



杂交构树半干青贮加工工艺参数研究

宫斌 侯坤 檀论 范彩云 王典 兰儒冰 陆兴伟 卓钊 王菊花 程建波

Study on the technical parameters of semi-dry hybrid *Broussonetia papyrifera* silage feed

GONG Bin, HOU Kun, TAN Lun, FAN Caiyun, WANG Dian, LAN Rubing, LU Xingwei, ZHUO Zhao, WANG Juhua, CHENG Jianbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0837>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杂交构树在兰州地区的生长动态及刈割期

Growth dynamics and optimum cutting period of hybrid *Broussonetia papyrifera*

草业科学. 2019, 36(12): 3111 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0093>

晾晒方式对构树失水速率及饲用价值的影响

Effect of different drying methods on water loss rate and nutritional value of *Broussonetia papyrifera*

草业科学. 2018, 12(5): 1170 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0529>

青贮饲料乳酸菌添加剂的应用现状

Actual research and application of the silage lactic acid bacteria additives

草业科学. 2017, 11(12): 2575 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0564>

苜蓿青贮乳酸菌的筛选及其对苜蓿青贮发酵的影响

Identification of lactic acid bacteria inoculant ZZU A341 and its effects on fermentation properties of alfalfa silage

草业科学. 2020, 37(2): 377 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0273>

不同添加物和密度对杂交狼尾草青贮效果的影响

Effects of different additives and densities on silage quality of hybrid *Pennisetum*

草业科学. 2021, 38(11): 2191 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0199>

乳酸菌添加剂对不同生育期菊芋茎叶青贮发酵品质的影响

Effect of growth stage and lactic acid bacteria additives on quality of Jerusalem artichoke silage

草业科学. 2019, 36(2): 540 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0228>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0837

宫斌, 侯坤, 檀论, 范彩云, 王典, 兰儒冰, 陆兴伟, 卓钊, 王菊花, 程建波. 杂交构树半干青贮加工工艺参数研究. 草业科学, 2023, 40(6): 1677-1686.

GONG B, HOU K, TAN L, FAN C Y, WANG D, LAN R B, LU X W, ZHUO Z, WANG J H, CHENG J B. Study on the technical parameters of semi-dry hybrid *Broussonetia papyrifera* silage feed. Pratacultural Science, 2023, 40(6): 1677-1686.

杂交构树半干青贮加工工艺参数研究

宫斌¹, 侯坤¹, 檀论¹, 范彩云¹, 王典², 兰儒冰²,
陆兴伟³, 卓钊¹, 王菊花¹, 程建波¹

(1. 安徽农业大学动物科技学院, 安徽 合肥 230036; 2. 内蒙古优然牧业有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010;
3. 安徽华好生态养殖有限公司, 安徽 六安 237010)

摘要: 杂交构树‘中科1号构树’(*Broussonetia papyrifera* ‘Zhongke No.1’) 属桑科构属落叶灌木, 具有生长迅速、产量高、蛋白含量丰富的特性, 是一种极具开发价值的非常规蛋白质饲料资源。但其作为一种饲料原料, 粗纤维含量高、蛋白质结构复杂, 且含有抗营养因子。为了提高构树饲料适口性和营养物质消化率, 降低其中纤维素含量, 本试验选用植物乳杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*)、乳酸片球菌 (*Pediococcus acidilactici*)、布氏乳杆菌 (*Lactobacillus buchneri*) 作为发酵菌种, 对半干构树采用正交设计来优化菌种组合、物料组合、含水量、青贮时间等条件, 以感官指标、化学指标以及营养指标为判定青贮质量优劣的依据, 最终确定最优的构树半干青贮饲料工艺参数组合。结果表明, 构树半干青贮最佳工艺参数为水分含量 55%、植物乳杆菌: 乳酸片球菌: 布氏乳杆菌组合比例 4:1:1、糖蜜添加量 3%、纤维素酶添加量 $9 \times 10^3 \text{ U} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、青贮时间 60 d。该条件下有氧稳定性为 226.33~245.67 h, 粗蛋白含量为 16.27%~16.62%, 酸性洗涤纤维含量为 32.25%~32.61%, 中性洗涤纤维含量为 44.17%~44.81%。本研究确定了杂交构树半干青贮饲料适宜工艺参数, 为构树青贮饲料在畜牧养殖业的应用提供依据。

关键词: 杂交构树; 半干青贮; 饲料; 正交试验; 乳酸菌; 厌氧发酵; 工艺参数

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2023)06-1677-10

Study on the technical parameters of semi-dry hybrid *Broussonetia papyrifera* silage feed

GONG Bin¹, HOU Kun¹, TAN Lun¹, FAN Caiyun¹, WANG Dian², LAN Rubing²,
LU Xingwei³, ZHUO Zhao¹, WANG Juhua¹, CHENG Jianbo¹

(1. College of Animal Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China;
2. China Youran Dairy Group Limited, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;
3. Anhui Hua Hao Ecological Breeding Co., Ltd., Liuan 237010, Anhui, China)

Abstract: The hybrid *Broussonetia papyrifera* belongs to the deciduous shrub family *Moraceae*, which is characterized by rapid growth, high yield, and rich protein content. It is a type of unconventional protein feed resource with great development value. However, as a feed material, it has high crude fiber content, complex protein structure, and contains anti-nutritional factors. To improve the *B. papyrifera* feed palatability and bioavailability of nutrients and reduce the content of cellulose and antinutrients, this experiment selected the *Lactiplantibacillus plantarum*, *Pediococcus acidilactici*, and *Lactobacillus buchneri* strains for fermentation of half dry *B. papyrifera* strains using orthogonal design. The combination, material composition, water content, silage conditions, and fermentation time were optimized. Based on the sensory, chemical, and

收稿日期: 2022-10-27 接受日期: 2023-02-02

基金项目: 安徽省重点研发计划项目 (202004a06020012); 安徽省高校自然科学基金 (KJ2021A0153); 安徽省牛羊产业技术体系资金 (AHCYJSTX-07)

第一作者: 宫斌 (1995-), 男, 安徽淮南人, 在读硕士生, 主要从事饲料资源开发利用研究。E-mail: 1025615018@qq.com

通信作者: 程建波 (1975-), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士, 主要从事反刍动物营养与饲料研究。E-mail: chengjianbofcy@163.com

nutritional indexes to assess the quality of silage, the optimal combination of process parameters of semi-dry silage was determined for hybrid *B. papyrifera*. The results showed that the optimal process parameters of semi-dry silage were as follows: Water content of 55%, strain combination of *Lactobacillus plantarum*, *Mycococcus lactis* and *Lactobacillus brucei* 4 : 1 : 1, molasses added at 3%, cellulase added at $9 \times 10^3 \text{ U} \cdot \text{kg}^{-1}$, silage time 60 days. The optimal process parameters of semi-dry silage for hybrid *Broussonetia papyrifera* were determined, which provides a basis for the application of *Broussonetia papyrifera* silage in animal husbandry and breeding.

Keywords: hybrid *Broussonetia papyrifera*; semi-dry silage; feed; orthogonal test; actobacillus; anaerobic fermentation; technical parameters

Corresponding author: CHENG Jianbo E-mail: chengjianbofcy@163.com

杂交构树 (*Broussonetia papyrifera*) 是一种新型构树品种, 具有生长速度快、生物产量高且粗蛋白含量高等特点^[1]。其叶片不生长绒毛, 畜禽喜欢采食, 因此, 具有十分巨大的开发价值, 有望弥补我国饲料短缺, 尤其高蛋白粗饲料短缺的现状^[2]。因此, 其作为一种新兴的蛋白质粗饲料备受研究者关注^[3]。然而杂交构树作为一种新兴的饲料原料, 由于粗纤维含量高、蛋白质结构复杂、含有单宁和木质素等抗营养因子, 大量使用会影响饲料适口性, 导致动物采食量下降, 消化利用率低, 使其在畜牧养殖业的应用受到了限制。青贮技术不仅可以软化木质素或植物纤维素, 也可改善原料适口性。有研究表明, 构树发酵过程中, 其粗纤维和复杂蛋白质可被乳酸菌等微生物降解, 产生乳酸、挥发性脂肪酸等芳香物质及小分子肽和氨基酸^[4]。青贮发酵能够显著改善构树的适口性和消化性能, 解决青绿构树饲料不能长期贮存的问题^[5-6]。然而, 目前杂交构树青贮发酵工艺不成熟, 缺乏加工工艺参数的研究。因此, 本研究以适宜生长期的半干构树为原料, 选用植物乳杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*)、乳酸片球菌 (*Pediococcus acidilactici*)、布氏乳杆菌 (*Lactobacillus buchneri*) 作为发酵菌种, 开展半干构树青贮工艺参数研究, 为其制作青贮饲料提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验原料

构树枝叶: 取自安徽省六安市安徽华好生态养殖公司。将长势良好且无病虫害的构树于株高 1.2 m 时收割, 用铡刀铡成 2~4 cm 长的小段, 通过自然风干将原料水分含量降低到 45%~60% 时进行青贮制作。构树原料营养成分: 干物质 55.11%、粗蛋白

16.12%、酸性洗涤纤维 32.62%、中性洗涤纤维 47.56%、粗脂肪 4.35%、粗灰分 9.75%。

试验用糖蜜: 购于潍坊丰冠生物有限公司。

试验菌种: 植物乳杆菌、布氏乳杆菌和乳酸片球菌购自国家菌种保藏中心。

试验用纤维素酶: 购于夏盛 (北京) 生物科技开发有限公司, 纤维素酶含量为 $1 \times 10^3 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.2 构树半干青贮试验设计

根据刘凯丽^[7]、司丙文等^[8]研究结果, 本试验采用正交试验设计, A 组表示水分含量 (60%、55%、50%、45%), B 组表示植物乳杆菌、乳酸片球菌、布氏乳杆菌添加比例 (0 : 0 : 0、1 : 1 : 1、2 : 1 : 1、4 : 1 : 1), 其中试验菌种添加总量为 $1.0 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$, C 组表示糖蜜添加量 (0、10、20、30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), D 组表示纤维素酶添加量 (0、 3×10^3 、 6×10^3 、 $9 \times 10^3 \text{ U} \cdot \text{kg}^{-1}$), E 组表示青贮时间 (15、30、45、60 d), 具体因素水平如表 1 所列, 共 5 个因素进行 $L_{16} (4^5)$ 正交优化试验, 以感官指标、化学指标、有氧稳定性及营养成分作为判定青贮质量优劣的依据, 最终确定一个最优的青贮工艺参数组合。

1.3 试验方法

1.3.1 菌种活化和培养基配制

植物乳杆菌、乳酸片球菌和布氏乳杆菌均在 30 °C、pH 6.8 条件下, 用 MRS 培养基培养活化。MRS 培养基: 葡萄糖 4 g, 胰蛋白胨 2 g, 酵母提取物 1 g, 牛肉膏 2 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.076 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.04 g, 吐温-80 0.2 mL, K_2HPO_4 0.4 g, 柠檬酸胺 0.4 g (固体培养基加琼脂粉 3.2 g), 加入无菌水至 200 mL。

1.3.2 半干构树青贮制作过程

将试验原料按试验设计方案 (表 1) 混合均匀, 装入发酵袋 (25 cm × 36 cm), 每袋 200 g, 每处理 3 个

表 1 构树半干青贮正交试验设计
Table 1 Orthogonal test of *Broussonetia papyrifera* semi-dry silage

因素水平 Factor level	因素 Factor				
	A/%	B	C/%	D/(U·kg ⁻¹)	E/d
1	60	0 : 0 : 0	0	0	15
2	55	1 : 1 : 1	10	3 × 10 ³	30
3	50	2 : 1 : 1	20	6 × 10 ³	45
4	45	4 : 1 : 1	30	9 × 10 ³	60

A 为水分含量, B 为菌种添加比例, C 为糖蜜添加量, D 为纤维素酶添加量, E 为青贮时间。下同。
A: moisture content; B: strain addition ratio; C: molasses addition; D: cellulase addition; E: silage time. This is applicable for the following figures and tables as well.

重复, 用封口机抽真空封口, 室温下贮藏规定时间后取样评定有氧稳定性、现场感官和化学指标。

1.3.3 半干构树青贮现场感官评定

青贮开袋后进行现场感官评定, 参照《青贮饲料质量评定标准》^[7]。观察青贮饲料的颜色、气味和质地。

1.3.4 半干构树青贮水分含量测定

将鲜样放于 65 °C 烘箱烘干至恒重, 室温回潮 24 h, 测定初水分含量。干物质 (dry matter, DM) 含量采用 105 °C^[9] 烘干法测定。

1.3.5 半干构树青贮料 pH 测定

取 30 g 青贮料放入 200 mL 三角瓶中, 加入超纯水 120 mL, 加塞, 放入 4 °C 冰柜中浸提 24 h 后, 将浸提液通过定量滤纸过滤, 一部分滤液采用精密 pH 计 (上海雷磁 pHs-3C 型) 测定其 pH, 另一部分滤液用于混合青贮料化学评定。

1.3.6 半干构树青贮料化学指标评定

将滤液分装在两个 5 mL 的离心管中, 放入-20 °C 冰箱中贮存待测氨氮 (NH₃-N)、总氮 (total nitrogen, TN) 和有机酸 (乳酸、乙酸和丁酸) 浓度。NH₃-N 浓度采用苯酚一次氯酸钠法测定^[8]; TN 采用凯氏定氮法测定^[10]; 有机酸浓度采用液相色谱法测定^[11], 总有机酸含量为乙酸、丁酸和乳酸含量之和。参照《青贮饲料质量评定标准》^[7], 将氨氮/总氮 (NH₃-N/TN) 得分和有机酸得分 (乳酸、乙酸和丁酸得分之和除以 2) 相加作为化学评定的总得分。

1.3.7 有氧稳定性测定

每组合取 200 g 样品放入自封袋, 扎数个小孔, 再套上一个大号自封袋, 防止污染及水分蒸发, 插入温

度计测定温度变化。样品置于阴暗处, 每 4 h 记录一次温度变化, 直至样品温度超过环境温度 2 °C 为止。

1.3.8 半干构树青贮常规营养成分测定

收集青贮构树样品, 烘干后测定其 DM、灰分 (Ash)、粗蛋白 (crude protein, CP)、中性洗涤纤维 (neutral detergent fibers, NDF)、酸性洗涤纤维 (acid detergent fibers, ADF)、粗脂肪 (ether extract, EE)。DM、Ash、CP、EE 含量采用《饲料分析及饲料质量检测技术》^[9] 中方法测定; ADF 和 NDF 参照 Van Soest 等^[12] 方法测定。

1.4 数据统计分析

数据采用 SPSS 13.0 进行单因素方差分析, Duncan's 多重比较, 结果以平均值 ± 标准差表示, $P < 0.05$ 为差异显著。采用极差分析法和综合平衡法对青贮发酵得分进行正交分析, K_i 为该因素 i 水平的平均值, K_i 越大表明该水平越优 (NH₃ : TN、ADF 和 NDF 的 K_i 越小水平越优), 极差 R^2 值为该因素各水平平均值中最大值与最小值之差, R^2 值越大表明该因素对结果影响越大。

2 结果与分析

2.1 半干构树青贮感官评定结果

处理 1 组的 pH 最高, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 处理 8 组的 pH 最低 (表 2)。处理 4 组的总得分最高, 处理 1 组的总得分最低。正交分析中, 感官评定半干构树青贮的影响因素, 由大到小为 $C > B > E > D > A$, 最优组合为 $A_2B_4C_4D_4E_4$ 。

2.2 半干构树青贮化学评定结果

处理 13 组的 NH₃-N/TN 含量最高, 处理 4 组的最低 (表 3); 处理 4 组的乳酸含量最高, 处理 1 组的乳酸含量最低; 处理 16 组的乙酸含量最高, 处理 4 组的乙酸含量最低; 处理 1 的丁酸含量最高, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 处理 13 的丁酸含量最低; 处理 4 的总得分最高, 处理 16 的总得分最低。正交分析中, 对半干构树青贮化学评定的影响因素由大到小为 $C > A > B > E > D$, 最优组合为 $A_2B_3C_4D_4E_4$ 。

2.3 半干构树青贮有氧稳定性评定结果

处理 10 组的有氧稳定性最高 (表 4), 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$); 处理 1 组的有氧稳定性最

表 2 半干构树青贮感官评定正交分析结果
Table 2 Orthogonal analysis for sensory evaluation of semi-dry *Broussonetia papyrifera* silage

类项 Items	代号 No.	因素水平 Factor level					pH	pH得分 pH score	水分得分 Moisture score	气味得分 Smell score	色泽得分 Color and luster score	质地得分 Quality score	总得分 Total scores
		A	B	C	D	E							
处理组 Treatment group	1	1	1	1	1	1	5.91 ± 0.17a	0.00	20.00	18.67	15.33	7.67	61.67
	2	1	2	2	2	2	4.72 ± 0.08bc	5.33	20.00	19.67	16.67	9.00	70.67
	3	1	3	3	3	3	4.43 ± 0.14cd	8.00	20.00	18.00	15.00	7.67	68.67
	4	1	4	4	4	4	4.20 ± 0.04d	15.67	20.00	20.33	16.00	8.67	80.67
	5	2	1	2	3	4	4.35 ± 0.08d	9.33	20.00	20.33	15.00	7.33	72.00
	6	2	2	1	4	3	4.68 ± 0.03bc	5.67	20.00	19.67	16.33	7.67	69.33
	7	2	3	4	1	2	4.69 ± 0.04bc	5.67	20.00	19.00	16.67	8.33	69.67
	8	2	4	3	2	1	4.19 ± 0.07d	14.33	20.00	19.33	14.67	8.00	76.33
	9	3	1	3	4	2	4.56 ± 0.09c	7.00	20.00	19.00	15.00	7.33	68.33
	10	3	2	4	3	1	4.28 ± 0.03d	11.00	20.00	20.00	14.67	7.00	72.67
	11	3	3	1	2	4	4.54 ± 0.13cd	7.33	20.00	19.33	14.00	6.67	67.33
	12	3	4	2	1	3	4.53 ± 0.09cd	7.00	20.00	21.67	15.33	8.33	72.33
	13	4	1	4	2	3	4.49 ± 0.07cd	7.67	20.00	18.67	15.00	9.00	70.33
	14	4	2	3	1	4	4.56 ± 0.22c	6.33	20.00	22.33	16.00	7.33	72.00
	15	4	3	2	4	1	4.54 ± 0.17c	7.00	20.00	21.33	15.00	7.33	70.67
	16	4	4	1	3	2	4.80 ± 0.09b	3.00	20.00	18.67	16.67	8.67	67.00
平均值 Mean	K ₁	70.42	68.08	66.33	68.92	70.34	最优组合 Optimal combination						
	K ₂	71.83	71.17	71.42	71.17	68.92							
	K ₃	70.17	69.06	71.33	70.09	70.17							
	K ₄	70.00	74.08	73.34	72.25	73.00							
R ²		1.83	6.00	7.01	3.33	4.08							

低,显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。正交分析中,对半干构树青贮有氧稳定性评定的影响因素由大到小为 $A > C > B > D > E$,最优组合为 $A_2B_2C_4D_3E_4$ 。

2.4 半干构树青贮营养成分评定结果

处理 4 组的 CP 含量最高 (表 5),处理 1 组的 CP 含量最低,显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。处理 13 组的 ADF 含量最高,处理 4 组的 ADF 含量最低;处理 1 组的 NDF 含量最高,处理 4 组的 NDF 含量最低,显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。正交分析中,对半干构树青贮 CP 含量的影响因素由大到小表现为 $B = C > A > E > D$,最优组合为 $A_2B_4C_4E_4D_4$;对半干构树青贮 ADF 含量的影响因素由大到小表现为 $A > C > B > D > E$,最优组合为 $A_1B_4C_4D_4E_4$;对

半干构树青贮 NDF 含量的影响因素由大到小表现为 $B > C > A > E > D$,最优组合为 $A_1B_4C_4E_4D_4$ 。

2.5 不同因素组合对构树青贮品质影响的综合平衡法分析

综合不同因素对构树半干青贮品质影响的正交分析,感官评定、化学评定和 CP 评定中因素 C 的极差最大 (表 6);化学评定、有氧稳定性评定和 ADF 评定中,A 的极差均大于 B、D、E;感官评定、CP 和 ADF 评定中 B 的极差均大于 A、D、E;感官评定、化学评定、CP 和 NDF 评定中 E 的极差均大于 D,因此不同因素对构树青贮品质的影响为 $C > A = B > E > D$ 。在水分含量水平上,感官评定、化学评定、有氧稳定性评定和 CP 评定中都以 A_2 水平最

表 3 半干构树青贮化学评定正交分析结果
Table 3 Orthogonal analysis for laboratory evaluation of semi-dry *Broussonetia papyrifera* silage

类项 Items	代号 No.	因素水平 Factor level				得分 Score	乳酸 Lactic acid/%	得分 Score	乙酸 Acetic acid/%	得分 Score	丁酸 Butyric acid/%	得分 Score	总得分 Total scores
		A	B	C	D	E							
处理组 Treatment group	1	1	1	1	1	1	52.95 ± 2.41d	46.00	34.45 ± 1.76a	17.33	12.61 ± 1.00a	26.67	76.50
	2	1	2	2	2	2	66.87 ± 0.88c	46.67	26.46 ± 0.80bc	21.67	6.67 ± 0.16bc	33.00	85.83
	3	1	3	3	3	3	73.40 ± 2.04bc	46.00	22.26 ± 1.87c	23.33	4.34 ± 0.52c	35.67	88.00
	4	1	4	4	4	4	81.39 ± 0.19a	49.33	14.24 ± 0.23d	25.00	4.37 ± 0.38c	35.67	92.17
	5	2	1	2	3	4	64.2 ± 0.85c	44.67	14.83 ± 1.83d	25.00	5.02 ± 0.48c	34.33	86.84
	6	2	2	1	4	3	8.14 ± 1.05bc	42.67	28.86 ± 0.85b	20.33	7.43 ± 0.30bc	32.00	80.00
	7	2	3	4	1	2	5.95 ± 0.59cd	46.67	20.66 ± 0.93c	24.33	4.48 ± 1.60c	35.00	88.84
	8	2	4	3	2	1	5.41 ± 1.03cd	48.00	22.20 ± 0.85c	23.67	7.94 ± 0.22b	31.67	88.17
	9	3	1	3	4	2	9.41 ± 0.80b	39.67	30.60 ± 2.33ab	19.33	5.78 ± 0.11bc	34.00	77.50
	10	3	2	4	3	1	5.16 ± 0.32cd	48.67	20.76 ± 0.70c	24.00	6.22 ± 0.10bc	33.00	89.67
	11	3	3	1	2	4	8.43 ± 2.06bc	42.33	23.61 ± 7.68bc	22.67	6.51 ± 1.20bc	33.33	82.00
	12	3	4	2	1	3	8.45 ± 0.34bc	42.00	18.79 ± 1.51cd	24.67	4.55 ± 1.97c	35.33	84.50
	13	4	1	4	2	3	11.55 ± 1.95a	34.00	24.70 ± 2.91bc	22.00	4.33 ± 1.00c	35.33	75.00
	14	4	2	3	1	4	8.78 ± 2.04b	40.00	20.82 ± 8.92c	23.00	6.04 ± 0.79bc	33.67	80.17
	15	4	3	2	4	1	6.74 ± 0.54c	45.33	29.85 ± 1.61ab	19.67	4.90 ± 4.25c	38.00	86.17
	16	4	4	1	3	2	10.36 ± 0.15ab	37.00	34.77 ± 1.06a	17.33	8.03 ± 2.47b	31.00	70.50
K ₁		85.63	78.96	77.25	82.50	85.13	最优组合 Optimal combination A ₂ B ₃ C ₄ D ₄ E ₄						
K ₂		85.96	83.92	85.84	82.75	80.67							
K ₃		83.42	86.25	83.46	83.75	81.88							
K ₄		77.96	83.84	86.42	83.96	85.30							
R ₂		8.00	7.29	9.17	1.46	4.63							

A: moisture content; B: strain combination; C: molasses addition; D: cellulase addition; E: silage time.

表 4 半干构树青贮有氧稳定性评定正交分析结果
Table 4 Orthogonal analysis for aerobic stability evaluation of semi-dry *Broussonetia papyrifera* silage

类项 Items	代号 No.	因素水平 Factor level					有氧稳定性 Aerobic stability/h
		A	B	C	D	E	
处理组 Treatment group	1	1	1	1	1	1	123.33 ± 2.31i
	2	1	2	2	2	2	201.33 ± 3.06h
	3	1	3	3	3	3	216.00 ± 2.00g
	4	1	4	4	4	4	226.00 ± 2.00f
	5	2	1	2	3	4	236.67 ± 6.11de
	6	2	2	1	4	3	240.67 ± 3.06cd
	7	2	3	4	1	2	246.00 ± 6.00c
	8	2	4	3	2	1	259.33 ± 6.43b
	9	3	1	3	4	2	240.00 ± 2.00d
	10	3	2	4	3	1	266.67 ± 1.15a
	11	3	3	1	2	4	221.33 ± 3.06fg
	12	3	4	2	1	3	230.67 ± 3.06ef
	13	4	1	4	2	3	227.33 ± 3.06ef
	14	4	2	3	1	4	232.00 ± 2.00e
	15	4	3	2	4	1	222.00 ± 2.00f
	16	4	4	1	3	2	212.00 ± 2.00g
平均值 Mean	K ₁	191.67	206.83	199.33	208.00	217.83	最优组合 Optimal combination
	K ₂	245.67	235.17	222.67	227.33	224.83	
	K ₃	239.67	226.33	236.83	232.84	228.67	A ₂ B ₂ C ₄ D ₃ E ₄
	K ₄	223.33	232.00	241.50	232.17	229.00	
R ²		54.00	28.34	42.17	24.84	4.17	

优;在菌种组合水平上,感官评定、CP、ADF 和 NDF 评定中都以 B₄ 水平最优,说明菌种组合中 B₄ 水平最优;在糖蜜含量水平上,感官评定、化学评定、有氧稳定性评定、CP、ADF 和 NDF 评定中,均以 C₄ 水平最优,即糖蜜含量中 C₄ 水平最优;纤维素酶含量中,感官评定、化学评定、CP、ADF 和 NDF 评定中,均以 D₄ 水平最优,即纤维素酶含量中 D₃ 水平最优;青贮时间上,感官评定、化学评定、有氧稳定性评定、CP、ADF 和 NDF 评定均以 E₄ 水平最优,即青贮时间中 E₄ 水平最优。

3 讨论

3.1 不同因素组合对构树青贮感官评定的影响

半干青贮也叫低水分青贮,是在青饲料刈割后

进行预干处理,将原料水分含量降低到 40%~60% 时进行的青贮制作^[13]。现有研究表明,半干青贮能够对腐败菌 (*Spoilage bacteria*)、梭状芽胞杆菌 (*Clostridium*) 形成生理干燥状态,抑制了这些菌种的生长繁殖,但同时也降低了乳酸菌的生长繁殖^[14-15]。因此,本研究中采用构树半干青贮进行研究。结果表明,不进行任何处理组的 pH 最高,显著高于其他处理组,说明半干青贮需要添加乳酸菌以及辅料混合发酵,才能提高青贮品质。进一步通过正交试验的极差分析也发现,随着构树水分的降低,构树青贮的感官评定先升高再降低,这可能是因为低水分的构树原料在抑制腐败菌繁殖的同时,也抑制了乳酸菌的生长,从而抑制了青贮发酵,也证实了前期研究结果^[15]。另外,随着植物乳杆菌比例,糖蜜含

表 5 半干构树青贮营养成分评定正交分析结果
Table 5 Orthogonal analysis for nutrient composition evaluation of semi-dry *Broussonetia papyrifera* silage

类项 Items	代号 No.	因素水平 Factor level					粗蛋白(CP) Crude protein/%	酸性洗涤纤维(ADF) Acid detergent fibers/%	中性洗涤纤维(NDF) Neutral detergent fibers/%
		A	B	C	D	E			
处理组 Treatment group	1	1	1	1	1	1	14.34 ± 1.21c	33.43 ± 1.27ab	47.97 ± 1.40a
	2	1	2	2	2	2	15.90 ± 0.73b	32.57 ± 1.11ab	46.56 ± 0.83b
	3	1	3	3	3	3	16.66 ± 0.40ab	31.27 ± 2.77b	43.33 ± 1.14c
	4	1	4	4	4	4	17.07 ± 0.49a	30.08 ± 2.69b	41.15 ± 1.09d
	5	2	1	2	3	4	16.26 ± 0.62ab	32.74 ± 1.12ab	45.77 ± 0.47b
	6	2	2	1	4	3	16.34 ± 0.25ab	32.44 ± 0.74ab	46.05 ± 0.66b
	7	2	3	4	1	2	16.68 ± 0.20ab	31.81 ± 0.51b	43.75 ± 0.47c
	8	2	4	3	2	1	16.82 ± 0.80ab	32.01 ± 2.05b	43.68 ± 0.80c
	9	3	1	3	4	2	15.93 ± 0.53b	33.13 ± 0.47ab	46.19 ± 0.64b
	10	3	2	4	3	1	16.47 ± 0.66ab	32.90 ± 0.43ab	45.04 ± 0.51bc
	11	3	3	1	2	4	16.04 ± 0.60ab	33.42 ± 0.32ab	46.07 ± 0.67b
	12	3	4	2	1	3	16.43 ± 0.45ab	33.60 ± 1.40ab	44.82 ± 2.33bc
	13	4	1	4	2	3	16.26 ± 0.13ab	34.79 ± 0.44a	46.74 ± 0.88ab
	14	4	2	3	1	4	16.36 ± 0.26ab	34.08 ± 0.39ab	45.54 ± 0.66b
	15	4	3	2	4	1	16.23 ± 0.91ab	33.94 ± 1.34ab	45.67 ± 0.60b
	16	4	4	1	3	2	16.11 ± 0.83ab	34.37 ± 1.85a	46.37 ± 0.88ab
粗蛋白(CP) Crude protein	K ₁	15.99	15.70	15.71	15.95	15.97	最优组合 Optimal combination	A ₂ B ₄ C ₄ D ₄ E ₄	
	K ₂	16.53	16.27	16.21	16.26	16.16			
	K ₃	16.22	16.40	16.44	16.38	16.42			
	K ₄	16.24	16.61	16.62	16.39	16.43			
	R ²	0.54	0.91	0.91	0.44	0.46			
酸性洗涤纤维(ADF) Acid detergent fibers	K ₁	31.84	33.52	33.42	33.23	33.07	最优组合 Optimal combination	A ₁ B ₄ C ₄ D ₄ E ₄	
	K ₂	32.25	33.00	33.21	33.20	32.97			
	K ₃	33.26	32.61	32.62	32.82	33.03			
	K ₄	34.30	32.52	32.40	32.40	32.58			
	R ²	2.46	1.00	1.02	0.83	0.49			
中性洗涤纤维(NDF) Neutral detergent fires	K ₁	44.50	46.67	46.62	45.52	45.59	最优组合 Optimal combination	A ₁ B ₄ C ₄ D ₄ E ₄	
	K ₂	44.81	45.55	45.46	45.51	45.47			
	K ₃	45.53	44.71	44.69	45.13	45.24			
	K ₄	46.08	44.01	44.17	44.77	44.63			
	R ²	1.58	2.66	2.45	0.75	0.96			

量和纤维素酶含量的升高, 构树青贮的感官评价也随之升高。随着青贮时间的增加, 青贮的感官评价先降低后升高。因此, 通过本研究在正交分析中发

现, 糖蜜添加量对构树青贮感官评定的影响最大, 其次依次是菌种比例、青贮时间、纤维素酶添加量和水分含量。

表 6 半干构树青贮正交试验综合平衡法分析结果
Table 6 Analysis of comprehensive balance method in orthogonal experiment of semi-dry *Broussonetia papyrifera* silage

指标 Index	因素 Factor									
	A		B		C		D		E	
	水平 Level	R^2	水平 Level	R^2	水平 Level	R^2	水平 Level	R^2	水平 Level	R^2
感官评定 Sensory evaluation	2	1.83	4	6.00	4	7.01	4	3.33	4	4.08
化学评定 Chemical evaluation	2	8.00	3	7.29	4	9.17	4	1.46	4	4.63
有氧稳定性 Aerobic stability	2	54.00	2	28.34	4	42.17	3	24.84	4	4.17
粗蛋白(CP) Crude protein	2	0.54	4	0.91	4	0.91	4	0.44	4	0.46
酸性洗涤纤维(ADF) Acid detergent fibers	1	2.46	4	1.00	4	1.02	4	0.83	4	0.49
中性洗涤纤维(NDF) Neutral detergent fibers	1	1.58	4	2.66	4	2.45	4	0.75	4	0.96

3.2 不同因素组合对构树青贮化学评定的影响

NH₃-N/TN 的值能够反映青贮饲料中蛋白质与氨基酸的分解程度,比值越大,表明蛋白质分解越多,青贮质量不佳^[16]。在本研究中发现构树半干青贮含水量为 45% 时, NH₃-N/TN 含量较高,这可能是因为随着构树晾晒时间的延长,构树中总氮的含量也随之降低;此外,较低的水分不利于乳酸菌发酵,不能有效的抑制腐败菌的生长繁殖,从而最终导致 NH₃-N/TN 含量升高,该结果与高海娟等^[17]研究结果相似。近期研究证实,青贮过程中添加乳酸菌可通过分解原料的可溶性碳水化合物 (water soluble carbohydrate, WSC) 加快发酵速度,产生乳酸,有效抑制了有害微生物的繁殖,从而减少各种好氧腐败菌繁殖对青贮干物质、粗蛋白质和水溶性碳水化合物的损耗,降低乙酸和丁酸含量^[18]。此外,陈雷等^[19]研究发现,全株玉米 (*Zea mays*) 青贮过程中添加乳酸菌和糖蜜能够显著提高青贮品质,糖蜜和乳酸菌制剂的联合使用加快了乳酸菌生长繁殖,提高了乳酸的生成速度。此外,付锦涛等^[18]研究表明,纤维素酶能将植物细胞壁的多糖分解成能被乳酸菌利用的单糖,葡萄糖和糖蜜均能显著降低了 pH,提高了乳酸含量^[20],因此,在本研究中,乳酸菌、糖蜜和纤维素酶均作为影响发酵的重要因素。从本研究正交试验的极差分析中可以看出,随着植物乳杆菌比例,糖蜜含量的增加,构树青贮的化学评分也随之升高;随着构树水分含量的降低,构树青贮的化学评分先升高再降低;随着青贮时间的增加,构树青贮的化学评分先降低再升高。正交分析说明糖蜜含量对半干构树青贮的影响最大,其次是水分含量、

菌种比例、青贮时间和纤维素酶添加量。

3.3 不同因素组合对构树青贮有氧稳定性的影响

青贮有氧稳定性是指开窖的青贮饲料接触氧气后,微生物利用青贮中剩余的营养成分繁殖发酵,导致青贮温度升高,超过环境温度 2 ℃ 所需要的时间^[21]。因此,延长青贮饲料的有氧稳定时间是保证青贮品质的重要条件。在本研究中,处理 10 的有氧稳定性最高,处理 1 的有氧稳定性最低。Filya 和 Sucu 等^[22]研究发现,不同类型乳酸菌制剂对饲料青贮有氧稳定性有极大的影响,当添加同质型乳酸菌制剂会降低青贮的有氧稳定性,而添加异质型乳酸菌出现相反的结果。另外,添加纤维素酶和糖蜜后发酵底物充足,造成较低 pH 环境,能够抑制腐败菌的增殖,提高有氧稳定性^[22]。本研究中,添加了混合青贮剂后,各处理组的有氧稳定性均显著升高。从正交试验的极差分析中可以看出,随着水分含量的降低,构树半干青贮的有氧稳定性先升高后降低;随着植物乳杆菌比例的增加,布氏乳杆菌比例的降低,构树青贮的有氧稳定性逐渐降低;随着糖蜜含量、纤维素酶含量和青贮时间的增加,构树青贮的有氧稳定性逐渐增加。正交分析说明水分对半干构树青贮有氧稳定性影响最大,其次是糖蜜添加量,菌种比例、纤维素酶添加量和青贮时间。

3.4 不同因素组合对构树青贮营养成分的影响

青贮发酵不仅能够延长饲料的保存时间,还能改善饲料中的营养物质含量,提高其营养价值。有研究证实,乳酸菌在发酵过程中,可以分解饲料中 WSC 产生乳酸,也可利用饲料中的含氮物质合成菌

体蛋白, 提高青贮饲料中 CP 的含量^[23]。也有研究发现, 在青贮中添加纤维素酶能够分解植物细胞壁, 提高纤维素、半纤维素在青贮中的降解速率, 降低原料中 ADF 和 NDF 含量, 同时纤维素降解后产生的物质能够被乳酸菌吸收利用, 既加快了乳酸菌的生长繁殖, 又提高了乳酸菌合成的菌体蛋白含量, 进而提高饲料中 CP 含量^[24]。因此, 在本研究中 CP、ADF 和 NDF 含量作为衡量半干构树青贮营养成分的指标。研究发现在处理 4 组的 CP 含量最高, ADF 和 NDF 含量最低, 说明处理 4 的青贮效果较好。从正交试验的极差分析中可以看出, 随着植物乳杆菌比例、糖蜜含量、纤维素酶含量和青贮时间的增加, 构树青贮中 CP 含量逐渐增加, ADF 和 NDF 含量逐渐降低, 说明菌酶联合制剂对半干构树青贮的营养品质有明显改善效果。正交分析表明,

菌种比例和糖蜜含量对半干构树青贮 CP 的影响最大, 其次是水分含量、青贮时间和纤维素酶添加量; 半干构树青贮水分对青贮 ADF 影响最大, 其次是糖蜜添加量、菌种比例、纤维素酶添加量和青贮时间; 而对半干构树青贮 NDF 影响最大是菌种比例, 其次是糖蜜含量、水分含量、青贮时间和纤维素酶添加量。

4 结论

半干构树青贮最佳工艺参数为: 水分含量 55%, 菌种组合为 4:1:1, 糖蜜添加量为 3%, 纤维素酶添加量为 $9 \times 10^3 \text{ U} \cdot \text{kg}^{-1}$, 青贮时间 60 d。该条件下有氧稳定性为 226.333~245.67 h, 粗蛋白含量为 16.27%~16.62%, ADF 为 32.25%~32.61%, NDF 为 44.17%~44.81%, 本研究确定了杂交构树半干青贮饲料适宜工艺参数, 为构树青贮饲料在畜牧养殖业的应用提供依据。

参考文献 References:

- [1] 王子成, 沈世华. 绿化、用材与饲料兼用型树种: 杂交构树. 科学种养, 2013(6): 54.
WANG Z C, SHEN S H. The versatile tree species that can be used as afforestation, timber and fodder: hybrid *Broussonetia papyrifera*. Scientific Farming, 2013(6): 54.
- [2] 贺春禄, 蒋剑春. 推广杂交构树是中国产业扶贫新途径. 高科技与产业化, 2019(4): 16-20.
HE C L, JIANG J C. A new way for China's industrial poverty alleviation to popularize hybrid *Broussonetia papyrifera*. High Technology and Industrialization, 2019(4): 16-20.
- [3] 屠焰, 刁其玉, 田莉, 周悒, 熊伟. 杂交构树营养成分瘤胃降解特点的研究. 中国畜牧杂志, 2009, 45(11): 38-41.
TU Y, DIAO Q Y, TIAN L, ZHOU Y, XIONG W. Study on rumen degradation characteristics of nutrients components of hybrid *Broussonetia papyrifera*. Chinese Journal of Animal Husbandry, 2009, 45(11): 38-41.
- [4] 黄炎坤, 李杨, 徐思源, 杨朋坤, 刘健, 马伟, 邓红雨. 杂交构树饲料资源的开发利用. 现代牧业, 2020, 4(3): 53-57.
HUANG Y K, LI Y, XU S Y, YANG P K, LIU J, MA W, DENG H Y. Development and utilization of feed resources of hybrid *Broussonetia papyrifera*. Modern Animal Husbandry, 2020, 4(3): 53-57.
- [5] 彭海龙, 江书忠, 罗平成. 构树在养猪生产上的应用研究. 饲料博览, 2018(12): 52-58.
PENG H L, JIANG S Z, LUO P C. Study on the application of *Broussonetia papyrifera* in pig production. Feed Review, 2018(12): 52-58.
- [6] 谭桂华, 刘子琦, 肖华, 曹洋. 构树的饲用价值及应用. 中国饲料, 2017(20): 32-35.
TAN G H, LIU Z Q, XIAO H, CAO Y. The feeding value and application of *Broussonetia papyrifera*. China Feed, 2017(20): 32-35.
- [7] 刘凯丽. 不同含水量及添加剂对杂交构树青贮饲料品质的影响. 太原: 山西农业大学硕士学位论文, 2019.
LIU K L. Effect of different moisture contents and additives on the quality of hybrid tree silage. Master Thesis. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [8] 司丙文, 徐文财, 张小利, 郭江鹏, 刁其玉, 屠焰. 不同添加剂对杂交构树青贮发酵品质的影响. 动物营养学报, 2018, 30(11): 4670-4675.
SI B W, XU W C, ZHANG X L, GUO J P, DIAO Q Y, TU Y. Effect of different additives on the fermentation quality of hybrid tree silage. The Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(11): 4670-4675.
- [9] 刘秦华, 张建国, 卢小良. 乳酸菌添加剂对王草青贮发酵品质及有氧稳定性的影响. 草业学报, 2009, 18(4): 131-137.
LIU Q H, ZHANG G J, LU X L. Effect of lactic acid bacteria additives on the fermentation quality and aerobic stability of king

- grass silage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(4): 131-137.
- [10] 刘玉, 林萌萌, 郑爱华, 刘晓东, 麻小凤. 杂交构树不同高度及不同部位的营养价值比较. 畜牧兽医杂志, 2018, 37(6): 77-78, 81.
LIU Y, LIN M M, ZHENG A H, LIU X H, MA X F. Comparison of the nutritional value of different heights and parts of hybrid *Broussonetia papyrifera*. *Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2018, 37(6): 77-78, 81.
- [11] 王凤欣. 全株玉米与紫花苜蓿拉伸膜裹包混合青贮的研究. 现代畜牧兽医, 2019(10): 25-30.
WANG F X. Study on mixed silage of whole maize and alfalfa wrapped in stretch film. *Modern Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2019(10): 25-30.
- [12] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [13] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术(第3版). 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
ZHANG L Y. *Feed Analysis and Feed Quality Testing Technology (Third Edition)*. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.
- [14] VAN S P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [15] YAN T, PATTERSON D C, GORDON F J, KILPATRICK D J. Effects of bacterial inoculation of unwilted and wilted grass silages. 1. Rumen microbial activity, silage nutrient degradability and digestibility. *The Journal of Agricultural Science*, 1998, 131(1): 103-112.
- [16] 刘华, 邱晶. 半干牧草青贮饲料的调制加工. 饲料博览, 2020(6): 79.
LIU H, QIU J. Preparation and processing of semi-dry forage silage. *Feed Review*, 2020(6): 79.
- [17] 高海娟, 泽东, 孙蕊. 添加剂、含水量及贮藏时间对苜蓿青贮的影响. 中国饲料, 2020(13): 35-39.
GAO H J, ZE D, SUN R. Effects of additives, water content and storage time on alfalfa silage. *Chinese Feed*, 2020(13): 35-39.
- [18] 付锦涛, 王学凯, 倪奎奎, 杨富裕. 添加乳酸菌和糖蜜对全株构树和稻草混合青贮的影响. 草业学报, 2020, 29(4): 121-128.
FU J T, WANG X K, NI K K, YANG F Y. Effect of adding lactic acid bacteria and molasses on mixed silage of whole *Broussonetia papyrifera* and straw. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 121-128.
- [19] 陈雷, 原现军, 郭刚, 闻爱友, 肖慎华, 巴桑, 余成群, 邵涛. 添加乳酸菌制剂和丙酸对全株玉米全混合日粮青贮发酵品质和有氧稳定性的影响. 畜牧兽医学报, 2015, 46(1): 104-110.
CHEN L, YUAN X J, GUO G, WEN A Y, XIAO S H, BA S, YU C Q, SHAO T. Effects of lactobacillus preparation and propionic acid on fermentation quality and aerobic stability of whole corn silage with total mixed diet. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2015, 46(1): 104-110.
- [20] LIMA R, LOUREN OM, RF DÍAZ, CASTRO A, FIEVEZ V. Effect of combined ensiling of sorghum and soybean with or without molasses and lactobacilli on silage quality and in vitro rumen fermentation. *Animal Feed Science & Technology*, 2010, 155(2-4): 122-131.
- [21] 关皓, 郭旭生, 干友民, 白慧娟, 宋珊. 添加剂对不同含水量多花黑麦草青贮发酵品质及有氧稳定性的影响. 草地学报, 2016, 24(3): 669-675.
GUAN H, GUO X S, GAN Y M, BAI H J, SONG S. Effects of additives on fermentation quality and aerobic stability of ryegrass silage with different water content. *Journal of Grassland Science*, 2016, 24(3): 669-675.
- [22] FILYA I, SUCU E. The effect of bacterial inoculants and a chemical preservative on the fermentation and aerobic stability of whole-crop cereal silages. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2007, 68(3): 499-518.
- [23] 黄媛, 代胜, 梁龙飞, 孙文涛, 彭超, 陈超, 郝俊. 不同添加剂对构树青贮饲料发酵品质及微生物多样性的影响. 动物营养学报, 2021, 33(3): 1607-1617.
HUANG Y, DAI S, LIANG L F, SUN W T, PENG C, CHEN C, HAO J. Effects of different additives on fermentation quality and microbial diversity of marsupium silage. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(3): 1607-1617.
- [24] COLOMBATTO D, HERVAS G, YANG W Z, BEAUCHEMIN K A. Effects of enzyme supplementation of a total mixed ration on microbial fermentation in continuous culture, maintained at high and low pH. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(10): 2617-2627.

(责任编辑 魏晓燕)