

## 冷风温度及装箱方式对鲜黄花菜预冷过程影响的模拟与试验研究

马燕燕, 张超凡, 曹建康

### Simulation and Experimental Study on the Effects of Cold Air Temperature and Packaging Method on the Pre-cooling Process of Fresh Daylily

MA Yanyan, ZHANG Chaofan, and CAO Jiankang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050191>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 黄花菜的活性成分、生物活性及加工技术研究进展

Research Progress on Bioactive Components, Biological Activities, and Processing Technology of Daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni)

食品工业科技. 2022, 43(19): 427-435 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090275>

#### 黄花菜多糖的表征与抗氧化活性分析

Characterization and Antioxidant Activity Analysis of Daylily Polysaccharides

食品工业科技. 2022, 43(12): 54-61 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080280>

#### 响应面优化超声协同高压矩形脉冲电场提取黄花菜多糖工艺及其抗氧化活性研究

Optimization of Ultrasound Combined with Rectangular High Pulsed Electrical Field Assisted Extraction of Polysaccharides from *Hemerocallis citrina* by Response Surface Methodology and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2020, 41(11): 163-170 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.025>

#### 酶解法制备黄花菜汁工艺优化及抗氧化性分析

Process Optimization and Antioxidant Analysis of Enzymatic Preparation of *Hemerocallis citrina* Juice

食品工业科技. 2023, 44(12): 164-171 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080058>

#### 基于网络药理学及指纹图谱的黄花菜抗抑郁指标成分筛选及提取工艺优化

Screening of Antidepressant Index Components and Optimization of Extraction Process of *Hemerocallis citrina* Baroni Based on Network Pharmacology and Fingerprint

食品工业科技. 2024, 45(16): 47-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090244>

#### 等离子体活化水辅助超声提取黄花菜多糖及其降糖活性

Plasma Activated Water Assisted Ultrasonic Extraction of Polysaccharides from Yellow Cauliflower and Its Hypoglycemic Activity

食品工业科技. 2025, 46(3): 232-240 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020268>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马燕燕, 张超凡, 曹建康. 冷风温度及装箱方式对鲜黄花菜预冷过程影响的模拟与试验研究 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 319–326. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050191

MA Yanyan, ZHANG Chaofan, CAO Jiankang. Simulation and Experimental Study on the Effects of Cold Air Temperature and Packaging Method on the Pre-cooling Process of Fresh Daylily[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 319–326. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050191

· 贮运保鲜 ·

# 冷风温度及装箱方式对鲜黄花菜预冷过程影响的模拟与试验研究

马燕燕<sup>1</sup>, 张超凡<sup>1,2</sup>, 曹建康<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 杭州市西湖职业高级中学, 浙江杭州 310000)

**摘要:** 为了探究不同冷风温度 (1 °C 和 4 °C) 和装箱方式 (与风向平行和与风向垂直) 对鲜黄花菜 (*Heremacallis citrina* Baroni.) 预冷效果的影响, 通过计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 技术模拟了鲜黄花菜预冷效果的变化。结果表明, 同一冷风温度下, 采用与风向平行的装箱方式, 鲜黄花菜预冷速度更快且更均匀, 预冷效果更好; 冷风温度越低, 预冷速度越快, 但预冷均匀性差。预冷模拟结果与实验结果一致, 两者最大温差为 1.2 °C, 模拟精度达到 92% 以上, 证明了 CFD 数值模拟应用于鲜黄花菜预冷研究的可行性, 优化了鲜黄花菜的预冷参数, 以期对鲜黄花菜的贮藏保鲜提供理论依据与技术参考。

**关键词:** 鲜黄花菜, 计算流体力学, 冷风温度, 装箱方式

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0319-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050191

本文网刊:



## Simulation and Experimental Study on the Effects of Cold Air Temperature and Packaging Method on the Pre-cooling Process of Fresh Daylily

MA Yanyan<sup>1</sup>, ZHANG Chaofan<sup>1,2</sup>, CAO Jiankang<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Hangzhou West Lake Vocational High School, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of different cold air temperatures (1 °C and 4 °C) and packing methods (parallel and perpendicular to the wind direction) on the pre-cooling efficiency of fresh daylily (*Heremacallis citrina* Baroni.), computational fluid dynamics (CFD) technology was employed to simulate the pre-cooling efficiency. This study revealed that under the same cold air temperature, fresh daylily packed parallel to the wind direction showed a faster and more uniform pre-cooling rate, leading to better pre-cooling efficiency compared to daylily packed perpendicular to the wind direction. Additionally, lower cold air temperatures were associated with a faster overall pre-cooling rates but poorer uniformity. With the maximum temperature difference of 1.2 °C and the simulation accuracy exceeding 92%, the simulation results were consistent with the experimental data. This study proves the feasibility of utilizing CFD numerical simulation to optimize pre-cooling parameters for fresh daylily, and thereby provides a theoretical foundation and technical guidance for the storage and preservation of this produce.

**Key words:** fresh daylily; computational fluid dynamics; cold air temperature; placement method

收稿日期: 2024-05-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1600203); 中国农业大学-大同市合作项目 (201904710611628)。

作者简介: 马燕燕 (1999-), 女, 博士研究生, 研究方向: 果蔬采后生理与贮藏保鲜, E-mail: 957107052@qq.com。

\* 通信作者: 曹建康 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: cjk@cau.edu.cn。

黄花菜在我国种植历史悠久,是以干制花蕾为食用部分的特色蔬菜,具有较高的营养价值和经济价值。但是,采后的鲜黄花菜易出现失重、腐烂、开散及霉变等不良现象,引起品质劣变<sup>[1]</sup>。利用低温贮藏<sup>[2-3]</sup>、气调包装<sup>[4-5]</sup>、化学制剂保鲜处理<sup>[6-8]</sup>等方式,可有效保持鲜黄花菜较高的好花率,延缓营养成分的降解消耗。但由于安全性、成本、可操作性等诸多因素的影响,应用受限。因此,优选鲜黄花菜贮藏保鲜工艺条件,延长其货架期已成为亟待解决的问题。

Sullivan 等<sup>[9]</sup>研究表明预冷对于鲜活农产品来说是最有效、成本最低的保鲜方法。预冷是果蔬进入冷链的首个环节,它是利用制冷技术,将果蔬快速冷却以去除果蔬采后田间热和呼吸热的过程<sup>[10]</sup>。有研究表明未经预冷的果蔬在流通中的损失率是经过预冷果蔬的 2~6 倍<sup>[11]</sup>。预冷可抑制果蔬的呼吸强度,维持细胞膜的功能特性,延长贮藏期<sup>[12]</sup>。满江等<sup>[13]</sup>探究不同预冷方式对甜樱桃模拟物流运输过程中品质的影响,结果发现在模拟物流运输贮藏 72 h 内,冷库预冷可以有效维持‘砂蜜豆’甜樱桃的采后品质。Berry 等<sup>[14]</sup>研究表明强制空气预冷期间,纸箱中的冷却速率和均匀性取决于空气条件(温度、速度)和包装中的气流分布。段洁利等<sup>[15]</sup>研究了冷风温度、通风速度及荔枝果实在包装箱中的位置对预冷速度的影响,发现预冷的冷风温度越低,降温速率越大,预冷时间越短,但温度太低会使荔枝发生冷害,造成品质下降。为了优化鲜黄花菜的预冷工艺,在保证预冷速度的同时提高预冷温度的均匀性,并且确保鲜黄花菜的产品质量。因此,亟需明确针对鲜黄花菜冷风温度和不同装箱方式下的预冷效果的研究。

计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值模拟是基于质量、动量和能量守恒,通过求解控制方程来模拟流体流动及热量和质量传递的过程,以获取高时空分辨率下的流体传热传质信息<sup>[16]</sup>。在不同的工业领域,CFD 可用来模拟流体流动、热量传递、质量传递(蒸腾或溶解过程)、相变过程(冷冻、融化或沸腾)、化学反应(燃烧或生锈)、机械运动(叶轮、活塞、风扇或方向舵)、相关结构的受压分析或变形过程分析以及固液或固汽之间的相关作用<sup>[17]</sup>。近年来随着 CFD 的运用领域不断拓宽,它被广泛应用于冷链各个环节的研究中。CFD 技术克服了传统理论分析方法在对象简化、计算求解等方面的不足,突破了试验过程中人力物力消耗、试验周期长等诸多限制<sup>[18]</sup>。如 CFD 被运用于冷库内部各种场的模拟研究时<sup>[19-22]</sup>,它不仅模拟果蔬包装箱内的空气流动及传热传质现象,而且还可以获得冷却性能的相关信息<sup>[23]</sup>。陈秀勤等<sup>[24]</sup>针对特定预冷时间,模拟了纸箱上圆形、键槽形两种开孔方式下包装箱内间隔、错位间隔和平方间隔等排列方式下果品的温度场,并进行了试验验证,结果吻合性较好,验证了模型的可靠性。韩佳伟等<sup>[25]</sup>在研究送风风速对苹

果差压预冷性能的影响时,发现当风速为 2.5 m/s 时,预冷效果最佳。因此,优化果品的预冷方法(包括合理设计开孔方式、调整送风风速和恰当排列果品)是提高冷链运输效率、延长果品保鲜期的重要因素。

本文以大同鲜黄花菜为研究对象,利用 CFD 模拟来研究不同冷风温度、不同装箱方式下鲜黄花菜的预冷过程,并进行了实验验证,以期优选鲜黄花菜适宜的预冷参数,为后续优选鲜黄花菜贮藏保鲜方法提供了理论依据与技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

鲜黄花菜 产地为山西大同,采摘于 8 月 15 日,经冷藏车运输,于 6 h 内到达实验室。选取无机械损伤、无病虫害、色泽匀称、成熟度一致的完整鲜黄花菜放置至室温。随机选取 25 根鲜黄花菜,测量其最宽部位直径和长度,取平均值,将其视为直径 0.87 mm,长 90 mm 的圆柱体,作为 CFD 模拟中黄花菜的模型尺寸。

Rc-4 温湿度记录仪、ZY-922512SM 小风扇 江苏精创电气股份有限公司;GM8902+数字风速风量计 深圳市聚茂源科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 物理模型 塑料泡沫箱体尺寸为 280 mm×160 mm×160 mm(长×宽×高),壁面厚度为 18 mm,箱子两侧开有对称性的正方形孔,尺寸为 92 mm×92 mm,左侧孔上安装有 12 V、0.18 A 的风扇,为进风口,另一侧为出风口,预冷时采取吹风方式,并盖上塑料泡沫箱的盖子。鲜黄花菜的装箱方式为与风向平行和与风向垂直两种,如图 1A 所示。

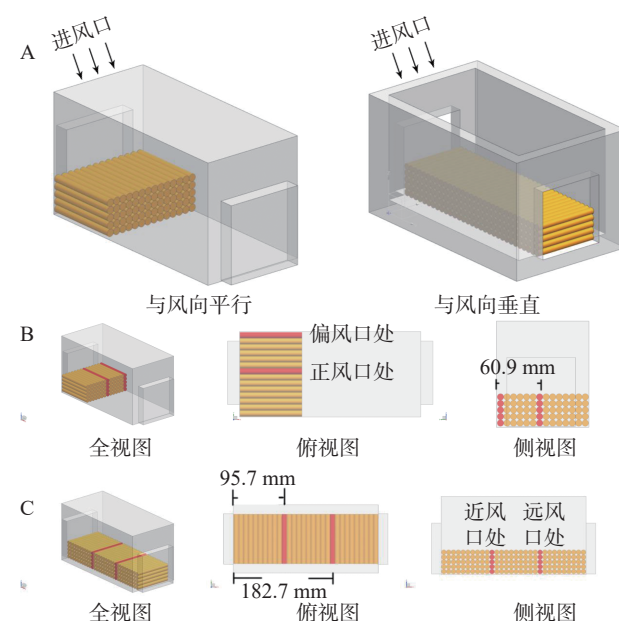


图 1 泡沫箱体内鲜黄花菜的装箱方式

Fig.1 Packing method of fresh daylily in the foam box

注: A 为鲜黄花菜的两种装箱方式; B、C 为与风向平行和与风向垂直时泡沫箱体内温度监测点的布置。



黄花菜装载量为 5 层, 每层均设置两个温度监测点。鲜黄花菜与风向平行装箱时, 温度监测点如图 1B 所示, 分别为偏风口处和正风口处; 鲜黄花菜与风向垂直装箱时, 温度监测点如图 1C 所示, 分别为近风口处和远风口处。每个温度监测点均放置一个自动温湿度记录仪, 并将其金属探头完全刺入鲜黄花菜中心部位, 该仪器每隔 10 s 自动记录一次数据。待鲜黄花菜中心温度下降至稍高于冷风温度时, 停止记录, 后将记录仪中的数据导入计算机中, 制作降温曲线, 以确定鲜黄花菜的预冷时间和预冷均匀性。

### 1.2.2 预冷性能评价指标

1.2.2.1 温度分布云图 利用温湿度记录仪监测箱内所有黄花菜的中心温度, 收集温度数据后采用 CFD 模拟软件绘制温度分布云图。

1.2.2.2 降温曲线 预冷时, 将自动温湿度记录仪的金属探头完全刺入鲜黄花菜中心部位, 后将该仪器自动记录的数据导入计算机中, 制作降温曲线。

1.2.2.3 7/8 预冷时间 通常采用 7/8 预冷时间来衡量预冷效果<sup>[26]</sup>。根据 1.2.2.2 制作的降温曲线, 将自动温湿度记录仪放置在进风口处, 即为冷风温度。7/8 预冷时间是预冷产品的温度与冷风温度的差值达到产品初始温度与冷风温度差值的 1/8 时所对应的冷却时间。计算公式如下:

$$\frac{T_h - T_a}{T_{h0} - T_a} = \frac{1}{8} \quad \text{式 (1)}$$

式中:  $T_{h0}$  为黄花菜的初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_h$  为黄花菜的预冷温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_a$  为冷风温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.2.4 预冷均匀性 预冷过程中温度分布的均匀性对果蔬的新鲜度有直接影响, 冷却不均匀, 会引起果蔬之间相互传热, 进而造成二次污染, 影响果蔬品质<sup>[23]</sup>, 因此预冷均匀性是衡量预冷效果的重要指标, 通过泡沫箱内不同位置黄花菜的温度波动大小来表示。根据 1.2.2.2 制作的降温曲线, 确定鲜黄花菜的预冷均匀性。计算公式如下:

$$\sigma = \frac{1}{\bar{T}_h} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{hi} - \bar{T}_h)^2} \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $\bar{T}_h$  为测点平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{hi}$  为第  $i$  个温度监测点的黄花菜温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n$  为温度监测点个数;  $\sigma$  为均匀性。

### 1.2.3 模拟计算

1.2.3.1 数学模型 模型假设: 果蔬预冷是极其复杂的非稳态冷却降温的过程, 为了简化求解, 通常需要对实际问题进行理想化, 做出如下假设: 黄花菜为大小均匀、各向同性的刚性圆柱体; 包装材料、黄花菜及空气的热物性常数均为常量; 忽略黄花菜成熟衰老过程呼吸热、蒸腾热的影响; 忽略箱体与黄花菜、黄花菜之间的辐射传热; 空气为瞬态、不可压缩的流体。

控制方程: a 冷空气区域: 对于瞬态、不可压缩的空气区域, 采用平均雷诺数纳维-斯托克斯方程 (RANS) 进行求解<sup>[25]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{式 (3)}$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho_a \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \eta_a \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho_a \bar{u}_i \bar{u}_j \right] - \frac{\partial \bar{P}_a}{\partial x_i} - \rho_a g \quad \text{式 (4)}$$

式中:  $\bar{u}_i$ 、 $\bar{u}_j$  为速度矢量  $U$  在坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的速度分量均值,  $\text{m/s}$ ;  $\bar{P}_a$  为压力,  $\text{N/m}^2$ ;  $x_i$ 、 $x_j$  为各坐标分量;  $\rho_a$  为冷空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\eta_a$  为冷空气动力粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\bar{u}_i \bar{u}_j$  为应力分量,  $i, j=1, 2, 3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

能量方程:

$$\frac{\partial \bar{T}_a}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{T}_a)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\lambda_a}{\rho_a c_{p,a}} \left[ \frac{\partial \bar{T}_a}{\partial x_j} \right] \right] - \frac{\partial (\bar{\mu}_j \bar{T}_a)}{\partial x_j} \quad \text{式 (5)}$$

式中:  $\bar{T}_a$  为箱体内部冷空气温度均值,  $\text{K}$ ;  $\lambda_a$  为冷空气热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $c_{p,a}$  为冷空气比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\bar{\mu}_j \bar{T}_a$  为通量项。

b. 黄花菜区域: 黄花菜内部以温度梯度方式进行的自身内部导热, 呼吸和蒸腾作用产生的热, 将全部以内热源的方式添加到能量方程中, 其控制方程为:

$$\rho_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} = \text{div}(\lambda_h \text{grad} T_h) + Q_{th} \quad \text{式 (6)}$$

式中:  $\rho_h$  为黄花菜密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_{p,h}$  为黄花菜比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T_h$  为黄花菜温度,  $\text{K}$ ;  $\lambda_h$  为黄花菜导热率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $Q_{th}$  为黄花菜内部热源,  $\text{W/m}^3$ 。

$$Q_{th} = Q_{resh} + Q_{evah} \quad \text{式 (7)}$$

式中:  $Q_{resh}$  为呼吸热,  $\text{W/m}^3$ ;  $Q_{evah}$  为蒸腾热,  $\text{W/m}^3$ 。

$$Q_{resh} = 0.003 \rho_h f (1.8 T_h + 32)^g \quad \text{式 (8)}$$

式中:  $f$ 、 $g$  为果蔬特定常量参数, 黄花菜的  $f=6.056 \times 10^{-5}$ ,  $g=2.508$ 。

$$Q_{evah} = c_1 T_h^2 + c_2 T_h + c_3 \quad \text{式 (9)}$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为果蔬常数, 对于黄花菜,  $c_1=9.1$ 、 $c_2=-7.4129 \times 10^3$ 、 $c_3=3.8751 \times 10^6$ 。

c. 耦合界面区: 根据能量守恒定律得到黄花菜-冷空气热平衡方程为:

$$\rho_a c_{p,a} \mu_i \left[ dydz \frac{\partial T_a}{\partial x} + dx dz \frac{\partial T_a}{\partial y} + dx dy \frac{\partial T_a}{\partial z} \right] dV_a dt = \left[ -\rho_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} \right] dV_h dt \quad \text{式 (10)}$$

式中:  $V_a$  为泡沫塑料箱内冷空气所占体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_h$  为泡沫塑料箱内黄花菜所占体积,  $\text{m}^3$ 。



**1.2.3.2 实验方法与数值模拟方法** a.实验方法:按照模拟条件设置实验参数,横排摆放时,包装箱内部分为 5 层鲜黄花菜,从下至上第一层至第五层偏风口处黄花菜分别被编号为 1-1~5-1;从下至上第一层至第五层正风口处黄花菜分别被编号为 1-7~5-7,如图 2 所示。利用 CFD 数值模拟实时监控鲜黄花菜中心位置温度变化过程,将测试数据作为数值模拟验证数据。采用自动温湿度记录仪每隔 10 s 自动记录 1 次数据,取温度实测值与模拟值进行对比,验证 CFD 模拟结果的准确性。

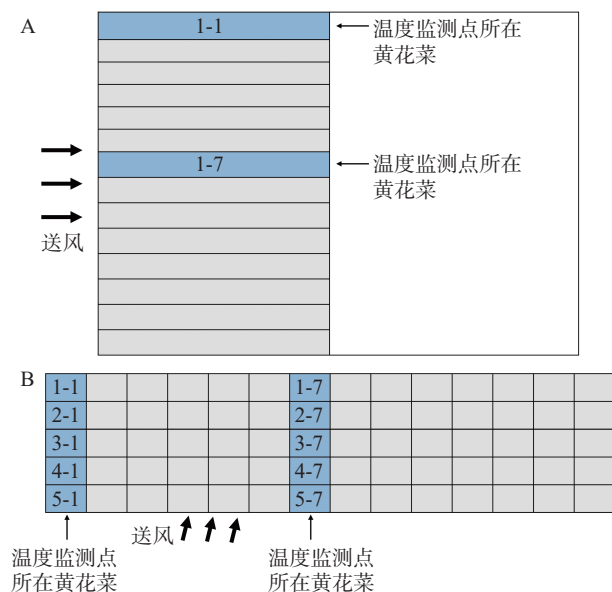


图 2 与风向平行时泡沫箱内鲜黄花菜的摆放位置编号

Fig.2 Position number of fresh daylily in foam box when parallel to wind direction

注: A 为俯视图的编号方式; B 为侧视图的编号方式。

b.数值模拟方法:选择大小均一的鲜黄花菜为模拟对象,空气相对湿度采用 85%,通过查找和计算得到相关热物性参数<sup>[27]</sup>,见表 1。模拟采用模型和 SIMPLE 算法,时间步长为 0.00012 s。

表 1 材料热物性参数

Table 1 Material thermophysical parameters

物性参数	空气	鲜黄花菜	塑料泡沫箱
密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.29	923.2	220
热导率( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	0.024	0.300	0.050
比热容( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	1004.8	2570.5	1700.0
动力粘度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1.72\times 10^{-5}$	—	—

注:黄花菜的热物性参数以生菜等 21 种果蔬的热物性参数平均值代表,—表示无需提供数据。

**1.2.3.3 初始条件与边界条件** 初始条件:  $t=0$  时,黄花菜的初始温度  $T_h=17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。边界条件:进风口送风参数设置为  $T_a=4\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T_a=1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $u=3\text{ m/s}$ ,  $v=0\text{ m/s}$ ,  $w=0\text{ m/s}$ ,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为速度矢量  $U$  在 3 个坐标轴的速度分量;由于速度出口状态无法预知,将其设为流体出口边界条件。

**1.2.3.4 网格划分** 利用 Fluent 前处理软件对箱体、黄花菜三维模型进行网格划分,通过网格无关性验证,得出最佳网格尺寸为  $0.03\text{ mm}$ ,鲜黄花菜装箱方式与风向平行的模型网格化后共有 345064 个节点,721973 个单元(图 3A);鲜黄花菜装箱方式与风向垂直模型网格化后共有 890977 个节点,1209458 个单元(图 3B)。

## 1.3 数据处理

CFD 模拟软件使用 ANSYS2021,数据统计采用微软 Excel 2010 软件进行处理,采用 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析和 ANOVA 检验,  $P<0.05$  表示差异显著,采用 Origin 2022 软件进行绘图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同冷风温度对黄花菜温度云图的影响

塑料泡沫箱内黄花菜的中心截面温度分布情况,反映了预冷过程中温度场的差异性。根据图 4 可以观察到预冷过程中黄花菜温度的不同变化趋

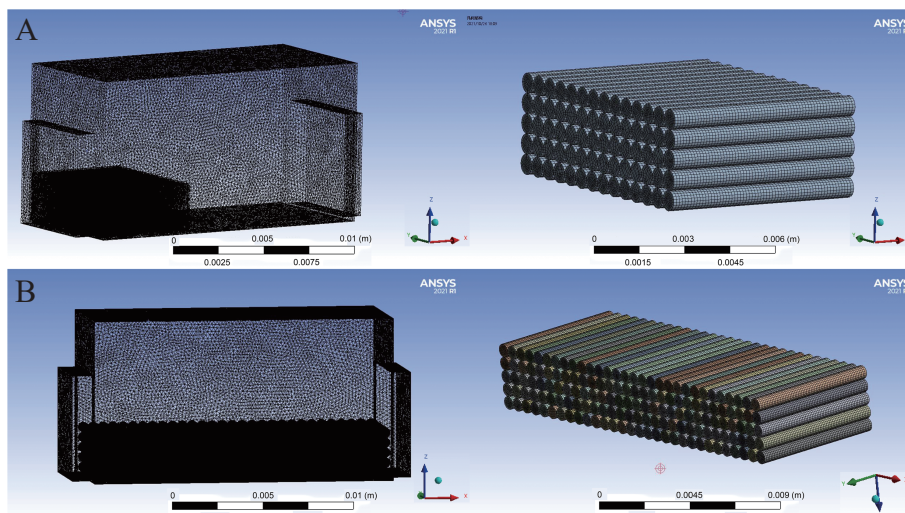


图 3 鲜黄花菜装箱方式与风向平行(A)和风向垂直(B)模型网格划分

Fig.3 Model meshing of fresh daylily packing way parallel to the wind direction (A) and perpendicular to the wind direction (B)

势。靠近进风口的黄花菜,其温度相对较低,说明冷风对进风口区域的黄花菜有更直接的冷却效果。冷风温度的不同,会显著影响黄花菜的最终预冷温度。具体而言,较低的冷风温度能更有效地降低黄花菜的温度。

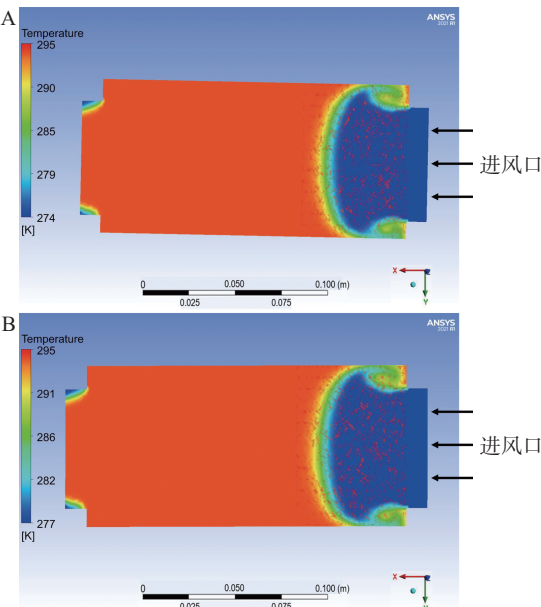


图 4 鲜黄花菜 1 °C(A) 与 4 °C(B)冷风预冷时的温度云图  
Fig.4 Temperature cloud image of fresh daylily at 1 °C (A) and 4 °C (B) cold air pre-cooling

2.2 不同冷风温度及装箱方式对黄花菜降温曲线的影响

由图 5 可知,两种装箱方式下,1 °C 冷风预冷时

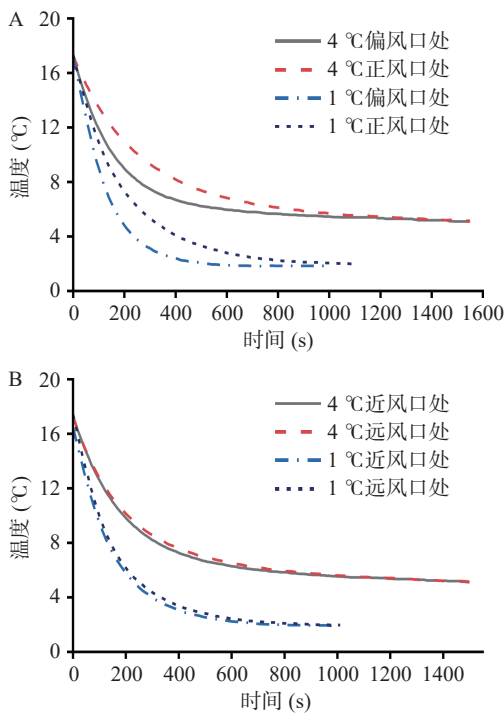


图 5 鲜黄花菜与风向平行(A)和与风向垂直(B)装箱时的降温曲线

Fig.5 Cooling curve for packaging fresh daylily parallel to the wind direction (A) and perpendicular to the wind direction (B)

的降温速率均高于 4 °C 冷风预冷。装箱方式与风向平行时,偏风口处的降温速率高于正风口处;装箱方式与风向垂直时,近风口处与远风口处的降温速率无显著差异。综合考虑,装箱方式与风向平行选择 1 °C 预冷的偏风口处,装箱方式与风向垂直选择 1 °C 预冷的近风口处和远风口处均可达到相似的预冷效果。

2.3 不同冷风温度及装箱方式对黄花菜 7/8 预冷时间的影响

由图 6 可知,相同装箱方式下,冷风温度越低,预冷时间越短。鲜黄花菜与风向平行装箱时,1 °C 冷风偏风口处和正风口处的预冷时间分别为 5.96 min 和 7.60 min;4 °C 冷风时,偏风口处和正风口处的预冷时间分别为 14.24 min 和 15.64 min。此时,偏风口处的鲜黄花菜降温速度更快。鲜黄花菜与风向垂直装箱时,1 °C 冷风时,近风口处和远风口处的预冷时间分别为 8.52 min 和 11.98 min;4 °C 冷风时,近风口处和远风口处的预冷时间分别为 15.31 min 和 20.08 min。此时,近风口处的鲜黄花菜降温速度更快。此外,同一冷风温度下,与风向平行时鲜黄花菜的预冷速度较与风向垂直时更快。综合考虑,装箱方式与风向平行选择 1 °C 偏风口处进行预冷,可确保鲜黄花菜快速降温,最大限度地减少预冷所需的时间。

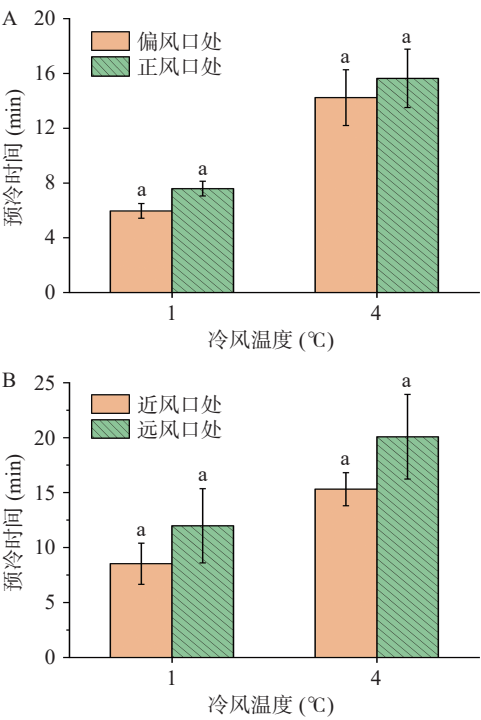


图 6 鲜黄花菜与风向平行(A)和与风向垂直(B)装箱时的 7/8 预冷时间

Fig.6 7/8 Pre-cooling time for packaging fresh daylily parallel to the wind direction (A) and perpendicular to the wind direction (B)

注: 数值以平均值±标准误表示,不同小写字母表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

## 2.4 不同冷风温度及装箱方式对黄花菜预冷均匀性的影响

$\sigma$  表示预冷箱内黄花菜预冷均匀性的分布状况,  $\sigma$  数值范围为 0~1,  $\sigma$  越大, 温度场越离散, 表示预冷越不均匀。由图 7 可知, 均匀性在整个预冷过程中呈现先增大后减小的趋势, 两种装箱方式, 都存在着不均匀性。鲜黄花菜装箱方式与风向平行时, 4℃ 偏风口处的鲜黄花菜预冷均匀性为 0.09, 显著低于 1℃ 的 0.325 ( $P<0.05$ ), 即 4℃ 冷风预冷的均匀性优于 1℃。鲜黄花菜装箱方式与风向平行时, 偏风口处的鲜黄花菜预冷均匀性优于正风口。鲜黄花菜装箱方式与风向垂直时, 近风口处的鲜黄花菜预冷均匀性优于远风口。此外, 同一冷风温度下, 与风向平行装箱的均匀性高于与风向垂直装箱, 即与风向平行装箱预冷效果更均匀。综合考虑, 装箱方式与风向平行选择 4℃ 偏风口处进行预冷, 可在确保鲜黄花菜快速而均匀降温的同时, 减少因温度不均匀导致的果品质量下降的风险。

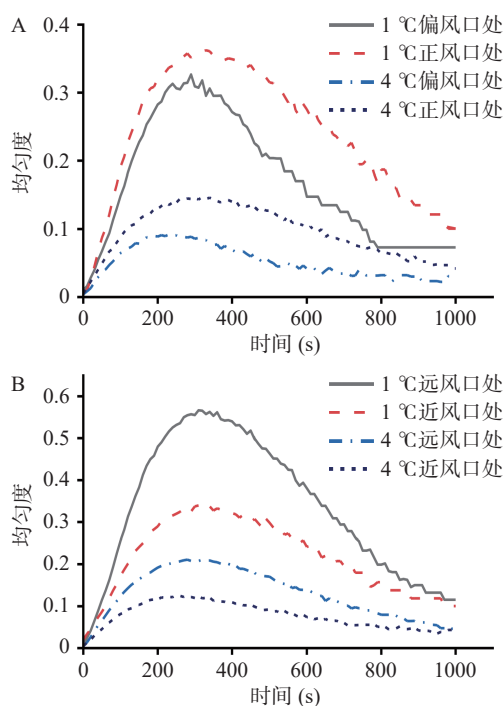


图 7 鲜黄花菜与风向平行(A)和与风向垂直(B)装箱时的均匀性

Fig.7 Uniformity for packaging fresh daylily parallel to the wind direction (A) and perpendicular to the wind direction (B)

## 2.5 预冷效果的实验验证与分析

通过对鲜黄花菜装箱方式与风向平行时各个温度监测点的实验值与模拟值进行对比验证, 可以更全面地评估 CFD 技术在鲜黄花菜预冷研究中的应用效果。结果如图 8 所示, 实验值整体上略微偏小于模拟值, 两者最大温度偏差为 1.2℃, 模拟精度达到 92% 以上。这进一步验证了 CFD 技术在鲜黄花菜预冷研究中的可行性和准确性。

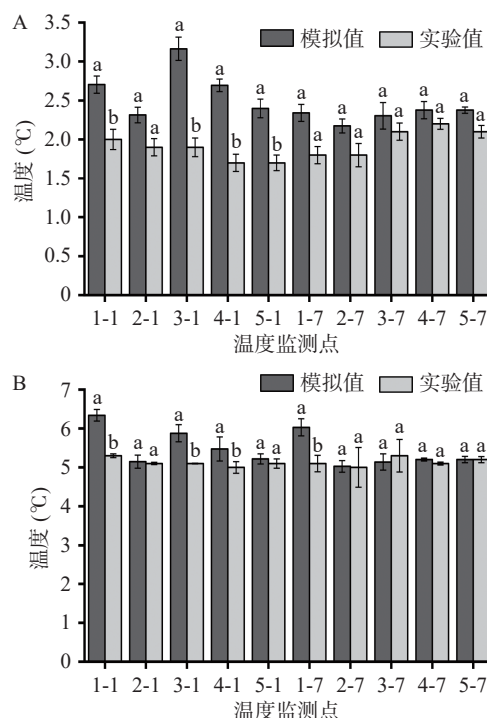


图 8 与风向平行装箱各温度监测点模拟值与实验值比较

Fig.8 Comparison of simulated values and experimental values at each temperature detection points for packaging fresh daylily parallel to the wind direction

注: A, 1℃ 冷风; B, 4℃ 冷风, 其中 1-1 表示从下至上第一层黄花菜偏风口处, 2-1 表示第二层偏风口处, 3-1 表示第三层偏风口处, 4-1 表示第四层偏风口处, 5-1 表示第五层偏风口处; 1-7 表示第一层正风口处, 2-7 表示第二层正风口处, 3-7 表示第三层正风口处, 4-7 表示第四层正风口处, 5-7 表示第五层正风口处; 不同小写字母表示有显著性差异 ( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

预冷是果蔬等鲜活农产品进入冷链的第一个重要环节, 根据送风方式的差异, 预冷又可分为水平送风预冷和垂直送风预冷。其中垂直送风可有效改善预冷过程中送风短路, 冷却效率低的问题, 预冷时间较水平送风预冷降低了 25%~50%<sup>[28]</sup>。Elansari 等<sup>[29]</sup> 研究表明, 垂直送风预冷可以使冷空气更好地进入到包装箱内部进行换热。金滔等<sup>[30]</sup> 在对垂直送风预冷对苹果性能模拟与分析中发现苹果的冷却速率随送风速度的升高、送风温度的降低而加快。解海卫等<sup>[31]</sup> 研究表明送风速度越大、送风温度越高预冷均匀性越好, 与本研究 4℃ 冷风比 1℃ 冷风条件下, 鲜黄花菜预冷更均匀的结果一致。

本研究发现偏风口处相较于正风口降温速度更快, 这可能是因为在整个箱中, 气流会形成复杂的流动场景, 偏风口处由于靠近冷风的进出口, 气流在这一区域可能会形成更为强劲和紧密的对流, 导致黄花菜更快地被冷风所包围和冷却<sup>[29]</sup>。由于气流流动和温度分布的影响, 偏风口处的预冷速度较快, 所以黄花菜能够更快地降温。近年来相关学者的主要研究对象为像苹果这样的球形类果品, 对像鲜黄花菜这样的圆柱体形状果蔬研究较少, 因此还需进一步研究以增加模拟的精度。



在本研究中,当鲜黄花菜装箱方式与风向平行时,空气流动会沿着箱体表面流动,形成较为均匀的对流<sup>[22]</sup>。这种对流会使得箱体表面上的空气与箱内空气之间的热量更均匀地交换,从而使得箱内温度分布更加均匀<sup>[15]</sup>。相比之下,当与风向垂直装箱时,空气流动会在箱体表面形成涡流或者湍流,这会导致空气在箱体表面停留的时间较短,热量交换不够充分,从而导致箱内温度分布不够均匀<sup>[20]</sup>。

将 CFD 模拟值与试验值进行比较,发现模拟值偏大,存在偏差的原因可能包括所建物理模型假定塑料泡沫箱内鲜黄花菜大小一样、分布均匀,摆放形式理想化,而实际过程中,鲜黄花菜大小相近,但无法保证完全一样<sup>[23]</sup>;且由于自重等原因,使得黄花菜之间空隙大小不一致,从而导致实际实验测试和模拟计算存在偏差;且预冷模拟部分只考虑传热影响,忽略预冷过程中的传质问题,并忽略了鲜黄花菜的呼吸热和蒸腾热<sup>[25]</sup>;模拟计算中输入的鲜黄花菜物性参数存在误差,同时在实际预冷过程中这些参数是变化的,但模拟计算中选取恒定不变的值,这也会引起模拟和实验结果的偏差<sup>[21]</sup>。

#### 4 结论

本研究以鲜黄花菜为研究对象,通过监测两种不同的冷风温度(1℃和4℃)和两种不同的鲜黄花菜装箱方式(与风向平行和与风向垂直)对预冷效果的影响,同时应用 CFD 仿真模拟技术计算圆柱体果蔬鲜黄花菜预冷效果的变化。结果表明,与风向平行装箱时,鲜黄花菜在偏风口处降温速度更快;而与风向垂直装箱时,近风口处的降温速度更快;同一冷风温度下,风向平行时的预冷速度比风向垂直时更快。此外,在相同装箱方式下,较低的冷风温度可以缩短预冷时间,提高整体预冷速度,但也可能导致温度场的不均匀性,因此需要合理安排黄花菜的摆放位置并选择适宜的冷风温度。研究结果显示,预冷模拟与实验结果的最大温差为 1.2℃,模拟精度超过 92%,验证了 CFD 技术在鲜黄花菜预冷研究中的可行性。

本研究突出了不同装箱方式和冷风温度对预冷效果的影响,为优化鲜黄花菜预冷工艺提供了重要参考。然而,仍需进一步研究如何在保证预冷速度的同时提高温度均匀性,以及优化冷风温度和风向对预冷效果的影响。未来的研究方向可以包括优化预冷设备设计、探索新的预冷工艺参数以及结合实验和模拟方法深入研究预冷过程的机理等。这些问题的解决将进一步推动鲜黄花菜预冷技术的发展,提升食品加工行业的效率和可持续发展。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

#### 参考文献

- [1] YAO Y, ZHAO N, XIAN T, et al. Effect of 2, 4-epibrassinolide treatment on the postharvest quality and physiological metabolism of fresh daylily flower buds during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017(226): 110–116.
- [2] MA Y, ZHANG C, CHEN G, et al. Controlled freezing storage (CFS) maintains quality of fresh edible buds of daylily (*Heimerocallis citrina*) by enhancing antioxidant capacity, energy charge and unsaturation of fatty acids[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 213: 112932.
- [3] LÜ H, GUO S, WU Z, et al. Postharvest quality and metabolism changes of daylily flower buds treated with hydrogen sulfide during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 212: 112890.
- [4] 高建晓, 古荣鑫, 胡花丽, 等. 不同薄膜包装对黄花菜贮藏品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(2): 255–259. [GAO Jianxiao, GU Rongxin, HU Huali, et al. Effects of different film packaging on storage quality of daylily[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(2): 255–259.]
- [5] 顾岩岩, 徐璐, 付正义, 等. 聚乳酸薄膜处理对黄花菜保鲜效果分析[J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(5): 929–935. [GU Yanyan, XU Lu, FU Zhengyi, et al. Effect of polylactic acid film treatment on preservation of daylily[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(5): 929–935.]
- [6] LI K, XU R, CAO J, et al. Nordihydroguaiaretic acid (NDGA) maintains the postharvest quality of fresh daylily flower buds (*Heimerocallis citrina*) by enhancing antioxidant metabolism and regulating phytohormone equilibrium[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 200: 112326.
- [7] 任邦来, 焦凤琴, 邓惠文, 等. 不同浓度 ASA 处理对黄花菜保鲜效果的影响[J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(10): 45–48. [REN Banglai, JIAO Fengqin, DENG Huiwen, et al. Effects of different concentrations of ASA treatment on fresh-keeping effect of daylily[J]. *Chinese Food and Nutrition*, 2019, 25(10): 45–48.]
- [8] 姚亚明, 彭菁, 刘檀, 等. 壳聚糖处理结合纳米包装对黄花菜贮藏品质及生理的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 282–286. [YAO Yaming, PENG Jing, LIU Tan, et al. Effects of chitosan treatment combined with nano-packaging on storage quality and physiology of daylily[J]. *Food Science*, 2016, 37(20): 282–286.]
- [9] SULLIVAN G H, DAVENPORT L R, JULIAN J W. Pre-cooling: Key factor for assuring quality in new fresh market vegetable crops[M]. Arlington: ASHS Press, 1996, 127: 521–524.
- [10] AN R, LUO S, ZHOU H, et al. Effects of hydrogen-rich water combined with vacuum precooling on the senescence and antioxidant capacity of pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110469.
- [11] 王明涛, 刘煥卫, 贡汉生. 西红柿变温预冷传热特性与系统能耗分析[J]. *食品与机械*, 2016, 32(4): 131–135. [WANG Mingtao, LIU Huanwei, GONG Hansheng. Heat transfer characteristics and system energy consumption of tomato precooling at variable temperature[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(4): 131–135.]
- [12] XIANG B, ZHANG X. Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73: 109007.
- [13] 满江, 何蓁蓁, 梁惜雯, 等. 不同预冷方式对甜樱桃模拟物流运输过程中品质的影响[J]. *现代园艺*, 2024, 47(7): 1–3, 5. [MAN Jiang, HE Mengmeng, LIANG Xiwen, et al. Effects of different pre-cooling methods on the quality of sweet cherry during simulated logistics transportation[J]. *Modern Horticulture*, 2024, 47(7): 1–3, 5.]
- [14] BERRY T M, DEFRAEYE T, NICOLAÏ B M, et al. Multipa-

- parameter analysis of cooling efficiency of ventilated fruit cartons using CFD: Impact of vent hole design and internal packaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9: 1481–1493.
- [15] 段洁利, 杨洲, 马征, 等. 荔枝果实通风预冷试验研究[J]. *食品科学*, 2007(7): 504–507. [DUAN Jieli, YANG Zhou, MA Zheng, et al. Experimental study on aerated precooling of litchi fruit[J]. *Food Science*, 2007(7): 504–507.]
- [16] CAI M, TIAN Z, LIU Z, et al. A computational fluid dynamics model coupled with ethylene polymerization kinetics for fluidized bed polyethylene reactor[J]. *Powder Technology*, 2022, 407: 117647.
- [17] JUNG S, CHUNG H, MONDACA M R, et al. Using computational fluid dynamics to develop positive-pressure precision ventilation systems for large-scale dairy houses[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 227: 182–194.
- [18] HATZIKIRIAKOS S G. Professor E. Mitsoulis's contributions to rheology and computational non-Newtonian fluid mechanics[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2023, 311: 104973.
- [19] RANI P, TRIPATHY P P. CFD coupled heat and mass transfer simulation of pineapple drying process using mixed-mode solar dryers integrated with flat plate and finned collector[J]. *Renewable Energy*, 2023, 217: 119210.
- [20] LIN C H, CHENG P S, HSIEH C H, et al. Investigations on predictions of cooling capacity for open refrigerated display cabinet using CFD approach with different positions of perforated back panels[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 43: 102018.
- [21] ZAFIRYADIS F, JENSEN A D, LAXMINARAYAN Y, et al. Predicting cold gas-solid flow in a pilot-scale dual-circulating fluidized bed: Validation of computational particle fluid dynamics model[J]. *Powder Technology*, 2021, 381: 25–43.
- [22] 张铭, 艾宇, 张少杰, 等. 冷库不同布置方案对冷库温度均匀性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 48(2): 210–221. [ZHANG Ming, AI Yu, ZHANG Shaojie, et al. Effect of different layout schemes on temperature uniformity of cold storage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 48(2): 210–221.]
- [23] KUMAR A, KUMAR R, SUBUDHI S. Numerical modeling of forced-air pre-cooling of fruits and vegetables: A review[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 145: 217–232.
- [24] 陈秀勤, 卢立新, 王军. 包装箱内层装果品差压预冷温度场的数值模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 249–257. [CHEN Xiuqin, LU Lixin, WANG Jun. Numerical simulation and verification of differential pressure precooling temperature field of fruit in inner packing box[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12): 249–257.]
- [25] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 280–289. [HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Effect of supply wind speed on differential pressure precooling performance of apples[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 280–289.]
- [26] ELANSARI A M. Hydrocooling rates of barhee dates at the khalal stage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 48(3): 402–407.
- [27] 钟志友, 张敏, 杨乐, 等. 果蔬冰点与其生理生化指标关系的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(2): 76–78. [ZHONG Zhiyou, ZHANG Min, YANG Le, et al. Study on the relationship between freezing point and physiological and biochemical indexes of fruits and vegetables[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(2): 76–78.]
- [28] DUAN Y, WANG G B, FAWOLE O A, et al. Postharvest precooling of fruit and vegetables: A review[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2020, 100: 278–291.
- [29] ELANSARI A M, MOSTAFA Y S. Vertical forced air pre-cooling of orange fruits on bin: Effect of fruit size, air direction, and air velocity[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2020, 19(1): 92–98.
- [30] 金滔, 李博, 朱宗升, 等. 苹果垂直送风式压差预冷性能模拟与分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 369–375. [JIN Tao, LI Bo, ZHU Zongsheng, et al. Simulation and analysis of vertical air supply pressure differential precooling performance of apple[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 369–375.]
- [31] 解海卫, 张晶, 张艳, 等. 苹果差压预冷均匀性的实验研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(5): 42–47. [XIE Haiwei, ZHANG Jing, ZHANG Yan, et al. Experimental study on uniformity of differential pressure precooling of apple[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(5): 42–47.]