

# 光学厚度预报因子对风云四号卫星扫描辐射计 红外通道快速正演精度的影响分析

马刚<sup>1,2</sup>, 马新园<sup>1,3</sup>, 白文广<sup>1,2</sup>, 刘辉<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>1,2\*</sup>, 覃丹宇<sup>1,2</sup>

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

3. 河南省周口市气象局, 河南 周口 466001)

**摘要:** 快速辐射传输模式利用光学厚度预报因子与卫星通道光谱特征系数可实现通道透过率的快速计算, 并达到与逐线积分模式相当的正演精度。针对 FY-4 AGRI 的 6 个红外通道, 分别建立了基于 RTTOV<sub>v7、v8、v9</sub> 和 CRTM<sub>v2.1</sub> (以下简称四种模式) 光学厚度预报因子的快速正演算子, 与逐线积分模式的结果对比, 分析了四种快速正演算子中均匀混合气体、水汽线吸收和水汽连续吸收预报因子对正演误差的影响。分析表明, 四种快速正演模式计算通道亮温与逐线模式结果相比, 在温度探测通道的最大标准差要小于 0.6K。v9 模式在水汽和温度通道的正演误差远小于其他三个模式; 四个模式在窗区通道的误差基本相当。v9 模式预报因子中, 引入实时大气与参考大气的整层温差减小了均匀混合气体光学厚度的正演误差。

**关键词:** 大气物理; 精度影响; 风云四号; 光学厚度预报因子; 红外通道快速正演

**中图分类号:** P414.4P407.6P422.3O439 **文献标识码:** A

## The influence of optical depth predictors on the rapid forward accuracy of infrared channels of FY-4 AGRI

MA Gang<sup>1,2</sup>, MA Xin-Yuan<sup>1,3</sup>, BAI Wen-Guang<sup>1,2</sup>, LIU Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2\*</sup>, QIN Dan-Yu<sup>1,2</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081, China;

3. Meteorological Bureau of Zhoukou City, Zhoukou 466001)

**Abstract:** The fast radiative transmission model can quickly calculate the transmittances coefficients by extending a series of optical depth core functions and channel spectral characteristics, so as to obtain an accuracy that is compatible with the line-by-line model. In this paper, four fast forward operators are established to predict the optical depth (OD) of mixed gas, water vapor line absorption and water vapor continuum absorption of RTTOV v7, v8, v9 and CRTM v2.1 in 6 infrared channels of AGRI in FY-4. The largest STDs of all the four fast operators are less than 0.6 K in brightness temperature of AGRI. The STD of water vapor, CO<sub>2</sub> and channel transmittances simulation in RTTOV v9 are the smallest among the four models. And the errors are less in lower levels than that of higher levels in the channel transmittances simulation. Experiments were also conducted using standard atmospheric profiles to calculate the Jacobine and OD of the mixed gas, water vapor absorption and water vapor continuum absorption. The OD errors of the mixed gas decrease with the new information of the deviations of real atmosphere profiles and the reference ones in v9. Simulations of OD of water vapor are improved by 19 water vapor line absorption profiles and 4 water vapor continuum absorption ones in v9.

收稿日期: 2017-10-13, 修回日期: 2018-01-18

Received date: 2017-10-13, revised date: 2018-01-18

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506022, GYHY201506002)

Foundation items: Supported by Public Science and Technology Research Funds Projects of Meteorology(GYHY201506022, GYHY201506002)

作者简介(Biography): 马刚(1972-)男, 北京人, 研究员级高级工程师, 博士, 主要研究方向为卫星遥感资料的辐射传输模拟和卫星资料同化应用。E-mail: magang@cma.gov.cn

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

**Key words:** atmospheric physics , impact to accuracy of brightness temperature , Fengyun4 satellite , optical depth predictor , fast simulation to Infrared imager channels

**PACS:** 95. 85. HP , 42. 68. -w , 42. 72. Ai , 78. 20. Bh

## 引言

用于描述辐射消光和辐射传递物理过程的辐射传输模式,可利用大气温度、湿度、痕量气体的分布,以及地表状态参数正演入瞳辐射,是联系大气热力参数空间与辐射参数空间的函数映射,是基于遥感辐射观测的大气和地表参数物理反演和卫星观测资料同化的基础和核心<sup>[1]</sup>。气象卫星在不同光谱采样观测大气层顶的上行大气辐射,利用辐射传输的逆运算可以获得大气和地表温湿度的参数分布,当光谱分辨率足够高时还可获得痕量气体组分的空间分布。

传统的辐射传输模式计算采用能够分辨吸收谱线的分辨率,在每一大气高度上对单一谱线吸收气体的吸收发射进行计算。同时要考虑谱线的线型、吸收系数等复杂的非线性过程,并基于通用的光谱库数据完成卫星传感器通道光谱范围的全部气体的吸收发射计算。这种计算方法称为逐线积分(LBL, line-by-line)方法,对应的辐射传输模式称为逐线积分模式。1976年,McMillan等提出参数化透过率的计算方法<sup>[2]</sup>,基于等吸收气体含量对大气分层;利用实时大气廓线相对于标准大气扰动的一阶Taylor展开,再用温度和湿度的线性组合作为Taylor展开的二阶和高阶精度项,从而获得与传统逐线积分模式相当的正演精度<sup>[3]</sup>。Eyre等认为在足够薄的气压层中,CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O等吸收气体是均匀分布的,此时其吸收发射过程只与气压层的平均温度和气体含量相关;而水汽作为可变混合比气体,也可以在薄的气压层中认为是均匀分布,此时的气压层透过率在计算中可用平均水汽含量进行订正<sup>[4]</sup>。Eyre于1991年发展了一个新算法,其中再次将均匀混合气体与水汽分开处理,而每种吸收气体采用相同形式的光学厚度预报因子<sup>[5]</sup>。这些快速辐射传输模式将卫星传感器通道的逐层光学厚度计算分解为依赖于先验的通道光谱信息(通道透过率系数)和实时大气状态参数(通道透过率/光学厚度预报因子)的基函数和。这类辐射传输计算方法称为快速辐射传输计算,可利用实时的大气温湿度、O<sub>3</sub>和其他痕量气体的垂直分布,以及地表发射率、地表温湿度等下垫面特征参数,正演特定卫星传感器通道的观测辐射。通道透

过率系数对于光谱固定的卫星通道是不变的,用LBL模式对全球代表性的大气状态廓线计算逐层的高光谱分辨率透过率数据集,联立针对大气状态廓线计算的通道透过率/光学厚度预报因子构建多元线性方程组,回归计算卫星通道的快速透过率系数查找表。

RTTOV(Radiative Transfer model for TOVs)是UKMO(Unite Kingdom Meteorological Office)发展的用于卫星辐射资料直接同化的快速辐射传输模式。从1991年Eyre开发的RTTOV v3.0至今,RTTOV v12.0已经公开发布,历经9个版本<sup>[6-7]</sup>。截止RTTOV v11,模式能够处理的卫星序列有17个,囊括的传感器有36种。与GENLN2逐线模式的结果相比,对FY2/3卫星红外探测器的最大正演误差控制在0.35 K以内<sup>[8]</sup>。CRTM(Community Radiative Transfer Model)是JCSDA(Joint Center for Satellite Data Assimilation)开发的快速辐射传输模式,其通道透过率计算的核心是OPTRAN(Optical Path TRANsmittances)模式,早期的CRTM依据吸收气体的含量划分模式层,近期发展的模式中,同时提供了基于吸收气体含量分层计算通道透过率的ODAS(Optical Depth on Absorber Space)方法和基于等压面计算通道透过率的ODPS(Optical Depth on Pressure Space)方法<sup>[9]</sup>。目前,CRTM已经发展了v1.0、v2.0、v2.1等3个大的版本系列。

不论是RTTOV还是CRTM都对通道透过率计算进行参数化。RTTOV正演滤光片式传感器红外通道的透过率时,气体吸收分别由均匀混合气体、水汽和O<sub>3</sub>完成,其中,均匀混合气体包括了CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O等7种时空分布变化缓慢的气体,水汽则是同时考虑了水汽的线吸收和连续吸收。RTTOV的光学厚度预报因子一般随模式的版本不同而有所差异,在RTTOV v9以后,光学厚度预报因子停止更新,模式的发展主要依赖LBL数据集的变化。CRTM则将吸收气体划分为干空气、水汽和O<sub>3</sub>,其中干空气的成分对应于RTTOV中的均匀混合气体。

近年来,国外纷纷开展了辐射传输模式的对比分析,用于确定卫星观测正演的最佳手段<sup>[10-11]</sup>。在基于RTTOV v7构建FY2 VISSR(Visible/Infrared Spin Scan Radiometer)正演算子的基础上,利用

NESDIS34 大气廓线数据集和构建的红外光谱高光谱分辨率透过率数据集, 针对 FY-4 AGRI (Advanced Geostationary Radiation Imager) 分别完成 RTTOV v7、v8、v9 和 CRTMv2.1 模式(以下简称 v7、v8、v9 和 v2.1 模式) 通道快速透过率系数查找表的构建. 从与 LBL 模式正演通道辐射亮温和透过率的对比、预报的 AGRI 通道光学厚度垂直分布等几个方面分析了不同通道光学厚度预报因子组合对卫星通道观测正演精度的影响. 分为 4 个部分, 前言部分中介绍了 RTTOV 和 CRTM 的发展; 快速辐射传输模式部分介绍了 RTTOV 和 CRTM 模式框架, 以及实验采用四种光学厚度预报因子; 卫星传感器和大气廓线数据集部分介绍了 FY-4 AGRI 的光谱特征和 NESDIS34 大气样本数据集; 实验分析部分分析不同通道光学厚度因子组合对卫星通道观测正演精度的影响; 最后是文章的总结.

## 1 快速辐射传输模式

对于在薄气压层上计算卫星通道透过率的快速辐射传输计算, 通道的透过率与光学厚度的关系为:

$$\tau_{ij} = e^{-d_{ij}} \quad (1)$$

其中  $\tau_{ij}$  为通道  $i$  在第  $j$  个气压层的透过率,  $d_{ij}$  为对应的通道光学厚度. 通道光学厚度是先验的通道光谱信息(通道透过率系数)  $-a_{ijk}$  和实时大气状态参数(通道光学厚度预报因子, 简称预报因子)  $-X_{kj}$  的多项式.

$$d_{ij} = d_{i,j-1} + \sum_{k=1}^K a_{ijk} X_{kj} \quad (2)$$

这里  $k$  为光学厚度预报因子的序号. 计算指定气压层的通道光学厚度时, 分别计算均匀混合气体、水汽和  $O_3$  的吸收发射; 对不同的吸收成分, 使用的预报因子也不相同. v7、v8、v9 和 v2.1 四种模式的预报因子中, 对于均匀混合气体, 预报因子是卫星天顶角  $\theta$  和实时大气温度  $T$  的函数. 4 种模式使用了 10 个左右的均匀混合气体预报因子, v7 和 v8 采用了相同的 10 个预报因子, v9 也用了 10 个预报因子, 但是加强了整层实时温度与参考温度离差对辐射消光的影响( $T_{**}$ ). v2.1 使用的预报因子个数为 7. 水汽吸收预报因子是  $T$ 、 $\theta$  和实时大气湿度  $Q$  的函数, 四种模式分别考虑了水汽线吸收和水汽连续吸收的吸收发射作用. v7 使用了 13 个预报因子计算水汽线吸收的影响, 2 个预报因子计算水汽连续吸收的影响. v8 中水汽线吸收的预报因子数量为 12, 但是加强了水汽连续吸收的效应, 水汽连续吸收预报因子数量为 4. v9 使用了 19 个水汽线吸收预报因子, 水汽连

续吸收的计算与 v8 相同. v2.1 中, 水汽线吸收的预报因子个数为 14, 对水汽连续吸收使用了 7 个预报因子进行描述<sup>[12,13]</sup>.  $O_3$  的预报因子是  $\theta$  和实时  $O_3$  廓线的函数. 考虑本文分析的对象-FY 4AGRI 的通道透过率受  $O_3$  吸收影响很小, 在此略去对其预报因子的分析.

## 2 卫星传感器和大气廓线数据集

### 2.1 FY-4AGRI

FY-4 是中国第 2 代静止轨道气象卫星, 于 2016 年 12 月 18 日发射成功, 目前定轨在  $105^\circ E$  上空. AGRI 是新一代搭载在静止卫星上的可见光/近红外扫描辐射计, 设置有 12 个通道, 主要用于灾害性天气短期预警, 如旋风、水灾、风暴、雷暴和飓风等<sup>[14]</sup>. 对 AGRI 6 个热红外通道进行正演分析, 其中 3 个  $6.7 \mu m$  水汽吸收线通道; 2 个分裂窗通道, 一个  $15 \mu m$   $CO_2$  吸收线附近的通道.

图 1 是 6 个红外通道的光谱响应函数分布. 红外 6 个通道的带宽为  $390 \text{ cm}^{-1}$  到  $42 \text{ cm}^{-1}$ . 通道 1 的光谱响应有明显的双峰值, 分别位于  $1542 \text{ cm}^{-1}$  和  $1649 \text{ cm}^{-1}$ , 算术平均的通道中心波数为  $1594 \text{ cm}^{-1}$ . 通道 2 在  $1378 \sim 1452 \text{ cm}^{-1}$  之间的计算中心波数为  $1409 \text{ cm}^{-1}$ . 通道 3~6 的光谱响应都为单峰函数, 计算通道中心波数分别为  $1163 \text{ cm}^{-1}$ 、 $922 \text{ cm}^{-1}$ 、 $833 \text{ cm}^{-1}$  和  $768.5 \text{ cm}^{-1}$ .

### 2.2 TIGR 43 和 NESDIS 34 大气样本数据集

TIGR 是法国动力气象实验室(LMD)发展 3I 反演法时建立的大气廓线数据集, 包含大气温度和湿度廓线. 这些廓线是利用复杂的统计分析方法从不同时期、全球范围内大量的统计样本中精选出来的, 代表了全球典型气候带大气温度湿度的垂直分布. TIGR2 包含 1761 条大气廓线, 从 TIGR2 库中精心挑选出来的 42 条廓线, 再加一条平均廓线构成 TIGR 43 大气样本数据集<sup>[15]</sup>.

NESDIS 从包含 383 条  $O_3$  样本库和几条南极的臭氧探空廓线中, 筛选其中相互独立的 34 条  $O_3$  廓线, 并附以同步探测的大气温湿廓线, 共同构成 NESDIS 34 大气样本数据集. 与 TIGR 数据集相比, NESDIS34 的廓线不仅代表了全球代表性大气分布, 还有对应的  $O_3$  垂直分布信息. 因此, 这些数据集常用于卫星通道  $O_3$  光学厚度快速透过率查找表的计算, 也可用于快速正演的独立精度检验.

## 3 实验分析

### 3.1 实验设计

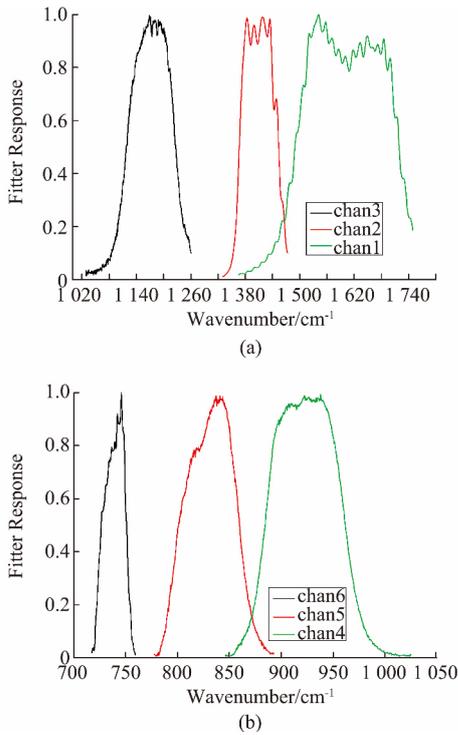


图1 FY-4AGRI 通道光谱响应函数 (a) AGRI 红外通道 1~3 的光谱响应, (b) AGRI 红外通道 4~6 的光谱响应  
Fig.1 Filter response function to FY-4 AGRI

GENLN2 LBL 模式通常用于构建高光谱分辨率的大气样本数据集<sup>[16]</sup>. 试验中, 利用 GENLN2 计算 NESDIS 34 大气样本数据集在 1 013. 25-0. 1 hPa 的 43 个等压层上的大气透过率数据库, 光谱分辨率为 0. 01 cm<sup>-1</sup>. 其中, 将均匀混合气体、水汽、O<sub>3</sub> 共同构成精确的大气透过率数据库. 根据 AGRI 6 个红外通道的光谱响应函数, 对光谱分辨率为 0. 01 cm<sup>-1</sup> 的三种气体的大气透过率数据卷积, 将计算 AGRI 透过率作为真值.

TIGR 的 43 条廓线分别构建 v7、v8、v9 和 v2. 1 模式的通道光学厚度预报因子, 结合 GENLN2 的精确透过率训练样本数据集, 回归计算 4 种模式的快速透过率查找表.

### 3.2 利用 NESDIS 34 廓线的精度分析

表 1 FY-4 AGRI 正演通道权重函数峰值高度 (单位: hPa)  
Table 1 FY-4 AGRI forward channel weight function peak height (Unit: hPa)

	1	2	3	4	5	6
V7	396	521	1 013. 25	1 013. 25	1 013. 25	957
V8	396	521	1 013. 25	1 013. 25	1 013. 25	957
V9	396	521	1 013. 25	1 013. 25	1 013. 25	922
V2. 1	396	521	1 013. 25	1 013. 25	1 013. 25	1 005

通道的权重函数分布代表了通道探测的目标高度. 利用 4 种模式分别计算 34 条廓线对应 6 个通道的权重函数如表 1 所示. 4 种模式在前 5 个通道正演通道权重函数峰值高度完全相同, 只在通道 6 有所差异, v7/8 的正演峰值为 957 hPa, v9 计算的峰值权重在 922 hPa, v2. 1 的最大值在 1 005 hPa.

图 2 是 4 种模式正演 34 条廓线对应的通道亮温, 并与 GENLN2 积分结果的比较. 图中显示了二者的标准差 (STD, Standard Deviation) 分布, 快速正演的最大偏差在通道 6, 以 CRTM 的值最大, 为 0. 587 K; v9 的值最小, 为 0. 417 K. 四种模式在窗区通道的正演精度都在 0. 238 K 和 0. 17 K. 低层水汽的误差在 0. 24 ~ 0. 26 K 之间. v9 的 STD 值最小, 为 0. 245 K, CRTM 其次, 为 0. 248 K. 中高层水汽通道的差异较大, 对通道 1, 四个模式的 STD 分别为 0. 07、0. 08、0. 04 和 0. 18 K; 对通道 2, STD 分别为 0. 07、0. 1、0. 06 和 0. 14 K. 总体而言, v9 的光学厚度预报因子对水汽和温度探测通道的正演偏差最小, 但在窗区通道的正演误差相对于最好的 v2. 1 模式要大 0. 005 ~ 0. 007 K 左右.

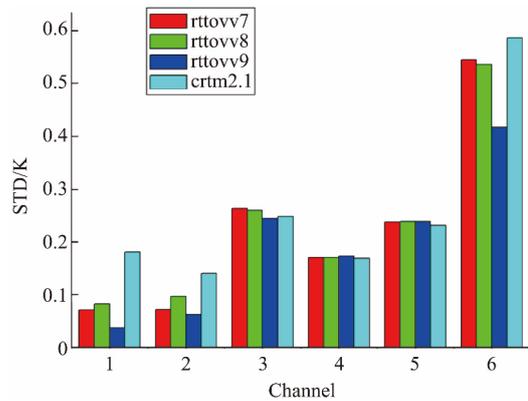


图 2 4 种快速辐射传输模式正演通道亮温的精度  
Fig.2 STD to 6 channels of FY-4 AGRI from simulated brightness temperature of GENLN2 to 4 fast forward models

图 3 (a) ~ (f) 是 AGRI 6 个红外通道透过率的 STD 分布, 计算条件与图 2 相同. 图中横坐标为四个模式, 垂直坐标为 43 个模式面序号. 快速正演的通道透过率与 LBL 的偏差发生在模式层为 10 以下的低层大气中. 对水汽通道, 随探测高度降低, 正演透过率的偏差加大, 从通道 1 的平均 10<sup>-3</sup> 增长到通道 3 的 10<sup>-2</sup>. v9 在 3 个水汽通道的逐层透过率偏差都最小, 偏差极值与通道权重函数峰值对应较好, 通道 1 的峰值权重为 350 hPa, 正演透过率的最大偏差为

0.0016, 在 300 ~ 400 hPa 之间, 并随高度下降透过率偏差迅速减小. 这说明 v9 能够很好反应一定大气厚度内的总体水汽的吸收和发射情况. 其余三个模式正演透过率的 STD 在数值分布上都不是单峰情形, 导致正演计算中非探测高度的透过率计算误差会引入通道总辐射率的模拟计算. 对窗区通道, v9 在近地面的透过率偏差比其余模式小 0.0004 左右, 模拟透过率的误差主要出现在大气中层 400 ~ 700 hPa 之间. v2.1 在近地面的透过率误差也有减小的趋势, 但是数值上比 v9 略大. 总体而言, 四个模式在 CO<sub>2</sub> 探测通道的逐层透过率要比其它 5 个通道的误差大一些, 在 10<sup>-2</sup> 左右. 随着探测高度升高, v9 的误差大值出现在 500 ~ 300 hPa 之间, 为 0.045, 且比其它 3 个模式的误差都大, 但是在近地层迅速减小, 保证了通道整层透过率的误差比另外 3 个模式都小.

### 3.3 基于标准大气廓线的正演分析

LBL 数据集只是通道透过率的总体分布, 无法提供逐个预报因子计算的通道光学厚度, 因此文中利用 1976 年美国标准大气廓线对 4 种预报因子正演的通道透过率做进一步分析.

快速辐射传输计算中, 大气的吸收由 3 个相互独立的部分组成: 均匀混合气体、水汽和 O<sub>3</sub>. 通道透过率计算中, 各吸收成分独立计算光学厚度, 通道吸收成分光学厚度的和:

$$d_{ij}^{c, an} = d_{ij}^{mix} + d_{ij}^{uv-l} + d_{ij}^{uv-c} + d_{ij}^o, \quad (3)$$

式中  $d_{ij}^{chan}$  是通道  $i$  在第  $j$  个模式面的总光学厚度, 上标  $mix$  是均匀混合气体,  $uv-l$  是水汽线吸收,  $uv-c$  是水汽连续吸收,  $o$  是 O<sub>3</sub>. 光学厚度数值随高度递减, 变化区间为  $[0, -\infty]$ . 图 4 是四种模式计算均匀混合气体的光学厚度. 可以看到, 6 个红外通道计算的光学厚度都随高度递减, 在近地面层为大值, 在 10 hPa 以上的大气中收敛到 0, 这与理论分析的光学厚度垂直分布一致. 从通道 1 到通道 6, 通道中心波数逐渐向 15  $\mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub> 吸收线移动, 包含 CO<sub>2</sub> 的均匀混合气体预报因子计算的光学厚度逐渐增大; 在温度探测通道, 均匀混合气体的光学厚度可以比水汽通道大一个数量级; 而窗区通道的大气吸收很弱, 此时的光学厚度要小于探测通道. 通道 1 中均匀混合气体的光学厚度在 200 hPa 附近开始显著降低, 只有 v9 中  $\text{Sec}(\theta) T_r(j)$  计算的光学厚度从 0.463 下降到 0.292, 与通道的探测高度有较好的对应, 对提高该层透过率的正演精度有正贡献 (见图 2). 通道 2 的计算中,  $\text{Sec}(\theta) T_r(j)$ ,  $\text{Sec}(\theta)^2 T_r(j)$ ,  $\text{Sec}(\theta)$  和  $\text{Sec}(\theta) T_r^2(j)$  在 300 ~ 500 hPa 之间的值比其它项计算的光学厚度大  $1 \times 10^{-3}$  以上, 这些都是 v9 和 v2.1 在该高度层的透过率误差比 v7 和 v8 都大的原因之一. 通道 3 的情况与通道 2 相差不大, 但是  $\text{Sec}(\theta) T_r(j)$ ,  $\text{Sec}(\theta)^2 T_r(j)$ ,  $\text{Sec}(\theta)$  和  $\text{Sec}(\theta) T_r^2(j)$  在中层大气正演极大值正好抵消, 为 v9 在中低层大气的透过率误差减小提供的有效贡献. v2.1 中 7 个预报因子计算通道 3 的光学厚度为 10<sup>-3</sup>, 远小于其它三个模式, 对通道透过率的贡献也要小得多. 通道 4、5 中, v9 和 v2.1 都在 1000 hPa 有正的正演光学厚度增量, 更接近分析的通道透过率分布. 但是 v9 在中层大气有计算光学厚度的极大值, 通道 4、5 在中层大气的透过率误差较大, 因此在图 1 显示了与其它三个模式相当的 STD. 对通道 6 模拟时, v9 仍然存在中层大气的计算光学厚度极大值, 使模式在中层大气的透过率误差增大. v2.1 在中层大气

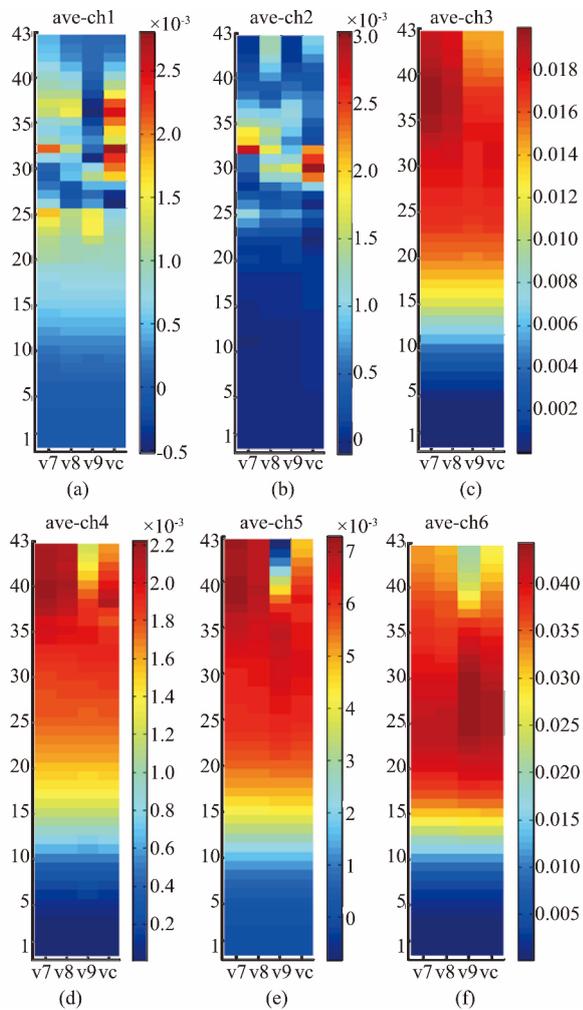


图 3 4 种模式正演通道透过率的 STD  
Fig. 3 STD to 6 channels of FY-4 AGRI from simulated transmittances of GENLN2 to 4 fast forward models

存在计算光学厚度极大值,中层透过率误差有所增大.由此可见,在通道光学厚度计算中,v9引入了 $T^{**}$ ,用整层温度与整层参考温度的离差取代了v7/v8模式中逐层温度与参考温度的离差和,对温度和水汽探测通道的正演精度提高有所帮助.但是在窗区通道的正演中, $T^{**}$ 强迫使计算通道透过率误差增大,v9正演精度下降.V2.1中单一 $T^{**}$ 的预报因子在中层大气也引起了计算光学厚度极大值,但数值上小很多,使模式正演STD小于v9但是大于v7/v8.

图5是水汽线吸收预报因子计算光学厚度的对比.水汽通道的光学厚度远大于均匀混合气体,并且随着高度升高光学厚度值趋向于0.随着通道中心波数逐渐远离水汽吸收线,光学厚度逐渐减小,而且通道1与通道3水汽线吸收的光学厚度相差 $10^2$ .v9

使用了19个预报因子,减弱了逐层实时水汽与参考廓线的离差( $W^*$ );加强了实时廓线与参考廓线整层的离差效应( $W^{**}$ ),使计算的水汽线吸收光学厚度比v7/v8大10倍.V2.1的计算光学厚度最大,但是v2.1的水汽线吸收预报因子定义与v8基本相同,只是引入了均匀混合气体的预报因子作为水汽订正.其余预报因子计算的光学厚度值与v8基本相同,但是该方法使正演偏差有所增大.图5(a)中,v7模式的 $\sqrt{\text{Sec}(\theta) W_r(j)}$ 、 $\text{Sec}^2(\theta) W_r^2(j)$ 和 $\frac{\sqrt{\text{Sec}(\theta) W_r(j)} W_r(j)}{W_*(j)}$ 的负光学厚度极大值对应,因此会出现大的透过率偏差.V8的透过率误差极大值在600和800 hPa,对应 $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$ 和 $\frac{\text{Sec}(\theta) \sqrt{W_r^3(j)}}{W_{**}(j)}$ 的负极值.v9的透过率误差最小,只

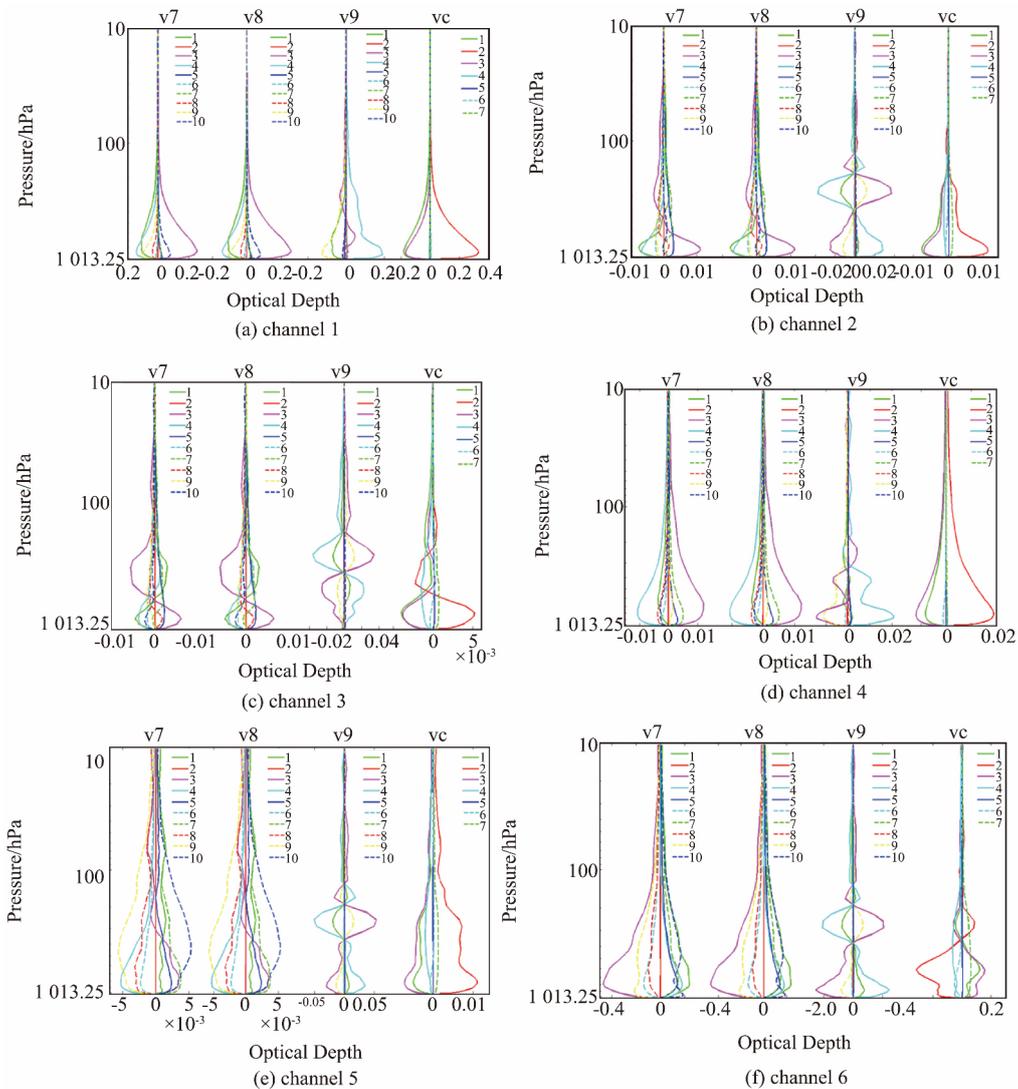


图4 快速正演均匀混合气体的光学厚度

Fig.4 Simulated optical depth to 6 channels of FY-4 AGRI from predictors of mixed gas

有 200 ~ 300 hPa 间有极大值, 对应的是  $\sqrt{\text{Sec}(\theta) W_r(j)}$  和  $\text{Sec}(\theta) \sqrt{W_r^3(j)}$  的负位相极大值. 尽管  $\text{Sec}(\theta) W_*(j)$  和  $\sqrt{\text{Sec}(\theta) W_r(j) W_r(j)}$  在 400 hPa 以下有负的大值, 但被  $\text{Sec}(\theta) \sqrt{W_r^3(j)}$  的正位相极大值抵消. v2.1 的透过率大值分别在 400 ~ 600 hPa 和 700 ~ 900 hPa 之间, 对应的是  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$  的两个极大值区间, 使模式的透过率误差增大. 通道 2 和 3 的情况与之类似. 在通道 4, v7 在负位相的预

报因子较多, 主要集中在 850 hPa 和 1000 hPa, 但是  $\sqrt{\text{Sec}(\theta) W_r(j)}$  和  $\frac{\text{Sec}(\theta) W_r(j)^2}{W_*(j)}$  在相同高度的正极大值使正演通道透过率总体误差增大. V8 的误差主要来源是  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$  在 750 hPa 以下的正光学厚度极大值, 使正演透过率误差也是递增的. v9 和 v2.1 的透过率误差在 850 hPa 以下逐渐减小, v9 在 1005 hPa 处有提供了正光学厚度极大值, 对减小透过率正演误差有利. 在 750 ~ 1000 hPa 之间计算水

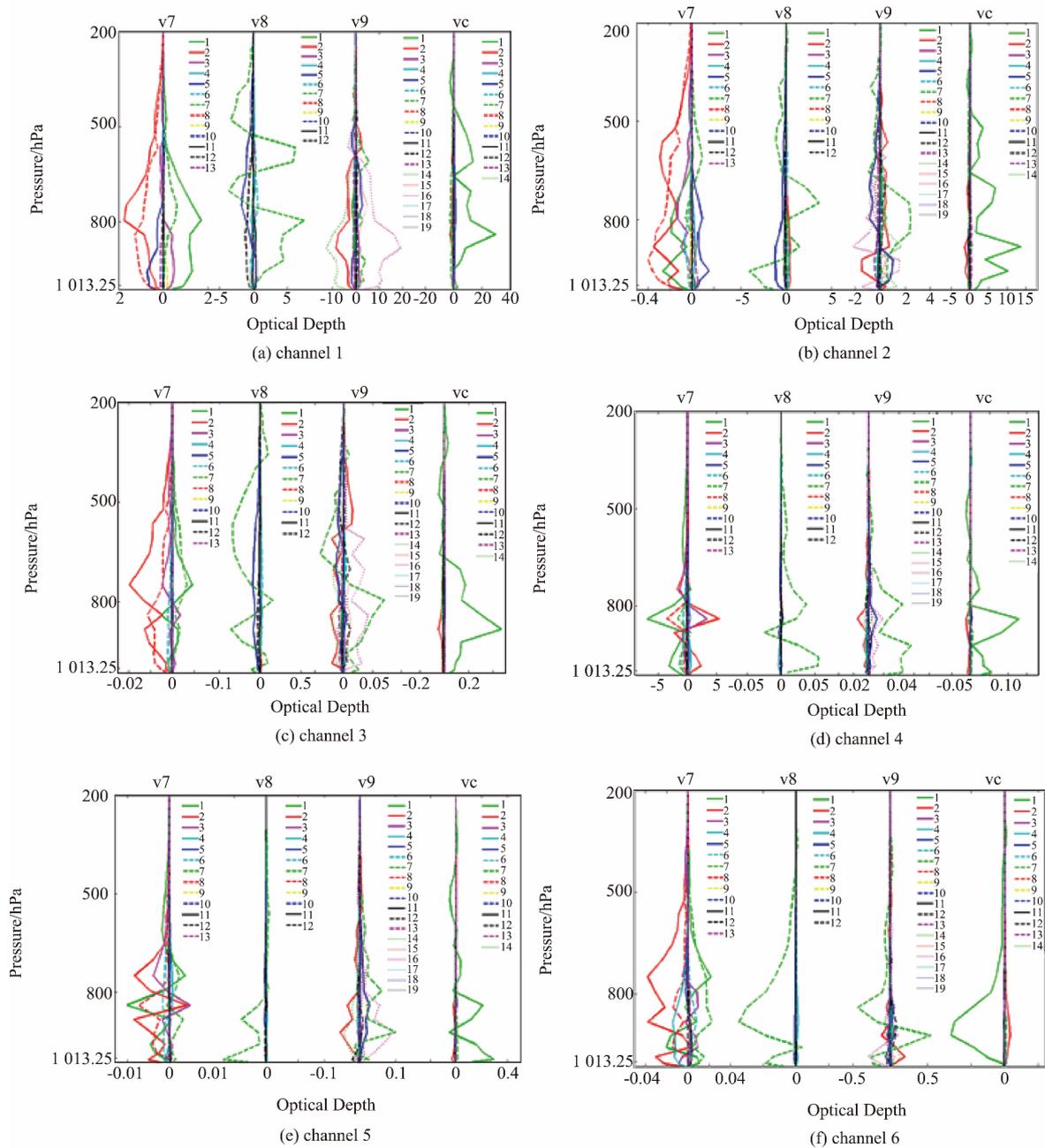


图 5 快速正演水汽线吸收的通道光学厚度

Fig. 5 Simulated optical depth to 6 channels of FY-4 AGRI from predictors of water vapor line absorption

汽线吸收光学厚度正的大值区域对应增大了透过率的正演误差,但由于数值远小于均匀混合气体计算光学厚度,对透过率的总体影响不明显。 $v2.1$ 的情况与之相同。在通道 5,  $v8/v9$  和  $v2.1$  中,  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$  是透过率误差的主要来源之一。从图 5(e) 看,均匀混合气体的计算光学厚度对水汽线吸收光学厚度的反位相订正很小。四个模式在通道 6 的正演透过率误差都是在 850 hPa 以下逐渐减小,  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$  在 850 hPa 的值分别为  $-1.74$  ( $v8$ ) 和  $-1.59$  ( $v2.1$ ), 远大于均匀混合气体的光学厚度,从而使对温度通道的正演误差都比较大。 $v9$  中  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$  在 900 hPa 处有正的极大值,在 1000 hPa 和 800 hPa 处有负的极大值,但是光学厚度比均匀混合气体小了一个数量级,这些都有利于提高通道探测高度附近的透过率。总体而言,  $v9$  中增加的水汽线吸收预报因子对通道光学厚度的影响不大,但是通过调整敏感的水汽预报因子,减小了水汽通道的透过率误差;低层水汽通道和窗区通道水汽线吸收的计算中,增大的光学厚度  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$  权重使  $v9$  在中层大气的透过率正演误差增大。温度通道,水汽线吸收的计算光学厚度比均匀混合气体小一个数量级,对通道透过率误差没有大的影响。

图 6 是水汽连续吸收预报因子计算的通道光学厚度。水汽连续吸收与大气温度成反比,与水汽含量成正比。水汽连续吸收在 200 hPa 以上大气中的光学厚度为 0。通道 1、2 的结果表明,  $v7$  计算的通道水汽连续吸收光学厚度比水汽线吸收的值小一个数量级,并且二者的计算值呈反位相变化,对通道总透过率的影响基本为零。近地面水汽通道和窗区通道的光学厚度计算中,  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r^2(j)}{T_r^4(j)}$  的值明显大于  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_r(j)}$ ,体现了水汽连续吸收的累积光学厚度为负,是对通道总光学厚度的订正。对于通道 6,其较低的探测高度使通道透过率仍然受到水汽连续吸收的影响,此时水汽连续吸收的峰值高度为 850 hPa。 $v8$  模式中水汽探测通道的光学厚度贡献主要来源于  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_j}$  和  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_r(j)}$ ,在数值上与水汽线吸收的光学厚度相当,2 个预报因子的计算光学厚度也呈反位相变化,水汽连续吸收光学厚度峰值与通道探测高度一致性较好。当高度降低到近地面,  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r^2(j)}{T_r(j)}$  和  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r^2(j)}{T_r^2(j)}$  的反位相变化对通道

总光学厚度的贡献为零。近地面通道和窗区通道的正演中,  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_r(j)}$  在 400 ~ 700 hPa(通道 3)、900 hPa(通道 4) 和 1000 hPa(通道 5) 处存在较大的正峰值,与低层探测通道受水汽连续吸收影响大的分析一致。 $v9$  对水汽探测通道的计算光学厚度不仅探测高度附近的水汽连续吸收有所加强,正偏差在数值上也有所减小。通道 4 的计算光学厚度正演中,  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_r^2(j)}$  在所有高度上都在负位相,过度加强了水汽连续吸收的影响,表明水汽连续吸收在吸收线附近的影响较弱。通道 5 的光学厚度,  $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_r^2(j)}$  在 1000 hPa 值为正,表明水汽连续吸收随通道探测高度降低对透过率的影响逐渐接近水汽线吸收的作用。通道 6 的光学厚度在 900 hPa 处,这两项一起订正了该高度上的正偏差。 $v2.1$  有 7 个预报因子中除窗区外的通道,其它通道的正演偏差都是四个模式中最大的。从  $\text{Sec}(\theta) W_r(j)$ 、 $\text{Sec}(\theta) \frac{W_r(j)}{T_r^4(j)}$  与水汽线吸收的预报因子可以看到,只有对温度探测通道在 800 ~ 1000 hPa 之间提供了有效的通道光学厚度。总体而言,水汽连续吸收预报因子仅对低层探测通道的正演有效,  $v9$  中的四个连续吸收预报因子能够很好地反应水汽连续吸收对该通道光学厚度正演的影响,而  $v2.1$  过多的水汽预报因子不能进一步提高通道透过率的正演精度。

#### 4 结论

针对 FY-4AGRI 的红外通道光谱特征,建立了 RTTOV $v7$ 、 $v8$ 、 $v9$  和 CRTM $v2.1$  四种快速正演算子。基于等压层进行辐射传输计算时,将大气吸收气体划分为均匀混合气体(干空气)、水汽和  $O_3$ 。对水汽的吸收处理中,分别从水汽线吸收和水汽连续吸收独立计算通道光学厚度。利用 NESDIS 34 大气样本数据和大气标准廓线,通过对比 GENLN2 的积分结果,本文分析了快速正演算子中均匀混合气体和水汽吸收中不同光学厚度预报因子对水汽探测通道、窗区通道和温度探测通道正演误差的影响,得到如下结论:

1) 四种正演算子分别包含了 10 ~ 19 个水汽线吸收光学厚度预报因子,2 ~ 7 个水汽连续吸收预报因子。对比 GENLN2 计算的 AGRI 通道辐射亮温,  $v9$  在水汽和温度探测通道的误差最小,  $v2.1$  在这些通

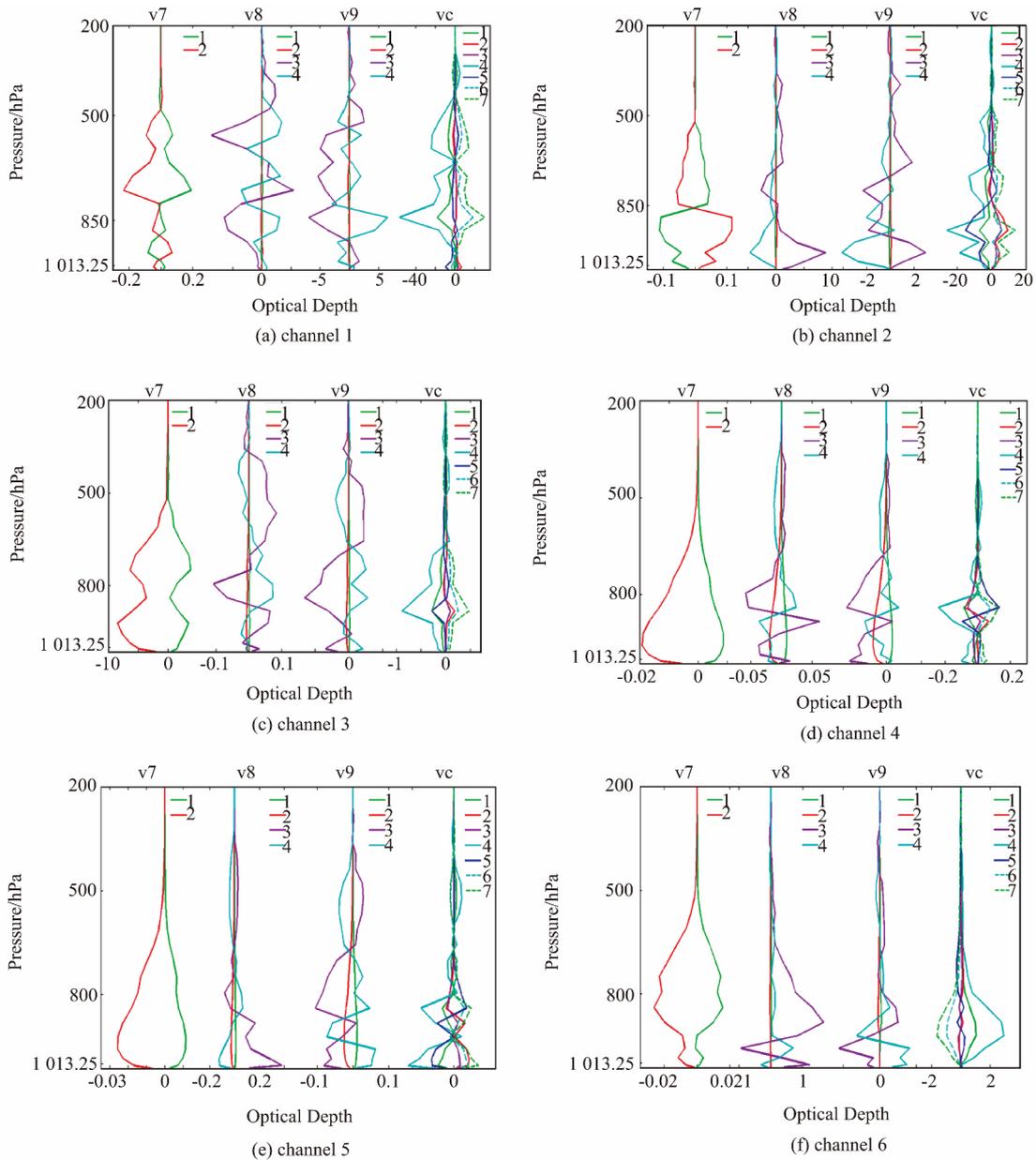


图 6 快速正演水汽连续吸收的通道光学厚度

Fig. 6 Simulated optical depth to 6 channels of FY-4 AGRI from predictors of water vapor continuum absorption

道的误差最大. 在窗区通道, 四种正演算子的误差水平相当.

2) 对四种正演算子计算通道透过率的误差分析表明, v9 的透过率误差最小, 在近地面的透过率误差远小于其它三个模式, 这与正演通道辐射亮温的误差分布有很好的对应.

3) 四种正演算子对 AGRI 6 个红外通道的计算光学厚度都随高度递减, 在近地面层出现峰值, 在 10 hPa 以上的大气中收敛到 0, 这与理论分析的光学厚度垂直分布一致. 在通道光学厚度计算中, v9 引入了  $T^* *$ , 对温度和水汽探测通道的正演精度

提高有所帮助, 但是在窗区通道的正演中,  $T^* *$  中层大气出现计算光学厚度极大值, 计算通道透过率误差增大, 使 v9 正演精度下降. v2.1 中单一  $T^* *$  的预报因子在中层大气也引起了计算光学厚度极大值, 但数值上小很多, 使模式正演 STD 小于 v9 但是大于 v7/v8.

References

[1] Rizzi R, Matricardi M. The use of TOVS clear radiances for numerical weather prediction using an updated forward model (下转第 370 页)

- 农业工程学报), 2011, **27**(12): 161-167.
- [25] WANG Bin, QIAN Xiao-Gang, PENG Xi. Characters of Spatial and Temporal Distribution of Soil Moisture under Different Vegetation in Huajiang Valley [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*(王宾, 钱晓刚, 彭熙. 花江峡谷不同植被类型下土壤水分时空分布特征. 水土保持学报), 2006, **20**(5): 139-143.
- [26] LI Kai-Zhong, PENG Xian-Wei, XIONG Kang-Ning. Evaluation to the Effect of Land use in Karst Valley of Guizhou Province - A Case Study in Huajiang Valley [J]. *Carsologica Sinica*(李开忠, 彭贤伟, 熊康宁. 贵州喀斯特峡谷地区土地利用效果评价—以贵州花江峡谷地区为例. 中国岩溶), 2005, **24**(4): 293-299.
- [27] XIONG Kang-Ning, CHEN Yong-Bi, CHEN Hu, et al. Be able to perform wonders—Guizhou rocky desertification control technology and mode [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology press(熊康宁, 陈永毕, 陈浒, 等. 点石成金—贵州石漠化治理技术与模式. 贵阳: 贵州科技出版社), 2011, **19**.
- [28] Bindlish R, Barros A P. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**(1): 130-137.
- [29] ZHANG Tian-Feng, WANG Jin-Song, GUO Jiang-Yong. Analysis on the Change of Aridity Index in Northwest China in Autumn [J]. *Arid Zone Research*(张天峰, 王劲松, 郭江勇. 西北地区秋季干旱指数的变化特征. 干旱区研究), 2007, **24**(1): 87-92.
- [30] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **79**(2): 213-224.

\*\*\*\*\*

(上接第 359 页)

- [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, **124**(548): 1293-1312.
- [2] Mcmillin L M, Fleming H E. Atmospheric transmittance of an absorbing gas: a computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with constant mixing ratios in inhomogeneous atmospheres. [J]. *Applied optics*, 1976, **15**(2): 358.
- [3] Mcmillin L M, Crone L J, Kleespies T J. Atmospheric transmittance of an absorbing gas. 5. Improvements to the OPTRAN approach. [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(36): 8396.
- [4] Eyre J R, Woolf H M. Transmittance of atmospheric gases in the microwave region: a fast model. [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(15): 3244-9.
- [5] Eyre J R. A fast radiative transfer model for satellite sounding systems [C]// ECMWF Research Dept. Tech. Memo 176, ECMWF. 1991.
- [6] Matricardi M, Chevallier F, Kelly G, et al. An improved general fast radiative transfer model for the assimilation of radiance observations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, **130**(596): 153-173.
- [7] Saunders R, Matricardi M, Brunel P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, **125**(556): 1407-1425.
- [8] MA Gang, QIU Chong-Jian, LI Guang-Qing, et al. Study of simulation on radiance from infrared and water vapor channel of fy2b by a fast forward model-rttov7 [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (马刚, 邱崇践, 黎光清, 等. 利用 RTTOV7 快速辐射传输模式模拟风云二号红外和水汽成像通道辐射率的研究. 红外与毫米波学报), 2006, **25**(1): 37-40.
- [9] Chen Y, Han Y, Liu Q, et al. Community Radiative Transfer Model for Stratospheric Sounding Unit [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2011, **28**(28): 767-778.
- [10] Chen Y, Han Y, Weng F. Comparison of two transmittance algorithms in the community radiative transfer model: Application to AVHRR [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, **117**(D6): 561-8.
- [11] Kratz D P, Mlynczak M G, Mertens C J, et al. An inter-comparison of far-infrared line-by-line radiative transfer models [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **90**(3-4): 323-341.
- [12] R9REP2008 RTTOV-9 science and validation report available at: [http://research.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/rtm/rttov9\\_files/rttov9\\_svr.pdf](http://research.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/rtm/rttov9_files/rttov9_svr.pdf) Saunders
- [13] Han Y, Delst P V, Liu Q, et al. User's Guide to the JCS-DA Community Radiative Transfer Model (Beta Version) [J]. NIST TN-1442, 2005.
- [14] Li Xiaokun, Wang Ganjin, Chen Guilin, FY-4 imager: visible channel star sensing [J]. *Science Technology and Engineering* (李晓坤, 王淦全, 陈桂林. 风云四号气象卫星扫描成像仪—可见光通道星敏感. 科学技术与工程), 2007, **7**(6): 993-996.
- [15] Qi C. A Sampling Technique of Typical Atmospheric Profiles Database in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (漆成莉, 刘辉, 马刚, 等. 中国区域典型大气廓线样本库的一种选择方法, 应用气象学报), 2010, **21**(1): 70-75.
- [16] Edwards D P. GENLN2: A general line-by-line atmospheric transmittance and radiance model. Version 3.0: Description and users guide [C]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-367 + STR, Boulder, CO. 1992.