

体外产气法和尼龙袋法评价北方 7 个品种小麦秸秆 饲用价值及有效降解率模型预测

程 景 张丹丹 李 博 靳 光 王栋才 徐 芳 孙锐锋 梁 圆 张元庆*

(山西农业大学(山西省农业科学院)动物科学学院,太原 030032)

摘 要: 本试验旨在通过体外产气法和尼龙袋法对北方 7 个品种小麦秸秆饲用价值进行评定,并建立有效降解率(ED)预测模型。采用体外产气法测定 72 h 动态产气量(GP)和发酵参数,并计算产气参数;采用尼龙袋法测定干物质降解率(DMD)、中性洗涤纤维降解率(NDFD)、酸性洗涤纤维降解率(ADFD),计算降解参数。结果表明:1) 晋麦 90 的 72 h GP 最高,晋麦 90 的体外干物质消化率(IVDMD)显著高于其他品种($P<0.05$);7 种小麦秸秆发酵液氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)含量在 23.18~28.57 mg/mL,发酵液 pH 在 6.77~6.97。苜蓿 0746-2 发酵液的乙酸、丙酸、丁酸、总挥发性脂肪酸含量显著高于其他品种($P<0.05$),鲁研 897 发酵液的乙酸/丙酸显著低于其他品种($P<0.05$)。2) 尼龙袋试验中,晋麦 90 的 DMD、NDFD、ADFD 及快速降解部分、慢速降解部分、ED 均最高,显著高于其他品种($P<0.05$)。3) 以 IVDMD 和 GP 预测的 ED 的回归方程为: $\text{ED} = -18.993 + 0.306\text{IVDMD} + 0.660\text{GP}$ ($R^2 = 0.884, P = 0.013$),以 DMD 预测的 ED 的回归方程为: $\text{ED} = 4.046 + 0.552\text{DMD}$ ($R^2 = 0.990, P < 0.001$)。综上所述,与其他 6 个品种相比,晋麦 90 的饲用价值相对较高,容易发酵、易于消化,但纤维含量高,在饲料中添加比例不宜过大。基于 ED 和 IVDMD、GP、DMD 的强相关性,建立 ED 的预测模型,可快速、有效地评价小麦秸秆 ED,为其营养价值评定提供参考。

关键词: 小麦秸秆;饲用价值;体外产气法;尼龙袋法;有效降解率

中图分类号:S816.15

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2020)09-4462-09

小麦作为一种传统的粮食作物,广泛种植于我国河南、河北、山西、河北等地^[1]。小麦是世界上种植面积最大的作物之一,也是我国三大粮食作物之一。据《中国统计年鉴》,2018 年我国小麦播种面积为 2 426.6 万 km^2 ,占全国农作物播种面积的 14.63%。小麦品种种类繁多,农民根据当地气候、土壤等需求选择种植,如晋麦 99 为山西省旱地小麦主推品种之一,在山西一个生长季种植面积在 3 000 亩(1 亩 $\approx 666.67 \text{ m}^2$)以上;烟 1212 具有高产、抗寒抗旱、抗病、抗干热风、抗倒伏等突

出优点,在全国快速、大面积推广,在全国每生长季种植面积在 4 000 万亩以上。

小麦种植面积广,产量丰富,据国家粮油信息中心预测,2019 年我国小麦秸秆产量将达到 1.34 亿 t。小麦秸秆采用遗弃甚至焚烧的处理方式,造成资源浪费、环境污染,若直接还田可带来清除杂草困难、土壤过度蓬松等问题。随着我国牛、羊等反刍动物饲养的快速发展,粗饲料供需缺口日益增大,充分开发利用本地粗饲料资源是形势所致,小麦秸秆价格低廉、种类繁多、来源广泛,

收稿日期:2020-03-05

基金项目:2019 农业农村部政府购买服务项目(16190050-07);国家重点研发计划(2018YFD0501703);山西省青年科技研究基金(201801D221309);山西省现代农业产业技术体系(2017-05);山西省农业科学院农业科技创新研究课题(YCX2018D2YS03)

作者简介:程 景(1988—),女,山西太谷人,助理研究员,硕士,研究方向为反刍动物营养与饲料科学。E-mail: chengjing1104@126.com

* 通信作者:张元庆,研究员,硕士生导师,E-mail: yuanqing_zhang@163.com

因此小麦副产品的质量也受到越来越多人的关注。小麦秸秆营养价值相对低,口感粗糙,并非理想的粗饲料来源^[2]。目前,鲜有对不同品种小麦秸秆营养价值评价的报道,人们对小麦秸秆在肉牛中的应用研究也较少。体外产气法和尼龙袋法已广泛应用于饲料饲用价值的评价^[3-4],通过上述2种方法对不同小麦品种进行系统的营养价值评定,探讨其做为牛、羊等反刍动物饲料的利用价值,对理论和实践均有重要意义。因此,本试验旨在研究山西省小麦主产区7个品种小麦秸秆的营养价值及其在肉牛瘤胃中的降解规律,并建立有效降解率(effective degradation, ED)的预测模型,为小麦秸秆在肉牛生产中的合理利用和饲料资源的开发提供理论依据和数据支持。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验所用的小麦秸秆采自山西省临汾市洪洞县,采集时间为2018年6月7日,即小麦腊熟期使用镰刀收割,自然晾晒风干后,65℃烘箱烘干后

粉碎,样品过40目筛,密封,放置阴凉处备用。

1.2 试验动物和饲养管理

试验采用单因子试验设计,选择4头体况良好、体重(553.7±36.4)kg、安装永久性瘤胃瘘管的晋南阉牛。试验牛饲粮按《肉牛营养需要和饲养标准》制定,饲粮精粗比40:60,按照山西省农业科学院畜牧兽医研究所试验牛场日常饲养管理方式饲养。

1.3 试验方法

1.3.1 体外产气试验

人工瘤胃缓冲溶液参照Menke等^[5]的方法新鲜配制,人工瘤胃缓冲液各组分组成见表1。按顺序依次蒸馏水400 mL,A液0.1 mL,B液200 mL,C液200 mL,刃天青1 mL,还原剂溶液40 mL。充分混匀后通入CO₂并预热至39℃待用,直至溶液颜色变淡或无色透明。晨饲前2h采集4头瘘管晋南牛瘤胃液各500 mL,用4层纱布过滤后混匀,与人工瘤胃缓冲液混合(瘤胃液与人工瘤胃缓冲液配比为1:2)制成人工瘤胃培养液,同时通入无氧CO₂直至溶液褪为无色。

表1 人工瘤胃缓冲液各组分组成

Table 1 Composition of components of artificial rumen buffer

项目 Items	组成 Composition
微量元素溶液 Microelement solution (A)	CaCl ₂ ·2H ₂ O 13.2 g、MnCl ₂ ·4H ₂ O 10.0 g、CoCl ₂ ·6H ₂ O 1.0 g、 FeCl ₃ ·6H ₂ O 8.0 g、蒸馏水定容至100 mL
缓冲溶液 Buffer solution (B)	NH ₄ HCO ₃ 4.0 g、NaHCO ₃ 35.0 g、蒸馏水定容至1 000 mL
常量元素溶液 Constant element solution (C)	Na ₂ HPO ₄ 5.7 g、KH ₂ PO ₄ 6.2 g、MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.6 g、蒸馏水定容至1 000 mL
指示剂溶液 Indicator solution	刃天青,0.1%(m/V)
还原剂溶液 Reduction solution	1 mol/L NaOH 4.0 mL、Na ₂ S·9H ₂ O 625.0 mg、蒸馏水定容至100 mL

称取0.22 g培养底物置于培养管底端,每组3个重复,试验共重复3个批次,每批次设3个空白对照。各培养管分别加入30 mL人工瘤胃培养液,将玻璃注射器内空气排尽,于39℃摇床连续培养72 h,试验共重复3个批次。分别于发酵0、1、2、3、4、6、8、10、12、16、20、24、28、32、36、40、48、54、60、72 h记录产气量(gas production, GP),发酵72 h后将样品从水浴摇床中取出后迅速置于冰水中以终止发酵。将发酵液排出至50 mL离心管中,4℃、5 400 r/min,离心15 min提取上清液,测定pH后,-20℃保存,用于测定氨态氮(NH₃-N)、

挥发性脂肪酸(VFA)含量,反应后残渣用蒸馏水清洗3遍,于65℃烘箱中烘干至恒重,用于计算体外干物质消化率(IVDMD)。

1.3.2 尼龙袋试验

称取2 g左右样品装入尼龙袋(12 cm×6 cm, 50 μm孔径)中,要求精确到0.000 1 g,每个样品每时间点设置3个重复。放入装有永久性瘤胃瘘管的晋南阉牛的瘤胃中,在发酵时间为0、4、8、16、24、36、48、72 h取出尼龙袋,冰水终止反应后用自来水冲洗尼龙袋直到水澄清,于65℃烘箱中烘干至恒重。

1.3.3 常规营养成分测定

发酵底物、发酵 72 h 残渣、尼龙袋试验残渣的干物质 (DM)、粗灰分 (Ash)、粗蛋白质 (CP)、粗脂肪 (EE)、可溶性糖 (WSS) 含量的测定参照 AOAC (2000) [6] 的方法; 中性洗涤纤维 (NDF) 和酸性洗涤纤维 (ADF) 含量的测定参照 Van Soest 等 [7] 的方法, 采用 ANKOM A200i 纤维分析仪 (美国 ANKOM 公司) 测定。

1.4 参数模拟

体外发酵模型计算产气参数:

$$GP = b(1 - e^{-c(t-Lag)})^{[8]}$$

式中: GP 为 t 时间点 0.22 g 底物某一营养成分的产气量 (mL); b 为 0.22 g 底物的理论最大产气量 (mL); c 为产气速度 (h^{-1}); t 为体外培养时间 (h); Lag 为延滞期 (h)。

饲料营养物质的瘤胃降解参数计算公式 [9] 如下:

$$P(t) = a + b \times (1 - e^{-ct});$$

$$ED = a + (b \times c) / (c + k).$$

式中: $P(t)$ 为 t 时间点干物质消化率 (%); a 为快速降解部分含量 (%); b 为慢速降解部分含量 (%); t 为饲料在瘤胃中留滞时间 (h); c 为慢速降解部分的降解速率 (%/h); ED 为饲料中营养物质有效降解率 (%); k 为待测饲料的瘤胃流通速率 (%/h), $k = 0.0253^{[7]}$ 。

IVDMD 计算公式:

$$A = 100 \times (B - C) / B.$$

式中: A 为待测小麦秸秆 IVDMD; B 为样品中待测小麦秸秆 DM 含量 (%); C 为残渣中待测小麦秸秆 DM 含量 (%)。

1.5 统计分析

试验数据采用平均值 \pm 标准差表示。用 Excel 2010 进行数据整理, SPSS 21.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 氏法多重比较。 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 7 种小麦秸秆的常规营养成分

由表 2 可知, 7 种小麦秸秆的 DM 含量均达到 90% 以上, 烟 1212 的 DM 含量最高 (96.06%); 苜蓿 0746-2 的 NDF 含量最高 (68.67%), 而中麦 5051 的 NDF 含量最低 (63.53%); 冀麦 659 的 ADF 含量最高 (42.26%), 而晋麦 90 的 ADF 含量最低 (36.60%); 7 种小麦秸秆的 CP 含量在 3.16% ~ 5.42%, 以良星 99 的 CP 含量最高 (5.42%); 烟 1212 的 EE 含量最低 (1.13%); 良星 99 的粗灰分含量最高 (12.35%), 而鲁研 897 的粗灰分含量最低 (9.73%); 苜蓿 0746-2 的 WSS 含量最高 (5.02%), 而良星 99 的 WSS 含量最低 (2.78%)。

表 2 7 种小麦秸秆的常规营养成分 (风干基础)

Table 2 Conventional nutritional composition of 7 kinds of wheat straw (air-dry basis)

项目 Items	干物质 DM	粗蛋白质 CP	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	粗脂肪 EE	粗灰分 Ash	可溶性糖 WSS
烟 1212 Yan 1212	96.06 \pm 0.13	3.84 \pm 0.05	68.15 \pm 1.41	41.72 \pm 2.70	1.13 \pm 0.49	10.72 \pm 0.11	3.29 \pm 0.12
中麦 5051 Zhongmai 5051	93.32 \pm 0.21	4.10 \pm 0.01	63.53 \pm 1.01	38.87 \pm 1.40	2.36 \pm 0.15	10.59 \pm 0.06	4.46 \pm 0.07
鲁研 897 Luyan 897	95.40 \pm 0.02	4.02 \pm 0.05	68.40 \pm 2.01	41.67 \pm 1.41	1.85 \pm 0.15	9.73 \pm 0.01	2.92 \pm 0.07
良星 99 Liangxing 99	94.32 \pm 0.02	5.42 \pm 0.05	64.99 \pm 2.20	40.84 \pm 1.39	2.58 \pm 0.15	12.35 \pm 0.24	2.78 \pm 0.06
冀麦 659 Jimai 659	93.83 \pm 0.40	3.16 \pm 0.21	68.14 \pm 2.18	42.26 \pm 1.51	2.03 \pm 0.32	11.13 \pm 0.04	2.81 \pm 0.08
苜蓿 0746-2 Hemai 0746-2	93.94 \pm 0.22	4.07 \pm 0.06	68.67 \pm 0.68	42.18 \pm 0.62	2.36 \pm 0.39	10.11 \pm 0.06	5.02 \pm 0.07
晋麦 90 Jinmai 90	92.64 \pm 0.06	3.53 \pm 0.02	64.88 \pm 0.51	36.60 \pm 1.22	2.17 \pm 0.18	10.65 \pm 0.01	3.51 \pm 0.06

2.2 7 种小麦秸秆的体外 GP、相关参数及 IVDMD

如图 1 所示,7 种小麦秸秆体外发酵过程均包括 2 个阶段,前期的产气速度较快,随后速度减慢直至达到平台期。72 h 内总 GP 均呈递增趋势。

由表 3 可知,7 种小麦秸秆的 72 h GP 和理论最大产气量的结果基本一致,且均以晋麦 90 最高。通过模型预测的理论最大产气量除烟 1212 外,均大于实际 GP。晋麦 90 的理论最大产气量最高(53.55 mL),且显著高于良星 99 ($P<0.05$),与其他品种差异不显著 ($P>0.05$);良星 99 的产气速度最高,显著高于苜麦 0746-2 和中麦 5051 ($P<0.05$),与其他品种差异不显著 ($P>0.05$);良星 99 的延滞期最长,显著高于苜麦 0746-2、中麦 5051 和鲁研 897 ($P<0.05$),与其他品种差异不显著 ($P>0.05$)。晋麦 90 的 IVDMD 最高(62.86%),且显著高于其他品种 ($P<0.05$)。良星 99 的发酵液 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最高(28.57 mg/mL),显著高于冀麦

659 和晋麦 90 ($P<0.05$),与其他品种差异不显著 ($P>0.05$)。发酵 72 h 后,发酵液 pH 在 6.77~6.97,良星 99 的发酵液 pH 最高(6.97),显著高于冀麦 659 和苜麦 0746-2 ($P<0.05$),与其他品种差异不显著 ($P>0.05$)。

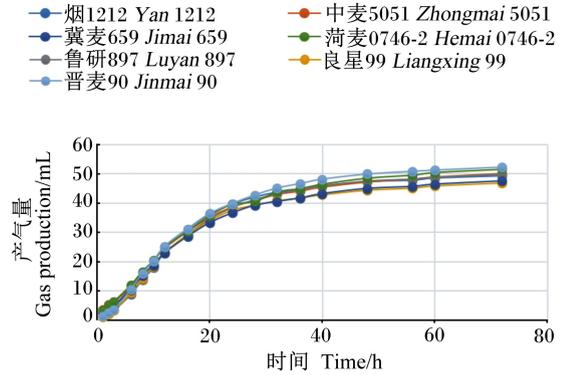


图 1 7 种小麦秸秆体外发酵 GP

Fig.1 Gas production of 7 kinds of wheat straws

表 3 7 种小麦秸秆的 IVDMD、降解参数和产气参数

Table 3 IVDMD, degradation parameters and gas production parameters of 7 kinds of wheat straws

项目 Items	72 h 产气量 72 h gas production/ mL	产气参数 Gas production parameters			体外干物质 降解率 IVDMD/%	氨态氮 $\text{NH}_3\text{-N}/$ (mg/mL)	pH
		理论最大产气量 Theory of maximum gas production (b)/mL	产气速度 Rate of gas production (c)/h ⁻¹	延滞期 Lag time (Lag)/h			
烟 1212 Yan 1212	49.27±3.80 ^{abc}	48.36±6.16 ^{ab}	0.992±0.303 ^{ab}	0.062±0.006 ^a	50.54±2.04 ^{cd}	25.66±1.3 ^{abc}	6.83±0.09 ^{ab}
中麦 5051 Zhongmai 5051	50.17±0.89 ^{abc}	51.30±0.86 ^{ab}	0.403±0.533 ^b	0.055±0.001 ^b	53.46±1.64 ^{bc}	27.36±3.70 ^{ab}	6.88±0.04 ^{ab}
鲁研 897 Luyan 897	49.70±2.23 ^{abc}	51.44±2.23 ^{ab}	1.494±0.093 ^a	0.056±0.003 ^b	56.65±0.95 ^b	25.46±0.97 ^{abc}	6.86±0.06 ^{ab}
良星 99 Liangxing 99	46.94±1.40 ^c	47.44±1.40 ^b	1.613±0.235 ^a	0.063±0.001 ^a	53.93±1.25 ^{bc}	28.57±1.03 ^a	6.97±0.12 ^a
冀麦 659 Jimai 659	47.47±1.73 ^{bc}	48.40±1.72 ^{ab}	1.142±0.618 ^a	0.059±0.004 ^{ab}	47.95±1.19 ^d	23.56±0.07 ^{bc}	6.80±0.08 ^b
苜麦 0746-2 Hemai 0746-2	51.60±2.58 ^{ab}	52.87±2.63 ^{ab}	0.430±0.211 ^b	0.054±0.004 ^b	50.91±1.90 ^{cd}	25.65±3.75 ^{abc}	6.77±0.05 ^b
晋麦 90 Jinmai 90	52.20±1.08 ^a	53.55±1.14 ^a	1.391±0.061 ^a	0.058±0.002 ^{ab}	62.86±2.84 ^a	23.18±0.28 ^c	6.83±0.05 ^{ab}

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$),相同或无字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。表 4 同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as Table 4.

2.3 7种小麦秸秆的发酵液VFA含量

由表4可知,7种小麦秸秆体外发酵72 h后,发酵液的总挥发性脂肪酸(TVFA)含量为苜蓿0746-2>中麦5051>晋麦90>烟1212>良星99>冀

麦659>鲁研897。苜蓿0746-2发酵液的乙酸、丙酸、丁酸、总挥发性脂肪酸含量显著高于其他品种($P<0.05$);鲁研897发酵液的乙酸/丙酸最低,显著低于其他品种($P<0.05$)。

表4 7种小麦秸秆的发酵液VFA含量

Table 4 Fermentation broth VFA content of 7 kinds of wheat straws

项目 Items	乙酸 Acetic acid/ (mmol/L)	丙酸 Propionic acid/ (mmol/L)	丁酸 Butyric acid/ (mmol/L)	总挥发性脂肪酸 Total volatile fatty acid/(mmol/L)	乙酸/丙酸 Acetic acid/ propionic acid
烟1212 Yan 1212	35.42±0.64 ^c	11.83±0.56 ^c	4.12±0.04 ^d	53.87±0.52 ^c	3.00±0.09 ^{ab}
中麦5051 Zhongmai 5051	39.53±0.57 ^b	13.43±0.39 ^b	4.73±0.02 ^b	60.40±1.37 ^b	2.94±0.02 ^{ab}
鲁研897 Luyan 897	33.30±0.73 ^d	11.92±0.47 ^c	3.92±0.07 ^c	50.17±0.89 ^d	2.85±0.03 ^c
良星99 Liangxing 99	34.17±1.23 ^{cd}	11.47±0.45 ^c	3.92±0.14 ^c	52.73±1.29 ^{cd}	2.98±0.02 ^{ab}
冀麦659 Jimai 659	34.25±0.47 ^{cd}	11.45±0.21 ^c	4.23±0.04 ^d	52.45±1.52 ^{cd}	2.96±0.02 ^{ab}
苜蓿0746-2 Hemai 0746-2	44.93±0.68 ^a	14.87±0.26 ^a	5.43±0.11 ^a	68.44±0.91 ^a	3.02±0.01 ^a
晋麦90 Jinmai 90	38.58±1.56 ^b	13.17±0.51 ^b	4.55±0.19 ^c	58.84±1.13 ^b	2.93±0.01 ^b

2.4 尼龙袋试验结果

由表5可知,尼龙袋法测定7种小麦秸秆72 h时干物质降解率(DMD)、中性洗涤纤维降解率

(NDFD)、酸性洗涤纤维降解率(ADFD)均以晋麦90最高,且显著高于其他品种($P<0.05$)。

表5 7种小麦秸秆的DMD、NDFD和ADFD

Table 5 DMD, NDFD and ADFD of 7 kinds of wheat straws

项目 Items	烟1212 Yan 1212	中麦5051 Zhongmai 5051	鲁研897 Luyan 897	良星99 Liangxing 99	冀麦659 Jimai 659	苜蓿0746-2 Hemai 0746-2	晋麦90 Jinmai 90	%
干物质降解率 DMD	43.19±2.63 ^{cd}	47.66±2.87 ^b	46.57±2.13 ^{bc}	46.57±2.74 ^{bc}	42.00±1.84 ^d	49.05±1.11 ^b	56.39±0.77 ^a	
中性洗涤纤维降解率 NDFD	45.75±2.51 ^{cd}	48.78±2.81 ^b	47.85±2.08 ^{bc}	47.78±2.66 ^{bc}	42.77±1.81 ^d	51.14±1.07 ^b	58.97±0.73 ^a	
酸性洗涤纤维降解率 ADFD	46.17±2.49 ^b	47.56±2.88 ^b	48.73±2.04 ^b	47.38±2.68 ^b	41.56±1.85 ^c	50.09±1.09 ^b	57.28±0.76 ^a	

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。表6同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as Table 6.

由表6可知,根据模型计算降解参数,晋麦90的快速降解部分、慢速降解部分和ED均最高,且显著高于其他品种($P<0.05$)。

2.5 体外产气法与尼龙袋法相关性分析

由表7可知,7种小麦秸秆72 h的ED与IVDMD、GP呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.843、0.807;ED与DMD呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为0.995。

由表8可知,以IVDMD和GP预测的ED的回归方程为:ED = -18.993 + 0.306IVDMD +

0.660GP ($R^2=0.884$, $P=0.013$),以DMD预测的ED的回归方程为:ED = 4.046 + 0.552DMD ($R^2=0.990$, $P<0.001$)。

3 讨论

3.1 7种小麦秸秆的常规营养成分

7种小麦秸秆的常规营养成分各不相同,其差异与品种、成熟时间等有关。本试验中,7种小麦秸秆的DM含量在92.64%~96.06%,均高于于胜晨等^[2]的研究结果。由于小麦收割期已处于小麦

完熟期的后期,同时因夏季采样,小麦秸秆水分流失较多。小麦秸秆的 CP、NDF、ADF 含量直接影响其饲用价值。本试验中,7 种小麦秸秆的 CP 含量在 3.16%~5.42%,这与孟梅娟等^[10]的研究结果一致,但低于于胜晨等^[2]报道的 7.8%;NDF 含量在 64.88%~68.40%,ADF 含量在 36.60%~

42.26%,这与于胜晨等^[2]、孟梅娟等^[10]的研究结果一致;EE 含量在 1.10%~2.58%,与魏晨等^[1]的研究结果一致。由此可见,小麦秸秆的 CP 含量低,纤维和 Ash 含量高,在一定程度上限制了其在生产中的应用,但小麦产量高,可作为辅助性粗饲料配合使用。

表 6 7 种小麦秸秆的瘤胃降解参数

Table 6 Rumen degradation parameters of 7 kinds of wheat straws

项目 Items	烟 1212 Yan 1212	中麦 5051 Zhongmai 5051	鲁研 897 Luyan 897	良星 99 Liangxing 99	冀麦 659 Jimai 659	苜麦 0746-2 Hemai 0746-2	晋麦 90 Jinmai 90
快速降解部分 Rapidly degraded fraction (a)/%	8.40 ±0.40 ^b	8.07 ±0.61 ^b	8.14 ±0.17 ^b	7.72 ±0.35 ^b	7.73 ±0.52 ^b	8.82 ±1.33 ^b	10.14 ±0.47 ^a
慢速降解部分 Slowly degraded fraction (b)/%	58.71 ±0.55 ^b	49.68 ±0.03 ^c	53.78 ±2.13 ^{cd}	56.73 ±0.31 ^{bc}	46.44 ±1.91 ^f	52.00 ±3.21 ^{de}	72.20 ±1.85 ^a
慢速降解部分的 降解速率 Degradation rate of slowly degraded fraction (c)/(%/h)	0.012 ±0.000 ^c	0.020 ±0.000 ^a	0.017 ±0.001 ^{bc}	0.015 ±0.000 ^{cd}	0.018 ±0.001 ^{abc}	0.020 ±0.003 ^{ab}	0.013 ±0.000 ^{dc}
有效降解率 ED/%	27.81 ±0.32 ^d	30.21 ±0.28 ^c	29.97 ±0.18 ^c	29.41 ±0.72 ^c	27.22 ±0.47 ^d	31.57 ±0.46 ^b	35.04 ±0.43 ^a

表 7 ED 与 IVDMD、DMD、GP 的相关性

Table 7 Correlation between ED and IVDMD, DMD and GP

项目 Item	体外干物质降解率 IVDMD	产气量 GP	干物质降解率 DMD
有效降解率 ED	0.843 [*]	0.807 [*]	0.995 ^{**}

* 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)。

* mean significant correlation ($P<0.05$), ** mean extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 8 IVDMD、GP 和 DMD 预测 ED 的回归方程

Table 8 Regression equations for ED predicted by IVDMD, GP and DMD

回归方程 Regression equations	决定系数 R^2	P 值 P-value
ED = -18.993 + 0.306IVDMD + 0.660GP	0.884	0.013
ED = 4.046 + 0.552DMD	0.990	<0.001

3.2 不同品种小麦秸秆体外 GP 和发酵参数的差异

体外产气法是国际上常用的饲草料资源饲用价值的评定方法,通过 GP 较真实地模拟反刍动物瘤胃中有机物质的消化水平^[11-12]。饲料中可发酵的有机物含量越高,GP 越高。但是单纯依赖体外 GP 不能直接衡量饲料的降解程度,还需要结合

IVDMD 等指标来综合评定。粗饲料的 DMD 受纤维含量和木质化程度的影响,可反映粗饲料体内消化降解的难易程度^[13]。本试验中,72 h GP 以晋麦 90 最高,说明晋麦 90 含有较多的可发酵碳水化合物和易发酵成分,因良星 99 的 Ash 含量高导致其 GP 低。7 种小麦秸秆的 IVDMD 差异较大 (47.95%~62.86%),可见其在瘤胃中的发酵利用

程度各不相同。马君军^[14]认为饲料的消化率和体外瘤胃发酵培养时 GP 高度相关,饲料在瘤胃内的降解率越高,GP 越大。但本试验条件下,良星 99 的 72 h GP 最低,IVDMD 却处于居中水平,这与其 CP 含量高有关,导致 IVDMD 提高。

反刍动物瘤胃液的 pH 可反映瘤胃内环境状态,主要影响因素为碱性物质(如 $\text{NH}_3\text{-N}$)和有机酸。苜蓿 0746-2 的 pH 最低,和其发酵液中 TVFA 含量高有关。同时发酵底物的营养成分也会影响发酵液 pH,良星 99 的 CP 含量最高,WSS 含量最低,因此其 pH 最高。

瘤胃中氮留存率是评价反刍动物饲料蛋白质利用率的重要标志^[15]。本试验结果中良星 99 的发酵液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最高,晋麦 90 最低。一是因为良星 99 的 CP 含量最高,晋麦 90 的 CP 含量最低,这与马露等^[16]研究结果一致;二是良星 99 的 GP 最低,晋麦 90 的 GP 最高,说明良星 99 可发酵碳水化合物含量低,而晋麦 90 的可发酵碳水化合物含量高,偏少时限制微生物的活性和对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的摄取和转化。

3.3 不同小麦秸秆体外发酵液 VFA 含量的差异

瘤胃发酵所产生的 VFA 可满足牛生活生产所需能量的 65%左右,其中乙酸、丙酸、丁酸等 VFA 是瘤胃碳水化合物发酵的主要产物,约占 TVFA 的 95%,VFA 的主要作用是给动物生产提供能量以及维持瘤胃环境^[17]。本试验条件下,苜蓿 0746-2 的乙酸、丙酸和丁酸含量显著高于其他几个品种,表明苜蓿 0746-2 中碳水化合物发酵较为完全。各品种小麦秸秆体外发酵液中乙酸/丙酸相差不多,且本试验条件下的小麦秸秆体外发酵液中乙酸/丙酸与苜蓿青贮、苜蓿干草等相比均较低^[18],这与小麦秸秆本身与苜蓿青贮、苜蓿干草等优质饲草相比碳水化合物含量低密切相关。

3.4 尼龙袋法评价不同小麦秸秆营养物质降解率

反刍动物干物质采食量与粗饲料的 DMD 呈正相关^[18]。本试验中,晋麦 90 的 DMD 最高,表明该品种小麦秸秆易被消化利用,这与体外产气试验结果一致。NDFD 和 ADFD 是评价反刍动物饲料纤维品质的重要指标。本试验中,晋麦 90 的纤维利用率最高,72 h 体内 NDFD 和 ADFD 均达到 57%以上,与大豆秸秆、羊草等相近^[14,19]。7 种小麦秸秆的快速降解部分在 7.76%~10.14%,远低于全株玉米青贮、苜蓿青贮、燕麦草等,这与其

CP、EE、非结构性碳水化合物含量低有关^[19-20];慢速降解部分在 45.34%~73.26%,远高于全株玉米青贮、苜蓿青贮、燕麦草等,这与其结构性碳水化合物含量高有关^[13-14,19]。

3.5 体外产气法与尼龙袋法测定干物质降解率相关性分析

马绍楠等^[20]研究结果表明,随产气时间增加,GP 与 ED 相关性逐渐减弱,GP_{24h} 与 ED 相关性最高,且以 GP_{24h} 建立的预测 ED 的方程显著。本试验中半体内消化 72 h 时,ED 与 IVDMD、GP 呈显著正相关,与 DMD 呈极显著正相关。以 IVDMD 和 GP 预测的 ED 的方程为: $\text{ED} = -18.993 + 0.306\text{IVDMD} + 0.660\text{GP}$ ($R^2 = 0.884$, $P = 0.013$),可在相关试验中通过体外产气法中的 72 h 的 IVDMD 和 GP 估算 ED;以 DMD 预测的 ED 的方程为: $\text{ED} = 4.046 + 0.552\text{DMD}$ ($R^2 = 0.990$, $P < 0.001$),在尼龙袋试验中可直接使用 72 h 的 DMD 估算 ED,而减去了根据不同时间点的降解率来计算 ED 的繁琐。

4 小 结

① 各品种小麦秸秆的营养价值和体外降解特性存在差异,从整体来看,小麦秸秆仍可作为反刍动物粗饲料的可靠来源。

② 与其他品种相比,晋麦 90 营养价值相对较好,容易发酵、易于消化,具有一定的优势,更适用于作为反刍动物粗饲料使用,但纤维含量高,在饲料中添加比例不宜过大。

③ 基于 ED 与 IVDMD、GP、DMD 的强相关性,建立了 ED 的预测模型,可快速、有效地评价小麦秸秆 ED,为评定小麦秸秆营养价值提供参考。

参考文献:

- [1] 魏晨,游伟,万发春,等.不同地区小麦秸秆的营养价值及瘤胃降解规律[J].饲料工业,2018,39(23): 13-17.
- [2] 于胜晨,曹水清,任有蛇,等.肉羊常用农作物秸秆类粗饲料营养价值及瘤胃降解特性[J].中国畜牧杂志,2017,53(9):69-74,85.
- [3] DE SOUZA A D V, ÍTAVO L C V, FAVARO S P, et al. Thermal decomposition, chemical composition, *in vitro* digestibility and gas production and *in situ* degradability of oilseed residues from the biofuel industry[J]. Animal Science Journal, 2018, 89(1): 79-87.

- [4] KONDO M,HIRANO Y,KITA K,et al.Nutritive evaluation of spent green and black tea leaf silages by *in vitro* gas production characteristics,ruminal degradability and post-ruminal digestibility assessed with inhibitory activity of their tannins[J].Animal Science Journal,2018,89(12):1656-1662.
- [5] 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.
- [6] AOAC.Official methods of analysis [S]. 19th ed. Washington, D. C.: Association of Official Analytical Chemists,2012.
- [7] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74 (10): 3583-3597.
- [8] FRANCE J,DIJKSTRA J,DHANOVA M S,et al.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].British Journal of Nutrition, 2000,83(2):143-150.
- [9] 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.
- [10] 孟梅娟,涂远璐,白云峰,等.小麦秸秆与米糠粕瘤胃体外发酵组合效应研究[J].草业学报,2016,25(9):161-172.
- [11] 李妍,韩肖敏,李建国,等.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[J].草业学报,2017,26(5):213-223.
- [12] 王珊,史良峰,张振斌,等.麻叶荨麻和羊草比例对体外培养瘤胃微生物发酵参数的影响[J].家畜生态学报,2018,39(4):33-37.
- [13] 陈晓琳,刘志科,孙娟,等.不同牧草在肉羊瘤胃中的降解特性研究[J].草业学报,2014,23(2):268-276.
- [14] 马君军.吉林省肉牛 4 种饲料养分浓度、瘤胃降解和体外发酵特性及其相关性研究[D].硕士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2018;39.
- [15] 石宁,贾淼,李艳玲.体外产气法研究植物精油对肉羊体外瘤胃发酵参数及甲烷产量的影响[J].动物营养学报,2019,31(1):274-284.
- [16] 马露,闫素梅,赵鹏,等.日粮不同 CP 及 RUP 水平对奶牛瘤胃发酵的影响[J].畜牧与饲料科学,2011,32(9):107-112.
- [17] 冯仰廉.反刍动物营养学[M].北京:科学出版社,2004;335-336.
- [18] 张霞,李妙善,周恩光,等.西北地区 4 种优质饲草的肉牛体外瘤胃发酵性能研究[J].草业学报,2019,28(9):135-145.
- [19] 魏晨,刘桂芬,游伟,等.6 种反刍动物常用粗饲料在肉牛瘤胃中的降解规律比较[J].动物营养学报,2019,31(4):1666-1675.
- [20] 马绍楠,许贵善,李娜,等.新疆南疆养羊常用粗饲料体外产气量与有效降解率的相关性分析[J].饲料工业,2018,39(5):33-39.

Evaluation on Feeding Value of 7 Kinds of Wheat Straws in North by *in Vitro* Gas Production and Nylon Bag Methods and Prediction Model of Effective Degradation

CHENG Jing ZHANG Dandan LI Bo JIN Guang WANG Dongcai XU Fang SUN Ruifeng
LIANG Yuan ZHANG Yuanqing*

(College of Animal Science, Shanxi Agricultural University(Shanxi Academy of
Agricultural Science), Taiyuan 030032, China)

Abstract: In this experiment, the feeding value of 7 varieties of wheat straws in north were evaluate by *in vitro* gas production and nylon bag methods, and to build the prediction model of effective degradation (ED). The 72 h dynamic gas production (GP) and fermentation parameters were determined by gas production method, and the gas production parameters were calculated. The dry matter degradation (DMD), neutral detergent fiber degradation (NDFD) and acid detergent fiber degradation (ADFD) were measure using nylon bag method, and the degradation parameters were calculated. The results showed as follows: 1) the 72 h GP of *Jinmai* 90 was the highest, and the *in vitro* dry matter degradation (IVDMD) of *Jinmai* 90 was significant higher than that of others varieties ($P<0.05$). The contents of ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) in fermentation broth of 7 varieties of wheat straws were 23.18 to 28.57 mg/mL, and the fermentation broth pH were 6.77 to 6.97. The contents of acetic acid, propionic acid, butyric acid and total volatile fatty acid in fermentation broth of *Hemai* 0746-2 were significantly higher than those of others varieties ($P<0.05$), and the acetic acid/propionic acid in fermentation broth of *Luyan* 897 was significantly lower than that of others varieties ($P<0.05$). 2) In the experiment of nylon bag, the DMD, NDFD, ADFD and rapidly degraded fraction, slowly degraded fraction, ED of *Jinmai* 90 were the highest, and significantly higher than those of others varieties ($P<0.05$). 3) The regression equation for ED predicted by IVDMD and GP was: $\text{ED} = -18.993 + 0.306\text{IVDMD} + 0.660\text{GP}$ ($R^2 = 0.884, P = 0.013$), and the regression equation for ED predicted by DMD was: $\text{ED} = 4.046 + 0.552\text{DMD}$ ($R^2 = 0.990, P < 0.001$). In conclusion, compared with other 6 varieties, *Jinmai* 90 has high feeding value, and easy to fermentation and digestion, but has high fiber content, which is recommended to be used in small amounts in the diet. Based on the strong correlation between the ED and IVDMD, GP, DMD, the ED of wheat straws can be evaluated quickly and effectively by ED prediction model, which provides a reference for the nutritional value assessment. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(9):4462-4470]

Key words: wheat straw; feeding value; *in vitro* gas production method; nylon bag method; effective degradation