

玉米秸秆饲料营养成分 NIRS 在线检测

薛俊杰 韩鲁佳 杨增玲 沈广辉 刘雨晨

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 玉米秸秆本身营养成分含量低,需作为粗饲料和其它饲料混合生产全混合日粮或经黄贮等技术工艺改善其品质。为在利用和改善处理过程中对其营养成分含量进行实时检测,采用 217 个玉米秸秆样品,利用优化后的近红外在线光谱采集系统,探索了利用近红外光谱技术在线检测玉米秸秆水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维和可溶性糖等营养成分含量的可行性。研究结果表明利用近红外光谱技术可以实现对玉米秸秆饲料营养成分的定量分析。水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维、可溶性糖含量模型的相对标准偏差和相对分析误差分别为 9.03% 和 1.97、11.36% 和 2.31、3.75% 和 2.02、16.18% 和 3.61。

关键词: 玉米秸秆; 营养成分; 在线检测; 近红外光谱

中图分类号: S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0216-08

On-line Measurement of Nutrient Content of Corn Stover Using NIRS

Xue Junjie Han Lujia Yang Zengling Shen Guanghui Liu Yuchen

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Corn stover contains abundant nutrients for animals and it is the main source of roughage for large domestic animals. To guarantee the quality of feed, the on-line measurement of the nutrient content of corn stover is essential when it is being used as a roughage feed or a raw material for silage. In the present study, the on-line determination of moisture, crude protein (CP), acid detergent fiber (ADF) and water-soluble carbohydrate (WSC) of corn stover was investigated using near infrared spectroscopy (NIRS) operating over a conveyor belt moving at 20 cm/s. The distance between the sample surface and the scanning window was 100 mm. The 217 corn stover samples, collected from three provinces of China, were crushed to not more than 5 cm for spectral analysis. The relative standard deviation (RSD) and ratio of standard error of performance to standard deviation (RPD) of the models developed for moisture, CP, ADF and WSC were 9.03% and 1.97, 11.36% and 2.31, 3.75% and 2.02 and 16.18% and 3.61, respectively. The results showed that it was feasible to determine the moisture, CP, ADF and WSC contents of corn stover using on-line NIRS, which would help raise the efficiency of nutrient measurement and thus guarantee the quality of feed. The sensitive bands of the models were investigated, which could help to simplify the models and thus reduce the cost of the specific spectrometers for practical application.

Key words: corn stover; nutrient content; on-line measurement; near infrared spectroscopy

引言

玉米秸秆是主要农作物秸秆之一,我国每年可

产生约 1.82 亿 t^[1],是一种重要的可再生资源。合理开发秸秆饲料资源对解决畜禽与人争粮问题意义重大,也是提高秸秆资源利用率和实现“过腹增

收稿日期: 2015-12-18 修回日期: 2016-05-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B11-2)、国家自然科学基金项目(31471407)和公益性行业(农业)科研专项(201003063)

作者简介: 薛俊杰(1989—),女,博士生,主要从事生物质工程研究,E-mail: xjj19890305@cau.edu.cn

通信作者: 杨增玲(1977—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质工程研究,E-mail: yangzengling@cau.edu.cn

值”的有效途径。然而秸秆饲料营养价值低,作为粗饲料和其它饲料混合生产全混合日粮需经黄贮等技术工艺改善其品质,在上述利用和改善处理过程中需对其营养成分进行实时检测。传统的湿化学检测方法费时费力,存在化学试剂污染,且从采样到获得成分含量有一定的延迟性,无法满足实时和现场分析的需要,为此需求一种实时在线检测方法,为随时调整混合比例和工艺参数提供理论依据。

近红外光谱技术 (Near infrared spectroscopy, NIRS) 基于样品化学键 (C—H、O—H、N—H 和 S—H) 的分子振动信息,是一种快速、高效、无损、绿色、可实现在线检测的方法,现已广泛应用于农业、制药业及石油化工业。根据已有研究^[2-8], NIRS 可在实验室成功定量预测饲料原料和产品的化学组成、营养成分、消化率和品质指标。然而,玉米秸秆的工业化利用 (例如饲料行业) 需对其基础特性进行在线检测。在线检测效率高,从检测到得到数据的时间延迟短,可为及时纠错,将损失减到最小提供保障。目前对秸秆的在线检测相关研究报道较少,利用 NIRS 实现秸秆成分含量的在线检测中,样品的运动以及采集设备的机械振动将给采集的光谱带来更多的噪声^[9]。而且,玉米秸秆的工业化利用中样品粒度往往较大,而大粒度样品的近红外光谱品质较差。这些都会影响玉米秸秆的饲料营养成分近红外光谱在线预测效果。

本文对利用 NIRS 在线检测玉米秸秆的水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维和可溶性糖等营养成分的可行性进行研究。

1 材料和方法

1.1 样品

实验采用的 217 个玉米秸秆样品于 2012 年采自河北省、山西省和山东省的 21 个地区,涵括约 50 万 km² 的种植面积,包含 68 个已知玉米品种。采集得到的样品经自然风干之后,用无筛的齿磨粉碎至粒度小于 50 mm (粗粉样品,图 1a)。粗粉样品将用于光谱扫描。采用四分法,取部分样品细粉至样品过 1 mm 样品筛,用于化学分析 (细粉样品,图 1b)。制备好的样品存放在干燥低温的样品室待用。

1.2 化学值分析

样品的化学值根据相应标准方法 (表 1) 进行检测,所有化学值都是两次平行的平均值,两次平行保证测定值之间的相对标准偏差小于等于 5%,所有化学值基于收到基,单位为 g/kg。

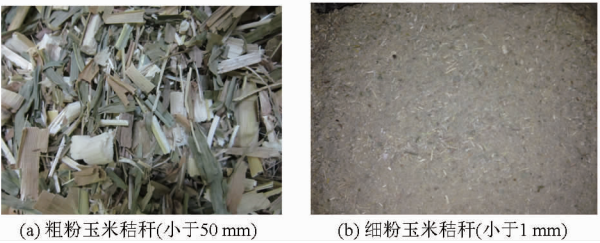


图 1 供光谱扫描和化学分析的玉米秸秆样品

Fig. 1 Corn stover samples prepared for spectral and chemical analysis

表 1 化学分析方法

Tab. 1 Chemical analysis methods

指标	参考方法	仪器
样品制备	文献[10]	粉碎机
水分	文献[11]	烘箱
粗蛋白	文献[12]	凯氏定氮仪
酸性洗涤纤维	文献[13]	烘箱
可溶性糖	蒽酮硫酸比色法 ^[14]	紫外分光光度计

1.3 近红外光谱在线检测

在线检测系统的搭建及光谱采集参数的选取均在前期研究基础^[15]上完成,采集系统由近红外光谱仪、传送带、支架和计算机组成 (图 2a),本研究采用 Matrix - F 型在线近红外光谱仪 (Bruker Daltonik GmbH, 德国),其光纤探头放置在传送带上方的支架上用于光谱采集,主机则和计算机一起放置在实验台上。光谱采集采用漫反射模式,内置背景 (镀金板),采集光谱范围为 12 000 ~ 4 000 cm⁻¹,分辨率为 8 cm⁻¹,样品光谱采集实况如图 2b 所示。为了保证采集窗口到样品表面的距离一致,将样品放在长方体样品槽 (700 mm (长) × 160 mm (宽) × 50 mm (高)) 中,样品槽放在传送带上,随传送带运动。采集窗口到样品表面的距离为 10 cm,传送带速度为 20 cm/s,光谱采集积分次数为 30 次。当样品槽进入采集窗口下时,开始光谱采集,当完成预设的光谱采集次数时,光谱采集自动停止。如样品离开采集窗口时,预设采集次数还未完成,则重复光谱扫描以完成预设采集次数。30 次积分的平均光谱作为本次装样的最后光谱。每个样品重复 3 次装样,将 3 次装样光谱的平均光谱作为该样品的最后光谱。

1.4 近红外光谱模型的建立与分析

所有近红外光谱定量预测模型的建立都运用最小二乘法 (Partial least squares, PLS) Toolbox 在 Matlab R2008a (Mathworks, Natick, MA, 美国) 平台上进行。具体建模步骤为:首先,样品按照浓度梯度法分为校正集和验证集 (3:1)。然后,样品的光谱数据经中心化处理或者自动标尺校正、一阶导数、二

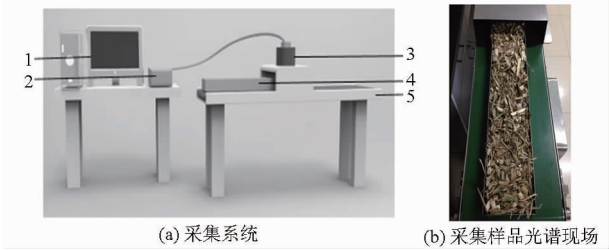


图 2 样品近红外光谱采集系统

Fig. 2 Experimental apparatus for collection of sample spectra from corn stover
1. 计算机 2. 光谱仪主机 3. 光谱仪检测探头 4. 样品槽
5. 传送带及支架

阶导数、Savitzky – Golay 或 Norris derivative 平滑、SNV 或 MSC 散射校正及其组合对原始光谱进行预处理。最后,采用偏最小二乘 PLS 算法,建立样品饲料营养成分的定量预测模型。

通过比较所建模型的性能参数,如校正集决定系数 R_c^2 、均方根误差 RMSEC 和验证集决定系数 R_p^2 、均方根误差 RMSEP 等,确定最优模型。同时考察模型的相对标准偏差 (Relative standard deviation, RSD) 和相对分析误差 (Ratio of standard error of performance to standard deviation, RPD)。RSD 和

RPD 的公式为

$$R_{\text{RSD}} = \frac{R_{\text{RMSEP}}}{V_{\text{Mean}}} \times 100\% \tag{1}$$

$$R_{\text{RPD}} = \frac{R_{\text{SD}}}{R_{\text{RMSEP}}} \tag{2}$$

式中 V_{Mean} ——验证集所有样品化学分析值平均值
 R_{SD} ——样品验证集化学值标准偏差
 R_{RSD} ——相对标准偏差
 R_{RMSEP} ——均方根误差
 R_{RPD} ——相对分析误差

2 结果与讨论

2.1 玉米秸秆成分含量

玉米秸秆化学分析值的范围、平均值和标准偏差如表 2 所示,化学分析值的频率分布直方图如图 3 所示。由图 3 可见样品饲料营养成分的化学分析值的分布均属于正态分布。由表 2 可知,玉米秸秆的所有营养成分的化学分析值均在正常范围内,与以往研究结果一致^[16-18]。由于样品种类不同,以及来自不同种植区的气候、土壤不同,样品的粗蛋白和可溶性糖含量分布在一个很宽的范围并且具有很大的变异性。

表 2 样品饲料营养成分校正集和验证集化学分析统计

Tab. 2 Statistic of calibration and prediction sets of nutrient content in samples							g/kg
营养成分	校正集			验证集			
	范围	平均值	标准偏差	范围	平均值	标准偏差	
水分	24. 85 ~ 70. 80	41. 11	7. 23	25. 97 ~ 70. 02	41. 64	7. 41	
粗蛋白	27. 44 ~ 105. 03	58. 28	15. 30	30. 00 ~ 101. 74	57. 99	15. 22	
酸性洗涤纤维	299. 50 ~ 520. 00	431. 61	35. 59	355. 00 ~ 514. 00	433. 69	32. 77	
可溶性糖	8. 55 ~ 191. 45	65. 90	37. 55	14. 64 ~ 191. 30	67. 19	39. 28	

2.2 样品光谱

2.2.1 光谱采集参数影响及其解决方法

由于样品的运动和采集设备的振动给样品光谱增加了噪声,通过研究不同近红外光谱仪器、传送带速度、焦距、积分时间等在线光谱采集参数对样品光谱品质的影响,结果表明对于不同光谱仪,采集参数对光谱的影响不同:对于光谱仪 A (内置光源,先分光式,集成所有部件便携式采样),焦距、传送带速度、积分时间都显著影响光谱的重复性。而对于光谱仪 B (具有较强外置光源,后分光式,具有单独采样探头),在实验取值范围内,只有积分时间对光谱重复性的影响显著。光谱仪 B 更加适合于玉米秸秆样品的在线光谱采集^[15]。因此,本文采用光谱仪 B,即 Matrix – F 型在线近红外光谱仪,在适当的采集参数下采集样品的近红外在线光谱,从而保证其光谱品质。

对于由样品颗粒的不均匀性而降低光谱品质问

题,通过扩大样品采集面积及重复装样来提高光谱的品质。本研究中的样品槽单次扫描可完成 6 次积分,采集面积为 5 600 cm²,如图 4 所示,蓝色光谱为样品槽单次扫描得到的单条光谱的二阶导数光谱,由图可知,其光谱上出现明显的毛刺,表明其噪声较大。对样品进行多次重复扫描,增加样品扫描面积后,红色光谱为重复 5 次扫描并且进行 3 次重复装样之后的平均光谱,可以明显看出其噪声比单条光谱小,光谱品质好。因此,本研究建模所使用的光谱都是与红色光谱相同的平均光谱。

2.2.2 样品光谱分析

所有样品的原始平均光谱 (4 440 ~ 8 000 cm⁻¹) 如图 5a 所示。由于 8 000 ~ 12 000 cm⁻¹波段的光谱所含有效信息很少,而 4 000 ~ 4 440 cm⁻¹波段的光谱有明显的噪声,因此本研究只使用了 4 440 ~ 8 000 cm⁻¹波段的光谱作为有效全谱。在 4 440 ~ 8 000 cm⁻¹光谱范围内有 3 个主要的吸收峰,其与

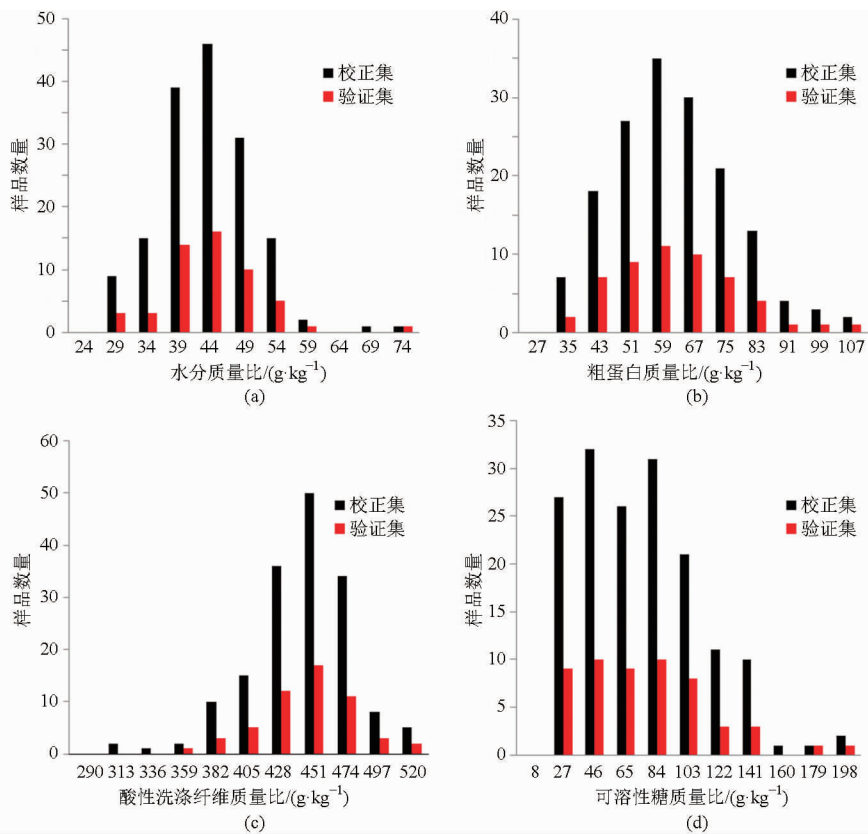


图 3 样品化学分析值频率直方图

Fig. 3 Frequency histogram of chemical analysis in samples

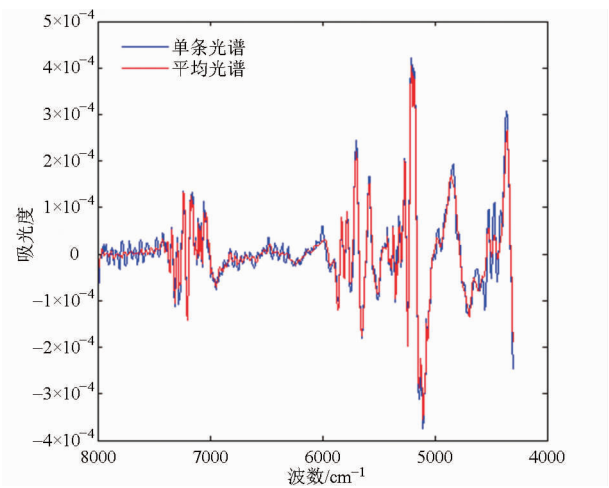


图 4 平均光谱和单条光谱二阶导数光谱图

Fig. 4 Single and average spectrum after 2nd derivative preprocessing

水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维和可溶性糖中的化学键相关。其中第 1 个吸收峰位于 $6\,000 \sim 7\,000\text{ cm}^{-1}$ ，主要归于 C—H 组合频的吸收峰 ($6\,944\text{ cm}^{-1}$)、水分的 O—H 伸缩振动 ($6\,897\text{ cm}^{-1}$)、O—H 伸缩振动一倍频 ($6\,494\text{ cm}^{-1}$)、C—H 伸缩振动一倍频 ($6\,173\text{ cm}^{-1}$)、R—CH—CH 中 C—H 伸缩振动一倍频 ($6\,079\text{ cm}^{-1}$) 和 cis—RCH=CHR 中的 C—H 伸缩振动一倍频 ($6\,024\text{ cm}^{-1}$)。第 2 个吸收峰位于 $5\,400 \sim 5\,000\text{ cm}^{-1}$ ，主要归于水分的 O—H 弯曲振

动二倍频 ($5\,155\text{ cm}^{-1}$)。第 3 个吸收峰位于 $5\,000 \sim 4\,500\text{ cm}^{-1}$ ， $4\,545\text{ cm}^{-1}$ 的峰归于—CHO 中 C—H 伸缩振动/C=O 伸缩振动的组合频， $4\,673\text{ cm}^{-1}$ 的峰归于 C—H 伸缩振动/C=O 伸缩振动的组合频以及 C—H 对称变形， $4\,785\text{ cm}^{-1}$ 的峰则归于 O—H 组合频^[19]。

玉米秸秆不同饲料营养成分的光谱主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 得分如图 5b ~ 5e 所示,由图可知:①样品分布较广,表明样品具有很好的代表性。②验证集几乎覆盖了校正集的全部分布,且均匀分布,表明样品分集合理,验证集具有很好的代表性。

2.3 近红外光谱定量分析模型

将样品按照 3 个不同省份分集,可得山东省样品 98 个,河北省样品 67 个,山西省样品 54 个,如图 6 所示为样品按照不同省份分集的成分含量 PCA 和光谱 PCA 图,其中图 6a、图 6b 分别为不同省份样品成分含量的主成分分析得分图,其中主成分 1 为水分,主成分 2 为粗蛋白,主成分 3 为酸性洗涤纤维,主成分 4 是可溶性糖,由图 6a、6b 可以看出,不同省份的样品成分含量分布均匀,没有明显的分集。图 6c 为不同省份样品近红外光谱的主成分分析得分图,主成分 1 和主成分 2 累积包含了光谱信息的 98.39%,由图可以看出 3 个不同省份的样品均匀分

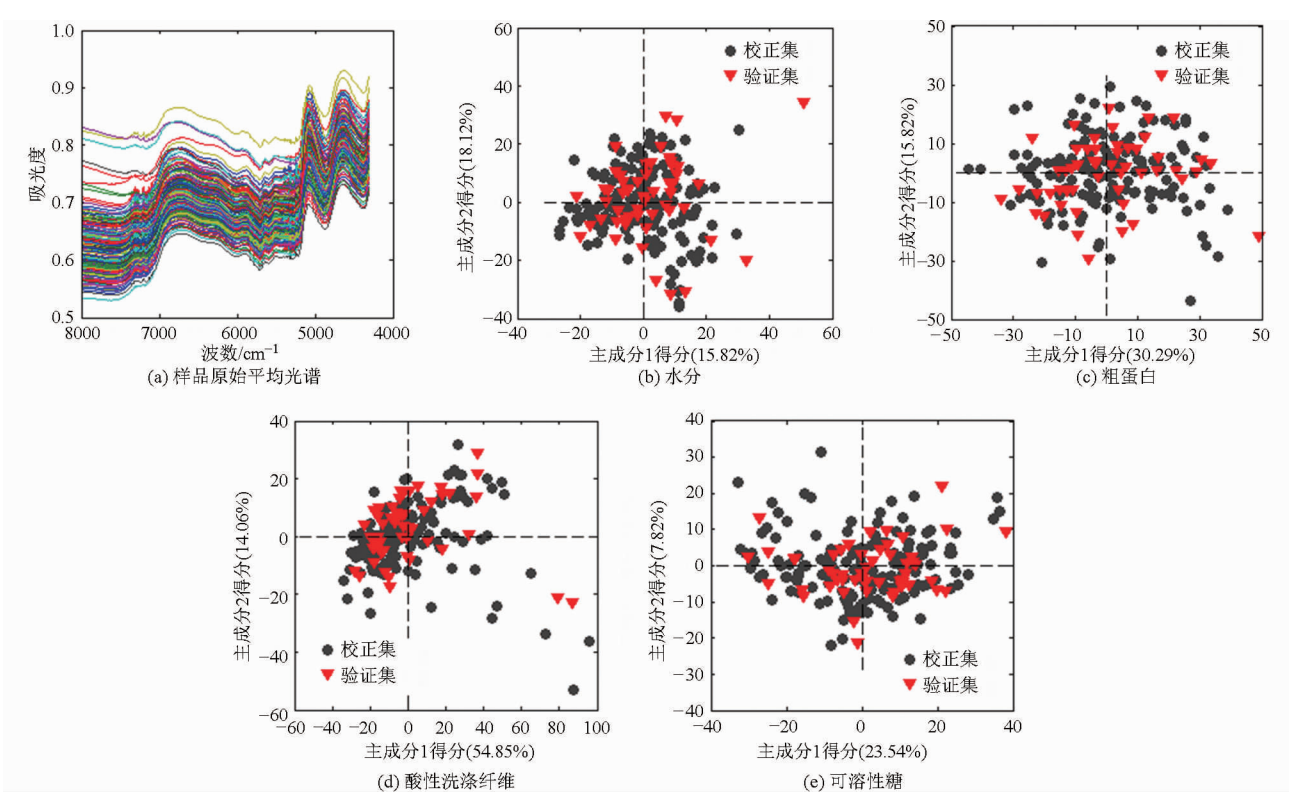


图5 样品光谱及其PCA分析得分图
Fig.5 Spectra of samples and PCA scores

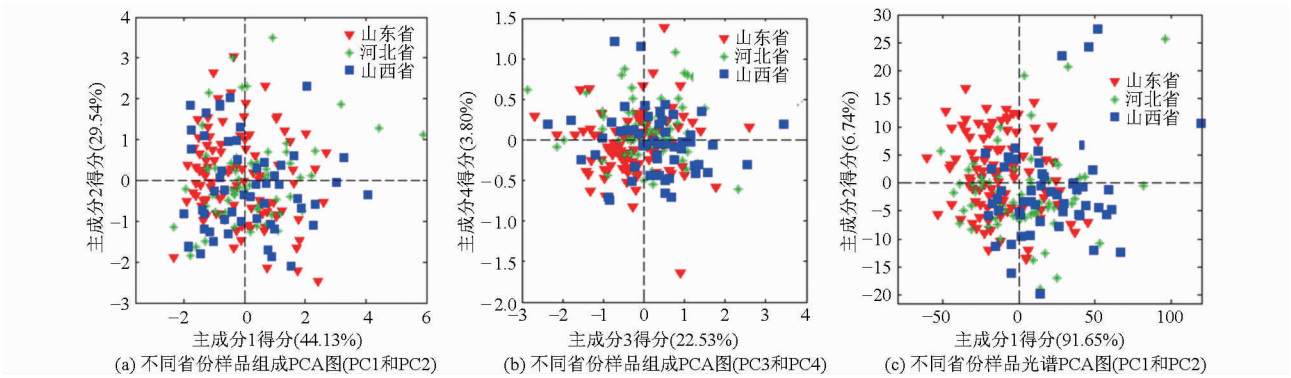


图6 不同省份样品组成成分及光谱PCA分析得分图
Fig.6 PCA scores of components and spectra of sample from different provinces

布,没有明显分集。由此可见,3个省份的样品无论从成分含量还是从光谱信息上都不出现明显分集,可能原因是虽然样品采自3个不同省份,但是这些省份同属于华北地区,气候土壤等条件较相似。而对于更大分布范围内如包含黑龙江省和海南省的取样,建议进行分集建模研究。因此,在本研究中将这3个省份的样品作为一个大样品集进行处理。

为保证模型的精度,本研究对化学分析值大于平均值加3倍标准偏差或者小于平均值减3倍标准偏差以及预测值残差大于3倍学生残差的样品进行了剔除,分别共剔除5个水分、4个粗蛋白、1个可溶性糖样品。

由于近红外光谱信息数据量大,有用信息微弱,需求特定的化学计量学方法进行模型回归,对

于不同的光谱数据,需求不同的回归方法。而由于样品光谱信息除包含有用信息外,还包含其他无关信息和噪声,因此,需要选用合适的光谱预处理方法来消除这些与样品信息无关的信息和噪声。表3所示为不同回归方法和不同预处理后的水分预测模型结果。由表可知,PLS的建模结果普遍好于PCR建模方法,表明PLS方法能更好地提取本研究中样品的光谱有用信息,因此,对于水分的模型选择使用PLS建模方法。而对于不同预处理模型结果,2号模型的精度最高,其使用的预处理为基线校正和平滑,表明本研究的样品光谱信息需要平滑来消除其随机噪声,同时需要基线校正来消除其线性误差。样品所有指标的模型都经过如表3所示的光谱预处理和回归方法比较选

择,由于篇幅限制,对于其他指标,本文只给出最优模型相关参数和方法。

经过适当的光谱预处理,样品的水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维、可溶性糖定量预测的最优模型的统计参数如表 4 所示,预测值与化学分析值的散点图如图 7 所示。

表 3 不同建模方法和预处理方法下的水分模型参数统计

Tab.3 Results of NIRS on-line models for moisture prediction using different regression and preprocessing methods											
编号	回归方法	平滑	导数/基线校正	散射校正	校正集			验证集			
					PC 个数	R_c^2	RMSEC/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	R_p^2	RMSEP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	RPD	RSD/%
1	PLS	None	None	None	7	0.72	3.83	0.73	3.87	1.92	9.29
2	PLS	(0,3) ^a	基线校正	None	6	0.81	3.18	0.75	3.76	1.97	9.03
3	PLS	None	1 st (2,15) ^b	None	5	0.71	3.91	0.72	3.98	1.86	9.55
4	PLS	None	基线校正	None	6	0.83	3.01	0.76	3.78	1.96	9.07
5	PLS	None	None	SNV	10	0.73	3.73	0.71	4.00	1.85	9.59
6	PLS	(0,3)	None	None	7	0.72	3.83	0.73	3.87	1.91	9.29
7	PCR	None	None	None	3	0.64	4.35	0.71	4.03	1.84	9.68
8	PCR	(0,3)	基线校正	None	7	0.66	4.21	0.65	4.40	1.68	10.57
9	PCR	None	1 st (2,15)	None	8	0.67	4.14	0.70	4.13	1.80	9.90
10	PCR	None	None	SNV	9	0.70	3.96	0.67	4.20	1.76	10.09
11	PCR	None	基线校正	None	4	0.63	4.36	0.64	4.47	1.66	10.72
12	PCR	(0,3)	None	None	6	0.69	4.00	0.69	4.24	1.75	10.17

注:a:平滑(0,3)中,“0”代表多项式次数,“3”代表窗口宽度,下同;b:1st(2,15)中,1st表示一阶导数,“2”代表多项式次数,“15”代表窗口宽度,下同。

表 4 校正集和验证集模型统计参数

Tab.4 Results of calibration and validation of NIRS on-line models								
营养成分	预处理	校正集			验证集			
		PC 个数	R_c^2	RMSEC/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	R_p^2	RMSEP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	RPD	RSD/%
水分	平滑(0,3) ^a ,基线矫正(加权最小二乘),自动缩放	6	0.81	3.18	0.75	3.76	1.97	9.03
粗蛋白	平滑(0,13),1 st (2,7),自动缩放	11	0.82	6.54	0.81	6.59	2.31	11.36
酸性洗涤纤维	SNV,1 st (2,15),自动缩放	10	0.81	15.59	0.77	16.25	2.02	3.75
可溶性糖	1 st (2,5),自动缩放	7	0.91	11.23	0.93	10.87	3.61	16.18

由表 4 可知,对于样品的水分含量来说,其定量预测模型的参数 R_c^2 、RMSEC、RMSEP、RSD、RPD 分别为 0.81、3.18 g/kg、3.76 g/kg、9.03%、1.97。模型相关系数大于 0.80,RSD 值小于 10%,表明模型可以用来对样品水分含量进行准确预测。PLS 建模过程中,给出了各波长点对最优模型贡献大小的得分图(如图 7 所示),其中水分模型的高贡献峰分布如图 7b 所示,5 000~5 600 cm^{-1} 的吸收峰主要对应水分 O—H 弯曲振动 2 倍频(5 155 cm^{-1})和 O—H 组合频(5 587 cm^{-1})。6 600~7 200 cm^{-1} 的吸收峰主要对应了 O—H 伸缩振动的 1 倍频(6 711 cm^{-1} 、6 897 cm^{-1})。

粗蛋白的定量预测模型统计参数 R_c^2 、RMSEC、RSD、RPD 值为 0.82、6.54 g/kg、11.36%、2.31。模型的相关系数大于 0.80,RPD 值大于 2.30,模型可以用来定量预测粗蛋白含量。对于粗蛋白模型的高贡献峰如图 7d 所示,4 673 cm^{-1} 的峰归于 C—H 伸缩振动/C=O 伸缩振动的组合频以及 C—H 对称

变形,4 785 cm^{-1} 的峰归于 O—H 组合频,5 747 cm^{-1} 的峰归于 S—H 伸缩振动 1 倍频,5 797 cm^{-1} 和 5 935 cm^{-1} 的峰归于 C—H 伸缩振动 1 倍频。

酸性洗涤纤维的定量预测模型参数 R_c^2 、RMSEC、RSD、RPD 值分别为 0.81、15.59 g/kg、3.75%和 2.02。模型相关系数大于 0.80,RSD 值小于 4%,表明模型可以用来定量预测样品的酸性洗涤纤维含量。酸性洗涤纤维模型的高贡献峰(图 7f)主要为 4 545、5 618、5 666、6 024、6 079 cm^{-1} ,其分别对应—CHO 中 C—H 伸缩振动/C=O 伸缩振动的组合频,纤维素中 C—H 伸缩振动 1 倍频/C—H 伸缩振动/HOH 变形的组合频,CH₂ 的 C—H 伸缩振动 1 倍频,cis—RCH=CHR 中的 C—H 伸缩振动 1 倍频,R—CH—CH 中 C—H 伸缩振动 1 倍频。

可溶性糖的模型参数 R_p^2 、RMSEP、RSD 和 RPD 分别为 0.93、10.87 g/kg、16.18%和 3.61。模型的相关系数为 0.93,表明该模型的预测值与化学分析值非

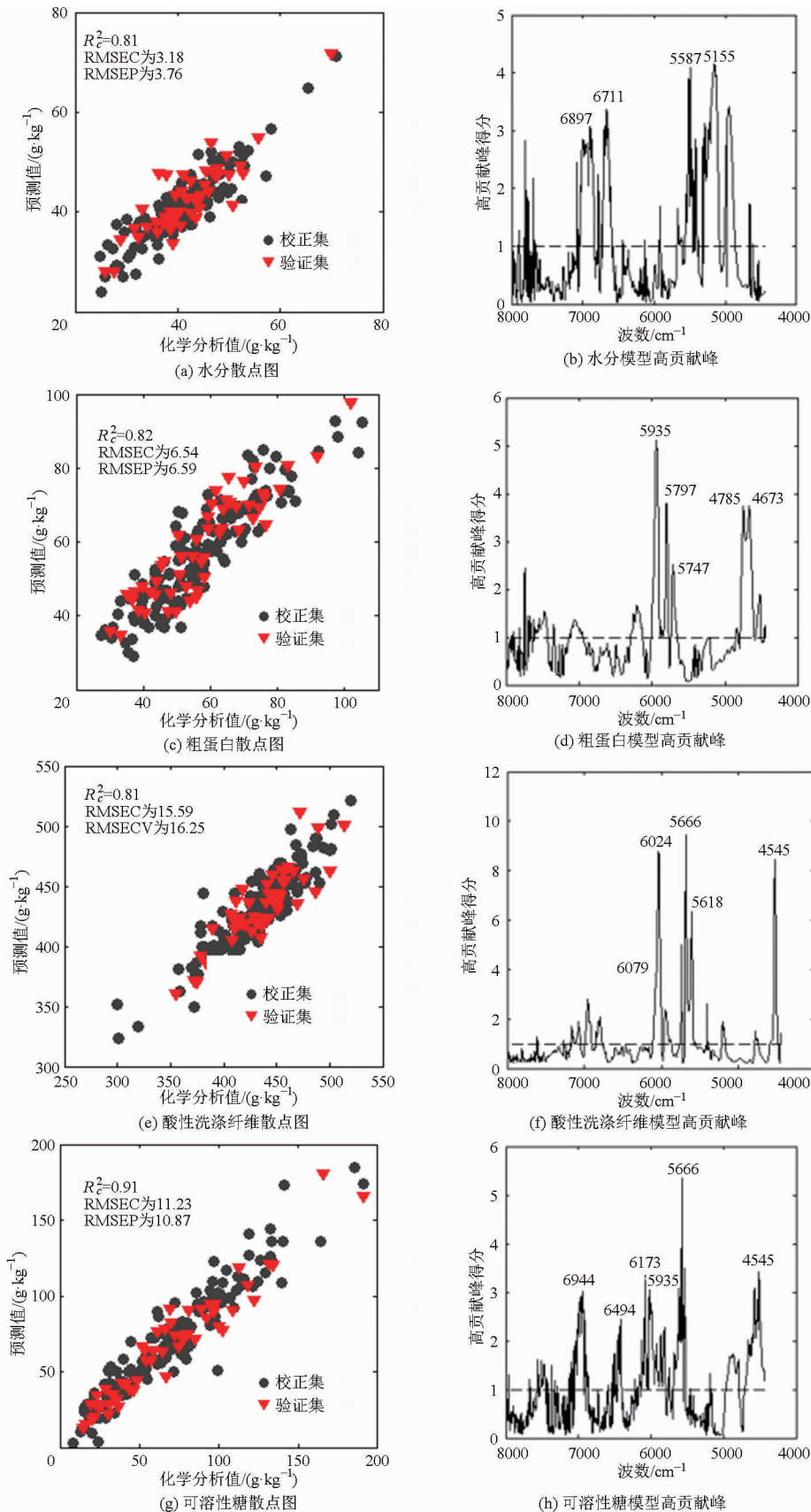


图 7 预测值与化学检测值散点图及模型高贡献光谱图

Fig. 7 Scatter plots of predicted values against measured values and variable importance of projection (VIP) scores for wave numbers in models

常接近,模型可以对样品的可溶性糖含量进行非常精确的定量预测。可溶性糖模型的高贡献峰较多(图 7h),主要包括—CHO 中 C—H 伸缩振动/C=O 伸缩振动的组合频($4\,545\text{ cm}^{-1}$),C—H 伸缩振动/C=O 伸缩振动的组合频以及 C—H 对称变形($4\,673\text{ cm}^{-1}$),C—H 伸缩振动 1 倍频/C—H 伸缩振动/HOH 变形的组合频($5\,618\text{ cm}^{-1}$),CH₂ 的 C—H 伸缩振动 1 倍频($5\,666\text{ cm}^{-1}$),C—H 伸缩振动 1 倍频($5\,935\text{ cm}^{-1}$ 、 $6\,173\text{ cm}^{-1}$),O—H 伸缩振动 1 倍频($6\,494\text{ cm}^{-1}$),O—H 伸缩振动 1 倍频/C=O 伸缩振动 3 倍频($6\,897\text{ cm}^{-1}$)和 C—H 组合频($6\,944\text{ cm}^{-1}$)。

2.4 模型精度讨论

由以上研究结果可知,利用近红外光谱技术在线定量预测玉米秸秆的水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维、可溶性糖含量具有可行性。然而,本研究的模型精度没有以往研究^[16-17]的精度高。分析可能原因

有:①在线光谱采集过程中采集窗口与样品表面之间相距 10 cm,采集过程处在一个相对开放的环境,环境自然光、水分、温度、空气以及灰尘都会给光谱的采集带来噪声。②采集系统的机械振动也会给光谱采集带来噪声,使光谱品质下降。③样品的粒度较大,且变异性较大。以上原因都会降低光谱的精确性和稳定性,从而降低模型的精度。

3 结束语

利用近红外光谱技术研究其在线定量预测玉米秸秆饲料营养成分水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维、可溶性糖含量的可行性。水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维、可溶性糖含量定量分析模型的 RSD 和 RPD 值分别为 9.03% 和 1.97、11.36% 和 2.31、3.75% 和 2.02、16.18% 和 3.61,表明模型可以用来进行定量分析。

参 考 文 献

- 1 农业部规划设计研究院. 农作物秸秆资源化利用资源调查与评价研究[R]. 国家能源局, 2012.
- 2 VOLKERS K C, WACHENDORF M, LOGES R, et al. Prediction of the quality of forage maize by near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2003, 109: 183 – 194.
- 3 XICCATO G, TROCINO A, DE BOEVER J L, et al. Prediction of chemical composition, nutritive value and ingredient composition of European compound feeds for rabbits by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2003, 104: 153 – 168.
- 4 COZZOLINO D, FASSIO A, FERNANDEZ E, et al. Measurement of chemical composition in wet whole maize silage by visible and near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 129(3 – 4): 329 – 336.
- 5 MENTINK R L, HOFFMAN P C, BAUMAN L M. Utility of near-infrared reflectance spectroscopy to predict nutrient composition and in vitro digestibility of total mixed rations [J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(6): 2320 – 2326.
- 6 WANG L, MENG Q X, REN L P. et al. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) and its application in the determination for the quality of animal feed and products [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1482 – 1487.
- 7 LIU X, HAN L J, YANG Z L. Transfer of near infrared spectrometric models for silage crude protein detection between different instruments [J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(11): 5599 – 5610.
- 8 ELVIRA F A, TOM F, AUGUSTO G C. et al. Evaluation of local approaches to obtain accurate near infrared (NIR) equations for prediction of ingredient composition of compound feeds [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(8): 924 – 929.
- 9 ANDERSSON M, SVENSSON O, FOLESTAD S. et al. NIR spectroscopy on moving solids using a scanning grating spectrometer-impact on multivariate process analysis [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2005, 75(1): 1 – 11.
- 10 ASTM E1757 – 01 Standard practice for preparation of biomass for compositional analysis [S]. 2007.
- 11 ASTM E 1756 – 08 Standard test method for determination of total solids in biomass [S]. 2008.
- 12 AOAC Official Method 2011.11 Protein (Crude) in animal feed, forage (plant tissue), grain, and oilseeds [S]. 2001.
- 13 AOAC Official Method 973.18 Fiber (acid detergent) and lignin (H₂SO₄) in animal feed [S]. 1977.
- 14 MCDONALD P, HENDERSON A R. Determination of water-soluble carbohydrates in grass [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1964, 15(6): 395 – 398.
- 15 XUE J J, YANG Z L, HAN L J, et al. Study of the influence of NIRS acquisition parameters on the spectral repeatability for on-line measurement of crop stover fuel properties [J]. *Fuel*, 2014, 117(B): 1027 – 1033.
- 16 LIU L Y, CHEN H Z. Prediction of maize stover components with near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(2): 275 – 278.
- 17 WANG Z H, LIU X L, LI R Z, et al. Development of near-infrared reflectance spectroscopy models for quantitative determination of water-soluble carbohydrate content in wheat stem and glume [J]. *Analytical Letters*, 2011, 44(15): 2478 – 2490.
- 18 HUANG H, FAULKNER D B, SINGH V, et al. Effect of harvest date on yield, composition and nutritive value of corn stover and DDGS [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(5): 1859 – 1864.
- 19 HRUSCHKA W R. Spectral reconstruction [M]//BURNS D A, CIURCIAK E W. Handbook of near-infrared analysis. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001: 431 – 433.