

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.025

陶勤, 王世航, 徐胜祥, 等. 基于碳承载力对河南省能源消费碳排放及其驱动因素的研究. 土壤, 2024, 56(2): 439–447.

# 基于碳承载力对河南省能源消费碳排放及其驱动因素的研究<sup>①</sup>

陶勤<sup>1,2</sup>, 王世航<sup>1</sup>, 徐胜祥<sup>2\*</sup>, 杨震<sup>1</sup>, 赵明松<sup>1</sup>, 王奇<sup>1,2</sup>, 邓良<sup>3</sup>

(1 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽淮南 232001; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3 安徽省地质测绘技术院, 合肥 230022)

**摘要:** 基于河南省近 20 年的能源消费碳排放数据和陆地生态系统碳承载力数据, 对近年来研究区碳排放量情况进行了分析, 并采用 LMDI 因素分解模型和 Tapio 脱钩模型对碳排放驱动因素以及与经济耦合情况进行了探讨。结果表明: ①2000—2020 年, 河南省碳排放量呈现“先急后缓”的增长状态, 在 2012 年后增加量开始减少并逐渐趋于稳定。②整体上, 经济产出效应和人口规模效应对碳排放起促进作用; 与之相反, 能源消费强度效应和能源消费结构效应抑制了碳排放, 经济产出效应的影响在减少, 能源消费强度效应的影响在增加。③由 Tapio 脱钩模型分析得出, 河南省碳排放与经济增长之间以弱脱钩为主, 脱钩指数逐年减小, 逐步向强脱钩状态迈进。总体上, 2000—2020 年河南省碳排放情况得到了很好的控制, 合理规划土地利用、提高新能源的消费比重、降低能源消费强度对该地区节能减排具有重要意义。

**关键词:** 能源消费; 碳排放; LMDI 因素分解模型; Tapio 脱钩模型

中图分类号: X24 文献标志码: A

## Carbon Emission and Driving Factors of Energy Consumption in Henan Province Based on Carbon Carrying Capacity

TAO Qin<sup>1,2</sup>, WANG Shihang<sup>1</sup>, XU Shengxiang<sup>2\*</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>, ZHAO Mingsong<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>, DENG Liang<sup>3</sup>

(1 School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Anhui Institute of Geological Surveying and Mapping Technology, Hefei 230022, China)

**Abstract:** Carbon emission data of energy consumption and carbon carrying capacity data of terrestrial ecosystem in Henan Province in recent 20 years were used to analyze carbon emissions. Based on the LMDI factorization model and Tapio decoupling model, the coupling between the driving factors of carbon emissions and economy were discussed. The results show that: 1) From 2000 to 2020, carbon emissions in Henan Province showed a “rapid and then slow” growth, and the increase began to decrease and gradually stabilize after 2012. 2) Overall, carbon emissions were driven by economic output effect and population scale effect. On the contrary, carbon emissions were inhibited by energy consumption intensity effect and energy consumption structure effect. The influence of economic output was decreasing, while the influence of energy consumption intensity was increasing. 3) According to the Tapio decoupling model, the decoupling between carbon emissions and economic growth in Henan Province was mainly weak decoupling, and the decoupling index was decreasing year by year, and gradually moving towards a strong decoupling. In general, the carbon emission situation in Henan Province was well controlled from 2000 to 2020. Rational planning of land use, increasing the proportion of new energy consumption and reducing energy consumption intensity are recommended for energy saving and emission reduction in the region.

**Key words:** Energy consumption; Carbon emissions; LMDI factorization model; Tapio decoupling model

研究表明, 人类活动导致的温室气体排放、气溶胶变化、土地利用变化等是气候变暖的关键因素<sup>[1]</sup>, 其中 CO<sub>2</sub> 是温室气体的重要组成部分, 减缓气候变暖的关键在于减少 CO<sub>2</sub> 的排放量<sup>[2]</sup>。为减少碳排放的

①基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA28100500)、安徽省自然科学基金项目(2208085MD88)和国家自然科学基金项目(31700369)资助。

\* 通讯作者(sxxu@issas.ac.cn)

作者简介: 陶勤(1998—), 女, 安徽太和人, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳循环。E-mail: 1458545387@qq.com

增长, 国家采取了一系列的有效措施并于 2020 年宣布中国 CO<sub>2</sub> 排放量力争在 2030 年实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的阶段目标<sup>[3]</sup>。在此背景下, 如何有效实施节能减排, 走更高质量的绿色低碳、可持续发展道路成为新时期讨论的热点话题<sup>[4]</sup>, 不少学者因此展开大量研究。

近年来学者们对于碳排放量的测算不再局限于工业、农业、旅游业、交通等行业, 对于能源消费碳排放和土地利用碳排放的研究逐渐增多。在能源消费碳排放方面, 学者们以不同区域为研究对象, 采用不同的方法从不同的角度对碳排放量的时空演变和驱动因素进行了大量的研究。邓吉祥等<sup>[5]</sup>将中国划分为八大区域, 并采用平均迪氏指数分解法对中国八大区域的碳排放量及其驱动因素进行了分析; 高长春等<sup>[6]</sup>从时空耦合的角度对中国除西藏外的 30 个省区的能源消费碳排放时空格局动态性进行了分析研究; 王少剑等<sup>[7]</sup>通过对 2000—2017 年中国县域碳排放数据进行分析, 得出中国县域人均碳排放的总体变化、区域之间的差异以及集聚特征; 马颖等<sup>[8]</sup>采用 LMDI 因素分解法对北上津地区的能源消费碳排放进行影响因素的分解, 并利用 Tapio 脱钩模型分析了碳排放与经济发展之间的关系。

尽管上述学者对我国各地区能源消费碳排放量及驱动因素进行了大量的研究并取得了显著的成果, 但均是单方面地关注了能源消费碳排放量, 很少将其与生态系统碳承载力联系起来。肖玲等<sup>[9]</sup>于 2013 年提出了碳承载力、净碳足迹等概念。Venetoulis 和 Talberth<sup>[10]</sup>将净初级生产力加入生态足迹模型并对其进行不断的完善和改进, 分析计算了各类型生态系统的碳吸收能力、各类土地的均衡因子和生态足迹。方恺等<sup>[11]</sup>提出了基于全球平均净初级生产力的能源足迹计算方法, 解决了传统能源足迹忽略多数土地碳吸收贡献、碳吸收能力界定不清等问题。基于以上, 本研究拟采用中国土地覆盖数据集(China land cover dataset, CLCD)<sup>[12]</sup>, 对河南省不同土地利用类型面积进行统计, 运用方恺等<sup>[11]</sup>提出的碳承载力计算方法研究河南省能源消费碳排放与碳承载力之间的关系, 并对碳排放的驱动因素进行分析, 以促进研究区节能减排, 实现低碳、高质量经济发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河南省位于我国中部, 东部与安徽省、山东省接壤, 北接河北省、山西省, 西连陕西省, 南临湖北省,

总面积 16.7 万 km<sup>2</sup>。河南省地势东低西高, 东部为平原, 西部为山地和丘陵, 是我国重要的粮食大省。全省大部分地区为暖温带, 南部地区跨亚热带, 属于北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候区。

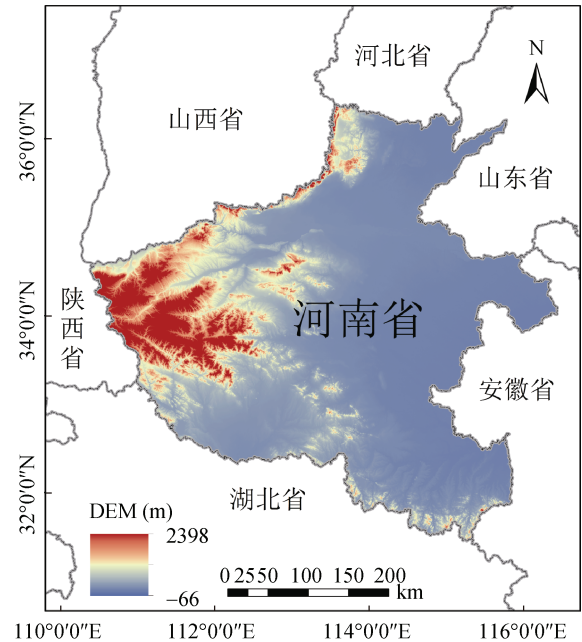


图 1 研究区地理位置

### 1.2 数据来源

能源消耗数据来自 2000—2020 年的《河南省统计年鉴》<sup>[13]</sup>, 土地利用数据采用了在 GEE(Google earth engine)平台上制作的第一个源自 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集(CLCD), 人口数据、国内生产总值(GDP)数据均来自 2000—2020 年的《河南省统计年鉴》<sup>[13]</sup>。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 土地利用变化监测** 土地利用变化监测包括从借助遥感影像、构建土地利用变化数据库、探究影响的潜在驱动力、搭建土地覆被空间模型等方面来监测土地利用的变化情况<sup>[14]</sup>。本研究借助遥感影像实现对河南省土地利用变化的监测。遥感影像变化的监测是指对同一地区不同时相的遥感图像进行比较, 以阐明土地利用类型<sup>[15]</sup>转换的全过程。常用的变化监测<sup>[16]</sup>方法有: 图像直接比较法、分类后比较法和基于信息融合的方法<sup>[17]</sup>。分类后比较法的关键是基于分类来检测信息内容的变化, 首先应用统一分类对每个阶段的遥感影像进行独立分类, 然后监测土地利用的变化。本研究采用分类后比较法, 基于河南省土地覆盖数据集对已分类的土地利用类型<sup>[18]</sup>进行下一步的分析研究。

**1.3.2 能源消耗碳排放计算** 能源消耗类碳源估算方法的核心是采用能源消耗总量和化石燃料系数或碳排放因子来计算碳排放量。本研究根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的清单法计算了河南省规模以上工业企业(主要包括采矿业、制造业、电力、燃气及水的生产和供应业)的能源消费碳排放。具体公式如下：

$$C = \sum m_i \times \beta_i \times \gamma_i \quad (1)$$

式中： $C$  为总碳排放量； $i$  为各能源的种类； $m_i$  为各能源的消耗量； $\beta_i$  为各能源折算标准煤系数； $\gamma_i$  为各能源碳排放系数。具体数据如表 1 所示。

**1.3.3 陆地生态系统碳承载力评估** 陆地生态系统碳承载力表现为某一区域内各种植被每年所能吸

收固定  $\text{CO}_2$  的质量<sup>[19]</sup>，有 3 种评估方法，总初级生产力(GPP)表示一个陆地生态系统中单位面积植物通过光合作用固定的碳的总质量<sup>[20]</sup>；净初级生产力(NPP)表示总初级生产量减去植物自养呼吸后的剩余碳的质量，即净固碳量；净生态系统生产力(NEP)表示一个生态系统植被的净初级生产量减去植物异氧呼吸排放的碳质量的差<sup>[21]</sup>。NPP 作为地球碳循环的原动力，可以真实反映各土地类型的生物生产和碳吸收能力<sup>[11]</sup>，相比于 NEP 更为成熟，数据也更容易获取<sup>[22]</sup>，因此，本研究采用不同子系统的 NPP 值来度量单位时间、单位面积相应子系统碳承载力，并研究河南省的碳汇量。陆地生态系统的细分及其碳承载力的 NPP 度量数据如表 2 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 主要能源碳排放转化系数

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油汽	天然气	标准煤
折算标煤系数(tce/t)	0.71	0.97	1.43	1.47	1.47	1.46	1.43	1.71	13.30	
碳排放系数( $\text{CO}_2$ , t/tce)	0.76	0.86	0.59	0.55	0.57	0.59	0.62	0.50	0.45	0.67

表 2 陆地生态系统的细分及其碳承载力的 NPP 度量

陆地生态系统细分	林地	草地	耕地	建设用地	未利用地	湿地	水域
NPP( $\text{C}$ , t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ))	6.75	5.58	3.97	1.00	1.17	12.07	5.51

生态系统碳承载力计算公式：

$$B = \sum A_j \times \alpha_j \quad (2)$$

式中： $B$  表示生态系统碳承载力； $j$  表示各土地利用类型； $A_j$  表示各土地利用类型的面积； $\alpha_j$  表示各土地利用类型的 NPP。

**1.3.4 LMDI 因素分解模型** Ang<sup>[23]</sup>在 Kaya 碳排放恒等式的基础上，提出了 LMDI (Logarithmic mean divisia index)分解法(平均迪氏指数分解法)。相比较于其他方法，该方法在理论基础、适用性以及可操作性上都具有一定的优势<sup>[24]</sup>，且因其分解无残差并有效地解决了“0”值问题，被广泛应用于碳排放的分解研究中。

Kaya 碳排放恒等式：

$$C = \sum C_i = \sum P \times \frac{G}{P} \times \frac{E}{G} \times \frac{C_i}{E} \quad (3)$$

式中： $C$  为能源消费碳排放的总量； $i$  为能源种类； $P$  为总人口数； $G$  为经济情况即 GDP； $E$  为能源消耗总量。

$$\text{令 } A = \frac{G}{P}, I = \frac{E}{G}, S = \frac{\sum C_i}{E}$$

$$\text{则 } C = \sum C_i = P \times A \times I \times S \quad (4)$$

式中： $P$  为人口规模； $A$  为人均 GDP 即经济产出； $I$

为能源消费强度； $S$  为能源消费结构。

LMDI 对数平均迪氏指数法公式如下：

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_P^T + \Delta C_\alpha^T + \Delta C_i^T + \Delta C_S^T \quad (5)$$

其中，

$$\Delta C_P^T = \sum \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C^T - \ln C^0} \ln \frac{P^T}{P^0} \quad (6)$$

$$\Delta C_\alpha^T = \sum \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C^T - \ln C^0} \ln \frac{A^T}{A^0} \quad (7)$$

$$\Delta C_i^T = \sum \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C^T - \ln C^0} \ln \frac{I^T}{I^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_S^T = \sum \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C^T - \ln C^0} \ln \frac{S^T}{S^0} \quad (9)$$

式中： $\Delta C$  为全国区域内能源消费碳排放变化综合效应； $C^0$  为基期碳排放量； $C^T$  为第  $T$  期碳排放量； $\Delta C_P$  为人口规模效应； $\Delta C_\alpha$  为经济产出效应； $\Delta C_i$  为能源消费强度效应； $\Delta C_S$  为能源消费结构效应。

通过整理《河南省统计年鉴》<sup>[13]</sup>得到人口、经济、能源结构(本文主要采用煤炭、石油和天然气的消耗量)数据，利用 LMDI 分解法对河南省碳排放驱动因素进行分析。

**1.3.5 Tapio 脱钩模型** 脱钩弹性系数，用于表述经济增长与环境压力两者之间存在的联系，在研究省

市乃至国家层面的经济情况和碳排放关系时, Tapio 脱钩弹性系数得到了广泛的应用<sup>[25]</sup>。公式如下:

$$e = \frac{\Delta C / C}{\Delta \text{GDP} / \text{GDP}} = \frac{(C_T - C_0) / C_0}{(\text{GDP}_T - \text{GDP}_0) / \text{GDP}_0} \quad (10)$$

式中:  $e$  为脱钩弹性指数,  $\Delta C$  和  $\Delta \text{GDP}$  为碳排放和 GDP 的变化量,  $C_0$  和  $\text{GDP}_0$  为基期的碳排放和 GDP,  $C_T$  和  $\text{GDP}_T$  为  $T$  时期的碳排放和 GDP。Tapio 脱钩模型的状态划分如表 3 所示。

Tapio 脱钩模型可划分为 8 个状态。强脱钩: 碳排放减少的同时经济增长, 是最理想的状态;

弱脱钩: 碳排放和经济都为增长状态, 但碳排放增长速度慢于经济增长速度; 衰退脱钩: 碳排放和经济都表现为降低, 但碳排放减少速度快于经济衰退速度; 强负脱钩: 经济衰退的同时碳排放增加, 是最差的状态; 弱负脱钩: 碳排放和经济都表现为降低, 但碳排放减少速度慢于经济衰退速度; 扩张负脱钩: 碳排放和经济都为增长状态, 但碳排放增长速度快于经济增长速度; 扩张连结: 碳排放与经济增长同步增加; 衰退连结: 碳排放与经济增长同步减少。

表 3 Tapio 脱钩模型的状态划分

脱钩状态		$\Delta C$	$\Delta \text{GDP}$	脱钩弹性系数( $e$ )
脱钩	强脱钩	<0	>0	$(-\infty, 0)$
	弱脱钩	>0	>0	$[0, 0.8]$
	衰退脱钩	<0	<0	$(1.2, +\infty)$
负脱钩	强负脱钩	>0	<0	$(-\infty, 0)$
	弱负脱钩	<0	<0	$[0, 0.8]$
	扩张负脱钩	>0	>0	$(1.2, +\infty)$
连结	扩张连结	>0	>0	$[0.8, 1.2]$
	衰退连结	<0	<0	$[0.8, 1.2]$

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化

土地资源利用的转变是人与地球资源之间化学物质转化的关键表现, 其在所有时间限制内都会发生。由 CLCD 数据集得到河南省 2000—2020 年各年份土地利用数据计算碳承载力, 并选取 2000 年、2010 年、2015 年以及 2020 年的土地利用空间分布图用于分析河南省近年来的土地利用变化情况, 如图 2 所示。通过图 2 可以直观地看出各土地类型面积变化情况以及发生土地类型转化的位置。其中, 建设用地的变化最为显著, 面积逐年增加。建设用地区域附近的非建设用地转变为建设用地的情况较为常见, 且这种情况在中心城区体现得更为显著。由于建筑物原来密度较大且扩张空间有限, 所以呈零星线状由中心城区向四周散开。林地面积和水域面积也有所增长, 但其增长幅度均小于建设用地。而河南省的耕地面积、草地面积以及未利用地面积逐年减少。

自然因素和人文因素对土地利用类型的改变有着很大程度的影响, 不同区域以及不同时间所对应的土地利用类型变化也不同, 为定量表达不同时期土地利用的变化情况, 本文运用土地利用转移矩阵来度量土地利用的变化。土地利用转移矩阵<sup>[26]</sup>是基于同一

地区但不在同一阶段的土地资源现状的变化而得出的一个二维矩阵, 通过对其进行分析, 能够得到 2 个不同阶段的土地利用类型之间相互转化的情况, 揭示土地资源在不同年份发生变化的类型、发生变化的具体位置以及发生变化的总面积。通过分析表 4 可得, 2000—2020 年河南省发生了 30 种土地类型的相互转换, 建设用地和非建设用地之间的转换现象较为普遍, 其中耕地的转换面积最多, 共计转换了 1 127 462.04  $\text{hm}^2$ , 耕地大部分转换为建设用地, 约占 64.31%, 转换面积 725 030.28  $\text{hm}^2$ 。

### 2.2 碳排放量

根据 IPCC 能源消费碳排放系数, 并结合公式(1)可以得到河南省 2000—2020 年的碳排放量, 根据公式(2)得到近 20 年河南省陆地生态系统碳承载力数据, 两者之差即为碳净排放量, 如表 5 所示。2000—2012 年, 河南省能源消费碳排放量持续增长, 由 2000 年的 5 305.62 万 t 增长到 2012 年的 15 842.01 万 t, 增长了近 2 倍, 2013 年陡降至 14 679.03 万 t, 2014 年回升至 15 336.30 万 t, 直至 2020 年能源消费碳排放量一直在 15 000.00 万 t 浮动, 逐渐趋于稳定。近 20 年来, 河南省生态系统碳承载力呈现缓慢减少的趋势, 从 6 926.62 万 t 减少到 6 766.00 万 t, 与这些年来大面积耕地转换为建设用地有着密切的关系。



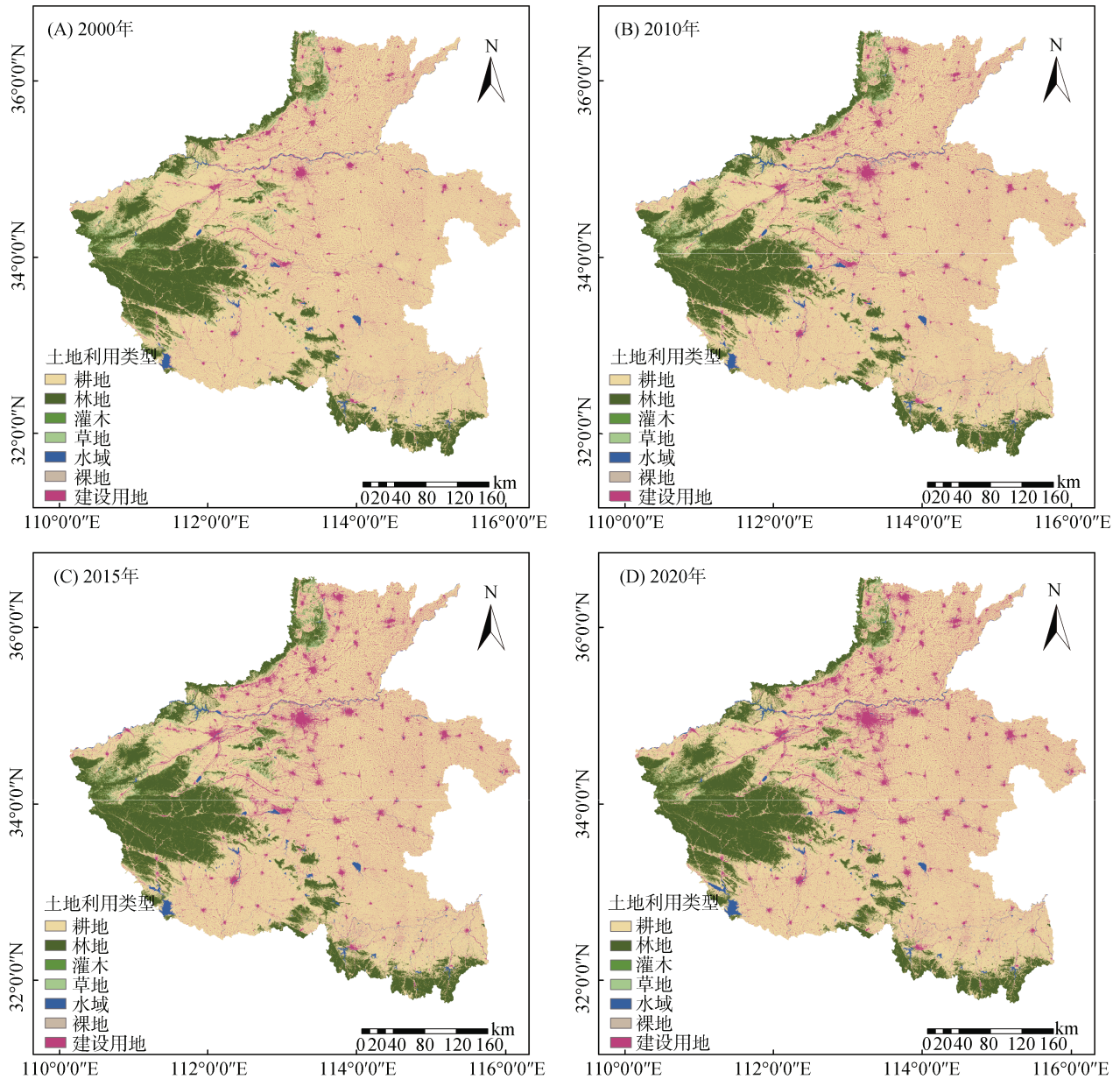


图 2 2000—2020 年河南省土地利用空间分布图

表 4 2000—2020 年河南省土地利用转移矩阵(hm<sup>2</sup>)

2000—2020 年	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	2000 年面积
耕地	10 594 172.88	301 908.51	42 909.66	57 512.88	100.71	725 030.28	11 721 764.07
林地	128 301.57	2 585 923.65	10 340.46	159.57	18.72	4 185.00	2 728 928.97
草地	107 033.58	73 010.07	136 135.71	2 054.25	50.04	7 754.04	327 393.18
水域	26 023.77	521.10	73.71	117 905.13	36.09	8 830.80	153 390.60
未利用地	231.84	0.00	34.92	226.44	17.10	415.62	925.92
建设用地	9 686.70	40.05	89.10	25 253.10	46.08	1 593 938.70	1 629 053.73
2020 年面积	10 865 450.34	2 962 888.02	189 583.56	203 111.37	268.74	2 340 154.44	

碳净排放量的变化趋势与能源消费碳排放量大致相同，均表现为先增后减然后趋于稳定，从 2000 年的 -1 620.99 万 t 增长到 2020 年的 8 477.84 万 t，且在 2012 年达到高峰 9 001.54 万 t。随着碳减排相关政策

的出台以及我国经济发展模式的转变，近年来河南省碳排放量减少，碳净排放量逐步降低。从 2003 年河南省开始出现碳净排放量转为正值现象，一直到 2020 年均为碳排放量大于生态系统碳承载力的状

态,其间虽然处于碳超载状态,但近年来碳超载程度有所缓解,碳超载量得到了一定的减少。这表明相关的政策和方法起到了一定的作用,河南省的碳排放现状和经济发展都在朝着好的方向发展。

表 5 2000—2020 年河南省能源消费碳排放量及生态系统碳承载力(万 t)

年份	能源消费碳排放量	生态系统碳承载力	碳净排放量
2000	5 305.62	6 926.62	-1 620.99
2001	5 523.48	6 925.84	-1 402.36
2002	6 066.85	6 923.32	-856.47
2003	7 098.65	6 928.21	170.44
2004	8 759.69	6 922.47	1 837.22
2005	9 798.48	6 910.75	2 887.72
2006	10 875.72	6 900.18	3 975.55
2007	11 951.32	6 889.37	5 061.95
2008	12 714.10	6 890.95	5 823.15
2009	13 233.33	6 882.58	6 350.75
2010	14 363.30	6 867.32	7 495.97
2011	15 451.46	6 855.15	8 596.31
2012	15 842.01	6 842.02	9 001.54
2013	14 679.03	6 832.69	7 846.34
2014	15 336.30	6 824.55	8 511.75
2015	14 969.81	6 815.13	8 154.68
2016	14 956.41	6 801.34	8 155.07
2017	14 848.54	6 796.73	8 051.81
2018	15 181.53	6 789.96	8 391.57
2019	14 941.00	6 782.96	8 158.04
2020	15 243.84	6 766.00	8 477.84

## 2.3 碳排放影响因素

**2.3.1 基于 LMDI 模型的因素分解** 采用 LMDI 分解法,将人口规模效应、经济产出效应、能源消费强度效应和能源消费结构效应<sup>[27]</sup>作为进一步探讨河南省能源消费碳排放的驱动因素,结果如表 6 所示。综合分析可得,河南省碳排放量近 20 年整体上呈增长趋势,可分为 3 个阶段:第一阶段 2000—2012 年,此期间除 2007—2009 年和 2011—2012 年外其余年份增长较为迅速,在 2003—2004 年增加量达到了近年来的峰值,1 661.04 万 t,第一阶段总增长量为 10 537.94 万 t,高增长的碳排放量与该阶段粗放的经济增长方式密切相关;第二阶段 2012—2013 年,碳排放量锐减,首次达到负增长,与 2012 年相比,2013 年碳排放量减少了 1 164.54 万 t,该阶段国家政策发生了改变,将生态文明建设上升到了国家战略层面,相应的经济增长模式也发生了一定的变化,由原来的粗放型发展逐渐转变为低碳集约型发展;第三阶段 2013—2020 年,其间碳排放量逐渐趋于稳定,这几

年的增长量在正值与负值之间小范围波动,平均增长量为 80.69 万 t。

从整体上看,人口规模效应和经济产出效应起到了促进 CO<sub>2</sub> 排放的作用,均表现为正效应,能源消费强度效应和能源消费结构效应抑制了 CO<sub>2</sub> 的排放,均表现为负效应。其中,经济产出效应是导致 CO<sub>2</sub> 排放量增加的主要因素,能源消费强度效应是降低 CO<sub>2</sub> 排放量的主要因素。具体而言,近 20 年来,经济产出效应导致的碳排放量为 38 446.71 万 t,年平均贡献率为 58.9%;能源消费强度效应导致的碳排放量为 -31 768.90 万 t,年平均贡献率为 -31.15%;人口规模效应和能源消费结构效应导致的碳排放量占据小部分,分别为 1 757.92 万 t 和 -4 002.03 万 t,年平均贡献率分别为 2.7% 和 3.1%。

人口规模效应的贡献率一直波动不大,随着人口的增长,对能源的需求和使用也随之增多,土地利用方式也会随之发生改变,建筑面积增多,林地面积减少;但近年来由于政府的管控,积极响应国家号召,退耕还林,人口规模效应对碳排放量的影响一直在小范围内波动。能源消费结构效应虽在 2003 年、2005 年、2007 年、2012 年和 2015 年对碳排放量表现为正效应,但整体上看是负效应,且呈现增长趋势,这与降低高碳能源的消费比重有着很大关联。经济产出效应和能源消费强度效应在 2000—2004 年贡献率呈增长趋势,在 2001—2004 年时能源消费强度效应甚至对碳排放量表现正效应,这可能与早年大力发展高能耗、低能效行业以及粗狂的经济发展模式有关;2005—2019 年,经济产出效应表现的正效应在降低,能源消费结构效应表现的负效应在增加。由此表明,低碳的经济发展模式对降低碳排放量有促进作用,河南省能源利用效率方面也得到了提升。

**2.3.2 Tapio 脱钩模型** 基于 LMDI 模型对碳排放驱动因素进行分析得出经济产出效应是影响碳排放的最关键因素,通过公式(10),计算得出 2000—2020 年河南省碳排放量与其经济增长之间脱钩关系的时序变化(表 7)。结果显示,2000—2020 年河南省碳排放与其经济增长之间的脱钩状态以弱脱钩为主,即经济发生增长,碳排放量也表现为上升趋势,但经济增长速度更快,属于较理想状态;2001—2004 年和 2019—2020 年,脱钩状态表现为扩张连结,表明这期间经济与碳排放量均呈现增长状态,且增长速度相当;2012—2013 年、2014—2017 年和 2018—2019 年,河南省的经济在增长,而碳排放量在减少,这阶段脱钩状态表现为强脱钩,属于理想状态。

表 6 2000—2020 年河南省能源消费碳排放变化效应因素分解

时段	人口规模效应		经济产出效应		能源消费强度效应		能源消费结构效应		碳排放量	
	碳排放量 (万 t)	贡献率	碳排放量 (万 t)	贡献率	碳排放量 (万 t)	贡献率	碳排放量 (万 t)	贡献率	年度变化 (万 t)	累积变化 (万 t)
2000—2001	7.25	0.01	441.79	0.61	-249.93	-0.35	-25.08	-0.03	217.86	217.86
2001—2002	11.78	0.02	493.64	0.86	40.17	0.07	-29.62	-0.05	543.37	761.23
2002—2003	81.23	0.07	902.33	0.81	119.94	0.11	7.17	0.01	1 031.80	1 793.03
2003—2004	-101.94	-0.05	1 694.12	0.86	152.17	0.08	-16.95	-0.01	1 661.04	3 454.06
2004—2005	89.91	0.03	1 962.11	0.67	-862.20	-0.29	31.06	0.01	1 038.79	4 492.85
2005—2006	13.79	0.01	1 623.24	0.73	-562.08	-0.25	-22.01	-0.01	1 077.25	5 570.10
2006—2007	-42.38	-0.01	2 661.45	0.63	-1 476.71	-0.35	25.34	0.01	1 075.60	6 645.70
2007—2008	90.22	0.02	2 178.43	0.58	-1 442.61	-0.38	-37.62	-0.01	762.78	7 408.48
2008—2009	80.70	0.05	942.03	0.61	-504.03	-0.33	-13.46	-0.01	519.23	7 927.71
2009—2010	-79.91	-0.03	1 544.14	0.59	-778.03	-0.30	-209.64	-0.08	1 129.97	9 057.67
2010—2011	87.73	0.03	2 235.47	0.64	-1 135.94	-0.33	15.47	0.00	1 088.16	10 145.84
2011—2012	115.11	0.04	1 369.77	0.51	-1 087.66	-0.41	96.33	0.04	392.10	10 537.94
2012—2013	82.22	0.02	1 577.06	0.31	-3 152.03	-0.62	-260.63	-0.05	-1 164.54	9 373.41
2013—2014	115.62	0.05	1 281.68	0.61	-696.47	-0.33	-16.27	-0.01	657.27	10 030.68
2014—2015	101.84	0.04	1 115.70	0.39	-1 658.03	-0.57	18.55	0.01	-366.49	9 664.19
2015—2016	443.97	0.05	4 214.49	0.45	-4 649.73	-0.50	0.00	0.00	-13.40	9 650.79
2016—2017	459.80	0.02	8 936.63	0.40	-1 0156.3	-0.46	-2743.06	-0.12	-107.87	9 542.92
2017—2018	20.11	0.02	586.25	0.51	-485.51	-0.42	-61.85	-0.05	332.99	9 875.91
2018—2019	132.22	0.02	2 449.18	0.38	-3 142.08	-0.49	-705.53	-0.11	-240.53	9 635.38
2019—2020	48.65	0.13	237.20	0.62	-41.87	-0.11	-54.23	-0.14	302.84	9 938.22

表 7 2000—2020 年河南省能源消费碳排放脱钩状态的时序变化

时段	$\Delta C$	$\Delta C/C$	$\Delta GDP$	$\Delta GDP/GDP$	脱钩弹性系数 ( $e$ )	脱钩状态
2000—2001	217.86	0.04	480.02	0.09	0.43	弱脱钩
2001—2002	543.37	0.10	502.47	0.09	1.08	扩张连结
2002—2003	1 031.80	0.17	906.93	0.15	1.13	扩张连结
2003—2004	1 661.04	0.23	1 468.78	0.21	1.11	扩张连结
2004—2005	1 038.79	0.12	1 832.28	0.22	0.54	弱脱钩
2005—2006	1 077.25	0.11	1 734.40	0.17	0.65	弱脱钩
2006—2007	1 075.60	0.10	2 846.62	0.24	0.42	弱脱钩
2007—2008	762.78	0.06	2 911.44	0.20	0.32	弱脱钩
2008—2009	519.23	0.04	1 445.07	0.08	0.50	弱脱钩
2009—2010	1 129.97	0.09	3 474.02	0.18	0.47	弱脱钩
2010—2011	1 088.16	0.08	3 663.66	0.16	0.47	弱脱钩
2011—2012	392.10	0.02	2 643.24	0.10	0.25	弱脱钩
2012—2013	-1 164.54	-0.07	2 670.58	0.09	-0.80	强脱钩
2013—2014	657.27	0.04	2 942.26	0.09	0.48	弱脱钩
2014—2015	-366.49	-0.02	2 509.34	0.07	-0.33	强脱钩
2015—2016	-13.40	-0.00	3 165.24	0.09	-0.01	强脱钩
2016—2017	-107.87	-0.01	4 575.58	0.11	-0.06	强脱钩
2017—2018	332.99	0.02	5 110.98	0.11	0.20	弱脱钩
2018—2019	-240.53	-0.02	3 781.85	0.08	-0.21	强脱钩
2019—2020	302.84	0.02	1 279.32	0.02	0.85	扩张连结

### 3 讨论

在过去几十年中,碳排放已成为全球关注的一个热门议题。能源消费对 CO<sub>2</sub> 的排放有着显著的影响<sup>[28]</sup>,既往不乏有学者对河南省碳排放进行研究,如孙昕<sup>[29]</sup>采用《IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的测量方法对河南省能源消费碳排放量进行了计算,结果表明碳排放量整体上呈现增加趋势,与本研究的结果基本一致。但这些研究均是单方面对碳排放进行分析,缺乏碳吸收方面的研究。探究区域固碳能力对缓解全球变暖具有重要意义<sup>[30]</sup>,分析区域碳排放量和陆地生态系统碳承载力对碳均衡目标制定的科学性具有重要的理论意义,其能有力完善低碳经济发展视角的区域生态文明的外延。本文不仅从能源消费的角度研究了河南省碳排放问题,还基于土地利用类型分析了河南省生态系统碳承载力,直观地表达了河南省生态系统的碳吸收能力,将两者联系起来分析河南省的碳超载情况,采用 LMDI 模型分析碳排放与经济、人口、能源消费强度和能源消费结构的关系,结果表明碳排放的主要驱动因素为经济,并基于 Tapio 脱钩模型分析碳排放与经济的脱钩情况,对节能减排工作更具有参考价值。

总体而言,河南省能源消费碳排放虽然为增长趋势,但其增长量近年来有明显的减少且出现了负值,碳排放量与经济密度的密切程度也在降低,这表明近年来节能减排工作取得了一定的成效。“十四五”时期是实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标的关键时期<sup>[31]</sup>,紧抓节能减排重点项目、完善相关政策机制、推动能源消费结构得到改善是提高生态环境质量、促进可持续发展的重要举措。立足于各地区的实际情况,实施具体的减排政策,不仅可以健全绿色低碳的发展体系,而且还能增加新能源的投入使用,提高其在能源消费构成中的比重,进而通过改善能源生产结构,实现节能减排和社会经济发展与碳排放<sup>[32]</sup>解耦的目的。

实现“碳达峰碳中和”战略目标不仅需要约束区域的碳排放总量,也需要切实转变经济社会发展方式<sup>[33]</sup>。但本文在碳排放驱动因素的研究中只考虑了经济、人口、能源消费强度和能源消费结构,未考虑能源替代和科技水平等因素对碳排放的影响,未来,能源消费结构逐渐多元化,深入研究能源消费对碳排放的影响是很有必要的。

### 4 结论

1) 近 20 年来河南省的碳排放量得到了一定的

控制,前期呈现“先急后缓”的持续增长状态,2012 年之前每年的碳排放量均为正值,2012 年以后,河南省的碳排放量开始出现负值,此后开始在零增长附近小范围波动。陆地生态系统碳承载力波动不大,整体呈缓慢递减趋势。

2) 碳排放的主要影响因素为经济产出效应和能源消费强度效应,经济产出效应对碳排放起促进作用,贡献率逐年减少并趋于稳定;能源消费强度效应对碳排放起抑制作用,并且为主要的抑制因素,贡献率呈增长趋势。人口规模效应和能源消费结构效应对碳排放影响较小。

3) 2000—2020 年期间河南省碳排放与其经济增长之间的脱钩状态以弱脱钩为主,经济发展与碳排放增量之间的联系进一步减弱,属于较理想的模式,这与我国近年来实施的节能减排措施有着很大的关联,脱钩指数逐年减小,逐步向强脱钩状态迈进。

### 参考文献:

- [1] 周波涛. 全球气候变化:浅谈从 AR5 到 AR6 的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667-671.
- [2] 任立军, 赵文琪, 李金, 等. 不同施肥模式对设施土壤 CO<sub>2</sub> 排放特征及碳平衡的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 874-881.
- [3] 张中秋, 劳燕玲, 赵宁俊, 等. 广东省土地利用-碳减排-经济增长的脱钩关系[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 250-258, 266.
- [4] 陈晓晖. 省域低碳经济发展与土地集约利用的协同关系及其网络效应研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [5] 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.
- [6] 高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展, 2016, 35(6): 747-757.
- [7] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [8] 马颖, 邵长秀. 基于 LMDI 的北上津区域能源消费碳排放影响因素分析及脱钩效应研究[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(1): 124-132.
- [9] 肖玲, 赵先贵, 许华兴. 山东省碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 152-157.
- [10] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint[J]. Environment, Development and Sustainability, 2008, 10(4): 441-469.
- [11] 方恺, 董德明, 林卓, 等. 基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2900-2909.
- [12] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.



- [13] 中华人民共和国河南省统计局. 河南统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [14] 郑亚萍. 鄱阳湖生态经济区土地利用变化及景观生态风险评价研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [15] 郭绍义, 王红新, 刘文彬, 等. 升金湖沿湖不同土地利用方式下土壤有机质和养分变化特征[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1132-1137.
- [16] 王莉莉. 基于遥感影像与矢量图的土地利用图斑变化检测方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [17] 胡贝. 基于遥感影像处理的土地动态变化监测[J]. 北京测绘, 2021, 35(1): 70-73.
- [18] 陆蕴青, 向伟, 李敏, 等. 黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 89-98.
- [19] 赵先贵, 马彩虹, 肖玲, 等. 北京市碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 8-12.
- [20] 王军邦, 杨屹涵, 左婵, 等. 气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7085-7099.
- [21] 韩璇, 宋宇加. 基于净生态系统生产力模型的山西省不同土地利用类型碳足迹分析[J]. 江西农业学报, 2022, 34(3): 214-220.
- [22] 方恺. 基于净初级生产力的能源足迹模型及其实证研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [23] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 867-871.
- [24] 宋府霖, 韩传峰, 滕敏敏. 长三角地区能源消费碳排放驱动因素分析及优化策略[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 21-28.
- [25] 宋鹏, 张慧敏, 毛显强. 面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1446-1455.
- [26] 谢贤健. 基于 GIS 和分形理论的沱江流域土地利用结构动态分析[J]. 土壤, 2023, 55(2): 433-440.
- [27] 马晓君, 董碧滢, 于渊博, 等. 东北三省能源消费碳排放测度及影响因素[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 3170-3179.
- [28] 尚梅, 王蓉蓉, 胡振. 中国省域能源消费碳排放时空格局演进及驱动机制研究——基于环境规制视角的分析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(4): 529-534, 551.
- [29] 孙昕. 河南省碳排放与经济增长分析[J]. 合作经济与科技, 2022(7): 39-41.
- [30] 李静泰, 闫丹丹, 么秀颖, 等. 中国滨海湿地碳储量估算[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 800-814.
- [31] Chen H, Qi S Z, Tan X J. Decomposition and prediction of China's carbon emission intensity towards carbon neutrality: From perspectives of national, regional and sectoral level[J]. Science of the Total Environment, 2022, 825: 153839.
- [32] 禹康康, 王延华, 孙恬, 等. 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 406-414.
- [33] 邓祥征, 蒋思坚, 李星, 等. 区域土地利用影响地表 CO<sub>2</sub> 浓度异质性特征的动力学机制[J]. 地理学报, 2022, 77(4): 936-946.