

文章编号: 1672-8785(2014)11-0023-05

FY-3B 红外分光计亮温资料的 云检测算法研究

王 根^{1,2} 谢 伟^{1,3} 陆其峰⁴ 张建伟²

(1. 安徽省气象信息中心, 安徽 合肥 230031;

2. 南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京 210044;

3. 南京大学大气科学系, 江苏 南京 210093;

4. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要: 结合风云三号 B 星 (FY-3B) 载红外分光计 (InfraRed Atmospheric Sounder, IRAS) 资料的通道特性, 分析了云在不同波段的光谱特性。与通道亮温偏差阈值法不同, 利用通道多光谱信息以及基于平滑梯度和通道信噪比的方法对 FY-3B/IRAS 资料进行云检测方法研究, 更有效地识别出了有云视场点。对 2013 年 1 月 9 日 00 时至 1 月 14 日 00 时共 5 天的 IRAS 资料数据进行了偏差订正, 然后采用以上方法进行了 IRAS 资料云检测。结果表明, 经过云检测后的通道亮温偏差服从高斯分布, 满足后期变分同化 IRAS 通道亮温的要求。

关键词: 风云三号 B 星; 红外分光计; 云检测; 平滑梯度法; 通道信噪比

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.11.006

Cloud Detection Method for Brightness Temperature Data from FY-3B Infrared Atmospheric Sounder

WANG Gen^{1,2}, XIE Wei^{1,3}, LU Qi-feng⁴, ZHANG Jian-wei²

(1. Anhui Meteorological Information Centre, Hefei 230031, China; 2. College of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

4. National Satellite Meteorological Centers, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the channel characteristics of the data acquired by the Infrared Atmospheric Sounder (IRAS) onboard FY-3B meteorological satellite, the spectral characteristics of cloud in different channels are analyzed. Unlike the threshold method based on channel brightness temperature deviation, the channel multispectral information and the method based on smooth gradient and channel signal-to-noise ratio are used to study the cloud detection of the data from FY-3B/IRAS. The cloud field-of-view is identified effectively. The deviation of the IRAS data from 00 UTC, 9 Jan, 2013 to 00 UTC 14 Jan, 2013 is corrected. Then, the cloud detection is conducted for the IRAS data. The result shows that the channel brightness temperature deviation after cloud detection obeys Gaussian distribution and meets the subsequent variational assimilation requirements of channel brightness for FY-3B/IRAS.

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 气象行业专项 (GYHY201406028; GYHY201106014; GYHY201206002); 国家自然科学基金项目 (40705037)

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 数值模拟和多源资料融合等方面的研究。E-mail: 203wanggen@163.com

Key words: infrared atmospheric sounder; cloud detection; smooth gradient method; channel signal to noise ratio; FY-3B

0 引言

数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 是一个初/边值问题。卫星资料的同化应用不仅可以改进 NWP 的初始场, 而且还可提高 NWP 的预报精度^[1]。红外探测器通道主要覆盖 CO₂ 和 H₂O 的光谱区域, 而 CO₂ 和 H₂O 吸收带则用来提供大气温度与湿度信息。温度和湿度是 NWP 的模式变量, 因此星载红外探测器的资料同化在 NWP 中具有重要意义。

风云三号气象卫星是我国第二代极轨气象卫星的首发星。该卫星搭载了 11 个有效载荷, 其中用于 NWP 的有微波温度计、微波湿度计和 IRAS。FY-3B 卫星于 2010 年 11 月 5 日发射升空, 其 IRAS 共有 26 个通道, 其中包括 20 个红外通道 (光谱范围为 3.7 ~ 15 μm)^[2-3]。

云在时间和空间分布上具有极大的不确定性。高度、厚度和种类等因素导致云的形态千变万化。当视场点有云时, 辐射传输模式下的通道亮温模拟效果不佳, 使有云通道的亮温偏差较大, 因此需要对红外资料进行云检测算法研究。所谓亮温偏差是指卫星通道的观测亮温 (O) 与模拟亮温 (B) 之差, 其定义为 O-B。模拟亮温可以通过将背景场输入到辐射传输模式下进行计算得到。

红外探测器云检测方法目前主要包括基于晴空视场点的云检测方法、基于晴空通道的云检测方法、云辐射订正以及不同仪器云产品匹配等四种。其中, 基于晴空视场点的云检测方法就是寻找绝对晴空视场点。若通道组合中的某个通道在某个视场点上被判断有云, 则剔除所有通道在此视场点的观测数据^[4]。其常用方法有 CO₂ 分层法^[5-6]、最小剩余法^[7]和局部最小方差发射率法^[8]。基于晴空通道的云检测方法根据不同通道亮温对云的敏感性指定通道“高度”(类似于通道权重函数), 然后按照“高度”进行通道排序, 寻找不受云影响的晴空通道。其

中具有代表性的是 ECMWF 方法^[9]。另外还有学者提出了利用不同仪器间云产品的匹配得到晴空视场点的思想^[10]。

为了获得 FY-3B/IRAS 的晴空视场点, 我们借鉴欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) 同化高分辨率红外辐射探测器 (High Resolution Infrared Radiation Sounder, HIRS) 资料的经验^[11], 使用通道 3、4、5、6、7 和 9 (对应于 HIRS 的通道 8) 亮温进行 IRAS 云检测研究。本文介绍了常用的基于通道亮温偏差阈值的云检测方法, 然后给出了基于平滑梯度和通道信噪比的云检测方法。我们对 5 天 (从 2013 年 1 月 9 日 00 时到 1 月 14 日 00 时) 的 IRAS 资料进行了偏差订正, 然后再使用平滑梯度法和通道信噪比相结合的云检测方法得到了偏差概率分布近似服从 0 均值、一定均方根误差的高斯正态分布^[2]。该结果满足变分同化的基本假定, 说明本文方法能够有效识别有云视场点。另外, 云检测时需要进行偏差订正, 而且两者应该交互进行。该方法对未来数值天气预报系统 (比如我国自主研发的全球/区域同化与预报系统 (Globe and Regional Assimilation and Prediction System, GRAPES)) 中的 FY-3B/IRAS 资料同化具有指导作用。

1 IRAS 云检测的常用方法介绍

1.1 基于通道亮温偏差阈值法的 IRAS 云检测

晴空和有云时的通道光谱信息不同^[12]。通过通道亮温梯度间的关系或者由通道亮温偏差直接给定的相应阈值 (通道不同, 阈值取值也不同), 可以判断视场点是否有云。借鉴 ECMWF 的 HIRS 云检测方法, 本文只考虑通道 3、4、5、6、7 和 9。当通道 i 的亮温偏差满足式 (1) 时, 表示通道 i 受到云的影响, 则将此视场点标记为“有云”。

$$|\Delta BT_i/\sigma_i - \Delta BT_{i-1}/\sigma_{i-1}| > 1.5$$

$$\text{或 } |\Delta BT_i| > 3\sigma_i, \quad i = 3, 4, 5, 6, 7, 9 \quad (1)$$

式中, i 从通道 3 迭代到通道 7, 再迭代到通道 9; ΔBT_i 为通道 i 的亮温偏差; σ_i 为通道 i 在晴空条件下的偏差标准差。本文参考 HIRS 给定的值: 通道 2 的标准差为 0.25, 通道 3 为 0.26, 通道 4 为 0.26, 通道 5 为 0.29, 通道 6 为 0.38, 通道 7 为 0.50, 通道 9 为 0.84。

1.2 亮温偏差阈值法的试验效果

本文以美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 时间窗 00 时、06 时、12 时和 18 时的 FNL 分析场作为 FY-3B/IRAS 通道亮温模拟的背景场, 并采用 ECMWF 的 RTTOV 快速辐射传输模式对 IRAS 通道亮温进行模拟^[13]。FY-3B/IRAS 的实际观测亮温 L1c 数据来自我国国家卫星气象中心数据库。研究数据的时间段为 2012 年 12 月 24 日 18 时 ~ 2013 年 1 月 8 日 18 时和 2013 年 1 月 9 日 00 时 ~ 1 月 14 日 00 时。本文只考虑 FY-3B/IRAS 的前 20 个通道, 其通道特性详见参考文献 [3]。

图 1 所示为利用通道亮温偏差阈值法对 2013 年 1 月 9 日 00 时至 1 月 14 日 00 时共 5 天的 FY-3B/IRAS 亮温资料进行云检测前后的偏差概率密度分布情况。其中, 虚线表示云检测前的数

据, 实线表示云检测后的数据; 横坐标为 IRAS 的通道亮温偏差 (O-B), 纵坐标为概率密度函数 (Probability Density Function, PDF)。

从图 1 中可以看出, 云检测前, FY-3B/IRAS 的通道亮温偏差概率不满足高斯分布, 存在较大的负偏差。而在利用通道偏差阈值法对 FY-3B/IRAS 资料进行云检测之后, 负偏差有所减小, 但还是没有消除。其原因如下: (1) 通道偏差阈值法基于通道间的梯度信息进行操作, 可能是该方法保留了一定量的有云视场点, 因此下面考虑采用基于通道信噪比耦合的云检测方法进一步剔除有云视场点; (2) 可能是通道亮温存在误差, 所以下面考虑先对通道亮温进行平滑处理; (3) 也有可能由于存在系统偏差, 下面考虑先对 IRAS 资料进行偏差订正, 然后再采用相应的方法进行云检测研究。

2 基于平滑梯度和通道信噪比的 IRAS 云检测

2.1 平滑梯度法^[11]

考虑到 IRAS 存在仪器定标、数据预处理以

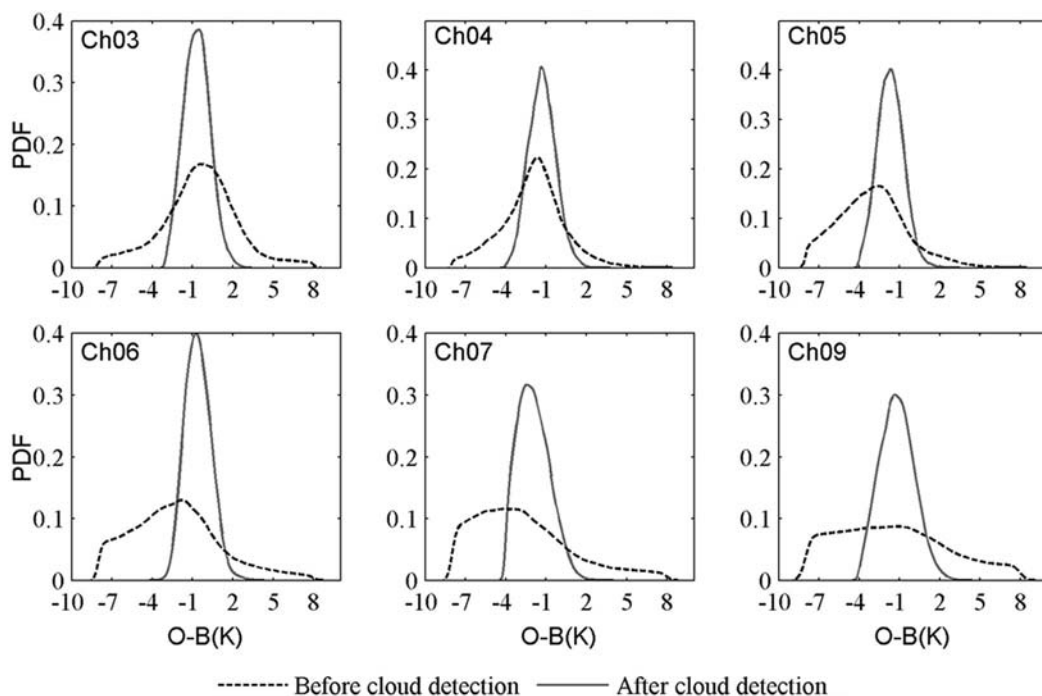


图 1 通道亮温偏差在云检测前后的概率密度分布

及辐射传输模式等方面的误差,我们在通道亮温偏差阈值法的基础上进行了修改,先对每个视场点进行通道亮温偏差的“三点”平滑,则

$$\Delta BT'_i = \begin{cases} \frac{1}{3}\Delta BT_{i-1} + \frac{1}{3}\Delta BT_i + \frac{1}{3}\Delta BT_{i+1}, & i = 3, 4, 5, 6, 7 \\ \Delta BT_i, & i = 9 \end{cases} \quad (2)$$

式中, i 为通道号; $\Delta BT'_i$ 为经平滑处理后的通道亮温偏差。

平滑梯度法针对各个通道使用不同的阈值。当通道 i 的亮温偏差满足式 (3) 时, 通道 i 就被标记为受到云的影响。

$$|\Delta BT'_i - \Delta BT'_{i-1}| > r_i \quad (3)$$

式中, r_i 为阈值, 用于检测通道 i 的云信号。从通道 3 一直遍历到通道 9, 一旦发现云信号的存在就停止遍历。通道 3 和通道 2 组合的 r 值为 0.82; 通道 4 和通道 3 组合的 r 值为 0.82; 通道 5 和通道 4 组合的 r 值为 0.72; 通道 6 和通道 5 组合的 r 值为 0.85; 通道 7 和通道 6 组合的 r 值为 0.83; 通道 9 和通道 7 组合的 r 值为 0.90。

当根据式 (3) 检测出通道 i 受到云的影响时, 需要进一步对其进行验证。若满足式 (4), 则最终确定通道 i 受到云的影响, 此视场点被标记为“有云”。

$$\Delta BT'_{i+1} - \Delta BT'_i > 0.8 (\Delta BT'_i - \Delta BT'_{i-1}), \quad i = 3, 4, \dots, 7 \quad (4)$$

2.2 基于通道信噪比的云检测

若满足式 (5), 则将此视场点 (Field-of-View, FOV) 标记成“有云”。

$$|R_{ctr,i} - R_{m,i}|_{FOV} > 5NE\Delta N_i, \quad i = 4, 5, 7 \quad (5)$$

式中, $R_{ctr,i}$ 和 $R_{m,i}$ 分别为通道 i 的模拟和观测辐射值; FOV 为视场点标记; $NE\Delta N_i$ 为通道 i 的信噪比。此处只考虑 IRAS 的长波 CO_2 吸收带对云敏感的通道 4 (波数为 703 cm^{-1})、5 (波数为 716 cm^{-1}) 和 7 (波数为 749 cm^{-1})。

3 不同云检测方法的效果比较

根据晴空和有云时通道光谱信息的不同, Auligne T 等人得到了晴空时通道亮温偏差呈现高斯分布的结果^[14]。下面给出 IRAS 资料 (从 2013 年 1 月 9 日 00 时到 1 月 14 日 00 时) 经过云检测后的亮温偏差概率分布。

为了进一步分析负偏差, 我们分两种情况进行考虑: (1) 在平滑梯度法的基础上加入基于通道信噪比的云检测方案, 记为“Gradient method and NEDN”; (2) 在 IRAS 资料偏差订正的基础上, 利用本文方法进行 IRAS 资料云检测研究, 记为“Gradient method and NEDN and BC”。

通过平滑梯度法与通道信噪比相结合的云检测方案, 通道亮温的负偏差实现了较大降幅, 但仍没有被消除 (图略)。考虑采用以上云检测方法对经过偏差订正后的 IRAS 资料进行视场点有云识别。

关于偏差订正的研究思想详见参考文献 [15-16]。本文由 NCEP 分析场计算得到 1000 ~ 300 hPa 的厚度、200 ~ 50 hPa 的厚度、模式地表温度和总可降水量等 4 个预报因子。通过对 2012 年 12 月 24 日 18 时至 2013 年 1 月 8 日 18 时共 16 天的数据进行统计得到偏差订正系数, 然后将其用于 2013 年 1 月 9 日 00 时至 1 月 14 日 00 时共 5 天的 IRAS 数据偏差订正。我们对长时间的 FY-3B/IRAS 资料进行了云检测研究, 并利用偏差概率密度分布的特征度量对其进行了验证。

图 2 所示为用不同云检测方法得到的结果。其中, 黑线表示亮温偏差阈值法的云检测结果, 红线表示基于梯度法、NEDN 和偏差订正的云检测结果。此处只考虑云检测算法所用到的 IRAS 通道 3、4、5、6、7 和 9 的情况。另外, 图 2 还分别给出了不同云检测方法下的通道亮温偏差均值和标准差。

从图 2 中可以看出, 通过使用经过偏差订正后的 FY-3B/IRAS 通道亮温数据, 并采用基于平滑梯度法和通道信噪比的云检测方法, 可以明显减小负偏差。其偏差概率密度分布近似服从 0 均值、一定均方根误差的高斯分布, 满足变分同

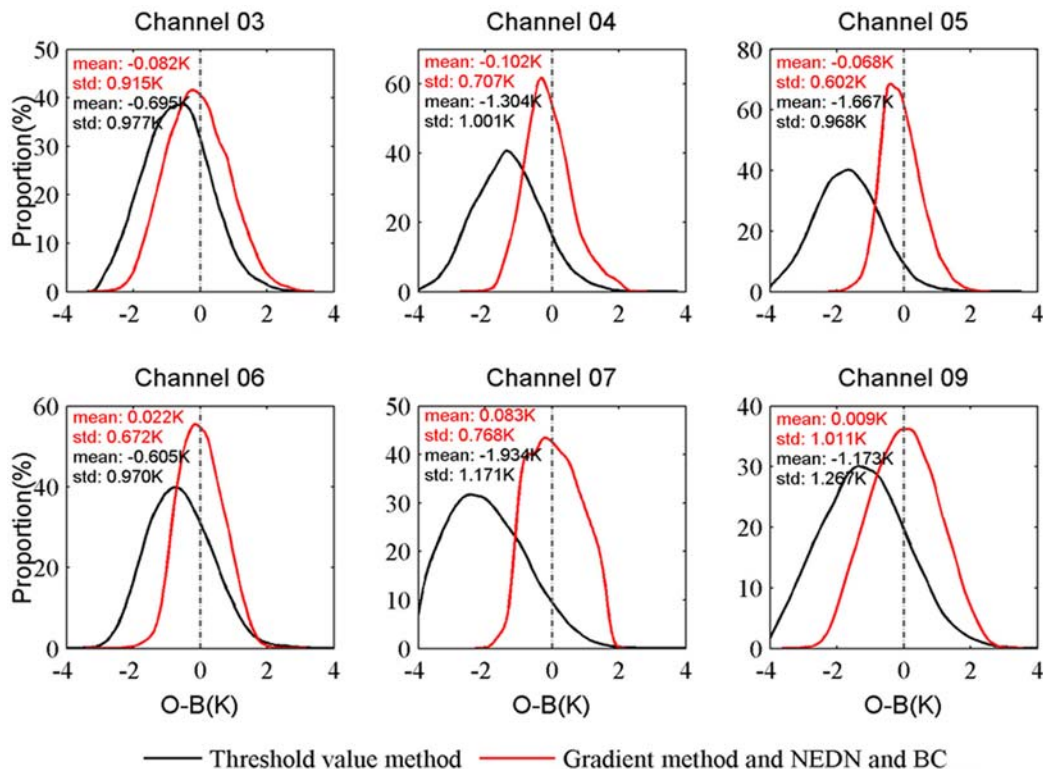


图 2 不同云检测方法的效果比较

化的基本假定；在变分同化极小化迭代过程中能够收敛，使得后期采用同化模式（如 GRAPES）变分同化 FY-3B/IRAS 资料时能够得到更准确的分析场，从而提高数值天气预报的预报精度。结果表明，采用本文方法对 FY-3B/IRAS 资料进行云检测是可行的；云检测时需要进行偏差订正，而且两者应该交互进行。基于通道亮温偏差阈值法进行 FY-3B/IRAS 资料云检测时具有较大的负偏差，导致后期进入变分同化系统的资料数据量较少，且不满足变分同化的要求。

需要说明的是，本文旨在得到 FY-3B/IRAS 的晴空视场点，所以采用通道 3、4、5、6、7 和 9 即可。在实际的研究过程中，基于平滑梯度和通道信噪比的方法也可以得到“晴空通道”。当 IRAS 的通道 i 被确定为受到云影响时，通道 $i, i+1, \dots, 9$ 被标记成受到云的影响，则相应的通道亮温在后期变分同化过程中不再使用。假定平流层通道 1（权重函数峰值在 30 hPa）和通道 2（权重函数峰值在 60 hPa）始终不受云的影响，因此只需对通道 1 和 2 的亮温偏差作一些质量控制。对于 IRAS 短波通道来说，只需采用相应的 IRAS 长波通道的检测结果。

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

4 总结与展望

本文基于 FY-3B/IRAS 的通道光谱特性，在 IRAS 资料偏差订正的基础上，采用基于平滑梯度和通道信噪比的方法进行了 IRAS 云检测研究。结果表明，FY-3B/IRAS 的通道亮温偏差概率服从高斯分布，满足变分同化的基本假定，能够有效识别出有云视场点。我们后期计划针对 IRAS 通道亮温偏差标准差进行统计研究，并将本文方法耦合到 GRAPES 模式中进行实例分析。

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] 陆其峰. 风云三号 A 星大气探测资料数据在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, **41**(7): 890–894.

(下转第 45 页)