

基于 STIRPAT 模型的淮河生态经济带碳排放 门槛效应研究

杨晨星¹, 庞庆华²

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学经济与金融学院, 江苏 常州 213200)

摘要: 基于 2010—2020 年淮河生态经济带 28 个城市的面板数据, 以 STIRPAT 模型为基础, 构建以人均 GDP 为门槛变量的门槛效应模型, 研究了产业结构和城镇化水平对碳排放总量的非线性影响。结果表明: 产业结构和城镇化水平对碳排放总量的影响均由显著的负向作用转为正向作用, 能源强度对碳排放具有正相关影响, 而能源消费结构对碳排放具有负相关影响。为了有效降低碳排放总量, 政府应根据城镇化发展的不同阶段及时调整产业结构, 促进淮河生态经济带高质量发展。

关键词: 碳排放; STIRPAT 模型; 门槛效应模型; 淮河生态经济带

中图分类号: F127

文献标志码: A

文章编号: 1003-9511(2025)01-0042-06

Research on threshold effect of carbon emissions in Huaihe River Ecological Economic Belt based on STIRPAT model//YANG Chenxing¹, PANG Qinghua²(1. Business School of Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. School of Economics and Finance, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: Based on the panel data of 28 cities in the Huaihe River Ecological Economic Belt from 2010 to 2020, this paper constructs a threshold effect model with per capita GDP as the threshold variable to study the nonlinear impact of industrial structure and urbanization level on total carbon emissions. The results show that the impact of industrial structure and urbanization level on total carbon emissions is changed from significant negative effects to positive effects. In addition, energy intensity has positive correlation effect on carbon emissions, and energy consumption structure has negative correlation effect on carbon emissions. Therefore, in order to effectively reduce the total amount of carbon emissions, the government should adjust the industrial structure in time according to the different stages of urbanization development, and promote the high-quality development of the Huaihe River Ecological Economic Belt.

Key words: carbon emissions; STIRPAT model; threshold effect model; Huaihe River Ecological Economic Belt

淮河生态经济带是我国中东部地区开放发展的新的战略支点。2018 年国务院批复了《淮河生态经济带发展规划》, 指出淮河生态经济带要将生态保护和环境治理放在首要位置。尽管淮河生态经济带在很长的时间内保持着经济的快速增长, 然而一直以来发展的均是高能耗、低产出、低效率的产业, 能源消耗和污染排放等问题尖锐, 其环境与经济发展都面临着巨大的压力。淮河生态经济带具有人口稠密、交通便捷、工业发达等优势, 制定提升淮河生态经济带碳排放效率的相关政策, 是完成其可持续绿色发展目标的重要基础。对淮河生态经济带碳排放效率进行分析, 进而确定影响碳排放效率的关键因子, 有利于推进淮河生态经济带的生态文明建设和

各方面的协调发展, 从而推动其全面融入“一带一路”建设。

近年来, 能源消费和碳排放领域的研究一直是关注的热点, 相关学者针对碳排放的驱动因素、研究方法与区域测算等进行了大量研究。①驱动因素。全世文等^[1]分析了 1953—2015 年中国的经济增长与碳排放短期和长期的协整关系; Li 等^[2]探讨了能源消费与经济增长对碳排放的影响; 苏凯等^[3]从人口、经济和技术等方面选取驱动因子来研究各因素对碳排放总量的影响程度。②研究方法。庞庆华等^[4]从空间角度出发, 在耦合模型的基础上运用引力模型对江苏省的碳排放现状进行分析; 王宪恩等^[5]以 VAR 模型为基础, 将脉冲响应和方差分解法

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(22YJAZH086)

作者简介: 杨晨星(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境科学与管理的可持续发展研究。E-mail: 1959146681@qq.com

相结合,分析各个阶段技术和可再生能源占比、工业化率表征的结构调整对碳排放的影响程度;蔡火娣^[6]运用 DEA-SBM 模型从 3 个方面比较了碳排放效率;Thomas^[7]运用多区域投入产出模型介绍了碳排放研究的主要方法特征和重要结果;Zhao 等^[8]运用 LMDI 法分解了上海市工业碳排放的影响因素。③区域测算。黄勤等^[9-13]分别对长江经济带、京津冀地区、西南地区 and 全国省级城市碳排放效率进行了研究。

综上,学者们利用多种效率模型鉴于多种驱动因素对碳排放效率进行了测量,取得了诸多研究成果,对于探索影响淮河生态经济带碳排放的因素、提高能耗效率具有重要的借鉴意义。然而鲜有学者采用门槛效应模型和 STIRPAT 模型相结合的方法来研究碳排放问题,而这两种方法的结合能够有效弥补碳排放因变量与各种自变量等比例变化的不足;另外,针对淮河生态经济带的研究主要是从生态效率^[14-15]、绿色发展^[16]、经济增长与生态环境协调发展等方面^[17-19]进行的,缺少对淮河生态经济带碳排放效率的系统研究。因此本文基于 STIRPAT 模型,构建以人均 GDP 为门槛变量的门槛效应模型,研究淮河生态经济带的碳排放问题,探究产业结构和城镇化水平对碳排放总量的非线性影响。

1 研究方法

本文建立门槛效应模型所依赖的基础模型为 STIRPAT 模型。STIRPAT 模型是一个由多变量组成的非线性方程。为了更直观地研究自变量对环境的影响,将其取对数,进而转化为线性框架模型^[20],由此构建的实证模型为

$$\ln C_{it} = \mu + \beta_1 \ln M_{it} + \beta_2 \ln U_{it} + \beta_3 \ln S_{it} + \beta_4 \ln Q_{it} + \beta_5 \ln Y_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: C_{it} 为碳排放总量; M_{it} 为产业结构; U_{it} 为城镇化水平; S_{it} 为能源消费结构; Q_{it} 为能源强度; Y_{it} 为人均 GDP; β_i 为相关变量的回归系数; i, t 分别为地级市行政单元和年份; μ 为常数项。

确定实证模型后,选择门槛效应模型对已知方程进行回归分析。Tong 等^[21]最早提出了门槛自回归模型,并将其应用于时间序列数据中。Hansen^[22-23]对 Tong 等的门槛自回归模型又进行了完善,提出了静态面板门槛回归模型,使得门槛模型可以运用在面板数据中,同时弥补了 Tong 等的模型必须人为设定门槛值的缺陷,且无需给出确定的非线性方程式。为了考察淮河生态经济带各个解释变量对碳排放总量的影响,以 Hansen 的静态面板门槛回归模型为基础,利用式(1)构建两个单门槛效应

模型:

$$\ln C_{it} = \mu + \beta_1 \ln M_{it} I(Y_{it} \leq \gamma) + \beta_2 \ln M_{it} I(Y_{it} > \gamma) + \beta_3 \ln S_{it} + \beta_4 \ln U_{it} + \beta_5 \ln Q_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$\ln C_{it} = \mu + \beta_1 \ln U_{it} I(Y_{it} \leq \gamma) + \beta_2 \ln U_{it} I(Y_{it} > \gamma) + \beta_3 \ln S_{it} + \beta_4 \ln M_{it} + \beta_5 \ln Q_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: $\ln Y_{it}$ 为门槛变量; γ 为门槛值; $I(\cdot)$ 为指示函数, $Y_{it} \leq \gamma$ 时, $I(\cdot) = 1$, $Y_{it} > \gamma$ 时, $I(\cdot) = 0$; ε_{it} 为随机扰动项。

2 数据来源及说明

2.1 数据来源

选取淮河生态经济带作为研究对象,时间维度为 2010—2020 年。文献和数据资料主要来源于 2010—2020 年国家统计局官网、《中国能源统计年鉴》《中国城市统计年鉴》及淮河生态经济带各市统计年鉴和统计公报等,个别缺失值和异常值采用线性插值法补齐及 SPSS 软件修正。

2.2 数据说明

a. 碳排放总量:参照《中国能源统计年鉴 2016》提供的各种能源折算形式,根据标准煤系数将各种能源的消费量转化成标准煤消费量,再根据 2006 年《IPCC2006 年国家温室气体清单指南》给出的碳排放系数估算二氧化碳排放量,最后将二氧化碳排放量折算为碳排放总量:

$$C = \sum_{i=1}^8 C_i = \sum_{i=1}^8 E_i \theta_i \vartheta_i \quad (4)$$

式中: C 为碳排放总量; C_i 为第 i 种能源碳排放量; E_i 为第 i 种能源的消费量; θ_i 为第 i 种能源的折算标准煤参考系数; ϑ_i 为第 i 种能源的碳排放系数。

b. 产业结构:第三产业在国民经济结构中的比重。国民经济结构中农业的产值和能耗水平难以改变,而第三产业能耗低、产值大,根据国家的减排文件和白皮书,“调整产业结构、发展第三产业”是减少碳排放的重要措施。因此,产业结构数值越大即第三产业发展越迅速,单位 GDP 增长导致的碳排放总量就越少。

c. 城镇化水平:城镇人口占总人口的比例。经济增长必然导致城镇化进程的加快及能源消耗的增加,最终对碳排放量增长产生影响,因此保证在城市化推进的基础上实现经济的低碳发展是政府的重要目标。

d. 能源消费结构:用煤炭消耗量在一次能源总消耗量中的占比来表示。我国的能源消费以煤炭为主,一次能源中除煤炭之外的能源消耗均较少,而原煤的碳排放系数高于石油类燃料和天然气,因此改善能源消费结构将有利于降低碳排放量。

e. 能源强度:单位 GDP 增长所需的能源消耗。能源强度高意味着经济增长以牺牲环境为代价,可以通过研发低碳技术来降低能源强度。

f. 人均 GDP:衡量区域经济发展程度的重要指标。本文以 2010 年为基期对人均 GDP 数据进行处理,各变量的统计性描述如表 1 所示。

表 1 各变量的统计性描述

变量	样本数量	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放总量	224	35 100 000	60 300 000	225 953	598 000 000
城镇化水平	224	0.47	0.10	0.25	0.68
人均 GDP	224	46 158.21	21 227.72	18 474.66	112 559
产业结构	224	0.38	0.06	0.17	0.49
能源消费结构	224	0.95	0.11	0.28	1.00
能源强度	224	0.94	1.28	0.03	6.75

3 实证结果

3.1 平稳性检验

处理面板数据时首先要确定序列平稳,因此在进行回归分析之前要对所有变量进行平稳性检验,防止出现伪回归现象。选取 IPS 单位根检验,原假设为各截面序列存在单位根,备选假设为不存在单位根,具体结果如表 2 所示。

表 2 变量的平稳性检验

变量	水平序列		一阶差分	
	LLC 检验	结果	LLC 检验	结果
城镇化水平	0.000	平稳	0.000	平稳
人均 GDP	0.3196	非平稳	0.000	平稳
产业结构	0.000	平稳	0.000	平稳
能源消费结构	1.000	非平稳	0.029	平稳
能源强度	0.000	非平稳	0.000	平稳

人均 GDP 和能源消费结构在水平序列拒绝存在单位根的原假设,其他变量均不能拒绝,表明水平序列为非平稳数据。对一阶差分序列再次进行单位根检验,发现各变量均在 1% 的显著性水平下拒绝原假设,可以继续进行面板数据固定效应模型分析。

3.2 固定效应模型分析

运用 stata13.0 对数据进行门槛效应模型分析,模型的拟合优度达到了 90.91%,拟合较好,参数联合检验的 F 统计量为 679.87, P 值为 0.000,表明参数总体上较为显著。其余解释变量的估计系数、标准误差、 t 统计量和相应的 P 值结果如表 3 所示。

表 3 固定效益模型的参数统计量

变量	估计系数	标注误差	t 统计量	P 值
城镇化水平	0.054	0.014	3.95	0.000
人均 GDP	0.059	0.040	1.50	0.096
产业结构	-0.036	0.017	-2.14	0.034
能源消费结构	-0.241	0.021	-11.03	0.000
能源强度	0.716	0.024	30.28	0.000
常数项	-1.264	0.083	-15.15	0.000

由表 3 可知,城镇化水平、能源强度、能源消费结构均通过了 1% 显著性水平下的原假设,产业结构通过了 5% 显著性水平下的原假设,人均 GDP 通过了 10% 显著性水平下的原假设,所有变量可以继续对门槛效应的检验。

3.3 门槛估计及检验

参考文献[24-26],将每个变量都当作可能的门槛变量,多次修改门槛变量和门限解释变量对模型进行试验,结果表明,以人均 GDP 为门槛变量,产业结构和城镇化水平为门限解释变量构建的门槛模型成立,其门槛个数、门槛估计值、95% 置信区间及显著性检验结果如表 4 所示。

表 4 人均 GDP 为门槛变量的门槛值估计及置信区间

门限解释变量	门槛个数	门槛值	95% 置信区间	显著性
产业结构	单门槛	-2.7249	[-2.7939, -2.6587]	0.0920
城镇化水平	单门槛	-2.7249	[-2.7939, -2.6587]	0.0120

由表 4 可知,以人均 GDP 作为门槛变量,产业结构和城镇化水平作为门限解释变量时在 10% 和 1% 的显著性水平下门槛模型存在单门槛效应,门槛值为 -2.7249,由此构建以人均 GDP 为门槛变量,分别以产业结构和城镇化水平为门限解释变量的门槛模型,并对门槛效应进行检验,确定门槛个数和每个门槛下的门槛值,具体见表 5。

表 5 人均 GDP 为门槛变量的门槛效应检验

门限解释变量	门槛个数	F 值	P 值	临界值		
				1% 显著性水平	5% 显著性水平	10% 显著性水平
产业结构	单一门槛	28.71	0.09	46.147	33.289	27.065
	双重门槛	18.02	0.35			
	三重门槛	9.74	0.36			
城镇化水平	单一门槛	38.25	0.01	39.590	26.248	21.780
	双重门槛	31.98	0.11			
	三重门槛	10.97	0.52			

由表 5 可见:①以人均 GDP 为门槛变量,产业结构为门限解释变量的模型在单一门槛下显著,在双重门槛和三重门槛下不显著。依据 F 统计量对模型是否存在门槛效应进行检验, F 值为 543.18, P 值均为 0.000,在 10% 的水平上存在单门槛效应。②以人均 GDP 为门槛变量,城镇化水平为门限解释变量的模型在单一门槛下显著,在双重门槛和三重门槛下不显著。依据 F 统计量对模型是否存在门槛效应进行检验, F 值为 602.06, P 值均为 0.000,在 1% 的水平上存在单一门槛效应。

3.3.1 人均 GDP 为门槛变量,产业结构为门限解释变量

以人均 GDP 为门槛变量,产业结构作为门限解释变量时,门槛效应模型的检验结果见表 6。

表 6 产业结构和城镇化水平为门限解释变量的门槛效应模型检验结果

门槛解释变量	$\ln Q_{it}$		$\ln S_{it}$		$\ln U_{it}$		常数项	
	计算值	t 统计值	计算值	t 统计值	计算值	t 统计值	数值	t 统计值
产业结构	0.716***	30.41	-0.225***	-11.26	0.074***	5.75	-1.263***	-15.13
城镇化水平	0.730***	32.24	-0.200***	-10.20	-0.016	-1.06	-1.210***	-14.13

从产业结构的角度来看,产业结构的门槛值在-2.7249。从检验结果可知,当淮河生态经济带产业结构小于门槛值时,产业结构的改善会减少碳排放量,但当其大于门槛值时,则会增加碳排放量。产业结构对碳排放总量的影响由显著的负向作用转为正向作用,是典型的门槛效应特点。

产业结构的改善意味着第三产业在淮河生态经济带三产中占比逐渐增大,当人均 GDP 达到门槛值之前,产业结构的改善可以显著减少城市的碳排放量。改革开放以来,淮河生态经济带以第二产业特别是工业发展为主,第二产业的发展以高能源消耗和高碳排放为特点,相比之下第三产业是三产中最清洁的产业,其发展相比于第一产业和第二产业消耗较少的能源。除此以外,淮河生态经济带积极引进先进的工业技术,并寻找可替代煤炭的清洁能源,这也是淮河生态经济带碳排放总量减少的原因之一。随着经济的进一步发展,淮河生态经济带人均 GDP 水平进一步提高,当人均 GDP 超过门槛值时,淮河生态经济带第三产业的发展已经趋于饱和状态,此时淮河生态经济带总体经济的发展再次倚重到传统的优势产业——第二产业的发展,而第二产业的发展离不开煤炭的消耗。相较于其他几种能源燃烧产生的碳排放量,电力和可再生能源的碳排放量最少,油产品其次,煤炭最大,因此煤炭消费量占据总消费量比重的提升会显著增加淮河生态经济带碳排放总量,碳排放总量又呈现波动上升的态势。以人均 GDP 为门槛变量,产业结构为门限解释变量的似然比统计量构成的区间如图 1 所示。

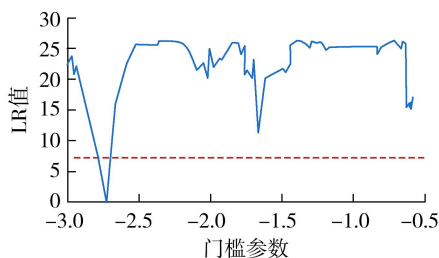


图 1 产业结构为门限解释变量的 LR 函数图

3.3.2 人均 GDP 为门槛变量,城镇化水平为门限解释变量

以人均 GDP 为门槛变量,城镇化水平作为门限解释变量,门槛效应模型的检验结果见表 6。

从城镇化水平的角度来看,当人均 GDP 小于门槛值时,城镇化水平的提高会减少碳排放量,当人均

GDP 大于门槛值时,城镇化水平的提高会增加碳排放量。城镇化水平对碳排放总量的影响由显著的负向作用转为正向作用,也是典型的门槛效应特点。

人均 GDP 在达到门槛值之前,由于淮河生态经济带经济水平快速提升,以服务业为主的第三产业蓬勃发展,大规模的劳动人口从乡村向城市转移,所以淮河生态经济带城镇化速度飞速提升。随着城镇人口的增多,高素质城市人口的聚集降低了公共物品的使用成本。伴随着淮河生态经济带生活方式的改变,城镇居民个人素质不断提高,加上政府积极宣传生态环境保护对淮河生态经济带的重要性,居民对环境的保护意识不断增强,很大程度上降低了城镇化水平对生态环境的负面影响。当城镇化水平发展到人均 GDP 大于门槛值时,淮河生态经济带作为全国经济发展的先行区,大部分城市已经处于城镇化演进的后期阶段,大规模的人口活动和经济发展,造成淮河生态经济带居民生活水准越来越高,居民的消费结构也在不断变化,人们对轿车、家用电器设备等高能耗产品的使用越来越多,导致淮河生态经济带生活能源消耗以及碳排放量不断增加,因此淮河生态经济带能源消费出现了明显的上升趋势。以人均 GDP 为门槛变量,城镇化水平为门限解释变量的似然比统计量构成的区间如图 2 所示。城镇化水平再次成为影响碳排放总量增加最主要的驱动因素之一^[27]。

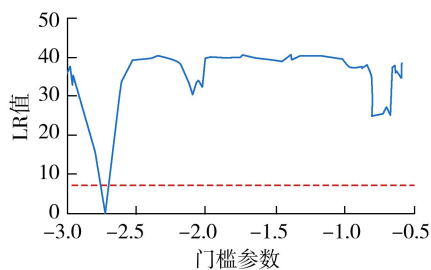


图 2 城镇化水平为门限解释变量的 LR 函数图

除了门限解释变量外,其余控制变量中象征着技术的能源消费结构和能源强度均通过了显著性检验。能源强度对碳排放具有正相关影响,能源消费结构对碳排放具有负相关影响。

能源消费结构的提高意味着煤炭消耗量在所有能源中的占比增加。煤炭一直以来都是淮河生态经济带的基础能源,在一次能源中占比大约为 70%。煤炭在燃烧过程中会释放大量的 CO₂、CO、NO₂、SO₂ 和烟尘等污染物。就淮河生态经济带而言,煤烟型污

染虽然是大气污染的主要来源之一,但是与原油、汽油等二次能源相比,煤炭的碳排放系数相对较低,所以煤炭消费量的提高会导致碳排放总量的大幅度减少。

能源强度的增加意味着单位 GDP 的增加需要投入更多的能源。能源强度一般用来衡量能源的利用效率,也可以用来分析经济发展对于能源的依赖程度。淮河流域工业发达,因此能源依赖度高,单位 GDP 增加需要消耗更多的能源,而淮河生态经济带部分地区如河南省、山东省部分城市技术水平相对落后,消耗单位能源会产生更多的碳排放,因此碳排放量会随着能源强度的增加而增加。

4 结论与建议

4.1 结论

a. 当人均 GDP 小于阈值时,产业结构和城镇化水平的提高会减少淮河生态经济带的碳排放总量;当人均 GDP 大于阈值时,产业结构和城镇化水平的提高会增加淮河生态经济带碳排放总量。

b. 控制变量中人口因素和经济因素对碳排放总量总体上呈现 V 形图像的影响;技术因素中能源强度对淮河生态经济带碳排放总量具有正相关影响,能源消费结构具有负相关影响。碳排放总量会随着能源强度的提高而提高,随着能源消费结构的提高而减少。

c. 在影响淮河生态经济带碳排放总量的 3 个因素中,技术因素影响最大,经济因素其次,人口因素对碳排放总量的影响程度最小。

4.2 建议

a. 根据城镇化发展的不同阶段合理制定淮河生态经济带碳减排政策,使得每个阶段的政策更具有针对性。在淮河生态经济带的城镇化发展初期,政府应积极发展第三产业,保证经济的低碳发展;城镇化发展中后期,政府应积极倡导居民低碳生活,从绿色低碳的角度保证居民生活质量进一步提升;在淮河生态经济带城镇化发展的各个阶段要做好生态文明建设。

b. 政府需要注重淮河生态经济带产业结构对碳排放总量的影响,及时调整和优化产业结构,抛弃淮河生态经济带现有的资源消耗型产业,重点发展适应经济发展规律的环境友好型产业。政府应立足淮河生态经济带产业基础,加大第三产业的发展力度,保证政府重点关注的战略性新兴产业的健康发展,严格限制高耗能、高排放、低产出产业的发展,发挥淮河生态经济带产业的特殊区位优势,坚持发展节能环保技术,最终实现产业低碳化。

c. 各地政府需要根据不同的区域特点选择适合自己的碳减排模式。淮河生态经济带幅员辽阔,有着丰富的能源和自然资源,但是各地级市处于不同的发展阶段,拥有不同的优势产业,城镇化进程也不尽相同,无法制定出适合整个淮河生态经济带的碳减排措施。各地政府应充分考虑自身的产业优势和城镇化进程,在各个阶段制定符合阶段经济发展规律的低碳政策和低碳措施,通过各个地级市的节能减排最终实现整个淮河生态经济带碳减排的目的。

参考文献:

- [1] 全世文,袁静婷. 我国经济增长与碳排放之间的变协整与阈值效应[J]. 改革,2019,300(2):37-45.
- [2] LI F, DONG S C, LI X, et al. Energy consumption-economic growth relationship and carbon dioxide emissions in China[J]. Energy Policy,2011,39(2):568-574.
- [3] 苏凯,陈毅辉,范水生,等. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究:以福建省为例[J]. 中国环境科学,2019,39(2):859-867.
- [4] 庞庆华,杨田田,李涵. 城市碳排放、产业结构和区域创新的空间联系:基于江苏省 13 个地级市的数据分析[J]. 华东经济管理,2018,32(12):22-28.
- [5] 王宪恩,段志远,王培博,等. 1990—2014 年典型国家技术变革与结构调整的碳排放驱动效应测度[J]. 资源科学,2018,40(11):2317-2327.
- [6] 蔡火娣. 基于传统 DEA 与 SBM 模型的二氧化碳排放效率测度[J]. 统计与决策,2016(18):130-135.
- [7] THOMAS W. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting[J]. Ecological Economics,2009,69(2):211-222.
- [8] ZHAO M, TAN L R, ZHANG W G, et al. Decomposing the influencing factors of industrial carbon emission in Shanghai using the LMDI method[J]. Energy,2010,35(6):2505-2510.
- [9] 黄勤,何晴. 长江经济带碳排放驱动因素及其空间特征:基于 LMDI 模型[J]. 财经科学,2017(5):80-92.
- [10] 李健,靳泽凡,苑清敏. 京津冀空气质量环境库兹涅茨曲线及影响因素:基于 2006—2017 年面板数据的分析[J]. 生态经济,2019,35(2):197-201.
- [11] 苏方林,黎文勇. 产业结构合理化、高级化对碳排放影响的实证研究:基于西南地区面板数据[J]. 西南民族大学学报(人文社科版),2015,36(11):114-119.
- [12] ZHAO X T, BURNETT J W, FLETCHER J J. Spatial analysis of China province-level CO₂ emission intensity[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,33:1-10.
- [13] 李俊奇,张希,李惠民. 北京某片区海绵城市建设和运行中的碳排放核算研究[J]. 水资源保护,2023,39(4):86-93.

- [14] 李刚, 唐诗雨. 淮河生态经济带产业结构优化对生态效率的影响分析[J]. 安徽农业大学学报(社会科学版), 2020, 29(4): 39-48.
- [15] 宋马林, 陶伟良, 翁世梅. 区域产业升级、政府创新支持与能源生态效率的动态关系研究: 淮河生态经济带的实证分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2021, 21(4): 119-132.
- [16] 沈晓梅, 向敏. 协同视阈下淮河生态经济带绿色高质量发展及其空间特征研究[J]. 水利经济, 2020, 38(6): 1-6.
- [17] 张勇, 高羽洁. 淮河生态经济带城市用地扩张与经济增长的脱钩关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(8): 1573-1582.
- [18] 赵茂林, 张梅菊. 淮河生态经济带能源生态效率与经济增长耦合互动研究[J]. 大连大学学报, 2022, 43(4): 80-92.
- [19] 黄敦平, 李沂泓, 孙臻瑶. 淮河生态经济带经济高质量发展水平综合评价[J]. 统计与决策, 2022, 38(1): 100-103.
- [20] WOLD S, RUHE A, WOLD H, et al. The collinearity problem in linear regression, the partial least squares (PLS) approach to generalized inverses [J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1984, 5(3): 735-740.
- [21] TONG H, LIM K S. Threshold autoregression, limit cycles and cyclical data [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1980, 42(3): 245-292.
- [22] HANSEN B E. Sample splitting and threshold estimation [J]. Econometrica, 2000, 68(3): 575-603.
- [23] HANSEN B E. Inference when a nuisance parameter is not identified under the null hypothesis [J]. Econometrica, 1996, 64(2): 413-430.
- [24] 赵培雅, 高煜, 孙雪. “双控”目标下产业智能化的节能降碳减排效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(9): 59-69.
- [25] 李婉红, 李娜. 绿色技术创新、智能化转型与制造企业环境绩效: 基于门槛效应的实证研究[J]. 管理评论, 2023, 35(11): 90-101.
- [26] TIAN H, QIN J, CHENG C. Can industrial collaborative agglomeration improve carbon emission efficiency? Empirical evidence from China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(49): 107899-107920.
- [27] 李俊奇, 王泓洁, 李惠民. 基于内容分析法的城镇雨水系统碳排放核算研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 33-43.

(收稿日期: 2023-02-23 编辑: 胡新宇)

(上接第 31 页)

- [5] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 8-15.
- [6] 李激, 姜珊, 赵勇, 等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 39-48.
- [7] ZHANG C, CHEN X, LI Y, et al. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 625-639.
- [8] 白景锋, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660.
- [9] OLAWUYI D. Sustainable development and the water-energy-food nexus: legal challenges and emerging solutions [J]. Environmental Science & Policy, 2020, 103: 1-9.
- [10] KARAN E, ASADI S, MOHTAR R, et al. Towards the optimization of sustainable food-energy-water systems: a stochastic approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 662-674.
- [11] 徐征和, 傅新. 黄河三角洲农业水土资源高效利用调查与分析[J]. 山东水利, 2021, 267(2): 4-6.
- [12] 杨真, 王宝山. 中国盐碱地改良利用技术研究进展及未来趋势[J]. 水土保持, 2014, 2(1): 1-11.
- [13] CANSINO-LOEZA B, MUNGUÍA-LÓPEZ A D C, PONCE-ORTEGA J M. A water-energy-food security nexus framework based on optimal resource allocation [J]. Environmental Science & Policy, 2022, 133: 1-16.
- [14] 鲁仕宝, 尚毅梓, 王浩. 基于修正水资源压力指数的华东地区水-能-粮协同安全评估[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 68-77.
- [15] 黄德春, 吴小庆, 李进秋. 中国省际水资源-能源-粮食安全测度及其时空演变[J]. 水利经济, 2022, 40(3): 48-53.
- [16] 张长征, 芮晦敏. 黄河流域水资源-能源-粮食系统投入产出效率及影响因素[J]. 水利经济, 2022, 40(6): 1-7.
- [17] 盖美, 翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4746-4756.
- [18] 何立新, 周帅宇, 张峥, 等. 基于投影寻踪模型的水-能源-粮食-人口系统安全评价[J]. 人民黄河, 2024, 46(4): 73-78.
- [19] 张应良, 徐亚东. 新形势下我国粮食安全风险及其战略应对[J]. 中州学刊, 2023(3): 52-61.
- [20] 姜长云. 影响我国粮食安全的新趋势新问题[J]. 学术前沿, 2022(4): 94-100.
- [21] 刘小京, 郭凯, 封晓辉, 等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 345-353.
- [22] 高静, 许可军. 科技视角下看滨州市盐碱地综合利用现状及对策建议[J]. 农业与技术, 2022, 42(4): 36-39.
- [23] 人民网. 山东如何答好“盐碱地农业之题” [EB/OL]. [2024-11-05]. <http://sd.people.com.cn/n2/2024/1105/c166188-41031450.html>.

(收稿日期: 2024-06-07 编辑: 胡新宇)