

河南省能源消费碳排放足迹研究

王亚丽

广东财经大学经济学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年10月16日; 录用日期: 2025年10月30日; 发布日期: 2025年11月24日

摘要

能源是人类生存和社会经济发展的基石, 研究能源消费的碳足迹可以测算能源消费对生态系统和环境系统造成的压力 and 提升能源消费效率, 因此该研究具有重要的现实意义。本文通过计算得出2005~2017年河南省能源消费碳排放足迹, 得出河南省经济发展过程中面对的资源环境和生态状况并不乐观; 接着对河南省能源消费碳排放足迹进行了因素分解分析, 结果显示: 经济发展因素正向促进能源消费碳排放足迹, 能源效率因素会起抑制作用, 而结构因素和人口因素影响效果不是很明显; 接着在能源结构优化背景下对河南省能源消费碳足迹进行了预测, 由于“河南省污染防治攻坚战三年行动计划”以及“十三五”节能减排综合工作方案等政策的实施, 截止2021年底能源消费碳足迹预测与2015年相比下降达到5%; 最后依据分析结果提出针对性建议。本文在研究过程中主要创新点有两个: 第一, 分析河南能源结构的环境影响并刻画了影响因素; 第二, 评估了河南能源政策对环境的改善作用。

关键词

能源消费, 碳足迹, LMDI法因素分解, 主要创新点

Research on the Carbon Emission Footprint of Energy Consumption in Henan Province

Yali Wang

School of Economics, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou Guangdong

Received: October 16, 2025; accepted: October 30, 2025; published: November 24, 2025

Abstract

Both human life and economic development heavily depend on energy consumption and the carbon footprint of energy consumption can measure the effects of energy consumption on ecosystems and environmental systems. With a carbon footprint, this article analyzes the environmental effects of energy consumption from 2005 to 2017 and evaluates the corresponding energy policies in Henan

Province. First, this article concludes that the environmental resources and ecological conditions faced by Henan Province during its economic development are not optimistic. Second, the factor decomposition analysis of the carbon footprint of energy consumption in Henan province is carried out. Economic development factors are positively promoting the carbon footprint of energy consumption, and energy efficiency factors will play an inhibiting role, while structural factors and population factors are not obvious. Third, by optimizing energy structure, the carbon footprint of energy consumption in Henan Province was predicted. Due to the implementation of the “Three-Year Action Plan for Pollution Prevention and Control in Henan Province” and the “13th Five-Year Plan” comprehensive energy saving and emission reduction work plan, the end of 2021 Carbon footprint of energy consumption is forecast to decrease by 5% compared to 2015. Finally, targeted recommendations are presented to improve the environment of Henan Province.

Keywords

Energy Consumption, Carbon Footprint, LMDI Factor Decomposition, Main Innovative Points

Copyright © 2025 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

历经 40 年快速发展我国经济实现了质的飞跃，中国现已是世界第二大经济体，但其背后却面临着高能耗、高排放和生态环境破坏的困境，尤其是能源消耗产生的二氧化碳等温室气体造成的全球性气候变暖备受关注，因此对于国家和地区来说降低碳排放，发展绿色低碳经济是实现经济和环境双赢的必要策略。河南是一个农业大省、人口大省，改革开放后其工业化和经济发展取得了长足的进步，但其经济的发展却是依托能源的高消耗、高排放和生态环境的失衡，2017 年全省 GDP 达到 4.4 万亿元，单位 GDP 能耗是 0.53 吨标准煤/万元，是北京 0.27 吨标准煤/万元的 1.96 倍，广东 0.38 吨标准煤/万元的 1.39 倍，江苏 0.39 吨标准煤/万元的 1.36 倍，由此可以看出河南能源消耗与国内发达省份相比依然过高，粗放型高投入、高能耗经济增长模式未变。因此通过研究影响河南省能源消费碳排放足迹的关键因素，进而为河南省发展绿色低碳经济提供策略建议，对于河南实现经济和环境协调发展具有重要意义。通过本文的研究，我们可以对河南省能源消耗和其面临的生态和环境约束瓶颈等有一个清晰的认知，对于降低河南省能源消费碳足迹环境资源和生态压力有了比较明确的方向。同时，透过本文我们还可以明确积极绿色良好的能源政策将会显著改善环境状况，缓解人民日益增长的绿色健康环境渴求与现实经济发展造成的环境污染严重的矛盾。

2. 概念界定和文献回顾

2.1. 概念界定

碳足迹最早起源于生态足迹，由英国学者 Wiedma [1] 于 2007 年提出，之后此概念得到迅速发展。但是关于碳足迹的定义至今在学术界并未形成统一：有学者 Hertwich [2]、Wiedmann & Minx [3] 等认为，碳足迹是人类活动或产品生命周期内所排放的二氧化碳总量；另外一部分学者及机构 Wackernagel [4]、Global Footprint Network [5] 等认为碳足迹是通过光合作用吸收由能源消耗所产生的二氧化碳所需要的生产性土地面积。鉴于本文研究的是能源消费碳排放足迹，为了凸显能源消费对环境和生态的影响，本文

使用第二种碳足迹定义。选择土地面积作为度量单位,能够将抽象的碳排放压力可视化对具体土地资源的需求,直观反映能源消费对生态系统造成的压力,并与生态足迹理论框架保持一致,有助于评估区域生态承载力及其超载状况,为区域土地利用规划和生态保护红线划定提供科学参考。

2.2. 文献回顾

自从英国学者 Wiedma [1]于 2007 年提出碳足迹这一概念后,关于碳足迹的研究迅速增加,国内外关于碳足迹的研究比较全面,且已经取得了丰硕的研究成果,主要从以下方面展开: 1) 以城市碳足迹为研究对象, Brown [6]研究了美国大、中、小城市的人均碳足迹,结果证明小城市的人均碳足迹小于大城市; Larsen [7]以挪威 429 个城市为样本,使用扩展的环境投入产出模型计算了这 429 个城市的碳足迹并对各个城市的影响因素进行了比较。赵爽等[8]以江苏省镇江市为例研究了中小城市工业碳足迹,结果指出所有权属性会抑制碳足迹。2) 以家庭碳足迹为研究对象, Weber [9]从家庭角度展开研究了影响美国碳足迹的因素,姚亮[10]采用基于投入产出的生命周期评价等方法研究了中国居民家庭的碳足迹情况。3) 以不同产业为研究对象, Manfred [11]以美国和澳大利亚不同产业为研究对象,指出多种影响因素共同作用于不同国家不同产业的碳足迹,赵荣钦[12]以不同产业空间碳足迹为研究对象得出工商业碳足迹占比较大。4) 以国家和地区为研究对象, Kenny [13]以爱尔兰为研究对象,采用六种模型对其碳足迹进行了测算,孙建卫等[14]以投入产出为分析基础,分析了碳足迹以及各部门之间的碳关联,研究指出贸易额增长会促进碳足迹增加。5) 以减少碳排放,降低碳足迹角度研究, Gaurav Jha 等[15]的研究显示生物质是一种碳中性、环境友好的能源,其使用比例的提升可以有效降低碳足迹, Jian-bo Xie 等[16]研究指出风力发电优先生产清洁能源,可以显著减少二氧化碳排放。

国内外关于能源碳足迹的研究目前尚处于探索阶段,但是也是取得了一定的研究成果,主要分为以下两个方面: 1) 以测算能源消费碳足迹角度研究, Virtanen [17]在研究中使用投入产出和过程分析测算了能源碳足迹,卢俊宇[18]通过研究测算了全国各地区的能源碳足迹的差异性,周国富[19]度量了能源消耗碳足迹情况,主要是通过能源碳足迹指标测算,丰霞[20]等运用投入产出法构建居民消费碳足迹测算模型,估算了居民消费的直接和间接碳足迹。2) 以分析影响消费碳足迹因素角度研究,张约翰[21]通过脱钩指数和岭回归法探讨了能源消费碳足迹的影响因素,发现经济增长是其主要影响因素,闫云凤[22]通过研究得出人口增长、技术创新及产业结构是影响能源消费碳足迹的主要因素;孙强和沈玉志[23]通过脉冲响应分析发现能源结构、能源效率、能源强度、经济发展以及人口压力是影响辽宁省能源碳足迹的主要因素。孙丽文[24]利用 debruyn 模型从时间和空间二维度对京津冀能源消费碳足迹影响因素进行了分解分析,结果表明碳足迹贡献度、经济规模、产业结构、能源强度以及能源结构对不同地区作用效应不同。

通过梳理相关文献,发现近年来无论是关于碳足迹还是能源碳足迹的研究出现大幅度增长,但是关于河南省能源消费碳足迹以及其生态压力的研究很少,因此本文以河南省为研究对象,先测算河南省能源消费碳足迹值的基础上,再通过 LMDI 分解法对河南省碳排放影响因素进行分解分析,并分析各因素对河南省能源消费碳足迹的影响对于河南省实现经济和环境双赢发展目标具有重要的现实意义,以为河南省能源使用及发展低碳绿色可持续经济提供一定的参考和借鉴。

3. 研究方法

3.1. 数据来源

本文使用的数据河南省能源消费、GDP、人口数据均来自《河南统计年鉴》(2006~2018),林地面积(包含森林和草原),其中森林面积来自《河南统计年鉴》(2006~2018),草原面积来自《中国环境统计年鉴》

(2006~2018), 研究时间为 2005~2017 年。具体数据如表 1。

Table 1. Statistics of energy consumption, population, GDP, and woodland area in Henan province, 2005~2017

表 1. 河南省 2005~2017 能源消费量、人口、GDP 和林地面积

年份	能源消费量 (万吨)	煤炭(万吨)	比例(%)	石油(万吨)	比例(%)	天然气(万吨)	比例(%)	GDP (亿元)	人数(万人)	林地(万 hm ²)
2005	14625	12753.0	87.2	1272.4	8.7	321.75	2.2	10621.6	9768	713.7
2006	16234	14188.5	87.4	1298.7	8.0	405.85	2.5	12412.9	9820	713.7
2007	17838	15643.9	87.7	1409.2	7.9	445.95	2.5	15064.7	9869	713.7
2008	18976	16547.1	87.2	1518.1	8.0	493.38	2.6	18068.5	9918	713.7
2009	19751	17183.4	87.0	1560.3	7.9	553.03	2.8	19547.6	9967	780.0
2010	18964	15702.2	82.8	1763.7	9.3	644.78	3.4	23157.6	10437	780.0
2011	20462	16697.0	81.6	2128.0	10.4	736.63	3.6	27007.5	10489	822.2
2012	20920	16736.0	80.0	2405.8	11.5	983.24	4.7	29681.8	10543	827.2
2013	21909	16913.7	77.2	2826.3	12.9	1051.63	4.8	32278.0	10601	802.5
2014	22890	17785.5	77.7	2884.1	12.6	1030.05	4.5	35027.0	10662	802.5
2015	23161	17718.2	76.5	3034.1	13.1	1042.25	4.5	37084.2	10722	837.9
2016	23117	17360.9	75.1	3120.8	13.5	1202.08	5.2	40249.2	10788	846.2
2017	22944	16818.0	73.3	3235.1	14.1	1353.70	5.9	44552.8	10853	853.0

3.2. 能源消耗碳排放测算方法

根据相关文献梳理和总结得出目前关于碳排放的计算方法主要有三种系统仿真法、排放系数法和实际测量法[25]。本文考虑到河南省能源消耗实际情况：以煤炭、石油、天然气为主，三者比例之和在 93% 以上，因此采用排放系数法核算河南省能源消耗碳排放量，计算公式见公式(1)，由于《河南统计年鉴》中的能源消耗总量以及煤炭、石油、天然气已经转化为万吨标准煤，所以能够客观精准地计算出能源消耗碳排放量。煤炭、石油、天然气碳排放系数见表 2。

Table 2. Carbon emission coefficients for three types of fossil fuels

表 2. 三种能源碳排放系数

煤炭	石油	天然气
0.7476	0.5825	0.4435

资料来源：国家发展和改革委员会能源研究所。(2003)中国可持续发展能源暨碳排放情景分析[R]。

所以能源消耗碳排放量计算公式如下：

$$C = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3 \quad (1)$$

C 为煤炭、石油、天然气三种能源燃烧排放的二氧化碳总量，单位：万吨，

α_1 、 α_2 、 α_3 是煤炭、石油、天然气的碳排放系数，单位：万吨/万吨标准煤，

C_1 、 $C_f = \sum C_{fi} = \sum C_i / F_i$ 、 $C_f = \sum C_{fi} = \sum C_i / F_i$ 是煤炭、石油、天然气的能源消耗量，单位：万吨标准煤。

3.3. 能源消耗碳足迹测算方法

碳足迹是通过光合作用吸收由能源消耗所产生的二氧化碳所需要的生产性土地面积，是衡量和分析能源消耗的一个综合指标。

能源消耗碳足迹计算公式如(2)所示：

$$C_f = \sum C_{fi} = \sum C_i / F_i \quad (2)$$

其中 C_f 是能源消耗碳排放足迹， i 是煤炭、石油、天然气 3 种能源， F_i 是能源土地转换系数，本文采用世界自然基金会(WWF)提供的数值 6.49 t/hm²，具体而言，先根据公式(1)算出能源消耗的碳排放量，再根据公式(2)计算出各种能源消耗的碳足迹，从而计算出总消耗能源的碳足迹。

3.4. 能源消耗碳足迹因素分解

为了探究能源消耗碳足迹的影响因素及不同因素的效果，本文将使用 LMDI 分解法进行分析。该方法又称为对数平均权重 Divisia 分解法，该方法可以很好地对因素进行分解，且对数值无特殊要求，因此使用最为广泛。因此本文将会采用 LMDI 分解法分析河南省能源消耗碳足迹影响因素，分为能源结构因素、能源碳足迹强度因素、能源效率因素、经济发展因素以及人口压力五大因素，具体分解模型如下：

$$C_f = \sum_i \frac{E_i}{E} \frac{C_{fi}}{E_i} \frac{E}{GDP} \frac{GDP}{P} \frac{P}{F} = \sum_i S_i I_i Q R P \delta \quad (3)$$

其中 $S_i = \frac{E_i}{E}$ ，表示第 i 类能源在能源消耗总量中所占的份额，

$I_i = \frac{C_{fi}}{E_i}$ ，表示消费单位 i 类能源的碳足迹，

$Q = \frac{E}{GDP}$ ，表示单位 GDP 能源消耗量，

$R = \frac{GDP}{P}$ ，表示人均 GDP，

$\delta = \frac{1}{F}$ ，表示能源土地转换系数， F 是 6.49 t/hm²。

能源消耗碳足迹在各因素的作用下变化情况如下：

能源结构因素效应： $\Delta C_{St} = \sum_i B_{it} LN \frac{S_{it}}{S_{i0}}$ ，

能源强度因素效应： $\Delta C_{It} = \sum_i B_{it} LN \frac{I_{it}}{I_{i0}}$ ，

能源效率因素效应： $\Delta C_{Qt} = \sum_i B_{it} LN \frac{Q_{it}}{Q_{i0}}$ ，

经济发展因素效应： $\Delta C_{Rt} = \sum_i B_{it} LN \frac{R_{it}}{R_{i0}}$ ，

人口压力因素效应： $\Delta C_{Pt} = \sum_i B_{it} LN \frac{P_{it}}{P_{i0}}$ 。 (4)

其中 $B_{it} = \frac{C_{it} - C_{i0}}{LN(C_{it}/C_{i0})}$ ， C_{it} 和 C_{i0} 表示 t 年和基期时候能源 i 的碳足迹。

4. 实证分析

4.1. 能源消费碳足迹计算结果分析

根据公式(1)和(2)以及表 1 和表 2 中数据，得出河南省 2005~2017 年各类能源消费的碳足迹，具体结果如表 3 和图 1 所示。

Table 3. Carbon footprint of various energy consumption in Henan province from 2005 to 2017 (10,000 hm²)

表 3. 河南省 2005~2017 年各类能源消费碳足迹(万 hm²)

年份	煤炭	占比(%)	石油	占比(%)	天然气	占比(%)	总量
2005	1469.05	91.50	114.26	7.12	22.23	1.38	1605.54
2006	1634.41	91.87	116.62	6.56	28.04	1.58	1779.07
2007	1802.06	91.97	126.55	6.46	30.81	1.57	1959.42
2008	1906.10	91.79	136.32	6.57	34.08	1.64	2076.51
2009	1979.40	91.74	140.12	6.49	38.20	1.77	2157.72
2010	1808.78	89.91	158.38	7.87	44.54	2.21	2011.69
2011	1923.37	88.82	191.10	8.83	50.89	2.35	2165.36
2012	1927.86	87.16	216.04	9.77	67.92	3.07	2211.83
2013	1948.34	85.65	253.80	11.16	72.65	3.19	2274.78
2014	2048.76	86.12	258.99	10.89	71.16	2.99	2378.91
2015	2041.00	85.56	272.46	11.42	72.00	3.02	2385.50
2016	1999.84	84.63	280.25	11.86	83.04	3.51	2363.13
2017	1937.30	83.46	290.51	12.51	93.51	4.03	2321.33

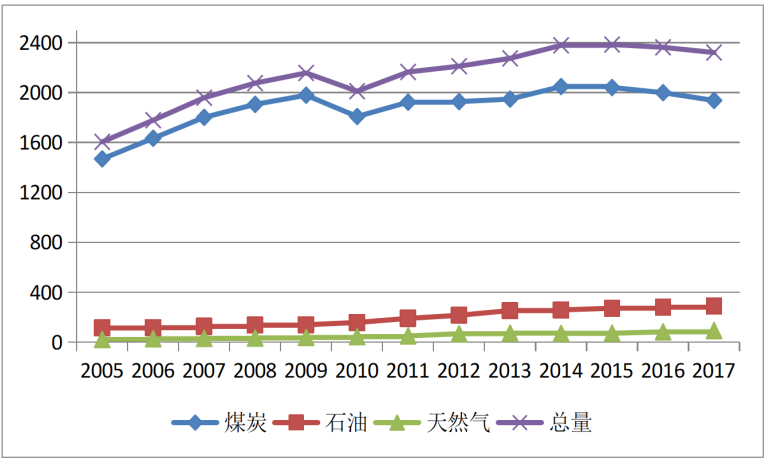


Figure 1. Carbon footprint of energy consumption in Henan province, 2005~2017

图 1. 河南省 2005~2017 年能源消费碳足迹

从表 3 可以看出，2005~2009 年、2011~2015 年河南省能源消费总碳足迹呈上升趋势，2016~2017 年开始缓慢降低。从 2005 年的 1605.54 (万 hm²)增长到 2009 年的 2157.72 (万 hm²)，5 年间共增长了 552.18 (万 hm²)，平均每年增长 110.436 (万 hm²)，年均增幅达到 7.7%，2011~2015 年年均增幅为 3.5%，这与河南省政府发展绿色可持续经济的决心是分不开的，省委、省政府分别制定了“十一五”、“十

二五”、“十三五”节能减排综合工作方案，方案明确了减排目标和措施，由以上数据可以看出，节能效果还是比较明显，虽然碳足迹从 2005 年 1605.54 (万 hm^2) 增长到 2017 年的 2321.33 (万 hm^2)，但是增幅逐渐放缓。

从图 1 中可以明显看出当煤炭碳足迹减少时总碳足迹立刻减少，最明显是 2010 年，2010 年出现这个情况的原因是 2010 年电力的消耗由原来的百分之二点多上升到百分之四点多，而电力一般是水电和核电，属于清洁能源，因此带来 2010 年的总碳足迹降低，由此也可以得出河南降低能耗碳足迹的途径之一是可以增加电力的投入和使用，从而逐步减少煤炭的消耗量，进而降低能耗总碳足迹，达到低碳经济发展的目的。从图 1 还可以看出，石油和天然气能耗碳足迹虽然也在增长，但是趋势比较缓慢，截至 2017 年石油碳足迹只有 290.51 (万 hm^2)，天然气碳足迹仅有 93.51 (万 hm^2)。

综合表 3 和图 1 可以得出，2005~2015 年是河南省工业化、城镇化进程加快和全面建成小康社会的关键时期，是建设中原经济区的奠基时期，因此能源需求呈刚性增长，能耗不断增长，碳排放量增加，总碳足迹上升。2016~2017 是“十三五”建设时期，“十三五”明确了建设美丽河南、提高能源利用效率和改善环境质量的总指导思想，实施能源消费总量和强度“双控”管理，从能耗碳足迹来看，在省委、省政府的指导思想和实现经济发展与环境改善双赢的决心以及努力下，效果初显，2016~2017 年的能耗碳足迹已经开始缓慢降低。

4.2. 各市 2017 年碳足迹情况分布图

依据 2017 年全省各市能源消费数据计算出 2017 年全省各市能源消费碳排放足迹，具体见图 2。

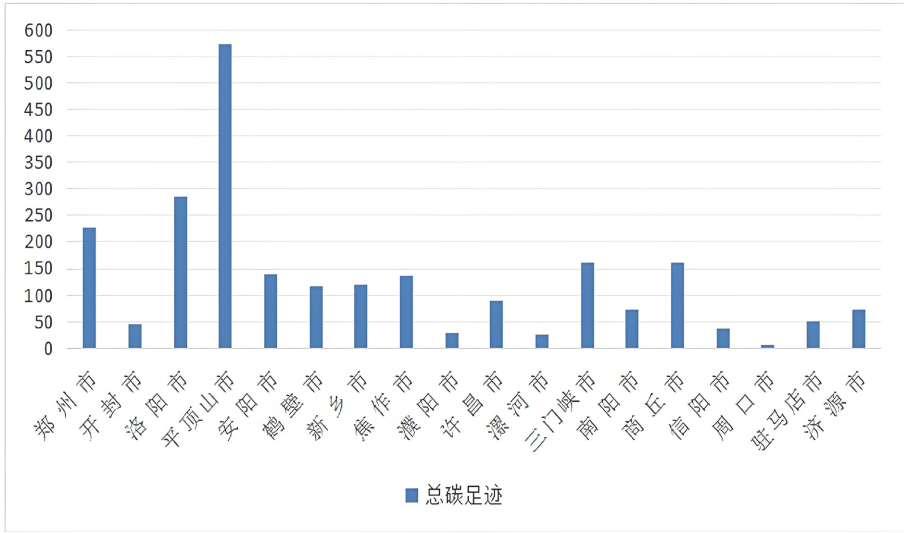


Figure 2. Distribution of carbon footprint of each city in 2017
图 2. 各市 2017 年碳足迹情况分布图

由图 2 可知，平顶山市是河南碳足迹最大的城市，其次是洛阳、郑州、三门峡和商丘市。平顶山市是河南煤炭生产基地同时也是煤炭消耗最大的城市。平顶山又被称为煤城，其工业发展严重依赖煤炭资源，其高污染、高排放生产模式最为明显。因此，河南发展绿色经济要因地制宜。全省双控同时对于碳足迹较大城市也要采取针对性措施，促进其进行节能减排低碳绿色发展同时加快环保节能产业发展，并建立绿色经济发展考核指标，两手抓两手都要硬。对于碳足迹比较小的城市也不能放松警惕，鼓励其继续保持良好状态，同时也要紧跟全国和全省绿色低碳发展经济的步伐，激励其积极投身全省绿色低碳可持续健康经济发展中去，为建设美丽河南，绿色河南，腾飞河南贡献自己的力量。

4.3. 能源消费的碳足迹产值和碳足迹强度分析

能源消费的碳足迹产值(VCF) [26]表示单位能源消费碳足迹产生的经济价值,计算公式为人均 GDP 与人均碳足迹的比值, VCF 越高,说明经济发展良好,能源消费的碳足迹创造的经济价值越大。

能源消费的碳足迹强度(CFI) [26]表示每万元 GDP 产值所需的能源消耗的碳足迹,即能源消费的碳足迹效益,计算公式为人均碳足迹与人均 GDP 的比值, CFI 越高,说明能源消费的碳足迹效益越差。

根据表 1 和表 3 数据以及以上公式可以算出河南省 2005~2017 年能源消耗的碳足迹产值和碳足迹强度,具体见图 3。

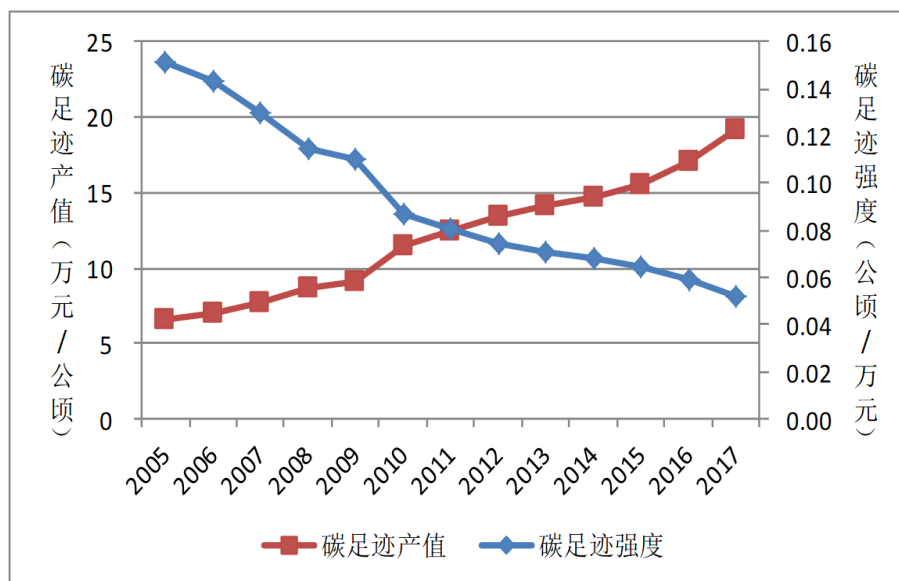


Figure 3. Carbon footprint output value and carbon footprint intensity of energy consumption
图 3. 能源消费碳足迹产值和碳足迹强度

通过观察图 3 知,河南省 2005~2017 年能源消费的碳足迹产值是逐年增加的,由 2005 年的 6.62 万元/公顷到 2017 年的 19.19 万元/公顷,为 2005 年的 2.9 倍,年均增长率 9.4%。说明十多年来河南省经济发展比较良好,能源利用的效率也是不断提升的,单位土地面积所创造的经济产值增加较快,单位能源消耗碳足迹产生的经济价值不断增加,但是 2005~2017 年 GDP 年均增长率为 12.8%,由此看出碳足迹产值的增速明显滞后于 GDP 增速,说明河南省的经济增长依然是建立在化石能源的高消耗基础上的。

通过对 2005~2017 年河南省能源消费的碳足迹强度进行计算得知,河南省 2005~2017 年能源消费碳排放足迹强度走势还是不错的,2005 年能源消费碳足迹强度为 0.15 公顷/万元,2017 年最低为 0.05 公顷/万元,这说明河南省这十多年里能源利用率越来越高,能源消费碳足迹的效益越来越好。

4.4. 能源消费的碳足迹生态压力分析

能源消费碳足迹生态压力(EPICF) [26]表示的是能源消费所产生的二氧化碳对自然环境和生态系统所产生的压力大小,计算公式为人均能源消费碳足迹与森林和草原面积之和的比值,比值越大,说明能源消费产生的二氧化碳对生态系统和自然环境的压力越大。为了更科学地评估生态压力的严重程度,本文引入 IPCC 推荐的单位面积森林年固碳系数(约 $5.5 \text{ t CO}_2/\text{hm}^2 \cdot \text{年}$) [27]对河南省林地的理论固碳能力进行估算。估算结果表明,河南省林地的年理论固碳量远低于同期的能源消费碳排放量,这从生态学角度证实了“生态压力”指标大于 1 的严峻性。根据表 1 和表 3 数据以及以上公式可以算出河南省 2005~2017

年能源消耗的碳足迹生态压力，比值大于 1 表示碳排放超出生态系统的理论固碳承载力，具体见图 4。

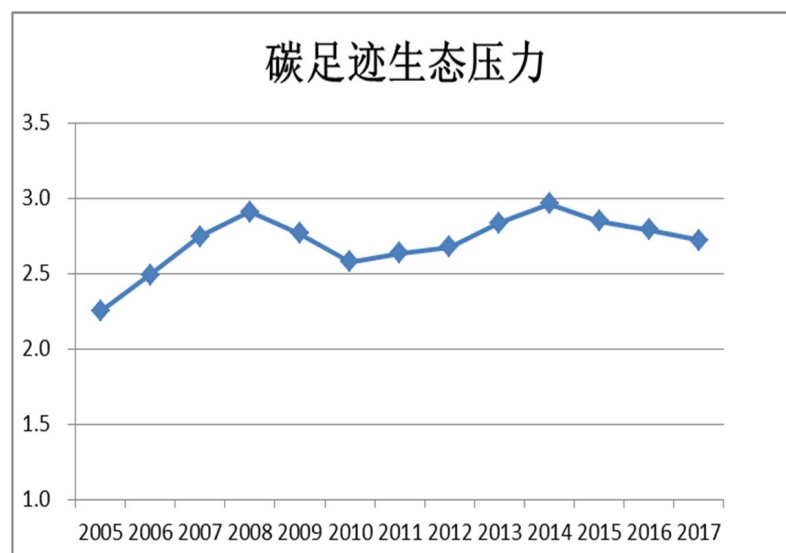


Figure 4. Ecological pressure from energy consumption carbon footprint

图 4. 能源消费碳足迹生态压力

由图 4 可知，河南省 2005~2017 年能源消费碳足迹生态压力呈现波浪形上升趋势，且所有年份的 EPICF 值均远大于 1，这表明河南省的碳排放长期处于严重的生态赤字状态，经济发展对生态环境造成了持续的超载压力。其中 2005~2008 年能源消费碳足迹的生态压力快速增加，2008 年达到 2.91，原因在于 2005~2008 年是河南省工业化、城镇化迅速发展时期，能源消耗量持续增加，造成碳排放足迹不断增加，而森林和草原面积这几年一直无增加，导致对自然生态系统压力增大；之后 2009~2010 呈现下降趋势，原因在于 2008 左右出台的退耕还林政策以及农业补贴政策，使得森林面积锐增，从 2008 年的 270.3 万公顷增加到 2009 年的 336.6 万公顷，一年时间森林面积增加 66.3 万公顷，缓解了部分的生态压力。2010~2014 年生态压力又呈现缓慢增加趋势是因为进入“十二五”时期后，河南经济发展进入攻坚期，为全面建设小康社会而奋斗，经济的飞跃发展随之而来的就是能源消费的增加，从而使能源消费碳足迹增加，而森林面积增长又非常缓慢，从 2010 的 336.6 万公顷到 2014 年的 359.07 万公顷，5 年时间仅增加 22.47 万公顷，从而生态压力不断增加。2015~2017 年生态压力逐渐降低，原因在于 2015 年比 2014 年一年时间森林面积增加了 35.43 万公顷，而经济发展又迈向“十三五”时期，此时省委、省政府更加注重绿色低碳经济发展的重要性，制定了提高能源利用效率和改善环境质量，实施能源消费总量和强度“双控”管理，全面打赢转型发展攻坚战和环境治理攻坚战，加快构建节能环保型产业体系的工作部署，且成效显著，2016~2017 年能耗碳足迹开始降低，而森林面积在微弱增长，因此双重效应下 2015~2017 年能源消费碳足迹生态压力开始呈缓慢下降趋势。

4.5. 能源消费碳足迹影响因素分解分析

根据公式(4)可知，影响能源消费碳足迹的因素总共有五种，分别是能源结构因素效应、能源强度因素效应、能源效率因素效应、经济发展因素效应和人口压力因素效应。根据公式(4)能源强度的定义可知，对于同一种能源来说，其强度是不变的，因此在下文的因素分解中不再考虑能源强度因素效应，只分析剩下的四种影响因素。本文的计算是以 2005 年的数据为基年，然后根据公式(4)以及表 1 和表 3 的数据分别计算 2006~2017 年的影响因素分解数据，具体见图 5。

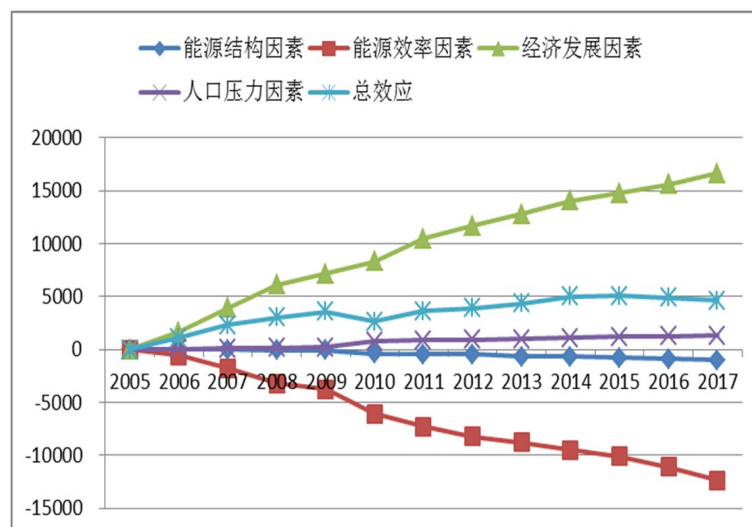


Figure 5. Schematic diagram of the decomposition of energy consumption carbon footprint factors

图 5. 能源消费碳足迹因素分解示意图

观察图 5 得出经济发展因素和人口压力因素会促进能源消费碳足迹的增加，两个因素效应值均呈明显增长趋势，但是人口因素效应值的影响效果相比较下显得比较弱一些，而经济发展才是主要作用力，其作用效果和影响力远远超过人口因素，因此经济发展是促进碳足迹增加的主导因素。人口因素也是另一个次要增加因素，但是可能因为“十一五”、“十二五”期间计划生育政策的持续实施控制了出生人口的数量，因此导致人口因素对碳排放足迹的促进作用并不明显。

由图 5 还可以看出，能源结构因素以及能源效率因素都是负值，所以能源效率和能源结构因素对能源碳排放足迹的增加起抑制作用，因此能源结构因素以及能源效率因素是减少二氧化碳排放的重要方法和措施。其中，能源效率因素的效应值的绝对值在 2006~2017 年期间迅速增加，2017 年达到最大值为 12324.24 万吨，主要原因在于“十一五”、“十二五”、“十三五”规划纲要提出我国单位 GDP 能耗分别降低 20%、16%和 15%，河南省委、省政府积极响应国家号召，坚决完成国家下达的节能减排指标，分别制定了“十一五”、“十二五”、“十三五”节能减排综合工作方案，加快淘汰落后产能，提高能源利用效率，减少二氧化碳的排放量，因此提高能源利用效率可以大大减少二氧化碳的排放量，抑制能源碳足迹的增加，这也是河南省发展低碳经济、全面打赢转型发展攻坚战和环境治理攻坚战的一个有效举措。

从图 5 中还可以看到，能源消费结构因素也会抑制碳排放。虽然其作用效果绝对值并没有能源效率作用效果绝对值大，但是对于减少能源消费碳足迹和二氧化碳排放还是可以起到一定的作用的。究其原因河南省这些年经济的飞跃发展是建立在能源高消耗基础上的，尤其是煤炭的高消耗。随着经济发展和节能减排号召下，煤炭在河南省能源消费中所占比例一直在下降，从 2005 年的 87.2%到 2017 年的 73.3%。而天然气的比例一直在增加，从 2005 年的 2.2%到 2017 年的 5.9%。由此可以看出改善能源消费结构，尤其是减少使用煤炭能源，增加天然气、电力等清洁能源的投入和使用，可以有效减少二氧化碳排放并降低能源消耗碳足迹。

5. 优化能源结构背景下的碳足迹预测

基于《河南省人民政府关于印发河南省污染防治攻坚战三年行动计划(2018~2020)的通知》可知到 2020 年，全省煤炭消费总量较 2015 年下降 10% [28]，因此结合上文分析和数据依据能源消费原始数据趋势做出数据预测并计算出碳足迹，具体结果见图 6。

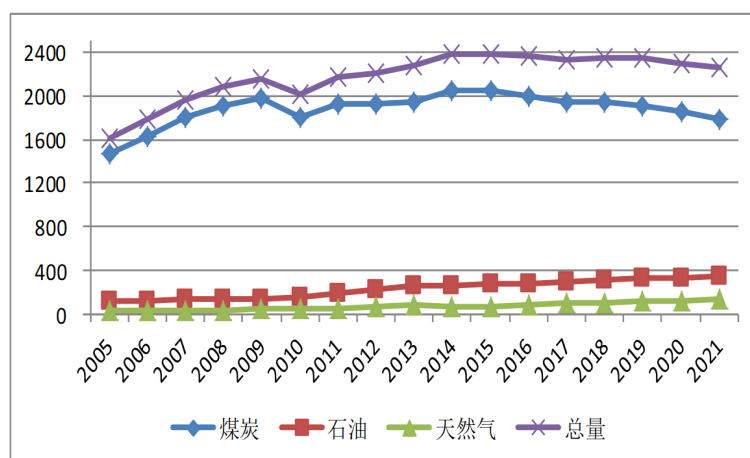


Figure 6. Carbon footprint forecast of energy consumption in Henan province from 2018 to 2021

图 6. 河南省能源消费 2018~2021 年碳足迹预测

由图 6 可知, 依据能源消费总量和煤炭、石油以及天然气占比趋势做出的数据预测基本符合河南省能源消耗实际情况, 截止 2020 年底, 煤炭消费总量较 2015 年下降 9.4% (基于预测数据存在一定的误差), 基本达到攻坚战中煤炭降低量指标, 由于“河南省污染防治攻坚战三年行动计划”以及“十三五”节能减排综合工作方案等政策的实施, 依据预测煤炭能源的碳足迹截止 2020 年和 2021 年年底与 2015 年相比分别下降约为 9% 和 12%, 总碳足迹截止 2020 年和 2021 年年底与 2015 年相比分别下降约为 4% 和 5%, 原因在于期间石油消耗碳足迹与 2015 年相比分别上升了 21% 和 25%, 石油消耗增长的碳足迹冲抵了煤炭消费减少带来的碳足迹降低, 导致总碳足迹下降慢于煤炭碳足迹下降速度。

由图 6 还可知, 河南省 2018~2021 年能源消费总碳足迹呈稳中缓慢下降态势, 煤炭碳足迹从 2016 年后开始呈下降趋势, 石油和天然气呈上升趋势。这与前文分析的 2016~2017 是“十三五”建设时期, “十三五”明确了建设美丽河南、提高能源利用效率和改善环境质量的总指导思想, 实施能源消费总量和强度“双控”管理是一致的, 同时 2018~2020 年是河南省污染防治攻坚战三年行动计划的关键期, 坚决打赢蓝天保卫战中提出了逐步削减煤炭使用总量、扩大天然气使用规模、大力发展非化石能源等一系列节能减排治理污染的举措, 因此 2018~2020 年煤炭消费总碳足迹持续降低符合现实, 2021 年又是“十四五”的开局之年, 省委、省政府也会更加注重绿色低碳可持续经济建设的建设, 故而节能减排行动会持续运行下去, 2021 年总碳足迹降低也是符合实际情况的。综合以上, 在优化能源结构背景下, 河南省 2020~2021 年能源消费总碳足迹会持续降低, 可以缓解小康社会建设目标经济发展中能源消费对生态环境资源造成的压力。

6. 结论和建议

通过对河南省 2005~2017 年能源消费碳排放足迹进行计算分析和研究, 可以得出以下结论:

- 1) 从整体结果来看, 河南省能源消费碳足迹呈现波浪形增加趋势。其中, 煤炭占据主导地位, 占比达到 73% 以上, 其次是石油, 最后天然气占比最小, 说明对于河南省来说煤炭的消耗是引起能源碳排放迅速增加的主因, 进而引起能源碳排放足迹快速增加, 像天然气这类清洁能源的占比过低。
- 2) 从能源消费碳足迹产值来看, 十多年来碳足迹产值呈现快速增加的趋势, 由 2005 年的 6.62 万元/公顷到 2017 年的 19.19 万元/公顷, 说明河南省能源利用效率逐年提高。
- 3) 从能源消费碳足迹强度来看, 河南省能源消费碳足迹强度呈持续下降趋势, 从另一方面说明河南

省从 2005 年~2017 年能源利用的效率确实在提升,说明河南省节能减排措施也取得了一定的成效,但是仍然有很大的进步空间。

4) 从能源消费碳足迹生态压力来看,河南省面临着很大的环境和生态压力,2005 年~2017 年生态压力值均在 2 以上,说明河南省的森林和草原面积对能源消耗产生的二氧化碳已经无法完全吸纳,能源消费产生的二氧化碳量已经远远超过林地的固碳能力,河南省的经济发展面临着严峻的环境资源和生态压力。

5) 由能源消费碳排放足迹因素分解可知,经济发展因素是河南省能源消费碳足迹增加的主因,人口压力虽然也会促进碳足迹增加,但是作用效果不明显,因此对于河南省来说,要实现低碳节能减排的发展目标,需要考虑适度控制经济规模增长,实现绿水青山和金山银山共存良性发展的美好画面。从因素分解中还可以得知,能源效率因素和能源结构因素都会对能源消费的碳足迹产生抑制作用,尤其是随着能源效率因素的增加,对河南省二氧化碳的排放抑制效果也在增加,由此说明,提升能源利用效率是河南省有效减少能源消费碳足迹的重要举措。

针对上文对河南省能源消费研究的结果和河南省的实际情况,特提出以下建议:

1) 保护森林和草原,防止乱砍滥伐乱开垦,坚持退耕还林和退耕还草政策。森林和草地的蓄碳能力占总蓄碳能力的 93% [27],对碳排放的吸收是最强的,从上文 2009 年骤增的森林面积缓解了生态压力也可以看出,目前考虑到河南省是全国粮食生产基地和农业大省这样一个实际情况,在保证粮食生产的基础上合理适度增加森林和草原面积,可以有效提升对碳排放的吸纳能力,减少二氧化碳等温室气体对环境造成的损害,并缓解全省因经济发展和工业化城镇化带来的能源消费的碳排放对生态系统的压力。

2) 优化调整能源结构。鉴于河南省经济发展高煤炭依赖的情况以及煤炭的高排放特征,因此在节能减排的大环境下,河南省需要发展清洁化和多元化能源使用方向,实施能源消费总量和种类双控管理,大力倡导天然气、水电、太阳能等优质能源的开发和使用,增加优质能源消费总量结构比例,改善煤炭“一枝独秀”的境况,加速推进煤改电、煤改气工程,积极争取尽早实现“气化河南”的新局面。建议在持续推进“煤改气”的同时,警惕石油消费快速增长带来的新压力,通过发展新能源交通等方式,实现对石油消费的达峰管控。

3) 大力发展循环经济,建立能源利用新理念。节能就是要尽量减少能源的消耗和使用,对能源要爱惜使用,按照能重复利用就重复利用,避免资源浪费,可以通过电视、新闻以及新媒体等媒介对人民进行宣传和教育,形成民众主人翁意识,提高节能意识和循环使用意识,建立能源利用新理念。同时政府做好牵头和示范性,可以开展循环经济示范城市创建活动,选取典型城市树立学习榜样;建立农业循环经济示范区和再生产品与再制造产品的研销一体化建设,对成功案例进行全省推广等。

4) 努力提高能源利用效率。科技是第一生产力,河南省可以考虑引进和推广一批高效节能同时减排效果好,又可以实现产业化的重大新技术研究成果并在全省进行推广和应用,建立示范排头兵,引领全省能耗应用高科技化发展,并考虑建立基于“互联网+”的智慧能源基地,推动智慧能源技术的创新和生产使用,与此同时也可以建立市场导向的能源使用体系,能源利用情况可以通过市场价格进行调节,促使能耗使用者积极引进高效节能设备和产品的使用,直接减少煤炭等能源的消费。

参考文献

- [1] Weidema, B.P., Thrane, M., Christensen, P., Schmidt, J. and Løkke, S. (2008) Carbon Footprint: A Catalyst for Life Cycle Assessment? *Journal of Industrial Ecology*, 12, 3-6. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x>
- [2] Hertwich, E.G. and Peters, G.P. (2009) Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis. *Environmental Science & Technology*, 43, 6414-6420. <https://doi.org/10.1021/es803496a>
- [3] Wiedmann, T., Minx, J., Barrett, J. and Wackernagel, M. (2006) Allocating Ecological Footprints to Final Consumption

- Categories with Input-Output Analysis. *Ecological Economics*, **56**, 28-48.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.05.012>
- [4] Wackernagel, M. and Rees, W. (1996) Our Ecological Footprint Reducing Human Impact on the Earth. New Society Publishers.
 - [5] GFN (2007) Ecological Footprint Glossary. Global Footprint Network.
 - [6] Brown, M.A., Southworth, F. and Sarzynski, A. (2009) The Geography of Metropolitan Carbon Footprints. *Policy and Society*, **27**, 285-304. <https://doi.org/10.1016/j.polsoec.2009.01.001>
 - [7] Larsen, H.N. and Hertwich, E.G. (2010) Identifying Important Characteristics of Municipal Carbon Footprints. *Ecological Economics*, **70**, 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.001>
 - [8] 赵爽, 江心英, 李玉婷. 中小城市工业能源消费碳足迹路径研究——以江苏省镇江市为例[J]. 山东工商学院学报, 2018, 32(6): 27-36, 73.
 - [9] Weber, C.L. and Matthews, H.S. (2008) Quantifying the Global and Distributional Aspects of American Household Carbon Footprint. *Ecological Economics*, **66**, 379-391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.021>
 - [10] 姚亮, 刘晶茹, 袁野. 中国居民家庭消费碳足迹近 20 年增长情况及未来趋势研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2403-2408.
 - [11] Huang, Y.A., Lenzen, M., Weber, C.L., Murray, J. and Matthews, H.S. (2009) The Role of Input-Output Analysis for the Screening of Corporate Carbon Footprints. *Economic Systems Research*, **21**, 217-242.
<https://doi.org/10.1080/09535310903541348>
 - [12] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057.
 - [13] Kenny, T. and Gray, N.F. (2009) Comparative Performance of Six Carbon Footprint Models for Use in Ireland. *Environmental Impact Assessment Review*, **29**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2008.06.001>
 - [14] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(5): 28-34.
 - [15] Jha, G., Soren, S. and Mehta, K.D. (2020) Life Cycle Assessment of Sintering Process for Carbon Footprint and Cost Reduction: A Comparative Study for Coke and Biomass-Derived Sintering Process. *Journal of Cleaner Production*, **259**, Article 120889. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120889>
 - [16] Xie, J., Fu, J., Liu, S. and Hwang, W. (2020) Assessments of Carbon Footprint and Energy Analysis of Three Wind Farms. *Journal of Cleaner Production*, **254**, Article 120159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120159>
 - [17] Virtanen, Y., Kurppa, S., Saarinen, M., Katajajuuri, J., Usva, K., Mäenpää, I., et al. (2011) Carbon Footprint of Food—Approaches from National Input-Output Statistics and a LCA of a Food Portion. *Journal of Cleaner Production*, **19**, 1849-1856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.001>
 - [18] 卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 326-336.
 - [19] 周国富, 宫丽丽. 京津冀能源消耗的碳足迹及其影响因素分析[J]. 经济问题, 2014(8): 27-31.
 - [20] 丰霞, 智瑞芝, 董雪旺. 浙江省居民消费间接碳足迹测算及影响因素研究[J]. 生态经济, 2018, 34(3): 23-30.
 - [21] 张约翰, 张平宇. 长吉都市区能源碳足迹测度及影响因素研究[J]. 地理科学, 2012, 32(9): 1099-1105.
 - [22] 闫云凤. 京津冀碳足迹演变趋势与驱动机制研究[J]. 软科学, 2016, 30(8): 10-14.
 - [23] 孙强, 沈玉志. 区域碳足迹耦合度及影响因素研究[J]. 生态经济, 2016, 32(11): 75-79.
 - [24] 孙丽文, 韩莹, 杜鹃. 京津冀高能耗产业碳足迹的影响因素——基于 de Bruyn 模型[J]. 技术经济, 2019, 38(8): 86-92, 118.
 - [25] 袁路, 潘家华. Kaya 恒等式的碳排放驱动因素分解及其政策含义的局限性[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 210-215.
 - [26] 李智等. 中国 1996 年-2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析[J]. 资源科学, 2007, 29(6): 54-60.
 - [27] Van Amstel, A. (2006) IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies.
 - [28] 河南省人民政府关于印发河南省污染防治攻坚战三年行动计划(2018-2020)的通知[EB/OL].
<https://www.henan.gov.cn/2018/09-21/692225.html>, 2025-10-15.