

鲜切生菜品质指标和菌落总数货架期预测模型的建立与比较

Establishment and comparison of shelf life model about quality index and colony count of fresh-cut lettuce

乔永祥^{1,2,3} 谢晶^{1,2,3} 雷昊^{1,2,3}

QIAO Yong-xiang^{1,2,3} XIE Jing^{1,2,3} LEI Hao^{1,2,3}

(1. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 2. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306; 3. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 3. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:以鲜切生菜为试验材料,研究不同温度(0, 5, 10, 15, 20 °C)对其品质和菌落总数的影响,随着温度的升高和贮藏时间的延长,叶绿素含量、V_C含量和菌落总数均呈现下降趋势;基于试验数据,以 Arrhenius 方程建立叶绿素和 V_C 的一级动力学模型,并建立菌落总数的 Gompertz 模型,预测其货架期。结果显示,与以 Arrhenius 方程建立的菌落总数货架期模型 SL_D 相比,以 Gompertz 方程建立的货架期模型 SL_G 的准确因子为 1.25,更趋近于 1,说明 Gompertz 方程可以更好地反映鲜切生菜在 0~20 °C 时的微生物生长趋势,建模更准确;以 Arrhenius 方程建立的货架期模型 SL_{chl_a}、SL_{V_C} 和以 Gompertz 方程建立的菌落总数货架期模型 SL_G 的相对误差分别为 8.89%, 4.44%, 6.67%, 货架期模型 SL_{V_C} 和 SL_G 相对误差更小,表明以 V_C 和菌落总数为特征指标建立的货架期模型可以更好地对 0~20 °C 温度范围内鲜切生菜的货架期进行实时监测。

关键词:鲜切生菜; 货架期; 预测模型; Arrhenius 方程; Gompertz 方程

Abstract: The influence of different temperature (0, 5, 10, 15 and 20 °C) on its quality and total number of colonies of fresh-cut lettuce during storage was studied, and the chlorophyll content, vitamin C content and colony total were found decreased with the increase of

基金项目: 2015 年度国家星火计划资助项目(编号: 2015GA680007); 上海市绿叶菜产业体系建设项目

作者简介: 乔永祥,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2017-08-07

temperature and storage time. Based on the experimental data, first order kinetic model of chlorophyll and vitamin C and Gompertz model of the total number of colonies were established to predict the shelf life. The results were as follows. Compared with the shelf life model SL_D of the total number of colonies based on Arrhenius equation, the accurate factor of shelf life model SL_G established by Gompertz equation was 1.25. This indicated that the Gompertz equation could better reflect the microbial growth trend of fresh-cut lettuce in 0~20 °C the temperature range. The relative errors of shelf life model SL_{chl_a} and SL_{V_C} established by Arrhenius equation, and shelf life model SL_G of the total number of colonies established by Gompertz equation were 8.89%, 4.44% and 6.67% respectively. The shelf life model SL_{V_C} and SL_G had less relative error, showing that the shelf life model based on vitamin C and colony counts could accurately monitor the shelf life of fresh-cut lettuce in the temperature range of 0~20 °C.

Keywords: fresh-cut lettuce; shelf life; prediction model; Arrhenius equation; Gompertz equation

生菜又称叶用莴苣,是一种营养丰富的绿叶蔬菜,由于生菜中富含维生素、碳水化合物和矿物质等营养物质,常作为蔬菜沙拉食用^[1-2]。然而,鲜切产品的退化速度比未加工的原料快得多,由于最小加工方法(去皮、切片、切块、切碎等)造成了损害,如组织软化、切割表面褐变,降低营养价值,存在异味和微生物腐败,在贮藏过程中通常会缩短鲜切果蔬的货架期^[3-4]。近年来,鲜切产品的需求量迅速增长,但货架期的限制仍然是鲜切果蔬产业进一步发展的最大障碍。因此,本试验拟通过货架期模型预测鲜切蔬菜流通中品质变

化,对其货架期进行实时监测。

以温度为基础的预测模型是食品货架期预测最常用的一种方法,其中常用的方法是 Arrhenius 方程,该方程可以反映速率常数与温度之间的关系,可以用来描述品质衰变动力学^[5-6]。王超等^[7]利用 Arrhenius 方程对鲜切菠菜的失重率和叶绿素进行建模,其动力学回归模型的相关系数 $R^2 > 0.90$,具有很高的拟合精度,可以准确预测鲜切菠菜流通过程中的因品质变化而引起的货架期变动;胡位歆等^[8]通过 Arrhenius 方程对草莓的 V_c 和可滴定酸等品质指标进行建模,得到的预测模型的相对误差分别为 2.86%,2.43%,可以很好地预测草莓在流通过程中的货架期。

然而,对于由微生物引起的食品衰败,虽然 Arrhenius 方程也可以对其进行建模预测货架期,但其准确性不如 Logistic 方程、Gompertz 方程、Richards 方程、Stannard 方程、Schnute 方程等,其中 Gompertz 方程可以简单且有效地描述微生物生长趋势^[9]。巩玉芬等^[10]在不同温度下分别对鲜切胡萝卜、鲜切马铃薯、鲜切菠菜的菌落总数通过修正的 Gompertz 方程进行曲线拟合, R^2 均大于 0.92,拟合度较高,较好地反映了贮藏过程中菌落总数的变化情况;肖璐等^[11]利用修正的 Gompertz 方程在不同温度下对鲜切西兰花构建微生物动力模型,研究发现修正的 Gompertz 方程能较好地描述其假单胞菌的生长趋势($R^2 > 0.95$),通过建模的货架期模型的相对误差为-6.86%,可以较准确地预测 0~20 °C 范围内鲜切西兰花的货架期。

虽然前人对鲜切蔬菜的货架期做了很多预测,但是 Arrhenius 方程在预测蔬菜货架期时往往受到蔬菜特性等条件限制,不能兼顾内部反应的真实性,导致蔬菜货架期的准确性受到影响,而相对于指标测定,很难控制准确度,微生物更稳定,通过 Gompertz 方程预测货架期更准确^[12]。本试验通过 Arrhenius 方程对鲜切生菜的叶绿素以及 V_c 等品质指标与修正的 Gompertz 方程对其菌落总数在 0,5,15,20 °C 进行建模,并利用 10 °C 下的品质指标和菌落总数对其进行验证,比较 2 个模型的准确度,以期能找到更为准确地预测鲜切生菜货架期的模型,为其在流通过程中的品质变化进行实时监测。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

新鲜生菜:购自上海市浦东新区临港新城某菜市场,挑选颜色鲜亮、脆嫩、无腐烂虫害、大小一致的生菜为试验原料。

1.2 仪器与设备

低温恒温培养箱:MIR-554-PC 型,日本三洋电机株式会社;

超净工作台:VS-1300L-U 型,苏净集团安泰有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9053A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

全自动压力蒸汽灭菌器:YXQ-LS-30SH 型,上海博讯实业有限公司;

紫外可见分光光度计:WFZ UV-2100 型,上海龙尼柯仪

器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 生菜预处理 将新鲜购买的生菜及时进行处理,挑选新鲜饱满、大小均匀、无虫害无缺损的生菜在自来水中浸泡 5 min,于通风阴凉处沥干 1 h,将整颗生菜切成 3~5 cm 小段,盛放在塑料托盘中,每个托盘 80 g 左右,用保鲜膜封口,分别保存在 0,5,10,15,20 °C 的恒温恒湿箱中,每组大约准备 8~10 盒,以备后续指标测定。每次试验每组样品随机选择 3 盒,测量其叶绿素含量、 V_c 含量、菌落总数以及感官品质评分。

1.3.2 试验设计 试验将鲜切生菜分别贮藏于 0,5,10,15,20 °C 的恒温恒湿箱中,试验初期分别隔 3.0,3.0,1.5,1.0,0.5 d 测试一次,末期则依据品质变化情况调整频率。每个指标均进行 3 次平行试验,以确保试验数据稳定可用,最后计算平均值及标准差。

1.3.3 感官质量评价 参照 King 等^[13]的方法,修改如下:每次邀请 3 名经过培训具有一定蔬菜感官评价经验的叶菜感官评价员组成评定小组,分别从色泽、质地、气味等方面进行打分:9 分为清香饱满、色泽鲜亮、质地脆嫩;腐败褐变严重,有异味为 1 分。

1.3.4 菌落总数的测定 按 GB/T 4789.2—2016 执行。

1.3.5 理化指标测定

(1) 叶绿素含量测定:采用分光光度计测量^[14]。

(2) V_c 含量测定:采用 2,6-二氯酚法^[15]。

1.3.6 数据处理与统计分析 各指标均做 3 次平行,均采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据整理,试验结果以“平均值±标准差”表示;用 Origin 8.0 软件绘图并拟合曲线,用 SPSS Statistics 19.0 进行差异显著性分析($P < 0.05$ 为差异显著)。

2 货架期模型的构建

2.1 品质变化的模型构建

Arrhenius 方程作为描述化学反应速率和温度关系的经典模型已被广泛应用于预测货架期。基本表达式为:

$$K = A \exp(-E_a/RT), \quad (1)$$

式中:

K ——速率常数;

A ——指前因子;

E_a ——活化能,J/mol;

R ——气体常数,8.314 4 J/(mol·K);

T ——绝对温度,K。

将品质变化动力学模型和 Arrhenius 方程联合应用,可以确定特征指标的反应速率 K 与贮藏温度 T 之间的关系:

$$\ln K = \ln A_0 + (-E_a/RT). \quad (2)$$

从而得到零级反应模型下鲜切生菜的货架期:

$$SL_0 = \frac{C - C_0}{k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}}, \quad (3)$$

式中:

SL_0 ——鲜切生菜的货架期,d;

C_0 ——特征指标初始值;

C ——贮藏 t d 时特征指标值。

一级反应模型下的鲜切生菜的货架期(SL_1):

$$SL_1 = \frac{\ln \frac{C}{C_0}}{k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}} \quad (4)$$

2.2 细菌总数生长模型构建

应用修正的 Gompertz 模型对鲜切生菜微生物的生长曲线进行拟合,其表达式为:

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) \times \exp\{-\exp[2.718\mu_{\max}(Lag - t)/(N_{\max} - N_0) + 1]\}, \quad (5)$$

式中:

N_t ——贮藏 t d 时菌落数,lg CFU/g;

N_{\max} 、 N_0 ——最大和初始微生物数量,lg CFU/g;

μ_{\max} ——细菌的最大比生长速率;

Lag ——延滞期,h。

2.2.1 温度影响微生物生长的动力学模型 温度对微生物生长参数影响的模型以 Belehradek 方程应用最为广泛^[16],表达式为:

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b_{\mu} \times (T - T_{\min\mu}), \quad (6)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = b_{\lambda} \times (T - T_{\min\lambda}), \quad (7)$$

式中:

b_{μ} 、 b_{λ} ——常数;

T ——贮藏温度,°C;

$T_{\min\mu}$ 、 $T_{\min\lambda}$ ——微生物生长的最低温度,°C。

2.2.2 菌落总数货架期预测模型的构建 将式(6)和式(7)代入式(5)可以求得货架期的预测模型 SL_2 , 见式(8)。

$$SL_2 = \frac{1}{[b_{\lambda} \times (T - T_{\min\lambda})]^2} - \{ \ln[-\ln(\frac{N_s - N_0}{N_{\max} - N_0})] - 1 \} \times \frac{N_{\max} - N_0}{2.178 [b_{\mu} \times (T - T_{\min\mu})]^2}, \quad (8)$$

式中:

SL_2 ——菌落总数的货架期,d;

N_0 ——初始菌落总数,lg CFU/g;

N_s ——达到货架期终点的菌落总数,lg CFU/g。

2.2.3 预测货架期模型的评价 菌落总数的货架期模型通常用准确因子(A_f)和偏差因子(B_f)来验证所建预测模型的可靠性^[17]。 A_f 和 B_f 分别表示为:

$$A_f = 10^{\frac{\sum \left| \lg \left(\frac{N_{pre}}{N_{obs}} \right) \right|}{n}}, \quad (9)$$

$$B_f = 10^{\frac{\sum \lg \left(\frac{N_{pre}}{N_{obs}} \right)}{n}}, \quad (10)$$

式中:

N_{obs} ——试验实际值;

N_{pre} ——利用预测模型得到的预测值;

n ——试验次数。

3 结果与分析

3.1 品质指标及总菌的变化

由图 1(a)可知,感官评分随着贮藏温度的上升呈现下降趋势,温度越高下降速率越快。在较高温度下贮藏,鲜切生

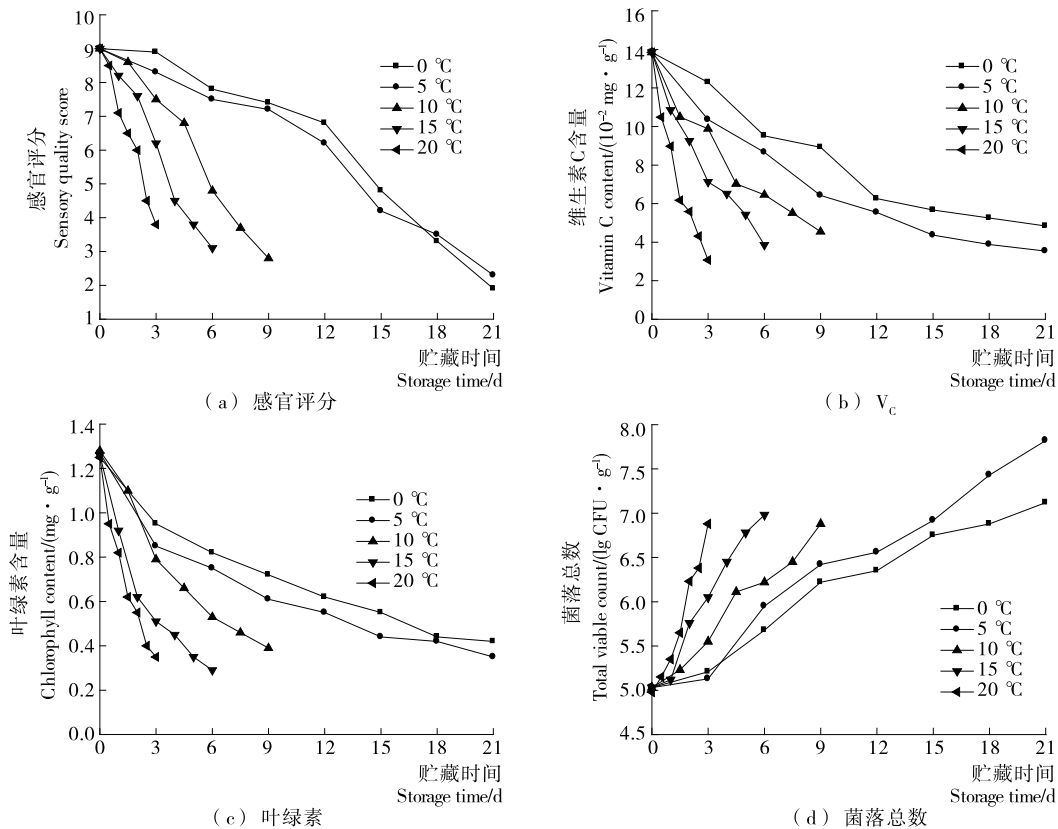


图 1 温度对鲜切生菜品质和菌落总数的影响

Figure 1 Effects of different temperatures on quality and colony count of fresh-cut lettuce

菜呼吸作用增强,导致品质恶化较快,失去食用价值,而低温可以很好地保持其良好的外观。

图 1(b)显示,鲜切生菜贮藏 15,20 °C 下,其 V_c 含量急剧下降,而在 0,5 °C 下,下降速率较缓,且差异不显著 ($P > 0.05$)。 V_c 不稳定,容易受氧气、酶、水分活度等因素的影响而被降解^[18],在 0,5 °C 等低温条件下抑制其酶的活性,延缓组织代谢,从而降低了 V_c 的损失。

贮藏期间叶绿素含量的变化如图 1(c)所示,鲜切生菜在贮藏过程中,叶绿素含量随温度的升高逐渐下降,与其他处理相比,0,5 °C 处理组叶绿素损失速率较缓,差异不显著 ($P > 0.05$)。在贮藏期间光照、温度、pH 等因素是影响叶类叶绿素含量变化的主要原因,高温有利于脱镁反应的进行,加快叶绿素的降解,而低温条件下可以抑制化学反应的进程,对叶绿素具有保护作用^[19]。

从图 1(d)中可以看出,鲜切生菜在高温条件(10,15,20 °C)下与低温条件(0,5 °C)下的菌落总数变化显著 ($P < 0.05$),其中高温条件下第 3 天菌落总数就已经达到腐败上限 6 lg CFU/g,失去商业价值,而低温条件下第 9 天菌落总数才超过 6 lg CFU/g,因此低温更适合鲜切生菜的贮藏。

3.2 化学反应动力学模型的建立

3.2.1 动力学分析 果蔬中特征营养指标的反应动力学大多数为零级反应或一级反应,本研究采用 Origin 8.0 软件对叶绿素和 V_c 进行线性和非线性拟合,得到不同温度下的动力学参数见表 1。由表 1 可知,一级动力学的相关系数 $\sum R^2$ 比零级动力学的更大,说明采用一级动力学模型对叶绿素和 V_c 进行拟合回归曲线更准确,因此本研究采用一级动力学研究鲜切生菜品质的动力学变化并进行建模。

表 1 零级和一级动力学反应速率常数 K 及决定系数 R^2

Table 1 Zero and first-order kinetic reaction rate constants K and coefficient of determination R^2

指标	温度/°C	零级		$\sum R^2$	一级		$\sum R^2$
		速率常数 K	决定系数 R^2		速率常数 K	决定系数 R^2	
叶绿素	0	-0.001 580	0.928 2	3.625 8	-0.012 75	0.984 0	3.913 9
	5	-0.002 640	0.863 3		-0.033 90	0.963 2	
	15	-0.055 20	0.881 0		-0.116 5	0.975 0	
	20	-0.074 50	0.953 3		-0.154 8	0.991 7	
V_c	0	-1.337 5	0.930 2	3.749 5	-0.016 07	0.964 2	3.916 8
	5	-1.408 0	0.905 8		-0.019 83	0.979 6	
	15	-2.556 4	0.960 8		-0.079 91	0.984 5	
	20	-4.715 8	0.952 7		-0.241 6	0.988 5	

3.2.2 货架期模型的建立 根据鲜切生菜在 0,5,15,20 °C 下贮藏过程中的叶绿素和 V_c 的变化规律,按照式(4),以 $1/T$ 为横坐标, $\ln K$ 为纵坐标,进行线性回归,由于叶绿素和 V_c 一级动力学模型速率 K 均为负数,因此本试验以 $\ln(-K)$ 为纵坐标进行拟合,从而求得指前因子 A_0 、活化能 E_a 等货架期预测模型参数,见表 2。

表 2 品质指标货架期预测模型参数

Table 2 The parameter of prediction model for the shelf-life

特征指标	指前因子 A_0	活化能 $E_a/(J \cdot mol^{-1})$	相关系数 R^2
叶绿素	-1.16×10^{14}	8.31×10^4	0.975 4
V_c	-2.39×10^{15}	9.03×10^4	0.951 5

依据一级反应模型下鲜切生菜的货架期[式(4)],得到货架期模型如下:

叶绿素含量货架期预测模型:

$$SL_{chlo} = \frac{\ln(C/C_0)}{-1.16 \times 10^{14} \times e^{-\frac{8.31 \times 10^4}{8.314T}}}, \quad (11)$$

V_c 含量货架期预测模型:

$$SL_{V_c} = \frac{\ln\left(\frac{V}{V_0}\right)}{-2.39 \times 10^{15} \times e^{-\frac{9.03 \times 10^4}{8.314T}}}, \quad (12)$$

式中:

SL_{chlo} 、 SL_{V_c} ——叶绿素和 V_c 的货架期, d;

C_0 、 C ——叶绿素的初始含量和贮藏第 t 天时的测量值, mg/g;

V_0 、 V —— V_c 的初始含量和贮藏第 t 天时的测量值, mg/100 g。

3.3 菌落总数货架期模型的建立

3.3.1 菌落总数生长的预测方程 图 2 为利用修正的 Gompertz 方程拟合,得到鲜切生菜在 0,5,15,20 °C 下贮藏的菌落总数的生长曲线,不同温度下的拟合参数见表 3。由表 3 可知,不同温度的决定系数 R^2 均高于 0.95,说明 Gompertz 模型可以较好地描述不同温度下鲜切生菜菌落总数生长的 S 型曲线。鲜切生菜在贮藏过程中最大菌落总数变化幅度不大,随着贮藏温度的升高,最大生长速率增大,延滞期缩短。

3.3.2 温度对菌落总数生长曲线参数的影响 图 3、4 分别为温度对菌落总数最大生长速率和延滞期 λ 之间的关系,通过 Belehradek 方程拟合,最大生长速率 $\sqrt{\mu_{max}}$ 和延滞期 $\sqrt{\frac{1}{\lambda}}$ 与温度 T 之间存在着良好的线性关系,如式(13)、(14)所示,相关系数均大于 0.95。

$$\sqrt{\mu_{max}} = 0.063 \times (T + 0.963 5), \quad (13)$$

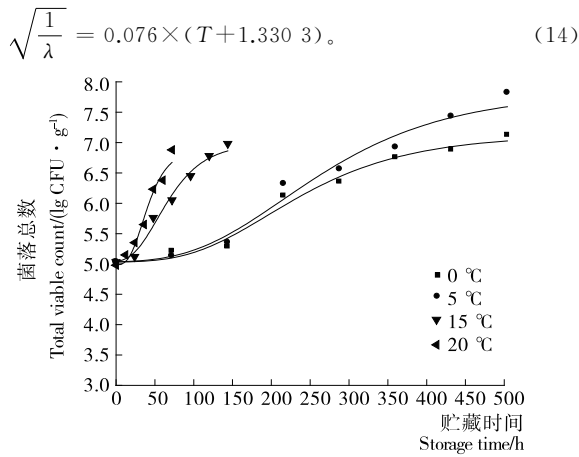


图 2 不同温度下菌落总数的生长曲线

Figure 2 Growth curves of total viable count at different temperatures

表 3 不同温度下鲜切生菜菌落总数生长曲线拟合参数

Table 3 Fitting parameters of colony growth curve of fresh-cut lettuce at different temperatures

贮藏温度 T/°C	最大菌落数 N_{max} / lg(CFU · g ⁻¹)	最大生长速率 μ_{max} /d ⁻¹	延滞时间 λ /h	决定系数 R^2
0	7.12	0.007 67	38.628 5	0.980 6
5	7.82	0.008 72	32.903 9	0.973 2
15	6.98	0.022 0	20.826 6	0.982 9
20	6.88	0.039 1	16.349 1	0.966 7

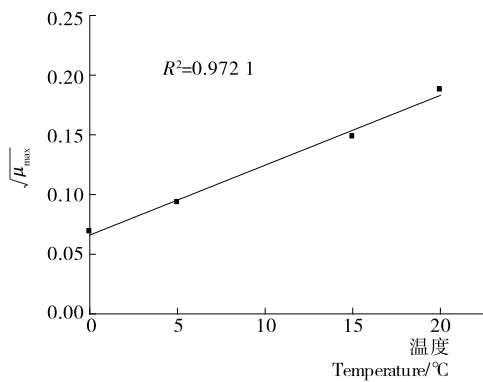


图 3 μ_{max} 与温度的关系

Figure 3 Relationship between μ_{max} and temperature

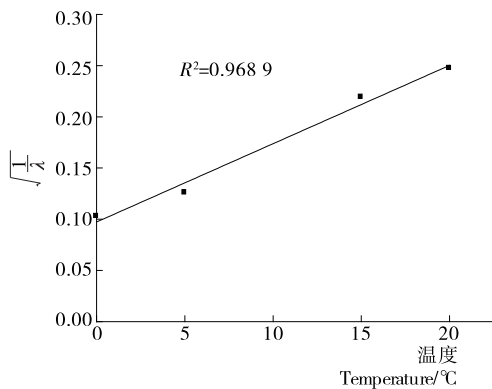


图 4 λ 与温度的关系

Figure 4 Relationship between λ and temperature

3.3.3 鲜切生菜菌落总数货架期模型的建立 有研究^[20]表明,当生菜中菌落总数达到 6 lg CFU/g 时,组织会腐烂变质。结合感官评价可知,当菌落总数达到 6 lg CFU/g 时,鲜切生菜色泽暗淡,萎焉褐变严重,达到感官终点,因此本试验以菌落总数增殖到 6 lg CFU/g 为货架期终点,此时其最低腐败水平 N_s 为 6.35 lg CFU/g。将上述参数代入式(8)得到菌落总数的货架期 SL_G 如下:

$$SL_G = \frac{1}{[0.076 \times (T + 1.330 3)]^2} - \frac{\{\ln[-\ln(\frac{6.35 - N_0}{7.136 - N_0})] - 1\} \times 7.136 - N_0}{2.178 \times [0.063 \times (T + 0.963 5)]^2} \quad (15)$$

依据式(4)得到 Arrhenius 方程拟合下的菌落总数的货架期预测模型 SL_D 如下:

$$SL_D = \frac{\ln(\frac{X_T}{X_{T_0}})}{3.35 \times 10^7 \times e^{(-\frac{4.808 \times 10^4}{8.314 T})}} \quad (16)$$

3.4 货架期模型的验证与评价

选取样品在 10 °C 条件下的货架期实测值,验证该预测模型的准确性。鲜切生菜在贮藏运输过程中容易褐变黄化、腐败产生等产生不良感官变化,微生物的污染也会加快其腐烂变质。本试验以叶绿素和 V_C 损失 20% 时的状态和菌落总数达到 6 lg CFU/g 为鲜切生菜货架期终点^[20-22],通过比较实测值与预测值来验证模型 SL_{chlo} 、 SL_{V_C} 、 SL_D 和 SL_G 的准确性,结果见表 4。由表 4 可知,货架期模型 SL_{chlo} 、 SL_{V_C} 和 SL_G 的相对误差分别为 8.89%、4.44%、6.67%,均在 10% 以内,可被接受,而货架期模型 SL_D 相对误差为 11.7%,不被接受。与货架期预测模型 SL_{chlo} 相比,货架期模型 SL_{V_C} 和 SL_G 的相对误差更小,预测值更准确,分别为 4.3、4.2 d,说明以 V_C 和菌落总数为特征指标建立的货架期模型优于以叶绿素为特征指标建立的。

偏差因子和准确因子可以评价以菌落总数为特征指标建立的货架期预测模型的可靠性。表 5 为根据式(9)、式(10)得到的在 10 °C 下鲜切生菜的菌落总数的偏差因子和准确因子。Ross 等^[16]研究表明当 $0.90 < B_f < 1.05$ 时,预测模型最好; $0.70 < B_f < 9.0$ 或 $1.06 < B_f < 1.15$ 时,预测模型可以被接受,否则模型不可靠。准确因子 A_f 越大说明准确性越低,预测值与实测值的差距越大, A_f 值等于 1 则表示预测值和实际值完全吻合^[23]。从表 5 可以看出,货架期模型 SL_G 的偏差因子为 0.88,准确因子更接近于 1,而货架期模

表 4 10 °C 下鲜切生菜的实测值与预测值

Table 4 The measured values and predicted values of fresh-cut lettuce under 10 °C

货架期模型	贮藏温度/°C	预测值/d	实测值/d	相对误差/%
SL_{chlo}	10	4.1	4.5	8.89
SL_{V_C}	10	4.3	4.5	4.44
SL_A	10	3.9	4.5	11.7
SL_G	10	4.2	4.5	6.67

表5 10℃下货架期模型SL_G和SL_D的准确因子和偏差因子

Table 5 The deviation and accuracy of the predicted values of fresh-cut lettuce under 10℃

货架期模型	贮藏温度/℃	试验次数(n)	偏差因子(B _f)	准确因子(A _f)
SL _G	10	12	0.88	1.25
SL _D	10	12	1.52	1.98

型SL_D的偏差因子为1.52,误差较大,这也进一步说明Gompertz模型较Arrhenius方程能更好地反映0~20℃时微生物的生长趋势。

4 结论

本试验通过Arrhenius方程和Gompertz模型分别对鲜切生菜的品质指标和菌落总数建立的不同温度下的货架期模型可以很好地监测其在贮藏过程中的品质变化和安全性。利用Arrhenius方程对叶绿素和V_C建模得到的品质指标的货架期预测模型的相关系数分别为0.989 1,0.988 0,均大于0.95,说明该预测模型可以很好地通过叶绿素和V_C等品质指标的变化情况预测鲜切生菜在0~20℃范围内的货架期;Gompertz模型较准确地描述了鲜切生菜在0~20℃范围内的菌落总数的S型生长趋势,相关系数均高于0.95,同时结合Behradek方程建立了菌落总数的货架期模型。通过测定10℃温度下各指标的变化情况,验证货架期的准确性,结果表明:货架期模型SL_{V_C}的相对误差比SL_{chl_a}小,以Gompertz模型建立的货架期模型SL_G的相对误差比SL_D小,说明以Arrhenius方程和Gompertz模型为基础分别对鲜切生菜的V_C和菌落总数建模得到的货架期模型能较准确地对0~20℃范围内鲜切生菜的货架期进行实时监测。

参考文献

[1] 冯双庆,赵玉梅. 水果蔬菜保鲜实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 172.
 [2] CHEN Zhao, ZHU Chuan-he, ZHANG Yan, et al. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on enzymatic browning and shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce (*Lactuca sativa*, L.)[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2010, 58(3): 232-238.
 [3] KIM D H, KIM H B, CHUNG H S, et al. Browning control of fresh-cut lettuce by phytoncide treatment[J]. *Food Chemistry*, 2014, 159(11): 188-192.
 [4] FERRARIO M, ALZAMORA S M, GUERRERO S. Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound[J]. *Food Microbiology*, 2015, 46: 635.
 [5] NOURIAN F, RAMASWAMY H S, KUSHALAPPA A C. Kinetics of quality change associated with potatoes stored at different temperatures[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2003, 36(1): 49-65.
 [6] OWEN R F. 食品化学[M]. 3版. 王璋, 许时婴, 江波, 等, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 849-875.
 [7] 王超, 刘斌, 巩玉芬, 等. 鲜切菠菜在不同冷藏温度下品质变化

的动力模型[J]. *制冷学报*, 2015, 36(6): 98-103.
 [8] 胡位歆, 丁甜, 刘东红. 草莓采后货架期预测模型的构建[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(3): 186-193.
 [9] 史波林, 赵镭, 支瑞聪. 基于品质衰变理论的食品货架期预测模型及其应用研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33(21): 345-350.
 [10] 巩玉芬. 不同温度贮藏对鲜切蔬菜品质变化的影响及其货架期预测模型的建立[D]. 天津: 天津商业大学, 2014: 40-42.
 [11] 肖璐, 范新光, 王美兰, 等. 基于预报微生物学理论的鲜切西兰花货架期预测模型[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(9): 141-146.
 [12] 张利平, 谢晶. Arrhenius方程结合特征指标在蔬菜货架期预测中的应用[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 163-168.
 [13] KING A D, MAGNUSON J, TÖRÖK T, et al. Microbial flora and storage quality of partially processed lettuce[J]. *Journal of Food Science*, 1991, 56(2): 459-461.
 [14] INSKEEP W P, BLOOM P R. Extinction coefficients of chlorophyll a and B in *n,n*-dimethylformamide and 80% acetone[J]. *Plant Physiology*, 1985, 77(2): 483-485.
 [15] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 134-138.
 [16] 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.
 [17] ROSS T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1996, 81(5): 501-508.
 [18] 谢晶, 张利平, 高志立, 等. 鸡毛菜的品质动力学分析及货架期预测模型[J]. *食品科学*, 2014, 35(10): 268-272.
 [19] 林永艳. 典型叶类蔬菜低温冷藏工艺的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013: 8-15.
 [20] 张立奎, 陆兆新, 汪宏喜. 鲜切生菜在贮藏期间的微生物生长模型[J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(2): 107-110.
 [21] THEOFANIA T, EFIMIA D, MARIANNA G, et al. Shelf-life prediction models for ready-to-eat fresh cut salads: Testing in real cold chain[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 240(2 017): 131-140.
 [22] 范新光. 鲜切西兰花减压冷藏保鲜技术与货架期预测模型的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2014: 42-43.
 [23] 董庆利, 曾静, 丁甜, 等. 猪肉中气单胞菌生长与失活的Gompertz模型构建[J]. *食品科学*, 2011, 32(11): 118-122.