

基于气体传感信息的蓝莓贮藏货架期预测方法

傅泽田^{1,2} 高乾钟³ 李新武¹ 张旭³ 张小栓^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;

3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 利用气体传感信息,提出了一种蓝莓货架期预测方法。将蓝莓贮藏 0°C 、 5°C 、 22°C 下,对贮藏微环境中的3种气体含量(氧气、二氧化碳、乙烯)进行了监测,同时将蓝莓5种理化指标(腐败率、硬度、pH值、可溶性固形物含量、失重率)作为传统的品质指示指标进行了获取,分析了贮藏微环境中气体含量变化和理化指标变化的相关性,并利用BP神经网络从气体角度建立了蓝莓的货架期预测模型。结果表明:蓝莓品质的变化受到贮藏温度的影响;气体含量的变化与蓝莓品质的变化存在明显相关性;利用BP神经网络建立的蓝莓货架期预测模型具有良好的预测效果。其中, 0°C 的预测误差为 $0.091\sim 0.191\text{ d}$, 5°C 的预测误差为 $0.069\sim 0.302\text{ d}$, 22°C 的预测误差为 $0.094\sim 0.338\text{ d}$,基本满足货架期预测需要。

关键词: 蓝莓; 货架期预测; 气体传感信息; 理化指标; BP神经网络

中图分类号: S609⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0308-08

Blueberry Shelf Life Prediction Method Based on Sensor Information Stored Gas

FU Zetian^{1,2} GAO Qianzhong³ LI Xinwu¹ ZHANG Xu³ ZHANG Xiaoshuan^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Given the importance of blueberry shelf life in ensuring the quality of blueberries during storage, a blueberry shelf life prediction method was proposed from the perspective of gas sensing information. Three kinds of gas content (oxygen, carbon dioxide and ethylene) and five kinds of physical and chemical indexes for blueberry (rate of corruption, hardness, pH value, soluble solids and weight loss rate) in storage environment of 0°C , 5°C and 22°C were monitored, the correlation between gas content and physical and chemical indexes were analyzed, and the shelf life prediction model of blueberry was established by using the BP neural network from the perspective of gas. The results showed that the quality of blueberry was affected by the storage temperature, and there was a clear correlation between the change of gas and blueberry quality. Blueberry shelf life prediction model using the BP neural network had good predictive results. Among them, the prediction error was $0.091\sim 0.191\text{ d}$ at 0°C , which was $0.069\sim 0.302\text{ d}$ at 5°C and $0.094\sim 0.338\text{ d}$ at 22°C . Predicting the shelf life of blueberries by using gas sensing information had the advantages of simple operation and low cost, which was a useful exploration for the shelf life prediction of blueberries.

Key words: blueberry; shelf life prediction; gas sensing information; physical and chemical indexes; BP neural network

0 引言

蓝莓的采摘季节处在高温期,贮藏和物流过程

中生理代谢快、硬度易下降^[1-3]。获取贮藏中蓝莓的货架期信息,并计算出蓝莓最佳的处理时间,可以有效保证蓝莓的营养价值和提高其经济价值。

收稿日期: 2018-01-28 修回日期: 2018-02-19

基金项目: 烟台市科技计划项目(2017JH004)和大北农青年学者研究计划项目

作者简介: 傅泽田(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与信息化研究,E-mail: fzt@cau.edu.cn

通信作者: 张小栓(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与信息化等研究,E-mail: zhxsuan@cau.edu.cn

目前针对蓝莓货架期的研究中,学者将蓝莓的化学指标(如花青素等)、理化指标(如硬度等)作为主要参数^[4-6]来探究不同包装方式^[2-3]、环境温度^[7]或不同前处理方式^[8-9]对蓝莓品质变化的影响,并利用动力学模型^[7,10-11]、温度模型^[4]或统计学模型^[6-9]进行货架期预测。但是未从蓝莓贮藏微环境中气体含量变化的角度进行货架期信息的获取与品质预测,而贮藏中的微环境不仅影响果蔬的品质变化,而且果蔬的品质变化也在微环境中有所体现^[12]。例如果蔬的呼吸作用与其生理生化变化过程有直接或间接的联系^[13]。谢晶等^[14]、曹冬洁等^[15]以呼吸速率为特征建立了关于菇类的酶抑制动力学方程,说明果蔬品质劣变也可以由呼吸作用引起的气体含量变化来体现;而胡花丽等^[16]也从 CO₂(二氧化碳)、C₂H₄(乙烯)的含量角度说明了气体对果蔬货架期的影响,但未从气体角度建立货架期预测模型。

由蓝莓贮藏微环境中的气体来预测货架期的方法是对货架期预测方法的一种有益探索。通过气体获取货架期信息需要同时采集多种气体信息并进行并行处理^[17-18],目前常见的多参量数据处理方法有统计学方法、支持向量机^[19]、遗传算法^[20-21]、人工 BP 神经网络^[22-24]等方法。其中,人工 BP 神经网络因其独特优势而在气体阵列的数据处理方面运用较多^[25-27]。其通过模拟人脑的处理过程,将输入的多维信息进行综合分析,有效避免不精确筛选导致的模型预测精度降低的问题,且模型的实现难度低、易搭建。

鉴于以上分析,本文针对不同温度下贮藏的蓝莓提出基于气体传感信息的货架期预测方法。通过选择并采集与蓝莓品质劣变过程相关的气体变化信息,获取 5 种传统理化指标作为品质的指示指标,通过相关性分析证明蓝莓贮藏微环境中的气体与其品质变化具有明显的相关性,利用 BP 神经网络从多参量气体角度针对不同温度建立蓝莓货架期预测模型。

1 蓝莓货架期预测模型的构建

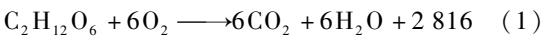
果蔬货架期信息是指果蔬在不同的环境中品质劣变的时间。通过货架期预测模型得到果蔬在特定环境下的贮藏时间,从而对果蔬及时地销售,避免果蔬的腐败^[28-30]。通过对蓝莓贮藏过程中理化指标和气体含量的监测,建立蓝莓的货架期预测模型,进而实现对蓝莓品质变化的感知。

1.1 模型参数选取

呼吸作用是果蔬贮藏过程最主要的生理活

动^[13-15]。贮藏中温度控制或气调控制方法的基本原理就是通过调节不同温度或者气体含量来实现对果蔬呼吸作用的影响^[31],从而控制果蔬品质劣变的速度。因此可使用与蓝莓呼吸作用相关的气体来作为建立蓝莓货架期预测模型的参数。

O₂和 CO₂作为果蔬呼吸速率表征的主要气体,可以反映蓝莓在贮藏过程中呼吸速率的变化。果蔬中常用来反映呼吸速率的方程为



其表现了 O₂ 与 CO₂ 之间的转换关系^[15]。利用 O₂ 和 CO₂ 含量变化与品质变化建立的耦合模型,可以进行蓝莓货架期的反映。

同时,蓝莓的呼吸作用过程会产生乙烯。乙烯含量的变化在一定程度上反映了蓝莓呼吸速率强弱,同时乙烯能影响蓝莓的衰老、腐败过程,进而间接地影响呼吸作用^[16]。所以乙烯是获取蓝莓品质劣变情况的一个重要气体参数。

综上所述,从气体角度建立的蓝莓货架期预测模型所选择的参数是:与呼吸作用密切相关的 O₂、CO₂和 C₂H₄含量。

1.2 模型参数数据获取方法

如图 1 所示,蓝莓货架期预测模型的建立过程为:首先获取气体参数信息,然后利用硬件处理设备传感信号的处理并进行传输,最后建立货架期预测模型。其中,模型参数信息的获取包括气体信息采集和信号处理两部分。在信息采集部分,利用氧气、二氧化碳和乙烯传感器实现,使用的气体传感器信息如表 1 所示,传感器利用电化学原理,具有体积小、占用空间小、携带方便、性价比高等优点,可以满足对气体响应的需要,并对贮藏环境有很好的适应性;传感器的供电电压都为 3.3 V,可以满足长时间连续监测的需求。在信号处理部分,硬件设计需满足数据预处理、数据储存和远端发送的功能。利用 CC2530 片上系统对信号储存发送,传感器节点采集的时间间隔设置为 10 min,CC2530 通信模块每 1 h 发送一次数据。采用 3.7 V、30 A·h 的锂电池对实验的硬件电路进行供电。

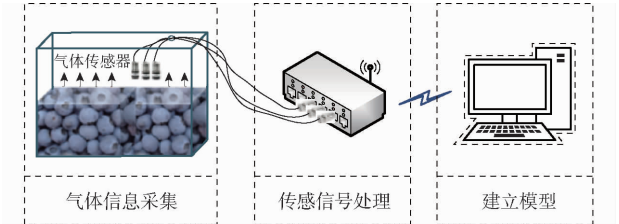


图 1 蓝莓货架期预测模型构建流程

Fig.1 Construction process of blueberry shelf life prediction model

表 1 气体传感器信息
Tab.1 Gas sensor information

种类	型号	量程/%	输出值/V	精度/%
O ₂	AP-M	0 ~ 25	0 ~ 1.0	±0.01
CO ₂	COZIR-W	0 ~ 5.00	0.4 ~ 2	±0.05
C ₂ H ₄	A15-75D	0 ~ 0.01	0.4 ~ 2	±0.05

1.3 蓝莓货架期预测模型构建方法

1.3.1 货架期预测模型算法选取

为实现对蓝莓货架期的有效预测,从模型参数的数据特点和模型自身特点两方面来选取合适的模型。在模型参数方面,本文利用气体传感器对与蓝莓呼吸作用密切相关的 3 种气体含量变化信息进行获取。在模型特点方面,需要一种能对丰富的数据量进行充分利用,并挖掘出多种参数之间的内在相关性,实现高精度预测的模型。

BP 神经网络可以满足上述需要。其通过模拟人脑的处理过程,能够有效对多参数进行处理,且善于处理丰富的数据量,因此在电子鼻系统和气体阵列的数据处理中运用较多。不仅其单独使用有良好的预测效果,而且可与其他方法进行结合来优化预测结果,具有较好的模型拓展性^[25-27]。针对蓝莓的货架期预测,传感器采集的数据量可以满足 BP 神经网络进行模型训练的数据量要求,而 BP 神经网络具有对多个因素进行综合分析的能力,能充分挖掘所监测气体与货架期之间的相关性,提高蓝莓货架期的预测效果。综上分析,本文使用 BP 神经网络建立蓝莓货架期预测模型。

1.3.2 BP 神经网络模型建立步骤

利用获取的蓝莓微环境内 3 种气体含量变化数据,通过 BP 神经网络来建立货架期预测模型。BP 神经网络建立流程如下^[22-24]:

(1) 构建神经网络结构。神经网络通常由输入层、隐含层、输出层构成,隐含层的层数对神经网络的精度影响较大。通常 3 层结构就能满足 n 维到 m 维的映射需求。

(2) 确定输入层、输出层和隐含层的节点数。根据蓝莓品质感知需求,输入层为 3 种气体含量,输出层为货架期。数据进行归一化处理为 0 ~ 1 之间的数,排除数据带来的误差。基本结构如图 2 所示。归一化公式为

$$X = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(2)

式中 X ——归一化数据

x ——原始气体含量数据

$x_{\max}$ ——数据中最大值

$x_{\min}$ ——数据中最小值

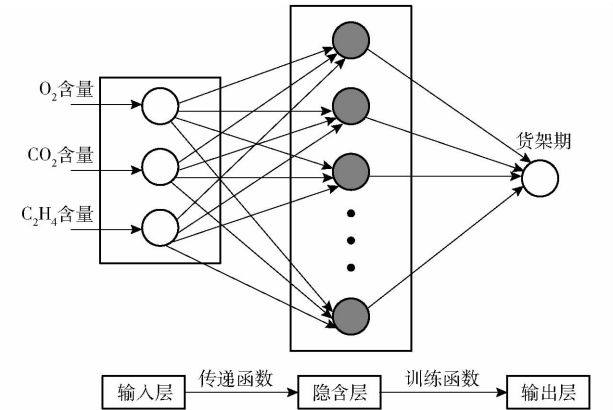


图 2 蓝莓 BP 预测模型结构图

Fig.2 Structure diagram of blueberry BP prediction model

隐含层节点数的确定方法为

$$n = (n_1 + n_0)^{1/2} + a$$

(3)

式中 n_0 ——输入节点数

n_1 ——输出节点数

a ——1 ~ 10 之间的常数

n ——隐含层节点数

(3) 选择网络函数进行训练。常用函数如表 2 所示。

表 2 BP 神经网络常用函数
Tab.2 BP neural network function

传递函数	功能
purelin	线性传递函数
hardlim	硬限幅传递函数
satlin	饱和线性传递函数
logsig	对数 S 形传递函数
tansig	正切 S 形传递函数
traingd	梯度下降法
traingdx	自适应 lr 动量梯度下降法
trainrp	弹性梯度下降法
trainbr	贝叶斯正则化算法
trainbfg	拟牛顿算法

2 蓝莓贮藏实验

2.1 实验方案

从北京某蓝莓种植基地采摘新鲜蓝莓,去除过熟和已经开始腐败的蓝莓,选择出果粒大小一致、表面无病斑伤痕成熟度 90% 以上的蓝莓果实,总共约 3 600 g 作为实验样本。将其均分为 A、B 两组,A 组用于气体监测,B 组用于理化指标测定。将 A 组再次均分为 3 组,每组 600 g,然后分别放入一个 18.2 cm × 18.2 cm × 10.8 cm 的容器中,用厚度为 0.02 mm 的 PE 保鲜膜进行密封;之后分别将其与氧气、二氧化碳、乙烯传感器一起放入 0、5、22℃ 的恒温箱中(温度按不同贮藏需求进行设置),控制湿度在 90% ~ 96% 之间,气体传感器的采集频率为

10 min/次。B 组也均分为 3 组,每组中再将蓝莓根据质量均分为 6 组,每组 100 g,每颗蓝莓质量为 1.5~2 g 不等,所以按上述标准再次精细挑选后,将 45 颗蓝莓作为每天的实验样本,放入上述密封盒的 1/6 大小的密封盒中,并同时用 PE 保鲜膜密闭(基本保证气体含量一致),标号 1~6。分别将样本间隔 20 min 放入 0、5、22℃ 温度下进行储存(为做理化指标实验留下时间),并记录初始时间。共储存 7 d,每天进行一次理化指标测定实验,并拷贝气体实验数据。理化指标在硬度、可溶性固溶物含量和 pH 值测量前先进行失重率和腐败率的测量,在理化指标测量前先进行感官评价。22℃ 下蓝莓贮藏实验和结果分别如图 3 和图 4 所示。

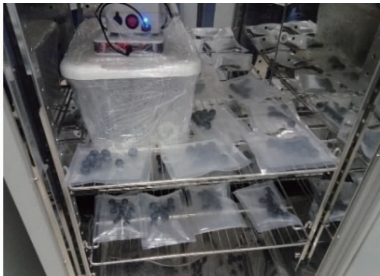


图 3 22℃ 下蓝莓贮藏实验
Fig. 3 Blueberry storage test at 22℃



图 4 22℃ 下 7 d 后蓝莓实验结果
Fig. 4 Blueberry experiment results after 7 d at 22℃

2.2 理化指标的测定方法

2.2.1 失重率

利用 EK3820 型天平对 45 个蓝莓实验样本进行称量,重复 3 次取平均值。

$$\alpha = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\%$$
 (4)

式中 M_0 ——贮藏前的质量
 M_1 ——贮藏后的质量
 α ——失重率

2.2.2 腐败率

按照实验方案,取每天待测量的实验样本组中 45 个样本统计腐烂果数,计算腐败率。烂果是指果实表面至少有一处发生病变或者汁液外漏、果实软化皱缩或腐烂现象。

$$\varepsilon = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$
 (5)

式中 m_0 ——蓝莓的总质量
 m_1 ——腐烂果的质量
 ε ——腐败率

2.2.3 硬度

利用质构仪测量蓝莓硬度。随机挑选 15 个实验样本进行测量,对每颗果取 2 个对称部位测定后取平均值。出发点负载 3 g,速率 0.5 mm/s^[9]。

2.2.4 可溶性固形物含量

随机选取 15 个实验样本,用纱布挤汁,采用 WYT-J 型手持折光仪对可溶性固形物含量进行测定。

2.2.5 pH 值的测定

用 pH 数显式酸度计测定蓝莓的 pH 值。随机选取 15 个实验样本,2 次测定后取平均值,每次对每个样本从蓝莓果实的同一位置刺入测量 pH 值。

2.2.6 感官评价

每次由实验室中相同的 10 位学生进行感官评价,感官评价得分标准如表 3。

表 3 蓝莓感官评价得分标准
Tab. 3 Blueberry sensory evaluation criteria

评价指标	分数
外观完好,风味正常清新,与采摘时外观和口感相似或更好	5
外观基本完好,略有皱缩,风味正常,接近采摘时口感	4
外观尚可,有皱缩,风味尚可,口感稍差	3
皱缩严重,明显异味	2
皱缩相当严重,发生霉变,产生霉味	1

3 结果分析与模型建立

3.1 理化指标与气体传感信息结果分析

3.1.1 理化指标结果与分析

对所得理化指标和感官评价的数据取平均值后,绘制不同温度下的雷达图,结果如图 5 所示。0、5、22℃ 下,蓝莓硬度一直不断下降,7 d 时下降率分别是 32.9%、35.6% 和 57.8%,说明低温可以减缓果实软化,与纪淑娟等^[32]的研究结果一致。腐败率在不同温度下速率和时间都不同,0℃ 和 5℃ 腐败率变化速率基本一致,5 d 时出现腐败率迅速增长,而 22℃ 中腐败率每次上升的幅度较大,说明蓝莓的腐败率受温度影响明显,温度越高,腐败越快;22℃ 下在第 2 天出现腐败后,保持了 3 d 基本不变又继续增加的现象,原因可能与气体含量、空间的密闭和温度有关。可溶性固形物(主要是可溶性糖)含量能直接反映果蔬的成熟程度和品质状况^[33],可溶性固形物含量和 pH 值在 0、5、22℃ 下都出现了波动,其

中 5℃ 的波动较大,0℃ 波动较小,基本与蓝莓在贮藏中的可溶性固形物含量逐渐增加,而进入衰老过程可能出现下降的生理变化规律相吻合,但各温度下表现的不一致可能与采收成熟度有关^[31]。感官评价是人对蓝莓品质变化的主观反映,在感官评价结果中,22℃ 较 0℃ 和 5℃ 下的波动较大,且感官评价得分下降较快,说明蓝莓品质劣变速度快;按照

表 3 感官评价得分标准,7 d 后,22℃ 的蓝莓基本不可食用,并发生了霉变;0℃ 和 5℃ 下蓝莓基本不影响食用,在 0℃ 和 5℃ 下人对蓝莓品质劣变的分辨力基本无差异。从图 5 的对比中可以看出,0℃ 和 5℃ 下失重率变化明显,22℃ 的腐败率变化更加明显,说明利用理化指标来衡量蓝莓的品质变化时,不同温度下对品质有明显指示作用的因素不同。

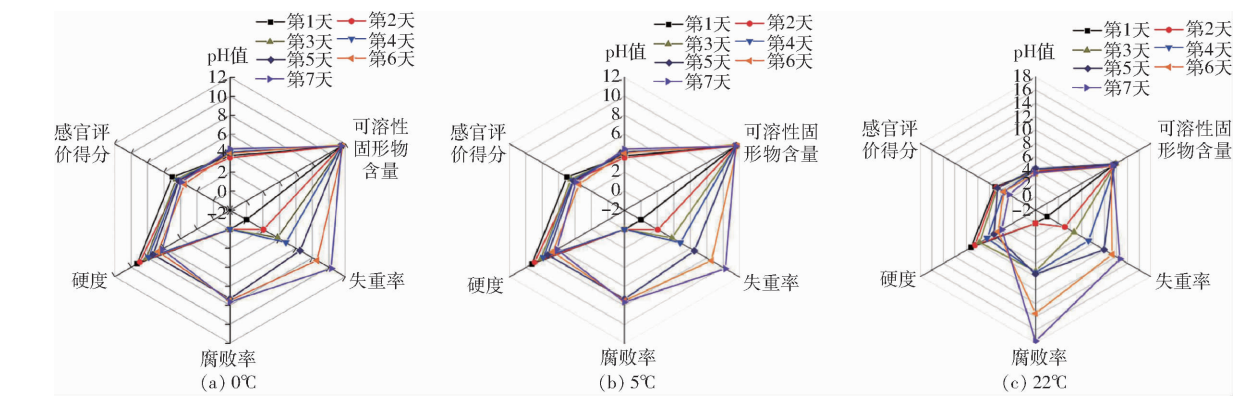


图 5 蓝莓感官评价得分和理化指标结果

Fig. 5 Blueberry sensory evaluation and physical and chemical index results

3.1.2 气体传感信息结果与分析

图 6 是 0、5、22℃ 下气体传感信息结果。在各个温度下, O₂、CO₂ 和 C₂H₄ 含量的变化规律基本相同: O₂ 逐渐下降, CO₂ 和 C₂H₄ 逐渐上升, 3 种气体变化趋势具有一定的相关性; 但气体变化速率不同, O₂ 在 0℃ 和 5℃ 下的变化基本一致, 22℃ 时有急速下降过程和缓慢变化的过程; 0℃ 下 CO₂ 和 C₂H₄ 的变化规律接近, 一直缓慢上升, 说明 0℃ 下蓝莓呼吸较为平稳; 5℃ 下乙烯前 4 d 增长迅速, 后接近稳定,

CO₂ 呈现持续增长的状态, 此处可能与传感器的性能和密封效果有关; 22℃ 下 O₂、CO₂ 和 C₂H₄ 在前 3 d 都有一个快速变化的过程, 后 C₂H₄ 稳定, O₂ 下降, CO₂ 缓慢上升, 这应该与蓝莓的呼吸作用无关, 而是环境中的微生物反应; 从对气体的变化结果分析也可知温度对蓝莓呼吸速率产生影响, 温度越高速率越快, 与理化分析结果相同。但是每个温度下的蓝莓品质变化规律, 都可以通过对 O₂、CO₂ 和 C₂H₄ 的综合分析获取。

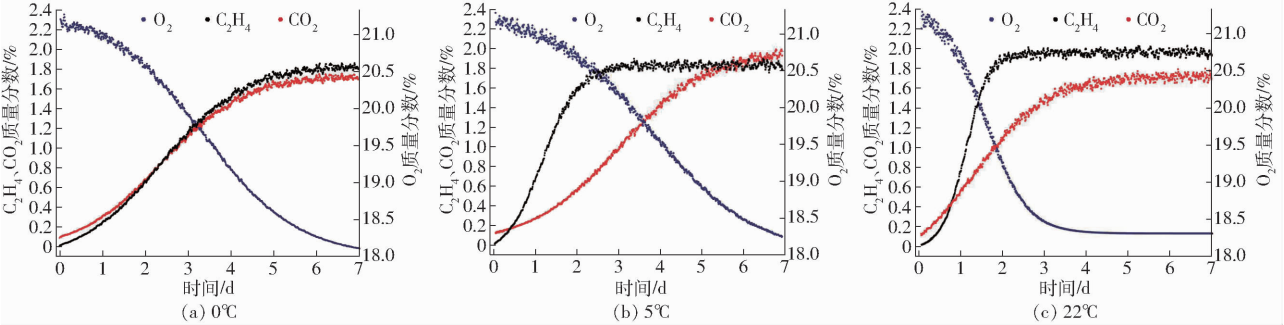


图 6 气体传感信息结果

Fig. 6 Gas sensing information results

3.1.3 理化指标与气体传感信息相关性分析

表 4 是 0、5、22℃ 下蓝莓理化指标与气体间相关性分析。相关性分析的方法是: 针对第 1 天的实验结果, 取某种气体数据对应时刻前后各 1 h 的数据, 共有 12 个数据点, 取均值后作为第 1 天理化指标对应的气体值。3 种气体均采用这样的方法进行取值, 第 2 天~第 7 天也采用类似的方法进行处理。将每种气体数据转变为与理化指标数量相同的 7 个

数据点后, 利用 Excel 作相关性分析。从表中可以看出, 每个温度下失重率、腐败率和硬度的变化与气体含量变化相关性较高, 表现出明显的相关性, 其中失重率和腐败率与 O₂ 含量呈负相关, 与 CO₂ 和 C₂H₄ 含量呈负相关; 硬度的相关性正好相反; 在理化结果分析和气体结果分析中, 同一温度下气体变化规律与理化指标变化呈现出一致性, 在 0℃ 时蓝莓持续进行呼吸作用, 呼吸速率慢, O₂ 含量持续下降, C₂H₄

和 CO₂ 含量持续上升,对应理化指标变化小,主要体现在失重率上,5℃的结果与 0℃基本相同;在 22℃时蓝莓呼吸作用较快,O₂下降速率、C₂H₄和 CO₂上升速率大,对应理化指标变化主要体现在腐败率上,

与果蔬品质变化规律相同;在 0℃和 5℃下失重率和 O₂、C₂H₄、CO₂含量表现明显相关性,22℃时失重率、腐败率和硬度都与 O₂、C₂H₄、CO₂含量表现为明显相关性,说明理化指标和气体的分析结果呈现出一致性。

表 4 理化指标与气体含量间的相关性
Tab.4 Correlation between physical and chemical indicators and gas

指标	O ₂ 含量			CO ₂ 含量			C ₂ H ₄ 含量		
	0℃	5℃	25℃	0℃	5℃	22℃	0℃	5℃	22℃
pH 值	-0.83	-0.43	0.29	0.80	0.49	-0.25	0.81	0.57	-0.12
可溶性固形物含量	-0.36	-0.14	0.62	0.39	0.03	-0.52	0.38	0.12	-0.51
失重率	-0.99	-0.96	-0.98	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99	
腐败率	-0.86	-0.89	-0.95	0.83	0.83	0.95	0.80	0.86	0.92
硬度	0.99	0.997	0.99	-0.98	-0.98	-0.98	-0.96	-0.98	-0.99

综上所述,气体变化和理化指标的变化具有明显相关性,说明从气体传感信息和理化指标两个角度都可以对不同温度下贮藏的蓝莓品质变化进行有效分析。而相较理化指标,气体监测难度低,采集到的数据量丰富,各个温度下对品质变化进行有效表征的指标来源多,使分析结果更加可靠。

3.2 蓝莓货架期预测模型构建

利用 BP 神经网络建模方法,分别对 0、5、22℃下的蓝莓建立货架期预测模型。将 O₂、CO₂和 C₂H₄含量作为输入,货架期作为输出。将每个温度下的第 1 天、第 2 天、第 3 天、第 4 天共 1728 个样本数据作为模型的训练样本并进行多次迭代,第 5 天、第 6 天、第 7 天共 1296 个样本数据进行检验。相应的参

数设置为:隐含层节点数为 10 层,利用 logsig 函数和 purelin 函数分别作为输入层和输出层函数,trainrp 作为训练函数,learndm 作为学习函数,设置学习速率为 0.001,动量因子为 0.01,误差为 1 h。

预测结果如表 5 所示,每个温度下的相对误差逐渐减小,BP 神经网络的预测效果与训练数据样本的数量和数据之间的关联性有关。从对气体和理化指标的分析中知,蓝莓的品质在低温时变化缓慢,随温度升高而加快。但在出现腐败之后,O₂、CO₂和 C₂H₄含量的变化变得平缓,故在 22℃预测的相对误差变化小,符合实际情况。从表中可以看出,0℃的预测误差为 0.091~0.191 d,5℃的预测误差为 0.069~0.302 d,22℃的预测误差为0.094~0.338 d,基本满足预测需要。

表 5 BP 神经网络货架期预测结果
Tab.5 BP neural network shelf life prediction results

实际 货架期/d	0℃			5℃			22℃		
	预测值/d	绝对误差/d	相对误差/%	预测值/d	绝对误差/d	相对误差/%	预测值/d	绝对误差/d	相对误差/%
1	1.091	0.091	9.129	1.101	0.101	10.107	1.094	0.094	9.355
2	2.145	0.145	7.264	2.185	0.185	9.251	2.174	0.174	8.690
3	3.147	0.147	4.909	3.268	0.268	8.924	3.250	0.250	8.337
4	4.166	0.166	4.138	4.302	0.302	7.561	4.212	0.212	5.303
5	5.191	0.191	3.816	5.192	0.192	3.845	5.262	0.262	5.240
6	6.099	0.099	1.652	6.069	0.069	1.152	6.294	0.294	4.902
7	7.093	0.093	1.334	7.073	0.073	1.037	7.338	0.338	4.826

4 结论

(1)对贮藏在 0、5、22℃下的蓝莓同时监测 3 种气体含量(O₂、CO₂和 C₂H₄)与获取 5 种理化指标(pH 值、可溶性固形物含量、失重率、腐败率和硬度)的变化,分析蓝莓在不同温度下贮藏时的品质变化规律,研究气体与理化指标在反映蓝莓品质变化时的相关性。结果表明,气

体和理化指标都可以有效地反映蓝莓品质变化。

(2)利用 BP 神经网络将 O₂、CO₂和 C₂H₄含量作为输入,货架期作为输出,分别对 0、5、22℃下的蓝莓建立了货架期预测模型。0℃的预测误差为 0.091~0.191 d,5℃的预测误差为 0.069~0.302 d,22℃的预测误差为 0.094~0.338 d,基本满足预测需要。

参 考 文 献

- 1 王友升,蔡琦玮,安琳,等. 1-甲基环丙烯和二氧化氯对蓝莓低温贮藏期间品质影响的多变量分析[J]. 中国食品学报, 2014,14(5): 253-258.
WANG Yousheng, CAI Qiwei, AN Lin, et al. Multivariate analysis of the influence of 1-methylcyclopropene and chlorine dioxide on fruit quality of blueberry during low temperature storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(5): 253-258. (in Chinese)
- 2 薛璐,于继男,鲁晓翔,等. 出库方式对冰温贮藏蓝莓货架期品质变化的影响[J]. 食品工业科技,2015,36(12):328-331, 340.
XUE Lu, YU Jinan, LU Xiaoxiang, et al. Effect of out-store modes on quality of ice-temperature storage blueberries during shelf-life period[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(12): 328-331, 340. (in Chinese)
- 3 刘萌,张振富,王美兰,等. 不同包装方式对蓝莓物流及货架期质构品质的影响[J]. 食品工业科技,2013,34(23): 323-327.
LIU Meng, ZHANG Zhenfu, WANG Meilan, et al. Influence of the different packing ways on texture quality of blueberry with logistics and shelf life[J]. Science and Technology of Food Industry,2013,34(23): 323-327. (in Chinese)
- 4 CARDELLI C, LABUZA T P. Application of Weibull Hazard Analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee[J]. LWT—Food Science and Technology, 2001, 34(5): 273-278.
- 5 DADALI G, OZBEK B, DEMIRHAN E. Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach[J]. Food and Bioproducts Processing, 2008,86(4): 235-241.
- 6 曹平,于燕波,李培荣. 应用 Weibull Hazard Analysis 方法预测食品货架寿命[J]. 食品科学,2007,28(8): 487-491.
CAO Ping, YU Yanbo, LI Peirong. Application of Weibull Hazard Analysis for forecast of food shelf-life[J]. Food Science, 2007, 28(8): 487-491. (in Chinese)
- 7 陈晓宇,朱志强,张小栓,等. 食品货架期预测研究进展与趋势[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(8):192-199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150826&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.026.
CHEN Xiaoyu, ZHU Zhiqiang, ZHANG Xiaoshuan, et al. Research progress and trend of food shelf life prediction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):192-199. (in Chinese)
- 8 李玮轩. ^{60}Co - γ 辐照处理对不同品种蓝莓货架期及冷藏效果的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
LI Weixuan. Effect of ^{60}Co -gamma irradiation on shelf life and cold storage quality of different varieties of blueberry [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 9 纪淑娟,周倩,马超,等. 1-MCP 处理对蓝莓常温货架品质变化的影响[J]. 食品科学,2014,35(2):322-327.
JI Shujuan, ZHOU Qian, MA Chao, et al. Effect of 1-MCP treatment on quality changes of blueberry at room temperature[J]. Food Science, 2014, 35(2):322-327. (in Chinese)
- 10 邢少华,张小栓,马常阳,等. 波动温度下罗非鱼微生物生长动力学模型[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):194-198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130734&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.034.
XING Shaohua, ZHANG Xiaoshuan, MA Changyang, et al. Microbial growth kinetics model of tilapia under variable temperatures [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):194-198. (in Chinese)
- 11 于滨,王喜波. 鸡蛋贮藏过程中品质变化的动力学模型[J]. 农业工程学报,2012,28(15):276-280.
YU Bin, WANG Xibo. Kinetics of quality change for eggs during storage[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 276-280. (in Chinese)
- 12 李江阔,张鹏,陈绍慧,等. 蓝莓贮后货架期间生理品质与挥发性物质的变化[J]. 食品科学,2014,35(10):246-251.
LI Jiangkuo, ZHANG Peng, CHEN Shaohui, et al. Changes in physiological quality and volatile substances in blueberry during shelf life after storage[J]. Food Science, 2014, 35(10):246-251. (in Chinese)
- 13 李佳,姜爱丽,胡文忠,等. 采后蓝莓呼吸代谢及颜色变化研究[J]. 现代园艺,2012(19):3-4.
- 14 谢晶,刘晓丹. 利用酶动力学拟合在密闭条件下香菇呼吸速率方程及米氏方程[J]. 中国食品学报,2006,6(1): 96-100.
XIE Jing, LIU Xiaodan. The estimation of respiration rate and michaelis-menten models of shiitake by principle of enzyme kinetics in closed system[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(1): 96-100. (in Chinese)
- 15 曹冬洁,王相友,王娟,等. 基于酶动力学方程的双孢蘑菇气调贮藏呼吸速率模型[J]. 农业工程学报,2016,32(4):284-289.
CAO Dongjie, WANG Xiangyou, WANG Juan, et al. Respiration rate model of *Agaricus bisporus* based on enzyme kinetics equation under controlled atmosphere storage[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4):284-289. (in Chinese)
- 16 胡花丽,叶小平,李鹏霞,等. 乙烯和 CO_2 气体吸收剂对采后小包装丰水梨货架期品质的影响[J]. 江苏农业学报,2017, 33(1):191-196.
HU Huali, YE Xiaoping, LI Pengxia, et al. Effects of gas absorbing agent of ethylene and CO_2 on the shelf quality of little packaged Hosui pear[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2017, 33(1):191-196. (in Chinese)
- 17 郭全友,王锡昌,杨宪时,等. 不同贮藏温度下养殖大黄鱼货架期预测模型的构建[J]. 农业工程学报,2012,28(10):267-

273.
GUO Quanyou, WANG Xichang, YANG Xianshi, et al. Predictive model construction of shelf life for cultured *Pseudosciaena crocea* stored at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 267–273. (in Chinese)
- 18 王萌. 面向气体传感器的自检测智能算法与硬件系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WANG Meng. Research on self-detection intelligent algorithm and hardware system design for gas sensor[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- 19 王建明, 刘鑫璐, 叶卫平. 基于支持向量机的 SAW 传感器阵列鉴别毒害气体的研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(2): 159–164.
WANG Jianming, LIU Xinlu, YE Weiping. Toxic gas identification by support vector machine from SAW sensor array measurements[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2017, 53(2): 159–164. (in Chinese)
- 20 邹小波, 方如明, 黄勇强, 等. 遗传算法在智能气体检测装置中的应用研究[J]. 信号处理, 2001, 17(5): 463–467.
ZOU Xiaobo, FANG Ruming, HUANG Yongqiang, et al. Study of genetic algorithms on intelligent gas test device[J]. Signal Processing, 2001, 17(5): 463–467. (in Chinese)
- 21 张彼德, 裴子春, 袁宇春. 基于遗传算法优化的 BP 神经网络的变压器油中气体预测[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 145–147.
ZHANG Bide, PEI Zichun, YUAN Yuchun. The prediction of gas in oil in a transformer based on bp neural network optimized by genetic algorithm[J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2010, 29(2): 145–147. (in Chinese)
- 22 刘雪, 李亚妹, 刘娇, 等. 基于 BP 神经网络的鲜鸡蛋货架期预测模型[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 328–334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151044&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.044.
LIU Xue, LI Yamei, LIU Jiao, et al. BP neural network based prediction model for fresh egg's shelf life[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 328–334. (in Chinese)
- 23 YU F, XU X Z. A short-term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network[J]. Applied Energy, 2014, 134: 102–113.
- 24 REN C, AN N, WANG J Z, et al. Optimal parameters selection for BP neural network based on particle swarm optimization: a case study of wind speed forecasting[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 56: 226–239.
- 25 龚雪飞, 徐景, 孙寿通, 等. PSO-BP 神经网络在多元有害气体检测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 154–156, 160.
GONG Xuefei, XU Jing, SUN Shoutong, et al. Application of PSO-BP neural network in multiple harmful gas detection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(2): 154–156, 160. (in Chinese)
- 26 石春燕. 基于人工神经网络的多气体分析系统研究与设计[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
SHI Chunyan. Study and design on multiple gases analysis system based on artificial neural network[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- 27 王玮. 基于气体传感器阵列的混合气体检测系统[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- 28 PEREIRA M, MALFEITO F M. A simple method to evaluate the shelf life of refrigerated rabbit meat[J]. Food Control, 2015, 49: 70–74.
- 29 SIRIPATRAWAN U, NOIPHA S. Active film from chitosan incorporating green tea extract for shelf life extension of pork sausages[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(1): 102–108.
- 30 WANG N N, YANG Y C, SUN D W, et al. Shelf-Life prediction of 'gros michel' bananas with different browning levels using hyperspectral reflectance imaging[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(5): 1173–1184.
- 31 张广燕. 箱式气调贮藏对蓝莓采后生理生化指标的影响[J]. 北方园艺, 2014(2): 132–134.
ZHANG Guangyan. Effects of plastic box modified atmosphere storage on the physiological and biochemical changes of postharvest blueberry fruits[J]. Northern Horticulture, 2014(2): 132–134. (in Chinese)
- 32 纪淑娟, 马超, 周倩, 等. 蓝莓果实贮藏期间软化及相关指标的变化[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 341–345.
JI Shujuan, MA Chao, ZHOU Qian, et al. Softening and softening indices change of blueberry during storage[J]. Food Science, 2013, 34(12): 341–345. (in Chinese)
- 33 WU M Z, WENG Y T, LIAO Z C. A new shelf life prediction method for farm products based on an agricultural IOT[J]. Advanced Materials Research, 2014, 846–847: 1830–1835.