

朱文刚,李刚,张华,等. 2013. 高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究. 气象, 39(5):633-644.

高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究^{* 1}

朱文刚^{1,2} 李 刚¹ 张 华³ 金大智¹ 王 根¹ 钟亦鸣¹

1 南京信息工程大学数统学院, 南京 210044

2 山东省气象科学研究所, 济南 250031

3 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 目前 GRAPES-3DVar(全球\区域同化预报系统)使用的 AIRS 云检测方案只能检测出完全晴空时的视场资料, 对于受到云污染的视场, 所有通道资料全部被剔除。研究表明有云视场当中的云顶以上资料对数值预报的影响更加重要, 研究也更加有意义。因此, 文章借鉴 McNally 和 Watts 云检测方案, 结合 GRAPES-3DVar 系统和仪器特征, 建立了一种适合于 GRAPES-3DVar 模式的晴空通道检测方案。该方案不但可以检测出完全晴空的视场资料, 同时也可以检测出有云视场当中不受云影响的云顶以上通道资料; 另外, 还可以求出云顶高度, 判断出高、中和低云。然后, 将 AIRS 观测资料分别用晴空视场检测方案和晴空通道检测方案进行云检测, 从结果分析看, 晴空视场检测方案可以检测出的晴空资料占总资料的 9.14%, 而晴空通道检测方案检测出的晴空资料达到了 34.86%, 是传统云检测方案的 3.8 倍, 大大增加了资料的使用度。

关键词: AIRS, 云检测, 晴空通道检测, 晴空视场检测, GRAPES-3DVar

中图分类号: P405

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.05.012

Study on Application Technique of Cloud Detection and Clear Channels Hyperspectral Atmospheric Infrared Detector AIRS Data

ZHU Wengang^{1,2} LI Gang¹ ZHANG Hua³ JIN Dazhi¹ WANG Gen¹ ZHONG Yiming¹

1 College of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Shandong Provincial Meteorological Institute, Jinan 250031

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Currently the method which GRAPES-3DVar (global\regional assimilation and prediction system) used can only detect the data of clear FOV, the whole channel data needs to be removed if the FOV is polluted by cloud. In fact, studies have shown that the data above cloud top in cloud FOV is more important to numerical prediction. Therefore, referring to McNally and Watts cloud detection schemes and, combining GRAPES-3DVar system and instrument characteristics, we built a detection scheme which is suitable for GRAPES-3DVar mode. This scheme can not only detect the field data of clear sky, but also detect the channel data above cloud top which is not influenced by cloud in cloud FOV. Besides, it can calculate the height of cloud top, and judge the cloud base of high, middle and low cloud. The detection scheme for the field view of clear sky cloud and the detection scheme for clear channel cloud are used to detect the AIRS observational data. The results show that the clear data detected by the field view of clear sky

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806003 和 GYHY201106008)及山东省超级计算科技专项项目(2011YD01106)共同资助
2012 年 5 月 4 日收稿; 2012 年 12 月 6 日收修定稿

第一作者: 朱文刚, 主要研究高光谱大气红外探测器的同化应用. Email: zhu122812@163.com

通信作者: 张华, 主要从事资料同化工作. Email: zhangh@cma.gov.cn

scheme stands for a 9.14% of the total and those by the clear channel cloud detection scheme the rate reaches 34.86%, 3.8 times more than the traditional cloud detection scheme.

Key words: AIRS, cloud detection, clear channel detection, clear FOV detection, GRAPES-3DVar

引 言

2002年5月4日,地球观测系统(EOS)第二颗卫星 Aqua 成功发射,原名 EOS-PM 1(下午星)。其上携带的高光谱大气红外探测器 AIRS(Atmospheric InfraRed Sounder),按美国国家航空宇航局(NASA)设计要求,采用红外光栅分光技术,高光谱分辨率 $\nu/\Delta\nu\approx 1200$ 每天全球覆盖两次,可以连续观测地球大气及变化,光谱覆盖 $3.7\sim 15.4\ \mu\text{m}$ ($650\sim 2700\ \text{cm}^{-1}$) 波长范围内共 2378 个通道的辐射亮温资料。AIRS 扫描宽度约 1650 km,星下点分辨率约为 13 km,垂直分辨率为 1 km,能提供从地面到 40 km 高度的大气信息,辐射精度优于 0.2 K,具有高测量精度和高光谱分辨率的特性,第一次在卫星上实现了真正意义上的对大气和海洋环境的高光谱分辨率大气红外探测,被用来探测精细的大气温度、湿度廓线及臭氧总含量等(陈靖等,2011;官莉,2007)。

当前,我国数值预报中心已经把 AIRS 用于资料同化,提高了数值预报的效果(张华等,2002;朱国富等,2008)。李娟等(2008)进行了直接同化 ATOVS 卫星辐射率资料在暴雨预报中的应用研究。但是,红外遥感资料不能穿透云,而只能测量云顶,得不到云底以下的信息。云对红外辐射率的影响巨大,例如,在中对流层长波波段($15\ \mu\text{m}$)的大气温度探测通道,云对大气温度廓线的影响可能会达到十几 K,导致了红外资料的云污染,使红外辐射率资料很难被使用。因此,要想实现高光谱大气红外探测器 AIRS 辐射率的同化应用,云检测是关键一步。

关于云检测方法,国内外的专家学者做了许多卓有成效的工作。Menzel 等(1983)通过 CO_2 切片法计算云顶气压和有效发射率来计算云导风;Smith 等(1990)通过 CO_2 切片法计算云顶气压和有效发射率对 ATOVS 的大气红外探测器进行云检测;Goldberg 等(2002;2003)利用 AIRS 通道和相应微波通道的经验组合,提出了适用于 AIRS 的 NES-

DIS-Goldberg 云检测方案,分别对陆地和海洋表面的视场进行云检测;McNally 等(2003)根据通道对云的敏感性不同,提出了一种寻找完全不受云影响的晴空通道检测方案。在国内,官莉(2007)运用与 AIRS 空间匹配的 MODIS 的 L2 级产品云掩膜来确定受到云污染的视场;王华荣等(2010)基于 FY-2C 红外资料进行夜间云检测的方法研究;陈靖等(2011)在 NESDIS-Goldberg 云检测方案基础之上,提出了适合 GRAPES-3DVar 的云检测方案,分别对海洋表面(4 个检验)和陆地表面(3 个检验)的视场进行云检测;但该方案只能提取完全晴空的视场资料,把有云的视场资料全部剔除。目前大部分数值预报业务模式只处理晴空大气卫星资料(Anderson et al, 1994),但是对于高光谱大气红外探测来说,全球只有少于 10% 的 AIRS 视场是没有云污染的,造成大量的资料被丢弃。并且,研究表明在 NWP 中那些引起预报误差增长的区域经常是有云的,在有云的敏感区域,应当仅剔除受云污染的资料尽可能地谨慎保留不受云污染的信息。因此,在各个视场检测出这些资料可以增加资料的使用度和避免潜在的有用信息的丢弃,尤其是高光谱探测器丢弃的有用信息更多。

GRAPES-3DVar(全球\区域同化预报系统)对有云视场辐射率资料的同化应用还没有开展。本研究借鉴 McNally 和 Watts 云检测方案,结合 GRAPES-3DVar 系统和 AIRS 仪器特征,对 AIRS 各个视场通道进行云检测,剔除受到云污染通道,从而为有云资料在数值天气预报资料同化系统中的应用奠定基础。该方案不但可以检测出晴空视场资料,同时也可以检测出有云视场当中不受云影响的晴空通道资料,然后把晴空通道的辐射率资料进行同化,增加供使用的高光谱卫星观测资料数量,改善预报模式初值,提高数值预报的效果。

1 AIRS 卫星资料

AIRS 红外探测器光谱覆盖范围 $3.7\sim 15.4\ \mu\text{m}$

(600 ~ 2700 cm⁻¹), 光谱分辨率短波 3.74 ~ 4.61 μm 为 2 cm⁻¹; 中波 6.20 ~ 8.22 μm 为 1 cm⁻¹; 长波 8.80 ~ 15.4 μm 为 0.5 cm⁻¹, 共有 2378 个红外通道。目前, GRAPES-3DVar 模式进行数值预报使用的通道为 323 个, 因此, 本文的晴空通道检测方案同样使用这 323 个通道, 分为 5 个光谱带, 图 1 为 AIRS 5 个光谱吸收带的分布, 其中长波 CO₂ 吸收带占 141 个, 臭氧吸收带占 36 个, 水汽吸收带占 57 个, 4.3 μm CO₂ 吸收带占 25 个, 4.2 μm CO₂ 吸收带占 64 个。

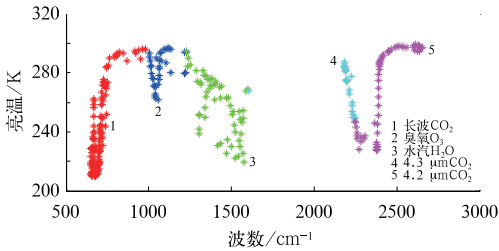


图 1 AIRS 5 个光谱吸收带的分布

Fig. 1 AIRS distribution of 5 spectral absorption bands

每天 AIRS 由 240 个景构成对全球的观测, 每 6 min 的观测资料构成一个景, 每个景由 135 条扫描线组成, 每条扫描线有 90 个观测视场, 每个视场包含 2378 个光谱取样, 约有 120 个景是白天观测的, 而另外 120 个景是晚上观测的。本文的目的就是利用云检测方案, 提取每个视场的晴空通道资料; 本研究所用资料为 AIRS 的一级产品 L1B 数据, 包括辐射率、地理经度、纬度、地表水平高度、太阳天顶角、方位角、卫星天顶角、方位角及陆地(海面)标记等 (NASAl, 2002), 均来自 NASA Goddard Space Flight Center Distribution Active Center (NASA/GSFC DAAC)。

2 GRAPES-3DVar 同化方法

变分同化方法的基本思想是将资料同化归结为一个表征分析场与观测场、分析场与背景场偏差的二次泛函极小值问题。该泛函(目标函数)一般定义为:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}[\mathbf{H}(x) - y_0]^T \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{H}(x) - y_0] \quad (1)$$

其中, x 是控制变量, 上标 T 和 -1 分别代表矩阵的转置和逆, 下标 b 表示背景场; y_0 是观测量, 这里是卫星辐射率; \mathbf{B} 是背景误差协方差矩阵; $\mathbf{R} = \mathbf{O} + \mathbf{F}$, 分别是观测误差和观测算子(正演模式)代表性误差协方差矩阵; \mathbf{H} 为观测算子, 这里为辐射传输模式 RTTOV7。传统上假定观测误差无偏并满足正态分布(陶士伟等, 2008)。

由于资料同化的大气观测的资料并不是完美的, 它们包含几种误差, 包括仪器和人为误差, 也可能包含“观测算子的正演误差”。仪器和观测算子的正演误差是随机的, 随机误差一般假设为正态分布。对于高光谱红外卫星资料而言, 云对 AIRS 辐射率有巨大的影响, 这种影响可能会导致观测误差不满足正态分布, 产生错误的信息。因此, 本文云检测方案核心思想就是剔除受云污染的资料, 尽可能保留有云区探测资料。

3 晴空通道检测方案

卫星测量到的某通道的大气辐射是整层大气在该通道的辐射总量。每层大气对辐射总量的贡献不同, 不同波长贡献最大的大气层也不同。哪个高度的大气层对辐射贡献最大可由权重函数决定, 权重函数最大的高度就是对总辐射贡献最大的大气层高度(邹晓蕾, 2009)。图 2a 为晴空视场的权重函数, 所有的通道为晴空通道。图 2b 为有云视场的权重函数, 当视场在某一高度有云时, 有些通道的权重函数的最大值在云的上面, 辐射率探测受云的影响较小, 称为晴空通道。由于红外不能穿透云, 此时, 有些通道就探测不到权重函数最大值所在的那一层, 称为有云通道, 显然, 高、中、低云的不同影响了晴空通道的数目, 视场当中的云越高晴空通道越少。通过计算通道的高度和云高, 通道高度大于云高的通道就是要提取的晴空通道。

本文的云检测思想, 采用 McNally 和 Watts 云检测方案, 根据通道对云的敏感性将模拟晴空亮温(用 6 h 的预报结果作为背景场)减去观测亮温的偏差进行排序, 采用移动平均滤波滤除仪器噪声, 对于几种情形(晴空、低冷云、高冷云、高暖云及低暖云)的偏差, 逐步寻找完全不受云污染的晴空通道。

如果观测亮温和晴空模拟亮温不受各种误差的影响, 晴空亮温和观测亮温的偏差主要来自云的影响, 图 3a 为世界时 2009 年 7 月 2 日 00 时 (-3 h ~

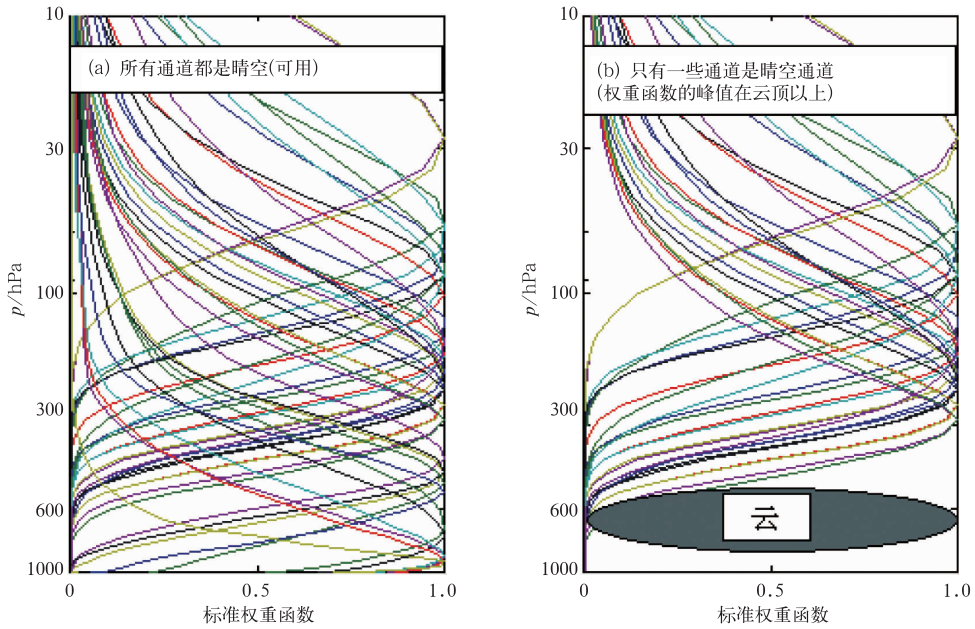


图 2 (a)晴空视场(无云)的权重函数,(b)有云视场的权重函数

Fig. 2 (a) Clear FOV weight function, (b) Cloudy FOV weight function

3 h), RTTOV 模拟的一个视场点的晴空亮温(空心圆)和观测亮温(实心圆)。那么晴空亮温减去观测亮温的偏差中非零的通道为有云通道,偏差为零的通道为晴空通道,图 3b 为晴空亮温减去观测亮温的偏差。实际上,偏差的引起还受仪器噪声、模式误差和大气状态的影响,这些噪声混淆了云的信息。

因此,为了检测偏差中的晴空通道,在每个视场点根据通道高度对偏差进行排序,图 3c 为根据通道高度排序后的偏差。由于这个排序没有考虑 5 个光谱带本身的特点和红外光谱的特性,所以应该把光谱分成 5 个光谱带再分别排序,图 3d 为分成 5 个光谱带再排序的偏差。在每个光谱带,云信息的敏感性是单调增加的,从中找出第一个不受云影响的晴空通道,那么对云具有更高敏感性的通道为有云通道,反之为晴空通道。

3.1 晴空通道检测方案步骤

(1) 根据通道对云的敏感性计算通道高度。

(2) 将模拟的晴空亮温减去观测亮温的偏差分成 5 个光谱带,然后根据通道高度对每个光谱带的偏差进行排序。

(3) 采用移动平均滤波减少各种噪声在云信号中的幅度,使得偏差中只包含云的信息。

(4) 在每个带从云敏感性最强的那个通道开始检测,当某个通道亮温偏差值和变分同化目标函数的梯度值同时满足:

$$\begin{cases} \text{grad}(d_{l_p}^i) < \text{grad}_{\max} \\ d_{l_p}^i < d_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

那么,此时这个通道的高度就是云顶高度,高于云顶高度的那些通道是晴空通道,低于云顶高度的那些通道是有云通道。图 4 为晴空通道检测方案流程。 i_{low} 是排序后对云最敏感的那个通道。窗区通道梯度阈值为 0.4 K,其他通道梯度阈值为 0.02 K。偏差向量阈值为 1.0 K。

3.2 关键参数的确定

3.2.1 通道高度

为了强调通道对云的敏感性,定义通道高度为

$$\left| \frac{R_{\text{clear}} - R_{\text{cloudy}}}{R_{\text{clear}}} \right| > 0.01 \quad (3)$$

其中, R_{clear} 参数指晴空的辐射率, R_{cloudy} 参数指黑体云向上发射的辐射率。这种定义通道高度的方法直观地反映了云响应。

受温度和水汽等影响,通道高度在不同的视场点是变化的。图 5 为世界时 2009 年 7 月 2 日 00 时(-3 h~3 h),通道 145、通道 226 和通道 787 在不

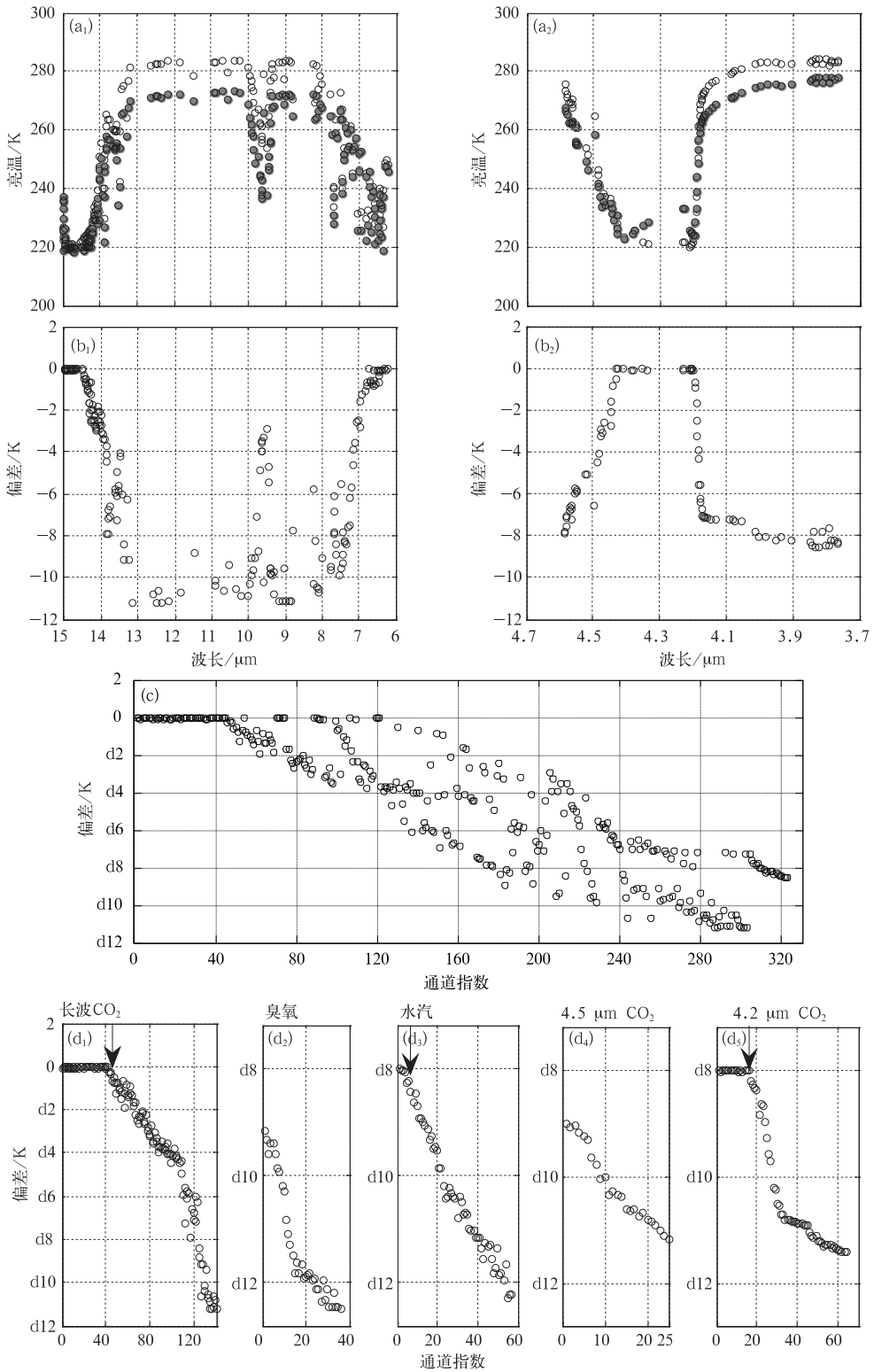


图 3 (a) 2009 年 7 月 2 日 00 时 (-3 h~3 h), RTTOV 模拟的一个视场点的晴空亮温(空心圆)和观测亮温(实心圆), (b) 晴空亮温减去观测亮温的偏差, (c) 根据通道高度排序后的偏差, (d) 分成 5 个光谱带再排序的偏差
 Fig. 3 (a) At 00 UTC 2 July 2009, clear FOV brightness temperature simulated by RTTOV (hollow circle) and the observed brightness temperature (solid circle), (b) the deviation of clear FOV brightness temperature minus observed brightness temperature, (c) the deviation according to the sequencing of the channel height, (d) the deviation of the sequencing of 5 spectral bands

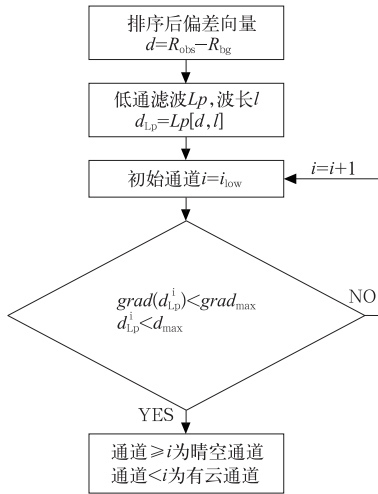


图 4 晴空通道检测方案流程图
Fig. 4 Flow chart of clear channel detection scheme

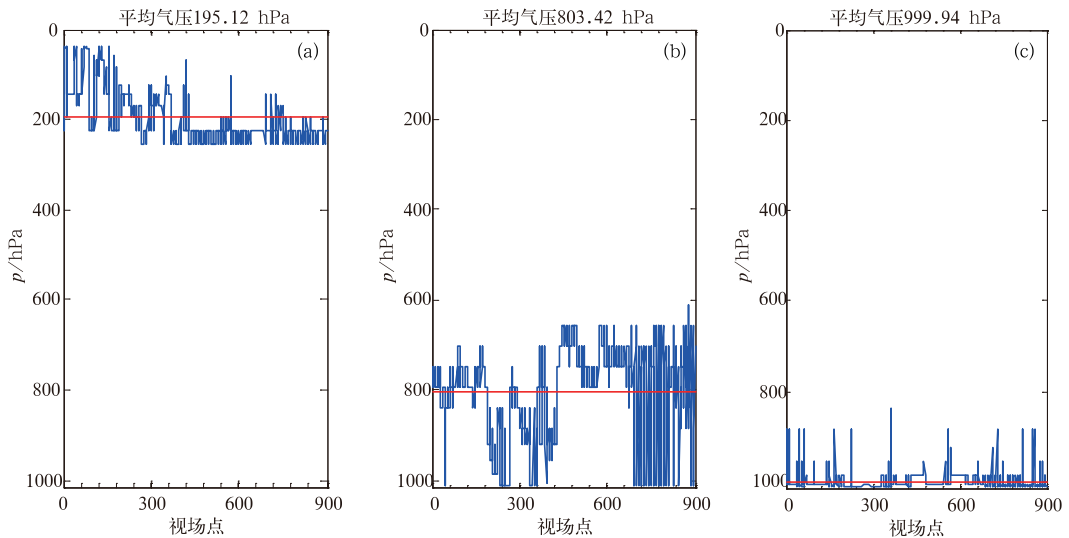


图 5 通道 145、通道 226 和通道 787 在不同视场点的通道高度
Fig. 5 The channel height at different FOV in channel 145, channel 226 and channel 787

50°S、100°~180°W)低、中和高 3 个通道在不同偏差阈值下的云检测结果。对于地面通道 787, 比较图 6b~6d 椭圆标注的区域发现, 当偏差阈值为 0.5 K 时(图 6c)把一些晴空通道资料给剔除了, 剔除的资料过多。比较图 6b、6d 和 6e 矩形标注的区域发现, 当偏差阈值为 2 K 时(图 6e)一些有云资料没有检测出来。当偏差阈值为 1 K 时(图 6d), 即有效地剔除受云污染的资料, 又保留了晴空视场。

图 7b MODIS 可见光云图中亮白的云代表中高云, 而灰暗的云为低云, 中层通道 226 不受低云的影响, 图 7b 椭圆标注的灰暗区域对于通道 226 来说

同视场点的通道高度。

3.2.2 阈值确定

本文借鉴欧洲中心的经验并结合 GRAPES-3DVar 模式本身的特性和误差来确定式(2)中最优的偏差阈值 d_{\max} 和梯度阈值 $grad_{\max}$ 。根据统计经验梯度阈值对云的敏感性影响很小, 因此梯度阈值仍然和欧洲中心保持一致, 窗区通道 $grad_{\max}$ 为 0.4 K, 非窗区通道 $grad_{\max}$ 为 0.02 K, 窗区通道的 $grad_{\max}$ 明显大于非窗区通道, 这是因为窗区通道的通道高度位于地面, 由于地面的复杂程度, 偏差的变化比较大。

对于偏差阈值的确定, 根据 GRAPES-3DVar 模式本身的特性和误差, 以世界时 2009 年 7 月 2 日 00 时(-3 h~3 h)的观测资料为例, 分析(40°N~

为晴空通道, 当偏差阈值为 0.5 K 时(图 7c)把这些晴空通道资料给剔除了。图 7b 矩形标注的亮白区域云高高于通道 226 的通道高度, 当偏差阈值为 2 K 时(图 7e)这些有云资料没有检测出来。经验知道高云一般在赤道附近, 中高纬度的云一般为中低云, 因此, 中层通道 226 比低层通道 787 明显增加了中高纬度资料。对于高层通道 145(波数 691.391 cm^{-1} , 权重函数的峰值在 100 hPa)来说, 有云区域一般集中在赤道附近(图略), 通过以上分析选择最优的偏差阈值 d_{\max} 为 1.0 K。

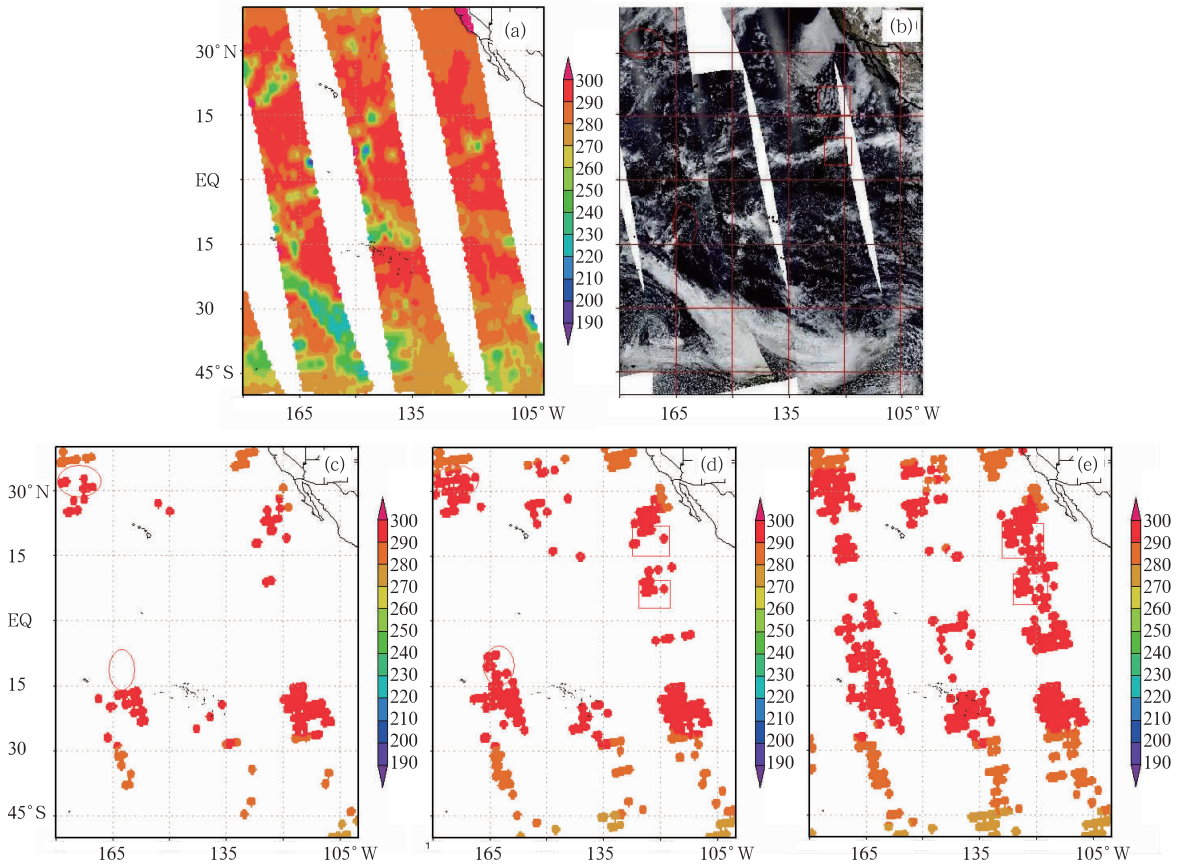


图 6 (a)云检测前通道 787(波数 917.306 cm^{-1} , 权重函数的峰值在地面) 的观测亮温;(b)MODIS 可见光云图(引自 <http://modis.gsfc.nasa.gov/>) (c)~(e)分别为偏差阈值为 0.5、1 和 2 K 时云检测后通道 787 的亮温
 Fig. 6 (a) The observed brightness temperature of channel 787 (wavenumber 917.306 cm^{-1} , weight function peak on the ground), (b) MODIS visible cloud image (reference: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>), (c)—(e) the brightness temperature of channel 787 after cloud detection at the deviation threshold 0.5 K, 1 K, 2 K respectively

4 云检测结果

以世界时 2009 年 7 月 2 日 00 时(-3 h~3 h) AIRS 的观测为例,图 8a 为 60 个景在窗区通道 787 的亮温扫描图图 8b 为对应的 MODIS 全球可见光云图。对比图 8a 和 8b,能够发现图 8a 中暖色调(高的亮温)对应着地表晴空或中低云;冷色调(冷的亮温)对应着高云。图 8c 为图 8a 经过 GRAPES-3DVar 质量控制(观测资料的稀疏化处理、极值检验及偏差订正等)后的亮温。

图 9a 为图 8c 经过 GRAPES-3DVar 晴空通道检测后晴空通道的亮温。对比图 9a 和 9b 发现该云

检测可以很好地检测出底层海洋上面的晴空通道,大部分视场受云的影响而被剔除。很明显在陆地上该云检测效果不理想,这是因为窗区通道 787 权重函数的峰值在地面,它得到的是地面的晴空信息,由于地表发射率先验知识(如地表温度误差和地表发射率误差比较大)的匮乏,所以在陆地上该云检测方案对近地面通道的检测不理想。图 9b 为通道 226 云检测后的晴空通道的亮温,图 9c 为通道 145 云检测后晴空通道的亮温,高层通道不受低云的影响,通道随高度增加云量减少晴空通道逐渐增多。高层通道 145 受到云污染的区域主要集中在热带地区,因为这些地区经常存在高的对流云系统,另外在较高纬度地带会有一些卷云的出现。

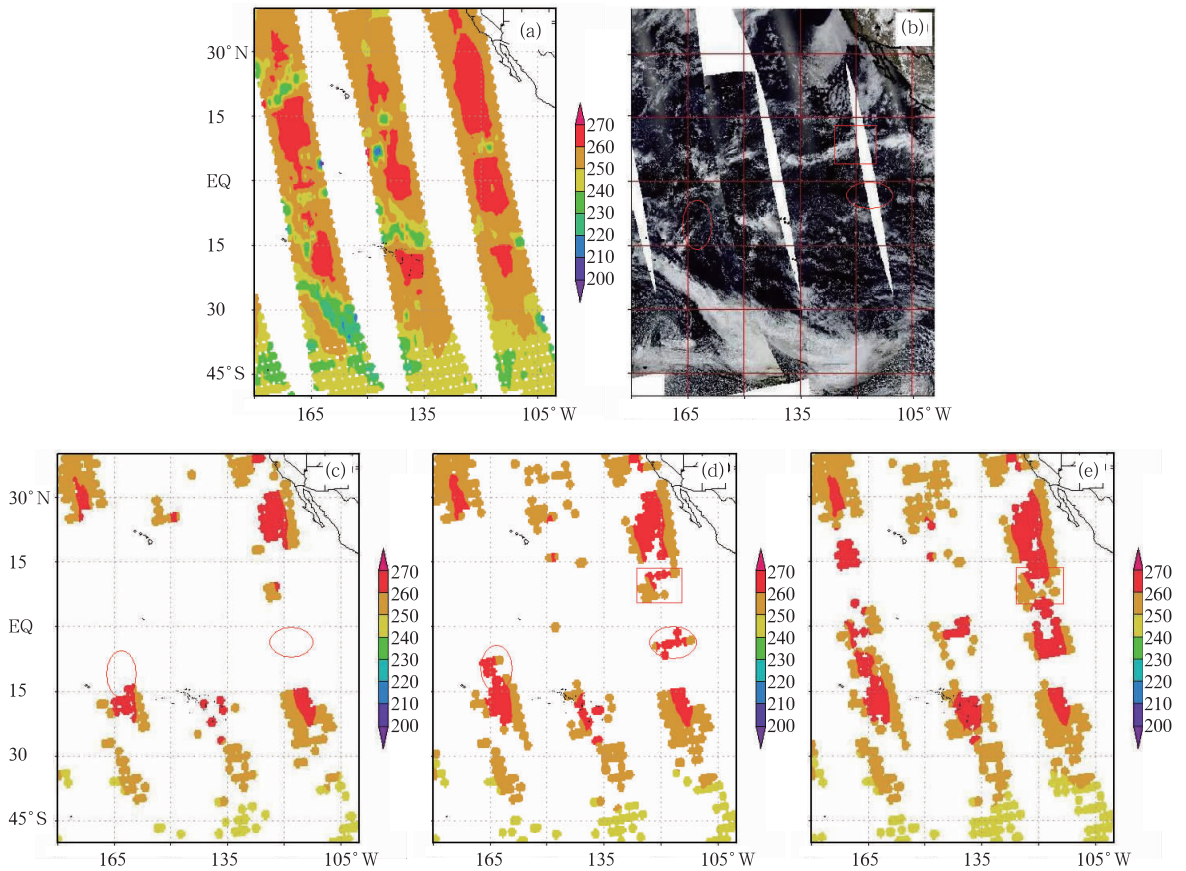


图 7 (a)云检测前通道 226(波数 714.191 cm^{-1} , 权重函数的峰值在 600 hPa)的观测亮温(b)MODIS 可见光云图(c)~(e)分别为偏差阈值为 0.5 、 1 和 2 K 时云检测后通道 787 的亮温

Fig. 7 (a) The observed brightness temperature of channel 226 before cloud detection (wavenumber 714.191 cm^{-1} , weight function peak at 600 hPa), (b) MODIS visible cloud image (c)~(e) the brightness temperature of channel 787 after cloud detection at the deviation threshold 0.5 K , 1 K , 2 K respectively

随机选取 3 个有云(高云、中云及低云)视场和一个完全晴空视场,图 10 为长波 CO_2 吸收带根据通道高度排序后的偏差,图 10a 为有高云的视场,图 10b 为有中云的视场,图 10c 为有低云的视场,图 10d 为完全晴空视场。从图中看出视场中随着云的高度降低晴空通道越来越多,这和图 9 云检测结果一致,直观地反映了高、中及低云对晴空通道的影响。

图 9 和图 10 只给出了部分通道云检测的结果,整体来看,图 11 为长波 CO_2 吸收带晴空通道的百分比。图中 11.0 、 13.5 和 $14.5 \mu\text{m}$ 3 个通道分别对应图 9a、9b 和 9c 3 张图,和图 9 云检测的结果一

致。晴空通道百分比从右往左基本上是上升趋势,验证了通道随高度增加云量减少晴空通道逐渐增多。

和传统的 GRAPES-3DVar 晴空视场检测方案相比,GRAPES-3DVar 晴空通道检测方案大大增加了中高层资料的使用率,以世界时 2009 年 7 月 2 日 00 时($-3 \text{ h} \sim 3 \text{ h}$)的 AIRS 观测资料为例,从表 1 看出在相同资料的情况下,GRAPES-3DVar 晴空视场检测使用了 16630 个晴空通道,晴空通道比例占 9.14% ,而 GRAPES-3DVar 晴空通道检测使用了 63577 个晴空通道,晴空通道比例占 34.86% ,是传统云检测方案的 3.8 倍。

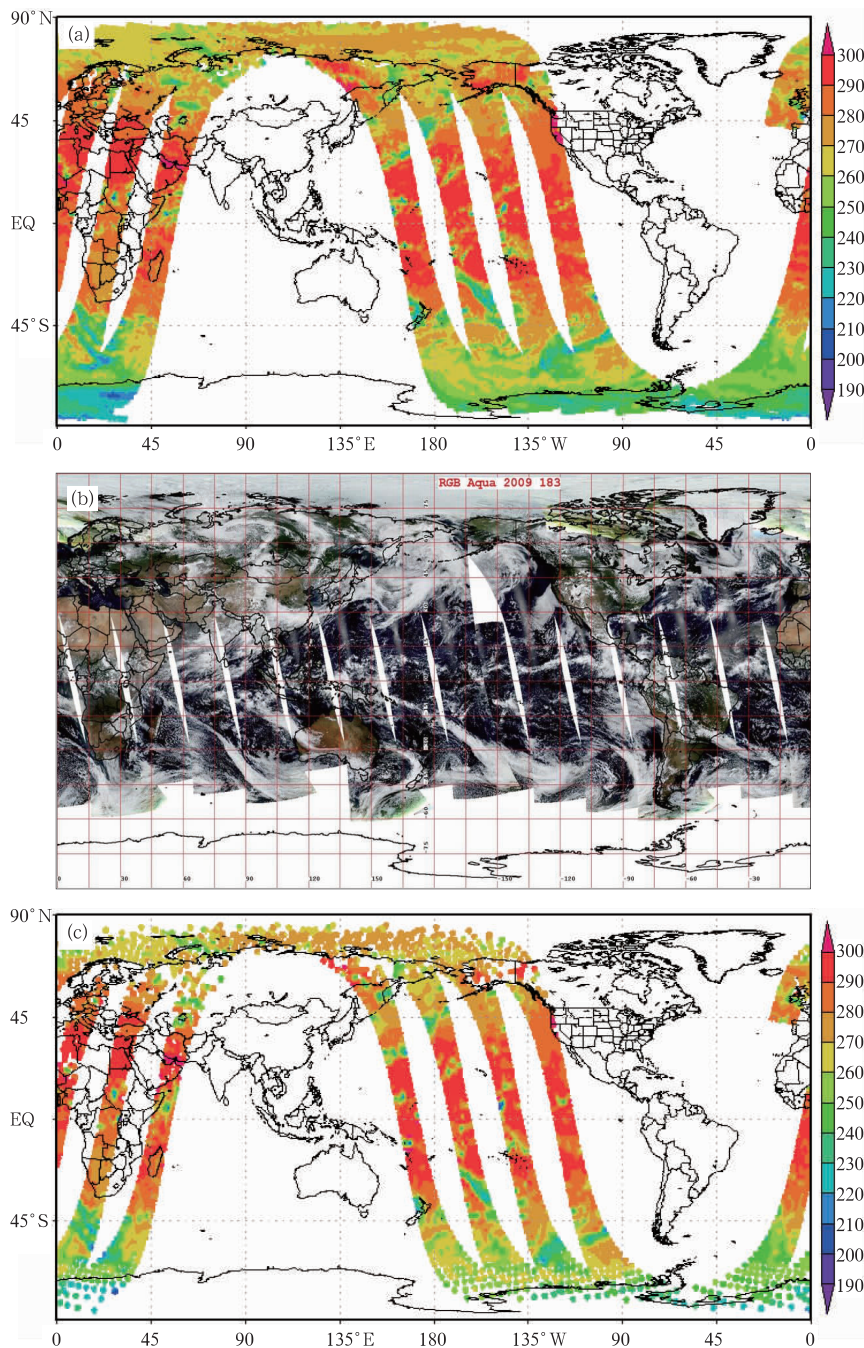


图 8 (a)窗区通道 787(波数 917.306 cm^{-1} , 权重函数的峰值在地面)的亮温扫描图, (b)MODIS 全球可见光云图, (c)经过 GRAPES-3DVar 质量控制(观测资料的稀疏化处理、极值检验及偏差订正等)后的窗区通道 787 的亮温

Fig. 8 (a) The scanned brightness temperature of window channel 787 (wavenumber 917.306 cm^{-1} , weight function peak on the ground), (b) MODIS global visible cloud image, (c) the brightness temperature of window channel 787 after GRAPES-3DVar quality control (Observation's sparse processing, extreme value testing, deviation correction, etc.)

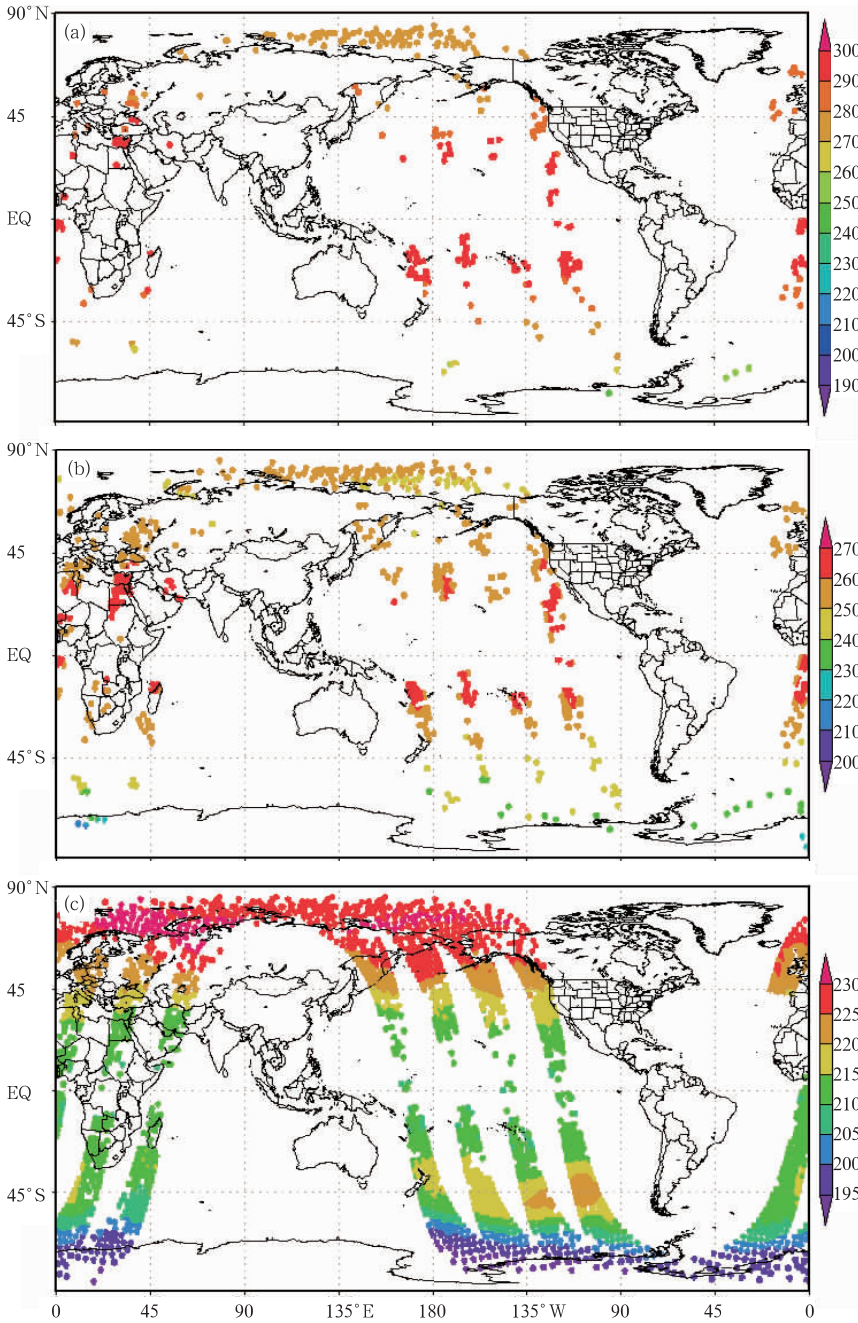


图 9 (a)云检测后窗区通道 787 的亮温, (b)云检测后通道 226 的亮温, (c)云检测后通道 145 的亮温

Fig. 9 (a) The brightness temperature of window channel 787 after cloud detection, (b) the brightness temperature of channel 226 after cloud detection, (c) the brightness temperature of channel 145 after cloud detection

5 小结和将来的工作

从上面的结果分析可以看出, GRAPES-3DVar

晴空通道检测方案可以求出云顶高度, 判断高、中、低云; 不但可以检测出晴空视场资料, 同时也可以检测出有云视场当中不受云影响的晴空通道资料, 增加了对流层中上层和平流层下层的资料。该云检测

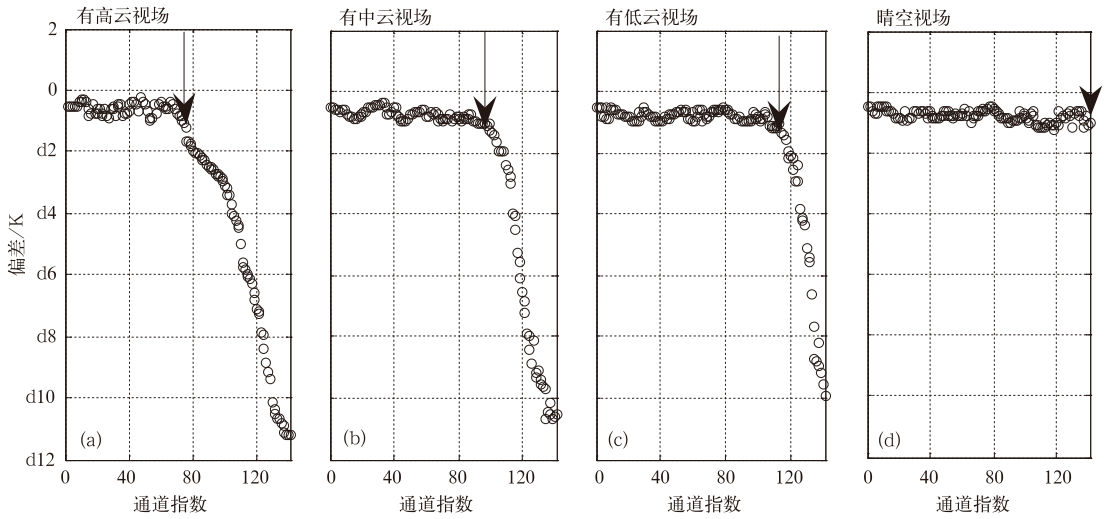


图 10 长波 CO₂ 吸收带根据通道高度排序后的偏差
 (a)有高空的视场(b)有中空视场(c)有低云的视场(d)完全晴空视场
 Fig. 10 The deviation of the longwave CO₂ absorption band according to the sequencing of the channel height

(a) high cloud FOV, (b) middle cloud FOV, (c) low cloud FOV, (d) completely clear FOV

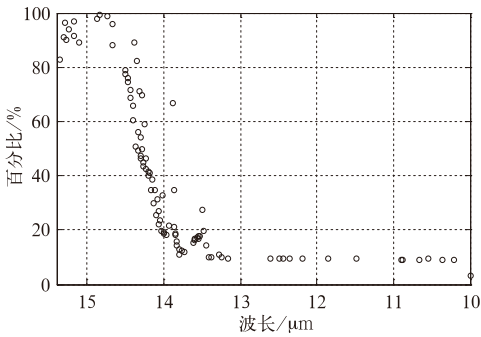


图 11 晴空通道的百分比

Fig. 11 The percentage of clear channels

表 1 两种云检测方案的结果

Table 1 The result of two cloud detection schemes

方案	总视场数	使用视场数	晴空通道数	晴空通道比例
GRAPES-3DVar 晴空视场检测	3345	290	16630	9.14%
GRAPES-3DVar 晴空通道检测	3345	2025	63577	34.86%

方案明显优于传统的晴空视场的云检测方案,大大增加了资料的利用率,为有云资料的使用打下基础。

由于地表发射率先验知识(如地表温度误差和地表发射率误差比较大)的匮乏,该云检测方案对近

地面层的检测效果不理想,对海洋上的云检测有比较理想的效果。

在接下来的工作中,将进行同化影响试验来进一步检验云检测的效果,并且把该方案应用到 GRAPES-3DVar 模式中,以期提高数值预报的质量。总之,该研究为 AIRS 有云资料在 GRAPES 三维变分同化系统中的应用奠定了基础。

参考文献

陈靖,李刚,张华,等. 2011. 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, 37(5):555-563.
 官莉. 2007. 星载红外高光谱资料的应用. 北京:气象出版社,106.
 官莉,王振会. 2007. 用空间匹配的 MODIS 云产品客观确定 AIRS 云检测. 气象科学, 27(5):516-521.
 李娟,朱国富. 2008. 直接同化卫星辐射率资料在暴雨预报中的应用研究. 气象, 34(12):36-43.
 陶士伟,郝民,薛纪善,等. 2008. 数值预报同化系统中观测资料误差分析. 气象, 34(7):34-40.
 王华荣,朱小祥,谢向明. 2010. 基于 FY-2C 红外资料进行夜间云检测的方法研究. 气象, 36(6):105-111.
 张华,薛纪善,庄世宇,等. 2002. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. 气象学报, 62(1):30-41.
 朱国富,薛纪善,张华,等. 2008. GRAPES 变分同化系统中卫星辐射率资料的直接同化. 科学通报, 53(20):2424-2427.
 邹晓蕾. 2009. 资料同化理论和应用(上册). 北京:气象出版社,120.
 Andersson E, Pailleux J, Thépault J N, et al., 1994. Use of cloud-

- cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 120(517), 627-653.
- Goldberg M D, Zhou, 2002. AIRS clear detection flag, Presentation material at a meeting.
- Goldberg M D, Qu Y, 2003. AIRS Near-real-Time Products and Algorithms in Support of Operational Numerical Weather Prediction, *IEEE Trans. Geosci Remote Sensing*, 41(2):379-388.
- Menzel, Smith M, Stewart T. 1983. Improved Cloud Motion Wind vector and altitude assignment using VAS. *J Appl Meteor*, 22(3):377-384.
- McNally A P, Watts P D. 2003. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders. *Q J R Meteorol Soc*, 129(595): 3411-3423.
- NASA/GES DAAC/Atmospheric Dynamics Data Support Team, Atmospheric Dynamics DST, AIRS/AMSU/HSB July 20, 2002 Sample Day L1B Data Documentation 2002, 17:1-20.
- Smith W L, Frey R. 1990. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder observations. *J Appl Meteor*, 29(7):658-662.