

网络出版时间:2014-02-28 13:13

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.03.005

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.03.005.html>

日粮非纤维性碳水化合物来源对体外瘤胃 发酵和养分利用的影响

刘婵娟¹, 赵向辉^{1,2}, 李朝云¹, 曹阳春¹, 汪菲¹, 姚军虎¹

(1 西北农林科技大学 动物科技学院, 陕西 杨凌 712100; 2 江西农业大学 动物科技学院, 江西 南昌 330045)

【摘要】 **【目的】**研究不同来源非纤维性碳水化合物(NFC)对体外瘤胃发酵和养分利用的影响。**【方法】**配制 NFC 来源分别为玉米淀粉、果糖、低聚果糖和多聚果糖的 4 种苜蓿-豆粕型日粮,用饲喂 60 d 后的 4 只安装有永久性瘤胃瘘管的成年山羊提供瘤胃液,对 4 种 NFC 来源日粮进行体外发酵试验,测定产气量、发酵液 pH、总挥发性脂肪酸(TVFA)产量、木聚糖酶和羧甲基纤维素酶活性、甲烷产量及干物质(DM)和中性洗涤纤维(NDF)的表观消失率。**【结果】**不同来源 NFC 日粮 DM 和 NDF 的表观消失率差异显著或极显著,最高值均出现在玉米淀粉组,其余处理组 DM 表观消失率差异不显著,果糖组的 NDF 表观消失率较低;NFC 来源极显著影响 TVFA 产量,其最高和最低值分别出现在多聚果糖和玉米淀粉组;玉米淀粉组丙酸占 TVFA 物质的量的比例显著或极显著低于其他 3 个处理组,但丁酸、异丁酸和异戊酸占 TVFA 物质的量的比例显著或极显著高于其他 3 个处理组。玉米淀粉组的产气量和多聚果糖组的甲烷产量与果糖组无显著差异,但显著或极显著高于其他 2 组。NFC 来源对体外瘤胃发酵液 pH、木聚糖酶和羧甲基纤维素酶活性、乙酸和戊酸占 TVFA 物质的量的比例及甲烷与 TVFA 物质的量比无显著影响。**【结论】**与果糖、低聚果糖和多聚果糖组相比,玉米淀粉组日粮的 DM 和 NDF 表观消失率及丁酸占 TVFA 物质的量的比例极显著升高,而 TVFA 产量及丙酸占其物质的量的比例极显著降低;与果糖和低聚果糖组相比,多聚果糖组日粮的 NDF 表观消失率和 TVFA 产量均更高。

【关键词】 非纤维性碳水化合物;瘤胃发酵;养分利用;甲烷

【中图分类号】 S816.32

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)03-0028-06

Effects of non-fiber carbohydrates sources on ruminal fermentation and nutrient utilization *in vitro*

LIU Chan-juan¹, ZHAO Xiang-hui^{1,2}, LI Chao-yun¹, CAO Yang-chun¹,
WANG Fei¹, YAO Jun-hu¹

(1 College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 College of Animal Science and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: **【Objective】** The study investigated the effects of non-fiber carbohydrates (NFC) from different sources on ruminal fermentation and nutrient utilization *in vitro*. **【Method】** Alfalfa-soybean meal with 4 different NFC sources (corn starch, sucrose, fructo oligosaccharide, and poly fructose) was designed. Rumen fluid was obtained from four ruminally fistulated goats fed for 60 d to ferment the four diets. The ruminal fermentation fluid pH, gas, production rate of total volatile fatty acid (TVFA), activities

【收稿日期】 2013-03-26

【基金项目】 科技部国际科技合作与交流专项(2010DFB34230);国家科技支撑计划项目(2012BAD12B02, 2012BAD39B05);陕西省“13115”科技创新工程技术研究项目(2010ZDGC-02)

【作者简介】 刘婵娟(1988—),女,陕西延安人,在读硕士,主要从事反刍动物营养调控研究。E-mail:chanjuanhx@163.com

【通信作者】 姚军虎(1962—),男,陕西宝鸡人,教授,博士生导师,主要从事动物营养原理与方法研究。

E-mail:yaojunhu2004@sohu.com

of xylanase and carboxymethyl cellulose enzymes, methane production, and the apparent disappearance rates of dry matter (DM) and neutral detergent fiber (NDF) were determined. 【Result】 Apparent disappearance rates of DM and NDF of 4 NFC sources were significantly/extremely significantly different, and both showed the highest in corn starch group. Apparent disappearance rate of NDF was low. Sources of NFC extremely significantly affected TVFA production rate, and the maximum and minimum values occurred in the poly fructose group and the corn starch group, respectively. Ratio of acetate to TVFA was the lowest in corn starch group, while ratios of butyrate, isobutyric and isovaleric to TVFA were greater than other treatments. Gas production rate of corn starch group and methane production rate of poly fructose group were similar to sucrose group, but significantly/extremely significantly greater than other groups. Effects of NFC sources on *in vitro* ruminal fermentation fluid pH, activities of xylanase and carboxymethyl cellulase enzymes, the molar ratios of acetic acid and valeric acid to TVFA, and mass ratio of methane to TVFA were not significant. 【Conclusion】 Compared with sucrose, fructo oligosaccharide and poly fructose groups, the apparent disappearance rates of diet DM and NDF, and molar ratio of acetate to TVFA in starch group were extremely significantly increased, while TVFA production rate and molar ratio of propionate to TVFA were extremely significantly decreased. Compared with fructose and fructo oligosaccharide poly treatments, poly fructose group had higher fiber degradation rate and TVFA production rate.

Key words: non-fibre carbohydrates; ruminal fermentation; nutrient utilization; methane

非纤维性碳水化合物 (Non-fiber carbohydrates, NFC) 是高产奶牛的主要能量来源, 其在奶牛日粮中的含量占日粮质量的 30%~45%。日粮中的 NFC 主要由淀粉、可溶性糖、果聚糖以及果胶质组成^[1]。尽管研究中普遍用一个计算值笼统表示日粮中的 NFC 含量, 但不同饲料原料中 NFC 组分差异较大。玉米中的 NFC 主要为淀粉, 糖蜜中的 NFC 主要为可溶性糖, 而菊苣和菊芋饲料的 NFC 中则含有大量的果聚糖。Roberfroid 等^[2] 研究报道, 果聚糖是果糖单元通过 β -(2-1) 链联接而成并以葡萄糖单元终止的碳水化合物, 根据聚合度不同又分为低聚果糖 (平均聚合度小于 10) 和多聚果糖 (平均聚合度大于 23), 不同来源的 NFC 在瘤胃降解特性方面存在较大差异。与淀粉相比, 可溶性糖在瘤胃中发酵较快^[3], 且会产生较多的丁酸^[4]。赵向辉等^[5] 通过体外试验, 对比研究了淀粉、可溶性糖 (蔗糖)、果胶和多聚果糖等 NFC 来源对瘤胃发酵和微生物合成的影响, 结果发现与淀粉相比, 蔗糖易产生较多丁酸, 且在微生物合成方面较淀粉和多聚果糖更具有优势。Heldt 等^[6] 对比研究了可溶性糖 (蔗糖、果糖和葡萄糖) 和淀粉对肉牛瘤胃发酵及粗饲料利用的影响, 结果表明, 与蔗糖相比, 果糖更有利于日粮有机物质 (Organic matter, OM) 和中性洗涤纤维 (Neutral detergent fiber, NDF) 在瘤胃中的降解, 说明在瘤胃降解特性方面, 蔗糖和多聚果糖的差异与蔗糖和果糖的差异可能不一致。然而, 目前关于

果糖、低聚果糖、多聚果糖和淀粉在瘤胃发酵特性方面的对比研究仍鲜有报道。本试验通过体外批次培养法研究了 4 个 NFC 来源 (玉米淀粉、果糖、低聚果糖和多聚果糖) 对瘤胃发酵和养分利用的影响, 以期反刍动物生产中 NFC 的高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验动物

选用 4 只体况良好、健康无疾病、平均体质量为 (55.0 ± 3.0) kg 且安装有永久性瘤胃瘘管的成年山羊作为瘤胃液供体羊。试验羊饲养于西北农林科技大学试验动物房, 单笼饲养 60 d, 每日 08:00 和 18:00 饲喂, 自由饮水。

1.2 试验日粮

配制 NFC 来源分别为玉米淀粉、果糖、低聚果糖和多聚果糖的 4 种苜蓿-豆粕型日粮 (表 1), 为叙述方便, 后文分别称为玉米淀粉日粮、果糖日粮、低聚果糖日粮和多聚果糖日粮。

1.3 山羊瘤胃液的采集与处理

早饲前采集供体羊瘤胃液, 迅速转入提前预热至 39℃ 并充满 CO₂ 的保温瓶, 盖上盖子, 快速运回实验室。将瘤胃液先用一层纱布过滤到放于 39℃ 水浴锅且持续通有 CO₂ 的容器中, 再用 4 层纱布过滤瘤胃液。将过滤后的瘤胃液迅速加入 CO₂ 饱和的缓冲液中, 配制成瘤胃液与缓冲液体积比为 1:4 的混合培养液。缓冲液参考 Menke 等^[7] 的方法配

制,在配制缓冲液时考虑到 NH_3HCO_3 对氮源的影响,将 NH_3HCO_3 用等物质的量的 NaHCO_3 代替。

表 1 非纤维性碳水化合物来源不同的日粮组成及其营养水平(干物质基础)

Table 1 Compositions and nutrient levels of diets with different non-fiber carbohydrates sources (Based on dry matter (DM))

组分 Ingredient	玉米淀粉 日粮 Corn starch	果糖 日粮 Fructose	低聚果糖 日粮 Fructo oligosac— charide	多聚果糖 日粮 Poly fructose	营养水平 Nutrient level	玉米淀粉 日粮 Corn starch	果糖 日粮 Fructose	低聚果糖 日粮 Fructo oligosac— charide	多聚果糖 日粮 Poly fructose
苜蓿草料 Alfalfa hay	550	550	550	550	干物质 Dry matter	902	925	926	912
豆粕 Soybean meal	250	250	250	250	有机物质 Organic matter	935	983	954	953
玉米淀粉 Corn starch	200	—	—	—	粗蛋白 Crude protein	172	172	171	172
果糖 Fructose	—	200	—	—	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	411	411	408	411
低聚果糖 Fructo oligosaccharide	—	—	200	—	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	309	309	307	309
多聚果糖 Polyfructose	—	—	—	200					

1.4 试验方法

准确称取 4 种日粮 0.5 g 于发酵瓶,每种日粮 6 个重复,其中 3 个用于产气量、发酵液 pH、总挥发性脂肪酸(Total volatile fatty acids,TVFA)产量及木聚糖酶和羧甲基纤维素酶活性测定,另外 3 个用于测定干物质(Dry matter,DM)和 NDF 的表观消失率。

用瓶口移液器准确量取 50 mL 混合培养液,注入 39 ℃水浴并保持厌氧处理的盛有 0.5 g 饲料样品的发酵瓶中,迅速盖上橡胶塞。然后,将封闭好的发酵瓶快速转入 39 ℃恒温摇床发酵 24 h。发酵结束后,所有发酵瓶移入冰水混合物中终止发酵。用带有精确刻度的大量程注射器测定并记录发酵产气量,之后立即测定发酵液 pH 值。准确量取 1 mL 发酵液并加入 1 mL 沉蛋白溶液(含 100 g/L 偏磷酸和 0.6 g/L 巴豆酸)以测定 TVFA 的产量;另取 2 mL 发酵液用于测定木聚糖酶和羧甲基纤维素酶活性。样品均于-40 ℃冷冻保存。

表 2 NFC 来源对日粮养分表观消失率、发酵液纤维素降解酶活性的影响

Table 2 Effects of non-fiber carbohydrates sources on apparent disappearance rates of diets and cellulose enzyme activities of fermenters (n=3)

分组 Group	干物质消失率/% Dry matter disappearance	中性洗涤纤维消失率/% Neutral detergent fiber disappearance	木聚糖酶活性/ (U·mL ⁻¹) Xylanase activity	羧甲基纤维素 酶活性/(U·mL ⁻¹) Carboxymethyl cellulose enzyme activity
玉米淀粉日粮 Corn starch diet	61.1 Aa	23.4 Aa	3.11 a	0.12 a
果糖日粮 Fructose diet	52.3 Bb	13.5 Bc	2.56 a	0.17 a
低聚果糖日粮 Fructo oligosaccharide diet	54.5 Bb	17.1 ABbc	2.80 a	0.13 a
多聚果糖日粮 Poly fructose diet	56.4 ABb	19.1 ABab	2.70 a	0.13 a
平均标准误 SEM	1.420	1.400	0.156	0.025
P 值 P value	<0.01	<0.01	0.10	0.93

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),标不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下表同。
Note:In each column,different lowercase letters mean significant difference ($P<0.05$),and different uppercase letters mean extremely significant difference($P<0.01$). The same below.

分析 TVFA 时,先将样品于 11 000 r/min 离心 10 min,吸取上清液过 0.45 μm 滤膜;然后根据 Akalin 等^[8]的方法,以巴豆酸为内标,使用液相色谱仪(L-2000,Hitachi,Japan)分析 TVFA 组成。甲烷浓度的测定采用配备有火焰离子化检测器的气相色谱仪(663-30,日立高新技术公司,日本东京)分析;NDF 表观消失率参考 Van Soest 等^[9]的方法测定,酶活性测定参考 Agarwal 等^[10]的方法,DM 表观消失率根据 Nordøy 等^[11]的方法测定。

1.5 数据统计处理

试验数据利用 SPSS 15.0 软件进行统计分析,Duncan's 法进行差异显著性多重比较。

2 结果与分析

2.1 NFC 来源对日粮养分表观消失率和发酵液纤维素分解酶活性的影响

不同 NFC 来源对日粮养分表观消失率、发酵液纤维素降解酶活性的影响见表 2。

由表 2 可知,日粮 DM 和 NDF 的表观消失率受 NFC 来源的影响达极显著水平($P<0.01$),最高值均出现在玉米淀粉组;其他处理组间的 DM 表观消失率无显著差异。日粮 NFC 来源对发酵液中木聚糖酶和羧甲基纤维素酶活性无显著影响,但玉米淀粉组的木聚糖酶活性明显高于其他组。

2.2 日粮 NFC 来源对体外瘤胃发酵液 pH、VFA 和甲烷产量的影响

由表 3 可知,NFC 来源对发酵液的 pH 无显著影响;对 TVFA 产量有极显著影响($P<0.01$),其最高和最低值分别出现在多聚果糖和玉米淀粉组。玉

米淀粉组丙酸占 TVFA 物质的量的比例显著或极显著低于其余 3 个处理组,但丁酸、异丁酸和异戊酸占 TVFA 的物质的量的比例显著或极显著高于其他 3 个处理组;NFC 来源对乙酸和戊酸占 TVFA 的物质的量的比例无显著影响。低聚果糖和多聚果糖组的乙酸与丙酸物质的量比显著低于玉米淀粉组($P<0.05$)。玉米淀粉组的产气量和多聚果糖组的甲烷产量与果糖组无显著差异,但显著或极显著高于其他 2 组。各处理组间的甲烷与总挥发性脂肪酸物质的量比无显著差异。

表 3 NFC 来源对体外瘤胃发酵液 pH、VFA 和甲烷产量的影响

Table 3 Effects of non-fiber carbohydrates sources on pH,VFA and methane in fermenters ($n=3$)						
分组 Group	占总挥发性脂肪酸物质的量的比例/% Percentage of TVFA					
	乙酸 Acetate	丙酸 Propionate	丁酸 Butyrate	戊酸 Pentanoic	异丁酸 Isobutyric	异戊酸 Isovaleric
玉米淀粉日粮 Corn starch diet	68.5 a	20.1 Bb	8.7 Aa	0.67 a	1.02 Aa	0.98 Aa
果糖日粮 Fructose diet	69.1 a	21.2 ABa	7.4 Bb	0.62 a	0.88 Bb	0.79 Bb
低聚果糖日粮 Fructo oligosaccharide diet	68.1 a	22.2 Aa	7.2 Bb	0.68 a	0.94 ABb	0.81 Bb
多聚果糖日粮 Poly fructose diet	68.6 a	21.9 Aa	7.2 Bb	0.66 a	0.94 ABb	0.80 Bb
平均标准误 SEM	0.18	0.27	0.20	0.01	0.018	0.025
P 值 P value	0.26	<0.01	<0.01	0.19	0.01	<0.01

分组 Group	总挥发性脂肪酸/ (mmol·d ⁻¹) TVFA	pH	乙酸与丙酸 物质的量比 Acetate/ propionate	产气量/ (mmol·d ⁻¹) Gas production	甲烷产量/ (mmol·d ⁻¹) Methane	甲烷与总挥发性 脂肪酸 物质的量比 CH ₄ /TVFA
玉米淀粉日粮 Corn starch diet	77.9 Bc	6.49 a	3.41 Aa	90.0 Aa	1.00 Ab	0.26 a
果糖日粮 Fructose diet	85.5 ABb	6.59 a	3.27 ABab	85.7 ABab	1.09 ABab	0.26 a
低聚果糖日粮 Fructo oligosaccharide diet	85.5 ABb	6.48 a	3.07 Bb	81.7 Bb	1.05 ABb	0.25 a
多聚果糖日粮 Poly fructose diet	93.9 Aa	6.48 a	3.14 ABb	82.7 Bb	1.17 Ba	0.25 a
平均标准误 SEM	1.87	0.024	0.047	1.15	0.023	0.002
P 值 P Value	<0.01	0.34	0.02	0.01	0.02	0.24

3 讨 论

3.1 NFC 来源对日粮养分表观消失率和发酵液纤维素降解酶活性的影响

体外试验中,日粮养分消失率反映瘤胃微生物利用饲料的程度。碳氮发酵同步性好的日粮更能促进瘤胃微生物的生长,提高微生物对日粮的降解与利用率^[12]。与淀粉相比,可溶性糖在瘤胃中发酵较快^[3],因而与豆粕氮的发酵不易达到同步。Heldt 等^[6]研究表明,当日粮瘤胃可降解蛋白含量较低时,玉米淀粉与果糖日粮的 OM 和 NDF 消失率无显著差异,然而日粮中添加快速发酵的酪蛋白后,玉米淀粉组的 OM 和 NDF 消失率低于果糖组。赵向辉

等^[5]也发现,当日粮瘤胃可降解氮不足时,蔗糖日粮的 NDF 消失率低于玉米淀粉日粮;通过添加酪蛋白增加瘤胃可降解氮后,蔗糖日粮的 NDF 消失率则高于玉米淀粉日粮。本研究中,玉米淀粉组的 DM 和 NDF 表观消失率均极显著高于果糖组,这可能与日粮碳水化合物和氮在瘤胃液中发酵的同步性有关。目前关于日粮低聚果糖和多聚果糖对 NDF 消失率影响的报道仍较少。Rosendo 等^[13]通过体外方法对比了淀粉、多聚果糖和果胶对 NDF 降解动力参数的影响,结果发现三者间无显著差异。在赵向辉等^[5]的研究中,无论日粮瘤胃可降解氮是否充足,多聚果糖组和淀粉组的 NDF 消失率均无显著差异。本研究中,多聚果糖与玉米淀粉日粮的 NDF 消失率

结果与上述研究一致。低聚果糖组的 NDF 消失率低于玉米淀粉组,介于果糖与多聚果糖组之间,表明低聚果糖在瘤胃发酵方面可能兼有果糖和多聚果糖的特性。玉米淀粉组较高的木聚糖酶活性与该处理组较高的 NDF 消失率一致。

3.2 NFC 来源对发酵液 pH、VFA 和甲烷产量的影响

VFA 浓度是反刍动物瘤胃内一项重要的发酵指标。瘤胃微生物在发酵饲料的过程中产生的 VFA 可提供反刍动物能量需要的 70%~80%^[5]。体内试验中,瘤胃液中 VFA 的产生是底物发酵和瘤胃壁吸收共同作用的结果;而在体外试验中,VFA 浓度则主要与底物的发酵有关。果糖具有较高的溶解性^[14]和发酵速率^[3],其在瘤胃液中能够 100%降解。然而,玉米淀粉的瘤胃有效降解率仅为 60%^[15]。淀粉组纤维消失率较高,果糖组 NFC 消失率较高,而 NFC 消化产生的 VFA 量高于纤维^[16]。因此,本试验中淀粉组的 DM 和 NDF 消失率最高但 TVFA 产量却最低,这可能与发酵底物的种类不同有关。低聚果糖和多聚果糖组可能与果糖组具有相似的情形。

研究表明,日粮 NFC 来源影响瘤胃的 VFA 组成比例^[17-18],但不同的研究结果并不一致。有体外试验报道,果糖发酵易产生较多的丁酸^[18],然而 Chamberlain 等^[19]通过饲喂羊不同来源的 NFC 发现,与淀粉组相比,果糖组产生较多的丙酸和较少的乙酸。在 Heldt 等^[6]的研究中,无论日粮可降解蛋白量如何,果糖组较淀粉组均产生了较多的丁酸,而产生的乙酸和丙酸较少。本研究中,与淀粉组相比,果糖组的丙酸占 TVFA 的物质的量的比例较高,丁酸占 TVFA 的物质的量的比例较低,与 Chamberlain 等^[19]的研究结果部分一致。低聚果糖和多聚果糖组表现出的瘤胃发酵特点与果糖组类似,这可能是因为二者在发酵分解过程中均产生了果糖。支链脂肪酸被瘤胃微生物用于重新合成支链氨基酸,是纤维分解菌生长和降解纤维时所必需的营养成分,可增加纤维分解菌的数量,提高纤维饲料的消失率^[20]。本研究中,淀粉组的支链脂肪酸占 TVFA 的物质的量的比例高于其他处理组,与该组较高的 NDF 消失率一致,表明较低的支链脂肪酸产量可能抑制了果糖、低聚果糖和多聚果糖组的纤维菌的数量,进而降低了纤维的消化。Heldt 等^[6]研究表明,果糖组的异丁酸和异戊酸占 TVFA 的物质的量的比例均低于淀粉组,这与本试验结果一致。

发酵过程中的产气量在一定程度上反映了可发酵物质的降解率^[7,21-22]。Getachew 等^[21]认为,发酵产气直接来源于微生物对饲料的降解,间接来源于瘤胃中脂肪酸的发酵。本研究中的产气量结果基本上与各处理组的 DM 消失率一致,而与 TVFA 的产量则不尽一致,这可能与发酵底物有关。各处理组的甲烷与 TVFA 物质的量比无显著差异,表明多聚果糖组较高的甲烷产量主要源自该组较高的 TVFA 产量。赵向辉等^[5]研究表明,可溶性糖和多聚果糖组的甲烷产量与淀粉组无显著差异,这与本试验结果类似。

4 结 论

与果糖、低聚果糖和多聚果糖组相比,玉米淀粉组日粮的 DM 和 NDF 表观消失率及丁酸占 TVFA 物质的量的比例极显著升高,而 TVFA 产量及丙酸占 TVFA 物质的量的比例显著或极显著降低。果糖与低聚果糖组日粮在瘤胃发酵中各指标测定结果均无显著差异,多聚果糖组日粮较果糖和低聚果糖组日粮有着更高的 NDF 表观消失率和 TVFA 产量。

[参考文献]

- [1] Hall M B, Larson C C, Wilcox C J. Carbohydrate source and protein degradability alter lactation, ruminal, and blood measures [J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(1): 311-322.
- [2] Roberfroid M B, Jan A E, Glenn R. The bifidogenic nature of chicory inulin and its hydrolysis products [J]. *The Journal of Nutrition*, 1998, 128(1): 11-19.
- [3] Weisbjerg M R, Hvelplund T, Bibby B M. Hydrolysis and fermentation rate of glucose, sucrose and lactose in the rumen [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica A; Animal Sciences*, 1998, 48(1): 12-18.
- [4] Martel C A, Titgemeyer E, Mamedova L, et al. Dietary molasses increases ruminal pH and enhances ruminal biohydrogenation during milk fat depression [J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(8): 3995-4004.
- [5] 赵向辉, 刘婵娟, 刘 烨, 等. 日粮可降解蛋白与非纤维性碳水化合物对人工瘤胃发酵、微生物合成以及纤维分解菌菌群的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(22): 4668-4677.
Zhao X H, Liu C J, Liu Y, et al. Effects of degradable protein and non-fiber carbohydrates on *in vitro* ruminal fermentation, microbial synthesis, and populations of ruminal cellulolytic bacteria [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(22): 4668-4677. (in Chinese)
- [6] Heldt J S, Cochran R C, Stokka G L, et al. Effects of different supplemental sugars and starch fed in combination with degradable intake protein on low-quality forage use by beef steers

[J]. Journal of Animal Science,1999,77(10):2793-2802.

[7] Menke K H,Steingass H. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid [J]. Animal Research and Development, 1988,28(7):55.

[8] Akalin A,Gönc S,Akbaş Y. Variation in organic acids content during ripening of pickled white cheese [J]. Journal of Dairy Science,2002,85(7):1670-1676.

[9] Van Soest P J,Robertson J,Lewis B. Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. Journal of Dairy Science, 1991,74(10):3583-3597.

[10] Agarwal N,Agarwal I,Kamra D N,et al. Diurnal variations in the activities of hydrolytic enzymes in different fractions of rumen contents of Murrah buffalo [J]. Journal of Applied Animal Research,2000,18(1):73-80.

[11] Nordøy E S,Sørmo W,Blix A S. *In vitro* digestibility of different prey species of minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) [J]. British Journal of Nutrition, 1993, 70 (2): 485-489.

[12] National Research Council. Nutrient requirements of dairy cattle [M]. 7th ed. Washington, DC: National Academy Press, 2001: 143.

[13] Rosendo O,Hall M B,Staples C,et al. The effect of different neutral-detergent-soluble polysaccharides in digestive cynamics *in vitro* of neutral detergent forage fiber and the synthesis of microbial protein [J]. Revista Cientifica,2010,13:18-27.

[14] Hall M B. Working with sugars (and molasses) [C]//Florida Ruminant Nutrient Symposiums. 13th Annual meeting. Gainesville,FL, USA:[s. n.],2002:146-158.

[15] Sauvant D,Perez J M,Tran G. Tables of composition and nutritional value of feed materials: Pigs, poultry, cattle, sheep, goats,rabbits,horses and fish [M]. Wageningen and INRA Editions. Versailles: Wageningen Academic Publish, 2004: 79-81.

[16] Heldt J,Cochran R,Mathis C,et al. Effects of various carbohydrate sources on the utilization of low-quality tallgrass-prairie hay in continuous culture [R]. Manhattan,KS,USA: Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service,Kansas State University,1998:13-15.

[17] Oba M. Review: Effects of feeding sugars on productivity of lactating dairy cows [J]. Canadian Journal of Animal Science, 2011,91:37-46.

[18] Sutton J. The fermentation of soluble carbohydrates in rumen contents of cows fed diets containing a large proportion of hay [J]. British Journal of Nutrition,1968,22:689-712.

[19] Chamberlain D G,Robertson S,Choung J J. Sugars versus starch as supplements to grass silage: Effects on ruminal fermentation and the supply of microbial protein to the small intestine,estimated from the urinary excretion of purine derivatives,in sheep [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,1993,63:189-194.

[20] 任莹,赵胜军. 异位酸影响反刍动物瘤胃代谢的研究进展 [J]. 饲料研究,2008(2):10-12.

Ren Y,Zhao S J. Research advances in the effect of ectopic acid on rumen metabolism [J]. Feed Research,2008(2):10-12. (in Chinese)

[21] Getachew G,Robinson P H,DePeters E J,et al. Relationships between chemical composition,dry matter degradation and *in vitro* gas production of several ruminant feeds [J]. Animal Feed Science and Technology,2004,111:57-71.

[22] Menke K H,Raab L,Salewski A,et al. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro* [J]. The Journal of Agricultural Science,1979,93:217-222.

(上接第 27 页)

[11] Arun K P,Vadali R B Sastry. Cottonseed meal in poultry diets [J]. The Journal of Poultry Science,2007,44(2):119-134.

[12] Adeyemo G O. Effects of cottonseed cake based diets on haematology and serum biochemistry of egg-type chickens [J]. International Journal of Poultry Science,2008,7(1):23-27.

[13] 王利,汪开毓. 动物棉酚中毒的研究进展 [J]. 畜牧业,2002 (5):26-28.

Wang L,Wang K Y. A review of the studies on gossypol toxicosis in animals [J]. Livestock and Poultry Industry,2002 (5):26-28. (in Chinese)

[14] Baliga B P,Lyman C M. Preliminary report on the nutritional significance of young gossypol in cottonseed meal [J]. Journal of American Oil Chemistry Society,1957,34(1):21-24.

[15] Abou-Donia M B,lyman C M,Diedckert J W. Metabolic fate of gossypol: The metabolism of ¹⁴C-gossypol in rats Lipid5 [J]. Toxicol Apil Pharmacol,1970,5(11):938-946.

[16] Clawson A J,Smith F H. Effect of protein source,autoclaving, and Lysine supplementation on gossypol toxicity [J]. Journal of Animal Science,1961,20(3):547-552.

[17] Lordelo M M,Calhoun M C. Relative toxicity of gossypol enantiomers in laying and broiler breeder hens [J]. Poultry Science,2007,86(3):582-590.

[18] 李建国. 游离棉酚对蛋鸡的毒性研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.

Li J G. Studies on the toxicity of free gossypol to layers [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2003. (in Chinese)