Journal of Low Carbon Economy 低碳经济, 2025, 14(2), 164-174
Published Online May 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jlce
https://doi.org/10.12677/jlce.2025.142018

Hans汉斯

盐城绿色低碳发展效率测度及其影响因素研究

薛　洁[1]，陈紫薇[1]，曹　洁[1,2*]

[1]盐城师范学院数学与统计学院，江苏 盐城
[2]盐城数字经济研究院，数字金融研究所，江苏 盐城

收稿日期：2025年3月3日；录用日期：2025年3月14日；发布日期：2025年5月12日

摘　要

提高绿色低碳发展效率既是“两山”理论的内在要求，也是推动城市绿色转型发展的重要措施。本文在运用WSR系统方法论解析县域绿色低碳发展效率的影响因素及其作用机制的基础上，利用非期望产出的超效率SBM模型测度县域绿色低碳发展效率，并以江苏省盐城市9个区县的数据为例展开实证研究。研究结果显示：盐城市整体的绿色低碳发展效率呈上升趋势且在2014年后基本达到资源利用的最优水平，但盐城市9个区县的绿色低碳发展效率存在较大差异，其中盐都区、大丰区和东台市达到最优，而响水县不足最优水平的50%；县域综合经济实力、产业结构、收入分配、创新发展和生态建设水平对县域绿色低碳发展效率具有显著的正向影响，其中产业结构、收入分配制度和城镇化率对资源利用有效与无效区县的影响存在显著差异。

关键词

绿色低碳发展效率，WSR系统方法论，US-SBM模型，碳排放量

Research on the Measurement of Green Low-Carbon Development Efficiency and Its Influencing Factors in Yancheng

Jie Xue[1], Ziwei Chen[1], Jie Cao[1,2*]

[1]School of Mathematics and Statistics, Yancheng Teachers University, Yancheng Jiangsu
[2]Digital Finance Research Department, Yancheng Digital Economy Research Institute, Yancheng Jiangsu

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Mar. 14th, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

Improving the green low-carbon development efficiency is not only the internal requirement of the

*通讯作者。

文章引用: 薛洁, 陈紫薇, 曹洁. 盐城绿色低碳发展效率测度及其影响因素研究[J]. 低碳经济, 2025, 14(2): 164-174.
DOI: 10.12677/jlce.2025.142018

"two mountains" theory, but also an important measure to promote green transformation and development of cities. On the basis of analyzing the connotation and influence mechanism of green low-carbon development efficiency in counties, this paper uses US-SBM model to measure the green low-carbon development efficiency of counties, and takes the data of 9 districts and counties in Yancheng City, Jiangsu Province as an example to carry out an empirical study. The research results show that the green low-carbon development efficiency of Yancheng City has shown an upward trend and has almost reached the optimal level of resource utilization since 2014. Moreover, there are great differences in the green low-carbon development efficiency among the nine districts and counties of Yancheng City. Among them, Yandu, Dafeng and Dongtai perform best, while the green low-carbon development efficiency of Xiangshui is less than 50% of the optimal level. Finally, the regional comprehensive economic strength, industrial structure, income distribution system, innovative development level and ecological construction have a significant positive impact on the green low-carbon development efficiency of Yancheng. In addition, the industrial structure, income distribution system and urbanization rate have a significant difference in the impact of effective and ineffective resource utilization.

Keywords

Green Low-Carbon Development Efficiency, WSR System Methodology, US-SBM Model, Carbon Emissions

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

2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布，中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和目标。党的十九届五中全会早已明确提出要"加快推动绿色低碳发展，持续改善环境质量，提升生态系统质量和稳定性，全面提高资源利用效率"，为"双碳"目标的实现指明了方向。由此可见，绿色低碳发展是以效率、和谐、持续为目标的经济增长和社会发展方式，是实现我国经济由高速增长转向高质量发展的必然选择。推进绿色低碳发展不仅只是单纯地降低碳排放量，而是要在给定劳动力、资本、资源等投入的条件下获得尽可能多的期望产出，同时尽可能减少非期望产出，如碳排放总量等，即实现绿色低碳发展效率的最优化。因此，提高绿色低碳发展效率既是"两山"理论的内在要求，也是推动城市绿色转型发展的重要措施。县域作为城市建设和碳排放量监测的基本单元，其绿色低碳发展具有不同于省域、市域的特点，故而从县域视角出发，探索县域绿色低碳发展效率及其影响因素对地方探索绿色低碳发展路径、实现高质量可持续发展具有重要的理论意义与实践价值。

国外研究学者对绿色低碳发展的研究起源于上世纪末，对于绿色低碳发展水平也已建立了一套较为完备的评价体系[1]-[3]。国内学者的研究起步较晚，但研究成果也十分丰富，如蒋南平和向仁康(2013) [4]、胡鞍钢和周绍杰(2014) [5]、乔晓楠(2016) [6]、段娟(2019) [7]等从理论层面围绕中国经济绿色低碳发展的理论内涵、困难挑战、实践路径等问题展开了系统探讨。近年来，国内外研究学者对绿色低碳发展的研究主要集中于如何科学测度绿色低碳发展效率，如 Zhang 和 Choi (2013) [8]、王东和李金叶(2022) [9]分别利用 SBM 和超效率 SBM 模型度量了中国及中国 30 个省份的能源效率，得出了中国的能源效率自 2010 年后呈现逐步上升趋势的研究结论；高赢和冯宗宪(2018) [10]、张军和李昊(2019) [11]分别利用超效率

DEA 模型对“一带一路”沿线国家的绿色低碳发展效率展开了定量分析，研究结果显示“一带一路”沿线国家的低碳发展效率水平整体偏低，但中印和东欧国家具有一定引领作用；刘翔和陈晓红(2017) [12]运用非期望产出的 SBM-DEA 模型对我国 30 个省份的低碳经济发展效率和碳减排潜力的动态变化进行了评估，研究发现东部省份属于高效率地区，而大部分中西部省份都是低效率；高志刚和田丰(2020) [13]、陈军华等(2021) [14]则从市域视角出发，运用非期望产出的超效率 SBM 模型分别对新疆及其 14 个地州市、四川省及其 21 个地州市的低碳效率进行测算，并以此比较研究对象之间的时空差异性，他们均认为低碳发展效率不同的地区未来应采取不同的发展路径；Iftikhar 等(2018) [15]、Mehmood 等(2020) [16]利用网络 DEA 模型分析了近十年世界主要经济体绿色低碳发展效率的时空演变过程，研究表明中国在中等收入国家中低碳发展效率较高且正处于逐步提高的趋势中。

现有文献为本文提供理论基础与方法借鉴的同时也存在一定的局限性：第一，现有文献多以省域、市域的绿色低碳发展效率为研究对象，缺乏从县域视角来考察该问题；第二，尽管现有文献已对绿色低碳发展效率展开定量研究，但对绿色低碳发展效率影响因素的研究相对缺乏且基本局限于定性分析层面。鉴于此，本文从县域视角出发，基于 WSR 系统方法论解析了绿色低碳发展效率的影响因素及其作用机制，利用 US-SBM 模型对县域绿色低碳发展效率进行测度，并以盐城市各区县的面板数据为例实证检验了盐城县域绿色低碳发展效率影响因素的作用效果，以期为城市绿色低碳发展路径提供信息参考。

2. 影响因素及机制分析

经济效率是经济学中的一个重要概念，它指的是资源在经济活动中的使用达到最优状态。绿色低碳发展效率则是在降低碳排放并保护生态环境的条件下，尽可能提高经济活动中的资源利用率，因此，绿色低碳发展效率是一个涉及经济、生态、社会等多方的复杂系统。本文参考顾基发和高飞(1998) [17]、陈菁泉等(2021) [18]的“物理－事理－人理”(WSR)系统方法论，从物理层、事理层和人理层这三个层面分析探讨绿色低碳发展效率的影响因素及其作用机制。

1. 物理因素及其影响机制分析

WSR 中的“物理”是指构成系统的客观存在，包括物质、物质所处的环境和物质运动所涉及的规律和机理，在社会经济发展中物理因素一般涵盖资源、技术、经济基础等要素。绿色低碳发展效率的提高包括两种情形，要么在经济效益不变的情况下减少碳排放量，要么在碳排放量不变的条件下提高经济效益。物理因素决定了地区经济活动的原始投入要素，根据经典的柯布－道格拉斯生产函数可知，投入要素越丰富经济产出越高，因此在控制碳排放量的条件下，地区的物理条件越好，其绿色低碳发展效率就会越高。

2. 事理因素及其影响机制分析

WSR 中的“事理”是指干预指导人类认识世界、改造世界、改造社会的实践活动，事理的本质就是基于现实社会的概念、规律所产生的方法、制度等因素能够使得实践活动更加有效、更加完美。由此可见，在绿色低碳发展的要求下，合理的事理因素能够提高绿色低碳发展效率。在物理资源一定的条件下，资源分配是提高绿色低碳发展效率的有效方法，因此，本文从资源分配的角度提炼了产业结构和收入分配这两个影响绿色低碳发展效率的事理因素。

产业结构是指第一、二、三产业在地区经济结构中所占的比重。地区产业结构重心由第一产业向第二、三产业转移标志着地区经济发展水平的提升，而在经济由高速增长向高质量发展转型的当下，第三产业的各行业相对于第二产业普遍具有更高的经济附加值和更低的碳排放强度。此外，第三产业可以通过绿色技术研发、绿色金融等方式为第一、二产业提供绿色服务，从而降低环境污染，增加就业渠道，

因此产业结构中第三产业占比越高，越有利于提高绿色低碳发展效率。

产业结构体现了投入端的资源分配，影响着经济产生中的绿色低碳行为；而收入分配则是产出端的资源分配，它对居民在社会生活中的绿色低碳行为有着重要影响。收入分配公平的地区，经济发展和生态建设成果由全体社会成员共享，收入水平提高，环保意识增强，绿色消费能力提升，从而有助于提高地区绿色低碳发展效率；反之，收入分配失衡的地区，纵使经济发展程度再高，其成果只由少部分高收入群体掌握，贫富差距加大，大量的低收入人群仍以满足基本的生理、安全等基本需求为目标，绿色低碳理念和行为引导困难，不利于提高地区绿色低碳发展效率。

3. 人理因素及其影响机制分析

WSR 中的“人理”主要是研究如何充分发挥人的创造性和潜力，利用已有的“物理”“事理”去组织最佳的实践活动以产生最大的效益和效率。本文根据“人理”的内涵，从人的创造力、创新力和行动力三方面出发，选取人力资源、创新发展和生态建设这三个人理因素并分析其对绿色低碳发展效率的影响机制。

人力资源涵盖劳动力的数量和质量两部分内容。一方面，由柯布—道格拉斯生产函数可知，劳动力的数量是经济生产投入的主要要素之一，因此劳动力投入越多，经济产出越多，在有效控制碳排放量的条件下可以提高绿色低碳发展效率；另一方面，劳动力素质越高，既能够通过提升劳动效率、强化绿色低碳理念来直接影响绿色低碳发展效率，还可以推动知识密集型产业发展，调整收入结构，从而通过优化产业结构和收入分配来间接影响绿色低碳发展效率。由此可见，丰富的人力资源有利于提高绿色低碳发展效率。

创新是传统经济发展模式向绿色低碳发展模式转变的源动力，创新本身就要求社会发展是更经济、更绿色、更高效，因此创新会引领技术、产业、经济和社会向提高绿色低碳发展效率的方向发展。同时，创新发展为解决可再生能源、节能、储能、二氧化碳利用等重点领域的关键问题提供了技术支撑，使得绿色技术得以实现与转化，有利于推动绿色低碳发展效率的提升。此外，创新发展还会影响劳动力素质、产品附加值、资源配置，间接促进地区绿色低碳发展。

生态是地区的环境基础，生态建设水平直接关系着绿色低碳发展效率。其一，良好的生态环境有利于二氧化碳的吸收，可通过直接减少碳排放量来提高绿色低碳发展效率；其二，良好的地区生态可以提供更有利的地区物理因素，为绿色低碳发展创造直接经济效益，从而提高绿色低碳发展效率；其三，地方政府的生态建设还包含监管排污、治理“三废”、完善垃圾回收利用系统、宣传低碳环保理念等内容，这些措施均有助于提高地区绿色低碳发展效率。

3. 模型构建与指标选取

3.1. 绿色低碳发展效率测度模型

综合国内外研究文献可以发现，数据包络分析(DEA)是度量投入产出效率的常用方法，已被广泛应用于经济发展效率、能源效率等问题的测度中来。但传统 DEA 模型计算出的效率值只能保持在区间$(0,1]$内且有效的决策单元取值均为 1，无法对有效的决策单元展开进一步比较，因此 Tone (2002) [19]在较为完善的 DEA 拓展模型 SBM 模型的基础上构建了超效率 SBM 模型，从而解决了传统 DEA 模型最大值只能为 1 的问题。此外，为了解决非期望产出的效率评价问题，本文引入非期望产出的超效率 SBM 模型(US-SBM)以测度县域绿色低碳发展效率。

假设某投入产出系统有 n 个决策单元 $DMU_j\ (j=1,2,\cdots,n)$，每个决策单元 DMU_j 含有 m 种投入要素 $x_{ij}\ (i=1,2,\cdots,m)$，q_1 种期望产出 $y_{rj}(r=1,2,\cdots,q_1)$ 和 q_2 种非期望产出 $b_{tj}\ (t=1,2,\cdots,q_2)$，则 US-SBM 模型

可表示为：

$$\min \rho = \frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} s_i^- / x_{ik}}{1+\frac{1}{q_1+q_2}\left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^{b-} / b_{tk}\right)} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1, j\neq k}^{n} x_{ij}\lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\ \sum_{j=1, j\neq k}^{n} y_{rj}\lambda_j + s_r^+ \leq y_{rk} \\ \sum_{j=1, j\neq k}^{n} b_{tj}\lambda_j - s_t^{b-} \leq b_{tk} \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^+, s_t^{b-} \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

其中，λ_j 为权重变量；s_i^-、s_r^+、s_t^{b-} 分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛变量；ρ 为效率值，其值越大表明投入产出效率越高，特别地当 $\rho \geq 1$,时表明该决策单元的投入产出有效，否则视为无效。

3.2. 指标选取及数据来源

1. 绿色低碳发展效率测度指标

本文从县域视角出发，基于指标选取的合理性和数据的可得性，确定了投入和产出两类要素：

(1) 本文以资本投入、劳动投入、技术投入和能源投入组成投入要素。首先采用永续盘存法测算的资本存量作为资本投入指标，基期资本存量和折旧率分别借鉴张军等(2004) [20]与张军和李昊(2019)的研究成果；其次分别选取年末从业人员总数、研发经费支出占比和能源消费总量作为劳动投入、技术投入和能源投入的代理变量。

(2) 本文以各地区的实际 GDP 作为盐城市及其各区县的期望产出，非期望产出则以各地区的碳排放量为指标。

将上述投入产出指标代入 US-SBM 模型，可计算出各区县各年度的绿色低碳发展效率(*lce*)，即式(1)中的 ρ 。

2. 绿色低碳发展效率影响因素指标

(1) 物理因素。“物理”包含经济、技术、资源等综合因素，故而本文选取人均实际地区生产总值(*gdp*)作为综合反映县域经济水平、技术发展和资源储备等因素的指标。

(2) 事理因素。依据前文分析，“事理”即资源分配因素，包含产业结构和收入分配，因此本文分别选取第三产业占 GDP 比值(*is*)和反映收入分配程度的泰尔指数(*ins*)来刻画县域产业和制度因素，其中泰尔指数的计算公式为：

$$ins_{it} = \sum_{j=1}^{2}\left(\frac{y_{i,j,t}}{y_{i,t}} \times \ln\left(\frac{y_{i,j,t}}{y_{i,t}} \Big/ \frac{x_{i,j,t}}{x_{i,t}}\right)\right) \tag{3}$$

其中，$j=1$ 代表城镇，$j=2$ 表示乡村，t 表示年份，i 表示区县，$y_{i,j,t}$ 表示第 i 区(县)第 t 年城镇或乡村的居民可支配收入，$y_{i,t}$ 表示第 i 区(县)第 t 年城镇和乡村居民收入的总和，$x_{i,j,t}$ 表示第 i 市第 t 年城镇或乡村的常住人口数目，$x_{i,t}$ 表示第 i 区(县)第 t 年总的常住人口数目。

(3) 人理因素。“人理”包含人力资源、创新发展和生态建设这三个方面，本文分别选取城镇化率(*urb*)、每千人人均专利授权量(*gp*)和绿化率(*gr*)作为衡量县域人理因素的指标。

3. 研究对象与数据来源

本文的研究对象为江苏省盐城市及其 9 个区县，包括亭湖区、盐都区、大丰区、阜宁县、建湖县、射阳县、滨海县、响水县和东台市。基于数据的可得性，分别选取盐城市 2005 年~2019 年全市数据和 2014 年~2017 年盐城市 9 个区县数据作为研究样本，其中碳排放量数据来源于《中国碳核算数据库》，其它指标数据来源于《江苏省统计年鉴》《盐城市国民经济和社会发展统计公报》和《盐城市统计年鉴》，对于个别缺失数据采用插值法进行处理。

3.3. 绿色低碳发展效率影响因素检验模型

为了检验本文基于 WSR 系统分析方法提出的各影响因素是否有助于提高县域绿色低碳发展效率，本文构建如下计量模型：

$$lce_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 gdp_{it} + \alpha_2 is_{it} + \alpha_3 ins_{it} + \alpha_4 urb_{it} + \alpha_5 gp_{it} + \alpha_6 gr_{it} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \tag{4}$$

其中，i 表示各县域，t 表示年份，λ 为区县固定效应，μ 为区县固定效应，α_0 为模型截距项，$\alpha_i\left(i=1,2,\cdots,6\right)$ 为影响因素系数，其显著性和数值正负情况可反映各影响因素对县域绿色低碳发展效率的影响情况。

此外，为了进一步分析各影响因素对绿色低碳发展有效与无效区县之间的差异性，本文向式(4)引入县域绿色低碳发展效率是否有效的虚拟变量 D_{it}，模型设定为：

$$lce_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it} \cdot D_{it} + \boldsymbol{\beta}'\mathbf{X}_{it} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \tag{5}$$

其中，x_{it} 为 gdp_{it}、is_{it}、ins_{it}、urb_{it}、gp_{it}、gr_{it} 中的任一影响因素；$\mathbf{X}_{it}$ 为除 x_{it} 之外的影响因素组成的列向量；D_{it} 为虚拟变量，若县域 i 在 t 年的绿色低碳效率值小于 1，则 D_{it} 取值为 1，否则为 0。

4. 实证分析

4.1. 盐城绿色低碳发展效率测度结果分析

基于 US-SBM 模型和 MaxDEA 软件，运用盐城市及其 9 个区县的绿色低碳发展效率测度指标数据，测算出盐城市及其各区县的绿色低碳发展效率，分别如图 1 和表 1 所示。

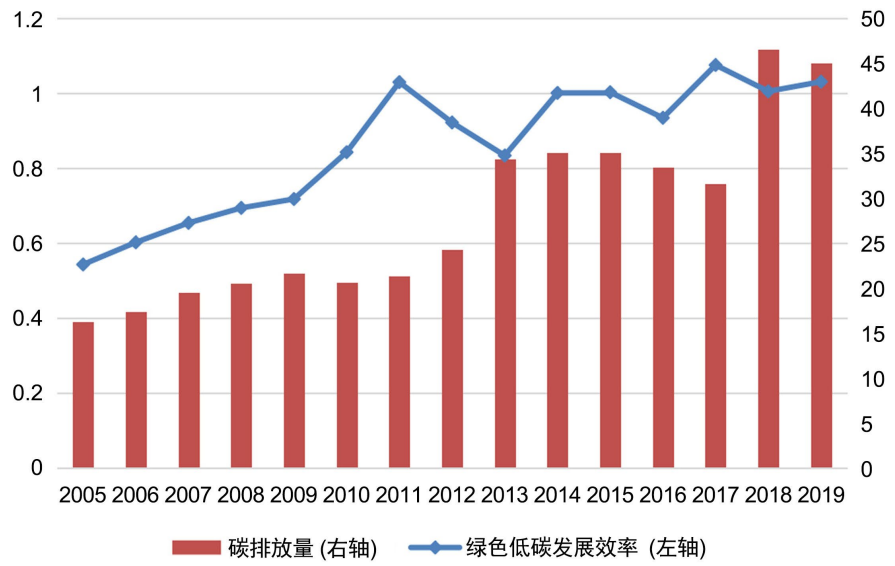

Figure 1. The changing trend of the green and low-carbon development efficiency in Yancheng
图 1. 盐城市绿色低碳发展效率变化趋势

Table 1. The green and low-carbon development efficiency values of each district and county in Yancheng from 2014 to 2017
表 1. 2014~2017 年盐城市各区县绿色低碳发展效率值

地区	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
亭湖区	0.6026	0.6438	0.6622	0.6645
盐都区	1.1482	1.1464	1.1231	1.1026
大丰区	1.0138	1.0180	1.0151	1.0138
东台市	1.0126	1.0969	1.1231	1.1186
滨海县	0.6170	0.6098	0.6421	0.6484
阜宁县	1.0041	0.06491	0.7180	0.7048
建湖县	0.8130	1.0278	1.0389	0.8206
射阳县	1.0198	0.5915	0.6237	0.5908
响水县	0.4644	0.4639	0.4901	0.5258

观察图 1 可知，在 2005 年至 2019 年之间盐城市绿色低碳发展效率整体呈现出上升趋势，这得益于盐城市始终以实现碳达峰碳中和为目标，坚持践行“两山”理论，持续优化能源结构，充分释放生态红利。2009 年之后盐城市绿色低碳发展效率快速提升，从 2009 年的 0.72 上升至 2011 年的 1.03，意味着盐城从未达到有效生产前沿面的状态转换为资源利用率达到最优的状态。究其原因，在 2009 年 4 月苏北唯一的环保产业园盐城环保产业园成立，同年 9 月盐城市政府推出了包括实行财税政策扶持、优先保障土地供给等一系列优惠措施在内的《关于推进江苏盐城环保产业园建设与发展的政策意见》，环保产业园的成立以及配套政策的落实使得盐城市在短短两年内就扭转了长期经济发展与环境保护相矛盾的局面。但随着 2012 年欧债危机导致的全球经济下行压力以及 2013 年盐城城镇化建设工作推进，盐城市碳排放总量显著增加，从而导致绿色低碳发展效率出现反转下降，2013 年的绿色低碳发展效率仅达到最优水平的 83%。随后，盐城市政府相继出台了《盐城市“十二五”控制温室气体排放工作方案》《盐城市生态文明建设规划》《绿色盐城建设工作意见》等一系列环保政策，从 2014 年之后，盐城市绿色低碳发展效率几乎全部达到最优水平。

从区县视域来看，在 2014 年~2017 年间，尽管盐城市整体的绿色低碳发展效率已达到最优，但其 9 个区县的绿色低碳发展效率大部分并未达到最优水平且存在较大差异，大致可分为三个梯队：盐都区、大丰区和东台市各年度的绿色低碳发展效率均达到最优水平，是各区县在绿色低碳发展方面的第一梯队，其中东台市绿色低碳发展效率逐年提升而盐都区在这四年内呈下降趋势，截止到 2017 年东台市已成为全市绿色低碳发展效率最高的地区；阜宁县和建湖县可组成第二梯队，它们在部分年份的资源利用水平达到最优，部分年份未能达到最优，但平均绿色低碳发展效率较高；其余区县组成绿色低碳发展的第三梯队，特别是以高能耗化工业为支柱产业之一的响水县，尽管在这四年期间其绿色低碳发展效率在逐年改善，但平均绿色低碳发展仍不足最优水平的 50%；同时还要关注城镇化程度最高的亭湖区在绿色低碳发展方面的不足，通过重点推进第三梯队绿色低碳发展进程从而提高盐城全市的绿色低碳发展效率。

4.2. 盐城绿色低碳发展效率影响因素分析

本文通过 Hausman 检验选择固定效应模型估计模型(4)以分析盐城绿色低碳发展效率的影响因素，基于 WSR 系统方法论提出的各影响因素的回归结果如表 2 所示。

表 2 中的列(1)为模型(4)的回归结果，其中只有人均实际 GDP 和城镇化率这两个影响因素的系数通过率显著性检验，虽然根据 F 统计量可知整个方程是显著的，但修正的可决系数仅为 0.5032，表明模型

(4)整体的拟合优度并不高。考虑到反映创新发展程度的人均专利授权量指标对绿色低碳发展效率的影响可能存在滞后，故采用其滞后变量进行替换重新对模型(4)进行参数估计。研究发现，运用滞后一期的人均专利授权量进行替代得到的拟合效果最好，即表 2 中的列(2)。由列(2)可知，模型中的绝大部分系数均通过了显著性检验，且模型的拟合优度从 0.5032 提升至 0.6809；人均实际 GDP 的系数为 0.1693，在 1%的显著性水平下显著，说明综合反映经济、技术、资源的“物理”因素对盐城绿色低碳发展效率具有显著的提升作用；代表资源分配这一“事理”因素的产业结构和泰尔指数的系数在 5%显著性水平下显著，且系数均为正值，表明盐城第三产业占比的提高和收入分配差异程度的减缓均有助于促进绿色低碳发展效率的提高；在反映“人理”的人力资源、创新发展和生态建设这三个因素中，人均专利授权量滞后一期的系数在 5%的显著性水平下显著为正，说明创新发展可以助推盐城绿色低碳发展效率，但该影响存在一年的滞后期；反映人力因素的城镇化率在 10%的显著性水平下显著为负，表明城镇化会在一定程度上抑制盐城绿色低碳发展效率。为了验证生态建设对绿色低碳发展效率的影响，利用逐步回归法对模型(4)进行进一步分析，由表 2 中的列(3)可知，绿化率的提高对盐城绿色低碳发展效率具有显著的正向影响。

Table 2. Estimation results of the influencing factors of Yancheng's green and low-carbon development efficiency
表 2. 盐城绿色低碳发展效率影响因素估计结果

变量	(1)	(2)	(3)
gdp	0.1542*** (0.0261)	0.1693*** (0.0222)	0.1494*** (0.0221)
is	−1.0066 (0.9982)	2.6002** (1.1124)	—
ins	−5.5144 (0.0618)	−6.8377** (7.7940)	—
urb	−0.9668* (0.5179)	−0.7472* (0.4271)	−0.9696*** (0.2785)
gp	−0.0562 (0.0622)	—	—
gp(−1)	—	0.1671** (0.0688)	—
gr	10.1034 (6.3776)	10.7741 (6.8766)	11.0080* (6.0974)
截距项	1.0801* (0.6033)	−1.3080 (0.8269)	0.4027** (0.1645)
区县固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
修正的 R^2	0.5032	0.6809	0.5465
F 统计量	4.9402	7.9293	8.0282

注：括号中的数值为标准差，***、**和*分别表示参数在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。

4.3. 盐城绿色低碳发展效率影响的差异性分析

为了检验盐城绿色低碳发展有效与无效区县之间的影响因素是否存在差异性，从而探索各区县不同绿色低碳发展路径，本文引入影响因素与区县的交互变量($x \cdot D$)，并根据 US-SBM 模型测算的各区县在

不同年份的绿色低碳发展效率值，将除盐都区、大丰区与东台市之外的 6 个区县设置为绿色低碳发展无效区县，模型回归结果如表 3 所示。

Table 3. Test results of the influence differences of Yancheng's green and low-carbon development efficiency
表 3. 盐城绿色低碳发展效率影响差异性检验结果

变量	(1) $x = gdp$	(2) $x = is$	(3) $x = ins$	(4) $x = urb$	(5) $x = gp(-1)$	(6) $x = gr$
x	0.0337 (0.0603)	2.8049** (1.0255)	23.3188*** (5.1151)	0.9647* (0.5517)	0.1182 (0.1816)	24.8815 (14.4806)
$x \cdot D$	−0.0269 (0.0655)	−1.0737** (0.3871)	−19.9961*** (3.4479)	−0.9866*** (0.2387)	0.0237 (0.0953)	−18.4523 (16.2618)
gdp	—	−0.0212 (0.0719)	−0.0473 (0.0399)	−0.0650 (0.0594)	0.1557** (0.0591)	0.0898(0.0768)
is	1.6495(1.1513)	—	2.0576** (0.7331)	1.7802* (0.9120)	2.4903* (1.2408)	2.6019** (1.2192)
ins	9.3475(8.0064)	9.5856(7.5010)	—	5.5234(6.6477)	16.3636* (8.2853)	13.2337 (8.8088)
urb	0.1149 (0.5654)	0.0396 (0.5002)	−0.3699 (0.2900)	—	−0.6769 (0.5689)	−0.5650 (0.5115)
$gp(-1)$	0.1489 (0.1328)	0.1255(0.1142)	0.2061** (0.0720)	0.2117** (0.0984)	—	−0.0128 (0.1311)
gr	9.7841* (5.2687)	10.8513* (5.5556)	10.9487** (3.8785)	10.1918** (4.7710)	9.6877 (6.4318)	—
区县固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
修正的 R^2	0.7182	0.7448	0.8751	0.8122	0.6529	0.6438
F 统计量	8.3629	9.4326	21.2421	13.4963	6.4334	6.2206

注：括号中的数值为标准差，***、**和*分别表示参数在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。

观察表 3 可以发现，人均实际 GDP、人均专利授权量和绿化率对盐城绿色低碳发展有效与无效的区县并无显著区别，但第三产业占比、泰尔系数和城镇化率对两者的影响具有显著区别。由表 3 中列(2)可知，第三产业占比对盐都区、大丰区和东台市这三个资源利用有效区县的绿色低碳发展效率的促进作用为 2.8049，其对其他资源利用无效区县的影响为 1.0737；由表 3 中列(3)可得，泰尔系数对资源利用有效区县绿色低碳发展效率的推动作用为 23.3188，而对资源利用无效区县的作用仅为 3.3227，表明改善产业结构、缩小收入差距对资源利用有效区县进一步提高绿色低碳发展效率的作用效果明显大于资源利用无效区县。由表 3 中列(4)可知，城镇化率对资源利用有效区县的影响为正值，而对资源利用无效区县的影响为负值，说明城镇化率的提高可以进一步提高资源利用有效区县的绿色低碳发展效率，但却会抑制资源利用无效区县的绿色低碳发展效率。由此可见，资源利用效率不同的区县有不同的绿色低碳发展路径，对于资源利用有效的区县可以通过优化产业结构和收入分配制度、提高城镇化率来进一步提高绿色低碳发展效率，而对于资源利用无效的区县则更适宜从提高地区综合经济实力、加大创新发展力度和推动生态建设进程等路径来实现绿色低碳发展。

4.4. 稳健性检验分析

为了检验本文基于 WSR 系统方法论提出的六个影响因素对盐城绿色低碳发展效率回归结果的稳健性，本文以解释变量即绿色低碳发展效率的滞后一期作为工具变量，采用 TSLS 方法再次检验模型(4)和模型(5)，模型回归系数的显著性与数值正负情况均未发生变化(文献篇幅有限，检验结果备索)，表明本文得到的实证检验结果具有良好的稳健性。

5. 结论与启示

本文在运用 WSR 系统方法论解析县域绿色低碳发展效率影响因素及其作用机制的基础上，利用 US-SBM 模型对盐城 9 个区县的绿色低碳发展效率进行了测度并对其影响因素的作用效果进行了实证检验，得出的主要结论有：第一，盐城市整体的绿色低碳发展效率自 2005 年起呈上升趋势，且从 2014 年开始基本均达到资源利用的最优水平；第二，盐城市 9 个区县的绿色低碳发展效率存在较大差异，盐都区、大丰区和东台市在 2014~2017 年各年度的绿色低碳发展效率均已达到最优水平，但响水县同期平均绿色低碳发展仍不足最优水平的 50%；第三，地区综合经济实力、产业结构、收入分配制度、创新发展程度和生态建设水平对县域绿色低碳发展效率具有显著的正向影响；第四，产业结构、收入分配制度和城镇化水平这三个影响因素对绿色低碳发展有效区县的推动作用要强于绿色低碳发展无效区县，而地区综合经济实力、创新发展程度和生态建设水平这三个因素对两者的影响并无显著差异。

基于研究结论，本文提出如下政策建议：(1) 以高质量发展理念为引领，以提升绿色低碳发展效率为目标，强化绿色发展政策引导效应，加强经济发展与环境保护的协调衔接，从而实现在守护绿水青山的同时共享金山银山。(2) 以差异化绿色发展思路为导向，因地制宜开展绿色低碳发展工作：对于资源利用率较高的区县应从优化产业结构、收入分配制度和提升城镇化水平着手以进一步提高绿色低碳发展效率；而对于资源利用率较低的区县应将如何提高绿色低碳发展效率的重心放在提升综合经济实力、鼓励创新和加大生态建设方面。(3) 以环保产业园为依托，积极扶持绿色产业，进一步推动新能源产业、信息产业发展，拓展绿色金融服务，大力发展绿色农业、生态旅游等特色低碳产业，通过增强经济实力、支持技术创新、调整产业结构提高县域绿色低碳发展效率。(4) 强化居民低碳意识，注重生活领域减排和生态环境建设，优化能源结构，控制城市人口规模，逐步建立居民节能减排账户，推动绿色能源产品与生态服务资产化，通过完善制度、树立低碳理念来促进县域绿色低碳发展效率的提升。

基金项目

2023 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202310324023Z)。

参考文献

[1] Ramanathan, R. (2006) A Multi-Factor Efficiency Perspective to the Relationships among World GDP, Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, **73**, 483-494. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.06.012

[2] Soytas, U. and Sari, R. (2009) Energy Consumption, Economic Growth, and Carbon Emissions: Challenges Faced by an EU Candidate Member. *Ecological Economics*, **68**, 1667-1675. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.06.014

[3] Świgost-Kapocsi, A. (2020) Reviewing the Measurement Methods for Green Development in Cities—A Proposal for Polish Cities. *Environmental & Socio-Economic Studies*, **8**, 12-20. https://doi.org/10.2478/environ-2020-0014

[4] 蒋南平, 向仁康. 中国经济绿色发展的若干问题[J]. 当代经济研究, 2013(2): 50-54.

[5] 胡鞍钢, 周绍杰. 绿色发展: 功能界定、机制分析与发展战略[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 14-20.

[6] 乔晓楠. 中国经济绿色低碳发展面临的问题与对策[J]. 中国特色社会主义研究, 2016(6): 76-81.

[7] 段娟. 中国绿色低碳发展道路的实践探索及其启示[J]. 宁夏社会科学, 2019(6): 27-34.

[8] Zhang, N. and Choi, Y. (2013) Environmental Energy Efficiency of China's Regional Economies: A Non-Oriented Slacks-Based Measure Analysis. *The Social Science Journal*, **50**, 225-234. https://doi.org/10.1016/j.soscij.2013.01.003

[9] 王东, 李金叶. 环境规制、技术进步与能源碳排放效率[J]. 技术经济与管理研究, 2022(7): 31-36.

[10] 高赢, 冯宗宪. "一带一路"沿线国家低碳发展效率测评及影响因素探究[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(21): 39-47.

[11] 张军, 李昊. "一带一路"绿色发展平均——基于生态创新和低碳效率的测度分析[J]. 林业经济, 2019(9): 106-111.

[12] 刘翔, 陈晓红. 我国低碳经济发展效率的动态变化及碳减排潜力分析[J]. 系统工程, 2017, 35(5): 92-100.

[13] 高志刚, 田丰. 新疆绿色经济效率测算及其时空格局演变研究[J]. 新疆财经, 2020(3): 5-15.

[14] 陈军华, 李乔楚, 何京. 碳中和目标下四川省低碳效率区域差异性[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 162-170.

[15] Iftikhar, Y., Wang, Z., Zhang, B. and Wang, B. (2018) Energy and CO_2 Emissions Efficiency of Major Economies: A Network DEA Approach. *Energy*, **147**, 197-207. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.012

[16] Mehmood, K., Iftikhar, Y., Chen, S., Amin, S., Manzoor, A. and Pan, J. (2020) Analysis of Inter-Temporal Change in the Energy and CO_2 Emissions Efficiency of Economies: A Two Divisional Network DEA Approach. *Energies*, **13**, Article 3300. https://doi.org/10.3390/en13133300

[17] 顾基发, 高飞. 从管理科学角度谈物理-事理-人理系统方法论[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(8): 1-5.

[18] 陈菁泉, 刘娜, 马晓君. 中国八大综合经济区能源生态效率测度及其驱动因素[J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2471-2480.

[19] Tone, K. (2002) A Slacks-Based Measure of Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, **143**, 32-41. https://doi.org/10.1016/s0377-2217(01)00324-1

[20] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000 [J]. 经济研究, 2004, 39(10): 35-44.