

DOI: 10.53104/xdkxts.2025.01.02.001

海南熱帶水果冷鏈運輸中溫度波動對果實品質與貨損率的影響

黃楠¹

1. 海南大學，海南 海口 570228

摘要：海南是我國重要的熱帶水果種植區域，核心品類包含芒果、荔枝、火龍果、菠蘿蜜和蓮霧等，相關產品暢銷國內外市場。冷鏈物流是保障水果長途流通品質的核心環節，溫度不穩定仍是突出難題，其會加快果實呼吸代謝，引發冷害或熱害，助長微生物繁殖，縮減貨架期限，提升損耗比例，造成明顯經濟損失。本文剖析海南熱帶水果冷鏈物流中溫度不穩定對水果品質及貨損比例的影響機制，探究不同溫度波動程度對應的理論體系及損耗路徑，參考發達國家與熱帶水果出口國的溫度管控實踐經驗。基於上述分析，本文提出針對性溫度管控優化方案，強化溫度穩定性，減少損耗量，提升海南熱帶水果供應鏈的綜合競爭力。

關鍵字：冷鏈運輸；溫度波動；熱帶水果；品質保持；損耗率；海南

The Impact of Temperature Fluctuations on Fruit Quality and Loss Rate in Cold Chain Transportation of Tropical Fruits in Hainan

HUANG Nan¹

1. Hainan University, Haikou 570228, P.R.China

Correspondence to: HUANG Nan; Email: huangnannn@yeah.net

Abstract: Hainan is an important tropical fruit-growing region in China, with core varieties including mango, lychee, dragon fruit, jackfruit, and wax apple. These products are popular in both domestic and international markets. Cold chain logistics are crucial for ensuring the quality of fruits during long-distance transportation, yet temperature instability remains a major challenge. Such fluctuations can accelerate fruit respiration and metabolism, cause chilling or heat damage, promote microbial growth, shorten shelf life, increase loss rates, and result in significant economic losses. This paper analyzes the mechanisms through which temperature instability in Hainan's tropical fruit cold chain logistics affects fruit quality and loss ratio, exploring the theoretical framework and loss pathways associated with different degrees of temperature fluctuation, while drawing on temperature control practices from developed countries and major tropical fruit exporters. Based on this analysis, the paper proposes targeted temperature management optimization strategies to enhance temperature stability, reduce losses, and improve the overall competitiveness of Hainan's tropical fruit supply chain.

Key words: cold chain transportation; temperature fluctuation; tropical fruits; quality preservation; loss rate; Hainan

收稿日期：2025-08-14 返修日期：2025-12-04 錄用日期：2025-12-12 出版日期：2025-12-22

通信作者：huangnannn@yeah.net

引用格式：黃楠. 海南熱帶水果冷鏈運輸中溫度波動對果實品質與貨損率的影響[J]. 現代科學探索, 2025, 1(2): 1-11.

引言

海南是我國重要的熱帶水果種植區域，重點出產芒果、荔枝、火龍果、菠蘿蜜、蓮霧等優質特色品類，近年海南自貿港建設持續推進，跨區域農產品流通效率不斷提升，熱帶水果除滿足本地消費需求外，還大量銷往內陸地區並出口至東南亞、中東等海外市場，對運輸時效與品質保障提出更為嚴格的標準。

冷鏈物流是維繫熱帶水果長距離流通品質的核心環節，相關研究顯示，健全的冷鏈體系能將果蔬腐損率從常溫運輸狀態下的 15% - 30% 控制在 5% - 10% 的較低水準，海南熱帶水果冷鏈運輸實際運營中仍存在明顯短板，冷藏車輛保有數量不足、預冷設施佈局不均衡、運輸規範缺乏統一性等問題表現突出，溫度波動作為影響水果品質與貨損比例的關鍵不穩定因素，在裝卸作業、中途停靠、製冷設備故障等環節極易出現暫態升降現象。

溫度的不穩定變化直接加快果實呼吸作用與代謝進程，還可能誘發冷害問題、促進微生物滋生，最終導致果實口感變差、色澤退變、腐爛概率上升，以芒果為例，運輸環境溫度在 10 ℃左右時，波動幅度超出 $\pm 3^\circ\text{C}$ ，果皮就容易出現褐斑且軟化速度明顯加快，對於荔枝這類高呼吸強度的水果，溫度短時間內升高會大幅加速褐變反應，使其商業可售週期縮短 1 - 3 天，這些品質層面的改變影響消費者食用體驗，還直接加重供應鏈各環節的經濟損耗。

當前國內外關於溫度波動的研究多集中在儲藏環節，針對冷鏈運輸過程動態溫度管控的系統性研究相對匱乏，海南產業實際中，水果運輸距離通常較長，海口至北京的運輸里程約 3000 公里，運輸週期需要 3 - 4 天，且運輸過程涉及輪渡、鐵路、公路等多種方式銜接，使得溫度波動風險更具複雜性與多樣性，深入探究溫度波動對熱帶水果品質與貨損率的影響機理，結合海南冷鏈運輸的獨特特點提出針對性溫控優化建議，對增強海南水果供應鏈競爭實力、減少經濟損失具有重要的理論價值與實踐意義。

本文以海南主要熱帶水果為研究物件，分

析冷鏈運輸環節溫度波動對果實品質及貨損率的影響路徑，借鑒國內外冷鏈管理實踐經驗，提出適配海南產業特徵的溫控管理優化策略，為海南熱帶水果冷鏈體系的完善提供參考依據。

1 海南熱帶水果冷鏈運輸現狀與問題分析

海南地處熱帶季風氣候帶，全年高溫高濕，適宜各類熱帶水果培育，近年依託海南自貿港相關政策支持及交通基礎設施持續完善，熱帶水果產業快速發展，海南省統計局資料顯示，2023 年全省熱帶水果總產量突破 470 萬噸，芒果、荔枝、火龍果的產出規模位居全國前列^[1]，消費需求升級與跨區域電商銷售崛起推動海南水果大量湧入珠三角、長三角、京津冀等遠距離消費市場，對運輸品質保障的依賴度明顯提升。

冷鏈物流是維繫熱帶水果長途運輸品質與市場價值的核心，相較於常溫運輸，冷鏈能顯著延緩果實呼吸強度與成熟進程，減少果實腐爛與水分流失，從全產業鏈視角，海南熱帶水果冷鏈運輸水準仍存在顯著短板。

冷鏈基礎設施佈局失衡

海南冷藏車輛保有量偏少，行業協會統計資料顯示，2023 年全省冷藏車總量不足 2500 輛，且多集中於海口、三亞等核心城市，部分縣域缺乏專業冷鏈運輸支撐能力，產地預冷設施普及比例較低，不少水果採收後長時間處於常溫環境，未能完成“採收後即時預冷”的標準化處理流程^[2]。

運輸環節溫度波動現象頻繁

運輸線路特性導致海南水果冷鏈常需跨海輪渡或鐵路中轉，港口或網站裝卸作業時，運輸車輛需長時間關閉製冷裝置，車廂內部溫度短時間快速上升，夏季高溫時段溫度上升速率可達每分鐘 $0.3 - 0.5^\circ\text{C}$ ^[3]，部分老舊冷藏車輛製冷性能不足，溫度控制精度較差，難以維持穩定的低溫運輸環境。

溫度管控標準尚未統一

當前海南熱帶水果冷鏈運輸環節未建立統一行業溫控規範，不同企業多憑自身經驗確定運輸溫度，例如芒果運輸溫度，部分企業設定為 12°C ，另有企業設定在 10°C 或更低區間，缺乏依託果實生理特徵的科學支撐，這種溫度設定差異影響運輸品質，增加行業整體管理難度。

經濟成本與管理水準制約溫控效果

部分中小型運輸企業為壓縮運營開支，縮短製冷裝置運行時長或混裝不同品類水果，導致車廂內溫度分佈不均，司機與裝卸作業人員溫度管控意識薄弱，對溫度波動危害缺乏足夠認知，使得運輸全過程溫控執行存在諸多漏洞。

總體而言，海南熱帶水果冷鏈運輸近年取得一定進步，溫度波動問題仍普遍存在，成為影響水果品質與貨損比例的關鍵風險要素，後續研究需深入剖析溫度波動的作用機理與損耗路徑，結合海南地理特徵與物流行業特點，探尋科學高效的溫控優化路徑。

2 溫度波動影響果實品質的機理

海南熱帶水果採收後仍維持複雜生理代謝過程，涵蓋呼吸代謝、乙烯生成、細胞分裂及組織修復等，這些過程的活躍程度與環境溫度密切相關，冷鏈運輸的核心工作之一是通過穩定適配的低溫條件，抑制不必要的代謝反應，延緩果實成熟與衰老進程，實際運輸場景中，溫控設備性能起伏、裝卸作業環境暴露、能源供應波動、人為操作偏差等因素，常造成運輸環境溫度變動，對熱帶水果品質形成多維度影響。

環境溫度升高，果實呼吸強度與乙烯釋放量呈指數級上升，引發一系列連鎖效應，細胞內有機酸快速消耗，糖分代謝進程加快，風味成分平衡狀態遭到破壞，果肉出現酸度降低、甜味過度積聚、芳香物質散失，同時酶促反應速率提升，促使果肉軟化、褐變等衰敗現象提前發生，芒果、荔枝、龍眼這類高糖高水分熱帶水果，短時間溫度攀升就足以明顯縮短商品流通週期^[4]。

溫度降至臨界值以下，部分熱帶水果顯現冷害症狀，香蕉在 12°C 以下易出現果皮暗褐、果肉失水，番木瓜處於 7°C 以下環境會產生水

浸狀斑點及組織壞死，冷害伴隨細胞膜脂質相變，膜結構喪失流動性與完整性，細胞通透性增加，胞內酚類物質與多酚氧化酶接觸，引發快速褐變，這些損傷在回溫過程中往往進一步加重，細胞已失去正常滲透調節能力，呼吸與蒸騰速率異常升高。

溫度頻繁變動進一步加劇果實損傷，反復冷熱交替造成細胞膜多次膨脹與收縮，加速膜蛋白降解及脂質過氧化，導致果實質構劣化、組織鬆散，這種環境變化還誘發次生代謝產物異常累積，如苦味物質、代謝毒素等，影響消費者感官接受程度。

微生物生態層面，溫度波動極易打破冷鏈運輸中微生物群落相對平衡，溫度處於病原微生物適宜生長區間($15\text{--}25^{\circ}\text{C}$)時，炭疽病菌、青黴、灰黴等腐敗真菌及部分細菌快速增殖，即便後續降溫至抑制範圍，這些微生物仍可能以休眠孢子形式存活，在終端銷售或消費者儲藏階段重新活躍，顯著提高果實腐爛風險與貨損比例。

海南熱帶水果受溫度波動影響更為複雜嚴重，海南出口類水果如芒果、火龍果、菠蘿蜜等，往往需要經歷跨島運輸與長距離物流，涉及港口集散、船舶運輸、冷庫中轉及多次裝卸作業，這些環節中溫控中斷的累積效應，常使運輸全程平均溫度波動幅度達到 $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$ ，這一區間已足以明顯縮短果實貨架週期，海南濕熱氣候條件下，冷鏈一旦出現管控缺口，果實溫升速度極快，微生物繁殖適宜視窗隨之擴大，造成的品質下降基本難以逆轉。

溫度波動是影響海南熱帶水果運輸品質的技術性難題，更是決定其國內外市場競爭能力的關鍵風險要素，維持溫度穩定並降低波動幅度，已成為海南熱帶水果冷鏈體系中提升品質保持率與減少貨損比例的核心任務。

3 溫度波動與貨損率關係的理論分析

3.1 溫度波動與貨損率的相關性框架

海南熱帶水果冷鏈運輸中，溫度變動與貨損比

例存在極強關聯性，這種關聯既表現為直接物理損害，還會通過多重生理生化反應間接影響果實品質，熱帶水果多為高水分高糖分且組織結構嬌嫩的農產品，適宜儲運的溫度範圍較窄，對溫度變動的敏感程度遠超溫帶水果，運輸期間溫度出現異常變動，果實呼吸強度會快速提高，能量消耗加速，可溶性固形物含量降低，酸度失衡，推動果實衰老與軟化^[5]。

溫度變動對貨損比例的作用呈現階段性與累積效應，運輸初期，短時間小幅溫度變動或許僅造成果實內部代謝輕微加快，外觀無明顯改變，這類早期微損傷會在後續運輸及銷售環節逐步放大，使保鮮週期顯著縮短，運輸中後期，多次溫度變動疊加的情況下，果實組織細胞膜通透性降低，抗病能力減弱，極易遭受真菌等微生物侵染，形成明顯腐爛區域，這一過程往往呈現非線性特徵，貨損比例在溫度變動累積到特定程度後會急劇上升。

冷鏈系統實際運行中，溫度變動可能源於多個環節，裝卸時車廂或冷庫門頻繁啟閉、冷機故障或能耗調節不當、運輸途中環境溫度驟變、車載溫控設備監測精度不足等，這些因素常在不同階段相互疊加，使溫度變動成為影響貨損比例的系統性風險因數。

構建關聯性框架需引入多維參數展開分析，溫度變動的幅度、持續時長、發生頻次，果實適宜儲運溫度範圍及耐受臨界值，不同品種的呼吸強度與耐冷敏感程度等，通過這些因素的組合可建立預測模型，將溫度變動轉化為貨損比例的量化指標，鳳梨、芒果等呼吸躍變型水果，溫度每升高 2°C 可能使貨損比例提升 5%—8%，椰子等耐儲性較強的水果，受影響幅度相對較小。

該框架的應用價值在於，能闡釋溫度變動與貨損比例之間的因果機制，還能為運輸環節的風險評估與幹預提供量化依據，通過持續監測與歷史資料分析，可提前識別高風險運輸條件，採取優化裝卸作業流程、提高溫控設備回應速度、設置動態溫度預警等預防措施，最大限度降低溫度變動引發的經濟損失與品質下滑。

3.2 不同溫度波動幅度的損耗路徑

海南熱帶水果對冷鏈運輸中的溫度穩定性

依賴度極高，不同幅度的溫度變動會經由不同生理生化路徑作用於果實，形成多樣化損耗路徑，這些路徑不僅取決於溫度變動的幅度，還與波動持續時長、發生頻次及水果品種特性密切相關^[6]。

輕度波動情境下，溫度變動幅度一般在 ± 1 °C 範圍內，持續時長較短，對果實的影響主要表現為呼吸速率與水分蒸發速率的微弱提升，此時損耗多體現為品質緩慢下滑，例如果皮光澤減弱、風味物質輕微散失，外觀仍能維持較好商品性，這類輕度損傷在銷售末期可能轉化為明顯軟化與失水，加速果實喪失市場競爭力。

中度波動情境下，溫度變動幅度介於 ± 2 °C 至 ± 4 °C 之間，果實代謝活動顯著加快，呼吸消耗大量有機物質，組織細胞膜穩定性遭到破壞，芒果、火龍果等呼吸躍變型水果，這一溫度變動區間可能引發提前成熟，導致硬度下降、糖酸比例失衡，同時微生物繁殖速度明顯提高，果實更易在運輸中或銷售初期出現病斑與腐爛現象，大幅提升貨損比例。

重度波動情境下，溫度變動幅度超出 ± 5 °C，特別是從低溫向高溫的急劇轉變，會導致果實發生不可逆轉的品質劣變，香蕉、木瓜等部分熱帶水果，劇烈溫度變動可能引發“冷害”或“熱害”反應，表現為果皮褐變、斑點加速擴散、果肉水漬化等，這類損傷通常發生在波動後的 24—48 小時內，幾乎無法通過後續冷卻或保鮮手段逆轉，造成的貨損不僅是數量減少，更包括商品價值的大幅貶損。

不同溫度波動幅度對應的損耗路徑還可能形成疊加效應，運輸初期出現的輕度波動若未得到控制，中後期疊加一次中度或重度波動，會使早期潛在損傷快速放大，導致品質在短時間內集中下滑，這種“鏈式反應”是冷鏈運輸風險管理的重點關注對象，需在監測與幹預中特別防範。

這種分級化的損耗路徑分析，有助於在冷鏈運輸中制定差異化風險控制策略，針對輕度波動，可通過縮短流通時長、優化末端配送速度減少影響，針對中度與重度波動，則需強化源頭裝車溫控、提升車輛隔熱性能，確保溫控設備全程維持高精度運行，避免因一次性失控

造成大規模品質與經濟損失。

3.3 成本—損耗平衡理論在冷鏈管理中的應用

海南熱帶水果冷鏈運輸中，溫度控制的穩定性直接影響運輸環節損耗程度，溫度管控品質與運輸投入成本緊密關聯，成本—損耗平衡理論核心是運輸環節需在保鮮投入與品質損失之間探尋最佳均衡狀態，讓綜合成本（運輸投入成本 + 損耗成本）降至最低，實現經濟收益與品質保障的最優匹配。

這一理論框架下，運輸全過程的綜合成本包含兩方面內容：

其一為管控成本，涵蓋冷鏈裝備採購及日常維護、能源耗費、溫度監測體系搭建等相關支出，這部分成本隨溫度控制精度及運輸管理品質的提升而增加，要維持全程 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的溫度穩定，需採用高性能製冷裝備與多點即時監測系統，所需投入遠高於 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 精度的溫度管控方案。

其二為損耗成本，即溫度變動引發的果實品質下滑、可售數量縮減及銷售價格走低造成的經濟損耗，損耗成本隨溫度控制精度的提升而下降，但下降態勢逐漸放緩，溫度控制精度達到特定水準後，繼續提升精度實現的損耗降低效果相對有限。

海南熱帶水果呼吸代謝旺盛，對溫度變動敏感度高，損耗成本曲線在溫度控制精度較低的區間呈現急劇下降特徵，溫度控制精度從 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 提升至 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 時，能明顯降低損耗比例，進一步將精度提升至 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 乃至 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，雖可減少部分品質損失，額外增加的能源及裝備成本卻可能超出損耗減少帶來的經濟收益。

實際運輸決策階段，需結合水果品種特性、運輸里程、季節氣候及市場價格波動設定溫度控制精度，運輸高價值且耐儲能力弱的水果（如榴槤、山竹）時，可採用更高精度的溫度管控方案，降低高額的單果經濟損耗，對於耐儲性較強的品類（如椰子、香蕉），可在保障基礎品質的前提下選取成本較低的溫度管控標準，達成整體經濟收益最大化。

該理論在冷鏈管理中的有效應用，依賴於資料化監測及評估體系的支撐，通過記錄過往

運輸批次的溫度管控投入、溫度變動資料及實際損耗比例，可構建適配不同水果品類的成本—損耗關聯模型，運輸企業能夠基於模型預判不同溫度管控方案對應的經濟成效，選定最優管理策略，海南熱帶水果的出口與內銷業務中，這類平衡決策有助於降低運輸環節的綜合成本，穩固市場競爭力的同時提高產業整體盈利水準。

3.4 典型案例分析

基於海南熱帶水果冷鏈運輸中溫度變動與貨損比例關係的理論分析，引入具體實例可更直觀展現溫度管控在不同運輸場景下對果實品質與損耗的實際作用，本節選取三類具有代表性的運輸模式，包括出口物流、內銷長途運輸及短途區域配送，通過案例探析溫度變動在不同條件下的表現特徵及管理啟示。

案例一：海南金煌芒出口新加坡的海運物流

某出口企業 2022 年夏季向新加坡批量出口金煌芒，運輸里程約 1900 公里，全程採用海運冷藏集裝箱，依據出口商提供的溫度記錄設備資料，前 3 天運輸溫度穩定維持在 13°C ，裝卸港口等候期間，製冷裝置短暫故障，集裝箱內溫度升至 18°C 並持續約 7 小時，抵達新加坡後，檢驗發現約 12% 的芒果出現果皮發黑、果肉過早軟化現象，市場銷售價格較預期下降 18%，經後續核算，溫度變動造成的經濟損失高達 4.6 萬元人民幣，該案例顯示，短時溫度異常會對熱帶水果出口品質產生顯著影響，果實臨近呼吸躍變高峰期時，溫度變動會加速成熟與腐敗進程。

案例二：海南鳳梨北運北京的公路物流

2023 年春季，一批海南鳳梨通過公路運輸發往北京，全程約 2800 公里，運輸時長約 3.5 天，承運商為壓縮運輸成本，將溫度控制精度設定於 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 範圍，運輸途中，受北方晝夜溫差大影響，車廂內溫度夜間最低降至 5°C ，白天最高升至 12°C ，到達目的地後，批發市場檢測發現部分鳳梨出現低溫傷害（表皮出現褐色斑紋）且糖度降低，整體損耗比例為 8.5%，與以往採用 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 精度運輸的批次相比，雖節省約 15% 的能源費用，損耗增加帶來的直接經濟損耗超過節省成本的兩倍，此案例凸顯長途運輸中忽

視溫度管控穩定性對果實品質的負面影響，為成本—損耗平衡提供實際參考依據。

案例三：海南火龍果本島內短途配送的溫度管控疏漏

海南本島內，某水果批發商從種植基地向海口市內商超配送火龍果，全程不足 100 公里，運輸時長約 2 小時，因運輸路程較短，承運方未啟動冷鏈裝置，借助凌晨低溫環境實施自然運輸，當日氣溫驟升至 32℃，車廂內溫度在運輸後半程快速接近外界溫度，導致果實到貨後 24 小時內出現失水比例上升、果皮色澤暗沉等品質劣化問題，造成約 5% 的貨損比例，損失比例不大，但火龍果單價較高，直接影響商超的銷售利潤，該案例表明，短途運輸中溫度變動仍可能引發明顯品質變化，高溫季節，缺乏基礎溫度管控措施會放大風險隱患。

這三個實例共同表明，溫度變動的影響與運輸距離、運輸時長相關，還與運輸環節的溫度管控策略、果實成熟程度、季節環境條件密切相關，對於海南熱帶水果，構建全程溫度管控監測體系、制定品種差異化的溫度控制規範，在關鍵環節（裝卸作業、等候期間、中轉運輸）實施風險防控，是降低貨損比例、穩定果實品質的核心舉措。

4 國內外冷鏈運輸溫控管理經驗借鑒

4.1 發達國家的溫控經驗

全球冷鏈運輸領域，發達國家的溫度管控模式始終保持領先水準，其制度設計、技術應用與管理方法在控制溫度變動、減少貨損比例方面成效突出，美國、日本及歐盟各成員國等，在熱帶水果及其他易腐農產品的運輸環節，廣泛構建“全程可控、全程可溯”的溫度管控體系，這些實踐經驗體現在硬體設施的先進配置，也反映在制度執行力度、行業標準化程度及資訊化技術的深度融合。

美國冷鏈運輸環節由多部門協同監管，運輸過程中配置精度可達 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的電子測溫記錄設備，借助物聯網系統完成資料即時上傳與動態

監控，溫度超出限定範圍，系統會自動向承運企業與貨主發送預警資訊，還可在車輛行駛過程中通過遠端操作調節製冷設備功率，行業內廣泛推行“產地預冷—恒溫運輸—快速配送”的三段式溫度管控方案，產地預冷階段通過強制空氣冷卻快速將果溫降至適宜區間，恒溫運輸階段保持溫度變動不超過 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，大幅延長熱帶水果保鮮週期，減少運輸途中的生理病害。

日本冷鏈體系以精細管控與運行穩定為突出特點，在熱帶水果運輸中嚴格把控溫度，同步調控相對濕度與氣體構成，針對芒果、鳳梨等水果採用溫濕雙控模式，結合氣調技術通過調低氧氣占比、提高二氧化碳占比抑制果實呼吸作用，延緩成熟與衰老進程，日本港口冷藏裝備與運輸車輛達成無縫對接，裝卸操作中果實基本不暴露在常溫環境，顯著降低裝卸環節的溫度變動，行業協會定期對冷鏈企業開展分級評定，評定結果直接關係企業市場准入資格與合作資源，這種制度化的行業競爭環境有效提升整體服務品質。

歐盟國家在溫度管控中凸顯法規統一化與跨境協同優勢，明確各類水果的適宜運輸溫度範圍及允許變動幅度（通常為 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ），運輸過程中普遍採用多點測溫監測技術，在集裝箱或冷藏車內佈設多個測溫探頭，捕捉空間內可能存在的局部溫差，這些資料經由雲服務平臺向貨主、承運方及監管部門共用，實現全程透明化與可追溯性，近年歐盟探索將區塊鏈技術融入冷鏈管控，使溫度資料、防篡改記錄與責任追溯有機結合，大幅提升溫控資料的可信度與管理效率。

綜合來看，發達國家冷鏈運輸溫控管理的優勢集中體現在四個方面：一是法規標準的剛性約束作用，確保溫度管理有章可循、執行到位；二是高精度溫度管控技術的普及推廣，降低溫度變動風險；三是全程可溯的資訊化管理體系，提升透明度與管理回應效率；四是行業自律機制與市場競爭環境，推動冷鏈企業持續優化服務水準。

這些實踐經驗對海南熱帶水果冷鏈運輸有著重要參考價值，海南在硬體設施建設、法規政策

配套、資訊化管控及行業競爭機制建設方面協同發力，有望顯著降低運輸過程中的溫度變動幅度，減少果實品質劣變與貨損比例，為熱帶水果產業的品牌建設與國際化發展筑牢基礎。

4.2 热帶水果出口國的溫控模式

全球熱帶水果供應體系裡，泰國、菲律賓、越南等出口國依託豐富的熱帶水果品類儲備及長期國際貿易實踐，構建起成熟度較高且兼具地域特色的冷鏈溫度管控模式，這些國家的溫度管控在硬體水準與資訊化程度上不及部分發達國家，在應對高溫高濕環境、長距離跨境運輸及成本管控等方面積累了獨特實踐經驗。

泰國是全球重要的熱帶水果出口地，其芒果、榴槤、龍眼等產品出口規模位居世界前列，當地冷鏈架構注重“產地初加工與預冷處理”的關鍵作用，多採用水冷、真空預冷等技術在採收後兩小時內快速降低果實溫度，減少呼吸強度與水分蒸發，運輸過程中，泰國企業普遍使用隔熱效果優良的集裝箱，搭配冰塊、冰膠包等輔助控溫措施，應對長途運輸中可能出現的製冷設備波動或能源中斷問題，針對出口中國、韓國等市場的需求，泰國部分大型出口商在集裝箱內加裝多點溫濕度監控系統，確保運輸過程中的環境參數符合進口國檢驗檢疫要求。

菲律賓在香蕉、鳳梨等大宗熱帶水果出口中採用“單品專線”運作模式，即為單一品類水果制定專屬冷鏈運輸規範與操作流程，例如出口香蕉採收後會立即進入分級、清洗及浸泡抗菌液處理步驟，隨後轉入溫度約13°C的預冷間進行梯度降溫處理，避免“冷害”現象發生，運輸階段維持恒溫狀態，變動範圍通常不超過±1°C，貨櫃內設置空氣迴圈裝置，減少局部溫差引發的品質差異，菲律賓還廣泛推行“港口直裝”模式，縮短貨物在港口的堆存時間，降低裝卸過程中的溫度變動風險。

越南近年在火龍果、芒果、荔枝等出口業務中逐步搭建區域性冷鏈集散樞紐，吸納部分發達國家的溫度管控技術，與泰國、菲律賓不同，越南更注重與進口國標準的銜接，部分出口企業在集裝箱冷藏設備中配備遠端資料傳送功能，使買方可即時監控溫度曲線，這種透明

化管控模式在提升客戶信任度、減少貿易糾紛方面發揮積極作用，受冷鏈基礎設施整體薄弱、運輸裝備更新進程遲緩影響，越南長距離運輸中仍存在溫度變動較大的問題，一定程度上影響果實抵達目的地時的外觀與口感。

熱帶水果出口國在溫度管控中形成的共性經驗包括：高度重視采後預冷工作，根據品類特性設定專屬運輸標準，結合經濟條件採用靈活溫控措施，在關鍵環節盡可能縮短常溫暴露時長，這些經驗雖在技術先進性上不及發達國家，但在應對高溫環境、成本約束及長途跨境運輸實際條件方面具有較強適應性，對於海南而言，這些國家的做法在采後處理、分品類溫度管控及經濟性方案設計等方面具備一定參考價值，尤其適用於當前海南熱帶水果出口規模持續擴大的背景下，探尋有限投資條件下提升溫度管控水準的路徑。

4.3 對海南的可借鑒要點與局限性

對照泰國、菲律賓、越南等熱帶水果出口國的溫度管控實踐，這些經驗在海南熱帶水果冷鏈運輸體系建設與優化中具備一定參考價值，但引入應用過程中存在適用局限，需要結合本地實際進行篩選與調整。

可借鑒要點方面，采後快速預冷是降低溫度變動、延緩果實衰老的核心步驟，泰國采後兩小時內完成預冷處理的做法值得海南推廣，尤其是針對芒果、火龍果、鳳梨等溫度敏感度較高的品類，通過搭建產地型預冷樞紐、優化冷鏈節點排布，可顯著降低運輸過程中溫度變動的初始風險，分品類定制溫度管控模式有助於減少品質損失，例如菲律賓為香蕉、鳳梨設定精確穩定的運輸溫濕度標準，海南可在龍眼、荔枝、芒果等品類上分別建立相應標準化運輸參數，並納入行業指導性檔，縮短常溫暴露時長是降低貨損比例的關鍵舉措，菲律賓的“港口直裝”與越南的“冷鏈集散樞紐”模式均能減少裝卸環節的溫度變動，這對海南尤為重要，海南水果外運需經港口或冷鏈中轉站，優化裝卸流程可有效減少溫度管控中斷的機會。

局限性方面，海南在冷鏈基礎設施佈局與裝備更新方面仍有短板，尤其是部分農村產區

的預冷及儲藏條件不足，直接複製泰國或菲律賓的高頻預冷模式可能面臨成本與設備保障欠缺的困難，海南熱帶水果的銷售管道與運輸里程呈現多元化特點，部分為短途內銷，部分為長途北運或出口，這種多元化運輸需求意味著單一溫度管控模式難以全面適配所有場景，需結合運輸半徑、品類特性與市場要求制定靈活溫度管控策略，海南冷鏈資訊化管控的整體水準尚有提升空間，越南出口企業常用的遠端溫度監控系統雖能提升透明度，但其在海南的全面推廣可能受到運營成本、技術培訓及終端接受度的限制。

海南借鑒國外經驗時，應在技術引進、模式應用與制度保障三個層面進行本土化適配，技術上可分階段導入遠端監控與多點溫濕度檢測裝備，模式上優先推廣“產地預冷 + 直達運輸”的組合架構以降低中間環節風險，制度上可通過地方行業協會擬定品類溫度管控指南，推動港口與物流企業協同優化裝卸環節，這種有選擇、有針對性的借鑒下，國外經驗才能在海南熱帶水果冷鏈運輸體系中落地並發揮實效。

5 海南熱帶水果冷鏈運輸溫控優化建議

基於前文系統分析，海南熱帶水果冷鏈運輸的溫控優化需以減小溫度變動幅度、延緩品質劣變進程、降低貨損比例為核心導向，結合本地氣候特徵、產業佈局及市場訴求，搭建從產地源頭到終端市場的全鏈條管控方案。

其一，優化產地預冷體系與冷鏈基礎設施配置，海南熱帶氣候使水果採收後易出現呼吸作用加劇、水分快速流失問題，高效預冷成為抑制溫度變動的首要屏障，建議在主要水果產區搭建集中式預冷樞紐，配備真空預冷、強制風冷等多元預冷技術，適配不同品類的特性需求，通過財政補貼與產業扶持政策，引導合作社與龍頭企業協作搭建中小型預冷網站，覆蓋偏遠產區，減少果實採收後長時間暴露在常溫環境中的風險。

其二，構建分品類溫控規範與動態適配機

制，海南水果品類豐富，不同果品對溫度、濕度的適配範圍存在明顯差異，應依託科研機構與行業協會，制定涵蓋芒果、荔枝、火龍果、鳳梨、龍眼等主力品類的運輸溫控參數，將其納入行業推薦規範或地方技術標準，實際運輸過程中，需配備多點溫濕度記錄設備，結合運輸里程、季節氣溫波動及貨物堆碼密度，動態調整製冷強度與通風頻次，避免單一溫控設定引發的能耗浪費或品質損傷。

其三，提升運輸與裝卸環節的協同效能，海南水果外運常涉及港口或冷鏈中轉網站，裝卸過程中的溫控中斷是誘發溫度變動的關鍵因素，建議推動港口、物流園區與果品企業建立裝卸預約機制，縮短貨物露天等候時間，優先配置封閉式裝卸通道或移動冷庫，推廣“產地直達 — 終端市場”的一體化冷鏈運輸模式，減少中途多次裝卸流程，降低溫度失控的潛在風險。

其四，強化冷鏈運輸的資訊化與智慧化管控行能力，通過引入遠端溫控監測系統與物聯網溫濕度傳感設備，實現運輸全程的即時監控與異常預警，貨物抵達後生成完整溫控報告，作為品質溯源與責任界定的依據，這一舉措能提升物流環節的透明度，在貨損發生時為保險理賠提供資料支撐，針對中小運輸企業，可由行業協會或政府部門牽頭搭建共用型溫控監測平臺，降低技術應用的門檻與運營成本。

其五，建立多方協同的溫控管理體系，冷鏈運輸涵蓋種植、加工、物流、銷售等多個環節，單一主體難以實現全程溫控的穩定性，建議在海南省內探索“政府引導 + 行業規範 + 企業自律”的協同模式，由政府出臺冷鏈溫控管理指導檔，行業協會負責標準推廣與專業培訓，企業在執行過程中結合實際開展技術創新與成本優化，設立冷鏈運輸品質評價與激勵機制，對溫控表現優異的企業給予政策扶持與市場推廣資源，形成良性競爭與持續改進的行業氛圍。

通過上述優化策略的統籌實施，海南熱帶水果冷鏈運輸中的溫度變動有望得到有效管控行，果實品質與貨損比例將得到顯著改善，能夠提升本地水果在國內外市場的競爭實力，為

全省熱帶農業的高品質發展筑牢基礎。

6 對海南水果供應鏈的綜合影響

冷鏈運輸溫度管控優化直接作用於水果運輸過程中的品質與損耗程度，對海南水果供應鏈的結構、運作效能和市場表現產生系統性作用^[7]，溫度波動控制能力的提升，意味著從產地到消費者的各個環節都將獲得更高的穩定性與可預期性，這種變化將通過以下方面體現。

其一，對上游種植端而言，穩定的溫度管掟能夠明顯減少采後損耗隱患，使種植戶在銷售與議價過程中擁有更足的主導權，以往冷鏈穩定性不足，部分農戶在銷售高峰期不得不以偏低價格迅速銷售，避免品質下滑造成的損失，溫度管控改善後，農戶可延長銷售週期，選擇更有利的市場時機，進而提升收入水準，品質穩定會推動種植者更注重優質化種植方式，形成從種植到運輸的正向激勵效應。

其二，對中游物流與批發環節而言，溫度管控優化提高了運輸的可預期性與合格比例，降低了因品質爭議產生的退貨及理賠矛盾，對批發商來說，貨物到港後的品相一致性增強，有助於快速完成分銷，減少滯留與二次損耗，在港口、冷鏈中轉站等關鍵節點，溫度管控穩定性還能減少中途篩貨、挑揀的時間成本，提升作業效能，增強與大型零售商及出口客戶的合作信任度。

其三，對下游零售端與消費者而言，溫度管控改善將直接改善終端水果的口感、品相與保鮮週期，進而提高消費者對海南水果品牌的信賴度與再次購買率，尤其在高端市場與出口市場，品質穩定性是維持價格優勢與品牌溢價的核心因素，溫度管控優化有助於塑造海南熱帶水果在國內外市場的高端定位，推動從“原產地標識”向“品質保障標識”的轉變。

此外，溫度管控改善還將促進海南水果供應鏈的資訊化建設與資料化管理，溫度管控資料的即時監測與留存，有助於追溯貨損成因，為整個供應鏈提供決策依據，例如分析不同運輸路線與季節的溫度管控資料，可優化運輸路線與調度計畫，降低整體物流成本，長期積累的資料還可成為政府與行業制定冷鏈標準及政

策的基礎，提高供應鏈治理的科學水準。

更為重要的是，溫度管控優化將在一定程度上推動海南水果產業鏈的縱向整合與橫向聯動，龍頭企業在掌握穩定溫度管控能力後，更有動力整合上游種植資源與下游銷售管道，形成“產運銷融合化”模式，進而提升整個供應鏈的議價能力與抗風險能力，溫度管控優化還會促使更多中小企業通過合作社、產業聯盟等方式實現資源共用，降低設備投資與技術應用的門檻，推動行業整體水準的提升。

總體來看，冷鏈運輸溫度管控的優化能降低貨損比例與運輸損耗，更將通過改善品質穩定性、提升市場競爭力與優化供應鏈協作模式，為海南熱帶水果產業的可持續發展提供堅實支撐，這種影響是結構性、長期性的，既體現在經濟效益的提升，也反映在品牌建設與產業升級的進程之中。

7 結論

海南熱帶水果在國內外市場的競爭力在很大程度上依賴于冷鏈運輸過程中品質的維持與損耗的管控，溫度波動作為影響果實品質與貨損比例的核心因素，其管理水準直接決定了產品從產地到終端的價值實現程度，通過對海南冷鏈運輸現狀、溫度波動影響機理、理論分析框架以及國內外溫度管控經驗的系統探討，可得出以下結論。

第一，海南熱帶水果冷鏈運輸在基礎設施、溫度管控技術與管理模式方面已獲得一定發展，但溫度波動仍然普遍存在，尤其在長途運輸、節點轉運及末端配送環節，波動幅度較大，對果實品質造成不可逆轉的損傷，提高了貨損比例。

第二，溫度波動對果實品質的影響具有生物學與物理學雙重作用機制，涉及呼吸作用增強、乙烯釋放量上升、組織失水、病害發生等多個過程，這些變化在不同水果品種、成熟度與運輸環境下表現差異顯著，體現出溫度管控必須具備針對性與精細性的特點。

第三，貨損比例的變化不僅取決於溫度波動幅度本身，還受運輸時長、包裝方式、品種耐

貯性以及管理回應速度等因素的協同影響，成本—損耗平衡理論表明，在溫度管控投入與損耗減少之間存在最佳均衡狀態，合理配置資源可明顯提高經濟效益與品質穩定性。

第四，發達國家與熱帶水果出口國在溫度管控方面的經驗，為海南提供了可參考的技術與管理思路，如全過程溫度管控監測、動態調溫、分區控溫、即時資料共用等，海南在氣候條件、產業結構與市場需求方面具有獨特性，借鑒模式必須經過本土化調整。

第五，溫度管控優化不僅是降低貨損的技術手段，更是推動海南熱帶水果供應鏈升級的核心環節，其改善效應將通過品質提升、市場

參考文獻：

- [1] iResearch 諮詢院. 中國生鮮農產品供應鏈研究報告-2020年[EB/OL]. 2020-03-31.
- [2] 鄭小瓊. 海南省熱帶水果冷鏈物流發展策略探析[J]. 現代商業, 2016, (16): 21-22. DOI:10.3969/j.issn.1673-5889.2016.16.007.
- [3] Nwokocha B C, Chatzifragkou A, Fagan C C. Impact of ultrasonication on African oil bean (*Pentaclethra macrophylla* Benth) protein extraction and properties[J]. Foods, 2023, 12(8): 1627. DOI:10.3390/foods12081627.
- [4] Wu J, Tang R, Fan K. Recent advances in postharvest technologies for reducing chilling injury symptoms of fruits and vegetables: A review[J]. Food Chemistry: X, 2023, 21: 101080. DOI:10.1016/j.fochx.2023.101080.
- [5] Feng Q, Wang Z, Xiong W, et al. The effect of postharvest storage temperatures on fruit flavor constituents in ‘Wushancuili’ plum[J]. Horticulturae, 2024, 10(4): 414. DOI:10.3390/horticulturae10040414.
- [6] Zehra K, Nawab A, Alam F, et al. Development of novel biodegradable water chestnut starch/PVA composite film: Evaluation of plasticizer effect over physical, barrier, and mechanical properties[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022.
- [7] Moffat A M, Beckstein C, Churkina G, et al. Characterization of ecosystem responses to climatic controls using artificial neural network[J]. Global Change Biology, 2010, 16(10): 2737-2749.

版權聲明

© 2025 作者版權所有。本文依據“知識共用署名 4.0 國際授權合約”（CC BY 4.0）以開放獲取方式發佈。該許可允許使用者在任何媒介中自由使用、複製、傳播與改編文章（含商業用途），惟須明確署名原作者及出處，並注明所作修改（如有）。完整協議詳見：<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans>

出版聲明

所有出版物中的陳述、觀點及資料僅代表作者及供稿者個人立場，與 Brilliance Publishing Limited 及/或編

拓展、品牌塑造與產業協同等途徑，帶來結構性、長期性的競爭優勢。

綜上，海南熱帶水果冷鏈運輸的溫度波動問題亟需在技術、管理與制度層面協同應對，未來應通過加強基礎設施建設、引入智慧化溫度管控設備、建立全過程溫度追溯體系、推動供應鏈各主體的協同合作，構建高效穩定且可持續的冷鏈運輸體系，唯有如此，才能在激烈的市場競爭中穩固海南熱帶水果的品牌地位，實現產業的高品質發展。

輯人員無關。Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員對因內容所提及的任何理念、方法、說明或產品所導致的人身或財產損害概不負責。