

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.013

引用格式:薛敏,李嘉若,郭玉帆,等.多环境燕麦干草主要品质成分近红外光谱模型构建及应用[J].草地学报,2026,34(8):2889-2898

XUE Min, LI Jia-ruo, GUO Yu-fan, et al. Near-Infrared Spectroscopy Models for Assessing Oat Hay Quality Across Diverse Environments[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8):2889-2898

多环境燕麦干草主要品质成分近红外光谱模型构建及应用

薛敏[#], 李嘉若[#], 郭玉帆, 孟雨, 王渝, 胡晓莹, 杜会龙^{*}, 何强^{*}

(河北大学生命科学学院, 河北保定 071000)

摘要:为构建适用于多环境的燕麦(*Avena sativa* L.)干草品质快速检测模型,本研究收集了河北保定、张家口和宁夏固原两年三点的849份样品,测定粗蛋白(Crude protein, CP)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)、可溶性糖(Soluble sugar, SS)和全钾(Total potassium, K)含量,并结合近红外光谱与偏最小二乘法建立预测模型。结果表明:五项指标均呈宽范围正态分布,代表性广泛。CP、SS和K模型预测精度较高,交叉验证决定系数(R^2)均 ≥ 0.89 ,相对分析误差(Ratio of performance to deviation, RPD) ≥ 3.0 ,验证集相关系数(r)分别为0.84、0.86和0.83,外部验证结果可靠。NDF和ADF模型的 $R^2 \geq 0.85$, RPD ≥ 2.5 ,验证集 r 分别为0.78和0.79,能满足常规筛查需求。基于模型预测结果与饲草品质标准,筛选出56份优质饲用燕麦种质。本研究为燕麦种质资源的高通量表型鉴定及品质育种提供高效技术支撑。

关键词:燕麦干草;近红外光谱;品质成分;预测模型;偏最小二乘法;种质资源

中图分类号:S543.7;S126

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2889-10

Near-Infrared Spectroscopy Models for Assessing Oat Hay Quality Across Diverse Environments

XUE Min[#], LI Jia-ruo[#], GUO Yu-fan, MENG Yu, WANG Yu, HU Xiao-ying, DU Hui-long^{*}, HE Qiang^{*}

(College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei Province 071000, China)

Abstract: To develop a rapid quality detection model for oat (*Avena sativa*) hay applicable across environments, 849 samples were collected at three sites (Baoding and Zhangjiakou in Hebei, Guyuan in Ningxia) for two years. Crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), soluble sugars (SS), and total potassium (K) were measured. Prediction models were established using near-infrared spectroscopy (NIRS) combined with partial least squares regression (PLSR). All five traits showed broad, near-normal distributions, indicating good sample representativeness. The CP, SS, and K models performed well, with cross-validation coefficients (R^2) ≥ 0.89 , ratio of performance to deviation (RPD) ≥ 3.0 , and validation set correlations (r) of 0.84, 0.86, and 0.83, respectively, demonstrating strong external predictive ability. The NDF and ADF models achieved $R^2 \geq 0.85$ and RPD ≥ 2.5 , with r values of 0.78 and 0.79, meeting requirements for routine screening. Based on model predictions and forage quality standards, 56 high-quality forage oat accessions were identified. This study provides an efficient technical platform for high-throughput phenotyping and quality-based breeding in oat germplasm.

Key words: Oat hay; Near-infrared spectroscopy; Quality components; Prediction model; Partial least squares; Germplasm resources

收稿日期:2026-03-08;修回日期:2026-04-21

作者简介:薛敏(2002-),女,汉族,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事饲草品质性状的鉴定与评价研究,E-mail:2036778897@qq.com;
李嘉若(2002-),女,汉族,河北沧州人,硕士研究生,主要从事燕麦基因组学研究,E-mail:2332896189@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:huilongdu@hbu.edu.cn;heqiang_cqnu@163.com

燕麦(*Avena sativa* L.)是全球重要的粮饲兼用型禾本科作物,因其适应性强、草产量高、营养品质优良,成为我国干旱和半干旱地区草地畜牧业的核心饲草,尤其在解决冷季缺草问题中发挥关键作用^[1-2]。随着我国草地畜牧业高质量发展,饲草产量与营养品质的协同提升需求日益迫切。然而,当前我国高产优质燕麦品种匮乏,优质饲用种质筛选滞后,严重制约了产业升级^[3]。燕麦干草的营养品质直接影响家畜生产性能与健康状况,根据农业农村部最新发布的《饲用燕麦干草质量分级》(NY/T 4684-2025),其核心评价指标包括粗蛋白(Crude protein, CP)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)、水溶性碳水化合物(Water-Soluble carbohydrates, WSC)等基础营养成分,以及体外干物质消化率(In vitro dry matter digestibility, IVDMD)、相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)等消化利用与综合评价指标^[4-5]。钾、钙、磷等矿物元素含量也是重要的补充评价参数^[6]。燕麦干草品质是基因型与环境互作的综合结果,上述指标受品种遗传背景、生态环境(如光照、温度、土壤肥力)、收获时期及加工方式等多种因素共同影响,其中生态环境的差异是导致燕麦干草品质波动的主要因素^[7-8],给跨区域优质种质筛选带来了巨大挑战。

当前国内牧草营养检测仍以常规化学方法为主,虽检测准确度高,但存在操作繁琐、周期长、耗时费力及试剂污染等缺陷,难以满足大规模种质筛选、表型评价及田间生产现场即时检测的需求。近红外光谱技术(Near-Infrared spectroscopy, NIRS)凭借其快速、无损、多组分同步检测的独特优势,已广泛应用于谷物、饲草等农产品品质分析^[9-11]。该技术通过建立光谱特征与化学成分之间的数学模型,实现对未知样本的高效预测,为饲草品质快速评价提供了技术支撑。

尽管已有研究尝试将NIRS技术应用于燕麦干草品质分析,但现有模型的适用范围普遍有限。例如,王储等^[12]基于249份来自单一生态区的燕麦样品构建了NIRS定量模型,但因未纳入多生态区代表性样本,模型的跨区域预测精度与普适性受到显著制约;张书阅等^[13]虽纳入不同产地和生育期样本($n=80$),但样本数量较小且生态代表性不足,导致模型稳健性与泛化能力受限。因此,亟需构建一个基于大样本、多生态区域覆盖的数据集所支持的

NIRS预测模型,以实现燕麦干草主要品质成分在复杂环境条件下的准确、稳定预测,提升其实用性与推广价值。

相较于以往局限于单一生态区或样本规模有限的研究,本研究系统整合了来自河北保定、河北张家口和宁夏固原三个生态区、跨越两个年度的共2121份燕麦干草样本,系统测定各样本中粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性糖及全钾等关键品质成分含量,利用TANGO-R型近红外光谱仪采集光谱数据,结合偏最小二乘法建立五项品质指标的多生态环境近红外预测模型。同时,综合品质与产量性状,筛选出一批高产优质的饲用燕麦优异种质资源。本研究旨在建立一套高效、准确、适用于多生态区的燕麦干草品质表型分析技术体系,为饲用燕麦品种选育、种质资源精准评价及产业应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为800份遗传多样性丰富的全球栽培燕麦种质资源,由河北大学和中国农业科学院北京畜牧兽医研究所联合收集并系统保存(材料信息可在OatOmics综合基因组数据库查询,网址为<http://www.oatomics.com/home>)。这些种质主要来源于全球6个大洲23个国家及我国12个燕麦主产省(区),生态类型上包含欧洲、北美温带地区的春播与冬性燕麦资源,以及亚洲燕麦主产区的特色地方种质;利用类型与籽粒特性上涵盖饲草型与籽实型燕麦、皮燕麦与裸燕麦(莜麦),同时包含皮燕麦与裸燕麦的种间杂交衍生种质,全面覆盖了栽培燕麦的主要种质类群。

1.2 试验设计及样本准备

供试的800份栽培燕麦种质于2023年(河北保定)和2024年(河北张家口、宁夏固原)进行田间种植。各试验点基本信息如下:(1)河北保定试验点(38°51'N, 115°30'E, 海拔18 m):属暖温带半湿润大陆性季风气候。2023年全年平均气温13.6℃,作物生长季平均气温21.5℃,光热资源充足,满足燕麦快速生长与干物质积累需求;全年降水量850.5 mm,较常年偏多68.2%,降水主要集中于7—8月(占全年68%),生长季水热匹配度良好,无严重旱涝、低温冻害等极端天气。(2)宁夏固原试验点(36°01'N,

106°16'E,海拔1753 m):属温带大陆性气候。2024年全年平均气温6.8℃,生长季平均气温15.2℃,适宜燕麦营养生长与籽粒灌浆。全年降水量420 mm,与常年均值持平,降水高度集中于7—9月(占全年65%),7月降水量110 mm为年内峰值,降水分布与燕麦需水关键期基本一致。3)河北张家口验点(41°40'N,115°38'E,海拔1536 m):属温带大陆性季风气候。2024年全年平均气温3.5℃,受春季特强寒潮影响,当年极端最低温明显偏低;生长季平均气温16.8℃,昼夜温差稳定在10~12℃,利于光合产物积累与饲草品质形成;全年降水量620 mm,较常年偏多45%,为历史偏多年份,降水主要集中于6—8月(占全年70%),生长季后期无明显干旱胁迫。

所有试验点采用完全随机区组设计,小区面积3 m²(3 m×1 m),行距30 cm,穴距30 cm,每小区种植120穴,每穴双粒点播。播种前统一整地施基肥,生长期间不追肥,全程人工除草、不喷施农药,确保各小区生长条件一致,排除非遗传因素干扰。

由于供试种质遗传背景差异大且跨生态区种植,为保证干草品质数据的可比性,本研究采用饲用燕麦干草品质评价通用的燕麦乳熟期(即饲草最适刈割期)作为采样标准;不同成熟特性的种质按其实际生育进程分批采样,确保所有样品均在各自乳熟期收集。每个试验小区随机选取5株代表性植株,取样前记录每份种质的单株鲜重及其他表型,剪取整个地上部分混匀后,先经105℃杀青30分钟灭活内源酶,再转入60℃烘箱烘干至恒重(24小时质量变化≤1%),通过粉碎机粉碎后过60目筛,将粉碎后的样品混合均匀,装入密封袋并标注种质编号、种植地点及采集日期,置于干燥阴凉处保存备用。由于部分种质生育期异常或无法达到乳熟期采样标准、遭受生物和非生物胁迫导致未能获得有效干草样品,以及少量人为误差,最终共获取2121份不同区域制备的干草分析样品(保定630份,张家口721份,固原770份)。在覆盖所有供试种质(每份种质至少在一个地点被选中)且每个试验点均有足够数量的代表性样品(如每个地点不少于200份)的前提下,从中选取849份样品进行化学测定,用于模型构建与验证,剩余的1272份样品进行光谱检测,用于大规模种质筛选。

1.3 品质指标测定

选取的849份样品委托陕西佰瑞斯生物科技有

限公司进行化学法检测,各指标均依据国家标准方法测定,具体如下:粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定(GB/T 6432—2018);中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量采用范氏纤维测定法(GB/T 20806—2022,NY/T 1459—2022)测定;可溶性糖含量参照铜还原-碘量法(GB/T 37493—2019)测定;全钾含量采用火焰光度法(GB/T 6437—2018)测定。所有指标均设置3次平行重复测定,剔除异常值后取平均值作为最终化学分析测定值,品质成分含量均以干物质(Dry matter,DM)为基础进行计算与表述。

1.4 近红外光谱采集

使用德国布鲁克公司(Bruker Optik GmbH)TANGO-R型近红外光谱仪及配套积分球附件、石英样品杯(直径50 mm,厚度2 mm)采集光谱数据。仪器参数设置如下:光谱扫描范围4000~12 500 cm⁻¹,分辨率4 cm⁻¹,扫描次数32次,以空气为参比背景。光谱采集前,仪器置于恒温实验室(温度(23±2)℃,相对湿度45%±5%)预热30 min;将样品均匀填充于样品杯并适度压实平整,确保厚度不小于10 mm,以避免信号失真;每个样品进行3次平行扫描,每次扫描前重新装样以降低取样误差,取3次光谱平均值为最终光谱;所有光谱以OPUS格式保存用于后续预处理与模型构建(采集的样品光谱数据见图1)。

1.5 近红外预测模型构建及外部验证

使用OPUS7.5软件进行光谱预处理与建模。为消除背景干扰,建模前对光谱采用无预处理(None pretreatment, NONE)、消除常数偏移量(Elimination of constant offset, ECO)、减去一条直线(Minus a straight line, MSL)、标准正态变量变换(Standard normal variate, SNV)、多元散射校正(Multiplicative scatter correction, MSC)、一阶导数(First derivative, FD)和二阶导数(Second derivative, SD)等预处理方法^[14],筛选最优处理方法,以提升模型稳定性与预测精度。接着,以种质和试验点为分层因素,采用分层随机抽样法将样品按3:1比例划分为校正集与验证集。通过偏最小二乘(Partial least squares, PLS)化学计量学方法,构建光谱数据与粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性糖及全钾5项品质指标化学测定值的定量关联模型,经交叉验证筛选最优参数后,利用验证集完成

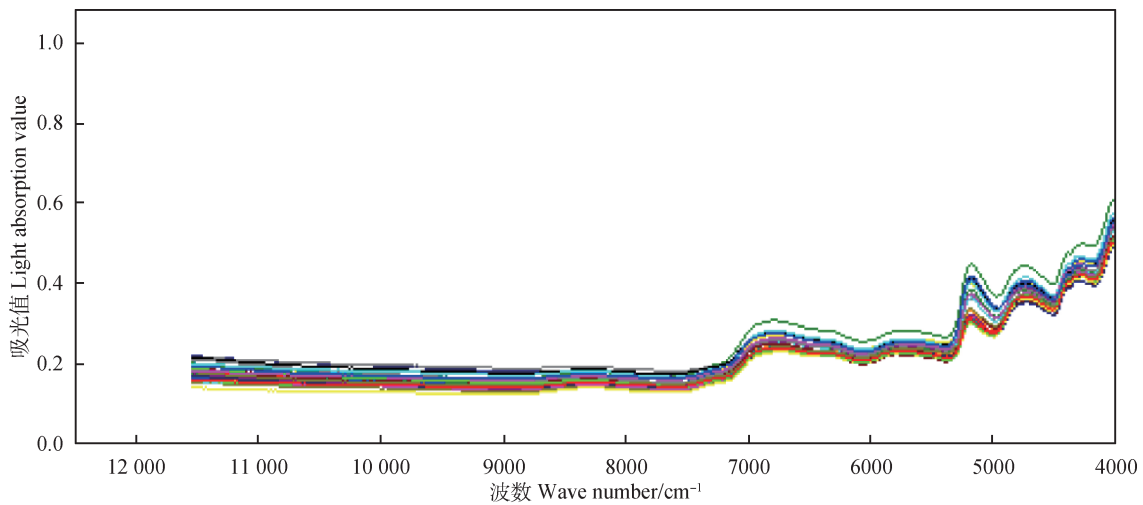


图1 燕麦干草样本近红外光谱图

Fig. 1 Near-infrared spectrogram of oat hay samples

模型外部验证。

模型性能采用三项核心指标综合评价:决定系数(Coefficient of determination, R^2)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)及相对分析误差(Relative percent deviation, RPD)。评价标准如下: R^2 越接近1、RMSE 越小,表明模型预测值与化学测定值的一致性越高、预测精度越好;RPD >2.5 时模型具备精确预测能力,可用于常规检测;2.0 $<$ RPD <2.5 时模型可用于快速粗略预测^[15]。最终使用Origin 8.0软件完成相关图表绘制。

2 结果与分析

2.1 燕麦干草品质指标分布特征

对849份燕麦干草样品的5项关键品质指标进行统计分析,两年三点的结果如图2所示。各指标的含量均符合正态分布,且含量范围跨度较大,表明样本材料具有良好的代表性。其中,粗蛋白含量为6.91%~14.73%,平均值为9.79%;中性洗涤纤维含量为47.08%~68.48%,平均值为57.97%;酸性洗涤纤维含量为28.44%~47.60%,平均值为36.32%;可溶性糖含量为0.78%~7.01%,平均值为3.19%,全钾含量为0.93%~3.96%,平均值为2.25%。广泛的数据分布为后续构建高适用性的预测模型奠定了数据基础。

2.2 近红外定标模型的建立与优化

为构建可靠模型,首先依据全局距离(GH)和残差T检验($|T|>2.5$)剔除光谱或化学值异常样

本,最终保留810份有效样品。采用分层随机抽样法按3:1比例将其划分为校正集(607份)和验证集(203份)。通过比较多种光谱预处理方法结合偏最小二乘回归建模的结果,确定了各指标的最优预处理方案(表1)。粗蛋白、可溶性糖和全钾的最优预处理组合为“消除常数偏移量+一阶导数+多元散射校正”,其交叉验证决定系数(R^2)分别为0.92, 0.92和0.89,相对分析误差(RPD)均大于3.0,表明模型具备优异的预测精度。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的最优预处理组合为“消除常数偏移量+一阶导数+标准正态变量变换”,其交叉验证决定系数分别为0.87和0.85,RPD分别为2.76和2.71,均高于2.5的预测标准,模型可用于定量分析。

2.3 最优定标模型的外部验证

使用全部验证集样本($n=203$)对各模型进行外部验证,以评估其泛化能力,结果如表2和图3所示。粗蛋白、可溶性糖和全钾模型的验证集预测值与化学测定值间相关系数(r)分别为0.85, 0.86和0.83,预测标准误差(SEP)较小,一致性良好,表明模型预测准确、稳定。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维模型的验证集相关系数分别为0.78和0.79,化学测定平均值分别为57.83%和36.78%,预测平均值分别为58.98%和35.57%,虽预测偏差略高于粗蛋白等指标,但其RPD值均大于2,表明模型仍可满足常规快速筛查与品质评价的需求(图3)。图3的散点图直观展示了各指标预测值与实测值之间良好的线性相关性,进一步证实了模型的有效性。综合来看,本研究构建的5项燕麦干草品质成分近红

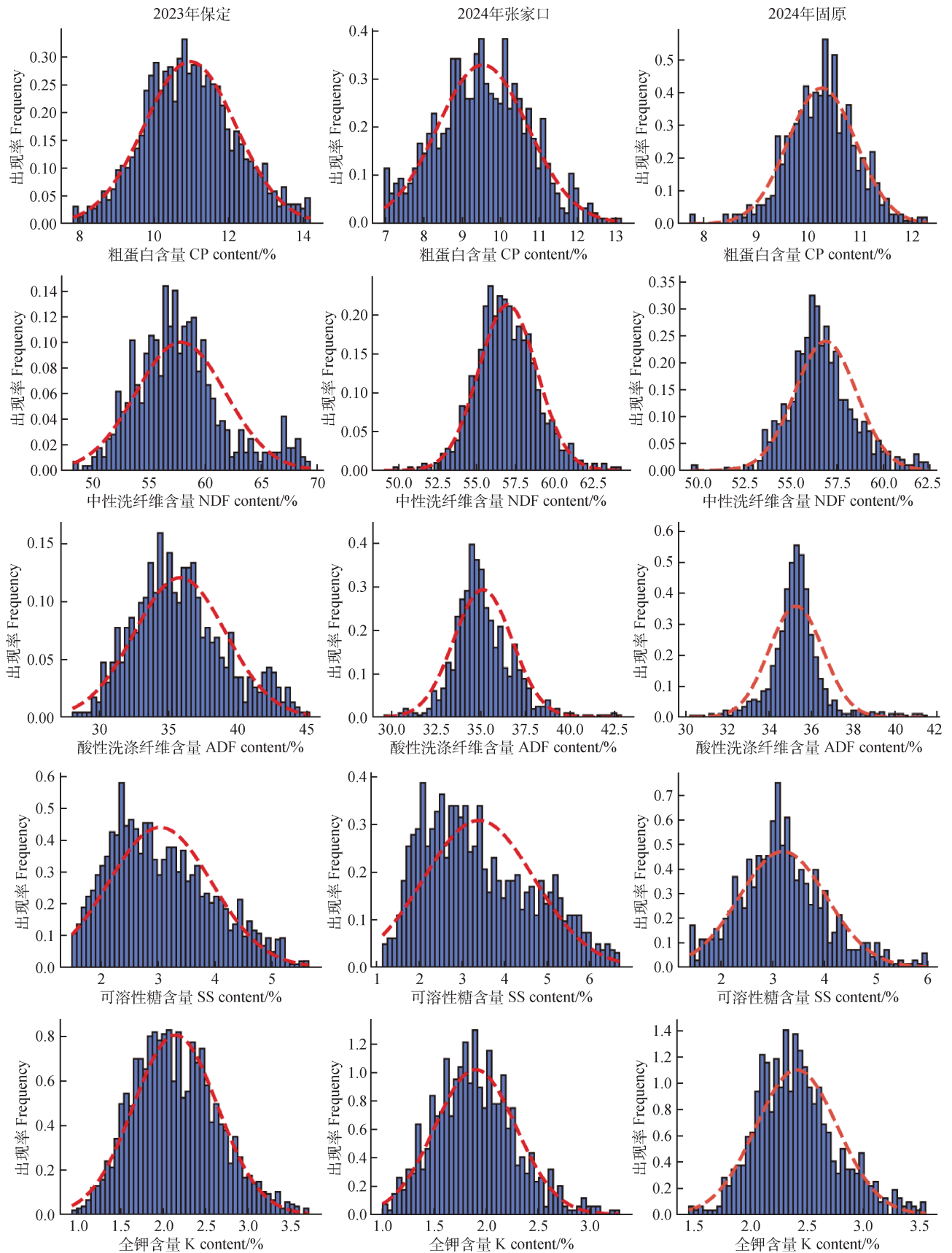


图2 燕麦干草品质成分含量测定值

Fig. 2 Determined values of quality component contents in oat hay

表 1 燕麦干草品质成分近红外光谱预测模型性能参数
Table 1 Optimal calibration models for quality components of oat hay

成分 Component	光谱预处理方法 Processing method	交叉验证 决定系数 R^2	交叉验证均方根 误差 RMSE/%	相对分 析误差 RPD
粗蛋白 CP	消除常数偏移量(ECO)+一阶导数(FD)+多元散射校正(MSC)	0.92	0.39	3.57
中性洗涤纤维 NDF	消除常数偏移量(ECO)+一阶导数(FD)+标准正态变量变换(SNV)	0.87	0.65	2.76
酸性洗涤纤维 ADF	消除常数偏移量(ECO)+一阶导数(FD)+标准正态变量变换(SNV)	0.85	0.61	2.71
可溶性糖 SS	消除常数偏移量(ECO)+一阶导数(FD)+多元散射校正(MSC)	0.92	0.43	3.59
全钾 K	消除常数偏移量(ECO)+一阶导数(FD)+多元散射校正(MSC)	0.89	0.49	3.21

外光谱预测模型均达到预期效果,其中粗蛋白、可溶性糖和全钾模型可用于高精度定量检测,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维模型可满足常规快速筛查需求。

表 2 燕麦干草品质最优定标模型的外部检验
Table 2 External validation of optimal calibration models for quality components of oat hay

成分 Component	样品数 Number of samples	化学测定平均值 Average value of chemical determination/%	预测平均值 Predicted average value/%	标准差 SEP	相关系数 r
粗蛋白 CP	203	9.77	9.32	0.88	0.84
中性洗涤纤维 NDF	203	57.83	58.98	3.05	0.78
酸性洗涤纤维 ADF	203	36.78	35.57	2.01	0.79
可溶性糖 SS	203	3.04	3.84	0.31	0.86
全钾 K	203	2.18	1.83	0.21	0.83

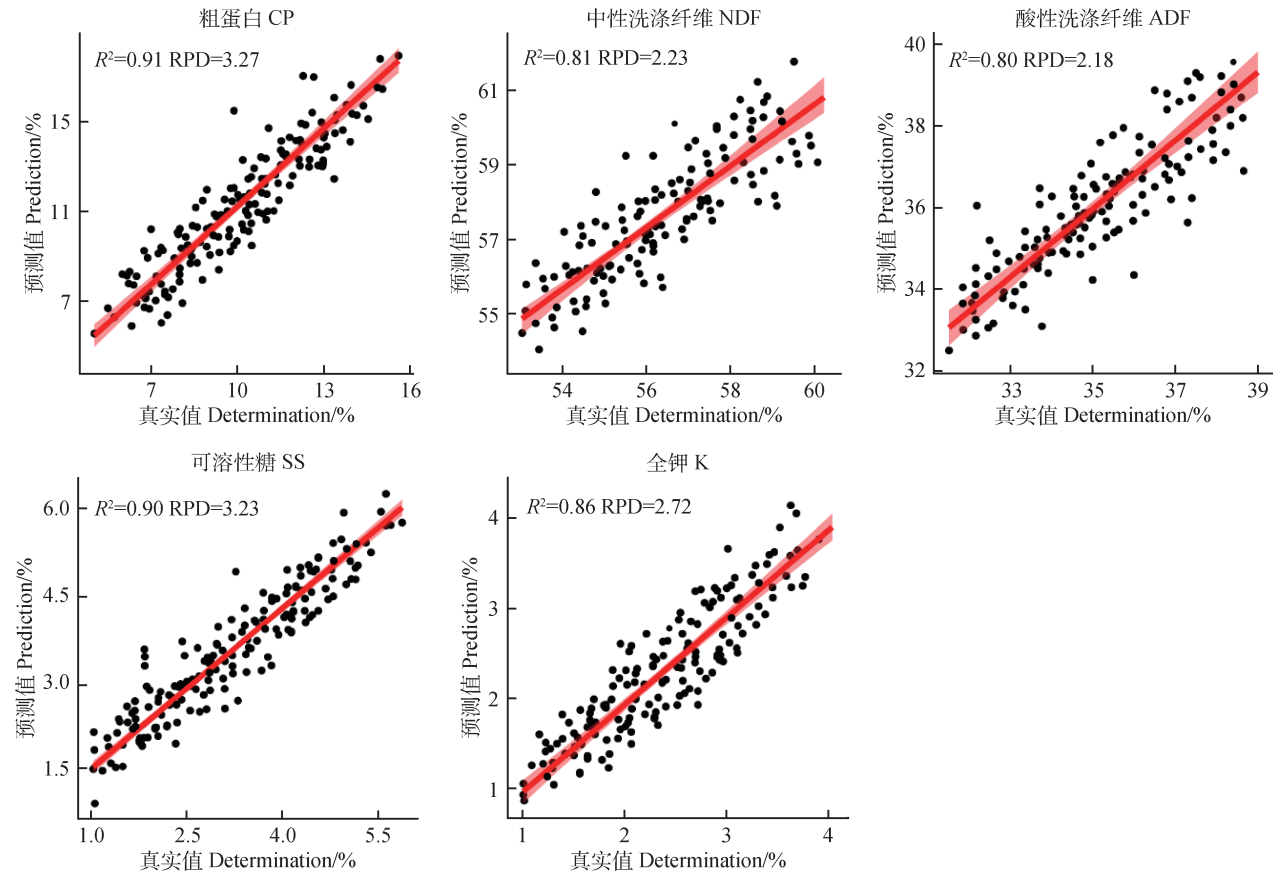


图 3 燕麦干草品质成分测定值与预测值的相关性
Fig. 3 Correlation between determined and predicted values of quality components in oat hay

2.4 高品质燕麦种质的筛选

基于构建的多环境近红外光谱预测模型,对 1272 份未化学测定的燕麦干草样本开展品质快速预测,其各指标含量分布与建模样本趋势一致:粗蛋白 7.23%~14.78%(均值 9.88%),中性洗涤纤维 47.00%~65.19%(均值 56.96%),酸性洗涤纤维 30.43%~44.17%(均值 36.11%),可溶性糖 0.82%~7.16%(均值 3.34%),全钾 0.99%~3.93%(均值 2.19%)。

整合 849 份建模样本化学数据与 1272 份样本光谱预测数据,依据内蒙古自治区地方标准 DB15/T 2599-2022《燕麦干草产品营养品质评价及质量分

级》中关于优质燕麦干草的高粗蛋白、低中性洗涤纤维分级原则,从 800 份燕麦种质资源中初筛获得 56 份优良种质。2025 年于张家口开展该 56 份种质的田间种植试验,收获后取样并委托第三方机构进行粗蛋白、中性洗涤纤维含量检测,筛选出 34 份同时满足粗蛋白 $\geq 10.0\%$ 、中性洗涤纤维 $\leq 57.0\%$ 的优质燕麦种质(表 3)。另筛选出 20 份三生态区粗蛋白稳定偏高种质(均值 11.83%,显著高于总体)(表 4)、20 份中性洗涤纤维稳定偏低种质(均值 49.84%,显著低于总体)(表 4),这些种质环境适应性好,遗传改良潜力大,可作为饲用燕麦品质育种核心亲本。

表 3 筛选的高品质饲用燕麦种质
Table 3 Screened high-quality forage oat germplasm resources

编号 Number	粗蛋白 CP/%	中性洗涤纤维 NDF/%	编号 Number	粗蛋白 CP/%	中性洗涤纤维 NDF/%
C001071	12.92	56.6	C001233	10.6	53.3
C001275	12.43	53.7	C000373	10.53	54.7
C001110	12.15	56.7	C000728	10.5	55.0
C000816	11.98	56.3	C000766	10.44	52.0
C000437	11.95	51.6	C000096	10.39	49.4
C001381	11.93	54.9	C001452	10.39	51.5
C000973	11.84	57.0	C001416	10.34	54.9
C001238	11.46	53.1	C000003	10.32	54.4
C001024	11.39	53.5	C000279	10.31	54.8
C000564	11.07	51.5	C001004	10.28	46.7
C001374	10.77	55.3	C000498	10.28	55.5
C000758	10.71	55.6	C000757	10.26	47.7
C001003	10.69	53.7	C001146	10.26	51.7
C000090	10.66	55.1	C001027	10.1	51.8
C001108	10.64	49.6	C000651	10.09	55.9
C001408	10.63	49.6	C000664	10.03	50.1
C001096	10.63	49.7	C000257	10.02	51.6

3 讨论

近红外光谱技术的核心在于构建光谱特征与化学成分之间的稳定关联,而样品的代表性及数据分布特征是决定模型性能的关键因素^[16-19]。以往相关研究常受限于单一生态区域或较小样本量,导致所建立的模型在跨区域应用时,易出现预测准确性显著下降的问题^[20-21]。为突破这一瓶颈,本研究系统收集了河北保定、张家口及宁夏固原三个生态区的燕麦样本,且试验周期跨越两个年度,使构建的样本集在基因型、生态环境及田间管理措施等方面均具备高度异质性。同时,5 项核心品质指标均呈现宽范围正态分布特征,为建立稳健可靠的预测模型奠定了坚实的数据基础。最终,所构建的模型在

多环境验证集中表现稳定,进一步证明了大样本量、多环境覆盖的研究策略对于提升 NIRS 模型稳定性与多环境适用性的关键作用。

本研究构建的 5 个品质指标预测模型中,粗蛋白、可溶性糖和全钾模型的预测性能显著优于中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维模型。这种差异与各成分的化学特性及光谱响应机制密切相关。从分子结构来看,粗蛋白的酰胺键($-\text{CONH}-$)、可溶性糖的羟基($-\text{OH}$)在近红外光谱区($4000\sim 12\,500\text{ cm}^{-1}$)具有特异性强、灵敏度高的特征吸收峰^[22];钾离子无直接近红外特征吸收,但其可与植物组织中含羟基、酰胺键的细胞壁多糖、蛋白质等有机成分结合,改变有机分子的振动特征,使光谱信号与全钾含量形成稳定的间接关联^[23]。上述三类指标的光谱响

表4 筛选20份高粗蛋白、20份低中性洗涤纤维燕麦种质

Table 4 Screened 20 high-CP and 20 low-NDF oat germplasm accessions

编号 Number	粗蛋白 CP/%	编号 Number	中性洗涤纤维 NDF/%
C000526	13.3	C001004	46.7
C001071	12.9	C000889	47.3
C001275	12.4	C000757	47.7
C001110	12.2	C000913	49.0
C001125	12.0	C000096	49.4
C000816	12.0	C001108	49.6
C000437	11.9	C001408	49.6
C001381	11.9	C001222	49.6
C001341	11.9	C001096	49.7
C000973	11.8	C000664	50.1
C000759	11.6	C001343	50.1
C000752	11.6	C001038	50.2
C000277	11.6	C000950	50.3
C000361	11.5	C000640	50.4
C001238	11.5	C000706	50.6
C001024	11.4	C001214	50.9
C000408	11.4	C001033	51.2
C000754	11.2	C001377	51.4
C000432	11.2	C000564	51.5
C000046	11.2	C001452	51.5

应受样品颗粒度、散射效应等物理因素干扰较小,因此能建立稳定的光谱与浓度关联^[24]。而中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维作为复杂的细胞壁聚合物,主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,三者的光谱吸收峰存在严重重叠,且纤维类成分的结晶度、聚合度会随生长环境变化产生差异,导致光谱信号中有效信息被干扰^[25]。尽管如此,本研究中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维模型的RPD值均高于2.5的预测阈值,表明其可以在实际中用于种质资源大规模快速筛查。后续可通过进一步扩大样品数量、优化光谱预处理算法(如小波变换、导数处理等)或结合区间偏最小二乘法等化学计量学方法,持续提升纤维类指标的预测准确度。

钾含量是评价燕麦干草矿物质营养价值的关键指标,因其含量直接影响畜禽的电解质平衡、神经肌肉传导及代谢酶活性,进而对奶牛产奶量、肉羊增重率等生产性能产生重要调控作用^[26-27]。然而,传统火焰光度法需经样品消解、显色等复杂步骤,检测周期长达24小时,试剂消耗大且易造成环境污染,难以满足大规模种质筛选需求。目前关于燕麦干草全钾含量的NIRS预测模型报道较少,且多局限于单一生态区或特定栽培条件^[28]。本研究基于两年三点大样本数据构建的全钾预测模型,交

叉验证 R^2 达0.89,RPD为3.21,预测值与化学测定值的相关系数为0.83,具有高精度和广泛的生态适用性,可实现不同环境下燕麦干草全钾的高通量定量检测。与传统方法相比,该模型无需化学试剂、绿色环保,对燕麦品质育种及标准化生产具有重要实践意义。

本研究中五项品质指标的测定值波动范围较大,除种质基因型差异外,可能与生育期长短也有一定关联。所有样品均按各自种质的实际生育进程在乳熟期采集,但早熟与晚熟种质到达乳熟期的时间相差较大。然而,晚熟种质并不必然表现为高粗蛋白、低纤维的高品质特征,其品质表现还受基因型-环境互作、氮素利用效率及碳氮代谢平衡等多种因素综合影响。已有研究表明,同一品种的粗蛋白含量随生育期增长呈下降趋势,而纤维含量呈上升趋势^[29-30]。后续研究可结合生育期天数、气候等数据,系统分析不同熟期种质品质性状的动态变化规律,以进一步解析生育期对燕麦干草品质的调控作用。

本研究虽构建了覆盖我国北方三个典型生态区的多环境预测模型,但仍存在一定局限性。首先,样品均来自北方春播燕麦区,未涵盖南方秋冬季燕麦种植区,模型在南方高温高湿生态区的适用性有待进一步验证。其次,所有试验点均采用不追肥、无人工灌溉(雨养)的统一管理方式,未考虑人工灌溉及不同施肥水平对干草品质及模型预测精度的影响。此外,本研究仅针对乳熟期收获的燕麦干草建立模型,对于其他重要发育时期收获的样品,模型的预测性能仍需评估。未来研究可进一步扩大样品的生态覆盖范围,纳入不同栽培管理条件和物候期的样品,持续优化模型的通用性和适用范围。

4 结论

本研究基于两年三点2121份燕麦干草样本,利用NIRS分析技术成功构建了涵盖粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性糖及全钾五项关键品质指标的多环境近红外光谱预测模型。所有模型均达到实际应用要求,其中粗蛋白、可溶性糖和全钾模型可用于定量分析,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维模型适用于样品的快速筛查。同时,本研究筛选出56份优质的燕麦种质资源,为品种选育提供

了重要材料。研究结果为燕麦种质资源精准评价、优质品种培育及干草品质标准化生产提供了高效技术支撑,对推动我国草地畜牧业高质量发展具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] ZHANG Y J, LI S C, DONG X L, et al. Evaluation of oat (*Avena sativa* L.) populations for autumn sowing production in Southwest China[J]. Grass and Forage Science, 2024, 79(1): 37-46
- [2] 王筱,李夺,潘翔磊,等. 赤峰半干旱区10个饲用燕麦品种适应性评价[J]. 草业科学, 2023, 40(2): 521-529
WANG X, LI D, PAN X L, et al. Adaptability evaluation of 10 forage oat varieties in Chifeng semiarid area [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(2): 521-529
- [3] 叶雪玲,甘圳,万燕,等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. 草业学报, 2023, 32(2): 160-177
YE X L, GAN Z, WAN Y, et al. Advances and perspectives in forage oat breeding[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2023, 32(2): 160-177
- [4] OKCU M, SEVEROĞLU S, KAVUNCU İ. Effects of different mixing ratios of common vetch and oats on forage yield and quality[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2025, 49(6): 1029-1039
- [5] DUAN H M, WU R, WANG W H, et al. Stay-green trait improves yield, quality, and feeding value of forage oats under contrasting eco-sowing systems[J]. Frontiers in Plant Science, 2026, 16: 1709486
- [6] RUJA A, COZMA A, COZMA B, et al. Nutritional, phytochemical, and rheological profiles of different oat varieties and their potential in the flour industry [J]. Agronomy, 2024, 14(7): 1438
- [7] SANADYA S K, SOOD V K, SHARMA G, et al. Adaptation of oat genotypes in organic and conventionally managed fields in the northwestern Himalayas[J]. Agronomy Journal, 2024, 116(2): 433-445
- [8] TULU A, DIRIBSA M, TEMESGEN W. Evaluation of seven oat (*Avena sativa*) genotypes for biomass yield and quality parameters under different locations of western Oromia, Ethiopia[J]. Advances in Agriculture, 2020, 2020(1): 8822344
- [9] 乔瑶瑶,赵武奇,胡新中,等. 近红外光谱技术检测燕麦中蛋白质含量[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(8): 138-142
QIAO Y Y, ZHAO W Q, HU X Z, et al. Determination of protein content in oat using near-infrared spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(8): 138-142
- [10] 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
REN X Z, GUO H R, JIA Y S, et al. Application and prospect of near infrared reflectance spectroscopy in forage analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 635-640
- [11] 王建伟,陶飞. 近红外光谱技术在农产品检测中的应用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(17): 155-158
WANG J W, TAO F. Application research progress of near infrared spectroscopy technology in agricultural products detection [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(17): 155-158
- [12] 王储,麻冬梅,李跃,等. 检测燕麦干草主要营养成分含量的近红外光谱分析模型[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2645-2651
WANG C, MA D M, LI Y, et al. Near infrared spectroscopic model for the detection of the main nutrient components of oat hay[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(10): 2645-2651
- [13] 张书阅,熊安然,潘予琮,等. 燕麦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, 2022, 34(2): 1334-1342
ZHANG S Y, XIONG A R, PAN Y C, et al. Near infrared prediction model establishment for conventional nutrient contents of oat grass[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(2): 1334-1342
- [14] 李进发,向阳,王宇,等. 基于近红外光谱技术建立刺糖中多糖含量的快速检测模型[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(24): 342-348
LI J F, XIANG Y, WANG Y, et al. Establishment of a rapid detection model for polysaccharide content in *Alhagi sparsifolia* honey based on near-infrared spectroscopy technology [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(24): 342-348
- [15] 李沁雨,杨雪萍,杨富裕,等. 特征光谱提取法在饲料桑青贮品质近红外光谱快速检测技术中的应用[J]. 草地学报, 2026, 34, 34(5): 1878-1888
LI Q Y, YANG X P, YANG F Y, et al. Rapid detection of mulberry silage quality based on near-infrared characteristic spectral interval extraction [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5): 1878-1888
- [16] 陈瀑,杨健,褚小立,等. 近五年我国近红外光谱分析技术的研究与应用进展[J]. 分析化学, 2024, 52(9): 1213-1224
CHEN P, YANG J, CHU X L, et al. Research and application progress of near infrared spectroscopy analytical technology in china in the past five years [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2024, 52(9): 1213-1224
- [17] 陈瀑,戴嘉伟,李敬岩,等. 近红外光谱分析中的化学计量学方法进展[J]. 化学试剂, 2023, 45(6): 105-112
CHEN P, DAI J W, LI J Y, et al. Progress of chemometric methods in near-infrared spectroscopy [J]. Chemical Reagents, 2023, 45(6): 105-112
- [18] WANG T, ZHENG Y, XU L L, et al. Comprehensive comparison on different wavelength selection methods using several near-infrared spectral datasets with different dimensionalities [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 331: 125767
- [19] HE C, JIANG X G, LI B, et al. A method based on local linear reconstruction combined with spectral information entropy for constructing and updating apple origin discrimination models[J].

- Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(7): 6365-6377
- [20] 丁超民, 李轲, 刘帆, 等. 近红外光谱技术在复杂组分样品中的应用进展[J]. 化学试剂, 2025, 47(7): 18-27
DING C M, LI K, LIU F, et al. Advancements in the application of near-infrared spectroscopy in complex compositional samples[J]. Chemical Reagents, 2025, 47(7): 18-27
- [21] 戴雨涛, 韩强. 跨区域鳄梨茎端腐烂光谱模型适应性研究[J]. 激光技术, 2025, 49(6): 822-828
DAI Y T, HAN Q. Cross-regional adaptability of spectral models for avocado stem-end rot detection[J]. Laser Technology, 2025, 49(6): 822-828
- [22] WHETSEL K B. Near-infrared spectroscopy: I. Spectral identification and analytical applications[J]. Spectrochimica Acta, 1954, 6(4): 257-287
- [23] 王国庆, 王芳, 陈达, 等. 近红外光谱技术用于复杂植物样品中无机离子测定的新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(12): 1540-1542
WANG G Q, WANG F, CHEN D, et al. A novel method for the determination of inorganic ions in complex plant samples by near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(12): 1540-1542
- [24] 吴晓庆. 基于光谱信息融合的苜蓿干草品质检测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2025: 2-27
WU X Q. Research on quality detection of alfalfa hay based on spectral information fusion[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2025: 2-27
- [25] JIN X L, CHEN X L, SHI C H, et al. Determination of hemicellulose, cellulose and lignin content using visible and near infrared spectroscopy in *Miscanthus sinensis* [J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 603-609
- [26] 古再丽努尔·艾麦提, 庾勇, 张好, 等. 燕麦草在反刍动物生产中的应用研究进展[J]. 饲料研究, 2025, 48(17): 155-159
GU Z L N E M, TUO Y, ZHANG Y, et al. Research progress on application of oat grass in ruminant production [J]. Feed Research, 2025, 48(17): 155-159
- [27] 朱雯, 黄李, 石琢, 等. 钾的生理功能及其在畜禽生产中的应用研究进展[J]. 动物营养学报, 2024, 36(10): 6121-6128
ZHU W, HUANG L, SHI Z, et al. Research progress of physiological roles of potassium and its application in livestock and poultry production [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(10): 6121-6128
- [28] 解津刚, 魏勇, 宋洁, 等. 新疆地区燕麦草饲料主要营养成分相关性分析[J]. 饲料研究, 2022, 45(5): 110-113
XIE J G, WEI Y, SONG J, et al. Correlation analysis of main nutrient components of oat grass feed in Xinjiang region [J]. Feed Research, 2022, 45(5): 110-113
- [29] 陈丽雪, 张继宗, 李会彬, 等. 河北坝上地区 4 个燕麦品种饲草产量和品质对不同刈割期的响应[J]. 山西农业科学, 2022, 50(8): 1204-1208
CHEN L X, ZHANG J Z, LI H B, et al. Response of forage yields and quality of four oat varieties to mowing stages in Bashang Plateau of Hebei Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 1204-1208
- [30] 桑瑞娟, 董春阳, 张红妹, 等. 不同生育期刈割对燕麦产量、品质和青贮发酵质量的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(10): 99-103
SANG R J, DONG C Y, ZHANG H M, et al. Effect of mowing at different fertility period on yield, quality, and silage fermentation quality of oat [J]. Feed Research, 2025, 48(10): 99-103

(责任编辑 闵芝智)