

戴铁, 石广玉, 漆成莉, 等. 2011. 风云三号气象卫星红外分光计探测大气 CO₂ 浓度的通道敏感性分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 577-585. Dai Tie, Shi Guangyu, Qi Chengli, et al. 2011. Channel sensitivity analyses for space-based measurement of atmospheric CO₂ concentration by FY-3 satellite/infrared atmospheric sounder [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 577-585.

风云三号气象卫星红外分光计探测大气 CO₂ 浓度的通道敏感性分析

戴铁^{1, 2} 石广玉¹ 漆成莉³ 徐娜^{1, 2} 张兴赢^{3, 4} 杨溯^{1, 2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

4 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 依据红外分光计 (InfraRed Atmospheric Sounder, IRAS) 光谱通道特征, 发展了基于 IRAS 的大气辐射传输计算模式。以大气分子吸收光谱数据集 (High resolution TRANsmission, HITRAN) 2004 为初始谱线输入资料, 利用该模式模拟计算 IRAS 在 CO₂ 吸收带的 10 个通道辐射率测值对 CO₂ 浓度变化的响应, 并对比了其与大气温度和水汽、O₃ 等气体浓度误差对辐射率测值的影响, 探讨了利用风云三号气象卫星探测大气 CO₂ 浓度的可行性。结果表明, IRAS 的通道 4 最适于用来监测大气 CO₂ 浓度的变化, 当 CO₂ 体积混合比浓度变化在 10×10^{-6} 时, 对应的辐射率变化同仪器等效噪声辐射率相当, 所以 IRAS 在理想状态下, 最高可分辨的大气 CO₂ 浓度变化约为 10×10^{-6} 。

关键词 风云三号气象卫星 探测 CO₂ 浓度 可行性

文章编号 1006-9585 (2011) 05-0577-09 **中图分类号** P407 **文献标识码** A

Channel Sensitivity Analyses for Space-Based Measurement of Atmospheric CO₂ Concentration by FY-3 Satellite/Infrared Atmospheric Sounder

DAI Tie^{1, 2}, SHI Guangyu¹, QI Chengli³, XU Na^{1, 2}, ZHANG Xingying^{3, 4}, and YANG Su^{1, 2}

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

4 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Based on the spectral characteristics of the InfraRed Atmospheric Sounder (IRAS) channel, an atmospheric radiative transfer model for IRAS is developed. Using the High resolution TRANsmission (HITRAN) 2004 molecular spectroscopic database, the sensitivity to changes in atmospheric CO₂ concentration of the measured radi-

收稿日期 2009-09-16 收到, 2011-03-07 收到修定稿

资助项目 风云三号卫星应用系统工程研发项目 4-5, 国家自然科学基金项目 40905056, 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放基金项目 LAPC-KF-2008-11

作者简介 戴铁, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事卫星遥感探测研究。E-mail: daitie@mail.iap.ac.cn

ance for ten channels of IRAS during the CO₂ absorption bands were calculated to explore the feasibility of monitoring atmospheric CO₂ concentration from Fengyun-3 (FY-3) meteorological satellite, and the uncertainties due to the errors of the atmospheric temperature, water vapor, and minor constituent concentrations were compared. It shows that the channel number 4 is the first choice to monitor atmospheric CO₂ concentrations, and the ability to identify the changes in CO₂ concentration is about 10×10^{-6} for the currently planned instrument noise.

Key words Fengyun-3 meteorological satellite, monitoring, CO₂ concentration, feasibility

1 引言

大气 CO₂ 是受人类活动影响最大的一种温室气体, 根据 IPCC 第四次科学评估报告 (Forster et al., 2007), 大气 CO₂ 浓度已经从工业革命前的 275×10^{-6} 增加到 2005 年的 379×10^{-6} , 所产生的全球平均辐射强迫为 $1.66 \pm 0.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 约占所有长寿命温室气体产生辐射强迫的 63%。大气 CO₂ 作为产生温室效应最主要的温室气体, 其所带来的全球变暖问题, 正日益受到人们的广泛关注。

研究大气 CO₂ 浓度变化产生的全球气候效应, 首先必需测量大气 CO₂ 浓度。大气 CO₂ 浓度具有明显的时空分布特性, 主要取决于自然和人为的 CO₂ 源汇分布。目前, 大气 CO₂ 浓度的监测主要依靠地面 CO₂ 观测网络进行的直接仪器采样测量, 由于监测成本较高, 空间分辨率有限, 现阶段定量地理解大气 CO₂ 源汇分布及其变化仍存在重大的不确定性 (Fan et al., 1998; Bousquet et al., 2000)。

利用卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度, 可以方便地连续获得其全球时空分布特性, 避免了地面站点监测的局限性, 将有助于提高对碳循环和全球气候系统变化的研究, 具有非常重要的现实意义。卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度的研究, 国外已有一些工作 (Tolton and Plouffe, 2001; Kuang et al., 2002; Frankenberg et al., 2005), 国内这方面的研究较少。赵高祥和汪宏七 (1991) 的研

究结果表明用卫星测量 $2385 \sim 2390 \text{ cm}^{-1}$ 波段出射辐射可以有效地监测 CO₂ 增加的辐射影响, 汪宏七等 (1994) 给出了卫星对 CO₂ 浓度增加的辐射影响进行监测的通道。戴铁等 (2008) 提出了 4 个适用于遥感大气 CO₂ 浓度变化的红外卫星通道, 石广玉等 (2010) 综述了卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度研究的最新进展。风云三号气象卫星是我国新一代极轨气象卫星 (杨军等, 2009; Zhang et al., 2009), 首次装载了自行研制的垂直探测仪器红外分光计 (InfraRed Atmospheric Sounder, IRAS), 将实现全球、全天候三维温度和湿度分布探测。本文依据 IRAS 光谱通道特征, 发展了基于 IRAS 的大气辐射传输计算模式, 并利用该模式探讨了 IRAS 探测大气 CO₂ 浓度的可行性。

2 红外分光计

红外分光计是风云三号气象卫星上的重要遥感仪器之一, 主要用来反演大气温湿度廓线。自 20 世纪 80 年代以来, 我国开始独立自主研究、研制红外分光计 (谢鲲等, 2003)。风云三号 (FY-3) 气象卫星携带的 IRAS 为滤光片式探测仪器, 与 NOAA 卫星上的高分辨率红外探测器 (High-resolution Infrared Radiance Sounder, HIRS) 在性能指标上类同 (见表 1)。表 2 列出了 IRAS 的光谱通道特性设计指标, 包括光谱通道中心波数、中心波长、左半功率点、右半功率点、主要吸收气体、计算的通道噪声 (噪声等效辐射率) 等。

表 1 FY-3/IRAS 与 NOAA/HIRS 的主要性能特征

Table 1 The major characteristics of sensor Fengyun-3 (FY-3)/ InfraRed Atmospheric Sounder (IRAS) and NOAA/High-resolution Infrared Radiance Sounder (HIRS)

仪器	对地扫描张角	通道个数	线扫描点数	地面视场 /km	步进和测量时间/ms	行扫描时间和回归时间/s	辐射校准暖黑体温度/K	辐射校准周期/s	量化等级 /bit
IRAS	$\pm 49.5^\circ$	26	56	17 (星下点)	100	6.4	290	256	13
HIRS	$\pm 49.5^\circ$	20	56	20.3 (短波和可见光通道) 18.9 (长波通道)	100	6.4	290	256	13

表 2 红外分光计光谱通道特征
Table 2 The channel spectral characteristics of IRAS

通道序号	中心波数 / cm ⁻¹	中心波长 / μm	左半功率点 / cm ⁻¹	右半功率点 / cm ⁻¹	主要吸收成分气体	通道噪声 / mW · m ⁻² · sr ⁻¹ · cm ⁻¹
1	668.99	14.95	667.42	670.96	CO ₂	2.33
2	677.37	14.76	671.19	682.64	CO ₂	0.58
3	691.18	14.47	685.12	697.45	CO ₂	0.41
4	703.23	14.22	696.82	709.57	CO ₂	0.33
5	715.36	13.98	709.12	721.87	CO ₂	0.31
6	732.60	13.65	726.11	739.15	CO ₂ 和 H ₂ O	0.32
7	748.22	13.37	740.63	755.63	CO ₂ 和 H ₂ O	0.28
8	803.66	12.44	790.64	816.39	大气窗区	0.14
9	900.74	11.11	885.58	915.5	大气窗区	0.11
10	1033.59	9.68	1022.91	1044.17	O ₃	0.12
11	1341.56	7.45	1316.66	1364.44	H ₂ O	0.07
12	1363.14	7.34	1344.99	1381.98	H ₂ O	0.08
13	1532.57	6.52	1506.02	1556.18	H ₂ O	0.08
14	2190.58	4.57	2179.12	2201.19	N ₂ O	0.006
15	2213.37	4.52	2201.67	2224.69	N ₂ O	0.005
16	2238.64	4.47	2227.67	2249.21	CO 和 N ₂ O	0.006
17	2250.73	4.44	2239.64	2262.44	CO ₂ 和 N ₂ O	0.005
18	2395.21	4.17	2381.52	2405.58	CO ₂	0.004
19	2513.19	3.98	2498.13	2529.08	大气窗区	0.004
20	2660.28	3.76	2623.29	2699.78	大气窗区	0.0015
21	14293.88	0.70	13939.22	14705.88	大气窗区	0.10%A
22	11287.96	0.89	11116.05	11465.26	大气窗区	0.10%A
23	10601.08	0.94	10404.74	10822.51	H ₂ O	0.10%A
24	10580.89	0.95	10503.10	10663.25	H ₂ O	0.10%A
25	8109.64	1.23	7833.31	8400.54	H ₂ O	0.10%A
26	6031.00	1.67	5837.37	6236.36	H ₂ O	0.10%A

注：A 表示反照率 (Albedo)，0.10%A 表示反照率探测精度。

3 基于 IRAS 的辐射传输模式

依据大气红外辐射传输基本原理，IRAS 探测的大气顶出射红外辐射可由下式表示 (董超华和张凤英, 1988):

$$I(v^*, \theta) = \int_{v_1}^{v_2} \epsilon B(v, T_s) \tau(v, p, \theta) f(v^* - v) dv + \int_{v_1}^{v_2} \int_p^0 B(v, T(p)) \frac{\partial \tau(v, p, \theta)}{\partial p} f(v^* - v) dp dv, \quad (1)$$

其中, $I(v^*, \theta)$ 表示中心波数为 v^* 的通道出射

红外辐射强度; ϵ 为地表比辐射率; $B(v, T(p))$ 为气压层在背景温度为 T 时的普朗克函数; v_1 、 v_2 分别表示各探测通道的左、右半功率点; $f(v^* - v)$ 为归一化通道光谱响应函数; T_s 表示地表温度; θ 表示出射角; v 表示波数; τ 为从气压层 p 到大气层顶的单色透过率, 可以表示为:

$$\tau(v, p, \theta) = \exp\left[-\int_0^p k(v, p) \frac{d\mu(p)}{\cos\theta}\right], \quad (2)$$

其中, k 为大气气体的吸收系数, μ 表示大气气体密度。

逐线积分方法是目前为止被认为“最精确”的大气辐射传输计算方法。本文将 IRAS 的通道

光谱响应特性加入 Shi (1981)、石广玉 (1998) 发展的一种快速逐线积分模式, 建立了基于 IRAS 的逐线积分辐射传输计算模式。模式包含了大气 H₂O、CO₂、O₃、N₂O、CO 和 CH₄ 6 种主要吸收气体的吸收作用; 垂直方向按大气压力分为 43 层 (见表 3); 光谱积分步长采用 Doppler 加宽的最小半宽度; 整层大气均采用 Voigt 线型; 线翼从线中心 5 cm⁻¹ 处截断。

表 3 大气压力的垂直分层
Table 3 Vertical coordinates defined by pressure levels

层	气压/hPa	层	气压/hPa	层	气压/hPa	层	气压/hPa
1	0.10	12	35.11	23	253.71	34	702.73
2	0.29	13	45.29	24	286.60	35	749.12
3	0.69	14	56.73	25	321.50	36	795.09
4	1.42	15	69.97	26	358.28	37	839.95
5	2.61	16	85.18	27	396.81	38	882.80
6	4.41	17	102.05	28	436.95	39	922.46
7	6.95	18	122.04	29	478.54	40	957.44
8	10.37	19	143.84	30	521.46	41	985.88
9	14.81	20	167.95	31	565.54	42	1005.43
10	20.40	21	194.36	32	610.60	43	1013.25
11	27.26	22	222.94	33	656.43		

4 IRAS 辐射率测值及敏感性分析

由表 2 可知, IRAS 包含大气 CO₂ 吸收的通道共有 10 个, 其中长波波段 7 个, 分别为通道 1~7, 短波波段 3 个, 分别为通道 16、17 和 18。利用上述的 IRAS 辐射传输模式, 以分子光谱资料汇编数据集 HITRAN 2004 (Rothman et al., 2005) 为模式谱线输入资料, 模拟计算了 IRAS 在 CO₂ 吸收带的 10 个通道观测值及其对大气 CO₂、H₂O、O₃、N₂O 等气体浓度和温度变化的灵敏度, 探讨了 IRAS 探测大气 CO₂ 浓度的可行性。

4.1 IRAS 通道测值正向模拟

IRAS 通道测值模拟计算总体来说可分为以下两步: 第一步, 模式首先从指定的大气吸收气体含量和温度等初始场开始, 由分子谱线汇编资料 HITRAN 2004, 算出各子层大气在每个取样点的吸收系数, 通过公式 (2) 进一步算出吸收物质量

函数的大气透过率, 进而由辐射传输计算的累加算法算出大气顶出射辐射率 (张华等, 2005); 第二步, 模式将计算的大气顶出射辐射率与 IRAS 探测通道的光谱响应函数作卷积计算, 并对探测通道的光谱区间做积分计算, 这样便获得了 IRAS 通道测量的辐射值。

由图 1a 和 1b 可见, 长波波段通道 1~7 波段区间的出射辐射率远大于短波通道 16、17 和 18 波段区间的出射辐射率, 约相差 1~2 个数量级。由图 1c 和 1d 可见, 模式模拟的光谱响应函数与仪器实际的光谱响应函数符合得较好, 这将降低光谱响应函数误差对模拟的通道观测辐射值的影响。通过对大气顶出射辐射率与通道光谱响应函数做卷积并积分计算, 便可获得卫星通道的辐射率测值。图 2 为热带大气 (TRoPical atmosphere, TRP)、中纬度夏季大气 (Mid-Latitude Summer atmosphere, MLS)、中纬度冬季大气 (Mid-Latitude Winter atmosphere, MLW)、亚极夏季大气 (Sub-Arctic Summer atmosphere, SAS)、亚极冬季大气 (Sub-Arctic Winter atmosphere, SAW) 以及美国标准大气 (U. S. STandarD atmosphere, USSTD) 6 种模式大气廓线条件下 (Anderson et al., 1986) 模拟计算的上述 10 个通道的辐射率测值, 可以看出不同模式大气条件下, 卫星辐射率测值存在较大的差异, 反映了大气温度、水汽和 O₃ 浓度等参数对卫星辐射率测值的影响。

4.2 对大气 CO₂ 浓度变化的响应

由图 3 可见, 在长波波段, 通道 4、5、6 和 7 的辐射率测值对大气 CO₂ 浓度变化的响应较大, 并基本不受模式大气的影 响。当大气 CO₂ 浓度变化达到 10×10^{-6} 时, 辐射率测值的变化已达到或接近于仪器的测量噪声; 在短波波段, 通道 16、17 和 18 的辐射率测值受大气 CO₂ 浓度变化的影响相近, 并且, 不同模式大气条件下, 大气 CO₂ 浓度变化对辐射率测值的影响存在较大的差异。由于仪器的测量噪声, 对于热带大气和中纬度夏季大气, 可分辨的大气 CO₂ 浓度变化约为 30×10^{-6} , 对于中纬度冬季和亚极冬季大气, 大气 CO₂ 浓度变化 50×10^{-6} 仍低于仪器的测量噪声。

4.3 大气温度和水汽、O₃ 等气体的影响

为考查大气温度廓线的不确定性对卫星测量

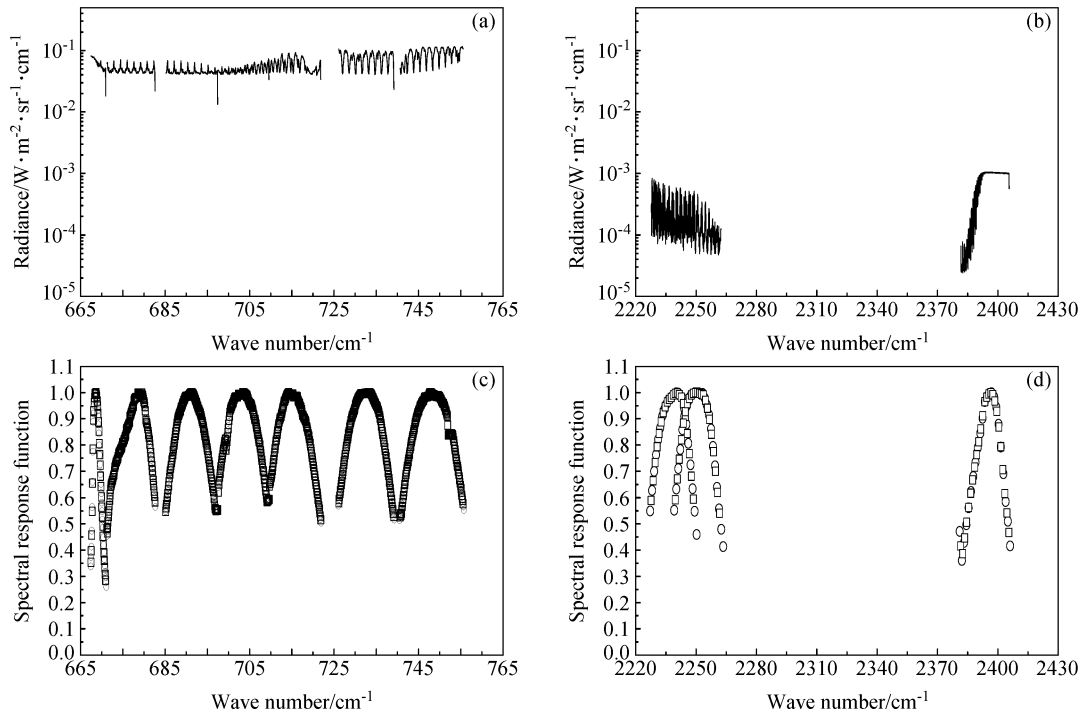


图 1 美国标准模式大气廓线条件下，IRAS CO₂吸收带内的通道 (a、c) 1~7、(b、d) 16~18 大气顶 (a、b) 出射辐射光谱和 (c、d) 光谱通道响应函数 (c、d 中○和□分别表示仪器设计和模式模拟的结果)

Fig.1 (a, b) The outgoing radiance spectrum and (c, d) the spectral response function of the channels (a, c) 1-7 and (b, d) 16-18 of IRAS in the CO₂ absorption bands for the U. S. standard atmosphere profile (○and □in c and d are from instrument design and model simulation)

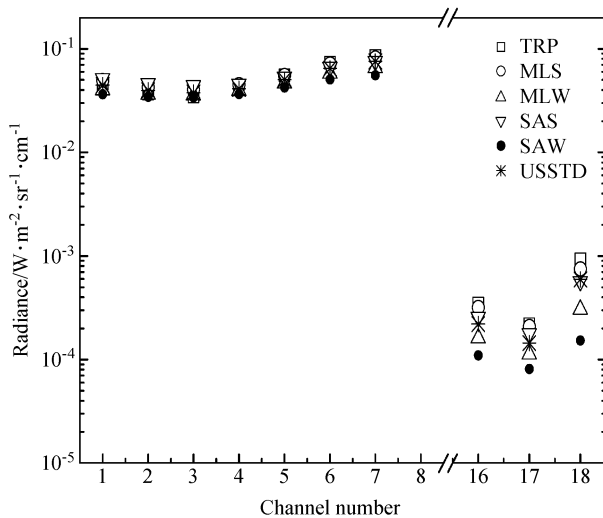


图 2 6 种模式大气廓线条件下计算的 IRAS 10 个通道的出射辐射率

Fig.2 The calculated outgoing radiances of the ten channels of IRAS for the six atmosphere profiles

辐射率的影响，图 4 给出不同大气温度廓线均方根误差精度时的卫星通道测量辐射值变化的绝对值。在长波波段，大气温度廓线均方根误差精度

为 2.0 和 1.5 K 时，其引起通道 4、5、6 和 7 的辐射率测值变化约相当于大气 CO₂ 浓度变化 10×10^{-6} 时的结果 (如图 4a 和 4b 所示)，这约相当于当前卫星遥感探测大气温度廓线误差有可能带来的影响 (高文华等, 2006; 刘辉等, 2008)，当大气温度廓线均方根误差达到无线电探空的精度 1.0 K 时，其引起通道 4、5、6 和 7 的辐射率测值变化约相当于大气 CO₂ 浓度变化 5×10^{-6} 时的结果。如果进一步假定大气温度廓线均方根误差精度达 0.5 K 时，其引起通道 4、5、6 和 7 的辐射率测值变化约相当于大气 CO₂ 浓度变化 2×10^{-6} 时的结果；在短波波段，即使大气温度廓线均方根误差精度达到 1.0 K，对通道 16、17 和 18 的辐射率测值的影响仍要高于大气 CO₂ 浓度增加 10×10^{-6} 时的结果；对于通道 18，大气 CO₂ 浓度增加 50×10^{-6} 对辐射率测值的影响与温度廓线均方根误差为 0.5 K 相当。

大气 H₂O 浓度增加 10% 对卫星通道测量辐射率的影响，约相当于无线电探空的精度 (如图 5a

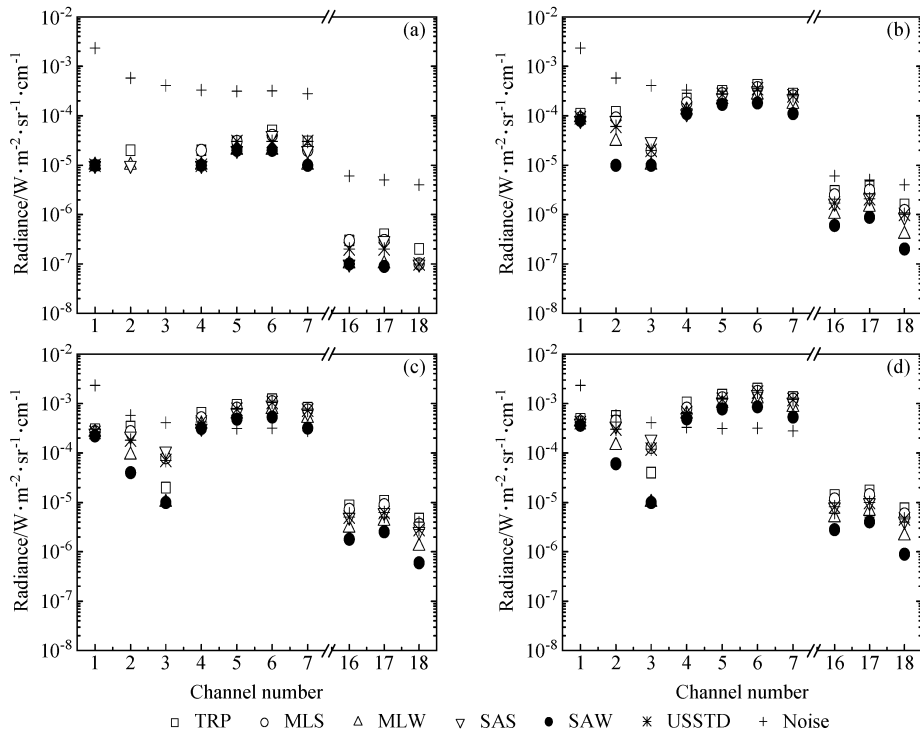


图 3 大气 CO₂ 浓度增加 (a) 1×10^{-6} 、(b) 10×10^{-6} 、(c) 30×10^{-6} 、(d) 50×10^{-6} 引起的通道出射辐射率变化

Fig. 3 Responses of simulated IRAS radiances to (a) 1×10^{-6} , (b) 10×10^{-6} , (c) 30×10^{-6} , and (d) 50×10^{-6} increase in the CO₂ concentration for the six different model atmospheres

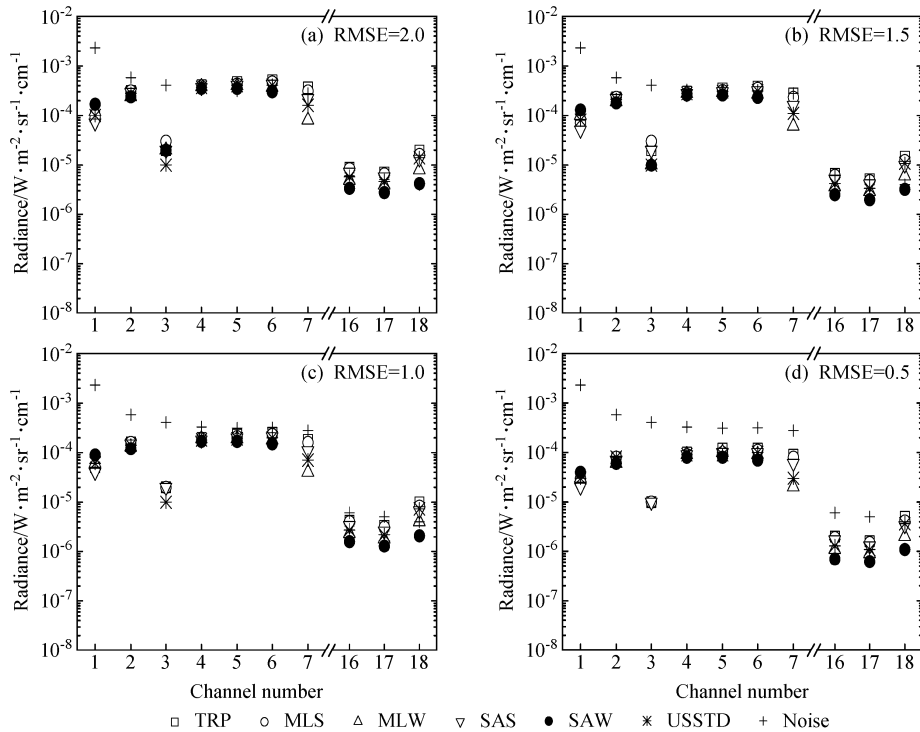


图 4 大气温度均方根误差 (a) 2.0 K、(b) 1.5 K、(c) 1.0 K、(d) 0.5 K 对通道出射辐射率的影响

Fig. 4 Responses of simulated IRAS radiances to the root-mean-square errors of temperature (a) 2.0 K, (b) 1.5 K, (c) 1 K, and (d) 0.5 K

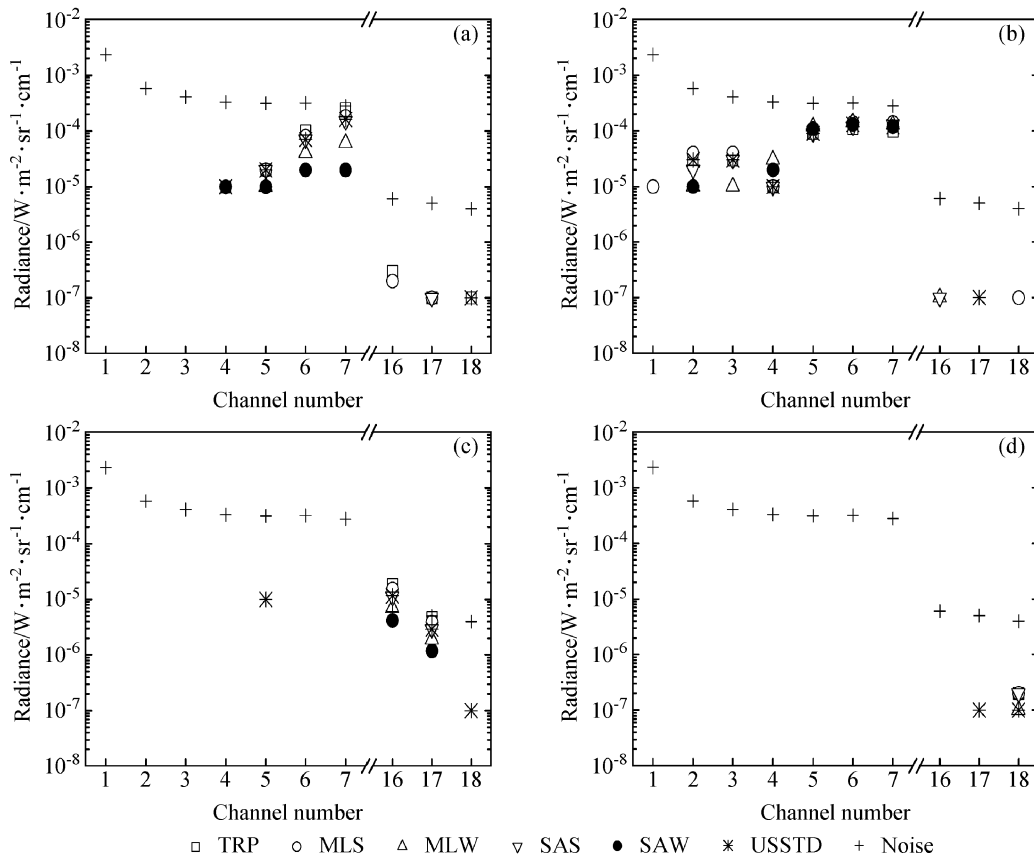


图 5 通道出射辐射率对大气 (a) H₂O、(b) O₃、(c) N₂O、(d) CH₄ 浓度变化的响应
Fig. 5 Responses of simulated IRAS radiances to changes in (a) H₂O, (b) O₃, (c) N₂O, and (d) CH₄ concentrations

所示), 通道 6 和 7 的测量辐射率受大气水汽廓线误差影响较大, 其余通道的测量辐射率变化均小于大气 CO₂ 浓度增加 1×10^{-6} 时的结果。大气 O₃ 浓度减小 13.5% 对通道测量辐射率的影响代表了中纬度地区 O₃ 浓度变化的典型值 (Chédin et al., 2003)。由图 5b 可见, 通道 5、6 和 7 的测量辐射率受 O₃ 浓度误差的影响较大, 对通道 4 的影响大约相当于大气 CO₂ 浓度增加 1×10^{-6} 时的结果, 对通道 16、17 和 18 的影响基本可以忽略不计。图 5c 给出大气 N₂O 浓度增加 30×10^{-9} 对通道测量辐射率的影响, 其约等于当前对大气 N₂O 浓度的测量精度, 由图可以看出, 通道 16 和 17 的测量辐射率受大气 N₂O 浓度误差的影响大约相当于大气 CO₂ 浓度增加 30×10^{-6} 时的结果, 其余各通道基本不受 N₂O 浓度变化的影响。图 5d 给出计与不计 CH₄ 吸收作用时通道测量辐射率的变化, 可以看出除了通道 18, 其余各通道的辐射率测值基本不受 CH₄ 浓度变化的影响。

5 结论

本文依据我国新一代极轨气象卫星风云三号携带的红外分光计 (IRAS) 的光谱通道特征, 发展了 IRAS 的大气辐射传输计算模式, 以大气分子吸收光谱数据集 HITRAN 2004 为初始谱线输入资料, 利用该模式综合全面地分析了大气 CO₂、H₂O、O₃ 等气体浓度变化以及大气温度廓线变化对卫星测量辐射率的影响, 分析了风云三号气象卫星探测大气 CO₂ 浓度的可行性。结果表明:

(1) 在短波波段, 通道 16、17 和 18 的测量辐射率受大气 CO₂ 浓度变化的影响相近, 且不同模式大气条件下, 大气 CO₂ 浓度变化对辐射率测值的影响存在较大差异。对于热带大气和中纬度夏季大气, 可分辨的大气 CO₂ 浓度变化约为 30×10^{-6} , 对于中纬度冬季和亚极冬季大气, 大气 CO₂ 浓度变化 50×10^{-6} 仍低于仪器的测量噪声, 同时通道

16 和 17 的测量辐射率易受大气 N_2O 浓度误差的影响, 通道 18 测量辐射率虽然基本不受大气微量气体浓度测量误差的影响, 但其易受温度廓线测量误差的影响, 现有温度廓线误差的影响甚至要超过大气 CO_2 浓度变化 50×10^{-6} 的影响。

(2) 在长波波段, 通道 4、5、6 和 7 的测量辐射率受大气 CO_2 浓度变化的影响较大, 同时, 大气 CO_2 浓度变化对通道测量辐射率的影响又基本不随模式大气而变, 进一步考虑大气 H_2O 、 O_3 、 N_2O 等气体浓度测量误差的影响, 发现通道 6 和 7 易受大气水汽廓线误差的影响, 通道 5、6 和 7 的测量辐射率易受 O_3 浓度误差的影响。

(3) 风云三号气象卫星携带的红外分光计 (IRAS) 具有一定的探测大气 CO_2 浓度变化的能力, 其中, 通道 4 最适于用来监测大气 CO_2 浓度的变化。当 CO_2 浓度变化在 10×10^{-6} 时, 对应的辐射率变化与仪器等效噪声辐射率相当, 所以 IRAS 在理想状态下, 最高可分辨的大气 CO_2 浓度变化约为 10×10^{-6} 。

参考文献 (References)

- Anderson G P, Clough S A, Kneizys F X, et al. 1986. AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km) [R]. AFGL Tech. Rep., AFGL-TR-0110, Air Force Geophys. Lab., Bedford, Mass., 48pp.
- Bousquet P, Peylin P, Ciais P, et al. 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980 [J]. *Science*, 290 (5495): 1342–1346.
- Chédin A, Saunders R, Hollingsworth A, et al. 2003. The feasibility of monitoring CO_2 from high-resolution infrared sounders [J]. *J. Geophys. Res.*, 108: 4064, doi: 10.1029/2001JD001443.
- 戴铁, 郑有飞, 石广玉. 2008. 利用红外辐射光谱反演大气 CO_2 浓度的理论研究 [J]. *气象与环境科学*, 31 (1): 1–5.
- Dai Tie, Zheng Youfei, Shi Guangyu. 2008. Theoretic study on the retrieval of atmospheric CO_2 concentrations from infrared emitting spectrum [J]. *Meteorological and Environmental Science (in Chinese)*, 31 (1): 1–5.
- 董超华, 张凤英. 1988. 利用 NOAA-9 气象卫星测值反演大气温度垂直分布 [J]. *红外研究*, 7 A (2): 125–130.
- Dong Chao-hua, Zhang Fengying. 1988. Retrieve the vertical distributing of atmospheric temperature using NOAA-9 meteorological satellite measurement [J]. *Journal of Infrared Research (in Chinese)*, 7 A (2): 125–130.
- Fan S, Gloor M, Mahlman J, et al. 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models [J]. *Science*, 282 (5388): 442–446.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M] // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 137pp.
- Frankenberg C, Platt U, Wagner T. 2005. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: Model studies for CH_4 and CO_2 retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard Envisat [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 5: 9–22.
- 高文华, 赵凤生, 盖长松. 2006. 大气红外探测器 (AIRS) 温度、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*, 64 (3): 271–280.
- Gao Wenhua, Zhao Fengsheng, Gai Changsong. 2006. Validation of AIRS retrieval temperature and moisture products and their application in numerical models [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (3): 271–280.
- Kuang Z, Margolis J, Toon G, et al. 2002. Spaceborne measurements of atmospheric CO_2 by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (15): 11, doi: 10.1029/2001GL014298.
- 刘辉, 董超华, 张文建, 等. 2008. AIRS 晴空大气温度廓线反演试验 [J]. *气象学报*, 66 (4): 513–519.
- Liu Hui, Dong Chao-hua, Zhang Wenjian, et al. 2008. Retrieval of clear-air atmospheric temperature profiles using AIRS observations [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (4): 513–519.
- Rothman L S, Jacquemarta D, Barbeb A, et al. 2005. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 96 (Special Issue): 139–204.
- Shi G Y. 1981. An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents [D]. Ph. D. dissertation, Tohoku University of Japan, 26pp.
- 石广玉. 1998. 大气辐射计算的吸收系数分布模式 [J]. *大气科学*, 22 (4): 659–676.
- Shi G Y. 1998. On the k -distribution and correlated k -distribution models in the atmospheric radiation calculations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (4): 659–676.
- 石广玉, 戴铁, 徐娜. 2010. 卫星遥感探测大气 CO_2 浓度研究最新进展 [J]. *地球科学进展*, 25 (1): 7–13.
- Shi Guangyu, Dai Tie, Xu Na. 2010. Latest progress of the study of atmospheric CO_2 concentration retrievals from satellite [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 25 (1): 7–13.
- Tolton B T, Plouffe D. 2001. Sensitivity of radiometric measurements of the atmospheric CO_2 column from space [J]. *Appl. Opt.*, 40: 1305–1313.

- 汪宏七, 赵高祥, 王璐易. 1994. 大气中 CO₂ 浓度增加对大气顶射出辐射影响的监测 [J]. 大气科学, 18 (5): 623 - 630. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang, Wang Luyi. 1994. Detecting of the effect of CO₂ increase on outgoing radiances [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (5): 623 - 630.
- 谢鲲, 王模昌, 殷德奎. 2003. 大气探测红外分光计技术研究进展 [J]. 红外, 2: 33 - 36. Xie Kun, Wang Mochang, Yin Dekui. 2003. Progress of the study of infrared atmospheric sounder [J]. Infrared, 2: 33 - 36.
- 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 2009. 中国新一代极轨气象卫星 — 风云三号 [J]. 气象学报, 67 (4): 501 - 509. Yang Jun, Dong Chao-hua, Lu Naimeng, et al. 2009. New generation polar-orbiting meteorological satellites of China—FY3 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (4): 501 - 509.
- 张华, 石广玉, 刘毅. 2005. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较研究 [J]. 大气科学, 29 (4): 581 - 593. Zhang Hua, Shi Guangyu, Liu Yi. 2005. A comparison between the two line-by-line integration algorithms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 581 - 593.
- Zhang P, Yang J, Dong C H, et al. 2009. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A [J]. Front. Earth Sci. China, doi: 10.1007/s11707-009-0036-2.
- 赵高祥, 汪宏七. 1991. CO₂ 增加对辐射的影响及其监测 [J]. 红外与毫米波学报, 10 (2): 133 - 140. Zhao Gaoxiang, Wang Hongqi. 1991. Radiative effect of increasing CO₂ and its detection [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves (in Chinese), 10 (2): 133 - 140.