

低碳视角下安徽省农产品物流效率及影响因素研究

郜于昌¹, 吴雪^{2,*}

¹宿州学院音乐学院, 安徽宿州, 中国

²宿州学院商学院, 安徽宿州, 中国

*通讯作者

【摘要】本文立足于绿色低碳发展背景,以安徽省农产品物流为研究对象,构建了一套综合评价指标体系。通过引入超效率SBM模型与GML指数模型,对物流效率进行静态与动态评估,并借助灰色关联分析法识别关键影响因素,以期为区域农产品物流的低碳化与高效化提供决策参考。结果发现安徽省农产品物流效率呈“短期波动、长期趋优”的趋势。其影响因素主要有:经济发展水平、产业结构、环保力度等。在此基础上提出促进安徽省农产品物流效率提升的政策建议,以期减少资源浪费,提高安徽省农产品物流效率,推动经济朝高质量方向发展。

【关键词】绿色低碳;农产品物流;效率评价;灰色关联度

【基金项目】安徽省哲学社会科学规划项目“皖北绿色食品产业集群可持续发展的水平测度与提升路径研究”(编号:AHSKYY2023D008)。

1.引言

21世纪以来,全球社会经济实现快速发展,但随之而来的环境污染与生态破坏问题日益凸显,由全球变暖引发的气候异常已成为世界各国共同面临的严峻挑战[1]。在全球气候变化治理的大背景下,低碳经济已成为各国经济转型的核心方向。农产品物流作为连接农业生产与市场消费的关键纽带,其效率提升与低碳转型对推动低碳经济发展具有重要现实意义。《安徽省“十四五”物流业发展规划》明确提出大力发展供应链物流、民生物流及物流新业态新模式,强化物流枢纽建设与产业集聚效应,推动物流成本整体下降。规划特别强调绿色物流理念的践行,要求加快物流与农业协同发展进程,通过减少中间流通环节、优化运作流程等方式,提升农产品物流效率并降低成本。在此政策背景下,系统研究安徽省农产品物流效率的发展现状与影响因素,对于落实规划要求、实现农业与物流产业协同升级具有重要价值。

2.文献综述

国内外学界关于绿色低碳视角下农产品物流效率及影响因素研究和论述的文献较为丰富。索瑞霞等在分析我国物流业发展现状后,绿色低碳技术是物流行业实现可持续发展的主要途径,要加强绿色低碳发展理念与物流企业的融合,鼓励物流企业对新产品的研发与创新的同时,增强绿色产业链供应链

的意识[1]。Ding与Liu在论文中通过实证研究,分析了中国31省市的物流业碳排放情况,指出物流效率受多种因素影响,包括技术进步、资源配置等[2]。黄晓慧等对农业绿色低碳转型进行研究,认为数字技术与农业深度融合是农业绿色低碳转型的重要驱动力之一,转型体现在投入与消耗降低、排放减少、质量提高、效率提升等方面[3]。李岩认为构建我国农产品物流效率评价指标体系应当从基础设施、市场条件、制度环境、物流节点、物流管理培训、规范标准等六个外部指标,储存、运输、装卸搬运等内部指标来综合构建,最后总体效益指标可从物流总值、物流成本、物流损耗率三方面考虑[4]。

在绿色低碳发展方面,研究主要关注绿色物流、低碳物流的概念界定、发展模式和政策建议等。近年来,越来越多的学者开始关注农产品物流的绿色低碳发展[5],但对安徽省农产品物流效率的研究相对较少。安徽省是中国重要的农产品生产基地,粮食产量全国领先,盛产水稻、小麦、油菜籽、茶叶及特色水果,同时作为长三角绿色农产品供应核心区,兼具粮食安全和特色农业优势。因此,本文通过构建安徽省农产品物流效率评价指标体系,运用超效率SBM模型和GML指数模型,对安徽省农产品物流效率进行了实证分析,再利用灰色关联度分析法,探究安徽省农产品物流效率的影响因素。本

研究一方面有利于拓展相关的理论研究,另一方面,通过对安徽省农产品物流效率水平以及影响因素进行研究评价,有利于促进安徽省农产品物流效率的提升,推动安徽省经济朝着高质量方向发展。

3.评价指标体系

3.1 安徽省农产品物流效率评价指标体系

在总结前人对地区物流效率研究的基础上,根据安徽省自身发展特征和数据可得性,构建安徽省农产品物流效率评价指标体系[6],具体见表1。

表1.安徽省农产品物流效率评价指标体系

指标类别	指标名称	指标单位
投入指标	农产品物流固定资产投资额	亿元
	货运汽车拥有量	万辆
	农产品物流从业人员数量	万人
	物流里程数	公里
	能源消耗量	万吨标煤
产出指标	农产品总产值	万元
	农产品物流总额	亿元
	二氧化碳排放量	万吨

3.2 影响因素选择

表2.各影响因素指标

维度	指标	指标内容	单位
影响因素	经济发展水平	安徽省人均GDP	元/人
	产业结构	安徽省第三产业产值占GDP的比重	%
	环保力度	环境保护支出占财政一般预算支出的比值	%
	信息化程度	安徽省邮电业务总量	万元
	交通基础设施密度	安徽省公路密度	km/100km ²

物流是一个综合复杂的系统,根据安徽省农产品物流行业发展的实际情况以及综合物流业发展现状及以往学者对物流效率影响因素的研究成果[7],本文将从经济发展水平、产业结构、环保力度、信息化程度、交通基础设施密度五个方面来展开研究,各指标的相关数据均可从《安徽省统计年鉴》中获取。影响因素指标如表2所示。

3.3 数据收集与计算

表1和表2中的数据主要来源于安徽省统计年鉴,安徽省国民经济和社会发展统计

公报,政府部门公开数据,中国能源统计年鉴等。为了全面分析物流效率的动态变化,本文的研究时间跨度定为2016年至最新统计的2024年,这一时间范围覆盖了近年来的物流发展趋势,为进一步分析提供了充足的数据支持。

(1) 安徽省物流业能源消耗量

在能源总量的对比研究中,为了统一度量标准并促进比较分析的便捷性,学者们普遍采用将各类能源转换为标准煤的表示方式[8]。这种能源折算至标准煤的计算方法详见公式(1):

$$E = \sum_{i=1}^n e_i \times c_i \quad (1)$$

在构建安徽省物流业能源消耗量的计算过程中,本文以原煤、煤油、汽油、柴油、燃料油和电力6种能源为基础,利用各能源的消耗量 e_i 及其折标准煤系数 c_i ,计算物流业能源消耗总量。

(2) 安徽省物流业碳排放量

综合系数法因其计算流程的简洁性和数据的易获取性(通常可通过相关统计部门发布的统计数据直接获取),而被广泛视为一种高效的总体估测手段。此外,在面对特定国家或地区进行碳排放量核算时,通常假定碳排放系数保持恒定。基于这两点考量,本文选择将综合系数法确立为主要的碳排放核算方法[9]。具体计算见公式(2):

$$\text{碳排放量} = \text{能源消耗总量} \times \text{混合碳排放系数} \times 3.67 \quad (2)$$

在公式(2)中,能源消耗总量的计算,通常需要将各类能源的消耗数据按照统一标准(如标准煤)进行折算,并将这些折算后的数值进行求和。安徽省的能源消耗总量,这一数据可以通过查阅安徽省的统计年鉴获取。而关于混合碳排放系数的设定,中国普遍采用的数值是0.67。此外,碳排放与二氧化碳排放之间存在一个固定的换算关系,即每吨碳燃烧所产生的二氧化碳量为3.67吨。

4.研究模型

4.1 DEA-SBM模型

在DEA(数据包络分析)的经典框架中,我们常见的有两种模型:基于恒定规模收益(CRS)的CCR模型和基于可变规模收益(VRS)的BBC模型。Tone对传统DEA模型进行了显著的改进,改进为SBM(Slack-Based Measure)模型,它有效地解决了传统径向DEA模型在处理投入要素时可能产生的“拥挤”或“松弛”现象,从而提

高了效率评估的准确性[10]。值得一提的是，SBM模型在衡量效率时，其结果并不依赖于投入产出的具体单位，这一特性进一步增强了其在实际应用中的广泛性和灵活性。现在我们需要评估一个具有 m 种投入和 s 种产出的决策单元 DMU 的效率时，通常会采用 SBM 模型。SBM 模型的基本公式见 (3)，公式中各参数含义见文献[10]:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{s_k^-}{x_{k0}}}{1 + \frac{1}{s} \left(\sum_{i=1}^s \frac{s_i^+}{y_{i0}} \right)} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_0 = X \lambda + s^- \\ y_0 = Y \lambda - s^+ \\ \lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \end{cases}$$

在该模型的目标函数中， ρ^* 代表了决策单元 DMU 的效率值，而 s_k^- 则指第 k 种投入的冗余量， s_{r+}^+ 表示的是第 r 种产出的不足， λ 是一个调整矩阵，它帮助我们确定前沿上的投入量 $X \lambda$ 和产出量 $Y \lambda$ 。

可以发现，各项投入指标的平均效率水平与各项产出平均效率水平的乘积其实就是 SBM 模型中每个决策单元的效率值，因此 SBM 效率值与投入和产出的效率水平均相关。

4.2 GML 指数模型

在评价安徽省农产品物流效率时，非期望产出超效率 SBM 模型固然提供了一种测算方法，但其局限性在于无法有效捕捉该效率的动态演变趋势。相较之下，Malmquist 指数法则展现出了其独特的优势，因为它能够精准地衡量从 t 期至 $t+1$ 期全要素生产率的变动情况。这种方法的运用，使得我们能够对安徽省农产品物流效率的动态变化进行分析和解读。GML 指数在评估效率变化时，不

$$y_t' = \frac{y_t}{y_t(1)} (y_t'(1)), \quad x_t' = \frac{x_t}{x_t(1)} (x_t'(1), x_t'(2), x_t'(3), x_t'(4), x_t'(5), x_t'(6), x_t'(7)) \quad (5)$$

第三步：对数据进行绝对差计算。将数据归一化去量纲处理后，对 Y_i 与 X_i 的绝对差进

$$\Delta_i(k) = |X_0'(k) - X_i'(k)|, \Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(m)), i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

第四步：求 $\Delta_i(k) = |X_0'(k) - X_i'(k)|$ 的两级最大差和最小差。

设 $M =$ 最大极差， $N =$ 最小极差，分别记为 $M = \max \max \Delta_i(k)$ ， $N = \min \min \Delta_i(k)$ 。

第五步：计算灰色关联系数的值并且构造公式：

$$\xi_{ij} = \frac{N + \rho M}{\Delta_i(k) + \rho M} \quad (7)$$

其中， ρ 为分辨系数，通常取值为 0.5。

仅成功克服了 ML 指数所存在的局限性，更以其可累乘性与传递性两大显著特点使得 GML 指数在动态效率分析方面展现出更高的准确性和可靠性[7]。GML 函数公式及各参数含义见参考文献[2]:

$$GML_t^{t+1} = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})} \quad (4)$$

式中， x 表示生产要素投入向量， y 表示期望产出， b 表示非期望产出。GML 指数大于 1，代表全要素生产率增长，反之下降。

当 GML 指数的值超过 1 时，这标志着安徽省农产品物流效率正处于增长态势，反之则表明其呈现下降趋势。GML 指数能够进一步细化为技术效率变化 (EC) 和技术进步变化指数 (TC) 两部分，为我们提供了深入探究安徽省农产品物流效率变动核心动因的途径。

若 EC 的数值大于 1，这反映出技术效率得到了提升，从而对安徽省农产品物流效率产生了积极的推动作用；而当 TC 的数值超过 1 时，则表明技术进步对安徽省农产品物流效率的提升做出了显著贡献。

4.3 灰色关联度分析法

灰色关联度分析步骤如下[7]:

第一步：建立主序列和子序列。主序列 (即参考序列) 记为 $Y_i = \{y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n)\}$; 子序列 (即比较序列) 记为: $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ 。

第二步：对主序列数列和子序列进行预处理，也就是进行无量纲化。在这里我们使用的是初始值法。公式如下：

行计算，公式如下：

第六步：求关联度 r_i 的值，公式如下：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_j \xi_{ij} \quad (8)$$

第七步：排序。对 r_i 的数值进行大小排序，关联度数值的大小与各因素间的关联程度密切相关，若 r_i 的值越小，则说明因素之间影响愈小，反之则愈大。

5. 实证分析

5.1 安徽省农产品物流效率的静态分析

依据表 1 的评价指标体系，选定相应的

投入和产出变量，利用 MATLAB R2024b 软件，采用超效率 SBM 模型可以计算出 2016-2024 年安徽省的农产品物流效率。计算结果如图 1 所示。

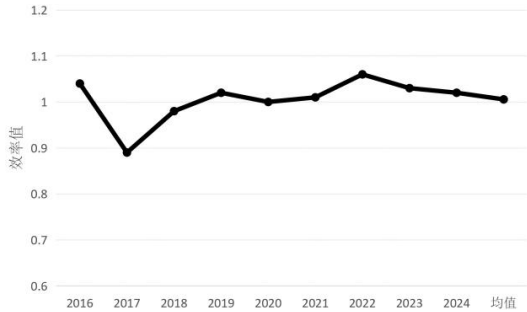


图 1. 安徽农产品物流效率图

根据图 1 显示来看安徽省农产品物流效率呈现“短期波动、长期趋优”的特征：2015 年超效率值达 1.036，显示初期有效，但 2017 年骤降至 0.898，可能与绿色转型初期投入增加相关，2017 年正值“十三五”规划刚开始，国家及安徽省加大了对高耗能、高排放物流设备的淘汰力度，《安徽省“十三五”节能减排实施方案》要求物流行业逐步替换传统燃油货车，推广新能源车辆。这一转型短期内增加了企业成本，导致物流效率下降。2017 年后效率逐步回升并于 2019-2024 年稳定在 1.000-1.025 区间，2022 年安徽省响应国家《“十四五”冷链物流发展规划》，推广物联网、区块链等技术优化物流路径，减少空驶率，提升运输效率，表明低碳措施（如智慧物流优化路径、冷链技术降低损耗）的长期增效作用显现，印证“双碳”政策下绿色投入与效率提升的协同性，但需关注 2020 年效率临界值（1.000）的“政策达标效应”，建议通过区域碳核算体系细化减排激励，巩固低碳高效发展路径。

综上所述，安徽省各地市物流业发展不均衡且有多个地市物流业绿色全要素生产率偏低。在 2019-2024 年，安徽省各地市物流业绿色全要素生产率均值都未达到 1，其中合肥市、淮北市、亳州市、六安市、蚌埠市和阜阳市均值较高，而宿州市、淮南市和滁州市等 10 个地市的均值与其他城市相比偏低且在 2018-2023 年间变化小，从未达到过效率有效。

5.2 安徽省农产品物流效率的动态分析

为进一步探究安徽省农产品物流效率在 2016-2024 年的动态演变特征，本文利用 MATLAB R2024b 软件测算安徽省的 GML 指数，结果如图 2 所示。

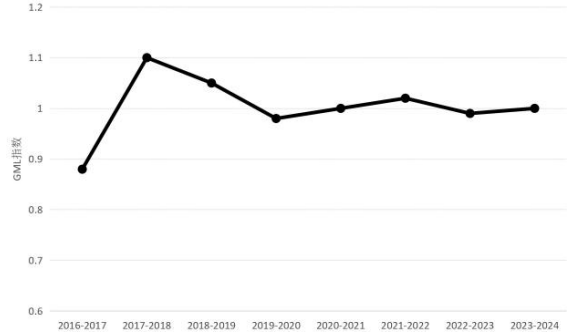


图 2. 安徽农产品物流效率 GML 指数分解

根据图 2，2016-2024 年间 GML 指数呈现阶段性波动特征。此外，根据 MATLAB R2024b 软件测算的结果表明安徽省农产品物流效率的动态变化主要依赖技术创新驱动。2016-2017 年农产品物流效率下降 13.4%，这可能是由于绿色转型初期新能源设备更替和低碳技术磨合带来的短期阵痛；2016-2017 年实现 9% 的技术进步，反映出安徽省冷链技术推广和智慧物流平台建设的成效；此后技术效率在 1.0 基准线附近窄幅波动，其中 2019-2020 年和 2022-2024 年出现小幅衰退，表明技术更新动能有所减弱。整体而言，技术效率呈现“短期阵痛-快速提升-平稳发展”的演变轨迹，但 2020 年后未能形成持续增长趋势，未来安徽省需要加强绿色技术扩散和数字物流创新来突破当前的技术平台期。

5.3 灰色关联度分析

参考数列为安徽省农产品物流效率值（X0），比较数列为影响安徽省农产品物流的因素，利用灰色关联度分析法得到以下关联系数数据，如表 3 所示。

由表 3 可知，各影响因素的关联度存在显著差异，其中产业结构和交通基础设施密度的关联度高，表明这两者对安徽省农产品物流效率的影响最为突出。产业结构的高关联度说明安徽省农产品物流效率的提升与农业产业化程度、农产品加工深度以及供应链整合水平密切相关。交通基础设施密度的高关联度则印证了“要想富，先修路”的实践经验，良好的公路、铁路及多式联运网络能够有效缩短农产品运输时间，减少损耗，尤其对于安徽省这样的农业大省而言，交通条件的改善对生鲜农产品的跨区域流通至关重要。经济发展水平和环保力度的关联度处于中等水平，说明区域经济实力对物流效率的提升有一定推动作用。环保力度的较强关联则反映了绿色物流政策的影响。然而，信息化程度的关联度明显偏低，表明安徽省农产

品物流的数字化、智能化水平仍较落后，农产品溯源系统、智能仓储、大数据调度等技术的应用尚未普及。

表 3. 关联系数相关数据

年份	经济发展水平 (X1)	产业结构 (X2)	环保力度 (X3)	信息化程度 (X4)	交通基础设施密度 (X5)
2016	0.704	0.856	0.781	0.560	0.830
2017	0.847	0.964	0.953	0.717	0.994
2018	0.856	0.994	0.844	0.617	0.951
2019	0.934	1.000	0.887	0.794	0.943
2020	0.975	0.971	0.623	0.431	0.998
2021	0.948	0.975	0.915	0.334	0.925
2022	0.851	0.996	0.923	0.612	0.940
2023	0.800	0.979	0.855	0.629	0.928
2024	0.752	0.963	0.811	0.651	0.920
均值	0.852	0.966	0.843	0.594	0.937

6. 绿色低碳视角下安徽省农产品物流效率提升对策

基于上述研究结论，结合安徽省农产品物流体系发展现状，针对制约农产品物流效率的关键瓶颈问题，现就提升安徽省农产品物流效率提供一些方向。

6.1 优化产业结构与供应链整合

根据表 3 的产业结构关联度 0.96641 可知，安徽省需立足农业资源优势，推动特色农产品加工集群发展。推广“订单农业+电商直采”模式，设立智慧物流产业集聚示范区，推动工业化与产业建设信息化深度融合。同时，促进物流业与农业深度融合，鼓励第三方物流企业拓展农产品冷链、仓储等增值服务，避免物流环节的功能单一化。同步升级冷链仓储体系，在合肥、芜湖等枢纽城市布局智能化冷库，引入温控监测技术，目标将生鲜损耗率降至 10% 以下，提升供应链整体效率。运用大数据、云计算等现代信息技术手段对供应链数据进行深度分析，实现库存成本的降低和供应链效率的提升。此外，推动传统物流企业向绿色物流转型，通过兼并重组或战略联盟整合行业资源，淘汰高能耗、低效率的落后产能。政府可设立专项基金，对采用低碳技术或实现零排放的物流项目给予补贴，引导产业结构向集约化、低碳化方向调整。

6.2 强化交通网络与多式联运能力

由图 1 可知安徽省 2018 年后积极推广物联网、区块链等技术优化物流路径，减少空驶率，提升运输效率，使得农产品物流效率在逐步提升。同时根据表 3 的交通基础设施密度的关联度 0.93654，安徽省皖北地区要

重点加强粮食主产区的多式联运能力，加密高速公路网，开通至长三角港口的集装箱水运专线，降低大宗农产品公路运输的碳排放强度。皖南山区实施农村公路提质工程，对山区道路进行硬化与抗灾加固，确保雨季物流畅通。强化铁路、公路、港口、航空等运输通道基础设施的升级改造，建立物流枢纽，确保农产品从原产地向消费市场迅速转移。针对山区“最后一公里”难题，探索“无人机+冷链驿站”配送模式，在偏远村落布设智能冷藏柜，结合社区团购实现 24 小时送达，降低偏远地区物流成本。此外，加强既有交通设施的绿色化改造，如将传统燃油货车逐步替换为电动或氢能能源车辆，并在物流园区布局光伏发电和充电桩，构建低碳能源供给体系。

6.3 深度应用数字化与智能化技术

根据图 2 的安徽省 2019-2020 年和 2022-2024 年 GML 指数出现小幅衰退，表明技术更新动能有所减弱。同时，由表 3 的信息化程度的关联度 0.59399，表明安徽省农产品物流的数字化、智能化水平仍较落后。因此，安徽省可以通过构建省级农产品物流大数据平台，整合生产、仓储、运输、销售全链条数据，利用人工智能算法优化路径规划，减少车辆空驶率与重复运输，提高安徽省农产品物流的智能化水平。针对农村数字化基础薄弱问题，实施“村村通 5G”工程，在村级物流服务站配备智能温控设备与物联网传感器，实时监测农产品仓储状态。同时，开发相关小程序，为农户提供实时物流需求匹配、价格预警等服务，推动小农户与现代化物流体系对接。鼓励物流企业引入无人叉车、

AGV 机器人等智能装备,在合肥、蚌埠等枢纽城市试点无人化仓储管理,降低人工操作能耗。

6.4 加快农产品物流绿色低碳转型

由表 3 可知环保力度这一指标,对安徽省农产品物流效率的影响程度偏高。所以,安徽省政府应加快安徽省农产品物流的绿色低碳转型,需要构建全链条、多方位的农产品物流绿色低碳转型的协同机制。在硬件设施方面,可通过实施智慧冷链管理系统实现产业数字化转型,对现有冷藏运输装备进行技术革新,应用绿色建筑材料和物联网温控装置,从而提升仓储空间使用效能。同时完善新能源车辆配套基础设施网络,实现充换电设施与物流节点的协同布局。在运输组织方面,可创新开展共同配送、夜间配送等集约化模式,建立城乡双向物流体系,提升车辆装载效率。在技术创新方面,重点推广物联网监控、智能路径规划等数字化手段,实现运输过程的精准管控。在制度保障方面,需建立健全绿色物流标准体系,开展碳排放监测评估,完善绿色认证和财税激励机制,引导企业主动采用环保技术和清洁能源,形成政府引导、市场主导、企业参与的绿色低碳发展格局,最终实现农产品物流经济效益与环境效益的协同提升。

7. 结论

本文利用超效率 SBM 模型和 GML 指数模型,对安徽省农产品物流效率进行了实证分析,并利用灰色关联度分析法,分析了安徽省农产品物流效率的影响因素,一方面探寻了绿色低碳视角下安徽省农产品物流效率提升的新方向,另一方面对推动安徽省经济高质量发展具有重要意义。然而,由于现存资料统计有限,数据不完整,在关于安徽省农产品物流效率的指标体系的选取上也有待进一步探讨,同时关于使用的研究工具及测度安徽省农产品物流效率局限于时间角度,这些都是本文研究的不足。未来,可以进一步拓展数据来源并完善农产品物流效率的指

标体系,结合更多实地调研与行业动态数据进行验证。同时,尝试从空间维度分析不同区域物流效率的差异,探索区域协同优化路径,为实践提供更精细化的参考。

参考文献

- [1]索瑞霞,谭媛媛,吕靖焯.我国农业绿色低碳化发展研究态势分析[J].中国农机化学报,2024,45(09):297-304.
- [2]Ding Heping, Liu Conghu. Carbon emission efficiency of China's logistics industry: Measurement, evolution mechanism, and promotion countermeasures[J]. Energy Economics, 2024, 129: 107221.
- [3]黄晓慧,聂凤英.数字化驱动农户农业绿色低碳转型的机制研究[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2023,23(01):30-37.
- [4]李岩.山西省农产品物流效率评价及影响因素研究[D].中北大学,2024.
- [5]李雪,张建栋,廖宇,张恒伟,窦海成,马永峰.绿色低碳概念在卷烟包装材料中的应用[J].包装工程,2024,45(05):109-117.
- [6]张红柳,康琳赛,王明吉.“双碳”目标下数字物流发展对流通业绿色全要素生产率的影响效应分析[J].商业经济研究,2024,(22):90-93.
- [7]李殿云.双循环新发展格局下安徽省农产品贸易高质量发展研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(04):66+74.
- [8]赵天琪,魏修治.安徽省农产品电商发展现状、问题及对策[J].时代经贸,2024,21(09):174-17.
- [9]Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [10]翟胜韬,王建民.“双碳”背景下长三角农产品低碳物流效率及影响因素[J].枣庄学院学报,2024,41(05):136-144.