

数智化驱动下农产品冷链物流供应链的优化策略研究

石丁丁 叶太莉 李妮娜 梁莉坪 石丽媛*

桂林学院 广西 桂林 541006

【摘要】：在乡村振兴与消费升级的双重背景下，农产品冷链物流体系面临产品易腐损耗高、供应链“最初一公里”短板突出，以及由自然和市场双重不确定性引致的运营风险。本文聚焦广西桂林市特色桂花蜜产业，引入“决策智能（DecisionIntelligence）”理念，以桂林东万禾冷链物流园项目为仿真原型，构建了一个融合需求随机波动与产出随机波动的“双不确定”环境下的三级冷链供应链仿真模型。通过运用敏感性分析，精准识别出运输温度、车辆行驶速度与装载率三个关键可控运营因子。在此基础上，采用仿真试验，建立了以总成本为响应变量的高精度回归模型，以此进行稳健优化。研究结果表明，当运输温度设定为 0.3°C 、车辆装载率为80%、平均行驶速度为 71.10km/h 时，供应链总成本均值可降至189.59万元，且成本波动范围（变异系数）被有效控制，控制在5%以内，系统稳健性显著增强。本研究进一步将上述优化方案与桂林桂花蜜产业实践相结合，从设施升级、数智赋能、模式创新与政策协同四个维度，提出了一套整合性的优化策略，旨在为同类型特色农产品的冷链供应链管理提供实证参考。

【关键词】：农产品冷链物流；双重不确定性；稳健优化；数智化转型；桂林桂花蜜；决策智能

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.043

1 引言

1.1 研究背景与意义

生鲜农产品流通损耗率高，冷链物流是保障品质、降低损耗的关键。以广西桂林桂花蜜为代表的特色农产品，生产季节性强、品质对温度敏感、市场需求波动明显。传统以成本最小化为单一目标的优化方法在现实扰动下极易失效。大数据、物联网、智能算法等数智化技术，特别是“决策智能”技术的发展，为不确定环境下的供应链稳健优化提供了新路径。因此，针对桂花蜜等特色农产品开展专项优化研究，具有重要的现实意义。

1.2 研究内容与方法

本文研究内容按照：现状分析→仿真建模→关键因子筛选→建模优化→结果验证→对策建议→结论展开。研究方法综合采用仿真建模与案例分析法，并通过重复仿真验证优化结果的可靠性。

2 农产品冷链供应链系统分析与仿真建模

2.1 研究对象与模型结构

本文以广西桂林桂花蜜特色产业为分析对象，以桂林东万禾冷链物流园项目为仿真原型，构建三级冷链供应链模型：上游为桂林产地及养蜂基地，中游为冷链分销中心与冷藏仓储，下游为商超、电商平台及批发市场。模型充分考虑桂花蜜产品特性，重点设置适宜储运温度区间与品质时效约束。

2.2 模型假设

为确保仿真模型的科学性与可行性，提出三项理想状态假设：

(1) 桂林桂花蜜产出受气候影响显著，需求受季节性消费与礼品市场影响明显，假定市场需求与产地产出均服从正态分布，以反映双不确定特征；

(2) 重点考虑运输环节品质损耗，损耗率与温度、运输时间高度相关，桂花蜜对温度波动敏感，需在稳定低温区间内运输；

(3) 仅考虑正向物流，不包含退货与逆向回流环节，随机误差项期望为0，保证模型统计平稳。

2.3 因子体系与筛选

研究初始纳入13个潜在可控因子，采用敏感性分析进行显著性筛选，最终识别出对总成本影响极显著的三大关键因子：运输温度、车辆行驶速度、车辆装载率。对桂花蜜等特色农产品，运输温度直接决定产品品质与货架期，车辆行驶速度与装载率直接影响运输效率与成本，是冷链优化的核心控制变量。其余因子影响微弱，予以剔除以简化模型、提升优化效率。

3 基于仿真试验的冷链总成本建模

3.1 试验设计与数据来源

本文采用三因子三水平仿真试验，共设计17组试验，以冷链供应链总成本为响应变量Y。试验因子及水平设置如下：

运输温度 X_1 ：-1级为 -1°C ，0级为 0.3°C ，+1级为 2°C （适配桂花蜜品质稳定区间）；

车辆行驶速度 X_2 ：-1级为 60km/h ，0级为 71.10km/h ，+1级为 80km/h ；

车辆装载率 X_3 ：-1级为60%，0级为80%，+1级为100%。

通讯作者，大学生创新训练项目指导老师。

本文构建回归模型的原始数据主要来源于三部分：

公开统计数据：以《广西特色农产品冷链物流发展报告（2022）》《桂林市农业经济发展统计年鉴（2023）》为基准，提取关键参数；

仿真试验数据：依托桂林东万禾冷链物流园项目仿真平台，输入17组试验点组合，在双不确定环境下运行仿真，得到供应链总成本Y；

实地调研数据：2024年对桂林桂花蜜主产区及合作冷链企业的实地调研，补充验证不同温控条件下的产品损耗率与成本结构。

3.2 模型拟合与方差分析

根据17组试验得到的仿真结果，采用回归分析对总成本进行二次多项式拟合。方差分析结果显示，回归模型整体显著（ $p < 0.05$ ），失拟项不显著（ $p > 0.05$ ）。模型决定系数 $R^2 = 0.9720$ ，调整后 $R^2_{adj} = 0.9403$ ，信噪比为16.048，说明模型拟合精度高、预测能力可靠。

在确认模型可靠的基础上，利用软件在设定区间内进行寻优计算。约束条件为温度 $-1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ 、行驶速度 $60 \sim 80\text{km/h}$ 、装载率 $60\% \sim 100\%$ ，最终得到使总成本最优的参数组合：运输温度 0.3°C 、车辆装载率 80% 、行驶速度 71.10km/h ，对应的总成本期望为189.59万元。

4 稳健优化与结果验证

4.1 优化目标与约束

以总成本均值最小、波动方差最小为双目标稳健优化导向，约束条件为温度、车速、装载率在工程可行区间内。针对桂花蜜产品特性，温度约束严格限定在品质稳定区间。

4.2 最优解与优化结果

基于回归模型进行稳健寻优，得到最优参数组合：运输温度 0.3°C 、车辆装载率 80% 、行驶速度 71.10km/h 。在该参数组合下，最优总成本均值为189.59万元，系统成本波动控制在5%以内，系统稳健性、抗扰动能力与运行稳定性显著提升。

4.3 稳健性验证

对最优参数组合执行50次独立重复仿真，结果显示总成

本分布集中、波动幅度小、变异系数 $\leq 5\%$ ，证明优化方案在双不确定环境下具有良好稳健性与现实可操作性。

5 桂林桂花蜜冷链优化案例与对策建议

5.1 桂林桂花蜜冷链流通模式分析

桂林作为桂花蜜核心产区，通过补齐产地预冷设施、规范分级包装标准、构建全程可追溯体系，有效破解特色农产品“最初一公里”瓶颈。结合本文稳健优化方案，可进一步实现温控精准化、装载合理化、调度智能化。

5.2 数智化赋能与优化对策

（1）完善冷链基础设施：重点加强产地预冷、保鲜仓储设施建设；优化冷库布局；推进干线运输与末端配送协同。针对桂林桂花蜜，建议建设专业化蜂蜜冷藏库与温控运输车队。

（2）推广稳健优化运营：普及仿真试验、因子筛选等科学工具；以“温度精准、车速合理、装载高效”为运营核心；从单一成本最优转向稳健最优。

（3）深化数智化技术应用：建设区域性冷链大数据平台；全面推广IoT实时温控与智能预警；加快区块链全程溯源落地。

（4）引入决策智能算法引擎：构建面向冷链供应链的决策智能引擎。通过机器学习预测需求，利用运筹优化算法解决路径规划、资源调度问题，实现“数据驱动决策”。

（5）创新流通模式与保障体系：发展即时零售、产地直供等新模式；推进品牌化运营、标准化分级；同时，完善冷链标准与监管体系；加大政策支持；培养复合型人才。

6 结论与展望

在双不确定环境下，运输温度、车辆速度、装载率是影响农产品冷链总成本的三大关键可控因子。本文构建的二阶回归模型拟合精度高，经优化得到的最优参数（ 0.3°C 、 80% 装载率、 71.10km/h ）可将总成本降至189.59万元，波动 $\leq 5\%$ ，系统稳健性显著提升。50次重复仿真验证了方案的稳定性。数智化技术、稳健运营、模式创新与政策保障协同发力，是新时代农产品冷链供应链优化的核心路径。

未来，可进一步融合实时大数据与动态优化，构建更精细的短期预测与调度模型；拓展数字孪生、智能仓储等前沿技术应用；深化跨区域冷链网络、产业链协同等方向研究。

参考文献：

- [1] 国家发展改革委.“十四五”冷链物流发展规划[Z].2021.
- [2] 农业农村部.关于加快推进农产品仓储保鲜冷链物流设施建设的实施意见[Z].2020.
- [3] 张敏,李军.农产品冷链物流效率影响因素与优化路径研究[J].中国流通经济,2022,36(05):45-54.
- [4] 王健,刘婧.大数据驱动下农产品供应链韧性提升机制[J].商业研究,2023(02):12-20.
- [5] 陈丽华,赵旭.区块链在农产品冷链追溯中的应用[J].中国物流与采购,2022(18):68-69.

- [6] 李丽,李军.多重不确定性下生鲜农产品供应链稳健优化仿真[J].系统工程,2023,41(02):98-107.
- [7] 黄祖辉,钟真.中国农产品冷链物流发展:现状、困境与突破[J].农业经济问题,2022,43(01):10-20.
- [8] 广西壮族自治区农业农村厅.广西特色农产品冷链物流发展报告[R].2022.
- [9] 桂林市统计局.桂林市农业经济发展统计年鉴[Z].2023.