

基于 LVF-NIR 的樱桃可溶性固形物含量 无损速测模型的建立与优化

王冬^{1,2,3}, 张鹤冬^{1,4}, 朱业伟⁵, 汪军⁵, 曹江娜⁵, 韩平^{1,2,3*}

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097; 2. 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097; 3. 农业部(华北)都市农业重点实验室, 北京 100097; 4. 北京工商大学食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048; 5. 北京格致同德科技有限公司, 北京 100124)

摘要: 目的 建立基于便携式近红外光谱仪的樱桃可溶性固形物含量无损快速定量检测模型, 从而实现樱桃品质的无损快速检测。**方法** 以北京通州产红灯樱桃、黄玉樱桃为研究对象, 采用便携式线性渐变分光近红外光谱仪采集光谱数据, 并采用折光仪测定其可溶性固形物含量; 采用偏最小二乘回归结合全交互验证算法将光谱数据与可溶性固形物含量测定值建立定量校正模型, 采用外部验证集对模型的预测性能做进一步测试。**结果** 红灯樱桃可溶性固形物含量模型的 R^2_C 、 $RMSEC$ 、 R^2_{CV} 、 $RMSECV$ 、 RPD 分别为 0.9194、0.79、0.8920、0.92、3.54, 黄玉樱桃可溶性固形物含量模型的 R^2_C 、 $RMSEC$ 、 R^2_{CV} 、 $RMSECV$ 、 RPD 分别为 0.8618、0.76、0.8246、0.86、2.70; 两种樱桃可溶性固形物含量合并模型的 R^2_C 、 $RMSEC$ 、 R^2_{CV} 、 $RMSECV$ 、 RPD 分别为 0.9125、0.81、0.8946、0.89、3.38。**结论** 基于便携式线性渐变分光近红外光谱仪数据所建校正模型具有较好的准确度, 可满足樱桃可溶性固形物含量的无损快速检测需求。

关键词: 樱桃; 可溶性固形物含量; 线性渐变分光; 定量校正模型

Development and optimization of the rapid and non-destructive quantitative models of soluble solid content of cherry based on LVF-NIR spectrometer

WANG Dong^{1,2,3}, ZHANG He-Dong^{1,4}, ZHU Ye-Wei⁵, WANG Jun⁵, CAO Jiang-Na⁵, HAN Ping^{1,2,3*}

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Risk Assessment Laboratory for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100097, China; 3. Key Laboratory of Urban Agriculture (North China), Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100097, China; 4. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 5. Beijing Great-Tech. Technology Development Co., Ltd., Beijing 100124, China)

ABSTRACT: Objective To determine the cherry quality rapidly and nondestructively, the calibration models of the

基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设-高效节水农业专项研究项目(储备性研究课题)(KJ CX20180409)、农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京)开放课题(KFKT201702)、北京工商大学食品安全大数据技术北京市重点实验室开放课题(BUBD-2017KF-11)

Fund: Supported by Innovation Ability Construction-Special Research of High Efficiency and Water-saving Agriculture (Topic of Reserve Research), Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (KJ CX20180409), Open Topic of Risk Assessment Laboratory for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture, P. R. China (KFKT201702), and Open Topic of Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University (BUBD-2017KF-11)

***通讯作者:** 韩平, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: hanp@brcast.org.cn

***Corresponding author:** HAN Ping, Ph.D, Associate Professor, No.9, Shuguang Garden Mid-road, Haidian District, Beijing Research Center for Agricultural Standard and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China. E-mail: hanp@brcast.org.cn

soluble solid content (SSC) of cherries based on the linear variable filter (LVF) near-infrared (NIR) spectrometer were developed. **Methods** Taking the Hongdeng and Huangyu cherries from Tongzhou District, City of Beijing as the research objects, the portable LVF-NIR spectrometer were applied to collect the LVF-NIR spectra data. Meanwhile, the values of SSC was determined by the refractometer. Partial least square (PLS) regression combined with full cross validation algorithm were applied to develop the quantitative analysis models of SSC, with the external validation sets being predicted to validate the prediction ability of the models developed above. **Results** For Hongdeng cherry, the R^2_C , $RMSEC$, R^2_{CV} , $RMSECV$ and RPD of the calibration model were 0.9194, 0.79, 0.8920, 0.92, 3.54, respectively; for Huangyu cherry, the R^2_C , $RMSEC$, R^2_{CV} , $RMSECV$ and RPD of the calibration model were 0.8618, 0.76, 0.8246, 0.86, 2.70, respectively; furthermore, for the both cherries, the R^2_C , $RMSEC$, R^2_{CV} , $RMSECV$ and RPD of the calibration model were 0.9125, 0.81, 0.8946, 0.89, 3.38, respectively. **Conclusion** The calibration models based on LVF-NIR spectrometer are of good accuracy, which can be able to satisfy the requirements of rapid and non-destructive determination of SSC of cherries.

KEY WORDS: cherry; soluble solid content; linear variable filter; quantitative calibration model

1 引言

樱桃是一种高附加值农产品,其果实富含糖类,味甘性温、色泽鲜艳、晶莹美丽。北京市通州区是北京樱桃的主要产地。按照品质将樱桃分级是进一步提高其附加值的有效手段。影响樱桃品质的主要指标有:可溶性固形物含量(soluble solid content, SSC)、色度以及单果重等,其中,SSC是影响樱桃品质的最重要指标。目前对樱桃SSC的检测基本采用破坏性测试——即将待测样品破碎、榨汁、过滤后,采用折光仪对樱桃汁进行SSC检测。上述传统检测方法虽然可以获得樱桃SSC的准确信息,但是存在检测代表性受限以及果实浪费严重的问题,由此造成收购环节中果农争议纠纷不断。限于目前樱桃SSC检测技术落后,很多樱桃合作社不愿采用破坏性检测对樱桃品质进行分级,取而代之的是采用单果重方式进行传统分级;即使少数樱桃合作社采用破坏性检测对樱桃品质进行分级,也只能局限于有限个数样品的抽检,检测代表性也严重受限。

随着20世纪70年代化学计量学的发展和近年来计算机技术的进步,近红外光谱技术以其快速、无损、高效、环境友好等特点,已应用于农业^[1]、食品加工业^[2]、制药领域^[3-5]、农产品品质快速检测领域^[6,7]等工农业生产的诸多方面。近年来,近红外光谱分析技术在走向成熟的同时,也越来越多地被人们所关注并得到广泛认可。基于近红外光谱技术的定量分析一般基于数学模型,当数学模型建立完成后,则无需对样品进行破坏性测试,仅需对待测样品采集光谱数据并进行计算,即可得到有关指标的预测值。

然而,目前的实验室大型近红外光谱仪仍以傅里叶变换型为主,其中含有迈克尔逊干涉仪等可移动部件,不适合樱桃光谱的现场测试;现有的便携式近红外光谱仪以国外进口为主,其中植入的模型对国内樱桃品种不适应现

象非常明显,主要体现为模型预测准确度低,难以满足樱桃SSC现场测试的需要。近年来,随着制造技术的进步,便携式光谱仪越来越多地被应用到农产品品质快速检测中^[8],并已有学者在此方面作了有意义的探索。

原帅等^[9]采用AvaSpec-2048TEC热电制冷光纤便携式可见-近红外光谱仪对烟台大樱桃采集了近红外光谱数据,并测定了样品的含糖量。郭卫东等^[10]采用Quality Spec Pro光谱仪采集樱桃的可见-近红外光谱数据,联合使用连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和广义回归神经网络(generalized regression neural network, GRNN)建立樱桃糖度的校正模型。罗枫等^[11]采用可见-近红外光谱仪对沙蜜豆樱桃冷藏过程中果实脆度建立校正模型;采用可见-近红外光谱研究了樱桃冷藏过程中维生素C(V_C)含量定量测定模型的建立^[12];采用可见-近红外光谱对萨米脱樱桃贮藏过程中果实硬度、咀嚼性、回复性建立了校正模型^[13];用可见-近红外光谱结合一阶微分、SNV+Detrend预处理,用PCA得分建立樱桃贮藏期果实品质定性判别模型^[14];在冷藏条件下对沙蜜豆樱桃采集可见-近红外光谱,考察糖度、酸度和糖酸比^[15]。

本研究以北京通州产红灯樱桃、黄玉樱桃为研究对象,采用基于线性渐变分光(linear variable filter, LVF)原理的便携式近红外光谱仪采集樱桃光谱数据,并采用折光仪测定樱桃SSC数据;采用偏最小二乘(partial least square, PLS)回归结合全交互验证(full cross validation)算法建立定量校正模型;以校正测定系数(determination coefficient of calibration, R^2_C)、校正均方根误差(root mean square error of calibration, $RMSEC$)、交互验证测定系数(determination coefficient of cross validation, R^2_{CV})、交互验证均方根误差(root mean square error of cross validation, $RMSECV$)、相对预测偏差(relative prediction deviation, RPD)作为模型准确

度的评价指标;对不同数据预处理方法做优化选择,并进一步探讨不同品种樱桃合并建立 SSC 模型的情况;采用外部验证集(external validation set)对优化模型的预测准确性做进一步验证。本文可为樱桃 SSC 无损快速定量检测提供参考,并可为其他水果的品质无损速测以及有关的检测装备研发提供一定的借鉴。

2 材料与方法

2.1 实验材料

红灯樱桃、黄玉樱桃:北京通州产,在果园中均匀布点,采集红灯樱桃、黄玉樱桃代表性样本各 300 个。

2.2 仪器设备

MicroNIR1700 型便携式近红外光谱仪(美国 VIAVI 公司),用于采集樱桃样品光谱数据。该光谱仪采用 LVF 原理,无任何可移动部件,结合微机电系统,光谱仪整体尺寸约 50 mm×40 mm×40 mm。

PAL-1 型折光仪(日本 ATAGO 公司),用于检测樱桃 SSC 值。以蒸馏水作为参比,将樱桃榨汁过滤后,测定樱桃汁的 SSC,单位为白利度(Brix)。

2.3 实验方法

将樱桃单个果实放在便携式近红外光谱仪镜头前采集光谱数据,光谱范围 908~1676 nm,以聚四氟乙烯白板作为参比,单次积分时间 5000 μ s,累积次数 50 次,每个样品采集光谱数据后用擦镜纸清洁光谱仪镜头,每测定 10 个样品光谱数据后用聚四氟乙烯白板做参比校正。

采用折光仪测定樱桃 SSC 数据,将折光仪用蒸馏水调零点;樱桃果肉经榨汁、过滤后,将樱桃汁滴于折光仪晶体上,获得 SSC 测定值。每个样品测定后用蒸馏水冲洗折光仪晶体,用滤纸吸干残留水分。

2.4 数据处理及评价方法

以光谱数据为自变量、SSC 值为因变量,采用 PLS 回归结合全交互验证算法建立定量校正模型。计算 R^2_C 、 $RMSEC$ 、 R^2_{CV} 、 $RMSECV$ 、 RPD 作为模型性能的评价指标。一般地, R^2_C 和 R^2_{CV} 越接近 1、 $RMSEC$ 和 $RMSECV$ 接近且皆越小时,模型具有较好的准确度, RPD 大于 3 说明模型具有较好的稳定性和预测能力, RPD 在 1.5~3 之间说明模型具有一定的预测能力。针对外部验证集,计算模型预测的相关系数(r)和预测均方根误差(root mean square error of prediction, $RMSEP$), r 越接近 1 且 $RMSEP$ 越小,说明对外部验证集的预测准确度越高。

3 结果与分析

根据 SSC 数据分别将红灯樱桃、黄玉樱桃分为校正集和外部验证集,校正集和交互验证集的样品数量比为

2:1,交互验证集和校正集有相似的 SSC 参考值分布,其统计结果如表 1 所示。

表 1 樱桃样品 SSC 参考值统计
Table 1 Statistics of the specified values of SSC of the cherry samples

统计量	校正集			外部验证集		
	红灯樱桃	黄玉樱桃	两种樱桃	红灯樱桃	黄玉樱桃	两种樱桃
样本容量 n	200	200	400	100	100	200
最小值 $min(\text{Brix})$	13.2	13.1	13.1	10.7	12.7	10.7
最大值 $max(\text{Brix})$	28.8	23.3	28.8	27.0	25.9	27.0
平均值 $average(\text{Brix})$	19.8	17.2	18.5	20.2	17.3	18.8
样本标准差 $std(\text{Brix})$	2.78	2.05	2.74	2.91	2.48	3.07
极差 $R_x(\text{Brix})$	15.6	10.2	15.7	16.3	13.2	16.3
变异系数 CV	14.0 %	11.9 %	14.8 %	14.4 %	14.3 %	16.4 %

基于 LVF 近红外光谱仪所采集的部分樱桃样品的近红外光谱如图 1 所示。从图 1 可见,在 908~1676 nm 范围内,樱桃的近红外光谱主要有 3 个吸收峰,分别存在于 976、1193、1447 nm。

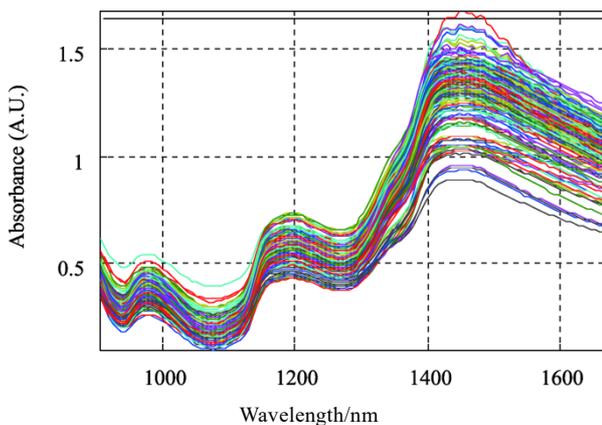


图 1 基于 LVF 近红外光谱仪的樱桃样品光谱
Fig.1 Spectra of cherry samples by LVF-NIR spectrometer

3.1 单品种樱桃 SSC 模型及优化

针对红灯樱桃,采用不同的数据预处理方法建立并优化其 SSC 的定量校正模型,结果如表 2 所示。在中心化基础上,使用了平滑、正态化、KM 校正、多元散射校正、导数、基线校正、标准正态变量变换等预处理;其中,正

态化、KM 校正、导数、基线校正、标准正态变量变换预处理的模型准确度相对较低, 说明上述预处理方式相对于校正集数据在进行数据预处理的同时引入了更多的数据噪声; 平滑、多元散射校正、7 点平滑分别结合基线校正或标准正态变量变换预处理的模型准确度相对较高。综合考虑各统计量, 当数据预处理采用“7 点平滑+中心化”时, 红灯樱桃优化定量校正模型参数为 $R^2_C=0.9194$ 、 $RMSEC=0.79$ 、 $R^2_{CV}=0.8920$ 、 $RMSECV=0.92$ 、 $RPD=3.54$, 以上统计数据说明红灯樱桃 SSC 的定量校正模型具有较高的稳定性和良好的预测能力。

表 2 红灯樱桃 SSC 的 PLS 建模结果
Table 2 PLS results of SSC for Hongdeng cherry

数据预处理	N^*	R^2_C	$RMSEC$	R^2_{CV}	$RMSECV$	RPD
中心化	8	0.8458	1.09	0.8203	1.18	2.56
5 点平滑+中心化	14	0.9189	0.79	0.8792	0.97	3.53
7 点平滑+中心化	15	0.9194	0.79	0.8920	0.92	3.54
正态化+中心化	7	0.8510	1.07	0.8284	1.15	2.60
KM 校正+中心化	12	0.8268	1.15	0.7474	1.40	2.41
多元散射校正+中心化	10	0.9124	0.82	0.8770	0.98	3.39
一阶 5 点导数+中心化	8	0.8939	0.90	0.8632	1.03	3.08
一阶 7 点导数+中心化	9	0.9067	0.85	0.8738	0.99	3.29
二阶 5 点导数+中心化	6	0.8572	1.05	0.7877	1.28	2.66
二阶 7 点导数+中心化	8	0.9093	0.83	0.8440	1.10	3.33
基线校正+中心化	8	0.8549	1.05	0.8246	1.17	2.64
标准正态变量变换+中心化	6	0.8570	1.05	0.8398	1.11	2.65
7 点平滑+基线校正+中心化	15	0.9194	0.79	0.8843	0.95	3.54
7 点平滑+标准正态变量变换+中心化	15	0.9227	0.77	0.8865	0.94	3.61

*N: 模型维数。

针对黄玉樱桃, 采用不同的数据预处理方法建立并优化其 SSC 的定量校正模型, 模型结果如表 3 所示。在中心化基础上, 使用了平滑、正态化、KM 校正、多元散射校正、导数、基线校正、标准正态变量变换等预处理; 然而, 除正态化预处理外, 其他各预处理的模型准确度相对较低, 说明上述除正态化预处理方式相对于校正集数据在进行数据预处理的同时引入了更多的数据噪声。综合考虑各统计量, 当数据预处理采用“中心化”时, 黄玉樱桃优化定量校正模型参数为 $R^2_C=0.8618$ 、 $RMSEC=0.76$ 、 $R^2_{CV}=0.8246$ 、 $RMSECV=0.86$ 、 $RPD=2.70$, 以上统计数据说明黄玉樱桃 SSC 的定量校正模型准确度尚可, 可进行基本

的实验分析, 也可以满足黄玉樱桃 SSC 无损快速测定的需求。

表 3 黄玉樱桃 SSC 的 PLS 建模结果
Table 3 PLS results of SSC for Huangyu cherry

数据预处理	N^*	R^2_C	$RMSEC$	R^2_{CV}	$RMSECV$	RPD
中心化	9	0.8618	0.76	0.8246	0.86	2.70
5 点平滑+中心化	9	0.8453	0.80	0.8190	0.87	2.55
7 点平滑+中心化	9	0.8433	0.81	0.8162	0.88	2.53
正态化+中心化	8	0.8602	0.76	0.8205	0.87	2.68
KM 校正+中心化	10	0.8435	0.81	0.7765	0.97	2.54
多元散射校正+中心化	7	0.8581	0.77	0.8163	0.88	2.66
一阶 5 点导数+中心化	7	0.8576	0.77	0.8114	0.89	2.66
一阶 7 点导数+中心化	5	0.8086	0.89	0.7861	0.95	2.29
二阶 5 点导数+中心化	6	0.8208	0.87	0.7388	1.05	2.37
二阶 7 点导数+中心化	5	0.8257	0.85	0.7895	0.94	2.40
基线校正+中心化	6	0.8153	0.88	0.7837	0.96	2.33
标准正态变量变换+中心化	6	0.8299	0.84	0.8032	0.91	2.43
7 点平滑+基线校正+中心化	9	0.8453	0.80	0.8140	0.89	2.55
7 点平滑+标准正态变量变换+中心化	8	0.8461	0.80	0.8171	0.88	2.56

*N: 模型维数。

3.2 两种樱桃 SSC 合并模型及优化

如果把两种樱桃 SSC 合并建立校正模型, 可减小模型选用时的难度; 然而, 合并建立校正模型亦存在模型预测准确度下降的可能。本部分针对红灯樱桃和黄玉樱桃的校正集样品 SSC 合并建立校正模型, 采用不同的数据预处理方法建立并优化定量校正模型, 结果如表 4 所示。在中心化基础上, 使用了平滑、正态化、KM 校正、多元散射校正、导数、基线校正、标准正态变量变换等预处理; 其中, KM 校正、多元散射校正、导数预处理的模型准确度相对较低, 说明上述预处理方式相对于校正集数据在进行数据预处理的同时引入了更多的数据噪声; 平滑、正态化、基线校正、标准正态变量变换预处理的模型准确度相对较高。综合考虑各统计量, 当数据预处理采用“7 点平滑+标准正态变量变换+中心化”时, 两种樱桃优化定量校正模型参数为 $R^2_C=0.9125$ 、 $RMSEC=0.81$ 、 $R^2_{CV}=0.8946$ 、 $RMSECV=0.89$ 、 $RPD=3.38$ 。以上统计数据说明两种樱桃 SSC 合并模型具有较高的稳定性和良好的预测能力。

表 4 两种樱桃 SSC 的 PLS 建模结果
Table 4 PLS results of SSC for the both cherry

数据预处理	N^*	R^2_C	RMSEC	R^2_{CV}	RMSECV	RPD
中心化	10	0.8741	0.97	0.8517	1.06	2.82
5点平滑+中心化	14	0.9108	0.82	0.8893	0.91	3.35
7点平滑+中心化	14	0.9099	0.82	0.8928	0.90	3.33
正态化+中心化	14	0.9253	0.75	0.8910	0.91	3.66
KM校正+中心化	12	0.8272	1.14	0.7853	1.27	2.41
多元散射校正+中心化	7	0.8630	1.01	0.8512	1.06	2.70
一阶5点导数+中心化	10	0.9065	0.84	0.8821	0.94	3.27
一阶7点导数+中心化	10	0.9021	0.86	0.8828	0.94	3.20
二阶5点导数+中心化	9	0.8879	0.92	0.8403	1.10	2.99
二阶7点导数+中心化	8	0.9004	0.86	0.8686	1.00	3.17
基线校正+中心化	14	0.9217	0.77	0.8837	0.94	3.58
标准正态变量变换+中心化	12	0.9160	0.79	0.8854	0.93	3.45
7点平滑+基线校正+中心化	14	0.9108	0.82	0.8913	0.91	3.35
7点平滑+标准正态变量变换+中心化	14	0.9125	0.81	0.8946	0.89	3.38

*N: 模型维数。

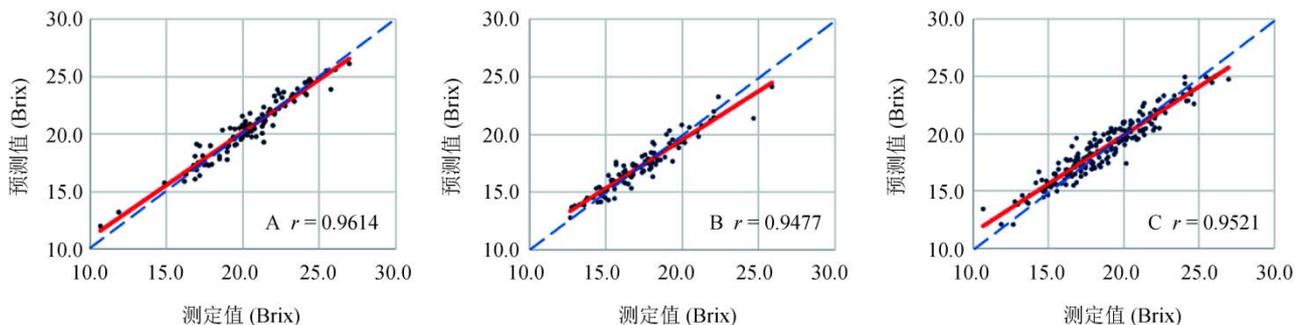
3.3 模型的外部验证

分别采用红灯樱桃 SSC、黄玉樱桃 SSC 和两种樱桃 SSC 优化的定量校正模型预测红灯樱桃、黄玉樱桃和两种樱桃的外部验证集样品, 将预测值和采用折光仪获取的外部验证集样品 SSC 测定值绘制相关关系图, 如图 2 所示。其中, 横坐标是樱桃 SSC 采用折光仪获取的测定值, 纵坐标是对应模型的预测值; 实线是预测值和测定值的线性回归拟合曲线, 虚线是 $Y=X$ 线。采用最小二乘回归算法分别计算预测值和测定值的回归方程和相关系数 r , 并计算回归的 F 值, 结果如表 5 所示。其中, F 值的计算如公式(1)所示:

$$F = (n-2) \frac{R^2}{1-R^2} \quad (1)$$

公式(1)中, R^2 是回归的测定系数, 在数值上等于相关系数 r 的平方, n 为外部验证集样本容量。

从表 5 可见, 红灯樱桃、黄玉樱桃以及两种樱桃的外部验证集预测值-测定值回归方程的斜率皆大于 0.84, 截距皆不超过 2.85, 相关系数 r 皆大于 0.94; 红灯樱桃、黄玉樱桃、两种樱桃的外部验证集预测值-测定值回归的 F 检验值分别大于对应样本容量和模型维数情况下 F 检验的查表值 F_{Tab} , 其中, 显著性水平 $\alpha=0.05$ 。该统计数据说明, 红灯樱桃、黄玉樱桃以及两种樱桃合并建立 SSC 定量校正模型, 对其相应的外部验证集的预测结果皆具有较高的准确度, 并且 SSC 预测值和测定值具有显著的相关关系。



注: A: 红灯樱桃; B: 黄玉樱桃; C: 两种樱桃。

图 2 外部验证集预测值-测定值相关关系图

Fig. 2 Scatter plot of the external validation sets

表 5 外部验证集预测值-测定值回归参数
Table 5 The regression parameters of the predicted values and specified values for the external validation sets

品种	回归方程	相关系数 r	F 值	F_{Tab} 值
红灯樱桃	$Y=0.9191X+1.7136$	0.9614	1194.8	1.787
黄玉樱桃	$Y=0.8422X+2.6525$	0.9477	863.7	1.986
两种樱桃	$Y=0.8480X+2.8492$	0.9521	1917.4	1.746

4 结 论

本文以北京通州产红灯樱桃、黄玉樱桃为研究对象,采用LVF近红外光谱仪采集樱桃果实近红外光谱数据,同时采用折光仪对其SSC含量进行测定,将光谱数据与SSC测定值用偏最小二乘回归结合全交互验证算法建立定量校正模型,采用外部验证集对模型预测性能作进一步验证,并研究了两种樱桃合并建立SSC定量校正模型。结果表明,模型的预测准确度与樱桃品种具有一定关系,红灯樱桃SSC模型准确度更高,黄玉樱桃SSC模型准确度亦可满足快速测定需求,两种樱桃SSC合并模型在一定程度上可弥补对黄玉樱桃SSC检测准确度的不足,模型适用性得到进一步提高。对外部验证集的预测结果表明,相应品种樱桃的SSC模型预测对应外部验证集所得结果的准确度较高,且预测值与测定值之间存在显著的相关关系,可以满足樱桃SSC无损快速测定的需求。

参考文献

- [1] Redaelli R, Alfieri M, Cabassi G. Development of a NIRS calibration for total antioxidant capacity in maize germplasm [J]. *Talanta*, 2016, 154: 164–168.
- [2] Alamprese C, Amigo JM, Casiraghi E, *et al.* Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics [J]. *Meat Sci*, 2016, 121: 175–181.
- [3] Tomuta I, Rus L, Iovanov R, *et al.* High-throughput NIR-chemometric methods for determination of drug content and pharmaceutical properties of indapamide tablets [J]. *J Pharm Biomed*, 2013, 84: 285–292.
- [4] Saerens L, Dierickx L, Quinten T, *et al.* In-line NIR spectroscopy for the understanding of polymer-drug interaction during pharmaceutical hot-melt extrusion [J]. *Eur J Pharm Biopharm*, 2012, 81(1): 230–237.
- [5] Peeters E, Silva AFT, Toiviainen M, *et al.* Assessment and prediction of tablet properties using transmission and backscattering Raman spectroscopy and transmission NIR spectroscopy [J]. *Asian J Pharm Sci*, 2016, 11(4): 547–558.
- [6] 李江波, 彭彦昆, 陈立平, 等. 近红外高光谱图像结合CARS算法对鸭梨SSC含量定量测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1264–1269.
Li JB, Peng YK, Chen LP, *et al.* Near-infrared hyperspectral imaging combined with CARS algorithm to quantitatively determine soluble solids content in "Ya" pear [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2014, 34(5): 1264–1269.
- [7] Alamar PD, Carames ETS, Poppi RJ, *et al.* Quality evaluation of frozen guava and yellow passion fruit pulps by NIR spectroscopy and chemometrics [J]. *Food Res Int*, 2016, 85: 209–214.
- [8] Cirilli M, Bellincontro A, Urbani S, *et al.* On-field monitoring of fruit ripening evolution and quality parameters in olive mutants using a portable NIR-AOTF device [J]. *Food Chem*, 2016, 199: 96–104.
- [9] 原帅, 张娟, 刘美娟, 等. 樱桃含糖量的无损检测实验研究[J]. *分析试验室*, 2015, 34(7): 760–764.
Yuan S, Zhang J, Liu MJ, *et al.* Nondestructive detection method for sugar content of cherry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2015, 34(7): 760–764.
- [10] 郭卫东, 倪开诚, 孙旭东, 等. 基于CWT和GRNN的可见-近红外漫反射光谱检测樱桃糖度的研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(12): 140–143.
Guo WD, Ni KC, Sun XD, *et al.* Determination of sugar content in cherry fruit by visible-near infrared diffuse reflectance spectroscopy based on CWT and GRNN [J]. *Food Sci*, 2009, 30(12): 140–143.
- [11] 罗枫, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 冷藏过程中樱桃果实脆度的近红外检测研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(17): 295–299.
Luo F, Lu XX, Zhang P, *et al.* Cherry brittleness near infrared detection in the process of brittle in cold storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(17): 295–299.
- [12] 罗枫, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 冷藏过程中樱桃VC含量的近红外检测[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(5): 173–176, 182.
Luo F, Lu XX, Zhang P, *et al.* Near infrared detection of VC content in cherry during cold storage [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(5): 173–176, 182.
- [13] 罗枫, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 近红外漫反射技术检测甜樱桃果实质地研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(15): 293–297.
Luo F, Lu XX, Zhang P, *et al.* Near infrared diffuse reflection technology of cherry fruit texture detection [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 36(15): 293–297.
- [14] 罗枫, 张鹏, 陈绍慧, 等. 近红外漫反射技术对货架期樱桃品质的判别[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(8): 1468–1472.
Luo F, Zhang P, Chen SH, *et al.* Qualitative discrimination of fruit quality of cherry during storage period by near infrared spectroscopy [J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2015, 27(8): 1468–1472.
- [15] 罗枫, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 冷藏樱桃内部品质的近红外漫反射光谱检测[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(3): 219–224.
Luo F, Lu XX, Zhang P, *et al.* The detection of frozen cherry quality by near infrared diffuse reflection spectrum [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(3): 219–224.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



王冬, 博士后, 副研究员, 主要研究方向为振动光谱分析与化学计量学。
E-mail: wangd@brcast.org.cn



韩平, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。
E-mail: hanp@brcast.org.cn