

# 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

赵江波<sup>1,2</sup>, 魏时来<sup>2</sup>, 赵明明<sup>1</sup>, 马涛<sup>1</sup>, 肖怡<sup>1</sup>, 丁静美<sup>1</sup>, 李岚捷<sup>1</sup>, 冯文晓<sup>1</sup>, 贾鹏<sup>1</sup>, 刁其玉<sup>1\*</sup>

(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:** 本试验旨在通过概略养分或可消化养分建立肉用绵羊配合饲料代谢能预测模型。选取 66 只 18 月龄体重为  $(49.6 \pm 1.3)$  kg 的杜泊 × 小尾寒羊 F<sub>1</sub> 代杂交去势肉羊, 采用完全随机试验设计。共 11 个处理, 包括 1 个基础饲料组和 10 个试验饲料组。分别测定 10 种试验饲料的概略养分和可消化养分; 代谢试验测定 10 种试验饲料的消化能 (DE) 和代谢能 (ME); 线性回归方法建立代谢能与概略养分和可消化养分的预测模型。结果表明, 饲料的 OMD 和 GED 与 CP、NDF、ADF、GE 相关极显著 ( $P < 0.01$ ); CPD 与 CP、NDF、ADF 相关极显著 ( $P < 0.01$ ), 与 OM 相关显著 ( $P < 0.05$ ); NDFD 和 ADFD 与 GE 和 CP 相关极显著 ( $P < 0.01$ ), NDFD 与 OM 和 NDF 相关显著 ( $P < 0.05$ )。建立的饲料概略养分代谢能预测模型:  $ME(MJ \cdot kg^{-1}) = 38.881 - 19.516ADF(\%) - 28.672OM(\%)$  ( $R^2 = 0.640, n = 60, P < 0.01$ ); 可消化养分代谢能预测模型:  $ME(MJ \cdot kg^{-1}) = 1.613DE(MJ \cdot kg^{-1}) - 14.705DOM(\%) + 2.743DNDF(\%) - 3.179$  ( $R^2 = 0.879, n = 60, P < 0.01$ )。综上所述, 饲料概略养分和可消化养分与代谢能之间相关性显著, 可以通过概略养分和可消化养分对饲料的代谢能进行有效的预测。

**关键词:** 肉羊; 精饲料; 消化能; 代谢能; 可消化养分; 预测模型

中图分类号: S826; S816.4

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2016)11-2257-09

## Effect of Concentrate Source on Nutrient Digestibility and Establishment of Prediction Model of Metabolizable Energy in Mutton Sheep

ZHAO Jiang-bo<sup>1,2</sup>, WEI Shi-lai<sup>2</sup>, ZHAO Ming-ming<sup>1</sup>, MA Tao<sup>1</sup>, XIAO Yi<sup>1</sup>, DING Jing-mei<sup>1</sup>,  
LI Lan-jie<sup>1</sup>, FENG Wen-xiao<sup>1</sup>, JIA Peng<sup>1</sup>, DIAO Qi-yu<sup>1\*</sup>

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

**Abstract:** The experiment was conducted to evaluate the feasibility for establishing the prediction model of the dietary metabolizable energy (ME) of compound feeds of sheep by using proximate analysis measurements or digestible nutrients. Sixty-six castrated Dorper × Thin-tailed Han crossbred rams ( $(49.6 \pm 1.3)$  kg of body weight) were randomly assigned into 11 groups (one basal diet group and 10 experimental diet groups). Digestibility trials were conducted to measure and calculate individual digestible energy (DE) and ME, establishing the metabolic energy and proximate nutrients and digestible nutrient prediction model with the linear regression method. The results indicated that: the OM and GE digestibility of diets were significantly related to CP, NDF, ADF and GE ( $P < 0.01$ ); CP digestibility was significantly related to CP, NDF and ADF

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家肉羊产业技术体系 (CARS-39); 国家“十二五”支撑计划“肉羊健康养殖模式构建与示范” (2011BAZ01734)

作者简介: 赵江波 (1990-), 男, 河北邢台人, 硕士生, 主要从事动物营养与饲料科学研究, E-mail: zhaojiangbo0722@163.com

\* 通信作者: 刁其玉, 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: diaoqiuyu@caas.cn

( $P < 0.01$ ), and significantly related to OM ( $P < 0.05$ ); NDF and ADF digestibility were significantly related to GE and CP ( $P < 0.01$ ). NDF digestibility was significantly related to OM and NDF ( $P < 0.05$ ). The prediction equation of dietary ME using proximate analysis measurements was  $ME (MJ \cdot kg^{-1}) = 38.881 - 19.516ADF (\%) - 28.672OM (\%)$  ( $R^2 = 0.640, n = 60, P < 0.01$ ); The prediction equation of dietary ME using digestible nutrients was  $ME (MJ \cdot kg^{-1}) = 1.613DE (MJ \cdot kg^{-1}) - 14.705DOM (\%) + 2.743DNDF (\%) - 3.179$  ( $R^2 = 0.879, n = 60, P < 0.01$ ). In conclusion, there were significant correlations between proximate nutrients, digestible nutrients and ME. The prediction model of proximate nutrients and digestible nutrients can be used in routine analysis.

**Key words:** mutton sheep; concentrate; digestible energy; metabolizable energy; digestible nutrients; prediction model

动物营养需要量、饲料营养价值评定和动物营养代谢是动物营养学科的永恒研究主题,也是饲料工业的科学基础,其中动物营养需要量和饲料营养价值评定更是饲料工业向精准化和标准化发展的重要技术支撑<sup>[1]</sup>。2014年全国肉类产量为8707万吨,比1978年增长了9.2倍,人均肉类占有量从不足9 kg增加到近64 kg。畜牧业的发展为改善居民膳食营养和保障国家食品安全作出重要贡献的同时也为动物饲料配方的制作者提出了更高的要求。饲料中精料的含量以及有效能的高低对动物的产肉性能有着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。在制作饲料配方时,饲料原料的营养参数在诸多饲养标准中均有参考值,实践中反刍动物的饲料多是由粗饲料搭配各种精料原料组合而成的。饲料的营养价值一方面取决于饲料本身营养物质的含量;另一方面取决于饲料在动物体内的转化效率。不同的精料与粗饲料进行搭配会对饲料的能值有着显著的影响。然而在反刍动物上相关方面的研究却相对缺乏。家禽通过代谢试验得出了代谢能;猪通过消化试验得出了消化能;奶牛通过呼吸测热试验得出了饲料的净能;并且根据测定出的能值与饲料概略养分之间建立了饲料有效能的预测模型<sup>[4-7]</sup>。近年来反刍动物饲料营养价值评定模型的应用,又使这些评定方法得到进一步深入和扩展。在肉羊上刘洁等建立了不同精粗比配合饲料代谢能的预测模型<sup>[8]</sup>,饲料的来源比较单一。

本研究旨在探究不同类别精料在肉羊配合饲料中所产生的能量,并建立预测模型,为中国肉用绵羊饲料营养价值评定提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间与地点

本试验于2015年7—9月在中国农业科学院南

口中试基地进行。

### 1.2 试验动物与设计

试验选取66只18月龄体重为(49.6±1.3) kg的杜泊×小尾寒羊F<sub>1</sub>代杂交去势肉羊,采用完全随机区组设计分为11个处理,包括1个基础饲料处理组和10个试验饲料处理组,每个处理6只羊。本试验基础饲料由羊草、玉米、豆粕和预混料组成,采用同一批原料进行配制以确保原料的一致性。根据前期不同比例的精料不同梯度替换试验结果,单一精料替换比例在30%时,所得的代谢能与实际测定值最为接近,且配方精粗比与生产实践最为接近,所以在本次试验中饲料分别由燕麦、大麦、小麦、玉米、高粱、豆粕、菜籽、棉籽、花生粕、DDGS替换基础饲料中供能饲料的30%后重新组成,即替换羊草、玉米和豆粕。饲料配方见表1。

### 1.3 饲养管理

试验前使用伊维菌素对肉羊进行驱虫,晨饲前称重并适应代谢笼。由于各试验饲料的原料存在较大差异,因此自由采食量亦会不同,因此试验开始前进行预饲,将采食量最低组的饲喂量定为各组试验期的饲喂量<sup>[8]</sup>。

### 1.4 物质代谢试验

预试期完成饲料过渡后,开始物质代谢试验。试验期共16 d,其中前8 d为预试期,后8 d为粪尿收集期。分别于早08:00和晚18:00进行饲喂,每次各饲喂600 g,自由饮水。采用全收粪尿法收集粪、尿,每天称取并记录每只羊排粪量,按10%取样,将每只羊5 d的粪样混合冷冻保存,用盛有100 mL 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>的塑料桶收集尿液,以防止贮存过程中有尿酸沉淀,稀释至5 L,对稀释尿液充分混合,用纱布过滤后每天取样30 mL,将每只羊5 d的尿样混合后-20℃冷冻保存以备测定尿能(UE)<sup>[9]</sup>。

表 1 饲料组成及营养水平(绝干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of diets (dry matter basis)

项目 Item	组成 Ingredient											玉米酒糟饲料 DDGS diet
	基础饲料 Basal diet	燕麦饲料 Oat diet	大麦饲料 Barley diet	小麦饲料 Wheat diet	高粱饲料 Sorghum diet	玉米饲料 Corn diet	豆粕饲料 Soybean meal diet	菜籽粕饲料 Rapeseed meal diet	棉籽粕饲料 Cottonseed meal diet	花生粕饲料 Peanut meal diet	玉米酒糟饲料 DDGS diet	
组成 Ingredient												
不同精料替换比例	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
玉米 Corn	19.06	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25	13.25
豆粕 Soybean meal	12.19	8.46	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	66.46	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00
磷酸氢钙 CaHPO <sub>4</sub>	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
石粉 CaCO <sub>3</sub>	0.15	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	0.5	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 <sup>1)</sup>	0.24	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	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient level <sup>2)</sup>												
干物质 DM	93.02	93.19	92.86	92.47	93.27	92.44	92.86	92.67	93.04	91.92	92.45	92.45
有机物 OM	86.75	86.89	86.68	84.98	86.44	86.17	85.41	84.71	86.25	85.44	85.87	85.87
总能/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) GE	17.89	17.97	17.73	17.59	17.82	17.89	18.18	18.23	18.40	18.37	18.84	18.84
粗蛋白质 CP	12.03	11.24	10.60	12.90	11.16	10.64	20.02	17.56	20.60	22.30	16.71	16.71
粗脂肪 EE	2.97	3.18	2.00	2.00	2.46	2.23	1.60	2.04	1.19	2.97	4.64	4.64
中性洗涤纤维 NDF	63.24	58.09	67.50	56.85	59.16	63.34	51.55	63.18	52.63	54.94	56.13	56.13
酸性洗涤纤维 ADF	31.26	22.62	24.57	21.29	23.01	23.97	24.61	33.09	22.96	24.96	23.31	23.31

<sup>1)</sup> 预混料为每千克饲料提供: 铜 16.0 mg, 铁 60 mg, 锰 40 mg, 锌 70 mg, 碘 0.8 mg, 硒 0.3 mg, 钴 0.3 mg, 维生素 A 12 000 IU, 维生素 D<sub>3</sub> 5 000 IU, 维生素 E 50 IU。<sup>2)</sup> 营养水平为实测值

<sup>1)</sup> One kilogram TMR contains: Cu 16.0 mg, Fe 60 mg, Mn 40 mg, Zn 70 mg, I 0.8 mg, Se 0.3 mg, Co 0.3 mg, VA 12 000 IU, VD<sub>3</sub> 5 000 IU, VE 50 IU. <sup>2)</sup> Nutrient levels are measured values

## 1.5 气体代谢

粪尿收集期的最后 3 d 进行气体代谢试验, 其中前 24 h 使动物适应呼吸代谢箱, 确保动物正常状态, 后 48 h 实测动物甲烷产量<sup>[10]</sup>。试验中气体的收集采用美国 SABLE 公司生产的 LGR(908-0011-002) 气体测定仪连接半开放式呼吸代谢箱收集, 气体流速为 300 L·min<sup>-1</sup>, 甲烷的百秒测量精度为 0.3 ppb。试验动物适应呼吸代谢箱后, 开始连续 48 h 的气体测定, 在 48 h 内每半小时测定一次呼吸代谢箱内甲烷的产量, 每只试验动物共得到 96 个甲烷产量的试验数据, 求其平均值作为每天每只试验动物的甲烷产量。

## 1.6 测定指标及方法

测定指标: 饲料和粪中的总能(GE)、有机物(OM)、干物质(DM)、粗蛋白质(CP)、粗脂肪(EE)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量指标测定参考《饲料分析及饲料质量检测技术》第三

版<sup>[11]</sup>进行测定。能量采用 Parr-6400 氧弹式热量测定仪测定, 对于尿能的测定, 取 5 块定量滤纸分别测定能值, 计算出滤纸的平均能值。将 10 mL 尿液分多次滴在滤纸上, 65 °C 烘干后于能量仪中测定, 得到滤纸和尿液的总能值。

饲料及原料养分表观全肠道消化率计算公式计算方法参照 O. Adelo<sup>[12]</sup>的公式:

饲料中某种养分的表观消化率(%) = (食入颗粒料总量 × 颗粒料中该养分的含量 - 排粪量 × 粪中该养分含量) / (食入颗粒料总量 × 颗粒料中该养分含量) × 100 %;

饲料的 DE(MJ·kg<sup>-1</sup>) = 总能(GE) - 粪能(FE);

甲烷能(CH<sub>4</sub>E)<sup>[13]</sup>(kJ) = 甲烷(L) × 39.54 kJ·L<sup>-1</sup>;

饲料的 ME(MJ·kg<sup>-1</sup>) = GE - (FE + UE + CH<sub>4</sub>E);

$UE(MJ \cdot kg^{-1}) = \text{总能值(滤纸+尿液)} - \text{滤纸能值}$ 。

### 1.7 数据处理

试验数据采用 Microsoft Office Excel 进行初步处理后,采用 SAS 9.2 统计软件中的 Correlate 过程对饲料的概略养分、可消化养分、能值等进行相关分析,用 Regression 过程中的 stepwise 方式进行回归分析,建立预测方程。

## 2 结果

### 2.1 10 种试验饲料的营养物质消化率

10 种试验饲料的干物质、有机物、总能、粗蛋白质、粗脂肪中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维平均消化率分别是 61.74%、64.92%、63.09%、72.18%、56.83%、53.04%、40.98%(表 2)。10 种试验饲料

中粗脂肪消化率的变异系数最大为 21.19%;其次为酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维,变异系数分别为 11.36%和 10.75%;其他营养物质如粗蛋白质、干物质、有机物、总能的消化率的变异系数分别为 8.32%、6.49%、6.18%、5.79%均在 10%以下。

### 2.2 消化率与概略养分含量的相关关系

饲料的有机物消化率和总能消化率与 CP、NDF、ADF 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与 GE 呈极显著正相关( $P < 0.01$ );粗蛋白质消化率与 NDF、ADF 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与 CP 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 OM 呈显著负相关( $P < 0.05$ );中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维消化率与 GE 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与 CP 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),其中中性洗涤纤维消化率与 OM 和 NDF 呈显著正相关( $P < 0.05$ )(表 3)。

表 2 10 种日粮营养成分消化率

Table 2 Nutrient digestibility of 10 diets

项目 Item	燕麦	大麦	小麦	高粱	玉米	豆粕	菜籽粕	棉籽粕	花生粕	玉米酒	平均值 Mean	变异 系数 CV
	饲料	饲料	饲料	饲料	饲料	饲料	饲料	饲料	饲料	糟饲料		
	Oat diet	Barley diet	Wheat diet	Sorghum diet	Corn diet	Soybean meal diet	Rapeseed meal diet	Cottonseed meal diet	Peanut meal diet	DDGS diet		
干物质 DM	63.85	61.42	68.93	63.93	57.46	54.84	62.27	59.05	60.85	64.78	61.74	6.49
有机物 OM	68.22	64.32	72.23	66.75	60.65	58.32	64.36	62.27	64.41	67.65	64.92	6.18
总能 GE	65.59	60.90	69.85	65.28	60.54	56.43	63.14	61.02	63.20	64.95	63.09	5.79
粗蛋白质 CP	68.56	69.36	78.07	68.33	73.15	63.56	75.47	80.38	79.57	65.37	72.18	8.32
粗脂肪 EE	72.11	55.09	31.53	63.89	66.77	64.33	44.56	49.77	59.37	60.89	56.83	21.19
中性洗涤纤维 NDF	54.17	60.49	58.95	60.70	48.17	51.77	50.32	44.36	47.31	54.13	53.04	10.75
酸性洗涤纤维 ADF	42.94	44.79	47.06	45.49	35.90	43.74	39.14	33.90	35.31	41.53	40.98	11.36

表 3 养分消化率与概略养分相关性分析

Table 3 Correlation between nutrient digestibility and proximate nutrient

项目 Item	有机物 OM	总能 GE	粗蛋白质 CP	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF
有机物消化率 OMD	0.223	0.624**	-0.496**	-0.514**	-0.652**
总能消化率 GED	0.142	0.502**	-0.404**	-0.557**	-0.681**
粗蛋白质消化率 CPD	-0.327*	0.113	0.569**	-0.574**	-0.426**
中性洗涤纤维消化率 NDFD	0.271*	-0.700**	0.776**	0.281*	0.168
酸性洗涤纤维消化率 ADFD	0.083	-0.684**	0.670**	0.219	0.020

\*\* .  $P < 0.01$ ; \* .  $P < 0.05$ . The same as Table 6 and Table 8

将饲料的常规含量与消化率的分析结果(表 3)引入线性回归分析,建立饲料概略养分含量与消化率之间的预测方程(表 4),结果表明,消化率可以用

饲料中的概略养分进行预测,并且随着预测因子的增加,方程的准确性也随之增加。

表 4 养分消化率与概略养分预测方程

Table 4 Prediction model for nutrient digestibility and proximate nutrients

编号 No.	预测方程 Prediction equation	R <sup>2</sup>	P-value
1	OMD=1.987-0.873ADF-0.068GE	0.687	P<0.01
2	OMD=2.164-0.528ADF-0.075GE-0.273NDF	0.738	P<0.01
3	OMD=1.952-0.338ADF-0.059GE-0.377NDF-0.256CP	0.764	P<0.01
4	GED=1.634-0.9ADF-0.48GE	0.610	P<0.01
5	GED=1.801-0.573ADF-0.054GE-0.259NDF	0.662	P<0.01
6	CPD=0.896-0.079NDF+1.084CP-1.273ADF	0.684	P<0.01
7	CPD=0.876-1.121CP-1.383ADF	0.682	P<0.01
8	CPD=1.917+1.447CP-1.363ADF-0.065GE	0.760	P<0.01
9	NDFD=0.699-1.185CP	0.602	P<0.01
10	NDFD=1.765-0.848CP-0.067GE	0.683	P<0.01
11	NDFD=1.708-0.783CP-0.070GE+0.215NDF	0.712	P<0.01
12	ADFD=1.669-0.071GE-0.535CP	0.569	P<0.01
13	ADFD=1.603-0.072GE-0.607CP+0.435ADF	0.615	P<0.01

### 2.3 饲料概略养分含量与有效能的相关关系

10 种试验饲料的消化能平均值为 13.74 MJ·kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 4.89; 代谢能平均值为 10.62 MJ·kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 6.59; 其中小麦的消化能和代谢能最高, 分别为 14.68 MJ·kg<sup>-1</sup> 和

11.45 MJ·kg<sup>-1</sup>, 菜籽粕的消化能和代谢能最低, 分别为 12.32 MJ·kg<sup>-1</sup> 和 9.36 MJ·kg<sup>-1</sup>。消化能/代谢能平均比值为 0.77, 变异系数为 3.61, 其中玉米酒糟的消化能/代谢能比值最大为 0.82, 最小值为豆粕和高粱的 0.74(表 5)。

表 5 10 种试验饲料的消化能和代谢能

Table 5 Digestible energy and metabolizable energy of 10 diets

项目 Item	燕麦 Oat diet	大麦 Barley diet	小麦 Wheat diet	高粱 Sorghum diet	玉米 Corn diet	豆粕 Soybean meal diet	菜籽粕 Rapeseed meal diet	棉籽粕 Cottonseed meal diet	花生粕 Peanut meal diet	玉米酒 糟饲料 DDGS diet	平均值 Mean	变异 系数 CV
消化能/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) DE	14.17	12.91	14.68	14.02	13.88	13.37	12.32	14.00	13.77	13.77	13.74	4.89
代谢能/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) ME	10.70	9.82	11.45	10.33	10.89	9.89	9.36	11.08	11.08	11.25	10.62	6.59
消化能/代谢能 DE/ME	0.75	0.76	0.78	0.74	0.78	0.74	0.76	0.79	0.80	0.82	0.77	3.61

饲料中的 NDF 和 ADF 与饲料消化能和代谢能呈极显著负相关( $P<0.01$ ), OM、GE、CP 与饲料消化能和代谢能无显著相关( $P>0.05$ )(表 6)。

将饲料的常规成分含量与饲料的消化能和代谢能分析结果(表 6)引入线性回归方程。不同来源精料组成的预测模型中消化能和代谢能的最佳预测因子均为 ADF, 通过 ADF 与其他概略养分进行搭配, 预测模型的 R<sup>2</sup> 均有不同程度的提高(表 7)。

表 6 日粮消化能和代谢能与饲料概略养分含量的相关性分析

Table 6 Correlation between proximate analysis and digestible energy and metabolizable energy of diets

项目 Item	有机物 OM	总能 GE	粗蛋 白质 CP	中性洗涤 纤维 NDF	酸性洗涤 纤维 ADF
消化能 DE	0.162	0.219	-0.245	-0.724**	-0.807**
代谢能 ME	0.029	0.046	-0.063	-0.610**	-0.714**

表 7 概略养分预测饲料消化能和代谢能的方程

Table 7 Prediction equation of dietary digestible and metabolizable energy using proximate nutrients

编号 No.	预测方程 Prediction equation	$R^2$	$P$ -value
1	DE=16.877-18.431ADF	0.651	$P<0.01$
2	DE=17.910-13.103ADF-4.421NDF	0.751	$P<0.01$
3	DE=18.653-8.751ADF-6.667NDF-4.255CP	0.791	$P<0.01$
4	ME=13.551-16.435ADF	0.510	$P<0.01$
5	ME=38.881-19.516ADF-28.672OM	0.640	$P<0.01$

## 2.4 饲料中可消化养分与代谢能之间的相关关系

消化能与饲料中的 DDM、DOM 呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与 ADF 呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 代谢能与饲料中的 DDM、DOM 和 DE 呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与 DADF 呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ) (表 8)。

将可消化营养物质以及消化能和代谢能引入线性回归分析, 建立利用可消化营养物质预测有效能的预测方程 (表 9 和表 10)。通过 DOM、DCP 和 DADF 搭配可准确的预测消化能; 代谢能也可以通过 DE、DOM 和 DNDF 进行准确的预测。

表 8 日粮代谢能与可消化营养物质的相关

Table 8 Correlation between digestible nutrients and metabolizable energy of diets

项目 Item	消化能 DE	可消化干物质 DDM	可消化有机物 DOM	可消化粗蛋白质 DCP	可消化中性洗涤纤维 DNDF	可消化酸性洗涤纤维 DADF
消化能 DE	1	0.859**	0.865**	0.099	-0.180	-0.338*
代谢能 ME	0.877**	0.604**	0.611**	0.061	-0.182	-0.375**

表 9 日粮消化能和代谢能与可消化营养物质预测方程

Table 9 Prediction equation of digestible energy and metabolizable energy of diets from digestible nutrients

编号 No.	预测方程 Prediction equation	$R^2$	$P$ -value
1	DE=3.647+16.199DOM	0.748	$P<0.01$
2	DE=1.791+18.424DOM+5.990DCP	0.821	$P<0.01$
3	DE=2.972+17.577DOM+4.487DCP-5.854DADF	0.836	$P<0.01$
4	ME=3.256+11.747DOM	0.373	$P<0.01$
5	ME=0.907+14.563DOM+7.581DCP	0.584	$P<0.01$

表 10 日粮代谢能与可消化营养物质和消化能预测方程

Table 10 Prediction equation of metabolizable energy of diets from digestible nutrients and digestible energy

编号 No.	预测方程 Prediction equation	$R^2$	$P$ -value
1	ME=0.901DE-1.626	0.770	$P<0.01$
2	ME=1.423DE-11.309DOM-1.935	0.857	$P<0.01$
3	ME=1.613DE-14.705DOM+2.743DNDF-3.179	0.879	$P<0.01$

## 3 讨论

### 3.1 饲料概略养分含量与消化率的相关关系

经过国内外学者多年的研究发现, 饲料养分与

饲料的消化率之间存在着显著的回归关系<sup>[14-17]</sup>。邓卫东等<sup>[18]</sup>测定了云南省 9 个牛羊饲养基地饲料样品概略养分的体外消化率, 分析得出干物质的体外消化率与 CP 呈显著正相关, 与 NDF 含量呈显著负

相关,可以用饲料中养分的含量来预测饲料的干物质体外消化率;刘洁等<sup>[8]</sup>通过对 12 种不同精粗比的日粮进行分析得出,饲料养分与消化率之间存在着显著的回归关系,其中 NDF 为最佳预测因子。本试验采用的 10 种试验饲料中精粗比保持不变,但日粮的精料来源变化较大,其结果同样表明饲料养分与消化率之间存在着显著的回归关系,与前人研究结果不同的是,不同养分的消化率其预测因子也不同,OM、GE 和 CP 的消化率与 NDF 和 ADF 均达到极显著的相关性,NDF 和 ADF 的消化率与 GE 和 CP 达到极显著水平,最佳预测因子虽有不同但代谢能的预测公式相似,刘洁等得出的代谢能最佳预测方程是由 NDF、OM 和 CP 组成且 CP 的系数极小,与本试验的代谢能最佳预测方程组合 ADF 和 OM 相似均由洗涤纤维和 OM 组成,侧面验证了本试验方程的准确性。本试验中,饲料原料的多样化决定了每种试验饲料营养成分存在着较大的差异,饲料中各种养分消化率的预测因子也会有所不同。究其原因可能是由饲料中营养物质结构不同造成的,生产实践中将反刍动物的饲料组成划分为粗饲料和精饲料,从本质上划分的是对饲料中结构性碳水化合物(SC)和非结构性碳水化合物的划分(NSC),其中 SC 主要为纤维类物质,受坚硬的细胞壁和结构的影响,可利用能量难以被畜体直接利用<sup>[19]</sup>,相对于粗料,精料中所含的可快速消化的碳水化合物较多,可以迅速的为瘤胃微生物提供大量可利用的能量,同理,饲料中蛋白的含量也可分为快速降解部分、慢速降解部分以及不可降解部分,各部分的含量对瘤胃微生物菌群起着关键作用,最终决定着营养物质的吸收利用情况,因此饲料中养分的结构对饲料中营养物质的消化率起着决定性作用,导致最佳预测因子有所差异。

### 3.2 饲料概略养分含量与有效能的相关关系

反刍动物饲料有效能的测定有体内法、体外法、半体内法和预测法等,本试验采用的是体内法结合套算法,实际测定了 10 种不同饲料原料组成的饲料消化能和代谢能,建立了用饲料常规养分预测饲料消化能和代谢能的预测方程。在生产实际中我们多是用日粮的消化能来预测代谢能,但消化能的测定对于生产中绝大部分是不切实际的,因此用饲料的常规养分建立预测模型,进行消化能和代谢能的预测是符合生产实际情况的。某一种饲料或者混合饲料中所含的养分不一样,其消化率也会有一定差异,

最终直接影响饲料的有效能。实用、快捷、切合实际是预测模型的特点,所以在国际上应用也比较广泛<sup>[20-23]</sup>。饲料中概略养分的含量决定着饲料有效能的多少,通常可以分为两种方式进行预测,一种是根据饲料消化率高的养分进行预测,另一种是根据消化率低的养分进行预测<sup>[24]</sup>。本试验中的 DE 和 ME 与概略养分中的洗涤纤维呈极显著负相关,其对有机物的消化率有限制作用,以纤维成分为主要指标可以较准确的评定饲料的能量,有研究认为,NDF 预测效果更佳,而且在以 NDF 为主要预测因子的方程内,如果再引入相关性高的其他成分,方程的准确度可以进一步提高;试验中最佳预测因子为 ADF,而不是 NDF,可能是本试验中精料多使用的为饼粕类饲料,所以结果与李明元等人的研究结果相似<sup>[25]</sup>;饲料的其他营养成分与饲料的 DE 和 GE 间的相关性均没有达到显著水平,可能是有些养分如 OM、DM 等含量均保持在同一水平上,波动较小;或者是某些养分如 CP 波动较大,从而没有线性关系。

### 3.3 可消化营养物质与有效能的相关关系

饲料中的概略养分可以用饲料中的 DE 和 ME 进行有效的预测,若饲料中的某些概略养分变化较大则可能出现预测因子差异不显著的情况。有些饲料中化学成分虽然相同,但其营养成分不同则会导致其消化率存在较大差异,再者相同化学成分的不同原料也会因其含有特定的抗营养因子造成养分利用受阻,因此有必要将可消化养分引入预测模型,提高模型的准确性。研究表明,饲料中可消化营养物质含量与代谢能之间存在显著相关,可以用饲料可消化营养建立代谢能的预测模型<sup>[26-27]</sup>。本试验在用饲料的概略养分建立回归模型后,将可消化养分与饲料的 DE 和 ME 引入线性回归,所建立的方程  $R^2$  得到显著提升。本试验实测的有效能中 ME/DE 的平均值为 0.77 与 NRC(2007)中推荐常用值 0.82 相比,本试验所得值略低,究其原因首先在于 NRC 中所用的只为推测值,与实际情况会有一定差异;其次本试验中各种替换后的试验日粮能氮水平不同,其含有的抗营养因素也不同,因此造成饲料的能量消化率差距较大,最终与推荐值有所差异。

在生产实际中,简洁、高效、准确的测定方法是目前科学工作者所追寻的,用可消化养分进行预测固然能提高预测的准确性,但同时增加了工作量,因此在实际应用中应考虑实际需求选择适合的预测方程。

## 4 结 论

4.1 饲料中的营养物质消化率与其化学成分存在相关性,饲料的 OMD 和 GED 的最佳预测因子为 ADF;CPD 和 NDFD 的最佳预测因子为 CP,ADFD 的最佳预测因子为 GE。

4.2 用概略养分预测饲料代谢能的预测因子最佳组合为 ADF、OM;消化能的预测因子最佳组合为 ADF、NDF 和 CP。

4.3 利用可消化营养物质建立 DE 和 ME 的预测模型比概略养分建立的预测模型准确性高。ME 预测模型预测因子最佳组合为 DE、DOM 和 DNDF;DE 预测模型预测因子最佳组合为 DOM、DCP 和 DAF。

## 参考文献(References):

- [1] 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)
- [2] 赵彦光,胡钟仁,谢 萍,等. 不同营养水平精饲料对萨能奶山羊生产性能及消化率的影响[J]. 饲料工业,2013,34(23):53-57.  
ZHAO Y G, HU Z R, XIE P, et al. Effect of different nutrient levels of concentrate on the production performance and digestibility of dairy goat[J]. *Feed Industry*, 2013,34(23):53-57. (in Chinese)
- [3] ABATE A L, MAYER M. Prediction of the useful energy in tropical feeds from proximate composition and *in vivo* derived energetic contents 1. Metabolizable energy[J]. *Small Ruminant Res*, 1997, 25(1): 51-59.
- [4] 蒋守群,蒋宗勇,郑春田,等. 饲料代谢能和粗蛋白水平对黄羽肉鸡生产性能和肉品质的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(24):5205-5216.  
JIANG S Q, JIANG Z Y, ZHENG C T, et al. Effects of levels of dietary metabolizable energy and crude protein on growth performance and meat quality of Chinese yellow broilers between 43 and 63 days [J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2013, 46(24): 5205-5216. (in Chinese)
- [5] 张建华,蒋桂韬,戴求仲,等. 4~7 周龄黑羽公番鸭代谢能和粗蛋白质需要量的研究[J]. 动物营养学

报,2012,24(12):2348-2355.

ZHANG J H, JIANG G T, DAI Q Z, et al. Metabolizable energy and crude protein requirements of black male muscovy ducks aged from 4 to 7 weeks[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(12): 2348-2355. (in Chinese)

- [6] 贺 喜,陈达图,胡官波,等. 生长猪大米蛋白消化能、代谢能的评定及预测模型研究[J]. 动物营养学报,2015,27(6):1740-1749.  
HE X, CHEN D T, HU G B, et al. Evaluation and prediction model of digestible energy and metabolic energy of rice protein for growing pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(6):1740-1749. (in Chinese)
- [7] 刘德稳. 生长猪常用七种饲料原料净能预测方程[D]. 北京:中国农业大学,2014.  
LIU D W. Determination and prediction equations for the net energy content of seven common ingredients in growing pigs[D]. Beijing:China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [8] 刘 洁,刁其玉,赵一广,等. 肉用绵羊饲料养分消化率和有效能预测模型的研究[J]. 畜牧兽医学报,2012, 43(8): 1230-1238.  
LIU J, DIAO Q Y, ZHAO Y G, et al. Prediction of nutrient digestibility and energy concentrations using chemical compositions in meat sheep feeds[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2012, 43(8): 1230-1238. (in Chinese)
- [9] GALVANI D B, PIRES C C, KOZLOSKI G V, et al. Energy requirements of texel crossbred lambs[J]. *J Anim Sci*, 2008, 86(12): 3480-3490.
- [10] DENG K D, DIAO Q Y, JIANG C G, et al. Energy requirements for maintenance and growth of dorper crossbred ram lambs[J]. *Livest Sci*, 2012, 150(1-3): 102-110.
- [11] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 第 3 版. 北京:中国农业大学出版社,2007.  
ZHANG L Y. Feed analysis and quality inspection technology[M]. 3rd edition. Beijing:China Agricultural University Press, 2007. (in Chinese)
- [12] ADELOA O. Digestion and balance techniques in pigs. In:Lewis A. J, and Southern L. L, (ed.) Swine Nutrition, 2nd edition [M]. Washington, DC: CRC Press,2001:906.
- [13] 冯仰廉,杨嘉实. 畜禽能量代谢[M]. 北京:中国农业出版社,2004.  
FENG Y L, YANG J S. Energy metabolism of live-



- stock and poultry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. (in Chinese)
- [14] ADESOGAN A T, OWEN E, GIVENS D I. Prediction of the *in vivo* digestibility of whole crop wheat from *in vitro* digestibility, chemical composition, *in situ* rumen degradability, *in vitro* gas production and near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 1998, 74(3): 259-272.
- [15] NOUSIAINEN J, RINNE M, HELLÄMÄKI M, et al. Prediction of the digestibility of primary growth and regrowth grass silages from chemical composition, pepsin-cellulase solubility and indigestible cell wall content[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2003, 110(1-4): 61-74.
- [16] OWENS F N, SAPIENZA D A, HASSEN A T. Effect of nutrient composition of feeds on digestibility of organic matter by cattle: A review[J]. *J Anim Sci*, 2010, 88(13 Suppl):151-169.
- [17] AMMAR H, LÓPEZ S, GONZÁLEZ J S, et al. Seasonal variations in the chemical composition and *in vitro* digestibility of some Spanish leguminous shrub species[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2004, 115(3-4): 327-340.
- [18] 邓卫东, 席冬梅, 毛华明. 云南省反刍家畜主要饲料营养价值评价[J]. 黄牛杂志, 2002, 28(1): 23-27.  
DENG W D, XI D M, MAO H M. Nutritional value evaluations of main feeds for ruminant in Yunnan Province [J]. *Journal of Yellow Cattle Science*, 2002, 28(1): 23-27. (in Chinese)
- [19] 王立志, 李红宇. 不同精粗比对反刍动物采食行为及饲料利用的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2006, 36(2): 41-42.  
WANG L Z, LI H Y. Effects of different forage ratio on ruminant feeding behavior and feed utilization[J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2006, 36(2): 41-42. (in Chinese)
- [20] THERIEZ M, CASTRILLO C, VILLETTE Y. Influence of metabolizable energy content of the diet and of feeding level on lamb performances II. Utilization of metabolizable energy for growth and fattening[J]. *Livest Prod Sci*, 1982, 9(4): 487-500.
- [21] JUST A, JØRGENSEN H, FERNÁNDEZ J A. Prediction of metabolizable energy for pigs on the basis of crude nutrients in the feeds[J]. *Livest Prod Sci*, 1984, 11(1): 105-128.
- [22] DEAVILLE E R, JUMPHRIES D J, GIVENS D I. Whole crop cereals: 2. Prediction of apparent digestibility and energy value from *in vitro* digestion techniques and near infrared reflectance spectroscopy and of chemical composition by near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2009, 149(1-2): 114-124.
- [23] LOSADA B, GARCÍA-REBOLLAR P, ÁLVAREZ C, et al. The prediction of apparent metabolizable energy content of oil seeds and oil seed by-products for poultry from its chemical components, *in vitro* analysis or near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2010, 160(1-2): 62-72.
- [24] 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[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2009.  
TAO C W. Study on nutritional value in common roughage for ruminants and establishment of prediction model of its bioavailable energy[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [25] 李明元, 王康宁. 用纤维等饲料成分预测植物性蛋白饲料的猪消化能值[J]. 西南农业学报, 2000, 13(Suppl): 41-50.  
LI M Y, WANG K N. Estimation of the digestible energy values of plant protein supplement with fibre and other feedstuff composition in pig [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 13(Suppl): 41-50. (in Chinese)
- [26] DETMANN E, FILHO VALADARES S C, PINA D S, et al. Prediction of the energy value of cattle diets based on the chemical composition of the feeds under tropical conditions [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2008, 143(1-4): 127-147.
- [27] YAN T, AGNEW R E. Prediction of nutritive values in grass silages: I. Nutrient digestibility and energy concentrations using nutrient compositions and fermentation characteristics[J]. *J Anim Sci*, 2004, 82(5): 1367-1379.