

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.029

引用格式:原野,邹雨琪,白宝超,等.玉米-笤帚糜子秸秆比例对TMR发酵特性及腐败机制的影响[J].草地学报,2026,34(3):1060—1076

YUAN Ye, ZOU Yu-qi, BAI Bao-chao, et al. Effects of Corn Straw and Broom Sorghum Straw Raw Ratio on Fermentation Characteristics and Spoilage Mechanism of TMR[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1060—1076

玉米-笤帚糜子秸秆比例对TMR发酵特性及腐败机制的影响

原野, 邹雨琪, 白宝超, 孟和高勒, 宝乐尔, 格根图*

(内蒙古农业大学草业学院/农业农村部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室/草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010019)

摘要:针对赤峰巴林左旗农村玉米与笤帚糜子秸秆利用率低、养殖户因日粮知识匮乏致肉牛营养不良的问题,本研究探究不同秸秆比例全混合日粮(Total mixed ration, TMR)常温贮藏期的营养品质、发酵特性、体外消化率及微生物群落变化,为秸秆饲料化与肉牛饲喂提供依据。设玉米秸秆:笤帚糜子秸秆=9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5五组,与精料混合制成50%含水量TMR,密封于乙烯塑料袋,于0, 2, 5, 7, 10, 15 d取样(每组3个重复),测定相关指标并测序。随着贮藏时间延长,各组干物质(Dry matter, DM)、粗蛋白(Crude protein, CP)和可溶性碳水化合物(Water-soluble carbohydrates, WSC)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)、酸洗洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)均下降($P < 0.05$),高比例笤帚糜子秸秆组DM损失低;pH值升高,检出微量丙酸(Propanoic acid, PA)和丁酸(Butyric acid, BA)($P < 0.05$);2 d后细菌以泛菌属(*Pantoea*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*)为主,真菌以链格孢属(*Alternaria*)和锁掷酵母属(*Clavispora*)为主。TMR常温2 d内即腐败,低笤帚糜子秸秆组因WSC耗竭易劣变,高比例组延缓腐败但酸化不足,好氧菌与霉菌增殖是关键。建议短期饲喂选高笤帚糜子秸秆配方,用气密性包装并控制贮藏时间。

关键词: 秸秆;全混合日粮;发酵;营养品质;发酵品质;体外消化率;微生物群落动态

中图分类号:S816.53

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1060-17

Effects of Corn Straw and Broom Sorghum Straw Raw Ratio on Fermentation Characteristics and Spoilage Mechanism of TMR

YUAN Ye, ZOU Yu-qi, BAI Bao-chao, MENG He-gaole, BAO Le-er, GE Gen-tu*

(College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University Key Laboratory of Forage Cultivation and the Processing and Highly Efficient Utilization of the Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: Aiming at low utilization efficiency of corn and broom sorghum straw raw materials in rural Balin Left Banner, Chifeng, and beef cattle malnutrition caused by farmers' lack of dietary knowledge, this study explored changes in nutritional quality, fermentation characteristics, in vitro digestibility and microbial community of total mixed rations (TMR) with different straw ratios during room-temperature storage, to provide basis for straw feed utilization and beef cattle feeding. Five groups with corn straw:broom sorghum straw raw ratios of 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5 were set, mixed with concentrate to prepare TMR with 50% moisture content, sealed in ethylene plastic bags. Samples were collected at 0, 2, 5, 7, 10, 15 days (3 replicates per group) for index determination and sequencing. With prolonged storage, dry matter (DM), crude protein (CP), water-soluble carbohydrates (WSC), neutral

收稿日期:2025-04-17;修回日期:2025-07-04

基金项目:巴林左旗肉牛健康养殖关键技术研发与示范(2022YFD1601203);功能性添加剂对全混合发酵日粮养分保存与养殖效果的调控(2022YFE0111000-3);退耕还草技术与示范(2021FDZD02)资助

作者简介:原野(2000-),女,蒙古族,内蒙古锡林郭勒人,硕士研究生,主要从事牧草加工与利用研究, E-mail: 242aiyuanye@sina.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: gegentu@163.com

detergent fiber(NDF), and acid detergent fiber(ADF) of all groups decreased ($P < 0.05$), and DM loss was lower in high broom sorghum straw raw groups; pH increased with trace detected propanoic acid and butyric acid ($P < 0.05$); after 2 days, bacteria were dominated by *Pantoea* (increasing pH) and *Bacillus* (promoting DM loss), while fungi were dominated by *Alternaria* and *Clavispora* (causing mildew, positively correlated with nutrient loss). TMR decays within 2 days at room temperature; low broom sorghum straw raw groups are prone to deterioration due to WSC depletion, while high-ratio groups delay decay but have insufficient acidification. Proliferation of aerobic bacteria and molds is the key for the decay. It is suggested to select high broom sorghum straw raw formula for short-term feeding, and to use airtight packaging and control storage time.

Key words: Straw; Total mixed ration; Fermentation; Nutritional quality; Fermentation quality; In vitro digestibility; Microbial community dynamics

全混合日粮(Total mixed ration, TMR)技术近年来在畜牧养殖领域备受关注。TMR是根据牛羊等家畜对粗蛋白质、能量、粗纤维、矿物质、维生素等营养指标的需求,通过科学配比形成的饲料配方。该技术借助特制的搅拌机,将粗饲料、精饲料与各类添加剂按适宜比例充分混合,制成营养均衡的日粮^[1-2]。TMR的优势在于实现营养均衡供给,既能显著提升家畜的生产性能,又能通过合理搭配牧草提高饲料利用效率^[3]。此外,TMR可优化反刍动物瘤胃内的微生物环境,促进营养物质的消化吸收,增强动物免疫力,减少疾病发生。张永根等^[4]对传统饲喂方式和TMR饲养方式进行对比研究发现:TMR饲养方式的平均产奶量高于传统饲养方式的7%,乳脂率、乳蛋白率和乳中干物质含量分别升高了0.06%,0.08%和0.35%。侯川川等^[5]在相关研究中表明,TMR饲喂方式下育肥湖羊的平均日增重、料重比、肉品质均优于传统精粗饲粮。

与此同时,秸秆(Straw)作为农业生态系统中重要的生物资源,其合理利用也备受关注。秸秆是作物收获籽粒后剩余的茎、叶和穗轴等部分,我国作为主要的玉米生产国,玉米(拉丁名)秸秆(Corn Straw)数量持续增加,据统计,我国玉米秸秆总量约占全球总量的20%-30%^[6]。而笤帚糜子(拉丁名)秸秆(Broom Sorghum Straw Raw)同样不容忽视,作为传统经济作物,笤帚糜子在北方地区广泛种植,其秸秆质地坚韧、纤维细长,具有较高的柔韧性和耐磨度,是制作笤帚等手工编织品的优质原料。此外,笤帚糜子秸秆还富含纤维素、半纤维素等成分,在生物质能源、生物基材料等领域也具备潜在的开发价值。除玉米秸秆与笤帚糜子秸秆外,各类秸秆普遍富含有机物、少量矿物质和水分,纤维成分占比较大,其可燃性约为普通煤的50%,纤维含量达30%,钙、磷等矿物质含量较高^[7]。然而,目前秸秆资源的利用率较低,大量秸秆被直接丢弃或焚

烧,这不仅造成了资源浪费,还导致了严重的空气污染。将秸秆饲料化成为当前我国秸秆资源利用的主要途径,这种方式不仅能缓解传统饲料供应紧张的问题,还能带来多种经济效益^[8]。

尽管TMR技术优势显著,但在实际应用中仍面临诸多挑战。一方面,关于不同秸秆比例对TMR发酵品质的影响研究尚不充分。秸秆作为TMR重要的粗饲料来源,其比例变化会对发酵过程产生复杂影响,但当前对于不同秸秆比例下TMR发酵过程中微生物群落的动态变化、发酵产物的生成规律以及营养成分的转化机制等方面的研究还不够深入,难以给实际生产提供精准的技术指导。另一方面,TMR的贮藏稳定性问题突出。TMR通常含有一定水分,在常温贮藏条件下,极易受到微生物污染,从而发霉变质,导致饲料营养成分损失,甚至可能产生有害代谢产物,有害动物健康。目前,针对常温贮藏下不同秸秆比例TMR的腐败机制、微生物群落演替规律以及体外消化率变化的系统性研究处于空白状态,TMR贮藏过程中真菌群落的动态变化及其与营养损失之间的关系也尚未明晰,使得实际生产中难以制定有效的贮藏策略,极大地限制了TMR技术的广泛应用。

本研究选取内蒙古自治区赤峰市巴林左旗当地丰富的玉米秸秆和笤帚糜子秸秆为研究材料,系统探究不同比例秸秆TMR的营养品质、发酵品质、体外消化率以及发酵过程中微生物群落的动态变化。本研究旨在填补相关研究空白,研究成果可为农业废弃物高值化利用提供科学依据,推动秸秆资源化、养殖减污降碳及区域绿色畜牧业发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区赤峰市巴林左旗隆昌镇超越饲料有限公司,东与阿鲁科尔沁旗先锋

乡、双胜镇相连,南与巴林右旗宝日勿苏镇相接,主要产物是玉米秸秆和笤帚糜子秸秆。

1.2 试验材料

本试验于2024年5月~2024年11月在内蒙古自治区赤峰市巴林左旗隆昌镇超越饲料有限公司进行,选择当地分布广泛的玉米秸秆、笤帚糜子秸秆为研究材料,精料由巴林左旗隆昌镇超越饲料有限公司提供。

表1 日粮组成
Table 1 Diet composition

配方 Formula	
成分 Ingredient	
笤帚糜子秸秆 Broom sorghum straw raw	36%、32%、28%、24%、20%
玉米秸秆 Corn straw	4%、8%、12%、16%、20%
玉米面 Corn flour	60%
43% 膨化豆粕 43% Extruded soybean meal	
DDGS Distillers	
Dried grains with solubles	
棕榈脂肪粉 Palm fat powder	
玉米纤维 Corn fiber	
氢钙 Calcium hydrogen phosphate	
石粉 Limestone powder	
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	
小苏打 Sodium bicarbonate	
盐 Salt	
糖蜜 Molasses	

1.3 试验设计

将玉米秸秆和笤帚糜子混合设置五个比例,分别是TM10%(玉米秸秆:笤帚糜子秸秆=9:1)、TM20%(玉米秸秆:笤帚糜子秸秆=8:2)、TM30%(玉米秸秆:笤帚糜子秸秆=7:3)、TM40%(玉米秸秆:笤帚糜子秸秆=6:4)、TM50%(玉米秸秆:笤帚糜子秸秆=5:5)与精料混合后以50%含水量混合制成TMR,五个组制成的日粮放入乙烯塑料袋,扎口封好,并在0,2,5,7,10,15 d从每组聚乙烯塑料袋中取样,每个处理3个重复,测定其营养品质、发酵品质、体外消化率、微生物测序。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 营养成分含量 (1)干物质(Dry matter, DM)含量采用烘干法进行测定^[9],将青贮样品置于电热鼓风干燥箱105℃干燥30min后于65℃烘干48h,准确称量,计算干物质含量;

(2)粗蛋白质(Crude protein, CP)含量采用杜马斯燃烧法进行测定^[10];

(3)可溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrates, WSC)采用蒽酮-硫酸比色法进行测定分析^[11];

(4)酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)含量采用ANKOM全自动纤维分析仪进行测定^[12]。

1.4.2 发酵指标测定 青贮样品开袋后,准确称取10g样品,置于聚乙烯无菌拍打袋中,加入90mL无菌蒸馏水,使用拍打式无菌均质器拍匀后过滤,滤液置于50mL离心管内,用于pH值、有机酸及氨态氮的测定。pH值采用便捷式pH计进行测定^[13];乳酸(Lactic Acid, LA)、乙酸(Acetic Acid, AA)、丙酸(Propanoic acid, PA)和丁酸(Butyric acid, BA)采用高效液相色谱仪测定^[14];氨态氮(NH₃-N)采用苯酚-次氯酸钠比色法测定^[15]。

1.4.3 微生物测序

1.4.3.1 细菌 采用CTAB法从样品中提取基因组DNA,稀释后的基因组DNA作为模板,用条形码特异性引物(338F: 5'-ACTCCTACGGGAG-GCAGCAG-3'和806R: 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对16S rRNA基因V3-V4区进行PCR扩增。PCR产物经2%琼脂糖凝胶电泳检测。使用NEBNext®Ultra™II DNA文库准备试剂盒构建DNA文库。文库质量确认后,在NovaSeq6000平台上进行测序。使用QIIME 2中的classify-sklearn模块将得到的扩增子序列变异(ASV)与数据库进行比对,以获得每个ASV的物种水平信息。

1.4.3.2 真菌 采用CTAB法从样品中提取基因组DNA,稀释后的基因组DNA作为模板,用条形码特异性引物(ITS1F: 5'-CTTGGTCATTTAGAG-GAAGTAA-3'和ITS2R: 5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3')对16S rRNA基因V3-V4区进行PCR扩增。PCR产物经2%琼脂糖凝胶电泳检测。使用NEBNext®Ultra™II DNA文库准备试剂盒构建DNA文库。文库质量确认后,在NovaSeq6000平台上进行测序。使用QIIME 2中的classify-sklearn模块将得到的扩增子序列变异(ASV)与数据库进行比对,以获得每个ASV的物种水平信息。

1.4.4 体外消化率测定 采用体外模拟培养箱模拟动物胃肠消化^[16],测定48 h体外干物质消化率(IVDMD)、体外中性洗涤纤维消化率(IVNDFD)称

取青贮饲料样品 0.5 g 于纤维袋中并密封,取晨饲前西门塔尔牛瘤胃液,经 4 层纱布过滤后,按照瘤胃液 400 mL、A 缓冲液 1330 mL、B 缓冲液 266 mL 装入 39℃ 预热的消化罐中,放入样品后通入二氧化碳(CO₂)至形成厌氧条件,完成密封后将消化罐放入体外模拟培养箱中 39℃ 培养 48 h。培养完成后,取出样品用蒸馏水进行冲洗,冲洗完全后烘干,称量其质量,测定未消化 NDF 含量,计算体外消化率。公式如下:

$$\text{IVDMD}(\%) = 100 \times (\text{样品中干物质的质量} - \text{未被消化的干物质质量}) / \text{样品中干物质的质量}$$
$$\text{IVNDFD}(\%) = 100 \times (\text{样品中 NDF 含量} - \text{未消化的 NDF 含量}) / \text{样品 NDF 含量}$$

注:A 缓冲液:10 g·L⁻¹磷酸二氢钾、0.5 g·L⁻¹硫酸镁、0.5 g·L⁻¹氯化钠、0.1 g·L⁻¹氯化钙、0.5 g·L⁻¹尿素(试剂级)。B 缓冲液:15 g·L⁻¹碳酸钠、

1 g·L⁻¹硫化钠。

1.5 数据处理与分析

使用 Microsoft Office Excel 2019 对试验数据进行初步整理和前期处理;使用 Origin 2022 作图;数据计算和方差分析利用 SAS 9.4 软件完成。

2 结果与分析

2.1 天然笤帚糜子和玉米秸秆的原料特性

笤帚糜子秸秆和玉米秸秆中 DM 含量以鲜重计为 90.80%,78.24%;笤帚糜子秸秆和玉米秸秆中 CP 含量为 2.80% 和 2.72%,WSC 含量为 5.67% 和 9.33%,NDF 含量为 83.00%、74.82%,ADF 含量为 58.58% 和 44.18%(表 2)。

表 2 笤帚糜子秸秆和玉米秸秆的营养成分

Table 2 Nutritional components of natural broom sorghum straw raw and corn straw

	DM/%FW	CP/%DM	WSC/%DM	NDF/%DM	ADF/%DM
笤帚糜子秸秆 Broom sorghum straw raw	90.80±1.56	2.80±0.33	5.67±0.01	83.00±0.03	58.58±0.03
玉米秸秆 Corn straw	78.24±1.41	2.72±0.52	9.33±0.01	74.82±0.02	44.18±0.03
Levels of significance	***	0.762	**	*	**

注:* $P<0.05$; ** $0.001<P<0.01$; *** $P<0.001$

Note: * $P<0.05$; ** $0.001<P<0.01$; *** $P<0.001$

2.2 不同比例秸秆 TMR 的营养成分

时间和比例对 DM、CP、WSC、NDF、ADF 分别存在显著影响($P<0.05$)(表 3)。两者的交互作用仅对 DM、WSC 存在显著影响($P<0.05$),对于其他指标不存在显著影响。随着时间的变化,不同比例秸秆的 DM 含量呈现逐渐下降的趋势,同时随着比例的增加,DM 含量也呈现下降的趋势。其中,0 d 的 TMR-10% 组的 DM 含量显著高于 15 d 的 TMR-10% 组($P<0.05$)。不同比例的 CP 含量总体上呈现逐渐降低趋势。其中 0 d 的 TMR-10% 组表现出更高的含量($P<0.05$)。随着时间的变化,WSC 总体上呈现逐渐降低的趋势,0 d 的 TMR-10% 组的 WSC 含量最高,不同的时间和比例分别对 WSC 有显著影响($P<0.05$),但两者的交互作用并无显著影响。NDF 指标中,所有比例下的数值均随时间推移显著下降,且下降幅度在初期最大,后续逐渐减缓,0 d 的 TMR-50% 组的 NDF 含量高于 15 d 的 TMR-20% 组,但没有显著差异。随着时间的变化,ADF 呈现逐渐下降的趋势,15 d 的 TMR-10% 组表

现出更低的含量,ADF 指标但并无显著性差异。

2.3 不同比例秸秆 TMR 饲草的发酵品质

时间对 pH 值、LA、AA、PA、BA 和 NH₃-N 都存在显著性影响($P<0.05$)(表 4)。比例对 LA、AA、BA 存在显著性影响($P<0.05$)。两者的交互作用对 LA、AA、PA、BA 和 NH₃-N 也都存在显著性影响($P<0.05$)。总体上来看,pH 值的变化是先上升后下降,0 d 的 TMR-40% 组的 pH 值最低,但是没有显著影响。LA 和 AA 的指标变化的趋势是先上升后逐渐下降,5 d 的 TMR-30% 组的 LA 浓度高于其他比例组($P<0.05$),10 d 的 TMR-10% 组的 AA 浓度高于其他比例组($P<0.05$)。时间对 PA 并无显著影响,7 d 的 TMR-10% 组的 PA 含量高于其他比例组。总体上,BA 含量呈现逐渐上升的趋势,0 d 时各处理组均未检测出 BA 的含量,2 d 开始后 BA 含量逐渐上升($P<0.05$)。NH₃-N 总体上来看呈现先上升后下降再上升的趋势,比例对 NH₃-N 并无显著影响,15 d 的 TMR-40% 组的 NH₃-N 含量最高($P<0.05$)。

表 3 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 的营养成分

Table 3 Nutrient composition of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios with different proportions.

时间 Time	比例 Ratio	干物质 DM/%FW	粗蛋白质 CP/%DM	可溶性碳水化合物 WSC/%DM	中性洗涤纤维 NDF/%DM	酸洗洗涤纤维 ADF/%DM
0	10%	51.82±0.19 ^{Aa}	15.06±0.08 ^{Aa}	5.30±0.15 ^{Aa}	58.79±0.40 ^{Da}	39.13±0.84 ^{Da}
	20%	51.82±0.17 ^{Aa}	14.34±0.23 ^{Ba}	5.18±0.22 ^{Aa}	60.59±0.14 ^{Ca}	41.60±0.19 ^{Cab}
	30%	51.27±0.21 ^{ABa}	14.50±0.13 ^{Ba}	4.81±0.23 ^{ABa}	61.65±0.78 ^{BCa}	42.43±0.06 ^{BCa}
	40%	51.09±0.12 ^{Ba}	14.05±0.16 ^{BCa}	4.35±0.30 ^{Bab}	62.36±0.39 ^{Ba}	44.22±0.96 ^{Ba}
	50%	50.80±0.16 ^{Ba}	13.79±0.14 ^{Ca}	4.26±0.08 ^{Ba}	63.88±0.13 ^{Aa}	46.34±0.07 ^{Aa}
2	10%	49.32±0.86 ^{Ab}	14.49±0.22 ^{Ab}	4.69±0.15 ^{Ab}	54.65±0.91 ^{Ab}	36.10±0.81 ^{Bab}
	20%	49.30±0.44 ^{Ab}	13.75±0.22 ^{Bb}	4.50±0.29 ^{Abc}	51.17±2.50 ^{Ab}	42.87±1.13 ^{ABa}
	30%	49.49±0.33 ^{Ab}	13.63±0.05 ^{Bb}	4.21±0.25 ^{Aa}	54.73±1.57 ^{Ab}	42.52±2.80 ^{ABa}
	40%	50.07±0.16 ^{Ab}	13.23±0.10 ^{Bc}	4.15±0.20 ^{Ab}	54.66±0.80 ^{Ab}	41.11±2.19 ^{ABab}
	50%	49.08±0.44 ^{Ab}	13.36±0.20 ^{Bab}	4.09±0.18 ^{Aa}	55.51±0.25 ^{Ab}	41.34±0.31 ^{ABab}
5	10%	48.08±0.52 ^{Abc}	14.50±0.20 ^{Ab}	4.12±0.30 ^{Abc}	54.25±0.82 ^{Ab}	35.10±0.32 ^{Aabc}
	20%	48.33±0.35 ^{Abc}	13.71±0.13 ^{Bb}	4.99±0.16 ^{Ab}	49.27±1.91 ^{Bb}	40.10±2.88 ^{Aab}
	30%	48.61±0.51 ^{Abc}	13.60±0.27 ^{Bb}	4.62±0.52 ^{Aa}	52.41±0.92 ^{ABb}	41.02±2.72 ^{Aab}
	40%	49.04±0.18 ^{Ac}	13.42±0.15 ^{Bbc}	4.57±0.15 ^{Aa}	53.27±0.90 ^{ABbc}	40.20±1.09 ^{Aab}
	50%	48.90±0.39 ^{Ab}	13.22±0.23 ^{Bb}	4.10±0.16 ^{Aa}	53.65±1.53 ^{Abc}	40.80±4.78 ^{Aab}
7	10%	47.38±0.39 ^{Bc}	13.61±0.13 ^{Ac}	4.34±0.13 ^{Abc}	53.29±0.38 ^{Ab}	34.62±0.78 ^{Abc}
	20%	47.12±0.53 ^{Bd}	13.37±0.08 ^{ABbc}	4.26±0.08 ^{Abc}	49.99±2.95 ^{Ab}	37.87±1.92 ^{Aab}
	30%	48.12±0.24 ^{ABc}	13.01±0.06 ^{Cc}	4.00±0.07 ^{Aa}	51.91±1.91 ^{Ab}	38.15±0.78 ^{Aab}
	40%	48.69±0.39 ^{Ac}	13.04±0.03 ^{Cc}	4.00±0.18 ^{Ab}	51.62±0.86 ^{Ac}	38.98±2.51 ^{Aabc}
	50%	48.60±0.21 ^{Abc}	13.26±0.04 ^{BCb}	4.04±0.07 ^{Aa}	53.13±2.32 ^{Abc}	37.56±2.29 ^{Ab}
10	10%	47.27±0.39 ^{Bc}	13.66±0.08 ^{Ac}	4.01±0.18 ^{Ac}	53.09±0.93 ^{Ab}	32.08±2.18 ^{Bbc}
	20%	47.31±0.11 ^{Bcd}	13.14±0.04 ^{Bc}	4.10±0.35 ^{Ac}	48.91±1.07 ^{Bb}	36.39±0.63 ^{ABab}
	30%	47.92±0.39 ^{ABc}	13.57±0.16 ^{Ab}	3.91±0.12 ^{Aa}	51.17±1.73 ^{ABb}	37.45±1.34 ^{ABa}
	40%	48.46±0.31 ^{Ac}	13.64±0.04 ^{Ab}	3.89±0.08 ^{Ab}	49.30±1.10 ^{Bde}	36.30±0.97 ^{ABbc}
	50%	47.97±0.04 ^{ABc}	13.05±0.03 ^{Bb}	3.91±0.09 ^{Aa}	51.99±0.15 ^{ABbc}	37.02±1.63 ^{Ab}
15	10%	46.49±0.37 ^{Cc}	13.56±0.10 ^{Ac}	4.54±0.13 ^{Abc}	52.44±1.07 ^{Ab}	30.88±1.75 ^{Ac}
	20%	47.17±0.15 ^{BCd}	13.29±0.15 ^{ABbc}	4.17±0.22 ^{Ac}	48.53±0.64 ^{Bb}	35.60±2.95 ^{Ab}
	30%	48.00±0.44 ^{ABc}	13.28±0.09 ^{ABbc}	4.33±0.14 ^{Aa}	50.64±1.51 ^{ABb}	34.48±3.12 ^{Ab}
	40%	48.39±0.32 ^{Ac}	13.41±0.17 ^{ABbc}	4.30±0.15 ^{Ab}	48.72±0.55 ^{Bc}	33.96±2.55 ^{Ac}
	50%	48.00±0.08 ^{ABc}	13.04±0.07 ^{Bb}	4.18±0.16 ^{Aa}	50.95±0.85 ^{ABc}	36.02±2.71 ^{Ab}
Levels of significance						
时间 Time		***	***	***	***	***
比例 Ratio		***	***	**	***	***
时间×比例 Time×Ratio		*	**	0.2147	0.5669	0.9985

注: * $P<0.05$; ** $0.001<P<0.01$; *** $P<0.001$ 。不同大写字母表示相同时间不同比例存在显著差异;不同小写字母为相同比例不同时间存在差异($P<0.05$),下同

Note: * $P<0.05$; ** $0.001<P<0.01$; *** $P<0.001$. Different capital letters significant difference exists among the same proportion of different treatment; Different proportions of the same lowercase letters were different ($P<0.05$), the same as below

2.4 不同比例秸秆 TMR 的体外消化率的变化

时间和比例对 IVDMD 和 IVNDFD 都有显著影响($P<0.05$,表 5),两者的交互作用也都有显著影响($P<0.05$)。总体来看,IVDMD 呈现先上升后降低的变化,最高值是 5d 的 TMR-50% 组显著高于 2d 的 TMR-40% 组($P<0.05$)。IVNDFD 指标最高值是 7d 的 TMR-10% 组,显著高于其他比例组合($P<0.05$)。

2.5 不同比例秸秆 TMR 的微生物细菌群落结构分析

2.5.1 不同比例秸秆 TMR 的菌群 α 多样性分析

Shannon 指数反映微生物群落的多样性,指数越高,说明群落的多样性越高;Ace 和 Chao 指数反映群落中所含物种的种类数量,用于评估群落中物种的丰富度,指数越高,代表群落的丰富度越高。Simpson 指数值越大,说明群落多样性越低。比例对各个处理组都有显著影响($P<0.05$,表 6),时间和两者的

表 4 不同比例苜蓿糜子秸秆和玉米秸秆全混合日粮的发酵品质

Table 4 Fermentation quality of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios with different proportions.

时间 Time	比例 Ratio	pH 值	乳酸 LA/ (g·kg ⁻¹ FM)	乙酸(AA)/ (g·kg ⁻¹ FM)	丙酸(PA)/ (g·kg ⁻¹ FM)	丁酸(BA)/ (g·kg ⁻¹ FM)	氨态氮(NH ₃ -N)/ (g·kg ⁻¹ FM)
0 d	10%	6.09±0.01 ^{Bc}	0.24±0.01 ^{De}	0.13±0.00 ^{ABc}	0.01±0.00 ^{Bb}	ND	0.18±0.01 ^{ABc}
	20%	6.15±0.02 ^{Ad}	0.41±0.03 ^{Ad}	0.11±0.01 ^{ABc}	0.01±0.00 ^{ABb}	ND	0.15±0.01 ^{BCc}
	30%	6.13±0.02 ^{ABc}	0.40±0.02 ^{ABcd}	0.14±0.02 ^{Ab}	0.01±0.00 ^{ABab}	ND	0.16±0.00 ^{BCc}
	40%	5.98±0.02 ^{Db}	0.29±0.01 ^{CDe}	0.09±0.00 ^{Bc}	0.01±0.01 ^{ABab}	ND	0.13±0.00 ^{Ce}
	50%	6.04±0.01 ^{Cb}	0.34±0.02 ^{B^Ccd}	0.12±0.01 ^{ABc}	0.03±0.01 ^{Aa}	ND	0.19±0.01 ^{Ac}
2 d	10%	6.97±0.04 ^{Aab}	0.36±0.01 ^{Bd}	0.12±0.01 ^{Ac}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.01±0.01 ^{Ab}	0.32±0.03 ^{Aa}
	20%	7.08±0.06 ^{Aa}	0.55±0.07 ^{Acb}	0.14±0.02 ^{ABc}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.01±0.01 ^{Abc}	0.33±0.04 ^{Aa}
	30%	7.27±0.02 ^{Aa}	0.48±0.02 ^{ABc}	0.13±0.02 ^{Ab}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.00±0.00 ^{Adc}	0.29±0.01 ^{ABb}
	40%	7.18±0.25 ^{Aa}	0.45±0.00 ^{ABc}	0.15±0.00 ^{Ab}	0.01±0.00 ^{ABab}	0.00±0.00 ^{Ac}	0.20±0.01 ^{Cd}
	50%	7.00±0.18 ^{Aa}	0.41±0.03 ^{Bcb}	0.17±0.02 ^{Aab}	0.01±0.00 ^{Bc}	0.00±0.00 ^{Ac}	0.22±0.01 ^{BCb}
5 d	10%	6.69±0.07 ^{ABab}	0.77±0.02 ^{Aa}	0.20±0.01 ^{ABb}	0.02±0.01 ^{Ab}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.19±0.01 ^{Cc}
	20%	6.54±0.10 ^{Bc}	0.71±0.03 ^{ABa}	0.18±0.01 ^{Bab}	0.02±0.00 ^{Ab}	0.01±0.00 ^{Bcd}	0.32±0.01 ^{Aa}
	30%	6.76±0.07 ^{ABb}	0.79±0.01 ^{Aa}	0.22±0.01 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{ABab}	0.03±0.01 ^{Aa}	0.25±0.02 ^{Bab}
	40%	6.82±0.12 ^{ABa}	0.66±0.02 ^{Ba}	0.21±0.01 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{ABab}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.26±0.00 ^{Bbc}
	50%	6.92±0.14 ^{Aa}	0.56±0.05 ^{Ca}	0.20±0.01 ^{ABa}	0.01±0.00 ^{Abc}	0.04±0.01 ^{Aa}	0.23±0.01 ^{Bab}
7 d	10%	7.08±0.08 ^{ABa}	0.62±0.01 ^{ABb}	0.22±0.01 ^{ABab}	0.04±0.01 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{ABab}	0.23±0.03 ^{ABbc}
	20%	6.86±0.09 ^{ABab}	0.57±0.03 ^{BCb}	0.20±0.01 ^{Aa}	0.02±0.01 ^{Bb}	0.01±0.00 ^{ABc}	0.17±0.00 ^{Bbc}
	30%	6.77±0.09 ^{Bb}	0.66±0.00 ^{Ab}	0.21±0.02 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Bab}	0.01±0.00 ^{ABcd}	0.27±0.01 ^{Aa}
	40%	7.29±0.18 ^{Aa}	0.53±0.01 ^{Cb}	0.21±0.01 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.01±0.00 ^{Ab}	0.27±0.02 ^{ABab}
	50%	7.01±0.16 ^{ABa}	0.40±0.03 ^{DCb}	0.14±0.01 ^{Bbc}	0.01±0.00 ^{Bc}	0.01±0.00 ^{Ac}	0.21±0.01 ^{ABbc}
10 d	10%	6.82±0.20 ^{Aab}	0.54±0.01 ^{Bc}	0.25±0.01 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Ab}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.24±0.03 ^{ABc}
	20%	6.71±0.10 ^{ABc}	0.48±0.01 ^{Cbcd}	0.16±0.02 ^{Bab}	0.03±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.22±0.02 ^{Ab}
	30%	6.73±0.02 ^{Ab}	0.65±0.01 ^{Ab}	0.13±0.02 ^{Bb}	0.02±0.01 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{ABc}	0.21±0.02 ^{Ab}
	40%	7.05±0.10 ^{Aa}	0.48±0.02 ^{Cc}	0.18±0.04 ^{Bab}	0.02±0.01 ^{ABab}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.23±0.01 ^{ABcd}
	50%	6.95±0.17 ^{Aa}	0.46±0.01 ^{Cb}	0.13±0.01 ^{Bc}	0.03±0.00 ^{ABab}	0.02±0.00 ^{Ab}	0.23±0.01 ^{ABab}
15 d	10%	6.52±0.27 ^{Bbc}	0.35±0.03 ^{ABd}	0.22±0.01 ^{ABab}	0.01±0.00 ^{Ab}	0.02±0.00 ^{Ca}	0.27±0.02 ^{ABab}
	20%	6.91±0.04 ^{ABab}	0.43±0.03 ^{ABcd}	0.15±0.01 ^{Bbc}	0.02±0.01 ^{Ab}	0.02±0.00 ^{BCab}	0.22±0.02 ^{Bb}
	30%	6.80±0.04 ^{ABb}	0.33±0.06 ^{ABd}	0.14±0.01 ^{Bb}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{ABab}	0.25±0.02 ^{ABab}
	40%	6.80±0.05 ^{AB}	0.35±0.00 ^{ABd}	0.20±0.01 ^{ABab}	0.03±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{BCa}	0.30±0.01 ^{Aa}
	50%	6.80±0.06 ^{AB}	0.29±0.01 ^{Bd}	0.11±0.00 ^{Cc}	0.02±0.00 ^{ABbc}	0.03±0.00 ^{ABb}	0.26±0.00 ^{ABa}
Levels of significance							
时间 Time		***	***	***	***	***	***
比例 Ratio		0.0680	***	**	0.3638	**	0.5851
时间×比例 Time×Ratio		0.1102	***	***	***	***	***

交互作用对各处理组并无显著影响。0 d 的 TMR-30% 组的 Ace 指数和 Chao 指数最高,15 d 的 TMR-20% 组的 Shannon 指数最高,0d 的 TMR-50% 组的 Simpson 指数最高。所有测序样品的覆盖率均超过了 0.99。

2.5.2 不同比例秸秆 TMR 的菌群 β 多样性分析

我们发现,所有样本的细菌群落被分为 6 个类群,说明时间显著影响了微生物群落的 β 多样性(图 1)。在 TMR-10% 组中,PC1 (48.12%) 与 PC2 (24.38%) 累计解释率达 72.50%(图 1A)。在 TMR-20% 组中,PC1 的解释度为 40.91%,PC2 的解释度为 21.52%(图 1B)。在 TMR-30% 组中则

表现出 PC1 的解释度为 44.25%,PC2 的解释度为 19.08%,0d 分布在第 4 象限,其他时间段分布在第 1、3 象限,彼此距离较远,说明差异较大(图 1C)。在 TMR-40% 中,PC1 的解释度为 40.14%,PC2 的解释度为 27.77%(图 1D)。在 TMR-50% 组中,PC1 的解释度为 37.04%,PC2 的解释度为 23.71%(图 1E)。

2.5.3 不同比例秸秆 TMR 的细菌群落结构分析

在 TMR-10% 组中,不同时间下共有 ASV 数量是 35 个,其中 0d 特有的 ASV 数量最多,有 102 个(图 2A)。TMR-20% 比例组中,共有 38 个 ASV,其中 0d 特有 63 个 ASV,数量最多(图 2B)。TMR-30%

表 5 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 的体外消化率

Table. 5 *In vitro* digestibility of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios with different proportions

时间 Time	比例 Ratio	体外干物质消化率 IVDMD/%DM	体外中性洗涤纤维消化率 IVNDFD/%DM
0 d	10%	29.47±1.27 ^{Bc}	46.09±3.81 ^{Aab}
	20%	29.66±0.54 ^{ABb}	50.27±0.16 ^{Aa}
	30%	34.85±2.65 ^{Aa}	46.76±2.78 ^{Aa}
	40%	32.45±1.59 ^{ABab}	49.96±0.52 ^{Aab}
	50%	32.90±0.86 ^{ABab}	46.64±1.23 ^{Aab}
2 d	10%	34.87±1.45 ^{Aa}	42.74±1.16 ^{Db}
	20%	31.26±0.12 ^{Bb}	45.94±0.52 ^{Cb}
	30%	29.97±0.47 ^{Ba}	48.59±0.75 ^{Ba}
	40%	26.79±0.80 ^{Cb}	52.90±0.44 ^{Aa}
	50%	34.67±0.46 ^{Aab}	43.69±0.58 ^{CDbc}
5 d	10%	30.43±0.71 ^{Abc}	47.77±2.24 ^{Aab}
	20%	37.49±0.38 ^{Aa}	42.20±0.24 ^{ABc}
	30%	33.85±1.16 ^{Aa}	45.12±0.56 ^{ABa}
	40%	32.01±4.15 ^{Aab}	46.28±3.82 ^{ABab}
	50%	38.55±3.02 ^{Aa}	39.08±2.49 ^{Bc}
7 d	10%	33.99±0.65 ^{ABab}	53.11±0.59 ^{Aa}
	20%	28.49±1.00 ^{Bb}	50.21±0.88 ^{ABa}
	30%	31.39±0.46 ^{ABa}	46.26±0.84 ^{BCa}
	40%	34.67±2.23 ^{Aa}	44.69±2.31 ^{Cb}
	50%	36.01±2.81 ^{Aa}	44.06±2.52 ^{Cbc}
10 d	10%	29.89±1.38 ^{Ac}	48.44±1.24 ^{Aab}
	20%	29.85±2.22 ^{Ab}	48.17±2.39 ^{Aab}
	30%	33.22±1.51 ^{Aa}	45.77±2.20 ^{Aa}
	40%	32.22±0.85 ^{Aab}	47.73±1.03 ^{Aab}
	50%	34.67±3.19 ^{Aab}	45.18±2.78 ^{Abc}
15 d	10%	29.58±1.62 ^{Bc}	46.43±3.20 ^{Aab}
	20%	27.87±1.46 ^{Bb}	50.32±1.27 ^{Aa}
	30%	30.50±1.62 ^{Ba}	46.58±1.16 ^{Aa}
	40%	36.57±1.38 ^{Aa}	46.97±2.34 ^{Aab}
	50%	28.47±0.50 ^{Bb}	52.02±0.44 ^{Aa}
Levels of significance			
时间 Time		*	**
比例 Ratio		*	*
时间×比例 Time×Ratio		**	***

组中,不同比例秸秆共有的 ASV 数量是 27 个,其中 0d 特有的 ASV 是最多的,有 83 个(图 2C)。TMR-40% 组,共有的 ASV 是 33 个,其中 2d 特有的 ASV 是最多的,有 29 个(图 2D)。TMR-50%,共同拥有的 ASV 数量是 30 个,其中 0 d 组特有的 ASV 数量最多,是 42 个(图 2E)。

2.5.4 不同比例秸秆 TMR 的细菌门水平结构分析 TMR-10% 组 0 d 时以 Cyanobacteriota 和 Pseudomonadota 为优势菌门,从 2 d 开始,Cyanobacteriota 丰度下降,Bacillota 丰度上升,优势菌门变为 Pseudomonadota、Bacillota(图 3A)。TMR-20% 组在 0d 时 Cyanobacteriota 和 Pseudomonadota 为优势

菌门,2 d 以后优势菌门变为 Pseudomonadota、Bacillota(图 3B)。TMR-30% 组 0 d,Cyanobacteriota 和 Pseudomonadota 相对丰度最高,从 2 d 开始 Pseudomonadota、Bacillota 成为了优势菌门(图 3C)。TMR-40% 组 0 d 时以 Cyanobacteriota 和 Pseudomonadota 相对丰度最高,2 d 开始后 Bacillota 丰度逐渐上升,Pseudomonadota、Bacillota、Actinomycetota 变为优势菌门(图 3D)。TMR-50% 组 0 d 时 Cyanobacteriota 和 Pseudomonadota 相对丰度最高,2 d 以后 Cyanobacteriota 丰度下降,Bacillota 丰度逐渐上升,优势菌门为 Pseudomonadota 和 Bacillota(图 3E)。

表 6 不同比例苜蓿糜子秸秆和玉米秸秆全混合日粮细菌的 α 多样性的动态变化

Table 6 Dynamic changes of bacteria α diversity of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed rations with different proportions

时间 Time	比例 Ratio	Ace	Chao	Shannon	Simpson	Coverages
0 d	10%	229.71±106.96 ^{Aa}	227.66±107.11 ^{Aa}	2.90±0.93 ^{Aa}	0.22±0.16 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	20%	254.69±53.96 ^{Aa}	250.00±53.54 ^{Aa}	3.23±0.33 ^{Aa}	0.10±0.01 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	30%	268.81±35.98 ^{Aa}	266.67±36.24 ^{Aa}	2.74±0.18 ^{Ab}	0.19±0.03 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	40%	195.12±16.54 ^{Aa}	189.47±16.23 ^{Aa}	2.63±0.28 ^{Aa}	0.18±0.03 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	50%	150.46±39.40 ^{Aa}	148.73±37.52 ^{Aa}	2.31±0.68 ^{Ab}	0.23±0.09 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
2 d	10%	152.01±11.86 ^{Aa}	150.85±12.57 ^{Aa}	3.46±0.03 ^{Aa}	0.07±0.01 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{BCab}
	20%	136.61±36.76 ^{Aa}	134.52±36.35 ^{Aa}	2.94±0.56 ^{Aa}	0.12±0.06 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{BCa}
	30%	127.63±42.48 ^{Ab}	126.71±42.69 ^{Ab}	3.33±0.39 ^{Ab}	0.07±0.02 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	171.88±27.54 ^{Aa}	168.56±27.53 ^{Aa}	3.26±0.29 ^{Aa}	0.08±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Cab}
	50%	119.67±10.57 ^{Aa}	117.74±10.56 ^{Aa}	3.37±0.12 ^{Aa}	0.06±0.01 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{ABa}
5 d	10%	162.95±40.22 ^{Aa}	160.67±39.74 ^{Aa}	3.12±0.36 ^{Aa}	0.11±0.03 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	20%	178.30±36.05 ^{Aa}	176.34±35.37 ^{Aa}	3.61±0.09 ^{Aa}	0.06±0.01 ^{ABa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	174.83±36.06 ^{Ab}	173.54±36.06 ^{Ab}	3.72±0.27 ^{Aa}	0.04±0.01 ^{Bb}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	137.18±10.17 ^{Aa}	136.43±10.11 ^{Aa}	3.43±0.12 ^{Aa}	0.07±0.01 ^{ABa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	162.36±10.90 ^{Aa}	161.31±11.05 ^{Aa}	3.65±0.10 ^{Aa}	0.05±0.01 ^{Bb}	0.99±0.00 ^{Aa}
7 d	10%	141.88±9.56 ^{Aa}	140.79±9.35 ^{Aa}	3.48±0.07 ^{Aa}	0.05±0.00 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	127.16±59.53 ^{Aa}	125.56±58.74 ^{Aa}	2.90±0.66 ^{Aa}	0.15±0.06 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	159.87±31.31 ^{Ab}	158.21±31.02 ^{Ab}	3.60±0.15 ^{Ab}	0.05±0.01 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	139.94±66.31 ^{Aa}	136.48±63.68 ^{Aa}	2.93±0.58 ^{Aa}	0.14±0.08 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	50%	160.32±19.60 ^{Aa}	158.15±18.47 ^{Aa}	3.44±0.11 ^{Aa}	0.07±0.01 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{Aa}
10 d	10%	215.56±35.06 ^{Aa}	212.52±36.67 ^{Aa}	3.46±0.47 ^{Aa}	0.09±0.05 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Cab}
	20%	182.02±34.06 ^{Aa}	179.67±32.05 ^{Aa}	3.48±0.28 ^{Aa}	0.07±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{BCab}
	30%	131.81±22.73 ^{Ab}	129.57±22.03 ^{Ab}	2.98±0.26 ^{Ab}	0.12±0.03 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{ABa}
	40%	157.01±23.60 ^{Aa}	155.34±23.74 ^{Aa}	3.31±0.27 ^{Aa}	0.08±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	50%	148.97±22.37 ^{Aa}	147.25±21.86 ^{Aa}	3.36±0.13 ^{Aa}	0.08±0.01 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{ABa}
15 d	10%	171.42±13.62 ^{Aa}	169.01±13.58 ^{Aa}	3.49±0.19 ^{Aa}	0.07±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	20%	211.59±37.99 ^{Aa}	209.50±37.28 ^{Aa}	3.77±0.09 ^{Aa}	0.05±0.00 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	167.72±39.20 ^{Ab}	164.74±36.99 ^{Ab}	3.37±0.31 ^{Ab}	0.08±0.03 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	125.44±13.63 ^{Aa}	124.01±13.09 ^{Aa}	3.17±0.21 ^{Aa}	0.09±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Ab}
	50%	152.71±19.68 ^{Aa}	151.89±19.70 ^{Aa}	3.48±0.23 ^{Aa}	0.07±0.02 ^{Ab}	0.99±0.00 ^{Aa}
Levels of significance						
时间 Time		*	*	*	**	***
比例 Ratio		0.4429	0.4354	0.8659	0.9681	0.3409
时间×比例 Time×Ratio		0.9128	0.9115	0.9218	0.8362	0.2629

2.5.5 不同比例秸秆 TMR 的细菌属水平结构分析 TMR-10% 组 0 d 时以 *Rouxella* 和 *Asaia* 为主,从 2 d 开始主要以 *Bacillus*、*Pantoea* 为优势菌属(图 4A)。TMR-20% 组在 0d 时 *norank_o_Chloroplast*、*Kosakonia* 和 *Pantoea* 为优势菌属,2 d 以后 *Pantoea*、*Bacillus* 成了优势菌属(图 4B)。TMR-30% 组 0d 时 *norank_o_Chloroplast* 和 *norank_f_Mitochondria* 相对丰度最高,从 2 d 开始 *Pantoea*、*Bacillus* 成为了优势菌属(图 4C)。TMR-40% 组 0 d 时以 *norank_o_Chloroplast* 和 *norank_f_Mitochondria* 相对丰度最高,2d 开始后 *Pantoea*、*Bacillus* 丰度逐渐上升,变为优势菌属(图 4D)。TMR-50% 组 0 d 时 *Pantoea*、*norank_o_Chloroplast* 相对

丰度最高,2 d 以后 *norank_o_Chloroplast* 丰度下降,*Bacillus* 丰度逐渐上升,优势菌属变为 *Pantoea* 和 *Bacillus*(图 4E)。

2.6 不同比例秸秆 TMR 的微生物真菌群落结构分析

2.6.1 不同比例秸秆 TMR 的菌群 α 多样性分析 在所有测序的样本中,Ace 指数、Chao 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数均无显著差异(表 7)。10 d 的 TMR-10% 组的 Ace 指数和 Chao 指数最高,15 d 的 TMR-10% 组的 Shannon 指数最高,2d 的 TMR-20% 组的 Simpson 指数最高。所有测序样品的平均覆盖度均大于 0.99。

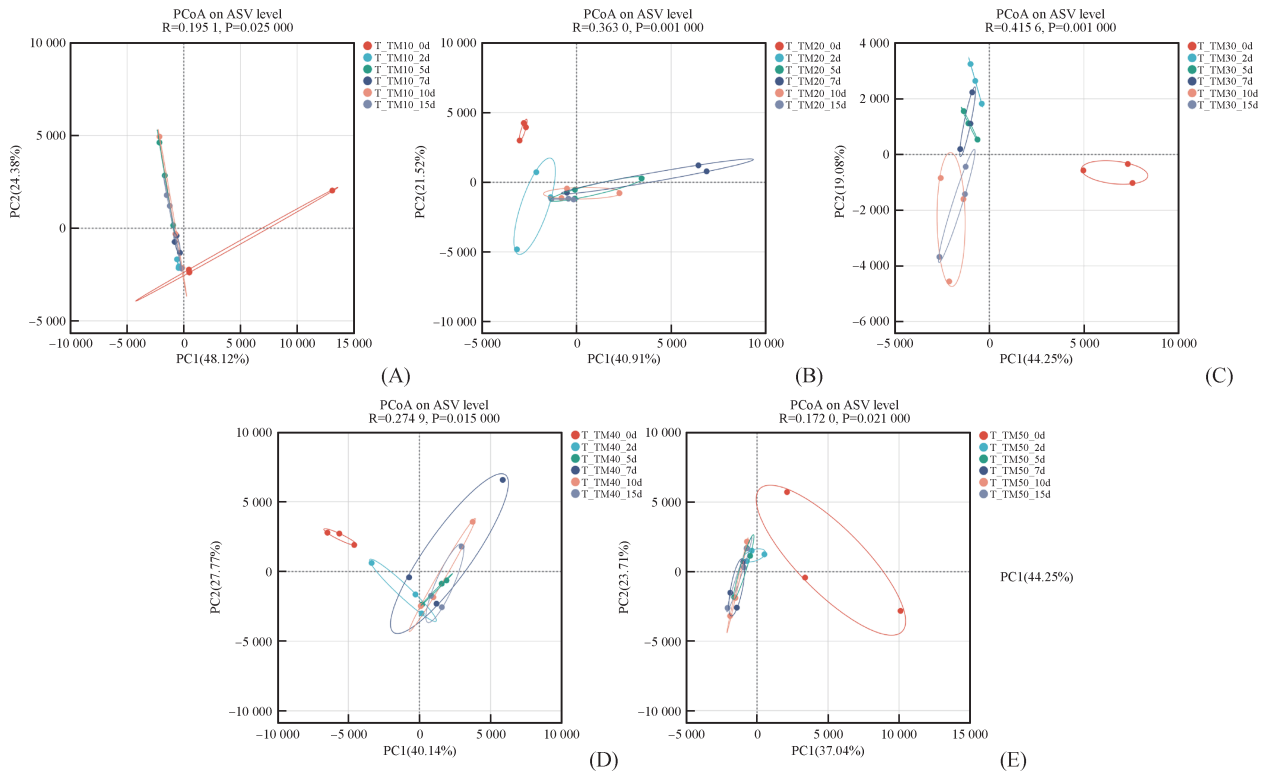


图 1 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 中细菌群落的 PCoA 分析

Fig. 1 PCoA analysis of bacterial communities in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios

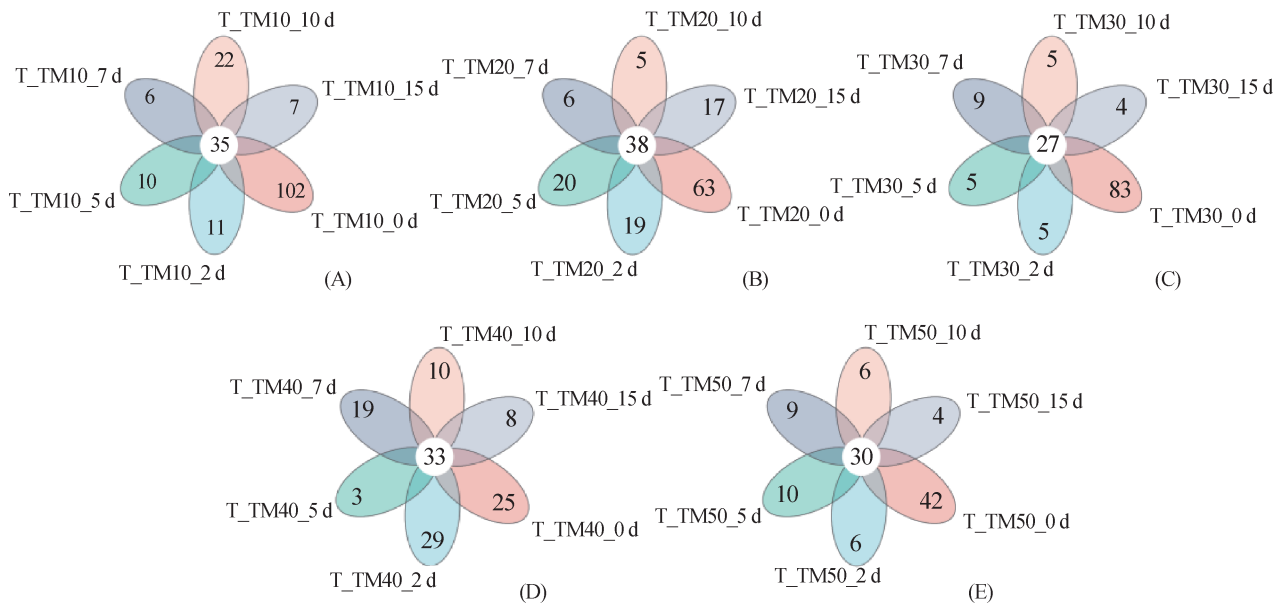


图 2 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 中细菌群落的 Venn 分析

Fig. 2 Venn analysis of bacterial communities in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw mixed total ratios

2.6.2 不同比例秸秆 TMR 的菌群 β 多样性分析
我们发现,所有样本的细菌群落被分为 6 个类群。在 TMR-10% 组中,PC1 的解释度为 26.10%,PC2 的解释度为 23.88%(图 5A)。在 TMR-20% 组中,PC1 和 PC2 分别占总方差的 54.85% 和 3.52%,PC1 的贡献率显著高于 PC2(图 5B)。在 TMR-

30% 组中,PC1 的解释度为 38.46%,PC2 的解释度为 13.15%(图 5C)。在 TMR-40% 组中,PC1 (49.48%)和 PC2(10.21%)累计解释率达 59.69%(图 5D),2d 时 TMR-40% 有较为明显的聚类。在 TMR-50% 组中,PC1 的解释度为 39.26%,PC2 的解释度为 14.70%(图 5E)。

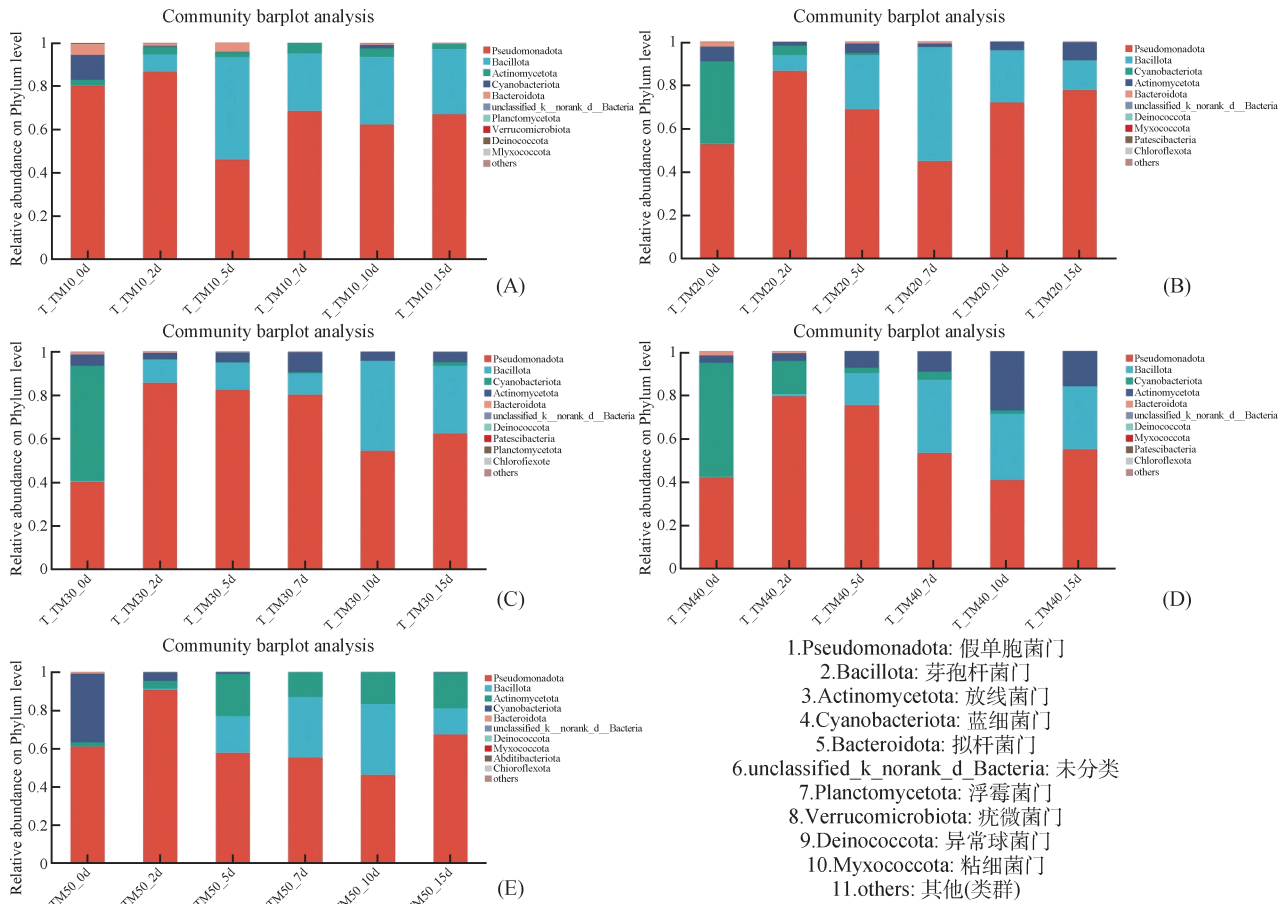


图3 不同比例苜蓿-玉米秸秆TMR中细菌种群门水平的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of bacterial population phylum in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed rations

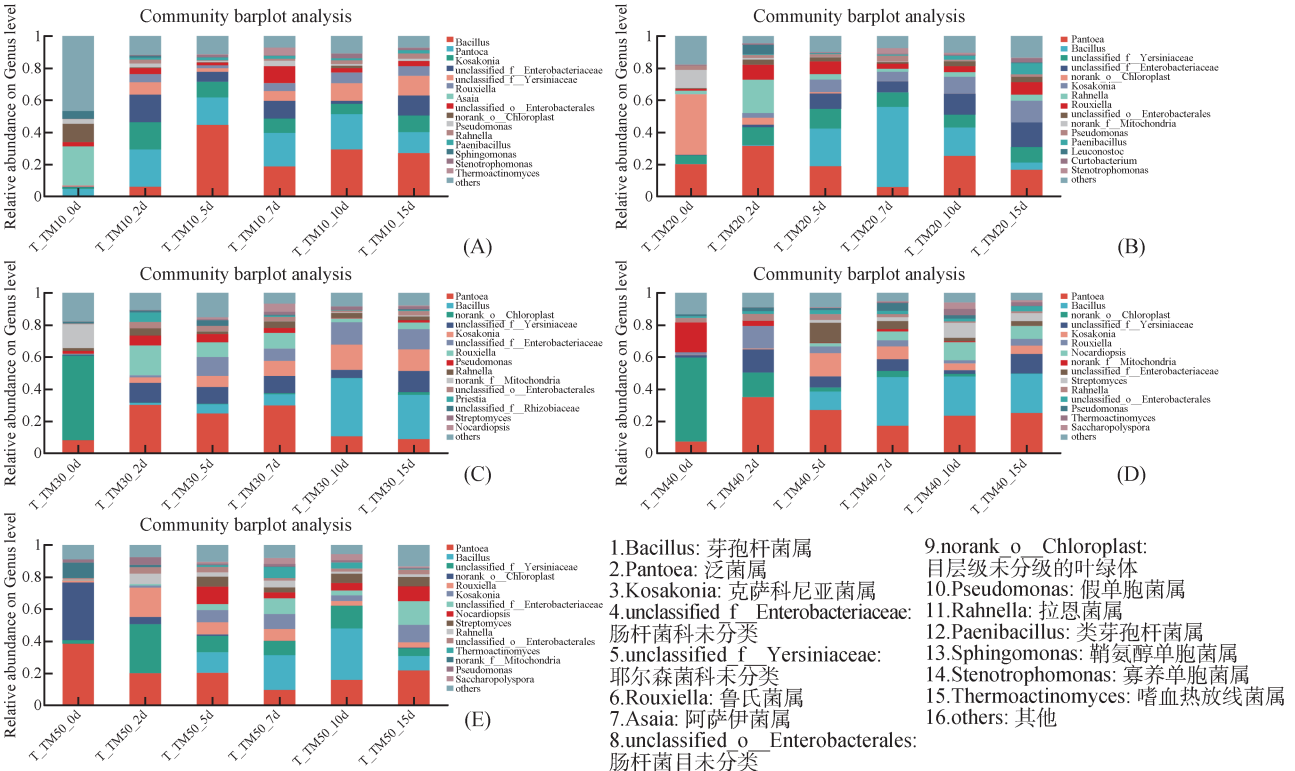


图4 不同比例苜蓿-玉米秸秆TMR中细菌种群属水平的相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of bacterial population genus in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw fermented total mixed rations

表 7 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 真菌的 α 多样性的动态变化Table 7 Dynamic changes of fungal α diversity of broom sorghum straw raw and cornstraw total mixed rations with different proportions

时间 Time	比例 Ratio	ACE	Chao	Shannon	Simpson	Coverages
0 d	10%	86.66±26.93 ^{Aa}	85.37±26.37 ^{Aa}	2.14±0.42 ^{Aa}	0.21±0.07 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	105.21±12.92 ^{Aa}	104.77±12.94 ^{Aa}	2.41±0.01 ^{Aa}	0.16±0.01 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	106.88±5.87 ^{Aa}	106.35±5.83 ^{Aa}	2.37±0.10 ^{A^{ab}}	0.16±0.02 ^{A^{ab}}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	116.72±26.56 ^{Aa}	115.81±26.59 ^{Aa}	2.24±0.34 ^{Aa}	0.24±0.07 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	106.90±8.63 ^{Aa}	105.30±8.80 ^{Aa}	2.47±0.08 ^{Aa}	0.14±0.01 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
2 d	10%	90.76±27.40 ^{Aa}	90.17±27.04 ^{Aa}	2.26±0.58 ^{Aa}	0.27±0.16 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	76.28±16.80 ^{Aa}	75.45±17.04 ^{Aa}	1.82±0.63 ^{Aa}	0.39±0.21 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	91.35±4.22 ^{A^{ab}}	90.48±4.21 ^{A^{ab}}	2.54±0.06 ^{A^{ab}}	0.12±0.01 ^{A^b}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	82.11±4.41 ^{Aa}	81.04±4.39 ^{Aa}	2.33±0.06 ^{Aa}	0.16±0.01 ^{A^{ab}}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	101.25±11.30 ^{Aa}	101.39±11.02 ^{Aa}	2.74±0.15 ^{Aa}	0.11±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
5 d	10%	90.92±3.81 ^{Aa}	90.36±3.70 ^{Aa}	2.30±0.20 ^{Aa}	0.20±0.08 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	106.41±4.33 ^{Aa}	106.93±2.54 ^{Aa}	2.17±0.31 ^{Aa}	0.27±0.11 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	96.91±8.34 ^{A^{ab}}	96.31±8.03 ^{A^{ab}}	2.70±0.08 ^{Aa}	0.11±0.01 ^{A^b}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	98.34±9.68 ^{Aa}	96.82±9.23 ^{Aa}	2.45±0.09 ^{Aa}	0.14±0.01 ^{A^{ab}}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	98.66±7.06 ^{Aa}	97.84±7.42 ^{Aa}	2.56±0.13 ^{Aa}	0.14±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
7 d	10%	90.50±11.46 ^{Aa}	92.50±12.93 ^{Aa}	2.41±0.14 ^{Aa}	0.17±0.01 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	93.23±17.15 ^{Aa}	92.26±16.62 ^{Aa}	2.28±0.28 ^{Aa}	0.17±0.04 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	97.65±6.71 ^{A^{ab}}	98.59±5.78 ^{A^{ab}}	2.60±0.15 ^{A^{ab}}	0.15±0.02 ^{A^{ab}}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	86.69±5.23 ^{Aa}	86.59±4.96 ^{Aa}	2.54±0.09 ^{Aa}	0.13±0.02 ^{A^{ab}}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	111.03±5.61 ^{Aa}	109.96±5.30 ^{Aa}	2.65±0.10 ^{Aa}	0.15±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
10 d	10%	117.88±2.78 ^{Aa}	117.19±2.74 ^{Aa}	2.80±0.07 ^{Aa}	0.11±0.01 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	96.04±15.81 ^{Aa}	95.31±16.03 ^{Aa}	2.41±0.33 ^{Aa}	0.15±0.04 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	69.06±21.44 ^{A^b}	68.10±21.44 ^{A^b}	2.01±0.38 ^{A^b}	0.23±0.06 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	102.06±4.14 ^{Aa}	100.45±3.94 ^{Aa}	2.60±0.09 ^{Aa}	0.12±0.01 ^{A^b}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	84.03±22.11 ^{Aa}	83.37±22.09 ^{Aa}	2.24±0.52 ^{Aa}	0.23±0.11 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
15 d	10%	114.56±6.45 ^{Aa}	112.87±6.85 ^{Aa}	2.89±0.15 ^{Aa}	0.09±0.02 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	20%	117.55±6.24 ^{Aa}	116.77±5.94 ^{Aa}	2.64±0.10 ^{Aa}	0.15±0.04 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
	30%	111.66±8.05 ^{Aa}	110.60±8.18 ^{Aa}	2.87±0.17 ^{Aa}	0.10±0.02 ^{A^b}	0.99±0.00 ^{Aa}
	40%	83.46±8.83 ^{Ba}	82.55±8.80 ^{Ba}	2.37±0.24 ^{Aa}	0.14±0.03 ^{A^{ab}}	0.99±0.00 ^{Aa}
	50%	98.40±7.80 ^{A^{Ba}}	98.21±7.91 ^{A^{Ba}}	2.49±0.22 ^{Aa}	0.16±0.03 ^{Aa}	0.99±0.00 ^{Aa}
Levels of significance						
时间 Time		0.9512	0.9408	0.5336	0.2883	0.7277
比例 Ratio		0.3367	0.3526	0.4118	0.4658	0.4785
时间×比例 Time×Ratio		0.5371	0.5270	0.6399	0.4901	0.2855

2.6.3 不同比例秸秆 TMR 的真菌群落结构分析
在 TMR-10% 组中,不同时间下共有 ASV 数量是 40 个,其中 2d 特有的 ASV 数量最多,有 18 个(图 6A)。TMR-20% 比例组中,共有 35 个 ASV,其中 0d 特有 17 个 ASV,数量最多(图 6B)。TMR-30% 组中,不同比例秸秆共有的 ASV 数量是 35 个,其中 0d 特有的 ASV 是最多的,有 17 个(图 6C)。TMR-40% 组,共有的 ASV 是 37 个,其中 0d 特有的 ASV 是最多的,有 15 个(图 6D)。TMR-50% 拥有的 ASV 数量是 42 个,其中 0d 组特有的 ASV 数量最多,是 15 个(图 6E)。

2.6.4 不同比例秸秆 TMR 的真菌门水平结构分析
TMR-10%、TMR-20% 以 Ascomycota、Basidiomycota、unclassified_k_Fungi 为优势菌门(图 7A;图 7B),5d 时的 TMR-10% 的 Ascomycota 丰度达到最高,7d 时的 TMR-20% 组 Ascomycota 达到丰度最高。TMR-30%、TMR-40%、TMR-50% 以 Ascomycota、Basidiomycota、Mucoromycota 为优势菌门(图 7C;图 7D;图 7E),10d 的 TMR-30% 的 Ascomycota 丰度达到最高,5d 的 TMR-40% 的 Ascomycota 丰度达到最高,10d 的 TMR-50% 组 Ascomycota 的丰度达到最高。

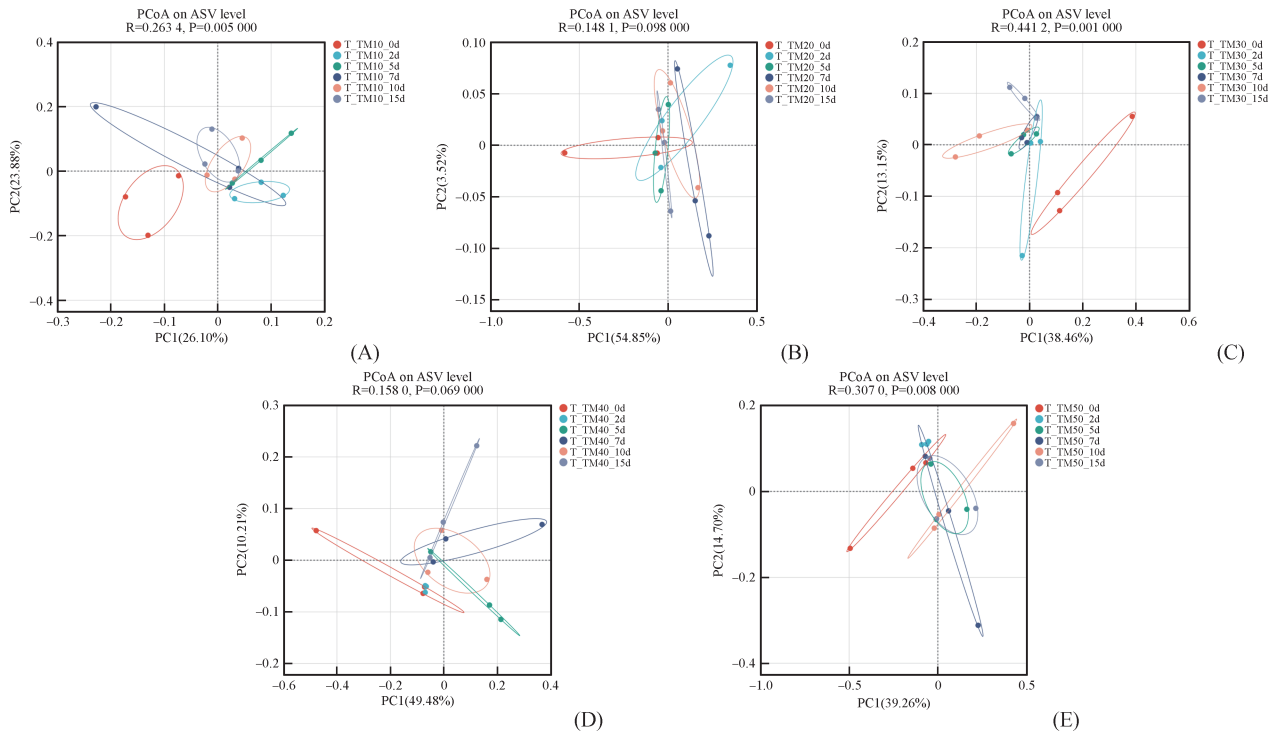


图5 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆TMR中真菌群落的PCoA分析

Fig. 5 PCoA analysis of funga communities in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios

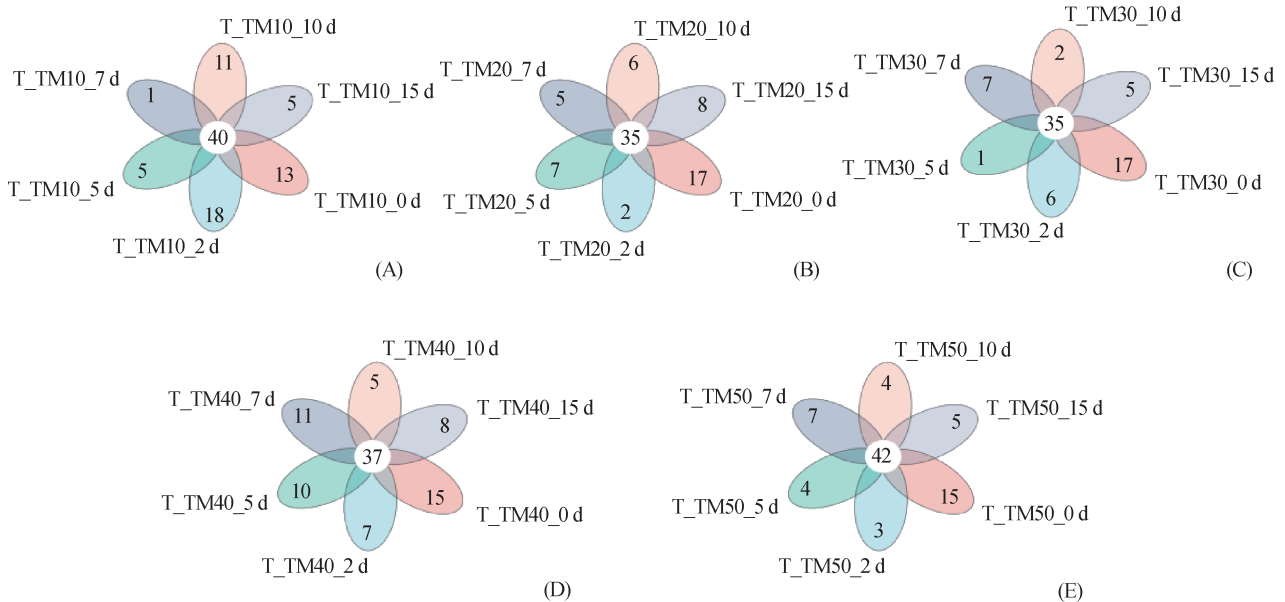


图6 不同比例笤帚糜子秸秆和玉米秸秆TMR中真菌群落的Venn分析

Fig. 6 Venn analysis of funga communities in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw mixed total ratios

2.6.5 不同比例秸秆TMR的真菌属水平结构分析 TMR-10%组中,*Alternaria*和*Fusarium*为优势菌属,5d时*Alternaria*丰度达到最高(图8A)。TMR-20%和TMR-30%组,*Clavispora*和*Alternaria*为优势菌属,TMR-20%组中,7d时*Clavispora*丰度达到

最高;TMR-30%组中,10d时*Clavispora*丰度达到最高(图8B,8C)。TMR-40%组和TMR-50%组,*Alternaria*和*Clavispora*为优势菌属,TMR-40%组中,0d时*Alternaria*丰度达到最高,TMR-50%组中,7d时*Alternaria*丰度达到最高(图8D,8E)。

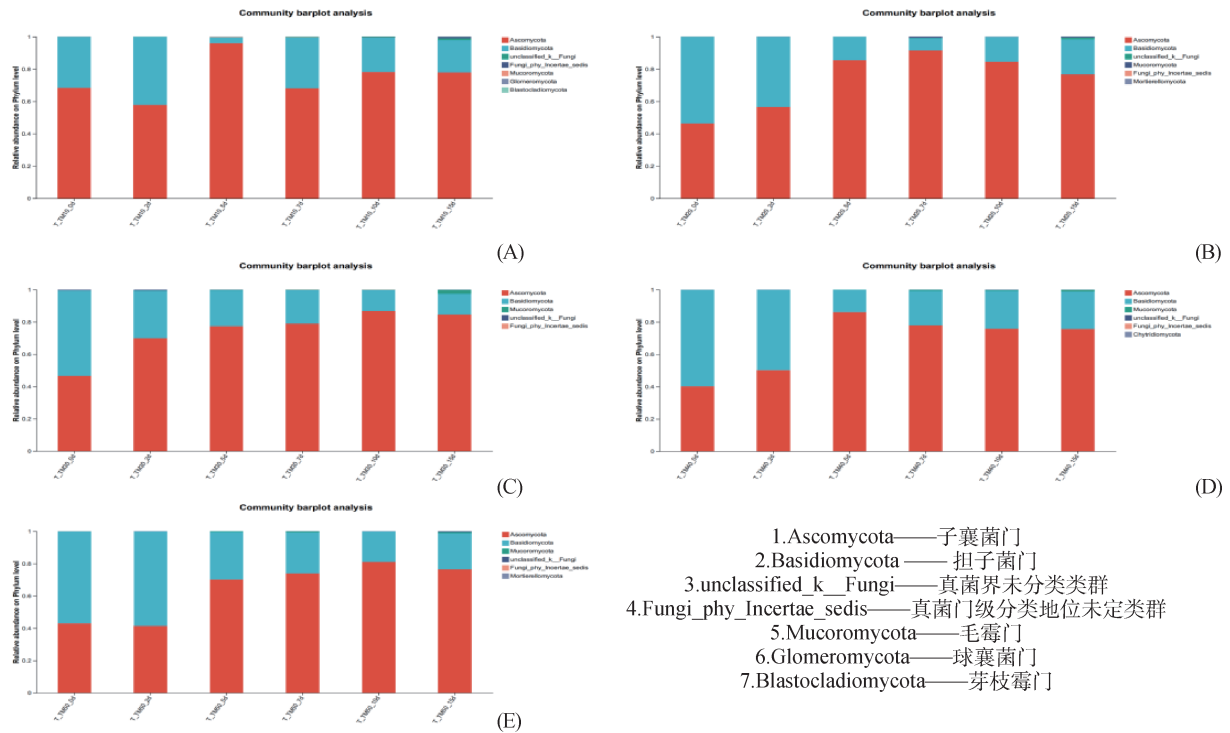


图 7 不同比例帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 中真菌种群门水平的相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of funga population phylum in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios

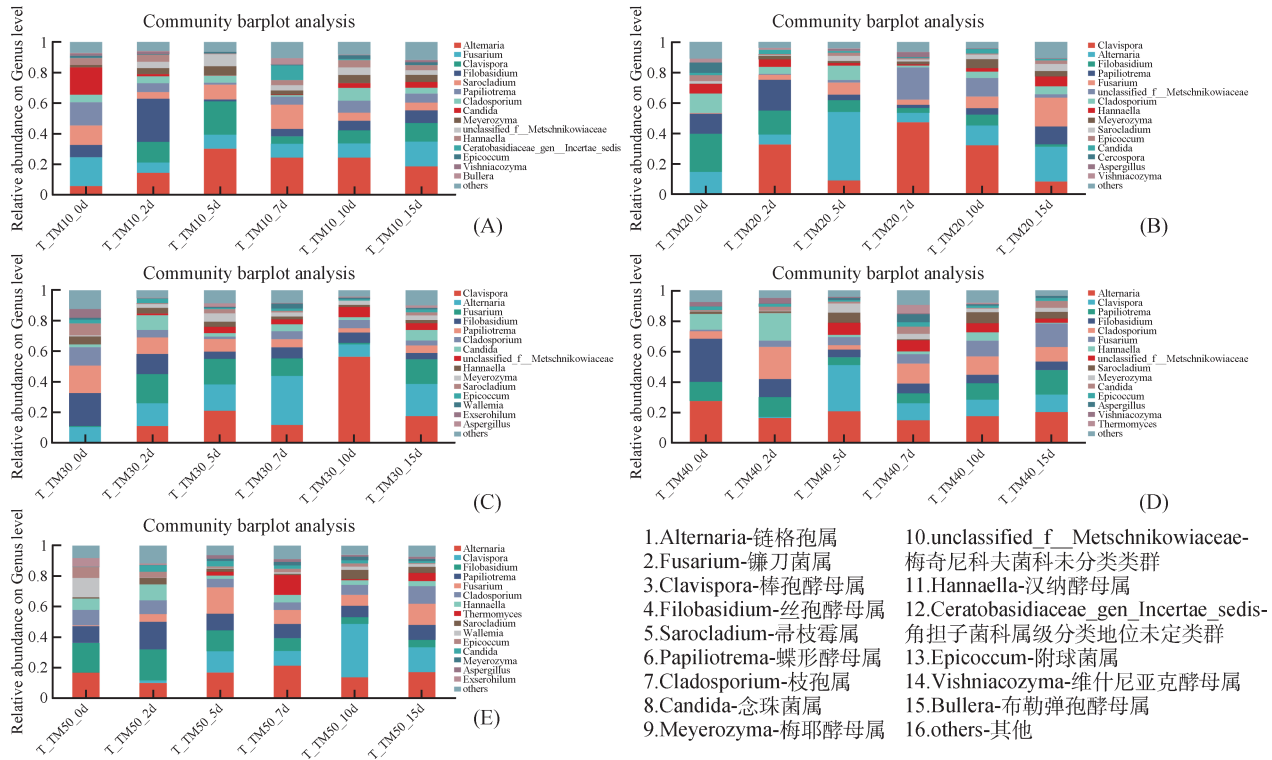


图 8 不同比例帚糜子秸秆和玉米秸秆 TMR 中真菌种群属水平的相对丰度

Fig. 8 Relative abundance of funga population genus in different proportions of broom sorghum straw raw and corn straw total mixed ratios

3 讨论

3.1 不同比例秸秆TMR对营养品质的影响

从试验结果来看,TMR组营养品质的各个指标从第2 d开始就有不同程度的降低,且在第2 d的取样过程中已经发现了不同位置的杂菌的生长点和饲料发热的现象。DM含量是评价发酵饲料的一个重要指标,如果干物质的含量变化过大,说明其饲料的发酵效果较差,不利于保存^[17]。从试验结果来看,所有比例组的DM含量随贮藏时间延长呈下降趋势,低秸秆比例组在贮藏过程中DM损失更显著($P<0.05$),这与秸秆中结构性碳水化合物含量高,微生物可利用碳源相对不足密切相关,同时玉米秸秆和苜蓿子秸秆的纤维结构差异加剧了这一现象,玉米秸秆的半纤维素含量较高,初期易被纤维分解菌降解,而苜蓿子秸秆因木质素含量丰富,其纤维素-木质素复合体对微生物酶解的抵抗性更强,导致后期DM损失速率趋缓^[18]。此外,低秸秆比例组的WSC消耗速率更快,WSC的快速耗尽导致乳酸菌无法建立优势,腐败菌占据主导,从而加剧DM损失^[19]。同时本试验中的CP含量随着时间的延长都有不同程度的降低。可能是因为TMR接触空气后,好氧性微生物和腐败菌会分解掉蛋白质和氨基酸以及一些胺类的物质。NDF和ADF含量随着时间的增加也在下降,NDF和ADF含量降低可能一部分是由于贮存过程中进行了发酵,在发酵的过程中,半纤维素会被同/异型的乳酸菌水解^[20],另一部分可能是因为霉菌的作用分解了NDF中的半纤维素和ADF中的纤维素。

3.2 不同比例秸秆TMR对发酵品质的影响

饲料接触空气的方式有很多,初期进行裹包时膜的破损、生产量大于家畜需求量时,过多的堆积,从而导致了一些好氧性微生物的生长繁殖,本试验中,将搅拌后的TMR放进聚乙烯塑料袋中,来检测其腐败过程。酵母菌会利用发酵底物产生水、二氧化碳及氨,并释放热量,使青贮饲料温度升高,pH值升高,降低乳酸含量^[21]。本试验中,pH值从第2 d开始,各个比例的pH值均有不同程度的提高,与Basso等^[22]的结论一致,可能是饲料与空气接触后,促进了好氧性微生物的活性,微生物就会分解饲料中的WSC,释放二氧化碳和热量,导致pH值升高,加速TMR的腐败变质。但到7 d后,pH值开始逐

渐降低,可能是因为含水量在第7 d越来越小,导致其好氧性微生物的作用开始降低。其中高比例秸秆pH值显著高于低比例秸秆,说明高比例秸秆可能延缓酸化进程。各个组的LA含量呈先上升后降低的状态,上升的原因可能是由于堆积密度过大,内部发生了部分发酵,在7 d后由于含水量的降低,与空气接触后,好氧微生物对其作用,导致LA含量下降,高比例秸秆的LA生成量较低,可能因秸秆纤维含量高导致可发酵底物不足^[23-24]。BA、PA是由腐败菌产生。BA含量过高,说明饲料发酵不良,PA含量高代表梭菌发酵,不仅造成营养损失还会使饲料发臭,影响家畜的适口性,引起家畜的健康问题。各个组从第2 d时均检测到了微量的PA和BA,但无显著差异,说明其从第2 d时,各组的TMR开始出现腐败。各组 $\text{NH}_3\text{-N}$ 从0 d开始先上升后逐步稳定,上升的原因可能是因为接触空气后,好氧性微生物降解利用蛋白质等化合物,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量升高^[25]。

3.3 不同比例秸秆TMR对体外消化率的影响

饲草的体外消化性能是体现其饲用价值的重要指标,有研究表明^[26],饲草的IVDMD与各种纤维组分呈负相关,纤维含量的下降有利于提高IVDMD。本研究通过体外消化试验,分析了不同比例的苜蓿子秸秆与玉米秸秆对TMR的IVDMD和IVNDFD的影响。在常温保存下,饲料中的好氧微生物与空气接触,其霉菌增殖,而两种秸秆的比例不同导致其营养物质含量和微生物数量不同,消化程度也不一样。本试验中的不同比例组的IVDMD随时间的变化先上升后下降的趋势,其中IVDMD在5d时TMR-50%达到峰值,这可能是由于高比例的秸秆中WSC含量较高,微生物降解利用后提高了IVDMD^[27],同时高比例秸秆中IVNDFD在后期显著提升。

3.4 不同比例秸秆TMR对细菌群落的影响

微生物群落的多样性、结构和功能,长期以来一直是青贮饲料研究领域的热点^[28]。监测微生物群落多样性是研究微生物对青贮发酵影响的重要方法之一^[29]。本试验中,各个组的TMR的随时间的延长,ACE指数、Chao指数、Shannon指数无显著差异,但0 d的所有比例的ACE指数、Chao指数、Shannon指数最高,说明其物种的丰富度最高。常

温保存后第2d开始物种的丰富度和多样性下降。这可能是由于饲料与空气接触后,好氧微生物开始增殖^[30],但随着内部堆积可能进行了发酵,导致细菌的多样性降低^[31]。Venn图结果显示,随着秸秆比例增加,各组的共有ASV数量呈现波动趋势,表明不同比例的秸秆显著影响微生物群落的菌群稳定性。0d在各组中普遍表现出最多的特有ASV,比如TMR-10%的102个、TMR-30%的83个。这可能是由于原料本身的微生物多样性在未发酵状态下更为复杂,而随着饲料接触空气腐败变质,pH上升,抑制了某些细菌的活性^[32]。

不同比例秸秆TMR随着时间的延长细菌门水平组成呈现显著的动态演替规律。所有试验组在初始阶段均以Cyanobacteriota和Pseudomonadota为优势菌门,这可能与原料中残留的植物表面附生菌及好氧环境相关,其中Cyanobacteriota的初始优势可能源于生长或收获过程中从土壤中携带出来^[32]。随着时间延长,TMR中Cyanobacteriota的相对丰度明显降低,被Bacillota取代,这可能是因为TMR与空气接触后好氧微生物对LA和WSC进行分解产生CO₂并大量产热而Bacillota的最适生长温度在20℃~30℃,导致其丰度逐渐增加,这也解释了本研究中的细菌种群的转移变化^[33]。TMR-40%组在2d出现Actinomycetota的显著富集,这可能与高比例秸秆提供的复杂纤维底物,如纤维素、半纤维素^[34]。本试验中从2d后到15d的优势菌门没有变化且都出现了Bacillota。可能是因为Bacillota里的梭菌属发酵产生BA导致其腐败变质,TMR的有机酸从2d开始检测到了微量的BA,也证实了这一观点^[35]。

在属水平上,从2d开始,各个组的优势菌属发现了Bacillus和Pantoea。且到15d时,优势菌属未发生变化,丰度有所降低。Pantoea作为一种兼性厌氧菌,在Pantoea在接触氧气时可迅速复活,通过氧化乳酸导致pH回升,DM含量降低^[36]。Bacillus的芽孢杆菌对低pH、高温等逆境具有极强抗性。若饲料密封不良或长期暴露于氧气,孢子可能萌发并消耗残留WSC及PA,导致pH值升高、DM损失和腐败气味^[37]。本试验中的各个组pH值从第2d升高、DM含量从第2d开始降低,也符合其观点。

3.5 不同比例秸秆TMR对真菌群落的影响

近些年来,发酵饲料中的微生物群落结构组

成、演替、功能一直是许多学者研究的方向,但大部分研究的都是细菌,关于秸秆饲料过程中真菌的群落特征和变化还比较少,尤其是TMR在常温保存方面,接触氧气后真菌的生长及动态演替这方面还存在空白。本试验使用ITS测序对不同比例的TMR中的真菌群落多样性、结构变化和功能进行动态分析。

本试验中,各个组的TMR的Ace指数、Chao指数、Shannon指数均没有显著差异,说明随着时间的变化,各个比例组的真菌群落多样性、结构均没有太大差异。本试验中,各个比例组的Ascomycota的相对丰度显著提高,Ascomycota中的一些物种可能会产生霉菌,导致发酵料发霉或产生霉变。霉变的发酵饲料可能影响牲畜的饲用价值,并可能对牲畜健康造成一定影响。Alternaria是常见的霉菌属,在发酵过程中可能会导致饲料降解和霉变,影响饲料消化率,使家畜的摄食量和生长性能下降^[38]。本试验中,各个比例组的从2d后,Alternaria和Clavispora成为了优势菌属,说明其从2d开始,各个比例组的TMR就开始出现不同的霉变。Clavispora通过分解WSC产生CO₂导致其局部温度升高,促进有害微生物的生长^[39]。

4 结论

本研究以巴林左旗玉米、苎帚糜子秸秆混合比例制成TMR为研究对象,发现TMR常温贮藏第2d即开始腐败;低比例苎帚糜子秸秆组DM损失更显著,高比例组可降低损失但乳酸生成不足,后期消化率更高;细菌群落演变及真菌优势菌属是导致饲料霉变关键。研究为当地秸秆资源饲料化利用提供了理论依据与技术支撑,建议实际生产中避免TMR常温长期贮藏,短期使用时优先选用高比例苎帚糜子秸秆配方,并加强包装密封性以延缓腐败。

参考文献

- [1] 张雨书,吕仁龙,李茂,等. 发酵型全混合日粮技术及其在热带地区的应用进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(15):131-135
ZHANG Y S, LV R L, LI M, et al. Fermented total mixed ration technology and its application in tropical area[J]. Feed Research, 2021, 44(15):131-135
- [2] KIM T I, MAYAKRISHNAN V, LIM D H, et al. Effect of fermented total mixed rations on the growth performance, carcass and meat quality characteristics of Hanwoo steers [J].

- Animal Science Journal, 2018, 89(3): 606-615
- [3] 王志军. 饲草组合优化及其发酵品质评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- WANG Z J. The quality evaluation of fermentation and the combinatorial optimization of forage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016
- [4] 张永根, 包军, 王志峰, 等. 使用全混合日粮饲喂奶牛试验[J]. 中国奶牛, 1999(3): 18-20
- ZHANG Y G, BAO J, WANG Z F, et al. Experiment on feeding dairy cows with total mixed diet[J]. China Dairy Cattle, 1999(3): 18-20
- [5] 侯川川, 马莲香, 邱家凌, 等. 饲粮类型对育肥湖羊生长性能、屠宰性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(12): 5023-5031
- HOU C C, MA L X, QIU J L, et al. Effects of different diet types on growth performance, slaughter performance and meat quality of fattening hu sheep[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(12): 5023-5031
- [6] 聂倾国, 聂永芳. 玉米秸秆的饲料化利用及其对饲养成本和经济效益的影响[J]. 中国饲料, 2023(24): 118-120
- NIE Q G, NIE Y F. Feed utilization of corn stalk and its influence on feeding cost and economic benefit[J]. China Feed, 2023(24): 118-120
- [7] 刘志霞. 农作物秸秆饲料化利用技术研究[J]. 新农业, 2024(6): 22-23
- LIU ZH X. Study on Feed Utilization Technology of Crop Straw[J]. New Agriculture, 2024(6): 22-23
- [8] 赵爱之. 农作物秸秆饲料化利用的效益分析[J]. 中国饲料, 2020(18): 71-74
- ZHAO A Z. Benefit analysis of utilization of crop straw feed[J]. China Feed, 2020(18): 71-74
- [9] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 饲料中水分和其他挥发性物质含量的测定: GB/T 6435—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of Moisture and Other Volatile Matter Content in Feed: GB/T 6435—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [10] 吴昊, 宋亚伟. 饲料分析及饲料质量检测技术探析[J]. 中国畜禽种业, 2020, 16(2): 60
- WU H, SONG Y W. Discussion on feed analysis and feed quality detection technology[J]. The Chinese Livestock and Poultry Breeding, 2020, 16(2): 60
- [11] MURPHY R P. A method for the extraction of plant samples and the determination of total soluble carbohydrates[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1958, 9(11): 714-717 [LinkOut]
- [12] 李博, 张丹丹, 程景, 等. 不同方法测定饲料中的中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量分析[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(12): 187-190
- LI B, ZHANG D D, CHENG J, et al. Determination of neutral detergent fiber and acidic detergent fiber in feed by different methods[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2020, 56(12): 187-190
- [13] 陈雷, 暴雪艳, 郭刚, 等. 单宁酸和乳酸菌对紫花苜蓿青贮品质和体外瘤胃发酵的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1853-1858
- CHEN L, BAO X Y, GUO G, et al. Effects of tannic acid and lactic acid bacteria on alfalfa silage quality and ruminal fermentation in vitro[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1853-1858
- [14] 许庆方, 玉柱, 韩建国, 等. 高效液相色谱法测定紫花苜蓿青贮中的有机酸[J]. 草原与草坪, 2007, 27(2): 63-65, 67
- XU Q F, YU Z, HAN J G, et al. Determining organic acid in alfalfa silage by HPLC[J]. Grassland and Turf, 2007, 27(2): 63-65, 67
- [15] BRODERICK G A, KANG J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and in vitro Media1[J]. Journal of Dairy Science, 1980, 63(1): 64-75
- [16] 李雨嘉, 吉方财, 秦子阳, 等. 全株玉米与大豆混合比例对青贮品质和体外消化特性的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(1): 627-636
- LI Y J, JI F C, QIN Z Y, et al. Effects of whole-plant corn and soybean mixture ratios on silage quality and digestion characteristics in vitro[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(1): 627-636
- [17] 许庆方, 张翔, 崔志文, 等. 不同添加剂对全株玉米青贮品质的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(2): 157-161
- XU Q F, ZHANG X, CUI Z W, et al. Effect of additives on the quality of whole-crop corn silage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(2): 157-161
- [18] AKRAM M. Nutritional evaluation of cereal straws as feed resources for ruminants. Animal Feed Science and Technology, 2019, 248(1): 1-10
- [19] 刘立山, 郎侠, 周瑞, 等. 降雨和风干对玉米秸秆青贮品质的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(2): 22-29
- LIU L S, LANG X, ZHOU R, et al. Effects of rainfall and air drying on the quality of corn straw silage[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(2): 22-29
- [20] 牛彦波, 安琦, 原韬, 等. 纤维素酶处理玉米秸秆对NDF与ADF及乳酸菌数量的影响[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(6): 14-16
- NIU Y B, AN Q, YUAN T, et al. Effect of corn straw treated with cellulase on NDF, ADF and lactic acid bacteria[J]. Heilongjiang Science, 2022, 13(6): 14-16
- [21] FILYA I, SUCU E. The effects of lactic acid bacteria on the fermentation, aerobic stability and nutritive value of maize silage[J]. Grass and Forage Science, 2010, 65(4): 446-455
- [22] BASSO F C, BERNARDES T F, DE TOLEDO PIZA ROTH A P, et al. Fermentation and aerobic stability of corn silage inoculated with *Lactobacillus buchneri* [J]. Revista Brasileira de Zootecnia, 2012, 41(7): 1789-1794

- [23] 唐云会,鲁茸格列,周宇斌,等. 水分含量对杂交臂形草青贮品质的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(9): 118-121
TANG Y H, LU R, ZHOU Y B, et al. Effects of moisture content on silage quality of *Brachiaria* hybrid [J]. Feed Research, 2024, 47(9): 118-121
- [24] 贾春旺,原现军,肖慎华,等. 青稞秸秆替代苇状羊茅对全混合日粮青贮早期发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(4): 179-187
JIA C W, YUAN X J, XIAO S H, et al. Effect of substituting hullless barley straw for tall fescue on early fermentation quality and aerobic stability of mixed-ration silage in Tibet [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(4): 179-187
- [25] BAYATKOUHSAR J, TAHMASEBI A M, NASERIAN A A. The effects of microbial inoculation of corn silage on performance of lactating dairy cows [J]. Livestock Science, 2011, 142 (1/2/3): 170-174
- [26] LIU Q H, LI X Y, DESTA S T, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and fibrolytic enzyme on the fermentation quality and in vitro digestibility of total mixed rations silage including rape straw [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15 (9): 2087-2096
- [27] 刘娣. 秸秆纤维素高效降解真菌的筛选、鉴定及其纤维素酶基因克隆[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008
LIU D. Screening, identification of high-efficiency straw cellulose-degrading fungi and cloning of their cellulase genes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008
- [28] LIU B Y, HUAN H L, GU H R, et al. Dynamics of a microbial community during ensiling and upon aerobic exposure in lactic acid bacteria inoculation-treated and untreated barley silages [J]. Bioresource Technology, 2019, 273: 212-219
- [29] TIAN H C, ZHU Y C, DAI M X, et al. Additives altered bacterial communities and metabolic profiles in silage hybrid *Pennisetum* [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 12: 770728
- [30] XU D M, WANG N, RINNE M, et al. The bacterial community and metabolome dynamics and their interactions modulate fermentation process of whole crop corn silage prepared with or without inoculants [J]. Microbial Biotechnology, 2021, 14(2): 561-576
- [31] 闫江, 江娟. 生活垃圾厌氧堆肥产甲烷及古细菌多样性分析 [J]. 环境科学与技术, 2006, 29(4): 9-10, 18, 115
YAN J, JIANG J. Features of methane produced in anaerobic digestion and analysis of Archaea diversity [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(4): 9-10, 18, 115
- [32] 刘美琪, 叶旭婷, 杨璐, 等. 莲鱼共养与常规池塘养殖环境中微生物群落的比较研究 [J]. 南华大学学报(自然科学版), 2025, 21(1): 140-152
LIU M Q, YE X T G, YANG L, et al. Comparative Study on Microbial Communities in Lotus-Fish Co-Culture and Conventional Pond Aquaculture Environments [J]. Journal of University of South China (Natural Science Edition), 2025, 21(1): 140-152.
- [33] KESHRI J, CHEN Y, PINTO R, et al. Microbiome dynamics during ensiling of corn with and without *Lactobacillus plantarum* inoculant [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(9): 4025-4037
- [34] DOLCI P, TABACCO E, COCOLIN L, et al. Microbial dynamics during aerobic exposure of corn silage stored under oxygen barrier or polyethylene films [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(21): 7499-7507
- [35] 罗浩, 陈聪, 叶光斌, 等. 一株窖泥中产氢广西梭菌的基因组注释与分析 [J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(7): 98-104
LUO H, CHEN C, YE G B, et al. Genome annotation and analysis of a strain of hydrogen-producing *Clostridium guangxiense* from pit mud [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(7): 98-104
- [36] WILKINSON J M, DAVIES D R. The aerobic stability of silage: key findings and recent developments [J]. Grass and Forage Science, 2013, 68(1): 1-19
- [37] DRIEHUIS F. Silage and the safety and quality of dairy foods: a review [J]. Agricultural and Food Science, 2013, 22(1): 16-34
- [38] 撒多文. 盐碱地紫花苜蓿刈割后营养品质变化特征与真菌群落结构研究[D]. 内蒙古农业大学, 2021
SA D W. Study on variation characteristics of nutritional quality and fungal community structure of *Medicago sativa* L. after cutting in saline-alkali soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [39] 宋俊呈, 刘宏, 王笑笑, 等. 产花香风味葡萄牙棒孢酵母的筛选及其对咖啡品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 26-36
Song Juncheng, Liu Hong, Wang Xiaoxiao, et al. Screening of *Corynespora portugalensis* with Floral Aroma and Its Effect on Coffee Quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 26-36

(责任编辑 彭露茜)