



近红外光谱技术分析高羊茅干草营养成分含量

代露茗 郭涛 李飞 王芳彬 贾倩民 潘发明 张爱文 李发弟

Analysis of nutrient content of tall fescue hay by near-infrared spectroscopy

DAI Luming, GUO Tao, LI Fei, WANG Fangbin, JIA Qianmin, PAN Faming, ZHANG Aiwen, LI Fadi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0448>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用近红外光谱技术快速预测苜蓿干草营养成分含量

Rapid prediction of nutrient content of alfalfa hay by using near infrared spectroscopy

草业科学. 2020, 37(11): 2374 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0601>

利用近红外光谱技术分析玉米秸秆和小麦秸秆的营养成分

Quantitative analysis of nutrients in corn straw and wheat straw using near-infrared spectroscopy

草业科学. 2020, 37(6): 1204 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0446>

青贮玉米不同部位(组织)养分含量近红外预测模型的构建

Construction of a near-infrared prediction model for nutrient content in different parts (tissues) of corn silage

草业科学. 2021, 38(9): 1753 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0356>

利用近红外光谱技术快速评定油菜秸秆的营养价值

Rapid evaluation of nutritional value of rape straw by near infrared spectroscopy

草业科学. 2019, 36(2): 522 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0522>

黄土高原13种栽培牧草营养成分NIRS模型分析

Analysis of nutritional content in 13 forage crop varieties in the Loess Plateau based on visible/near infrared reflectance spectroscopy

草业科学. 2017, 11(3): 575 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0137>

近红外技术预测放牧肉牛粪便组分

Predicting fecal composition of grazing beef cattle by near infrared spectroscopy

草业科学. 2020, 37(1): 178 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0148>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0448

代露茗, 郭涛, 李飞, 王芳彬, 贾倩民, 潘发明, 张爱文, 李发弟. 近红外光谱技术分析高羊茅干草营养成分含量. 草业科学, 2022, 39(4): 731-739.

DAI L M, GUO T, LI F, WANG F B, JIA Q M, PAN F M, ZHANG A W, LI F D. Analysis of nutrient content of tall fescue hay by near-infrared spectroscopy. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 731-739.

近红外光谱技术分析高羊茅干草营养成分含量

代露茗¹, 郭涛¹, 李飞¹, 王芳彬², 贾倩民¹, 潘发明³, 张爱文⁴, 李发弟^{1,5}

(1. 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室 / 兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室 / 兰州大学草地农业科技学院 / 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省畜牧技术推广总站, 甘肃 兰州 730030; 3. 甘肃省农业科学院畜草与绿色农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃省绵羊繁育技术推广站, 甘肃 张掖 734000; 5. 甘肃省肉羊繁育生物技术工程实验室, 甘肃 民勤 733300)

摘要: 本研究利用近红外光谱 (NIRS) 技术构建高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 干草的近红外预测模型, 于甘肃省庆阳市采集 101 份高羊茅样品, 将湿化学分析结果和 NIRS 结合, 利用改良偏最小二乘法 (MPLS) 进行预测模型的建立和验证。最终建立了高羊茅干草干物质 (DM)、粗蛋白质 (CP)、有机物 (OM)、中性洗涤纤维 (NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF)、粗脂肪 (EE)、灰分 (Ash) 这 7 种营养成分的预测模型, 其中建立的 CP 和 DM 的预测模型外部验证相对分析误差 (RPD) 值为 3.53 和 2.55, 预测模型的预测效果较好, 可以用于实际生产中预测成分含量; OM、NDF、ADF、EE 和 Ash 的预测模型 RPD 值为 2.17、2.04、2.06、2.06 和 2.02, 所预测的结果可以作为一些饲料生产中的参考。

关键词: 高羊茅; 反刍动物; 近红外光谱技术; 营养成分; 湿化学分析; 预测模型

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)04-0731-09

Analysis of nutrient content of tall fescue hay by near-infrared spectroscopy

DAI Luming¹, GUO Tao¹, LI Fei¹, WANG Fangbin², JIA Qianmin¹, PAN Faming³, ZHANG Aiwen⁴, LI Fadi^{1,5}

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems / Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Animal Husbandry Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730030, Gansu, China; 3. Institute of Animal & Pasture Science and Green Agriculture of Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. Gansu sheep breeding technology extension station, Zhangye 734000, Gansu, China; 5. Engineering Laboratory of Mutton Sheep Breeding and Reproduction Biotechnology in Minqin, Gansu Province, Minqin 733300, Gansu, China)

Abstract: In this study, near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) technology was used to construct a near-infrared prediction model of tall fescue hay. A total of 101 samples of tall fescue were collected from Qingyang City, Gansu Province. Wet chemical analysis results and NIRS were combined to establish and validate the prediction model by using modified partial least square (MPLS). Finally the prediction models of dry matter (DM), crude protein (CP), organic matter (OM), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), ether extract (EE) and crude ash (Ash) of tall fescue hay were established. The ratio of performance to deviation for validation (RPD) values of the prediction models of CP and DM were 3.53 and 2.55, respectively. The prediction models have good prediction effect and can be used to predict the content of components in actual production. The RPD values of the prediction models of OM, NDF, ADF, EE and Ash were 2.17, 2.04,

收稿日期: 2021-07-15 接受日期: 2021-08-25

基金项目: 甘肃省农牧厅科技项目 (GCLM2017-4); 农业农村部公益性行业科研专项 (201503134)

第一作者: 代露茗 (1998-), 女, 河北定州人, 在读硕士生, 主要从事饲料资源开发与利用。E-mail: dailm20@lzu.edu.cn

通信作者: 张爱文 (1972-), 男, 甘肃武威人, 高级畜牧师, 硕士, 主要从事畜牧技术推广。E-mail: snhcaw@qq.com

2.06, 2.06 and 2.02, respectively, and the predicted results can be used as reference for some production.

Keywords: tall fescue; ruminant; near-infrared spectroscopy; nutrient component; wet chemical analysis; prediction model

Corresponding author: ZHANG Aiwen E-mail: snhcaw@qq.com

畜牧业迅速发展对牧草的需求日益增大^[1-2]。高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 又称苇状羊茅, 作为主要的冷季型多年生草本植物, 一般在寒冷潮湿的气候中生长, 具有生长旺盛、抗旱、抗病虫、适应性强、耐牧性强以及生长季利用时间长等优势^[3]。在我国, 高羊茅主要分布在华北、西北中南部等无极端寒冷冬季以及华东、华中和西南等海拔较高、温度较低的地区^[4]。牧草型的高羊茅具有直立生长、植株高大、叶片粗糙、叶量丰富、生长快和绿期长等特点^[5], 可以作为优质的多年生牧草进行长期放牧, 或与一些其他的禾本科牧草或者豆科牧草进行混播^[6]。作为反刍动物牧草来源之一, 基于其良好的草质和丰富的营养, 高羊茅既可青饲又可晒制干草。因此评定高羊茅的营养价值, 对于反刍动物营养具有生产实践的意义。在目前生产实践中, 传统的常规营养成分测定牧草中的营养成分消耗大量的人力、物力和财力^[7], 所以需开发牧草营养成分的快速检测技术。

自 20 世纪 90 年代以来, 近红外光谱分析技术 (near-infrared reflectance spectroscopy, NIRS) 得到了快速发展。由于 NIRS 具有方便、快速、高效、无损、低成本和重现性好等优点^[8-9], 目前被已应用在产品分析、化工、临床、制药、环境、纺织和食品等众多领域中^[10-15]。测定未知样品中的成分浓度和性质时, 可以直接利用样品的吸收光谱图和已经建立的矫正模型来进行预测。迄今为止, 国内外学者利用 NIRS 技术建立了苜蓿 (*Medicago sativa*) 干草^[16-17]、玉米 (*Zea mays*) 青贮^[18]、小麦 (*Triticum aestivum*) 秸秆、玉米秸秆^[19] 等常见饲用干草各营养成分预测模型, 而对于高羊茅牧草营养成分、应用价值等缺乏深入研究以及数据支撑。

本研究旨在利用 NIRS 将高羊茅干草各营养成分湿化学分析值与近红外光谱数据结合, 来分析高羊茅干草中的干物质 (dry matter, DM)、粗蛋白质 (crude protein, CP)、有机物 (organic matter, OM)、中性洗涤纤维 (neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维 (acid detergent fiber, ADF)、粗脂肪 (ether extract, EE) 和粗灰分 (Ash) 的含量, 从而建立高羊茅干草的定标模

型, 为以后研究分析和快速预测高羊茅干草这 7 种营养成分含量提供可靠的参考和依据, 以进一步提高牧草检测技术和应用范围, 从而有利于准确地评定饲料营养价值、合理配制动物日粮、充分发挥动物生产性能等。

1 材料与amp;方法

1.1 样品的采集与处理

本研究在 2019–2020 年期间随机选取甘肃省庆阳市环县 (36°17'01" N, 107°31'36" E) 的抽穗期高羊茅, 进行刈割取样, 共计 101 份。称量鲜重后带回实验室, 于 105 °C 杀青 15 min 后, 置于 65 °C 干燥 48 h 至恒重。室温回潮 6 h 后将样品用微型植物试样粉碎机 (FZ 102, 中国) 粉碎, 过 1.00 mm 筛。将粉碎过筛后的样品混合均匀, 密封于自封袋中, 干燥避光, 常温保存, 以备近红外光谱仪扫描和湿化学分析。

1.2 高羊茅干草常规营养成分含量的测定

高羊茅干草中 DM 和 Ash 含量的测定按照 GB/T 6438–2007 和 GB/T 6435–2006 的标准使用全自动水分灰分仪 (Pre-ASH 340, 瑞士) 进行测定。CP 含量的测定按照 GB/T 24318–2009 的标准, 使用杜马斯定氮仪 (DN 2000, 中国) 进行测定。NDF 和 ADF 含量的测定使用半自动纤维分析仪 (ANKOM a200i, 美国) 进行测定。EE 含量的测定按照 GB/T 6433–2006 的标准使用全自动脂肪仪 (ANKOM XT15i, 美国) 进行测定。最终数据通过 Excel 2019 进行统计整理。

1.3 高羊茅干草近红外分析

1.3.1 近红外光谱图的采集

本研究利用光谱为 850~2 500 nm 的多功能近红外分析仪 (FOSS 2500, 丹麦) 对高羊茅样品扫描来进行近红外光谱图的采集。先将仪器预热 30 min 左右, 然后将样品混合均匀后装入样品杯的 1/3~2/3 处, 每个样品进行 3 次重复装样后扫描, 最后取 3 次光谱的平均值作为该样品的光谱图, 并对平均光谱图进行一阶导数处理和二阶导数处理, 光谱图中的特征谱峰会有所增加^[19]。

1.3.2 近红外预测模型的建立与验证

本研究使用 WinISI IV 软件对高羊茅的近红外吸收光谱图和湿化学实测值统计分析处理。在建立定标模型之前,将各营养成分按含量高低进行排序,按 1:4 的比例将样品分为验证集 ($n = 20$) 和定标集 ($n = 81$)。使用 MPLS 对各种不同营养成分分别构建定标模型。

鉴于光谱会受到光谱漂移、背景信息和噪声等因素影响而产生干扰,需要结合不同的导数处理对光谱进行散射校正,其中光谱的散射校正处理方式包含 11 种:无处理 (none); 标准正态变量变换结合散射处理 (SNV and Detrend); 标准正态变量变化 (SNV only); 去散射处理 (Detrend only); 标准多元离散校正处理 (Standard MSC); 加权多元离散校正处理 (Weighted MSC); 反向多元离散校正处理 (Inverse MSC); 导数范围和补偿处理 (Scale and Offset); 导数范围和线性处理 (Scale and Linear); 导数范围和二次处理 (Scale and Quadratic); 导数、导数范围和补偿处理 (Derivative, Scale and Offset)。导数处理方式包含 3 种:0, 0, 1, 1, 1, 4, 4, 1, 2, 4, 4, 1, 逗号间隔的 4 个数字依次表示:导数处理阶数、导数数据间隔、一次平滑点数和二次平滑点数。在创建预测模型的过程中,进行内部交叉验证和外部验证,使用全局距离 (global hood, $\text{GH} \geq 3$) 和“T”检验 ($T > 2.5$) 来对异常的样品数据进行剔除^[20]。

1.3.3 高羊茅干草近红外预测模型的评价

采用交叉验证相关系数 (coefficient of determination for cross-validation, 1-VR)、定标标准分析误差 (standard error of calibration, SEC)、交互验证标准分析误差 (standard error of cross-validation, SECV) 指标来判断定标模型的准确性。其中 1-VR 值越大,则预测模型效果越好; SEC 值和 SECV 值越小,则预测模型效果越好^[16]。当 1-VR 值最大, SECV 值最小时预测模型准确性相对较高,可作为高羊茅干草最佳定标模型^[21]。

在对验证集数据进行评价时,参考预测决定系数 (coefficient of determination for validation, RSQ), 其中 RSQ 值越接近于 1, 则预测模型效果越好。如果在 $0 < \text{RSQ} \leq 0.25$ 时,表示创建的预测模型不可用; 在 $0.26 \leq \text{RSQ} \leq 0.49$ 时,表示创建的预测模型的相关性较差; 在 $0.50 \leq \text{RSQ} \leq 0.64$ 时,表示创建的预测模型可以用来粗略地筛选样品; 在 $0.66 \leq \text{RSQ} \leq 0.81$ 时,表示创建的预测模型可以用在实际生产中

的预测; 在 $0.83 \leq \text{RSQ} \leq 0.90$ 时,表示创建的预测模型可以用在一些生产实践中的精确预测^[16, 22]。

利用外部验证相对分析误差 (ratio of performance to deviation for validation, $\text{RPD} = \text{SD}/\text{SEP}$) 验证预测模型的准确性时,在 $\text{RPD} < 2.0$ 时,表示创建的预测模型预测效果较差,不能用于实际生产实践之中; 在 $2.0 \leq \text{RPD} < 2.5$ 时,表示创建的预测模型预测能力相对较弱,不能代表湿化学分析实测值,但可以用于粗略地预测含量; 在 $\text{RPD} \geq 2.5$ 时,表示创建的预测模型可以用于实际的分析当中^[8, 23]。

2 结果

2.1 高羊茅干草常规营养成分含量

高羊茅干草 7 种营养成分的含量变化范围较大,有足够的变化梯度,符合利用近红外光谱技术来建立牧草营养成分预测模型的要求 (表 1)。DM 变异程度最小, Ash 变异程度最大。定标集和验证集各营养成分湿化学分析结果 (表 2) 显示,其中在定标集中,DM 含量在 93.71%~96.72%, CP 含量在 11.28%~29.71%, OM 含量在 77.43%~98.93%, NDF 含量在 30.27%~58.32%, ADF 含量在 14.12%~34.01%, EE 含量在 1.76%~5.79%, Ash 含量在 1.07%~22.57%。验证集中各营养成分的含量都在定标集的范围内,其中 DM 含量在 94.29%~96.30%, CP 含量在 11.40%~25.06%, OM 含量在 79.37%~94.78%, NDF 含量在 31.07%~52.74%, ADF 含量在 15.90%~29.03%, EE 含量在 1.82%~4.89%, Ash 含量在 3.06%~18.49%。

2.2 高羊茅干草近红外扫描光谱图

经过对每个样品 3 次重复装样扫描后求平均得到最终的平均光谱图 (图 1), 高羊茅中各营养成分种类和含量的不同以及含氢键的数量不同,使得到的光谱图中存在很多吸收峰。图 2 和图 3 分别为高羊茅干草近红外扫描光谱图为了消除基线漂移和背景信息的影响,一阶导数处理和二阶导数处理后得到的光谱图。

2.3 高羊茅干草近红外定标模型的建立

利用 WinISI IV 软件将高羊茅干草 7 种营养成分的近红外光谱数据与湿化学分析值相结合,再结合 11 种去散射处理和 3 种导数处理后,分别对 7 种营养成分进行单独的定标。以最大 1-VR 值和最小

表1 高羊茅干草7种营养成分湿化学分析结果(干物质基础)
Table 1 Results of wet chemical analysis of seven nutrients in tall fescue hay (DM basis)

营养成分 Nutrient	样本数量 Sample number	最小值 Minimum/%	最大值 Maximum/%	平均值 Mean/%	标准差 SD	变异系数 CV/%
干物质 DM	101	93.71	96.72	95.29	0.55	0.57
粗蛋白 CP	101	11.28	29.71	17.53	3.83	21.86
有机物 OM	101	77.43	98.93	88.95	3.68	4.14
中性洗涤纤维 NDF	101	30.27	58.32	46.26	5.00	10.81
酸性洗涤纤维 ADF	101	14.12	34.01	24.86	3.15	12.69
粗脂肪 EE	101	1.76	5.79	3.56	0.71	19.84
粗灰分 Ash	101	1.07	22.57	11.05	3.68	33.33

DM: dry matter; CP: crude protein; OM: organic matter; NDF: neutral detergent fiber; ADF: acid detergent fiber; EE: ether extract; Ash: crude ash; this is applicable for the following tables as well.

表2 高羊茅干草定标集和验证集各营养成分含量(干物质基础)
Table 2 Nutrient content in the calibration set and validation set of tall fescue hay (DM basis)

样品类别 Sample sort	营养成分 Nutrient	样本数量 Sample number	最小值 Minimum/%	最大值 Maximum/%	平均值 Mean/%	标准差 SD	变异系数 CV/%
定标集 Calibration set	干物质 DM	81	93.71	96.72	95.30	0.55	0.58
	粗蛋白 CP	81	11.28	29.71	17.61	3.89	22.09
	有机物 OM	81	77.43	98.93	89.03	3.69	4.15
	中性洗涤纤维 NDF	81	30.27	58.32	46.38	5.00	10.77
	酸性洗涤纤维 ADF	81	14.12	34.01	24.94	3.18	12.76
	粗脂肪 EE	81	1.76	5.79	3.57	0.71	20.00
	粗灰分 Ash	81	1.07	22.57	11.14	3.75	33.64
验证集 Validation set	干物质 DM	20	94.29	96.30	95.25	0.51	0.54
	粗蛋白 CP	20	11.40	25.06	17.21	3.58	20.77
	有机物 OM	20	79.37	94.78	88.38	3.90	4.41
	中性洗涤纤维 NDF	20	31.07	52.74	45.78	4.99	10.89
	酸性洗涤纤维 ADF	20	15.90	29.03	24.58	3.02	12.30
	粗脂肪 EE	20	1.82	4.89	3.49	0.66	19.03
	粗灰分 Ash	20	3.06	18.49	10.70	3.39	31.72

SECV 值为依据,筛选出每种营养成分最佳定标模型的处理方式如表3所列。不同营养成分的最佳光谱处理方式和导数处理方式有所不同,其中DM的光谱和导数处理的最佳组合是 none 和 1, 4, 4, 1; CP的光谱和导数处理的最佳组合是 Derivative, Scale and Offset 和 2, 4, 4, 1; OM的光谱和导数处理的最佳组合是 none 和 2, 4, 4, 1; NDF的光谱和导数处理的最佳组合是 Derivative, Scale and Offset 和 1, 4, 4, 1; ADF的光谱和导数处理的最佳组合是 Scale and Quadratic 和 0, 0, 1, 1; EE的光谱和导数处理的最佳组合是 Detrend only 和 1, 4, 4, 1; Ash的光谱和导数处理的最佳组合是 SNV and Detrend 和 2, 4, 4, 1。7种营养成分的最佳定标模型中的 SEC、SECV 和 1-VR 值分别为: DM为 0.17、0.22 和 0.85, CP为

0.33、0.67 和 0.97, OM为 1.22、1.42 和 0.81, NDF为 1.40、1.63 和 0.86, ADF为 0.99、1.09 和 0.80, EE为 0.21、0.28 和 0.84, Ash为 0.99、1.52 和 0.80。

2.4 高羊茅干草最佳近红外定标模型的验证

在高羊茅干草最佳近红外定标模型建立后,用20个验证集样品进行验证,如表4所列验证集中DM的RSQ、SEP、RPD值分别为0.85、0.21和2.55,CP的分别为0.94、0.83和3.53,OM为0.78、1.58和2.17,NDF的分别为0.78、2.38和2.04,ADF的分别为0.84、1.21和2.06,EE的分别为0.79、0.28和2.06,Ash的分别为0.77、1.47和2.02。因此,建立的高羊茅干草7种营养成分的近红外预测模型(表4),其中OM、NDF、ADF、EE、Ash的最佳定标模型中 $2.0 \leq RPD < 2.5$,表明可以用在实际生产中的一些粗略的预测;DM、

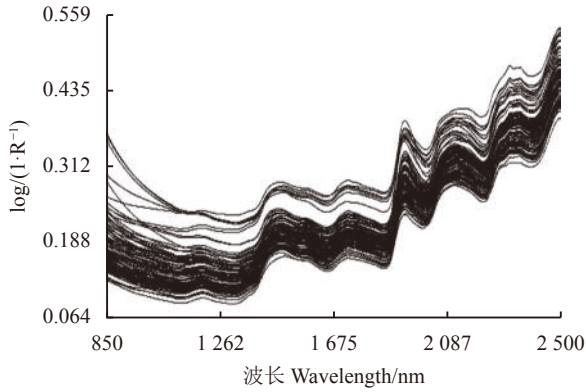


图 1 高羊茅干草近红外原始光谱图

Figure 1 Near-infrared spectrogram of tall fescue hay

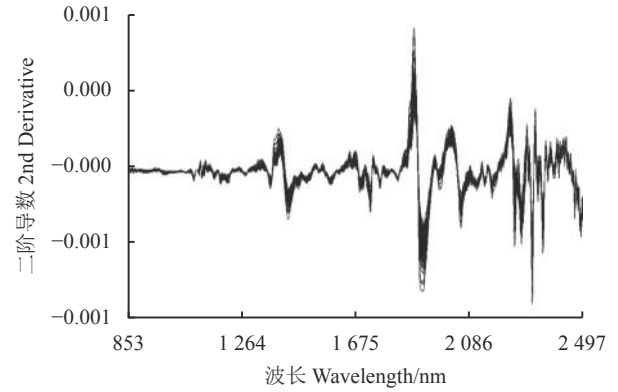


图 3 高羊茅干草二阶导数处理光谱图

Figure 3 Second derivative spectrogram of tall fescue hay

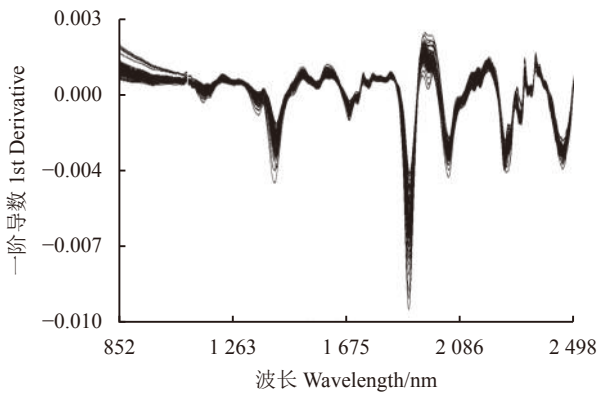


图 2 高羊茅干草一阶导数处理光谱图

Figure 2 First derivative spectrogram of tall fescue hay

CP 的最佳定标模型中 RPD ≥ 2.5 , 表明可以用于一些准确度要求较高的预测, 其预测精度相对较高。

高羊茅干草每种营养成分的预测值与湿化学分析值的相关性关系如图 4 所示, 其中 CP 的 R^2 为 0.937 4, 表明预测值与湿化学分析值的相关性关系最好, DM 的 R^2 为 0.738 6, 表明预测值与湿化学分析值的相关性关系较差。

3 讨论

相关学者已经建立了玉米青贮^[24]、苜蓿干草^[16]、油菜 (*Brassica campestris*) 秸秆^[20]、小麦秸秆^[19]、高粱 (*Sorghum bicolor*)^[25] 等一些饲用粮草的营养成分预测模型。闫佰鹏等^[20] 基于 NIRS 技术, 对采集到的 125 份油菜秸秆样品测定其营养成分, 分别建立定标模型, 最终内部验证结果高于外部验证结果, 可能与饲料样品的性质、实验室测定值的误差以及所选取的外部验证样本数有关, 油菜秸秆 DM、CP、NDF、ADF、EE 和 Ash 的 1-VR 均在 0.90 左右, 所建立的 NIRS 模型是可行的, 中性洗涤不溶蛋白质 (neutral detergent insoluble protein, NDIP)、酸性洗涤不溶蛋白质 (acid detergent insoluble protein, ADIP)、酸性洗涤木质素 (acid detergent lignin, ADL) 所构建 NIRS 模型效果不太理想, 还需进一步优化; 何云等^[16] 利用 265 份苜蓿干草样品分析验证后所建立 DM、CP、NDF、ADF 和 Ash 的各营养成分定标模型, 其

表 3 高羊茅干草各营养成分最佳定标模型
Table 3 Optimal calibration models of nutrients in tall fescue hay

营养成分 Nutrition component	样本数量 Sample number	光谱处理 Spectrum treatment	参数 Parameter	定标标准分析 误差 SEC	交叉验证标准 误差 SECV	交叉验证相关 系数 1-VR
干物质 DM	81	none	1, 4, 4, 1	0.17	0.22	0.85
粗蛋白 CP	81	Derivative, Scale and Offset	2, 4, 4, 1	0.33	0.67	0.97
有机物 OM	81	none	2, 4, 4, 1	1.22	1.42	0.81
中性洗涤纤维 NDF	81	Derivative, Scale and Offset	1, 4, 4, 1	1.40	1.63	0.86
酸性洗涤纤维 ADF	81	Scale and Quadratic	0, 0, 1, 1	0.99	1.09	0.80
粗脂肪 EE	81	Detrend only	1, 4, 4, 1	0.21	0.28	0.84
粗灰分 Ash	81	SNV and Detrend	2, 4, 4, 1	0.99	1.52	0.80

表4 高羊茅干草最佳定标模型验证结果
Table 4 Validation results of the optimal calibration model of tall fescue hay

营养指标 Nutrition index	化学测定值 Chemical measured value	预测值 Predictive value	预测决定 系数 RSQ	预测标准 误差 SEP	外部验证相对 分析误差 RPD
干物质 DM	95.29	95.33	0.85	0.21	2.55
粗蛋白 CP	16.80	16.94	0.94	0.83	3.53
有机物 OM	88.80	89.00	0.78	1.58	2.17
中性洗涤纤维 NDF	45.78	46.06	0.78	2.38	2.04
酸性洗涤纤维 ADF	24.86	25.29	0.84	1.21	2.06
粗脂肪 EE	3.42	3.43	0.79	0.28	2.06
粗灰分 Ash	11.10	11.15	0.77	1.47	2.02

RSQ: coefficient of determination for validation; SEP: standard error of prediction; RPD: ratio of performance to deviation for validation.

中 DM、CP、NDF 和 ADF 的 RSQ 值都大于 0.80, 外部验证的 RPD 值都大于 2.50, 均可用于实际生产中的预测, 但是 Ash 的 RSQ 值和 RPD 值都较低, 只能用于粗略的预测, 这可能是由于物质本身的化学结构与测定方法的准确度与精确度的影响, 因为 NIRS 是根据有机物中的含氢基团对近红外光的吸收, 物质结构越简单越容易形成明显的吸收光谱, 而且 NIRS 这种间接分析技术的结果与常规测定的准确性和精密度相关; 常春等^[26] 利用 120 份羊草 (*Leymus chinensis*) 样品, 全面建立了 DM、CP、NDF、ADF、ADL、EE 等 9 项羊草品质 NIRS 模型, 除 EE 外, 各项指标均可用于实际生产中的测定, 可能是由于牧草中的 EE 含量较低, 化学测量误差相对较大。

本研究中在两种光谱处理后, 光谱图中的特征谱峰都有所增加, 证实了在一定程度上消除了一些外界因素的影响。在 1 436 nm 附近的吸收峰可能是由多种因素形成: 与脂肪族和芳香族碳氢化合物相关的亚甲基 ($-\text{CH}_2$) 的 C-H 结合带、淀粉的 C-H 伸缩; 酰胺、蛋白质或芳香胺的 N-H 伸缩; 酮的 C=O 伸缩等。1 926 nm 附近的吸收峰可能与水分子和多糖中的 O-H 伸缩和 HOH 变形结合、酰胺中的 C=O 伸缩有关。2 100 nm 附近的吸收峰可能与淀粉 O-H 弯曲或 C-O 拉伸有关, 也可能与淀粉或纤维素的 C-O 拉伸有关。而 2 302 nm 附近吸收峰可能与蛋白质的 C-H 弯曲、由淀粉和其他多糖结合而成 C-H 伸缩和 CH_2 变形、连接到肽链的 N-H 上的 C=O 氢键、以及多糖的 C-H 弯曲有关^[27]。2 488 nm 处的吸收峰与纤维素的 C-H 拉伸和 C-C 结合有关^[24]。

本研究共采集 101 份高羊茅样品, 使用 NIRS 技术结合湿化学分析值建立了高羊茅干草 DM、CP、OM、NDF、ADF、EE 和 Ash 预测模型。每种营养成

分的定标模型和验证结果都有所不同, 原因可能是不同营养成分中所含有机官能团的种类与数量都有所不同, 导致近红外光在不同波段有不同的吸收。这 7 种营养成分的预测模型中 1-VR 全都在 0.80 以上, 相关性分析 R^2 都在 0.70 以上, 再结合 RPD 值, 各项营养成分的 RPD 值均大于等于 2。这表明所建立的高羊茅干草 DM、CP、OM、NDF、ADF、EE 和 Ash 预测模型均可用于实际生产中的预测^[22]。其中 CP 的定标模型中 1-VR 和 RPD 值最高, 分别为 0.97 和 3.53, 表明预测效果最好, 这可能是由于含氮化合物蛋白质中主要含氢基团为 N-H 键, 在近红外光谱区会产生很强的吸收峰, 因而可以获得较好的定标结果。EE、ADF 和 NDF 的定标模型中 1-VR 和 RPD 值较 CP、DM 和 OM 低的原因可能是在高羊茅牧草中脂肪含量较低, 湿化学分析误差较大; ADF 和 NDF 中纤维素和木质素等的内部结构较复杂。Ash 的定标模型中 1-VR 和 RPD 值最低, 可能是因为粗灰分是无机物, 没有含氢键, 在近红外光谱区没有吸收, 而是通过影响其他含氢键的吸收来间接测定粗灰分的含量, 导致预测结果较不稳定。

4 结论

本研究利用 101 个高羊茅样品, 结合 NIRS 以及 MPLS 来建立了高羊茅干草 DM、CP、OM、NDF、ADF、EE 和 Ash 这 7 种营养成分的预测模型。其中建立的 DM 和 CP 的预测模型 RPD 值为 2.55 和 3.53, 预测模型的预测效果较好, 可以用于实际生产中的预测成分含量; OM、NDF、ADF、EE 和 Ash 的预测模型 RPD 值为 2.17、2.04、2.06、2.06 和 2.02, 所预测的结果可以作为饲料生产中的参考。

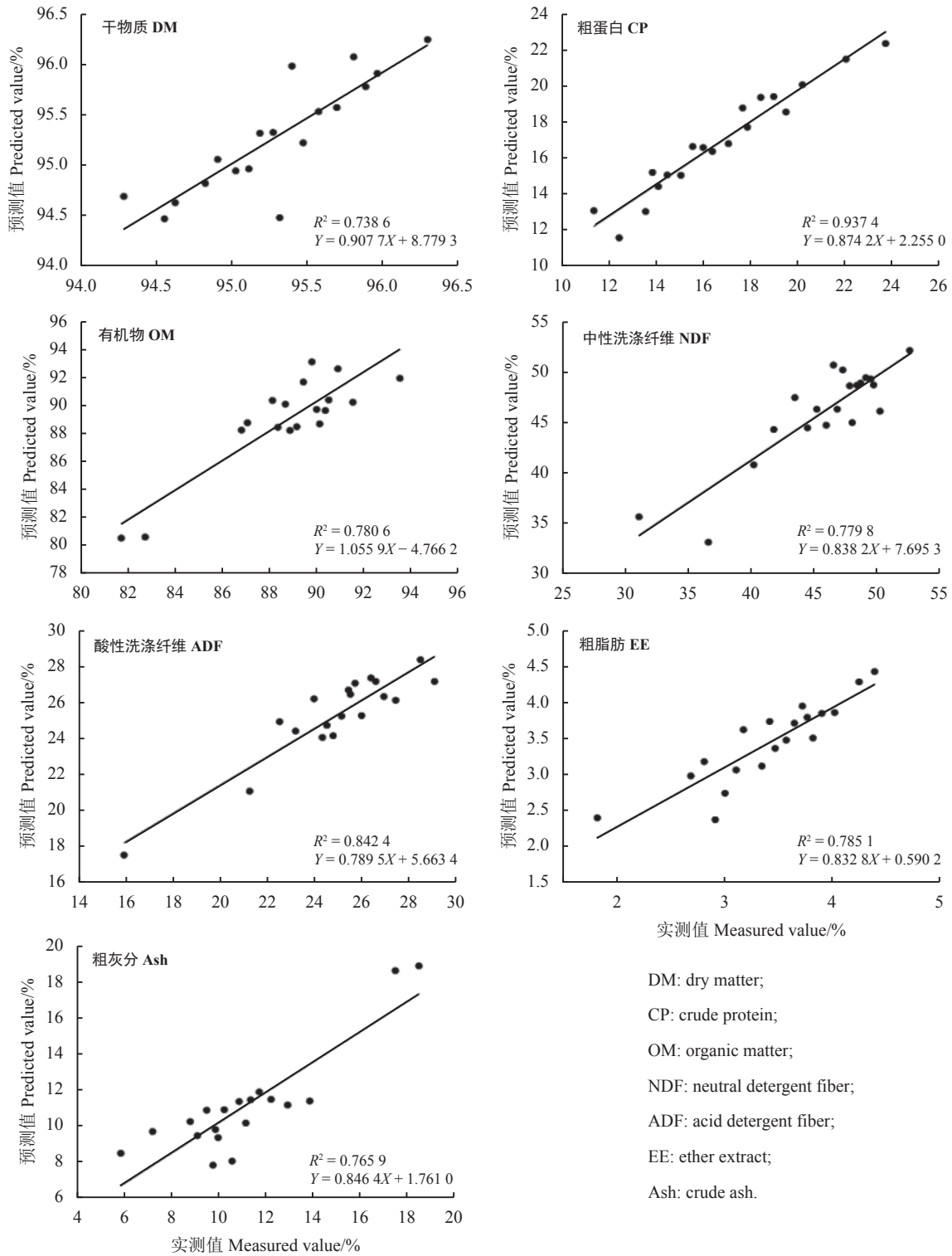


图 4 营养成分含量的预测值与化学测定值的相关性

Figure 4 Correlation between predicted value and chemical measured value of nutrition component

参考文献 References:

[1] 陈昌荣, 阮晓贵, 黄琦, 刘琼波, 李文霞, 李飞艳. 野生牧草种质资源保护与开发. 畜牧兽医科学(电子版), 2020(17): 146-147.
CHEN C R, RUAN X G, HUANG Q, LIU Q B, LI W X, LI F Y. Conservation and development of wild herbage germolasm

- resources. *Graziery Veterinary Sciences (Electronic Version)*, 2020(17): 146-147.
- [2] 马宏义. 野生牧草种质资源在生态环境中的地位和保护措施. *当代畜牧*, 2020(10): 44-45.
MA H Y. Status and protection measures of wild forage germplasm resources in ecological environment. *Contemporary Animal Husbandry*, 2020(10): 44-45.
- [3] 吴佳海, 牟琼, 唐成斌, 尚以顺, 莫本田, 瓦庆荣. 牧草新品种黔草 1 号高羊茅的选育. *贵州农业科学*, 2006(4): 75-79.
WU J H, MOU Q, TANG C B, SHANG Y S, MO B T, WA Q R. Breeding of qiancao 1, a new festuca arundinacea variety. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006(4): 75-79.
- [4] 乔玉梅. 禾本科牧草与大豆秸秆饲用产量和营养品质的研究. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 2008.
QIAO Y M. Yield and quality of soybean straw and gramineal forage. PhD Thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2008.
- [5] 伍文丹, 雷雄, 赵文达, 杨晓鹏, 熊毅, 熊艳丽, 张新全, 马啸. 饲草型高羊茅引进品种的表型变异分析. *草业科学*, 2019, 36(10): 2622-2630.
WU W D, LEI X, ZHAO W D, YANG X P, XIONG Y, XIONG Y L, ZHANG X Q, MA X. Analysis of phenotypic variation of introduced cultivars of tall fescue. *Pratacultural Science*, 2019, 36(10): 2622-2630.
- [6] 彭艳, 马素洁, 南吉, 索朗德吉, 魏学红. 西藏林芝地区阿尔冈金紫花苜蓿与高羊茅混播效果研究. *黑龙江畜牧兽医*, 2019(16): 129-132.
PENG Y, MA S J, NAN J, Suolangdeji, WEI X H. Study on the mixed sowing effect of Algonquin alfalfa and tall fescue in Linzhi, Tibet. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019(16): 129-132.
- [7] 陈志敏, 张姝, 王征南, 乌远征. 我国东北、西北地区秸秆牧草类饲料资源常规概略养分含量调查报告. *中国奶牛*, 2020(4): 59-62.
CHEN Z M, ZHANG S, WANG Z N, WU Y Z. Investigation report on nutrient content of straw and forage feed resources in northeast and northwest China. *China Dairy Cattle*, 2020(4): 59-62.
- [8] ANDERSON J V, WITTENBERG A, LI H, BERTI M T. High throughput phenotyping of *Camelina sativa* seeds for crude protein, total oil, and fatty acids profile by near infrared spectroscopy. *Industrial Crops and Products*, 2019, 137: 501-507.
- [9] IKOYI A Y, YOUNGE B A. Influence of forage particle size and residual moisture on near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibration accuracy for macro-mineral determination. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 270: 114675.
- [10] 李磊, 陈丰. 红外光谱分析技术在化工生产中的应用. *化工设计通讯*, 2020, 46(4): 150-156.
LI L, CHEN F. Application of infrared spectrum analysis technology in chemical production. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, 46(4): 150-156.
- [11] 张梦璐, 张国权. 红外光谱技术在食品检测中的应用. *中国食品*, 2021(7): 95.
ZHANG M L, ZHANG G Q. Application of infrared spectroscopy in food detection. *China Food*, 2021(7): 95.
- [12] 王娅宁, 薛旭东. 近红外光谱在制药过程控制中的应用分析. *中国卫生产业*, 2016, 13(33): 50-52.
WANG Y N, XUE X D. Application of near infrared spectroscopy in pharmaceutical process control. *China Health Industry*, 2016, 13(33): 50-52.
- [13] 孙克强, 王京力, 廖佳, 赵珍玉. 近红外光谱技术在纺织产品检测中的应用. *轻纺工业与技术*, 2019, 48(8): 189-191.
SUN K Q, WANG J L, LIAO J, ZHAO Z Y. Application of near infrared spectroscopy in textile products detection. *Light and Textile Industry and Technology*, 2019, 48(8): 189-191.
- [14] 欧宇. 浅谈红外光谱技术在环境科学中的应用与展望. *江西化工*, 2021, 37(1): 94-96.
OU Y. Application and prospect of infrared spectroscopy in environmental science. *Jiangxi Chemical Industry*, 2021, 37(1): 94-96.
- [15] 毛建雄, 肖东, 罗燕, 张翹, 王秀良. 近红外光谱技术在测定新生儿坏死性小肠结肠炎脑血氧饱和度和判定肠坏死程度的探讨. *岭南现代临床外科*, 2020, 20(5): 562-566, 572.
MAO J X, XIAO D, LUO Y, ZHANG C, WANG X L. Determination of cerebral oxygen saturation and determination of intestinal necrosis in neonatal necrotizing enterocolitis by near infrared spectroscopy. *Lingnan Modern Clinics in Surgery*, 2020, 20(5): 562-566, 572.
- [16] 何云, 张亮, 武小姣, 郑爱荣, 刘薇, 贺永惠, 牛岩, 王跃先, 张晓霞. 苜蓿干草常规营养成分含量近红外预测模型的建立. *动物营养学报*, 2019, 31(10): 4684-4690.

- HE Y, ZHANG L, WU X J, ZHENG A R, LIU W, HE Y H, NIU Y, WANG Y X, ZHANG X X. Near infrared prediction model establishment for routine nutritional component contents of alfalfa hay. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(10): 4684-4690.
- [17] 郭涛, 黄右琴, 郭龙, 李发弟, 潘发明, 张兆杰, 李飞. 利用近红外光谱技术快速预测苜蓿干草营养成分含量. *草业科学*, 2020, 37(11): 2374-2381.
- GUO T, HUANG Y Q, GUO L, LI F D, PAN F M, ZHANG Z J, LI F. Rapid prediction of nutrient content of alfalfa hay by using near infrared spectroscopy. *Pratacultural Science*, 2020, 37(11): 2374-2381.
- [18] 刘娜, 王俊, 屠焰, 刁其玉, 陈国顺, 郭江鹏, 齐志国. 玉米青贮饲料质量评定及其营养成分快速检测方法的建立. *家畜生态学报*, 2019, 40(10): 1-7.
- LIU N, WANG J, TU Y, DIAO Q Y, CHEN G S, GUO J P, QI Z G. The quality evaluation and the development of rapid detection method for nutrient components of corn silage. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2019, 40(10): 1-7.
- [19] 郭涛, 黄右琴, 兰贵生, 闫佰鹏, 李发弟, 李飞. 利用近红外光谱技术分析玉米秸秆和小麦秸秆的营养成分. *草业科学*, 2020, 37(6): 1204-1213.
- GUO T, HUANG Y Q, LAN G S, YAN B P, LI F D, LI F. Quantitative analysis of nutrients in corn straw and wheat straw using near-infrared spectroscopy. *Pratacultural Science*, 2020, 37(6): 1204-1213.
- [20] 闫佰鹏, 王芳彬, 李成海, 周文静, 李发弟, 李飞. 利用近红外光谱技术快速评定油菜秸秆的营养价值. *草业科学*, 2019, 36(2): 522-530.
- YAN B P, WANG F B, LI C H, ZHOU W J, LI F D, LI F. Rapid evaluation of nutritional value of rape straw by near infrared spectroscopy. *Pratacultural Science*, 2019, 36(2): 522-530.
- [21] REDDERSEN B, FRICKE T, WACHENDORF M. Effects of sample preparation and measurement standardization on the NIRS calibration quality of nitrogen, ash and NDFom content in extensive experimental grassland biomass. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 183(3-4): 77-85.
- [22] 郭涛, 黄右琴, 代露茗, 郭龙, 李发弟, 潘发明, 张兆杰, 李飞. 苜蓿干草不同处理方式对近红外预测模型预测准确性的影响. *动物营养学报*: 1-10[2021-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5461.S.20210317.1717.029.html>.
- GUO T, HUANG Y Q, DAI L M, GUO L, LI F D, PAN F M, ZHANG Z J, LI F. Effects of different processing methods of alfalfa hay on accuracy of near-infrared prediction models. *Chinese Journal of Animal Nutrition*: 1-10[2021-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5461.S.20210317.1717.029.html>.
- [23] 向娜娜, 赵江涛, 陈丽, 夏超笃, 王晓琼, 陈林, 纪昌正. 基于近红外光谱技术评估大豆皮纤维含量的研究. *动物营养学报*, 2021, 33(3): 1792-1800.
- XIANG N N, ZHAO J T, CHEN L, XIA C D, WANG X Q, CHEN L, JI C Z. Research on evaluation of fiber content in soybean hulls based on near-infrared spectroscopy technique. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(3): 1792-1800.
- [24] 王新基, 郭涛, 潘发明, 李飞. 利用近红外光谱技术快速分析全株玉米青贮营养成分. *家畜生态学报*, 2021, 42(1): 52-55.
- WANG X J, GUO T, PAN F M, LI F. Rapid analysis of nutritional components of whole plants silage using near-infrared spectroscopy. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2021, 42(1): 52-55.
- [25] 王勇生, 李洁, 王博, 张宇婷, 耿俊林. 基于近红外光谱技术评估高粱中粗蛋白质、水分含量的研究. *动物营养学报*, 2020, 32(3): 1353-1361.
- WANG Y S, LI J, WANG B, ZHANG Y T, GENG J L. Evaluation of crude protein and water content in sorghum by near-infrared spectroscopy. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(3): 1353-1361.
- [26] 常春, 侯向阳, 武自念, 吴洪新, 任卫波, 尹强, 张继泽, 孔令琪, 贾玉山. 近红外光谱法测定羊草干草的9项品质指标. *中国草地学报*, 2019, 41(5): 47-52.
- CHANG C, HOU X Y, WU Z N, WU H X, REN W B, YIN Q, ZHANG J Z, KONG L Q, JIA Y S. Nine quality indexes determination of *Leymus chinensis* Hay by near infrared reflectance spectroscopy. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(5): 47-52.
- [27] LORD N, SHANG C, ROSSO L, ZHANG B. Development of near-infrared reflectance spectroscopy calibration for sugar content in ground soybean seed using Perten DA7250 analyzer. *Crop Science*, 2021, 61(2): 966-975.

(责任编辑 张瑾)