闫 琛,佘 璐,黄 涛,等.卫星 XCO_2 产品覆盖度及时空变化比较 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3644-3653.
Yan C, She L, Huang T, et al. A comparative study of the coverage and spatiotemporal variations of three satellite-based XCO_2 products over China [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3644-3653.

卫星 XCO_2 产品覆盖度及时空变化比较

闫 琛[1],佘 璐[1*],黄 涛[2],马大为[2],武 丹[2],冯自贤[1],赵红红[1] (1.宁夏大学地理科学与规划学院,宁夏 银川 750021；2.宁夏回族自治区遥感调查院,宁夏 银川 750021)

摘要：系统分析了 OCO-3、OCO-2 以及 GOSAT 卫星的大气 CO_2 柱浓度(XCO_2)二级产品在中国的时空覆盖度及分布规律,并进行了综合比较.结果表明:OCO-3、OCO-2 及 GOSAT 的二级 XCO_2 产品在中国的年均空间覆盖度分别为 43.38%,21.19%,0.40%,月均覆盖度分别为 4.77%,2.43%,0.16%,且 OCO-3 月均覆盖度呈现显著的奇数月低,偶数月高的特点,奇数月覆盖度为 2.23%,偶数月则高达 7.31%;3 个卫星产品的覆盖度呈现显著的空间分布差异,OCO-2 和 OCO-3 在华南和华中地区的覆盖度显著低于东北,西北和华北地区,GOSAT 在研究区的观测极为稀疏,主要集中在东部地区,OCO-3 在省会,工业城市等区域形成 20 余个热点观测区域,表现出显著高的覆盖度和观测频次;2019~2022 年间,3 个卫星产品的年均 XCO_2 呈现一致的增加趋势,但年增量显著下降,3 个产品都表现出春冬季 XCO_2 显著高于夏秋季的季节性规律;XCO_2 年均值呈现东部高于西部,南部高于北部的空间分布特征,但不同卫星得到的 XCO_2 极值子区域不同,且同一子区域不同产品的 XCO_2 值也表现出显著差异.

关键词：XCO_2；OCO-2；OCO-3；GOSAT；覆盖度
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3644-10

A comparative study of the coverage and spatiotemporal variations of three satellite-based XCO_2 products over China. YAN Chen[1], SHE Lu[1*], HUANG Tao[2], MA Da-wei[2], WU Dan[2], FENG Zi-xian[1], ZHAO Hong-hong[1] (1.School of Geography and Planing, Ningxia University, Yinchuan 750021, China；2.Remote Sensing Survey Institute of Ningxia, Yinchuan 750021, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3644~3653

Abstract：This study systematically analyzes and compares the spatiotemporal coverage and distribution patterns of the Level-2 atmospheric column CO_2 concentration (XCO_2) products from OCO-3, OCO-2, and GOSAT satellites over China.The results showed that the annual average spatial coverage of the Level-2 XCO_2 products in China were 43.38%, 21.19% and 0.40% for OCO-3, OCO-2, and GOSAT, respectively, with corresponding monthly average coverages were 4.77%, 2.43% and 0.16%. Notably, OCO-3 exhibited a significant lower monthly average coverage in odd-numbered months (2.23%) compared to even-numbered months (7.31%). There were significant spatial distribution differences in the coverage of the three satellite products. The coverage of OCO-2 and OCO-3 in southern and central China was significantly lower than that in northeastern, northwestern and northern China. In contrast, GOSAT's observations were extremely sparse, mainly concentrated in eastern China. In addition, OCO-3 identified over 20 hotspot observation areas over provincial capitals and industrial cities, which showed markedly higher coverage and observation frequency. From 2019 to 2022, all three satellite XCO_2 products reveal consistent increasing trends in annual average XCO_2, albeit with declining annual increment. Seasonal pattern showed consistently higher XCO_2 in spring and winter than in summer and autumn. Spatially, annual average XCO_2 showed higher concentrations in the eastern than western China, and in southern than northern China. However, the location of XCO_2 extreme value varied across satellites, and significant differences in XCO_2 concentrations were observed among different products within the same sub-region.

Key words：XCO_2；OCO-2；OCO-3；GOSAT；coverage

CO_2 是大气中最重要的温室气体之一.自工业革命以来,人类活动对地球生态系统的干预加剧,致使大气 CO_2 浓度持续上升[1-3],其浓度变化是全球气候变化研究的核心议题[4-8].由于具有大面积同步观测优势[9-11],基于卫星遥感的大气CO_2研究在过去 20 多年迅速发展.多个国家相继发射了用于监测大气 CO_2 的卫星[12-16],如日本的温室气体观测卫星(GOSAT)及其后续 GOSAT-2[17-19].美国的轨道碳观测卫星 2(OCO-2)和轨道碳观测卫星 3(OCO-3)[20-23],我国首颗碳卫星(TanSat)[12].这些卫星大都

收稿日期：2024-12-18
基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BEG02043);国家自然科学基金资助项目(42301415)
* 责任作者, 副教授, shelu_whu@nxu.edu.cn

能够提供全球范围的大气 CO_2 柱浓度产品(XCO_2),为研究全球和区域的大气CO_2时空分布和变化趋势提供了丰富的信息来源.

目前已有许多学者基于卫星 CO_2 产品开展了全球或区域范围的 XCO_2 产品精度评估[21-23],大气XCO_2时空变化[23]等研究,尤其是来源于 OCO-2/3 以及GOSAT 卫星的XCO_2被广泛应用于相关研究[24-25].然而,由于 XCO_2 反演产品大多源于高光谱传感器,如 OCO 上搭载的三波段高分辨率光栅光谱仪,GOSAT 搭载的傅立叶变换光谱仪(FTS),受硬件条件的限制,他们的观测幅宽往往较窄,1 天内的观测范围有限,同一区域 1 年内的观测次数也较少,这给卫星 XCO_2 产品的应用带来一定限制.尽管已有一些学者关注卫星 XCO_2 产品的时空覆盖度,但是这些研究大都是将二级 XCO_2 产品重采样为较低的分辨率后进行分析[26-28].研究表明,CO_2的分布具有显著的时空异质性,尤其是在排放源区域[29],这表明其在不同时间和空间上的分布并不均匀.这也对卫星 XCO_2 产品的空间分辨率、空间覆盖度和时间观测频次提出了更高的要求.虽然几种卫星 XCO_2 产品的空间分辨率已明确,但在卫星产品原始分辨率下,其空间覆盖度、时间观测频次以及区域差异却鲜少被研究.

本文以中国为研究区,分析和比较了 OCO-2、OCO-3 以及 GOSAT 二级 XCO_2 产品在中国陆地的空间覆盖度、时间覆盖频次及区域时空差异;同时基于3个产品,分析了中国大气XCO_2的时空变化特征,比较了三者揭示的 XCO_2 变化规律的异同;并以 OCO-2 为例,分析了二级XCO_2和三级XCO_2产品在评估 XCO_2 时空特征的差异,探讨了可能的原因.

1　材料与方法

1.1　数据

使用了 3 颗常用的大气 CO_2 监测卫星的 XCO_2 产品,即 OCO-2、OCO-3 和 GOSAT 卫星(表 1).由于同一颗卫星的XCO_2产品可能有多个版本,选择广泛使用且持续更新的版本.由于 OCO-3 二级 XCO_2 数据发布时间最早为 2019 年 9 月,数据仅更新到 2023 年 11 月(截止至 2024 年 10 月网站访问结果),本研究所使用的3个数据的时间跨度均限定为2019年 9 月~2023 年 10 月.

表 1　本研究中使用的卫星 XCO_2 数据详细信息

Table 1　Details of satellite XCO_2 products used in this study

卫星/载荷	幅宽(km)	级别	XCO_2 产品版本	数据空间分辨率	数据时间
OCO-2	10.6	二级	OCO2_L2_Lite_FP_11.1r	2.25km×1.29km	2019.09~2023.10
OCO-3	16	二级	OCO3_L2_Lite_FP_10.4r	2.25km×1.29km	2019.09~2023.10
GOSAT	640	二级	GOSAT_FTS_v03.05	10.5km	2019.09~2023.10
OCO-2	-	三级	OCO2_GEOS_L3CO2_DAY_10r	0.5°×0.625°	2019.09~2022.02

1.1.1　OCO-2XCO_2 产品

OCO-2 是由美国宇航局(NASA)于 2014 年 7 月 2 日发射的卫星,其主要任务是获得能够准确量化 XCO_2 变化的空间测量数据.OCO-2 卫星的重访周期为 16d,观测幅宽为 10.6km.OCO-2 仪器有 3 个光谱仪,专门用于在 1.61μm 和 2.06μm 观测 CO_2,这种优化配置确保了对大气气体的精确测量[19-20].OCO-2 卫星具有 3 种观测模式:Nadir、Glint 和 Target.Nadir 模式垂直向下观测,可快速扫描地表较大区域,获取大气 CO_2 的宏观分布.Glint 模式追踪太阳光在地表的镜面反射,信号更强,适用于海洋观测.Target 模式则在卫星经过时可持续观测指定目标,时间分辨率高,便于分析特定区域的 CO_2 浓度变化.NASA 官方发布的 OCO-2 卫星的二级 XCO_2 产品是基于 ACOS 算法反演得到的[28],该产品时间分辨率为 1d,且具有较高精度,与地面站点的 XCO_2 观测比较,RMSE 为 1.067×10^{-6}[30].为了增加可用的数据,本研究使用了该二级XCO_2产品中的所有有效反演数据,即 XCO_2_quality_flag=0,1 的数据都纳入使用.

OCO-2 三级全球全覆盖 XCO_2 产品,是为弥补由传感器观测幅宽窄,无法穿透云层和浓厚气溶胶等因素所导致二级产品大量有空白区域的局限而生成的,其利用地球观测系统通用数据同化系统(GEOS CoDAS)结合 OCO-2 二级反演数据采用格点统计插值方法的高性能计算实现 XCO_2 数据的全覆盖.三级产品分为逐日和逐月产品 2 个版本,本研

究使用了逐日数据.数据起始时间为 2015 年 1 月 1 日,目前更新到 2022 年 3 月 1 日(截止至 2024 年 10 月网站访问结果).

1.1.2 OCO-3 XCO_2 产品 OCO-3 卫星由美国宇航局于 2019 年 5 月 4 日发射,其与 OCO-2 卫星有共同的科学目标,且重访周期和空间分辨率也与 OCO-2 相同[22].与 OCO-2 不同的是,OCO-3 卫星除了有 Glint、Nadir 和 Target 观测模式之外,还设置了 SAM(snapshot area mapping)观测模式[23].SAM 模式允许 OCO-3 在大约 2min 内收集大约 80km×80km 的小型测量图,这使得 OCO-3 能够对城市、发电厂和火山等 CO_2 排放密集的大片区域进行扫描[23],增加了对 CO_2 潜在主要排放区域的观测.但是 OCO-3 仅在中低轨道观测,观测数据仅覆盖 51°N~51°S 之间.同样的,OCO-3 二级 XCO_2 产品也提供了数据质量标识以表征反演质量,本研究使用了该产品所有可用的 XCO_2 反演结果,数据的时间分辨率为 1d.OCO-2 和 OCO-3 的 XCO_2 数据都可以在 EARTHDATA 网站(https://search.earthdata.nasa.gov)获取.

1.1.3 GOSAT XCO_2 产品 GOSAT 卫星由日本于 2009 年 1 月 23 日成功送入太空,肩负着监测全球温室气体分布的重任[17,28,30].该卫星重访周期为 3d,以 10.5km 直径分辨率定期对地球进行打点观测[30].GOSAT 卫星搭载的科学仪器包括云和气溶胶成像仪(CAI)以及专门用于碳观测的热红外和近红外传感器(TANSO)[31-32].本研究使用的 GOSAT XCO_2 二级逐日产品是基于 TANSO 观测数据和 ACOS 算法反演得到的.为了确保分析结果的准确性和科学性,本文使用经过校准的 XCO_2_Calibration 数据子集.

1.2 研究方法

本研究中涉及到的年覆盖次数频率分布,年均观测次数,XCO_2 数据空间覆盖度以及 XCO_2 均值计算具体如下:

产品年覆盖频次分布计算方式如公式(1):

$$F_i = \frac{x_i}{\sum_{i=0}^{n} x_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中:F_i 为研究区内年观测次数为 i 次的像素出现的频率,其中 i 是指年覆盖次数(i=0,1,2,…);x_i 则是指年覆盖次数为 i 次的像素个数.

研究区各像素的年均观测次数则是将研究期内(本研究研究数据时间跨度为 3a)该像素的所有观测次数除以研究期年数.为了整数显示,本研究对结果进行了向上取整,像元的年均观测次数计算见公式(2):

$$M_{(l,s)} = \frac{N_{(l,s)}}{3} \tag{2}$$

式中:$M_{(l,s)}$是指像素(l,s)的年均观测次数;$N_{(l,s)}$是指像素(l,s)在研究期间(即 3a 时间内)的有效 XCO_2 观测总次数.

XCO_2 产品的空间覆盖度是指有 XCO_2 数据观测的面积与研究区总面积之比,如公式(3):

$$C = \frac{A_0}{A} \times 100\% \tag{3}$$

式中:C 表示数据产品的覆盖度;A_0 表示有 XCO_2 数据观测的区域总面积;A 表示研究区总面积.

像元的 XCO_2 均值计算方式如公式(4):

$$E_{(l,s)} = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_i}{m} \tag{4}$$

式中:$E_{(l,s)}$是指像素(l,s)的年(或季,月)均 XCO_2 值;i 表示时间频次;p_i 则表示在年(或季,月)时间尺度内第 i 次有效观测的 XCO_2;m 为年(或季,月)时间尺度内像素(l,s)的有效 XCO_2 观测总次数.

研究区或者子研究区的均值计算则如公式(5):

$$E_{\text{area}} = \frac{\sum_{j}^{N} E_j}{N} \tag{5}$$

式中:E_{area} 是指研究区或子研究区的 XCO_2 均值;E_j 表示第 j 个有效观测像素的 XCO_2 均值;N 表示区域有效观测像素的总个数.

2 结果与讨论

2.1 卫星 XCO_2 产品空间覆盖度分析

由图 1 可见,3 个产品在研究区的观测频次均较低,年观测频次为 0(即无 XCO_2 数据)的区域年均占比分别达 78.81%(OCO-2),56.62%(OCO-3) 和 99.60%(GOSAT).在有卫星 XCO_2 数据覆盖的区域,OCO-2 和 OCO-3 产品的观测频次大多小于 4 次,平均观测次数分别为 2 和 3 次;有 GOSAT 数据覆盖的区域,年均观测频次为 6 次,部分区域年观测频次可达 165 次,但有观测区域年均占比仅 0.40%.

由图 2 可见,由于 3 颗卫星的幅宽,重访周期和观测模型存在较大差异[32],其 XCO_2 产品的空间覆

盖度也差别较大.本研究直接采用各数据的原始分辨率进行分析,其中 OCO−2 和 OCO−3 的空间分辨率为 2.25km×1.29km,GOSAT 则为 10.5km.从图 2 可以看出,OCO−2 采用右倾斜线轨道,OCO−3 为了提升数据覆盖率采用了交叉斜线轨道,GOSAT 则采用了打点观测模式.受高光谱传感器观测幅宽和重访周期的限制,即使基于 3 年的卫星 XCO_2 产品,3 颗卫星均未能对研究区实现全覆盖.3 种 XCO_2 数据的空间覆盖均呈现出显著的区域差异.OCO−2 和 OCO−3 的空间覆盖度整体呈现西北高,东南低的分布格局.这种空间分布特征主要与云层和气溶胶对卫星观测和 XCO_2 反演的干扰有关.中国东部和南部气候湿润,降雨频繁且云量较多,导致卫星难以获取有效观测,此外东南部工业发达、人口密集、气溶胶浓度较高,进一步限制了 XCO_2 有效反演,导致东部和南部的卫星 XCO_2 数据覆盖度低.相比之下,北方地区受云雨天气影响较小,数据覆盖度相对较高.值得注意的是,由于轨道设计的限制,OCO−3 在纬度大于 51°N 的区域无数据覆盖.GOSAT 卫星的 XCO_2 产品在中国的空间覆盖度极低,但在中部和东部部分小区域有密集观测,如北京、长三角和珠三角的局部区域年观测频次甚至超过 100 次;而西部地区观测点极为稀疏,且这些稀疏的观测点年均观测频次普遍低于 37 次.

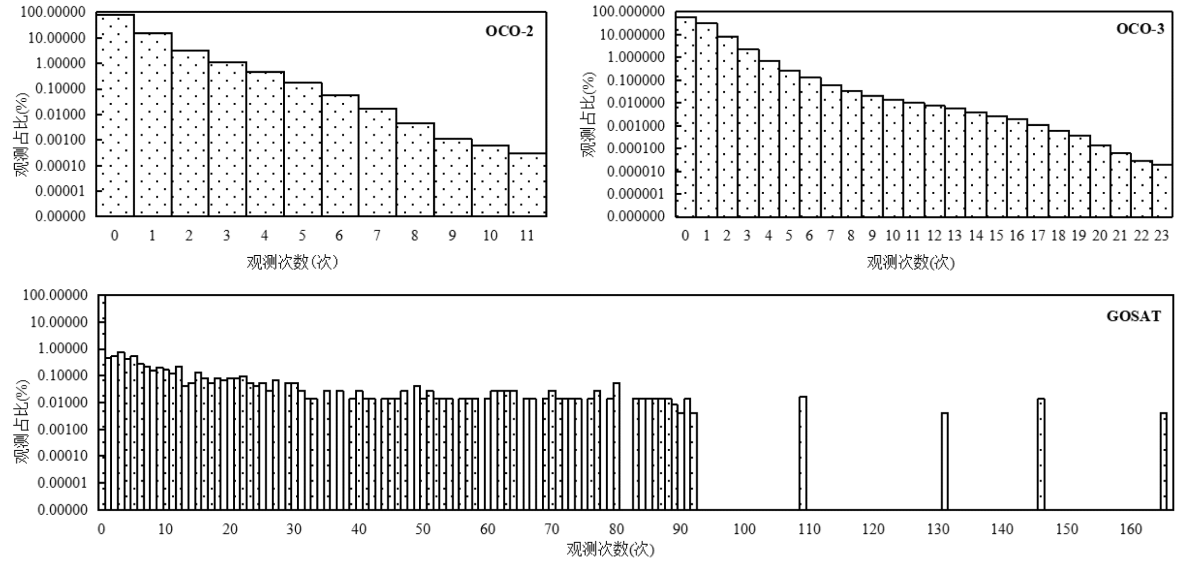


图 1　研究区 OCO−2、OCO−3 和 GOSAT 卫星 XCO_2 数据的年均观测次数频率分布直方图

Fig.1　Histogram of the annual mean observation frequency distribution of XCO_2 data from OCO−2, OCO−3 and GOSAT satellites in the study area

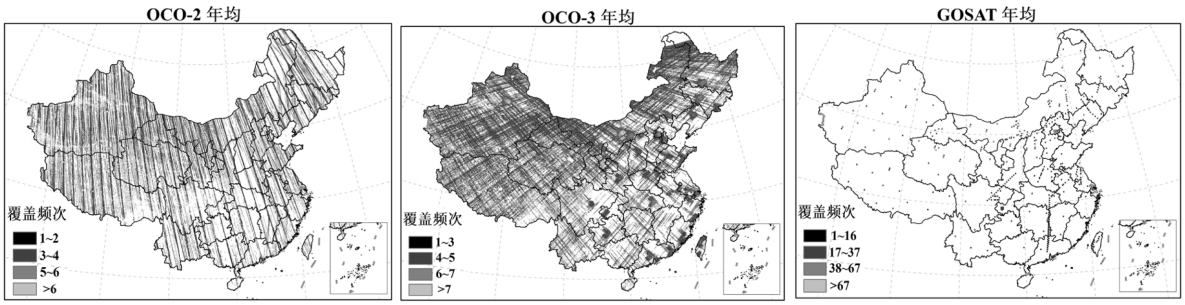


图 2　OCO−2、OCO−3 和 GOSAT 卫星 XCO_2 数据的年均覆盖次数空间分布

Fig.2　Spatial distribution of annual average observation frequency of XCO_2 data from OCO−2, OCO−3 and GOSAT satellites

审图号:GS(2024)0650 号

为进一步挖掘 XCO_2 数据覆盖空间分布差异,按照地理区位将中国分为西北、华北、东北、西南、华

中、华东、华南 7 个子区域进行统计分析.由表 2 可见,对 OCO-2 和 OCO-3 而言,中国北部(包括华北、西北、东北)覆盖度高,其中华北地区覆盖度分别高达 27.34%和 62.11%;南部和中部覆盖相对较低,其中华南地区最低,分别为 9.37%和 17.72%,这主要与区域的地理位置,气候条件和地形特征有关,这些因素共同影响了卫星传感器的有效覆盖范围.与 OCO-2/3 不同的是,GOSAT 在经济相对欠发达的区域,如西北、西南、东北覆盖度低,其中西北地区覆盖度仅为 0.19%.而在工业和经济较为发达的区域,如华东、华北、华南和华中地区覆盖度较高.且 GOSAT 的覆盖度普遍较低,这也限制了其在省市尺度上的碳排放监测应用.值得注意的是,在有 GOSAT 观测的某些热点区域,其观测次数要远超过 OCO 卫星系列,比如北京南部的 GOSAT 年观测覆盖次数可以达到 100 次以上.因此,对于有 GOSAT 密集观测的北京、上海等区域,GOSAT 的 XCO_2 数据不失为小范围的 XCO_2 时间变化和碳排放监测等相关研究的重要数据源.

表 2 OCO-2、OCO-3 和 GOSAT 卫星二级 XCO_2 数据在中国不同区域的年均空间覆盖度统计(%)

Table 2 Annual average spatial coverage statistics of XCO_2 data from OCO-2, OCO-3 and GOSAT satellites in different regions of China(%)

卫星	全国	西北	西南	华北	东北	华东	华南	华中
OCO-2	21.19	26.44	11.67	27.34	23.70	16.36	9.37	11.44
OCO-3	43.38	53.33	29.40	62.11	51.40	27.44	17.72	22.90
GOSAT	0.40	0.19	0.24	0.66	0.33	0.94	0.5	0.78

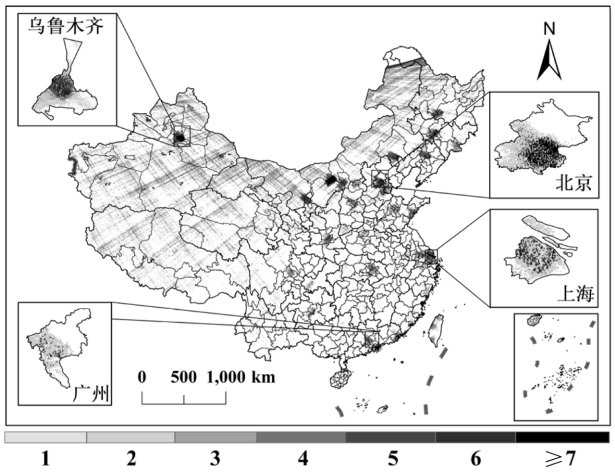


图 3 OCO-3 卫星 XCO_2 数据年覆盖次数的空间分布及典型的热点观测区域

Fig.3 Spatial distribution of annual coverage frequency of OCO-3XCO_2 data and typical hotspot observation areas

审图号:GS(2024)0650 号

由图 3 可见,OCO-3 观测热点区域主要集中分布于两类地区:一是北京、上海、广州这类直辖市或省会;二是包头、鄂尔多斯等工业城市(群).这种空间分布格局是 OCO-3 的 SAM 观测模式对潜在 CO_2 高排放区加密观测的结果,该模式有利于获取重点观测区域的 XCO_2 时空变化信息.

表 3 中的热点观测区域的覆盖次数显著高于其他地区,如北京西南部的年均覆盖次数可达 8 次,上海和广州可达 6 次.此外,受云雨天气影响较大的华中、华南和华东地区的热点观测区域的覆盖度则普遍低于北方地区,如北方城市乌鲁木齐和呼和浩特的年均观测次数可达 11 次.OCO-3 卫星在省会城市、直辖市、工业区等区域形成的 20 余个热点观测区域,揭示了其在潜在高排放区域的高频次观测能力,也为利用卫星数据开展城市和工业区碳排放精准监测提供了科学依据.

表 3 OCO-3 主要热点观测区所在城市

Table 3 Cities containing OCO-3 hotspot observation areas

区划	热点观测区域所在城市和城市群
西北地区	乌鲁木齐、银川、西安
西南地区	重庆、贵阳
华北地区	北京、天津、呼和浩特、包头、鄂尔多斯、廊坊、赤峰
东北地区	哈尔滨、沈阳、长春
华东地区	上海、青岛、厦门、济南、杭州
华南地区	广州
华中地区	武汉

由图 4 可见,3 个卫星的 XCO_2 产品的季均覆盖频次分布与年均观测频次分布类似,XCO_2 产品数据在 30°N~50°N 较为密集,在 10°N~30°N 则较稀疏.从 2019 年 9 月到 2023 年 10 月,OCO-2 数据的季均覆盖率为 6.88%,OCO-3 则达到 13.51%,而 GOSAT 仅为 0.24%,OCO-2 与 GOSAT 的 XCO_2 产品均在夏季覆盖少,而 OCO-3 则在夏季覆盖较多.

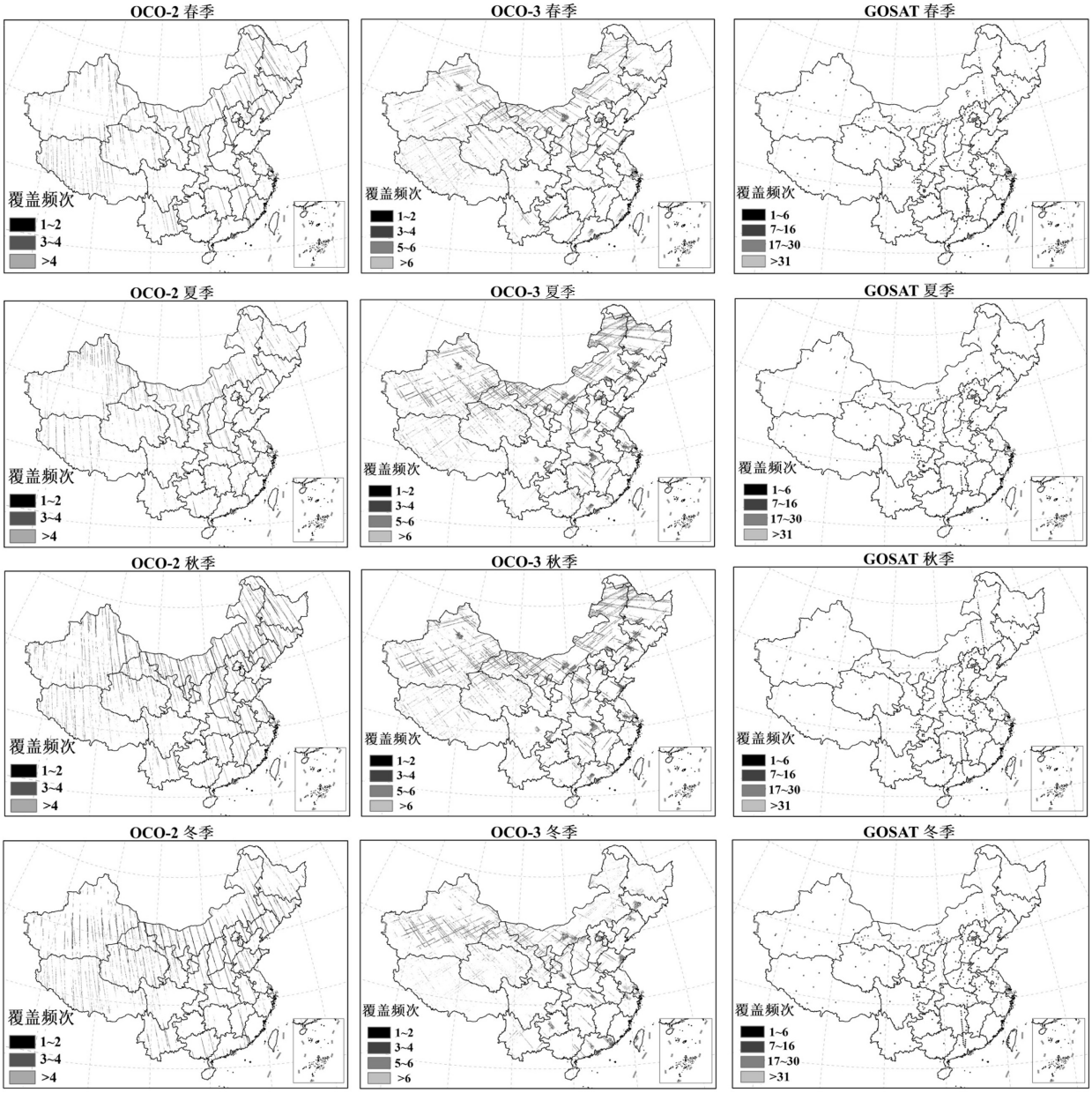


图 4　OCO−2、OCO−3 以及 GOSAT 卫星 XCO_2 数据的季均覆盖次数空间分布

Fig.4　Spatial distribution of seasonal mean coverage frequency of XCO_2 data from OCO−2, OCO−3 and GOSAT satellites

审图号:GS(2024)0650 号

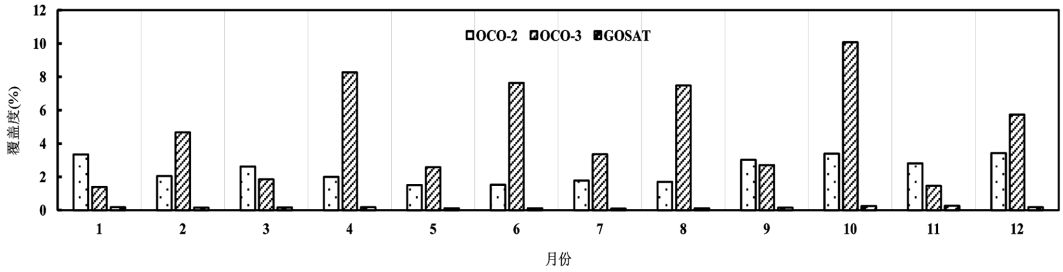


图 5　OCO−2、OCO−3 以及 GOSAT 卫星 XCO_2 数据在中国的月均覆盖度

Fig.5　Monthly average coverage of OCO−2, OCO−3 and GOSAT XCO_2 over China

由图 5 可见,OCO−3 月均覆盖度远高于 OCO−2　　和 GOSAT,达到 4.77%,且不同月份差异较大,奇数月

覆盖度(2.23%)远低于偶数月(7.31%),这可能与传感器运行轨道与模式有关[24].OCO−2 的月均覆盖率为2.43%,月覆盖度在 1.51%~3.43%之间,且 5~8 月显著低于其他月份.GOSAT 的月均覆盖率最低,仅 0.16%,同样在 5~8 月份出现了覆盖率的低谷.OCO−2 和 GOSAT 在 5~8 月的低覆盖度主要归因于夏季云雨天气较多,难以实现高精度的 XCO_2 数据反演.

2.2 中国 XCO_2 产品浓度时空分布分析

2.2.1 中国 XCO_2 时间变化特征 由表 4 可见,GOSAT 年均 XCO_2 从 2020 年的 412.18×10^{-6} 上升至 2022 年的 417.07×10^{-6};OCO−2 则从 412.40×10^{-6} 增长至 417.32×10^{-6};OCO−3 也呈现出类似的增长情况,从 411.84×10^{-6} 增加至 417.01×10^{-6}.同年相比,OCO−2 的年均浓度高于其他两颗卫星,OCO−3 年均 XCO_2 显著低于 OCO−2 和 GOSAT.此外,从 3 个数据中都可以发现,研究区在 2021~2022 年的增加量(约 2.17×10^{-6})小于 2020~2021 年的增加量(约 2.81×10^{-6}),即年增量呈现显著下降.

图 6 中,春季为 3~5 月,夏季为 6~8 月,秋季为 9~11 月,冬季为 12 月~次年 2 月.3 颗卫星的 XCO_2 年均值都呈现出增加趋势,且三者 XCO_2 显示出相似的季节变化节律:夏<秋<冬<春.春季和夏季相差可达 $(4.29\sim4.91)\times10^{-6}$.大气中 CO_2 浓度在春季最高,主要是由于冬季积累的高浓度延续到春季,尚未被完全稀释;同时,春季植物处于生长初期,光合作用能力尚未达到夏季的水平,对 CO_2 的吸收较弱,而土壤微生物活动增强,呼吸作用释放的 CO_2 增加[33-35].此外,春季的大气扩散条件虽比冬季有所改善,但仍不如夏季,难以快速稀释高浓度的 CO_2.这些自然过程与人类活动的综合影响,使得春季成为 CO_2 浓度最高的季节[36].

表 4 基于 OCO−2、OCO−3 和 GOSAT 卫星数据的研究区年均 XCO_2 及年增量($\times10^{-6}$)

Table 4 Annual average XCO2 concentration and annual increment in the study area derived from OCO−2, OCO−3 and GOSAT satellites($\times10^{-6}$)

卫星	2020 年	2021 年	2022 年	2020 年~2021 年增量	2021 年~2022 年增量
OCO−2	412.40	415.14	417.32	2.74	2.18
OCO−3	411.84	414.68	417.01	2.84	2.33
GOSAT	412.18	415.02	417.07	2.84	2.05

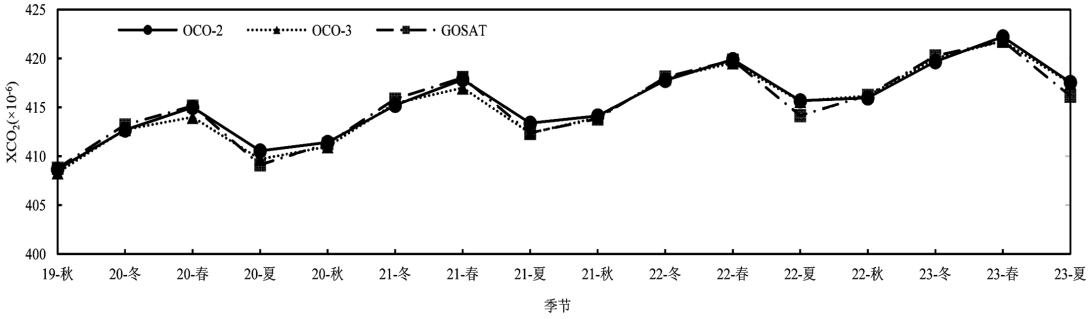


图 6 基于 OCO−2、OCO−3 和 GOSAT 卫星 XCO_2 数据的研究区季均浓度变化

Fig.6 Seasonal variation in XCO_2 concentration in the study area based on data from OCO−2, OCO−3 and GOSAT satellite

2.2.2 中国 XCO_2 空间分布特征 由图 7 可见,OCO−2、OCO−3 以及 GOSAT 卫星 3 个 XCO_2 产品均显示出显著的空间分布差异,年均 XCO_2 整体呈现东部高于西部,南部高于北部的分布特征,尤其是华东和华中远高于西北和西南,区域间的年均差别最高为 $(1.86\sim3.49)\times10^{-6}$.东部和中部地区工业活动频繁,化石燃料燃烧和城市化进程快导致高碳排放,是 XCO_2 较高的主要原因,华南地区尽管工业活动强城市化水平高,但是植被覆盖度高,碳汇作用较强,因此 XCO_2 略低于华东和华中.尽管华北地区京津冀区地区经济发达,但是内蒙古人口密度低、排放较少,且内蒙古北部和东北部植被覆盖率较高,对大气 CO_2 有显著吸收作用,因而华北地区 XCO_2 也显著低于华东和华中.西北和西南地区工业活动相对较少,人口密度低,因此 XCO_2 较低,西南由于森林覆盖率高、碳汇作用强,该地区的 XCO_2 最低,说明了人类活动和自然碳源、碳汇对 XCO_2 有显著影响.

通过表 5 和图 7 可知,子区域年均 XCO_2 分布存在显著差异.表现为以下两方面特征.一方面,3 个产品显示的 XCO_2 极值区域不一致,OCO−2 和 GOSAT

显示华东地区 XCO_2 最高,分别为 416.45×10^{-6} 和 417.54×10^{-6},OCO−3 则显示华中地区最高(416.98×10^{-6});OCO−2 和 OCO−3 数据均显示 XCO_2 最低区域为西南,分别为 414.59×10^{-6} 和 413.49×10^{-6},但 GOSAT 则显示东北地区最低(415.30×10^{-6}).

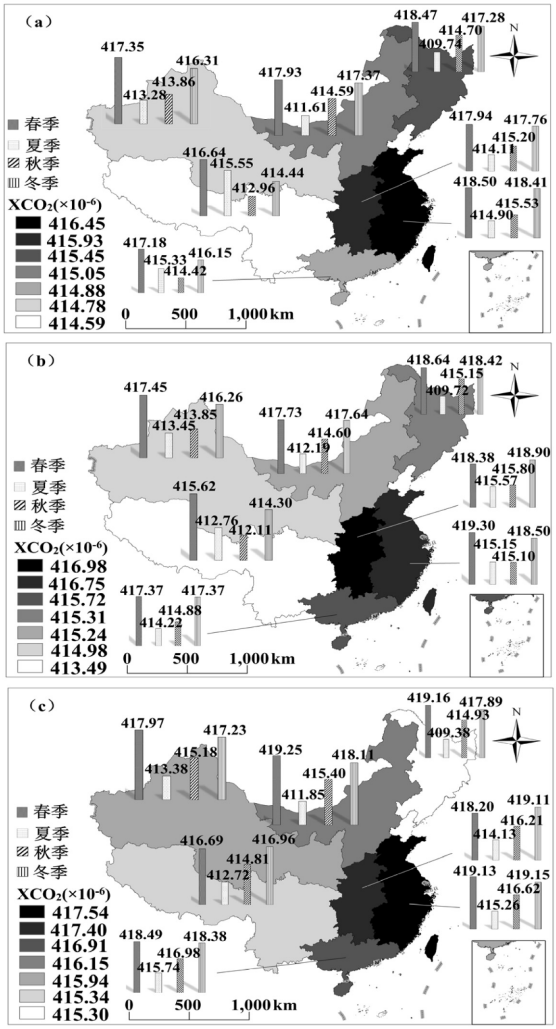


图 7　基于 OCO−2(a)、OCO−3(b)以及 GOSAT(c)卫星数据的中国不同区域的季均与年均 XCO_2 分布

Fig.7　Seasonal and annual average concentration distribution in different regions of China based on data from OCO−2 (a), OCO−3 (b) and GOSAT (c) satellite

审图号:GS(2024)0650 号

另一方面,不同产品在同一区域得到的年均 XCO_2 值存在较大差异.以华南地区为例,OCO−2、OCO−3 和 GOSAT 的年均 XCO_2 分别为 414.88×10^{-6},415.72×10^{-6}, 416.91×10^{-6},最大差异达 2.03×10^{-6}.西南地区 3 个数据的年均分别为 414.59×10^{-6}, 413.49×10^{-6}, 415.34×10^{-6},最大差别达 1.85×10^{-6}.这种差异在季均值尺度上更为显著,如西南地区夏季均值,OCO−2 与 GOSAT 差异高达 6.16×10^{-6},OCO−2 与 OCO−3 相差也达 2.79×10^{-6}.进一步分析表明,这种区域浓度差异可能与数据的空间采样密度密切相关.对比 OCO−2 和 OCO−3,两者差别较大的区域主要是西南(1.1×10^{-6}),华南(0.84×10^{-6})和华中(1.05×10^{-6}),其次是华东地区(0.3×10^{-6}),其他 3 个子区域的差异都在 0.2×10^{-6} 以内.值得注意的是,差别最大的 3 个子区域恰好是 OCO−2 空间覆盖度最低的区域:西南(11.67%)、华南(9.37%)和华中(11.44%).相比之下,OCO−2 空间覆盖度超过 20%的子区域,其与 OCO−3 的 XCO_2 差异则均小于 0.2×10^{-6}.这一结果表明,空间采样密度对区域 XCO_2 分析结果有显著影响,卫星 XCO_2 数据过低的空间覆盖度可能导致区域 XCO_2 评估存在较大不确定性.因此,在利用卫星数据进行区域 XCO_2 研究,碳排放监测以及碳中和政策评估等相关研究时,需系统评估空间采样密度对研究结果的潜在影响,并谨慎评估卫星数据的适用性及其空间代表性.这一发现对提升卫星遥感数据在碳监测领域的应用可靠性具有重要指导意义.

表 5　基于 OCO−2、OCO−3 以及 GOSAT 卫星数据的中国 7 个子区域年均 XCO_2 值($\times10^{-6}$)

Table 5　Annual average XCO_2 in the 7 sub−regions of China based on OCO−2, OCO−3 and GOSAT satellite data($\times10^{-6}$)

卫星\区域	西北	西南	华北	东北	华东	华南	华中
OCO−2	414.78	414.59	415.05	415.45	416.45	414.88	415.93
OCO−3	414.98	413.49	415.24	415.31	416.75	415.72	416.98
GOSAT	415.94	415.34	416.15	415.30	417.54	416.91	417.40

2.3　OCO−2 二级产品与三级产品浓度对比

由图 8 可见,OCO−2 三级全覆盖 XCO_2 产品的年均 XCO_2 普遍低于二级产品,两者之间的平均差异为 -4.95×10^{-6}.其中,华中地区的差异最为显著,三级与二级产品的年均值相差达 -7.05×10^{-6},该区域二级产品的覆盖度仅为 11.44%.整体而言,在 OCO−2 二级 XCO_2 数据覆盖率较高的区域,二级和三级数据的年均 XCO_2 差异较小,而在覆盖率较低的区域,两者差异显著增大.这一现象表明,在生成全覆盖 XCO_2 产品过程中数据覆盖度具有重要影响.

从现有结果来看,二级 XCO_2 产品可能更具代表性,原因在于其直接源于卫星观测数据反演,避免了模型插值和同化过程中可能引入的系统性偏差.在

覆盖度较高的区域,OCO−2 和 OCO−3 的差异小,二级数据与三级数据的差异也较小,进一步支持了二级数据的可靠性.然而,由于目前地面 XCO_2 观测数据稀少,且缺乏经过系统验证的时空覆盖度高的卫星XCO_2产品作为参考,仅通过二级与三级之间的差异无法严谨地得出哪个产品更优.尽管如此,两者之间存在的显著差异提醒研究者在利用卫星 XCO_2 观测数据或同化数据进行碳排放监测和碳循环研究时,需格外关注数据的空间覆盖度及其潜在误差.未来研究应进一步结合多源验证数据,以更全面地评估不同数据产品的精度和适用性.

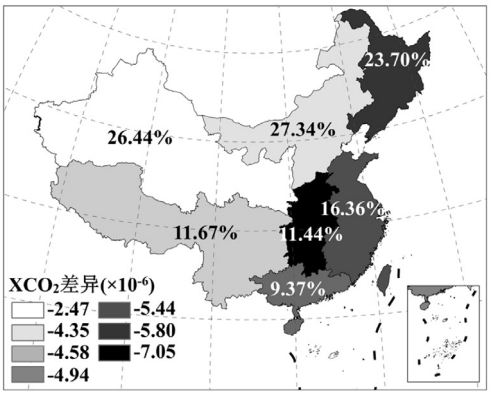


图 8 OCO−2 三级 XCO_2 数据与二级 XCO_2 数据不同子区域的 XCO_2 差异(a)及 OCO−2 二级 XCO_2 数据覆盖率分布(b)

Fig.8 (a) Differences in XCO_2 concentration between OCO−2 Level−3 and Level−2 data in different regions of China; (b) Spatial coverage distribution of OCO−2 Level−2XCO_2 Data

审图号:GS(2024)0650 号

2.4 讨论

与以往研究多集中于单一卫星产品分析不同,本研究多卫星、多时空维度的对比分析有助于揭示地理位置及气象条件对卫星数据获取的影响,为优化卫星观测模式提供科学依据,同时也为了解不同卫星对不同尺度的适用性提供了更全面的视角.本研究直接基于产品原始数据进行分析,避免了以往研究对数据降尺度处理再分析可能带来的误差,更准确地反映数据的真实空间覆盖特征.本研究揭示了 OCO−3 在中国的热点观测区域分布,并深入比较了二级(L2)与三级(L3)XCO_2 产品的差异,这两方面在现有研究中尚未得到充分关注和系统性探讨.

在使用不同卫星数据评估区域的 XCO_2 时,本研究发现不同卫星产品之间存在显著差异,同一卫星的二级产品和三级全覆盖产品之间差异更大.且在卫星覆盖度低的区域,差异更显著.这种差异可能来源于卫星过低的时空采样密度.较低时空覆盖度的数据可能会导致以下问题:(1)数据的区域代表性不足,基于低覆盖度的数据估算的 XCO_2 可能无法准确反映区域整体情况,尤其是在 CO_2 分布空间异质性强的区域;(2)低覆盖度限制了其对中小尺度的 XCO_2 空间分布特征的描述能力,难以捕捉局部排放源;(3)低频次的卫星观测无法捕捉 XCO_2 的时间变化尤其是短期变化特征,限制了对碳源和碳汇动态过程的理解;(4)低观测频次使得某些区域在特定时间段内缺乏有效数据,导致季节性变化的分析不够准确.这些问题可能进一步给区域碳收支监测和评估带来不确定性.

3 结论

3.1 OCO−3、OCO−2 和 GOSAT 在中国的年均空间覆盖度分别为 43.38%,21.19%和 0.40%,月均覆盖度分别为 4.77%,2.43%和 0.16%.OCO−3 覆盖度显著高于 OCO−2 和 GOSAT,且其月均覆盖度呈现奇数月低,偶数月高的显著特征.在有卫星数据覆盖的区域,OCO−3,OCO−2 和 GOSAT 的年均观测频次分别为 3 次,2 次和 6 次.

3.2 3 个卫星产品的覆盖度均存在显著的空间差异.受云雨天气影响,OCO−2 和 OCO−3 在华南和华中地区的覆盖度显著低于东、西北和华北地区.得益于 OCO−3 观测模式的优化设计,其在省会及工业城市形成了 20 余个热点观测区域,表现出显著高的覆盖度和观测频次,年均观测频次可达 11 次,远高于全国平均值.

3.3 2019~2022 年间,3 个卫星产品在中国的年均 XCO_2 均呈现一致的增长趋势,但年增量显著下降,反映了中国碳排放增速放缓及生态系统碳汇能力增强.同时,3 个产品均表现出春冬季XCO_2显著高于夏秋季的季节性规律,季节差异超过 4×10^{-6}.

3.4 中国 XCO_2 年均值呈现东部高于西部,南部高于北部的空间分异特征,3 种卫星产品识别的 XCO_2 最高和最低区域并不一致,即使在同一子区域,不同卫星得到的 XCO_2 均值也显示出显著差异.此外,OCO−2 与 OCO−3 的二级 XCO_2 数据差异,以及 OCO−2 二级与三级 XCO_2 数据间的差异,在 OCO−2 覆盖度较低的区域更为突出,表明低覆盖度数据可能增加 XCO_2 时空评估及相关研究的不确定性.

参考文献：

[1] Hussein H, Sharaf A. Towards net-zero carbon emissions: a systematic review of carbon sustainability reporting based on GHG protocol framework [J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2024,24:100516.

[2] Deng Z, Zhu B, Davis S J, et al. Global carbon emissions and decarbonization in 2024 [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2025,6:231-233.

[3] Ploy A, Peter E, Céline G, et al.Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions [J]. Nature Communications, 2023,14(1):5425-5425.

[4] Dengler J, Reid J. Emissions and CO_2 concentration—an evidence based approach [J]. Atmosphere, 2023,14(3):566.

[5] Li J, Zhang X, Guo L, et al. If some critical regions achieve carbon neutrality, how will the global atmospheric CO_2 concentration change? [J]. Remote Sensing, 2024,16:1486.

[6] Mao Z H, Zhang Y, Bu L B, et al. Measurement of CO_2 column concentration above cloud tops with a spaceborne IPDA lidar [J]. Geophysical Research Letters, 2024,51:e2024GL113309.

[7] Treharne R, Bjerke J W, Tømmervik H, et al. Arctic browning: Impacts of extreme climatic events on heathland ecosystem CO_2 fluxes [J]. Global Change Biology, 2019,25(2):489-503.

[8] Cassia R, Nocioni M, Correa-Aragunde N, et al. Climate change and the impact of greenhouse gasses: CO_2 and NO, friends and foes of plant oxidative stress [J]. Frontiers in plant science, 2018,9:273.

[9] Hu K, Feng X, Zhang Q, et al. Review of satellite remote sensing of carbon dioxide inversion and assimilation [J]. Remote Sensing, 2024,16:3394.

[10] Gerald D M, Hughes Z. Marsh processes and their response to climate change and sea-level rise [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019,47(1):481-517.

[11] Miller K G, Browning J V, Schmelz W J, et al. Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records [J]. Science advances, 2020,6(20):eaaz1346.

[12] 刘良云,陈良富,刘　毅,等.全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战 [J]. 遥感学报, 2022,26(2):243-267.
Liu L Y, Chen, L F, Liu Y, et al. Satellite remote sensing for global stocktaking: Methods, progress and perspectives [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022,26(2):243-267.

[13] He C, Ji M, rieneisen M L, et al. A review of datasets and methods for deriving spatiotemporal distributions of atmospheric CO_2 [J]. Journal of Environmental Management, 2022,322:116101.

[14] Sun Y, Yin H, Wang W, et al. Monitoring greenhouse gases(GHGs) in China: status and perspective [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022,15(16):4819-4834.

[15] 陈良富,张　莹,邹铭敏,等.大气 CO_2 浓度卫星遥感进展 [J]. 遥感学报, 2015,19(1):1－11.
Chen L F, Zhang Y, Zou M M, et al. Overview of atmospheric CO_2 remote sensing from space [J]. Journal of Remote Sensing, 2015,19(1):1-11.

[16] 李正强,谢一凇,石玉胜,等.大气环境卫星温室气体和气溶胶协同观测综述 [J]. 遥感学报, 2022,26(5):795-816.
Li Z Q, Xie Y S, Shi Y S, et al. A review of collaborative remote sensing observation of greenhouse gases and aerosol with atmospheric environment satellites [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(5):795-816.

[17] Nakajima M, Kuze A, Suto H. The current status of GOSAT and the concept of GOSAT-2 [C]. Sensors, Systems and Next-Generation Satellites XVI. SPIE, 2012,8533:21-30.

[18] Nakajima M, Suto H, Yotsumoto K, et al. Fourier transform spectrometer on GOSAT and GOSAT-2 [C]. International Conference on Space Optics—ICSO 2014. SPIE, 2017,10563:1354-1362.

[19] Suto H, Kataoka F, Kikuchi N, et al. Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021,14(3):2013-2039.

[20] Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, et al. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017,10(1):59-81.

[21] Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) [Z]. Earth observing systems xx. SPIE, 2015,9607:960702.

[22] Eldering A, Bennett M, Basilio R. The OCO-3 Mission: overview of science objectives and status [Z]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016,EPSC:2016-5189.

[23] Eldering A, Taylor T E, O'Dell C W, et al. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1year of simulated data [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019,12(4): 2341-2370.

[24] Wunch D, Wennberg P O, Osterman G, et al. Comparisons of the orbiting carbon observatory-2 (OCO-2) XCO_2 measurements with TCCON [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017,10(6):2209-2238.

[25] Inoue M, Morino I, Uchino O, et al. Validation of XCO_2 derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(19):9771-9788.

[26] Chen Y, Cheng J, Song X, et al. Global-scale evaluation of XCO_2 products from GOSAT, OCO-2 and CarbonTracker using direct comparison and triple collocation method [J]. Remote Sensing, 2022, 14(22):5635.

[27] Zhang L, Cheng T, Yue T, et al. Quantitative analysis of spatiotemporal coverage and uncertainty decomposition in OCO-2/3XCO_2 across China [J]. Atmospheric Environment, 2024:120636.

[28] Kiel M, Eldering A, Roten D D, et al. Urban-focused satellite CO_2 observations from the Orbiting Carbon Observatory-3: a first look at the Los Angeles megacity [J]. Remote Sensing of Environment, 2021,258:112314.

[29] Fang J, Chen B, Zhang H, et al. Global Evaluation and Intercomparison of XCO_2 Retrievals from GOSAT, OCO-2 and TANSAT with TCCON [J]. Remote Sensing, 2023,15(20):5073.

[30] Chevallier F, Palmer P I, Feng L, et al. Toward robust and consistent regional CO_2 flux estimates from in situ and spaceborne measurements of atmospheric CO_2 [J]. Geophysical Research Letters, 2014,41(3):1065-1070.

[31] Hamazaki T, Kaneko Y, Kuze A, et al. Fourier transform spectrometer for greenhouse gases observing satellite (GOSAT) [Z]. Enabling sensor and platform technologies for spaceborne remote sensing. SPIE, 2005,5659:73-80.

[32] Kuze A, Suto H, Nakajima M, et al. Initial onboard performance of TANSO-FTS on GOSAT [Z]. Fourier Transform Spectroscopy. Optica Publishing Group, 2009:FTuC2.

[33] Yang H, Li T, Wu J, et al. Inter-comparison and evaluation of global satellite XCO_2 products [J]. Geo-spatial Information Science, 2023:1-14.

[34] 任杨千千,连　懿,李海笑,等.中国大陆 CO_2 浓度时空分布特征及驱动因素 [J]. 中国环境科学, 2023,43(4):1919-1929.
Ren Y Q Q, Lian Y, Li H X, et al. Spatial and temporal distribution of CO_2 concentration in mainland China and its influencing factors [J]. China Environmental Science, 2023,43(4):1919-1929.

[35] 胡　诚,张俊清,刘慧丽,等.城市尺度温室气体排放反演研究进展及发展趋势 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):7036-7045.
Hu C, Zhang J Q, Liu H L, et al. Review of the greenhouse gas emission inversion approaches at city scale and future development trends [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):7036-7045.

[36] 邓安健,郭海波,胡　洁,等.GOSAT 卫星数据监测中国大陆上空 CO_2 浓度时空变化特征 [J]. 遥感学报, 2020,24(3):319-325.
Deng A J, Guo H B, Hu J, et al. Analysis of temporal and distribution characteristic of CO_2 concentration over China based on GOSAT satellite data [J]. Journal of Remote Sensing (Chinese), 2020,24(3):319-325.

作者简介：闫　琛(2001-),女,宁夏银川人,宁夏大学硕士研究生,主要从事大气 CO_2 卫星遥感研究.12023130983@nxu.edu.cn.