

DOI: 10.11686/cyxb2017019

http://cyxb.lzu.edu.cn

魏明, 崔志浩, 陈志强, 郑月, 颜培实. 直接法和回归法测定玉米青贮对肉牛有效能值的研究. 草业学报, 2017, 26(11): 113-122.

WEI Ming, CUI Zhi-Hao, CHEN Zhi-Qiang, ZHENG Yue, YAN Pei-Shi. Comparing the calculation of corn silage's effective energy value for beef cattle using direct and regression methods. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(11): 113-122.

## 直接法和回归法测定玉米青贮对肉牛有效能值的研究

魏明, 崔志浩, 陈志强, 郑月, 颜培实\*

(南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:**旨在应用直接法和回归法测定肉牛玉米青贮的消化能、代谢能和净能值,并探讨精料回归法用于估测肉牛单一粗饲料原料能值的可行性。试验选取 12 头体况良好、体重相近 $[(259 \pm 14.08) \text{ kg}]$ 的生长期公牛,随机分为 3 组,每组 4 头牛。分两期试验进行,试验一按试验牛自由采食量的 95%、80%和 60%3 个水平饲喂全玉米青贮日粮;试验二在固定玉米青贮投喂量的基础上,各组分别按青贮饲喂量的 15%、25%和 50%(干物质基础)添加精料补充料。试验每期 14 d,其中前 10 d 为预饲期,后 4 d 为正试期。正试期消化代谢和呼吸代谢试验同期进行,测定玉米青贮对肉牛能量代谢规律。结果表明:1)肉牛对全玉米青贮日粮的各种营养物质消化率和能量消化率及代谢率随饲喂水平的提高总体逐渐降低;肉牛能量采食量(总能、消化能、代谢能和净能)随饲喂水平的提高逐渐升高,组间差异显著( $P < 0.05$ )。2)玉米青贮对肉牛的消化能、代谢能和净能值随着饲喂水平的提高呈下降趋势,各有效能值变化范围分别为 10.58~11.48 MJ/kg, 8.33~9.44 MJ/kg 和 5.20~6.21 MJ/kg。3)添加精料补充料显著提高了肉牛对日粮的干物质采食量和粗蛋白消化率( $P < 0.05$ ),而洗涤纤维消化率精料添加比例组间差异不明显( $P > 0.05$ );随着精料添加比例的增加,肉牛对日粮的能量采食量(总能、消化能、代谢能和净能)和能量消化率及代谢率逐渐上升,消化能代谢率各组之间无显著差异( $P > 0.05$ )。4)根据试验日粮有效能值与精料添加量之间的关系建立线性回归方程后,外推估测得玉米青贮的消化能、代谢能和净能值分别为 10.53 MJ/kg, 8.29 MJ/kg 和 5.35 MJ/kg,与 95%饲喂水平组直接测定结果(10.58 MJ/kg, 8.33 MJ/kg 和 5.20 MJ/kg)差异不显著( $P > 0.05$ )。综上所述,回归法测定玉米青贮对肉牛的有效能值与直接法测定结果差异不明显,精料回归法可以用于估测肉牛单一粗饲料的有效能值。

**关键词:**直接法;回归法;代谢能;净能;肉牛;玉米青贮

## Comparing the calculation of corn silage's effective energy value for beef cattle using direct and regression methods

WEI Ming, CUI Zhi-Hao, CHEN Zhi-Qiang, ZHENG Yue, YAN Pei-Shi\*

College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

**Abstract:** A study was conducted to determine the digestible energy (DE), metabolizable energy (ME) and net energy (NE) values of corn silage for beef cattle by direct and regression methods. The study sought to determine the feasibility of estimating the effective energy value of a single roughage using regression techniques. Twelve bulls with similar body weight  $[(259 \pm 14.08) \text{ kg}]$  were randomly divided into three groups of four. In

收稿日期:2017-01-18;改回日期:2017-03-15

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303145)和国家自然科学基金(31501930)资助。

作者简介:魏明(1990-),男,浙江湖州人,在读博士。Email:18551625936@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail:yanps@hotmail.com

experiment 1, bulls were fed a full corn silage diet at 3 levels of feed intake: 95%, 80% and 60% of ad libitum intake (AL). In experiment 2, bulls were fed corn silage diets with concentrate added at 3 different ratios (15%, 25% and 50% respectively). Each experiment lasted for 14 days, including a 10-d pretest period and a 4-d test period. Digestibility and respirometry tests were conducted to determine the energy metabolism of corn silage for beef cattle. The results were as follows: 1) With increasing feed intake, the nutrient digestibility, energy digestibility and metabolizability of the full corn silage diet decreased, whereas energy intake improved significantly ( $P < 0.05$ ). 2) The DE, ME and NE values of corn silage tended to decrease with increasing levels of feed intake, with the decreases ranging from 10.58–11.48 MJ/kg, 8.33–9.44 MJ/kg and 5.20–6.21 MJ/kg respectively. 3) Adding concentrate to corn silage significantly improved the diet's dry matter (DM) and crude protein (CP) digestibility, whereas it did not affect the digestibility of neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) ( $P > 0.05$ ). With increasing concentrate additions, the diet's energy intake and energy digestibility increased, whereas there were no significant differences in DE metabolizability between the three groups ( $P > 0.05$ ). 4) According to the linear regression equations for dietary available energy value and concentrate addition, the DE, ME and NE values for corn silage were 10.53 MJ/kg, 8.29 MJ/kg and 5.35 MJ/kg, which were not different ( $P > 0.05$ ) from those obtained using the direct method (10.58 MJ/kg, 8.33 MJ/kg and 5.20 MJ/kg respectively) for the high level intake treatment (95% AL). In conclusion, regression and direct methods do not give different values for the effective energy value of corn silage for beef cattle, indicating that regression can be used to estimate the value of single roughage for beef cattle.

**Key words:** direct method; regression method; metabolizable energy; net energy; beef cattle; corn silage

在肉牛日粮中,粗饲料通常占 40%~80%<sup>[1]</sup>,是肉牛生长主要的营养来源。因此,准确评定粗饲料原料的营养价值和能量有效利用率对丰富肉牛饲料营养水平数据库、优化饲粮配方具有重要意义。世界各国对反刍动物的能量评价体系大多通过测定粗饲料化学成分<sup>[2-3]</sup>以及体外法<sup>[4]</sup>、半体内法<sup>[5-6]</sup>评定其营养物质降解率,建立数学模型,预测粗饲料能量在反刍动物体内的利用情况,进而评定有效能值。但 Birkett 等<sup>[7]</sup>认为,体外法和半体内法没有考虑动物真实正常的代谢生理状态,其建立的有效能值预测模型存在一定的局限性。而体内法通过测定采食量、日粮消化利用率来评定饲料的营养价值,最接近实际的消化代谢。目前,结合动物体内试验估测饲料原料有效能值的经典方法主要包括直接法、替代法和回归法 3 种<sup>[8]</sup>。国内生长猪常用饲料原料消化能<sup>[9]</sup>、净能<sup>[10-11]</sup>通常采用替代法测定;肉鸡<sup>[12-13]</sup>、蛋鸡<sup>[14]</sup>、肉鸭<sup>[15-16]</sup>等家禽单一饲料的代谢能、净能也适合替代法测定。Adeola 等<sup>[17-18]</sup>分别采用回归法和替代法测定了玉米(*Zea mays*)干酒糟及其可溶物(distillers dried grains with solubles, DDGS)对肉鸡的代谢能以及常见谷物 DDGS、菜籽粕、棉籽粕对猪的消化能和代谢能, Bolarinwa 等<sup>[19-20]</sup>则结合直接法和回归法测定了大麦(*Hordeum vulgare*)、高粱(*Sorghum bicolor*)和小麦(*Triticum aestivum*)对猪的有效能。关于反刍动物饲料原料营养物质可利用性和有效能值体内法测定的研究报道主要包括:曲志涛<sup>[21]</sup>采用替代法结合呼吸面罩测热测定了北方地区常用粗饲料[玉米秸秆、玉米青贮、苜蓿(*Medicago sativa*)和羊草(*Leymus chinensis*)]对奶牛的代谢能和净能;有研究比较了直接法和替代法测定肉羊粗饲料代谢能的差异,并通过替代法建立了肉羊 10 种常用粗饲料有效能值的预测方程<sup>[22-23]</sup>;赵江波等<sup>[24-25]</sup>研究表明替代法也可用于估测肉羊精料原料的代谢能。以上研究主要集中于奶牛和肉羊方面,而在肉牛上鲜有报道。此外,替代法要求基础日粮中各组分均匀分布,而粗饲料和精料补充料都是反刍动物日粮不可或缺的组成部分,精粗料之间不易混合均匀。因此,有必要探究其余两种方法(直接法和回归法)在肉牛粗饲料能值评定上的应用。

玉米因植株高大,干物质产量高,机械操作容易等特点,成为我国青贮饲料中最多的种类,是肉牛生产重要的粗饲料来源。本研究以玉米青贮为粗饲料原料,分别应用直接法和回归法结合呼吸代谢试验测定玉米青贮对肉

牛的有效能值和各营养物质的表观消化率。旨在研究饲喂水平对饲料原料有效能值测定结果的影响,探讨精料回归法用于估测肉牛单一粗饲料原料能值的可行性,为评定反刍动物粗饲料能值提供方法学上的参考数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验于 2015 年 9 月初至 10 月初在安徽凤阳进行,整个试验期最低温度和最高温度分别为 11.5 和 25.5 ℃,平均相对湿度为 63.4%。试验选取 12 头体况良好、体重相近[(259±14.08) kg]的生长期公牛,随机分成 3 组,每组 4 个重复,每个重复 1 头牛。本研究以直接法和回归法测定玉米青贮对肉牛的有效能值,分为两期消化和呼吸代谢试验。直接法饲喂全玉米青贮日粮,按试验牛自由采食量的 95%、80% 和 60% 3 个饲喂水平饲喂。回归法饲喂玉米青贮并添加精料补充料,精料补充料添加量分别为青贮饲喂量的 15%、25% 和 50% (干物质基础),所有试验牛青贮饲喂量一致。两期试验所有试验牛全部采食试验日粮,不剩余料。本试验中粗饲料为全株玉米青贮,精料补充料由玉米、豆粕、磷酸氢钙、食盐和预混料组成,试验日粮组成及营养水平见表 1。每期试验持续 14 d,其中前 10 d 为预饲期,后 4 d 为正试期,正试期中消化代谢和呼吸代谢试验同期进行。两期试验之间间隔一周,作为日粮更换的适应期。

### 1.2 试验操作及样品采集

试验牛全部采用单栏拴系式饲养,每天喂料 2 次(08:00 和 16:00),自由饮水。其他饲养管理工作按牛场程序进行。正式试验开始前和结束后连续 2 d 对试验牛进行早晨空腹称重,取平均值作为采样体重。

正试期 4 d,对各试验牛连续 96 h 全收粪尿。每头牛每天 24 h 的粪样全部收集,对全部粪便称重并做好记录,每天收集的每头牛粪样充分混合后分成 2 部分取样:1 份在 65 ℃ 烘干,用于常规养分含量测定;1 份用 10% 的稀硫酸固氮(每 100 g 粪样加 10 mL 硫酸),65 ℃ 烘干,制成风干样,粉碎过 0.35 mm 筛后密封保存,以备氮分析。试验牛尿液通过限位栏和自制的接尿装置收集,接尿装置包括橡胶漏斗、导尿管和接尿桶 3 部分;限位栏在不影响试验牛正常采食、饮水及趴卧基础上限制其活动范围,提高尿液收集的稳定性。每天 24 h 的尿样全部收集,用量筒准确记录。用 6~8 层纱布过滤后,量取每头牛每天取尿样的 10%,置于干净塑料瓶中,加入 10% 的硫酸(每 100 mL 尿液加入 10 mL 硫酸),密封,置于 -20 ℃ 保存,备测。

呼吸代谢试验和消化代谢试验同时进行,12 头试验牛分为两批,每 6 头牛连续 48 h 测定。开放式呼吸测热

表 1 试验日粮组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Ingredients and nutrient levels of experimental diet (DM basis)

项目 Items	全玉米青贮 日粮 Full corn silage diet	精料添加比例 Concentrate adding proportion		
		15%	25%	50%
		日粮组成 Ingredients (%)		
玉米青贮 Corn silage	98.00	84.96	78.00	64.67
玉米 Corn grain	0.00	8.48	13.00	21.66
豆粕 Soybean meal	0.00	4.56	7.00	11.67
磷酸氢钙 Calcium hydro- gen phosphate	0.50	0.50	0.50	0.50
预混料 Premix <sup>1)</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00
食盐 Salt	0.50	0.50	0.50	0.50
总共 Total	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels <sup>2)</sup>				
干物质 Dry matter (%)	21.70	28.87	33.60	42.66
总能 Gross energy (MJ/kg)	17.42	17.31	17.25	17.14
粗蛋白 Crude protein (%)	8.27	9.29	10.51	12.85
中性洗涤纤维 Neutral de- tergent fiber (%)	53.58	48.05	45.10	39.44
酸性洗涤纤维 Acid deter- gent fiber (%)	32.78	29.39	27.58	24.11
粗灰分 Ash (%)	5.87	6.40	6.68	7.22
钙 Ca (%)	0.83	0.95	0.96	0.98
磷 P (%)	0.56	0.61	0.59	0.54

注: <sup>1)</sup> 预混料为每 kg 日粮提供: 维生素 A 500000 IU, 维生素 D 15000 IU, 维生素 E 3000 IU, 铜 3 g, 锌 12 g, 铁 30 g, 锰 10 g, 硒 60 mg, 碘 200 mg, 钴 100 mg。 <sup>2)</sup> 营养水平均为实测值。

Note: <sup>1)</sup> The premix provided the following per kg of diets: Vitamin A 500000 IU, Vitamin D 15000 IU, Vitamin E 3000 IU, Cu 3 g, Zn 12 g, Fe 30 g, Mn 10 g, Se 60 mg, I 200 mg, Co 100 mg. <sup>2)</sup> Nutrient levels were measured values.

装置于每天 06:00(代表饲前 1 h)、12:00(代表午间休息)、18:00(代表饲后 1 h)和 24:00(代表夜间休息)对各试验牛测定气体代谢,每头牛每次测定时长为 8~12 min,取平均值作为各试验牛的产热量和甲烷产量。开放式呼吸测热装置的研制参照文献[26],整个系统包括呼吸测热头箱、气路系统(气体流量计、采气泵)、气体采样检测系统。气样氧气浓度变化由顺磁式氧气分析仪(8000M, Signal Instrument, UK)测定,甲烷浓度变化由 INNOVA 1412 光声谱多点气体检测仪(LumaSense Technologies, Ballerup, Denmark)测定。所有试验牛在预饲期间多次佩戴呼吸头箱以达到适应的目的。

### 1.3 测定指标及方法

日粮和粪中的总能(gross energy, GE)、干物质(dry matter, DM)、粗蛋白质(crude protein, CP)、粗灰分(Ash)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量参照《饲料分析及饲料质量检测技术》<sup>[27]</sup>的方法进行测定。能量采用 IKA-C200 氧弹式热量测定仪测定;氮采用 FOSS-8400 全自动凯氏定氮仪测定;中、酸性洗涤纤维采用 ANKOMA200i 纤维分析仪测定。

尿能(urinary energy, UE)测定:取 2 张定量滤纸叠在一起测定其能值,做 3 个平行,计算出滤纸的平均能值。将 10 mL 尿液分多次滴在 2 张重叠滤纸上,65 °C 烘干后于 IKA-C200 氧弹式热量测定仪中测定,得到滤纸和尿液的总能值,减去滤纸能值即为尿能。

### 1.4 数据计算及分析

各指标计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{消化能(digestible energy, DE)} &= \text{总能} - \text{粪能} \\ \text{代谢能(metabolizable energy, ME)} &= \text{消化能} - \text{尿能} - \text{甲烷能} \\ \text{总能消化率(gross energy digestibility)} &= \text{消化能} / \text{总能} \\ \text{总能代谢率(gross energy metabolized)} &= \text{代谢能} / \text{总能} \\ \text{消化能代谢率(digestible energy metabolized)} &= \text{代谢能} / \text{消化能} \\ \text{净能(net energy, NE)} &= \text{维持净能} + \text{生长净能} \\ \text{生长净能(net energy requirement for growth, NEg)} &= \text{代谢能} - \text{产热量} \\ \text{甲烷能(methane energy)} &= \text{甲烷产量(L)} \times 39.55 \end{aligned}$$

产热量(heat production, HP)的计算根据 Mclean 等<sup>[28]</sup>推导的公式:

$$\text{HP} = 20.47 \times \Delta \text{O}_2 \times F \times \text{STP} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ h} / \text{BW}^{0.75}$$

式中:20.47 为单位耗氧量代谢产热系数(kJ/L); $\Delta \text{O}_2$  为入气、排气的氧气浓度差(%); $F$  为呼吸头箱单位时间内排气量(L/min);STP 为标准状况;BW<sup>0.75</sup> 为代谢体重。

净能维持需要量(net energy requirement for maintenance, NEm)的计算根据 Lofgreen 等<sup>[29]</sup>的净能模型:  $\text{LogHP} = a + b\text{MEI}$ , 式中: $a$ 、 $b$  为待解常数;MEI 为代谢能采食量,当 MEI 为 0 时的 HP 即为 NEm。

### 1.5 统计分析

建立试验日粮的有效能值(DE、ME 和 NE)与试验日粮中精料补充料添加量之间的回归模型: $Y = a + bX$ , 式中: $Y$  表示试验日粮的有效能值, $X$  表示试验日粮中精料补充料添加量, $a$ 、 $b$  为待解常数。当试验日粮中精料补充料添加量为 0 时,可以根据回归方程估测玉米青贮的有效能值。

采用 Excel 2010 进行试验数据初步处理后,用 IBM SPSS 20.0 软件进行统计分析,试验结果以“平均值±标准差”表示,差异显著性检验采用单因素方差分析(one-way ANOVA),差异显著时采用 Duncan 氏法进行多重比较, $P < 0.05$  为差异显著。回归分析采用线性回归分析法(Linear regression)。

## 2 结果与分析

### 2.1 直接法

**2.1.1 饲喂水平对玉米青贮营养物质消化率和能量代谢规律的影响** 由表 2 可知,随着饲喂水平的提高,玉米青贮的干物质、粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维消化率均呈下降的趋势,其中高(95% AL)、低(60%

AL) 饲喂水平组之间中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维消化率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 干物质和粗蛋白消化率各组之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 饲喂水平对肉牛玉米青贮营养物质消化率的影响

Table 2 Effects of feed intake level on nutrients digestibility of corn silage of beef cattle

项目 Items	玉米青贮饲喂水平 Levels of feed intake of corn silage			P 值 P-value
	60% AL	80% AL	95% AL	
干物质采食量 Dry matter intake ( $\text{g}/\text{kg}^{0.75}$ )	46.22 $\pm$ 2.25c	61.66 $\pm$ 3.34b	75.44 $\pm$ 2.13a	<0.001
干物质消化率 Dry matter digestibility (%)	63.75 $\pm$ 2.84	60.28 $\pm$ 4.17	59.74 $\pm$ 2.98	0.107
粗蛋白消化率 Crude protein digestibility (%)	38.72 $\pm$ 4.98	34.48 $\pm$ 5.43	35.49 $\pm$ 4.99	0.369
中性洗涤纤维消化率 Neutral detergent fiber digestibility (%)	61.33 $\pm$ 4.09a	60.63 $\pm$ 3.37ab	58.19 $\pm$ 3.34b	0.046
酸性洗涤纤维消化率 Acid detergent fiber digestibility (%)	68.35 $\pm$ 5.77a	65.51 $\pm$ 4.96b	64.80 $\pm$ 2.99b	0.023

注: 同行数据字母相异表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。AL: 自由采食。下同。

Note: Different letters in the same row mean significant difference between the treatments ( $P < 0.05$ ). AL means ad libitum. The same below.

由表 3 可知, 肉牛单位代谢体重的能量采食量(总能、消化能、代谢能、净能)以及粪能、甲烷能排出量均随日粮饲喂水平的提高而显著增加 ( $P < 0.05$ )。总能消化率和代谢率则随着饲喂水平的提高而下降, 60% AL 饲喂水平组显著高于 95% AL 饲喂水平组 ( $P < 0.05$ ), 而消化能代谢率 3 组之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 3 饲喂水平对肉牛玉米青贮能量代谢规律的影响

Table 3 Effects of feed intake level on energy metabolism of corn silage of beef cattle

项目 Items	玉米青贮饲喂水平 Levels of feed intake of corn silage			P 值 P-value
	60% AL	80% AL	95% AL	
总能 Gross energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	805.03 $\pm$ 39.26c	1074.17 $\pm$ 58.17b	1314.05 $\pm$ 37.01a	<0.001
粪能 Fecal energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	274.68 $\pm$ 28.21c	395.38 $\pm$ 30.82b	516.19 $\pm$ 22.91a	<0.001
尿能 Urinary energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	28.87 $\pm$ 13.10	25.22 $\pm$ 10.34	37.36 $\pm$ 13.30	0.534
甲烷能 Methane energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	65.39 $\pm$ 6.59c	96.32 $\pm$ 10.73b	111.54 $\pm$ 9.59a	0.002
消化能 Digestible energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	530.35 $\pm$ 29.61c	678.79 $\pm$ 27.94b	797.87 $\pm$ 21.24a	<0.001
代谢能 Metabolizable energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	436.10 $\pm$ 18.68c	557.25 $\pm$ 49.10b	648.96 $\pm$ 52.05a	<0.001
产热量 Heat production [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	429.69 $\pm$ 24.97c	489.49 $\pm$ 35.00b	531.74 $\pm$ 36.88a	0.005
净能 Net energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	286.41 $\pm$ 8.01b	347.77 $\pm$ 17.54a	392.22 $\pm$ 38.31a	0.016
总能消化率 Gross energy digestibility (%)	65.88 $\pm$ 1.39a	63.23 $\pm$ 1.25b	60.72 $\pm$ 1.62c	0.002
总能代谢率 Gross energy metabolized (%)	54.18 $\pm$ 1.26a	51.82 $\pm$ 2.43ab	49.39 $\pm$ 2.94b	0.027
消化能代谢率 Digestible energy metabolized (%)	82.28 $\pm$ 2.01	82.00 $\pm$ 4.38	81.33 $\pm$ 4.72	0.934

**2.1.2 饲喂水平对玉米青贮有效能值的影响** 由表 4 可知, 玉米青贮的消化能、代谢能和净能能值的变化范围分别为 10.58~11.48 MJ/kg, 8.33~9.44 MJ/kg 和 5.20~6.21 MJ/kg。随着饲喂水平的提高, 玉米青贮的消化能、代谢能和净能能值均呈现下降趋势。消化能值各饲喂水平之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 60% AL 饲喂水平组玉米青贮代谢能和净能值显著高于 95% AL 饲喂水平组 ( $P < 0.05$ ), 而与 80% AL 饲喂水平组差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.2 回归法

**2.2.1 精料添加水平对日粮营养物质消化率和能量代谢规律的影响** 由表 5 可知, 精料的添加显著提高了肉牛的干物质采食量 ( $P < 0.05$ ), 随着精料添加比例的提高逐渐增加。精料的添加亦改善了肉牛对粗蛋白的消化

率,显著高于全玉米青贮日粮( $P < 0.05$ ),并且随着精料添加比例的提高显著上升( $P < 0.05$ )。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维消化率则不受精料添加比例的影响,组间差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 4 饲喂水平对肉牛玉米青贮有效能值的影响

Table 4 Effect of feed intake level on effective energy value of corn silage of beef cattle

项目 Items	玉米青贮饲喂水平 Levels of feed intake of corn silage			P 值
	60% AL	80% AL	95% AL	P-value
消化能 Digestible energy (MJ/kg DM)	11.48±0.24a	11.02±0.22b	10.58±0.28c	0.002
代谢能 Metabolizable energy (MJ/kg DM)	9.44±0.17a	9.03±0.35a	8.33±0.51b	0.027
净能 Net energy (MJ/kg DM)	6.21±0.43a	5.63±0.68ab	5.20±0.52b	0.120

表 5 精料添加比例对肉牛日粮营养物质消化率的影响

Table 5 Effects of concentrate adding proportion on nutrients digestibility of diet of beef cattle

项目 Items	精料添加比例 Concentrate adding proportion			P 值
	15%	25%	50%	P-value
干物质采食量 Dry matter intake ( $\text{g}/\text{kg}^{0.75}$ )	66.82±3.28c	73.33±4.05b	86.81±2.52a	<0.001
干物质消化率 Dry matter digestibility (%)	60.57±2.78b	63.88±1.69a	65.13±1.41a	0.003
粗蛋白消化率 Crude protein digestibility (%)	41.87±2.64c	46.65±2.34b	53.10±1.09a	<0.001
中性洗涤纤维消化率 Neutral detergent fiber digestibility (%)	59.01±3.67	58.03±2.98	57.32±3.64	0.892
酸性洗涤纤维消化率 Acid detergent fiber digestibility (%)	63.09±3.47	61.32±4.33	62.68±5.26	0.854

由表 6 可知,随着精料的添加,肉牛单位代谢体重总能、消化能、代谢能和净能采食量逐渐上升,组间差异明显( $P < 0.05$ )。肉牛的粪能、尿能和甲烷能随着精料添加比例的提高整体逐渐升高,粪能和尿能各组之间差异不显著( $P > 0.05$ ),甲烷能 50%精料添加组显著高于 15%添加组( $P < 0.05$ )。精料的添加也改善了日粮的能量消化率和代谢率,总能消化率和代谢率随精料添加比例的增加而逐渐上升,50%添加组显著高于其余两组( $P < 0.05$ ),消化能代谢率随精料的添加亦有上升趋势,但差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 6 精料添加比例对肉牛日粮能量代谢规律的影响

Table 6 Effects of concentrate adding proportion on energy metabolism of diet of beef cattle

项目 Items	精料添加比例 Concentrate adding proportion			P 值
	15%	25%	50%	P-value
总能 Gross energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	1156.62±56.84c	1264.96±69.91b	1487.99±43.20a	<0.001
粪能 Fecal energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	420.12±14.88	445.17±51.66	476.44±13.23	0.210
尿能 Urinary energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	41.20±23.78	45.49±25.95	44.61±27.21	0.968
甲烷能 Methane energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	90.01±9.85b	93.22±10.65ab	113.79±27.09a	0.176
消化能 Digestible energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	735.79±35.17c	817.30±39.01b	1016.54±21.20a	<0.001
代谢能 Metabolizable energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	604.58±14.03c	678.60±25.81b	858.14±32.80a	<0.001
产热量 Heat production [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	480.94±19.12c	510.98±13.65b	559.78±23.12a	0.001
净能 Net energy [ $\text{kJ}/(\text{kg}^{0.75} \cdot \text{d})$ ]	373.65±19.88c	430.62±17.78b	528.37±25.48a	<0.001
总能消化率 Gross energy digestibility (%)	63.59±1.58b	64.57±1.40b	68.37±2.80a	0.013
总能代谢率 Gross energy metabolized (%)	52.27±1.34b	53.65±0.91b	57.67±1.93a	0.002
消化能代谢率 Digestible energy metabolized (%)	82.17±3.26	83.03±3.06	84.42±5.75	0.759

**2.2.2 日粮消化能、代谢能和净能与精料添加水平的线性关系** 相关性分析结果如图 1 所示。日粮的消化能、代谢能和净能与精料添加水平之间存在着显著的线性回归关系,回归方程分别为:DE(kJ/kg<sup>0.75</sup>) = 611.90 + 14.03X(R<sup>2</sup> = 0.925, RMSE = 37.22, n = 12, P < 0.001); ME(kJ/kg<sup>0.75</sup>) = 482.59 + 11.25X(R<sup>2</sup> = 0.944, RMSE = 24.32, n = 12, P < 0.001); NE(kJ/kg<sup>0.75</sup>) = 312.56 + 7.36X(R<sup>2</sup> = 0.903, RMSE = 27.19, n = 12, P < 0.001)。式中:DE、ME 和 NE 分别代表消化能、代谢能和净能, X 代表精料添加量(g/kg<sup>0.75</sup>)。当精料添加量 X 为 0 时,即日粮为全玉米青贮,此时方程的截距 611.90, 482.59 和 312.56 kJ/kg<sup>0.75</sup> 分别为玉米青贮的消化能、代谢能和净能。以肉牛的代谢体重换算,玉米青贮的消化能、代谢能和净能能值分别为(10.53 ± 0.43) MJ/kg、(8.29 ± 0.34) MJ/kg 和(5.35 ± 0.22) MJ/kg。将回归值和直接法 3 种饲喂水平所测得的玉米青贮有效能值进行差异显著性检验表明,线性回归值与 95% AL 饲喂水平测定值差异不显著(P > 0.05),而 60% AL、80% AL 饲喂水平测定值均显著高于外推值(P < 0.05)。

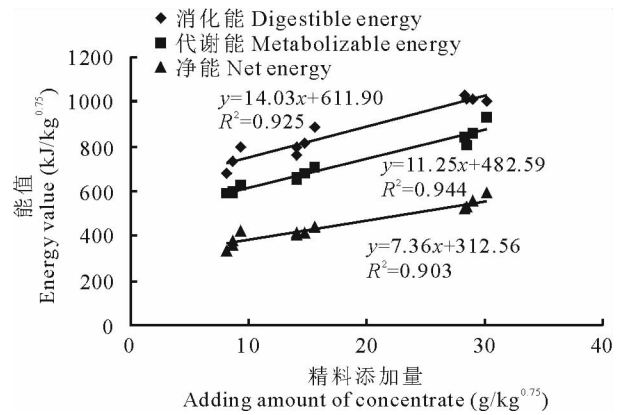


图 1 日有效能值与精料添加量之间的线性关系

Fig. 1 Linear relationship between concentrate addition to corn silage and effective energy value of the diet

### 3 讨论

#### 3.1 饲喂水平和精料补充料添加水平对玉米青贮营养物质消化率和能量代谢规律的影响

评定日粮对动物消化利用特性中饲喂水平是一个需要考虑的因素。许贵善等<sup>[30]</sup>研究表明限饲能提高肉羊日粮主要营养物质的表观消化率,Robinson 等<sup>[31]</sup>在奶牛上也得到了类似的结果。Van Soest<sup>[32]</sup>研究证实,反刍动物瘤胃流通速率与干物质采食量显著正相关,流通速率越慢,瘤胃对日粮消化越充分。本试验中肉牛对玉米青贮营养物质消化率以及能量消化率和代谢率的变化趋势与上述学者的研究结果一致。Tyrrell 等<sup>[33]</sup>研究报道粪能随总能采食量的增加而相应增加,本试验中玉米青贮低、中和高 3 个饲喂水平组的粪能占总能的比例分别为 34.12%、36.81% 和 39.28%,符合上述规律。本试验中玉米青贮的消化能、代谢能和净能能值的变化范围分别为 10.58~11.48 MJ/kg, 8.33~9.44 MJ/kg 和 5.20~6.21 MJ/kg。各有效能值均随饲喂水平的提高而下降,说明限饲提高了肉牛对玉米青贮的能量利用效率。

精料补充料的粗蛋白含量高于粗饲料,而中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量较低,精料的添加能显著改善日粮的营养水平。从表 1 可知,本试验日粮的营养水平随着精料补充料添加水平的提高而提高,日粮中干物质、粗蛋白、钙和磷含量随比例升高,而中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量则相应降低。日粮营养物质组成对动物营养物质的消化代谢有重要影响。McDonald<sup>[34]</sup>提出,适宜的饲料精料比例可以提高日粮中各养分的利用率,促进动物生长。刘晓牧等<sup>[35]</sup>研究表明绵羊对日粮干物质、有机物、粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的消化率在适宜的精料补饲水平下随精料饲喂量的提高而显著提高。余梅等<sup>[36]</sup>研究发现水牛在补饲精料后日粮总 DM 采食量显著提高,随着补饲水平的提高,水牛对各营养物质的消化率呈升高趋势。本试验中,随着精料添加比例的提高,肉牛的干物质采食量以及干物质和粗蛋白消化率显著升高,与上述研究结果一致;而中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的消化率,各组之间无明显差异。精料补充料的添加也提高了肉牛对日粮能量的利用效率。饲粮能量利用效率主要受其原料组成的影响,研究表明<sup>[37]</sup>饲料中蛋白质和粗纤维含量都会影响其能值,饲料中中性洗涤纤维含量与代谢能呈高度负相关。本试验各组日粮中性洗涤纤维含量从高到低依次是精料 15% 组、25% 组和 50% 组,而它们的消化能、代谢能依次变大。

#### 3.2 直接法和回归法用于肉牛粗饲料有效能值的评定

直接法是以被测原料作为唯一的能量来源,使用直接法可以避免饲料原料之间的交互,测定结果比较准确直

观。但大多数单一原料的营养水平和组成成分不平衡,影响动物对能量的吸收利用。因此,直接法的使用范围非常狭窄,一般仅适用于适口性好、营养组成相对均衡的饲草以及谷物类饲料原料有效能值的测定。Villamide<sup>[8]</sup>研究指出兔子单独饲喂苜蓿干草和葵籽饼粕等优质牧草和饼粕饲料,其测定结果变异率低(4.7%),日增重可达到31.5 g/d。对肉牛而言,粗饲料可以单独饲喂,能够有效地避免原料之间互作效应的影响。本试验预饲期间所有试验牛对玉米青贮的自由采食量(干物质计)均在5.3 kg以上。根据我国肉牛饲养标准(NY/T815-2004)<sup>[38]</sup>对生长肥育牛干物质采食量的推荐公式: $DMI=0.062\times LBW^{0.75}+(1.5296+0.0037\times LBW)\times ADG$ (式中:LBW为活重;LBW<sup>0.75</sup>为代谢体重;ADG为平均日增重),试验牛对玉米青贮干物质采食量的维持水平在4.0 kg左右。前期饲养试验结果得知200~300 kg肉牛自由采食玉米青贮,平均日增重为0.5 kg/d。本研究中玉米青贮的总能为17.42 MJ/kg,粗蛋白含量为8.27%,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维分别为53.58%和32.78%,营养价值和饲喂品质较好,使得直接法测定玉米青贮有效能值在理论上成为可能。

回归法分为线性回归和多元回归两种,线性回归是将基础日粮和被测原料以不同比例配合成试验日粮,建立以被测原料在试验日粮中所占比例与对应试验日粮有效能值之间的线性回归方程,通过外推估测被测原料的有效能值。在使用替代法估测饲料原料有效能值时,被测原料与基础饲料之间潜在的互作效应亦会影响测定结果。此外,被测原料的替代比例对其有效能值结果的精确性影响较大。Villamide<sup>[8]</sup>研究报道替代比例为10%、20%和40%时所估测的原料有效能值标准差分别是试验日粮有效能值标准差的13.4、6.4和2.9倍。与替代法相比,回归法至少选取3个及以上的被测原料混合或替代比例,提高了测定结果的准确性,具有更高的理论可靠性。宁东等<sup>[39]</sup>研究发现在试验饲粮中棉籽粕或玉米蛋白粉替代比例为5%时,其净能值与10%和20%替代比例组有较大的差异,通过回归法筛选出替代法估测棉籽粕和玉米蛋白粉净能的最佳替代比例分别为10%~20%和20%以上。而Bolarinwa等<sup>[20]</sup>研究发现回归法估测猪常用谷物精料的消化能和代谢能与直接法测得的结果之间无明显差异,并提出回归法是估测饲料原料能值行之有效的一种间接手段。考虑到精料补充料在反刍动物日粮中应用的普遍性和重要性,本研究引入精料补充料和玉米青贮组成混合日粮,提出精料回归法用于估测粗饲料原料有效能值。在定量投喂粗饲料的基础上设置不同梯度的精料补充料添加水平,建立精料添加量梯度水平与试验日粮有效能值之间的线性回归方程。本试验中,试验日粮的能量采食量和能量利用率均随精料添加水平的提高而显著上升,试验日粮的消化能、代谢能和净能与精料添加量之间线性相关。通过回归法估测得玉米青贮的消化能、代谢能和净能分别为10.53 MJ/kg、8.29 MJ/kg和5.35 MJ/kg,和直接测定值差异不显著(10.58 MJ/kg、8.33 MJ/kg和5.20 MJ/kg)。

#### 4 结论

饲喂水平会影响单一饲料原料有效能值测定结果,限饲提高了肉牛对日粮的能量利用效率;回归法测定玉米青贮对肉牛的有效能值与直接法测定结果差异不明显,精料回归法可以用于估测反刍动物单一粗饲料原料有效能值。

#### 参考文献 References:

- [1] Zhu Y J, Zhang Y. Nutrition modulation of roughage utilization for ruminant. *Pratacultural Science*, 2003, 20(6): 36-39. 朱宇旌, 张勇. 反刍动物粗饲料利用的营养调控. *草业科学*, 2003, 20(6): 36-39.
- [2] Van Soest P J. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. *Journal of Animal Science*, 1967, 26(1): 119.
- [3] Russell J B, Oconnor J D, Fox D G, *et al.* A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets. 1. Ruminal fermentation. *Journal of Animal Science*, 1992, 70(11): 3551-3561.
- [4] Krishnamoorthy U, Rymerb C, Robinsonc P H. The *in vitro* gas production technique: limitations and opportunities. *Animal Feed Science and Technology*, 2005, 123-124(1): 1-7.
- [5] Orskov E R, Hovell F D, Deb Mould F. The use of the nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. *Tropical Animal Health and Production*, 1980, 5(3): 195-213.
- [6] Vanzan E S, Cochran R C, Titgemeyer E C. Standardization of in situ-techniques for ruminant feedstuff evaluation. *Animal*



- Science, 1998, 76: 2717-2729.
- [7] Birkett S, De Lange K. Limitations of conventional models and a conceptual framework for a nutrient flow representation of energy utilization by animals. *British Journal of Nutrition*, 2001, 86(6): 647-659.
- [8] Villamide M. Methods of energy evaluation of feed ingredients for rabbits and their accuracy. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 57(3): 211-223.
- [9] Zhu L. Evaluation of Digestible Energy Value of Cottonseed Meal Feeds for Pigs and Prediction of Digestible Energy Value of Cottonseed Meal from Chemical Analysis[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.  
朱良. 棉籽粕饲料猪消化能评定及化学估测模型的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- [10] 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.  
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.
- [11] Zhang G F. Prediction Equations for the Net Energy Content of Soybean Meal in Growing Pigs[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.  
张桂凤. 生长猪豆粕净能推测方程的构建[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [12] Huan Z J. The Mensuration of Net Energy Value of Corn and Soybean Meal and Prediction Models for Broiler Chicken[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009.  
桓宗锦. 肉鸡玉米和豆粕净能的测定及其预测模型的建立[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [13] Wang X, Jia G, Li X, *et al.* Determination of the net energy and appropriate substitution ratio of soybean meal yellow-feathered broilers for using a substitution method. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(5): 1434-1439.  
王骁, 贾刚, 李霞, 等. 套算法测定黄羽肉鸡豆粕净能及适宜豆粕替代比例的研究. *动物营养学报*, 2010, 22(5): 1434-1439.
- [14] Wang X L. Measurement on Net Energy Value of Corn and Soybean Meal and Application of Net Energy System for Laying Hens[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2010.  
王旭莉. 蛋鸡玉米和豆粕净能值的测定及其净能体系的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [15] Li J. Study on Evaluation of Soybean Meal Net Energy for Tianfu Duck[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.  
李杰. 评定天府肉鸭豆粕净能的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [16] Mi C L. Study on Evaluation the Net Energy of Corn for Tianfu Duck[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.  
米成林. 评定天府肉鸭玉米净能的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [17] Adeola O, Ileleji K. Comparison of two diet types in the determination of metabolizable energy content of corn distillers dried grains with solubles for broiler chickens by the regression method. *Poultry Science*, 2009, 88(3): 579-585.
- [18] Adeola O, Kong C. Energy value of dried distillers grains with solubles and oil-seed meals for pigs. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(1): 164-170.
- [19] Bolarinwa O, Adeola O. Regression and direct methods do not give different estimates of digestible and metabolizable energy values of barley, sorghum, and wheat for pigs. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(2): 610-618.
- [20] Bolarinwa O, Adeola O. Direct and regression methods do not give different estimates of digestible and metabolizable energy of wheat for pigs. *Journal of Animal Science*, 2012, 90(Suppl4): 390-392.
- [21] Qu Z T. Determination of Crude Feed Composition and Production Levels of Net Energy Impact of *Leymus chinensis* and Different Varieties of Corn Net[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.  
曲志涛. 粗饲料组成和生产水平对羊草净能的影响及不同品种玉米净能值的测定[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [22] Zhao M M, Yang K L, Deng K D, *et al.* A comparison on metabolizable energy of *Leymus chinensis* in mutton sheep determined by direct and substitution methods. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(2): 436-443.  
赵明明, 杨开伦, 邓凯东, 等. 直接法与替代法测定羊草对肉用绵羊代谢能的比较研究. *动物营养学报*, 2016, 28(2): 436-443.
- [23] Zhao M M, Ma T, Ma J N, *et al.* Prediction and equation of effective energy values of common roughages for mutton sheep. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(8): 2385-2395.  
赵明明, 马涛, 马俊南, 等. 肉用绵羊常用粗饲料有效能值的预测与方程的建立. *动物营养学报*, 2016, 28(8): 2385-2395.
- [24] Zhao J B, Wei S L, Ma T, *et al.* Investigation of substitutional methods for evaluating metabolizable energy and nutrient digestibility of single grain in mutton sheep. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2016, 47(7): 1405-1413.  
赵江波, 魏时来, 马涛, 等. 套算法用于估测肉用羊单一谷物饲料代谢能值及养分消化率的探索. *畜牧兽医学报*, 2016, 47(7): 1405-1413.
- [25] Zhao J B, Wei S L, Ma T, *et al.* Establishment of prediction model of metabolizable energy of concentrate or mutton sheep by substitution method. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(4): 1217-1224.

- 赵江波, 魏时来, 马涛, 等. 应用套算法估测肉羊精饲料代谢能. 动物营养学报, 2016, 28(4): 1217-1224.
- [26] Li Y Z, Li M X, Sun L, *et al.* Study on an open circuit respiratory calorimetry system. Chinese Journal of Animal Nutrition, 1998, 10(3): 29-34.  
李玉芝, 李芒雪, 孙黎, 等. 开放式呼吸测热系统的研制. 动物营养学报, 1998, 10(3): 29-34.
- [27] Zhang L Y. Analysis of Feed and Feed Quality Control Technology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.  
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- [28] Mclean J, Tobin G. Animal and Human Calorimetry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [29] Lofgreen G, Garrett W. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. Journal of Animal Science, 1968, 27(3): 793-806.
- [30] Xu G S, Diao Q Y, Ji S K, *et al.* Effects of different feeding levels on energy and protein digestion and metabolism in mutton sheep. Chinese Journal of Animal Science, 2012, 48(17): 40-44.  
许贵善, 刁其玉, 纪守坤, 等. 不同饲喂水平对肉用绵羊能量与蛋白质消化代谢的影响. 中国畜牧杂志, 2012, 48(17): 40-44.
- [31] Robinson P, Sniffen C, Van Soest P J. Influence of level of feed intake on digestion and bacterial yield in the forestomachs of dairy cattle. Canadian Journal of Animal Science, 1985, 65(2): 437-444.
- [32] Van Soest P J. Nutritional Ecology of the Ruminant[M]. New York: Cornell University Press, 1994.
- [33] Tyrrell H, Moe P. Effect of intake on digestive efficiency. Journal of Dairy Science, 1975, 58(8): 1151-1163.
- [34] McDonald D A. The occurrence of turbulent flow in the rabbit aorta. The Journal of Physiology, 1952, 118(3): 340-347.
- [35] Liu X M, Wang Z H, Li F C, *et al.* The influence of mixed concentrate supplementation level on feed conversion rate and nitrogen balance in sheep fed dry corn stalk based diets. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2004, 35(3): 266-269.  
刘晓牧, 王中华, 李福昌, 等. 精料补饲水平对绵羊饲料利用效率和氮平衡的影响. 畜牧兽医学报, 2004, 35(3): 266-269.
- [36] Yu M, Liu J Y, Zhao G, *et al.* Effect of concentrate supplementation level on digestion and metabolism of buffalo fed sugar-cane tops silage. Journal of Yunnan Agricultural University, 2013, 28(4): 470-475.  
余梅, 刘建勇, 赵刚, 等. 补饲精料对采食蔗梢青贮水牛消化代谢的影响. 云南农业大学学报, 2013, 28(4): 470-475.
- [37] 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.  
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.
- [38] Agriculture Industry Stand of the People's Republic of China. Feeding standard of beef cattle; NY/T815-2004[S]. 2004.  
中华人民共和国农业行业标准. 肉牛饲养标准: NY/T815-2004[S]. 2004.
- [39] Ning D, Guo Y M, Wang Y W, *et al.* Metabolizable energy and net energy values of cottonseed meal and corn gluten meal for laying hens by using indirect calorimetry method and regression method. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013, 25(5): 968-977.  
宁冬, 芮于明, 王永伟, 等. 间接测热法和回归法估测棉籽粕和玉米蛋白粉在蛋鸡中的代谢能和净能值. 动物营养学报, 2013, 25(5): 968-977.