-3D 红外高光谱垂直探测仪 HIRAS 在轨性能综合评价[C]//中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会 S9 卫星资料同化. 国家卫星气象中心;中国科学院上海技术物理研究所;北京华云星地通有限公司:1. Hu Xiuqing, Qi Chengli, Wu Chunqiang, et al. (2018). Comprehensive performance evaluation of the FY-3D infrared hyperspectral vertical sounding instrument HIRAS in orbit [C]. In Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, S9 Satellite Data Assimilation. National Satellite Meteorological Center; Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences; Beijing Huayun Xingdi Tong Co., Ltd: 1.
- 邹晓蕾, 2009. 资料同化理论和应用(上册)[M]. 北京:气象出版社:120. Zou Xiaolei. (2009). Data Assimilation Theory and Applications (Volume 1) [M]. Beijing: Meteorological Press: 120 pages.
- Carminati F, Xiao X, Lu Q, et al. Assessment of the hyperspectral infrared atmospheric sounder (HIRAS)[J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 2950.
- Goldberg M D, Qu Y, McMillin L M, et al. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 379-389.
- Eresmaa, R., 2014. Imager-assisted cloud detection for assimilation of Infrared Atmospheric Sounding Interferometer radiances. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140, 2342-2352, DOI:10.1002/qj.2304.
- Letertre-Danczak, J., 2016. The use of geostationary radiance observations at ECMWF and aerosol detection for hyper-spectral infrared sounders: 1st and 2nd years report. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report No. 40, 18 p.
- McNally, A.P. and P.D. Watts, 2003. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 129, 3411-3423.
- Dragani R, McNally P A. Operational assimilation of ozone-sensitive infrared radiances at ECMWF[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139(677):2068-2080.
- 许冬梅, 李玮, 武芳, 等. 2022. 红外高光谱 IASI 卫星资料同化对一次大风过程的影响研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 16(01):124-132. Xu Dongmei, Li Wei, Wu Fang, et al. (2022). Impact of infrared hyperspectral IASI satellite data assimilation on a severe wind event [J]. *Desert and

Oasis Meteorology*, 16(01), 124-132.

Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, et al. CALIPSO lidar description and performance assessment[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(7): 1214-1228.

Winker D M, Hunt W H, Hostetler C A. Status and performance of the CALIOP lidar[C]//*Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing*. SPIE, 2004, 5575: 8-15.

邓松, 李刚, 张华, 等. 2017. 高光谱红外云检测方案阈值的客观判定方法[J]. *气象*, 43(02):213-220. Deng Song, Li Gang, Zhang Hua, et al. (2017). Objective determination method for threshold of hyperspectral infrared cloud detection scheme [J]. **Meteorological Journal**, 43(02), 213-220.

Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19).

Geer A, Vidot J. RTTOV v13 Users Guide James Hocking and Roger Saunders Met Office, Exeter, UK &[J]. 2020.

Saunders R, Hocking J, Turner E, et al. RTTOV-13 science and validation report, EUMETSAT NWP-SAF, Met Office, Exeter, UK[J]. 2020.

Clough S A, Iacono M J, Moncet J L. LBLRTM: Line-By-Line Radiative Transfer Model[J]. *Astrophysics Source Code Library*, 2014: ascl:1405.001.

Qi C, Wu C, Hu X, et al. High spectral infrared atmospheric sounder (HIRAS): system overview and on-orbit performance assessment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4335-4352.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.

Winker D, Vaughan M, Hunt B. The CALIPSO mission and initial results from CALIOP[C]//*Lidar remote sensing for environmental monitoring VII*. SPIE, 2006, 6409: 640902.

Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323

Weisz E, Li J, Menzel W P, et al. Comparison of AIRS, MODIS, CALIPSO and CALIPSO cloud top height retrievals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17).

Eresmaa R. Cloud and Aerosol Detection Software Version 3 User Guide[J]. 2020.

Ni Z, Wu M, Lu Q, et al. Research on infrared hyperspectral remote sensing cloud detection method based on deep learning[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2023: 1-21.

WMO. Meteorology—A three-dimensional science: Second session of the commission for aerology [J]. *WMO Bull*, 1957 (4): 134—138.

刘乐, 李耀东, 等. 2016. RTTOV 快速辐射传输模式应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 44(03): 230-232. Liu Le, Li Yaodong, et al. (2016). Research progress on the application of the RTTOV fast radiative transfer model [J]. **Journal of Anhui Agricultural Sciences**, 44(03), 230-232.

周校立, 2023. 快速辐射传输模式 RTTOV 在模拟 FY-3D HIRAS 亮温中的应用 [D]. 南京信息工程大学. DOI:10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.001639. Zhou Xiaoli. (2023). Application of the fast radiative transfer model RTTOV in simulating brightness temperature of FY-3D HIRAS [D]. Nanjing University of Information Science & Technology. DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.001639.