

# 基于可见/近红外光谱技术快速检测 花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量

黄亮, 薛建新, 穆炳宇

(山西农业大学农业工程学院, 山西晋中 030801)

**摘要:** 为了快速无损检测不同品种(“松花”、“雪白”)花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量。本实验采集新鲜收获的“松花”、“雪白”花椰菜样本进行可见/近红外光谱的采集、提取和分析。首先,采用基线校正(Baseline)、标准正态变量变换(Standard Normal Variate transform, SNV)、中值滤波(Median Filter, MF)、高斯滤波(Gaussian Filter, GF)、S-G平滑(Savitzky-Golay)五种方法进行原始光谱的预处理分析。然后,分别采用连续投影算法(Successive Projections Algorithm, SPA)、回归系数法(Regression Coefficient, RC)进行特征波段的提取,并采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)进行主成分的提取,在此基础上,结合最佳预处理方法建立偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR)模型。结果表明:“松花”花椰菜的光谱数据所建立的MF-PCA-PLS模型最佳,校正集模型参数 $R_c=0.89$ , RMSEC=1.23, 预测集模型参数 $R_p=0.89$ , RMSEP=0.63。“雪白”花椰菜光谱数据所建的MF-RC-PLS模型最优,校正集模型参数 $R_c=0.87$ , RMSEC=1.31, 预测集模型参数 $R_p=0.73$ , RMSEP=0.46。由此可见,近红外光谱结合PLSR算法能够快速、无损、准确地检测花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量。

**关键词:** 花椰菜; 近红外光谱; 硫代葡萄糖苷; 无损检测

文章编号: 1673-9078(2021)04-269-274

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.4.0874

## Rapid Detection of Glucosinolates in Cauliflower Based on Visible/Near-infrared Spectroscopy

HUANG Liang, XUE Jian-xin, MU Bing-yu

(School of Agriculture and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China)

**Abstract:** In order to quickly detect the content of glucosinolates in different varieties of cauliflower (“Songhua” and “Snow-white”), in this experiment, fresh “Songhua” and “Snow-white” cauliflower samples were collected for visible/near-infrared spectrum collection, extraction and analysis. First, five methods, Baseline correction, Standard Normal Variate transform (SNV), Median Filter (MF), Gaussian Filter (GF) and S-G smoothing (Savitzky-Golay), were used for the preprocessing analysis of the original spectra. Secondly, methods of extracting feature bands were respectively adopted, namely the Successive projection Algorithm (SPA) and the Regression Coefficient (RC) were used to extract the feature bands. Principal Component Analysis (PCA) was used to extract the Principal components. A Partial Least Squares Regression (PLSR) model was established based on the optimal preprocessing method. The results showed that the MF-PCA-PLS model established by the spectral data of “Songhua” cauliflower was the best, and the calibration set model parameter  $R_c=0.89$ , RMSEC=1.23, predictive set model parameters  $R_p=0.89$ , RMSEP=0.63. The MF-RC-PLS model based on the spectral data of “Snow-white” cauliflower was optimal, with calibration set model parameters  $R_c=0.87$ , RMSEC=1.31, predictive set model parameters  $R_p=0.73$ , RMSEP=0.46. It can be seen that the content of glucoside in cauliflower can be detected quickly, nondestructively and accurately by PLSR algorithm combined with visible/near-infrared spectroscopy.

**Key words:** cauliflower; near infrared spectroscopy; glucosinolates; nondestructive testing

引文格式:

黄亮,薛建新,穆炳宇.基于可见/近红外光谱技术快速检测花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量[J].现代食品科技,2021,37(4):269-274

HUANG Liang, XUE Jian-xin, MU Bing-yu. Rapid detection of glucosinolates in cauliflower based on visible/near-infrared spectroscopy [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 269-274

收稿日期: 2020-09-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31801632); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0396); 山西农业大学科技创新基金项目(2016YJ04)

作者简介: 黄亮(1997-),男,硕士研究生,研究方向:农产品的无损检测;通讯作者:薛建新(1989-),女,博士,副教授,研究方向:农产品的无损检测

花椰菜 (*Brassica oleracea L. var. botrytis L.*), 又称花菜、菜花或椰菜花, 是一种很受人们欢迎的蔬菜, 花椰菜富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、膳食纤维、多种维生素和钙、铁、磷等矿物质, 具有较高的食用价值<sup>[1]</sup>和医药价值<sup>[2]</sup>。

硫代葡萄糖苷 (Glucosinolates), 简称硫苷, 是十字花科蔬菜中的一种重要的次生代谢产物<sup>[3]</sup>。许多研究表明: 硫代葡萄糖苷水解后会产生一系列生物活性物质, 这类活性物质具有抵抗真菌、细菌、病毒和蚜虫等功效<sup>[4-7]</sup>, 同时还可阻碍早期癌细胞的生长<sup>[8]</sup>。基于花椰菜中硫代葡萄糖苷的营养价值和抗癌的作用, 很多专家认为, 花椰菜中硫代葡萄糖苷含量的多少是评价其产后面品质的重要依据之一<sup>[9]</sup>, 因而近年来对硫苷的提取、检测分析引起研究人员的极大兴趣。

硫代葡萄糖苷通常存在于组织细胞的液泡中, 细胞壁的破裂能引起硫代葡萄糖苷的降解, 从而导致营养成分的流失。采用传统的检测方法检测硫代葡萄糖苷的含量既耗时又损坏了样本的外部形态和内部结构。因此, 快速无损检测花椰菜中的硫代葡萄糖苷就显得尤为重要。而目前, 采用可见/近红外光谱技术进行花椰菜中硫代葡萄糖苷含量预测的文献鲜有报道。根据量子力学理论可知, 可见/近红外光谱照射在花椰菜表面后, 硫代葡萄糖苷分子中含氢原子的基团对光子产生吸收作用后从基态跃迁到第二或更高的激发态。这种能级跃迁所产生的吸收光谱极易受到不同物理性质及化学性质的影响, 比如硫代葡萄糖苷的含量。因此基于这项理论, 采用近红外光谱测定花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量。

近几年, 近红外光谱分析目前已经广泛运用到蔬菜<sup>[10]</sup>、水果<sup>[11]</sup>、肉类<sup>[12]</sup>、谷物<sup>[13]</sup>等农作物中。Sahamishirazi S<sup>[14]</sup>等利用了近红外光谱技术测定 12 个不同品种的西兰花中硫代葡萄糖苷的含量, 结果表明, 近红外光谱技术可以对大样本西兰花中硫代葡萄糖苷的含量进行定性和定量的测定。顾敏<sup>[15]</sup>利用近红外光谱技术实现了西兰花表面农药残留种类的判别, 表明利用近红外光谱技术可以实现对西兰花外部品质的相关检测。常静<sup>[16]</sup>等利用近红外光谱技术结合 PLS、PCR 两种方法分别建立了杜仲中松脂醇二葡萄糖苷的预测模型, 结果表明, 两种方法建立的模型精度都较高。郭泽慧<sup>[17]</sup>等人实现了利用可见/近红外光谱技术对萝卜根、叶中的硫苷组分含量的快速无损检测。目前利用可见/近红外光谱技术对花椰菜品质的检测研究较少, 对花椰菜中硫代葡萄糖苷的检测鲜有研究。偏最小二乘回归算法主要是寻找一个线性回归模型, 来探索两个变量之间的线性关系, 可在本实验中对光谱数

据与硫苷值进行偏最小二乘回归建模。基于此, 本实验拟采用可见/近红外光谱技术结合偏最小二乘回归算法检测花椰菜中硫代葡萄糖苷含量, 旨在为花椰菜内部品质的价值评估提供一种无损检测途径。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 试验样本

实验材料花椰菜采自山西省太谷县农贸市场, 采后当天运达实验室, 并对样本进行筛选。实验所需“松花”花椰菜花球较圆整, 花球尚紧实、大而松散, 茎部色泽浓绿。“雪白”花椰菜花球圆整、完好, 花球紧实、不松散, 茎部色泽浅绿。花椰菜切割成样本后自然风干, 选定“松花”样本和“雪白”样本各 120 个 (共计 240 个), 运用 K-S (Kennard-Stone) 算法分别在两种花椰菜样本中选出 90 个样本作为校正集 (共 180 个), 30 个样本作为预测集 (共 60 个)。

### 1.2 试验仪器

使用美国 ASD (Analytical Spectral Device) 公司的 Field Spec 3 型近红外光谱仪采集光谱, 光谱范围为 350~2500 nm, 每个样本采集三次光谱数据取平均值。

### 1.3 硫代葡萄糖苷含量的测定方法

硫代葡萄糖苷含量的测定采用分光光度法<sup>[17]</sup>。通过硫苷在蔬菜中内源酶-芥子酶的作用下水解产生葡萄糖且能用 3,5-二硝基水杨酸法测定所产生的葡萄糖含量的原理来计算出硫苷的含量。

### 1.4 数据处理

本实验采用 Matlab 2019、The Unscrambler X 10.1 软件进行光谱数据的提取及后期数据处理, 利用 OriginPro 8.5 软件进行图形绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硫代葡萄糖苷含量的分析

采用分光光度法对 240 个花椰菜样本中硫代葡萄糖苷的含量进行测量, 测量结果如表 1 所示。经过样本总量的平均计算, 花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量分布在 2.44~10.62 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) 之间, 分布范围较广, 因此具有很好的代表性。“松花”花椰菜的预测集硫苷含量范围为 4.21~9.98 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ), 校正集硫苷含量范围为 3.26~11.19 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )。“雪白”花椰菜预测集硫苷含量范围为 6.12~9.03 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ), 校正集硫

苷含量范围为 4.89~12.31 ( $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ )。校正集含量差异较大,反映了个别样本的差异性,但总体不影响预测模型的精度。故“松花”和“雪白”花椰菜预测集中硫代葡萄糖苷的含量均在校正集内,说明校正集和预测集划分合理。

### 2.2 近红外光谱数据的采集

近红外光谱数据的采集均在自制的暗室中进行。为了减少误差,提高光谱数据的准确程度,每个样本的头部、茎部各采集三次,每次采集光谱时,旋转样本  $120^\circ$ 。入射光与样本表面成  $90^\circ$ 角是为了减少样本表面的角反射噪音。采用黑纸板固定样本来防止采集到与样本无关的光谱信息。两个花椰菜品种的所有光谱曲线取平均值后如图 1。由图 1 可知,两类不同品种的花椰菜光谱走势基本相同,但 800 nm 后“松花”花椰菜的光谱反射率普遍高于“雪白”花椰菜的光谱反射率,这可能与品种、颜色、质地等因素有关。为了

去除光谱首尾的噪声对后期光谱数据分析造成的影响,因此,本实验仅采用 450 nm~2250 nm 波段的数据进行后续的预测分析。

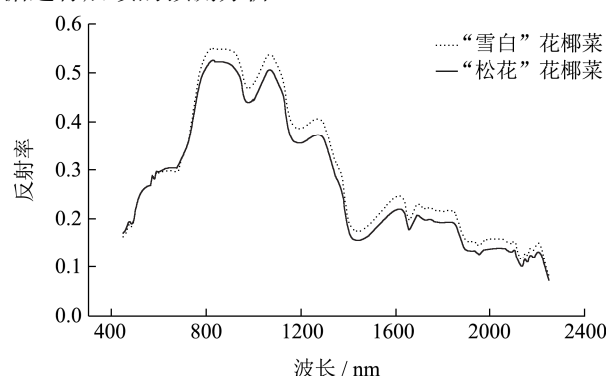


图 1 “松花”、“雪白”花椰菜平均光谱曲线

Fig.1 Mean spectral curves of "Songhua" and "Snow-white" cauliflower

### 2.3 光谱数据预处理

表 1 硫代葡萄糖苷指标值统计结果

Table 1 Statistical results of glucosinolates

项目	样品数量/个	最大值/ $(\mu\text{mol}/100\text{ g})$	最小值/ $(\mu\text{mol}/100\text{ g})$	平均值/ $(\mu\text{mol}/100\text{ g})$	方差/ $(\mu\text{mol}/100\text{ g})^2$
松花校正集	90	11.19	3.26	5.74	3.86
松花预测集	30	9.98	4.21	6.70	1.57
雪白校正集	90	12.31	4.89	7.71	2.47
雪白预测集	30	9.03	6.12	8.21	0.48

表 2 “松花”、“雪白”花椰菜不同预处理后 PLSR 模型精度

Table 2 PLSR model accuracy of "Songhua" and "Snow-white" cauliflower after different pretreatment

品种	预处理方法	校正集		预测集	
		$R_c$	RMSEC/%	$R_p$	RMSEP/%
松花	The original spectrum	0.90	1.19	0.89	0.63
	Baseline	0.89	1.22	0.89	0.63
	Median Filter	0.90	1.19	0.89	0.63
	Gaussian Filter	0.90	1.19	0.89	0.63
	Standard Normal Variate transform	0.88	1.27	0.85	0.71
	Savitzky-Golay	0.89	1.23	0.86	0.70
雪白	The original spectrum	0.86	1.34	0.72	0.47
	Baseline	0.86	1.36	0.67	0.50
	Median Filter	0.86	1.34	0.75	0.44
	Gaussian Filter	0.86	1.34	0.69	0.49
	Standard Normal Variate transform	0.78	1.67	0.70	0.48
	Savitzky-Golay	0.86	1.34	0.75	0.45

为了进一步消除可见/近红外光谱中噪声及环境因素对实验精度的影响<sup>[18]</sup>,分别采用基线校正(Baseline)、标准正态变量变换(Standard Normal Variate transform, SNV)、中值滤波(Median Filter, MF)、高斯滤波(Gaussian Filter, GF)、S-G 平滑

(Savitzky-Golay)五种预处理方法对原始光谱进行预处理。偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR)模型是近红外光谱分析中使用最广泛的经典线性回归建模方法之一<sup>[15]</sup>,通过不同的预处理方法处理后所建的 PLSR 模型精度如表 2 所示。

经过中值滤波预处理后的“松花”、“雪白”花椰菜预测集相关系数最高,其相关系数  $R_p$  分别为 0.89、0.75,预测集均方根误差 RMSEP 分别为 0.63、0.44。即中值滤波能较好地消除或减少环境噪音、样本大小不同和表面散射带来的误差。

中值滤波是一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术,其原理是把数字序列中某个值用该值的一个领域中各个值的中值代替,让周围的数据更接近真实值,从而消除孤立的噪声点。马超<sup>[19]</sup>对贮藏期内滩羊熟肉的肌红蛋白含量变化进行无损检测,光谱数据经过中值滤波预处理后,所建模型效果最佳,其模型参数分别为: $R_c=0.79$ ,  $RMSEC=1.81$ ,  $R_p=0.87$ ,  $RMSEP=2.63$ 。“松花”花椰菜经过中值滤波预处理后模型参数优于滩羊熟肉模型的相应模型参数,说明对于“松花”花椰菜而言,使用中值滤波进行预处理后,模型更稳定、可靠性更高。但“雪白”花椰菜经过中值滤波后,建模效果略低于滩羊熟肉的建模效果,可见,经过中值滤波后,并未使“雪白”花椰菜模型获取更多的有效光谱信息,这可能是由于花椰菜的品种差异较大所导致的。综合比较后,采用经过中值滤波预处理后的花椰菜来进行后续研究。

## 2.4 模型优化

### 2.4.1 SPA 法提取特征波长

连续投影算法 SPA 可提高建模的速度和效率<sup>[20]</sup>。SPA 作为一种特征波长提取方法在近红外光谱检测中应用广泛。高明<sup>[21]</sup>在冬小麦叶片叶绿素含量可见/近红外光谱检测研究中使用 SPA 法对冬小麦的反射叶片光谱数据进行特征波长选择,显著提升了模型 (SPA-PLS) 的建模精度。

经 SPA 提取到的特征波长如图 2 所示。“雪白”花椰菜中,设置最大变量数为 13,当特征波长数为 12 时, RMSE 最小,最小值为 2.48。所提取的 12 个波长依次为 827、1069、968、760、532、2246、1692、1363、2250、612、1842、683 nm (图 2a);“松花”花椰菜中,设置最大变量数为 10,当特征波长数为 7 时, RMSE 最小,最小值为 2.88。所提取的 7 个特征波长依次为 725、1121、1022、1364、2202、796、682 nm (图 2b)。近红外光谱采集过程中,光源照射在样本表面,水分蒸发将导致某些吸收峰发生偏移。682 nm 和 683、612、725 nm 波段可能是水分特征波段 687、606、728 nm 发生位置偏移所致。另外,在花椰菜的采集、运输、保存过程中,样本表面受到的机械损伤、内部物质含量的降解也会导致某些吸收峰发生偏移。827 nm 处的波段可能与蛋白质特征波段 832 nm 的位置偏移有关

<sup>[18]</sup>。532、1363 和 1364、1842 nm 波段可能是蛋白质特征波段 526、1360、1834 nm 发生位置偏移所致。2236、2250 nm 波段可能是硬度值特征波段 2246、2265 nm 发生位置偏移所致。1692、1121、1022、1069 nm 波段可能是维生素特征波段 1698、1129、1030、1070 nm 发生位置偏移所致。968、760、725、2202、796 nm 附近的吸收峰可能与硫代葡萄糖苷分子结构中 O-H 二级倍频 (960 nm)、C-H 四级倍频 (762 nm)、O-H 三级倍频 (730 nm)、N-H 合频 (2200 nm)、N-H 三级倍频 (785 nm) 有关。

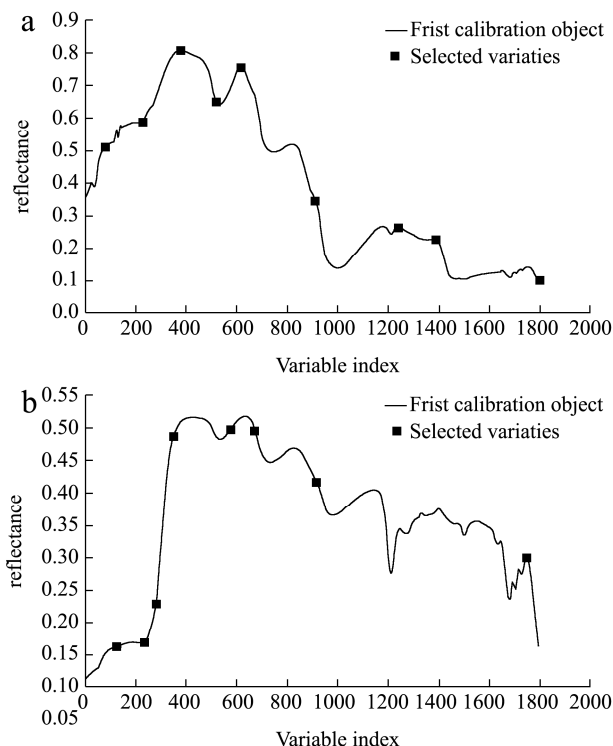


图 2 SPA 法提取“松花”、“雪白”花椰菜特征波段

Fig.2 Characteristic bands of "Songhua" and "Snow-white" cauliflower were extracted by SPA method

注: a: “雪白”花椰菜在 SPA 算法下选择的最优特征波长;  
b: “松花”花椰菜在 SPA 算法下选择的最优特征波长。

### 2.4.2 RC 法提取特征波长

回归系数法 RC<sup>[22]</sup>是将原始变量简化成少数变量,且新的特征变量能包含原始光谱数据的有效信息,从而产生比全波段变量更优的预测结果<sup>[22]</sup>。张筱蕾<sup>[23]</sup>利用 RC 提取得到的特征波长建立 PLS 模型后,波段数即自变量由全波段 1800 个降至 10 个,有效提高了模型运行速度,从而实现油菜养分及产量信息的快速获取。本实验利用经过中值滤波后的 PLSR 模型中的回归系数进行“松花”、“雪白”花椰菜的特征波长提取,结果如图 3 所示。其中,1912 nm 和 1064 nm 波段可能是水分特征波段 1900 nm 和 1067 nm 发生位置偏移所致,1661 nm 波段与可溶性固形物 (SSC) 含量特

征波段重合。759、959、1467 nm附近的特征吸收峰可能与硫代葡萄糖苷分子结构中C-H基团的四级倍频(762 nm)、O-H二级倍频(960 nm)、O-H一级倍频(1450 nm)有关。

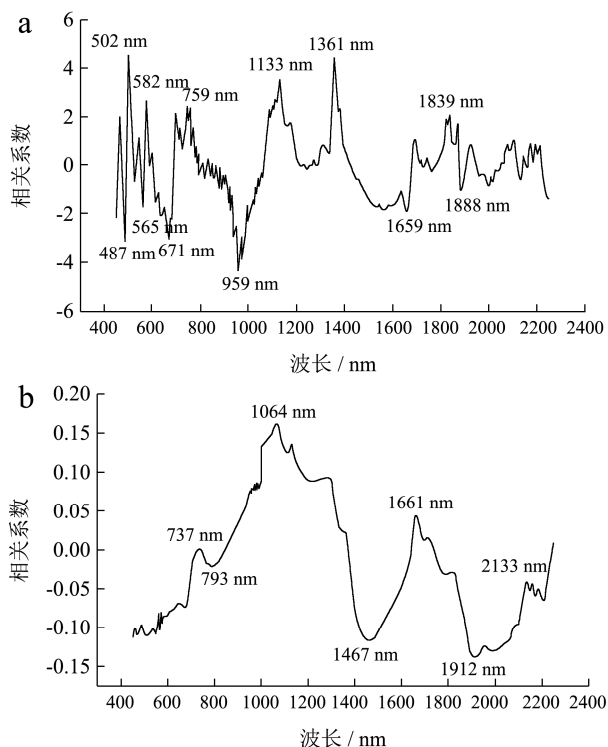


图3 RC法提取“松花”、“雪白”花椰菜特征波段

Fig.3 RC method was used to extract the characteristic bands of "Songhua" and "Snow-white" cauliflower

注: a: “雪白”花椰菜; b: “松花”花椰菜。

### 2.4.3 主成分提取

主成分分析 PCA 是一种常用的数据降维的方法,它的主要原理是使得提取出的新变量能够最大化的保留原始数据内在信息的同时也能够降低维度<sup>[24]</sup>。利用 PCA 进行降维后,得到 15 个主成分的累积贡献率,“松花”、“雪白”花椰菜结果如表 3 所示。由表 3 可知,“松花”、“雪白”花椰菜前 8 个主成分的累积贡献率已达到 99.88%和 99.95%,能解释其光谱数据中 99.88%和 99.95%的信息量。因此,选定前 8 个主成分进行后续的光谱建模。

### 2.5 硫代葡萄糖苷含量的预测

“松花”和“雪白”花椰菜原始光谱经过中值滤波后分别采取上述的三种模型优化算法得到的有效光谱数据建立 PLSR 预测模型。根据模型的相关系数 ( $R_c$ 、 $R_p$ ),校正均方根误差 (RMSEC) 和预测均方根误差 (RMSEP) 对模型的建模精度进行分析<sup>[25]</sup>,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,利用“松花”和“雪白”花椰菜的有效

光谱数据分别建立 MF-PCA-PLS 模型和 MF-RC-PLS 模型后,其 RMSEP 值最小(分别为 0.63 和 0.46),所以“松花”花椰菜经过 PCA 处理后所建模型的预测精度最高,“雪白”花椰菜经过 RC 特征波长提取后所建模型的预测精度最高,其  $R_p$  值分别达到 0.89、0.73。

表 3 前 15 个主成分累积贡献率

Table 3 Cumulative contribution rate of the first 15 principal components

No.of PC	Songhua cauliflower Percent/%	Snow-white cauliflower Percent/%
PC1/%	64.87	73.60
PC2/%	98.20	98.78
PC3/%	99.30	99.70
PC4/%	99.65	99.83
PC5/%	99.78	99.89
PC6/%	99.83	99.91
PC7/%	99.85	99.93
PC8/%	99.88	99.95
PC9/%	99.90	99.96
PC10/%	99.91	99.97
PC11/%	99.92	99.98
PC12/%	99.92	99.98
PC13/%	99.94	99.98
PC14/%	99.94	99.99
PC15/%	99.95	99.99

表 4 经过不同提取特征波长的 PLSR 模型结果

Table 4 results of PLSR model with different extracted characteristic wavelengths

方法	校正集		预测集		
	$R_c$	RMSEC/%	$R_p$	RMSEP/%	
松花	MF-SPA-PLS	0.88	1.28	0.86	0.69
	MF-RC-PLS	0.89	1.24	0.84	0.74
	MF-PCA-PLS	0.89	1.23	0.89	0.63
雪白	MF-SPA-PLS	0.85	1.41	0.70	0.48
	MF-RC-PLS	0.87	1.31	0.73	0.46
	MF-PCA-PLS	0.65	2.03	0.68	0.49

### 3 结论

本实验采用偏最小二乘回归法 (PLSR) 快速、无损地对花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量进行了预测,并结合最优处理方法和提取特征波长法建立了最佳预测模型。结果为“松花”花椰菜的光谱数据所建立的 MF-PCA-PLS 模型最佳,预测集模型参数  $R_p=0.89$ , RMSEP=0.63。“雪白”花椰菜的光谱数据所建立的 MF-RC-PLS 模型最优,预测集模型参数  $R_p=0.73$ ,

RMSEP=0.46。结果表明。样本硫苷的实际含量与预测值有很好的相关性,可以在一定程度上对不同品种花椰菜的硫苷含量进行预测。该实验为在线无损检测花椰菜内部品质提供了理论基础。

## 参考文献

- [1] Tao L, Wang X L, Guo M H. Analysis of genomic DNA methylation and gene expression in Chinese cabbage (*Brassicarapa L. ssp. pekinensis*) after continuous seedling breeding [J]. Russian Journal of Genetics, 2015, 51(8): 774-782
- [2] Omae N, Suzuki M, Ugaki M. The genome of the Cauliflower mosaic virus, a plant pararetrovirus, is highly methylated in the nucleus [J]. FEBS Letters, 2020, 594(12): 1974-1988
- [3] 雷建军,陈长明,陈国菊,等.硫苷及其生物合成分子生物学机理研究进展[J].华南农业大学学报,2019,40(5):59-70  
LEI Jian-jun, CHEN Chang-ming, CHEN Guo-ju, et al. Advances in molecular biology of glucosinolates and their biosynthesis [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 59-70
- [4] Kliebenstein D, Pedersen D, Barker B, et al. Comparative analysis of quantitative trait loci controlling glucosinolates, myristic acid and insect resistance in *Arabidopsis thaliana* [J]. Genetics, 2002, 161(1): 325-332
- [5] Hashem F A, Saleh M M. Antimicrobial components of some Cruciferae plants (*Diplotaxis harra* Forsk. and *Eruccaria microcarpa* Boiss.) [J]. Phytotherapy Research, 1999, 13(4): 329-332
- [6] Lin C M, Kim J, Du W X, et al. Bactericidal activity of isothiocyanate against pathogens on fresh produce [J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(2): 25-30
- [7] Siemens D H, Mitchell-Olds T. Glucosinolates and herbivory by specialists (Coleoptera: *Chrysomelidae*, Lepidoptera: *Plutellidae*): consequences of concentration and induced resistance [J]. Environ Entomol, 1996, 25(16): 1344-1353
- [8] 林海鸣,郑晓鹤,周军,等.硫代葡萄糖苷及异硫氰酸酯的抗癌和抗氧化作用进展[J].中国现代应用药学,2015,32(4): 513-520  
LIN Hai-ming, ZHENG Xiao-he, ZHOU Jun, et al. Advances in anticancer and antioxidant effects of glucosinolates and isothiocyanates [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2015, 32(4): 513-520
- [9] Wei L, Liu C, Zheng H, et al. Melatonin treatment affects the glucoraphanin-sulforaphane system in postharvest fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea L.*) [J]. Food Chemistry, 2020, 307(4): 125-562
- [10] Lara L M, Wilson S A, Chen P, et al. The effects of infrared treatment on physicochemical characteristics of vegetable soybean [J]. Heliyon, 2019, 5(1): 8-16
- [11] Jahromi K E, Pan Q, Khodabakhsh A, et al. A broadband mid-infrared trace gas sensor using super continuum light source: applications for real-time quality control for fruit storage [J]. Sensors, 2019, 19(10): 325-340
- [12] Chapman J, Elbourne A, Truong V K, et al. Shining light into meat - a review on the recent advances *in vivo* and carcass applications of near infrared spectroscopy [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(3): 935-941
- [13] Ma T, Inagaki T, Tsuchikawa S. Three-dimensional grain angle measurement of softwood (*Hinoki cypress*) using near infrared spatially and spectrally resolved imaging (NIR-SSRI) [J]. Holzforschung, 2019, 73(9): 817-826
- [14] Sahamishirazi S, Zikeli S, Fleck M, et al. Development of a near-infrared spectroscopy method (NIRS) for fast analysis of total, indolic, aliphatic and individual glucosinolates in new bred open pollinating genotypes of broccoli (*Botrytisvar. italica*) [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 272-277
- [15] 顾敏.基于高光谱成像的西兰花农药残留无损检测方法研究[D].杭州:浙江理工大学,2017  
GU Min. Study on nondestructive detection method of pesticide residues in broccoli based on hyperspectral imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2017
- [16] 常静,唐延林,徐锦.杜仲松脂醇二葡萄糖苷含量的近红外光谱检测研究[J].计算机与应用化学,2001,28(3):288-290  
CHANG Jing, TANG Yan-lin, XU Jin. Determination of pinosresinol diglucoside in *Eucommia ulmoides* Oliv. by near infrared spectroscopy [J]. Computer and Applied Chemistry, 2001, 28(3): 288-290
- [17] 郭泽慧.萝卜硫苷组分近红外定标模型的构建[D].杭州:浙江农林大学,2007  
GUO Ze-hui. Construction of near infrared calibration model for glucosinolates in radish [D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2007
- [18] 薛建新.基于光谱及成像技术的鲜枣品质检测研究[D].晋中:山西农业大学,2016  
XUE Jian-xin. Study on quality detection of fresh jujube based on spectral and imaging technology [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016