

孟晓阳, 张兴赢, 周敏强, 等, 2018. GOSAT 卫星二氧化碳遥感产品的验证与分析[J]. 气象, 44(10): 1306-1317.

GOSAT 卫星二氧化碳遥感产品的验证与分析^{*}

孟晓阳¹ 张兴赢² 周敏强³ 白文广² 周丽花⁴ 余 骁⁵ 胡玥明¹

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家卫星气象中心, 北京 100081

3 比利时高层大气物理所, 布鲁塞尔 1180, 比利时

4 北京师范大学, 北京 100875

5 成都信息工程大学, 成都 610225

提 要: 本文利用全球地基二氧化碳柱浓度观测站点(Total Carbon Column Observing Network, TCCON)18个站点 CO₂ 地基观测数据对 GOSAT(Greenhouse gases Observing Satellite)2009—2017 年的大气 CO₂ 遥感反演产品进行验证分析, 结果显示卫星 CO₂ 遥感产品与地基遥感观测结果较为一致, 在东亚、北美、欧洲和大洋洲四个区域内卫星遥感产品与地基观测的平均偏差分别为 2.23 ± 2.69 、 2.19 ± 2.19 、 2.01 ± 2.49 、 1.59 ± 1.79 ppm, 相关系数不低于 0.75。卫星在 30°S~60°N 范围内的产品精度较高, 而在高纬地区产品精度稍低。本文进一步利用 GOSAT L2 XCO₂ 遥感反演产品对全球大气 CO₂ 的长时间序列变化进行了分析, 结果表明 2009—2017 年全球大气 CO₂ 浓度呈持续上升趋势, 全球年平均增长率为 $2.22 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$, 增长较快的国家和地区包括中国、美国、印度和非洲, 受厄尔尼诺有关的自然排放影响, 2016 年相对上一年的增长量最多, 年均 CO₂ 绝对增量在 3 ppm 以上。

关键词: CO₂, 遥感, 地基验证, 全球变化

中图分类号: P407, P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.007

Validation and Analysis of GOSAT XCO₂ Measurements by TCCON Sites

MENG Xiaoyang¹ ZHANG Xingying² ZHOU Minqiang³ BAI Wenguang²

ZHOU Lihua⁴ YU Xiao⁵ HU Yueming¹

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Belgian Institute for Space Aeronomy, Brussels 1180, Belgium

4 Beijing Normal University, Beijing 100875

5 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract: The data from 18 sites of TCCON are used for the validation of GOSAT XCO₂ products from 2009 to 2017, which show a consistency between satellite data and ground-based measurements. Biases between the satellite data and ground-based measurements in East Asia, North America, Europe and Oceania are 2.23 ± 2.69 , 2.19 ± 2.19 , 2.01 ± 2.49 , 1.59 ± 1.79 ppm, respectively, and the correlation coefficient is not less than 0.75. The accuracy of satellite products is higher in the range of 30°S—60°N, but slightly lower in high latitudes. In addition, authors also use GOSAT L2 XCO₂ products to analyze the change of global atmospheric CO₂ in long-term sequence. The results show that the concentration of global

^{*} 国家重点研发计划(2017YFB0504001 和 2016YFB0500705)、国家自然科学基金面上项目(41775028)及高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目(32-Y20A17-9001-15/17 和 32-Y20A18-9001-15/17)共同资助

2018 年 4 月 3 日收稿; 2018 年 7 月 20 日收修定稿

第一作者: 孟晓阳, 主要从事卫星遥感大气成分应用研究. Email: meixiaoyang15@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 张兴赢, 主要从事卫星大气成分遥感探测及其应用研究. Email: zxy@cma.gov.cn

atmospheric CO₂ shows a continuous upward trend from 2009 to 2017, and the global average annual growth rate is 2.22 ppm · a⁻¹. There are some fast-growing countries and regions, including China, the United States, India, and Africa. Influenced by natural emissions of El Niño, the concentration of atmospheric CO₂ grew the fastest in 2016, with the growth rate being more than 3 ppm · a⁻¹.

Key words: CO₂, remote sensing, validation, global trend

引 言

日本宇宙航空开发研究机构(Japan Aerospace Exploration Agency)于 2009 年发射了全球第一颗温室气体探测卫星 GOSAT,星上搭载高光谱傅里叶变换光谱仪(Fourier Transformation Spectrometer, FTS)对全球大气 CO₂ 浓度进行高光谱遥感探测(Kuze et al, 2009)。卫星遥感可以提供稳定、长时间序列、广空间区域的大气成分信息(张兴赢等, 2007),应用卫星遥感数据来分析全球大气 CO₂ 的变化趋势已有非常广泛的应用(白文广等, 2010; 布然等, 2015; 刘瑞霞等, 2014; Liu et al, 2015)。但是受各种因素的影响,卫星反演大气成分产品的数据质量存在一定的误差和不确定性,系统和全面的评估是获得准确可靠卫星数据的一个重要手段(林伟立和徐晓斌, 2011)。地基 FTS 由地对空接收太阳近红外波段直接辐射,与卫星遥感接收由地面反射回太空的太阳辐射相比,直射光探测减少了云与大气气溶胶、地表反照率等要素的影响;同时地基 FTS 在反演算法上对干涉光谱进行傅里叶变换时订正了云和气溶胶造成的慢变化,也能够一定程度上减少它们的影响,目前地基 FTS 对大气 CO₂ 柱浓度的观测精度可以达到 0.25% (~1 ppm, 1 ppm = 10⁻⁶) (Wunch et al, 2015),能够为卫星遥感反演 CO₂ 等温室气体浓度产品的地面验证提供重要的数据源,来进一步提高卫星反演产品的精度(张兴赢等, 2009; 吴军等, 2013)。全球地基二氧化碳柱浓度观测站点(Total Carbon Column Observing, TCCON)是利用地基 FTS 由地对空获取直接太阳辐射中 4000~9000 cm⁻¹ 范围内近红外部分的光谱数据,避开了散射光不确定性大的不利影响(Yang et al, 2002),采用非线性的最小二乘光谱匹配算法反演大气中 CO₂、CH₄、N₂O、HF、CO、H₂O、HCL、O₂ 和 HDO 等大气成分的柱浓度(Buschmann et al,

2016)。TCCON 观测数据已成为验证和系统校正温室气体观测卫星反演的大气 CO₂ 柱浓度数据的主要地面数据源,可以提供足够精度的 XCO₂ 产品来验证卫星遥感产品(Wunch et al, 2011)。

Morino et al(2011)利用 TCCON 站点数据验证了日本国立环境研究所(National Institute for Environmental Studies, NIES)反演的 GOSAT L2 v01. xx 二氧化碳干空气混合比(XCO₂)产品,发现卫星产品与地基观测结果相比有一 8.85 ± 4.75 ppm 的偏差。Yoshida et al(2013)改进了反演算法后,对 v02. xx 版本的 NIES-GOSAT L2 XCO₂ 产品进行验证,得到了一个稍小的偏差和标准差,分别为 -1.48、2.09 ppm。Inoue et al(2013)利用飞机航测的数据验证了 NIES-GOSAT L2 XCO₂ v02. xx 产品,发现了 NIES-GOSAT 的 CO₂ 遥感产品比飞机航测得到的大气 CO₂ 浓度低,偏差为 -0.68 ± 2.56 ppm。Crisp et al(2012)对 ACOS(Atmospheric CO₂ Observations from Space)算法反演的 GOSAT L2 XCO₂ 产品的反演误差进行了系统评价,初步的验证显示,ACOS-GOSAT L2 XCO₂ v3.3 与 TCCON 地基站点的平均偏差和标准差分别为 1.34、1.83 ppm。Zhang et al(2015)利用同化模式与 ACOS-GOSAT CO₂ 遥感产品进行比较,发现 ACOS-GOSAT 反演的 XCO₂ 产品比模式结果高 0.11 ± 1.81 ppm。目前 NIES 团队反演的 GOSAT 的大气 CO₂ 产品已经更新到 v02.72 版本,本文的验证研究将基于最新版本的数据产品开展,并分析全球大气 CO₂ 浓度变化趋势及区域变化特征。

1 数据和方法

1.1 研究数据

GOSAT 搭载的温室气体的载荷为傅里叶变换光谱仪(TANSO-FTS),TANSO-FTS 包括 3 个短

波红外波段光谱(Band 1: $0.76\ \mu\text{m}$ O_2 吸收 A 带; Band 2: $1.61\ \mu\text{m}$ CO_2 弱吸收带; Band 3: $2.06\ \mu\text{m}$ CO_2 强吸收带), 及一个热红外宽通道光谱($5.5\sim 14.3\ \mu\text{m}$), 其中短波红外波段的光谱分辨率高达 $0.2\sim 0.5\ \text{cm}^{-1}$, 星下点像元直径约为 $10\ \text{km}$ (Kuze et al, 2009)。NIES 基于最优估计算法开发了 NIES-FP 反演算法(Yoshida et al, 2011), 采用云与气溶胶探测仪(TANSO-CAI)的云产品进行云剔除, 通过气溶胶、地表和气体参数同步反演来订正大气光路, 目前是 GOSAT 数据产品的标准算法(Yoshida et al, 2013)。本文所使用的 GOSAT L2 级数据产品为 NIES-GOSAT v02.72 版本, 时间范围从 2009—2017 年(https://data2.gosat.nies.go.jp/index_en.html)。

地基数据来自于 TCCON, 文中所用到的站点分布如图 1 所示。TCCON 的官方输出产品 XCO_2 是由 CO_2 和 O_2 的比值获得, 目的是消除部分由于仪器和其他因素造成的反演系统误差。

1.2 研究方法

国际上针对 GOSAT 不同时间段和不同版本的数据产品开展了验证工作, 一般选用卫星过境前后 $30\sim 60\ \text{min}$ 的地基观测数据, 与地基周围 $1^\circ\sim 10^\circ$ 范围内的卫星遥感产品做对比验证(Butz et al, 2011; Kulawik et al, 2016; Morino et al, 2011; Qu et al, 2013; Wunch et al, 2017; 周敏强等, 2015)。由于卫星的空间和时间覆盖率有限, 当地基站点的匹配点数量较少时可将时间匹配条件放宽到卫星过境前后 $120\ \text{min}$ (Wunch et al, 2017)。但大气 CO_2 存在较明显的日变化, 放宽匹配时间范围可能会引入由于地基站点周围大气 CO_2 浓度日变化带来的误差。有分析指出, 随着时空匹配范围放宽, 卫星产品与地基的匹配点数量逐渐增多, 但不同的时空匹配方法的统计结果相差不大, 即 CO_2 遥感反演产品对选定的时空匹配方法不敏感, 可能与 CO_2 在此时空范围内变化不大有关(张森等, 2014)。而在全球范围内, 大气 CO_2 的浓度并不是均匀分布, 空间匹配条件的改变在一定程度上影响着对大气 CO_2 遥感产品精度的验证结果。本文借鉴前人对 CO_2 遥感反演产品与地基遥感资料时空匹配方法所做敏感性分析结果, 在全球范围内分区域对 GOSAT 卫星最新版本

的数据产品进行精度验证。在空间匹配条件上以地基站点经纬度坐标为中心, 分别采用 $1^\circ\sim 3^\circ$ 的匹配范围将卫星数据与地基站点相匹配。在时间匹配条件上一致选用在用卫星过境前后 $1\ \text{h}$ 内的地基观测数据与卫星遥感产品进行匹配。计算地基与卫星匹配点的绝对误差、相对误差、标准差和相关系数, 并对匹配结果分别做敏感性分析, 选取适用于 GOSAT 卫星遥感产品验证的最佳空间匹配条件。

2 GOSAT 卫星 CO_2 遥感产品精度验证

2.1 GOSAT 卫星 CO_2 遥感产品在典型区域的验证分析

卫星遥感反演 CO_2 产品的验证可为进一步提高卫星反演产品的精度提供依据(Wunch et al, 2017), 本文主要通过对东亚、北美、欧洲和大洋洲这四个典型区域的卫星遥感产品分别做验证, 分析 GOSAT XCO_2 遥感反演产品在这些区域内的观测精度。应用上述匹配方法对 TCCON 所有站点进行匹配, 并挑选了 18 个在四个典型区域内、观测数据时间序列较长、代表性较好的站点作为标准地基观测站点(表 1), 对 GOSAT 大气 CO_2 遥感产品进行验证分析。图 2 为 GOSAT L2 XCO_2 v02.72 产品监测的 2017 年全球大气 CO_2 浓度年平均值的分布情况, 可以看出 CO_2 的全球分布具有很明显的纬带差异。北半球 CO_2 浓度的高值区分布在东亚地区、北美和欧洲等人口众多、经济发达的地区; 南半球的 CO_2 浓度明显低于北半球, 经计算可知 2017 年大洋洲的 XCO_2 年均值为 $402.87\ \text{ppm}$, 在全球范围内处于一个较低水平。

2.1.1 东亚地区

在东亚地区的 TCCON 站点主要分布在日本和韩国(表 1)。由表 2 可以看出, 在东亚地区地基观测数据跟 GOSAT 遥感反演产品的平均偏差为 $2.23\pm 2.69\ \text{ppm}$, 且随着空间匹配范围的放大, 卫星遥感产品与地基观测数据的绝对误差增大, 标准差也不断变大, 相关系数呈现减小的趋势。经分析比较可知, 在东亚地区选择的时空匹配范围越小, 卫星与地基的匹配结果越好, 匹配数据的相关性更高。

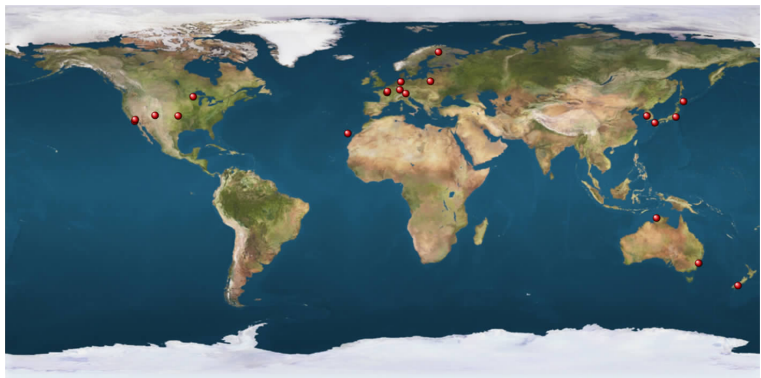


图 1 本文用于 GOSAT 遥感产品验证的 18 个 TCCON 站点分布图
Fig. 1 Location of 18 TCCON stations for the validation of GOSAT products
(https://en.wikipedia.org/wiki/Total_Carbon_Column_Observing_Network)

表 1 本文用于 GOSAT 遥感产品验证的 18 个 TCCON 站点分布信息
Table 1 Information of TCCON stations for the validation of GOSAT products

站点区域	站点名称(缩写)	纬度/°N	经度/°E
东亚地区	Anmeyondo South Korea (AN)	36.54	126.33
	Saga Japan (JS)	33.24	130.29
	Rikubetsu Hokkaido Japan (RJ)	43.46	143.77
	Tsukuba Ibaraki Japan (TK)	36.05	140.12
北美地区	Edwards USA (DF)	34.96	-117.88
	Lamont Oklahoma USA (OC)	36.6	-97.49
	Park Falls Wisconsin USA (PA)	45.94	-90.27
欧洲地区	Bialystok Poland (BI)	53.23	23.02
	Bremen Germany (BR)	53.1	8.85
	Garmisch Germany (GM)	47.48	11.06
	Izana Tenerife Spain (IZ)	28.3	16.48
	Karlsruhe Germany (KA)	48.85	2.36
	Orleans France (OR)	47.97	2.11
	Paris France (PR)	48.85	2.36
	Sodankyla Finland (SO)	67.37	26.63
大洋洲地区	Darwin (DB)	-12.43	130.89
	Lauder NewZealand (LH/LL)	-45.04	169.68
	Wollongong (WG)	-34.41	150.88

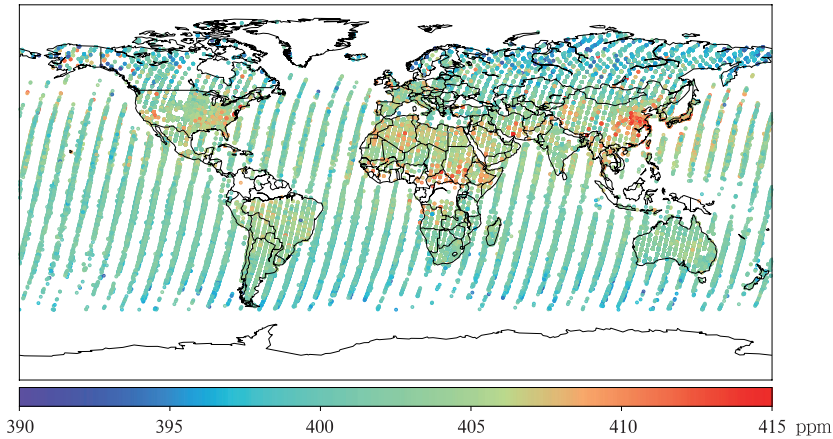


图 2 GOSAT L2 XCO₂ v02.72 产品 2017 年全球年平均大气 CO₂ 浓度分布
Fig. 2 Spatial distribution of global CO₂ column mixing ratios by GOSAT in 2017

表 2 东亚地区 TCCON 站点观测数据与 GOSAT 反演产品比较结果

Table 2 Results of comparison between GOSAT retrieved products and TCCON observations in East Asia

匹配方式		1°				2°				3°			
站点	匹配数量	绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数	绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数	绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数
AN	34	2.41	0.60	2.42	0.77	2.67	0.67	3.12	0.65	2.57	0.64	2.95	0.65
JS	196	2.54	0.63	3.13	0.83	2.73	0.68	3.14	0.84	3.28	0.82	3.47	0.80
RJ	40	2.07	0.52	3.11	0.92	1.97	0.49	2.41	0.86	1.94	0.49	2.28	0.86
TK	290	1.91	0.48	2.12	0.75	2.07	0.52	2.74	0.84	2.09	0.53	2.71	0.85
平均		2.23	0.55	2.69	0.82	2.36	0.59	2.85	0.80	2.47	0.62	2.85	0.79

根据三种不同空间匹配方式,分别对匹配数据做散点相关图,可以看出,图 3a、3b、3c 都具有很强的相关性,随空间匹配范围放大,TK 站点的数据跟卫星数据的相关性增强,JS 站点的数据跟卫星观测结果的相关性降低。相关性最好的是 RJ 站点与 GOSAT 的匹配数据,相关系数最高可达 0.92。

通过分析以上计算结果,认为在东亚地区对卫星 CO₂ 遥感产品验证时可以采用地基站点周围 1° 的空间匹配范围来筛选卫星数据,缩小空间匹配范围获得的卫星观测结果的代表性更高,受地基站周围不同地表特征的影响程度小,使得验证结果更精确。在此匹配条件下,东亚地区 GOSAT CO₂ 遥感产品与地基观测结果的偏差为 2.23 ± 2.69 ppm,平均相关系数为 0.82。

2.1.2 北美地区

北美地区用来验证卫星数据产品的 TCCON 站点主要有 3 个(表 1)。通过对表 3 统计结果的分析

可知在北美地区,GOSAT XCO₂ 产品的平均偏差约为 2.19 ± 2.19 ppm,卫星产品的精度略高于东亚地区。随着空间匹配范围加大,卫星产品与地基观测结果的绝对误差增大,标准差也有变大的趋势,相关系数则相反呈现减小的趋势。由此可见,放宽验证的空间匹配条件虽然能获得更多的匹配点,使得统计意义上的结果更加真实可靠,同时也会使验证结果显示的卫星遥感产品的精度水平偏低。

根据三种不同空间匹配方式,分别对匹配数据做散点相关图,三组数据都具有很强的相关性,统计结果显示不同匹配方案所得到的相关系数均在 0.78 以上。由散点相关图可以看出,DF 站点的数据与 GOSAT 产品的数值大小最接近,绝对误差在 1.80 ppm 之内。同时,OC 和 PA 站点的观测数据与卫星遥感产品的结果非常一致,相关系数在 0.90 ~ 0.93。但是随空间匹配范围的放大,匹配数据散点的收敛性变低,相关性降低。

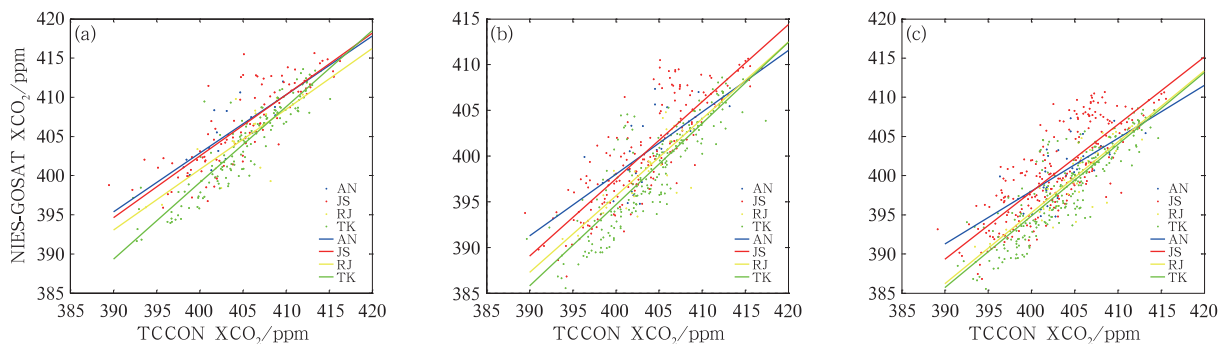


图 3 东亚地区 TCCON 站点观测数据与 GOSAT 反演产品相关散点分布图

- (a)空间匹配范围为 1°时卫星与地基数据对比,
 (b)空间匹配范围为 2°时卫星与地基数据对比,
 (c)空间匹配范围为 3°时卫星与地基数据对比

Fig. 3 Scatterplots of TCCON data and GOSAT data in East Asia

(a) comparision in space matching range of 1°, (b) 2°, (c) 3°

表 3 同表 2,但为北美地区

Table 3 Same as Table 2, but for North America

匹配方式		1°				匹配数量	2°				匹配数量	3°			
站点	匹配数量	绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数		绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数		绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数
DF	720	1.55	0.39	1.84	0.84	810	1.70	0.43	2.20	0.79	934	1.77	0.45	2.28	0.78
OC	890	2.33	0.59	2.32	0.93	1923	2.72	0.69	2.42	0.92	2422	2.84	0.72	2.40	0.92
PA	468	2.68	0.67	2.40	0.93	862	2.59	0.65	2.76	0.91	1364	2.11	0.54	2.80	0.90
平均		2.19	0.55	2.19	0.90		2.34	0.59	2.46	0.87		2.24	0.57	2.49	0.87

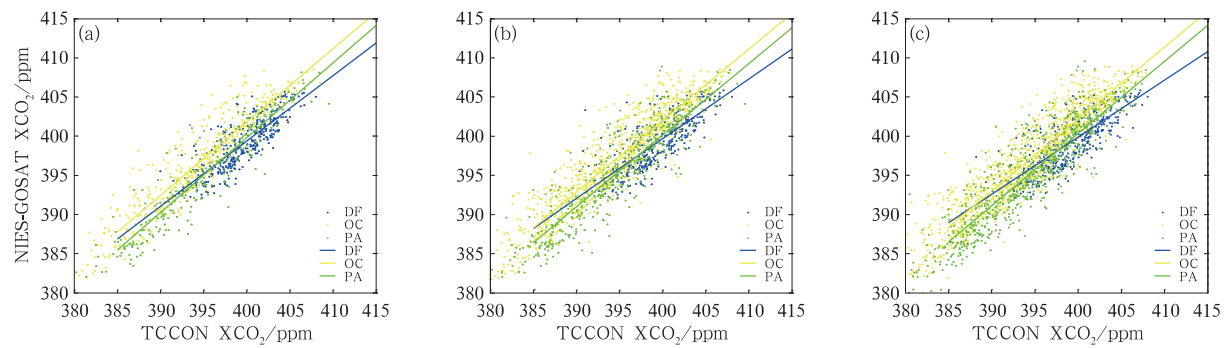


图 4 同图 3,但为北美地区

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for North America

通过分析以上计算结果,认为在北美地区和东亚地区一样,需要采用更小的空间匹配条件获得更精确的验证结果。在 1°的空间匹配条件下,北美地区 GOSAT CO₂ 遥感产品与地基观测结果的偏差为 2.19±2.19 ppm,平均相关系数为 0.90。

2.1.3 欧洲地区

欧洲地区的 TCCON 站点分布最为密集,且观测时间序列较长,本文应用了欧洲 8 个 TCCON 站点(表 1)的观测数据,分别与 GOSAT 的产品进行时空匹配和统计运算,结果如表 4 所示。在 1°匹配条件下,8 个站点与 GOSAT 遥感产品的平均偏差

为 2.01±2.49 ppm,其中有 4 个站点的绝对偏差在 2 ppm 以下。在放宽空间匹配范围后,各个站点与卫星产品比较的平均偏差变化不大,匹配点数的增多在一定程度上加大了地基与卫星数据的相关性。这可能是由于欧洲地区的地基站点分布较为密集,验证结果受空间匹配条件的影响较小。

8 个站点验证 GOSAT 卫星遥感产品的平均相关系数为 0.87,由图 5a、5b、5c 可以看出,随着空间匹配范围放宽,匹配点的数量增多,两组数据的拟合曲线的斜率更接近 1,相关性变好。说明在欧洲地区空间匹配标准对验证结果的影响较小。

表 4 同表 2,但为欧洲地区

Table 4 Same as Table 2, but for Europe

匹配方式	匹配 数量	1°				匹配 数量	2°				匹配 数量	3°			
站点		绝对误差 /ppm	相对 误差	标准差 /ppm	相关 系数		绝对误差 /ppm	相对 误差	标准差 /ppm	相关 系数		绝对误差 /ppm	相对 误差	标准差 /ppm	相关 系数
BI	390	2.13	0.54	2.75	0.87	668	2.23	0.57	2.93	0.86	870	2.26	0.57	2.91	0.86
BR	70	2.19	0.56	1.75	0.94	102	2.10	0.53	1.36	0.96	184	2.11	0.53	2.12	0.92
GM	396	2.04	0.52	2.57	0.92	702	1.92	0.49	2.71	0.90	960	1.82	0.46	2.53	0.91
IZ	78	1.87	0.48	2.44	0.90	154	1.97	0.50	2.38	0.91	214	1.98	0.50	2.18	0.91
KA	178	1.81	0.46	2.22	0.92	364	1.80	0.46	2.47	0.90	500	1.78	0.45	2.35	0.90
OR	186	1.80	0.46	2.58	0.90	334	1.85	0.47	2.78	0.89	736	1.79	0.45	2.53	0.90
PR	68	1.79	0.45	2.30	0.66	106	1.79	0.45	2.28	0.68	150	1.82	0.46	2.51	0.65
SO	350	2.48	0.63	3.36	0.86	834	3.31	0.85	3.40	0.86	940	3.40	0.87	3.36	0.86
平均		2.01	0.51	2.49	0.87		2.12	0.54	2.53	0.87		2.12	0.53	2.56	0.86

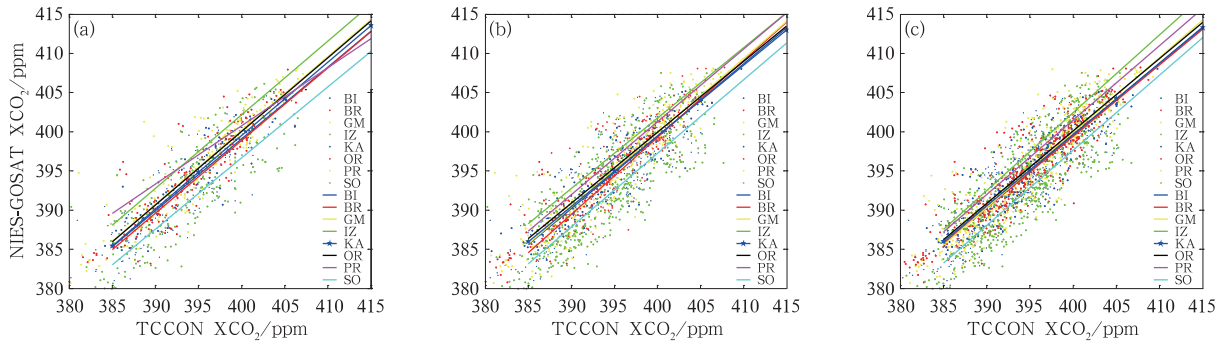


图 5 同图 3,但为欧洲地区
Fig. 5 Same as Fig. 3, but for Europe

通过分析以上计算结果,认为在欧洲地区空间匹配标准对验证结果的影响较小,对卫星 CO₂ 遥感产品验证时可以采用地基站点周围 3°的空间匹配范围来筛选卫星数据,扩大空间匹配范围有利于获得更多的匹配数据,使得验证结果更加可靠。在此匹配条件下,欧洲地区 GOSAT CO₂ 遥感产品与地基观测结果的偏差为 2.12±2.56 ppm,平均相关系数为 0.86。

2.1.4 大洋洲地区

大洋洲的 TCCON 站点分布较少,为使验证结果更具有地域代表性,本文选用了距离较远的 3 个站点(表 1)的数据对 GOSAT 的 CO₂ 遥感产品进行验证(表 5)。3 个站点的数据与 GOSAT 反演产品的相关性均很高,相关系数都在 0.9 以上,偏差约为 1.59±1.79 ppm,小于东亚、北美和欧洲三个区域。

表 5 同表 2,但为大洋洲地区

Table 5 Same as Table 2, but for Oceania

匹配方式	匹配数量	1°				匹配数量	2°				匹配数量	3°			
		绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数		绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数		绝对误差 /ppm	相对误差	标准差 /ppm	相关系数
DB	356	1.52	0.39	1.57	0.94	624	1.57	0.40	1.77	0.93	1056	1.48	0.37	1.69	0.93
LL	156	1.64	0.42	1.59	0.95	168	1.64	0.42	1.59	0.95	180	1.64	0.42	1.60	0.94
WG	248	1.62	0.41	2.21	0.90	458	1.69	0.43	2.13	0.90	582	1.60	0.41	1.95	0.91
平均		1.59	0.40	1.79	0.93		1.63	0.41	1.83	0.93		1.57	0.40	1.74	0.93

从图 6a、6b、6c 可以看出,3°的匹配条件下,可以得到更多的匹配点,此时 WG 站点与卫星观测结果的相关性略高于 1°的匹配条件下的计算结果,其他站点的验证结果变化不大。可见在大洋洲的 3 个站点同欧洲的站点一样,也没有因为空间匹配范围

的扩大使得验证结果显示的卫星产品精度下降,可能与大洋洲区域内人口稀少,地表特征变化不明显,人为活动对大气 CO₂ 浓度的影响较小(Wunch et al, 2011),大气 CO₂ 浓度的分布较为均匀。

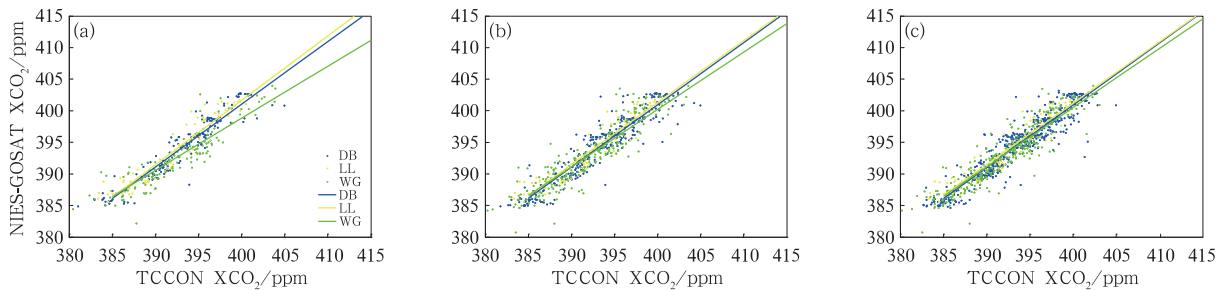


图 6 同图 3,但为大洋洲地区
Fig. 6 Same as Fig. 3, but for Oceania

同样由于在大洋洲地区空间匹配标准对验证结果的影响很小,对卫星 CO₂ 遥感产品验证时可以采用地基站点周围 3°的空间匹配范围来筛选卫星数据来获得更多的匹配数据,使得验证结果更加可靠。在此匹配条件下,大洋洲地区 GOSAT CO₂ 遥感产品与地基观测结果的偏差为 1.57±1.74 ppm,平均相关系数为 0.93。

2.2 GOSAT 卫星 CO₂ 遥感产品在不同纬度带的验证分析

图 7 显示了 2009—2017 年 GOSAT 卫星在各个纬度带内观测的大气 XCO₂ 浓度的平均值,与全球平均值的变化趋势一致,并且有明显的季节波动。北半球大气 CO₂ 浓度在 5 月显示了最大值,8 月显示最低值,在 60°~90°N 范围内出现部分异常高值,可能与卫星在高纬地区的反演误差有关。南半球大气 CO₂ 浓度显示了与北半球相反的季节变化,最大值在 11 月,最小值在 2 月,季节差异为 3~4 ppm,季节变化不明显。因此对不同纬度带内的 GOSAT 卫星遥感产品进行精度验证分析非常有必要。

根据地基站点所在的纬度划分,本文重点应用以上 18 个站点的地基观测数据对 GOSAT NIES-

XCO₂ 产品进行验证。综合上文中的分析结果,选取卫星过境时间前后 1 h 的地基观测数据做平均,与卫星在地基站地理坐标周围 1°范围内的 XCO₂ 产品数值的平均值进行匹配验证。计算结果如表 6 所示,通过比较计算可知,卫星数据与在 0°~30°S 内的地基站点的匹配度最高,标准差为 1.57 ppm,相关系数高达 0.94。卫星数据与 60°~90°N 纬度带内地基站点匹配结果的一致性较低,标准差为 3.36 ppm,相关系数为 0.86。由于地基观测站点数量有限且分布不均匀,验证结果很难显示整个纬度带内的平均水平,还需要在全球范围内建立更多的 TCCON 地基观测站点来验证卫星 CO₂ 遥感产品。

3 全球大气 CO₂ 浓度分布与变化趋势分析

经过上述验证分析,可以认为 GOSAT 在全球范围内的观测结果具有较高的精度,其在南半球的观测精度偏高于北半球,利用 GOSAT 2010—2017 年的观测数据,对 GOSAT 观测的全球大气 CO₂ 浓度变化和时空分布进行了初步分析。卫星监测结果显示,2010—2017 年期间,全球大气 CO₂ 含量呈现稳

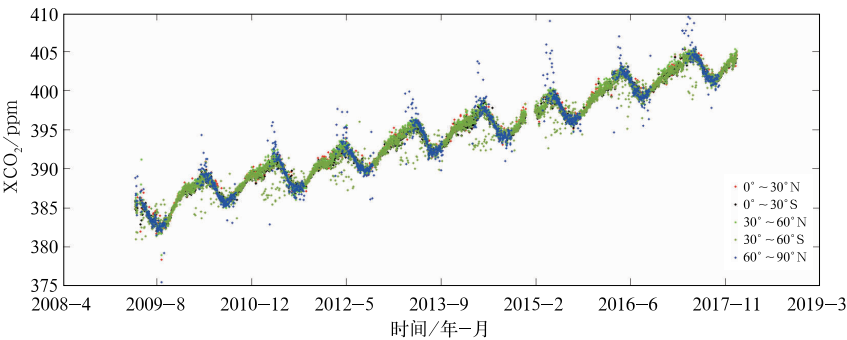


图 7 2009—2017 年 GOSAT 观测全球不同纬度带内大气 XCO₂ 浓度平均值

Fig. 7 Temporal variation of XCO₂ average concentration in different latitudinal zones from 2009 to 2017

表 6 不同纬度带内 TCCON 站点观测数据与 GOSAT 反演产品比较结果

Table 6 Results of comparison between GOSAT retrieved products and TCCON observations in different latitudinal zones

纬度带	TCCON 站点数/个	绝对误差/ppm	相对误差/%	标准差/ppm	相关系数
0°~30°N	1	1.87	0.48	2.44	0.90
30°~60°N	13	2.10	0.52	2.42	0.86
60°~90°N	1	2.48	0.63	3.36	0.86
0°~30°S	1	1.52	0.39	1.57	0.94
30°~60°S	2	1.63	0.41	1.90	0.92

定季节波动增长,在春季达到峰值,夏季降至谷值,其中 2017 年全球大气 CO_2 年均值达到 402.94 ppm。

比较近 8 年多的数据可知全球年均 CO_2 含量呈现线性增长趋势,平均年增长率为 $2.22 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 7 2010—2017 年典型国家和地区的 CO_2 浓度变化

Table 7 Annual variations of XCO_2 in typical areas from 2010 to 2017

地区	经纬度	平均值/ppm	平均年增长率/ $\text{ppm} \cdot \text{a}^{-1}$	2017 年相对增量/%
美国	$33^\circ \sim 48^\circ \text{N}, -122.5^\circ \sim -72.5^\circ \text{E}$	395.35	2.32	0.69
中国	$22^\circ \sim 42^\circ \text{N}, 90^\circ \sim 120^\circ \text{E}$	395.43	2.33	0.67
印度	$14^\circ \sim 30^\circ \text{N}, 72.5^\circ \sim 85^\circ \text{E}$	395.58	2.27	0.57
非洲	$-34^\circ \sim 9^\circ \text{N}, -17^\circ \sim 51^\circ \text{E}$	395.25	2.24	0.50
大洋洲	$-30^\circ \sim -20^\circ \text{N}, 120^\circ \sim 150^\circ \text{E}$	394.96	2.16	0.51

2010—2017 年卫星观测全球几个主要地区的大气 CO_2 年际变化如图 8 所示。卫星遥感监测显示,大气 CO_2 浓度呈逐年上升趋势,其中中国、印度、美国和非洲大气 CO_2 浓度均高于全球大气平均水平,大洋洲的大气 CO_2 浓度略低于全球平均水平。

2010—2017 年全球范围大气 CO_2 浓度的年平

均增长率为 $2.22 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$,其中北半球大气 CO_2 年均绝对增量略高于南半球年均绝对增量。增长较快的地区包括:中国($2.33 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$)、美国($2.32 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$)、印度($2.27 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$)和非洲($2.24 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$)。

由图 9 可以看出,全球和区域每年的大气 CO_2

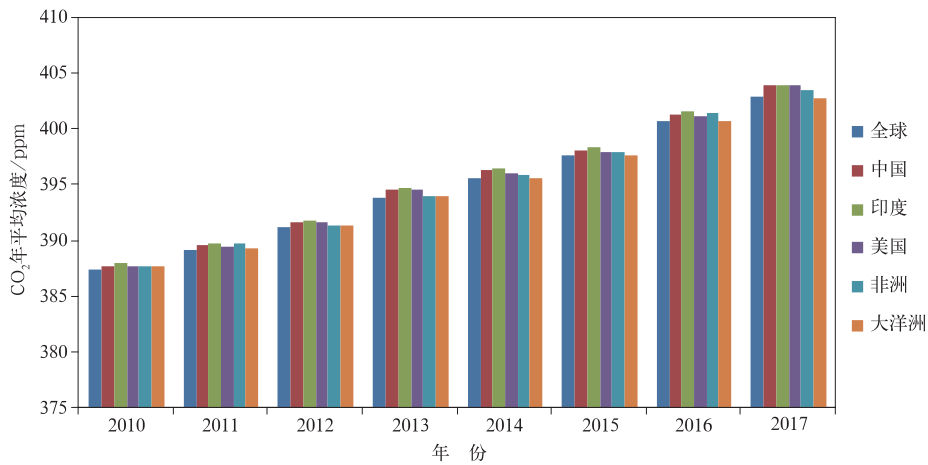


图 8 2010—2017 年 GOSAT 监测典型区域大气 CO_2 浓度年平均值

Fig. 8 Annual average concentrations of XCO_2 in typical areas from 2010 to 2017

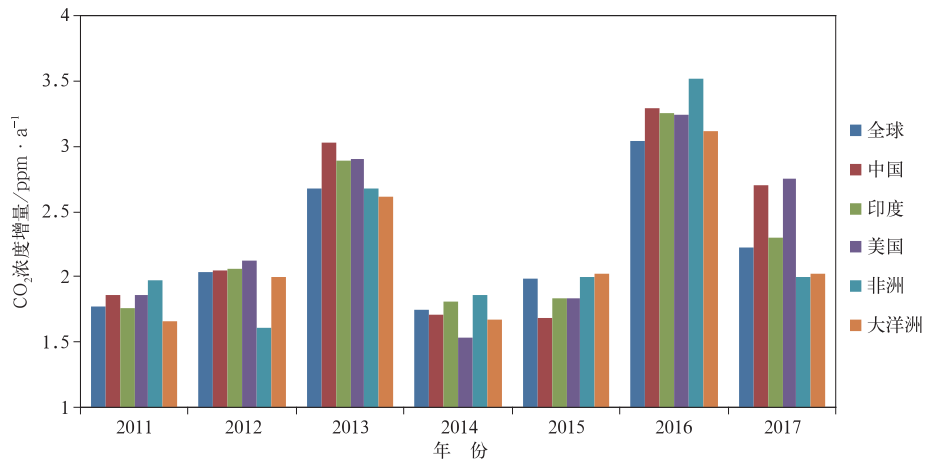


图 9 2011—2017 年间全球及典型区域大气 CO_2 相对前一年的增量变化

Fig. 9 The CO_2 increment relative to the previous year in typical areas from 2011 to 2017

绝对增量都有上下浮动,说明大气中 CO_2 浓度的增加一方面取决于人为排放的增加,包括世界人口增长速度、能源需求量的增加和开发速度以及替代能源的开发速度等;另一方面又取决于自然 CO_2 贮库对人为排放的 CO_2 的响应,特别是生物圈和海洋的响应(王明星和曾庆存,1986)。2013 年全球 CO_2 相对于 2012 年年均上升了约 2.9 ppm,超过了 2011 年和 2012 年的增幅。全球大气监测网的台站对大气 CO_2 中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的测量结果表明, CO_2 增速的变化是由于大气和陆地生物圈之间的通量发生了微小的变化。光合与呼吸作用或生物质燃烧之间平衡的变动对该交换通量造成微小的年际变化(1%~2%),这会对大气 CO_2 的增速产生很大的影响,不过目前对 2012—2013 年年均绝对增量超过平均增幅的因素还没有准确的判断,依赖全球大气监视网台站的观测结果来进一步推断(WMO, 2014)。2016 年相对于 2015 年全球和典型区域大气 CO_2 浓度增幅最大,年均增量在 3 ppm 以上,显著高于过去 5 年(2010—2015 年),这可能与 2015 年发生的 El Niño 事件有关(Buschmann et al, 2016; WMO, 2016; 2017; Wunch et al, 2015; 贾凡, 2014)。

早期发现,大气 CO_2 浓度的年际变率与 ENSO 存在明显的相关性,即在 El Niño 年,大气 CO_2 年际增长率异常增加,La Niña 年相反(邢如楠和王彰贵, 2001; 徐永福等, 2004)。随后大量研究指出,大气 CO_2 浓度的年际增长率主要来自于陆地生态系统,由 ENSO 引起的异常温度和降水是导致陆地碳循环年际异常的主要气候驱动因子(祁承经等, 2010; 周涛等, 2008)。最近一次 El Niño 事件发生于 2015—2016 年,其引起全球陆地降水、近地表温度异常增加(李雪等, 2016),北半球热带外地区异常

吸收增多,而热带及南半球热带外地区分别异常释放增多,导致了全球陆气碳通量释放量增加,在 El Niño 年,全球大气 CO_2 年增长率明显高于其他年份,与 2016 年卫星观测的 CO_2 浓度绝对增长量较高相符。

基于 GOSAT 2017 年对全球大气 CO_2 的监测结果,对全球几个主要国家和地区的年均大气 CO_2 浓度和增长率进行分析(图 10),全球平均 XCO_2 浓度为 402.94 ppm,中国大气 CO_2 平均浓度 404.07 ppm,几个主要的国家和地区:美国 403.97 ppm,印度 403.93 ppm;亚洲 404.43 ppm,非洲 403.50 ppm,大洋洲 402.87 ppm;除大洋洲外,其他区域年均大气 CO_2 浓度均高于全球平均水平。2017 年几个重点区域和国家中,美国和中国的年增长率最高,分别为 2.75、2.70 $\text{ppm} \cdot \text{a}^{-1}$,印度的年增长率(2.31 $\text{ppm} \cdot \text{a}^{-1}$)略高于全球年增长率(2.24 $\text{ppm} \cdot \text{a}^{-1}$),非洲和大洋洲年增长率较低,仅为 2.00、2.03 $\text{ppm} \cdot \text{a}^{-1}$,总体来看北半球年增长率略高于全球增长率。

4 结 论

前人研究中大多采用一种匹配方案适用于全球站点,而在全球范围内,大气 CO_2 的浓度并不是均匀分布,空间匹配条件的改变在一定程度上影响着对卫星产品精度的验证结果。本文利用 TCCON 全球 18 个地基观测站点长时间序列的观测数据分不同的地理区域对 GOSAT 最新版本数据(v02.72)大气 CO_2 干空气混合比产品进行了验证分析,综合考虑卫星与地基数据在不同时空匹配条件下的偏差、标准差、相关系数和匹配点数量等信息,结合区域下垫面特征确定在不同区域内卫星产品和地基数据的

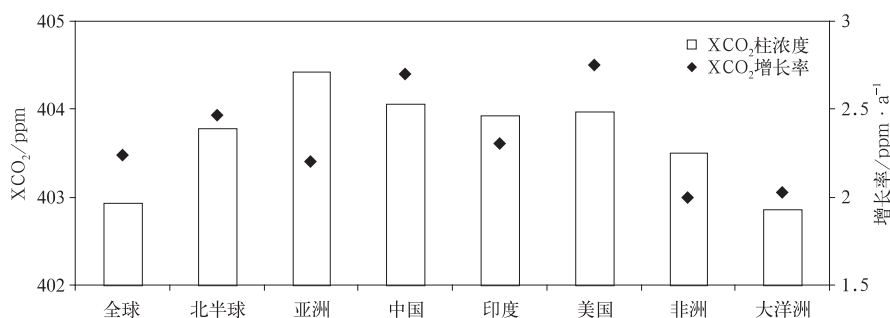


图 10 2017 年全球主要几个国家和地区大气 CO_2 浓度和增长率

Fig. 10 Annual average concentration and growth rate of XCO_2 in typical areas in 2017

最佳时空匹配方案对 GOSAT 卫星产品进行精度验证,并利用该卫星产品对全球大气 CO₂ 浓度时空分布和变化趋势进行了初步研究,得出结论如下:

(1) GOSAT 全球大气 CO₂ 遥感产品与 TC-CON 地基站点观测结果的一致性较好,大多数站点与卫星产品匹配的相关系数高于 0.75。平均偏差小于 2.5 ppm,可以较精确地对全球大气 CO₂ 浓度进行大范围实时监测。

(2) 在东亚和北美地区验证结果受空间匹配条件的影响较大,匹配范围越宽,验证所得卫星 CO₂ 遥感产品的精度越低,采用 1°的空间匹配条件分别得到 GOSAT XCO₂ 产品在东亚 2.23 ± 2.69 ppm (0.55%)和北美 2.19 ± 2.19 ppm (0.55%)的偏差;但在欧洲和大洋洲,改变空间匹配范围对验证结果的影响不明显,采用 3°的空间匹配条件可得到 GOSAT XCO₂ 产品在欧洲 2.12 ± 2.56 ppm (0.53%)和大洋洲 1.57 ± 1.74 ppm (0.40%)的偏差。

(3) 根据对不同纬度带内 GOSAT 的卫星遥感产品进行验证可知卫星在 30°S~60°N 范围内的产品精度较高。

(4) 全球大气 CO₂ 浓度呈上升趋势,2010—2017 年 GOSAT 监测的大气 CO₂ 年平均增长速度约为 $2.22 \text{ ppm} \cdot \text{a}^{-1}$,其中中国、印度、美国都是增长较快的国家,而大洋洲的大气 CO₂ 浓度和增长率均低于全球平均水平。分析 GOSAT 多年观测结果发现,2016 年全球和几个典型区域的大气 CO₂ 浓度增幅最大,年均增量在 3 ppm 以上,这一现象与 2015—2016 年发生的 El Niño 现象有关。

参考文献

- 白文广,张兴赢,张鹏,2010. 卫星遥感监测中国地区对流层二氧化碳时空变化特征分析[J]. 科学通报,55(30):2953-2960.
- 布然,雷莉萍,郭丽洁,等,2015. 大气 CO₂ 浓度时空变化卫星遥感监测的应用潜力分析[J]. 遥感学报,19(1):34-45.
- 贾凡,2014. 全球变暖背景下热带太平洋的响应及其机制[D]. 青岛:中国海洋大学.
- 李雪,石大山,牛超,2016. 2015: 超强厄尔尼诺之年[J]. 生态经济,32(3):6-9.
- 林伟立,徐晓斌,2011. 卫星遥感 NO₂ 资料地面验证对中国大气本底观测的潜在需求[J]. 气象,37(5):571-575.
- 刘瑞霞,张兴赢,刘杰,等,2014. 卫星遥感 CO₂ 时空分布特征分析[C] 2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都:中国环境科学学会:1-2.
- 祁承经,曹福祥,曹受金,2010. 热带森林碳汇或碳源之争[J]. 生态学报,30(23):6613-6623.

- 王明星,曾庆存,1986. 大气中的二氧化碳含量[J]. 大气科学,10(2):212-219.
- 吴军,方勇华,叶函函,等,2013. 基于高分辨率地基 FTS 光谱的大气 CO₂ 反演方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,32(5):1281-1284.
- 邢如楠,王彰贵,2001. 热带太平洋表面水中 CO₂ 对 El Niño 事件响应的数值模拟[J]. 气象学报,59(3):308-317.
- 徐永福,赵亮,浦一芬,等,2004. 二氧化碳海气交换通量估计的不确定性[J]. 地学前缘,11(2):565-571.
- 张森,张兴赢,刘瑞霞,2014. 卫星高光谱大气 CO₂ 遥感反演精度地基验证研究[J]. 气候变化研究进展,10(6):427-432.
- 张兴赢,张鹏,方宗义,等,2007. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象,33(7):3-14.
- 张兴赢,张鹏,廖宏,等,2009. 地基傅里叶红外高光谱遥感观测大气成分平台建设及其反演技术研究[J]. 气象,35(1):9-17.
- 周敏强,张兴赢,王普才,等,2015. 二氧化碳柱浓度的卫星反演试验及地基验证[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,45(6):856-863.
- 周涛,仪垂祥,Bakwin P S,等,2008. 大气 CO₂ 浓度变化与生物群系气候异常之间的关联分析[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,38(2):224-231.
- Buschmann M,Deutscher N M,Sherlock V,et al,2016. Retrieval of xCO₂ from ground-based mid-infrared (NDACC) solar absorption spectra and comparison to TCCON[J]. Atmos Meas Tech,9(2):577-585.
- Butz A,Guerlet S,Hasekamp O,et al,2011. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT[J]. Geophys Res Lett,38:L14812.
- Crisp D,Fisher B M,O'Dell C,et al,2012. The ACOS CO₂ retrieval algorithm-Part II:Global XCO₂ data characterization[J]. Atmos Meas Tech,5(4):687-707.
- Inoue M,Morino I,Uchino O,et al,2013. Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data[J]. Atmos Chem Phys,13(19):9771-9788.
- Kulawik S,Wunch D,O'Dell C,et al,2016. Consistent evaluation of ACOS-GOSAT, BESD-SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON[J]. Atmos Meas Tech,9(2):683-709.
- Kuze A,Suto H,Nakajima M,et al,2009. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring[J]. Appl Opt,48(35):6716-6733.
- Liu Ruixia,Zhang Xingying,Liu Jie,et al,2015. A spatial-temporal distribution characteristics study on the atmospheric carbon dioxide observed by gosat satellite remote sensing[J]. J Trop Meteor,21(4):408-416.
- Morino I,Uchino O,Inoue M,et al,2011. Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra[J]. Atmos Meas Tech,4(6):1061-1076.
- Qu Yan,Zhang Chunmin,Wang Dingyi,et al,2013. Comparison of atmospheric CO₂ observed by GOSAT and two ground stations in China[J]. Int J Remote Sens,34(11):3938-3946.

- WMO, 2014. Global Atmosphere. 2014. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin)- N° 10 - Climate Summit edition: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2013[M].
- WMO, 2016. Global Atmosphere. 2016. WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015[M].
- WMO, 2017. Global Atmosphere. 2017. WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016[M].
- Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al, 2011. The total carbon column observing network[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 369(1943): 2087-2112.
- Wunch D, Toon G C, Sherlock V, et al, 2015. The Total Carbon Column Observing Network's GGG2014 Data Version[M]. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory.
- Wunch D, Wennberg P O, Osterman G, et al, 2017. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON[J]. *Atmos Meas Tech*, 10(6): 2209-2238.
- Yang Zhonghua, Toon G C, Margolis J S, et al, 2002. Atmospheric CO₂ retrieved from ground-based near IR solar spectra[J]. *Geophys Res Lett*, 29(9): 53-1-53-4.
- Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, et al, 2013. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data[J]. *Atmos Meas Tech*, 6(6): 1533-1547.
- Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al, 2011. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite[J]. *Atmos Meas Tech*, 4(4): 717-734.
- Zhang Huifang, Chen Baozhang, Xu Guang, et al, 2015. Comparing simulated atmospheric carbon dioxide concentration with GOSAT retrievals[J]. *Sci Bull*, 60(3): 380-386.