

DOI:10.11686/cyxb2024481

http://cyxb.magtech.com.cn

梁韵仪, 陈雅坤, 何可可, 等. 饲草中性洗涤纤维48 h消化率预测模型的构建. 草业学报, 2025, 34(11): 150-160.

LIANG Yun-yi, CHEN Ya-kun, HE Ke-ke, et al. Construction of a predictive model for the 48-hour digestibility of neutral detergent fiber in forage. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11): 150-160.

饲草中性洗涤纤维48 h消化率预测模型的构建

梁韵仪¹, 陈雅坤¹, 何可可^{1,2}, 杨嘉宇^{1,3}, 赵连生^{1*}, 卜登攀^{1*}

(1. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 畜禽营养与饲养全国重点实验室, 北京 100193; 2. 新疆农业大学动物科学学院, 新疆肉乳用草食动物营养实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 山西农业大学动物科学学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 饲草等粗饲料是反刍动物日粮纤维的主要来源。中性洗涤纤维(NDF)是衡量饲草纤维含量的重要指标,其消化率是评估饲草质量、动物干物质采食量的关键参数。目前常用体外48 h NDF消化率(NDFD₄₈)评估饲草NDF的可消化情况。准确测定粗饲料NDFD₄₈值对精准平衡动物日粮具有指导意义。目前粗饲料NDFD₄₈可用瘤胃尼龙袋法、实验室半体内法测定或近红外快速检测,但通常受测定试验条件和仪器设备等制约。基于NDFD₄₈的生物学意义,旨在拟合构建估测NDFD₄₈的计算方法。利用奶牛营养需要(NASEM, 2021)中饲草纤维指标[NDF和酸性洗涤纤维(ADF)]及消化率指标(NDFD₄₈)作为测试集,构建了NDFD₄₈模型,并选取Journal of Dairy Science期刊中14篇文章的相关指标及本实验室实测指标作为2套验证集,对模型进行了验证。结果发现,NDFD₄₈计算值与2套NDFD₄₈实测值均具有显著相关性($P < 0.001$), R^2 分别为0.89和0.85。利用一致性相关系数(CCC)对模型进行验证,相关性达到0.93和0.91。此模型检测指标少,计算简便,精准度高。模型评估表明,该模型可为生产应用及饲草营养预判提供理论参考。

关键词: 粗饲料; 纤维消化率; 简化算法

Construction of a predictive model for the 48-hour digestibility of neutral detergent fiber in forage

LIANG Yun-yi¹, CHEN Ya-kun¹, HE Ke-ke^{1,2}, YANG Jia-yu^{1,3}, ZHAO Lian-sheng^{1*}, BU Deng-pan^{1*}

1. State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Herbivore Nutrition for Meat & Milk, College of Animal Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. College of Animal Science, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China

Abstract: Forage is the primary source of dietary fiber for ruminants. Neutral detergent fiber (NDF) is an important indicator used to measure the fiber content of roughage. Its digestibility is a key parameter for evaluating forage quality and animal dry matter intake. Currently, the *in vitro* 48-hour NDF digestibility (NDFD₄₈) is commonly used to assess forage NDF digestibility. An accurate measure of the NDFD₄₈ value of roughage is important for balancing animal diets. Presently, roughage NDFD₄₈ can be measured using the rumen nylon bag technique, laboratory semi-*in vitro* methods, or near-infrared spectroscopy, but these are often constrained by test conditions and unavailability of equipment. Given the biological significance of NDFD₄₈, this study aimed to develop a computational method to predict NDFD₄₈. Fiber indicators (NDF and acid detergent fiber, ADF) and digestibility indicators (NDFD₄₈) from

收稿日期: 2024-12-03; 改回日期: 2025-02-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1301002), 云南省重大科技专项计划(202402AE090032), 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAS-17), 首农食品集团自立科技项目(SNSPKJ(2022)02)和家畜产业技术体系北京市创新团队(BAIC05-2024)资助。

作者简介: 梁韵仪(1994-), 女, 内蒙古锡林郭勒盟人, 在读博士。E-mail: yunyi5553@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: budengpan@126.com; aaronann@163.com

NASEM (2021) were used as a test set to build the NDFD₄₈ model. Fourteen articles from the Journal of Dairy Science along with relevant indicators, and laboratory-measured values, were selected as two validation sets for the model. The results showed that the calculated NDFD₄₈ values were significantly correlated with the measured NDFD₄₈ values in the two validation sets ($P < 0.001$), with R^2 values of 0.89 and 0.85, respectively. The model was further validated using the concordance correlation coefficient (CCC), achieving CCC values of 0.93 and 0.91. This model requires fewer input indicators, is easy to compute, and demonstrates high accuracy. Based on the evaluation performed here, the model can provide forage NDF estimates suitable for production applications and forage nutrition prediction.

Key words: roughage; fiber digestibility; simplified algorithm

饲草是反刍动物重要的粗饲料来源,其品质影响反刍动物采食量、瘤胃健康、生产性能及产品品质等^[1-3]。优质粗饲料在瘤胃微生物作用下,通过产生的发酵产物,可为反刍动物提供蛋白和能量^[4-6]。

纤维素、半纤维素和木质素是植物细胞壁的主要组成成分,其结构比例影响饲草在瘤胃的消化速率,进而区分不同品质饲草^[7]。中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)是瘤胃微生物发酵的主要底物,其含量和结构影响瘤胃 pH、微生物种群和发酵产物[如挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)]的生成^[8]。构成 NDF 的主要成分有纤维素、半纤维素和木质素^[7]。其消化率(neutral detergent fiber digestibility, NDFD)决定了饲料中纤维组的能量释放速率和总量,可有效评价饲草品质^[9]。研究显示,日粮中饲草每增加 1 个单位 NDFD,干物质采食量提升 $0.17 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$,4% 脂肪校正奶提升 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。因此探究 NDFD 对于评估饲草质量及生产至关重要^[10]。

Van Soest 等^[7]提出了洗涤法(association of official analytical chemists, AOAC, A3306)测定 NDF 含量,而 NDFD 的测定方法主要有原位法^[11]、体外法^[12]以及近红外(near infrared, NIR)快速检测法等。通常采用 30 h (NDFD₃₀)和 48 h (NDFD₄₈)测定 NDF 的消化率。原位法测定 NDFD 最接近 NDF 消化率的真实值^[13],但该方法因需要借助带有瘤胃瘘管的动物而很难进行大面积推广使用。体外发酵法测定 NDFD 是目前实验室的常用方法,但也因其耗时长且操作繁琐而存在一定的局限性。近红外光谱法可快速测定 NDFD,但需要整合大量数据库样本以保证检测的准确性。同时,设备的获取难易度也使得 NIR 应用范围存在限制性。另外,一些研究通过使用潜在可消化 NDF (potential digestible neutral detergent fiber, pdNDF)以及不可消化 NDF (indigestible neutral detergent fiber, iNDF)对饲草的 NDF 消化率进行估算。此方法需要通过进行体外 240 h 培养后获得的饲草残渣对 pdNDF 进行评估。评估耗时费力,且由于不同的实验室检测标准,可能存在试验误差^[14]。

基于原位法、体外法及近红外检测存在的限制性问题,一些学者根据饲草组成成分与 NDFD 之间的关系进行了经验模型的构建以估测 NDFD。较早的研究中,前人简单地按照饲草的品种对 NDFD 进行了可消化率的区间划分。例如:禾本科牧草的 NDFD 为 35%~65%,豆科牧草的 NDFD 为 25%~75%。由于饲草收获季节、收割茬次、收获地区、品种差异等造成数据的巨大差异,影响评估的准确度^[10]。Van Soest 等^[15]基于木质素的不同检测方法与 NDFD₄₈进行了相关性分析及经验模型的构建,发现不同木质素检测方法对于豆科牧草与禾本科牧草相对于 NDFD 之间的相关性差异较大。其中,不同饲草的酸性洗涤木质素与 NDFD₄₈之间呈明显负相关,而禾本科牧草酸性洗涤可溶木质素(acid-soluble lignin, ΔL)与克拉松木质素(klason lignin)之比与 NDFD₄₈之间呈正相关($R^2 = 0.6867$, $P < 0.05$),但与豆科牧草并未发现明显相关性^[15]。表明木质素并不直接对 NDFD₄₈产生负面影响。因此,可推断木质素作为评估 NDFD₄₈的指标可能并不可靠。同时,在进行体外 NDF 48 h 消化率评估时,残留在瘤胃液中的 NDF 残渣为未消化的 NDF。该残留物由难以消化的 NDF 和尚未被消化部分的潜在可消化 NDF 组成。由于木质素主要为 NDF 的不可消化成分,无法构成与 NDFD₄₈之间的直接关系,进而造成木质素与 NDFD₄₈的不相关性。

相比于木质素,半纤维素作为饲草的潜在可消化 NDF 可以更好地解释 NDFD₄₈。因此,本研究以影响饲草纤维消化率的重要常规养分 NDF 和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)为出发点,通过分析 NDFD 存在的

关系,构建NDFD₄₈预测模型。由于饲料常规营养成分容易获取,最终利用易检测常规营养指标预估检测相对复杂的体外NDFD₄₈,为生产应用及饲草营养预判提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集来源与方法

为获得数据支撑及保证数据的有效参考性,同时满足多元化饲草应用模型检测NDFD₄₈的准确度,对所选数据进行了测试集(1套)和验证集(2套)的划分。其中,奶牛营养需要(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, NASEM)数据库^[16]涵盖了34种饲草类型(表1),每种饲草养分数据包括平均值、样本数和标准差,样本多样性广且样本量大,具有较高参考价值。因此作为本研究模型测试的数据库(测试集),用于研究NDFD₄₈与NDF、ADF之间的相关性及模型构建。

验证集中第一套数据(验证集1)来源主要通过检索2004—2024年发表在Journal of Dairy Science期刊上关于饲草消化率的文献共计46篇。进一步筛选出符合含有饲草NDF、ADF含量以及NDFD₄₈数据的文献共计14篇作为验证数据库1(表2),数据涵盖禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminosae)及禾豆混合牧草及青贮共计16种,检索文章数据均采用AOAC方法检测饲草NDF和ADF含量。对于NDFD₄₈检测,其中13篇使用体外法,1篇使用近红外法,1篇使用体外法(营养指标见表3)。其中,Brunette等^[20]检测了12、24、72、120 h禾本科饲草及苜蓿(*Medicago sativa*)NDF消化率,根据文献提供数据,本研究利用回归模型获得了饲草NDFD₄₈,拟合模型 R^2 达到0.99,具有参考价值。

验证集中第二套数据(验证集2)为本团队实验室实测数据。采集了内蒙古、辽宁、天津地区牧场苜蓿青贮18份,黑龙江禾豆混合青贮10份,黑龙江苜蓿干草6份,河北田菁(*Sesbania cannabina*)10份,共计44份样品进行了体外48 h消化率及NDF和ADF含量检测(营养指标见表4和表5)。其中NDF及ADF采用GB/T 20806-2022方法^[29]并利用中国农业大学自主研发的DFA-1型分布式定时消煮纤维测定仪进行检测。根据Goering等^[12]所建立的方法,对测试饲草进行了NDFD₄₈检测。

1.2 NDFD₄₈预测模型构建方法

基于模型构建数据库(表1),应用R中caret包(Hadley Wickham)分析NDF、ADF含量与NDFD₄₈之间相关性。通过评估NDFD₄₈与不同纤维组分对于消化率贡献度及其规律构建模型。将检索Journal of Dairy Science期刊中获得的验证数据库中NDF及ADF含量代入模型计算NDFD₄₈,并利用R中DescTools包(Andri Signorell, 2021)进行与实测值的相关性分析,获得决定系数(coefficient of determination, R^2)、一致性相关系数(concordance correlation coefficient, CCC)、均方误差(mean squared error, MSE)、预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSE),验证模型构建的准确度。其中决定系数 R^2 越接近1,代表模型构建越准确。CCC越接近1,代表预测结果与实际值越一致。MSE与RMSE值越小,预测模型越准确。

2 结果与分析

2.1 NDFD₄₈预测模型

通过分析发现,NDF、ADF含量与NDFD₄₈存在二次相关性(图1和图2)。当饲草中ADF为33.8%~43.8%,NDF为51.1%~66.6%时,NDFD₄₈达到60%NDF以上(介于60.8%NDF~67.8%NDF),之后随ADF及NDF含量不断升高而降低。同时,NDFD₄₈大小受NDF和ADF含量的互作影响较大。当NDFD₄₈高于60%NDF时,半纤维素含量均高于16%DM。且数据显示,NDFD₄₈含量高的饲草主要为禾本科饲草。当NDF和ADF含量为58%DM和35.5%DM时(冷季草,中熟,国际饲料编号:NRC6F34),NDFD₄₈达到最大值(67.8%NDF)。在NASEM数据库中,花生秧(国际饲料编号:NRC6F109)NDFD₄₈最低(40.1%NDF),其半纤维素含量仅为7.9%DM,表明半纤维素含量高低对NDFD₄₈变化具有重要影响。

2.2 通过NDF和ADF预测NDFD₄₈

半纤维素通过NDF减去ADF得出,半纤维素在一定程度上更易被动物机体消化吸收,作为饲草潜在可消化

表 1 NASEM 中粗饲料 ADF、NDF 含量及 NDFD₄₈Table 1 ADF, NDF content and NDFD₄₈ in NASEM

国际饲料编号 International feed number	饲料名称 Feed name	酸性洗涤 纤维 ADF (%DM)	中性洗涤 纤维 NDF (%DM)	中性洗涤纤维 48 h 消化率 NDFD ₄₈ (%NDF)
NRC6F1	苜蓿草 Alfalfa	33.9	42.9	49.1
NRC6F33	冷季草, 成熟 Cool season grass, mature	41.4	66.7	55.8
NRC6F34	冷季草, 中熟 Cool season grass, medium-mature	35.5	58.0	67.8
NRC6F89	禾豆混播干草 Grass and legume mixed hay	39.3	58.2	54.5
NRC6F84	禾豆混播干草, 禾为主, 中熟 Grass and legume mixed hay, grass dominant, medium-mature	33.8	54.7	67.5
NRC6F86	禾豆混播干草, 豆为主, 成熟 Grass and legume mixed hay, legume dominant, mature	38.7	51.2	48.0
NRC6F91	豆科干草, 未成熟 Leguminous hay, immature	30.7	37.7	51.4
NRC6F92	豆科干草, 成熟 Leguminous hay, mature	37.2	46.6	43.4
NRC6F93	豆科干草, 中熟 Leguminous hay, medium-mature	32.1	41.1	52.4
NRC6F107	豌豆干草 Pea hay	32.0	43.4	58.5
NRC6F109	稻草 Rice straw	62.0	43.0	48.2
NRC6F110	谷草 Millet straw	75.0	50.0	43.2
NRC6F111	玉米秸秆 Corn stalks	70.8	46.7	49.3
NRC6F112	莠麦秸 Hulless oat straw	74.0	49.0	44.4
NRC6F114	花生秧 Peanut straw	37.9	45.8	40.1
NRC6F131	一年生黑麦草, 中熟 Annual ryegrass, medium-mature	36.7	57.3	59.8
NRC6F127	一年生黑麦草, 成熟 Annual ryegrass, mature	42.7	66.8	55.9
NRC6F138	高粱青干草 Sorghum green hay	38.8	63.0	60.8
NRC6F142	苏丹草 Sudan grass	39.3	61.0	54.4
NRC6F143	黄豆草 Soybean grass	31.3	40.3	50.5
NRC6F151	苏丹草, 成熟 Sudan grass, mature	41.6	65.8	55.8
NRC6F152	苏丹草, 中熟 Sudan grass, medium-mature	36.9	54.6	56.7
NRC16F164	小黑麦干草 Triticale hay	38.3	60.0	63.7
NRC16F176	小麦秸秆 Wheat straw	53.1	76.9	41.8
NRC16F18	狗牙根青贮, 成熟 Bermudagrass silage, mature	42.8	70.8	52.3
NRC16F19	狗牙根青贮, 中熟 Bermudagrass silage, medium-mature	39.0	64.1	63.5
NRC16F35	冷季草青贮 Cool season grass silage	39.0	62.1	63.6
NRC16F52	玉米秸秆, 青贮, 高干物质 Corn stalks, silage, high dry matter	46.9	72.0	56.2
NRC16F51	玉米秸秆, 青贮, 低干物质 Corn stalks, silage, low dry matter	44.8	66.2	52.8
NRC16F90	草豆混播青贮 Grass and beans mixed silage	34.8	51.2	61.1
NRC16F88	禾豆混播青贮, 豆为主 Grass-legume mixed silage, legume-dominant	33.9	45.9	56.2
NRC16F95	豆科牧草青贮, 中熟 Leguminous forage silage, medium-mature	33.7	43.2	49.4
NRC16F100	粟黍青贮 Foxtail millet silage	39.2	59.7	61.2
NRC16F106	燕麦青贮, 中熟 Oat silage, medium-mature	38.8	57.4	54.1
NRC16F108	豌豆青贮 Pea silage	37.1	52.5	57.7
NRC16F121	水稻青贮, 带穗 Rice silage with panicles	31.8	41.9	54.2
NRC16F130	一年生黑麦草青贮, 中熟 Annual ryegrass silage, medium-mature	38.3	58.0	61.9
NRC16F135	饲用高粱青贮, 未成熟 Sorghum silage, immature	36.4	56.7	58.5
NRC16F136	饲用高粱青贮, 成熟 Sorghum silage, mature	39.2	61.6	63.6
NRC16F140	苏丹草青贮 Sudan grass silage	38.9	59.5	54.9
NRC16F154	苏丹草青贮, 中熟 Sudan grass silage, medium-mature	39.0	60.7	64.6
NRC16F165	小黑麦豌豆混播青贮 Triticale and pea mixed silage	37.1	55.7	65.1
NRC16F166	小黑麦青贮, 成熟 Triticale silage, mature	37.2	58.6	58.5
NRC16F167	小黑麦青贮, 中熟 Triticale silage, medium-mature	34.8	52.2	57.5
NRC16F174	小麦青贮, 抽穗 Wheat silage, heading stage	35.1	51.1	61.4
NRC16F175	小麦青贮, 植株 Wheat silage, plant	37.0	56.6	59.0

表2 基于 Journal of Dairy Science 检索的关于饲草 NDF、ADF 含量及 NDFD₄₈ 相关文献Table 2 Based on the Journal of Dairy Science, retrieve literature related to forage NDF, ADF content, and NDFD₄₈

第一作者 First author	发表时间 Publication time	涉及饲草 Forage
Oliver A L ^[17]	2004	苜蓿干草、高粱青贮 Alfalfa hay, sorghum silage
Dann H M ^[18]	2008	高粱和苏丹草混合青贮 Sorghum and sudan grass mixed silage
Kendall C ^[3]	2009	小麦秸秆、苜蓿青贮 Wheat straw, alfalfa silage
Colombini S ^[2]	2012	高粱青贮 Sorghum silage
Kammes K L ^[19]	2012	苜蓿青贮、鸭茅青贮 Alfalfa silage, duck grass silage
Brunette T ^[20]	2016	混合牧草青贮 Mixed forage silage
Coblentz W K ^[21]	2013	燕麦草 Oat grass
Palmonari A ^[22]	2016	苜蓿、禾本科饲草 Alfalfa, grass forage
Fustini M ^[23]	2017	苜蓿干草 Alfalfa hay
Brown A N ^[24]	2018	黑麦草、小黑麦、大麦、毛苕子、三叶草 Ryegrass, rye, barley, hairy roots, clover
Lyons S E ^[25]	2019	饲用高粱草 Sorghum grass
Krogstad K C ^[26]	2021	苜蓿干草、小麦秸秆 Alfalfa hay, wheat straw
Farhad P K ^[27]	2023	黑麦草、牛茅草、红三叶草、白三叶草 Ryegrass, fescue, red clover, white clover
Stypinski J D ^[28]	2024	苜蓿干草 Alfalfa hay

表3 基于 Journal of Dairy Science 发表文献中不同饲草的 NDF、ADF 含量及 NDFD₄₈Table 3 Forages NDF, ADF content, and NDFD₄₈ in the Journal of Dairy Science

项目 Item	中性洗涤纤维 NDF (%DM)		酸性洗涤纤维 ADF (%DM)		中性洗涤纤维 48 h 消化率 NDFD ₄₈ (%NDF)	
	均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD
豆科 Legume	41.25	3.96	30.64	4.05	59.10	17.63
禾豆混播 Grasses and legume mixed forage	47.50	1.97	30.49	1.59	73.15	4.11
禾本科 Grasses	58.36	5.91	37.25	5.48	59.87	10.63

豆科:苜蓿干草、苜蓿青贮、红三叶草、白三叶草;禾豆混播:高粱和苏丹草混合青贮、混合牧草青贮;禾本科:高粱青贮、小麦秸秆、鸭茅青贮、燕麦草、黑麦草、小黑麦、大麦、毛苕子、饲用高粱草、牛茅草。Legume: alfalfa hay, alfalfa silage, red clover, white clover. Grasses and legume mixed forage: sorghum and sudan grass mixed silage, mixed forage silage. Grasses: sorghum silage, wheat straw, duck grass silage, oat grass, ryegrass, rye, barley, hairy roots, sorghum grass, fescue.

表4 实测不同饲草 NDF、ADF 含量及 NDFD₄₈Table 4 Laboratory testing of NDF, ADF content, and NDFD₄₈ in different forage samples

项目 Item	中性洗涤纤维 NDF (%DM)		酸性洗涤纤维 ADF (%DM)		中性洗涤纤维 48 h 消化率 NDFD ₄₈ (%NDF)	
	均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD	均值 Mean	标准差 SD
苜蓿青贮 Alfalfa silage	39.43	3.86	32.38	2.79	50.82	2.85
苜蓿干草 Alfalfa hay	41.53	3.86	32.38	2.79	50.82	2.85
田菁 Sesbania	64.88	3.71	46.34	2.23	44.20	5.79
禾豆混合青贮 Grasses and legume mixed silage	56.08	7.33	37.56	4.91	56.87	10.17

苜蓿青贮:来自内蒙古、辽宁、天津地区奶牛场;苜蓿干草:来自黑龙江四方山牧场;田菁:来自北京市顺义区金鑫牧场;禾豆混合青贮:来自黑龙江四方山牧场。Alfalfa silage: from dairy farm of Inner Mongolia, Liaoning and Tianjin. Alfalfa hay: from Sifangshan farm of Heilongjiang. Sesbania: from Jinxin farm of Shunyi, Beijing. Grasses and legume mixed silage: from Sifangshan farm of Heilongjiang.

纤维,与 NDFD₄₈ 依然呈二次相关关系,当半纤维素含量为 20%DM 时, NDFD₄₈ 趋向于最大值(图 3)。同时,半纤维素含量与 NDFD₄₈ 的相关性($R^2=0.70$)高于 NDF 和 ADF 含量与 NDFD₄₈ 的相关性($R^2=0.51$; $R^2=0.56$)。因

表 5 实验室实测饲草数据中粗饲料 ADF、NDF 含量及 NDFD₄₈Table 5 ADF, NDF content and NDFD₄₈ measured in the laboratory

饲草品种 Forage species	酸性洗涤纤维 ADF (%DM)	中性洗涤纤维 NDF (%DM)	中性洗涤纤维 48 h 消化率 NDFD ₄₈ (%NDF)	饲草品种 Forage species	酸性洗涤纤维 ADF (%DM)	中性洗涤纤维 NDF (%DM)	中性洗涤纤维 48 h 消化率 NDFD ₄₈ (%NDF)
田菁 Sesban				苜蓿青贮 Alfalfa silage			
1	47.28	61.48	36.79	22	27.47	34.56	56.04
2	50.50	64.39	36.39	23	28.11	35.34	56.16
3	45.33	59.50	40.12	24	27.67	34.38	59.20
4	47.27	69.28	46.78	25	28.03	34.33	58.28
5	44.04	62.88	46.25	26	33.52	40.83	45.90
6	47.68	69.20	41.69	27	33.51	41.05	45.79
7	43.73	62.63	49.98	28	31.29	38.67	48.08
8	45.99	69.77	51.94	29	32.08	39.33	47.67
9	43.56	67.28	51.15	30	32.43	41.26	51.88
10	48.01	62.38	40.89	31	33.86	42.48	47.48
禾豆混合青贮 Grasses and legume mixed silage				苜蓿干草 Alfalfa hay			
11	43.25	62.50	50.20	32	31.83	40.08	51.01
12	43.27	66.45	55.53	33	31.30	39.73	52.52
13	45.52	66.46	49.50	34	33.19	41.79	46.22
14	37.92	50.00	46.33	35	30.31	37.94	50.34
15	37.22	55.83	54.91	36	29.95	35.62	47.89
16	35.08	59.86	54.30	37	29.07	38.29	61.08
17	32.21	50.90	69.84	38	36.76	54.06	60.28
18	32.76	51.36	69.86	39	37.18	47.80	45.60
19	32.24	51.85	72.55	40	33.54	41.47	50.03
20	36.20	45.62	45.68	41	32.78	43.89	53.67
21	32.84	40.00	49.81	42	30.04	38.20	51.58
				43	31.00	40.43	52.79
				44	29.73	37.37	51.22

此,此预测公式主要借助半纤维素的消化能力进行构建。其公式如下为:

$$\text{可消化 NDF (digested neutral detergent fiber, dNDF)} = \text{NDF} \times \text{NDFD}_{48} \quad (1)$$

$$\text{dNDF} = (\text{NDF} - \text{ADF}) / \text{NDF} \times 100 \quad (2)$$

将公式 2 代入公式 1 后可得到:

$$\text{NDFD}_{48} = \text{dNDF} / \text{NDF} \quad (3)$$

$$\text{NDFD}_{48} = (\text{NDF} - \text{ADF}) / \text{NDF}^2 \times 100 \quad (4)$$

此模型首先通过 $\text{NDFD}_{48} \times \text{NDF}$ 对可消化 NDF (dNDF) 进行计算 (公式 1)。通过 NDF 减去 ADF 得到半纤维素含量即预估潜在可消化部分,除以 NDF 即饲草总纤维含量,得到潜在可消化饲草纤维含量 (公式 2)。最终生成公式 3。

2.3 NDFD₄₈ 预测准确性验证

2.3.1 基于验证集 1 分析 利用验证集 1 中相关饲草 NDF 和 ADF 含量,对 NDFD₄₈ 计算模型进行验证,得到 NDFD₄₈ 计算值与 NDFD₄₈ 实测值 (验证集 1 中文献所列数据) 呈显著相关性 ($R^2=0.8868, P<0.0001$, 图 4), 利用一致性相关系数 (CCC) 对模型进行验证,其相关性达到 0.93 (表 6)。说明此公式对于评估饲草 NDFD₄₈ 具有参考价值。

2.3.2 基于验证集 2 分析 对不同地区苜蓿青贮、苜蓿干草、田菁、禾豆混合青贮共计 44 份样品进行 NDF、

ADF 含量和 NDFD₄₈ 检测并利用公式对实测 NDFD₄₈ 与基于 NDF 和 ADF 含量计算的 NDFD₄₈ 进行相关性分析。根据实验室实测结果显示,预测模型使用 NDF 和 ADF 评估粗饲料消化率具有较高的准确度和可靠性($R^2=0.8542, P<0.001$,图5)。模型的各项统计指标均表明,NDF 和 ADF 作为评价指标在 NDFD₄₈ 模型构建中具合理有效性(表7)。

3 讨论

3.1 数据选择

构建模型所用 NASEM 中的 49 组饲草数据,是利用主成分分析和聚类分析两种多变量分析方法进行异常值剔除后获得的平均值,样本中 NDF 含量

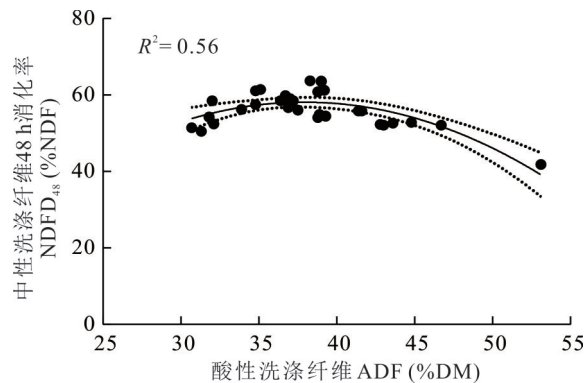


图2 NASEM 中饲草 ADF 含量与 NDFD₄₈ 相关性

Fig. 2 Relationship between forage ADF content and NDFD₄₈ in NASEM

(37.7%~76.9%) 与 ADF 含量(30.7%~75.0%) 覆盖范围广, NDFD₄₈ 的差异化大(40.1%NDF~67.8%NDF), 饲草种类丰富(含豆科、禾本科和豆禾混合牧草 34 种), 因此作为本研究模型测试集具有代表性。

所利用的两套验证集中, 验证集 1 包含禾本科、豆科及禾豆混合牧草及青贮共计 16 种饲草, NDF 及 ADF 含量分别为 29.6%DM~77.2%DM 和 23.2%DM~41.3%DM。根据文献显示, NDFD₄₈ 最低值体现在豆科牧草中(40.2%NDF), 而最高值在禾豆混播牧草中(78.8%NDF)。数据覆盖饲草种类广,

且指标差距大, 对于验证模型具有一定的参考意义。验证集 2 利用实测数据对模型进行进一步验证, 发现实测 NDFD₄₈ 与预测 NDFD₄₈ 之间相关性系数 R^2 达到 0.85。将两套验证数据集中 NDF 和 ADF 分别代入公式并与实测 NDFD₄₈ 进行对比验证, 一致性相关系数(CCC)分别为 0.93 和 0.91, 表明此模型在预测 NDFD₄₈ 时与实测

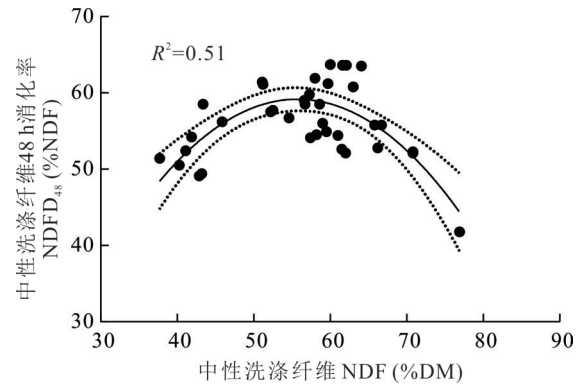


图1 NASEM 中饲草 NDF 含量与 NDFD₄₈ 相关性

Fig. 1 Relationship between forage NDF content and NDFD₄₈ in NASEM

实线表示最佳拟合曲线, 两侧虚线为置信区间。下同。The solid line represents the best fit curve, and the dotted lines on both sides are the confidence intervals. The same below.

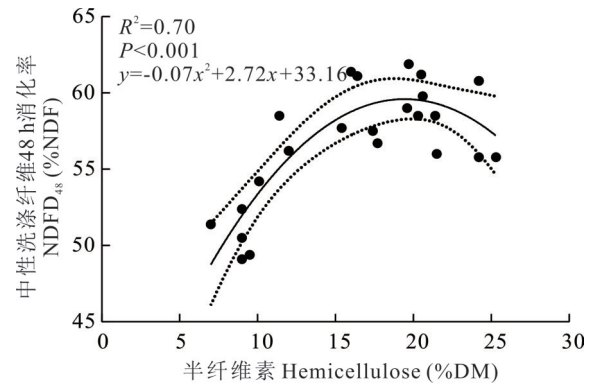


图3 NASEM 中饲草半纤维素含量与 NDFD₄₈ 相关性

Fig. 3 Relationship between forage hemicellulose content and NDFD₄₈ in NASEM

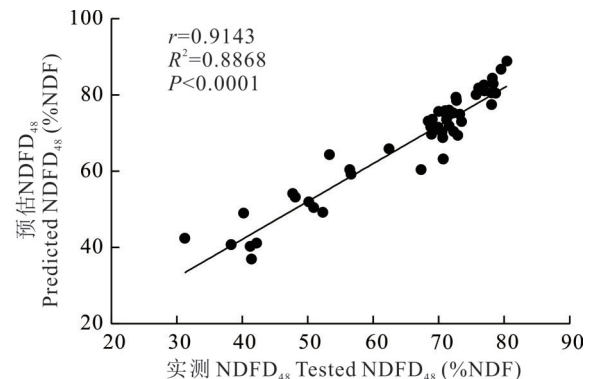


图4 验证集 1 中 NDFD₄₈ 实测值与模型预测 NDFD₄₈ 相关性

Fig. 4 The correlation between the NDFD₄₈ predictive model and the tested NDFD₄₈ based on validation set 1

表 6 基于验证集 1 分析 NDFD₄₈ 预测模型的准确性Table 6 The accuracy of the NDFD₄₈ predictive model based on validation set 1

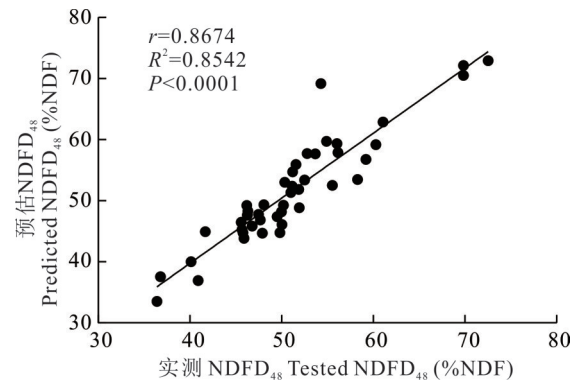
项目 Item	线性回归 Linear regression			R ² (%)	MSE	CCC	Bias	RMSEP
	a	b	P 值 P-value					
验证集 1 中 NDFD ₄₈ vs. 模型预测 NDFD ₄₈ NDFD ₄₈ in validation set 1 vs. NDFD ₄₈ predictive model	5.26	0.89	0.0001	89	25.53	0.93	1.98	5.05

a: 截距 Intercept; b: 斜率 Slope; R²: 测定系数 Determination coefficients; MSE: 均方误差 Mean square error; CCC: 一致性相关系数 Correlation coefficient of consistency; Bias: 平均偏差占模型预测平均值(X轴值)的百分比, 负号表示预测过度 Average deviation as a percentage of the model's predicted mean (X-axis value), with a negative sign indicating over prediction; RMSEP: 预测均方根误差 Predicted root mean square error. 下同 The same below.

NDFD₄₈ 具有较强的一致性。

3.2 预测模型所选指标的实用性

纤维消化性和瘤胃停留时间是评估饲草消化率高低的关键因素。尽管研究尝试用不可消化纤维(iNDF)作为评估饲料消化率的内源标志物^[30], 但因 iNDF 检测方法复杂且实施困难、iNDF 与潜在可消化纤维相关数据有限等问题, 目前通常用 NDFD₄₈ 作为评估饲草消化率的重要指标^[28]。通过评估 NDF 消化率可有效预测动物干物质采食量(dry matter intake, DMI)并反映饲草饲喂价值。研究显示, 与低可消化 NDF 日粮组(58%)相比, 给奶牛饲喂高可消化 NDF

图 5 验证集 2 中 NDFD₄₈ 实测值与模型预测 NDFD₄₈ 相关性Fig. 5 The correlation between the NDFD₄₈ predictive model and the tested NDFD₄₈ based on validation set 2表 7 基于验证集 2 分析 NDFD₄₈ 预测模型的准确性Table 7 The accuracy of the NDFD₄₈ predictive model based on validation set 2

项目 Item	线性回归 Linear regression			R ² (%)	MSE	CCC	Bias	RMSEP
	a	b	P 值 P-value					
验证集 2 中 NDFD ₄₈ vs. 模型预测 NDFD ₄₈ NDFD ₄₈ in validation set 2 vs. NDFD ₄₈ predictive model	9.74	0.80	0.0007	85	11.75	0.91	0.48	3.42

日粮时(67%)每天可多生产 2.7 kg 牛奶^[31]。但体内法测 NDF 消化率受到瘤胃内不同滞留时间的干扰, 而滞留时间可能受到干物质摄入量的影响^[32], 而使用体外法对 NDFD₄₈ 进行检测时受试验条件、人为干预因素、基于不同日粮动物瘤胃液微生物群体变化等影响局限性较大, 因此, 本研究构建了利用 NDF 和 ADF 含量预测饲草 NDF 消化率的模型。

ADF 主要为粗饲料中不易消化的纤维部分, 能量含量较低, 与饲料的消化性能直接相关。随着 ADF 的增加, 可消化性减少。ADF 越高, NDF 中所剩半纤维素含量将越低, 进而影响整体纤维消化情况^[33]。研究显示, ADF 与饲草可消化干物质(digestible dry matter, DDM)之间呈明显负相关^[34]。同时, 近期利用苜蓿、青藏高原地区牧草和高寒草甸牧草为对象的研究均表明饲草消化率与 ADF 呈极显著负相关^[35-37]。木质素虽作为粗饲料中不可消化纤维存在, 但对于评估 NDFD₄₈ 来讲, 无法对饲草剩余潜在可消化纤维进行合理预判。因此 ADF 含量作为本研究模型的关键指标具有科学性。

NDF 主要包含纤维素、半纤维素和木质素等细胞壁组分, 饲草中 NDF 含量是决定饲草质量的主要因素^[13,38]。纤维素和半纤维素能够缓慢被瘤胃微生物消化, 而木质素作为不可消化纤维无法被瘤胃消化吸收。饲草 NDF 在

瘤胃中的降解率与DMI相关^[39-40]。Mertens^[41]基于日粮NDF与日粮体积和密度之间存在正相关关系,提出通过日粮中NDF预测奶牛DMI,当日粮NDF由33%降低至28%时,DMI可由体重的3.6%提升至体重的3.8%,产奶量每天增加3 kg。Undersander等^[42]指出NDF和动物DMI(%BW)呈明显负相关。Abrams等^[43]指出NDF可有效预测体外NDF消化率($r=-0.66$)。Harper等^[44]证实牧草的摄入量和消化率在很大程度上受NDF含量的影响,不同饲草的NDFD为23.73%~70.34%,与日粮NDF含量(22.2%~45.8%)呈明显负相关。Kendall等^[3]研究了高NDF和低NDF日粮在奶牛采食量和产奶性能方面的影响,通过使用低NDF氨化麦秸与高NDF无处理麦秸对比发现低NDF组采食量明显高于高NDF组($P<0.01$)。因此,NDF作为影响反刍动物采食量的重要指标,在评估饲料消化率过程中起到了关键作用。

本研究NDFD₄₈预测模型中分子为饲草半纤维素含量。半纤维素是在NDF中易降解的组分,NDFD会影响半纤维素消化率(hemicellulose digestibility, HSD),高NDFD意味着高HSD^[44]。随着饲草成熟度增加,木质化程度增加,饲草NDF消化率降低,由于木质素不可消化性,其升高同时降低了纤维素和半纤维素等其他细胞壁成分的消化率^[45]。通过分析测试集NASEM中饲草NDF、ADF、半纤维素含量与NDFD₄₈相关性可以发现,NDFD₄₈与半纤维素含量存在二次相关性($R^2=0.70$),且相关性高于ADF与NDF含量对于NDFD₄₈的相关程度,在解释纤维消化率方面更具有参考性。因此,在模型的构建上通过利用中性洗涤纤维减去酸性洗涤纤维获得的半纤维素作为评估饲草的可消化纤维部分,体现饲草的纤维消化情况。

由于NDF消化率可能受淀粉的影响,因此模型主要基于粗饲料中禾本科及豆科饲草进行NDFD₄₈的评估,当淀粉含量达到干物质的10%以上时,模型不具有参考价值,因此,模型并未涉及谷物类占比较大粗饲料如全株玉米青贮。

4 结论

饲草NDF消化率可有效评估反刍动物干物质采食量及瘤胃健康状况,常用来评定NDFD₄₈的检测方法耗时、投入成本高且较为复杂,本研究利用NDF和ADF含量可对NDFD₄₈进行准确预测,可有效解决当前评估NDFD₄₈程序复杂和设备资源缺乏的问题,可应用于对NDFD₄₈的快速评价。

参考文献 References:

- [1] Feng Y L, Zhang Z Y. The nutritional value and reasonable utilization of poor quality roughages on ruminant. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2003(3): 8-12.
冯仰廉, 张子仪. 低质粗饲料对反刍家畜的营养价值及合理利用. *中国农业科技导报*, 2003(3): 8-12.
- [2] Colombini S, Galassi G, Crovetto G M, *et al.* Milk production, nitrogen balance, and fiber digestibility prediction of corn, whole plant grain sorghum, and forage sorghum silages in the dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(8): 4457-4467.
- [3] Kendall C, Leonardi C, Hoffman P C, *et al.* Intake and milk production of cows fed diets that differed in dietary neutral detergent fiber and neutral detergent fiber digestibility. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(1): 313-323.
- [4] Ridla M, Laconi E B, Nahrowi, *et al.* Modelling feed energy and protein values for ruminants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 637(1): 1-3.
- [5] Zhang J K, Lu D X, Hu M, *et al.* Study on modelling of forage grading index parameters and associative effects in mixed forages. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004.
张吉鹏, 卢德勋, 胡明, 等. 粗饲料分级指数参数的模型化及粗饲料科学搭配的组合效应研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.
- [6] Lou S N, Hou F J, Ren J Z. Evaluation of grassland agricultural productivity by food equivalent unit. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12): 1-16.
娄珊宁, 侯扶江, 任继周. 用食物当量评价草地农业的生产力. *草业学报*, 2019, 28(12): 1-16.
- [7] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [8] Wanapat M, Gunun P, Gunun N, *et al.* Changes of rumen pH, fermentation and microbial population as influenced by different ratios of roughage (rice straw) to concentrate in dairy steers. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(4): 675-685.

- [9] Hoffman P, Combs D. Using NDF digestibility in ration formulation. University of Wisconsin Board of Regents, 2014, 6(3): 1–3.
- [10] Ball D M, Collins M, Lacefield G D, *et al.* Understanding forage quality. American Farm Bureau Federation Publication, 2001, 1(1): 1–15.
- [11] Zhang W, Mo F. Application and recommendation of *in situ* nylon bag technique for feed nutritional value evaluation. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1): 1–14.
张微, 莫放. 原位尼龙袋技术在评价饲料营养价值中的应用与建议方案. 动物营养学报, 2019, 31(1): 1–14.
- [12] Goering H K, Soest P J V. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). USDA Agricultural Handbook, 1970, 379: 1–20.
- [13] Hoffman P C, Shaver R D, Combs D K, *et al.* Understanding NDF digestibility of forages. Focus on Forage, 2001, 3(10): 1–3.
- [14] Combs D K. Relationship between NDF digestibility and animal performance. WCDS Advances in Dairy Technology, 2016, 28(2): 83–96.
- [15] Van Soest P J, Robertson J B, Barry M C. Soluble lignin and its relation to klason lignin, acid-detergent lignin and digestibility of NDF//Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers. Syracuse, NY: ResearchGate, 2018.
- [16] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Nutrient requirements of dairy cattle (Eighth Revised Edition). Washington, DC: The National Academies Press, 2021: 360–413.
- [17] Oliver A L, Grant R J, Pedersen J F, *et al.* Comparison of brown midrib-6 and -18 forage sorghum with conventional sorghum and corn silage in diets of lactating dairy cows. Journal of Dairy Science, 2004, 87(3): 637–644.
- [18] Dann H M, Grant R J, Cotanch K W, *et al.* Comparison of brown midrib sorghum-sudangrass with corn silage on lactational performance and nutrient digestibility in Holstein dairy cows. Journal of Dairy Science, 2008, 91(2): 663–672.
- [19] Kammes K L, Allen M S. Nutrient demand interacts with forage family to affect digestion responses in dairy cows. Journal of Dairy Science, 2012, 95(6): 3269–3287.
- [20] Brunette T, Baurhoo B, Mustafa A F. Effects of replacing grass silage with forage pearl millet silage on milk yield, nutrient digestion, and ruminal fermentation of lactating dairy cows. Journal of Dairy Science, 2016, 99(1): 269–279.
- [21] Coblenz W K, Nellis S E, Hoffman P C, *et al.* Unique interrelationships between fiber composition, water-soluble carbohydrates, and *in vitro* gas production for fall-grown oat forages. Journal of Dairy Science, 2013, 96(11): 7195–7209.
- [22] Palmonari A, Canestrari G, Fustini M, *et al.* Using single or multiple liquor-donor cows for *in-vitro* digestibility of amylase-and sodium sulfite-treated neutral detergent fiber with ash correction. Journal of Dairy Science, 2016, 99(12): 9754–9758.
- [23] Fustini M, Palmonari A, Canestrari G, *et al.* Effect of undigested neutral detergent fiber content of alfalfa hay on lactating dairy cows: Feeding behavior, fiber digestibility, and lactation performance. Journal of Dairy Science, 2017, 100(6): 4475–4483.
- [24] Brown A N, Ferreira G, Teets C L, *et al.* Nutritional composition and *in vitro* digestibility of grass and legume winter (cover) crops. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 2037–2047.
- [25] Lyons S E, Ketterings Q M, Godwin G S, *et al.* Optimal harvest timing for brown midrib forage sorghum yield, nutritive value, and ration performance. Journal of Dairy Science, 2019, 102(8): 7134–7149.
- [26] Krogstad K C, Herrick K J, Morris D L, *et al.* The effects of pelleted dried distillers grains and solubles fed with different forage concentrations on rumen fermentation, feeding behavior, and milk production of lactating dairy cows. Journal of Dairy Science, 2021, 104(6): 6633–6645.
- [27] Farhad P K, Noel S J, Johansen M, *et al.* Methane emission, nutrient digestibility, and rumen microbiota in Holstein heifers fed 14 different grass or clover silages as the sole feed. Journal of Dairy Science, 2023, 106(6): 4072–4091.
- [28] Stypinski J D, Weiss W P, Carroll A L, *et al.* Effect of acid detergent lignin concentration for diets formulated to be similar in neutral detergent fiber content on energy utilization in lactating Jersey cows. Journal of Dairy Science, 2024, 107(8): 5699–5708.
- [29] Zhang F P, Zhang Y, Zhang R, *et al.* Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds: GB/T 20806-2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.
张凤枰, 张芸, 张茹, 等. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定: GB/T 20806-2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [30] Palmonari A, Gallo A, Fustini M, *et al.* Estimation of the indigestible fiber in different forage types. Journal of Animal Science, 2016, 94(1): 248–254.
- [31] Oba M, Allen M S. Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: Effects on dry matter

- intake and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 1999, 82(3): 589–596.
- [32] Varga G A. *In vivo* digestibility of forages//Tri-State dairy nutrition conference. Columbus: The Ohio State University, 2006: 95–106.
- [33] Soufizadeh M, Pirmohammadi R, Alijoo Y, *et al.* Indigestible neutral detergent fibers: Relationship between forage fragility and neutral detergent fibers digestibility in total mixed ration and some feedstuffs in dairy cattle. *Veterinary Research Forum*, 2018, 9(1): 49–57.
- [34] Cherney D J, Parsons D. Predicting forage quality//Kenneth J M, Michael C, Nelson C J, *et al.* Forages: The Science of Grassland Agriculture. Chichester: Wiley, 2020: 687–699.
- [35] Lemaire G, Belanger G. Allometries in plants as drivers of forage nutritive value: A review. *Agriculture*, 2019, 10(1): 5.
- [36] Yang C T, Gao P, Hou F J, *et al.* Relationship between chemical composition of native forage and nutrient digestibility by Tibetan sheep on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(3): 1140–1149.
- [37] Liang J Y, Jiao T, Wu J P, *et al.* The relationship between seasonal forage digestibility and forage nutritive value in different grazing pastures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 108–115.
梁建勇, 焦婷, 吴建平, 等. 不同类型草地牧草消化率季节动态与营养品质的关系研究. *草业学报*, 2015, 24(6): 108–115.
- [38] Shi H T, Li S L. Efficient utilization and evaluation techniques of roughage//Proceedings of the 7th China academic symposium of feed nutrition. Beijing: China Agricultural University, 2014: 458.
史海涛, 李胜利. 粗饲料高效利用及评价技术//第七届中国饲料营养学术研讨会论文集. 北京: 中国农业大学出版社, 2014: 458.
- [39] Nocek J E, Russell J B. Protein and energy as an integrated system. Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production. *Journal of Dairy Science*, 1988, 71(8): 2070–2107.
- [40] Beauchemin K A. Using ADF and NDF in dairy cattle diet formulation—A western Canadian perspective. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 58(1): 101–111.
- [41] Mertens D R. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. *Journal of Animal Science*, 1987, 64(5): 1548–1558.
- [42] Undersander D J, More J E. Relative forage quality (RFQ)—Indexing legumes and grasses for forage quality. *Focus on Forage*, 2002, 4(5): 1–2.
- [43] Abrams S M, Hartadi H, Chaves C M, *et al.* Relationship of forage-evaluation techniques to the intake and digestibility of tropical grasses//Allan S J, Virgil M H. Proceedings of the Xiv international grassland congress. Boca Raton: CRC Press, 2019: 508–511.
- [44] Harper K J, Mcneill D M. The role iNDF in the regulation of feed intake and the importance of its assessment in subtropical ruminant systems (the role of iNDF in the regulation of forage intake). *Agriculture*, 2015, 5(3): 778–790.
- [45] Nair J, Beattie A D, Cheistensen D, *et al.* Effect of variety and stage of maturity at harvest on nutrient and neutral detergent fiber digestibility of forage barley grown in western Canada. *Canadian Journal of Animal Science*, 2018, 98(2): 299–310.