

肉羊精料可代谢蛋白质预测模型的建立

富丽霞^{1,2}, 马涛¹, 刁其玉¹, 成述儒², 宋雅喆¹, 孙卓琳¹

(¹中国农业科学院饲料研究所/农业部饲料生物技术重点实验室, 北京 100081; ²甘肃农业大学动物科学技术学院, 兰州 730070)

摘要:【目的】在通过概略养分或可消化养分建立肉用绵羊常用精饲料可代谢蛋白质(metabolic protein, MP)的预测模型, 为动物日粮的科学配置提供依据。【方法】试验选用 14 月龄, 平均体重为 (49.27 ± 3.12) kg 的安装有永久性瘤胃瘘管的杜寒杂交 1 代肉用羯羊 6 只, 采用尼龙袋法和改进三步体外法测定 10 种精饲料的瘤胃有效降解率、瘤胃非降解蛋白质(undegraded dietary protein, UDP)及 UDP 小肠消化率; 另外选用 10 只体况健康、平均体重 (47.43 ± 4.41) kg 的杜寒杂交成年公羊分 11 期进行消化代谢试验, 设 11 个处理组, 其中 1 个基础饲粮组和 10 个试验饲粮组, 试验组饲粮分别由高粱、玉米、大麦、小麦、燕麦、菜籽粕、花生粕、棉籽粕、豆粕及玉米酒糟(distillers dried grains with solubles, DDGS)等替换基础饲粮中羊草、玉米和豆粕, 每个处理 10 个重复, 每个重复 1 只羊, 每期饲喂 20 d, 其中预试期 15 d, 正试期 5 d。试验羊提前打好耳号, 使用伊维菌素进行驱虫, 单栏饲养。由于各组饲粮营养成分存在差异造成采食量不同, 在预试期观察并确定最低组的采食量作为限量, 每天饲喂两次, 分别于 8:00、16:30 饲喂, 每次饲喂 600 g, 自由饮水。采用全收粪尿法测定养分表观消化率和尿嘌呤衍生物法(purine derivative, PD)测定微生物合成蛋白质(microbial synthetic protein, MCP), 通过养分含量或可消化养分建立 MP 的预测模型。试验数据采用 SAS 9.1 中的 NLIN 程序计算 a、b、c 值和直线回归与多元回归程序分析建立 MP 估测模型, 单因素方差分析(one-way ANOVA, LSD)进行显著性检验。【结果】饲料的粗蛋白质(CP)瘤胃降解率和 UDP 小肠消化率均因饲料种类不同而异, 高蛋白饲料的 CP 瘤胃降解率和 UDP 小肠消化率较高, 10 种精饲料的 CP 瘤胃有效降解率的范围在 43.71%—60.87%之间, UDP 小肠消化率的范围在 80.10%—92.86%之间, 其中燕麦饲料的瘤胃有效降解率显著高于其他 9 种饲料($P < 0.001$), 而其 UDP 小肠消化率显著低于其他 9 种饲料($P < 0.001$); 饲粮组成不同, 各营养物质的表观消化率不同; 瘤胃可降解蛋白质与瘤胃非降解蛋白质比例的变化, 不会对全消化道养分的表观消化率产生显著影响; 本研究中 10 种饲料的 MP 与 DP 的比例范围在 50.96%—62.33%之间, 基于饲粮 CP(%)含量预测可消化蛋白质(DP, %)的模型是 $DP = 0.895 \times CP - 2.663$ ($R^2 = 0.994$, $n = 10$, $P < 0.001$); 基于养分含量(%)和可消化养分(%)建立的 MP ($g \cdot kg^{-1}$ DM)预测模型分别是: $MP = 5.323 \times CP - 14.374$ ($R^2 = 0.994$, $n = 10$, $P < 0.001$)和 $MP = 5.899 \times DP + 2.077$ ($R^2 = 0.984$, $n = 10$, $P < 0.001$)。【结论】饲粮中的粗蛋白质含量与可消化蛋白质存在强相关性; 饲粮中概略养分含量和可消化养分与 MP 存在相关性, 可以通过饲粮概略养分含量或可消化养分比较准确地估测精饲料的 MP 值。

关键词: 肉用绵羊; 精饲料; 微生物合成蛋白质; 小肠消化率; 可代谢蛋白质; 预测模型

Establishment of a Prediction Model of Metabolizable Protein of Concentrate for Mutton Sheep

FU LiXia^{1,2}, MA Tao¹, DIAO QiYu¹, CHENG ShuRu², SONG YaZhe¹, SUN ZhuoLin¹

(¹Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Feed Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ²College of Animal Science and Technology, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070)

收稿日期: 2018-2-12; 接受日期: 2018-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0109000)、国家肉羊产业技术体系建设专项资金(CARS-38)

联系方式: 富丽霞, Tel: 15711427055; E-mail: fulixia0202@126.com。通信作者刁其玉, Tel: 13910616460; E-mail: diaoqiuyu@caas.cn

Abstract: 【Objective】The aim of this study was to establish a predictive model of metabolizable protein (MP) of concentrates, which is commonly used in feedstuffs of sheep by nutrient or nutrient digestibility. **【Method】**Six 14-month-old Dorper (♂) × thin-tailed Han sheep (♀) sheep with an average body weight of (49.27 ± 3.12) kg fitted with a permanent rumen fistula were selected and used in testing effective degradation rate, rumen undegraded dietary protein (UDP) and intestinal digestibility of UDP by nylon bag method and three-step modified *in vitro* method. Ten healthy Dorper × thin-tailed Han ram with an average body weight of (47.43 ± 4.41) kg were selected and used in 11 treatment groups including one basic diet group and 10 experimental groups (The Chinese wildrye hay, corn and soybean meal of basic diet were replaced by sorghum, corn, barley, wheat, oat, rapeseed peanut, cottonseed, soybean and DDGS.), respectively. Each period lasted for 20 d (15 d for adaptation and 5 d for trial period). The experimental sheep were prefixed with ear numbers, dewormed with ivermectin, and feed a single column. Due to the differences in the nutrient composition of each group of feeding foods, the amount of feeding in the lowest group was observed and determined during the adaptation as the limit of feeding, fed twice a day, at 8:00 and 16:30, respectively. Feed 600 g, free drinking water. Each ram is a replicate and all rams were used to determine the apparent digestibility of nutrients and microbial synthetic protein (MCP) using the urinary purine derivative method. The MP predictive model was established using proximal analysis of nutrient contents or nutrient digestibility. Using NLIN program in SAS 9.1 to calculate a, b, c values and linear regression and multivariate regression program analysis, MP estimation model was established, and the single factor variance analysis(one-way ANOVA, LSD) was significantly tested. **【Result】**The results showed that the rumen digestibility and digestion rate of CP in different concentrates were different, and CP degradability and intestinal digestibility of UDP of high protein diet were higher. The effective degradation rate of CP rumen in 10 kinds of feed ranged from 43.71% to 60.87%, and intestinal digestibility of UDP ranged from 80.10% to 92.86%. The effective degradation rate of rumen in oat feed was significantly higher than that of other feeds ($P < 0.001$), while intestinal digestibility of UDP was significantly lower than that of other feeds ($P < 0.001$). The diets had different composition and apparent digestibility of different nutrients. The digestion and absorption sites of dietary protein did not affect the apparent digestibility of nutrients. The ratio of MP to DP of 10 feeds in this study ranged from 50.96% to 62.33%, The digestible protein (DP, %) prediction model established by dietary CP (%) content was: $DP = 0.895 \times CP - 2.663$ ($R^2 = 0.994$, $n = 10$, $P < 0.001$); The MP ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DM) prediction model established by nutrient contents (%) and apparent nutrient digestibility (%) were: $MP = 5.323 \times CP - 14.374$ ($R^2 = 0.994$, $n = 10$, $P < 0.001$) and $MP = 5.899 \times DP + 2.077$ ($R^2 = 0.984$, $n = 10$, $P < 0.001$). **【Conclusion】**Digestible protein had a strong relationship with crude protein in diet. The nutrient content and nutrient digestibility in diets were correlated with the presence of MP, and the MP values of concentrate feed could be estimated more accurately by the nutrient and nutrient digestibility in diets.

Key words: mutton sheep; concentrate; microbial synthetic protein; small intestinal digestibility; metabolizable protein; prediction model

0 引言

【研究意义】反刍动物由于瘤胃特殊的消化生理结构, 单从饲料概略养分含量或可消化养分很难准确地评价饲料的真实饲用价值, 必须结合营养物质在体内的一系列生化转化过程才能客观完整地反映对饲料的利用效果。可代谢蛋白质(MP)是目前评价反刍动物利用饲料蛋白质最准确的指标, 该指标不仅考虑了动物本身对饲料蛋白质的需要, 还将瘤胃微生物对饲料蛋白质的利用情况考虑在内, 比较充分完整地体现了反刍动物利用蛋白质的特殊性。准确估测饲料中的MP, 可以简捷快速地评价饲料的营养价值, 为饲料间配合效果提供科学依据。**【前人研究进展】**MP的准确测定比较复杂, 一方面要测定瘤胃微生物合成蛋白质(MCP), 还要明确原料瘤胃非降解蛋白质(UDP)在小肠中的代谢情况。测定MCP应用最广泛最经典

的方法是标记物法, 其中尿嘌呤衍生物(PD)法测定步骤简单, 符合动物福利要求, 是估测MCP最有效的方法之一, MA等^[1-2]应用该法探究了单一饲料中尿嘌呤衍生物与微生物氮的估测模型。AFRC^[3]中报道MCP中有25%表现为核酸的形式, 不能用于体组织的组成, 而剩余的75%的MCP在小肠中的消化率约为85%, 因此MCP在小肠中的消化率约为64%。关于UDP及其小肠消化率的测定主要采用尼龙袋法和改进三步体外法, 该方法简单易于操作, 并且很好的模拟了反刍动物特殊的生理条件, GARGALLO等^[4]采用改进三步体外法测定了12种饲料的UDP小肠消化率, 王燕等^[5]综合比较发现改进三步体外法可以比较准确的测定UDP小肠消化率。国外学者(INRA, 1989; AFRC, 1993; CSIRO, 2007; NRC, 2007)对MP体系的研究较多^[3,6-8], 认为MP与DP显著相关, 但是国外的相关模型并不一定适合中国的实际生产及相关

品种，近年来国内学者对该体系的研究已经展开^[9-10]，但是只研究了不同精粗比饲料的 MP 预测模型，饲料来源比较单一。【本研究切入点】精饲料是提供饲料蛋白质的主要原料，反刍动物由于其消化生理结构的特殊性不能饲喂单一精饲料，并且我国地域辽阔，精饲料种类繁多，赵江波等^[11]研究了肉羊常用精饲料代谢能的预测模型，对于肉用绵羊常用精饲料可代谢蛋白质的研究鲜见报道，因此本研究考虑应用套算法探索肉用绵羊对不同精饲料原料的蛋白质利用情况。【拟解决的关键问题】通过实测各种饲料的概略养分含量和进行消化代谢试验得到各种养分在体内的消化代谢实测数据，建立肉用绵羊常用精饲料的 MP 估测模型，从而可利用简单的化学分析或消化参数预测饲料中的 MP，简捷快速地评价各种饲料的营养价值，为进一步完善我国肉用绵羊的饲养标准提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验时间和地点

本试验于 2016 年 10 月 11 日至 2017 年 6 月 12 日在中国农业科学院南口中试基地进行。

1.2 试验材料

尿囊素：纯度≥98.0%（Sigma），尿酸：纯度≥99.0%（Sigma），黄嘌呤氧化酶：7.6 unit/mL（Sigma），尿酸酶：5 unit/mg（Sigma），胃蛋白酶（Sigma P-7000），胰蛋白酶（Sigma P-7545），百里香酚。

1.3 试验动物与试验设计

选用 14 月龄体况健康，平均体重为（49.27±3.12）kg 的安装有永久性瘤胃瘘管的杜泊羊（♂）×小尾寒羊（♀）杂交 1 代肉用羯羊 6 只，进行尼龙袋试验和改进三步体外法试验，饲料组成及营养水平见表 1。

选用另外 10 只体况健康，平均体重（47.43±4.41）kg 的杜寒杂交成年公羊进行消化代谢试验，采用单因子试验设计，试验分 11 期处理，其中：1 期基础饲料组和 10 期试验饲料组，每期处理 10 个重复，每个重复 1 只羊。试验饲料组分别由 10 种肉用绵羊常用的精饲料高粱、玉米、大麦、小麦、燕麦、菜籽粕、花生粕、棉籽粕、豆粕及玉米酒糟 DDGS 等替换基础饲料中羊草、玉米和豆粕，单一精饲料替换比例为 30%^[12]，饲料组成及营养水平见表 2。

1.4 饲养管理

试验羊用耳号标记，用伊维菌素进行驱虫，单栏饲养。6 只试验瘘管羯羊提前饲喂基础日粮（表 1）15 d，再进行尼龙袋试验和改进三步体外法试验。

表 1 尼龙袋试验和改进三步体外法试验饲料组成及营养水平（干物质基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the diet for nylon bag test and three-step modified *in vitro* test (Dry matter basis, %)

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
羊草 Chinese wildrye hay	55.00
玉米 Corn	29.40
豆粕 Soybean meal	14.00
磷酸氢钙 CaHPO ₄	0.86
食盐 NaCl	0.50
预混料 Premix ¹⁾	0.24
合计 Total	100
营养水平 Nutrient levels ²⁾	
干物质 Dry matter, DM	95.55
有机物 Organic matter, OM	93.68
总能 Gross energy, GE (MJ·kg ⁻¹)	16.34
粗蛋白质 Crude protein, CP	11.90
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber, NDF	59.12
酸性洗涤纤维 Acid detergent fibre, ADF	25.22
粗脂肪 Ether digestible organic matter extract, EE	2.21
钙 Ca	0.93
磷 P	0.41

¹⁾ 预混料为每千克饲料提供 The premix provides the following per kg of diet: VA 15 000 IU, VD 5 000 IU, VE 50 mg, Fe 90 mg, Cu 12.5 mg, Mn 60 mg, Zn 90 mg, Se 0.3 mg, I 1.0 mg, Co 0.3 mg

²⁾ 营养水平均为实测值 The nutrient levels are measured values

10 只试验公羊饲喂基础饲料组和 10 种试验饲料组（表 2），各组饲料营养成分存在差异造成采食量不同，为消除差异通过预饲期观察，确定最低组的采食量作为饲喂量^[13]，每天分别于 8: 00、16: 30 饲喂，饲喂量 600 g，自由饮水，每种饲料饲喂 20 d，其中预试期 15 d，正试期 5 d，正试期全收粪和尿。

1.5 半体内试验（尼龙袋试验）

试验单一饲料为 10 种反刍动物常用的精饲料：高粱、玉米、大麦、小麦、燕麦、菜籽粕、豆粕、棉籽粕、花生粕和 DDGS，饼粕类饲料的加工方法都采用行业的浸提法，玉米等谷物类采用粉碎机直接粉碎粒度 5 mm 左右，DDGS 由于本身颗粒小，购买后直接使用，经 2.5 mm 筛孔的粉碎机粉碎。

采用 HVELPLUND^[14]尼龙袋法测定 10 种精饲料原料的瘤胃降解率，每个样品设立 3 个重复，每个重复 1 只羊。样品设 6、12、24、36、48 h 等 5 个时间点，

表 2 饲料组成和营养水平（干物质基础）
Table 2 Dietary composition and nutrient levels (DM basis, %)

项目 Items	组成 Ingredient										
	基础 饲料	高粱 饲料	玉米 饲料	大麦 饲料	小麦 饲料	燕麦 饲料	菜籽粕 饲料	花生粕 饲料	棉籽粕 饲料	豆粕 饲料	玉米酒 糟饲料
	Basal diet	Sorghum diet	Corn diet	Barley diet	Wheat diet	Oat diet	Rapeseed diet	Peanut meal diet	Cottonseed meal diet	Soybean meal diet	DDGS diet
不同精料替换比例 Different concentrate replacement ratio		30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
玉米 corn	19.0	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
豆粕 Soybean meal	12.2	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46	8.46
羊草 Chinese wildrye hay	66.5	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
石粉 Limestone	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
预混料 Premix ¹⁾	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
合计 Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
营养水平 Nutrient levels ²⁾											
干物质 DM	92.13	90.92	90.79	91.62	91.51	91.58	91.87	91.55	93.96	93.89	91.32
有机物 OM	90.15	93.10	93.45	93.77	93.51	94.74	89.06	89.38	92.34	92.07	90.30
总能 GE (MJ·kg ⁻¹)	17.92	17.78	17.81	17.75	17.63	17.93	18.25	18.40	18.43	18.21	18.81
粗蛋白质 CP	12.03	11.06	10.56	11.50	11.96	12.68	22.12	26.89	20.36	22.55	17.06
中性洗涤纤维 NDF	33.20	33.56	33.33	37.84	37.15	33.29	40.13	36.19	41.33	33.55	40.74
酸性洗涤纤维 ADF	18.05	17.71	16.82	19.66	19.03	17.43	22.35	19.44	23.67	19.67	19.42
粗脂肪 EE	2.70	2.16	2.19	2.01	2.24	2.77	2.04	1.13	1.40	1.65	3.89
灰分 Ash	9.85	6.90	6.55	6.23	6.49	5.26	10.94	10.62	7.66	7.93	9.70
钙 Ca	0.94	1.05	0.94	0.82	0.96	0.96	1.45	1.06	1.03	0.99	0.82
总磷 TP	0.35	0.24	0.29	0.25	0.26	0.29	0.36	0.27	0.32	0.31	0.39

¹⁾ 预混料每千克饲料提供 The premix provides the following per kg of diet: VA 12 000 IU, VD 5 000 IU, VE 50 IU, Fe 60 mg, Cu 16.0 mg, Mn 40 mg, Zn 70 mg, I 0.8 mg, Se 0.3 mg, Co 0.3 mg
²⁾ 营养水平为实测值。The nutrient levels are measured values

每个时间点 2 个平行。准确称取试验样品 6 g，放入已恒重的尼龙袋中，2 个平行的尼龙袋绑在一个塑料管上。饲喂后 2 h 投放至瘤胃，不同时间点分别投放，最后统一取出。自来水冲洗干净（0 时间点的也需要一起冲洗），置于鼓风干燥箱内 65℃ 下恒温烘 48 h，回潮 24 h 后称重。测定分析其中的 DM、OM、CP。

1.6 改进三步体外法试验

采用改进三步体外法^[4]测定 UDP 小肠消化率。称取 5 g 试验样品于尼龙袋中，置于瘤胃中培养 16 h 后取出，清洗至水清，在 55℃ 烘箱内烘 48 h，制成风干样后过 40 目筛，称取 0.5 g 经瘤胃 16 h 降解后的饲料残渣风干样，放入 Ankom F57 滤袋中，用封口机封口。将来自同一只羊的 30 个滤袋（即 5 个饲

料样品×6 个重复）放入同一个培养品中，每个培养品加入预培养的盐酸胃蛋白酶溶液 2 升[每升溶液中含有 1g 胃蛋白酶（Sigma P-7000），用 0.1 N HCl 调节 pH 至 1.9]，将培养瓶置于 Daisy II（Ankom, Fairport, NY, USA）培养箱 39℃ 振荡培养 1 h 后，用自来水冲洗尼龙袋至水澄清。再次将滤袋放入含有预热的胰酶制剂溶液[每升溶液中含 50 mg 百里香酚，3 g 胰酶制剂（Sigma P-7545），用磷酸二氢钾调节 pH 至 7.75]的培养瓶中于 39℃ 震荡培养 24 h，用自来水冲洗尼龙袋至水澄清，55℃ 烘干至恒重，称重，分析袋内残渣总蛋白含量。

1.7 消化代谢试验及样品收集

每期消化代谢试验正试期前后均称重并记录。

正试期每天全收粪并称重，将粪样充分混匀并从不
同位点取未受羊毛及尘土污染的部分样品，准确称
取总粪量的 10%于自封袋中置于-20℃冰箱保存；每
天全收尿并记录尿量，收尿前于桶中加入 100 mL
10%的稀硫酸，调整尿样 pH 至 2—3，防止尿样腐败
分解，四层纱布过滤，采集尿样时先加自来水将尿
样稀释至 5 L，混匀后取 30 mL 尿样于收尿瓶中置于
-20℃冰箱保存。

1.8 测定指标

样品中营养成分 DM、OM、CP、Ash 的测定参
照张丽英^[15]的测定方法，测定 NDF 和 ADF 含量时，
先用胰蛋白酶及淀粉酶对样品进行酶解处理，再按照
VAN SOEST 等^[16]方法进行操作。PD 采用分光光度计
进行测定^[17]。

1.9 计算公式

1.9.1 待测样品在不同时间点的瘤胃消失率及有效
降解率（effective degradation rate, ED）的计算
公式

$$A(\%) = 100 \times (B - C) / B$$

式中，A 为待测饲料营养物质的瘤胃消失率（%）；B
为待测样品中营养物质的质量（g）；C 为残渣中营养
物质的质量（g）。

有效降解率参照 ORSKOV 和 MC DONALD 提
出的数学模型^[18]计算：

$$dP = a + b(1 - e^{-ct})$$

式中，dP 为某营养成分在 t 时间的瘤胃消失率；a = 快
速降解部分（%）；b = 慢速降解部分（%）；c = b
部分的降解速率（/h）；t = 培养时间（h）。

利用最小二乘法算出参数 a、b 和 c，然后进一步
计算有效降解率：ED = a + bc/(c + k)

式中，ED 为某营养成分的有效降解率；k 为待测饲料
的流通速率，参考冯仰廉^[19]取 K=0.08%/h。

1.9.2 UDP 小肠消化率计算

$$UDP(\%) = CP \text{ 含量}(\%) \times (1 - \text{瘤胃 CP 降解率})；$$

$$UDP \text{ 小肠消化率}(\%) = (UDP \text{ 含量} - \text{残渣中蛋白} \\ \text{质含量}) / UDP \text{ 含量} \times 100。$$

1.9.3 营养物质消化率及 PD 排出量等指标的计算

$$\text{饲料中某营养成分的表观消化率}(\%) = 100 \times (\text{饲} \\ \text{粮采食量} \times \text{饲料中该营养成分的含量} - \text{排粪量} \times \text{粪中} \\ \text{该养分含量}) / (\text{饲料采食量} \times \text{饲料中该营养成分的含} \\ \text{量})；$$

$$PD(\text{mmol} \cdot \text{d}^{-1}) = \text{尿囊素} + \text{尿酸} + \text{黄嘌呤} + \text{次黄嘌呤}， \\ \text{微生物氮 (Microbial nitrogen, MN, g} \cdot \text{d}^{-1}) = -0.521 + \\ 1.493 \times PD(\text{mmol} \cdot \text{d}^{-1})^{[1]}；$$

$$MP = MCP \times 0.64 + UDP \times UDP \text{ 小肠消化率}^{[3]}。$$

1.10 统计分析

试验数据采用 Excel 整理统计后，分别采用 SAS
9.1 中的 NLIN 程序计算 a、b、c 值和直线回归与多元
回归程序分析建立 MP 估测模型，单因素方差分析
（one-way ANOVA, LSD）进行显著性检验，并采用
Duncan 氏法进行多重比较，P<0.05 作为差异显著的
判断标准。结果均以平均值表示。

2 结果

2.1 单一精饲料原料的常规养分含量

本试验中 10 种单一精饲料原料的常规养分含量
见表 3，各种饲料 CP 含量差异较大，饼粕类饲料的
CP 较高，DDGS 次之，谷物类饲料最低。

2.2 单一精饲料原料 CP 瘤胃降解率和 UDP 小肠消化率

采用尼龙袋法和改进三步体外法及基于公式
（1.9.1 和 1.9.2）得出的 CP 瘤胃降解率和 UDP 小肠
消化率见表 4。可以看出，10 种饲料的 CP 有效降解
率在 43.71%—60.87%之间，其中燕麦的 CP 瘤胃有效
降解率显著高于其他 9 种饲料（P<0.01），除燕麦外，

表 3 单一精饲料原料的营养水平（干物质基础）
Table 3 Concentrates nutrient levels (DM basis) (%)

项目 Items	高粱 Sorghum	玉米 Corn	大麦 Barley	小麦 Wheat	燕麦 Oat	菜籽粕 Rapeseed meal	花生粕 Peanut meal	棉籽粕 Cottonseed meal	豆粕 Soybean meal	玉米酒糟 DDGS
干物质 DM	89.59	89.94	90.60	89.64	90.31	91.60	91.97	92.28	91.74	91.65
有机物 OM	98.27	98.79	95.75	98.33	98.22	93.04	94.39	92.66	92.50	95.19
粗蛋白 CP	10.48	8.88	10.35	13.57	15.15	40.50	58.36	44.99	47.92	30.45
中性洗涤纤维 NDF	14.97	16.98	18.58	14.87	10.25	17.45	12.24	20.17	12.93	23.97
酸性洗涤纤维 ADF	3.01	4.06	8.69	4.66	3.30	13.19	6.65	14.60	7.05	8.66

表 4 单一精饲料蛋白质瘤胃降解率和瘤胃非降解蛋白质小肠消化率

Table 4 Ruminal degradability of crude protein and intestinal digestibility of undegraded dietary protein of concentrates (%)

项目 Items	高粱 Sorghum	玉米 Corn	大麦 Barley	小麦 Wheat	燕麦 Oat	菜籽粕 Rapeseed meal	花生粕 Peanut meal	棉籽粕 Cottonseed meal	豆粕 Soybean meal	玉米酒糟 DDGS	SEM P 值 P value
蛋白质瘤胃降解率 Ruminal degradability of crude protein											
6 h	16.64d	24.25bcd	22.73cd	30.30b	44.30a	27.42bc	24.33bcd	29.19b	16.87d	15.77d	1.697 <0.01
12 h	20.10d	27.54cd	31.66cd	49.83b	63.53a	35.55c	28.63cd	31.53cd	20.28d	19.73d	2.649 <0.01
24 h	24.82c	32.77bc	39.66b	63.25a	72.64a	41.34b	40.82b	42.52b	34.15bc	22.15c	2.948 <0.01
36 h	36.18cd	37.66cd	48.51bc	70.28a	80.64a	47.56bc	48.55bc	54.55b	41.45bcd	35.03d	3.302 <0.01
48 h	38.77d	47.25cd	59.36bc	74.27a	84.19a	58.01bc	59.51bc	62.18b	54.02bc	38.88d	2.668 <0.01
有效降解率 Effective degradation rate	45.08e	43.71e	44.38e	49.32de	60.87a	52.04bcd	57.26ab	54.62bcd	56.02abc	51.08cd	1.143 <0.01
瘤胃非降解 蛋白质小肠消化率 Small intestine digestibility of undegraded dietary protein	84.69d	86.23cd	84.23d	84.10d	80.10e	89.25b	92.86a	92.31a	89.26b	87.31bc	0.731 <0.01

同行数据标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下表同
In the same row, values with different small letters mean significant difference (P<0.05). The same as below

本研究的其他 9 种饲料中饼粕类饲料（菜籽粕、花生粕、棉籽粕、豆粕、DDGS）的 CP 瘤胃有效降解率均高于谷物类饲料（高粱、玉米、大麦、小麦）；而燕麦的 UDP 小肠消化率为 80.10%，显著低于其他饲料（P<0.01），饼粕类饲料的 UDP 小肠消化率均高于谷物类饲料。

2.3 单一精饲料可代谢蛋白质

小肠吸收的蛋白质主要由 MCP 和 UDP 组成，通过半体内法（尼龙袋法）及公式（1.9.1 和 1.9.2）得出单一精饲料的瘤胃降解蛋白质（Rumen degraded protein, RDP）和 UDP，利用尿嘌呤衍生物法及结合公式（1.9.3）得出单一精饲料的 MCP，进一步通过公式 $MP=MCP\times 0.64+UDP\times UDP$ 小肠消化率（AFRC, 1993）得出单一精饲料 MP（表 5）。由表 5 可见，10 种精饲料 RDP 从高到低的顺序依次是花生粕、豆粕、棉籽粕、菜籽粕、DDGS、燕麦、小麦、高粱、大麦

及玉米；本研究的 10 种精饲料的 UDP 含量除燕麦和小麦外，各饲料 UDP 含量从高到低的顺序与 RDP 的顺序一致；饼粕类饲料的 MCP 和 MP 均高于谷物类的，MCP 含量在 46.92—84.74（g·kg⁻¹ DM）之间，MP 含量在 41.81—129.08（g·kg⁻¹ DM）之间，其中花生粕的 MCP 和 MP 都最高，玉米的 MCP 和 MP 都最低。MP 占 DP 的比例范围在 50.96%—62.33%之间。

2.4 10 种饲料营养物质的表观消化率

10 种饲料营养物质的表观消化率见表 6，可以看出，不同饲料各营养物质的表观消化率不同，其中玉米饲料的 DM 表观消化率最高，为 67.40%，菜籽粕饲料的 DM 表观消化率只有 57.32%；玉米饲料的 OM 表观消化率也最高，菜籽粕饲料的最低；饼粕类饲料的 CP 表观消化率高于谷物类饲料的，CP 表观消化率在 64.03%—80.16%之间；NDF 和 ADF 的表观消化率范围分别是 36.01%—48.79%、34.35%—47.40%。

表 5 单一精饲料原料的瘤胃非降解蛋白质、微生物合成蛋白质和可代谢蛋白质

Table 5 Undegraded dietary protein, microbial synthetic protein and metabolizable protein of concentrates

项目 Items	高粱 Sorghum	玉米 Corn	大麦 Barley	小麦 Wheat	燕麦 Oat	菜籽粕 Rapeseed meal	花生粕 Peanut meal	棉籽粕 Cottonseed meal	豆粕 Soybean meal	玉米酒糟 DDGS
瘤胃降解蛋白质 RDP (g·kg ⁻¹ DM)	15.59	12.82	15.15	22.16	30.35	68.84	115.23	79.43	85.76	51.16
瘤胃非降解蛋白质 UDP (g·kg ⁻¹ DM)	18.98	16.52	18.74	22.31	19.30	63.44	85.85	64.22	67.34	48.89
微生物合成蛋白质 MCP (g·kg ⁻¹ DM)	54.50	46.92	50.97	50.64	59.83	73.80	84.74	66.27	81.11	60.87
可代谢蛋白质 MP (g·kg ⁻¹ DM)	48.04	41.81	45.46	48.28	50.30	99.47	129.08	96.89	106.18	78.23
可代谢蛋白质占可消化蛋白的比例 The percentage of MP to DP (%)	61.66	55.63	50.96	55.08	53.73	53.33	54.86	62.33	55.14	56.78

表 6 不同饲料营养物质表观消化率

Table 6 Apparent nutrient digestibility of different diets (%)

项目 Items	高粱 饲料 Sorghum diet	玉米 饲料 Corn diet	大麦 饲料 Barley diet	小麦 饲料 Wheat diet	燕麦 饲料 Oat diet	菜籽粕 饲料 Rapeseed diet	花生粕 饲料 Peanut meal diet	棉籽粕 饲料 Cottonseed meal diet	豆粕 饲料 Soybean meal diet	玉米酒糟 饲料 DDGS diet	SEM	P 值 P value
干物质消化率 Digestible dry matter (DMD)	65.29abc	67.40a	64.69bc	65.48abc	63.40c	57.32e	64.20c	59.68d	66.79ab	58.78de	0.41	<0.01
有机物消化率 Digestible organic matter (DOM)	68.65ab	70.44a	68.49ab	68.68ab	66.91b	64.15c	69.97a	61.45d	69.30a	64.47c	0.37	<0.01
粗蛋白质消化率 Digestible crude protein (DCP)	64.03e	64.60de	71.05b	67.09cd	67.63c	77.47a	79.73a	71.75b	80.16a	73.76b	0.65	<0.01
中性洗涤纤维消化率 Digestible neutral detergent fiber (DNDF)	42.96bc	42.56bcd	47.59ab	48.79a	38.86cde	37.09de	43.71abc	36.01e	42.66bcd	41.67cd	0.67	<0.01
酸性洗涤纤维消化率 Digestible acid detergent fiber (DADF)	42.91ab	37.38c	45.10a	45.85a	38.46bc	34.35dc	46.96a	30.91d	47.40a	35.91c	0.76	<0.01

2.5 可代谢蛋白质预测模型的建立

为进一步通过饲料养分含量和可消化养分来预测饲料的可代谢蛋白质,结合本试验中 10 种饲料的养分含量和可消化养分与 MP 进行逐步回归分析,建立的回归模型如表 7 所示。从模型式可见,决定系数 R^2 均在 0.98 以上,饲料养分含量比可消化养分预测 MP 决定系数 R^2 更高。基于养分含量建立 MP 预测模型的预测因子从一元到五元决定系数 R^2 增加幅度不大;引

入变量越多,可消化养分预测 MP 模型的决定系数 R^2 值越高, R^2 的变化范围在 0.984—0.991 之间。用饲料中 CP 含量预测 DP,决定系数 R^2 为 0.984。

3 讨论

3.1 单一精饲料粗蛋白质瘤胃降解率和小肠消化率

关于精饲料 CP 瘤胃降解率和 UDP 小肠消化率已有较多研究^[20-23]。饲料在瘤胃中的降解主要是瘤胃微

表 7 概略养分和可消化养分预测可代谢蛋白质模型

Table 7 Prediction model for metabolizable protein using chemical composition and apparent digestibility

递推回归模型 Recursive regression equation	决定系数 R^2	P 值 P value
MP=5.323CP-14.374	0.994	<0.001
MP=5.268CP+0.532DM-62.319	0.995	<0.001
MP=5.290CP+0.669DM-0.173ADF-71.664	0.995	<0.001
MP=5.318CP+1.262DM-0.877ADF+0.376NDF-126.679	0.995	<0.001
MP=5.373CP+1.481DM-0.827ADF+0.404NDF+0.254OM-174.198	0.995	<0.001
MP=5.899DP+2.077	0.984	<0.001
MP=5.710DP-0.530DOM-37.165	0.986	<0.001
MP=5.500DP-1.741DOM+1.371DDM+38.005	0.989	<0.001
MP=5.678DP-1.550DOM+1.344DDM-1.129DNDF+32.093	0.990	<0.001
MP=5.791DP-1.587DOM+1.552DDM-1.871DNDF+0.443DADF+19.832	0.990	<0.001
DP=0.895CP-2.663	0.994	<0.001

预测模型基于 10 种饲料养分含量和可消化营养成分的实测值。MP 为可代谢蛋白质 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ DM); 概略养分的单位为%, 可消化养分的单位是% Prediction equations are based on the measured nutrient content and digestible nutrient content of 10 feeds. MP is a metabolizable protein ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ DM); the unit of proximate nutrient is % and the unit of digestible nutrient is %

生物的一系列生物消化过程,一般而言,随饲料在瘤胃中停留时间的增加,瘤胃降解率增大,饲料自身的物理或化学性质也会影响瘤胃降解率^[24-25]。本研究的10种精饲料中,燕麦因其包被淀粉粒的蛋白质基质很容易被细菌穿透,所以CP瘤胃降解率显著高于其他饲料,其他几种饲料中饼粕类饲料(菜籽粕、花生粕、棉籽粕、豆粕、DDGS)的CP瘤胃降解率高于谷物类饲料(高粱、玉米、大麦、小麦),这可能与饼粕类饲料含有较高的CP含量有关,冷静等^[26]通过研究6种牧草的瘤胃降解率发现CP含量高有利于蛋白质的降解。饲料CP含量高,能够为瘤胃微生物提供的氮源丰富,因此相应的CP瘤胃降解率会长高。另一方面,过高的瘤胃消失率将会造成进入反刍动物小肠的蛋白质不足,因此CHALUPA等^[27]认为应当对瘤胃降解较高的饲料采取过瘤胃保护措施(如热处理和甲醛处理),以保证小肠有充足的可吸收利用氨基酸。

本研究得出10种精饲料的UDP小肠消化率范围在80.10%—92.86%之间,在INRA报道的65%—95%范围内^[7]。比较发现每种饲料的UDP小肠消化率均高于CP瘤胃降解率,表明大量不被瘤胃降解的蛋白质能在小肠被很好的消化,朱亚骏等^[22]得出类似的结果,因此可以考虑使用这10种饲料做蛋白质过瘤胃保护措施,以提供给小肠充足的氨基酸。本研究还发现饼粕类饲料(菜籽粕、花生粕、棉籽粕、豆粕、DDGS)的UDP小肠消化率高于谷物类饲料(高粱、玉米、大麦、小麦、燕麦),周荣等^[23]报道奶牛对常用饲料的UDP小肠消化率饼粕类饲料最高,谷物类饲料次之,粗饲料最低,岳群等^[28]研究发现高蛋白低纤维饲料比低蛋白高纤维饲料更易被小肠消化利用,本试验中使用的饼粕类饲料较谷物类饲料蛋白质含量高很多,而纤维含量相差不大,据此可认为精饲料蛋白质含量越高,UDP小肠消化率越高,与周荣等^[23]和岳群等^[28]研究的结果相一致。

3.2 饲料养分表观消化率和精饲料瘤胃微生物蛋白质合成量

营养物质的表观消化率是动物对饲料消化利用的综合反映,本试验中10种饲料因其精饲料组成不同,各养分表观消化率差异显著,其结果与赵江波等^[12]在杜寒杂交羯羊的研究结果接近。10种饲料精饲料组成不同,饼粕类饲料的CP水平高于谷物类饲料,随CP水平的增加,CP表观消化率有升高的趋势,但其他养分的表观消化率没有明显的变化,与李志静等^[29]研究

得出的结果类似,刘洁等^[13]研究表明CP表观消化率与CP含量存在正相关关系。纤维是影响反刍动物采食量的一个重要因素,在瘤胃中发酵的产物是其重要的能量来源,NDF是目前认为表示纤维含量的最准确的指标,本研究中10种饲料的NDF水平在33.33%—41.33%范围内,通过比较发现,NDF含量对其他营养物质的表观消化率无显著影响,孔祥浩等^[30]报道肉羊饲料的NDF含量处于30%—45%之间时,对其他营养物质的表观消化率影响不显著。

本研究中10种精饲料的RDP、UDP、MP含量以及MCP合成量,饼粕类饲料均高于谷物类饲料。瘤胃微生物利用饲料中养分降解产生的氮源与碳源合成微生物蛋白质,饲料蛋白质含量越高,提供给微生物的氮源越丰富,微生物合成蛋白质越多,最终以MP含量的多少体现反刍动物对饲料蛋白质的利用效果,MA等^[1]研究报道饲料中CP含量越高,NDF含量越低,MCP合成量越高。本研究得出随着饲料中RDP水平的增加,MCP含量也增加,与HAIG等^[31-32]通过十二指肠MCP流量和尿嘌呤衍生物法研究得出的结果类似。随着10种精饲料原料的RDP与UDP比例的增加,各养分的表观消化率没有表现出明显的变化趋势,PAENGKOUM^[33]等也报道饲料养分消化率不受RDP含量的影响。反刍动物采食的饲料蛋白质,必须有一定量的RDP供微生物分解利用,否则就会调用体蛋白为细菌提供营养,使机体的代谢形成负平衡,若细菌营养不足,也会影响淀粉和纤维素的消化。

3.3 利用饲料养分含量和可消化养分建立精饲料原料MP的预测模型

蛋白质不仅是饲料重要的营养成分,也是限制肉用绵羊生产性能的重要因素,饲料中被动物机体利用的蛋白质除了受机体自身的影响外,还受到饲料组成及可消化养分的影响。综合10种饲料的概略养分及可消化养分与MP进行相关性分析,并建立递推式回归模型,发现引入概略养分含量建立的MP预测模型决定系数比利用可消化养分得到的决定系数高。当只引入CP含量时, R^2 就已经达到0.994,再依次引入DM、ADF、NDF和OM时, R^2 升高。如果采用可消化养分建立MP预测模型,可以看出依次引入可消化养分参数, R^2 不断提高,从0.984升高至0.991,预测模型的显著效果未发生变化。

本研究利用饲料中CP含量(%)及DP(%)建立的MP($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DM)预测模型分别是 $\text{MP}=5.323 \times \text{CP}-14.374$ ($R^2=0.994$, $n=10$, $P<0.001$)和 $\text{MP}=5.899 \times$

DP+2.077 ($R^2=0.984$, $n=10$, $P<0.001$), 经转化发现 MP 预测模型与 NRC(2007)推荐的 $MP(\%)=0.7\times DP(\%)$ 有差异, 可能与羊的品种及饲料的地域性有关。基于 CP 建立的 DP 预测模型是 $DP=0.895\times CP-2.663$ ($R^2=0.994$, $n=10$, $P<0.001$), 与 NRC(2007)的 $DP=0.9\times CP-3$ 及刘洁^[9]的 $DP=1.000\times CP-4.672$ 结果接近。刘洁^[9]建立了单一饲粮 12 个不同精粗比梯度的 MP 预测模型: $MP(g\cdot kg^{-1}DM)=-55.712+9.826\times CP(\%)$ 和 $MP(g\cdot kg^{-1}DM)=-9.841+0.983\times DP(g\cdot kg^{-1}DM)$, 曲连发^[10]建立了单一饲粮 6 个不同精粗比梯度的 MP 预测模型: $MP(g\cdot kg^{-1}DM)=0.96\times CP(g\cdot kg^{-1}DM)-87.89$ 和 $MP(g\cdot kg^{-1}DM)=0.75\times DP(g\cdot kg^{-1}DM)-25.82$, 两个研究结果都得出 MP 与 CP 或 DP 的相关性最高, NRC(2007)也推荐采用 CP 或 DP 预测 MP 模型, 本研究得出的结果类似。

前人研究均采用一元函数预测 MP, 但预测模型都有差异, 本研究得出 10 种单一精饲料原料的 MP 与 DP 的含量各不相同, 范围在 50.96%—62.33%之间, 因此利用多种饲粮的 DP 建立 MP 的预测模型更加准确, 利用更加广泛。对于我国肉用绵羊常用精饲料 MP 的预测模型鲜有报道, 通过本研究依次引入多元变量, 使预测值的准确性得到了提高, 决定系数 R^2 逐渐增大, 并对饲料中养分或可消化养分逐一进行方差膨胀因子(VIF)检验, 得出 VIF 均小于 10, 即各个因子不存在多重共线性, 不影响最终 MP 的预测值。本试验中, 根据 MP 与养分含量和可消化养分之间的相关性建立了关于 MP 的多个预测模型, 并且决定系数很高。通过对各个预测模型进行检验, 发现采用养分含量预测 MP 模型时, 得出利用一元或多元建立的 MP 预测模型得出的 MP 值与实际值都很接近; 引入可消化养分预测 MP 时, 不论引入一元或者多元 MP 预测结果也都与实际值很接近。表明在实际生产中可以通过简单的测定养分含量或可消化养分就可以估测出肉用绵羊对饲粮中 CP 的利用效果。

可代谢蛋白质比较准确地反映了反刍动物利用蛋白质的效果, 但是测定步骤繁琐, 在实际的生产实践中不易测定, 本研究通过体外法、半体内法和体内法较为完整的研究了肉用绵羊对常用精饲料蛋白质的利用情况, 并基于概略养分和可消化营养成分建立了 MP 的预测模型, 对 MP 的估测有重要意义。但是由于试验周期较长, 还未对预测模型用其他饲粮进行验证, 所以还有待于进一步研究, 以便更好的完善与推广。

4 结论

4.1 基于饲粮中 CP 含量预测 DP 的模型是: $DP=0.895\times CP-2.663$ ($R^2=0.994$, $n=10$, $P<0.001$)。

4.2 基于概率养分可以比较准确的预测 MP, 预测模型是: $MP=5.323\times CP-14.374$ ($R^2=0.994$, $n=10$, $P<0.001$)。

4.3 基于可消化养分建立的精饲料 MP 预测模型是: $MP=5.899\times DP+2.077$ ($R^2=0.984$, $n=10$, $P<0.001$)。

References

- [1] MA T, DENG K D, TU Y, ZHANG N F, JIANG C G, LIU J, ZHAO Y G, DIAO Q Y. Effect of dietary forage-to-concentrate ratios on urinary excretion of purine derivatives and microbial nitrogen yields in the rumen of dorper crossbred sheep. *Livestock Science*, 2014, 160(1): 37-44.
- [2] CHEN X B, XUE B. Excretion of purine derivatives by sheep and cattle and its use for the estimation of absorbed microbial protein[D]. Aberdeen: University of Aberdeen, 1989.
- [3] AFRC. Energy and Protein Requirements of Ruminants. Wallingford, UK: CAB International, 1993.
- [4] 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.
- [5] 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(07): 1264-1273.
WANG Y, XIN H S, YANG F, CHEN C D, ZHANG W W, LI M, XIA K, ZHANG Y G. Determination of small intestinal digestibility and correlation analysis of tumor non-degradable protein by different methods. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(07): 1264-1273. (in Chinese)
- [6] CSIRO. *Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants*. Collingwood, Australia: CSIRO Publishing, 2007.
- [7] INRA. *Ruminant Nutrition, Recommended Allowance and Feed Table*. Paris, France: John Libbey Eurotext, 1989.
- [8] NRC. *Nutrient Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids and New World Camelids*. Washington: National Academy Press, 2007.
- [9] 刘洁. 肉用绵羊饲料代谢能与代谢蛋白质预测模型的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
LIU J. Prediction of metabolizable energy and metabolizable protein in feeds for meat sheep[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural

- Sciences, 2012. (in Chinese)
- [10] 曲连发. 肉用绵羊代谢蛋白质预测模型的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- QU L F. Prediction of metabolizable protein on meat sheep[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [11] 赵江波, 魏时来, 马涛, 肖怡, 丁静美, 李岚捷, 冯文晓, 贾鹏, 赵明明, 刁其玉. 应用套算法估测肉羊精饲料代谢能. 动物营养学报, 2016, 28(04): 1217-1224.
- ZHAO J B, WEI S L, MAO T, XIAO Y, DING J M, LI L J, FENG W X, JIA P, ZHAO M M, DIAO Q Y. Establishment of prediction model of metabolizable energy of concentrate for mutton sheep by substitution method. *Chinese Journal of Animal Nutrition*. 2016, 28(04): 1217-1224. (in Chinese)
- [12] 赵江波, 魏时来, 赵明明, 马涛, 肖怡, 丁静美, 李岚捷, 冯文晓, 贾鹏, 刁其玉. 精料来源对肉羊营养物质消化率的影响及代谢能预测模型的建立. 畜牧兽医学报, 2016, 47(11): 2257-2265
- ZHAO J B, WEI S L, ZHAO M M, MA T, XIAO Y, DING J M, LI L J, FENG W X, JIA P, DIAO Q Y. Effect of concentrate source on nutrient digestibility and establishment of prediction model of metabolizable energy in mutton sheep. *Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2016, 47(11): 2257-2265. (in Chinese)
- [13] 刘洁, 刁其玉, 赵一广, 姜成钢, 邓凯东, 李艳玲, 屠焰. 肉用绵羊饲料可消化养分和有效能预测模型的研究. 畜牧兽医学报, 2012, 43(08): 1230-1238.
- LIU J, DIAO Q Y, ZHAO Y G, JIANG C G, DENG K D, LI Y L, TU Y. Prediction of nutrient digestibility and energy concentrations using chemical compositions in meat sheep feeds. *Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2012, 43(08): 1230-1238. (in Chinese)
- [14] HVELPLIND T. Digestibility of rumen microbial protein and undegraded dietary protein estimated in the small intestine of sheep and by in sacco procedure [nylon bag technique, amino acids absorbable in the small intestine (AAT)]. *Acta Agriculturae Scandinavica Supplementum*, 1985.
- [15] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- Zhang L Y. *Feed Analysis and Feed Quality Control Technology*. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] CHEN X B, GOMES M J. *Estimation of Microbial Protein Supply to Sheep and Cattle Based on Urinary Excretion of Purine Derivatives. An Overview of the technical Details*. Bucksburn: Occasional Publication, 1992.
- [18] OREKOV E R, MCDONALD I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science*, 1979, 92(02): 499-503.
- [19] 冯仰廉. 动物营养研究进展. 北京: 中国农业空间出版社. 1994.
- FENG Y L. *Advances in Animal Nutrition Research*. China Agricultural Space Press. 1994. (in Chinese)
- [20] 赵连生, 牛俊丽, 徐元君, 王芳, 郑琛, 李发第, 郭江鹏, 卜登攀. 6种饲料原料瘤胃降解特性和瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率. 动物营养学报, 2017, 29(06): 2038-2046.
- ZHAO L S, NIU J L, XU Y J, WANG F, ZHENG C, LI F D, GUO J P, BU D P. Ruminal degradation characteristics and small intestinal digestibility of rumen undegraded protein of six feed ingredients. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(06): 2038-2046. (in Chinese)
- [21] 刁其玉, 屠焰. 奶牛常用饲料蛋白质在瘤胃的降解参数. 乳业科学与技术, 2005(2): 70-74.
- DIAO Q Y, TU Y. Degradabilities of crude protein in feedstuffs for dairy cattle in rumen. *Dairy Science and Technology*, 2005(2): 70-74. (in Chinese)
- [22] 朱亚骏, 于子洋, 袁翠林, 胡静, 王利华, 朱风华, 张廷荣, 林英庭. 山东省羊主要精饲料瘤胃降解率和小肠消化率的研究. 中国农学通报, 2014, 30(17): 1-6.
- ZHU Y J, YU Z Y, YUAN C L, HU J, WANG L H, ZHU F H, ZHANG T R, LIN Y T. Research about ruminal and small intestinal digestibility of Shandong province mainly concentrates for sheep. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2014, 30(17): 1-6. (in Chinese)
- [23] 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(01): 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(01): 81-85. (in Chinese)
- [24] GAO W, CHEN A D, ZHANG B W, PING K, LIU C, JIE Z. Ruminal degradability and post-ruminal digestion of dry matter, nitrogen and amino acids of three protein supplements. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2015, 28(4): 485-493.
- [25] OH Y K, PERK Y J, BAEK Y C, DO Y J, KIM D H, KWAK W S, CHOI H. In situ ruminal degradation and intestinal digestion of crude protein and amino acids of three major proteinaceous feeds for Hanwoo steers. *Research Opinions in Animal and Veterinary Sciences*,

- 2015, 5(10):395-400.
- [26] 冷静, 张颖, 朱仁俊, 杨舒黎, 苟潇, 毛华明. 云南黄牛对6种牧草瘤胃降解规律的研究. 中国农学通报, 2011, 27(01): 398-402.
- LENG J, ZHANG Y, ZHU R J, YANG S L, GOU X, MAO H M. Study on rumen degradabilities of six forages in Yunnan yellow cattle. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2011, 27(01): 398-402. (in Chinese)
- [27] CHALUPA W, SNIFFEN C J. Protein and amino acid nutrition of lactating dairy cattle-today and tomorrow. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 58: 65-75.
- [28] 岳群, 杨红建, 谢春元, 么学博, 王加启. 应用移动尼龙袋法和三步法评定反刍家畜常用饲料的蛋白质小肠消化率. 中国农业大学学报, 2007(6): 62-66.
- YUE Q, YANG H J, XIE C Y, ME X B, WANG J Q. Estimation of protein intestinal digestibility of ruminant feedstuffs with mobile nylon bag technique and three-step in vitro procedure. *Journal of China Agricultural University*, 2007(6): 62-66. (in Chinese)
- [29] 李志静, 睦丹, 周玉香. 不同蛋白水平对舍饲滩羊消化代谢及血液生化指标的影响. 中国畜牧杂志, 2014, 50(17): 39-43.
- LI Z J, XU D, ZHOU Y X. Effect of dietary protein level on nutrient digestion metabolism and serum biochemical indexes in tan sheep. *Chinese Journal of Animal Science*. 2014, 50(17): 39-43. (in Chinese)
- [30] 孔祥浩, 郭金双, 朱晓萍, 贾志海, 岳春旺, 靳玲品, 李秀花, 秦艳红. 不同 NDF 水平肉羊饲粮养分表观消化率研究. 动物营养学报, 2010, 22(1): 70-74.
- KONG X H, GUO J S, ZHU X P, JIA Z H, YUE C W, JIN L P, LI X H, QIN Y H. Study on apparent nutrients digestibility of mutton sheep diets with different neutral detergent fiber levels. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(1): 70-74. (in Chinese).
- [31] HAIG P A, MUTSVANGWA T, SPRATT R, MCBRIDE B W. Effects of dietary protein solubility on nitrogen losses from lactating dairy cows and comparison with predictions from the Cornell Net Carbohydrate and Protein System. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(5): 1208-1217.
- [32] HRISTOV A N, ETTER R P, ROPP J K, GRANDEEN K L. Effect of dietary crude protein level and degradability on ruminal fermentation and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(11): 3219-3229.
- [33] PAENGKOU M, LIANG J B, JELAN Z A, BASERY M. Effects of ruminally undegradable protein levels on nitrogen and phosphorus balance and their excretion in saanen goats fed oil palm fronds. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2004, 26(1): 15-22.

(责任编辑 林鉴非)