

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[J]. 气象,2011,37(5):555-563.

# 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<sup>\*1</sup>

陈 靖<sup>1,2</sup> 李 刚<sup>1</sup> 张 华<sup>3</sup> 王 根<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学数理学院,南京 210044

2 天津市气象局气象科学研究所,天津 300074

3 国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 对于高光谱大气红外探测器 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)辐射率的同化,云检测技术是关键的一步。本文借鉴 Goldberg 的云检测的思想,通过 AIRS 通道和相应微波通道的经验组合来进行云检测,此云检测方案不需要对通道进行偏差订正,并且除背景场海表温度,不依赖于大气的先验信息,是一个快速简单的云检测方案。本文将其原来 NESDIS-Goldberg 的 3 个云检测步骤改为 7 个云检测步骤,其中海洋表面 4 个,陆地表面 3 个,并选择最优的阈值,然后利用 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。对 2006 年 6 月 30 日 AIRS 的视场,分别用 NESDIS-Goldberg 云检测方案和 GRAPES-Goldberg 云检测方案进行云检测,从结果的分析来看,GRAPES-Goldberg 云检测方案可以更有效地检测出受到云污染的视场,晴空视场占到总视场的 10.1%。

**关键词:** AIRS, 云污染, 云检测, GRAPES-3DVar

## Application of Cloud Detection to Assimilation of AIRS Radiance Data

CHEN Jing<sup>1,2</sup> LI Gang<sup>1</sup> ZHANG Hua<sup>3</sup> WANG Gen<sup>1</sup>

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

2 Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin Meteorological Service, Tianjin 300074

3 National Meteorological Centre, CMA, Beijing 100081

**Abstract:** The cloud detection technology is one of the key steps to implement the application of the assimilation of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). Mitch Goldberg's cloud detection is a very fast model based on an empirical combination of 3 tests applied to AIRS channel and co-registered AMSUA channels. The cloud detection does not need to apply a channel bias correction. Also, it is relatively independent of atmospheric prior information, except for sea surface temperature. According to the Mitch Goldberg's thought of cloud detection, the original 3 tests of NESDIS-Goldberg cloud detection scheme have been improved to 7, 4 in sea surface and 3 in land surface. The improved cloud detection is conducted to AIRS FOV of the land and sea respectively with the use of GRAPES-3DVAR (Global/ Regional Assimilation and Prediction System). There is a cloud, if every single FOV passed the cloud detection scheme. The NESDIS-Goldberg cloud detection scheme and GRAPES-Goldberg cloud detection scheme are used to detect the 6 scenes of AIRS on 1 July 2006 respectively. The analysis result shows that, the GRAPES-Goldberg cloud detection scheme can effectively find out the FOV contaminated by cloud, and the clear FOV accounts for 10.1% of the total FOV.

\* 国家 863 计划“高光谱大气红外探测器辐射率直接同化的技术研究”(2007AA12Z140)和国家重点基础研究发展计划 973“台风登陆前后多源观测资料综合分析理论和方法研究”(2009CB421502)共同资助

2010 年 5 月 15 日收稿; 2010 年 9 月 13 日收修定稿

第一作者:陈靖,主要从事高光谱大气红外探测器的同化应用研究.Email:cjj1\_1@163.com

**Key words:** AIRS(Atmospheric Infrared Sounder), cloud contamination, cloud detection, GRAPES-3DVar

## 引言

2002 年 5 月 2 日,地球观测系统(EOS)第二颗卫星 Aqua 发射成功,其上携带的高光谱大气红外探测器(AIRS, Atmospheric Infrared Sounder)是 Aqua 卫星平台上 6 个观测仪器中的一个主要观测仪器。采用红外光栅分光技术,2378 个通道覆盖  $650\sim 2700\text{ cm}^{-1}$  红外谱区域,其光谱分辨率( $\nu/\Delta\nu$ )高于 1200,辐射精度优于 0.2 K,真正实现了高光谱精度探测<sup>[1]</sup>。与 HIRS(High Resolution Infrared Sounder)相比,高光谱分辨率探测器 AIRS 在温度、湿度的探测能力方面有了重大的改进。因此,AIRS 具有用于资料同化,提高数值天气预报技巧的潜能。当前,许多数值预报中心都在监控近实时的 AIRS 数据和实施影响研究。

在热红外波段,大部分云像完全的辐射体一样发射。这些辐射体的温度相当于云顶水滴或冰晶的温度。不透明云与辐射的总效果造成卫星的传感器不能探测来自地面和云下面的大气辐射,而只能测量云顶。云在红外区段的污染妨碍了确定地面和大气条件的许多自动技术的应用,例如,对于中对流层在长波段( $15\text{ }\mu\text{m}$ )的大气温度探测通道,大气温度廓线中的不确定性相当于十几分之 K 的辐射信号,而云的影响可能会达到十几 K,这种不平衡导致了云污染,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。

关于云检测的方法,国外的学者专家做了许多卓有成效的工作。Menzel 等<sup>[2]</sup>通过  $\text{CO}_2$  切片法计算云顶气压和有效发射率来计算云导风;在此基础上,Smith 等<sup>[3]</sup>通过  $\text{CO}_2$  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;对于 AIRS 云检测,McNally 等<sup>[4]</sup>提出了一种寻找不受云影响的通道的云检测方案。在有云的区域,这些不受云影响的通道仍然可以使用,避免了在有云的情况下丢弃潜在的可用信息,增加了可供使用的卫星资料量。以上的云检测方法都会用到背景场和大气温度、湿度、臭氧和地表温度的先验信息,来判断晴空辐射率。Goldberg 等<sup>[5]</sup>提出了适用于高光谱大气红外探测器 AIRS 的 NESDIS-Goldberg 云检测方案;Goldberg 等<sup>[6]</sup>在原来云检测方案的基

础上,分别对陆地和海洋表面的视场进行云检测。在国内,官莉<sup>[1]</sup>运用了与 AIRS 空间匹配的 MODIS 的 L2 级产品云掩膜来确定受云污染的视场。

我国现已建立起具有直接同化卫星辐射率资料能力的全球/区域三维变分同化系统(GRAPES-3DVar),能够直接同化 NOAA15-17 的先进的 TIROS 业务垂直探测器(ATOVs, Advanced TIROS Operational Vertical Sounder)卫星辐射率资料<sup>[7-8]</sup>,但对 AIRS 卫星辐射率资料的同化应用工作还没有开展。本研究在 Goldberg 等<sup>[5]</sup>的 AIRS 云检测基础上,参考 Goldberg 等<sup>[6]</sup>提出的云检测方案,结合 GRAPES-3DVar 系统和 AIRS 仪器特征,将其原来 NESDIS-Goldberg 的 3 个检验步骤<sup>[5]</sup>改为 7 个,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,剔除受到云污染的视场,从而为高光谱大气红外探测器辐射率资料同化奠定基础。

## 1 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。该泛函一般定义为:

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

其中, $x$  是控制变量,下标  $b$  表示背景场; $y_o$  是观测量,这里是卫星辐射率; $B$  是背景误差协方差矩阵; $R = O + F$ ,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; $H$  为观测算子,在这里,对 AIRS 卫星辐射率资料来说,观测算子为辐射传输模式 RTTOV7。上标 T 和  $-1$  分别代表矩阵的转置和逆。传统上假定观测误差无偏<sup>[9]</sup>,即: $E(\epsilon^o) = 0$ ,其中, $\epsilon^o = y_o - H(x')$ 为观测误差, $x'$  为分析场的真值。

为了减少每一个迭代步的计算量,由式(1),令  $\delta x = x - x_b$ ,即:增量  $\delta x$ ,将  $H(x)$  在  $x_b$  处泰勒展开,将目标函数式(1)写成:

$$J(\delta x) = \frac{1}{2}[\delta x^T B^{-1} \delta x + (H' \delta x + d)^T O^{-1}(H' \delta x + d)] \quad (2)$$

其中, $d = H(x_b) - y_o$ ,称为新息向量(innovation vector)。

2 AIRS 卫星资料

AIRS 是红外探测器,光谱覆盖  $3.7\sim15.4\ \mu\text{m}$  ( $600\sim2700\ \text{cm}^{-1}$ ),分 3 段:短波  $3.74\sim4.61\ \mu\text{m}$ ;中波  $6.20\sim8.22\ \mu\text{m}$ ;长波  $8.80\sim15.4\ \mu\text{m}$ 。共有 2378 个红外通道,目前,进行资料同化使用的通道为 323 个。图 1 为 AIRS 通道分布。

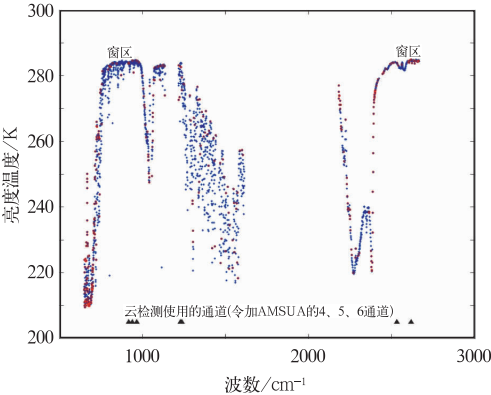


图 1 AIRS 通道分布

蓝色的点代表所有的 AIRS 通道;红色的圆圈代表选出的供资料同化使用的 323 个通道;黑色的三角表示进行云检测要用到的通道

Fig. 1 AIRS channels distribution

The blue points are all the AIRS channels; the 323 channels for data assimilation are indicated by red circles; channels for cloud detection are indicated by black triangles

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。图 2a 为世界时 2006 年 7 月 1 日 00 时(−3 h~3 h)(文中所有时间均为世界时),60 个景在窗区通道(波数为  $917.306\ \text{cm}^{-1}$ )的亮度温度;图 2b 为 AIRS 60 个景在全球的分布。图 2a 中比较低的观测亮温值代表可能有云(较高云)的存在,而高亮度温度值的区域往往给出的是地面(晴空)信息,较高的亮度温度意味着可能是地表或中、低层云混合(部分有云),本研究的目的就是利用云检测方案,将有云的视场剔除出去。资料同化中使用的 AIRS 的一级产品 L1B 数据资料,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<sup>[10]</sup>,均来自 NASA 空间飞行中心(Goddard Space Flight Center Distribution Active Center,NASA/GSFC DAAC)。

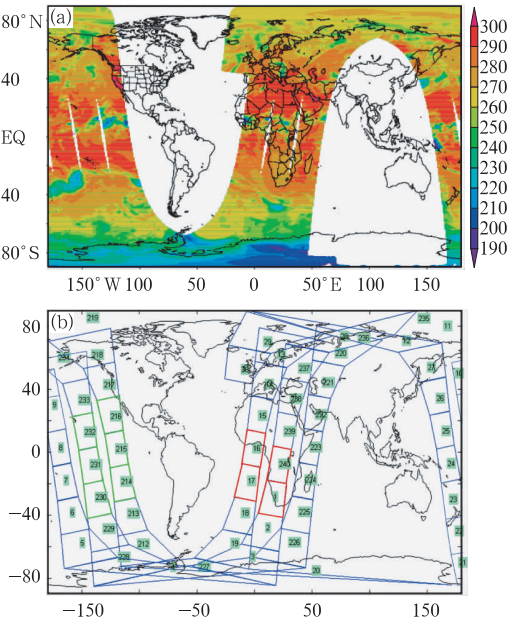


图 2 (a) 2006 年 7 月 1 日 00 时(−3 h~3 h) 的 AIRS 窗区通道(波数为  $917.306\ \text{cm}^{-1}$ ) 扫描亮温图(单位:K);(b) 2006 年 7 月 1 日 00 时(−3 h~3 h)AIRS 60 个景在全球的分布  
Fig. 2 (a) The 6 h swath image of brightness temperature at AIRS window channel ( $917.306\ \text{cm}^{-1}$ ) at 00 UTC 1 July 2006 (unit: K); (b) The distribution of 60 scenes of AIRS at 00 UTC 1 July 2006

3 云检测方案

Goldberg 等<sup>[6]</sup>提出的云检测方案,通过 AIRS 通道和相应微波通道的经验组合来进行云检测,包括了 10 个云检测步骤,其中,陆地视场 5 个,海洋视场 5 个。由于部分云检测步骤的关键参数无法获得,以及资料、技术条件等原因,结合 NESDIS-Goldberg 云检测方案(见附录),以我国的 GRAPES-3DVar 同化系统为平台,提出了 GRAPES-Goldberg 云检测方案,分别对陆地和海洋上的视场进行云检测,其中海洋视场 4 个,陆地视场 3 个。本节实验选取的资料为 2006 年 6 月 30 日 23:59 至 7 月 1 日 1:47 时间段内,位于非洲西南部的陆地及非洲大陆西海岸大西洋上的 4 个景,分别为 2006 年 6 月 30 日的一个景 240,以及 2006 年 7 月 1 日的 3 个景 1,16,17(见图 2b 中红色框标出的区域),4 个景共计 48600 个视场点,其中海洋表面 26605 个,陆地表面 18064 个,海岸 3931 个视场点(不考虑)。

### 3.1 对海洋表面视场的云检测

(1) Test\_General 检验。对于海洋表面(已剔除掉海冰的视场),检验长波窗区通道 914(波数为  $965.43 \text{ cm}^{-1}$ )的观测亮度温度是否小于  $270 \text{ K}$ 。因为海水的冰点在  $271 \text{ K}$  左右,对于云顶高度较高的云来说,云顶温度可能会低于  $271 \text{ K}$ ,如果窗区通道 914 的观测亮温小于  $270 \text{ K}$ ,那么可以肯定是有云存在的,如式(3)所示。

$$AIRS_{914} < 270.0 \quad (3)$$

其中,  $AIRS_{914}$  为 AIRS 914 通道的观测亮温。

图 3a 为云检测前, AIRS 窗区通道 787(波数为  $917.306 \text{ cm}^{-1}$ )观测亮温  $y_0$  与背景场(来自国家气象中心 T213 分析场)模拟亮温  $H(x_0)$  的散点图,其中,绿色的点为满足式(3)的,受冷云污染的视场;图 3b 为经过 Test\_General 检测后,剔除掉满足式(8)的视场后,观测亮温与背景场模拟亮温的散点图。从图中可以看出来,由于冷云导致的大的偏差已经消除了,但是由于低云和中层云的影响,还存在比较大的偏差。这就需要进行下面的检验。

(2) TestA 检验。与 NESDIS-Goldberg 云检测方案(见附录)的第二个检验步骤相同。本检验利用 AIRS  $8\sim 11 \mu\text{m}$  窗区短波红外通道 2226(波数为  $2531.978 \text{ cm}^{-1}$ )的观测亮温与  $15 \mu\text{m}$  窗区附近长波红外通道 843(波数为  $937.908 \text{ cm}^{-1}$ )的观测亮温作比较,可以检测出高度较低的云。这一步可以检测出第一步未检测出的云,但对第一步检测出的冷云效果不大。

$$Test A = AIRS_{2226} - AIRS_{843} \quad (4)$$

图 3a 中红色的点为 TestA 检测出的受云污染的视场;图 3c 为通过 Test\_General 和 TestA 两个检验后,窗区通道 787 的观测亮温与背景场模拟亮温的散点图。从图中可以看出,通过 TestA 检验后,一些受中低云影响的视场被剔除了,但是,对于距离地表很近的云,有可能会检测不出来,下面的两个检测主要针对这个情况。

(3) TestSST1 检验。与 NESDIS-Goldberg 云检测方案的第三个检验步骤相同。由 AIRS 的 791(波数为  $918.747 \text{ cm}^{-1}$ )、914(波数为  $965.431 \text{ cm}^{-1}$ )、1285(波数为  $1228.225 \text{ cm}^{-1}$ )、1301(波数为  $1236.539 \text{ cm}^{-1}$ )4 个通道的亮温可以很好地模拟海洋表面温度。如式(5)所示。

$$AIRS_{\text{SST-Sim}} = 8.28206 -$$

$$0.97957AIRS_{791} + 0.60529AIRS_{914} +$$

$$1.7444AIRS_{1285} - 0.40379AIRS_{1301} \quad (5)$$

其中,  $AIRS_{\text{SST-Sim}}$  为模拟的海洋表面温度,  $AIRS_{791}$ ,  $AIRS_{914}$ ,  $AIRS_{1285}$ ,  $AIRS_{1301}$  分别为 AIRS 4 个通道的观测亮温。这些长波通道能够严格的估计海洋表面温度,因为它们能够通过多通道的线性回归去除掉水汽吸收来计算亮温。

TestSST1 检验利用模拟的海洋表面温度  $AIRS_{\text{SST-Sim}}$  与背景场海洋表面温度作比较,如(6)式所示。

$$TestSST1 = SST_{\text{background}} - AIRS_{\text{SST-Sim}} \quad (6)$$

图 3a 中蓝绿色的点为 TestSST1 检测出的被低云污染的视场;图 3d 为通过 Test\_General、TestA 及 TestSST1 检验后,窗区通道 787 的观测亮温与背景场模拟亮温的散点图。从图中可以看出,经过 TestSST1 检验后,可以剔除掉上面 2 个检验未检验出的被低云污染的视场。

(4) TestSST2 检验。AIRS 短波窗区通道 2333(波数为  $2616.095 \text{ cm}^{-1}$ )是 AIRS 窗区通道中最透明的一个,仪器误差很小,可以很好地模拟海洋表面温度(在  $280 \text{ K}$  的海洋表面,2333 通道模拟的海表温度的误差小于  $0.05 \text{ K}$ )。用 2333 通道的观测亮温与背景场海洋表面温度作比较,如式(7),其中,  $AIRS_{2333}$  为 2333 通道的观测亮温,  $SST(\text{Background})$  为背景场海洋表面温度。这个检验由于受太阳光的污染,只在夜间进行。

$$TestSST2 = SST_{\text{Background}} - AIRS_{2333} \quad (7)$$

(只在夜间)

图 3a 中黄色的点为通过 TestSST2 检验,进一步检测出的云污染视场;图 3e 为经过所有检验后,窗区通道 787 观测亮温与背景场模拟亮温的散点图。从图中可以看出,经过上面所有的 4 个检验后,观测与背景场模拟的偏差基本在  $-5\sim 5 \text{ K}$  之间,由于云污染而导致的大的偏差视场已经被剔除了。

此外,图 3e 中,经过云检测后,背景场模拟值与观测值仍然残余着一定的系统性差异,这是因为,除云污染外,由于卫星探测器的定标、定位、灵敏度、老化等原因,使得卫星观测资料存在着系统性的误差;同时,预报模式也存在着系统性的偏差,这使得背景场产生了偏差;另外,在辐射转换计算的过程中,辐射传输模式也存在误差。所有这些误差的综合效应造成了背景场模拟值与观测值的系统差异。

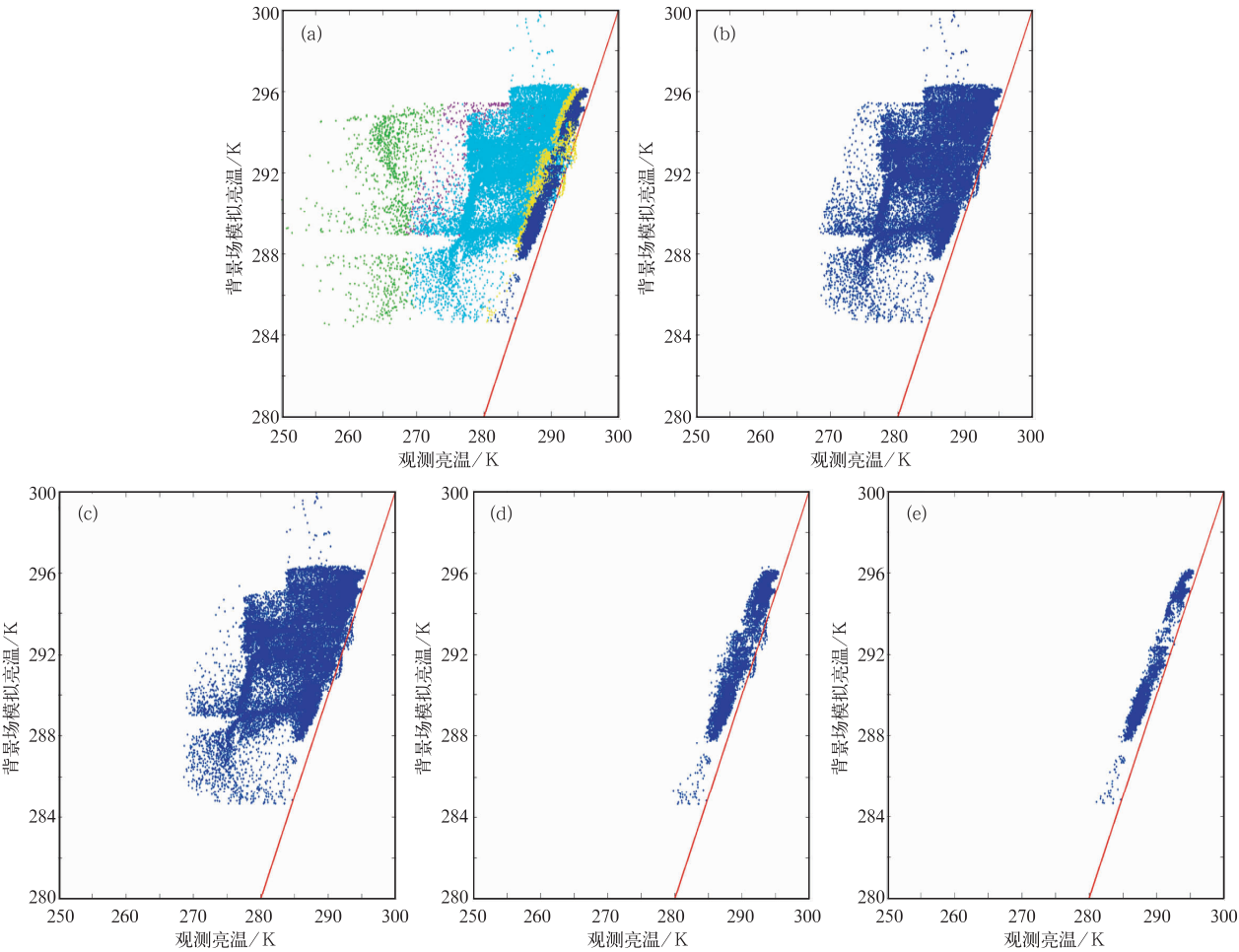


图 3 云检测不同阶段,背景场模拟亮温与窗区通道 787 观测亮温散点图(单位:K)  
(a) 云检测前,其中绿色、紫色、蓝绿色和黄色的点分别代表四个云检测步骤检测出的云污染视场;  
(b) Test\_General;(c) Test\_General+TestA;(d) Test\_General+TestA+TestSST1;  
(e) Test\_General+TestA+TestSST1+TestSST2

Fig. 3 At different stages of cloud detection, the scatter diagrams of the brightness temperature simulated by background and the brightness temperature observed at window channel 787 (unit:K)  
(a) Before cloud detection. The cloud contamination FOVs detected by 4 different steps are indicated by green, purple, aquamarine and yellow dots respectively; (b) Test\_General; (c) Test\_General+TestA; (d) Test\_General+TestA+TestSST1; (e)Test\_General+TestA+TestSST1+TestSST2

表 1 为不同云检测阶段检测出的云污染视场数及晴空视场数。从表中可以更清楚地看出,经过 4 个不同的检验,被云污染的视场都被剔除了,大约有 4.24%的视场是晴空的。

表 1 海洋视场不同阶段云检测结果(单位:个)

Table 1 The result of cloud detection at different stages for sea surface FOV

检验步骤	总视场	剔除视场数(有云)	剔除视场比例
Test_ General	26605	965	3.62%
Test_ General+TestA	26605	1729	6.5%
Test_ General+TestA+TestSST1	26605	23963	90.1%
Test_ General+TestA+TestSST1+TestSS2	26605	25477	95.8%

3.2 对陆地表面视场的云检测

由于地表发射率的不确定性和多样性,对 AIRS 陆地视场的云检测应该与海洋视场的云检测方案有所区别。

(1) TestA 检验。同 3.1 节的 TestA 检验。图 4a 为云检测前,陆地表面背景场模拟亮温与 AIRS 787 通道观测亮温的散点图,其中,绿色的点为 TestA 检测出的云污染视场;图 4b 为经过 TestA 检验后,模拟与观测的散点图。从两幅图的对比可以看出,经过此检验后,一些偏差相当大的视场被剔除了。为了进一步检测高度比较低的云,还要进行

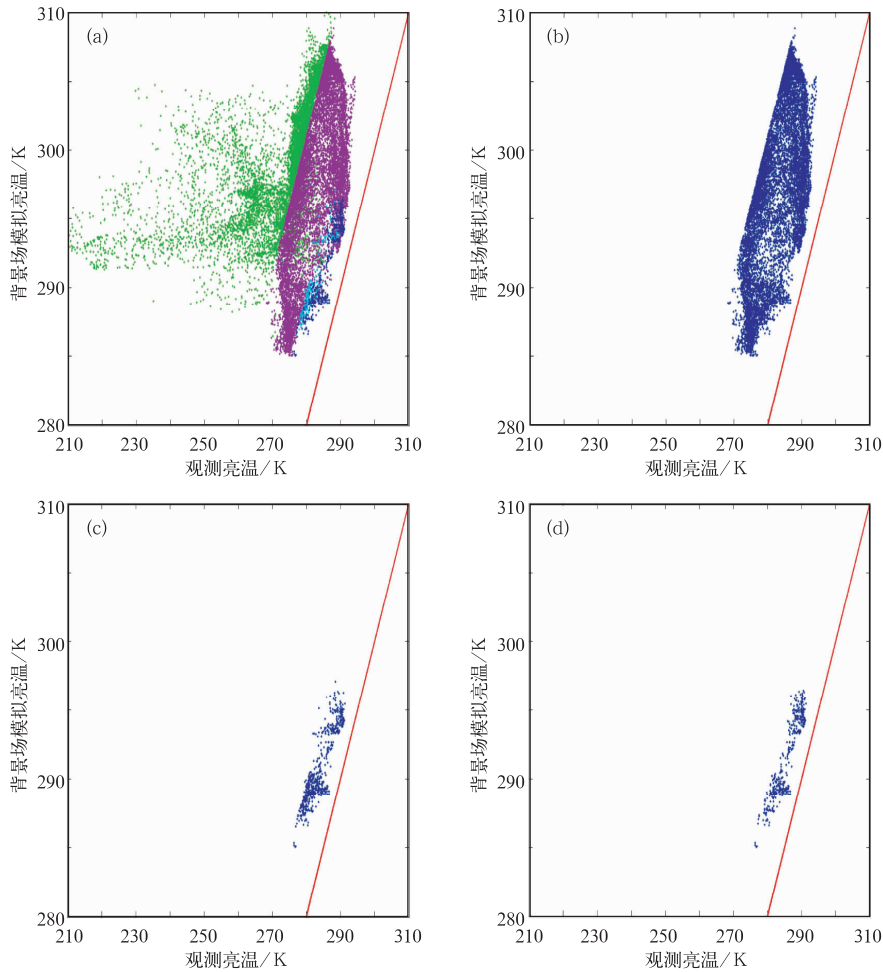


图 4 云检测不同阶段背景场模拟亮温与窗区通道 787 观测亮温散点图(单位:K)  
(a)云检测前,其中绿色、紫色和蓝绿色的点分别代表 3 个云检测步骤检测出的云污染视场;  
(b) TestA; (c) TestA+TestB; (d) TestA +TestB+TestLST

Fig. 4 At different stages of cloud detection, the scatter diagrams of the brightness temperature simulated by background and the brightness temperature observed at window channel 787 (unit:K)

(a) Before cloud detection. The cloud contamination FOVs detected by 3 different steps are indicated by green, purple and aquamarine dots respectively;  
(b) TestA; (c) TestA+TestB; (d) TestA+TestB+TestLST

下面的检验。

(2) TestB 检验。与 NESDIS-Goldberg 云检测方案的第一个检验相同。AIRS 2112 通道(波数为  $2390.089\text{ cm}^{-1}$ )的模拟亮温可以通过一个经验函数,由微波探测器 AMSU-A 的 4、5、6 通道的亮温以及微波通道和红外通道的卫星方位角、太阳天顶角的差反演而来,如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \text{AIRS}_{2112\_Sim} = & 18.653 - 0.169 \times \\ & \text{AMSU}_4 + 1.975 \times \text{AMSU}_5 - \\ & 0.865 \times \text{AMSU}_6 + 4.529 \times \\ & [1 - \cos(\text{Scan})] + 0.608 \times \cos(\text{SolZen}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\text{Scan}$  为 AMSUA 与 AIRS 的扫描角的差,  $\text{SolZen}$  为 AMSUA 与 AIRS 太阳天顶角的差,

$\text{AMSU}_4, \text{AMSU}_5, \text{AMSU}_6$  分别为 AMSU-A 3 个通道的观测亮温。

TestB 方案是由 AIRS 2112 通道的观测亮温  $\text{AIRS}_{2112}$  与 2112 通道的模拟亮温  $\text{AIRS}_{2112\_Sim}$  作比较。如(9)式所示。

$$\text{TestB} = \text{AIRS}_{2112\_Sim} - \text{AIRS}_{2112} \quad (9)$$

TestB 选择 2112 通道的原因是:这个通道受温度的影响较大,来自水汽和其他痕量气体的污染可以忽略不计,此外,AIRS 2112 通道的权重函数在低的大气层达到峰值,能够检测出高度非常低的云(2112 通道的权重函数在 850 hPa 左右达到峰值)。

图 4a 中紫色的点为 TestB 检测出的受高度比较低的云污染的视场;图 4c 为经过 TestA 与 TestB



检验后背景场模拟亮温与 787 通道观测亮温的散点图。从图中可以明显的看出,经过这两个检验后,大部分受低云污染的视场被剔除了。在白天阴天的情况下,由于太阳辐射,可能会使 2112 通道的观测亮温偏高,而错误地将有云的视场判断为晴空,上面的 TestA 检验可以避免这种情况发生。为了进一步检验距离地表更近的低云,就要进行第三个检验。

(3) TestLST 检验。与 3.2.1 节的 TestSST2 检验相似,如式(10),其中  $LST_{background}$  为背景场陆地表面温度,  $AIRS_{LST\_Sim}$  为 4 个 AIRS 通道模拟的陆地表面温度。但是由于地表类型的复杂多样性,以及在路地表面,地表温度的预报比较差,所以, TestLST 检验的两个阈值应该取的大一些(例如  $-5\text{ K}$ 、 $10\text{ K}$ )。

$$TestLST = LST_{background} - AIRS_{LST\_Sim} \tag{10}$$

图 4a 中蓝绿色的点为 TestLST 检测出的云污染的视场;图 4d 为经过所有 3 个云检测后,背景场与观测的散点图。从图中可以看出,由云污染导致的大的偏差视场都被剔除了。

表 2 为对陆地表面视场,不同云检测阶段检测出的云污染视场数及晴空视场数。从表中可以更清

表 2 陆地视场不同阶段云检测结果(单位:个)

Table 2 The result of cloud detection at different stages for land surface FOV

检验步骤	总视场	剔除视场数(有云)	剔除视场比例
TestA	18064	2933	16.2%
TestA+ TestB	18064	17452	96.6%
TestA+ TestB+TestLST	18064	17636	97.6%

楚地看出,经过 3 个不同的检验,被云污染的视场都被剔除了,大约有 2.4% 的视场是晴空的。

3.3 阈值的给定

对于每一个视场点,只要满足下面其中一个判别条件,AIRS 视场就被认为是有云的:

对于海洋表面:

$$\begin{cases} AIRS_{914} < 270.0 \\ TestA > TestA_{-thresh} \\ TestSST1 > TestSST1_{-thresh} \\ TestSST2 < TestSST2_{-thresh1} \\ TestSST2 > TestSST2_{-thresh2} \end{cases} \tag{14}$$

对于陆地表面:

$$\begin{cases} TestA > TestA_{-thresh} \\ TestB > TestB_{-thresh} \\ TestLST < TestLST_{-thresh1} \\ TestLST > TestLST_{-thresh2} \end{cases} \tag{15}$$

其中,  $TestSST1_{-thresh}$ 、 $TestSST2_{-thresh1}$ 、 $TestSST2_{-thresh2}$ 、 $TestA_{-thresh}$ 、 $TestB_{-thresh}$ 、 $TestLST_{-thresh1}$  和  $TestLST_{-thresh2}$  为阈值,这些阈值是可调的,通常为 2.0,  $-0.6$ , 3.3, 5.0, 2.0,  $-5$  和 10 K。阈值可以根据累积分布函数来选择<sup>[6]</sup>。以上面的实验资料为例,图 5a 显示了 TestSST2 检验,背景场海洋表面温度与 2333 通道(波数为  $2616\text{ cm}^{-1}$ )观测亮温的偏差的累积分布函数,如果认为 5% 的视场是晴空的,那么这个检验的阈值就选择 2 K,如图 5b。在实际应用中可以通过 MODIS 的云检测产品来估计晴空视场的比例。

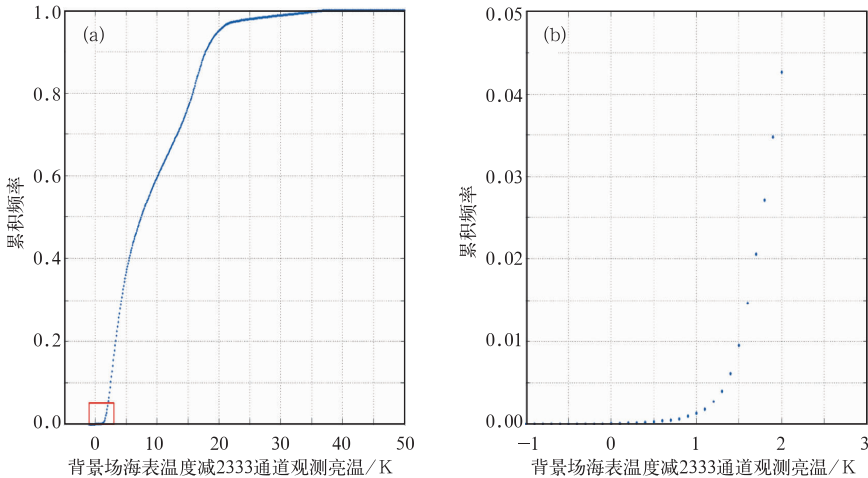


图 5 (a) 背景场海洋表面温度与 AIRS 2333 通道( $2616\text{ cm}^{-1}$ )观测亮温的偏差的累积分布函数;(b) 图(a)中红色区域

Fig. 5 (a) Cumulative distribution functions of the departures between background SST and the brightness temperature observed by the AIRS channel 2333 ( $2616\text{ cm}^{-1}$ ); (b) The enlarged red area in (a)

4 云检测结果

当前,各数值预报中心主要以海洋表面上的 AIRS 资料同化为主,因此,选择 2006 年 6 月 30 日 21:23 至 23:17 时间段内,位于美国西海岸太平洋上的 AIRS 6 个景 214,215,216,230,231 和 232(图 2b 中绿色框标出的区域)为例,图 6a 给出了它们在窗区通道 787 的亮度温度,图中亮度温度较低的冷云由蓝色(冷色调)表示,比较暖的亮度温度意味着中低云或地表,而冷的亮度温度值代表高云。这与图 6c 和 6d 的云检测结果是吻合的。对上述 6 个景共 72900 个视场,其中,海洋视场 72414 个,陆地视场 28 个,海岸线视场 458 个(剔除)。用 3.1 节

NESDIS-Goldberg 和 3.2 节 GRAPES-Goldberg 云检测方案分别进行云检测,将有云的视场剔除,如图 6c 和 6d。与图 6b MODIS 可见光云图相比,经过云检测后,有云的视场基本上都被剔除了。

在 35°N,120°W 附近的陆地上,图 6a 中椭圆标出的区域,出现了比较大的偏差(图略),这是因为高光谱红外大气探测器某些通道对地表类型、地表发射率和地表温度十分敏感,由于地表发射率、地表类型等的复杂性,可能会产生相当大的误差,GRAPES-Goldberg 云检测方案可以剔除掉这些大的偏差的视场。在后面的同化阶段,将直接剔除掉地面的观测资料。

从表 3 中可以看到,利用 NESDIS-Goldberg 云检测方案,共检测出 64791 个受到云污染的视场,晴

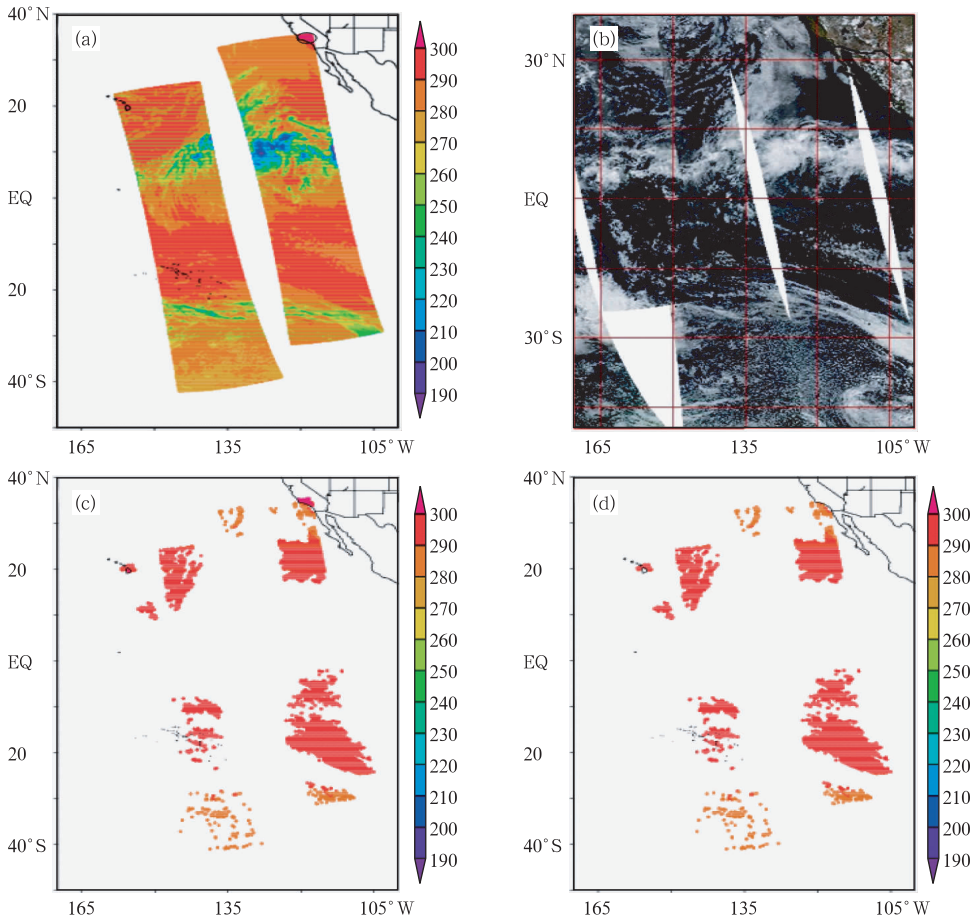


图 6 (a)2006 年 6 月 30 日,云检测前 AIRS 6 个景在窗区通道 787 的亮度温度;  
(b) MODIS 可见光云图(引自 <http://modis.gsfc.nasa.gov>);  
(c) NESDIS-Goldberg 云检测后窗区通道 787 的亮度温度;  
(d) GRAPES-Goldberg 云检测后窗区通道 787 的亮度温度

Fig. 6 (a) Before cloud detection, the brightness temperature of 6 AIRS scenes at window channel 787 on 1 July 2006; (b) The image of cloud was released by MODIS instrument (quoted from <http://modis.gsfc.nasa.gov>); (c) After NESDIS-Goldberg cloud detection; (d) After GRAPES-Goldberg cloud detection



空视场占到总视场的 10.6%;使用 GRAPES-Goldberg 云检测方案对相同的视场进行云检测,共检测出 65021 个受到云污染的视场,晴空视场占到总视场的 10.1%。从两个云检测方案的结果可以看出,使用 GRAPES-Goldberg 云检测方案可以检测出 NESDIS-Goldberg 云检测方案未检测出的受到云污染视场,尤其是对于陆地视场来说,GRAPES-Goldberg 云检测方案更加有效。

表 3 两个云检测方案的结果 (单位:个)  
Table 3 The result of two cloud detection schemes

方案		总视 场数	受云污染 视场数	晴空视 场数	晴空 比例
NESDIS-Goldberg 云检测方案		72442	64791	7651	10.6%
GRAPES-Goldberg	海洋	72414	65021	7393	10.1%
云检测方案	陆地	28	28	0	

5 小 结

从上面的结果分析可以看出,对于 GRAPES-3DVar 系统,GRAPES-Goldberg 云检测方案相对于 NESDIS-Goldberg 的云检测方案可以更加有效地检测出受到云污染的视场,并且可以区分陆地和海洋上的视场,尤其是对于陆地上的视场,GRAPES-Goldberg 云检测方案可以更加有效地剔除掉云污染的视场,此外,能够检测出有云视场上的高中低云。将经过云检验的 AIRS 晴空辐射率资料应用到 GRAPES 模式中,将会为 AIRS 资料同化打下良好的基础。此云检测方案不需要运用通道的偏差订正,并且,除了地球表面的温度,不依赖于大气的先验信息,是一种快速、有效的云检测方案。以上所做的研究是基于视场上的,本着“如疑之则弃之”的原则的云检测方案。在接下来的工作中,将进行同化影响试验<sup>[11-12]</sup>来进一步检验云检测的效果。总之,该研究为 AIRS 辐射率资料将在 GRAPES 三维变分同化系统中的应用奠定了基础。

附 录

NESDIS-Goldberg 云检测方案  
NESDIS-Goldberg 云检测方法已经运用到 NESDIS 的 AIRS 同化系统中,包括 3 个检验步骤:

(1) 通过 2112 通道的观测亮温  $AIRS_{2112}$  与 AMSUA 3 个通道模拟的 2112 通道的亮温  $AIRS_{2112\_Sim}$  作比较。

$$AIRS_{2112\_Sim} - AIRS_{2112} > 2\text{ K} \tag{A1}$$

(2) AIRS 的短波红外通道 2226 (波数为 2531.97803  $\text{cm}^{-1}$ ) 的观测亮温  $AIRS_{2226}$  与长波红外通道 843 (波数为 937.908  $\text{cm}^{-1}$ ) 的观测亮温  $AIRS_{843}$  作比较。

$$AIRS_{2226} - AIRS_{843} > 5\text{ K} \tag{A2}$$

(3) 利用模拟的海洋表面温度  $AIRS_{SST\_Sim}$  与背景场海洋表面温度  $SST_{background}$  作比较。

$$\begin{cases} SST_{background} - AIRS_{SST\_Sim} > 3.3\text{ K} \\ SST_{background} - AIRS_{SST\_Sim} < -0.6\text{ K} \end{cases} \tag{A3}$$

对于每一个视场,如果通过了上面的 3 个检验,那么就认为是有云的。

参考文献

[1] 官莉. 星载红外高光谱资料的应用[M]. 北京: 气象出版社, 2007.

[2] Menzel, Smith M, Stewart T. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS [J]. J Appl Meteor, 1983,22: 377-384.

[3] Smith, Frey R. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder observations [J]. J Appl Meteor, 1990,29:658-662.

[4] McNally A P, Watts P D A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders[J]. Q J Roy Meteor Soc, 2003, 129:3411-3423.

[5] Goldberg M D, Zhou. AIRS clear detection flag[C]. 2002, Presentation Material at a Meeting.

[6] Goldberg M D, Qu Y. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, 41(2): 379-388.

[7] 张华,薛纪善,庄世宇,等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验[J]. 气象学报,2002,62(1):30-41.

[8] 朱国富,薛纪善,张华,等. GRAPES 变分同化系统中卫星辐射率资料的直接同化[J]. 科学通报,2008,53(20):2424-427.

[9] 陶士伟,郝民,薛纪善,等. 数值预报同化系统中观测资料误差分析[J]. 气象,2008,34(7):34-40.

[10] NASA/GES DAAC/Atmospheric Dynamics Data Support Team. Atmospheric Dynamics DST, AIRS/AMS-U/HSB July 20, 2002 Sample Day L1B Data Documentation[R]. 2002, 17:1-20.

[11] 李娟,朱国富. 直接同化卫星辐射率资料在暴雨预报中的应用[J]. 气象,2008, 34(12):36-43.

[12] 郭锐,李泽椿,张国平. ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究[J]. 气象,2010, 36(2):1-12.