

网络出版时间:2023-12-13 09:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.06.003
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20231211.2014.013

海鲜菇菌糠微生物发酵及其在肉羊瘤胃降解特性研究

张耀^{1a,2}, 陈鑫珠^{1b}, 黄勤楼^{1a,2}, 游小凤^{1a,2}, 林东文³, 王华⁴, 黄小云^{1a,2}, 黄秀声^{1a,2}

(1 福建省农业科学院 a 农业生态研究所, b 畜牧兽医研究所, 福建 福州 350013; 2 福建省丘陵地区循环农业工程技术研究中心, 福建 福州 350013; 3 龙岩市新罗区农业农村局, 福建 龙岩 364000; 4 龙岩学院 生命科学学院, 福建 龙岩 364012)

【摘要】【目的】探究不同微生物菌剂对海鲜菇菌糠发酵效果的影响,并研究其在肉羊瘤胃内降解特性。【方法】以海鲜菇菌糠为主要原料,分别添加 0.1% 植物乳杆菌、0.1% 活菌多复合发酵菌剂、0.1% 活菌多复合发酵菌剂+3% 糖蜜以及 3% 糖蜜,以不添加菌剂和糖蜜的处理为对照组。每处理 3 个重复,室温厌氧发酵 45 d 后,取样测定其营养成分(干物质(DM)、粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量)及发酵品质(pH 及乳酸、乙酸、丙酸和丁酸含量)。取发酵效果最佳处理的发酵菌糠和菌糠原料进行瘤胃降解试验,测定发酵前后海鲜菇菌糠 DM、CP、NDF 和 ADF 不同发酵时间点(4, 8, 12, 24, 48 及 72 h)的瘤胃降解率,并计算降解参数及有效降解率。【结果】与对照组相比,各试验组 CP 含量均升高,NDF 含量均降低,其中 0.1% 活菌多复合发酵菌剂+3% 糖蜜处理发酵效果最佳,其 CP 含量提高了 9.69% ($P < 0.05$), NDF、ADF 和半纤维素含量分别下降了 9.12% ($P < 0.05$), 2.66% 和 28.71%。各试验组 pH 较对照组均显著降低 ($P < 0.05$), 乳酸含量均升高,其中 0.1% 活菌多复合发酵菌剂+3% 糖蜜处理组 pH 值最低,为 3.29, 乳酸含量最高(7.84%), 较对照组提高了 33.11% ($P < 0.05$)。0.1% 活菌多复合发酵菌剂+3% 糖蜜处理组菌糠 DM、CP、NDF 和 ADF 的 72 h 瘤胃降解率较发酵前分别提高了 8.61%, 8.58%, 14.75% 和 8.93% ($P < 0.05$), 有效降解率较发酵前分别提高了 7.66%, 11.75%, 20.74% 和 3.39% ($P > 0.05$)。【结论】在海鲜菇菌糠中添加 0.1% 活菌多复合发酵菌剂+3% 糖蜜能明显提高其营养价值、发酵品质及其在肉羊瘤胃中的降解率。

【关键词】 海鲜菇菌糠; 微生物发酵; 肉羊; 瘤胃; 降解特性

【中图分类号】 S826.9⁺25

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)06-0020-09

Microbial fermentation of *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue and its degradation characteristics in meat sheep rumen

ZHANG Yao^{1a,2}, CHEN Xinzhu^{1b}, HUANG Qinlou^{1a,2}, YOU Xiaofeng^{1a,2}, LIN Dongwen³,
WANG Hua⁴, HUANG Xiaoyun^{1a,2}, HUANG Xiusheng^{1a,2}

(1 a Agricultural Ecology Research Institute, b Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China; 2 Fujian Engineering and Technology Research Center for Recycling Agriculture in Hilly Areas, Fuzhou, Fujian 350013, China; 3 Agricultural and Rural Bureau of Xinluo District in Longyan City, Longyan, Fujian 364000, China; 4 College of Life Science, Longyan University, Longyan, Fujian 364012, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the effects of different microbial agents on the fermentation of *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue and analyzed its degradation characteristics in meat sheep rumen. 【Method】 Using *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue as raw material, treatments were set up by adding 0.1% *Lactobacillus plantarum*, 0.1% live bacteria multi-compound fermentation agent, 0.1%

【收稿日期】 2023-04-20

【基金项目】 福建省公益类科研项目(2020R1021002, 2020R1021004, 2022R1021002); 福建省人民政府-中国农业科学院“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021010, XTCXGC2021019); 福建省农业科学院项目(CXTD2021009-1)

【作者简介】 张耀(1994-), 男, 河南固始人, 硕士, 主要从事农业废弃物资源化和动物营养研究。E-mail: 1097826255@qq.com

【通信作者】 黄秀声(1972-), 男, 福建闽清人, 研究员, 硕士, 主要从事草业科学和生态农业研究。E-mail: hxs706@163.com

黄小云(1989-), 女, 福建南安人, 助理研究员, 硕士, 主要从事废弃物资源化利用研究。E-mail: 954945394@qq.com

live bacteria multi-compound fermentation agent+3% molasses and 3% molasses, respectively, while the control group was treated without bacterial agent and molasses. Each treatment had 3 replicates. After 45 days of anaerobic fermentation at room temperature, nutrients (contents of DM, CP, NDF and ADF) and fermentation quality (pH and contents of lactic acid, acetic acid, propionic acid and butyric acid) were measured. The mushroom residue from the treatment with the best fermentation effect and mushroom residue raw material were selected for the rumen degradation test. The rumen degradation rates of DM, CP, NDF and ADF were measured at different time points (4, 8, 12, 24, 48 and 72 h) before and after fermentation, and the degradation parameters and effective degradation rates were calculated. 【Result】 Compared with the control group, the content of CP in experimental groups was increased, while the content of NDF was decreased. The fermentation effect of the treatment with 0.1% live bacteria multi-compound fermentation agent+3% molasses was the best, in which CP content increased by 9.69% ($P<0.05$), while NDF, ADF and hemicellulose contents decreased by 9.12% ($P<0.05$), 2.66% and 28.71%, respectively. The pH of treatment groups was significantly lower than that of the control group ($P<0.05$), while lactic acid content was increased. The treatment with 0.1% live bacteria multi-compound fermentation agent+3% molasses had the lowest pH value of 3.29 and the highest lactic acid content of 7.84%, and the lactic acid content was increased by 33.11% ($P<0.05$). The rumen degradation rates of DM, CP, NDF and ADF were increased by 8.61%, 8.58%, 14.75% and 8.93% at 72 h in the treatment with 0.1% live bacteria multi-compound fermentation agent+3% molasses ($P<0.05$) compared with those before fermentation, and the effective degradation rates were increased by 7.66%, 11.75%, 20.74% and 3.39%, respectively ($P>0.05$). 【Conclusion】 Adding 0.1% live bacteria multi-compound fermentation agent+3% molasses to *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue significantly improved its nutritional value, fermentation quality and degradation rate in mutton sheep rumen.

Key words: *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue; microbial fermentation; mutton sheep; rumen; degradation characteristics

我国是食用菌生产大国,食用菌年产量占世界总产量80%以上,截止到2019年我国食用菌年产量已达3900多万 $t^{[1]}$ 。菌糠是食用菌收获后的培养基残渣,又称菌渣,由棉籽壳、玉米芯、稻草、锯木屑、甘蔗渣及多种农业副产物、工业废弃物组成 $^{[1-2]}$ 。有研究表明,菌糠中含有大量粗蛋白、粗纤维、矿物质和丰富的氨基酸、糖类及其他生物活性营养物质,是一类优质的畜禽非常规饲料原料 $^{[3-5]}$ 。目前,大多数的菌糠被焚烧或是随意丢弃,部分被开发成肥料、二次栽培食用菌的培养基质原料或用于沼气的生产,只有极少一部分被当作饲料用于动物生产中,食用菌废弃物资源未能有效利用既是对生物资源的浪费,还对生态环境造成了严重的破坏 $^{[6-7]}$ 。因此,合理地开发和利用菌糠,不仅能节约资源,减少环境污染,促进食用菌产业良性发展,还可以缓解我国饲料资源短缺、“人畜争粮”的现状,降低饲料原料成本,提高经济效益。

食用菌生产中的木腐菌多以棉籽壳、木屑、甘蔗渣为主要原料,导致菌糠中粗纤维含量较高,尤其木

质素含量高,使得菌糠适口性以及利用率较差,并且菌糠中水分含量较高,易发霉变质,不利于保存和运输。因此,需要对其进行发酵处理,从而提高其适口性、营养价值及利用率,延长其保存时间。在菌糠中加入一定比例的微生物菌剂对其进行发酵,菌糠中纤维素和半纤维素等大分子物质被降解成为动物机体易消化吸收的糖类、氨基酸、维生素等营养物质,可提高菌糠的饲用性 $^{[8-9]}$ 。大量研究证实,菌糠经过微生物发酵后,其适口性和粗蛋白含量明显提高,粗纤维、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量降低,营养价值得到改善,其中以混菌发酵的效果最佳 $^{[10-12]}$ 。然而,目前关于海鲜菇菌糠,特别是发酵后的海鲜菇菌糠在动物生产中的应用研究较少。因此,本试验采用微生物发酵的方式,探究不同微生物菌剂对海鲜菇菌糠发酵效果的影响,并采用尼龙袋法,探究发酵前后海鲜菇菌糠干物质(DM)、粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)在肉羊瘤胃内0~72 h动态降解变化,比较发酵前后海鲜菇菌糠主要营养成分在瘤胃内的降解特性,为海鲜菇

菌糠在动物生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试菌糠 海鲜菇菌糠,购自福建顺昌神农菇业有限公司。选取采菇 1 次,新鲜无发霉的菌糠进行微生物发酵试验。称取海鲜菇菌糠原料和发酵效果最佳处理的海鲜菇菌糠各 500 g,经过 65 °C 烘干后用植物样品粉碎机粉碎,过 40 目(孔径 425 μm)筛,装入标记好的自封袋中,室温保存作为肉羊瘤胃降解试验材料,备用。

1.1.2 微生物发酵添加剂 植物乳杆菌 37L1(L-37L1),由福建省农业科学院自行分离鉴定得到,活菌数 100×10^{10} CFU/g。活菌多复合发酵菌剂(活菌数:枯草芽孢杆菌 $\geq 100 \times 10^6$ CFU/g,乳酸菌 $\geq 10 \times 10^6$ CFU/g,酿酒酵母 $\geq 100 \times 10^6$ CFU/g,总细菌 $\geq 210 \times 10^6$ CFU/g),购自北京晟亚育达生物科技有限公司。糖蜜,购自河北顺通百科商贸有限公司,鲜样含水量为 45.23%,干样总糖含量 59.21%,其中蔗糖含量为 38.42%,还原糖含量为 12.35%。

1.1.3 供试肉羊 供试肉羊为 4 只健康无病、体况良好、装有永久性瘤胃瘻管的简阳大耳黄羊,体质量 (25.00 ± 2.25) kg/只,试验前进行驱虫、健胃处理。

1.2 海鲜菇菌糠营养成分和 pH 测定

干物质(DM)含量根据常规方法^[13]测定,粗蛋白(CP)含量根据凯氏定氮法测定,中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量采用 Van Soest^[14]的方法测定,半纤维素含量(hemicellulose, HC)为 NDF 与 ADF 含量的差值。取 10 g 样品,装入 100 mL 广口锥形瓶中,定容,封口,4 °C 冰箱中保存,24 h 后用纱布过滤,得到浸提液,用 pH S-3D 型酸度计测定浸提液 pH。

1.3 不同发酵处理对海鲜菇菌糠饲料品质的影响

1.3.1 试验设计 试验设 5 个处理:添加 0.1% 植物乳杆菌 37L1(处理 1)、添加 0.1% 活菌多复合发酵菌剂(处理 2)、添加 0.1% 活菌多复合发酵菌剂 + 3% 糖蜜(处理 3,考虑到活菌多复合发酵菌剂的细菌含量不高,故设该处理)、添加 3% 糖蜜(处理 4)、不添加菌剂和糖蜜(空白对照,CK)。菌剂添加量均按菌糠的鲜质量计。每处理设 3 个重复,每个重复 1 袋菌糠(1 kg/袋)。将海鲜菇菌糠混合均匀,分别称取 1 kg 菌糠,装入青贮袋内,标记。对照组喷洒 5 mL 无菌水,其余各处理组喷洒 5 mL 配制好的发酵液,混合均匀后,用真空抽气机抽至真空后用封口机

密封,常温保存,厌氧发酵 45 d 后取样,备测。

1.3.2 指标测定 DM、CP、NDF、ADF、HC 含量和 pH 测算方法见 1.2 节。发酵结束后,每个青贮袋分别取 10 g 发酵样品,按照 1.2 节方法制备浸提液,采用日本岛津 LC-20AT 型高效液相色谱仪(检测器:SPD-20A 紫外可见检测器;流动相:3 mmol/L 高氯酸)测定浸提液中乳酸(LA)、乙酸(AA)、丙酸(PA)和丁酸(BA)的含量。

1.4 瘤胃降解试验

1.4.1 试验设计 采用单因子试验设计,用 4 只简阳大耳黄羊进行试验。选择上述发酵效果最佳的海鲜菇菌糠发酵料和菌糠原料作为瘤胃降解材料。将 300 目(孔径为 48 μm)、8 cm × 13 cm 的瘤胃尼龙袋(购自中国农业大学肉牛中心)称质量并编号,然后准确称取过 40 目(孔径 425 μm)筛的样品 4 g 放入袋中,封口机封口。将尼龙袋用尼龙绳固定,一根绳子上系 14 个袋,于晨饲前 2 h 将装有样品的尼龙袋送入瘤胃中,每只羊放入 1 根绳子,采用“同时放入,分别取出”的方法,于放袋后 0(空白,将装有样品的尼龙袋放入瘤胃后立即取出),4,8,12,24,48 和 72 h 分别取出 2 个尼龙袋,用自来水冲洗至水澄清。将洗净后的尼龙袋放入 65 °C 烘箱中烘干至质量恒定,室温下保存备测。

试验羊日粮由粗料与混合精料组成。粗料为羊草、花生秸秆,混合精料由 40% 玉米、16% 麦麸、14% 豆粕、6% 棉籽粕、21% 玉米麸、3% 预混料组成。试验羊每天喂料 2 次(09:00,16:00),自由饮水。

1.4.2 瘤胃降解指标计算 样品逃逸率 = (空白试验袋样品干物质质量 - 空白试验袋中残留物质量) / 空白试验袋样品干物质质量 × 100%。

校正装袋样品质量 = 实际装袋样品质量 × (1 - 样品逃逸率)。

某目标成分某培养时间点的降解量 = (校正装袋样品质量 × 空白试验残余物中某目标成分的含量) - (某培养时间点残余物的质量 × 某培养时间点残余物中某目标成分的含量)。

某成分时间点的实时降解率 = 该成分某时间点的降解量 / (校正装袋样品质量 × 空白试验残余物中该成分的含量) × 100%。

根据动力学指数模型来确定降解参数 a 、 b 、 c 的值,具体公式为: $y = a + b(1 - e^{-at})$ 。式中: y 为 t 时刻被测样品的实时降解率, a 为被测样品的快速降解部分(%), b 为慢速降解部分(%), c 为 b 的降解速率(%/h)。

有效降解率(ED)= $a[bc/(c+k)]$ 。

式中: k 为待测饲料瘤胃外流速度,为 0.0235 h^{-1} [15]。

1.5 数据分析

用Excel 2007整理数据,采用SPSS 25.0进行单因素方差分析(one-way ANOVA)及Duncan's法多重比较,结果用“平均值±标准差”表示,以 $P<0.05$ 作为差异显著判断标准。再利用SAS软件建立非线性动态模型来确定数学指数模型中的降解参数 a 、 b 和 c 的值。

2 结果与分析

2.1 海鲜菇菌糠的营养成分

海鲜菇菌糠原料的pH为5.63,呈弱酸性;DM含量为36.39%;CP含量为8.21%;NDF、ADF和HC含量较低,分别为48.25%,36.52%和11.73%。

表1 不同发酵处理对海鲜菇菌糠营养成分的影响

Table 1 Effect of different fermentation treatments on nutrient composition of *Hypsizygyus marmoreus* mushroom residue

组别 Group	干物质 DM	粗蛋白 CP	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	半纤维素 HC
CK	35.92±0.04 b	8.36±0.52 b	47.06±0.99 a	35.39±2.00 bc	11.67±1.91 a
处理1 Treatment 1	35.47±0.48 b	8.81±0.36 ab	46.42±2.73 ab	36.78±1.40 ab	9.64±4.02 ab
处理2 Treatment 2	35.67±0.03 b	8.72±0.27 ab	46.12±0.76 ab	38.93±0.77 a	7.19±0.28 b
处理3 Treatment 3	35.71±0.17 b	9.17±0.19 a	42.77±1.07 c	34.45±0.69 bc	8.32±1.48 ab
处理4 Treatment 4	37.57±0.52 a	9.28±0.15 a	43.52±1.25 bc	33.30±2.48 c	10.22±1.34 ab

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表2同。

Note: Different small letters mean significant difference ($P<0.05$). The same in Table 2.

2.2.2 pH和有有机酸 由表2可知,不同处理组pH值较CK组均显著降低($P<0.05$),且处理3和4显著低于处理1和2($P<0.05$)。处理3和4乳酸含量均显著高于其余3组($P<0.05$),其中处理3的乳酸含量最高(7.84%),较CK组提高了33.11%($P<0.05$)。CK组和处理2乙酸含量与处理1无

2.2 不同发酵处理对海鲜菇菌糠饲料品质的影响

2.2.1 营养成分 由表1可知,处理4的DM含量显著高于其余4组($P<0.05$)。处理3和4的CP含量与处理2和1无显著差异($P>0.05$),但显著高于CK组($P<0.05$),其中处理3的CP含量较CK组提高了9.69%($P<0.05$)。处理3的NDF含量与处理4差异不显著($P>0.05$),显著低于其余3组($P<0.05$),与CK组相比,处理3的NDF含量下降了9.12%($P<0.05$)。处理2的ADF含量与处理1无显著差异($P>0.05$),显著高于其余3组($P<0.05$);处理1的ADF含量显著高于处理4($P<0.05$);处理3的ADF含量与CK组相比下降了2.66%,但二者无显著差异($P>0.05$)。CK组的HC含量显著高于处理2($P<0.05$),与其余3组无显著差异($P>0.05$),其中处理3的HC含量较CK组下降了28.71%。

显著差异($P>0.05$),显著高于处理3和4($P<0.05$);处理1丙酸含量显著高于CK组、处理3和4($P<0.05$),而处理2丙酸含量与处理1和4差异不显著($P>0.05$),显著高于CK组和处理3($P<0.05$)。CK组和处理4丁酸含量无显著差异($P>0.05$),均显著高于其余3组($P<0.05$)。

表2 不同发酵处理对海鲜菇菌糠pH和有有机酸含量的影响

Table 2 Effect of different fermentation treatments on pH and organic acid of *Hypsizygyus marmoreus* mushroom residue

组别 Group	pH	乳酸/% LA	乙酸/% AA	丙酸/% PA	丁酸/% BA
CK	3.56±0.06 a	5.89±0.52 b	0.69±0.07 a	0.00±0.00 c	0.03±0.00 a
处理1 Treatment 1	3.44±0.04 b	6.19±0.33 b	0.57±0.02 ab	0.36±0.05 a	0.00±0.00 b
处理2 Treatment 2	3.41±0.02 b	6.20±0.05 b	0.64±0.11 a	0.25±0.09 ab	0.00±0.00 b
处理3 Treatment 3	3.29±0.02 c	7.84±0.02 a	0.49±0.04 bc	0.00±0.00 c	0.00±0.00 b
处理4 Treatment 4	3.32±0.01 c	7.34±0.27 a	0.42±0.05 c	0.18±0.09 b	0.04±0.01 a

2.3 菌糠在肉羊瘤胃的降解特性

2.3.1 DM瘤胃降解率及降解参数 综合不同处理对海鲜菇菌糠营养成分及菌糠pH和有有机酸的影响,可知处理3(0.1%活菌多复合发酵菌剂+3%糖

蜜)的发酵效果最佳,与其与菌糠原料作为肉羊瘤胃降解材料进行降解试验。

由表3可知,随着样品在瘤胃中滞留时间的延长,菌糠原料和发酵料DM降解率均逐渐升高,72h

时降解率达到最高,分别为 66.29%和 72.00%;菌糠发酵料 4 和 72 h 降解率显著高于菌糠原料($P < 0.05$),其中 72 h 降解率较原料提高了 8.61%。2 种样品 48 和 72 h 降解率均显著高于其余 4 个时间点($P < 0.05$),其中菌糠原料 8,12 和 24 h 降解率依次显著升高($P < 0.05$);菌糠发酵料 24 h 降解率显

著高于前 3 个时间点($P < 0.05$),前 3 个时间点中 12 h 降解率与 8 h 差异不显著($P > 0.05$),但显著高于 4 h($P < 0.05$)。菌糠发酵料 a 显著高于原料($P < 0.05$);b 和 ED 高于原料,但二者无显著差异($P > 0.05$),其中 ED 较原料提高了 7.66%;c 较原料降低了 50%,但差异未达显著水平($P > 0.05$)。

表 3 海鲜菇菌糠原料和发酵料的 DM 瘤胃降解率及降解参数

Table 3 Rumens degradation rate and degradation parameters of DM from *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue raw material and fermentation material

项目 Item	菌糠发酵料 Mushroom residue fermentation material	菌糠原料 Mushroom residue raw material
降解率/% Degradation rate	4 h	34.20±1.06 Bd
	8 h	37.19±1.51 d
	12 h	45.72±2.29 c
	24 h	56.69±1.67 b
	48 h	64.44±1.47 a
	72 h	66.29±1.61 Ba
降解参数 Degradation parameters	a/%	24.34±1.92 B
	b/%	43.09±1.73
	c/(%·h ⁻¹)	0.06±0.01
	ED/%	55.22±4.63

注:①菌糠原料、菌糠发酵料的动力学指数模型回归系数(R^2)均为 0.98。②同行数据后标不同大写字母表示不同样品的降解率差异显著($P < 0.05$)。同列数据后标不同小写字母表示不同时间点的降解率差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Note:①The regression coefficients (R^2) of the kinetic index model of mushroom residue raw material and mushroom residue fermentation material were both 0.98. ② Different capital letters indicate significant difference in degradation rate of different samples ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences in degradation rate at different time points ($P < 0.05$). The same below.

2.3.2 CP 瘤胃降解率及降解参数 由表 4 可知,菌糠发酵料 CP 12,48 和 72 h 降解率均显著高于同时时间点的菌糠原料($P < 0.05$),其中 72 h 降解率较原料提高了 8.58%。2 种样品 48 和 72 h 降解率均显著高于前 4 个时间点($P < 0.05$),24 h 降解率显

著高于 4~12 h($P < 0.05$),12 h 降解率与 8 h 差异不显著,但显著高于 4 h($P < 0.05$)。菌糠发酵料 a、b、c 以及 ED 均高于原料,但差异不显著($P > 0.05$),其中 ED 较菌糠原料提高了 11.75%。

表 4 海鲜菇菌糠原料和发酵料的 CP 瘤胃降解率及降解参数

Table 4 Rumens degradation rate and degradation parameters of CP from *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue raw material and fermentation material

项目 Item	菌糠发酵料 Mushroom residue fermentation material	菌糠原料 Mushroom residue raw material
降解率/% Degradation rate	4 h	36.89±1.86 d
	8 h	40.25±3.46 cd
	12 h	44.15±1.21 Bc
	24 h	52.84±2.38 b
	48 h	64.91±1.97 Ba
	72 h	67.46±2.36 Ba
降解参数 Degradation parameters	a/%	31.32±1.69
	b/%	40.88±2.23
	c/(%·h ⁻¹)	0.03±0.01
	ED/%	53.94±6.39

注:菌糠原料和菌糠发酵料的动力学指数模型回归系数(R^2)分别为 0.97 和 0.98。

Note: The regression coefficients (R^2) of kinetic index model of mushroom residue raw material and mushroom residue fermentation material were 0.97 and 0.98, respectively.

2.3.3 NDF 瘤胃降解率及降解参数 由表 5 可知,菌糠发酵料 NDF 24,48 和 72 h 降解率显著高

于同时时间点的菌糠原料($P < 0.05$),其中 72 h 降解率较原料提高了 14.75%。菌糠发酵料 4~8 h 降解

率增长较慢,12,24和48 h降解率依次显著升高($P < 0.05$),72 h降解率最高,为62.86%。菌糠原料48和72 h降解率显著高于前4个时间点($P < 0.05$),24 h降解率显著高于4~12 h($P < 0.05$),8

与12 h降解率无显著差异($P > 0.05$),但均显著高于4 h($P < 0.05$)。菌糠发酵料**b**较原料显著提高了24.3%($P < 0.05$),**a**、**c**和ED与原料无显著差异($P > 0.05$),但ED与原料相比提高了20.74%。

表5 海鲜菇菌糠原料和发酵料的NDF瘤胃降解率及降解参数

Table 5 Ruminal degradation rate and degradation parameters of NDF from *Hypsizygos marmoreus* mushroom residue raw material and fermentation material

项目 Item	菌糠发酵料 Mushroom residue fermentation material	菌糠原料 Mushroom residue raw material
降解率/% Degradation rate	4 h	18.28±1.80 d
	8 h	24.72±1.81 c
	12 h	30.15±2.50 c
	24 h	36.83±2.64 Bb
	48 h	50.56±1.82 Ba
	72 h	54.78±1.77 Ba
降解参数 Degradation parameters	<i>a</i> /%	13.59±1.71
	<i>b</i> /%	45.55±2.16 B
	<i>c</i> /(%·h ⁻¹)	0.03±0.01
	ED/%	38.77±6.77

注:菌糠原料和菌糠发酵料的动力学指数模型回归系数(R^2)分别为0.98和0.99。

Note: The regression coefficients (R^2) of kinetic index model of mushroom residue raw material and mushroom residue fermentation material were 0.98 and 0.99, respectively.

2.3.4 ADF瘤胃降解率及降解参数 由表6可知,菌糠发酵料ADF12和72 h降解率显著高于相同降解时间的原料($P < 0.05$),其中72 h降解率与原料相比提高了8.93%。菌糠发酵料4~48 h降解率随发酵时间的延长显著升高($P < 0.05$),72 h降解率最高为56.86%,但与48 h差异不显著($P > 0.05$)。菌糠原料48和72 h降解率显著高于其余

时间点($P < 0.05$),8,12和24 h降解率依次显著升高($P < 0.05$)。菌糠发酵料**a**较原料下降了28.09%,但二者之间无显著差异($P > 0.05$);**b**较原料显著提高了11.23%($P < 0.05$);**c**与原料无显著差异;ED较原料提高了3.39%,但二者之间差异不显著($P > 0.05$)。

表6 海鲜菇菌糠原料和发酵料ADF的瘤胃降解率及降解参数

Table 6 Ruminal degradation rate and degradation parameters of ADF from *Hypsizygos marmoreus* mushroom residue raw material and fermentation material

项目 Item	菌糠发酵料 Mushroom residue fermentation material	菌糠原料 Mushroom residue raw material
降解率/% Degradation rate	4 h	15.91±2.01 d
	8 h	19.72±1.39 d
	12 h	24.82±1.11 Bc
	24 h	36.91±1.85 b
	48 h	48.84±1.76 a
	72 h	52.20±1.23 Ba
降解参数 Degradation parameters	<i>a</i> /%	8.30±1.32
	<i>b</i> /%	47.73±1.40 B
	<i>c</i> /(%·h ⁻¹)	0.04±0.00
	ED/%	38.37±2.20

注:菌糠原料和菌糠发酵料的动力学指数模型回归系数(R^2)分别为0.99和0.98。

Note: The regression coefficients (R^2) of kinetic index model of mushroom residue raw material and mushroom residue fermentation material were 0.99 and 0.98, respectively.

3 讨论

3.1 不同处理对海鲜菇菌糠发酵效果的影响

菌糠含水量高,富含大量营养物质,保存不当很

容易造成发霉变质,对其进行微生物发酵处理不仅能延长保存时间,还可进一步提高其营养价值。郑有坤等^[1]探究了乳酸菌和酵母菌混菌发酵与单菌发酵对木腐香菇菌糠营养价值的影响,结果发现,混

菌发酵效果最佳,菌糠粗蛋白含量提高至 11.2%,中性和酸性洗涤纤维分别降至 60.8%和 59.3%。苏衍菁等^[16]在金针菇菌糠中接种 2%的植物和干酪乳杆菌并加入适量的辅料(麸皮和豆粕)进行混菌发酵,结果发现,发酵菌糠粗蛋白含量提高至 16%。李志香等^[17]用 3 株酵母菌种对醋糟菌糠进行混菌发酵,结果发现,菌糠粗蛋白含量较发酵前显著提高,达到 24.94%,粗纤维含量降低了 12.5%。本研究发现,海鲜菇菌糠经过不同处理方式处理后,各处理组 DM 含量与 CK 组相比总体差异不大,这可能是由于各组的 pH 值都很低,抑制了发酵过程中不良微生物对原料营养物质的降解^[18];与 CK 组相比,各处理组的 CP 含量升高,NDF、ADF 和半纤维素含量下降,其中以处理 3 组发酵效果最佳,发酵后 CP 含量较 CK 组提高了 9.69%,NDF、ADF 和半纤维素含量较 CK 组分别下降了 9.12%,2.66%和 28.71%,与 Kwak 等^[19]研究结果相似。这可能是由于发酵过程中菌糠中梭菌活性被抑制,避免了原料中蛋白质被分解,并且复合发酵菌剂中枯草芽孢杆菌能够产生大量胞外酶,起到降解纤维的作用。

在海鲜菇菌糠中添加植物乳杆菌和复合发酵菌剂,使得菌糠中枯草芽孢杆菌、乳酸菌等成为优势菌群,进而加速其发酵进程,使发酵效果更佳。枯草芽孢杆菌能够产生大量淀粉酶,将淀粉水解产生糖类,为乳酸菌的生长繁殖提供碳源,并且其还能够抑制有害微生物,进而减少有害物质的产生^[20-21]。有研究表明,在发酵过程中,乳酸菌能够将水溶性碳水化合物转化为有机酸,主要是乳酸,在厌氧条件下,使得菌糠 pH 迅速下降至 4.2 以下,从而抑制腐败微生物的生长,缩短发酵进程,改善发酵品质,有效保留原料的营养成分^[22-25]。李改英等^[26]研究发现,在苜蓿中添加 5%和 10%的糖蜜能够显著提高苜蓿的青贮品质,其中粗蛋白和乳酸含量显著提高,氨态氮含量和 pH 显著降低。发酵饲料的 pH 值是衡量发酵价值的重要指标^[27]。本研究中,不同处理组 pH 值较 CK 组显著降低,乳酸含量均有不同程度的提高,其中以处理 3 组 pH 值最低,为 3.29,乳酸含量最高,为 7.84%,这可能是由于外源乳酸菌的添加,以及在厌氧条件下更有利于乳酸菌菌株的生长^[28],而且糖蜜的添加增加了底物中碳水化合物含量,为乳酸菌提供了充足的发酵底物,从而使得乳酸菌快速生长,产生大量乳酸,pH 值迅速降低,抑制了有害菌活性,从而减少了蛋白质的分解,提高了发酵品质。这与陈鑫珠等^[29]的试验结果基本一致。

3.2 发酵前后海鲜菇菌糠瘤胃降解特性比较

动物干物质采食量的大小主要受到 DM 降解率和饲料原料适口性的影响,DM 瘤胃降解率越高,机体消化能力越强,相应的干物质采食量就越大;反刍动物生长发育所需要的主要营养来源于粗饲料,粗饲料中 CP 含量以及瘤胃降解率能反映该饲料的营养价值;NDF 和 ADF 瘤胃降解率能反映饲料的品质,其值的高低可衡量该饲料纤维物质被消化的难易程度^[30-32]。梁学武等^[33]研究发现,香菇菌糠经过 3 株白腐真菌菌种发酵后,DM 和 NDF 有效降解率分别为 55.98%~67.72%和 30.94%~46.24%,较发酵前有了显著提高。有研究发现,用 NaOH、生物处理及 NaOH+生物处理香菇菌糠,以上 3 个试验组 DM 和 NDF 有效降解率较对照组显著提高,其中以 NaOH+生物处理效果最佳,其 DM 和 NDF 有效降解率分别为 64.36%和 41.52%^[34]。陈超等^[35]研究了微贮后金针菇菌糠的瘤胃降解特性,结果发现,微贮 45 d 后金针菇菌糠 DM 和 CP 有效降解率分别为 45.9%和 44.1%,显著高于菌糠原样和微贮 60 d 后金针菇菌糠。本研究结果显示,海鲜菇菌糠经过活菌多复合发酵菌剂+3%糖蜜复合发酵后,发酵料的 CP 含量较发酵前有了显著提高,NDF 含量显著降低,DM 和 ADF 含量稍微降低;对该发酵料和菌糠原料进行瘤胃降解测定后发现,发酵后的海鲜菇菌糠 72 h DM、CP、NDF 和 ADF 降解率较发酵前显著提高,有效降解率分别为 59.45%,60.28%,46.81%和 39.67%,均高于发酵前,说明发酵后的海鲜菇菌糠更利于山羊消化吸收,与向德标等^[36]的研究结果基本一致。但海鲜菇菌糠发酵料与原料的 DM、CP、NDF 和 ADF 有效降解率均无显著差异,其原因可能是接种的菌剂仅在发酵过程中起作用,改变了发酵品质和营养价值,并未改变瘤胃内微生物区系。本研究中,发酵前后海鲜菇菌糠 72 h 降解率和有效降解率均高于宫福臣等^[37]和潘军等^[38]的研究结果,这可能是由于动物品种、日粮配方以及菌糠种类不同所致。本试验海鲜菇菌糠发酵料和原料 2 种样品在 4~8 h 时间段都出现了降解缓慢的情况,这可能是由于此时间段降解这 2 种菌糠的瘤胃微生物系统尚未建立,或微生物还并未完全附着在消化底物上所致;在 8~72 h,随着瘤胃滞留时间的延长,瘤胃降解率逐渐升高,最终在 72 h 处降解率达到最大值,这与梁学武等^[33]、宫福臣^[37]的研究结果一致。

4 结 论

微生物处理能明显提高海鲜菇菌糠营养成分及发酵品质,其中复合发酵菌剂+3%糖蜜处理发酵效果最佳,同时能显著提高海鲜菇菌糠 DM、CP、NDF 和 ADF 的瘤胃降解率。

[参考文献]

- [1] 崔嘉,陈宝江. 菌糠饲料的研究进展 [J]. 饲料研究,2018(3): 77-84.
Cui J, Chen B J. Research progress of fungus residue feed [J]. Feed Research, 2018(3): 77-84.
- [2] 李志涛,林冬梅. 菌糠发酵饲料开发应用研究 [J]. 畜牧与兽医,2015(9):127-129.
Li Z T, Lin D M. Research on the development and application of fermented fungus residue feed [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2015(9): 127-129.
- [3] Sosa-Hernández M A, Leifheit E F, Ingrassia R, et al. Subsoil *Arbuscular mycorrhizal* fungi for sustainability and climate-smart agriculture: a solution right under our feet? [J]. Front Microbiol, 2019, 10: 744.
- [4] Cobb A B, Wilson G W T, Goad C L, et al. The role of *Arbuscular mycorrhizal* fungi in grain production and nutrition of sorghum genotypes: enhancing sustainability through plant-microbial partnership [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 233: 432-440.
- [5] 陶新. 菌糠在动物日粮中的应用效果 [J]. 广东饲料, 2007, 16(1): 45-46.
Tao X. Application effect of fungus residue in animal diet [J]. Guangdong Feed, 2007, 16(1): 45-46.
- [6] 陈锡,姜明,李双双,等. 菌糠的综合利用研究进展 [J]. 中国园艺文摘, 2017, 33(8): 43-44.
Chen X, Jiang M, Li S S, et al. Research progress on comprehensive utilization of fungus residue [J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2017, 33(8): 43-44.
- [7] 王勤礼,闫芳,韩玉琦,等. 姬菇菌糠发酵过程中理化指标变化研究 [J]. 食用菌, 2020, 42(2): 14-16.
Wang Q L, Yan F, Han Y Q, et al. Study on the changes of physical and chemical indexes during the fermentation of *Hypsizygos marmoreus* fungus residue [J]. Edible Fungi, 2020, 42(2): 14-16.
- [8] Kim J S, Lee Y H, Ahmadi Y I, et al. Effect of microbial inoculant or molasses on fermentative quality and aerobic stability of sawdust-based spent mushroom substrate [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 188-195.
- [9] 袁崇善,张爱武. 菌糠的营养及其在家畜饲料中的应用 [J]. 家畜生态学报, 2019, 40(1): 69-73.
Yuan C S, Zhang A W. Nutrition of spent mushroom substrate and its application in livestock feed [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2019, 40(1): 69-73.
- [10] Kim Y I, Seok J S, Kwak W S. Effect of mixed microbes addition on chemical change and ailage atorage of spent mushroom substrates [J]. Journal of Animal Science and Technology, 2008, 50(6): 37-42.
- [11] 郑有坤,易敏,陈建州,等. 微生物发酵对香菇菌糠饲料品质的影响 [J]. 西南农业学报, 2013, 26(3): 1143-1147.
Zheng Y K, Yi M, Chen J Z, et al. Influence of microorganism fermentation on feed quality of spent mushroom compost of *Lentinula edodes* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(3): 1143-1147.
- [12] 李佳腾,杨凡提,王世康,等. 纤维素分解菌的筛选及杏鲍菇菌糠混菌发酵条件的优化 [J]. 动物营养学报, 2019, 31(10): 4802-4816.
Li J T, Yang F T, Wang S K, et al. Screening of cellulose-degradation strains and condition optimization of mixed strains fermentation of *Pleurotus eryngii* spent mushroom substrate [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(10): 4802-4816.
- [13] 宋金昌,牛一兵. 饲料分析与饲料质量检测技术 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012.
Song J C, Niu Y B. Feed analysis and feed quality inspection technology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012.
- [14] Van Soest P J. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages [J]. J Anim Sci, 1967, 26(1): 119-120.
- [15] 卢德勋. 系统动物营养学的进展和展望 [J]. 饲料工业, 2013, 34(1): 2-8.
Lu D X. Progress and prospects of system animal nutrition [J]. Feed Industry, 2013, 34(1): 2-8.
- [16] 苏衍菁,吴江,叶耿坪,等. 发酵菌糠饲料的开发 [J]. 中国微生物生态学报, 2018, 30(5): 521-524.
Su Y Q, Wu J, Ye G P, et al. Development of fermented fungus chaff feed [J]. Chinese Journal of Microecology, 2018, 30(5): 521-524.
- [17] 李志香,蔡元丽. 菌糠发酵饲料的研究 [J]. 中国畜牧兽医, 2003, 30(5): 8-9.
Li Z X, Cai Y L. Study on the fermented feed of mushroom chaff [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2003, 30(5): 8-9.
- [18] Liu B, Huan H, Gu H, et al. Dynamics of a microbial community during ensiling and upon aerobic exposure in lactic acid bacteria inoculation-treated and untreated barley silages [J]. Bioresour Technol, 2019, 273: 212-219.
- [19] Kwak W S, Jung S H, Kim Y I. Broiler litter supplementation improves storage and feed-nutritional value of sawdust-based spent mushroom substrate [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 2947-2955.
- [20] 刘兴,姚晶,夏元军. 枯草芽孢杆菌在固态发酵饲料中的应用研究进展 [J]. 饲料研究, 2020(2): 113-116.
Liu X, Yao J, Xia Y J. Research progress in the application of *Bacillus subtilis* in solid-state fermentation feed [J]. Feed Research, 2020(2): 113-116.
- [21] 郭照宙,崔红霞,武洪志,等. 枯草芽孢杆菌在动物饲料中的应

- 用 [J]. 饲料博览, 2017(6): 26-28.
- Guo Z Z, Cui H X, Wu H Z, et al. Application of *Bacillus subtilis* in animal feed [J]. Feed Expo, 2017, (6): 26-28.
- [22] 陈鑫珠, 李文杨, 刘远, 等. 甘蔗稍绿汁发酵液对菌糠发酵品质的影响 [J]. 草地学报, 2018, 26(2): 474-478.
- Chen X Z, Li W Y, Liu Y, et al. Effects of previously fermented juice of sugarcane top on the fermentation quality of fungus chaff silage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 474-478.
- [23] 王建福, 雷赵民, 成述儒, 等. 添加乳酸菌制剂和麸皮对去穗玉米秸秆青贮质量的影响 [J]. 草业学报, 2018, 27(4): 162-169.
- Wang J F, Lei Z M, Cheng S R, et al. Effects of lactic acid bacteria preparation and bran on corn stover silage quality [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 162-169.
- [24] Zi X, Li M, Chen Y, et al. Effects of citric acid and *Lactobacillus plantarum* on silage quality and bacterial diversity of king grass silage [J]. Front Microbiol, 2021, 12: 631096.
- [25] Tahir M, Li J, Xin Y, et al. Response of fermentation quality and microbial community of oat silage to homofermentative lactic acid bacteria inoculation [J]. Front Microbiol, 2023, 13: 1091394.
- [26] 李改英, 傅彤, 郭永国, 等. 添加糖蜜和农副产品对苜蓿青贮品质的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(2): 135-139.
- Li G Y, Fu T, Guo Y G, et al. Effects of adding molasses and agricultural and sideline products on the quality of alfalfa silage [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2009, 44(2): 135-139.
- [27] Muck R E, Nadeau E, McAllister T A, et al. Silage review: recent advances and future uses of silage additives [J]. J Dairy Sci, 2018, 101(5): 3980-4000.
- [28] Li P, Lu Y, Zhao M, et al. Effects of phenyllactic acid, lactic acid bacteria, and their mixture on fermentation characteristics and microbial community composition of timothy silage [J]. Front Microbiol, 2021, 12: 743433.
- [29] 陈鑫珠, 李文杨, 刘远, 等. 菌糠发酵饲料品质的动态变化 [J]. 中国草食动物科学, 2018, 38(3): 76-78.
- Chen X Z, Li W Y, Liu Y, et al. The dynamic changes of the quality of fermented feed with mushroom residue [J]. Chinese Herbivore Science, 2018, 38(3): 76-78.
- [30] Li Q, Xue B, Zhao Y, et al. In situ degradation kinetics of 6 roughages and the intestinal digestibility of the rumen undegradable protein [J]. Journal of animal science, 2018, 96(11): 4835-4844.
- [31] 夏科, 姚庆, 李富国, 等. 奶牛常用粗饲料的瘤胃降解规律 [J]. 动物营养学报, 2012, 24(4): 769-777.
- Xia K, Yao Q, Li F G, et al. Rumen degradation characteristics of commonly used roughages for dairy cows [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2012, 24(4): 769-777.
- [32] 余焯, 高欢, 矣国, 等. 云上黑山羊常用粗饲料瘤胃降解特性与常规营养成分的预测 [J]. 动物营养学报, 2023, 35(2): 1018-1034.
- Yu Y, Gao H, Yi G, et al. Prediction of rumen degradation characteristics and conventional nutrient composition of roughage for yunshang black goats [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(2): 1018-1034.
- [33] 梁学武, 姚亮, 刘庆华, 等. 白腐真菌改善香菇菌糠结构性碳水化合物瘤胃降解特性的效果 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(1): 80-84.
- Liang X W, Yao L, Liu Q H, et al. Effects of white rot fungi on ruminal degradability of structural carbohydrates of waste material from *Lentinus edodes* in cattle [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2002, 31(1): 80-84.
- [34] 梁学武, 姚亮, 刘庆华, 等. 复合处理香菇菌糠纤维类成分瘤胃降解率的研究 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2002, 20(3): 213-218.
- Liang X W, Yao L, Liu Q H, et al. Effect of combination treatment on ruminal degradability of fiber of waste material from *Lentinus edodes* in cattle [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science Edition), 2002, 20(3): 213-218.
- [35] 陈超, 范海瑞, 汪波, 等. 金针菇菌糠微贮营养价值评价及瘤胃有效降解率研究 [J]. 动物营养学报, 2019, 31(5): 2350-2356.
- Chen C, Fan H R, Wang B, et al. Evaluation of nutritional value and rumen effective degradation rate in of micro-storage mushroom bran [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(5): 2350-2356.
- [36] 向德标, 田宏现, 何瑞国, 等. 微贮对菌糠在瘤胃中降解特性的影响 [J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2001, 22(4): 75-78.
- Xiang D B, Tian H X, He R G, et al. The effect of microorganism fermentation on the digestion characteristics of WFMC in rumen [J]. Journal of Jishou University (Natural Science Edition), 2001, 22(4): 75-78.
- [37] 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 degradation characteristics between spent mushroom substrate and commonly used roughages for dairy cows [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013, 25(6): 1366-1374.
- [38] 潘军, 曹玉凤, 吕超, 等. 食用菌栽培对棉籽壳营养价值及山羊瘤胃动态降解率的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 93-98.
- Pan J, Cao Y F, Lü C, et al. Effects of mushroom cultivation on nutritional value and the dynamics of goat ruminal degradability of cottonseed hull [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 93-98.