

基于时间序列模型的荔枝预冷过程果肉温度变化特性

王广海^{1,2}, 虞新新², 吕恩利²

(1.广东机电职业技术学院, 广州 510515; 2.国家农产品冷链物流装备研发专业中心, 广州 510642)

摘要: **目的** 解决荔枝在采后预冷过程中预冷时间难把握、预冷后处理时间长导致的果肉温度偏高等问题。**方法** 通过研究不同环境下荔枝果肉温度变化与时间的关系, 设计荔枝果肉的温降和温升试验, 模拟荔枝预冷和晾干包装阶段的温度变化过程, 提出一种时间序列下的荔枝果肉温度预测模型。**结果** 基于时间序列模型的荔枝果肉温度变化预测值与试验值具有高度的一致性, 均方差均在80%以上, 表明预测结果稳定、可靠。在2~3℃冰水预冷环境下, 荔枝果肉从26℃降至5℃约需14 min, 将预冷后在室温(25℃)下晾干的处理时间控制在4~6 min内, 可以有效地减少荔枝入库贮藏前果肉温度过高的问题, 提高了荔枝的冰水预冷效果, 保证荔枝在贮藏期间具有较佳的品质。**结论** 通过构建时间序列模型, 研究荔枝预冷过程中果肉的温度变化特性, 可为荔枝在预冷、晾干、包装环节的过程参数控制提供参考依据。

关键词: 荔枝; 果肉温度; 时间序列; 预冷

中图分类号: S37 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)05-0106-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.014

Temperature Change Characteristics of Pulp during Litchi Pre-cooling Process Based on Time Series Model

WANG Guang-hai^{1,2}, YU Xin-xin², LYU En-li²

(1. Guangdong Mechanical & Electrical Polytechnic, Guangzhou 510515, China;

2. National R&D Center for Agricultural Products Cold Chain Logistics Equipment, Guangzhou 510642, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problems that the pre-cooling time of litchis is difficult to be controlled during the post-harvest pre-cooling process, and the long pre-cooling processing time leads to high pulp temperature. By studying the relationship between the temperature change and time of litchi pulp in different environments, the temperature drop and rise experiment of litchi pulp were designed. The temperature change process of litchi pre-cooling and drying packaging stage was simulated. And the litchi pulp temperature prediction model under time series was proposed. Experimental results showed that the predicted value of litchi pulp temperature change based on the time series model was highly consistent with the experimental value, and the mean variance was more than 80%, indicating that the prediction results were stable and reliable. In the pre-cooling environment of ice water at 2-3℃, it took about 14 min for the litchi pulp temperature to be reduced from 26℃ to 5℃, and the drying treatment time controlled within 4-6 min at room temperature (25℃) after pre-cooling could effectively reduce the problem of high pulp temperature before litchi storage, improve the pre-cooling effect of litchi ice water, and ensure good quality of litchis. Construction of the time series model to study the change characteristics of pulp temperature during litchi pre-cooling process can provide a reference basis for control of process parameters in pre-cooling, drying and packaging of litchis.

KEY WORDS: litchi; pulp temperature; time series; pre-cooling

收稿日期: 2022-06-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0701002); 广东省重点领域研发计划(2019B020225001); 广东机电职业技术学院创新团队项目(CXTD20220002)

作者简介: 王广海(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品冷链物流技术与装备。

采后荔枝果肉的温度较高,在常温下荔枝的品质劣变速率较快。通过快速预冷的方式降低其呼吸和蒸腾作用,可以有效延长荔枝等果蔬的贮藏时间^[1-7]。荔枝预冷主要有冰水预冷、冷库预冷和差压预冷等方式^[8]。吕盛坪等^[9]研究了 3 种预冷方式对荔枝果肉温度的影响,结果表明,冰水预冷是降温最快、温度分布最均匀的一种预冷方式。郭嘉明等^[10-11]研究了果蔬在预冷过程中的降温特性。荔枝果肉的温度变化特性在快速预冷和晾干包装 2 个不同进程中存在显著差异,通过建模分析预测荔枝果肉温度的变化趋势,选择合理的预冷和晾干包装时长,是荔枝预冷环节的关键内容。传统冰水预冷一般根据经验值来推测预冷时间,存在明显的不确定性。另外,果品预冷后需经晾干包装处理后再进行贮藏,晾干时间过长会导致入库贮藏温度过高,预冷效果不明显^[12],国内外针对该过程时间控制的相关研究较为少见。文中通过引入时间序列算法^[13-15],描述荔枝预冷过程温度样本数据的动态结构,实现模型阶数和参数的最佳估计,通过建模分析荔枝果肉温度的变化特性,给出荔枝果肉温度与时间的映射关系,为荔枝预冷、晾干和包装环节的过程控制提供理论基础和参考依据。

1 实验

1.1 材料与装置

实验采用的荔枝品种为“桂味”,果实成熟度为 8~9 成,在果园采摘后于 1 h 内运回实验室,并去除

果实枝叶,筛除坏果、伤果,选择颜色鲜红、直径约 3~4 cm 的荔枝作为研究对象,共约 120 kg,采用冰水预冷方式进行预冷试验。冰水预冷装置选用保温性能较好的泡沫箱体(长×宽×高为 40 cm×40 cm×60 cm),单箱预冷荔枝的质量约为 10 kg,置于实验室自主研发的可控温冷藏厢体内,冷藏厢体可以模拟不同的环境温度。冰水使用蓄冷冰袋来调节温度,选择 PT100 型探针式温度计测量冰水预冷过程中的温度。试验平台和装置如图 1 所示。

1.2 实验设计

所用冰水预先采用蓄冷冰袋调制,采用 PT100 型探针式温度计实时记录冰水的温度变化情况,并及时加水进行调节,使水温稳定在 2~3 °C。为了减少预冷过程中的热量损失,将预冷水箱置于冷藏厢体内。采用冷藏厢体的控制器 PLC 实时采集温度变送器的数据,并通过变频器控制风机的运转,将厢体内环境温度维持在 2 °C 左右。荔枝预冷温降实验的时长为 42 min,每隔 1 min 从水箱中取出,测定荔枝不同位置的果肉温度(果皮以下约 1.5 cm 处),重复 3 次实验,记录荔枝果肉温度的变化数据,分析冰水预冷过程中荔枝果肉的降温速率。实验仪器设备规格参数如表 1 所示。

荔枝经预冷后随即进行晾干试验。将冰水预冷后的荔枝直接取出,置于室温(25 °C)环境下,温升实验时间为 46 min,每隔 1 min 检测 1 次果肉温度,重复 3 次实验,模拟预冷后入库前荔枝包装及晾干过程的温度变化情况。

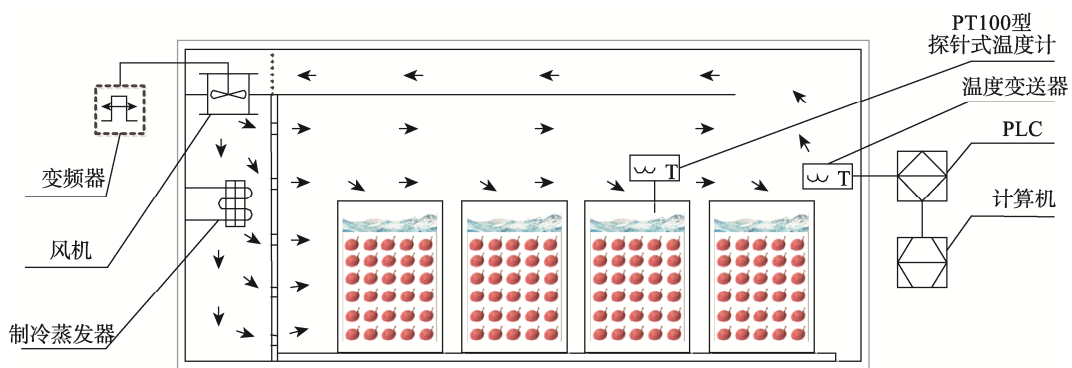


图 1 试验平台和装置
Fig.1 Test platform and device

表 1 实验仪器设备规格参数
Tab.1 Specifications of test equipment and equipment

序号	仪器设备名称	规格型号	生产厂家	参数
1	PLC	主机型号 S7-314	西门子(中国)有限公司	供电电压为 24 V
2	PT100 型探针式温度计	WZP-187	乐清市台邦电子科技有限公司	测量范围为-50~300 °C, 误差为±0.5 °C
3	温度变送器	HT-SBWZ-2088	安徽徽腾仪表有限公司	测量范围为-50~50 °C, 误差为±0.5 °C
4	变频器	MM420	西门子(中国)有限公司	调节频率范围为 0~50 Hz
5	控制风机	130FLJ0	深圳市俊业达电机科技有限公司	转速为 2 500 r/min, 风量为 144 m ³ /h

为了进一步研究预冷荔枝果肉温度的变化特性,将预冷后的荔枝放置在温度波动系数较低玻璃罐内,将玻璃罐放置在可控温的冷藏厢体内,分别设置不同水平值(2、4、6、8、10℃)的环境温度,每次实验时间为10 min,每隔1 min检测1次荔枝的果肉温度数据,重复3次实验,记录温度变化数据,分析冰水预冷后荔枝果肉在静置过程中的升温速率。

1.3 时间序列模型

构建时间序列模型是结合历史数据对未发生的数据进行预测的一种推导方法,根据统计学相关知识,对历史数据进行针对性分析,找出阶段数据的演变规律,建立数学模型,进而对预测指标的数据走向和发展趋势做出定量的评估。通过描述荔枝预冷过程温度样本数据的动态结构,实现模型阶数和参数的最佳估计,引入自回归滑动平均模型(Auto Regressive Moving Average Model,简称ARMA模型),结合时间序列发生机理对荔枝预冷过程中果肉温度变化值及其变化速率进行预测,提高信号估计和预测的精度。文中采用ARMA模型作为拟合平稳序列模型,预测荔枝在预冷过程中果肉温度的变化特征,具体计算见式(1)~(5)。

$$\rho_h = \frac{Cov(x_t, x_{t-h})}{\sigma_{x_t} \cdot \sigma_{x_{t-h}}} \quad (1)$$

式中: ρ_h 为自相关系数; $Cov(x_t, x_{t-h})$ 为自协方差; σ_{x_t} 为标准差,反映总体数据特征的离散程度。

荔枝果肉温度变化过程较为平稳,前后数据方差的差异性不显著,自相关系数可表示为式(2)。

$$\rho_h = \frac{Cov(x_t, x_{t-h})}{\sigma_{x_t}^2} \quad (2)$$

偏相关系数递推见式(3)。

$$\phi_{1,1} = \rho_1$$

$$\phi_{h+1,h+1} = \left(\rho_{h+1} - \sum_n \rho_{h+1-i} \phi_{h,i} \right) \left(1 - \sum_n \rho_i \phi_{h,i} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$\phi_{h+1,i} = \phi_{h,i} - \phi_{h+1,h+1} \phi_{h,h-(i-1)}$$

式中: $\phi_{h,h}$ 为偏相关系数; h 为随机变量相隔周期。

对于任意 $\phi_{h,h}$ 、 ρ_h 满足以下判断条件要求,见式(4),则拟合平稳序列ARMA模型可以构建训练数据集 P 。

$$|\phi_{h,h}| \leq \frac{2}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$$|\rho_h| \leq \frac{2}{\sqrt{n}}$$

ARMA预测模型表达式见式(5)。

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \varepsilon_t + \alpha_1 \varepsilon_{t-1} + \alpha_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \alpha_q \varepsilon_{t-q} \quad (5)$$

式中: p 、 q 为模型的阶数; β_p 、 α_q 为模型的待

定系数; ε_t 为误差; Y_t 为平稳时间序列。

1.4 数据处理

试验数据分析与处理采用Excel 2010和SPSS 19.0软件。

2 结果与分析

2.1 荔枝果肉温度与时间的关系

荔枝的贮藏温度为4~6℃,平均为5℃左右。如图2所示,在冰水预冷过程中,荔枝果肉温度从26℃降至5℃约需14 min,荔枝在预冷初期的降温速率较大,且随着时间的推移,降温速率逐渐减小;荔枝果肉温度从5℃降至2℃约需30 min,降温速率较小,且随着时间的推移,降温速率逐渐趋于平缓。根据荔枝在预冷过程中果肉温度的下降特征可知,不同时间段内荔枝果肉温度的降温效果差异显著,如图2所示。前14 min内的平均降温速率计算见式(6)。

$$dT/dt = 1.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min} \quad (6)$$

在15~45 min时间段内的平均降温速率计算见式(7)。

$$dT/dt = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min} \quad (7)$$

为了减少荔枝与冰水的接触时间,减少霉菌滋生,降低低温贮藏过程的品质劣变速率,可推断荔枝适宜的有效预冷时间为13~15 min。

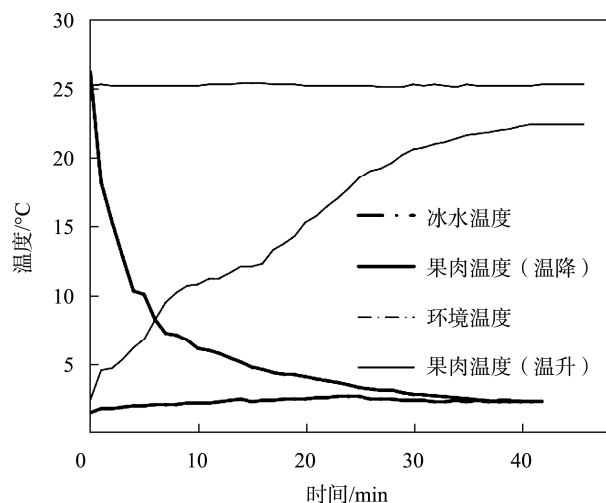


图2 荔枝果肉温度的变化情况
Fig.2 Temperature change of litchi

经冰水预冷后的荔枝在入库贮藏前,需要对荔枝进行晾干、包装等处理,该过程需要耗费一定时间,因此确保荔枝果肉温度处于较低水平范围内完成上述处理过程是非常必要的。如果晾干、包装等处理过程耗时过长,则荔枝入库贮藏前的果肉温度过高,这将直接影响前期的预冷效果,对后期荔枝贮藏品质的影响较大,因此有必要对荔枝预冷后的温升试验数据建立模型分析。从图2可以看出,将冰水预冷后的荔

枝静置在常温环境 (25 °C) 下, 在前 5 min 内荔枝果肉温度基本保持在 6 °C 以内, 升温速率随着时间的推移, 总体呈现波动性减小的趋势, 平均升温速率为 0.85 °C/min。为了减小荔枝预冷后温度与贮藏温度的差值, 在预冷后 4~6 min 时间内应及时将荔枝放入冷库贮藏, 这样可有效减小荔枝的贮藏温度波动, 延长荔枝的保鲜周期。

2.2 预测与验证

减少荔枝预冷后晾干、包装等环节的处理时间, 可有效降低荔枝温度大幅度波动对贮藏品质的影响。为了更好地分析荔枝果肉温度的变化情况, 引入时间序列 ARMA 模型预测荔枝果肉温度变化与时间的关系。ARMA 模型是结合 AR、MA 双模型的综合预测模型, 是分析处理动态数据的一种有效的手段, 针对曲线进行拟合具有较高的准确性, 模型预测结果如图 3 所示。在预冷过程中, 荔枝的果肉温度从 26.3 °C 降至 2.2 °C 耗时 42 min, 通过 SPSS 19.0 软件对荔枝预冷实验数据进行建模分析, 可以得到该时段内时间序列 ARMA 模型预测荔枝果肉温度从 25.3 °C 降至 2.2 °C; 在常温环境 (25 °C) 下晾干、包装过程中, 荔枝果肉温度从 2.3 °C 升至 22.5 °C 耗时 42 min, 该时段内时间序列 ARMA 模型预测荔枝果肉温度从 2.4 °C 升至 22.7 °C。从图 3 可以看出, 荔枝在预冷和晾干过程中, 模型预测值 P 与实验实测值高度拟合, R 方值 (决定系数) 均大于 0.84。说明该模型可以解释荔枝在预冷过程中果肉温度预测值超过 84% 的变异比例, 预测值 P 与实验实测值之间的差异较小。根据时间序列 ARMA 模型预测 60 min 内荔枝果肉温度的变化趋势, 如图 3 所示, 在 42~60 min 的时间段内, 荔枝果肉温度的预测值曲线变化趋势逐渐接近实验设置的条件值, 表明预测结果具有相当的可靠性。

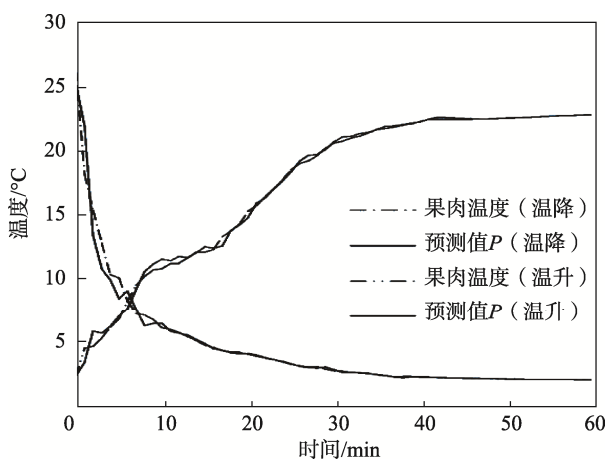


图 3 荔枝果肉温度变化预测
Fig.3 Prediction of the temperature change of litchi

上述时间序列 ARMA 模型表征了荔枝在冰水预冷环境下降温过程和室温 (25 °C) 环境下升温过程

的温度预测值 P , 根据该模型可准确计算荔枝在某时段内果肉温度变化与时间的递推关系。结合荔枝预冷前果肉温度与所需贮藏环境温度的差值, 通过上述模型可计算荔枝从预冷至入库贮藏环节的最佳时间范围, 减小环境温度变化对荔枝果肉温度造成的影响, 最终保持荔枝的贮藏品质。

为了进一步验证上述时间序列 ARMA 模型的可靠性, 设计了荔枝预冷后分别处在不同水平值 (2、4、6、8、10 °C) 环境温度下的温升试验, 研究果肉温度与时间的映射关系。实验结果和模型预测结果如图 4 所示。荔枝在 2 °C 的环境温度下进行 10 min 的温升试验, 果肉温度从 3.1 °C 升至 2.15 °C, 模型预测果肉温度从 3.08 °C 升至 2.2 °C; 荔枝在 4 °C 的环境温度下进行 10 min 的温升试验, 果肉温度从 3.25 °C 升至 4.3 °C, 模型预测果肉温度从 3.27 °C 升至 4.16 °C; 荔枝在 6 °C 的环境温度下进行 10 min 的温升试验, 果肉温度从 3.5 °C 升至 6.35 °C, 模型预测果肉温度从 3.54 °C 升至 6.36 °C; 荔枝在 8 °C 的环境温度下进行 10 min 的温升试验, 果肉温度从 3.85 °C 升至 8.4 °C, 模型预测果肉温度从 3.81 °C 升至 8.16 °C; 荔枝在 10 °C 的环境温度下进行 10 min 的温升试验, 果肉温度从 4.35 °C 升至 10.3 °C, 模型预测果肉温度从 4.35 °C 升至 10.4 °C。另外, 从图 4 可看出, 在 10~20 min 的时间段内, 荔枝果肉温度的预测值曲线变化趋势逐渐接近于实验设置的条件值, 表明预测结果具有相当的可靠性。预冷后的荔枝在不同的环境温度水平下进行晾干、包装等温升过程, 果肉温度的时间序列 ARMA 模型预测值 P 与实验实测值高度拟合, R 方值 (决定系数) 均大于 0.82。这表明该模型可以解释荔枝晾干、包装过程果肉温度预测值超过 82% 的变异比例, 时间序列 ARMA 模型能够在较大程度上表征荔枝果肉温度随时间的变化特性, 可为荔枝快速预冷和保鲜贮藏提供指导。

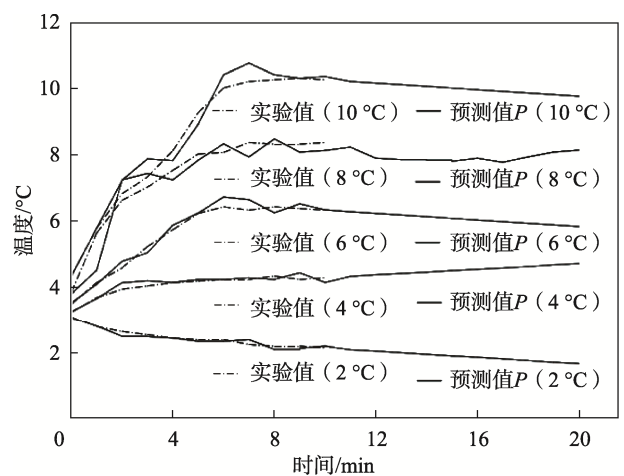


图 4 不同温度环境下荔枝果肉温度变化预测
Fig.4 Prediction of litchi temperature change under different temperature

3 结语

通过分析冰水预冷过程中荔枝果肉温度的变化特性,结合荔枝保鲜处理工艺流程,设计了荔枝冰水预冷的温降和温升实验,引入时间序列 ARMA 模型对荔枝果肉温度变化进行了预测分析。

1) 冰水预冷能较快地将荔枝果肉温度降至所需温度,但为了减少荔枝与冰水的接触时间,选择预冷时长 13~15 min 为宜。

2) 为了避免入库时荔枝果肉温度过高,在预冷后 4~6 min 内及时将荔枝放入冷库贮藏,可有效减小温度波动,延长荔枝的保鲜周期。

3) 时间序列 ARMA 模型预测值 P 与实验实测值高度拟合,这在较大程度上表征了荔枝果肉温度随时间的变化特性,可为荔枝冰水预冷、晾干、包装的过程参数控制提供依据。

参考文献:

- [1] 蒋依辉,刘伟,袁沛元,等.荔枝保鲜包装技术研究进展[J].包装工程,2016,37(15):95-101.
JIANG Nong-hui, LIU Wei, YUAN Pei-yuan, et al. Research Progress of Fresh-keeping Packaging Technology of Litchi[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 95-101.
- [2] 胡位荣,张昭其,蒋跃明,等.采后荔枝冰温贮藏的适宜参数研究[J].中国农业科学,2005,38(4):797-802.
HU Wei-rong, ZHANG Zhao-qi, JIANG Yue-ming, et al. Study on the Parameter of Ice-Temperature Storage in Litchi (*Litchi Chinensis* Sonn)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(4): 797-802.
- [3] CHOURASIS M K, GOSWAMI T K. Simulation of Transport Phenomena during Natural Convection Cooling of Bagged Potatoes in Cold Storage, Part I: Fluid Flow and Heat Transfer[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 33-45.
- [4] LAGUERRE O, FLICK D. Temperature Prediction in Domestic Refrigerators: Deterministic and Stochastic Approaches[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(1): 41-51.
- [5] HOANG H M, LAGUERRE O, MOUREHJ, et al. Heat Transfer Modeling in a Ventilated Cavity Loaded with Food Product: Application to a Refrigerated Vehicle[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 389-398.
- [6] 卢素珊,涂桢楷,赵锡和,等.我国荔枝加工技术研究现状[J].现代农业装备,2022,43(2):14-17.
LU Su-shan, TU Zhen-kai, ZHAO Xi-he, et al. Research Status of Litchi Processing Technology in China[J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(2): 14-17.
- [7] 李秋月,龙桂英,巴良杰,等.不同物流条件对荔枝采后贮藏期间果实品质的影响[J].广东农业科学,2014,41(16):96-99.
LI Qiu-yue, LONG Gui-ying, BA Liang-jie. Effects of Logistics Condition on Fruit Quality of Postharvest Litchi during Storage[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(16): 96-99.
- [8] 阮文瑜,刘宝林,宋晓燕.荔枝的冷却方式选择[J].食品工业科技,2012,33(11):352-353.
RUAN Wen-liu, LIU Bao-lin, SONG Xiao-yan. Comparison of Cooling Method for Litchi Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 352-353.
- [9] 吕盛坪,吕恩利,陆华忠,等.荔枝不同预冷方式降温特性研究[J].华南农业大学学报,2015,36(3):114-119.
LYU Sheng-ping, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Cooling Characteristics of Different Precooling Methods for Litchi[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(3): 114-119.
- [10] 郭嘉明,魏鑫钰,杜县南,等.基于传热传质的荔枝预冷果温和质量损失率预测[J].农业机械学报,2019,50(3):323-329.
GUO Jia-ming, WEI Xin-yu, DU Xian-nan, et al. Prediction on Fruit Temperature and Weight Loss Rate for Litchi Pre-cooling Based on Heat and Mass Transfer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 323-329.
- [11] 吕盛坪,吕恩利,陆华忠,等.不同预冷方式对荔枝贮藏品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(3):157-162.
LYU Sheng-ping, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effect of Different Precooling Methods on the Storage Quality of Litchi[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 157-162.
- [12] 王丽艳,蒋爱国,郭树国.基于BP神经网络的猕猴桃切片品质参数预测研究[J].中国农机化学报,2015,36(4):135-138.
WANG Li-yan, JIANG Ai-guo, GUO Shu-guo. Prediction study on Quality Parameters of Chinese Gooseberry Slice Based on BP Neural Network[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(4): 135-138.
- [13] 段青玲,张磊,魏芳芳,等.基于时间序列 GA-SVR 的水产品价格预测模型及验证[J].农业工程学报,2017,33(1):308-314.
DUAN Qing-ling, ZHANG Lei, WEI Fang-fang, et al. Forecasting Model and Validation for Aquatic Product Price Based on Time Series GA-SVR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 308-314.
- [14] 邹平,杨劲松,姚荣江.土壤温度时间序列预测的BP神经网络模型研究[J].中国生态农业学报,2008,16(4):835-838.
ZOU Ping, YANG Jin-song, YAO Rong-jiang. Application of BP Neural Network in Forecasting Soil Temperature Time Series[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 835-838.
- [15] 杨锡运,孙翰墨.基于时间序列模型的风电场风速预测研究[J].动力工程学报,2011,31(3):203-208.
YANG Xi-yun, SUN Han-mo. Wind Speed Prediction in Wind Farms Based on Time Series Model[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(3): 203-208.