

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.11.018

徐爽, 蔡鸿明, 赵林畅, 等. 农业食品供应链的可持续性指标衡量和分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(11): 186-196.

农业食品供应链的可持续性指标衡量和分析

徐爽¹, 蔡鸿明², 赵林畅³, 徐永驰⁴

1. 贵阳学院 经管学院, 贵阳 550005; 2. 上海交通大学 软件学院, 上海 201100;

3. 贵阳学院 数信学院, 贵阳 550005; 4. 贵阳学院 电通学院, 贵阳 550005

摘要: 随着全球动荡和自然环境的持续恶化, 农业产品供应链(Agriculture Food Supply Chain, AFSC)的可持续性成为消费者、企业、政府组织和学术界更感兴趣的课题。当前, 大多数农业产品供应链可持续性的研究主要采用可持续性三重底线(Triple Bottom Line, TBL)相关关键绩效指标, 但是现代 AFSC 具有非线性和可循环特征, 需要关注废物管理、回收利用和再循环等指标。该文通过将循环经济的相关绩效指标引入 TBL 指标体系中, 提出了一种基于环境、社会、经济和循环 4 维度的可持续性绩效指标模型, 用于评估 AFSC 的可持续性。该模型首先基于三角模糊数-层次分析法(TFN-AHP)确定框架中维度和关键绩效指标的权重; 然后使用改进 TOPSIS 方法评估备选方案的可持续发展绩效, 并对其进行排序。通过实证结果分析验证了该文方法的可行性和有效性, 能够为农业产品供应链的可持续性发展提供借鉴。

关键词: 农业食品供应链; 可持续性; 循环; 三角模糊数-层次

分析法; 逼近理想解排序法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)11-0186-11

Sustainability Index Metrics and Analysis of Agricultural Food Supply Chains

XU Shuang¹, CAI Hongming², ZHAO Linchang³, XU Yongchi⁴

1. School of Economics and Management, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

2. School of Software, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China;

3. School of Mathematics and Information Science, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

4. School of Electronics and Communications Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China

Abstract: As global unrest and the natural environment continue to deteriorate, the sustainability of the

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61972243); 贵州省教育厅青年项目(黔教技[2022]307 号); 贵阳学院引进人才启动资金科研项目 GYU-KY-[2023].

作者简介: 徐爽, 副教授, 主要从事数据挖掘研究.

agricultural food supply chain (AFSC) has become a topic of greater interest to consumers, businesses, government organizations, and academia. Most of the current research on AFSC sustainability mainly uses the triple bottom line (TBL) sustainability related key performance indicators. However, the characteristics of modern AFSC are non-linear and circular, which need focus on indicators such as waste management, recycling and recirculation. Therefore, by introducing performance indicators related to circular economy into the TBL indicator system, a sustainability performance indicator model based on four dimensions of environment, society, economy, and cycle was proposed to evaluate the sustainability of AFSC. The model first used triangular fuzzy number-based hierarchical analysis to determine the weights of the dimensions and key performance indicators in the framework. Then, the improved TOPSIS method was used to assess the sustainability performance of the alternatives and rank them. The analysis of empirical results verified the feasibility and validity of the proposed method, which can provide some guidance for the sustainability of agricultural food supply chains.

Key words: agricultural food supply chains; sustainability; circular; TFN-AHP method; TOPSIS

农业食品供应链(Agricultural Food Supply Chain, AFSC)是农业生产的重要组成部分,也是事关农业食品安全的关键一环. 因此, AFSC 对于各个国家都至关重要^[1-2]. 然而, 随着气候变暖、经济复苏乏力、局部冲突和动荡频发等全球性危机加剧, 农业食品供应链受到一定程度的冲击, 使得世界各地的食品供应链都遭受了不利影响^[3], 因此全球多个国家出台了不同程度的农业食品保护主义政策, 增加了维持供应链可行性的复杂性^[4]. 部分国家居民为了应对疫情、战争及自然灾害, 选择囤积保质期超长的应急储备食物, 而这种消费行为的重大变化又给供应网络带来了额外的负担^[5]. 在这种情况下, 如何防范化解食品供应链风险, 保证食品供应链的安全与可持续运作, 已成为学术界和商业界广泛关注和研究的重要课题.

目前, 针对农业食品供应链的风险管理, 专家学者提出了加强农业食品供应链可行性和可持续性的多种方法. Mu 等^[6]提出了弹性食品供应链的建议. Ekanayake 等^[7]讨论了与供应链相关的风险管理技术. Sharma 等^[8]主张更广泛地使用工业 4.0 技术来应对农业食品供应链扭曲的风险. Singh 等^[9]提出了一种新的公共食品分配框架, 以提高食品供应链的弹性. 然而, 上述研究仅仅停留在定性描述阶段, 对农业食品供应链可持续性发展能力缺少系统、深入的多维度定量评估. 因此, 需要建立一个适当的模型和指标评估体系, 用于衡量农业食品供应链可持续性的绩效.

可持续性发展是指在不牺牲后代满足其需求能力的基础上, 满足现有群体需求能力的发展途径^[10]. 将可持续性纳入供应链的绩效评估中, 有助于缓解环境破坏、劳动力短缺等风险和脆弱性, 提高企业稳定性, 并避免生产和分销过程的延误. 农业部门期待通过提高可持续发展绩效来实现 AFSC 中的可持续发展. AFSC 可持续性评估对于实现优质、安全、可靠、营养和负责任的社会食品至关重要^[11]. 农业食品供应链可持续性绩效评估研究本质上是多学科问题, 其内容包括确定指标、评估关键绩效指标的相对权重及开发合适的绩效评估模型^[12]. 基于经济、环境、社会三重底线(Triple Bottom Line, TBL)的评估方法为可持续农业食品供应链提供了一个有效途径^[13]. Liu 等^[14]将 TBL 可持续性概念应用于农业食品供应链, 用于衡量农业食品供应链系统的可持续绩效. Cecchini 等^[15]利用松弛测度法(Slacks-based Measure, SBM)和数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)来衡量乳制品企业的环境效率. Houssard 等^[16]使用生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)技术评估了乳制品行业的环境可持续性. 考虑到 TBL 背景下农业食品供应链绩效评估是多维度的, Shi 等^[17]采用多标准决策方法(multi-criteria decision-making model, MCDM)对 AFSC 中的供应链系统进行了整体分析. Banaeian 等^[18]和 Zhang 等^[19]分别使用多准则妥协解排序法(VIKOR)和模糊多准则妥协解排序法(Fuzzy VIKOR)来评估农业食

品供应链中供应商的可持续能力。Tirkolaei 等^[20]将模糊集理论、层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 相结合, 构建了一种衡量可持续供应商绩效的模糊决策方法。农业食品本质上易腐烂, 需要严格的温度控制和冷链物流。但是, 在 AFSC 中仍会存在大量的食物损失和浪费, 这使可持续性发展面临严重挑战。Kumar 等^[21]在供应链可持续评估中引入了循环经济的概念, 通过有效的管理降低浪费, 最大限度地确定供应链的可持续发展。循环经济概念有助于可持续发展, 为 TBL 增加了价值, 并确保人民最大限度地获得 AFSC 的安全管理。

国外学者在农业食品供应链及可持续供应链发展方面做出了很多有效的探索, 但是国内鲜有学者涉足农业食品供应链可持续性的定量研究, 而农业食品供应链可持续性指标衡量和分析是 AFSC 可持续发展的起点, 具有重要意义。鉴于此, 本文拟构建农业食品供应链可持续性评价指标体系, 并采用三角模糊数-层次分析法 (TFN-AHP) 和改进 TOPSIS 综合方法对 AFSC 进行可持续绩效评估, 以期对农业食品产业经济发展、食品安全、环境污染问题提供理论基础和实践指导。

本文的创新之处在于提供了一个全面标准的绩效指标体系, 为 AFSC 可持续消费和生产进行有效评价, 即在现有 AFSC 可持续指标 TBL 体系中引入循环维度。可持续绩效评估表明, 经济和环境维度在促使企业可持续发展方面发挥了更重要的作用, 其次是循环和社会维度。循环维度在可持续发展中起到催化剂作用, 通过减少、回收、再利用和循环利用来管理 AFSC 过程中的废物, 减少碳排放, 从而为经济、社会和环境提供动力。

1 AFSC 可持续性评价指标体系

循环经济是 AFSC 可持续发展的驱动力。本文在 AFSC 可持续性评价指标体系中环境、社会、经济 3 个维度的基础上, 构建新的循环维度来评价农业食品供应链的可持续性。图 1 给出了 AFSC 可持续发展的维度和关键绩效指标。

1.1 环境维度 (EN)

从环境维度来评估 AFSC 时, 需要从生态层面评估 AFSC 的可持续性。因此, 将绿色材料消耗 (EN1)、环境法规和政策 (EN2)、资源利用 (EN3)、绿色物流 (EN4) 和温室气体排放 (EN5) 作为 AFSC 的环境维度关键绩效指标。

1.2 社会维度 (S)

社会维度是可持续发展评估的第 2 个重要支柱。社会表现标志着该行业对人民及其生活方式的影响程度。本文将供应链内部透明度 (S1)、人力资源 (S2)、员工福利 (S3) 和利润分享 (S4) 作为 AFSC 的社会维度关键绩效指标。



图 1 AFSC 可持续发展的维度和关键绩效指标

1.3 经济维度(EC)

经济维度被用来衡量 AFSC 的经济增长和财务健康程度. 本文将盈利能力(EC1)、食品质量(EC2)、物流效率(EC3)和收入增长(EC4)作为 AFSC 的经济维度关键绩效指标.

1.4 循环维度(C)

循环维度是在可持续 TBL 维度的基础上, 针对 AFSC 绩效评估新引入的维度. 循环维度有助于通过额外指标引入提高供应链的可持续性, 特别是在环境 and 经济目标方面. 循环经济实践在供应链可持续性方面有多个指标, 本文将废物管理(C1)、逆向物流有效性(C2)及资源利用回收和再循环(C3)作为循环维度的关键绩效指标.

2 AFSC 可持续性评价模型

对农业食品供应链可持续性进行综合评价, 涉及到非定量因素, 本文采用三角模糊数-层次分析法和改进 TOPSIS 综合评价法对 AFSC 进行可持续绩效评估. 首先, 采用三角模糊数-层次分析法计算 4 个维度和相应关键绩效指标的权重. 然后, 利用权重系数, 通过改进 TOPSIS 法对 AFSC 的可选项进行排序. 图 2 给出了本文评价模型的框架. 图 2 中 CR(一致性比例)用于评估判断矩阵的一致性, 通常设置为小于 0.1 的值, 旨在确保决策者在构建判断矩阵时不会引入过多的不一致性.

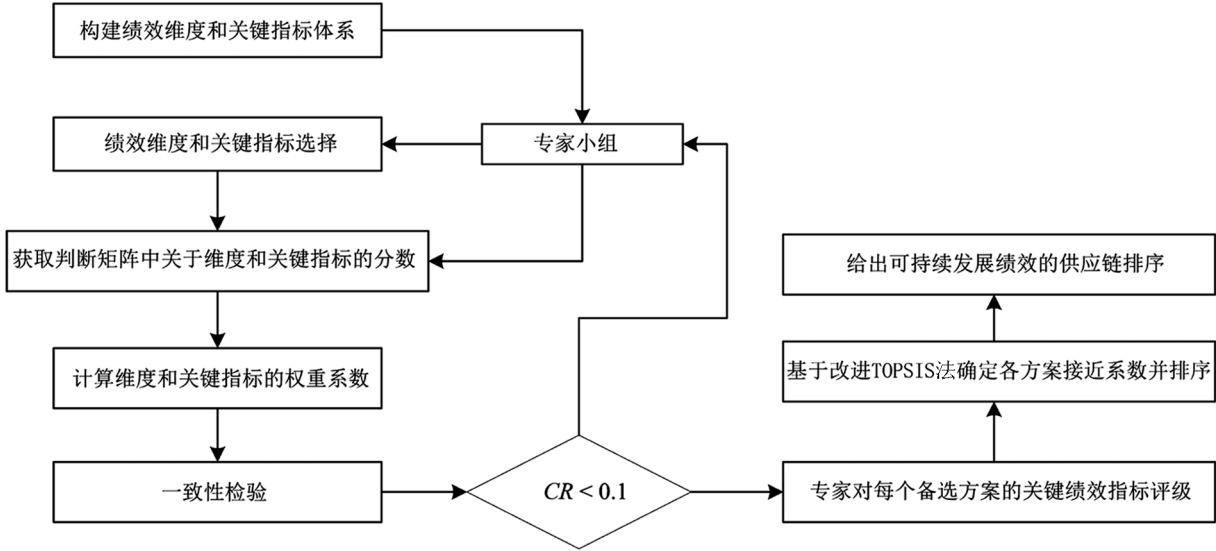


图 2 本文评价模型的框架

2.1 基于 TFN-AHP 法的权重计算

层次分析法(AHP)是将与决策相关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 并进行定量分析的决策方法. 对于多指标综合评估类问题, 一般采用 AHP 方法对指标权重进行计算. 考虑到专家评分往往具有一定的不确定性和模糊性, 本文采用 TFN-AHP 法来进行权重确定^[22].

2.1.1 三角模糊数

为了表示某一特征 t 隶属于集合 O 的程度, 采用三角形函数来表达模糊隶属函数. 设 $O=(l, o, v)$ 为三角模糊数, 其隶属度函数 $\eta_o(t)$ 为:

$$\eta_o(t)=\begin{cases} \frac{t}{o-l}-\frac{l}{o-l} & t\in[l,m] \\ \frac{t}{o-v}-\frac{v}{o-v} & t\in[m,u] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中, t 代表输入变量; l 代表三角形模糊数的起始点; v 代表三角形模糊数的结束点. o 表示输入

变量 t 对模糊集 O 的隶属度为 1 的中值. 当 $t=o$ 时, t 完全属于 O ; l 和 v 分别为下界和上界.

假定两个三角模糊数 $O_1=(l_1, o_1, v_1)$ 和 $O_2=(l_2, o_2, v_2)$, 其基本运算规则为:

$$\begin{cases} M_1 \oplus M_2 = (l_1 + l_2, o_1 + o_2, v_1 + v_2) \\ M_1 \otimes M_2 = (l_1 \cdot l_2, o_1 \cdot o_2, v_1 \cdot v_2) \\ \frac{1}{M_1} = \left(\frac{1}{v_1}, \frac{1}{o_1}, \frac{1}{l_1}\right) \end{cases} \tag{2}$$

为比较两个三角模糊数 O_1 与 O_2 的大小, 应先按照式(3)求得 $B(O_1 \geq O_2)$ 与 $B(O_2 \geq O_1)$ 的值. 其中, 当 $O_1 \geq O_2$ 的可能度用三角模糊函数定义为:

$$B(O_1 \geq O_2) = \begin{cases} 1 & o_1 \geq o_2 \\ \frac{l_2 - v_1}{(o_1 - v_1) - (o_2 - l_2)} & o_1 \geq o_2, v_1 \geq l_2 \\ 0 & l_2 \geq v_2 \end{cases} \tag{3}$$

因此, 一个三角模糊数 O 大于 r 个三角模糊数 $O_i(i=0, 1, \cdots, r)$ 的可能度为:

$$B(M \geq M_1, M_2, \cdots, M_r) = \min\{B(O \geq O_i)\} \quad i=1, 2, \cdots, r \tag{4}$$

图 3 说明当公式(4)中比较 O_1 与 O_2 大小时, 纵坐标上 η_{o_1} 和 η_{o_2} 之间交叉点 E 对应最大值, 该值同时满足 $B(O_1 \geq O_2)$ 和 $B(O_2 \geq O_1)$.

2.1.2 TFN-AHP 计算权重

TFN-AHP 计算权重的具体运算过程为:

步骤 1 构造三角模糊判断矩阵

利用已构建的评估指标体系, 由 C 位专家对同一层次评估指标的重要程度进行两两比较. 利用三角模糊数构造模糊判断矩阵, 指标重要程度描述与三角模糊数对应关系见表 1.

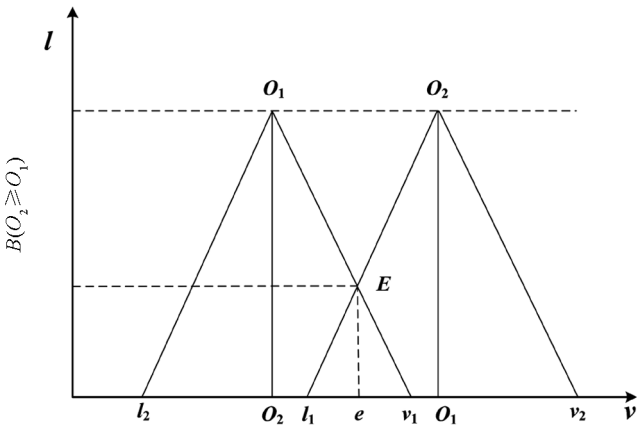


图 3 O_1 与 O_2 的交叉点

表 1 三角模糊数的构造

语义	构造方式	属性等级	语义	构造方式	属性等级
很低	(0, 0, 0.1)	1	比较高	(0.5, 0.7, 0.9)	5
低	(0, 0.1, 0.3)	2	高	(0.7, 0.9, 1)	6
比较低	(0.1, 0.3, 0.5)	3	很高	(0.9, 1, 1)	7
中	(0.3, 0.5, 0.7)	4			

步骤 2 建立模糊综合判断矩阵

假设有 n 个评估指标, 则构造的模糊判断矩阵为 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, 其中 $a_{ij}=(l_{ij}, o_{ij}, v_{ij})$. 考虑到共有 C 位专家进行评分, 因此 A 为 C 专家评分后的综合判断矩阵, 其定义为:

$$a_{ij} = \frac{1}{C} \otimes (a_{ij}^1 + a_{ij}^2 + \cdots + a_{ij}^h) \tag{5}$$

式(5)中, a_{ij}^k 表示第 k 个专家评的三角模糊数.

步骤 3 计算模糊综合度

假设 $O_{h_i}^1, O_{h_i}^2, \cdots, O_{h_i}^g$ 第 i 个一级指标下有 g 个二级指标三角模糊数, 则其模糊综合度 Q_i 表示为:

$$Q_i = \sum O_{h_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^g O_{h_i}^j \right]^{-1}$$

(6)

步骤 4 去模糊化, 计算权重

设 $D'(F_i) = \min B(Q_i \geq Q_j)$, 则评估指标的初始权重矩阵 W' 为:

$$W' = [D'(F_1), D'(F_2), \dots, D'(F_i)]$$

(7)

式(7)中, F_i 为第 i 个一级评估指标.

对初始权重矩阵进行标准化处理, 即可求出评估指标的最终权重向量 W , 为:

$$W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] =$$

$$[d'(B_1) / \sum_{i=1}^n d'(B_i), d'(B_2) / \sum_{i=1}^n d'(B_i), \dots, d'(B_n) / \sum_{i=1}^n d'(B_i)]$$

(8)

步骤 5 一致性检验

计算模糊综合判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$, 根据式(9)计算判断矩阵的一致性指标 CI .

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(9)

然后, 计算一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(10)

式(10)中, RI 为随机一致性指标, 其值取决于判断矩阵的维度(也就是元素的数量). RI 的值会随着判断矩阵的维度而变化, 如表 2 所示. 当 $CR \leq 0.1$ 时, 判断矩阵为满意一致性矩阵; 当 $CR > 0.1$ 时, 判断矩阵不具有 consistency, 需要对其进行调整, 直到其为满意一致性矩阵为止.

表 2 随机一致性指标

维数	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.2 基于改进 TOSIS 法评估 AFSC 可持续性

TOPSIS 法是一种多属性的决策分析方法, 其基本思路是通过计算有限数量的评价对象与正、负理想化方案之间的接近程度、相对贴适度来对评价对象的优劣做出判断^[23].

假设某多属性决策问题有 m 个备选方案, 即方案集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. 评价方案优劣的属性有 n 个, 构成属性向量 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. 此时任一方案 $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的 n 个属性值构成决策向量 $Y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}\}$, 则 m 个方案的向量可构成决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$. 向量 Y_i 能够唯一表示方案 x_i , 其可视为 n 维空间中的一个点. 在该空间中, 假设存在一个理想解 x^* , 其每个属性值都是决策矩阵中该属性的最优值. 假设存在一个负理想解 x^0 , 其每个属性值都是决策矩阵中该属性的最劣值. 在 n 维空间中, 对每个备选方案 $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 到理想解 x^* 和负理想解 x^0 的距离进行比较, 其中离理想解最近, 离负理想解最远的方案就是最优方案, 可据此对方案的优劣性进行排序.

2.2.1 传统 TOSIS 算法

TOPSIS 具体运算过程为:

步骤 1 计算规范决策矩阵

已知决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, 则规范化决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 可通过以下公式计算得到:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

(11)

步骤 2 构建加权规范矩阵

假设各属性的权重向量 $\mathbf{W}=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T$ 已知, 则加权规范矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}$ 可通过以下公式计算得到:

$$x_{ij} = w_j \cdot z_{ij} \quad i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,n \quad (12)$$

式(12)中, 权重向量 $\mathbf{W}$ 中的各个权重系数由 TFN-AHP 计算得到.

步骤 3 确定理想解 x^* 和负理想解 x^0

假设理想解 x^* 和负理想解 x^0 的第 j 属性值分别为 x_j^* 和 x_j^0 , 则其定义为:

$$x_j^* = \begin{cases} \max_i x_{ij} & j \text{ 为效益型属性} \\ \min_i x_{ij} & j \text{ 为成本型属性} \end{cases} \quad (13)$$

$$x_j^0 = \begin{cases} \min_i x_{ij} & j \text{ 为成本型属性} \\ \max_i x_{ij} & j \text{ 为效益型属性} \end{cases} \quad (14)$$

步骤 4 计算评价方案与理想解的距离

方案 x_i 到理想解 x^* 的距离为:

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^*)^2} \quad i=1,2,\cdots,m \quad (15)$$

方案 x_i 到负理想解 x^0 的距离为:

$$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^0)^2} \quad i=1,2,\cdots,m \quad (16)$$

步骤 5 计算各方案的综合评估指数

根据方案 x_i 综合评估指数 c_i 的大小来判定各方案的优劣次序.

$$c_i = \frac{d_i^0}{d_i^0 + d_i^*} \quad i=1,2,\cdots,m \quad (17)$$

2.2.2 改进 TOSIS 算法

TOPSIS 法可以充分反映各方案与最优方案之间的差距, 呈现出最真实的情况, 而且在使用时对数据的限制较少, 使用起来比较灵活. 但传统的 TOPSIS 法存在不足, 其距离计算基于欧式距离, 可能存在与理想解 x^* 和负理想解 x^0 欧式距离都较近的方案, 此时 TOPSIS 法不能对方案进行排序. 针对欧式距离存在的不足, 可以引入灰色关联分析法, 利用灰色关联度代替欧氏距离.

具体而言, 加权规范矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}$ 不需要通过步骤 2 进行构建. 根据步骤 3 中的理想解 z^* 和负理想解 z^0 将规范化决策矩阵代入式(13)–式(14)求得.

计算理想解 z^* 和负理想解 z^0 的灰色关联系数 U_j^* 和 U_j^0 , 其中 j 表示第 j 个属性.

$$U_j^* = \frac{\min_i \min |z_j^* - z_{ij}| + 0.5 \max_i \max |z_j^* - z_{ij}|}{|\min_i |z_j^* - z_{ij}| + 0.5 \max_i |z_j^* - z_{ij}|} \quad (18)$$

$$U_j^0 = \frac{\min_i \min |z_j^0 - z_{ij}| + 0.5 \max_i \max |z_j^0 - z_{ij}|}{|\min_i |z_j^0 - z_{ij}| + 0.5 \max_i |z_j^0 - z_{ij}|} \quad (19)$$

根据灰色关联系数 U_j^*, U_j^0 和权重向量 w_j , 计算各方案与理想解 z^* 和负理想解 z^0 的灰色关联度 U_i^* 和 U_i^0 .

$$U_i^* = \sum_{j=1}^n w_j U_j^* \quad (20)$$

$$U_i^0 = \sum_{j=1}^n w_j U_j^0$$

(21)

最后, 计算各方案的灰色关联贴近度 P_i , 根据灰色关联贴近度大小判断各方案的优劣.

$$P_i = \frac{U_i^*}{U_i^* + U_i^0}$$

(22)

3 案例分析

针对农业食品供应链可持续性评估, 本文选择西南地区 4 家乳品生产企业的乳制品供应链作为案例对象进行评价、分析. 为了能够向乳制品生产行业提供真实、有效的科学数据, 相关人员采用问卷形式从环境、社会、经济和循环 4 个维度, 对 16 个关键绩效指标进行打分. 打分人员包括相关部门的专家学者、乳制品生产人员、销售人员和消费者. 通过整理, 得到模糊判断矩阵(表 3).

表 3 4 个维度的模糊判断矩阵

	S	EC	EN	C
S	1	0.2	0.3	0.5
EC	5	1	1	2
EN	3	1	1	3
C	2	0.5	0.3	1

3.1 基于 TFN-AHP 法计算权重

首先, 整理相关人员的打分, 获得模糊判断矩阵. 表 3 给出了 4 个维度上的整体模糊判断矩阵. 单个维度上二级指标对应的判断矩阵 A_1, A_2, A_3 和 A_4 分别为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 3 & 0.5 \\ 0.2 & 1 & 0.3 & 0.4 \\ 0.3 & 3 & 1 & 0.3 \\ 2 & 4 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 0.5 & 3 & 2 \\ 0.2 & 1 & 0.2 & 2 & 0.3 \\ 2 & 5 & 1 & 4 & 3 \\ 0.3 & 0.5 & 0.3 & 1 & 1 \\ 0.5 & 3 & 0.3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 2 & 0.5 \\ 4 & 1 & 3 & 1 \\ 0.5 & 0.3 & 1 & 0.3 \\ 2 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \\ 1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

其次, 使用式(8)获得每个标准和指标的权重, 并使用式(10)检查结果的一致性. 维度和关键指标的一致性比率如表 4 所示. 从表 4 中可以看出, 所有维度和关键指标的一致性比率都低于 0.1. 表 5 给出了各维度的局部权重和全局权重.

表 4 维度和关键指标的一致性比率

	CI	CR
维度	0.027	0.029
环境指标	0.070	0.062
社会指标	0.053	0.058
经济指标	0.021	0.024
循环指标	0.030	0.051

表 5 4 个维度的局部权重和全局权重

维度	权重	二级指标	局部权重	全局权重	排名
经济	0.4	盈利能力	0.15	0.06	6
		食品质量	0.40	0.16	1
		物流效率	0.10	0.04	10
		收入增长	0.35	0.14	2
环境	0.34	绿色材料消费	0.28	0.10	4
		环境法规和政策	0.08	0.03	14
		资源利用	0.41	0.14	3
		绿色物流	0.09	0.03	13
		温室气体排放	0.14	0.05	7
社会	0.1	供应链内部透明度	0.35	0.03	12
		人力资源	0.07	0.01	16
		员工福利	0.15	0.02	15
		利润分享	0.43	0.04	9
循环	0.16	废物管理	0.24	0.04	11
		逆向物流有效性	0.49	0.08	5
		资源利用回收和再循环	0.27	0.04	8

3.2 基于改进 TOPSIS 法进行排名

首先，根据专家打分，获取 4 个乳制品生产企业在每个维度下的关键绩效得分并形成决策矩阵。其次，通过式(11)规范化后可消除量纲的影响，得到规范化决策矩阵(表 6)。在本文中，环境维度的 3 个指标(资源利用、绿色物流和温室气体排放)属于成本标准，其他 13 个指标都是效益标准。

表 6 规范化决策矩阵

企业	环境维度指标					社会维度指标				经济维度指标				循环维度指标		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
1	0.56	0.56	0.14	0.11	0.11	0.11	0.56	0.11	0.56	0.56	0.56	0.11	0.11	0.56	0.33	0.11
2	0.33	0.56	0.11	0.14	0.20	0.56	0.11	0.56	0.56	0.11	0.56	0.11	0.56	0.33	0.33	0.11
3	0.56	0.78	0.11	0.11	0.11	0.56	0.33	0.11	0.78	0.33	0.11	0.33	0.56	0.33	0.11	0.11
4	0.78	0.11	0.11	0.11	0.11	0.56	0.11	0.56	0.33	0.33	0.33	0.11	0.33	0.11	0.33	0.33

利用式(13)一式(14)确定理想解和负理想解，并根据理想解和负理想解计算每个备选方案的距离。在确定各备选方案的距离后，计算其接近系数。通过接近系数的值，确定备选方案的最终排名(表 7)。

表 7 备选方案的距离及接近系数

企业	与理想解的距离	与负理想解的距离	接近系数	排名
1	0.162 06	0.277 82	0.631 6	1
2	0.218 23	0.226 31	0.509 1	2
3	0.233 18	0.204 12	0.466 8	3
4	0.261 88	0.179 64	0.406 9	4

3.3 结果分析与讨论

采用 TFN-AHP 和改进 TOPSIS 相结合的方法来计算绩效指标的权重，并根据 4 个乳制品生产企业在环境、社会、经济和循环 4 个维度的综合得分对其进行排名。研究结果表明，经济维度的权重最高，

环境维度和循环维度处于中间, 而社会维度的权重最低. 本文在环境维度、社会维度、经济维度的权重与文献[24]中提供的权重基本一致.

在二级指标中, 绿色材料消耗的权重是环境维度中最高的加权指标, 而环境法规和政策权重最低. 社会维度中的人力资源和利润分享权重、经济维度中的食品质量和物流效率权重、循环维度中的废物管理和逆向物流有效性权重的数值及排名与文献[25]中的结果一致. 表 5 给出了 4 个维度 16 个指标的局部权重、全局权重及排名. 从全局权重来看, 食品质量权重为 0.16, 排名第 1, 收入增长权重为 0.14, 排名第 2, 说明企业首先要关注产品的质量和收益, 从而实现可持续目标. 此外, 帮助企业实现可持续发展的关键绩效指标是绿色材料消耗, 通过该指标可以控制材料和能量消耗, 引导企业在满足生产需求的同时, 通过降本增效实现可持续发展目标. 循环维度中的废物管理、逆向物流有效性及资源利用回收和再循环指标权重分别为 0.04, 0.08 和 0.04, 排名分别为 11, 5, 8. 由于乳制品行业因使用化学品而产生废水和工业污泥, 可持续发展目标中的循环指标可以帮助企业实现废水处理和污泥转化为肥料, 从而提高公司的经济和生态收益.

改进 TOPSIS 方法被用于评估 4 家乳制品厂供应链可持续的能力并对其进行排名. 该方法将 TFN-AHP 获得的权重和专家对每个备选方案的决策矩阵作为输入, 其结果如表 7 所示. 从表 7 中可知, 第 1 家乳制品厂的接近系数最高, 其距离最接近理想解, 第 4 家乳制品厂的接近系数最低, 其可持续性能力最低; 其余 2 家可持续性能力为中等. 根据可持续绩效得分, 第 1 家乳制品厂被评为 4 家乳制品厂供应链中可持续性和循环能力最佳的企业.

4 结论

本文提出一种融合循环维度和 TBL 维度的可持续性评估框架, 用于评估现代农业产品供应链的可持续性. 该框架根据 AFSC 的主要特征要素, 从环境、经济、社会 and 循环 4 个维度构建了包含 16 个关键绩效标准的指标体系, 保证了评估指标的科学性和全面性. 为了对 AFSC 可持续性关键绩效指标进行量化, 设计了一种基于 TFN-AHP 和改进 TOPSIS 的综合方法. 首先利用 TFN-AHP 计算 4 个维度和 16 个关键绩效指标的权重; 然后使用改进 TOPSIS 法评估供应链备选方案的可持续发展绩效, 并根据接近系数对其进行排序; 最后通过乳制品企业的案例验证了本文方法的可行性和合理性, 可有效指导实际农业产品供应链的实践活动.

因为所采用的关键绩效指标都是固定的, 所以本文主要缺陷是定性评估. 下一步研究计划是将本文指标体系推广到其他行业供应链进行可持续性评估, 且引入 VIKOR 等其他 MCDM 工具共同完成.

参考文献:

- [1] ADAMS D J, DONOVAN J, TOPPLE C. Implementing Sustainability in Food Manufacturers' Operations and Supply Chains [J]. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2022, 33(5): 1132-1146.
- [2] IVO DE CARVALHO M, RELVAS S, BARBOSA-PÓVOA A P. A Roadmap for Sustainability Performance Assessment in the Context of Agri-Food Supply Chain [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 34: 565-585.
- [3] BENJAMIN A G A, YAW K L, EBENEZER A, et al. Firm Performance Implications of Supply Chain Integration, Agility and Innovation in Agri-Businesses: Evidence from an Emergent Economy [J]. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, 2022, 12(2): 320-341.
- [4] ARCESE G, FORTUNA F, PASCA M G. The Sustainability Assessments of the Supply Chain of Agri-Food Products: The Integration of Socio-Economic Metrics [J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2023, 40: 100782-100788.
- [5] LOXTON M, TRUSKETT R, SCARF B, et al. Consumer Behaviour during Crises: Preliminary Research on how Coronavirus Has Manifested Consumer Panic Buying, Herd Mentality, Changing Discretionary Spending and the Role of the Media in Influencing Behaviour [J]. *Journal of Risk and Financial Management*, 2020, 13(8): 166-186.
- [6] MU W, VAN ASSELT E D, VAN DER FELS-KLERX H J. Towards a Resilient Food Supply Chain in the Context of

- Food Safety [J]. Food Control, 2021, 125: 107953-107960.
- [7] EKANAYAKE E M A C, SHEN G Q P, KUMARASWAMY M M. Identifying Supply Chain Capabilities of Construction Firms in Industrialized Construction [J]. Production Planning & Control, 2021, 32(4): 303-321.
- [8] SHARMA R, SHISHODIA A, KAMBLE S, et al. Agriculture Supply Chain Risks and COVID-19: Mitigation Strategies and Implications for the Practitioners [J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2020, 2020: 1-27.
- [9] SINGH C S, SONI G, BADHOTIYA G K. Performance Indicators for Supply Chain Resilience: Review and Conceptual Framework [J]. Journal of Industrial Engineering International, 2019, 15(1): 105-117.
- [10] 孙广刚. 绿色食品产业与中国绿色农业的可持续性发展战略 [J]. 中国市场, 2022(16): 4-6.
- [11] BATWARA A, SHARMA V, MAKKAR M, et al. An Empirical Investigation of Green Product Design and Development Strategies for Eco Industries Using Kano Model and Fuzzy AHP [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8735-8769.
- [12] 张仕超, 王金亮, 魏朝富, 等. 丘陵山区多元新型农业经营主体时空演变及产业响应 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 118-137.
- [13] KAMBLE S S, GUNASEKARAN A, GAWANKAR S A. Achieving Sustainable Performance in a Data-Driven Agriculture Supply Chain: a Review for Research and Applications [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 219: 179-194.
- [14] LIU Y, ECKERT C, YANNOU-LE BRIS G, et al. A Fuzzy Decision Tool to Evaluate the Sustainable Performance of Suppliers in an Agrifood Value Chain [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127: 196-212.
- [15] CECCHINI L, VENANZI S, PIERRI A, et al. Environmental Efficiency Analysis and Estimation of CO₂ Abatement Costs in Dairy Cattle Farms in Umbria (Italy): a SBM-DEA Model with Undesirable Output [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 895-907.
- [16] HOUSSARD C, MAXIME D, BENOIT S, et al. Comparative Life Cycle Assessment of Five Greek Yogurt Production Systems: a Perspective beyond the Plant Boundaries [J]. Sustainability, 2020, 12(21): 9141-9161.
- [17] SHI H A, QUAN M Y, LIU H C, et al. A Novel Integrated Approach for Green Supplier Selection with Interval-Valued Intuitionistic Uncertain Linguistic Information: a Case Study in the Agri-Food Industry [J]. Sustainability, 2018, 10(3): 733-750.
- [18] BANAEIAN N, MOBLI H, FAHIMNIA B, et al. Green Supplier Selection Using Fuzzy Group Decision Making Methods: a Case Study from the Agri-Food Industry [J]. Computers & Operations Research, 2018, 89: 337-347.
- [19] ZHANG J, YANG D, LI Q A, et al. Research on Sustainable Supplier Selection Based on the Rough DEMATEL and FVIKOR Methods [J]. Sustainability, 2020, 13(1): 88-107.
- [20] TIRKOLAEI E B, DASHTIAN Z, WEBER G W, et al. An Integrated Decision-Making Approach for Green Supplier Selection in an Agri-Food Supply Chain: Threshold of Robustness Worthiness [J]. Mathematics, 2021, 9(11): 1304.
- [21] KUMAR S, RAUT R D, NAYAL K, et al. To Identify Industry 4.0 and Circular Economy Adoption Barriers in the Agriculture Supply Chain by Using ISM-ANP [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293: 126023-126035.
- [22] 程永龙, 杨海旭, 杜国强, 等. 基于 TFN-AHP 赋权的木结构建筑可靠性评估研究 [J]. 林产工业, 2019, 56(11): 6-12.
- [23] 邹筱, 庞天赐, 周欢. 双向收益共享成本分担契约下生鲜农产品供应链优化研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(11): 122-130.
- [24] SUFIYAN M, HALEEM A, KHAN S, et al. Evaluating Food Supply Chain Performance Using Hybrid Fuzzy MCDM Technique [J]. Sustainable Production and Consumption, 2019, 20: 40-57.
- [25] KUMAR M, KUMAR CHOUBEY V, DEEPAK A, et al. Life Cycle Assessment (LCA) of Dairy Processing Industry: a Case Study of North India [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: 129331-129343.