

王阔鹏, 晏琦, 程志强, 等. 糙皮侧耳与黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧对其养分含量及奶牛瘤胃降解特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3): 756-764.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.03.022

糙皮侧耳与黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧对其养分含量及奶牛瘤胃降解特性的影响

王阔鹏, 晏琦, 程志强, 吉慧敏, 魏元浩, 林森

(扬州大学动物科学与技术学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 本研究旨在研究 2 种白腐真菌及其组合预处理花生秧的效果。选取单菌株糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*) (Po)、黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*) (Pc) 和组合菌株(PoPc) 处理花生秧, 并设置对照组花生秧(CK1)、灭菌花生秧(CK2)测定发酵后 10 d、20 d 和 30 d 养分含量变化。利用尼龙袋法评定其粗蛋白质(CP)、干物质(DM)、中性洗涤纤维(NDF) 和酸性洗涤纤维(ADF) 的 72 h 瘤胃动态降解率和有效降解率。结果表明, (1) Po 处理花生秧 30 d 时 CP 含量显著增加($P < 0.05$)。Pc 和 PoPc 处理 30 d 花生秧的粗蛋白含量、粗灰分含量差异不显著($P > 0.05$), 2 种真菌的组合存在拮抗作用, 降解木质素效果小于单一菌株。(2) Po 处理 NDF、ADF 瘤胃有效降解率显著高于 Pc 处理和 PoPc 处理($P < 0.05$), DM 瘤胃有效降解率显著低于 Pc 处理和 PoPc 处理($P < 0.05$)。3 种真菌预处理方式同 CK1 相比未显著改变 CP 有效降解率。综上, 与 Pc 处理和 PoPc 处理相比, Po 处理花生秧提高了 CP 含量, 减少了其他可利用碳水化合物在发酵过程中的损失; Po 具有提高花生秧营养价值的潜力。

关键词: 花生秧; 糙皮侧耳; 黄孢原毛平革菌; 瘤胃降解率; 养分含量

中图分类号: S816.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)03-0756-09

Effects of fermentation treatment of peanut vine with *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* on nutrient content and rumen degradation characteristics of dairy cows

WANG Kuo-peng, YAN Qi, CHENG Zhi-qiang, JI Hui-min, WEI Yuan-hao, LIN Miao

(College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of two white rot fungi and their combination on the pretreatment of peanut vine. A single strain of *Pleurotus ostreatus* (Po), *Phanerochaete chrysosporium* (PC) and a combination strain (PoPC) were selected to treat peanut vine, and control peanut vine (CK1) and sterilized peanut vine (CK2) were set to determine the changes of nutrient contents at 10 d, 20 d and 30 d after fermentation. The dynamic degradation rates and effective degradation rates of dry matter (DM), crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) at 72 h were evaluated by nylon bag method. The results showed that the crude protein content of peanut vine pretreated with Po for 30 d increased significant ($P < 0.05$). The crude protein content and crude ash content

of peanut vine pretreated by Pc and PoPc for 30 days had no significant difference ($P > 0.05$). The combination of the two fungi had antagonistic effect, and the lignin degradation effect was less than that of single strain. The rumen effective degradation rate of NDF and ADF in Po treatment was significantly higher than that in Pc and PoPc treatments ($P < 0.05$), and the rumen effective degradation

收稿日期: 2021-09-14

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-36); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 王阔鹏(1997-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 从事反刍动物营养研究。(E-mail) 1285385717@qq.com

通讯作者: 林森, (E-mail) linmiao@yzu.edu.cn

rate of DM in Po treatment was significantly lower than that in Pc and PoPc treatments ($P < 0.05$). The three fungal pretreatment methods did not significantly change the effective degradation rate of CP compared with CK1. In conclusion, compared with Pc and PoPc, Po pretreatment of peanut vine increased CP content and reduced the loss of other available carbohydrates during fermentation. Po has the potential to improve the nutritional value of peanut vine.

Key words: peanut vine; *Pleurotus ostreatus*; *Phanerochaete chrysosporium*; rumen degradation rate; nutrient content

中国农作物秸秆每年的理论产量约为 9.0×10^8 t, 秸秆综合利用率达到 80.1%, 其中饲料化利用占比仅为 18.8%^[1]。秸秆中细胞壁的主要成分为半纤维素、纤维素和木质素^[2], 瘤胃不降解木质素, 半纤维素、纤维素与木质素通过共价键、醚键和酯键等方式结合, 阻碍纤维素酶的水解及瘤胃中的微生物利用^[3-4]。采用预处理方式破坏秸秆木质素结构, 使瘤胃微生物及消化酶能够更加容易接触到纤维素, 达到提高秸秆的饲料利用率的目的^[5]。目前生物法是预处理秸秆的主要方式之一, 利用微生物发酵或酶解等方式使秸秆中的营养物质被吸收转化, 进而生产出富含菌体蛋白、维生素等成分的生物饲料, 解决了难消化的粗纤维转化为可消化养分的难题, 但其缺点是作用效果往往会受到工艺条件的影响^[6]。芽孢杆菌属细菌、木霉属真菌^[7-8]及白腐真菌^[9-10]是常用的可降解木质纤维素的菌种, 可用于生产高品质的发酵粗饲料。降解木质素的真菌主要有白腐菌、褐腐菌、软腐菌 3 类, 其中只有白腐菌能独立降解木质素^[11]。

花生在中国油料生产中种植面积仅次于油菜, 居第二位, 2019 年中国花生种植面积为 4.633×10^6 hm²^[12]。花生种植面积的扩大产生了大量花生秧。随着中国奶牛规模化养殖的发展, 对优质粗饲料的需求量也迅猛增加, 深入研究花生秧预处理方法, 用以代替苜蓿等牧草, 成为亟待解决的问题。本研究以白腐真菌发酵花生秧为研究对象, 通过测定花生秧在发酵过程中养分含量的变化, 评价其降解木质素的特点和能力, 通过尼龙袋法评价不同白腐真菌预处理花生秧在奶牛瘤胃中的降解率的差异, 为提高花生秧的降解率及饲喂价值提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 菌种及接种载体制备

本研究所用菌种为糙皮侧耳 (*Pleurotus ostreatus*) 和黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*), 由中国农业大学徐春城课题组赠予。2 种真

菌活化后接种到麦芽提取物培养基上, 24 ℃ 恒温培养至菌丝铺满培养皿。称取粟米 200 g, 加热调制到水分含量为 60% 左右, 105 ℃ 烘干米粒表面水分使其分散不黏连, 装入聚丙烯发酵袋灭菌 (121 ℃, 20 min)。在超净台中分别接种上述 2 种白腐真菌至粟米中, 24 ℃ 培养 14 d, 菌丝布满米粒表面后, 置于 4 ℃ 冰箱中保存, 备用。

1.2 花生秧来源及处理

花生秧风干样于 2020 年 10 月取自河南省许昌市, 使用前用铡刀切碎至 2~3 cm, 自来水浸泡过夜, 最后将水分含量调制成 78.2%。每袋 200 g 分装至聚丙烯菌袋 (长 37 cm×宽 20 cm) 中, 灭菌 (121 ℃, 20 min), 超净台冷却备用。

1.3 接种及发酵

发酵试验共 3 个处理组, 糙皮侧耳发酵处理花生秧 (Po)、黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧 (Pc) 及糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌复合发酵处理花生秧 (PoPc), 同时设置原料花生秧对照组 (CK1) 和花生秧灭菌对照组 (CK2)。用无菌镊子向灭菌后花生秧中接种入 2% (质量比) 的长满菌丝的粟米粒, 复合处理组糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌各接入 1% 的粟米粒。将菌包放在温度为 24 ℃、相对湿度为 75% 的培养箱中发酵。各组在发酵的第 0 d、10 d、20 d 和 30 d 进行取样, 每个处理每次随机取样 3 个菌包, 烘箱中 65 ℃ 烘 48 h, 然后粉碎至可通过 2 mm 的筛网, 用于瘤胃尼龙袋试验。剩余部分用于相关指标测定, 所有试验测定均设置 3 个重复。花生秧养分含量见表 1。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 花生秧养分含量 干物质 (DM) 含量、粗蛋白 (CP) 含量、粗灰分 (ASH) 含量的测定参考张丽英^[13]的方法测定; CP 含量使用 FOSS 半自动凯氏定氮仪测定; 中性洗涤纤维 (NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF)、木质素 (ADL) 含量根据 Van Soest 等^[14]的方法使用 ANKOM-2000I 全自动纤维分析仪测定。

表 1 100 g 花生秧营养成分含量(风干样)

Table 1 Nutrient content of 100 g peanut vine

项目	Po	Pc	PoPc	CK1	CK2
中性洗涤纤维(%)	62.1±2.1	36.8±1.8	41.8±2.6	48.7±1.0	61.6±1.2
酸性洗涤纤维(%)	53.7±2.7	28.8±1.6	32.2±1.8	40.4±1.4	50.9±0.5
木质素(%)	8.9±1.4	8.7±0.9	9.3±0.4	8.6±0.3	12.4±0.1
粗蛋白(%)	13.6±1.5	12.7±1.6	13.4±0.7	8.6±1.1	6.1±1.3
粗灰分(%)	6.1±0.1	10.2±0.8	10.3±0.3	8.3±0.5	5.8±0.2
干物质(%)	93.3±0.4	92.8±0.9	93.6±0.2	90.1±0.2	90.8±1.3

CK1 为原料花生秧;CK2 为灭菌花生秧;Po 为糙皮侧耳发酵 30 d 的花生秧;Pc 为黄孢原毛平革菌发酵 30 d 的花生秧;PoPc 为糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌共同发酵 30 d 的花生秧。

1.4.2 养分含量损失率计算 养分含量损失率计算参考牛东泽^[15]的方法:

$$DM_1 = \frac{(m_2 - m_1) \times DM_0 - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1) \times DM_0} \times 100\%$$

式中, DM_1 为样品发酵后干物质的损失率; m_1 培养袋质量; DM_0 为原样品的干物质含量; m_2 为培养袋和未发酵样品鲜质量; m_3 培养袋和发酵样品干质量。

1.4.3 瘤胃降解率指标 本试验在扬州大学农牧场进行,选用 3 头体质状况良好、体质量(625±25) kg、安装永久性瘤胃瘘管的荷斯坦奶牛,试验奶牛基础饲料组成及饲喂方式参考王敬林等^[16]的研究。称取被测样品 3 g 左右放入处理好的尼龙袋中,5 个组每个时间点设置 2 个平行,3 次重复。尼龙袋固定于塑胶管,按同时放入、依次取出原则^[17],分别在 6 h、12 h、24 h、36 h、48 h、72 h 后取出,冲洗干净,65 °C 烘干,称质量并保存。

某时间点瘤胃降解率=(降解前养分含量-该时间点降解后养分含量)/降解前袋内养分含量×100%。

瘤胃动力学数学模型和有效降解率(ED)参照 Orskov 等^[18]的计算方法。某饲料营养成分实时瘤胃降解率(P)符合指数曲线:

$$P = a + b(1 - e^{-ct})$$

$$ED = a + bc/(k + c)$$

式中, t 为瘤胃中饲料停留的时间(h); a 为快速降解部分(%); b 为慢速降解部分(%); c 为 b 的降解速率(%); ED 为饲料营养物质的有效降解率(%); k 为瘤胃食糜外流速率,参考郑向丽等^[19]的研究, k 取值为0.023 5。

1.5 统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS21.0 对试验数据整理

并进行双因素方差分析,采用单因素方法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧的养分含量变化

由表 2 可知,白腐真菌菌种和发酵时间的互作效应对花生秧的 NDF 和 ADF 含量均有极显著影响($P < 0.01$),对木质素与灰分含量无显著影响($P > 0.05$)。发酵时间的延长有利于提高发酵处理花生秧的粗蛋白含量,最大值出现在发酵 30 d 的 Po 组。另外,Po 组发酵时间对发酵处理花生秧的 NDF 和 ADF 含量无影响,但 Pc、PoPc 两组发酵时间与发酵处理花生秧 NDF 和 ADF 含量呈负相关($P < 0.01$);Pc 组对花生秧 ADL 降解效果最好,与发酵时间呈负相关($P < 0.05$)。在发酵 10 d、20 d 和 30 d 时,这 3 个时间点 Po 组与 Pc 组、PoPc 2 组粗灰分含量差异显著($P < 0.05$),粗灰分含量随发酵时间的延长而增大($P < 0.05$)。

2.2 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧的养分含量损失率

由表 3 可知,白腐真菌菌种和发酵时间的互作效应对花生秧 DM、ADL 和纤维素降解量均有极显著影响($P < 0.01$)。Pc 组和 PoPc 组的各养分损失率均与发酵时间呈正相关关系($P < 0.05$)。随着发酵时间的延长,3 个处理组的 DM、ADL 和 NDF 损失率均差异显著($P < 0.05$)。Po 组与 Pc 组和 PoPc 组 DM 损失率在各时间段均差异极显著($P < 0.01$)。Po 组的 ADL 在各时间段的损失率差异不显著($P > 0.05$),但在发酵 30 d 时 ADL 损失率显著小于 Pc 组与 PoPc 组($P < 0.05$);PoPc 组 30 d 时 NDF 损失

率显著高于其他 2 个处理组 ($P<0.05$); Pc 组和 PoPc 组在发酵 30 d 时花生秧纤维素和半纤维素损失率差异不显著 ($P>0.05$), 但 2 个组纤维素和半纤维素损失率显著大于 Po 组 ($P<0.05$)。

表 2 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧的养分含量

Table 2 Nutrient content of peanut vine fermented by *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium*

项目	处理	花生秧养分含量(100 g 风干样)				P 值		
		0 d	10 d	20 d	30 d	T	D	T * D
中性洗涤纤维	Po	61.6±1.2aA	56.1±1.1bA	60.3±1.3aA	62.1±2.1aA	<0.001	<0.001	<0.001
	Pc	61.6±1.2aA	52.4±0.9bAB	44.1±1.1cB	36.8±1.8dC			
	PoPc	61.6±1.2aA	50.8±1.8bB	46.6±1.1cB	41.7±2.6dB			
酸性洗涤纤维	Po	50.9±0.5abA	48.7±0.8bA	53.0±1.7aA	53.7±2.7aA	<0.001	0.001	<0.001
	Pc	50.9±0.5aA	42.9±1.2bAB	34.9±0.9cB	28.8±1.6dC			
	PoPc	50.9±0.5aA	38.6±1.8bB	36.1±1.3bcB	32.3±1.8cB			
木质素	Po	12.4±0.1aA	10.2±0.8bA	9.3±0.1bB	9.0±1.4bA	0.02	<0.001	0.344
	Pc	12.4±0.1aA	12.1±0.1aA	10.4±0.4bA	8.7±0.9cA			
	PoPc	12.4±0.1aA	11.9±0.3aA	10.9±0.1bA	9.3±0.4cA			
粗蛋白	Po	6.1±1.3cA	12.6±1.6abA	12.0±1.4bA	13.6±1.5aA	0.54	<0.001	0.014
	Pc	6.1±1.3bA	12.0±1.5aA	12.0±1.2aA	12.7±1.6aB			
	PoPc	6.1±1.3bA	10.6±1.1aA	11.8±1.7aA	13.4±0.6aAB			
粗灰分	Po	5.8±0.2bA	4.9b±0.1B	6.0±0.1bB	6.1±0.1aB	0.065	<0.001	0.103
	Pc	5.8±0.2cA	7.3±0.2bA	9.3±0.4aA	10.2±0.8aA			
	PoPc	5.8±0.2dA	7.8±0.3cA	9.1±0.3bA	10.3±0.3aA			

CK1、CK2、Po、Pc、PoPc 见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示不同采样时间之间差异显著 ($P<0.05$)。同一项目同一列数据后不同大写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。T 代表处理, D 代表采样时间, T * D 代表处理和采样时间的互作效应。

表 3 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧的养分含量损失率

Table 3 Loss rate of nutrient content of peanut vine fermented by *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium*

项目	处理	养分含量消失率(%)			P 值		
		10 d	20 d	30 d	T	D	T * D
干物质	Po	-2.8±0.3bB	5.0±0.8aB	4.4±0.3aB	<0.001	<0.001	<0.001
	Pc	18.7±0.3cA	33.9±0.6bA	43.9±0.4aA			
	PoPc	19.3±1.2cA	35.1±1.4bA	42.9±1.7aA			
木质素	Po	31.9±0.35aA	33.6±0.9aB	32.0±1.2aB	<0.001	<0.001	<0.001
	Pc	27.8±0.2cA	51.2±0.7bA	63.6±0.6aA			
	PoPc	27.3±0.9cA	50.2±1.9bA	61.9±0.9aA			
中性洗涤可溶物	Po	-28.6±0.7cA	-7.5±0.1bC	7.5±0.1aC	<0.001	<0.001	0.086
	Pc	-10.2±1.1cA	1.5±0.5bB	15.0±0.3aB			
	PoPc	-20.4±1.4cA	6.2±0.2bA	22.9±0.9aA			
纤维素	Po	3.7±0.6bB	4.6±0.6bB	8.7±0.1aB	<0.001	<0.001	<0.001
	Pc	40.8±0.8cA	62.9±0.6bA	73.1±1.3aA			
	PoPc	47.9±1.6bA	63.3±0.9aA	69.6±2.3aA			
半纤维素	Po	33.7±1.8bA	40.4±1.3aB	27.1±1.7cB	0.065	0.007	0.056
	Pc	34.5±1.4cA	50.0±1.6bA	61.2±2.8aA			
	PoPc	13.9±0.9bB	44.9±0.2abAB	55.0±2.6aA			

CK1、CK2、Po、Pc、PoPc 见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示不同采样时间之间差异显著 ($P<0.05$)。同一项目同一列数据后不同大写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。T 代表处理, D 代表采样时间, T * D 代表处理和采样时间的互作效应。

2.3 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 DM 降解特性

由表 4 可知,CK1 72 h DM 降解率高于其他各组 ($P<0.05$)。Pc 组和 PoPc 组在 6 h 时 DM 降解率均高于其他组 ($P<0.05$),快速降解部分 Pc 组和

PoPc 组显著高于其他各组 ($P<0.05$);Po 组在各时间点均低于其他各组 ($P<0.05$),CK2 在各时间点(除 12 h 外)DM 降解率显著低于 CK1 ($P<0.05$);CK1 与 Pc 组 DM 有效降解率高于 PoPc 组、CK2 和 Po 组 ($P<0.05$)。

表 4 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧在瘤胃中 DM 降解特性

Table 4 Dry matter degradation characteristics of peanut vine fermented by *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* in rumen

项目	DM 降解率 (%)				
	Po	Pc	PoPc	CK1	CK2
6 h	13.9±2.0d	39.0±1.1a	34.7±1.7a	28.3±1.5b	19.6±2.6c
12 h	17.0±2.2c	40.9±2.3a	35.2±1.6ab	34.8±2.5ab	29.2±4.5b
24 h	22.8±1.0d	43.8±1.5b	38.4±4.6bc	52.0±5.3a	33.8±2.9c
36 h	23.3±1.6d	47.7±3.6ab	41.7±2.9bc	53.0±4.7a	37.0±4.5cd
48 h	31.6±3.5c	48.3±2.6ab	42.4±2.5b	55.2±2.7a	44.9±6.5b
72 h	36.5±3.1c	50.6±4.5b	44.1±3.6b	59.6±5.7a	47.4±5.1b
快速降解部分	11.0±0.2b	36.3±2.6a	32.1±1.4a	13.1±1.7b	14.2±2.1b
慢速降解部分	49.2±1.6a	16.5±1.1c	14.3±0.2c	46.0±3.0a	35.8±2.4b
潜在降解部分	60.2±3.6a	52.8±1.7b	46.4±1.5c	59.2±5.2a	50.0±4.9bc
有效降解率	25.1±2.3c	45.0±2.8a	39.4±1.2b	45.8±1.3a	35.2±3.6b

CK1、CK2、Po、Pc、PoPc 见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 NDF 降解特性

由表 5 可知,CK1、CK2 与 Po 组 12 h NDF 降解率差异不显著 ($P>0.05$);Pc 组在 6 h 和 12 h 时 NDF 降解率显著高于 PoPc 组 ($P<0.05$),12 h 后这 2 组 NDF 降解率相似,且显著低于其他 3 组 ($P<0.05$);在

24 h、36 h 时 Po 与 CK2 两组 NDF 的降解率显著低于 CK1 ($P<0.05$),且出现降解延滞期。CK1 NDF 降解率在 72 h 时间点最高,但与 Po、CK2 两组差异不显著 ($P>0.05$)。Pc 组的快速降解部分显著高于其他各组 ($P<0.05$);Pc 组与 PoPc 两组的有效降解率低于 Po 组、CK1 和 CK2 ($P<0.05$)。

表 5 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧在瘤胃中 NDF 降解特性

Table 5 Degradation characteristics of neutral detergent fiber (NDF) of peanut vine fermented by *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* in rumen

项目	NDF 降解率 (%)				
	Po	Pc	PoPc	CK1	CK2
6 h	6.9±1.1ab	4.2±0.3b	1.3±0.8c	8.5±1.5a	6.0±0.9ab
12 h	11.5±1.7a	4.9±1.6b	1.9±0.1c	13.1±2.3a	12.2±1.1a
24 h	15.3±0.5c	5.8±1.2d	3.2±0.6d	22.9±1.9a	19.2±0.9b
36 h	25.3±0.9b	7.9±1.9c	4.9±1.0c	29.2±2.8a	25.5±1.4b
48 h	30.3±1.0a	8.5±2.1b	6.0±0.6b	30.9±3.5a	31.4±2.5a
72 h	33.2±1.9a	10.9±2.8b	7.3±0.9b	37.3±2.5a	35.6±2.7a
快速降解部分	1.3±0.3b	3.5±0.3a	0.3±0.1c	1.3±0.1b	0.08±0.1c
慢速降解部分	41.2±3.0a	28.3±1.2b	11.1±0.4c	39.6±1.1a	42.1±2.2a
潜在降解部分	42.5±2.3a	31.7±0.9b	11.4±1.5c	40.9±3.5a	42.2±1.9a
有效降解率	20.6±1.6a	7.5±0.2b	4.3±0.5b	23.4±2.6a	21.6±2.4a

CK1、CK2、Po、Pc、PoPc 见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 ADF 降解特性

由表 6 可知,36 h 时 CK1 的 ADF 降解率显著高于 CK2 ($P<0.05$),在其他时间点两者差异不显著,除 6 h 外,这两组在不同时间段均高于其他 3 组($P<$

0.05)。Pc 组和 PoPc 组各时间点 ADF 降解率相近,两组在 72 h 的 ADF 降解率极显著低于其他 3 组($P<0.01$)。Po 组的潜在降解部分与 CK1 差异不显著($P>0.05$);CK1 与 CK2 两组在慢速降解部分均显著高于其他组($P<0.05$)。

表 6 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧瘤胃中 ADF 降解特性

Table 6 Degradation characteristics of acid detergent fiber (ADF) of peanut vine fermented by *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* in rumen

项目	ADF 降解率 (%)				
	Po	Pc	PoPc	CK1	CK2
6 h	6.4±1.6a	2.1±0.4b	1.5±0.5b	10.3±0.4a	9.5±0.8a
12 h	8.8±1.2b	2.9±0.4c	2.1±1.0c	15.6±0.6a	15.4±0.3a
24 h	14.3±1.6b	3.2±0.3c	2.5±1.2c	24.6±1.2a	20.9±1.2a
36 h	21.3±2.6c	5.0±0.4d	3.6±0.4d	33.4±0.7a	28.3±1.2b
48 h	26.8±2.8b	5.9±1.46c	4.5±1.9c	33.8±1.1a	36.3±1.5a
72 h	28.6±0.5b	7.4±1.7c	5.1±2.1c	38.2±1.8a	39.5±2.6a
快速降解部分	0.8±0.1c	1.5±0.3b	0.9±0.2c	1.4±0.4b	3.9±0.7a
慢速降解部分	35.4±2.3b	21.1±2.3c	6.7±1.2d	39.1±1.8a	46.2±2.9a
潜在降解部分	36.2±3.6b	22.6±1.7c	7.7±0.6d	40.5±2.5b	50.2±2.7a
有效降解率	17.8±1.6b	4.8±0.5c	3.3±0.4c	25.4±1.7a	25.3±1.6a

CK1、CK2、Po、Pc、PoPc 见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.6 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 CP 降解特性

由表 7 可知,在 6 h 和 12 h 时 Pc 组与 PoPc 组 CP 降解率无显著差异,均高于其他 3 组($P<0.05$),两组均在 6 h 后降解率平缓上升;各时间点 Po 组和 CK1 CP

降解率差异不显著($P>0.05$);CK2 CP 降解率最低($P<0.05$);在 12 h 后,除 CK2 外,其他 4 组 CP 降解率相近。Pc 组与 PoPc 组快速降解部分 CP 降解率高于其他各组($P<0.05$),两者无差异。Po 组与 CK1 慢速降解部分 CP 降解率显著高于其他组($P<0.05$)。

表 7 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理花生秧瘤胃中 CP 降解特性

Table 7 Degradation characteristics of crude protein (CP) of peanut vine fermented by *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* in rumen

项目	CP 降解率 (%)				
	Po	Pc	PoPc	CK1	CK2
6 h	20.4±0.1b	31.3±2.0a	30.9±1.3a	16.7±1.7b	7.1±0.5c
12 h	24.0±1.8b	32.1±1.4a	33.4±1.8a	22.7±1.5b	8.8±0.9c
24 h	36.1±1.1a	34.9±1.2a	35.4±1.3a	31.3±2.3a	12.8±1.1b
36 h	37.2±0.8a	36.9±0.8a	37.5±1.0a	36.3±1.3a	18.3±1.1b
48 h	43.1±1.1a	39.9±1.1a	40.1±1.2a	42.5±1.5a	20.6±0.7b
72 h	49.6±1.2a	41.9±1.1b	43.9±1.2ab	48.5±2.3a	23.2±1.2c
快速降解部分	14.4±1.6b	29.4±0.7a	29.9±1.2a	10.9±0.5b	3.3±0.5c
慢速降解部分	41.4±1.5a	20.5±0.8c	33.5±1.2b	45.9±2.2a	25.1±1.5c
潜在降解部分	55.±1.8ab	49.9±1.7b	63.5±2.1a	56.8±1.7a	28.4±1.9c
有效降解率	35.1±2.6a	36.5±1.4a	37.5±1.9a	33.1±1.4a	15.2±1.0b

CK1、CK2、Po、Pc、PoPc 见表 1 注。同一行数据后不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧养分变化

花生秧是一种优质的粗饲料,本研究中花生秧养分含量与前人报道结果相符^[19-20]。白腐真菌对木质纤维素的降解程度取决于发酵底物的特性,其通过促进纤维素和半纤维素释放而改善瘤胃发酵能力来提高秸秆的营养价值^[21]。在白腐真菌发酵过程中,秸秆中木质素的降解同时伴随着纤维素和半纤维素的降解,导致有机物损失严重^[22]。本试验中,Pc 组处理花生秧 30 d 后 DM 和 ADL 损失率分别为 43.9% 和 63.6%,PoPc 组处理花生秧 30 d 后 DM 和 ADL 损失率(42.9%、61.9%)稍低于 Pc 组,表明 2 种真菌对花生秧的发酵无协同作用,与前人研究混合真菌发酵其他农作物秸秆的研究结果不同^[23-25]。白腐真菌菌种和发酵天数的交互作用对花生秧 ADL 的含量变化影响不显著,与牛东泽^[15]研究真菌发酵小麦秸秆的结论一致。白腐真菌在生长过程中能够产生菌体细胞蛋白质,本研究中花生秧发酵随着时间的增加 CP 含量增加。通常情况下,随着碳水化合物被降解为 CO₂ 和 H₂O,基质中 NDF 和 ADF 的含量出现下降^[26],本研究中 Po 处理花生秧后出现了 NDF 和 ADF 的含量稍上升的结果,这一现象可能是由于其他组分(ADL)的损失造成 NDF 与 ADF 表观值升高,试验结果与 Niu 等^[3]利用白腐真菌处理小麦秸秆后 ADF 含量变化的研究结果相同。本研究中 Pc 处理花生秧出现了较高的 DM、纤维素和半纤维素损失率,说明该菌生长特点为非选择性降解纤维素、半纤维素和木质素^[21]。因此,在本研究的试验条件下,该菌不是发酵饲用花生秧的最佳菌种。

3.2 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 DM 降解特性

DM 瘤胃降解率反映了有机物质在秸秆内的累积量^[27]。DM 降解率受饲料原料品种、饲料粒度、日粮精粗比、奶牛所处泌乳阶段等因素影响^[28]。农作物秸秆等粗饲料木质素含量高,秸秆在真菌发酵培养中,菌丝能够分泌纤维素酶及木质素降解酶,使细胞壁结构松散,木质素中的苯环被解链,使其松软,秸秆相对接触面积增大,有助瘤胃内微生物对底物的附着及消化,加快降解速率^[29]。本研究中在瘤

胃发酵前期 Pc 组 12 h 时 DM 降解率为 40.91%,而 Po 处理花生秧后干物质含量无大变化,DM 有效降解率仅为 25.1%。Po 组有效降解率显著低于 Pc 组,原因可能为不同菌种发酵秸秆后产物不同,阻碍了瘤胃微生物对其消化利用,文江南等^[30]利用平菇处理水稻秸秆,抑制了水稻秸秆的瘤胃纤维降解、挥发性脂肪酸生成。本研究中花生秧干物质的有效降解率为 45.8% 左右,稍低于前人研究结果^[31]。

3.3 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 NDF 和 ADF 降解特性

纤维在瘤胃中的消化主要受木质素的影响,纤维素、半纤维素和木质素间形成的酯键、醚键等阻碍了微生物的附着,影响瘤胃对粗饲料的消化利用^[32]。本研究中 Pc 和 PoPc 两组 NDF 与 ADF 有效降解率最低,且 Po 组显著高于这 2 个组。上述结果与干物质降解率恰好相反,原因可能是 Pc 处理后花生秧可溶性碳水化合物含量较高,并且 Pc 组和 PoPc 组预处理花生秧时消耗了过多的纤维性养分。本研究中 5 种花生秧 NDF 与 ADF 降解率在前 12 h 变化较小,12 h 后降解率明显提高,至 48 h 后趋于平缓,结果与前人研究结果^[33]基本一致。本研究中花生秧 NDF 与 ADF 的有效降解率为 23.36% 和 25.38%,与蔡阿敏等^[20]报道的夏季花生秧 NDF 和 ADF 的有效降解率 31.48%、30.64%,冯豆等^[34]报道的花生秧 NDF 和 ADF 的有效降解率 36.52%、34.07% 以及刘艳芳等^[32]报道的花生秧 NDF 和 ADF 的有效降解率 27.01%、27.43% 相比较低。王加启等^[35]发现随着日粮精粗比的增加,NDF 与 ADF 的降解率均有不同程度的降低。

3.4 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌发酵处理的花生秧 CP 降解特性

微生物处理秸秆,可利用秸秆将非蛋白质氮转化为自身菌体蛋白质,提高秸秆发酵物的蛋白质含量及消化率,将秸秆中粗纤维等降解为反刍动物容易消化吸收的单糖、双糖、氨基酸等小分子物质^[29]。本研究中花生秧的 CP 有效降解率低于蔡阿敏等^[20]、刘艳芳等^[32]及冯豆等^[34]研究的花生秧有效降解率,可能是由于奶牛个体与饲喂的全混合日粮(TMR)不同,使得瘤胃消化环境不同^[36]。试验中 Pc 组和 PoPc 组的 CP 的快速降解部分显著高于其他 3 组,苜蓿作为优质蛋白质来源,其降解率高且降解速率快,而本研究中 Pc 和 PoPc 处理花生秧 CP

的瘤胃快速降解部分为 29.4% 和 29.9%, 一级苜蓿的快速降解部分为 31.7%^[32], 这说明花生秧经过真菌发酵后, 其中的蛋白质更易消化。Po 组 CP 有效降解率与 CK1、Pc 组和 PoPc 组差异不显著, 但 Po 处理后的花生秧自身蛋白质含量提高, 同未处理的花生秧相比, Po 处理后瘤胃内降解蛋白质的当量也增加。CK2 的 CP 有效降解率显著低于其他 4 组, 其机制需要进一步研究。同种粗饲料用不同真菌处理, CP 含量高的在瘤胃中的降解率不一定高, 只有通过化学分析方法判断其营养价值具有单一性^[32], 需要结合动物粗饲料采食量及瘤胃体外产气培养判断其可利用性。

4 结 论

3 种发酵预处理方式中, Po 预处理花生秧效果最好, 可降低 ADL 含量并增加 CP 含量; 干物质损失率最低(4.4%)。

通过瘤胃尼龙袋试验, 糙皮侧耳和黄孢原毛平革菌单独及混合预处理花生秧的瘤胃 CP 有效降解率与花生秧原料相近。但从总体营养成分上看, 白腐真菌预处理提高了蛋白质价值, Po 处理的花生秧 NDF、ADF 有效降解率显著高于 Pc 和 PoPc 处理。

参考文献:

- [1] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2583-2593.
- [2] 冯仰廉. 反刍动物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 314.
- [3] NIU D Z, ZHAO S, YANG S H, et al. Lignin plays a negative role in the biochemical process for producing lingo cellulosic biofuels[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2014, 27: 38-45.
- [4] RAFFRENATO E, FIEVISOHN R, COTANCH K W, et al. Effect of lignin linkages with other plant cell wall components on *in vitro* and *in vivo* neutral detergent fiber digestibility and rate of digestion of grass forages[J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100(10): 8119-8131.
- [5] 左飒飒. 白腐真菌降解玉米秸秆机理及其应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- [6] NIU D Z, ZUO S, JIANG D, et al. Treatment using white rot fungi changed the chemical composition of wheat straw and enhanced digestion by rumen microbiota *in vitro*[J]. Animal Feed Science and Technology, 2018, 237: 46-54.
- [7] 刁其玉, 国春艳. 提高粗饲料利用率的途径[J]. 粮食与饲料工业, 2005(10): 34-36.
- [8] SNCHEZ C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27(2): 185-194.
- [9] BEIKAI V, JOKHA I, KACHLI E, et al. The comparison of white rot basidiomycetes lignocellulolytic potential in wheat straw solid-state fermentation[J]. Ecological Engineering and Environment Protection, 2014(1): 69-74.
- [10] SHAMA K, AOA D S. Fungal degradation of lignocellulosic residues: an aspect of improved nutritive quality[J]. Criticals Views in Microbiology, 2015, 41(1): 52-60.
- [11] 李志兰, 杜孟浩. 木质素的生物合成及降解研究现状[J]. 浙江农业科学, 2010(4): 914-918.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [13] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [14] VAN SOEST P J, OBE TSON 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.
- [15] 牛东泽. 白腐菌发酵对小麦秸秆营养价值及微生物多样性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [16] 王敬林, 魏源浩, 武小娇, 等. 大蒜不同部位副产物与奶牛常规粗饲料瘤胃降解特性对比研究[J]. 动物营养学报, 2021, 33(10): 5708-5716.
- [17] 王加启. 反刍动物营养学研究方法[M]. 北京: 现代教育出版社, 2011.
- [18] ORSKOV E, MCDONALD I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage[J]. Journal of Agricultural Science, 1979, 92(2): 499-503.
- [19] 郑向丽, 王俊宏, 徐国忠, 等. 4 种花生秸秆在奶牛瘤胃中的降解特性[J]. 草业学报, 2016, 25(5): 149-155.
- [20] 蔡阿敏, 薛 宵, 赵佳浩, 等. 春花生秧与夏花生秧的营养价值评价及瘤胃降解率比较[J]. 动物营养学报, 2019, 31(4): 1823-1832.
- [21] 李 洋, 窦秀静, 张幸怡, 等. 非常规粗饲料分级指数和相对价值比较研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(2): 54-60.
- [22] SHARMA R, ARORA D. Changes in biochemical constituents of paddy straw during degradation by white rot fungi and its impact on *in vitro* digestibility[J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 109: 679-686.
- [23] 王 志, 陈 雄, 王实玉, 等. 拟康氏木霉和白腐菌混菌发酵处理稻草秸秆的研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 36-39.
- [24] 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.
- [25] 张立霞. 纤维降解菌组合的筛选、优化及对玉米秸秆的降解效果[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [26] 赵雪莉. 白腐真菌发酵对玉米秸秆纤维降解和绵羊饲喂价值的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020.

- [27] 高月娥,蔡 明,黄必志,等.桑叶在肉牛瘤胃中的降解特性研究[J].山地农业生物学报, 2017,36(4):80-84.
- [28] 王立明.奶牛常用饲料瘤胃降解规律和小肠消化率的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [29] 张立霞,屠 焰,李艳玲,等.不同微生物菌株及其组合处理对玉米秸秆瘤胃降解率的影响[J]. 动物营养学报,2014,26(8): 2433-2444.
- [30] 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.
- [31] 秦雯霄,廉红霞,付 彤,等.玉米青贮与花生秧配比对奶牛瘤胃中花生秧降解特性的影响[J].动物营养学报,2015,27(6): 1928-1935.
- [32] 刘艳芳,马 健,都 文,等.常规与非常规粗饲料在奶牛瘤胃中的降解特性[J]. 动物营养学报, 2018, 30(4): 1592-1602.
- [33] 郑向丽,王俊宏,徐国忠,等.4种花生秸秆在奶牛瘤胃中的降解特性[J]. 草业学报, 2016, 25(5): 149-155.
- [34] 冯 豆.花生秧营养价值的评定及其对奶牛瘤胃细菌多样性的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2018.
- [35] 王加启,冯仰廉.不同粗饲料日粮发酵规律及合成瘤胃微生物蛋白质效率研究[J].黄牛杂志, 1994(S2):82-85,77.
- [36] OCAK N. Rumen degradability of dry matter and crude protein of fresh or dry lucerne and grass forages[J]. Journal of Animal and Veterinary Advances,2005,4(2):324-328.

(责任编辑:陈海霞)