

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0607

冉福, 雷赵民, 焦婷, 程强, 赵生国, 高雪梅, 李昌宁. 汽爆处理对玉米—小麦型混合秸秆营养品质的影响. 草业科学, 2019, 36(3): 878-887.

RAN F, LEI Z M, JIAO T, CHENG Q, ZHAO S G, GAO X M, LI C N. Effect of steam explosion treatments on nutritional quality of corn-wheat mixed straw. Pratacultural Science, 2019, 36(3): 878-887.

汽爆处理对玉米—小麦型混合秸秆 营养品质的影响

冉 福^{1,2}, 雷赵民², 焦 婷¹, 程 强³, 赵生国², 高雪梅¹, 李昌宁¹

(1. 甘肃农业大学草业学院 / 草业生态系统教育部重点实验室 / 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学动物科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省平凉市灵台县康庄牧业有限公司, 甘肃 平凉 744400)

摘要: 为研究汽爆工艺作为秸秆饲料化预处理技术的可行性, 本研究以经采食后残余黄贮玉米 (*Zea mays*) 秸秆与小麦 (*Triticum aestivum*) 秸秆 (7:3 混合) 为原料, 进行蒸汽破壁处理。通过测定汽爆前和汽爆后不同时间段 (0、24 和 120 h) 饲草的常规养分、CNCPS 组分、体外产气量及物态结构等, 对秸秆的营养价值进行综合评价。结果表明, 1) 汽爆后不同放置时段混合秸秆的粗脂肪 (EE)、酸性洗涤不溶蛋白 (ADIP)、中性洗涤不溶蛋白 (NDIP)、单糖 (ESC)、可溶性蛋白 (SP)、总挥发性脂肪酸 (VFA) 和钙 (Ca) 含量较汽爆前显著增加 ($P < 0.05$), 干物质 (DM)、中性洗涤纤维 (NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF)、木质素 (ADL)、淀粉 (CB₁) 和磷 (P) 含量则显著下降 ($P < 0.05$); 2) CNCPS 评价体系中, 汽爆处理组碳水化合物 (CHO)、淀粉、可溶性纤维 (CB₂)、不可消化纤维 (CC) 难溶性真蛋白 (PB₁) 和纤维结合蛋白 (PB₂) 含量显著低于未汽爆组 ($P < 0.05$); 非纤维性碳水化合物 (NFC)、挥发性脂肪酸 (CA₁)、乳酸 (CA₂)、水溶性碳水化合物 (CA₄)、氨 (PA₁)、可溶性真蛋白 (PA₂) 和非降解蛋白质 (PC) 与未汽爆组相比, 汽爆后各时段均显著升高 ($P < 0.05$); 其他有机酸 (CA₃) 和可溶性纤维 (CB₂) 检测结果为 0.00, 汽爆前后基本没有变异; 3) 汽爆处理能够消除部分秸秆抗消化物质, 增大微生物单位接触面积, 提高产气量和消化率, 显著增加玉米及小麦混合秸秆相对饲喂价值 ($P < 0.05$); 4) 扫描电镜结果表明, 汽爆处理后玉米秆、穗皮中纤维键断开, 叶肉部分细胞壁破坏, 只剩丝状叶脉或难破壁的丝状木质素, 纤维和纤维束变得卷曲柔软, 且卷曲程度增加。综上, 汽爆处理可明显改变混合秸秆饲料理化特性, 显著提高其营养价值及饲喂品质; 且汽爆后短时间内营养物质不会流失, 是一种经济有效的农作物秸秆预处理方法。

关键词: 玉米秸秆; 汽爆技术; 营养成分; CNCPS; 体外产气; 纤维结构

中图分类号: S816.11; S816.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)03-0878-10

Effect of steam explosion treatments on nutritional quality of corn-wheat mixed straw

RAN Fu^{1,2}, LEI Zhaomin², JIAO Ting¹, CHENG Qiang³, ZHAO Shengguo², GAO Xuemei¹, LI Changning¹

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University / Key Laboratory of Grassland Ecosystem / China-US Grassland Animal Husbandry Sustainable Development Research Center / Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

3. Lingtai County, Gansu Province, Kangzhuang Animal Husbandry Co., Ltd., Pingliang 744400, Gansu, China)

Abstract: To determine the effects of steam explosions on straw feed processing, corn straw silage residue after feeding and

收稿日期: 2018-11-01 接受日期: 2019-01-15

基金项目: 玉米秸秆饲用化汽爆破壁发酵关键技术研究示范项目 (20180408); 甘肃省现代草食畜产业技术体系 (GARS-CS-4) 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (201003019、201503134、201303059); 现代农业产业技术体系 (CARS-40-09B)

第一作者: 冉福 (1994-), 男, 甘肃会宁人, 在读硕士生, 研究方向为动物营养。E-mail: Ranfu1907@163.com

通信作者: 焦婷 (1976-), 女, 副教授, 硕士, 博士, 研究方向为草食动物营养。E-mail: jiaot@gau.edu.cn

wheat straw (7 : 3 mixed) were used as test materials. The nutritional value of straw products was evaluated by measuring the conventional nutrients, CNCPS components, gas production in vitro, and physical structure of straw before a steam explosion and at different times (0, 24, and 120 h) after the explosion. We found that crude fat (EE), acid detergent insoluble protein (ADIP), neutral detergent insoluble protein (NDIP), monosaccharide (ESC), soluble protein (SP), total volatile fatty acid (VFA), and calcium (Ca) of mixed straw at different times after the steam explosion were significantly higher than before the steam explosion ($P < 0.05$). In contrast, dry matter (DM), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), lignin (ADL), starch, and phosphorus (P) content were significantly ($P < 0.05$) lower than before the steam explosion. The CNCPS component, CHO, starch (CB_1), soluble fiber (CB_3), non-digestible fiber (CC), insoluble true protein (PB_1), and fiber-binding protein (PB_2) in the steam explosion group were significantly lower than those in the control ($P < 0.05$). However, non-fibrous carbohydrate (NFC), volatile fatty acid (CA_1), lactic acid (CA_2), water-soluble carbohydrate (CA_4), ammonia (PA_1), soluble true protein (PA_2), non-degraded protein (PC), and soluble true protein (PA_2) were significantly higher than those in the control ($P < 0.05$). Steam explosions could eliminate some anti-digestion materials in straw, increase the contact unit area for microbial activity, gas production, dry matter digestibility, and the relative feeding value (RFV) of corn-wheat straw ($P < 0.05$). Scanning electron microscopy (SEM) showed that the fiber bonds in corn stalks and panicle skin were broken, the cell wall of the mesophyll was destroyed, only the filamentous veins and filamentous lignin, which were difficult to break, remained, and fibers and fiber bundles became soft and curled after steam explosion treatments. Thus, steam explosions used could significantly change straw's physical and chemical properties and improve its nutritional value and feeding quality. It is a very effective way to treat straw so that it can be used as feed.

Keywords: corn straw; steam explosion technology; nutrient composition; CNCPS; in vitro gas production; fiber structure

Corresponding author: JIAO Ting E-mail: jiaot@gsau.edu.cn

随着我国经济快速发展,畜产品产量的快速增长带动中国饲料粮需求量不断上升^[1],为解决人畜争粮矛盾,提高饲料转化率,节约成本,农作物副产品——秸秆作为家畜饲料利用已经成为当前研究热点。我国拥有丰富的农作物秸秆资源,秸秆综合利用不仅可以减少传统秸秆焚烧带来的环境污染,而且有利于生态建设和保护,缓解资源紧张压力。在畜牧业生产实践中,未经处理的农作物秸秆适口性差、营养品质低、消化利用率低^[2],资源浪费大。传统秸秆资源的加工方法有物理法(粉碎、铡短、浸泡等)、化学法(氨化、碱化等)和微生物法(青贮、微贮等),氨化和碱化因其影响秸秆饲料适口性未被广泛应用,而青贮则因其能较好地保存饲料原料的营养价值及低成本近几年被广泛推广^[3-5]。如二茬苜蓿(*Medicago sativa*)与玉米(*Zea mays*)秸秆混贮,不仅可以提高青贮保存性能,而且可以提高青贮品质、显著降低丁酸含量^[6]。但对于农作物副产品秸秆或秕壳,黄贮并不能很好地改善其营养品质,在饲喂家畜后,会有大量的秸秆因牛羊的捡食挑食遗弃而被浪费。

汽爆(蒸汽爆破)工艺是一种物理化学结合的方

法,是将作物秸秆等原料铡碎后传送至汽爆腔中,通入饱和水蒸汽加压至一定压力,保压一定时间后瞬间释放,秸秆纤维结构发生系列反应:类酸性水解及热降解、类机械断裂、氢键破坏和纤维结构重新排列;细胞壁内的冷凝水迅速蒸发,对已软化的木质纤维施加横向剪切力,纤维发生机械断裂,原有纤维结构破坏,质地疏松;部分半纤维素发生水解,部分降解产生的少量有机酸,细胞壁内的部分纤维素也发生降解,从而实现高温高压高湿环境下秸秆资源的汽爆加工^[3, 7-9]。以往关于秸秆汽爆的研究,大多集中于某单一的秸秆及仅从某一方面进行其品质评定,如常规营养分析^[10]、体外产气^[11]、纤维结构^[12]等,没有综合养分、产气量及纤维结构等全面系统的评价。

本研究以饲养实践中广泛存在的、营养品质较差的以及生产中产生一定浪费的家畜采食挑拣后残余的黄贮玉米茎秆为原料,并与小麦秸秆以7:3比例混合,进行汽爆加工处理,基于常规养分分析和CNCPS(The Cornell Net Carbohydrate and Protein System)组分评价,结合体外产气量及扫描电镜结果,全面分析汽爆加工对秸秆饲料的有效性影

响, 以期为秸秆资源的有效利用及汽爆技术的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采集甘肃灵台康庄牧业有限公司养殖场肉牛采食挑捡后残余的黄贮玉米茎秆(2017年10月收获玉米籽实后采收的玉米秸秆制作的玉米黄贮), 与小麦秸秆以7:3比例均匀混合作为汽爆原料。汽爆处理前混合样含水量为 $(56.28\% \pm 0.15\%)$ 。

1.1.1 汽爆设备组成及参数

汽爆装置: 汽爆腔容积为 1.14 m^3 , 装草样约130 kg, 汽爆腔设计压力为2.0 MPa, 为山东陆丰有限公司生产; 使用蒸汽锅炉发生器供应高压蒸汽; 额定工作压力为1.6 MPa。

本研究在压强为1.0 MPa、温度 180°C 下维压处理10 min后, 迅速打开汽爆腔阀门, 经汽爆腔爆出物料, 在传输带作用下将物料运送至饲料堆积仓, 冷却后进行采样, 6次重复。

1.1.2 样品的采集与处理

每次采用多点随机取样法采集汽爆前混合样及汽爆后放置0、24及120 h的样品, 每次处理草样6个重复, 每个重复约1.5 kg, 真空包装后带回实验室预处理后待测。

1.2 汽爆前后养分测定

营养养分分析 取真空包装样品其中3个重复在 $(65 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干72 h后, 利用粉碎机粉碎样品, 过0.45 mm网筛用于分析测定各成分。干物质(dry matter, DM)、粗蛋白质(crude protein, CP)、粗脂肪(crude fat, EE)、粗灰分(ash)、淀粉的含量采用AOAC方法测定^[13]; 中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)、酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)含量采用Van Soest等方法测定^[14]; 中性洗涤不溶蛋白(neutral detergent insoluble protein, NDIP)、酸性洗涤不溶蛋白(acid detergent insoluble protein, ADIP)、可溶性粗蛋白(soluble protein, SP)含量采用周荣等方法测定^[15]; 钙(calcium, Ca)含量按照空气-乙炔火焰原子吸收光谱法测定^[16]; 磷(phosphorus, P)含量按照钒钼酸铵分光光度法测定^[17];

挥发性脂肪酸(volatile fatty acid, VFA)使用安捷伦(Agilent 1100)气相色谱仪测定^[18]。

CNCPS体系对营养组分的划分及计算方法 CNCPS经过不断改进和完善, 能够真实反映饲料中的碳水化合物和蛋白质在瘤胃内的降解率、消化率、外流数量以及能量、蛋白质的吸收效率情况, 并建立相应的数学模型, CNCPS能够对饲料的碳水化合物(CHO)和蛋白质营养价值进行更深层次的评定^[14]。

在CNCPS 6.5中^[19-21], 根据蛋白质在瘤胃内的降解及流通特性, CNCPS将碳水化合物进一步分为: CA_1 (乙酸、丙酸和丁酸等挥发性脂肪酸)、 CA_2 (乳酸)、 CA_3 (其他有机酸)、 CA_4 (水溶性碳水化合物)、 CB_1 (淀粉)、 CB_2 (可溶性纤维)、 CB_3 (可消化纤维)和 CC (不可消化纤维)。将蛋白质划分为 PA 、 PB 和 PC (非降解蛋白质), PA 包括 PA_1 (氨)、 PA_2 (可溶性真蛋白), PB 包括 PB_1 (难溶性真蛋白)、 PB_2 (纤维结合蛋白质), 计算公式参考李国彰^[21]。

1.3 体外产气

1.3.1 瘤胃液供体

瘤胃液取自甘肃兰州小西湖屠宰场屠宰的羊只, 为5只1周岁、平均体重约为60 kg小尾寒羊, 在屠宰后迅速将瘤胃液内容物取出, 经4层纱布过滤到 39°C 恒温厌氧的保温瓶中(持续通入 CO_2)。

1.3.2 人工瘤胃培养液

微量元素溶液(A液)^[18]: 称取 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 13.2 g, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 10.0 g, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.0 g, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 8.0 g, 蒸馏水溶解定容至100 mL。

缓冲溶液(B液)^[18]: NH_4HCO_3 4.0 g, NaHCO_3 35.0 g, 蒸馏水溶解定容至1 000 mL。

常量元素溶液(C液)^[18]: Na_2HPO_4 5.7 g, KH_2PO_4 6.2 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.6 g, 蒸馏水溶解定容至1 000 mL。

刃天青溶液^[18]: 0.1%。

还原剂溶液^[18]: $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 4.0 mL, $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 0.625 g, 蒸馏水 95 mL。

缓冲液制备^[18]: 蒸馏水 400 mL + A液 0.1 mL + B液 200 mL + C液 200 mL + 刃天青溶液 1 mL + 还原剂溶液 40 mL。按上述比例依次向玻璃瓶中加入蒸馏水、A液、B液、C液和刃天青溶液。加入刃

天青溶液后混合液变为蓝色, 通入 CO_2 并预热至 39°C 后约 30 min, 混合液色变淡或无色。在与过滤瘤胃液混合之前加入还原剂并通 CO_2 气体至溶液完全褪色。

1.3.3 体外产气装置

准确称取发酵底物 1 g 于 F57 纤维滤袋中, 用 FS-300 封口机封口, 放入 250 mL 产气瓶中, 将产气瓶放置在 39°C 下预热 30 min, 然后再将采集的羊瘤胃液与人工培养液以体积比 1:2 混合均匀, 准确量取 150 mL 混合液加入产气瓶中, 在盖上感应模块之前持续通入 CO_2 约 2 min, 保证产气瓶为厌氧环境, 将各个产气瓶放置于 39°C 的 SPH-110X24 型恒温振荡水浴培养摇床中培养 72 h。每个样品 3 次重复, 同时做空白试验。

1.3.4 干物质消失率 (DMD) 和相对饲喂价值 (RFV)

发酵 72 h 后, 迅速将所有发酵瓶置于冷水终止发酵, 取出发酵瓶中的纤维滤袋, 将其用蒸馏水冲洗干净后, 放置于 105°C 烘箱中, 烘干 48 h 至恒重。

$$\text{DMD} = [(m_0 + m) - (m_2 + m_1)] / m \times 100\%;$$

$$\text{RFV} = \text{DMI} \times \text{DDM} / 1.29。$$

式中: m_0 指放入发酵瓶前纤维袋重, m 为发酵前样重, m_1 为发酵后样重, m_2 指终止发酵瓶后纤维袋重; DMI (dry matter intake, %) 为饲料干物质的随意采食量占体重 BW (body weight, BW) 的百分比; DDM (digestible dry matter, %) 为饲料可消化干物质百分比; 1.29 为标准校正系数。DMI 与 DDM 的预测模型公式^[1] 分别为:

$$\text{DMI} = 120/\text{NDF};$$

$$\text{DDM} = 88.9 - 0.779 \times \text{ADF}。$$

1.4 体视与扫描电镜观察

在其余 3 个重复样品中, 挑出具有代表性的茎秆、玉米穗皮及其组织, 将其剪成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的样块, 经过预处理后用扫描电镜 (S-3400N) 观察^[22] 汽爆处理前后组织纤维降解情况。

1.5 统计分析

所有数据用 Excel 2013 进行预处理后, 采用 SPSS 19.0 软件进行单因子方差分析, 差异显著时, 采用 Duncan 法进行多重比较; 显著水平为 $P < 0.05$ 。采用 Excel 2013 作图。

2 结果与分析

2.1 汽爆前后残留黄贮玉米—小麦秸营养成分含量变化

未汽爆组和汽爆后不同放置时间段 (以下分别简称为 0 h 组、24 h 组和 120 h 组) 营养成分存在差异; 与未汽爆组相比, 汽爆各组 CP、EE、ADIP、NDIP、ESC 和 SP 含量都显著上升 ($P < 0.05$), 且均在放置 24 h 时达到最大; 而汽爆后不同放置时间段秸秆 NDF、ADF 和 ADL 均显著低于未汽爆组 ($P < 0.05$), 最大分别降低 25.5%、29.3% 和 29.7%, 24 h 组木质素含量却高于 0 h 组和 120 h 组 ($P > 0.05$); 汽爆处理后 DM、淀粉和 P 含量显著低于未汽爆组 ($P < 0.05$), 而单糖含量则显著增加 ($P < 0.05$); Ash 随着发酵时间增加先增加后显著减少 ($P < 0.05$); VFA 和 Ca 在汽爆处理后也显著增加 ($P < 0.05$) (表 1)。

2.2 汽爆前后黄贮玉米—小麦秸秆 CNCPS 成分含量变化

汽爆后不同放置时间秸秆 CHO、CB₁、CB₃、CC、PB₁ 和 PB₂ 含量均显著低于未汽爆组 ($P < 0.05$), 其中 CB₁ 和汽爆后含量几乎为 0, PB₁ 汽爆后含量为 0, PB₂ 在汽爆后 120 h 组较未汽爆组降低 52%; 汽爆后秸秆中 NFC、CA₁、CA₂、CA₄、PA₁、PA₂ 和 PC 较未汽爆组均显著升高 ($P < 0.05$), 其中 NFC 在 120 h 组含量最高, 为 28.08%, CA₁ 和 CA₂ 在汽爆后 0 h 组含量最高, 分别为 8.43% 和 8.33%, CA₄ 含量在汽爆后 120 h 组达到最大, 较未汽爆组增加了 105%, PA₁、PA₂ 和 PC 在汽爆后 24 h 组含量最高, 分别为 1.31%、3.65% 和 2.45%; 而 CA₃ 和 CB₂ 检测结果均为 0 (表 2)。

2.3 汽爆前后黄贮玉米—小麦秸秆体外产气量、消化率及相对饲喂价值变化

2.3.1 体外产气量

从产气速率来看, 汽爆后 0~24 h 各组产气速率均高于 24~72 h, 在汽爆 36 h 后, 产气曲线基本趋于平缓, 产气速率减缓 (图 1)。整个发酵产气过程中, 未汽爆组产气量始终低于汽爆各组。

2.3.2 体外消化率及相对饲喂价值

与未汽爆组相比, 汽爆后黄贮玉米—小麦秸秆

表 1 汽爆前后秸秆营养成分
Table 1 Nutritional components of straw before and after steam explosion

营养成分 Nutrient	未汽爆组(CK) No steam explosion	汽爆后 0 h 0 h after steam explosion	汽爆后 24 h 24 h after steam explosion	汽爆后 120 h 120 h after steam explosion
干物质 Dry matter/%	89.95 ± 0.01a	83.65 ± 0.06b	84.05 ± 0.01b	83.89 ± 0.06b
粗蛋白 Crude protein/%	7.63 ± 0.16b	7.47 ± 0.00b	8.41 ± 0.02a	7.31 ± 0.01b
灰分 Ash/%	7.99 ± 0.05a	8.02 ± 0.02a	7.13 ± 0.01b	6.80 ± 0.01c
脂肪 Crude fat/%	0.00 ± 0.00d	4.96 ± 0.03b	5.12 ± 0.00a	4.83 ± 0.01c
可溶性蛋白 Soluble protein/%	1.65 ± 0.06c	4.62 ± 0.02b	4.96 ± 0.02a	4.61 ± 0.03b
酸性洗涤不溶蛋白 ADIP/%	1.03 ± 0.02c	2.02 ± 0.00b	2.45 ± 0.01a	2.43 ± 0.01a
中性洗涤不溶蛋白 NDIP/%	2.53 ± 0.05d	3.01 ± 0.00c	3.43 ± 0.01a	3.15 ± 0.00b
中性洗涤纤维 NDF/%	70.18 ± 0.16a	52.26 ± 0.05c	53.11 ± 0.03b	52.99 ± 0.09b
酸性洗涤纤维 ADF/%	44.98 ± 0.16a	31.80 ± 0.04b	33.87 ± 0.12b	32.41 ± 0.09b
木质素 Lignin/%	9.90 ± 0.01a	7.28 ± 0.00c	8.07 ± 0.01b	6.96 ± 0.01c
总挥发性脂肪酸 VFA/%	2.04 ± 0.09d	8.43 ± 0.01a	6.55 ± 0.01c	7.98 ± 0.01b
淀粉 Starch/%	3.66 ± 0.01a	0.00 ± 0.00c	0.13 ± 0.04b	0.00 ± 0.00c
单糖 Monosaccharide/%	2.39 ± 0.03d	9.35 ± 0.02c	11.94 ± 0.02a	11.59 ± 0.05b
钙 Calcium/%	0.36 ± 0.01b	0.50 ± 0.01a	0.50 ± 0.00a	0.51 ± 0.00a
磷 Phosphorus/%	0.26 ± 0.00a	0.24 ± 0.00b	0.21 ± 0.00c	0.22 ± 0.00d

表中同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。表2同。

Different lowercase letters within the same row indicate significant differences at the 0.05 level, similarly for Table 2. ADIP, acid detergent insoluble protein; NDIP, neutral detergent insoluble protein; NDF, neutral detergent fiber; ADF, acid detergent fiber; VFA, volatile fatty acid.

表 2 汽爆前后秸秆 CNCPS 成分
Table 2 CNCPS composition of straw before and after steam explosion

CNCPS 成分 CNCPS composition	未汽爆组(CK) No steam explosion	汽爆后 0 h 0 h after steam explosion	汽爆后 24 h 24 h after steam explosion	汽爆后 120 h 120 h after steam explosion
CHO/%	84.38 ± 0.21a	79.56 ± 0.01c	79.35 ± 0.03c	81.07 ± 0.02b
NFC/%	14.20 ± 0.37d	27.30 ± 0.06b	26.24 ± 0.06c	28.08 ± 0.11a
CA ₁ /%	2.04 ± 0.09d	8.43 ± 0.01a	6.55 ± 0.01c	7.98 ± 0.01b
CA ₂ /%	0.00 ± 0.00d	8.33 ± 0.01a	6.45 ± 0.01c	7.87 ± 0.01b
CA ₃ /%	0.00	0.00	0.00	0.00
CA ₄ /%	9.53 ± 0.07d	17.14 ± 0.04c	18.34 ± 0.03b	19.62 ± 0.03a
CB ₁ /%	3.66 ± 0.01a	0.00 ± 0.00c	0.13 ± 0.04b	0.00 ± 0.00c
CB ₂ /%	0.00	0.00	0.00	0.00
CB ₃ /%	46.39 ± 0.19a	34.78 ± 0.06b	33.68 ± 0.06b	36.41 ± 0.11b
CC/%	23.76 ± 0.03a	17.47 ± 0.01b	19.37 ± 0.03b	16.70 ± 0.01b
PA ₁ /%	0.21 ± 0.01c	1.17 ± 0.01b	1.31 ± 0.01a	1.16 ± 0.01b
PA ₂ /%	1.45 ± 0.05c	3.42 ± 0.03b	3.65 ± 0.02a	3.48 ± 0.02b
PB ₁ /%	3.45 ± 0.06a	0.00 ± 0.00b	0.02 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b
PB ₂ /%	1.50 ± 0.07a	0.99 ± 0.00b	0.98 ± 0.01b	0.72 ± 0.01c
PC/%	1.03 ± 0.02c	2.02 ± 0.00b	2.45 ± 0.01a	2.43 ± 0.01a

表中%为占干物质的百分比; CHO: 碳水化合物; NFC: 非纤维性碳水化合物; CA₁: 挥发性脂肪酸; CA₂: 乳酸; CA₃: 其他有机酸; CA₄: 水溶性碳水化合物; CB₁: 淀粉; CB₂: 可溶性纤维; CB₃: 可消化纤维和; CC: 不可消化纤维; PA₁: 氨; PA₂: 可溶性真蛋白; PB₁: 难溶性真蛋白; PB₂: 纤维结合蛋白质; PC: 非降解蛋白质。

In the table % means DM%; CHO: Carbohydrate; NFC: Nonfiber CHO; CA₁: Volatile fatty acids; CA₂: Lactic acid; CA₃: Other organic acids; CA₄: Water soluble carbohydrate; CB₁: Starch; CB₂: Soluble fibre; CB₃: Digestible fiber; CC: Indigestible fiber; PA₁: Ammonia; PA₂: Soluble true protein; PB₁: Insoluble true protein; PB₂: Fiber-bound protein; PC: Indigestible protein.

DMD 和 RFV 均显著提高 ($P < 0.05$), 最大分别约提高了 39% 和 30%; 汽爆后不同放置时间 DMD 差异不显著 ($P > 0.05$), 而 RFV 在汽爆后放置 24 h 和 120 h 组较 0 h 组稍有降低, 但都显著高于未汽爆组 ($P < 0.05$)(表 3)。

2.4 汽爆前后黄贮玉米秸秆纤维结构变化

在 100 倍扫描电镜下, 玉米茎秆及玉米穗皮均由整块的片状经汽爆后只剩丝状叶脉或难破壁的丝状木质素(图 2), 玉米秆、叶片纤维之间明显松开, 纤维和纤维束明显卷曲折叠, 变得蓬松柔软, 纤维结构被破坏, 消化率提高。

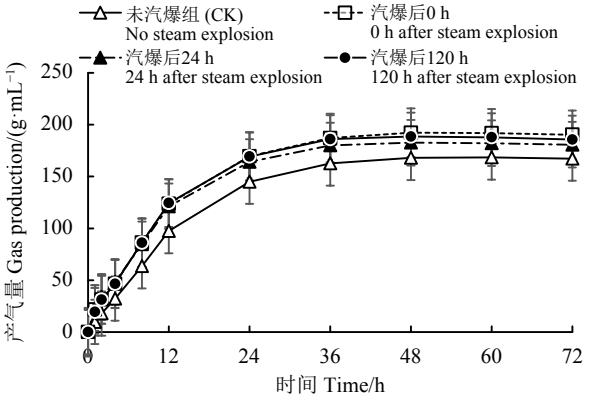


图 1 汽爆前后秸秆体外发酵产气曲线
Figure 1 Gas production curve of in vitro fermentation of straw before and after steam explosion

表 3 汽爆前后消化率及相对饲喂价值
Table 3 Digestibility and relative feeding value before and after steam explosion

处理 Treatment	消化率 Digestibility (DMD)/%	相对饲喂价值 Relative feeding value (RFV)
未汽爆 No steam explosion(CK)	52.73 ± 0.12b	74.96 ± 0.34c
汽爆后 0 h 0 h after steam explosion	73.07 ± 1.19a	97.29 ± 0.21a
汽爆后 24 h 24 h after steam explosion	68.53 ± 1.09a	92.50 ± 0.11b
汽爆后 120 h 120 h after steam explosion	68.98 ± 3.10a	93.46 ± 0.28b

表中同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。
Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between the different treatments at the 0.05 level.

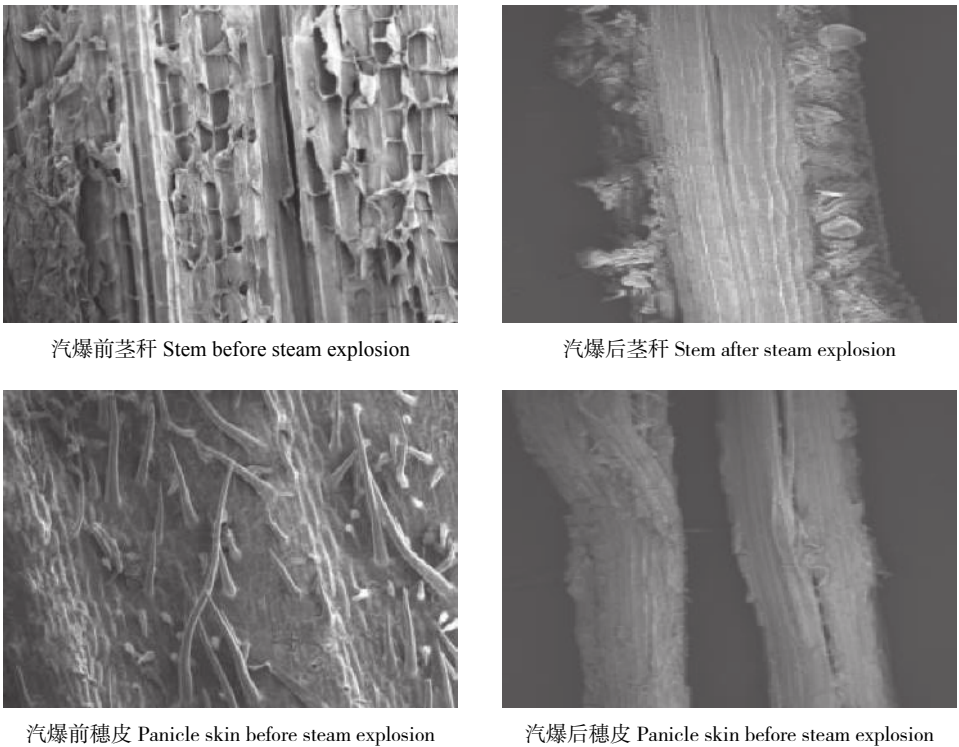


图 2 玉米茎秆和穗皮汽爆前后纤维结构变化
Figure 2 Comparison of fiber structure of corn stem and panicle skin before and after steam explosion

3 讨论

3.1 汽爆前后黄贮玉米-小麦秸秆常规营养成分含量变化

汽爆作为一种新型秸秆加工技术,主要通过蒸煮和爆破使其发生系列物理化学反应,从而改变其结构性质。秸秆中含有大量的木质纤维素,其核心构成组分是纤维素、半纤维素和木质素,木质素和半纤维素牢固连接并紧密包裹纤维素,木质纤维素很难自身发生水解反应,这也就降低了秸秆饲用价值^[3]。汽爆能够破坏秸秆细胞壁,打破木质纤维素形成的致密组织,使部分木质素、半纤维素和纤维素裸露出来并发生系列反应,进而被成功利用。本研究发现,汽爆处理后秸秆原料的 NDF、ADF 和 ADL 均显著下降 ($P < 0.05$),这与和立文等^[11]、陈尚铨等^[23]在玉米和小麦 (*Triticum aestivum*) 秸秆上的研究结果一致。DM 含量减少,可能是由于半纤维素等分解产物在高温下挥发造成^[24];同时,汽爆后秸秆的单糖、EE、CP、ADIP、NDIP、SP 和 VFA 等营养成分含量也显著升高,可能是因为高温高湿汽爆环境下发生系列反应,促使秸秆组分比例发生变化,部分营养成分含量升高并产生多种脂肪酸^[10, 23-24];卢艳^[25]研究发现,汽爆处理后,玉米秸秆的水溶性糖含量约增加 12 倍,其中葡萄糖和木糖的含量最高,约为 40.17% 和 34.12%。朱均均等^[10]研究也表明,玉米秸秆在汽爆预处理后,纤维素、半纤维素和木质素发生不同程度降解,损失率分别为 9.6%、47.98% 和 17.55%;碳水化合物分解为甲酸、乙酸、乙酰丙酸、羟甲基糠醛和糠醛,本研究与上述研究结果相似。

3.2 汽爆处理前后 CNCPS 各营养成分特点

CNCPS 是当前饲草评价应用中已较为普遍的一种方式^[26-27],CNCPS 体系能够全面、系统地反映饲料在瘤胃内的利用情况,对饲料价值评定更加精准。本研究发现,汽爆处理前后 CNCPS 各组分含量差异较大。碳水化合物组分中,CA₁、CA₂、CA₄ 的含量显著增加,它们均为反刍动物的主要能量来源^[28],为瘤胃微生物的繁殖和其功能发挥提供良好环境,促进瘤胃微生物生长,加快瘤胃发酵速率。CB₁ 主要为淀粉,在汽爆过程中几乎完全被

分解掉;CB₃ 为植物可利用细胞壁,汽爆处理后各时间组含量减少,在瘤胃内缓慢降解^[29]。CC 为瘤胃不可消化纤维,汽爆处理后都显著降低,增加秸秆营养价值。CA₃ 和 CB₂ 在本研究的样品中未检测到。

蛋白质成分中,PA₁、PA₂ 含量显著增加,PB₁ 和 PB₂ 显著降低,表明汽爆处理可以增加秸秆原料蛋白在瘤胃里的快速降解部分,减少其在后消化道吸收的中慢速蛋白部分,提高秸秆饲料的消化吸收率,这也可能会提前或缩短秸秆在家畜体内的整个消化吸收期。因为秸秆样品和汽爆程度等因素,使部分蛋白成分与不可利用的纤维部分结合^[30],导致 PC 量增加,秸秆其在反刍动物体内的利用降低^[31]。

3.3 汽爆处理前后体外产气量、消化率及相对饲喂价值

体外产气法是饲草或饲料间组合在人工瘤胃液下模拟瘤胃发酵、消化,依靠其产生气体的量及速率来评价、预测饲草或饲料间组合效应的一种快速方法;但单一的产气量并不能直接用于评价饲草的降解程度,应结合 DMD 等各项综合指标来评价其营养价值^[32]。产气量大说明瘤胃微生物活性高,与底物发酵更加充分,相反,则可能是底物可供微生物发酵产物不足所致^[33-34]。本研究中,从产气曲线图和 DMD 可明显看出,汽爆后各组产气量及 DMD 明显高于未汽爆组;可能在汽爆处理后易于发酵的底物增多,其中氮含量相对升高,为瘤胃微生物发酵提供足够氮源,使产气量增加;汽爆处理可消除秸秆部分抗消化物质^[19],使木质纤维素解聚,增大、促进微生物附着面积和酶解作用,同时纤维素和半纤维素大量降解成小分子物质,加快秸秆发酵产气,提高秸秆的消化率^[35]。相对饲喂价值 (RFV) 是结合可消化干物质和干物质采食量综合评价粗饲料品质优劣的重要指标。本研究中,汽爆处理组显著提高了秸秆相对饲喂价值,主要是因为汽爆降低了 NDF 含量,提高了模型干物质采食量^[19]。也进一步说明汽爆处理后的秸秆营养价值更高,与上述评价结果一致。

3.4 汽爆前后黄贮玉米秸秆纤维结构变化

王玉等^[12]研究发现,汽爆处理中类机械断

裂、热降解及氢键破坏作用,使秸秆中纤维素、半纤维素、木质素分离,纤维结构出现明显变化。秸秆受到物理化学双重分解,除发生上述化学变化之外,秸秆原料形态也受到不同程度的破坏^[23-24]。本研究发现,与未汽爆组相比,汽爆后原本片状或秆状的残留秸梗变成柔软的细丝状,纤维结构断裂,纤维和纤维束卷曲折叠;纤维键松开,部分纤维断裂,细胞被破坏。被爆破的程度原料叶、穗皮大于茎秆。且原料是在高温、高压的爆破腔里经瞬间释放压力后而成丝的,因此,此过程不但有助于充分清洗秸秆表面杂质,也因熟化而使秸秆气味芳香,大大改善秸秆适口性,从而提高家畜采食量。

综上所述,利用各种不同的评定方法对汽爆处理前后玉米—小麦秸秆营养价值进行全面、系统评价,发现经汽爆处理后原料养分、产气量、DMD、RFV及纤维结构等方面都优于汽爆处理前秸秆,说明汽爆在秸秆预处理中是完全可行的,可为秸

秆饲料的进一步开发利用提供理论依据。

4 结论

1) 汽爆处理显著降低了黄贮玉米与小麦混合秸秆纤维(NDF、ADF、ADL)含量,提高了可消化碳水化合物(单糖等)含量,从而提高秸秆原料的营养价值;2) CNCPS体系评价中,黄贮玉米—小麦秸秆中的碳水化合物和蛋白质在瘤胃内的降解率、消化率、外流数量以及能量、蛋白质的吸收效率均显著提高,增加其在反刍动物瘤胃内降解吸收;3) 汽爆增加和提高了黄贮玉米—小麦秸秆体外产气速率和产气量及相对饲喂价值;4) 汽爆处理后,原本片状或秆状的残留秸梗变成柔软的细丝状,纤维结构断裂,纤维和纤维束卷曲折叠;且经高温高压蒸汽爆破熟化处理,秸秆原料气味芳香,改善了饲料适口性,家畜采食量增加,减少了饲料浪费。综上,农作物秸秆的汽爆处理在畜牧业生产实践中具有广阔的应用前景。

参考文献 References:

- [1] 陈海燕. 中国畜牧业政策支持水平研究. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
CHEN H Y. The evaluation and research on the support policy of China's animals husbandry. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [2] 石伟楠. 农作物秸秆资源综合利用探析. *农技服务*, 2017, 34(22): 139.
SHI W N. Analysis on comprehensive utilization of crop straw resources. *Agricultural Technology Service*, 2017, 34(22): 139.
- [3] 任向荣, 徐敏强, 李伟然, 王三保. 蒸汽爆破生物质秸秆的工业应用. *现代化工*, 2009, 29(11): 89-91.
REN X R, XU M Q, LI W R, WANG S B. Industrial utilization of steam explosion of efficient straw. *Modern Chemical Industry*, 2009, 29(11): 89-91.
- [4] 常娟, 卢敏, 尹清强, 郑秋红, 郭红伟, 樊春光. 秸秆资源预处理研究进展. *中国农学通报*, 2012, 28(11): 1-8.
CHANG J, LU M, YIN Q Q, ZHEN Q H, GUO H W, FAN C G. Progress of research on pretreatment of corn stover. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(11): 1-8.
- [5] TALEBNIA F, KARAKASHEV D, ANGELIDAKI I. Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresource Technology*, 2010, 101(13): 4744-4753.
- [6] 孙小龙, 周禾, 李平, 玉柱. 苜蓿与玉米秸秆混贮研究. *草业学报*, 2009, 18(5): 86-92.
SUN X L, ZHOU H, LI P, YU Z. A study on mixed silage of alfalfa and maize straw. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(5): 86-92.
- [7] 罗鹏, 刘忠. 蒸汽爆破法预处理木质纤维原料的研究. *林业科技*, 2005(3): 53-56.
LUO P, LIU Z. Steam explosion of biomass as a pretreatment for conversion to ethanol. *Forestry Science & Technology*, 2005(3): 53-56.
- [8] LASER M, SCHULMAN D, ALLEN S G, LICHWA J, ANTAL M, LYND L R. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresource Technology*, 2002, 43(4): 243-244.
- [9] MOSIER N, WYMAN C, DALE B, ELANDER R, LEE Y Y, HOLTZAPPLE M, LADISCH M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2005, 96(6): 673-686.

- [10] 朱均均, 勇强, 陈尚钊, 徐勇, 张晓萍, 余世袁. 玉米秸秆蒸汽爆破降解产物的分析. *林产化学与工业*, 2009, 29(2): 22-26.
ZHU J J, YONG Q, CHEN S Y, XU Y, ZHANG X P, YU S Y. Identification of degraded products from steam exploded corn stalk. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2009, 29(2): 22-26.
- [11] 和立文, 孟庆翔, 李德勇, 任丽萍, 周振明. 体外法评价汽爆处理对常见秸秆饲料品质的影响. *中国农业大学学报*, 2016, 21(9): 90-96.
HE L W, MENG Q X, LI D Y, REN L P, ZHOU Z M. In vitro method to evaluate the effect of steam explosion on the quality of common straw feed. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9): 90-96.
- [12] 王玉, 周俊, 雍晓雨, 陈怡露, 刘晓凤, 郑涛. 汽爆预处理对水稻秸秆纤维结构的影响. *江苏农业科学*, 2014, 42(11): 319-324.
WANG Y, ZHOU J, YONG X Y, CHEN Y L, LIU X F, ZHENG T. Effect of steam explosion pretreatment on fiber structure of rice straw. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(11): 319-324.
- [13] CUNNIFF P A, CUNNIFF P A, CUNNIFF P, CUNNIFF P A. Official methods of analysis of AOAC international. AOAC Official Method, 1995, 6(11): 382-382.
- [14] SNIFFEN C J, O'CONNOR J D, VAN SOEST P J, FOX D G, RUSSELL J B. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, 1992, 70(11): 3562-3577.
- [15] 周荣, 王加启, 周振峰, 卜登攀, 魏宏阳, 周凌云. 饲料非蛋白氮与可溶性蛋白测定方法概述. *中国奶牛*, 2011(11): 39-41.
ZHOU R, WANG J Q, ZHOU Z F, BU D P, WEI H Y, ZHOU L Y. Standardization of procedures of nonprotein nitrogen and buffer-soluble protein. *China Dairy Cattle*, 2011(11): 39-41.
- [16] 徐学笛. 空气-乙炔火焰原子吸收光谱法测定头发中钙元素含量的方法及研究. *化工时刊*, 2008, 22(4): 37-39.
XU X D. Study on determination of the content of calcium in hair by atomic absorption spectrometry with air acetylene flame. *Chemical Industry Times*, 2008, 22(4): 37-39.
- [17] 郑丽斯, 颜立毅. 分光光度计法测定饲料中总磷的不确定度评定. *农产品加工*, 2012(9): 131-135.
ZHENG L S, YAN L Y. The uncertainty evaluation of total phosphorus of feed by the spectrophotometer method. *Ademic Periodical of Farm Products Processing*, 2012(9): 131-135.
- [18] 郑琛. 外源添加甘露寡糖对绵羊养分消化代谢、瘤胃发酵、消化道食糜流通量及免疫的影响. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2012.
ZHENG C. Effects of exogenous addition of mannooligosaccharides on nutrient digestion and metabolism, rumen fermentation, digestive tract sputum flux and immunity in sheep. PhD Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012.
- [19] HIGGS R J, CHASE L E, ROSS D A, VAN AMBURGH M E. Updating the cornell net carbohydrate and protein system feed library and analyzing model sensitivity to feed inputs. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(9): 6340-6360.
- [20] VAN AMBURGH M E, COLLAO-SANZEN E A, HIGGS R J, ROSS D A, RECKTENWALD E B, RAFFRENATO E, CHASE L E, OVERTON T R, MILLS J K, FOSKOLOS A. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System: Updates to the model and evaluation of version 6.5. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98: 6361-6380.
- [21] 李国彰, 喻笑男, 王志兰, 马万浩, 邓颖, 董春晓, 闫佰鹏, 兰贵生, 李飞, 李发弟, 翁秀秀. 大麦秸秆: 康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系评定组分及近红外光谱分析技术预测营养价值. *动物营养学报*, 2018, 30(3): 1063-1072.
LI G Z, YU X N, WANG Z L, MA W H, DENG Y, DONG C X, YAN B P, LAN G S, LI F, LI F D, WENG X X. Barley straw: Evaluation of components in Cornell Net Carbohydrate and Protein System and prediction of nutritional value by near infrared spectrum. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(3): 1063-1072.
- [22] 焦婷, 吴建平, 肖元明, 王娟, 梁建勇. 一种扫描电镜的样品制备方法. 中国专利: CN106018027A, 2016-10-12.
JIAO T, WU J P, XIAO Y M, WANG J, LIANG J Y. Sample preparation method of scanning electron microscope. China Patent: CN106018027A, 2016-10-12.
- [23] 陈尚钊, 勇强, 徐勇, 朱均均, 余世袁. 蒸汽爆破预处理对玉米秸秆化学组成及纤维结构特性的影响. *林产化学与工业*, 2009, 29(S1): 33-38.
CHEN S Y, YONG Q, XU Y, ZHU J J, YU S Y. Effect of steam-explosion pretreatment on chemical components and cellulosic structure of corn stalk. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2009, 29(S1): 33-38.
- [24] 周涛, 陈万宝, 孟庆翔, 周振明, 任丽萍. 秸秆蒸汽爆破技术在畜牧生产中的应用研究进展. *中国畜牧兽医*, 2016, 43(9): 2352-

2357.

ZHOU T, CHEN W B, MENG Q X, ZHOU Z M, REN L P. Application of straw steam explosion technology in livestock production. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2016, 43(9): 2352-2357.

- [25] 卢艳. 低压蒸汽爆破玉米秸秆成份分析及其发酵特性研究. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2014.

LU Y. Study on the water soluble analys and xylase fermentation characteristics of corn straw treated with steam explsn. Master Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2014.

- [26] 赵广永, CHRISTENSEN D A, MCKINNON J J. 用净碳水化合物-蛋白质体系评定反刍动物饲料营养价值. *中国农业大学学报*, 1999(S1): 71-76.

ZHAO G Y, CHRISTENSEN D A, MCKINNON J J. The use of Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS) for the evaluation of some chinese feeds of ruminants. *Journal of China Agricultural University*, 1999(S1): 71-76.

- [27] 陈艳, 王之盛, 张晓明, 吴发莉, 邹华围. 常用粗饲料营养成分和饲用价值分析. *草业学报*, 2015, 24(5): 117-125.

CHEN Y, WANG Z S, ZHANG X M, WU F L, ZOU H W. Analysis of the nutritional components and feeding values of commonly used roughages. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(5): 117-125.

- [28] 赵向辉, 刘婵娟, 刘烨, 李朝云, 姚军虎. 日粮可降解蛋白与非纤维性碳水化合物对人工瘤胃发酵、微生物合成以及纤维分解菌菌群的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(22): 4668-4677.

ZHAO X H, LIU C J, LIU Y, LI C Y, YAO J H. Effects of degradable protein and nonfiber carbohydrates on in vitro ruminal fermentation, microbial synthesis and populations of ruminal cellulolytic bacteria. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(22): 4668-4677.

- [29] 陶春卫, 张爱忠, 姜宁, 熊本海. 用 CNCPS 评定反刍动物几种常用粗饲料营养价值的研究. *中国草食动物*, 2009, 29(5): 14-18.

TAO C W, ZHANG A Z, JIANG N, XIONG B H. Using CNCPS to evaluation the nutrient value of some roughages for ruminant. *Grass-Feeding Livestock*, 2009, 29(5): 14-18.

- [30] 黄锋华, 董宽虎. 白羊草灌丛草地优势种牧草营养物质及瘤胃降解动态研究. *中国草地学报*, 2006(6): 18-23.

HUANG F H, DONG K H. Study on nutrients of dominant species of forage and dynamics of the rumen degradability in old world bluestem shrub rangeland. *Chinese Journal of Grassland*, 2006(6): 18-23.

- [31] 张鹏, 卜登攀, 张养东, 王林枫, 姜士凯. 康奈尔净碳水化合物-净蛋白质体系 (CNCPS) 在反刍动物上的应用研究. *中国奶牛*, 2014(5): 7-10.

ZHANG P, BU D P, ZHANG Y D, WANG L F, JIANG S K. Application research of CNCPS system on ruminant animal. *China Dairy Cattle*, 2014(5): 7-10.

- [32] 陈光吉, 宋善丹, 郭春华, 柏雪, 张正帆, 张艳, 游明鸿, 白史且. 利用体外产气法和 CNCPS 法对不同生育期藜草营养价值的评价研究. *草业学报*, 2015, 24(09): 63-72.

CHEN G J, SONG S D, GUO C H, BAI X, ZHANG Z F, ZHANG Y, YOU M H, BAI S Q. The nutritional value of reed canary grass at different growth stages as determined by in vitro gas production and Cornell Net Carbohydrate and Protein System methods. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(09): 63-72.

- [33] 韩肖敏, 曹玉凤, 李秋风, 高艳霞, 李妍, 李建国. 用体外产气法评价玉米秸秆、稻草、玉米秸秆青贮与精料的组合效应. *动物营养学报*, 2017, 29(2): 699-711.

HAN X M, CAO Y F, LI Q F, GAO Y X, LI Y, LI J G. Associative effects of corn stalk, rice straw, corn stalk silage and concentrate evaluated by gas production technique in vitro. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(2): 699-711.

- [34] 李妍, 韩肖敏, 李建国, 李秋风, 高艳霞, 曹玉凤, 李运起. 体外法评价玉米秸秆、谷草和玉米秸秆青贮饲料组合效应研究. *草业学报*, 2017, 26(5): 213-223.

LI Y, HAN X M, LI J G, LI Q F, GAO Y X, CAO Y F, LI Y Q. Associative effects of cornstalk, millet straw and corn stalk on silage digestibility in vitro. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(5): 213-223.

- [35] SARKAR N, GHOSH S K, BANNERJEE S, AIKAT K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 19-27.

(责任编辑 武艳培)