

引用格式:

陈桂华, 姜奥宇, 陈东, 郭楠, 唐启源, 陈坤. 稻秸菌糠的营养成分及其瘤胃体外发酵特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 442-448.

CHEN G H, JIANG A Y, CHEN D, GUO N, TANG Q Y, CHEN K. The nutrient composition of rice straw substrate and its characterization in vitro rumen fermentation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(4): 442-448.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



稻秸菌糠的营养成分及其瘤胃体外发酵特性

陈桂华¹, 姜奥宇², 陈东^{2*}, 郭楠², 唐启源³, 陈坤⁴

(1.湖南省洞口县农业农村局, 湖南 洞口 422300; 2.湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 3.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 4.湖南艾特农牧科技发展有限公司, 湖南 长沙 410128)

摘要:选取平菇六月灰(PoL)、大毛木耳(AhI)、茶树菇(Aa)共3种食用真菌接种于稻秸混合基质, 进行20 d发酵培养, 长满菌丝后收集稻秸菌糠(菌菇菌糠一体)进行常规营养成分测定及采集山羊瘤胃食糜液, 开展为期72 h瘤胃体外发酵特性分析, 探究不同食用真菌发酵处理对稻秸营养成分和瘤胃体外发酵特性的影响。结果表明: PoL和AhI组粗蛋白质(CP)质量分数显著高于Aa组的, AhI和Aa组中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)质量分数显著低于PoL组的; PoL组瘤胃体外发酵甲烷、氢气及72 h总产气量、干物质降解率和总挥发性脂肪酸浓度均显著高于其他2组的, PoL组瘤胃体外发酵液pH显著低于其他2组的。由此得出, PoL稻秸处理组的CP质量分数较高, 相比发酵前栽培料NDF和ADF降解程度较低, 但体外发酵特性均优于另外2种真菌处理组, 实际生产中可采用PoL发酵稻秸提高其饲用价值。

关键词:食用真菌; 水稻秸秆菌糠; 营养成分; 瘤胃体外发酵特性

中图分类号: S816.6

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)04-0442-07

The nutrient composition of rice straw substrate and its characterization in vitro rumen fermentation

CHEN Guihua¹, JIANG Aoyu², CHEN Dong^{2*}, GUO Nan², TANG Qiyuan³, CHEN Kun⁴

(1.Agriculture and Rural Affairs Bureau of Dongkou County, Dongkou, Hunan 422300, China; 2.College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3.College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 4.Hunan Aite Agriculture and Animal Husbandry Science and Technology Development Co. Ltd, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Three fungi of *Pleurotus ostreatus* Liuyuehui(PoL), *Auriuolaria hispida* Iwade(AhI) and *Agrocybe aegirit*(Aa) were inoculated with rice straw mixed substrate and fermented for 20 days. The collected rice straw substrate after the complete growth of hyphae was subject to the analysis of conventional nutrient composition, and the rumen chyme liquid from goat was also collected for characterization in vitro rumen fermentation for 72 hours to study the effects of different fungi fermentation treatments on the nutrient composition and in vitro rumen fermentation characteristics of rice straw substrate. The results showed the crude protein(CP) contents of PoL and AhI groups were significantly higher than that of Aa group, and the contents of neutral detergent fiber(NDF) and acid detergent fiber(ADF) in AhI and Aa groups were significantly lower than those of PoL groups. The methane, hydrogen and total gas production at 72 hours, dry matter degradation rate and total volatile fatty acid content of in vitro rumen fermentation in PoL group were significantly higher

收稿日期: 2020-04-28

修回日期: 2020-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0501800); 国家水稻产业技术体系(CARS-01); 湖南省草食动物产业技术体系

作者简介: 陈桂华(1978—), 女, 湖南邵阳人, 兽医师, 主要从事畜牧兽医研究, 401351584@qq.com; *通信作者, 陈东, 博士, 讲师, 主要从事营养与饲料研究, chendong_326@126.com

than those of the other two groups. In vitro rumen fermentation broth pH of PoL group was significantly lower than that of the other two groups. It was concluded that content of CP was higher in PoL rice straw treatment group, whose degradation degree of NDF and ADF were lower than those of culture materials, and in vitro rumen fermentation was better than the other two groups. PoL fermentation could be used to treat rice straw to improve its feeding value in practice.

Keywords: edible fungi; rice straw substrate; nutrient composition; in vitro rumen fermentation characteristics

中国水稻资源非常丰富,年播种面积为 3×10^7 hm^2 左右,稻谷年产量维持在 2×10^8 t 以上^[1]。按谷草比 1 : 1^[2]计算,中国水稻秸秆(以下简称“稻秸”)年产量为 2×10^8 t 左右。虽然稻秸中的粗纤维水平较常规饲料高,但相对小麦秸秆和玉米秸秆纤维含量较低^[3],具有较高的开发利用价值。对稻秸进行青贮、氨化和碱化等处理也会对瘤胃微生物区系及发酵模式产生不同影响^[4]。通过食用真菌处理,能提升稻秸的饲用价值,扩大反刍动物粗饲料来源,实现农作物秸秆资源可循环利用,对于促进农业与环境和谐发展具有重要意义。菌糠是食用菌采摘后的基质,主要由农作物秸秆和食用菌的菌丝残体组成。培养 1 kg 食用菌的同时得到 5 kg 的菌糠^[5]。菌糠的营养价值相较原栽培料有显著改善。食用菌栽培废料中含有大量的菌体蛋白、多糖以及微量元素,经过适当加工处理后可部分替代糠麸类饲料饲喂动物。由于菌糠粗纤维含量较常规饲料更高,且单胃动物胃肠道内缺乏纤维素和半纤维素分解酶,因此,菌糠的饲用价值主要体现在草食动物饲养生产中^[6]。

目前,利用食用真菌处理农作物秸秆,以提高养分利用率的研究颇受关注。前人研究^[7]表明,利用混合真菌对玉米秸秆进行发酵处理,可使纤维素和木质素降解率得到不同程度提高。而真菌降解木质素,可以改善秸秆的营养价值、提高适口性和消化率^[8]。龚剑明等^[9]报道,香菇菌和黄孢原毛平革菌 2 种不同真菌发酵油菜秸秆,降解纤维物质,提高体外发酵的有机物降解率。柳珊等^[10]研究发现,用白腐真菌对玉米秸秆进行预处理,可有效降解其细胞壁成分,促进厌氧发酵中氢气和甲烷生成,可利用白腐真菌高效降解木质纤维素的性能生产较高品质的秸秆饲料。

稻秸广泛应用于草食动物粗饲料,然而研究主要集中在采用化学方式处理稻秸进行饲喂利用^[11],对食用菌发酵处理稻秸并比较分析其营养成分和

体外发酵特性方面鲜有研究报道。合理选择菌种能有效提高稻秸的营养价值和养分利用率。本研究中,以稻秸、麸皮、豆粕分别占 85%、10%、5%的比例混合,装袋灭菌后接种不同食用菌菌株,测量其常规养分含量及瘤胃体外发酵产物成分,旨在为稻秸型菌糠饲料化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试食用菌种由湖南农业大学食用菌工程研究中心提供;供试稻秸为大通湖区宏硕生态农业农机合作社水稻(湘两优 900)完熟收割后的秸秆。稻秸的粗蛋白(CP)、粗脂肪(EE)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、总可消化养分(TDN)的质量分数(干物质基础)分别为 2.51%、1.70%、69.25%、40.85%、49.70%。

1.2 试验设计

试验设置 3 个处理组,稻秸分别接种平菇六月灰(*Pleurotus ostreatus* Liuyuehui, PoL)、大毛木耳(*Auriolaria hispida* Iwade, AhI)、茶树菇(*Agrocybe aegirita*, Aa)。每组 3 个重复。

1.3 稻秸菌糠的准备

参照文献^[12]的方法进行真菌接种:将稻秸切至 1.5~2.5 cm 长短,在 1%石灰水中浸泡 48 h 后沥干,按稻秸、麸皮、豆粕分别占 85%、10%、5%(干物质基础)的比例混合均匀,装入菌包(容积为 1 kg/包),即为栽培料;栽培料于高压灭菌锅内(120~125 $^{\circ}\text{C}$ 、0.15~0.20 MPa、4 h)灭菌后,在超净工作台接种,每个菌包接种 1 cm \times 1 cm \times 1 cm 的菌块。在 (25 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$ 下避光有氧培养约 20 d,待菌丝体长满整个菌包后收取菌包中的菌糠,65 $^{\circ}\text{C}$ 烘干、粉碎、过孔径 250 μm 的筛,用于常规营养成分测定和用作体外瘤胃发酵底物。

1.4 体外模拟瘤胃发酵

参照文献[13]的方法,选择和饲养管理瘤胃液供体羊;参照 MENKE 等^[14]的方法,配制人工瘤胃缓冲液;参照文献[13]的方法,准备人工瘤胃培养液。

采用全自动体外模拟瘤胃发酵设备进行体外模拟瘤胃发酵,具体参数设定及使用操作参照 WANG 等^[15]的方法。称取 0.6 g 底物,放入 150 mL 发酵瓶中,放置于恒温培养箱(振荡频率为 50 r/min,温度为 39.5 °C)中预热;发酵瓶中充入 CO₂,以保证厌氧环境,再向发酵瓶中加入 60 mL 人工瘤胃培养液,并将发酵瓶放回恒温培养箱中进行体外模拟瘤胃发酵 72 h。发酵瓶通过导管与三通电磁阀(3V320-08,宁波奉化永利气动成套有限公司)和压力传感器(CYG130-12,昆山双桥传感器测控技术有限公司)连接。

1.5 指标的测定

按 GB/T 2431—2009、GB/T 20806—2006、NY/T 1459—2007、GB/T 6433—2006 的方法分别测定稻秸菌糠的 CP、NDF、ADF、EE 质量分数;按氧弹燃烧法测定稻秸菌糠的总能(GE);参照文献[16]的方法,利用 ADF 计算 TDN。

利用压力传感器对发酵瓶中的压力进行测定并记录,根据压力与气体体积间的关系计算 72 h 气体生成量;参照文献[17]的方法,当发酵瓶中压力达到设定排气压力(9 kPa)时,计算机控制电磁阀打开,发酵瓶中的气体通过导管进入气相色谱仪(安捷伦 7890A),测定甲烷和氢气产量。

体外模拟瘤胃发酵 72 h 后终止发酵,取 2 mL

发酵液,离心(4 °C、15 000 r/min) 10 min,取 1 mL 上清液加入 0.1 mL 25%偏磷酸固定 15 min, -20 °C 保存,备用。参照文献[18]的方法,通过装有检测器和 HP-INNOWax 毛细管色谱柱(30.0 m×320 μm×0.5 μm, Catalog No19091N-213)的气相色谱仪(GC-2010, Shimadzu)测定体外发酵液中挥发性脂肪酸(VFA)的浓度和组分占比,并计算乙酸与丙酸占比的比值(乙丙比);采用 T/CAAA 003—2018 中的苯酚-次氯酸钠比色法测定体外发酵液中氨态氮(NH₃-N)质量浓度;参照文献[19]的方法,利用 Spectrum 公司 SI400 型 pH 计测定体外发酵液的 pH。将发酵内容物于 105 °C 烘箱中烘 8 h,测定干物质降解率。

1.6 数据处理与统计分析

运用 Excel 2010 整理数据;采用 SPSS 24.0 中的 ANOVA 进行单因素方差分析;用 Duncan 氏法进行多重比较检验。

2 结果与分析

2.1 食用真菌发酵对稻秸营养成分的影响

由表 1 可知,与栽培料相比,平菇六月灰、大毛木耳、茶树菇 3 种不同食用真菌发酵稻秸后,菌糠的 NDF 和 ADF 质量分数显著降低,CP 和 TDN 显著增加;PoL 和 AhI 组菌糠的 CP 质量分数显著高于 Aa 组的;PoL 组菌糠的 NDF、ADF 质量分数显著高于 AhI 和 Aa 组的;AhI 和 Aa 组菌糠的 TDN 分别达 63.43%和 64.07%,显著高于 PoL 组的。

表 1 食用真菌处理稻秸菌糠的营养成分

组别	粗蛋白	中性洗涤纤维	酸性洗涤纤维	能值/(MJ·kg ⁻¹)	粗脂肪	总可消化养分
栽培料	5.72c	69.25a	40.85a	11.01	2.09	57.08c
PoL	11.33a	54.92b	37.61b	12.52	2.66	59.60b
AhI	11.86a	46.92c	32.69c	12.23	2.08	63.43a
Aa	9.30b	46.64c	31.87c	11.32	2.03	64.07a
标准误	0.468	0.913	0.412	0.402	0.256	0.435

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.2 食用真菌发酵对稻秸菌糠体外瘤胃发酵特性的影响

由表 2 可知,不同食用真菌发酵的稻秸进行体

外瘤胃发酵时,PoL 组甲烷、氢气产量及 72 h 总产气量显著高于其他 2 组的。

表 2 食用真菌处理稻秸菌糠的体外瘤胃发酵 72 h 的气体生成量

Table 2 The gas production of rice straw substrate under edible fungi treatments in vitro rumen fermentation for 72 h

组别	mL/g		
	72 h 总产气量	甲烷产量	氢气产量
PoL	190.11a	29.04a	1.76a
AhI	121.78b	17.21b	0.86b
Aa	120.69b	17.78b	0.94b
标准误	4.317	0.575	0.067

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

表 3 食用真菌处理稻秸菌糠体外瘤胃发酵 72 h 的底物降解和挥发性脂肪酸生成情况

Table 3 The substrate degradation and VFA production of rice straw substrate under edible fungi treatments in vitro rumen fermentation for 72 h

组别	氨态氮/ (mg·(100 mL) ⁻¹)	pH	干物质降 解率/%	总挥发性脂肪 酸/(mmol·L ⁻¹)	挥发性脂肪酸各组占比/%						乙丙比
					乙酸	丙酸	丁酸	异丁酸	戊酸	异戊酸	
PoL	8.67a	6.59c	57.77a	74.68a	71.76b	23.54a	3.28a	0.50ab	0.46a	0.46	3.05
AhI	7.53b	6.78a	52.69b	53.73b	72.47ab	23.46b	2.68b	0.53a	0.38b	0.48	3.09
Aa	8.59a	6.66b	51.69b	51.64b	73.41a	22.50b	2.71b	0.49b	0.41b	0.48	3.26
标准误	0.27	0.007	1.851	2.42	0.389	0.313	0.051	0.013	0.013	0.01	0.061

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

食用菌发酵过程中微生物群落不断发生演变,因此,CP、NDF 和 ADF 代谢呈现不同变化规律。食用菌可通过生物固氮机制利用基料养分,合成子实体蛋白质和菌体蛋白质,子实体采收后,剩余基料含有大量的残留菌体蛋白,使基料的蛋白质含量显著提高^[20],且食用菌在不同时期分泌的蛋白酶活性不同。本研究中,3 种不同食用真菌发酵处理稻秸 PoL 和 AhI 组的 CP 质量分数显著高于 Aa 组的。其原因可能是 3 种食用菌所分泌的蛋白酶活性峰值时间不一致,Aa 分泌的蛋白酶活性在 20 d 时高于其他 2 组的,且合成菌体蛋白的速率低于基质中含氮物质的分解速率。宫福臣等^[21]报道,菌糠的 CP 有效降解率显著高于玉米秸秆的,说明菌糠蛋白更容易被瘤胃微生物分解,用于合成微生物蛋白,有利于实现反刍动物饲料的高效化利用。

菌丝体细胞可分泌纤维素酶和木质素酶等多种胞外酶^[22]。通过酶解作用,可将纤维素等大分子物质分解成可溶性碳水化合物^[23],有效降低基料中 NDF 和 ADF 含量。石其伟等^[24]研究发现,不同种类微生物制剂发酵处理稻秸,可不同程度降解木质素和半纤维素。本研究中,相比发酵前栽培料,3

由表 3 可知,不同食用真菌发酵稻秸进行体外瘤胃发酵后,PoL 组体外发酵液中干物质降解率、总挥发性脂肪酸(TVFA)浓度及丙酸、丁酸和戊酸占比均显著高于其他 2 组的;PoL 组体外发酵液的 pH 显著低于其他 2 组的;Aa 组体外发酵液中乙酸占比显著高于 PoL 组的;AhI 组体外发酵液中 NH₃-N 质量浓度显著低于其他 2 组的。

种不同食用真菌发酵的稻秸菌糠的 NDF 和 ADF 质量分数均显著降低,且 AhI 和 Aa 组 NDF 和 ADF 降解程度均显著高于 PoL 组的,说明食用菌发酵可作为一种有效降低稻秸纤维含量的处理方法,且不同食用真菌分泌的纤维降解酶活性存在差异,表现为 Aa、AhI、PoL 分泌的纤维降解酶活性依次降低。李雯等^[25]研究发现,不同纤维素降解菌对纤维素分解效果不一致,均有利于降低物料的碳、氮损失。本研究中,AhI 组栽培料纤维质量分数显著减小的同时,CP 质量分数显著增加,说明 AhI 发酵稻秸较其他 2 种食用菌更有利于促进基料养分浓缩,有效改善稻秸营养成分水平。

TDN 是衡量饲料采食量和能量价值的重要指标。本研究中,AhI 和 Aa 组的 TDN 显著高于 PoL 组,表明这 2 种食用真菌可进一步优化稻秸饲料的可利用率。由此得出,3 种食用真菌中,AhI 组处理稻秸综合效果较优。

不同发酵底物所含碳水化合物的总量和组成会对体外发酵产气量产生影响^[26]。产气量越高,饲料在瘤胃中的发酵程度也越高^[15]。汤少勋等^[27]研究表明,底物的碳水化合物含量对体外发酵总产气量的影响远高于蛋白质。本研究中,PoL 组甲烷、氢气及 72 h 总产气量均显著高于其他 2 组,仅管 PoL

组纤维类大分子物质含量显著高于其他 2 组,但是仍然保持在一定范围内,可持续供给体外瘤胃液发酵,从而使总产气量及 TVFA 浓度显著增加;另一方面,不同发酵底物的非结构性碳水化合物与 NDF 的比值也会对瘤胃微生物区系结构产生影响,该比值为 1.61 时微生物发酵活性明显增强^[28],表明经 PoL 处理后的稻秸更有利于瘤胃微生物进行相关代谢活动,并为动物提供较高的能量水平。

瘤胃液 pH 是衡量反刍动物瘤胃发酵状况的敏感指标,一般认为,pH 6.0~7.0 时适合瘤胃微生物生长繁殖。本研究的各组体外发酵液 pH(6.59~6.78)均在正常范围内,与张勇等^[29]的研究结果一致,说明瘤胃发酵液 pH 适合微生物生长和微生物蛋白合成。PoL 组 pH 显著低于其他 2 组,与体外瘤胃发酵产生了较多 VFA 有较大相关性。

瘤胃内 $\text{NH}_3\text{-N}$ 既是微生物对底物含氮物质代谢的终产物,也是合成微生物蛋白的主要氮源。MCDONALD 等^[30]报道,瘤胃 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的最佳质量浓度应为 5~25 mg/(100 mL)。本研究中,3 组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度(7.53~8.67 mg/(100 mL))均在此浓度范围内,其中 PoL 和 Aa 组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度显著高于 AhI 组的,这可能与平菇真菌和茶树菇真菌发酵后生成的菌体蛋白更利于微生物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的利用率有关,具体机理还有待进一步研究。

VFA 是饲料中碳水化合物在瘤胃微生物发酵作用下的终产物,为反刍动物提供重要的能量来源^[31]。本研究中,PoL 组 TVFA 浓度显著高于其他 2 组的,这与 PoL 组较高的 CP 和 NDF 质量分数有关。PoL 组瘤胃微生物可利用发酵底物较多,且干物质降解率显著高于其他组,体外瘤胃发酵产物增加,说明 PoL 发酵稻秸可为反刍动物提供更多能量;PoL 组丙酸、丁酸和戊酸的占比高于其他 2 组,表明经 PoL 处理后的稻秸能提高动物对纤维素和可溶性碳水化合物的利用率,这可能是不同发酵底物所含可发酵有机物和 NDF 含量会对 VFA 产量及其组成产生影响^[32]。

综合来看,PoL 组 CP、NDF 质量分数和干物质降解率较高,且体外产气参数较其他 2 组更优,更有利于合成瘤胃微生物蛋白和机体蛋白参与生理代谢;与此同时,PoL 组在瘤胃发酵时产生较多 CH_4 气体,在实际生产中易造成能量的浪费,需要

综合考量各方面因素,使稻秸饲用价值最大化。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 国家数据 [EB/OL]. [2020-01-01]. <http://data.stats.gov.cn/>. National Bureau of Statistics. National data [EB/OL]. [2020-01-01]. <http://data.stats.gov.cn/>.
- [2] 谢光辉,韩东倩,王晓玉,等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1-8. XIE G H, HAN D Q, WANG X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1-8.
- [3] 吕中旺,王建,孙鹏,等. 秸秆主产区三大作物秸秆饲用品质分析与评价[J]. 草业科学, 2018, 35(8): 2016-2021. LYU Z W, WANG J, SUN P, et al. Forage quality of three crop straws in a main producing area [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(8): 2016-2021.
- [4] 辛杭书,刘凯玉,张永根,等. 不同处理水稻秸秆对体外瘤胃发酵模式、甲烷产量和微生物区系的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(5): 1632-1640. XIN H S, LIU K Y, ZHANG Y G, et al. Effects of different treated rice straws on pattern, methane production and microflora of in vitro ruminal fermentation [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(5): 1632-1640.
- [5] MOHD HANAFI F H, REZANIA S, MAT TAIB S, et al. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate (SMS): an overview [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018, 20: 1383-1396.
- [6] 高旭红,窦林敏,李佳腾,等. 杏鲍菇菌糠饲料的发酵条件及其对山羊的饲喂效果[J]. 动物营养学报, 2018, 30(5): 1973-1980. GAO X H, DOU L M, LI J T, et al. Fermentation condition of *Pleurotus eryngii* waste sticks feed and its feed effects on goats [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(5): 1973-1980.
- [7] 张仲卿,张爱忠,姜宁. 混合真菌发酵对玉米秸秆纤维素与木质素降解率的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(3): 1385-1395. ZHANG Z Q, ZHANG A Z, JIANG N. Effects of mixed fungal fermentation on degradation rate of cellulose and lignin of corn straw [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(3): 1385-1395.
- [8] SHARMA R K, ARORA D S. Fungal degradation of lignocellulosic residues: an aspect of improved nutritive quality [J]. Critical Reviews in Microbiology, 2015, 41(1): 52-60.

- [9] 龚剑明, 赵向辉, 周珊, 等. 不同真菌发酵对油菜秸秆养分含量、酶活性及体外发酵有机物降解率的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(7): 2309–2316.
GONG J M, ZHAO X H, ZHOU S, et al. Effects of different fungi fermentations on nutrient contents, enzyme activities and in vitro fermentation organic matter degradation rate of rape straw[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(7): 2309–2316.
- [10] 柳珊, 吴树彪, 张万钦, 等. 白腐真菌预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷影响实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 124–129.
LIU S, WU S B, ZHANG W Q, et al. Effect of white-rot fungi pretreatment on methane production from anaerobic digestion of corn stover[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S2): 124–129.
- [11] 李辉勇, 黄可龙, 金密, 等. 碱性预处理对稻草秸秆酶解的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(6): 611–614.
LI H Y, HUANG K L, JIN M, et al. Effect of alkaline pretreatment on enzymatic hydrolysis of rice straw[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2009, 35(6): 611–614.
- [12] 文江南, 张秀敏, 王敏, 等. 平菇处理小麦和水稻秸秆对纤维成分和体外瘤胃发酵特征的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(2): 892–899.
WEN J N, ZHANG X M, WANG M, et al. Effects of *Pleurotus ostreatus* treatment of wheat and rice straw on fiber composition and in vitro rumen fermentation characteristics[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(2): 892–899.
- [13] 邹诗雨, 陈东, 唐启源, 等. 青贮时间对再生稻头季全株青贮品质和体外瘤胃发酵特性的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(7): 3282–3290.
ZOU S Y, CHEN D, TANG Q Y, et al. Effects of silage time on quality and in vitro rumen fermentation characteristics of first season ratoon rice whole silage[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(7): 3282–3290.
- [14] 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.
- [15] WANG M, WANG R, TANG S X, et al. Comparisons of manual and automated incubation systems: effects of venting procedures on in vitro ruminal fermentation[J]. Livestock Science, 2016, 184: 41–45.
- [16] National Research Council. Nutrient Requirements of Small Ruminants :Sheep ,Goats ,Cervids ,and New World Camelids[M]. Washington, DC :The National Academies Press, 2007.
- [17] WANG M, JANSSEN P H, SUN X Z, et al. A mathematical model to describe in vitro kinetics of H₂ gas accumulation[J]. Animal Feed Science and Technology, 2013, 184(1/2/3/4): 1–16.
- [18] 王荣, 谭利伟, 王敏, 等. 硝酸钠和 2-溴乙烷磺酸钠对山羊体外瘤胃发酵甲烷、氢气和挥发性脂肪酸生成的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(5): 1586–1595.
WANG R, TAN L W, WANG M, et al. Effect of sodium nitrate and 2-bromoethanesulphonate on methane, hydrogen and volatile fatty acids production of in vitro ruminal fermentation[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(5): 1586–1595.
- [19] HAN K J, COLLINS M, VANZANT E S, et al. Bale density and moisture effects on alfalfa round bale silage[J]. Crop Science, 2004, 44(3): 914–919.
- [20] KOUTROTSIOS G, MOUNTZOURIS K C, CHATZIPAVLIDIS I. Bioconversion of lignocellulosic residues by *Agrocybe cylindracea* and *Pleurotus ostreatus* mushroom fungi: assessment of their effect on the final product and spent substrate properties[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 127–135.
- [21] 宫福臣, 韩梅琳, 杨琼, 等. 菌糠与奶牛常用粗饲料瘤胃降解特性的对比研究[J]. 动物营养学报, 2013, 25(6): 1366–1374.
GONG F C, HAN M L, YANG Q, et al. Comparison of rumen degradation characteristics between spent mushroom substrate and commonly used roughages for dairy cows[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013, 25(6): 1366–1374.
- [22] RAJAVAT A S, RAI S, PANDIYAN K, et al. Sustainable use of the spent mushroom substrate of *Pleurotus florida* for production of lignocellulolytic enzymes[J]. Journal of Basic Microbiology, 2020, 60(2): 173–184.
- [23] 张薇, 王明远, 苏小军, 等. 离子色谱法测定水稻秸秆木质纤维素水解物单糖[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2011, 37(2): 206–210.
ZHANG W, WANG M Y, SU X J, et al. Measurement of composition of monosaccharide in lignocelluloses of rice straw by ion chromatography[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2011, 37(2): 206–210.
- [24] 石其伟, 刘强, 荣湘民, 等. 不同微生物菌剂对水稻秸秆发酵效果的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(3): 264–268.
SHI Q W, LIU Q, RONG X M, et al. Effects of different microbial agents on fermentation of rice straw in composting[J]. Journal of Hunan Agricultural University

- (Natural Science), 2006, 32(3): 264–268.
- [25] 李雯, 刘艳薇, 李停锋, 等. 不同纤维素降解菌对玉米秸秆的降解效果[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 402–410.
- LI W, LIU Y W, LI T F, et al. Effects of different cellulose-degrading microorganism on corn straw degradation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 402–410.
- [26] METZLER-ZEBELI B U, SCHERR C, SALLAKU E, et al. Evaluation of associative effects of total mixed ration for dairy cattle using in vitro gas production and different rumen inocula[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(12): 2479–2485.
- [27] 汤少勋, 姜海林, 周传社, 等. 不同牧草品种对体外发酵产气特性的影响[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 72–77.
- TANG S X, JIANG H L, ZHOU C S, et al. Effects of different forage species on in vitro gas production characteristics[J]. Acta Pratacultural Science, 2005, 14(3): 72–77.
- [28] 普宣宣, 郭雪峰, 刘新路, 等. 日粮不同 NFC/NDF 比例对瘤胃微生物体外消化与发酵特性的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(8): 91–96.
- PU X X, GUO X F, LIU X L, et al. Effects of different NFC/NDF ratios on in vitro digestion and fermentation of rumen microorganisms[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(8): 91–96.
- [29] 张勇, 郭海明, 汤志宏, 等. 油菜籽颗粒料对湖羊生产性能、瘤胃发酵参数及血液生化指标的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 171–179.
- ZHANG Y, GUO H M, TANG Z H, et al. Effects of pelleted rape straw feed on productive performance, rumen fermentation parameters, and blood biochemical indexes of Hu sheep[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2016, 25(10): 171–179.
- [30] MCDONALD P, EDWARDS R A. The influence of conservation methods on digestion and utilization of forages by ruminants[J]. The Proceedings of the Nutrition Society, 1976, 35(2): 201–211.
- [31] 李洋, 高民, 胡红莲, 等. 反刍动物瘤胃挥发性脂肪酸的吸收机制[J]. 动物营养学报, 2018, 30(6): 2070–2078.
- LI Y, GAO M, HU H L, et al. Ruminal absorption mechanism of volatile fatty acids in ruminants[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(6): 2070–2078.
- [32] 巴桑珠扎, 陈亮, 奥斯曼, 等. 西藏地区不同作物秸秆体外发酵特性研究[J]. 动物营养学报, 2017, 29(2): 719–728.
- BASANGZHUZA, CHEN L, AOSIMAN, et al. Study on in vitro fermentation characteristics of different crop straws in Tibet region[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(2): 719–728.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正