

电力行业二氧化碳排放影响因素研究

杨文海

中国华能华能上安电厂, 河北 石家庄

收稿日期: 2022年11月23日; 录用日期: 2022年12月7日; 发布日期: 2022年12月29日

摘要

本文选取我国2008年~2017年的电力行业二氧化碳排放数据为样本, 运用主成分分析法研究中国电力行业二氧化碳排放的驱动因素。研究结果表明: 能源强度、城镇化水平是影响二氧化碳排放的首要因素, 经济发展水平、发电结构、产业结构、燃煤量、人口总量是影响二氧化碳排放的次要因素, 能源价格对电力行业二氧化碳排放没有太大影响。其中负向驱动因素包括: 能源强度、城镇化水平、产业结构与能源价格; 正向驱动因素包括: 经济发展水平、发电结构、燃煤量与人口总量。

关键词

电力行业, 二氧化碳排放, 影响因素, 主成分分析

Research on Influencing Factors of Carbon Dioxide Emissions in the Power Industry

Wenhai Yang

Huaneng Shangan Power Plant, China Huaneng, Shijiazhuang Hebei

Received: Nov. 23rd, 2022; accepted: Dec. 7th, 2022; published: Dec. 29th, 2022

Abstract

This paper selects China's power industry carbon dioxide (CO₂) emission data from 2008~2017 as a sample and uses principal component analysis to study the driving factors of China's power industry's carbon dioxide emissions. The results show that energy intensity and urbanization level are the primary factors influencing CO₂ emissions, while economic development level, power generation structure, industrial structure, coal combustion volume, and total population are secondary factors influencing CO₂ emissions, and energy prices do not have much influence on CO₂ emissions in the power industry. The negative drivers include: energy intensity, urbanization level, industrial structure, and energy price; the positive drivers include: economic development level,

power generation structure, coal combustion volume, and total population.

Keywords

Power Industry, Carbon Dioxide Emissions, Influencing Factors, Principal Component Analysis

Copyright © 2022 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

改革开放以来, 中国在经济方面取得举世瞩目的成就, 同时也成为了世界上二氧化碳排放最多的国家[1], 那么中国对二氧化碳排放控制的情况成为了世界关注的焦点[2]。截止到 2018 年, 中国的 GDP 达到 900309.5 亿元, 相比于 2017 年增长了 6.6% [3]; 二氧化碳排放量达到 9466.504 Mt, 相比于 2017 年增长了 3.1% [4], 其中, 有大约 40% 的二氧化碳排放量是来自于电力行业[5]。因此, 有效的控制电力行业的二氧化碳排放量是缓解中国总二氧化碳排放的关键。

此外, 随着我国电力行业的逐步发展和完善, 国内电能需求随着增加, 同时也造成了大量二氧化碳的排放。双碳目标的提出使得越来越多的学者关注于电力行业的低碳转型问题, 且侧重于发电系统的低碳减排。然而, 电力行业的低碳发展并非只依靠单一或局部的发电系统来完全实现, 与电力行业相关的其他相关因素, 譬如电力设备制造和运输、产业结构等均需得到合理的降碳, 以加速双碳目标的实现。因此, 亟需研究并识别电力行业二氧化碳排放主要影响因素, 为后期行业二氧化碳控制提供合理支撑。

目前对于二氧化碳排放影响因素研究有大量的文献。在农业方面, 宋艺(2020)通过灰色关联度方法的运行以动态分析全国农业碳排放的影响因素, 其中, 各因素影响大小从大到小排序为: 化肥、柴油、农药、农膜、灌溉、翻耕[6]。胡婉玲(2020)运用峰值分析、LMDI 分解和 EKC 检验等方法对农业碳排放进行分析统计, 结果发现: 与碳减排成正相关的因素包括农业产业结构、农村人口以及生产效率, 与碳减排成负相关的因素包括地区经济发展水平以及城镇化水平[7]。在交通运输业方面, 陈滨霞(2020)聚焦于交通运输对碳排放的时变成因, 通过贝叶斯 MCMC 方法以及多元时变参数 TVP-SV 回归模型的结合运行, 得出能源强度在碳排放中起主导作用[8]。王勇(2021)聚焦于铁路运输, 通过构建固定 - 随机效应模型以获得与二氧化碳排放成正相关的因素, 包括产业结构、平均运输距离以及换算周转量, 与二氧化碳排放成负相关的因素包括车辆结构和高速铁路[9]。在旅游业方面, 汤姿(2019)通过 STIRPAT 模型分析了旅游业二氧化碳排放的影响因素, 结果显示旅游业总收入对二氧化碳排放影响最大[10]。在制造业方面, 尹健(2020)关注于制造业的二氧化碳排放量, 通过对数平均 Divisia 指数分解法的利用分析制造业二氧化碳排放影响因素包括行业经济发展和能源结构[11]。在服务业方面, 夏鸣(2019)采用 PDA + LMDI 模型进行分析, 结果表明能源强度为主要贡献因子[12]。在家庭消费方面, 胡振(2020)建立 LMDI 模型进行分析, 结果表明, 碳排放强度效应、消费抑制效应和居住密度效应等因素与碳减排成正相关, 住房面积效应和家庭规模效应等与碳减排成负相关[13]。任英华(2020)构建了家庭消费改进 STIRPAT 模型并总结出影响城镇碳排放的主要因素为城镇居民消费结构[14]。

通过上述的文献分析发现, 在对二氧化碳排放影响因素进行研究时, 涉及了许多领域, 采用了各种模型各种分析方法, 但是对于电力行业二氧化碳排放影响因素的研究却很少。因此, 本文采用主成分分析方法来进行电力行业二氧化碳排放影响因素研究。

2. 电力二氧化碳排放影响因素

1) 电力行业燃煤量

能源的消费便会伴随着二氧化碳排放的产生，而电力行业便是将煤炭等一次能源经发电设施转换成电能，电能的产生便伴随着能源的消耗以及二氧化碳的排放。因而本文将电力行业燃煤量(X_1)作为一个影响因素[15]。

2) 经济发展水平

一个国家或一个地区经济的发展是以能源的消费为基石，尤其是对电能的消耗。经济的发展水平在一定程度上影响了电力行业的发电量，自然就间接的影响到电力行业的二氧化碳排放量。因而本文的经济发展水平(X_2)用人均 GDP 来表示，单位是元[16]。

3) 城镇化水平

在以能源消耗为支撑的经济发展模式下，电能作为生产和生活不可或缺的能源，城镇化进程的推进会增加电能的消耗，那么不可避免的增加电力行业的二氧化碳排放。因而本文的城镇化水平(X_3)表示为城镇人口/总人口[16]。

4) 能源价格

能源价格的上升会增加电能生产的成本，可能会提升电能的价格，使得生产和生活的成本增加，这样可能会造成电能使用量的减少，进而减少电力行业的二氧化碳排放。因而本文的能源价格(X_4)表示为居民消费价格指数[17]。

5) 人口总量

人口数量的多少会影响到电能的消费量以及产。人口基数越大，电能消费越多，电力二氧化碳排放越多。因而本文将人口总量(X_5)作为一个影响因素，单位是万人[16]。

6) 能源强度

能源的利用消耗与其经济或物力产出的比重即为能源强度，可指代每单位 GDP 耗能总量，最常用的单位为“吨标准煤/万元”。能源强度作为最常用的一个衡量能源综合利用效率的指标，能够充分体现研究对象利用能源所产生的经济效益。因而本文的能源强度(X_6)表示为能源消费的总量/GDP [16]。

7) 发电结构

现阶段，我国电力行业的发电形式仍以传统火力发电为主，风电、水电等能源发电为辅。然而，行业内部的二氧化碳排放几乎全部来自于火力发电。因而本文的发电结构(X_7)表示为火力发电量/总发电量 [16]。

8) 产业结构

在第一、第二、第三产业中，第二产业属于耗能和碳排放相对较高的产业，而第三产业的发展情况则昭示着当地经济的现代化程度。第三产业的蓬勃发展能够提高其他产业的生产效率，加快工农业发展的现代化与专业化，进而优化全社会的生产结构框架，促进市场良性循环，缓解各领域就业压力，健康、快速地推动全社会经济持续发展，同时也会降低第二产业所占的比重，进而降低第二产业的碳排放。因而本文的产业结构(X_8)表示为第二产业产值与第三产业产值之比[16] [17] [18] [19] [20]。

3. 数据

3.1. 电力二氧化碳排放的计算

本文假设电力行业的二氧化碳排放都是从火力发电方式中产生的。那么，电力行业二氧化碳排放总量可表示为：

$$C = E \times P \times A \quad (1)$$

其中, C 为电力行业二氧化碳排放总量; E 为火力发电的发电总量, 单位为亿千瓦时; P 为单位发电量的标准煤耗, 单位为克/千瓦时; A 为单位标准煤的二氧化碳排放系数, 此处取国家发改委推荐的 2.6308 吨二氧化碳/吨标准煤[16]。

3.2. 数据来源

本文以 2008 年~2017 年为研究期。本文的 GDP、人均 GDP、城镇人口数量、总人口数量、居民消费价格指数、第二产业产值、第三产业产值等数据及电力行业燃煤量、火力发电量、总发电量、单位发电量的标准煤耗等数据均来自于历年的《中国统计年鉴》和《中国电力年鉴》。

4. 主成分分析

4.1. 数据标准化

由于所选的影响因素(电力行业燃煤量、经济发展水平、城镇化水平、能源价格、人口总量、能源强度、发电结构、产业结构)的单位不同, 因此, 在进行主成分分析之前, 需要将原始数据进行标准化处理, 来消除指标间量纲不一致及数量级有差异等现象。标准化的公式为:

$$S_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_{ij} - \bar{\alpha}_j)^2 / (n-1)}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$Z_{ij} = (\alpha_{ij} - \bar{\alpha}_j) / S_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, m 为样本数量, $m = 11$; n 为原始指标数量, $n = 8$; α_{ij} 为各样本的原始数据; $\bar{\alpha}_j$ 为各指标样本数据的平均值; S_j 为所有样本数据的标准差; Z_{ij} 为所有样本数据标准化处理后得到的标准化数据。

4.2. 主成分分析

电力行业相关因素各不相同, 差异明显, 且变量较多。此外, 这些因素并不服从正态分布, 因素之间往往是共线性或自相关的。有鉴于此, 本文采用主成分分析法, 通过对原始数据的合理利用, 聚焦于较少的几个关键因素以研究其对二氧化碳排放的影响。方法主要步骤如下:

1) 主成分分析适用性检验

本文利用巴特利球体以及 KMO 两个方法对变量开展检验。

巴特利球体检验的操作步骤为: 首先, 判断变量是否适合进行因子分析, 具体地, 若原假设在分析中不被否定, 则表明变量之间提供信息的独立性与可拆分性, 故而因子分析不适用于该类变量, 反之亦然。然后, 对变量之间的相关性进行定量检验(利用 Bartlett 球检验方法判断是否为单位阵)。相关性检验的原点由变量的相关系数矩阵所组成的矩阵所表示。此时, 我们定义相关系数矩阵是一个标准的单位矩阵为零假设, 则若巴特利球检验所得到的结果, 即统计量数值较小, 且相应伴随概率值绝对大于确定的用户显著性水平常量, 则零假设在该分析中成立并作为基本假设之一, 反之亦然, 这意味着相关系数矩阵并非一个标准的单位矩阵, 因子分析能够正常实施。此外, 若所有假设都不被相关性变量所否定, 那么变量之间缺乏公因子, 进而具有一定的可能性去独立提供信息。

当需要检验变量之间的相关性程度及偏相关性程度时, KMO 检验是较好的方法, 因此在本文获得运用。首先, 定义变量之间的相关性程度及偏相关性程度由 0~1 之间的数所表示, 越趋近于 0, 则表示变量之间的相关性程度越若, 而偏相关性则越强, 进而因子分析能够实现更差的求解效果; 越趋近于 1, 则完全相反。此外, 在 0~1 之间取 0.9、0.8、0.7、0.6 分别表示很合适、合适、较为合适、一般、不太合适, 极度合适的取值在 0.5 以下。

本文的 Bartlett 球检验结果(见表 1)为拒绝原假设, 适合作因子分析; KMO 值(表 1)为 0.783, 该值大于 0.7, 因子分析的效果还不错。因此, 本文中的影响电力二氧化碳排放的影响因素(包括: 电力行业燃煤量、经济发展水平、城镇化水平、能源价格、人口总量、能源强度、发电结构、产业结构)适合作因子分析。

Table 1. KMO and Bartlett's test

表 1. KMO 和 Bartlett's 检验

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy		0.813
	Approx. Chi-Square	204.004
Bartlett's Test of Sphericity	df	36
	Sig.	0.000

2) 建立相关系数矩阵(见附录表 A1)

3) 计算特征值与特征向量、贡献率和累计贡献率

本文用 λ 来表示特征值。每个成分的贡献率计算方式为: 各成分所包含的信息占所有信息总和的百分比。其中, 各成分所包含的信息用方差进行表示, 则该成分的贡献率大小等于各成分的方差所占所有成分方差之和的百分比。需要强调的是, 判定成分中各因素是否为主成分的方法有两个: 其一, 将所有特征值大于 1 的成分视为主成分; 其二, 将所有成分中贡献率大于 85%的成分视为主成分。

本文根据后者来确定主成分内容, 如表 2 所示。

Table 2. Characteristic value, contribution rate and cumulative contribution rate of principal components

表 2. 主成分的特征值、贡献率和累计贡献率

主成分	特征值	贡献率%	累计贡献率%
1	7.302	81.129%	81.129%
2	1.076	11.951%	93.081%

4) 计算主成分载荷

由总方差解释可知, 主成分 1 的特征根 λ_1 为 7.302, 相应的累计方差贡献率为 81, 128%; 成分 2 的特征根 λ_2 为 1.076, 相应的累计方差贡献率为 93, 081%。显然, 二者的累计方差功能贡献率均大于 80%, 这意味着二者已经涵盖了绝大部分信息, 进一步说明电力行业影响二氧化碳排放的因素中, 这二者能够合理地代表所有指标, 故分别用 F_1 和 F_2 来表示主成分 1 和 2。 F_1 和 F_2 对应的系数分别由主成分的贡献率所得, 具体如下:

$$F_1 = 0.103 \times ZX_1 - 0.136 \times ZX_2 - 0.137 \times ZX_3 + 0.054 \times ZX_4 - 0.136 \times ZX_5 + 0.136 \times ZX_6 + 0.127 \times ZX_7 + 0.131 \times ZX_8 \quad (4)$$

$$F_2 = -0.444 \times ZX_1 + 0.032 \times ZX_2 + 0.006 \times ZX_3 + 0.771 \times ZX_4 - 0.028 \times ZX_5 - 0.088 \times ZX_6 + 0.180 \times ZX_7 + 0.196 \times ZX_8 \quad (5)$$

其中, F_1 和 F_2 表示为第一主成分和第二主成分, ZX_1, \dots, ZX_8 表示为 X_1, \dots, X_8 经过标准化处理后的值, 主成分载荷见表 3。

5) 主成分的综合得分

主成分的综合得分公式为:

Table 3. Main component loads
表 3. 主成分载荷

指标	第一主成分荷载	第二主成分荷载
电力行业燃煤量(X_1)	0.755	-0.477
能源价格(X_4)	0.391	0.829
能源强度(X_6)	0.992	-0.094
城镇化水平(X_3)	-0.997	0.006
人口总量(X_5)	-0.994	-0.030
产业结构(X_8)	0.954	0.211
发电结构(X_7)	0.925	0.194
经济发展水平(X_2)	-0.995	0.035

$$F = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) \times F_1 + \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \times F_2 \quad (6)$$

$$F = 0.872 \times F_1 + 0.128 \times F_2 \quad (7)$$

即:

$$F = 0.033 \times ZX_1 - 0.114 \times ZX_2 - 0.119 \times ZX_3 + 0.146 \times ZX_4 - 0.122 \times ZX_5 + 0.107 \times ZX_6 + 0.134 \times ZX_7 + 0.139 \times ZX_8 \quad (8)$$

4.3. 回归分析

根据主成分 F 的表达式, 对因变量中国电力行业二氧化碳排放量(C)和主成分 F 进行回归分析, 回归结构如下:

$$C = -2.89 \times 10^{-15} + 0.138 \times ZX_1 + 0.998 \times ZX_2 - 3.210 \times ZX_3 - 0.075 \times ZX_4 + 0.115 \times ZX_5 - 3.404 \times ZX_6 + 0.646 \times ZX_7 - 0.330 \times ZX_8 \quad (9)$$

$R^2 = 0.881$, 调整后 $R^2 = 0.847$ 。因此, 模型拟合效果非常好, 并且各系数均通过了显著性检验总体上模型建立的非常好, 故中国电力行业二氧化碳排放的回归模型为式(9)。

4.4. 结果分析

通过回归模型发现:

1) 电力行业燃煤量每变化 1%, 中国电力行业二氧化碳排放变化 0.138%, 电力行业燃煤量产生的是正向效应, 比较其他的系数, 该因素对并未对二氧化碳排放量产生过大影响。火力发电为我国电力行业主要的发电形式, 发电过程中需要燃烧大量煤炭, 进而产生大量二氧化碳排放。因此, 电力行业燃煤量的增加会带动电力行业二氧化碳排放排放量的增加。

2) 经济发展水平每变化 1%, 中国电力行业二氧化碳排放变化 0.998%。具体分析可知, 经济发展水平产生的是正向效应, 对二氧化碳排量的影响相对比较大的。在本文中经济发展水平表示为人均 GDP。人均 GDP 的上升意味着社会的进步, 从企业角度来讲, 人均 GDP 上升说明企业经济效益高, 那么企业生产耗费的电能增多, 导致电力行业二氧化碳排放量变多; 从人自身角度来讲, 人均 GDP 上升说明生活条件有所改善, 那么除了最基本的生理需求之外其他更高层次的需求逐渐显现出来, 生活中耗费的电能增多, 也会导致电力行业二氧化碳排放量变多。因此, 经济发展水平会对电力行业二氧化碳排放产生正向影响。

3) 城镇化水平每变化 1%，中国电力行业二氧化碳排放变化 3.21%。具体分析可知，该因素对二氧化碳排量的影响比较大，城镇化水平产生的是负向效应。在本文中城镇化水平表示为城镇人口除以总人口。随着时间的推移，中国的人口基数越来越大，电能消耗量自然增多，由于中国的发电方式以火电为主，那么，电力行业二氧化碳的排放量增加。虽然经济在不断发展，但是，城镇人口的增长率却比总人口增长率更低(2009 年，2017 年)，这样就出现了电力行业二氧化碳排放增多，而城镇化水平下降这一现象。

4) 能源价格每变化 1%，中国电力行业二氧化碳排放变化 0.075%，能源价格产生的是负向效应，这个系数是最小的，说明在八个影响因素中，对能源价格增加于其他因素相同的影响因素数值时，其使得电力行业二氧化碳排放量产生的变化是最小的。本文中使用的能源价格表示为某地区居民消费价格指数，用来准确可观的反映一个居民家庭消费商品及购买相关服务的价格水平变动情况，是指过去一个月消费商品和服务价格的变动系数。居民消费价格指数下降，那么人们对商品的购买力则会上升，为满足市场需求，生产商品耗费的电能增多，电力行业二氧化碳排放量增多。因此，能源价格对电力行业二氧化碳排放量产生的是负向影响。

5) 人口总量每变化 1%，中国电力行业二氧化碳排放变化 0.115%。具体分析可知，人口总量产生的是正向效应，人的生活行为和工作行为都会消耗大量电能，人口数量的增多，会增加电能的消费量变会造成大量的电力行业二氧化碳排放。因此，人口总量会对电力行业二氧化碳排放存在正向的影响。

6) 能源强度每变化 1%，中国电力行业二氧化碳排放变化 3.404%。具体分析可知，能源强度产生的是负向效应，这意味着电力行业二氧化碳排放量增加的同时能源强度在减少，而且这个系数是最大的，说明在八个影响因素中增加相同的影响因素数值，能源强度会使得电力行业二氧化碳排放量产生最大的变化。能源强度表示为能源消费量与 GDP 的比值，随着经济的发展，国家的 GDP 值不断增加，使得电能消费增多，进而导致电力行业消耗的一次能源增多，那么，能源消费总量增加必然会导致电力行业二氧化碳排放量上升，但是，当能源消费总量的增长率小于 GDP 的增长率时(2009 年，2017 年)，便产生了能源强度下降，电力行业二氧化碳排放增多这一现象。另外，能源强度指代单位 GDP 能耗，随着经济的发展，社会的进步以及技术的开发，单位 GDP 的耗能是不断减少的，能源产生的经济效益是增加的，这就又从另外一个角度解释了能源强度产生负向效应的原因。

7) 发电结构每变化 1%，中国电力行业二氧化碳排放变化 0.646%。具体分析可知，发电结构产生的是正向效应。在本文中，发电结构表示为火力发电量除以总发电量。2009 年，火电发电量占总发电量的比重为 81.81%；2017 年，火电发电量占总发电量的比重为 70.99%。火力发电消耗一次能源来产生电能的，消耗的主要是煤炭资源，而且，大约有 50%的煤资源消耗用于电力行业发电。煤炭资源的燃烧会产生大量的二氧化碳气体排放。因此，发电结构的变化会影响到电力行业二氧化碳排放量的变化。

8) 产业结构每变化 1%，中国电力行业二氧化碳排放变化 0.330%。具体分析可知，产业结构产生的是负向效应，在本文中，产业结构表示为第二、第三产业产值之比。在三种产业中，第二产业是相对高耗能产业，第二产业产值的上升必然以消耗大量电能为基础，使得电力行业二氧化碳排放量增多。但是，随着社会进步，第三产业取得强劲发展第三产业产值的增长率高于第二产业产值的增长率(在 2017 年，第三产业产值增长率为 7.91%，第二产业产值增长率为 5.89%)，这就造成了产业结构的负向效应。

综上所述，影响电力行业二氧化碳排放的两个主要因素为能源强度和城镇化水平，其次为经济发展水平、发电结构、产业结构、电力行业燃煤量、人口总量，最后为能源价格。其中，具有正向效应的影响因素为：电力行业燃煤量、经济发展水平、人口总量、发电结构；具有负向效应的影响因素为：城镇化水平、能源价格、能源强度、产业结构。

5. 政策建议

当前,我国电力行业的能源消耗主体依旧为煤炭,石油和天然气的碳排放系数相较于煤炭均较低,因此,煤炭燃烧产生的二氧化碳气体较多,造成严重污染。而且,中国发电总量中有 70%~80%是高二氧化碳排放的火力发电量,火电技术的改造目前并不能有效地减少二氧化碳的排放量,所以要推进电力的清洁生产。中国幅员辽阔有三十多个省、市、自治区,每个省份都有其得天独厚的自然资源与地理条件。比如,四川有丰富的水电资源,新疆有丰富的风电资源等。对于这些超低二氧化碳排放或零排放的发电方式进行合理开发,同时也要妥善解决开发电能清洁生产所产生的问题。比如,目前电网接入是风电传输面临的巨大挑战。地方政府在推进风电机组标准化、系列化的同时,应加强对并网技术的研究,解决跨区域输电问题。事实上,特高压电网和智能电网的建设可以减少远距离输电的电能损耗,解决可再生能源并网问题,二者的有机结合是电网发展不可逆转的趋势。此外,水电是经济上最健全、技术上最成熟的清洁发电方式。然而,大多数水电资源位于生态系统脆弱的西南地区。因此,政府不仅要加快水电站建设,而且要妥善解决发展过程中的环境保护和生态恢复问题。这样提高了这些清洁发电方式发电量的比重,自然火力发电量比重降低,电力行业的二氧化碳排放量也会下降。

另外,发展碳捕获和储能技术是制定多方面二氧化碳排放控制方法的关键。目前,碳捕获与储能技术是目前唯一可用于大规模化石燃料利用中减少二氧化碳排放的技术。由于我国严重依赖煤炭,碳捕集和储能技术可能是我国不可或缺的选择。

参考文献

- [1] He, Y.Y., Wei, Z.X., Liu, G.Q. and Zhou, P. (2020) Spatial Network Analysis of Carbon Emissions from the Electricity Sector in China. *Journal of Cleaner Production*, **262**, Article ID: 121193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121193>
- [2] Yang, L.S. and Lin, B.Q. (2016) Carbon Dioxide-Emission in China's Power Industry: Evidence and Policy Implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **60**, 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.058>
- [3] 中国统计年鉴, 2019[Z].
- [4] Enerdata Energy Statistical Yearbook 2019.
- [5] Liao, C.Y., Wang, S.G., Zhang, Y.Y., Song, D. and Zhang, C.H. (2019) Driving Forces and Clustering Analysis of Provincial-Level CO₂ Emissions from the Power Sector in China from 2005 to 2015. *Journal of Cleaner Production*, **240**, Article ID: 118026. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118026>
- [6] 宋艺, 谢彤云, 王澜熹, 吴倩, 许鲜. 我国农业碳排放影响因素的实证研究——基于灰色关联模型[J]. 农业与技术, 2020, 40(8): 143.
- [7] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(5): 56-62.
- [8] 陈滨霞, 周东海, 蒋远营. 中国交通运输业对碳排放的时变成因研究——基于 TVP 模型[J]. 生态经济, 2020, 36(4): 19-25.
- [9] 王勇, 李红昌, 郭雪萌, 于克美. 我国铁路运营二氧化碳排放影响因素研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 189-195.
- [10] 汤姿, 李晓红. 基于 STIRPAT 模型的黑龙江省旅游业二氧化碳排放影响因素分析[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 141-145.
- [11] 尹健, 李伟娟. 装备制造二氧化碳排放影响因素分析[J]. 四川环境, 2020, 39(2): 96-101.
- [12] 夏鸣, 勾寂鉴, 李书书. 我国第三产业碳排放的影响因素分析——基于 LMDI-PDA 分解法[J]. 营销界, 2019(52): 54-55.
- [13] 胡振, 龚薛, 刘华. 家庭消费碳排放影响因素及其变化趋势分析——以陕西省为例[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 24-30.
- [14] 任英华, 丁浩珂. 城镇碳排放影响因素分析——基于家庭消费 STIRPAT 模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(12): 256-263.
- [15] Li, J., Wang, Y., Xu, D., et al. (2020) High-Resolution Analysis of Life-Cycle Carbon Emissions from China's

Coal-Fired Power Industry: A Provincial Perspective. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **100**, Article ID: 103110. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103110>

- [16] Wei, S. (2015) Research on Low-Carbon Development Models and Decision Support System Design for China's Electric Power Industry.
- [17] 荀玺蓉. 传统能源价格与中国碳排放权交易价格的相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [18] 彭浩. 基于主成分分析的广西碳排放影响因素实证研究[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(10): 1794-1797.
- [19] 彭浩. 内蒙古低碳经济驱动因素研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2017, 381(11): 3-5, 14.
- [20] 阳玉香, 谭忠真. 湖南省低碳经济驱动因素的实证研究——基于主成分分析法[J]. 经济·管理, 2012(2): 160-162.

附录

Table A1. Correlation coefficient matrix

表 A1. 相关系数矩阵

	电力行业 燃煤量	能源 价格	能源 强度	城镇化 水平	人口 总量	产业 结构	发电 结构	经济发 展水平
电力行业燃煤量	1.000	0.580	0.780	-0.727	-0.695	0.575	0.514	-0.732
能源价格	0.058	1.000	0.312	-0.366	-0.378	0.481	0.406	-0.332
能源强度	0.780	0.312	1.000	-0.994	0.985	0.919	0.891	-0.991
城镇化水平	-0.727	-0.366	-0.994	1.000	0.997	-0.953	-0.928	0.997
人口总量	-0.695	-0.378	-0.985	0.997	1.000	-0.968	-0.948	0.997
产业结构	-0.575	0.481	0.919	-0.953	-0.968	1.000	0.976	-0.948
发电结构	0.514	-0.224	-0.958	0.925	0.891	-0.779	1.000	-0.930
经济发展水平	-0.732	-0.332	-0.991	0.997	0.997	-0.948	-0.930	1.000