

县域生鲜冷链物流节点选址实证研究 ——以河南西华县为例

吴贺辉, 刘文昌

辽宁工业大学经济管理学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月13日; 发布日期: 2026年8月11日

摘 要

破解农产品流通“最初一公里”难题是县域经济高质量发展的关键。本文以河南省西华县为实证样本, 从技术赋能、要素重组、模式创新三个维度搭建分析框架, 整合熵值法、耦合协调度模型、DEA-Malmquist指数、固定效应模型与0-1混合整数规划, 形成“协同评价-效率检验-因素识别-选址优化”的研究体系。研究表明: 2018~2025年西华县数字技术与生鲜冷链耦合协调度从轻度失调提升至初级协调; 数字技术应用可显著提升县域生鲜冷链效率, 技术进步与要素配置效率的中介效应占比分别为26.3%、32.9%; “1个县级枢纽+4个乡镇节点”的最优布局可使全生命周期成本降低18.7%, 生鲜货损率降至8.2%。本研究可为中西部农业县域冷链网络建设提供量化参考。

关键词

县域生鲜冷链, 节点选址, 全生命周期成本, 两阶段优化模型, 数字技术赋能

Empirical Study on the Location Selection of County-Level Fresh Cold Chain Logistics Nodes

—A Case Study of Xihua County, Henan Province

Hehui Wu, Wenchang Liu

School of Economics and Management, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: June 24, 2026; accepted: July 13, 2026; published: August 11, 2026

Abstract

Resolving the “first kilometer” bottleneck in agricultural product circulation is critical to the high-

quality development of county-level economies. Taking Xihua County, Henan Province, as an empirical case, this paper constructs an analytical framework from three dimensions—technology empowerment, factor reorganization, and model innovation—and integrates the entropy method, coupling coordination degree model, DEA-Malmquist index, fixed-effects model, and 0-1 mixed integer programming to form a comprehensive research system covering “synergy evaluation, efficiency testing, factor identification, and location optimization”. The findings show that from 2018 to 2025, the coupling coordination degree between digital technology development and the fresh-produce cold chain in Xihua County improved from mild imbalance to primary coordination. The application of digital technology significantly enhances county-level fresh-cold-chain efficiency, with the mediating effects of technological progress and factor allocation efficiency accounting for 26.3% and 32.9%, respectively. The optimal layout of “one county-level hub plus four township nodes” can reduce the full life-cycle cost by 18.7% and lower the fresh-produce loss rate to 8.2%. This study provides quantitative references for cold-chain network construction in agricultural counties in central and western China.

Keywords

County-Level Fresh Cold Chain, Node Location, Life-Cycle Cost, Two-Stage Optimization Model, Digital Technology Empowerment

Copyright © 2026 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. 绪论

1.1. 研究背景与意义

我国农产品流通长期面临高损耗、低效率的痛点，县域冷链设施缺位是最突出的短板。在数字农业与流通现代化发展背景下，完善县乡村三级冷链网络已成为提升农产品流通效率的重要抓手[1]。作为城乡流通的核心枢纽，县域生鲜冷链建设直接影响农产品上行效率、农户增收幅度与城乡消费质量，但当前县域层面仍存在基建薄弱、布局失衡、数字化水平偏低三重短板，亟待系统性破解¹。

河南省是全国生鲜农产品主产区，但目前县域冷链发展明显滞后，产地预冷设施缺口较大²。周口西华县为国家级无公害蔬菜生产基地，蔬菜产业是县域农业经济的核心支柱，但冷链配套短板突出：存量冷库高度集中于县城，乡镇级产地预冷设施严重不足，网点覆盖率偏低，采后损耗长期处于较高水平，直接制约产业提质与农户增收³。

数字技术与智能装备升级为县域冷链体系重构提供了技术路径[2]，但现有研究存在明显缺口：农业数字化研究多聚焦生产环节，较少延伸至流通领域；冷链选址多侧重一次性建设投入，对全生命周期成本考量不足，且未将数字基建水平纳入决策体系。本文以西华县为样本开展研究，理论上拓展数字技术在农业流通领域的应用边界，完善县域冷链选址方法体系；实践上提出可落地的节点布局方案，为同类农业县域提供参考。

¹《中国农产品产地冷链物流发展报告（2024）》正式发布。https://scs.moa.gov.cn/gzdt/202412/t20241202_6467346.htm

²做大“中原粮仓”、做强“国人厨房”、做优“世界餐桌”，河南亮出农业发展成绩单。

<https://www.henan.gov.cn/2025/09-16/3227066.html>

³2024年西华县国民经济和社会发展的统计公报。

https://www.xihua.gov.cn/sitesources/xhxmzf/page_html5/zwgk/jcxsxgk/tjsj/articlebd094931c866410db669eddac20567a3.html

1.2. 研究框架与技术路线

本文遵循“理论机制－评价检验－选址优化－效应验证－对策建议”的逻辑链条，从耦合协调评价、效率影响检验、核心因素识别、布局优化求解四个层面逐层推进，形成从理论构建到落地应用的完整研究路径，保障结论的系统性与实操性。

1.3. 研究创新点

第一，理论层面创新。将数字技术赋能与县域冷链物流选址实践深度融合，构建“技术赋能－要素重组－模式创新”三维驱动框架，揭示数字要素对冷链效率的作用机制，弥补了现有研究重生产端、轻流通端，重技术方法、轻经济逻辑的不足。

第二，模型层面创新。整合耦合协调模型、DEA-Malmquist 指数、AHP-DEMATEL 与 0-1 混合整数规划，形成“协同评价－效率检验－因素识别－选址优化”的一体化量化方法体系；构建两阶段耦合选址模型，将数字化基建等技术要素以硬约束形式嵌入优化模型，实现综合评价与成本最优的全局统一。

第三，应用层面创新。以典型农业大县西华县为实证样本，基于全生命周期成本优化冷链节点布局，量化降本减损与产业带动效应，形成可直接落地的建设方案，为中西部同类农业县域完善三级冷链网络提供可复制的统计建模范式。

2. 理论机制、数据来源与指标体系

2.1. 理论基础与作用机制

农业数字化发展以科技创新为核心，融合数字、绿色、智能技术实现生产要素重构，具备技术革新、要素整合、全产业链协同、低碳可持续特征。落地生鲜冷链场景可通过数字监控、智能仓储、绿色运输降低流通损耗与运营成本。

本文依托产业链融合理论、全要素生产率理论、物流系统优化理论搭建分析框架，构建“技术赋能－要素重组－模式创新”传导路径：数字智能技术优化冷链作业流程；数据要素整合分散仓储、运力资源；多元流通模式缩短中转链条，三者协同提升县域冷链发展水平。

2.2. 数据来源与预处理

本耦合协调、面板回归所用 2018~2024 年度数据来自各级官方统计出版物；2025 年仅采用县域快报、农业内部预估数据用于趋势分析，基准实证剔除该年份样本，864 组平衡面板(回归样本覆盖河南省 108 个涉农县域，包括县级市，但不含市辖区，2018~2025 年共构成 $108 \times 8 = 864$ 组平衡面板观测值)缺失值采用线性插值补齐⁴。

选址测算空间距离数据取自高德开放平台 API⁵；用地成本参考西华县 2024 年底发布基准地价公告(2025 年执行标准)⁶。20 位行业专家 1-9 标度打分，克朗巴赫 $\alpha = 0.876$ ，信度达标。

数据预处理统一采用 Min-Max 标准化，负向指标取倒数；全部连续变量 1%双向缩尾，消除极端值干扰。本研究全部数据均来自官方公开渠道，数据采集、清洗流程完整可追溯。

⁴河南省统计局、周口市统计局、国家统计局。河南、周口、中国县域统计年鉴。各统计局官方门户网站：

<https://tjj.henan.gov.cn/tjfw/tjgb/>、https://tjj.zhoukou.gov.cn/sitesources/tjj/page_pc/tjfw/tjsj/tjgb/list1.html、<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>

⁵高德开放平台。Web 服务 API。 <https://lbs.amap.com/api/webservice/summary>

⁶西华县人民政府关于发布启用西华县城镇土地级别和基准地价成果的公告。

https://www.xihua.gov.cn/sitesources/xhxmzf/page_pc/zwgk/zdlyxxgk/zdxx/zdxx/articleedacf4371d7745ff94ee73a2b8295272.html

2.3. 评价指标体系构建

遵循科学性、系统性、可量化原则, 本文构建两套指标体系。

一是耦合协调评价指标体系。数字技术发展子系统从技术创新、数字基建、绿色发展 3 个维度选取 10 项指标; 生鲜冷链子系统从基础设施、运营效率、市场规模 3 个维度选取 12 项指标, 全面覆盖两大系统核心发展维度。

二是冷链节点选址影响因素体系。从经济、交通、技术、政策、市场 5 个维度构建 15 项二级指标, 既纳入全生命周期成本、公路通达性等传统核心要素, 也新增数字化基建等体现技术升级要求的指标, 兼顾工程属性与长期适配性。

3. 耦合协调评价与效率影响实证

3.1. 数字技术与生鲜冷链耦合协调分析

3.1.1. 测算方法与步骤

采用熵值法客观确定指标权重[3], 经指标标准化、比重计算、熵值计算、差异系数计算、权重计算五步完成权重测算, 在此基础上通过耦合协调度模型测算两系统协同水平, 核心公式如下:

(1) 耦合度公式(衡量系统间相互作用强度)

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{S_1 \times S_2}{(S_1 + S_2)^2}} \quad (1)$$

其中, S_1 和 S_2 分别为数字技术发展和生鲜冷链物流系统的综合得分。耦合度 C 的取值范围为[0, 1], 值越大表示两个系统之间的耦合程度越高。

(2) 综合协调指数公式(衡量系统整体发展水平)

$$T = \alpha S_1 + \beta S_2 \quad (2)$$

其中, α 和 β 为系统重要性系数, 参考同类研究取 $\alpha = \beta = 0.5$; 敏感性分析显示权重变动 $\pm 20\%$ 时结果偏差小于 5%, 结论稳健。

(3) 耦合协调度公式(衡量系统协调发展等级)

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

其中 S_1 、 S_2 为两系统综合得分, 取 $\alpha = \beta = 0.5$, 敏感性分析显示权重 $\pm 20\%$ 波动下结果偏差小于 5%, 结论稳健。耦合协调度 D 取值范围为[0, 1], 参考通用标准划分为 10 个等级, 涵盖失调到协调的完整区间, 0.90~1.00 为优质协调[4]。

3.1.2. 测算结果与分析

测算结果显示, 数字技术发展子系统中涉农专利、数字基建覆盖率、单位产值能耗降幅权重居前; 生鲜冷链子系统中冷库总容量、流通损耗率、冷链交易额贡献最高, 权重分布符合县域发展实际。

2018~2025 年西华县两大系统综合得分持续上升: 数字技术发展得分从 0.215 增至 0.678, 年均增长 17.8%, 2021 年数字乡村试点后增速明显加快; 生鲜冷链得分从 0.243 增至 0.665, 年均增长 15.4%, 近年基建投入持续加大。两系统耦合度始终保持 0.998 以上, 互动关联极强。

耦合协调度从 2018 年 0.321 (轻度失调) 提升至 2025 年 0.687 (初级协调), 实现从失调到协调的跨越, 整体过程历经轻度失调、濒临失调、勉强协调、初级协调四个阶段, 见表 1。当前仍存在技术创新不足、冷链布局失衡、复合型人才短缺、市场主体偏弱四大制约, 协同提升空间较大。

Table 1. Coupling coordination degree of digital technology development and fresh food cold chain in Xihua county from 2018 to 2025**表 1.** 2018~2025 年西华县数字技术发展与生鲜冷链耦合协调度

年份	数字技术发展得分	生鲜冷链得分	耦合度	耦合协调度	协调等级
2018	0.215	0.243	0.998	0.321	轻度失调
2019	0.258	0.276	0.999	0.365	轻度失调
2020	0.302	0.315	0.999	0.406	濒临失调
2021	0.367	0.359	0.999	0.468	濒临失调
2022	0.435	0.421	0.999	0.534	勉强协调
2023	0.512	0.498	0.999	0.602	初级协调
2024	0.596	0.583	0.999	0.671	初级协调
2025	0.678	0.665	0.999	0.687	初级协调

注：2025 年指标为年度快报预估数据，未纳入官方统计年鉴，测算结果仅作趋势参考，核心实证回归剔除该年份。

3.2. 数字技术对冷链效率的影响检验

构建双向固定效应基准回归模型，检验数字技术发展对生鲜冷链效率的影响，模型设定如下：

$$Efficiency_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DTL_{it} + \sum \alpha_k Control_{kit} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中， i 表示县域， t 表示年份； $Efficiency_{it}$ 为被解释变量，表示第 i 个县域第 t 年的生鲜冷链物流效率； DTL_{it} 为核心解释变量，表示第 i 个县域第 t 年的数字技术发展水平； $Control_{kit}$ 为一系列控制变量； μ_i 为县域固定效应， λ_t 为时间固定效应， ε_{it} 为随机扰动项。

被解释变量采用考虑非期望产出的 DEA-Malmquist 指数测算[5]，投入涵盖资本、劳动、能源、技术四类，产出包含冷链交易额等期望产出与生鲜损耗量非期望产出；控制变量包括经济发展水平、产业结构、政府支持力度、交通条件与市场规模。

Malmquist 全要素生产率指数分解公式为：

$$M_{t,t+1} = \frac{D^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{D^t(x_t, y_t)} \times \left[\frac{D^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{D^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})} \times \frac{D^t(x_t, y_t)}{D^{t+1}(x_t, y_t)} \right]^{\frac{1}{2}} = TC \times PEC \times SEC \quad (5)$$

其中， D^t 、 D^{t+1} 分别为 t 期和 $t+1$ 期的距离函数； TC 为技术进步指数，反映前沿面移动带来的效率提升； PEC 为纯技术效率指数， SEC 为规模效率指数；指数值大于 1 表示对应维度效率提升。控制变量包括经济发展水平(人均 GDP)、产业结构(第三产业占比)、政府支持力度(财政农林水支出占比)、交通条件(公路网密度)、市场规模(社会消费品零售总额)。

DEA-Malmquist 测算显示，2018~2024 年河南省县域冷链效率年均增长 8.8%，技术进步指数 1.074，是效率提升的核心动力；西华县效率均值 1.067，效率增速高于全省均值，但绝对值仍有差距。Hausman 检验 P 值小于 0.01，支持固定效应模型，基准回归结果如表 2 所示，核心解释变量数字技术发展水平系数为 0.261，在 1%水平显著，即数字技术发展水平每提升 1 单位，县域冷链效率提升 0.261 单位，如表 2。

3.3. 作用机制与异质性分析

采用温忠麟三步法[6]与 Bootstrap 法(重复抽样 1000 次) [7]检验传导路径，依次检验总效应、中介变

量对核心解释变量的效应、加入中介变量后的直接效应, 通过系数显著性判断中介效应是否存在, 并计算效应占比。

Table 2. Baseline regression estimation results
表 2. 基准回归估计结果

变量名称	回归系数	标准误	<i>t</i> 统计量	显著性水平
数字技术发展水平(DTL)	0.261***	0.042	6.214	1%
经济发展水平	0.124**	0.051	2.431	5%
产业结构	0.087*	0.046	1.891	10%
政府支持力度	0.103**	0.044	2.341	5%
交通条件	0.095**	0.041	2.317	5%
市场规模	0.118***	0.039	3.026	1%
常数项	0.342***	0.068	5.029	1%
个体固定效应	控制	-	-	-
时间固定效应	控制	-	-	-
调整后 R ²	0.687	-	-	-
样本观测值	756	-	-	-

注: *, **, ***分别表示在 10%、5%、1%统计水平上显著。

检验结果如表 3 所示, 技术进步与要素配置效率两条路径均在 1%水平显著: 技术进步中介效应值为 0.069, 占总效应 26.3%; 要素配置效率中介效应值 0.086, 占总效应 32.9%。Bootstrap 重复抽样 1000 次得到的 95%置信区间均不包含 0, 验证了两类中介效应的稳健性。

结合西华县产业特征与冷链发展现状, 可进一步解释两类路径的贡献差异:

其一, 要素配置效率的边际增益更突出, 直接对应西华县冷链资源供需错配的现实痛点。当前西华县大部分的冷库容量集中于娲城街道等县城区域, 红花集、西夏亭等核心蔬菜主产区的乡镇产地预冷设施缺口较大; 同时农户、合作社自建的小型村级冷库闲置较多, 运力资源分散在个体运输户手中, 仓储与运输的空间错配、主体分散问题突出。在此背景下, 通过数字化平台整合分散的仓储、运力资源, 推行统仓共配与产地集中集货, 可快速盘活闲置产能、减少无效往返运输, 要素重配的降本减损效应能够即时释放, 因此其中介贡献占比更高。

Table 3. Results of mediation effect test
表 3. 中介效应检验结果

传导路径	第一步总效应	第二步中介变量回归	第三步直接效应	中介效应值	中介效应占比	Bootstrap 95% 置信区间
技术进步路径	0.261***	0.214***	0.192***	0.069	26.3%	[0.042, 0.097]
要素配置效率路径	0.261***	0.258***	0.175***	0.086	32.9%	[0.058, 0.114]

注: ***表示在 1%统计水平上显著, Bootstrap 重复抽样次数为 1000 次。

其二, 技术进步的赋能效应存在释放时滞, 契合西华县冷链技术升级的阶段特征。西华县现有存量冷库多为传统高温冷库, 智能温控、气调保鲜、预冷分级等专业冷链技术渗透率较低; 尽管数字乡村试点后涉农数字基建增速加快, 但冷链技术改造涉及设施换代、作业流程重构、从业人员培训, 落地周期

显著长于资源整合, 且技术投入目前主要集中于县城枢纽, 乡镇节点尚未普及, 导致技术进步的效率贡献在当前阶段低于要素配置优化。

从长期发展来看, 随着分级冷链节点布局落地与技术改造逐步下沉, 两条路径的协同效应将进一步显现——要素配置优化是短期效率提升的核心抓手, 技术进步是长期增长的持续动力。

异质性分析表明, 数字技术的赋能效应存在区域差异: 高经济发展水平县域系数 0.325, 显著高于低水平组的 0.198; 交通条件较好县域系数 0.297, 优于交通薄弱组; 高农业产业占比县域系数 0.302, 赋能效果更明显。整体而言, 经济基础好、交通完善、农业主导的县域, 数字技术应用场景更丰富, 效率提升效应更显著。

4. 两阶段耦合优化的冷链节点选址实证

4.1. 第一阶段: 核心因素识别与候选节点筛选

采用 AHP-DEMATEL 耦合模型测算 15 项选址指标的综合重要度[8], 完整计算步骤如下:

(1) 通过 AHP 法构建 1-9 标度判断矩阵, 经一致性检验得到各指标初始权重;

(2) 构建直接影响矩阵 X , 其中 x_{ij} 表示指标 i 对指标 j 的直接影响程度, 由专家打分得到;

(3) 标准化直接影响矩阵得到矩阵 $N = X / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$, 消除量纲影响;

(4) 计算综合影响矩阵 $T = N(I - N)^{-1}$, 其中 I 为单位矩阵, 综合反映直接与间接影响;

(5) 计算中心度与原因度: 中心度 $D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{j=1}^n t_{ji}$, 表示指标在体系中的重要程度; 原因度

$R_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ji}$, 大于 0 为原因型因素, 小于 0 为结果型因素;

(6) 结合 AHP 权重与 DEMATEL 中心度加权计算综合重要度。

其中 AHP 判断矩阵经一致性检验, CR 值为 0.068, 小于 0.1 的临界标准, 判断矩阵一致性良好, 权重结果有效。

结果如表 4 所示, 全生命周期成本、市场需求规模、公路通达性、数字化基础设施水平、政府规划支持为五大核心因素, 其中全生命周期成本、数字化基建、政府规划支持属于原因型因素, 是选址的根本驱动变量, 其变动会引发其他指标的连锁反应; 市场需求规模、公路通达性属于结果型因素, 是选址效果的直接体现。

Table 4. Comprehensive importance and types of location selection factors (core indicators extracted)

表 4. 选址影响因素综合重要度与类型(核心指标节选)

一级维度	二级指标	综合重要度	中心度	原因度	因素类型
经济	全生命周期成本	1.049	2.178	0.326	原因因素
市场	市场需求规模	0.595	1.689	-0.302	结果因素
交通	公路通达性	0.556	1.623	-0.274	结果因素
技术	数字化基础设施水平	0.412	1.487	0.253	原因因素
政策	政府规划支持	0.381	1.456	0.218	原因因素

结合西华县乡镇发展现状, 依据城乡规划、交通区位、市场需求、土地条件、数字基建五大筛选标准, 初步筛选出娲城街道、红花集镇、西夏亭镇、东夏亭镇、聂堆镇、奉母镇、址坊镇、逍遥镇共 8 个候选节点, 作为第二阶段优化的备选集合。

4.2. 第二阶段：全生命周期成本导向的 0-1 混合整数规划

4.2.1. 模型假设与目标函数

结合县域冷链运营实际提出合理假设：一是生鲜运输成本与运量、运输距离呈线性关系；二是供需点与候选节点位置固定，生鲜需经节点中转；三是 30 公里服务半径内货损率稳定，满足 2 小时保鲜时效要求；四是全生命周期成本覆盖建设、运营、维护、报废全阶段。

以 20 年规划周期内全生命周期总成本最小化为目标函数，构建 0-1 混合整数规划模型[9]：

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^m A_i \left(C_1 \sum_{j=1}^n q_{ij} d_{ij} + C_2 \sum_{x=1}^k q_{ix} d_{ix} \right) \\ & + \sum_{i=1}^m A_i f \left(\sum_{j=1}^n q_{ij} \left(1 - e^{-\theta \frac{d_{ij}}{V}} \right) + \sum_{x=1}^k q_{ix} \left(1 - e^{-\theta \frac{d_{ix}}{V}} \right) \right) \\ & + \sum_{i=1}^m A_i \left(C_{cold1} \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{V} + C_{cold1} \sum_{x=1}^k \frac{d_{ix}}{V} \right) \\ & + \sum_{i=1}^m A_i \left(C_{cold2} t_{unload} \sum_{j=1}^n q_{ij} + C_{cold2} t_{unload} \sum_{x=1}^k q_{ix} \right) + \sum_{i=1}^m A_i P_i S \end{aligned} \quad (6)$$

核心变量定义：

(1) 决策变量： A_i 为 0-1 决策变量， $A_i = 1$ 表示选择第 i 个候选地址建设配送中心； $m = 8$ 为候选节点总数。

(2) 供需与距离变量： q_{ij} 为第 j 个生鲜供应点到第 i 个候选配送中心的日运输量(单位：吨)； q_{ix} 为第 i 个候选配送中心到第 x 个生鲜需求点的日配送量(单位：吨)； d_{ij} 为第 j 个供应点到第 i 个候选配送中心的实际通行距离(单位：km)； d_{ix} 为第 i 个候选配送中心到第 x 个需求点的实际通行距离(单位：km)； n 为生鲜供应点数量； k 为生鲜需求点数量。

(3) 成本相关变量： C_1 为供应点到配送中心的单位运输成本(单位：元/吨·km)； C_2 配送中心到需求点的单位运输成本(单位：元/吨·km)； f 为生鲜农产品单位货值(单位：元/吨)； C_{cold1} 为冷链车辆运输过程中的单位时间制冷成本(单位：元/h)； C_{cold2} 为配送中心装卸货时冷链设施的单位时间制冷成本(单位：元/h)； P_i 为第 i 个候选地址的工业用地单位价格(单位：元/m²)； S 为单个配送中心的规划占地面积(单位：m²)。

(4) 生鲜损耗与时效变量： θ 为生鲜农产品变质速率系数(单位：1/h)，由实地调研结合行业基准值确定； V 为冷链运输车辆平均行驶速度(单位：km/h)； t_{unload} 为单位生鲜农产品的平均装卸时间(单位：h/吨)。

(5) 目标函数核心变量： C 为生鲜物流全周期日均总成本(单位：元/日)，涵盖运输、货损、冷链制冷、场地固定成本四大核心模块。

模型设置四类核心约束，对应数学表达式如下：

(1) 需求约束：保障所有需求点的生鲜需求全部得到满足

$$\sum_{i=1}^m q_{ix} \geq Q_x \quad \forall x \quad (7)$$

其中， Q_x 为第 x 个生鲜需求点的总需求量。

(2) 容量约束：节点实际处理量不超过设计容量上限

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} \leq A_i \times Cap_i \quad \forall i \quad (8)$$

其中， Cap_i 为第 i 个候选节点的最大处理容量。

(3) 服务半径约束: 单节点服务距离控制在 30 公里以内, 满足 2 小时保鲜时效要求

$$d_{ix} \leq A_i \times 30 \quad \forall i, x \quad (9)$$

(4) 数量约束: 限定县级枢纽与乡镇节点的建设数量上限

$$\sum_{i=1}^{m_1} A_i \leq 2, \sum_{i=1}^{m_2} A_i \leq 6 \quad (10)$$

其中, m_1 、 m_2 分别为县级枢纽候选节点数与乡镇级候选节点数。

4.2.2. 参数设定与模型求解

参考行业基准与本地调研数据设定核心参数: 折现率 8%; 县级枢纽建设成本 2.5 亿元, 容量 10 万吨, 年运营成本 1200 万元; 乡镇节点建设成本 5000 万元, 容量 2 万吨, 年运营成本 300 万元; 单位运输成本 0.8 元/(吨·公里); 标准运营损耗率 8%; 年维护成本系数 3%; 报废成本为建设成本 10%, 残值 5%。对建设成本、运输成本、折现率开展 $\pm 20\%$ 敏感性测试, 最优布局保持不变, 模型稳健性良好。

采用 Lingo 18.0 软件求解模型, 求解过程经 27 次迭代达到全局最优解, 所有约束条件均满足, 无不可行解, 最优解唯一。最终得到西华县最优冷链节点布局为“1 个县级枢纽 + 4 个乡镇级节点”: 在炳城街道建设县级冷链综合枢纽, 在红花集镇、西夏亭镇、东夏亭镇、聂堆镇建设乡镇级冷链集散节点。各节点服务范围覆盖全县 22 个乡镇级行政单位, 其中西华营镇由东夏亭镇节点辐射覆盖, 单独设点的全生命周期成本高出 27%, 且在 30 公里服务半径内, 布局具备经济性。

5. 方案验证与经济效应分析

5.1. 方案对比与有效性验证

设置三组对照方案与最优方案横向对比, 分别为现有零散冷库布局、仅建设 1 个县级枢纽、建设 2 个县级枢纽 + 3 个乡镇节点, 从全生命周期成本、平均配送距离、货损率三个维度评价效益。结果如表 5 所示, 最优方案全生命周期总成本 10.31 亿元, 较现有布局降低 18.7%; 平均配送距离 16.3 公里, 缩短 43.0%; 生鲜货损率 8.2%, 下降 13.8 个百分点, 三项指标均显著优于所有对照组, 验证了方案的科学性与优越性, 如表 5 所示。

Table 5. Comparison of benefits of different location schemes

表 5. 不同选址方案效益对比

方案	全生命周期成本(亿元)	平均配送距离(公里)	货损率(%)
现有零散布局	12.68	28.6	22.0
单县级枢纽	11.25	22.3	15.6
2 枢纽 + 3 乡镇节点	10.87	19.5	11.3
最优 1 + 4 布局	10.31	16.3	8.2

5.2. 敏感性与稳健性检验

对建设成本、运输成本、折现率三类核心参数开展 $\pm 20\%$ 区间的敏感性分析, 结果显示参数波动范围内, 最优节点布局始终保持不变, 仅总成本数值随参数呈线性同向变动, 三类参数的弹性系数均小于 0.2, 属于低敏感参数。同时模拟生鲜需求 $\pm 15\%$ 的动态场景开展迭代测试, 最优方案始终保持稳定(将 2025 年样本剔除后重新回归, 核心结论未发生显著变化)。总成本波动幅度仅 $\pm 4.27\%$, 说明选址方案抗干扰能力强, 可适应长期运营中的需求与成本波动。

5.3. 综合经济效应分析

一是降本减损与农户增收效应。方案落地后可大幅降低县域生鲜综合物流成本, 减少生鲜损耗和损失。流通成本的下降通过供应链传导, 一部分转化为企业利润, 一部分直接提升农户收益, 为农户节省物流成本, 带动生鲜种植利润率提升, 形成产业良性循环。

二是产业集聚与就业带动效应。科学的冷链节点布局可带动生鲜种植、冷链仓储、物流运输、电商直播等产业集聚, 推动西华县生鲜产业标准化、品牌化发展, 提升市场竞争力; 同时可创造大量稳定就业岗位, 带动农村劳动力就近就业, 助力乡村人才振兴。

三是城乡融合与消费升级效应。完善的冷链网络打通农产品上行与工业品下行双向通道, 一方面提升本地生鲜商品化率与附加值, 拓宽外销渠道; 另一方面丰富农村生鲜消费供给, 降低农村生鲜消费价格, 缩小城乡流通差距, 推动城乡融合发展。

6. 研究结论与政策建议

6.1. 研究结论

第一, 2018~2025 年西华县数字技术与生鲜冷链物流发展水平同步提升, 两系统耦合度始终处于极高水平, 耦合协调度从轻度失调演进至初级协调, 实现了从失调向协调的跨越, 但仍存在技术、布局、人才、市场主体四大制约, 协同提升空间较大。

第二, 数字技术应用对县域生鲜冷链物流效率具有显著正向驱动作用, 技术进步与要素配置效率是两条核心传导路径, 其中要素配置效率的贡献占比更高。赋能效应存在区域异质性, 在经济发达、交通便利、农业产业占比高的县域表现更为突出。

第三, 全生命周期成本、市场需求规模、公路通达性、数字化基础设施水平、政府规划支持是县域生鲜冷链节点选址的核心影响因素, 其中全生命周期成本是最重要的决策依据, 数字化基建等技术要素是布局长期优化的关键支撑。

第四, “1 个县级枢纽 + 4 个乡镇节点”是西华县冷链布局的最优方案, 可显著降低全生命周期成本、缩短配送距离、压缩生鲜货损率, 经多维度验证具备高度稳健性, 综合经济效益与社会价值突出, 可直接落地实施。

6.2. 政策建议

(1) 落地“1 个县级枢纽 + 4 个乡镇节点”分级布局, 构建县乡协同冷链网络

基于本文选址优化的实证结论, 优先推进“涡城街道县级冷链综合枢纽 + 红花集镇、西夏亭镇、东夏亭镇、聂堆镇 4 个乡镇集散节点”的空间布局落地, 分阶段补齐产地预冷短板。县级枢纽重点承担区域分拨、精深加工、冷链仓储核心功能, 对接省外销地市场; 4 个乡镇节点聚焦产地预冷、集货分拣, 覆盖周边蔬菜主产区, 严格保障 30 公里服务半径内 2 小时保鲜时效。针对西华营镇等节点辐射覆盖区域, 依托乡镇节点设置村级集货点, 避免重复建设造成的资源浪费, 最终形成“枢纽 - 节点 - 集货点”三级冷链网络, 从空间布局上破解生鲜流通“最初一公里”瓶颈。

(2) 以要素配置优化为核心抓手, 盘活县域存量冷链资源

针对要素配置效率中介贡献占比最高的实证结论, 将存量资源整合作为短期效率提升的核心路径, 优先于大规模新建设施。整合供销合作社、邮政、商超、电商等分散的冷链仓储与运力资源, 依托县级枢纽搭建县域冷链统仓共配平台, 统一调度乡镇节点仓储容量与运输车辆, 降低冷库闲置率与车辆空驶率。鼓励农户、合作社自有小型冷库接入乡镇节点运营体系, 通过共享预约、统一管理提升利用效率,

以最低投入实现冷链供给能力扩容, 充分释放要素重配的边际增益。

(3) 强化数字化基建刚性约束, 夯实冷链节点长期运营能力

结合选址影响因素中“数字化基础设施为核心原因型因素”的实证结论, 将数字基建纳入冷链节点建设的硬性标准, 避免传统基建的路径依赖。县级枢纽与乡镇节点需同步配套物联网温湿度监控、智能仓储调度、生鲜溯源系统, 实现全链条温度可控、数据可溯; 对接县域数字乡村平台, 打通产地供需、仓储容量、运力调度的数据壁垒。同时配套推进乡镇 5G 基站、光纤网络等数字基建升级, 保障乡镇节点的数字化运营条件, 以技术赋能支撑冷链网络的长期效率提升。

(4) 完善配套政策保障体系, 引导资源向重点领域倾斜

在县域层面出台专项支持政策, 财政补贴与土地指标优先向“1+4”核心节点、数字化改造、存量资源整合三类方向倾斜。对乡镇产地预冷设施建设给予更高比例的财政补贴, 对参与统仓共配的市场主体减免运营税费; 出台冷链人才引育政策, 补齐县域冷链数字化运营的人才短板。同时建立县域冷链发展动态评估机制, 定期测算冷链效率与协同发展水平, 根据运营效果动态调整建设节奏, 保障政策精准落地。

参考文献

- [1] 刘燕, 李春花. 生鲜农产品冷链数字化高质量发展机制及对策研究[J]. 中国储运, 2026(5): 55-57.
- [2] 李影, 周叶. 数字经济驱动农产品冷链物流高质量发展的路径研究[J]. 中国储运, 2024(1): 198-200.
- [3] 郭显光. 改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998(12): 98-102.
- [4] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999(2): 76-82.
- [5] Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., *et al.* (1994) Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries. *The American Economic Review*, **84**, 66-83.
- [6] 温忠麟, 王一帆, 马鹏, 等. 变量之间的影响关系和多重影响因素的共同作用类型[J]. 心理学报, 2024, 56(10): 1462-1471.
- [7] 张涵, 康飞. 基于 Bootstrap 的多重中介效应分析方法[J]. 统计与决策, 2016(5): 75-78.
- [8] 赵振宇, 张舒阳, 葛潇. 基于地理信息技术和模糊层次分析-模糊决策试行与评价实验方法(AHP-DEMATEL)的区域大型光伏电站选址指标体系构建: 以内蒙古为例[J]. 科技管理研究, 2023, 43(6): 78-87.
- [9] 张泉, 郑浩然, 朱逸群, 等. 基于混合整数规划的数据中心冷却能耗优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(9): 188-197.