

文章编号: 1672-8785(2016)04-0018-09

云参数对 AIRS 亮温模拟计算的影响试验

顾成明¹ 王云峰^{1*} 张晓辉² 钟 波¹ 马新园¹

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101;

2. 中国人民解放军 66188 部队, 河北张家口 075100)

摘要: 由于云污染对大气红外遥感的严重干扰, 大量红外资料遭到了舍弃。为了充分同化红外资料, 提高初始场精度和改善数值预报效果, 利用通用辐射传输模式 (Community Radiative Transfer Model, CRTM) 模拟了大气红外探测仪 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 的通道亮温, 并分析了云类型、云层含水量、云厚度和云顶高度等云参数对 AIRS 亮温的影响。结果表明: (1) 由于云层对红外辐射的截断作用, 只有高于云顶的大气才会对辐射亮温产生影响; (2) 随着云层积分含水量的增加, 亮温逐渐减小, 但其减速放缓, 直至不变; 有效半径较大的粒子对辐射的散射作用较强, 相应亮温较小; (3) 若云顶高度固定不变, 云厚度的变化则不会对亮温产生影响; 若云底高度固定不变, 云层越厚, 相应的亮温越小; (4) 地面通道亮温对云顶高度的变化比较敏感, 云顶以上通道的亮温不受云顶高度变化的影响。

关键词: CRTM ; AIRS ; 亮温; 云参数

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.04.004

Test of Effect of Cloud Parameter on AIRS Brightness Temperature Simulation

GU Cheng-ming¹, WANG Yun-feng^{1*}, ZHANG Xiao-hui², ZHONG Bo¹, MA Xin-yuan¹

(1. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. PLA Army 66188, Zhangjiakou 075100, China)

Abstract: Because of the serious interference of cloud contamination with atmospheric infrared remote sensing, a large number of infrared data are abnegated. To make full use of the infrared data in assimilation to improve the initial field accuracy and numerical prediction effectiveness, a general Community Radiative Transfer Model (CRTM) is used to simulate the brightness temperature of channels of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and analyze the effect of cloud parameters (cloud type, cloud moisture, cloud thickness and cloud top) on the brightness temperature of channels of AIRS. The results show that 1) Infrared radiation can be truncated by clouds, so that only the atmosphere above cloud top can affect the radiation; 2) The brightness temperature decreases gradually with the increase of water content, but its decrease rate will slow down until it is constant. The particles with a larger effective radius have stronger scattering for the radiation, so the corresponding brightness temperature will be lo-

收稿日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41375106; 11271195; 41230421); 江苏省自然科学基金项目 (BK20131065)

作者简介: 顾成明 (1991-), 男, 江苏江阴人, 硕士研究生, 主要研究方向为资料同化与数值模拟。

* 通讯作者: E-mail: wangyf@mail.iap.ac.cn

wer; 3) For a constant cloud top height, the variation of cloud thickness will not affect the brightness temperature. For a constant cloud bottom height, the thicker the cloud is, the lower the brightness temperature will be; 4) Since the brightness temperature of ground channels are more sensitive to the variation of cloud top height, the brightness temperature of the channels above cloud top will not be changed.

Key words: CRTM; AIRS; brightness temperature; cloud parameter

0 引言

卫星资料以其覆盖范围广、时间连续性强的优点弥补了常规观测资料的不足。特别是近十几年来,随着气象卫星及传感器的更新换代,卫星资料在水平分辨率和空间分辨率方面逐渐具备了常规资料无法比拟的精度,现已成为常规资料不可或缺的补充。然而,目前数值预报模式的发展非常迅速,全球的环境变化已经越来越多地触及到大气内部的垂直结构特征,比如大气要素垂直分布、二氧化碳浓度、臭氧含量等。这就要求卫星探测必须具有较高的垂直分辨率。

在现有的红外高光谱探测仪器中,搭载于美国地球观测系统(Earth Observation System, EOS)计划下的Aqua卫星的AIRS探测仪最具代表性,其资料运用也比较广泛。在AIRS入轨之前,美国国家航空航天局和美国空间科学与工程中心气象卫星研究联合研究所等机构的研究人员完成了许多模拟和反演研究^[1-5]。结果表明,通过将AIRS资料同化到数值模式中,可以提高一些主要中尺度数值预报的效果^[6]。针对红外高光谱资料的应用研究,国内外均已开展了许多工作。刘旸等人^[7]针对红外高光谱资料,从训练数据通道信息的提取及降维、反演算法精度的改进等方面对晴空大气水汽廓线反演的研究现状进行了分析与讨论。张水平^[8]以信息容量为指标,设计了一种采用“逐次吸收法”进行通道选择的计算方案,即通过用AIRS探测资料反演大气温度廓线来进行通道选择试验。蒋德明等人^[9]基于AIRS实测资料,采用特征向量反演法研究了非红外遥感因子对红外遥感大气温湿廓线反演的辅助作用。Li J等人^[10]研发了一种可对

30%的AIRS视场进行晴空订正的中等分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)-AIRS联合晴空订正技术。Li J等人^[11]提出了一种可提高反演准确度和计算效率的基于一维变分MODIS-AIRS联合反演云参数和云物理性质的方法。官莉等人^[12]基于AIRS实测资料,采用人工神经网络算法实现了晴空大气的温度垂直廓线反演。Blackwell W J^[13]提出了一种采用神经网络算法进行晴空订正和大气温度廓线反演的方法,并利用AIRS和先进微波探测单元(Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU)模拟资料对其进行了试验。王云峰等人^[14]对WRFDA模式中的AIRS亮温资料质量控制方案进行了检验,并以美国Earl飓风为例进行了数值试验,研究了质量控制方案对飓风路径模拟的影响。张建伟等人^[15]采用主成分累计影响系数法对AIRS资料进行了通道选择,并选出了主要的通道信息。

目前,专门利用AIRS资料进行亮温正演模拟的研究比较少见。因此,本文结合美国标准大气廓线,利用CRTM快速辐射传输模式正演计算了各个通道的亮温值,并研究了AIRS亮温对CRTM模式中各类云参数(云类型、云含水量、云厚度和云顶高)的敏感性。该研究可以深入了解并改进CRTM模式,同时也可为将受云污染的AIRS资料直接用于同化作准备,从而提高红外资料的利用率。

1 模式、资料与仪器介绍

1.1 CRTM 模式

CRTM模式是由美国卫星资料同化联合中心近年来开发和建立的一种快速辐射传输模式,其目标是实现数值天气预报中的全天候条

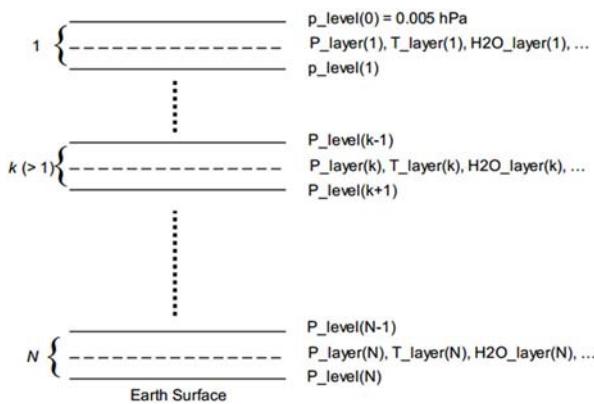


图 1 CRTM 模式的大气分层方案 (引自《NOAA Technical Report NESDIS 122》)

件下卫星资料的同化应用。对受云和降水影响的卫星观测的模拟计算能力是模式设计的一个突出特点。

在 CRTM 模式的计算过程中, 使用离散坐标系统对大气进行分层处理。图 1 所示为 CRTM 模式的大气分层方案。在输入数据时, 温湿廓线和吸收气体廓线只需输入 layer 层上的值, 而气压在 level 层和 layer 层上均需输入数据。要注意的是, 必须将数据对应气压值由小至大的顺序输入。CRTM 模式不要求输入固定气压层上的廓线值, 但是大气顶层的气压值不得超过 0.005 hPa。

1.2 资料选取

图 2 所示为本文试验选取的美国标准大气廓线。图 2(a) 中的温度廓线表明, 对流层 (10 km

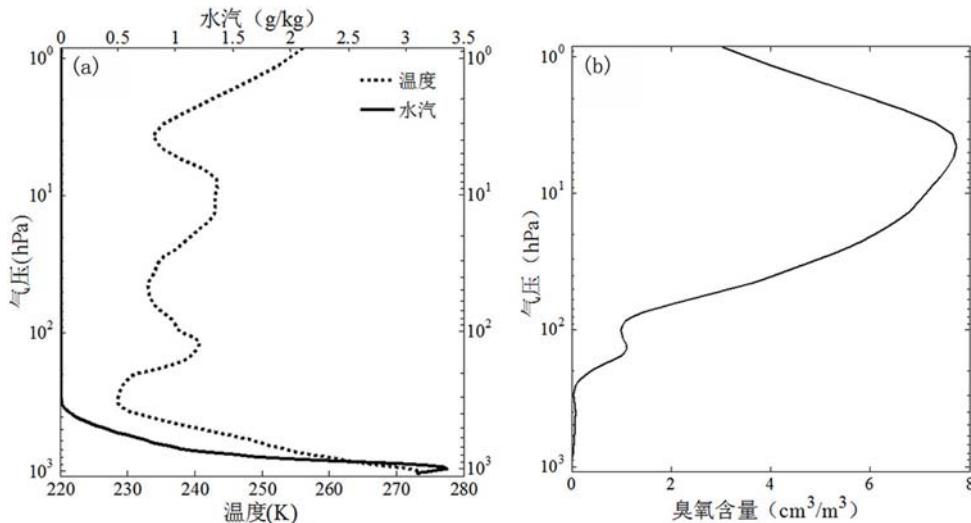


图 2 美国标准大气廓线: (a) 温湿廓线; (b) 臭氧廓线

以下) 温度会以一定速率随高度递减, 其温度结构是由地表至大气的能量对流输送和辐射平衡的结果^[16~17]。从图 2(b) 中可以看出, 臭氧主要出现在平流层 ($10 \sim 45 \text{ km}$) 中, 臭氧吸收大量紫外线后会使温度升高, 这与温度廓线图中平流层内出现逆温层的情况是一致的。

在 CRTM 模式中设置云参数时, 将云粒子类型、有效半径和云含水量等云参数设定在相应气压层上来表示该气压高度有云存在, 同时通过改变气压层数目来控制云层厚度。通过改变最下层气压层的高度可以控制云底所处高度; 通过改变最上层气压层的高度可以控制云顶所处高度。

1.3 AIRS 仪器介绍

AIRS 搭载在美国 EOS 计划中的第二颗 Aqua 卫星上, 其光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 为 1200^[18], 在 $3.74 \sim 15.4 \mu\text{m}$ ($650 \sim 2700 \text{ cm}^{-1}$) 的光谱覆盖范围内共设置有 2378 个红外通道。AIRS 每 2.667 s 横向扫描一次, 其 49.5° 的扫描角可覆盖地球表面上 1650 km 大小的长度 (称为一条扫描线)。每条扫描线有 90 个观测视场, 其中每个视场又包含 2378 个光谱取样^[7]。星下点的水平分辨率为 13.5 km , 垂直分辨率为 1 km , 因此具有高测量精度和高光谱分辨率的特性。AIRS 第一次在真正意义上实现了对大气及海洋环境的高光谱分辨率大气红外探测^[19]。

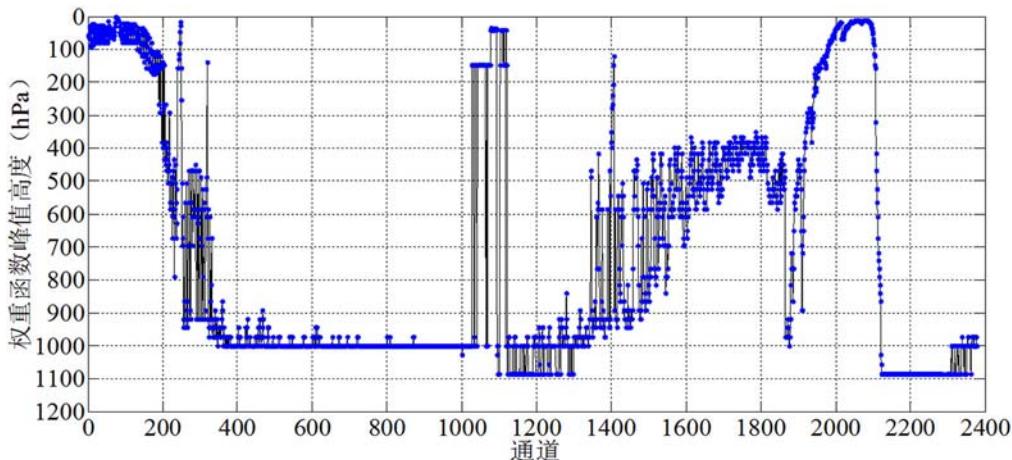


图 3 AIRS 的各个通道权重函数的峰值高度

表 1 不同类型的云的相关参数选取

云类型	所处高度 (hPa)	含水量 (kg/m^2)	有效半径 (μm)
水云	840.016 ~ 891.679	0.5	15
雪云	565.285 ~ 606.847	0.05	200
雨云	840.016 ~ 891.679	0.5	100
冰云	279.537 ~ 307.014	0.05	100
雹云	565.285 ~ 606.847	0.05	2300
霰云	840.016 ~ 891.679	0.05	150

图 3 为 AIRS 的 2378 个权重函数的峰值高度图。根据大气垂直探测理论, 各个权重函数的峰值高度即指该通道探测的主要要素所处的高度, 也就是有效辐射层。AIRS 的通道 1 ~ 274 和通道 1865 ~ 2144 几乎囊括了大气层顶至地面的所有高度, 主要用于探测大气温度的垂直分布; 通道 275 ~ 936 和通道 2145 ~ 2378 的探测高度贴近地面, 主要用于探测地表信息; 通道 937 ~ 1262 覆盖了平流层, 用于探测大气中的臭氧; 通道 1263 ~ 1864 覆盖了对流层, 用于探测大气中的水汽分布。

2 试验结果

2.1 云类型对 AIRS 亮温模拟的影响

CRTM 模式中有云水、云冰、雨、雪、霰和雹等 6 类云粒子可供选择。在用 CRTM 模拟云区通道亮温时, 还需输入粒子有效半径。由于观测资料和可信研究方法的缺失, 通常不考虑云的微物理结构, 而是将有效半径定义为常数^[20]。

Petch J C^[21] 就将冰晶的有效半径取为 30 μm 。通过参考文献[20]并结合实际情况, 本文将云水、雪、雨水、云冰、雹和霰粒子的有效半径分别设定为 15 μm 、200 μm 、100 μm 、100 μm 、2300 μm 和 150 μm (见表 1)。由于不同类型的云所处高度和含水量不同, 我们在模式中对云所处高度和含水量进行了详细设定(见表 1)。此处, 含水量是指路径积分含水量, 而不是指通常云物理学意义上的含水量(即单位体积空气中水凝物粒子的含量)。

图 4(a) 所示为在各类型云影响下的 AIRS 各通道亮温。由于云顶最高达 280 hPa, 100 hPa 以上的通道(1 ~ 200、1100 附近、1950 ~ 2100) 的亮温基本不受云的影响。与晴空相比, 有云存在时的各通道亮温较小; 通道 400 ~ 1000、通道 1130 ~ 1250 和通道 2200 ~ 2378 的亮温与晴空亮温的偏差在 20 ~ 50 K 之间。这是由以下两方面原因造成的: 第一, 红外辐射无法穿透云层, 所以红

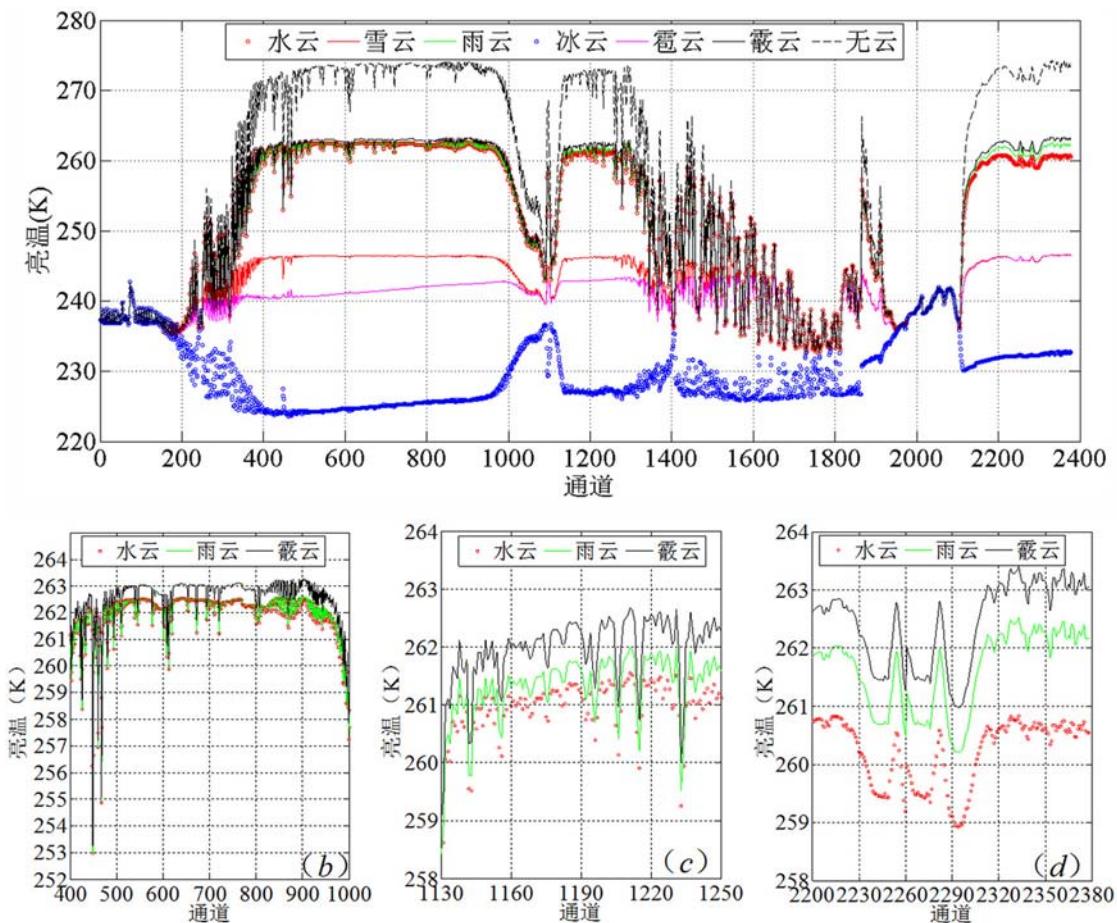


图4 不同云粒子类型所对应的各通道亮温: (a) 所有通道; (b) 通道 400~1000 ; (c) 通道 1130~1250 ;
(d) 通道 2200~2378

外遥感技术所探测到的辐射仅来自云顶及其以上大气的贡献。云顶高度越高, 对辐射产生贡献的大气柱越短, 相应卫星所接收到的大气红外辐射能就越低, 经模拟得出的亮温也就越小。第二, 由图4(a)可见, 通道400~1000、通道1130~1250和2200~2378作为地面通道时, 从地表至卫星高度处的大气都在为红外辐射接收提供贡献。因此, 与有云存在时相比, 其亮温值也就必然较高。

对于所处高度相同的水云、雨云和霰云($840.016 \sim 891.679 \text{ hPa}$)而言, 相应的地面通道亮温之间仍存在区别。图4(b)~图4(d)所示分别为图4(a)中的地面通道400~1000、1130~1250和2200~2378受水云、雨云和霰云影响时的亮温。其中, 受水云和雨云粒子的影响, 通道400~1000的亮温几乎相等, 比受霰云影响时的亮温值小0.5 K; 通道1130~1250的亮温受水

云影响时最小, 比受雨云影响时小0.5 K以上, 比受霰云影响时小1.2 K以上; 通道2200~2378的亮温受水云影响时最小, 比受雨云影响时小1.5 K, 比受霰云影响时小2.5 K。这些变化是由云层含水量的不同引起的。液态水对红外辐射主要以吸收为主。霰云的液态水含量仅为 0.05 kg/m^2 , 这样的低云水含量无法完全吸收红外辐射, 所以部分辐射的透射对卫星接收的红外辐射产生了贡献。而水云和雨云的含水量是霰云的10倍, 导致红外辐射被完全吸收, 因此相应的亮温也就偏小。

图4(a)中所处高度相同($565.285 \sim 606.847 \text{ hPa}$)的雪云和雹云在窗区通道的亮温差异也比较明显, 最大值达到了5 K以上。这是由于根据粒子物理性质所设定的粒子有效半径相差较大, 雹云粒子的有效半径是雪云的10倍以上的

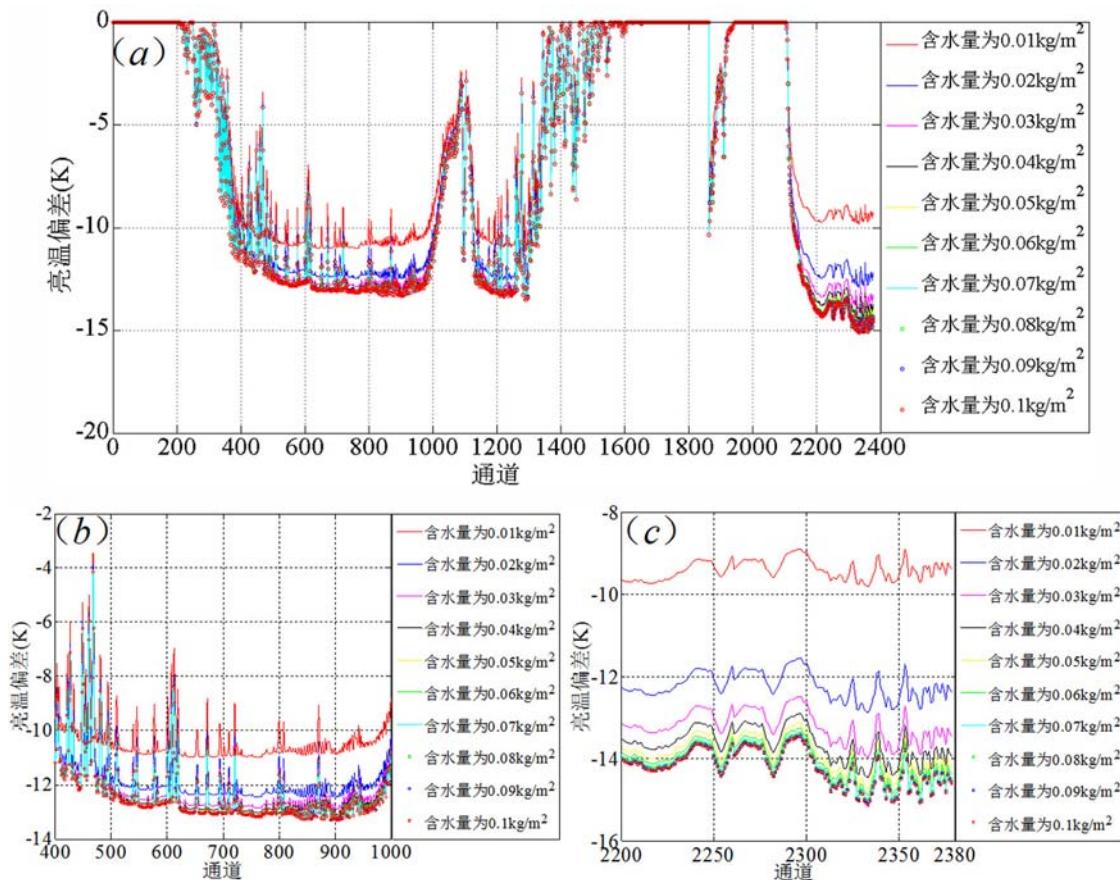


图 5 不同云含水量所对应的各通道亮温与晴空亮温的偏差: (a) 所有通道; (b) 通道 400 ~ 1000 ; (c) 通道 2200 ~ 2378)

缘故。有效半径越大, 粒子对红外辐射的散射越强, 向上传输的辐射能相对较小, 对应的亮温值也就偏小。

2.2 云层含水量对 AIRS 亮温模拟的影响

以水云为例, 将云层高度设置为 814.877 ~ 944.933 hPa。图 5(a) 所示为改变云层含水量时所对应的各通道亮温与基于晴空大气模拟出的亮温的偏差。控制积分含水量由 0.01 kg/m^2 至 0.1 kg/m^2 递增, 此时高度位于云层以下的地面通道的亮温偏差增大, 但其增速明显下降。

为了更好地观察这一现象, 图 5(b) 和图 5(c) 单列出了通道 400 ~ 1000 和通道 2200 ~ 2378 的亮温与晴空亮温的偏差随云层含水量的变化情况。图 5(b) 中, 当云层含水量从 0.01 kg/m^2 增至 0.02 kg/m^2 时, 通道 400 ~ 1000 的亮温偏差的增量超过 1.5 K ; 当云层含水量从 0.02 kg/m^2 增至 0.03 kg/m^2 时, 相应通道的亮温偏差的增量在 0.5 K 以内, 随后亮温偏差的增量随含水量的升高而减小。

而减小; 当云层含水量超过 0.05 kg/m^2 之后, 亮温偏差基本不再随含水量的升高而增大。图 5(c) 中, 当云层含水量从 0.01 kg/m^2 增至 0.02 kg/m^2 时, 通道 2200 ~ 2378 的亮温偏差的增量超过 2.5 K ; 当云层含水量从 0.02 kg/m^2 增至 0.03 kg/m^2 时, 相应通道的亮温偏差的增量在 1 K 以内, 随后亮温偏差的增量随含水量的升高而减小; 当云层含水量超过 0.07 kg/m^2 之后, 亮温偏差基本不再随含水量的升高而增大。这是因为当云水含量较低时, 液态水对红外辐射的吸收作用不强; 在入射辐射中, 有相当部分的红外辐射经透射后被卫星探测到。随着云水含量的升高, 液态水的吸收作用增强, 入射辐射被吸收的部分增多, 对应的亮温也就会降低。当云水含量达到一定值的时候, 入射辐射被完全吸收, 透射的辐射以散射为主, 此后云水含量的增加不再继续使亮温降低。

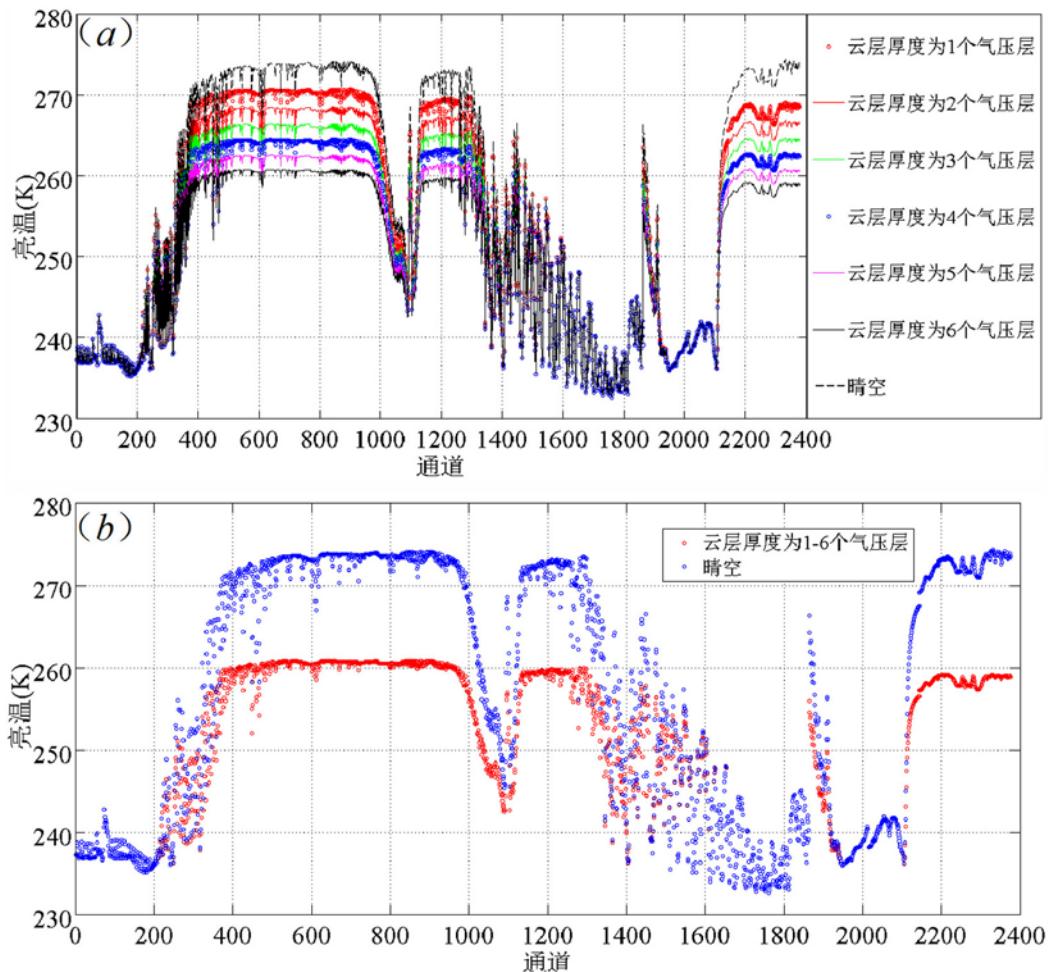


图 6 不同云厚度所对应的各通道亮温: (a) 保持云底高度不变; (b) 保持云顶高度不变)

2.3 云层厚度对 AIRS 亮温模拟的影响

以水云为例, 将含水量设置为 0.5 kg/m^2 , 并在 $814.877 \sim 944.933 \text{ hPa}$ 内所包含的 6 个气压层上设置云参数信息, 以此表示相应气压层中有云存在。通过改变气压层的数目来控制云层厚度。

控制云底高度 (944.933 hPa) 不变, 向上增厚云层。图 6(a) 所示为此时 AIRS 各通道亮温的变化情况。由于接收的辐射贡献主要来自于云顶以上的大气, 高度高于云层的通道 ($1 \sim 400$ 、 $1050 \sim 1130$ 和 $1300 \sim 2100$) 的亮温基本不随云厚度变化。当向上增厚云层时, 云顶被抬高, 云层对红外辐射的截断作用使得为卫星提供红外辐射能的大气柱缩短; 位于云层下方的地面通道的亮温值也就随之递减, 而且云顶每上升一个气压层, 亮温值减小 0.4 K 左右。

控制云顶高度 (814.877 hPa) 不变, 向下增厚云层。图 6(b) 所示为此时 AIRS 各通道亮温的变化情况。高度处于云层以上的通道亮温值基本不随云层厚度变化; 随着云层向下增厚, 通道亮温不变。这是因为在云中存在一定含水量 (0.5 kg/m^2) 的情况下, 可以将云层视为灰体; 固定云顶高度之后, 云顶下方的辐射无法传输到上层大气, 导致为卫星接收辐射产生贡献的大气始终是云顶以上的那一段。因此, 随着云层不断向下增厚, 通道亮温不会发生变化。

2.4 云顶高度对 AIRS 亮温模拟的影响

由于云阻挡了红外辐射, 使下方辐射无法透过, 云区红外波段下行辐射的反射和辐射放射实际上是在云顶发生的, 因此可将云顶看作下垫面。本文设置的云顶分别位于 100 hPa 、 200 hPa 、 300 hPa 、……、 900 hPa 高度, 云类型统一

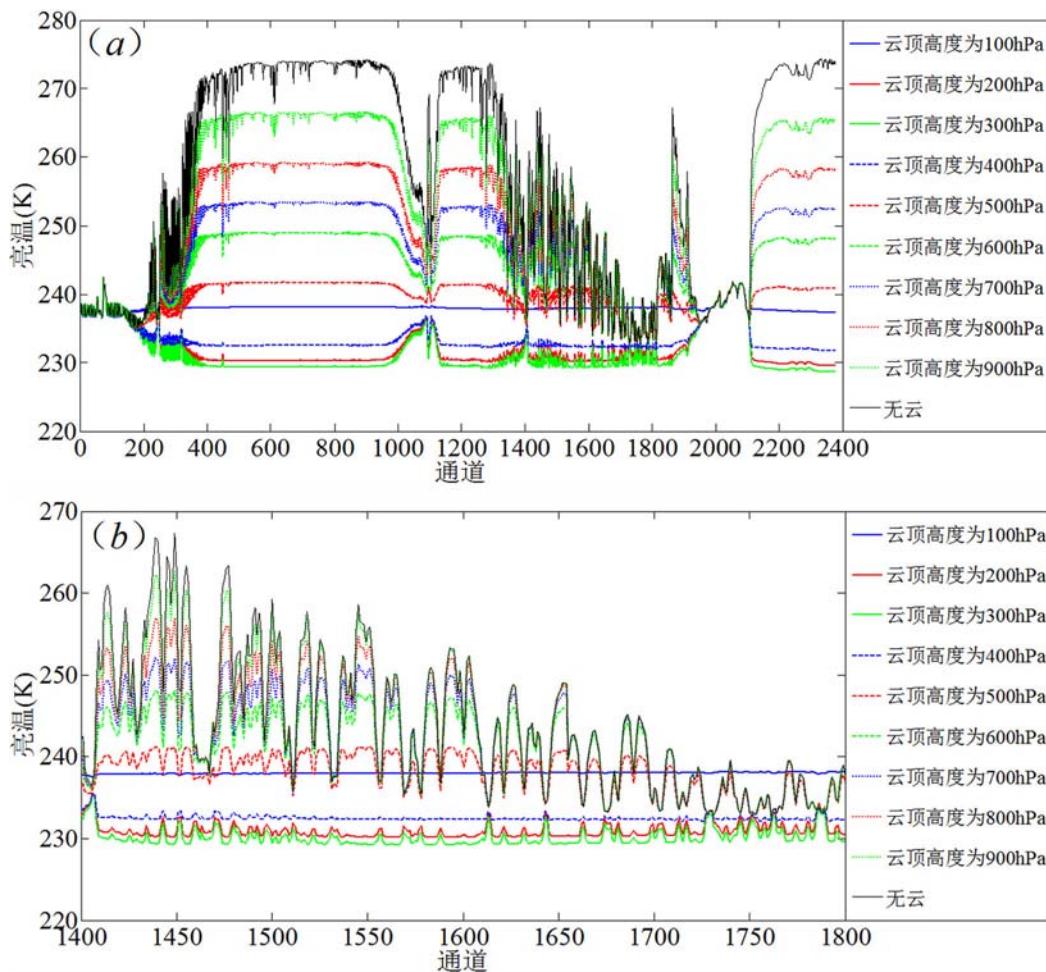


图 7 云顶位于不同高度时的各通道亮温: (a) 所有通道; (b) 通道 1400 ~ 1800

为雨云。图 7(a) 所示为各通道亮温的变化情况。通过对对照图 3 可以发现: (1) 由于权重函数峰值高度位于 100 hPa 以上, 接收到的辐射主要来自不受云影响的高度, 位于 100 hPa 以上的通道亮温不受云顶高度变化的影响; (2) 由于始终受到云的影响, 地面通道的亮温随云顶高度的变化比较明显; (3) 图 7(b) 所示为高度介于地面与高空之间 (400 ~ 900 hPa) 的通道 (1400 ~ 1800) 亮温的变化情况。其中, 当云顶低于 400 hPa 时, 高度位于 400 hPa 附近的通道 1700 ~ 1800 的亮温变化很小, 而且随着通道高度的下降, 对相应通道产生影响的最低云顶高度也在下降。也就是说, 只有当云顶位于通道高度以上时, 云顶高度的变化才会对通道亮温产生影响。云顶与通道的这种高低配置决定了云顶变化对通道亮温的影响程度。

3 结束语

本文利用 CRTM 模式模拟了不同云参数 (云类型、云层含水量、云厚度和云顶高度) 所对应的 AIRS 各通道亮温, 并分析了云参数对 AIRS 通道亮温模拟计算的影响。通过结合仪器特性和红外遥感原理来解释可能的形成原因, 我们得出了以下主要结论:

(1) 云层所处高度特别是云顶高度对 AIRS 亮温模拟的影响较大。由于云层对红外辐射能的截断作用, 只有处于云顶以上的大气才能对卫星接收的辐射产生影响。

(2) 对于不同类型的云, 积分含水量和粒子有效半径的差异均会导致亮温模拟结果不同。当积分含水量处在一定范围内时, 亮温会随含水量的增加而减小, 但是其减速会放缓, 直至不

变。有效半径较大的粒子对辐射能的散射作用较强, 相应通道亮温较小。

(3) 当云层含水量充足 (0.5 kg/m^2) 时, 可以将云层看作灰体。若云顶高度固定不变, 云层的厚度变化不会对亮温产生影响; 反之, 若云底高度固定不变, 云层越厚, 相应的亮温越小。

(4) 当云顶存在于不同高度时, 受通道权重函数峰值高度与云顶的高低配置影响, 地面通道亮温对云顶高度的变化比较敏感; 高空通道亮温则不受云顶高度变化的影响; 对于介于前两者之间的通道, 只有当云顶位于通道高度以上时, 云顶高度的变化才会影响到通道亮温。

参考文献

- [1] Jun L. Optimal Use of High Resolution Infrared Sounder Channels in Atmospheric Profile Retrieval [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 1994, **11**(3): 271–276.
- [2] Jun L. The Capability of Atmospheric Profile Retrieval From Satellite High Resolution Infrared Sounder Radiances [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 1994, **12**(2): 255–258.
- [3] Susskind J, Barnet C D, Blaisdell J M. Determination of Atmospheric and Surface Parameters Form Simulated AIRS/AMSU/HSB Sounding Data: Retrieval and Cloud Clearing Methodology [J]. *Adv Space Res*, 1998, **21**(3): 369–384.
- [4] Susskind J, Barnet C D, Blaisdell J M. Retrieval of Atmospheric and Surface Parameters From AIRS/AMSU/HSB Data in the Presence of Clouds [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 390–409.
- [5] Chao H D, De M J, Cheng L Q, et al. Experimental Study on Atmospheric Parameters Using New Atmospheric Sounding Instrument Data [C]. *SPIE*, 2005, **5655**: 573597.
- [6] 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 Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 379–389.
- [7] 刘旸, 蔡波, 班显秀, 等. AIRS 红外高光谱资料反演大气水汽廓线研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2013, **28**(8): 891–896.
- [8] 张水平. AIRS 资料反演大气温度廓线的通道选择研究 [J]. *气象科学*, 2009, **29**(4): 476–481.
- [9] 蒋德明, 董超华, 曹思沁. 附加影响因子对红外遥感资料反演大气温湿廓线的辅助作用 [J]. *热带气象学报*, 2009, **25**(Z): 80–84.
- [10] Li J, Liu C Y, Huang H L, et al. Optical Cloud-Clearing for AIRS Radiance Using Modis [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2005, **43**(6): 1266–1278.
- [11] Li J, Menzel W P, Zhang W J, et al. Synergistic Use of MODIS and AIRS in a Variational Retrieval of Cloud Parameters [J]. *J App Meteor*, 2004, **43**(2): 1619–1633.
- [12] 官莉, 刘旸, 张雪慧. 人工神经网络算法在红外高光谱资料反演大气温度廓线中的应用 [J]. *大气科学学报*, 2010, **33**(3): 341–346.
- [13] Blackwell W J. Retrieval of Cloud-Cleared Atmospheric Temperature Profiles From Hyperspectral Infrared and Microwave Observations [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [14] 王云峰, 韩月琪, 马刚, 等. AIRS 资料质量控制对颶风路径模拟的影响试验 [J]. *气象科学*, 2014, **34**(4): 384–389.
- [15] 张建伟, 王根, 张华, 等. 基于主成分累计影响系数法的高光谱大气红外探测器的通道选择试验 [J]. *大气科学学报*, 2011, **34**(1): 36–42.
- [16] 廖国男著. 郭彩丽, 周诗健译. *大气辐射导论* [M]. 北京: 气象出版社, 1985.
- [17] 宋正方. *应用大气光学基础* [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [18] Zhang P, Pascal B, Dong C H. Study of Hyperspectral IR Atmospheric Sounding With an Accurate Forward Simulation [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(6): 414–418.
- [19] Aumann H H. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 256–264.
- [20] 董佩明, 王海军, 韩威, 等. 水物质对云雨区卫星微波观测模拟影响 [J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(6): 682–691.
- [21] Petch J C. Improved Radiative Transfer Calculations From Information Provided by Bulk Microphysical Schemes [J]. *J Atmos Sci*, 1998, **49**(4): 1846–1858.