

文章编号: 1672-8785(2016)10-0010-07

CRTM 云模式的建立与敏感性试验

郭兴亮¹ 周育锋² 王云峰^{1*} 顾成明¹ 钟 波¹

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101;

2. 北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘要: 云污染会严重影响云区辐射的模拟, 导致大量云区卫星资料被废弃。结合快速辐射传输模式 (Community Radiative Transfer Model, CRTM) 的应用现状以及红外遥感原理, 对 CRTM 模式中的辐射传输模块进行了修改, 并提出了能够模拟云区红外辐射的 CRTM 云模式。利用 CRTM 云模式模拟了高光谱大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 的通道亮温, 并针对云模式中新增的参数进行了敏感性分析。结果表明, 随着通道高度的下移, 对卫星接收辐射贡献较大的大气层也在下移, 偏差大值区所处的高度也越来越低; 在偏差大值区中, 偏差值会随着云量的增加而增大, 直到全云覆盖时, 偏差值最大; 云量较大时, 输入的温度廓线的垂直变化会引起云顶发射辐射产生相同的垂直分布, 这与用 CRTM 云模式模拟出的亮温随云顶高度抬升而出现的垂直变化一致; 用 CRTM 云模式模拟的亮温值对新增的云量和云顶高度参数的敏感性较强, 符合大气红外辐射传输的规律。

关键词: CRTM ; 云污染; AIRS ; 敏感性分析

中图分类号: TP7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.10.003

Establishment of CRTM Cloud Mode and Test of Sensitivity

GUO Xing-liang¹, ZHOU Yu-feng², WANG Yun-feng^{1*}, GU Cheng-ming¹, ZHONG Bo¹

(1. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. Beijing Applied Meteorological Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: Cloud contamination may affect the simulation of the radiation of a cloud area and hence results in the discard of a large number of satellite data. According to the current application of the Community Radiative Transfer Model (CRTM) and the principle of infrared remote sensing, the radiation transfer module in the CRTM is modified and a CRTM cloud mode which can simulate the infrared radiation of cloud areas is proposed. The CRTM cloud mode is used to simulate the channel brightness temperature of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). The sensitivity of the new parameters added to the cloud mode is analyzed. The results show that with the decline of channel altitude, the atmosphere which contributes greatly to the radiation received by the satellite decline too. The altitude where the large deviation area locates is becoming lower and lower. In the large deviation area, the deviation increases with the increasing of cloud amount. When the sky is fully covered by cloud, the deviation re-

收稿日期: 2016-07-14

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: 郭兴亮 (1992-), 男, 四川绵阳人, 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

aches its maximum. When cloud amount becomes larger, the vertical variation of the temperature profile inputted may cause the radiation emitted by cloud top to form the same vertical distribution. This is in accordance with the vertical variation occurred when the brightness temperature simulated by the CRTM cloud mode increases with the rising of cloud top. The brightness temperature value simulated by the CRTM cloud mode is more sensitive to the newly added parameters of cloud amount and cloud top altitude. This accords with the law of atmospheric infrared radiation transfer.

Key words: CRTM; cloud contamination; AIRS; sensitivity analysis

0 引言

自 20 世纪 60 年代以来, 大气遥感技术迅速发展, 逐渐成为了大气科学发展中的关键技术之一。1957 年苏联第一颗人造地球卫星的上天和 1960 年美国第一颗气象卫星的上天, 意味着借助于卫星平台, 利用大气遥感技术可以实现对全球大气状况的监视和测量^[1]。此后, 随着大气遥感理论及技术的不断进步, 卫星探测从最初的“拍照”、仅传回简单的云图, 逐步深入发展为微波和红外遥感, 时空分辨率也在不断提高, 直至应用于数值天气预报。

在卫星资料的同化过程中, 一般选用 CRTM 模式来模拟亮温。模拟亮温与实测亮温的差值信息必须包含在代价函数中才能实现对卫星观测资料的有效同化, 因此 CRTM 模式的优劣会直接影响卫星资料同化的效果。但由于卫星遥感受云和降水的影响严重, 模拟的云区辐射与实测辐射之间的差值往往较大^[2-3]。以 AIRS 在 15 μm 处的对流层温度探测通道为例, 大气温度廓线的误差会导致大约 1 K 的偏差, 而云的影响则会导致几十开的亮温偏差^[4]。因此, 云污染对亮温模拟的干扰会导致大量卫星资料无法得到利用。

在云区卫星资料的同化方面, 通常是在用云检测方法判断卫星视场是否有云后直接去掉有云视场, 而只同化晴空资料。但是如果仅仅同化晴空资料, 那么云区资料的剔除往往又会造成大量卫星资料无法使用。欧洲中期天气预报中心的统计数据表明, 因受云和降水影响而无法被同化系统使用的卫星资料占了全部丢弃资料的 75% 以上^[5]。云雨区包含重要的天气现

象, 是决定数值预报效果好坏的敏感区域。若将云雨区资料剔除, 则会造成大量卫星资料的浪费。这样既无法充分发挥卫星资料的优势, 也不利于对重要天气现象的预报和研究。特别是对于 AIRS 卫星资料而言, 其像元内完全无云的可能性很小。据初步统计, 只有约 10% 的 AIRS 像元完全不受云的影响^[6]。增加观测数量, 提高观测质量, 并结合先进的同化方案已经成为了改善初始场分析质量和提高数值预报准确率的一条有效技术途径^[7]。因此, 要在现有卫星资料同化的基础上作进一步发展, 可以考虑从处理云雨区的卫星资料入手。

本文将结合红外大气探测原理, 通过修改 CRTM 模式来建立可精确模拟云区红外辐射传输的 CRTM 云模式并对其进行敏感性分析, 从而为云区红外资料的同化打下基础。

1 CRTM 模式在 WRFDA 系统中的应用现状

AIRS 卫星亮温资料同化试验的目标函数 J 可以定义为

$$J = J_B + J_{AIRS} \quad (1)$$

式中, J_B 为模式大气 X 与背景场 X_B 的偏差; J_{AIRS} 为模式模拟的 AIRS 亮温值与实际卫星观测资料之间的偏差, 其具体表达式为

$$\begin{aligned} J_{AIRS} &= \frac{1}{2} \sum_i [H_{AIRS}(X) - BT_{AIRS}]^T \\ &\times O_{AIRS}^{-1} [H_{AIRS}(X) - BT_{AIRS}] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, 上标 “T” 表示转置; B 为背景误差的协方差矩阵; 下标 “i” 表示同一时次下的不同空间观测点; H_{AIRS} 为基于 CRTM 模式正演计算

AIRS 亮温值的观测算子; BT_{AIRS} 为实际观测的 AIRS 卫星亮温值; O_{AIRS} 为 AIRS 资料的误差协方差矩阵。

CRTM 模式作为正演计算 AIRS 亮温的观测算子已被集成到了 WRFDA 同化系统中。虽然独立的 CRTM 模式已考虑了云和气溶胶对大气吸收和散射辐射的影响, 但是内嵌到 WRFDA 同化系统中的 CRTM 模式仅被用于模拟晴空亮温, 而该模式对云雨区卫星观测的模拟计算还无法在同化系统中实现。

针对目前 CRTM 模式的应用现状, 本文从云区红外辐射传输模块的修正入手, 开发出了一种可模拟云区红外通道亮温的 CRTM 云模式。

2 CRTM 云模式的介绍

CRTM 原模式用于处理晴空资料的辐射传输方程为

$$\begin{aligned} Rad_i^{tot} = & \varepsilon_i \cdot B_i^{surf} \cdot \tau_i^{surf} + \int_{k=1}^j B_{k,i} d\tau_{k,i} \\ & + (1 - \varepsilon_i) \cdot (\tau_i^{surf})^2 \cdot \int_{k=1}^j \frac{B_{k,i}}{\tau_{k,i}^2} d\tau_{k,i} \quad (3) \end{aligned}$$

式中, Rad_i^{tot} 为通道 i 接收的总辐射; 等号右边的第一项表示下垫面辐射, 第二项表示大气的辐射贡献, 第三项表示下垫面的反射辐射; ε_i 为下垫面的发射率; B_i^{surf} 为下垫面的普朗克温度; τ_i^{surf} 为下垫面处的大气透过率; $B_{k,i}$ 为第 k 层大

气的普朗克温度。在模拟晴空辐射时, 该方程能够很好地实现亮温计算, 并可保证其精度。但是用于云区辐射的模拟则必须进行相应的修改。

现有的 CRTM 模式在快速正演卫星传感器辐射时, 不论是红外波段还是微波波段, 对于观测像元通常只考虑完全晴空和完全被云覆盖两种情况。在云模式中对 CRTM 原辐射传输方程进行了修改, 并加入了云量和云顶高度这两个参数, 具体如下:

$$\begin{aligned} Rad_i^{tot} = & f \cdot Rad_i^{cld} + (1 - f) \cdot Rad_i^{clr} \\ = & f \cdot \left[\varepsilon_i^{cld-top} \cdot B_i^{cld-top} \cdot \tau_i^{cld-top} + \int_{k=N}^j B_{k,i} d\tau_{k,i} \right. \\ & \left. + (1 - \varepsilon_i^{cld-top}) \cdot (\tau_i^{cld-top})^2 \cdot \int_{k=N}^j \frac{B_{k,i}}{\tau_{k,i}^2} d\tau_{k,i} \right] \\ & + (1 - f) \cdot \left[\varepsilon_i \cdot B_i^{surf} \cdot \tau_i^{surf} + \int_{k=1}^j B_{k,i} d\tau_{k,i} \right. \\ & \left. + (1 - \varepsilon_i) \cdot (\tau_i^{surf})^2 \cdot \int_{k=1}^j \frac{B_{k,i}}{\tau_{k,i}^2} d\tau_{k,i} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

如图 1 所示, 将 AIRS 的含云视场分为晴空区和云区两部分, 然后分别计算云区和晴空区的辐射。模拟云区辐射时, 以云顶为下垫面, 卫星接收到的云区辐射包括云顶发射和反射的辐射以及云顶以上的大气辐射; 模拟晴空区辐射

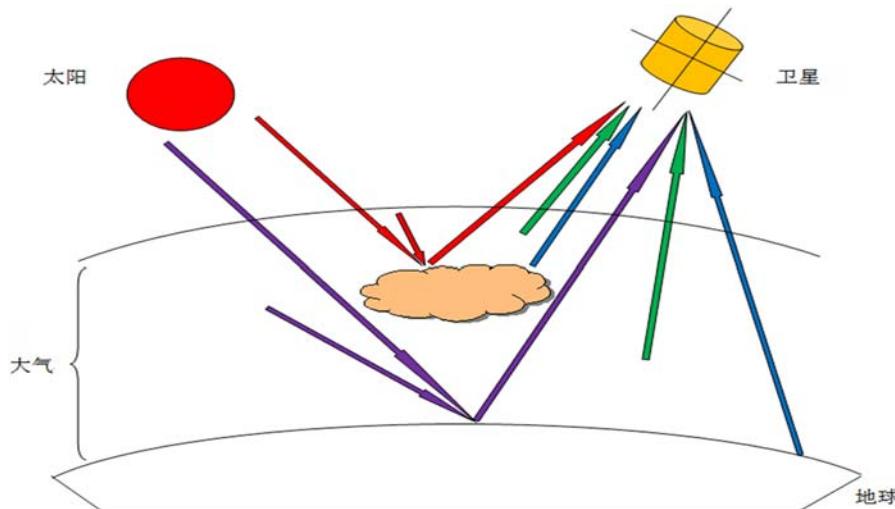


图 1 云模式中 AIRS 含云视场的辐射传输示意图

时, 则使用原模式中的方法计算下垫面发射和反射的辐射以及下垫面以上的大气辐射。

式(4)为针对图1改写的AIRS含云视场的辐射传输方程。其中, $\text{Rad}_i^{\text{tot}}$ 为通道 i 接收的总辐射; f 为视场中云所占的比例, 即云量, 其变化范围为 $0 \sim 1$, 以便考虑不同云量对亮温计算的影响; $\text{Rad}_i^{\text{cld}}$ 为全云覆盖下的辐射值; $\text{Rad}_i^{\text{clr}}$ 为无云时的辐射值。因此, 等号右边的第一项即为云区对总辐射的贡献量, 第二项即为晴空区对总辐射的贡献量。 $\text{Rad}_i^{\text{cld}}$ 和 $\text{Rad}_i^{\text{clr}}$ 均由下垫面的发射辐射、下垫面反射的大气下行辐射和大气逐层的上行辐射等三部分组成。其中, 下行辐射是大气层顶辐射的逐层向下积分, 它在下垫面发生反射, 其辐射量的大小只与截断云顶高度有关。晴空和云区的区别就在于截断高度的大小, 即 $\text{Rad}_i^{\text{clr}}$ 将地面设置为下垫面, 而 $\text{Rad}_i^{\text{cld}}$ 则将云顶设置为下垫面。 N 为云顶高度, 在模式中将其范围设置为垂直方向上的 41 ~ 96 层, 相应高度为 80.198 ~ 972.264 hPa。因此可以考虑云顶分别存在于 56 个高度时对亮温计算的影响。 $\varepsilon_i^{\text{cld-top}}$ 和 ε_i 分别为云顶和地表的发射率。考虑到云层表面的辐射特性, 本文凭经验将 $\varepsilon_i^{\text{cld-top}}$ 取为 0.9, 而 ε_i 则是根据仪器, 针对不同通道选取不同的值; $B_i^{\text{cld-top}}$ 和 B_i^{surf} 分别为云顶和地表的普朗克温度; $\tau_i^{\text{cld-top}}$ 和 τ_i^{surf} 分别为云顶和地表的大气透过率。

3 CRTM 云模式应用于 AIRS 亮温模拟时的敏感性分析

利用CRTM原模式计算晴空下AIRS各通道的亮温值, 然后利用由式(4)得出的各个云量和云顶高度下的通道辐射值 $\text{Rad}_i^{\text{tot}}$ 计算各通道的亮温值, 并从相应通道的晴空亮温中减去云模式中在不同云顶和云量下计算的亮温值, 从而得出两者的差值。通过研究处于典型高度的通道亮温差值随云顶高度和云量的分布规律, 可以分析用云模式模拟的AIRS通道亮温对于新增的云量和云顶高度这两个参数的敏感性。图2所示为亮温偏差随云顶高度及云量的分布情况。

本文选取了AIRS的11个通道, 它们分别为通道6(50 hPa)、通道138(100 hPa)、通道174(200 hPa)、通道192(300 hPa)、通道201(400 hPa)、通道215(500 hPa)、通道227(600 hPa)、通道252(700 hPa)、通道232(800 hPa)、通道267(900 hPa)和通道375(1000 hPa)。

图2中的红色曲线为该通道的权重函数曲线。计算时采用以下方程:

$$wf = \frac{d\tau}{d \ln p} \quad (5)$$

式中, wf 为权重函数; τ 为大气透过率; p 为气压。权重函数的分布代表各层大气对该通道的辐射贡献率。某一高度的函数值越大, 表示此高度的大气对该通道的辐射值贡献越大。将权重函数峰值所处的高度定义为该通道的高度。

总体来看, 亮温偏差范围沿垂直方向的变化与权重函数的垂直分布即通道高度之间有着明显的对应关系。在图2(a)~图2(k)中, 随着通道高度的下移, 对卫星接收辐射贡献较大的大气层也在下移, 因此相应偏差大值区所处的高度也越来越低。同时, 通道高度越低, 亮温偏差受大气辐射差异的影响越大, 最大偏差值也就增大。高度位于 50 hPa 处的通道 6 所对应的最大亮温偏差在 0.5 K 以内; 高度位于 500 hPa 处的通道 215 所对应的最大亮温偏差就达到了近 10 K; 高度最低的通道 375(1000 hPa) 所对应的最大亮温偏差则超过了 40 K。

3.1 亮温偏差分布对云量的敏感性分析

在图2(a)~图2(k)的偏差大值区中, 偏差值会随着云量的增加而增大。在云量为 1 即全云覆盖的情况下, 偏差值最大。以通道 215(500 hPa) 为例, 当云量为 0.1 时, 亮温偏差在 2 K 以内; 当云量为 1 时, 亮温偏差超过了 10 K。

结合模式中的亮温计算公式:

$$T_B^i = \frac{P_2^i}{\log(P_1^i/\text{Rad}_i^{\text{tot}} + 1)} \quad (6)$$

式中, T_B^i 为通道 i 探测的亮温; $\text{Rad}_i^{\text{tot}}$ 为通道 i 接收到的总辐射值; P_1^i 和 P_2^i 为根据仪器确定的

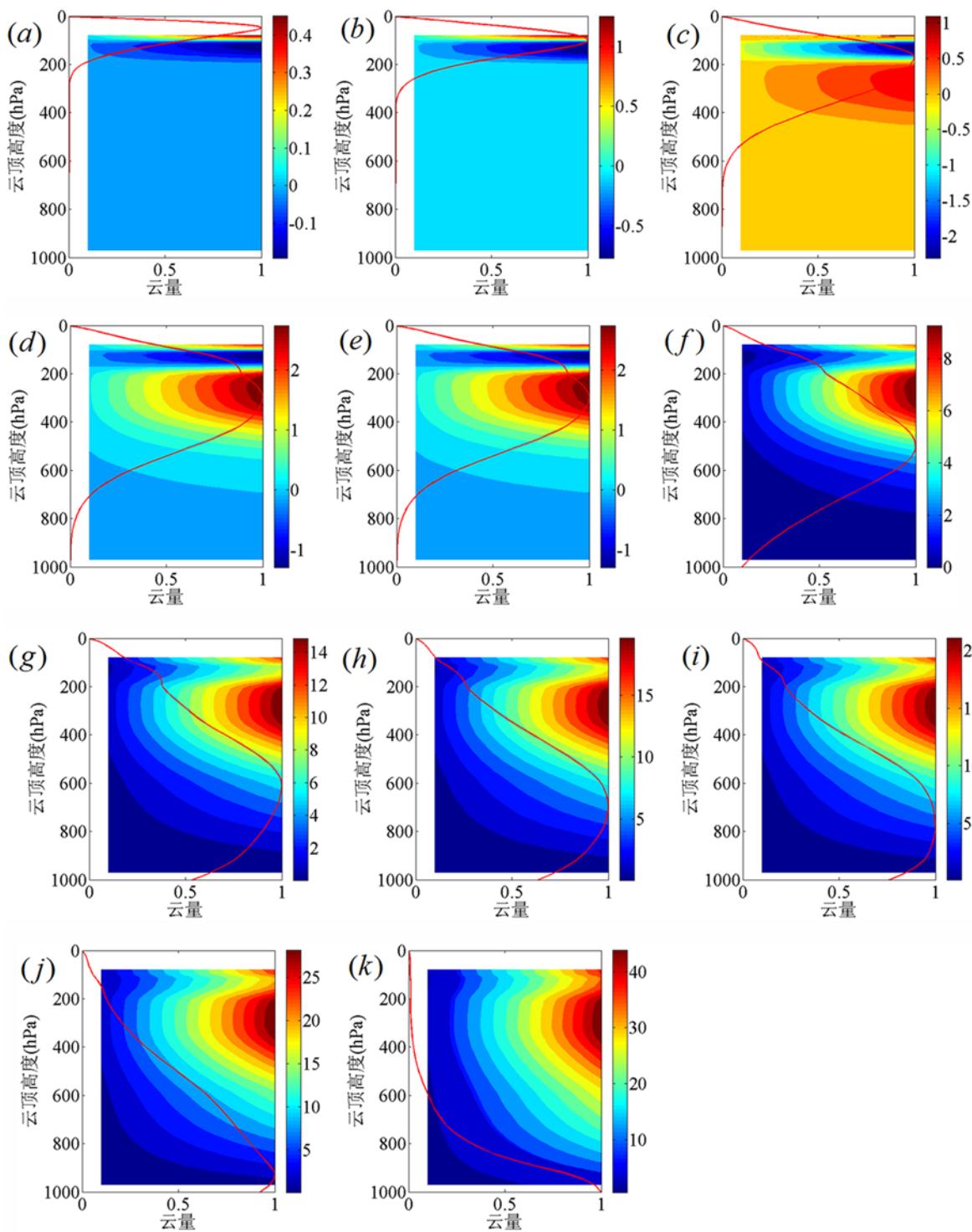


图 2 AIRS 晴空亮温与含云视场的亮温偏差随云顶高度及云量的分布情况: (a) 通道 6 ; (b) 通道 138 ; (c) 通道 174 ; (d) 通道 192 ; (e) 通道 201 ; (f) 通道 215 ; (g) 通道 227 ; (h) 通道 252 ; (i) 通道 232 ; (j) 通道 267 ; (k) 通道 375

各通道的两个普朗克参数。由式(4)可知,随着云量 f 的增大,某通道接收的总辐射值 $\text{Rad}_i^{\text{tot}}$ 会更多地来自于云区辐射 $\text{Rad}_i^{\text{cld}}$ 。 $\text{Rad}_i^{\text{cld}}$ 只能代

表云顶及其以上大气的辐射信息,而 $\text{Rad}_i^{\text{clr}}$ 则可代表地表及其以上大气的辐射信息。所以在同等条件下, $\text{Rad}_i^{\text{cld}} < \text{Rad}_i^{\text{clr}}$ 。因此,云量 f 越

大, Rad_i^{tot} 越小, 式(6)的分母值就越大, 亮温 T_B^i 也就越小, 导致晴空和有云时的亮温偏差随着 f 的增大而增大。

3.2 亮温偏差分布对云顶高的敏感性分析

图2中, 当云量一定时, 各通道的亮温偏差会随着云顶高度的升高而减小, 这是由于随着云顶高度的抬升, 云层上方为卫星探测的红外辐射提供贡献的大气柱缩短, 相应的辐射亮温值也就会减小。同时还可以注意到, 如果云量相对较大(0.7以上), 那么除了位置较高的通道6(50 hPa)和通道138(100 hPa)之外, 其他通道的云顶处于300 hPa时, 亮温偏差存在一个极大值区; 当云顶处于100 hPa时, 亮温偏差存在一个次极大值区。这主要是由式(4)中的云顶发射辐射项 $\varepsilon_i^{cld_top} \cdot B_i^{cld_top} \cdot \tau_i^{cld_top}$ 的变化引起的。如图3所示, 随着云顶高度的上升, 当云顶低于300 hPa时, 各通道所对应的不同云顶高度的发射辐射一致减小; 而当云顶处在350~100 hPa时, 云顶的发射辐射会随着云顶高度的上升而增大, 再往上又减小。云顶发射辐射的这种变化使得云区辐射随高度的上升也是先减小后增大再减小。所以, 当云量相对较大(0.7以上)时, 云区辐射对总辐射的贡献较大。而此时总辐射所对应的亮温值与晴空亮温的差值也就先增大后减小再增大。相应地, 当云顶处于300 hPa时, 亮温偏差出现了一个极大值区; 当云顶处于100 hPa时, 亮温偏出现了一个次极大值区。而云顶发射辐射随云顶高度的上升之所以会产生这样的垂直变化, 是因为受到温度廓线的影响, 300~100 hPa高度上存在明显的逆温, 导致云顶的普朗克辐射 $B_i^{cld_top}$ 发生同样的变化, 最终引起云顶发射辐射产生如上所说的垂直分布。

4 结束语

由于WRFDA同化系统中采用的CRTM模式仅仅用来处理晴空区资料, 而且目前还无法准确获取模拟云区亮温所必需的云参数资料,

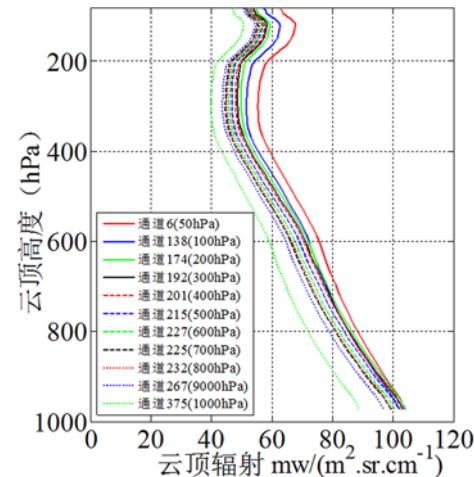


图3 各通道在不同云顶高度处的云顶发射辐射

本文对CRTM模式中关键的辐射传输模块进行了修改。对含云视场进行了分割, 并加入了云量和云顶高度两个参数。以云顶高度为依据, 分别计算了云区和晴空区的红外辐射。随后以云量为权重, 对这两部分辐射进行了加权平均以得出含云视场的红外辐射, 并提出了能够更好模拟云区辐射的CRTM云模式。接着利用CRTM云模式模拟了AIRS通道亮温, 并针对新增的云量和云顶高度两项参数进行了敏感性分析, 最终得出了以下结论:

(1) 从亮温偏差范围来看, 其沿垂直方向的变化与权重函数的垂直分布即通道高度之间有着明显的对应关系。随着通道高度的下移, 对卫星接收辐射贡献较大的大气层也在下移, 使得相应的偏差大值区所处的高度也越来越低。

(2) 在偏差大值区中, 偏差值会随着云量的增加而增大。在云量为1即全云覆盖的情况下, 偏差值最大。

(3) 云量较大时, 输入的温度廓线的垂直变化会引起云顶发射辐射产生相同的垂直分布。这与用CRTM云模式模拟出的亮温随云顶高度抬升而出现的垂直变化一致。

(4) 用CRTM云模式模拟的亮温值对新增的云量和云顶高度参数的敏感性较强, 并且符合大气红外辐射传输的规律。

参考文献

- [1] 吕达人, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾 [J]. **大气科学**, 2003, **7**(4): 553–566.
- [2] English S J. Issues in the Assimilation of Cloud and Precipitation Affected Radiance and Prospects for Future Instruments [C]. Reading: ECMWF Seminar on Recent Developments in the Use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction, 2007.
- [3] 任强, 董佩明, 薛纪善. 台风数值预报中受云影响微波卫星资料的同化试验 [J]. **应用气象学报**, 2009, **20**(2): 137–146.
- [4] 朱文刚, 李刚, 张华, 等. 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 [J]. **气象**, 2013, **39**(5): 633–644.
- [5] 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.
- [6] Huang H L, Li J, Baggett K, et al. Evaluation of Cloud Cleared Radiance for Numerical Weather Prediction and Cloud Contaminated Sounding Applications [C]. SPIE, 2005, **5890**: 38–45.
- [7] 程麟生, 丑纪范. **大气数值模拟** [M]. 北京: 气象出版社, 1991.

(上接第6页)

3 结论

通过气相外延方法生长出了 Au掺杂碲镉汞薄膜材料。利用金相显微镜对外延表面进行了表征, 利用红外透射光谱分析了材料的组分和截止波段。利用 SIMS 技术分析了气相外延薄膜材料纵向杂质的分布情况。对于 Au掺杂样品, 其 Au杂质含量沿表面向衬底方向先缓慢增加, 到 HgCdTe 和 CdZnTe 的互扩散区, Au杂质的含量为最高, 达到峰值; 然后随着深度的增加, Au杂质含量开始递减, 在 HgCdTe 和 CdZnTe 界面处降至最低; 随后又缓慢升至最高, 直至衬底里面保持不变。由此可见, 互扩散区对 Au杂质具有吸杂的作用。通过对外延层中 I、II 族杂质的分布分析发现, I、II 族杂质含量也是在互扩散区达到最大, 而互扩散区两端的浓度基本一致, 没有出现 Au杂质的缓变分布。这说明互扩散区的组分梯度没有影响到 I、II 族的杂质分布。而对外延层中 VI、VII 族的杂质分布分析发现, 杂质含量在互扩散区达到最大, 互扩散区的杂质浓度会随着深度的增加而缓慢降低, 直至到达衬底后才保持不变, 与 Au杂质的分布趋势一致。这说明互扩散区的组分梯度会对 VI、VII 族的杂质分布有一定影响。与 Au杂质的分布趋势不同的是, VI、VII 族杂质的分布在界面处没有出现图 3 中 B 点处的最低谷值。这主

要是因为 Au杂质是由外来因素掺杂进去的, 而 VI、VII 族杂质则是外延生长过程中所用源材料和衬底的本征杂质。本研究结果对 Au掺杂 p型碲镉汞薄膜材料的电学性能研究以及杂质在碲镉汞外延层及衬底的分布研究提供了实验和理论依据。

参考文献

- [1] Yang J R. Physics and Technology of HgCdTe Materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] Chu M R, Terterian S, Wang P C. Au-Doped HgCdTe for Infrared Detectors and Focal Plane Arrays [C]. SPIE, 2001, **4454**: 116–122.
- [3] Mynbaev K D, Ivanov-Omskii V I. Doping of Epitaxial Layers and Heterostructures Based on HgCdTe [J]. **Semiconductors**, 2006, **40**(1): 1–21.
- [4] Shih H D, Kinch M A, Aqariden F, et al. Development of High-operating-temperature Infrared Detectors with Gold-doped $Hg_{0.70}Cd_{0.30}Te$ [J]. **Applied Physics Letters**, 2004, **84**(8): 1263–1265.
- [5] Wang R, Jiao C L, Xu G Q, et al. Growth and Raman Spectrum of Au-doped $Hg_{1-x}Cd_xTe$ Epitaxial Crystals [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2014, **43**(9): 3047–3050.
- [6] 李湘. HgCdTe分子束外延薄膜材料的二次离子质谱的研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 1996.
- [7] Chu J H, Sher A. Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [8] Dieter K S. Semiconductor Material and Device Characterization [M]. London: Wiley, 1998.