

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0217

贾存辉,钱文熙,吐尔逊阿依·赛买提,敖维平,古力皮叶木·阿布都克然木.粗饲料营养价值指数及评定方法.草业科学,2017,34(2):415-427.

Jia C H, Qian W X, Tursunay · Samat, Ao W P, Gulpiya · Abdulkirem. Roughage nutritional value evaluation indices and research methods. Pratacultural Science, 2017, 34(2): 415-427.

粗饲料营养价值指数及评定方法

贾存辉¹, 钱文熙^{1,2}, 吐尔逊阿依·赛买提¹,
敖维平^{1,2}, 古力皮叶木·阿布都克然木¹

(1.塔里木大学动物科学学院, 新疆 阿拉尔 843300;

2.新疆生产建设兵团塔里木畜牧科技重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要:粗饲料是反刍动物瘤胃微生物和宿主主要的营养来源,科学有效地评价粗饲料营养和饲喂价值,对于开发饲料资源、合理利用粗饲料和提高其利用效率至关重要。本文简述了国内外对动物粗饲料营养价值的评定指数和方法,介绍了粗饲料营养价值评定方法的发展以及各方法的优缺点,指出实际研究中可根据不同的科研需求,选择适合的评定指数和方法,根据实际情况完善评定指数和评定方法,对粗饲料营养价值的科学评定和合理利用起到一定借鉴作用。

关键词:粗饲料;营养价值;评定指数;评定方法;分级指数;康奈尔净碳水化合物—蛋白质体系;体外法

中图分类号:S816.25

文献标志码:A

文章编号:1001-0629(2017)2-0415-13*

Roughage nutritional value evaluation indices and research methods

Jia Cun-hui¹, Qian Wen-xi^{1,2}, Tursunay · Samat¹, Ao Wei-ping^{1,2}, Gulpiya · Abdulkirem¹

(1.Collage of Animal Science, Tarim University, Alar 843300, China;

2.Key Laboratory of Tarim Animal Husbandry Science and Technology of

Xinjiang Production & Construction Corps, Alar 843300, China)

Abstract: Roughage is the main source of nutrition for rumen microbes and their hosts. It is essential to effectively and scientifically evaluate roughage nutrition and feed value, to develop feed resources, to understand reasonable use of roughage, and to improve its utilization efficiency. This review of a large number of domestic and foreign studies details the evaluation indices and methods of evaluating the nutritional value of crude feed. It also discusses the development of evaluation methods and the advantages and disadvantages of each method. We can select the best evaluation index and method according to research needs, but this selection can play a role in the evaluation and rational utilization of the nutritional values of crude feed.

Key words: roughage; nutritional value; evaluation index; evaluation method; grading index; Cornell net carbohydrate and protein system; in vitro method

Corresponding author: Qian Wen-xi E-mail: qianwenxizj@163.com

饲料干物质中粗纤维含量在18%以上的饲料均称为粗饲料,主要包括豆科牧草、禾本科牧草和各种秸秆等,其营养价值评定体系是指测定粗饲料中的营养物质含量并评价这些营养物质被动物消化吸收的效率

及动物营养效果的体系^[1]。在反刍动物日粮中,粗饲料占其中的40%~80%,甚至更高。粗饲料的品质高低是影响反刍动物健康和生产性能的最关键因素,同时也影响到精饲料的添加量及成本,最终影响畜牧业

* 收稿日期:2016-04-25 接受日期:2016-09-26

基金项目:国家自然科学基金(31260569,31460610)

第一作者:贾存辉(1992-),男,甘肃靖远人,在读硕士生,研究方向为动物营养与饲料科学。E-mail: jia_cunhui@163.com

通信作者:钱文熙(1977-),男,甘肃庆城人,副教授,硕士,研究方向为动物营养与饲料科学。E-mail: qianwenxizj@163.com

的生产效益。随着畜牧业的发展,粗饲料的产量及种类大大增加,但是开发利用率依然较低,合理有效地利用种类丰富的粗饲料资源对反刍动物饲养有着重要意义,而科学有效地评价粗饲料营养和饲喂价值,对于开发饲料资源、合理利用粗饲料和提高其利用效率至关重要。目前,国内外对粗饲料的评定指数和评定方法是在实际应用中经过漫长的试验研究不断发展完善而来的,总结并分析各种评定方法的优缺点及适用范围可为科学、完善地评定粗饲料营养价值提供有力保障。

1 粗饲料营养价值评定指数

1.1 单项评定指数

单项评定指数是评定粗饲料营养价值的基础,主要包括粗饲料的常规化学成分的测定、适口性、采食量、消化率、瘤胃降解率等。

1.1.1 化学成分 粗饲料化学成分是决定粗饲料营养价值的基本因素,是影响反刍动物对粗饲料利用和转化的先决条件。其可分为两部分:消化率高的细胞内容物和消化率低的植物细胞壁成分。前者主要包括粗蛋白(CP)、糖类、淀粉、有机酸、水溶性矿物质、维生素等,反刍动物对它们的消化率可高达 98%;后者主要包括纤维素、半纤维素、木质素、二氧化硅和木质化含氮物等^[2]。

粗蛋白从粗饲料中的总氮量来估计其营养价值,是评价粗饲料最重要的指标,其含量越高,粗饲料品质越好,因为它决定了粗饲料的价格。中性洗涤纤维(NDF)用于估测粗饲料消化率,其含量越低,粗饲料品质越好。酸性洗涤纤维(ADF)用于估测粗饲料潜在采食量,其含量越高,粗饲料品质越低^[3]。为了便于记忆,陈谷等^[4]提出了“20-30-40”法则,即判断粗饲料营养价值的标准是其 CP 含量至少要高于 20%,ADF 含量要低于 30%,NDF 含量要低于 40%。

1.1.2 适口性 适口性指的是粗饲料本身引起动物产生食欲的合理化特性,通俗的讲就是动物对粗饲料的喜好程度。适口性是一个相对概念,通过比较动物对不同粗饲料的采食反应,来描述动物对某种特定粗饲料的采食愿意程度^[5]。适口性主要取决于粗饲料的外观、颜色、气味、味道、大小、质地和硬度等,影响因素包括粗饲料的刈割期、纤维素木质化程度、碳水化合物含量、加工与贮藏方式、抗营养因子以及精粗饲料的配合比例等。玉米(*Zea mays*)秸秆果穗以上部分比下部秸秆营养成分高,适口性也好,适口性越好,动物喜好程度就越高,采食量就会增加,动物生产性能也会提高^[6]。

1.1.3 采食量 采食量是指把粗饲料作为唯一日粮来源,一定时间内反刍动物随意采食时所能进食的粗饲料干物质数量。粗饲料采食量是反刍动物生产力的主要限制因子,动物只有吃掉适度、足量的优质粗饲料才能体现出其生产性能^[7]。反刍动物采食量越高,粗饲料适口性越好,品质也越好^[8]。为了能方便快捷地测定反刍动物采食量,朱兴运^[9]对反刍动物采食量的测定方法进行了系统的总结,发现这些方法并不完善,需要根据具体情况结合应用。卢德勋^[10]提出了干物质随意采食量(DMI)预测公式,DMI 高低受粗饲料中 NDF 含量的影响;NDF 含量越高,DMI 越小,DMI 越高,粗饲料品质就越好^[11]。反刍动物采食量受动物体重、健康状况、增重速度、饲养方式、日粮类型、饲料能量浓度、饲料加工、气候、生理状态及所处环境等多方面因素的影响^[12]。但由于反刍动物对不同粗饲料的消化吸收利用效率有很大的差异,因此采食量也不能完全反映粗饲料品质高低。

1.1.4 消化率 消化率是指粗饲料在动物消化道中经消化后未随粪便排出体外而被动物吸收利用的部分占动物采食粗饲料总量的百分比,是粗饲料营养价值评定的关键指标,反映了动物对粗饲料的转化效率^[13]。不同种类、同一种类但不同产地、不同刈割期、不同加工方式处理的粗饲料消化率会存在较大的差异。消化率的高低与粗饲料细胞壁成分的含量和组成、蛋白质及其降解产物的含量、粗饲料中抗营养因子的含量以及精粗饲料的配合比例等因素有关^[14]。消化率越高,粗饲料的营养价值就相对较高。消化率主要包括小肠消化率、体外干物质消化率(IVDMD)等。

小肠消化率是指在瘤胃微生物发酵过程中未被降解的粗饲料养分进入小肠后在小肠消化酶作用下被分解的百分比值^[15],主要用于评定粗饲料中蛋白质、氨基酸等成分在小肠中的消化率,是一种以小肠可消化养分为基础评定反刍动物粗饲料营养价值的指标。有研究者采用尼龙袋法测定奶牛常用粗饲料的小肠消化率,证明小肠消化率与不同种类的粗饲料提供可消化物质的能力有很大关系^[16]。但是因为用小肠消化率评定粗饲料营养价值时需要安装十二指肠和回肠瘘管,导致操作过程复杂,成本高,因此,它主要用于评定精饲料的营养价值,而在粗饲料的应用中并不广泛。

IVDMD 受粗饲料中纤维素含量和木质化程度的影响,反映粗饲料在动物体内消化降解的难易程度。低水分青贮可以明显提高黑小麦 IVDMD,是提高其营养价值的有效途径,表明 IVDMD 值越高,粗饲料品质越好^[17]。使用粉碎、全株压块、去皮压块 3 种不同

的处理方式处理玉米秸秆的研究表明,提高 IVDMD 可以改善玉米秸秆的营养价值,而经去皮压块处理的玉米秸秆 IVDMD 和营养价值明显高于另两种处理方式^[18]。

1.1.5 瘤胃降解率 瘤胃降解率是指粗饲料在瘤胃内的降解速度和程度。粗饲料中大部分纤维素经过瘤胃微生物发酵产生挥发性脂肪酸(VFA)、二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)等,从而为反刍动物提供能量、矿物质元素、维生素等必需营养素^[19]。瘤胃降解率从客观上反映了日粮调控和添加物的作用形式,在进行日粮调控时具有重要意义,一般作为粗饲料营养价值评定的最基本指标^[20]。研究表明,36 和 48 h 的瘤胃实时降解率与有效降解率高度相关,由此建议优质粗饲料采用 36 h 的瘤胃实时降解率,中低级粗饲料采用 48 h 的瘤胃实时降解率^[21-23]。NDF 与淀粉的比例能更直观地反映出反刍动物瘤胃降解率,通过采用尼龙袋法测定 4 种饲料的瘤胃降解率,确定了其营养价值较高时的 NDF 与淀粉的比例范围为 0.86~1.13^[24]。但瘤胃降解率的高低主要反映的是粗饲料蛋白质含量的高低,而不能对粗饲料营养价值进行全面的评价。

1.2 综合评定指数

单一的评价指标对粗饲料营养价值的评定存在很大局限性,在实际生产中应将单一评价指数作为基础,与反刍动物的生理特性有机结合起来,使用更加科学合理的综合评定指数对粗饲料营养价值进行评价。

1.2.1 总可消化养分体系(TDN) TDN 是根据总可消化养分评定粗饲料营养价值,将粗饲料中粗蛋白、粗脂肪、粗纤维和无氮浸出物 4 种可消化粗养分的含量按一定的系数组成的一个综合指标来评定粗饲料营养价值的方法^[25]。TDN 体系的优点是首次采用粗饲料对动物的有用部分来评定粗饲料的营养价值。其缺点是,TDN 体系既不是物质体系也不是能量体系;既不是消化能也不是代谢能;不能区分反刍动物和非反刍动物;只能反映粗饲料的消化率和动物的消化能力。

1.2.2 产奶两千(Milk2000) Milk2000 是由 Under-sander 等^[26]首次提出,主要用来对全株玉米青贮品种[同时也可用于苜蓿(*Medicago sativa*)/禾本科牧草]进行营养价值评价和分级的指数^[27]。其定义是:用每吨粗饲料干物质的泌乳量作为评定乳牛粗饲料品质的指数。Milk2000 的基础是粗饲料中所含的能量及乳牛对粗饲料的 DMI。粗饲料中的能量及乳牛的 DMI 分别采用特定的模型,即由粗饲料中的 ADF 及 NDF 进行预测得到。Lauer 等首先使用这个指数对全株杂交玉米青贮的品质进行了评定,后经过 Schwab 和

Shaver 的修订,可在 Excel5.0 电子制表软件上进行计算,取名 Milk2000^[28]。

Milk2000 的优点是计算简便快捷,便于实际应用,但是它主要用于乳牛对于禾本科粗饲料的评定和分级,不适用于其它的反刍动物,并且运用它所测得的结果只能用于所测定粗饲料的分级,而不能作为实测值利用。

1.2.3 粗饲料相对值(RFV) RFV^[29]由美国饲草和草原理事会下属的干草市场特别工作组提出。其定义是:相对一特定标准粗饲料(如盛花期苜蓿),某种粗饲料可消化干物质的采食量^[30]。RFV 的基础是可消化的干物质(DDM)的随意采食量,其关系式是:

$$DMI = 120 / NDF;$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF;$$

$$RFV = DMI \times DDM / 1.29.$$

式中:DMI 单位为%,即占体重的百分比;NDF、DDM、ADF 单位为%,即占干物质的百分比。常数 1.29 为盛花期苜蓿 DDM 的采食量。除以 1.29 是因为以盛花期苜蓿的 RFV 值为 100 做标准,RFV 值大于 100 的粗饲料表明整体上质量较好。RFV 值越大,表明饲料的营养价值越高。

RFV 的优点在于它所采用的预测模型简单实用,它提供粗饲料饲用价值的相对估计值,可对不同批量或种类的粗饲料饲用价值进行比对;而且实验室只需要测定粗饲料的 NDF、ADF 和 DM 就可以计算出某种粗饲料的 RFV 值^[31]。美国全国牧草和草地委员会以 RFV 为基数确定了一套分级标准,以便能更简单实用地评价粗饲料营养价值(表 1)。它的缺点是只对粗饲料进行了简单的分级,没有考虑到粗饲料中粗蛋白质含量对其营养价值的影响,而不包括蛋白质指标的粗饲料评定指数是不够准确的。因此,无法利用这种评定指标进行粗饲料的科学组合和合理搭配。

1.2.4 质量指数(QI) QI^[32]由美国佛罗里达州饲草推广测试项目提出。其定义是:TDN 随意采食量是 TDN 维持需要的倍数。QI 的基础是有机物质消化率(OMD),其关系式是:

$$OMD = 32.2 + 0.49IVOMD;$$

$$TDN = OM \times OMD / 100;$$

$$DM \text{ 采食量} = 120.7 - 0.83NDF;$$

$$TDN \text{ 采食量} = DM \text{ 采食量} \times TDN / 100;$$

$$QI = TDN \text{ 采食量} / 29.$$

式中:IVOMD 为体外有机物消化率;OM 为有机物质;OMD、IVOMD 单位为%;TDN、OM、NDF 单位为%,DM 采食量、TDN 采食量单位为 g·MW⁻¹。常

表 1 牧草干草质量市场分级标准^[4]
Table 1 Grass hay quality grade standards^[4]

分级标准 Grading standard	粗蛋白 Crude protein (CP)/%	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber(ADF)/%	中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre(NDF)/%	可消化干物质 Digestible dry matter(DDM)/%	干物质随意采食量 Dry matter intake(DMI)/%	饲料相对值 Relative feed value(RFV)
特级 Super	>19	<31	<40	>65	>3.0	>151
1	17~19	31~35	40~46	62~65	2.6~3.0	125~151
2	14~16	36~40	47~53	58~61	2.3~2.5	101~124
3	11~13	41~42	54~60	56~57	2.0~2.2	86~100
4	8~10	43~45	61~65	53~55	1.8~1.9	77~85
5	<8	>45	>65	<53	<1.8	<77

数 29 为绵羊的 TDN 维持需要量($29\text{ g}\cdot\text{MW}^{-1}$),除以 29 是以绵羊为标准,QI 基数设定为 1,当 QI 值小于 1,表明粗饲料质量低,动物会掉膘;当 QI 值等于 1,动物既不增重也不失重;当 QI 值等于 1.8,表明粗饲料为中等质量,动物会增重^[33]。

QI 的优点是将 TDN 的维持需要作为参照点,而不是选择某一特定的粗饲料作为参照;同时它将 DM 采食量用每千克代谢体重所采食粗饲料的克数($\text{MW}=\text{W}_{\text{kg}}^{0.75}$)来表示,而不是占体重百分比;还采用 IVOMD 来预测 OMD,使 OMD 更加精确^[34]。它的缺点是估测模型依然不理想,同样没有考虑粗蛋白,因此依然无法用于粗饲料的科学搭配。

1.2.5 粗饲料相对质量(RFQ) RFQ^[35]是一个旨在取代 RFV 和 QI 而提出的新的粗饲料评定指标。RFQ 也是把粗饲料作为动物唯一蛋白和能量来源时,对粗饲料可利用能随意采食量的估测。其关系式是:

$$\text{RFQ}=\text{DMI}\times\text{TDN}/1.23.$$

式中:DMI 单位为%,TDN 单位为%。常数 1.23 是通过试验测得 TDN 采食量对 DDM 采食量的无截距回归斜率(0.95)乘以 RFV 式中的 1.29 得到的^[36]。除以 1.23 的目的是将各粗饲料的 RFQ 平均值及范围调整到与 RFV 相似。

RFQ 的优点是其预测模型相较于 RFV 更加灵活,可通过 TDN 进行预测,使预测值更接近实际情况,尤其能准确地对禾本科牧草进行分级^[37]。同时,RFQ 还可以预测影响粗饲料采食量和消化率的精粗饲料的组合效应。但是它的缺点是成本高、耗时长、需要的重复组较多、受体外消化率测定方法的制约等,这也是 RFQ 未能普及的原因。

1.2.6 粗饲料分级指数(GI) GI 是由卢德勋^[38]提出的全新的饲料评定指数。饲料的营养价值是对饲料的饲用价值量化评估的技术参数,是饲料科学理论和技术体系的最重要的核心组成部分之一。其定义为粗饲

料的 CP 和 NDF 经过校正后,粗饲料可利用能的随意采食量。其关系式是:

$$\text{GI}_{2001}=\text{ME}\times\text{DMI}\times\text{CP}/\text{NDF}(\text{或 ADL}).$$

式中:GI₂₀₀₁单位为 MJ·d⁻¹;ME 为粗饲料代谢能,也可用粗饲料产奶净能 NE_L^[39],单位为 MJ·kg⁻¹;DMI 单位为 kg·d⁻¹;CP 单位为%,即占干物质的百分数,可用 NDF 或 ADL 代替,ADL 为酸性洗涤木质素。

GI₂₀₀₁的特点是除了引入能量参数外,还引入了 CP 和 DMI 等参数,将它们统一起来考虑,全面准确的反映出粗饲料的实际饲用价值,并且简便易行,实现了粗饲料的合理化搭配,便于实际生产推广使用,同时它还可以用于指导牧草的种植、确定牧草的最佳刈割期。王旭^[40]首次验证了 GI₂₀₀₁理论,为反刍动物的优化饲养设计和粗饲料的科学利用提供了技术依据。此后,众多学者对于 GI 模型作了初步研究和完善。成立新等^[41]通过测定 5 种饲草的 GI,证明以 ADL 为指标测得的饲草 GI 最符合实际值。

因为 GI₂₀₀₁只考虑到粗饲料中的 CP、NDF 等参数,并且表现性较强,没有结合反刍动物的消化生理特点来说明反刍动物对粗饲料的消化利用情况。GI₂₀₀₈就在 GI₂₀₀₁的基础上做出了进一步的完善,主要用于研究目的,且更具科学性^[42]。其关系式为:

$$\text{GI}_{2008}=\text{NE}_L\times\text{DCP}\times\text{DMI}/(\text{NDF}-\text{peNDF}).$$

式中:GI₂₀₀₈单位为 MJ·d⁻¹;NE_L为粗饲料产奶净能,单位为 MJ·kg⁻¹;DMI 单位为 kg·d⁻¹;DCP、NDF、peNDF 单位为%,即占干物质的百分数。GI₂₀₀₈在蛋白质指标上新引入了可消化粗蛋白(DCP),该指数将粗饲料的营养组成成分和动物的消化生理特点结合了起来,并且将包括粗饲料物理有效中性洗涤纤维(peNDF)在内的纤维方面指标进行了综合评定,更能全面精确地评定粗饲料营养价值,也提高了日粮优化搭配技术的集成化程度^[43]。

$$\text{GI}_{2009}=\text{NEL}\times\text{DCP}\times\text{DMI}/(\text{NDF}-\text{peNDF}).$$

GI₂₀₀₉ 是对 GI₂₀₀₈ 的进一步补充,它们的公式相同,但 GI₂₀₀₉ 灵活性更强,结果更准确。在 GI₂₀₀₉ 中,DMI 的估测公式采用 RFQ 中的公式,NEL 是由 ADF 或 NDF 计算出来的,而且针对不同的粗饲料所采用的预测模型也不相同,因此最主要的是 GI₂₀₀₉ 能区别出各种粗饲料品质间的微小差异,使分级更加明显^[44]。当几种粗饲料 DM 和 CP 含量差别不明显时,就可以用

GI₂₀₀₉ 来进行评价。

通过测定内蒙古地区^[45]、黑龙江省^[46]、张家口地区^[47]这几个不同地域的反刍动物常用粗饲料的 GI,并与 RFV 值进行了比较。数据结果显示,RFV 与 GI 评定 4 种粗饲料的分级趋势一致,证明 GI 评定粗饲料营养价值也是一种科学合理的指数,同时也反映了粗饲料的营养价值具有显著的地域差异(表 2)。

表 2 不同地区 4 种粗饲料饲料相对值(RFV)和分级指数(GI)的比较

Table 2 Comparison of GI and RFV of four kinds of roughage in different regions

粗饲料 Roughage	内蒙古 Inner Mongolia ^[45]		黑龙江 Heilongjiang ^[46]		张家口 Zhangjiakou ^[47]	
	饲料相对值	分级指数	饲料相对值	分级指数	饲料相对值	分级指数
	RFV	GI/MJ · d ⁻¹	RFV	GI/MJ · d ⁻¹	RFV	GI/MJ · d ⁻¹
苜蓿干草 Alfalfa hay	109.20	32.11	109.54	11.30	117.90	3.97
玉米青贮 Corn silage	100.12	19.7	92.84	9.71	100.88	0.91
羊草 Chinese wild rye	91.55	9.39	78.31	4.11	80.12	0.62
玉米秸秆 Corn straw	69.93	3.98	74.13	3.34	68.89	0.23

2 粗饲料营养价值评定方法

评定粗饲料营养价值的方法主要分为评定粗饲料养分含量的方法和评定粗饲料营养物质可利用性的方法^[48]。前者主要在实验室中进行,包括概略养分分析法、范式纤维分析法、康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系(cornell net carbohydrate and protein system, CNCPS)法以及近红外光谱分析技术等;后者主要进行动物试验,包括体内法、半体内法、体外法等。

2.1 评定粗饲料养分含量的方法

评定粗饲料养分含量的方法一般在实验室进行,这些传统的方法都已经比较成熟,可靠性较高,为粗饲料营养价值的评定奠定了研究基础。

2.1.1 概略养分分析法 概略养分分析法就是传统的常规成分分析法,1864 年由德国 Weende 试验站提出,将粗饲料根据化学成分分为水分、粗蛋白、粗纤维、粗脂肪、粗灰分和无氮浸出物六大养分^[49]。其中,水分(H₂O)的测定方法是在 105 ℃ 烘箱中烘干;CP 的测定方法是凯氏定氮法;粗纤维(CF)采用酸煮和碱煮的方法测定;粗脂肪(EE)用索氏抽提法测定;粗灰分(Ash)用马弗炉 550 ℃ 高温加热法测定;无氮浸出物(NFE/%) = 100% - (H₂O% + CP% + CF% + EE% + Ash%)^[50]。

营养成分概略养分分析法测定简单,概括性强,是粗饲料营养价值评定的基础,可用于不同样本之间的比较。但它的缺点是只能说明粗饲料各种营养组成成分含量的高低,测出的粗纤维也不是一个明确的化学

实体,而是几种物质的混合物,不能完全用于评定粗饲料营养价值的高低,而粗饲料营养价值评定的关键还与反刍动物对粗饲料的采食和消化吸收利用情况有关,因此,用概略养分分析法评定粗饲料营养价值的高低具有很大局限性。

2.1.2 范式纤维分析法 范式纤维分析法是 van Soest 在 Weende 体系的基础上对粗纤维和无氮浸出物进行了补充和修正^[51]。将 CF 精确分解为 NDF、ADF、ADL,由此可进一步计算得到纤维素、半纤维素、木质素的含量。NDF 与动物采食量呈负相关关系,ADF 与动物消化率呈负相关关系,ADL 是不被动物利用的成分,也是评定粗饲料品质的重要指标。万娟娟等^[52]在评定新疆沙尔套山草地优势禾本科牧草营养价值时就采用范式纤维分析法测定了其 NDF、ADF 的含量。

范式纤维分析法将粗饲料中可被动物直接利用的、可溶性细胞内容物与不易消化的细胞壁区分开来,使粗饲料营养成分的划分更科学、合理,而且在一定程度上反映出反刍动物对粗饲料的采食量和消化率。但是范式纤维分析法仍然是建立在通过化学方法处理粗饲料样品的基础上的,因此它的预测结果也有很大的局限性。

2.1.3 CNCPS CNCPS 体系是由美国康奈尔大学提出的基于瘤胃降解特征的采用多项指标评定粗饲料品质的方法^[53]。经过多年的研究实践,该体系已经被证实具有较高的应用价值,也被各权威机构所接受,它不仅考虑了粗饲料在瘤胃内的消化与流通速率、吸收的

碳水化合物和蛋白质的利用效率,也考虑了环境、动物等因素。CNCPS 体系将碳水化合物划分为 4 个部分:CA 为糖类,为瘤胃中可快速降解部分;CB₁ 为淀粉和果胶,为瘤胃中中速降解部分;CB₂ 为可利用的细胞壁,为瘤胃中缓慢降解部分;CC 为不可利用的细胞壁。其中 CA 又分为挥发性脂肪酸(CA₁)、乳酸(CA₂)、其它有机酸(CA₃)和糖分(CA₄) 4 个部分。将蛋白质分为 3 个部分:非蛋白氮(PA)、真蛋白(PB)和不可利用蛋白质(PC),其中 PB 又分为能溶于缓冲液的快速降解蛋白质部分(PB₁)、不溶于缓冲液但溶于中性洗涤纤维的中速降解蛋白质部分(PB₂)、不溶于缓冲液但溶于酸性洗涤纤维的慢速降解蛋白质部分(PB₃) 3 个部分。CNCPS 体系核心是根据瘤胃微生物对氮和能量的利用不同,将微生物划分为两类,发酵非结构碳水化合物(NSC)的微生物和发酵结构性碳水化合物(SC,纤维素、半纤维素)的微生物,SC 细菌仅利用氨作氮源,而 NSC 细菌可利用氨、氨基酸和肽等氮源,肽对这类微生物的生长有较强的促进作用,这种划分反映了瘤胃细菌对氮的利用,使瘤胃微生物群体简单化。有研究者利用 CNCPS 体系评定粗饲料时发现,PC 蛋白组分在小肠中可消化,因此提出应对 PC 蛋白组分小肠消化率合理性做进一步研究,并建议将瘤胃细菌划分为非结构性碳氧化化合物的微生物与结构性碳水化合物的微生物,建立了细菌生长的维持需要,细菌最大理论生长量的细菌产量估计动态模型^[54]。

CNCPS 主要评价粗饲料营养物质平衡状况及利用率,预测动物生产性能,应用 CNCPS 体系评定粗饲料营养价值能更全面更精确地反映粗饲料的营养价值和反刍动物对粗饲料的利用率^[55],可区分出多个测定指标,能更好地反映粗饲料的品质^[56]。而且它把饲料的化学成分、植物的细胞成分和反刍动物的消化利用率结合起来,使分析结果更加精确,易于标准化,但是它很难区分开品质接近的粗饲料^[57]。陶春卫^[58]采用该体系和体外产气法做对比对粗饲料品质进行评价,得出的评定结果不一致,证明多项指标的 CNCPS 体系也不能全面评定粗饲料品质。解祥学等^[59]评价了该体系在中国的研究进展和发展趋势,指出 CNCPS 体系中国化将会对中国反刍动物粗饲料发展乃至整个畜牧业的发展带来深远影响。

2.1.4 近红外光谱分析技术(NIRS) NIRS 是一种较新的快速定性定量分析技术,其理论依据是基于粗饲料中的粗蛋白、粗纤维、粗脂肪等成分中的含氢基团在近红外光谱区(0.7—2.5 μm)对红外线具有特定的吸收光谱,然后通过建立粗饲料待测成分含量与光谱

信息之间的线性或非线性模型,对粗饲料营养价值进行评定,实质上是利用了回归分析的原理^[60]。

NIRS 的优点是不需要复杂的前处理,成本低,测速快,准确度高,可同时分析多个不同种类的样品,还可估测粗饲料有效能和利用率^[61];缺点是检测结果的准确性必须建立在有大量准确的原始数据库的基础上,而这些原始数据库却需要花费大量时间和研究来建立,同时对所用仪器要求较高。有研究表明,NIRS 预测性能优于其它方法,尤其是在预测氨基酸含量方面^[62]。白琪林等^[63]利用该技术测定 161 种玉米秸秆 IVDMD 并建立了不同种类、不同生长时期、不同部位的玉米秸秆校正模型,为玉米秸秆的品质评价和筛选奠定了基础。NIRS 对玉米青贮的综合品质进行检测时有较好的效果,且简单易行,可取代常规分析法^[64]。

2.2 评定粗饲料营养成分可利用率的方法

动物试验可以根据其消化吸收利用情况准确、直观的反映出粗饲料营养价值的高低。目前,体内法、半体内法和体外法已经得到国际和国内的广泛认同。

2.2.1 体内法 体内法又称活体法,是通过活体消化试验计算采食的粗饲料养分与瘤胃或十二指肠流出的食糜中未降解粗饲料养分之间的差值确定粗饲料养分瘤胃降解率的方法。主要通过测定反刍动物对粗饲料的采食量、消化率、降解率、利用率和发酵流通速率等指标,来评价粗饲料的营养价值^[65]。

体内法的缺点是:必须使用瘃管动物,维持饲养费用高,不便于大规模推广应用;动物个体间差异较大,且处于应激状态,测定结果不准确,可重复性差;采集瘤胃内容物和小肠食糜难度较大,且代表性不强;瘤胃内微生物合成所用的标记物没有统一的标准,因此,体内法适用性较小^[66]。但由于它接近动物正常的生理状态,测出的结果能反映出粗饲料在体内的实际降解率,所以仍然是其它评价方法参考和校正的首选标准。

2.2.2 半体内法 半体内法又称为瘤胃尼龙袋法,是将待测饲料按照一定要求粉碎后装入尼龙袋内,通过瘤胃瘃管置于瘤胃中进行培养,经过一定时间后取出残渣,分析得到该时间点的待测饲料的降解率,如果测定多个时间点的降解率,可得到动态降解率,并且能有效估测饲料粮的消失速度以及潜在的降解率,以评价粗饲料在瘤胃内的降解速度和程度。有研究表明,用尼龙袋法估测的粗饲料消化率值高于用酶解法的估测值^[67]。采用此法还可测定常用粗饲料的过瘤胃淀粉量和淀粉瘤胃降解率^[68-69]。采用瘤胃尼龙袋法测定常用粗饲料的瘤胃降解特性,证明不同种类的粗饲料在瘤胃内的降解和消化特性不同,以及不同粗饲料过瘤

胃蛋白为小肠提供的可消化吸收蛋白质的潜力也不同^[70-71]。

这种方法简单易行、成本低,具有较好的重复性,可直接应用于实际生产,逐渐取代体内法^[72]。但是它的缺点是:一次只能测定少量样本,并且至少需要3只瘘管动物来做平行试验;粗饲料样品大小是根据尼龙袋的孔眼确定的,没有经过咀嚼与反刍,样本消化初期会造成流失,后期会分解不完全,导致降解率估测值偏低;反刍动物的日粮结构、尼龙袋内粗饲料受瘤胃内容物或微生物污染的程度等都会影响到实验结果的精确性。

2.2.3 体外法 体外法是指借助生物学方法将粗饲料置于特定的培养基中,通过模拟瘤胃内环境测定粗饲料降解率的方法^[73]。主要包括模拟人工瘤胃法、体外产气法、持续发酵法、酶解法和粪液法、溶解度法等。

1)模拟人工瘤胃法(短期瘤胃法)。模拟人工瘤胃法是用试管或发酵罐来培养瘤胃液和饲料样品,模拟瘤胃消化评定粗饲料的可消化性,是目前应用比较广泛的方法。但是该法只能测得一个时间点的静态发酵情况,不能用于测定粗饲料的动态消化率,耗时长,步骤较多,且模拟的瘤胃环境易发生变化,同时它还需要体内法的结果数据进行校正,因此测定值之间存在较大误差。人工瘤胃发酵会受到不同种类矿物质元素、非蛋白氮(NPN)和纤维素酶等的影响^[74]。

2)体外产气法。体外产气法是根据粗饲料样品在体外用瘤胃液消化所产生气体(CO₂、CH₄)的比率来估计有机物消化率的方法,还可以用于预测单个饲料或者混合饲料的代谢能值。其原理:消化率不同的各种粗饲料,在相应的时间内(一般为24 h)产气量与产气率不同^[75]。根据所用器材不同将体外产气技术分为注射器式和压力传感器式等系统^[76]。

有研究表明,在体外产气法中粗饲料做底物时的标准用量为400 mg^[77]。闫贵龙等^[78]采用体外产气法测定了玉米秸秆不同部位的降解率,结果发现玉米秸秆各部位的营养价值存在明显差异。体外产气法还可对不同组合饲料的营养价值进行评定,通过评定6种常用粗饲料的营养价值比较了瘤胃尼龙袋法和体外产气法的优缺点,证明这两种方法都有各自的局限性^[79-80]。

体外产气法的优点:对动物依赖性小、自动化程度高、成本低、重复性好,越来越多的被用于粗饲料营养价值的评定^[81]。但样品种类数量、底物组成、微生物种群及其生长状况都会影响到产气量的多少,从而影响到体外产气法的可靠性及应用价值^[82]。因此,单凭产气量估测消化率是不太理想的,最好是将粗饲料底

物消失量、挥发性脂肪酸和微生物蛋白产量综合起来考虑。

3)体外持续发酵法(长期瘤胃法)。体外持续发酵法是在短期瘤胃法的基础上通过提升仪器的先进性从而进行持续培养的方法,这种方法可大规模评定粗饲料营养成分降解率,提高工作效率。目前较为成熟的装置有1977年Czerkawski和Breckenridge^[83]建立的Rusitec装置、1976年Hoover^[84]研制的CC装置、1995年王加启和冯仰廉^[85]研制的瘤胃持续动态模拟装置和1999年孟庆翔^[86]研发的双外流连续培养系统(CCS)。

持续发酵法能更准确的模拟瘤胃环境,可将人工瘤胃中产生的发酵产物持续排出,维持内环境稳定。同时,它还可以保持数周的稳定发酵,来估测粗饲料的动态降解率,这是体外持续发酵法的最大优点。利用体外持续发酵法测定粗饲料的降解率并与尼龙袋法做比较,证明这种方法具有良好的稳定性和准确性^[87-88]。安朋朋等^[89]通过对国内外几种典型的持续动态瘤胃发酵系统进行比较提出了新的合理的设计方法,以期体外持续发酵法可以更加完善的应用于粗饲料价值评定。

4)酶解法。酶解法就是在特定温度和pH条件下,用酶溶液或酶混合物代替瘤胃液在体外模拟反刍动物消化道酶谱和水解条件测定粗饲料消化率的方法。最早是由Tilley和Terry^[90]提出的瘤胃液—胃蛋白酶两步消化法,后经过其他研究者改善提出纤维素酶和胃蛋白酶复合法模拟瘤胃液消化粗饲料,证明酶解法具有一定的可靠性及可行性^[91-93]。之后,国春艳等^[94]通过大量试验建立了胃蛋白酶—胰蛋白酶两步酶解法评定蛋白质体外消化的最适条件,更加直观地证明了两步酶解法是实验室评价饲料降解特性的经济、可行的方法。Calsamiglia和Stern^[95]建立了综合瘤胃尼龙袋法和体外法的酶解“三步法”,该法通过尼龙袋法获得瘤胃残渣,将残渣用胃蛋白酶—胰酶制剂酶解,能更好的模拟反刍动物的生理条件。研究者们改进了“三步法”,降低了试验成本,且改进后的“三步法”比原始“三步法”测定瘤胃非降解蛋白质(RUP)小肠消化率效果要好^[96-98]。

酶解法的优点是不需要瘘管动物提取瘤胃液作为培养液,而是用酶来取代,成本低、耗时少、效率高;稳定性高,容易标准化;适用于比较不同种类粗饲料间的相对差异,估测它们的瘤胃降解率,实验室之间可比性强。缺点是,体外不可能完全模拟体内的消化过程,并且酶的活性敏感易受到各方面因素的影响,需要的重

复实验组较多;对粗饲料能量及消化率所作出的估测结果会因粗饲料品种、收获季节、加工方式等的不同而不同,因此其结果不能很真实地反映粗饲料在动物体内的消化情况^[99]。

5)粪液法。粪液法是用人工唾液稀释的牛粪液或羊粪液代替瘤胃液进行粗饲料的消化率测定的方法。苗志虹等^[100]采用羊粪液代替瘤胃液测定不同饲草的干物质消化率,并且进一步研究了样品和粪液的加入量问题。郝正里等^[101]用新鲜的羊粪液—胃蛋白酶消化法测定了 7 种牧草的干物质消化率,并比较了羊粪在不同条件下保存不同时间的效果。EL-Meadaway 等^[102]证明牛粪液也可用于测定牧草体外消化率。有研究表明,粪液法和尼龙袋法存在极显著相关性,同时也证明粪液法测定有机物和粗蛋白降解率具有可行性^[103]。粪液法主要用于评定粗饲料纤维品质的高低,可发酵指数(FFI)是评定粗饲料纤维品质的重要指标^[104],杨玉芬^[105]首先运用 FFI 指数通过粪液法对猪的 9 种常用粗饲料进行了评定。

粪液法的优点是操作简单、结果准确、重复性高,适用于大批量粗饲料的消化率测定,特别是对于放牧动物更具优势。但是粪液法的适用范围和方法的标准化仍需做进一步研究。

6)溶解度法。溶解度法是根据粗饲料在缓冲液中的溶解度评定粗饲料蛋白质降解率的方法。由于同一蛋白质在不同溶剂中溶解度不同,导致缓冲液标准较难确定,而且溶解度法不能很好地反映粗饲料蛋白质在瘤胃内的降解情况,使其适用性受到限制。除法国

采用溶解度法估测常用粗饲料蛋白质降解程度外,其他国家很少使用。国内仅周岩民等^[106]使用蛋白质溶解度法评价了几种油料饼粕的品质。

3 小结

在反刍动物生产中,粗饲料的品质、供给直接影响畜牧业生产效益。近年来,粗饲料营养价值的评定已经取得了巨大的进步,虽然目前这些评定体系已经可以实现较为准确的评定粗饲料的综合品质,尤其是 GI 体系已经能较全面地反映出粗饲料的营养价值,在国内得到了广泛的使用。但这些体系依然侧重于测定粗饲料自身的常规营养成分含量,指标比较单一,忽视了反刍动物的粗饲料转化率问题,对于粗饲料的科学搭配以及日粮的优化配合方面的研究仍然不足。将粗饲料营养价值评定体系和反刍动物的生理阶段与消化利用率有机结合起来,将更加精确地评价粗饲料营养价值的科学性、全面性、普遍性以及标准化,以便于粗饲料的实际生产应用。同时,随着科技的进步、各种评定方法的不断发展完善和评定装置的不断改进,应该根据具体情况综合选择适用的评定方法,使其能更系统、准确、简便、快捷地评价不同种类的粗饲料营养价值,提高畜牧业生产效益。综上所述,粗饲料营养价值的评定对粗饲料的开发利用以及反刍动物的营养作用都有着至关重要的作用,根据不同的科研需求,选择合适的评定指数和方法,通过完善的评定指数和科学的评定方法来评价粗饲料营养价值具有非常重要的意义。

参考文献 References:

- [1] 曹志军,史海涛,李德发,李胜利.中国反刍动物饲料营养价值评定研究进展.草业学报,2015,24(3):1-19.
Cao Z J, Shi H T, Li D F, Li S L. Progress on nutritional evaluation of ruminant feedstuff in China. Acta Prticulturae Sinica, 2015, 24(3): 1-19. (in Chinese)
- [2] 许冬梅.宁夏地区五种沙生灌木饲用价值的研究.银川:宁夏农学院硕士学位论文,1998.
Xu D M. Studies on feeding value for five psammophyte shrubs in Ningxia region. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia Agricultural College, 1998. (in Chinese)
- [3] Li H Y, Xu L, Liu W J, Fang M Q, Wang N. Assessment of the nutritive value of whole corn stover and its morphological fractions. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2014, 27(2): 194-200.
- [4] 陈谷,邵建辉,颜倬.苜蓿科学生产技术方案.北京:中国农业出版社,2011.
- [5] 杨加豹.动物饲料适口性与影响因素.饲料研究,2001(1):23-26.
- [6] 刘德军,陶学宗,高连兴.牛饲料用于玉米秸秆营养成分分布规律及适口性研究.沈阳农业大学学报,2009,40(6):740-743.
Liu D J, Tao X Z, Gao L X. Dry corn stalk nutrient distribution and palatability selection. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(6): 740-743. (in Chinese)
- [7] 魏鹏,安沙舟,孙宗玖,李海,邓海峰,张伟功,梁伊,卡斯达尔·努尔旦别克.放牧条件下乳用伊犁马采食量的初步研究.草业科学,2015,32(1):114-118.

- Wei P, An S Z, Sun Z J, Li H, Deng H F, Zhang W G, Liang Y, Kasidaer • Nurdanbieke. Preliminary study of dairy Yili horse feed intake under grazing conditions. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 114-118. (in Chinese)
- [8] 窦文洁, 谭秀文, 杨在宾, 宋恩亮, 刘桂芬, 万发春. 牛粗饲料品质评价指标研究进展. *中国草食动物*, 2011, 31(1): 61-64.
Dou W J, Tan X W, Yang Z B, Song E L, Liu G F, Wan F C. Progress in the evaluation of coarse fodder quality index for cattle. *China Herbivores*, 2011, 31(1): 61-64. (in Chinese)
- [9] 朱兴运. 绵羊采食量和消化率测定方法简况(综述). *草业与畜牧*, 1983(1): 63-71.
- [10] 卢德勋. 乳牛营养工程技术及其应用. *内蒙古畜牧科学*, 2003(1): 5-12.
- [11] 李然, 孙满吉, 刘彩娟, 张永根. 不同粗饲料分级指数的粗饲料对奶山羊血液指标及产奶性能的影响. *中国饲料*, 2010(15): 8-12.
- [12] 龙瑞军, 董世魁, 王元素, 郭铁瑞, Pagella J. 反刍动物采食量的概念与研究方法. *草业学报*, 2003, 12(5): 8-17.
Long R J, Dong S K, Wang Y S, Guo Y R, Pagella J. Concepts and investigative methods of ruminant forage intake. *Acta Pratacultural Sinica*, 2003, 12(5): 8-17. (in Chinese)
- [13] 张吉鹏. 反刍家畜粗饲料品质评定的指标及其应用比较. *中国畜牧杂志*, 2006, 42(5): 47-50.
Zhang J K. Quality evaluation parameters of ruminant coarse fodder and their application comparison. *Chinese Journal of Animal Science*, 2006, 42(5): 47-50. (in Chinese)
- [14] 张吉鹏, 张震宇, 李龙瑞. 反刍动物粗饲料高效利用技术. *饲料与畜牧: 新饲料*, 2015(2): 41-45.
- [15] 王加启. 反刍动物营养学研究方法. 北京: 现代教育出版社, 2011.
Wang J Q. *Methods in Ruminant Nutrition Research*. Beijing: Modern Education Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 张永根, 李春雷, 王艳菲, 李洋, 李欣欣, 潘春方, 刘凯玉, 姜丹. 奶牛常用饲料干物质和蛋白质瘤胃降解特性及小肠消化率研究. *东北农业大学学报*, 2013, 44(9): 1-6.
Zhang Y G, Li C L, Wang Y F, Li Y, Li X X, Pan C F, Liu K Y, Jiang D. Degradation characteristics of crude protein and dry matter in the rumen and small intestinal digestibility of commonly used feed stuff for dairy cows. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(9): 1-6. (in Chinese)
- [17] 庄益芬, 安宅一夫, 张文昌. 低水分青贮对黑小麦草细胞壁成分和体外干物质消化率的影响. *甘肃农业大学学报*, 2006, 41(6): 94-97.
Zhuang Y F, Ataku K, Zhang W C. Effects of low moisture ensiling on cell wall composition and in vitro dry matter digestibility of triticale. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2006, 41(6): 94-97. (in Chinese)
- [18] 张学峰. 三种处理方式玉米秸饲料营养价值评定. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2004.
Zhang X F. Study on nutritive value of maize stalk treated by three different processing techniques. Master Thesis. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [19] 袁翠林, 于子洋, 王利华. 粗饲料营养价值评定的研究进展. *饲料博览*, 2015(5): 27-30.
Yuan C L, Yu Z Y, Wang L H. Research progress of nutritive value assessment of roughages. *Feed Review*, 2015(5): 27-30. (in Chinese)
- [20] 冯秉福, 赵新全, 徐世晓, 赵亮, 曹俊虎. 青海省贵南地区藏羊常用饲料瘤胃降解率测定. *黑龙江畜牧兽医*, 2014(1): 89-90.
Feng B F, Zhao X Q, Xu S X, Zhao L, Cao J H. Determination of ruminal degradation rates of common feedstuffs for Tibetan sheep in Guinan areas of Qinghai. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(1): 89-90. (in Chinese)
- [21] 田雨佳. 不同刈割茬次和物候期的苜蓿对奶牛营养价值的比较研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2011.
Tian Y J. Comparative study on the nutritional value of different stubble and different phenonphase of alfalfa in dairy cows. Master Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [22] 王立明. 奶牛常用饲料瘤胃降解规律和小肠消化率的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2012.
Wang L M. Study on rumen dynamic degradability and small intestinal digestibility of common feedstuffs in dairy cows. Master Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [23] 李胜利, 史海涛, 曹志军, 王雅晶. 粗饲料科学利用及评价技术. *动物营养学报*, 2014, 26(10): 3149-3158.
Li S L, Shi H T, Cao Z J, Wang Y J. Scientific utilization and evaluation technology of forage. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(10): 3149-3158. (in Chinese)
- [24] 朱丹, 张佩华, 赵勐, 刘士杰, 张开展, William P W, 卜登攀. 不同 NDF 与淀粉比例饲粮在奶牛瘤胃的降解特性. *草业科学*, 2015, 32(12): 2122-2130.
Zhu D, Zhang P H, Zhao M, Liu S J, Zhang K Z, William P W, Bu D P. Rumen degradation characteristics of different neutral detergent fiber/starch ratio diets in dairy cattle. *Pratacultural Science*, 2015, 32(12): 2122-2130. (in Chinese)
- [25] 陈代文. *动物营养与饲科学*. 第二版. 北京: 中国农业出版社, 2005.

- Chen D W. Animal Nutrition and Feed Science. 2nd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)
- [26] Undersander D J, Howard W T, Shaver R D. Milk per acre spreadsheet for combining yield and quality into a single term. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(2): 231-235.
- [27] Behling A. Milk2000 Gets A Makeover. *Hay & Forage Grower*, 2006, 21(6): 38.
- [28] 张吉鹏. 粗饲料品质评定指数——产奶二千. *江西饲料*, 2005(6): 10-15.
- [29] Rohweder D A, Barnes R F, Jorgensen N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. *Journal of Animalence*, 1978, 47(3): 747-759.
- [30] 张吉鹏, 卢德勋, 刘建新, 包赛娜, 邹庆华, 刘庆华. 粗饲料品质评定指数的研究现状及其进展. *草业科学*, 2004, 21(9): 55-61.
Zhang J K, Lu D X, Liu J X, Bao S N, Zou Q H, Liu Q H. The present research situation and progress of crude fodder quality evaluation index. *Pratacultural Science*, 2004, 21(9): 55-61. (in Chinese)
- [31] 张吉鹏, 陈开文, 谢金防, 肖海红, 卢德勋. 分级指数与相对值在奶牛用粗饲料品质评定上的比较研究. *上海: 第三届中国奶牛发展大会*, 2008: 100-104.
- [32] Moore J E, Kunkle W W, Bjorndal K A. Extension forage testing program utilizing near infrared reflectance spectroscopy. *Houston: American Forage and Grassland Conference*, 1984: 41-52.
- [33] 张吉鹏. 粗饲料品质评定指数研究进展. *中国饲料*, 2003(16): 9-11.
- [34] 张吉鹏. 粗饲料品质评定指数的比较研究. *饲料研究*, 2003(9): 17-20.
- [35] Moore J E, Undersander D J. Relative forage quality: An alternative to relative feed value and quality index. *Florida: Proceedings 13th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium*, 2002: 16-32.
- [36] 张吉鹏. 粗饲料营养价值评定的研究进展. *广东畜牧兽医科技*, 2003, 28(2): 15-19.
- [37] 李志强. 燕麦干草质量评价. *中国奶牛*, 2013(19): 1-3.
- [38] 卢德勋. 实施创新驱动学科发展战略, 推进饲料科学理论和技术体系的创新和发展. *饲料工业*, 2015, 36(1): 1-13.
Lu D X. To push on innovation and development of feed science and technology system under carrying out innovation driven discipline development strategy. *Feed Industry*, 2015, 36(1): 1-13. (in Chinese)
- [39] Huang Q, Piao X S, Ren P, Li D F. Prediction of digestible and metabolizable energy content and standardized ileal amino acid digestibility in wheat shorts and red dog for growing pigs. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2012, 25(12): 1748-1758.
- [40] 王旭. 利用 GI 技术对粗饲料进行科学搭配及绵羊日粮配方系统优化技术的研究. *呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文*, 2003.
Wang X. A technique for formulation of mixed forages by grading index and systematic optimization of sheep ration based on the technique. *Master Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University*, 2003. (in Chinese)
- [41] 成立新, 杨瑞杰, 格根图, 孙林, 付俊平, 贾玉山. 5 种饲草的分级指数测定与评价. *草业科学*, 2013, 30(8): 1284-1288.
Cheng L X, Yang R J, Gegentu, Sun L, Fu J P, Jia Y S. Measurement and evaluation of grading indexes (GI) of five forages. *Pratacultural Science*, 2013, 30(8): 1284-1288. (in Chinese)
- [42] 胡红莲, 卢媛. 粗饲料分级指数技术——粗饲料品质评定的新进展. *饲料工业*, 2010, 32(21): 31-35.
- [43] 红敏, 高民, 卢德勋, 胡红莲. 粗饲料品质评定指数新一代分级指数的建立及与分级指数(GI₂₀₀₁)和饲料相对值(RFV)的比较研究. *畜牧与饲料科学*, 2011, 32(9-10): 143-146.
Hong M, Gao M, Lu D X, Hu H L. New forage grading index: Its establishment and comparative study on the evaluation of forage quality with the grading index-2001(GI₂₀₀₁) and relative feed value(RFV). *Animal Husbandry and Feed Science*, 2011, 32(9-10): 143-146. (in Chinese)
- [44] 王艳菲, 李春雷, 潘春方, 李欣新, 李洋, 刘凯玉, 王丽娟, 张永根. 粗饲料分级指数技术(2009)在粗饲料品质评定中的研究及应用. *中国饲料*, 2013(11): 19-22.
- [45] 其其格, 金曙光, 刘锋. 内蒙古地区 12 种牧草的粗饲料分级指数及粗饲料相对值的测定及比较. *内蒙古农业大学学报*, 2008, 29(3): 19-22.
Qiqige, Jin S G, Liu F. GI and RFV determination and comparison of 12 inds of pasture grass in Inner Mongolia. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2008, 29(3): 19-22. (in Chinese)
- [46] 王法明, 张爱忠, 姜宁, 赵芳芳, 卜登攀, 熊本海. 黑龙江省反刍动物常用粗饲料分级指数及饲料相对值的测定与比较研究. *中国畜牧杂志*, 2014, 50(17): 33-39.
Wang F M, Zhang A Z, Jiang N, Zhao F F, Bu D P, Xiong B H. GI and RFV determination and comparison study of common ruminant forage in Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, 50(17): 33-39. (in Chinese)

- [47] 秦旭峰,贾金凤,李亚奎.张家口地区肉羊常用粗饲料分级指数的测定.黑龙江畜牧兽医,2015,3(5):122-124.
- [48] 刘洁,刁其玉.反刍动物饲料营养价值评定方法的比较.银川:中国畜牧兽医学会养羊学分会全国养羊生产与学术研讨会,2010;18-22.
- [49] Morrison F B, Feeds and Feeding. Clinton IA: Morison Publishing Co., 1956.
- [50] 杨胜.饲料分析及饲料质量检测技术.北京:中国农业大学出版社,1993.
- [51] van Soest P J. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. Journal of Animalence, 1966, 26(1): 119-128.
- [52] 万娟娟,于磊,鲁为华,杨国林,张前兵,杨洁晶.新疆沙尔套山草地优势禾本科牧草营养价值综合评定.草业科学,2014, 31(11): 2141-2147.
- Wan J J, Yu L, Lu W H, Yang G L, Zhang Q B, Yang J J. Comprehensive evaluation of nutritive value of dominant gramineous grass in Shaertao Mountain, Zhaosu County in Xinjiang. Pratacultural Science, 2014, 31(11): 2141-2147. (in Chinese)
- [53] 陈艳,王之盛,张晓明,吴发莉,邹华围.常用粗饲料营养成分和饲用价值分析.草业学报,2015,24(5): 117-125.
- Chen Y, Wang Z S, Zhang X M, Wu F L, Zou H W. Analysis of the nutritional components and feeding values of commonly used roughages. Acta Pratacultural Sinica, 2015, 24(5): 117-125. (in Chinese)
- [54] 李威,高民,卢德勋,刘敏,张兴夫,樊金富. CNCPS 与 NRC 在反刍动物方面的分析比较及其研究进展.饲料工业,2008, 29(13): 45-48.
- [55] 曲永利,吴健豪,李铁.应用康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系评定东北农区奶牛饲料营养价值.动物营养学报,2010,22(1): 201-206.
- Qu Y L, Wu J H, Li T. Use of cornell net carbohydrate and protein system for evaluation of nutrient value of feeds to dairy cattle in the northeast agricultural region of China. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2010, 22(1): 201-206. (in Chinese)
- [56] 徐元君.新疆地区 15 种饲料的反刍动物营养价值评价.兰州:甘肃农业大学硕士学位论文,2014.
- Xu Y J. Evaluation of the nutritional value of 15 ruminant animal feed in Xinjiang province. Master Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [57] 陶春卫,张爱忠,姜宁,熊本海.用 CNCPS 评定反刍动物几种常用粗饲料营养价值的研究.中国草食动物,2009,29(3): 14-18.
- Tao C W, Zhang A Z, Jiang N, Xiong B H. Using CNCPS to evaluate the nutritive value of some roughages for ruminant. China Herbivores Science, 2009, 29(3): 14-18. (in Chinese)
- [58] 陶春卫.反刍动物常用粗饲料营养价值评定及其有效能值预测模型的建立.大庆:黑龙江八一农垦大学硕士学位论文,2009.
- Tao C W. Study on nutritional value in common roughage for ruminants and establishment of prediction model of its bioavailable energy. Master Thesis. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [59] 解祥学,孟庆翔,代俊芳,任丽萍.康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系在中国的研究进展及发展趋势.中国畜牧兽医,2010, 37(5): 17-20.
- Xie X X, Meng Q X, Dai J F, Ren L P. Research progress and development trend of cornell net carbohydrate and protein system in China. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2010, 37(5): 17-20. (in Chinese)
- [60] Shenk J S, Barton F E, Marten G C. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): Analysis of forage quality. Crop Science, 1984, 24(6): 1179-1182.
- [61] 年芳.近红外光谱技术及其在饲料分析中的应用.甘肃农业科技,2007(10): 47-49.
- [62] 丁丽敏,计成,戎易.近红外(NIRS)和粗蛋白预测氨基酸含量的精度比较研究.饲料工业,2002,23(4): 15-18.
- [63] 白琪林,陈绍江,董晓玲,孟庆祥,严衍禄,戴景瑞.近红外漫反射光谱法测定玉米秸秆体外干物质消化率.光谱学与光谱分析, 2006, 26(2): 271-274.
- Bai Q L, Chen S H, Dong X L, Meng Q X, Yan Y L, Dai J R. Prediction of IVDMD with near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize stalk. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(2): 271-274. (in Chinese)
- [64] 穆怀彬.近红外光谱技术在玉米营养品质和青贮玉米品质评定中的研究.呼和浩特:内蒙古农业大学博士学位论文,2008.
- Mu H B. Applications of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in the analysis of maize nutritional qualities and silage qualities. PhD Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [65] 伊霞,仵书雷,张遂林,李艳琴.反刍动物粗饲料营养价值评定方法研究进展.冀农杯 2008“绿色奥运”科技论文集.保定:河北农业大学,2008.
- [66] 张永根.粗饲料营养价值评定研究进展.饲料工业,2012,33(13): 1-6.
- [67] Dewhurst R J, Hepper D, Ajf W. Comparison of in sacco and in vitro techniques for estimating the rate and extent of rumen

- fermentation of a range of dietary ingredients. *Animal Feed Science & Technology*, 1995, 51(3): 211-229.
- [68] 任莹, 赵胜军, 卢德勋, 李宏. 瘤胃尼龙袋法测定常用饲料过瘤胃淀粉量及淀粉瘤胃降解率. *动物营养学报*, 2004, 16(1): 42-46.
Ren Y, Zhao S J, Lu D X, Li H. Measurement of amount of rume bypass starch and ruminal starch degradability in some feed-stuffs by a nylon bag technique. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2004, 16(1): 42-46. (in Chinese)
- [69] 霍小凯, 王加启, 卜登攀, 王建平, 郭同军, 李喜艳. 瘤胃尼龙袋法测定 10 种饲料过瘤胃淀粉量和淀粉瘤胃降解率. *中国饲料*, 2009(23): 13-15.
- [70] 么学博, 杨红建, 谢春元, 岳群, 王加启. 反刍家畜常用饲料蛋白质和氨基酸瘤胃降解特性和小肠消化率评定研究. *动物营养学报*, 2007, 19(3): 225-231.
Yao X B, Yang H J, Xie C Y, Yue Q, Wang J Q. In situ degradability characteristics of crude protein and amino acids in the rumen and small intestinal digestibility using the mobile nylon bag with ruminant feedstuffs. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2007, 19(3): 225-231. (in Chinese)
- [71] 周荣, 王加启, 张养东, 潘发明, 卜登攀, 魏宏阳, 周凌云. 移动尼龙袋法对常用饲料蛋白质小肠消化率的研究. *东北农业大学学报*, 2010, 41(1): 81-85.
Zhou R, Wang J Q, Zhang Y D, Pan F M, Bu D P, Wei H Y, Zhou L Y. Intestinal digestibility of crude protein and dry matters with ruminant feedstuffs using the mobile nylon bag. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(1): 81-85. (in Chinese)
- [72] 刘丽, 刘发孝. 浅析粗饲料营养价值的评定方法. *山东畜牧兽医*, 2008(增刊): 125-128.
- [73] 杨淑芬, 方热军. 体外法评定反刍动物饲料营养价值的研究进展. *饲料广角*, 2015, 24(3): 36-38.
- [74] 王宁娟. 人工瘤胃法研究矿物质元素及非蛋白氮对瘤胃发酵的影响. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2003.
Wang N J. Effects of mineral and NPN on rumen fermentation using artificial rumen. Master Thesis. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003. (in Chinese)
- [75] 孙菲菲, 刘桂芬, 孙国强, 万发春. 体外法评定反刍动物饲料营养价值的研究进展. *饲料广角*, 2011, 20(13): 39-41.
- [76] 茅慧玲, 段智勇, 刘建新. 体外法在反刍动物饲料营养价值评定上的应用. *中国饲料*, 2006(15): 14-16.
- [77] 熊本海, 卢德勋, 许冬梅. 利用体外法研究粗饲料的产气曲线及 5 种养分的发酵系数. *畜牧兽医学报*, 2001, 32(2): 113-121.
Xiong B H, Lu D X, Xu D M. In vitro study on gas production curves and ingredients fermentating coefficients of the feedstuff. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2001, 32(2): 113-121. (in Chinese)
- [78] 闫贵龙, 曹春梅, 鲁琳, 孟庆翔. 玉米秸秆不同部位主要化学成分和活体外消化率比较. *中国农业大学学报*, 2006, 11(3): 70-74.
Yan G L, Cao C M, Lu L, Meng Q X. Comparison of main chemical composition and in vitro digestibility in various sections of corn stalks. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(3): 70-74. (in Chinese)
- [79] 张吉鹏, 刘建新. 用压力传感器产气技术评定玉米秸秆添加苜蓿的组合效应. *中国畜牧杂志*, 2007, 43(21): 40-43.
Zhang J K, Liu J X. A semi-automated in vitro gas production technique using a pressure transducer to evaluate interactions between untreated corn stovers and alfalfa hay. *Chinese Journal of Animal Science*, 2007, 43(21): 40-43. (in Chinese)
- [80] 史良, 刁其玉. 体外产气法评定不同来源中性洗涤纤维与粗蛋白质间组合效应. *中国饲料*, 2008(14): 18-21.
- [81] Getachew G, Blümmel M, Makkar H P S, Becker K. In vitro gas measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds: A review. *Animal Feed Science & Technology*, 1998, 72(S3-4): 261-281.
- [82] 唐一国, 龙瑞军, 补小艳, 李季容. 反刍家畜饲料营养价值体外法评定研究进展. *中国奶牛*, 2002(5): 31-33.
- [83] Czerkawski J W, Breckenridge G. Design and development of a long-term rumen simulation technique(RUSITEC). *British Journal of Nutrition*, 1977, 38(3): 371-384.
- [84] Hoover W H, Crooker B A, Sniffen C J. Effects of differential solid-liquid removal rates on protozoa numbers in continous cultures of rumen contents. *Journal of Animal Science*, 1976, 43(2): 528-534.
- [85] 王加启, 冯仰廉. 瘤胃持续模拟技术的研究. *动物营养学报*, 1995, 7(1): 29-35.
Wang J Q, Feng Y L. Study on rumen simulation technique. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 1995, 7(1): 29-35. (in Chinese)
- [86] 孟庆翔. 双外流连续培养系统用于瘤胃发酵的体外模拟: 技术综述. *动物营养学报*, 1999, 11(S1): 45-50.
Meng Q X. Use of a dual-flow continuous culture system for simulating ruminal fermentation in vitro: A technical review. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 1999, 11(S1): 45-50. (in Chinese)
- [87] 任鹏, 冯仰廉. 体外持续发酵法评定反刍动物饲料干物质和蛋白质降解率的研究. *动物营养学报*, 1989, 1(1): 16-17.
Ren P, Feng Y L. Studies on long-term rumen simulation technique for estimating the dry matter and protein degradability of feedstuffs. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 1989, 1(1): 16-17. (in Chinese)
- [88] 黄永民, 冯仰婕, 鲍景丹. 体外发酵法测定过瘤胃氨基酸瘤胃降解率的研究. *饲料研究*, 1998(12): 4-5.

- [89] 安朋朋,周凌云,李发弟,姜雅慧,王典,沈维军.持续动态瘤胃发酵系统的结构功能比较研究进展.畜牧兽医学报,2012,43(7):1009-1014.
An P P, Zhou L Y, Li F D, Jiang Y H, Wang D, Shen W J. Comparison review of the structure and function of continuous culture systems of rumen mixed microorganism. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2012, 43(7): 1009-1014. (in Chinese)
- [90] Tilley J M A, Terry R A. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. Grass & Forage Science, 1963, 18(2): 104-111.
- [91] Krishnamoorthy U, Sniffen C J, Stern M D, van Soest P J. Evaluation of a mathematical model of rumen digestion and an in vitro simulation of rumen proteolysis to estimate the rumen-undegraded nitrogen content of feedstuffs. British Journal of Nutrition, 1983, 50(3): 555-568.
- [92] 熊文中,冯仰廉.酶解法评定反刍动物饲料干物质和蛋白质降解率的研究.中国畜牧杂志,1989,25(4):5-9.
Xiong W Z, Feng Y L. Studies on the enzymatic method for estimating the dry matter and protein degradability of feedstuffs. Chinese Journal of Animal Science, 1989, 25(4): 5-9. (in Chinese)
- [93] 马丽娟,杨沛霖,金顺丹,李忠宽,高秀华.酶水解法评定鹿饲料蛋白质、有机物降解率的研究.动物营养学报,1996,8(2):48-55.
Ma L J, Yang P L, Jin S D, Li Z K, Gao X H. Studies on protein and organic matter degradability of feeds for deers with zymolytic method. Chinese Journal of Animal Nutrition, 1996, 8(2): 48-55. (in Chinese)
- [94] 国春艳,刁其玉,杨威.两步酶解法评定豆粕粗蛋白质降解率的研究.黑龙江畜牧兽医,2007(1):61-62.
- [95] Calsamiglia S, Stern M D. A three-step in vitro procedure for estimating intestinal digestion of protein in ruminants. Journal of Animal Science, 1995, 73(5): 1459-1465.
- [96] Gargallo S, Calsamiglia S, Ferret A. Technical note: A modified three-step in vitro procedure to determine intestinal digestion of proteins. Journal of Animal Science, 2006, 84(8): 2163-2167.
- [97] 王燕,辛杭书,杨方,陈常栋,张微微,李敏,夏科,张永根.不同方法测定瘤胃非降解蛋白质小肠消化率及相关性分析.动物营养学报,2012,24(7):1264-1273.
Wang Y, Xin H S, Yang F, Chen C D, Zhang W W, Li M, Xia K, Zhang Y G. Small intestinal digestibility of rumen undegraded protein measured by different methods and correlation analysis. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2012, 24(7): 1264-1273. (in Chinese)
- [98] 杨伟超,代述军,王洪涛,蔡唯实,姜国良,高巍.改良体外三步法评定棉粕与豆粕 RUP 小肠消化率研究.长沙:中国畜牧兽医学动物营养分会第十一次全国动物营养学术研讨会论文集.2012.
- [99] 李树聪,王加启,唐文花.反刍动物饲料蛋白质瘤胃降解率的测定方法综述.草食家畜,2001(1):32-36.
- [100] 苗志虹,汝应俊,吴天星,张文远,杨诗兴.用粪液代替瘤胃液测定饲料干物质的体外消化率.甘肃畜牧兽医,1990(6):16-17.
- [101] 郝正里,马海生,高凯,王彦文.用羊粪液测定牧草干物质的体外消化率.甘肃畜牧兽医,1994(2):6-8.
- [102] EL-Meaway A, Mir Z, Mir P S, Zaman M S, Yanke L J. Relative efficacy of inocula from rumen fluid or faecal solution for determining in vitro digestibility and gas production. Canadian Journal of Animal Science, 1998, 78(4): 673-679.
- [103] 张永根,王志博,宋平,李志明.用粪液法与尼龙袋法测定牧草有机物和蛋白质降解率的比较研究.东北农业大学学报,2005,36(6):750-755.
Zhang Y G, Wang Z B, Song P, Li Z M. Comparative study on nylon bag technique and faecal fluid method for determining organic matter and protein digestion. Journal of Northeast Agricultural University, 2005, 36(6): 750-755. (in Chinese)
- [104] 张吉鹏,卢德勋,李龙瑞,邹庆华,胡明,牛文艺,任晓萍,娜仁.绵羊常用粗饲料纤维品质的评定及绵羊采食量的模型化研究.黑龙江畜牧兽医,2004(3):8-10.
Zhang J Q, Lu D X, Li L R, Zou Q H, Hu M, Niu W Y, Ren X P, Na R. Evaluation of forage fibre quality and modeling of sheep DMI. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2004(3): 8-10. (in Chinese)
- [105] 杨玉芬.日粮纤维对于猪不同生长阶段消化生理和生产性能的研究.呼和浩特:内蒙古农业大学博士学位论文,2001.
Yang Y F. Study on effect of dietary fiber on digestive physiology and performance of pigs in different growth period. PhD Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [106] 周岩民,吴迪,刘峰,程高翔.蛋白质溶解度法评价几种主要油料饼粕品质的研究.粮食与饲料工业,1996(6):36-39.
Zhou Y M, Wu D, Liu F, Cheng G X. Study of the quality of several main oilseed cakes or meals with protein solubility method. Cereal & Feed Industry, 1996(6): 36-39. (in Chinese)

(责任编辑 王芳)