

基于AHP-熵权法的农产品“最先一公里” 预冷模式选择研究

花晓凤, 刘华琼*

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年12月1日; 录用日期: 2024年12月23日; 发布日期: 2025年1月15日

摘要

本文针对我国农产品“最先一公里”预冷处理中存在的温控不佳、高耗能、低利用率及品质难保障等关键问题, 系统分析了固定设施预冷、移动设施预冷及其组合模式的优劣, 以期优化产地预冷环节。基于指标体系设计原则, 构建了涵盖经济、技术、社会三个维度的预冷模式选择评价指标体系, 共含12个二级指标。采用AHP-熵权法分析, 确定了各指标权重, 发现经济因素占主导, 尤其是投资建设成本、盈利能力为关键影响因素。最后, 运用线性综合法对三种预冷模式进行综合评估, 结果显示联合预冷模式最优, 次之为移动设施预冷和固定设施预冷。以期为农产品预冷模式选择提供科学依据和决策支持。

关键词

农产品“最先一公里”, 预冷模式, AHP-熵权法

Research on the Selection of “First Kilometer” Pre-Cooling Mode for Agricultural Products Based on AHP-Entropy Right Method

Xiaofeng Hua, Huaqiong Liu*

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong university, Jinan Shandong

Received: Dec. 1st, 2024; accepted: Dec. 23rd, 2024; published: Jan. 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 花晓凤, 刘华琼. 基于 AHP-熵权法的农产品“最先一公里”预冷模式选择研究[J]. 现代管理, 2025, 15(1): 165-179. DOI: 10.12677/mm.2025.151021

Abstract

Aiming at the key problems of poor temperature control, high energy consumption, low utilization rate and difficult to guarantee quality in the “first kilometer” pre-cooling treatment of agricultural products in China, this paper systematically analyzes the advantages and disadvantages of pre-cooling in fixed facilities, pre-cooling in mobile facilities and their combined modes, with a view to optimizing the pre-cooling link at the origin. Based on the principle of index system design, the evaluation index system of pre-cooling mode selection covering economic, technical and social dimensions was constructed, containing 12 secondary indexes. AHP-entropy weighting method was used to analyze and determine the weights of each index, and it was found that economic factors dominated, especially investment and construction costs and profitability were the key influencing factors. Finally, the three pre-cooling modes were comprehensively evaluated using the linear synthesis method, and the results showed that the joint pre-cooling mode was optimal, followed by mobile facility pre-cooling and fixed facility pre-cooling. The results show that the combined pre-cooling mode is the best, followed by mobile pre-cooling and fixed pre-cooling.

Keywords

Agricultural “First Kilometer”, Pre-Cooling Mode, AHP-Entropy Weight Method

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

随着全球农业生产与消费模式的演变,农产品冷链物流已成为确保食品质量、延长货架期和提升市场竞争力的关键环节。在这一过程中,“最先一公里”,即农产品从采摘到初步冷却和运输的环节,尤为重要。有效的预冷技术不仅能提高农产品的保鲜效果,还能显著减少运输和存储过程中的损耗,提升市场价值,促进农业产业链的优化与发展。预冷是通过低温手段迅速降低农产品温度,从而减少新陈代谢、减缓水分流失、延缓腐烂进程,保持产品的新鲜度和质量。尽管预冷技术在提高农产品保存和运输效率方面具有重要作用,但实际应用仍受制于农产品种类、产地分散性及基础设施建设等多种因素。因此,如何根据不同农业生产模式和冷链物流需求选择合适的预冷方式,成为当前亟待解决的问题。常见的预冷模式包括固定设施预冷、移动设施预冷和联合设施预冷模式等。每种模式具有特定的适用范围和优势,但也存在局限性。固定设施预冷模式适用于大规模农业生产区,但高成本和较长运输距离可能影响产品质量。移动设施预冷模式灵活性更高,能够直接到达分散的农业生产区,但设备购置和维护成本较高,且偏远地区交通条件可能存在挑战。联合设施预冷模式结合了两者的优点,通过资源灵活调配提供定制化服务,更好地适应不同区域需求。

纵观现有研究,农产品“最先一公里”预冷方面的研究已经取得了显著成果。国内学者从移动制冷技术的应用[1],到预冷设施的选址与路径优化[2]-[4],再到预冷集配中心的平面布置设计[5]等方面不断探索和创新,以期找到最佳的预冷方案。同时,关于预冷处理对农产品品质影响的研究[6]-[9]也层出不穷,为预冷技术的实际应用提供了有力的理论支撑。国外的预冷技术已经处于相对成熟阶段[10]-[13],其目前的预冷保鲜率已经达到80%以上。然而,尽管研究成果丰硕,但在实际应用中,农产品预冷处理仍面临诸多挑战。如何根据农产品的种类、产地、运输距离等因素,科学合理地选择预冷模式,成为当前亟待

解决的问题。此外, 预冷过程中的经济成本、技术可行性、社会影响等因素也需要综合考虑, 以确保预冷处理的可持续性和实用性。为进一步优化农产品冷链管理, 选择最适合的预冷模式显得尤为重要。本研究综合分析了不同预冷模式的特点, 重点从经济、技术和社会三个维度出发, 构建了一个多维度的评价指标体系, 并运用层次分析法(AHP)和熵权法对各预冷模式的优劣进行量化分析。通过系统地评价各模式的性能和适用性, 本研究旨在为农产品冷链物流管理者提供科学的决策支持, 帮助其在不同情境下做出最合适的选择, 从而降低冷链运输中的损耗, 提升农产品的新鲜度, 最终促进农业冷链物流的可持续发展。

2. 农产品“最先一公里”预冷模式

2.1. 固定设施预冷模式

固定设施预冷模式遵循“集中运输-预冷处理-再运输”的流程, 通过预冷站将农产品集中进行预冷处理(见图 1)。该模式在大型农产品生产基地或集中产区具有显著优势, 能够高效处理大批量农产品, 并确保预冷质量的均匀性。然而, 这种模式在不同规模的生产基地中适用性各有差异, 对于偏远或分散的小型农户地区, 长距离运输到预冷站可能导致高昂的物流和时间成本。同时, 预冷站的地理位置也是一个重要因素, 如果站点远离主要生产区域, 运输成本和农产品的新鲜度可能受到负面影响。例如, 在山东和河北等大型水果生产基地, 固定设施预冷模式能够高效处理大量苹果, 确保预冷效果的一致性。但在交通条件较差的山区, 如甘肃省的苹果种植区, 由于道路不便, 固定设施模式面临较高的运输成本和较长的运输时间, 进而影响农产品的新鲜度和市场竞争力。

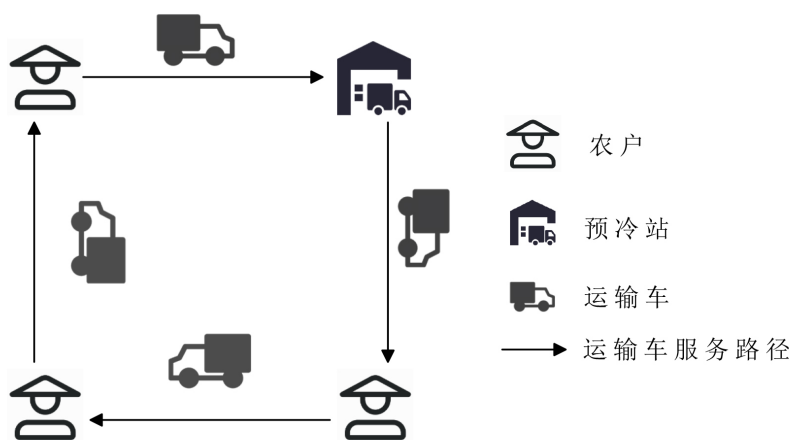


Figure 1. Organization of the pre-cooling model for fixed facilities

图 1. 固定设施预冷模式的组织形式

2.2. 移动设施预冷模式

移动设施预冷模式由配备移动预冷装置的预冷车从车场出发, 到农户所在地进行农产品预冷服务, 完成服务预冷车再回到车场(见图 2)。该模式极大地提升了预冷服务的灵活性与便捷性, 特别适合农户分散、地形复杂或交通不便的地区。相比固定设施预冷模式, 移动预冷模式显著缩短了农产品运输距离与时间, 降低了损耗, 提升了鲜度保障。然而, 移动设施预冷模式主要限制在于较高的设备购置和维护成本。此外, 道路条件会直接影响预冷车的服务范围 and 效率。在交通不佳的地区, 恶劣的道路状况可能限制预冷车的通行, 甚至影响预冷服务的质量。例如, 在四川和云南的一些山区农场, 农户分布较为分散,

固定设施难以覆盖, 移动设施预冷模式成为理想选择。这种模式使农户能够在本地完成预冷处理, 减少长途运输对农产品新鲜度的影响。尽管移动设施预冷模式在偏远地区展现了显著优势, 但其高昂的成本对部分小规模农户而言可能难以负担。因此, 在实际应用中, 需要综合评估区域特点、经济可行性及技术支持水平, 以确保选择的预冷模式能在效率与成本之间取得最佳平衡。

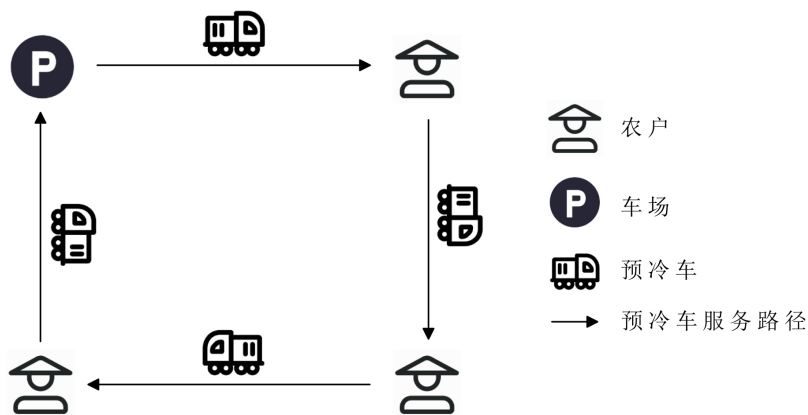


Figure 2. Organization of pre-cooling models for mobile facilities
图 2. 移动设施预冷模式的组织形式

2.3. 联合设施预冷模式

联合预冷模式是指固定设施与移动设施相结合的预冷模式, 是一种融合了两者优先、旨在实现资源最优配置和高效服务的创新策略。该模式充分考虑到固定设施预冷和移动设施预冷各自的特点与局限性, 通过智能调度和协同作业, 根据区域特性和生产需求动态调整预冷策略, 达到提高预冷效率、降低成本、扩大服务范围的目的。在大型集中产区, 固定设施能够高效处理大批量农产品, 确保预冷质量; 而在偏远或分散的地区, 移动预冷车则可以提供便捷的上门服务, 从而覆盖固定设施难以触及的区域。通过灵活组合两种预冷方式, 联合模式既提升了预冷效率, 又降低了整体成本, 同时显著扩大了服务范围。虽然联合预冷模式具备明显优势, 但其实施效果仍受到多种因素的影响。例如, 固定设施的选址决定了服务的覆盖范围和效率, 而移动设施对道路条件的依赖则可能限制其灵活性和服务质量。在交通不便或农户分布高度分散的地区, 如何合理配置固定与移动设施, 并制定最优预冷方案, 是决定该模式效果的关键。在实际应用中, 联合预冷模式已在混合型生产基地中展现了卓越成效。在福建省的一些水果和蔬菜生产基地, 该模式通过在集中产区设置固定设施预冷, 同时在偏远村落和小型农户区域部署移动预冷车, 极大提升了预冷服务的覆盖率与效率。依托智能调度系统, 该模式能够根据农产品的生产分布和运输需求精准安排预冷作业, 确保农产品的新鲜度, 同时降低运输过程中的损耗。这种灵活高效的模式为优化农产品冷链体系、提升市场竞争力提供了有力支持。

2.4. 预冷模式对比分析

根据前面对三种模式的分析不难得出, 针对不同生产区域和农户需求, 每种模式在灵活性、成本效益、覆盖范围等方面各有优势, 同时也存在局限性。固定设施预冷模式适合集中产区的大批量处理; 移动设施预冷模式在偏远、分散地区具有独特的优势; 而联合预冷模式则综合了两者的优势, 通过智能化调度, 实现资源的最优配置。为更清晰地对比和分析这三种模式的特点与适用性, 本文通过多维度指标, 从预冷设施、农产品需求以及农户体验三大方面展开系统分析, 见表 1。

Table 1. Comparison and analysis table of three pre-cooling modes**表 1.** 三种预冷模式对比分析表

维度	对比指标	固定设施预冷模式	移动设施预冷模式	联合预冷模式
预冷设施	灵活性	较低, 固定位置服务	高, 可覆盖分散区域	高, 可动态调配
	功能	高效, 适合大批量处理	灵活, 适合小规模处理	综合, 兼顾效率与灵活
	利用率	高(集中使用)	较低(单一使用场景)	高(合理协同)
	规模	大型, 集中部署	小型, 移动灵活	灵活组合, 可扩展
	信息化	易于集成智能调度	信息化要求低	依赖智能协同系统
	绿色环保	能耗较高	能耗低	能耗优化, 综合管理
	投资成本	高(初期投入大)	中(设备购置成本较高)	高(综合成本)
农产品	预冷及时性	中(需运输到预冷站)	高(就地服务)	高(智能调度优化)
	运输半径	长, 适合大规模生产区	短, 适合分散区域	灵活调整
农户	便利性	较低, 需自行运输	高, 提供上门服务	高, 覆盖全面

3. 构建评价指标体系

本文经过研究, 对农产品“最先一公里”预冷模式的评价指标选取主要从经济因素、技术因素、社会因素三个方面进行考虑, 通过德尔菲法筛选和整合文献中的预冷模式选择影响因素, 结合问卷调查数据, 运用因子分析法对这些因素进行降维处理, 从而提炼出关键指标, 作为构建评价指标体系的重要依据。

3.1. 指标筛选

德尔菲法本质上是一种通过匿名问卷反馈的方式, 用于筛选和确定指标[14]。通过向已具有农产品冷链物流相关经验或该行业有一定学习研究成果的人员征询预冷模式选择影响因素的相关意见, 经过汇总与反馈, 筛选出了 21 个三级指标 $d_j (j=1, 2, \dots, 21)$ 。分别为: 初始投资成本、设备可靠性、适应性与灵活性、环境友好性、维修频率、社会责任和可持续发展、社会接受度与认知度、能效比、维护成本、公共安全性、冷却效率、技术创新性、投资回报率、二氧化碳排放量、运营成本、系统的兼容性、法律法规要求、环境适应性、生命周期成本、能源消耗成本、预冷模式的自动化与智能化水平。

3.2. 指标降维

因子分析法通过提取相关变量中的共同因子, 旨在简化复杂的情况, 尽可能减少信息损失, 将众多原始指标汇聚为较少的综合指标, 这些综合指标即为因子分析的结果变量。鉴于本文所涉及的三级指标数量较多且存在一定相关性, 采用因子分析法对 21 个三级指标进行降维, 在尽量减少信息损失的基础上, 提取出影响预冷模式选择的综合指标, 供后续分析及综合指标权重计算使用, 见表 2。

通过问卷网发放调查问卷, 采用 5 分制评分法对上述 21 个三级指标进行评分, 对 200 份调查问卷的评分数据进行汇总整理, 并将其作为原始数据。经 SPSS 软件计算, 原始数据的 KMO 检验系数为 0.752, Bartlett 球形检验的显著性水平小于 0.05, 结果表明原始数据非常适合进行因子分析。通过因子分析提取的公共因子基本涵盖了各原始变量的信息, 因此, 使用这些原始数据进行因子分析是合理的。在 SPSS 软件中, 采用主成分分析法处理原始数据, 并通过正交最大方差法进行因子旋转, 得到旋转后的因子载荷矩阵。根据旋转后的矩阵, 将三级指标进行降维合并, 并将提取出的公共因子作为二级指标。

Table 2. The secondary indicators obtained after dimensionality reduction
表 2. 降维处理后获得的二级指标

三级指标编号	成分	合并降维	二级指标命名
$d_1、d_{19}$	1	投资建设成本	c_1
$d_9、d_{13}、d_{15}$	2	盈利能力	c_2
$d_5、d_{20}$	3	损失率	c_3
$d_{16}、d_{21}$	4	预冷及时性	c_4
$d_8、d_{12}$	5	创新性	c_5
d_{17}	6	信息化	c_6
d_3	7	可操作性	c_7
d_{11}	8	温度控制精度	c_8
d_7	9	消费者满意度	c_9
d_{10}	10	食品安全性	c_{10}
$d_4、d_{14}、d_{18}$	11	环境影响	c_{11}
d_6	12	促进就业	c_{12}

经过以上分析, 构建出以投资建设成本、盈利能力、损失率、预冷及时性、创新性、信息化、可操作性、温度控制精度、消费者满意度、食品安全性、环境影响和促进就业为二级指标, 以经济因素、技术因素、社会因素为一级指标, 以农产品“最先一公里”预冷模式选择为总目标的评价指标体系。

4. 基于 AHP-熵权法的农产品“最先一公里”预冷模式选择

4.1. 层次分析法(AHP)下预冷模式选择指标权重测定

层次分析法是美国运筹学家 A. L. Satty 提出的将定性和定量相结合进行计算决策权重的主观赋权研究方法。该方法将定量分析与定性分析结合起来, 用决策者的经验判断各衡量目标之间的相对重要程度。它在处理复杂的决策问题上具有科学性和实用性, 能够有效应用于方案的选择与影响指标的分析。

4.1.1. 层次结构模型建立

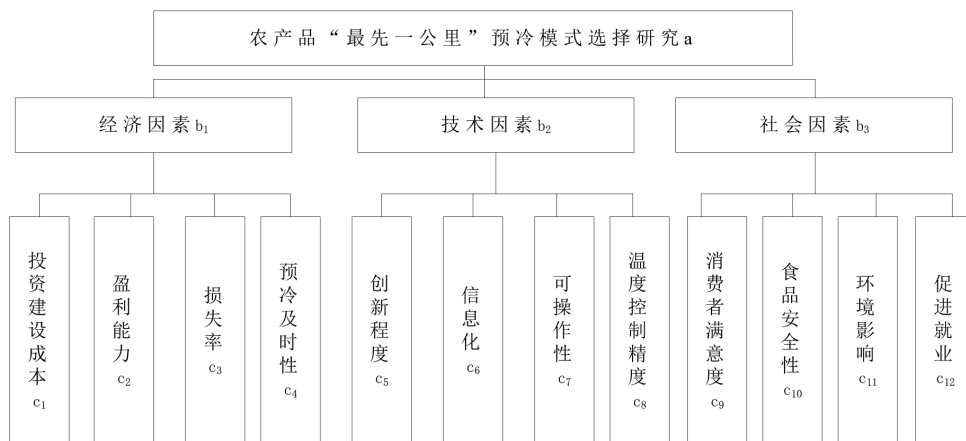


Figure 3. The hierarchical structure model
图 3. 递阶层次结构模型

根据前文所构建的农产品“最先一公里”预冷模式选择评价指标体系, 本文确定了预冷模式选择的层次结构模型。通过对农产品“最先一公里”预冷模式选择问题的分层分析, 结合研究目标和各层次的影响因素, 构建了相应的层次分析结构模型。该模型包括目标层(A层)、一级指标层(B层)和二级指标层(C层)三个层次, 见图3。

4.1.2. 构造比较判断矩阵

采用 Satty 等人提出的 1 到 9 标度法对同一层次的不同影响因素进行两两比较, 即对第 i 个因素与第 j 个因素对于上一层次因素的重要性进行赋值, 以确定各个指标因素的相对权重, 并用 a_{ij} 来表示[15]。对于前文所示的递阶层次结构模型, 可构建准则层因素相对于目标层因素的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中 n 表示进行两两比较的因素个数, 按此方法可继续构建其他层次的判断矩阵。

$$\begin{bmatrix} A & B1 & B2 & B3 \\ B1 & 1 & b_{12} & b_{13} \\ B2 & \frac{1}{b_{12}} & 1 & b_{23} \\ B3 & \frac{1}{b_{13}} & \frac{1}{b_{23}} & 1 \end{bmatrix}$$

4.1.3. 计算方法与一致性检验

AHP 中用于计算各判断矩阵最大特征值 λ_{\max} , 以及其对应特征向量 w 的常用方法有几何平均法和算数平均法两种, 这两种方法均可用 yaahp 软件实现计算, 但两种方法求出的各指标的权重系数不同。使用几何平均法所得的各指标权重系数更接近现实情况, 而算数平均法所计算的结果与现实情况相比有一定的误差[16], 考虑到 AHP 法计算指标权重时几何平均法要比算数平均法更准确, 所以本文采用几何平均法来计算各指标权重。

在构建判断矩阵时, 可能会出现逻辑性错误。因此, 为提高判断矩阵的科学性与合理性, 需要将计算结果进行一致性检验。

1) 计算一致性指标 CI

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

若 $CI = 0$, 表示矩阵完全一致; 若 CI 趋于 0, 则表示矩阵有较好的一致性。

2) 确定随机性一致性指标 RI , 以更好地判断矩阵的一致性比率, 具体见表 3。

Table 3. Randomness consistency indicator RI

表 3. 随机性一致性指标 RI

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3) 计算一致性比率 CR

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

4.1.4. 基于 AHP 的权重计算

本文采用问卷调查法, 以具有农产品冷链物流相关经验或该行业有一定学习研究成果的人员为调查

对象, 向物流从业人员、高校教师、农产品冷链物流领域人才等在内的专家发放农产品“最先一公里”预冷模式评价调查问卷, 邀请他们对评价模型中各个指标的重要程度进行打分, 具体 9 标度法得分对应关系见表 4。最终收回问卷 14 份, 其中有效问卷 12 份。

1. 构建第一层次判断矩阵

Table 4. Correspondence between basic decision tolerance intervals and 9-scaled method scores

表 4. 基本决策容许区间与 9 标度法得分的对应关系

比较关系	9 标度法得分	基本决策容许区间 $[a_{ij}^L, a_{ij}^U]$
极端重要	9	[8, 10]
强烈重要	7	[6, 8]
明显重要	5	[4, 6]
稍微重要	3	[2, 4]
同等重要	1	[1, 2]

针对每位专家的问卷反馈, 我们分别建立了第一层次的判断矩阵, 并逐一进行了一致性校验, 见表 5。对于那些一致性指标略微偏高, 即大于 0.1 的判断矩阵, 我们依据吴诗辉等[17]人的研究, 采用了判断矩阵调整策略, 在充分尊重专家原始决策意图的基础上, 对矩阵进行了适度的优化调整。本阶段的所有数据分析及计算结果均通过专业的决策分析工具 yaahp 软件得出。

Table 5. First level judgment matrix A

表 5. 第一层次判断矩阵 A

		专家 1			专家 2			专家 3			专家 4			...
A	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	...	
B1	1	5	3	1	5	1	1	3	1	1	1/5	1/3	...	
B2	1/5	1	1	1/5	1	1/3	1/3	1	1/5	5	1	1	...	
B3	1/3	1	1	1	3	1	1	5	1	3	1	1	...	

12 位专家的判断矩阵一致性检验结果如下, 其中 $A_{(i)}CR (i = 1, 2, \dots, 12)$ 表示第 i 个专家的判断矩阵一致性检验结果。

$$\begin{aligned}
 &A_{(1)}CR = 0.0281 < 0.1, A_{(2)}CR = 0.0280 < 0.1, A_{(3)}CR = 0.0280 < 0.1, \\
 &A_{(4)}CR = 0.0280 < 0.1, A_{(5)}CR = 0.0068 < 0.1, A_{(6)}CR = 0.0782 < 0.1, \\
 &A_{(7)}CR = 0.0280 < 0.1, A_{(8)}CR = 0.0000 < 0.1, A_{(9)}CR = 0.0280 < 0.1, \\
 &A_{(10)}CR = 0.0778 < 0.1, A_{(11)}CR = 0.0372 < 0.1, A_{(12)}CR = 0.0372 < 0.1
 \end{aligned}$$

Table 6. Decision-making judgment matrix for stratum A clusters

表 6. A 层群决策判断矩阵表

A	B1	B2	B3	W_i
B1	1	1.1191	1.4033	0.3838
B2	0.8936	1	1.2439	0.3420
B3	0.7126	0.8039	1	0.2742

以上结果表明, 所有判断矩阵都通过了一致性检验, 然后利用几何平均法对其进行汇总处理得到第

一层次群决策判断矩阵, 见表 6。

根据 yaahp 软件对上表的判断矩阵进行一致性检验, 可得其 $CR = 0.0000 < 0.1$, $\lambda_{\max} = 3$, 则该群决策判断矩阵是可行有效的。以下各层次的判断矩阵结果都按照上述方法进行汇总计算, 后文不再赘述。

由上表可知, 一级指标层三个因素的权重排序为经济因素 > 技术因素 > 社会因素, 这表明经济因素是影响农产品“最先一公里”预冷模式选择的最主要因素。

2. 构建第二层次判断矩阵

Table 7. Decision-making judgment matrix for B1 tier clusters

表 7. B1 层群决策判断矩阵表

B1	C1	C2	C3	C4	w_i
C1	1	1.1893	1.6586	1.7873	0.3311
C2	0.8408	1	1.3537	1.6679	0.2836
C3	0.6029	0.7387	1	1.5758	0.2212
C4	0.5595	0.5996	0.6346	1	0.1641

根据 yaahp 软件对上表的判断矩阵进行一致性检验, 可得其 $CR = 0.0051 < 0.1$, $\lambda_{\max} = 4.0136$, 则群决策判断矩阵 B1 是可行有效的。B1 层群决策判断矩阵表见表 7。对于经济因素的各因素的权重排序为投资建设成本 > 盈利能力 > 损失率大于预冷及时性。以此类推, 群决策判断矩阵 B2、B3 是可行有效的。技术因素的各因素的权重排序为信息化 > 创新程度 > 可操作性 > 温度控制精度。社会因素的权重排序为食品安全性 > 消费者满意度 > 环境影响 > 促进就业。

3. AHP 下农产品“最先一公里”预冷模式选择指标综合权重计算

上述结果表明所以群决策判断矩阵均通过一致性检验。将一级指标层 B 对准目标层 A 以及二级指标层 C 对准以及指标层 B 的权重结果进行加权, 可以得到各评价指标的综合权重, 见表 8。

Table 8. The comprehensive weights of selection criteria for pre-cooling modes under AHP

表 8. AHP 下预冷模式选择指标综合权重

A	B 层	B1	B2	B3	综合权重	排序
	权重	0.3838	0.342	0.2742		
C 层						
	C1	0.3311			0.1271	1
	C2	0.2836			0.1088	3
	C3	0.2212			0.0849	6
	C4	0.1641			0.0630	10
	C5		0.2536		0.0867	5
	C6		0.3188		0.1090	2
	C7		0.2425		0.0829	7
	C8		0.1852		0.0633	9
	C9			0.2678	0.0734	8
	C10			0.3241	0.0889	4
	C11			0.2270	0.0622	11
	C12			0.1811	0.0497	12

4. 指标权重计算结果分析

通过对目标层下各指标权重的计算,得到经济因素、技术因素、社会因素的权重分别为 0.3838、0.342、0.2742。由此可知,经济因素是在进行预冷模式选择时首要考虑的因素,经济因素中所涉及的投资建设成本和盈利能力是在选择预冷模式需要考虑的重要原因。技术因素是次要影响因素,包括信息化、创新性等。社会因素也是在进行预冷模式选择时需要考虑的一个重要因素,主要包括消费者满意度、环境影响等。

4.2. 熵权法下预冷模式选择指标权重测定

熵权法是在客观条件下进行分析的方法,它通过计算指标的信息熵,根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重。现已广泛应用于社会经济、科学技术及工程实践等多个领域。采用熵权法可以最大限度地减少各因素权重对评价结果的主观性影响,使其更符合客观实际。

4.2.1. 数据处理

以指标 c_j 的原始数据为例,对其进行标准化、平移、归一化处理

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

其中, x 代表第 i 个样本的第 j 个指标值($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), r_{ij} 为标准化后的数据。为避免标准化处理后的部分数据存在数值较低甚至为负值的情况,因而统一对其进行平移处理。

$$r'_{ij} = r_{ij} + 0.01 \quad (4)$$

$$p_{ij} = \frac{r'_{ij}}{\sum_{i=1}^m r'_{ij}} \quad (5)$$

式中, m 为原始数据样本的数据量。

式(3)表示对二级指标 c_j 原始数据的标准化处理;式(4)表示对标准化后的数据进行平移,其目的式为保证数据 r'_{ij} 中不含有数字 0;式(5)表示对非 0 数据 r'_{ij} 的归一化处理。

4.2.2. 指标熵值及差异性系数计算

熵值反映了指标的不确定性和混乱程度,熵值越大,说明该指标的差异性越小,对评价的影响越小;反之,熵值越小,说明该指标的差异性越大,对评价的影响越大。计算指标熵值 e_j 及对应的差异性系数的公式如下。

$$e_j = \frac{\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij})}{\ln m} \quad (6)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

将熵权法所计算的各指标权重归一化处理,用 v_j 表示第 j 个指标的权重。

$$v_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^n g_j} \quad (8)$$

4.2.3. 基于熵权法的权重计算

基于上述 12 个评价指标,本文通过向 20 位在农产品冷链物流领域拥有多年经验的专业从业人员发放问卷。每位专家对每项指标进行了打分,满分 10 分。为了确保结果的可靠性和代表性,所有专家的评分结果被收集并计算其平均值,形成了以下数据,见表 9。

Table 9. Pre-cooling model evaluation indicator raw data
表 9. 预冷模式评价指标原始数据

评价指标	固定设施预冷模式	移动设施预冷模式	联合预冷模式
投资建设成本	8.5	6.83	6.67
盈利能力	7.5	7.58	7.79
损失率	6.71	6.85	7.42
预冷及时性	7.17	8.25	8.34
创新程度	7.5	7.67	8.3
信息化	6.67	7.11	7.5
可操作性	8.11	7.58	7.83
温度控制精度	7.5	7.83	8.17
消费者满意度	7.17	8.1	8.54
食品安全性	7	7.35	7.71
环境影响	7.65	7.34	6.54
促进就业	6.54	7.1	7.56

首先按照熵权法的步骤确定各指标权重。对各指标进行标准化处理, 其中投资建设成本、损失率、环境影响为负向指标, 其余皆为正向指标。按照式对数据进行标准化处理, 并结合上文中熵和熵权的计算方法, 得到标准化评价指标矩阵 R 以及各指标的熵值和权重, 见表 10。

Table 10. Evaluation index weights of pre-cooling mode selection under entropy weight method
表 10. 熵权法下预冷模式选择评价指标权重

指标	标准化矩阵 R			熵值和权重		
	固定设施预冷模式 D1	移动设施预冷模式 D2	联合预冷模式 D3	信息熵值 e_j	差异系数 g_j	权重 v_j
投资建设成本	0.0000	0.9126	1.0000	0.6300	0.3700	0.0709
盈利能力	0.0000	0.2759	1.0000	0.4752	0.5248	0.1005
损失率	1.0000	0.8028	0.0000	0.6255	0.3745	0.0717
预冷及时性	0.0000	0.9231	1.0000	0.6302	0.3698	0.0708
创新程度	0.0000	0.2125	1.0000	0.4225	0.5775	0.1106
信息化	0.0000	0.5301	1.0000	0.5873	0.4127	0.0791
可操作性	1.0000	0.0000	0.4717	0.5710	0.4290	0.0822
温度控制精度	0.0000	0.4925	1.0000	0.5773	0.4227	0.0810
消费者满意度	0.0000	0.6788	1.0000	0.6142	0.3858	0.0739
食品安全性	0.0000	0.4930	1.0000	0.5774	0.4226	0.0810
环境影响	0.0000	0.2793	1.0000	0.4777	0.5223	0.1001
促进就业	0.0000	0.5490	1.0000	0.5918	0.4082	0.0782

4.3. 基于 AHP-熵权法的综合权重测定

单一赋权方法容易受到方法本身的偏差影响, 导致计算结果不准确。因此, 建议采用组合赋权方法。

具体来说, 可以通过结合主观判断与客观数据的 AHP-熵权法。该方法不仅能有效减轻层次分析法中的主观干扰, 还能减少因样本量不足而导致的熵权法计算偏差。通过组合赋权, 能够规避单一方法的局限性, 提升权重计算的准确性和可靠性。

在多指标决策分析中, 综合权重的确定是影响决策质量的关键环节。加权平均法和乘法合成法是两种常见的权重综合方法, 它们在计算过程和适用场景上存在差异。加权平均法通过为每个指标分配权重并计算加权平均, 广泛应用于多指标决策中, 简便直观, 适用于权重平衡且指标影响力差异不大的情况。但容易受到极端值的影响, 且无法有效平衡主观与客观信息的权重。乘法合成法则是将 AHP 法和熵值法的权重相乘, 能够更好地平衡主观与客观信息, 减少极端权重对结果的影响, 通过标准化处理, 增强了鲁棒性, 适合处理需要综合专家判断和客观的决策问题。与加权平均法相比, 乘法合成法能够更好地处理多来源信息, 避免单一权重的偏倚, 使结果更加稳定和可靠。因此本文采用乘法合成法作为综合权重的确定方法, 以确保在多指标决策分析中能够充分考虑主观与客观信息的平衡, 具体计算如式(9)所示。

$$w_j^* = \frac{w_j v_j}{\sum w_j v_j} \tag{9}$$

其中 w_j 是层次分析法的权重, v_j 是熵权法的权重。农产品“最先一公里”预冷模式选择具体评价指标体系, 见图 4。

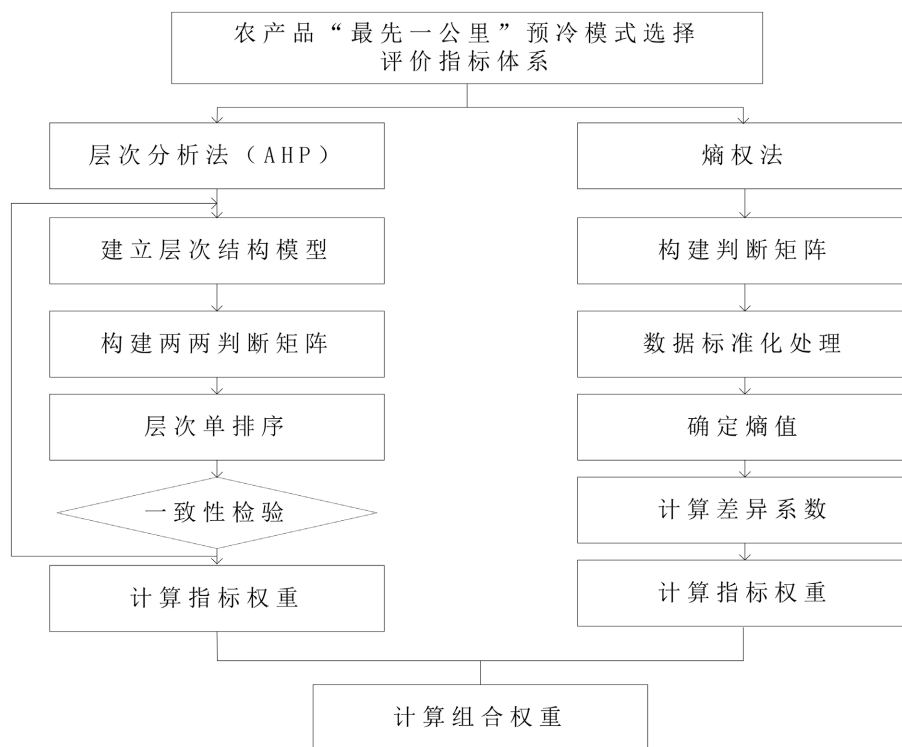


Figure 4. Analytical diagram of pre-cooling mode selection based on AHP-entropy weight method
图 4. 基于 AHP-熵权法的预冷模式选择分析图

根据前文分别对层次分析法和熵权法下农产品“最先一公里”预冷模式选择指标权重的测算, 按照式(9)将两种主客观权重相结合可计算得出各项评价指标的组合权重, 见表 11。

Table 11. Weights of combinations of evaluation indicators for pre-cooling mode selection under AHP-entropy
表 11. AHP-熵权法下预冷模式选择评价指标组合权重

一级指标	二级指标	AHP 权重 w_j	熵权法权重 v_j	组合权重 w_j^*
经济因素 B1	投资建设成本 C1	0.1271	0.0709	0.1080
	盈利能力 C2	0.1088	0.1005	0.1312
	损失率 C3	0.0849	0.0717	0.0730
	预冷及时性 C4	0.0630	0.0708	0.0535
技术因素 B2	创新程度 C5	0.0867	0.1106	0.1151
	信息化 C6	0.1090	0.0791	0.1034
	可操作性 C7	0.0829	0.0822	0.0817
	温度控制精度 C8	0.0633	0.0810	0.0615
社会因素 B3	消费者满意度 C9	0.0734	0.0739	0.0651
	食品安全性 C10	0.0889	0.0810	0.0863
	环境影响 C11	0.0622	0.1001	0.0747
	促进就业 C12	0.0497	0.0782	0.0466

由上表 11 可见, 盈利能力、投资建设成本及创新程度是影响预冷模式选择最主要的影响因素, 不同的预冷模式会带来不同的成本投入和收益回报, 因此, 企业在做出选择时, 应综合考虑这些因素, 权衡利弊, 以制定出符合自身发展需求的最佳预冷模式选择策略。

4.4. 研究结果分析

Table 12. Ranking table of the weights of combinations of indicators
表 12. 各指标组合权重排序表

一级指标	二级指标	组合权重 w_j^*	排序
经济因素 B1 $w = 0.3658$	投资建设成本 C1	0.1080	3
	盈利能力 C2	0.1312	1
	损失率 C3	0.0730	8
	预冷及时性 C4	0.0535	11
技术因素 B2 $w = 0.3617$	创新程度 C5	0.1151	2
	信息化 C6	0.1034	4
	可操作性 C7	0.0817	6
	温度控制精度 C8	0.0615	10
社会因素 B3	者满意度 C9	0.0651	9
	食品安全性 C10	0.0863	5
	环境影响 C11	0.0747	7
	促进就业 C12	0.0466	12

本研究通过线性加权法求得农产品“最先一公里”预冷模式的综合评估值。其中 r_{ij}' 为样本数据平移

后的标准化值, w_j^* 为各指标组合权重。

$$z_i = \sum_{j=1}^n w_j^* r'_{ij} \quad (10)$$

Table 13. Comprehensive assessment of the value of different pre-cooling models for the “first kilometer”

表 13. 农产品“最先一公里”不同预冷模式综合评估值

	经济因素	技术因素	社会因素	综合评估值
固定设施预冷模式	0.0951	0.1242	0.0027	0.2220
移动设施预冷模式	0.2701	0.0931	0.1390	0.5023
联合预冷模式	0.2780	0.3016	0.2753	0.8549

农产品“最先一公里”预冷模式选择取决于“经济因素、技术因素、社会因素”的综合作用。由排序表 12 可知在预冷模式选择各一级指标中, 经济因素指标权重最大, 为 0.3658, 其次为技术因素和社会因素。针对三种模式的评价结果, 按照式(10)分别对目标层指标和三个准则层指标进行综合评估, 见表 13。从各模式综合评估数据来看, 联合预冷模式的综合评估值最高, 为 0.8549; 其次为移动设施预冷模式, 综合评估值为 0.5023, 固定设施预冷模式最低, 为 0.2220。这一结果清晰地表明, 在综合考虑经济、技术和社会三大因素后, 联合预冷模式展现出了最为优越的性能和潜力。

然而, 为了进一步提升联合预冷模式的应用效果和可持续发展。未来的研究时, 优化联合预冷模式的运营策略至关重要, 虽然联合预冷模式在综合评估中表现优秀, 但在实际操作中, 如何高效协调预冷设施与冷链运输, 以及如何合理调配资源, 以最大限度地提高运作效率并降低成本, 仍需深入研究。未来可以通过大数据分析、人工智能算法及实时监控系統来优化运营调度, 确保预冷环节和物流配送的协调性, 从而进一步提升模式的整体效益。结合大数据和人工智能技术可以进一步提升预冷效率和准确性, 通过对各类农产品在不同气候条件、运输途径和预冷方法下的冷却数据进行深度挖掘和分析, 可以建立精准的冷链管理模型, 算法可以自动调整预冷时间、温度和其他关键参数, 确保每种农产品都在最适宜的条件下冷却, 从而提高保鲜质量, 减少资源浪费, 降低整体能耗。除此以外, 考虑到社会因素和地方特色, 未来的研究还应关注如何通过政策支持和技术普及推动联合预冷模式在更多地区的应用, 通过政府政策引导、市场机制激励, 以及技术培训与支持, 可以帮助更多农产品生产者和运输企业顺利应用联合预冷模式, 进一步推动农业冷链体系的完善。总的来说, 联合预冷模式的进一步优化不仅需要在技术上实现突破, 还应结合经济和社会因素, 以更高效、智能和可持续的方式推动冷链管理的创新, 为农产品流通体系的现代化提供坚实的基础。

5. 总结与展望

本文从农产品“最先一公里”的角度, 系统梳理了三种预冷模式: 固定设施预冷、移动设施预冷和联合预冷模式, 并对其特点进行了深入分析与对比。在此基础上, 通过经济、技术和社会三个层面的 12 个指标, 结合问卷调查数据, 采用 AHP-熵权法对三种模式进行了综合评价。研究结果表明, 联合预冷模式在各方面表现出显著优势, 极有可能成为未来农产品“最先一公里”预冷的主流选择。尽管联合预冷模式具有较高的潜力, 但本研究也存在一定局限性。首先, 该模式的实施需要较高的初期投资, 涉及政府与企业的共同投入, 这一成本问题值得进一步探讨。其次, 如何在不同地区和不同类型的农产品中优化联合预冷策略, 仍是未来实践中的关键课题。

参考文献

- [1] 赵皎云. 移动制冷技术在农产品冷链“最先一公里”的应用——访中集冷链科技有限公司方案解决部负责人岳治强[J]. 物流技术与应用, 2020, 25(S1): 48-51.

- [2] 李娅, 王旭坪, 林娜, 冯晓春, 阮俊虎, 胡祥培. 村镇农产品多类型预冷设施选址-路径优化模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(11): 3016-3029.
- [3] 胡悦, 罗亚波, 李霞. 基于混合算法的不确定环境下逆向物流网络设计研究[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(1): 90-95.
- [4] 马祖军, 王一然. 考虑生鲜农产品“最先一公里”损耗的预冷站选址定容[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 315-323.
- [5] 彭影, 洪士雯, 刘依林. 基于 SLP 法生鲜农产品源产地预冷集配中心平面布置设计[J]. 南方农机, 2022, 53(4): 44-46.
- [6] 钟玮迪, 张瑞杰, 程俊嘉, 等. 1-MCP 及延迟预冷处理对库尔勒香梨采后品质的影响[J]. 食品科技, 2015, 40(12): 310-314.
- [7] 孙颖, 张聪, 曹蕊, 刘子豪. 关于农产品“最先一公里”产地预冷的分析及探究[J]. 物流科技, 2022, 45(20): 25-27+32.
- [8] 陈兴开, 常子安, 连欢, 和晓慧, 杨相政. 产地预冷和冷链流通对红心火龙果贮藏品质的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(7): 1-7+27.
- [9] 王钰良. 考虑产地预冷融资的供应链定价决策研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 电子科技大学, 2022.
- [10] Wu, W., Beretta, C., Cronje, P., Hellweg, S. and Defraeye, T. (2019) Environmental Trade-Offs in Fresh-Fruit Cold Chains by Combining Virtual Cold Chains with Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, **254**, Article ID: 113586. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113586>
- [11] Fujiwara, O. and Perera, U.L.J.S.R. (1993) EOQ Models for Continuously Deteriorating Products Using Linear and Exponential Penalty Costs. *European Journal of Operational Research*, **70**, 104-114. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90235-f](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90235-f)
- [12] Ambaw, A., Mukama, M. and Opara, U.L. (2017) Analysis of the Effects of Package Design on the Rate and Uniformity of Cooling of Stacked Pomegranates: Numerical and Experimental Studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, **136**, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.015>
- [13] Altman, E.I. and Rijken, H.A. (2004) How Rating Agencies Achieve Rating Stability. *Journal of Banking & Finance*, **28**, 2679-2714. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2004.06.006>
- [14] 蔡朋, 肖丹, 洪玉燕. 基于模糊综合评价法的大型船舶轴系材料择优研究[J]. 中国水运, 2022(8): 89-91.
- [15] 瞿英, 路亚静, 刘紫玉, 杨明欣. 基于 AHP-DEMATEL 法的权重计算方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(7): 38-46.
- [16] 邵芳. 基于 AHP-熵值法的中国跨境电商企业海外仓建设模式选择研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西财经大学, 2022.
- [17] 吴诗辉, 刘晓东, 贾月岭, 等. 一种调整 AHP 不一致判断矩阵的优化方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 2106-2112.