

杜雪燕, 王 迅, 柴沙驼, 等. 基于近红外光谱的天然牧草 CNCPS 组分分析与预测[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(5): 1115-1123.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.05.027

基于近红外光谱的天然牧草 CNCPS 组分分析与预测

杜雪燕, 王 迅, 柴沙驼, 刘书杰

(1. 青海大学/青海省高原放牧家畜营养与饲料科学重点实验室/青海高原牦牛研究中心, 青海 西宁 810016)

摘要: 从青海省河南县高山嵩草草地采集天然牧草样品 66 个, 研究近红外光谱技术测定天然牧草净碳水化合物和净蛋白质体系(CNCPS)组分的可行性。选用修正的偏最小二乘法(MPLS)建模, 筛选最佳的光谱和数学处理方法, 建立了天然牧草中粗蛋白质(CP)、可溶性蛋白质(SP)、非蛋白氮(PA)、快速降解真蛋白(PB₁)、中速降解真蛋白(PB₂)、慢速降解真蛋白(PB₃)、结合粗蛋白(PC)和中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、酸性洗涤木质素(ADL)、总碳水化合物(CHO)、非结构性碳水化合物(CNSC)、糖类(CA)、淀粉和果胶(CB₁)、可利用纤维(CB₂)、不可利用纤维(CC)等的近红外定量分析模型。结果显示, CP、PC、NDF、ADF、CHO、CNSC、CA 的交叉验证决定系数(*I*-VR)分别为 0.989、0.870、0.975、0.932、0.964、0.966、0.846, 交叉验证相对分析误差(RPDCV)分别为 9.336、2.913、6.353、3.758、5.306、5.521、2.603, 其他指标的 *I*-VR 均小于 0.9, RPDCV 均小于 2.5。可见, 近红外技术可以用于天然牧草 CNCPS 组分快速测定, CP、PC、NDF、ADF、CHO、CNSC、CA 含量预测模型的预测能力较好, PA、PB₁、PB₂、PB₃、CB₁、CB₂、CC 含量预测模型需要进一步研究以提高精度。

关键词: 近红外光谱技术(NIRS); 天然牧草; CNCPS 组分; 营养价值

中图分类号: S816.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)05-1115-09

Analysis and prediction of natural pasture CNCPS (cornell net carbohydrate and protein system) components by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS)

DU Xue-yan, WANG Xun, CHAI Sha-tuo, LIU Shu-jie

(1. Qinghai University/Key Laboratory of Plateau Grazing Animal Nutrition and Feed Science of Qinghai Province/Qinghai Plateau Yak Research Center, Qinghai Province, Xining 810016, China)

Abstract: Sixty-six samples collected from alpine grassland of *Kobresia hastily* in Henan county, Qinghai province were used to investigate the feasibility of predicting the CNCPS (cornell net carbohydrate and protein system) composition of natural pasture by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). Using modified partial least squares (MPLS) regression method, the models of CP (crude protein), SP (soluble protein), PA (non-protein nitrogen), PB₁ (rapidly degradable crude protein), PB₂ (intermediately degradable crude protein), PB₃ (slowly degradable crude protein), PC (bound crude protein), and models of NDF (neutral detergent fiber), ADF (acid detergent fiber), ADL (acid detergent lignin), CHO (total carbohydrate), CNSC (non-structural carbohydrates), CA (sugars), CB₁ (starch and pectin), CB₂ (available fiber), CC (not available fiber) were built. The results showed *I*-VR (cross validation determination coefficient) for CP, PC, NDF, ADF, CHO, CNSC, and CA were 0.989, 0.870, 0.975, 0.932, 0.964, 0.966 and 0.846, respectively, and RPDCV (ratios of standard deviation of reference analysis

收稿日期: 2015-02-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303062-1); 国家自然科学基金(地方科学基金)项目(41461081)

作者简介: 杜雪燕(1988-), 甘肃临洮人, 硕士研究生, 研究方向为动物营养与饲料科学。(E-mail) duxueyan2012@126.com

通讯作者: 柴沙驼, (E-mail) chaishatuo@163.com

data to SECV) were 9.336, 2.913, 6.353, 3.758, 5.306, 5.521, and 2.603, respectively. Models with $I\text{-}VR$ less than 0.9 and $RPDCV$ less than 2.5 were not ideal. The results indicated that CNCPS components of natural pasture could be fastly and accurately predicted by NIRS, and the models established were applicable for the predictions of CP, PC, NDF, ADF, CHO, CNC and CA. Further studies should be focusing on improving the precision of the models for PA, PB_1 , PB_2 , PB_3 , CB_1 , CB_2 , and CC.

Key words: near infrared reflectance spectroscopy (NIRS); natural pasture; cornell net carbohydrate and protein system (CNCPS); nutritional value

天然牧草营养直接影响放牧家畜的营养状况、生命活动和生产性能。准确获取天然牧草营养信息,对草地畜牧业生产非常重要。康奈尔净蛋白质和碳水化合物体系(CNCPS)可以将牧草的化学分析与植物细胞成分及反刍动物的消化吸收高度结合,全面深度评价天然牧草的营养价值。在国内,CNCPS已广泛应用于反刍动物常用饲料营养价值测定和评价^[1-3],并且建立了适合中国肉牛和奶牛的常用饲料组分数据库^[4],为CNCPS模型的准确预测提供基础。在天然牧草营养评价方面,艳城等^[5]测定了内蒙古荒漠草原区8种牧草的CNCPS组分,表明CNCPS体系将饲料化学分析与反刍动物瘤胃消化利用情况结合在一起,使结果呈现动态指标。目前,天然牧草营养价值评价主要依靠传统的化学分析方法,检测周期长、成本高。运用高效检测技术准确、全面、快速测定天然牧草营养价值,有利于实时估测草地营养状况。

近红外光谱技术(NIRS)是现代光谱分析技术、计算机技术和现代化学计量学的高度集合体,是新兴光谱分析技术^[6],以快速、实时、无损测定的优势,广泛应用于牧草、烟草、茶叶等产品的营养成分分析^[7-9]。陈龙等^[10]对NIRS在CNCPS体系中的应用进行了积极探索,结果表明NIRS技术可以准确预测燕麦干草CNCPS蛋白质组分含量,为NIRS在天然牧草价值方面的应用提供了新的思路。

本试验探讨利用近红外技术测定天然牧草中CNCPS蛋白质组分和碳水化合物组分的可行性,为青海地区天然牧草营养价值数据库的建立提供数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验地位于青海省河南县,是典型的高寒草甸类高山嵩草草地。经度 $101^{\circ}38'08.7'' \sim$

$101^{\circ}38'13.8''$, 纬度 $34^{\circ}51'03.4'' \sim 34^{\circ}51'18.1''$, 平均海拔3 570 m。该草地以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为主要优势种,次优势种有线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、双柱头蔗草(*Scirpus triqueter*)、异针茅(*Stipa aliena*)、草地早熟禾(*Poa crymophila*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等,伴生有菊科、豆科、蔷薇科等牧草,主要有毒植物为秦艽(*Gentiana macrophylla* Pall)、橐吾(*Ligularia sibirica* L.)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)等。

在牧草生长季节,按照任继周样地设置原则^[11],采集 $1.0 \times 1.0 \text{ m}^2$ 样方牧草,齐地面刈割,挑出石子、毒杂草等不可食部分,将可食牧草自然风干,共计66份样品。所有样品粉碎,65℃烘48 h,过筛(1 mm),装入自封袋,常温避光保存,用于化学成分测定和光谱扫描。

1.2 仪器及参数

本试验使用FOSS公司生产的DS2500近红外光谱分析仪。工作参数:波长400~2 500 nm;双检测器系统,硅检测器(400~1 100 nm),硫化铅检测器(1 100~2 500 nm);数据采集频率为1 s扫描2次;光谱分辨率:0.5 nm;波长准确度<0.05 nm;定标软件为WinISI III;数据采集形式为 $\lg(1/R)$ 。工作条件:室温25℃稳定。

每次开机扫描光谱前,仪器预热30 min。将处理好的样品装入样品杯,大约为杯容量的3/4,每个样品重复扫描6次,每次均扫描背景,将平均光谱保存为样品的最终光谱,从而消除由装样紧实度以及样品粒度不同所造成的误差。

1.3 牧草营养指标的测定

1.3.1 CNCPS组分的定义和划分 CNCPS体系以反刍动物瘤胃消化特征为基础,将牧草化学成分、植物细胞组成、瘤胃消化利用情况有机结合,从蛋白质组分和碳水化合物组分更深层次评价天然牧草营养价值。CNCPS体系将蛋白质分为3部分:非蛋白质

氮、真蛋白质、不可降解粗蛋白质,分别用 PA、PB、PC 表示。PA 在瘤胃中快速降解。真蛋白质 PB,包括 PB₁、PB₂、PB₃,PB₁是可溶于缓冲液的真蛋白质,属于快速降解蛋白质;PB₂是中性洗涤可溶蛋白质,属于中速降解蛋白质;PB₃是酸性洗涤可溶蛋白质,属于缓慢降解蛋白质。PC 是酸性洗涤不溶蛋白质,为结合蛋白质,是与木质素、单宁等结合的蛋白质。碳水化合物被分为 4 部分:以糖类为主的快速降解部分(CA);以淀粉和果胶为主的中速降解部分(CB₁);以可利用纤维为主的慢速降解部分(CB₂);以牧草细胞壁为主的不可利用纤维(CC)。

1.3.2 指标测定方法 粗蛋白质(CP)、可溶性蛋白质(SP)含量按 AOAC 方法^[12]测定,酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤木质素(ADL)含量采用 Vansoest 等^[13]的方法测定,每份样品测定 2 个平行,取平均值。按照 Sniffen 等^[14]的方法计算总碳水化合物(CHO)、非结构性碳水化合物(CNSC)、CNCPS 蛋白质组分(PA、PB₁、PB₂、PB₃、PC)、CNCPS 碳水化合物组分(CA、CB₁、CB₂、CC)含量。

1.4 模型的建立与优化

样品按 3:1 比例随机分为定标集(Calibration)和验证集(Validation)^[15]。用 WinISI III 软件,采用修正偏最小二乘法(MPLS),结合散射光谱预处理和导数、平滑数学预处理方法,用定标集样品建立模

型。用马氏距离(Mahalanobis distance)和绝对偏差(Residual)分别对光谱值和化学值进行检验^[16],提高模型的准确度。同时进行交叉验证,防止模型过拟合现象。根据定标标准偏差(SEC)、交叉检验标准误差(SECV)、交叉验证决定系数(1-VR)、预测标准误差(SEP)等指标评价,确定最优模型^[17]。用验证集样品对最优模型进行外部验证,评价其外部预测能力^[18]。用交叉验证相对分析误差 RPDCV(SD/SECV)和外部验证相对分析误差 RPDP(SD/SEP)对模型进行进一步评价;RPDCV 和 RPDP 大于 3,说明定标效果良好,建立的模型可以用于实际检测;小于 2.5,说明该模型难以用于实际测定;大于 2.5 且小于 3.0,模型的预测精度有待进一步提高^[19],精度提高后模型可用于实际测定。

2 结果与分析

2.1 牧草营养成分测定结果

根据马氏距离检测结果,剔除异常样品。由常规化学分析方法和 CNCPS 体系蛋白质各组分计算公式,计算天然牧草各蛋白质组分含量。结果(表 1)显示:定标集和验证集蛋白质各组分含量范围、平均值和标准差都比较接近,验证集样品的代表性较强;牧草中 CNCPS 体系蛋白质组分含量由高到低依次为 PB₂、PA、PB₃、PC、PB₁,PB₂含量最高(36.68%),PB₁含量最低(10.07%)。

表 1 天然牧草中各蛋白质组分含量

Table 1 The contents of protein components in natural pasture

营养成分	定标集			验证集		
	样品数量	含量范围(%)	平均值(%)	样品数量	含量范围(%)	平均值(%)
CP	50	3.76~20.62	10.19±4.10	15	3.88~20.19	9.73±4.73
SP	47	15.98~50.16	31.78±7.15	16	16.59~48.46	33.36±8.90
PA	49	4.21~43.13	22.82±8.00	15	7.25~43.12	23.20±8.82
PB ₁	47	1.24~19.80	10.07±4.95	12	1.25~19.15	10.35±5.10
PB ₂	49	11.29~52.25	36.68±6.71	15	13.16~49.50	35.95±6.32
PB ₃	48	4.55~46.43	18.18±9.51	16	4.85~45.94	17.31±9.39
PC	48	7.42~36.48	15.57±6.57	13	7.52~35.98	17.46±6.94

CP:粗蛋白质;SP:可溶性蛋白质;PA:非蛋白质氮;PB₁:快速降解真蛋白质;PB₂:中速降解真蛋白质;PB₃:慢速降解真蛋白质;PC:结合粗蛋白质。CP 为占干物质的百分含量,其余各组分均是占 CP 的百分含量。

根据常规化学分析方法和 CNCPS 体系碳水化合物各组分计算公式,计算天然牧草各碳水化合物组分含量。结果(表 2)显示,牧草中 CNCPS 体系碳

水化合物组分含量由高到低依次为 CB₂、CC、CA、CB₁。CB₂含量最高,达到 36.37%,CB₁含量最低,为 1.81%。

表 2 天然牧草中碳水化合物各组分含量

Table 2 The contents of carbohydrates components in natural pasture

营养成分	定标集			验证集		
	样品数量	含量范围(%)	平均值(%)	样品数量	含量范围(%)	平均值(%)
NDF	46	48.36 ~ 69.02	56.98±5.36	14	48.97 ~ 68.37	56.12±6.16
ADF	48	29.39 ~ 52.61	37.04±5.37	14	31.70 ~ 48.89	37.12±4.26
ADL	48	5.82 ~ 42.58	21.27±10.38	13	5.93 ~ 42.11	21.05±11.06
CHO	46	69.27 ~ 88.23	78.61±4.08	15	72.81 ~ 83.03	77.45±3.23
CNSC	46	18.85 ~ 42.41	32.27±5.06	16	18.94 ~ 39.84	32.57±6.18
CA	46	17.53 ~ 39.76	30.63±4.55	15	17.64 ~ 37.84	30.94±5.78
CB ₁	48	0.51 ~ 2.81	1.81±0.55	16	0.54 ~ 2.57	1.76±0.64
CB ₂	44	8.95 ~ 64.51	36.37±14.61	10	9.48 ~ 64.51	36.60±15.97
CC	47	11.13 ~ 72.59	35.10±15.41	12	11.31 ~ 72.10	35.90±16.84

NDF: 中性洗涤纤维; ADF: 酸性洗涤纤维; ADL: 酸性洗涤木质素; CHO: 总碳水化合物; CNSC: 非结构性碳水化合物; CA: 糖类; CB₁: 淀粉和果胶; CB₂: 可利用纤维; CC: 不可利用纤维。CNSC、CA、CB₁、CB₂、CC 是占 CHO 的百含量; NDF、ADF、CHO 是占干物质的百分含量; ADL 是占 NDF 的百分含量。

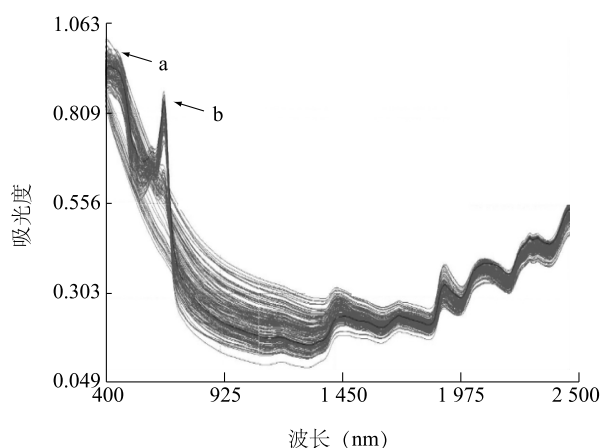
2.2 牧草样品光谱测定结果

图 1 显示: 牧草样品光谱响应曲线形态变化呈现 2 种趋势。生长期牧草中含有大量的叶绿素, 因叶绿素的强吸收, 在以 450 nm 为中心的蓝波段(a) 和 670 nm 为中心的红波段(b) 出现吸收峰; 随牧草生长发育停止, 叶绿素含量降低, 叶绿素在蓝、红波段的吸收减少, 反射增加; 牧草干枯时, 叶绿素更少, 叶黄素和叶红素在牧草叶片光谱响应中起主导作用。760 ~ 900 nm 是近红外波段, 是植物的高反射区, 其光谱特征主要受牧草细胞结构影响。不同牧草的色素含量、细胞结构、含水量(自由水) 均不同, 因此在同一波长处, 光谱响应应有一定的变化范围。总之, 天然牧草样品光谱在全波长范围内存在多个吸收峰, 为其营养成分的定量分析提供了丰富的信息。

2.3 天然牧草 CNCPS 组分近红外光谱分析模型的建立与评价

通过 WinISI III 定标软件, 用修正偏最小二乘法(MPLS) 及不同光谱和数学处理方法, 对定标集样品建立模型, 筛选最佳模型。最佳处理参数下, 模型的交叉检验标准误差(SEC_V) 最小、交叉验证决定系数(1-VR) 最大。

利用最佳的光谱和化学处理方法, 建立最优模型。由表 3 可以看出, 粗蛋白质(CP) 的交叉验证标准误差(SEC_V) 为 0.439 3, 交叉验证决定系数(1-



a: 以 450 nm 为中心的蓝波段; b: 以 670 nm 为中心的红波段。

图 1 牧草样品近红外光谱图

Fig. 1 NIRS spectra of natural pasture

VR) 为 0.989, 交叉验证相对分析误差(RPDCV) 为 9.336; 不溶蛋白质(PC) 的 SEC_V 为 2.255, 1-VR 为 0.870, RPDCV 为 2.913。其他蛋白质组分的 1-VR 均小于 0.8。

由表 4 可以看出, 碳水化合物组分 NDF、ADF、CHO、CNSC 的 1-VR 分别为 0.975、0.932、0.964、0.966, RPDCV 分别为 6.353、3.758、5.306、5.521; CA 的 1-VR 为 0.846, RPDCV 为 2.603; CB₁、CB₂、CC 的 1-VR 分别为 0.684、0.716、0.619, 均小于 0.9, RPDCV 分别为 1.870、1.940、1.786, 均小于 2.5。

表 3 蛋白质组分各指标 NIRS 模型参数

Table 3 The parameters of protein components of NIRS models

蛋白质组分	最佳处理参数	模型参数			
		SEC	SECV	I-VR	RPDCV
CP	None,1,4,4,1	0.370	0.439	0.989	9.336
SP	SNV and detend 1,4,4,1	2.226	3.311	0.717	2.159
PA	SNV and detend 2,4,4,1	2.863	4.730	0.602	1.691
PB ₁	SNV and detend 1,4,4,1	1.326	2.184	0.660	1.809
PB ₂	SNV and detend 2,4,4,1	2.448	4.357	0.766	1.999
PB ₃	SNV and detend 2,4,4,1	5.204	6.356	0.510	1.496
PC	None,1,4,4,1	1.699	2.255	0.870	2.913

各蛋白质组分见表 1 注。SNV+Detrend:标准正常化+去散射处理;1,4,4,1:一阶导数处理,数据间隔点为 4,平滑处理间隔点为 4,二次平滑处理间隔点为 1;2,4,4,1:二阶导数处理,数据间隔点为 4,平滑处理间隔点为 4,二次平滑处理间隔点为 1;None:无散射处理。SEC:定标标准偏差;SECV:交叉验证标准误差;I-VR:交叉验证决定系数;RPDCV:交叉验证相对分析误差($RPDCV=SD/SECV$)。

表 4 碳水化合物组分各指标 NIRS 模型参数

Table 4 The parameters of carbohydrates components of NIRS models

碳水化合物组分	最佳处理参数	模型参数			
		SEC	SECV	I-VR	RPDCV
NDF	SNV and detend 2,4,4,1	0.541	0.844	0.975	6.353
ADF	None,2,4,4,1	1.021	1.429	0.932	3.758
ADL	None,1,4,4,1	4.471	5.304	0.710	1.957
CHO	SNV and detend 2,4,4,1	0.473	0.769	0.964	5.306
CNSC	SNV and detend 1,4,4,1	0.646	0.917	0.966	5.521
CA	SNV and detend 1,4,4,1	1.194	1.748	0.846	2.603
CB ₁	SNV and detend 2,4,4,1	0.168	0.294	0.684	1.870
CB ₂	None,2,4,4,1	5.263	7.532	0.716	1.940
CC	SNV and detend 1,4,4,1	8.337	8.627	0.619	1.786

各碳水化合物组分见表 2 注。最佳处理参数和模型参数等见表 3 注。

2.4 天然牧草 CNCPS 组分模型预测效果分析

通过预测标准误差(SEP)、预测值与化学值的相关系数(RSQ)、外部验证相对分析误差(RPDP),用验证集样品对模型进行外部验证,评价实际预测效果,进一步检验其优劣。对验证集样品的预测值和化学值进行成对数据双尾 t 检验^[20],用预测值和化学值作散点比较两者相关性。

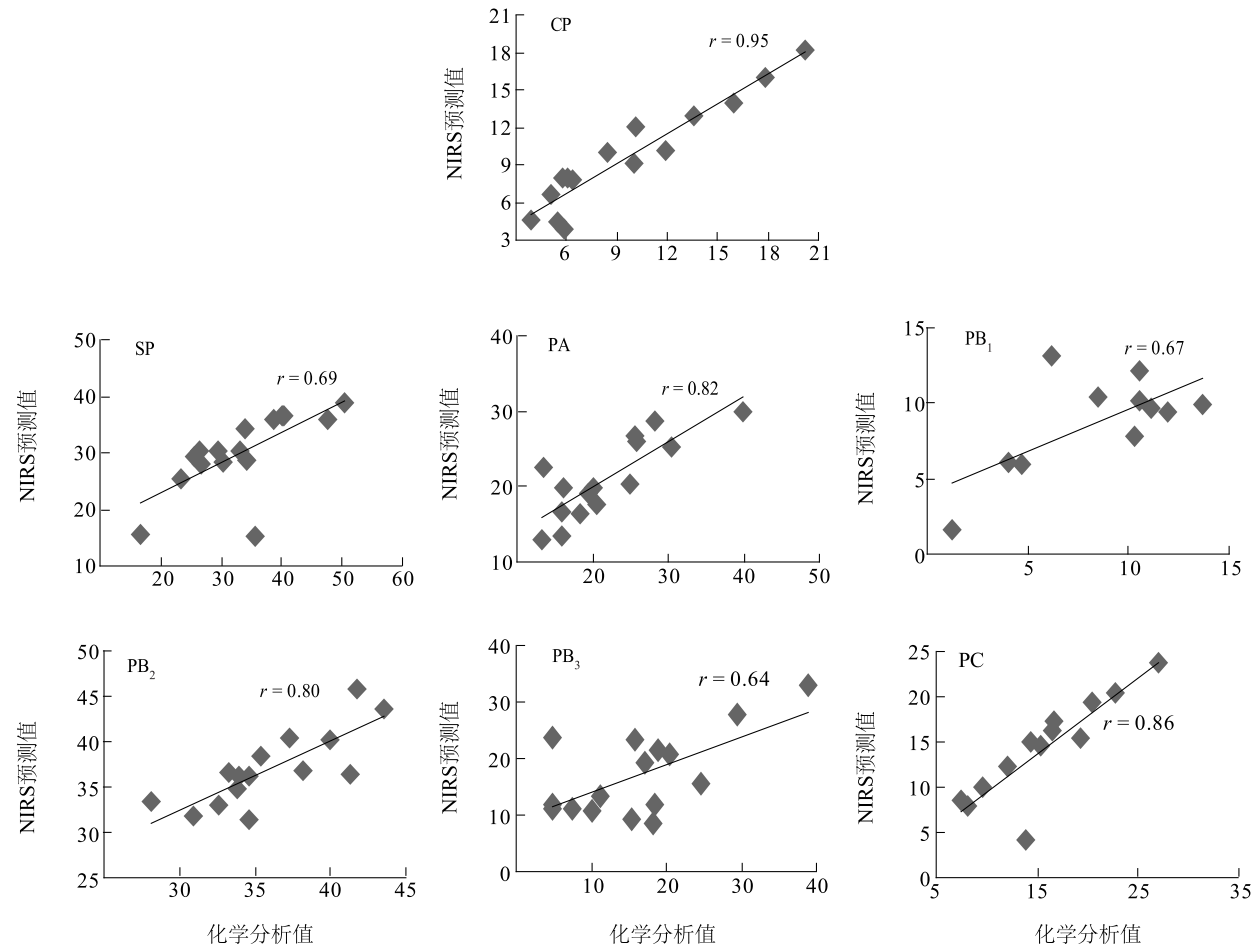
蛋白质组分各指标模型预测效果见表 5。粗蛋白质(CP)的 RPDP 为 10.95,大于 3;其他指标的 RPDP 均小于 2.5。各指标化学分析值与 NIRS 预测值相关性散点图见图 2,PA、PB₁、PB₂、PB₃、PC 的化学分析值与 NIRS 预测值相关系数分别为 0.82、0.67、0.80、0.64、0.86。

表 5 蛋白质组分定标模型评价

Table 5 The evaluation of calibration model for protein components

蛋白质组分	SEP	RSQ	RPDP	化学分析值	NIRS 值	相关系数	t 值	$t_{0.05}$
CP	0.431	0.991	10.95	9.88	9.95	0.95	-1.079	2.145
SP	7.085	0.481	1.009	33.36	30.00	0.69	2.084	2.131
PA	4.157	0.674	1.925	21.87	21.00	0.82	0.800	2.145
PB ₁	2.754	0.454	1.434	8.24	8.62	0.67	-0.462	2.201
PB ₂	2.826	0.629	2.236	35.95	36.99	0.80	-1.488	2.145
PB ₃	7.190	0.403	1.323	16.31	17.03	0.64	-0.387	2.131
PC	2.457	0.744	2.049	15.68	14.22	0.86	1.765	2.179

各蛋白质组分见表 1 注。SEP:预测标准误差;RSQ:NIRS 预测值与实测值的相关系数;RPDP:外部验证相对分析误差($RPDP=SD/SEP$)。



蛋白质组分 CP、SP、PA、PB₁、PB₂、PB₃、PC 见表 1 注。

图 2 蛋白质组分的化学分析值与 NIRS 预测值的相关性

Fig. 2 Correlation between measured and NIRS predicted values of protein components

碳水化合物组分各指标模型预测效果见表 6。NDF、ADF、CHO、CNSC 的 *RPDP* 分别为 5.286、3.787、4.589、4.928，均大于 3；CA、CB₁、CB₂、CC 的 *RPDP* 分别为 2.138、2.037、1.940、1.464，均小于

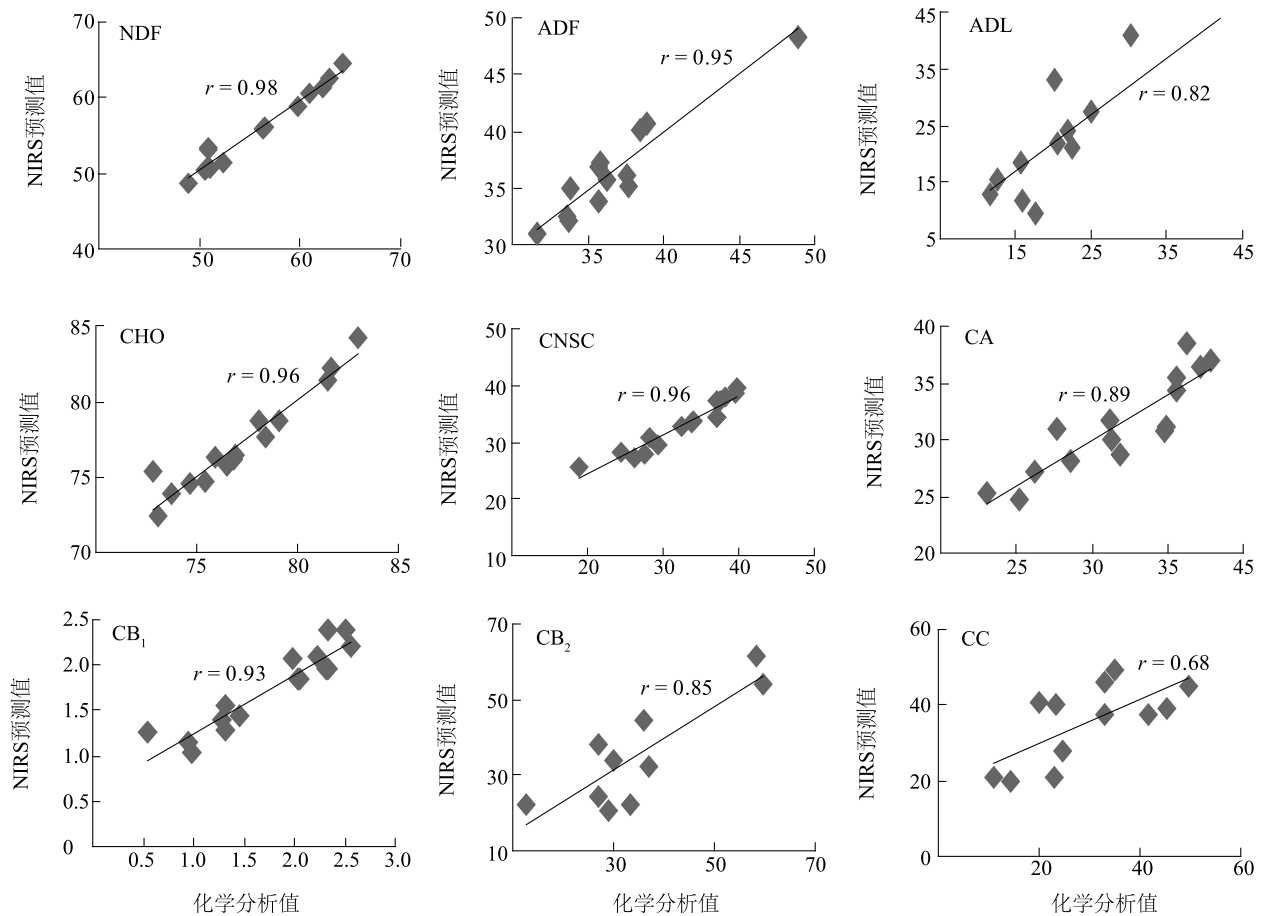
2.5；CA、CB₁、CB₂、CC 的化学分析值与 NIRS 预测值的相关系数分别为 0.89、0.93、0.85、0.68。化学分析值与 NIRS 预测值相关性见图 3。

表 6 碳水化合物组分定标模型评价

Table 6 The evaluation of calibration model for carbohydrates components

碳水化合物组分	SEP	RSQ	RPDP	化学值	NIRS 值	相关系数	t 值	t _{0.05}
NDF	1.014	0.965	5.286	55.61	55.61	0.98	-0.021	2.160
ADF	1.418	0.908	3.787	37.20	36.97	0.95	0.593	2.160
ADL	6.660	0.672	1.559	18.42	22.90	0.82	-3.147	2.179
CHO	0.889	0.923	4.589	77.18	77.26	0.96	-0.334	2.145
CNSC	1.254	0.923	4.928	32.09	32.63	0.96	-0.878	2.131
CA	2.128	0.793	2.138	31.82	31.35	0.89	0.855	2.145
CB ₁	0.270	0.865	2.037	1.75	1.73	0.93	0.357	2.131
CB ₂	7.533	0.715	1.940	34.96	35.34	0.85	-0.155	2.262
CC	10.525	0.468	1.464	29.52	35.39	0.68	-2.228	2.201

各碳水化合物组分见表 2 注。SEP：预测标准误差；RSQ：NIRS 预测值与实测值的相关系数；RPDP：外部验证相对分析误差 ($RPDP=SD/SEP$)。



碳水化合物组分 NDF、ADF、ADL、CHO、CNCSC、CA、CB₁、CB₂、CC 见表 2 注。

图3 碳水化合物组分的化学分析值与 NIRS 预测值相关性分析

Fig.3 Correlation between measured and NIRS predicted values of carbohydrates components

3 讨论

3.1 近红外光谱技术对天然牧草常规营养成分的预测

NIRS 在牧草营养分析方面的应用起步较晚,但是营养成分分析是 NIRS 技术的传统应用领域,国内外学者对牧草、秸秆类粗饲料中营养成分进行了大量研究,建立了 NIRS 预测模型。Armind 等^[21]建立的多花黑麦草 (*Lolium multiflorum*) 的 CP、NDF、ADF、CF(粗纤维)、ASH(粗灰分)含量预测模型,定标决定系数均在 0.9 以上。Dale 等^[22]利用 NIRS 建立紫花苜蓿的 CF、NDF、ADF、ADL 含量预测模型,预测标准误差 (SEP) 分别为 1.058、0.964、1.041、1.209。石丹等^[23]首次建立了适合

中国北方不同区域、不同生育期、不同干燥方式的羊草干草 CP、NDF、ADF 的 NIRS 预测模型,预测值与化学分析值的相关系数分别为 0.963 7、0.959 4、0.947 9。

本研究建立了天然牧草中蛋白质组分和碳水化合物组分的 NIRS 模型。其中,CP 的 *I*-VR 为 0.989,RPDCV(9.336)和 RPDP(10.95)均大于 3; NDF、ADF、CHO、CNCSC 含量模型的 *I*-VR 值分别为 0.975、0.932、0.964、0.966,RPDCV 值和 RPDP 值均大于 3。SP 的 *I*-VR 值为 0.717,比 Carmen 等^[24]报道的结果好,说明利用 NIRS 分析技术对该成分进行定量分析是可行的,但其预测精度有待于进一步提高。ADL 的 *I*-VR 值(0.710)比较低,模型需要进一步优化。

3.2 近红外光谱技术对天然牧草 CNCPS 组分的预测

建立天然牧草中 CNCPS 组分校正模型的难度很大。其原因有:①测定指标多。CNCPS 体系通过测定常规蛋白质、碳水化合物等 23 个指标,区分了非蛋白质氮与真蛋白质、结构性碳水化合物与非结构性碳水化合物,真实地反映饲料的特性及动物对其利用情况,能够全面反映饲料的营养成分。②计算步骤繁杂,难免误差累积。例如,通过 NPN、SP、ADIP 和 NDIP 等的测定值计算 PA、PB₁、PB₂、PB₃、PC 含量,计算结果难免会受到测定值准确度的影响。NPN、SP、ADIP 和 NDIP 等的测定比较繁琐,ADIP 的测定又受到 ADF 的影响,误差随测定步骤的增加而积累,并通过 CNCPS 的计算公式而扩大。

本试验中 CNCPS 蛋白质组分 PA、PB₁、PB₂、PB₃、PC 的模型预测值与化学分析值的相关系数分别为 0.821、0.674、0.798、0.635、0.862, Carmen 等^[24]的试验结果依次为 0.467、0.054、0.051、0.734、0.747,相比较可知,本研究 CNCPS 蛋白质组分预测模型精度较好,但是比陈龙等^[10]的结果差。可能是样品的原因,本试验选用的样品为天然牧草,与单种牧草的模型相比较,天然牧草样品中各营养成分的组成和含量更加复杂,对光谱数据和化学分析值的影响较大。CNCPS 体系中将碳水化合物分为快速降解糖(CA)、中速降解淀粉(CB₁)、慢速降解有效细胞壁部分(CB₂)、不可利用的细胞壁部分(CC)。各组分的计算结果会受其他组分的交叉影响,一种组分的分析误差都会影响其他指标,甚至导致误差累积。可见,准确的化学值测定是指标模型建立的基础。Chen 等^[25]研究表明,添加新样品到定标集可以提高模型精度。因此可尝试添加样品量、提高实测值精度来优化模型。

本试验以青海省河南县典型的高山嵩草草地天然牧草为研究对象,探讨 NIRS 定量分析天然牧草 CNCPS 营养成分的可行性。采用改进偏最小二乘法,建立了天然牧草常规蛋白质组分和碳水化合物组分及 CNCPS 体系各组分的近红外定量分析模型。模型预测效果表明,常规组分 CP、NDF、ADF、CHO、CNSC、PC、CA 含量预测模

型可以实际应用。

参考文献:

- [1] 于震. CNCPS 在奶牛日粮评价和生产预测上的应用[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2007.
- [2] 吴端钦,张爱忠,姜宁,等. 用 CNCPS 评定反刍动物几种常用精料营养价值的研究[J]. 中国牛业科学,2009,35(1):9-12.
- [3] 曲永利,吴健豪,张永根. 用 CNCPS 体系评定黑龙江省西部地区奶牛饲料营养价值[J]. 中国畜牧杂志,2009,45(11):42-45.
- [4] 赵金石. 基于 CNCPS 模型思路的中国肉牛、奶牛营养动态模型的建立与应用[D]. 北京:中国农业大学,2008.
- [5] 艳城,孙海洲,赵存发,等. 应用 CNCPS 体系评价内蒙古荒漠草原天然牧草营养价值研究[J]. 中国草食动物科学,2014(专辑):221-226.
- [6] 卢万鸿,何仕广,曹加光,等. 近红外光谱技术的分析与应用[J]. 桉树科技,2012,29(1):49-54.
- [7] 张瑞忠,董宽虎. 近红外技术在牧草方面的应用[J]. 草业科学,2007,24(6):14-19.
- [8] 王冬,闵顺耕,朱业伟,等. 法布里干涉近红外光谱仪测定烟草品质成分[J]. 现代科学仪器,2011(6):107-110.
- [9] 周健,成浩,王丽鸳,等. 近红外技术在茶叶上的研究进展[J]. 茶叶科学,2008,28(4):294-300.
- [10] 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.
- [11] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京:中国农业出版社,1998:201-213.
- [12] AOAC. Official Methods of Analysis [M]. 13th ed. Washington, D. C.: Association of Official Analytical Chemists, 1980.
- [13] VANSOEST P J, SNIFFEN C J, MERTENS D R, et al. A net protein system for cattle; The rumen sub-model for nitrogen[M]// Owens F N. Protein Requirements for Cattle: Proceedings of an International Symposium. Stillwater: Div of Agricultural, Oklahoma State University, 1981: 265.
- [14] SNIFFEN C J, O'CONNOR J D, VAN SOEST P J, et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability[J]. Animal Science, 1992, 70(11):3562-3577.
- [15] CAMPBELL M R, MANNIS S R, PORT H A, et al. Prediction of starch amylase content versus total grain amylose content in corn by near-infrared transmittance spectroscopy [J]. Cereal Chem, 1999, 76(4): 552-557.
- [16] 闵顺耕,李宁,张明祥. 近红外光谱光谱分析中异常值的判别与定量模型优化[J]. 光谱学与光谱分析,2004,24(10): 1205-1209.
- [17] MALLEY D F, RONICKE H, FINDLAY D L, et al. Feasibility of using near-infrared reflectance spectroscopy for the analysis of C,

- N,P, and diatoms in lake sediments[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 21(5): 295.
- [18] 李君霞, 闵顺耕, 张洪亮, 等. 水稻蛋白质近红外定量分析模型的优化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(5): 833-837.
- [19] SHENK J S, LANDA I, HOOVER M R, et al. Description and evaluation of a near infrared reflectance spectra computer for forage and grain analysis [J]. *Crop Science*, 1980, 21(3): 355-358.
- [20] 明道绪. 田间统计与试验分析[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 86-91.
- [21] ARMINDA M B, IAN M, RHONA M P, 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.
- [22] DALE L M, ROTAR I T, VIDICAN A R, et al. Determination of alfalfa crude fiber, NDF, ADF and lignin content by nir spectrometry[J]. *Seria Agronomie*, 2012, 55(1): 245-249.
- [23] 石 丹, 张英俊. 近红外光谱法快速测定羊草干草品质的研究[J]. *光谱与光谱学分析*, 2011, 31(10): 2730-2733.
- [24] CARMEN V, SONIA A, JAVIER G, et al. Potential use of visible and near infrared reflectance spectroscopy for the estimation of nitrogen fractions in forages harvested from permanent meadows [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86: 308-314.
- [25] CHEN C S, WANG S M. Establishment of calibration equations for determining the chemical components of pangola grass using near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Taiwan Livestock Research*, 2004, 37(2): 97-104.

(责任编辑: 张震林)