

FY-4A 干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)资料云检测技术

郭强^{1,2}, 文锐¹, 王新^{2*}

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 目前 FY-4A/GIIRS 资料同化中直接采用多通道扫描成像辐射计(AGRI)的云检测结果, 云污染视场内全部通道被剔除, 部分可用通道信息丢失。为了获得这些可用通道信息, 基于 McNally 给出的云检测原理, 利用 GIIRS 观测和 RTTOV 模拟晴空结果, 结合 GIIRS 灵敏度等辐射特性, 提出了自主的 GIIRS 云检测方法。结果表明: GIIRS 与 AGRI 的云检测结果一致性较好, 当 GIIRS 视场中存在细云或碎云时, 二者存在一定差异; 利用得到的云顶高度, 可获得云污染视场中的可用通道, 通道使用率增加 13.76%。该云检测方法为 GIIRS 资料同化提供了重要参考。

关键词: 风云四号卫星; 干涉式大气垂直探测仪; 云检测; 晴空通道

中图分类号: P414.4 文献标识码: A

Cloud detection technique research for Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder(GIIRS) on FY-4A platform

GUO Qiang^{1,2}, WEN Rui¹, WANG Xin^{2*}

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Currently the FY-4A/GIIRS data assimilation directly uses the cloud detection product from Advanced Geostationary Radiometric Imager (AGRI), and the whole channel data has to be removed when the corresponding IFOV is contaminated by cloud, leading to the loss of some available channel information. In order to improve the utilization rate of those data, a cloud detection algorithm is set up with both GIIRS observation and RTTOV simulation by adopting the method given by McNally, together with radiation characteristics such as GIIRS sensitivity. The results of the proposed method are generally identical to those from the AGRI CLMs, where some minor differences will occur for IFOVs with a certain of fractus. Using the derived the heights of cloud top for each IFOV, the clear channels with respect to the cloud IFOVs can be identified with the data utilization increased by around 13.76% in statistics. This proposed cloud detection algorithm can provide an important reference for GIIRS data assimilation.

Key words: FY-4 meteorological satellite, geosynchronous interferometric infrared sounder (GIIRS), cloud detection, clear channel

PACS: 92. 60. Wc, 07. 57. Ty

引言

卫星资料逐渐成为资料同化的首要观测来源。根据欧洲中期天气预报中心(ECMWF)对预报时次的统计, 进入同化系统的资料中有 91.41% 是来自

卫星观测^[1], 这其中, 红外高光谱资料因其高精度探测、高光谱分辨率等优点, 是所有卫星观测资料中对预报误差减小和同化效果改善贡献最大的一种^[2]。

收稿日期: 2020-01-15, 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(41875037)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41875037)

作者简介(Biography): 郭强(1975-), 男, 江苏南通人, 博士, 研究员。主要研究领域为卫星定标技术及数据量化应用

E-mail: guoqiang@cma.gov.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: xinwang@cma.gov.cn

Received date: 2020-01-15, Revised date: 2020-09-16

大气中云是由水滴及冰晶构成,在红外波段会强烈吸收,造成云层下方的红外辐射无法被探测,只能测量云顶以上的大气辐射,导致卫星观测的辐射值与实际值有较大偏差^[3]。目前国内外常用的红外卫星仪器云检测方法可以概括为四种:找出“晴空视场(clear FOVs)”^[4]、“晴空通道(clear channels)”^[5]、“云辐射订正(cloud-clearing)”^[6]和“匹配不同仪器之间的云产品”^[7]。“晴空视场”方法是寻找绝对晴空的视场,剔除有云视场内所有通道的观测资料。Goldberg等人提出了AIRS的NESDIS-Goldberg云检测方案,分别对陆地和海洋表面的视场进行云检测^[8]。国内陈靖等人借鉴Goldberg等提出的云检测步骤,将原来的3个步骤改为7个(海洋4个,陆地3个),再利用GRAPES-3DVAR(全球/区域同化预报系统)分别对AIRS的海洋和陆地上的视场进行云检测,找出受到云污染的视场,并将其剔除^[9]。“晴空通道”方法是根据不同通道对云的敏感性不同来指定通道高度,McNally等人在2003年提出不受云影响的晴空通道云检测方案,已被ECMWF用于AIRS和IASI卫星观测资料的云检测,提高了预报质量^[10]。“云辐射订正”方法是由李俊等人提出的结合MODIS数据的AIRS资料的云检测算法,是对传统单波段技术的扩展^[6]。此外,官莉等人将高光谱大气红外探测器AIRS,与MODIS的L2级云掩膜产品进行空间匹配来确定哪些视场受云污染影响^[7]。

风云四号A星(FY-4A)是我国第一颗静止轨道三轴稳定的定量遥感卫星,装载的干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)是国际上首台在静止轨道上以红外干涉分光方式探测大气垂直结构的精密遥感仪器,通过获取大气温、湿度廓线和痕量气体含量的垂直分布,服务于天气预报、气候和环境变化预测的业务和科研应用。目前FY-4A的云检测通用技术是通过设定 $12\ \mu\text{m}$ 通道亮温标准差的特征阈值,同时结合AGRI的可见光通道图像得到云检测实时产品^[11],再将GIIRS的一级(L1)观测资料与AGRI成像仪定位信息以及云检测产品进行时空匹配,筛选出晴空像素所在空间位置,但该方法的缺陷是无法计算有云视场时GIIRS的可用通道,在本文研究中定义为“晴空通道”。

截至目前,国内外数值预报业务中在卫星资料同化处理时,传统做法是仅选择处理晴空视场资料,受云污染的视场被全部剔除,这种处理方法较简单,但对于红外高光谱数据造成大量的观测信息

浪费^[9]。实际上,视场范围内完全无云的情况仅占很小比例,据统计,红外高光谱观测资料中完全不受云污染的瞬时视场所占比例约为10%^[12-13],找到能够提升资料利用率的方法尤为迫切。

本研究借鉴McNally2003年提出的云检测基本原理,提出了基于FY-4A/GIIRS观测资料云检测的通道选取与阈值确定方法,可实现有云视场下GIIRS的可用晴空通道挑选,弥补了目前GIIRS云检测中基于AGRI云检测结果简单剔除有云视场内全部观测资料的缺陷,增加了资料利用率。本文主要分为以下四个部分,在阐述所用的大气辐射传输模式和资料基础上,介绍了本研究所形成的云检测新方法,并进一步与FY-4/AGRI已有的云检测产品比较验证,最后进行了结果分析和讨论。

1 模式与资料

RTTOV是由ECMWF开发的一种快速辐射传输模式,广泛运用在卫星资料同化业务中,可以快速精确地模拟出各类卫星传感器在给定大气状态条件下的观测辐射值^[14],RTTOV具有四个基本模式:正演模式、切线模式、伴随模式以及k矩阵模式,其中正演模式是在给出观测位置的大气廓线和其他信息的基础上,计算该处大气层顶指定的多个通道的辐射率。对于给定的大气状态廓线(大气温度、水汽、臭氧)和表面参量(表面发射率、气压、温度),同时考虑卫星观测天顶角的影响,可以计算出各模式层到大气层顶的光学厚度,再计算各气压层到大气层顶的总的通道透射率,最后正演计算出卫星观测到的辐亮度^[15]。

本文试验中主要用到了三类数据,第一类是FY-4A卫星的GIIRS的L1区域观测数据(源自国家卫星气象中心),其探测波段为 $700\sim 1\ 130\ \text{cm}^{-1}$ (长波)和 $1\ 650\sim 2\ 250\ \text{cm}^{-1}$ (中波),共1 650个通道,光谱分辨率为 $0.625\ \text{cm}^{-1}$,空间分辨率为16 km,具有高精度探测和高光谱分辨率的显著优点,可以精细探测大气温湿度廓线、臭氧总含量等;第二类数据是FY-4A卫星的AGRI的地理定位(GEO)文件和CLM全圆盘云检测实时产品(源自国家卫星气象中心),空间分辨率为4 km;第三类数据为全球再分析数据(源自<https://apps.ecmwf.int/datasets/>),在研究中使用分辨率为 0.125° 格点化的大气温压湿廓线以及地面信息数据。选取了世界时2019年5月10日至2019年5月12日06时和12时的数据,分析范围如图1所示,大致在 $3^\circ\text{N}\sim 10^\circ\text{N}$, $55^\circ\text{E}\sim 135^\circ\text{E}$,单次

试验有7 000个视场点。

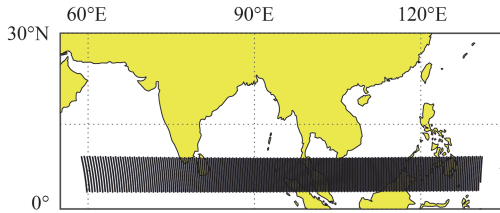


图1 选取的GIIRS视场分布

Fig. 1 The location of selected GIIRS FOV

2 云检测方法

本研究所形成的云检测方法是,首先,基于红外光谱中各波段的发射率不同进行波段划分,其次,按不同通道对云的敏感性不同(通道的权重分布与云顶高度之间的相对关系)进行通道排序,进而得到对应的辐亮度偏差序列(将GIIRS观测辐亮度与模式模拟晴空辐亮度作差),选择出偏差单调变化的通道组合,这样处理的方法定义称为云信息单调变化排序。最后,设置辐亮度偏差阈值,根据阈值对每一个瞬时视场进行二次通道筛选,保留阈值范围以内的通道。该阈值物理含义是在此辐亮度偏差之内的全部通道均判识为晴空通道(晴空通道定义见引言)。图2为本研究使用的云检测方法流程图,以下2.1~2.5为具体步骤。

2.1 偏差计算

对于某一瞬时视场,将相同时刻的大气温压湿

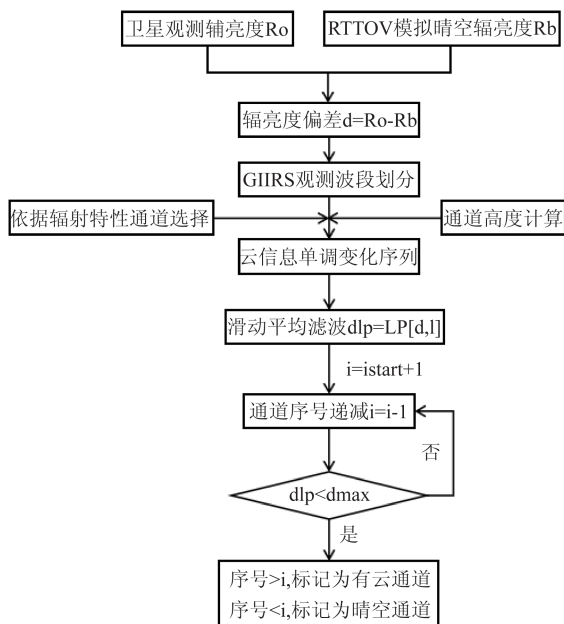


图2 云检测流程图

Fig. 2 Flow chart of cloud detection

廓线和地面信息输入RTTOV快速辐射传输模式,设定为晴空状态,利用正向模式模拟出相应的晴空辐亮度,计算GIIRS观测辐亮度与模式模拟晴空辐亮度之间的差值。偏差除了主要来自云的影响,还受到仪器噪声、模式误差、大气状态的影响偏差值^[5]。

2.2 波段划分

将GIIRS光谱覆盖范围分为四个光谱带,分别为长波CO₂(700~790 cm⁻¹)、臭氧及窗区(790~1 130 cm⁻¹)、水汽(1 650~2 000 cm⁻¹)、及4.3 μm附近的CO₂(2 150~2 250 cm⁻¹)光谱带。

2.3 通道排序

云信息单调变化排序的计算过程:按通道对云的敏感性,对辐亮度偏差排序,排序依据为该通道的通道高度,通道高度定义见式(1),即对于某瞬时视场的一个通道,可利用RTTOV模式模拟计算晴空辐射值 R_{clear} ,随后再该视场上空某一高度处放置一层不透明云(近似为黑体)模拟得到全云辐射值 R_{cloudy} 。当 R_{clear} 和 R_{cloudy} 之间的偏差与 R_{clear} 的比率刚好超过指定阈值(这里取0.01),此时不透明云的高度就是该通道的通道高度^[2]。

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

实际计算中,采用了各个通道的权重函数峰值高度排序,代替通过计算通道高度对辐亮度偏差排序的方法,源于权重函数的峰值高度与通道高度从原理上指示意义相同。

为了证明两者的一致性,以长波CO₂光谱带为例,图3(a)中黑色实线为根据RTTOV模式计算得到GIIRS的145个通道的通道高度分布,红色实线为GIIRS的145个通道的权重函数峰值高度分布,两者趋势一致结果接近。未完全重合处是由于两个曲线分层差异,模式将大气分为37层,最低层为1 000 hPa,而GIIRS的权重函数分布是将大气分为99层,最低层为1 071.02 hPa。

通过上述比较,通道高度可以由权重函数的分布曲线的峰值得到,GIIRS有1 650个通道即有1 650条权重函数曲线,如图3(b)所示为任意挑选GIIRS某一瞬时视场内的三个不同高度通道的权重函数的峰值高度分布,分别为(701.25 cm⁻¹, 235.33 hPa)、(715.625 cm⁻¹, 575.63 hPa)、(750 cm⁻¹, 1 042.33 hPa),其他通道权重函数曲线类似。

在GIIRS的同一光谱带内,存在不同通道的权重函数峰值高度相同的情况,需要进行通道选择。

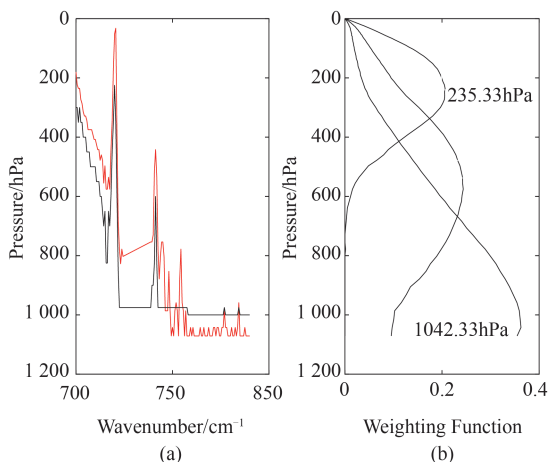


图3 (a)权重函数峰值高度与通道高度,(b)通道701.25cm⁻¹、715.625cm⁻¹、750cm⁻¹权重函数峰值高度:(a)(b)
Fig. 3 (a) Weighting function peak and channel height, and (b) peak weighting function of three channels

仪器灵敏度用来定量描述系统对目标物的辐射特征量变化的分辨能力,探测过程中的目标辐射变化量总是与噪声相伴随。GIIRS的灵敏度用噪声等效辐亮度(NEDR)来表征,在轨测试发现,GIIRS探测通道的长波两端及中波低波数段的噪声值明显偏大,分析认为可能是微量的有机挥发物导致系统受到污染^[16],图4为GIIRS实时观测资料的仪器灵敏度数据统计结果。考虑到部分红外波段的仪器灵敏度较低,对应的NEDR数值较大,为了同化资料的可靠性,需要首先将这些通道剔除。以长波CO₂为例,最终选择的通道分布情况如表1所示。

2.4 数字滤波

采用滑动平均的滤波方法,减少仪器噪声、模

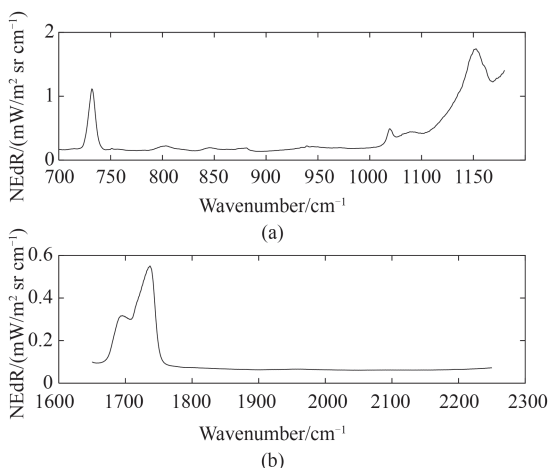


图4 GIIRS实时观测资料的仪器灵敏度(NEDR)数据统计结果
Fig. 4 Statistical result of NEDR from GIIRS real-time data

表1 GIIRS长波CO₂波段选出的通道

Table 1 List of selected channels in GIIRS longwave CO₂ band

ν/cm^{-1}	P/hPa	NEDR/(mW/m ² ·sr·cm ⁻¹)
701.250	235.33	0.1651
702.500	273.02	0.1635
703.125	286.36	0.1616
703.750	413.24	0.1611
715.625	575.63	0.1775
740.000	729.99	0.2370
748.125	852.89	0.1640
746.875	986.17	0.1636
750.000	1042.33	0.1687

式误差、大气状态等误差项对云信息的影响。

2.5 循环搜索

对于各光谱带,从高度最低即云敏感性最强的通道开始检测,直到某个通道的偏差小于规定的阈值,即应用表达式(2)进行循环搜索:

$$d < d_{\text{max}} \quad (2)$$

式中, d_{max} 为偏差阈值,计算中高于该通道高度的通道记为晴空通道,其他为有云通道。

3 云检测试验结果

将GIIRS观测资料与RTTOV模拟的晴空资料作偏差,再经波段划分、通道排序、数字滤波、循环搜索后,得到所有视场点各光谱带排序后的偏差结果。同时,与AGRI的CLM云检测产品进行经纬度匹配,得到GIIRS对应视场内AGRI云检测结果。图5显示了6个观测视场的通道排序情况,其中前三个视场的辐亮度偏差较小,后三个视场的辐亮度偏差较大。与AGRI云检测产品经纬度匹配,得到前三个瞬时视场为晴空区域,而后三个瞬时视场为受云污染的区域。

本文处理分析了上述6个观测样本资料,通过与AGRI的CLM云检测实时产品匹配,初步得到判

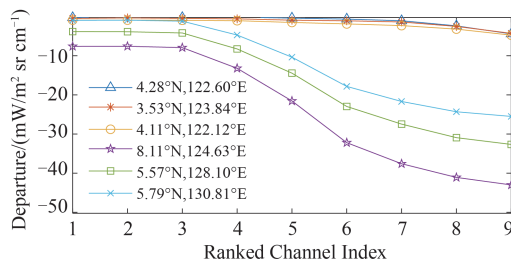


图5 不同视场根据通道排序后的偏差
Fig. 5 Bias of different FOV based on ranked channel height

断视场是否受云污染的辐亮度偏差阈值,其中06时(白天)的辐亮度阈值为 $8 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$, 12时(夜间)的辐亮度阈值为 $3 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

图6-11为世界时2019年5月10日至2019年5月12日06时和12时的云检测试验结果,以及与AGRI的CLM云检测实时产品(CLM云检测实时产品中,浅灰色为确定有云区域,灰色为可能有云区域,蓝色为可能晴空区域,深蓝色为确定晴空区域)比对的结果,红色为判断受云污染的瞬时视场,蓝色为晴空视场及可能有云的视场。其中,图6(a)、图7(a)、图8(a)、图9(a)、图10(a)以及图11(a)为5月10日至5月12日的AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果(红色区域对应AGRI云检测实时产品中的确定有云区域,蓝色区域包括确定晴空区域、可能晴空区域以及可能有云区域),图6(b)、图7(b)、图8(b)、图9(b)、图10(b)以及图11(b)为本试验根据辐亮度偏差阈值判别出的云检测结果,图6(c)、图7(c)、图8(c)、图9(c)、图10(c)以及图11(c)为对应的AGRI云检测实时产品。可以看到,对于连续受云污染的视场,GIIRS和AGRI的云检测结果一致性较好。

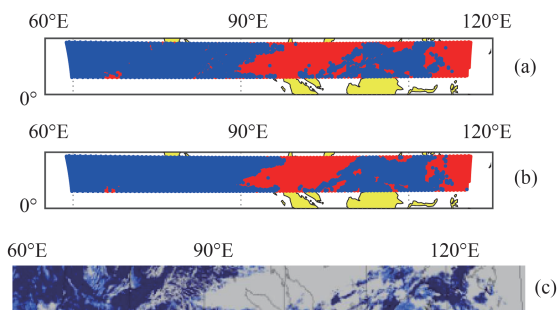


图6 (UTC)2019年5月10日06时(a)AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果,(b)根据辐亮度偏差阈值判别出的云检测结果,(c)AGRI云检测实时产品

Fig. 6 Cloud detection result at 0600 UTC 10 May 2019, (a) result after matching the AGRI CLM data, (b) cloud detection result, and (c) AGRI CLM data

统计表明:在42 000个试验瞬时视场中,AGRI云检测产品中受云污染视场为18 830个,本试验检测出的GIIRS云污染视场有15 479个,约占前者结果的82.20%。结合图6至图11可以看到,二者的一致性整体较好,但在边缘视场的云检测结果稍有差异,考虑到GIIRS与AGRI的空间分辨率分别为16 km和4 km,当GIIRS的瞬时视场中存在不

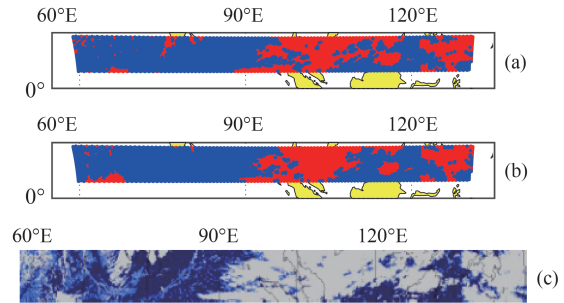


图7 (UTC)2019年5月10日12时(a)AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果,(b)根据辐亮度偏差阈值判别出的云检测结果,(c)AGRI云检测实时产品

Fig. 7 Cloud detection result at 1200 UTC 10 May 2019, (a) result after matching the AGRI CLM data, (b) cloud detection result, and (c) AGRI CLM data

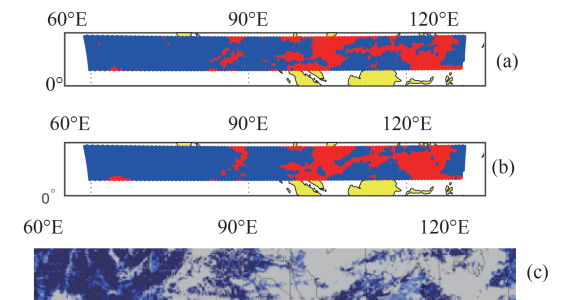


图8 (UTC)2019年5月11日6时(a)AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果,(b)根据辐亮度偏差阈值判别出的云检测结果,(c)AGRI云检测实时产品

Fig. 8 Cloud detection result at 0600 UTC 11 May 2019, (a) result after matching the AGRI CLM data, (b) cloud detection result, and (c) AGRI CLM data

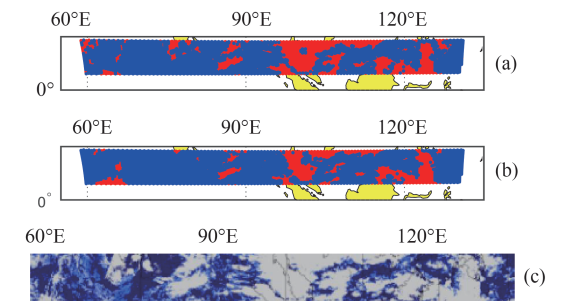


图9 (UTC)2019年5月11日12时(a)AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果,(b)根据辐亮度偏差阈值判别出的云检测结果,(c)AGRI云检测实时产品

Fig. 9 Cloud detection result at 1200 UTC 11 May 2019, (a) result after matching the AGRI CLM data, (b) cloud detection result, and (c) AGRI CLM data

太敏感的细云或碎云,难以准确判断边缘视场(即远离卫星星下点)的情况,云检测结果存在一定差异。

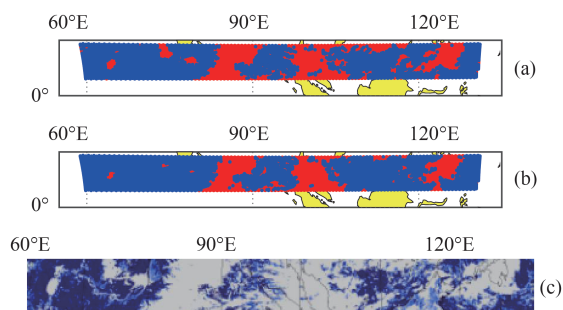


图10 (UTC)2019年5月12日6时(a)AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果,(b)根据辐亮度偏差阈值判别的云检测结果,(c)AGRI云检测实时产品

Fig. 10 Cloud detection result at 0600 UTC 12 May 2019, (a) result after matching the AGRI CLM data, (b) cloud detection result, and (c) AGRI CLM data

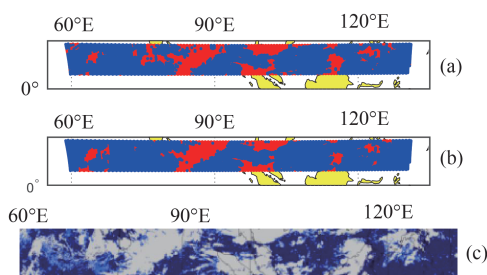


图11 (UTC)2019年5月12日12时(a)AGRI云检测实时产品与GIIRS瞬时视场匹配结果,(b)根据辐亮度偏差阈值判别的云检测结果,(c)AGRI云检测实时产品

Fig. 11 Cloud detection result at 1200 UTC 12 May 2019, (a) result after matching the AGRI CLM data, (b) cloud detection result, and (c) AGRI CLM data

表2 受云污染视场的可用通道百分占比

Table 2 Percentage of clear channels in cloud FOV

	5月10日	5月11日	5月12日	总体百分比
06时(白天)	13.94%	20.26%	17.42%	13.76%
12时(夜间)	9.20%	9.70%	11.05%	

对于已经判别的受云污染视场,可进一步得到视场中的可用通道,从而增加资料同化的数据使用率。根据辐亮度阈值以及表1中的通道选择结果,初步确定瞬时视场的云顶高度,通道高度在云顶高度及以上的通道就是该瞬时视场的可用通道,表2为云检测试验的全部云污染视场中,可用通道占有通道的百分比,总体百分比为13.76%。原有的云检测方案是剔除所有的受云污染视场资料,只使用晴空区域的资料进行同化,而本试验将原本丢弃的视场资料中的部分通道得以利用,GIIRS实时观测的通道资料使用率明显增加。

4 结论与讨论

红外高光谱卫星资料容易受到云污染的影响,当前FY-4A/GIIRS采用传统云检测方案,造成大量观测资料浪费。本文在McNally方案基础上,优选部分通道并优化阈值参数,提出了基于GIIRS观测资料的自主云检测方法,结合RTTOV模式与EC再分析资料,结果经验证有较好的可行性,得出以下主要结论:

(1)根据GIIRS的仪器灵敏度进行通道选择,在长波CO₂波段得到9个通道,分别为:701.25 cm⁻¹、702.5 cm⁻¹、703.125 cm⁻¹、703.75 cm⁻¹、715.625 cm⁻¹、740 cm⁻¹、748.125 cm⁻¹、746.875 cm⁻¹、750 cm⁻¹。经42 000个瞬时视场试验验证,确定辐亮度偏差阈值满足:06时(白天)的阈值满足8 mW/m².sr.cm⁻¹,12时(夜间)的阈值为3 mW/m².sr.cm⁻¹。

(2)由提出的GIIRS云检测方法得到的检验结果,与AGRI云检测实时产品一致性较好;当GIIRS瞬时视场中存在少量细云或碎云时,由于GIIRS空间分辨率明显大于AGRI,因此在GIIRS边缘视场,二者云检测结果存在一定差异。

(3)利用提出的GIIRS云检测方法,使得受云污染的瞬时视场中的部分通道得以利用,统计分析约13.76%的通道被保留,GIIRS观测中的通道使用率明显增加。

本文提出的云检测方法为GIIRS资料同化提供了重要参考,卫星观测资料的可用通道信息明显增加。本文与AGRI云检测产品对比分析,未来将进一步进行与其他同类产品的对比研究。同时,本文仅选择了GIIRS探测波段中的长波CO₂通道进行云检测处理,后续还将考虑选择其他通道(臭氧、水汽以及短波CO₂通道)进行研究,并确定不同探测波段下的阈值参数,不断改进完善GIIRS资料的云检测技术研究。

References

- [1] DONG Pei-Ming, XUE Ji-Shan, HUANG Bing, et al. Application status and development of satellite data assimilation in numerical weather forecast [J]. *Meteorological Science and Technology* (董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展. *气象科技*), 2008, **36**(01): 1-7.
- [2] LIU Hang. Research on infrared hyper-spectral clear channel detection used in variational assimilation method [D]. Changsha: National University of Defense Technology (刘航. 红外高光谱晴空通道云检测在变分同化中的应用研究. 长沙: 国防科学技术大学), 2014.

- [3] GU Cheng-Ming, CHEN Cheng, GUO Wen-Bo. Influence of cloud detection of infraed satellite data on numerical simulation of typhoon [J]. *Infrared*(顾成明,陈成,郭文博. 红外卫星资料的云检测对台风数值模拟的影响. *红外*), 2018, **39**(01):24-30.
- [4] 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]. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, **125**(559):2359-2378.
- [5] 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.
- [6] Li J, Liu C Y, Huang H L, et al. Optimal cloud-clearing for AIRS radiances using MODIS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(6): 1266-1278.
- [7] Guan Li. *The application of space-borne infrared hyperspectral data* [M]. Beijing: (China Meteorological Press(官莉. 星载红外高光谱资料的应用) [M]. 北京: 气象出版社), 2008: 55-56.
- [8] 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.
- [9] CHEN Jing, LI Gang, ZHANG Hua, et al. Application of cloud detection to assimilation of AIRS radiance data [J]. *Meteorological Monthly*(陈靖,李刚,张华,等. 云检测在高光谱大气红外探测器辐射率直接同化中的应用. *气象*), 2011, **37**(05):555-563.
- [10] DENG Song, LI Gang, ZHANG Hua. Objective determination scheme of threshold in high-spectral-resolution infrared cloud detection [J]. *Meteorological Monthly*(邓松,李刚,张华. 高光谱红外云检测方案阈值的客观判定方法. *气象*), 2017, **43**(02):213-220.
- [11] ZHOU Fang. Inversion and accuracy verification of spectral calibration parameters for spaceborne infrared hyperspectral instrument [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(周方. 星载红外高光谱仪器光谱定标参数反演与精度验证研究. 北京: 中国气象科学研究院), 2019.
- [12] Andersson E. Use of cloud-cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1994, **120**(517): 627-653.
- [13] Huang H L, Li J, Baggett K, et al. Evaluation of cloud-cleared radiances for numerical weather prediction and cloud-contaminated sounding applications [J]. *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring. International Society for Optics and Photonics*, 2005, **5890**:589006.
- [14] DI Di. Data assimilation research for Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder onboard Feng Yun-4 satellite [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(狄迪. 风云四号高光谱红外探测仪资料同化相关问题研究. 北京: 中国气象科学研究院), 2019.
- [15] LIU Le, LI Yao-Dong. The application and research advances of RTTOV fast radiative transfer mode [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*. (刘乐,李耀东. RTTOV 快速辐射传输模式应用研究进展. *安徽农业科学*), 2016, **44**(03):230-232.
- [16] FENG Xuan, LI Li-Bing, CHEN Bo-Yang, et al. Post-Launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4A [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(冯绚,李利兵,陈博洋,等. 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(05):648-654.