

文章编号: 1672-8785(2021)07-0036-07

## 高光谱 GIIRS 中波通道的最优选择 及其对云检测的影响

王 根<sup>1,2,3</sup> 邵立瑛<sup>1</sup> 丁卫东<sup>1</sup> 陈 娇<sup>1</sup> 刘 倪<sup>1</sup> 谢 菲<sup>1</sup>

(1. 安徽省气象台 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中亚大气科学研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;

3. 安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪(Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS)中波通道的最优选择是有效变分同化此资料的关键技术之一, 能减少冗余信息所引起的变分同化和反演的不稳定性。将通用的熵减法(Entropy Reduction, ER)用于 GIIRS 通道优选。此外, 由于红外探测器观测容易受云影响, 在变分同化 GIIRS 亮温资料时, 需要进行云检测以获得晴空视场点或云参数信息。采用最小剩余法对 GIIRS 资料开展了云检测研究。该方法不仅能判识视场点是否有云, 而且还能得到视场点的有效云量和有效云顶气压信息。但检测精度受不同通道组合的影响, 因此基于台风“利奇马(2019)”资料进一步探讨了该影响。

**关键词:** 高光谱 GIIRS; 通道选择; 云检测; 熵减法; 台风“利奇马”

中图分类号: P407 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.07.005

## Optimal Selection of Medium-Wave Channels in Hyperspectral GIIRS and Its Influence on Cloud Detection

WANG Gen<sup>1,2,3</sup>, SHAO Li-ying<sup>1</sup>, DING Wei-dong<sup>1</sup>, CHEN Jiao<sup>1</sup>, LIU Ni<sup>1</sup>, XIE Fei<sup>1</sup>

(1. Anhui Key Lab of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Anhui Meteorological

Observatory, Hefei 230031, China; 2. Center of Central Asia Atmospheric Science

Research, Urumqi 830002, China; 3. Anhui Institute of Meteorological, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The optimal selection of medium-wave channels in the geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) of FY-4A is one of the key technologies for effective variational assimilation of the data, which can reduce the ill-posed assimilation and inversion caused by redundant information. In this paper, the general entropy reduction method is applied to GIIRS channel optimization. In addition, since the observations of infrared sounders are easily affected by clouds, cloud detection is needed to obtain field points or cloud parameter infor-

收稿日期: 2021-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41805080); 中亚大气科学研究基金项目(CAAS202003); 安徽省气象台自立项目(AHMO202007; AHMO202004)

作者简介: 王根(1983-), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 博士, 主要从事卫星资料广义同化、正则化反问题以及人工智能可解释性等方面的研究。E-mail: 203wanggen@163.com

mation in the clear sky during the variational assimilation of GIIRS bright temperature data. In this paper, the minimum residual method is used to conduct cloud detection of GIIRS data. This method can not only determine whether there are clouds, but also obtain the information of effective cloud amount and cloud top pressure at the field-of-view. Since the detection accuracy is affected by the combination of different channels, the influence based on the data of Typhoon "Lekima (2019)" is further discussed in this paper.

**Key words:** hyperspectral GIIRS; channel selection; cloud detection; entropy reduction method; typhoon "Lekima"

## 0 引言

卫星资料的应用改进了数值天气预报的初值,并提高了预报精度。卫星红外高光谱探测器通道覆盖的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  吸收带光谱区域主要提供大气温度和湿度信息。与热力学大气不稳定相关性较强的高影响天气事件很难预测,因为它们与短时间内快速发展的对流系统有关。静止卫星红外高光谱资料具有较高的时间和垂直分辨率,因此在数值预报模式中同化这类资料具有重要意义<sup>[1]</sup>。

目前极轨卫星携带的高光谱探测器有大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)、红外大气探测干涉仪 (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI) 和跨轨扫描红外探测器 (Cross-track Infrared Sounder, CrIS)。AIRS、IASI 和 CrIS 分别有 2378、8461 和 1305 个通道<sup>[2]</sup>。风云四号 A 星载 GIIRS 是目前世界上唯一一个由静止卫星携带的高光谱探测器,其 1650 个通道覆盖  $700\sim 2250\text{ cm}^{-1}$  光谱区域<sup>[3]</sup>。考虑到同化的时效性以及不同通道之间的相关性,需对 GIIRS 进行通道最优选择。通道最优选择是有效变分同化高光谱资料的关键技术之一,能减少冗余信息所引起的同化和反演不适定性<sup>[1,4]</sup>。针对卫星垂直探测仪的通道最优选择方法主要有信息熵分步迭代法(简称熵减法)<sup>[5-6]</sup>、非线性估计采样法<sup>[7]</sup>、通道得分指数法<sup>[8]</sup>、主成分累计影响系数法<sup>[9]</sup>和时序分析-奇异谱分析法<sup>[10]</sup>。综合国内外的研究成果,目前主流的通道选择方法是熵减法。

高光谱红外探测器广义质量控制的研究内

容包括通道亮温重构、通道最优选择、离群值剔除、偏差订正、云检测和资料稀疏化等<sup>[1,4]</sup>。它们的本质是相互之间有所反馈<sup>[11]</sup>,比如通道最优选择对云检测效果有一定的影响。常用的卫星红外探测器云检测方法主要有晴空视场点法(如最小剩余法<sup>[12-13]</sup>)、晴空通道法(也称 McNally and Watts 方法<sup>[14]</sup>)、云辐射订正法<sup>[1]</sup>、不同仪器云产品匹配法<sup>[15]</sup>、粒子滤波法<sup>[16]</sup>和深度学习法<sup>[17]</sup>。

本文借鉴 Eyre J R 等人<sup>[12]</sup>提出的最小剩余法,同时参考 Lee A 等人<sup>[18]</sup>将该方法用于 IASI 资料的研究成果,基于台风“利奇马(2019)”资料开展 FY-4A/GIIRS 不同中波通道组合对云检测的影响研究。

## 1 方法

### 1.1 基于熵减法的高光谱 GIIRS 中波通道最优选择

执行 GIIRS 通道最优选择时,分两步进行:第一步,建立通道黑名单;第二步,在剩余通道中采用熵减法进行通道最优选择<sup>[1,8]</sup>。其中,建立 GIIRS 中波通道黑名单的步骤如下:

(1) 剔除仪器噪声较大的通道。本文在统计 FY-4A/GIIRS 中波通道亮温偏差的均值和标准差的基础上,结合通道信噪比来剔除噪声较大的通道。

(2) 剔除辐射传输模式模拟误差较大的通道。

(3) 考虑到地表发射率等较难确定,剔除权重函数峰值位于地表的通道<sup>[9]</sup>。

(4) 剔除其它在实际选择时需列入黑名单的 GIIRS 通道(如导致变分同化极小化迭代

收敛失败的通道)<sup>[8]</sup>。

从信息论的角度出发, 通道选择原则应在给定被选通道数量的条件下, 使得变分反演或同化所选通道子集后得到较好的分析场或者提高预报的精度<sup>[1]</sup>。本文基于熵减法进行 GIIRS 通道最优选择研究。

在剔除 GIIRS 黑名单通道后的剩余通道中, 采用分步迭代法找到使背景误差协方差减幅最大的通道, 即选择 ER 最大值所对应的通道<sup>[1,6]</sup>:

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_{i-1} \left[ \mathbf{I} - \frac{\mathbf{h}_i (\mathbf{A}_{i-1} \mathbf{h}_i)^\top}{1 + (\mathbf{A}_{i-1} \mathbf{h}_i)^\top \mathbf{h}_i} \right] \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{A}_i$  表示选择  $i$  个通道之后更新的分析误差协方差矩阵, 初始  $\mathbf{A}_0$  设定为矩阵  $\mathbf{B}$ ;  $\mathbf{h}_i$  表示对应通道的标准化 Jacobian 矩阵。

当熵的变化幅度不再显著增加或者所选通道组合中的通道个数达到一开始设定的数量时, 停止通道选择。ER 的定义为<sup>[8]</sup>

$$ER = \frac{1}{2} \ln[\det(\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1})] \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  分别表示分析和背景误差协方差矩阵。

## 1.2 基于最小剩余法的卫星红外亮温云检测

最小剩余法的具体执行过程是卫星红外探测器通道组合优化求解的过程<sup>[12-13,18]</sup>。根据辐射传输理论, 卫星红外探测器通道  $k$  的模拟辐射值可以写成:

$$R_k = (1 - N_e) R_k^{clr} + N_e R_k^{cld}(p_{c,k}) \quad (3)$$

式中,  $N_e$  表示有效云量;  $R_k^{clr}$  表示晴空辐射;  $R_k^{cld}(p_{c,k})$  表示云顶气压为  $p_{c,k}$  时的有云辐射模拟; 此处假定如果视场点有云, 则其仅为单层云。可通过普朗克函数将辐射值转换为亮温值。

将通道  $k$  的观测辐射值  $R_k^o$  和模拟辐射值  $R_k$  的偏差定义为

$$\delta_k = R_k^o - R_k = (R_k^o - R_k^{clr}) - N_e (R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clr}) \quad (4)$$

通过极小化最小剩余法的目标泛函可以得到有效云量  $N_e$  和有效云顶气压  $p_{c,k}$ , 则有

$$\sum_k \delta_k^2 = \sum_k [(R_k^o - R_k^{clr})$$

$$- N_e (R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clr})]^2 \quad (5)$$

极小化求解有效云量和有效云顶气压时分两步进行, 具体如下:

(1) 给定有效云顶气压, 并将其代入式(5)进行极小化计算后得到  $N_e$ :

$$N_e = \left\{ \sum_k (R_k^o - R_k^{clr}) [R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clr}] \right\} / \left\{ \sum_k [R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clr}]^2 \right\} \quad (6)$$

(2) 将  $N_e$  代入式(5)进行极小化计算后得到有效云顶气压。

需要说明的是: 当  $N_e < 0.1$  时, 标记该视场点为晴空视场点, 则完成了 FY-4A/GIIRS 中波通道视场点云检测过程; 为了检验最小剩余法的效果, 将此处有效云量和有效云顶气压用于 FY-4A/GIIRS 中波通道云区亮温模拟。

## 2 FY-4A/GIIRS 通道最优选择及其对云检测的影响分析

### 2.1 数据及模式说明

本文的背景场资料来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的最终全球资料同化系统。FY-4A/GIIRS 资料和 FY-4A 先进地球同步辐射成像仪(Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI)全圆盘云检测云膜(Cloud Mask, CLM)产品<sup>[19]</sup>来源于我国国家卫星气象中心的官方网站(<http://satellite.nsmc.org.cn>)。全球降水测量(Global Precipitation Mission, GPM)的多星集成反演(Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM, IMERG)降水产品数据来源于美国国家宇航局的官方网站(<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>)。

本文采用 Tiros 业务垂直探测器辐射传输模式(Radiative Transfer for Tiros Operational Vertical Sounder, RTTOV)<sup>[20]</sup>进行 FY-4A/GIIRS 通道亮温模拟。

### 2.2 FY-4A/GIIRS 通道最优选择试验

基于熵减法选择的通道组合结果受观测和

背景误差协方差矩阵的影响<sup>[6]</sup>。本文的背景误差协方差矩阵取自我国全球/区域同化和预报增强系统 (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System, GRAPES)<sup>[6]</sup>。GIIRS 观测误差通过统计观测与模拟亮温偏差得到。图 1 所示为建立通道黑名单后基于熵减法得到的 GIIRS 中波最优通道组合 (标记为“星形”)。通道组合的总数量设定为 100。将 RT-TOV 模拟中纬度夏季大气廓线得到的模拟亮温作为图 1 中的背景亮温。

### 2.3 云检测试验设置

为了便于介绍, 以台风“利奇马”高光谱 GIIRS 加密区为例, 设置以下对比试验: (1)

采用熵减法得到 GIIRS 通道最优组合, 并将通道总数设定为 100; (2) 在剔除黑名单的剩余通道中随机选取 300 个通道; (3) 结合熵减法和通道权重函数峰值法优选 45 个通道。最后, 基于最小剩余法开展不同通道组合对视场点的有云检测, 并进行云区亮温模拟的影响研究。

### 2.4 高光谱 GIIRS 云检测试验分析

图 2 所示为 GIIRS 通道 1029 在台风“利奇马”加密区亮温 (品红色标记为台风运动轨迹)、GPM IMERG 降水产品、AGRI 云图以及基于 AGRI-CLM 产品的 GIIRS 云量分布。采用双线性插值法将 AGRI-CLM 产品匹配至 GIIRS 视场点。

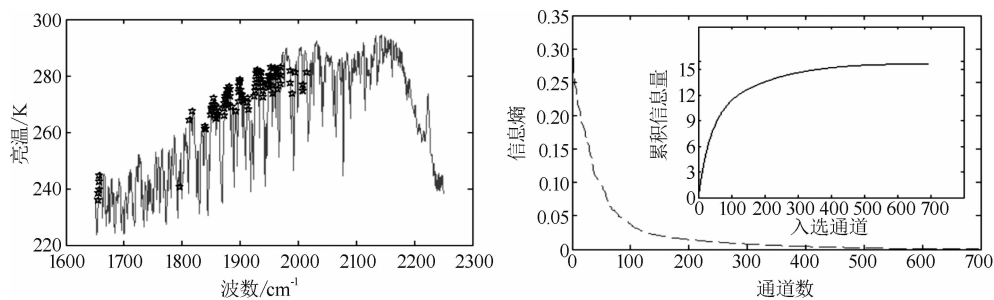


图 1 基于熵减法的 GIIRS 中波通道最优组合和迭代变化

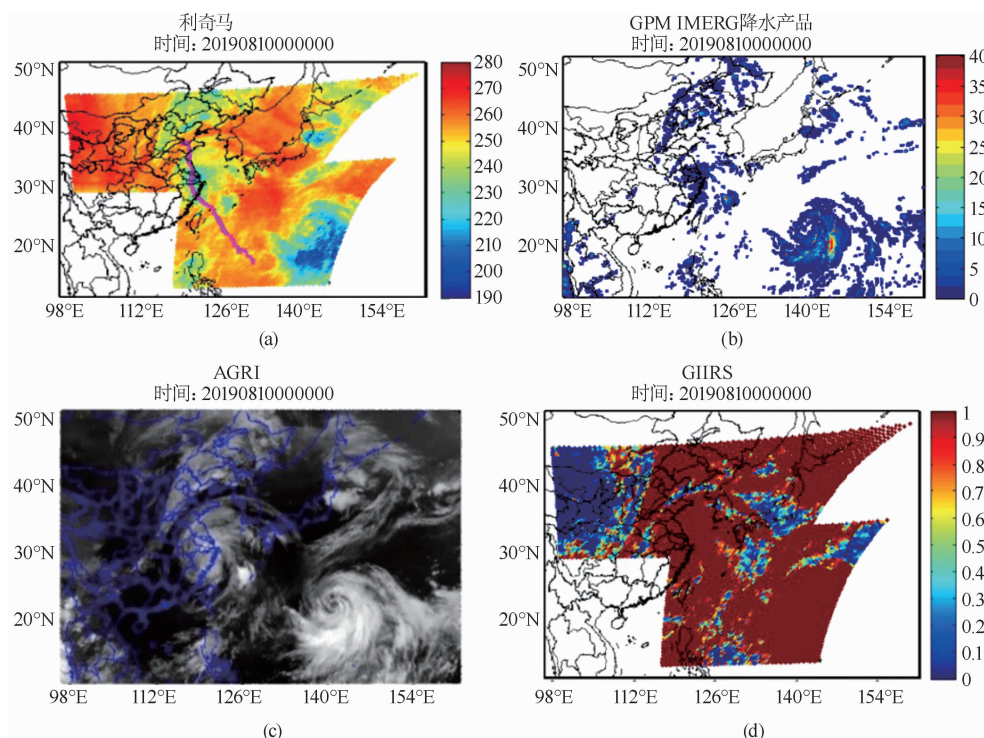


图 2 (a) GIIRS 加密区; (b) GPM IMERG 降水产品; (c) AGRI 云图; (d) 基于 AGRI-CLM 产品的 GIIRS 云量分布

从图 2 中可以看出, GIIRS 观测亮温与 GPM IMERG 降水产品以及 AGRI 云图分布具有较好的一致性。此处基于 GIIRS 云量的判识能够得到绝对晴空视场点(图中色标标记为“0”)。但是与整个加密区的视场点相比,晴空视场点的数量较少。考虑到高影响天气伴随着云的产生<sup>[21]</sup>, 如果仅使用晴空视场点的亮温信息, 则会丢失一些较为关键的有用信息。因此, 本文采用最小剩余法进行 GIIRS 云量反演, 进一步依据  $N_c < 0.1$  来判识视场点是否有云。

图 3 所示为 2019 年 8 月 10 日 00 时 00 分基于不同通道组合采用最小剩余法得到的有效云量分布以及“无云”条件下 GIIRS 通道 1026 对整个加密区的模拟和观测亮温散点分布。其中, 色标“0”标记为晴空; 色标越暖, 云量值越大。此处将“无云”模拟定义为所有视场点在亮温模拟时均被视作晴空视场点, 即“晴空模拟”。

由图 3 可知, 基于 FY-4A/GIIRS 不同通道组合得到的有效云量分布大体一致, 但在某些视场点上有所不同。如果不考虑无云条件下的“晴空”亮温模拟, 则背景场模拟亮温偏暖、观测亮温偏冷, 存在由云带来的负偏差。

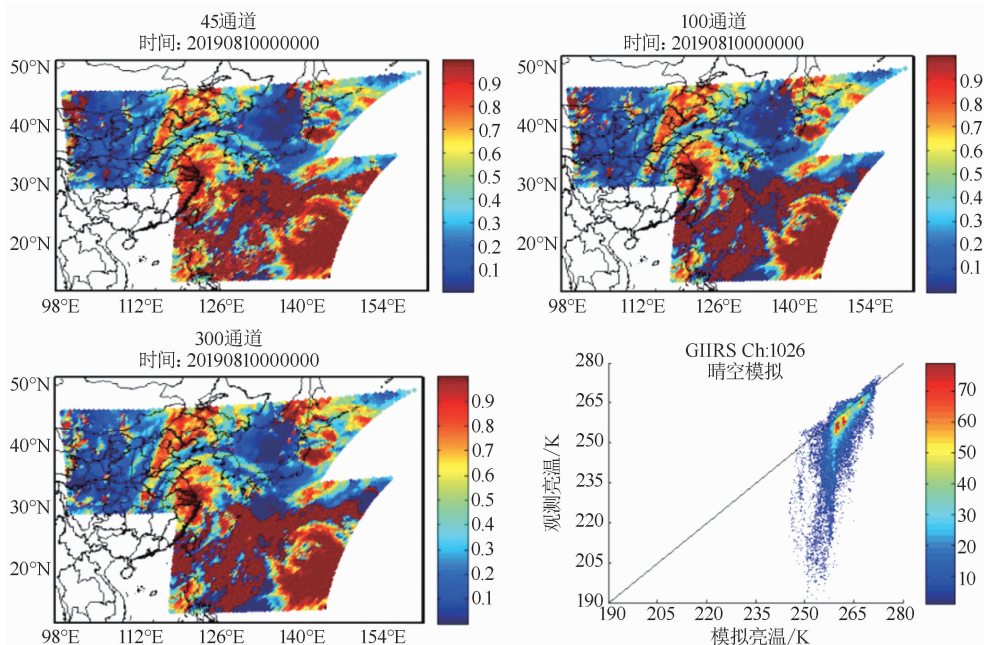


图 3 基于不同通道组合得到的有效云量以及通道晴空模拟与观测亮温散点分布

本文分析了不同通道组合对用最小剩余法得到的云参数结果的影响。采用有云亮温模拟的具体执行过程如下: 将在不同通道组合(45、100 和 300 个通道)下采用最小剩余法得到的云参数信息提供给 RTTOV 来模拟 GIIRS 亮温。图 4 所示为这三种组合下通道 1026 的有云模拟亮温与观测亮温散点分布。

由图 4 可知, 当考虑云参数模拟 GIIRS 通道亮温时, 有云模拟亮温与观测亮温的效果较好, 但整体亮温存在偏差。究其原因有两个: (1) GIIRS 资料未进行偏差订正; (2) 本文采用最小剩余法得到的视场点云信息仅为单层云, 可能有些视场点存在多层云部分重叠的现象。在此个例中, 亮温偏差较大的视场点位于台风密闭云区部分(图略)。

### 3 总结与展望

考虑到通道最优选择和云检测对 FY-4A/GIIRS 的重要性, 本文将通用的熵减法用于 GIIRS 通道优选。在通道选择的基础上, 采用最小剩余法对 GIIRS 资料进行云检测研究后可知, 不同通道组合对视场点是否有云的判识有一定的影响。将云检测得到的云参数用于 GIIRS 有云亮温模拟后可知, 除台风密闭云区外, 有云模拟亮温与观测亮温较为一致。

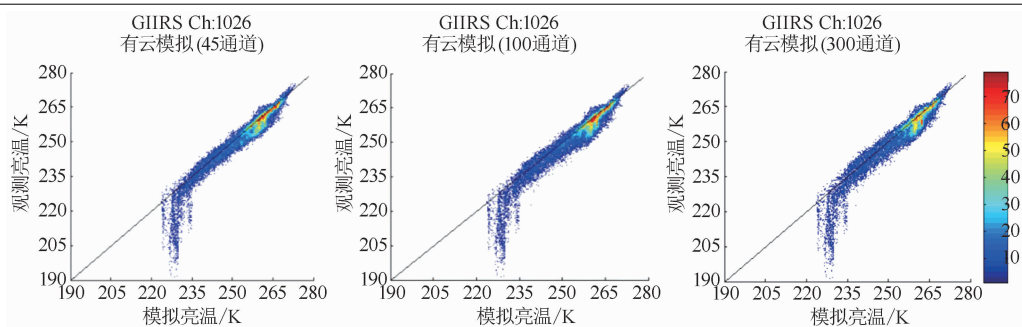


图 4 有云模拟亮温与观测亮温分布

本文的不足之处是研究个例较少。后期将进行大量试验研究以及 GIIRS 资料的偏差订正(包括阵列偏差订正), 并将进一步把本文方法推广应用到 GRAPES 数值天气预报模式中, 从而提高极端和高影响天气的预报精度。

### 参考文献

- [1] 王根. 卫星资料广义同化、大气科学中的数学反问题与人工智能应用——学习笔记 [M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [2] Li J, Han W. A step forward toward effectively using hyperspectral IR sounding information in NWP [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, **34**: 1263–1264.
- [3] Yang J, Zhang Z, Wei C, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, FengYun 4 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, **98**(8): 1637–1658.
- [4] 王根, 张华, 杨寅. 高光谱大气红外探测器 AIRS 资料质量控制研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2017, **32**(2): 139–150.
- [5] Rabier F, Fourrie N, Chaf D. Channel selection methods for infrared atmospheric sounding interferometer radiances [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, **128**(581): 1011–1027.
- [6] 尹若莹, 韩威, 高志球, 等. 基于 FY-4A 卫星探测区域模式背景误差和观测误差估计的长波红外通道选择研究 [J]. *气象学报*, 2019, **77**(5): 898–910.
- [7] Fowler A. A sampling method for quantifying the information content of IASI channels [J]. *Monthly Weather Review*, 2017, **145**(2): 709–725.
- [8] Noh Y, Sohn B, Kim Y, et al. A new infrared atmospheric sounding interferometer channel selection and assessment of its impact on Met Office NWP forecasts [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, **34**(11): 1265–1281.
- [9] 王根, 陆其峰, 张建伟, 等. 高光谱大气红外探测器通道选择方法及试验研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, **29**(5): 795–802.
- [10] Yu P P, Shi C X, Yang L, et al. A new temperature channel selection method based on singular spectrum analysis for retrieving atmospheric temperature profiles from FY-4A/GIIRS [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, **37**(7): 735–750.
- [11] Auligné T, McNally A P. Interaction between bias correction and quality control [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, **133**(624): 643–653.
- [12] Eyre J R, Menzel W P. Retrieval of cloud parameters from satellite sounder data: A simulation study [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, **28**(4): 267–275.
- [13] 王根, 华连生, 刘惠兰, 等. 基于最小剩余法的 FY-3B/IRAS 资料云检测研究 [J]. *红外*, 2015, **36**(9): 15–20.
- [14] McNally A P, Watts P D. A cloud detection algorithm for high spectral-resolution infrared sounders [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, **129**(595): 3411–3423.
- [15] 董超华, 李俊, 张鹏, 等. *卫星高光谱红外大气遥感原理和应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [16] Xu D M, Auligné T, Descombes G, et al. A

- method for retrieving clouds with satellite infrared radiances using the particle filter [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(11): 3919–3932.
- [17] Zhang Q, Yu Y, Zhang W M, et al. Cloud Detection from FY-4A's Geostationary Interferometric Infrared Sounder Using Machine Learning Approaches [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(24): 3035.
- [18] Lee A, Sohn B J, Pavelin E, et al. Assessment of cloud retrieval for IASI 1D-var cloudy-sky assimilation and improvement with an ANN approach [J]. *Weather and forecasting*, 2020, **35**(4): 1363–1380.
- [19] Min M, Wu C Q, Li C, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(4): 708–719.
- [20] Saunders R, Hocking J, Turner E, et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, **11**(7): 2717–2737.
- [21] McNally A P. A note on the occurrence of cloud in meteorologically sensitive areas and the implications for advanced infrared sounders [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, **128**(585): 2551–2556.

---

(上接第 25 页)

- [18] Ohira M, Deguchi H, Tsuji M, et al. Novel Waveguide Filters with Multiple Attenuation Poles Using Dual-behavior Resonance of Frequency-selective Surfaces [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2005, **53**(11): 3320–3326.
- [19] Marcuvitz N. *Waveguide Handbook* [M]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [20] Lee C K, Langley R J. Equivalent-circuit Models for Frequency-selective Surfaces at Oblique Angles of Incidence [J]. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, 2008, **132**(6): 395–399.