

基于极端气温的西红柿 Arrhenius 品质预测耦合模型构建

The establishment of Arrhenius prediction model for tomato quality under extreme meteorological temperatures

马旻臻^{1,2,3} 王冀⁴ 史策^{2,3,5} 贾志鑫^{2,3,5} 许倩⁶

MA Minzhen^{1,2,3} WANG Ji⁴ SHI Ce^{2,3,5} JIA Zhixin^{2,3,5} XU Qian⁶

(1. 浙江海洋大学食品与药学院, 浙江 舟山 316022; 2. 北京市农林科学院信息技术研究中心,

北京 100097; 3. 北京市农林科学院农产品质量追溯国家工程研究中心, 北京 100097;

4. 北京市气候中心, 北京 100097; 5. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 北京 100097;

6. 塔里木大学食品科学与工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

(1. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316004, China;

2. Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences,

Beijing 100097, China; 3. National Engineering Research Center of Agricultural Product Quality

Traceability, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 4. Beijing

Climate Center, Beijing 100097, China; 5. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for

Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China; 6. School of

Food Science and Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

摘要:目的: 基于 Arrhenius 方程结合气象温度数据构建西红柿品质预测耦合模型, 预测西红柿在极端气温下短期贮运过程的品质变化。方法: 分析 2020 年潍坊、保定、大兴气象温度数据, 选取 7 个温度点模拟西红柿在短期贮运过程中极端温度的变化范围。基于 Arrhenius 方程, 结合气温与失重率、硬度、色差 (ΔE) 和感官评分 (SE) 构建西红柿品质预测耦合模型, 并选取 $-10, 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行验证。结果: 贮运 48 h 内, 西红柿的失重率和 ΔE 逐渐增加, SE 和硬度逐渐降低。基于 Arrhenius 方程结合气象温度数据构建品质预测耦合模型, $0\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下, 失重率和 SE 变化采用零级反应拟合, 硬度与 ΔE 变化分别采用一级反应与半级反应拟合; $-15\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下, SE、 ΔE 、失重率与硬度的变化均采用零级反应拟合。对预测模型进行验证, $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下西红柿的失重率、

硬度与 SE 的相对误差在 15% 以内 (除 48 h 的); $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下, 西红柿的硬度与 SE 的相对误差在 15% 以内 (除 48 h 的)。结论: 基于 Arrhenius 方程结合极端气象温度数据构建的西红柿品质预测耦合模型能够有效预测极端温度条件下西红柿的品质。

关键词: 西红柿; 极端天气; 温度耦合; Arrhenius; 品质变化

Abstract: Objective: A coupled model for predicting tomato quality during short-term storage and transportation under extreme temperatures, utilizing the Arrhenius equation in conjunction with meteorological temperature data, to forecast the quality changes in tomatoes during the short-term storage and transportation processes under extreme weather conditions.

Methods: Analyzing the meteorological temperature data for the year 2020 in Weifang, Baoding, and Daxing, 7 temperature points were selected to simulate the range of temperature variations for short-term storage and transportation of tomatoes. By utilizing the Arrhenius equation and integrating temperature with weight loss rate, hardness, color difference (ΔE), and sensory evaluation scores (SE), a coupled model was developed for predicting tomato quality. The model was validated by using temperatures of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Results:** Within 48 hours of

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 32071917); 青年北京学者; 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目 (编号: 2023C02006); 兵团指导性科技计划项目 (编号: TDZKXC202207)

作者简介: 马旻臻, 男, 浙江海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 史策 (1989—), 女, 北京市农林科学院信息技术研究中心副研究员, 博士。E-mail: shice001@163.com

收稿日期: 2023-11-30 **改回日期:** 2024-03-27

storage and transportation, Loss rate and ΔE of tomatoes gradually increased, while evaluation scores (SE) and hardness decreased gradually. The quality prediction coupling model based on the Arrhenius equation combined with meteorological temperature data was constructed. Under storage conditions from 0 to 36 °C, changes in loss rate and SE were fitted with zero-order reactions, while changes in hardness and ΔE were fitted with first-order and half-order reactions, respectively. For storage conditions from -15 to 0 °C, zero-order reaction fits were applied to model the changes in SE, ΔE , weight loss rate, and hardness. Validation of the predictive model revealed that, under 12 °C storage conditions, the relative errors for tomato weight loss rate, hardness, and SE were within 15%, except for the 48 hour prediction. Under -10 °C storage conditions, the relative errors for tomato hardness and SE were within 15%, excluding the 48 hour prediction. **Conclusion:** The coupled model for tomato quality prediction, constructed by integrating the Arrhenius equation with extreme meteorological temperature data, proves to be effective in forecasting the quality of tomatoes under extreme temperature conditions.

Keywords: tomato; extreme temperatures; temperature-coupled; Arrhenius; quality change

西红柿是一种重要的喜温性蔬菜,其肉质纤细,酸甜适口,汁多味鲜,具有极高的营养价值。2019年,中国西红柿年产量达3 254万t,其中加工西红柿的总产量仅次于美国和欧盟^[1]。目前,蔬菜的主要销售形式为采摘后在短时间内运到目的地进行销售^[2]。西红柿的品质受多种因素影响,包括自身的呼吸作用、温度变化、病原菌感染以及机械损伤,这些因素导致了西红柿外观颜色的加深、果肉的老化以及硬度的改变^[3]。此外,短期运输易受极端天气与极端温度的影响,使蔬菜品质受损^[4]。根据《气候变化国家报告》的数据,极端天气对农作物的不利影响也在逐年加强,预计到2023年,中国的农业产能可能因极端温度天气的影响而下降5%~10%^[5]。

蔬菜的呼吸作用会导致其颜色、硬度、质量和其他质量指标的变化,而阿伦尼乌斯(Arrhenius)定律解释了温度和呼吸速率之间的关系^[6-9]。裴娇艳^[10]采用Arrhenius一级动力学模型回归方程,并结合Logistic和Gompertz曲线进行拟合,构建了一种基于西红柿的色泽、硬度、明度值和番茄红素含量的品质预测模型。毛苏扬^[11]将Arrhenius方程与圣女果的理化指标的函数变化过程相结合,建立了货架期预测模型。但目前有关基于极端温度条件下结合气象温度数据预测西红柿品质的研究尚未见报道。

研究拟以腐烂率、失重率、可溶性固形物含量(SSC)、色差(ΔE)、硬度和感官评分(SE)为评价指标,分析西红柿在贮运过程中的品质变化。同时,构建一种基于气象

温度数据与品质指标相互耦合的Arrhenius西红柿品质预测模型,以便能够在极端温度条件下预测西红柿的品质,以期在极端气温短途运输的蔬果品质监测提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

西红柿:品种为秋延晚,单个西红柿质量为(180±10)g,该品种在夏季进行育苗,秋初进行定植,秋末冬初继续在保护设施内生长发育,最终在12月上市供应;种植在光照充足,气温为15~30 °C,土壤与空气湿度分别为60%~80%和40%~50%的塑料大棚内,在绿熟期进行采摘,采摘后6h内送至实验室。

1.2 仪器与设备

微生物培养箱:Panasonic MIR-254-PC型,日本松下(三洋)公司;

百分之一电子天平:ME1002E型,瑞士梅特勒利多公司;

食品测色仪:LABScan® XE型,美国HunterLab公司;手持折光仪:MyBrix 10 pcs box型,瑞士梅特勒利多公司;

质构仪:TA-XT2i型,英国Stable Micro Systems公司。

1.3 试验方法

选取大兴、保定和潍坊3个蔬菜站,其温度数据来自北京市气象局,为华北地区的代表性蔬菜站点。试验于2021年11—12月在北京市农林科学院信息技术研究中心农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室进行。将挑选好的西红柿用聚乙烯保鲜自封袋分装,每6个一袋。将分装好的西红柿分别置于(36±0.5),(24±0.5),(12±0.5),(0±0.5),(-5±0.5),(-10±0.5),(-15±0.5) °C的高精度恒温培养箱中贮存,每个温度5袋共30个西红柿,用以模拟西红柿在采摘、运输及销售过程中所处的温度环境。每隔12h在每个贮藏温度下取样一次,每次随机选取1袋共6个西红柿,总计12个样本,对各项指标进行平行检测。试验温度根据潍坊、保定和大兴3个蔬菜站的全年气象温度数据进行选择。

1.4 品质指标测定

1.4.1 腐烂率 采用观察法甄别西红柿的腐烂状况,将有霉菌、塌陷或黑斑的果实鉴定为腐烂果实,按式(1)计算腐烂率。

$$R = \frac{A_R}{A_T} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R ——腐烂率, %;

A_R ——西红柿的腐烂数;

A_T ——西红柿的总数。

1.4.2 失重率 采用电子天平称量样品在每个测试时间点的质量,按式(2)计算失重率。

$$W = \frac{W_0 - W_i}{W_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

W ——失重率, %;

W_0 ——第 0 天样品的质量, g;

W_i ——第 i 天样品的质量, g。

1.4.3 可溶性固形物 参照 GB 12295—1990。

1.4.4 色泽 使用食品测色仪测定西红柿赤道部位每隔 90°取 4 个位置的 L^* (亮度)、 a^* (红/绿)、 b^* (黄/蓝) 值^[10-12]。按式(3)计算 ΔE 。

$$\Delta E = [(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* + a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2]^{0.5}, \quad (3)$$

式中:

ΔE ——色差值;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——第 0 天样品参数;

L_i^* 、 a_i^* 、 b_i^* ——第 i 天样品参数。

1.4.5 硬度 采用质构仪 P/2E 探针测量西红柿的硬度,测前速度 1.00 mm/s、试验速度 5.00 mm/s、测后速度 5.00 mm/s、测试距离 10.00 mm、测试时间 5.00 s、脱皮模式 Auto、触发力 0.05 N、触发类型 Auto force、高级选项 On,取每个西红柿的赤道部位进行试验。

1.4.6 感官评价 参照 Martens 等^[13]的方法,制定如表 1 所示的评定标准。

1.5 基于温度耦合的西红柿品质预测模型的建立

采用动力学模型对不同温度下贮藏的西红柿的失重率、硬度、色差和感官评分等指标进行拟合分析。贮藏期间,食品品质的变化率遵循一般动力学反应定律^[14]:

$$\frac{-dC}{dt} = kC^n, \quad (4)$$

零级反应动力学模型:

$$C = C_0 - kt, \quad (5)$$

一级反应动力学模型:

$$C = C_0 \exp(-kt), \quad (6)$$

对于第 n 阶反应的的动力学模型($n \neq 1$):

$$\left[\frac{C}{C_0} \right]^{1-n} = 1 + (n-1)kC_0^{n-1}t, \quad (7)$$

式中:

C ——贮藏一定时间后的品质指标值;

C_0 ——贮藏开始前的初始品质指标值;

t ——贮藏时间, d;

k ——速率常数;

n ——反应级数。

温度对食品化学反应速率的影响遵循 Arrhenius 方程^[15-16],可描述温度与食品化学反应速率的关系,根据

表 1 西红柿感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation standard of tomato

项目	评价指标	分值
色泽	绿色	5
	轻微红色	4
	小部分红色	3
	大部分红色	2
	完全熟红	1
质地	硬实	5
	较硬	4
	较软	3
	完全变软	2
	软腐	1
外观	表面光滑饱满	5
	表面无光泽较饱满	4
	表面无光泽较粗糙	3
	表面无光泽有褶皱	2
	表面有皱缩、瘪缩、开裂	1
气味	清香	5
	较香无异味	4
	无异味	3
	轻微异味	2
	酸臭味、霉味	1

动力学模型拟合结果^[15,17],建立 Arrhenius 模型:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (8)$$

对式(5)两边取对数可得:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT}, \quad (9)$$

式中:

k_0 ——指前因子;

E_a ——反应的活化能, J/mol;

R ——气体等温常熟, 8.314 510 J/(mol · K);

T ——热力学温度, K。

结合式(4)和式(8),在反应级数($n=0, 0.5, 1, 2$)下得到温度耦合品质预测模型^[18-19]。 $\ln k$ 与 $1/T$ 呈线性关系,直线斜率为 $-E_a/R$, Y 轴上截距为 $\ln k_0$ 。求得不同温度下西红柿各指标的速率常数 k 后,以 $\ln k - 1/T$ 可以计算出活化能 E_a 和指前因子 k_0 。通过对 $\ln k$ 、 $1/T$ 线性拟合,依据直线的斜率和截距分别计算反应活化能 E_a 和指前因子 k_0 值。

1.6 Arrhenius 温度耦合品质预测模型的评估和验证

为了评估 Arrhenius 模型的性能和准确性,使用相对误差 E_{re} 验证模型的准确度^[20]。

$$E_{re} = \frac{W_{pre} - W_{exp}}{W_{exp}} \times 100\%, \quad (10)$$

式中:

E_{re} ——试验值与预测值的相对误差, %;

W_{exp} ——试验值;

W_{pre} ——预测值。

1.7 数据分析

采用 Excel 2016、Origin 2018 软件将数据处理成散点图,进行方差分析(ANOVA)并建立 Arrhenius 模型。使用 Origin 2018 软件进行线性拟合、置信区间分析。

2 结果与讨论

2.1 气象数据分析

由图 1 可知,潍坊、保定、大兴全年最低日气温均出

现在 350 d 左右(12 月),分别为 -14.2 , -15.6 , -12.1 °C;潍坊、保定全年最高日气温均出现在 150 d 左右(5 月份),大兴全年最高日气温出现在 220 d 左右(7 月份),温度分别为 36.2 , 35.1 , 39.7 °C。全年日均最高气温温度段出现天数由多到少分别为: $20 \sim 30$, $0 \sim 10$, $10 \sim 20$, >30 , $-10 \sim 0$, < -10 °C;全年日均最低气温温度段出现天数由多到少分别为 $0 \sim 10$, $10 \sim 20$, $-10 \sim 0$, $20 \sim 30$, < -10 , >30 °C。一般蔬菜的采收、贮运、销售处于夏秋季,因此根据这些气象温度数据,将试验温度点定为 36 , 24 , 12 , 0 , -5 , -10 , -15 °C,作为西红柿短期运输受极端温度影响的贮藏条件。

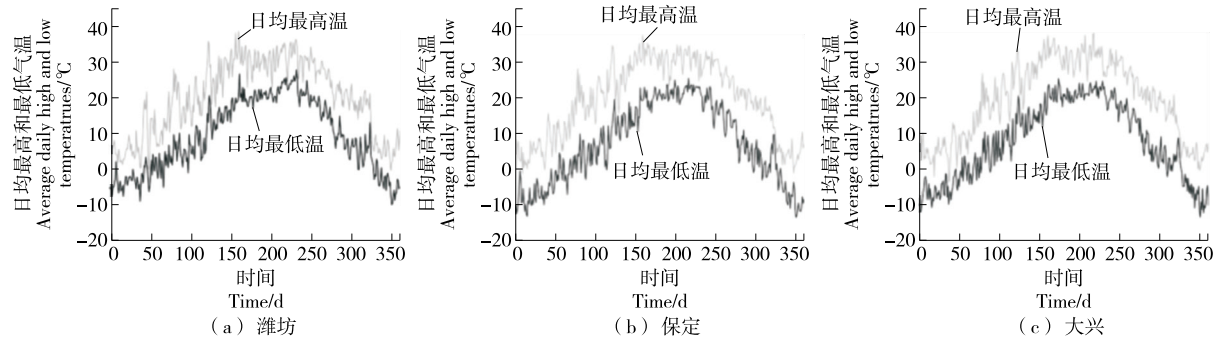


图 1 2020 年潍坊、保定及大兴的日均最高、最低日气温

Figure 1 Annual maximum and minimum daily temperatures in Weifang, Baoding and Daxing in 2020

2.2 品质指标分析

2.2.1 腐烂率 蔬菜腐烂是其组织衰老和外部病原菌感染的结果^[21]。西红柿在不同温度下贮藏 48 h 后均未发生腐烂,表明秋延晚西红柿在短期贮藏中能保持良好的组织特性。

2.2.2 失重率 蔬菜失重的主要原因是自身呼吸作用和水分的蒸腾作用^[22]。由图 2 可知,秋延晚西红柿在 48 h 短期贮运过程中失重率均增加,可能是由于贮运初期西红柿中的营养和水分充足,呼吸和水分蒸腾旺盛^[23]。在 12.0 , -5 , -10 °C 短期贮运条件下,西红柿失重率增长趋势相近,48 h 短期贮运过程中的失重率均在 0.9% 以内。 24 °C 下西红柿贮运后期失重率达到 1.7%, 36 °C 下的更高,接近 2.5%。 -15 °C 下西红柿贮运后期失重率为 1.2%,可能是西红柿在贮运过程中发生干耗^[24]。由于西红柿在采摘后失去了养分和水分的供给,只能通过呼吸作用提供所需的能量,并通过蒸腾作用提供所需的动力。高温环境下,西红柿的呼吸作用会加剧,同时水分和营养物质的散失也会加快;而环境温度过低时,也可能影响西红柿的水分散失。

2.2.3 可溶性固形物含量 可溶性固形物含量代表番茄中溶质的百分含量,主要由可溶性糖和有机酸等营养成分组成,是衡量西红柿品质的重要指标^[25]。由图 3 可知,

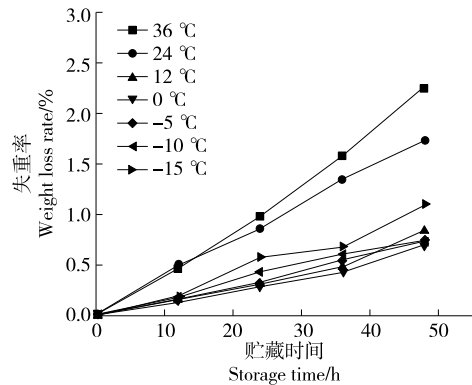


图 2 不同温度下西红柿失重率的变化

Figure 2 Changes in weight loss rate of tomato under different temperature storage conditions

秋延晚西红柿在不同贮藏温度下,SSC 含量为 $4.6\% \sim 6.7\%$,整体较稳定,表明不同贮藏温度对西红柿 SSC 含量无明显影响。其中 36 , 24 , 12 , 0 °C 下 SSC 含量较 -5 , -10 , -15 °C 下的波动小,可能是低温贮藏使西红柿中水分冻结进而影响 SSC 含量。

2.2.4 色差值 西红柿的颜色主要由叶绿素和类胡萝卜素共同呈现,其中番茄的红色主要为番茄红素(类胡萝卜素类化合物的一种)所呈现的颜色^[26]。由图 4 可知,不同贮藏温度下,样品的 ΔE 值均有所增加。贮藏期间, ΔE

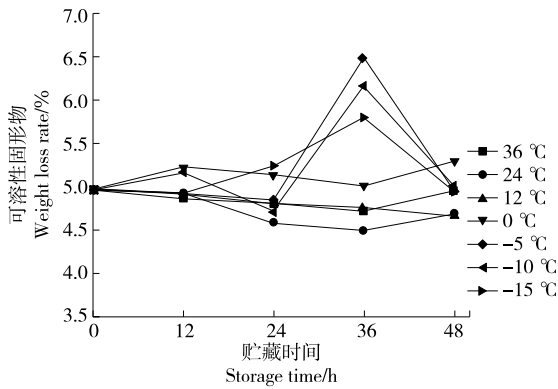


图 3 不同温度下西红柿可溶性固形物的变化

Figure 3 Changes in soluble solids of tomato under different temperature storage conditions

值为 0.54~5.89,其中肉眼很难辨别 ΔE 值在 3.2~6.5 时的西红柿颜色变化^[27]。表明西红柿在短期贮藏期内可以保持良好的色泽。西红柿在 -15, -10, 36 °C 下的 ΔE 值较大, 24, 12, 0, -5 °C 下的变化相对较小, 可能是高温环境下类胡萝卜素受到热敏感性的影响, 导致其降解加速, 而低温可能使水结晶形成冰晶, 导致细胞破裂, 从而释放类胡萝卜素, 低温还可能致类胡萝卜素不规则聚集或结晶, 使其在细胞中的分布变得不均匀^[10,28]。综上, 贮藏温度对西红柿的颜色有显著影响, 为保证西红柿颜色稳定, 短期贮运宜在 0~12 °C 下进行。

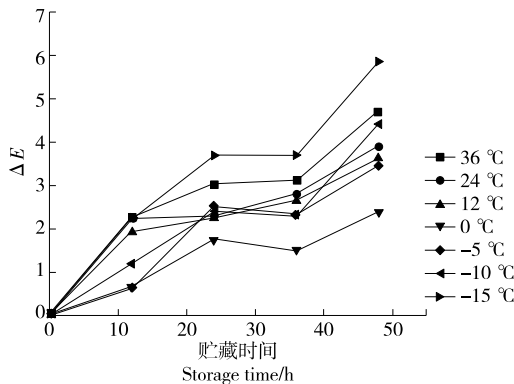


图 4 不同温度下西红柿 ΔE 的变化

Figure 4 Changes in ΔE of tomato under different temperature storage conditions

2.2.5 硬度 由图 5 可知, 随着采后贮藏时间的延长, 西红柿的硬度总体呈下降趋势, 表明西红柿水分流失量增加。这可能是因为细胞壁结构和纤维素含量的变化影响了西红柿的硬度。另一方面, 西红柿在绿熟期含有大量原果胶, 使其具有较高的硬度。随着贮藏时间的延长, 绿熟的西红柿逐渐进入后熟阶段, 此时原果胶含量下降, 而可溶性果胶含量上升, 西红柿质地逐渐变软。西红柿过熟时, 果胶会降解成果胶酸, 进一步使西红柿变得更加软烂^[29]。

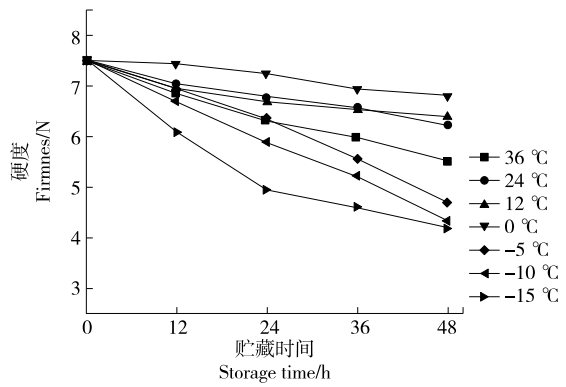


图 5 不同温度下西红柿硬度的变化

Figure 5 The change of firmness of tomato at different temperatures

当贮藏温度为 -5, -10, -15 °C 时, 西红柿硬度下降较快, 可能是西红柿冷冻缓慢, 所生成的冰晶较大, 破坏了细胞壁结构, 导致汁液及纤维素水解酶流失进而使西红柿硬度下降^[30]。在 12, 24, 36 °C 下, 随着贮藏温度的升高西红柿硬度逐渐降低, 可能是因为温度高加速了细胞壁和纤维素水解酶降解^[31]。

2.2.6 感官评价(SE) 由图 6 可知, 贮藏期间, 西红柿的感官评分呈持续下降趋势。这是因为果实内的果胶质和纤维素等营养成分逐渐分解, 细胞壁中的支持纤维变得松散柔软, 因此果皮逐渐失去光泽, 出现皱褶。此外, 蔬菜的外观色泽也是感官评价的重要指标。不同温度下, 贮藏 48 h 后, 番茄红素的降解导致西红柿的颜色由鲜艳的红色逐渐变为深红色。值得注意的是, 12 °C 下, 西红柿的感官评分下降较慢, 可能与西红柿对温度的敏感性有关^[32]。

2.3 预测模型的构建与验证

由于西红柿在不同温度下贮藏 48 h 内均未发生腐烂, SSC 含量无明显变化规律, 因此选择失重率、硬度、 ΔE 和 SE 数据进行分析, 采用 Arrhenius 方程构建西红柿品质预测耦合模型。由于西红柿在 -15~0, 0~36 °C

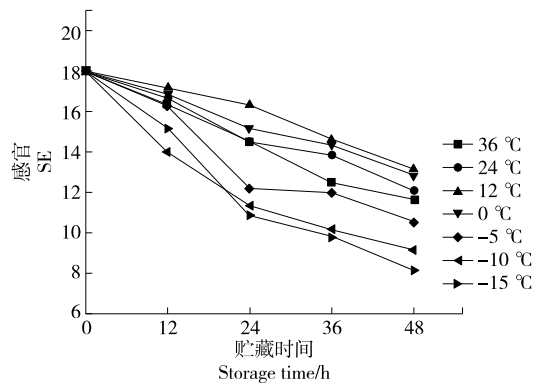


图 6 不同温度下西红柿 SE 的变化

Figure 6 The change of SE of tomato at different temperatures

下,各品质指标反应速率与反应活化能不同^[33],因此,分别构建-15~0,0~36 °C的品质预测耦合模型。

2.3.1 基于温度耦合 Arrhenius 西红柿品质预测模型的构建 采用式(4)对西红柿在 36,24,12,0,-5,-10,-15 °C得到的数据进行线性回归拟合,分别对零级、半级、一级和二级反应的新鲜度指标(C、C^{0.5}、lnC、1/C)随时间的变化曲线进行排序并确定反应级数,结果见表 2。0~36 °C下,西红柿 Arrhenius 方程基于失重率和 SE 的反应级数均为零级,硬度的反应级数为一级,ΔE 的反应级数为半级;-15~0 °C下,西红柿 Arrhenius 方程基于失重率、SE、硬度和 ΔE 的反应级数均为零级。

根据不同温度下的速率常数,lnk 对 1/T 拟合得到 0~36 °C下西红柿品质预测模型的失重率、硬度、ΔE 和

表 2 不同温度下 Arrhenius 品质预测模型的决定系数
Table 2 Estimation of the reaction orders in Arrhenius models of quality indicators by R²

指标	温度/K	0 级	半级	一级	二级	
失重率	258	0.97	0.91	0.91	0.74	
	263	0.99	0.94	0.90	0.82	
	268	0.89	0.87	0.92	0.84	
	273	0.98	0.92	0.86	0.90	
	285	0.97	0.88	0.87	0.81	
	297	0.94	0.94	0.83	0.79	
	309	0.91	0.90	0.91	0.80	
	硬度	258	0.94	0.97	0.97	0.67
		263	0.99	0.88	0.89	0.60
268		0.90	0.94	0.95	0.71	
273		0.89	0.93	0.90	0.82	
285		0.88	0.90	0.92	0.79	
297		0.89	0.89	0.90	0.89	
309		0.81	0.84	0.84	0.91	
ΔE		258	0.90	0.97	0.78	0.69
		263	0.92	0.91	0.69	0.73
	268	0.79	0.90	0.79	0.65	
	273	0.89	0.89	0.83	0.94	
	285	0.84	0.73	0.80	0.81	
	297	0.81	0.90	0.79	0.80	
	309	0.93	0.88	0.91	0.86	
	SE	258	0.97	0.88	0.84	0.74
		263	0.92	0.84	0.71	0.76
268		0.88	0.76	0.83	0.80	
273		0.90	0.94	0.93	0.72	
285		0.89	0.79	0.82	0.69	
297		0.91	0.86	0.79	0.83	
309		0.94	0.90	0.82	0.71	

SE 的 E_a 分别为 -90 492.42, -23 413.16, -6 234.04, -14 918.14 J/mol, 指前因子 k₀ 分别为 5.63 × 10¹⁴, 64.72, 0.52, -47.56; -15~0 °C 下西红柿品质预测模型的失重率、硬度、ΔE 和 SE 的 E_a 分别为 -20 057.53, 8 107.37, -20 142.73, 1 033.54 J/mol, 对应的指前因子 k₀ 为 174.68, -0.11, 587.15, -0.14。基于失重率、硬度、ΔE 和 SE 的 Arrhenius 西红柿品质预测模型见表 3。

2.3.2 预测模型的验证 为了验证温度耦合模型在一定温度范围内具有普遍适用性,随机选取两个温度(12,-10 °C)进行新一轮试验并进行验证。

由表 4 可知,基于温度耦合的 Arrhenius 品质预测模型对西红柿 SE 的预测相对误差均在 10% 以内,平均相对误差 < 1%, 预测准确度高。西红柿的失重率与硬度的预测相对误差均在 15% 以内(除 48 h 的), 预测较为准确。12 °C 贮藏 12 h, 基于温度耦合的 Arrhenius 品质预测模型对西红柿的 ΔE 预测相对误差达 90%, 说明基于温度耦合的 Arrhenius 品质预测模型在 0~36 °C 下对西红柿 ΔE 的预测相对不准确, 可能是因为西红柿的颜色变化涉及多个复杂的反应动力学过程, 而 Arrhenius 的构建

表 3 基于失重率、硬度、ΔE 和 SE 构建的 Arrhenius 西红柿品质预测模型[†]

Table 3 Arrhenius tomato quality prediction model constructed based on W, hardness, ΔE and SE

温度/°C	指标	预测模型
0~36	失重率/%	$B_{XW} = 5.63 \times 10^{14} \exp\left(\frac{-90\ 492.42}{RT}\right)t + B_{XW0}$
	硬度/N	$B_F = 64.72 \exp\left(\frac{-23\ 413.16}{RT}\right)t + B_{F0}$
	ΔE	$B_{\Delta E} = \left[0.52 \exp\left(\frac{-6\ 234.04}{RT}\right)t - B_{F0}^{0.5}\right]^2$
	SE	$B_{XS} = -47.56 \exp\left(\frac{-14\ 918.14}{RT}\right)t + B_{XS0}$
-15~0	失重率/%	$B_W = 174.68 \exp\left(\frac{-20\ 057.53}{RT}\right)t + B_{W0}$
	硬度/N	$B_F = -0.11 \exp\left(\frac{8\ 107.37}{RT}\right)t - B_{F0}$
	ΔE	$B_{\Delta E} = 587.15 \exp\left(\frac{-20\ 142.73}{RT}\right)t + B_{\Delta E0}$
	SE	$B_{SE} = -0.14 \exp\left(\frac{1\ 033.54}{RT}\right)t + B_{SE0}$

[†] B_{XW}、B_F、B_{ΔE}、B_{XS} 分别为西红柿失重率、硬度、ΔE 和 SE 的预测值; B_{XW0}、B_{F0}、B_{ΔE0}、B_{XS0} 分别为失重率、硬度、ΔE 和 SE 的初始值。

表 4 西红柿在 12 °C (285 K) 下品质指标预测值和实测值的相对误差

Table 4 The relative error of the quality index predicted and experiment value of tomato at 12 °C (285 K)

贮藏时 间/h	失重率				SE			
	试验值/%	预测值/%	相对误差/%	平均相对误差/%	试验值	预测值	相对误差/%	平均相对误差/%
0	0	0	0	0	18	18	0	0
12	0.16	0.17	-6.25	-0.52	17.17	16.95	1.28	0.11
24	0.31	0.35	-12.90	-1.08	16.33	15.90	2.63	0.22
36	0.48	0.52	-8.33	-0.69	14.63	14.84	-1.44	-0.12
48	0.83	0.70	15.66	1.31	13.17	13.79	-4.71	-0.39

贮藏时 间/h	硬度				ΔE			
	试验值/N	预测值/N	相对误差/%	平均相对误差/%	试验值	预测值	相对误差/%	平均相对误差/%
0	7.52	7.52	0	0	0	0	0	0
12	6.95	7.52	-8.12	-0.68	1.94	0.20	89.69	7.47
24	6.68	7.52	-12.47	-1.04	2.26	0.81	64.16	5.35
36	6.54	7.52	-14.92	-1.24	2.66	1.82	31.58	2.63
48	6.38	7.52	-17.72	-1.48	3.63	3.23	11.02	0.92

假设了温度与反应速率之间的简单的线性关系。因此，基于温度耦合的 Arrhenius 品质预测模型可以快速预测 0~36 °C 下西红柿 SE、失重率和硬度的变化。

由表 5 可知，贮藏初期与后期，基于温度耦合的 Arrhenius 品质预测模型对 ΔE 与失重率的预测相对误差

在 20% 以上，相对误差较大，说明 Arrhenius 品质预测模型结果较差。对西红柿硬度与 SE 的预测相对误差在 15% 以内(除 48 h 的)，说明利用西红柿的 SE 和硬度的变化基于温度耦合 Arrhenius 品质预测模型，可以快速预测 -15~0 °C 下的西红柿品质。

表 5 西红柿在 -10 °C (263 K) 下品质指标预测值和实测值的相对误差

Table 5 The relative error of the quality index predicted and experiment value of tomato at -10 °C (263 K)

贮藏时 间/h	失重率				SE			
	试验值/%	预测值/%	相对误差/%	平均相对误差/%	试验值	预测值	相对误差/%	平均相对误差/%
0	0	0	0	0	18	18	0	0
12	0.18	0.22	-22.22	-1.85	14	15.30	-9.29	-0.77
24	0.42	0.44	-4.76	-0.40	11.33	12.61	-11.30	-0.94
36	0.61	0.65	-6.56	-0.55	10.17	9.91	2.56	0.21
48	0.74	0.87	-17.57	-1.46	9.17	7.22	21.26	1.77

贮藏时 间/h	硬度				ΔE			
	试验值/N	预测值/N	相对误差/%	平均相对误差/%	试验值	预测值	相对误差/%	平均相对误差/%
0	7.52	7.52	0	0	0	0	0	0
12	6.99	6.98	0.20	0.02	1.19	0.70	41.18	3.43
24	5.90	6.44	-9.23	-0.77	2.42	1.41	41.74	3.48
36	5.21	5.90	-13.24	-1.10	2.29	2.11	7.86	0.66
48	4.33	5.37	-23.86	-1.99	4.41	2.82	36.05	3.00

3 结论

研究了极端温度条件下西红柿品质的变化，并构建了极端温度下 Arrhenius 西红柿品质预测耦合模型。结果表明，西红柿在 48 h 内无腐烂现象，在 36, 24, 12, 0, -5, -10, -15 °C 下，西红柿的失重率、色差值逐渐增加，感官评分和硬度逐渐降低。根据气象温度数据结合品质

变化，建立基于失重率、硬度、色差值和感官评分的 Arrhenius 西红柿品质预测模型。12 °C (285 K) 下，西红柿的失重率、硬度与感官评分的试验值与预测值相对误差在 15% 以内(除 48 h 的)；-10 °C (263 K) 下，西红柿的硬度与感官评分的试验值与预测值相对误差在 15% 以内(除 48 h 的)。因此，在极端气温条件下的短途贮运过程

中,结合极端气象温度数据构建的西红柿品质预测 Arrhenius 方程耦合模型是进行极端温度条件下西红柿品质无损预测的有效方法。后续可进行多品种西红柿样本混合试验,研究西红柿品种对西红柿在极端气温下的品质变化并构建其品质预测模型。

参考文献

- [1] GOTAME T P, SHRESTHA S L, JOSHI B K, et al. Classification of crop plants based on growing season, temperature requirement and photosynthetic behavior[J]. Working Groups of Agricultural Plant Genetic Resources (APGRs) in Nepal, 2018, 21/22: 103-120.
- [2] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature, 2016, 529: 84-87.
- [3] LEROUX M N, SCHMIT T M, ROTH M, et al. Evaluating marketing channel options for small-scale fruit and vegetable producers[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2010, 25 (1): 16-23.
- [4] AGUIRRE F, CARRASCO J, SAUTER T, et al. Snow cover change as a climate indicator in Brunswick Peninsula, Patagonia [J]. Frontiers in Earth Science, 2018, 6: 130.
- [5] 王向阳. 警惕极端天气冲击我国粮食安全[C]// 中国财政学会. 中国财政学会—财政与国家治理决策参考. [出版地不详]: 中国财政学会, 2019: 5.
WANG X Y. Be alert of extreme weather on China's food security [C]// The Chinese Society of Public Finance. Chinese Society of Finance-Finance and National Governance Decision Reference. [S.l.]: Society of Public Finance of China, 2019: 5.
- [6] FONSECA S C, OLIVEIRA F A, BRECHT J K. Modeling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(2): 99-119.
- [7] BENKEBLIA N. Effect of maleic hydrazide on respiratory parameters of stored onion bulbs (*Allium cepa* L.) [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2004, 16(1): 47-52.
- [8] SINGLA M, KUMAR A, KAUR P, et al. Quality changes of carrots under different frozen storage conditions: A kinetic study[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12): e14953.
- [9] PEREIRA N, FARROKHI M, VIDA M, et al. Valorisation of wasted immature tomato to innovative fermented functional foods [J]. Foods, 2023, 12: 1 532.
- [10] 裴娇艳. 番茄果实采后品质特性变化及预测模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010: 37-46.
PEI J Y. Studies on changes of quality characters and prediction model of postharvest tomato fruit [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010: 37-46.
- [11] 毛苏扬. 圣女果涂膜保鲜技术与货架期预测模型的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 63-74.
MAO S Y. Studies on coating preservation technology and shelf-life prediction model of cherry tomato [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 63-74.
- [12] 刘燕德, 徐海, 孙旭东, 等. 西红柿成熟度的近红外漫透射光谱无损检测[J]. 激光技术, 2019, 43(1): 25-29.
LIU Y D, XU H, SUN X D, et al. Non-destructive measurement of tomato maturity by near-infrared diffuse transmission spectroscopy [J]. Laser Technology, 2019, 43(1): 25-29.
- [13] MARTENS M, ROSENFELD H J, RUSSWURM J H. Predicting sensory quality of carrots from chemical, physical and agronomical variables: A multivariate study[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 1985, 35(4): 407-420.
- [14] BOEKEL M A J S V. Statistical aspects of kinetic modeling for food science problems[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(3): 477-486.
- [15] RATKOWSKY D A, OLLEY J, MCMEEKIN T A, et al. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. Journal of Bacteriology, 1982, 149(1): 1-5.
- [16] BOEKEL M A J S V. Kinetics of heat-induced changes in foods: A workflow proposal [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 306: 110634.
- [17] NIU Y B, WEI S Y, LIU H. The kinetics of nutritional quality changes during winter jujube slices drying process [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2021, 13(1): 73-82.
- [18] WANG H, KONG C, LI D, et al. Modeling quality changes in brined bream (*Megalobrama amblycephala*) fillets during storage: Comparison of the Arrhenius model, BP, and RBF neural network [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(12): 2 429-2 443.
- [19] JIA Z, SHI C, ZHANG J, et al. Comparison of freshness prediction method for salmon fillet during different storage temperatures[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(12): 4 987-4 994.
- [20] NAGY T, TURANYI T. Uncertainty of Arrhenius parameters[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2011, 43(7): 359-378.
- [21] OJAGHIAN S, WANG L, XIE G L, et al. Inhibitory efficacy of different essential oils against storage carrot rot with antifungal and resistance-inducing potential [J]. Journal of Phytopathology, 2019, 167(9): 490-500.
- [22] BEN-FADHEL Y, CINGOLANI M C, LI L, et al. Effect of γ -irradiation and the use of combined treatments with edible bioactive coating on carrot preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100635.
- [23] 程科, 李洁, 赵思明, 等. 西红柿的贮藏特性研究[J]. 现代食品科技, 2006, 22(3): 28-31.
CHENG K, LI J, ZHAO S M, et al. Study on storage properties of tomato[J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(3): 28-31.
- [24] 张海利, 孙娟, 庞子千. 番茄品质及耐贮藏性研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 257-258.
ZHANG H L, SUN J, PANG Z Q. Study on tomato quality and

storage tolerance[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(8): 257-258.

[25] 罗颖, 薛琳, 黄帅, 等. 番茄果实可溶性固形物含量与果实指标的相关性研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(1): 23-27.

LUO Y, XUE L, HUANG S, et al. A study on relations between soluble solids content and fruit indicators of tomatoes[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2010, 28(1): 23-27.

[26] 何春玫, 梁宇宇. 西红柿采样部位及时期对番茄红素含量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(6): 1 393-1 395.

HE C M, LIANG Y N. Influence of sampling time and position on the lycopene contents in different tomato cultivars [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(6): 1 393-1 395.

[27] 张宏, 高永生. 番茄酱加工全过程色差控制的研究[J]. *内蒙古农业科技*, 2014(4): 33-35.

ZHANG H, GAO Y S. Study on color difference control in the whole process of ketchup processing [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2014(4): 33-35.

[28] EZEANAKA M C, 张懋, 陈凯, 等. 微波热烫和气调包装对中央厨房用胡萝卜理化特性及品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(5): 46-55.

EZEANAKA M C, ZHANG M, CHEN K, et al. Influence of microwave blanching and modified atmosphere packaging on physiochemical properties and quality of carrot used in central kitchen processing[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(5): 46-55.

[29] 刘彦鹏, 何焰蓝, 康强. 微波与红外用于保鲜的探索[J]. *激光与光电子学进展*, 2006(3): 48-51.

LIU Y P, HE Y L, KANG Q. Study of storage effects of electromagnetic waves for vegetables and fruits using microwave and infrared[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006(3): 48-51.

[30] 王磊. 西红柿臭氧保鲜实验研究[J]. *包装工程*, 2005, 26(1): 14-16.

WANG L. Experimental research on tomatoes' ozone fresh-keeping[J]. *Packaging Engineering*, 2005, 26(1): 14-16.

[31] 赵云峰, 林河通, 林娇芬, 等. 果实软化的细胞壁降解酶及其调控研究进展[J]. *仲恺农业技术学院学报*, 2006, 19(1): 65-70.

ZHAO Y F, LIN H T, LIN J F, et al. A review of cell wall-degrading enzymes in fruit softening and their control[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology*, 2006, 19(1): 65-70.

[32] 许娟妮. 不同贮藏温度对番茄感官及品质的影响[J]. *农产品加工*, 2016(6): 52-53, 57.

XU J N. Effect of different storage temperature on sensory and quality of tomato [J]. *Farm Products Processing*, 2016(6): 52-53, 57.

[33] RÍOS M A C, ROSILLO F F, HUATANGARI L Q, et al. Estimation of coffee shelf life under accelerated storage conditions using mathematical models: Systematic review[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2023, 41(2): 92-102.

(上接第 106 页)

[10] CAI W, YANG C Y, SMARANDACHE F, et al. *Extensics and innovation methods*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013: 1-9.

[11] 秦臻, 季铁, 刘芳, 等. 基于民族图案基因可拓语义的产品设计方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(10): 1 595-1 603.

QIN Z, JI T, LIU F, et al. Product design method based on ethnic pattern primitive extension semantics [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Graphics*, 2021, 33(10): 1 595-1 603.

[12] 吴通, 陈登凯, 余隋怀. 产品创新设计的可拓推理设计方法[J]. *机械设计*, 2018, 35(4): 113-118.

WU T, CHEN D K, YU S H. Extension reasoning design method for product innovation design[J]. *Machine Design*, 2018, 35(4): 113-118.

[13] 陈望衡. *中国古典美学史*[M]. 南京: 江苏人民出版社, 2019: 36-45.

CHEN W H. *History of classical Chinese aesthetics*[M]. Nanjing: Jiangsu People's Publishing House, 2019: 36-45.

[14] 齐东方. *唐代金银器研究*[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1999: 127-131.

QI D F. *Research on gold and silver ware of Tang Dynasty*[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 1999: 127-131.

[15] 朱青峰. *唐代金银器纹样研究*[D]. 北京: 中国地质大学, 2018: 28-33.

ZHU Q F. *Study on patterns of gold and silver ware in Tang Dynasty*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 28-33.

[16] STINY G. *Introduction to shape and shape grammars*[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1980, 7(3): 343-351.

[17] 刘丹, 孙远志. 基于形状文法的侗族织绣纹样再生设计应用[J]. *湖南包装*, 2022, 37(5): 68-72.

LIU D, SUN Y Z. Dong needlepoint pattern regenerative design based on shape grammar application[J]. *Hunan Packaging*, 2022, 37(5): 68-72.

[18] 彭张林, 杜一甫, 程啸先, 等. 面向设计众包的产品概念方案评价与选择[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(10): 3 450-3 461.

PENG Z L, DU Y F, CHENG X X, et al. Evaluation and selection of product concept schemes for design crowdsourcing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 29(10): 3 450-3 461.

[19] 刘玲玲, 魏旭泽. 基于模糊层次分析法的公共设施设计: 以侗族旅游村为例[J]. *湖南包装*, 2022, 37(3): 38-41, 48.

LIU L L, WEI X Z. Public facilities design based on fuzzy analytic hierarchy process: A case study of dong nationality tourism village [J]. *Hunan Packaging*, 2022, 37(3): 38-41, 48.