文章编号: 1672-8785(2023)08-0042-07

基于 GOSAT-2 卫星的中国 XCO₂ 时空分布特征分析

侯欣言 哈斯巴干* 特日格勒呼

(上海师范大学环境与地理科学学院,上海 200234)

摘 要: CO₂ 是主要的温室气体之一,它对全球变暖的作用很大。自工业化以来,CO₂ 浓度在全球范围内大幅增加。为实现碳减排目标,迫切需要监测大气中的 CO₂ 浓度并分析其时空分布特征。随着温室气体观测卫星的发射,利用碳卫星可以大范围地观测和分析大气中的 CO₂ 浓度。本研究基于 GOSAT-2 卫星数据,利用克里金插值技术分析了 2020 年 6 月至 2021 年 5 月中国陆地区域的 CO₂ 柱浓度(XCO₂)的时空变化特征。结果表明,全国范围内 XCO₂ 的平均值从 2020 年的 413.86 ppm 增加到 2021 年的 419.59 ppm,增加了 5.73 ppm。其中,XCO₂ 的最低值和最高值分别出现在冬季和春季。进一步的分析表明,XCO₂ 在空间分布上不一致,在人口密度较高的东南部区域浓度较高,而在人口稀少的西北部较低。此外,大城市及其周边地区的 XCO₂ 普遍高于其他地区,表明人为因素导致城市地区的 XCO₂ 增加过快。本文的分析结果可为碳源与碳汇的研究提供重要的基础数据和参考依据。

关键词: CO₂ 柱浓度; GOSAT-2 卫星; 遥感; 克里金插值法; 时空分布; 中国 中图分类号: TP751 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.08.006

Temporal-Spatial Distribution Analysis of XCO₂ Concentration in China Based on GOSAT-2 Satellite

HOU Xin-yan, HASI Ba-gan*, TE Teri-gelehu

(School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: CO_2 is one of the main greenhouse gases, which plays a great role in global warming. Since industrialization, the concentration of CO_2 has increased substantially worldwide. In order to achieve the target of carbon reduction, it is urgent to monitor the concentration of CO_2 in the atmosphere and analyze its spatial and temporal distribution characteristics. With the launch of greenhouse gas observation satellites, carbon satellites can be used to observe and analyze atmospheric CO_2 concentration on a large scale. Using GOSAT-2 satellite data and Kriging interpolation technique, the spatial and temporal variation of CO_2 column concentration

基金项目:上海市科技计划项目(22010503600)

作者简介: 侯欣言(1999-), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 主要从事碳卫星监测温室气体浓度 方面的研究。

*通讯作者: E-mail: hasibagan@staff.shnu.edu.com

收稿日期: 2023-04-03

 (XCO_2) over China's land area from June 2020 to May 2021 is analyzed. The results show that the nationwide average XCO₂ has increased from 413. 86 ppm in 2020 to 419.59 ppm in 2021 (an increase of 5.73 ppm). The lowest and highest values of XCO₂ appear in winter and spring, respectively. The further analysis shows that XCO₂ is spatially inconsistent, with higher concentration in the densely populated southeast region and lower concentration in the sparsely populated northwest region. In addition, XCO₂ in large cities and their surrounding areas are generally higher than that in other areas, indicating that human factors cause XCO₂ in urban areas to increase too quickly. The analysis results can provide important basic data and reference for the study of carbon sources and sinks.

Key words: XCO_2 ; GOSAT-2 satellite; remote sensing; Kriging interpolation method; temporal-spatial distribution; China

0 引言

工业革命以来,CO₂、CH₄等温室气体浓 度的增加导致了全球气候变暖。其中,人类社 会生产活动所引起的温室气体大量排放被认为 是其在大气中浓度不断增加的重要原因之一。 当前,在碳中和与碳达峰政策背景下,如何应 对全球变暖问题、缓解全球温室气体排放、精 准评估区域温室气体减排能力是国内外研究的 重点^[1-2]。

地面站点观测大气中的温室气体浓度局限 于局部地区,无法观测大范围的温室气体浓 度^[2-3]。而基于遥感卫星则可对全球范围的温 室气体进行周期性的观测。因此,利用遥感技 术监测温室气体浓度,可以更好地监测海洋和 陆地生态环境、获取全球时空分布与变化特 征,从而有利于更好地实施各个国家的碳减排 政策。为了提高人们对地球大气层的理解,全 球性的、长期的大气成分数据集至关重要。通 过卫星进行温室气体遥感监测提供了这样的途 径。碳卫星遥感数据产品对监测当前温室气体 浓度以及预测未来温室气体分布有着重要的 作用。

基于上述背景,许多国家相继发射了监测 温室气体排放的卫星。例如,我国在 2016 年 发射了碳监测卫星(TanSat),美国分别于 2014 年和 2019 发射了碳观测站 2 号卫星(OCO-2) 和碳观测站 3 号卫星(OCO-3),加拿大在 2021 年发射了 GHGSat-C2 卫星。日本发射的温室 气体观测卫星(GOSAT)自 2009 年 1 月起进入 轨道,用于监测 CO₂和 CH4^[4]。温室气体观测 卫星 2号(GOSAT-2)是 GOSAT 卫星的后续, 也被称为"IBUKI-2",是日本宇宙航空研究开 发机构 2019年发射的专用于观测温室气体的 卫星,用于监测 CO₂、CH4和 CO。该卫星扩 展了其前身 GOSAT 的能力,搭载了 TANSO-FTS-2(傅里叶变换光谱仪-2)和 TANSO-CAI-2 (云和气溶胶成像仪-2)^[5]。基于卫星的 XCO₂ 将大量信息从大气底层(近地面)传输到大气顶 部^[6-7]。通过利用碳监测卫星对温室气体进行 观测,可以分析 CO₂和 CH4 在全球的时空分 布及其变化特征和趋势,并检测这些气体的源 和汇如何随季节、年份和地点变化。

Janardanan R 等人研究发现,利用 GOS-AT 可在全中国范围内反演 CH₄ 的排放量^[8]。 Chandra N 等人利用 GOSAT 探讨了 CH₄ 的柱 平均浓度(XCH₄)的季节性分布特征以及其是 否受季风环流的影响^[9]。然而,利用 GOSAT-2 分析中国 XCO₂ 时空分布特征的研究还有欠 缺。因此,本文基于 GOSAT-2 碳监测卫星的 L2 级数据,采用克里金插值方法分析中国的 XCO₂ 时空分布特征。

1 研究区及研究数据

1.1 研究区概况

本文的研究区域为中国,地势特征为西高 东低,呈三级阶梯分布,自西而东,逐级下 降。平原少而山地多,陆地高差悬殊。山地、 高原和丘陵约占陆地面积的 67%,盆地和平 原约占陆地面积的 33%。山地和高原多集中



图 1 研究区域位置图(图中的点表示 GOSAT-2 卫星的观测点及其对应的柱状浓度)

于西部地区。中国各地降水差异较大,总体为 从东南沿海向西北内陆递减,东南沿海的年降 水量大多在1600 mm 以上,西北大部分地区 的年降水量在50 mm 以下。本文的研究区域 位置如图1所示。

1.2 数据来源

GOSAT 系列卫星为温室气体观测卫星, 其监测所获取到的 XCO₂ 为 CO₂ 垂直大气柱浓 度。GOSAT-2 卫星的观测方式不同于 Landsat 等陆地观测卫星的基于面上的扫描方式,而是 在点上进行柱状扫描。本研究使用的产品为 GOSAT-2 卫星的 L2 级 XCO₂ 产品(GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 CO₂ 柱平均干空气摩 尔产品)。数据获取的时间范围为 2020 年 6 月 至 2021 年 5 月。XCO₂ 的点数据在各省的分布 比较均匀,因此利用普通克里金插值法对全国 范围进行插值,进而分析 2020~2021 年四季 的时空间分布特征。

2 研究方法

2.1 插值方法

地统计插值方法主要有克里金法、反距离 加权插值法、多元回归法以及泰森多边形插值 法等四种方法。其中,普通克里金法常用于地 理空间插值计算。因此,本研究采用了普通克 里金插值法。该方法以半变异函数理论和结构 分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行 无偏最优估计^[10],其公式如下:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \tag{1}$$

式中, $Z(s_0)$ 为区域内 s_0 位置的预测值;n为 插值所搜索的观测点个数; λ_i 为位置 s_i 确定值 的权重系数; $Z(s_i)$ 为区域内 s_i 位置的预测值。 2.2 精度评价

评价克里金模型插值精度时通常采用交叉 验证方法,即通过比较估计值和观测值来验证 克里金模型插值的效果^[11]。评价普通克里金 插值的精度主要利用以下四个参数:均方根误 差(Root Mean Square, RMSE)、平均标准误 差(Average Standard Error, ASE)、标准均方 根误差(Root Mean Square Standardized Error, RMSSE)、平均标准化误差(Mean Standardized Error, MSE)。其中, RMSE 表示模型预测结 果与测量值的接近程度:

$$\operatorname{RMSE}_{\overline{n}} \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[Z^*(s_i) - Z(s_i) \right]^2}{n} \qquad (2)$$

ASE 为预测标准差的平均值:

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma^{2}(s_{i})}{n}}$$
(3)

RMSSE 应接近于 1,其公式为

$$RMSSE = \sqrt[n]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\left[Z^*(s_i) - Z(s_i)\right]^2}{\sigma^2(s_i)}} \quad (4)$$

如果 RMSSE 大于 1,则低估了预测中的变异 性;如果RMSSE小于1,则高估了预测中的 变异性。MSE 为标准误差的平均值:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{Z^{*}(s_{i}) - Z(s_{i})}{\sigma^{2}(s_{i})} \right]$$
(5)

在式(2)~式(5)中, $Z^*(s_i)$ 是变量的预测 值, Z(s_i)是变量的实际值, n 是样本的个数。 评价普通克里金插值模型的精度时,主要根据 以下四个方面进行可靠性评估: RMSE 提供插 值精度的度量,较小的 RMSE 表示更准确的 估计: ASE 应该接近 RMSE; RMSSE 接近 1 表示预测标准误差较小; MSE 接近 0 表示模 型的偏差较低[12]。

3 结果与分析

3.1 GOSAT-2 监测的 XCO₂ 时空分析

在研究期内, GOSAT-2 卫星观测的 XCO₂ (垂直单位柱中气体分子的数量)样本分布均匀 日样本量充足。结果表明,研究区域的 XCO₂ 浓度始终保持在 389.61 ppm 以上, 即 XCO₂ 处于较高水平。2020年6月至2021年5月, 中国平均 XCO₂ 从 410.72 ppm 增加到 421.00 ppm。其中, 2020 年的平均 XCO₂ 从 6 月的 414.74 ppm 增长到了 12 月的 417.17 ppm; 2021年的春季增加更为明显,平均 XCO2 在 420 ppm 以上,并于 2021 年 4 月份达到峰值 421.00 ppm。总的来说, 2021 年平均 XCO₂ 的 总体水平高于 2020 年, XCO₂ 的平均值从 2020年的 413.86 ppm 增加到 2021 的 419.59 ppm(增加了 5.73 ppm)。表 1 列出了 2020~ 2021 年 GOSAT-2 卫星监测的中国 XCO₂ 的描 述性统计结果。表中的季节划分规则如下:12 月、1月、2月为冬季;3~5月为春季;6~8 月为夏季; 9~11月为秋季。

利用普通克里金法把 GOSAT-2 卫星观测 的 XCO₂ 点数据转换为面上数据后发现, XCO₂的高浓度值主要出现在中国的东南部地 区(见图 2)。这种分布特点表明我国东南部的 XCO₂相对较高,而西北部的 XCO₂则相对较 低。在西北地区,新疆维吾尔自治区的 XCO₂ 相对较高。塔里木盆地的 XCO₂ 仅在冬季较低,

年份	月份	最小值/ppm	最大值/ppm	平均值/ppm	样本数
	6	392.45	448.80	414.74	640
	7	389.61	428.59	410.72	768
	8	392.05	431.76	412.83	989
2020	9	389.98	442.98	413.08	914
	10	394.83	439.19	414.29	1227
	11	400.43	430.22	414.21	1013
	12	394.39	430.95	417.17	695
	1	398.84	435.42	418.51	839
	2	404.44	438.39	417.36	836
2021	3	396.85	444.19	420.12	499
	4	405.17	442.03	421.00	659
	5	402.20	439.65	420.97	665

表 1 2020~2021 年 GOSAT-2 卫星监测的中国 XCO₂ 的描述性统计

http://journal.sitp.ac.cn/hw

INFRARED (MONTHLY)/VOL.44, NO.8, AUG 2023



图 2 2020~2021 年 GOSAT-2 监测的 XCO₂ 在中国的四季空间分布浓度图: (a)2020 年夏季; (b)2020 年秋季; (c)2020~2021 年冬季; (d)2021 年春季

而在春季、夏季和秋季都比其他地方高(见图 2(a)、图 2(b)和图 2(d))。在东北地区,秋季 和冬季的 XCO₂ 比全国的其他区域高(见图 2 (b)和图 2(c))。在东南地区,夏季和秋季的 XCO₂ 更高(见图 2(a)和图 2(b))。此外,东南 沿海省份的 XCO₂ 在春季更高(见图 2(d))。

对比 XCO₂ 图 和 黑 河-腾 冲线 后 发 现, XCO₂ 高的地区大致与胡焕庸提出的中国人口 分布的黑河-腾冲线的东南侧区域重叠。这条 线不仅是一条人口地理界线,而且是一条生态

表2 普通克里金插值法的交叉验证表

季节	RMSE/ppm	ASE/ppm	RMSSE	MSE
夏季(2020年6、7、8月)	4.200	3.900	1.068	-0.005
秋季(2020年9、10、11月)	3.519	3.339	1.048	0.012
冬季(2020年12月与2021年1、2月)	3.257	3.333	0.965	0.001
春季(2021年3、4、5月)	4.503	4.889	0.921	0.003

环境线[13]。以生态环境线分割的生活空间集 中在中国的东南部地区(主要城市和城市群), 生态空间分布在黑河-腾冲线的东南侧区域[14]。 而这一地区也是中国 CO₂ 排放较高的区域。 其中,位于生态环境线东南侧区域的东北地区 的秋冬季节的 XCO₂ 较高,这可能是因为气候 寒冷的东北地区对取暖有着巨大需求, 燃烧煤 炭导致二氧化碳排放增多。未来如果利用其他 新型能源代替煤炭供暖,温室气体在东北地区 的排放将会减少。通过对比图 2 中四个季度的 XCO₂,我们发现大城市的 XCO₂ 普遍高于其 他地区。例如,位于中国中部的陕西省省会西 安市全年的 XCO₂ 高于其他地区,可能是附近 其他城市的工业排放导致的。陕西省地形为南 北高、中间低,而西安位于陕西省中南部。随 着空气流动,大量的 CO2 容易汇聚在西安 上空。

表 2 列出了普通克里金插值法的交叉验证 结果。可以看出,四个季节的 ASE 取值范围 为 3. 333~4.889 ppm, RMSE 的取值范围为 3. 257~4.503 ppm。本研究的 ASE 接近 RMSE。由于样本量正常,所以误差水平在可 接受范围内。RMSSE 接近 1,取值范围为 0.921~1.068。MSE 趋近于 0,取值范围为 -0.005~0.012。这表明计算结果的精度是可 接受的。

4 结束语

本文利用 GOSAT-2 数据对中国 2020 年 6 月至 2021 年 5 月的 XCO₂ 进行了定量统计和 时空分析。研究区域的平均 XCO₂ 保持在 389.61 ppm 以上。研究期内,平均 XCO₂ 在 2021 年 4 月份达到峰值,2021 年的 XCO₂ 的 总体水平高于 2020 年。XCO₂ 的平均值从 2020年的 413.86 ppm 增加到 2021年的 419.59 ppm,增加了 5.73 ppm。研究期内的 XCO₂ 空间分布主要呈现为东南地区较高、西北地区较低,有明显的时间和空间变化特征。本文利用 GOSAT-2 对温室气体浓度的分析和预测结果可为相关部门制定节能减排决策提供数据 依据。

由于 GOSAT-2 是最近发射的卫星,因此 本文中的研究时间范围较小。后续研究可结合 未来几年 GOSAT-2 的温室气体监测数据进行 比较和分析,并利用模型进一步预测温室气体 浓度的分布和变化幅度,以便更好地体现 XCO₂ 的变化趋势。此外,为了以更高精度估 算温室气体浓度,后续研究应将地面监测与卫 星监测结合起来,利用多源数据开展长时间序 列、高分辨率以及高精度的碳排放碳吸收监 测,进而科学地阐明温室气体的源与汇。

参考文献

- [1] Fang J, Yu G, Liu L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China
 [J]. Proc Natl Acad Sci, 2018, 115 (16): 4015-4020.
- [2] 刘毅,王婧,车轲,等.温室气体的卫星遥感——进展与趋势[J].遥感学报,2021,25
 (1):53-64.
- [3] Zhou Y, Shan Y, Liu G, et al. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings [J]. Appl Energy, 2018, 228: 1683– 1692.
- [4] 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]. *Appl Opt*, 2009, **48** (35): 6716–6733.

- [5] 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]. Atmos Meas Tech., 2021, 14(3): 2013–2039.
- [6] Deng F, Jones D B A, Henze D K, et al. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO₂ from GOSAT XCO₂ data [J]. Atmospheric Chem Phys, 2014, 14(7): 3703–3727.
- [7] Hwang Y, Schlüter S, Choudhury T, et al. Comparative Evaluation of Top-Down GOSAT XCO₂ vs. Bottom-Up National Reports in the European Countries [J]. Sustainability, 2021, 13 (12): 6700.
- [8] Janardanan R, Maksyutoy S, Tsuruta A, et al. Country-Scale Analysis of Methane Emissions with a High-Resolution Inverse Model Using GOSAT and Surface Observations [J]. *Remote Sens*, 2020, 12(3): 375.

- [9] Chandra N, Hayashida S, Saeki T, et al. What Controls the Seasonal Cycle of Columnar Methane Observed by GOSAT over Different Regions in India? [J]. Atmospheric Chem Phys, 2017, 17 (20): 12633-12643.
- [10] 陆海建,莫健莹,邓一荣,等. 基于克里金的粤 港澳大湾区典型化工厂地块地下水流场分布空 间分析 [J]. 惠州学院学报,2022,42(6):100-106.
- [11] Gong G, Mattevada S, O'Bryant S E. Comparison of the Accuracy of Kriging and IDW Interpolations in Estimating Groundwater Arsenic Concentrations in Texas [J]. *Environ Res*, 2014, **130**: 59–69.
- [12] 孔令娜,向南平.基于 ArcGIS 的降水量空间插 值方法研究 [J].测绘与空间地理信息,2012, 35(3):123-126.
- [13] 王铮,张丕远,刘啸雷,等.中国生态环境过渡 的一个重要地带[J]. **生态学报**,1995,**15**(3): 319-326.
- [14] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国"三生空间"分类
 评价与时空格局分析 [J].地理学报,2017,72
 (7):1290-1304.