

中国二氧化碳排放量时空分布及预测

唐欣黎, 席武俊*, 张璐, 高阳, 晏奕

楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南 楚雄

收稿日期: 2023年11月17日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月28日

摘要

本文通过查阅并整理碳排放相关资料, 在现有的研究基础上, 依托SuperMap空间插值法制作出2020年中国31省市春、夏、秋、冬的二氧化碳排放量的空间分布图和数理统计分析碳排放量年变化, 探究全国31省市近十年碳排放时间变化的趋势以及2020年碳排放量与季节变化的关系, 发现中国各省市在二氧化碳排放上存在明显的区域差异, 东部沿海地区在一年四季中二氧化碳排放量都位居前列, 另外时间上大体的趋势是在2011~2019年逐渐增加, 部分省市在2019~2020年中二氧化碳的排放量又大幅减少。最后在此基础上建立灰色预测模型, 得出继2020年后的5年中国二氧化碳总体排放量下降, 但都稍高于2020年的结果。

关键词

碳排放, 空间分布, 时间序列预测

Spatiotemporal Distribution and Prediction of Carbon Dioxide Emissions in China

Xinli Tang, Wujun Xi*, Lu Zhang, Yang Gao, Yi Yan

School of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong Yunnan

Received: Nov. 17th, 2023; accepted: Dec. 20th, 2023; published: Dec. 28th, 2023

Abstract

This article, by reviewing and organizing carbon emission-related data, and based on existing research, utilizes the SuperMap spatial interpolation method to create spatial distribution maps and mathematical statistical analysis of carbon dioxide emissions in the spring, summer, autumn, and winter of 31 provinces and cities in China in 2020. It explores the trend of carbon emissions over

*通讯作者。

the past decade and the relationship between carbon emissions and seasonal changes in 2020, It has been found that there are significant regional differences in carbon dioxide emissions among various provinces and cities in China. The eastern coastal region ranks among the top in carbon dioxide emissions throughout the year. Additionally, the overall trend over time is gradually increasing from 2011 to 2019, with some provinces and cities experiencing a significant decrease in carbon dioxide emissions from 2019 to 2020. Finally, a grey prediction model was established based on this, and it was found that the overall carbon dioxide emissions in China have decreased over the past five years after 2020, but all slightly higher than the results of 2020.

Keywords

Carbon Emissions, Spatial Distribution, Time Series Prediction

Copyright © 2023 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. 研究背景

近年来, 如何应对气候变暖问题已成为全球热点。习近平总书记于 2020 年 9 月 22 日在第七十五届联合国大会上向世界郑重宣布中国“双碳”目标, 即二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。在中国经济迅速发展的同时面临着越来越大的二氧化碳减排压力。基于大气二氧化碳浓度长期连续的观测, 可实时反映二氧化碳的动态变化情况, 还可反映二氧化碳年际变化趋势, 这对全面理解与预测未来全球变化、温室效应尺度及其对社会经济的影响意义重大。为此, 本文拟从省级尺度研究中国 31 省市二氧化碳排放量情况, 分析 2020 年二氧化碳排放量季节变化趋势以此研究中国 31 省市二氧化碳排放量空间分布, 对 2011 年~2020 年 10 年来的二氧化碳排放情况进行分析以此对 2021~2025 年碳排放量进行预测。

2. 研究现状

近年来, 国内外学者针对碳排放的时空变化格局和影响因子做了大量研究。研究范围主要集中在全国、省域和市域, 研究内容主要包括碳排放量的核算、区域差异和格局演变以及影响因素等。如王兴民等从城市尺度来研究中国 CO₂ 排放的空间分异特征和驱动因子的影响[1]。邓吉祥等分析了中国八大区域碳排放的区域格局变化特征及探讨了影响区域碳排放变化的原因[2]。祁强强等人认为从时空尺度把握碳排放分布规律, 量化区域碳排放的主导因素, 对于确定减排的重点区域和调控要素具有重要的指导意义, 并指出了经济发展和产业结构仍是碳排放量增长的主要原因[3]。田娟娟, 张金锁两人通过研究发现碳排放量空间格局发生了显著的变化, 2000 年及 2005 年碳排放呈现“西低东高”“北高南低”的空间分异特征, 而 2010 年及 2017 年碳排放逐渐呈现不平衡的空间分异特征, 高碳排放区向东南及西北移动趋势日趋明显[4]。一些研究者从城市尺度研究了中国 CO₂ 排放的空间分异特征和驱动因子的影响, 分析了中国八大区域碳排放的区域格局变化特征及变化原因。综上, 大多数学者都强调了从时空尺度把握碳排放分布规律的重要性。因此, 我们将在学者研究的基础上, 将其研究成果与所查找的数据资料结合在一起, 做出更深入的分析。

3. 研究对象与方法

3.1. 研究对象

本文以中国除港澳台地区外的 31 个省市从 2011 年到 2020 年二氧化碳的排放量为研究对象, 主要对

二氧化碳排放量的时空分布及 2021~2025 年碳排放量预测做出研究。

3.2. 数据来源

本文在综合现有研究现状的基础上,根据 31 个省市从 2011 年到 2020 年二氧化碳的排放量数据进行预测。二氧化碳排放量的数据由中国能源数据库(<http://www.stats.gov.cn/sj/ndsjs>)、中国核算数据库(<https://www.ceads.net.cn/>)提供。

3.3. 研究方法

3.3.1. 文献资料法

通过查阅与本次研究有关的图书资料及论文文献,深度分析国内外相关领域的研究现状,为该研究提供理论依据;检索大量的能源数据库,对本文的撰写提供数据支持与预测基础。

3.3.2. 数理统计法

运用 SPSSPRO 对 31 个省市从 2011 年到 2020 年二氧化碳的排放量的数据结果进行统计学处理与分析。通过其对原始数据的整理分析,可以获得十年来二氧化碳排放量的时间分布及其变化趋势,其得到的统计值可作为其它评价方法的基础资料。

3.3.3. 空间插值法

空间插值是通过已知点或分区的数据,推求任意点或分区数据的方法,常用于根据离散的采样点来获取连续的表面,包括空间内插和外推两种方法。空间内插提供一种从有限的已知样本点中估计同一区域中其他任意位置的值的方法,外推则是通过已知区域的数据来推求其他区域数据的方法。插值分析可以由有限的采样点数据,估计周围的数值情况,从而掌握研究区域内数据的总体分布状况,使得离散的采样点不仅仅反映其所在位置的数值情况,而且可以反映区域的数值分布[5]。

目前 SuperMap 中提供三种插值方法,用于模拟或者创建一个表面,分别是:距离反比权重法(IDW)、克吕金插值方法(Krging)、径向基函数插值法(RBF)。选用何种方法进行内插,通常取决于样点数据的分布和要创建的表面类型。无论选择哪种插值方法,已知点的数据越多,分布越广,插值结果将越接近实际情况[6]。

3.3.4. 数据标准化

数据标准化主要是消除变量间的量纲关系,使各指标值处于同一数量级别,从而可以确保数据的一致性、可靠性和可比性。标准化处理公式如下所示:

$$x_{i,j}^* = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_j}{s_y}, i \in [1, N], j \in [1, P]$$

$$y_j^* = \frac{y_j - \bar{y}_j}{s_y}, j \in [1, P]$$

其中 \bar{x}_i 和 \bar{y}_j 分别表示 x_i 和 y_j 的均值[7]。

3.3.5. 预测

(1) 灰色预测模型 GM(1,1)

灰色系统理论的特点是能够在有限的样本中充分挖掘利用其中的信息,为解决少量数据难以预测的问题提供了解决方案。灰色模型与其他模型的最大区别在于该模型具有灰色累加算子,这是其他模型所不具备的[8]。

本文在 SPSSPRO 中用时间序列对中国 31 省市 2011~2020 年的碳排放量数据进行级比检验建立灰色 GM(1,1) 时间序列为等间距模型进行预测。

设 $X^{(0)}(t_k) = (x^{(0)}(t_1), x^{(0)}(t_2), \dots, x^{(0)}(t_n))$, 若间距 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1} \neq c, k = 2, 3, \dots, n$, 则称该序列为非等间距序列。 $X^{(r)}(t_k)$ 为 $X^{(0)}(t_k)$ 的 r 阶累加序列, 其中

$$x^{(r)}(t_k) = \begin{cases} x^{(0)}(t_1) & k=1 \\ x^{(0)}(t_1) + \sum_{j=2}^k \frac{x^{(0)}(t_j) \times \Delta t_j}{t_j^{1-r}} & k=2, 3, \dots, n \end{cases}$$

r 的取值范围为 $0 < r \leq 1$ [8]。

本文使用 MAPE 作为衡量模型有效性的标准, 如公式所示。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}(k)|}{x^{(0)}(k)}$$

表 1 为预测模型评价标准, 用以说明 MAPE 的取值范围。一般情况下认为当 MAPE 在 10% 以下时该模型有较高的预测能力[9]。

Table 1. Prediction model evaluation criteria

表 1. 预测模型评价标准

MAPE	预测精度
<10%	较高
10%~20%	较好
20%~50%	合理
>50%	较弱

(2) 线性回归预测模型

本文对各省市 2011~2020 年的碳排放量数据的采用线性回归(一般二乘法)的方法, 得出 $y = bx + a$ 的回归方程, 从而利用方程对 2020 年之后的五年二氧化碳排放量进行预测。一般地, 影响 y 的因素有多个, 假设有 x_1, x_2, \dots, x_k, k 个因素, 通常可考虑如下的线性关系式:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

对 y 与 x_1, x_2, \dots, x_k 同时作 n 次独立观察得 n 组观测值 $(x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tk}), t = 1, 2, \dots, n (n > k + 1)$, 它们满足关系式:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \dots + \beta_k x_{tk} + \varepsilon_t$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_n$ 互不相关均是与 ε 同分布的随机变量。于是有 $Y = X\beta + \varepsilon$, 使用最小二乘法得到 β 的解 $\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$, 其中, $(X^T X)^{-1} X^T Y$ 称为 X 的伪逆[10]。

4. 中国 31 省市碳排放结果与分析

4.1. 中国 31 省市碳排放时间分布

通过分析 2011 年到 2020 年二氧化碳的排放量数据, 研究中国除港澳台地区外的 31 个省市二氧化碳排放量的时间变化, 结果如图 1 所示。

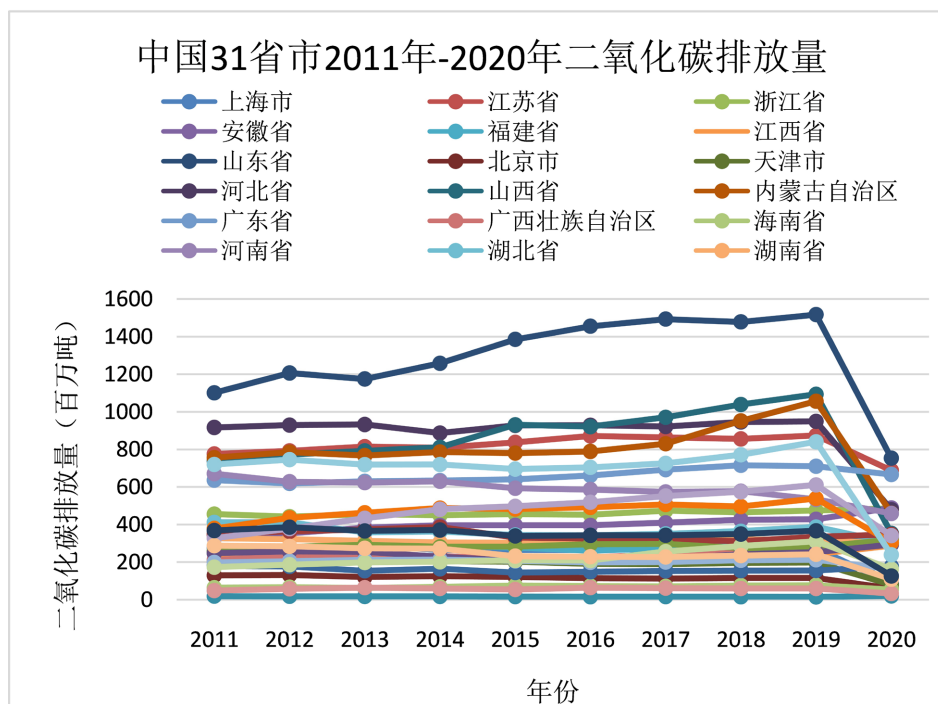


Figure 1. Carbon dioxide emissions from 31 provinces and cities

图 1. 31 省市二氧化碳排放量

从(图 1) 31 省市二氧化碳排放量曲线图可以看出：各省市在 2011~2020 年二氧化碳排放量整体变化趋势一致。大体的趋势是在 2011~2019 年逐渐增加，大多数省市在 2019~2020 年中二氧化碳的排放量又大幅减少。

在 2011~2019 年期间，二氧化碳逐渐增加的原因主要有三方面：一是随着经济迅速增长，我国现阶段产业结构不断调整，高耗能产业占有相当大比重，因此带来大量的碳排放；二是我国的能源消费结构以煤炭为主，导致了碳排放量的增加；三是随着人口的剧增和工业化的发展，人类社会对化石燃料的需求急剧增加，从而导致二氧化碳排放量的快速增长。

在 2019~2020 年期间，大多数省市二氧化碳排放量减少的原因是：中国政府采取了一系列措施,如推广清洁能源、加强工业和交通领域的节能减排、加强碳交易等，来减少碳排放。2019 年到 2020 年，疫情期间全国大部分地区碳排放量创新低，但仍然有省份不减反增加，浙江省、安徽省、福建省、江西省等部分华东及沿海省份疫情期间由于油轮活动限制，导致主要海港污染物排放量激增，另外由于 2020 年的下半年疫情回缓后，作为国内最大的碳排放区域的华东省份复工复产后产业能源消耗，因此二氧化碳排放量就上升得很快，总量变化仍为上升趋势。而重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区、广西壮族自治区等部分西南与南部省份相较于全国其它地区，受疫情的影响较小，各领域复苏较快，维持经济发展仍需要大量的煤炭能源消耗，所以碳排放量仍在增长。

4.2. 中国 31 省市碳排放空间分布

为分析二氧化碳排放量空间分布特点，根据气候统计法，本文采用四季分类的方法。气候统计上，3、4、5 月为春季，6、7、8 月为夏季，9、10、11 月为秋季，12、1、2 月为冬季。

通过 SuperMap iDesktop 软件，运用空间插值法，本文得到中国除港澳台地区外的 31 个省市春、夏、秋、冬四季二氧化碳排放量的空间分布，如图 2 所示。

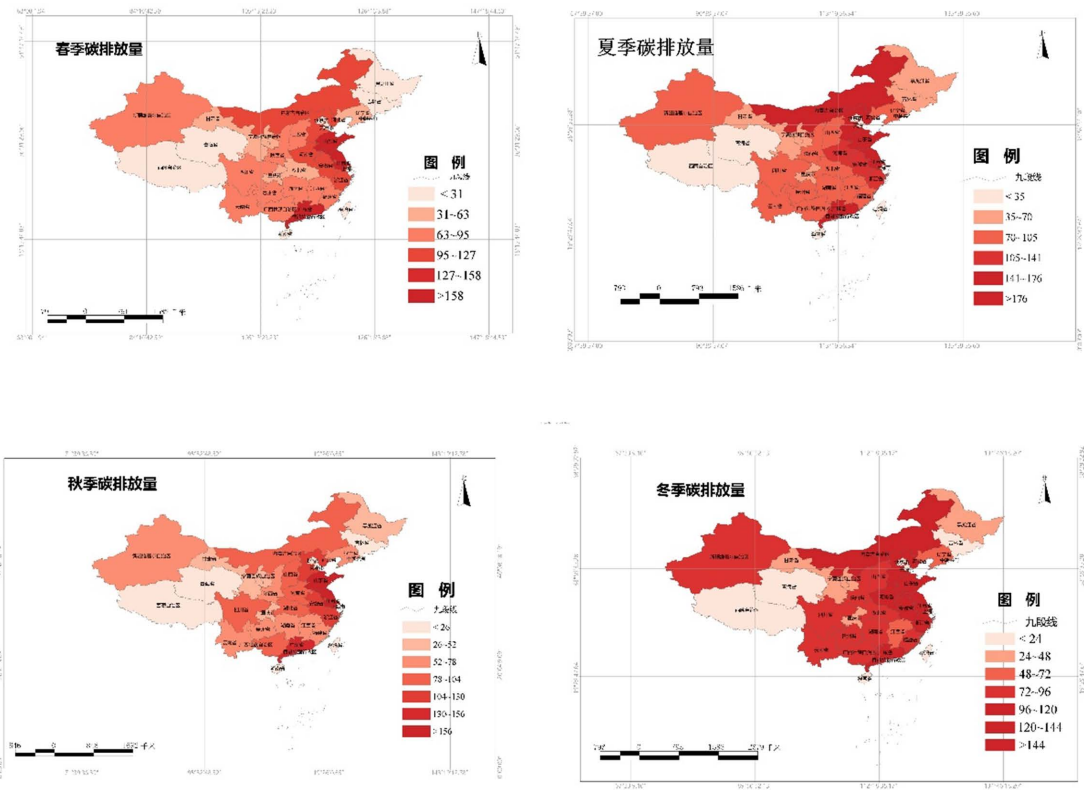


Figure 2. Spatial distribution of carbon dioxide emissions in 31 provinces and cities
图 2. 31 省市二氧化碳排放量空间分布图

在 2020 年中，各省市在夏季的二氧化碳排放量最多，总排放量为 2590.18 百万吨；在秋季二氧化碳排放量最少，总排放量为 2172.61 百万吨。

华东地区在一年四季中二氧化碳排放量都位居前列，其碳排放量主要来自山东和江苏两省，二省合计占华东地区总排放量的 50% 以上，山东和江苏都是中国东部沿海的主要制造业中心，山东的能源、工业和农业部门也很强大，所以二氧化碳排放量较多；而东北地区二氧化碳排放量相对较少，原因是该地区的能源利用效率偏低，这意味着在能源消耗过程中，碳排放量可能相对较低。碳排放量的影响因素可能基于低碳经济视角，这意味着在经济发展过程中，可能更注重减少碳排放，从而降低了碳排放强度。

4.3. 中国 31 省市碳排放预测

根据上述设定数据构建的基准情况，以年份为自变量 X (2011 年为自变量 1)，对 2011 年~2020 年中国 31 省市二氧化碳的排放量进行线性回归预测模型建立，见表 2，据此对 2021~2025 年中国 31 省市总二氧化碳排放量进行预测。

Table 2. Prediction model for carbon dioxide emissions in 31 provinces and cities in China from 2011 to 2020
表 2. 2011 年~2020 年中国 31 省市二氧化碳排放量预测模型

省市	预测公式	省市	预测公式
上海市	$y = 314.37 - 11.11 * X$	湖北省	$y = 402.426 - 7.068 * X$
江苏省	$y = 811.344 + 1.156 * X$	湖南省	$y = 321.158 - 1.447 * X$
浙江省	$y = 440.333 + 3.746 * X$	重庆市	$y = 167.363 - 1.209 * X$
安徽省	$y = 331.396 + 12.729 * X$	四川省	$y = 368.636 - 4.441 * X$

Continued

福建省	$y = 241.038 + 7.426 * X$	贵州省	$y = 268.58 + 3.212 * X$
江西省	$y = 194.454 + 6.175 * X$	云南省	$y = 231.0 + 1.739 * X$
山东省	$y = 1237.328 + 8.143 * X$	西藏自治区	$y = 17.953 - 0.152 * X$
北京市	$y = 141.424 - 4.851 * X$	陕西省	$y = 449.258 + 1.663 * X$
天津市	$y = 230.293 - 7.759 * X$	甘肃省	$y = 213.107 - 2.022 * X$
河北省	$y = 1002.826 - 22.021 * X$	青海省	$y = 61.077 - 0.822 * X$
山西省	$y = 826.381 + 2.912 * X$	宁夏回族自治区	$y = 173.512 + 8.344 * X$
内蒙古自治区	$y = 786.234 + 1.791 * X$	新疆维吾尔自治区	$y = 381.49 + 16.315 * X$
广东省	$y = 608.977 + 9.313 * X$	辽宁省	$y = 800.749 - 20.446 * X$
广西壮族自治区	$y = 197.227 + 8.513 * X$	吉林省	$y = 313.558 - 13.561 * X$
海南省	$y = 66.875 + 0.29 * X$	黑龙江省	$y = 418.005 - 14.96 * X$
河南省	$y = 686.521 - 18.006 * X$		

由于 2019 年~2020 年受疫情的影响,用线性回归模型研究中国 31 省市二氧化碳排放量年份与年二氧化碳排放量之间线性回归关系,得出结果:F 检验的显著性 P 值为 0.812,水平上不呈现显著性,不能拒绝回归系数为 0 的原假设,模型无效。所以直接用线性回归模型预测中国 31 省市总二氧化碳排放量预测是无效的。

Table 3. Grade comparison inspection result table

表 3. 级比检验结果表

索引项	原始值	级比值	平移转换后序列值	平移转换后级比值
1	12067.358	-	40184.358	-
2	12393.927	0.974	40510.927	0.992
3	12439.715	0.996	40556.715	0.999
4	12605.466	0.987	40722.466	0.996
5	12670.868	0.995	40787.868	0.998
6	12813.486	0.989	40930.486	0.997
7	13151.411	0.974	41268.411	0.992
8	13561.661	0.97	41678.661	0.99
9	14058.375	0.965	42175.375	0.988
10	9284.154	1.514	37401.154	1.128

在 SPSSPRO 中用时间序列进行级比检验,通过级比检验,见表 3 级比检验结果表,从表中分析可以得到,平移转换后序列的所有级比值都位于区间(0.834, 1.199)内,说明平移转换后序列适合构建灰色预测模型[11]。

Table 4. Model Fitting Results Table

表 4. 模型拟合结果表

索引项	原始值	预测值	残差	相对误差(%)
1	12067.358	12067.358	0	0
2	12393.927	12894.83	-500.904	4.042
3	12439.715	12809.013	-369.298	2.969
4	12605.466	12723.376	-117.909	0.935
5	12670.868	12637.917	32.951	0.26
6	12813.486	12552.638	260.848	2.036
7	13151.411	12467.537	683.874	5.2
8	13561.661	12382.614	1179.047	8.694
9	14058.375	12297.868	1760.506	12.523
10	9284.154	12213.3	-2929.146	31.55

从表 4 得出结果：模型平均相对误差为 6.821%，意味着模型拟合效果良好，因此采用灰色预测模型 GM(1,1) 进行预测。预测结果如表 5 所示。

Table 5. Predicted total carbon dioxide emissions from 31 provinces and cities in China from 2021 to 2025
表 5. 中国 31 省市 2021~2025 年总二氧化碳排放量预测值

预测阶数	预测值
1	12128.909
2	12044.695
3	11960.657
4	11876.794
5	11793.108

5. 结论与讨论

根据已有的数据和趋势分析，未来中国各省市的二氧化碳排放预测如下。

5.1. 总体趋势

在当前政策和经济发展情况下，中国的二氧化碳排放量总体下降，但稍高于 2020 年，预计到 2025 年，中国的温室气体排放将达到 11793.108 百万吨。

5.2. 区域差异

中国各省市在二氧化碳排放上存在明显的区域差异。

5.2.1. 空间分布方面

东部沿海地区，经济发达、人口密集一年四季中二氧化碳排放量都位居前列；而在西部地区，经济相对落后、人口较少，二氧化碳排放量最少；各省市在夏季的二氧化碳排放量最多，在秋季二氧化碳排放量最少。

5.2.2. 时间分布方面

各省市在 2011~2020 年二氧化碳排放量整体变化趋势一致。大体的趋势是在 2011~2019 年逐渐增加，大多数省市在 2019~2020 年中二氧化碳的排放量又大幅减少。预计未来这种区域差异将继续存在。

5.3. 产业结构调整

随着国家产业结构的优化调整，高能耗、高排放的产业将逐渐向低能耗、低排放的产业转型。这将导致部分省市的二氧化碳排放量下降，但在一些重工业基地和能源产区，排放量仍将保持较高水平。

5.4. 节能减排政策

随着国家对节能减排的重视程度加大，未来政府将采取更加严格的政策措施，推动各省市实施节能减排。这将有助于降低各省市的二氧化碳排放。

综合考虑以上因素，未来中国各省市在二氧化碳排放上的预测呈现出以下特点：总体上，二氧化碳排放将慢慢减少；区域差异明显，东部地区排放量较高，西部地区排放量较低。

基金项目

本项目为楚雄师范学院地理科学云南省一流专业建设点项目成果。

参考文献

- [1] 王兴民, 吴静, 白冰, 等. 中国 CO₂ 排放的空间分异与驱动因素: 基于 198 个地级及以上城市数据的分析[J]. 经济地理, 2020, 40(11): 29-38.
- [2] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 189-200.
- [3] 祁强强, 徐占军, 李娜艳, 等. 黄河流域碳排放的时空分布及影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(4): 577-582.
- [4] 田娟娟, 张金锁. 基于地理探测器的中国碳排放时空分布特征及驱动因素研究[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 13-20+27.
- [5] 黄涛. 基于 SuperMap 的多源异构气象数据的实时预处理模型研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [6] 王晓英. 地基 GNSS 层析对流层水汽若干关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [7] 孙荣恒. 应用数理统计[M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2014: 204-206.
- [8] 李森, 兰延文. 碳排放驱动力及县域碳排放时空分布研究——以河南省为例[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(3): 6.
- [9] Wu, L., Liu, S.F., Liu, D.L., *et al.* (2015) Modelling and Forecasting CO₂ Emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) Countries Using a Novel Multi-Variable Grey Model. *Energy*, **79**, 489-495.
- [10] 普布次仁. 金融支持西藏边境地区建设研究[J]. 西藏民族大学学报(哲学社会科学版), 2022, 43(3): 102-107.
- [11] 甘浪雄, 张怀志, 卢天赋, 等. 基于熵权法的水上交通安全因素[J]. 中国航海, 2021, 44(2): 53-58.