

贡梨尺寸差异对可溶性固形物模型的适用性研究

刘燕德, 廖军, 孙赵祥, 李斌, 朱明旺, 姚金良, 王秋

Study on the applicability of gongpear size difference to soluble solid model

引用本文:

刘燕德, 廖军, 孙赵祥, 李斌, 朱明旺, 姚金良, 王秋. 贡梨尺寸差异对可溶性固形物模型的适用性研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 527-533.

LIU Yande, LIAO Jun, SUN Zhaoxiang, LI Bin, ZHU Mingwang, YAO Jinliang, WANG Qiu. Study on the applicability of gongpear size difference to soluble solid model[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(4): 527-533.

您可能感兴趣的其他文章

1. 微型近红外光谱仪在苹果糖度测量中的应用研究

引用本文: 徐永浩, 宋彪, 陈晓帆, 等. 微型近红外光谱仪在苹果糖度测量中的应用研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 735-740.

2. 基于Tchebichef图像矩的氧化锌太赫兹光谱定量研究

引用本文: 殷贤华, 郭超, 奉慕霖, 等. 基于Tchebichef图像矩的氧化锌太赫兹光谱定量研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 747-752.

3. 基于改进的偏最小二乘法的LIBS钢液成分定量分析

引用本文: 马翠红, 崔金龙. 基于改进的偏最小二乘法的LIBS钢液成分定量分析[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 876-881.

4. GaN基微腔传感器悬空隔膜的机电转换的ANSYS研究

引用本文: 朱彦旭, 杜志娟, 刘飞飞, 等. GaN基微腔传感器悬空隔膜的机电转换的ANSYS研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 791-795.

5. 基于改进YOLOv4算法的水果识别检测研究

引用本文: 裴瑞景, 王硕, 王华英. 基于改进YOLOv4算法的水果识别检测研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 400-406.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0527-07

贡梨尺寸差异对可溶性固形物模型的适用性研究

刘燕德^{1,2}, 廖 军^{1,2}, 孙赵祥^{1,2}, 李 斌^{1,2}, 朱明旺^{1,2}, 姚金良^{1,2}, 王 秋^{1,2}

(1. 华东交通大学 智能机电装备创新研究院, 南昌 330013; 2. 华东交通大学 机电与车辆工程学院, 南昌 330013)

摘要: 为了降低贡梨自身尺寸差异造成其可溶性固形物含量预测模型的精度不高问题, 采用近红外漫反射光谱技术和偏最小二乘回归算法, 建立近红外光谱模型和尺寸通用模型, 进行了理论分析和实验验证, 取得了小果、中果、大果 3 个尺寸等级的局部尺寸模型和尺寸通用模型, 预测了不同尺寸等级贡梨可溶性固形物含量的数据。结果表明, 局部尺寸模型预测自身等级的贡梨可溶性固形物含量的效果好, 预测其它等级的效果差; 通用模型预测小果、中果、大果的预测相关系数分别为 0.892、0.937、0.889, 预测均方根误差分别为 0.524、0.417、0.551, 通用模型无论预测哪一个尺寸等级的贡梨都有较好的结果。尺寸通用模型能够减小尺寸差异带来的不良影响, 适用于检测不同尺寸等级的贡梨可溶性固形物含量。

关键词: 光谱学; 尺寸通用模型; 近红外漫反射光谱; 贡梨

中图分类号: O657.3 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.013

Study on the applicability of gongpear size difference to soluble solid model

LIU Yande^{1,2}, LIAO Jun^{1,2}, SUN Zhaoxiang^{1,2}, LI Bin^{1,2}, ZHU Mingwang^{1,2}, YAO Jinliang^{1,2}, WANG Qiu^{1,2}

(1. Innovation Institute of Intelligent Electromechanical Equipment, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to reduce the low accuracy of the prediction model of soluble solid content caused by the size difference of gongpear, a general size model was proposed. Near-infrared diffuse reflection spectroscopy and partial least squares regression algorithm modeling method of the near-infrared spectrum were adopted, and the theoretical analysis and experimental verification were respectively carried out. Gongpear soluble solids content of data were obtained by a local size prediction model of the small fruit, middle fruit and big fruit size grades and a universal size model with different size grade. The results show that, the local size model is good at predicting the soluble solid content of gongpears with its own grade, but poor at predicting other grades. The correlation coefficient were 0.892, 0.937, 0.889 and root mean square error of small fruit, medium fruit and large fruit predicted by the general model were 0.524, 0.417, 0.551. The general size model could reduce the adverse effects of size difference and was suitable for the determination of soluble solid content of gongpear with different size grades.

Key words: spectroscopy; universal dimensional model; near-infrared diffuse reflectance spectroscopy; gongpear

引 言

贡梨是一种非常普通的水果, 深受人们的喜爱。随着生产力的发展, 人们的生活水平不断提高, 对优质水果的需求也越来越急切, 而可溶性固形物含量(soluble solid content, SSC)是衡量水果是否属于优质水果

的关键参数之一。因此, 开发贡梨 SSC 的预测模型具有重要意义。

已有的研究表明, 水果的颜色^[1]、温度^[2]和检测方向^[3]等在检测过程可能会对光谱信息采集有很大影响。为消除这些因素带来的影响, GUO 等人^[4]通过改进一种颜色补偿算法显著提高基于富士苹果的短波近红外光谱建立的 SSC 预测模型性能; YAO 等人^[5]获取 9 个温度下的西瓜汁近红外光谱, 建立 SSC 预测温度通用模型用于提高模型的鲁棒性, 降低温度的影响, 其温度通用模型对 9 个温度下的西瓜汁都显示出较好的 SSC 预测能力; XIA 等人^[3]获取 6 个检测方向下的富士苹果近红外光谱, 建立 SSC 预测方向通用模型用于降低不同检测方向带来的影响, 其方向通用模型能

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31760344); 江西省技术创新引导类计划资助项目(20192AEI91007); 华东交通大学研究生院研究生创新资金资助项目(YC 2021-S464)

作者简介: 刘燕德(1967-), 女, 博士, 教授, 现主要从事光电检测技术方面的研究。

E-mail: jxliuyd@163.com

收稿日期: 2022-06-21; 收到修改稿日期: 2023-02-24

够准确地预测不同检测方向下的富士苹果 SSC。因此建立通用模型是一种能够减小这些因素影响的方法。以上学者的研究均将样品的尺寸控制在一定范围,避免尺寸带来的影响。

XIA 等人^[6]发现,果径 60.57 mm~94.26 mm 的富士苹果原始光谱有差异,如不考虑尺寸因素会影响校正模型的精度;CEN 等人^[7]和 van BEERS 等人^[8]发现,光在苹果内部传输时会发生散射和吸收,果实体积越大,散射和光衰减现象越严重,由于原始光谱的变化,模型精度会受到影响,果实赤道处的近红外光谱信号会随着果径的增大而向上移动。因此水果的尺寸也是影响光谱信息采集的重要因素之一。为降低贡梨尺寸对贡梨 SSC 模型的影响,本文作者提出尺寸通用模型并对其进行研究。

1 材料与方法

1.1 样品来源及参考值测量

实验中所用样品为贡梨,购买于南昌某水果市场,购买果径大小分别为 70 mm~80 mm、80 mm~90 mm 和 90 mm~100 mm 的样品各 160 个,购买的样品表面均光滑且没有污渍;实验前把样品编号并放在室温为 25 ℃ 的室内储存 24 h。定义果径大小为 70 mm~80 mm 的贡梨为小果、80 mm~90 mm 的贡梨为中果、90 mm~100 mm 的贡梨为大果。

将小果的 160 个样本用 Kennard-Stone (K-S) 算法分为两部分,其中第一部分含 120 个样本用于开发贡梨 SSC 预测模型,第二部分含 40 个样本用于验证模型的预测性能。中果和大果的样本同理分配。

通过挤压样品获取贡梨的汁液,并将其滴到日本东京 ATAGO 有限公司生产的数字折光仪 PAL-1 上,以测量 SSC 值,绕赤道部位相隔 90°,为每个样品收集 4 个 SSC 值,将 4 个值的平均值作为参考值。

1.2 实验装置与光谱采集

样品的近红外漫反射光谱由自主搭建的漫反射光学装置测得,采用漫反射方式并在每个样品的赤道部位采集光谱。图 1 为环型光源漫反射检测系统和实验效果图。水果托盘下面标有精度为 0.1 mm 的刻度,其中使用的检测光纤为集合光纤,能够同时传递光源和接收反射信息,光源光纤与检测光纤环状分布,光谱仪为 Ocean Optics 公司的 QE65PRO 光谱仪,光源为 12 V、100 W 的单个卤钨灯,采用稳压电源供电。

漫反射光谱信息采集水果表层信息,ZHANG 等人^[9]的研究表明,漫反射光射入梨的果肉中从而获取

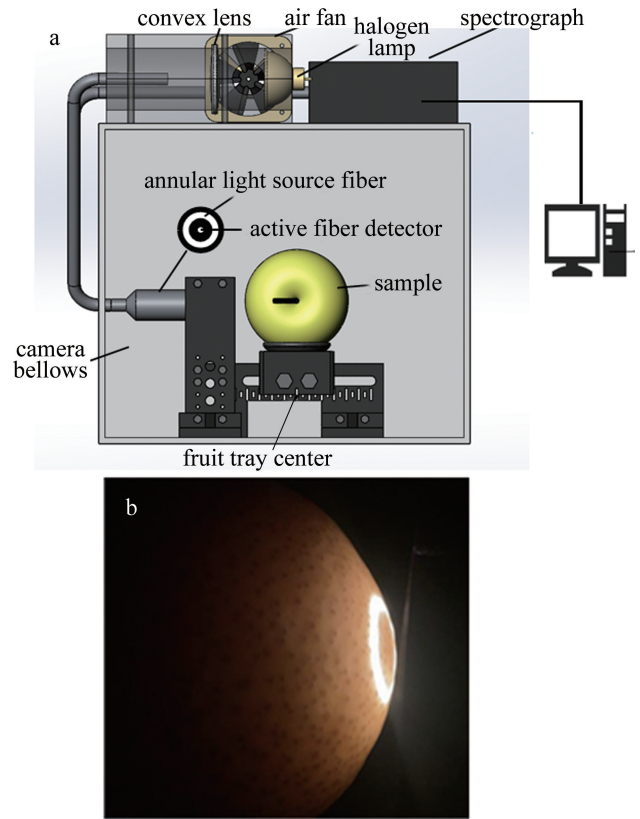


图 1 a—环型光源漫反射检测系统 b—实验效果图

Fig. 1 a—diffuse reflection detection system for ring light source b—experimental renderings

样品的果肉近红外光谱信息。漫反射采集到的贡梨光谱信息包含了果皮与果肉的信息,反映出整个贡梨的 SSC 信息。小果、中果和大果中的最大果的半径分别为 40 mm、45 mm 和 50 mm,为了在实验过程中防止果实表面触碰到光纤探头,分别根据小果、中果和大果 3 个等级中的最大果的果径设定 5 个光源位置,即光源与各个等级最大果的表面距离分别为 0 mm、2.5 mm、5 mm、7.5 mm 和 10 mm。小果光谱数据采集:分别采集光源距离水果托盘中心为 40 mm、42.5 mm、45 mm、47.5 mm 和 50 mm (定义为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5) 的漫反射光谱;中果光谱数据采集:分别采集光源距离水果托盘中心为 45 mm、47.5 mm、50 mm、52.5 mm 和 55 mm (定义为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 和 B_5) 的漫反射光谱;大果光谱数据采集:分别采集光源距离水果托盘中心为 50 mm、52.5 mm、55 mm、57.5 mm 和 60 mm (定义为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5) 的漫反射光谱。

1.3 实验验证方案及建模方法

偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR) 是一种无监督的多变量统计分析方法^[10],具有较强的抗干扰性。图 2 为实验验证方案,校正集用正方

形表示,预测集用椭圆形表示;分别找出小果、中果和大果中预测效果最好的模型并定义其位置为 A 、 B 和 C ,而 A 、 B 和 C 所对应的光源位置分别为测量小果、中果和大

果的 5 个位置中的最优光源位置;基于 A 、 B 、 C 的校正集数据建立贡梨可溶性固形物尺寸通用模型;分别使用小果、中果和大果的预测集对各模型进行验证。

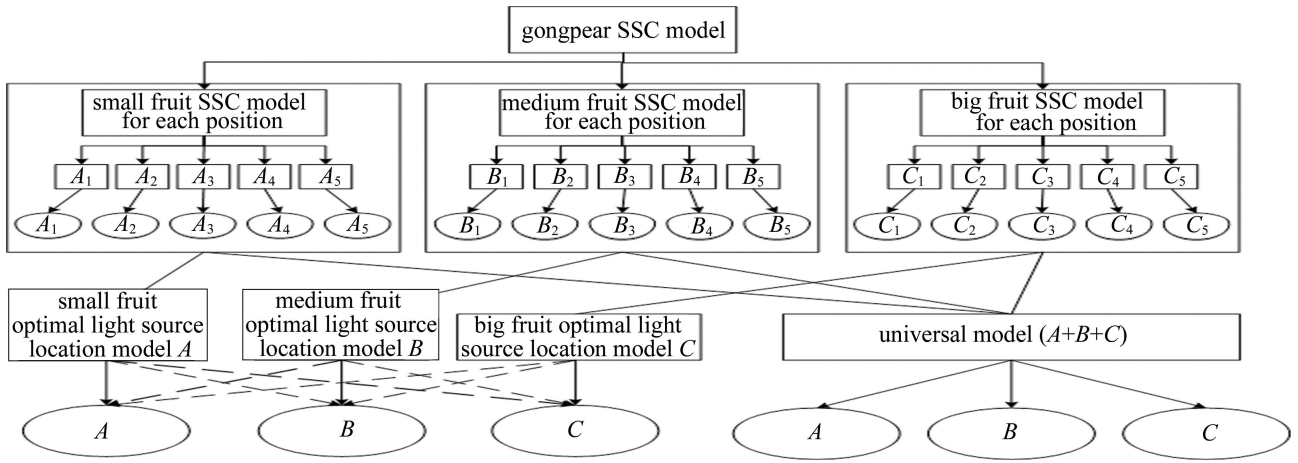


图 2 实验验证方案

Fig. 2 Model establishment and experimental verification scheme

1.4 模型性能分析

根据校准和预测的相关系数 r_c 和 r_p 、校准的均方根误差 (calibration of root mean square error, RMSEC) R_c 、预测的均方根误差 (root mean square error of prediction, RMSEP) R_p 来评估校准模型的性能^[11]。 r_c 、 r_p 、 R_c 和 R_p 的计算定义如下:

$$r_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_c} (y_{p,i} - y_{m,i})^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^{n_c} (y_{p,i} - y_{mean})^2} \quad (1)$$

$$r_p = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} (y_{p,i} - y_{m,i})^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} (y_{p,i} - y_{mean})^2} \quad (2)$$

$$R_c = \sqrt{\frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} (y_{p,i} - y_{m,i})^2} \quad (3)$$

$$R_p = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (y_{p,i} - y_{m,i})^2} \quad (4)$$

式中, $y_{p,i}$ 为水果个数 i 中 SSC 的预测值, $y_{m,i}$ 为水果个数 i 中 SSC 的实测值, y_{mean} 为校准集或预测集中 SSC 的平均值, n_c 和 n_p 分别为校准集和预测集中水果个数。

2 结果与分析

2.1 光谱特征与光谱分析

如图 3 所示,分别从小果、中果和大果中随机选一个果,在 5 个位置获得了近红外漫反射原始光谱。不管是小果、中果还是大果,位置 2 均为光谱能量最强的位置,这个现象可能是光源与样品表面的距离大小所

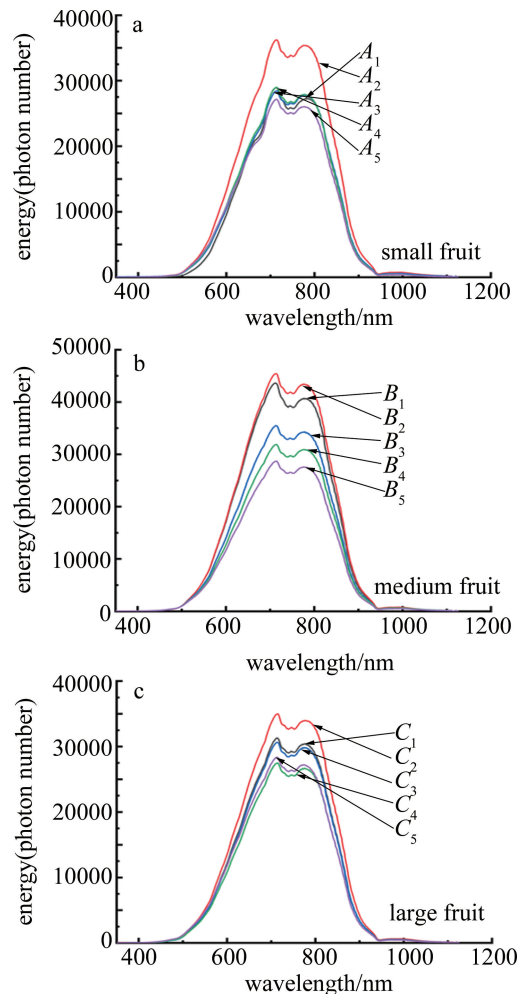


图 3 小果、中果和大果在 5 个位置的光谱图

Fig. 3 Spectra of small, medium and large fruit at five positions

导致,但位置1的光谱能量比位置2小,其原因可能是位置1的距离太近且样品的表面不够均匀而导致漫反射光不能被完全吸收;所采集的光谱形状相同,但是光强的大小有差异,它们在750 nm附近存在波谷,在710 nm与800 nm附近各有一个波峰。贡梨的主要成分为水分、果糖、蔗糖和葡萄糖等,其在710 nm处的波峰主要与C—H和O—H键的倍频伸缩振动有关^[12],在800 nm处的波峰主要与C—H键及N—H键的二倍频吸收有关^[13],750 nm附近的波谷可能由O—H三倍频伸缩振动导致^[14]。

2.2 小果、中果和大果的最优光源位置判别

以小果为例,分别用位置 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 的120个校正集光谱建立PLSR模型,再分别通过自身40个预测集对模型进行验证,其中预测效果最好的模型所对应的位置即为小果的最优光源位置;中果和大果同理找出相应的最优光源位置。

使用光谱预处理方法是为了让原始数据变得更容易观察分析^[15]。表1、表2和表3中分别记录小果、中果和大果使用标准正态变量变换(standard normal variable, SNV)^[16]和高斯滤波平滑(Gaussian filtering smoothing, GFS)^[17]预处理后结合PLSR算法建立的模型以及预测结果。从表中可以发现,使用SNV预处理后建立的SSC模型效果不稳定,甚至导致有些原本拟合性较好的模型出现过拟合现象,如 B_2 使用SNV预处理后建立的SSC模型的 $r_c < r_p$,而 B_2 通过原始光谱

表1 小果在5个位置处建立的模型

Table 1 Model of small fruit at five positions

position	pretreatment	calibration		prediction	
		r_c	R_c	r_p	R_p
A_1	raw	0.988	0.168	0.874	0.607
	SNV	0.931	0.390	0.860	0.602
	GFS	0.983	0.195	0.888	0.573
A_2	raw	0.963	0.290	0.905	0.466
	SNV	0.976	0.233	0.827	0.413
	GFS	0.954	0.322	0.914	0.447
A_3	raw	0.909	0.448	0.931	0.418
	SNV	0.936	0.380	0.944	0.378
	GFS	0.904	0.461	0.930	0.422
A_4	raw	0.977	0.230	0.835	0.405
	SNV	0.933	0.387	0.825	0.434
	GFS	0.994	0.118	0.850	0.365
A_5	raw	0.930	0.395	0.947	0.344
	SNV	0.950	0.336	0.951	0.359
	GFS	0.924	0.412	0.956	0.344

表2 中果在5个位置处建立的模型

Table 2 Model of medium fruit at five positions

position	pretreatment	calibration		prediction	
		r_c	R_c	r_p	R_p
B_1	raw	0.928	0.381	0.893	0.547
	SNV	0.914	0.415	0.895	0.533
	GFS	0.961	0.283	0.897	0.497
B_2	raw	0.947	0.328	0.929	0.436
	SNV	0.892	0.463	0.901	0.522
	GFS	0.940	0.351	0.930	0.434
B_3	raw	0.918	0.405	0.842	0.651
	SNV	0.953	0.311	0.856	0.628
	GFS	0.988	0.156	0.871	0.586
B_4	raw	0.964	0.271	0.832	0.427
	SNV	0.962	0.278	0.816	0.473
	GFS	0.956	0.299	0.836	0.415
B_5	raw	0.927	0.356	0.933	0.426
	SNV	0.945	0.269	0.960	0.425
	GFS	0.931	0.371	0.934	0.424

表3 大果在5个位置处建立的模型

Table 3 Model of big fruit at five positions

position	pretreatment	calibration		prediction	
		r_c	R_c	r_p	R_p
C_1	raw	0.898	0.455	0.611	0.949
	SNV	0.734	0.702	0.576	0.996
	GFS	0.866	0.517	0.602	0.576
C_2	raw	0.961	0.287	0.906	0.508
	SNV	0.991	0.259	0.813	0.786
	GFS	0.968	0.135	0.917	0.487
C_3	raw	0.937	0.362	0.805	0.707
	SNV	0.961	0.286	0.849	0.645
	GFS	0.975	0.229	0.827	0.679
C_4	raw	0.982	0.196	0.880	0.565
	SNV	0.988	0.160	0.755	1.009
	GFS	0.975	0.228	0.860	0.544
C_5	raw	0.991	0.137	0.801	0.531
	SNV	0.981	0.200	0.894	0.545
	GFS	0.986	0.172	0.807	0.511

建立的贡梨SSC模型 r_c 与 r_p 比较接近,且 $r_c > r_p$;使用GFS预处理后建立的PLSR模型,没有出现让原本拟合性能较好的模型出现过拟合现象,并且经过GFS预处理后建立的PLSR模型,其 r_c 和 r_p 大都更为接近,拟合性能变得更好,GFS的效果更稳定,因此选用GFS预处理方法。

对GFS预处理后建立的PLSR模型分析比较。对于小果, A_3 和 A_5 的 r_c 均小于 r_p ,出现过拟合现象; A_1

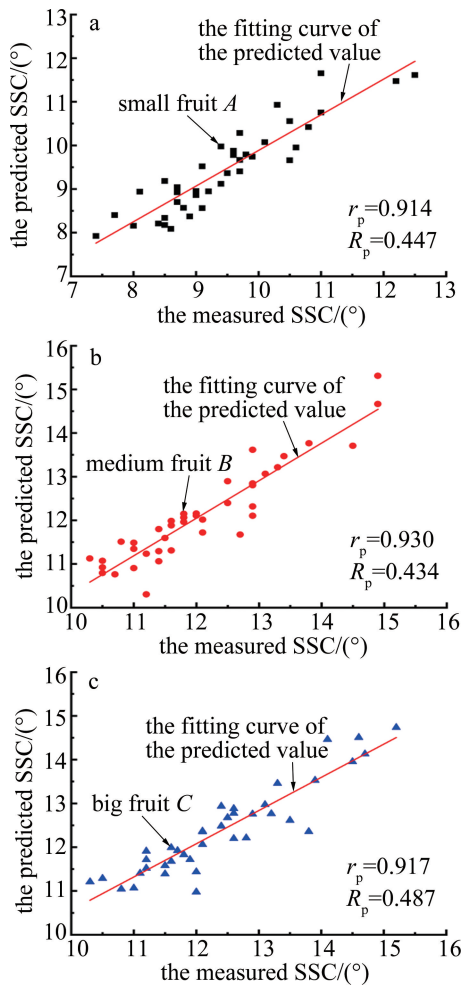


图 4 小果、中果和大果在局部尺寸模型下的 SSC 预测散点图

Fig. 4 SSC prediction scatter plots of small, medium and large fruits under local size model

和 A_4 的 r_c 分别为 0.983 和 0.994, 但是它们的 r_p 分别为 0.888 和 0.850, 拟合性较差; A_2 的 r_c 和 r_p 分别为 0.954 和 0.914, A_2 的 r_c 相对于 A_3 和 A_5 略小, 但拟合性更好, 因此确定 A_2 为小果的最优光源位置, 定义为 A 。对中果和大果同理分析确定了 B_2 和 C_2 分别为它们各自的最优光源位置, 定义为 B 和 C 。小果、中果和大果的最优光源位置均在位置 2。在 A 、 B 和 C 处建立的模型为各自的局部尺寸模型, 图 4 为局部尺寸模型的 SSC 预测散点图。

2.3 小果、中果和大果的 SSC 预测尺寸通用模型的建立

使用 A 、 B 和 C 的 360 个校正集数据建立贡梨 SSC 尺寸通用模型, 依次对 A 、 B 和 C 的预测集数据进行预测。如表 4 所示, 使用预处理方法后建立的 SSC 尺寸通用模型的 r_c 和 R_c 分别为 0.964 和 0.431, A 、 B 和 C 的预测集 r_p 和 R_p 分别为 0.892、0.937、0.889 和 0.524、0.417 和 0.551, 可以看出, 通用模型对小果、中果和大果均有较好的预测效果。

2.4 局部尺寸模型与通用模型的对比

将 A 、 B 和 C 的预测集数据分别对小果、中果和大果的局部尺寸模型和通用模型进行预测, 根据模型预测效果评估模型的准确性。如表 5 所示, 小果、中果和大果的局部尺寸模型预测自身等级的 SSC 效果好, 但预测另外两个尺寸等级的 SSC 效果差, 例如小果的局部尺寸模型预测中果、大果的 r_p 和 R_p 分别为 0.644、0.828 和 4.351、1.003, R_p 均超过 1° 糖度, 预测精度低,

表 4 贡梨 SSC 预测尺寸通用模型及预测结果

Table 4 General model and prediction results of gorgpear SSC size prediction

model	pretreatment	calibration		prediction					
		r_c	R_c	A		B		C	
				r_p	R_p	r_p	R_p	r_p	R_p
A+B+C	raw	0.966	0.419	0.891	0.497	0.936	0.419	0.887	0.557
	GFS	0.964	0.431	0.892	0.446	0.937	0.417	0.889	0.551

表 5 局部尺寸模型和通用模型对小果、中果和大果的预测结果

Table 5 Prediction results of small, medium and large fruit by local size models and general model

model	calibration		prediction					
	r_c	R_c	A		B		C	
			r_p	R_p	r_p	R_p	r_p	R_p
A+B+C	0.964	0.431	0.892	0.524	0.937	0.417	0.889	0.551
A	0.954	0.322	0.914	0.447	0.644	4.351	0.828	1.003
B	0.940	0.351	0.250	1.233	0.930	0.434	0.628	4.433
C	0.968	0.259	0.715	1.595	0.499	0.084	0.917	0.487

且 r_p 与 r_c 相差较大,拟合性能差;中果和大果的局部尺寸模型均存在类似情况;而通用模型预测小果、中果和大果的 r_p 分别为 0.892、0.937、0.889, R_p 分别为 0.524、0.417、0.551, R_p 均在 0.5 左右,精度高,且 r_p 与 r_c 相差不大,拟合性能较好;因此可以说明通用模型适用于预测小果、中果和大果的 SSC。图 5 为通用模型的 SSC 预测散点图。

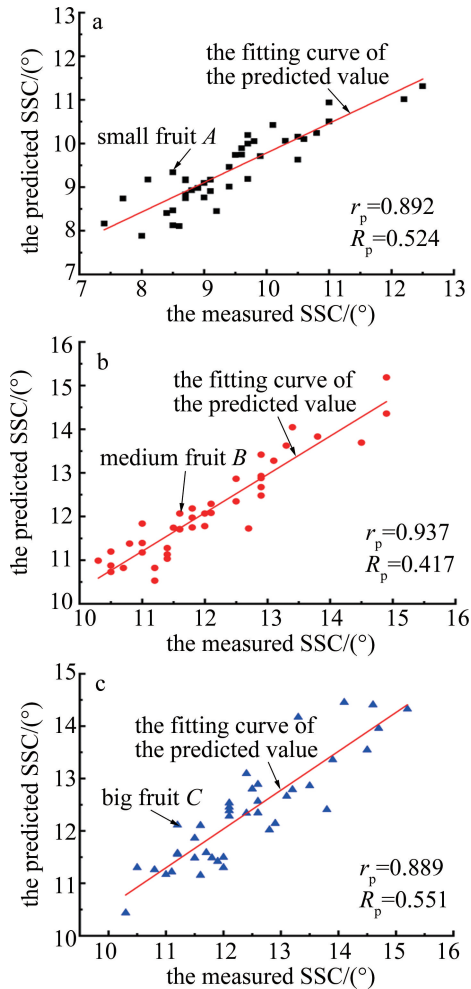


图 5 小果、中果和大果在通用模型下的 SSC 预测散点图

Fig. 5 SSC prediction scatter plots of small, medium and large fruits under general model

3 结论

基于近红外光谱技术^[18],采用本课题组设计的近红外漫反射系统收集小果、中果和大果各 5 个光源位置的近红外漫反射光谱。分别通过 5 个光源位置下所采集的光谱数据建立 PLSR 模型,根据模型预测效果找出小果、中果和大果的最优光源位置,结果表明均为位置 2。比较局部尺寸模型与通用模型的预测效果,结果表明局部尺寸模型预测自身尺寸等级的 SSC 效

果好,预测其它两个尺寸等级的 SSC 效果差;通用模型 r_c 和 R_c 分别为 0.964 和 0.431,小果、中果、大果的 r_p 和 R_p 分别为 0.892、0.937、0.889 和 0.524、0.417、0.551,贡梨 SSC 尺寸通用模型无论预测哪一个尺寸等级的贡梨 SSC 都有较好的结果,通用模型能够降低尺寸带来的不良影响,适用于检测不同尺寸等级下的贡梨 SSC。

参考文献

- [1] HUANG Y P, LIU Y, YANG Y T, *et al.* Discrimination of tomato color grade by spatial resolution spectroscopy and visible/near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39 (11): 3585-3591 (in Chinese).
黄玉萍,刘英,杨雨图,等.空间分辨光谱和可见/近红外光谱的番茄颜色等级判别[J].光谱学与光谱分析,2019,39(11):3585-3591.
- [2] SUN X, SUBEDI P, WALSH K B. Achieving robustness to temperature change of a NIRS-PLSR model for intact mango fruit dry matter content [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 162: 111117.
- [3] XIA Y, HUANG W, FAN S, *et al.* Effect of spectral measurement orientation on online prediction of soluble solids content of apple using Vis/NIR diffuse reflectance [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 467-477.
- [4] GUO Z, HUANG W, PENG Y, *et al.* Color compensation and comparison of shortwave near infrared and long wave near infrared spectroscopy for determination of soluble solids content of 'Fuji' apple [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 115: 81-90.
- [5] YAO Y, CHEN H, XIE L, *et al.* Assessing the temperature influence on the soluble solids content of watermelon juice as measured by visible and near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(1): 22-27.
- [6] XIA Y, FAN S, LI J, *et al.* Optimization and comparison of models for prediction of soluble solids content in apple by online Vis/NIR transmission coupled with diameter correction method [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2020, 201: 104017.
- [7] CEN H, LU R, MENDOZA F, *et al.* Relationship of the optical absorption and scattering properties with mechanical and structural properties of apple tissue [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 30-38.
- [8] van BEERS R, AERNOUTS B, WATTÉ R, *et al.* Effect of maturation on the bulk optical properties of apple skin and cortex in the 500-1850 nm wavelength range [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 79-89.
- [9] ZHANG X X, LI Sh K, LI P, *et al.* Effects of near-infrared diffuse light on fruit penetration [J]. Chinese Journal of Food Science, 2022, 22(1): 298-305 (in Chinese).
张欣欣,李尚科,李跑,等.近红外漫反射光对水果的穿透能力研究[J].中国食品学报,2022,22(1):298-305.
- [10] HUANG J J, LI X M, TENG H Q. Evaluation model of loess collapsibility based on partial least square method [J]. Journal of Disaster Science, 2021, 36(2): 60-64 (in Chinese).
黄建军,李雪梅,滕宏泉.基于偏最小二乘法的黄土湿陷性评价模型[J].灾害学,2021,36(2):60-64.

- [11] LIU Y D, WANG J Zh, JIANG X G, *et al.* Detection of soluble solids in apple by near infrared spectroscopy with multi-mode adjustable optical mechanism[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(7): 2064-2070(in Chinese).
刘燕德,王军政,姜小刚,等.多模式可调节光学机构的苹果可溶性固形物近红外光谱检测[J].*光谱学与光谱分析*,2021,41(7):2064-2070.
- [12] MCDEVITT R M, GAVIN A J, ANDRÉS S, *et al.* The ability of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict the chemical composition of ground chicken carcasses and to discriminate between carcasses from different genotypes[J]. *Hispania*, 2005, 13(3): 109-117.
- [13] ZHOU L J, WU H, LI J T, *et al.* Determination of fatty acids in broiler breast meat by near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2012, 90(3): 658-664.
- [14] LIU Y D, ZHU D N, WU M M, *et al.* Online detection of soluble solids in yulu pear by near-infrared diffuse transmission spectroscopy [J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(10): 115-119(in Chinese).
刘燕德,朱丹宁,吴明明,等.玉露香梨可溶性固形物近红外漫透射光谱在线检测[J].*食品与机械*,2016,32(10):115-119.
- [15] LI L Sh, LIU Y D, HU J, *et al.* Application of near infrared nondestructive testing technology in fruit maturity discrimination[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2021, 38(6):95-105(in Chinese).
黎丽莎,刘燕德,胡军,等.近红外无损检测技术在水果成熟度判别中的应用研究[J].*华东交通大学学报*,2021,38(6):95-105.
- [16] XIAO Sh J, WANG Q H, LI Ch F, *et al.* Nondestructive testing classification of milk quality by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(4):1243-1249(in Chinese).
肖仕杰,王巧华,李春芳,等.傅里叶变换中红外光谱的牛奶品质无损检测分级[J].*光谱学与光谱分析*,2022,42(4):1243-1249.
- [17] CAO P T, ZHANG M, LI Zh Ch. Adaptive filtering denoising method based on generalized S-transform and Gaussian smoothing [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(6): 1128-1136 (in Chinese).
曹鹏涛,张敏,李振春.基于广义S变换及高斯平滑的自适应滤波去噪方法[J].*石油地球物理勘探*,2018,53(6):1128-1136.
- [18] ZHANG J L, XIN M, FAN L L, *et al.* Monitoring system based on near infrared spectroscopy after skin flap transplantation [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(1): 91-95(in Chinese).
张锦龙,辛明,樊琳琳,等.基于近红外光谱在皮瓣移植术后的监测系统[J].*激光技术*,2020,44(1):91-95.