

引用格式: 徐静, 熊世豪, 张倩. 资源环境约束下中国水稻生产效率及提升路径[J]. 资源科学, 2024, 46(7): 1330-1345. [Xu J, Xiong S H, Zhang Q. Efficiency and improvement path of rice production in China under resource and environmental constraints[J]. Resources Science, 2024, 46(7): 1330-1345.] DOI: 10.18402/resci.2024.07.07

资源环境约束下中国水稻生产效率及提升路径

徐 静^{1,2}, 熊世豪^{1,2}, 张 倩¹

(1. 扬州大学商学院, 扬州 225127; 2. 江苏现代物流研究基地, 扬州 225127)

摘 要:【目的】在水稻产业高质量发展的背景下, 分析资源环境约束下中国水稻生产效率的时空演变趋势和差异, 对未来探寻水稻生产效率提升、促进水稻绿色可持续发展具有重要价值。【方法】本文基于2009—2021年中国水稻投入产出面板数据, 基于超效率SBM(Slacks-based Measure)模型的窗口DEA(Data Envelopment Analysis)和模糊集定性比较分析方法, 研究了在资源环境约束下考虑气候和污染排放的水稻生产效率及提升路径。【结果】①全国各类型水稻的生产效率总体处于较高水平, 其中粳稻(1.0089)>早籼稻(1.0065)>中籼稻(0.9769)>晚籼稻(0.9380), 早、中、晚和粳稻历年生产效率均值达到相对有效的比例分别为77.78%、76.92%、67.13%、58.12%。除此之外, 各类型水稻的年均碳排放量呈倒“U”型变化趋势, 且氮磷污染指数常年居高不下; ②总体上, 中国六大水稻稻作区生产效率区域差异显著, 华中、西北和西南稻作区水稻生产效率均值高于全国平均水平, 东北和华南稻作区生产效率均值低于全国平均水平, 华北稻作区中籼稻生产效率均值高于全国平均水平而粳稻生产效率均值低于全国平均水平; ③从组态视角进一步探索, 找到了6种提升生产效率的组态, 并归纳得到3条提升水稻生产效率的主要路径: 技术服务型、市场驱动型和人才引领型。【结论】加大源污染防治力度、发挥高效稻作区优势和提供高水平的农业技术服务等是提高水稻生产效率的重要路径。

关键词: 资源环境约束; 水稻; 生产效率; 模糊集定性比较分析; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.07.07

1 引言

水稻是中国最重要的粮食作物, 全国65%以上的人口以稻米为主食^[1]。据国家统计局统计, 2022年中国水稻播种面积已达到2945万hm², 水稻产量20850万t, 占全国粮食总产量的30.4%, 近20年增长19.5%^[2]。然而, 中国水稻产出增长主要依赖要素投入驱动^[3], 对于土地资源相对匮乏、生产过度依赖化肥与农药以及生态环境压力等多重约束下的中国而言, 粗放型的增长方式不但不能推动水稻产业的长效发展, 还会日益加剧水稻产业发展与生态环境之间的矛盾。据农业农村部公开数据显示, 2021年中国三大粮食作物的氮、磷、钾、复混肥单亩折纯使用量为8.39、0.44、0.56、15.54 kg, 而化肥与农药利用率仅有41.3%和41.8%, 其对土壤和水质造成了

高强度、超负荷的污染^[4,5]。资源的稀缺性和生态环境的重要性, 决定了中国水稻综合生产能力提高不能仅依靠要素投入扩张, 而要转向生产效率的持续增长^[6]。那么, 如何有效利用水稻生产资源、摆脱对生产要素投入的过度依赖, 进而提高生产效率, 是中国水稻产业发展亟待突破的瓶颈。

生产要素投入作为影响生产效率的重要因素, 受到广泛关注。学者们指出, 耕地、劳动力、农资、温度、农业灌溉技术、资本等均是影响水稻生产的重要因素, 其对水稻产出的影响各异。具体而言, 一方面已有研究主要从单一要素或少量几个组合要素出发分析生产要素投入对水稻产量的影响, 如发现耕地是约束水稻生产最为重要的投入要素^[7]; 劳动力和农资对水稻产出的弹性显著为正^[8]; 温度

收稿日期: 2023-03-06; 修订日期: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(72103178; 72373129); 扬州大学商学院研究生创新项目(SXYYJSKC202317); 扬州大学“高端人才支持计划”资助项目。

作者简介: 徐静, 女, 河南潢川人, 博士, 教授, 研究方向为农产品物流与供应链管理。E-mail: xujing_sxy@yzu.edu.cn

2024年7月

增加会导致早籼稻的生育期缩短^[9];农业灌溉技术对水稻产量有正向影响^[10];在机械、化肥、种子和农药等4种影响水稻增产的农业资本投入要素中,机械投入的影响最显著^[11]。另一方面,水稻生产效率受多要素投入的综合影响,鲜有学者将土地、劳动力、农资、水稻生长季平均温度、降水量和日照时长等要素同时纳入考量,更不提深度分析实现水稻生产效率提升的要素组合路径。此外,中国地域广阔,水稻品种多且省域稻作制度不同,而已有研究多不区分水稻品种和熟制^[12]。而开展水稻品种、熟制和区域生产效率异质性分析对于分类指导中国水稻生产效率提升至关重要。

产量是影响生产效率的另一个重要因素,也是水稻生产效率的期望产出指标。传统生产效率研究只关注产量指标^[13,14]。随着越来越多的文献关注水稻生产过程中伴随化学品投入带来的环境影响,少数研究开始考虑水稻生产的生态效率问题。具体而言:一部分学者考虑了将化肥、农药和农膜等投入造成的环境污染折合成一个指标作为非期望产出,测算农业的绿色生产率^[15];另一部分学者将水稻生产中的CO₂排放作为非期望产出,估算水稻生产的环境效率^[16];或将氮、磷、农药等投入和消耗造成的环境负荷综合成一个环境影响指标作为非期望产出^[17]。但总体而言,产出指标只有2个,对水稻生产生态效率的刻画不够精细。在稻田污染和“双碳”目标的双重关切下,将碳排放和氮磷污染分开测算更有利于综合把握水稻的生产效率。

在水稻生产效率的测算上,主要有参数法和非参数法两类。参数法以随机前沿分析(Stochastic Frontier Analysis, SFA)为典型^[18],非参数方法以数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)及其拓展模型为代表^[19]。相较于SFA只能对应多投入单产出的特点,DEA多投入多产出的测算方法由于不需要设定具体的函数形式,可有效规避生产函数设置偏误带来的误差问题,是目前的主流方法。然而,已有关于中国水稻生产效率测算的文献鲜少分不同水稻类型进行分析^[20],而受水稻类型细分后样本量进一步缩小的客观限制,现有方法有待进一步拓展。与传统DEA模型相比,基于超效率SBM(Slacks-based Measure)模型的窗口DEA方法,可以在评估同类决策单元(Decision Making Unit, DMU)

时进行小样本拓展,更好解决投入产出“松弛”或“冗余”问题,已经在其他领域得到应用^[21]。

基于上述分析,本文借助2009—2021年中国水稻投入产出面板数据,引入基于超效率SBM模型的窗口DEA和模糊集定性比较分析方法,研究了在资源环境约束下的水稻生产效率及提升路径。主要边际贡献如下:①在水稻生产效率测算中,除了使用传统的土地、劳动力和农资等指标,还考虑了日照时间、降水量和温度等气候条件的影响,并将水稻生产过程中的环境污染和碳排放纳入分析框架,以弥补原有评价指标不足。②根据生产实际,将水稻分成早籼稻、中籼稻、晚籼稻、粳稻等4个不同品种,将研究范围涉及的23个水稻主产省份进一步细分为六大稻作区域,引入基于超效率SBM模型的窗口DEA方法以克服原有测算精度不高问题。③本文不仅系统分析了资源环境约束下中国不同省份不同稻作区水稻生产效率的变化趋势和区域差异,还运用模糊集定性比较分析方法探寻机械化水平、劳动力质量、自然灾害程度、价格变动趋势等多因素对水稻生产效率的组态效应,并寻找提高水稻生产效率的关键因素和最佳路径,为实现中国水稻生产的绿色转型提供参考。

2 研究方法、研究区域、变量与数据

2.1 研究方法

2.1.1 窗口DEA模型

由于各类型水稻种植的省份数目并不多,因此本文采用DEA窗口模型来增加决策单元(省份)的数量^[22]。窗口DEA是将每个决策单元在各个时期内的数据看做一个相对独立的“DMU”,假设有 n 个DMU, p 个时期,则“DMU”的总数为 np 。如果窗口的宽度为 $d(d \leq p)$,则窗口的数量为 $w=p-d+1$ 。窗口内的“DMU”数量为 md ,等同于单个时期的DMU数量的 d 倍。

2.1.2 考虑非期望产出的超效率SBM模型

超效率SBM模型解决了传统CCR(Charnes Cooper Rhodes, CCR)模型中对无效率的测量没有包含松弛变量以及出现多个DMU有效的问题^[23,24],从而可以对投入产出冗余和强有效的DMU进行分析^[25,26]。为了探析在不同省份的稻谷产值差异下土地、劳动力、农资和降水量等投入的冗余状况,同时考虑到碳排放和环境污染等非期望产出,本文采用

考虑非期望产出的超效率SBM模型来测算水稻的生产效率。假定在水稻生产过程中,每个DMU均包括3种向量,即投入向量 X 、期望产出向量 Y^k 和非期望产出向量 Y^l ,将矩阵 X 、 Y^k 、 Y^l 定义如下:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^{m \times n} > 0 \quad (1)$$

$$Y^k = [y_1^k, y_2^k, \dots, y_n^k] \in R^{s_1 \times n} > 0 \quad (2)$$

$$Y^l = [y_1^l, y_2^l, \dots, y_n^l] \in R^{s_2 \times n} > 0 \quad (3)$$

式中: $x \in R^m$ 、 $y^k \in R^{s_1}$ 、 $y^l \in R^{s_2}$,其中 R 表示正实数集合;上标 m 、 s_1 、 s_2 分别代表存在 m 类投入要素、 s_1 类期望产出和 s_2 类非期望产出;上标 n 、 k 、 l 表示决策单元数量、期望产出和非期望产出;下标 n 表示决策单元的编号。某一特定DMU(x_0, y_0^k, y_0^l)的超效率SBM模型可以表示为:

$$\theta = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^k}{y_{r0}^k} + \sum_{h=1}^{s_2} \frac{s_h^l}{y_{h0}^l} \right)} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } x_0 = X\lambda + s^-, y_0^k = Y^k\lambda - s^k, y_0^l = Y^l\lambda + s^l, \\ s_i^- \geq 0, s_r^k \geq 0, s_h^l \geq 0, \lambda \geq 0$$

式中: x_0, y_0^k, y_0^l 分别表示这一特定DMU的投入变量、期望产出和非期望产出; m, s_1, s_2 分别代表存在 m 类投入要素、 s_1 类期望产出和 s_2 类非期望产出;下标0表示待评价的某决策单元; θ 表示被评价单元的效率值; s^-, s^k, s^l 分别表示投入变量、期望产出和非期望产出的松弛变量;下标 i, r, h 表示某一待评价的决策单元; λ 为权重。

2.1.3 模糊集定性比较分析法

定性比较分析(QCA)是针对中小型案例的一种研究方法,其核心思想认为结果变量是多个条件变量综合作用的结果^[27]。模糊集定性比较分析方法(fsQCA)是QCA中的分析类型之一,其允许隶属关系的出现并将变量在0(完全不隶属)~1(完全隶属)之间赋值,同时,采用定量与定性相结合的方式聚焦于“组态效应”分析,使得对充分性和必要性的评估更精准^[28,29]。根据实际情况,基于全局视角和组态思维,中国水稻生产效率也是多因素共同作用的结果,所涉及的单个变量多为连续变量,存在部分隶属和程度变化的问题,因此本文运用fsQCA研究多个因素对水稻生产效率的联动效应。

2.2 研究区划分

本文主要的研究对象是水稻,品种包括早籼

稻、中籼稻、晚籼稻、粳稻4种,生长期大致为120~150天之间。由于各地区气候条件、水稻产量、价格不同,不同省份的稻作制度和生产效率会有所差异。因此,本文在王兴等^[30]关于20个省份五大稻作区划分的基础上,结合农业农村部中国信息网对六大稻作区所涉及区域的定义,将内蒙古划分到东北稻作区,将宁夏和陕西划分到西北稻作区。具体分为东北早熟单季稻作区(内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江)、华北单季稻作区(河南、河北、山东)、华中单双季稻作区(江苏、浙江、安徽、湖北、江西、湖南、重庆、四川)、西北干燥区单季稻作区(宁夏、陕西)、西南单双季稻作区(云南、贵州)、华南双季稻作区(福建、广东、广西、海南),覆盖了中国水稻生产的主要区域,需要说明的是,由于数据获取困难,本文研究不包括港澳台地区。

2.3 变量选取

2.3.1 投入和产出变量

(1)投入变量。结合目前水稻生产效率测度的研究以及考虑了与水稻生产过程息息相关的社会经济和自然环境要素下,本文选取了土地、劳动力、农资、生长季平均温度、生长季降水量、生长季日照时长6个投入变量。①土地投入。以水稻单位播种面积所投入的土地成本表示,包括流转地租金和自营地折租两部分;②劳动力投入。以水稻单位播种面积所投入的劳动成本表示,包括家庭用工折价和雇工费用两部分;③农资投入。以水稻生产单位播种面积所投入的农资成本表示;④生长季平均温度。以水稻生长季的月均温度表示;⑤生长季降水量。以水稻生长季的月均降水量表示;⑥生长季日照时长。以水稻生长季的月均日照时长表示。

(2)期望产出。根据文献,产量或产值均可以作为水稻生产的期望产出^[8,13],但考虑到产值是产量与价格的乘积,一般只选择其中之一作为评价指标。基于数据可获得性,采用稻谷产值作为期望产出。数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。

(3)非期望产出。本文选取了水稻生产过程中产生的氮磷污染和碳排放作为非期望产出:①氮磷污染。以氮磷污染指数来表示,衡量水稻种植过程中单位面积上氮磷污染治理的费用^[31];②碳排放。以农资和水稻种植过程中产生的碳足迹表示,参照王兴等^[30]、刘勇等^[32]的做法,对不同稻作制度下中国

2024年7月

水稻种植过程中所产生的碳排放进行测算,并将测算结果作为非期望产出。

2.3.2 结果变量和条件变量

(1)结果变量。将2021年的水稻生产效率(Eff)作为结果变量。

(2)条件变量。根据QCA条件变量数量的选取原则,在借鉴李谷成等^[33]、田红宇等^[34]既有文献研究成果的基础之上,最终筛选出机械化水平、劳动力质量、自然灾害程度、水稻价格变动趋势作为影响水稻生产效率的条件变量。①机械化水平(Aml)。以农用机械总动力与农作物总播种面积之比来衡量。有学者表示,在种植业中,劳动者在生产过程中通过借助农用机械来辅助完成耕地、播种、收割、运输等高体力强度环节,不仅可以减少农业劳动时间投入,也可以扩大耕地规模^[33],进而提高土地利用率和作物产出效应^[35];②劳动力质量(Qua)。以平均每个雇工劳动一个标准劳动日(8小时)所得到的全部收入来衡量。劳动力质量反映了劳动力所拥有的技能、受教育和培训水平,其在一定程度上影响水稻的生产效率,研究表明水稻种植过程中存在劳动力质量约束并对水稻生产效率有较为显著的负面影响^[34];③自然灾害程度(Dis)。以农作物受灾面积与农作物总播种面积之比来衡量。自然灾害的发生会引起农作物外部环境的突变,使得原有投入要素的投入量和配置结构发生改变,导致农作物生长平衡遭到破坏,有效产出减少,造成农作物生产效率下降^[36]。同时,不同地区气候条件会存在差异,因此要因地制宜,根据自然灾害程度进行生产要素投入的优化配置和结构调整,进而提高生产效率^[37];④水稻价格变动趋势(Tre)。以水稻相对于上一年的零售价格指数来衡量。有学者认为,农户在做生产决策时会依据往年农作物的收购价格对下一年农作物的生产投入进行调整,最终导致生产效率波动^[38,39]。

2.4 数据来源、处理与校准

2.4.1 数据来源

土地、劳动力、农资投入成本、水稻产值、化肥用量、农膜、水稻种子等数据来源于2010—2022年的《全国农产品成本收益资料汇编》以及《中国农村统计年鉴》。省域逐月温度、降水量、日照时长来源于2010—2022年的中国气象科学数据共享服务网

《中国地面气候资料月值数据集》。参考Xue等^[40]的研究,水稻生产过程中单位面积上各类型水稻农药使用量为:早季稻(早籼稻和中籼稻)2.9 kg/hm²,晚季稻(晚籼稻和粳稻)为4.2 kg/hm²。

2.4.2 数据处理

本文根据《全国农产品成本收益资料独立统计数据料汇编》中关于氮肥、磷肥和复合肥的独立统计数据,基于《关于太湖流域氨氮、总磷排放指标有偿使用收费标准的通知》的政府文件^[41],将水稻种植过程中单位面积上氮肥、磷肥和复合肥的使用量转换为氮磷污染治理费用,其中复合肥是根据1:1的氮肥和磷肥组成来计算^[42],最后按照100:1的比例将氮磷污染治理费用转换为氮磷污染指数。

对于水稻从播种到收获过程中碳足迹的计算,主要考虑到化肥、农药、农膜等农资的使用以及作为水稻生育期中的主要排放源甲烷(CH₄)的碳排放,本文统一使用CO₂排放当量kgCO₂/hm²为测算单位。参考王兴等^[30]使用的农资投入碳足迹计算方法,可得到以下公式:

$$CF_i = \sum_{i=1}^u IP_i \times EF_i \quad (5)$$

式中: CF_i 为第*i*种投入的碳排放量; IP_i 为第*i*种投入的质量; EF_i 为第*i*种投入的排放系数(表1); u 为水稻生产过程中使用的化肥、水稻种子、农膜、农药等资源。考虑到水稻的产地和品种,参考闵继胜等^[42]测算和整理的中国各省份早、中和晚稻在生长周期内的CH₄碳排放系数,如表2所示。

2.4.3 数据校准

本文对条件变量(机械化水平、劳动力质量、自

表1 水稻种植过程中主要农资碳源排放系数

Table 1 Carbon source emission coefficients of major agricultural materials during rice cultivation

农资碳源	碳排放系数/ kgCO ₂ -eq/kg	参考来源
氮肥	5.20	CPCD
磷肥	2.33	CPCD
钾肥	0.66	CPCD
复合肥	2.47	CPCD
农药	13.50	CPCD
水稻种子	1.84	ecoinvent 2.2
农膜	22.72	ecoinvent 2.2

注:CPCD是中国产品全生命周期温室气体排放系数库,ecoinvent 2.2是瑞士全生命周期评估数据库(2.2版本)。

表2 中国各省域不同水稻类型甲烷(CH₄)排放系数 (g/m²)

Table 2 Emission coefficients of methane for different rice types at provincial level in China (g/m²)

省域	早稻	晚稻	中稻	省域	早稻	晚稻	中稻	省域	早稻	晚稻	中稻
北京	0.00	0.00	13.23	安徽	16.75	27.60	51.24	四川	6.55	18.50	25.73
天津	0.00	0.00	11.34	福建	7.74	52.60	43.47	贵州	5.10	21.00	22.05
河北	0.00	0.00	15.33	江西	15.47	45.80	65.42	云南	2.38	7.60	7.25
山西	0.00	0.00	6.62	山东	0.00	0.00	21.00	西藏	0.00	0.00	6.83
内蒙古	0.00	0.00	8.93	河南	0.00	0.00	17.85	陕西	0.00	0.00	12.51
辽宁	0.00	0.00	9.24	湖北	17.51	39.00	58.17	甘肃	0.00	0.00	6.83
吉林	0.00	0.00	5.57	湖南	14.71	34.10	56.28	青海	0.00	0.00	0.00
黑龙江	0.00	0.00	8.31	广东	15.05	51.60	57.02	宁夏	0.00	0.00	7.35
上海	12.41	27.50	53.87	广西	12.41	49.10	47.78	新疆	0.00	0.00	10.50
江苏	16.07	27.60	53.55	海南	13.43	49.40	52.29				
浙江	14.37	34.50	57.96	重庆	6.55	18.50	25.73				

注:该表参考闵继胜等^[42]的研究制作。

然灾害程度、水稻价格变动趋势)以及结果变量(生产效率)进行了数据校准。依据杜运周等^[43]的校准运用以及案例的实际情况,采用分位数直接校准法,90%、50%和10%分别为完全隶属、交叉点和完全不隶属的锚点,为了避免在前因条件的案例隶属度恰好为0.50的组态归属问题^[44],本文将0.5隶属度改为0.499。

3 结果与分析

3.1 水稻生产效率的测算和分析

3.1.1 水稻产出的年度变化

2009—2021年全国水稻实现了连年丰产,总产量从19620万t增加到21284万t,增幅约为8.48%。全国水稻单产水平呈波动增长态势(图1),从2009年的6585.3 kg/hm²增长到2021年的7113.4 kg/hm²,增幅约为8.02%;在期望产出上,全国稻谷产值总体

上呈增长态势,由2009年的14014.8元/hm²增长到2021年的20118.6元/hm²,增幅约为39.41%。受水稻价格波动影响,水稻产值起伏变动大,前期波动上升,2014年开始逐渐下降,呈持续递减态势,直到2019年才逐步回升,2012—2021年水稻产值呈现出增产不增值现象。

在非期望产出上(图2),2009—2021年单位面积上各类型水稻生产的碳排放量整体上呈现先上升后下降的趋势,且各类型水稻碳排放量均在2016年达到峰值,随后逐年减少。其原因在于,2016年全国早、中、晚水稻的化肥平均使用量分别为20.52、22.99、23.13 kg/亩,使用化肥造成的碳排放量达到顶值,而2017年农业农村部组织开展有机肥替代化肥行动^[45],一定程度上降低了水稻生产中的化肥使用。单位面积上粳稻生产的碳排放量整体上呈现波动变化态势,2009—2021年粳稻的总碳排放增量接近零,其原因在于,粳稻主要生长于北方和高海拔地区等单季稻稻作区,对化肥和农药的依赖低于主要生长于南方双季稻稻作区的籼稻,因此碳排放受政策的影响相对较小。各类型水稻的氮磷污染指数常年居高不下,水稻整体的氮磷污染指数均值为2.39,且年均增速达29.59%。其中籼稻的氮磷污染指数增长趋势明显,平均增速为32.34%,而中籼稻增速最快,约40.16%。相比于籼稻,粳稻的氮磷污染指数增速有所下降,年均增速21.32%,但氮磷污染指数均值仍达2.53,处于较高水平。总之,水稻的碳排放和氮磷污染主要来自化肥,其次是生长周

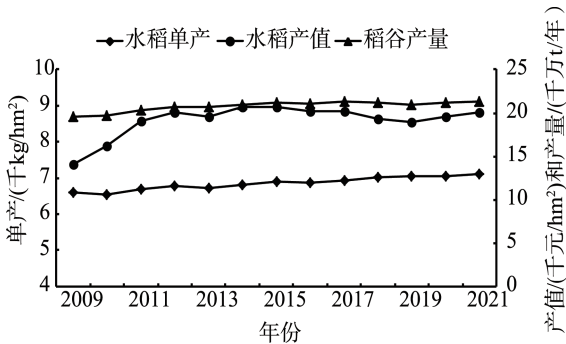


图1 2009—2021年中国水稻的总产量、单产和产值

Figure 1 Total rice production, yields and production value in China, 2009—2021

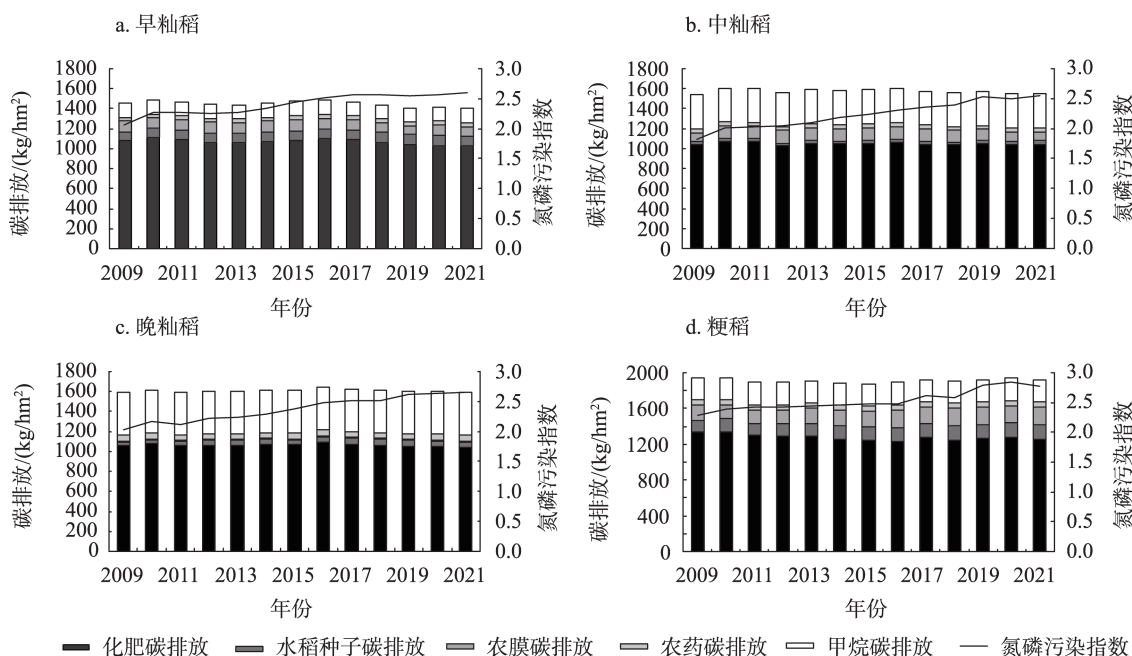


图2 2009—2021年中国水稻的非期望产出

Figure 2 Unexpected output of rice in China, 2009–2021

期中产生的甲烷。

3.1.2 水稻生产效率时间演变趋势

运用MAXDEA6.0软件测算2009—2021年中国水稻的生产效率(图3),发现早籼稻和粳稻生产效率的历年变化相对稳定,早、中和晚籼稻的年平均值为1.0065、0.9769和0.9380;而粳稻生产效率以2013年的0.9447为拐点,先减后增,以升为主,年平均值为1.0089,说明粳稻生产效率总体上有上升趋势。总的来说,在资源环境约束下,各类型水稻的生产效率均值都处于较高水平,其中粳稻>早籼稻>中籼稻>晚籼稻,粳稻相较于籼稻有更好的表现力。

除此之外,早、中、晚籼稻和粳稻历年生产效率

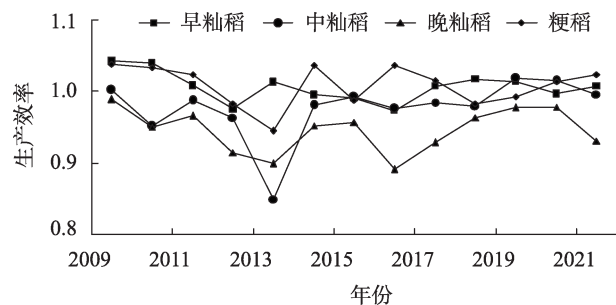


图3 2009—2021年中国水稻生产效率历年变化趋势

Figure 3 Trends in rice productivity in China, 2009–2021

均值达到DEA有效的比例分别为77.78%、67.13%、58.12%、76.92%。总体来看,早籼稻和粳稻的投入有更多的期望产出,生产效率相对较高,资源配置更合理(图4)。具体来讲,籼稻各年DEA有效的比例变化波动较大,而粳稻相对稳定。基于投入与产出冗余的视角,以早籼稻为例分析可知,2009—2014年土地和劳动力投入冗余突出(表3),到2015年,投入逐渐恢复正常,仅2016年存在少量劳动力和土地投入冗余,2019—2020年少量土地投入冗

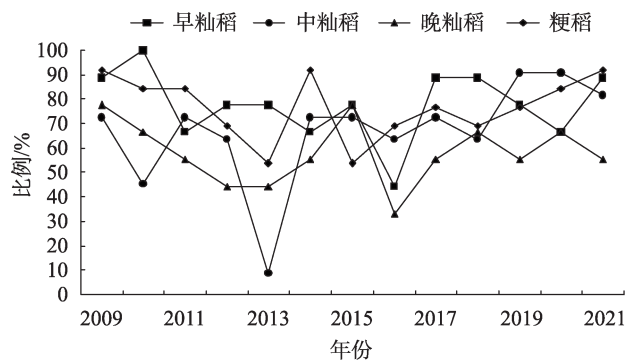


图4 2009—2021年水稻生产效率达到DEA有效的省份占全部省份的比例

Figure 4 Proportion of provinces with data envelopment analysis (DEA)-effective production efficiency in rice in all studied provinces, 2009–2021

表3 2009—2021年早籼稻的全国平均生产效率的来源分解

Table 3 Source decomposition of national average productivity of early indica rice, 2009–2021

年份	生产效率	投入冗余						期望产出不足	非期望产出冗余	
		土地投入	劳动力投入	农资投入	生长季平均温度	生长季降水量	生长季日照时长	水稻产值	氮磷污染指数	碳排放
2009	0.8856	-140.23	-183.92	0.00	-0.95	-1351.03	0.00	0.00	-520.88	-61.01
2010	0.8328	-20.70	-843.48	-46.55	-1.57	-1659.51	0.00	0.00	-885.79	-108.41
2011	0.8971	-247.34	0.00	0.00	0.00	-632.29	-31.00	0.00	-367.21	-67.50
2012	0.8576	-171.52	-2399.74	0.00	-0.60	-1773.53	0.00	0.00	-359.50	-44.69
2013	0.8455	-143.70	-4023.83	0.00	-0.17	-674.80	-19.56	0.00	-272.10	-13.19
2014	0.8909	-99.62	-2843.37	0.00	-0.23	-1068.43	0.00	0.00	-308.53	-25.96
2015	0.9228	0.00	0.00	-37.40	-1.48	-2567.53	-52.85	0.00	-439.23	-20.63
2016	0.8391	-175.52	-359.33	-620.33	-2.10	-2108.60	-147.82	0.00	-751.03	-174.91
2017	0.9073	0.00	0.00	0.00	-0.45	-1505.20	-20.65	0.00	-257.32	-44.43
2018	0.9129	0.00	0.00	-444.75	-1.97	0.00	-88.49	0.00	-442.48	-46.90
2019	0.8760	-169.49	0.00	-600.07	-0.95	-2379.65	0.00	0.00	-551.04	-81.11
2020	0.8513	-437.34	0.00	-1100.64	-1.75	-2583.11	-56.99	0.00	-309.34	-30.24
2021	0.9234	0.00	0.00	-716.80	-0.81	-2052.40	0.00	0.00	-326.87	-8.14

余,其余年份均无冗余,说明“十二五”期间,政府部门大力发展农业科技,促进土地利用率和劳动生产率大幅度提高,截至2021年底,农作物耕、种、收综合机械化水平达到72%,良种对农业增产的贡献率达到45%以上^[46],表明水稻生产已由高劳动力投入向高技术投入转变。除此之外,农资投入、氮磷污染指数和碳排放产出冗余较高,表明水稻种植对化肥、农药等农资投入的依赖程度较高。而在环境投入因素中,生长期的平均气温和日照时长冗余较少,降水量冗余常年较高,这是由于籼稻一般处在夏秋季节生长,此期间全国各地极端天气较多,因此容易形成洪水和干旱等灾害并危害籼稻生长,一方面,暴雨造成短时间强降水,不利于水稻开花授粉,也不利于水稻生长发育;另一方面,干旱造成大面积缺水,影响种子发芽率,降低水稻产量^[47]。综上,水稻产投系统中的冗余主要体现在农资、降水量、污染和碳排放等要素上,因此,提高水稻生产效率需要在防灾、减排、降污等多方面付出努力。

3.1.3 水稻生产效率演变的区域差异

本文比较分析了2009—2021年六大稻作区生产效率的差异(表4),并分别观察不同省份水稻生产效率值的年际变化(图5)。

(1)华中单双季稻稻作区。所在地区主要分布于长江中下游平原,自然环境和地理条件优越,水稻的品种丰富。早籼稻、晚籼稻和粳稻的生产效率

年均值都大于1,大部分省份均为生产效率有效。在早籼稻和晚籼稻中,湖南、湖北实现了2009—2021年历年生产效率有效,且湖南的生产效率年均值排名位居第一。同时种植晚籼稻的各省份生产效率年均值都高于全国平均水平,生产配置水平较高。除此之外,在大部分年份中,除江西和安徽外,其他省份的生产效率实现了生产有效。

(2)西北干燥区单季稻稻作区。所在地区气候干旱、光能资源丰富。总体上,此稻作区水稻生产效率年均值都大于1。2009—2021年陕西的生产效率年均值排名位居中籼稻第一,并且盛产粳稻的宁夏多年实现了生产效率有效,生产效率持续处于相对较高水平。

(3)华南双季稻稻作区。所在地区气候条件适宜、降水量丰富,以种植籼稻为主。种植早籼稻的广东、中籼稻的福建以及晚籼稻的广东和广西的生产效率年均值低于全国平均水平,而种植早籼稻和晚籼稻的海南生产效率年均值高于全国平均水平。可见,广东和广西两省的水稻效率较低,原因在于两广地区6—10月受暴雨、台风等自然因素影响使降水量投入冗余,而强降水不利于水稻发育。虽2018年后生产效率有上升趋势,但仍需要改善投入产出配置,以提高生产效率。

(4)东北早熟单季稻稻作区。所在地区近20年来大力推广灌溉技术,稻作面积不断扩大,成为粳

表4 2009—2021年中国水稻区域生产效率比较

Table 4 Comparison of productivity of rice in China by region, 2009–2021

产 区		早籼稻			中籼稻			晚籼稻			粳稻		
		效率	排名	均值	效率	排名	均值	效率	排名	均值	效率	排名	均值
华中单双季稻	浙江	1.0362	4	1.0135	—	—	0.9866	1.0277	3	1.0108	1.0226	5	1.0289
	江西	0.9536	8	—	—	—	—	0.9560	7	—	—	—	—
	安徽	0.9951	7	—	0.9315	10	—	0.9879	4	—	1.0068	9	—
	湖北	1.0325	5	—	1.0087	4	—	1.0318	2	—	1.0763	2	—
	湖南	1.0502	1	—	0.9408	9	—	1.0505	1	—	—	—	—
	江苏	—	—	—	1.0050	6	—	—	—	—	1.0097	7	—
	重庆	—	—	—	1.0063	5	—	—	—	—	—	—	—
	四川	—	—	—	1.0273	3	—	—	—	—	—	—	—
西北干燥区单季稻	宁夏	—	—	—	—	1.0556	—	—	—	1.0554	3	1.0554	
	陕西	—	—	—	1.0556	1	—	—	—	—	—	—	—
华南双季稻	福建	1.0396	3	0.9977	0.7615	11	0.7615	0.9631	5	0.8653	—	—	—
	广东	0.8991	9	—	—	—	—	0.7488	9	—	—	—	—
	广西	1.0082	6	—	—	—	—	0.7933	8	—	—	—	—
	海南	1.0440	2	—	—	—	—	0.9561	6	—	—	—	—
东北早熟单季稻	内蒙古	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0112	6	1.0032
	辽宁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.9425	12	—
	吉林	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.9777	10	—
	黑龙江	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0812	1	—
西南单双季稻	云南	—	—	—	0.9723	8	0.9788	—	—	—	1.0357	4	1.0357
	贵州	—	—	—	0.9852	7	—	—	—	—	—	—	—
华北单季稻	河南	—	—	—	1.0523	2	1.0523	—	—	—	1.0096	8	0.9656
	河北	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.9234	13	—
	山东	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.9637	11	—
全国均值		1.0065			0.9769			0.9380			1.0089		

稻的主产地之一。总体上,2009—2021年生产效率均值接近1。黑龙江粳稻的生产效率年均值排名第一,并实现了历年生产效率有效,生产效率处于较高水平。

(5)西南单双季稻稻作区。所在地区海拔高度差异显著,水稻垂直分布明显,但主要以中籼稻、粳稻为主。种植粳稻的云南省生产效率较高且年均值大于1,种植中籼稻的贵州省在大多数年份都生产有效。

(6)华北单双季稻稻作区。总体上,种植的水稻类型以中籼稻和粳稻为主,河南的生产效率年均值都大于1且高于全国平均水平,而河北和山东的生产效率年均值都低于全国平均水平。2009—2018年山东省的生产效率都大于1,处于生产有效,但2019—2021年由于粳稻期产出降低,使生产效率有所下降。而河北省历年的生产效率变化波动大,低于全国平均水平的年份居多,但从2016年起,生

产效率提升显著,从产投冗余的角度对比分析可知,2016年后河北省的劳动力投入和碳排放显著降低,使得多数年份水稻生产效率提高并实现生产有效。

总体上,早、中、晚籼稻和粳稻所选样本省份中,分别有66.67%、63.64%、77.78%和38.46%省份的水稻生产效率年均值高于全国平均水平。除此之外,中国六大稻作区生产效率区域差异显著。华中和西北稻作区水稻生产效率均值大于1且高于全国平均水平,东北稻作区水稻生产效率均值大于1但低于全国平均水平,华南稻作区生产效率均值低于全国平均水平,西南稻作区生产效率均值高于全国平均水平,其粳稻生产效率高于1,华北稻作区中籼稻生产效率均值高于全国平均水平,而粳稻生产效率低于全国平均水平。华中稻作区水稻种植优势明显,产生这种结果的原因,一部分可能是华中稻作区水资源和光资源丰富,自然灾害较少,另一

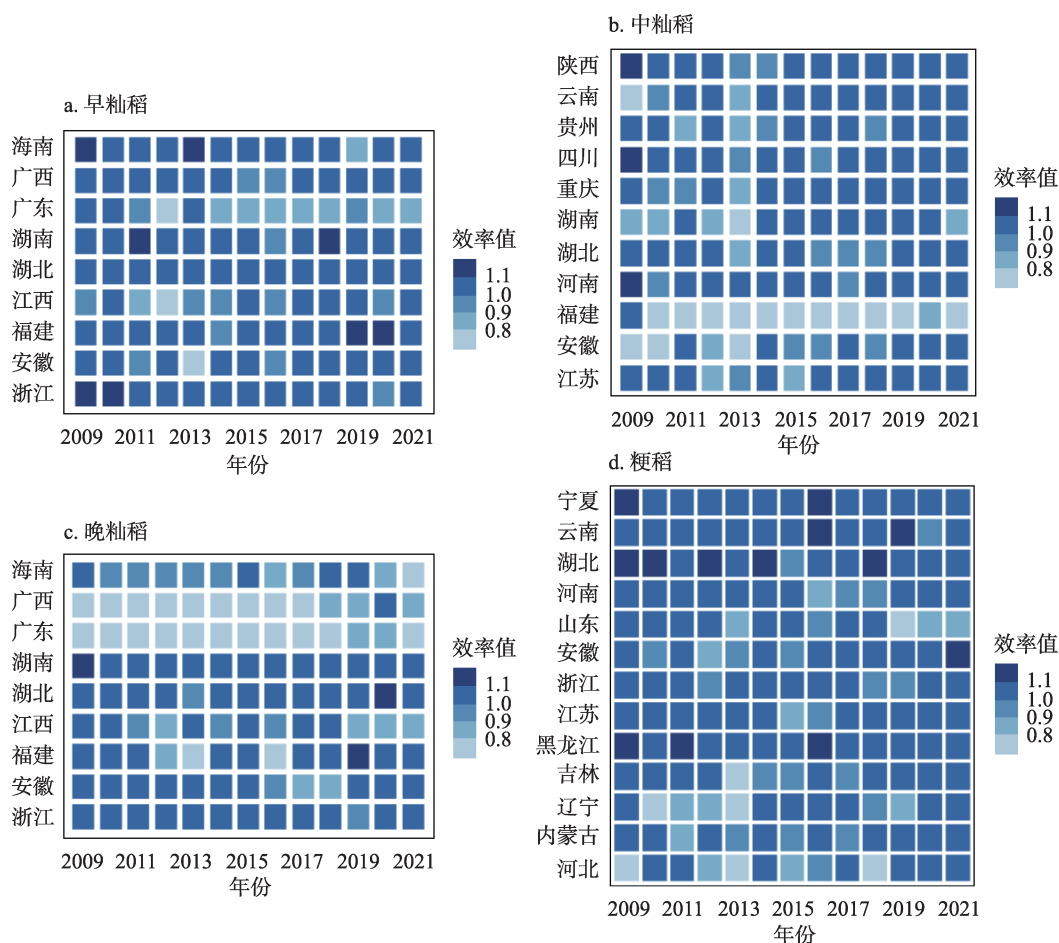


图5 2009—2021年中国水稻生产效率年际变化的省际比较

Figure 5 Interprovincial comparison of interannual changes in rice production efficiency in China, 2009–2021

部分是华中稻作区自古农耕文化悠久,农业科技投入较多、开放程度较高、污染管控更严格、治理更全面、农民的环保意识更强,因此有较高的生态水平^[48]。而其他地区如华南稻作区的广东、广西受自然因素制约^[49],华北稻作区的河北、山东等地近些年发展程度进步较大,但农业现代化水平集约化程度较弱、污染治理力度不强^[50],这些因素都会造成生产效率低下。

3.2 生产效率提升路径分析

3.2.1 单个条件的必要性分析

在条件组态分析之前,需要对条件变量进行必要性检验,检验单个条件变量出现或不出现是否可以作为水稻生产效率提高的必要条件,一般情况下,当一致性>0.9时,该条件就是结果的必要条件^[51]。本文运用fsQCA4.0计算得到4个前因变量出现和不出现的一致性和覆盖率(表5),从检验结果来看,

所有单一变量的一致性<0.9,显然不构成水稻生产效率提高的必要条件,故应对所有前因变量予以保留。这表明,每个水稻种植省份并不一定是通过某一特定条件来提高水稻生产效率,而是有其独特的发展路径。

3.2.2 条件组态分析

参考前人的研究^[41,52],以及结合研究案例在真值表中的分布,本文将频次阈值设置为1,一致性阈值设置为0.8,并要求PRI一致性大于0.75。通过fsQCA软件可得到中间解、简单解和复杂解3种,本文综合考虑中间解和简单解,将二者都存在的条件设置为核心条件,将中间解存在而简单解不存在的条件设置为边缘条件。得到最终条件变量构型如表6所示,早、中、晚籼稻以及粳稻分别有1、1、2、2条组态路径能够提高水稻的生产效率。各品种水稻的总体一致性以及每条路径的一致性均大于0.8,

表5 fsQCA对单个条件的必要性检验

Table 5 The fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA) necessity test for individual conditions

水稻 类型	结果 变量	一致性和 覆盖率	前因条件							
			<i>Aml</i>	$\sim Aml$	<i>Qua</i>	$\sim Qua$	<i>Dis</i>	$\sim Dis$	<i>Tre</i>	$\sim Tre$
早籼稻	<i>Eff</i>	一致性	0.6698	0.5653	0.5820	0.5802	0.5951	0.6978	0.6623	0.6231
		覆盖率	0.7194	0.6048	0.5810	0.6717	0.6905	0.6952	0.6466	0.7406
	$\sim Eff$	一致性	0.5733	0.6983	0.6724	0.5150	0.6465	0.6918	0.7478	0.5818
		覆盖率	0.5331	0.6497	0.5810	0.5162	0.6493	0.5966	0.6320	0.5986
中籼稻	<i>Eff</i>	一致性	0.5987	0.6476	0.4942	0.7749	0.6362	0.6672	0.8499	0.5269
		覆盖率	0.5835	0.6953	0.5674	0.7132	0.7130	0.6263	0.7870	0.6004
	$\sim Eff$	一致性	0.7036	0.6566	0.6746	0.6065	0.5843	0.7325	0.6337	0.7598
		覆盖率	0.5537	0.5692	0.7416	0.5345	0.6271	0.6585	0.5619	0.8290
晚籼稻	<i>Eff</i>	一致性	0.7359	0.4563	0.6542	0.5303	0.5320	0.6252	0.5631	0.6330
		覆盖率	0.7595	0.4691	0.6139	0.6053	0.5931	0.5985	0.5282	0.7229
	$\sim Eff$	一致性	0.4515	0.4389	0.6328	0.5631	0.5546	0.6124	0.7423	0.4660
		覆盖率	0.7526	0.7285	0.5592	0.6053	0.5823	0.5520	0.6557	0.5011
粳稻	<i>Eff</i>	一致性	0.5694	0.7503	0.5860	0.5949	0.6764	0.6548	0.6459	0.6713
		覆盖率	0.6692	0.8046	0.6775	0.6477	0.8608	0.6564	0.7111	0.7671
	$\sim Eff$	一致性	0.7675	0.6407	0.5870	0.6439	0.5624	0.8603	0.7399	0.6650
		覆盖率	0.7066	0.5383	0.5317	0.5492	0.5607	0.6756	0.6381	0.5953

注:~表示“非”。下同。

表6 水稻生产效率的前因组态

Table 6 Antecedent grouping patterns in rice productivity

	构型					
	早籼稻		中籼稻		晚籼稻	
	1a	2a	1b	1c	3	2b
机械化水平 <i>Aml</i>	●	⊗	●	●	⊗	⊗
劳动力质量 <i>Qua</i>	⊗	⊗	⊗		●	⊗
自然灾害程度 <i>Dis</i>	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
水稻价格变动趋势 <i>Tre</i>		●		⊗	⊗	●
一致性	0.9631	0.9301	0.9580	0.8964	0.8373	0.9638
原始覆盖度	0.3899	0.4339	0.4427	0.3359	0.3894	0.2357
唯一覆盖度	0.3899	0.4339	0.2718	0.1650	0.2688	0.1350
总体一致性	0.9631	0.9301	0.9125		0.8982	
总体覆盖度	0.3899	0.4339	0.6078		0.5045	

注:●=核心条件存在;⊗=核心条件缺失;⊙=边缘条件缺失;“空白”表示该条件变量在此构型下可以存在也可以不存在。下同。

证实了这些组态对于结果产生的充分性,且总体覆盖度较高,表明这些组态能较大程度上解释提升水稻生产效率的原因。此外,根据表6构型合并结果,归纳得到3条提升水稻生产效率的主要路径,如图6所示。

(1)技术服务型提升路径。组态1a和1b指出以高机械化水平、非高劳动力质量为核心条件,非高自然灾害程度为边缘条件的外部因素可以充分地

产生高的水稻生产效率,组态1c指出以高机械化水平、非高自然灾害程度、非高水稻价格变动趋势为核心条件可以充分实现高水稻生产效率。比较1a、1b和1c,可以发现两者在核心条件上相同,仅在边缘条件上存在替代关系(1a、1b的非高劳动力质量与1c中非高水稻价格变动趋势),这反映出,在这些省份劳动力质量不高、自然灾害程度较低和价格波动不大的情况下,可以通过提升机械化水平提高双

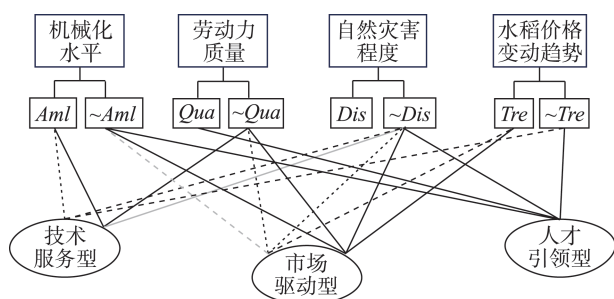


图6 中国水稻生产效率提升路径

Figure 6 Paths to improve rice production efficiency in China

注:实线和虚线分别代表同一路径下不同的构型;黑色线和灰色线分别代表核心条件和边缘条件。

季稻(早籼稻和晚籼稻)的生产效率。在湖北、湖南等双季稻主产区,主要的农业经营形式是以小农户为主、具有分散式特征的家庭经营^[53],导致农用机械和技术精细化需求,如果不能提供一定规模水平的农机服务,那么机械化水平对粮食生产效率的溢出效应就难以提升^[54,55],其农用机械和技术需求具有精细化的特点。因此,应该大力发展农业机械技术,提升对农户的技术服务水平,进而提高生产效率。

(2)市场驱动型提升路径。组态2a和2b指出以非高劳动力质量、非高自然灾害程度、高水稻价格变动趋势为核心条件,非高机械化水平为核心或边缘条件的外部因素可以充分地实现高的水稻生产效率。这条路径表明,在这些省份机械化水平不高、劳动力质量欠佳和自然灾害程度较低的情况下,通过提高水稻的市场价格,可以促进中籼稻和粳稻的生产效率。这说明水稻零售价格高对中籼稻和粳稻的生产效率具有正向溢出效应。根本原因在于价格上升提高了农业生产利润,这会吸引农户增加生产资料投入和扩大生产规模,从而影响到下一期农户的生产决策,导致农户可能进行生产结构的调整,最终影响水稻的生产效率^[47]。可以说,粮食市场价格是水稻生产的“风向标”。

(3)人才引领型提升路径。组态3指出以非高机械化水平、高劳动力质量、非高自然灾害程度、非高水稻价格变动趋势为核心条件的外部因素可以充分实现高水稻生产效率。此路径表明,这些省份在机械化程度差异不显著、自然灾害程度较低和粮食价格变动趋势不大的情况下,高劳动力质量对提高粳稻生产效率具有积极作用。可能的原因在于,

黑龙江、吉林、辽宁等农业大省作为粳稻主产区,是以家庭农场、合作社以及村集体为代表的专业化新型农业经营主体为主,其粮食生产具有规模化、集约化等特点,因此对具备高素质的农业生产人才需求较高,而雇用高质量劳动力不仅可以弥补自身劳动力的不足,还能为生产带来分工与专业化协作的优势,进而发挥显著的正向效应^[56]。因此,劳动力高质量发展是提高生产效率的强大持续动力。

3.2.3 稳健性检验

为确保研究结果的可靠性,本文采用提高或降低一致性阈值的方法进行稳健性检验^[50,57],在其他条件保持不变的情况下,将一致性阈值从0.8提高到0.85进行组态分析(表7)。对比表6和表7可知,籼稻路径组合以及核心程度没有发生变化,只有粳稻少了一条以非高机械化水平、非高劳动力质量、非高自然灾害程度、高价格变动趋势为核心条件的组态路径,总体上水稻的提升路径没有发生变化,结果仍有较好的可信度,故本文fsQCA的研究结果通过稳健性检验。

表7 稳健性检验结果

Table 7 Robustness test results

条件变量	构型				
	早籼稻	中籼稻	晚籼稻	粳稻	
	1a	2a	1b	1c	3
机械化水平 <i>Aml</i>	●	⊗	●	●	⊗
劳动力质量 <i>Qua</i>	⊗	⊗	⊗		●
自然灾害程度 <i>Dis</i>	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
水稻价格变动趋势 <i>Tre</i>		●		⊗	⊗
一致性	0.9631	0.9301	0.9580	0.8964	0.9638
原始覆盖度	0.3899	0.4339	0.4427	0.3359	0.3694
唯一覆盖度	0.3899	0.4339	0.2718	0.1650	0.3694
总体一致性	0.9631	0.9301	0.9125		0.9638
总体覆盖度	0.3899	0.4339	0.6078		0.3694

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于超效率SBM模型测算了2009—2021年中国不同类型水稻的生产效率,总结了不同时期、不同区域的水稻生产效率特征,并利用fsQCA方法研究了中国水稻生产效率提升的路径。主要结论如下:

(1)全国水稻实现连年丰产,单产水平增幅达

2024年7月

8.02%。在期望产出上,稻谷产值总体上呈增长态势且总体增幅达39.41%。在非期望产出上,各类型粳稻生产的碳排放量整体呈现先上升后下降趋势,其在2016年达到峰值,随后逐年减少。而粳稻生产的碳排放量整体上呈波动态势并且13年内的碳排放增量接近为0。除此之外,各类型水稻的氮磷污染指数常年居高不下,水稻整体的氮磷污染指数均值为2.39,且年均增速高达29.59%。总而言之,水稻的碳排放主要是来自于化肥和水稻生长过程中产生的甲烷。

(2)在资源环境约束下,早、中、晚粳稻和粳稻历年生产效率均值达到DEA有效的比例分别为77.78%、67.13%、58.12%、76.92%。整体上,各类型水稻的生产效率均值都处于较高水平,但粳稻的表现能力优于粳稻,除此之外,各类型水稻仍存在农资和降水量投入以及氮磷污染指数和碳排放产出冗余的问题。

(3)从总体上看,中国六大水稻稻作区的生产效率存在显著的区域差异,华中稻作区水稻种植类型丰富,早粳稻、晚粳稻和粳稻都实现了生产有效,其中湖北和浙江各类型水稻的生产效率年均值都大于1;西北和西南稻作区以中粳稻和粳稻种植为主,其生产效率均值都高于全国平均水平,陕西的中粳稻生产效率年均值全国第一;华南稻作区以早粳稻和晚粳稻种植为主,生产效率均值低于全国平均水平,其中广东和广西的生产效率年均值较低,水稻种植的投入产出效率还有待提高;东北和华北稻作区以粳稻种植为主,生产效率均值都低于全国平均水平,但黑龙江的生产效率年均值全国第一并实现了历年生产有效。

(4)机械化水平、劳动力质量、自然灾害程度、水稻价格变动趋势多个前因条件组合形成了提升水稻生产效率的6种组态,并归纳得到3条主要路径,分别是技术服务型、市场驱动型和人才引领型。从不同的路径类型可以看出,粳稻与粳稻之间生产效率的提升既存在同一种发展方式也存在差异化道路。

4.2 政策建议

为提高中国水稻的生产效率,实现水稻绿色可持续发展,本文提出以下政策建议:

(1)积极创新农机装备技术,提高农业机械化

水平。机械化对农业高质量发展具有重要意义,因此需要积极创新农机装备技术,充分发挥农机的溢出效应,为农业生产增产减损、节本增效。同时,各地区应推进高水平农机服务,并合理利用“鲇鱼效应”扩大施用效率高的地区对效率低的积极影响,实现区域装备技术的协调发展,实现技术的外溢和收敛,在资源有限的范围内提升水稻生产能力。

(2)完善目标价格制度,确保作物“优种优收”。价格变动趋势作为水稻生产效率的核心条件之一,它会影响农户生产决策偏好和积极性,因此,政府可以通过一定差价补贴的方式进行宏观调控,在确保粮食稳产保供的前提下,促进农户实现“优种优收”,形成可靠的大食物安全体系。

(3)加大农业科技推广力度,提升农业劳动力质量。在现代农业规模化、集约化的发展趋势下,为实现农业发展由增产导向转向提质导向,以及解决大量农村优质劳动力向非农行业转移的问题,农业部门需要加大农业教育投入,因地制宜地开展农业技术培训,进而提升农业劳动力质量,并注重人力资源积累,真正实现“质量兴农、人才强农”。

参考文献(References):

- [1] 周洁红,刘青,王煜.气候变化对水稻质量安全的影响:基于水稻主产区1063个农户的调查[J].浙江大学学报(人文社会科学版),2017,47(2):148-160.[Zhou J H, Liu Q, Wang Y. The impact of climate change on quality and safety of rice: Based on the survey of 1063 farmers in main rice production region[J]. Journal of Zhejiang University (Humanities and Social Sciences), 2017, 47 (2): 148-160.]
- [2] 中国国家统计局.国家统计局关于2022年粮食产量数据的公告[EB/OL].(2022-12-12)[2023-08-01].http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901673.html. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Announcement of the National Statistical Office on Grain Production Data for 2022[EB/OL]. (2022-12-12) [2023-08-01]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901673.html.]
- [3] 李鸣钰,高西宁,潘婕,等.未来升温1.5℃与2.0℃背景下中国水稻产量可能变化趋势[J].自然资源学报,2021,36(3):567-581.[Li M Y, Gao X N, Pan J, et al. Possible trends of rice yield in China under global warming by 1.5℃ and 2.0℃[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 567-581.]
- [4] 中国国家统计局.全国农产品成本收益资料汇编[M].北京:中国统计出版社,2022.[National Bureau of Statistics of the People's

- Republic of China. National Farm Product Cost-Benefit Survey [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.]
- [5] 中国农业农村部. 种植业高质量发展成效显著[N/OL]. (2022-12-26) [2023-08-01]. https://www.moa.gov.cn/ztzl/zyncgzh2022/pd2022/202212/t20221226_6417613.html. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. High-Quality Development of the Plantation Industry Has Been Effective [N/OL]. (2022-12-26) [2023-08-01]. https://www.moa.gov.cn/ztzl/zyncgzh2022/pd2022/202212/t20221226_6417613.html.]
- [6] Scott R, 黄季焜. 中国的农村经济与通向现代工业国之路[J]. 经济学(季刊), 2005, 4(4): 1019-1042. [Scott R, Huang J K. China's rural economy and the path to a modern industrial state[J]. China Economic Quarterly, 2005, 4(4): 1019-1042.]
- [7] 刘颖, 洪道远. 要素投入、技术效率与水稻生产潜力研究: 基于湖北省农村固定观察点的面板数据[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018, (3): 35-43. [Liu Y, Hong D Y. Study on factors investment, technical efficiency and potential of rice production: Panel data based on fixed observation points in Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018, (3): 35-43.]
- [8] 闵锐, 谢雨濛, 黄炜虹, 等. 中国粮食生产技术进步偏向与增长路径选择[J]. 统计与决策, 2023, 39(15): 89-93. [Min R, Xie Y M, Huang W H, et al. Technological progress bias and growth path selection in China's grain production[J]. Statistics & Decision, 2023, 39(15): 89-93.]
- [9] 庞艳梅, 陈超, 郭晓艺, 等. 1961-2015年西南区域单季稻生长季气候年型及其生产潜力分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 476-489. [Pang Y M, Chen C, Guo X Y, et al. Analysis of annual climate types and potential yield for single cropping rice in Southwest China during 1961-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 476-489.]
- [10] 刘芳, 刘颖. 我国水稻生产中不同类型技术要素投入的时空变化及门限效应分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 2002-2014. [Liu F, Liu Y. Temporal and spatial changes and threshold effects of different types of technical inputs in rice production in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 2002-2014.]
- [11] 黄玛兰, 李晓云, 游良志. 农业机械与农业劳动力投入对粮食产出的影响及其替代弹性[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018, (2): 37-45. [Huang M L, Li X Y, You L Z. Impact of agricultural machinery and agricultural labor investment on grain production and its elasticity of substitution[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018, (2): 37-45.]
- [12] 张强, 张戈丽, 朱道林, 等. 1980-2018年中国水稻生产变化的时空格局[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 687-700. [Zhang Q, Zhang G, Zhu D L. Spatiotemporal patterns of paddy rice production change in China during 1980-2018[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 687-700.]
- [13] Li Z H, Wu X L, Wang X C, et al. Measurement and analysis of contribution rate for China rice input factors via a varying-coefficient production function model[J]. Agriculture, 2022, DOI: 10.3390/agriculture12091431.
- [14] 张仁慧, 马林燕, 赵凯, 等. 农业生产托管对粮食绿色生产效率的提升作用[J]. 资源科学, 2023, 45(11): 2248-2263. [Zhang R H, Ma L Y, Zhao K, et al. The role of agricultural production trusteeship in improving green production efficiency of grain[J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2248-2263.]
- [15] 肖锐, 陈池波. 财政支持能提升农业绿色生产率吗? 基于农业化学品投入的实证分析[J]. 中南财经政法大学学报, 2017, (1): 18-24. [Xiao R, Chen C B. Can financial support promote agricultural green productivity? An empirical evidence from agricultural chemicals input[J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2017, (1): 18-24.]
- [16] Sharma S, Majumdar K. Efficiency of rice production and CO₂ emissions: A study of selected Asian countries using DDF and SBM-DEA[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2021, 64(1): 1-23.
- [17] 黄玛兰, 曾琳琳, 李晓云. LCA和DEA法相结合的农业生产效率研究: 兼顾绿色认知和环境规制的影响[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022, (1): 94-104. [Huang M L, Zeng L L, Li X Y. Joint life cycle assessment and data envelopment analysis for assessing agriculture eco-efficiency: Considering the impacts of green cognition and government regulations[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2022, (1): 94-104.]
- [18] 王萍萍, 韩一军. 我国粮食作物化肥施用技术效率的时空效应研究: 基于小麦、水稻的实证分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(6): 34-45. [Wang P P, Han Y J. Spatial correlation and time trend effect of chemical fertilizers' technical efficiency for crops in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(6): 34-45.]
- [19] 张利国, 谭笑, 肖晴川, 等. 基于气候资源投入的中国农业生态效率测度与区域差异[J]. 经济地理, 2023, 43(4): 154-163. [Zhang L G, Tan X, Xiao Q C et al. Agricultural eco-efficiency measurement and regional difference in China based on the climate resource input[J]. Economic Geography, 2023, 43(4): 154-163.]
- [20] 吉雪强, 张跃松. 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及动因[J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 675-693. [Ji X Q, Zhang Y S. Spatial correlation network structure and motivation of carbon emission efficiency in planting industry in the Yangtze Riv-

2024年7月

- er Economic Belt[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(3): 675–693.]
- [21] 吴启余, 曾刚, 杨阳, 等. 长三角城市绿色创新效率时空演变与绿色创新网络驱动效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(3): 461–471. [Wu Q Y, Zeng G, Yang Y et al. Spatiotemporal evolution of green innovation efficiency in cities of the Yangtze River Delta and the driving effect of green innovation network[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(3): 461–471.]
- [22] 盛科荣, 王丽萍, 孙威. 网络权力、知识溢出对中国城市绿色经济效率的影响[J]. *资源科学*, 2021, 43(8): 1509–1521. [Sheng K R, Wang L P, Sun W. Impacts of network power and knowledge spillovers on China's urban green economic efficiency[J]. *Resources Science*, 2021, 43(8): 1509–1521.]
- [23] Kaoru T. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498–509.
- [24] 成刚. 数据包络分析方法与MaxDEA软件[M]. 北京: 知识产权出版社, 2014. [Cheng G. *Data Envelopment Analysis: Methods and MaxDEA Software*[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2014.]
- [25] Kaoru T. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32–41.
- [26] Kaoru T. Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-Based Measure (SBM) Approach[C]. Toronto: NAPW III, 2004.
- [27] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中QCA方法的应用: 定位、策略和方向[J]. *管理学报*, 2019, 16(9): 1312–1323. [Zhang M, Du Y Z. Qualitative Comparative Analysis (QCA) in management and organization research: Position, tactics, and directions[J]. *Chinese Journal of Management*, 2019, 16(9): 1312–1323.]
- [28] Rihoux B, Ragin C C. *Configurational Comparative Methods: Qualitative Comparative Analysis (QCA) and Related Techniques*[M]. New York: Sage Publications, 2008.
- [29] 杜运周, 李佳馨, 刘秋辰, 等. 复杂动态视角下的组态理论与QCA方法: 研究进展与未来方向[J]. *管理世界*, 2021, 37(3): 180–197. [Du Y Z, Li J X, Liu Q C, et al. Configurational theory and QCA method from a complex dynamic perspective: Research progress and future directions[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(3): 180–197.]
- [30] 王兴, 赵鑫, 王钰乔, 等. 中国水稻生产的碳足迹分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(4): 713–722. [Wang X, Zhao X, Wang Y Q, et al. Assessment of the carbon footprint of rice production in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(4): 713–722.]
- [31] 崔晓, 张屹山. 中国农业环境效率与环境全要素生产率分析[J]. *中国农村经济*, 2014, (8): 4–16. [Cui X, Zhang Y S. Analysis of environmental efficiency and environmental total factor productivity in Chinese agriculture[J]. *China Rural Economy*, 2014, (8): 4–16.]
- [32] 刘勇, 张俊飏, 张露. 基于DEA-SBM模型对不同稻作制度下我国水稻生产碳排放效率的分析[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(6): 177–186. [Liu Y, Zhang J B, Zhang L. Analysis of carbon emission efficiency of rice in China under different rice planting patterns based on the DEA-SBM model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(6): 177–186.]
- [33] 李谷成, 李烨阳, 周晓时. 农业机械化、劳动力转移与农民收入增长: 孰因孰果?[J]. *中国农村经济*, 2018, (11): 112–127. [Li G C, Li Y Y, Zhou X S. Agricultural mechanization, labor transfer and the growth of farmer's income: A re-examination of causality [J]. *China Rural Economy*, 2018, (11): 112–127.]
- [34] 田红宇, 付玮琼. 农户务农劳动力质量与水稻生产技术效率: 基于土地流转和农业社会化服务调节视角[J]. *商业研究*, 2021, (2): 88–98. [Tian H Y, Fu W Q. The quality of rural labor force and rice production technical efficiency[J]. *Commercial Research*, 2021, (2): 88–98.]
- [35] 彭超, 张琛. 农业机械化对农户粮食生产效率的影响[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2020, 19(5): 93–102. [Peng C, Zhang C. Assessment of agricultural mechanization on farmers' grain aggregated production efficiency[J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)*, 2020, 19(5): 93–102.]
- [36] 栾健, 韩一军. 干旱灾害与农田灌溉对小麦生产技术效率的影响[J]. *资源科学*, 2019, 41(8): 1387–1399. [Luan J, Han Y J. Impacts of drought disasters and farmland irrigation on wheat production technical efficiency[J]. *Resources Science*, 2019, 41(8): 1387–1399.]
- [37] 周曙东, 周文魁, 朱红根, 等. 气候变化对农业的影响及应对措施[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2010, 10(1): 34–39. [Zhou S D, Zhou W K, Zhu H G, et al. Impact of climate change on agriculture and its countermeasures[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2010, 10(1): 34–39.]
- [38] 吕东辉, 徐彩芬, 张郁. 价格波动对黑龙江省种植结构影响的模拟分析[J]. *农业技术经济*, 2019, (12): 96–106. [Lv D H, Xu C F, Zhang Y. Simulation analysis of price fluctuation on the influence of planting structure in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019, (12): 96–106.]
- [39] 张贝倍, 王善高, 周应恒. 新形势下水稻价格下降对农户生产决策的影响: 基于种植结构、品质调整、要素投入的视角[J]. *世界农业*, 2020, (3): 72–81. [Zhang B B, Wang S G, Zhou Y H. The effect of rice price on farmers' production decisions: Based on planting structure, quality adjustment, and factor input[J]. *World Agriculture*, 2020, (3): 72–81.]

- [40] Xue J F, Liu S L, Chen Z D, et al. Assessment of carbon sustainability under different tillage systems in a double rice cropping system in Southern China[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(9): 1581–1592.
- [41] 中国江苏省生态环境厅. 关于太湖流域氨氮、总磷排放指标有偿使用收费标准的通知[EB/OL]. (2008–06–10) [2023–08–01]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2008/6/10/art_84226_10226026.html. [Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province of China. Notice on the Charges for the Reimbursable Use of Ammonia Nitrogen and Total Phosphorus Emission Indicators in the Taihu Lake Region[EB/OL]. (2008–06–10) [2023–08–01]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2008/6/10/art_84226_10226026.html.]
- [42] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21–27. [Min J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21–27.]
- [43] 杜运周, 刘秋辰, 陈凯薇, 等. 营商环境生态、全要素生产率与城市高质量发展的多元模式: 基于复杂系统观的组态分析[J]. *管理世界*, 2022, 38(9): 127–145. [Du Y Z, Liu Q C, Chen K W, et al. Ecosystem of doing business, total factor productivity and multiple patterns of high-quality development of Chinese cities: A configuration analysis based on complex systems view[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(9): 127–145.]
- [44] Fiss P C. Building better causal theories: A fuzzy set approach to typologies in organization research[J]. *Academy of Management Journal*, 2011, DOI: 10.5465/AMJ.2011.60263120.
- [45] 中国农业农村部. 农业部关于实施农业绿色发展五大行动的通知[EB/OL]. (2017–05–08) [2023–08–01]. http://www.kjs.moa.gov.cn/hbny/201904/t20190418_6185477.html. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Agriculture on the Implementation of Five Major Actions for Green Development of Agriculture[EB/OL]. (2017–05–08) [2023–08–01]. http://www.kjs.moa.gov.cn/hbny/201904/t20190418_6185477.html.]
- [46] 中国农业农村部. 2021年全国农业机械化发展统计公报[EB/OL]. (2022–08–17) [2023–08–01]. http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202208/t20220817_6407161.html. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. National Statistical Bulletin on the Development of Agricultural Mechanisation 2021[EB/OL]. (2022–08–17) [2023–08–01]. http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202208/t20220817_6407161.html.]
- [47] 邹芷潇, 程昌秀, 沈石. 社会经济及气象因素对水稻产量的影响研究: 以三江平原为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(4): 24–30. [Zou Z X, Cheng C X, Shen S. The influence of socio-economic factors and meteorological factors on rice yield: A case study of Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Agricultural Re-*
- sources and Regional Planning*, 2022, 43(4): 24–30.]
- [48] 谭德凤, 陶建平, 贺娟. 政策传播视角下农业保险购买行为研究[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2023, (5): 66–76. [Tan S F, Tao J P, He J. Study on the purchase behavior of agricultural insurance from the perspective of policy dissemination[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2023, (5): 66–76.]
- [49] 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(2): 218–227. [Duan J Q, Zhou G S. Climate suitability of double rice planting regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 218–227.]
- [50] 王永华, 马明. 中国农业现代化发展水平的空间分布格局及其演变[J]. *江汉论坛*, 2018, (2): 30–35. [Wang Y H, Ma M. Spatial distribution pattern of China's agricultural modernisation development level and its evolution[J]. *Jiangnan Tribune*, 2018, (2): 30–35.]
- [51] Ragin C C, Fiss P C. *Redesigning Social Inquiry: Fuzzy Sets and Beyond*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2008.
- [52] Schneider C Q, Wagemann C. *Set-theoretic Methods for the Social Sciences: A Guide to Qualitative Comparative Analysis*[M]. London: Cambridge University Press, 2012.
- [53] 印子. 内生型农业机械化服务市场的运行逻辑和动力机制: 基于华北乡村农业发展案例的分析[J]. *中国农村观察*, 2023, (5): 24–43. [Yin Z. The operation logic and dynamic mechanism of endogenous agricultural mechanization service market: A case study of rural agricultural development in North China[J]. *China Rural Survey*, 2023, (5): 24–43.]
- [54] Greckhamer T, Furnari S, Fiss P C, et al. Studying configurations with qualitative comparative analysis: Best practices in strategy and organization research[J]. *Strategic Organization*, 2018, 16(4): 482–495.
- [55] 孔祥智, 张琛, 张效榕. 要素禀赋变化与农业资本有机构成提高: 对1978年以来中国农业发展路径的解释[J]. *管理世界*, 2018, 34(10): 147–160. [Kong X Z, Zhang C, Zhang X R. Change of factor endowment and improvement of agricultural capital organic composition: An explanation of China's agricultural development path since 1978[J]. *Journal of Management World*, 2018, 34(10): 147–160.]
- [56] 黄晨鸣, 朱臻. 雇工劳动对农户粮食生产技术效率的影响研究: 基于三省水稻种植户的调查[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(2): 229–238. [Huang C M, Zhu Z. The effects of contract-labors on technical efficiency of grain production: Based on a survey data of rice farms in three provinces[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(2): 229–238.]
- [57] Linton G, Kask J. Configurations of entrepreneurial orientation and competitive strategy for high performance[J]. *Journal of Business Research*, 2017, 70: 168–176.

Efficiency and improvement path of rice production in China under resource and environmental constraints

XU Jing^{1,2}, XIONG Shihao^{1,2}, ZHANG Qian¹

(1. Business School, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. Jiangsu Modern Logistics Research Base, Yangzhou 225127, China)

Abstract: [Objective] In the context of high-quality development of the rice industry, analyzing the spatial and temporal trends and differences in rice production efficiency in China under resource and environmental constraints is of great value in exploring the improvement of rice production efficiency in the future and promoting the green and sustainable development of rice production. [Methods] Drawing on China's comprehensive rice input-output panel data from 2009 to 2021, and using the window DEA analysis method based on the super efficiency SBM model and the fuzzy-set qualitative comparative analysis method, this study examine the rice production efficiency and improvement path considering climate and pollution emission under resource and environmental constraints. [Results] The research showed that: (1) Rice production efficiency across the nation was generally at a commendably high level. Round-grained rice demonstrated the highest efficiency (1.0089), followed by rearly indica rice (1.0065), medium indica rice (0.9769), and late indica rice (0.9380), and the proportion of early, medium, late indica rice and round-grained rice with relatively efficient average productivity was 77.78%, 76.92%, 67.13%, and 58.12% of all years, respectively. The average annual carbon emissions from rice production showed an inverted U-shaped trend. Concomitantly, the nitrogen and phosphorus pollution index of rice production remained conspicuously high. (2) Overall, regional differences in production efficiency were significant across China's six principal rice paddy regions. The average value of rice production efficiency in central, northwestern and southwestern rice paddy region is higher than the national average, that in northeastern and southern rice paddy region is lower than the national average, and that in northern rice paddy region is higher than the national average for medium indica rice and lower than the national average for round-grained rice. (3) From the perspective of grouping patterns, six paths to improve production efficiency were found, and the three main paths to improve rice production efficiency are: technology-oriented, market-driven, and talent-led. [Conclusion] Increasing the prevention of source pollution, taking advantage of efficient rice paddy regions and providing high level of technical agricultural services are important paths to improving the efficiency of rice production.

Key words: resource and environmental constraints; rice; production efficiency; fuzzy-set qualitative comparative analysis; China