

“双碳”目标下生猪养殖业高质量发展路径研究

——基于湖南省的案例实证

杜红梅 王伟玲 陈思畅¹

(湖南农业大学 商学院, 湖南 长沙 410128)

【摘要】: 为实现“双碳”目标, 生猪养殖业“降碳减排”高质量发展是必然选择。基于种养结合的视角, 考虑养殖的非期望产出和粪污资源化利用收益, 运用 SE-SBM 模型和 GML 指数, 测算和分析 2001—2019 年湖南不同规模的环境技术效率和绿色全要素生产率增长, 为“双碳”目标下生猪养殖业高质量发展提供参考。研究发现: 种养结合模式的环境技术效率值均高于非种养结合, 两种模式下环境技术效率由高到低依次为中规模、大规模、小规模; 种养结合模式除了精饲料的冗余量略高于非种养结合, 水及燃料动力费、医疗防疫费冗余量基本差不多, 其他指标的松弛量均低于非种养结合, 中规模在投入、产出方面仍有改进空间; 种养结合与非种养结合模式下, 不同养殖规模绿色全要素生产率具有很大差异; 种养结合的中规模绿色全要素生产率增幅最大, 湖南省中规模养殖更适合发展种养结合型模式。

【关键词】: 生猪规模养殖 种养结合 绿色效率 SE-SBM 模型 GML 指数

【中图分类号】: F323.3; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)07-139-07

2020 年, 我国宣布要在 2030 年前实现“碳达峰”, 在 2060 年前实现“碳中和”。根据 2019 年《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》数据, 2010 年我国动物肠道发酵和动物粪便管理排放总量为 3.54 亿吨二氧化碳当量, 占农业活动排放的 42.8%, 畜禽养殖业是农业的主要碳源。而养殖粪污资源化利用, 可以减少畜禽养殖过程中粪便排放引起的“碳污染”^[1], 畜禽粪污资源化利用是养殖业“降碳”的有效方式, 2021 年中央一号文件《中共中央国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》再次提出推进农业绿色发展, 加强畜禽粪污资源化利用。统筹推进畜牧业发展和畜禽粪污治理, 是落实绿色发展理念, 实现乡村振兴的必然要求。“产业兴旺”是乡村振兴的重点, 也是农业增效、农村进步、农民富裕的基础^[2]。推广种养结合模式是实现农业转型升级、农村产业兴旺、农民安居乐业的必由之路。湖南作为中部农业大省, 生猪养殖业一直是农业的支柱产业, 2020 年生猪出栏量稳居全国第二, 2021 年上半年, 湖南省生猪出栏量 2980.3 万头, 跃升至全国第一^[3]。2019 年, 国务院办公厅印发《关于稳定生猪生产促进转型升级的意见》, 确定到 2022 年生猪养殖业的产业升级应取得重要进展的目标, 其中包括生猪的养殖规模化率达到 58% 左右, 规模养殖场(户)粪污资源化利用率达到 78% 以上。规模化、集约化的生猪规模养殖在提高养殖效率、增加收入的同时, 也产生了大量且集中的排泄物, 未经无害化处理及资源化利用的粪污中含有大量有害物质, 对水资源、土壤和大气环境造成污染^[4]。2017 年, 国务院办公厅颁布《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》, 将构建种养循环发展机制作为畜禽养殖废弃物资源化利用的重要方向。农牧结合、种养循环是中华农耕文化的精髓, 是解决农业生态系统内部物质与能量消纳与再利用的有效途径。提升生产效率是产业发展的永恒主题, 种养结合的资源化利用路径对生猪养殖环境技术效率、绿色全要素生产率产生怎样的影响, 如何提升粪污资源化利用对生猪养殖绿色效率的正效应, 明晰这些问题对生猪养殖业

¹作者简介: 杜红梅, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为生态经济与管理。E-mail: duhongmei@hunau.edu.cn
基金项目: 国家社会科学基金项目“畜禽粪污资源化利用政策的诱导机理及补偿政策研究”(20BJY046)

“降碳减排”和绿色可持续发展具有重要意义。

种养结合就是将禽畜养殖产生的粪便作为有机肥的基础，为种植业提供有机肥来源，而种植业生产的作物又能给畜禽养殖提供食源，通过物质循环利用，提高农业资源利用率^[5]。学者们围绕种养结合模式下畜禽养殖的经济、社会 and 生态效益进行研究。钟珍梅等^[6]构建以沼气为纽带种养结合的循环农业模式，发现该模式经济效益、生态效益均高于单纯的生猪养殖模式。朱冠楠和李群^[7]认为种养结合的生态养殖系统能吸纳大量劳动力，均衡收入分配，促使社会结构和社会分工更加合理，从而产生社会效益。黄显雷等^[8]认为畜禽粪便作为有机肥直接还田利用，可以促进粪污资源化利用，减少农业面源污染。田慎重等^[9]指出畜禽粪便与秸秆等种植业废弃物通过种养结合的循环，降低了成本与资源的投入。环境效率是衡量资源、环境与经济协调发展的重要指标，可以侧面反映经济活动对环境的影响程度^[10]。具体到生猪养殖业的环境效率评价，大体分为随机前沿生产函数(SFA)^[11, 12]和数据包络分析方法(DEA)^[13]两类，李欣蕊等^[14]采用 SFA 和 M 指数相结合的方法，将养猪业碳排放量引入生产效率模型。张晓恒等^[15]运用随机前沿函数和 Kopp 提出的非径向的概念，测算分析包含排泄物中全氮盈余量的生猪环境效率。左永彦等^[16]构建了固定窗式参考集 FWML 指数，将化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)作为非期望产出测算生猪环境全要素生产率。杜红梅等^[17]考虑相同的污染因子，采用方向性距离函数模型，测度不同规模生猪养殖的绿色全要素生产率。王善高和田旭^[18]采用随机前沿函数测算小规模生猪养殖效率，对比发现种养结合养殖户环境效率比普通养殖户高。

通过梳理文献发现：(1)将种养结合与生猪养殖的环境效率结合起来进行的研究非常少；(2)诸多研究将养殖粪污排放量全部当成“非期望产出”，没有考虑一部分粪污通过种养结合途径实现资源化利用的事实，因而高估了生猪养殖的污染量，使得环境效率、绿色全要素生产率失真。(3)基本上都将粪污资源化利用的收益忽略不计，现实中数量庞大的中、小养殖场(户)大多规划了相应的农田消纳面积，生猪粪污的资源化处理会带来一定的显性和隐性收益，考虑这些收益更能体现绿色养殖的内涵。因此，既考虑养殖粪污负外部性价值，又考虑其正外部性价值，使生猪养殖绿色效率评估更客观、全面。因此，本文基于种养结合的视角，考虑污染物 COD、TN、TP 的削减以及粪污资源化利用的收益，运用超效率 SBM 模型，测算 2001—2009 年湖南省不同规模生猪养殖的环境技术效率并与非种养结合模式进行比较；采用 GML 指数测算与对比分析不考虑非期望产出的传统全要素生产率、考虑非期望产出的绿色全要素生产率(即非种养结合模式的绿色全要素生产率)以及考虑非期望产出和粪污资源化利用的绿色全要素生产率(即种养结合模式的绿色全要素生产率)三种情景下的全要素生产率增长，为我国现行的畜禽养殖粪污“种养结合，农牧循环”的治理方略提供实证支持，同时为湖南乃至其他生猪主产省份的生猪养殖产业转型升级和绿色发展提供依据和借鉴参考。

1 模型、指标与数据

1.1 模型

SBM 模型是由 Tone^[19]首先提出来的，在测算决策单元效率时，为了避免多个单元处于前沿面都相对有效而不能区分效率差异的问题，本文采用 SE-SBM 模型对有效单元进行比较和排序。

1.1.1 SE-SBM 模型

参考 Huang 等^[20]对 SE-SBM 模型的改进，设定可变规模报酬下(VRS)包含非期望产出项的超效率模型如式(1)所示。其中， S^- 、 S^g 、 S^b 分别为生猪养殖的投入冗余量、期望产出不足和非期望产出过量， Y^e 和 Y^b 分别为期望产出和非期望产出， λ 代表权重向量， ε 是一个很小的数，为了防止分母为 0。

$$\begin{aligned}
\min \delta &= \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{X_{io}}}{1 - \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{Y_{ro}^g} + \sum_{k=1}^{S_2} \frac{S_k^b}{Y_{ko}^b} \right)} \\
\text{s.t. } X_{io} - \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j X_{ij} + S_i^- &\geq 0, i = 1, \dots, m; \\
\sum_{i=1, j \neq 0}^n \lambda_j Y_{ij} - Y_{ro}^g + S_r^g &\geq 0, r = 1, \dots, S_1; \\
1 - \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{Y_{ro}^g} + \sum_{k=1}^{S_2} \frac{S_k^b}{Y_{ko}^b} \right) &\geq \varepsilon \\
\sum_{i=j}^n \lambda_j = 1, \lambda_j &\geq 0; S_i^- \geq 0, i = 1, \dots, m; \\
S_r^g \geq 0, r = 1, \dots, S_1; S_k^b &\geq 0, k = 1, \dots, S_2
\end{aligned} \tag{1}$$

1.1.2 Global Malmquist-Luenberger (GML) 指数

由于使用传统 Malmquist-Luenberger 指数对包含非期望产出的全要素生产率进行评价时，其生产参考集以生产当期比较为主，容易造成观测后期出现“技术退步”问题，以及对生产要素投入的长期性和效果的滞后性体现不足，且存在不可连续性和线性规划无解的可能。为了避免这一问题对观测后期结果的影响，本文采用基于 SE-SBM 的 GML 指数模型，参考 Oh^[21]、岳立和李文波^[22]的思路，利用方向距离函数，在可变规模报酬下，定义 t 期到 t+1 期的 GML 指数为：

$$\begin{aligned}
&GML_t^{t+1}(x^t, y^t, b^t, g^t; x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1}) \\
&= \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t; g^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})} \\
&= \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t; g^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})} \times \\
&\quad \left[\frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t; g^t)}{1 + D^t(x^t, y^t, b^t, g^t)} \times \frac{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})} \right] \\
&= TEC_{t+1}^t \times TC_{t+1}^t
\end{aligned} \tag{2}$$

式中：D^G(x^t, y^t, b^t; g^t) 为环境方向性距离函数，其生产可能性集不再局限于同一年；GML_t^{t+1}、TEC_{t+1}^t、TC_{t+1}^t 分别表示绿色全要素生产率、技术效率以及技术进步；GML_t^{t+1}、TEC_{t+1}^t、TC_{t+1}^t 指数大于 (小于) 1，则表明考察年度内绿色全要素生产率提高 (降低)、技术效率提高 (降低)、技术进步 (退步)，等于 1 则表示不变。

1.2 指标选取、数据来源及处理

本文将 2001—2019 年分为“十五” (2001—2005 年)、“十一五” (2006—2010 年)、“十二五” (2011—2015 年)、“十三五” (2016—2019 年) 4 个时间段，研究对象为湖南省生猪小规模、中规模、大规模养殖环境技术效率和绿色全要素生产率，生猪的养殖规模根据 2006 年《全国农产品成本收益资料汇编》 (以下简称《资料汇编》) 的统计口径，划分为小规模 (年存栏 30~100 头)，中规模 (年存栏 100~1000 头)，大规模 (年存栏 >1000 头)。

投入指标用养殖环节产生的各项成本费用表示，分为直接投入和间接投入。直接投入包括仔猪重量(千克/头)、用工数量(天/头)、精饲料重量(千克/头)、水及燃料动力费(元/头)、医疗防疫费(元/头)。间接投入(元/头)包括固定资产折旧费、养殖管理、销售及财务上产生的费用，所有指标数据来源于历年《资料汇编》，价值指标均以 2001 年为基期的农业生产资料价格指数进行平减。

期望产出用生猪净产量和粪污资源化利用收益表示。生猪净产量(千克/头)，即生猪出栏体重减去仔猪体重，来源于 2002—2020 年的《资料汇编》；粪污资源化利用收益(元/头)，指对生猪粪尿进行处理，变废为宝，从中获利。主要表现为：作为有机肥还田能节省化肥投入；生产沼气能供暖发电，从而节省动力；利用干粪堆肥生产有机肥出售能获得的利润，减去资源化利用过程中产生的人工成本、能源成本和设备折旧成本等费用。该数据来源于本研究团队实际调研所得，并结合相关文献进行适当调整。

非期望产出用生猪养殖污染物排放量表示，即生猪粪尿经无害化处理或资源化利用后排放到环境中的污染物：化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)。本文以《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》(以下简称《排污系数手册》)中的产排污系数为依据，参照已有的研究，将生猪的养殖周期设定为 199 天，按 1 : 2 的比例分为保育期和育肥期。生猪排污量计算公式如下：

$$P = AD \times COP \times (AW^{0.75} / RW^{0.75}) \tag{3}$$

式中：P 为每头生猪排放的某类污染物；AD 为平均饲养天数；COP 为排污系数；AW、RW 分别为生猪的实际体重和参考体重。平均饲养天数及生猪实际体重来源于《资料汇编》，参考体重来自《排污系数手册》。随着生猪养殖业的发展，环境规制要求的提高，养殖清粪工艺在不断优化，因此不同时期清粪工艺占比各不相同。生猪粪污处理方式比例的来源是：本研究团队从 2011—2015 年对湖南省生猪养殖清粪工艺进行抽样调查，依据抽样调查结果，整理得到了“十二五”期间的粪污不同处理方式的比例，按照“十二五”期间不同清粪方式年度变化规律估算得到“十五”“十一五”及“十三五”的值，如表 1 所示。生猪粪污利用率指标数据的来源是：考虑到种养结合模式对生猪养殖粪污进行资源化利用会减少非期望产出，每个时期粪污利用率水平有所不同，根据相关文献^[23]及咨询湖南畜禽养殖粪污治理专家获得的信息，将湖南“十五”至“十三五”粪污利用率水平分别设定为 50%、60%、70%和 75%，得出污染物的削减比例，最终计算得到种养结合模式下非期望产出。

表 1 湖南省不同时期生猪养殖的粪污处理方式比例

时期	方式	小规模	中规模	大规模
“十五”	干清粪	44.54%	38.28%	50.24%
	水冲粪	50.13%	56.08%	41.77%
“十一五”	干清粪	45.35%	43.82%	58.86%
	水冲粪	50.71%	50.76%	33.74%
“十二五”	干清粪	45.14%	49.52%	66.91%
	水冲粪	51.27%	45.35%	26.44%
“十三五”	干清粪	44.91%	55.22%	74.02%

	水冲粪	51.82%	39.98%	20.17%
--	-----	--------	--------	--------

数据来源：表中数据是根据研究团队抽样调查、相关文献及专家咨询结果整理得到。

本文分别从静态和动态两个视角分析湖南省生猪规模养殖的效率，利用超效率 SBM 模型测算种养结合与非种养结合两种模式下的环境技术效率是一项静态指标。动态方面则是测算与对比分析三种情景下的全要素生产率增长，即：不考虑非期望产出的传统全要素生产率、考虑非期望产出的绿色全要素生产率（即非种养结合模式的绿色全要素生产率）、考虑非期望产出和粪污资源化利用的绿色全要素生产率（即种养结合模式的绿色全要素生产率），三种情景下的投入产出指标选取见表 2。其中传统全要素生产率测算未纳入非期望产出及资源化利用净收益；非种养结合模式的绿色全要素生产率纳入非期望产出，但未纳入资源化利用净收益；而种养结合模式纳入全部指标，但是考虑到种养结合实现粪污资源化利用，有一部分养殖粪污“变废为宝”，减少非期望产出的排放。因此，该模式下非期望产出的排放有所削减，按照上文所设的比例对不同时期规模养殖所产生的非期望产出进行削减。

2 结果与分析

2.1 非种养结合与种养结合模式生猪养殖环境技术效率比较

运用 Matlab 软件测算湖南省生猪规模养殖环境技术效率和全要素生产率，首先计算非种养结合模式、种养结合模式两种情景下湖南省规模生猪养殖的环境技术效率，结果见表 3。

表 2 生猪规模养殖不同情境下全要素生产率指标选取对比

指标选取		传统全要素生产率	非种养结合模式 绿色全要素生产率	种养结合模式 绿色全要素生产率
投入指标	仔猪重量	√	√	√
	用工数量	√	√	√
	精饲料重量	√	√	√
	水及燃料动力费	√	√	√
	医疗防疫费	√	√	√
	间接费用	√	√	√
非期望产出	COD 排放量	×	√	○
	TN 排放量	×	√	○
	TP 排放量	×	√	○
产出指标	生猪净产量	√	√	√
	资源化利用净收益	×	×	√

注：“√”表示当前情境纳入该指标，“×”表示当前情境未考虑该指标，“○”表示选取该指标时按比例进行削减。

表 3 非种养结合与种养结合模式生猪养殖环境技术效率

规模	时期	种养结合模式	非种养结合模式
小规模	“十五”	1.266	1.086
	“十一五”	1.149	1.188
	“十二五”	1.275	1.270
	“十三五”	1.234	1.232
	均值	1.231	1.194
中规模	“十五”	1.702	1.541
	“十一五”	1.209	1.277
	“十二五”	1.276	1.311
	“十三五”	1.180	1.225
	均值	1.342	1.340
大规模	“十五”	1.558	1.498
	“十一五”	1.228	1.289
	“十二五”	1.406	1.331
	“十三五”	1.162	1.181
	均值	1.339	1.325

根据表 3，得出以下结果：(1)从整体情况来看，种养结合模式的环境技术效率值均高于非种养结合模式的环境技术效率值，说明种养结合的生态养殖方式总体上有助于生猪养殖产业的可持续发展。两种模式下的环境技术效率值均表现为：中规模>大规模>小规模，说明湖南作为生猪养殖大省，适合发展中规模、大规模生猪养殖。(2)从时序变化特征看，两种模式的中规模和大规模的环境技术效率波动特征几乎相同。“十五”至“十三五”的环境技术效率呈“下降—上升—下降(趋于稳定)”的趋势，其中“十一五”和“十三五”的环境技术效率值低于其他时段。可能的原因是“十一五”进入到环保政策收紧期，我国从 2006 年开始相继发布了《畜禽场环境质量及卫生控制规范》《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》《畜禽养殖业污染防治技术政策》等环保政策和规范，鼓励大型的养殖场推进沼气工程等基础设施建设，中规模和大规模养殖场投入支出的增加，导致环境技术效率的降低。“十三五”是环境保护政策的爆发期，习近平总书记在 2016 年中央财经领导小组第十四次会议上提出要加快推进畜禽养殖废弃物处理和资源化，确保在“十三五”时期基本解决大规模养殖场粪污处理和资源化问题。随即国务院办公厅印发了《“十三五”生态环境保护规划》，原环保部、原农业部联合印发了《畜禽养殖禁养区划定技术指南》，划定禁养区及落地猪场拆迁政策，2017 年原农业部发布了《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》，支持规模养殖场改进养殖工艺和设备，建设畜禽粪污

集中处理和资源化利用设施。随着 2018 年 8 月非洲猪瘟的爆发，生猪产业遭遇空前大挑战，政府部门制定了一系列稳定生猪生产的政策，发布了更为严格的环境法规《关于进一步规范畜禽养殖禁区划定和管理促进生猪生产发展的通知》，对中规模、大规模的生猪养殖环保督察和防控更加严厉，各养殖场环保控污的运行支出也不断攀升，多因素叠加影响导致“十一五”和“十三五”较前一个五年期环境效率下降。实现生猪养殖业绿色可持续发展，需加强环境规制政策的适宜性，技术规范的可操作性，避免政策和技术要求过高甚至超越实际，给生猪养殖带来负向的生产率波动。

2.2 基于 SE-SBM 的种养结合模式与非种养结合模式的生猪规模养殖松弛变量分析

表 4 是种养结合和非种养结合模式两种情景下湖南生猪规模养殖环境效率所对应的投入、产出松弛量。总体上湖南生猪养殖小规模、中规模、大规模有效决策单元均属于弱 DEA 有效，即松弛量不全为 0，存在投入冗余，非期望产出过量问题。对比两种情景，种养结合模式除精饲料重量的冗余量高于非种养结合外，水及燃料动力费、医疗防疫费冗余量基本差不多，其他指标的松弛量均低于非种养结合，尤其是非期望产出 COD 的排放松弛量大大低于非种养结合，这恰恰是种养结合、农牧循环治理养殖粪污的最大优势所在。当然不可否认的是种养结合模式，特别是中规模养殖在投入环节，如养殖技术、饲养管理仍存在较大的改进空间，非期望产出 COD 的排放仍需进一步削减。同时，要使种养结合模式成为农户主动积极所为，亟待提升畜禽粪污资源化利用的效益和效率。

2.3 生猪养殖绿色全要素生产率与传统全要素生产率对比分析

表 5 是包含非期望产出的绿色全要素生产率与不包含非期望产出的传统全要素生产率计算结果，两种情景下不同养殖规模呈现出不同的特征。其中，小规模的传统全要素生产率增长更高，而中规模绿色全要素生产率增长更高，可能的解释是小规模生猪养殖场(户)粪污集中处理和资源化利用的设施与设备不齐全，加上相关方面的支持资金不足，粪污处理和利用低效率，未能达到资源化利用的有效水平，养殖过程对环境造成一定的污染，是一种以环境损害为代价不可持续的养殖模式；而中规模养殖得益于自身规模经济以及政策支持倾斜，粪污的资源化利用绩效较好，因而中规模养殖属于可持续发展模式，实现了环境友好、资源节约和经济高效。

表 4 种养结合模式与非种养结合模式的生猪规模养殖的松弛变量结果

指标选取		种养结合模式			非种养结合模式		
		小	中	大	小	中	大
投入松弛变量	仔猪重量	2.1723	3.5351	3.2012	2.4326	3.6799	3.1620
	用工数量	0.0717	0.5935	0.0979	0.0865	0.5778	0.0979
	精饲料重量	19.5653	6.2260	2.9512	19.3129	4.8172	3.5421
	水及燃料动力费	1.2112	1.6243	1.9002	1.1708	1.5940	1.8984
	医疗防疫费	0.1395	0.7165	0.8938	0.1271	0.7424	0.8674
	间接投入	0.9186	2.6348	3.3054	0.8879	2.7999	3.2995
产出松弛变量	化学需氧量	0	41.1454	94.9753	0	51.3657	270.1642
	总氮	0	0	0	0	0	0

	总磷	0	0	0	0	0	0
	主产品净产量	0	0	0	0	0	0
	资源化利用净收益	0.0008	0.1274	0.3455			

表 5 考虑非期望产出的生猪养殖绿色全要素生产率与传统全要素生产率

规模	时期	绿色全要素生产率			传统全要素生产率		
		GTFP	TEC	TC	TFP	TEC	TC
小规模	“十五”	1.0294	1.0118	1.0174	1.2895	1.2382	1.0358
	“十一五”	1.0022	0.9993	1.0065	1.0480	1.0274	1.0205
	“十二五”	1.0487	1.0209	1.0306	1.0322	1.0167	1.0154
	“十三五”	0.9340	0.9285	1.0067	0.9904	0.9770	1.0136
	总均值	1.0102	1.3484	1.2044	1.3070	1.2534	1.0371
中规模	“十五”	2.1375	1.9746	1.0970	1.8511	1.3833	1.3382
	“十一五”	1.0458	1.0273	1.0182	0.9966	0.9993	1.0019
	“十二五”	1.0339	1.0167	1.0169	1.0244	1.0209	1.0049
	“十三五”	0.9926	0.9770	1.0158	0.9351	0.9285	1.0081
	总均值	1.2898	1.2382	1.0359	1.2018	1.0830	1.0883
大规模	“十五”	0.9440	1.0078	0.9323	0.9287	0.9847	0.9517
	“十一五”	0.9800	0.9337	1.0424	0.9978	0.9600	1.0428
	“十二五”	1.0388	1.0479	0.9873	1.0439	1.0446	1.0016
	“十三五”	0.8681	0.8798	0.9917	0.8683	0.8798	0.9915
	总均值	0.9691	0.9752	0.9914	0.9722	0.9765	0.9956

注：GTFP 为考虑非期望产出的测算结果，TFP 为不考虑非期望产出的测算结果，TEC、TC 分别表示技术效率和技术进步。此处“十三五”截止到 2019 年。表 6、表 7 同。

2.4 种养结合与非种养结合模式生猪养殖绿色全要素生产率比较分析

根据表 6 可以发现，两种模式下不同养殖规模绿色全要素生产率表现出很大差异：(1) 小规模养殖在种养结合模式下 GTFP 增长不稳定，呈现波动式特征，“十二五”至“十三五”GTFP 增长降幅较大，这从侧面反映出种养结合养殖模式虽然是政府大力

提倡的一种方式，但小规模养殖场正处在发展的瓶颈期，受生猪市场、环境政策等外部因素影响大，开展种养结合前期投入资金量较大，而小规模养殖效益不高，大多处于入不敷出的状态，加上享受政府补贴较少，其种养结合发展的综合效应并未完全释放，导致其绿色生产率增长衰减。(2)种养结合模式对规模养殖的优势已经开始显现，观察期内考虑种养结合的减排效应和粪污资源化利用收益，GTFP 出现了大幅增长。种养结合模式对规模养殖 GTFP 的增长发挥了积极作用，实现了资源节约、环境友好、经济高效的“三赢”。这一方面与规模养殖自身成熟的技术和完善的设备与设施有关，也与政府支持政策倾斜有关，即政府在推进种养结合模式时，把规模养殖场作为重点支持对象。(3)大规模养殖在两种模式下 GTFP 增长均处于衰减状态，但种养结合模式在一定程度上减缓了 GTFP 的衰减，这是由于大规模生猪养殖场拥有成熟的配套粪污资源化利用设施，在开展种养结合过程中提升了资源配置效率，但由于技术上未能取得重大突破，种养结合模式的环境、经济与社会综合效益没能完全释放。

表 6 种养结合与非种养结合模式生猪养殖绿色全要素生产率

规模	时期	种养结合模式			非种养结合模式		
		GTFP	TEC	TC	GTFP	TEC	TC
小规模	“十五”	0.8609	0.9260	0.9144	1.0294	2.5090	1.8174
	“十一五”	0.9850	1.0066	0.9781	1.0022	0.9993	1.0065
	“十二五”	1.0020	0.9986	1.0060	1.0487	1.0209	1.0306
	“十三五”	0.9740	0.9765	0.9979	0.9340	0.9285	1.0067
	总均值	0.9555	0.9769	0.9741	1.0102	1.3484	1.2044
中规模	“十五”	2.1255	1.2235	1.7737	2.1375	1.9746	1.0970
	“十一五”	1.0207	1.0747	0.9584	1.0458	1.0273	1.0182
	“十二五”	1.0546	0.9872	1.0878	1.0339	1.0167	1.0169
	“十三五”	0.9842	0.9744	1.0101	0.9926	0.9770	1.0158
	总均值	1.2962	1.0650	1.2075	1.2898	1.2382	1.0359
大规模	“十五”	1.0873	1.0990	0.9845	0.9440	1.0078	0.9323
	“十一五”	0.9226	0.9232	0.9776	0.9800	0.9337	1.0424
	“十二五”	0.9864	0.9985	0.9876	1.0388	1.0479	0.9873
	“十三五”	0.9409	0.9431	0.9983	0.8681	0.8798	0.9917
	总均值	0.9843	0.9910	0.9870	0.9691	0.9752	0.9914

2.5 种养结合模式不同规模养殖绿色全要素生产率增长及其来源分析

从表 7 可以发现：(1)中规模养殖 GTFP 增长幅度最大，观察期内保持年均增长 29.62%，远高于小规模和大规模，这也说明中规模养殖场在进行种养结合过程中投入到产出的转化率最高，加之中规模养殖是当下政府大力鼓励扶持种养结合的重点对象，

大都规划了一部分农田或配套土地，资源化利用转化的收益率高。而大规模和小规模养殖的 GTFP 增长均呈现出下降趋势，这表明大规模、小规模养殖的非期望产出与粪污资源化收益比例不协调，养殖粪污未得到有效利用。小规模养殖的 GTFP 增长较低，一方面是由于先天不足，粪污资源化利用的规模不经济，导致 GTFP 增长恶化；另一方面它们既没有中规模养殖场(户)粪污资源化可以享受的政策红利，也缺乏大规模养殖场(户)成熟的资源化利用配套设施与设备及平均成本优势，而大规模养殖场虽技术成熟，但并未形成完整的粪污处理产业链模式，养殖各类生产要素受到“高投入—低产出”掣肘，观察期绿色全要素生产率也出现了小幅下降。湖南在中规模养殖场(户)大力推广种养结合模式是在目前生产主体的技术接受能力和经济承受能力条件下的相宜决策。

(2)从 GML 指数的分解项来看，不同的养殖规模呈现出不同的特点：首先，从“十五”开始，小规模养殖的 GTFP 增长经历了很长时间的下降，从分解项来看，技术退步是主要原因，这主要是技术的投入没有及时跟上生猪规模养殖发展的要求，尤其是防疫技术推广滞后是小规模养殖发展的掣肘，技术效率的降低是另一个重要原因。随着由散养向规模养殖转型，管理模式创新滞后，带来的增长动能略显不足，但其在“十二五”期间 GTFP 的增长较高，主要得益于技术进步。“十二五”期间是湖南生猪养殖规模化发展的加速阶段，散户退出或转型小规模养殖，大量建设规模养殖场，同步投产带来了先进的技术和管理经验，加上农村养殖惠农政策的启动以及政府对农村环境的重视，养殖配套粪污处理设施与设备逐步完善，大大提高了资源配置效率和技术效率，使得 GTFP 指数有所提高，“十三五”期间小规模养殖 GTFP 增长呈现后劲不足的态势，尤其是在养殖环境管理方面与严格的环境要求不相适应。

其次，中规模养殖则呈现“L”型的变化特征，“十五”期间出现了明显的峰值，这主要得益于该时期中规模养殖技术进步和管理效率提质，种养结合模式的效果得以充分显现，而“十一五”时期由于复杂的行业内外外部因素，导致技术创新与推广应用方面的停滞，没能延续前期快速增长的势头，“十二五”期间凭借养殖技术上的突破促使该时期 GTFP 增长出现了又一个小高峰，“十三五”前三年面对更加严格的环境管控要求，表现出一定的不适应性，技术及管理效率出现了小幅度下降，却仍是三类规模中 GTFP 增长衰减幅度最小的。

最后，大规模养殖主要呈现出“W”型的波动特征，“十五”期间，技术效率指数处于较高水平，技术效率大幅提高弥补了技术退步造成的效率损失；随后“十一五”期间行业内外外部不利因素叠加使得技术效率值下降，加上技术上没有根本性的突破，造成该时期 GTFP 处于负增长水平；“十二五”时期则伴随技术进步指数和技术效率指数的小幅回升，GTFP 较之“十一五”出现了小幅度的提高，但仍处于负增长状态；“十三五”期间，严格的养殖环境管控要求以及受 2018 年 8 月开始的“非洲猪瘟”的影响，生猪存栏量下降且生猪养殖投入成本提高，很多大型养猪场为了保持盈利，降低了对技术的投入，并伴随着省内外市场供应不协调，使得该时期大规模养殖 GTFP 增长出现下降。总的来说，观测期内大规模养殖技术效率和技术进步处于低效率水平，未形成与环境保护相适应的 GTFP 增长。

3 结论与建议

本文基于种养结合的视角，考虑生猪养殖的非期望产出以及粪污资源化利用的收益，运用 SE-SBM 模型和 GML 指数，测算了 2001—2019 年湖南省不同规模养殖的环境技术效率和绿色全要素生产率增长，得出如下结论：(1)种养结合模式因对粪污进行资源化利用，其环境技术效率要高于非种养结合模式，是一种可持续的发展模式，两种模式的环境效率值由高到低依次为中规模、大规模、小规模；由于受到国家环保政策、生猪行业周期性波动以及疫情等多因素叠加影响，使得两种模式的环境技术效率呈现波动性特征。对于环境效率最具优势的中规模养殖，种养结合模式下如何节约投入、削减非期望产出 COD 的排放、提高资源化利用净收益方面仍有较大改进空间。(2)种养结合与非种养结合两种模式下，不同养殖规模绿色全要素生产率具有很大差异：小规模养殖在非种养结合模式下 GTFP 出现上升，在种养结合模式下 GTFP 增长呈现波动下降特征，由技术停滞和技术低效率共同导致。种养结合模式的 GTFP 增长优势对中规模养殖已经显现，观察期内 GTFP 出现了大幅增长，年均增长 29.62%，增长动能主要来自技术进步。两种模式下大规模养殖 GTFP 增长均处于衰减状态，虽然种养结合模式一定程度上减缓了 GTFP 的衰减，但由于技术上未能取得重大突破，使环境、经济与社会的综合效益没能完全释放。

基于研究结论，提出以下建议：(1)构建养殖粪污资源化利用的全链条支持政策体系，促进资源化产品的价值实现和资源化利用技术的创新。在前期支持养殖户粪污处理设备与设施建设的基础上，今后支持政策重点应该以资源化产品的利用和资源化利用技术创新为重点，即一方面构建种植户有机肥及沼液、沼渣使用的激励机制，让“种”与“养”衔接更加便捷、顺畅，使资源化产品的价值充分彰显；另一方面政府支持养殖粪污资源化利用先进工艺技术研发，加快粪污资源化利用技术规范的制定和落地实施，破除资源化利用的技术和成本障碍，使资源化利用净收益最大化和非期望产出最小化，实现种养结合模式环境技术效率最优化、绿色全要素生产率增长目标。(2)建立并完善资源化利用配套服务体系。一方面是加强对养殖户资源化利用设施与设备运行维护的技术指导，发挥其最大化效应，间接提高资源化利用净收益；另一方面加强资源化产品使用的服务与技术指导，让农户充分感受到资源化产品的价值和使用便利性。通过加强配套化服务体系的建立和完善，充分发挥技术激励作用，可以更好地促进粪污的资源化利用，提升生猪养殖绿色效率，真正实现农业强、农村美、农民富。(3)加强农村环境规制政策和技术规范的适宜性和可操作性，增强支持政策的包容性，提升小规模绿色效率。

表 7 2001—2019 年湖南省种养结合模式生猪规模养殖 GML 指数及其分解

年份	小规模			中规模			大规模		
	GTFP	TEC	TC	GTFP	TEC	TC	GTFP	TEC	TC
2001—2002	0.7620	1.0877	0.7005	2.8626	1.0829	2.6434	0.7934	0.9012	0.8804
2002—2003	1.4827	1.2607	1.1761	2.2913	1.3792	1.6613	1.2495	1.2384	1.0090
2003—2004	0.6682	0.7850	0.8513	1.8267	1.4200	1.2864	1.1059	1.1637	0.9503
2004—2005	0.5307	0.5707	0.9298	1.5214	1.0119	1.5036	1.2003	1.0927	1.0985
2005—2006	0.9463	1.0579	0.8945	0.9521	1.0248	0.9291	0.4791	0.7374	0.6497
2006—2007	1.0836	1.0798	1.0035	1.1338	1.0984	1.0323	1.3832	1.1119	1.2439
2007—2008	1.1073	1.0500	1.0546	1.0192	0.9239	1.1032	0.7982	0.7966	1.0020
2008—2009	0.8721	0.8977	0.9714	1.1590	1.1293	1.0263	0.8846	0.8551	1.0345
2009—2010	0.9155	0.9475	0.9663	0.8392	1.1970	0.7011	1.0680	1.1151	0.9577
2010—2011	1.0384	1.0379	1.0005	1.1790	0.8418	1.4005	0.9717	1.0501	0.9254
2011—2012	0.9517	0.9004	1.0569	1.0614	1.1712	0.9062	0.9445	0.9296	1.0161
2012—2013	1.0094	1.0959	0.9211	0.9474	0.8345	1.1354	1.0708	1.0362	1.0334
2013—2014	0.9562	0.9591	0.9970	1.0474	1.0578	0.9902	0.8531	0.8904	0.9581
2014—2015	1.0543	0.9999	1.0544	1.0379	1.0309	1.0068	1.0917	1.0864	1.0049
2015—2016	0.9483	0.9887	0.9591	0.9551	0.9354	1.0211	0.8990	0.9402	0.9561
2016—2017	0.9736	0.9421	1.0335	0.9640	0.9627	1.0014	0.9283	0.8802	1.0546
2017—2018	0.9928	0.9939	0.9989	1.0149	0.9969	1.0180	0.9166	0.9512	0.9636
2018—2019	0.9812	0.9812	1.0001	1.0027	1.0027	0.9999	1.0197	1.0009	1.0188

总均值	0.9555	0.9769	0.9741	1.2962	1.0650	1.2075	0.9843	0.9910	0.9870
-----	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

注：GML 测算值为 GTFP 指数；TEC、TC 分别代表 TFP 分解项的技术效率和技术进步指数。

参考文献:

- [1] 闵继胜, 周力. 组织化降低了规模养殖户的碳排放了吗——来自江苏三市 229 个规模养殖户的证据[J]. 农业经济问题, 2014(9): 35-42.
- [2] 李周, 温铁军, 魏后凯, 等. 加快推进农业农村现代化: “三农”专家深度解读中共中央一号文件精神[J]. 中国农村经济, 2021(4): 2-20.
- [3] 湖南省人民政府. 湖南生猪产能恢复正常上半年全省地方猪产业产值增加 100 亿元[EB/OL]. (2021-08-13). http://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/zwdt/202108/t20210813_20321332.html.
- [4] 宣梦, 许振成, 吴根义, 等. 我国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018(2): 126-132.
- [5] 郭庆海. “粮改饲”行动下的生态关照——基于东北粮食主产区耕地质量问题的讨论[J]. 农业经济问题, 2019(10): 89-99.
- [6] 钟珍梅, 黄勤楼, 翁伯琦, 等. 以沼气为纽带的种养结合循环农业系统能值分析[J]. 农业工程学报, 2012(14): 196-200.
- [7] 朱冠楠, 李群. 明清时期太湖地区的生态养殖系统及其价值研究[J]. 中国农史, 2014(2): 133-141.
- [8] 黄显雷, 赵俊伟, 方琳娜, 等. 基于种养结合的畜禽养殖环境承载力研究——以舒兰市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020(4): 34-42.
- [9] 田慎重, 郭洪海, 姚利, 等. 中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J]. 农业工程学报, 2018(S1): 123-131.
- [10] 邹洁, 项朝阳. 中国大陆畜牧业环境效率测算及影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2016(1): 90-96.
- [11] Key N, McBride W D, Mosheim R. Decomposition of total factor productivity change in the U.S. hog industry[J]. Journal of Agricultural and Applied Economics, 2008, 40(1): 137-149.
- [12] Ma H Y, Rae A N, Huang J K. Livestock productivity in China: Data revision and total factor productivity decomposition[R]. Hamilton: Massey University, 2002.
- [13] 甘林针, 王雨林, 陈蓉, 等. 基于 DEA 模型的不同饲养规模生猪生产效率分析——以四川省为例[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(16): 23-26.
- [14] 李欣蕊, 齐振宏, 曹丽红. 我国养猪业环境全要素生产率测算与分解研究——基于 SFA-Malmquist 方法[J]. 中国农业大学学报, 2015(4): 272-280.

-
- [15] 张晓恒, 周应恒, 张蓬. 中国生猪养殖的环境效率估算——以粪便中氮盈余为例[J]. 农业技术经济, 2015(5): 92-102.
- [16] 左永彦, 彭珏, 封永刚. 环境约束下规模生猪养殖的全要素生产率研究[J]. 农村经济, 2016(9): 37-43.
- [17] 杜红梅, 王明春, 胡梅梅. 不同规模生猪养殖绿色全要素生产率的时空差异——基于非径向、非角度 SBM 生产率指数模型[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2019(2): 16-23.
- [18] 王善高, 田旭. 种养结合能提高小规模生猪养殖的环境效率吗?——基于江苏省生猪养殖户的分析[J]. 中国农业大学学报, 2021(2): 199-210.
- [19] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [20] Huang J H, Yang X G, Cheng G, et al. A comprehensive eco-efficiency model and dynamics of regional eco-efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67: 228-238.
- [21] Oh D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index[J]. Journal of Productivity Analysis, 2010, 34(3): 183-197.
- [22] 岳立, 李文波. 环境约束下的中国典型城市土地利用效率——基于 DDF-Global Malmquist-Luenberger 指数方法的分析[J]. 资源科学, 2017(4): 597-607.
- [23] 沈玉英. 畜禽粪便污染及加快资源化利用探讨[J]. 土壤, 2004(2): 164-167.