

体外法评价汽爆处理对常见秸秆饲料品质的影响

和立文 孟庆翔 李德勇 任丽萍* 周振明*

(中国农业大学 动物科学技术学院/动物营养学国家重点实验室,北京 100193)

摘要 为评估汽爆作为秸秆饲料化处理技术的可行性,通过常规化学分析、体外产气量法以及模型预测等方法综合评价3种常见秸秆的汽爆处理效果。结果显示:汽爆处理后,秸秆的干物质和灰分的比例显著升高($P < 0.05$),同时中性洗涤纤维的比例显著降低($P < 0.01$);不同种类秸秆的蛋白质、酸性洗涤纤维和木质素的比例变化不一致。汽爆处理消除($P < 0.01$)了秸秆体外发酵的延滞期(lag),提高($P < 0.01$)了产气速率(c),降低($P < 0.01$)了理论最大产气量(B);汽爆处理对玉米秸和稻秸发酵产气的提升作用比小麦秸的效果好。汽爆处理显著提高($P < 0.01$)秸秆的粗饲料相对值(%)和干物质采食量(% ,BW)。以上结果表明,汽爆处理使秸秆理化特性发生很大变化,粗饲料品质显著提高。

关键词 秸秆;汽爆技术;营养价值;体外产气量;预测模型

中图分类号 S 823

文章编号 1007-4333(2016)09-0090-07

文献标志码 A

In vitro method to evaluate the effect of steam explosion on the quality of common straw feed

HE Li-wen, MENG Qing-xiang, LI De-yong, REN Li-ping*, ZHOU Zheng-ming*

(College of Animal Science and Technology/State Key Laboratory of Animal Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To estimate the feasibility of applying steam explosion as the processing technique of fibrous feedstuff, chemical analysis, *in vitro* gas production and model prediction were adopted to evaluate the effects of steam explosion. The results showed that: Steam explosion increased ($P < 0.05$) the dry matter and ash of the straw, while decreased ($P < 0.01$) the content of neutral detergent fiber (NDF); The changes of crude protein, acid detergent fiber (ADF) and lignin (ADL) among the three straw were inconsistent; Steam explosion processing eliminated ($P < 0.01$) the lag time of *in vitro* fermentation and increased ($P < 0.01$) the rate of gas production (c), while decreased ($P < 0.01$) the asymptotic gas production; Moreover, steam explosion exerted a better effect on the gas production of corn straw and rice straw than that of wheat straw. Consequently, the relative forage value (%) and dry matter intake (% , BW) of the straw were increased ($P < 0.01$) with steam explosion. In conclusion, the physiochemical property of the straw was altered, substantially improved the quality of straw feed.

Keywords straw; steam explosion technique; nutrition value; *in vitro* gas production; model prediction

秸秆饲料化利用由来已久,具有种类多、数量大、分布广等优点,是很好的饲料资源,但秸秆消化率低、适口性差、营养价值低等缺陷是其饲料化利用的主要障碍,因而探寻有效的秸秆加工方法来改善其消化性和适口性,提升秸秆饲料的营养价值是充

分利用秸秆资源的先决条件。

通常,成熟秸秆的木质化程度较高,其密实的木质纤维化结构很难被微生物消化和酶解,是其抗消化的关键因素。长期以来,国内外专家一直在积极探索各种秸秆加工技术以提高其饲用价值,常见的

收稿日期:2015-10-15

基金项目:北方农作物秸秆饲用化利用技术与示范(201503134);国家肉牛牦牛产业技术体系(CARS-38)

第一作者:和立文,博士研究生,E-mail:helw082@163.com

通讯作者:周振明,副教授,博士生导师,主要从事动物营养与饲料科学研究,E-mail:zhouzm@cau.edu.cn

秸秆处理方法大致可分为物理方法、化学方法和生物学方法及各种方法组合应用^[1]。青贮和黄贮是目前应用最为广泛的秸秆处理方法,很好的保存了秸秆的营养价值并改善其适口性和消化率,但其对秸秆木质纤维素结构的破坏作用有限且变异大,而且也不适用于干枯成熟秸秆的加工处理。研究表明,汽爆处理可有效破坏秸秆木质化结构,使原料中大部分半纤维素和少量木质素和纤维素降解而溶出。汽爆是利用饱和水蒸汽将纤维原料加热至一定压力,使高压蒸汽渗入纤维内部,然后骤然减压,蒸汽从物料孔隙膨胀释放,使纤维发生机械断裂和化学变化的生物质预处理手段^[2]。近些年来,汽爆秸秆在生物质能源、工业材料及农业化肥等领域有着广泛的应用^[3]。Chang 等^[4]报道,汽爆处理可使玉米秸的纤维素、半纤维素和木质素含量分别下降 8.47%、50.45% 和 36.65%; Wang 等^[5]研究表明,汽爆处理可使玉米秸的生物气体产量提高了 16.8%~63.2%。

在工业领域的广泛应用证明了汽爆技术是一种有效的生物质预处理方法,但其作为饲料资源开发技术的研究报道较少,在畜牧生产中的应用价值还有待验证。本研究通过常规化学成分分析、体外产气量法和模型预测等方法来评估汽爆技术作为常见秸秆饲料化加工技术的应用潜力,旨在为汽爆技术在畜牧生产中应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验在中国农业大学肉牛研究中心大兴试验基地进行。试验所用的玉米秸、小麦秸、稻秸和汽爆玉米秸、汽爆小麦秸、汽爆稻秸均采样于张家港金泰饲料技术服务有限公司。汽爆工艺大致流程:秸秆原料切短加水→水蒸气(120~230℃)蒸煮 40 min(0.2~2.6 MPa)→瞬间泄压爆破→干燥成品(~120℃)。所有样品在实验室用小型锤片式粉碎机粉碎成过 40 目标准筛的试验样品。

1.2 试验方法

1.2.1 试验动物及基础日粮

选用 3 头体重约为 600 kg、装有永久性瘤胃瘘管的西门塔尔×利木赞杂交牛(2 岁半)作为瘤胃液供体动物。供体动物的试验日粮参照 2004 年中国肉牛饲养标准配制,精粗质量比为 60:40,日粮组成及营养水平见表 1;每天限量饲喂 2 次(8:00 和

16:00),自由饮水,预饲 1 周。

表 1 日粮组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Ingredients and nutrient level of the diet (Dry matter)

项目 Item	含量 Content
日粮组成 Feed compositions	
ω (青贮玉米)/% Corn silage	53.0
ω (啤酒糟)/% Brewer's grains	25.0
ω (玉米)/% Corn	20.0
ω (石粉)/% Limestone	0.2
ω (磷酸氢钙)/% CaHPO ₄	0.3
ω (食盐)/% Salt	0.5
ω (预混料)/% Premix	1.0
营养水平 Nutrient level	
代谢能 Metabolizable energy/(MJ/kg)	10.80
ω (蛋白质)/% Crude protein	11.00
ω (钙)/% Calcium	0.50
ω (磷)/% Phosphorus	0.33

1.2.2 试验设计

体外产气量试验采用单因子试验设计,设玉米秸组、小麦秸组、稻秸组和汽爆玉米秸组、汽爆小麦秸组、汽爆稻秸组,每个组 6 个重复,同时设 1 个空白对照组(3 个重复)。分别称取 220 mg 饲料样品置于 100 mL 玻璃培养管底部,空白对照管不加饲料,所有培养管放置 39℃ 培养箱预热;人工瘤胃培养液的配制参照文献^[6]。用分液瓶将配好的人工培养液置于 39℃ 水浴恒温并持续通入 CO₂;然后采集 3 头供体瘘管牛晨饲前的瘤胃液,经 4 层纱布过滤并混合均匀,用保温瓶置于 39℃ 水浴保存;量取一定体积瘤胃液与人工培养液混合(体积比 1:2)并继续通入 CO₂ 至厌氧环境形成;用分液器分别向所有培养管注入 30 mL 人工瘤胃培养液,排尽培养管中气泡,密封,记录培养管初始刻度后置于 39℃ 恒温水浴培养箱中培养。定时(2、4、6、8、10、12、18、24、30、36、42、48、54、60、72、84 和 96 h)读取所有培养管的刻度值(mL),发酵至 96 h 结束培养试验。

1.3 常规化学成分分析

参照 AOAC 方法^[7],对 6 种秸秆样品进行常规化学分析,测定指标包括干物质(DM)、蛋白质(CP)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、酸性洗涤木质素(ADL)和灰分(Ash),其中蛋白质是根据杜马斯燃烧法用元素分析仪(Rapid N III, Elementar, Germany)测定的,粗蛋白值等于 N 值 \times 6.25;中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和酸性洗涤木质素用纤维分析仪(ANKOM²⁰⁰ FIBER ANALYZER, Macedon, NY, USA)进行测定。

1.4 公式计算

1.4.1 发酵参数(B,c,lag)

产气动态参数估测选用带有延滞期的预测模型:

$$GP = B \times (1 - e^{-c(t-lag)})^{[8]}$$

式中:GP 为 t 时间点的产气量(Gas Production), mL;B 为理论最大产气量(Asymptotic), mL;c 为样本的产气速率, h^{-1} ; t 为活体外培养时间, h; lag 为发酵延滞时间, h。

1.4.2 粗饲料相对值(Relative forage value, RFV)

RFV 的计算公式为:

$$RFV(\%) = DMI \times DDM / 1.29^{[9]}$$

式中:DMI(Dry matter intake)为饲料干物质的随意采食量占体重(Body weight, BW)百分比, %; BW; DDM(Digestible dry matter)为饲料可消化干物质百分比, %, DM; 1.29 为标准校正系数。DMI 与 DDM 的预测模型分别为:

$$DMI(\%, BW) = 120 / NDF^{[9]}$$

$$DDM(\%, DM) = 88.9 - 0.779 \times ADF^{[9]}$$

式中:NDF 和 ADF 均是以干物质为基础的百分含量表示, %, DM。

1.4.3 能量预测值(Energy value, EV)

NE_l(Net energy for lactation)为产奶净能, MJ/kg, NE_l的预测模型为:

$$NE_l(\text{MJ/kg}) =$$

$$(1.0440 - 0.0119 \times ADF / 0.45) \times 4.184^{[10]}$$

式中:ADF 是以干物质为基础的百分含量表示, 即 %, DM。此外,根据饲料的蛋白质含量和体外发酵产气量还可以预测饲料的代谢能(Metabolizable energy, ME),预测模型为:

$$ME(\text{MJ/kg}) = 2.20 + 0.1357GP +$$

$$0.0057CP + 0.0002859CP^2^{[11]}$$

式中:GP 为 200 mg(DM)饲料体外培养 24 h 的总产气量(mL), CP 为饲料粗蛋白含量(g/kg, DM)。

1.5 统计分析

采用 Excel 软件进行数据整理,通过差值法统计各个时间点的产气量;根据动态发酵模型,采用 SAS9.0 软件中 Non-LINEAR 方法计算动态发酵参数(B,c 和 lag);用 SAS9.0 中的 TTEST 方法对常规化学成分、产气量、发酵参数和预测值进行 t 检验分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果

2.1 汽爆处理对秸秆常规化学成分含量的影响

表 2 显示的是 3 种秸秆(玉米秸、小麦秸和稻秸)汽爆前后主要化学成分的含量变化。汽爆处理后,3 种秸秆的干物质和灰分的比例均显著升高($P < 0.05$),同时中性洗涤纤维的比例均显著降低($P < 0.01$);3 种秸秆的蛋白质、酸性洗涤纤维和木质素的比例并未显示出一致性变化,汽爆玉米秸的酸性洗涤纤维比例显著降低而汽爆小麦秸的则显著升高($P < 0.01$),同时汽爆小麦秸的蛋白质比例显著下降($P < 0.01$),汽爆稻秸的酸性洗涤木质素比例显著升高($P < 0.05$)。

2.2 汽爆处理对秸秆体外发酵的影响

3 种秸秆汽爆前后的体外发酵产气情况见表 3。汽爆处理缩短并消除了($P < 0.01$)秸秆体外发酵的延滞期(lag),提高($P < 0.01$)了秸秆体外发酵的产气速率(c),却降低($P < 0.01$)了理论最大产气量(B)。图 1 显示是 3 种秸秆汽爆处理前后的体外发酵产气曲线对比,汽爆处理对玉米秸和稻秸发酵产气的提升作用比小麦秸的效果好,3 种汽爆秸秆与其相应的秸秆原料的终末产气量(96 h)基本持平。

2.3 汽爆处理对秸秆营养价值参数的影响

由表 4 可知,汽爆处理后秸秆的营养价值得到很大提高,绝大部分评价参数得到明显改善。汽爆处理显著提高($P < 0.01$)3 种秸秆的粗饲料相对值(%) 和干物质采食量(%, BW),而对饲料可消化干物质比例(%, DM)、代谢能(MJ/kg)和产奶净能(MJ/kg)的影响作用不一致;汽爆处理提高($P < 0.05$)玉米秸可消化干物质的比例和代谢能值,却降低($P < 0.01$)小麦秸可消化干物质的比例和产奶净能值,同时使稻秸的代谢能值显著升高($P < 0.01$)。

表 2 汽爆处理对秸秆常规化学成分含量的影响(干物质基础)

Table 2 Effects of steam explosion on the chemical compositions of the straw(DM)

w/%

项目 Item	干物质 Dry matter	蛋白质 Crude protein	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	酸性洗涤木质素 Acid detergent lignin	灰分 Ash
汽爆玉米秸 Steam-exploded corn straw	93.93±0.01 A	6.05±0.13	54.48±0.36 A	45.33±0.03 A	8.06±0.56	8.61±0.06 A
玉米秸 Corn straw	92.93±0.02 B	5.60±0.27	81.25±0.22 B	48.72±0.42 B	7.29±0.21	6.90±0.05 B
汽爆小麦秸 Steam-exploded wheat straw	94.97±0.04 A	4.21±0.07 A	56.39±0.22 A	52.06±0.05 A	10.02±0.75	12.30±0.42 a
小麦秸 Wheat straw	91.84±0.07 B	5.01±0.02 B	76.58±0.03 B	48.94±0.34 B	7.83±0.59	10.73±0.10 b
汽爆稻秸 Steam-exploded rice straw	94.69±0.01 A	4.48±0.05	55.64±0.16 A	48.10±0.30	9.18±0.91 a	13.52±0.07 A
稻秸 Rice straw	93.21±0.10 B	4.58±0.03	75.31±0.02 B	48.33±0.26	4.86±0.54 b	12.66±0.03 B

注：每列同种秸秆汽爆处理前后数值不同大写字母表示在 0.01 水平上差异显著，不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Values followed by different capital letters within each column of the same type of straw mean significant difference at 0.01 level and the lower-case letters mean significant difference at 0.05 level. The same bellow.

表 3 汽爆处理对 3 种秸秆体外发酵产气的影响

Table 3 Effects of steam explosion on the *in vitro* gas production of the straw

项目 Item	发酵参数 Fermentation parameters		
	理论最大产气量/(mL/g) Asymptotic GP, DM	产气速率/h ⁻¹ Rate of gas production	延滞期/h Lag time
	汽爆玉米秸 Steam-exploded corn straw	206.45±10.25 A	0.049±0.003 A
玉米秸 Corn straw	225.38±2.63 B	0.029±0.001 B	1.59±0.22 B
汽爆小麦秸 Steam-exploded wheat straw	188.80±7.37 A	0.038±0.001 A	-0.56±0.24 A
小麦秸 Wheat straw	206.15±4.55 B	0.031±0.001 B	2.11±0.09 B
汽爆稻秸 Steam-exploded rice straw	212.73±4.07 A	0.042±0.002 A	-0.29±0.10 A
稻秸 Rice straw	234.78±5.94 B	0.023±0.001 B	0.49±0.17 B

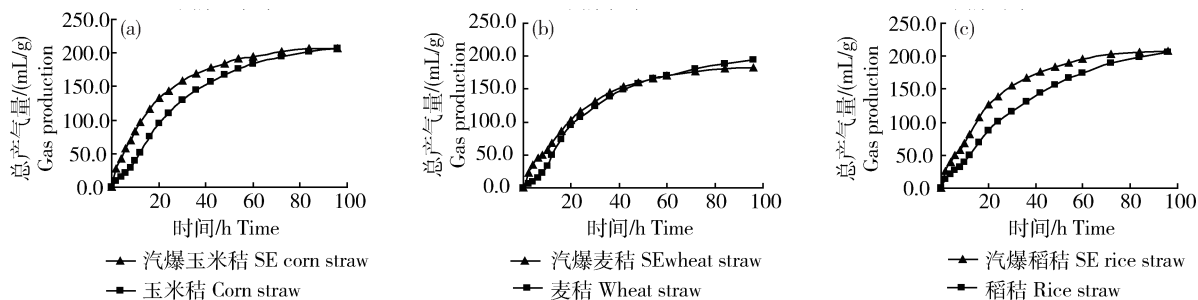


图1 3种秸秆汽爆前后体外发酵产气曲线对比

Fig. 1 Gas production curves of the straw before and after steam explosion (SE) processing

表4 汽爆处理对3种秸秆营养价值参数的影响

Table 4 Effects of steam explosion on the nutritive values of the straw

项目 Item	粗饲料相对值/% Relative forage value	干物质采食量/% Dry matter intake	可消化干物质/% Digestible dry matter	代谢能/(MJ/kg) Metabolizable energy	产奶净能/(MJ/kg) Net energy for lactation
汽爆玉米秸 Steam-exploded corn straw	91.51±0.65 A	2.20±0.01 A	53.59±0.03 A	7.72±0.05 a	4.69±0.02
玉米秸 Corn straw	58.35±0.53 B	1.48±0.01 B	50.95±0.33 B	6.48±0.19 b	4.32±0.05
汽爆小麦秸 Steam-exploded wheat straw	79.77±0.38 A	2.13±0.01 A	48.35±0.04 A	6.10±0.02	3.95±0.01 A
小麦秸 Wheat straw	61.68±0.30 B	1.57±0.00 B	50.78±0.26 B	6.08±0.03	4.30±0.04 B
汽爆稻秸 Steam-exploded rice straw	86.00±0.64 A	2.16±0.01 A	51.44±0.23	6.74±0.04 A	4.39±0.04
稻秸 Rice straw	63.31±0.27 B	1.59±0.01 B	51.26±0.21	5.84±0.02B	4.36±0.03

3 讨论

3.1 汽爆处理对秸秆常规化学成分含量的影响

作为一种新型的生物质加工技术,汽爆处理主要通过汽相蒸煮和蒸汽爆破作用使物料发生理化变化而改变其结构和化学组分。秸秆细胞壁主要由大量的木质纤维素和少量的淀粉、果胶和蛋白结合而成,木质纤维素的存在是秸秆消化率低的主要抗营养因素,破坏木质纤维素密实的结构使养分充分释放是提高秸秆饲料消化率的关键所在。汽爆处理裂解了秸秆细胞壁的木质化结构,使纤维素、半纤维和

木质素解聚,有利于微生物附着和消化酶作用,同时高温高压蒸煮条件使这些成分部分降解为可溶性糖、有机酸和酚醛类化合物等易消化的小分子物质,使秸秆的理化结构发生巨大变化^[12-13]。本研究中,汽爆秸秆的中性洗涤纤维比例大幅度下降,而酸性洗涤纤维和木质素的比例变化不大,同时灰分比例升高,表明汽爆处理使大量的半纤维素发生降解。Zhang等^[14]研究表明,汽爆处理可显著降低小麦秸的纤维素、半纤维素和木质素的含量,而且半纤维素的降解率最高;Chang等^[4]报道,汽爆处理可使玉米秸秆的纤维素、半纤维素和木质素含量分别下降

8.47%、50.45%和36.65%。另外,汽爆秸秆化学成分的变化还有可能是由于汽爆过程产生挥发性物质导致干物质损失,使秸秆组分的相对比例发生改变,Liu等^[15]报道,稻秸高压蒸汽处理后干物质损失率12.2%~17.1%。NDF与日粮采食量密切相关,其含量与能量密度成负相关,粗饲料高NDF含量可限制动物的采食量及其能量摄入,NDF含量越高,粗饲料品质越低。因而,汽爆处理提高了秸秆的饲料品质。

3.2 汽爆处理对秸秆体外发酵产气的影响

由于秸秆养分含量低和细胞壁的抗消化作用,秸秆的发酵速度比较缓慢,通常还有一定的延滞期,这是秸秆瘤胃降解率普遍较低的原因。本研究中,汽爆处理消除了秸秆发酵的延滞期,加速发酵进程,提高了体外发酵的产气速率和前期产气量,同时也降低了秸秆的理论最大产气量。原因是汽爆处理使木质纤维素解聚,促进微生物附着和酶解作用,同时纤维素和半纤维素大量降解成小分子物质,加快了秸秆发酵产气,提高了秸秆的消化率^[12-13]。虽然秸秆汽爆前后的终末产气量相当,但是食糜在瘤胃内的停留时间通常只有48h左右,消化缓慢的组分将随着胃肠蠕动排出体外;理论最大产气量表示饲料的发酵产气潜力,实际产气量与其差值越大表明饲料的发酵程度越低,饲料未得到充分利用。可见,汽爆处理促进秸秆发酵,提高了秸秆饲料的营养价值。另外,从产气量曲线对比来看,汽爆处理对玉米秸和稻秸发酵产气的提升作用比小麦秸的效果好,表明不同物料对汽爆处理的响应是不一样的,这可能是由3种秸秆的化学组分不同和种间结构差异造成的。

3.3 汽爆处理对秸秆营养价值参数的影响

粗饲料营养评价指标主要分为单项营养指标(常规化学成分、干物质采食量、可消化干物质等)和综合评价指标(粗饲料的分级指数(GI)、粗饲料相对值(RFV)、粗饲料质量指数(QI)等)^[16-17]。单一的化学指标只能反映粗饲料某一营养素含量的高低,没有考虑动物因素的影响,无法全面的评价粗饲料的营养价值。综合评价指标是以单项营养指标为基础,同时考虑了饲料因素和动物因素,结合多个单一指标建立起来的粗饲料评价参数,可以比较客观地评定粗饲料品质的优劣。粗饲料NDF含量与瘤胃充盈度密切相关,直接影响动物的采食量,而ADF含量与其有机物的消化率呈负相关^[18]。RFV

是基于粗饲料的中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)的含量,结合粗饲料的可消化干物质(DDM)和干物质采食量(DMI)而建立起来的一项粗饲料品质评价指数^[9]。本研究中,汽爆处理提高了秸秆的粗饲料相对值和干物质采食量,改善了秸秆饲料的品质,与利用单一化学指标评价结果一致。其主要原因是汽爆处理使秸秆NDF含量显著降低,提高了模型预测干物质采食量,进而提高了秸秆的粗饲料相对值。此外,单独利用一些中间变量(可消化干物质、产奶净能等)对粗饲料进行评价可能不太准确,有时会出现矛盾的结果,相比较而言,综合评价指标更能客观准确地反映粗饲料的饲用价值。

4 结论

汽爆处理使秸秆中半纤维素大量降解,中性洗涤纤维含量显著减少,体外发酵产气速率加快和前期产气量增加,粗饲料综合评价指标升高,具有较好的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 夏兆刚,孟庆翔.提高秸秆饲用价值的方法和途径[J].饲料研究,1999,2(6):21-24
Xia Z G, Meng Q X. Methods to improve the feed value of straw[J]. *Feed Research*, 1999, 2(6): 21-24 (in Chinese)
- [2] 常娟,尹清强,任天宝,张百良,宋安东,左瑞雨,卢敏,刘俊照.蒸汽爆破预处理和微生物发酵对玉米秸秆降解率的影响[J].农业工程学报,2011,4(27):277-280
Chang J, Yin Q Q, Ren T B, Zhang B L, Song A D, Zuo R Y, Lu M, Liu J X. Effect of steam explosion and microbial fermentation on corn straw degradation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 4(27): 277-280 (in Chinese)
- [3] 杨春和,张爱军,白晓龙,乔启成,陈效民.汽爆技术在农作物秸秆利用中的研究现状与进展[J].安徽农业科学,2008,36(36):16099-16101
Yang C H, Zhang A J, Bai X L, Qiao Q C, Cheng X M. Present situation and progress of study on the application of steam explosion technology in the utilization of crop straw [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2008, 36(36): 16099-16101 (in Chinese)
- [4] Chang J, Yin Q Q, Ren T B, Song A D, Zuo R Y, Lu M, Liu J X. Effect of steam explosion pretreatment and microbial fermentation on degradation of corn straw [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 343: 809-814
- [5] Wang X T, Zhang B L. Study on anaerobic digestion of steam-explosion pretreated cornstalk[J]. *China Biogas*, 2013, 31(1):

10-14

- [6] Menke K H, Raab L, Salewski A, Steingass H, Fritz D, Schneider W. 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]. *Journal of Agriculture Science*, 1979, 93(1): 217-222
- [7] 934. 01, 942. 05, 968. 06, 973. 18. AOAC. Official methods of analysis [S]. 16th ed. Arlington: Association of Official Analytical Chemists, 1997
- [8] France J, Dijkstra J, Dhanoa M S, Lopez S, Davies D R, Sanderson R, Sileshi Z. Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed *in vitro*: Derivation of models and other mathematical considerations [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2000, 83(2): 143-150
- [9] Rohweder D A, Barnesre, Orgensen N. Proposed hay grading standards based on laboratory analysis for evaluating quality [J]. *Journal of Animal Science*, 1978, 47(3): 747-759
- [10] 卢德勋. 乳牛营养技术精要[C]//2001年动物营养学术研讨会论文集. 呼和浩特: 内蒙古畜牧科学院, 2001
- Lu D X. Technical essence of dairy nutrition [C]. In: *Proceeding of Animal Nutrition Symposium*. Hubehaote: Animal Husbandry of Inner Mongolia Academy of Science, 2001 (in Chinese)
- [11] Menke K H, Steingass H. Estimation of the energetic feed value obtained by chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid [J]. *Animal Research Development*, 1988, 28: 7-55
- [12] Forsberg C W, Forano E, Chesson A. *Microbial Adherence to the Plant Cell Wall and Enzymatic Hydrolysis* [M]. In: Cronjen P B; Ruminant Physiology Digestion, Metabolism, Growth and Reproduction. Wallingford: CABI Publishing, 2000: 79-97
- [13] Sarkar N, Ghosh S K, Bannerjee S, Aikat K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 19-27
- [14] Zhang L, Li D, Wang L, Wang T P, Zhang L, Chen X D, Mao Z H. Effect of steam explosion on biodegradation of lignin in wheat straw [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(1): 8512-8515
- [15] Liu J X, Orskov E R, Chen X B. Optimization of steam treatment as a method for upgrading rice straw as feeds [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1999, 76(3/4): 345-357
- [16] John M, Daniel J U. Relative forage quality: An alternative to relative feed value and quality index [C]//In: Proceeding 13th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium. Gainesville: University of Florida Dairy Extension, 2002: 16-32
- [17] 张吉鹏, 卢德勋. 奶牛粗饲料品质的综合评价 [C]//中国奶业协会 2007 年会论文集. 北京: 中国奶业协会出版社, 2007
- Zhang J K, Lu D X. Quality evaluation of roughage for cow [C]. In: *Collected Paper of Dairy Association of China*. Beijing: China Dairy Industry Association Publishing, 2007 (in Chinese)
- [18] 吴秋珏. 饲料结构与非结构碳水化合物比例与绵羊消化代谢及瘤胃代谢参数 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005
- Wu Q Y. Effects of ratio of structural and nonstructural carbohydrates in diets on digestion and metabolism as well as rumen metabolic parameters for sheep [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005 (in Chinese)

责任编辑: 苏燕