DOI:10.11686/cyxb2025399 http://cyxb.magtech.com.cn
雷燕, 贺海洋, 汤鲜丽, 等. 乳酸菌和糖蜜对加拿大一枝黄花青贮品质及抗氧化活性的影响. 草业学报, 2026, 35(9): 169－179.
LEI Yan, HE Hai-yang, TANG Xian-li, *et al*. Effects of lactic acid bacteria and molasses on the quality and antioxidant activity of *Solidago canadensis* silage. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 169－179.

乳酸菌和糖蜜对加拿大一枝黄花青贮品质及抗氧化活性的影响

雷燕[1,2],贺海洋[1,2],汤鲜丽[1,2],张志飞[1,2],穆麟[1,2*]
(1. 湖南农业大学农学院,湖南 长沙 410128;2. 岳麓山实验室,湖南 长沙 410128)

摘要:加拿大一枝黄花为菊科的多年生草本植物,不仅生物量大、粗蛋白与可溶性碳水化合物含量较高,还富含多酚、黄酮等活性成分,具有开发为功能型饲料的潜力。本研究以加拿大一枝黄花为青贮原料,探究植物乳杆菌与糖蜜添加对加拿大一枝黄花青贮品质的影响。试验采用双因素完全随机设计,设置4个糖蜜添加梯度(0、0.5%、1.0%、2.0%)和2个植物乳杆菌接种水平(0、10^6 cfu·g^{-1}),青贮30 d后测定其发酵品质、营养品质及抗氧化指标。结果表明,仅添加糖蜜处理中,2.0%糖蜜组(M_2L_0)pH较M_0L_0、$M_{0.5}L_0$、M_1L_0显著降低($P<0.01$);同一糖蜜添加水平下,接种植物乳杆菌降低青贮pH,同时显著降低氨态氮/总氮比值。糖蜜与植物乳杆菌互作显著降低了青贮饲料中中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维的含量,增加了乳酸和水溶性碳水化合物的含量。此外,青贮30 d后加拿大一枝黄花的抗氧化活性与未青贮原料相比显著提升,而2.0%糖蜜和植物乳杆菌复配处理与对照组相比抗氧化活性进一步增强。综合分析表明,添加2.0%糖蜜并接种植物乳杆菌可显著提升青贮饲料的品质与抗氧化活性。本试验为实现加拿大一枝黄花的饲料化利用,解决入侵植物的生态治理提供了新思路。

关键词:加拿大一枝黄花;糖蜜;植物乳杆菌;青贮;青贮品质;抗氧化活性

Effects of lactic acid bacteria and molasses on the quality and antioxidant activity of *Solidago canadensis* silage

LEI Yan[1,2], HE Hai-yang[1,2], TANG Xian-li[1,2], ZHANG Zhi-fei[1,2], MU Lin[1,2*]
1. *College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha* 410128, *China*; 2. *Yuelu Mountain Laboratory, Changsha* 410128, *China*

Abstract: *Solidago canadensis*, a perennial herbaceous plant of the Asteraceae, exhibits significant potential for development as a functional feed due to its high biomass, and relatively high crude protein and water-soluble carbohydrate contents, as well as its abundance of bioactive compounds such as polyphenols and flavonoids. This study investigated the effects of *Lactobacillus plantarum* inoculation and molasses addition on the ensiling quality of *S. canadensis*. A two-factor completely randomized design was adopted, with four molasses addition levels (0, 0.5%, 1.0%, 2.0%) and without or with *L. plantarum* inoculation (0, 10^6 cfu·g^{-1}). After ensiling for 30 days, nutritional composition, fermentation quality, and antioxidant activity were evaluated. The results indicated that among treatments with molasses alone, the pH of the 2.0% molasses group (M_2L_0) was extremely significantly

收稿日期:2025-09-30;改回日期:2025-11-13
基金项目:国家重点研发计划课题(2024YFD1301204)和国家自然科学基金(32503287)资助。
作者简介:雷燕(2001－),女,云南丽江人,在读硕士。E-mail: 2457884562@qq.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: linmu331@outlook.com

lower than those of M_0L_0, $M_{0.5}L_0$ and M_1L_0 ($P<0.01$). At the same molasses addition level, inoculation with *L. plantarum* reduced silage pH and significantly decreased the ratio of ammonia nitrogen to total nitrogen. The combined addition of molasses and *L. plantarum* significantly decreased the contents of neutral detergent fiber and acid detergent fiber, while increasing the contents of lactic acid and water-soluble carbohydrates. Furthermore, after ensiling for 30 days, the antioxidant capacity of *S. canadensis* was significantly enhanced compared with the raw material before ensiling, and the combination of 2.0% molasses and *L. plantarum* further increased the antioxidant activity compared with the control treatment. Multivariate analysis showed that adding 2.0% molasses and *L. plantarum* significantly improved the quality and antioxidant activity of the silage. This study provides new insights for utilizing *S. canadensis* as a livestock feed and offers a novel approach for the ecological management of this invasive plant species.

Key words: *Solidago canadensis*; molasses; *Lactobacillus plantarum*; ensiling; silage quality; antioxidant activity

近年来,人们对畜产品的需求持续增长,传统饲料受耕地减少和成本增加等因素制约,导致供需矛盾日益突出[1]。开发非常规饲料资源已成为保障畜牧业可持续发展的迫切需求。值得注意的是,中华人民共和国农业农村部公告第1773号[2]对《饲料原料目录》进行制定,将车前草(*Plantago asiatica*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、泽兰(*Lycopus lucidus* var. *hirtus*)等可饲用野生资源正式纳入目录。在此背景下,利用生物量大、繁殖迅速的野生资源作为非常规饲料原料,不仅能够拓宽饲料来源、降低饲养成本,同时能够实现生态治理与资源化利用的协同效益。

加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)是菊科多年生草本植物,原产于加拿大和美国,于1935年作为观赏植物被引入中国,凭借强大的生态适应性与繁殖能力[3-4],侵占本地植物生存空间,破坏原有生态景观与农业生产的稳定性,已成为亟待治理的恶性杂草,被列入《中国外来入侵物种名单》[5]。加拿大一枝黄花不仅生物量大、生长迅速,从营养成分来看,其在营养生长期的粗蛋白和可溶性碳水化合物含量较高,已被应用于草粉颗粒饲养长毛兔[6],并可替代常规牧草添加于湖羊日粮,达到增重效果[7]。此外,该植物富含多酚、黄酮等生物活性成分,具备开发功能型饲料的潜力[8]。为实现其资源化利用,生物发酵是一条有效路径,可通过微生物的酶解与生物转化作用,降解抗营养因子,诱导植物活性物质发生结构转化并产生新的代谢产物,从而显著增强其功能特性[9]。在各类发酵方式中,青贮利用乳酸菌快速降低pH,能有效延长饲草的贮存期并减少营养损失[10]。前人研究证实,青贮技术能成功应用于艾草(*Artemisia argyi*)[11]、甜叶菊(*Stevia rebaudiana*)[12]等菊科植物,有效促进酚类、黄酮类等抗氧化成分的释放,显著增强其抗氧化活性。因此,本研究推测将加拿大一枝黄花进行青贮具备开发为优质功能型青贮饲料的潜力。

乳酸菌和糖蜜作为发酵促进型添加剂,常被用于青贮饲料生产中,糖蜜为乳酸菌生长繁殖提供发酵底物,乳酸菌可促进发酵以快速降低pH,抑制霉菌等有害微生物活动,减少青贮饲料的营养物质损失[13]。因此,本试验以湖南洞庭湖地区优势野生物种加拿大一枝黄花为研究对象,将其作为青贮原料,通过外源添加乳酸菌与糖蜜,探究其对青贮品质和抗氧化活性的影响,旨在筛选出可显著提升青贮效果的适宜添加剂组合。本研究不仅可为加拿大一枝黄花的资源化高值利用提供理论依据,也可为入侵植物的绿色防控与生态治理开辟新途径,对促进区域生态安全与农业可持续发展具有重要的科学与实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在湖南省岳阳市中洲牧草基地开展,研究所用的加拿大一枝黄花原料取自岳阳市中洲乡洞庭湖区(29°24′ N,113°07′ E),于2024年5月29日营养生长期进行收割,留茬高度5 cm。

1.2 试验设计

本试验采取双因素完全随机设计，以鲜重为标准，将糖蜜添加梯度分为4个处理：0(M_0)、0.5%($M_{0.5}$)、1.0%(M_1)、2.0%(M_2)，植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)接种水平分为2个处理：0(L_0)、10^6 cfu·g^{-1}(LP)，共8个处理，各处理设5个重复。当天刈割后的加拿大一枝黄花，切碎至1～2 cm，将糖蜜(全糖约48%，锤度约87，南宁东亚糖业集团)和植物乳杆菌(活菌数≥1.0×10^{11} cfu·g^{-1}，台湾亚芯生物科技有限公司，成分含麦芽糊精)溶解于无菌水中，喷洒20 mL·kg^{-1}细雾状液体于待青贮材料表面。混匀样品后取500 g装入聚乙烯厌氧袋(20 cm×30 cm)中，经真空封口后置于室温(22～29 ℃)保存。青贮发酵30 d后取样评估发酵品质、营养品质及抗氧化活性。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生物产量分析　株高：加拿大一枝黄花刈割前，在小区内随机选取20株，测量地面到植物正常生长最高处的距离。密度与鲜草产量和干草产量：避开小区边缘的位置，随机选取3个1 m^2样方区域，统计植株数量以计算密度，将样方内材料进行刈割，现场分别称取总鲜重。而后将鲜样于65 ℃烘箱(GFL-620，天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司)中烘干后称重可测得干重。

1.3.2 发酵品质分析　取青贮饲料样品20 g，加入180 mL超纯水，放入4 ℃冰箱静置24 h，先后通过4层纱布和定性滤纸过滤，测定pH(雷磁PHS-3C型pH测试仪，上海仪电科学仪器股份有限公司)。滤液经离心处理(9500 r·min^{-1}，15 min，4 ℃)后获得上清液。取部分上清液用于氨态氮(ammonia-nitrogen，NH_3-N)的测定(采用苯酚－次氯酸盐反应)[14]，剩余部分经0.22 μm滤膜过滤后，用于评估乳酸(lactic acid)、乙酸(acetic acid)、丙酸(propionic acid)和丁酸(butyric acid)含量[使用安捷伦1260 Infinity Ⅱ高效液相色谱系统；色谱柱：Agilent TC-C18，250.0 mm×4.6 mm×5.0 μm；进样量为20 μL；柱温为50 ℃；检测波长为210 nm；流动相为甲醇(B)和0.01 mol·L^{-1}磷酸二氢钾(D)]；设置梯度洗脱为0：00时，B∶D＝3∶97；10：00时，B∶D＝10∶90[15]。

1.3.3 营养品质分析　青贮30 d后将收集的样品置于烘箱，65 ℃烘干至恒重，用于干物质(dry matter，DM)含量分析。采用蒽酮-硫酸比色法测定水溶性碳水化合物(water soluble carbohydrate，WSC)含量[16]；采用凯氏定氮法(TM8400型全自动凯氏定氮仪，丹麦福斯集团公司)测定总氮(total nitrogen，TN)含量，通过公式计算得出粗蛋白(crude protein，CP)含量(CP＝TN×6.25)[14]；采用浸提法(XT10型脂肪分析仪，美国ANKOM Technology)测定粗脂肪(ether extract，EE)含量；采用范氏(Van Soest)法(A220型半自动纤维分析仪，美国ANKOM Technology)测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber，NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber，ADF)、酸性洗涤木质素(acid detergent lignin，ADL)含量；采用高温灼烧法(LX3611型马弗炉，天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司)测定粗灰分(crude ash，Ash)含量[17]；半纤维素(hemicellulase，HC)含量为NDF与ADF的差值。

1.3.4 抗氧化活性分析　准确称取1.0 g经0.425 mm筛分出的烘干样品至50 mL离心管内，加入20 mL 70%乙醇，随后将离心管置于摇床中，于50 ℃、300 r·min^{-1}条件下振荡提取1 h。提取结束后，以6000 r·min^{-1}离心10 min，收集上清液。按上述相同提取条件重复提取1次，离心并收集上清液，最终合并两次收集的上清液，充分混匀后于－20 ℃冷冻保存备用[18]。

自由基1，1-二苯基-2-三硝基苯肼(1，1-diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH)清除活性的测定，参考张婧菲等[19]提供的方法并进行适当调整。使用无水乙醇配制0.5 mg·mL^{-1} 6-羟基-2，5，7，8-四甲基色烷-2-羧酸(6-hydroxy-2，5，7，8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid，Trolox)标准溶液(S30953，上海源叶生物科技有限公司)和0.1 mmol·L^{-1} DPPH自由基溶液(S30629，上海源叶生物科技有限公司)，4 ℃避光存放。200 μL提取液或Trolox标准溶液(0、4.950、9.804、14.563、19.231、23.810、28.302、32.710 μg·mL^{-1})加入600 μL DPPH自由基溶液，置于恒温摇床内25 ℃避光反应30 min，在517 nm处读取溶液吸光度。清除活性表示为trolox当量(g trolox·kg^{-1} DM)。

根据总抗氧化能力检测试剂盒(编号S0119，上海碧云天生物技术有限公司)的说明测定2，2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2，2'-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid，ABTS)自由基清除活性。将稀释后得到的ABTS工作液避光存放。10 μL提取液或Trolox标准溶液(0、0.036、0.071、0.134、0.191、0.242、0.289

mg·mL^{-1})加入200 μL ABTS工作液,室温下避光孵育5 min后,在734 nm处读取溶液吸光度。清除活性表示为trolox当量(g trolox·kg^{-1} DM)。

铁离子还原能力(ferric reducing ability of plasma,FRAP)使用总抗氧化能力检测试剂盒(编号S0116,上海碧云天生物技术有限公司)测定。将配置好的工作液放置在37 ℃下孵育。5 μL提取液或Trolox标准溶液(0、0.037、0.073、0.142、0.175、0.207、0.268 mg·mL^{-1})与180 μL FRAP工作液混合,放入酶标仪(BioTek Epoch 2,美国安捷伦科技)中,振荡30 s后,37 ℃孵育5 min,在593 nm处读取溶液吸光度。还原力表示为trolox当量(g trolox·kg^{-1} DM)。

1.4 数据处理

采用Excel 2019软件进行数据整理,SPSS 27.0软件进行方差分析,使用一般线性模型分析植物乳杆菌和糖蜜之间的交互作用,通过单因素ANOVA检验,采用邓肯法进行组间比较,结果表示为"平均值±标准差",$P<0.05$表示具有统计学差异。采用灰色关联度分析评价最佳处理[13]。

2 结果与分析

2.1 加拿大一枝黄花的生物产量与营养成分

对洞庭湖区加拿大一枝黄花的生物产量测定结果显示:其植株密度为124株·m^{-2},平均高度为111.96 cm,鲜草产量为2.28 kg·m^{-2},折合干草产量为0.73 kg·m^{-2},干鲜比约为32%。样本间性状差异较小,群体生长状态较为均一。加拿大一枝黄花DM含量为36.83%FW,即含水量为63.17%FW,其CP、WSC、NDF、ADF、HC、EE及ADL含量分别为11.64%、7.45%、64.03%、46.74%、16.85%、6.02%和9.08%DM(表1)。

表1 加拿大一枝黄花原料的营养成分

Table 1 The nutritional composition of *S. canadensis* raw materials

干物质 Dry matter (%FW)	粗蛋白 Crude protein (%DM)	可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate (%DM)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%DM)	酸性洗涤木质素 Acid detergent lignin (%DM)	半纤维素 Hemicellulase (%DM)	粗脂肪 Ether extract (%DM)
36.83±0.57	11.64±0.15	7.45±0.18	64.03±0.45	46.74±0.45	9.08±0.48	16.85±0.03	6.02±0.10

FW: 鲜重Fresh weight; DM: 干物质Dry matter. 下同The same below.

2.2 乳酸菌和糖蜜对加拿大一枝黄花青贮发酵品质的影响

青贮饲料的pH受糖蜜与植物乳杆菌添加的显著影响($P<0.01$)。仅添加糖蜜条件下,除1%糖蜜单独添加(M_1L_0)外,其余糖蜜处理组pH较对照组(M_0L_0)均显著降低;在同等糖蜜水平下,接种植物乳杆菌的处理组pH均低于未接种组,M_2LP处理组的pH最低。两种添加剂处理的乳酸含量均显著升高,与未添加植物乳杆菌处理组相比,添加植物乳杆菌能够增加乳酸含量,其中$M_{0.5}LP$极显著增加了乳酸含量($P<0.001$),M_2LP的乳酸含量显著高于其他处理组。单独添加糖蜜处理之间的乙酸含量无显著差异,植物乳杆菌添加使得乙酸含量显著降低。同一糖蜜添加水平下,接种植物乳杆菌各组氨态氮/总氮均显著低于未接种处理组($P<0.01$)。此外,各处理组中均未检测出丁酸(表2)。

2.3 乳酸菌和糖蜜对加拿大一枝黄花青贮营养品质的影响

单独添加0.5%和1.0%糖蜜与未添加糖蜜相比,均显著提高了青贮饲料的CP含量。糖蜜的添加显著提高了WSC含量,且随着添加量的增加,WSC含量呈现显著上升趋势($P<0.05$)。糖蜜与植物乳杆菌的协同作用对各处理组的CP、WSC、EE、NDF、ADF和HC含量有极显著影响($P<0.01$)。与M_0L_0相比,单独添加糖蜜显著降低了各处理组的NDF和ADF含量。此外,复配添加糖蜜和植物乳杆菌的处理组,其NDF和ADF含量也显著低于单独添加植物乳杆菌的处理组(M_0LP,表3)。

表 2　加拿大一枝黄花青贮饲料的发酵品质

Table 2　The fermentation quality of *S. canadensis* silage

指标 Index	处理 Treatment	M_0	$M_{0.5}$	M_1	M_2	*P* 值 *P* value		
						L	M	L×M
pH	L_0	4.18±0.03a*	4.05±0.06b	4.12±0.02ab***	3.90±0.01c*	<0.01	<0.01	0.08
	LP	4.08±0.02a	3.92±0.03b	3.87±0.01bc	3.82±0.04c			
乳酸 Lactic acid（%DM）	L_0	3.68±0.11b	4.17±0.04b***	4.15±0.30b	5.03±0.33a	<0.01	<0.01	0.27
	LP	3.92±0.09c	4.91±0.06b	4.65±0.09b	5.73±0.24a			
乙酸 Acetic acid（%DM）	L_0	0.82±0.07a**	0.74±0.14a*	0.67±0.03a***	0.65±0.02a***	<0.05	<0.01	0.59
	LP	0.54±0.01a	0.37±0.03bc	0.32±0.02c	0.38±0.02b			
丙酸 Propionic acid（%DM）	L_0	0.13±0.01b***	0.12±0.01b**	0.15±0.01b	0.25±0.01a	<0.05	<0.01	0.18
	LP	0.09±0.01b	0.09±0.01b	0.10±0.05b	0.26±0.01a			
丁酸 Butyric acid（%DM）	L_0	ND	ND	ND	ND	—	—	—
	LP	ND	ND	ND	ND			
氨态氮/总氮 Ammonia-N/total-N	L_0	2.80±0.15ab***	2.70±0.25ab**	3.07±0.21a***	2.34±0.17b***	<0.01	<0.01	0.06
	LP	1.42±0.15a	0.61±0.02c	0.89±0.05b	0.75±0.10bc			

ND：未检测到 Not detected；—：未分析此数据 This data was not analyzed. L_0：未添加植物乳杆菌 No *L. plantarum* addition；LP：添加植物乳杆菌 With *L. plantarum* addition；M_0～M_2：糖蜜添加水平 Molasses addition level（0，0.5%，1.0%，2.0%）. L：植物乳杆菌对发酵品质的影响 Effect of *L. plantarum* on fermentation quality；M：糖蜜对发酵品质的影响 Effect of molasses on fermentation quality；L×M：植物乳杆菌与糖蜜对发酵品质的交互作用 Interaction effect between *L. plantarum* and molasses on fermentation quality. 不同小写字母表示相同植物乳杆菌处理不同糖蜜添加水平下差异显著（$P<0.05$），星号表示相同糖蜜添加水平不同植物乳杆菌处理下差异显著（***：$P<0.001$；**：$P<0.01$；*：$P<0.05$）。下同。Different lowercase letters indicate significant differences under the same *L. plantarum* treatment with different molasses addition levels（$P<0.05$），and asterisks indicate significant differences under the same molasses addition level with different *L. plantarum* treatments. The same below.

表 3　加拿大一枝黄花青贮饲料的营养品质

Table 3　The nutritional quality of *S. canadensis* silage

指标 Index	处理 Treatment	M_0	$M_{0.5}$	M_1	M_2	*P* 值 *P* value		
						L	M	L×M
干物质 Dry matter（%FW）	L_0	33.36±0.53c	33.69±0.34bc	35.09±1.19ab	35.58±0.50a	>0.05	>0.05	>0.05
	LP	34.96±1.85a	35.39±1.90a	36.37±1.62a	36.31±0.65a			
粗蛋白 Crude protein（%DM）	L_0	12.11±0.03c***	12.80±0.06b***	13.19±0.03a***	12.18±0.18c	<0.01	<0.01	<0.01
	LP	13.18±0.12a	11.75±0.09c	12.04±0.06b	12.18±0.05b			
水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate（%DM）	L_0	1.30±0.07c**	1.66±0.02b*	1.62±0.07b***	2.00±0.04a**	<0.01	<0.01	<0.01
	LP	1.86±0.08c	2.23±0.13b	2.37±0.10b	2.65±0.14a			
粗脂肪 Ether extract（%DM）	L_0	5.81±0.02b	6.08±0.11a	6.15±0.02a	5.70±0.11b	>0.05	<0.01	<0.01
	LP	6.28±0.12a	5.68±0.06b	5.78±0.09b	5.59±0.14b			
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber（%DM）	L_0	65.02±0.39a***	53.55±1.05b***	50.52±1.76b**	54.00±0.42b**	<0.01	<0.01	<0.01
	LP	63.78±1.20a	61.77±0.68b	59.30±0.46c	56.40±0.41d			
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber（%DM）	L_0	49.04±0.54a***	40.05±0.77bc***	37.08±1.36c**	40.66±0.56b	<0.05	<0.01	<0.01
	LP	49.54±1.28a	46.43±0.69b	44.18±0.47c	42.22±0.07d			
酸性洗涤木质素 Acid detergent lignin（%DM）	L_0	10.21±1.05a	7.18±1.10c	8.13±0.10bc*	9.15±0.27ab	>0.05	>0.05	>0.05
	LP	9.35±0.07a	8.76±2.24a	10.87±1.20a	9.64±1.27a			
半纤维素 Hemicellulase（%DM）	L_0	15.40±0.10a***	13.08±0.29b**	12.88±0.58b*	12.91±0.35b	<0.05	<0.01	<0.01
	LP	13.80±0.24b	14.78±0.13a	14.41±0.26ab	13.71±0.46b			

2.4 乳酸菌和糖蜜对加拿大一枝黄花青贮品质影响的综合评价

为全面评价乳酸菌与糖蜜添加对加拿大一枝黄花青贮品质的影响，将发酵品质和营养品质两个核心维度进行综合分析。由双因素方差分析结果可知，乳酸菌和糖蜜对CP、WSC、NDF、ADF、EE存在显著的交互作用(表3)。结合表2结果，进一步筛选出发酵品质关键指标(pH、乳酸、乙酸、NH_3-N/TN)，用于灰色关联度分析。采用判断矩阵法并结合公式计算，确定各评价指标的权重如下：营养品质[ω(CP)=0.109，ω(NDF)=0.113，ω(ADF)=0.112，ω(WSC)=0.105，ω(EE)=0.132]与发酵指标[ω(pH)=0.111，ω(NH_3-N/TN)=0.113，ω(乳酸)=0.098，ω(乙酸)=0.107]。基于上述权重，通过灰色关联分析法对8个处理组的青贮综合品质进行分析，加权排名结果(表4)显示：所有处理组中，青贮综合品质排名前3的处理组依次为：M_2LP、M_1LP、M_1L_0。

表4 各处理加权关联度及其排名

Table 4 Weighted correlation degree and ranking of each treatment group

处理 Treatment	加权关联度 Weighted correlation degree	排名 Ranking
M_2LP	0.872	1
M_1LP	0.859	2
M_1L_0	0.843	3
M_0LP	0.826	4
M_0L_0	0.801	5
M_2L_0	0.785	6
$M_{0.5}LP$	0.763	7
$M_{0.5}L_0$	0.741	8

2.5 加拿大一枝黄花青贮前后的抗氧化活性分析

青贮料处理组M_0L_0的铁离子还原能力、DPPH清除率及ABTS清除率均显著高于原料，且M_2LP处理组的铁离子还原能力、DPPH清除率较M_0L_0显著升高。总体来看，加拿大一枝黄花青贮后的抗氧化活性相较于未青贮原料显著提升，其中2.0%糖蜜与植物乳杆菌复配处理组的抗氧化活性进一步增强，优于M_0L_0(表5)。

表5 加拿大一枝黄花青贮前后的抗氧化活性分析

Table 5 Analysis of antioxidant activity before and after silage of *S. canadensis*

指标 Index	原料 Raw material	M_0L_0	M_2LP
铁离子还原能力 Ferric reducing antioxidant power (g trolox·kg^{-1} DM)	13.52±0.70c	59.34±4.77b	67.61±0.74a
DPPH清除率 Scavenging rate of DPPH (g trolox·kg^{-1} DM)	4.98±0.48c	10.06±0.28b	23.86±0.82a
ABTS清除率 Scavenging rate of ABTS (g trolox·kg^{-1} DM)	16.77±1.62c	51.68±0.59a	46.31±0.89b

DPPH：1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl；ABTS：2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 2,2'-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid. 不同小写字母表示相同抗氧化指标在不同处理下差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences under the same antioxidant index with different treatments ($P<0.05$).

3 讨论

本研究选择湖南洞庭湖区生物量大的野生资源作为青贮原料。加拿大一枝黄花的入侵性强，高密度分布，表现出较强的垂直生长优势[20]。鲜重或干重是饲草饲用价值的重要衡量指标之一[21]。本研究调查发现，处于营养生长时期的加拿大一枝黄花茎秆纤细，但株高和鲜草产量大，它的高密度高产适合集中收割。本试验中，株高约112 cm的加拿大一枝黄花，其含水量达63%，可溶性糖含量为7%(显著高于3%)，这类理化特性不仅为乳酸菌提供了良好的生长环境，也使其充分满足了青贮发酵所需的关键前提条件[22]。加拿大一枝黄花的营养品质随生长期变化显著，在4—9月，含水量由约84%降至约70%，粗蛋白含量由约22%降至约9%[6]，粗纤维含量逐渐增加，为10%～32%[8]，试验中采集于5月的加拿大一枝黄花处于营养生长时期，其饲用价值较高。

青贮饲料在厌氧发酵的过程中，pH值是影响饲料发酵效果的关键因素[23]。本研究各糖蜜、植物乳杆菌复合处理组青贮pH均低于对照组，且全部降至4.2以下；接种植物乳杆菌能够提升青贮乳酸含量。pH下降主要归因于乳酸积累，而乳酸的产生与乳酸菌代谢密切相关[24]。在厌氧条件下，植物乳杆菌消耗糖原，产生乳酸[25]，而糖蜜中富含葡萄糖与果糖，为植物乳杆菌提供充足碳源，促进乳酸生成，有效抑制好氧细菌繁殖，使pH快速降低。联

合接种 10^5 cfu·g^{-1}植物乳杆菌和2%糖蜜可促进串叶松香草(*Silphium perfoliatum*)青贮发酵,显著降低pH并增加乳酸含量,本试验结果与其相似[26]。单独添加糖蜜对乙酸的产生无显著影响,而植物乳杆菌添加使得乙酸含量显著降低,这可能与同型乳酸菌发酵占主导有关。本试验所添加的植物乳杆菌为兼性异型发酵乳酸菌,在发酵前期可溶性碳水化合物充足的情况下,以同型乳酸发酵为主,消耗一分子的葡萄糖,产生两分子的乳酸,从而抑制了产生乙酸的异型发酵乳酸菌或乳酸异化过程,最终导致乙酸含量下降[27]。青贮去穗玉米(*Zea mays*)秸秆的试验中,添加植物乳杆菌和3%糖蜜也显著降低了乙酸含量[28]。NH_3-N/TN反映青贮饲料中蛋白质和氨基酸被微生物分解的程度,优质青贮饲料中NH_3-N/TN应低于10%[29]。本研究中所有处理组的NH_3-N/TN均低于10%,符合优质青贮饲料标准。在加拿大一枝黄花青贮过程中,糖蜜与植物乳杆菌复配添加显著降低了NH_3-N/TN,表明糖蜜和植物乳杆菌能够使得乳酸菌占主导地位,快速降低pH,抑制蛋白水解菌和植物酶的活性,减少细菌对蛋白质和氨基酸的降解,从而降低NH_3-N生成[30]。因此,本试验中较低pH值的糖蜜与植物乳杆菌复配组均表现出更低的NH_3-N/TN,这与已有研究结果一致。添加 10^6 cfu·g^{-1}植物乳杆菌与2%糖蜜青贮花生(*Arachis hypogaea*)秧,其复配处理不仅pH低于糖蜜或植物乳杆菌单独添加组,NH_3-N/TN也显著低于各单独处理[31]。此外,各处理组中均未检测出丁酸,这表明青贮发酵过程与添加剂的协同作用可促使体系pH降低,梭菌等有害微生物繁殖受到抑制,从根源上避免丁酸的生成,最终改善加拿大一枝黄花的青贮发酵品质[32-33]。

0.5%、1.0%糖蜜可有效保留加拿大一枝黄花CP含量,而2.0%糖蜜的添加效果不佳,不同于鲜食玉米秸秆青贮中添加2%~4%糖蜜能显著提高CP含量[34],这一现象表明糖蜜作用的最佳剂量具有原料差异性。造成此现象的原因可能与青贮体系的氮转化平衡有关。尽管较低pH(2.0%糖蜜添加组)能抑制蛋白降解,但本研究及团花(*Neolamarckia cadamba*)叶青贮的结果均显示其并未带来较高的CP含量[35]。由此推测酸性环境能有效抑制蛋白降解,但同时也可能限制了包括微生物蛋白再合成在内的维持氮转化功能的微生物群落。添加糖蜜后可显著提高WSC含量,同时添加植物乳杆菌效果更显著。这是由于糖蜜能够为乳酸菌提供更多发酵底物,同时接种乳酸菌,使pH快速降低,抑制好氧微生物活动,从而减少对WSC的消耗[36]。与未添加的空白对照相比,添加糖蜜或糖蜜与植物乳杆菌复配均显著降低了青贮饲料的NDF和ADF含量,这与添加5%糖蜜和 10^5 cfu·g^{-1}植物乳杆菌青贮啤酒花(*Humulus lupulus*)枝叶的结果相似[37],共同证实外源添加剂可有效促进青贮发酵。NDF和ADF含量的减少主要归因于糖蜜添加所产生的复合效应:一方面,糖蜜作为关键底物,通过激活天然微生物群落的酶解活性并协同有机酸作用,实现了对纤维结构的生物降解[38-39];另一方面,糖蜜自身非纤维成分也对最终指标产生了营养稀释效应[40]。饲喂试验进一步证明,加拿大一枝黄花是优质的饲料资源。在同一营养生长期,加拿大一枝黄花作为长毛兔饲料表现出良好的适口性,其CP平均含量约为15%,高于本试验青贮饲料(约12%),而EE含量约为4%,低于青贮饲料(约6%),使用该草粉替代10%~20%苜蓿(*Medicago sativa*)草粉饲喂长毛兔后,对产毛量和增重未产生显著负面影响[6]。另有试验表明,即便使用CP含量仅为2.24%的加拿大一枝黄花鲜饲湖羊20 d,平均每只仍可增重1.9 kg[7]。由此表明本试验中青贮后的加拿大一枝黄花具备饲用可行性,且因CP与EE含量较高,饲喂效果可能更佳。综上所述,加拿大一枝黄花经青贮处理,尤其在添加糖蜜和植物乳杆菌的条件下,能够有效保存饲料中的CP和WSC,降低NDF与ADF含量,提高饲料营养价值,并可安全用于动物日粮,对生产性能无不利影响,具有良好的饲用可行性和经济价值。

在畜牧生产中,氧化应激不仅会降低动物肠道微生物的多样性,还可能诱发炎症反应,严重危害动物健康[41]。新鲜加拿大一枝黄花本身具备一定的抗氧化潜力,试验中表现出铁离子还原能力以及DPPH和ABTS自由基清除活性[42]。经植物乳杆菌与2.0%糖蜜复配青贮处理后,其抗氧化活性较对照组显著增强,且较原料也有所提升,表明青贮发酵过程能够进一步提高加拿大一枝黄花的抗氧化活性,并在糖蜜与植物乳杆菌的协同作用下强化该效果。接种*L. plantarum*-YX20菌株可显著提升苜蓿青贮的ABTS、DPPH自由基清除能力及总抗氧化能力,且青贮90 d时的抗氧化性能优于第1天,本试验结论与其一致[43]。发酵作为一种利用微生物降解大分子并促进活性物质转化的技术手段[44],在多项研究中被证实可增强抗氧化活性。例如,利用黑曲霉固态发酵粉葛(*Pueraria thomsonii*)副产物,可通过其代谢作用释放结合态酚类物质,从而提高提取液的抗氧化能力[45-46]。植物

乳杆菌凭借其较强的环境适应能力和多样化的代谢功能，在发酵过程中发挥重要作用，例如其在金银花(*Lonicera japonica*)发酵过程中可提高多酚类物质(如木犀草素)的含量，该物质与DPPH和ABTS清除活性呈正相关，且显著高于对照组[47]。加拿大一枝黄花富含萜类、黄酮和酚类等活性成分，青贮后抗氧化能力的提升可能源于微生物(尤其是乳酸菌)对大分子活性物质的分解作用，通过酚类物质等代谢途径促使抗氧化活性物质释放，从而增强青贮饲料的抗氧化活性。

4 结论

糖蜜与植物乳杆菌的协同作用可有效促进加拿大一枝黄花青贮的发酵进程，表现为发酵终点pH、NDF和ADF含量及NH_3-N/TN显著降低，乳酸和WSC含量显著提高；其中，2.0%糖蜜与植物乳杆菌复配处理的效果最为显著。此外，经30 d青贮后，加拿大一枝黄花的抗氧化活性较未青贮原料显著增强，而2.0%糖蜜和植物乳杆菌复配处理组的抗氧化活性进一步增强，优于对照组。

参考文献 References：

[1] Wang J T, Sa D W, Shao L H, *et al*. Optimizing agricultural structure and accelerating the development of the forage industry. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 211－220.
王加亭，撒多文，邵麟惠，等. 调整优化农业结构，加快饲草产业发展. 草业学报，2025，34(2)：211－220.

[2] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement No. 1773 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. (2012-06-01)[2025-08-26]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201206/t20120614_2758749.htm.
中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业农村部公告第1773号. (2012-06-01)[2025-08-26]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201206/t20120614_2758749.htm.

[3] Tian L L. Breeding characteristics and allelopathy of *Solidago canadensis* after being introduced to arid area in Xinjiang. Shihezi: Shihezi University, 2013.
田丽丽. 加拿大一枝黄花引种新疆干旱区后繁殖习性与化感潜力的研究. 石河子：石河子大学，2013.

[4] Zhang T, Du W, Lu Z J, *et al*. Analysis of the suitable habitat of *Solidago canadensis* L. based on different geospatial and temporal distribution data. Plant Quarantine, 2024, 38(6): 48－54.
张婷，杜伟，陆占军，等. 基于不同时空的地理分布数据对加拿大一枝黄花的适生区分析研究. 植物检疫，2024，38(6)：48－54.

[5] Wei D D, Liu J Y, Xu M M, *et al*. Research progress and resource utilization strategy of invasive alien plant of *Solidago canadensis*. Modern Chinese Medicine, 2023, 25(9): 1853－1865.
魏丹丹，刘嘉艺，徐明明，等. 外来入侵植物加拿大一枝黄花的研究进展与资源化利用策略. 中国现代中药，2023，25(9)：1853－1865.

[6] Xu J W, Chen S F, Jiang Y Q, *et al*. Effect experiment of *Solidago canadensis* as feed for long-haired rabbits. Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary, 2009, 34(6): 3－5.
许建伟，陈世芳，蒋永清，等. 加拿大一枝黄花饲喂长毛兔的效果试验. 浙江畜牧兽医，2009，34(6)：3－5.

[7] Chen Y G, Zhou H G, Wang S L. Brief report on the experiment of feeding *Solidago canadensis* L. to Hu sheep. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2011(2): 76.
陈益乖，周华光，王仕伦. 加拿大一枝黄花喂养湖羊试验简报. 上海农业科技，2011(2)：76.

[8] Ju H X. Study on feeding nutrient composition of *Solidago canadensis* L. in different periods. Feed Research, 2019, 42(8): 37－39.
居瀚寻. 不同时期加拿大一枝黄花饲用营养成分研究. 饲料研究，2019，42(8)：37－39.

[9] Liang Z J, Huang Y Z, Zhang P Z, *et al*. Impact of fermentation on the structure and antioxidant activity of selective phenolic compounds. Food Bioscience, 2023, 56: 103147.

[10] Queiroz O C M, Arriola K G, Daniel J L P, *et al*. Effects of 8 chemical and bacterial additives on the quality of corn silage. Journal of Dairy Science, 2013, 96(9): 5836－5843.

[11] Nie A Z. Effects of fermented *Artemisia argyi* on the growth performance and intestinal health of Hongyu roosters. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025.

聂阿真. 发酵艾草对红玉公鸡生长性能与肠道健康的影响. 郑州：河南工业大学，2025.

[12] Wu L J, Ou X, Cao X H, *et al*. Effects of mixed ratio of forage mulberry and stevia residue on silage quality and microbial diversity. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(12): 276－281.
吴丽娟，欧翔，操贤洪，等. 饲料桑与甜叶菊渣混合比例对青贮饲料品质及微生物多样性的影响. 中国畜牧杂志，2024，60(12)：276－281.

[13] Guo Y Z. Effects of different additives on quality of millet straw silage. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021.
郭媛珍. 不同添加剂对谷子秸秆青贮品质的影响. 晋中：山西农业大学，2021.

[14] Broderick G A, Kang J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and *in vitro* media. Journal of Dairy Science, 1980, 63(1): 64－75.

[15] Liu J C, Jiang J F, Song X M, *et al*. Separation and analysis of main organic acids in silage by high performance liquid chromatography. Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2015, 47 (10): 47－52.
柳俊超，姜俊芳，宋雪梅，等. 青贮饲料中主要有机酸的高效液相色谱分离分析. 畜牧与兽医，2015，47(10)：47－52.

[16] Yoshida S, Forno D A, Cock J H, *et al*. Laboratory manual for physiological studies of rice. Los Baños: International Rice Research Institute, 1971: 61.

[17] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality detection technology (the second edition). Beijing: China Agriculture University Press, 2007.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术(第2版). 北京：中国农业大学出版社，2007.

[18] Aloo S O, Ofosu F K, Oh D H. Effect of germination on alfalfa and buckwheat: phytochemical profiling by UHPLC-ESI-QTOF-MS/MS, bioactive compounds, and *in-vitro* studies of their diabetes and obesity-related functions. Antioxidants, 2021, 10(10): 1613.

[19] Zhang J F, Han H L, Shen M M, *et al*. *In vitro* antioxidant activity of curcuminoids and their protective effects against oxidative stress-induced damage of chicken erythrocytes. Food Science, 2020, 41(13): 96－105.
张婧菲，韩红丽，沈明明，等. 姜黄素类化合物的体外抗氧化活性及其对鸡红细胞氧化损伤的保护作用. 食品科学，2020，41(13)：96－105.

[20] Wang Y W. Hunan launches general survey of invasive alien species. Forestry and Ecology, 2022(5): 48.
王亚文. 湖南启动外来入侵物种普查. 林业与生态，2022(5)：48.

[21] Zhang J L, Shi A, Liang X J, *et al*. Evaluation on nutrition and feeding value of sorghum-sudangrass hybrid, forage sorghum and silage corn under relay cropping after wheat in the Yellow River irrigation area of Ningxia. Feed Research, 2021, 44(4): 83－87.
张俊丽，施安，梁小军，等. 宁夏引黄灌区麦后复种高丹草、饲用高粱、青贮玉米营养及饲用价值评定. 饲料研究，2021，44(4)：83－87.

[22] Hei M Q, Cao Z Y, Wang Z Y, *et al*. Effects of adding compound *Lactobacillus* and molasses on the quality of alfalfa silage with different moisture contents. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1601－1609.
黑梦琴，曹正宇，王志远，等. 添加复合乳酸菌和糖蜜对不同水分含量苜蓿青贮品质的影响. 草地学报，2024，32(5)：1601－1609.

[23] Zhou X D, Ma C Y, Zhang J Q, *et al*. Effects of leaf extracts of caragana on silage quality and antioxidant activity of alfalfa. Pratacultural Science, 2024, 41(4): 995－1006.
周小栋，马成艳，张嘉琦，等. 柠条叶提取物对苜蓿青贮品质及抗氧化活性的影响. 草业科学，2024，41(4)：995－1006.

[24] Yan X Q, Bao J, Zhao M, *et al*. High-moisture alfalfa silage fermentation: a comparative study on the impact of additives including formic acid, *Lactobacillus plantarum*, cinnamon essential oil, and wood vinegar. Microbiology Spectrum, 2025, 13(9): e0000325.

[25] Xu J Z, Ma J F, Sa R L, *et al*. Effects of lactic acid bacteria inoculants on the nutrient composition, fermentation quality, and microbial diversity of whole-plant soybean-corn mixed silage. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1347293.

[26] Xian O Y, Li X, Chen Y C, *et al*. Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* and molasses on the silage of *Silphium perfoliatum*. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(6): 1505－1511.
鲜欧洋，李肖，陈永成，等. 植物乳杆菌和糖蜜接种对串叶松香草青贮的影响. 新疆农业科学，2024，61(6)：1505－1511.

[27] Huo Z W. Effect of *L. plantarum* and cellulase on the silage quality of grape branches and mulberry leaves. Shihezi: Shihezi University, 2024.
霍志伟. 植物乳杆菌与纤维素酶对葡萄枝叶和桑枝叶青贮品质的影响. 石河子：石河子大学，2024.

[28] Li L X, Gong Z F, Li J, *et al*. The effects of molasses and lactic acid bacteria on the fermentation quality of ear-removed corn straws silage. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(4): 1026-1029.
李龙兴, 龚正发, 黎俊, 等. 糖蜜和乳酸菌对去穗玉米秸秆青贮发酵品质的影响. 草地学报, 2018, 26(4): 1026-1029.

[29] Kuang Z Y, Mu L, Wei L, *et al*. Effects of different mixing ratios and lactic acid bacteria additions on the quality and aerobic stability of mixed silage of maize and soybean. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 227-238.
匡宗洋, 穆麟, 魏岚, 等. 不同混合比例和乳酸菌添加对全株玉米和大豆混合青贮品质及有氧稳定性的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 227-238.

[30] Jin X P, Chen C, Ma T L, *et al*. *Lactobacillus plantarum* and cellulase improve fermentation quality by regulating bacterial community in hybrid *Pennisetum purpureum* silage. Pratacultural Science. (2025-06-26) [2025-8-29]. https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250626.1332.004.
金鑫萍, 陈晨, 麻天丽, 等. 植物乳杆菌与纤维素酶调控杂交象草青贮细菌群落提升发酵品质. 草业科学. (2025-06-26) [2025-8-29]. https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250626.1332.004.

[31] Mao K, Xu Y, Wang X M, *et al*. Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* and molasses on the fermentation quality, biogenic amines contents and bacterial community of peanut vine silage. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 146-158.
毛开, 许艺, 王学梅, 等. 植物乳植杆菌与糖蜜对花生秧青贮饲料发酵品质、生物胺含量及细菌群落的影响. 草业学报, 2025, 34(5): 146-158.

[32] Zheng M L, Niu D Z, Jiang D, *et al*. Dynamics of microbial community during ensiling direct-cut alfalfa with and without LAB inoculant and sugar. Journal of Applied Microbiology, 2017, 122(6): 1456-1470.

[33] Li R R, Jiang D, Zheng M L, *et al*. Microbial community dynamics during alfalfa silage with or without clostridial fermentation. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17782.

[34] Yao M L, Wang H B, Lin X W, *et al*. Effects of different levels of molasses and complex bacterial enzyme preparations on nutritional value and fermentation quality of fresh corn stalk silage. China Feed, 2024(21): 137-141.
姚美玲, 王洪宝, 林秀蔚, 等. 添加不同水平糖蜜和复合菌酶制剂对鲜食玉米秸秆青贮营养价值及发酵品质的影响. 中国饲料, 2024(21): 137-141.

[35] He L W, Wang C, Xing Y Q, *et al*. Dynamics of proteolysis, protease activity and bacterial community of *Neolamarckia cadamba* leaves silage and the effects of formic acid and *Lactobacillus farciminis*. Bioresource Technology, 2019, 294: 122127.

[36] Jia T T, Wu Z, Yu Z. Effect of different lactic acid bacteria additives on the fermentation quality and aerobic stability of oat silage. Pratacultural Science, 2018, 35(5): 1266-1272.
贾婷婷, 吴哲, 玉柱. 不同类型乳酸菌添加剂对燕麦青贮品质和有氧稳定性的影响. 草业科学, 2018, 35(5): 1266-1272.

[37] Xian O Y, Li X, Chen Y C, *et al*. Effects of molasses and *Lactobacillus plantarum* on silage quality, microbial quantity and rumen degradation rate of hop branches and leaves. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(3): 719-726.
鲜欧洋, 李肖, 陈永成, 等. 糖蜜和植物乳杆菌对啤酒花枝叶青贮品质、微生物数量及瘤胃降解率的影响. 新疆农业科学, 2024, 61(3): 719-726.

[38] Fu J T, Wang X K, Ni K K, *et al*. The effects of adding lactic acid bacteria and molasses on fermentation of *Broussonetia papyrifera* and rice straw mixed silage. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(4): 121-128.
付锦涛, 王学凯, 倪奎奎, 等. 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.

[39] Zhao J, Li J F, Dong Z H, *et al*. Study on various degradation mechanisms of lignocellulose during spontaneous ensiling and their contributions to 2G bioethanol production. Industrial Crops and Products, 2025, 229: 121020.

[40] Zong C, Zhang J, Shao T, *et al*. Effects of additives on fermentation quality of alfalfa silage. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(12): 180-187.
宗成, 张健, 邵涛, 等. 添加剂对紫花苜蓿青贮饲料发酵品质的影响. 草业学报, 2020, 29(12): 180-187.

[41] Qiao Y, Sun J, Ding Y Y, *et al*. Alterations of the gut microbiota in high-fat diet mice is strongly linked to oxidative stress. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(4): 1689-1697.

[42] Shen X, Zou Z R. Review on research progress of chemical constituents and bioactivities of *Solidago*. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(23): 4303-4313.
沈校, 邹峥嵘. 一枝黄花属植物的化学成分和生物活性研究进展. 中国中药杂志, 2016, 41(23): 4303-4313.

[43] Wang W K. Effects of antioxidant lactic acid bacteria and fruit peel residues on antioxidant characteristics and fermentation quality of alfalfa and whole-plant corn silage. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023.
王文康. 抗氧化活性乳酸菌和果渣对紫花苜蓿和全株玉米青贮饲料抗氧化特性和发酵品质的影响. 南京: 南京农业大学,

2023.

[44] Mu L, Cao X, Wang Y T, *et al*. Inclusion of *Lonicerae flos* improved anaerobic fermentation and antioxidant activity of mixed silage (agro-residue and alfalfa). Animal Feed Science and Technology, 2024, 315: 116007.

[45] Wang S Y, Huang Y S, Chen L H, *et al*. Effects of solid fermentation of *Aspergillus niger* on release of bound phenols and antioxidant activity of by-products of *Pueraria thomsonii*. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 136－144.
王胜宇, 黄优生, 陈丽华, 等. 黑曲霉固态发酵对粉葛副产物中结合态酚类物质释放及抗氧化活性的影响. 食品工业科技, 2025, 46(5): 136－144.

[46] Lin D F, Yi Z H, Lan X M, *et al*. Changes of main nutrients and antioxidant activities of leaves of *Apocynum venetum* L. after fermentation. Plant Fiber Sciences in China, 2025, 47(2): 107－116.
林登蕃, 易著虎, 兰小明, 等. 罗布麻叶发酵前后主要营养物质变化及抗氧化活性研究. 中国麻业科学, 2025, 47(2): 107－116.

[47] Zhang B. Effects of lactic acid bacteria fermentation on antioxidant activity of luteolin in honeysuckle and cellular oxidative damage. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2025.
张博. 乳酸菌发酵对金银花木犀草素抗氧化活性及细胞氧化损伤的影响. 新乡: 河南科技学院, 2025.