

东北地区 CO₂ 浓度时空演变特征及 多因子驱动机制研究

常国荣,王婷*,邢洋,李巍巍,孙慕龄

(通辽市气象局,通辽 028000)

【摘要】本研究基于2015—2022年NASA轨道碳观测卫星-2(OCO-2)的XCO₂数据、全球大气研究排放数据库(EDGAR)的CO₂排放数据、MODIS MOD13A3植被指数(NDVI)产品以及中国1km分辨率逐月降水量数据集,综合运用地理信息系统分析、空间自相关检验、时间序列趋势分析和多元统计建模等方法,系统探究东北地区大气CO₂浓度的时空演变规律及其驱动机制。主要研究发现包括:1.东北地区大气CO₂浓度呈现显著的“南高北低”空间格局,高值核心区持续稳定分布于辽宁省中南部工业走廊地带,其空间浓度梯度差最高达到2.5ppm;2.东北地区大气年均CO₂浓度以2.3ppm/年的速率持续上升,月尺度变化呈现典型的“单峰型”季节波动特征,其中每年3月至4月达到浓度峰值,每年7月至8月出现浓度谷值;3.人为碳排放是影响CO₂浓度的主导因子,自然因子中归一化植被指数(NDVI)与降水产生抑制效应。

【关键词】二氧化碳浓度;OCO-2;时空演变;双变量空间自相关;随机森林;梯度提升树;

中图分类号:X51 文献标识码:A 文章编号:1673-288X(2025)05-0071-06 DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202505071

大气CO₂浓度变化是全球气候变化研究的核心议题,东北地区作为中国北方生态安全屏障与老工业基地,研究其CO₂浓度动态对区域碳循环及“双碳”政策实施具有重要意义^[1]。然而,该区域地面监测站点稀疏,现有数据难以支撑高精度时空分析,制约了碳收支评估与政策的精准性。

1 研究现状

1.1 排放驱动研究

人为碳排放是CO₂浓度的核心驱动因子,现有研究基于欧盟全球大气排放数据库、中国碳核算数据库等排放清单,证实了工业排放、能源消费与区域CO₂高值区的空间关联性。但未用OCO-2数据验证东北“工业走廊-林区”浓度梯度,也未明确高纬度“单峰型”波动特殊

性。植被生长状况与降水是关键调节因子,NDVI与CO₂浓度呈负相关(夏季光合固碳强、浓度低,冬季反之);降水对CO₂浓度的作用存在争议,如南方湿润区为直接冲刷作用,西北干旱区为间接植被介导作用,东北作为温带大陆性季风气候区,降水对CO₂浓度的调节机制是直接的还是间接的均尚未明确。

1.2 驱动机制分析方法进展

空间分析方面,双变量Moran's I已用于东部“CO₂浓度-人为排放”关联研究(如长三角热点区识别),但东北“CO₂浓度-NDVI/降水”空间交互分析仍较少;机器学习方面,随机森林、梯度提升树已用于因子贡献率量化,但支持向量机(SVM)应用不足,SVM具有在小样本、非线性数据中优势显著,且研究缺乏“SVM-随机森林-梯度提升树”多模型对比,难以筛选最

基金项目:通辽市气象局科技创新项目“东北地区CO₂浓度时空演变特征驱动力研究”(202319)。

作者简介:常国荣(1994—),男,硕士,工程师,主要研究方向为高分遥感与生态监测,E-mail:changguorong007@163.com。

通讯作者:王婷(1990—),女,本科,工程师,主要研究方向为大气环境与农业发展,E-mail:471369663@qq.com。

优方法,可能导致贡献率量化偏差。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区

研究区涵盖辽宁省、吉林省、黑龙江省三省及内蒙古自治区东部五个盟市,其地理坐标范围在北纬 38° 43′ 至 53° 30′、东经 115° 30′ 至 135° 20′ 之间,总占地面积约 152 万平方公里^[2]。该区域呈现典型的“山环水绕”半环状地形结构^[3]。其气候类型属温带大陆性季风气候,年均气温介于-5℃至 10℃之间,降水量呈现自东南向西北递减的空间格局^[4]。

2.2 数据来源

CO₂ 浓度数据采用源自 NASA 的轨道碳观测卫星-2(OCO-2),OCO-2 数据定义为:整层大气垂直气柱中 CO₂ 总量与干空气总量的比值。其单位为 ppm(百万分之一),即每百万个空气分子中的 CO₂ 分子数^[5];碳排放数据使用全球大气研究排放数据库中数据;NDVI 数据采用 MOD13A3 数据;降水数据采用国家青藏高原科学数据中心的 1km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2023 年)。

2.3 研究方法

2.3.1 空间自相关分析(双变量 Moran's I)

采用双变量全局空间自相关指数量化 CO₂ 浓度与驱动因子的空间耦合关系:

$$I_b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}$$

式中: n 为空间单元总数; x_i 为单元 i 的 CO₂ 浓度值; y_j 为单元 j 的驱动因子值; w_{ij} 为基于 Queen 邻接规则构建的空间权重矩阵(距离阈值设为 50km)显著性检验采用 999 次蒙特卡洛随机置换法,零假设为空间随机分布。

2.3.2 随机森林拟合分析

随机森林是一种基于 Bagging(自助聚合)的集成学习方法,通过构建多棵决策树并整合其预测结果提升模型性能。其核心在于双重随

机性:数据随机抽样与特征随机选择,最终结果通过投票(分类)或平均(回归)确定。

2.3.3 支持向量机(SVM)

支持向量机(SVM)是 Vapnik 团队提出的监督学习模型,其核心是在特征空间找最优超平面以最大化间隔,通过核函数解决非线性问题,兼顾结构风险最小化以避免过拟合;其突出优势是小样本学习能力强、非线性拟合精准、抗干扰与泛化性好,适配高维数据场景。

3 结果与分析

3.1 CO₂ 浓度时空变化特征

3.1.1 CO₂ 空间格局演变

2015 年至 2022 年期间,东北地区 CO₂ 浓度空间分布呈现稳定的“南高北低”梯度格局(见图 1):高值核心区持续分布于沈阳-长春-哈尔滨工业走廊;低值稳定区主要分布在大兴安岭北段原始林区和小兴安岭边缘,空间浓度梯度差最高达到 2.5ppm。

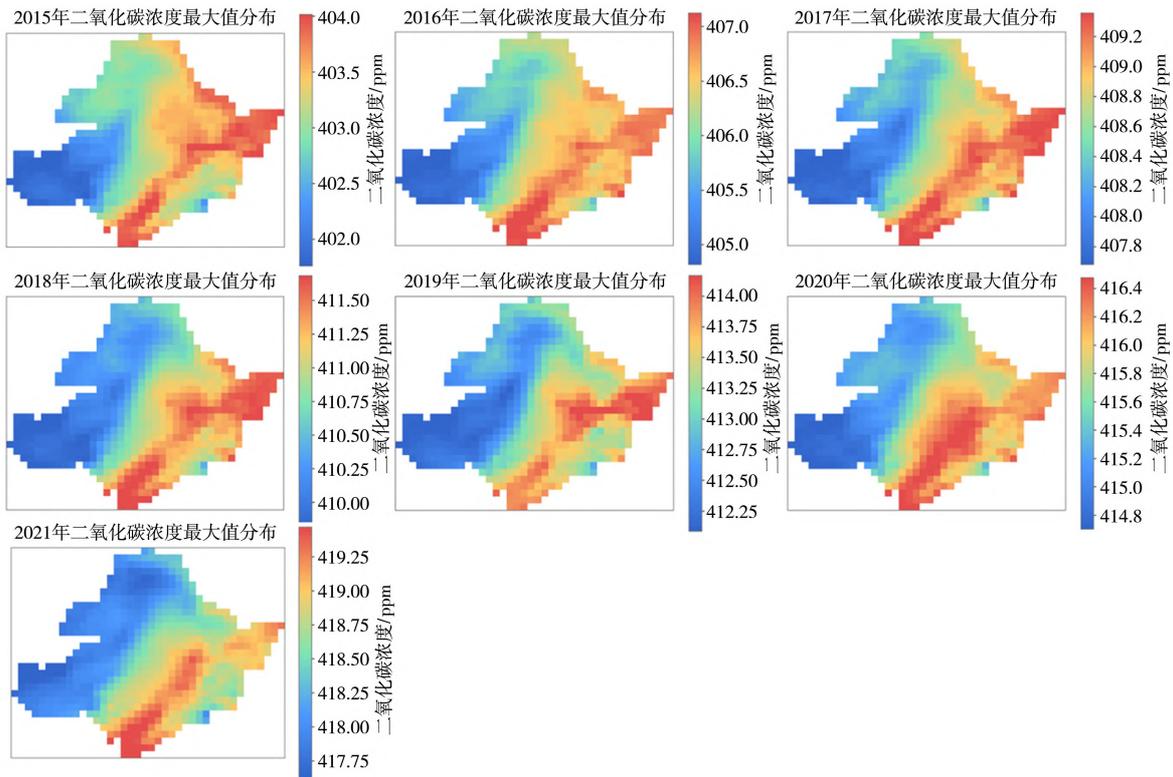
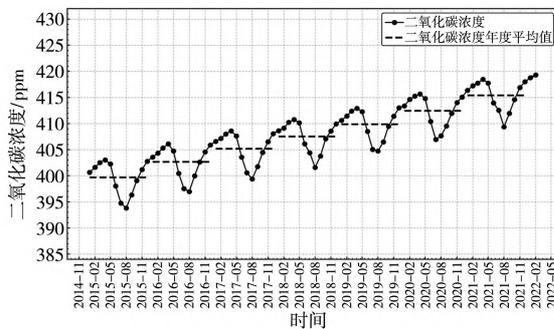
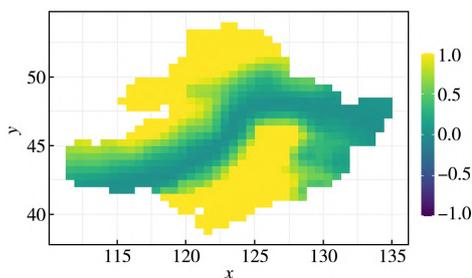
3.1.2 时间变化规律

CO₂ 浓度呈现典型“单峰型”季节波动。图 2 显示,每年 3 月至 4 月,CO₂ 浓度均值达到最高,之后迅速下降,到 7 月至 8 月时达到谷值期。2015—2021 年期间,东北地区 CO₂ 浓度年均值从 399.67ppm 持续上升至 415.41ppm,其年均增速为 2.24ppm/年。

3.2 碳排放的驱动作用

3.2.1 空间耦合特征

采用双变量 Moran's I 分析方法,对 2015—2022 年逐月观测数据开展空间相关性分析(见图 3)。结果显示,双变量 Moran's I 系数平均值为 0.2672,该均值大于 0 且与 0 存在一定偏离度,表明 CO₂ 排放与浓度间存在一定程度的正向空间自相关,即空间上呈现“高排放-高浓度”“低排放-低浓度”的相邻分布特征,但其整体聚集强度未表现出显著偏高的特征。从时间动态特征来看,双变量 Moran's I 系数存在明显的月度波动,波动范围为 0.1156 至 0.3856。上述

图1 2015—2021年东北地区 CO₂ 浓度空间分布图图2 2015—2021年东北地区 CO₂ 浓度变化时间趋势图图3 2016年9月东北地区 CO₂ 浓度与 CO₂ 排放相关系数

波动特征表明,CO₂ 排放与浓度的空间关联性存在时间异质性,其驱动因素或与季节性变化、

人类活动(如工业生产强度调整、供暖需求波动等)及政策调控措施相关。

此外,需注意 CO₂ 作为全球或大区域尺度的气候变化驱动因子,在东北地区这一局部尺度下,难以对 CO₂ 排放与浓度直接建立确定性关联。因此,本研究识别的东北地区 CO₂ 排放与浓度间正向空间关联性,仍需结合更大尺度的观测数据与模拟分析开展进一步验证。

3.2.2 时间耦合特征

大部分时间里,CO₂ 浓度(方块折线)和二氧化碳排放量(圆圈折线)的变化趋势是同向的(见图4)。在 CO₂ 排放量增加时,CO₂ 浓度也随之上升;当排放量有所下降时,浓度的上升趋势也会变缓或者出现小幅度的下降,这体现了二者之间的紧密联系,这说明排放量的变化是影响大气中 CO₂ 浓度的一个重要因素。年内碳排放峰值出现在每年12月(工业生产高峰),CO₂ 浓度峰值出现在次年3月,滞后约3个月,这反映出大气 CO₂ 累积的化学惰性及冬季逆温层对污染物的滞留效应。

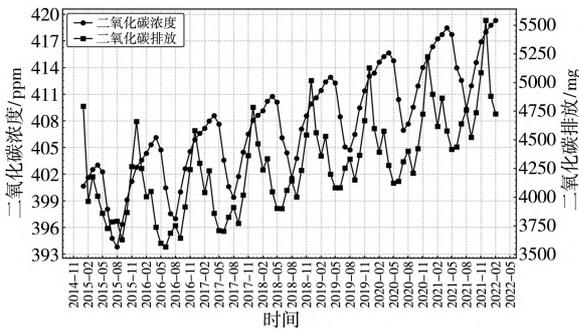


图4 2015—2021年东北地区CO₂浓度与CO₂排放时间变化趋势图

分析两者关系得出的皮尔逊相关系数为0.71。这一数值表明CO₂浓度与排放之间存在较强的正线性相关关系。同时,*p*值为1.76e-14,远小于常见的显著性水平。这意味着在统计学意义上,浓度与排放之间的线性相关关系是显著的。

3.3 植被光合固碳对CO₂浓度的调节作用

通过2015—2022年期间CO₂浓度与NDVI趋势关系的折线图(见图5),可以发现CO₂浓度和NDVI均呈现年度周期性波动,每年的曲线形态相似,且呈现负相关趋势,多数时段,两条曲线“反向波动”,CO₂浓度高时,NDVI往往偏低,CO₂浓度低时,NDVI相对偏高。本次分析得到的皮尔逊相关系数为-0.44。这一负值表明该浓度与NDVI之间呈现出一定程度的负线性相关关系。生态逻辑上,这与植被生长周期匹配:植被夏季生长旺盛(NDVI高),会吸收更多CO₂(使大气CO₂浓度相对降低);冬季植被枯萎(NDVI低),CO₂吸收减少(浓度相对升高)。对应的皮尔逊*p*值为2.60e-05,远小于

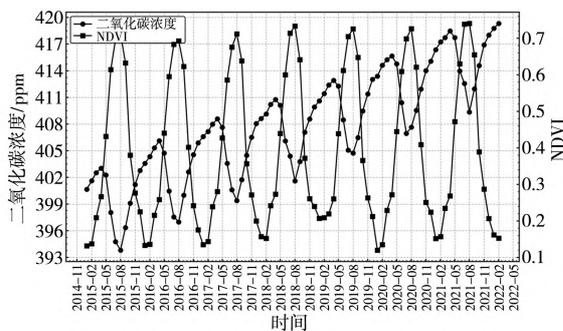


图5 2015—2021年东北地区CO₂浓度NDVI时间变化趋势图

常见的显著性水平,可以认为该浓度与NDVI之间的线性相关关系是显著的。

3.4 降水沉降效应对二氧化碳浓度的调节作用

CO₂浓度和降水量均呈现明显的年度循环(见图6),每年曲线形态存在夏季、冬季的起伏模式,且呈现负相关趋势,多数年份中,降水量峰值对应CO₂浓度的相对低谷;降水量低谷对应CO₂浓度的相对高峰。

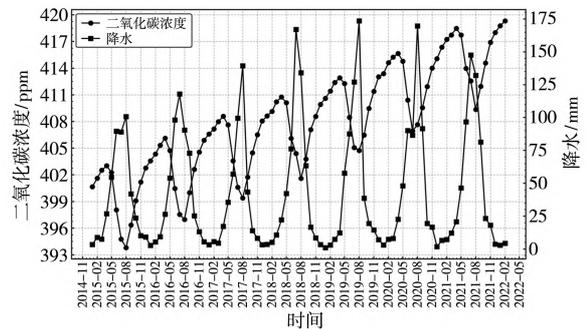


图6 2015—2021年东北地区CO₂浓度与降水时间变化趋势图

两者皮尔逊相关系数为-0.36。该负值表明浓度与降水之间存在一定程度的负相关关系。从直观上推测,随着降水量的增加,CO₂浓度会呈现下降趋势,降水可能对CO₂具有冲刷、稀释等作用。对应的皮尔逊*p*值为5.95e-04,远小于0.05的显著性水平。

3.5 多模型驱动机制解析

3.5.1 多种模型回归结果

使用决策树回归、弹性回归网络、优化随机森林等方法对CO₂浓度进行回归分析,结果显示,其中支持向量机(SVM)方法展现出了相当不错的性能。支持向量机取得了R²为0.65的成绩。这意味着回归模型能够解释65%的目标变量的变异性,相比优化梯度提升树(0.52),额外树回归(0.50),优化随机森林(0.49),三次多项式回归(0.41)等模型,分析结果更精准地捕捉到变量之间的关系,对数据的拟合效果更佳。支持向量机的均方误差为12.8,均方根误差为3.58,说明模型预测值与真实值之间的偏差相对较小。

3.5.2 驱动机制解析

使用多种回归模型分析各因子对二氧化碳浓度变化的贡献率,经计算,CO₂ 排放平均贡献

度达到 73.5%,NDVI 平均贡献度为 14.9%,降水平均贡献度为 11.7%。明确了 CO₂ 排放是影响 CO₂ 浓度的核心因子。

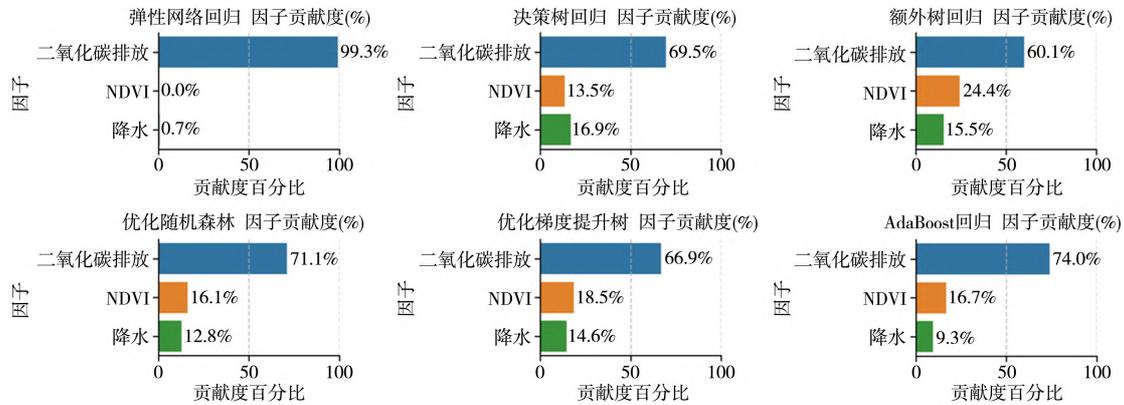


图 7 多种回归模型因子贡献度图

4 讨论

与现有研究方法相比,本研究的创新体现在两个方面:一是首次将双变量 Moran's I 应用于东北地区 CO₂ 浓度与 CO₂ 排放、NDVI、降水的空间耦合分析,填补了该区域自然因子与碳浓度空间关联研究的空白;二是突破现有区域碳浓度研究多依赖单一因子回归或线性模型的局限,通过随机森林、梯度提升树、SVM 等多种机器学习模型的对比应用,既量化了“排放-植被-降水”的非线性交互效应,又通过对比模型性能验证明确了区域碳浓度驱动分析中机器学习方法的最优选择,为同类研究提供了整合化的方法范式。

本研究结论与杨梅焕等(2024)具有一致性:其指出中国 CO₂ 呈“东部高、西部及东北地区低”的空间格局,且东北 2015—2022 年 CO₂ 年均增速 2.62ppm/a(全国最快)。本研究进一步量化东北人为排放贡献率达 73.5%,并锁定辽宁中南部工业走廊为高值核心,填补了其全国尺度未覆盖的东北内部“工业-生态”浓度梯度空白。本研究在其高精度分布分析基础上,引入双变量 Moran's I 与 SVM 模型($R^2=0.65$),不仅验证了其空间模拟方法的可靠性,更实现了 CO₂ 与排放、NDVI 的空间耦合及定量驱动

分析,拓展了区域 CO₂ 浓度研究的方法维度。

本研究仍存在局限性:一是部分模型存在多重共线性问题,需进一步优化变量筛选;二是未将温度、土地利用等潜在影响因子纳入模型,这可能限制模型解释力。未来研究可扩充变量维度,结合更精细的时空数据,采用更稳健的统计方法,深入探究 CO₂ 浓度的驱动机制,为区域碳减排与生态保护政策制定提供更精准的科学依据。

5 结论

5.1 东北地区 CO₂ 浓度时空分布特征

东北地区 CO₂ 浓度高值区域主要集中于东南部,且最高值稳定出现在最南部及辽宁区域;CO₂ 浓度呈现季节性波动变化,7 月、8 月达年度最低,3 月、4 月为年度最高。

5.2 CO₂ 浓度与各因子相关性

CO₂ 浓度与 CO₂ 排放在时间上存在较强且显著的正相关关系,且年内碳排放峰值与 CO₂ 浓度峰值滞后约 3 个月,这可能反映出大气 CO₂ 累积的化学惰性及冬季逆温层对污染物的滞留效应;CO₂ 浓度与 NDVI 在空间上未显示显著关联,时间上呈显著弱负相关;CO₂ 浓度与降水在空间上未显示显著关联,时间上呈显著弱负相关。采用决策树回归、弹性回归网络、优

化随机森林等模型对 CO₂ 浓度进行回归分析,其中支持向量机(SVM)性能最优, R^2 达 0.65, 优于其他模型。多模型分析显示,各因子对 CO₂ 浓度变化的贡献率中,CO₂ 排放占比约为 73.5%,NDVI 占比约为 14.9%,降水占比约为 11.7%。另一方面,虽然东北地区 CO₂ 浓度与 CO₂ 排放的空间分布初步显示二者存在一定程度的正向空间关联性,但是考虑到 CO₂ 作为全球或大区域尺度的气候变化驱动因子,在东北地区这一局部尺度下,难以直接建立 CO₂ 排放与浓度的确定性关联,该关联的普适性需结合更大尺度数据进一步验证。

5.3 综合性建议

针对东北地区“南高北低”的 CO₂ 浓度格局,建议在辽宁中南部工业走廊等高值区实施“精准减排”政策,推动能源结构转型与产业升级;植被(NDVI)与降水的调控效应表明,大兴

安岭等生态敏感区作为 CO₂ 浓度低值区,其植被-降水协同固碳潜力显著,建议进一步强化“生态碳汇”工程,通过植被修复与水资源优化管理增强协同固碳能力。

参考文献:

- [1] 莫露,巫兆聪,张熠.基于 OCO-2 数据的 CO₂ 浓度时空变化及影响因素分析——以中国东北地区为例[C]//第六届高分辨率对地观测学术年会论文集(上),2019:113-122.
- [2] 张力伟,张迪.新质生产力赋能东北全面振兴的理论逻辑、战略重点与关键路径[J].东北大学学报(社会科学版),2025,27(04):1-9.
- [3] 刘若轩,王志强,谭玉萍.东北典型黑土区小流域黑土层厚度及影响因素[J].水土保持学报,2024,38(04):346-353+361.
- [4] 刘玉莲,康恒元,赵玲.基于高分辨率资料的东北冷涡气候特征[J].气象,2025,51(07):830-839.
- [5] 高顺,欧金沛,黄晓蕾,等.基于 OCO-2 卫星的中国人碳为碳排放时空变化与社会经济影响分析[J].中国环境科学,2024,44(12):7024-7035.

Study on Spatiotemporal Evolution Characteristics of CO₂ Concentration and Multi-factor Driving Mechanisms in Northeast China

CHANG Guorong, WANG Ting*, XING Yang, LI Weiwei, SUN Muling

(Tongliao Meteorological Bureau, Tongliao 028000, China)

Abstract: This study is based on the XCO₂ data from NASA's Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) during 2015—2022, CO₂ emission data from the Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), MODIS MOD13A3 vegetation index products, and the monthly precipitation dataset with 1km resolution in China. By comprehensively applying methods such as geographic information system analysis, spatial autocorrelation test, time series trend analysis, and multiple statistical modeling, it systematically explores the spatiotemporal evolution patterns of atmospheric carbon dioxide concentrations in Northeast China and their driving mechanisms. The main findings are as follows: The CO₂ concentration presents a significant spatial pattern of “higher in the south and lower in the north”. The high-value core areas are stably distributed in the central-southern industrial corridor of Liaoning Province, with the maximum spatial concentration gradient difference reaching 2.5ppm. The annual mean CO₂ concentration continues to increase at a rate of 2.3ppm per year, and the monthly-scale variation shows a typical “unimodal” seasonal fluctuation characteristic, with the concentration peaking from March to April and troughing from July to August each year. Anthropogenic carbon emissions are the dominant factor affecting CO₂ concentrations. Among natural factors, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and precipitation exert an inhibitory effect.

Keywords: carbon dioxide concentration; OCO-2; spatiotemporal evolution; bivariate spatial autocorrelation; random forest; gradient boosting tree

(责任编辑 安祺)