

饲料非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维对 12 月龄荷斯坦后备奶牛生长性能、营养物质表观消化率及瘤胃甲烷产量的影响

董利锋¹ 李斌昌^{1,2*} 王 贝^{1,3} 叶疆凤³ 刁其玉^{1**}

(1. 中国农业科学院饲料研究所,农业部饲料生物技术重点实验室/奶牛营养学北京市重点实验室,北京 100081;

2. 甘肃农业大学动物科学技术学院,兰州 730070;3. 塔里木大学动物科学学院,阿拉尔 843300)

摘要: 本试验旨在通过监测饲料非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维(NFC/NDF)对 12 月龄荷斯坦后备奶牛生长性能、营养物质表观消化率及瘤胃甲烷(CH₄)产量的影响,获得我国生产模型下的 CH₄ 排放规律和 CH₄ 转化因子,为提高奶牛能量利用效率、建立国家或区域性温室气体排放清单和探索减排策略提供科学依据和支撑。选取 45 头体况良好的 12 月龄的荷斯坦后备奶牛,随机分为 3 组(每组 15 头):低 NFC/NDF 组(饲料 NFC/NDF=1.12)、中 NFC/NDF 组(饲料 NFC/NDF=1.36)和高 NFC/NDF 组(饲料 NFC/NDF=1.64),试验期为 63 d,包括 14 d 的预试期和 49 d 的正试期。结果表明:1)高 NFC/NDF 组的干物质采食量(DMI)、有机物采食量(OMI)、非纤维性碳水化合物采食量(NFCI)、总能摄入量(GEI)、平均日增重(ADG)以及干物质(DM)和粗蛋白质(CP)表观消化率显著高于中 NFC/NDF 组和低 NFC/NDF 组($P < 0.05$)。2)随着饲料 NFC/NDF 的增加,CH₄ 产量、CH₄ 产量/代谢体重、CH₄ 产量/DMI、CH₄ 产量/OMI、CH₄ 产量/中性洗涤纤维采食量(NDFI)和甲烷能(CH₄-E)产量显著降低($P < 0.05$)。作为 CH₄ 转化因子的 CH₄-E 产量/GEI 在中 NFC/NDF 组和高 NFC/NDF 组之间没有显著差异($P > 0.05$),但二者均显著低于低 NFC/NDF 组($P < 0.05$)。3)瘤胃 CH₄ 排放量与荷斯坦后备奶牛的体重、DMI、饲料 NDF 含量呈显著正相关关系($P < 0.05$),而与饲料 NFC/NDF 呈显著负相关($P < 0.05$),其中基于 DMI 和 NDFI 的 CH₄ 排放量预测模型的决定系数最高(0.86)。由此可见,将饲料 NFC/NDF 由 1.12 提高至 1.64 时,能够显著提高 12 月龄荷斯坦后备奶牛的 DMI、ADG 以及 DM 和 CP 表观消化率,且能够显著降低瘤胃 CH₄ 产量。可基于 DMI 和 NDFI 建立 12 月龄后备奶牛瘤胃 CH₄ 排放量的预测模型。

关键词: 后备奶牛;饲料 NFC/NDF;生长性能;营养物质消化;甲烷排放;预测模型

中图分类号:S816

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2020)08-3688-10

饲料中碳水化合物经瘤胃微生物降解生成挥发性脂肪酸(如乙酸和丁酸)时,伴随有氢气和二氧化碳的产生。氢气作为反应底物经过一系列复

杂的生物化学反应被产甲烷菌利用生成甲烷(CH₄)^[1]。瘤胃 CH₄ 是有机物无氧酵解的必然副产物之一,由于其排放而损失的能量可占到饲料

收稿日期:2020-03-03

基金项目:国家重点研发计划(2017YFF0211701,2017YFF0211702,2016YFE0109000);国家自然科学基金青年科学基金项目(31802085)

作者简介:董利锋(1985—),男,河南巩义人,助理研究员,博士,主要从事反刍动物营养与温室气体调控研究。E-mail: donglifeng@caas.cn

* 同等贡献作者

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

总能 的 2.7%~9.8%, 制约了我国反刍动物生产的养殖效率和盈利能力的提升^[2]。与此同时, CH₄ 是比二氧化碳危害更大的温室气体, 增温潜势是二氧化碳的 28 倍^[3]。我国是奶牛养殖和乳制品生产大国, 2016 年底奶牛的存栏量为 1 507 万头, 2019 年牛奶产量为 3 201 万 t, 位居世界第 3 位^[4]。2005 年我国动物胃肠道 CH₄ 排放量达 1 438 万 t, 占农业活动 CH₄ 排放量的 60% 左右^[5]。因此, 降低反刍动物瘤胃 CH₄ 排放对于降低温室气体排放和畜牧业可持续发展具有双重意义。

作为奶牛种群中的主体, 不同养殖模式下泌乳奶牛瘤胃 CH₄ 的排放特征已得到了较为广泛的研究。Jonker 等^[6]发现荷斯坦泌乳奶牛在放牧条件下瘤胃 CH₄ 的平均排放量为 411.5 g/d。王贝等^[7-8]发现处于泌乳前期和泌乳中期的中国荷斯坦奶牛瘤胃 CH₄ 排放量(分别为 391.9 和 399.8 g/d)存在一定的差异, 且都受到饲料精粗比的显著影响。Niu 等^[2]总结了欧洲、美国、澳大利亚和新西兰共 5 233 头奶牛的 CH₄ 排放量数据, 发现泌乳奶牛的 CH₄ 排放量在 79~729 g/d, CH₄ 转化因子[Y_m, 甲烷能(methane energy, CH₄-E)产量/总能摄入量(GE intake, GEI)]在 2.7%~9.8%。Hristov 等^[9]研究了 3 种主要测定方法(六氟化硫示踪技术、呼吸测热室和 GreenFeed 测定系统)对泌乳奶牛瘤胃 CH₄ 排放量的影响, 发现单位干物质采食量(DMI)和单位产奶量的 CH₄ 排放量分别为 20.1 和 15.6 g/kg。但是, 目前我国关于后备奶牛瘤胃 CH₄ 排放的研究较少, 尤其是不同饲料模式下荷斯坦后备奶牛的营养物质消化率、瘤胃 CH₄ 排放量的研究还存在空白, 缺乏系统性的 CH₄ 排放规律和 Y_m 的研究。尽管我国承诺在 2030 年之前大幅度降低全行业(工业、农业和服务业)中温室气体的排放, 但是目前尚缺乏我国养殖模式下的瘤胃 CH₄ 排放和 Y_m 数据。采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)等国际组织的推荐值来计算我国畜牧养殖业的温室气体排放清单时, 测算值和实际排放数据会存在较大的误差, 制约了我国减排承诺的实施和减排策略的开发。与此同时, 世界各国也都在开发基于本国养殖模式和管理特征的本土化的 Y_m, 以便得到更为准确的

CH₄ 排放清单和制订相应的减排调控策略。因此, 本试验拟通过研究饲料非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维(non-fibrous carbohydrate/neutral detergent fiber, NFC/NDF)对 12 月龄荷斯坦后备奶牛生长性能、营养物质表观消化率及瘤胃 CH₄ 产量的影响, 旨在获得我国生产模型下的 CH₄ 排放规律和 Y_m, 为提高奶牛能量利用效率、建立国家或区域性温室气体排放清单和探索减排策略提供科学依据和支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验时间和地点

本试验于 2019 年 7—9 月在北京市房山区琉璃河镇中加永宏奶牛场开展。

1.2 试验动物与试验设计

试验选取 45 头健康状况良好的中国荷斯坦后备奶牛, 采用单因素试验设计, 根据月龄[(11.9±1.2)月龄]和体重[(335.5±35.0)kg]一致的原则随机分为 3 个组, 每组 15 头。参照中国《奶牛饲养标准》(NY/T 34—2004), 配制含有 30%、40% 和 50% 精饲料的饲料, 并设定饲料 NFC/NDF 分别为 1.12(低 NFC/NDF 组)、1.36(中 NFC/NDF 组)和 1.64(高 NFC/NDF 组)。试验饲料组成及营养水平见表 1。采用全混合日粮搅拌机将试验饲料制作成全混合日粮进行饲喂。试验期为 63 d, 其中预试期 14 d, 正试期 49 d。

1.3 饲养管理

试验奶牛采用栓系式饲养, 每天喂料 2 次(06:00 和 17:00), 日剩料量控制在 5% 左右。自由饮水, 定期清理水槽, 保证清洁饮水。

1.4 样品采集与指标测定

1.4.1 饲料样品采集与营养成分含量的测定

于正试期的第 15~17 天收集饲料样品, 充分混合后进行营养成分分析。样品采用四分法进行收集, 于 65 ℃烘箱中烘 48 h, 回潮 24 h 后制成风干样, 粉碎后依照周艳等^[10]所述方法对有机物(organic matter, OM)、粗蛋白质(crude protein, CP)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、粗脂肪(ether extract, EE)、粗灰分(ash)、总能(gross energy, GE)、钙和磷等常规营养成分含量进行分析。

表1 试验饲粮组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis)

%

项目 Items	低 NFC/NDF 组 Low NFC/NDF group	中 NFC/NDF 组 Medium NFC/NDF group	高 NFC/NDF 组 High NFC/NDF group
原料 Ingredients			
全株玉米青贮 Whole-plant corn silage	42	36	30
燕麦干草 Oat grass hay	14	12	10
苜蓿干草 Alfalfa hay	14	12	10
精料补充料 Concentrate supplementation ¹⁾	30	40	50
合计 Total	100	100	100
营养水平 Nutrient levels ²⁾			
干物质 DM	93.9	93.7	93.3
有机物 OM	93.1	92.8	92.2
产奶净能 NE _L /(MJ/kg)	6.46	6.67	6.82
粗蛋白质 CP	14.1	14.5	14.7
粗脂肪 EE	3.7	3.8	3.8
粗灰分 Ash	6.9	7.2	7.8
中性洗涤纤维 NDF	36.8	32.6	29.3
酸性洗涤纤维 ADF	19.8	17.5	14.8
钙 Ca	0.3	0.5	0.6
总磷 P	0.2	0.2	0.3
非纤维性碳水化合物 NFC	41.24	44.18	48.03
非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维 NFC/NDF	1.12	1.36	1.64

1) 精料补充料购自北京三元种业科技股份有限公司,主要成分为玉米、小麦麸、豆粕、磷酸氢钙、石粉和食盐,其粗蛋白质含量 $\geq 17\%$,粗脂肪含量 $\geq 2.5\%$,粗纤维含量 $\leq 9.0\%$,钙含量为 $0.5\% \sim 1.5\%$,磷含量为 $0.4\% \sim 1.0\%$,食盐含量为 $0.5\% \sim 2.0\%$ 。Concentrates were purchased from a commercial company (Beijing Sanyuan Breeding Technology Corporation, China), which mainly comprised corn, wheat bran, soybean meal, CaHPO_4 , limestone and NaCl. The nutrient contents showed as follows: crude protein $\geq 17\%$, ether extract $\geq 2.5\%$, crude fiber $\leq 9.0\%$, $\text{Ca}=0.5\% \sim 1.5\%$, $\text{P}=0.4\% \sim 1.0\%$, $\text{NaCl}=0.5\% \sim 2.0\%$.

2) 产奶净能(产奶净能 $=0.550 \times \text{消化能}-0.395 \times 8$)和非纤维性碳水化合物[非纤维性碳水化合物 $=1-(\text{中性洗涤纤维}+\text{粗蛋白质}+\text{粗脂肪}+\text{粗灰分})$]为计算值,其他为计算值。 $\text{NE}_L(\text{NE}_L=0.550 \times \text{DE}-0.395 \times 8)$ and NFC [NFC $=1-(\text{NDF}+\text{CP}+\text{EE}+\text{Ash})$] were calculated values, while the others were measured values.

1.4.2 生长性能测定

正试期内记录每头奶牛的投料量和剩料量,记录每头奶牛每天的采食量。于正试期的第1、15、35和49天对每头奶牛进行空腹称重,计算平均日增重(average daily gain, ADG)。

1.4.3 营养物质表观消化率测定

试验采用酸不溶灰分法测定后备奶牛的营养物质表观消化率。于正试期的第32~35天采用直肠取粪法连续收集粪便样品16次,每头牛每次收集粪样100 g,采样时间点分别为第32天的07:00、11:00、15:00、19:00,第33天的08:00、12:00、16:00、20:00,第34天的09:00、13:00、17:00、21:00和第35天的10:00、14:00、18:00、

22:00。每次取粪样后按照每100 g鲜样加10 mL 10%盐酸固氮,混匀后密封于自封袋中, -20°C 冷冻保存待测。将采集的粪样于 65°C 烘箱中烘48 h,回潮24 h后称重,粉碎过40目筛后测定其DM、CP、NDF和ADF含量,计算各营养物质的表观消化率^[10]。

1.4.4 瘤胃 CH_4 产量测定

试验采用六氟化硫示踪技术测定荷斯坦后备奶牛瘤胃 CH_4 排放量。该测定技术包括了六氟化硫渗透管制备、采气管路的连接和集气罐的安装等。选用的18只六氟化硫渗透管(外径 $=6.2\text{ mm}$ 、内径 $=3.8\text{ mm}$ 、高度 $=45\text{ mm}$,购自北京环科易成科技有限公司)的渗透速率范围为 $3.10 \sim$

3.60 mg/d,平均渗透速率为3.20 mg/d。采气管路购于世伟洛克北京公司,收集气体时的流速为0.45 mL/min。用于收集气体的集气罐材质为不锈钢(半径=8 cm、高度=25 cm、体积=5.0 L),经快速接头(世伟洛克北京公司)与采气管路相连接。

从每个组中随机挑选出6头奶牛,于正试期的第36~49天进行气体代谢试验。连续收集每头动物每天24 h的气体,时间为每天08:00至次日08:00,记录产量。一次气体收集完毕后,更换新的集气罐。集气罐在使用前检漏,并采用真空泵(2XZ-2,上海沪析实业有限公司)抽至约-100 kPa,采气后集气罐的剩余压力在-40 kPa以上表明采样成功。采用配备有氢火焰离子化检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD)的气相色谱仪同时测定气体样品中CH₄和六氟化硫气体的浓度,从而计算瘤胃内CH₄产量^[11]。

表2 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄荷斯坦后备奶牛生长性能的影响

Table 2 Effects of dietary NFC/NDF on growth performance of 12-month-old Holstein dairy heifers

项目 Items	低 NFC/NDF 组	中 NFC/NDF 组	高 NFC/NDF 组	SEM	P 值 P-value
	Low NFC/ NDF group	Medium NFC/ NDF group	High NFC/ NDF group		
干物质采食量 DMI/(kg/d)	6.98 ^b	7.06 ^b	7.18 ^a	0.233	0.001
有机物采食量 OMI/(kg/d)	6.50 ^b	6.56 ^b	6.62 ^a	0.227	0.017
中性洗涤纤维采食量 NDFI/(kg/d)	2.57 ^a	2.30 ^b	2.10 ^b	0.100	0.038
非纤维性碳水化合物采食量 NFCI/(kg/d)	2.69 ^b	2.96 ^b	3.19 ^a	0.106	0.001
总能摄入量 GEI/(MJ/d)	115.9 ^b	117.9 ^b	124.6 ^a	0.500	<0.001
平均日增重 ADG/(kg/d)	0.97 ^b	1.14 ^b	1.39 ^a	0.062	0.010

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

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

2.2 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛营养物质表观消化率的影响

由图1可知,高 NFC/NDF 组的 DM 和 CP 表观消化率显著高于中 NFC/NDF 组和低 NFC/NDF 组($P<0.05$),而中 NFC/NDF 组和低 NFC/NDF 组的 DM 和 CP 表观消化率没有显著差异($P>0.05$)。对于 NDF 表观消化率,高 NFC/NDF 组和中 NFC/NDF 组之间没有显著差异($P>0.05$),但二者均显著高于低 NFC/NDF 组($P<0.05$)。3 个组之间 ADF 表观消化率没有显著差异($P>0.05$)。

2.3 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛瘤胃 CH₄ 产量的影响

由表3可知,随着饲料 NFC/NDF 的增加,

1.5 数据统计分析

试验数据采用 SPSS 20.0 统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。采用 Duncan 氏法进行多重比较,以 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛生长性能的影响

由表2可知,高 NFC/NDF 组的 DMI、有机物采食量(OM intake, OMI)、非纤维性碳水化合物采食量(NFC intake, NFCI)、GEI 和 ADG 显著高于中 NFC/NDF 组和低 NFC/NDF 组($P<0.05$),而后2组之间无显著差异($P>0.05$)。高 NFC/NDF 组和中 NFC/NDF 组的中性洗涤纤维采食量(NDF intake, NDFI)差异不显著($P>0.05$),但二者均显著低于低 NFC/NDF 组($P<0.05$)。

CH₄ 产量显著降低($P<0.05$)。其中,高 NFC/NDF 组的 CH₄ 产量/代谢体重、CH₄ 产量/DMI、CH₄ 产量/OMI、CH₄ 产量/NDFI 和 CH₄-E 产量显著低于中 NFC/NDF 组和低 NFC/NDF 组($P<0.05$)。CH₄-E 产量/GEI 在中 NFC/NDF 组和高 NFC/NDF 组之间没有显著差异($P>0.05$),但二者均显著低于低 NFC/NDF 组($P<0.05$)。

2.4 12 月龄后备奶牛瘤胃 CH₄ 和 CH₄-E 排放量预测模型

由表4可知,瘤胃 CH₄ 排放量与荷斯坦后备奶牛的体重、DMI、饲料 NFC/NDF 含量呈显著正相关关系($P<0.05$),而与饲料 NFC/NDF 呈显著负相关($P<0.05$)。其中 CH₄ 排放量与体重和 DMI 的决

定系数均在 0.70 以上。另外, CH₄-E 排放量与 GEI、NDFI 以及 DMI 和 NDFI 呈显著的正相关关

系 ($P < 0.05$), 而与 NFCI 呈显著的负相关关系 ($P < 0.05$)。

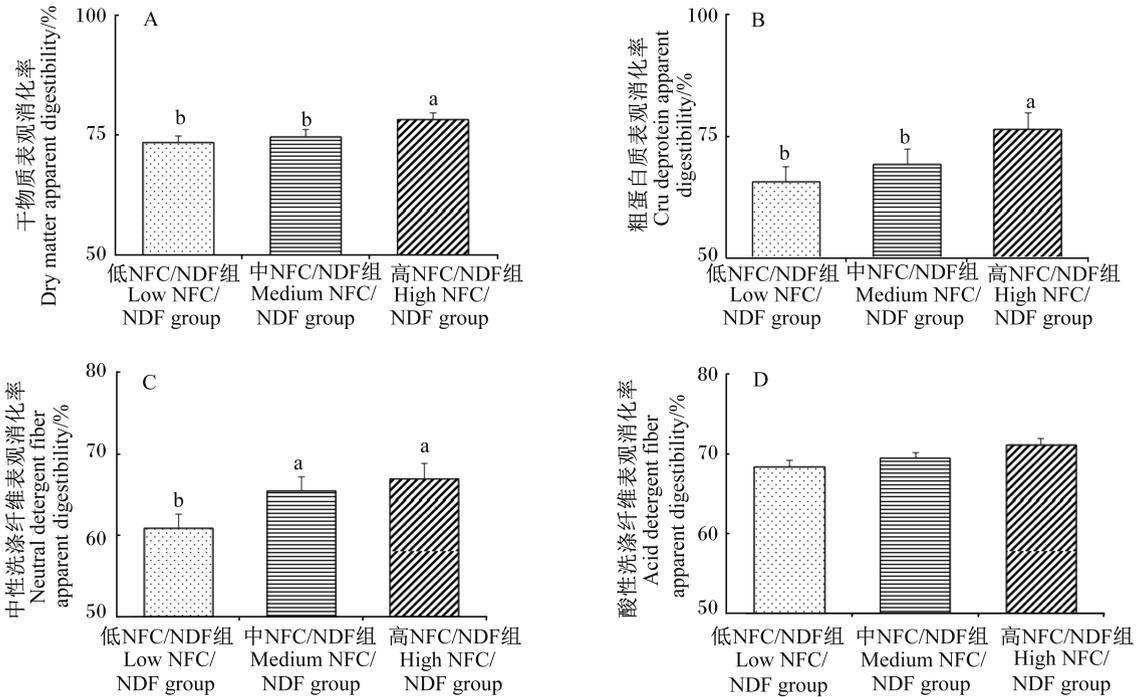


图 1 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛营养物质消化率的影响

Fig.1 Effects of dietary NFC/NDF on nutrient apparent digestibility of 12-month-old Holstein dairy heifers

表 3 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄荷斯坦后备奶牛瘤胃甲烷产量的影响

Table 3 Effects of dietary NFC/NDF on rumen CH₄ production of 12-month-old Holstein dairy heifers

项目 Items	低 NFC/NDF 组 Low NFC/ NDF group	中 NFC/NDF 组 Medium NFC/ NDF group	高 NFC/NDF 组 High NFC/ NDF group	SEM	P 值 P-value
甲烷产量 CH ₄ production/(g/d)	159.68 ^a	133.16 ^b	119.32 ^c	5.50	<0.001
甲烷产量/代谢体重 CH ₄ production/MBW/(g/kg BW ^{0.75})	2.09 ^a	1.71 ^b	1.50 ^c	0.08	0.001
甲烷产量/干物质采食量 CH ₄ production/DMI/(g/kg)	22.88 ^a	18.85 ^b	16.63 ^c	0.903	<0.001
甲烷产量/有机物采食量 CH ₄ production/OMI/(g/kg)	27.13 ^a	22.65 ^b	20.40 ^c	0.958	<0.001
甲烷产量/中性洗涤纤维采食量 CH ₄ production/NDFI/(g/kg)	63.77 ^a	55.81 ^b	54.60 ^c	1.744	0.019
甲烷能 CH ₄ -E/(MJ/d)	8.89 ^a	7.41 ^b	6.64 ^c	0.281	<0.001
甲烷能/总能摄入量 CH ₄ -E/GEI	0.074 ^{2a}	0.061 ^{8b}	0.055 ^{8b}	0.003	<0.001

表4 基于生长性能、营养物质含量与摄入量的12月龄荷斯坦后备奶牛瘤胃甲烷和甲烷能排放量预测模型

Table 4 Prediction equations of CH₄ and CH₄-E emissions based on production performance, nutrient content and intake parameters for 12-month-old Holstein dairy heifer

项目 Items	预测模型 Prediction equations	决定系数 R ²	P值 P-value	编号 No.
甲烷产量 CH ₄ production/(g/d)	CH ₄ = 0.19 _(±0.151) × BW (kg) + 78.6 _(±49.64)	0.42	0.024	1
	CH ₄ = 36.27 _(±6.712) × DMI (kg/d) - 87.8 _(±12.24)	0.71	0.017	2
	CH ₄ = 3.53 _(±0.102) × NDF (%) - 6.12 _(±1.37)	0.68	0.032	3
	CH ₄ = -28.4 _(±3.58) × NFC/NDF + 141.4 _(±10.86)	0.64	0.011	4
甲烷能产量 CH ₄ -E production/ (MJ/d)	CH ₄ -E = 0.041 _(±0.0012) × GEI (MJ/d) + 1.46 _(±0.785)	0.72	<0.010	5
	CH ₄ -E = 1.69 _(±0.232) × NDFI (kg/d) + 0.13 _(±0.519)	0.68	0.041	6
	CH ₄ -E = -2.32 _(±0.082) × NFCI (kg/d) + 3.57 _(±0.737)	0.70	0.039	7
	CH ₄ -E = 0.57 _(±0.041) × DMI (kg/d) + 0.60 _(±0.079) × NDFI (kg/d) - 0.27 _(±0.737)	0.86	0.035	8

CH₄: 甲烷产量 methane production; CH₄-E: 甲烷能产量 methane energy production; BW: 体重 body weight; DMI: 干物质采食量 dry matter intake; NDF: 中性洗涤纤维含量 neutral detergent fiber content; NFC: 非纤维性碳水化合物含量 non-fibrous carbohydrate content; GEI: 总能摄入量 gross energy intake; NDFI: 中性洗涤纤维采食量 neutral detergent fiber content intake; NFCI: 非纤维性碳水化合物采食量 non-fibrous carbohydrate intake。预测模型中下角标括号内数据为参数的标准误差 In prediction equations, subscript data in bracket were the standard errors of parameters。

3 讨论

3.1 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛生长性能的影响

本试验中饲料 NFC/NDF 为 1.64 时, 荷斯坦后备奶牛的 DMI、GEI 和 ADG 都显著高于饲料 NFC/NDF 为 1.12 和 1.36 时, 这与朱昊鹏等^[12]的研究结果相符合。一般认为, 提高饲料中精饲料的比例不仅能增加饲料中能量、蛋白质、矿物质和维生素等营养物质的含量, 而且在影响饲料流通速度和消化率的同时还可增加 DMI^[13]。Moorby 等^[14]发现当饲料中精饲料比例从 20% 增加到 65% 时, 奶牛的 DMI 增加了 57%。同样的, 与饲喂 NDF 含量为 32% 的饲料相比, 饲喂 NDF 含量为 28% 的饲料奶牛的 DMI 和 OMI 显著增加^[15]。NRC(2001)^[16]指出, 以粗饲料为主的饲料在消化道内停留时间长, 会限制动物的采食量。因此, 随着饲料精饲料比例的提高, 饲料中易消化物质增多, 进一步提高消化率, 使食糜流通速度加快, 进而使采食量及生长性能得到提升。

3.2 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛营养物质表观消化率的影响

反刍动物对粗饲料的利用主要取决于营养物质在瘤胃内的消化率及其吸收情况, 而消化率则受到如动物品种和生理阶段、饲料组成和结构、流通速度等诸多因素的影响。尽管前人的研究结论

有所差异, 但饲料纤维水平被认为是影响营养物质消化率的主要因素。本试验中, 提高饲料 NFC/NDF 显著提高了 DM 和 CP 的表观消化率。Zhang 等^[17]对荷斯坦后备奶牛的研究发现, 饲料精饲料比例由 20% 上升至 80% 时, DM 和 OM 的表观消化率分别由 73.08% 和 76.13% 显著增加到了 80.88% 和 84.33%, 原因可能是随着饲料精饲料比例的升高, 易消化或瘤胃发酵物质含量增加, 从而提高了 DM 和 OM 的消化率。与此同时, 提高饲料 NFC/NDF 对 NDF 表观消化率的影响较小, 原因可能较高比例的精饲料降低了饲料在瘤胃内的停留时间, 减少了纤维类物质在瘤胃内的降解^[18]。另外, 提高饲料精饲料比例会促进瘤胃内酸性 OM 的积累, 在降低瘤胃 pH 的同时抑制瘤胃纤维降解菌的相对丰度和表达活性, 从而降低 NDF 或 ADF 的消化率^[19]。

3.3 饲料 NFC/NDF 对 12 月龄后备奶牛瘤胃 CH₄ 产量的影响

与泌乳奶牛一样, 后备奶牛瘤胃 CH₄ 产量受到动物品种、生理阶段、饲料类型和组成等诸多因素的影响。Van Wyngaard 等^[20]发现, 随着饲料精饲料比例的提高, 奶牛瘤胃 CH₄ 排放强度 (CH₄ 产量/DMI) 从 29.1 g/kg 显著下降至 25.1 g/kg。周艳等^[10]研究表明, 当饲料中 NDF 含量由 36.59% 增加至 45.59% 时, 杜寒杂交母羊瘤胃 CH₄ 产量由 36.07 L/d 增加到了 79.32 L/d。本试验结果发

现,高饲粮 NFC/NDF 组瘤胃 CH_4 产量比中 NFC/NDF 组和低 NFC/NDF 组分别下降了 11.6% 和 33.8%,且 CH_4 产量/DMI 分别下降了 13.3% 和 37.6%。前人的研究表明,提高饲粮中非纤维性碳水化合物 (non-fibrous carbohydrate, NFC) 含量能够促进瘤胃由乙酸型发酵向丙酸型发酵类型转变,乙酸与丙酸比例降低;而当丙酮酸代谢过程中底物氢气的量减少时,瘤胃产甲烷菌的产生 CH_4 的能力减弱,从而降低 CH_4 的产量^[21]。也有研究表明,提高饲粮中淀粉含量和降低粗饲料的比例都能够有效降低瘤胃内原虫、纤维分解菌和产甲烷菌的数量,从而显著降低 CH_4 产量^[22]。另外,前人研究发现,瘤胃 CH_4 产量与饲粮纤维水平显著相关,主要原因是饲粮营养组成能够改变产甲烷菌优势菌群结构和相对丰度。例如,与饲喂高比例粗饲料饲粮相比,饲喂低比例粗饲料饲粮显著改变了瘤胃内史氏甲烷短杆菌 (*Methanobrevibacter smithii*) 和甲烷热杆菌 (*Methanosphaera stadtmanae*) 的相对丰度^[23],从而降低瘤胃 CH_4 产量。

$\text{CH}_4\text{-E}/\text{GEI}$ 作为 Y_m 常用来计算国家或地区内反刍动物的温室气体排放清单。IPCC^[3] 采用固定的 Y_m (6.5%) 来计算中国泌乳奶牛和后备奶牛的瘤胃 CH_4 排放量。但是,该数据是基于英国^[24] 和美国^[16] 的饲养标准得到的计算值,在评估各国奶牛养殖生产过程中的 CH_4 排放量时容易造成误差。而且,由于生理阶段、饲粮结构和养殖模式的不同,泌乳奶牛和后备奶牛瘤胃 CH_4 排放量不同, Y_m 也存在显著差异。Niu 等^[2] 通过收集 2 566 头泌乳奶牛的瘤胃 CH_4 排放量数据发现,平均 Y_m 为 6.0%,低于 IPCC 的推荐值。Morrison 等^[25] 采用六氟化硫示踪技术测定了放牧条件下 5~10 月龄、12~17 月龄和 18~23 月龄的荷斯坦后备奶牛的瘤胃 CH_4 排放量,其 Y_m 分别为 5.9%、6.9% 和 6.6%。Jiao 等^[26] 采用半开放式呼吸测热室研究了舍饲条件下 6、12、18 和 22 月龄荷斯坦后备牛的消化代谢和瘤胃发酵特征,发现不同生理阶段的 Y_m 存在差异,分别为 6.80%、6.70%、6.45% 和 6.35%。本试验中低 NFC/NDF 组、中 NFC/NDF 组和高 NFC/NDF 组的 Y_m 分别为 7.42%、6.18% 和 5.58%,其平均值 (6.39%) 低于 IPCC^[3] 推荐值和 Jiao 等^[26] 的测算值,高于加拿大荷斯坦后备奶牛

的测算值 (6.0%)^[27]。因此,基于我国养殖模式下后备奶牛瘤胃 CH_4 的排放特征建立动态性本土化的 Y_m 有助于准确评估养殖业温室气体 CH_4 排放量和实施低碳可持续畜牧业发展。

3.4 12 月龄后备奶牛瘤胃 CH_4 排放量预测模型

瘤胃 CH_4 排放量预测模型能够为评估 CH_4 排放量、建立温室气体排放清单和开发减排策略提供准确简便的方法。基于反刍动物的瘤胃 CH_4 产量实测值,并结合其采食量、能量消化率和饲养水平、碳水化合物消化率或其他的动物和饲粮组成等特征,前人已研究建立了一系列的 CH_4 排放量预测模型^[28-29]。与这些模型的结论一致,DMI 被认为是预测模型中最为重要的预测指标,相关系数可超过 0.80,因此,基于 DMI 的预测模型被广泛应用于欧洲、北美、澳大利亚和新西兰的 CH_4 排放量预测模型中^[30]。除此之外,本试验中, CH_4 排放量与 NDF 含量存在显著正相关关系,而与 NFC/NDF 存在显著的负相关关系,原因是饲粮中纤维类物质含量的增加促进了瘤胃内乙酸、丁酸和底物氢气的生成,从而提高了 CH_4 的产量,而增加饲粮中非纤维类物质的含量则可降低 CH_4 的产量。但也有研究认为 NFC/(NFC+NDF) 与 CH_4 排放量的相关性较弱,与 NFC 含量相比,NDF 含量更能够决定反刍动物瘤胃 CH_4 排放量^[31]。本试验中 $\text{CH}_4\text{-E}$ 排放量与 DMI 和 NDFI 存在显著的正相关关系,且决定系数最高 (0.86)。前人的研究发现,与单一的预测指标相比,增加预测模型中的变量数量,可显著提高预测模型的决定系数和预测精度。例如,基于 NDFI 建立的 $\text{CH}_4\text{-E}$ 排放量预测模型,其决定系数为 0.46,而在该基础上预测指标增加 ADFI 和 DMI,预测模型的决定系数能够提高至 0.63,大幅度地提高了预测准确度^[32]。但也有研究认为增加预测模型中的变量数量也存在弊端,如有些指标需要在实验室进行测定,在实际生产中难以直接获取,会增加预测模型建立的难度^[29]。

4 结论

将 12 月龄荷斯坦后备奶牛饲粮 NFC/NDF 由 1.12 提高至 1.64,可显著提高 DMI、ADG 以及 DM 和 CP 表观消化率,并可显著降低瘤胃 CH_4 和 $\text{CH}_4\text{-E}$ 产量以及 CH_4 排放强度。另外,本试验基于后备奶牛的生长性能、营养物质含量与摄入量

等指标建立的 CH_4 排放量预测模型具有较高的预测准确度,能够用于荷斯坦后备奶牛瘤胃 CH_4 排放量的预测和评估。

参考文献:

- [1] VAN GASTELEN S, DIJKSTRA J, BANNINK A. Are dietary strategies to mitigate enteric methane emission equally effective across dairy cattle, beef cattle, and sheep? [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(7):6109-6130.
- [2] NIU M T, KEBREAB E, HRISTOV A N, et al. Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8):3368-3389.
- [3] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] 宁启文, 胡乐鸣. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [5] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2013.
- [6] JONKER A, FARRELL L, SCOBIE D, et al. Methane and carbon dioxide emissions from lactating dairy cows grazing mature ryegrass/white clover or a diverse pasture comprising ryegrass, legumes and herbs [J]. *Animal Production Science*, 2019, 59(6):1063-1069.
- [7] 王贝, 许贵善, 李斌昌, 等. 饲料 NDF/NFC 对泌乳高峰期奶牛瘤胃甲烷排放量、营养物质表观消化率及生产性能的影响 [J]. *中国饲料*, 2019(9):15-21.
- [8] 王贝, 李斌昌, 董利锋, 等. 饲料 NDF/NFC 对泌乳中期奶牛瘤胃甲烷排放量、营养物质表观消化率及生产性能的影响 [J]. *饲料工业*, 2019, 40(9):45-51.
- [9] HRISTOV A N, KEBREAB E, NIU M, et al. Symposium review: uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models [J]. *Journal of Dairy Science*, 101(7):6655-6674.
- [10] 周艳, 许贵善, 董利锋, 等. 不同饲养模式下饲料非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维对生长期杜寒杂交所母羊生长性能、营养物质表观消化率和甲烷产量的影响 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30(4):1367-1376.
- [11] 王贝, 许贵善, 李斌昌, 等. 饲料 NDF/NFC 对泌乳后期奶牛瘤胃甲烷排放量、营养物质表观消化率及生产性能的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(4):120-127.
- [12] 朱昊鹏, 郑月, 颜培实. 精料补饲水平对锦江黄牛生长性能和瘤胃液理化指标的影响 [J]. *畜牧与兽医*, 2017, 49(3):24-29.
- [13] KENNEDY E, O'DONOVAN M, DELABY L, et al. Effect of herbage allowance and concentrate supplementation on dry matter intake, milk production and energy balance of early lactating dairy cows [J]. *Livestock Science*, 2008, 117(2/3):275-286.
- [14] MOORBY J M, DEWHURST R J, EVANS R T, et al. Effects of dairy cow diet forage proportion on duodenal nutrient supply and urinary purine derivative excretion [J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(9):3552-3562.
- [15] KENDALL C, LEONARDI C, HOFFMAN P C, et al. Intake and milk production of cows fed diets that differed in dietary neutral detergent fiber and neutral detergent fiber digestibility [J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(1):313-323.
- [16] NRC. Nutrient requirements of dairy cattle [S]. 7th ed. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 2001.
- [17] ZHANG J, SHI H T, WANG Y J, et al. Effects of limit-feeding diets with different forage-to-concentrate ratios on nutrient intake, rumination, ruminal fermentation, digestibility, blood parameters and growth in Holstein heifers [J]. *Animal Science Journal*, 2017, 89(3):527-536.
- [18] LASCANO G J, KOCH L E, HEINRICHS A J. Precision feeding dairy heifers a high rumen-degradable protein diet with different proportions of dietary fiber and forage-to-concentrate ratios [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(9):7175-7190.
- [19] HUUSKONEN A, KHALILI H, JOKI-TOKOLA E. Effects of three different concentrate proportions and rapeseed meal supplement to grass silage on animal performance of dairy-breed bulls with TMR feeding [J]. *Livestock Science*, 2007, 110(1/2):154-165.
- [20] VAN WYNGAARD J D V, MEESKE R, ERASMUS L J. Effect of concentrate level on enteric methane emissions, production performance, and rumen fermentation of Jersey cows grazing kikuyu-dominant pasture during summer [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(11):9954-9966.
- [21] HASSANAT F, GERVAIS R, JULIEN C, et al. Replacing alfalfa silage with corn silage in dairy cows diets: effects on enteric methane production, ruminal fermenta-

- tation, digestion, N balance, and milk production [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96 (7) : 4553–4567.
- [22] ARNDT C, POWELL J M, AGUERRE M J, et al. Performance, digestion, nitrogen balance, and emission of manure ammonia, enteric methane, and carbon dioxide in lactating cows fed diets with varying alfalfa silage-to-corn silage ratios [J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98 (1) : 418–430.
- [23] CARBERRY C A, WATERS S M, KENNY D A, et al. Rumen methanogenic genotypes differ in abundance according to host residual feed intake phenotype and diet type [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 80 (2) : 586–594.
- [24] The Agricultural and Food Research Council. Technical committee on responses to nutrients [R]. Nutritive requirements of ruminant animals: energy. Rep. 5. [S. l.] : CAB International, 1990.
- [25] MORRISON S J, MCBRIDE J, GORDON A W, et al. Methane emissions from grazing Holstein-Friesian heifers at different ages estimated using the sulfur hexafluoride tracer technique [J]. *Engineering*, 2017, 3 (5) : 753–759.
- [26] JIAO H P, YAN T H, WILLS D A, et al. Development of prediction models for quantification of total methane emission from enteric fermentation of young Holstein cattle at various ages [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 183 : 160–166.
- [27] OMINSKI K H, BOADI D A, WITTENBERG K M, et al. Estimates of enteric methane emissions from cattle in Canada using the IPCC Tier-2 methodology [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2007, 87 (3) : 459–467.
- [28] YAN T, AGNEW R E, GORDON F J, et al. Prediction of methane energy output in dairy and beef cattle offered grass silage-based diets [J]. *Livestock Production Science*, 2000, 64 (2/3) : 253–263.
- [29] ENGELKE S W, DAŞ G, DERNO M, et al. Methane prediction based on individual or groups of milk fatty acids for dairy cows fed rations with or without linseed [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102 (2) : 1788–1802.
- [30] APPUHAMY J A D R N, FRANCE J, KEBREAB E. Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America, Europe, and Australia and New Zealand [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22 (9) : 3039–3056.
- [31] VELARDE-GUILLÉN J, PELLERIN D, BENCHAAAR C, et al. Development of an equation to estimate the enteric methane emissions from Holstein dairy cows in Canada [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2019, 99 (4) : 792–803.
- [32] ELLIS J L, KEBREAB E, ODONGO N E, et al. Prediction of methane production from dairy and beef cattle [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90 (7) : 3456–3466.

Effects of Dietary Non-Fibrous Carbohydrate/Neutral Detergent Fiber on Growth Performance, Nutrient Apparent Digestibility and Rumen Methane Production of 12-Month-Old Holstein Dairy Heifers

DONG Lifeng¹ LI Binchang^{1,2*} WANG Bei^{1,3} YE Jiangfeng³ DIAO Qiyu^{1**}

(1. Beijing Key Laboratory for Dairy Cow Nutrition/Key Laboratory of Feed Biotechnology, Ministry of Agriculture, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Animal Science and Technology, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The objective of the present study was to investigate the effects of dietary non-fibrous carbohydrate/neutral detergent fiber (NFC/NDF) on growth performance, nutrient apparent digestibility, and rumen methane (CH₄) production of 12-month-old Holstein dairy heifers, aiming to obtain the CH₄ emission data and CH₄ conversion factor under the current production system, providing scientific evidence and references to develop national or regional greenhouse gases emission inventory and mitigation strategies. Forty-five 12-month-old Holstein dairy heifers in healthy condition were selected and randomly assigned to 3 groups with 15 animals in each group: low NFC/NDF group (dietary NFC/NDF = 1.12), medium NFC/NDF group (dietary NFC/NDF = 1.36), and high NFC/NDF group (dietary NFC/NDF = 1.64). The whole experiment lasted for 63 d included a 14-d adaptation period and a 49-d measurement period. The results showed as follows: 1) the dry matter intake (DMI), organic matter intake (OMI), non-fibrous carbohydrate intake (NFCI), gross energy intake (GEI), average daily gain (ADG) and the apparent digestibility of dry matter (DM) and crude protein (CP) in high NFC/NDF group were significantly higher than those in low or medium NFC/NDF groups ($P < 0.05$). 2) With the dietary NFC/NDF increasing, the CH₄ production, CH₄ production/metabolic body weight, CH₄ production/DMI, CH₄ production/OMI, CH₄ production/neutral detergent fiber intake (NDFI) and CH₄ energy (CH₄-E) production were significantly decreased ($P < 0.05$). The difference of CH₄ conversion factor (CH₄-E production/GEI) between medium and high NFC/NDF groups was not significant ($P > 0.05$), which were significantly lower than that in low NFC/NDF group ($P < 0.05$). 3) The significant positive correlations between rumen CH₄ emission and body weight, DMI, dietary NDF content were observed ($P < 0.05$), whereas rumen CH₄ emission was significantly negatively related to dietary NFC/NDF ($P < 0.05$). The highest coefficient of determination ($R^2 = 0.86$) was achieved for prediction equation of CH₄ emission which was developed based on DMI and NDFI. It is concluded that as the dietary NFC/NDF increases from 1.12 to 1.64, the DMI, ADF and the apparent digestibility of DM and CP are significantly increased, which is accompanied with significant decrease of rumen CH₄ production. Meanwhile, the prediction equation of CH₄ emission can be developed using DMI and NDFI for 12-month-old Holstein dairy heifers. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(8):3688-3697]

Key words: dairy heifers; dietary NFC/NDF; growth performance; nutrient digestion; methane emission; prediction equation

* Contributed equally

** Corresponding author, professor, E-mail: diaoqiyu@caas.cn