近红外漫反射光谱法快速检测谷子蛋白质和淀粉含量

田 翔[1,2,3]，刘思辰[1,2,3]，王海岗[1,2,3]，秦慧彬[1,2,3]，乔治军[2,3,*]
（1.山西省农业科学院农作物品种资源研究所，山西 太原 030031；2.农业部黄土高原作物基因与种质创制重点实验室，山西 太原 030031；3.杂粮种质资源发掘与遗传改良山西省重点实验室，山西 太原 030031）

摘 要：建立近红外漫反射光谱法测定谷子中的蛋白质和淀粉含量，提供一种快速、简便、无损的分析方法进行谷子品种资源鉴定和筛选。以191 份山西核心谷子种质为材料，采用近红外漫反射光谱法建立谷子蛋白质和淀粉含量的快速检测模型。结果表明，采用一阶导数＋矢量归一化光谱预处理，分别建立谷子蛋白质和淀粉含量的校正模型，模型的校正决定系数（R^2_{cal}）分别为0.977 0和0.907 3，交叉验证均方根误差分别为0.203%和0.466%，外部验证决定系数（R^2_{val}）分别为0.989 6和0.977 2，预测均方根误差分别为0.225%和0.368%。对于谷子蛋白质和淀粉的预测，化学法和近红外仪器法测定间无显著差异，近红外测定结果是准确可靠的。说明采用近红外漫反射光谱分析技术能够满足对谷子蛋白质和淀粉含量的检测。

关键词：谷子；近红外漫反射光谱；蛋白质；淀粉

Application of Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy in Rapid Detection of Crude Protein and Starch in Foxtail Millet

TIAN Xiang[1,2,3], LIU Sichen[1,2,3], WANG Haigang[1,2,3], QIN Huibin[1,2,3], QIAO Zhijun[2,3,*]
(1. Institute of Crop Germplasm Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China;
2. Key Laboratory of Crop Gene Resources & Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Taiyuan 030031, China;
3. Shanxi Key Laboratory of Genetic Resources and Genetic Improvement of Minor Crops, Taiyuan 030031, China)

Abstract: This study aimed to establish a near infrared (NIR) diffuse reflectance spectrometry method for measuring the contents of crude protein and starch in foxtail millet for providing a fast, simple and non-destructive analytical method for the identification and screening of foxtail millet germplasm resources. For this purpose, a total of 191 samples of a foxtail millet core collection in Shanxi province were measured using NIR diffuse reflectance spectroscopy. The results showed that with the spectral preprocessing method of first derivative + vector normalization, calibration models were established to predict the contents of crude protein and starch in foxtail millet. The corresponding coefficients of determination for calibration (R^2_{cal}) were 0.977 0 and 0.907 3, and the root mean square errors of cross-validation (RMSECV) were 0.203% and 0.466%, the coefficients of determination for external validation (R^2_{val}) were 0.989 6 and 0.977 2, and the root mean square errors of prediction (RMSEP) were 0.225% and 0.368%, respectively. For the detection of crude protein and starch foxtail millet, no significant differences were seen between chemical analysis and NIR measurement, but the results obtained with NIR measurement were more accurate and reliable. NIR diffuse reflectance spectrometry technology can be useful for the detection of crude protein and starch in foxtail millet.

Key words: foxtail millet; near infrared (NIR) diffuse reflectance spectrometry; crude protein; starch
DOI:10.7506/spkx1002-6630-201716022
中图分类号：S515 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2017）16-0140-05
收稿日期：2016-06-22
基金项目：国家谷子高粱产业技术体系谷子糜子生理岗位项目（CARS-06-13.5-A16）；
国家农作物种质资源平台山西作物子平台项目（NICGR2016-02）；
山西省农作物种质资源鉴定评价研究项目（2017ZZCX-17）；山西省省级财政支农专项（2016ZYZX41）
作者简介：田翔（1982—），女，助理研究员，硕士，研究方向为农作物品质分析。E-mail：704193015@qq.com
*通信作者：乔治军（1964—），男，研究员，学士，研究方向为糜子栽培和资源。E-mail：nkypzs@126.com.cn

引文格式：
田翔, 刘思辰, 王海岗, 等. 近红外漫反射光谱法快速检测谷子蛋白质和淀粉含量[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 140-144. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201716022. http://www.spkx.net.cn
TIAN Xiang, LIU Sichen, WANG Haigang, et al. Application of near infrared diffuse reflectance spectroscopy in rapid detection of crude protein and starch in foxtail millet[J]. Food Science, 2017, 38(16): 140-144. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201716022. http://www.spkx.net.cn

谷子起源于黄河流域，是我国古老的栽培作物，在我国北方居民生活中占有重要的地位，其淀粉、蛋白质、脂肪、维生素及硒等微量元素营养物质含量丰富，可平衡膳食促进人体健康[1]。早在《本草纲目》中有记载，谷子“治反胃热痢，消渴口感，益丹田，补虚损，开肠胃”。谷子中蛋白质含量一般为8%～12%，蛋白质含量是评价营养价值高低的重要方面，对谷子蛋白质含量的测定就成为谷子种质资源鉴定以及选育优良谷子品种和改良谷子品质的重要项目之一[2-3]。目前测定谷子中蛋白质和淀粉含量主要使用凯氏定氮法和旋光法，这些化学法可靠性高，但测定步骤繁琐、费用高，故不适宜对样品进行批量分析和无损检测[4]。在谷子品质育种过程中，需要对大量种质资源、突变体、杂交后代材料快速鉴定和筛选，且无损检测以便种子更新和繁殖。研究组利用MPA型傅里叶变换近红外光谱仪建立了谷子中蛋白质和淀粉含量的检测模型[5]，为谷子品种资源品质评价提供一种快速、简便、无损的分析方法。

近红外漫反射光谱[6]是利用有机物在近红外光谱区的特征振动吸收信息而快速测定样品中多种化学成分含量，如蛋白质、脂肪、糖类等。与常用的化学分析方法不同，近红外光谱分析法是一种间接分析技术，是用统计的方法在样品待测属性值与近红外光谱数据之间建立一个关联模型（或称校正模型），之后通过验证完成模型的建立，利用近红外光谱仪器测得的样品光谱数据即可通过软件模型预测被测组分含量，近红外法具有操作简单、分析速度快、无损伤、环保等特点。近红外漫反射光谱技术对小麦、大豆、玉米等大宗作物品质分析的报道较多，在小宗杂粮品质分析上应用很少[7]。在蔬菜的营养品质评价方面，王多加等[8]用近红外光谱法非破坏性检测了西红柿、草莓、南瓜中蔗糖、葡萄糖、果糖、柠檬酸、苹果酸等营养成分，结果都表明近红外光谱分析法可满足实际应用所需的测定精度。张帆等[9]利用近红外光谱检测西瓜干粉中纤维素和可溶性糖。本实验依据谷子蛋白质和淀粉含量的真实值建立近红外光谱分析模型，利用该模型快速定量检测谷子品质。为建立谷子常规品质近红外光谱分析模型，首先用化学测定方法测定了170 份谷子蛋白质和淀粉的含量，利用德国Bruke公司生产的MPA型傅里叶变换近红外光谱仪和OPUS建模软件，建立谷子蛋白质近红外光谱分析模型，并用21 份验证集进行预测，此法为谷子育种与品质分析提供一种方便有效的分析方法[10]。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

供试的191 份谷子资源由山西省农业科学院农作物品种资源研究所育种专家提供，其粒形多样，产地不同，色泽分黄、白、红、绿、黑和灰色，因此该模型品质特性具有广泛的代表性。170 个样品作为建立浓度定标方程的定标样品。21 个样品做为验证集。

DHG-9140AS电热鼓风干燥箱　宁波东南仪器有限公司；8400型全自动凯氏定氮仪　丹麦福斯公司；MPA型傅里叶变换近红外光谱仪　德国Bruke公司；AP-300旋光仪　日本奥拓公司。

1.2 方法

1.2.1 谷子蛋白质含量测定

参考GB/T 5511—2008《谷物和豆类氮含量测定和粗蛋白质含量计算 凯氏法》，实验室利用全自动凯氏定氮仪进行测定，每个校正样品集谷子脱壳磨碎，称取0.5 g试样2 份置于250 mL消化管，再加入消化片5 g，然后加入12 mL浓硫酸，轻轻摇动消化管，使试样被硫酸湿润。将消化管放入420 ℃的消化炉上，约90 min样品消化至透明蓝绿色液体，取出冷却至室温。把消化管放入全自动凯氏定氮仪，设定分析程序后仪器依次进行自动蒸馏、滴定、结果计算和清洗。结果为蛋白质含量（%），蛋白系数6.25。两次测定的相对误差小于1%。

1.2.2 谷子淀粉含量测定

参照GB 5006—1985《谷物籽粒粗淀粉测定法》，重复称取同一个脱壳磨粉的谷子样品两份，每份2.5 g，放在250 mL锥形瓶中，加入氯化钙-乙酸溶液高温水解25 min，迅速冷却，再加入1 mL 30%硫酸锌溶液和1 mL 15%亚铁氰化钾溶液沉淀蛋白，过滤后，在室温（20±1）℃条件下进行旋光度测定，取2 次读数平均值，计算淀粉含量，2 个平行测定结果的相对误差不得大于1.0%[11]。

1.2.3 近红外漫反射光谱采集与光谱分析

利用MPA傅里叶变换近红外光谱仪，以镀金的漫反

射体作参比，样品杯为容积25 cm^3的圆柱形石英杯，每次装样满2/3为宜。扫描光谱区选用3 594.9～12 790.3 cm^{-1}，分辨率采用16 cm^{-1}，每隔2 nm采集反射强度，重复对样品进行近红外光谱扫描采集64 次后形成一条反射光谱储存[12]。每份样品扫描2 次取平均值，并将反射光谱信息转换成吸光度储存[13]，使用OPUS建模软件对光谱进行优化处理、数学分析和回归统计。如图1所示，校正集合中170 份谷子近红外扫描图谱区域范围较宽，选择的谷子差异性明显，有利于建模。先用谷子校正样品集建立校正模型，并做内部交叉验证，再将验正样品集进行外部验证，根据交叉验证决定系数（R^2_{cv}）、交叉验证均方根误差（root mean square errors of cross-validation，RMSECV）、外部验证决定系数（R^2_{val}）、预测均方根误差（root mean square errors of prediction，RMSEP）等指标确定最优模型[14]。对于同一样品集所构建的回归方程而言，校正决定系数R^2_{cal}越大，近红外分析结果与化学分析结果越吻合，可信度越高；交叉验证决定系数R^2_{cv}越大，RMSECV越低，定标建模过程中进行交叉验证时得到的近红外预测值与化学分析值越接近，定标模型的准确度越高[15-16]。

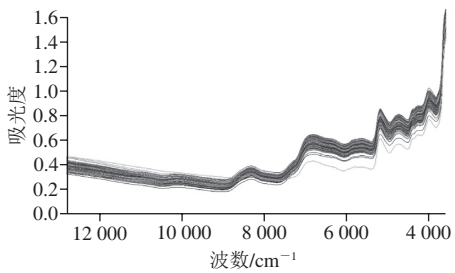

图 1 谷子近红外漫反射光谱扫描图谱

Fig. 1 Near infrared spectra of foxtail millet samples

2 结果与分析

2.1 样品的化学分析结果

由表1可知，构建定标模型的谷子资源蛋白质含量范围为9.82%～16.63%，平均值为13.05%，高于玉米、接近小麦。谷子淀粉含量范围为70.13%～82.15%，平均值为76.27%。其中蛋白质含量高于谷子一级优质米鉴定标准12.5%以上的优异资源有91 份，高于16.00%的优异资源共计10 份。经对比发现种皮的颜色与蛋白含量无显著相关性，高蛋白含量的谷子普遍粒形中等偏大。谷子颜色、形态和大小各不同[17]，数据变幅较大，建立的模型有较好的适用性。通过对上述谷子种质资源的鉴定评价发现，谷子种质资源具有丰富的遗传多样性[18]。

表 1 191 份山西谷子样品中蛋白及淀粉含量

Table 1 Contents of crude protein and starch in 191 foxtail millet samples from Shanxi province

编号	蛋白质含量/%	淀粉含量/%	编号	蛋白质含量/%	淀粉含量/%	编号	蛋白质含量/%	淀粉含量/%	编号	蛋白质含量/%	淀粉含量/%
1	12.25	77.38	49	11.08	78.88	97	16.11	74.91	145	11.61	74.95
2	13.06	76.37	50	14.91	80.23	98	10.93	81.91	146	11.72	74.88
3	12.62	75.73	51	16.31	71.94	99	14.85	79.93	147	12.16	73.34
4	13.96	74.82	52	11.62	78.94	100	15.12	77.95	148	10.63	77.25
5	13.26	76.72	53	14.18	75.85	101	11.81	80.63	149	16.27	74.68
6	12.79	76.25	54	10.10	77.86	102	12.08	76.20	150	9.82	71.65
7	16.30	75.03	55	11.53	75.79	103	11.76	77.36	151	11.88	80.05
8	13.23	76.34	56	11.18	75.09	104	15.28	74.45	152	11.30	75.85
9	15.98	73.75	57	15.69	73.80	105	12.37	77.25	153	11.72	78.41
10	16.02	73.58	58	14.99	75.67	106	15.11	76.31	154	11.01	77.48
11	14.96	73.28	59	14.39	75.09	107	11.64	78.12	155	11.56	79.70
12	14.30	72.64	60	13.69	76.72	108	12.79	73.51	156	12.21	74.33
13	13.74	76.55	61	12.16	76.90	109	16.00	72.58	157	11.63	76.66
14	11.60	78.66	62	13.59	76.90	110	14.35	75.03	158	11.15	77.95
15	12.20	76.52	63	11.70	76.78	111	11.69	77.25	159	11.79	76.55
16	15.66	73.22	64	14.42	78.94	112	14.43	71.53	160	11.76	79.93
17	12.67	75.76	65	15.14	73.80	113	11.91	74.91	161	12.17	75.96
18	15.68	73.63	66	11.23	78.82	114	11.89	75.38	162	11.98	79.23
19	13.11	76.87	67	12.00	79.46	115	14.20	78.12	163	12.16	78.3
20	14.63	77.01	68	13.49	76.20	116	11.05	75.26	164	12.23	78.95
21	13.92	72.93	69	12.74	78.76	117	12.19	74.68	165	12.21	77.39
22	13.89	75.73	70	11.71	76.43	118	15.27	70.13	166	12.22	77.98
23	10.50	76.25	71	11.65	78.35	119	15.05	75.96	167	11.65	77.25
24	13.63	75.20	72	15.31	74.91	120	15.56	74.33	168	11.90	77.48
25	13.75	73.34	73	13.22	76.08	121	13.77	75.96	169	12.12	76.78
26	16.02	76.66	74	14.35	77.13	122	15.92	74.33	170	12.19	76.31
27	11.68	77.13	75	13.50	76.20	123	15.91	75.96	171	12.17	75.96
28	12.19	77.95	76	11.29	76.66	124	14.90	75.26	172	11.62	76.66
29	14.61	75.26	77	12.48	75.96	125	15.17	76.20	173	11.20	73.06
30	15.80	73.45	78	14.80	76.08	126	15.47	78.18	174	12.05	77.48
31	12.23	77.60	79	13.43	76.90	127	14.63	72.81	175	12.19	73.31
32	14.04	75.67	80	14.72	75.15	128	14.94	74.45	176	11.49	77.01
33	13.68	75.15	81	12.00	78.41	129	12.11	74.21	177	11.85	79.35
34	12.54	75.73	82	11.37	77.07	130	14.16	76.99	178	11.02	82.15
35	13.60	75.03	83	13.20	78.41	131	14.79	75.73	179	12.12	70.39
36	14.22	75.20	84	11.20	78.53	132	15.50	78.68	180	11.20	80.12
37	14.21	74.04	85	14.33	76.20	133	11.91	77.36	181	10.32	73.23
38	10.63	77.07	86	12.13	78.30	134	11.66	76.20	182	16.63	81.12
39	13.73	73.34	87	12.32	77.95	135	13.79	75.61	183	11.98	74.11
40	11.60	75.90	88	10.16	81.86	136	13.69	78.41	184	11.53	75.02
41	11.86	78.06	89	14.84	77.83	137	12.96	74.33	185	12.04	80.12
42	10.62	77.19	90	11.65	80.28	138	11.05	73.75	186	15.98	72.35
43	11.12	75.03	91	15.54	76.78	139	12.04	79.75	187	15.99	72.85
44	15.62	75.67	92	14.89	75.73	140	11.29	73.17	188	16.52	74.23
45	11.50	78.85	93	11.19	77.95	141	11.43	76.55	189	12.23	72.21
46	13.97	76.60	94	13.03	76.55	142	12.18	74.56	190	12.24	75.21
47	10.74	80.52	95	16.63	74.56	143	12.16	73.28	191	11.98	78.68
48	13.43	75.73	96	12.51	79.29	144	12.15	73.61			

2.2 近红外定标模型的建立

本实验利用MPA傅里叶变换近红外光谱仪，通过OPUS/QUANT软件中的自动优化功能，分别对谷子蛋白和淀粉建模的最佳光谱预处理方法进行筛选，得到对原

始近红外漫反射图谱的数学预处理方式均为一阶导数＋矢量归一化法，谱区范围均选择3 594.9～12 790.3 cm^{-1}，通过对谷子蛋白和淀粉建标模型的交叉验证，比较R^2_{cv}、RMSECV和主因子数等参数，确定最优校正模型[19]。

2.3 定标模型的验证

2.3.1 内部交叉验证

根据样品的近红外的特征，利用软件的自动验证功能，软件每次在170 份建标谷子样品中随机选取2 份样品作为检验样品，用其余的谷子样品（168 份）建立定标模型，并对检验样品做预测，自动重复至所有样品均被作过检验样品[20]。谷子蛋白质和淀粉含量的交叉检验结果如图2所示，其R^2_{cal}分别为0.977 0和0.907 3，RMSECV分别为0.203%和0.466%。

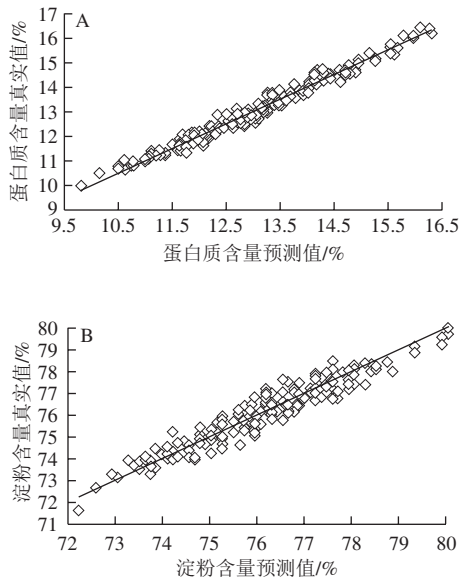

图 2 蛋白质含量（A）和淀粉含量（B）预测值与真实值的相关关系

Fig. 2 Relationship between the predicted values and chemically measured values of crude protein (A) and starch content (B) for test set

2.3.2 外部验证

近红外模型外部验证就是采用未参加模型建立的、化学成分已知的验证集样品对所建模型的实际预测效果进行评价[21-22]。如图3所示，研究用21 份独立于建模的谷子样品对上述谷子蛋白质和淀粉模型分别检验，结果蛋白质和淀粉的R^2_{val}分别为0.989 6和0.977 2， RMSEP分别为0.225%和0.368%，斜率分别为1.010和0.913，蛋白含量预测值与真实值间绝对误差小于0.28%，淀粉含量预测值与真实值间绝对误差小于0.35%。对于谷子蛋白质和淀粉的预测，化学法和近红外仪器法测定间无显著差异，近红外漫反射光谱测定结果是准确可靠的。说明采用近红外漫反射光谱分析技术能够满足对谷子常规品质成分的检测。

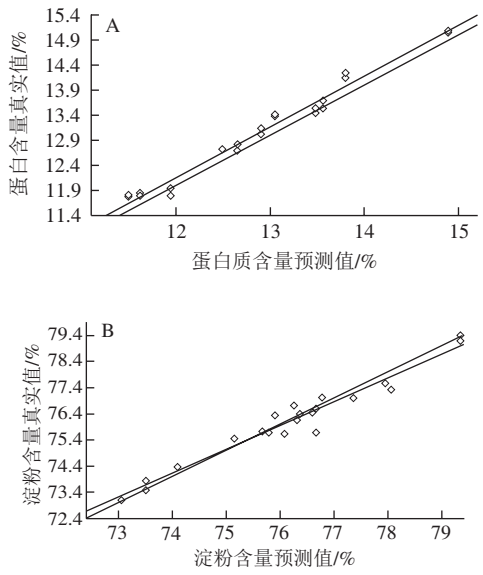

图 3 谷子蛋白质含量（A）和淀粉含量（B）真实值与近红外预测值线性相关关系

Fig. 3 Linear correlation between actually measured values and NIRS predicted values of protein (A) and starch content (B) in foxtail millet

研究选用山西省191 份谷子种质资源，利用MPA傅里叶变换近红外光谱仪，通过近红外分析技术，借助于近红外定标软件，分析谱区为3 594.9～12 790.3 cm^{-1}，采用一阶导数＋矢量归一化光谱预处理[23-24]，初步建立谷子蛋白质和淀粉含量的预测模型。谷子蛋白和淀粉定标模型外部检验决定系数达0.97以上、误差在0.368%以下，在谷子资源品质育种中能够满足大批量品种的快速、无损检测要求，有效地提高谷子品质育种效率，为谷子蛋白和淀粉含量分析鉴定提供了一种新的、有效的技术手段。通过对上述谷子蛋白质和淀粉含量评价鉴定，筛选出高蛋白和高淀粉含量的优异资源30 份，今后可利用初步建立的谷子品质预测模型快速检测更多的谷子资源，为育种和生产服务[25-27]。

3 讨 论

采用MPA傅里叶变换近红外光谱仪对191 份谷子种子样本进行光谱扫描，利用光谱定量分析软件进行光谱预处理、数学方法运算及回归统计分析，得到了谷子蛋白质和淀粉的近红外定标模型。由于建标的谷子样本是完整带壳的，也不会因脱壳造成水分或营养流失，而且经扫描后谷子籽粒不会破损，因此该模型既满足了谷子品质育种中的资源的快速检测要求，也是一种无损检测的方法。不仅为谷子品质育种及资源评价提供有益的参考，而且对加快谷子品种资源研究，提供了十分方便的测试手段[28]。

本实验使用定标样品较少，对我国的复杂多样、品种繁多的谷子种质来说，不具备普遍代表性，另外谷子外壳的颜色、化学真值的准确度和谷子的纯度、谷子建标资源数量都是影响模型的准确度的重要因素。今后工作中需不断补充新的谷子进行模型补充矫正和升级优化，进一步保持模型的稳定性和提高模型的准确性。

今后可利用傅里叶变换近红外漫反射技术测定物质成分具有无损、快速、准确的特点，探索其在谷子品质测定方面的广泛的应用，如纤维素、脂肪、氨基酸等化学成分的定量研究[29-30]。

参考文献：

[1] 刘三才, 朱志华, 李为喜, 等. 谷子品种资源微量元素硒和蛋白质含量的测定与评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3812-3818. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2009.11.007.

[2] 贺微仙, 王文真, 王会龙. 我国北方谷子资源蛋白质含量研究初报[J]. 作物品种资源, 1985(3): 19-21.

[3] 王星玉. 山西省谷子品种资源的品质研究[J]. 作物品种资源, 1985(3): 22-23.

[4] 朱志华, 李为喜, 刘方, 等. 谷子种质资源品质性状的鉴定与评价[J]. 杂粮作物, 2004, 24(6): 329-331. DOI:10.3969/j.issn.2095-0896.2004.06.007.

[5] 李伟, 肖爱平, 冷鹃. 近红外光谱技术及其在农作物中的应用[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 56-59.

[6] 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 近年来我国近红外光谱分析技术的研究与应用进展[J]. 分析仪器, 2006(2): 1-10. DOI:10.3969/j.issn.1001-232X.2006.02.001.

[7] KAYS S E, BARTON F E, WINDHAM W R. Predicting protein content by near infrared reflectance spectroscopy in diverse cereal food products[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2000, 8(1): 2147-2158. DOI:10.1255/jnirs.262.

[8] 王多加, 周向阳, 金同铭, 等. 近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2004(4): 447-450.

[9] 张帆, 王倩, 马智宏, 等. 西瓜可溶性糖和纤维素含量的近红外光谱测定[J]. 食品科学, 2007, 28(1): 258-261.

[10] 麻慧芳, 杨成元, 史关燕, 等. 我国谷子种质资源保存研究综述[J]. 甘肃农业科技, 2015(3): 57-60. DOI:10.3969/j.issn.1001-1463.2015.03.020.

[11] 田翔, 沈群, 乔治军, 等. 近红外光谱分析技术在糜子品质检测中的应用[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(9): 131-135.

[12] 潘威, 马文广, 郑昀晔. 等. 用近红外光谱无损测定烟草种子淀粉含量[J]. 烟草科技, 2017, 50(2): 15-21. DOI:10.16135/j.issn1002-0861.2016.0254.

[13] SOHN M, BARTON F E, MCCLUNG A M, et al. Near-infrared spectroscopy for determination of protein and amylose in rice flour through use of derivatives[J]. Cereal Chemistry, 2004, 81(3): 341-344.

[14] LIU F, HE Y, SUN G M. Determination of protein content of *Auricularia auricular* using near infrared spectroscopy combined with linear and nonlinear calibrations[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(11): 4520-4527.

[15] 沈广辉, 刘贤, 张月敬, 等. 基于在线近红外光谱快速检测玉米籽粒主要品质参数的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(1): 105-109. DOI:10.19556/j.0258-7033.2017-01-105.

[16] 张丽君, 刘龙龙, 马名川, 等. 燕麦蛋白质近红外定量模型的创建及其在育种中的应用[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(8): 10-13; 20. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2017.08.004.

[17] 孙加梅, 王雪梅, 王东建, 等. 谷子种质资源遗传多样性研究[J]. 山东农业科学, 2013, 45(3): 33-37. DOI:10.3969/j.issn.1001-4942.2013.03.009.

[18] 韩熹, 严红兵, 卢福洁, 等. 基于国产近红外谷物分析仪的大豆中粗蛋白与粗脂肪含量的检测研究[J]. 现代科学仪器, 2009(2): 119-121.

[19] 王卫东, 谷运红, 秦广雍, 等. 近红外漫反射光谱法测定整粒小麦单株蛋白质含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(4): 697-701. DOI:10.3321/j.issn:1000-0593.2007.04.019.

[20] 蒙秋霞, 牛宇, 张丽珍, 等. 近红外透射光谱技术测定黍稷蛋白含量的研究[J]. 中国农业通报, 2011, 27(33): 243-247.

[21] 俞法明, 陆艳婷, 严文潮, 等. 用近红外光谱技术快速测定籼稻品种的蛋白质含量[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 134-138.

[22] JANA K, JAN M. Content and quality of protein in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) varieties[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2006, 61(1): 45-49. DOI:10.1007/s11130-006-0013-9.

[23] 吴建国, 石春海, 张海珍, 等. 应用近红外反射光谱法整粒测定小样品油菜籽含油量的研究[J]. 作物学报, 2002, 28(3): 421-425. DOI:10.3321/j.issn:0496-3490.2002.03.027.

[24] 孙群, 李军会, 王建华, 等. 乌拉尔甘草单粒种子硬实特性的近红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2669-2672. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2009)10-2669-04.

[25] 刘建学, 张卫卫, 韩四海, 等. 白酒基酒中己酸、乙酸的近红外快速检测[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 181-185. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201604032.

[26] 申瑞玲, 邵舒, 董吉林, 等. 山西省不同品种谷子淀粉理化性质的比较[J]. 粮食与饲料工业, 2015(2): 20-24. DOI:10.7633/j.issn.1003-6202.2015.02.006.

[27] 王右军, 朱大洲, 屠振华, 等. CCD短波近红外光谱快速检测牛奶中掺假物质的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(6): 135-138. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2009.06.028.

[28] 胡润文, 夏俊芳. 脐橙总糖近红外光谱模型传递研究[J]. 食品科学, 2012, 33(3): 28-32.

[29] 高文淑, 景茂, 严衍禄. 付里叶变换近红外漫反射光谱法测定谷子、玉米中多种氨基酸含量[J]. 北京农业大学学报, 1990(增刊2): 88-93.

[30] 高文淑, 张录达, 王万军. 应用付里叶变换近红外漫反射光谱法测定谷子中的粗脂肪含量[J]. 北京农业大学学报, 1990(增刊2): 94-97.