

基于便携式近红外光谱仪的黄桃 腐败时间快速预测

Rapid prediction of yellow peach spoilage time based on portable near infrared spectrometer

周 旭 杨倩倩 张 进 李博岩

ZHOU Xu YANG Qianqian ZHANG Jin LI Boyan

(贵州医科大学公共卫生与健康学院, 贵州 贵阳 561113)

(School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 561113, China)

摘要:目的:利用便携式近红外(near infrared, NIR)光谱仪与化学计量学方法预测黄桃的腐败时间。方法:利用便携式 NIR 光谱仪采集黄桃样本的漫反射光谱,通过光谱预处理方法提高数据特征,采用偏最小二乘法(partial least squares, PLS)建立黄桃腐败时间的预测模型。通过均方根误差(root mean square error, RMSE)和决定系数(coefficient of determination, R^2)评估模型的预测效果。结果:模型对黄桃腐败时间预测的 R^2 为 0.63, RMSE 为 4.09 d。结论:NIR 光谱结合化学计量学方法能够实现黄桃腐败时间的无损、准确预测。

关键词:黄桃;近红外光谱;化学计量学;腐败时间;失重率

Abstract: Objective: Portable near-infrared (NIR) spectroscopy and stoichiometric methods were used to predict the spoilage time of yellow peach. Methods: Diffuse reflectance spectra of yellow peach samples were collected using a portable NIR spectrometer. Spectral preprocessing techniques were employed to enhance data features, and partial least squares (PLS) regression was applied to establish a prediction model upon the spoilage time and NIR data of yellow peach. The model performance was evaluated by both root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). Results: An R^2 value of 0.63 and RMSE of 4.09 days were achieved for the spoilage time prediction for yellow peach. Conclusion: NIR spectroscopy combined with chemometric methods can provide a non-destructive and accurate prediction of yellow peach spoilage time.

Keywords: yellow peach; near infrared spectroscopy;

chemometrics; spoilage time; weight loss rate

黄桃(*Amygdalus persica*)属于蔷薇科植物桃属,别名黄肉桃^[1]。黄桃口感独特,富含维生素、膳食纤维以及多种微量元素,深受消费者喜爱。2019 年中国桃种植面积达到 89.0 万 hm^2 ,总产量 1 599.3 万 t ^[2]。黄桃采摘时间多在炎热夏季,采后会快速成熟且易受微生物污染^[3]。通过对不同成熟度的果实进行分级仓储和销售能够降低采收后的损耗。目前,市场上常用的水果分级技术主要依靠人工肉眼识别,该方法主观性强且分辨效率低,难以实现精准分级^[4]。水果品质测量方法主要包括维生素含量和可溶性固形物等理化指标检测。这些方法专业技能要求高、耗时较长,仅适用于少数样本的抽检分析,很难满足广泛的实际检测需求^[5]。因此,研究快速、无损、非侵入的黄桃品质检测技术具有重要的实用价值。

近红外(near infrared, NIR)光谱是一段波长介于 780~2 500 nm 的电磁辐射。基于 NIR 光谱的检测方法能够反映复杂体系中含氢基团的倍频和组合频^[6],具有绿色、快捷和无损的特点,被广泛应用于食品、医药、农业等领域^[7-9]。张鹏等^[10]利用 NIR 光谱和主成分分析方法建立了苹果货架期判别模型,预测采摘后苹果货架期时间。关晔晴等^[11]建立的蜜桃可溶性固形物含量的 NIR 光谱最小二乘回归模型可以对蜜桃品质进行快速智能分级。Saad 等^[12]利用 NIR 光谱与偏最小二乘法(partial least squares, PLS)模型预测不同成熟期草莓可溶性固形物、总多酚含量以及酸度等指标,评估不同成熟期草莓的品质和货架期。毛欣然等^[13]结合了 NIR 光谱技术与 PLS 法构建梨的可溶性固形物、酸度和硬度信息的定量模型。张晨等^[14]建立的 NIR 光谱机器学习模型可以检测蓝莓贮藏期的品质问题。这些研究表明,NIR 光谱技术可用于水果品质的预测,对监控水果在货架期阶段的

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:82360700,22004022)

作者简介:周旭,男,贵州医科大学在读硕士研究生。

通信作者:李博岩(1979—),男,贵州医科大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail: Boyan_Li@hotmail.com

收稿日期:2024-02-21 **改回日期:**2024-05-03

品质变化发挥着关键作用。但还未见到利用 NIR 光谱技术研究黄桃腐败时间的相关报道。

研究拟采用便携式 NIR 光谱技术采集锦绣黄桃样本的漫反射光谱,建立黄桃采摘后在贮藏过程中腐败时间的预测模型,以期为黄桃在食品供应链中的品质变化检测与分级管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

2023 年 7 月 31 日于贵州省贵阳市花溪区青岩镇山王庙果园采摘无病虫害、无表面损伤、大小均匀且食用成熟度一致的新鲜锦绣黄桃样本。

1.1.2 仪器与设备

数字微阵列的便携式 NIR 光谱仪:DLP2010 DMD 型,无锡迅杰光远科技有限公司;

电子天平:FA2004B 型,上海天美天平仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样本制备 清理黄桃样本的表皮污垢后,用聚乙烯塑料盒分装,置于 25℃、45%~55%的相对湿度条件下贮藏,记录黄桃样本在贮藏过程中的失重率和腐败时间信息。

1.2.2 失重率测定 采用重量法,按式(1)计算样本的失重率。

$$E = \frac{H_0 - H}{H_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

E ——样本失重率,%;

H_0 ——黄桃样本的初始质量,g;

H ——特定时间点(7:00、13:00、19:00)测得的样本平均质量,g。

1.2.3 腐败程度与腐败时间的确定 综合以往的水果腐败研究文献^[3,15-16],根据样本的外观、质地以及表面腐烂面积,将黄桃腐败程度划分为 5 个等级(图 1)。0 级:无任何腐烂或干缩痕迹;1 级:有腐烂痕迹且面积在 5%以下;2 级:腐烂痕迹面积为 5%~10%;3 级:腐烂痕迹面积为 10%~20%;4 级:腐烂或干缩痕迹面积在 20%以上。

样本腐败时间定义为发生 1 级腐败当天的腐败时间为 0,腐败前为负数,腐败后为正数。

1.2.4 近红外光谱采集 使用便携式 NIR 光谱仪采集黄桃样本的光谱。保持实验室内温湿度恒定,仪器开机后预热 30 min,采集漫反射光谱,波长范围为 900~1 700 nm,分辨率为 12 nm。试验周期内每天分 3 个时间点(7:00、13:00、19:00)采集光谱,每个时间点选取样本赤道上的 4 个均匀分布的位点和两端的 2 个位点进行光

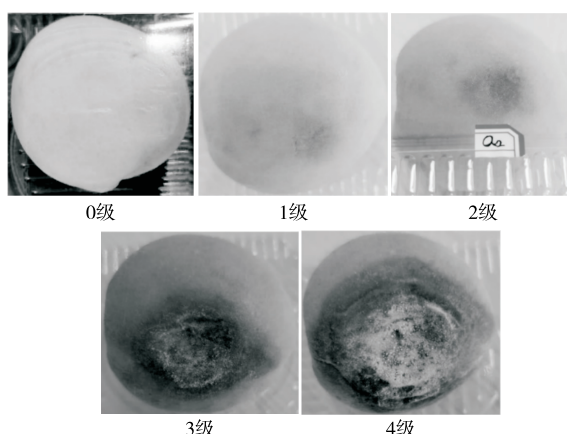


图 1 黄桃样本腐败程度的 5 个等级划分示意图

Figure 1 Diagram of five spoilage levels of yellow peach sample

谱采集,取平均光谱建模。

1.2.5 光谱预处理 采用 6 种光谱预处理方法,包括:标准正态变量(standard normal variate, SNV)变换、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、Savitzky-Golay (SG)平滑、连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)、一阶导数(first derivative, 1st Deriv)和二阶导数(second derivative, 2nd Deriv),对 NIR 光谱进行数据处理。

1.2.6 黄桃腐败时间建模 以分层抽样方式按 7:3 的比率将数据划分为校正集(calibration set)和预测集(prediction set)。使用 PLS 法对校正集建立样本腐败时间的预测模型,采用 10 折交叉验证(10-fold cross validation)方法确定最优潜变量数(optimal number of latent variables, optLV)。计算校正集、交叉验证、预测集的决定系数(R_c^2 、 R_{cv}^2 和 R_p^2)、校正集均方根误差(root mean square error of calibration, RMSEC)、交叉验证均方根误差(root mean square error of cross validation, RMSECV)、预测集均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP),以评估模型的准确性。 R_c^2 、 R_{cv}^2 和 R_p^2 值越大,RMSEC、RMSECV 和 RMSEP 值越小,表示模型的准确性和预测性越好。建模和数据分析在搭建的 NIR 光谱建模平台(<https://nir.cheminfolab.com>)上完成。

2 结果与分析

2.1 黄桃的失重率与腐败时间

图 2 是以样本 A₁、A₂为例的两个黄桃样本随贮藏时间增加的失重率变化曲线。由图 2 可知,在 24 d 的腐败过程中样本的失重率整体上呈先缓慢增加再迅速增大的变化趋势。样本 A₁、A₂ 分别在第 13 天、第 19 天对应的失重率接近 10%。失重率的增大主要与水分的丧失有

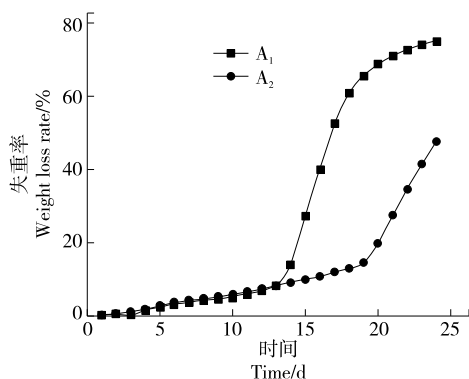


图2 黄桃失重率变化曲线

Figure 2 Change curves of weight loss rate of yellow peaches

关,这不仅影响水果的新鲜度,也可能加快微生物的生长和代谢活动,促进腐败变质的发生^[17]。

两个黄桃样本均在第9天开始产生腐败(1级腐败),表1详细给出了样本出现不同腐败程度的起始天数,说明黄桃在腐败过程中除了水分流失和微生物生长,还与其他多种因素相关,提示使用 NIR 光谱建立腐败时间模型的必要性。

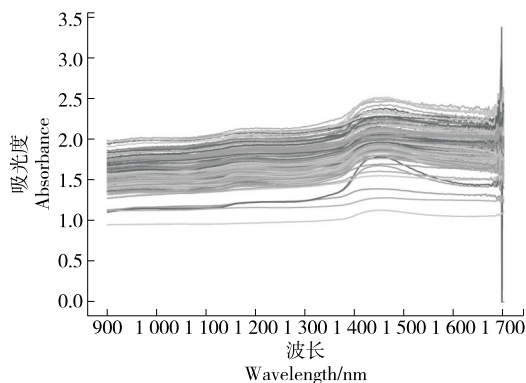
2.2 黄桃腐败时间的建模与预测

2.2.1 NIR 光谱特征 图3(a)是两个黄桃样本 A_1 、 A_2 在24 d的腐败过程中收集所得的142个原始 NIR 光谱。从图3(a)可以看出,光谱强度主要集中在1.0~2.5,光谱中存在明显的散射效应,主要原因是在贮藏过程中样本发

表1 黄桃样本不同腐败程度的起始时间

Table 1 Onset days of spoilage of yellow peaches at four levels

样本	1级腐败时间	2级腐败时间	3级腐败时间	4级腐败时间
A_1	9	12	13	15
A_2	9	13	15	17

(a) 样本 A_1 、 A_2 在24 d腐败过程中的NIR光谱

生腐败变质、水分挥发,导致化学组成与微生物构成变化。在1 400~1 700 nm 区间内,光谱易受噪声影响。NIR 光谱具有多个较宽的吸收谱带:1 150~1 250, 1 400~1 500 nm 分别是由化学物质的 C—H 官能团的二阶倍频、N—H 的一阶倍频震动所致。900~1 000, 1 530~1 630 nm 的吸收谱带主要归因于 O—H 官能团的一阶倍频、C—H 官能团的三阶倍频震动,以及 R—OH、Ar—OH 官能团的吸收。随着腐败时间的增长,1 150~1 250 nm谱带的相对强度降低,如图3(b)所示,黄桃样本 A_1 在第1天的0级腐败和第24天出现4级腐败时的光谱变化尤为显著,1 150~1 250 nm 吸收带的峰强度变得微弱,同时1 450~1 700 nm 区间的信号受噪声严重干扰。

2.2.2 腐败时间预测模型 采用 PLS 法建立了黄桃腐败时间的预测模型,通过10折交叉验证选择 optLV。分别对两个黄桃样本采集的 NIR 光谱建立单样本独立预测模型(A_1 和 A_2)和两者的混合预测模型(A_{1+2}),模型预测结果如表2所示。样本 A_1 模型的预测准确性明显优于样本 A_2 模型,其对应的 RMSEP 值分别为 4.43, 5.26 d, R_p^2 分别为 0.49, 0.28。将两个样本的 NIR 光谱合并后建立的混合模型 A_{1+2} 在校正集上的预测准确度略低于两个单样本独立模型,但是在预测集上的预测准确度却明显优于任何一个独立模型,其 RMSEP 为 4.23 d, R_p^2 为 0.60。这可能是因为光谱数量增加后,模型的泛化效果得到提升。这也提示了在实际应用中广泛收集不同黄桃样本的光谱,合并这些光谱后建立混合模型,能够提高黄桃样本的腐败时间预测模型的稳健性和准确性。

图4(a)为 RMSEC 和 RMSECV 随不同潜变量数(number of latent variables, nLV)变化的趋势。随着 nLV 的增加, RMSEC 持续降低,而 RMSECV 在 nLV 为5时达到最小值,随后表现出一定的上升趋势。图4(b)为校正集和交叉验证的 R^2 变化趋势,结果与 RMSE 一致,即在 nLV 为5时建立的模型预测效果和泛化能力达到最优的平衡点。图4(c)为使用 optLV 建立的模型在校

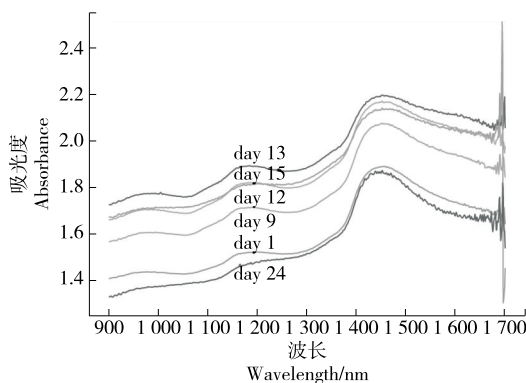
(b) 样本 A_1 在特定时间点的NIR光谱

图3 黄桃样本的原始 NIR 光谱

Figure 3 NIR spectra of yellow peach samples

表 2 不同黄桃样本腐败时间预测模型参数

Table 2 Parameters of different prediction models for the spoilage time of yellow peaches

样本	潜变量数	校正集		交叉验证		预测集	
		RMSEC/d	R^2_c	RMSEC/d	R^2_{cv}	RMSEC/d	R^2_p
A ₁	5	2.48	0.87	3.15	0.79	4.43	0.49
A ₂	5	3.13	0.79	4.64	0.55	5.26	0.28
A ₁₊₂	5	3.61	0.72	4.08	0.64	4.23	0.60

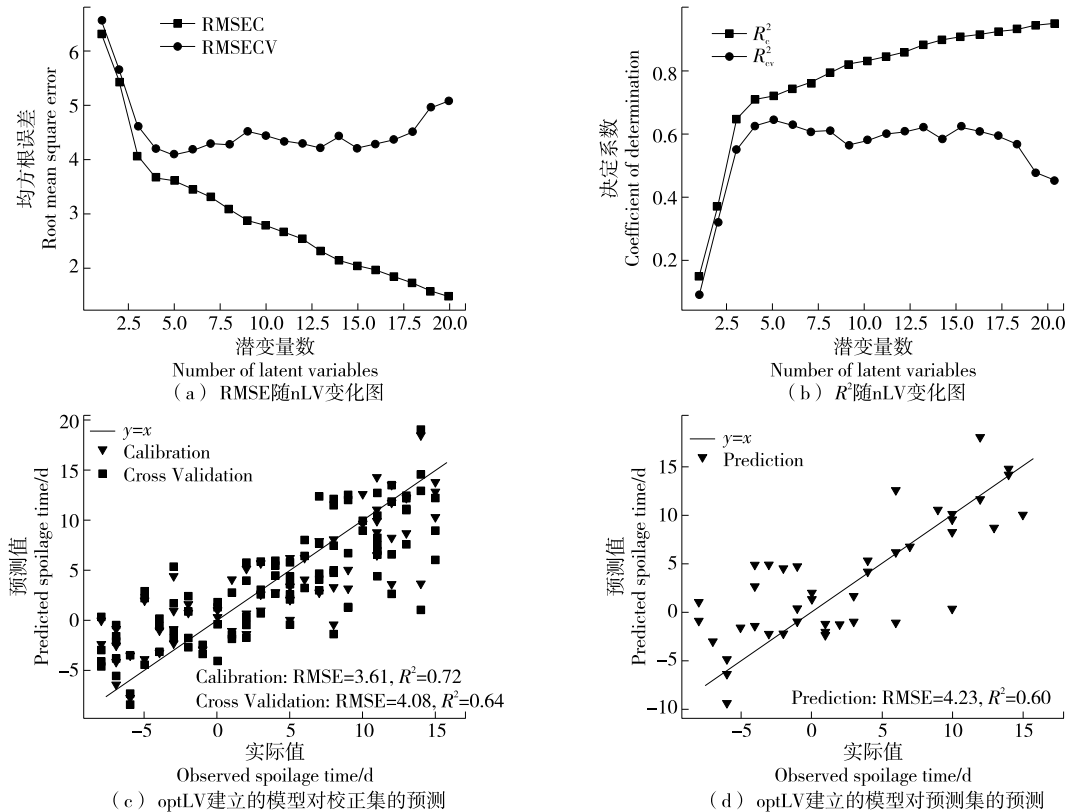


图 4 基于 NIR 光谱建立的黄桃样本腐败时间的预测结果

Figure 4 Prediction results for the spoilage time of yellow peach samples based on NIR spectra

正集上的预测结果,显示预测结果与真实黄桃腐败时间有较好的一致性。其中校正集预测结果与交叉验证的结果基本一致。图 4(d)为该模型在预测集上的预测结果,与校正集上的结果一致,预测的腐败时间与真实值总体趋势一致,平均预测误差为 4.23 d。表明将不同黄桃样本的光谱合并后建立混合模型,并用于新样本的腐败时间的预测是可行的。

2.3 光谱预处理方法优化建模

由于便携式 NIR 光谱仪在信噪比上低于实验室仪器^[18],因此使用不同预处理方法对数据特征进行提取,并对比不同参数下各种预处理方法对建模效果的影响。其中,MSC 和 SNV 采用默认设置;SG 平滑,1st Deriv 和 2nd Deriv 的窗口数优化范围为 3~17;对于 CWT,小波基选择范围包括 Gaussian 小波(gaus)、Mexican Hat 小波

(mexh)和 Morlet 小波(morl),尺度优化范围为 10~100。

采用不同预处理方法建立的模型预测结果如表 3 所示。采用 1st Deriv 和 2nd Deriv 后模型预测效果相较于原始光谱显著变差,可能是因为求导操作在提取信号特征时放大了噪声的影响,从而导致模型预测效果变差。MSC、SNV 和 CWT 则得到了与原始光谱类似的建模效果,说明该模型对变动的背景不敏感,在使用此类方法消除背景后模型效果没有显著改善。采用 SG 平滑后,预测模型相较于原始模型有一定提升,RMSEP 从未经光谱预处理时的 4.23 d 降低到 4.09 d, R^2_p 从 0.60 增加到 0.63。说明 SG 平滑后的光谱的噪声得到了抑制,提升了整体建模效果,这也再次说明了该模型受光谱噪声影响较大的事实。

经过 SG 平滑预处理的光谱如图 5 所示。与未经预

表 3 不同预处理方法下黄桃腐败时间预测模型比较

Table 3 Performance comparison of prediction models of yellow peach spoilage time with different data preprocessing methods

预处理方法	潜变量数	校正集		交叉验证		预测集	
		RMSEC/d	R_c^2	RMSEC/d	R_{cv}^2	RMSEC/d	R_p^2
MSC	2	3.98	0.66	4.40	0.59	4.45	0.56
SNV	4	3.65	0.72	4.14	0.64	4.28	0.59
SG 平滑(窗口数 5)	9	3.05	0.80	3.94	0.67	4.09	0.63
1 st Deriv (窗口数 17)	6	3.43	0.75	4.36	0.60	5.00	0.44
2 nd Deriv (窗口数 17)	9	2.95	0.82	6.36	0.14	5.73	0.26
CWT (mexh 小波,尺度 20)	8	2.83	0.83	3.37	0.76	4.31	0.58

处理的光谱(图 3)相比,平滑的光谱整体噪声有轻微降低,尤其是在 1 600~1 700 nm 处的噪声水平降低明显。

经 SG 平滑预处理后 NIR 光谱建立的黄桃腐败时间预测结果如图 6 所示。当 RMSECV 在 nLV 为 9 时达到最小值 3.94 d,随后表现出一定的上升趋势。图 6(b)中 R^2 随 nLV 的变化趋势与 RMSE 一致,在 nLV 为 9 时 R_{cv}^2 达到 0.67。因此,选择 optLV 为 9 建立预测模型,图 6(c)中显示的校正集上的预测和交叉验证结果无明显差异,预测的腐败时间与真实值具有一致性。图 6(d)为预测集上的腐败时间预测结果, RMSEP 为 4.09 d,相比于预处理前,降低了 0.14 d。说明合理的光谱预处理能在一定程度上降低模型的预测误差,提高模型预测的准确度^[19]。

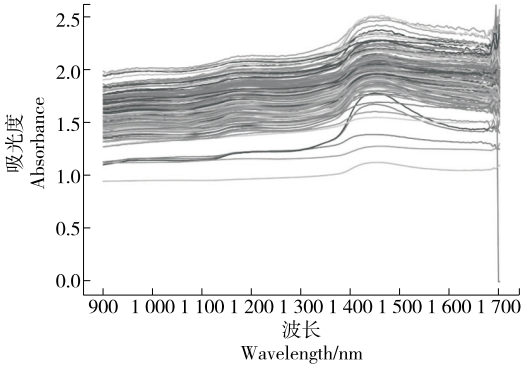


图 5 SG 平滑预处理后的光谱图
Figure 5 Spectra preprocessed with SG smoothing

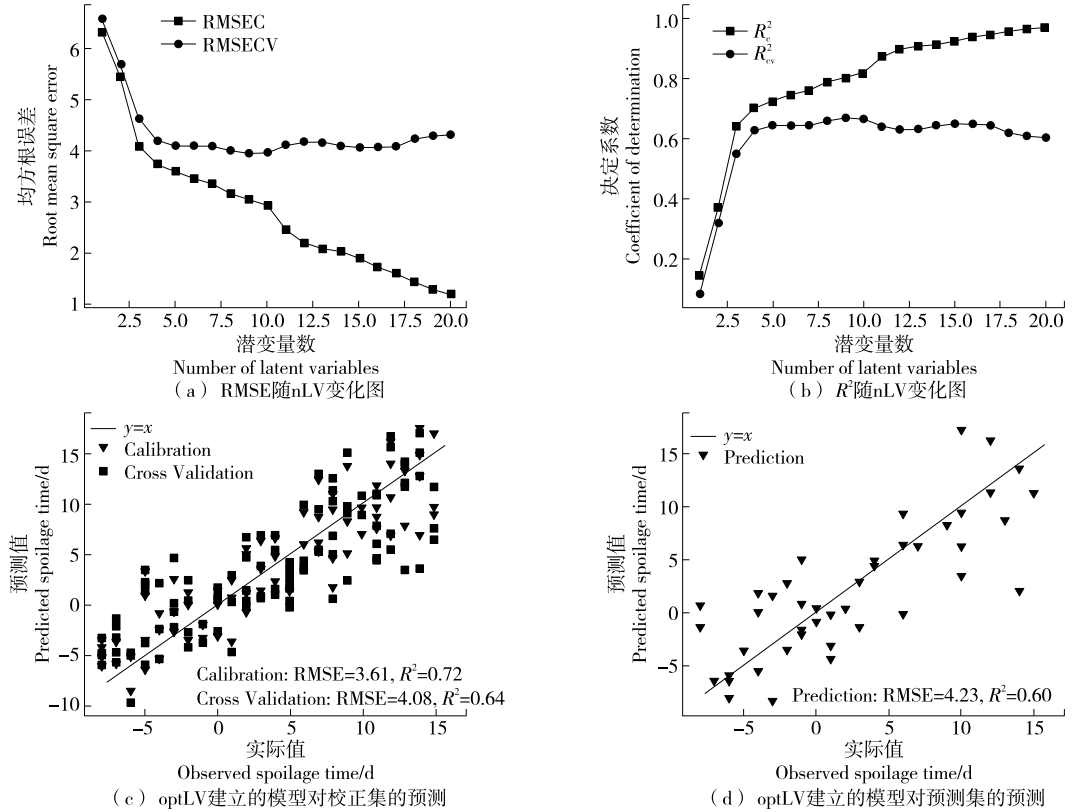


图 6 SG 平滑预处理 NIR 光谱后建立的黄桃腐败时间预测结果

Figure 6 Predictions of yellow peach spoilage time with NIR spectra after being preprocessed with SG smoothing

3 结论

研究采用便携式近红外光谱仪结合化学计量学建立了黄桃腐败时间的预测模型。通过检测黄桃在采摘后的失重率和腐败出现的时间,发现黄桃腐败受多种因素影响。便携式近红外光谱仪以漫反射模式快速无损采集黄桃在贮藏过程中的光谱,利用化学计量学方法建立光谱与腐败时间之间的预测关系模型,通过光谱处理方法优化以确定最佳建模参数,最终模型的决定系数为 0.63,均方根误差为 4.09 d。采用无损、便携的近红外光谱技术实现黄桃腐败时间的预测具有可行性。

参考文献

- [1] 武琳霞, 李玲, 习佳林, 等. 桃品质的无损检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 367-377.
WU L X, LI L, XI J L, et al. Progress in nondestructive detection techniques for peach quality [J]. Food Science, 2022, 43(15): 367-377.
- [2] 王力荣. 我国桃产业现状与发展建议[J]. 中国果树, 2021, 10(1): 1-5.
WANG L R. Current situation and development suggestions of peach industry in China[J]. China Fruits, 2021, 10(1): 1-5.
- [3] 袁楚珊, 黄余年, 董欣瑞, 等. 不同贮藏温度对黄桃采后品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 356-364.
YUAN C S, HUANG Y N, DONG X R, et al. Effect of different storage temperatures on postharvest quality and antioxidant capacity of yellow-fleshed peach [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 356-364.
- [4] 何馥嫻, 蒙庆华, 唐柳, 等. 高光谱成像技术在水果品质检测中的研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(9): 1 590-1 599.
HE F X, MENG Q H, TANG L, et al. Research progress in hyperspectral imaging technology for fruit quality detection [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(9): 1 590-1 599.
- [5] 康明月, 王成, 孙鸿雁, 等. 基于改进的 WOA-LSSVM 樱桃番茄内部品质检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(11): 3 541-3 550.
KANG M Y, WANG C, SUN H Y, et al. Research on internal quality detection method of cherry tomatoes based on improved WOA-LSSVM[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(11): 3 541-3 550.
- [6] 张进, 叶世著, 吴艾璟, 等. 连续小波变换结合无参数模型增强框架对时序漂移的近红外光谱建模[J]. 分析化学, 2022, 50(9): 1 391-1 398.
ZHANG J, YE S Z, WU A J, et al. Continuous wavelet transform combined with parametric-free calibration enhancement framework for calibration of time-shift near-infrared spectra[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(9): 1 391-1 398.
- [7] 孙晓荣, 郑冬钰, 刘翠玲, 等. 小麦粉品质在线无损快速检测系统设计及实现[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 87-91.
SUN X R, ZHENG D Y, LIU C L, et al. Design and implementation of online non-damage and rapid testing system for wheat flour quality[J]. Food & Machinery, 2021, 38(12): 87-91.
- [8] 叶佳丽, 江海霞, 郭栋良, 等. 亚麻籽蛋白质、亚麻酸和木酚素含量近红外预测模型建立与应用[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(2): 353-360.
YE J L, JIANG H X, GUO D L, et al. Establishment and application of near-infrared reflectance spectroscopy models for predicting protein, linolenic acid and lignan contents of flaxseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021, 43(2): 353-360.
- [9] 吕都, 唐健波, 姜太玲, 等. 基于近红外光谱技术快速检测稻谷水分含量[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 51-56.
LU D, TANG J B, JIANG T L, et al. Research on rapid prediction model of rice moisture content based on near infrared spectroscopy [J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 51-56.
- [10] 张鹏, 陈帅帅, 李江阔, 等. 采用近红外光谱进行采后苹果品种及货架期定性判别[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 200-205.
ZHANG P, CHEN S S, LI J K, et al. Near-infrared spectroscopy for qualitative identification of postharvest apple varieties and shelf life [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(19): 200-205.
- [11] 关晔晴, 王冬, 李楠, 等. 基于近红外技术无损检测深州蜜桃果实内部品质[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 290-296.
GUAN Y Q, WANG D, LI N, et al. Near-infrared technology-based non-destructive detection of the internal quality of Shenzhou peaches[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 290-296.
- [12] SAAD A G, AZAM M M, AMER B M A. Quality analysis prediction and discriminating strawberry maturity with a hand-held Vis-NIR spectrometer [J]. Food Analytical Methods, 2022, 15: 689-699.
- [13] 毛欣然, 夏静静, 徐惟馨, 等. 手持式近红外光谱仪测定梨三种品质指标通用模型建模方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(2): 406-412.
MAO X R, XIA J J, XU W X, et al. Study on modeling method of general model for measuring three quality indexes of pear by handheld near-infrared spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(2): 406-412.
- [14] 张晨, 朱玉杰, 冯国红. 基于集成学习和近红外光谱的蓝莓贮藏品质检测方法研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 306-314.
ZHANG C, ZHU Y J, FENG G H. Research on storage quality detection method of blueberry based on ensemble learning and near-infrared spectroscopy[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 306-314.
- [15] 彭彦昆, 孙晨, 刘乐, 等. 苹果外部缺陷全表面在线检测分选装置研发[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 266-275.
PENG Y K, SUN C, LIU L, et al. Development of full-surface online detection and sorting device for external defects of apples [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 266-275.

(下转第 187 页)

- [16] 邓凯波, 黄雅萍, 代亚萍, 等. 超微粉碎对南瓜粉物化及其粉糊流变性质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(11): 42-49.
DENG K B, HUANG Y P, DAI Y P, et al. Effect of ultrafine grinding on physicochemical and paste rheological properties of pumpkin powder[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 42-49.
- [17] 刘子放, 张岩, 李俊, 等. 湿法超微粉碎程度对新鲜桑果浆理化特性及活性成分含量的影响[J]. 蚕业科学, 2017, 43(3): 472-478.
LIU Z F, ZHANG Y, LI J, et al. Effect of wet superfine grinding on physicochemical properties and active ingredient contents of fresh mulberry pulp[J]. Acta Sericologica Sinica, 2017, 43(3): 472-478.
- [18] ZHAO X Y, ZHU H T, ZHANG G X, et al. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders[J]. Powder Technology, 2015, 286: 838-844.
- [19] 王晓慧, 姚茂君, 陈怡君, 等. 超声辅助复合酶法提取莓茶多糖的工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 166-172.
WANG X H, YAO M J, CHEN Y J, et al. Research on extraction technology of Ampelopsis grossedentata polysaccharide by ultrasound-assisted enzymatic method[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 166-172.
- [20] 宁豫昌, 高俊杰, 袁艺萌. 复合酶处理对刺梨、苹果混合发酵果汁的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8): 87-94.
NING Y C, GAO J J, YUAN Y M. Effect of compound enzyme treatment on mixed fermented juice of *Rosa roxburghii* Tratt and *Malus pumila* Mill[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(8): 87-94.
- [21] 朱金艳, 张俊鹏, 郑存娜, 等. 复合酶法制取蓝莓汁的工艺优化研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(5): 2-6, 19.
ZHU J Y, ZHANG J P, ZHENG C N, et al. Study on optimization of blueberry juice preparation process by complex enzyme[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(5): 2-6, 19.
- [22] 贾鸿冰, 田继远, 于娟. 复合果胶酶酶解对蓝莓出汁率和花色苷溶出量的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 270-274.
JIA H B, TIAN J Y, YU J. Effect of enzymatic hydrolysis of compound pectinase on juice yield and anthocyanin extraction from blueberry[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(6): 270-274.
- [23] 程宏桢, 蔡志鹏, 王静, 等. 百香果全果酒发酵工艺优化及体外抗氧化性比较分析[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 91-97.
CHENG H Z, CAI Z P, WANG J, et al. Optimization of fermentation process for whole passion fruit wine and comparative analysis of antioxidant activity in vitro[J]. China Brewing, 2020, 39(4): 91-97.
- [24] 楚文靖, 张付龙, 孙悦, 等. 蓝莓鲜果酶法榨汁工艺的优化研究[J]. 现代食品, 2021(11): 100-103, 119.
CHU W J, ZHANG F L, SUN Y, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis technology for blueberry fruit[J]. Modern Food, 2021(11): 100-103, 119.
- [25] 汪晓琳, 谷绒, 胡晓涛, 等. 蓝莓汁复合酶法制取工艺的优化研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(6): 71-77.
WANG X L, GU R, HU X T, et al. Optimization technology of preparing blueberry juice by compound enzymolysis method[J]. Storage and Process, 2017, 17(6): 71-77.
- [26] ARNOUS A, MEYER A S. Discriminated release of phenolic substances from red wine grape skins (*Vitisvinifera* L.) by multicomponent enzymes treatment[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(1): 68-77.
- [27] JIANG J, PATERSON A, PIGGOTT J R. Short communication: Effects ofpectolytic enzyme treatments on anthocyanins in raspberry juice[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1990, 25(5): 596-600.
- [28] BUCHERT J, KOPONEN J M, SUUTARINEN M, et al. Effect of enzyme-aided pressing on anthocyanin yield and profiles in bilberry and blackcurrant juices[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(15): 2 548-2 556.
- [29] 郭庆启, 张娜, 何娇, 等. 蓝靛果汁花色苷热降解动力学的研究[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(9): 74-78.
GUO Q Q, ZHANG N, HE J, et al. Thermal degradation dynamic of anthocyanins in *Lonicera edulis* turcz juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(9): 74-78.
- [30] 何婉莹, 黄展锐, 赵良忠, 等. 生浆法制豆腐的工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 188-196.
HE W Y, HUANG Z R, ZHAO Z L, et al. Optimization of tofu production from filtered raw soybean milk[J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(10): 188-196.

(上接第 106 页)

- [16] LIU H, JIANG W B, CAO J K, et al. Effect of chilling temperatures on physiological properties, phenolic metabolism and antioxidant level accompanying pulp browning of peach during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 255: 175-182.
- [17] YANG X Z, CHEN J H, JIA L W, et al. Rapid and non-destructive detection of compression damage of yellow peach using an electronic nose and chemometrics[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1 866.
- [18] 张进, 胡芸, 周罗雄, 等. 近红外光谱分析中的化学计量学算法研究新进展[J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1 196-1 203.
ZHANG J, HU Y, ZHOU L X, et al. Progress of chemometric algorithms in near-infrared spectroscopic analysis[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(10): 1 196-1 203.
- [19] ZHANG J, ZHOU X, LI B Y. PFCE2: A versatile parameter-free calibration enhancement framework for near-infrared spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 301: 122978.