

燕麦蛋白质近红外定量模型的创建及其在育种中的应用

张丽君, 刘龙龙, 马名川, 崔林, 周建萍* (山西省农业科学院农作物品种资源研究所, 农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室, 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 [目的]研究利用近红外光谱分析法定量分析燕麦完整籽粒粗蛋白含量的可行性,探讨不同地区种植的同一种燕麦品种蛋白质含量的变化,以期对燕麦的营养品质育种提供参考依据。[方法]收集蛋白质含量变幅较大的124份代表性燕麦样品,利用近红外谷物品质分析仪进行光谱扫描,采用常规化学分析方法(GB/T 5009.5—2010)测定样品蛋白质含量,借助近红外定标软件WinISI,采用偏最小二乘法(PLS)建立燕麦粗蛋白含量的定标模型。利用定标模型对14个地区219份(17个品种)燕麦完整籽粒粗蛋白含量进行测定,分析不同地区、不同类型燕麦样本间的差异。[结果]124份燕麦籽粒样品的粗蛋白含量为15.49%~23.77%,分布范围较广,具有较好的代表性。成功建立了燕麦蛋白质含量的定标模型,决定系数较高,标准误差较小,回归方程具有较高的准确性。因此,利用近红外光谱分析技术检测燕麦籽粒中粗蛋白含量是可行且可靠的,可替代化学测定方法。[结论]近红外光谱分析技术为检测燕麦籽粒粗蛋白含量提供了一种新方法。

关键词 燕麦;近红外光谱;粗蛋白

中图分类号 S503 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)08-0010-04

Establishment of Near-infrared Quantitative Model for Protein in Oat and Its Application in the Breeding

ZHANG Li-jun, LIU Long-long, MA Ming-chuan, ZHOU Jian-ping* et al (Institute of Crop Germplasm Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture/Shanxi Key Laboratory of Genetic Resources and Genetic Improvement of Minor Crops, Taiyuan, Shanxi 030031)

Abstract [Objective] To study the feasibility of quantitatively analyzing protein content in oat by using near-infrared spectroscopy (NIRS) and discuss the changes of crude protein content in the same oat variety planted in different regions, to provide reference basis for improving the nutritional quality in the oat's breeding. [Method] 124 representative oat samples with a broad range of crude protein content were collected to make spectral scanning by using near-infrared grain quality analyzer. The contents of crude protein in samples were determined using traditional chemical method (GB/T 5009.5—2010). By the aid of near-infrared calibration software WinISI, the calibration model was established by using partial least square (PLS) method. The content of crude protein in 219 oat samples (17 varieties) was determined by using calibration model. The differences among different regions and different types were analyzed. [Result] The content of crude protein in 124 oat grain samples was 15.49% - 23.77%, which had broader distribution range and good representativeness. The calibration model was successfully established with larger coefficient of determination and smaller standard error. The regression equation had a higher accuracy. Therefore, it was feasible and reliable to determine the content of crude protein in oat grains by using near-infrared spectroscopy technique. Near-infrared spectroscopy technique can replace chemical measurement method. [Conclusion] Near-infrared spectroscopy technique provides a new method for determining the content of crude protein in oat grains.

Key words Oat; Near-infrared spectroscopy; Crude protein

燕麦起源于地中海、非洲以及中国,隶属禾本科燕麦属(*Avena*. L)一年生草本,集食用、饲用、药用于一体,具有一定的医疗价值和保健作用,对于提高人类健康水平具有重要作用^[1-2]。燕麦在我国已有2 100年的栽培历史,是我国西南高寒山区和北方农牧地区的特色农作物。燕麦对自然条件恶劣、生态环境脆弱、土壤盐碱化严重地区的适应能力较强,具有抗干旱、耐盐碱的特性,对于改善生态环境具有重要意义^[3]。与其他谷物相比,燕麦的蛋白质含量为13%~22%,脂肪含量为4%~16%,含有大量的不饱和脂肪酸^[4-5]。燕麦已成为制作面包、点心、饼干的优质原料。随着市场多样化需求的不断增加,燕麦在食品加工、医药业、畜牧业等行业越来越显示出重要作用。

蛋白质含量测定的常规方法主要是凯氏法(Kjeldahl),

它是一个繁琐、耗时、费力的破坏性分析法,在育种中难以及时准确地提供分析数据,一定程度上阻碍了燕麦蛋白质育种的研究进程。近红外光谱(Near infrared spectroscopy, NIRS)分析技术是新近发展起来的农产品高效分析法,是利用有机物质在近红外谱区的振动吸收而快速测定样品中多种化学成分含量的一项技术,其中透射谱区的近红外光在样品的穿透能力可达30 mm,适合整粒或原样样品分析^[6-7]。近红外光谱分析技术有常规分析法所难以比拟的许多优越性,已广泛应用于农作物的水分^[8]、蛋白质^[9]、脂肪^[10]、淀粉^[11]、糖^[12]等含量的测定,其中水稻^[13]、大豆^[14]、玉米^[15]等大宗作物品种分析的报道较多。近红外光谱技术能有效改变燕麦蛋白质育种进展缓慢的不利局面,目前利用完整燕麦籽粒的研究报道却很少。陈龙等^[16]、赵秀芳等^[17]通过近红外光谱对燕麦干草蛋白质进行分析。笔者采用近红外透射技术,利用全息数字光栅进行全谱扫描,对燕麦粗蛋白含量进行了测定,并分析不同地区燕麦蛋白质与产地之间的关系,旨在为燕麦种质资源的筛选、鉴定及收集、利用寻找一种准确、简便、有效的分析手段。

1 材料与方法

1.1 材料 试验材料包括2个部分,分别用于蛋白质含量

基金项目 国家自然科学基金项目(31501372);山西省农业科学院农业科技创新研究项目(ZDSYS1503);山西省重点研发计划项目(201603D221004-1);山西省农业科学院所长青年引导专项(ydxx02);山西省农业科学院种业发展项目(2016zyzx41);现代农业产业技术体系项目(CARS-08-A-1)。

作者简介 张丽君(1981—),女,河北行唐人,副研究员,博士,从事作物遗传育种研究。*通讯作者,研究员,从事作物种质资源研究。

收稿日期 2017-02-05

预测模型建立和育种材料的预测筛选。一部分来自山西种质资源中期库保存蛋白质含量变幅较大的 124 份代表性燕麦样品(来源地信息见表 1),这些材料的蛋白质含量和 11 个农艺性状(单株粒重、千粒重、生育期、株高、幼苗习性、幼苗颜色、有效分蘖、旗叶叶相、穗形、小穗形、内稃色)均有较大差异,因此具有较好的代表性;另一部分来自燕麦表现现代产业技术体系 2011 年全国燕麦新品种展示试验的 14 个区试点(地名、经纬度、海拔、降水量见表 2)的 219 份燕麦籽粒 17 个燕麦品种(白燕 2 号、蒙燕 833-1-1、冀张筱 12 号、冀品 1 号、宁筱 1 号、坝筱 12 号、坝筱 13 号、燕 2009、白燕 11 号、冀张燕 5 号、定燕 1 号、坝燕 5 号、冀鉴 001、V9、冀张燕 3 号、坝燕 6 号、9642-4),用于蛋白质含量的检测。

1.2 方法

1.2.1 样品制备。选取适量的样品,去除杂质以及病、霉籽

表 2 2011 年 14 个燕麦区试点的地理位置、海拔和降水量

Table 2 The geographical location, altitude and precipitation of 14 oat pilots in 2011

编号 No.	地区 Region	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude//m	降水量 Precipitation//mm
1	山西阳高县	113°46'	40°22'	1 050.3	333.0
2	山西右玉县	112°27'	40°00'	1 345.8	410.6
3	山西大同市	113°20'	40°06'	1 067.0	384.0
4	内蒙古武川县	111°09'	41°08'	1 600.0	355.0
5	内蒙古乌兰察布市	114°	41°00'	1 400.0	171.0
6	河北张北县	114°42'	41°09'	1 400.0	300.0
7	新疆奇台县	89°12'	44°13'	830.0	176.0
8	青海湟中县	101°37'	36°28'	2 620.0	481.0
9	甘肃定西市	104°42'	35° 32'	1 920.0	494.2
10	宁夏固原市	106°18'	36°05'	1 600.0	493.5
11	西藏山南市	91°47'	29°08'	3 660.0	394.0
12	西藏日喀则市	88°46'	29°18'	4 050.0	413.0
13	四川盐源县	101°31'	27°26'	2 545.0	680.0
14	云南香格里拉县	99°44'	27°41'	3 280.0	800.0

1.2.2 光谱测定。样本经风选除杂,在瑞典 FOSS - Tecator 的 Infracore™ 1241 型近红外光谱仪上进行光谱扫描,将燕麦籽粒置于样品池中。在光程 18 mm 下扫描光谱,采集样品的吸收光谱;为了克服样品粒度差异引起的光谱漂移^[18],减少误差,每份样品重复取样 2 次,每次取样扫描 2 个光谱(重复装样获得光谱),2 次重复 4 个光谱,得到 1 条平均近红外光谱图,通过分析仪适配器转换,把每个光谱数据储存于计算机内,并使用 FOSS 公司提供的近红外专业定标软件(WinISI)对光谱进行分析。

1.2.3 燕麦籽粒粗蛋白含量的测定。粗蛋白含量测定按照国家标准(GB 5009.5—2010)中凯氏法^[19]进行。标准样品是用全麦粉粗蛋白质标准物质[GBW(E)100126],利用 FOSS 的全自动凯氏定氮仪(Kjeltec8400)测定粗蛋白含量;每个样品重复测定 2 次,求出 2 次重复测定结果的平均值。常规分析数据为化学值,近红外分析数据为预测值。

1.2.4 建立 NIRS 模型。利用 WINSIⅢ软件,对采集的光谱数据进行标准正常化和去散射处理,导数光谱分别采取一阶导数和二阶导数处理,利用主成分分析(PCA)技术自动剔

粒,用于样品光谱的采集;用 FOSS 的旋风磨(Cyclotec1093)将已经扫过光谱的样品(建模材料)制成粉状,用于常规粗蛋白的测定。

表 1 燕麦种质资源来源

Table 1 The sources of oat germplasm

地区 Region	样本数 Sample size//份	地区 Region	样本数 Sample size//份
黑龙江 Heilongjiang	2	甘肃 Gansu	7
河北 Hebei	3	青海 Qinghai	2
吉林 Jilin	1	陕西 Shaanxi	5
西藏 Tibet	1	贵州 Guizhou	1
四川 Sichuan	3	云南 Yunnan	5
山西 Shanxi	50	内蒙古 Inner Mongolia	44

除超常样品,并选择具有代表性的样品,采用最小二乘法回归(Partial least square, PLS)法建立燕麦粗蛋白的定标模型。

1.2.5 定标模型在育种中的应用。使用近红外分析仪对 14 个地区 219 份燕麦籽粒 17 个燕麦品种籽粒粗蛋白含量进行测定。所有样品重复测定 3 次,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 燕麦籽粒中蛋白质含量的化学测定 采用国家标准(GB 5009.5—2010)凯氏法测定 124 份燕麦籽粒样品的粗蛋白含量,结果表明粗蛋白含量为 15.49%~23.77%,平均值为 18.93%。这表明试验选取燕麦品种的粗蛋白含量分布范围较广,具有较好的代表性,可用于近红外光谱定标预测。

2.2 校正模型的建立与检验结果分析 利用 WinISI 软件具备的“标准正常化处理和散射处理,参数选择为 0.0.1.1”对原始光谱数据标准正常化处理,去除样品间因散射而引起的光谱误差,消除由光散射产生的线性基线和背景的影响,然后选择参数求一阶导数和二阶导数,每隔 4 点求导,每隔 4 点进行平滑处理,对光谱进行优化,剔除异常光谱。一阶导数如图 1 所示。运用偏最小二乘法(PLS),建立燕麦蛋白质

的定标模型。

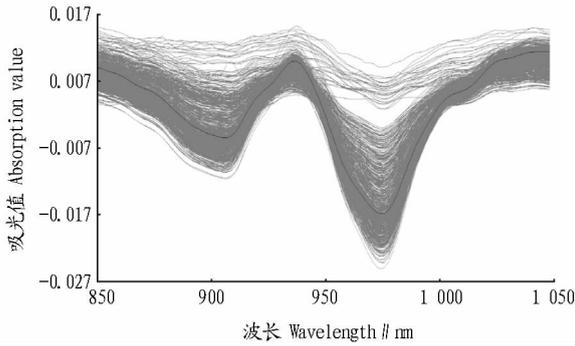


图1 一阶导数后的光谱

Fig.1 Spectrum after first-order derivative

2.3 燕麦中蛋白质含量的近红外分析校正模型 通过主要参数 RSQ、1-VR、SEC、SECV 来衡量近红外模型。124 份样品中燕麦粗蛋白含量的 RSQ 和 1-VR 分别为 0.950 3 和 0.957 7, SEC 和 SECV 分别为 0.285 7 和 0.382 1。粗蛋白含量模型的决定系数较高,而标准误差较小,近红外回归方程具有较高的准确性,因此利用近红外光谱分析技术检测燕麦籽粒中粗蛋白含量是可行且可靠的,可以替代化学测定方法进行粗蛋白含量测定。

2.4 定标模型在育种中的应用 燕麦样品来自全国 10 个

省份的 14 个试点。根据行政区划,将各试点划分为 3 个生态区,分别为华北生态区(内蒙古、山西、河北)、西北生态区(新疆、青海、甘肃、宁夏)和西南生态区(西藏、云南、四川)。由表 3 可知,山西阳高县、山西右玉县、山西大同市 3 个试点的经纬度、海拔以及降水量等不同,同一品种粗蛋白含量存在差异,山西右玉县 17 个燕麦样品的粗蛋白含量低于山西阳高县和山西大同市。14 个试点的 219 份燕麦籽粒 17 个燕麦样品的平均粗蛋白含量均存在明显差异(表 3),其中甘肃试点粗蛋白含量最高,其次是宁夏试点,四川试点粗蛋白含量最低。由表 4 可知,3 个生态区燕麦的粗蛋白含量由高到低依次为西北(15.33%)、华北(15.16%)、西南(11.32%)。

3 讨论与结论

由于 NIRS 具有强大的分析能力,NIRS 克服了形态学、细胞学等鉴定方法的弊端,实现了品种的快速准确鉴定,有效保证了被测样品的完整性,做到无损检测^[20]。目前,利用 NIRS 技术鉴定的植物品种已涵盖多种植物,包括粮食作物、经济作物和药用植物等。由于近红外光谱信息是重叠、复杂的信息,受到测定环境、测量技术、背景成分、样品待测成分的影响^[21],使得光谱模型参数构成复杂,其准确性成为自身最大的缺陷。取样的科学性,减少试验误差,提高光谱分析模型的准确性是工作重点。近红外分析模型的建立需要拥

表 3 2011 年 14 个地区燕麦的粗蛋白含量比较

Table 3 The comparison of crude protein content in 14 oat pilots in 2011

地区 Region	白燕 2 号 Baiyan No. 2	蒙燕 833-1-1 Mengyan 833-1-1	冀张筱 12 号 Jizhangyou No. 12	冀品 1 号 Jipin No. 1	宁筱 1 号 Ningyou No. 1	坝筱 12 号 Bayou No. 12	坝筱 13 号 Bayou No. 13	燕 2009 Yan 2009	白燕 11 号 Baiyan No. 11
山西省阳高县 Yanggao County of Shanxi Province	17.9	17.2	18.0	16.6	18.6	17.4	16.4	18.1	18.1
山西省右玉县 Youyu County of Shanxi Province	15.5	13.3	13.9	13.5	16.4	13.2	15.0	15.9	14.6
山西省大同市 Datong County of Shanxi Province	18.4	17.1	17.9	18.2	19.0	17.1	18.3	19.8	17.6
内蒙古武川县 Wuchuan County of Inner Mongolia	15.6	12.1	13.7	15.3	14.6	15.8	13.1	17.4	14.8
内蒙古乌兰察布市 Wulanchabu City of Inner Mongolia	17.6	16.5	18.5	18.2	18.2	17.6	17.0	19.8	17.9
河北省张北县 Zhangbei County of Hebei Province	17.3	14.7	17.2	18.1	17.9	16.1	17.0	18.8	17.7
新疆奇台县 Qitai County of Xinjiang	16.9	13.4	15.4	18.4	14.8	18.2	12.9	19.7	14.6
青海省湟中县 Huangzhong County of Qinghai	13.9	11.8	—	—	12.9	12.3	12.2	14.1	14.2
甘肃省定西市 Dingxi City of Gansu Province	18.1	18.0	19.3	18.9	18.8	19.6	18.4	21.3	18.1
宁夏固原市 Guyuan City of Ningxia	18.4	16.2	17.5	18.8	17.2	19.3	16.5	21.1	18.4
西藏山南市 Shannan City of Tibet	15.6	12.6	14.6	—	12.6	12.6	10.9	14.8	16.2
西藏日喀则市 Shigatse City of Tibet	18.0	11.5	12.2	—	12.8	10.6	—	—	13.7
四川省盐源县 Yanyuan County of Sichuan Province	11.9	9.7	9.7	7.7	11.0	8.6	8.5	11.4	11.9
云南省香格里拉县 Shangrila County of Yunnan Province	12.3	—	9.9	18.9	11.1	9.0	13.8	—	10.2

接下表

续表 3

地区 Region	冀张燕 5 号 Jizhangyan No. 5	定燕 1 号 Dingyan No. 1	坝燕 5 号 Bayan No. 5	冀鉴 001 Jijian 001	V9	冀张燕 3 号 Jizhangyan No. 3	坝燕 6 号 Bayan No. 6	9642-4
山西省阳高县 Yanggao County of Shanxi Province	12.7	12.4	14.1	15.4	14.8	13.1	14.7	15.2
山西省右玉县 Youyu County of Shanxi Province	10.2	10.9	12.5	13.6	14.1	10.3	12.0	13.6
山西省大同市 Datong County of Shanxi Province	13.9	11.4	14.1	16.1	15.2	13.5	14.5	16.0
内蒙古武川县 Wuchuan County of Inner Mongolia	11.0	11.6	13.6	13.2	13.3	10.9	13.0	14.1
内蒙古乌兰察布市 Wulanchabu City of Inner Mongolia	12.8	12.1	13.8	15.1	14.2	12.2	14.2	16.8
河北省张北县 Zhangbei County of Hebei Province	12.2	13.3	12.8	14.0	13.8	12.4	13.7	16.2
新疆奇台县 Qitai County of Xinjiang	11.5	14.1	15.0	16.1	14.5	10.4	13.6	17.2
青海省湟中县 Huangzhong County of Qinghai Province	9.6	12.2	11.5	—	11.9	10.7	11.2	10.2
甘肃定西市 Dingxi City of Gansu Province	13.7	—	—	15.4	15.8	13.4	—	14.1
宁夏固原市 Guyuan City of Ningxia	14.0	12.8	14.8	17.4	15.6	13.8	14.1	16.5
西藏山南市 Shannan City of Tibet	11.0	11.5	—	—	9.0	11.0	—	11.6
西藏日喀则市 Shigatse City of Tibet	8.9	11.7	12.8	—	—	8.8	13.2	—
四川省盐源县 Yanyuan County of Sichuan Province	8.1	8.6	7.6	10.7	10.2	8.4	9.4	10.1
云南省香格里拉县 Shangrila County of Yunnan Province	11.9	10.6	9.3	10.4	12.9	—	10.0	10.6

表 4 2011 年 3 个生态区试点燕麦的粗蛋白含量比较

Table 4 The comparison of crude protein content in oats in three ecological zones of China in 2011

生态区 Ecological zone	粗蛋白含量 Crude protein content//%			
	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	变化范围 Range
华北 North China	15.16	2.36	0.16	10.2 ~ 19.8
西北 Northwest China	15.33	2.91	0.19	9.6 ~ 21.3
西南 Southwest China	11.32	2.41	0.21	8.4 ~ 18.9

有典型的种质资源,样品按不同时间、地点、批次均匀选取,使得样品具有代表性。该研究中为了使模型达到理想的分析效果,参与定标的 124 份样本粗蛋白含量为 15.49% ~ 23.77%,尽量减少试验误差,注意选择种质产地来源的代表性,以提高模型的稳健性,拓宽模型的适用范围,采用平均化学值、平均光谱为基础参数的方法,在进行建模软件的优化、对异常值剔除等选用了合适的预处理方法以尽量扣除干扰信息。该研究中使用定标样品 124 份,对我国的复杂多样、品种繁多的燕麦种质及地域、气候条件不同的品种而言,不具有普遍代表性,因此定标模型的升级优化工作还在进行。

近红外光谱分析技术最早应用在水产品方面^[22],在作物育种中常常利用单个籽粒的差异来进行相关性状的选择。改变了在燕麦品质育种中,利用传统化学方法分析测定籽粒品质,破坏籽粒性状,测定值是剩余样品的参考值,加快了育种的效率和进程。目前,农作物品质研究涉及籽粒不同成分之间的关系,在品质改良中要针对不同的育种目标和加工用途分别进行选择。我国燕麦生产主要推广育成品种,因此籽粒品质性状的优势也是主要研究内容。欧阳韶晖等^[23]对 2013 年现代产业技术体系 13 个区试点燕麦的主要营养品质进行了研究,分析不同生态区燕麦籽粒品质性状的优势,探

讨不同生态区的优势品种。郑建梅等^[24]通过对内蒙古和河北种植的 10 个裸燕麦品种进行淀粉品质分析,比较品种的变异性和地区之间的差异性。赵世锋等^[25]、张智勇等^[26]进行了燕麦品种产量和品质性状的差异分析,通过品质与产量的综合表现筛选优质、高产、抗逆性强的品种。笔者使用近红外分析仪对不同生态区不同试点的燕麦品种材料进行测定,花费时间短,操作简单,结果可靠,同时利用近红外光谱分析仪可以实现对整粒进行非破坏性测定,对于达到要求的样品还可以应用于育种实践中。通过对国内 14 个燕麦主产区燕麦品种展示的样品进行粗蛋白含量分析,在不同种植地区以及华北、西北、西南等不同生态区之间,燕麦粗蛋白含量差异明显。燕麦营养品质在不同品种、不同地区及不同年份之间存在差异^[23],营养成分的含量会受产地地理坐标(经度、纬度、海拔和降水量)的影响,但不同燕麦受影响的方式可能不同,纬度对蛋白质含量的影响显著^[18]。选育优良的燕麦品种和适宜的推广种植产地,需要进行连续多年的栽培种植和观察,并结合各种种植区的气候、生态、海拔、经纬度、水土等条件,深入探究营养品质、燕麦产量变化和生态环境之间的关系。

该研究采用种质资源库中的 124 份资源建立燕麦近红外模型,并对 2011 年现代产业技术体系新品种展示试验的 14 个地区 17 个品种的蛋白质进行分析。结果表明,利用近红外光谱技术对燕麦种质资源的主要品质性状进行鉴定评价可以获得理想的结果,在今后的燕麦蛋白质育种工作中加强高蛋白种质的筛选和利用,通过蛋白质含量高的燕麦资源与生产上具有广泛利用价值、农艺性状优良的燕麦品种杂交,在育种分离的低世代,利用近红外分析技术辅助,定向增加选择压可能是燕麦高蛋白育种的一条有效途径,该技术与常规的化学分析方法相比是有效、简便、环保、实用的快速鉴定方法;对燕麦种质资源主要品质性状及其不同产地的影

(下转第 20 页)

积,有利于土体空气交换、提高昼夜温差、促进薯块膨大^[10]。适宜的垄距和垄高有利于甘薯的大田生长发育,能充分发挥个体和群体的交互效应,提高产量,也有利于甘薯机械化收获,从而达到农机农艺相配套的高产栽培。该试验中产量最高是垄距为 80 cm、垄高 30 cm (A₃B₂) 的处理,为 42.91 t/hm²,其结薯数和大中薯比例也较高,明薯率为 96.40%,居第二位,伤薯率中等。综合来看,A₃B₂ 处理是较好的组合,较适合小型收获机收获,可为甘薯龙薯 14 号机械化栽培提供参考。

参考文献

- [1] 福建省统计局,国家统计局福建调查总队. 福建统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2010-2012.
- [2] 胡良龙,田立佳,计福来,等. 国内甘薯生产收获机械化制因素与探讨[J]. 中国农机化,2011(3):16-18.

(上接第 13 页)

响进行分析,为燕麦优良品质资源的选择、收集提供了新途径。

参考文献

- [1] 张丽君,刘龙龙,乔治军,等. 燕麦核不育雌蕊转座子测序及分析[J]. 草地学报,2014,22(2):352-358.
- [2] 张丽君,刘龙龙,畅志坚,等. 燕麦隐性核不育 eSSR 标记的开发及其验证[J]. 草业学报,2015,24(7):146-154.
- [3] 穆志新,刘龙龙,张丽君,等. 燕麦资源生物学性状多样性分析[J]. 山西农业科学,2016,44(12):1751-1754,1817.
- [4] 刘龙龙,张丽君,范银燕,等. 燕麦雄性不育新种质在遗传改良中的应用[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(1):192-195.
- [5] 张丽君,刘龙龙,马名川,等. 燕麦成熟胚组织培养体系的优化及其影响因素[J]. 山西农业科学,2015,43(3):269-272.
- [6] 刘建学. 实用近红外光谱分析技术[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [7] 赵婷婷,张丽珍,郑淑华,等. 黍稷籽粒淀粉含量的近红外光谱分析[J]. 华北农学报,2011,26(1):234-238.
- [8] 王江蓉,周京,沉娜,等. 近红外测定稻谷水分定标模型验证研究[J]. 粮食与饲料工业,2015,12(3):5-7.
- [9] 赖立群,麻望琼,陈华才. 近红外漫反射光谱结合神经网络检测小麦蛋白质含量[J]. 中国计量学院学报,2015,26(1):55-59.
- [10] 朱逢乐,彭继宇,高俊峰,等. 应用可见/近红外光谱成像测定鲑鱼片脂肪含量分布[J]. 农业工程学报,2014,30(23):314-323.
- [11] 张良,赵雪君,石琪. 马铃薯直链淀粉含量近红外模型的建立[J]. 作物杂志,2014(2):73-76.
- [12] 秦利,刘华,杜培,等. 基于近红外光谱法的花生籽仁中蔗糖含量的测定[J]. 中国油料作物学报,2016,38(5):666-671.

- [3] 胡良龙,胡志超,王冰,等. 国内甘薯生产机械化研究进展与趋势[J]. 中国农机化,2012(2):14-16.
- [4] 胡良龙,胡志超,谢一芝,等. 我国甘薯生产机械化技术路线研究[J]. 中国农机化,2011(6):20-25.
- [5] 俞金保. 甘薯不同垄作方式对比试验初报[J]. 福建农业科技,2014,45(5):7-8.
- [6] 苏明,黄浩,甘学德,等. 不同株行距对甘薯生长和产量性状的影响[J]. 江西农业学报,2011,23(5):6-9.
- [7] 黄志谋,沈其文,杨新笋,等. 不同垄距及株距对鄂薯 9 号产量的影响[J]. 湖北农业科学,2015,54(11):2580-2582.
- [8] 祁驰恒,谭淑琼,曾钰婷,等. 不同垄高对马铃薯主要性状及产量的影响[C]//屈冬玉,陈伊里. 2016 年中国马铃薯大会论文集. 哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2016:380-383.
- [9] 彭慧元,邓宽平,雷尊国. 不同起垄方式对马铃薯产量及经济性性状的影响研究[J]. 江西农业学报,2012,24(7):42-43.
- [10] 唐永金,侯大斌. 甘薯栽培适宜垄宽、垄高和垄形的理论探讨[J]. 西南农业学报,1998,11(1):123-125.

- [13] 李君霞,张洪亮,严衍禄,等. 水稻蛋白质近红外定量模型的创建及在育种中的应用[J]. 中国农业科学,2006,39(4):836-841.
- [14] 王海龙,杨向东,张初,等. 近红外高光谱成像技术用于转基因大豆快速无损鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(6):1843-1847.
- [15] 王铁固,刘新番,库丽霞,等. 近红外反射光谱测定玉米完整子粒蛋白质和淀粉含量的校正模型[J]. 玉米科学,2008,16(3):57-59,63.
- [16] 陈龙,靳晓霞,冯晋芳,等. 近红外光谱法预测燕麦干草蛋白组分的研究[J]. 中国奶牛,2012(7):11-13.
- [17] 赵秀芳,李卫建,黄伟,等. 燕麦干草品质的近红外光谱定量分析[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(9):2094-2097.
- [18] 王姣姣,刘浩,任贵兴. 豌豆品质性状近红外模型建立及区域差异分析[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(4):779-787.
- [19] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB/T 5009.5-2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [20] 黄艳华,杜娟,夏田,等. 近红外光谱在植物种及品种鉴定中的应用[J]. 中国农学通报,2014,30(6):46-51.
- [21] 李君霞,张洪亮,严衍禄,等. 水稻蛋白质近红外定量模型的创建及在育种中的应用[J]. 中国农业科学,2006,39(4):836-841.
- [22] 段民孝,郭景伦,王元东,等. 利用近红外透射分析仪快速测定玉米子粒品质的初步研究[J]. 华北农学报,2003,18(1):37-40.
- [23] 欧阳韶晖,米雅清,王青,等. 2013 年中国燕麦区试品种(系)主要营养成分分析[J]. 麦类作物学报,2016,36(4):455-459.
- [24] 郑建梅,曹莹莉,胡新中,等. 不同地区不同裸燕麦品种淀粉品质分析[J]. 麦类作物学报,2012,32(1):74-78.
- [25] 赵世锋,曹丽霞,张立军,等. 不同类型燕麦育成品种的品质与产量分析[J]. 河北农业科学,2012,16(1):58-61,106.
- [26] 张智勇,齐冰洁,邢义莹,等. 不同燕麦品种产量和品质性状的差异分析[J]. 内蒙古农业科技,2014(6):7-8.