

# 基于RTTOV模式的大气二氧化碳反演 参数敏感性分析

李镜尧,施润和\*,殷瑞娟

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室,华东师范大学环境遥感与数据同化联合实验室,上海 200241)

**摘要:**大气二氧化碳是开展全球气候变化和碳循环研究的关键数据。卫星遥感技术与模式模拟相结合的反演方法已成为获取该数据的重要手段,但模式输入参数本身的误差会对大气二氧化碳反演精度产生影响,须在反演算法设计中加以关注。本文利用RTTOV 10快速辐射传输模式模拟Aqua/AIRS红外探测器17个大气二氧化碳反演通道,计算了这些通道上大气顶出射辐射对温度廓线、臭氧廓线、水汽廓线、地表温度和地表发射率的参数误差的不确定性,并与二氧化碳增加0.5%时造成的不确定性进行对比,分析二氧化碳对上述参数误差的敏感性。结果表明,温度廓线误差是干扰AIRS大气二氧化碳反演的主要因素,其次是臭氧廓线误差,而水汽廓线、地表温度和地表发射率的误差对二氧化碳反演的影响在除去个别通道后可忽略不计。最后,本文以通道为单位,确定了各通道上的高敏感参数、敏感参数和不敏感参数,为二氧化碳反演通道的选择和反演算法的设计提供了参考。

**关键词:**二氧化碳;反演;敏感性分析;RTTOV

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2014.00443

## 1 引言

2007年第四次政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告指出,自工业革命以来,由于大量化石燃料的燃烧和土地利用变化等原因,全球大气二氧化碳含量上涨了约三分之一,其辐射强迫达到 $1.66 \pm 0.17 \text{ W/m}^2$ ,占有长寿命温室气体辐射强迫的63%;而全球海陆表面温度也在近半世纪以来上升了大约半度<sup>[1]</sup>。大量证据表明,大气二氧化碳作为主要的温室气体之一,与全球气候变暖有着十分密切的关系<sup>[2-4]</sup>。探究大气二氧化碳与气候变化的关系,需要借助高精度长时间序列的全球大气二氧化碳浓度数据。

当前,大气二氧化碳数据获取手段主要有2种,即地面站点监测和卫星遥感反演。地面站点监测网最典型的代表是世界温室气体中心(World Data Center for Greenhouse Gases, WDCGG),它由世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和日本气象厅(Japan Meteorological Agen-

cy, JMA)共同维护<sup>[5]</sup>,但其监测站点在全球的空间分布仍然较稀疏,缺乏海洋、沙漠及极地资料,无法满足全球动态监测的需要。而高光谱卫星遥感技术能够提供全球范围的高精度的实时的资料,是监测全球大气参数及环境变化的重要手段。一些国家已经发射了一系列高光谱红外探测器(如SCIAMACHY、IASI、AIRS、GOSAT等),并实现了全球范围温室气体的有效观测<sup>[6]</sup>。

辐射传输模式(Radiative Transfer Model, RTM)是利用卫星资料反演大气二氧化碳的重要组成部分。使用辐射传输模式对大气辐射传输过程进行前向模拟时,需要输入各种大气状态参数与地表参数,而这些参数本身也存在着一定的误差,可能导致模式输出的大气顶出射辐射值偏离卫星观测结果,进而影响大气二氧化碳的反演精度。因此,在利用卫星资料与模式模拟反演大气二氧化碳之前,首先需要分析大气二氧化碳反演参数的敏感性。Jianping Mao等人利用逐线积分辐射传输模式(Line-by-Line Radiative

收稿日期:2013-06-26; 修回日期:2013-09-16。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2010CB951603);国家自然科学基金项目(41201358);上海市科委重点支撑项目(13231203804)。

作者简介:李镜尧(1989-),男,硕士生,主要从事大气遥感研究。E-mail: kuntaljiy@163.com

\*通讯作者:施润和(1979-),男,博士,副教授,主要从事定量遥感模型与验证研究。E-mail: rhshi@geo.ecnu.edu.cn

Transfer Model, LBLRTM)分析了用  $1.58\mu\text{m}$  波段反演大气二氧化碳浓度的敏感性和可行性<sup>[7]</sup>;戴铁等人利用 IRAS (Infrared Atmospheric Sounder) 的 LBLRTM研究用风云三号卫星(FY-3)  $4.3\mu\text{m}$  和  $15\mu\text{m}$  波段反演大气二氧化碳浓度的敏感性<sup>[8]</sup>。

与精度高、运算慢的逐线积分模式相比,快速辐射传输模式更适于卫星遥感反演前向模型,但须对其模拟卫星传感器波段的敏感性和抗干扰能力进行评估。SARTA模型是NASA用于AIRS二氧化碳反演的前向模型,目前,针对AIRS Version 5的版本为v1.07,发布于2007年<sup>[9-10]</sup>。而RTTOV (Radiative Transfer Model for TOVS)模型作为最著名的快速辐射传输模式之一,于2011年推出了最新版本RTTOV 10,在诸多方面进行了重大调整,发展更成熟、应用更广泛<sup>[11-12]</sup>。因此,本文以RTTOV 10作为前向模式,模拟Aqua/AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 在  $15\mu\text{m}$  波段上的大气二氧化碳反演通道,利用敏感性分析方法研究温度廓线、水汽廓线、臭氧廓线、地表温度与地表发射率在不同大小参数误差下,对各通道辐射亮度造成的不确定性,及其对二氧化碳反演的影响,为反演波段选择与反演算法的改进提供参考。

## 2 数据与方法

### 2.1 RTTOV 模式

欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)在20世纪90年代初开发了模拟TOVS卫星观测的辐射传输模式,用于反演温度和湿度廓线。后来该模式经过多次改进<sup>[11-12]</sup>,最终在欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)的支持下发展为现在的快速辐射传输模式RTTOV (Radiative Transfer Model for TOVS),并应用于欧洲数值天气预报卫星应用中心(NWP SAF)的数据同化处理中。该模式作为最常用的大气快速辐射传输模式之一,目前的最新版本是RTTOV 10,能模拟近30个卫星平台上约50个传感器的辐射观测,其模拟的红外波谱范围为  $3\sim 20\mu\text{m}$  ( $500\sim 3000\text{cm}^{-1}$ )、微波频率范围为  $10\sim 200\text{GHz}$ ,并随着新传感器的发射而不断更新<sup>[13]</sup>,RTTOV晴空辐射传输方程为:

$$L^{\text{Clr}}(\nu, \theta) = \tau_s(\nu, \theta)\varepsilon_s(\nu, \theta)B(\nu, T_s) + \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau + (1 - \varepsilon_s(\nu, \theta))\tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, T)}{\tau^2} d\tau \quad (1)$$

式(1)中,方程右边3部分分别表示地表发射

射、大气发射辐射和地表反射辐射,其中,  $\theta$  表示观测天顶角;  $B(\nu, T)$  表示普朗克函数;  $\tau_s$  表示从地表到大气顶的透过率;  $\varepsilon_s$  表示地表发射率;  $T_s$  表示地表温度;  $\tau$  表示当前积分层大气到大气顶的透过率;  $T$  表示当前积分层的大气的平均温度。单色光大气透过率  $\tau$  定义为:

$$\tau = \exp\left[-\int_u \sum_j k_j(u) du\right] \quad (2)$$

其中,  $k_j$  为大气中各种气体(如水汽、臭氧、二氧化碳、一氧化氮等)的光谱吸收系数;  $u$  为辐射传输距离。

在晴空模拟条件下,RTTOV所有输入参数中,只有水汽廓线是必须的,臭氧、二氧化碳、一氧化氮、甲烷和一氧化碳都属于可选参数,其他微量气体的影响已经被计算在系数文件里<sup>[13]</sup>。RTTOV使用提前由LBLRTM (Line-by-Line Radiative Transfer Model)计算好的、针对不同传感器的系数文件,来实现快速辐射传输模拟。这些系数文件中包含了各个大气分层和观测角度下的透过率数据,并根据气压、温度及各吸收气体含量不同而变化<sup>[11]</sup>。与LBLRTM模式相比,RTTOV具有直接针对特定传感器实现快速辐射传输模拟的优点,更符合大范围大气参数产品快速反演的需要。

### 2.2 分析数据与方法

当模式某个输入参数在背景值附近发生微小变化即扰动时,模式的输出值也会发生相应的改变。输出值的改变越大(即不确定性越大),反过来可以说明输出对该输入参数的敏感性越高。敏感性的高低用敏感度  $S$  表达,定义如下<sup>[14]</sup>:

$$S = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R' - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (3)$$

其中,  $S$  为敏感度(以百分数表示);  $R_0$  为初始背景值下的模拟结果;  $R'$  为某参数扰动后的模拟结果。

在辐射传输模式中,将参数扰动量设定为其自身的误差大小,那么,得出的敏感度即反映该参数误差对模式输出的影响程度。大气廓线数据与地表参数是辐射传输模式输入参数的重要组成部分,其自身也存在着不同大小的误差,这些误差会对模式输出的辐射值产生一定的影响。在二氧化碳反演的过程中,需要反复迭代二氧化碳的浓度值,使得模式输出的大气顶出射辐射值与卫星观测值之间的残差最小化<sup>[14-15]</sup>。如果由于其他参数的误差而

导致模式输出值不准确,那么,必将影响二氧化碳的反演精度。因此,本文通过对比这些参数的敏感性与二氧化碳本身的敏感度,来确定参数误差对二氧化碳反演结果的影响大小。由于 $15\mu\text{m}$ 波段也是温度廓线( $T(p)$ )的反演波段,因此,温度廓线是首先要考虑的分析参数;水汽和臭氧是此波段范围内的主要吸收物质,所以,水汽廓线( $q(p)$ )和臭氧廓线( $O_3(p)$ )也是要考虑的重要参数;另外,红外波段还有可能受到地表热辐射的影响,因此,把地表温度( $T_s$ )与地表发射率( $\epsilon_s$ )也作为待分析参数,具体分析流程如图1所示。

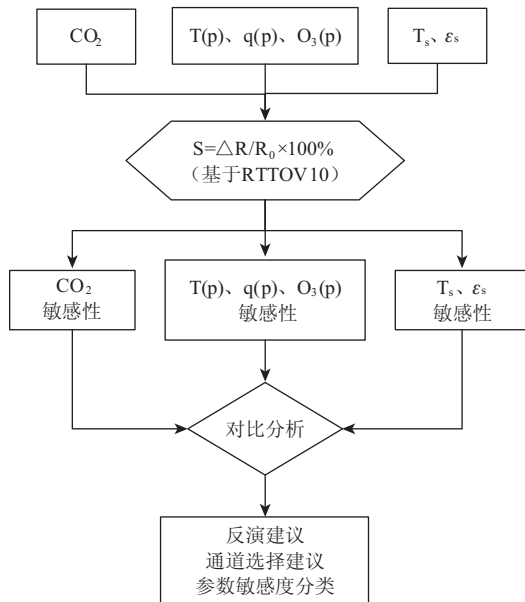


图1 敏感性分析流程图

Fig.1 Flow diagram of sensitivity analysis

本文利用RTTOV 10模拟AIRS传感器中 $15\mu\text{m}$ 波段上的17个对流层二氧化碳的反演通道<sup>[16]</sup>(见表1),以1976年美国标准大气作为初始值输入<sup>[17]</sup>,二氧化碳浓度设为380ppmv,地表发射率为0.95,待分析的参数有 $T(p)$ 、 $q(p)$ 、 $O_3(p)$ 、 $T_s$ 和 $\epsilon_s$ 。鉴于对 $\text{CO}_2$ 平均柱浓度( $X_{\text{CO}_2}$ )的观测精度至少要达到0.5%才能反映出其季节变化<sup>[18]</sup>,本文以 $\text{CO}_2$ 变化0.5%(约1.9ppmv)作为开展敏感性分析的参考值;其他参数的扰动量见表2,其值根据各自的反演误差大小而定<sup>[16,19-20]</sup>。

### 3 敏感性分析结果

#### 3.1 二氧化碳敏感度

本研究使用的大气二氧化碳初始浓度为380ppmv,图2为大气二氧化碳在初始值上增加

表1 AIRS红外大气对流层二氧化碳反演通道号与波数

Tab.1 AIRS retrieval channels for  $\text{CO}_2$ 

AIRS 通道号	波数( $\text{cm}^{-1}$ )	AIRS 通道号	波数( $\text{cm}^{-1}$ )
151	693.0	213	710.4
156	694.3	218	711.8
172	698.7	239	717.9
173	699.0	250	721.2
175	699.6	251	721.5
180	701.0	308	738.1
185	702.4	309	738.4
190	703.8	318	741.2
193	704.6		

表2 各参数敏感性分析扰动量

Tab.2 Parameter perturbation quantity

待分析参数	敏感性分析扰动量		
$T(p)$	$\pm 0.5\text{k}$	$\pm 1\text{k}$	$\pm 1.5\text{k}$
$q(p)$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$
$O_3(p)$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$
$T_s$	$\pm 1\text{k}$	$\pm 2\text{k}$	$\pm 3\text{k}$
$\epsilon_s$	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.05$

0.5%后各个通道上表现出的敏感度。从图2可以看出,在这17个反演通道上,随着波数的增大,二氧化碳敏感度有逐渐增大的趋势,其中,在 $738.1\text{cm}^{-1}$ 通道上敏感度最高,达到0.117%,而在 $693.0\text{cm}^{-1}$ 和 $698.7\text{cm}^{-1}$ 两个通道上的敏感度很低,低于0.01%。由于在敏感性很低的通道上大气顶出射辐射对大气二氧化碳含量改变的响应十分微弱,因此,在反演中建议不使用这两个通道,本文后面的讨论中将不考虑这两个通道。

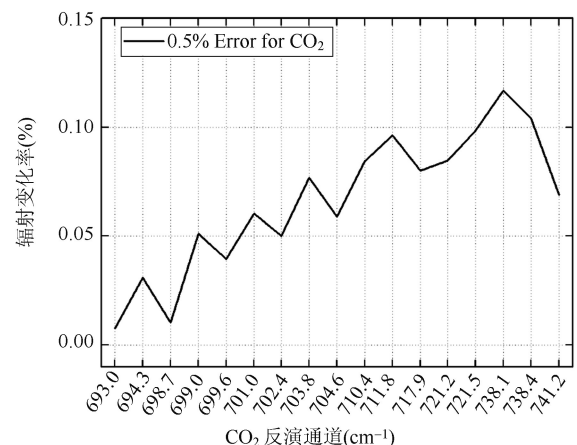


图2 二氧化碳扰动0.5%后各通道上的敏感度

Fig.2 Sensitivity to 0.5% perturbation of  $\text{CO}_2$  in each channel



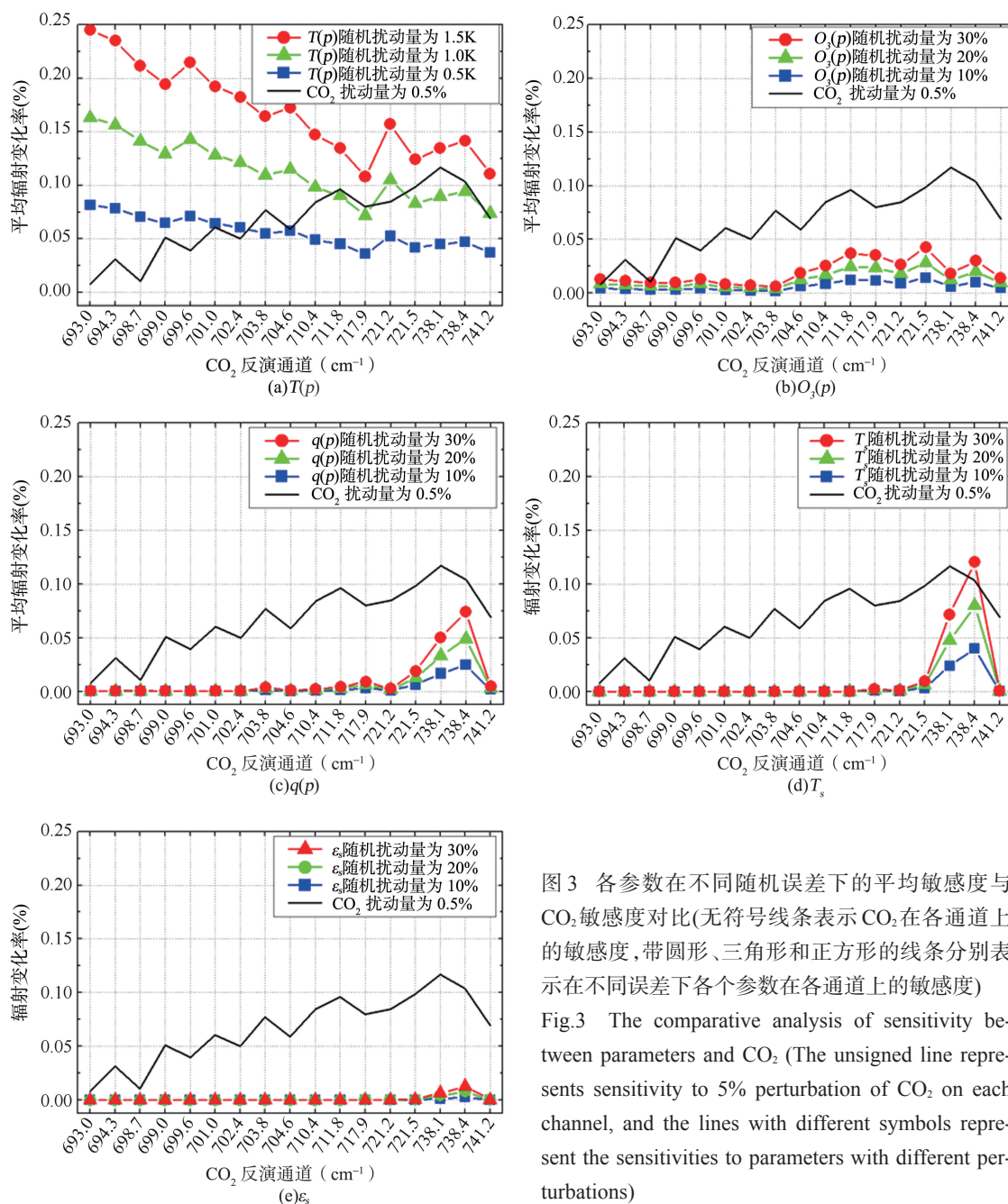


图3 各参数在不同随机误差下的平均敏感度与CO<sub>2</sub>敏感度对比(无符号线条表示CO<sub>2</sub>在各通道上的敏感度,带圆形、三角形和正方形的线条分别表示在不同误差下各个参数在各通道上的敏感度)

Fig.3 The comparative analysis of sensitivity between parameters and CO<sub>2</sub> (The unsigned line represents sensitivity to 5% perturbation of CO<sub>2</sub> on each channel, and the lines with different symbols represent the sensitivities to parameters with different perturbations)

### 3.2 温度、臭氧及水汽廓线敏感度

大气廓线数据是辐射传输模式输入参数的重要组成部分,也是敏感性分析中主要的待分析参数,图3(a)、(b)和(c)分别为温度、臭氧和水汽廓线的敏感性分析结果。

温度与红外热辐射密切相关,同时又会通过谱线线强与半宽影响二氧化碳的吸收系数,因此,温度廓线在红外波段上的敏感度相对较大。从图3(a)中可以看出,在0.5k的随机误差扰动下,温度廓

线的敏感度在近一半通道上都明显高于二氧化碳的敏感度;在1k随机误差扰动下,仅有5个通道上二氧化碳的敏感度稍高于温度廓线敏感度;而当温度误差达到1.5k时,其敏感度在所有通道上都超过了二氧化碳。从各通道敏感度平均值来看,温度廓线在0.5k随机误差扰动下的各通道的平均敏感度约为0.056%,略小于二氧化碳变化0.5%的平均敏感度0.066%;而温度廓线在1k随机误差扰动下的平均敏感度已经高过了二氧化碳平均敏感度,达到

了0.113%,因此,在二氧化碳反演中温度廓线的误差应控制在0.5k。另外,从总体趋势上看,二氧化碳敏感度越低的通道上温度廓线的敏感度就越高,尤其是在 $694.3\text{cm}^{-1}$ 通道上的反差最大,因此,为了减少温度廓线误差的影响,在反演中可以不使用该通道。

臭氧廓线在各个通道上的敏感度都随着扰动量的增大而增大。除了二氧化碳敏感度最低的两个通道( $693.0\text{cm}^{-1}$ 和 $698.7\text{cm}^{-1}$ )以外,臭氧廓线的敏感度在其他通道上都低于二氧化碳敏感度,说明臭氧分子在这些通道上虽然有一定的吸收,但吸收特性低于二氧化碳分子。臭氧廓线各通道平均敏感度约为二氧化碳敏感度的1/3,因此,臭氧廓线对二氧化碳反演的影响也不容忽视。

水汽廓线在大多数通道上的敏感度几乎为零,因此,在这些通道上,水汽对二氧化碳反演的影响可以忽略不计。但在 $738.1\text{cm}^{-1}$ 和 $738.4\text{cm}^{-1}$ 两个通道上,水汽敏感度随着扰动量的增大而明显增强。尤其是在 $738.4\text{cm}^{-1}$ 通道上,水汽30%误差的敏感度约为二氧化碳扰动0.5%的敏感度的3/4,其影响不可忽略。

### 3.3 地表温度与发射率敏感度

图3(d)和(e)分别为地表温度和地表发射率的敏感度与 $\text{CO}_2$ 敏感度对比图。如图所示,地表温度和地表发射率与水汽廓线的敏感度在总体趋势上表现出一致性,即仅在 $738.1\text{cm}^{-1}$ 和 $738.4\text{cm}^{-1}$ 两个通道上随着扰动量的增大而明显增强。而地表温度在3k误差下的最大敏感度甚至高于同通道上二氧化碳扰动0.5%的敏感度,这可能是因为在该通道上是以二氧化碳和水汽的吸收为主,并且总体大气透过率相对较高,地表贡献率相对较大,所以,地表温度的敏感度在这些通道上比较明显。同理,地表发射率的敏感度的绝对值还是远远低于二氧化碳的敏感度,对二氧化碳的反演几乎不造成影响。为了尽量减少影响二氧化碳反演精度的敏感参数个数,使影响因素来源单一化,在反演中可以考虑不使用 $738.1\text{cm}^{-1}$ 和 $738.4\text{cm}^{-1}$ 这两个通道,这样水汽廓线与地表温度的误差对二氧化碳的反演的影响也可以忽略不计。

### 3.4 参数敏感度分类

以二氧化碳增加0.5%在各个通道上求得的敏感度为标准,分别将温度廓线(1k随机误差)、水汽

廓线(20%随机误差)、臭氧廓线(20%随机误差)、地表温度(2k误差)、地表发射率(0.03误差)在各个通道上的敏感度与该标准对比。敏感度大于二氧化碳敏感度的参数归为高敏感参数,其参数误差导致的辐射值变化已经超过了二氧化碳0.5%的扰动下对应的辐射量变化,对二氧化碳反演精度的影响较大;敏感度低于二氧化碳敏感度一个数量级以下的参数归为不敏感参数,这些参数的误差对二氧化碳反演的影响很小甚至可以忽略不计;介于高敏感和不敏感之间的参数归为敏感参数,这些参数的敏感度虽然低于二氧化碳敏感度,但它们处于同一数量级中,其影响也不容忽视。

表3为参数敏感度分类结果。其中,温度廓线在12个通道上为高敏感参数,5个通道上为敏感参数,所以温度廓线的误差将是影响大气二氧化碳反演的主要因素,这与邹铭敏等研究结论相一致<sup>[21]</sup>;臭氧廓线在 $693.0\text{cm}^{-1}$ 通道上表现为高敏感参数,同时在另外4个通道上表现为敏感参数,其余通道上为不敏感参数,因此,臭氧廓线的误差对二氧化碳的反演也会造成一定的影响;水汽廓线和地表温度仅在 $738.1\text{cm}^{-1}$ 和 $738.4\text{cm}^{-1}$ 两个通道表现为敏感参数,其余通道上均为不敏感参数;地表发射率在所有通道上均表现为不敏感参数。

表3 参数敏感度高低分类表

Tab.3 Parameter sensitivity classification table

波数( $\text{cm}^{-1}$ )	高敏感参数	敏感参数	不敏感参数
693.0*	$T(p), O_3(p)$		$q(p), T_s, \varepsilon_s$
694.3*	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
698.7*	$T(p)$	$O_3(p)$	$q(p), T_s, \varepsilon_s$
699.0	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
699.6	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
701.0	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
702.4	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
703.8	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
704.6	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
710.4	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
711.8		$T(p), O_3(p)$	$q(p), T_s, \varepsilon_s$
717.9		$T(p), O_3(p)$	$q(p), T_s, \varepsilon_s$
721.2	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$
721.5		$T(p), O_3(p)$	$q(p), T_s, \varepsilon_s$
738.1*		$T(p), q(p), T_s$	$O_3(p), \varepsilon_s$
738.4*		$T(p), q(p), T_s$	$O_3(p), \varepsilon_s$
741.2	$T(p)$		$O_3(p), q(p), T_s, \varepsilon_s$

注:带\*的通道为不建议使用的通道

## 4 结论

本文利用 RTTOV 10 快速辐射传输模式模拟 Aqua/AIRS 红外探测器 17 个大气二氧化碳反演通道, 计算了这些通道上大气顶出射辐射对温度廓线、臭氧廓线、水汽廓线、地表温度和地表发射率的参数误差的不确定性, 并与二氧化碳增加 0.5% 时造成的不确定性进行对比, 分析二氧化碳对上述参数误差的敏感性。虽然仅是在有限的模拟条件下的单变量敏感性分析, 但已经能够明显分辨出各参数对二氧化碳反演的影响大小。分析结果表明: 温度廓线的敏感度在各个反演通道上都很高, 是该波段范围内影响二氧化碳反演的主要因素, 在反演中, 最好使用误差在 0.5K 以内的温度廓线数据; 臭氧廓线的平均敏感度约为二氧化碳敏感度的 1/3, 也是影响二氧化碳反演的敏感参数之一; 水汽廓线和地表温度在不考虑 738.1 $\text{cm}^{-1}$  和 738.4 $\text{cm}^{-1}$  两个通道的情况下可认为是不敏感参数; 地表发射率始终表现为不敏感参数, 在反演中可以设为固定值。最后, 文章根据各参数在各个通道上的敏感度高低将它们分成了高敏感参数、敏感参数与不敏感参数, 对其相对重要性进行了排序。同时, 根据各参数敏感性分析结果, 文中提出了 5 个不宜使用的通道: 693.0 $\text{cm}^{-1}$ 、694.3 $\text{cm}^{-1}$ 、698.7 $\text{cm}^{-1}$ 、738.1 $\text{cm}^{-1}$ 、738.4 $\text{cm}^{-1}$ , 以便尽量减少参数误差对二氧化碳反演的影响。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. London: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Alexiadis A. Global warming and human activity: A model for studying the potential instability of the carbon dioxide/temperature feedback mechanism[J]. Ecological Modelling, 2007, 203(3):243-256.
- [3] Ghommem M, Hajj M R, Puri I K. Influence of natural and anthropogenic carbon dioxide sequestration on global warming[J]. Ecological Modelling, 2012(235):1-7.
- [4] Florides G A, Christodoulides P. Global warming and carbon dioxide through sciences[J]. Environment International, 2009, 35(2):390-401.
- [5] WMO, JMA. World Data Centre for Greenhouse Gases [EB/OL]. (2001-07-02)[2013-05-06]. <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/index.html>
- [6] 石广玉, 戴铁, 徐娜. 卫星遥感探测大气  $\text{CO}_2$  浓度研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(1):7-13.
- [7] Mao J, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. Applied Optics, 2004, 43(4):914-927.
- [8] 戴铁, 石广玉, 漆成莉, 等. 风云三号气象卫星红外分光计探测大气  $\text{CO}_2$  浓度的通道敏感性分析[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(5):577-585.
- [9] Strow L L, Hannon S E, Souza-Machado D, et al. An overview of the AIRS radiative transfer model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2):303-313.
- [10] Strow L L, Hannon S E, Machado S D, et al. Validation of the Atmospheric Infrared Sounder radiative transfer algorithm[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D9): 1-24.
- [11] 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, 1999, 125(556):1407-1425.
- [12] 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.
- [13] Hocking J, Rayer P, Saunders R. RTTOV v10 Users Guide [R]. Darmstadt, Germany: EUMETSAT, 2010.
- [14] 叶函函, 王先华, 吴军, 等. 二氧化碳浓度高精度反演的敏感性研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(3):208.
- [15] Chahine M, Barnett C, Olsen E T, et al. On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to  $\text{CO}_2$ [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32.
- [16] Crevoisier C, Chedin A, Scott N A. AIRS channel selection for  $\text{CO}_2$  and other trace-gas retrievals[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003, 129(593):2719-2740.
- [17] NOAA US, Force USA. US standard atmosphere, 1976[R]. NOAA-S/T, 1976.
- [18] Miller C E, Crisp D, DeCola P L, et al. Precision requirements for space-based  $\text{XCO}_2$  data[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112.
- [19] 高文华, 赵凤生, 盖长松. 大气红外探测器(AIRS)温、湿度反演产品的有效性检验及在数值模式中的应用研究[J]. 气象学报, 2006(3):271-280.
- [20] Gambacorta A, Barnett C D. Methodology and information content of the NOAA NESDIS operational channel selection for the Cross-Track Infrared Sounder (CrIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(6):3207-3216.
- [21] 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 等. 短波红外通道  $\text{CO}_2$  观测的温度敏感性分析[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5):455-461.



## Sensitivity Analysis of Atmospheric Carbon Dioxide Retrieval Parameters Based on RTTOV

LI Jingyao, SHI Runhe\* and YIN Ruijuan

*(Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Joint Laboratory for Environmental Remote Sensing and Data Assimilation, ECNU & CEODE, Shanghai 200241, China)*

**Abstract:** As one of the main greenhouse gases, global atmospheric carbon dioxide has increased one third over the past one hundred years, becoming the focus of global warming research. Using satellite remote sensing technology and radiative transfer model to retrieve atmospheric carbon dioxide has become the most important means to obtain the global carbon dioxide concentration data. However, the input parameters of radiative transfer model inevitably carry some errors, which will influence the retrieval accuracy more or less, so this influence must be quantified and considered in the retrieval algorithm. In this paper, the radiances of 17 infrared carbon dioxide retrieval channels located in 15 $\mu$ m wave band of the Aqua/AIRS infrared detection instrument are simulated by the fast radiative transfer model RTTOV10. The temperature profile, ozone profile, water vapor profile, surface temperature and emissivity are considered as the influence factors. And the sensitivities of the outgoing radiance to the errors of these input parameters are calculated. Then the comparison between these sensitivities and that to 0.5% change of atmospheric carbon dioxide concentration is made. Analysis shows that: temperature profile errors have the biggest influence on carbon dioxide retrieval, and these errors should be less than 0.5K. The total sensitivity of all channels to ozone profile errors are about one third of that to carbon dioxide, making ozone profile errors take the second place. The sensitivities to errors of water vapor profile and surface temperature show the same trend which is only high at channel 738.1  $\text{cm}^{-1}$  and 738.4  $\text{cm}^{-1}$ . Errors of surface emissivity are negligible at all channels, because the sensitivities due to them are far less than that to carbon dioxide. Finally, for each channel, these parameters are divided into three classes which are high sensitive parameters, low sensitive parameters and non-sensitive parameters, providing a reference for carbon dioxide retrieval channel selection and algorithm design.

**Key words:** carbon dioxide; retrieval; sensitivity analysis; RTTOV

\*Corresponding author: SHI Runhe, E-mail: rhshi@geo.ecnu.edu.cn