

过瘤胃葡萄糖的瘤胃稳定性及其不同剂量对燕麦干草瘤胃降解特性的影响

王亚品¹ 张帆¹ 华登科¹ 蒋林树² 熊本海^{1*}

(1. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 北京农学院, 奶牛营养学北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 本试验旨在应用尼龙袋法研究过瘤胃葡萄糖(RPG)的瘤胃稳定性及其不同剂量对燕麦干草瘤胃降解特性的影响, 为科学利用 RPG 有效缓解能量负平衡(NEB)提供理论参考。试验分为 2 个部分。试验一: 选用 4 头安装有永久性瘤胃瘘管的健康荷斯坦奶牛, 通过测定不同时间点(0、2、4、6、8、12、24 h) RPG 中葡萄糖的剩余量, 计算 RPG 的瘤胃降解率, 探究 RPG 的瘤胃稳定性, 以为后续研究提供理论支持。试验二: 选用 6 头安装有永久性瘤胃瘘管的健康荷斯坦奶牛, 随机分为 3 组, 每组 2 头。对照组饲喂基础饲料, 200 和 350 g 组在基础饲料中分别添加 200 和 350 g/(头·d)的 RPG, 将 RPG 均匀混合于精料中进行饲喂。预试期 7 d, 正试期 3 d。通过测定燕麦干草在瘤胃内滞留 2、6、12、24、36、48、72 h 后干物质(DM)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、粗蛋白质(CP)的瘤胃降解率和降解参数, 探究不同剂量 RPG 对燕麦干草瘤胃降解特性的影响。结果显示: 1) RPG 在瘤胃内的有效降解率为 45.97%。2) 各时间点(07:00、14:00、21:00)时, 对照组瘤胃液 pH 显著高于 350 g 组($P < 0.05$), 200 g 组瘤胃液氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度显著高于其他 2 组($P < 0.05$), 瘤胃液各挥发性脂肪酸(VFA)(14:00 的丁酸和异戊酸除外)及总 VFA 浓度各组之间差异不显著($P > 0.05$)。3) 燕麦干草的 DM 有效降解率各组之间差异不显著($P > 0.05$); 350 g 组燕麦干草的 NDF 有效降解率最低, 与 200 g 组和对照组差异显著($P < 0.05$); 燕麦干草的 ADF 瘤胃有效降解率与 NDF 有效降解率具有相似的变化规律; 燕麦干草的 CP 有效降解率各组之间没有显著差异($P > 0.05$)。综上所述, RPG 的过瘤胃率为 54.03%, 奶牛饲料中添加 200 g/(头·d) RPG 在缓解 NEB 及调控瘤胃发酵的同时不会对燕麦干草瘤胃降解特性产生显著影响。

关键词: 能量负平衡; 过瘤胃葡萄糖; 燕麦干草; 瘤胃降解率; 发酵特性; 尼龙袋法

中图分类号: S816

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2020)07-3428-11

能量负平衡(NEB)是奶牛产后能量代谢障碍性疾病(酮病、脂肪肝)的共同病理学基础, 多发于日产奶 30 kg 以上的高产牛。泌乳早期的奶牛易出现 NEB, 由此引起的体脂动员导致奶牛血浆非酯化脂肪酸(NEFA)浓度升高^[1], 同时高浓度 NEFA 通过刺激相关基因诱导细胞凋亡 DNA 片段

化因子 45 样效应因子 A(CIDEA)的表达影响乳脂含量^[2], 从而制约养殖业以及奶业的发展。

过瘤胃葡萄糖(RPG)对于奶牛 NEB 的缓解具有重要意义^[3], 目前已经在生产中得到广泛地应用。研究表明, 在奶牛饲料中补充 200 g/(头·d) RPG 能够显著提高产奶量, 降低

收稿日期: 2020-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31572435, 31402107); 国家“十三五”国家重点研发计划(2016YFDO700205, 2016YFDO700201)

作者简介: 王亚品(1995—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: wypwangyapin@163.com

* 通信作者: 熊本海, 研究员, 博士生导师, E-mail: xiongbenhai@caas.cn

炎症相关指标^[5];同时,还有研究发现在奶牛饲料中补充 RPG 能够促进新陈代谢以及回肠上皮的免疫稳态^[6]。燕麦干草是奶牛重要的粗饲料来源之一,中性洗涤纤维(NDF)消化率高,而且吸收效果很好,能够符合围产后期奶牛的实际营养需求,可减缓体况损失。在添加燕麦草的同时合理利用其他优质粗饲料,营养优势互补,可确保奶牛瘤胃保持健康高效的消化功能,对草料的利用效率达到最大化,有效减少产后代谢病的发生,使新产牛提前达到泌乳高值,并延长泌乳高峰时段^[7]。李明华等^[4]研究干奶前期饲喂燕麦草对奶牛围产后期的影响时发现,燕麦草能明显降低奶牛产后酮病的发病率,提高奶牛产后 21 d 以内的产奶量,还可降低奶牛产犊时人工助产的比率。Zou 等^[8]研究发现,用燕麦干草部分替代紫花苜蓿干草可以改善瘤胃发酵,提高氮的利用率。RPG 以氢化脂肪为包衣,在瘤胃内的滞留可能会影响微生物的发酵及燕麦干草在瘤胃内的降解。因此,RPG 的瘤胃稳定性及其脂肪包衣对粗饲料瘤胃降解特性的影响成为了其能否广泛应用的关键。尼龙袋法又叫半体内法,是评价饲料瘤胃降解率的常用方法。本试验通过尼龙袋法研究 RPG 的瘤胃稳定性及其不同剂量对燕麦干草瘤胃降解特性的影响,以探究在缓解奶牛 NEB 的同时不影响燕麦干草消化的 RPG 最适添加剂量,为生产中合理应用 RPG 提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验动物与饲养管理

选用 6 头体重相近、体况相似、产奶量相近、胎次相同、健康且安装有永久性瘤胃瘘管的荷斯坦奶牛作为试验动物,饲养试验于 2019 年 9 月在北京奶牛中心延庆基地良种场开展。试验期间,奶牛采用散栏式饲养,每日饲喂全混合日粮(TMR)3 次(07:00、14:00 和 21:00),自由采食和饮水。TMR 组成及营养水平见表 1。

1.2 试验材料

试验选用的 RPG 产品壁材为氢化脂肪,芯材为食品级葡萄糖。试验选用的燕麦干草为北京奶牛中心延庆基地良种场进口燕麦干草。为充分模拟燕麦干草瘤胃降解特性,本试验采用 TMR 原料中燕麦干草即已经轧短的燕麦干草开展尼龙袋试验。

表 1 TMR 组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of the TMR (DM basis)		%
项目 Items	含量 Content	
原料 Ingredients		
玉米青贮 Corn silage	24.53	
玉米 Corn	15.73	
棉籽粕 Cottonseed meal	3.31	
苜蓿干草 Alfalfa hay	14.31	
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	10.20	
干酒糟及其可溶物 DDGS	3.11	
压片玉米 Pressure corn piece	8.17	
豆粕 Soybean meal	12.32	
甜菜粕 Beet pulp	4.81	
预混料 Premix ¹⁾	2.95	
食盐 NaCl	0.56	
合计 Total	100.00	
营养水平 Nutrient levels ²⁾		
产奶净能 NE _L /(MJ/kg)	7.13	
粗脂肪 EE	4.56	
粗蛋白质 CP	17.36	
酸性洗涤纤维 ADF	18.50	
中性洗涤纤维 NDF	31.34	
钙 Ca	0.68	
磷 P	0.41	

1) 每千克预混料含有 One kilogram of the premix contained the following: Fe 1 400 mg, Cu 1 200 mg, Mn 2 400 mg, Zn 5 500 mg, Se 40 mg, Co 30 mg, I 90 mg, VA 900 000 IU, VD 700 000 IU, VE 9 000 IU。

2) 产奶净能为计算值^[9],其他营养水平为实测值。NE_L was a calculated value^[9], while the others were measured values.

1.3 试验方法

1.3.1 尼龙袋法测定 RPG 瘤胃稳定性

选择 5 cm×10 cm,孔径 30~50 μm 的尼龙袋,将尼龙袋于 40 ℃^[10-11]烘至恒重(48 h)备用。准确称取 10 g RPG 样品,小心放入已知质量的尼龙袋中。选择 4 头瘤胃瘘管牛,每头瘘管牛共投放 18 个装有 10 g RPG 样品的尼龙袋,于晨饲前 1 h 投放到瘤胃中,另一端用尼龙绳固定在瘘管塞上。分别于放置后 2、4、6、8、12、24 h 后取出每头瘘管牛瘤胃中的 3 个尼龙袋,记录编号。将取出的尼龙袋立即放在自来水下冲洗,然后放入水中浸泡 55 min,随后用中等流速的自来水漂洗,直至流水

澄清为止。将3个装有10 g RPG样品的尼龙袋放入37℃温水中浸泡5 min后取出,记录编号,作为0 h时样品,用流水冲洗至澄清。将冲洗干净的尼龙袋于40℃的烘箱中烘至恒重(48 h),称重后取出尼龙袋中的剩余物,放入自封袋中于4℃下保存待测。

1.3.2 尼龙袋法测定不同剂量RPG对燕麦干草瘤胃降解特性的影响

按体重和产奶量将6头瘦管牛随机分为3组,每组2头。对照组饲喂基础饲料,200和350 g组分别在基础饲料的基础上添加200和350 g/(头·d)的RPG,将RPG均匀混合于精料中进行饲喂。预试期7 d,正试期3 d。

准确称取通过2.5 mm筛的燕麦干草风干样品3 g于尼龙袋中,将21个尼龙袋于晨饲前1 h投放到每头瘦管牛的瘤胃中,另一端将尼龙绳固定在瘦管塞上。分别于放置2、6、12、24、36、48、72 h后取出每头瘦管牛瘤胃中的3个尼龙袋,记录编号。将取出的尼龙袋立即放在自来水下冲洗,然后放入水中浸泡55 min,随后用中等流速的自来水漂洗直至流水澄清为止。将冲洗干净的尼龙袋于65℃的烘箱中烘至恒重(48 h,称重后取出尼龙袋中的剩余物,磨碎过1 mm筛,放入自封袋中于4℃下保存备用。

在正试期的最后1天,采集试验牛空腹状态下07:00、14:00、21:00 3个时间点的瘤胃液,一部分立即测定pH,另一部分-20℃保存待测氨态氮(NH₃-N)及挥发性脂肪酸(VFA)浓度。

1.4 测定指标及方法

对于RPG样品,采用蒽酮法^[12]对不同时间点尼龙袋剩余物中葡萄糖含量进行测定;对于燕麦干草样品,各个时间点干物质(DM)、粗蛋白质(CP)含量分别参照GB/T 6435—2006、GB/T 6432—1994中方法测定,NDF、酸性洗涤纤维(ADF)含量参照Van Soest等^[13]的方法测定。

使用便携式pH计(Testo-205,Testo AG,Lenzkirch,德国)测定并记录不同时间点瘤胃液pH。使用气相色谱仪(GC-14B,津岛公司,日本)测定瘤胃液VFA浓度^[12]。采用苯酚-次氯酸钠比色法^[12]测定瘤胃液NH₃-N浓度。

1.5 计算公式

1.5.1 瘤胃降解率

饲料样品中某营养成分瘤胃降解率(%)=100×(降解前该营养成分含量-降解后该营养成分含量)/降解前该营养成分含量。

1.5.2 瘤胃降解参数

瘤胃降解参数依据Ørskov等^[14]的指数模型计算:

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

式中: t 为饲料原料在瘤胃内停留时间(h); P 为 t 时刻某营养成分的瘤胃降解率(%); a 为该营养成分的快速降解部分(%); b 为该营养成分的慢速降解部分(%); c 为 b 的降解速率(%/h)。

用最小二乘法计算出 a 、 b 和 c 值,再代入下面的公式中,计算出饲料原料成分的有效降解率:

$$ED=a+bc/(c+k)$$

式中: ED 为有效降解率(%); k 为饲料原料的外流速度(h⁻¹), $k=0.036+0.017x$, x 为饲养水平,本试验中,RPG和燕麦干草的 k 值均取0.03^[15-16]。

1.6 数据统计与分析

采用SAS 9.2软件中非线性指数模型NLIN过程计算 a 、 b 、 c 值,再用ANOVA程序进行平均值的方差分析,并采用Duncan氏法进行多重比较,结果用平均值±标准差表示,以 $P<0.05$ 作为差异显著性的判断标准。

2 结果与分析

2.1 RPG的瘤胃稳定性

由表2可知,RPG在瘤胃中的降解率随着在瘤胃中培养时间的延长而增加,在瘤胃滞留24 h时降解率达到57.25%。由表3可知,RPG在瘤胃内的慢速降解部分达到46.25%,同时RPG在瘤胃内的有效降解率为45.97%,即过瘤胃率为54.03%。

2.2 不同剂量的RPG对奶牛瘤胃液pH、NH₃-N和VFA浓度的影响

由表3可知,瘤胃液pH随着RPG添加剂量的增加而降低,且各时间点时350 g组均显著低于对照组($P<0.05$)。各时间点瘤胃液NH₃-N浓度均表现为200 g组显著高于对照组和350 g组($P<0.05$),对照组和350 g组之间差异不显著($P>$

0.05)。不同剂量 RPG 对 14:00 的瘤胃液丁酸和异戊酸浓度有显著影响 ($P<0.05$),均以 200 g 组浓度最高,对各时间点的其他 VFA 和总 VFA 浓度无显著影响 ($P>0.05$)。

表 2 RPG 的瘤胃降解率及降解参数

Table 2 Ruminal degradability and degradation parameters of RPG

项目 Items	过瘤胃葡萄糖 RPG
瘤胃降解率 Ruminal degradability/%	
0 h	2.43±0.98
2 h	20.10±6.36
4 h	27.89±1.79
6 h	31.61±1.50
8 h	36.18±0.96
12 h	39.30±1.73
24 h	57.25±7.06
瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters	
a/%	9.46±1.52
b/%	46.25±5.48
C/(%/h)	0.11±0.02
a+b/%	55.71±5.42
有效降解率 ED/%	45.97±3.01

“a”为快速降解部分,“b”为慢速降解部分,“c”为慢速降解部分的降解速率,“a+b”为潜在可降解部分。下表同。

“a” was rapidly degraded proportion, “b” was slowly degraded proportion, “c” was the degradation speed of slowly degraded proportion, and “a+b” was potentially degradable proportion. The same as below.

2.3 不同剂量的 RPG 对燕麦干草瘤胃降解特性的影响

2.3.1 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 DM 瘤胃降解特性的影响

由表 4 可以看出,对照组 2、6、12、48 h 的 DM 瘤胃降解率显著高于 200 和 350 g 组 ($P<0.05$),同时在 36 h 的 DM 瘤胃降解率显著高于 200 g 组 ($P<0.05$),但对对照组 24 h 的 DM 瘤胃降解率显著低于 200 和 350 g 组 ($P<0.05$)。DM 快速降解部分最高的是对照组,达 14.94%,显著高于依次降低的 200、350 g 组 ($P<0.05$);对照组和 200 g 组的 DM 慢速降解部分及潜在可降解部分显著高于 350 g 组 ($P<0.05$),但是 3 组之间的 DM 有效降解率没有显著差异 ($P>0.05$)。

2.3.2 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 NDF 瘤胃降解特性的影响

由表 5 可以看出,只有 48 和 72 h 的 NDF 瘤胃降解率对照组显著高于 350 g 组 ($P<0.05$),其他各个时间点 NDF 瘤胃降解率在各组之间均没有显著差异 ($P>0.05$),但是总体来看对照组的 NDF 瘤胃降解率在各个时间点普遍高于依次降低的 200、350 g 组。200 g 组的 NDF 慢速降解部分显著高于依次降低的对照组和 350 g 组 ($P<0.05$),并且其 NDF 慢速降解部分的降解速率显著低于对照组和 350 g 组 ($P<0.05$)。分析 NDF 潜在可降解部分数据发现,200 g 组显著高于依次降低的对照组和 350 g 组 ($P<0.05$)。350 g 组的 NDF 有效降解率显著低于对照组和 200 g 组 ($P<0.05$)。

表 3 RPG 对奶牛瘤胃液 pH、氨态氮、挥发性脂肪酸浓度的影响

Table 3 Effects of RPG on pH, $\text{NH}_3\text{-N}$ and VFA concentrations in rumen fluid of dairy cows

项目 Items	时间 Time	组别 Groups			P 值 P-value
		350 g	200 g	对照 Control	
pH	07:00	6.19±0.01 ^b	6.40±0.07 ^{ab}	6.48±0.06 ^a	0.025
	14:00	5.82±0.03 ^b	6.10±0.16 ^{ab}	6.24±0.02 ^a	0.049
	21:00	6.10±0.02 ^b	6.28±0.04 ^a	6.35±0.02 ^a	0.006
氨态氮 $\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}/\text{dL})$	07:00	11.32±0.36 ^b	14.14±0.96 ^a	11.72±0.60 ^b	0.048
	14:00	12.09±0.19 ^b	15.52±0.66 ^a	12.54±0.46 ^b	0.010
	21:00	10.55±0.46 ^b	13.16±0.09 ^a	11.17±0.10 ^b	0.005
乙酸 Acetate/(mmol/L)	07:00	64.21±1.16	59.40±2.51	66.84±7.02	0.354
	14:00	70.65±2.65	67.79±3.23	67.90±1.97	0.549
	21:00	71.84±0.41	70.63±5.46	66.82±6.18	0.602

续表 3

项目 Items	时间 Time	组别 Groups			P 值 P-value
		350 g	200 g	对照 Control	
丙酸 Propionate/(mmol/L)	07:00	22.86±0.63	25.81±1.54	24.65±1.99	0.284
	14:00	23.65±1.54	23.95±3.00	22.77±0.28	0.832
	21:00	26.10±2.65	27.92±5.65	23.06±7.09	0.699
乙酸/丙酸 Acetate/propionate	07:00	2.81±0.13	2.31±0.23	2.71±0.07	0.098
	14:00	2.99±0.08	2.86±0.49	2.98±0.05	0.888
	21:00	2.77±0.26	2.61±0.72	3.00±0.66	0.806
异丁酸 Isobutyrate/(mmol/L)	07:00	0.70±0.12	0.78±0.01	0.62±0.07	0.294
	14:00	0.69±0.05	0.55±0.09	0.94±0.30	0.245
	21:00	0.68±0.06	0.83±0.14	0.64±0.02	0.236
丁酸 Butyrate/(mmol/L)	07:00	9.55±0.87	10.02±0.38	9.61±0.01	0.682
	14:00	9.22±0.04 ^{ab}	8.26±0.08 ^b	10.24±0.62 ^a	0.045
	21:00	11.05±0.63	11.63±2.64	8.55±2.07	0.375
异戊酸 Isovalerate/(mmol/L)	07:00	1.19±0.29	1.36±0.00	1.29±0.28	0.795
	14:00	1.19±0.03 ^b	1.06±0.11 ^b	1.83±0.02 ^a	0.003
	21:00	1.17±0.05	1.47±0.23	1.26±0.32	0.483
戊酸 Valerate/(mmol/L)	07:00	1.17±0.01	1.24±0.19	1.14±0.11	0.731
	14:00	1.01±0.08	1.08±0.08	1.23±0.42	0.703
	21:00	1.29±0.21	1.39±0.42	0.91±0.11	0.331
总挥发性脂肪酸 Total VFA/(mmol/L)	07:00	99.69±1.81	98.61±0.40	100.24±3.05	0.746
	14:00	106.40±4.16	103.06±0.03	108.82±1.96	0.241
	21:00	112.12±2.63	113.87±3.63	111.86±0.75	0.733

同行数据肩标不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同或无字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P > 0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$). The same as below.

表 4 燕麦干草的 DM 瘤胃降解率及降解参数

Table 4 DM ruminal degradability and degradation parameters of oat hay

项目 Items	组别 Groups		
	350 g	200 g	对照 Control
DM 瘤胃降解率 Ruminal degradability of DM/%			
2 h	15.46±0.24 ^c	16.03±0.08 ^b	18.20±0.02 ^a
6 h	16.20±0.06 ^c	17.24±0.10 ^b	18.95±0.23 ^a
12 h	18.47±0.22 ^b	17.97±0.04 ^c	23.93±0.06 ^a
24 h	27.60±0.15 ^a	27.13±0.23 ^a	24.78±0.03 ^b
36 h	35.13±0.05 ^a	32.62±0.99 ^b	34.52±0.03 ^a
48 h	35.55±0.02 ^c	39.38±0.04 ^b	41.75±0.17 ^a
72 h	37.14±0.06 ^b	41.94±0.16 ^a	42.20±0.00 ^a
DM 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of DM			
a/%	12.60±0.06 ^b	12.65±1.03 ^b	14.94±0.03 ^a
b/%	29.33±0.20 ^b	40.04±5.36 ^a	38.93±0.03 ^a
c(%/h)	0.03±0.00 ^a	0.01±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b
a+b/%	41.93±0.14 ^b	52.69±6.39 ^a	53.88±0.01 ^a
有效降解率 ED/%	27.32±0.03	25.93±4.55	29.92±0.05

表 5 燕麦干草的 NDF 瘤胃降解率及降解参数

Table 5 NDF ruminal degradability and degradation parameters of oat hay

项目 Items	组别 Groups		
	350 g	200 g	对照 Control
NDF 瘤胃降解率 Ruminal degradability of NDF/%			
2 h	28.99±1.31	30.02±2.79	31.99±0.94
6 h	30.84±1.02	33.57±0.93	34.72±3.22
12 h	32.67±2.91 ^b	34.55±0.83 ^{ab}	38.35±0.54 ^a
24 h	35.97±1.96 ^b	37.06±1.16 ^{ab}	42.50±1.99 ^a
36 h	39.36±0.72	41.27±3.02	43.87±2.97
48 h	40.72±1.66	47.17±3.19	45.39±1.27
72 h	46.42±1.84	53.16±2.75	51.19±2.39
NDF 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of NDF			
a/%	22.67±0.99 ^{ab}	24.80±1.34 ^a	21.51±1.65 ^b
b/%	21.54±1.75 ^b	34.58±3.68 ^a	24.72±0.88 ^b
c/(%/h)	0.05±0.02 ^b	0.02±0.00 ^c	0.12±0.02 ^a
a+b/%	44.20±1.21 ^b	59.38±5.02 ^a	46.23±1.66 ^b
有效降解率 ED/%	36.21±0.71 ^b	39.92±1.53 ^a	41.25±1.20 ^a

2.3.3 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 ADF 瘤胃降解特性的影响

由表 6 可以看出,350 g 组的 ADF 瘤胃降解率在 48 h 内增速缓慢,在 48 h 后增速较快,其 48 h 的 ADF 瘤胃降解率最低,为 42.48%,而其 72 h 的 ADF 瘤胃降解率则最高,显著高于对照组和 200 g

组($P<0.05$)。对照组的 ADF 快速降解部分最高,但是 3 组之间无显著差异($P>0.05$)。对照组的 ADF 慢速降解部分以及潜在可降解部分均显著低于 200 和 350 g 组($P<0.05$),但其有效降解率显著高于 200 和 350 g 组($P<0.05$)。

表 6 燕麦干草的 ADF 瘤胃降解率及降解参数

Table 6 ADF ruminal degradability and degradation parameters of oat hay

项目 Items	组别 Groups		
	350 g	200 g	对照 Control
ADF 瘤胃降解率 Ruminal degradability of ADF/%			
2 h	22.94±3.00	21.25±1.62	22.15±1.43
6 h	24.02±1.80	25.34±3.93	23.24±0.30
12 h	26.30±4.91	30.49±1.95	24.44±0.17
24 h	37.70±0.22 ^a	33.77±1.12 ^b	33.50±1.00 ^b
36 h	41.16±0.73	42.93±1.37	41.08±3.50
48 h	42.48±2.57 ^b	47.86±0.65 ^a	45.18±1.02 ^{ab}
72 h	50.62±1.10 ^a	49.27±0.22 ^{ab}	46.35±1.15 ^b
ADF 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of ADF			
a/%	18.05±1.31	17.57±0.09	19.13±0.09
b/%	36.77±1.41 ^a	35.87±2.74 ^a	26.47±1.20 ^b
c/(%/h)	0.03±0.00 ^b	0.03±0.01 ^b	0.16±0.01 ^a
a+b/%	54.81±0.10 ^a	53.44±2.66 ^a	45.60±1.29 ^b
有效降解率 ED/%	35.50±1.19 ^b	36.35±0.52 ^b	41.31±1.24 ^a

2.3.4 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 CP 瘤胃降解特性的影响

由表 7 可以看出,对照组 48 h 的 CP 瘤胃降解率显著高于 200 和 350 g 组 ($P < 0.05$),其他时间

点的 CP 降解率各组之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。CP 瘤胃降解参数各组之间差异不显著 ($P > 0.05$),并且数值波动较小。

表 7 燕麦干草的 CP 瘤胃降解率及降解参数

Table 7 CP ruminal degradability and degradation parameters of oat hay

项目 Items	组别 Groups		
	350 g	200 g	对照 Control
CP 瘤胃降解率 Ruminal degradability of CP/%			
2 h	40.00±3.22	37.98±4.38	40.49±3.49
6 h	41.32±4.99	41.51±1.43	43.06±0.49
12 h	44.09±1.70	43.83±1.43	44.98±2.39
24 h	45.02±1.34	45.23±1.27	48.77±2.77
36 h	46.44±0.99	48.20±0.41	51.20±2.62
48 h	49.25±0.83 ^b	48.50±0.75 ^b	52.62±0.91 ^a
72 h	58.47±2.03	54.60±0.88	55.66±3.33
CP 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of CP			
a/%	27.59±3.72	26.13±1.43	27.68±0.43
b/%	24.13±1.72	22.42±0.64	23.89±1.48
c/(%/h)	0.29±0.29	0.29±0.18	0.17±0.05
a+b/%	46.27±1.73	45.83±0.81	47.94±1.66
有效降解率 ED/%	51.73±4.87	48.55±0.89	51.56±1.44

3 讨论

3.1 RPG 的瘤胃稳定性

RPG 的瘤胃稳定性是其作为过瘤胃产品的重要指标,稳定性强的 RPG 在瘤胃内经过包衣的包裹能够达到很好的瘤胃保护效果和后肠释放功能。本试验结果表明,经氢化脂肪包被的葡萄糖,其瘤胃有效降解率为 45.97%,本试验结果与薛倩等^[16]测得的以乙基纤维素、聚丙烯酸树脂和壳聚糖作为包衣壁材的葡萄糖微胶囊瘤胃有效降解率基本一致。

3.2 不同剂量的 RPG 对奶牛瘤胃液 pH、NH₃-N 和 VFA 浓度的影响

瘤胃液 pH、NH₃-N 和 VFA 浓度是反映瘤胃发酵情况的重要指标。pH 的降低是由于强烈的瘤胃发酵及其引起的短链脂肪酸增加所致^[17]。本试验中,添加的 RPG 在短时间内所释放出的葡萄糖,使得瘤胃 pH 迅速降低。本研究发现,饲料添加 RPG 能够降低瘤胃液 NH₃-N 浓度,此前有研究通过为泌乳奶牛提供淀粉、蔗糖及乳糖等非纤维性碳水化合物(NFC)来探究高糖饲料对奶牛瘤胃

发酵的影响,发现试验组 NH₃-N 浓度有类似的降低趋势,并且对照组极显著高于试验组^[18],这些结果可能表明当饲料 NFC 含量增加时,在瘤胃中有更多的有机物发酵和微生物蛋白合成,造成瘤胃 NH₃-N 浓度降低^[19-20]。

Van Soest^[21]指出,包括乙酸、丙酸和丁酸在内的 VFA 是碳水化合物瘤胃发酵的最终产物,是反刍动物代谢能的主要来源。本试验结果发现,不同剂量的 RPG 对瘤胃液 VFA 浓度的影响不大,这与李海霞等^[22]的研究结果一致,过瘤胃产品并没有对瘤胃液中乙酸和丙酸的浓度造成显著影响。瘤胃液中 VFA 的产生与瘤胃微生物有着密切的关系,正如 Leng^[23]所指出的,瘤胃微生物生长的效率取决于能量和蛋白质的可得性及二者的同步,而其中能量与瘤胃液中 VFA 浓度有密切的关系。

3.3 不同剂量的 RPG 对燕麦干草瘤胃降解特性的影响

3.3.1 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 DM 瘤胃降解特性的影响

本试验中,总的来看,添加高剂量 RPG 组 DM 瘤胃降解率最低,原因是 RPG 的包衣壁材氢化脂

肪对瘤胃中的微生物产生了抑制作用,此前已有研究发现脂肪会抑制瘤胃微生物的生长,Rabiec 等^[24]和 Martin 等^[25]试验均发现饲料中添加脂肪对干物质采食量(DMI)有显著影响,并能够调控瘤胃微生物群落,降低甲烷排放。可见,由于 RPG 的氢化脂肪包衣影响了瘤胃微生物的活动,进而降低了 DM 的瘤胃降解率。

3.3.2 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 NDF 及 ADF 瘤胃降解特性的影响

NDF 和 ADF 的瘤胃降解率是衡量燕麦干草营养价值的重要指标。本试验中,大部分时间点对应的 NDF 及 ADF 瘤胃降解率各组之间差异不显著,这与李妍等^[26]的报道一致,说明 RPG 的添加剂量不会显著影响粗饲料在瘤胃内的消化。但是对照组的 NDF 及 ADF 瘤胃降解率普遍较高,这主要是由于 2 个 RPG 添加组奶牛瘤胃中 RPG 损失部分的脂质包被在饲料颗粒上,导致微生物对饲料的吸附受到影响,在影响纤维分解菌生长的同时,降低了纤维降解率^[27];同时,瘤胃液 pH 较低时会对瘤胃纤维分解菌产生较大的影响,当瘤胃中 pH 低于 6.2 时,瘤胃纤维分解菌的生长将会受到抑制^[28]。Grant 等^[29]试验结果表明,瘤胃液 pH 从 6.8 降到 5.8 时,会使 NDF 的降解时间延长且降解率下降。Barbosa 等^[30]的研究也发现,反刍动物瘤胃液 pH 在 5.5~7.2,在喂食高浓缩饲料后不久出现最低值;而瘤胃液 pH 在 6.0 以下可能会抑制纤维素分解菌的活性,这是导致纤维降解率降低的一个因素。

饲料在瘤胃内的发酵过程中会产生大量的 VFA,导致瘤胃液 pH 降低,进而扰乱瘤胃微生物区系,抑制纤维降解。前人研究发现,适宜瘤胃发酵的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度最小值高于 10 mg/dL^[31]。值得注意的是,维持微生物合成所需的最低 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 10 mg/dL,而发酵(尤其是纤维发酵)所需 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的理想值为 15~29 mg/dL^[32]。

研究发现燕麦干草能够增强瘤胃微生物的活动,从而提高产气量,并且在提高总 VFA 浓度的同时不影响丙酸的比例^[33],这与本试验结果不一致,其原因可能是本试验中 RPG 影响了瘤胃内发酵环境,从而对瘤胃的消化代谢产生了影响,但是具体的影响因素有待探究。本试验中各组之间的 NDF 和 ADF 瘤胃动态降解模型参数差异较大,350 g 组的降解情况处于较低水平,这与 Li 等^[5]

及 Zhang 等^[6]研究结果一致,RPG 影响了 NDF 及 ADF 的降解速度,表现出较缓的增速。虽然 RPG 可能阻碍了瘤胃微生物的生长及功能,但是有研究发现其能够促进奶牛回肠上皮代谢,改善回肠免疫稳态^[34],并且对回肠消化和黏膜相关菌群无显著影响^[6]。此外,本试验中对照组的燕麦干草相关数据与刘艳芳等^[35]及刘祥圣等^[36]的测定结果保持一致,说明试验及测定过程合理,各组之间的差异是由处理所致。

3.3.3 不同剂量的 RPG 对燕麦干草 CP 瘤胃降解特性的影响

CP 瘤胃降解率主要受饲料粗蛋白质的含量、组成以及在瘤胃内滞留时间的影响^[37]。NRC (2001)表明,燕麦干草粗蛋白质含量为 9.1%,其中 10 种必需氨基酸的含量占到粗蛋白质总量的 35.35%。本试验中,2 个 RPG 添加组的 CP 瘤胃降解率在除 48 h 时的各时间点与对照组均无显著差异,说明 RPG 对奶牛瘤胃微生物蛋白质分解菌没有显著的抑制作用。研究显示蛋白质有效消化的瘤胃最佳氨浓度为 5.0~25.0 mg/dL^[38]和 15~30 mg/dL^[39]。Wallace 等^[40]也观察到,当瘤胃液中氨浓度从 9.7 mg/dL 增加到 21.4 mg/dL 时,DM 和 CP 的瘤胃降解速率增加,这与本研究结果不尽一致,一部分原因可能是燕麦干草的可降解蛋白质(RDP)较少^[11],而苜蓿草虽然粗蛋白质含量(18%~20%)高,但 RDP 比例较大,大部分蛋白质在瘤胃中直接被消化^[41],究其确切因素还需进一步开展试验探究。在 Doran 等^[42]的研究中也发现燕麦干草组的 RDP 含量要比苜蓿干草与燕麦干草混合组以及桑叶与燕麦干草混合组少,所以其 CP 瘤胃降解特性几乎不受 RPG 的影响。

4 结 论

① RPG 在瘤胃内的有效降解率为 45.97%,即过瘤胃率为 54.03%。

② 不同剂量的 RPG 对瘤胃发酵有一定的影响,奶牛饲料中添加 350 g/(头·d) RPG 影响了燕麦干草常规营养成分瘤胃降解特性,其中主要对 DM 的 72 h 降解率和 NDF、ADF 的有效降解率产生了显著影响。

③ 从瘤胃发酵参数及燕麦干草 DM、NDF、ADF、CP 等瘤胃降解特性分析,奶牛饲料中添加 200 g/(头·d) RPG 可调控瘤胃发酵,同时不会

对燕麦干草瘤胃降解特性造成显著影响,但是生产中奶牛所需最适剂量还需结合机体代谢及生产性能等指标进一步探究。

参考文献:

- [1] WHITE H M. The role of TCA cycle anaplerosis in ketosis and fatty liver in periparturient dairy cows [J]. *Animals*, 2015, 5 (3) : 793-802.
- [2] SUN X D, WANG Y Z, LOOR J J, et al. High expression of cell death-inducing DFFA-like effector a (CI-DEA) promotes milk fat content in dairy cows with clinical ketosis [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102 (2) : 1682-1692.
- [3] 李影, 李徐延, 张洪友, 等. 过瘤胃葡萄糖对奶牛能量代谢的影响 [J]. *中国兽医杂志*, 2014, 50 (1) : 6-8.
- [4] LI X P, TAN Z L, JIAO J Z, et al. Supplementation with fat-coated rumen-protected glucose during the transition period enhances milk production and influences blood biochemical parameters of liver function and inflammation in dairy cows [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 252 : 92-102.
- [5] ZHANG X L, WU J, HAN X F, et al. Effects of rumen-protected glucose on ileal microbiota and genes involved in ileal epithelial metabolism and immune homeostasis in transition dairy cows [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 254 : 114-199.
- [6] 白廷军, 杨茁萌. 燕麦干草的生产与利用 [J]. *中国奶牛*, 2015 (18) : 26-28.
- [7] 李明华, 李锡智, 周玉财, 等. 干奶前期饲喂燕麦草对奶牛围产后期生产性能的影响 [J]. *中国奶牛*, 2016 (7) : 11-14.
- [8] ZOU Y, ZOU X P, LI X Z, et al. Substituting oat hay or maize silage for portion of alfalfa hay affects growth performance, ruminal fermentation, and nutrient digestibility of weaned calves [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, 31 (3) : 369-378.
- [9] ALI M, VAN DUINKERKEN G, CONE J W, et al. Relationship between chemical composition and in situ rumen degradation characteristics of maize silages in dairy cows [J]. *Animal*, 2014, 8 (11) : 1832-1838.
- [10] 谢实勇, 贾志海, 范俊英. 瘤胃保护性蛋氨酸稳定性检验研究 [J]. *当代畜牧*, 2003 (5) : 31-32.
- [11] 李金霞, 孙海洲, 赵存发, 等. 过瘤胃保护性精氨酸稳定性检验研究 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2011, 32 (2) : 72-73.
- [12] 王加启. 反刍动物营养学研究方法 [M]. 北京: 现代教育出版社, 2011.
- [13] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74 (10) : 3583-3597.
- [14] ØRSKOV E R, MCDONALD I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1979, 92 (2) : 499-503.
- [15] 颜品勋, 冯仰廉, 王燕兵, 等. 青粗饲料通过牛瘤胃外流速度的研究 [C]. 反刍动物营养需要及饲料营养价值评定与应用. 北京: 中国畜牧兽医学动物营养学会, 2011 : 33-35.
- [16] 薛倩, 高艳霞, 陈子宁, 等. 不同壁材对过瘤胃葡萄糖微胶囊稳定性的影响 [J]. *中国饲料*, 2015 (6) : 25-27, 31.
- [17] DONKIN S S. Glycerol from biodiesel production; the new corn for dairy cattle [J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2008, 37 : 280-286.
- [18] GAO X, OBA M. Effect of increasing dietary nonfiber carbohydrate with starch, sucrose, or lactose on rumen fermentation and productivity of lactating dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99 (1) : 291-300.
- [19] RUSSELL J B, O'CONNOR J D, FOX D G, et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation [J]. *Journal of Animal Science*, 1992, 70 (11) : 3551-3561.
- [20] NOCEK J E, RUSSELL J B. Protein and energy as an integrated system. Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production [J]. *Journal of Dairy Science*, 1988, 71 (8) : 2070-2107.
- [21] VAN SOEST P J. *Nutritional ecology of the ruminant* [M]. 2nd ed. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1994 : 476.
- [22] 李海霞, 杨美英, 吴文海, 等. 过瘤胃蛋氨酸对黔北麻羊生长性能、养分表观消化率、血浆生化指标及瘤胃发酵的影响 [J]. *动物营养学报*, 2019, 31 (6) : 2933-2940.
- [23] LENG R A. Modification of rumen fermentation [M] // HACKER J B. *Nutritional limits to animal production from pastures*. Farnham Royal, U. K. : CAB, 1982 : 427-453.
- [24] RABIEE A R, BREINHILD K, SCOTT W, et al. Effect of fat additions to diets of dairy cattle on milk

- production and components; a meta-analysis and meta-regression[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(6): 3225–3247.
- [25] MARTIN C, FERLAY A, MOSONI P, et al. Increasing linseed supply in dairy cow diets based on hay or corn silage; effect on enteric methane emission, rumen microbial fermentation, and digestion [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(5): 3445–3456.
- [26] 李妍, 薛倩, 高艳霞, 等. 瘤胃保护葡萄糖对围产后期荷斯坦奶牛生产性能及血清生化指标的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2016, 47(1): 113–119.
- [27] DEVENDRA C, LEWIS D. The interaction between dietary lipids and fibre in the sheep 2. Digestibility studies[J]. *Animal Science*, 1974, 19(1): 67–76.
- [28] RUSSELL J B, WILSON D B. Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH? [J]. *Journal of Dairy Science*, 1996, 79(8): 1503–1509.
- [29] GRANT R H, MERTENS D R. Influence of buffer pH and raw corn starch addition on *in vitro* fiber digestion kinetics[J]. *Journal of Dairy Science*, 1992, 75(10): 2762–2768.
- [30] BARBOSA A M, VALADARES R F D, VALADARES FILHO S C, et al. Endogenous fraction and urinary recovery of purine derivatives obtained by different methods in Nellore cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(2): 510–519.
- [31] LENG R A. Factors affecting the utilization of ‘poor-quality’ forages by ruminants particularly under tropical conditions[J]. *Nutrition research reviews*, 1990, 3(1): 277–303.
- [32] PRESTON T R. Better utilization of crop residues and by-products in animal feeding; research guidelines. 2. A practical manual for research workers [R]. Rome; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986.
- [33] 张毕阳, 赵桂琴, 焦婷, 等. 饲料中添加燕麦干草对绵羊体外发酵的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(2): 182–191.
- [34] 张小丽, 吴建, 韩雪峰, 等. 过瘤胃葡萄糖对围产期奶牛空肠微生物群落和黏膜代谢及免疫相关基因表达的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(7): 3143–3155.
- [35] 刘艳芳, 马健, 都文, 等. 常规与非常规粗饲料在奶牛瘤胃中的降解特性[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(4): 1592–1602.
- [36] 刘祥圣, 王琳, 宁丽丽, 等. 构树不同部位与奶牛常用粗饲料瘤胃降解特性对比研究[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(8): 3612–3620.
- [37] 冯仰廉. 反刍动物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [38] PRESTON T R, LENG R A. Matching ruminant production systems with available resources in the tropics and sub-tropics [M]. Armidale; Penambul Books, 1987.
- [39] WANAPAT M, PIMPA O. Effect of ruminal NH_3 -N levels on ruminal fermentation, purine derivatives, digestibility and rice straw intake in swamp buffaloes [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 1999, 12(6): 904–907.
- [40] WALLACE R J. Effect of ammonia concentration on the composition, hydrolytic activity and nitrogen metabolism of the microbial flora of the rumen[J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1979, 47(3): 443–455.
- [41] 张颖, 毛华明. 不同种类牧草营养物质瘤胃降解率研究[J]. *饲料工业*, 2014, 35(21): 54–57.
- [42] DORAN M P, LACA E A, SAINZ R D. Total tract and rumen digestibility of mulberry foliage (*Morus alba*), alfalfa hay and oat hay in sheep[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 138(3/4): 239–253.

Rumen Stability of Rumen-Protected Glucose and Its Effects of Different Doses on Rumen Degradation Characteristics of Oat Hay

WANG Yapin¹ ZHANG Fan¹ HUA Dengke¹ JIANG Linshu² XIONG Benhai^{1*}

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100193, China; 2. Beijing Key Laboratory for Dairy Cow Nutrition, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the rumen stability of rumen protected glucose (RPG) and its effects of different doses on the rumen degradation characteristics of oat hay by using the nylon-bag technique, so as to provide theoretical reference for scientific use of RPG to effectively alleviate negative energy balance (NEB). The experiment was divided into two parts. In experiment I, four Chinese Holstein cows with permanent ruminal cannulas were selected to evaluate the stability of RPG in the rumen and determine the degradation rate of rumen by measuring the residual amount of glucose remaining in the RPG at different time points, so as to provide theoretical support for subsequent study. In experiment II, six Chinese Holstein cows with permanent ruminal cannulas were used and randomly divided into 3 groups with 2 cows per group. Cows in control group were fed a basal diet, and those in 200 and 350 g groups were fed the basal diet added with 200 and 350 g/(head · d) RPG, respectively, and the RPG were fed mixing concentrate. The pre-test lasted for 7 d and the test lasted for 3 d. The dry matter (DM), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and crude protein (CP) ruminal degradability and degradation parameters of oat hay retained in the rumen for 2, 6, 12, 24, 36, 48 and 72 h were determined to evaluate the effects of different doses of RPG on the degradation characteristics of oat hay. The results showed as follows: 1) the effective degradation rate of RPG in the rumen was 45.97%. 2) At different time points (07:00, 14:00 and 21:00), rumen fluid pH of the control group was significantly higher than that in the 350 g group ($P < 0.05$), and rumen fluid ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) concentration of the 200 g group was significantly higher than that of the other groups ($P < 0.05$), but there were no significant difference in each volatile fatty acid (except acetate and isovalerate at 14:00) and total volatile fatty acid concentration ($P > 0.05$). 3) The effective degradation rate of DM for oat hay was not significant among groups ($P > 0.05$); the lowest effective degradation rate of NDF for oat hay was found in 350 g group, which was significantly different from the 200 g group and the control group ($P < 0.05$), at the same time, the effective degradation rate of ADF for oat hay also had a similar change pattern; there was no significant difference in the effective degradation rate of CP for oat hay among groups ($P > 0.05$). In summary, the rumen passage rate of RPG is 54.03%, and the addition of 200 g/(head · d) RPG to the diet can alleviate NEB and regulate rumen fermentation while ensuring that the rumen degradation characteristics of oat hay are not significantly affected. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(7):3428-3438]

Key words: energy negative equilibrium; rumen protected glucose; oat hay; rumen degradation rate; fermentation characteristics; nylon-bag technique