

基于SEW-FCE-DS的农业企业绿色创新绩效评价研究

宫凡棋

哈尔滨商业大学商务学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年9月13日; 录用日期: 2024年10月10日; 发布日期: 2024年10月22日

摘要

为客观和准确地评价农业企业绿色创新绩效, 本文通过评价指标的海选、筛选与信效度检验三个步骤构建农业企业绿色创新绩效评价指标体系, 并提出了基于SEW-FCE-DS的农业企业绿色创新绩效评价模型。首先运用结构熵权法确定指标权重, 然后运用模糊综合评价法对农业企业绿色创新绩效进行评价, 以判定各个指标对绿色创新绩效的影响程度, 再运用D-S证据理论对评价对象总体进行合成评价, 增强结果的可靠性与客观性。最后, 本文以中国农业企业的先进代表——北大荒集团为例进行分析。结果表明: 构建的评价模型能够有效评价农业企业绿色创新绩效水平, 从而进一步为后发农业企业绿色创新绩效的提升给予建议。

关键词

农业企业, 绿色创新绩效, 模糊综合评价法, 结构熵权法, D-S证据理论

Research on Green Innovation Performance Evaluation of Agribusiness Based on SEW-FCE-DS

Fanqi Gong

School of Business, Harbin University of Commerce, Harbin Heilongjiang

Received: Sep. 13th, 2024; accepted: Oct. 10th, 2024; published: Oct. 22nd, 2024

Abstract

In order to objectively and accurately evaluate the green innovation performance of agricultural enterprises, this paper starts from the connotation of green innovation performance, combines the

characteristics of agricultural enterprises with classical high-frequency indicators, and constructs the green innovation performance evaluation index system of agricultural enterprises through three steps of evaluation index selection, screening and reliability and validity testing. Finally, a green innovation performance evaluation model of agricultural enterprises based on SEW-FCE-DS was proposed. First, the structural entropy weight method is employed to determine the index weight, and then the fuzzy comprehensive evaluation method is used to evaluate the green innovation performance of agricultural enterprises to determine the impact of each index on the green innovation performance. Then the D-S evidence theory is employed to conduct synthetic evaluation of the overall evaluation object to enhance the reliability and objectivity of the results. Finally, this paper takes the advanced representative of China's agricultural enterprises—Beidahuang Group as an example to analyze. The results show that the constructed evaluation model can effectively evaluate the green innovation performance level of agricultural enterprises, and further provide suggestions for the improvement of green innovation performance of late agricultural enterprises.

Keywords

Agricultural Enterprises, Green Innovation Performance, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Structural Entropy Weight Method, Dempster-Shafer Evidence Theory

Copyright © 2024 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

随着科学技术的高速发展，中国农业农村的经济发展取得了显著的进步，但农业生产长期过量施用化肥、农药等化学物质，导致环境污染等一系列连锁反应，农业资源环境已不堪重负，且农业已超过工业成为中国最大的面源污染产业，给生态环境的发展带来了严峻挑战。二十大报告提到：“要加快发展方式绿色转型，实施全面节约战略，发展绿色低碳产业，倡导绿色消费，推动形成绿色低碳的生产方式和生活方式[1]。”《十四五规划和二零三五年远景目标》中把绿色与创新视为我国未来五年发展的重要目标，绿色创新成为解决经济增长与环境恶化之间矛盾的一把“金钥匙”。农业企业作为农业污染的主要制造者、农业环境治理的重要主体，驱动其转变传统粗放式发展方式，秉承节约资源、绿色发展理念，积极进行绿色创新并将成果进行转化利用，从而兼顾环境、社会和经济“三重底线”，成为破解当前困局的关键。而对绿色创新绩效进行科学、系统地评价是评估企业绿色创新水平、减少创新过程中可能出现的问题和修正绿色创新政策的关键手段。鉴于此，本文以绿色创新为主线，建立农业企业的绿色创新绩效评价指标体系，选取北大荒集团为研究对象，运用结构熵权法确定指标权重、模糊综合评价法判定各个指标对绿色创新绩效的影响程度、D-S 证据理论对评价对象总体进行合成评价，分析与评价农业企业绿色创新水平，为加速农业绿色转型提供建议。

2. 相关文献述评

国内外学者对绿色创新绩效进行了较为全面的研究，并取得了一定的研究成果。从构建绿色创新绩效综合评价指标方面来看，主要基于创新过程视角、投入产出视角和全面发展理念视角[2]。García-Granero 等(2018)基于创新过程视角，将绿色创新绩效分为组织绩效、产品绩效、制造绩效和营销绩效[3]。Li 等(2023)基于投入产出视角，从绿色创新投入、预期产出及非期望产出三个维度构建绿色创新效率指标体系评价产业绿色创新效率[4]。闫华飞等(2023)基于全面发展理念视角，从绿色创新经济、环境和社会效益三

个维度测度区域绿色创新绩效[5]。

从绿色创新绩效评价方法方面来看,有学者采用单一评价方法包括 TOPSIS 法、层次分析法、模糊综合评价法、数据包络分析法、梯度提升算法等测度绿色创新绩效。陈柔霖等(2020)利用模糊可拓层次分析法评价中国东北地区制造业绿色创新绩效[6]。胡俊南等(2023)运用层次分析法,从发展趋势、行业差异和地区差异 3 个角度对江西省战略性新兴产业绿色创新绩效进行评价[7]。Wang 等(2023)采用改进的数据包络分析法评价城市绿色创新效率,分析了中国城市绿色创新效率的空间特征和分布演变[8]。Zhang 等(2023)采用梯度提升算法预测企业绿色创新绩效,并证明梯度提升模型的预测效果优于线性模型、决策树模型和随机森林模型[9]。此外,还有学者采用组合评价方法测度绿色创新绩效,李守林等(2018)利用灰色关联分析法和 TOPSIS 法评价物流企业的创新绩效[10]。Li 等(2018)采用投影寻踪法和随机前沿分析法评价高端制造业绿色创新效率[11]。熊彬等(2019)采用投影寻踪模型并结合基于实编码的加速遗传算法衡量工业绿色创新产出,并利用 DEA-Malmquist 指数法评价其绿色创新效率[12]。Xia (2021)采用 DEA-SBM 模型和 TOPSIS 法对长江经济带绿色创新绩效进行评价[13]。Hu 等(2023)利用主成分分析法和 Sup-SBM 模型对区域绿色创新绩效进行测度[14]。

通过文献总结发现,国内外学者对于绿色创新绩效进行了较全面的研究,具有较高参考价值,但普遍存在指标选取过多且相对重复、未详细描述二级指标等不足,并鲜有学者结合绿色创新管理构建评价指标体系;大多数文献评价方法较为单一,说服力不够;在综合多种方法对企业绿色创新绩效进行评价的文献中,鲜有学者对评价结果进行综合地评价。针对以上问题,并考虑到所构建的农业企业绿色创新绩效评价体系中涉及较多的定性指标,且这些指标会因企业规模等因素而表现出明显的差异,加上不能从企业年度报告或统计年鉴提取所需数据,对各指标分析评价时需要大量主观判断,故本文将结构熵权法(Structural Entropy Weight Method, SEW)、模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)和 D-S 证据理论(Dempster-Shafer Evidence Theory)综合应用,构建 SEW-FCE-DS 综合评价模型测量农业企业绿色创新绩效,以提升企业绿色创新绩效评价的科学性。

3. 农业企业绿色创新绩效评价指标体系的构建

3.1. 评价指标的海选

本文以绿色创新绩效内涵、权威机构和核心文献的高频率指标为基础,梳理相关文献并确定海选评价指标,遵循科学性、有效性、可操作性、定性定量相结合等评价指标选取原则,基于投入产出视角,并考虑企业的绿色创新管理,得出农业企业绿色创新绩效评价指标初选结果。

3.2. 评价指标的筛选

利用 Delphi 方法进行指标优选[15],邀请绿色创新领域的专家和在农业企业中从事绿色创新相关工作的人员共 10 位,请他们根据李克特五级量表方法评价每一个预选指标并收集评价结果,上述量表等级从“直接舍弃”到“非常重要”分别对应分值 1~5,最后根据公式(1)与(2)计算专家们评分值的平均值 f_j 与变异系数 u_j ,且只保留 $f_j \geq 3.5$ 且 $u_j \leq 0.25$ 的指标。指标初筛结果见表 1 所示:

$$f_j = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ij}}{n} \quad (1)$$

$$u_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{ij} - f_j)^2 / (n-1)}}{f_j} \quad (2)$$

其中: f_{ij} 为第 i 位专家对第 j 项指标给出的分值, n 表示专家总人数。

Table 1. Screening results of green innovation performance index system

表 1. 绿色创新绩效指标体系筛选结果

一级指标	二级指标	三级指标(<i>j</i>)	平均值(<i>f_j</i>)	变异系数(<i>u_j</i>)	
绿色创新投入	人力投入	员工知识水平	4.7	0.10	
		研发人员数量	3.9	0.31	
		研发员工占比	4.5	0.12	
		新产品研发经费投入率	4.6	0.11	
		技术引进及改造经费投入率	4.3	0.19	
	资金投入	员工培训经费投入率	4.4	0.16	
		创新产品营销经费投入率	3.4	0.25	
		环保投资额	4.4	0.16	
		绿色创新激励水平	4.3	0.16	
		绿色创新项目决策水平	4.2	0.15	
绿色创新管理	管理机制	绿色创新风险管理水平	4.6	0.15	
		绿色创新战略规划水平	4.1	0.18	
		产学研合作程度	4.6	0.11	
		合作机制	4.2	0.15	
	合作机制	农业产业链合作程度	4.2	0.15	
		绿色金融合作程度	4.3	0.16	
		创新氛围	员工的绿色创新素质	3.2	0.20
			管理者的绿色创新素质	4.6	0.11
			企业的绿色创新文化	4.4	0.16
		绿色创新产出	经济效益	净资产收益率	4.2
创新产品销售率	4.5			0.12	
创新产品成本降低率	4.3			0.16	
创新投资收益率	4.5			0.12	
成本费用利用率	3.1			0.28	
社会效益	新增就业岗位数		4.4	0.12	
	企业纳税额		4.5	0.12	
	带动农户数		4.1	0.24	
	带动农户增收额		3.6	0.33	
	获得政府表彰次数		2.5	0.51	
绿色创新产出	环境效益	ISO14000 认证	4.5	0.12	
		环境治理披露情况	4.6	0.11	
		废物综合利用率	4.3	0.16	
		政府环境处罚	3.5	0.34	
		重点污染监控单位	3.2	0.35	
	创新效益	专利授权数	3.7	0.31	
		专利申请数	4.4	0.22	
		创新产品市场占有率	4.6	0.11	
		创新成果转化率	4.7	0.10	
		新产品及重大工艺创新数	3.6	0.30	

3.3. 评价指标的信效度检验

3.3.1. 信度检验

信度指测量数据的可靠程度，信度系数越高即表示该测验的结果越一致、稳定与可靠。本文采用克朗巴哈系数(Cronbach Alpha)对筛选确定的指标进行检验，再次请上述 10 位专家进行评分，并利用 SPSS 26.0 分析评分结果，得到 Cronbach Alpha 系数，结果见表 2。

Table 2. Reliability statistics table

表 2. 信度统计表

Cronbach Alpha	指标个数
0.818	28

一般而言， α 的值在 0~1 之间，当 $\alpha \geq 0.7$ 时表示信度较好，可以接受。由表可知， $\alpha = 0.818 > 0.7$ ，表明此问卷信度良好。

3.3.2. 效度检验

效度即有效性，表示评价结果反映被评对象特质的程度。本文利用内容效度比 CVR 检验问卷反映企业绿色创新绩效评价特征的程度，公式为：

$$CVR = \frac{2M - N}{N} \quad (3)$$

其中， M 表示认为某评价指标为“必要且相关”的专家数量， N 表示专家总人数，且通常认为 $CVR \geq 0.75$ 是有效的。

在 10 位参与评价的专家中，9 位专家认为此问卷能够反映企业绿色创新绩效特质，因此计算出 $CVR = 0.80 > 0.75$ ，表明此问卷效度较好。

综合以上分析，本文构建的农业企业绿色创新绩效评价指标体系信效度较高，可用于后续研究，评价指标体系如表 3 所示：

Table 3. Green innovation performance evaluation index system

表 3. 绿色创新绩效评价指标体系

目标层	准则层	一级指标	二级指标	指标属性
农业绿色创新 绩效	创新创新投入	人力投入	员工知识水平	定量指标
			研发员工占比	定量指标
		资金投入	新产品研发经费投入率	定量指标
			技术引进及改造经费投入率	定量指标
			员工培训经费投入率	定量指标
	绿色创新管理	管理机制	环保投资额	定量指标
			绿色创新激励水平	定性指标
			绿色创新项目决策水平	定性指标
			绿色创新风险管理水平	定性指标
			绿色创新战略规划水平	定性指标

续表

农业绿色创新 绩效	绿色创新管理	合作机制	产学研合作程度	定性指标	
			农业产业链合作程度	定性指标	
			绿色金融合作程度	定性指标	
	创新氛围		管理者的绿色创新素质	定性指标	
			企业的绿色创新文化	定性指标	
	经济效益		净资产收益率	定量指标	
			创新产品销售率	定量指标	
			创新产品成本降低率	定量指标	
	绿色创新产出	社会效益		创新投资收益率	定量指标
				新增就业岗位数	定量指标
				企业纳税额	定量指标
		环境效益		带动农户数	定量指标
				ISO14000 认证	定量指标
				环境治理披露情况	定量指标
	创新效益		废物综合利用率	定量指标	
		专利申请数	定量指标		
		创新成果转化率	定量指标		
		创新产品市场占有率	定量指标		

4. 基于 SEW-FCE-DS 的农业企业绿色创新绩效评价模型构建

4.1. 结构熵权法

结构熵权法是一种定性分析与定量分析相结合的权重系数结构分析方法[16]。具体操作方法如下。

4.1.1. 收集专家意见，形成“典型排序”

首先，根据测评指标设计定性排序的《待评指标权重专家调查表》；其次，专家利用得尔菲法给出对测评指标集的重要性“排序”意见的定性判断；最后，收集和整理专家意见，形成评价指标的“典型排序”。

4.1.2. 对“典型排序”进行“盲度”分析

第一步：设专家组中共有 k 名专家，对应的指标集记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，对应的“典型排序”数组为 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ ，“典型排序”矩阵为 $A(A = (a_{ij})_{i \times n}, i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, n)$ ，其中 a_{ij} 代表第 i 名专家对第 j 个指标的评价。

第二步：将“典型排序”定量、定性转化，得到隶属函数：

$$\gamma(J) = -\lambda p_n(J) \ln p_n(J) \tag{4}$$

其中，令 $p_n(J) = (m - J) / (m - 1)$ ， $\lambda = 1 / \ln(m - 1)$ ，代入并计算得：

$$\mu(J) = \frac{\ln(m - J)}{\ln(m - 1)} \tag{5}$$

其中， J 代表专家根据“典型排序”对某一指标进行评价后所给出的定性排序数； $\mu(J)$ 是 J 所对应的隶属

函数值, μ 为定义在 $[0,1]$ 上的变量; m 是转换参数, 取 $m=j+2$ 。将 $J=a_{ij}$ 代入 $\mu(J)$ 中, 得到排序数 a_{ij} 的隶属度 $b_{ij}(b_{ij}=\mu(a_{ij}))$, 隶属度矩阵为 $\mathbf{B}=(b_{ij})_{k \times n}$ 。

第三步: 假如 k 名专家对指标 u_j 具有一致的看法, 称为平均认识度 b_j :

$$b_j = (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{kj}) / k \quad (1)$$

专家由认知引发的对指标 u_j 的不确定性, 称为“认知盲度” M_j :

$$M_j = \left\{ \left[\max(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) - b_j \right] + \left[\min(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) - b_j \right] \right\} / 2 \quad (7)$$

第四步: 参加测评的 k 名专家对指标 u_j 的总体认识度记为 x_j ,

$$x_j = b_j (1 - M_j), x_j > 0 \quad (8)$$

通过 x_j 得到 k 名专家对指标 u_j 的评价向量 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

4.1.3. 归一化处理

对 $x_j = b_j (1 - M_j)$ 进行归一化处理得到指标 u_j 的权重, 令

$$w_j = x_j / \sum_{i=1}^m x_i \quad (9)$$

其中 $w_j (j=1, 2, \dots, n) > 0$, 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。 (a_1, a_2, \dots, a_n) 为专家对因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 重要性的整体判断, 且与 k 名专家的整体认知相符, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 即为因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 的权向量[17]。

4.2. 模糊综合评价法

模糊综合评价法通过将定性评价转变成定量评价, 可以有效解决模糊或难以量化的问题[18]。具体操作方法如下:

1) 确定评价对象因素集, 记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 该集合是影响评价对象所有因素集合, 其中 n 为评价指标个数。

2) 确定评价指标的评价集, 记为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 其中 v_j 表示第 i 个评价结果, m 为所有的评价等级数目。

3) 建立模糊关系矩阵, 独立对各个指标 $u_i (i=1, 2, \dots, n)$ 进行单因素评价, 确定单因素 u_i 对评价集 $v_j = \{j=1, 2, \dots, m\}$ 的隶属度 r_{ij} , 由此得到第 i 个因素 u_i 的单因素评价矩阵 $\mathbf{R}_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\}$, 进而构建模糊关系矩阵 \mathbf{R} , 得到评价对象由 U 向 V 转化的模糊关系 \mathbf{R} 。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

4) 确定评价指标权重向量, 记为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 指标权重由上文结构熵权法确定。

5) 构造模糊综合评价矩阵, 记为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$, 且 $Q = W * R$, 其中 q_j 代表被评价对象对评价等级模糊子集元素 v_j 的隶属程度。

在此计算过程中, 常用到的模糊合成算子包括四种类型, 分别为主因素突出型、主因素决定型、取小与有界性以及加权平均型[19], 由于加权平均型模糊合成算子是根据不同元素的权重大小综合评价, 对整体指标调整与衡量契合度更高, 因此本文选择加权平均型模糊算子。

6) 根据模糊评价矩阵进行综合评价, 并依照指标隶属度确定评价对象的最终等级。

4.3. D-S 证据理论

D-S 证据理论是一种运用不完全或非精确证据进行决策的一种理论，是将专家评语以模糊评语集的方式加以呈现，将未知性且以概率方式呈现的评价对象的特征集加以融合研究的方法[20][21]。本文基于过往研究，采用基于考虑证据之间关系及其本身特性的证据融合方法[22]。具体操作方法如下。

4.3.1. 基于 Lance 距离证据可信度确定

系统辨识框架为 $\mathbb{M} = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ，其共有 N 个证据 E_1, E_2, \dots, E_n ，对应的 mass 函数为 m_1, m_2, \dots, m_n ，且 $m_i = \{m_i(A_1), m_i(A_2), \dots, m_i(A_m)\}$ ，则证据 E_i 与 E_j 之间的 Lance 距离为：

$$d(E_i, E_j) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{|m_i(A_k) - m_j(A_k)|}{m_i(A_k) + m_j(A_k)} \quad (10)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

证据体 E_i 、 E_j 之间的相似性测度 $s(E_i, E_j)$ 为：

$$s(E_i, E_j) = 1 - d(E_i, E_j), 0 \leq s(E_i, E_j) \leq 1 \quad (11)$$

鉴于不同证据在辨识框架中的权重不同，因此通过证据的可信度确定其权重，证据 E_i 的可信度 Rel_i 为：

$$Rel_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^n s_{ij}^2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^n s_{ij}^2}} \quad (12)$$

4.3.2. 基于信度熵的证据不确定度确定

假定 $A_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 为系统辨识框架 \mathbb{M} 的子集，证据 E_i 对应的 mass 函数为 $m_i(A_k) (i = 1, 2, \dots, n)$ ， $|A_k|$ 表示子集 A_k 所包含元素的个数，当子集 A_k 只包含一个元素时，即 $|A_k| = 1$ ，则关键证据 E_i 的信度熵 Ed_i 为：

$$Ed_i = - \sum_{A_k \subseteq \Theta} m_i(A_k) \log_2 m_i(A_k) \quad (13)$$

为防止在某些情况中导致证据 E_i 零权重，因此通过计算信度熵的指数形式来确定证据 E_i 的权重：

$$U_i = e^{Ed_i} = e^{- \sum_{A_k \subseteq \Theta} m_i(A_k) \log_2 \frac{m_i(A_k)}{2^{|A_k|-1}}} \quad (14)$$

归一化处理后，证据 E_i 的不确定度 Unc_i 为：

$$Unc_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (15)$$

4.3.3. 可信度和不确定度相结合的证据加权融合

对基于证据可信度和不确定度得到的融合权重进行折扣处理，则证据 E_i 的折扣系数 W_i 为：

$$W_i = Rel_i \times Unc_i \quad (16)$$

对折扣系数进行归一化处理为：

$$\bar{W} = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (17)$$

通过将证据 E_i 的 mass 函数值 $m_i(A_k)(i=1,2,\dots,n;k=1,2,\dots,m)$ 赋予所对应的折扣系数, 得到修正后证据 E_{Avg} 的 mass 函数值 $m_{Avg}(A_k)$:

$$m_{Avg}(A_k) = \sum_{i=1}^n \bar{W} m_i(A_k) \tag{18}$$

假设辨识框架 \mathbb{M} 内存在两个证据 m_1 与 m_2 , 则 Dempster 合成规则(也称两组证据的正交和)可以表示为:

$$m(A) = m_1 \oplus m_2(A) = \begin{cases} 0, A = \Phi \\ \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 = A} m_1(A_1) m_2(A_2), A \neq \Phi \end{cases} \tag{18}$$

$$K = \sum_{A_1 \cap A_2 \neq \Phi} m_1(A_1) m_2(A_2) = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 = \Phi} m_1(A_1) m_2(A_2) \tag{19}$$

应用 Dempster 合成原则, 将 mass 函数值合成, 则得到证据融合结果 m_{Fus} :

$$m_{Fus} = (((m_{Avg} \oplus m_{Avg})_1 \oplus \dots)_i) \oplus m_{Avg})_{n-1} \tag{20}$$

根据最终证据融合结果的 mass 函数值, 依照信度函数最大化原则, 确定评价结果。

4.4. 基于 SEW-FCE-DS 模型的评价步骤

- 1) 确定综合评价层次模型: 构建农业企业绿色创新绩效综合层次模型, 目标层为农业企业绿色创新绩效, 准则层为绿色创新投入、绿色创新管理、绿色创新产出, 指标层为 28 个指标;
- 2) 确定因素集: 因素集是影响绿色创新绩效的各个指标所组成的集合;
- 3) 确定评价集: 评价集是刻画各个指标所处状态的集合, 本文将评价级分为差、较差、中、较好、好五级;
- 4) 确定指标权重: 权重是评价指标在整体评价体系中的相对重要程度, 本文通过结构熵权法确定各个评价指标的权重;
- 5) 进行模糊单因素评价: 确定因素集的各个因素隶属于评价集的程度, 得到所有指标因素的模糊评价结果, 建立单因素模糊关系矩阵;
- 6) 进行模糊综合评价: 在模糊单因素评价的基础上, 结合确定的指标权重值, 将模糊关系矩阵与权

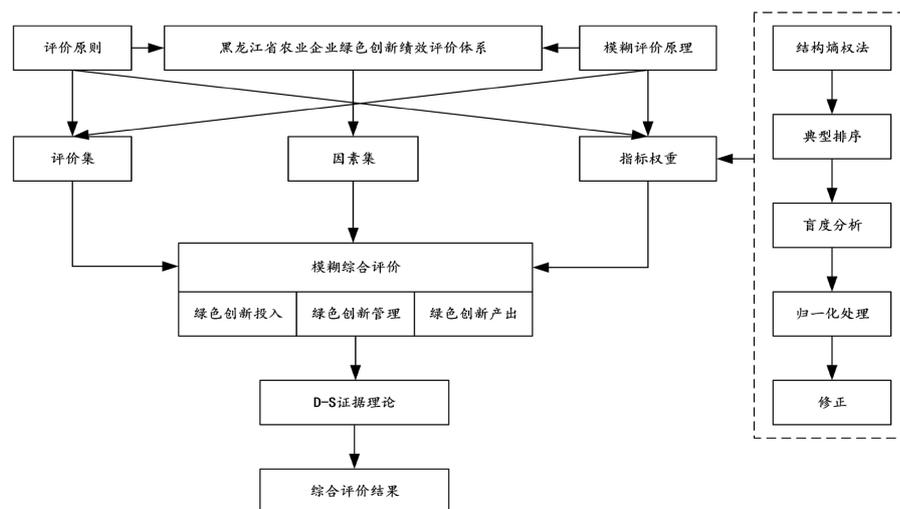


Figure 1. Flowchart of evaluation based on SEW-FCE-DS model
图 1. 基于 SEW-FCE-DS 模型的评价流程图

重矩阵进行模糊运算，得到最终的模糊综合评价结果；

7) 研究对象总体评价：运用 D-S 证据理论对评价对象总体进行合成评价；

8) 确定最终的评价结果并进行分析：在模糊计算与 D-S 证据理论评价结果的基础上，应用最大隶属度原则确定绿色创新绩效评价结果，并结合评价结果对黑龙江省农业企业绿色创新绩效进行分析。评价流程图如图 1 所示。

5. 农业企业绿色创新绩效评价的实证分析

5.1. 评价样本选取

本文最终选取作为农业第一大省 - 黑龙江省的北大荒集团作为实证研究的样本企业，理由为：首先，北大荒企业作为黑龙江省乃至全国农业领域的领军企业，已发展为目前国内规模最大、现代化水平较高的以农业为主营业务的大型综合性标杆企业，其在保障国家粮食安全、推动农业现代化方面发挥了重要作用，具有较高的代表性和影响力；其次，北大荒企业在绿色创新方面投入了大量的资源和精力，并积累了较为丰富的实践经验，通过对其绿色创新绩效的研究，可以为该地区乃至农业全行业提供具有借鉴意义的实践经验和管理启示；最后，作为知名企业，北大荒企业的绿色创新绩效研究结果具有一定的传播和示范效应，有助于引领行业内其他企业朝着绿色、环保方向持续发展，从而促进整个行业的可持续发展。

5.2. 基于 SEW-FCE-DS 模型的评价过程

此部分邀请了研究绿色创新领域的专家与任职于黑龙江省农业企业的高管共 16 位，并向其提供相关资料以对北大荒集团的绿色创新绩效水平评价打分，主要包括：北大荒集团近 7 年公开发布的年度报告、环境报告，公司官网发布的绿色化转型相关资料以及媒体对北大荒集团绿色创新绩效方面的评价报道等资料。其中，6 位专家利用结构熵权法对北大荒集团的绿色创新绩效水平进行评价以确定权重，10 位专家基于模糊综合评价法对二级指标进行单因素评价。

5.2.1. 确定指标体系模型、因素集与评价集

因素集是对评价对象产生影响的指标所形成的集合，根据表 3 构建的农业企业绿色创新绩效评价指标体系确定评价的因素集，据此形成如图 2 所示的综合层次结构模型。

评价集是各个专家对各项评价指标可能做出的各种结果所组成的集合，评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{好, 较好, 中, 差, 较差}\}$ 。其中，各评价等级皆为模糊向量，其描述了不同评价等级中存在的隶属度[23]。

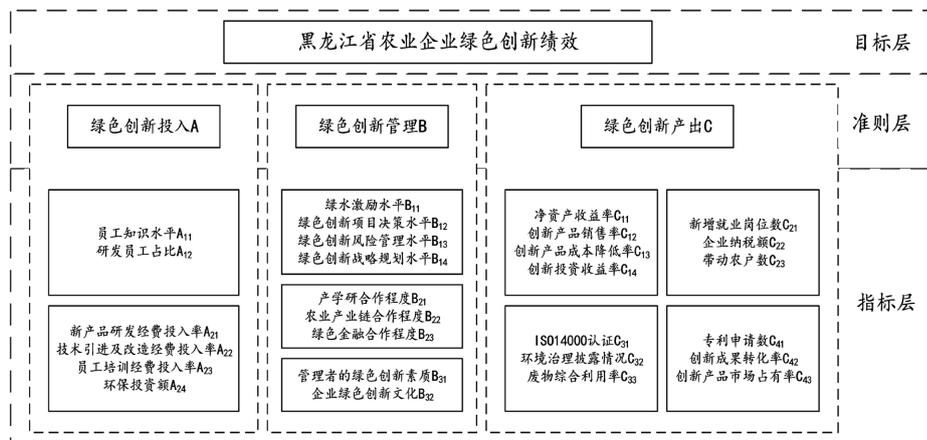


Figure 2. Synthesis hierarchical structure model
图 2. 综合层次结构模型

5.2.2. 确定评价指标权重

根据德尔菲法及结构熵权法原理设计调查问卷，并计算一级指标与二级指标的综合权重，所得结果如表 4 所示。

Table 4. The weight of green innovation performance evaluation index based on SEW

表 4. 基于结构熵权法确定的绿色创新绩效评价指标权重

目标层	准则层	权重	一级指标	权重	综合权重	二级指标	权重	综合权重
农业绿色 创新绩效	创新创 新投入 (A)	0.3778	人力投入 (A ₁)	0.5000	0.1889	员工知识水平(A ₁₁)	0.4515	0.0853
						研发员工占比(A ₁₂)	0.5485	0.1036
			资金投入 (A ₂)	0.5000	0.1889	新产品研发经费投入率(A ₂₁)	0.3046	0.0575
						技术引进及改造经费投入率(A ₂₂)	0.2369	0.0448
						员工培训经费投入率(A ₂₃)	0.2765	0.0522
						环保投资额(A ₂₄)	0.1820	0.0344
	绿色创 新管理 (B)	0.3004	管理机制 (B ₁)	0.3723	0.1118	绿色创新激励水平(B ₁₁)	0.2458	0.0275
						绿色创新项目决策水平(B ₁₂)	0.2245	0.0251
						绿色创新风险管理水平(B ₁₃)	0.2460	0.0275
			合作机制 (B ₂)	0.3156	0.0948	绿色创新战略规划水平(B ₁₄)	0.2837	0.0317
						产学研合作程度(B ₂₁)	0.3799	0.0360
						农业产业链合作程度(B ₂₂)	0.2403	0.0228
绿色创 新产出 (C)	0.3218	创新氛围 (B ₃)	0.3121	0.0938	绿色金融合作程度(B ₂₃)	0.3799	0.0360	
					管理者的绿色创新素质(B ₃₁)	0.5023	0.0471	
		经济效益 (C ₁)	0.2697	0.0868	企业的绿色创新文化(B ₃₂)	0.4977	0.0467	
					净资产收益率(C ₁₁)	0.1744	0.0151	
					创新产品销售率(C ₁₂)	0.2919	0.0253	
					创新产品成本降低率(C ₁₃)	0.2418	0.0210	
		社会效益 (C ₂)	0.2082	0.0670	创新投资收益(C ₁₄)	0.2919	0.0253	
					新增就业岗位数(C ₂₁)	0.3321	0.0223	
		环境效益 (C ₃)	0.2254	0.0725	企业纳税额(C ₂₂)	0.2762	0.0185	
					带动农户数(C ₂₃)	0.3917	0.0262	
ISO14000 认证(C ₃₁)	0.3165				0.0230			
环境治理披露情况(C ₃₂)	0.3117				0.0226			
创新效益 (C ₄)	0.2966	0.0954	废物综合利用率(C ₃₃)	0.3718	0.0270			
			专利申请数(C ₄₁)	0.2607	0.0249			
			创新成果转化率(C ₄₂)	0.3697	0.0353			
			创新产品市场占有率(C ₄₃)	0.3697	0.0353			

从准则层来看，在影响企业绿色创新绩效的多种因素中，绿色创新投入因素起到了最为关键的作用，意味着绿色创新投入在企业的绿色创新活动中具有不可忽视的重要性。从一级指标来看，人力投入、资金投入与管理机制对企业绿色创新绩效具有较大影响。

5.2.3. 进行模糊综合评价

根据模糊综合评价法，请专家独立对各个二级指标进行单因素评价，建立单因素模糊关系矩阵，且选用加权平均型模糊合成算子，依据公式 $Q = W * R$ 得出模糊综合评价结果，结果如表 5 所示。根据隶属度最大原则，北大荒集团绿色创新绩效模糊综合评价结果的最大元素值为 0.331，说明北大荒集团的绿色创新绩效水平处于中等偏上的状态，但仍有进一步的提升空间。

Table 5. Green innovation performance evaluation results of target level

表 5. 目标层绿色创新绩效评价结果

北大荒集团绿色创新绩效				
好	较好	中	差	较差
0.224	0.329	0.311	0.106	0.030

5.2.4. 研究对象总体评价

根据 D-S 证据理论对评价对象总体进行合成评价，将绿色创新绩效评价指标体系中准则层三个指标作为系统识别框架，表示为 $\mathbb{M} = \{A_1, A_2, A_3\} = \{\text{绿色创新投入, 绿色创新管理, 绿色创新产出}\}$ ，将评价集的五个指标作为系统证据，表示为 $E = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\} = \{\text{好, 较好, 中, 差, 较差}\}$ ，各自绿色创新绩效评价的结果作为 mass 函数值，应用 Dempster 合成原则进行证据融合，最终证据融合结果如表 6 所示。

Table 6. Conclusive results of evidence fusion

表 6. 最终证据融合结果

证据融合	A ₁	A ₂	A ₃	K
$m_1(A_1) \oplus m_2(A_1)$	0.3138	0.3597	0.3265	0.1980
$m_1(A_1) \oplus m_2(A_1) \oplus m_3(A_1)$	0.3040	0.3732	0.3228	0.2572
$m_1(A_1) \oplus m_2(A_1) \oplus m_3(A_1) \oplus m_4(A_1)$	0.2943	0.3869	0.3188	0.2575
$m_1(A_1) \oplus m_2(A_1) \oplus m_3(A_1) \oplus m_4(A_1) \oplus m_5(A_1)$	0.2847	0.4007	0.3146	0.2577

根据信度函数最大化原则，对绿色创新绩效三个层面进行综合排序为：绿色创新管理 > 绿色创新产出 > 绿色创新投入。

5.3. 评价结果分析

整体来看，北大荒集团绿色创新绩效模糊综合评价结果为 $[0.224, 0.329, 0.311, 0.106, 0.030]$ ，整体处于中等偏上水平，但仍有不足之处。绿色创新绩效三个层面指标的信度函数值由大到小依次为绿色创新管理(0.4007)、绿色创新产出(0.3146)、绿色创新投入(0.2847)，表明三个层面指标对提高企业的绿色创新绩效均有促进作用。其中，绿色创新管理层面的数值最大表明企业绿色创新的管理机制、合作机制与创新氛围对提升企业绿色创新绩效水平发挥关键作用，而绿色创新投入层面得分最低表明企业需进一步加强绿色创新活动的人力与资金投入。

具体来看，北大荒集团绿色创新投入指标权重为 37.78%，模糊综合评价结果为“中”，表明绿色创新投入对企业绿色创新绩效的提升具有重要作用，但企业用于绿色创新活动的人力与资金投入相对不足，与企业创新投入的实际相符。近几年，北大荒集团虽高度重视绿色化转型升级，资金与人力投入不断增加，但研发资金投入占营业收入比例最高不足 2%、研发人员数量占公司总人数的比例不足 1%。其次，企业绿色创新产出指标权重为 32.18%，模糊综合评价结果为“中”，其经济效益、环境效益与创新效益

结果处于中等水平，揭示了企业绿色创新成果转化率、商品化率低、环境保护意识不足等问题，至今未完全实现绿色转型。究其原因因为农业绿色创新的难度高、周期长，还需面对市场和政策变化等不确定性因素，导致创新成果失败风险明显增加，加上农业工作环境艰苦、工作强度大、任务繁重等特点，使企业很难吸引并留住高素质复合型创新人才，制约了其绿色可持续发展。此外，企业绿色创新管理的模糊综合评价结果为“较好”，这得益于北大荒集团积极探索“揭榜挂帅”“赛场选马”机制，优化人才战略布局；开展“迎丰收庆小康，科技助力北大荒——集团科技成就展”活动，进行“省农垦总局科学技术进步奖”评选等，营造绿色创新的氛围；实施集团管控信息化项目，提高企业现代化管理水平；联合 60 多个科研院所和全国高校科研院所，开展农作物和畜禽种源“卡脖子”技术攻关合作，还与京东、阿里、碧桂园等合作开辟数字农业新试验合作，提高产学研合作水平。

6. 结论与启示

本文在已有研究的基础上，结合绿色创新绩效的内涵和农业企业的特性，从绿色创新投入、绿色创新管理与绿色创新产出三大方面初步构建绿色创新绩效评价指标体系，再利用 Delphi 专家调查法进行指标筛选并进行信效度检验，进而构建了农业企业绿色创新绩效评价指标体系。然后，本文将结构熵权法、模糊综合评价法和 DS 证据理论有效集成，构建基于 SEW-FCE-DS 的农业企业绿色创新绩效评价模型，该模型充分利用结构熵权法将定性分析与定量分析相结合优势，使指标赋权更具科学性；利用模糊综合评价分析法将定性评价转变成定量评价，进而有效地应对各种模糊、不确定的信息，使得综合评价结果更具可靠性；并利用证据理论将不同证据源的数据进行综合优势，增强结果的可靠性。最后，本文以中国农业企业的先进代表——北大荒集团为例进行分析。

通过实例分析可知，本文构建的绿色创新绩效评价模型能有效地衡量农业企业绿色创新绩效水平，并通过分析中国农业企业的典型代表——北大荒集团的绿色创新绩效，探究其在绿色创新方面采取的战略规划，且发现优势的同时总结不足之处，为后发农业企业提升绿色创新绩效提供借鉴：第一，秉持绿色发展理念，全面提升绿色创新能力。农业企业应在其发展战略中融入绿色创新理念，并制定方案及时评估其实施效果，发现绿色创新过程中的问题并不断修正计划，有针对性地提升企业的绿色创新能力，实现绿色转型升级。第二，加大绿色创新投入力度，增强自主研发能力。农业企业可以通过设立数据平台实施责任挂钩制度，明确每项绿色创新活动的负责人，从而提高研发的产出率、转化率和商品化率。同时，企业应依据自身的发展战略和目标，吸引和培养应用型、创造型、复合型人才，并通过多样化的激励措施，为企业营造重视人才和创新成果的氛围，加速从模仿创新到原始创新转变的进程，从而实现跨越式发展。第三，秉持开放合作理念，加强绿色创新管理能力。农业企业不仅各部门之间要加强沟通与交流，提升各部门之间的协作能力，而且要跨越组织边界多方沟通，加强与高等院校、科研院所等机构的合作，获取互补性知识以提升自身绿色创新能力。此外，还要提高绿色创新项目决策与风险管理水平，为农业企业绿色创新活动的顺利进行提供保障。

本文仅是对绿色创新绩效评价的初步探索，虽然研究了北大荒集团的绿色创新绩效，但由于不同农业企业之间存在差异性，且企业发展的动态变化，故未来的研究可关注不同类型、不同发展阶段的农业企业绿色创新绩效发展水平。此外，虽然本文选择绿色创新实践领域的典型企业作为研究对象，但由于案例研究固有的局限性及公开信息的不足，导致研究结论的普适性成为不可忽视的限制因素。随着信息日益透明化与公开化，将来可借助诸如多案例分析、动态模拟等方法，进一步验证并丰富现有研究结论。

参考文献

- [1] 加快推进发展方式绿色转型——党的二十大报告在生态环境系统引发热烈反响[J]. 资源节约与环保, 2022(10): 150-151.

- [2] 谢琨, 庞凤娇, 陈高敏, 等. 我国钢铁企业绿色技术创新绩效评价研究[J]. 价格理论与实践, 2019(9): 153-156.
- [3] García-Granero, E.M., Piedra-Muñoz, L. and Galdeano-Gómez, E. (2018) ECO-Innovation Measurement: A Review of Firm Performance Indicators. *Journal of Cleaner Production*, **191**, 304-317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.215>
- [4] Li, G., Li, X. and Huo, L. (2023) Digital Economy, Spatial Spillover and Industrial Green Innovation Efficiency: Empirical Evidence from China. *Heliyon*, **9**, e12875. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12875>
- [5] 闫华飞, 杨美, 冯兵. 实施长江经济带发展战略提升了地区绿色创新绩效吗?——基于双重差分的实证检验[J]. 生态经济, 2023, 39(9): 50-57+67.
- [6] 陈柔霖, 李倩. 企业绿色创新绩效评价体系构建[J]. 长春工业大学学报, 2020, 41(5): 508-513.
- [7] 胡俊南, 胡瑾. 江西省战略性新兴产业企业绿色技术创新绩效评价研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(7): 33-41.
- [8] Wang, K., Zhang, F., Xu, R., Miao, Z., Cheng, Y. and Sun, H. (2023) Spatiotemporal Pattern Evolution and Influencing Factors of Green Innovation Efficiency: A China's City Level Analysis. *Ecological Indicators*, **146**, Article ID: 109901. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109901>
- [9] Zhang, J. and Yin, K. (2023) Application of Gradient Boosting Model to Forecast Corporate Green Innovation Performance. *Frontiers in Environmental Science*, **11**, Article ID: 1252271. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1252271>
- [10] 李守林, 赵瑞, 陈丽华. 基于灰色关联分析和 TOPSIS 的物流企业创新绩效评价[J]. 工业技术经济, 2018, 37(4): 12-21.
- [11] Li, T., Liang, L. and Han, D. (2018) Research on the Efficiency of Green Technology Innovation in China's Provincial High-End Manufacturing Industry Based on the RAGA-PP-SFA Model. *Mathematical Problems in Engineering*, **2018**, Article ID: 9463707. <https://doi.org/10.1155/2018/9463707>
- [12] 熊彬, 李宁, 杨朝均. 中国工业绿色创新绩效的地区差异及趋同性研究[J]. 软科学, 2019, 33(2): 65-68.
- [13] Xia, Q. (2021) Performance Evaluation and Spatio-Temporal Heterogeneity Analysis of Green Technology Innovation in the Yangt River Economic Belt. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **692**, Article ID: 032110. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/692/3/032110>
- [14] Hu, Y., Wang, C., Zhang, X., Wan, H. and Jiang, D. (2023) Financial Agglomeration and Regional Green Innovation Efficiency from the Perspective of Spatial Spillover. *Journal of Innovation & Knowledge*, **8**, Article ID: 100434. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100434>
- [15] 王春枝, 斯琴. 德尔菲法中的数据统计处理方法及其应用研究[J]. 内蒙古财经学院学报: 综合版, 2011, 9(4): 92-96.
- [16] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.
- [18] 杨惠敏, 付萍. 基于熵权的多级模糊综合评价的应用[J]. 华北电力大学学报, 2005(5): 106-109.
- [19] 谢丽娟, 陈俏. 模糊综合评判中合成算子的选取[J]. 科协论坛(下半月), 2012(9): 103-104.
- [20] Dempster, A.P. (1967) Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, **38**, 325-339. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177698950>
- [21] Shafer, G. (1976) A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press.
- [22] 王旋, 狄鹏, 尹东亮. 基于 Lance 距离和信度熵的冲突证据融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(2): 592-602.
- [23] 李仕峰, 杨乃定, 刘效广. 基于熵和证据理论的 NPD 项目复杂性模糊评价[J]. 管理工程学报, 2013, 27(1): 121-126+134.