

# 生猪产业规模化发展与碳排放： 促进还是抑制？

梁耀文<sup>1,2</sup>, 王明利<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081;  
2. 中国农业大学经济管理学院, 北京 100083)



**摘要** 在使用生命周期法测算2007—2020年省际生猪碳排放的基础上, 系统考察了生猪产业规模化发展对生猪碳排放的影响与作用机制。结果表明: 第一, 生猪碳排放呈现出明显的空间溢出效应和聚集效应, 即一个地区的生猪碳排放与周边地区密切相关; 第二, 生猪产业规模化发展对生猪碳排放呈现显著的“倒U型”关系, 规模化发展对生猪碳排放的影响存在显著的门槛效应, 当生猪产业规模化率保持在45.1%以上时, 规模化发展可有效促进生猪产业碳减排; 第三, 小规模生猪养殖占比与生猪碳排放是显著的单调递增关系, 而中规模和大规模生猪养殖占比与生猪碳排放之间表现显著的“倒U型”关系; 第四, 聚集效应和技术进步效应是生猪产业规模化发展影响生猪碳排放的主要作用途径。建议合理规划生猪产业的空间布局, 发展适度规模养殖, 发挥技术进步的推动作用, 稳妥实现生猪产业碳减排与规模化发展的“双赢”目标。

**关键词** 生猪碳排放; 生猪产业规模化; 空间SUR模型; 门槛效应

**中图分类号:** F326.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-3456(2024)04-0071-10

**DOI编码:** 10.13300/j.cnki.hnwkxb.2024.04.007

全球变暖已成为人类当前面临的严峻挑战。作为负责任的大国, 中国积极提出了自主减排的“双碳”目标承诺。党的二十大明确指出, 碳达峰和碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。相较二、三产业碳排放主要来源, 农业碳排放正得到越来越多的重视。畜牧业是农业碳排放的主要来源, 生猪产业已成为中国畜牧业第二大碳源<sup>[1]</sup>。中国是世界上最大的猪肉生产国和消费国, 居民具有食用猪肉的传统偏好, 对猪肉的消费量占肉食品消费总量的64%, 以养猪为生的农户多达3775万户(生猪产业发展规划2016—2020年)。随着中国经济高速发展, 为满足日益增长的猪肉需求, 生猪规模化程度不断提高。农业农村部数据显示, 2007—2022年, 中国生猪养殖规模化率从32%提高到了65.1%。然而, 这也引发了碳排放、粪污污染等环境问题。那么, 生猪产业规模化发展对其碳排放<sup>①</sup>有怎样的影响? 研究这一问题, 不仅能够观察到生猪碳排放规模化发展过程中的走势, 还能够为全面践行中国式现代化发展理念, 实现生猪产业高质量发展提供新的视角。

规模化发展对生猪碳排放具有复杂的多重影响。首先, 规模化发展对生猪碳排放的非线性影响。一方面, 在生猪产业规模化发展进程中, “粗放”发展可能大幅增加碳排放。另一方面, 中国生猪养殖的生产效率较低, 且养殖成本远高于其他国家<sup>[2]</sup>, 还面临政策压力、疫病和市场频繁波动等挑战<sup>[3-4]</sup>。其次, 生猪碳排放并非仅限于简单的局部环境问题, 其具有随大气、化学和物理等自然因素流动的天然属性, 同时受到技术进步、产业转移和商品流通等经济机制的影响而扩散转移。因此, 将研

收稿日期: 2023-11-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“基于可持续发展的畜牧业现代化路径与政策支持体系研究”(72033009); 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-IAED-2023-01)。

\*为通讯作者。

① 为便于表述, 除特殊说明外, 本文中的“碳排放”代表“碳排放量”, 用二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>-eq)表示。

究区域假设为相互独立的个体并不符合实际,考虑空间关联效应能够增强分析结果的稳健性,有利于提出科学的决策。

基于此,本文在理论分析的基础上,运用生命周期法测算2007—2020年中国省际生猪碳排放,并综合运用EKC模型、面板门槛模型和广义空间最小二乘回归模型,系统探讨生猪产业规模化发展对生猪碳排放的非线性影响。

## 一、理论分析与研究假设

生猪碳排放相比于其他领域碳排放具有特殊性。以往有关畜牧业、生猪碳排放的研究通常采用IPCC系数法和生命周期法<sup>[1,5-6]</sup>。然而,在测算生猪产业碳排放和探索减排路径时,还需要考虑生猪养殖的特殊性和环节复杂性。生猪养殖不仅受能源和农资投入的影响而产生碳排放,还受自然属性的影响而引发碳排放<sup>[7]</sup>。因此,传统的标准化碳排放评价方法可能无法直接应用于生猪产业。

生猪产业规模化发展是引发整个产业转型和结构变革的特殊过程。通常情况下,生猪产业规模化发展是指逐步向高效养殖为主的产业结构转变。虽然生猪产业规模化发展表现为大量散养户的退出或向规模养殖场转移,但其本质并非简单的产业聚集或扩散蔓延。生猪养殖户追求利润最大化,其养殖规模的发展方向受到利润空间的影响。根据“农业技术跑步机”理论<sup>[8]</sup>,生猪养殖户必须不断的扩大养殖规模并更新生产方式,才能保持产业竞争力。然而,我国生猪市场波动性增加,环保政策日益严苛,这在一定程度上限制了生猪产业的扩张。虽然政府倾向于规模养殖并限制散养户,但我国仍有大量散养生猪养殖户。与规模养殖户相比,散养户具有更灵活的进出市场优势,能更好地应对供需波动。同时,我国悠久的生猪养殖历史培养了独特的猪肉消费偏好<sup>①</sup>,而现代规模化养殖无法完全覆盖这种需求。因此,我国的生猪散养户仍然是产业不可或缺的一部分,不可能理想化地使其完全退出。此外,我国生猪产业规模化发展方向主要受政策引致,包括扶持性补贴政策和抑制性环境规制政策,这些政策既有促进作用,又有一定的限制作用<sup>[9]</sup>。

基于上述判断,可以通过以下理论解释规模化发展对生猪碳排放的影响。首先,根据环境库兹涅茨假说理论,随着生猪产业规模化的发展,碳排放会迅速增加,但增加到一定程度后随着技术创新和生产方式转变,碳排放量将下降。其次,根据新古典经济学观点,环境规制的成本效应<sup>②</sup>贯穿环保政策实施的整个过程,即在环保政策实施过程中,对产业结构的影响表现为挤出效应<sup>[10]</sup>。特别是在“唯绿色GDP”官员考核机制<sup>③</sup>的推动下,往往采取过于严厉的限制措施,对所有规模的生猪养殖产生冲击。然而,散养和小规模生猪养殖户对政策更为敏感,数量变化弹性较大。因此,散养户和小规模生猪减少的数量较多,导致中规模和大规模生猪的比例“表面上”上升。根据波特假说,环境规制的成本效应是后期推动产业结构升级的动力,而规模化发展是环境规制能够促进生猪产业转型升级的一个重要方向<sup>[11]</sup>。特别是在环境污染处理技术升级创新和促进新旧动能转换方面,规模化发展能够发挥在生猪碳排放治理的规模经济优势。因此,规模化发展与生猪碳排放之间并非简单的线性关系,不同发展阶段可能对生猪碳排放的影响方向也不同,不同的污染物<sup>④</sup>与产业发展的关系也可能呈现不同的曲线形状<sup>[12]</sup>。鉴于我国生猪产业存在明显的周期性特征<sup>[3]</sup>,本文认为规模化发展对生猪碳排放的影响可能是非线性关系,并提出如下假设:

H<sub>1</sub>: 规模化发展对生猪碳排放具有“倒U型”影响。

基于以上论述,本文认为规模化发展对生猪碳排放的影响机制可能体现在以下几方面:

第一,规模化发展能够促进资金、劳动力等资源要素的聚集,而聚集的过程对生猪碳排放的影响

① 例如,川菜中的回锅肉必须选取本土散养黑毛猪的二刀肉,现代规模养殖的三元猪无法替代。

② 由于环境规制强度提升导致生产成本上升。

③ 我国自“十一五”后,官员的考核指标从“唯GDP论”逐渐向同时注重生态效益的“绿色GDP论”过渡。

④ 生猪碳排放的主要碳源为粪便管理和饲料粮种植,生猪粪污是畜牧业最主要的污染物,而饲料粮种植过程中伴随着化肥农药等农资过量投入,其本身直接对环境造成破坏,因此这里将生猪产业的碳排放视为污染物。

不确定。一方面,生猪规模化发展必然伴随着饲料、土地等要素的需求增加,但我国各地生猪产业发展的资源禀赋差异明显。在这种情况下,规模化发展有助于促进资源要素的集中和合理优化配置,从而提高生产效率和碳排放治理效率。另一方面,尽管生猪规模化发展具有聚集优势,但也可能带来负面影响。规模效应可能会加重对资源要素的过分消耗,从而加剧碳排放。

第二,生猪产业规模化发展的过程也带动了技术进步,而技术进步对于生猪产业减排的影响同样不确定。根据“农业技术跑步机”理论,生猪产业受规模经济驱动,不断扩大养殖规模并更新技术和生产方式。绿色技术进步偏向推动更先进、低碳的生产技术应用,有利于生猪产业减排。然而,在目前严苛的环保要求下,即便生猪规模化发展具有绿色技术进步偏向,也难以实现污染物的完全资源化利用。根据《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》中推荐的畜禽粪污承载力标准,5亩地只能承载出栏50头以下生猪场的粪便投入。按照种植业经营规模户均100亩地计算,也仅仅能够承载500头存栏猪场粪便的利用<sup>[13]</sup>。因此,这一过程可能会产生拥堵效应,从而加剧生猪碳排放。

第三,规模化发展对生猪碳排放的影响还可能取决于产业转移方向。一方面,我国生猪养殖具有明显的资源依赖性。随着规模化加速发展,生猪产业会向资源丰富的地区转移,例如粮食主产区的生猪规模化发展更迅速<sup>[14]</sup>。这会降低生猪养殖成本,使养殖户和养殖企业更有能力采纳新型低碳养殖技术,从而有助于生猪产业碳减排。另一方面,自《畜禽养殖禁养区划定技术指南》实施以来,各地纷纷划定禁养区,导致大量养殖户被迫搬迁。同时,由于相关政策衔接不畅,缺乏可持续性,各地方的相关决策更趋向于“向底线竞争”<sup>[15]</sup>。根据“污染天堂假说”<sup>[16]</sup>,这时生猪养殖户会向政策相对宽松的地区转移,从而增加生猪碳排放。

综上所述,进一步提出如下假设:

H<sub>2</sub>:规模化发展可以通过聚集效应影响生猪碳排放。

H<sub>3</sub>:规模化发展可以通过技术进步效应影响生猪碳排放。

H<sub>4</sub>:规模化发展可以通过产业转移效应影响生猪碳排放。

## 二、模型构建、变量说明与数据来源

### 1. 模型构建

生猪碳排放计算。生猪产业体量庞大且环节复杂,从单一的养殖环节评价生猪碳排放,略显针对性不足。本文基于生命周期法,将生猪碳排放系统划分为生猪饲料粮种植、生猪饲料加工运输、生猪肠道发酵、生猪粪便管理、生猪饲养耗能和生猪产品加工等6个系统边界<sup>[17]</sup>,测算中国2007—2020年省际生猪碳排放<sup>①</sup>。

基准模型设定。由于我国不同地区之间的生猪产业发展联系紧密,所以空间上邻近地区之间在生猪产业发展会表现较强的联动性。因此,在考察规模化发展对生猪碳排放的影响时,有必要对其潜在的空间关联性进行检验和控制。为了检验规模化发展与生猪碳排放之间的非线性关系,本文基于可扩展的STIRPAT模型<sup>[18]</sup>和EKC模型,构建分析规模化发展对生猪碳排放影响的基准模型,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \ln TZ_{it} = & \alpha + \rho W \ln TZ_{it} + \gamma W psz_{it} + \lambda Wm + \ln \beta_1 \ln pop_{it} + \\ & \beta_2 \ln gdp_{it} + \beta_3 \ln tc_{it} + \beta_4 \ln psz_{it} + \beta_5 (\ln psz_{it})^2 + \\ & \beta_6 (\ln psz_{it})^3 + \beta_7 X_{it} + \beta_8 control_{it} + u_i + v_t + \mu_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,TZ为生猪碳排放,人口密度(*pop*)表示人口因素,人均GDP(*gdp*)代表财富因素,而技术方面因素用技术水平(*tc*)表征。生猪规模化率(*psz*)为核心解释变量;*X*代表一些解释变量的补充变量;*control*表示其他控制变量; $\rho$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$ 分别代表生猪碳排放、生猪规模化率及其他变量的空间滞后项系数;*m*代表了除生猪规模化率以外的其他变量; $\alpha$ 和 $\beta_1 - \beta_8$ 为待估系数, $u_i$ 为地区固定效应, $v_t$ 为时间

① 篇幅有限,详细的公式及参数略,感兴趣可向作者获取。

固定效应, $\mu$ 代表干扰项。

## 2. 变量选取与测算说明

核心解释变量的度量。目前,学者们对生猪产业规模化水平的度量标准不统一,通过咨询有关专家,本文按照《中国畜牧兽医年鉴》的划分标准计算生猪产业规模化水平<sup>①</sup>。生猪产业整体及各养殖规模占比的测算公式为: $psz_{ij}=(prt_{ij}/toa_i)\times 100$ ,其中 $prt_{ij}$ 表示该地区某规模的生猪出栏数, $toa_i$ 为该地区生猪出栏总数。

控制变量的选取。首先,基于STIRPAT模型选择人口、财富、技术三方面的因素,具体为:人口密度( $pop$ )、人均GDP( $gdp$ )、生产效率( $eff$ )。人口密度采用单位面积人口数量表征;人均GDP采用2000年不变价的人均GDP表示;生产效率由生猪饲料转化率表示,计算公式为: $S_{i,j}=[q_{i,j,k}/(y_{i,j,k}-p_{i,j,k}\times r)]\times(n_{i,j,k}\times c_{k0})/N_{i,j}$ ;其中, $S_{i,j}$ 表示饲料转化率<sup>②</sup>, $y_{i,j,k}$ 为第*i*年*j*地区*k*养殖规模的每头生猪的主产品产量, $p_{i,j,k}$ 是每头生猪仔畜重量, $q_{i,j,k}$ 为生猪耗粮数量, $n_{i,j,k}$ 是不同规模生猪户数, $c_{k0}$ 代表规模转换系数<sup>③</sup>, $k$ 代表四种生猪养殖规模(散养、小规模、中规模、大规模)。

其次,本文引入了部分与生猪产业密切相关的拓展变量,主要有:城镇化率( $cit$ )、环境规制( $enr$ )、饲料供给能力( $fod$ )、疫病风险( $dsa$ )、猪粮比价( $ppr$ )。城镇化率:城镇化水平越高,基础设施建设完善,产业服务配套体系能力越强,有利于生猪产业规模化发展。环境规制:环保政策日益严格,对生猪产业规模化发展提出了新要求,其中环境规制是重要指标之一。因此,本文借鉴曾昉等的研究<sup>[19]</sup>,采用调整系数法改进经济发展水平来计算环境规制。计算公式为 $ER=GDP\times 1/(2/3\times\sqrt{area}/\pi)$ ,其中, $area$ 表示各省行政区划面积, $\pi$ 为圆周率。饲料供给能力:我国生猪养殖严重依赖粮食饲料,一个地区的生猪饲料供给能力越强,可能会在很大程度上决定了生猪产业规模化发展和转移的方向,本文用生猪饲料产量<sup>④</sup>表示。疫病风险:疫病是生猪规模化发展需要重点考虑的问题,尤其是非洲猪瘟爆发后,生猪产业面临严重挑战,疫病爆发会阻碍生猪产业规模化发展,本文用生猪9种常见的疫病<sup>⑤</sup>导致的死亡数和扑杀数之和作为疫病风险的代理变量。猪粮比价:猪粮比价是评估生猪市场盈利能力的重要标准<sup>[4]</sup>,是生猪养殖的盈亏平衡点,能够直接影响生猪养殖户进入和退出市场,该变量用月度生猪市场价格与玉米价格比值的年度均值表示。

此外,本文还将自然条件因素作为控制变量,具体有:气候条件、农用地面积( $land$ )、交通条件( $tra$ )。气候条件:生猪产业链既涉及畜牧业又包含种植业,气候条件也是重要的影响因素,而遥感技术能够客观、准确、全面地测量大范围数据资料,因此,本文运用基于遥感释译的年平均降水量( $amp$ )和年平均气温( $tem$ )表示。农用地面积:一方面,资源化利用是生猪养殖粪污最有效的处理方式之一,但需要配套土地进行消纳。另一方面,可利用土地面积是生猪养殖场选址的重要影响因素,是生猪产业规模化发展的先决条件之一。因此,该变量采用农用地面积<sup>⑥</sup>表征。交通条件:交通设施发达有利于生猪养殖物资的运输,也利于扩大生猪产品的销售范围,从而促进生猪产业规模化发展,考虑到生猪多以公路方式运输为主,本文运用公路里程表征交通条件。

空间权重矩阵。根据地理学第一定律,空间上的任何经济现象都与其周边地区有关联和依赖,且越邻近的地区联系越为紧密。鉴于经济距离矩阵可能会存在内生性<sup>[20]</sup>,为尽可能降低回归偏误,本文构造了严格外生的邻接矩阵( $W_1$ )和地理距离矩阵( $W_2$ ),其中 $W_2$ 考虑了空间衰减效应<sup>⑦</sup>,其中的元

① 具体划分标准为:1~49头为散养,50~100为小规模,100~1000为中规模,1000以上为大规模。

② 《全国农产品成本收益资料汇编》中的生猪数据是分规模统计,为便于计算,这里采用加权平均的方式计算全规模生猪饲料转化率。

③ 《全国农产品成本收益资料汇编》和《中国畜牧兽医年鉴》中对生猪的规模分类标准有差异,前者1~30头为散养,后者1~49头为散养,因此规模转换系数 $c_{k0}$ 取值0.6和0.4。

④ 生猪饲料产量由《中国农业年鉴》中的配合饲料产量、浓缩饲料产量和添加剂预混合饲料产量中的猪饲料产量加总得到。

⑤ 具体有:猪瘟、高致病性猪蓝耳病、猪繁殖与呼吸综合征、猪囊虫病、炭疽、猪丹毒、猪肺疫、非洲猪瘟、口蹄疫。

⑥ 《关于稳定生猪生产促进转型升级的意见》明确指出,养猪用地按农用地管理。

⑦ 空间衰减效应是指两个区域间的空间效应随着距离的增加而加速减少。

素为两个省会之间经纬度<sup>①</sup>。

### 3. 数据来源

本文研究样本为中国30个省,不包含西藏及港澳台地区(数据缺失),时间跨度为2007—2020年<sup>②</sup>。生猪碳排放测算相关数据和影响因素数据均来源于2008—2021年的《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》《中国畜牧兽医年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》《兽医公报》及各省统计年鉴及经济社会发展公报,以及国家统计局官网、中国经济社会大数据研究平台、EPS数据库和布瑞克农业大数据平台。个别缺失数据采用插值法补充。降水量和气温数据来源于国家气象科学数据共享服务平台—中国地面气候资料日值数据集(V3.0)<sup>③</sup>,使用Barness法<sup>④</sup>通过R语言计算。各变量描述性统计结果如表1所示。

表1 变量的描述性统计

变量	平均值	标准差	最小值	最大值
生猪碳排放/ <i>TZ</i>	1000	763.20	18.80	2900
规模化率/ <i>PSZ</i>	0.532	0.272	0.156	1
人口密度/ <i>pop</i>	581.00	698.50	37.03	3800
人均GDP/ <i>gdp</i>	4.302	2.546	0.611	15.420
生产效率/ <i>eff</i>	2.572	0.309	1.874	3.377
城镇化率/ <i>cit</i>	55.75	13.47	28.24	89.60
环境规制/ <i>enr</i>	1.655	1.780	0.083	11.970
猪粮比价/ <i>ppr</i>	7.274	1.512	4.726	11.340
疫病风险/ <i>dsa</i>	3800	18000	0	300000
饲料供给能力/ <i>fod</i>	247.00	252.70	0.42	1500
平均气温/ <i>tem</i>	13.45	5.58	1.47	25.56
平均降水量/ <i>amp</i>	944.60	536.80	91.06	2400
农用地面积/ <i>land</i>	1900	1900	27	9500
交通条件/ <i>tra</i>	14.18	7.559	1.120	33.71

## 三、规模化发展对生猪碳排放的影响

### 1. 空间溢出效应检验

本文使用Moran's *I*指数检验生猪碳排放的空间相关性,计算公式参见叶阿忠等<sup>[21]</sup>的研究。以空间权重矩阵  $W_1$  为例, Moran's *I*指数的计算结果大于0且均在1%或5%的水平上显著(0.143~0.205),说明生猪碳排放具有“高一高”型聚集和“低—低”型聚集的空间正相关性特征。此外,本文采用Chen等<sup>[22]</sup>的方法,将标准化的生猪碳排放作为横轴,生猪碳排放的空间滞后值为纵轴,绘制了2007、2014和2020年的生猪碳排放的空间分布散点图(见图1),以研究生猪碳排放的局部空间特征。图1中大多数省份位于第一和第三象限,表明省际生猪碳排放存在显著的聚集效应。以上结果表明,在碳排放的自然属性、区域间生猪产业转移和产品贸易等经济活动的双轮驱动下,本地区的生猪碳排放水平与地理邻近地区的生猪碳排放水平密切相关,并呈现出“一荣俱荣”“一损俱损”的特征。

### 2. 规模化发展对生猪碳排放的影响估计

本文运用EKC模型检验生猪规模化发展与其碳排放的非线性关系。在具体模型设定上,传统研究通常采用二次函数。但已有研究表明,引入三次项能更好的拟合数据<sup>[12,23-24]</sup>。因此,本文在传统EKC检验的基础上,在模型中引入了三次项。同时,考虑到空间计量模型还存在不可观测的空间交互影响,而广义空间两阶段最小二乘法(generalized spatial two-stage least squares, GS2SLS)采用自变量及其空间滞后项作为因变量的工具变量<sup>[25]</sup>,即使在模型存在异方差的情况下,其估计量仍然一致<sup>[26]</sup>,GS2SLS处理空间模型内生性与异方差问题更有优势。因此,本文采用GS2SLS对基准模型进行估计,并采用单位生猪碳排放替代生猪碳排放总量与更换空间权重矩阵的方式对基准模型进行稳健性检验,具体结果如表2所示。

由表2可知,规模化对生猪碳排放存在明显的非线性关系。生猪产业总体规模化水平对碳排放影响的系数为 $\beta_4 > 0$ 、 $\beta_5 < 0$ 、 $\beta_6 > 0$ ,但 $\beta_6$ 未通过显著性检验。同时,按照EKC检验的步骤,删除生猪规模化水平三次项后,保留二次项和一次项进行再估计,结果如表2第(2)列所示。本文发现生猪产业

① 30个省份的经纬度信息提取自自然资源部下载的标准地图。

② 所用统计资料中,2007年以前的部分数据缺失,因此基于最大数据可获得性选取2007年以后的数据。

③ 资料来源:中国气象局气象数据中心: <http://data.cma.cn/>。

④ 先使用IDW法插值成格点数据(每个格点附近的5个站点数据,避免过渡平滑),该数据覆盖中国的0.1°x0.1°分辨率的网格,每个格点长宽都是0.1°(纬度/经度),将插值得到的网格数据构建成栅格数据,然后再分区域平均汇总。

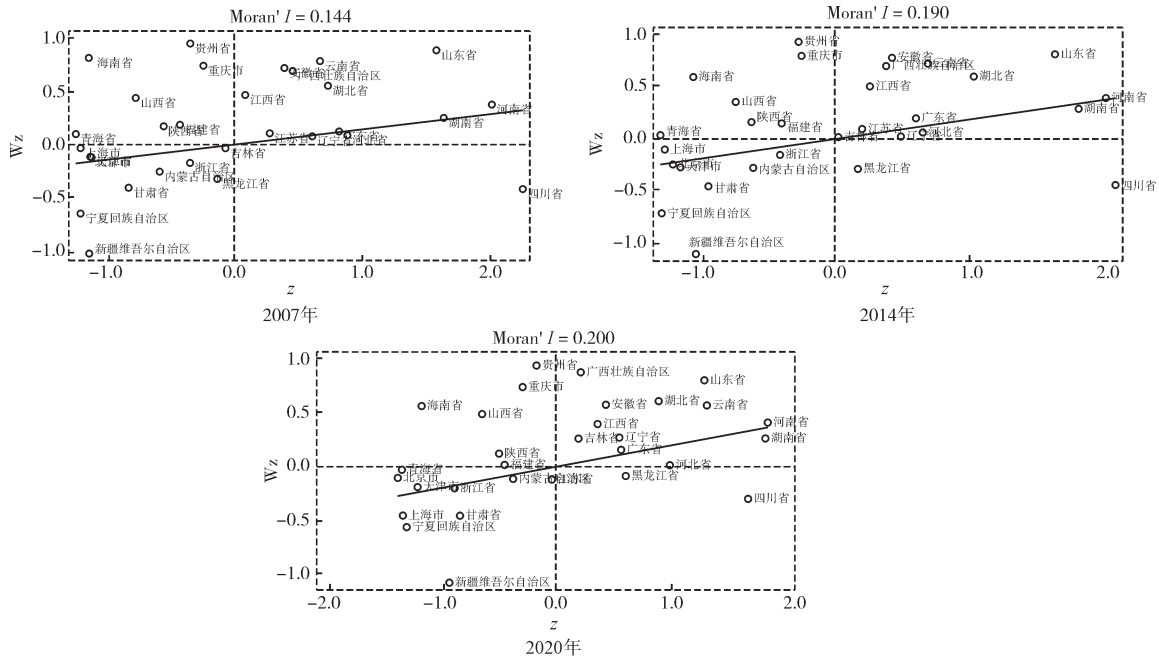


图1 生猪碳排放空间分布

总体规模化水平与生猪碳排放之间呈现显著的“倒U型”曲线关系,这意味着假说1成立。这一结果可从两方面进行解释:一方面,中国生猪产业的规模化发展引发了粗放的规模扩张,导致了大量资源消耗,碳排放成为生猪产业规模化进程中激增的“副产品”;另一方面,在日益严苛的环境规制作用下,生猪产业规模化发展促进了生猪产业转型,发挥了规模经济、聚集效应的正外部性,对规范生猪产业的绿色生产行为产生积极影响,从而降低了生猪碳排放。

3. 规模化发展对生猪碳排放影响的区间分析

由前文分析可知,规模化发展与生猪碳排放之间存在显著的非线性关系,其影响随着规模化水平处于不同区间而呈现不同的特点。本文继续采用面板门槛模型分析规模化对生猪碳排放的影响区间,具体模型如式(2),估计结果如表3所示。

$$\ln TZ_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln psz_{it} \times 1(\ln psz_{it} \leq \gamma_1) + \beta_2 \ln psz_{it} \times 1(\gamma_1 < \ln psz_{it} \leq \gamma_2) + \beta_3 \ln psz_{it} \times 1(\ln psz_{it} > \gamma_3) + \alpha \ln X_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中,1(·)表示示性函数,当括号中判断为真时,则取值为1,反之则取0;γ<sub>1</sub>、γ<sub>2</sub>为门槛值,β<sub>1</sub>、β<sub>2</sub>、β<sub>3</sub>、α为待估系数;X为控制变量;u<sub>i</sub>为地区固定效应,v<sub>t</sub>为时间固定效应;ε<sub>it</sub>为干扰项。

由表3可知,门槛效应检验F值在1%的水平上显著,因此模型中存在一个门槛值,生猪产业规模化水平在45.1%附近发生了显著变化。具体来看:当生猪产业规模化水平小于45.1%时,生猪产业

表2 规模化发展对生猪碳排放的影响回归结果

变量	N=420			
	(1) 总体规模	(2) 去除 三次项	(3) 替换 被解释变量	(4) 空间权重 矩阵 W <sub>2</sub>
lnpsz(β <sub>1</sub> )	0.0301** (0.0143)	0.0253*** (0.0037)	0.0202** (0.0093)	0.0154*** (0.0035)
lnpsz <sup>2</sup> (β <sub>2</sub> )	-0.0693*** (0.0208)	-0.0521** (0.0263)	-0.0589*** (0.0209)	-0.0362** (0.0182)
lnpsz <sup>3</sup> (β <sub>3</sub> )	0.0052 (0.0035)	—	—	—
控制变量	控制	控制	控制	控制
ρ	0.3777*** (0.0562)	0.3193*** (0.0369)	0.2754*** (0.0663)	0.2293*** (0.0289)
Wald test	441.12 (0.0000)	377.91 (0.0000)	645.55 (0.0000)	522.90 (0.0000)
个体效应	控制	控制	控制	控制
时间效应	控制	控制	控制	控制
Kleibergen-Paap rk LM statistic	127.63 (0.0000)	231.33 (0.0000)	372.36 (0.0000)	214.58 (0.0000)
Kleibergen-Paap rk ald F statistic	11.67 (0.0000)	19.88 (0.0000)	21.44 (0.0000)	28.22 (0.0000)

注:括号内为标准误,\*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%、1%水平上显著,下同;限于篇幅,未报告控制变量的系数与效应分解估计结果。

规模化水平对生猪碳排放影响的系数为0.0509;当生猪产业规模化水平大于45.1%时,其回归系数为-0.0967,且两个回归系数分别在10%、1%的水平上显著。由此可知,当生猪产业规模化水平小于门槛值45.1%时,随着生猪产业规模化发展,生猪碳排放逐渐升高;当生猪产业规模化水平越过门槛值45.1%时,生猪规模化发展能够显著地促进生猪碳排放降低。

#### 四、影响差异与机制

##### 1. 规模化发展对生猪碳排放影响的规模异质性

考虑到我国生猪产业各养殖规模的发展具有关联性和异质性<sup>[10]</sup>,本文使用更有效率的空间似无相关模型对式(1)进行了系统估计,分别得出小规模、中规模、大规模生猪养殖规模变动对生猪碳排放的影响,具体结果如表4所示。

生猪产业规模化发展对生猪碳排放非线性影响具有规模异质性。具体来看,小规模生猪养殖对碳排放影响的系数为 $\beta_4 < 0$ 、 $\beta_5 > 0$ ,但 $\beta_5$ 未通过显著性检验,小规模生猪养殖占比与碳排放之间影响呈现显著的单调递增关系,说明小规模生猪养殖占比变动尚处于加剧生猪碳排放阶段,这是因为我国生猪产业的小规模养殖户没有彻底摆脱低效率的生产方式,仍然存在规模不经济的现象<sup>[27]</sup>;中规模生猪养殖的占比对碳排放影响的系数为 $\beta_4 > 0$ 、 $\beta_5 < 0$ ,且 $\beta_4$ 和 $\beta_5$ 均在1%的水平上显著,说明中规模生猪的占比与碳排放之间存在显著的“倒U型”关系;同理,大规模生猪养殖的占比对生猪碳排放的影响也呈现“倒U型”关系。因此,要实现生猪规模化发展与碳排放的有效“脱钩”,应分规模制定实施减排计划,使减排效应的涓流在生猪产业充分渗透。一方面,应该重点发挥中、大规模生猪在规模经济和聚集效应方面的优势;另一方面,在生猪产业规模扩张的同时注重改善生产效率,单纯依靠生猪规模的低效扩张并不利于碳减排目标的实现。

表4 不同养殖规模变动对生猪碳排放的影响回归结果

变量	(6)基准回归			(7)替换被解释变量			(8)空间权重矩阵 $W_2$		
	小规模	中规模	大规模	小规模	中规模	大规模	小规模	中规模	大规模
$\ln p_{sz}(\beta_4)$	0.0176*** (0.0032)	0.0322*** (0.0118)	0.0026* (0.0015)	0.0180** (0.0091)	0.0207*** (0.0057)	0.0011** (0.0005)	0.0087** (0.0041)	0.0113*** (0.0042)	0.0066* (0.0039)
$\ln p_{sz}^2(\beta_5)$	0.0166 (0.0144)	-0.0742*** (0.0231)	-0.0061* (0.0034)	0.0164 (0.0121)	-0.0734*** (0.0232)	-0.0039* (0.0022)	0.0147 (0.0099)	-0.0362** (0.0182)	-0.0106* (0.0064)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
$\rho$	0.3530*** (0.0563)	0.6519*** (0.0665)	-0.2703*** (0.0658)	0.2204*** (0.0395)	0.6179*** (0.1288)	-0.2622*** (0.0410)	0.1464*** (0.0223)	0.4009*** (0.0590)	0.3351*** (0.1260)
Breusch-Pagan( $p$ )	21.7(0.0000)			29.81(0.0000)			164.33(0.0017)		

##### 2. 规模化发展对生猪碳排放的影响机制

本文继续采用机制分析模型对聚集效应、技术进步效应和产业转移效应三种途径进行检验。其中,考虑到产业集中度已成为影响生猪产业可持续发展的重要因素<sup>[28]</sup>,本文参考黄炳凯等<sup>[10]</sup>的方法,运用区域内各规模养殖场数量占比计算泰尔指数,泰尔指数值越大,表示产业集中度越低,以此量化生猪产业规模化发展的聚集效应。技术进步效应采用生猪绿色技术进步指数表征,计算方法参考闫桂权等<sup>[29]</sup>的研究<sup>①</sup>。而对于产业转移效应,本文参考曾昉等<sup>[20]</sup>的方法,选取各省生猪出栏量占

① 篇幅有限,未列出计算结果,感兴趣可向作者获取。

表3 面板门槛模型回归结果

变量	(5)回归系数
门槛值	3.8089
$0 < \ln p_{sz} \leq 3.8089$	0.0509*(0.0280)
$\ln p_{sz} > 3.8089$	-0.0967*** (0.0303)
控制变量	控制
时间固定效应	控制
个体固定效应	控制
门槛效应检验F值	85.48(0.0000)

注:F统计量的P值为bootstrap方法反复抽样1000次得到的概率值,并用该值判断门槛效应的显著性水平;本文将门槛值( $\ln p_{sz} = 3.8089$ )作对数变换,即对应的规模化水平为45.1%。

全国总出栏量的比值予以度量。基于此,本文参考江艇<sup>[30]</sup>、苏斌等<sup>[31]</sup>、项后军等<sup>[32]</sup>和Baron等<sup>[33]</sup>的研究,构建如下机制检验模型:

$$M_{it} = \alpha + \rho WM_{it} + \phi_1 \ln psz_{it} + \beta_0 Wpsz_{it} + \lambda Wm + \ln \beta_1 \ln pop_{it} + \beta_2 \ln gdp_{it} + \beta_3 \ln tc_{it} + \beta_5 (\ln psz_{it})^2 + \beta_6 (\ln psz_{it})^3 + \beta_7 X_{it} + \beta_8 control_{it} + \mu_i + v_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln TZ_{it} = \alpha + \rho W \ln TZ_{it} + \phi_2 \ln psz_{it} + \delta M_{it} + \gamma Wpsz_{it} + \lambda Wm + \ln \beta_1 \ln pop_{it} + \beta_2 \ln gdp_{it} + \beta_3 \ln tc_{it} + \beta_5 (\ln psz_{it})^2 + \beta_6 (\ln psz_{it})^3 + \beta_7 X_{it} + \beta_8 control_{it} + u_i + v_i + \zeta_{it} \quad (4)$$

其中, $M_{it}$ 表示可能的机制变量,包括生猪产业集中度( $\ln gde$ )、绿色技术进步指数( $\ln gef$ )和产业转移( $\ln trs$ ); $\zeta_{it}$ 表示干扰项;其他指标的意义同式(1)。

传统的机制检验假定不存在同时影响机制变量和因变量的不可观测因素,且机制变量不存在测量误差<sup>[34]</sup>。但是,现实中我国生猪产业规模庞大且环节复杂,非洲猪瘟等不确定性事件频发,同时面临日趋多变的内外部环境。因此,传统的机制检验假设在生猪产业相关研究中较难成立。为使研究更贴近生猪产业发展的实际情况,本文选取的空间SUR模型,能够提高机制分析的因果识别能力,具体结果如表5所示。

由表5可知,当生猪产业集中度为机制变量时,式(3)和式(4)中生猪规模化率和生猪产业集中度的系数均显著为负,且式(3)的生猪规模化率的系数绝对值降低。因此,可以判定生猪产业集中度是生猪规模化发展影响生猪碳排放的机制变量。同理,绿色技术进步符合机制变量的判定标准。而当产业转移作为机制变量时,式(3)中生猪规模化率的系数显著为正,式(4)中的生猪规模化率和产业转移显著为负,但其中生猪规模化率的系数绝对值增大。因此,产业转移并不符合机制变量的标准。综上所述,可以得到以下结论:聚集效应和技术进步效应是生猪产业规模化发展影响碳排放的主要路径。因此, $H_2$ 部分成立。

表5 机制检验

变量	(9) $M=\ln gde$		(10) $M=\ln gef$		(11) $M=\ln trs$	
	式(3)	式(4)	式(3)	式(4)	式(3)	式(4)
$\ln psz$	-0.1616*** (0.0155)	-0.0147*** (0.0034)	0.0973** (0.0487)	-0.0153*** (0.0025)	0.0257* (0.0145)	-0.0482** (0.0210)
$M$	—	-0.5333*** (0.0659)	—	-0.0392*** (0.0112)	—	-0.6857*** (0.0161)
$\rho$	0.4428*** (0.0326)	0.2802*** (0.0292)	0.4646*** (0.0345)	0.2655*** (0.0299)	0.3093*** (0.0199)	0.4799*** (0.0307)
BP( $\rho$ )	44.93(0.0000)		25.15(0.0011)		373.1(0.0000)	

## 五、结论与启示

### 1. 结论

本文以2007—2020年中国省际面板数据,综合运用EKC模型、面板门槛模型、中介效应模型和空间SUR模型,系统研究了生猪规模化发展对其碳排放的影响及作用机制,主要结论有:第一,生猪碳排放的空间上呈现“高一高”型聚集和“低一低”型聚集的空间正相关性特征,同时存在显著的空间溢出效应和聚集效应,一个地区的生猪碳排放水平与地理邻近地区的生猪碳排放密切相关。第二,生猪产业规模化发展对生猪碳排放具有显著的非线性关系影响。生猪产业整体规模化发展与生猪碳排放呈现“倒U型”非线性曲线关系,当生猪产业规模化率保持在45.1%以上时,规模化发展可有效促进生猪产业碳减排。小规模生猪养殖占比变动与生猪碳排放表现显著的单调递增关系,而中规模、大规模生猪养殖占比变动与生猪碳排放表现出显著的“倒U”型关系。第三,生猪产业集中度和绿色技术进步是生猪规模化发展影响生猪碳排放的机制变量,聚集效应和技术进步效应是生猪规模化



发展影响碳排放的主要作用途径。

## 2. 启示

基于上述结论,得到启示如下:一是合理规划生猪产业的空间布局,形成减排区域合力。治理生猪碳排放不仅仅是解决局部环境问题,还需要合理规划生猪产业规模化发展的空间布局。应尽快建立起区域联动减排的生态补偿机制,并逐渐构建完备的监测预警平台和信息共享平台,加强区域间的协同减排合作,以确保政策实施的连贯性。同时,还要采取一系列监管与惩罚措施,坚决杜绝“搭便车”“向底线竞争”等分割而治的行为。二是推进适度规模养殖,提高生产效率。需要正视我国并不是养猪强国的事实,因此必须在充分调查的基础上,适度推动生猪产业向中规模和大规模转移,同时不放松对散养和小规模生猪养殖的支持,以避免生猪产业出现“超理性”的产能波动。同时,需要综合考虑各方面因素,统筹规划,高效地配置资源,提高生猪产业的生产效率,从而实现生猪产业绿色低碳转型与规模化发展的“双赢”目标。三是均衡发挥技术进步的引擎作用,并以减排为契机实现生态价值转化。政府要成为生猪产业技术进步的引领者,通过种养结合的核心路径,并遵循“源头减量—过程控制—末端利用”的全产业链技术创新原则,共同推动减排技术(注重环境)和生产技术(注重效率)的均衡发展。同时,以生猪产业绿色低碳转型为契机,利用好碳市场和碳金融工具,提升低碳生猪产品的溢价能力,并将减少的碳排放转为可交易的碳资产,实现生猪产业减排的生态价值转化,助力生猪产业高质量发展。

## 参 考 文 献

- [1] 周晶,青平,颜廷武.技术进步、生产方式转型与中国生猪养殖温室气体减排[J].华中农业大学学报(社会科学版),2018(4):38-45.
- [2] 高海秀,王明利,石自忠.中国生猪产业国际竞争力比较[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2020,20(1):145-152.
- [3] 张利庠,罗千峰,韩磊.构建中国生猪产业可持续发展的长效机制研究[J].农业经济问题,2020(12):50-60.
- [4] 王明利,李鹏程,马晓萍.规模化选择对畜牧业高质量发展的影响及其路径优化——基于生猪养殖规模化视角[J].中国农村经济,2022(3):12-35.
- [5] 汪爱娥,游梦琪,王德海.中国生猪主产区养殖碳排放时空特征与脱钩效应研究[J].农业资源与环境学报,2018,35(3):269-275.
- [6] 励汀郁,熊慧,王明利.“双碳”目标下我国奶牛产业如何发展——基于全产业链视角的奶业碳排放研究[J].农业经济问题,2022(2):17-29.
- [7] 田云,尹恣昊.中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应[J].中国农村经济,2022(3):104-127.
- [8] COCHRANE W W. Farm prices: myth and reality[M]. Minnesota: Univ of Minnesota Press, 1958.
- [9] 罗千峰,张利庠.基于B-N分解法的我国生猪价格波动特征研究[J].农业技术经济,2018(7):93-106.
- [10] 黄炳凯,耿献辉,胡浩.中国生猪养殖规模结构变动是产业政策造成的吗?——基于马尔可夫链的实证分析[J].中国农村观察,2021(4):123-144.
- [11] 李晗,赵敏娟,陆迁.畜禽禁养区政策降低了中国生猪产能吗——基于县域面板数据的实证分析[J].农业经济问题,2021(8):12-27.
- [12] 侯孟阳,姚顺波.异质性条件下化肥面源污染排放的EKC再检验——基于面板门槛模型的分组[J].农业技术经济,2019(4):104-118.
- [13] 董红敏,左玲玲,魏莎,等.建立畜禽废弃物养分管理制度 促进种养结合绿色发展[J].中国科学院院刊,2019,34(2):180-189.
- [14] 谭莹,胡洪涛.环境规制、生猪生产与区域转移效应[J].农业技术经济,2021(1):93-104.
- [15] ROE B, IRWIN E G, SHARP J S. Pigs in space: modeling the spatial structure of hog production in traditional and nontraditional production regions[J]. American journal of agricultural economics, 2002, 84(2): 259-278.
- [16] COPELAND B R, TAYLOR M S. North-south trade and the environment [J]. Quarterly journal of economics, 1994, 109(3): 755-787.
- [17] 梁耀文,王明利.中国生猪碳排放经验解构与动态达峰路径选择[J].农业经济问题,2023(10):101-115.
- [18] SHAO S, YANG L L, YU M B, et al. Estimation, characteristics, and determinants of energy-related industrial CO<sub>2</sub> emissions in Shanghai (China), 1994–2009[J]. Energy policy, 2011, 39(10): 6476-6494.
- [19] 曾昉,李大胜,谭莹.环境规制背景下生猪产业转移对农业结构调整的影响[J].中国人口·资源与环境,2021,31(6):158-166.
- [20] BERA A K, DOĞAN O, TAŞPINAR S. Simple tests for endogeneity of spatial weights matrices [J]. Regional science and urban

- economics, 2018(69):130-142.
- [21] 叶阿忠, 吴继贵, 陈生明. 空间计量经济学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2015.
- [22] CHEN Z H, ZHU H G, ZHAO W C, et al. Spatial agglomeration of china's forest products manufacturing industry: measurement, characteristics and determinants[J]. Forests, 2021, 12(8):1006.
- [23] 余东华, 张明志. “异质性难题”化解与碳排放EKC再检验——基于门限回归的国别分组研究[J]. 中国工业经济, 2016(7): 57-73.
- [24] 张越杰, 闫佳惠. 中国肉牛产业碳排放的达峰假象——基于EKC理论的实证分析与检验[J]. 农业经济问题, 2022(6):93-105.
- [25] ELHORST J P. Spatial econometrics from cross-sectional data to spatial panels[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [26] ARRAIZ I, DRUKKER D M, KELEJIAN H H, et al. A spatial cliff-ord-type model with heteroskedastic innovations: small and large sample results[J]. Journal of regional science, 2010, 50(2):592-614.
- [27] 胡浩, 江光辉, 戈阳. 中国生猪养殖业高质量发展的现实需求、内涵特征与路径选择[J]. 农业经济问题, 2022(12):32-44.
- [28] 雷仙云, 侯思远, 常毅, 等. 中国生猪产业集聚状况及其影响因素分析[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(10):7-9.
- [29] 闫桂权, 何玉成, 张晓恒, 等. 中国规模生猪养殖的绿色技术进步偏向[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11):1811-1822.
- [30] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5):100-120.
- [31] 苏斌, 丁文婷. 产业结构升级与经济高质量发展的互动关系研究——基于VAR模型的实证分析[J]. 新疆财经, 2022(2):29-38.
- [32] 项后军, 张清俊. 中国的显性存款保险制度与银行风险[J]. 经济研究, 2020, 55(12):165-181.
- [33] BARON R M, KENNY D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations.[J]. Journal of personality and social psychology, 1986, 51(6):1173-1182.
- [34] HAYES A F. Beyond baron and kenny: statistical mediation analysis in the new millennium[J]. Communication monographs, 2009, 76(4):408-420.

## Scale Development of the Swine Industry and Carbon Emissions : Facilitator or Inhibitor?

LIANG Yaowen, WANG Mingli

**Abstract** Employing the life cycle methodology to compute provincial carbon emissions from swine spanning from 2007 to 2020, we methodically investigated the ramifications and mechanisms of scale development in the swine industry on carbon emissions. Our inquiry revealed that carbon emissions from swine manifest significant spillover effects and aggregation effects, signifying a close correlation between carbon emissions from swine within a given area and those in the neighboring regions. Additionally, the scale development of the swine industry demonstrates a pronounced “inverted U-shaped” association with carbon emissions from swine, denoting a substantial threshold impact of scale development on carbon emissions from swine. When the scale rate of the swine industry remains at 45.1% or above, scale development can effectively facilitate the reduction of carbon emissions within the industry. Moreover, there is a significant monotonically increasing relationship between the proportion of small-scale swine farming and carbon emissions from swine, whereas the proportion of medium and large-scale swine farming exhibit a notable inverted U-shaped relationship with carbon emissions from swine. Finally, aggregation effects and technological advancements serve as the primary conduits through which the scale development of the swine industry influences carbon emissions from swine. It is advisable to meticulously design the spatial arrangement of the swine industry, develop moderate-scale farming, capitalize on technological advancements to instigate change, and judiciously attain the mutually beneficial objective of mitigating carbon emissions while fostering scale development in the swine industry.

**Key words** carbon emissions from swine; scale development of pig industry; spatial seemingly unrelated regression(SUR) models; threshold effect

(责任编辑:金会平)