

## 丙三醇对牛瘤胃发酵、尿嘌呤衍生物、 消化率、能量代谢及氮平衡的影响

王 聪, 黄应祥, 刘 强, 霍文婕, 杨文柱, 张拴林

(山西农业大学动物科技学院, 山西太谷 030801)

**摘要:** 【目的】研究丙三醇对西门塔尔牛瘤胃发酵、尿嘌呤衍生物含量、日粮养分表观消化率、能量代谢及氮平衡的影响。【方法】选用 8 头体重 450 kg、年龄 3 岁、装有永久性瘤胃瘘管的西门塔尔牛阉牛, 采用  $4 \times 4$  重复拉丁方设计, 对照组饲喂基础日粮, 处理组分别在基础日粮上添加丙三醇 100、200 和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。【结果】日粮添加 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  丙三醇, 瘤胃 pH、乙酸/丙酸比例和氨态氮浓度显著低于对照组和 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组 ( $P < 0.05$ ), 瘤胃总挥发性脂肪酸浓度、丙酸和丁酸摩尔比显著高于对照组和 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组 ( $P < 0.05$ ); 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  丙三醇组玉米秸秆 DM、OM、NDF、ADF 和混合精料 DM、OM 降解率显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ), 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组混合精料 CP 降解率显著低于对照组和 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组 ( $P < 0.05$ ); 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组尿囊素和尿嘌呤衍生物含量显著高于 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和对照组 ( $P < 0.05$ ); 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组 OM、EE、CP、NFE、NDF 和 ADF 表观消化率显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组消化能和代谢能显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ); 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组沉积能显著高于 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和对照组 ( $P < 0.05$ ); 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组和 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组沉积氮显著高于对照组和 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  组 ( $P < 0.05$ )。【结论】丙三醇的适宜添加水平为 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

**关键词:** 西门塔尔牛; 丙三醇; 瘤胃发酵; 嘌呤衍生物; 消化率; 能量代谢; 氮平衡

## Effects of Glycerol on Rumen Fermentation, Urinary Excretion of Purine Derivatives, Digestibility, Energy Metabolism and Nitrogen Balance in Simmental Steer

WANG Cong, HUANG Ying-xiang, LIU Qiang, HUO Wen-jie, YANG Wen-zhu, ZHANG Shuan-lin

(College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi)

**Abstract:** 【Objective】The objective of this study was to evaluate the effects of glycerol supplementation on rumen fermentation, urinary excretion of purine derivatives, nutrients digestibility, energy metabolism and nitrogen balance of steers. 【Method】Eight ruminal cannulated Simmental steers were used in a replicated  $4 \times 4$  Latin square experiment and fed with basic diet and added with glycerol at 0, 100, 200 and 300 g per steer per day, respectively. 【Result】The results showed that ruminal pH, ratio of acetate to propionate and ammonia nitrogen of steers supplemented with glycerol at 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  were lower than steers supplemented with glycerol at 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and the control significantly ( $P < 0.05$ ). Total VFA concentration, the molar proportions of propionate and butyrate of steers supplemented with glycerol at 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  were higher than steers supplemented with glycerol at 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and control significantly ( $P < 0.05$ ). Ruminal DM, OM, NDF and ADF degradation of corn straw, and ruminal DM and OM degradation of concentrate of steers supplemented with glycerol at 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  were higher than the control significantly ( $P < 0.05$ ). Ruminal CP degradation of concentrate of steers supplemented with glycerol at 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  were lower than steers supplemented with glycerol at 100  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and the control significantly ( $P < 0.05$ ). Allantoin concentration and urinary excretion of purine derivatives of steers supplemented with glycerol at 200  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  and 300  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$  were higher

收稿日期: 2008-03-03; 接受日期: 2008-05-30

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD5B04)

作者简介: 王 聪 (1973—), 女, 山西寿阳人, 副教授, 博士, 研究方向为反刍动物营养与饲料科学。E-mail: wangdx0321@163.com。通信作者  
刘 强 (1971—), 男, 山西浮山人, 副教授, 博士, 研究方向为反刍动物营养与饲料科学。E-mail: liuqiangabc@163.com

than steers supplemented with glycerol at 100 g·d<sup>-1</sup> and control significantly ( $P<0.05$ ). Dietary OM, EE, CP, NFE, NDF and ADF digestibilities of steers supplemented with glycerol at 200 g·d<sup>-1</sup> and 300 g·d<sup>-1</sup> were higher than the control significantly ( $P<0.05$ ). Digestible energy and metabolizable energy of steers supplemented with glycerol at 200 g·d<sup>-1</sup> and 300 g·d<sup>-1</sup> were higher than the control significantly ( $P<0.05$ ). Retention energy of steers supplemented with glycerol at 200 g/d and 300 g/d were higher than the control and supplemented with glycerol at 100 g·d<sup>-1</sup> significantly ( $P<0.05$ ). Retention nitrogen of steers supplemented with glycerol at 200 g·d<sup>-1</sup> and 300 g·d<sup>-1</sup> were higher than steers supplemented with glycerol at 100 g·d<sup>-1</sup> and the control significantly ( $P<0.05$ ).

【Conclusion】 These results indicated that the optimum dose of glycerol supplementation was 200 g·d<sup>-1</sup>.

Key words: Simmental steer; glycerol; rumen fermentation; purine derivative; digestibility; energy metabolism; nitrogen balance

## 0 引言

【研究意义】反刍动物体内葡萄糖缺乏易引起酮病等代谢性疾病, 丙三醇是葡萄糖异生的前体物质, 进入葡萄糖异生途径后通过甘油激酶在肝脏和肾脏转化为葡萄糖<sup>[1]</sup>, 与其它生糖物质相比, 其异生为葡萄糖的过程不依赖于限速酶丙酮酸羧化酶或磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶<sup>[2]</sup>。因此, 研究丙三醇对牛瘤胃发酵和能量代谢等方面的影响具有重要意义。【前人研究进展】Remond 等<sup>[3]</sup>研究发现添加丙三醇(240 g·d<sup>-1</sup>或 480 g·d<sup>-1</sup>), 瘤胃丙酸和丁酸浓度增加, 而乙酸浓度降低。Trabue 等<sup>[4]</sup>在牛的瘤胃液中添加 25 mmol 丙三醇, 发现 80%的丙三醇在 24 h 被代谢, 降低了乙酸发酵, 增加了丙酸发酵。Linke 等<sup>[5]</sup>发现丙三醇在瘤胃中迅速发酵, 为瘤胃微生物提供了能量, 促进了纤维分解菌的生长与繁殖, 而 Valérie 等<sup>[6]</sup>研究发现当丙三醇浓度达到 5%时, 纤维分解活性被抑制。【本研究切入点】目前, 丙三醇对奶牛泌乳性能影响的研究报道较多, 而丙三醇对瘤胃发酵、尿嘌呤衍生物、消化率、能量

代谢及氮平衡影响的研究报道较少, 并且由于试验日粮和添加水平不同结果也不同。【拟解决的关键问题】在中国目前养牛业仍以玉米秸秆为主要粗饲料的饲养条件下, 研究日粮添加不同水平丙三醇对西门塔尔牛瘤胃发酵、消化率、能量平衡及氮平衡的影响, 为生产实际提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验动物和设计

选用 8 头装有永久性瘤胃瘘管、年龄 3 岁、体况良好、体重(450±12.3) kg 的西门塔尔牛阉牛, 采用 4×4 重复拉丁方设计。对照组饲喂基础日粮, 处理 1、处理 2 和处理 3 组分别在基础日粮上添加丙三醇 100、200 和 300 g·d<sup>-1</sup>。试验分 4 阶段, 每阶段预试期 10 d, 正试期 10 d。

### 1.2 试验日粮及饲养管理

基础日粮按照肉牛营养需要和饲养标准<sup>[7]</sup>配制, 由混合精料和玉米秸秆组成, 组成及营养水平见表 1。饲料的精粗比为 35 : 65, 日喂饲料干物质质量为 9 kg。

表 1 试验基础日粮组成和营养水平

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diet (%DM)

原料组成 Composition of basal diet	比例 Percentage (%)	营养水平 Nutrient levels	含量 Content
玉米秸秆 Corn straw	65.0	综合净能 NE <sub>mf</sub> <sup>2)</sup> (MJ·kg <sup>-1</sup> )	6.30
玉米 Corn grain	18.2	粗蛋白质 Crude protein	11.82
麸皮 Wheat bran	3.5	中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre	56.51
豆粕 Soybean meal	5.8	酸性洗涤纤维 Acid detergent fibre	35.59
棉粕 Cottonseed cake	4.5	钙 Ca	1.12
菜粕 Rapeseed meal	1.7	磷 P	0.74
石粉 Limestone	0.5		
食盐 Salt	0.3		
预混料 Premix <sup>1)</sup>	0.5		

<sup>1)</sup>每 kg 日粮含: 维生素 A 3000 IU; 维生素 D 1200 IU; 维生素 E 15 IU; 铁 30 mg; 铜 8 mg; 锌 30 mg; 锰 40 mg; 碘 0.25 mg; 硒 0.3 mg; 钴 0.1 mg。

<sup>2)</sup>综合净能根据原料组成计算所得, 其余为实测值

<sup>1)</sup> Provided per kilogram of diet: V<sub>A</sub> 3000 IU; V<sub>D3</sub> 1200IU; V<sub>E</sub> 15 IU; Fe 30 mg; Cu 8 mg; Zn 30 mg; Mn 40 mg; I 0.25 mg; Se 0.3 mg; Co 0.1 mg. <sup>2)</sup> NE<sub>mf</sub> is calculated value. Other nutrient levels are measured values

试验牛单槽饲养, 每日 07: 00 和 19: 00 饲喂, 自由饮水。本试验所用丙三醇为广东省阳西县香料厂生产的食品级添加剂, 纯度为 99.8%, 饲喂前混合于精料中饲喂。

### 1.3 样品采集与测定

**1.3.1 瘤胃液的采集与测定** 每阶段正式试验期的第 8、9 和 10 天, 在饲喂前 (07: 00) 及采食后 3、6、9 h 于瘤胃腹囊处采集瘤胃液 200 ml, 用 4 层纱布过滤, 立即用酸度计 (Sartorius Basic pH Meter, PB-20 型, 德国) 测定 pH 值, 3 000 r/min 离心 10 min 后取上清液, -40℃ 冷冻保存。采用氧化镁直接蒸馏法测定氨态氮<sup>[8]</sup>。取瘤胃液 1 ml, 加入 0.2 ml 25% 偏磷酸溶液, 混合均匀, 冰水浴中放置 30 min 后于 5 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 用气相色谱仪 (GC102AF, 上海分析仪器厂) 测定挥发性脂肪酸 (VFA)<sup>[9]</sup>, 色谱柱为  $\varnothing 4$  mm (外)  $\times$  2 m 玻璃柱, 固定相 PEG-20M, 涂布浓度为 3%, 载体为 Chromsorb WAW DMCS; 色谱柱温 160℃, 汽化室温度 200℃; 空气压力 0.12 MPa, 氢气压力 0.06 MPa, 氮气压力 0.08 MPa; 氮气 (载气) 流速 30 ml·min<sup>-1</sup>, 氢气流速 60 ml·min<sup>-1</sup>, 空气流速 360 ml·min<sup>-1</sup>; 灵敏度 10<sup>-10</sup>, 衰减 16 倍; 进样量 1  $\mu$ l。

**1.3.2 瘤胃降解率测定** 用瘤胃尼龙袋法<sup>[2]</sup>分别测定玉米秸秆干物质 (DM)、有机物质 (OM)、中性洗涤纤维 (NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF) 和混合精料 DM、OM、粗蛋白质 (CP) 的瘤胃降解率。准确称取玉米秸秆 3.5g 装入尼龙袋, 每头牛 14 袋; 准确称取混合精料 4.0 g, 装入尼龙袋, 每头牛 12 袋; 于晨饲前 2 h 将尼龙袋投入瘤胃腹囊 50 cm 处, 分别于 4、8、12、24、36、48、72 h 取出 2 个袋 (混合精料 48 h 结束), 立即用水冲洗至水液完全澄清为止, 在 65℃ 烘至恒重, 测定降解前后样品 DM、OM、NDF、ADF 和 CP 含量。

**1.3.3 采食量测定及饲料样品分析** 试验期间逐日详细记录采食量和剩草料量, 每天按比例采集精料与玉米秸秆样品, 每期试验结束后混合均匀, 测定饲料总能 (GE)、DM、OM、CP、粗脂肪 (EE)、NDF、ADF、钙 (Ca) 与磷 (P) 含量。

**1.3.4 排泄粪量测定及粪样分析** 试验期间逐日收集每头牛的粪, 分别放置在带盖的塑料桶中, 于每日 07: 00 称量并记录日排泄粪量, 然后按 2% 比例采集粪样 2 份, 其中 1 份鲜粪定氮, 另 1 份于 65℃~70℃ 测定初水后制成风干样品, 每期试验结束后混合均匀, 测定粪样 GE、DM、OM、EE、NDF、ADF 含量。

**1.3.5 排泄尿量测定及尿样分析** 试验期间逐日收集每头牛的尿, 用量筒测量体积并记录排尿量。一份尿样按尿量 2% 比例采集, 低温保存, 每期试验结束后混合均匀, 测定 GE 和 CP 含量。另一份尿样按总尿量的 1% 采集, 收集到装有 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的 800 ml 磨口玻璃瓶中, 调节尿 pH < 3, 混匀尿样, 移取 20 ml 并稀释至 100 ml 制成次级尿样, 装入塑料瓶内 -40℃ 贮存, 采用比色法测定尿酸和尿囊素含量<sup>[10]</sup>。

**1.3.6 气体采集与分析** 每阶段采用呼吸面具采气装置<sup>[11]</sup>进行气体采集。每天采气 4 次, 分别为: 6: 00 (代表饲前 1 h)、12: 00 (代表日间休息状态)、20: 00 (代表饲后 1 h) 和 24: 00 (代表夜间休息)。每次采集 10 min<sup>[12]</sup>。采气时记录牛舍温度, 以便进行产热量计算。CH<sub>4</sub> 浓度利用气相色谱仪 (GC-2010, 日本) 进行分析, 检测器为离子火焰化检测器 (FID); 色谱柱为  $\varnothing 3$  mm  $\times$  2 m 的 5Å (埃) 分子筛色谱柱; 工作柱温 90℃, 进样口温度 100℃, 检测器工作温度 150℃, 载气为高纯氮气, 流速 23 ml·min<sup>-1</sup>; 氢气流速 40 ml·min<sup>-1</sup>, 空气流速 400 ml·min<sup>-1</sup>; 进样量 1 ml。CO<sub>2</sub> 浓度和 O<sub>2</sub> 浓度采用工业气体分析仪 (1906 型, 上海华岩) 进行测定。

**1.3.7 样品初水分、DM、OM、CP、Ca 和 P 含量** 采用实验室常规方法测定<sup>[8]</sup>; NDF 和 ADF 采用 Van Soest 方法测定<sup>[13]</sup>; GE 采用 XYR-1C 微机氧弹式热量计测定<sup>[14]</sup>。

### 1.4 数据处理及统计分析

应用  $A (\%) = (B - C) / B \times 100$  公式计算待测饲料在瘤胃中不同时间 DM、OM、NDF、ADF 和 CP 消失率。其中 A 为待测饲料的养分瘤胃消失率 (%), B 为待测饲料降解前养分含量 (g), C 为待测饲料降解后养分含量 (g)。应用 Orskov<sup>[15]</sup> 提出的数学指数模型  $dp = a - b(1 - e^{-ct})$  来确定降解常数 (a, b 和 c), 待测饲料养分的有效降解率 (effective degradability, ED) 由公式:  $ED = a + [bc / (c + k)]$  计算得出, 式中 dp 为动态降解率, a 为快速降解部分, b 为慢速降解部分, c 为速降常数, t 为饲料在瘤胃内滞留时间, k 为待测饲料的瘤胃外流速度。玉米秸秆瘤胃外流速度实测值为 0.025·h<sup>-1</sup>, 混合精料为 0.058·h<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>。沉积能 = 食入能 - 粪能 - 尿能 - 气体能 - 产热量。产热量 (kJ)<sup>[17]</sup> = 16.18 O<sub>2</sub> (L) + 5.02 CO<sub>2</sub> (L) - 2.17 CH<sub>4</sub> (L) - 5.99  $\times$  尿氮量 (g); 气体能 (kJ) = 39.6  $\times$  CH<sub>4</sub> (L); 瘤胃液 pH、NH<sub>3</sub>-N、VFA、尿嘌呤衍生物、消化率、能量代谢和氮平衡等数据应用 SPSS 统计分析软件的 One-

way-anova 进行方差分析和 LSD 多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 丙三醇对瘤胃发酵的影响

由表 2 可见, 随着丙三醇水平的提高, 瘤胃 pH 呈下降趋势, 200 g·d<sup>-1</sup> 组和 300 g·d<sup>-1</sup> 组显著低于对照

和 100 g·d<sup>-1</sup> 组 ( $P<0.05$ ); 瘤胃总挥发性脂肪酸浓度、丙酸和丁酸摩尔比呈上升趋势, 200 g·d<sup>-1</sup> 组和 300 g·d<sup>-1</sup> 组显著高于对照和 100 g·d<sup>-1</sup> 组 ( $P<0.05$ ); 瘤胃乙酸浓度趋于下降, 但差异不显著 ( $P>0.05$ ); 瘤胃乙酸/丙酸比例和氨态氮浓度呈下降趋势, 200 g·d<sup>-1</sup> 组和 300 g·d<sup>-1</sup> 组显著低于对照组和 100 g·d<sup>-1</sup> 组 ( $P<0.05$ )。

表 2 丙三醇对西门塔尔牛瘤胃发酵的影响

Table 2 Effects of glycerol supplementation on ruminal fermentation in Simmental steer

项目 Item	丙三醇添加量 Supplemental glycerol (g·d <sup>-1</sup> )			
	0	100	200	300
pH	6.58±0.09a	6.56±0.10a	6.32±0.08b	6.23±0.12b
总挥发性脂肪酸 Total VFA (mmol·L <sup>-1</sup> ) mol/100 mol	95.51±1.53b	96.82±1.81b	100.86±2.04a	102.44±1.98a
乙酸 Acetate (A)	70.05±1.18a	69.97±1.32a	69.62±1.76a	69.29±1.54a
丙酸 Propionate (P)	14.23±0.56c	16.16±0.74b	18.79±0.37a	19.01±0.49a
丁酸 Butyrate	0.83±0.21b	0.84±0.18b	0.95±0.24a	0.98±0.17a
乙酸: 丙酸 Acetate: Propionate (A : P)	4.92±0.09a	4.33±0.26a	3.71±0.15b	3.64±0.12b
氨态氮 Ammonia N (mg·d <sup>-1</sup> ·L <sup>-1</sup> )	10.44±0.73a	9.25±0.69a	7.86±0.81b	7.54±0.47b

同行不同小写字母差异显著 ( $P<0.05$ )。下同

In the same row, values with different small letter means significant difference ( $P<0.05$ ). The same as below

### 2.2 丙三醇对玉米秸秆和混合精料瘤胃有效降解率的影响

由表 3 可见, 随着丙三醇水平的提高, 玉米秸秆 DM、OM、NDF 和 ADF 瘤胃有效降解率呈上升趋势, 200 g·d<sup>-1</sup> 组和 300 g·d<sup>-1</sup> 组显著高于对照组 ( $P<0.05$ ), 其它组间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 混合精料 DM 和 OM 瘤胃有效降解率呈上升趋势, 200 g·d<sup>-1</sup> 组和 300

g·d<sup>-1</sup> 组显著高于对照组 ( $P<0.05$ ), 其它组间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 混合精料 CP 瘤胃有效降解率呈下降趋势, 200 g·d<sup>-1</sup> 组和 300 g·d<sup>-1</sup> 组显著低于对照组和 100 g·d<sup>-1</sup> 组 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 丙三醇对尿嘌呤衍生物含量的影响

由表 4 可见, 随着丙三醇水平的提高, 对尿酸含量无显著影响 ( $P>0.05$ ), 尿囊素和尿嘌呤衍生物含

表 3 丙三醇对玉米秸秆和混合精料瘤胃有效降解率的影响

Table 3 Effects of glycerol supplementation on ruminal effective degradability of corn straw and concentrate in Simmental steer

项目 Item	丙三醇添加量 Supplemental glycerol (g·d <sup>-1</sup> )			
	0	100	200	300
玉米秸秆 Corn straw				
干物质 Dry matter	37.51±1.18b	38.77±0.81ab	40.24±0.95a	39.40±1.08a
有机物 Organic matter	36.25±1.32b	37.62±0.74ab	39.18±0.84a	38.04±1.12a
中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre	31.83±1.46b	33.12±0.69ab	34.51±0.87a	33.30±1.27a
酸性洗涤纤维 Acid detergent fibre	29.19±1.29b	30.23±0.93ab	31.37±0.76a	30.85±1.24a
混合精料 Concentrate				
干物质 Dry matter	49.21±1.25b	50.04±1.37ab	52.64±0.75a	52.21±1.24a
有机物 Organic matter	48.76±1.33b	49.11±1.26ab	51.23±0.56a	49.79±1.15a
粗蛋白质 Crude protein	35.48±0.58a	34.57±1.04a	32.38±1.14b	32.13±1.21b

表 4 丙三醇对西门塔尔牛尿嘌呤衍生物浓度的影响

Table 4 Effects of glycerol supplementation on purine derivatives of urine in Simmental steer

项目 Item	丙三醇添加量 Supplemental glycerol (g·d <sup>-1</sup> )			
	0	100	200	300
尿囊素 Allantoin (mmol·d <sup>-1</sup> )	57.69±1.36b	59.29±1.48b	63.63±1.38a	69.84±1.51a
尿酸 Uric acid (mmol·d <sup>-1</sup> )	7.31±0.57a	7.38±0.62a	7.44±0.49a	7.32±0.73a
尿嘌呤衍生物 Urinary purine derivatives (mmol·d <sup>-1</sup> )	65.00±1.81b	66.67±1.79b	71.07±1.64a	77.16±1.75a

量呈上升趋势, 200 g·d<sup>-1</sup>组和 300 g·d<sup>-1</sup>组显著高于 100 g·d<sup>-1</sup>组和对照组 ( $P<0.05$ )。

#### 2.4 丙三醇对日粮养分消化率的影响

表 5 日粮添加丙三醇水平对西门塔尔牛日粮养分表观消化率的影响

Table 5 Effects of glycerol supplemental levels on nutrient apparent digestibility in Simmental steer (%)

项目 Item	丙三醇添加量 Supplemental glycerol (g·d <sup>-1</sup> )			
	0	100	200	300
干物质 Dry matter	53.41±1.32b	55.50±1.19ab	58.76±1.09a	56.27±1.34a
有机物质 Organic matter	58.64±1.60b	59.85±0.50ab	63.62±1.11a	60.88±1.32a
粗蛋白 Crude protein	56.63±1.04b	57.08±0.74ab	57.35±0.84a	58.54±1.51a
粗脂肪 Ether extract	67.43±2.45b	67.86±2.63b	72.09±1.56a	70.99±4.14a
无氮浸出物 Nitrogen free extract	61.97±2.26b	62.87±0.72ab	63.54±0.91a	63.84±2.89a
中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre	62.43±1.18b	64.35±1.58ab	65.58±1.38a	65.60±2.58a
酸性洗涤纤维 Acid detergent fibre	42.61±1.98b	45.26±1.52ab	47.71±2.13a	45.73±3.36a

#### 2.5 丙三醇对日粮能量平衡的影响

由表 6 可见, 处理组间采食总能无显著差异。尿能、气体能和产热量呈下降趋势, 但差异不显著; 200 g·d<sup>-1</sup>组粪能显著低于对照组 ( $P<0.05$ ); 消化能、代谢能和沉积能呈上升趋势, 200 g·d<sup>-1</sup>组和 300 g·d<sup>-1</sup>组消化能与代谢能显著高于对照组 ( $P<0.05$ ), 200 g·d<sup>-1</sup>

由表 5 可见, 随着丙三醇水平的增加, 日粮 OM、EE、CP、NFE、NDF 和 ADF 表观消化率呈上升趋势, 200 g·d<sup>-1</sup>组和 300 g·d<sup>-1</sup>组显著高于对照组 ( $P<0.05$ )。

组和 300 g·d<sup>-1</sup>组沉积能显著高于 100 g·d<sup>-1</sup>组和对照组 ( $P<0.05$ ), 100 g·d<sup>-1</sup>组沉积能显著高于对照组 ( $P<0.05$ )。

#### 2.6 丙三醇对西门塔尔牛日粮氮平衡的影响

由表 7 可见, 随着丙三醇水平的增加, 对采食氮无显著影响; 粪氮和尿氮呈下降趋势, 200 g·d<sup>-1</sup>组显

表 6 丙三醇对西门塔尔牛日粮能量平衡的影响

Table 6 Effects of glycerol supplementation on diet energy balance in Simmental steer (MJ·d<sup>-1</sup>)

项目 Item	丙三醇添加量 Supplemental glycerol (g·d <sup>-1</sup> )			
	0	100	200	300
采食总能 Intake energy	378.54±2.35a	377.96±1.86a	378.34±2.14a	377.66±2.63a
粪能 Feces energy	205.93±1.03a	199.64±1.24ab	190.72±1.18a	194.44±0.82ab
消化能 Digestible energy	172.61±1.34b	180.32±0.99ab	187.62±1.32a	183.22±1.19a
尿能 Urine energy	17.56±0.65a	17.43±0.87a	17.21±1.20a	17.27±0.97a
气体能 Gas energy	12.40±0.47a	12.24±0.56a	12.11±0.49a	11.92±0.66a
代谢能 Metabolizable energy	142.65±1.64b	150.65±1.73ab	158.30±1.78a	154.03±1.61a
产热量 Heat	75.94±1.51a	75.27±1.38a	74.39±1.72a	73.34±1.69a
沉积能 Energy retention	66.71±1.37c	75.38±1.41b	83.91±1.49a	80.69±1.52a

表 7 丙三醇对西门塔尔牛日粮氮平衡的影响

Table 7 Effects of glycerol supplementation on diet nitrogen balance in Simmental steer ( $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ )

项目 Item	丙三醇添加量 Supplemental glycerol ( $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ )			
	0	100	200	300
采食氮 Intake nitrogen	102.65±2.35a	102.68±1.86a	103.24±2.14a	103.15±2.63a
粪氮 Feces nitrogen	44.53±1.03a	43.70±1.24a	41.79±1.18b	42.40±0.82ab
尿氮 Urine nitrogen	52.08±0.65a	51.35±0.87a	47.97±1.20b	48.75±0.97ab
可消化氮 Digestible nitrogen	58.12±1.34b	58.98±0.99ab	61.45±1.32a	60.75±1.19a
沉积氮 Retention nitrogen	6.04±0.58b	7.63±1.02b	13.48±0.49a	12.00±0.52a

著低于对照组 ( $P<0.05$ )；可消化氮和沉积氮呈上升趋势，200  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 组和 300  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 组沉积氮显著高于对照组和 100  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 ( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

日粮添加丙三醇后，丙三醇在瘤胃中迅速发酵，为瘤胃微生物提供了能量，促进了纤维分解菌的生长与繁殖<sup>[5]</sup>或提高了纤维分解菌的活力，从而使玉米秸秆 NDF 和 ADF 的瘤胃有效降解率提高。而 Valérie 等<sup>[6]</sup>研究发现，低浓度的丙三醇 (0.1%~1%) 对羊瘤胃液中黄色瘤胃球菌、产琥珀酸丝状杆菌和厌氧真菌的生长、附着及纤维分解活性没有影响，当丙三醇浓度达到 5% 时，这些细菌的生长和纤维分解活性被抑制，但对其纤维附着能力没有影响。造成这些结果不一致的原因可能是日粮组成不同。

由于丙三醇提高了玉米秸秆 DM、OM、NDF 和 ADF 及混合精料 DM 和 OM 的有效降解率，增加了丙酸和丁酸产量，使总挥发性脂肪酸浓度升高，pH 降低，瘤胃乙/丙酸比例下降。当瘤胃 pH 高于 6.2，适宜于纤维分解菌的活动<sup>[18]</sup>，这与纤维有效降解率升高的结果相一致。Schröder 等<sup>[19]</sup>研究发现，日粮添加丙三醇，瘤胃液 pH 高于 6.2，但进食后降低较明显，本试验结果与其结果一致。DeFrain 等<sup>[20]</sup>研究发现，在产前添加丙三醇对瘤胃液 pH 没有影响，产后升高，这与日粮类型有关。日粮添加丙三醇提高了丙酸产量，可能是促进了丙酸产生菌的活动。这与 Remond<sup>[3]</sup>、Trabue<sup>[4]</sup>、Schröder<sup>[19]</sup>、DeFrain<sup>[20]</sup>、Khalili 等<sup>[21]</sup>研究结果一致。Remond 等<sup>[3]</sup>研究发现添加丙三醇 (240  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$  或 480  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 后瘤胃丙酸和丁酸浓度增加，而乙酸浓度降低。Trabue 等<sup>[4]</sup>在牛的瘤胃液中添加 25 mmol 丙三醇，结果发现 24 h 时 80% 的丙三醇被代谢，降低了乙酸发酵，增加了丙酸发酵。Schröder 等<sup>[19]</sup>研究发现丙三醇可以轻微降低瘤胃内乙酸与丙酸比例，丙酸浓

度升高。DeFrain 等<sup>[20]</sup>研究发现产前添加丙三醇对瘤胃液 VFA 含量没有影响，产后 VFA 含量增加，瘤胃丁酸含量高于对照组、丙酸含量增长了约 20%。Khalili 等<sup>[21]</sup>研究发现添加丙三醇 (252  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 后瘤胃乙酸摩尔比显著降低，而丙酸和丁酸摩尔比显著增加。

瘤胃氨态氮浓度反映了蛋白质降解与合成之间所达到的平衡状况<sup>[22]</sup>，日粮添加丙三醇的浓度高于 200  $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ，显著降低了瘤胃氨态氮浓度。一方面是由于丙三醇抑制了瘤胃蛋白质分解菌的生长或降低了蛋白质分解活性，这与混合精料蛋白质瘤胃有效降解率降低相一致；Paggi 等<sup>[23]</sup>体外试验研究结果与此相同，他们发现添加 50、100、200 和 300 mmol 丙三醇后，蛋白质分解活性分别为 0.813、0.781、0.767 和 0.780。另一方面是由于丙三醇促进微生物利用  $\text{NH}_3\text{-N}$  合成微生物蛋白，这与尿嘌呤衍生物增加相一致；尿嘌呤衍生物含量与牛瘤胃微生物蛋白质 (MCP) 产量存在高度正相关<sup>[10]</sup>，随着丙三醇水平增加，尿嘌呤衍生物浓度增加。瘤胃可发酵碳水化合物是影响微生物蛋白质合成的关键日粮因子<sup>[24]</sup>，本试验中玉米秸秆 DM、OM、NDF 和混合精料 DM、OM 瘤胃有效降解率增加，为瘤胃微生物蛋白质的合成提供了丰富的可发酵碳水化合物。另外，纤维分解菌从瘤胃液氨态氮获得其生长繁殖所需要的氮<sup>[25]</sup>，本试验中氨态氮浓度高于 5  $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$ ，可以满足微生物生长的需要<sup>[26]</sup>，因此纤维物质的降解率明显增加。

由于添加丙三醇促进了瘤胃发酵和提高了瘤胃营养物质的有效降解率，日粮养分消化率显著提高。瘤胃蛋白质降解率的降低说明过瘤胃蛋白质增加，加之瘤胃微生物蛋白质合成增加，说明达到小肠的蛋白质总量增加，因此添加丙三醇改善了日粮的氮平衡。日粮养分消化率的提高和氮平衡的改善，使日粮能量利用率提高，从而使沉积能增加。这与 Schröder 等<sup>[19]</sup>和 Paggi 等<sup>[27]</sup>的结果不一致。Schröder 在低淀粉日粮

基础上给羊添加 46、98、116 和 155 g·d<sup>-1</sup> 的丙三醇发现对 OM、淀粉、NDF 的消化率没有影响,但在高淀粉日粮基础上添加相同水平的丙三醇,发现 NDF 的消化率降低。Paggi 等体外试验研究发现 100、200 和 300 mmol 的丙三醇降低了 DM 消化率约 8%~15%。这种结果的不一致主要来源于日粮的不同。Chung 等<sup>[28]</sup>发现补充丙三醇后饲料转化为牛奶的效率提高,产后 1 周内奶牛能量平衡得到明显改善。Bodarski 等<sup>[29]</sup>报道补充丙三醇 300 ml·d<sup>-1</sup> 和 500 ml·d<sup>-1</sup> 后奶牛产奶量显著提高了 14.6% 和 12.5%。在这些研究中,产奶量的提高、能量平衡的改善和饲料效率的提高,从侧面证明了丙三醇可以提高日粮消化率、氮平衡和能量平衡。

## 4 结论

(1) 日粮添加丙三醇 200 g·d<sup>-1</sup> 和 300 g·d<sup>-1</sup> 促进了玉米秸秆干物质、有机物质和纤维物质的降解,提高了混合精料干物质和有机物质的降解率,降低了混合精料粗蛋白质的降解率,瘤胃挥发性脂肪酸总量和丙酸与丁酸摩尔比增加,乙酸摩尔比没有显著变化,瘤胃 pH 和乙/丙酸比例显著降低;

(2) 日粮添加丙三醇 200 g·d<sup>-1</sup> 和 300 g·d<sup>-1</sup>, 尿嘌呤生物浓度显著增加,瘤胃 NH<sub>3</sub>-N 浓度显著降低,促进了瘤胃微生物蛋白质的合成;

(3) 日粮添加丙三醇 200 g·d<sup>-1</sup> 和 300 g·d<sup>-1</sup> 显著提高了日粮养分消化率、氮平衡和能量平衡;

(4) 因添加丙三醇 200 g·d<sup>-1</sup> 和 300 g·d<sup>-1</sup>, 各项指标之间差异均不显著,所以丙三醇的适宜水平为 200 g·d<sup>-1</sup>。

## References

- [1] Krebs H A, Lund P. Formation of glucose from hexoses, pentoses, polyols and related substances in kidney cortex. *Biochemical Journal*, 1966, 98: 210-214.
- [2] 冯仰廉. 反刍动物营养学. 北京: 科学出版社, 2004: 372, 575-576.  
Feng Y L. *Ruminant Animal Nutrition*. Beijing: China Science Press, 2004: 372, 575-576. (in Chinese)
- [3] Remond B, Souday E, Jouany J P. *In vitro* and *in vivo* fermentation of glycerol by rumen microbes. *Animal Feed Science and Technology*, 1993, 41(2): 121-132.
- [4] Trabue S, Scoggin K, Tjandrakusuma S, Rasmussen M A, Reilly P J. Ruminal fermentation of propylene glycol and glycerol. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55: 7043-7051.
- [5] Linke P L, DeFrain J M, Hippen A R, Jardon P W. Ruminal and plasma responses in dairy cows to drenching or feeding glycerol. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(Suppl. 1): 343. (Abstr. )
- [6] Valérie R, Gérard F, Cécile A, Philippe G. Effects of glycerol on the growth, adhesion, and cellulolytic activity of rumen cellulolytic bacteria and anaerobic fungi. *Current Microbiology*, 1992, 25(4): 197-201.
- [7] 冯仰廉. 肉牛营养需要和营养标准. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 19-26.  
Feng Y L. *Beef Cattle Nutrient Requirements and Feeding Standard*. Beijing: Chinese Agriculture University Press, 2000: 19-26. (in Chinese)
- [8] 杨 胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 北京农业大学出版社, 1996: 16-35.  
Yang S. *Feed Analysis and Quality Determination*. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1996: 16-35. (in Chinese)
- [9] Liu Q, Wang C, Huang Y X, Dong K H, Yang W Z, Wang H. Effects of lanthanum on rumen fermentation, urinary excretion of purine derivatives and digestibility in steers. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, 142(1-2): 121-132.
- [10] International Atomic Energy Agency. Estimation of rumen microbial protein production from purine derivatives in urine. A laboratory manual for the FAO/IAEA Co-ordinated Research Programme on Development, Standardization and Validation of Nuclear Based Technologies for Measuring Microbial Protein Supply in Ruminant Livestock for Improving Productivity. *IAEA-TECDOC-945, Vienna, IAEA*, 1997: 22-24.
- [11] 郭 城. 家畜能量代谢试验采气装置的研制. 中国人民解放军兽医大学学报, 1982, 2(2): 192-198.  
Guo C. Development of device of gas sampling for energy metabolism experiment in livestock. *Journal of the People's Liberation Army Veterinary University*, 1982, 2(2): 192-198. (in Chinese)
- [12] 郭 城. 家畜气体能量代谢试验采气方法的研究. 中国畜牧杂志, 1984, 20(3): 7-9.  
Guo C. Study on the method of gas sampling for energy metabolism experiment in livestock. *Chinese Journal of Animal Science*, 1984, 20(3): 7-9. (in Chinese)
- [13] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74: 3583-3597.
- [14] 袁 纛. 动物营养学实验教程. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 66-78.  
Yuan Y. *Animal Nutrition Experimental Guide*. Beijing: Chinese

- Agriculture University Press, 2006: 66-78. (in Chinese)
- [15] Ørskov E R, DeB Hovell F D, Mould F. The use of the nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. *Tropical Animal Production*, 1980, 5(3): 195-213.
- [16] Liu Q, Wang C, Huang Y X, Miao C H, Gao D H. Effects of Sel-Plex on rumen fermentation and purine derivatives in Simmental steers. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 2007, 16(Suppl. 2): 133-138.
- [17] 杨 凤. 动物营养学(第二版). 北京: 中国农业出版社, 2001: 174. Yang F. *Animal Nutrition* (2nd ed). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001: 174. (in Chinese)
- [18] Russell J B, Wilson D B. Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH? *Journal of Dairy Science*, 1996, 79: 1503-1509.
- [19] Schröder A, Südekum K H. Glycerol as a by-product of biodiesel production in diets for ruminants. In *New Horizons for an Old Crop*. Proc. 10th Int. Rapeseed Congr. , Canberra, Australia. Wratten N, Salisbury P A, ed. The Regional Institute Ltd., Gosford, New South Wales, Australia, 1999: 241.
- [20] DeFrain J M, Hippen A R, Kalscheur K F, Jardon P W. Feeding glycerol to transition dairy cows: Effects on blood metabolites and lactation performance. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87: 4195-4206.
- [21] Khalili H, Varvikko T, Toivonen V, Hissa K, Suvitie M The effects of added glycerol or unprotected free fatty acids or a combination of the two on silage intake, milk production, rumen fermentation and diet digestibility in cows given grass silage based diets. *Agricultural and Food Science in Finland*, 1997, 6(5-6): 349-362.
- [22] Aufrère J, Graviou D, Demarquilly C. Ruminal degradation of protein of cocksfoot and perennial ryegrass as affected by various stages of growth and conservation methods. *Animal Research*, 2003, 52(2): 245-261.
- [23] Russell J B, Connor O, Fox J D, Soest V, Sniffen C J. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. *Journal of Animal Science*, 1992, 70: 3551-3561.
- [24] Satter L D, Slyter L L. Effect of ammonia concentration on rumen microbial protein production in vitro. *British Journal of Nutrition*, 1974, 32: 199-208.
- [25] Paggi R A, Fay J P, Fernáandez H M. Effect of short-chain acids and glycerol on the proteolytic activity of rumen fluid. *Animal Feed Science and Technology*, 1999, 78(1): 341-347.
- [26] Krause K M, Combs D K, Beauchemin K A. Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. I. Milk production and diet digestibility. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(8): 1936-1946.
- [27] Paggi R A, Fay J P, Faverin C. *In vitro* ruminal digestibility of oat hay and cellulolytic activity in the presence of increasing concentrations of short-chain acids and glycerol. *Journal of Agricultural Science*, 2004, 142(1): 89-96.
- [28] Chung Y H, Rico D E, Martinez C M, Cassidy T W, Noirov V, Ames A, Varga G A. Effects of feeding dry glycerin to early postpartum holstein dairy cows on lactational performance and metabolic profiles. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90: 5682-5691.
- [29] Bodarski R, Wartelecki T, Bommer F, Gosiewski S. The changes of metabolic status and lactation performance in dairy cows under feeding tmr with glycerin (glycerol) supplement at periparturient period. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Animal Husbandry*, 2005, 8(4): 22.

(责任编辑 高 雨, 林鉴非)