

基于近红外光谱结合波长优选检测 单颗葡萄的 SSC 含量

Determination of SSC content in single grape based on NIR combined
with wavelength selection

郭 成 马 月 梁梦醒 颜 辉

GUO Cheng MA Yue LIANG Meng-xing YAN Hui

(江苏科技大学生物技术学院, 江苏 镇江 212000)

(School of Biotechnology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China)

摘要:采用无损检测测定单颗葡萄中可溶性固形物(SSC)含量,获得个体和群体信息,以期指导田间管理、葡萄储存条件设置及满足消费者对葡萄口味的不同需求。采用手持式 NIR 光谱仪在 950~1 650 nm 波长范围采集葡萄的近红外光谱,采用偏最小二乘(PLS)回归建立葡萄 SSC 预测模型。为了减少冗余无信息变量,增加模型的预测精度和稳定性,采用无信息变量消除法(UVE)、随机蛙算法(RF)筛选出与葡萄 SSC 含量相关的重要波长变量。结果表明:RF 筛选建立的 SSC 预测模型优于全光谱 PLS 和 UVE 筛选建立的模型。RF-PLS 模型的校正集、交叉验证及预测集的 R_c^2 、 R_{cv}^2 和 R_p^2 分别为 0.960 5、0.933 4、0.930 4,校正均方根误差(RMSEC),交叉验证均方根误差(RMSECV)和预测均方根误差(RMSEP)分别为 0.638 2、0.829 9、0.868 8。表明通过波长优选后的,基于便携式近红外光谱在预测单颗葡萄 SSC 含量的应用上完全可行,有较高的预测精度。

关键词:葡萄;可溶性固形物;近红外光谱;随机蛙算法;无信息变量消除法

Abstract: The soluble solid content (SSC), one of the important index for evaluating the qualities, in a single grape were measure real-timely and non-destructively in this study, This might help to improve the management of the fruits as well as prolong their storage time, satisfying the needs of different customers. The near infrared (NIR) spectra of grapes was detected by using a hand-held NIR spectrometer, wavelength ranging from 950 to 1,650 nm. Based on partial least squares (PLS) data, the prediction model for SSC content in grapes was established. In order to reduce redundancy and unin-

formative variables while increase prediction accuracy and stability of this model, sensitive wavelength variables were selected by uninformative variable elimination (UVE) and random frog (RF), respectively. The results showed that the SSC predictive model established by RF-PLS is better than the ones done by full-spectrum PLS and UVE. R_c^2 , R_{cv}^2 and R_p^2 of RF-PLS were 0.960 5, 0.933 4 and 0.930 4, and RMSEC, RMSECV and RMSEP of it were 0.638 2, 0.829 9 and 0.868 8, respectively. Our results showed that the spectra based on portable NIR spectrometer could be successfully applied in prediction of SSC content in a single grape with high prediction accuracy after wavelength selection for the model.

Keywords: grapes; soluble solids content; NIRS; random frog; uninformative variable elimination

据统计^[1],2014 年中国葡萄总产量达 1 254.6 万 t,如此多的产量,需要有效的田间与采后管理。葡萄为葡萄科葡萄属木质藤本植物,是世界性的水果。葡萄中的可溶性固形物含量(Soluble Solids Content,SSC)是衡量葡萄品质的重要指标之一。SSC 传统的检测方法是从每穗摘取 1~3 粒葡萄,做成葡萄汁再进行含量的测定,但该方法费时、费力,并且具有破坏性^[2]。由于葡萄不同果穗以及相同果穗上不同个体的成熟度不一致,如能在果穗上不同位置无损检测单粒葡萄的 SSC,首先可以获得葡萄个体和整体的情况,用以指导果农采用合理的田间管理方法,提高葡萄的品质;其次,根据葡萄中 SSC 含量,选择最佳的储存条件,延长储存时间;对于客户,通过无损检测 SSC,选择购买适合自己口感的葡萄。

近红外光谱(Near Infrared,NIR)分析技术具有分析速度快、绿色、无损等优点^[3],正逐渐广泛应用于苹果^[4]、脐橙^[5]、西瓜^[6]、梨^[7]等水果 SSC 的检测。吕刚等^[8]采用基于 USB4000 的自制手持式光谱仪,建立 LV-SVM 模型预测葡萄活体生长期单个果粒的糖度,该系统功耗较大,不利于长

基金项目:镇江市农业科技支撑项目(编号:NY2014032)

作者简介:郭成,男,江苏科技大学硕士研究生。

通讯作者:颜辉(1971—),男,江苏科技大学副教授,博士。

E-mail: yanh1006@163.com

收稿日期:2016-07-02

期现场分析。吴桂芳等^[2]采用 Handheld FieldSpec 光谱仪建立的 PLS-ANN 模型预测葡萄浆果的糖度,该仪器价格昂贵。陈辰等^[9]使用 NIRS DS2500,采用可见/近红外漫反射光谱技术建立 MPLS 模型预测单个葡萄 SSC,但该光谱仪体积大,耗能高,价格昂贵。徐洪宇等^[10]采用 MPATM 型傅里叶变换近红外光谱仪,使用积分球采样,建立 PLS 模型预测酿酒葡萄的糖度,该方法所需样品数多,无法分析单个样品的品质,且光谱仪体积大,不便于实时现场检测。因此,目前多数 NIR 分析仪器体积大(通常采用光纤光谱仪)、光源功耗高、价格高昂,难以适合现场检测的需求^[11]。

由于便携式 NIR 仪器的分辨率不如研究型仪器高,所以建立的模型预测精度也不如研究型仪器^[12]。通过 NIR 与偏最小二乘回归(Partial Least Squares, PLS)方法结合进行建模,一般认为 PLS 具有较强的全波长建模能力。通过波长优选可以简化模型,更主要是可以剔除不相关或非线性变量,从而得到稳健性好、预测能力强的校正模型^[13-14]。目前,波长优选方法主要有随机蛙(Random Frog, RF)^[15]、移动窗(Moving Window, MW)^[16]、无信息变量消除法(Uninformative Variable Elimination, UVE)^[17]、间隔偏最小二乘法(Interval PLS, iPLS)^[18]、自适应量加权采样(Competitive Adaptive Reweighted Sampling, CARS)^[19]和遗传算法(Genetic Algorithms, GA)^[20]等。

本研究拟采用低功耗的便携式近红外光谱仪,探讨 UVE 与 RF 两种波长优选方法与 PLS 的结合,建立最适于实时现场预测单颗葡萄 SSC 含量的近红外无损检测模型,用以克服前人研究中分析仪器体积大、光源功耗高、价格高昂、不利于现场开展工作等缺点,以期应用于葡萄田间管理与摘后储藏。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

葡萄:采自江苏省镇江市丹徒区公琴水果合作社,分别在目视成熟度不同的 20 个葡萄果穗上采摘,从每个果穗的穗节部、穗尖部各采摘一颗,穗中部采摘两颗,共采摘 80 颗葡萄。

1.1.2 仪器设备与软件

折光仪:WZ-103 型,浙江托普云农科技股份有限公司;

便携式近红外光谱仪:MicroNIR1700 型,美国捷迪通讯技术有限公司(JDSU);

软件:近红外光谱预处理与 PLS 建模使用 MATLAB R2009a 在 PLS Toolbox 6.2 工具箱中实现,UVE 与 RF 波长优选分别使用 ChemoAC 和 LibPLS 工具箱实现。

1.2 方法

1.2.1 近红外光谱采集 用 MicroNIR1700 采集葡萄的近红外反射光谱,光谱范围为 950~1 650 nm。光谱采样间隔为 12.5 nm,积分时间 15 ms,扫描次数 50 次。每个样品采集赤道一点作为一个样本,共有 80 个。每个点采集光谱 3 次,以 3 次平均值作为最终光谱。

1.2.2 SSC 测定 采集光谱后即刻采用折光仪测量葡萄 SSC 含量。

1.2.3 校正集和预测集定义 所有样本按照 SSC 升序排序,根据 3:1 的比例分为校正集和预测集,校正集含 60 个样本,预测集含 20 个样本,其中 SSC 最大和最小样品应为校正集。预测集样品 SSC 范围应被包含在校正集样品 SSC 范围。

1.2.4 光谱预处理 通常采用的预处理方法包括均值中心化(mean centering)、标准化(autoscaling)、不同点移动平滑(move smoothing)、一阶导数(1st D)、标准正态变量变换(standard normal variable transformation, SNV)、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)等。

选择多种方法对原始光谱进行预处理,比较以下预处理方法的组合,1st D、1st D+SNV、1st D+SNV+Mean Center、1st D+MSC+Mean Center,分别使用上述 4 种预处理方法进行 PLS 建模。

1.2.5 偏最小二乘回归法 PLS 是一种多元回归分析方法,模型建立在成分提取的方法之上。PLS 在提取成分的过程中,同时考虑到预测变量数据和因变量数据中的信息,使从两者中提取的信息之间的相关性达到最大,然后用所获得的成分建立多元回归分析模型^[21]。

将光谱数据与相应的 SSC 数据导入 PLS 工具箱,选择光谱最佳预处理方法,采用留一法(Leave one out, LOO)进行交叉验证。

1.2.6 波长优选 NIR 分析一般采用线性方法建立模型,波长优选能够剔除与分析目的性质无关或呈非线性关系的波长变量,从而达到简化模型、提高预测精度的目的。本研究中,拟采用无信息变量消除法(UVE)、随机蛙算法(RF)进行波长优选,以期达到提高模型精度的目的。

(1) 无信息变量消除法: UVE 是建立在分析 PLS 回归系数基础上的算法,目的是消除那些不提供有用信息的波长变量。在 NIR 的 PLS 多元回归模型中, UVE 是把相同于自变量矩阵的变量数目的随机变量矩阵加入光谱矩阵中,然后通过交叉验证,逐一剔除无信息的变量,建立 PLS 多元回归模型,从而得到回归系数的矩阵,通过分析回归系数矩阵中回归系数向量的均值和标准偏差的商的稳定性,最后根据商值的绝对值大小决定是否将该变量用于最终的模型中^[22]。

(2) 随机蛙算法: RF 是一种新型的波长优选算法,特点是能够利用少量的变量迭代进行建模,是一种非常有效的高维数据变量选择方法。该算法针对每个波长变量选择可能性进行输出,根据可能性的大小进行波长选择^[23]。

2 结果与分析

2.1 SSC 测定结果

由表 1 可知,校正集和预测集的 SSC 值范围相近,分别为 6.15~18.20 °Brix 和 6.80~17.85 °Brix,且校正集和预测集样品的标准差相近,分别为 3.24 和 3.26,因此校正集和预测划分合理,为建立可靠的模型奠定了基础。

2.2 光谱特征

图1为80个葡萄样品的原始近红外光谱曲线。由图1

表 1 样本 SSC 参考值统计结果					
Table 1 Statistics of SSC reference value in the data sets					
数据集	样本数/ 个	范围/ °Brix	平均值/ °Brix	标准差/ °Brix	变异系 数/%
样品集	80	6.15~18.20	14.11	3.23	22.9
校正集	60	6.15~18.20	14.09	3.24	23.0
预测集	20	6.80~17.85	14.15	3.26	23.0

可知,各个样品的光谱曲线类似,无明显异常的样品。光谱在 970 nm 和 1 440 nm 处出现 O—H 吸收峰,在 1 190 nm 出现了 C—H 键二级倍频吸收峰^[24-25]。原始光谱曲线呈现的吸收特征变化反映了葡萄内部不同组分信息含量的差异。

2.3 模型的分析与比较

2.3.1 PLS 由表 2 可知,选择 1st D+SNV+Mean Center 进行预处理的效果最好,其均方根误差小,相关系数大。

表 2 预处理方法对 PLS 的影响							
Table 2 Effects of different Preprocess methods for PLS model							
预处理方法	LVs	RMSEC	R_c^2	RMSECV	R_{cv}^2	RMSEP	R_p^2
1 st D	9	0.679 6	0.955 3	1.103 7	0.884 3	1.082 5	0.885 0
1 st D+SNV	9	0.629 4	0.961 6	1.037 9	0.897 9	0.965 2	0.909 9
1 st D+SNV+Mean Center	8	0.674 7	0.955 9	0.980 0	0.907 3	1.003 7	0.900 6
1 st D+MSC+Mean Center	10	0.491 4	0.976 6	1.157 5	0.874 4	0.849 6	0.931 2

证 R_{cv}^2 和 RMSECV 分别为 0.907 3 和 0.980 0,预测集 R_p^2 和 RMSEP 分别为 0.900 6 和 1.003 7。虽然得出 SSC 预测结果较好,但全波长光谱区域中存在信息较弱或有多重线性关系的冗余信息。波长优选能有效减少参与建模变量,充分利用光谱信息,提高模型的预测精度^[26-27]。因此,采用以下两种方法对光谱进行波长优选。

2.3.2 UVE-PLS 采用 UVE 进行特征波长的提取。图 2 是 UVE 方法进行波长优选的结果,横坐标方向上,垂直线左边的部分为实际光谱变量,右边的为光谱的系统噪声变量,该部分由随机噪声模拟产生,纵坐标方向上是每个变量的稳定性数值,水平两条虚线代表选择实际变量的稳定性数值的阈值,在阈值范围内的稳定性数值对应的变量是与葡萄 SSC 无关的信息量,在阈值范围外的稳定性数值对应的变量则是与葡萄 SSC 有关的信息量,据此,保留有关的信息量对应的波长变量,去除无关的信息量对应的波长变量,最后根据保留的波长变量建立 PLS 模型。

通过 UVE 进行波长优选,特征波长的个数由 125 降为 32,建立 PLS 模型后,结果见表 3,校正集相关系数 R_c^2 和校正集均方根误差 RMSEC 分别为 0.960 1 和 0.641 5,交叉验证相关系数 R_{cv}^2 和交叉验证均方根误差 RMSECV 分别为 0.929 5 和 0.853 4,均方根误差比全光谱建模降低了 12.91%,预测集相关系数 R_p^2 和预测集均方根误差 RMSEP 分别为 0.924 6 和 0.899 8,均方根误差比全光谱建模降低了 10.35%。从结果来看,可能是 UVE-PLS 的方法消除了全波长数据中的一些冗长的信息,因此模型的预测精度得到了提高,并且

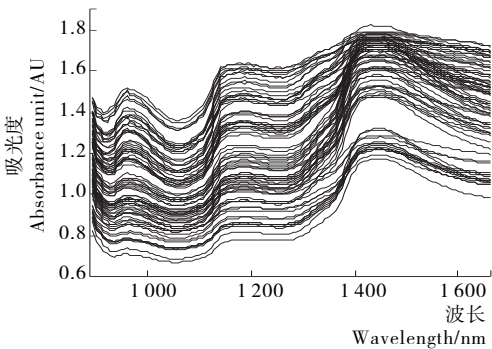


图 1 原始光谱
Figure 1 Raw spectra

对 1st D+SNV+Mean Center 预处理后的全波长光谱信息建模,得出 PLS 模型的相关结果。由表 2 可知,PLS 的模型的校正集和预测集的 R^2 都在 0.90 以上,主因子数为 8 时,校正集 R_c^2 和 RMSEC 分别为 0.955 9 和 0.674 7,交叉验

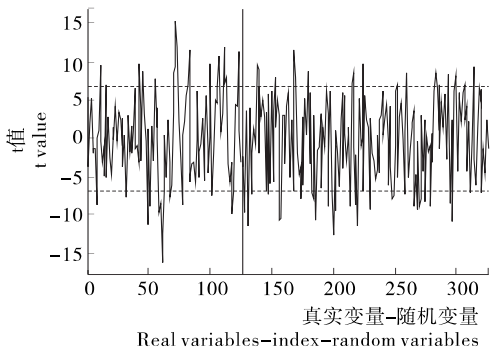


图 2 无信息变量消除法选择变量图
Figure 2 Variable selection by UVE

由于数据矩阵维数的大幅降低,在一定程度上也简化了模型。

2.3.3 RF-PLS 通过 RF 算法提取特征波长进行 PLS 建模,其选择的依据是不同的变量具有不同的选择可能性,每个波长的选择可能性结果见图 3,最终 RF 算法选出的特征波长为 50 个,将选出的波长进行 PLS 建模,结果见表 3,校正集 R_c^2 和 RMSEC 分别为 0.960 5 和 0.638 2,交叉验证 R_{cv}^2 和 RMSECV 分别为 0.933 4 和 0.829 9,均方根误差比全光谱建模降低了 13.31%,预测集 R_p^2 和 RMSEP 分别为 0.930 4 和 0.868 8,均方根误差比全光谱建模降低了 13.44%。模型的预测能力有所提高,大大简化了模型。

图 4 是两种波长优选的结果,优选后的波长主要集中在 970,1 190,1 450 nm 附近。优选波长是基于数学方法随机

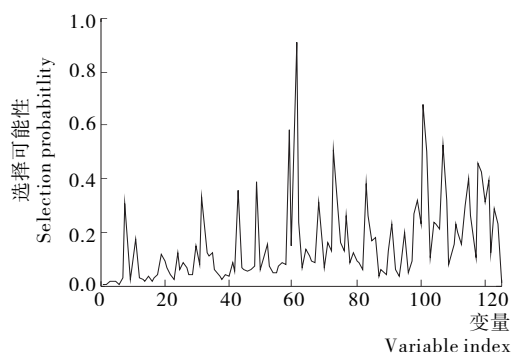
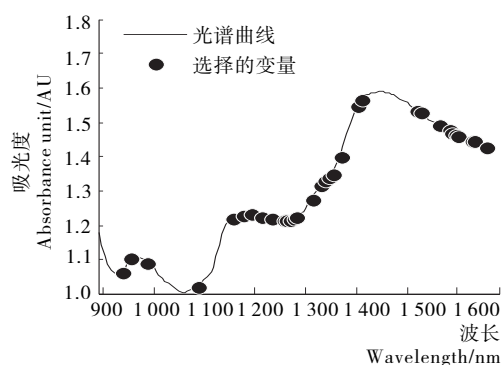
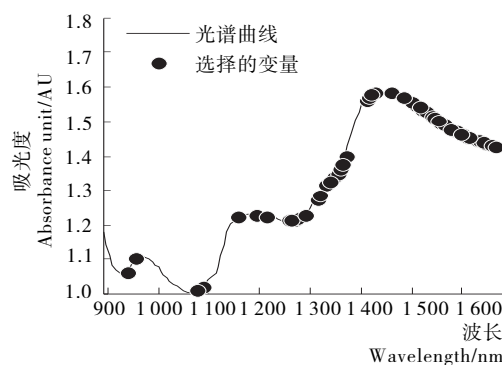


图3 随机蛙算法选择变量图

Figure 3 Variable selection by RF algorithm



(a) UVE方法选取的波长变量



(b) RF方法选取的波长变量

图4 两种的特征波长选择

Figure 4 Characteristic wavelength selection of two methods

表3 模型结果

Table 3 The results of models

方法	LVs	RMSEC	R_c^2	RMSECV	R_{cv}^2	RESEP	R_p^2
PLS	8	0.674 7	0.955 9	0.980 0	0.907 3	1.003 7	0.900 6
UVE-PLS	7	0.641 5	0.960 1	0.853 4	0.929 5	0.899 8	0.924 6
RF-PLS	7	0.638 2	0.960 5	0.829 9	0.933 4	0.868 8	0.930 4

相关系数 R_{cv}^2 (0.933 4)和 R_p^2 (0.930 4)较高且相近,保证了模型的预测精度。与全波长建模相比,RF可以减少建模的输入变量,提高预测效果;与 UVE-PLS 相比,RF-PLS 有较高的预测精度。

吕刚等^[8]预测混合品种葡萄的糖度 R_p^2 为 0.860;吴桂芳等^[2]建立的 PLS-ANN 模型预测葡萄浆果的 SSC 的 R_p^2 为 0.908 2;陈辰等^[9]预测 2 种温度混合葡萄样品的 SSC, R_p^2 为 0.920 5;徐洪宇等^[10]建立的 PLS 模型预测酿酒葡萄的糖度 R_p^2 为 0.924 0。本研究所使用的 MicroNIR1700 为便携式近红外光谱仪,所得最佳的 RF-PLS 模型的 R_p^2 为 0.930 4,与上述的研究相比,本研究结果最好,另外本工作特别适合在果园里现场实时分析,有很大的优势。

3 结论

本研究结果表明了基于 MicroNIR1700 的近红外光谱技术在葡萄 SSC 预测中的高度可行性。通过减少冗余的无信息变量,可增加模型的稳定性和预测精度。其中 RF-PLS 算法对于葡萄 SSC 的预测效果优于 UVE-PLS 算法。本工作

选择所得,部分波长会被重复选中,说明这些区域数据信息与被测对象含量有较高的相关性。优选波长包含了葡萄糖和蔗糖等可溶性固形物官能团的合频和倍频吸收区,如 970 nm 附近与糖相关的 O—H 键合频吸收,1 190 nm 附近是与糖相关的 C—H 键合频吸收,1 450 nm 附近是与糖相关的 O—H 键 1 倍频吸收。上述分析说明波长优选结果和化学结构分析具有一致性。

优选波长与全波长建模结果比较见表 3。由表 3 可知,通过两种波长优选方法建模的结果均优于全波长建模,其中以通过 RF 提取特征波长建模效果最好。其主因子数较低,且均方根误差 RMSECV (0.829 9)和 RESEP (0.868 8)较低,

的完成对水果种植的田间管理、采摘后贮藏以及消费者的使用提供了非常有效的工具。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 267.
- [2] 吴桂芳, 黄凌霞, 何勇. 葡萄浆果糖度可见/近红外光谱检测的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2 090-2 093.
- [3] 李敏. 近红外光谱技术在水果无损检测中的最新研究进展[J]. 绿色科技, 2013(10): 215-218.
- [4] 屈亚堃, 宫元娟. 近红外光谱技术在苹果品质无损检测中的应用[J]. 农业科技与装备, 2014(6): 32-33.
- [5] 赵珂, 熊艳, 赵敏. 基于近红外光谱技术的脐橙快速无损检测[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 649-652.
- [6] 介邓飞, 谢丽娟, 饶秀勤, 等. 近红外光谱变量筛选提高西瓜糖度预测模型精度[J]. 农业工程学报, 2013(12): 264-270.
- [7] 崔秀帅, 唐荣年, 杨举华, 等. 芒果无损检测方法的研究现状及发展趋势[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(7): 167-170.
- [8] 吕刚, 杨海清. 基于光谱技术的葡萄活体可溶性固体含量在线检测研究[J]. 红外, 2012, 33(10): 43-48.
- [9] 陈辰, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 玫瑰香葡萄贮藏期间糖酸品质的近红外检测[J]. 食品与发酵工业, 2015(6): 175-180.
- [10] 徐洪宇, 张京芳, 侯力璇, 等. 基于 FT-NIR 光谱技术检测酿酒葡萄中可溶性固形物含量[J]. 中国食品学报, 2013, 13(11): 153-159.
- [11] 王亚红. 葡萄中糖含量的近红外检测技术研究及仪器开发[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2014: 121-125.

- [12] YAN Hui, LU Dao-li, CHEN Bin, et al. Development of a hand-held near infrared system based on an Android OS and MicroNIR, and its application in measuring soluble solids content in Fuji apples[J]. NIR news, 2014, 25(4): 16.
- [13] ZOU Xiao-bo, ZHAO Jie-wen, POVEY M J W, et al. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 667(1/2): 14-32.
- [14] 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 近红外分析中光谱预处理及波长选择方法进展与应用[J]. 化学进展, 2004, 16(4): 528-542.
- [15] LI Hong-dong, XU Qing-song, LIANG Yi-zeng. Random frog: an efficient reversible jump Markov Chain Monte Carlo-like approach for variable selection with applications to gene selection and disease classification[J]. Anal Chim Acta, 2012(740): 20-26.
- [16] KASEMSUMRAN S, DU Yi-ping, LI Bo-yan, et al. Moving window cross validation: a new cross validation method for the selection of a rational number of components in a partial least squares calibration model[J]. Analyst, 2006, 131(4): 529-537.
- [17] KOSHOUBU J, IWATA T, MINAMI S. Elimination of the uninformative calibration sample subset in the modified UVE (Uninformative Variable Elimination)-PLS (Partial Least Squares) method[J]. Anal Sci., 2001, 17(2): 319-22.
- [18] JIANG Hui, LIU Guo-hai, MEI Cong-li, et al. Measurement of process variables in solid-state fermentation of wheat straw using FT-NIR spectroscopy and synergy interval PLS algorithm [J]. Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2012(97): 277-283.
- [19] LI Jiang-bo, GUO Zhi-ming, HUANG Wen-qiang, et al. Near-infrared spectra combining with CARS and SPA algorithms to screen the variables and samples for quantitatively determining the soluble solids content in strawberry[J]. Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi, 2015, 35(2): 372-8.
- [20] CAO Nan-ning, WANG Jia-hua, LI Peng-feng, et al. Study on Variable Selection of NIR Spectral Information Based on GA and SCMWPLS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(4): 915-919.
- [21] 丁光辉. PLS 和 GA 应用于部分有机污染物的 QSAR 研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 97-99.
- [22] 吴迪, 吴洪喜, 蔡景波, 等. 基于无信息变量消除法和连续投影算法的可见—近红外光谱技术白虾种分类方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(6): 423-427.
- [23] 陈立旦, 赵艳茹. 可见—近红外光谱联合随机蛙跳算法检测生物柴油含水量[J]. 农业工程学报, 2014(8): 168-173.
- [24] 唐建平. 近红外光谱在水果品质检测中的应用[J]. 北京农业, 2014(24): 232-232.
- [25] YAN Hui, HAN Bang-xing, WU Qiong-ying, et al. Rapid detection of Rosa laevigata polysaccharide content by near-infrared spectroscopy [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2011, 79(1): 179-84.
- [26] 丁姣, 蔡建荣, 张海东, 等. 近红外结合 Si-ELM 检测食醋品质指标[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 93-96.
- [27] 安泉鑫, 陈莉, 庞林江, 等. 近红外光谱技术在食品中的应用进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 239-242.

(上接第 30 页)

说明海藻糖的添加能够改善糯米粉的性质,使其具有较高糊化温度、糊化黏度、热稳定性、高温持水能力、透明度、冻融稳定性,且降低其沉降性,糯米粉性质的改善能够增大糯米粉的加工利用范围且对糯米粉制品的品质具有改善作用。但研究表明海藻糖的添加量应控制在 1.0%~1.5%。相比于仅仅研究海藻糖的添加对糯米粉制品品质影响,该研究能够为海藻糖在糯米粉制品中的应用提供具体的理论依据。除该研究所涉及的糯米粉的理化性质,海藻糖的添加量对糯米粉其他理化性质的影响可进一步研究。

参考文献

- [1] 程池. 海藻糖的特性和应用[J]. 食品与发酵工业, 1996(1): 59-64.
- [2] 蒙健宗, 赵文. 海藻糖的性质及其在新型食品开发中的应用[J]. 食品科学, 2005, 26(6): 281-283.
- [3] 彭亚锋, 周耀斌, 李勤, 等. 海藻糖的特性及其应用[J]. 中国食品添加剂, 2009(1): 65-69.
- [4] 姚文东. 冷冻糯米团糕品质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(9): 66-70.
- [5] 袁博, 黄卫宁, 邹奇波. 添加剂及储藏温度对糯性粉团抗老化的研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(2): 49-54.
- [6] 麦锋, 陆晓霞, 汪振炯. 海藻糖对中式糯米糕团品质影响研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014(3): 22-25.
- [7] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338.
- [8] 傅茂润, 赵双, 曲清莉, 等. 超微粉碎对红米理化性质和加工特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(4): 96-100.
- [9] 林鹭缘, 曾绍校, 张怡, 等. 瓜尔豆胶对莲子淀粉糊特性影响的研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 87-90.
- [10] 王颖, 晁桂梅, 杨秋歌, 等. 添加剂对糜子淀粉糊性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(11): 24-29.
- [11] 祁国栋, 张炳文, 王运广, 等. 超微细粉碎技术对糯玉米粉加工特性影响的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(9): 146-149.
- [12] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 22-27.
- [13] TIMASHEFF S N. The control of protein stability and association by weak interactions with water: how do solvents affect these processes? [J]. Annual review of biophysics and biomolecular structure, 1993, 22(435): 67-74.
- [14] GREEN J L. Phase relations and vitrification in saccharide-water solutions and the trehalose anomaly[J]. Physical Chemistry, 1989, 93(169): 2 880-2 882.
- [15] 荣建化, 史俊丽, 张正茂, 等. 超微细化大米淀粉流变特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(3): 73-76.
- [16] CROWE J H, CROWE L H, CHAPMAN D. Preservation of membranes in anhydrobiotic organisms: the role of trehalose [J]. Science, 1984, 223(4 637): 701-703.
- [17] 阎立梅, 刘晓辉, 王致禄. 聚醋酸乙烯酯乳液冻融稳定改性的机理[J]. 应用化学, 2001, 18(2): 120-124.
- [18] MUADKILAY J, CHAROENREIN S. Effects of hydro-colloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels [J]. Food Hydro-colloids, 2008, 22(7): 1 268-1 272.