

饲粮非纤维性碳水化合物(NFC)与中性洗涤纤维(NDF)比例对育成期杜寒杂交母羊生长性能、营养物质消化率和甲烷产量的影响

周艳^{1,3}, 刁其玉^{1*}, 董利锋¹, 邓凯东², 许贵善³, 马涛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, 北京 100081;

2. 金陵科技学院 动物科学与技术学院, 南京 210038; 3. 塔里木大学动物科学学院, 阿拉尔 843300)

摘要:旨在借助开路式循环呼吸测热系统研究饲粮不同非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维(NFC/NDF)比例对育成期(48~55 kg)杜寒杂交母羊生产性能、营养物质消化率及甲烷产量的影响。选用30只体重(48±0.50) kg的杜泊(♂)×小尾寒羊(♀)母羊,采用单因素试验设计,将试验动物随机分到饲粮 NFC/NDF=0.78组(精粗比为35:65,自由采食)、NFC/NDF=1.03组(精粗比为50:50,限饲)和 NFC/NDF=2.17组(精粗比为65:35,限饲)3个处理组中,每个处理组10只羊。试验期为32 d,包括17 d预试期和15 d正试期。试验分为自由采食组和限饲组两种饲养模式,各组的能量和粗蛋白质采食量均相同,以饲粮 NFC/NDF为0.78自由采食组的平均日增重作为 NFC/NDF为1.03组和2.17组的限饲标准。试验羊只定期晨饲前称重,记录每日采食量;在正试期内测定甲烷产量、饲粮能量和饲粮营养物质表观消化率。结果表明:1)限饲条件下饲粮 NFC/NDF为2.17组的饲料转化效率显著高于自由采食条件下饲粮 NFC/NDF为0.78组的饲料转化效率($P<0.05$),饲粮 NFC/NDF为1.03组与另外两组皆无显著性差异($P>0.05$)。2)当饲粮 NFC/NDF比例由0.78增加至2.17时,3个处理组的干物质表观消化率、有机物表观消化率、总能表观消化率和总能代谢率皆显著提高($P<0.05$),NFC/NDF=2.17组的粗蛋白质表观消化率显著高于 NFC/NDF=0.78组($P<0.05$),两组皆与 NFC/NDF=1.03组无显著差异($P>0.05$)。另外,随着饲粮 NFC/NDF比例的增加,NFC/NDF=2.17组的 NDF表观消化率显著高于 NFC/NDF=0.78组和 NFC/NDF=1.03组($P<0.05$),后两组间无显著差异($P>0.05$)。3)NFC/NDF=2.17组的甲烷日排放量为32.53 L·d⁻¹,显著低于 NFC/NDF=0.78组的58.03 L·d⁻¹和 NFC/NDF=1.03组的63.17 L·d⁻¹($P<0.05$),后两组间的甲烷日排放量无显著差异($P>0.05$),3组的单位代谢体重的甲烷日排放量具有相同的变化规律。随着饲粮 NFC/NDF比例的增加,NFC/NDF=2.17组的单位干物质采食量的甲烷排放量、单位有机物采食量的甲烷排放量和单位可消化有机物的甲烷排放量皆显著低于 NFC/NDF=1.03组($P<0.05$),NFC/NDF=0.78组的以上指标与另外两组相比皆无显著差异($P>0.05$);单位总能摄入量的甲烷能排放量、单位消化能摄入量的甲烷能排放量、单位代谢能摄入量的甲烷能排放量具有相同的变化规律。NFC/NDF=1.03组的单位中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量和单位可消化中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量显著高于 NFC/NDF=0.78组和 NFC/NDF=2.17组($P<0.05$),后两组间无显著差异($P>0.05$)。另外,单位日增重的甲烷排放量和单位可消化酸性洗涤纤维的甲烷排放量在3个处理组之间无显著差异($P>0.05$)。综合生长性能、饲粮各营养物质表观消化率、能量代谢及甲烷排放水平,对育成期(48~55 kg)杜寒杂交母羊限饲饲粮 NFC/NDF为2.17的饲粮是最佳的碳减排措施。

关键词: 甲烷; NFC/NDF; 生长性能; 营养物质消化率; 绵羊

中图分类号: S826.5

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2018)07-1405-11

收稿日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(41475126); 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0109000)

作者简介: 周艳(1991-),女,新疆伊犁人,硕士生,主要从事动物营养与饲料科学研究, E-mail: 1141387117@qq.com

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

The Effect of Different Ratios of Dietary Non-fibrous Carbohydrate (NFC) to Neutral Detergent Fiber (NDF) on Production Performance, Nutrient Digestibility and Methane Emissions of Dorper×Thin-tailed Han Crossbred Growing Ewes

ZHOU Yan^{1,3}, DIAO Qi-yu^{1*}, DONG Li-feng¹, DENG Kai-dong², XU Gui-shan³, MA Tao¹
(1. Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China, 2. College of Animal Science and Technology, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, China, 3. College of Animal Science and Technology, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the effects of ratios of dietary non-fibrous carbohydrate to neutral detergent fiber (NFC/NDF) on the growth performance, nutrient digestibility and methane (CH₄) production of Dorper×Thin-tailed Han crossbred ewes with 48.0-55 kg of body weight (BW). Thirty ewes with (48.0±0.5) kg BW were selected and divided into 3 treatments with 10 sheep in each treatment: NFC/NDF=0.78 (concentrate/forage=35:65, ad libitum), NFC/NDF=1.03 (concentrate/forage=50:50, feed restriction) and NFC/NDF=2.17 (concentrate/forage=65:35, feed restriction). The trial lasted for 32 d, including a 17-d adaptation and a 15-d experimental period. The energy and crude protein intake were same in each treatment. The average daily weight gain of the treatment of NFC/NDF=0.78 was taken as the standard for the feed restriction of the treatment of NFC/NDF=1.03 and 2.17. The BW was measured before morning feed, and feed intake was recorded daily. The CH₄ production, dietary energy and nutrient digestibility were determined during experimental period. The results showed that: 1) The feed conversion efficiency in the NFC/NDF=2.17 treatment was significantly higher than that in the NFC/NDF=0.78 treatment ($P<0.05$), whereas no significant difference was observed between NFC/NDF=1.03 treatment and other two treatments ($P>0.05$). 2) The apparent digestibility of dry matter, organic matter, gross energy and metabolic rate of gross energy in NFC/NDF=2.17 treatment were the highest among the 3 treatments ($P<0.05$). The apparent digestibility of crude protein in NFC/NDF=2.17 treatment was higher than that in NFC/NDF=0.78 treatment ($P<0.05$), however, there was no significant difference between NFC/NDF=2.17 and NFC/NDF=1.03 treatments, or between NFC/NDF=0.78 and NFC/NDF=1.03 treatments ($P>0.05$). With the increase of ratio of dietary NFC/NDF, the apparent digestibility of NDF in NFC/NDF=2.17 treatment was the highest ($P<0.05$), whereas no significant difference was observed between NFC/NDF=0.78 and NFC/NDF=1.03 treatments ($P>0.05$). 3) The CH₄ emissions in NFC/NDF=2.17 treatment was 32.53 L·d⁻¹, which was significantly lower than that in NFC/NDF=0.78 (58.03 L·d⁻¹) and NFC/NDF=1.03 (63.17 L·d⁻¹) treatments ($P<0.05$), whereas no significant difference was observed between NFC/NDF=0.78 and NFC/NDF=1.03 treatments ($P>0.05$). The similar results were found in CH₄ emission as a proportion of metabolic weight in the 3 treatments. With the increase of dietary NFC/NDF, the CH₄ emission as a proportion of dry matter intake, organic matter intake and digestible organic matter intake in NFC/NDF=2.17 treatment was significantly lower than that in NFC/NDF=1.03 treatment ($P<0.05$), whereas no significant difference were observed between NFC/NDF=0.78 and other two treatments ($P>0.05$). The CH₄ emission as a proportion of gross energy intake, digestible energy intake, metabolic energy intake had the similar results. The CH₄ emission as a

proportion of NDF intake and digestible NDF intake in NFC/NDF=1.03 treatment was significantly higher than that in the other two treatments ($P<0.05$), whereas no significant difference was observed between NFC/NDF=0.78 and NFC/NDF=2.17 treatments ($P>0.05$). The CH_4 emission as a proportion of average daily gain and digestible ADF intake were similar among the 3 treatments ($P>0.05$). According to the production performance, nutrient digestibility, energy utilization and CH_4 production, it will be recommended that NFC/NDF=2.17 under restriction feeding would achieve the best carbon-cutting results for Dorper \times Thin-tailed Han crossbred ewes with 48-55 kg of BW.

Key words: methane; non-fibrous carbohydrate (NFC)/neutral detergent fiber (NDF); production performance; nutrient digestibility; sheep

据统计,1880—2012 年全球平均气温上升了 $0.85\text{ }^\circ\text{C}$ ^[1],气温变化给自然生态平衡带来了深远影响,也直接威胁人类的健康和安全。2016 年 11 月 1 日正式实施的《巴黎协定》,则是为将全球平均气温较工业前水平升高 $2.0\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,并控制在 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 内而努力。温室气体浓度的增加和臭氧层的破坏是导致全球变暖的两个主要因素,而甲烷(CH_4)与这两个因素皆相关^[2]。 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 并称 3 大温室气体, CH_4 增温潜势是 CO_2 的 25 倍,在大气中半衰期为 10 年,研究表明,畜牧业则是导致大气中温室气体甲烷累计的一个主要贡献者^[3],约占农业源温室气体排放的 80%,对全球变暖的影响作用占到所有影响气候变暖作用的 15%~20%。到 2013 年,我国畜牧业总产值在第一产业总产值的比例较 1980 年上升了 12.4%^[4],2015 年我国羊存栏量已达到 3.1 亿头^[5],但是畜牧业生产投入与资源消耗呈正比的现状阻碍了我国养殖业及饲料工业绿色 GDP 总目标的步伐^[6]。因此,发展低碳畜牧业成为了我国碳减排压力下的协调可持续之路。

反刍家畜产生的甲烷是饲粮在瘤胃发酵过程中的必然产物,甲烷产量的增加通常意味着饲粮能量利用效率的降低。大量文献报道,反刍家畜胃肠道甲烷的产生与动物品种、瘤胃微生物群落结构的组成、饲粮类型及饲粮精粗比等有关,相关的研究也多以调节饲粮营养水平、添加外源调控物、基因选育等作为主要的甲烷减排手段。丁静美等^[7]研究了不同 NFC/NDF 饲粮对成年杜寒杂交羯羊甲烷产量的影响,结果表明,维持水平下饲喂 NFC/NDF 为 1.04 的玉米秸秆饲粮对肉用绵羊具有较好的甲烷减排效果。

本研究选取的杜寒杂交母羊年龄相同,饲养环境相同,饲喂的日粮原料来源相同,组间平均日增重

一致,着力研究在等能等氮采食条件下日粮不同 NFC/NDF 比例对生长期杜寒杂交母羊胃肠道甲烷排放的影响,以明确有效降低瘤胃甲烷产生的日粮类型,为饲粮配方的配制及甲烷减排提供理论依据,以期对提升畜牧业生产效率及环境效率,从而应对全球温室效应、促进和保障我国现代化农业和可循环农业的发展起到参考作用。

1 材料与方 法

本试验于 2017 年 3 月—5 月在中国农业科学院南口中试基地进行。

1.1 试验动物及试验设计

采用单因素随机区组设计,选取体况良好、体重相近(48.0 ± 0.5) kg 的杜泊羊(♂) \times 小尾寒羊(♀)杂交 F1 代母羊 30 只,按照饲粮精粗比例的不同随机分配到 3 组,各组饲粮 NFC/NDF 分别为 0.78(精粗比为 35:65 组)、1.03(精粗比为 50:50 组)、2.17(精粗比为 65:35 组),每组 10 只羊,且保证 3 组间试验动物平均体重相近,预试前每只按照 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体重皮下注射伊维菌素注射液进行驱虫处理。参考 NRC(2007)配制 3 种精粗比全混合颗粒饲粮,饲粮配方和营养成分见表 1。试验全期 NFC/NDF=0.78 组自由采食,其他两组限饲,保证各组总能和粗蛋白质摄入量一致,自由饮水。试验期为 32 d,其中预试期 17 d,正试期 15 d。

1.2 饲养管理

试验羊单栏饲养,每天 08:00 和 17:00 各饲喂 1 次,自由饮水。NFC/NDF=0.78 组自由采食量根据前 1 d 羊只的进食量进行调整,确保饲槽内有 10%左右的剩料;限饲组采食量则根据每 10 d 自由采食组平均体重变化进行 1 次调整。饲喂前采集饲料样本,精确称取前 1 d 的剩料并在混合均匀后采

样,记录采食量和剩料量,用于计算整个试验期内各组试验羊平均日干物质采食量。

表 1 试验饲料组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air dry basis) %

项目 Item	非纤维性碳水化合物/ 中性洗涤纤维 NFC/NDF		
	0.78	1.03	2.17
原料 Ingredient			
羊草 Chinese wildrye hay	65.00	50.00	35.00
玉米 Corn	19.10	32.91	46.69
豆粕 Soybean meal	13.00	14.05	15.10
磷酸氢钙 CaHPO ₄	0.60	0.55	0.53
石粉 Limestone	0.80	0.99	1.18
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50
预混料 Premix ¹⁾	1.00	1.00	1.00
合计 Total	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient level			
干物质 DM	90.68	90.07	87.58
有机物 OM	91.67	91.59	91.53
粗蛋白 CP	8.08	8.60	9.46
代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME ²⁾	8.03	8.02	8.04
粗脂肪 EE	2.28	2.68	2.74
中性洗涤纤维 NDF	45.59	39.65	36.59
钙 Ca	1.14	1.17	1.15
磷 P	0.33	0.39	0.41
非纤维性碳水化合物 NFC ³⁾	35.72	40.66	79.33
精粗比 Concentrate:forage	35:65	50:50	65:35

¹⁾ 由北京精准动物营养研究中心提供,为每千克饲料提供:VA 15 000 IU,VD 2 200 IU,VE 50 IU,Fe 55 mg,Cu 12.5 mg,Mn 47 mg,Zn 24 mg,Se 0.5 mg,I 0.5 mg,Co 0.1 mg。²⁾ 代谢能为计算值,其余为实测值。³⁾ 非纤维性碳水化合物=100-(中性洗涤纤维+粗蛋白质+粗脂肪+粗灰分)

¹⁾ The premix provided the following per kg of diets: VA 15 000 IU,VD 2 200 IU,VE 50 IU,Fe 55 mg,Cu 12.5 mg,Mn 47 mg,Zn 24 mg,Se 0.5 mg,I 0.5 mg,Co 0.1 mg.

²⁾ ME was calculated values and others were measured values. ³⁾ NFC=100-(NDF + CP + EE + Ash)

1.3 养分和气体代谢试验

1.3.1 代谢试验 试验正试期于每天晨饲前采用全收粪尿法收集粪、尿。收集粪样时,将每只试验

羊对应的收粪袋取下后称取重量,记录其前 1 d 的排粪量,随后将每只试验羊的粪样搅拌均匀后,按排粪量的 10% 进行取样。在收集尿样前,需先向收集尿桶中加入 100 mL 10% 的 H₂SO₄ 以固尿氮,收集后记录每只试验羊对应的尿液体积,随后用 4 层纱布过滤,按每只羊排尿量的 10% 进行取样。

1.3.2 CH₄ 测定 CH₄ 排放量采用开放式循环呼吸测热系统(Sable, city, USA)进行测定,系统连接 3 个呼吸测热箱,可以同时测定 3 只羊的 CH₄ 排放量。每个呼吸测热箱内配有料槽和水槽,试验羊在试验期间可以自由采食和饮水。在试验正试期的第 1、4、7、10、13 天,将试验动物分 5 批(3 只/批,每组 1 只)先后进入 3 个气体代谢箱内,适应 24 h,随后再测定其 48 h 的 CH₄ 和 CO₂ 排放量(GGA, Los Gatos Reserch, California, 美国)及氧气消耗量(FC-10 氧气测定仪, Sable System Interational, Henderson, NV, 美国)。本试验中测定系统 30 min 循环 4 次。开始测定时,系统首先测定试验环境中 CH₄ 的含量,测定时间为 2 min,随后由环境向呼吸测热箱内置换,置换时间为 1 min,然后依次测定 3 个呼吸测热箱的 CH₄ 排放量,每个呼吸测热箱测定时间为 2 min,接着系统由呼吸测热箱向环境置换,置换时间为 1 min,最后再次测定试验环境中的 CH₄ 含量,测定时间为 2 min。以上为 Sable 开放式气体代谢系统完成一个周期的测定流程,以此循环连续测定 48 h 的 CH₄ 排放量。计算过程中,以前后两次测定的试验环境中 CH₄ 含量的平均值作为基底值,通过 Sable 气体代谢系统的测定程序对对应的宏文件进行计算机统计分析,得到每只试验羊每天的 CH₄ 排放量。在试验羊进入和离开气体代谢室时分别对其进行体重测定,以两次测定的平均体重作为试验羊代谢体重的计算依据^[7-8]。

1.4 测定指标

1.4.1 生长性能 每天晨饲前,记录前 1 d 自由采食组剩料量,并根据剩料量调整第 2 天饲喂量,保证采食方式为自由采食水平;中、高限饲组根据每 10 d 称重结果调整采食量。对采食量、剩料量均严格记录,用于计算整个试验期每只羊的干物质采食量,记录体重变化,并计算日增重和饲料转化效率。

1.4.2 营养物质消化率 消化代谢和气体代谢试验结束后,将每只羊的粪样、料样置于 65 °C 烘箱内烘干 48 h,回潮 24 h 后称重,得出初水分含量,随后经粉碎过 40 目网筛制成分析样品,以备分析检测

干物质(dry matter, DM)、粗灰分(Ash)、粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(EE)含量。中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、饲料总能(gross energy, GE)、粪能(fecal energy, FE)及尿能(urinary energy, UE), 以及饲料中钙(Ca)和磷(P)含量测定依据《饲料分析及饲料质量检测技术》^[9]进行。

尿能(UE): 取 3 mL 经初步处理后的尿液, 分多次滴在 3 张叠好的定量滤纸上, 并保留 3 个空白滤纸, 在 65 °C 烘箱内烘干后用 Parr 6400 氧弹式量热仪测定, 得到滤纸和尿液的总能。

UE=滴加尿液滤纸的能值-滤纸能值; 甲烷能(CH₄-E, kJ)=甲烷排放量(L)×39.54 kJ·L⁻¹^[10]; 代谢能(ME, kJ)=总能(GE)-粪能(FE)-尿能(UE)-甲烷能(CH₄-E)。

1.5 数据统计分析

数据采用 Excel 2007 进行初步整理, 采用 SAS 9.4 统计软件 ANOVA 进行数据独立性、正态性和

方差齐性检验, 差异显著时用 Duncan's 法进行多重比较, 以 $P < 0.05$ 为差异显著的判断标准。

2 结果

2.1 饲料不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊生长性能及饲料转化率的影响

表 2 为不同饲料处理组对 48~55 kg 杜寒杂交母羊生长性能的影响。可见, 3 组母羊的初始体重、结束体重和平均日增重均无显著差异($P > 0.05$)。NFC/NDF=0.78 组干物质采食量($2\ 264.90\text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)显著高于 NFC/NDF=1.03 组($1\ 528.60\text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)和 NFC/NDF=2.17 组($1\ 444.40\text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)($P < 0.05$), 后两组间干物质采食量无显著差异($P > 0.05$)。同时, NFC/NDF=0.78 组的饲料转化效率数值(15.65)显著高于 NFC/NDF=2.17 组(9.81, $P < 0.05$), NFC/NDF=1.03 组的饲料转化效率数值(13.33)与其他两组无显著差异($P > 0.05$)。

表 2 日粮不同 NFC/NDF 比例对 48~55 kg 杜寒杂交母羊生长性能的影响

Table 2 The effect of different ratios of dietary NFC/NDF on growth performance of Dorper×Thin-tailed Han crossbred ewes with 48-55 kg of body weight

项目 Item	非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维 NFC/NDF			SEM	P 值 P value
	0.78	1.03	2.17		
试羊数 No. of lambs	5	5	5		
初始体重/kg Initial BW	49.18	50.34	50.60	0.55	0.616
结束体重/kg Final BW	55.83	55.56	56.93	0.32	0.281
平均日增重/(g·d ⁻¹) ADG	154.69	134.95	147.19	7.93	0.631
干物质采食量/(g·d ⁻¹) DMI	2 264.90 ^a	1 528.60 ^b	1 444.40 ^b	10.02	0.006 1
饲料转化效率 F/G	15.65 ^a	13.33 ^{ab}	9.81 ^b	1.01	0.087

不同日粮处理间, 同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 下表同

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference among different diet treatments ($P < 0.05$), the same as below

2.2 饲料不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊营养物质表观消化率的影响

饲料不同 NFC/NDF 比例对杜寒杂交 F1 代母羊营养物质表观消化率的影响见表 3。3 组干物质、有机物的表观消化率均随饲料中 NFC/NDF 比例的增加而显著升高($P < 0.05$)。NFC/NDF=2.17 组的粗蛋白质表观消化率显著高于 NFC/NDF=0.78 组($P < 0.05$), 两组皆与 NFC/NDF=1.03 组无显著差异($P > 0.05$)。另外, NFC/NDF=2.17 组的

NDF 表观消化率显著高于 NFC/NDF=0.78 组和 NFC/NDF=1.03 组($P < 0.05$), 后两组间无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 饲料不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊能量代谢的影响

表 4 为饲料不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交 F1 代母羊能量代谢的影响。随着饲料 NFC/NDF 比例的增加, 3 个处理组中粪能呈显著降低的趋势($P < 0.05$); NFC/NDF=2.17 组甲烷能

表 3 饲粮不同 NFC/NDF 比例对 48~55 kg 杜寒杂交母羊营养物质表观消化率的影响

Table 3 The effect of different ratios of dietary NFC/NDF on apparent digestibility of dietary nutrients of Dorper×Thin-tailed Han crossbred ewes with 48-55 kg of body weight

项目 Item	非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维 NFC/NDF			SEM	P 值 P value
	0.78	1.03	2.17		
干物质 DM					
采食量/(g·d ⁻¹) Intake	1 649.40	1 351.20	1 245.80	99.45	0.204
粪排量/(g·d ⁻¹) Feces output	741.08 ^a	538.62 ^b	409.14 ^b	51.89	0.011
表观消化率/% Apparent digestibility	54.87 ^c	59.97 ^b	67.01 ^a	1.65	0.000 4
有机物 OM					
采食量/(g·d ⁻¹) Intake	1 497.80	1 225.00	1 125.30	86.11	0.196
粪排量/(g·d ⁻¹) Feces output	679.03 ^a	494.06 ^b	381.30 ^c	47.19	0.014
表观消化率/% Apparent digestibility	54.48 ^c	59.55 ^b	65.97 ^a	1.56	0.000 4
粗蛋白质 CP					
采食量/(g·d ⁻¹) Intake	146.95	129.03	125.58	7.73	0.525
粪排量/(g·d ⁻¹) Feces output	73.02 ^a	57.36 ^{ab}	50.45 ^b	4.47	0.096
表观消化率/% Apparent digestibility	50.32 ^b	55.19 ^{ab}	59.72 ^a	1.64	0.045
中性洗涤纤维 NDF					
采食量/(g·d ⁻¹) Intake	829.30 ^a	594.80 ^{ab}	520.50 ^b	55.36	0.039
粪排量/(g·d ⁻¹) Feces output	499.04 ^a	307.64 ^{ab}	262.38 ^b	38.22	0.020
表观消化率/% Apparent digestibility	39.95 ^b	37.78 ^b	49.31 ^a	2.06	0.031

显著低于 NFC/NDF=0.78 组和 NFC/NDF=1.03 组 ($P < 0.05$), 后两组间无显著差异 ($P > 0.05$); NFC/NDF=0.78 组的总能摄入量和代谢能摄入量皆显著高于 NFC/NDF=1.03 组和 NFC/NDF=2.17 组 ($P < 0.05$), 后两组间无显著差异 ($P > 0.05$); NFC/NDF=0.78 组的消化能摄入量显著高于 NFC/

NDF=2.17 组 ($P < 0.05$), NFC/NDF=1.03 组与以上两组皆无显著差异 ($P > 0.05$); 总能表观消化率和总能代谢率均随饲粮 NFC/NDF 比例的升高而显著升高 ($P < 0.05$); 而 3 个处理组间的尿能随饲粮 NFC/NDF 比例的升高则无显著变化 ($P > 0.05$)。

表 4 饲粮不同 NFC/NDF 比例对 48~55 kg 杜寒杂交母羊能量代谢的影响

Table 4 The effect of different ratios of dietary NFC/NDF on energy metabolism of Dorper×Thin-tailed Han crossbred ewes with 48-55 kg of body weight

项目 Item	非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维 NFC/NDF			SEM	P 值 P value
	0.78	1.03	2.17		
总能摄入量/(MJ·d ⁻¹) GEI	32.55 ^a	25.53 ^b	22.86 ^b	1.44	0.003
粪能/(MJ·d ⁻¹) FE	15.70 ^a	10.37 ^b	7.78 ^c	1.03	<0.000 1
尿能/(MJ·d ⁻¹) UE	0.48	0.36	0.47	0.07	0.747
消化能摄入量/(MJ·d ⁻¹) DE intake	31.48 ^a	21.79 ^{ab}	18.95 ^b	2.29	0.045
代谢能摄入量/(MJ·d ⁻¹) ME intake	26.27 ^a	17.73 ^b	16.71 ^b	1.88	0.055
甲烷能/(MJ·d ⁻¹) CH ₄ -E	2.29 ^a	2.50 ^a	1.29 ^b	0.21	0.026
总能表观消化率/% Apparent digestibility of GE	51.54 ^c	59.42 ^b	65.83 ^a	1.44	<0.000 1
总能代谢率/% Metabolic rate of GE	43.55 ^c	48.16 ^b	58.19 ^a	1.88	<0.01

2.4 饲料不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊甲烷排放量的影响

表 5 为饲料不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交 F1 代母羊甲烷产量的影响。NFC/NDF = 2.17 组的甲烷日排放量为 $32.53 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 显著低于 NFC/NDF = 0.78 组的 $58.03 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 NFC/NDF = 1.03 组的 $63.17 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ ($P < 0.05$), 后两组间的甲烷日排放量无显著差异 ($P > 0.05$), 单位代谢体重的甲烷日排放量具有相同的变化规律。NFC/NDF = 2.17 组的单位干物质采食量的甲烷排放量、单位有机物采食量的甲烷排放量和单位可消化有机物采食量的甲烷排放量皆显著低于 NFC/NDF = 1.03 组

($P < 0.05$), NFC/NDF = 0.78 组的以上指标与另外两组相比皆无显著差异 ($P > 0.05$); 单位总能摄入量的甲烷能排放量、单位消化能摄入量的甲烷能排放量和单位代谢能摄入量的甲烷能排放量具有相同的变化规律。NFC/NDF = 1.03 组的单位中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量和单位可消化中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量显著高于 NFC/NDF = 0.78 组和 NFC/NDF = 2.17 组 ($P < 0.05$), 后两组间无显著差异 ($P > 0.05$)。另外, 单位日增重的甲烷排放量和单位可消化酸性洗涤纤维采食量的甲烷排放量在 3 个处理组之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 5 饲料不同 NFC/NDF 比例对 48~55 kg 杜寒杂交母羊甲烷排放量的影响

Table 5 The effect of different ratios of dietary NFC/NDF on methane emissions of Dorper × Thin-tailed Han crossbred ewes with 48-55 kg of body weight

项目 Item	非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维 NFC/NDF			SEM	P 值 P value
	0.78	1.03	2.17		
甲烷日排放量/($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$) CH_4 emission daily	58.03 ^a	63.17 ^a	32.53 ^b	5.41	0.026
单位代谢体重的甲烷日排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-0.75}$) $\text{CH}_4/\text{BW}^{0.75}$	3.18 ^a	3.39 ^a	1.73 ^b	0.29	0.023
单位日增重的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$) CH_4/ADG	0.07	0.12	0.02	0.03	0.512
单位干物质采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{DM intake}$	31.49 ^{ab}	44.44 ^a	25.84 ^b	3.37	0.051
单位有机物采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{OM intake}$	34.68 ^{ab}	49.01 ^a	28.61 ^b	3.71	0.052
单位中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{NDF intake}$	62.63 ^b	100.95 ^a	61.86 ^b	7.77	0.044
单位酸性洗涤纤维采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{ADF intake}$	128.64 ^b	252.05 ^a	172.75 ^{ab}	20.72	0.027
单位可消化有机物采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{Digestible OM intake}$	64.83 ^{ab}	81.18 ^a	43.56 ^b	6.42	0.036
单位可消化中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{Digestible NDF intake}$	157.73 ^b	231.20 ^a	115.16 ^b	18.57	0.015
单位可消化酸性洗涤纤维采食量的甲烷排放量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{CH}_4/\text{Digestible ADF intake}$	526.00	562.00	674.20	73.09	0.729
单位总能摄入量的甲烷能排放量/ ($\text{MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$) $\text{CH}_4\text{-E}/\text{GE intake}$	7.04 ^{ab}	9.87 ^a	5.57 ^b	0.75	0.044
单位消化能摄入量的甲烷能排放量/ ($\text{MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$) $\text{CH}_4\text{-E}/\text{DE intake}$	7.55 ^{ab}	11.72 ^a	6.76 ^b	0.96	0.061
单位代谢能摄入量的甲烷能排放量/ ($\text{MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$) $\text{CH}_4\text{-E}/\text{ME intake}$	9.07 ^{ab}	14.83 ^a	7.66 ^b	1.38	0.063

3 讨论

3.1 饲粮不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊生产性能的影响

日增重和饲料转化效率是评价动物生产性能的重要指标。本研究中,随着饲粮 NFC/NDF 比例的升高,3 个处理组的饲料转化率表现出了显著性差异,这不同于以往报道中的试验方法。本研究中,试验动物是在自由采食和限制饲喂两种模式下进行,虽然饲粮 NFC/NDF 水平不同,但通过调整采食水平,使得 3 组的营养摄入量一致,达到组间平均日增重无显著差异的目的。而 NFC/NDF=2.17 组的饲料转化率显著高于 NFC/NDF=0.78 组,则说明 NFC/NDF=2.17 组的日粮营养素供应量与动物实际需要量较为接近^[11],具备较好的生长性能。另外,杜寒杂交绵羊属于早熟品种,48~55 kg 时的绵羊体况已达到体成熟和性成熟的要求,营养需求逐渐趋于育种标准^[12]。因此,本试验中,3 种不同营养水平的试验动物尽量保证体重一致,也是为了给即将进行的配种工作打好基础。

3.2 饲粮不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊能量和营养物质代谢的影响

准确测定饲料中可消化(可利用)养分的含量具有重要的生产指导意义,同时也是评定饲料营养价值的重要方法。Ley 等^[13]和裴彩霞等^[14]的研究表明,动物种类越相似瘤胃产甲烷菌群越相似。焦金真等^[15]选择甲烷菌和细菌进行 qRT-PCR 定量研究,考察了浏阳黑山羊胃肠道不同部位重要功能微生物的数量分布特征,结果发现,除溶纤维丁酸弧菌外,细菌、甲烷菌、白色瘤胃球菌、黄色瘤胃球菌、琥珀酸丝状杆菌、双歧杆菌和栖瘤胃普雷沃氏菌的数量均以瘤胃最多,盲肠、结肠、直肠居中,回肠次之,十二指肠和空肠最少,这意味着更多的营养物质在瘤胃微生物的作用下能得到充分降解,转移至后肠发酵的营养物质降低。赵洪波等^[16]提出,日粮组成的差异会引起奶牛瘤胃微生物区系和发酵模式的改变。以上结论与本研究中随着饲粮 NFC/NDF 的升高,干物质、有机物、粗蛋白质和 NDF 的表观消化率皆显著增加,3 个处理组中粪能显著降低的结果相一致。碳水化合物发酵速率及含量是控制微生物生长中能量利用的两大主要因素^[17-18]。董瑞阳^[19]和丁静美等^[7]的研究皆表明,黄色瘤胃球菌和产琥珀酸丝状杆菌的拷贝数(copies · mL⁻¹ 瘤胃

液)随精料的提高而降低,所以饲粮 NFC 浓度的增加,有利于反刍动物瘤胃内栖瘤胃普雷沃氏菌这类既可以分解蛋白质也可以分解淀粉的优势菌群的繁殖和代谢^[20-21],从而提高微生物的发酵速率,相应提高了饲粮能量的利用效率,可用来解释本研究中能量表观消化率随饲粮 NFC/NDF 比例的增加而显著提高的结果。从另一方面来说,当饲粮 NDF 含量较高时,动物需采食较多的饲粮才能满足维持及生产需要,而采食量的增加会提高食糜通过消化道的速度,降低胃肠道的紧张度及减少微生物的作用时间,意味着瘤胃发酵程度的降低,造成饲粮营养物质消化率的下降^[22-23],而微生物细胞为维持瘤胃种群的繁殖需要进行的频繁分裂,则会增加微生物能量需要,这就导致饲料总能量利用的减少^[24]。因此,反刍家畜营养物质消化率和能量利用效率与甲烷产量存在负相关关系。

3.3 饲粮不同 NFC/NDF 比例对育成期杜寒杂交母羊甲烷产量的影响

反刍动物采食量是决定甲烷产量的重要因素之一,常被作为预测因子广泛应用于动物甲烷产量的预测方程中^[25-27]。本试验设置了自由采食和限饲两种饲养模式,随着饲粮 NFC/NDF 含量的升高,试验羊干物质采食量由 1 649 降至 1 245 g · d⁻¹,其甲烷排放量由 58.03 降至 32.53 L · d⁻¹,单位干物质采食量的甲烷排放量也由 31.49 降至 25.84 L · kg⁻¹。饲粮在瘤胃内被纤维分解菌、淀粉分解菌等瘤胃微生物降解,以 *Methanobrevibacter* 为主的瘤胃产甲烷菌能够利用糖酵解过程中丙酮酸生化过程中释放的氢气作为电子供体还原二氧化碳生成甲烷。采食量的减少,降低了瘤胃微生物菌群产甲烷的底物供应量,从而减少了甲烷的生成量,这与 Ramin 和 Huhtanen^[28]、许贵善等^[29]的研究结果一致。反刍动物瘤胃具有一定限度的容量,采食量的增加,虽提高了饲粮在瘤胃中的流通速度,减少了微生物作用时间,进而降低了甲烷的相对产量,但高采食量会促进厌氧微生物发酵,产生更多的易消化有机物,增加瘤胃中用于甲烷生成的总底物供应量,从而提高了甲烷生成的绝对产量。

饲料化学组分、发酵类型与甲烷产量间的关系多有报道^[30-31],多数报道认为其作用机理是因为碳水化合物的数量和类型会改变瘤胃的生态学和功能学,而瘤胃发酵和消化动力学的改变既影响微生物生长和微生物对氮的利用,也通过影响瘤胃 pH(产

甲烷菌对低于 6.0 以下的 pH 较为敏感^[32])而调整瘤胃原虫和产甲烷菌的数量及丙酸产量,进而作用于甲烷的生成过程^[33]。赵一广等^[34]采用开路式呼吸测定系统研究了日粮不同中性洗涤纤维(NDF)含量对 50 kg 体重的成年杂交公羊瘤胃甲烷排放的影响,结果表明,随着日粮中 NDF 含量的增加(27.03%~51.83%,干物质基础),其单位可消化有机物甲烷排放量显著提高(37.83~48.80 L·kg⁻¹)。丁静美等^[7]采用与本研究相似的饲喂处理,发现成年杜泊×小尾寒羊杂交羯羊的甲烷日排放量随着日粮 NDF/NFC 水平而变化,当日粮 NDF/NFC 为 3.02 时绵羊的甲烷排放量为 42.10 L·d⁻¹,显著高于日粮 NDF/NFC 为 1.04 的排放量(35.98 L·d⁻¹),与本研究结果一致。本试验中,随着饲料 NFC 浓度的升高,育成绵羊限饲条件下的单位可消化有机物甲烷排放量(81.18~43.56 L·kg⁻¹)和可消化中性洗涤纤维的甲烷排放量(231.20~115.16 L·kg⁻¹)皆显著降低;当日粮 NFC/NDF 为 0.78 时绵羊的甲烷排放量为 58.03 L·d⁻¹,显著高于日粮 NFC/NDF 为 2.17 的排放量(32.53 L·d⁻¹)。在王尧悦等^[21]的研究中,产甲烷菌的数量与黄色瘤胃球菌、溶糊精琥珀酸菌及溶纤维丁酸菌的数量均呈极显著正相关,所以,饲料 NDF 含量较高时,可产生更多的甲烷产量^[25,35];而非结构性碳水化合物的增多抑制了瘤胃 pH 和纤维的分解消化,表明纤维分解菌的数量受到了减少或活性受到了弱化^[17],而且非结构性碳水化合物较结构性碳水化合物含有更多的能量物质,可提高瘤胃发酵速率,加快饲料翻转,改变瘤胃物理化学条件和微生物数量,此时瘤胃挥发性脂肪酸中丙酸比例升高,增加了氢气的消除途径,导致甲烷产量的下降^[24]。

4 结 论

4.1 在平均日增重一致的基础上,对育成绵羊饲喂 NFC/NDF 为 2.17 的饲料较 NFC/NDF 为 0.78 和 1.03 的饲料饲料转化率高,生长性能较好。

4.2 在平均日增重一致的基础上,对育成绵羊限制饲喂 NFC/NDF 为 2.17 的饲料时,其日粮干物质、有机物等养分的表观消化率及总能表观消化率均显著升高。

4.3 在平均日增重一致的基础上,对育成绵羊限制饲喂 NFC/NDF 为 2.17 的饲料时,其甲烷日排放量、单位代谢体重甲烷排放量、单位干物质采食量的

甲烷排放量单位可发酵有机物甲烷排放量和单位总能摄入量的甲烷能排放量、单位消化能摄入量的甲烷能排放量及单位代谢能摄入量的甲烷能排放量在 3 个处理组中均相对最低。

4.4 综合生长性能、饲料各营养物质表观消化率、能量代谢及甲烷排放水平,对育成期杜寒杂交母羊限制饲喂 NFC/NDF 为 2.17 的饲料是最佳的碳减排措施。

参考文献 (References):

- [1] 王艳君,景 丞,曹丽格,等. 全球升温控制在 1.5 °C 和 2.0 °C 时中国分省人口格局[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(4): 327-336.
WANG Y J, JING C, CAO L G, et al. The population patterns over China under the 1.5 °C and 2.0 °C warming targets [J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(4): 327-336. (in Chinese)
- [2] BROUCEK J. Production of methane emissions from ruminant husbandry: a review[J]. *J Environ Protec*, 2014, 5(15): 1482-1493.
- [3] CARRO M D, VALDÉS C, RANILLA M J, et al. Effect of forage to concentrate ratio in the diet on ruminal fermentation and digesta flow kinetics in sheep offered food at a fixed and restricted level of intake[J]. *Anim Sci*, 2000, 70(1): 127-134.
- [4] 邹 洁, 项朝阳. 中国大陆畜牧业环境效率测算及影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 90-96.
ZOU J, XIANG C Y. Research on the livestock environmental efficiency in mainland China and its influencing factors[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(1): 90-96. (in Chinese)
- [5] [HTTP://data.stats.gov.cn/search.htm?s=绵羊](http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=绵羊).
- [6] 张子仪. 从科学发展观谈我国动物营养科研工作的跨越与回归[J]. 中国畜牧杂志, 2005, 41(8): 3-5.
ZHANG Z Y. Leaping over and returning of scientific research on animal nutrition in China [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2005, 41(8): 3-5. (in Chinese)
- [7] 丁静美, 成述儒, 邓凯东, 等. 不同中性洗涤纤维与非纤维性碳水化合物比值饲料对肉用绵羊甲烷排放的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(3): 806-813.
DING J M, CHENG S R, DENG K D, et al. Effects of different neutral detergent fiber/nonfiberous carbohydrate diets on methane emission of meat sheep [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(3):

- 806-813. (in Chinese)
- [8] 肖 怡. 三种益生菌对肉羊甲烷排放、物质代谢和瘤胃发酵的影响[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2016.
XIAO Y. Effects of three probiotics on methane emission, nutrient metabolism and rumen fermentation in mutton sheep[D]. Alar: Tarim University, 2016. (in Chinese)
- [9] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京:中国农业大学出版社,2010.
ZHANG L Y. Feed analysis and feed quality testing technology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 杨嘉实,冯仰廉. 畜禽能量代谢[M]. 北京:中国农业出版社,2004.
YANG J S, FENG Y L. Livestock energy metabolism [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. (in Chinese)
- [11] JONES S D M, BURGESS T D, DUPCHAK K, et al. The growth performance and carcass composition of ram and ewe lambs fed on pasture or in confinement and slaughtered at similar fatness[J]. *Can J Anim Sci* 1984, 64(3): 631-640.
- [12] YILMAZ O, DENK H, BAYRAM D. Effects of lambing season, sex and birth type on growth performance in Norduz lambs[J]. *Small Ruminant Res*, 2007, 68(3): 336-339.
- [13] LEY R, EHAMADY M, LOZUPONE C, et al. Evolution of mammals and their gut microbes[J]. *Science*, 2008, 320(5883): 1647-1651.
- [14] 裴彩霞,毛胜勇,朱伟云. 山羊瘤胃产甲烷古菌多样性及与其他动物瘤胃的比较[J]. 畜牧兽医学报, 2012, 43(6): 909-914.
PEI C X, MAO S Y, ZHU W Y. Molecular diversity of rumen methanogens from the goat and its comparison with other ruminants [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2012, 43(6): 909-914. (in Chinese)
- [15] 焦金真,王芑芑,汤少勋,等. 浏阳黑山羊胃肠道不同部位重要功能微生物的数量分布特征研究[J]. 畜牧兽医学报, 2013, 44(10): 1590-1599.
JIAO J Z, WANG P P, TANG S S, et al. Quantity and distribution characteristics of functional microorganisms in gastrointestinal tract of liuyang black goats[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2013, 44(10): 1590-1599. (in Chinese)
- [16] 赵洪波,夏 科,谢小来,等. 泌乳水平对奶牛日粮及羊草能量、氮代谢及瘤胃甲烷排放量的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(1): 36-40.
ZHAO H B, XIA K, XIE X L, et al. Effect of lactation level on diets, energy of chinese wildrye hay, nitrogen metabolism and Methane emissions of dairy cow[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2013, 49(1): 36-40. (in Chinese)
- [17] 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]. *J Anim Sci*, 1992, 70(11): 3551-3561.
- [18] 张 勇. 不同营养水平补饲料对泌乳期甘肃高山细毛羊的补饲研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016.
ZHANG Y. Study on different nutritional level supplements feeding Gansu alpine merino during lactation period[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [19] 董瑞阳. 粗饲料组合对泌乳牛与干奶牛甲烷产量、瘤胃发酵模式及微生物菌群的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2014.
DONG R Y. Effect of roughage combinations on methane production, rumen fermentation pattern and microbial population of lactating cows and dry cows[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [20] STEVENSON D M, WEIMER P J. Dominance of Prevotella and low abundance of classical ruminal bacterial species in the bovine rumen revealed by relative quantification real-time PCR[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2009, 83(5): 987-988.
- [21] 王尧悦,赵钊艳,王兴涛,等. 日粮营养水平对 150~180 日龄滩羊瘤胃相关微生物菌群数量、pH 和 VFA 含量的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2016, 47(10): 2060-2070.
WANG Y Y, ZHAO Z Y, WANG X T, et al. Effect of dietary nutrient levels on the number of related microbes, PH and VFA levels in rumen of tan sheep aged from 150 to 180 days[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2016, 47(10): 2060-2070. (in Chinese)
- [22] MOULD F L, ØRSKOV E R. Manipulation of rumen fluid pH and its influence on cellulolysis in sacco, dry matter degradation and the rumen microflora of sheep offered either hay or concentrate[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 1983, 10(1): 1-14.
- [23] BRUNETTE T, BAURHOO B, MUSTAFA A F. Effects of replacing grass silage with forage pearl millet silage on milk yield, nutrient digestion, and ruminal fermentation of lactating dairy cows[J]. *J Dairy Sci*,

- 2016,99(1):269-279.
- [24] KNAPP J R, LAUR G L, VADAS P A, et al. Invited review: enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions[J]. *J Dairy Sci*, 2014, 97(6):3231-3261.
- [25] JOHNSON K A, JOHNSON D E. Methane emissions from cattle[J]. *J Anim Sci*, 1995, 73(8):2483-2492.
- [26] MILLS J A, KEBREAB E, YATES C M, et al. Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows [J]. *J Anim Sci*, 2003, 81(12):3141-3150.
- [27] ELLIS J L, KEBREAB E, ODONGO N E, et al. Prediction of methane production from dairy and beef cattle[J]. *J Dairy Sci*, 2007, 90(7):3456-3466.
- [28] RAMIN M, HUHTANEN P. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants[J]. *J Dairy Sci*, 2013, 96(4):2476-2493.
- [29] 许贵善, 刁其玉, 纪守坤, 等. 不同饲喂水平对肉用绵羊能量与蛋白质消化代谢的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2012, 48(17):40-44.
XU G S, DIAO Q Y, JI S K, et al. Effect of feeding levels on digestion and metabolism of energy and protein in sheep[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2012, 48(17):40-44. (in Chinese)
- [30] SINGH S, KUSHWAHA B P, NAG S K, et al. *In vitro* ruminal fermentation, protein and carbohydrate fractionation, methane production and prediction of twelve commonly used Indian green forages[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2012, 178(1-2):2-11.
- [31] PRUSTY S, SONTAKKE U, KUNDU S S. Methane and nitrous oxide emission from livestock manure[J]. *Afr J Biotechnol*, 2015, 13(44):4200-4207.
- [32] 承磊, 郑珍珍, 王聪, 等. 产甲烷古菌研究进展[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(5):1143-1164.
CHENG L, ZHENG Z Z, WANG C, et al. Recent advances in methanogens [J]. *Microbiology China*, 2016, 43(5):1143-1164. (in Chinese)
- [33] COTTLE D J. Use of residual feed intake as an indirect selection trait for reduction of methane emissions in grazing beef cattle[C]// AAABG. 2011:423-425.
- [34] 赵一广, 刁其玉, 刘洁, 等. 肉羊甲烷排放测定与模型估测[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(13):2718-2727.
ZHAO Y G, DIAO Q Y, LIU J, et al. Estimation and regression models of methane emissions from sheep[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(13):2718-2727. (in Chinese)
- [35] BUDDLE B M, DENIS M, ATTWOOD G T, et al. Strategies to reduce methane emissions from farmed ruminants grazing on pasture[J]. *Vet J*, 2011, 188(1):11-17.

(编辑 郭云雁)