

DOI: 10.11686/cyxb2019354

http://cyxb.magtech.com.cn

周恩光, 王虎成, 尚占环. 甜高粱的饲用价值及其绵羊体外瘤胃发酵产气性能研究. 草业学报, 2020, 29(5): 43—49.

Zhou E G, Wang H C, Shang Z H. Nutritional value of forage sweet sorghum and its gas production performance evaluated using incubation with sheep rumen fluid *in vitro*. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(5): 43—49.

甜高粱的饲用价值及其绵羊体外瘤胃发酵产气性能研究

周恩光¹, 王虎成^{1*}, 尚占环²

(1. 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业教育部工程研究中心, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本试验旨在研究不同收割时期饲用甜高粱的饲用价值及其绵羊体外瘤胃发酵产气性能, 分别对8—11月收割的甜高粱(大奖3180, 标记为 S_1 、 S_2 、 S_3 与 S_4)的养分含量及相对饲喂价值(RFV)、总可消化养分(TDN)、干物质采食量(DMI)、可消化干物质(DDM)和牧草相对饲用品质(RFQ)进行评价。利用体外模拟发酵产气技术评定不同收割时期的甜高粱在3、6、9、12、24、36和48 h体外产气规律, 估算降解率。结果表明, 1)不同收割时期的甜高粱的干物质(DM)、粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、粗脂肪(EE)和粗灰分(Ash)含量差异均显著($P < 0.05$)。2)不同收割时期的甜高粱的RFV、DMI、RFQ呈现出 $S_1 > S_4 > S_3 > S_2$, 差异极显著($P < 0.001$)。 S_1 和 S_4 的TDN和DDM含量差异不显著($P > 0.05$), 但极显著高于 S_2 和 S_3 ($P < 0.001$)。3)在培养12 h之前, 不同收割时期的甜高粱产气量(GP)差异极显著($P < 0.001$), 且 S_3 的GP最高; 24 h后, S_4 的GP显著高于 S_2 ($P < 0.05$); 培养36 h后不同收割时期的甜高粱GP差异不显著($P > 0.05$)。4)不同时期收割的甜高粱在发酵12、24、48 h的干物质消失率(DMD)均无显著差异($P > 0.05$)。综上结果, 8月对黄土高原丘陵沟壑区甜高粱进行收割时饲用价值最好。

关键词: 甜高粱; 收割时期; 营养价值; 体外发酵性能

Nutritional value of forage sweet sorghum and its gas production performance evaluated using incubation with sheep rumen fluid *in vitro*

ZHOU En-guang¹, WANG Hu-cheng^{1*}, SHANG Zhan-huan²

1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. College of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: This experiment studied the nutritional value and gas production performance, when incubated with sheep rumen fluid, of sweet sorghum forage harvested at different crop growth stages. The forage sweet sorghum cultivar Dajiang 3180 was harvested in August (S_1), September (S_2), October (S_3) and November (S_4), the herbage nutritive value analyzed. And the relative feeding value (RFV), total digestible nutrient (TDN), dry matter intake (DMI), digestible dry matter (DDM) and relative forage quality (RFQ) were evaluated.

收稿日期: 2019-08-14; 改回日期: 2019-09-30

基金项目: 定西市安定区草地农业试验示范区建设项目(GCLM2017)和甘肃省重大科技专项计划项目“饲用甜高粱种质创新及栽培饲用技术研究”与示范(1502NKDA005-3)”资助。

作者简介: 周恩光(1992-), 男, 河南商丘人, 在读硕士。E-mail: zhoueg17@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wanghucheng@lzu.edu.cn

ated. Herbage digestibility and the gas production at 3, 6, 9, 12, 24, 36 and 48 h were evaluated by *in vitro* simulated fermentation. It was found that: 1) There were significant differences in dry matter, crude protein, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, ethanol extract and crude ash levels at the different harvest dates ($P < 0.05$). 2) There were significant differences across the four harvest periods in RFV, DMI and RFQ ($S_1 > S_4 > S_3 > S_2$) ($P < 0.001$). The TDN and DDM of S_1 and S_4 were higher than the S_2 and S_3 harvests ($P < 0.001$). 3) For the first 12 h of fermentation, there were gas production (GP) differences between the four harvest periods ($P < 0.001$), with the GP of S_3 being the highest. After 24 h, the GP of S_4 was higher than S_2 ($P < 0.05$); There were no significant differences in GP between the four harvest periods after 36 h incubation ($P > 0.05$). 4) There were no significant difference in DMD between the four harvest periods at 12, 24 and 48 h of incubation ($P > 0.05$). In summary, the feeding value of sweet sorghum in the ‘hill and gully’ region of the Loess Plateau, China, is highest in August.

Key words: sweet sorghum; harvest period; nutritional value; *in vitro* fermentation characteristics

饲草作物作为反刍动物的主要饲料来源,在畜牧业中占有很重要的地位。大力推广优质饲草种植和提高饲料的利用率对缓解我国草畜发展不平衡有重要意义^[1-2]。而同种饲草在不同时期其营养价值不同,掌握牧草的营养动态变化规律,对于改善和调控家畜营养状况有重要意义。在众多反刍动物营养价值评定方法中体外法因其操作简单、能够较快速地反映饲料在瘤胃内的消化状况而被广泛应用^[3-4]。甜高粱(*Sorghum dochna*)因其生物产量高、营养丰富、耐寒、耐旱、抗涝等特性被用作动物粗饲料广泛种植^[5-6]。唐桃霞等^[7]研究表明,适度的刈割频率有利于甜高粱的粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(ethanol extract, EE)、粗灰分(crude ash, Ash)和可溶性糖的积累,提高甜高粱的饲用价值。李春宏等^[8]研究表明,江苏地区的头茬甜高粱在早期和中期进行刈割,其生物学产量高,品质较好。李珊珊等^[2]研究表明,随着生育期的推进,甜高粱的 CP 和 Ash 含量显著降低,中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量显著升高,饲用价值降低。梁万平^[9]研究表明,采用间隔 72 d 二茬刈割技术能有效提高饲用型产量和茎秆品质。而目前针对西北黄土高原丘陵沟壑区栽培的饲用甜高粱的营养价值变化规律及适宜收割期的研究鲜有报道,为此本研究以甘肃省定西市推广应用的甜高粱为研究对象,参照当地利用方式,设置不同的收割时期,进而分析其营养品质及饲用价值,同时利用体外瘤胃发酵技术评定其产气性能,为该地区的甜高粱合理高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

甜高粱(大奖 3180)种植于甘肃省定西市祥泰养殖场甜高粱试验田,播种时间为 2017 年 5 月 27 日,分别在 8—11 月(二茬)对甜高粱进行离地 10~15 cm 收割,并分别标记为 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 组,将收割后的甜高粱用轧草机轧碎,65 °C 烘干 72 h 之后用粉碎机粉碎过 40 目(0.425 mm)筛,用四分法取样,放在自封袋中保存备检。

1.2 试验动物

选用 3 只体况良好,体重约为 28 kg 的小尾寒羊作为瘤胃液供体动物,试验期间试验羊进行群饲,保持圈内清洁卫生,定期消毒,每天喂料两次(8:00 和 17:00),自由饮水。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 营养成分和饲喂价值的评定 甜高粱饲草营养成分测定参照《饲料分析及饲料质量检测技术》^[10],采用 105 °C 烘干法测定干物质(dry matter, DM)含量,使用全自动纤维分析仪(ANKOM-2000i 型,美国)测定中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量;使用全自动凯氏定氮仪(JK-9830,上海)测定粗蛋白(CP)含量;采用 550 °C 高温灼烧法测定粗灰分(Ash)含量。营养成分测定结果用于饲喂价值的评估,包括总可消化养分(total digestible nutrient, TDN) = $82.38 - (0.7515 \times \text{ADF})$;相对牧草品质(relative forage quality, RFQ) = $\text{TDN} \times \text{DMI} / 1.23$;相对饲用价值(relative feeding value, RFV) = $(\text{DDM} \times \text{DMI}) / 1.29$,其中 DDM(digestible dry

matte)为可消化干物质,DMI(dry matter intake)为粗饲料的干物质随意采食量^[11-13]。DDM 和 DMI 的预测模型分别是:

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

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

1.3.2 体外发酵测定 在晨饲前用瘤胃液采集器(科立博 A1164K,武汉)经口腔采集 3 只羊的瘤胃液混合均匀后用 4 层纱布过滤,参考 Menke^[14]的方法配制缓冲液,并将缓冲液与过滤后的瘤胃液以 2:1 的比例混合,得到混合液,配制期间保持 39 °C 恒温,并持续通入 CO₂,磁力搅拌器不断搅拌,直至溶液颜色变为无色透明(厌氧指示剂为刃天青溶液)。把采集到的 4 组甜高粱作为发酵底物,每个样品设 3 个平行。准确称取 400 mg 饲料样品于已先装入 10 g 左右玻璃珠的尼龙袋(0.050 mm,5 cm×3 cm)中,封口后置入特制的 100 mL 玻璃注射器中,将 40 mL 混合液迅速注入装样注射器中,密封排气后置于 39 °C 恒温振荡器中进行体外发酵试验。每个样 3 个重复,并设置 3 个空白组,即没有发酵底物,其他条件不变,作为产气量校正。记录 3、6、9、12、24、36、48 h 共 7 个时间点的产气量(gas production, GP);在 12、24 及 48 h 3 个发酵时间点取出装有底物的尼龙袋,反复用水洗涤后,晾干,105 °C 烘 4 h 后称重测定其干物质降解率。

1.4 产气动力学分析

产气动力学参数采用模型 $\text{GP}=(a+b)\times(1-e^{-a})$ 计算。其中,GP 为某一时刻的产气量, a 为快速产气量($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$), b 为缓慢产气量($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$), c 为产气速率($\%\cdot\text{h}^{-1}$), $a+b$ 为潜在产气量($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)。

1.5 体外有机物消失率估算

按照 Menke^[14]的体外有机物消化率模型,以体外发酵 24 h 产气量估算体外有机物消失率(organic matter disappearance, OMD),计算公式为: $\text{OMD}=(0.986\text{GP}+0.0606\text{CP}+11.03)\times 100\%$,式中:GP 为 24 h 产气量,CP 为粗蛋白含量。

1.6 干物质消失率(dry matter disappearance, DMD)测定

试验开始前,对放入注射器中的尼龙袋和样的总重进行称量,记录数值为 M_1 ,取出 12、24 与 48 h 发酵的尼龙袋迅速放入冷水中终止发酵,然后用蒸馏水冲洗至溶液不再浑浊,用烘箱在 105 °C 烘干 48 h 后称重,记录数值为 M_2 。

$$\text{计算公式:DMD}=[(M_1-M_2)/M_1]\times 100\%$$

1.7 数据统计与分析

试验数据经 Excel 2016 初步整理后,使用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),采用 Duncan 法对不同处理组均值进行多重比较。用非线性回归参数估计程序求出产气动力学参数;结果用平均值表示, $P<0.05$ 作为显著的判断标准。

2 结果与分析

2.1 甜高粱的营养成分含量

S_1 时期的甜高粱饲草干物质含量显著高于其他 3 个时期($P<0.05$),且从 $S_1\sim S_4$ 呈先下降后上升的趋势(表 1)。4 个不同收割期的甜高粱的 CP 含量呈先下降后上升的趋势,其中 S_4 时期 CP 含量最高,达 14.46%, S_2 时期含量最低,为 8.34%。不同收割期的甜高粱 EE 含量呈逐渐下降的趋势。甜高粱的 4 个不同的收割期中 S_4 时期 Ash 含量最高,达 15.98%, S_3 时期含量最低,为 9.33%。4 个时期的 Ash 含量差异极显著($P<0.001$),且呈先降低后升高的趋势。4 个收割期的甜高粱中的 NDF 含量差异极显著($P<0.001$), S_2 时期甜高粱的 NDF 含量最高,达 67.60%, S_1 时期最低,为 48.44%,且 4 个时期的 NDF 含量呈现出先升高后降低的趋势。4 个不同收割期的甜高粱的 ADF 含量差异极显著($P<0.001$),其中 S_2 时期 ADF 含量最高,达 37.34%, S_4 时期最低,整体上呈先升高后降低的趋势。

2.2 甜高粱的相对饲喂价值评估

不同收割期的甜高粱的 RFV、DMI、RFQ 呈现出 $S_1>S_4>S_3>S_2$,且 4 个时期差异极显著($P<0.001$)(表

2)。S₁ 和 S₄ 时期甜高粱的 TDN 和 DDM 均较高且差异不显著($P>0.05$),两个时期极显著高于 S₂ 和 S₃ 时期($P<0.001$)。

2.3 甜高粱瘤胃体外发酵产气性能

随着发酵时间的延长,每个时期的甜高粱的产气量均逐渐增加,在培养 12 h 之前,不同收割期的甜高粱产气量均差异极显著($P<0.001$),且 S₃ 时期均最高,S₂ 时期均最低,培养 24 h 后 4 个时期的甜高粱 GP 差异均不显著($P>0.05$)(表 3)。4 个不同收割期的甜高粱快速降解部分产气量、慢速降解部分产气量以及潜在产气量差异均不显著($P>0.05$)。S₄ 时期的产气速率显著高于其他 3 个时期($P<0.05$)(表 4)。

表 1 甜高粱的营养成分含量
Table 1 Nutrient content of sweet sorghum (dry matter basis, %)

项目 Item	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	标准误 SEM	P 值 P-value
干物质 DM	93.45a	92.97bc	92.85c	93.17b	0.003	0.010
粗蛋白 CP	10.29b	8.34d	8.96c	14.46a	0.901	<0.001
粗脂肪 EE	2.93a	2.27ab	1.83b	1.92b	0.165	0.040
粗灰分 Ash	14.23b	12.06c	9.33d	15.98a	0.930	<0.001
中性洗涤纤维 NDF	48.44d	67.60a	61.24b	53.03c	0.028	<0.001
酸性洗涤纤维 ADF	25.64c	37.34a	30.97b	25.44c	0.018	<0.001

注:同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),相同小写字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same row mean significant differences ($P<0.05$), the same letter or no letter mean no significant differences ($P>0.05$). The same below.

表 2 甜高粱的饲喂价值评估
Table 2 Evaluation of feeding value index of sweet sorghum

项目 Item	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	标准误 SEM	P 值 P-value
相对饲喂价值 RFV	170.76a	106.19d	126.98c	156.34b	25.18	<0.001
总可消化养分 TDN (%)	63.11a	54.32c	59.11b	63.26a	3.67	<0.001
干物质采食量 DMI (%)	2.48a	1.78d	1.96c	2.26b	0.27	<0.001
可消化干物质 DDM (%)	68.92a	59.81c	64.78b	69.08a	3.81	<0.001
相对牧草品质 RFQ	127.11a	78.41d	94.20c	116.40b	19.00	<0.001

表 3 甜高粱体外发酵产气量
Table 3 The gas production of sweet sorghum *in vitro* fermentation (mL · g⁻¹)

时间 Time (h)	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	标准误 SEM	P 值 P-value
3	37.63b	24.88c	47.85a	29.20bc	10.13	<0.001
6	53.58b	38.27c	76.54a	61.23b	15.93	0.010
9	78.51b	55.62c	112.38a	92.64ab	23.90	<0.001
12	104.88bc	82.26c	134.11a	123.02ab	22.67	<0.001
24	160.28	149.06	185.28	189.40	19.48	0.060
36	222.78	190.90	225.34	222.77	16.41	0.560
48	246.59	214.71	249.15	240.23	15.76	0.640

2.4 甜高粱瘤胃体外发酵的 DMD 和 OMD

同一时期的甜高粱 DMD 均随培养时间的延长呈现出逐渐增高的趋势,4 个不同收割期的甜高粱培养 12、

24、48 h 后 DMD 均差异不显著($P>0.05$),培养 24 h 后 4 个不同收割时期的甜高粱的 OMD 差异不显著($P>0.05$)(表 5)。

表 4 甜高粱体外发酵产气动力学参数

Table 4 The kinetic parameters of gas production of sweet sorghum *in vitro*

项目 Item	S_1	S_2	S_3	S_4	标准误 SEM	P 值 P -value
快速降解部分产气量 GP of quickly degraded part ($a, \text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	-2.58	1.92	0.09	-3.34	2.43	0.10
慢速降解部分产气量 GP of slowly degraded part ($b, \text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	306.83	257.60	287.00	268.01	21.71	0.50
潜在产气量 Potential GP ($a+b, \text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	304.25	259.52	287.09	264.67	20.72	0.51
产气速率常数 Constant of GP rate ($c, \% \cdot \text{h}^{-1}$)	0.04b	0.04b	0.04b	0.05a	0.01	<0.001

注:“—”表示产气滞后,快速降解部分产气量大小由绝对值确定。
Note: “—” indicates gas production lag, and partial gas production of rapid degradation is determined by absolute value.

表 5 甜高粱在瘤胃体外发酵的 DMD 和 OMD

Table 5 DMD and OMD of sweet sorghum *in vitro* fermentation (%)

项目 Item	时间 Time (h)	S_1	S_2	S_3	S_4	标准误 SEM	P 值 P -value
干物质消失率 DMD	12	50.37	53.34	62.33	46.51	3.19	0.38
	24	59.95	64.56	69.64	69.47	2.90	0.66
	48	78.28	66.12	78.68	78.87	2.30	0.12
有机物消失率 OMD	24	71.18	71.85	77.22	80.48	3.12	0.74

3 讨论

3.1 甜高粱营养成分含量

植物的不同生长期,其营养物质含量也有很大差异,CP 含量是衡量粗饲料营养水平的一个重要指标。本研究发现,甜高粱 CP 含量表现为 $S_4>S_1>S_3>S_2$ 。罗峰等^[15]研究表明,甜高粱 CP 积累过程中呈现出先降低后升高的趋势,而 S_4 处于二茬时的分蘖期,此时的 CP 含量极显著高于其他 3 个时期,这与李珊珊等^[2]的研究结果一致,所以从 CP 含量来看, S_1 和 S_4 时期的甜高粱营养水平更高。NDF 和 ADF 与家畜的干物质采食量和可消化干物质呈负相关,本研究结果表明,4 个不同收割期甜高粱的 NDF 和 ADF 均呈现出先降低后升高的趋势,且 S_2 时期甜高粱显著高于其他 3 个时期,表现为 $S_2>S_3>S_4>S_1$,而 S_1 和 S_4 是处于不同茬次的相同时期,所以甜高粱随着生长期的推进 CP 总体上为逐渐降低的趋势,ADF 和 NDF 总体上为逐渐升高的趋势,这与陈鹏等^[16]的研究结果一致。李珊珊等^[2]认为随着生育期的推进,植株纤维增加,粗蛋白质减少,适口性降低,动物的随意采食量也会降低,所以 S_4 和 S_1 时期的甜高粱更适宜饲喂动物。

3.2 甜高粱的饲喂价值

饲喂价值是评价粗饲料的重要指标,也是粗饲料的一种重要的经济性状。RFV 是 NDF 和 ADF 的综合反映,指数越高,说明该饲料的营养价值越高,若 $\text{RFV}>100$,则说明该粗饲料的营养价值较高^[11]。本试验中 4 个时期甜高粱的 RFV 值均大于 100,且 $S_1>S_4>S_3>S_2$,说明甜高粱是一种优质的粗饲料资源,适宜饲喂动物,相对于 S_2 和 S_3 , S_1 和 S_4 时期的甜高粱有更高的饲喂价值。TDN 是综合反映粗饲料的消化率和动物消化能力的重要指标,其值越高说明粗饲料的 CP 含量较高,纤维含量较低,粗饲料品质越好^[13,17]。本研究表明, S_4 和 S_1 的 TDN 值显著高于 S_3 和 S_2 ,说明在 S_1 和 S_4 时期收割的甜高粱品质较好。RFQ 与 RFV 类似,都是提供粗饲料饲用价值的相对估计值,但 RFQ 能更精确的评定饲料品质尤其适用于禾本科牧草,RFQ 值较高的牧草其饲料品质也越好^[12]。本试验中 4 个收割时期甜高粱的 RFQ 值为: $S_1>S_4>S_3>S_2$,说明 S_1 时期的饲料品质更好,饲喂价值更高。

3.3 甜高粱体外发酵产气性能

饲料在瘤胃中产生的气体主要来源于微生物对饲料中碳水化合物和蛋白质含碳部分的分解,其终产物主要

包括 CO_2 、 CH_4 和 H_2 [18]。研究表明,瘤胃发酵 GP 与可发酵有机物含量和瘤胃微生物活力之间具有正相关关系 [19]。体外产气量可反映瘤胃中微生物的降解活性和饲料降解率,底物产气量的多少反映了其被瘤胃微生物利用的程度,同时也代表了底物营养价值的高低程度 [20]。本试验中 4 个不同收割期的甜高粱 48 h 总产气量差异不显著。说明 4 个收割期的甜高粱的可消化有机物含量相似。通过测定体外发酵产气参数得出,4 个时期的快速降解部分产气量、慢速降解部分产气量和潜在产气量均无显著差异。 S_4 时期的产气速率显著高于其他 3 个时期,这可能与 S_4 时期甜高粱的 NDF 和 ADF 含量较低有关,也可能是 S_4 时期易发酵物质含量较高。高含量的 ADF 及 NDF 会降低微生物对牧草的降解速率,而当饲草中非结构碳水化合物或易发酵物质含量较高时,微生物会利用降解产物迅速繁殖,从而提高产气速率 [1,21]。综上可知, S_4 时期的甜高粱有更高的饲料降解率,更适合饲喂动物。

3.4 甜高粱在瘤胃体外发酵的 DMD 和 OMD

DMD 和 OMD 是反映饲料被动物利用程度大小的重要指标,也是影响反刍动物采食量的一个重要因素,降解率越高,饲料的可利用程度就越高,动物的采食量就越大。因此其也是评定饲料营养价值的重要依据 [22-25]。DM 的降解主要由饲料中粗蛋白、粗脂肪和粗纤维决定,反映了饲料在瘤胃中降解的难易程度 [26]。张颖等 [27] 通过瘤胃尼龙袋法对云南地区 5 种牧草研究表明干物质和有机物质降解率与粗蛋白含量有较强的正相关关系,而与纤维素含量有较强的负相关关系。本研究结果表明,4 个不同收割期甜高粱 DMD 和 OMD 差异均不显著,说明不同收割期对甜高粱的可利用程度影响不大。

4 结论

8 月的甜高粱 CP 含量高,且 NDF 和 ADF 含量较低,相对饲喂价值高,8 月的甜高粱能很好地优化瘤胃体外发酵过程,提高饲料的利用效率。所以 8 月收割的甜高粱更适宜作为动物的粗饲料来源。

参考文献 References:

- [1] Zhang G J, Wang H M, Luo H L, *et al.* Evaluation of nutritional value of leguminous forage in different growth stages by *in vitro* gas production and *in vitro* digestion. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2011, 23(3): 387-394.
张桂杰,王红梅,罗海玲,等.应用体外产气与体外消化法评定不同生育期豆科牧草营养价值.动物营养学报,2011,23(3): 387-394.
- [2] Li S S, Bai Y F, Wang T, *et al.* Nutritional value and artificial rumen degradation characteristics of feed sorghum. Pratacul-tural Science, 2018, 35(5): 1273-1286.
李珊珊,白彦福,王婷,等.饲用高粱营养价值及人工瘤胃降解特性.草业科学,2018,35(5): 1273-1286.
- [3] Lu D X, Xie C W. Research methods and techniques of modern ruminant nutrition. Beijing: Agriculture Press, 1991.
卢德勋,谢崇文.现代反刍动物营养研究方法和技术.北京:农业出版社,1991.
- [4] Bhatta R, Tajima K, Takusari N, *et al.* Comparison of *in vivo* and *in vitro* techniques for methane production from ruminant diets. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2007, 20(7): 1049-1056.
- [5] Gao S J, Liu X H, Li Y F, *et al.* Resources and utilization of chinese sweet sorghum. Horticulture and Seed, 2006, 26(4): 46-47.
高士杰,刘晓辉,李玉发,等.中国甜高粱资源与利用.园艺与种苗,2006,26(4): 46-47.
- [6] Yang X H. High-efficiency cultivation techniques of feeding sweet sorghum in desert development zone of hexi corridor. Sugar Crops of China, 2016, 38(1): 62-64.
杨兴虎.河西走廊沙漠开发区饲用甜高粱高效栽培技术.中国糖料,2016,38(1): 62-64.
- [7] Tang T X, Wang Z H, Zhang Y P, *et al.* Effects of cutting frequency on yield and feed value of feeding sweet sorghum. Sugar Crops of China, 2018, 40(1): 35-37.
唐桃霞,王致和,张亚萍,等.刈割频率对饲用甜高粱产量和饲用价值的影响.中国糖料,2018,40(1): 35-37.
- [8] Li C H, Su Y J, Zhang P T, *et al.* Effects of different cutting periods on the yield and quality of sweet sorghum. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(2): 239-245.
李春宏,苏衍菁,张培通,等.不同刈割时期对甜高粱产量和品质的影响.南方农业学报,2018,49(2): 239-245.
- [9] Liang W P. Effect of cutting time on yield and quality of feeding sweet sorghum. Sugar Crops of China, 2015, 37(4): 42-43.
梁万平.刈割间隔时间对饲用型甜高粱产质量的影响.中国糖料,2015,37(4): 42-43.
- [10] Yang S. Feed analysis and feed quality testing technology. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993.

- 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [11] Rohweder D A, Barnes R F, Neal J. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. *Journal of Animal Science*, 1978, 47(3): 747—759.
- [12] Zhang J K, Lu D X, Liu J X, *et al.* Research status and development of crude feed quality evaluation index. *Pratacultural Science*, 2004, 21(9): 55—61.
- 张吉鹏, 卢德勋, 刘建新, 等. 粗饲料品质评定指数的研究现状及其进展. *草业科学*, 2004, 21(9): 55—61.
- [13] Xiong Y, Xu Q F, Yu Z, *et al.* Nutrient and forage value of oat hay in different producing areas. *Pratacultural Science*, 2018, 35(10): 165—170.
- 熊乙, 许庆方, 玉柱, 等. 不同产地燕麦干草养分及饲用价值. *草业科学*, 2018, 35(10): 165—170.
- [14] Menke K. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research*, 1988, 28: 7—55.
- [15] Luo F, Wei J Z, Gao J M, *et al.* Study on the accumulation of crude protein in different types of forage sorghum. *Tianjin Agricultural Science*, 2013, 19(2): 6—8.
- 罗峰, 魏进招, 高建明, 等. 不同类型饲用高粱粗蛋白积累规律研究. *天津农业科学*, 2013, 19(2): 6—8.
- [16] Chen P, Luo F, Gao J M, *et al.* Effects of different sowing dates on quality traits of sweet sorghum in different growth stages. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, (5): 2608—2609.
- 陈鹏, 罗峰, 高建明, 等. 不同播期对不同生育时期甜高粱品质性状的影响. *安徽农业科学*, 2012, (5): 2608—2609.
- [17] Jia C H, Qian W X, Tursunay · Samat, *et al.* Nutritional value index and assessment method of forage. *Pratacultural Science*, 2017, 34(2): 415—427.
- 贾存辉, 钱文熙, 吐尔逊阿依·赛买提, 等. 粗饲料营养价值指数及评定方法. *草业科学*, 2017, 34(2): 415—427.
- [18] Li Z M, Ma M, Zhao W, *et al.* Effects of nutrient dynamics on rumen *in vitro* growth and methane production in different growth stages of peas. *Feed Research*, 2016, (2): 1—6.
- 李占明, 马敏, 赵微, 等. 山野豌豆不同生长时期营养动态变化及其对瘤胃体外发酵和甲烷产量的影响. *饲料研究*, 2016, (2): 1—6.
- [19] Ma M, Li M C, Zhao W, *et al.* Effects of different growth stages on the rumen fermentation and methane production of Yanbian yellow cattle by *in vitro* gas production. *Feed Industry*, 2016, (1): 19—23.
- 马敏, 李明超, 赵微, 等. 利用体外产气法研究不同生长期胡枝子对延边黄牛瘤胃发酵及甲烷产量的影响. *饲料工业*, 2016, (1): 19—23.
- [20] Li Z J, Hu Y G. Biological characteristics of feed rye and its dynamic changes in yield and nutrition. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(1): 45—51.
- 李志坚, 胡跃高. 饲用黑麦生物学特性及其产量营养动态变化. *草业学报*, 2004, 13(1): 45—51.
- [21] Tang S X, Huang R L, Tan Z L, *et al.* Study on gas production characteristics of different varieties of oat straws *in vitro* fermentation. *Genomics and Applied Biology*, 2006, 25(4): 330—335.
- 汤少勋, 黄瑞林, 谭支良, 等. 不同品种燕麦秸秆体外发酵产气特性的研究. *基因组学与应用生物学*, 2006, 25(4): 330—335.
- [22] Zhao G Y. Advances in research on regulation of rumen fermentation. *Journal of Animal Nutrition*, 1999, (S1): 21—28.
- 赵广永. 瘤胃发酵调控研究进展. *动物营养学报*, 1999, (S1): 21—28.
- [23] Michael Blümmel. Comparison of *in vitro* gas production and nylon bag degradability of roughages in predicting feed intake in cattle. *Animal Feed Science & Technology*, 1993, 40(2/3): 109—119.
- [24] Zhao X, Dong K H, Wang Y X, *et al.* Degradation dynamics of different concentrate-to-roughage feeds in rumen of sheep. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3): 62—66.
- 赵祥, 董宽虎, 王永新, 等. 不同精粗比全混合饲料在绵羊瘤胃内的降解动态. *草业学报*, 2005, 14(3): 62—66.
- [25] Wang F, Xu Y J, Niu J L, *et al.* Evaluation of nutritional value of ruminant feed by *in vitro* gas production method. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016, 43(1): 76—83.
- 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. *中国畜牧兽医*, 2016, 43(1): 76—83.
- [26] Chen X L. Study on nutritional value and rumen degradation characteristics of common roughage for meat sheep. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2014.
- 陈晓琳. 肉羊常用粗饲料营养价值和瘤胃降解特性研究. 青岛: 青岛农业大学, 2014.
- [27] Zhang Y, Mao H M. Study on rumen degradation rate of different kinds of forage nutrients. *Feed Industry*, 2014, 35(21): 54—57.
- 张颖, 毛华明. 不同种类牧草营养物质瘤胃降解率研究. *饲料工业*, 2014, 35(21): 54—57.