

文章编号: 1672-8785(2015)09-0015-06

# 基于最小剩余法的 FY-3B/IRAS 资料云检测研究

王根 华连生 刘惠兰 张苗苗

(安徽省气象信息中心, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 由于红外探测器的观测易受云的影响及快速辐射传输模式对云亮温的模拟不精确, 在同化风云三号 B 星 (Feng Yun-3B) 红外分光计 (Infrared Atmospheric Sounder, IRAS) 的亮温资料时, 首先需要进行云检测, 以获得晴空视场点或晴空通道信息。基于最小剩余法 (Minimum Residual Method, MRM) 对 IRAS 资料进行了云检测研究, 该方法不仅能判识视场点是否有云, 还能得到视场点的云参数 (有效云量)。同时, 采用 FY-2E 卫星云图对云检测效果进行了验证。结果表明, 将该方法用于 IRAS 资料云检测是可行的。

**关键词:** 风云三号 B 星; 红外分光计; 云检测; 最小剩余法; 卫星云图

中图分类号: P407 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.09.004

## Study of FY-3B/IRAS Data Cloud Detection Based on Minimum Residual Method

WANG Gen, HUA Lian-sheng, LIU Hui-lan, ZHANG Miao-miao

(Anhui Meteorological Information Centre, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Since infrared detectors' observation is easy to be affected by cloud and the simulation of cloud brightness temperature by a fast radiative transfer mode is not precise, cloud detection should be carried out first in order to obtain clear field-of-view or clear channel information when the bright temperature data from the Infrared Atmospheric Sounder (IRAS) onboard FY-3B satellite are assimilated. The cloud detection study is carried out on the data from IRAS on the basis of the Minimum Residual Method (MRM). The method not only can distinguish if there exists cloud in the field-of-view, but also can obtain the cloud parameters (effective cloud fraction) in the field-of-view. At the same time, the cloud detection effectiveness is verified by the cloud images from FY-2E satellite. The result shows that the method is feasible for IRAS data cloud detection.

**Key words:** FY-3B satellite; infrared atmospheric sounder; cloud detection; minimum residual method; satellite cloud image

## 0 引言

数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 是一个初 / 边值问题。新型探测资料的应用, 尤其是卫星资料的使用极大地改进了 NWP 的初值, 提高了预报精度<sup>[1]</sup>。红外探测器的光谱

通道主要覆盖 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 吸收带, CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 吸收带主要提供大气温度和湿度信息。温度和湿度是积分 NWP 的模式变量, 因此在 NWP 中同化卫星红外探测器的通道亮温具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2015-08-06

基金项目: 淮河流域气象开放研究基金 (HRM201407); 安徽省气象局科技发展基金 (KM201507、RC201506)

作者简介: 王根 (1983-), 男, 江苏姜堰人, 博士, 主要从事卫星资料同化、GRAPES 数值模拟和多源数据融合等方面的研究。 E-mail: 203wanggen@163.com

风云三号气象卫星是我国第二代极轨气象卫星的首发星，携带包括用于 NWP 的微波温度计、微波湿度计和 IRAS 共 11 个探测器。其中 IRAS 有 20 个红外通道<sup>[2]</sup>。

云在时间和空间分布上具有极大的不确定性，其形态也因高度、厚度、种类不同而千变万化。而且，辐射传输模式对有云视场点的通道亮温模拟效果不好，因此所模拟的通道亮温在有云视场点的偏差较大。资料变分同化是基于误差服从高斯分布这一假定，当资料中存在云信息时，偏差概率密度分布呈现一定的负偏，具有“拖尾效应”，从而需要对红外资料的云检测进行研究<sup>[3]</sup>。卫星通道亮温偏差是观测亮温(O)与模拟亮温(B)之差，定义为 O-B。而模拟亮温是通过把背景场(文中采用 National Centers for Environmental Prediction(NCEP) 的 FNL 资料)输入到辐射传输模式(文中采用欧洲中心 Radiative Transfer for TIROS-N Operational Vertical Sounder(RTTOV)<sup>[4]</sup>)计算得到。

目前，国内外关于红外探测器云检测方法的研究主要有四种：基于“晴空视场点”、基于“晴空通道”、“云辐射订正”和不同仪器云产品的匹配。基于晴空视场点的云检测是寻找绝对晴空的视场点，当通道组合中的某个通道在某个视场点被判断有云，剔除所有通道在此视场点的观测<sup>[5]</sup>。常用方法有 CO<sub>2</sub> 分层法<sup>[6,7]</sup>、最小剩余法<sup>[8]</sup>和局部最小方差发射率法<sup>[9]</sup>。基于“晴空通道”的云检测，则是根据不同通道亮温对云的敏感性不同指定通道“高度”，类似于通道的权重函数，然后进行通道排序，寻找不受云影响的晴空通道，具有代表性的是 ECMWF 方法<sup>[10,11]</sup>。另外有学者采用不同仪器间云产品的匹配以得到晴空视场点<sup>[12,13]</sup>。

目前，国际上开展了一系列红外亮温资料的有云同化研究。通过一些算法(如 CO<sub>2</sub> 分层法)得到视场点的云信息<sup>[14]</sup>。但大多数算法假设云是各向同性的，这种假设不能满足大部分个例分析的要求。为了充分利用部分受云影响的辐

射，Wang 和 Zhang 提出了广义变分同化云参数的方法<sup>[3]</sup>。

考虑到目前我国自主研发的 GRAPES(Globe and Regional Assimilation and Prediction System)<sup>[15]</sup>模式还未开展有云资料同化工作，本文旨在得到 FY-3B/IRAS 的晴空视场点，基于 MRM<sup>[8]</sup> 进行 IRAS 云检测研究，与可见光红外扫描辐射计(Visible and InfraRed Radiometer, VIRR) 云检测产品进行比较<sup>[12]</sup>。并采用 FY-2E 静止卫星红外云图进行结果验证。

本文结构如下：第一部分，介绍 IRAS 云检测方法；第二部分，进行 IRAS 不同云检测方法效果的验证；第三部分，总结与展望。

## 1 IRAS 云检测方法介绍

### 1.1 基于 VIRR 匹配的 IRAS 云检测方法介绍

曹广真等通过查表方法进行了 FY-3A 气象卫星可见光红外扫描辐射计 VIRR 云检测产品与红外分光计 IRAS 之间的匹配，具体操作步骤参见文献[12]。VIRR 选择的通道避开了强的气体吸收带，所选的红外大气窗区通道主要用于获取下垫面和云的信息。VIRR 红外通道对下垫面辐射的变化较敏感，但对吸收气体如 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 吸收带等的辐射不敏感，不能反映气体吸收带的辐射变化情况。IRAS 探测器通道均匀地分布在较宽的红外光谱区，利用多个通道进行观测可以反映大气层顶的长波辐射。由于红外探测器易受云的影响，FY-3B/IRAS 不能探测云顶以下的大气温度和湿度垂直分布信息，也不能将与云相似的地物特征如积雪分开。IRAS 观测主要用于大气温度、湿度廓线的反演，而 VIRR 观测主要用于地表特征参数的提取<sup>[12]</sup>。目前，FY-3B/IRAS 大气温度和湿度廓线反演采取的云检测方法是：把 VIRR 云检测产品匹配到 IRAS 像元视场点，当 IRAS 视场点云量小于 0.01 时标记为“晴空视场点”。

### 1.2 基于 MRM 的 IRAS 云检测研究

MRM 采用 IRAS 通道辐射组合的方式实现(至少包含 2 个通道)。由辐射传输理论可知，卫星探测器的  $k$  通道观测到的辐射值可以写为<sup>[3,8]</sup>

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

式中,  $N_e$  是有效云量,  $R_k^{clear}$  是晴空辐射,  $R_k^{cld}(p_{c,k})$  为云顶气压在  $p_{c,k}$  的有云辐射; 此处假定为单层云。对于不透明云,  $N_e$  代表有效云量; 对于半透明云,  $N_e$  表示有效云量和云发射率的乘积。文中只考虑云的发射和吸收, 不考虑云的反射, 并假定不同通道的  $N_e$  值不同, 且半透明云的发射率独立于波长。

给定大气温度、湿度和地表信息(信息来自于所选用的背景场), 使用辐射传输模式模拟晴空和给定气压层的有云辐射。观测辐射值  $R_k^{meas}$  和模拟辐射值  $R_k$  偏差定义为

$$\begin{aligned}\delta_k &= R_k^{meas} - R_k \\ &= (R_k^{meas} - R_k^{clear}) - N_e(R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clear})\end{aligned}\quad (2)$$

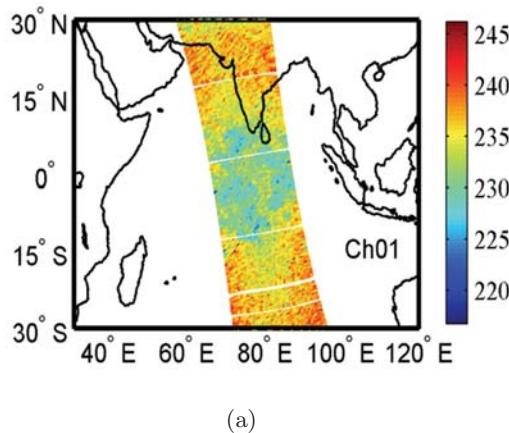
极小化以下的目标泛函, 得到有效云量  $N_e$  和云顶气压  $p_{c,k}$ :

$$\sum_k \delta_k^2 = \sum_k [(R_k^{meas} - R_k^{clear}) - N_e(R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clear})]^2 \quad (3)$$

有效云量和云顶气压的极小化求解分两步进行: (a) 对于给定云顶气压, 极小化目标泛函(3), 得到有效云量  $N_e$ :

$$N_e = \frac{\sum_k (R_k^{meas} - R_k^{clear})[R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clear}]}{\sum_k [R_k^{cld}(p_{c,k}) - R_k^{clear}]^2} \quad (4)$$

(b) 把有效云量  $N_e$  代入目标泛函(3)极小化, 得到云顶气压(Cloud Top Pressure, CTP)。最小剩余法能得到每个视场点的有效云量  $N_e$  和云顶气压  $p_{c,k}$ 。



## 2 IRAS 不同云检测方法的效果验证

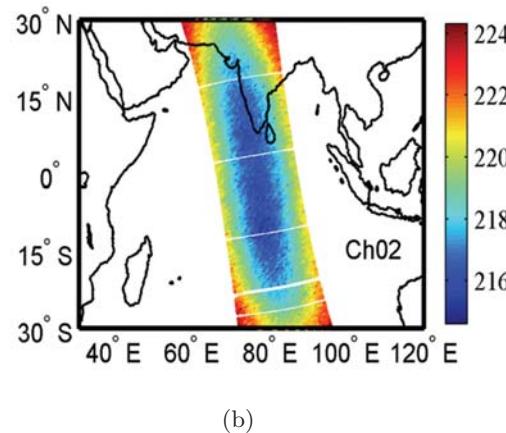
FY-3B/IRAS 实际观测的亮温 L1c 数据来自国家卫星气象中心数据室。FY-2E 数据来源于国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网。

下面采用 MRM 法对 FY-3B/IRAS 的云参数进行研究。首先, 以 2012 年 12 月 26 日 06 时为例做简单的说明, 把 MRM 法和 VIRR 匹配的云结果进行比较。采用 FY-2E 静止卫星云图作为最终云检测效果的检验, 该时段正好是 FY-3B/IRAS 和 FY-2E 的覆盖区域。

因 FY-3B/IRAS 的通道权重函数峰值不同, 探测到的大气分层信息也不同。对于高层通道, 不易受云的影响(如平流层通道 1 和 2, 峰值最大贡献层分别在 30 hPa 和 60 hPa), 对于一些窗口通道(如通道 8 和 20)则不仅受云的影响, 也受地表信息的影响。

图 1 给出了研究区域中 FY-3B/IRAS 代表性通道观测的亮温分布。其中, 不同颜色代表 IRAS 通道观测亮温的不同值, 横坐标为经度, 纵坐标为纬度。

从图 1 中可看出, 在研究区域内, 高层通道 1 和 2 亮温值的变化幅度较平缓。从中低层通道 7 和 8 可以看出, 此研究区域存在晴空和有云视场点。对于近地面通道 19 和 20, 云信息在 IRAS 通道观测的亮温分布图上表现得较明显。这说明 IRAS 不同通道的亮温对云判别具有较好的指示作用。



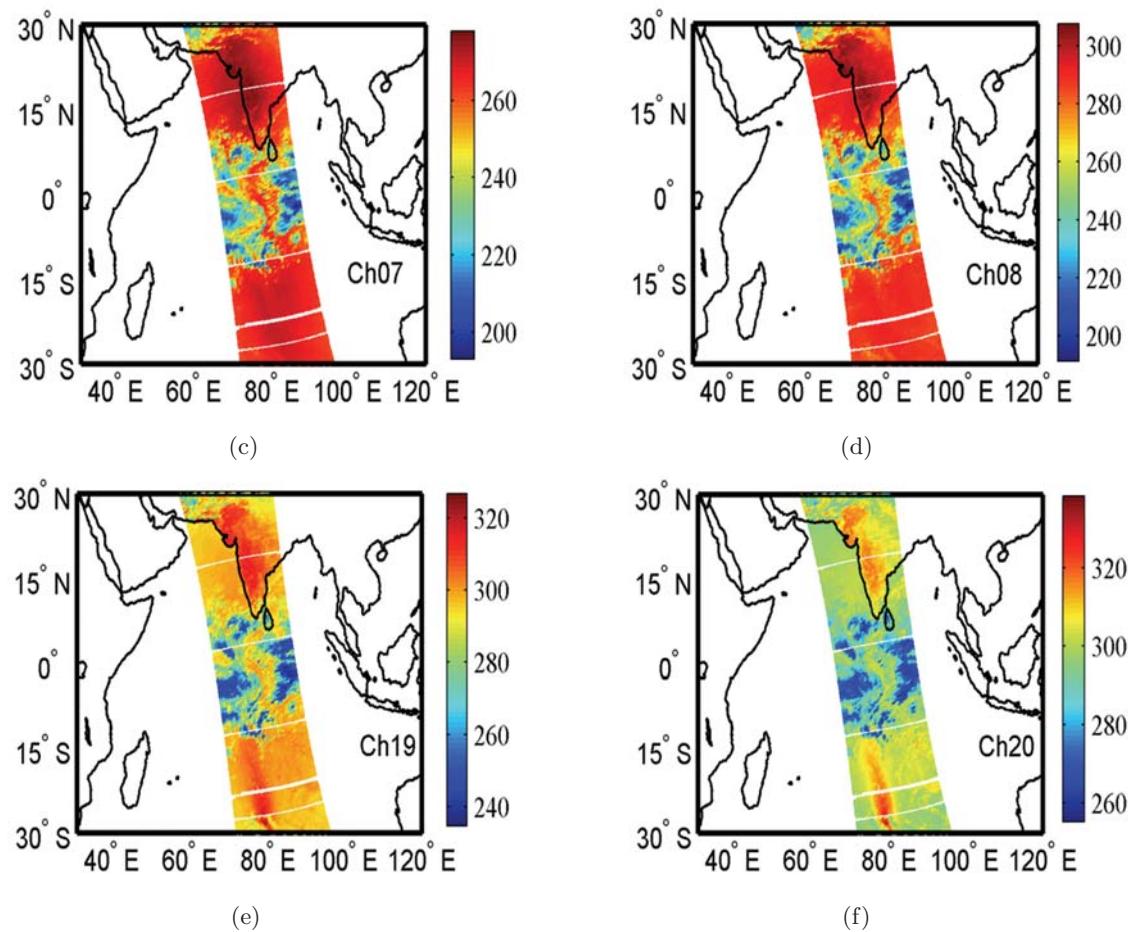


图 1 FY-3B/IRAS 通道 1、2、7、8、19 和 20 的观测亮温

本研究采用 FY-2E 静止卫星的云图对最终云检测效果进行检验, 如图 2 所示。图 2 给出了相应时次 (2012 年 12 月 26 日 06 时) 的卫星云图信息, 其中图 2(a) 是 FY-2E 整个覆盖区域的圆

盘图, 黑色方框是本文的研究区域; 图 2(b) 为信息参考图。在图 2(b) 中用黑色方框标出的一朵云作为后期 VIRR 和最小剩余法云判别的重点研究区域。

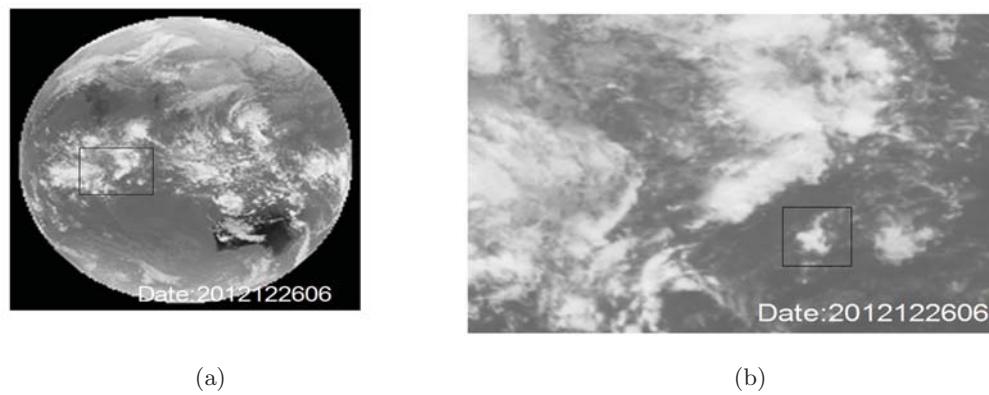


图 2 FY-2E 云图信息 (左图 A 为整个圆盘图, 右图 B 为 A 图中的黑色区域)

从图 2(b) 中可以看出, 有 1 朵云比较突出(图中用黑框标出)。为进一步突出图 2(b) 方框所标识的云信息, 文中采用图像处理技术中的模糊 C- 均值聚类(Fuzzy c-means clustering, FCM) 算法

进行聚类分析<sup>[16,17]</sup>, 具体执行过程中分高、中和无云三类进行处理, 如图 3 所示。图 3 为 FCM 聚类结果, 其中, a.3 中用红色框标识的云将作为后期不同云检测方法重点比较的视场点。

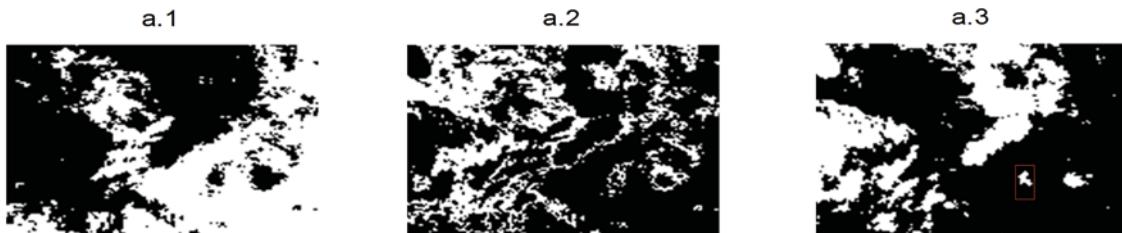


图 3 基于模糊 C- 均值聚类的 FY-2E 云图聚类信息

MRM 法执行过程如下:

(1) 极值检测, 如果某通道的观测或模拟亮温超出给定的阈值(150~350 K), 则将此通道所在的视场点亮温标记为“错误资料”。

(2) 对错误资料剔除之后, 分别将 IRAS 前 20 个通道观测亮温(O)与 RTTOV 模拟亮温(B)做差(O-B)比较。

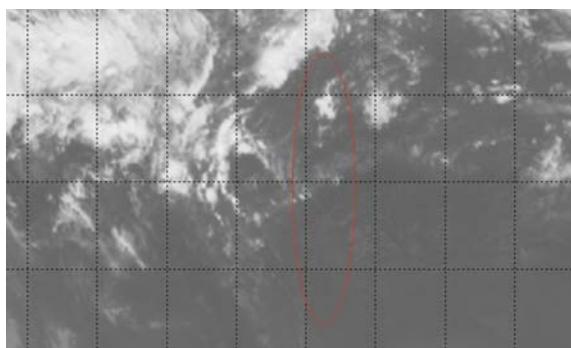
(3) 极小化目标泛函式(3), 分别得到有效云量和云顶气压。

考虑到 MRM 法把云假定为单层云, 而实际较多情况下同一视场点会出现多层云重叠的现象。MRM 法得到的是数学解而非物理理解, 因此文中只给出了 MRM 法的有效云量信息, 这与 VIRR 云产品匹配到 IRAS 只提供云量信息相一致。

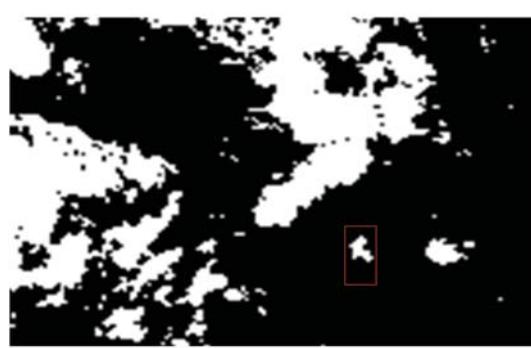
把基于 VIRR 云产品和 MRM 法的云量效果图进行比较, 如图 4 所示。对于 VIRR 云产品,

如果某个视场点的有效云量小于 0.01, 则将此视场点标记为“晴空视场点”。需要说明的是, FY-3B/IRAS 通道观测亮温 L1c 格式数据包括了各个视场点的云量信息, 通过查表进行 VIRR 云产品与 IRAS 视场点之间的匹配, 可得到 IRAS 视场点云量信息<sup>[12]</sup>。其中, a-MRM 标记为最小剩余法, b-VIRR 标记为 VIRR 云产品; 色标表示云量信息, 0 代表无云, 1 为完全有云, 0~1 为部分有云。横坐标为经度, 纵坐标为纬度。所选区域与 FY-2E 静止卫星的云图空间匹配(时间稍有延迟, 所选月份为 12 月)。

从图 4 中可以看出, 基于最小剩余法的云参数计算方法可行。从 FY-2E 静止卫星云图中可以看出(图中标记为红色椭圆), 此区域中只有一朵云, 其余为晴空视场点; 从聚类分析的结果图中也可以得到, 而 VIRR 云产品存在很多视场点的误判。



(a)



(b)

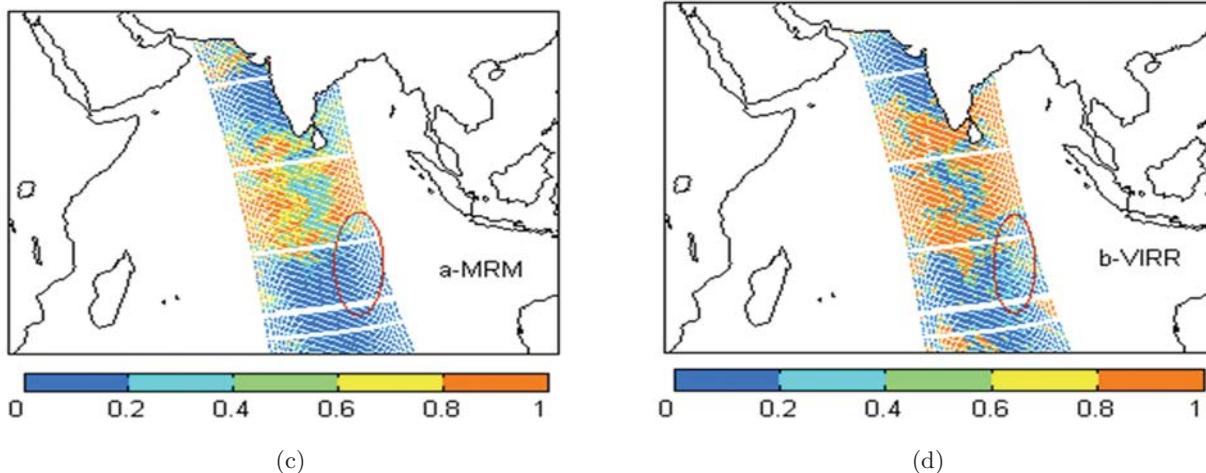


图4 VIRR 云产品和最小剩余法得到的云量比较

通过 MRM 法得到云量信息，假设云量超过某个阈值，则标记此视场点有云（完成了 IRAS 资料的云检测过程）。后期在对 IRAS 亮温资料变分进行同化的过程中，如果此视场点有云，则此视场点资料不进入变分同化系统。MRM 法不仅可以得到晴空和有云视场点，还能提供视场点云参数信息，但云高的研究是一个难点（这与目前静止卫星反演云迹风时高度指定类似），在未来的工作中将进行云高的研究。

### 3 总结与展望

考虑到红外探测器易受云的影响以及目前快速辐射传输模式对红外探测器的有云辐射模拟效果不佳，因此在变分同化红外资料前需要进行云检测。基于 MRM 法进行了 FY3B/IRAS 资料的云检测研究，并与可见光红外扫描辐射计 VIRR 云产品匹配到 IRAS 视场点进行了比较。参考 FY-2E 云图可知，将 MRM 法用于 IRAS 资料云检测是可行的。但文中也有不足之处，所选个例较少，后期需要进行大量个例研究，并把 MRM 法加入到 GRAPES 模式中对 IRAS 晴空资料进行变分同化。

### 参考文献

- [1] Rabier F, Fourrie N, Chafai D, et al. Channel Selection Methods for Infrared Atmospheric Sounding Interferometer Radiances [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, **128**(581) : 1011–1027.
- [2] 王根, 陆其峰, 刘辉, 等. FY-3B 红外分光计亮温观测模拟偏差订正的初步研究 [J]. 红外, 2014, **35**(1):18–23.
- [3] Wang G, Zhang J W. Generalised Variational Assimilation of Cloud-affected Brightness Temperature Using Simulated Hyper-spectral Atmospheric Infrared Sounder Data [J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(1):49–58.
- [4] Hocking J, Rayer P, Saunders R, et al. RTTOV v10 Users Guide[M]. NWPSAFMO-UD-023, EUMETSAT, Darmstadt, Germany, 2010.
- [5] English S J, Eyre J R, Smith J A. A Cloud-detection Scheme for Use with Satellite Sounding Radiances in the Context of Data Assimilation for Numerical Weather Prediction[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, **125**(559): 2359–2378.
- [6] Chahine M T. Remote Sounding of Cloudy Atmospheres. I. The Single Cloud Layer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, **31** (1): 233–243.
- [7] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved Cloud motion Wind Vector and Altitude Assignment Using VAS[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, **22**(3): 377–384.
- [8] 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.
- [9] Huang H L, Smith W L, Li J, et al. Minimum Local Emissivity Variance Retrieval of Cloud Altitude (下转第 29 页)