

内蒙古地区二氧化碳柱浓度时空分布特征分析

阿云嘎

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2024年2月25日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

为厘清内蒙古地区 XCO_2 时空分布及其源汇特征, 本研究基于GOSAT卫星的二氧化碳柱浓度(XCO_2)官方L2数据产品, 运用反距离权重(IDW)方法对内蒙古地区进行 XCO_2 空间插值, 研究2019年内蒙古自治区以及各盟市 XCO_2 空间分布和季节变化特征, 对影响 XCO_2 分布的驱动因素进行分析。结果表明: 基于IDW方法插值结果与观测结果误差大部分处于 ± 1 ppm之间, 模拟结果和观测结果有较好的一致性; 在内蒙古 XCO_2 时空分布特征方面, 浓度高值出现在内蒙古中部、西部以及东北部地区, 而北部接壤蒙古国的地区 XCO_2 浓度相对较低; 内蒙古自治区 XCO_2 年均值为407 ppm, 春、夏、秋、冬季 XCO_2 均值统计分别为409.32 ppm、403.6 ppm、405.57 ppm、408.44 ppm, 东部地区相比西部地区季节差异更明显, 呈现出冬春季高、夏秋季低的分布特征; 按盟市统计结果显示, 呼、包、鄂等经济水平相对较高地区 XCO_2 浓度较高, 锡林郭勒盟、巴彦淖尔市等人口分布较少地区 XCO_2 浓度相对较低。

关键词

XCO_2 插值, 时空分布, 内蒙古

Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics of Carbon Dioxide Column Concentration in Inner Mongolia Region

Yunga A

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 25th, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

In order to clarify the spatial and temporal distribution of XCO_2 and its source and sink characteristics in Inner Mongolia, based on the official L2 product of carbon dioxide column concentration (XCO_2) of GOSAT satellite. This study used the inverse distance weight (IDW) method to interpo-

late XCO₂ in Inner Mongolia, qualified the spatial distribution and seasonal variation characteristics of XCO₂ in Inner Mongolia Autonomous Region and its cities in 2019, and analyzed the driving factors affecting the distribution of XCO₂. The results showed that most of the errors between the interpolation results based on the IDW method and the observed values are around ± 1 ppm, and the simulation results are in good agreement with the observed results. In terms of the spatial and temporal distribution characteristics of XCO₂, the high concentration appeared in the central, western and northeastern regions of Inner Mongolia, while the XCO₂ concentration in the northern region bordering Mongolia was relatively low. The annual average value of XCO₂ in Inner Mongolia Autonomous Region is 407 ppm. The average values of XCO₂ in spring, summer, autumn and winter are 409.32 ppm, 403.6 ppm, 405.57 ppm and 408.44 ppm, respectively. The seasonal difference in the eastern region is more obvious than that in the western region, showing the distribution characteristics of high in winter and spring and low in summer and autumn. According to the statistical results of the league city, the XCO₂ in the relatively high economic level areas such as Hohhot, Baotou and Erdos is higher, and the XCO₂ in the sparsely populated areas such as Xilin Gol League and Bayan Nur City is relatively low.

Keywords

XCO₂ Interpolation, Spatiotemporal Distribution, Inner Mongolia

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自工业革命开始人类活动所排放的温室气体量急速上升加剧了温室效应导致全球变暖，出现了地表温度增长、海平面上升、极端天气事件频发等环境问题[1]。随着时代的发展，温室气体的浓度达到史无前例的高度，如何有效监测温室气体以应对气候变化已然成为了世界性难题。温室气体通过吸收地表长波辐射使得地球表面温度上升，其中 CO₂ 是受人类活动影响最大的温室气体。从 1840 年至今，全球大气 CO₂ 浓度在此期间内增长了约 130 ppm，增量接近 140% [2] [3]。为加深大气 CO₂ 浓度对全球气候变化的影响机理认识，需要高分辨率大气 CO₂ 浓度观测数据进行时空监测。识别和量化 CO₂ 浓度时空分布可以在国家和区域尺度上更好地了解 CO₂ 的源和汇，帮助了解 CO₂ 时空变化并应对气候变化所造成的一系列问题。

早期，大气 CO₂ 观测局限于地面站点监测，由于资金和技术的原因，地面站点数量少且分布不均匀导致空间覆盖度有限，很多偏远地区无法监测[4]。部分站点的环境条件也极大地影响了监测的准确性。随着卫星观测技术的发展，使用卫星来观测 CO₂ 不仅有全球覆盖度而且降低了监测成本，有效地弥补了地面监测的局限性[5] [6]。目前有许多专门监测大气 XCO₂ 的卫星，比如美国国家航空航天局(NASA)研发的 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2)、我国发射的首颗碳监测卫星 TANSAT，以及由日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)发射的 GOSAT 卫星。通过地面监测网络和卫星遥感技术的综合应用，极大地增强了对大气 XCO₂ 分布的理解[7] [8]。

相关研究表明，大气 XCO₂ 浓度不仅持续上升，而且在不同季节和地区的分布情况表现出明显的差异，受到自然因素和人类活动的强烈影响[9] [10]。内蒙古作为我国北部边疆重要的生态环境屏障，处于干旱半干旱地带，生态环境敏感且脆弱[11]。目前，已有不少对于内蒙古地区 XCO₂ 的相关研究，但大多数是从碳排放的经济效应、产业结构方面去分析，仅通过区域碳排放量难以表征其碳排放强度，无法从整体上精确分析 CO₂ 的分布情况。本研究充分利用卫星遥感监测数据，刻画内蒙古大气 XCO₂ 时空分布

特征，填补该研究区针对碳监测领域研究的不足，助于优化我国的碳达峰和碳中和目标实施策略，促进地区可持续发展，同时为应对全球气候变化提供科学依据。

2. 研究区概况

内蒙古自治区地处中国北部边疆，位于北纬 $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'$ ，东经 $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'$ 之间(图1)，地势由东北向西南斜伸，总面积118.3万平方千米，平均海拔1000 m。内蒙古地形复杂、地貌单元多样，全区基本属一个高原型的地貌区，涵盖高原、山地、平原、沙漠等地貌，位于北半球中高纬度内陆区，受海洋碳汇的复杂影响较小。气候以温带大陆性气候为主，属于西北干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带[12]。内蒙古重工业集中在呼、包、鄂以及锡林郭勒等地区，有铜铅锌铁等矿产，煤炭产量仅次于山西省位列全国第二。内蒙古地处于农牧交错带，属于半农半牧地区，依赖生态和环境平衡，因此阐明该区 XCO_2 分布格局具有重要的生态应用价值。

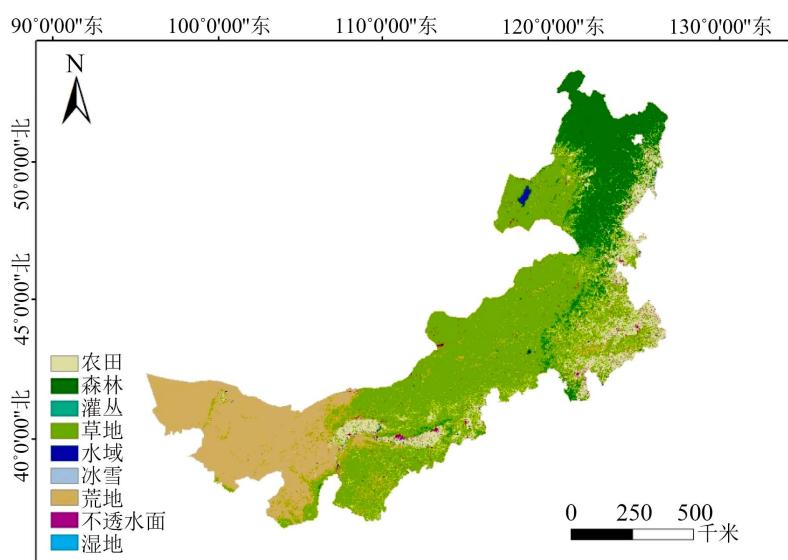


Figure 1. Overview of the research area

图1. 研究区概况图

3. 数据与方法

3.1. GOSAT 卫星数据

GOSAT是第一颗专门用于观测温室气体的卫星，发射于2009年7月，是由日本宇宙航空研究开发机构JAXA、国家环境研究所(National Institute for Environmental Studies, NIES)和环境署(Ministry of the Environment, MOE)共同推动的项目[13]。GOSAT卫星运行高度约为666 km、回归周期为3天、降交点过境时间为当地时间下午13:00、数据的空间分辨率为 $10.5\text{ km} \times 10.5\text{ km}$ ，2级产品观测精度为(1~4) ppm [14]。GOSAT主要配备了两个传感器分别是傅里叶变换光谱仪(TANCO-FTS)和云气溶胶成像仪(CAI)，FTS测量SWIR和TIR波段的二氧化碳、甲烷和水汽，CAI观测云和气溶胶信息，用于云雾天气并纠正气溶胶对反演的 CH_4 和 CO_2 的影响。

本研究所用的数据GOSAT 2级(Level 2, L2) XCO_2 数据产品(https://www.gosat.nies.go.jp/index_e.html)，时间选取2018年12月~2019年11月，版本为V2.97，数据格式为HDF。本文利用MATLAB软件对HDF格式数据进行预处理，获取其 XCO_2 时空分布，用ArcGIS软件将空间分辨率重采样至 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ，开展

研究区 XCO₂ 时空分布特征分析。

3.2. 地统计学方法

为有效分析 XCO₂ 的时空分布特征，基于反距离权重方法(IDW)进行 XCO₂ 空间插值。当任何未测量的位置为预测值时，反距离权重法会采用预测位置周围的测量值。与距离预测位置较远的测量值相比，距离预测位置最近的测量值对预测值的影响更大。反距离权重法假定每个测量点都有一种局部影响，而这种影响会随着距离的增大而减小。由于这种方法为距离预测位置最近的点分配的权重较大，而权重却作为距离的函数而减小，因此称之为反距离权重法。

反距离权重计算过程如下：

- 1) 计算未知点到所有点的距离 d_i :

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

- 2) 计算每个点的权重 w_i :

$$w_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (2)$$

- 3) 计算插值点的值 Z_0 :

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n w_i * Z(X_i, Y_i) \quad (3)$$

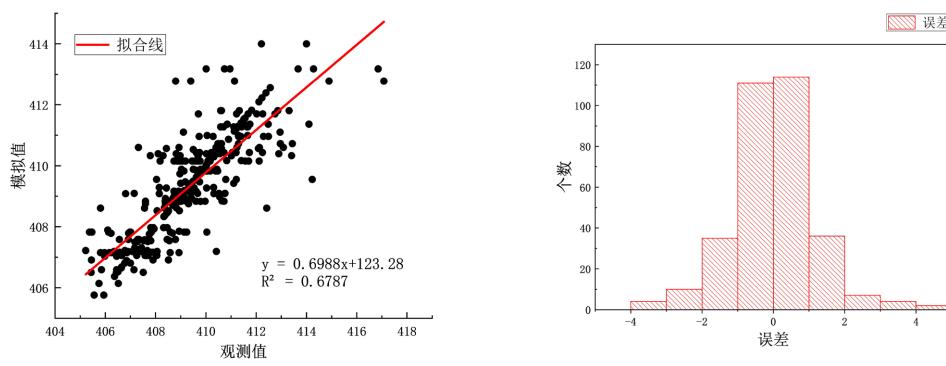
上述公式中， (x, y) 为观测点的坐标， (x_i, y_i) 为模拟点的坐标。 Z_0 为坐标点 (x, y) 处的预测值， $Z(X_i, Y_i)$ 为在 (x, y) 处的测量值， n 为参与插值点周围样点的数量。

4. 结果与讨论

4.1. 内蒙古 XCO₂ 插值结果验证

对 2019 年卫星产品数据按冬季(12 月、1 月~2 月)、春季(3 月~5 月)、夏季(6 月~8 月)、秋季(9 月~11 月)进行统计，得到研究区不同季节的 XCO₂ 时空分布特征，并进行相关性分析与误差统计。

从观测值与模拟值的相关性来看(图 2)，除冬季以外，其它三个季节 R^2 均大于 0.65，表现出较好的相关性。通过偏差直方图可以看出，模拟误差大部分集中在 $\pm 1 \text{ ppm}$ 之间，其中春季占比为 69.6%，夏季占比为 66.6%，秋季占比为 60.8%，冬季占比为 54.2%。由此可见，IDW 空间插值结果能够有效地代表区域 XCO₂ 分布。



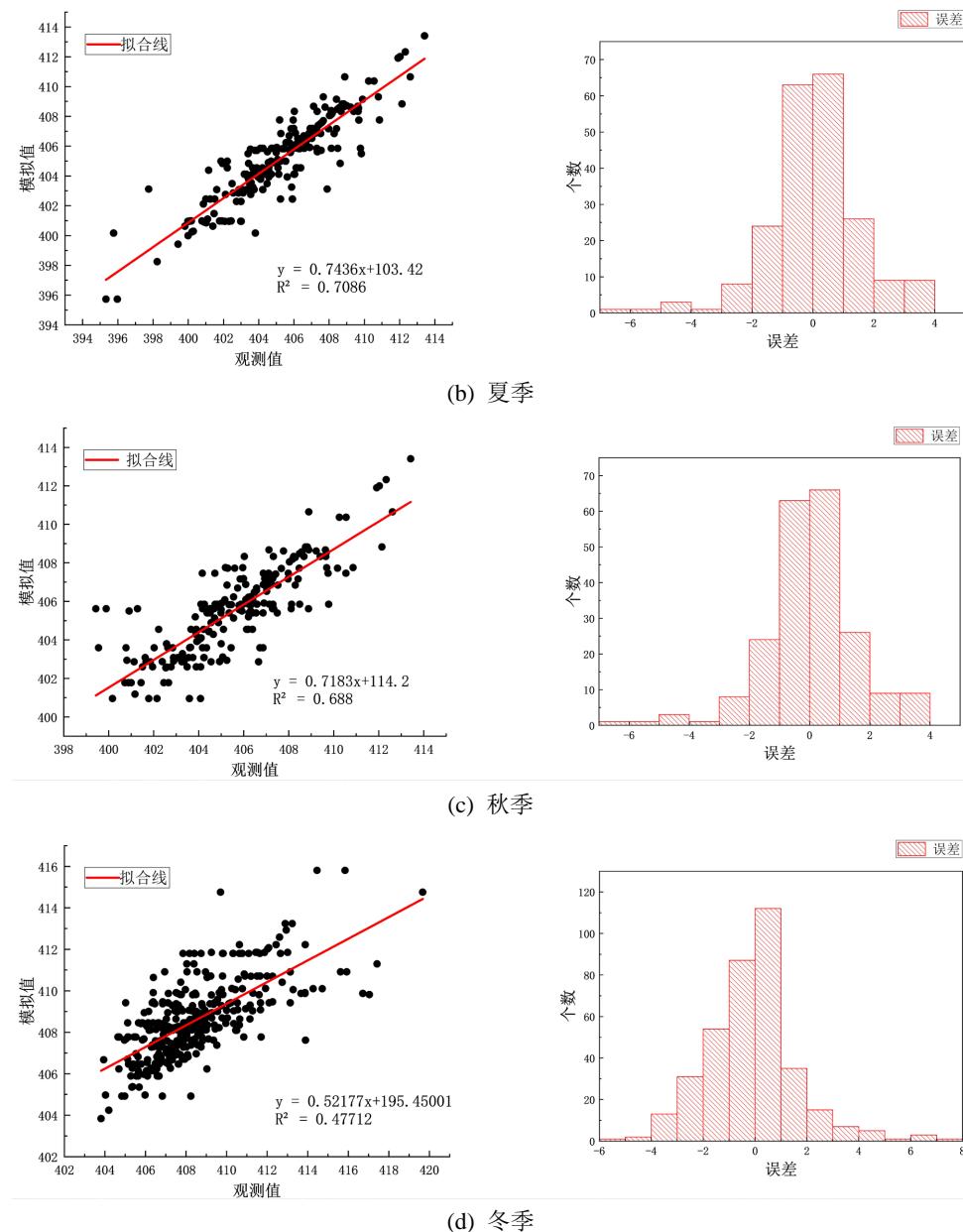


Figure 2. Correlation and concentration deviation between observed and simulated values in different seasons

图 2. 不同季节观测值与模拟值相关性及浓度偏差

表 1 为内蒙古各季节 XCO₂ 观测值与模拟值误差分析表, 由表得出, 误差均值在春夏秋季为正, 冬季为负, 说明春夏秋季模拟值偏高, 冬季模拟值偏低。但由于误差均值绝对值小于 0.1 难以证明插值结果, 故在下文中使用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)分析误差情况。平均绝对误差除春季为 0.77 外, 其它季节均大于 1, 误差最大值出现在冬季, 为 7.22, 而最小值出现在秋季, 为 3.93。由均方根误差看出夏秋季在 1.5 左右, 春季与冬季 RMSE 的值接近 1 和 2。整体来看, 春季相比其它季节有更好的空间插值效果, 冬季最差, 可能是 GOSAT 作为被动遥感卫星, 受观测条件等影响, 冬季在北半球高纬度地区太阳高度角过大, 导致反演数据不确定性相对较高, 一定程度上影响了内蒙古冬季数据的准确性。

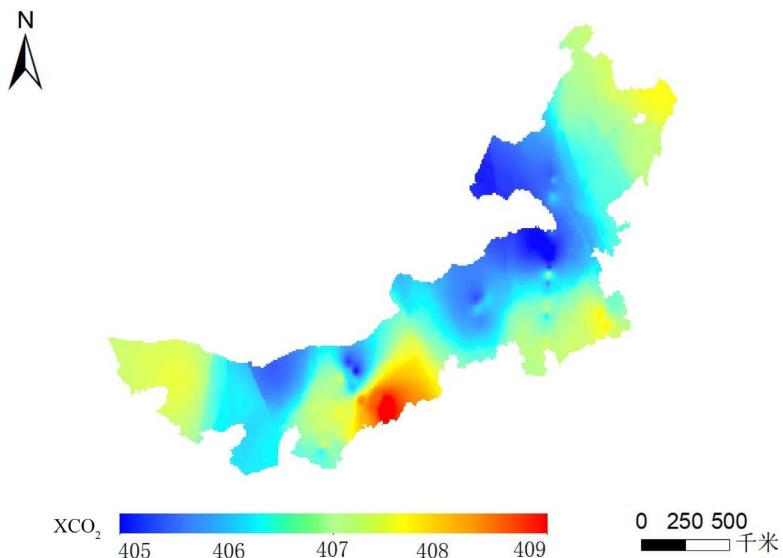
Table 1. Simulated XCO₂ error by seasonal statistics (Unit: ppm)**表 1.** 按季节统计模拟 XCO₂ 误差(单位: ppm)

季节	误差均值	平均绝对误差	误差最小值	误差最大值	均方根误差	个数
春季(MAM)	0.02	0.77	-3.98	4.68	1.14	200
夏季(JJA)	0.07	1.05	-5.37	4.77	1.59	104
秋季(SON)	0.04	1.02	-6.18	3.93	1.49	323
冬季(DJF)	-0.12	1.23	-5.05	7.22	1.75	368

4.2. 内蒙古 XCO₂ 时空分布特征分析

4.2.1. 空间分布特征分析

统计内蒙古 XCO₂ 年均值,结果显示内蒙古 XCO₂ 范围为 405~409 ppm, 均值为 407 ppm, 标准差为 2.42 ppm。从空间格局(图 3)上看,浓度最高值出现在内蒙古中部地区,西部以及东北部地区也有较高的 XCO₂ 浓度分布,而北部接壤蒙古国地区的浓度较低,南部接壤山西地区较高,内蒙古南部和北部地区存在差异,XCO₂ 浓度由北向南逐渐增高,东西空间变化不明显,可以初步判断呼鄂经济圈较高的碳排放所造成较高的 XCO₂ 浓度分布。

**Figure 3.** Distribution map of XCO₂ in Inner Mongolia**图 3.** 内蒙古 XCO₂ 分布图

4.2.2. 月度分布特征分析

根据 2019 年内蒙古 XCO₂ 月均值分布曲线(图 4)可知,各季节 XCO₂ 平均值存在差异。春、冬季浓度较高,夏季浓度较低。不同月份浓度变化明显,5 月份浓度最高,8 月份最低。北半球的 CO₂ 监测都反映了每年 5 月 CO₂ 浓度峰值的这种模式[15]。夏秋季节植被茂盛,光合作用强,植被的固碳能力使得大气中二氧化碳浓度下降,因此 5~8 月 XCO₂ 呈现下降趋势。春季、冬季植被不在生长季,固碳能力减弱,加之采暖期化石燃料和生物质燃料的消耗,大大增加了本地的 CO₂ 排放,两者共同作用使得春季、冬季浓度较高。

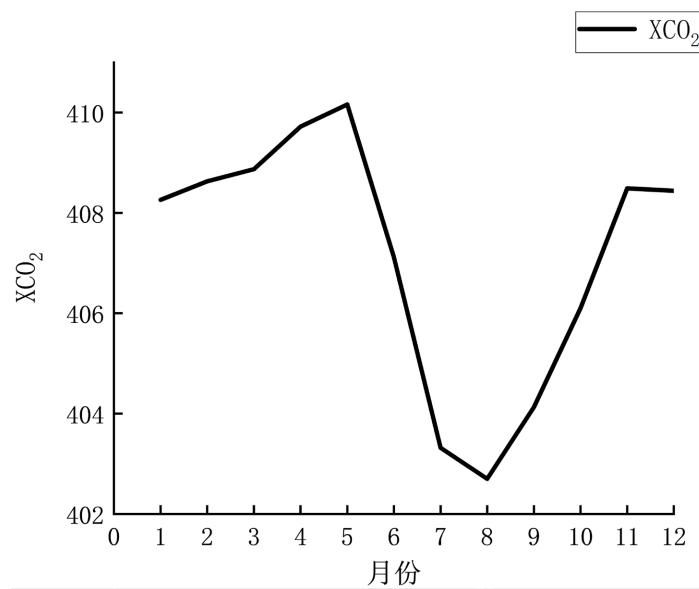


Figure 4. Monthly average distribution curve of XCO₂ in Inner Mongolia
图 4. 内蒙古 XCO₂ 月均分布曲线

4.2.3. 季节分布分析

各季节 XCO₂ 均值在春季为 409.32 ppm, 夏季为 403.6 ppm, 秋季为 405.57 ppm, 冬季为 408.44 ppm (图 5), XCO₂ 季节均值大小为: 春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季。在春季, XCO₂ 浓度最高的地区主要出现在东北和南部地区, 但锡林郭勒盟有明显的低值区; 夏季, 高值在中部以及西部地区而在东北部呼伦贝尔市出现低值; 在秋季, 高低值有明显的分界线, 南部普遍比北部地区高。在冬季, 高值出现在中部人口密集高地区, 如呼和浩特市和乌海市。整体而言, 内蒙古南部 XCO₂ 浓度要比北部高, 有较高季节差异性。

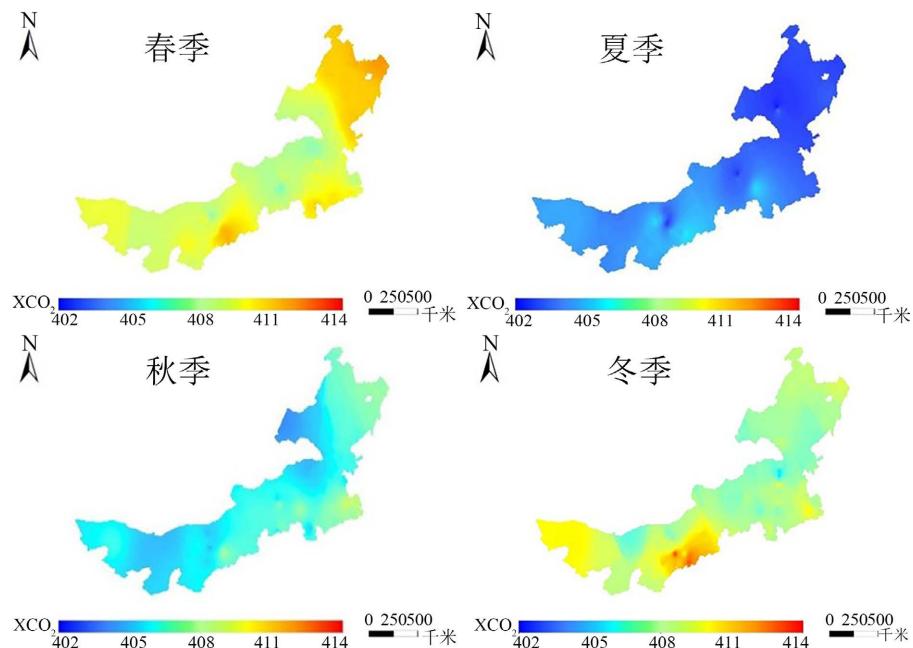


Figure 5. Seasonal distribution map of XCO₂ in Inner Mongolia
图 5. 内蒙古 XCO₂ 季节分布图

4.2.4. 内蒙古各盟市 XCO₂ 分布特征

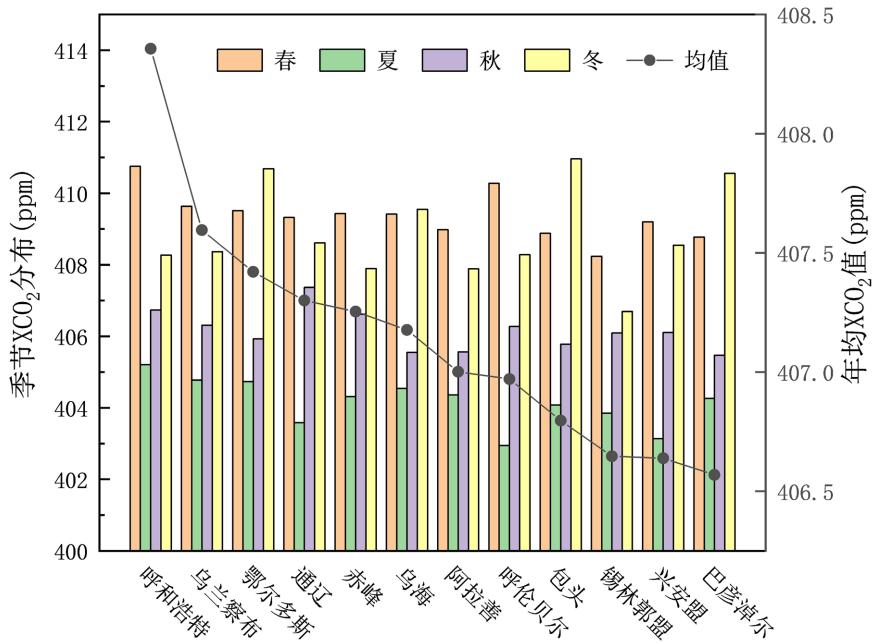


Figure 6. Seasonal and annual distribution of XCO₂ in various league cities of Inner Mongolia
图 6. 内蒙古各盟市 XCO₂ 季节与年均分布

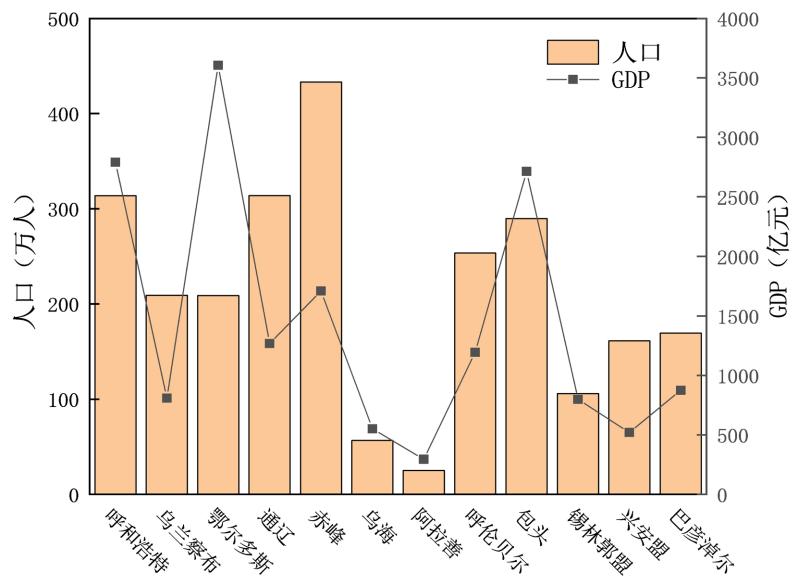


Figure 7. Population and GDP of each league and city in Inner Mongolia in 2019
图 7. 2019 年内蒙古各盟市人口和 GDP

由各盟市 XCO₂ 浓度分布(图 6)可知, 呼和浩特、乌兰察布、鄂尔多斯 XCO₂ 浓度比较高, 而巴彦淖尔、兴安盟、锡林郭勒盟的值较低。最高值出现在呼和浩特而最小值出现在锡林郭勒盟。按季节统计各盟市 XCO₂ 分布情况可以看出, 各盟市 XCO₂ 季节差异显著, 基本呈现春季、冬季高于夏季、秋季的特征。由内蒙古自治区统计局综合数据平台公布的人口分布与地区生产总值数据[16] (图 7)。可以看出东部

以及中部人口多的地区与 XCO_2 的分布有一定的相关性，呼和浩特、赤峰、通辽等人口较多的地区 XCO_2 普遍较高。而乌兰察布市的人口不多，但 XCO_2 却排第二高值，这可能是与呼和浩特市的距离相近，受其较高的 XCO_2 的影响有关。西部地区人口偏少但仍有较高的 XCO_2 ，尤其是在乌海市、阿拉善盟等地，这可能是当地植被覆盖度低造成的。整体而言，东部盟市 XCO_2 季节差异比西部盟市更明显，其原因可能是在植被生长季节，植被的光合作用加强碳汇，使得夏季和秋季的 XCO_2 浓度较低；而在冬季和春季，由于植被进入休眠期，碳汇减弱，而此时人类活动所排放的 XCO_2 含量增多，造成了冬季和春季较高的 XCO_2 浓度，导致东部盟市产生了较为显著的季节差异。

5. 结论

本文基于 GOSAT 官方 L2 数据，运用反距离权重法对研究区进行 XCO_2 数据插值，分析了内蒙古及各盟市 XCO_2 空间分布与季节分布特征。主要结论如下：

- 1) 反距离权重空间插值结果具有较好的稳定性。从 XCO_2 插值结果来看，不同季节观测值与模拟值之间有较高的相关性，相对误差大部分在 $\pm 1 \text{ ppm}$ 之间，除冬季以外，其它季节 R^2 均大于 0.65。
- 2) 内蒙古地区大气 XCO_2 分布呈现出显著的空间异质性。在工业发展水平较高地区和人口较集中的区域， XCO_2 浓度相对较高；反之，在人口密度较低的区域， XCO_2 浓度则相对较低。这一分布情况与各盟市的统计结果一致。
- 3) 内蒙古地区的大气 XCO_2 浓度呈现明显的季节性变化，受到自然和人为因素的共同影响。由于冬季供暖需求导致的燃煤增加， XCO_2 浓度在 5 月达到年度最高值。随后，随着气温的上升和植被的生长，浓度开始下降，至 8 月份达到最低值，反映了季节性的植被活动对 XCO_2 浓度的影响。

综上所述，本研究基于 GOSAT 卫星数据运用反距离权重空间插值法分析了内蒙古 XCO_2 时空分布和季节分布特征，揭示该区域内碳循环的动态过程、评估地区生态系统对全球碳平衡的影响，对制定有效的地方碳减排策略具有重要意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 夏玲君, 刘立新, 李柏贞, 等. 我国中部地区大气 CO_2 柱浓度时空分布[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2811-2819.
- [3] Lv, Z., Shi, Y., Zang, S., et al. (2020) Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO_2 Concentration in China and Its Influencing Factors. *Atmosphere*, **11**, 231. <https://doi.org/10.3390/atmos11030231>
- [4] 莫露, 巫兆聪, 张熠. 中国 XCO_2 时空分布与影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2562-2570.
- [5] Cao, L., Chen, X., Zhang, C., et al. (2017) The Temporal and Spatial Distributions of the Near-Surface CO_2 Concentrations in Central Asia and Analysis of Their Controlling Factors. *Atmosphere*, **8**, 85. <https://doi.org/10.3390/atmos8050085>
- [6] 何江浩, 蔡玉林, 秦鹏. 二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析[J]. 科学通报, 2020, 65(Z1): 194-202.
- [7] 侯艳芳. 基于遥感的中国大气 CO_2 浓度时空分布及影响因素研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [8] 章育仲, 袁凤杰. 全球大气监测网与我国监测站网[J]. 气象科技, 2002(1): 36, 57-59.
- [9] 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(1): 1-11.
- [10] Falahatkar, S., Mousavi, S.M. and Farajzadeh, M. (2017) Spatial and Temporal Distribution of Carbon Dioxide Gas Using GOSAT Data over IRAN. *Environmental Monitoring and Assessment*, **189**, Article No. 627. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6285-8>
- [11] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001~2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.

-
- [12] 苏日罕, 郭恩亮, 王永芳, 等. 1982-2020 年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 419-431.
 - [13] Te, T., Bagan, H., Che, M., et al. (2023) Spatiotemporal Variability of Near-Surface CO₂ and Its Affecting Factors over Mongolia. *Environmental Research*, **236**, Article 116796. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116796>
 - [14] 葛钰洁, 肖钟湧. 基于 GOSAT 卫星的中国 CO₂ 浓度时空特征分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(5): 96-108.
 - [15] 杨晓钰, 王中挺, 潘光, 等. 卫星遥感温室气体的大气观测技术进展[J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(6): 581-597.
 - [16] 内蒙古自治区 2019 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].
<https://tj.nmg.gov.cn/datashow/easyquery/easyquery.htm?cn=B0103>, 2024-01-25.