

基于改进PROMETHEE方法的区域农业机械化可持续发展评价

刘译潞

扬州大学商学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月7日

摘 要

针对区域农业机械化可持续发展评价中存在的指标关联性复杂和决策偏好模糊问题, 本研究提出一种基于改进PROMETHEE-II方法的评价模型。通过引入sigmoid优先函数处理决策模糊性, 结合Shapley值法融合指标关联性以进行权重调整, 构建了动态评价体系。实证选取五个典型区域, 结果表明改进方法在排序稳定性和区域区分度上显著优于传统方法, 为差异化政策制定提供可靠依据。主要创新体现在三个方面: 一是采用sigmoid函数处理定性指标量化中的不确定性问题; 二是通过Shapley值计算量化指标关联性; 三是建立基于加权方差最大化的参数优化机制。研究验证了改进PROMETHEE方法在区域农业机械化可持续发展评价中的有效性和优越性。

关键词

农业机械化, 可持续发展, PSIR-ESD, 指标评价

Evaluation of Regional Agricultural Mechanization Sustainable Development Based on Improved PROMETHEE Method

Yilu Liu

Business School, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: September 22, 2025; accepted: October 28, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

Evaluation of regional agricultural mechanization sustainable development, this study proposes an

evaluation model based on the improved PROMETHEE-II method. By introducing the sigmoid preference function to deal with decision ambiguity and combining the Shapley value method to integrate indicator correlation for weight adjustment, a dynamic evaluation system is constructed. The empirical study selects five typical regions, and the results show that the improved method is significantly better than the traditional method in ranking stability and regional differentiation, providing a reliable basis for differentiated policy formulation. The main innovations are reflected in three aspects: first, the adoption of the sigmoid function to deal with the uncertainty in the quantification of qualitative indicators; second, the quantification of indicator correlation through Shapley value calculation; third, the establishment of a parameter optimization mechanism based on weighted variance maximization. The study verifies the effectiveness and superiority of the improved PROMETHEE method in the evaluation of regional agricultural mechanization sustainable development.

Keywords

Agricultural Mechanization, Sustainable Development, PSIR-ESD, Indicator Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在乡村振兴战略和农业现代化协同推进下,区域农业机械化的可持续发展能力已成为衡量农业现代化水平的关键指标[1]。然而,现阶段我国农机化发展呈现显著的区域异质性,东部沿海地区与中西部丘陵山地带的机械化水平差距持续扩大,资源配置效率低下、环境负外部性加剧、技术适配性不足等结构性问题日益凸显[2]。传统评价体系难以破解多指标关联性与决策模糊性的双重约束,亟需构建更能体现系统复杂性的评估模型与决策方法[3]。

区别于传统的机械化水平单维度评估,农业机械化可持续发展(ESDAM)本质上是一个多属性决策问题,需统筹社会经济效能、资源环境约束、技术适配性与产业支撑能力四大维度[4]。然而,现有评价方法存在三方面局限:一是 PSIR 框架中各指标关联性未被充分量化;二是决策者在指标权重分配时面临显著模糊性;三是静态评价难以反映区域动态发展差异。针对这些瓶颈,本研究引入改进 PROMETHEE-II 模型,通过 sigmoid 优先函数化解权重分配模糊性,利用 Shapley 值法量化关联性以调整指标权重,最终构建能够适应区域差异化特征的动态评价体系。

基于系统论视角,农业机械化系统呈现出典型的跨产业耦合特征:农机制造业(第二产业)提供装备支撑,农机服务与流通(第三产业)实现价值转化,而服务对象(第一产业)则构成系统作用本体[5]。这种三元产业结构决定了 ESDAM 评价必须采用能够处理非线性关系的分析方法[6]。本文设计的改进 PROMETHEE-II 模型,通过区间犹豫模糊集处理定性指标量化问题,借助优先指数矩阵整合跨产业影响,恰好契合农业机械化系统的复杂特性[7]。

尽管农业可持续发展[8]-[11]与机械化水平评价[12]-[15]已有较多成果,但面向 ESDAM 的交叉研究仍存在方法论缺陷:一是多沿用 AHP/熵权法等传统权重分配方法[16]-[18],未能解决指标关联性问题;二是评价维度偏重经济效益而弱化环境响应[19] [20];三是缺乏对区域差异化适配机制的探讨[21]。本文基于 PSIR-ESD 框架,选取 11 个兼具区域普适性与地形特异性的二级指标,通过改进 PROMETHEE-II 实现从“静态评分”到“动态优先序”的评估范式转变,为差异化区域制定农机发展策略提供定量依据。

2. PSIR 可持续发展分析框架设计

PSIR [22]可持续发展分析框架,是经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)联合开发的经典动态交互模型,适用于解析多因素交织的复杂系统[23]。本研究结合区域农业机械化评价对数据可获取性与分析精准度的需求,对该模型的划分方式进行简化处理,重点突出“外部作用-系统反馈”的核心逻辑。

农业机械化系统具有开放性特征,其与外部生态、经济、社会等环境要素间存在多维度、非线性的复杂关联。本研究结合近 10 年中外核心文献及《农业机械化发展“十四五”规划》(2021-2025)等政策,初筛出含经济、技术、环境等维度的 150 个指标,作为评价备选指标。随后,依据数据可获取、可量化等指标选取原则,并结合研究实际需求,最终确定了 11 个得分较高且符合区域评价要求的二级指标(C1 经济因素, C2 社会因素, C3 农业科技因素, C4 市场因素, C5 服务水平, C6 劳动力因素, C7 作业水平因素, C8 农机化效益, C9 环境影响, C10 环境响应, C11 科技响应),同时收集了这些指标之间相互影响关系的数据。

参考可持续发展理论,构建区域农业机械化可持续发展 PSIR-ESD 评价模型(PSIR 为“Pressure-State-Impact-Response”, ESD 为“Evaluation of Sustainable Development”),将 11 个指标归入对应准则层:压力层(P):区域社会经济、市场环境对农业机械化的驱动与约束性外部作用力;状态层(S):机械化系统受压力后呈现的可量化发展表征;影响层(I):机械化对区域经济、生态环境的直接与间接效应;响应层(R):针对机械化环境短板与技术瓶颈的外部动态调整措施。

2.1. 区域农业机械化的外部驱动与约束机制分析

在推动农业机械化可持续发展的过程中,外部环境既提供关键驱动力,也形成现实约束。压力层级集中体现了这一“驱动与约束共同作用”的作用机制,主要涵盖经济支撑、市场条件、社会基础和科技能力四类因素,共同影响区域农机化发展的速度与质量。

经济投入构成最核心的驱动力量。农业机械化专项生产资金(如购置与作业补贴)的投入强度,直接关系到农机装备的普及与更新。研究表明,资金配置与区域实际需求匹配度高的地区,机械化水平显著领先,这一点在 EAST 区域的实证结果中得到明确印证。

劳动力因素呈现出明显的双重性:农村劳动力持续外流导致农业人力稀缺,从而激发“机械替代”需求;然而,高素质的农机操作、维护与管理人才却显不足,已成为部分区域农机化纵深发展的瓶颈。该因素在评价中占比 8.5%,显示出其不可忽略的约束作用。

市场机制在农机化推进中扮演核心调节角色。应充分发挥市场在资源配置中的决定性作用,并辅以政府的政策扶持与有效监管。现实中,农机产品价格偏高与农民购买力有限之间的矛盾,成为影响农户购机决策的关键限制因素。

科技能力与工业基础为农机化进程提供持续动能。农机工业不仅关乎装备供给保障,更通过技术迭代提升机具适配性与作业效益。两者需协同发展,以避免因工业支撑不足或创新滞后而拖累整体进程。尤其随着智能化、信息化技术与农业深度融合,科技因素在农机化评价中的权重日趋上升。借助农业农村部科技教育司发布的专项数据(如农业科技进步贡献率、智能农机装备覆盖率等)将其纳入评估框架,有助于更全面把握发展质量,弥补以往评价中对此类维度关注的缺失。

2.2. 农业机械化系统内部发展状态的表征与测度

农机作业规模化、专业化下,单一农机户“小而散”模式难适应需求,农户协作与农机社会化服务成突破瓶颈的核心途径,本研究以“农业机械化作业服务组织机构数”衡量服务水平。

机械化可持续发展对农机从业人员数量与技能要求提高，实地调研显示农机手短缺是主要挑战，故以“农机户人数”衡量劳动力因素；核心指标为主要农作物耕种收综合机械化覆盖率(Q7)，聚焦主粮作物，与实证中 EAST 区域排序第一的结果呼应，其覆盖率适配区域作业水平。

2.3. 农机化发展的经济增效与资源环境效应评估

本文从农机化经营效益与环境影响两个方面，分析农业机械化可持续发展的影响。

农机化经营效益是影响可持续发展的关键因素。农机投入需为使用者创造实际收益，使其通过机械化实现增收，方能激励其进一步扩大投入与生产规模，从而提升可持续发展能力。因此，有必要将农机化经营效益纳入评价指标体系，以反映其对农业机械化可持续发展的影响。

此外，我国作为全球第二大能源消费国，农机领域的柴油消耗占农业总能耗的 23.5%，且传统农机的碳排放强度较新能源农机高出 40%以上。机械化发展需考虑资源生态承载力，重视环境影响，其环境影响指标为农业机械化作业环节柴油消耗量(Q9)，仅统计作业耗油量，避免非作业因素干扰。

2.4. 面向可持续目标的政策与科技响应策略研究

响应层面以“环境保护经费投入额”反映环境响应措施；农机技术升级推广需科研机构与人员参与，故以“农机教育科研和推广人数”反映科技响应措施。

Table 1. PSIR-ESD evaluation index system of agricultural mechanization sustainable development level
表 1. 农业机械化可持续发展水平 PSIRPSIR-ESD 评价指标体

目标层	准则层	因素	指标 Indicators	数据来源	数据年份
农业机械化可持续发展评价指标体系	压力 (P)	经济因素	Q1 农业机械化专项生产资金投入强度	《中国农业机械化年鉴》	2022 年
		社会因素	Q2 劳动力质量	《国民经济和社会发展统计公报》	2022 年
		农业科技因素	Q3 农业科技进步贡献率	《农业科技进步报告》	2022 年
		市场因素	Q4 农机价格	《中国农业机械工业年鉴》	2022 年
	状态 (S)	服务水平	Q5 农机服务组织数	农业农村部农机化管理司专项调查数据	2022 年
		劳动力因素	Q6 农机户人数	各省农业农村厅农机化处年报	2022 年
		作业水平因素	Q7 主要农作物耕种收综合机械化覆盖率	《中国农业机械化年鉴》	2022 年
	影响(I)	农机化效益	Q8 农机化收益	《农村经济发展报告》	2022 年
		环境影响	Q9 农业机械化作业环节柴油消耗量	《中国能源统计年鉴》	2022 年
	相应 (R)	环境响应	Q10 环保保护经费投入额	《生态环境保护财政预算报告》	2022 年
		科技响应	Q11 农机科研与技术推广专职人员规模	《中国农业科技统计年鉴》	2022 年

3. 基于改进 PROMETHEE 方法的农业机械化可持续发展评价

基于关联性属性对区域农业机械化可持续发展能力优先度的影响分析，通过对传统优先度函数的分析设计了基于 sigmoid 函数的 PROMETHEE 优先函数，设计了融合关联性属性的权重调整算法，使得改

进的 PROMETHEE 方法更符合实际问题决策环境。具体步骤如下。

根据表 1 所提供的 PSIR 评价指 $X = (\chi_{ij})_{m \times n}$ 标体系, 农业领域专家给出定性指标的评价值, 定量指标值来源于调查结果, 形成区间犹豫模糊集决策矩阵 $X^{(0)} = (\chi_{ij}^{(0)})_{m \times n}$ 。

Set 1: 将区间犹豫模糊集决策矩阵 $X^{(0)} = (\chi_{ij}^{(0)})_{m \times n}$

标准化[24]为矩阵, 其中

$$X(0) = \begin{pmatrix} \chi_{11}^{(0)} & \chi_{12}^{(0)} & \cdots & \chi_{1n}^{(0)} \\ \chi_{21}^{(0)} & \chi_{22}^{(0)} & \cdots & \chi_{2n}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_{m1}^{(0)} & \chi_{m2}^{(0)} & \cdots & \chi_{mn}^{(0)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\chi = \begin{cases} \chi_{ij}^{(0)}, \text{ 指标 } j \text{ 为效益指标} \\ (\chi_{ij}^{(0)})^c, \text{ 指标 } j \text{ 为成本指标} \end{cases} \quad (2)$$

Set 2: 构建区间犹豫模糊得分矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times n}$, 其中 $s_{ij} = \frac{1}{l^{(ij)}} \sum_{\gamma \in \chi_{ij}} \gamma$, γ 为区间犹豫模糊数, $l^{(ij)}$ 为区间犹豫模糊集 χ_{ij} 中区间模糊数的个数[23]。

Set 3: 基于 $p_j(\alpha_i \geq \alpha_k) = \min \left\{ \max \left\{ \frac{\alpha_i^U - \alpha_k^L}{(\alpha_i^U - \alpha_i^L) + (\alpha_k^U - \alpha_k^L)}, 0 \right\}, 1 \right\}$ 可能度函数[25]计算在各指标下区域

农业机械化可持续发展能力之间的可能度函数 $p_j(\alpha_i \geq \alpha_k)$ 。其中 $p_j(\alpha_i \geq \alpha_k)$ 表示在指标 Q_j 下区域农业机械化可持续发展能力 α_i 优于 α_k 的可能度,

即 $p_j(\alpha_i \geq \alpha_k) = p_j(s_{ij} \geq s_{kj})$, 且 $\alpha_i = [\alpha_i^L, \alpha_i^U]$, $\alpha_k = [\alpha_k^L, \alpha_k^U]$

Set 4: 利用优先度函数计算在各指标下两两区域农业机械化可持续发展能力之间的优先度 $p_j(\alpha_i \geq \alpha_k)$:

$$p_j(\alpha_i \geq \alpha_k) = \frac{1}{1 + e^{\alpha - 2\alpha p_j(\alpha_i \geq \alpha_k)}}, p_j(\alpha_i \geq \alpha_k) \in [0, 1] \quad (3)$$

式中: α 为待定系数, 设定初始值 1。

本研究选用 Sigmoid 函数作为优先函数, 因其能有效处理决策模糊性问题。相较于传统 PROMETHEE 函数, Sigmoid 的 S 形曲线更好地模拟了决策者从“无差异”到“严格偏好”的心理转变过程, 特别适用于定性指标的不确定性量化。参数 α 作为平滑因子调控偏好敏感度: α 值越小曲线越平缓, 决策容忍度越高; α 值越大曲线越接近阶跃形态, 决策越严格。这种灵活性可精确捕捉决策模糊偏好, 契合农业机械化可持续发展的复杂决策需求。

Set 5: 基于指标关联性设计属性权重调整机制, 计算指标间关系矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, 为量化指标关联性, 本研究将 11 个评价指标视为联盟博弈中的参与者。联盟 $S \subseteq N$ 的价值函数 $v(S)$ 定义为该子集内所有指标间协方差之和, 即 $v(S) = \sum_{i, j \in S} \text{cov}(i, j)$, 用以反映指标子集的内部协同效应。在此基础上, 各指标 Q_j

的 Shapley 值 I_j 按下式计算: $I_j = \sum_{S \subseteq N \setminus \{j\}} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!} [v(S \cup \{j\}) - v(S)]$, 其中, N 为所有指标的集合,

n 为指标总数, S 为不包含 j 的任意子集。Shapley 值 I_j 客观衡量了指标 Q_j 与所有其他指标组合的边际贡献平均值, 从而量化其全局重要性, 进一步, 通过莫比乌斯变换系数 m [26] 简化计算, 利用

$I_j = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} \times \sum_{K \subset X \setminus N, |K|=k} m_{jk}, \forall j \in K$, 其中 m_{jk} 为莫比乌斯系数, 最终通过归一化得到调整后的权重:

$$W_j = \frac{I_j}{\sum_{k=1}^n I_k}。$$

Set 6: 计算两两区域农业机械化可持续发展能力 α_i 和 α_k 的优先指数 $H(\alpha_i, \alpha_k)$:

$$H(\alpha_i, \alpha_k) = \sum_{j=1}^n p_j(\alpha_i, \alpha_k) W_j \quad (4)$$

Set 7: 令 $\phi^+(\alpha_i)$, $\phi^-(\alpha_i)$ 分别为区域农业机械化可持续发展能力 α_i 的流出与流入, 差值为 α_i , 净流为 $\phi(\alpha_i)$, 其中:

$$\begin{cases} \phi^+(\alpha_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m H(\alpha_i, \alpha_k) \\ \phi^-(\alpha_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m H(\alpha_k, \alpha_i) \end{cases} \quad (5)$$

其中, m 为评价区域的个数。

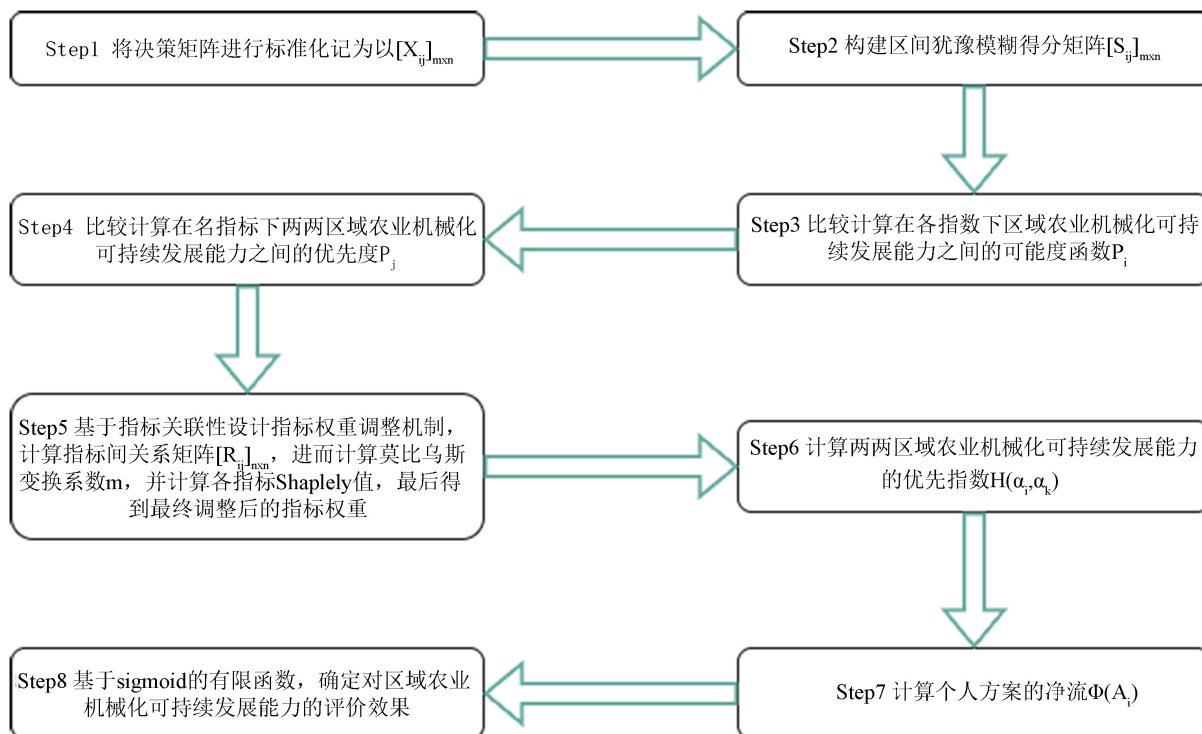


Figure 1. Flow chart of evaluation steps of improved PROMETHEE method

图 1. 改进 PROMETHEE 方法评价步骤流程图

Set 8: 模拟运算功能确定变量 α , 提高农业可持续发展能力的可辨识度。农业可持续发展能力可辨

识度一般通过各区域农业可持续发展能力得分的方差来体现。基于 sigmoid 的优先度函数中, α 过于大时, 基于可能度之间的差异而表征的优先程度不能反映真实情况, 农业机械化可持续发展能力得分的方差同样偏大, 故设定 α 的取值范围为 $[1,10]$ 。评价过程中, 评价者更加关注得分排序靠前的区域, 为此对各区域得分方差的计算过程中引入加权向量。首先将各区域农业机械化可持续发展能力按净流值大小进行排序, 假设 5 个地区农业可持续发展能力 (c,b,d,e,f) 依据净流值从大到小排序后的区域农业机械化可持续发展能力顺序为 $[c,b,d,e,f]$, 以各区域农业可持续发展能力得分的方差最大为依据, 提出加权方差计算公式 $d = (\phi(c) - \phi(b))^2 + 0.9(\phi(b) - \phi(d))^2 + 0.8(\phi(d) - \phi(e))^2 + 0.7(\phi(e) - \phi(f))^2$ 。加权方差计算中权重序列的确定遵循决策注意力衰减原则。在多属性评价中, 决策者更关注排名靠前方案的差异性。因此对相邻方案净流值之差按排序位次赋予递减权重, 该设定符合行为决策理论中的注意力分配规律, 为参数优化提供了有理论依据的系统性目标函数。考虑到计算复杂性以及 α 取值范围为区间 $[1,10]$ 内的整数, 运用 Excel 模拟运算功能以 d 取最大值为目标确定参数 α , 当 d 取最大值时区域农业机械化可持续发展能力可辨识度最高, 最终依据净流值完成各区域农业机械化可持续发展能力排序。核心步骤如图 1 所示。

4. 实例分析

某个风险投资公司进行农业机械化项目投资决策, 现有 5 个区域(EAST, SOUTH, WEST, NORTH, MID)可供选择, 该排序结果与前述压力层、状态层核心指标分析相吻合。五个区域的具体指向为: EAST(代表华东地区, 如江苏省)、SOUTH(代表华南地区, 如广东省)、WEST(代表西南地区, 如四川省)、NORTH(代表华北地区, 如河南省)、MID(代表中部地区, 如湖北省)。EAST 区域因其在农业生产资金投入强度(Q1)和耕种收综合机械化覆盖率(Q7)上的显著优势, 综合评价位居首位。专家基于以下 11 个指标对区域农业机械化可持续发展能力进行评估: Q1 农业机械化专项生产资金投入强度, Q2 劳动力质量, Q3 农业科技贡献率, Q4 农机价格, Q5 农机服务组织数, Q6 农机户人数, Q7 主要农作物耕种收综合机械化覆盖率, Q8 农机化收益, Q9 农业机械化作业环节柴油消耗量, Q10 环保保护经费投入额, Q11 农机科研与技术推广专职人员规模。本研究指标结合实证区域特性, 其中 Q7 参考区域排序分地形统计, Q9 按作业环节筛选数据。专家评定各指标的决策权重(%)为

$W_i [8.5, 5.6, 10.8, 6.8, 2.9, 7.6, 7.2, 7.6, 7.2, 7.1, 7.7, 7.1, 8.5]$, 对区域 α_i 在指标 Q_i 下的评估值是区间犹豫模糊数 $\chi_{ij}^{(0)}$, 决策矩阵为:

$$\chi^{(0)} = \begin{bmatrix} \tilde{H} \{[0.7, 0.9]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7], [0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8], [0.8, 0.9]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6], [0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8], [0.8, 0.9]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} \\ \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6], [0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4], [0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} \\ \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4], [0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} \\ \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3], [0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3], [0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} \\ \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6], [0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} \end{bmatrix}$$

Set 1: 将区间犹豫模糊决策矩阵标准化得到标准矩阵 $X = (\chi_{ij})_{m \times n}$:

$$\chi = \begin{bmatrix} \tilde{H} \{[0.7, 0.9]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7], [0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8], [0.8, 0.9]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3], [0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8], [0.8, 0.9]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} \\ \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6], [0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4], [0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} \\ \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4], [0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3]\} \\ \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.2, 0.3], [0.3, 0.4]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7], [0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.3, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.6, 0.7]\} \\ \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.6]\} & \tilde{H} \{[0.7, 0.8]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.5, 0.6], [0.6, 0.7]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} & \tilde{H} \{[0.4, 0.5]\} \end{bmatrix}$$

Set 2: 构建区间犹豫模糊得分矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times n}$:

$$S = \begin{bmatrix} [0.7, 0.9] & [0.65, 0.75] & [0.75, 0.85] & [0.3, 0.4] & [0.7, 0.8] & [0.3, 0.4] & [0.7, 0.8] & [0.75, 0.85] & [0.45, 0.55] & [0.3, 0.4] & [0.7, 0.8] \\ [0.5, 0.6] & [0.5, 0.7] & [0.6, 0.7] & [0.5, 0.6] & [0.4, 0.5] & [0.55, 0.65] & [0.4, 0.5] & [0.35, 0.45] & [0.5, 0.6] & [0.6, 0.7] & [0.5, 0.6] \\ [0.2, 0.3] & [0.4, 0.5] & [0.35, 0.45] & [0.3, 0.4] & [0.2, 0.3] & [0.5, 0.6] & [0.3, 0.4] & [0.5, 0.6] & [0.4, 0.5] & [0.7, 0.8] & [0.2, 0.3] \\ [0.4, 0.5] & [0.25, 0.35] & [0.45, 0.55] & [0.65, 0.75] & [0.5, 0.6] & [0.6, 0.7] & [0.7, 0.8] & [0.7, 0.8] & [0.3, 0.4] & [0.3, 0.5] & [0.6, 0.7] \\ [0.45, 0.55] & [0.45, 0.55] & [0.5, 0.6] & [0.4, 0.5] & [0.4, 0.6] & [0.7, 0.8] & [0.4, 0.5] & [0.55, 0.65] & [0.5, 0.6] & [0.5, 0.6] & [0.4, 0.5] \end{bmatrix}$$

Set 3: 计算在各指标下区域农业机械化可持续发展能力之间的可能度函数 $p_j(\alpha_i \geq \alpha_k)$ 。

$$p_1(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 1 & 0.75 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_2(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.83 & 1 & 1 & 1 \\ 0.75 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0.75 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_3(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 1 & 0.75 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_4(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 1 \\ 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_5(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0.5 & 0.67 \\ 0 & 0 & 1 & 0.33 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_6(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 1 & 0.25 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.75 & 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_7(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_8(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.5 & 0 & 0.25 \\ 0.25 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 1 & 0.75 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_9(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0.75 & 1 & 0.25 \\ 0.75 & 0.5 & 1 & 1 & 0.5 \\ 0.25 & 0 & 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0.75 & 0.5 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_{10}(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0.33 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0.67 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$p_{11}(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Set 4: 利用优先度函数计算在各属性下两两区域农业机械化可持续发展能力之间的优先度 $P_j(\alpha_i \geq \alpha_k)$:

$$P_j(\alpha_i \geq \alpha_k) = \frac{1}{1 + e^{\alpha - 2\alpha p_j(\alpha_i \geq \alpha_k)}}, p_j(\alpha_i \geq \alpha_k) \in [0, 1] \quad (6)$$

式中: a 为待定系数, 设定初始值 1。

$$p_1(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.62 \\ 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.27 & 0.27 & 0.73 & 0.50 & 0.38 \\ 0.27 & 0.38 & 0.73 & 0.62 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_2(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.66 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.34 & 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.38 \\ 0.27 & 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 \\ 0.27 & 0.34 & 0.62 & 0.73 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_3(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.27 & 0.27 & 0.73 & 0.50 & 0.38 \\ 0.27 & 0.27 & 0.73 & 0.62 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_4(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.73 & 0.50 & 0.73 & 0.27 & 0.73 \\ 0.50 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.50 & 0.73 \\ 0.73 & 0.27 & 0.73 & 0.27 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_5(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.27 & 0.42 \\ 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.27 & 0.73 & 0.73 & 0.50 & 0.58 \\ 0.27 & 0.27 & 0.73 & 0.42 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_6(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.27 & 0.27 & 0.27 & 0.27 \\ 0.73 & 0.50 & 0.62 & 0.38 & 0.27 \\ 0.73 & 0.38 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.73 & 0.62 & 0.73 & 0.50 & 0.27 \\ 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_7(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.50 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.27 & 0.50 \\ 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.50 & 0.27 & 0.73 & 0.50 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.27 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_8(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.62 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 & 0.27 \\ 0.27 & 0.73 & 0.50 & 0.27 & 0.38 \\ 0.38 & 0.73 & 0.73 & 0.50 & 0.73 \\ 0.27 & 0.73 & 0.62 & 0.27 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_9(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.38 & 0.62 & 0.73 & 0.38 \\ 0.62 & 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.50 \\ 0.38 & 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.27 \\ 0.27 & 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 \\ 0.62 & 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_{10}(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.27 & 0.27 & 0.42 & 0.27 \\ 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.73 & 0.50 & 0.73 & 0.73 \\ 0.58 & 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 \\ 0.73 & 0.27 & 0.27 & 0.73 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$p_{11}(\alpha_i \geq \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.73 & 0.73 & 0.73 & 0.73 \\ 0.27 & 0.50 & 0.73 & 0.27 & 0.73 \\ 0.27 & 0.27 & 0.50 & 0.27 & 0.27 \\ 0.27 & 0.73 & 0.73 & 0.50 & 0.73 \\ 0.27 & 0.27 & 0.73 & 0.27 & 0.50 \end{bmatrix}$$

Set 5: 基于属性关联性设计属性权重调整机制, 计算属性间关系矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, 进而计算莫比乌斯变换系数, 利用定义 7 计算各属性 Shapley 值, 最后得到最终调整后的指标权重 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ 。

调整指标权重, 获得最终指标权重 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ 。协方差矩阵 D 为:

$$D = \begin{bmatrix} 0.0314 & 0.0174 & 0.0237 & -0.0028 & 0.0265 & -0.0128 & 0.019 & 0.0108 & 0.0047 & -0.0194 & 0.0262 \\ 0.0174 & 0.0184 & 0.0152 & -0.0113 & 0.0095 & -0.0113 & 0 & -0.0017 & 0.0077 & -0.0019 & 0.0072 \\ 0.0237 & 0.0152 & 0.0186 & -0.0034 & 0.0185 & -0.0109 & 0.012 & 0.0054 & 0.0046 & -0.0122 & 0.0186 \\ -0.0028 & -0.0113 & -0.0034 & 0.0176 & 0.0015 & 0.0091 & 0.008 & -0.0001 & -0.0049 & -0.0052 & 0.0076 \\ 0.0265 & 0.0095 & 0.0185 & 0.0015 & 0.026 & -0.0095 & 0.023 & 0.016 & 0.0005 & -0.0223 & 0.026 \\ -0.0128 & -0.0113 & -0.0109 & 0.0091 & -0.0095 & 0.0176 & -0.009 & -0.0076 & 0.0001 & 0.0063 & -0.0094 \\ 0.019 & 0 & 0.012 & 0.008 & 0.023 & -0.009 & 0.028 & 0.02 & -0.006 & -0.024 & 0.026 \\ 0.0108 & -0.0017 & 0.0054 & -0.0001 & 0.016 & -0.0076 & 0.02 & 0.0206 & -0.0056 & -0.0183 & 0.0144 \\ 0.0047 & 0.0077 & 0.0046 & -0.0049 & 0.0005 & 0.0001 & -0.006 & -0.0056 & 0.0056 & 0.0033 & -0.0014 \\ -0.0194 & -0.0019 & -0.0122 & -0.0052 & -0.0225 & 0.0063 & -0.024 & -0.0183 & 0.0033 & 0.0224 & -0.0232 \\ 0.0262 & 0.0072 & 0.0186 & 0.0076 & 0.026 & -0.0094 & 0.026 & 0.0144 & -0.0014 & -0.0232 & 0.0296 \end{bmatrix}$$

关系矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.685 & 0.940 & -0.114 & 0.886 & -0.521 & 0.618 & 0.408 & 0.324 & -0.696 & 0.830 \\ 0.685 & 1 & 0.776 & -0.592 & 0.409 & -0.592 & 0 & -0.083 & 0.683 & -0.088 & 0.294 \\ 0.940 & 0.776 & 1 & -0.180 & 0.803 & -0.576 & 0.507 & 0.265 & 0.411 & -0.568 & 0.765 \\ -0.114 & -0.592 & -0.180 & 1 & 0.067 & 0.494 & 0.347 & -0.005 & -0.450 & -0.249 & 0.321 \\ 0.886 & 0.409 & 0.803 & 0.067 & 1 & -0.423 & 0.819 & 0.661 & 0.038 & -0.883 & 0.901 \\ -0.521 & -0.592 & -0.576 & 0.494 & -0.423 & 1 & -0.390 & -0.382 & 0.009 & 0.301 & -0.397 \\ 0.618 & 0 & 0.507 & 0.347 & 0.819 & -0.390 & 1 & 0.805 & -0.441 & -0.917 & 0.878 \\ 0.408 & -0.083 & 0.265 & -0.005 & 0.661 & -0.382 & 0.805 & 1 & -0.477 & -0.811 & 0.564 \\ 0.324 & 0.683 & 0.411 & -0.450 & 0.038 & 0.009 & -0.441 & -0.477 & 1 & 0.267 & -0.100 \\ -0.696 & -0.088 & -0.568 & -0.249 & -0.883 & 0.301 & -0.917 & -0.811 & 0.267 & 1 & -0.863 \\ 0.830 & 0.294 & 0.765 & 0.321 & 0.901 & -0.397 & 0.878 & 0.564 & -0.100 & -0.863 & 1 \end{bmatrix}$$

整理得, 莫比乌斯系数为

$$\begin{cases} m_1 = 0.13068 \\ m_2 = 0.09504 \\ m_3 = 0.08316 \\ m_4 = 0.07128 \\ m_5 = 0.23759 \\ m_6 = 0.10692 \\ m_7 = 0.03564 \\ m_8 = 0.09504 \\ m_9 = 0.09504 \\ m_{10} = 0.03564 \\ m_{11} = 0.05940 \end{cases}
\begin{cases} m_{12} = 0.00072 \\ m_{13} = 0.00086 \\ m_{14} = 0.0009 \\ m_{15} = 0.00232 \\ m_{16} = 0.00061 \\ m_{17} = 0.00024 \\ m_{18} = 0.00043 \\ m_{19} = 0.00034 \\ m_{110} = 0.00027 \\ m_{111} = 0.00054 \\ m_{23} = 0.00052 \\ m_{24} = 0.00034 \end{cases}
\begin{cases} m_{25} = 0.00078 \\ m_{26} = 0.00051 \\ m_{27} = 0.00000 \\ m_{28} = 0.00006 \\ m_{29} = 0.00052 \\ m_{210} = 0.00003 \\ m_{211} = 0.00014 \\ m_{34} = 0.00009 \\ m_{35} = 0.00133 \\ m_{36} = 0.00043 \\ m_{37} = 0.00013 \\ m_{38} = 0.00018 \end{cases}
\begin{cases} m_{39} = 0.00027 \\ m_{310} = 0.00003 \\ m_{311} = 0.0032 \\ m_{45} = 0.00010 \\ m_{46} = 0.00032 \\ m_{47} = 0.00007 \\ m_{48} = 0.00000 \\ m_{49} = 0.00026 \\ m_{410} = 0.00005 \\ m_{411} = 0.00011 \\ m_{56} = 0.00091 \\ m_{57} = 0.00058 \end{cases}
\begin{cases} m_{58} = 0.00126 \\ m_{59} = 0.00007 \\ m_{510} = 0.00063 \\ m_{511} = 0.00107 \\ m_{67} = 0.00013 \\ m_{68} = 0.00033 \\ m_{69} = 0.00001 \\ m_{610} = 0.00010 \\ m_{611} = 0.00021 \\ m_{78} = 0.00001 \\ m_{79} = 0.00002 \\ m_{710} = 0.00000 \end{cases}
\begin{cases} m_{711} = 0.00000 \\ m_{89} = 0.00000 \\ m_{810} = 0.00001 \\ m_{811} = 0.00001 \\ m_{910} = 0.00008 \\ m_{911} = 0.00005 \\ m_{1011} = 0.00015 \end{cases}$$

计算各指标 Shapley 值为:

$$I_1 = 0.13, I_2 = 0.09, I_3 = 0.07, I_4 = 0.07, I_5 = 0.24, I_6 = 0.10, I_7 = 0.04, I_8 = 0.08, I_9 = 0.08, I_{10} = 0.04, I_{11} = 0.06。$$

最终调整权重为 $W = [0.13, 0.09, 0.07, 0.07, 0.24, 0.10, 0.04, 0.08, 0.08, 0.04, 0.06]$

Set 6: 计算两两区域农业机械化可持续发展能力 α_i 和 α_k 的优先指数 $H(\alpha_i, \alpha_k)$:

$$H(\alpha_i, \alpha_k) = \sum_{j=1}^n P_j(\alpha_i, \alpha_k) W_j \quad (7)$$

$$H(\alpha_i, \alpha_k) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.621 & 0.664 & 0.645 & 0.627 \\ 0.375 & 0.5 & 0.650 & 0.482 & 0.551 \\ 0.332 & 0.364 & 0.5 & 0.389 & 0.326 \\ 0.351 & 0.514 & 0.607 & 0.5 & 0.501 \\ 0.369 & 0.378 & 0.670 & 0.495 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Set 7: 计算各区域农业机械化可持续发展能力 α_i 净流值 $\phi(\alpha_i)$:

$$\begin{cases} \phi(\alpha_1) = 0.282 \\ \phi(\alpha_2) = 0.049 \\ \phi(\alpha_3) = -0.301 \\ \phi(\alpha_4) = -0.01 \\ \phi(\alpha_5) = -0.024 \end{cases}$$

Table 2. Correspondence table of parameter a values, regional net flow values and d values

表 2. 参数 a 取值与各区域净流值及 d 值对应表

α 值	$\phi(\alpha_1)$	$\phi(\alpha_2)$	$\phi(\alpha_3)$	$\phi(\alpha_4)$	$\phi(\alpha_5)$	d 值
1	0.2829	0.0499	-0.3002	-0.0092	-0.0235	0.1309
2	0.4671	0.0834	-0.4986	-0.0160	-0.0358	0.3564
3	0.5560	0.1005	-0.5982	-0.0198	-0.0386	0.5047
4	0.5928	0.1082	-0.6427	-0.0210	-0.0373	0.5737

续表

5	0.6068	0.1115	-0.6623	-0.0205	-0.0355	0.6021
6	0.6120	0.1126	-0.6712	-0.0193	-0.0341	0.6134
7	0.6137	0.1128	-0.6755	-0.0177	-0.0333	0.6181
8	0.6142	0.1127	-0.6777	-0.0161	-0.0330	0.6203
9	0.6142	0.1124	-0.6789	-0.0147	-0.0330	0.6214
10	0.6141	0.1120	-0.6796	-0.0136	-0.0330	0.6221

Set 8: 确定各区域农业机械化可持续发展能力排序; 当 $\alpha = 1$ 时, 各区域农业机械化可持续发展能力排序为[EAST, SOUTH, NORTH, MID, WEST]; 运用 Excel 模拟运算功能, 以各方案得分方差体现方案可辨识度, 调整参数 α 的大小, 使得 d 值最大。基于 sigmoid 函数的优先度函数中, 参数 α 值过大时, 由可能度之间差异表征的优先程度不能反映真实情况, 则方案得分的方差同样偏大, 故设定 α 取值范围为 [1,10], 调整参数 α 的结果如表 2 所示。

当 $\alpha = 10$ 时, d 值最大, 方案排序结果为[EAST,SOUTH,NORTH,MID,WEST]。

参考文献[27] TOPSIS 方法, 结合 $X = (\chi_{ij})_{m \times n}$, 计算相对接近度 d 。经计算得各区域农业机械化可持续发展能力相对接近度 d , 如图 2 所示。

	d	排名
EAST	0.71991	1
SOUTH	0.525344	4
WEST	0.383721	5
NORTH	0.582667	3
MID	0.624193	2

Figure 2. Table of relative proximity of regional agricultural mechanization sustainable development capacity by TOPSIS method

图 2. 各区域农业机械化可持续发展能力 TOPSIS 法相对接近度表

根据相对接近度 d 的大小对区域农业机械化可持续发展能力进行排序。将 TOPSIS 方法的计算结果与改进 PROMETHEE 方法进行对比, 如图 4 所示。

参考文献[28] FVIKOR 方法, 结合 $X = (\chi_{ij})_{m \times n}$, 计算 Q_j , i 分别表示 EAST、SOUTH、WEST、NORTH、MID。

经计算的各区域农业机械化可持续发展能力 Q_j 值, 如图 3 所示。

EAST	q1	0.257142857	2
SOUTH	q2	0.186603067	1
WEST	q3	1	5
NORTH	q4	0.34266911	4
MID	q5	0.336401089	3

Figure 3. Table of Q values of regional agricultural mechanization sustainable development capacity by FVIKOR method

图 3. 各区域农业机械化可持续发展能力 FVIKOR 法 Q 值表

根据 Q_j 的大小对区域农业机械化可持续发展能力进行排序将 FVIKOR 方法的计算结果与改进

PROMETHEE 方法进行对比，如表 3 所示。

Table 3. Comparison table of regional rankings by improved PROMETHEE, TOPSIS and FVIKOR methods
表 3. 改进 PROMETHEE、TOPSIS、FVIKOR 三种方法区域排名对比表

改进 PROMETHEE		TOPSIS		FVIKOR	
净流值	排名	d	排名	q	排名
0.6141	1	0.719910273	1	0.257142857	2
0.1220	2	0.525344234	4	0.186603067	1
-0.6796	5	0.383721075	5	1	5
-0.0136	3	0.582667096	3	0.34266911	4
-0.0330	4	0.624193476	2	0.336401089	3

根据实例分析得出的结论和 FVIKOR 方法与 TOPSIS 方法进行对比，在 FVIKOR 方法中有妥协解，因此在 FVIKOR 方法中 EAST 和 SOUTH 都是最优解，与改进 PROMETHEE 方法的结果相近。TOPSIS 方法计算结果与改进 PROMETHEE 方法有较大差别，由于改进 PROMETHEE 方法考虑的范围比 TOPSIS 方法更加全面周到，所以改进 PROMETHEE 方法具有更高的排序稳定性、科学度和可信度。

基于排序结果，进一步分析各区域在 PSIR 框架各维度的表现：EAST 区域在压力层(P)和经济影响层(I)表现突出，但在环境响应层(R)相对较弱，建议在保持农机投入的同时加强环保技术推广；SOUTH 区域科技因素(Q3)得分较高但市场化程度(Q4)不足，应重点完善农机服务市场体系；WEST 区域在劳动力质量(Q2)和农机收益(Q8)方面存在明显短板，需加强农机人才培养和效益提升。

5. 结论

论文在深入研究农业机械化可持续发展自身特点的基础上，构建了压力(P)、状态(S)、影响(I)、响应(R)这四个维度的农业机械化可持续发展指标体系，并提出基于改进 PROMETHEE 的区域农业机械化可持续发展能力评价方法，有效克服了现有农业机械化可持续发展评价指标中存在的模糊性以及评价影响因素的复杂性或不确定性、定性指标难以量化等问题，能够为相关方面提供具体、可操作的参考和路径。通过算例与 FVIKOR 方法和 TOPSIS 方法对比，验证了论文提出的方法的可行性、合理性和排序稳定性。

参考文献

[1] 农业部. 全国农业可持续发展规划(2015-2030 年) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.

[2] 农业农村部办公厅. “十四五”全国农业机械化发展规划[Z]. 北京: 农业农村部, 2021.

[3] 聂佳梅. 广西农业机械化发展的环境承载力研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2006.

[4] 吐尔逊·买买提, 丁为民, 艾力·哈斯木, 等. 基于组合赋权和 AHP 法的农机化可持续发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 67-73.

[5] 王术, 刘一明. 农业机械化与区域农业可持续发展关系实证分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 1-6, 31.

[6] 许洪源. 农业机械化发展影响因素分析及对策研究[J]. 南方农机, 2022, 53(22): 84-87.

[7] 常江雪, 白学峰, 等. 中国农业机械化绿色可持续发展理论框架研究[J]. 中国农机大学学报, 2021, 42(3): 213-221.

[8] 王源, 赵雅男, 黄莹. 基于熵值法的贵州省农业可持续发展水平评价研究[J]. 国土与自然资源研究, 2022(1): 52-54.

- [9] 谌钰洁, 海新权, 时月. 甘肃省农业可持续发展水平综合评价——基于农业高质量发展视角[J]. 国土与自然资源研究, 2022(6): 60-64.
- [10] 唐健飞, 刘剑玲. 省域农业可持续发展水平评价及其耦合协调分析——以长江经济带 11 省市为例[J]. 经济地理, 2022, 42(11): 179-185.
- [11] 缪建群, 赵梅, 黄国勤. 南方丘陵山区农业可持续发展综合评价及实证分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(8): 163-172.
- [12] 卢秉福, 韩卫平, 朱明. 农业机械化发展水平评价方法比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 46-49.
- [13] 王凯旋. 安徽省农业机械化发展水平评价及提升对策研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [14] 周继鸿, 黄大明. 广西农业机械化发展水平评价与分析[J]. 广西农业机械化, 2021(3): 4-6.
- [15] 周定武. 湖南省农业机械化综合水平评价与发展对策研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [16] 卢秉福, 张祖立, 朱明, 等. 农业机械化发展关键影响因素的辨识与分析[J]. 农业工程学报, 2008(11): 114-117.
- [17] 赵利. 农业机械化发展水平、影响因素及作用研究综述[J]. 农业经济与科技, 2020, 31(11): 22-25.
- [18] 辛可元. 我国农业机械化发展过程、影响因素及对策分析[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(11): 73-75.
- [19] Li, W., Wei, X., Zhu, R. and Guo, K. (2019) Study on Factors Affecting the Agricultural Mechanization Level in China Based on Structural Equation Modeling. *Sustainability*, **11**, Article 51. <https://doi.org/10.3390/su11010051>
- [20] 何琼. 我国农机产业集群演化机制与可持续发展路径研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [21] 李华, 喻晓玲. 农业机械化程度对农业经济的影响——基于新疆 13 个地区的面板数据[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(24): 226-228.
- [22] 李治, 朱明, 黄凰. 基于模糊 DEMATEL-ISM 的湖北省农业机械化可持续发展评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 51-58.
- [23] 范胜龙, 杨玉珍, 陈训争, 等. 基于 PSR 和无偏 GM(1,1)模型的福建省耕地生态安全评价与预测[J]. 中国土地科学, 2016, 30(9): 19-27.
- [24] Chen, N., Xu, Z. and Xia, M. (2013) Interval-Valued Hesitant Preference Relations and Their Applications to Group Decision Making. *Knowledge-Based Systems*, **37**, 528-540. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.09.009>
- [25] Xu, Z.S. and Da, Q.L. (2002) The Uncertain OWA Operator. *International Journal of Intelligent Systems*, **17**, 569-575. <https://doi.org/10.1002/int.10038>
- [26] Grabisch, M. (1997) K-Order Additive Discrete Fuzzy Measures and Their Representation. *Fuzzy Sets and Systems*, **92**, 167-189. [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(97\)00168-1](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(97)00168-1)
- [27] Rouhani, S., Ghazanfari, M. and Jafari, M. (2012) Evaluation Model of Business Intelligence for Enterprise Systems Using Fuzzy Topsis. *Expert Systems with Applications*, **39**, 3764-3771. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.074>
- [28] Opricovic, S. and Tzeng, G. (2004) Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and Topsis. *European Journal of Operational Research*, **156**, 445-455. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00020-1)