

文章编号: 0253-4339(2026)04-0090-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250528001

蔬菜产地冷加工碳减排关键点位及可行路径研究

赵建勋^{1,2,3} 黄铭暄^{1,2,3} 唐明生^{1,2,3} 邹慧明^{1,2,3} 田长青^{1,2,3}

(1 中国科学院理化技术研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049;

3 低温科学与技术重点实验室 北京 100190)

摘要 近年来人们对蔬菜等优质生鲜农产品的需求不断增加,在市场需求和国家政策的推动下,蔬菜产地冷加工相关工艺的应用规模不断扩大,也使蔬菜产地处理环节碳排放量随之增加。本文基于已建立的产地处理碳排放计算模型,采用敏感度分析法计算模型中各参数的敏感度,分析得到产地冷加工的碳减排杠杆点为制冷剂泄漏和蔬菜损失率。根据碳减排关键点位,提出可行路径并计算碳减排预期成效。在制冷剂泄漏减排方面,采用R515B作为过渡制冷剂、R744作为最终替代制冷剂的方案,计算结果表明,R515B过渡方案由能源消耗和制冷剂泄漏引起的碳排放量均降低,可降低28.98%的产地碳排放;R744最终替代方案由制冷剂泄漏引起的碳排放量降低,但由能源消耗引起的碳排放量增加,可降低26.78%的产地碳排放。在蔬菜质量损失方面,对采收、预冷、贮藏环节分别采取机械采收、优化预冷技术、气调贮藏等方式,计算得到采用蔬菜损失率优化方案可降低11.48%的产地碳排放。将制冷剂泄漏和蔬菜损失率优化方案联合应用,可降低37.62%的产地碳排放。

关键词 蔬菜处理;冷加工;冷链;碳减排

中图分类号: TB69;X511

文献标识码: A

Key Points and Feasible Paths for Carbon-Emission Reduction of Cold Processing in Vegetable-Producing Areas

Zhao Jianxun^{1,2,3} Huang Mingxuan^{1,2,3} Tang Mingsheng^{1,2,3} Zou Huiming^{1,2,3} Tian Changqing^{1,2,3}

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Beijing, 100190, China)

Abstract In recent years, the demand for high-quality fresh agricultural products, such as vegetables, has increased continuously, and the application rate of cold processing in vegetable-producing areas has increased as well, thus resulting in an increase in carbon emissions during vegetable processing. Based on existing models, this study performed sensitivity analysis to calculate the sensitivity of each parameter. The carbon-emission reduction leverage points were identified as refrigerant leakage and vegetable loss rate. Based on the key points of carbon-emission reduction, feasible paths were proposed, and the expected effects were calculated. In terms of refrigerant leakage, a green refrigerant replacement scheme was adopted, with R515B and R744 as the transitional and final solutions, respectively. Based on calculations, the transitional and final solutions can reduce carbon emissions by 28.98% and 26.78% in producing areas, respectively. In terms of vegetable quality loss, an optimization scheme for the vegetable loss rate can reduce carbon emissions by 11.48% in the producing areas. By jointly applying the optimization schemes for refrigerant leakage and vegetable loss rate, the calculation results show that using the combined optimization scheme can reduce carbon emissions by 37.62% in the producing areas.

Keywords vegetables treatment; cold processing; cold chain; carbon emission reduction

随着我国经济的飞速发展,人民对食品的质量和品质提出了更高的要求,优质蔬菜等生鲜农产品成为市场的主流需求之一。蔬菜产地处理过程可分为采收、分选、预冷、贮藏和包装5个环节,以冷加工

为主的产地处理过程应用率不高,若蔬菜采收后缺失以预冷为主的冷加工环节,则会很大程度上影响食物的品质^[1],这也是导致我国蔬菜等生鲜农产品的腐损率居高不下的主要因素之一。因此,在国家政

基金项目:国家重点研发计划(2023YFD2001300)资助项目。(The project was supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD2001300).)

收稿日期:2025-05-28;修回日期:2025-08-02;录用日期:2025-08-13

策和市场需求的三重推动下,蔬菜“最先一公里”冷链配套设施不断健全。然而蔬菜产地处理过程需要增设大量的产地冷链设备与其他处理设备,存在增加蔬菜产地处理过程的能源消耗和碳排放的可能性,不利于实现农产品冷链物流的低碳发展。

国内外学者对生鲜农产品在冷链物流中产生的碳排放情况及减排方案已开展相关研究。Hu Guangwei 等^[2]从宏观角度研究冷链扩张过程中碳足迹与食品损耗之间的关系,构建非线性优化框架确定了在最终需求不变的情况下冷链的最佳规模,并利用系统动力学分析发达国家和发展中国家的温室气体减排潜力。胡百灵等^[3]对我国果蔬冷链物流全程碳足迹进行测算,并从经济学的角度,对比了碳税和碳排放权交易 2 种控碳降碳方法在果蔬冷链物流领域的优劣,认为碳排放权交易政策更符合未来发展。李斌等^[4]采用生命周期评估法研究了某典型果蔬在冷链各环节的碳排放情况,重点量化了运输环节不同供冷方式的碳足迹,并针对不同的运输情况提出碳足迹更小的运输方案。蔡依平等^[5]同样采用生命周期评估的方法,计算了番茄生命周期中各项活动的碳足迹,认为生产方式和运输方式是影响番茄碳排放的主要因素,并分别提出了塑料薄膜生产和海上运输这 2 种碳减排方式。由于运输环节的碳足迹较高,更多学者聚焦于冷链运输环节,通过改变冷藏车供冷方式、优化配送路线等途径实现碳减排目标。李靖等^[6]以丙三醇和氯化钠为原料,研制了一种无毒低温相变材料,并将其应用于蓄冷冷藏车,在废气排放、环保、节能及稳定性等方面表现出显著优势。王智忆等^[7]在考虑车速、距离、载重量等影响因素的情况下,构建以碳排放量最低为目标的配送路径优化模型。

上述文献概述了冷链碳足迹和冷链减排途径的研究现状,冷链减排途径的研究主要聚焦于当前冷链碳足迹较高的运输环节。文献[8]研究表明,在产地冷链全覆盖条件下,每 1 kg 蔬菜在产地处理过程中产生 0.134 kg 的碳排放,是产地冷链不断完善背景下不可忽略的碳排放来源之一。但鲜有学者对该碳排放开展研究,缺少对果蔬等生鲜农产品在产地处理全过程中碳减排情况的分析测算。

因此,本文以蔬菜为研究对象,采用敏感度分析法计算了蔬菜冷加工过程具体环节和各碳排放来源的敏感度,依此计算得到产地处理碳减排的关键点位,提出碳减排的可行路径,并计算了不同可行路径的碳减排预期成效。

1 计算模型及方法

1.1 产地处理碳排放计算模型

在分析蔬菜产地处理过程碳排放的基础上,建立产地处理过程碳排放计算模型,将产地处理过程划分为采收、分选、贮藏、预冷和包装环节,碳排放来源主要有蔬菜质量损失、能源消耗、制冷剂泄漏和材料消耗^[8],该模型中产地处理各环节间的关联仅为蔬菜质量变化。

为更清晰地表征各类参数对模型计算结果的影响,将模型参数分为 2 类,分别是环节质量损失率 L_x 和环节碳排放因子 a_x ,依据已建立模型结构,再将环节碳排放因子 a_x 分为 2 类,环节质量损失相关的 a_{x1} 和与环节质量损失无关的 a_{x2} 。依此将模型参数简化,得到的改进模型如下:

$$C = [a_{11}L_1 + a_{12}(1 - L_1)]m + [a_{21}L_2 + a_{22}(1 - L_2)](1 - L_1)m + (a_{31}L_3 + a_{32})(1 - L_1)(1 - L_2)m + (a_{41}L_4 + a_{42})(1 - L_1)(1 - L_2)(1 - L_3)m + [a_{51}L_5 + a_{52}(1 - L_5)] \cdot (1 - L_1)(1 - L_2)(1 - L_3)(1 - L_4)m \quad (1)$$

式中: C 为产地处理碳排放, kgCO_2eq ; a_{x1} 为质量损失相关碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$; a_{x2} 为质量损失无关碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$; L_x 为环节质量损失率, %。下标 x 的值由采收、分选、预冷、贮藏和包装环节决定,按处理顺序分别对应 1~5。

基于模型中的参数数值,计算得到 L_x 、 a_{x1} 、 a_{x2} 的数值^[8]如表 1 所示。

表 1 模型参数数值
Tab.1 Model parameter values

处理环节	$a_{x1}/(\text{kgCO}_2\text{eq/kg})$	$a_{x2}/(\text{kgCO}_2\text{eq/kg})$	$L_x/\%$
采收环节($x=1$)	0.372	1.325×10^{-3}	6.00
分选环节($x=2$)	0.372	1.860×10^{-4}	0
预冷环节($x=3$)	0.260	9.300×10^{-3}	1.70
贮藏环节($x=4$)	0.260	8.550×10^{-4}	1.75
包装环节($x=5$)	0.372	4.226×10^{-2}	2.40

1.2 敏感度分析法

敏感度分析是一种定量分析与某个因素有关的 1 个或 1 组指标变化对该因素产生影响的方法,其实质是通过观察相关变量的数值变动,明确其对被解释指标产生影响的程度和方向^[9]。本文采用局部敏感度分析中的微分法计算各模型参数变化对产地处

理过程碳排放量的影响,计算如下:

$$S_{x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: S_{x_i} 为输入变量 x_i 对输出 y 的局部敏感度; $\partial y/\partial x_i$ 表示当 x_i 增加一个很小的量时,输出 y 的变化速度。 S_{x_i} 值越大,说明该变量的敏感度越高,在本文中代表该参数的改变对整体碳排放结果的影响越大,是碳排放关键点位判断的主要依据。

2 产地处理碳减排关键点位分析

2.1 环节质量损失率 L_x 敏感度计算

将式(1)中所有的环节碳排放因子 a_x 替换为已知参数,蔬菜质量 m 取 1,分别求每个环节质量损失率 L_x 的敏感度,计算结果如表 2 所示。

表 2 L_x 敏感度计算结果

Tab.2 Calculation result of the sensitivity of L_x

处理环节	采收	分选	预冷	贮藏	包装
$\partial C/\partial L_x$	0.304	0.286	0.193	0.194	0.299

由计算结果可知,各处理环节质量损失率的敏感度关系为:采收>包装>分选>贮藏>预冷,环节质量损失率的改变主要影响蔬菜质量损失引起的碳排放。

2.2 环节质量损失相关碳排放因子 a_{x1} 敏感度计算

将式(1)中所有的环节质量损失率 L_x 和环节质量损失无关碳排放因子 a_{x2} 替换为已知参数,蔬菜质量 m 取 1,分别求每个环节的质量损失相关碳排放因子 a_{x1} 的敏感度,计算结果如表 3 所示。

表 3 a_{x1} 敏感度计算结果

Tab.3 Calculation result of the sensitivity of a_{x1}

处理环节	采收	分选	预冷	贮藏	包装
$\partial C/\partial a_{x1}$	0.060	0	0.016	0.016	0.022

由计算结果可知,环节质量损失相关碳排放因子的敏感度主要受该环节蔬菜质量损失率敏感度影响,且越靠后的环节,其敏感度的数值越偏离该环节的质量损失率。敏感度大小关系为:采收>包装>贮藏=预冷>分选。环节质量损失相关碳排放因子的改变也主要影响蔬菜质量损失引起的碳排放。

2.3 环节质量损失无关碳排放因子 a_{x2} 敏感度计算

将所有的环节质量损失率 L_x 和环节质量损失相关碳排放因子 a_{x1} 替换为已知参数,蔬菜质量 m 取 1,

分别求每个环节的质量损失无关碳排放因子 a_{x2} ,计算结果如表 4 所示。

表 4 a_{x2} 敏感度计算结果

Tab.4 Calculation result of the sensitivity of a_{x2}

处理环节	采收	分选	预冷	贮藏	包装
$\partial C/\partial a_{x2}$	0.940	0.940	0.940	0.924	0.886

由计算结果可知,环节质量损失无关碳排放因子的敏感度均较高,其规律为越先进行的处理环节,敏感度越高。

a_{x2} 可分为能源消耗 b_1 、制冷剂泄漏 b_2 和材料消耗 b_3 这 3 个碳排放来源。其中,采收和分选环节的 a_{x2} 仅由能源消耗组成;预冷和贮藏环节的 a_{x2} 由能源消耗和制冷剂泄漏组成;包装环节的 a_{x2} 由能源消耗和材料消耗组成。每个环节的质量损失无关碳排放因子 a_{x2} 可由不同碳排放来源相加替代,即可分别求得每一个碳排放来源 b_x 的敏感度,结果如表 5 所示。

表 5 b_x 敏感度计算结果

Tab.5 Calculation result of the sensitivity of b_x

碳排放来源	能源消耗	制冷剂泄漏	材料消耗
$\partial C/\partial b_x$	4.630	1.864	0.886

由计算结果可知,能源消耗敏感度最高,制冷剂泄漏次之,材料消耗敏感度最小,不同碳排放来源的敏感度与其涉及的环节有关,涉及环节越多,该碳排放来源的敏感度越高。

根据已有产地处理过程碳排放计算模型,能源消耗碳排放仅占总产地处理碳排放的 8%^[8],因此降低各环节能源消耗的碳减排效果并不理想。综上,对现有模型采用敏感度分析法,得到产地处理过程碳减排的杠杆点为:1)制冷剂泄漏(越先进行的环节越重要);2)蔬菜损失率(分为质量损失和腐损 2 部分)。

3 碳减排可行路径及预期成效分析

基于产地处理碳减排关键点位的分析结果,本节将从制冷剂替代和蔬菜损失率 2 个方面提出碳减排的可行路径,并估算减排预期成效。

3.1 制冷剂替代

在蔬菜产地处理过程中,涉及制冷剂泄漏碳排放的是预冷和贮藏环节,制冷剂替代是降低制冷剂泄漏碳排放的主要方式之一。本文采用变暖影响总当量的计算思路,综合考虑制冷剂替代对制冷剂泄漏和设备能耗的碳排放影响,并且为提高碳减排实际应用的可行性,设立过渡方案。

R515B 是近期开发出的一种新型低全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)混合制冷剂,由于 R515B 具有良好的热力学性能、安全性和环保特性,本文将其作为预冷和贮藏环节制冷剂替代的过渡方案。

CO₂(R744)具有良好的环境特性和较高的安全性,被一致认为是具有优良应用潜力的环保工质,本文将 CO₂ 作为预冷和贮藏环节制冷剂替代的最终目标,产地绿色制冷剂替代的技术路线如图 1 所示。

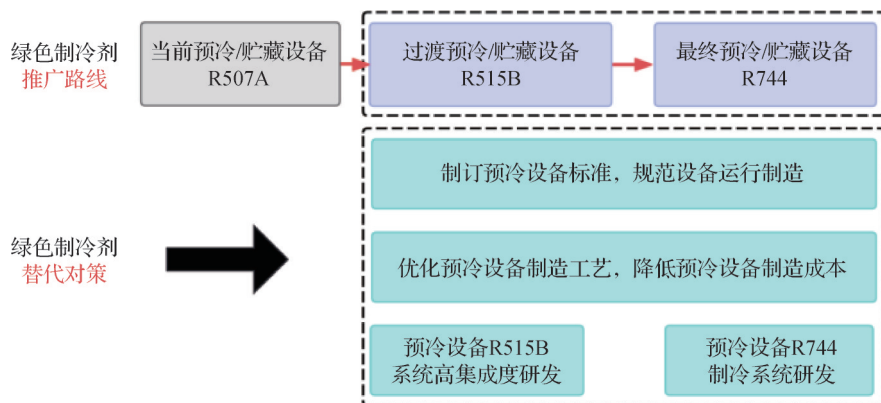


图 1 产地绿色制冷剂替代的技术路线

Fig.1 Technical routes for replacing environmentally friendly refrigerants in the production area

3.1.1 预冷环节制冷剂替代方案

假设预冷初温为 30℃,预冷终温为 2℃,蔬菜比热容为 3.275 kJ/(kg·℃),预冷 2 h、20%漏冷,计算得到单位质量蔬菜预冷所需的制冷量为 15.92 W。

现有预冷设备制冷剂以 R507A 计算,充注量为 3 kg/kW,设备每 1 kg 蔬菜容量的制冷剂充注量为 47.76 g,按 5% 的年泄漏率计算,年泄漏量为 2.388 g,因蔬菜成熟期较短、预冷时间短,假设预冷设备容量与实际年处理蔬菜量之比为 1:300。计算得到预冷 1 kg 蔬菜的制冷剂泄漏量为 7.96×10^{-3} g, R507A 的 GWP 为 3985,对应的碳排放量为 31.72 gCO₂/kg。综合考虑我国蔬菜品类和产地预冷设施建设情况,取各预冷方式占比分别为:冷库预冷 65%、冷水预冷 20%、差压预冷 10%、真空预冷 5%,预冷能效比分别为 2.0/1.38/1.54/1.2,以加权计算得到预冷环节平均能效比为 1.79。

对于 R515B 过渡方案,采用等效制冷量法计算得到 R515B 预冷设备的充注量为 2.5 kg/kW。设备每 1 kg 蔬菜容量的制冷剂充注量为 39.8 g, R515B 的 GWP 为 299,采用与前文相同的步骤,计算得到预冷 1 kg 蔬菜的制冷剂泄漏量为 6.63×10^{-3} g,对应的碳排放量为 1.98 gCO₂/kg,过渡制冷剂的预冷平均能效比为 1.933。

对于 R744 最终方案,预冷设备充注量为 0.5 kg/kW。设备每 1 kg 蔬菜容量的制冷剂充注量为 7.96 g, R744 的 GWP 为 1。同样采用与前文相同的步骤,计算得到预冷 1 kg 蔬菜的制冷剂泄漏量为 1.33×10^{-3} g,对应的碳排放量为 1.33×10^{-3} gCO₂/kg,替代方案的预冷平均

能效比为 1.217。

3.1.2 贮藏环节制冷剂替代方案

现有冷藏设备设施采用 R507A 制冷剂,冷藏库每 1 kg 蔬菜贮藏容量的制冷剂充注量为 0.35 g,假设年贮存量为库容的 10 倍,实际贮藏 1 kg 蔬菜对应的制冷剂充注量为 0.035 g。取制冷剂年泄漏率为 5%,贮藏 1 kg 蔬菜的制冷剂年泄漏量为 1.75×10^{-3} g,对应贮藏 1 kg 蔬菜的碳排放量为 6.974 gCO₂/kg。根据现有模型参数,取冷藏库运行能耗为 0.5 kW·h/(t·d)。

对于 R515B 过渡方案,计算得到每 1 kg 蔬菜贮藏容量的冷藏设备设施所需制冷剂充注量为 0.29 g。贮藏 1 kg 蔬菜的制冷剂年泄漏量为 1.45×10^{-3} g,对应贮藏 1 kg 蔬菜的碳排放量为 0.433 55 gCO₂/kg。能耗取 0.412 kW·h/(t·d)。

对于 R744 最终方案,单位库容的冷藏设备设施 CO₂ 充注量为 0.4 kg。1 m³贮藏 250 kg 蔬菜,每 1 kg 的蔬菜贮藏容量所需制冷剂充注量为 1.6 g。贮藏 1 kg 蔬菜的制冷剂年泄漏量为 8×10^{-3} g,对应贮藏 1 kg 蔬菜的碳排放量为 0.08 gCO₂/kg。考虑 CO₂ 制冷系统在产地冷藏场所技术成熟度不高,CO₂ 冷藏库能耗较高,因此能耗取 0.83 kW·h/(t·d)。

3.1.3 制冷剂替代方案的预期成效

将 3 种制冷剂在预冷、贮藏环节对应的参数数值带入产地处理过程碳排放计算模型(外包装材选用瓦楞纸箱),计算得到现有方案、过渡方案和最终方案的碳排放情况,如表 6 所示。

现有方案中,在经历全部产地处理过程后,每从产地运出 1 kg 蔬菜,产生 133.41 gCO₂eq;采用过渡方

表 6 制冷剂替代优化方案的产地碳排放量
Tab.6 Carbon emissions at the production area of the
refrigerant substitution optimization scheme

项目	能源 消耗	蔬菜 腐损	制冷剂 泄漏	材料 消耗	总和 gCO ₂ eq/kg
现有方案(R507A)	11.53	39.80	40.39	41.68	133.41
过渡方案(R515B)	10.75	39.80	2.52	41.68	94.75
最终方案(R744)	16.12	39.80	0.08	41.68	97.68

案后,预冷和贮藏环节由能源消耗和制冷剂泄漏引起的碳排放量均降低,每从产地运出 1 kg 蔬菜,仅产生 94.75 gCO₂eq,采用此方案可降低 28.98% 的产地碳排放;采用最终方案后,预冷和贮藏环节由制冷剂泄漏引起的碳排放量降低,但由能源消耗引起的碳排放量增加,每从产地运出 1 kg 蔬菜,仅产生 97.68 gCO₂eq,采用此方案可降低 26.78% 的产地碳排放。

最终方案在制冷剂泄漏方面的碳排放最低,但其减排效果弱于过渡方案的原因是 CO₂ 系统在果蔬产地处理领域的技术成熟度不高,导致使用过程中能源消耗引起的碳排放量更大。随着 CO₂ 系统的技术成熟度提高,其能效比不断提升,由能源消耗引起的碳排放量将显著降低,最终方案的减排效果将优于过渡方案。

3.2 蔬菜损失率

除分选环节外,产地处理的其余环节均涉及蔬菜质量损失产生的碳排放,同样采用文献分析法找到各环节降低蔬菜损失率的优化方案。

3.2.1 采收环节

采收环节的蔬菜损失主要为采收损失,其主要包括人为损伤、机械损伤、人为遗漏、市场标准 4 大方面^[10]。在机械采收技术完善、机械制造工艺成熟的条件下,机械采收质量高,因此机械采收的采收损失率低于人为采收。以马铃薯为例,其采收机械研究较成熟,现已投入使用,使用采收机械的采收损失比人工采收低 1.75%^[10]。现有蔬菜基本为人工采收,假设所有蔬菜均采用适合的采收机械,则采收损失率可从 6%^[11] 降至 4.25%。

3.2.2 预冷环节

预冷环节的蔬菜损失主要为预冷过程的蔬菜失重,采用不同预冷方式,预冷损失率各不相同。冷库预冷是低成本的预冷技术,实现方式简单、技术成熟度高,因此不专门提出降低冷库预冷蔬菜失重率的途径,认为其失重率保持不变。在冷水预冷过程中,蔬菜与水通过浸没、喷淋等方式充分接触,假设冷水

预冷过程无蔬菜失重,因此不涉及降低冷水预冷蔬菜失重率的途径。

差压预冷方面,可采用冰浆湿冷差压预冷技术,通过冰浆湿冷营造的高湿度环境,以此降低差压预冷的蔬菜损失率,以西红柿为例,采用差压预冷的蔬菜失重率为 1.5%,采用冰浆湿冷差压预冷新技术的蔬菜失重率为 0.1%^[12],将该研究数值变化率代入现有模型,可将模型中差压预冷失重率的数值从 2.5% 降至 0.17%。

真空预冷的蔬菜损失率与真空压力、喷水量等有关,可通过数值模拟、实验测算等方式,以蔬菜真空预冷损失率最低为目标,得到每种蔬菜的最佳真空预冷参数,并且在产地采用最佳参数完成预冷过程,以此降低真空预冷损失率。目前已有多名学者分别对番薯叶、大叶茼蒿、菠菜和西蓝花等蔬菜在不同环境条件下的失重率等进行测算^[13-16],并且得到失重率最低的真空环境参数。本文计算得到不同蔬菜在其最佳环境参数下真空预冷失重率的平均值为 1.44%,以此代表优化后的真空预冷失重率的数值。

3.2.3 贮藏环节

贮藏环节的蔬菜损失主要是贮藏过程中的蔬菜失重,可采用气调贮藏的方式,调节蔬菜储存环境的气体比例,控制果蔬的呼吸代谢速率,提升蔬菜贮藏的保鲜效果。潘怡丹等^[17]分别对小白菜、油麦菜、芹菜和菠菜在普通冷库和气调冷藏集装箱中贮藏的失重率进行测算,结果表明,气调冷藏集装箱的蔬菜失重率约为普通冷库中蔬菜失重率的 50%。本文采用此结论,现模型中贮藏环节蔬菜失重率为 0.58%^[8] (1 d),优化后贮藏环节蔬菜失重率为 0.29% (1 d)。但气调冷藏库需要增设制氮机、CO₂ 脱除机、乙烯脱除装置等设备,推测能耗增加 30%。

3.2.4 包装环节

包装环节的蔬菜损失主要为后处理过程,即在蔬菜进行包装环节前,将贮藏后蔬菜中的萎蔫、腐烂部分剔除而产生的损失。降低该过程损失率的关键在于提升蔬菜在贮藏环节的保鲜效果。同样采用气调冷藏库代替常规冷库能够提升蔬菜的保鲜效果,减少蔬菜在保鲜过程中的腐损。杨相政等^[18]研究了气调处理对茭白的保鲜效果,研究发现,采用适宜的气调贮藏可以将根腐率降低 83.03%;王丽^[19]对荷兰豆在不同贮藏条件下的贮藏效果进行测算,结果显示在气调贮藏条件下,荷兰豆的腐损率减少 42.81%。此外,李阳等^[20]研究了月桂酰精氨酸乙酯盐酸盐复配保鲜剂对青椒贮藏保鲜效果的影响,结果表明,采用此保鲜剂可减少 73.06% 的腐损率。基于上述研

究,保守估计采用气调库、保鲜剂等方式可将后处理损失减少 40%。

3.2.5 降低蔬菜质量损失方案的预期成效

将现有蔬菜质量损失率和经优化后的蔬菜质量损失率参数分别代入产地处理过程碳排放计算模型,计算得到现有方案、蔬菜损失率优化方案的碳排放情况,如表 7 所示。

由计算结果可知,现有方案在经历全部产地处理过程后,每从产地运出 1 kg 蔬菜,产生 133.41 gCO₂eq;采用蔬菜损失率优化方案后,每从产地运出 1 kg 蔬菜,仅产生 118.09 gCO₂eq,可降低 11.48% 的产地碳排放。

3.3 制冷剂替代与蔬菜损失率联合优化

假设同时应用制冷剂替代和蔬菜损失率优化方

表 7 蔬菜腐损率优化方案的产地碳排放量
Tab.7 Carbon emissions at the production area of the vegetable spoilage rate optimization plan

项目	gCO ₂ eq/kg				
	能源消耗	蔬菜腐损	制冷剂泄漏	材料消耗	总和
现有方案	11.53	39.80	40.39	41.68	133.41
蔬菜损失率优化方案	11.58	25.22	39.62	41.68	118.09

案,并将碳减排的所有可行路径应用于联合优化方案,得到现有方案和优化方案工艺如图 2 所示。并将优化前后参数分别代入产地处理过程碳排放计算模型(外包装材料选用瓦楞纸箱),计算得到现有方案、制冷剂泄漏与蔬菜损失率联合优化方案的碳排放情况,如表 8 所示。

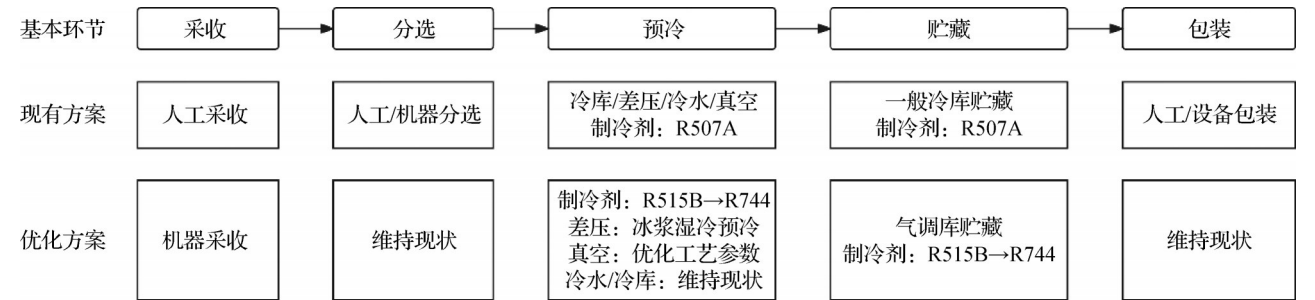


图 2 现有方案和优化方案的工艺图
Fig.2 Process diagrams of the existing scheme and the optimized scheme

表 8 联合优化方案的产地碳排放量
Tab.8 Carbon emissions at the production area of the joint optimization plan

项目	gCO ₂ eq/kg				
	能源消耗	蔬菜腐损	制冷剂泄漏	材料消耗	总和
现有方案	11.53	39.80	40.39	41.68	133.41
联合优化方案	16.24	25.22	0.08	41.68	83.23

由计算结果可知,现有方案在经历全部产地处理过程后,每从产地运出 1 kg 蔬菜,产生 133.41 gCO₂eq;采用联合优化方案后,每从产地运出 1 kg 蔬菜,仅产生 83.23 gCO₂eq,可降低 37.62% 的产地碳排放。

4 结论

本文基于已建立的产地处理过程的碳排放计算模型,采用敏感度分析法分别计算了环节质量损失率 L_x 、环节碳排放因子 a_x 和碳排放来源 b_x 的敏感度,分析得到产地处理过程碳减排的杠杆点为制冷剂泄漏和蔬菜损失率。根据碳减排关键点位,采用文献分析法对由制冷剂泄漏和蔬菜质量损失引起的碳排

放进行分析,提出碳减排可行路径,并计算预期成效。得到结论如下:

1)在制冷剂泄漏减排方面,采用 R515B 作为过渡方案、R744 作为最终方案;采用 R515B 过渡方案,预冷和贮藏环节由能源消耗和制冷剂泄漏引起的碳排放量均降低,可降低 28.98% 的产地碳排放;采用 R744 最终方案,预冷和贮藏环节由制冷剂泄漏引起的碳排放量降低,但由能源消耗引起的碳排放量增加,总体可降低 26.78% 的产地碳排放。

2)在蔬菜质量损失方面,对采收、预冷、贮藏环节分别采取机械采收、优化预冷技术、气调贮藏等方式减少产地处理过程中的蔬菜损失率,计算得到采用蔬菜损失率优化方案后,可降低 11.48% 的产地碳排放。

3)将制冷剂泄漏和蔬菜损失率碳减排优化方案联合应用,可降低 37.62% 的产地碳排放。

参考文献

[1] 孙颖,张聪,曹蕊,等.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. (Sun Ying, Zhang Cong, Cao Rui, et al. Analysis and research on precooling of agricultural products in the "first one kilometer" of producing areas[J]. Logistics Sci-Tech, 2022, 45(20): 25-27.)
- [2] Hu Guangwen, Mu Xianzhong, Xu Ming, et al. Potentials of GHG emission reductions from cold chain systems: case studies of China and the United States [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118053.
- [3] 胡百灵, 赵子琪, 姚冠新. 果蔬冷链物流碳排放测算及控制[J]. 财会月刊, 2019, 40(5): 119-124. (Hu Bailing, Zhao Ziqi, Yao Guanxin. Measurement and control of carbon emission in cold chain logistics of fruits and vegetables [J]. Finance and Accounting Monthly, 2019, 40(5): 119-124.)
- [4] 李斌, 刘斌, 陈爱强, 等. 基于冷链模式的某果蔬碳足迹计算[J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 158-166. (Li Bin, Liu Bin, Chen Aiqiang, et al. Calculation of carbon footprint of fruits and vegetables based on cold chain model [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(2): 158-166.)
- [5] 蔡依平, 张文娟, 张世翔, 等. 基于生命周期评估的冷链物流碳足迹计算[J]. 物流技术, 2015, 34(1): 120-123. (Cai Yiping, Zhang Wenjuan, Zhang Shixiang, et al. Calculation of carbon footprint of cold chain logistics based on life circle assessment [J]. Logistics Technology, 2015, 34(1): 120-123.)
- [6] 李靖, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 32-37. (Li Jing, Xie Ruhe, Liu Guanghai, et al. Development of new low-temperature phase change material and equipment used in refrigerated transportation [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 32-37.)
- [7] 王智忆, 陆敬筠. 考虑低碳的冷链物流车辆配送路径优化[J]. 科技管理研究, 2017, 37(17): 228-232. (Wang Zhiyi, Lu Jingyun. Optimizing the distribution path of low-carbon cold chain logistics vehicles [J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(17): 228-232.)
- [8] 赵建勋, 田长青, 唐明生, 等. 蔬菜产地处理过程碳排放模型建立与计算分析[J]. 冷藏技术, 2024, 47(3): 6-11. (Zhao Jianxun, Tian Changqing, Tang Mingsheng, et al. Development of carbon emission model of vegetable treatment process in producing area and emission analysis [J]. Journal of Refrigeration Technology, 2024, 47(3): 6-11.)
- [9] 蔡翼飞, 魏后凯, 吴利学. 我国城市高端制造业综合成本测算及敏感度分析[J]. 中国工业经济, 2010(1): 34-44. (Cai Yifei, Wei Houkai, Wu Lixue. A sensitivity analysis of high-end manufacturing development to composite cost in China [J]. China Industrial Economics, 2010(1): 34-44.)
- [10] 张敏. 马铃薯供应链主要环节实物及其价值损耗研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. (Zhang Min. A study on the physical and value loss of the main process of potato supply chain [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.)
- [11] 阎志琪. 中国蔬果供应链生物质废弃物产排特征研究[D]. 昆明: 云南大学, 2022. (Yan Zhiqi. Study on the characteristics of biomass waste generation and discharge with the vegetable and fruit supply chain in China [D]. Kunming: Yunnan University, 2022.)
- [12] 黄逸宸, 武卫东, 黄华, 等. 应用于冰浆湿冷差压预冷系统的包装箱开孔结构实验研究[J]. 制冷技术, 2024, 44(2): 53-60. (Huang Yichen, Wu Weidong, Huang Hua, et al. Experimental study on opening structure of the packaging box applied to ice slurry wet cooling differential pressure precooling system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2024, 44(2): 53-60.)
- [13] 刘琼瑜, 池东, 龙成树, 等. 番薯叶真空预冷降温特性的试验与模拟[J]. 现代农业装备, 2025, 46(1): 75-83. (Liu Qiongyu, Chi Dong, Long Chengshu, et al. Experiment and simulation of vacuum precooling characteristics of sweet potato leaves [J]. Modern Agricultural Equipments, 2025, 46(1): 75-83.)
- [14] 潘嘉信. 叶菜类蔬菜真空预冷特性理论分析与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017. (Pan Jiaxin. Theoretical analysis and experimental research on vacuum pre-cooling performance of leaf vegetables [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.)
- [15] 解新方, 张洁, 王志东. 真空预冷终温和补水率对菠菜采后贮藏品质影响[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 166-169. (Xie Xinfang, Zhang Jie, Wang Zhidong. Effect of terminal temperature and compensated water on vacuum precooling of spinach and its effect on storage quality [J]. The Food Industry, 2020, 41(5): 166-169.)
- [16] Santana J C C, Araújo S A, Alves W A L, et al. Optimization of vacuum cooling treatment of postharvest broccoli using response surface methodology combined with genetic algorithm technique [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 209-215.
- [17] 潘怡丹, 于曼, 过叶青, 等. 气调冷藏集装箱对蔬菜贮藏的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 313-320. (Pan Yidan, Yu Man, Guo Yeqing, et al. Effect of air-conditioned refrigerated container on preservation of vegetables [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 313-320.)
- [18] 杨相政, 吴立忠, 王达, 等. 气调处理对茭白保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(4): 39-42. (Yang Xiangzheng, Wu Lizhong, Wang Da, et al. Effect of

controlled atmosphere treatment on storage quality of water bamboo[J]. *Storage and Process*, 2018, 18(4): 39-42.)

- [19] 王丽. 荷兰豆气调保鲜实验及其传热传质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2017. (Wang Li. Snow peas modified atmosphere experiment and its heat and mass transfer [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2017.)
- [20] 李阳, 邓伶俐, 徐晓卉, 等. 月桂酰精氨酸乙酯盐酸盐复配保鲜剂对青椒保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 201-206. (Li Yang, Deng Lingli, Xu Xiaohui, et al. Effect of compound N α -lauroyl-L-arginate ethylester preservative on the preservation of green bell

pepper[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 201-206.)

通信作者简介

田长青,男,研究员,中国科学院理化技术研究所,010-82543696, E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn。研究方向:冷链技术与装备、汽车热系统、热泵技术。

About the corresponding author

Tian Changqing, male, researcher, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 86-10-82543696, E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn. Research fields: cold chain technology and equipment, automotive thermal systems, heat pump technology.