

梁盼,陈轩,施龙中,等.稻-鸭-虾综合种养模式与其他稻田种养模式效率比较[J].华中农业大学学报,2025,44(3):26-37.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.004

## 稻-鸭-虾综合种养模式与其他稻田种养模式 效率比较

梁盼<sup>1</sup>,陈轩<sup>1,2</sup>,施龙中<sup>1</sup>,李荣强<sup>1</sup>

1. 华中农业大学经济管理学院,武汉 430070; 2. 华中农业大学双水双绿研究院,武汉 430070

**摘要** 为探究不同稻田种养模式的效率差异及影响因素,基于2023年湖北省的实地调研数据,构建“效率评价-影响因素”框架,采用微观农户调研数据与气候数据相结合的方法,通过SFA和SBM-DEA模型对不同稻田种养模式的技术效率和生态效率分别进行测算,并比较其效率差异,探讨不同模式的优劣。研究结果显示:(1)在水稻单作、稻-虾、稻-鸭和稻-鸭-虾4种稻田种养模式中,稻-鸭-虾模式的技术效率和生态效率均表现突出,分别为0.760和0.545;而稻-鸭模式的技术效率及稻-虾模式的生态效率最低,分别为0.581和0.323。(2)户主性别、农业保险、经济发展水平、极端气温以及平均降雨量等因素抑制了技术效率的提升,而户主年龄、农业补贴、家庭总收入和无人机使用则促进技术效率的提高。(3)户主年龄和高温热浪指标显著提高了生态效率;而户主性别、家庭总人口数、家庭总收入、无人机使用情况、经济发展水平、极端低温和干旱等因素则抑制了生态效率的提升。(4)相比水稻单作模式,稻-虾模式的技术效率和生态效率显著降低0.053和0.178;而稻-鸭-虾模式的技术效率比水稻单作模式高0.163。研究表明,稻-鸭-虾模式在技术效率和生态效率方面均表现最佳,具有较高的推广潜力。

**关键词** 稻田种养; 技术效率; 生态效率; 极端气候

**中图分类号** F326.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0026-12

随着我国粮食供给保障能力的不断提升,居民食物消费结构也随之发生变化。在党的二十大报告中,习近平总书记明确指出“要树立大食物观,发展设施农业,构建多元化食物供给体系”<sup>[1]</sup>。这一重要论述为新时代国家粮食安全体系的构建提供了新的方向。然而,近年来我国传统农产品行业面临诸多挑战。有效耕地面积的持续减少<sup>[2]</sup>以及气候变化的加剧<sup>[3]</sup>,对各类食物的有效供给构成威胁,部分农产品仍依赖进口,国内自给量略有不足<sup>①</sup>,传统农产品行业亟需实现转型升级。在此背景下,稻田综合种养模式因其低成本、高效益、增产增收等优势,日益受到关注。湖北省稻田综合种养在我国处于领先地位。截至2023年稻田综合种养面积已达55.97万hm<sup>2</sup>,水产品产量达102.3万t,总产值突破1 000亿元(湖北省农业农村厅:<https://nyt.hubei.gov.cn/bmdt/>

[http://mtksn/202405/t20240530\\_5221238.shtml](http://mtksn/202405/t20240530_5221238.shtml))。目前,湖北已探索出稻-虾、稻-蛙、稻-鸭、稻-鸭-虾等十余种“稻+”创新组合生产模式。然而,不同模式在经济效益和生态效益上的表现存在差异,部分地区由于经验不足<sup>[4]</sup>、技术规范性缺乏<sup>[5]</sup>以及过度追求单一品种产量的逐利行为<sup>[6]</sup>,使得稻田综合种养模式在部分地区未能实现预期的综合效益。尽管稻田综合种养模式已被广泛推广,但现有研究较少系统比较不同模式的技术效率和生态效率。部分模式可能在短期经济收益上占优,而另一些模式可能在生态可持续性方面更具优势。因此,科学评估不同模式的技术效率与生态效率,不仅有助于优化种养模式选择,也能为政府农业政策提供科学依据。为此,本研究以湖北省为例,重点分析水稻单作与3种主要综合种养模式(稻-虾、稻-鸭、稻-鸭-虾)的技术效率和生

收稿日期:2024-08-19

基金项目:湖北省哲学社会科学重大项目(23ZD115);湖北洪山实验室重大项目(2021hszd002);湖北省软科学面上项目(2024EDA107);

华中农业大学经济管理学院交叉研究项目培育专项(2023JGJC04);中央高校基本科研业务费专项(2023JGLW06)

梁盼,E-mail:panliang@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:陈轩,E-mail:xuan.chen@mail.hzau.edu.cn

① 根据国家统计局数据平台和布瑞克农业大数据平台2020—2022年水稻、大米和水产品等农产品进出口数据。

态效率,并探讨不同模式的优劣,为我国稻田综合种养模式的优化发展提供实证支持。

技术效率是衡量生产力的重要指标<sup>[7]</sup>,反映了生产者利用现有技术的有效程度,是生产率分析中常用的指标之一<sup>[8]</sup>。Dwiyana等<sup>[9]</sup>率先独立测算了稻-鱼系统中的水稻和单一稻作系统的技术效率,结果显示稻-鱼模式下稻作的技术效率相对较低。然而,Rahman等<sup>[10]</sup>认为独立计算缺乏科学性,主张将综合种养作为一个系统,并采用随机输入距离函数(stochastic input distance function)对孟加拉国“Gher”(稻-虾-鱼)系统技术效率进行测算,其平均技术效率约为0.68。随后,Rahman等<sup>[11]</sup>进一步评估了“Gher”系统的全要素生产率,发现尽管全要素生产率有所提高,但技术效率却呈下降趋势。此外,其他研究对比了稻-鱼共作和稻-鱼轮作的养殖效率,结果显示前者具有更高的技术效率,而后者在分配效率中表现更优<sup>[12]</sup>。生态效率则指在经济生产过程中,在减少环境污染和节约自然资源的前提下,以既定投入实现最大产出<sup>[13]</sup>。相较于单一种植水稻,稻田综合种养模式通常具有更高的生态效益<sup>[14]</sup>。一方面,基于互利共生理论<sup>[15]</sup>,综合种养能够减少饲料、化肥和农药等的使用<sup>[16]</sup>,在减排增效<sup>[17]</sup>和减轻面源污染<sup>[18]</sup>方面表现出显著优势;另一方面,稻田综合种养有助于提升生态系统服务价值<sup>[19]</sup>,优化土壤结构、提升土壤养分含量<sup>[20]</sup>,调节土壤微生物群落多样性<sup>[14]</sup>,减少水稻草害发生<sup>[21]</sup>,并改善水生生物生存所需的水体环境<sup>[22]</sup>。

当前关于稻田种养模式的技术效率和生态效率影响因素的研究较为有限,多数研究仍集中于水稻单作。现有研究将影响因素大致归纳为3类:第一类是人口统计学特征。性别在决策过程中具有重要作用,男性通常在家庭经营管理中参与度更高,因此表现出更高的生产效率<sup>[23]</sup>。教育水平对技术效率具有显著的提升作用,受教育程度越高,农户的信息处理能力越强,从而更有利于从事农业生产<sup>[10]</sup>。此外,家庭农业决策者的年龄同样对水稻技术效率具有显著影响<sup>[24]</sup>。第二类是家庭特征。研究表明,家庭人口规模与技术效率呈正相关关系<sup>[16]</sup>,而家庭的非农收入比重<sup>[25]</sup>、性别分工<sup>[26]</sup>以及农户负债情况<sup>[25]</sup>等因素在一定程度上影响农业技术效率和生态效率水平。第三类是农业生产情况。土地流转被认为能够显著促进技术效率提升<sup>[27]</sup>,而技术培训对农户生产效率亦具有促进作用<sup>[26]</sup>。此外,气候变化加剧了诸如海平面上升、飓风、盐水入侵、洪水和干旱<sup>[3]</sup>等极端天气

事件,可能会对稻田种养模式的可持续发展产生深远影响<sup>[28]</sup>。

通过文献梳理发现,现有研究存在一定的局限性。首先,在技术效率测算方面,现有关于稻田种养模式的效率研究较少,且主要集中在孟加拉国、越南等地,对中国稻田种养模式技术效率的研究较为缺乏。其次,在生态效率方面,现有研究主要探讨稻田综合种养模式的整体生态价值或某些生态指标的变化,然而整体生态价值测度所需数据量较大、计算困难<sup>[29]</sup>,单一指标的测算稍显片面、缺乏综合考察<sup>[13]</sup>。且尚未发现有研究直接使用生态效率指标测算并比较分析不同稻田种养模式。再次,已有研究主要聚焦于单一模式,而此类研究无法揭示不同模式在“高效”与“绿色”之间的平衡点,缺乏对不同模式之间效率差异的系统性分析,特别是对经济效益与生态效益的权衡考虑较少。最后,气候变化对稻田种养模式具有显著影响,但具体影响机制和影响程度尚未有明确的结论。

基于此,本研究构建了“效率评价-影响因素”的分析框架,以湖北省稻田种养模式为研究对象,采用微观农户调研数据与气候数据相结合的方法,测算不同模式的技术效率与生态效率,并进一步探讨其影响因素,旨在揭示湖北省不同稻田种养模式的技术效率与生态效率现状及其差异,填补区域实证研究的空白。同时,研究分析气候因素对技术效率和生态效率的影响,拓展环境约束下的效率研究维度,旨在为农业可持续发展提供科学依据。

## 1 模型设定、数据来源及变量说明

### 1.1 模型设定

1)随机前沿生产函数模型。本研究使用SFA模型进行技术效率测算,通过极大似然法估计出各个参数值,并将测算出的技术无效率项的条件期望值作为技术效率值来进行测算<sup>[30]</sup>。具体模型设定如下:

$$Y_i = f(X_i; \beta) \exp(\epsilon = V_i - U_i) \quad (1)$$

对式(1)两边同时取对数,则有:

$$\ln Y_i = \ln f(X_i; \beta) + \epsilon (\epsilon = V_i - U_i) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $i$ 表示不同农户个体, $Y_i$ 表示第*i*个农户在某种稻田种养模式下的实际总产出; $f(X_i; \beta)$ 为前沿生产函数,是现有技术条件下的最优产出; $X_i$ 代表第*i*个农户在该种养模式下的土地、化肥、农药、机械、劳动力、除草杀虫剂等生产要素投入向量; $\beta$ 为待估参数; $\epsilon$ 为复合扰动项,由 $V_i$ 和 $U_i$ 组成,相互独

立。其中,  $V_i$  为随机误差项, 由统计误差及不可控因素造成, 服从正态分布;  $U_i$  为非负的管理误差项, 代表技术无效率, 服从截尾正态分布。基于 SFA 模型的设定, 可以得出技术效率值的计算公式如下:

$$T_i = \exp(-U_i) = \frac{E(Y_i|U_i, X_i)}{E(Y_i|U_i=0, X_i)} \quad (3)$$

式(3)中,  $T_i$  表示第  $i$  个农户该稻田种养模式下的生产技术效率值, 取值范围为  $[0, 1]$ , 技术效率值越趋近于 1 代表技术效率越高, 反之则表示技术效率越低;  $E(Y_i|U_i, X_i)$  表示实际产出;  $E(Y_i|U_i=0, X_i)$  表示不存在技术无效率情况下的最大可能产出。

在运用 SFA 模型之前, 首先要确定使用哪种形式的生产函数, 本研究使用更符合生产实际、灵活性较强的超越对数形式的生产函数, 该形式的生产函数同时也能反映不同投入要素对产量的联合影响<sup>[31]</sup>, 具体模型形式如下:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \quad (4)$$

$$\ln Y_i = \beta_0 + \sum_j \beta_j \ln x_{i,j} + \frac{1}{2} \sum_j \sum_k \beta_{jk} \ln x_{i,j} \ln x_{i,k} + V_i - U_i \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $Y_i$  代表第  $i$  个农户该稻田种养模式下的实际总产出;  $x_1 \sim x_7$  分别表示土地、种子、化肥、除草杀虫剂、机械、劳动力以及其他生产要素的投入量;  $\beta_0$  为常数项,  $\beta_j, \beta_{jk}$  代表产出弹性;  $V_i$  为随机误差项,  $U_i$  代表技术无效率项。

2) SBM-DEA 模型。本研究基于 Tone<sup>[32]</sup> 提出的非期望产出 SBM-DEA 模型测算农户稻田种养模式的生态效率, 该方法很好地解决了传统 DEA 径向模型中存在的缺陷, 使得效率最大化<sup>[33]</sup>。在农业生产的各个环节中, 农业化学用品投入、农业废弃物处理等会对环境造成一定的污染, 存在非期望产出。本研究借鉴赵雯歆等<sup>[34]</sup> 的研究, 建立如下模型:

$$\min p = \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_n^x}{x_{n0}}}{1 + \frac{1}{M+1} \left( \sum_{m=1}^M \frac{s_m^y}{y_{m0}} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^u}{u_{i0}} \right)} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k x_{nk} + s_n^x = x_{n0}, & n=1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^K z_k y_{mk} - s_m^y = y_{m0}, & m=1, 2, \dots, M \\ \sum_{k=1}^K z_k u_{ik} - s_i^u = u_{i0}, & i=1, 2, \dots, I \\ \sum_{k=1}^K z_k = 1 \\ z_k \geq 0; s_n^x \geq 0; s_m^y \geq 0; s_i^u \geq 0 \end{cases}$$

其中, 在该样本中稻田种养共  $k$  个决策单元,  $n$  代表共  $n$  类投入要素,  $m$  代表共  $m$  类期望产出,  $i$  代表共  $i$  类非期望产出, 相应地,  $x_{n0}$  为投入,  $y_{m0}$  为期望产出,  $u_{i0}$  为非期望产出。  $p$  表示为稻田种养模式的生态效率, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $z_k$  表示权重系数;  $s_n^x, s_m^y, s_i^u$  为松弛变量, 分别代表稻田种养模式中生产投入的冗余、期望产出的不足以及非期望产出的冗余;  $x_{nk}, y_{mk}, u_{ik}$  分别表示各决策单位的生产投入、期望产出和非期望产出。

## 1.2 数据来源

本研究的数据来自笔者所在课题组 2023 年 7—8 月在湖北省十堰市、荆州市和襄阳市等地开展的实地调研, 这些地区是湖北省黑米的主要种植区。调研采用分层随机抽样的方法, 具体实施过程如下: 第一步, 选取长江中下游具有代表性的湖北省作为主要调查区域。第二步, 基于湖北省内稻田综合种养模式的地理分布和农业经营特点, 选定黄石、荆州、十堰、天门、襄阳 5 个市作为样本地区。第三步, 在每个市中随机选取稻田综合种养推广应用程度较高的 4 个乡镇。第四步, 从每个乡镇中随机抽取 1~2 个村, 并在每个村中随机抽取 10~15 户农户为最终调查对象。调研内容涵盖人口统计学特征、稻田种养模式的产出投入情况、农业新技术的采纳情况以及户主环保意愿等信息。本次调研共收集了 512 户农户 2020—2022 年的面板数据, 在剔除缺失值严重的样本后, 最终获得有效样本 493 份 (共 1 479 个观测值), 样本回收有效率为 96.29%。

由于样本期内部分农户的种养模式存在变动, 例如, A 农户在 2020 年采用水稻单作种植模式, 2021 年转为稻—鸭, 2022 年又调整为稻—鸭—虾模式。因此, 在测算效率时, 本研究将每个农户每年的投入产出视为一个独立的决策单元进行分析。在剔除关键变量缺失严重、存在异常值、极端值及答案不一致的样本后, 最终纳入效率分析的有效决策单元为 1 167 个。

## 1.3 变量选取

1) 技术效率和生态效率测度指标。在技术效率测算中, 本研究选取各种种养模式下的所有农产品产量作为产出指标。其中, 水稻单作模式的产出指标为水稻产量, 而综合种养模式的产出指标包括水稻产量以及水产品或畜产品的总产量。投入要素则涵盖土地、种苗、化肥、农药、机械、劳动和其他生产要素。



在生态效率测算中,期望产出和投入指标与技术效率测算保持一致。而非期望产出则以稻田种养模式生产过程中所产生的面源污染排放量衡量。农业面源污染排放数据的计算依据生态环境部发布的《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》(中华人民共和国生态环境部:https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202106/t20210618\_839512.html),主要包括总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD),具体如表 1 所示。需要说明的是:(1)种植业污染排放主要指在降水或灌溉水的作用下,土壤和肥料中的氮、磷溶解或悬浮于径流水中,并随径流迁移出田块所导致的农田氮、磷流失,本研究仅考虑水稻种植过程中产生的流失量;(2)由

于系数手册中未包含肉鸭的产排污系数,本研究借鉴曹云等<sup>[35]</sup>研究成果,采用肉鸭全饲养期各污染源的 平均排污系数进行计算,其中每只肉鸭平均饲养周期为 42 d,平均体质量为 3.37 kg;(3)种植业和水产养殖业的排污系数均参照湖北省相关标准。表 2 为各投入产出指标的说明及描述性统计分析。

| 表 1 面源污染排污系数   |           |       |       |
|--|-----------|-------|-------|
| Table 1 Emission coefficients for non-point source pollution |           |       |       |
| 污染来源 Source of pollution                                     | 化学需氧量 COD | 总磷 TP | 总氮 TN |
| 种植业/(kg/hm <sup>2</sup> ) Planting sector                    | /         | 0.79  | 6.68  |
| 水产养殖业/(kg/t) Aquiculture sector                              | 28.36     | 0.10  | 1.35  |
| 肉鸭/[g/(d·只)] Broiler duck                                    | 4.54      | 0.19  | 0.40  |

| 表 2 稻田种养模式效率测算指标   |                                 |  |             |           |            |            |
|--|---------------------------------|--|-------------|-----------|------------|------------|
| Table 2 Efficiency measurement indicators for rice paddy farming modes |                                 |  |             |           |            |            |
| 指标性质<br>Characteristic<br>of metrics                                   | 指标选取<br>Selection of indicators | 指标说明<br>Description of indicators  | 平均值<br>Mean | 标准差<br>SD | 最小值<br>Min | 最大值<br>Max |
| 投入指标<br>Input<br>indicators  | 土地投入<br>Land inputs             | 稻田种养模式总面积/hm <sup>2</sup><br>Total area of rice field integrated farming model | 1.02        | 1.18      | 0.06       | 6.67       |
|  | 种苗投入<br>Seed inputs             | 稻田种养模式种苗投入/kg<br>Total seed inputs of rice field integrated farming model      | 118.67      | 178.06    | 1.50       | 1 200      |
|  | 化肥投入<br>Fertilizer inputs       | 所有化肥投入/kg<br>Total fertilizer inputs   | 1 453.74    | 1 856.13  | 40         | 10 500     |
|  | 农药投入<br>Pesticide inputs        | 除草杀虫过程中的农药投入/元<br>Pesticide inputs during weed and pest control processes      | 1 450       | 2 160     | 0          | 17 330     |
|  | 机械投入<br>Machinery inputs        | 所有机械投入/元<br>All machinery inputs   | 2 670       | 4 530     | 0          | 28 500     |
|  | 劳动投入<br>Labor inputs            | 总劳动投入,包括自家和雇佣/人<br>Total labor input, inclusive of family and hired            | 3.68        | 5.59      | 1          | 52         |
|  | 其他投入<br>Other inputs            | 除上述投入之外的其他投入/元<br>Other inputs apart from the aforementioned inputs            | 4 050       | 16 830    | 0          | 310 000    |
| 期望产出<br>Desired output   | 总产量<br>Total outputs            | 稻田种养模式总产出/kg<br>Total output of rice field integrated farming model            | 8 574.18    | 8 314.59  | 18.76      | 30 839.79  |
| 非期望产出<br>Undesired<br>outputs  | 化学需氧量<br>COD                    | 总化学需氧量/kg<br>Total chemical oxygen demand                                      | 10.33       | 59.52     | 0          | 1 042.45   |
|  | 总磷<br>TP                        | 总磷污染排放量/kg<br>Total phosphorus pollution emission                              | 10.68       | 12.83     | 0.58       | 89.54      |
|  | 总氮<br>TN                        | 总氮污染排放量/kg<br>Total nitrogen pollution emission                                | 1.25        | 1.47      | 0.07       | 8.24       |

注:在实际分析中,上述指标均为对数形式。Note: In the actual analysis, the above indicators are all in logarithmic form.

2)影响因素指标。借鉴已有研究<sup>[36-38]</sup>,本研究从以下 2 个方面选择影响因素指标:第一,户主个人特征。作为家庭经营的主要决策者,户主的个人特征对农业生产的技术效率具有重要影响。具体包括:户主性别、年龄、受教育年限、健康状况以及环境保护意愿等;第二,农户家庭特征。主要涉及家庭总人口数、家庭年总收入、农业保险、农业补贴以及种植过程中无人机的使用情况等。

此外,本研究还将地区经济发展水平和极端气候纳入影响因素指标体系。(1)地区经济发展水平。

采用调研户所在村的年平均夜间灯光强度作为衡量指标,数据来源于NASA的VNP46年度夜间灯光数据集(VNP46A4)。参照胡雪梅等<sup>[39]</sup>的做法,以该村对应栅格的灯光总强度除以非零栅格数,表示该村年平均夜间灯光强度。(2)极端气候因素。采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境信息中心(NCEI)提供的全球气象观测站点数据,并匹配至距离调研村最近的气象站点。极端气候指标包括:高温热浪(参照中国气象局的定义:[https://www.cma.gov.cn/kppd/kppdsytj/201307/t20130705\\_218624.html](https://www.cma.gov.cn/kppd/kppdsytj/201307/t20130705_218624.html))、极端低温天气(借鉴李力等<sup>[40]</sup>的定义)、暴雨(借鉴尹红等<sup>[41]</sup>相关定义)、干旱(借鉴李力等<sup>[40]</sup>的定义)以及年平均降水量。影响因素的相关说明及描述性统计分析详见表3。

表 3 各变量定义及描述性统计分析

Table 3 Definition of variables and descriptive statistical analysis

| 变量类别<br>Category of variables                       | 变量<br>Variables                                  | 变量说明<br>Descriptions of variables  | 样本量<br>Sample size | 平均值<br>Mean | 标准差<br>SD | 最小值<br>Min | 最大值<br>Max |
|---|--|--|--------------------|-------------|-----------|------------|------------|
| 效率指标<br>Efficiency indicators                       | 技术效率<br>Technical efficiency                     | 通过SFA方法测算出来的技术效率,取值范围为[0,1]<br>The technical efficiency measured by the SFA method ranges between [0,1]  | 1 167              | 0.59        | 0.17      | 0          | 0.94       |
|   | 生态效率<br>Ecological efficiency                    | 通过SBM-DEA方法测算出来的生态效率,取值范围为[0,1]<br>The ecological efficiency measured by the SBM-DEA method ranges between [0,1]   | 1 167              | 0.47        | 0.23      | 0.11       | 1          |
| 户主个人特征<br>Household head's personal characteristics | 性别 Gender  | 1=男性,0=女性 1=Male, 0=Female   | 1 167              | 0.77        | 0.42      | 0          | 1          |
|   | 受教育年限<br>Education level                         | 户主实际受教育年限/年<br>Years of actual education of the household head   | 1 167              | 7.43        | 1.96      | 6          | 16         |
|   | 年龄<br>Age  | 户主实际年龄/岁<br>Actual age of the household head   | 1 167              | 58.93       | 8.68      | 32         | 84         |
|   | 健康状况<br>Health status                            | 户主一年之中因身体不适休息的次数/次<br>Number of days the household head rested due to physical discomfort in a year  | 1 167              | 15.03       | 42.10     | 0          | 365        |
|   | 环境保护意愿<br>Willingness to protect the environment | 户主环境保护意愿,由6道5级李克特量表题衡量,得分高于50%分位数取值为1,否则为0<br>The willingness of the household head to protect the environment was measured using six 5-point Likert scale questions, with a score above the 50th percentile assigned a value of 1, and a score below it assigned a value of 0 | 1 167              | 0.34        | 0.47      | 0          | 1          |
|   | 家庭总人口数<br>Total number of family members         | 家庭总人口数/人<br>Number of household members  | 1 167              | 5.83        | 2.48      | 1          | 20         |
|   | 家庭年总收入<br>Annual total household income          | 家庭年总收入/万元<br>Annual household income   | 1 167              | 4.33        | 4.19      | 0          | 15         |
| 农户家庭特征<br>Household characteristics                 | 农业补贴<br>Agricultural subsidy                     | 是否收到过任何形式的农业补贴(1=是,0=否)<br>The household has received at least one type of agricultural subsidy (1=Yes, 0=No)  | 1 167              | 0.90        | 0.30      | 0          | 1          |
|   | 农业保险<br>Agricultural insurance                   | 是否有农业保险(1=是,0=否)<br>Household participation in agricultural insurance (1 = Yes, 0 = No)  | 1 167              | 0.34        | 0.47      | 0          | 1          |
|   | 无人机使用情况<br>The usage status of drones            | 在生产过程中,是否使用过无人机(1=是,0=否)<br>Use of drones in the production process (1 = Yes, 0 = No)  | 1 167              | 0.26        | 0.44      | 0          | 1          |

续表 3 Continued Table 3

| 变量类别<br>Category of variables | 变量<br>Variables                         | 变量说明<br>Descriptions of variables  | 样本量<br>Sample size | 平均值<br>Mean | 标准差<br>SD | 最小值<br>Min | 最大值<br>Max |
|-------------------------------|---|--|--------------------|-------------|-----------|------------|------------|
| 经济指标<br>Economic indicator    | 经济发展水平<br>Level of economic development | 该农户所在村对应的平均夜间灯光强度,衡量经济发展水平 Average nighttime light intensity of the village where the household resides, serving as a proxy for economic development level | 1 167              | 2.01        | 4.42      | 0          | 18.60      |
|                               | 平均降雨量<br>Average rainfall               | 一年之中,降雨量的平均值/mm Annual mean rainfall   | 1 167              | 4.43        | 4.56      | 1.51       | 23.28      |
| 气候因素<br>Climatic factors      | 高温热浪<br>Heatwave                        | 一年之中,日最高气温连续 3 d 及以上高于 35 ℃ 的频次/次 Annual frequency of consecutive daily maximum temperature exceeding 35 ℃ for three or more days                          | 1 167              | 4.10        | 2.63      | 0          | 10         |
|                               | 极端低温<br>Extreme low temperatures        | 当天最低气温低于样本期 10% 分位数的时间/d Number of days with daily minimum temperature below the 10th percentile of the sample period.                                     | 1 167              | 32.97       | 9.28      | 7          | 37         |
|                               | 暴雨<br>Heavy rainstorm                   | 一年之中,降雨量超过 50 mm 的时间/d Annual count of days with rainfall exceeding 50 mm  | 1 167              | 3.63        | 2.29      | 0          | 8          |
|                               | 干旱<br>Drought                           | 一年之中,降雨量连续为 0 的最长时间/d Maximum annual consecutive days with zero rainfall   | 1 167              | 23.51       | 7.29      | 14         | 33         |

2 结果与分析

2.1 技术效率及生态效率测算结果

基于湖北省实地调研数据,本研究运用 Stata18.0 软件测算不同稻田种养模式的技术效率和生态效率,结果详见表 4。在不区分具体种养模式的情况下,湖北省稻田种养模式的平均技术效率为 0.593,生态效率为 0.469。其中,稻-鸭-虾模式的技术效率最高,达到 0.760;其次是稻-虾和水稻单作模式,二者效率水平相近;稻-鸭模式的技术效率最低,效率值为 0.581。稻-鸭-虾模式生态效率表现最佳,效率值为 0.545;水稻单作和稻-鸭模式紧随其后,效率值分别为 0.516 和 0.452;而稻-虾模式的生态效率值最低,仅为 0.323。综合来看,稻-鸭-虾模式在技术效率和生态效率方面均优于其他模式。这主要得益于该模式通过提高稻田生物多样性,构建了更稳定的生态系统,有效减少了化肥、农药等化学投入,同时提升了单位面积土地的经济产出。

为检验不同种养模式的效率值是否存在显著差异,本研究首先采用方差分析(ANOVA)进行检验,结果显示技术效率和生态效率的  $P$  值分别为 0.030 和 0.000,表明在 5% 显著性水平下,不同种养模式的技术效率和生态效率存在显著差异。进一步地,本研究采用“ $t$ -检验”对不同种养模式之间的均值差异进行两两比较(表 5)。结果显示:在技术效率方面,稻-鸭-虾模式的均值与其他 3 种模式的均值存在显著差异。在生态效率方面,水稻单作与稻-虾模式、

表 4 稻田种养模式的技术效率和生态效率  
Table 4 Technical and ecological efficiency for rice integrated farming system

| 种养模式<br>Integrated farming system   | 技术效率<br>Technical efficiency | 生态效率<br>Ecological efficiency |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 不区分种养模式<br>No distinction practices | 0.593                        | 0.469                         |
| 水稻单作<br>Monocropping rice           | 0.593                        | 0.516                         |
| 稻-虾<br>Rice-crayfish                | 0.591                        | 0.323                         |
| 稻-鸭<br>Rice-duck                    | 0.581                        | 0.452                         |
| 稻-鸭-虾<br>Rice-duck-crayfish         | 0.760                        | 0.545                         |

稻-虾与稻-鸭模式、稻-鸭与稻-鸭-虾模式之间均值的差异较为显著。

2.2 技术效率及生态效率影响因素分析

本研究基于多元线性回归模型,探究了户主个人特征、农户家庭特征、经济指标和气候因素对技术效率和生态效率的影响,具体结果见表 6。表 6 中数值表示的含义为:在控制其他因素不变的前提下,该变量变动一单位时,对技术效率或生态效率的影响大小与方向。

1) 户主个人特征。研究结果显示,户主性别会影响稻田种养的技术效率和生态效率。可能的原因在于,男性相比女性更倾向于采用传统农业生产方式,而这些方式可能未能充分利用现代农业技术或者绿色农业技术。户主年龄对技术效率和生态效率

表 5 不同稻田种养模式效率“*t*-检验”的 *P* 值

Table 5 *P*-value of the *t*-test for efficiency across different rice integrated farming system

| 模式<br>Models                | 技术效率 Technical efficiency |                      |                  | 生态效率 Ecological efficiency |                      |                  |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|----------------------------|----------------------|------------------|
|                             | 水稻单作<br>Monocropping rice | 稻-虾<br>Rice-crayfish | 稻-鸭<br>Rice-duck | 水稻单作<br>Monocropping rice  | 稻-虾<br>Rice-crayfish | 稻-鸭<br>Rice-duck |
| 水稻单作<br>Monocropping rice   | /                         | /                    | /                | /                          | /                    | /                |
| 稻-虾<br>Rice-crayfish        | 0.903                     | /                    | /                | 0.000                      | /                    | /                |
| 稻-鸭<br>Rice-duck            | 0.784                     | 0.835                | /                | 0.255                      | 0.014                | /                |
| 稻-鸭-虾<br>Rice-duck-crayfish | 0.002                     | 0.014                | 0.007            | 0.705                      | 0.471                | 0.002            |

有显著的积极影响。这可能是因为随着年龄的增长,户主积累了丰富的农业生产经验,并获得了广泛的社会资本和网络资源,从而提高了种养管理能力。类似的观点也在王善高等<sup>[24]</sup>的研究中有所体现。户主身体状况对技术效率和生态效率的影响不显著。户主的环保意识对技术效率的影响较小,在生态效率方面虽有一定作用,但未达到显著水平。

2)农户家庭特征。家庭总人口与生态效率呈显著负相关关系,表明家庭人口的增加可能使农户更加关注基本生活需求,而在一定程度上忽略了生态保护。家庭总收入对技术效率具有显著影响,表明收入较高的家庭具备更多经济资源,可用于购买先进的农业设施、优质种子和肥料等,从而提升技术效率。然而,高收入家庭可能在生产过程中对生态保护的关注度较低,导致生态效率下降。农业补贴对技术效率有显著促进作用。这可能是因为农业补贴直接为农户提供了经济支持,降低了新技术采纳和应用的成本,从而鼓励农户采用更高效的生产技术。相比之下,农业保险对技术效率的影响则相对负面,可能是由于农户对农业保险形成依赖心理,认为保险能弥补潜在损失,因此在生产管理和技术提升方面投入减少。无人机使用对技术效率有显著提升作用,且在生态效率方面影响较大。这可能是由于无人机能够精准监测作物生长状况并进行农药喷洒,在提高生产效率的同时,也可能导致农药和化肥使用量增加,从而对生态环境产生一定影响。

3)经济指标。研究发现,经济发展对技术效率和生态效率均产生显著影响。在经济较发达的地区,由于农业在整体经济中的占比相对较低,农业用地减少,从而影响农业技术效率。此外,在经济快速发展背景下,农户和地方政府可能更关注短期经济利益,增加化学投入,从而对生态效率产生不利

影响。

4)气候因素。研究表明,降水量、极端低温和干旱天气对技术效率和生态效率均具有较大影响。具体而言,年平均降水量和极端低温与稻田种养模式的技术效率和生态效率均呈现负相关关系。然而,极端高温对生态效率具有一定的积极作用。这可能是因为综合种养模式具备较强的环境适应性,能够在高温条件下维持生物多样性,减少化学投入,从而提升生态效率。暴雨天数的增加在某些情况下可能对生态效率产生积极影响,因为充足的自然降水可以减少灌溉成本,提高水资源利用效率,进而提升技术效率。而干旱天气对生态效率的不利影响则表明,水资源匮乏会直接影响稻田的水分供应,从而降低生态系统的整体效率。

此外,技术效率和生态效率影响因素评估结果中的常数项(0.477和0.481)均在1%水平上显著,表明在所有解释变量均取0时,基准技术效率和生态效率的均值。由于部分变量取0并不现实,该值主要用于回归模型的整体调整,而不代表具体观测样本的平均水平。

2.3 稻田综合种养模式与水稻单作的比较

本研究引入稻田综合种养模式虚拟变量(若农户采用的模式为“稻-虾”,则变量“稻-虾”取值为1,否则为0;“稻-鸭”“稻-鸭-虾”定义与“稻-虾”类似),进一步探讨了水稻单作与不同稻田综合种养模式对技术效率和生态效率影响的差异,实证结果见表7。结果表明,在1%的显著性水平下,相较于水稻单作模式,稻-虾模式的技术效率和生态效率分别降低0.053和0.178。这可能与农户的种养结构调整策略有关,在湖北省,稻-虾模式中小龙虾的市场价格远高于稻谷,因此农户可能倾向优先扩大小龙虾养殖面积,压缩稻田种植面积,导致未能充分发挥稻-虾



| 表 6 技术效率与生态效率的影响因素评估  |   |                                 |                                  | 表 7 不同稻田综合种养模式与水稻单作的比较  |   |  |                                  |
|---|---|---------------------------------|----------------------------------|---|---|--|----------------------------------|
| Table 6 Assessment of factors influencing technical efficiency and eco-efficiency |   |                                 |                                  | Table 7 Comparison of different integrated rice farming models with monocropping rice |   |  |                                  |
| 因素类别<br>Factors<br>category   | 影响因素<br>Influencing factors                         | 技术效率<br>Technical<br>efficiency | 生态效率<br>Ecological<br>efficiency | 因素类别<br>Factors<br>category   | 影响因素<br>Influencing factors                         | 技术效率<br>Technical<br>efficiency            | 生态效率<br>Ecological<br>efficiency |
| 户主个人特征<br>Household<br>head's per-<br>sonal charac-<br>teristics                  | 性别 Gender   | −0.025**<br>(0.011)             | −0.067***<br>(0.016)             | 种养模式<br>Integrated rice<br>farming<br>models  | 稻-虾<br>Rice-crayfish                                | −0.053***<br>(0.014)                       | −0.178***<br>(0.017)             |
|   | 年龄 Age  | 0.002***<br>(0.001)             | 0.004***<br>(0.001)              |   | 稻-鸭<br>Rice-duck                                    | −0.061<br>(0.043)                          | −0.109<br>(0.067)                |
|   | 受教育年限<br>Education level                            | 0.001<br>(0.002)                | −0.001<br>(0.003)                |   | 稻-鸭-虾<br>Rice-duck-crayfish                         | 0.163***<br>(0.047)                        | −0.050<br>(0.106)                |
|   | 健康状况<br>Health status                               | −0.000<br>(0.000)               | −0.000<br>(0.000)                |   | 性别 Gender   | −0.021*<br>(0.011)                         | −0.065***<br>(0.016)             |
|   | 环境保护意愿<br>Willingness to protect the<br>environment | −0.008<br>(0.010)               | 0.022<br>(0.015)                 | 户主个人特征<br>Household<br>head's person-<br>al characteris-<br>tics                      | 年龄 Age  | 0.001**<br>(0.001)                         | 0.002***<br>(0.001)              |
|   | 家庭总人口数<br>Total number of family<br>members         | −0.002<br>(0.002)               | −0.007***<br>(0.003)             |   | 受教育年限<br>Education level                            | 0.000<br>(0.002)                           | 0.000<br>(0.003)                 |
|   | 家庭年总收入<br>Annual total household in-<br>come        | 0.005***<br>(0.001)             | −0.003*<br>(0.002)               |   | 健康状况<br>Health status                               | −0.000<br>(0.000)                          | 0.000<br>(0.000)                 |
| 农户家庭特征<br>Household<br>characteristics  | 农业补贴<br>Agricultural subsidy                        | 0.047**<br>(0.021)              | −0.010<br>(0.021)                |   | 环境保护意愿<br>Willingness<br>to protect the environment | −0.012<br>(0.010)                          | 0.009<br>(0.014)                 |
|   | 农业保险<br>Agricultural insurance                      | −0.038***<br>(0.011)            | −0.002<br>(0.016)                | 家庭总人口数<br>Total num-<br>ber of family members   | −0.002<br>(0.002)                                   | −0.007***<br>(0.003)                       |                                  |
|   | 无人机使用情况<br>The usage status of drones               | 0.020*<br>(0.011)               | −0.069***<br>(0.016)             | 家庭年总收入<br>Annual to-<br>tal household income  | 0.005***<br>(0.001)                                 | −0.002<br>(0.002)                          |                                  |
| 经济指标<br>Economic<br>indicator   | 经济发展水平<br>Level of economic develop-<br>ment        | −0.009***<br>(0.001)            | −0.006***<br>(0.002)             | 农户家庭特征<br>Household<br>characteristics  | 农业补贴<br>Agricultural subsidy                        | 0.056***<br>(0.021)                        | 0.012<br>(0.019)                 |
|   | 高温热浪<br>Heatwave                                    | −0.001<br>(0.003)               | 0.018***<br>(0.003)              |   | 农业保险<br>Agricultural insurance                      | −0.040***<br>(0.011)                       | −0.012<br>(0.015)                |
|   | 极端低温<br>Extreme low temperatures                    | −0.002**<br>(0.001)             | −0.002*<br>(0.001)               |   | 无人机使用情况<br>The us-<br>age status of drones          | 0.042***<br>(0.013)                        | 0.011<br>(0.017)                 |
|   | 气候因素<br>Climatic<br>factors                         | 平均降雨量<br>Average rainfall       | −0.004***<br>(0.001)             | −0.001<br>(0.002)   | 经济指标<br>Economic<br>indicator                       | 经济发展水平<br>Level of<br>economic development | −0.009***<br>(0.002)             |
| 暴雨<br>Heavy rainstorm   |   | 0.014***<br>(0.003)             | −0.001<br>(0.004)                | 高温热浪<br>Heatwave  |   | −0.003<br>(0.003)                          | 0.015***<br>(0.003)              |
| 干旱<br>Drought   |   | 0.001<br>(0.001)                | −0.004***<br>(0.001)             | 极端低温<br>Extreme low<br>temperatures   |   | −0.002**<br>(0.001)                        | −0.002***<br>(0.001)             |
| 样本量<br>Sample size  |   | 1 167                           | 1 167                            | 气候因素<br>Climatic fac-<br>tors   | 平均降雨量<br>Average rainfall                           | −0.005***<br>(0.001)                       | −0.003**<br>(0.002)              |
| $R^2$   |   | 0.118                           | 0.103                            |   | 暴雨<br>Heavy rainstorm                               | 0.015***<br>(0.003)                        | 0.006<br>(0.004)                 |
|   |   |                                 |                                  |   | 干旱<br>Drought                                       | 0.002*<br>(0.001)                          | −0.004***<br>(0.001)             |
|   |   |                                 |                                  |   | 样本量<br>Sample size                                  | 1 167                                      | 1 167                            |
|   |   |                                 |                                  | $R^2$   | 0.139   | 0.174                                      |                                  |

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示在 10%、5%、1% 的水平上显著，括号内数据为稳健标准误。下表同。Note: \*, \*\*, and \*\*\* indicate significance at the 10%, 5%, and 1% levels, respectively. Values in parentheses represent robust standard errors. The following table is identical.

注：本回归以水稻单作模式为基准组，种养模式部分的回归系数表示不同模式相对于水稻单作模式的效率变化。Note: In this regression, the monocropping-rice model serves as the reference group, and the coefficients for the integrated rice farming models reflect the changes in efficiency relative to it.



模式互利共生、良性循环、绿色生态的潜力。此外,稻-鸭-虾模式的技术效率,在1%的显著性水平下显著高于水稻单作。这表明通过多层次的资源利用、生物互利共生、综合生产收益和可持续发展等多个方面的整合,稻-鸭-虾综合种养模式显著提高了技术效率,相对于单一的稻作模式,这种模式更能体现高效、绿色和可持续的农业生产特性。而水稻单作和稻-鸭模式的效率无显著差异。此外,技术效率和生态效率回归中的常数项(0.502和0.564)均在1%的水平上显著,由于部分变量无法真正取零,常数项主要用于调整回归方程的整体水平,而不完全等同于水稻单作模式的真实均值。

### 3 讨论及建议

作为一种兼具较高经济效益与生态效益的农业模式,稻田综合种养在保障粮食安全,推动传统农业转型升级方面发挥着重要作用。湖北省稻田种养模式的发展在全国居于领先地位。基于实地调研数据,本研究分析了湖北省不同稻田种养模式的技术效率和生态效率,并进一步探讨了农户特征、家庭结构、经济发展以及气候因素对效率的影响。主要结论如下:(1)在水稻单作、稻-虾、稻-鸭和稻-鸭-虾4种模式中,稻-鸭-虾模式的技术效率和生态效率均最高,分别为0.760和0.545,表明该模式在提升农业生产效率的同时,也兼顾了生态可持续性。(2)户主性别、农业保险、经济发展水平、极端气温以及平均降雨量显著抑制技术效率的提升,而户主年龄、农业补贴、家庭总收入以及无人机技术应用对技术效率有显著的提升作用。(3)户主年龄和高温热浪对湖北省稻田种养模式的生态效率具有显著的提升作用;户主性别、家庭总人口数、家庭总收入、无人机技术应用、经济发展水平以及极端低温和干旱不利于湖北省稻田种养模式生态效率的发展。(4)与水稻单作种植相比,稻-虾模式的技术效率和生态效率在1%的显著性水平下分别降低0.053和0.178,而稻-鸭-虾综合种养模式的技术效率比水稻单作模式平均高0.163。综合来看,稻-鸭-虾模式表现出较强的技术和生态优势,应进一步推广与优化。同时,应关注农业保险、经济发展水平、极端气候等因素对效率的影响,并通过政策支持、技术推广等措施提高稻田种养模式的整体效率与可持续性。

基于本研究的研究结果,提出以下政策建议:

第一,政府可在具备相应自然条件和产业基础

的地区,因地制宜推广稻-鸭-虾综合种养模式。建议通过组织农技推广站对农户进行系统培训,讲解该模式的潜在优势、操作方法及管理要点,提高农民的种养技术水平。同时,可在适宜地区建立示范基地,展示稻-鸭-虾模式的具体操作和成功案例,供周边农户参观学习。此外,政府可探索出台针对不同区域特点的专项扶持政策,为适合推广该模式的农户提供资金、设备和技术支持,以降低农户转型成本和风险。

第二,提高农业生产风险管理能力,增强极端气候适应性。在应对极端气候的挑战时,建议推广使用抗旱、抗涝、耐高温等适应性强的稻种,以增强稻田综合种养模式对极端气候的适应能力。此外,应加快建立健全气象灾害预警系统,及时向农民发布气象预警信息,帮助农民提前做好防范和应对措施,降低气候灾害对农业生产的影响。同时,加强农田水利基础设施建设,改进灌溉和排水系统,进一步提升农业生产的抗灾能力,确保稻田综合种养模式在各种气候条件下的稳定性和持续性。

第三,优化对农户的支持政策,提高生产效率。政府应鼓励更多农户参与多样化的稻田综合种养模式,提升整体农业生产效率。同时,应加大无人机等现代农业技术的推广和应用,提高农业生产的精准性和效率,提供技术培训和设备补贴,降低农户使用现代技术的门槛。通过多种渠道增加农户收入,提供多元化的农业项目、发展农产品加工和销售,以提升农户的经济能力,促进农业生产的可持续发展。

### 参考文献 References

- [1] 罗必良,耿鹏鹏.农业新质生产力:理论脉络、基本内核与提升路径[J].农业经济问题,2024,45(4):13-26.LOU B L, GENG P P. New quality agricultural productivity: theoretical framework, core concepts, and enhancement pathways [J]. Issues in agricultural economy, 2024, 45(4): 13-26 (in Chinese with English abstract).
- [2] GUI Y. The process and driving forces of change in arable-land area in the Yangtze River Delta during the past 50 years [J]. Journal of natural resources, 2001, 16(2): 121-127.
- [3] AHMED N. Linking prawn and shrimp farming towards a green economy in Bangladesh: confronting climate change [J]. Ocean & coastal management, 2013, 75: 33-42.
- [4] 练加标,李永彬,乔翠芳,等.盐城市大丰区稻虾综合种养模式推广技术及效益分析[J].现代农业科技,2018(18):218-219. LIAN J B, LI Y B, QIAO C F, et al. Technical promotion and benefit analysis of rice-shrimp integrated farming sys-

- tem in Dafeng District, Yancheng City [J]. Modern agricultural science and technology, 2018(18): 218-219 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y, GUAN C Y, LI Z Y, et al. Review of rice - fish - duck symbiosis system in China: one of the globally important ingenious agricultural heritage systems (GIAHS) [J/OL]. Sustainability, 2023, 15(3): 1910 [2024-08-19]. <https://doi.org/10.3390/su15031910>.
- [6] 陈松文, 江洋, 汪金平, 等. 湖北省稻虾模式发展现状与对策分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 1-7. CHEN S W, JIANG Y, WANG J P, et al. Situation and countermeasures of integrated rice-crayfish farming in Hubei Province [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [7] WANG Z N, CHEN X, SHI L Z, et al. Productivity versus environmental sustainability: a broadscale assessment of freshwater aquaculture's technical efficiency and ecological efficiency in China's inland provinces [J/OL]. Journal of the world aquaculture society, 2024, 55(3): e13057 [2024-08-19]. <https://doi.org/10.1111/jwas.13057>.
- [8] 孟令杰. 中国农业产出技术效率动态研究[J]. 农业技术经济, 2000(5): 1-4. MENG L J. Dynamic study on technical efficiency of agricultural output in China [J]. Journal of agrotechnical economics, 2000(5): 1-4 (in Chinese).
- [9] DWIYANA E, MENDOZA T C. Comparative productivity, profitability and efficiency of rice monoculture and rice-fish culture systems [J]. Journal of sustainable agriculture, 2006, 29(1): 145-166.
- [10] RAHMAN S, BARMON B K, AHMED N. Diversification economies and efficiencies in a 'blue-green revolution' combination: a case study of prawn-carp-rice farming in the 'Gher' system in Bangladesh [J]. Aquaculture international, 2011, 19(4): 665-682.
- [11] RAHMAN S, BARMON B K, ANIK A R. Productivity growth and efficiency changes in prawn-carp-rice farming in 'Gher' system in Bangladesh: a Fare-Primont index approach [J/OL]. Aquaculture, 2020, 522: 735107 [2024-08-19]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735107>.
- [12] AHMED N, ZANDER K K, GARNETT S T. Socioeconomic aspects of rice-fish farming in Bangladesh: opportunities, challenges and production efficiency [J]. Australian journal of agricultural and resource economics, 2011, 55(2): 199-219.
- [13] 王志平, 陶长琪, 沈鹏熠. 基于生态足迹的区域绿色技术效率及其影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 35-40. WANG Z P, TAO C Q, SHEN P Y. Regional green technical efficiency with its influencing factors analysis based on ecological footprint [J]. China population, resources and environment, 2014, 24(1): 35-40 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李文博, 刘少君, 叶新新, 等. 稻田综合种养模式对土壤生态系统的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(10): 1292-1300. LI W B, LIU S J, YE X X, et al. Effects of the co-culture of rice and aquatic animals on soil eco-system: a review [J]. Journal of ecology and rural environment, 2021, 37(10): 1292-1300 (in Chinese with English abstract).
- [15] 汪熙琮, 田卓亚, 杨彩艳, 等. 采纳稻田综合种养模式能否提升农户效益? —以稻虾共作模式为例[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 259-274. WANG X C, TIAN Z Y, YANG C Y, et al. Can the adoption of rice-aquaculture integrated cultivation mode improve farmers' benefits? A case study of rice and crayfish coculture pattern [J]. Journal of China agricultural university, 2023, 28(10): 259-274 (in Chinese with English abstract).
- [16] 谭淑豪, 刘青, 张清勇. 稻田综合种养土地利用的生态-经济效益: 以湖北省稻虾共作为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3131-3143. TAN S H, LIU Q, ZHANG Q Y. Study on the ecological-economic effects of rice-aquatic coculture land use pattern: the case of rice-crayfish coculture in Hubei Province [J]. Journal of natural resources, 2021, 36(12): 3131-3143 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘金根, 杨通, 冯金飞. 稻-虾(克氏原螯虾)综合种养模式的碳足迹分析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8): 1041-1049. LIU J G, YANG T, FENG J F. Carbon footprint analysis of rice-*Procambarus clarkii* integrated farming system [J]. Journal of ecology and rural environment, 2021, 37(8): 1041-1049 (in Chinese with English abstract).
- [18] 竺平, 张开惠, 宋德玉, 等. 荆州市稻虾共作生产现状、存在问题与建议[J]. 基层农技推广, 2019, 7(3): 101-103. ZHU P, ZHANG K H, SONG D Y, et al. Present situation, existing problems and suggestions of rice-shrimp co-cropping production in Jingzhou City [J]. Primary agricultural technology extension, 2019, 7(3): 101-103 (in Chinese).
- [19] LIU D, TANG R C, XIE J, et al. Valuation of ecosystem services of rice-fish coculture systems in Ruyuan County, China [J/OL]. Ecosystem services, 2020, 41: 101054 [2024-08-19]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101054>.
- [20] 禹盛苗, 朱练峰, 欧阳由男, 等. 稻鸭种养模式对稻田土壤理化性状、肥力因素及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 151-156. YU S M, ZHU L F, OUYANG Y N, et al. Influence of rice-duck farming system on soil physical properties, fertility factors and yield in paddy fields [J]. Chinese journal of soil science, 2014, 45(1): 151-156 (in Chinese with English abstract).
- [21] 沈建凯, 黄璜, 傅志强, 等. 规模化稻鸭生态种养对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 123-128. SHEN J K, HUANG H, FU Z Q, et al. Effect of large-scale rice-duck eco-farming on the composition and diversity of weed community in paddy fields [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2010, 18(1): 123-128 (in Chinese with English abstract).
- [22] 林孝丽, 周应恒. 稻田种养结合循环农业模式生态环境效应

- 实证分析:以南方稻区稻-鱼模式为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(3): 37-42. LIN X L, ZHOU Y H. An analysis on the eco-environment effect of circular agriculture mode of planting-culture in the paddyfield [J]. China population, resources and environment, 2012, 22(3): 37-42 (in Chinese with English abstract).
- [23] PHAM T A N, LOC H H, TRAN D D, et al. The inefficiency of Vietnamese prawn-rice rotational crops: a slacks-based data envelopment analysis[J]. Journal of agribusiness in developing and emerging economies, 2020, 11(1): 60-71.
- [24] 王善高, 雷昊. 土地流转费用上涨对农业生产的影响研究: 基于江苏稻农农业生产方式和生产效率的分析[J]. 价格月刊, 2018(2): 89-94. WANG S G, LEI H. Research on the impact of rising land transferring charge on agricultural production: based on the analysis of agricultural production means and production efficiency of Jiangsu rice farmers [J]. Prices monthly, 2018(2): 89-94 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨俊, 李争. 耕地转入稻农生产行为及其耕地利用技术效率研究: 以赣抚平原农区的农户样本为例[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2016(6): 109-114. YANG J, LI Z. Study on farmland transfer-in rice farmers' productive behavior and technical efficiency of farmland utilization: a case study in Gan-fu Plain areas [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2016(6): 109-114 (in Chinese with English abstract).
- [26] 蔡荣, 李宁, 刘婷. 性别分工、技术效率与生产风险: 以苏北3县840户稻农为例[J]. 农林经济管理学报, 2018, 17(3): 254-264. CAI R, LI N, LIU T. Gender division of labor, technical efficiency and production risk: a case study of 840 rice farmers from three counties in Northern Jiangsu [J]. Journal of agroforestry economics and management, 2018, 17(3): 254-264 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘爱珍, 漆雁斌, 邓鑫. 生产环节外包能提高水稻生产技术效率吗: 来自四川省649户稻农的实证[J]. 南方农村, 2019, 35(2): 4-10. LIU A Z, QI Y B, DENG X. Can outsourcing of production links improve the technical efficiency of rice production: an empirical study of 649 rice farmers in Sichuan Province [J]. South China rural area, 2019, 35(2): 4-10 (in Chinese with English abstract).
- [28] BAKER E, BEZNER KERR R, DERYNG D, et al. Mixed farming systems: potentials and barriers for climate change adaptation in food systems [J/OL]. Current opinion in environmental sustainability, 2023, 62: 101270 [2024-08-19]. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101270>.
- [29] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [30] AIGNER D, KNOX LOVELL C A, SCHMIDT P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models [J]. Journal of econometrics, 1977, 6(1): 21-37.
- [31] BATTESE G E, COELLI T J. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data [J]. Empirical economics, 1995, 20(2): 325-332.
- [32] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European journal of operational research, 2001, 130(3): 498-509.
- [33] 杨丽, 黄斯唯, 张特. 工农业绿色生产效率与健康效率研究: 基于并行两阶段SBM-DEA模型[J]. 经济与管理, 2023, 37(5): 45-54. YANG L, HUANG S W, ZHANG T. Research on industry and agricultural green production efficiency and health efficiency: based on the parallel two-stage SBM-DEA model [J]. Economy and management, 2023, 37(5): 45-54 (in Chinese with English abstract).
- [34] 赵雯歆, 罗小锋, 唐林. 劳动力转移对农户粮食绿色生产效率的影响: 兼论技术推广的作用[J]. 资源科学, 2023, 45(7): 1440-1454. ZHAO W X, LUO X F, TANG L. The influence of labor transfer on farmers' green grain production efficiency: also discussing the role of technology extension [J]. Resources science, 2023, 45(7): 1440-1454 (in Chinese with English abstract).
- [35] 曹云, 刘兴超, 王光奎, 等. 肉鸭发酵床网上养殖垫料无害化处理及其还田效果研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(10): 1356-1364. CAO Y, LIU X C, WANG G K, et al. Composting of bio-bedding materials for ducks and the effects of returning composted bedding materials to field [J]. Journal of ecology and rural environment, 2023, 39(10): 1356-1364 (in Chinese with English abstract).
- [36] 魏素豪, 高延雷. 农机作业服务市场的“本地化”提高了农户粮食生产技术效率吗? [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2023(6): 1-13. WEI S H, GAO Y L. Does the “localization” of agricultural machinery service market improve the technical efficiency of grain production for farmers? [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2023(6): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张晖, 张雨萌. 农业补贴提高了粮食生产技术效率吗?: 基于江苏省552户粮食生产型家庭农场数据的实证研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022(6): 58-67. ZHANG H, ZHANG Y M. Does agricultural subsidy improve technical efficiency of grain production?: an empirical study based on the data of 552 grain production family farms in Jiangsu Province [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2022(6): 58-67 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王金秋, 钱煜昊, 王晨. 水稻直播的再出现: 简单的复古还是理性的回归[J]. 农业技术经济, 2020(9): 130-142. WANG J Q, QIAN Y H, WANG C. The reappearance of rice direct seeding: simple retro or rational return [J]. Journal of agrotechnical economics, 2020(9): 130-142 (in Chinese with English abstract).
- [39] 胡雪梅, 张伟, 熊凯源. 服务业产业多样化对城市经济韧性的影响: 来自地级市夜间灯光数据的证据[J]. 调研世界, 2024

- (4): 37-48. HU X M, ZHANG W, XIONG K Y. The influence of the diversification of service industry on urban economic resilience in China: evidence from city night light data [J]. The world of survey and research, 2024(4): 37-48 (in Chinese with English abstract).
- [40] 李力, 吴施美, 陈贞竹. 极端天气风险与宏观经济波动: 基于网络关联与空间溢出双重视角[J]. 金融研究, 2023(9): 58-75. LI L, WU S M, CHEN Z Z. Extreme weather risks and macroeconomic fluctuations: a dual perspective based on network connectedness and spatial spillovers [J]. Journal of financial research, 2023(9): 58-75 (in Chinese with English abstract).
- [41] 尹红, 孙颖. 基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 363-373. YIN H, SUN Y. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices [J]. Climate change research, 2019, 15(4): 363-373 (in Chinese with English abstract).

## A comparative study of rice-duck-crayfish integrated farming system and other rice paddy farming systems

LIANG Pan<sup>1</sup>, CHEN Xuan<sup>1,2</sup>, SHI Longzhong<sup>1</sup>, LI Rongqiang<sup>1</sup>

1. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;  
2. Shuangshui Shuangliu Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** To explore the differences in efficiency and influencing factors among various rice field farming models, this study constructs an “efficiency assessment-influencing factors” framework based on field survey data collected from Hubei Province in 2023. By integrating micro-level household survey data with climate data, we employ both SFA and SBM-DEA models to measure the technical efficiency and ecological efficiency of different rice field farming systems. We systematically examine the efficiency disparities between these models and evaluate their respective advantages and limitations. The results indicate that: (1) Among the four rice-farming modes including single rice, rice-crayfish, rice-duck, and rice-duck-crayfish, the rice-duck-crayfish mode demonstrates the highest technical and ecological efficiency, with values of 0.760 and 0.545, respectively. In contrast, the technical efficiency of the rice-duck model and the ecological efficiency of the rice-crayfish model are the lowest, at 0.581 and 0.323, respectively. (2) Factors such as the gender of the household head, agricultural insurance, economic development level, extreme temperatures, and average rainfall have inhibited the improvement of technical efficiency, while the age of the household head, agricultural subsidies, total household income, and drone usage positively contribute to technical efficiency. (3) The age of the household head and indicators of high-temperature heatwaves significantly improve ecological efficiency, while factors such as the gender of the household head, total household population, total household income, drone usage, level of economic development, extreme low temperatures, and drought negatively affect the improvement of ecological efficiency. (4) Compared to the single rice mode, the rice-crayfish mode exhibits significant decrease in technical efficiency and ecological efficiency by 0.053 and 0.178, respectively. However, technical efficiency of the rice-duck-crayfish mode is 0.163 higher than that of the single rice mode. The study indicates that the rice-duck-crayfish model demonstrates the highest performance in terms of both technical and ecological efficiency, highlighting its substantial potential for promotion.

**Keywords** integrated farming in rice fields; technical efficiency; ecological efficiency; extreme climate

(责任编辑: 边书京)