

魏曼丽, 包美丽, 包金花, 等. 黄芪茎叶粉对肉牛体外瘤胃发酵参数、产气量及干物质消化率的影响 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (2): 193–201.

WEI M L, BAO M L, BAO J H, et al. Effect of *Astragalus Membranaceus* Straw on Cattle Rumen Digestion *In Vitro* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (2): 193–201.

黄芪茎叶粉对肉牛体外瘤胃发酵参数、产气量及干物质消化率的影响

魏曼丽^{1,2}, 包美丽¹, 包金花³, 任秀珍^{3,4}, 刘天奇⁵, 贾振伟¹, 魏曼琳^{1*}

(1. 内蒙古民族大学动物科技学院, 内蒙古 通辽 028000; 2. 通辽广播电视台, 内蒙古 通辽 028000;
3. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古 通辽 028000; 4. 内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心, 内蒙古 通辽 028000; 5. 吉林农业大学动物科学技术学院, 吉林 长春 130000)

摘要:【目的】采用人工瘤胃法研究黄芪茎叶粉对肉牛体外瘤胃发酵参数、产气量及干物质消化率的影响, 以期黄芪茎叶粉在反刍动物生产中的应用提供理论参考。【方法】试验分为玉米秸秆对照组 (CON 组) 和黄芪组 (AM 组) 两个处理, 每组 3 个重复, 分别于发酵的不同时间点 (0、1、2、3、4、5、6、7、8、10、12、14、16、20、24、28、32、36、40、44、48、56、64、72 h) 记录两组的产气量, 并在发酵 72 h 后终止发酵, 测定发酵液的 pH、氨态氮、挥发性脂肪酸和干物质消化率的变化。【结果】1) 黄芪茎叶粉极显著降低了瘤胃发酵各时间点的产气量和理论最大产气量, 但提高了发酵的产气速率 ($P < 0.01$); 2) 黄芪茎叶粉显著提高了瘤胃挥发性脂肪酸中乙酸的含量和乙酸/丙酸比值 ($P < 0.01$), 降低了氨态氮、总挥发性脂肪酸、丙酸和丁酸含量 ($P < 0.05$); 3) 黄芪茎叶粉对瘤胃 pH 和干物质消化率没有显著影响 ($P > 0.05$)。【结论】黄芪茎叶粉降低了瘤胃总产气量, 对于促进瘤胃乙酸型发酵具有一定调控作用, 具有作为反刍动物饲料和饲料添加剂应用的潜力。

关键词: 黄芪; 瘤胃; 产气量; 发酵参数; 干物质消化率

中图分类号: S823.5

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 02-0193-09

Effect of *Astragalus Membranaceus* Straw on Cattle Rumen Digestion *In Vitro*

WEI Manli^{1,2}, BAO Meili¹, BAO Jinhua³, REN Xiuzhen^{3,4}, LIU Tianqi⁵, JIA Zhenwei¹, WEI Manlin^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;
2. Tongliao Radio and Television Station, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 3. College of Agriculture, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 4. Engineering Technology Research Center of Forage Crops, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 5. College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130000, China)

Abstract: 【Objective】Effect of *Astragalus membranaceus* straw on *in vitro* rumen digestion of cattle was investigated to determine the applicability of *Astragalus membranaceus* straw in ruminant feed. 【Methods】An experiment was divided into two groups of corn stalk meal (CON group) and *Astragalus membranaceus* straw meal (AM group) with three repeats per group. Gas production in the *in vitro* fermentation at 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 56, 64, and 72 h were monitored. At 72 h, the terminal pH and contents of ammonia nitrogen, volatile fatty acids, and dry matters digestibility were measured. 【Results】(1) In AM group, the amounts of gas production at all sampling points during the fermentation were significantly reduced but the gas production rate was increased ($P < 0.01$). (2) In AM group, the acetic acid content and the acetic acid to propionic acid ratio were significantly higher ($P < 0.01$), but the contents of ammonia nitrogen,

收稿日期: 2022-06-15 初稿; 2022-10-17 修改稿

作者简介: 魏曼丽 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物营养与饲料 (E-mail: 80414165@qq.com)

* 通信作者: 魏曼琳 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 动物营养与饲料 (E-mail: weimanlin@163.com)

基金项目: 内蒙古教育厅高校科研项目 (NJZY18156); 内蒙古自治区科技计划项目 (2022YFXZ0015); 内蒙古民族大学自治区科技储备项目 (2018MDCB04); 内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心资助项目 (MDK2016024); 农业农村部农牧交错带牛羊牧繁育关键技术集成示范项目 (16210096)

total volatile fatty acid, propionic acid and butyric acid were lowered significantly ($P < 0.05$). (3) No significant differences on pH and dry matter digestibility were observed between CON and AM ($P > 0.05$). 【Conclusion】 *Astragalus membranaceus* straw decreased the total rumen gas production, and had a certain regulatory effect on rumen acetic acid fermentation, which indicated *Astragalus membranaceus* straw had the potential to be used as feed and feed additive for ruminants.

Key words: *Astragalus membranaceus*; rumen; gas production; fermentation parameters; dry matter digestibility

0 引言

【研究意义】随着畜牧业的集约化和规模化发展,动物的生产性能得到极大提高,尤其是对动物具有促生长和保健作用的饲料添加剂的使用得到了越来越多的关注。基于食品安全的角度考虑,西方发达国家很早就已经禁止在奶牛上使用抗生素类促生长制剂(AGPs),以防止奶牛胴体和牛奶中出现抗生素残留,对人类健康造成危害^[1]。欧盟从2006年1月起禁用抗生素类生长促进剂,我国也从2020年7月1日起,停止生产含有促生长类药物饲料添加剂的商品饲料。因此,寻找替代抗生素类促生长制剂的绿色天然植物添加剂和中草药制剂等日益引起人们的普遍关注,某些具有药用价值的植物原料和植物提取物对于替代抗生素、提高动物的健康和免疫水平、促进饲料营养价值的最大限度发挥、实现养殖的节本增效等具有重要的研究价值。【前人研究进展】黄芪(*Astragalus membranaceus*)属豆科植物,是中国和东南亚许多国家常用的植物药材,应用历史悠久,种植面积广。据研究,作为一种传统的药用植物,黄芪中含有100多种化合物^[2],其中含有皂苷类、多糖类、黄酮类等多种活性成分,被证明具有减少氧化损伤、利尿消肿、抗炎抗菌和增强免疫等功效^[3-7]。根据市场需求和经济适用性,黄芪可以进行批量种植,在内蒙古的种植区域也比较广泛,近年来主要集中在包头、赤峰、兴安盟等地。黄芪的根可入药,将黄芪的干燥根用溶剂提取、浓缩和纯化后得到的黄芪多糖等植物提取成分被证明具有提高动物免疫力和促进动物生产性能的作用。例如在每头奶牛日粮中每天添加10~50 g的黄芪多糖能提高泌乳牛血清总抗氧化能力^[8]。黄芪多糖、银黄联用可以有效提高新生犊牛免疫力,降低腹泻及肺炎发生率^[9]。日粮中每头牛添加5~10 g的黄芪多糖显著提高早期断奶母犊牛的采食量和日增重^[10]。在日粮中直接添加5%~8%的黄芪粉也可以提高藏羊的生长性能、肉品质和瘤胃发酵性能,并提高机体免疫力和抗氧化性能^[11]。添加黄芪超细粉显著降低了牦牛瘤胃氨态氮含量,提高了总挥发性脂肪酸

和乙酸含量,并且显著提高了发酵底物的干物质降解率,改善了瘤胃微生物的多样性^[12]。甚至添加0.5%枯草杆菌处理的发酵黄芪也能够提高断奶仔猪生长性能,降低腹泻率和提高免疫力^[13]。事实上,植物的根部收获后地上的残余部分一般是植物根部质量的几倍,由于没有得到有效利用,黄芪地上部分大多被丢弃或焚烧^[14]。黄芪茎叶产量高,价格低廉,粗蛋白含量高于玉米秸秆,粗纤维含量与玉米秸秆相近,适口性和消化率较好,具有当作反刍动物饲料或饲料添加剂开发应用的潜力。据测定,黄芪风干茎叶一般含有干物质91.42%、粗蛋白11.59%,粗纤维35.13%,粗脂肪1.62%,粗灰分3.26%,无氮浸出物37.64%^[15]。其中含有的主要活性成分为黄酮类化合物,如野黄芩苷、黄芩苷和芹菜素苷等^[16],这些植物成分对于提高动物机体免疫力和抗炎、抗氧化等具有一定潜在效用^[17,18]。研究表明,黄芪茎叶经过生物发酵后可以替代10%~50%的青贮玉米,并且提高了奶牛的产奶量,降低了奶牛乳房炎发病率和体细胞数量^[19]。60日龄的犊牛日粮中每天添加50 g黄芪茎叶增加了犊牛的体斜长和胸围,促进了生长,并且有效降低了犊牛的发病率和死亡率^[15]。【本研究切入点】前人的研究结果揭示了黄芪及其提取物对动物具有改善生长性能和提高健康水平的效果,并且在绵羊、奶牛和牦牛中的一部分研究报道也证实了黄芪及其提取物的某些有益作用,具有广阔的应用前景,但黄芪茎叶在肉牛瘤胃中的消化特性和作用机理尚不清楚。【拟解决的关键问题】本研究旨在通过人工瘤胃法研究黄芪茎叶粉对肉牛体外瘤胃发酵参数、产气量及干物质消化率的影响,以为黄芪茎叶粉作为反刍动物饲料或饲料添加剂的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用黄芪茎叶粉为通辽市科尔沁区黄芪种植园所提供的新鲜黄芪茎叶(含水量约为53%),原料经65℃烘干并粉碎过40目筛制成风干样备用。试验所用瘤胃液采集自本实验室的3头西门塔

尔杂交矮管牛，体重（500±30）kg。

1.2 瘤胃体外发酵试验

1.2.1 人工瘤胃缓冲液的配制 试验前配制人工瘤胃缓冲液，组成及比例参照 Menke 等^[20]的方法制备。将配制好的溶液按照比例依次加入培养瓶中充分混匀，并向其中通入二氧化碳（CO₂）保持厌氧并进行预热，预热温度为 39 ℃，当混合液颜色变为无色透明时停止 CO₂ 的通入。

1.2.2 人工瘤胃培养液的配制 采集 3 头西门塔尔杂交牛的瘤胃液样本，用四层纱布过滤后混合，按照体积比 1:2 的比例加入人工瘤胃缓冲液中制成人工瘤胃培养液，在 39 ℃ 下用恒温磁力搅拌器进行持续搅拌，同时通入 CO₂ 保持厌氧。

1.2.3 试验设计 采用单因素试验设计，处理分为对照组（CON group）和黄芪组（AM group），每组 3 个重复。对照组和黄芪组分别以粉碎至 40 目的玉米秸秆和黄芪茎叶粉为发酵底物，玉米秸秆和黄芪茎叶粉的主要营养成分见表 1。试验时准确称取干物质 0.2000 g 的发酵底物，加入玻璃注射器（德国 Häberle 公司生产的 100 mL 型号 HFT000025），将玻璃注射器放于 39 ℃ 恒温干燥箱中进行预热，随后在玻璃注射器内加入约 30 mL 经过 CO₂ 饱和的人工瘤胃培养液，排出注射器中的气泡后密封，对初始刻度进行记录，并在 39 ℃ 恒温水浴摇床中以 120 r·min⁻¹ 进行发酵培养。

1.2.4 发酵液样本采集及测定 分别在发酵的不同时间点（0、1、2、3、4、5、6、7、8、10、12、

14、16、20、24、28、32、36、40、44、48、56、64、72 h）记录产气量，同时，将产气量数据按照 Ørskov 和 McDonald^[21] 的模型进行分析，计算相关预测值：

$$Y = B \times (1 - e^{-ct})$$

其中，Y、B、c、t 分别表示产气量（mL）、理论最大产气量（mL）、产气速率（mL·h⁻¹）和培养时间（h）。

在发酵第 72 h 时将注射器放入冰水中终止发酵，用 50 mL 的离心管收集发酵液，立即用便携式 pH 计（型号 SX-620）测定其 pH。取 15 mL 发酵液于 4 ℃ 下 8000 r·min⁻¹ 离心 15 min 去除饲料颗粒和杂质后，取 0.5 mL 上清液加入 4.5 mL 0.2 mol·L⁻¹ 的盐酸溶液，摇匀后按照冯宗慈等^[22] 改进的比色法测定氨态氮（NH₃-N）含量。另取 1.0 mL 上清液加入 0.2 mL 含有内标物 2EB 的 25% 偏磷酸溶液混匀，于 -20 ℃ 冷冻过夜后按照 Erwin 等^[23] 的方法测定挥发性脂肪酸（VFA）含量。挥发性脂肪酸采用北京北分天普仪器技术有限公司的气相色谱仪（型号 GC-6800）测定，色谱条件：Φ6 mm×2 m 石英玻璃填充柱（固定相 15% 聚乙二醇-20M-2-硝基对苯二甲酸 FFAP，担体 80~100 目红色 硅藻土（Chromosorb），柱温 150 ℃，进样口温度 220 ℃；进样量 1 μL；FID 检测器温度 280 ℃；载气为高纯 N₂，流量 30 mL·min⁻¹，压力 200 kPa；燃气为 H₂，流量 30 mL·min⁻¹；助燃气为空气，流量 300 mL·min⁻¹。

1.2.5 干物质消化率测定 准确称取 0.5000 g 的饲料风干样于专用消化袋中（北京一牛肉牛信息技术研究中心，规格 35 mm×75 mm，孔径 38~40 μm），消化袋事先在 105 ℃ 恒重后称重记录，饲料装入消化袋后用热封机封口，放入 100 mL 专用玻璃培养管中，每个管中放 2 个消化袋，每个处理 3 个重复。玻璃培养管中加入 70 mL 人工瘤胃培养液并通入 CO₂ 保持厌氧，放入恒温水浴摇床（120 r·min⁻¹，39 ℃）发酵 72 h 后，将培养管置于冰水中终止发酵，取出消化袋用蒸馏水清洗后，在 105 ℃ 条件下烘干 12 h，称重并计算瘤胃干物质消化率。

干物质消化率/% = {[m - (m₂ - m₁ × c)]/m} × 100

其中，m 为样品的干物质重，m₁ 为空白袋重，c 为空白袋校正系数（空白袋消化烘干后重/消化前重），m₂ 为烘干后的袋+样品残渣总重。

1.3 数据处理方法

试验数据利用 Excel 2019 进行整理，采用 SAS 8.1 统计软件中的广义线性模型（GLM）进行方差分

表 1 玉米秸秆和黄芪茎叶粉中主要营养成分

Table 1 Main nutrients in corn stalk and AM

(单位: %)

指标 Items	玉米秸秆 Corn stalk	黄芪茎叶粉 <i>Astragalus membranaceus</i> straw
干物质 Dry matter	85.8	86.5
粗蛋白 Crude protein	5.9	10.9
粗脂肪 Ether extract	1.3	1.5
粗纤维 Crude fiber	35.0	30.2
粗灰分 Crude ash	7.0	3.0
无氮浸出物 Nitrogen free extract	36.6	40.8
钙 Calcium	0.35	1.43
磷 Phosphorus	0.19	0.10

析，再用 SNK-q 检验进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 黄芪茎叶粉对体外瘤胃发酵产气量的影响

对照组 (CON group) 和黄芪组 (AM group) 体外发酵 72 h 的产气量变化如图 1 所示，不同发酵阶段的产气量如表 2 所示。在发酵的前期 (0~12 h)，各组产气量数值均呈现快速爬升，为快速发酵阶段，对照组和黄芪组的产气量分别达到了理论最大产气量 (B) 的 85.4% 和 94.6%，且黄芪组在发酵 12 h 时的产气量比对照组极显著降低了 32.1% ($P<0.01$)。在发酵的中期 (24 h 和 48 h)，黄芪组产气量比对照组分别降低了 39.2% 和 38.5%，差异极显著 ($P<0.01$)。但两组的发酵产气变化规律却有所不同。由图 1 可知，对照组的产气量在 12~24 h 阶段仍有上升趋势，24 h 的产气量比 12 h 的产气量增加了 18.2%。而黄芪组 24 h 的产气量比 12 h 的产气量仅增加了 5.8%。对照组产气量在 24 h 左右才达到全程发酵的极大值，而黄芪组在 12 h 就达到了全程产气量的极大值。但此后两组的产气量均进入了变化幅度较小的“平台期”；即在发酵后期 (48~72 h) 两组均维持在相对较为恒定的产气水平，但黄芪组总产气量比对照组极显著降低了 39.3% ($P<0.01$)。通过模型预测得到两组的理论最大产气量 (B) 和产气速率 (c) (表 2)，黄芪组的理论最大产气量极显著低于对照组 ($P<0.01$)，与图 1 中所示的实际产气量的变化趋势相一致；但与对照组相比，黄芪组在发酵初期的产气速率 (c) 更快，比对照组显著增加了 29.2% ($P<0.05$)，但由于黄芪组的快速产气时间较短，因而总产气量仍然低于对照组。

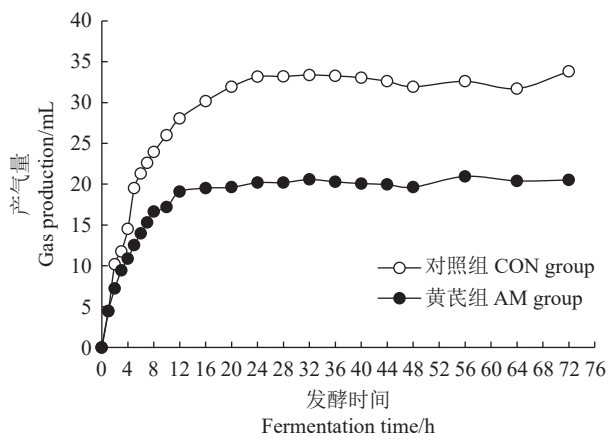


图 1 黄芪茎叶粉对瘤胃体外发酵产气量的影响
Fig. 1 Effect of AM on *in vitro* gas production

2.2 黄芪茎叶粉对体外瘤胃发酵 pH、氨态氮和干物质消化率的影响

黄芪组和对照组发酵 72 h 后体外瘤胃发酵液的

表 2 黄芪茎叶粉对产气量模型参数的影响
Table 2 Effects of AM on parameters of gas production model

指标 Items	对照组 CON group	黄芪组 AM group
12 h 产气量 Gas production in 12 hours / mL	28.07±1.65 A	19.07±1.35 B
24 h 产气量 Gas production in 24 hours / mL	33.17±1.65 A	20.17±1.35 B
48 h 产气量 Gas production in 48 hours / mL	31.90±2.00 A	19.63±1.65 B
72 h 产气量 Gas production in 72 hours / mL	33.80±4.30 A	20.53±2.35 B
理论最大产气量 B Theoretical maximum gas production / mL	32.84±2.05 A	20.16±1.98 B
产气速率 c Gas generation rate / (mL·h ⁻¹)	0.16±0.01 b	0.21±0.02 a

表中同行数据后不同大、小写字母表示处理之间差异极显著 ($P<0.01$) 或显著 ($P<0.05$)，相同字母或无字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。

In the table, different capital shoulder letters in the table indicate significant differences between groups ($P<0.01$), different lowercase letters showed significant difference ($P<0.05$), the same letter or no shoulder letters indicates no significant difference ($P>0.05$), the same as below.

pH 和氨态氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 含量 (表 3) 都在瘤胃正常范围内 (6.90~7.02)，且两组 pH 和干物质消化率均没有显著差异 ($P>0.05$)；但黄芪组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 比对照组显著降低了 34.6% ($P<0.05$)。

表 3 黄芪茎叶粉对瘤胃发酵液 pH、氨态氮和干物质消化率的影响
Table 3 Effects of AM on rumen pH, ammonia nitrogen, and dry matter digestibility *in vitro*

指标 Items	对照组 CON group	黄芪组 AM group
pH	6.90±0.10	7.02±0.01
氨态氮 Ammonia Nitrogen / (mg·dL ⁻¹)	21.70±1.23 a	14.20±4.24 b
干物质消化率 Dry matter digestibility/%	63.88±6.46	58.00±0.82

2.3 黄芪茎叶粉对瘤胃挥发性脂肪酸的影响

黄芪组和对照组体外发酵 72 h 后的挥发性脂肪酸 (VFA) 含量见表 4。结果表明，黄芪组的总挥发酸 (TVFA)、丙酸和丁酸含量分别比对照组显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 降低了 44.1%、7.7% 和 26.0%，而乙酸和乙酸/丙酸极显著增加了 7.1% 和 14.6% ($P<0.01$)；二者戊酸、异丁酸、异戊酸含量差异均不显著 ($P>0.05$)。

表 4 黄芪茎叶粉对体外瘤胃挥发性脂肪酸的影响
Table 4 Effects of AM on rumen volatile fatty acids *in vitro*

指标 Item	对照组 CON group	黄芪组 AM group
总挥发酸 Total volatile acid/ (mmol·L ⁻¹)	28.33±0.74 a	15.83±0.35 b
乙酸 Acetate/%	65.03±0.40 B	69.63±0.30 A
丙酸 Propionic acid/%	19.17±0.10 A	17.70±0.17 B
丁酸 Butyrate/%	12.30±0.20 A	9.10±0.06 B
戊酸 Valerate/%	0.90±0.25	0.77±0.06
异丁酸 Isobutyrate/%	0.87±0.56	1.07±0.10
异戊酸 Isovalerate/%	1.80±0.06	1.80±0.06
乙酸/丙酸 The ratio of acetate acid to propionic acid	3.43±5.35 B	3.93±5.47 A

3 讨论与结论

3.1 黄芪茎叶粉对瘤胃产气量的影响

反刍动物的瘤胃具有很强的降解纤维物质的能力，被称为“天然发酵罐”。二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和氢气（H₂）是体外瘤胃发酵产生的主要气体，产气量可以反映瘤胃中微生物的活动和饲料的降解率^[24]。在体外发酵的过程中，产气量能够反映牧草及饲料在瘤胃微生物作用下发酵的动态变化，不同饲料底物的营养成分造成了产气量的差异。底物中的淀粉（Starch）和糖类（Saccharides）属于快速降解成分，含量越高则产气速度越快，总产气量也较高；而中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）和木质素（Lignin）等结构性碳水化合物属于缓慢降解成分，NDF 含量以及 NDF 与淀粉等无氮浸出物的比值含量越高则产气量和产气速率越慢^[25,26]。而粗蛋白（CP）含量也与产气量有一定正相关^[27]。本试验中，相比玉米秸秆，黄芪茎叶粉的粗纤维含量更低而粗蛋白和无氮浸出物含量更高，尽管发酵前期产气速率显著提高了，但却没有获得更高的产气量。说明除了受到底物中的 NDF、粗蛋白和无氮浸出物含量影响以外，瘤胃发酵还受到了其他因素的影响。研究表明，一些植物提取物和次生代谢产物可以通过影响瘤胃微生物的组成和活性而影响瘤胃产气等发酵特性^[28,29]。黄芪是传统的中草药，其茎叶中含有许多植物次生代谢产物，如黄酮类、皂甙类和黄芪多糖等 17 种化合物^[30]，其中，黄

酮类物质被证明具有降低瘤胃产气量的作用，这种作用可能与其对产甲烷菌的抑制有关^[31,32]；另一方面，皂甙类被证明对瘤胃原虫具有抑制作用^[33]，原虫数量的减少也会在一定程度上降低瘤胃甲烷产量^[34]；此外，黄芪多糖也可以降低牛和山羊的瘤胃原虫数量^[35]，也会在一定程度上降低瘤胃产气。本试验的结果也表明，黄芪组在各个时间点的发酵产气量以及预测最大产气量均比玉米秸秆降低 30%~40%。这可能与黄芪茎叶粉中含有的抑制甲烷产生的植物成分有关，但由于本试验中没有测定气体成分，因而是否由于甲烷产量的降低导致这一结果还有待于进一步研究证实。

3.2 黄芪茎叶粉对瘤胃干物质消化率的影响

干物质消化率能够反映饲料在发酵体系中被瘤胃微生物降解的程度，干物质消化率也是保证反刍动物饲料营养价值实现的前提。研究表明，动物饲料中添加黄芪对采食量和干物质消化率均有促进作用^[36]。例如在羊饲料中添加黄芪和白芷等复合物使羊的能量代谢和生长性能提高^[37]。在奶牛日粮添加柴胡、黄芪、陈皮和山楂等中草药添加剂对奶牛的干物质采食量和干物质消化率起到了促进作用^[38]。体外试验的研究也发现，添加黄芪后各时间点的饲料瘤胃消化率均高于对照组^[12]。这些结果可能与黄芪相对较低的纤维含量和相对较高的粗蛋白含量有关，也可能与植物源性饲料添加剂对于反刍动物瘤胃和后肠微生物区系的调控以及肠道健康有关。研究表明，植物源性饲料添加剂可以增加动物肠绒毛长度、促进肠道发育和改善肠道菌群^[39-41]。某些药用植物中含有的次生代谢产物，也可能对营养物质消化率的提高有促进作用^[42-44]。此外，肠前消化能力的提高可以降低可发酵物质进入后肠的流量^[45]，从而保障后肠健康和提高营养物质总体消化率。本试验中黄芪组的干物质消化率与对照组差异不显著（*P*>0.05），这之前部分研究结果不完全一致，原因可能与黄芪的添加方式有关，之前的研究多在基础日粮中添加黄芪，或将黄芪与其他药用植物复合添加，消化底物的营养成分（例如淀粉、粗蛋白等）比例相对适宜，有利于瘤胃微生物的生长代谢，而本研究采用黄芪茎叶粉作为唯一发酵底物，营养的均衡性可能不如配合日粮，因而表观消化率相对于对照组并没有显著提高。

3.3 黄芪茎叶粉对瘤胃 pH、氨态氮浓度的影响

反刍动物的瘤胃是一个动态的微生物生态系统，大量微生物如细菌、真菌、原生动物、古细菌和病毒等在其中定殖和流动，共同形成一个动态的稳恒体

系。饲料中的淀粉和纤维被瘤胃微生物分解成挥发性脂肪酸 VFA 的过程,使瘤胃 pH 降低,而饲料中的蛋白质和含氮物质被瘤胃微生物转化成氨则使 pH 升高,因而瘤胃的 pH 与发酵底物的营养成分以及瘤胃微生物的活动密切相关^[45]。随着饲料在瘤胃的消化和降解,瘤胃 pH 在 5.5~7.5 呈现周期性波动,这是瘤胃微生物相对适宜的酸度范围,有利于瘤胃微生物对饲料中 NDF 和 ADF 的降解、提高纤维类饲料的消化率和挥发性脂肪酸的生成。研究表明,某些中草药饲料添加剂具有调控瘤胃 pH 和平衡瘤胃微生态环境的作用,例如在绵羊饲料中添加 15% 的黄芪副产物显著提高了瘤胃液的 pH,使绵羊瘤胃液 pH 达到了最佳范围^[46]。本试验结果也表明,瘤胃发酵 72 h 后两组 pH 都在正常范围内(6.90~7.02),说明黄芪茎叶粉在瘤胃发酵的过程中,能够维持瘤胃 pH 的相对稳定^[47]。

氨态氮是蛋白质代谢的终产物,也是瘤胃微生物蛋白质合成的主要原料之一。与单胃动物不同,反刍动物可以利用瘤胃中含有的大量厌氧微生物将饲料分解成小分子营养物质,也可以吸收和利用一部分非蛋白氮(NPN)合成菌体蛋白,从而提高饲料氮源的利用效率。饲料中的含氮物质和瘤胃微生物内源性含氮物质的分解是瘤胃氨态氮的主要来源。研究表明,黄芪或黄芪多糖能提高绵羊瘤胃内蛋白质的水解能力,向瘤胃微生物提供更多的氮源,并且促进蛋白的发酵和减少瘤胃壁转运,从而提高氮在瘤胃中的利用效率,降低饲料蛋白质的浪费^[37,46]。另一方面,有研究认为黄芪副产物中含有的少量黄芪皂苷能够调控瘤胃发酵功能,减少甲烷排放量和提高氮代谢率^[48]。本试验中黄芪组的氨态氮浓度显著降低($P<0.05$),这与之前的某些研究结果不一致,可能与底物配方构成和黄芪或副产物中的皂甙或多糖等次生代谢产物的含量差异有关,这部分还需要更多的研究加以证实。

3.4 黄芪茎叶粉对瘤胃挥发性脂肪酸含量的影响

反刍动物瘤胃中大量的微生物能够将饲料中难以利用的纤维基质分解成动物可利用的糖类,并最终转化为挥发性脂肪酸(VFA)^[49],动物所需 70%~80% 的能量是从挥发性脂肪酸中获取的。研究表明,向牦牛瘤胃发酵液中添加黄芪超细粉时,其瘤胃内总挥发酸、乙酸/丙酸值和 pH 均有所提高^[12]。一方面是由于黄芪中的多糖给瘤胃微生物提供了营养,使得微生物菌群如琥珀酸弧菌更加活跃,从而使乙酸产量增加^[12]。另一方面,某些中草药添加剂中所含有的多糖、挥发油和甙类等也可能抑制了原

虫的生长,从而有利于纤维分解菌增殖,使乙酸产量增加。此外,乙酸产量的增加与瘤胃 pH 的变化也有一定关系,当瘤胃 pH 达到微生物最适范围时,瘤胃中产生乙酸会更多,并且可以进一步提高奶牛的产奶量、乳脂率和饲料转化效率^[50]。本试验中黄芪组乙酸含量和乙酸/丙酸比值也出现了极显著增加($P<0.01$),这与之前的研究结果一致。当乙酸/丙酸大于 3 时,瘤胃发酵模式为乙酸型发酵,该模式可以有效提高能量利用率,黄芪茎叶粉可能对于提高奶牛产奶量和乳脂率具有良性的调控作用。与此同时,本试验中黄芪茎叶粉使得瘤胃总挥发酸产量显著降低($P<0.05$),这可能与黄芪茎叶粉中相对较低的纤维物质含量有关;而丙酸和丁酸比例的显著下降,则与乙酸比例的升高或者瘤胃微生物区系的变化有关,这部分还有待于进一步研究证实。

综上所述,在体外发酵条件下,黄芪茎叶粉极显著降低了瘤胃发酵各时间点的产气量和理论最大产气量,提高了发酵的产气速率($P<0.01$);显著提高了瘤胃挥发性脂肪酸中乙酸的含量和乙酸/丙酸比值($P<0.01$),降低了氨态氮、总挥发酸、丙酸和丁酸含量($P<0.05$);但对瘤胃 pH 和干物质消化率没有显著影响($P>0.05$)。黄芪茎叶粉对于促进瘤胃进行乙酸型发酵具有一定调控作用,具有作为反刍动物饲料添加剂应用的潜力。

参考文献:

- [1] MCGUFFEY R K, RICHARDSON L F, WILKINSON J I D. Ionophores for dairy cattle: Current status and future outlook [J]. *Journal of Dairy Science*, 2001, 84: E194-E203.
- [2] WANG X J, DING L M, WEI H Y, et al. *Astragalus membranaceus* root supplementation improves average daily gain, rumen fermentation, serum immunity and antioxidant indices of Tibetan sheep [J]. *Animal*, 2021, 15 (1): 100061.
- [3] 谢静, 龚易昕悦, 丁立生, 等. 黄芪及其活性成分对脓毒症临床和药理作用的研究进展 [J]. *中草药*, 2021, 52 (8): 2502-2510.
XIE J, GONG Y X Y, DING L S, et al. Progress in clinical and pharmacological studies of *Astragali Radix* and its active components against sepsis [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52 (8): 2502-2510. (in Chinese)
- [4] HUANG H, LUO S H, HUANG D C, et al. Immunomodulatory activities of proteins from *Astragalus membranaceus* waste [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99 (8): 4174-4181.
- [5] 张王宁, 高耀, 李科, 等. 基于网络药理学的黄芪总黄酮治疗肾病综合征的机制研究 [J]. *药学报*, 2018, 53 (9): 1429-1441.
ZHANG W N, GAO Y, LI K, et al. Exploration into the mechanism of total flavonoids of *Astragali Radix* in the treatment of nephrotic

- syndrome based on network pharmacology [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2018, 53 (9): 1429-1441. (in Chinese)
- [6] 李紫岩, 朱寿东, 刘澜波, 等. 内蒙古道地药材蒙古黄芪生态适宜性区划研究 [J]. 中国农业科技导报, 2021, 23 (2): 170-176.
- LI Z Y, ZHU S D, LIU L B, et al. Research on the ecological suitability division of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) bge. var. *mongholicus* (Bge.) P. K. Hsiao in Inner Mongolia [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23 (2): 170-176. (in Chinese)
- [7] ZHANG J Q, XIE X S, LI C, et al. Systematic review of the renal protective effect of *Astragalus membranaceus* (root) on diabetic nephropathy in animal models [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2009, 126 (2): 189-196.
- [8] 申义君, 周金伟, 王斌, 等. 黄芪多糖对泌乳期奶牛抗氧化能力的影响 [J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26 (2): 244-247.
- SHEN Y J, ZHOU J W, WANG B, et al. Effects of *Astragalus* polysaccharides on the activity of antioxidant enzyme in lactating Holstein cows [J]. *Natural Product Research and Development*, 2014, 26 (2): 244-247. (in Chinese)
- [9] 郭思凡, 曹杰. 黄芪多糖、银黄联用对新生犊牛免疫力及发病的影响 [J]. 中国乳业, 2021 (10): 61-66.
- GUO S F, CAO J. Effects of *Astragalus* polysaccharide combined with Yinhuang soluble powder on immunity and diseases in neonatal calves [J]. *China Dairy*, 2021 (10): 61-66. (in Chinese)
- [10] 王义翠, 刘延鑫, 孙宇, 等. 不同水平黄芪多糖对早期断奶犊牛生长性能及抗氧化能力的影响 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018 (20): 151-153, 156.
- WANG Y C, LIU Y X, SUN Y, et al. Effects of different levels of *Astragalus* polysaccharides on growth performance and antioxidant capacity in early weaned calves [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018 (20): 151-153, 156. (in Chinese)
- [11] 王宪举. 饲喂黄芪对藏羊生长、生理代谢和肉品质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- WANG X J. The effect of supplementing *Astragalus membranaceus* on growing performance, physiological metabolism and meat quality of Tibetan sheep[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [12] 魏海燕, 王宪举, 闫琦, 等. 添加黄芪超细粉和抗生素对瘤胃体外发酵的影响 [J]. 家畜生态学报, 2020, 41 (7): 23-30.
- WEI H Y, WANG X J, YAN Q, et al. Effect of *Astragalus* superfine powder and antibiotics on *in vitro* rumen fermentation [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2020, 41 (7): 23-30. (in Chinese)
- [13] 郭丹丹, 孔庆娟, 申子平. 枯草芽孢杆菌发酵黄芪对断奶仔猪生长性能和血液指标的影响 [J]. 饲料研究, 2019, 42 (3): 91-94.
- GUO D D, KONG Q J, SHEN Z P. Effects of *Bacillus subtilis* fermented astragalus on growth performance and blood biochemical indices of weaned piglets [J]. *Feed Research*, 2019, 42 (3): 91-94. (in Chinese)
- [14] 张国庆. 黄芪茎叶的利用研究 [J]. 天津药学, 2010, 22 (5): 5-7.
- ZHANG G Q. Investigation of active ingredients from roots and stem Leaves of *Astragalus mongholicus* Bunge [J]. *Tianjin Pharmacy*, 2010, 22 (5): 5-7. (in Chinese)
- [15] 李伟, 赵金波, 孟维珊, 等. 黄芪茎叶对犊牛生长影响的研究 [J]. 现代畜牧科技, 2022 (3): 14-15, 59.
- LI W, ZHAO J B, MENG W S, et al. Effect of *Astragalus membranaceus* stems and leaves on calf growth [J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2022 (3): 14-15, 59. (in Chinese)
- [16] 朱正兰, 江蔚新. 黄芪地上部分有效成分研究 [J]. 黑龙江医药, 2004, 17 (6): 417-419.
- ZHU Z L, JIANG W X. Study on the effective components in the overground organ of membranaceus [J]. *Heilongjiang Medical Journal*, 2004, 17 (6): 417-419. (in Chinese)
- [17] 佟继铭, 陈光晖, 刘玉玲, 等. 黄芩茎叶总黄酮对家兔实验性动脉粥样硬化的预防作用 [J]. 中草药, 2005, 36 (1): 93-95.
- TONG J M, CHEN G H, LIU Y L, et al. Preventive effect of total flavonoids from stems and leaves of *Scutellaria baicalensis* Georgi on experimental atherosclerosis in rabbits [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2005, 36 (1): 93-95. (in Chinese)
- [18] LI Y, GUO S, ZHU Y, et al. Flowers of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* as a novel high potential by-product: Phytochemical characterization and antioxidant activity [J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2019, 24 (3): 434.
- [19] 周庆民, 张艳, 徐馨, 等. 黄芪茎叶生物发酵物对奶牛应用效果的试验研究 [J]. 中国乳业, 2016 (9): 32-35.
- ZHOU Q M, ZHANG Y, XU X, et al. Experimental study on application effect of biological fermentation products of *Astragalus membranaceus* stems and leaves on dairy cows [J]. *China Dairy*, 2016 (9): 32-35. (in Chinese)
- [20] 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 (1): 217-222.
- [21] 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.
- [22] 冯慈慈, 高民. 通过比色测定瘤胃液氨氮含量方法的改进 [J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31 (S1): 37.
- FENG Z C, GAO M. Improvement of determination of ammonia nitrogen content in rumen fluid by colorimetric method [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 31 (S1): 37. (in Chinese)
- [23] ERWIN E S, MARCO G J, EMERY E M. Volatile fatty acid analyses of blood and rumen fluid by gas chromatography [J]. *Journal of Dairy Science*, 1961, 44 (9): 1768-1771.
- [24] 王芳, 徐元君, 牛俊丽, 等. 体外产气法评价反刍动物饲料营养价值的研究 [J]. 中国畜牧兽医, 2016, 43 (1): 76-83.
- WANG F, XU Y J, NIU J L, et al. Nutrient value evaluation of different type feeds by *in vitro* gas production method [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2016, 43 (1): 76-83. (in Chinese)
- [25] 付瑶, 史仁煌, 王雅晶, 等. 体外法研究不同水平中性洗涤纤维日粮

- 对泌乳高峰期奶牛瘤胃发酵和产气量的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52 (7): 46-50.
- FU Y, SHI R H, WANG Y J, et al. Effects of NDF level in diet on rumen fermentation and gas production *in vitro* during peak lactation period of dairy cows [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52 (7): 46-50. (in Chinese)
- [26] 朱丹, 张佩华, 赵勤, 等. 不同中性洗涤纤维与淀粉比例饲粮对体外瘤胃发酵的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27 (8): 2580-2588.
- ZHU D, ZHANG P H, ZHAO M, et al. Effects of different neutral detergent fiber to starch ratio diets on rumen fermentation *in vitro* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27 (8): 2580-2588. (in Chinese)
- [27] 马艳艳, 成艳芬, 朱伟云. 体外发酵法评价不同产地、不同茬次苜蓿的营养价值[J]. 动物营养学报, 2014, 26 (8): 2421-2432.
- MA Y Y, CHENG Y F, ZHU W Y. Different origins and stubbles of alfalfa: Evaluation of nutritional value by an *in vitro* fermentation method [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26 (8): 2421-2432. (in Chinese)
- [28] 毕思思. 黄芪属植物对牦牛与黄牛体外发酵特征的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- BI S S. Effects of *Astragalus* plants on *in vitro* fermentation characteristics of yak and cattle[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (in Chinese)
- [29] 张芮铭, 田可, 何天乐, 等. 植物提取物对高精料饲粮下反刍动物瘤胃功能、微生物区系和炎症反应的调控效果[J]. 动物营养学报, 2020, 32 (1): 36-41.
- ZHANG R M, TIAN K, HE T L, et al. Regulation effects of plant extracts on rumen function, microflora and inflammatory response in ruminants under high-concentrate diet [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32 (1): 36-41. (in Chinese)
- [30] 毕小凤. 黄芪茎叶主要化学成分及其部分药理作用研究[D]. 太原: 山西中医药大学, 2017.
- BI X F. Studies on chemical constituents and pharmacological effects of stem leaf of *Astragalus membranaceus*[D]. Taiyuan: Shanxi University of Traditional Chinese Medicine, 2017. (in Chinese)
- [31] 曹洪志, 李成贤, 李雪梅, 等. 竹叶提取物对肉牛生产性能、瘤胃发酵特征及微生物数量的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45 (1): 15-19.
- CAO H Z, LI C X, LI X M, et al. Effects of bamboo leaf extract on production performance, rumen fermentation characteristics and rumen microbial populations of beef cattle [J]. *Feed Research*, 2022, 45 (1): 15-19. (in Chinese)
- [32] 杨鼎, 晔蕾罕, 李长青, 等. 槲皮素等类黄酮对瘤胃微生物影响研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2020, 41 (6): 32-36, 45.
- YANG D, YE R H, LI C Q, et al. Research advances on the effects of quercetin and other flavonoids on rumen microorganisms [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2020, 41 (6): 32-36, 45. (in Chinese)
- [33] WINA E. Saponins: Effects on Rumen Microbial Ecosystem and Metabolism in the Rumen[M]//PATRA A. Dietary Phytochemicals and Microbes. Dordrecht: Springer, 2012: 311-350.
- [34] 焦阳, 叶均安. 皂甙调控反刍动物瘤胃发酵和生产性能的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2015, 51 (9): 72-76.
- JIAO Y, YE J A. Regulation of saponins on rumen fermentation and productive performance in ruminants [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2015, 51 (9): 72-76. (in Chinese)
- [35] 张清月. 诺丽果多糖对绒山羊瘤胃发酵、营养物质消化、免疫及抗氧化功能的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- ZHANG Q Y. Effects of noni fruit polysaccharide on rumen fermentation, nutrient digestion, immunity and antioxidation in Cashmere goats[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [36] 魏海燕. 饲喂黄芪对断乳牦牛犊生长和生理代谢的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- WEI H Y. The effect of supplementing *Astragalus* to weaned yak calves on growth performance and physiological metabolism[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [37] LIANG X, YAMAZAKI K, KAMRUZZAMAN M, et al. Effects of Chinese herbal medicine on plasma glucose, protein and energy metabolism in sheep [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2013, 4 (1): 51.
- [38] 祛群, 宝拉日, 海林, 等. 中草药添加剂对奶牛干物质采食量和瘤胃发酵的影响[J]. 中国饲料, 2018 (18): 38-42.
- HU Q, BAO L R, HAI L, et al. Effects of herbal additives on dry matter intake and rumen fermentation in dairy cows [J]. *China Feed*, 2018 (18): 38-42. (in Chinese)
- [39] 邓必贤, 邓文琼, 李健, 等. 黄芪超微粉对三黄鸡小肠绒毛形态结构、肠内容物消化酶活性和盲肠菌群的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2014, 43 (6): 616-621.
- DENG B X, DENG W Q, LI J, et al. Effects of *Astragalus* ultramicro powder on the small intestinal villus structure, intestinal contents activities of digestive enzymes and cecum microflora of three yellow broilers [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2014, 43 (6): 616-621. (in Chinese)
- [40] NAMKUNG H, LI J GONG M, YU H, et al. Impact of feeding blends of organic acids and herbal extracts on growth performance, gut microbiota and digestive function in newly weaned pigs [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2004, 84 (4): 697-704.
- [41] 冯士彬, 程连平, 舒迎霜, 等. 黄芪多糖对湖羊羔羊生长性能、血清指标、消化功能和直肠菌群的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35 (1): 122-129.
- FENG S B, CHENG L P, SHU Y S, et al. Effect of astragalus polysaccharide on growth performance, serum indices, digestive function and rectum flora of Hu lambs [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35 (1): 122-129. (in Chinese)
- [42] ZHOU T X, ZHANG Z F, KIM I H. Effects of dietary *Coptis chinensis* herb extract on growth performance, nutrient digestibility, blood characteristics and meat quality in growing-finishing pigs [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26 (1): 108-115.
- [43] LIU C, QU Y H, GUO P T, et al. Effects of dietary supplementation with alfalfa (*Medicago sativa* L.) saponins on lamb growth performance, nutrient digestibility, and plasma parameters [J]. *Animal*

- Feed Science and Technology*, 2018, 236: 98–106.
- [44] EL-ASHRY M A, EL-BORDENY N E, KHATTAB H M, et al. Effect of dietary supplemented with medicinal herbs on nutrient digestibility and some blood metabolites of buffalo calves [J]. *Egyptian Journal of Nutritional and Feeds*, 2006, 9 (2) : 179–191.
- [45] SEKIROV I, RUSSELL S L, ANTUNES L C, et al. Gut microbiota in health and disease [J]. *Physiological Reviews*, 2010, 90 (3) : 859–904.
- [46] ABDALLAH A, ZHANG P, ABUBAKARI A H, et al. Reclamation of *Astragalus* by-product through dietary inclusion in ruminant diets: Effects on growth performance, nutrient digestibility, rumen fermentation, blood biochemical parameters, and humoral immune response in sheep [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine:ECAM*, 2019, 2019: 8530961.
- [47] 顾小卫, 赵国琦, 金晓君, 等. 中草药添加剂对奶牛干物质采食量及瘤胃内环境的影响 [J]. *中国奶牛*, 2010 (4) : 18–21.
- GU X W, ZHAO G Q, JIN X J, et al. Effects of feeding herbal additives on dry matter intake and the ruminal environment in dairy cows [J]. *China Dairy Cattle*, 2010 (4) : 18–21. (in Chinese)
- [48] 王小晶. 不同日粮中添加酸化剂、植物提取物和中草药对山羊体外发酵及甲烷产量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- WANG X J. Effects of acidifiers, plant extracts and Chinese herbal medicine on in vitro rumen fermentation and methane emission in goats[D]. Chongqing: Southwest University, 2009. (in Chinese)
- [49] HOLMES E, LI J, MARCHESI J, et al. Gut microbiota composition and activity in relation to host metabolic phenotype and disease risk [J]. *Cell Metabolism*, 2012, 16 (5) : 559–564.
- [50] 郭晨阳. 植物复合提取物对奶牛瘤胃发酵、产奶性能和细菌区系的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- GUO C Y. Effects of compound plant extracts on rumen fermentation, milk production performance and bacterial flora in dairy cows[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. (in Chinese)

(责任编辑: 张梅)