

曹钰,李如仁,张慧芳,等.GOSAT与TROPOMI的甲烷柱浓度(XCH<sub>4</sub>)对比分析[J].中国环境科学,2025,45(3):1185-1197.

Cao Y, Li R R, Zhang H F, et al. Comparison analysis of methane column concentrations (XCH<sub>4</sub>) between GOSAT and TROPOMI [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1185-1197.

## GOSAT与TROPOMI的甲烷柱浓度(XCH<sub>4</sub>)对比分析

曹钰<sup>1,2</sup>,李如仁<sup>1</sup>,张慧芳<sup>2\*</sup>,李会亚<sup>3</sup>,方君君<sup>2</sup>,陈报章<sup>2,4,5</sup> (1.沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2.中国科学院地理科学与资源研究所,地理信息科学与技术系国家重点实验室,北京 100101; 3.广东省深圳生态环境监测中心,广东 深圳 518049; 4.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049; 5.江苏省地理信息资源与开发利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

**摘要:** 甲烷(CH<sub>4</sub>)作为大气中主要的温室气体,其空间分布特征是气候研究的主要内容.然而,多源卫星观测的甲烷柱浓度(XCH<sub>4</sub>)数据之间存在差异,对这些差异的系统评估有助于提高其科学应用的准确性.本研究对2019年3月~2023年2月期间的温室气体观测卫星(GOSAT, Greenhouse Gases Observing Satellite)和对流层观测仪(TROPOMI, Tropospheric Monitoring Instrument)所获得的XCH<sub>4</sub>产品进行比较分析,并使用总碳柱观测网(TCCON, Total Carbon Column Observing Network)数据进行评估.结果表明,两颗卫星共同特征为:赤道附近XCH<sub>4</sub>较高,向两极递减,北半球的XCH<sub>4</sub>值普遍高于南半球;年际变化中,南半球的波动幅度较大,达到 $\pm 15 \times 10^{-9}$ ;季节变化表现为夏季较低,冬季较高,差异特征为:TROPOMI的数据量是GOSAT的1300倍;GOSAT在北美和非洲的年均增长率( $13.08 \times 10^{-9}/a$ 和 $13.92 \times 10^{-9}/a$ )略低于TROPOMI( $13.34 \times 10^{-9}/a$ 和 $14.12 \times 10^{-9}/a$ ),且南美的年际振幅( $16.10 \times 10^{-9}/a$ )较大;夏季两颗卫星的XCH<sub>4</sub>差异最大,为 $-5.00 \times 10^{-9}$ .经与TCCON数据验证分析显示:两颗卫星都具有较高的一致性,但也存在误差,具体而言TCCON与GOSAT和TROPOMI的差值分别为 $-7.61 \times 10^{-9}$ (南北半球分别为 $-4.59 \times 10^{-9}$ 和 $-4.63 \times 10^{-9}$ )和 $-5.03 \times 10^{-9}$ (南北半球分别为 $-6.70 \times 10^{-9}$ 和 $0.18 \times 10^{-9}$ ).

**关键词:** XCH<sub>4</sub>; GOSAT; TROPOMI; 交叉验证; 遥感

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1185-13

**Comparison analysis of methane column concentrations (XCH<sub>4</sub>) between GOSAT and TROPOMI.** CAO Yu<sup>1,2</sup>, LI Ru-ren<sup>1</sup>, ZHANG Hui-fang<sup>2\*</sup>, LI Hui-ya<sup>3</sup>, FANG Jun-jun<sup>2</sup>, CHEN Bao-zhang<sup>2,4,5</sup> (1.School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2.State Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.Shenzhen Ecological Environment Monitoring Center Station of Guangdong Province, Shenzhen 518049, China; 4.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Geographic Information Resources and Development and Utilization, Nanjing 210023, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1185~1197

**Abstract:** As one of the major greenhouse gases in the atmosphere, the spatial distribution characteristics of Methane (CH<sub>4</sub>) were the main content of climate research. However, differences were observed between the methane column concentration (XCH<sub>4</sub>) data from multiple satellite sources. A systematic evaluation of these differences was conducted to improve the accuracy of its scientific application. The XCH<sub>4</sub> products obtained by the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) and the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) from March 2019 to February 2023 were compared and analyzed, and the Total Carbon Column Observing Network (TCCON) data were used for evaluation. The results showed that the two satellites shared the following common characteristics: XCH<sub>4</sub> was higher near the equator and decreased towards the poles, with XCH<sub>4</sub> values in the northern hemisphere generally being higher than those in the southern hemisphere; In the interannual variation, the fluctuation range in the southern hemisphere was larger, reaching  $\pm 15 \times 10^{-9}$ ; Seasonal variation was characterized by lower values in summer and higher values in winter. The differences were as follows: The data volume of TROPOMI was found to be 1300 times greater than that of GOSAT; The annual average growth rates of GOSAT in North America and Africa ( $13.08 \times 10^{-9}/a$  and  $13.92 \times 10^{-9}/a$ ) were slightly lower than those of TROPOMI ( $13.34 \times 10^{-9}/a$  and  $14.12 \times 10^{-9}/a$ ), while the interannual amplitude in South America ( $16.10 \times 10^{-9}/a$ ) was found to be larger. The XCH<sub>4</sub> difference between the two satellites in summer was found to be the largest, with a measurement of  $-5.00 \times 10^{-9}$ .

收稿日期: 2024-08-14

基金项目: 中国科学院基础与交叉前沿科研 B 类先导专项(XDB0740300);资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(KPI005);新疆自治区重点研发计划项目(2021B03002-2);国家自然科学基金资助项目(41977404,41771114)

\* 责任作者, 助理研究员, zhanghf@lreis.ac.cn

Verification and analysis with TCCON data showed that both satellites exhibited high consistency, although errors were also observed. Specifically, the differences between TCCON and GOSAT and TROPOMI were  $-7.61 \times 10^{-9}$  ( $-4.59 \times 10^{-9}$  and  $-4.63 \times 10^{-9}$  in the northern and southern hemispheres, respectively) and  $-5.03 \times 10^{-9}$  ( $-6.70 \times 10^{-9}$  and  $0.18 \times 10^{-9}$  in the northern and southern hemispheres, respectively).

**Key words:** XCH<sub>4</sub>; GOSAT; TROPOMI; cross-validation; remote sensing

甲烷(CH<sub>4</sub>)浓度在全球范围内不断增加,对全球的生态环境和气候变化产生了巨大的影响.根据世界气象组织的报告,自2020年以来,全球平均CH<sub>4</sub>浓度迅速增长,引发国际社会广泛关注,包括中国在内的多国提出了“碳中和”与“碳达峰”的目标<sup>[1-2]</sup>.为了响应这些目标,精确监测大气中的CH<sub>4</sub>浓度变得尤为紧迫.虽然地基监测能提供高精度数据,但因其覆盖范围和高昂成本,限制了自身发展,从而促进卫星监测手段的兴起,以实现广泛、经济、快速的大气CH<sub>4</sub>获取<sup>[3-5]</sup>.目前的卫星观测传感器包括大气红外探测仪(AIRS),红外大气探测仪(IASI),大气扫描成像吸收光谱仪绘图法(SCIAMACHY),温室气体观测卫星(GOSAT),对流层发射光谱仪(TES)以及搭载在哥白尼哨兵五号前体(Sentinel-5p)的对流层观测仪(TROPOMI)等,它们在不同的时间和空间尺度上提供了全球平均的干空气甲烷物质的量分数(XCH<sub>4</sub>).

目前,已有许多研究利用卫星监测数据来探究区域和全球尺度的XCH<sub>4</sub>浓度分布<sup>[6-8]</sup>.受反演模型、测量仪器、空间分辨率以及大气和地表参数等影响,卫星浓度产品的精度存在误差和不确定性<sup>[9-12]</sup>.因此,在利用卫星数据进行研究之前,对其进行全面的评估验证非常关键.这一步骤对于识别和减少不确定性、提高反演算法和数据产品的准确性至关重要.总碳柱观测网(TCCON)是一个由地基傅里叶变换光谱仪组成的观测网,可以收集到高精度且稳定的测量数据<sup>[13]</sup>.这些数据不仅是反演地基XCH<sub>4</sub>数据的基础,也是评估和校正卫星XCH<sub>4</sub>产品性能的重要依据<sup>[14-16]</sup>.尽管前人已利用TCCON对各种碳卫星数据进行了广泛的比较,但同时对比多源卫星(如GOSAT和TROPOMI数据)及与TCCON差异的研究仍有欠缺.GOSAT和TROPOMI采用不同的观测策略,体现在不同的轨道和测量足迹上.GOSAT所搭载的傅里叶变换光谱仪TANSO-FTS在电磁波谱的短波红外SWIR和热红外TIR区域工作,采取星下采点观测.短波红外测量允许以高灵敏度检索地球表面的XCH<sub>4</sub><sup>[17]</sup>.TROPOMI则是通过一种最低点观测

108°视场推扫光栅高光谱光谱仪来进行大气CH<sub>4</sub>的观测.而TCCON是通过高精度光谱仪在固定地面站点进行定期观测,以获取大气中CH<sub>4</sub>的浓度.这些技术上的差异可能导致卫星数据在空间分布、时效性及测量精度等方面存在显著差异.然而,前人的研究中往往缺乏对卫星与地基观测间时空匹配标准的系统性分析,或者仅针对特定区域或短时间尺度展开研究,未能充分考虑全球范围内的复杂性.因此,选择有效的时空匹配标准,以TCCON的数据作为基准,可以有效识别和校正它们间的差异,以提高卫星数据的可靠性和准确性并增强对全球CH<sub>4</sub>时空变化的理解.通过系统性地分析数据差异,希望为各国应对大气CH<sub>4</sub>浓度快速增长的挑战,实施精准的减排政策,并为逐步实现碳达峰和碳中和目标提供有效的参考.

本文选取GOSAT和TROPOMI的XCH<sub>4</sub>数据进行全面的比较分析,以评估它们在XCH<sub>4</sub>测量中的一致性和差异.具体而言,本研究将从年际、季节和空间三个角度分析卫星数据的一致性和差异性,并利用TCCON数据验证两颗卫星数据的精度.以期卫星(XCH<sub>4</sub>)数据的科学应用提供全球时空分布和对比分析的关键信息,从而为后续研究提供可靠的参考.

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

**1.1.1 GOSAT数据** GOSAT是国际第一颗专门用于高精度观测空间温室气体浓度的卫星.它于2009年1月发射升空,由日本宇航局,日本国立环境研究所(NIES)和日本政府环境部(MOE)的联合项目运行.GOSAT的参数信息如表1,它是太阳同步轨道卫星,倾角为98.06°,观测高度为665.96km,带宽为640km,每3d就可以监测全球范围内的XCO<sub>2</sub>和XCH<sub>4</sub>,并且公转的周期为98.1min,过境时间为13:00(当地时),空间分辨率为10.5km×10.5km<sup>[18-19]</sup>.GOSAT的有效载荷包括用于碳观测的热和近红外

传感器-傅里叶变换光谱仪(TANSO-FTS)和云和气溶胶成像仪(TANSO-CAI).TANSO-FTS 仪器有 4 个高光谱分辨率的光谱带,其中 3 个在 SWIR 的 0.76, 1.6,2.0 $\mu\text{m}$  中工作对近地表吸收具有敏感性,第 4 个则是在 5.5~14.33 $\mu\text{m}$  的 TIR 波段工作,对对流层中部的吸收具有敏感性<sup>[20]</sup>,且 1.56~1.72 $\mu\text{m}$  和 5.56~14.33 $\mu\text{m}$  为 CH<sub>4</sub> 的反演波段.

本研究所使用到的 XCH<sub>4</sub> 产品来自日本国家环境研究所(NIES)提供的经过偏差校正后的 FTS L2CH<sub>4</sub> column amount (SWIR) 产品,版本为 V02.95/V02.96(下载地址: <https://data2.gosat.nies.go.jp/GosatDataArchiveService/usr/download/ProductPage/veiw>).该 GOSAT L2 产品采用的反演算法为 NIES 算法<sup>[21]</sup>.本研究选择 2019 年 3 月~2023 年 2 月的时间范围,根据用户手册中的质量标志(xch4\_quality\_flag=0)对数据进行初步筛选,之后通过箱型图分析进一步识别并剔除数据中的异常值,以确保后续分析结果的准确性和可靠性.

1.1.2 TROPOMI 数据 Sentinel-5p 卫星是欧空局 ESA 于 2017 年 10 月 13 日发射的一颗全球大气污染监测卫星,该卫星搭载了对流层观测仪 TROPOMI. TROPOMI 的参数信息如表 1,它是太阳同步轨道卫星,过境时间为当地下午 13:30,卫星高度为 824km,预计任务寿命为 7a<sup>[22]</sup>.TROPOMI 是一种推扫式成像光谱仪,带宽为 2600km,空间分辨率为 5.5km $\times$ 7km.

该仪器每秒观测一整条条带,并在大约 90min 内绕地球运行一周,从而实现每天接近全球的覆盖率<sup>[23]</sup>.

表 1 GOSAT 和 TROPOMI 的传感器参数信息  
Table 1 Sensor parameter information of GOSAT and TROPOMI

参数名称	GOSAT	Sentinel-5p
传感器	TANSO-FTS TANSO-CAI	TROPOMI
轨道倾角(°)	98.06	98.18
轨道高度(km)	665.96	824
重访周期(d)	3	1
过境时间	13:00	13:30
空间分辨率(km)	10.5	5.5 $\times$ 7.0
条带(km)	640	2600
轨道周期(min)	98.1	90
CH <sub>4</sub> 波段( $\mu\text{m}$ )	1.56~1.72 5.56~14.33	0.25~1.0
CH <sub>4</sub> 反演算法	NIES	RemoTeC

本研究收集了 2019 年 3 月~2023 年 2 月的由 NASA 提供的 Sentinel-5p 卫星反演的 S5P\_L2\_CH4\_HiR 的经过偏差校正后的 XCH<sub>4</sub> 产品(下载地址: [https://disc.gsfc.nasa.gov/dataest/S5P\\_L2\\_CH4\\_HiR\\_2/](https://disc.gsfc.nasa.gov/dataest/S5P_L2_CH4_HiR_2/)),其采用的反演算法为 RemoTeC<sup>[24]</sup>,并且充分阅读用户手册,根据质量的筛选标准(qa\_value>0.5)进行筛选,之后通过箱型图分析进一步识别并剔除数据中的异常值,以确保后续的分析准确性和可靠性.

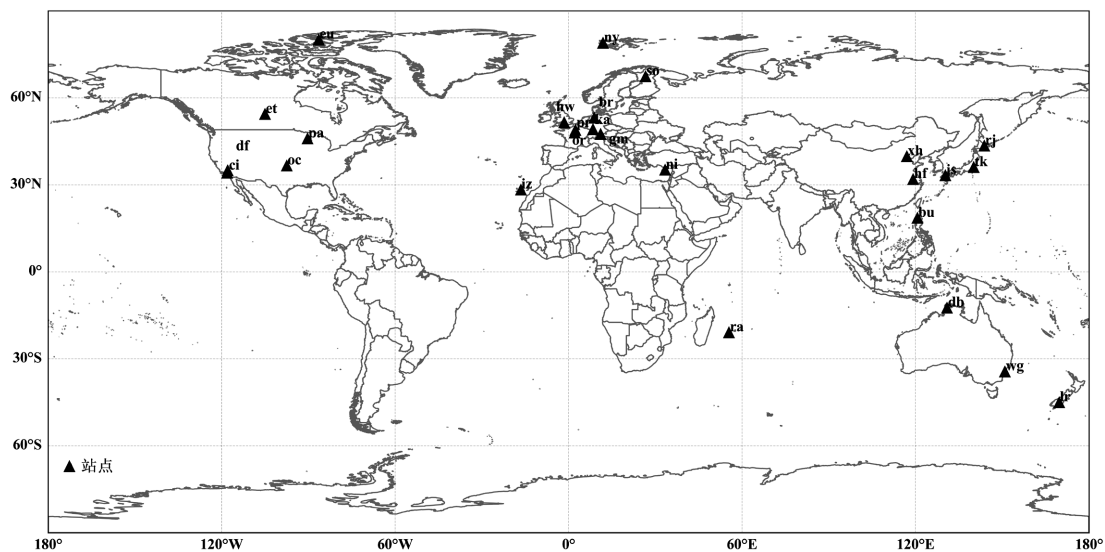


图 1 TCCON 站点分布

Fig.1 TCCON site distribution

审图号为 GS(2021)648 号

**1.1.3 TCCON 数据** 本研究使用 TCCON 地面站点观测数据来评估 GOSAT 和 TROPOMI 的数据。TCCON 是由全球多个国家的不同观测站点组成的全球合作观测网络, 建立于 2004 年, 如今全球共有 33 个观测站点, 主要分布在美洲及欧洲等国家, 致力于提供稳定的、长时间序列的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO 等观测记录。TCCON 网络建立了严格的数据采集与反演标准, 基于 FTS 观测平台, 通过测量对太阳直射光的吸收来反演多种大气温室气体的柱浓度和垂直廓线, 从而获取高时空分辨率的温室气体立体分布信息, 不仅可以实现卫星数据的有效验证和补充, 还能实现对地基、机载、星载仪器数据的校验, 以及对化学模型的对比校正<sup>[25-26]</sup>。

表 2 TCCON 站点信息及与卫星匹配的数据量

Table 2 TCCON site information and data volume matching with satellites

站点名称	经度	纬度	GOSAT	TROPOMI	文献
Brenben (br)	8.85	53.10	9	43	[27]
Burgos (bu)	120.65	18.53	14	106	[28]
Caltech (ci)	-118.13	34.14	496	1049	[29]
Darwin (db)	130.89	-12.43	34	551	[30]
Dryden (df)	-117.88	34.96	391	865	[31]
East Trout Lake (et)	-104.99	54.35	-	443	[32]
Eureka (eu)	-86.42	80.05	-	53	[33]
Garmisch (gm)	11.06	47.48	50	326	[34]
Hefei (hf)	119.17	31.90	7	176	[35]
Harwell (hw)	-1.5	51.5	-	58	[36]
Izana (iz)	-16.50	28.31	-	28	[37]
Saga (js)	130.29	33.24	166	401	[38]
Karlsruhe (ka)	8.44	49.10	11	326	[39]
Lauder (lr)	169.70	-45.00	123	589	[40]
Nicosia (ni)	33.40	35.10	-	712	[41]
Ny-Alesund (ny)	11.92	78.92	-	15	[42]
Lamont (oc)	-97.49	36.60	191	819	[43]
Orléans (or)	2.11	47.96	33	131	[44]
Park Falls (pa)	-90.27	45.96	69	524	[45]
Paris (pr)	2.36	48.85	23	127	[46]
Reunion Island (ra)	55.48	-20.9	-	8	[47]
Rikubetsu (rj)	143.77	43.46	11	292	[48]
Sodankylä (so)	26.63	67.37	49	335	[49]
Tsukuba (tk)	140.12	36.05	67	101	[50]
Wollongong (wg)	150.88	34.41	64	296	[51]
Xianghe (xh)	117.00	39.80	147	608	[52]

为了建立 GOSAT、TROPOMI 和 TCCON 数据之间的对应关系, 下载了 GGG2020 版本的数据。意识到两颗卫星在陆地上的观测模式为天底模式, 而在海洋部分则是闪烁模式。为了消除两种模式

的差异, 本研究只针对陆地区域进行分析。由于数据集的时间年限和卫星与站点的匹配限制, 选取对应时间范围作为与 GOSAT 和 TROPOMI 的进行评估所使用的数据, 匹配后的站点空间分布如图 1。

## 1.2 方法

**1.2.1 卫星间对比的时空匹配准则** 表 1 显示了两颗卫星在空间分辨率上面存在一定的差异。这些 XCH<sub>4</sub> 观测值在空间和时间上都是不规则分布, 由于气溶胶和云等地球物理因素的影响, 造成了许多空隙。GOSAT 和 TROPOMI XCH<sub>4</sub> 观测值的时空尺度不同, 导致 GOSAT 的有效观测值远小于 TROPOMI<sup>[10]</sup>, 并且两颗卫星之间的覆盖率也存在一定的差异, GOSAT 为 41.92%, 而 TROPOMI 为 97.03%。因此为便于比较, 本研究计算每个 1°×1° 空间分辨率网格内的 XCH<sub>4</sub> 值和数据量。这一选择与大多数全球模式使用的典型分辨率 1°×1° 一致。具体步骤如下: 1) 统计每个 1°×1° 网格内的卫星观测到 XCH<sub>4</sub> 的数据量, 并将同一纬度的数据点相加, 以分析两颗卫星在不同纬度上的可用数据差异。2) 对于 XCH<sub>4</sub>, 首先确定 1°×1° 范围内的所有 XCH<sub>4</sub> 的值, 然后计算它们的均值以便获取到网格级别的值。之后对不同纬度下的 XCH<sub>4</sub> 均值和标准差进行计算, 并对 XCH<sub>4</sub> 全球尺度的年际变化进行分析。3) 在分析两颗卫星 XCH<sub>4</sub> 的差异 (ΔXCH<sub>4</sub>) 时, 对每个对应的格网直接采用如式 (1) 所示的差分方法。为了比较不同纬度带之间的差异, 对每 1° 纬度带内所有网格的差异进行了平均, 并研究了它们随纬度的变化。4) 在时间尺度上, 分析每颗卫星在 4 个时期 (季节) 的点计数和 XCH<sub>4</sub> 值, 其中 3 月、4 月、5 月 (MAM, March April May); 6 月、7 月、8 月 (JJA, June July August); 9 月、10 月、11 月 (SON, September October November); 12 月、1 月、2 月 (DJF, December January February)。

$$DXCH_4 = XCH_{4TRO} - XCH_{4COS} \quad (1)$$

式中的 TRO 和 GOS 分别代表 TROPOMI 和 GOSAT, 用于计算它们的 XCH<sub>4</sub> 差。

**1.2.2 时间序列分析方法** STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess) 是一个非常通用和稳健强硬的分解时间序列的方法, 其中 Loess 是一种估算非线性关系的方法。利用 STL 方法<sup>[53]</sup>对 GOSAT

和 TROPOMI 两颗卫星的原始数据进行时间序列的分解.将原始时间序列数据分解为长期趋势(关于位置 $(x,y)$ 的函数)和时间 $(t)$ ,一个季节循环(关于位置和月份 $(m)$ 的函数)和年际变化(IAV)<sup>[54]</sup>.通过公式(2)计算如下:

$$\text{IAV}(x,y,t)=\text{Raw}(x,y,t)-\text{Trend}(x,y,t)-\text{Season}(x,y,m) \quad (2)$$

首先,由于南极洲常年被冰雪覆盖没有观测数据,因此将两个卫星的数据分为 6 个大洲分别是 a 北美洲、b 非洲、c 亚洲、d 欧洲、e 南美洲、f 大洋洲;然后对原始(Raw)时间序列进行拟合来计算每个位置的观测趋势并去除.之后,通过计算每个月数据的平均值来计算出平均季节变化周期;最后通过公式(2),将趋势以及季节周期去除,得到年际变化.

**1.2.3 卫星和 TCCON 的匹配标准** 在将两颗卫星的数据与 TCCON 地面站点的数据进行匹配时,由于 GOSAT 采用打点式的观测方式,而 TROPOMI 采用推扫式,两颗卫星在数据覆盖率存在明显的差异. TCCON 站点虽然提供高时间分辨率的数据,但是其空间覆盖率有限,这些差异可能导致数据整合时出现偏差.因此,采取以下几个步骤来解决它们之间的差异:首先进行空间上的匹配,确定每个 TCCON 站点的位置.接下来,在  $1^\circ \times 1^\circ$  的空间范围内对每个点进行中心化,并从该范围内筛选卫星 XCH<sub>4</sub> 值.然后将这些值进行平均,以创建空间匹配.之后进行时间匹配:考虑到每分钟尺度上的匹配点较少,基于 TCCON 站点的采集时间,匹配了时间范围为  $\pm 30\text{min}$  的卫星数据.将这些值取平均值,形成最终值与 TCCON 进行匹配,匹配结果见表 2.由于 TCCON 数据是高频值,需对一小时 TCCON 数据和匹配的卫星值进行平均,得到最终结果进行分析.最后,为了评估卫星值与 TCCON 数据的一致性在空间上的差异,分别计算了北半球(以下简称 NH)和南半球(以下简称 SH)的情况.

**1.2.4 评估方法** 本研究采用相关系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、期望值( $\bar{X}$ )和标准差( $\sigma$ )4 个指标对卫星和 TCCON 的  $\Delta\text{XCH}_4$  进行评估.这些指标的数学表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: $n$  表示总匹配数量; $X$  为来自卫星的 XCH<sub>4</sub>;  $Y$  为来自 TCCON 的 XCH<sub>4</sub>;  $\hat{Y}$  为 TCCON 的预测值;而  $\bar{Y}$  则是 TCCON 的数学期望.

关于  $\bar{X}$  和  $\sigma$ ,它们满足正态分布的公式为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: $X$  为 TCCON 与卫星匹配后的 XCH<sub>4</sub> 之差;  $\bar{X}$  为  $\Delta\text{XCH}_4$  的均值;  $\sigma$  为标准差.

## 2 结果与分析

### 2.1 季节、空间和纬度分析与观测数量时空分布

从季节分布来看,JJA 期间两颗卫星的 XCH<sub>4</sub> 数据量最高,分别达到  $1.23 \times 10^8$  (TROPOMI) 和  $1.01 \times 10^5$  (GOSAT),这可能与全球植被生长和生物活动的增加有关.除南美洲北部在 4 个季节中的 GOSAT 数据量较低外,两颗卫星在不同季节的数据量显示明显的相似性.进一步分析非洲北部、亚洲西南部和大洋洲表现出高度的一致性.这可能与这些地区特定的地理与环境因素有关,如农业活动和自然生态系统的分布.在纬度带分析中,赤道附近的数据量在 4 个季节内相对较少.而北半球(NH)的  $20^\circ \sim 40^\circ\text{N}$  和南半球(SH)的  $20^\circ \sim 30^\circ\text{S}$ ,数据量达到峰值.然而造成南北半球高纬数据捕获稀疏的主要原因可能是 NH 高纬度地区,由于 DJF 时期太阳光不足,探空次数较少;而在 SH 高纬度地区的限制因素可能是海拔高度和岛屿位置<sup>[7]</sup>.此外,JJA 期间,两颗卫星在  $30^\circ\text{S}$  附近的数据点密度达到最高.

值得注意的是 TROPOMI 的 XCH<sub>4</sub> 数据量 ( $4.49 \times 10^8$ ) 约为 GOSAT ( $3.35 \times 10^5$ ) 的 1300 倍,这一差异可能源于两种传感器的技术规格和观测策略.特别是在 DJF 时期,GOSAT 的数据在 SH 相对缺失的,而 TROPOMI 则存在明显的峰值.

### 2.2 卫星 XCH<sub>4</sub> 对比

**2.2.1 XCH<sub>4</sub> 空间分布对比** 图 3 表明两颗卫星显示出相似的 XCH<sub>4</sub> 空间分布特征,均表现出 NH 的 XCH<sub>4</sub> 浓度高于 SH (NH 均值在  $(1872 \sim 1875) \times 10^9$ , SH 在  $(1828 \sim 1833) \times 10^9$ ),且低值区域分布在  $20^\circ\text{S}$  以南的地区.与 SH 相比,NH 低纬度地区在 SON 和 DJF

中的全球 XCH<sub>4</sub> 有显著的增加.由图 3 可见,XCH<sub>4</sub> 值呈现出赤道向两极递减的趋势,这一趋势在 4 个观测时期中均得到体现,进一步证实了纬度对 XCH<sub>4</sub> 分布的影响.此外,两颗卫星在 NH 的 XCH<sub>4</sub> 值相比 SH 表现出更大的标准差(图 3 中浅蓝色阴影),说明 NH 地区 XCH<sub>4</sub> 的分布更为离散.对比发现,TROPOMI 数据显示在 JJA 时期的 XCH<sub>4</sub> 值变化并未出现明显的

峰值,变化程度较小;相反,GOSAT 的 XCH<sub>4</sub> 在 4 个时期中都表现出峰值,尤其在 SON 和 DJF 时期最为明显.在分析 10°S~10°N 纬度范围内的 XCH<sub>4</sub> 变化时,TROPOMI 数据显示出先下降后上升的趋势,而 GOSAT 则未表现出这种模式.此外,GOSAT 的 XCH<sub>4</sub> 数据在赤道附近变异性更大,这可能与使用的离散采样方法有关.

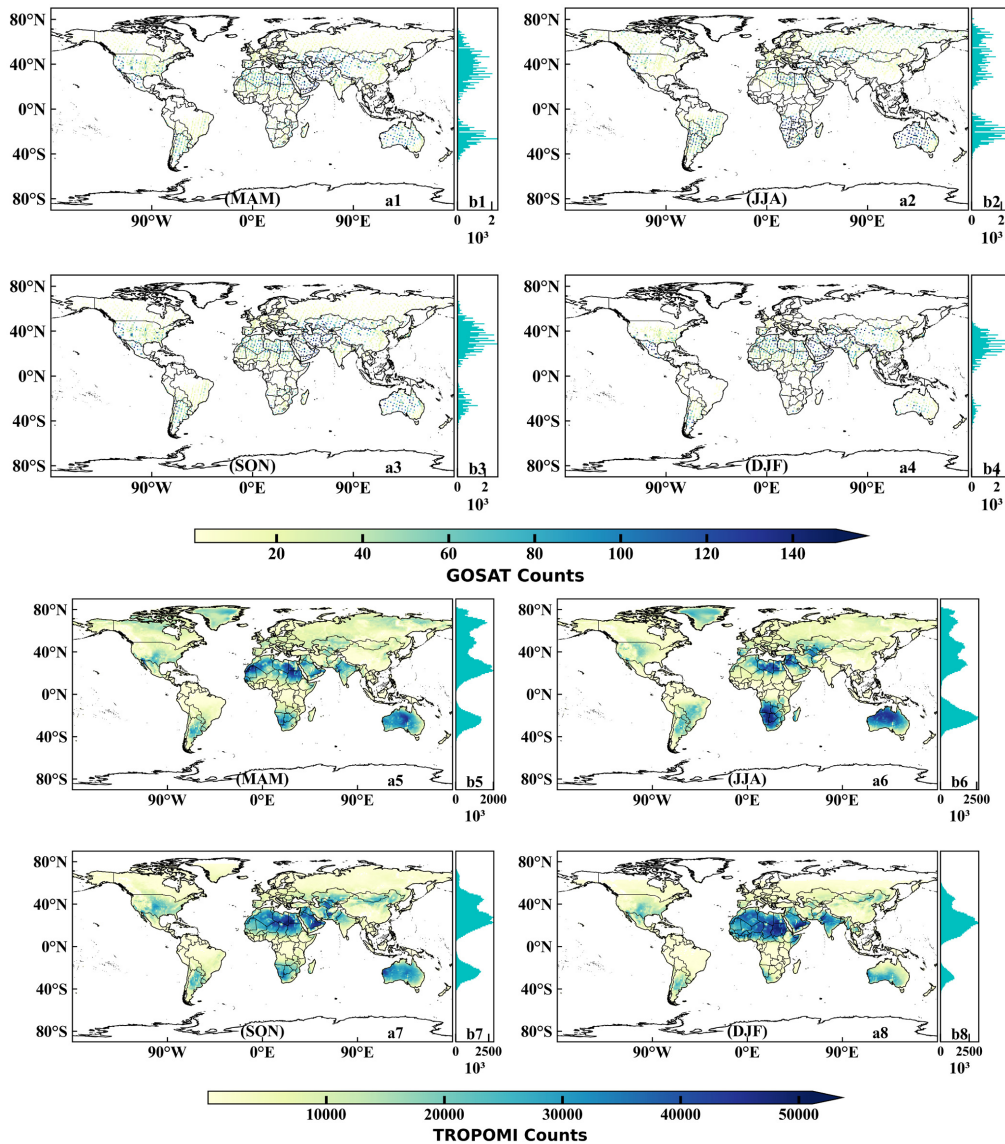


图 2 GOSAT 和 TROPOMI 在四个时期的数据分布  
Fig.2 Data distribution of GOSAT and TROPOMI in four periods

审图号为 GS(2021)648 号

2.2.2 XCH<sub>4</sub> 年际及季节对比 对 2019~2022 年期间 GOSAT 和 TROPOMI 两颗卫星观测的 XCH<sub>4</sub> 数据进行了年际和季节变化的比较,发现全球 XCH<sub>4</sub> 浓度从 1790×10<sup>-9</sup> 增长到 1920×10<sup>-9</sup>,且这一增长趋势在

6 大洲均有记录(图 4).进一步分析发现,除北美洲和非洲外,GOSAT 在其他区域记录的增长率普遍高于 TROPOMI(表 3),这可能与两颗卫星在不同区域的观测数量有关.两者均显示出明显的季节性变化特

征:夏季浓度较低,冬季浓度较高(图 4a2~f2).这种季节性变化通过大气中羟基自由基(OH)的浓度变化来解释.OH 是 CH<sub>4</sub> 的主要消耗者,OH 浓度在夏季较高,导致 CH<sub>4</sub> 消耗加速,而冬季相反,这导致 CH<sub>4</sub> 浓度呈现出季节性变化<sup>[55-56]</sup>.此外,CH<sub>4</sub> 的季节性变化还受到稻田和植被生长周期、季风活动以及温度和湿度变化的影响.例如,沼泽和湖泊等厌氧环境对 CH<sub>4</sub> 排放中起到重要作用<sup>[57-59]</sup>.

在对两颗卫星数据进行的年际变化对比分析中,NH 中各大洲的 XCH<sub>4</sub> 变化范围均在 $\pm 5 \times 10^{-9}$  以内(图 4a3~f3),表明它们的年际变异性相对较小.相比之

下,SH 中各大洲的变化范围则显著较大,达到 $\pm 15 \times 10^{-9}$ ,表明 SH 各大洲在年际变化程度上高于 NH.特别是在 2022 年,两颗卫星的观测数据显示 NH 中各大洲普遍呈现增长趋势,而 SH 则相反.然而,在 2020 年和 2021 年某些大洲上的观测结果存在明显的差异.进一步通过计算年际振幅均值(表 3)进行深入分析.结果显示,GOSAT 卫星在除大洋洲外的其他五个大洲上记录的年际振幅均值普遍高于 TROPOMI 卫星,尤其在南美洲,两者之间的差异达到了最大值  $4.04 \times 10^{-9}/a$ .此外,SH 的年际振幅均值普遍高于 NH,其中南美洲的振幅均值尤为显著,均超过了  $10 \times 10^{-9}/a$ .

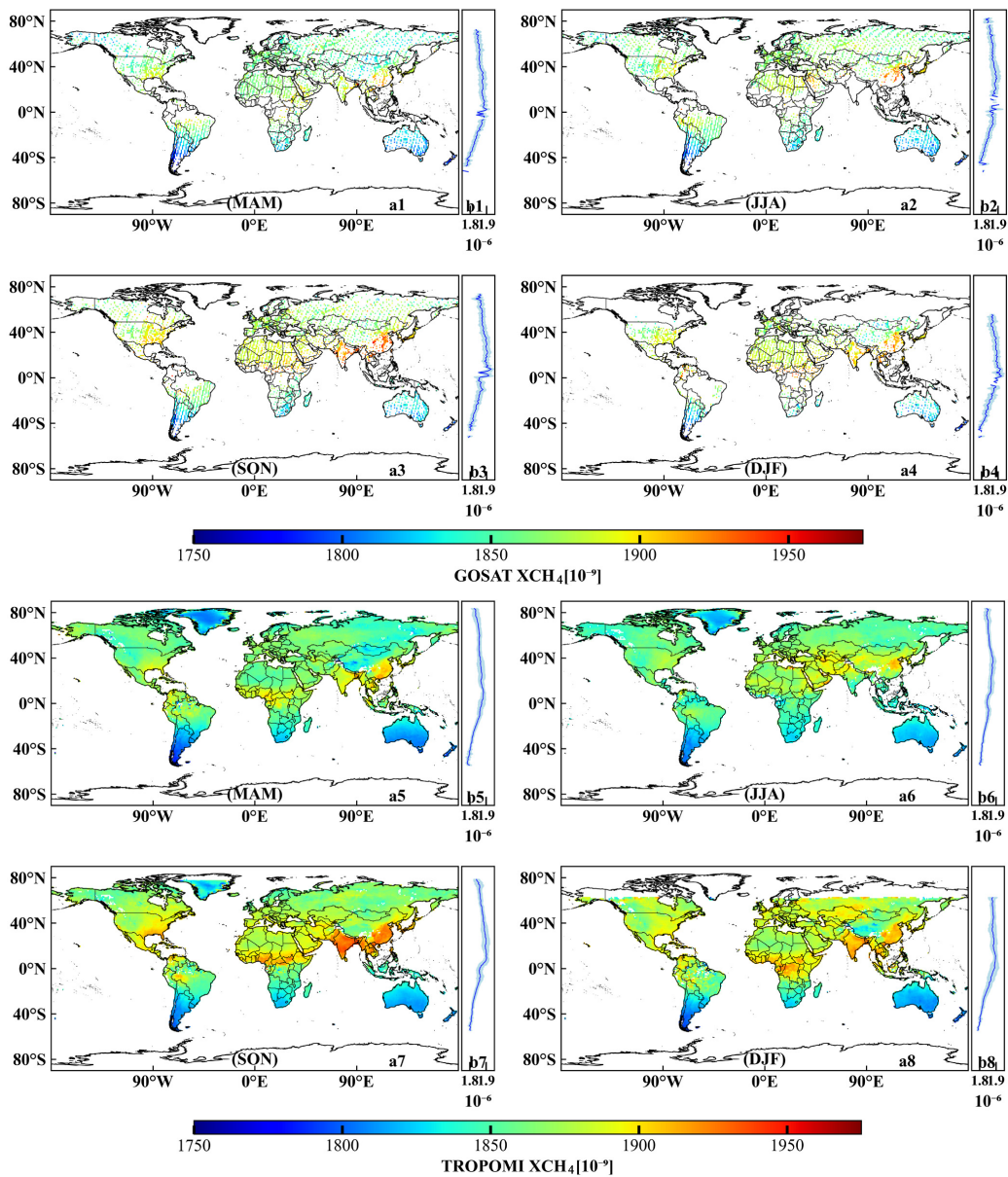


图 3 GOSAT 和 TROPOMI 的 XCH<sub>4</sub> 值四个时期的空间分布  
 Fig.3 Spatial distribution of XCH<sub>4</sub> values of GOSAT and TROPOMI in four periods

审图号为 GS(2021)648 号

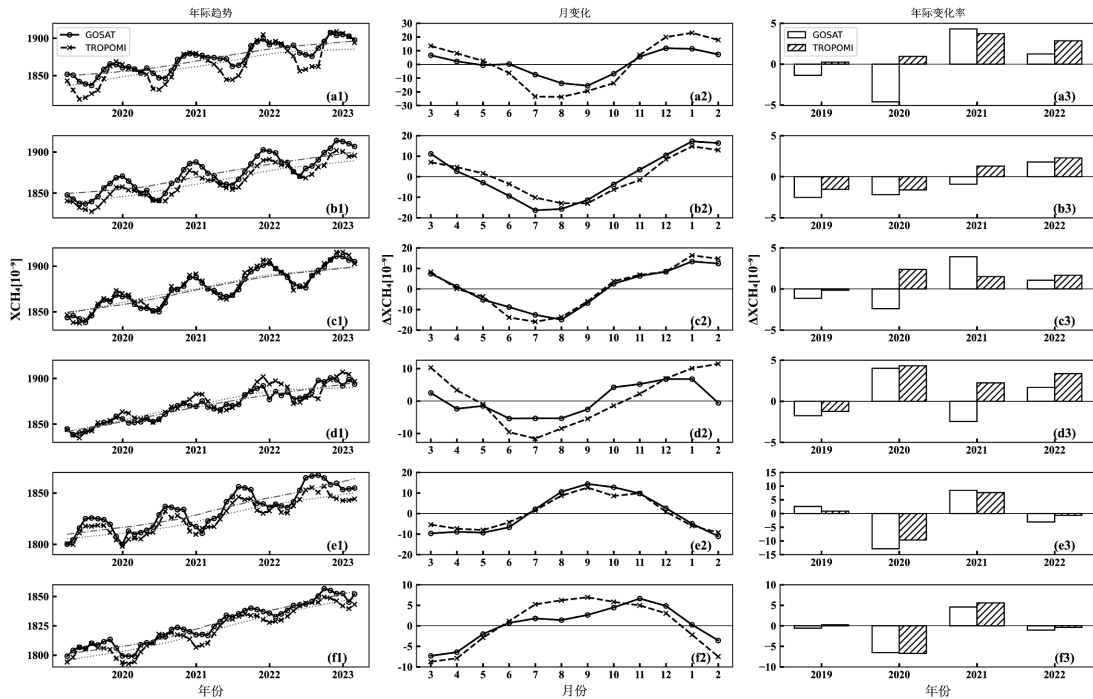


图 4 2019~2022 年全球 XCH<sub>4</sub> 时间变化趋势

Fig.4 Global XCH<sub>4</sub> temporal variation trend from 2019 to 2022

其中绿色为 GOSAT,蓝色为 TROPOMI;a1-f1 中曲线为时间序列,虚线为通过 STL 方法获得的趋势;a2-f2 为通过 STL 方法获得的季节变化周期;a3-f3 为通过公式(2)得到的年际变化率(IAV)

表 3 GOSAT 和 TROPOMI 在六大洲内的年际增长率和年际振幅均值(10<sup>-9</sup>/a)

Table 3 The interannual growth rate and interannual amplitude mean of the GOSAT and TROPOMI in six continents(10<sup>-9</sup>/a)

区域	年际增长率(10 <sup>-9</sup> /a)		年际振幅均值(10 <sup>-9</sup> /a)	
	GOSAT	TROPOMI	GOSAT	TROPOMI
北美洲	13.08±2.70	13.34±2.99	5.04	1.45
非洲	13.92±2.19	14.12±1.74	1.44	1.32
亚洲	13.54±2.72	13.51±3.16	3.48	1.91
欧洲	13.94±1.80	13.23±5.29	5.46	2.92
南美洲	14.10±3.07	12.28±2.97	16.10	12.06
大洋洲	14.28±2.39	14.09±2.06	7.57	8.40

2.2.3 ΔXCH<sub>4</sub> 时空分布对比 从图 5 可以看出,两颗卫星浓度之间存在一定的差异,且不同季节的 ΔXCH<sub>4</sub> 不同.2019~2022 年间,TROPOMI 与 GOSAT 平均差异为-1.72×10<sup>-9</sup>,表明 TROPOMI 的测量值普遍低于 GOSAT.特别是在 JJA 期间,ΔXCH<sub>4</sub> 的值最大 (-5.00×10<sup>-9</sup>),而在 MAM 期间最小(0.32×10<sup>-9</sup>),季节间差距达到 5.32×10<sup>-9</sup>.此外,MAM 和 DJF 的标准误差较高,显示这两个时期的测量变异性较大.从空间差异(图 6)来看,两颗卫星在 4 个时期的差值空间分布总体一致,个别区域存在南北差异.在南美洲、非洲、

大洋洲和亚洲南部,GOSAT 的值高于 TROPOMI,而在非洲区域的差异更为明显.

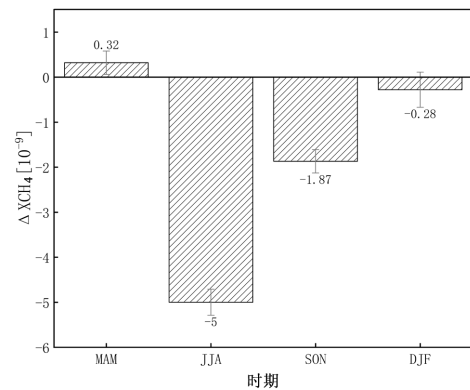


图 5 GOSAT 和 TROPOMI 的 XCH<sub>4</sub> 在 4 个时期的均值之差对比

Fig.5 Comparison of the mean difference of XCH<sub>4</sub> between GOSAT and TROPOMI in four periods

通过图 6 比较不同纬度带上的 ΔXCH<sub>4</sub>,发现两颗卫星之间的 ΔXCH<sub>4</sub> 均在±50×10<sup>-9</sup> 的范围内.在 40°S~30°N,ΔXCH<sub>4</sub> 主要呈现负值,表明 TROPOMI 的值普遍低于 GOSAT.此外,SH 的 ΔXCH<sub>4</sub> 值大于 NH,这表明两颗卫星的差异主要集中在 SH.在

MAM、JJA 和 SON 时期,观察到相似差异变化,而在 DJF 时期,30°~60°N 的情况与其他时期相反,表明

此时期和纬度范围内,TROPOMI 观测的值小于 GOSAT 的观测值。

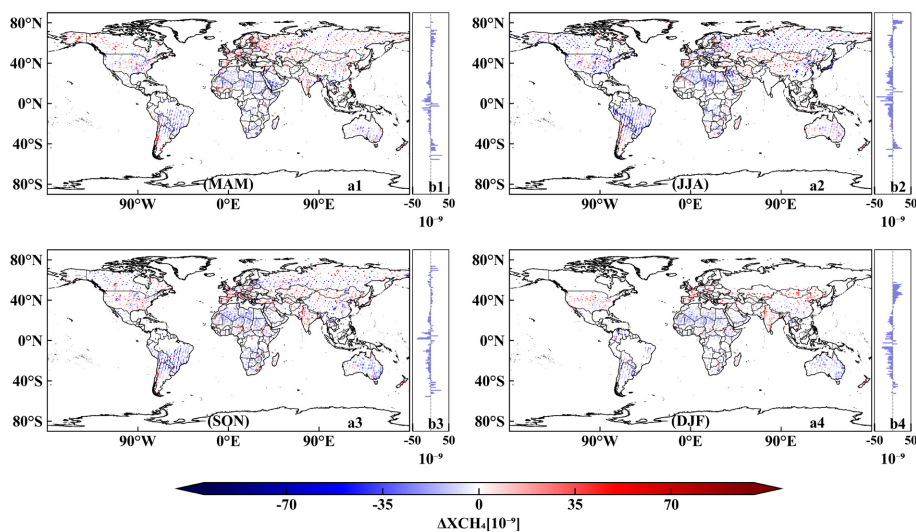


图 6 GOSAT 和 TROPOMI XCH<sub>4</sub> 之差( $\Delta XCH_4$ )的时空分布

Fig.6 Distribution of the difference ( $\Delta XCH_4$ ) between GOSAT and TROPOMI XCH<sub>4</sub>

审图号为 GS(2021)648 号

## 2.3 评估卫星与 TCCON 的 $\Delta XCH_4$ 差异评估

### 2.3.1 $\Delta XCH_4$ 评估

TCCON 是验证多源卫星 XCH<sub>4</sub> 一致性的最有价值的地面数据来源。根据 TCCON 的观测数据,全球 XCH<sub>4</sub> 约为  $1859.25 \times 10^{-9}$ , 南北半球分别约为  $1833.57 \times 10^{-9}$  和  $1871.05 \times 10^{-9}$ 。然而 GOSAT 的全球 XCH<sub>4</sub> 约为  $1866.86 \times 10^{-9}$ , 南北半球分别约为  $1838.16 \times 10^{-9}$  和  $1875.68 \times 10^{-9}$ ; TROPOMI 全球 XCH<sub>4</sub> 约为  $1864.28 \times 10^{-9}$ , 南北半球分别约为  $1840.27 \times 10^{-9}$  和  $1870.87 \times 10^{-9}$ 。这些数据表明,两颗卫星观测的 XCH<sub>4</sub> 和 TCCON 数据相比存在一定的差异,尤其在南北半球上的差异更明显。为了能够更加准确的分析出卫星与 TCCON 之间的差异,将匹配后的数据分别进行了南北半球的分离,然后分别进行回归拟合,如图 7。

首先,在 NH 中,TROPOMI 的匹配数量(N)为 7538,GOSAT 为 1768。在 SH,TROPOMI 为 1444,GOSAT 为 187。表明 TROPOMI 的数据量显著多于 GOSAT。两颗卫星数据的拟合直线与 1:1 参考线接近,说明卫星反演得到的 XCH<sub>4</sub> 具有较高的精度。分析  $R^2$  和 RMSE 时,在 NH,GOSAT 的  $R^2$  值(0.841)高于 TROPOMI 的  $R^2$  值(0.732),表明 GOSAT 的拟合度略高。且 GOSAT 的 RMSE 值(9.188)显著低于 TROPOMI 的 RMSE 值(14.563),可以看出虽然

GOSAT 的数据点少,但其相关性系数和 RMSE 均优于 TROPOMI,表明 GOSAT 数据在北半球更接近 TCCON 测量值。而在 SH 中,TROPOMI 的  $R^2$  值(0.845)略高于 GOSAT 的  $R^2$  值(0.836),但两者相差不大。而 RMSE 则是 GOSAT(10.344)低于 TROPOMI(13.608),尽管在 SH 中 GOSAT 的数据量较少,但其相关系数与 TROPOMI 相近。回归分析显示,TROPOMI 和 GOSAT 在 NH 的斜率分别为 0.932 和 0.934,SH 为 0.936 和 0.980,表明两颗卫星观测的 XCH<sub>4</sub> 与 TCCON 数据高度相关,尤其是 GOSAT 的斜率更接近 1。此外,GOSAT 在南北半球的截距为 129.032 和 37.353,更接近 TCCON 真实基线,表明其系统误差较小。图 8 展示了对  $\Delta XCH_4$  的频率分布正态变换特征,利用式(4)进行拟合的概率密度分布图,显示出  $\Delta XCH_4$  的值在  $\pm 60 \times 10^{-9}$  之间。在 NH,TROPOMI 的数据分布较为集中,均值  $\bar{x}$  为  $-5.20 \times 10^{-9}$ ,而 GOSAT 的为  $-1.55 \times 10^{-9}$ ,均小于 0,表明两颗卫星在 NH 的反演结果高估了 XCH<sub>4</sub>,其中 TROPOMI 的高估程度更为显著。SH 方面,TROPOMI 的均值小于 0,而 GOSAT 相反,显示出二者存在不同的差异。在 NH,GOSAT 的  $\sigma$  为 14.67,而 TROPOMI 为 9.31,SH 中分别为 13.79 和 10.38,显示出它们间的差异。尽管 GOSAT 的标准差更大,表示数据分布范围更广,但在南北半球的系

统偏差都小于 TROPOMI,这表明 GOSAT 的数据虽

然波动较大,但总体精度优于 TROPOMI.

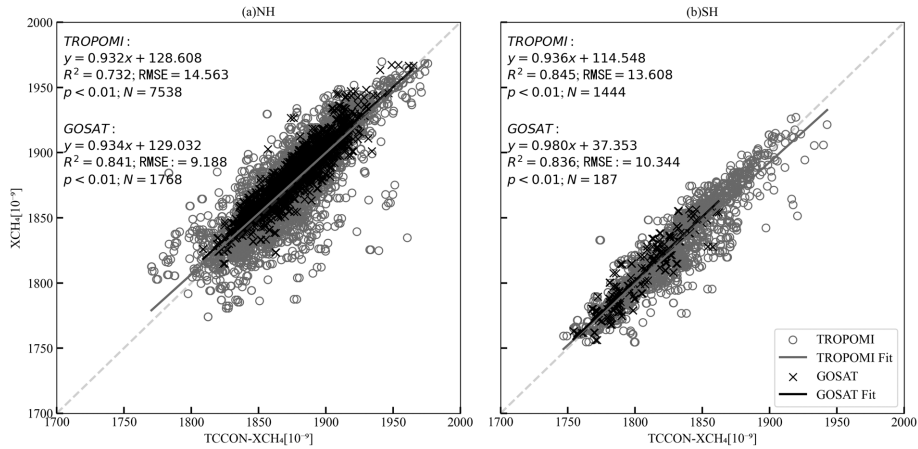


图7 GOSAT 和 TROPOMI 与 TCCON 的 XCH<sub>4</sub> 验证结果

Fig.7 XCH<sub>4</sub> verification results of GOSAT and TROPOMI with TCCON

橙色为 GOSAT,蓝色为 TROPOMI,NH 与 SH 分别为南北半球,灰色虚线为 1:1 的参考线,实线为回归拟合线.N 表示匹配的数量, $R^2$  为决定系数,RMSE 为均方根误差

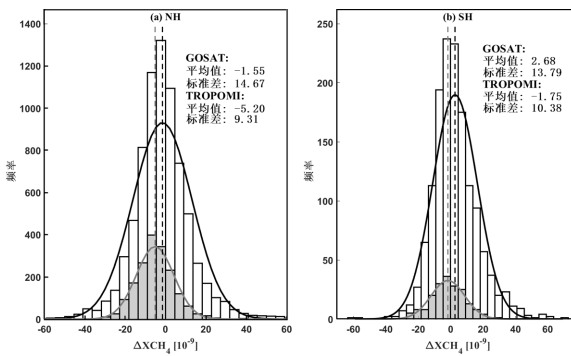


图8 TCCON 与 GOSAT 和 TROPOMI XCH<sub>4</sub> 之差的频率分布

Fig.8 Frequency distribution of the difference between TCCON and XCH<sub>4</sub> of GOSAT and TROPOMI

其中红色代表 GOSAT,蓝色代表 TROPOMI,实线是用公式(4)对频率分布的拟合线,虚线则是对应图中的  $\bar{x}$  值(平均值), $\sigma$  为标准差

**2.3.2 ΔXCH<sub>4</sub> 在季节和半球尺度上的评估** 图 9 展示 TCCON 与两颗卫星在南北半球四个季节 XCH<sub>4</sub> 差值(ΔXCH<sub>4</sub>)的均值.在 NH 中,两颗卫星的 ΔXCH<sub>4</sub> 显示出显著的差异:在 MAM 和 SON 期间,两者均为负值(ΔXCH<sub>4</sub><0),但 TROPOMI 较小.相反,在 JJA 期间,GOSAT 的 ΔXCH<sub>4</sub> 为最大负值(-8.64×10<sup>-9</sup>),而 TROPOMI 则相反.在 SH 中的差异为:MAM 期间,GOSAT 的 ΔXCH<sub>4</sub><0,TROPOMI 接近于零.而在 JJA 和 SON 期间,两者表现相反的趋势.总体来看,GOSAT 在大多数情况下的 ΔXCH<sub>4</sub><0,尤其是在 NH 的 MAM 和 JJA 期间,相比于 TCCON 来说,其值被高估.TROPOMI 仅在 NH 的 JJA 期间的 ΔXCH<sub>4</sub>>0,其

余期间的 ΔXCH<sub>4</sub><0;而在 SH 中的四个季节中都表现出 ΔXCH<sub>4</sub>>0,其中 SON 期间的 ΔXCH<sub>4</sub> 最大(4.93×10<sup>-9</sup>).这些结果表明,GOSAT 与 TROPOMI 在南北半球的不同季节中的 XCH<sub>4</sub> 观测存在明显的差异.这种差异可能反映了两颗卫星在不同条件下的数据处理和观测能力的差异,以及季节性变化和地理位置对 XCH<sub>4</sub> 浓度的影响.

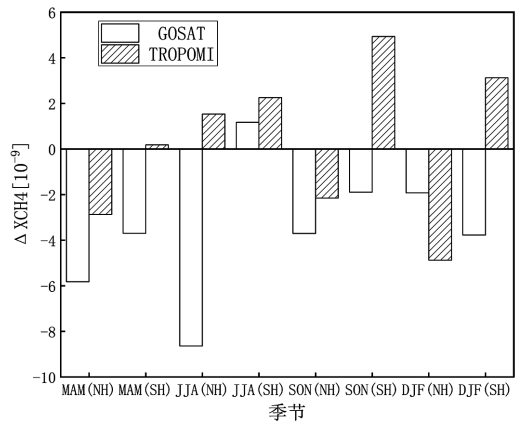


图9 南北半球的四个季节中 TCCON 与 GOSAT 和 TROPOMI 的 XCH<sub>4</sub> 差的平均值

Fig.9 The average values of the XCH<sub>4</sub> differences between TCCON and GOSAT and TROPOMI in the four seasons in the northern and southern hemisphere

2.4 讨论

本研究评估了 GOSAT 和 TROPOMI 两颗卫星的 XCH<sub>4</sub> 反演结果,发现它们在观测策略、空间覆盖

范围和测量精度上存在显著差异.GOSAT 使用离散采样点,空间覆盖较为局限,而 TROPOMI 采用连续像元观测,能够提供更广泛的空间覆盖.尽管两颗卫星的季节性 XCH<sub>4</sub> 测量趋势相似,但 GOSAT 记录的 XCH<sub>4</sub> 值普遍高于 TROPOMI,且在中纬度地区的波动性更大.

这些差异可以归因于几个关键因素:首先,GOSAT 和 TROPOMI 的观测策略和空间分辨率差异较大.GOSAT 的离散采样模式可能导致其无法准确代表某些区域的数据,而 TROPOMI 通过更高的时空分辨率,能够更精确地捕捉到甲烷浓度的局部变化.其次,反演算法的不同,尤其是在气溶胶、云层以及辐射传输模型的处理方式上,可能会影响两颗卫星的 XCH<sub>4</sub> 测量结果.此外,中纬度地区云层和气溶胶的影响较为显著,这可能是 GOSAT 数据波动性较大的原因.最后,数据的时间范围差异也可能影响结果的比较,特别是在季节性变化或短期气候波动的背景下.

在  $\Delta XCH_4$  的比较中,不同时间段和纬度带上两颗卫星存在差异,研究同时表明,与 TCCON 数据相比,两颗卫星的精度较高,但 GOSAT 的数据相对更可靠.这些发现表明,尽管 GOSAT 和 TROPOMI 在全球范围内展现了较高的一致性,但在某些区域和季节,仍存在显著的差异.因此,结合多颗卫星的数据,以实现全球范围内更精确的甲烷监测至关重要.理解这些观测差异的原因,不仅能推动卫星反演算法的改进,还能为数据校准方法的完善提供方向,进而提高未来卫星观测数据的质量和可靠性.

本研究的局限性主要体现在数据时间范围较短,影响了对长期趋势的评估;此外,尽管数据已经通过反演过程生成,但不同卫星的测量算法和数据处理方法可能导致数据产品间的差异,这些差异可能影响最终结果的准确性.此外,云层和气溶胶效应的定量影响尚需进一步研究.在未来的工作中,计划结合更多卫星数据,并采用模式模拟数据,进一步探讨不同时间和空间分辨率下 XCH<sub>4</sub> 数据的表现.同时,长期趋势分析将有助于更好地理解甲烷浓度的变化,为全球气候政策和减缓战略的评估提供科学依据.

### 3 结论

3.1 两颗卫星提供 XCH<sub>4</sub> 产品在 1°×1° 的网格单元内的数据量存在显著差异.TROPOMI 数据量约为

GOSAT 的 1300 倍.两颗卫星在非洲北部,亚洲西南部和大洋洲地区捕获到更多的数据,而在极地地区捕获的数据较少.

3.2 比较 1°×1° 网格单元内 4 个时期 XCH<sub>4</sub> 的均值发现,XCH<sub>4</sub> 从赤道向两极递减,且 4 个时期中北半球的 XCH<sub>4</sub> 值(GOSAT 为  $1875.67 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI 为  $1872.04 \times 10^{-9}$ ) 高于南半球(GOSAT 为  $1833.43 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI 为  $1828.45 \times 10^{-9}$ ).接着,通过分析两颗卫星在 2019~2022 年的时间变化,结果显示两颗卫星在 6 个区域内均呈现出逐年上升的趋势,并表现出冬高夏低的特征.在年际变化的对比中,尽管两颗卫星总体上表现出一致的趋势,但在 2019 年(GOSAT:  $-1.37 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI:  $0.25 \times 10^{-9}$ ) 与 2020 年(GOSAT:  $-4.61 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI:  $0.95 \times 10^{-9}$ ) 的北美洲,2021 年(GOSAT:  $-0.92 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI:  $1.30 \times 10^{-9}$ ) 的非洲,2020 年(GOSAT:  $-2.40 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI:  $2.38 \times 10^{-9}$ ) 的亚洲以及 2021 年(GOSAT:  $-2.46 \times 10^{-9}$ ,TROPOMI:  $2.23 \times 10^{-9}$ ) 的欧洲,这些区域中两颗卫星的变化存在显著差异,这可能是由于气候变化、地表活动或其他因素导致的大气组成变化,从而影响到卫星观测的 CH<sub>4</sub> 浓度.在比较两颗卫星的  $\Delta XCH_4$  时,发现在 JJA 期间的值( $-5.00 \times 10^{-9}$ ) 最大.全球尺度分析表明,TROPOMI 的值高于 GOSAT.此外,从区域上看,两颗卫星在巴西( $-8.87 \times 10^{-9}$ ),北非( $-9.00 \times 10^{-9}$ ) 和亚北极地区( $2.82 \times 10^{-9}$ ) 表现出明显的差异.

3.3 研究显示,在全球及南北半球尺度上,TCCON 与 GOSAT 的差值约为  $-7.61 \times 10^{-9}$  (南北半球分别为  $-4.59 \times 10^{-9}$  和  $-4.63 \times 10^{-9}$ ),而与 TROPOMI 的差值约为  $-5.03 \times 10^{-9}$  (南北半球分别为  $-6.7$  和  $0.18 \times 10^{-9}$ ).分析表明,GOSAT 和 TROPOMI 在数据特性上存在差异.GOSAT 在北半球的拟合精度较高( $R^2: 0.841$ , RMSE: 9.188),而 TROPOMI 的空间覆盖范围更广.回归分析结果显示,GOSAT 在南北半球的观测值与 TCCON 数据更为接近,其回归斜率接近 1,截距较小.频率分布分析表明,GOSAT 的标准差在南北半球均高于 TROPOMI.此外,在季节和南北半球尺度上的  $\Delta XCH_4$  对比中,两颗卫星与 TCCON 之间存在显著差异.

#### 参考文献:

- [1] Association W M. State of the global climate 2021 [R]. 2022.
- [2] Van Soest H L, den Elzen M G J, van Vuuren D P. Net-zero emission

- targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement [J]. *Nature Communications*, 2021,12(1):2140.
- [3] Butz A, Galli A, Hasekamp O, et al. TROPOMI aboard sentinel-5 precursor: Prospective performance of CH<sub>4</sub> retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120:267–276.
- [4] Jacob D J, Varon D J, Cusworth D H, et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022,22(14):9617–9646.
- [5] Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al. Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse Gases Observing Satellite [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2010,3:4791–4833.
- [6] 张绍会,谢冰,张华,等.全球和东亚地区 CH<sub>4</sub> 浓度时空分布特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(12):4401–4408.  
Zhang ShaoHui Z S H, Xie Bing X B, Zhang Hua Z H, et al. The spatial-temporal distribution of CH<sub>4</sub> over globe and East Asia [J]. 2018.
- [7] 冯敏玉,张根,夏玲君,等.长江中下游六省大气甲烷柱浓度时空分布 [J]. *地球化学*, 2021,50(1):121–132.  
Feng M Y, Zhang G, Xia L J, et al. Spatial and temporal distribution of atmospheric methane in middle-low reaches of Yangtze River based on satellite observations [J]. *Geochimica*, 2021,50(1):121–132.
- [8] Song H, Sheng M, Lei L, et al. Spatial and temporal variations of atmospheric CH<sub>4</sub> in monsoon Asia detected by satellite observations of GOSAT and TROPOMI [J]. *Remote Sensing*, 2023,15(13):3389.
- [9] Yeonjin Jung, Jhoon Kim, Woogyung Kim, et al. Impact of aerosol property on the accuracy of a CO<sub>2</sub> retrieval algorithm from satellite remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2016,8(4):322.
- [10] O'dell C W, Eldering A, Wennberg P O, et al. Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8ACOS algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018,11(12):6539–6576.
- [11] Ni Q, Zhou M, Wang J, et al. Intercomparison of CH<sub>4</sub> products in China from GOSAT, TROPOMI, IASI, and AIRS satellites [J]. *Remote Sensing*, 2023,15(18):4499.
- [12] R Liang, Y Zhang, Y Zhang, et al. East Asian methane emissions inferred from high-resolution inversions of GOSAT and TROPOMI observations: A comparative and evaluative analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023,23(14):8039–8057.
- [13] Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al. The total carbon column observing network [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011,369(1943):2087–2112.
- [14] Griffith David W T, Vanessa S, Andrews Arlyn E, et al. Bias corrections of GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016,9(8):3491–3512.
- [15] Zhen Qu, Daniel J Jacob, Lu Shen, et al. Global distribution of methane emissions: a comparative inverse analysis of observations from the TROPOMI and GOSAT satellite instruments [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021,21(18):14159–14175.
- [16] M Zhou, B Dils, P Wang, et al. Validation of TANSO-FTS/GOSAT XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> glint mode retrievals using TCCON data from near-ocean sites [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016,3(3):1415–1430.
- [17] Schepers D, Guerlet S, Butz A, et al. Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: Performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2012, 117(10):D10307.
- [18] 侯姗姗,雷莉萍,关贤华.温室气体观测卫星 GOSAT 及产品 [J]. *遥感技术与应用*, 2013,28(2):269–275,224.  
Shanshan H, Liping L, Xianhua G. A general introduction to greenhouse gases observing satellite (GOSAT) and its products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013,28(2):269–275.
- [19] Kuze A, Suto H, Nakajima M, et al. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. *Applied optics*, 2009,48(35):6716–6733.
- [20] Parker R, Boesch H, Cogan A, et al. Methane observations from the greenhouse gases observing satellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011,38(15):L15807.
- [21] Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, et al. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data. [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(6):1533–1547.
- [22] Veeffkind J.P, Aben I, McMullan K, et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,120:70–83.
- [23] Haili Hu, Landgraf J, Detmers R, et al. Toward global mapping of methane with TROPOMI: First results and intersatellite comparison to GOSAT [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018,45(8):3682–3689.
- [24] Hasekamp O P, Butz A. Efficient calculation of intensity and polarization spectra in vertically inhomogeneous scattering and absorbing atmospheres [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008,113(D20):D20309.
- [25] Lei L P, Guan X H, Zeng Z C, et al. A comparison of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration GOSAT-based observations and model simulations [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014,57:1393–1402.
- [26] Wunch D, Wennberg P O, Osterman G, et al. Comparisons of the orbiting carbon observatory-2 (OCO-2) X CO<sub>2</sub> measurements with TCCON [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017,10(6):2209–2238.
- [27] Notholt J, Petri C, Warneke T, et al. TCCON Data from Bremen (DE) [Z]. Release GGG2020.R0,022.
- [28] Morino I, Velasco V A, Hori A, et al. TCCON Data from Burgos, Philippines, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive [Z]. Caltech DATA, California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [29] Wennberg P O, Wunch D, Roehl C, et al. TCCON Data from California Institute of Technology, Pasadena, California, USA, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [30] Deutscher N M, Griffith C, Paton-Walsh V A, et al. Velasco, P. O. Wennberg, J.-F. Blavier, R. A. Washenfelder, Y. Yavin, G. Keppel-Aleks, and G. C. Toon. 2023. TCCON data from Darwin (AU), Release GGG2020.R0 [Z].

- [31] Iraci L, Podolske J, Roehl C, et al. TCCON Data from Armstrong Flight Research Center, Edwards, CA, USA, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [32] Wunch D, Mendonca J, Colebatch O, et al. TCCON Data from East Trout Lake, Canada, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [33] Strong K S, Roche J E, Franklin J, et al. TCCON data from Eureka, Canada, Release GGG2020R0. TCCON data archive, hosted by Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2020.
- [34] Sussmann R, Rettinger M. TCCON data from Garmisch, Germany, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [35] Cheng L, Wang W, Sun Y. TCCON data from Hefei, China, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [36] Weidmann D, Brownsword R, Doniki S. TCCON data from Harwell, Oxfordshire (UK), Release GGG2020R0 [Z].
- [37] Blumenstock T, Hase F, Schneider M, et al. TCCON Data from Izana, Tenerife, Spain, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [38] Shiomi K, Kawakami S, Ohyama H, et al. TCCON data from Saga, Japan, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [39] Hase F, Blumenstock T, Dohe S, et al. TCCON data from Karlsruhe, Germany, Release GGG2020R1. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [40] Pollard D F, Robinson J, Shiona H. TCCON Data from Izana, Tenerife, Spain, Release GGG2020R0. TCCON data from Lauder (NZ), Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [41] Petri C, Vrekoussis M, Rousogenous C, et al. TCCON Data from Izana, Tenerife, Spain, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [42] Buschmann M, Petri C, Palm M, et al. TCCON Data from Ny-Alesund [J]. Svalbard, Norway, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [43] Wennberg P O, Wunch D, Roehl C, et al. TCCON data from Lamont, Oklahoma, USA, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [44] Warneke T, Messerschmidt J, Notholt J, et al. TCCON data from Orleans, France, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [45] Wennberg P O, Roehl C, Wunch D, et al. TCCON data from Park Falls, Wisconsin, USA, Release GGG2020R1. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [46] Te Y, Jeseck P, Janssen C. TCCON data from Paris, France, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [47] De Mazière M, Sha M K, Desmet F, et al. TCCON data from Reunion Island (La Reunion), France, Release GGG2020R0. TCCON data archive, Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology, Pasadena, CA, U.S.A.
- [48] Morino I, Ohyama H, Hori A, et al. TCCON data from Rikubetsu, Hokkaido, Japan, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [49] Kivi R, Heikkinen P, Kyro E. TCCON data from Sodankyla, Finland, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [50] Morino I, Ohyama H, Hori A, et al. TCCON Data from Tsukuba, Ibaraki, Japan, 125HR, Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [51] Deutscher N M, Griffith D W T, Paton-Walsh C, et al. TCCON data from Wollongong (AU), Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [52] Zhou M, Wang P, Kumps N, et al. TCCON data from Wollongong (AU), Release GGG2020R0. In TCCON Data Archive; Caltech DATA [Z]. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 2020.
- [53] Gordan M I, Popescu C A, Călina J, et al. Spatial Analysis of Seasonal and Trend Patterns in Romanian Agritourism Arrivals Using Seasonal-Trend Decomposition Using LOESS [J]. Agriculture, 2024,14(2):229.
- [54] Guan Y, Keppel-Aleks G, Doney S C, et al. Characteristics of Interannual Variability in Space-based XCO<sub>2</sub> Global Observations [J]. EGU sphere, 2023,23(9):5355-5372.
- [55] Watson R T, Meira Filho L G, Sanhueza E, et al. Greenhouse gases: sources and sinks [J]. Climate change, 1992,92:25-46.
- [56] Thompson R L, Stohl A, Zhou L X, et al. Methane emissions in East Asia for 2000-2011 estimated using an atmospheric Bayesian inversion [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(9):4352-4369.
- [57] D Bruhn, T N Mikkelsen, J Øbro, et al. Effects of temperature, ultraviolet radiation and pectin methyl esterase on aerobic methane release from plant material [J]. Plant Biology, 2009,11:43-48.
- [58] 姚守平, 罗 鹏, 王艳芬, 等. 湿地甲烷排放研究进展 [J]. 世界科技研究与发展, 2007,(2):58-63.  
Yao S P, Luo P, Wang Y F, et al. Advances in the research on methane emissions from wetlands [J]. World Sci.-Technol. Res. Dev, 2007, 29:58-63.
- [59] He W, Han G, Email Author Song W, et al. Effects of tidal action on methane emissions over a salt marsh in the Yellow River Delta, China (Article) [J]. Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17):6238-6246.

**致谢:** 感谢日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)提供的 GOSAT XCH<sub>4</sub> 产品.同时,我们也要对 NASA 提供的 Sentinel-5P XCH<sub>4</sub> 产品集表示衷心的感谢.此外,TCCON 网络提供的高精度温室气体观测数据对我们的研究同样不可或缺.

**作者简介:** 曹 钰(1999-),男,辽宁朝阳人,沈阳建筑大学硕士研究生,主要研究方向为摄影测量与遥感.Caoy1030@163.com.