

基于近红外光谱技术快速评定饲草营养价值研究进展

潘发明, 刘佳, 张博, 陈平, 王斐, 谢建鹏, 吕琛
(甘肃省农业科学院畜牧与绿色农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 豆科和禾本科饲草是反刍动物重要的粗饲料来源之一, 其品质优劣直接影响日粮配制。近红外光谱技术以其快速、绿色和便捷等特点广泛应用于饲草营养价值评定。本文基于反刍动物常用饲草营养价值评定指标, 阐述了近红外光谱技术的基本原理及应用近红外光谱技术构建饲草营养成分预测模型, 综述了基于近红外光谱技术评定饲草营养价值、快速预测饲草可消化养分的研究进展和饲草营养成分近红外光谱技术模型优化与转移, 旨在为利用近红外光谱技术分析饲草营养成分含量和可消化养分提供理论依据与技术支持。

关键词: 近红外光谱技术; 饲草; 营养价值; 预测模型; 模型转移

中图分类号: S816; O433.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)08-0693-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.08.002

Research Progress on Rapid Evaluation of Forage Nutritional Values Based on Near Infrared Spectroscopy Technology

PAN Faming, LIU Jia, ZHANG Bo, CHEN Ping, WANG Fei, XIE Jianpeng, LÜ Chen
(Institute of Animal Husbandry, Pasture and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Leguminous and gramineous forages are important sources of roughage for ruminants, and their quality directly affects diet formulation. Near-infrared spectroscopy (NIRS) technology, characterized by its rapidity, environmental friendliness, and convenience, has been widely applied to evaluate forage nutritional value. Based on commonly used nutritional evaluation indicators for ruminant forages, this paper explains the basic principles of NIRS and its application in constructing predictive models for forage nutrient components. It reviews research progress in evaluating forage nutritional value using NIRS, rapid prediction of forage digestible nutrients, and optimization and transfer of NIRS models for forage nutrient components, aiming to provide theoretical basis and technical support for analyzing forage nutrient content and digestible nutrients using NIRS technology.

Key words: Near infrared reflectance spectroscopy; Forage; Nutritional value; Predictive model; Model transfer

饲草产业发展是草食畜牧业不断发展的基础。然而, 优质饲草是全球现代草食畜牧业健康、高质量发展的重要基础保障, 也是草食家畜维持高产与生产优质、安全畜产品的重要前提^[1], 对促进农村产业结构调整具有重要的意义^[2-3]。近年来, 基于近红外光谱技术(Near infrared reflectance spectroscopy, NIRS)以多种类、多形态方式构建了饲草营养成分含量预测模型。本文对 NIRS 技术基本原理及应用 NIRS 技术构建饲草营养成分预测模型进

行了介绍, 综述了基于 NIRS 技术评定饲草营养价值、快速预测饲草可消化养分的研究进展以及饲草营养成分 NIRS 模型优化与转移, 以期草食家畜日粮科学精准配制、优化饲养管理和提高饲料利用率奠定基础。

1 NIRS 技术原理与饲料营养成分预测模型构建

1.1 NIRS 技术原理与优势

美国试验和材料检测协会定义的近红外光是指波长在 780 ~ 2 526 nm 的电磁波^[4]。而近红外光

收稿日期: 2025-05-25; 修订日期: 2025-07-21

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划项目(25ZDNG001); 甘肃省农业科学院人才引进专项(2023GAAS42); 甘肃省科技计划项目(21CXINA363)。

作者简介: 潘发明(1983—), 男, 甘肃民勤人, 副研究员, 硕士, 研究方向为动物营养与饲料科学。Email: pan-faming@163.com。

通信作者: 刘佳(1991—), 女, 山西阳泉人, 硕士, 主要从事动物营养与畜产品健康研究工作。Email: liujia@gsagr.cn。

谱技术是根据待测不同有机分子含氢基团中化学键泛频振动和转动,在近红外波长区域(780~2 526 nm)获得待测物质光谱信息,使用化学计量学和数学方式构建的近红外线性或非线性模型,从而实现对待测物质的营养成分含量的预测^[5]。饲草是畜牧业生产、发展的基础,其质量好坏和畜产品质量密切相关^[6]。应用化学分析法、消化试验法、代谢试验法和饲养试验等方法评定饲草营养价值不仅耗时耗力,而且对样品有一定的破坏性,对于饲草营养价值评定有一定的滞后性,影响饲草资源合理高效利用,制约动物精准营养调控的发展。近年来,随着数学、化学计量学和计算机技术的快速发展,近红外光谱技术以快速、便捷和绿色等特点应用于饲草营养价值评定。

1.2 基于 NIRS 技术构建饲料营养成分预测模型

我国基于近红外光谱技术构建了饲料原料、农作物副产物及其成品料中常规营养成分(干物质、粗蛋白质、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗脂肪和粗灰分)和元素含量预测模型,不仅为其营养价值评定奠定了基础,而且为成品料生产的质量控制提供了有效方法^[7]。其预测模型构建如图 1 所示,将采集到的样品一部分用于获得近红外光谱,另一部分用于湿化学分析,之后将同一样品的湿化学分析值和近红外光谱整合,多个样品组合即可利用数学和化学计量学方式构建各营养成分含量近红外快速预测模型。

2 基于 NIRS 技术评定饲草营养价值研究进展

2.1 基于 NIRS 技术快速评定豆科饲草及副产物营养价值

豆科饲草可与根瘤菌共生固氮,其优质饲草中蛋白质含量可达 25%,有“蛋白质饲料”之美誉^[8]。具有适应性较强、适口性好和消化率较高等特点,已广泛应用于动物饲料配制^[9]。迄今为止,关于豆科饲草营养成分含量近红外预测模型构建中,主要集中于苜蓿干草、苜蓿青贮、红豆草和花生秧的研究。其中,关于苜蓿干草常规营养成分含量和元素含量近红外预测模型构建已有诸多研究,且获得了较准确的预测结果^[10-13]。肖红等^[14]使用偏最小二乘回归法建模,证明了 NIRS 技术可以测定紫花苜蓿青贮饲料鲜样中的粗灰分含量。陈鹏飞等^[15-16]基于偏最小二乘法、傅里叶变换近红外光谱和液氮冷冻制样技术构建不同品种、生育期和青贮方法的苜蓿青贮鲜样($n=160$)营养成分含量(干物质、粗蛋白质、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维)和发酵品质(氨态氮、乳酸、乙酸和丁酸)预测模型。李文等^[17]构建了红豆草粗蛋白质、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗脂肪和粗灰分 5 种营养成分近红外预测模型,为红豆草干草品质性状快速分析提供了新方法。付趁等^[18]采集了河南省 6 个花生品系 120 份花生秧样品,使用福斯近红外光谱仪(DS2500)采集光谱,结合湿化学分析构建了各营养成分(水分、粗蛋白质、粗纤维、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、酸性木质素、粗脂

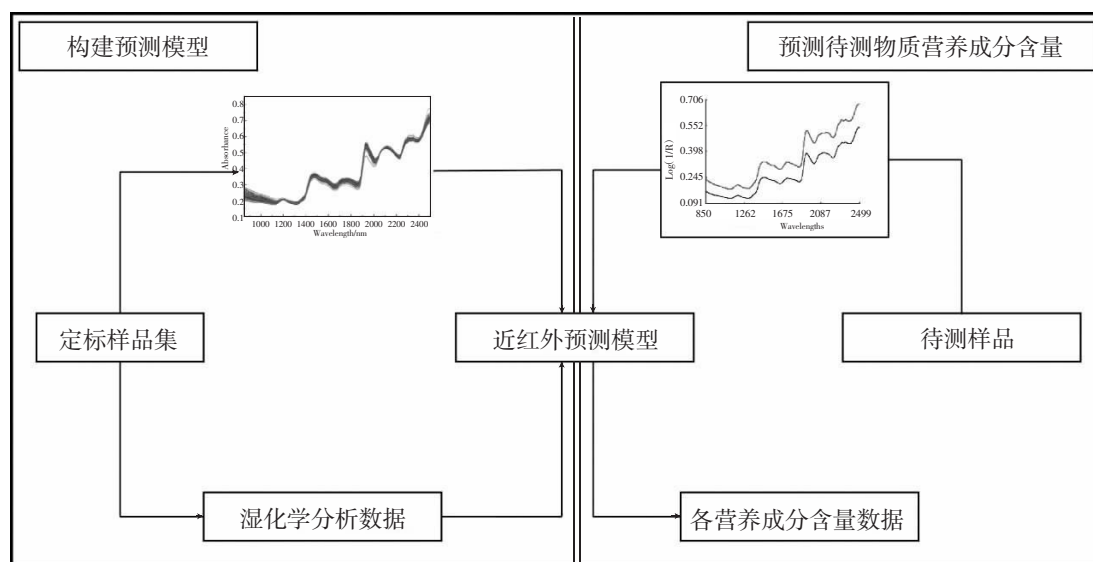


图 1 近红外预测模型构建及分析示意图

肪和粗灰分)预测模型, 由于高纤维饲料粗脂肪含量较低, 检测误差较其他营养成分大, 粗脂肪模型预测效果较差, 需进一步优化调整。冯豆^[19]基于 Spectrastar 1400XL-3 型近红外光谱仪, 不仅构建了花生秧常规营养成分模型, 而且发现在奶牛日粮中 100%替代苜蓿时, 能显著提高花生秧的中性洗涤纤维瘤胃降解率。

目前, 基于 NIRS 技术构建的豆科部分饲草各营养成分含量预测模型如表 1 所列, 由于构建模型所用光谱仪器、光谱预处理方法、样本数量、营养成分含量变异范围不同, 预测准确性评价参考指标均为 RPD, 其各营养成分预测准确性仍参差不齐, 模型无法共享。

2.2 基于 NIRS 技术快速评定禾本科饲草及副产物营养价值

禾本科饲草在我国种类繁多, 以抗寒旱和抗盐碱等优势广泛分布于各地, 占比达到我国优良牧草 40%; 具有营养价值高、适口性好和适应性强的特点, 多以干草或青贮形式应用于反刍动物饲养之中^[25]。常见的禾本科饲草有玉米青贮、燕

麦草、高羊茅和无芒雀麦, 副产物有玉米秸秆和小麦秸秆等。玉米青贮营养丰富, 适口性好, 是反刍动物饲养中使用范围最广、用量最大的粗饲料之一, 但其营养品质受玉米品种、种植与收割方式和加工调制工艺的影响^[36-37], 其营养成分含量变异性较大, 构建近红外预测模型可为日粮配方精准配制奠定基础。燕麦种植主要分布于亚洲、欧洲和北美洲等地区, 其面积和产量仅次于玉米、小麦和高粱、大麦^[38]。由于抗旱、耐寒性强、产草量大、水溶性碳水化合物含量丰富等特点, 广泛应用于反刍动物饲养之中^[39]。玉米秸秆和小麦秸秆木质化程度高, 纤维含量较高, 营养价值相对较低, 其作为反刍动物饲料资源开发潜力巨大^[30]。此外, 大麦秸秆粗蛋白含量和饲用价值与玉米秸秆相当, 以纤维素酶和木聚糖酶预处理玉米秸秆和大麦秸秆, 可显著提高大麦秸秆中性木质素和酸性木质素在绵羊瘤胃中的降解率, 为大麦秸秆作为反刍动物饲料提供了可能性^[40-41]。基于 NIRS 技术构建的禾本科部分饲草各营养成分含量预测模型如表 2 所列, 其各营养成分预测模型预测准

表 1 基于 NIRS 技术构建豆科饲草营养成分含量预测模型^①

样品类型	样本数量	光谱仪器	营养成分	模型参数	值域	参考文献
箭筈豌豆	190	DS2500F	DM、OM、CP、NDF、ADF、EE、Ash	RPD	>2.5	[20]
苜蓿干草	493	AuroraNir, Carl Zeiss	NDF、ADF、RFV	RPD	3.39~5.43	[21]
苜蓿干草	493	AuroraNir, Carl Zeiss	DM、CP、NDF、ADF、RFV	RPD	2.77~7.19	[22]
苜蓿青贮	300	SpectraStat1400 XL3	CP、NDF、ADF、EE、Ash、Ca、P	RPD	2.37~4.47	[23]
苜蓿草捆	229	NIR System 5000	DM、CP、NDF、ADF、EE、Ash、Ca和P等	RPD	1.00~4.54	[24]

①DM(Dry matter)为干物质, OM(Organic matter)为有机物, CP(Crude protein)为粗蛋白质, NDF(Neutral detergent fiber)为中性洗涤纤维, ADF(Acid detergent fiber)为酸性洗涤纤维, EE(Ether extract)为粗脂肪, Ash 为粗灰分, Ca(Calcium)为钙, P(Phosphorus)为磷, RFV(Relative feed value)为相对饲喂价值, RPD(Relative predict deviation)为相对分析误差, 下同。

表 2 基于 NIRS 技术构建禾本科饲草营养成分含量预测模型^①

样品类型	样本数量	光谱仪器	营养成分	模型参数	值域	参考文献
燕麦草、高羊茅、无芒雀麦	108/101/101	DS2500F	DM、CP、OM、NDF、ADF、Ash	RPD	1.48~4.00	[25]
玉米青贮	80	DS2500F	DM、CP、NDF、ADF、EE、Ash	RPD	1.25~1.92	[26]
玉米青贮	89	PSS-HA-03	DM、CP、NDF、ADF、ADL和EE等	R ² _v	0.85~0.92	[27]
玉米青贮	974	DS2500F	DM、CP、NDF、ADF、EE和Starch等	R ² _v	0.45~0.97	[28]
青贮玉米	227	DS2500F	DM、CP、OM、NDF、ADF、ADL、EE	RSQ _v	0.53~0.99	[29]
玉米秸秆、小麦秸秆	155/135	DS2500F	DM、CP、NDF、ADF、ADL	RSQ _v	0.29~0.89	[30]
大麦秸秆	96	DS2500	DM、OM、CP、NDF、ADF和EE等	RSQ _v	0.87~0.98	[31]
燕麦青贮	273	AuroraNir, GraiNit	水分、CP、NDF、ADF、EE和WSC等	RPD	1.17~3.94	[32]
燕麦草	133	DS2500F	DM、CP、NDF、ADF、Ash、WSC、Ca、P、K	RPD	>2.00	[33]
多花黑麦草	420	AuroraNir, Carl Zeiss	DM、CP、NDF、ADF、Ash、WSC	R ²	0.81~0.88	[34]
狼尾草属	165	DA7200	水分、CP、NDF、ADF、ADL、CF、Ash	RPD	1.77~3.53	[35]

①Starch 为淀粉, ADL(Acid detergent lignin)为酸性洗涤木质素, WSC(Water-soluble carbohydrates)为水溶性碳水化合物, CF(Crude fiber)为粗纤维, K(Potassium)为钾, R² 为预测决定系数。下同。

确性与豆科饲草近红外模型预测结果类似。

2.3 基于 NIRS 技术快速评定其他饲草营养价值

天然草地牧草营养价值与反刍家畜营养状况、生命活动和生产性能密切联系,快速、高效评定、监控其营养价值信息,是评估天然草地营养供给和计算载畜量的基础,是科学开发利用草地生态资源的重要依据^[42]。目前基于 NIRS 技术构建的天然牧草部分养分含量和降解率模型参数和所用样本数量和仪器信息如表 3 所列。天然牧草种类繁多,变异性较大,构建其 NIRS 预测模型所需样本数量大,研究构建模型所用样本数量及营养成分含量变异性不一,且所用近红外仪器有光栅型和傅里叶型等方式采集光谱,光谱格式不统一,模型不能普遍适用。

3 基于 NIRS 技术快速预测饲草可消化养分研究进展

1976 年, Norris 等^[50]构建了高羊茅、苜蓿和苜蓿菠萝草混合物等饲草的 IVDMD 近红外预测模型,定标决定系数为 0.90,证实了利用 NIRS 预测其 IVDMD 的可行性。自此, Bruno-Soares 等^[51]采集了 135 份不同生长期的燕麦、大麦、黑小麦和小麦整株样品,构建的干物质消化率(Dry matter digestibility, DMD)和有机物消化率(Organic matter digestibility, OMD)近红外预测模型定标决定系数分别为 0.86 和 0.88,可用于实际分析。Olsoy 等^[52]以蒿属植物为研究对象,构建了其叶片 DMD 预测模型,预测值与实测值相关性可达 0.83。Samadi 等^[53]构建了动物饲料体外干物质降解率和体外有机物降解率 NIRS 预测模型,证明了利用 NIRS 技术构建饲料养分降解率的可行性。季晓菲等^[49]基于偏最小二乘法建立了藜草体外干物质消化率预

测模型,其预测相关系数为 0.98,可用于藜草体外干物质消化率的实际测定。诸多研究表明,构建饲草可消化养分近红外预测模型可行,且为其精准优化反刍动物日粮配方奠定了基础,推动畜牧业可持续发展。

4 饲草营养成分 NIRS 预测模型优化与转移

近红外预测模型在同一型号仪器上的通用性依赖于硬件制造技术,因此国外有关模型转移算法研究工作明显减少,但是模型转移算法研究仍然必要,仪器硬件技术指标提高,为不同型号以及不同光谱采集方式仪器之间的模型转移提供了有效保障^[7]。模型转移主要是通过建立主仪器和从仪器、模型参数或预测值之间的函数关系,校正由不同类型仪器、检测条件及环境等变化因素导致的预测误差^[54]。王红英等^[55]应用基于光谱共享法的模型转移技术,可实现对小样本量和较窄化学值范围条件的豆粕和玉米粉营养成分实时在线监控和离线检测。刘贤等^[56]探究青贮饲料(玉米、水稻、高粱、小麦和苜蓿)NIRS 分析模型在傅里叶变换型和光栅型光谱仪之间的模型转移,采用斜率/截距和局部中心化 2 种方法进行转移后 NIRS 预测模型预测准确性接近,且提高了转移之前的模型预测精度。丁柯等^[57]采用光谱差值转移算法、直接校正算法和分段直接校正算法进行了蛋白质饲料原料的粗蛋白质含量 3 种不同类型仪器间的模型转移,预测均方根误差明显低于模型转移之前,玉米蛋白粉、菜粕和酒糟的粗蛋白质含量预测模型转移后 RPD 均高于 3.0,鱼粉样品模型从主仪器转移至从仪器,RPD 均大于 2.5,取得了较好的预测效果。杨增玲等^[58]采用斜率/截距矫正和样品扩充 2 种方法,将实验室静态豆粕

表 3 基于 NIRS 技术构建其他饲草营养成分预测模型

样品类型	样本数量	光谱仪器	营养成分 ^①	模型参数	值域	参考文献
天然牧草、草地干草	85	极光手持近红外仪	DM、CP、NDF、ADF、EE、Ash	RPD	1.05~8.16	[43]
天然草地-混合牧草	118	DS2500	CP、NDF、ADF、Ash、Ca和P	RPD	1.65~2.78	[44]
天然草地-混合牧草	301	DS2500	CP、NDF、ADF	RPD	3.58~4.67	[45]
天然牧草	407	XDS-RCA	DM、CP、NDF、ADF、EE、Ash、ADL、Ca和P	RPD	2.00~7.10	[46]
天然牧草	210	DS2500	CP、NDF、EE	RPD	1.76~9.34	[47]
天然牧草	39	DS2500	CP、NDF、ADF、EE、Ca和P	RPD	1.16~4.47	[48]
藜草	360	NIRFlex N- 500	IVDMD	R ² _V	0.96	[49]

①IVDMD(In vitro dry matter digestibility)为体外干物质消化率。

含水率和粗蛋白质近红外光谱预测模型转移至饲料企业生产在线应用监控品质, 并可达到在线分析的要求。王红英等^[55]以豆粕和玉米粉为研究对象, 分别应用离线光谱和在线光谱构建定量分析模型, 基于光谱共享法的模型转移技术, 并构建光谱共享模型, 经对比结果表明, 光谱共享模型预测准确性最好。Shi 等^[59]采用 5 种光谱校正算法将光栅型近红外光谱仪干物质、粗蛋白质、粗脂肪和磷含量预测模型转移至傅里叶变换光谱仪, 且预测准确性优于主仪器。

5 结束语

应用 NIRS 技术快速评定饲草营养价值已有诸多研究, 应用不同类型近红外光谱仪, 构建了不同种类饲草营养成分含量预测模型。由于各模型预测准确性参差不齐, 需要对其采用模型扩展和校正方式来优化; 针对模型无法通用问题, 限制实际生产中饲草营养价值快速评定。应用模型转移技术, 将主仪器各饲草营养成分含量预测模型转移至从仪器, 实现模型共享; 针对不同实验室采集到的同一类型饲草不同品种、生长周期饲草, 应整合数据, 进行多源数据融合, 扩展并优化模型; 同时, 构建标准化光谱共享平台, 建立跨仪器、不同环境的光谱数据库, 为饲草合理高效利用奠定理论基础与技术支撑。

参考文献:

- [1] 钟 瑾, 郭旭生, 邵 涛, 等. 草产品加工及利用的生物学基础及研究进展[J]. 中国科学基金, 2024, 38(4): 668-676.
- [2] 侯云鹏, 张 明, 文殷花, 等. 干旱缺水对陇中旱作区饲草型小黑麦产量及营养品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2025, 4(1): 34-38.
- [3] 王振锋, 念淑红, 周晓丽, 等. 干旱山区饲草高粱品种(系)引种试验初报[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(10): 932-936.
- [4] 徐微微. 近红外光谱解析技术与模型建立[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
- [5] 郭 涛, 黄右琴, 代露茗, 等. 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[J]. 动物营养学报, 2021, 33(5): 2939-2948.
- [6] 任秀珍, 郭宏儒, 贾玉山, 等. 近红外光谱技术在饲草分析中的应用现状及展望[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 635-640.
- [7] 褚小立, 陆婉珍. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2595-2605.
- [8] 李争艳, 徐智明. 豆科牧草在肉羊生产中的应用[J]. 北方牧业, 2023(21): 15.
- [9] 何海轩, 张楠楠, 刘 毅, 等. 青海省高寒地区 6 种全株豆科饲草产量及营养价值比较分析[J]. 饲料工业, 2025, 46(8): 28-34.
- [10] 郭 涛, 黄右琴, 郭 龙, 等. 利用近红外光谱技术快速预测苜蓿干草营养成分含量[J]. 草业科学, 2020, 37(11): 2374-2381.
- [11] 何 云, 张 亮, 武小姣, 等. 苜蓿干草常规营养成分含量近红外预测模型的建立[J]. 动物营养学报, 2019, 31(10): 4684-4690.
- [12] 唐开婷. 便携式近红外光谱仪预测苜蓿干草品质模型建立与应用[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [13] 刘建新, 梁 婷, 尹成诚, 等. 近红外光谱技术分析苜蓿干草元素含量[J/OL]. 甘肃农业大学学报, 1-14 (2024-04-29)[2025-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20240428.1559.069.html>.
- [14] 肖 红, 马富华, 王粉琴, 等. 紫花苜蓿青贮饲料粗灰分含量的近红外评定方法研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(21): 140-141.
- [15] 陈鹏飞, 戎郁萍, 韩建国, 等. 近红外光谱法测定紫花苜蓿青贮鲜样的营养价值[J]. 光谱学与光谱分析, 2007(7): 1304-1307.
- [16] 陈鹏飞, 戎郁萍, 韩建国. 近红外光谱技术测定紫花苜蓿青贮鲜样的发酵品质[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(12): 2799-2803.
- [17] 李 文, 肖云月, AKOY B R, 等. 红豆草干草关键品质指标近红外预测模型构建[J]. 草业科学, 2025, 42(5): 1235-1242.
- [18] 付 趁, 巴提玛·努尔巴合提, 马慧慧, 等. 基于近红外光谱的花生秧营养组分预测模型构建[J]. 动物营养学报, 2023, 35(7): 4697-4705.
- [19] 冯 豆. 花生秧营养价值的评定及其对奶牛瘤胃细菌多样性的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [20] WANG T, WANG L, GUO T, et al. Rapid determination of nutrient composition and mineral element content of common vetch (*Vicia sativa* L.) using Near-infrared spectroscopy [J/OL]. Animal Bioscience, 1-10 (2025-04-11)[2025-05-21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40241587>.
- [21] 杨 松, 岳嘉豪, 程柳洋, 等. 基于便携式近红外光谱仪建立苜蓿干草纤维品质预测模型[J]. 动物营养

- 学报, 2025, 37(2): 1376–1387.
- [22] 岳嘉豪. 基于便携式近红外光谱仪的苜蓿干草品质参数模型建立[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [23] 兰尊海, 曹明月, 李 贤, 等. 苜蓿青贮常规营养成分近红外模型的建立[J]. 中国饲料, 2024(23): 164–168.
- [24] 薛祝林, 刘 楠, 张英俊. 近红外光谱法预测紫花苜蓿草捆的营养品质和消化率[J]. 草地学报, 2017, 25(1): 165–171.
- [25] 代露茗. 三种禾本科牧草营养组成评价及 NIRS 预测模型的构建[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [26] 王新基, 郭 涛, 潘发明, 等. 利用近红外光谱技术快速分析全株玉米青贮营养成分[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(1): 52–55.
- [27] 刘 娜. 全株玉米青贮营养价值快速评价及预测模型构建[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [28] 张 舒. 基于 BP-神经网络建立玉米青贮营养成分近红外预测模型[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [29] 唐德富, 陈志刚, 李 飞, 等. 青贮玉米不同部位(组织)养分含量近红外预测模型的构建[J]. 草业科学, 2021, 38(9): 1753–1761.
- [30] 郭 涛, 黄右琴, 兰贵生, 等. 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[J]. 草业科学, 2020, 37(6): 1204–1213.
- [31] 李国彰, 喻笑男, 王志兰, 等. 大麦秸秆: 康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系评定组分及近红外光谱分析技术预测营养价值[J]. 动物营养学报, 2018, 30(3): 1063–1072.
- [32] 田丽梅, 陈 菲, 林炎丽, 等. 近红外光谱检测燕麦饲草青贮营养品质研究[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3841–3850.
- [33] WANG L, WANG T, DAI L, et al. Deep learning and machine learning methods based on the NIRS dataset for rapid determination of the nutrients content and quality of oat hay[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236: 110428.
- [34] 南丁罕, 格根图, 王志军, 等. 多花黑麦草营养成分最优近红外分析建模方法的研究[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 610–619.
- [35] 朱瑞芬, 徐远东, 刘 畅, 等. 基于 2 种算法建立近红外光谱模型预测狼尾草属牧草品质的研究[J]. 动物营养学报, 2024, 36(6): 3984–3994.
- [36] 邢承前, 吴兆海, 赵连生, 等. 全株玉米青贮饲料有效能值和营养物质表观消化率相关参数研究[J]. 中国饲料, 2025(9): 138–145.
- [37] 潘发明, 郭 涛, 李 飞, 等. 全株玉米青贮营养成分含量近红外光谱预测模型的建立[J]. 中国草食动物科学, 2025, 45(3): 62–68.
- [38] 张 知, 邹璨阳, 梁秀芝, 等. 102 份燕麦种质资源遗传多样性及农艺性状综合评价[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(6): 847–856.
- [39] 韩航琪, 王梓凡, 项 敏, 等. 燕麦草块加工参数筛选及其对营养成分含量的影响[J]. 中国草地学报, 2025, 47(4): 67–74.
- [40] 程思明, 郎学渊, 张永华, 等. 大麦秸秆对育肥羊生长性能、屠宰性能及肉品质的影响[J]. 中国饲料, 2024(22): 125–128.
- [41] 王国秀, 马东方, 黄永亮, 等. 纤维素酶和木聚糖酶处理大麦秸秆和玉米秸秆的绵羊瘤胃降解特性[J]. 动物营养学报, 2023, 35(3): 1781–1790.
- [42] 杜雪燕, 王 迅, 柴沙驼, 等. 近红外光谱技术在天然草地牧草营养价值评价中的应用及展望[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 1–6.
- [43] 贺梦婷. 近红外光谱技术在饲草营养品质分析中的应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [44] 张凡凡, 尉小霞, 段宏伟, 等. 新疆沙尔套山天然草地主要混合牧草营养指标近红外光谱分析[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 661–667.
- [45] 杨金芬, 马存霞, 李毓敏, 等. 三江源东部地区天然混合牧草营养成分近红外光谱预测模型构建[J]. 动物营养学报, 2021, 33(12): 7042–7049.
- [46] 刘 哲, 王玉琴, 薛树媛, 等. 近红外漫反射光谱定量分析天然牧草营养成分[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 249–255.
- [47] 杜雪燕, 王 迅, 柴沙驼, 等. 天然牧草营养成分的近红外光谱定量分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(17): 6–11.
- [48] 杨艳玲, 王 迅, 王书祥, 等. 近红外光谱技术结合竞争性自适应重加权算法快速分析天然牧草营养成分[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2025, 55(2): 39–46.
- [49] 季晓菲, 蒲珉锴, 游明鸿, 等. 近红外光谱法测定藜草体外干物质消化率的研究[J]. 草学, 2019(6): 8–12; 19.
- [50] NORRIS K H, BARNES R F, MOORE J E, et al. Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy [J]. Journal of Animal Science, 1976, 43(4): 889–897.
- [51] BRUNO-SOARES A M, MURRAY I, et al. Use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the prediction of the chemical composition and nutritional attributes of green crop cereals[J]. Animal Feed Science

- and Technology, 1998, 75(1): 15–25.
- [52] OLSOY P J, GRIGGS T C, ULAPPA A C, et al. Nutritional analysis of sagebrush by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 134: 125–131.
- [53] SAMADI, WAJIZAH S, MUNAWAR A A. Near infrared spectroscopy (NIRS) data analysis for a rapid and simultaneous prediction of feed nutritive parameters[J]. *Data in Brief*, 2020, 29: 105211.
- [54] 田 静. 基于光谱标准化的小麦粉品质 NIR 模型跨仪器共享的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [55] 王红英, 常楚晨, 金 楠, 等. 近红外模型转移技术在饲料生产中的应用[J]. *饲料工业*, 2021, 42(3): 1–7.
- [56] 刘 贤, 董苏晓, 韩鲁佳, 等. 青贮饲料近红外光谱分析模型转移研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(5): 153–157.
- [57] 丁 柯, 张月敬, 沈广辉, 等. 蛋白饲料原料粗蛋白含量近红外光谱模型转移研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1334–1339.
- [58] 杨增玲, 杨钦楷, 沈广辉, 等. 豆粕品质近红外定量分析实验室模型在线应用[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 358–363; 371.
- [59] SHI Y, LI F, LIU N, et al. Evaluation of the predictive performance of NIRS-PLS models for the nutrient content of pelleted total mixed rations after being transferred from scanning grating to Fourier transform NIR spectrometer[J]. *Microchemical Journal*, 2025, 212: 113543.