

黄璐,王富豪,郭鲁平,等. 基于近红外光谱法的绿豆淀粉和蛋白质无损快速检测[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):187-191.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.028

基于近红外光谱法的绿豆淀粉和蛋白质无损快速检测

黄璐¹,王富豪²,郭鲁平³,张晓燕¹,袁星星¹,薛晨晨¹,陈新¹

(1. 江苏省农业科学院经济作物研究所,江苏南京 210014; 2. 南京财经大学食品科学与工程学院,江苏南京 210095;
3. 江苏大学食品与生物工程学院,江苏镇江 212013)

摘要:为实现绿豆籽粒淀粉和蛋白质含量的无损快速检测,满足高淀粉、高蛋白绿豆的筛选、选育等需要,选用我国不同地区 100 份绿豆种质资源为材料,采用酸水解法和凯氏定氮法分别测定淀粉和蛋白含量,样品中淀粉含量范围为 40.88% ~ 53.62%,蛋白含量范围为 20.17% ~ 27.38%,化学测量值数据分布广。应用近红外光谱技术建立绿豆中主要营养物质的快速检测方法。通过采集样品的近红外光谱,结合化学方法所得数据建立近红外定量模型。结果表明,采用无光谱预处理可以得到最优的淀粉数学模型,内部交叉验证决定系数(r^2)和交叉验证均方根误差(RMSECV)分别为 0.926 9 和 0.658。采用一阶导数 + MSC 处理得到最优的蛋白模型,内部交叉验证决定系数 r^2 和 RMSECV 分别为 0.9341 和 0.384。淀粉和蛋白外部验证决定系数 r^2 分别为 0.935 1 和 0.921 2,模型预测效果较好。建立的近红外模型可用于绿豆籽粒淀粉和蛋白质含量的无损快速检测,模型涵盖了绿豆种质淀粉和蛋白质含量的广泛检测分布范围,可实现绿豆资源的快速评价,提高育种效率。

关键词:绿豆;淀粉;蛋白质;无损快速检测;近红外光谱

中图分类号:S522.01;S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)19-0187-05

绿豆(*Vigna radiata* L.)又称青小豆、植豆,起源于亚洲东南部^[1]。绿豆是我国主要的杂粮作物,其营养和经济价值较高。在我国栽培历史长达 2 000 多年^[2],主产区在东北、长江下游及黄淮河流域,其适应性广、抗逆性强的特点,成为产区农民致富的主要经济作物^[3-4]。绿豆具有清热、解毒等功效,经加工可制成具有药食同源功效的食材,如绿豆汤、绿豆糕、绿豆饼等,其味道香甜、口感松软,老少皆宜^[5-6],同时还具有解毒、降低胆固醇、抗肿瘤和抗炎等生物学功能^[7-9]。绿豆营养丰富,最主要的成分是淀粉,籽粒中淀粉含量约为 50%,主要分为抗性淀粉和非抗性淀粉。其中,抗性淀粉可为人类带来理想的生理健康益处,如降血糖、降低胆固醇和甘油三酯等作用。绿豆淀粉具有热黏度高、易回生

等特性,常被用来制做粉丝、粉皮等^[10-11]。绿豆中蛋白质含量(25% ~ 28%)仅次于淀粉^[12-13],高于其他常见谷物,是小麦面粉的 2.3 倍、玉米面的 3.0 倍、大米的 3.2 倍、小米的 2.7 倍,且绿豆蛋白富含赖氨酸、亮氨酸和苏氨酸 3 种必需氨基酸^[3,5],尤其是赖氨酸水平接近鸡蛋,是优质的植物蛋白来源^[14]。

绿豆中淀粉含量的测定通常采用酶水解法和酸水解法^[15],蛋白质可通过凯氏定氮法、分光光度法或燃烧法^[16]进行检测。常规化学分析方法用于农产品和食品品质检测通常费时、费力且成本高。近红外光(NIR)是一种电磁波,其波长介于可见光(VIS)与中红外光(IR)之间,近红外谱区为 780 ~ 2 500 nm,对 C—H、N—H、O—H 等基团的振动有强烈的感应^[17]。近红外光谱技术是基于谱区内所包含的物质信息,快速对有机物质进行定性和定量的物理检测技术。因其操作简便、快捷、成本低、无试剂污染等特点而被广泛研究和应用于农业、医药、石油化工等各个领域^[18-21]。Plans 等采用近红外光谱技术对菜豆皮营养品质性状进行模型建立,通过模型准确预测豆皮中的膳食纤维、糖醛酸、灰分、钙和镁的含量,大大缩短了实验时间,为育种和品质质量提供了重要的检测工具^[22]。Wang 等采用近红外光谱建立了可快速而准确地预测蚕豆淀粉、蛋白

收稿日期:2021-12-22

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(20)2015];现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-08-G15)。

作者简介:黄璐(1989—),女,江苏泰州人,博士,助理研究员,主要从事豆类功能育种与综合利用研究。E-mail:huanglu@jaas.ac.cn。

通信作者:陈新,博士,研究员,主要从事豆类作物遗传育种研究, E-mail:cx@jaas.ac.cn;薛晨晨,博士,副研究员,主要从事豆类功能育种与综合利用研究, E-mail:xuecc@jaas.ac.cn。

质、油分和多酚含量的模型^[23]。此外,近红外技术已广泛应用于大豆^[24]、油菜^[25]、大麦^[26]等作物的品质育种中。在美国,近红外被官方认可用于商业贸易中分析大豆中主要成分^[27],但对绿豆主要化学成分的预测缺少商业化模型。

本研究基于笔者所在课题组保存的大量绿豆资源,参考多年种植的数据报告(在省内多点开展种植和农艺性状调查),筛选出 100 份绿豆核心资源作为试验材料,利用化学方法测定绿豆淀粉(酸水解法)和蛋白质(凯氏定氮法)含量,基于近红外技术建立快速检测模型,用于绿豆育种中蛋白质和淀粉含量的无损检测,以期为绿豆资源的进一步快速测定和利用提供技术支撑,实现绿豆资源的快速评价,提高育种效率。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器设备

试验材料:供试的绿豆品种(系)由笔者所在实验室收集并保存,挑选了品质、产地、色泽存在较大差异的 100 份资源于 2020 年 6 月种植于江苏省农业科学院六合实验基地,2020 年 9 月收获。2020 年 10 月至 2021 年 5 月期间进行绿豆淀粉和蛋白质无损快速检测研究,试验地点为江苏省农业科学院经济作物研究所。本试验所需试剂均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司。

仪器设备:Matrix-I 傅立叶红外变换光谱仪,购自德国 BRUKER 公司;K-370 全自动凯氏定氮仪,购自瑞士 BUCHI 公司;Grinder-96 高通量组织研磨仪,购自骋克仪器(上海)有限公司;Spark 10M 纯水仪,购自四川优普超纯有限公司;AR223CN 电子天平,购自奥豪斯仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 绿豆淀粉及蛋白含量测定 淀粉含量根据 GB 5009.9—2016 中酸水解方法^[15]进行测定,蛋白含量根据凯氏定氮法(GB 5009.5—2016)^[16]测定。

1.2.2 样品近红外光谱数据的采集 对 100 份绿豆样品在波长 800~2 500 nm(4 000~12 000 cm⁻¹)范围内进行光谱采集,扫描样品前,将近红外光谱仪预热 2 h,以仪器内置参比作为背景校正。开启旋转样品台,将绿豆样品放入旋转样品池,进行绿豆光谱扫描。为降低由取样所造成的光谱漂移,减小误差,每份材料重复装样 3 次进行扫描,装样时保持样品的装载量、表面平整和实密程度一致。样品扫描温

度为 25 ℃,每个样品扫描 64 次,分辨率为 8 cm⁻¹。

1.2.3 近红外光谱分析模型的建立 根据 3:1 的比例,将 100 份资源分为校正集和验证集,75 份样用于模型建立,25 份样用于模型精度检验。采用偏最小二乘法(PLS)将化学方法所得的化学值与光谱数据相关联,建立绿豆淀粉和蛋白检测模型。利用不同的预处理方法对数据优化,模型的预测效果根据交叉验证决定系数 r^2 、交叉验证均方根误差 RMSECV、校正决定系数 r^2 、校正均方根误差 RMSEE、外部验证决定系数 r^2 和预测均方根误差 RMSEP 等指标确定最优模型。

1.3 数据分析

绿豆淀粉和蛋白含量测定单项试验重复 3 次,结果表示为“平均值±标准差”。采用 OPUS 6.5 软件建立近红外光谱与标准化学值之间的数学模型,并通过预测集对近红外模型的准确度进行评价,同时采用 OriginPro 8 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 绿豆近红外光谱图

100 份整粒绿豆样品的近红外原始光谱图,见图 1。由图 1 可知,绿豆在波段 12 000~4 000 cm⁻¹ 范围内存在多个吸收峰,不同样品近红外光谱图变化趋势总体一致,但在近红外的吸光度有较大差异,有利于建模。近红外谱区主要包含 2 000 cm⁻¹ 以上的基团信息,可检测样品中的 C—H、N—H、O—H、S—H 等基团振动及光谱叠加吸收,这些基团是有机物的重要组成元素,如淀粉和蛋白质。

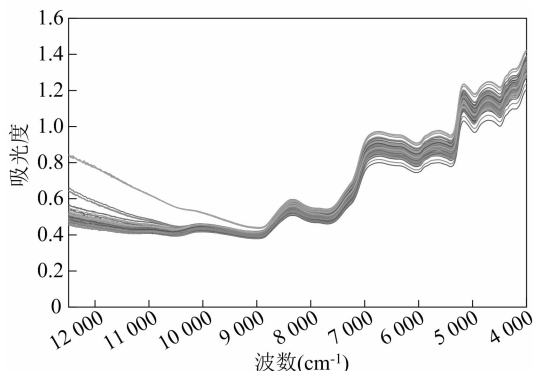


图1 绿豆近红外光谱图

2.2 绿豆淀粉和蛋白质化学分析结果

采用传统化学分析方法对 100 份绿豆中淀粉(酸水解法)和蛋白质(凯氏定氮法)含量进行分析测定,由表 1、表 2 可知,样品中淀粉含量范围为 40.88%~53.62%,蛋白质含量范围为 20.17%~

表 1 绿豆淀粉和蛋白质含量

编号	蛋白质含量 (%)	淀粉含量 (%)	编号	蛋白质含量 (%)	淀粉含量 (%)
M1	27.38 ± 0.24	44.28 ± 0.54	M51	24.28 ± 0.15	44.70 ± 0.16
M2	24.80 ± 0.46	40.88 ± 0.94	M52	22.12 ± 0.23	45.76 ± 0.47
M3	23.03 ± 0.17	49.93 ± 0.78	M53	21.48 ± 0.30	46.80 ± 0.47
M4	21.62 ± 0.27	47.88 ± 0.55	M54	23.53 ± 0.41	47.70 ± 1.28
M5	27.08 ± 0.14	48.05 ± 0.60	M55	22.24 ± 0.31	44.29 ± 0.33
M6	24.02 ± 0.25	47.76 ± 0.62	M56	23.40 ± 0.25	45.09 ± 0.74
M7	23.72 ± 0.45	47.73 ± 0.70	M57	21.28 ± 0.17	47.33 ± 0.49
M8	24.41 ± 0.11	49.21 ± 0.66	M58	24.03 ± 0.14	45.97 ± 0.33
M9	22.81 ± 0.42	49.89 ± 1.16	M59	23.64 ± 0.29	42.08 ± 0.56
M10	21.17 ± 0.28	51.89 ± 1.37	M60	23.72 ± 0.42	45.18 ± 1.01
M11	27.34 ± 0.07	47.70 ± 1.17	M61	24.09 ± 0.59	44.92 ± 0.49
M12	24.42 ± 0.47	49.71 ± 0.73	M62	23.46 ± 0.43	47.75 ± 0.48
M13	23.89 ± 0.05	51.01 ± 2.28	M63	22.60 ± 0.41	45.96 ± 0.18
M14	24.57 ± 0.40	53.62 ± 1.14	M64	24.68 ± 0.21	47.28 ± 0.39
M15	24.80 ± 0.16	44.55 ± 0.59	M65	23.00 ± 0.48	47.08 ± 0.76
M16	20.58 ± 0.16	53.52 ± 0.37	M66	23.08 ± 0.35	43.53 ± 0.84
M17	20.82 ± 0.13	52.51 ± 1.62	M67	25.67 ± 0.27	44.63 ± 0.81
M18	23.18 ± 0.13	48.18 ± 0.64	M68	21.26 ± 0.23	47.93 ± 0.26
M19	23.85 ± 0.07	50.69 ± 0.76	M69	21.68 ± 0.30	44.47 ± 0.42
M20	24.80 ± 0.38	50.70 ± 0.79	M70	23.19 ± 0.22	48.80 ± 2.48
M21	22.88 ± 0.23	47.47 ± 0.66	M71	23.19 ± 0.34	45.40 ± 0.41
M22	22.79 ± 0.16	53.45 ± 0.68	M72	23.11 ± 0.42	44.31 ± 0.78
M23	20.89 ± 0.10	52.28 ± 1.14	M73	21.11 ± 0.65	44.53 ± 0.40
M24	23.20 ± 0.43	50.18 ± 0.75	M74	23.50 ± 0.40	43.49 ± 0.36
M25	21.90 ± 0.23	50.56 ± 0.03	M75	21.64 ± 0.23	46.71 ± 0.57
M26	21.10 ± 0.45	51.00 ± 0.81	M76	23.48 ± 0.20	48.03 ± 1.22
M27	21.58 ± 0.21	52.73 ± 0.56	M77	22.02 ± 0.33	47.54 ± 0.51
M28	23.71 ± 0.16	46.08 ± 0.52	M78	22.18 ± 0.48	45.61 ± 0.15
M29	24.14 ± 0.20	50.89 ± 0.78	M79	23.27 ± 0.19	46.82 ± 1.24
M30	23.89 ± 0.32	49.63 ± 0.52	M80	22.81 ± 0.01	44.36 ± 0.52
M31	21.90 ± 0.26	49.52 ± 0.60	M81	23.11 ± 0.52	47.10 ± 0.75
M32	22.82 ± 0.78	52.01 ± 0.44	M82	23.59 ± 0.48	47.43 ± 1.08
M33	21.92 ± 0.24	51.76 ± 0.09	M83	22.32 ± 0.08	47.08 ± 0.51
M34	20.17 ± 0.34	49.29 ± 0.64	M84	24.13 ± 0.23	45.60 ± 1.16
M35	24.77 ± 0.18	46.65 ± 0.59	M85	24.48 ± 0.25	46.94 ± 0.26
M36	21.81 ± 0.06	48.49 ± 0.23	M86	24.30 ± 0.22	47.50 ± 0.47
M37	24.88 ± 0.43	47.43 ± 0.35	M87	25.41 ± 0.39	45.93 ± 0.30
M38	21.12 ± 0.15	51.95 ± 0.50	M88	23.73 ± 0.23	48.02 ± 0.88
M39	22.93 ± 0.22	46.26 ± 0.41	M89	23.59 ± 0.26	46.94 ± 0.14
M40	24.42 ± 0.11	45.39 ± 0.44	M90	24.61 ± 0.41	46.53 ± 1.14
M41	23.48 ± 0.15	48.96 ± 0.39	M91	24.22 ± 0.08	48.57 ± 0.25
M42	24.58 ± 0.50	45.13 ± 0.63	M92	22.81 ± 0.39	44.29 ± 0.47
M43	26.97 ± 0.21	44.45 ± 0.15	M93	22.53 ± 0.19	47.87 ± 0.55
M44	26.52 ± 0.12	43.65 ± 0.51	M94	22.39 ± 0.23	46.18 ± 0.46
M45	23.10 ± 0.24	48.26 ± 0.41	M95	24.21 ± 0.30	46.64 ± 0.46
M46	23.66 ± 0.23	44.96 ± 0.28	M96	21.82 ± 0.24	48.29 ± 1.26
M47	24.30 ± 0.24	44.83 ± 0.22	M97	23.38 ± 0.32	47.81 ± 0.61
M48	23.84 ± 0.34	43.64 ± 0.25	M98	23.22 ± 0.19	46.88 ± 0.18
M49	23.87 ± 0.20	44.76 ± 0.44	M99	24.20 ± 0.32	44.64 ± 1.45
M50	24.72 ± 0.18	43.53 ± 1.72	M100	22.91 ± 0.11	47.00 ± 0.60

表 2 绿豆淀粉和蛋白质化学含量分布

指标	最小值 (%)	最大值 (%)	差值 (%)	平均值 (%)	标准差 (%)
淀粉含量	40.88	53.62	12.74	47.36	2.69
蛋白质含量	20.17	27.38	7.21	23.36	1.45

27.38%, 淀粉和蛋白质含量的平均值分别为 47.36% 和 23.36%。本研究所用的绿豆资源, 是通过比较品质、产地、色泽等相关性状, 挑选了存在较大差异的 100 份资源。淀粉和蛋白的化学测定结果与前人相关报道相比, 有更广泛的区间, 涵盖了绿豆种质淀粉和蛋白质含量广泛的分布范围^[12,28]。品种的多样性导致蛋白质和淀粉含量的差异性, 数据具有较宽的变幅, 适合用于近红外分析模型的建立, 有较好的适用性。

2.3 模型的建立与优化

使用 OPUS 软件, 通过偏最小二乘法 (PLS) 统计方法, 考察了不同光谱预处理和谱区范围对近红外模型的影响。通过选择信息相关性最大的谱区, 选择减少光谱基线偏移、漂移、增加信息量、稳定可靠的光谱预处理方法, 对于绿豆样品近红外数学模型的精确度是非常重要的。利用软件的功能和大量的谱区组合选择, 优化出所需的最佳光谱预处理方法和谱区范围, 从对比验证的统计结果中选择最优的光谱预处理方法和谱区范围用于建立模型 (表 3)。对于绿豆淀粉, 采用无光谱预处理, 谱区范围 11 772.2 ~ 7 498.4、6 102.1 ~ 4 597.8 cm^{-1} 效果最佳。对于绿豆蛋白, 采用一阶导数 + MSC, 谱区范围 9 403.9 ~ 6 094.4、4 605.5 ~ 4 242.9 cm^{-1} 光谱预处理效果最好。由图 2 可知, 为通过一阶导数 + MSC 方式处理后的近红外光谱, 与蛋白质相关信息集中在 9 403.9 ~ 6 094.4 和 4 605.5 ~ 4 242.9 cm^{-1} 波数, 表明绿豆样品间的差异主要来源于此范围内。

通过交叉验证, 比较不同光谱预处理和谱区范围组合的交叉验证决定系数 r^2 、交叉验证均方根误差 RMSECV 等参数, 确定绿豆淀粉和蛋白最优模型。由图 3 和表 3 可知, 对于绿豆淀粉来说, 在无光谱预处理条件下, 交叉验证决定系数 r^2 为 0.926 9, 交叉验证均方根误差 RMSECV 为 0.658, 模型效果最佳。对于绿豆蛋白质来说, 采用一阶导数 + MSC 建立的模型效果最佳, 交叉验证决定系数 r^2 为 0.934 1, 交叉验证均方根误差 RMSECV 为 0.384。不同光谱预处理和谱区范围对不同营养成分的信息贡献不同, 不同成分近红外模型的最佳光谱预处

表 3 绿豆淀粉和蛋白质模型优化

化学指标	预处理方法	谱区范围 (cm ⁻¹)	决定系数 r^2	RMSECV
淀粉	无光谱预处理	11 772.2 ~ 7 498.4, 6 102.1 ~ 4 597.8	0.926 9	0.658
蛋白质	一阶导数 + MSC	9 403.9 ~ 6 094.4, 4 605.5 ~ 4 242.9	0.934 1	0.384

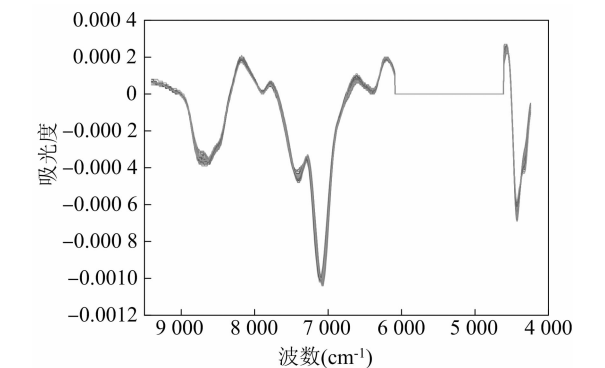
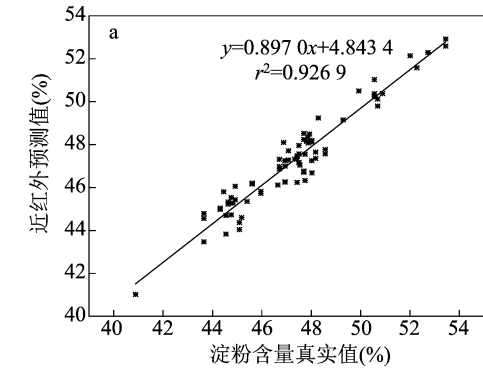


图2 一阶导数 +MSC 处理的近红外图谱

理方法和谱区范围也不同,每一种营养成分近红外模型的建立都需要单独分析和单独优化,才能建立合适的近红外模型。



2.4 绿豆淀粉和蛋白质模型外部验证与评价

本研究选用的 100 份绿豆资源中 75 份样品为校正集,25 份为验证集^[29]。为验证模型的准确性,采用未用于建模的、完全独立的且化学值已知的验证集中的 25 份资源对所建模型的精确度进行评价。由图 4 可知,剩余 25 份绿豆种质资源对预测模型进行外部验证的散点图,发现淀粉外部验证决定系数 r^2 为 0.935 1(图 4-a),预测均方根误差 RMSEP 为 0.743,蛋白外部验证决定系数 r^2 为 0.921 2(图 4-b),预测均方根误差 RMSEP 为 0.31,模型预测效果较好,近红外光谱预测值与真实数值基本一致,满足检测结果,能满足近红外用于绿豆淀粉和蛋白质的无损快速检测。

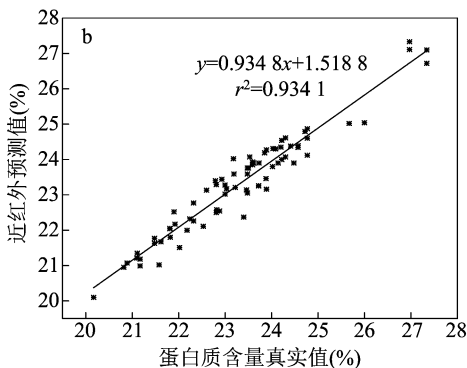


图3 绿豆淀粉(a)和蛋白质(b)交叉检验模型

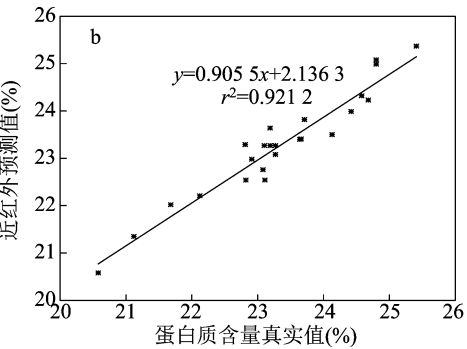
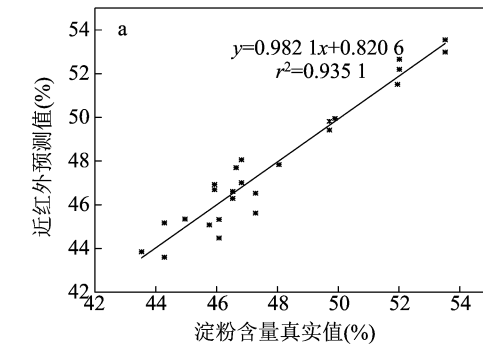


图4 绿豆淀粉(a)和蛋白质(b)模型外部验证

3 讨论与结论

淀粉和蛋白质是绿豆中主要的营养物质,分别占 40.88% ~ 53.62% 和 20.17% ~ 27.38%,传统化学分析方法是用来测定绿豆淀粉和蛋白的常用方

法,但化学分析方法通常较为耗时,需要昂贵的化学试剂、专门的检测设备和熟练的分析人员^[30]。本研究选用 100 份绿豆资源用于近红外数学模型的建立,按 3 : 1 比例划分为校正集(75 份样品)和验证集(25 份样品),通过不同的光谱预处理方法对淀粉

和蛋白质的数学模型进行优化。采用无光谱预处理和谱区范围 11 772. 2 ~ 7 498. 4、6 102. 1 ~ 4 597. 8 cm^{-1} 得到最优的淀粉数学模型,交叉验证均方根误差为 0. 658,交叉验证决定系数为 0. 926 9。采用一阶导数 + MSC 预处理和谱区范围 9 403. 9 ~ 6 094. 4、4 605. 5 ~ 4 242. 9 cm^{-1} 得到最优的蛋白质数学模型,交叉验证均方根误差为 0. 384,交叉验证决定系数为 0. 934 1。通过外部检验方法对绿豆淀粉和蛋白质的光谱模型进行检验,淀粉和蛋白外部验证决定系数 r^2 分别为 0. 935 1 和 0. 921 2,模型预测效果较好。模型涵盖了绿豆种质淀粉和蛋白质含量的广泛检测分布范围,有较好的适用性。绿豆淀粉和蛋白质近红外模型的建立可快速完成对育种材料的品质测定与分析,极大地缩短检测时间,减小了工作量,且结果准确、可靠,可实现对绿豆资源的快速鉴定与评价,对提高育种效率具有一定意义。

参考文献:

- [1] 王丽侠,程须珍,王素华. 绿豆种质资源、育种及遗传研究进展[J]. 中国农业科学,2009,42(5):1519–1527.
- [2] Du M X, Xie J H, Gong B, et al. Extraction, physicochemical characteristics and functional properties of Mung bean protein[J]. Food Hydrocolloids,2018,76:131–140.
- [3] 陈 新,袁星星,陈华涛,等. 绿豆研究最新进展及未来发展方向[J]. 金陵科技学院学报,2010,26(2):59–68.
- [4] 孙壮林,侯跃文,刘建英,等. 绿豆种植史考略[J]. 中国农史,1991,10(1):48–52.
- [5] 张 舒,王长远,盛亚男,等. 加工方式对绿豆蛋白亚基和功能性质的影响[J]. 食品科学,2019,40(19):113–119.
- [6] 贾鹏禹,孙 蕊,赵晶晶,等. 介质阻挡放电氦等离子体-气相色谱测定绿豆中脂肪酸含量[J]. 食品科学,2019,40(8):119–123.
- [7] Dahiya P K, Linnemann A R, van Boekel M A J S, et al. Mung bean: technological and nutritional potential[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2015,55(5):670–688.
- [8] Kudre T G, Benjakul S, Kishimura H. Comparative study on chemical compositions and properties of protein isolates from mung bean, black bean and Bambara groundnut[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2013,93(10):2429–2436.
- [9] Reddy N, Yang Y Q. Potential of plant proteins for medical applications[J]. Trends in Biotechnology,2011,29(10):490–498.
- [10] 唐敏敏,洪 雁,顾正彪,等. 黄原胶对绿豆淀粉糊化和流变特性的影响[J]. 食品科学,2013,34(21):42–46.
- [11] 刘婷婷,吴玉莹,秦宇婷,等. 绿豆淀粉工艺废水中蛋白质的功能性质[J]. 食品科学,2017,38(5):104–110.
- [12] 修 琳,张 森,许秀颖,等. 绿豆蛋白对荞麦淀粉糊化和流变特性的影响[J]. 食品科学,2020,41(16):57–61.
- [13] Khaket T P, Dhanda S, Jodha D, et al. Purification and biochemical characterization of dipeptidyl peptidase – II (DPP7) homologue from germinated *Vigna radiata* seeds[J]. Bioorganic Chemistry,2015,63:132–141.
- [14] Siemensma A D, Weijer W J, Bak H J. The importance of peptide lengths in hypoallergenic infant formulae[J]. Trends in Food Science & Technology,1993,4(1):16–21.
- [15] 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定:GB 5009.9—2016[S].
- [16] 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S].
- [17] 曹晓宁,田 翔,赵小娟,等. 基于近红外光谱法快速检测藜麦淀粉含量[J]. 江苏农业科学,2017,45(4):147–149.
- [18] Guillemain A, Dégardin K, Roggo Y. Performance of NIR handheld spectrometers for the detection of counterfeit tablets[J]. Talanta,2017,165:632–640.
- [19] Malegori C, Nascimento Marques E J, de Freitas S T, et al. Comparing the analytical performances of Micro – NIR and FT – NIR spectrometers in the evaluation of acerola fruit quality, using PLS and SVM regression algorithms[J]. Talanta,2017,165:112–116.
- [20] Forina M, Oliveri P, Bagnasco L, et al. Artificial nose, NIR and UV – visible spectroscopy for the characterisation of the PDO Chianti Classico olive oil[J]. Talanta,2015,144:1070–1078.
- [21] 卢 洁,田 婧,梁振华,等. 近红外光谱法快速测定香菇总糖含量[J]. 食品科学,2021,42(12):189–194.
- [22] Plans M, Simó J, Casañas F, et al. Near – infrared spectroscopy analysis of seed Coats of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): a potential tool for breeding and quality evaluation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2012,60(3):706–712.
- [23] Wang J J, Liu H, Ren G X. Near – infrared spectroscopy (NIRS) evaluation and regional analysis of Chinese *Faba* bean (*Vicia faba* L.)[J]. The Crop Journal,2014,2(1):28–37.
- [24] Pazdernik D L, Killam A S, Orf J H. Analysis of amino and fatty acid composition in soybean seed, using near infrared reflectance spectroscopy[J]. Agronomy Journal,1997,89(4):679–685.
- [25] 高建芹,张洁夫,浦惠明,等. 近红外光谱法在测定油菜籽含油量及脂肪酸组成中的应用[J]. 江苏农业学报,2007,23(3):189–195.
- [26] Fontaine J, Schirmer B, Hörr J. Near – infrared reflectance spectroscopy (NIRS) enables the fast and accurate prediction of essential amino acid contents. 2. Results for wheat, barley, corn, Triticale, wheat bran/middlings, rice bran, and Sorghum [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2002,50(14):3902–3911.
- [27] Sato T, Eguichi K, Hatano T, et al. Use of near – infrared reflectance spectroscopy for the estimation of the isoflavone contents of soybean seeds[J]. Plant Production Science,2008,11(4):481–486.
- [28] 曹志敏,张志肖,王 彦,等. 近红外光谱法非破坏性测定绿豆籽粒粗蛋白质含量的研究[J]. 河北农业科学,2016,20(5):104–108.
- [29] 王胜鹏,龚自明,郑鹏程,等. 青砖茶品质近红外特征光谱筛选及预测模型建立[J]. 食品科学,2020,41(18):283–287.
- [30] 乔春艳,张雪茹,郑卫民,等. 基于近红外光谱技术对市售羊奶粉品质指标独立模型与通用模型探究[J]. 食品工业科技,2021,42(22):297–305.