

温度和乳酸菌添加剂对燕麦青贮发酵品质及有氧稳定性的影响

琚泽亮,赵桂琴,柴继宽

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:以乳熟期刈割的燕麦为材料,研究温度和乳酸菌添加剂对其青贮发酵品质及有氧稳定性的影响,设置无添加(对照,CK)、商业青贮添加剂 Synlac I(SLI 处理)和人工筛选菌株 *Lactobacillus rhamnosus* HT1(HT1 处理)3 个处理,分别置于 25℃、35℃和 45℃下青贮 60 d 后,取样测定青贮燕麦的发酵品质和有氧稳定性。结果表明:随着贮藏温度的升高,燕麦青贮饲料中水溶性碳水化合物和乳酸含量降低,pH 和氨氮含量显著升高($P<0.05$)。乳酸菌添加剂能够改善燕麦青贮饲料的发酵品质和有氧稳定性。25℃下,添加剂处理的青贮饲料霉菌和酵母菌数量低于 $1.00 \log_{10} \text{cfu/g}$,丙酸和丁酸均未检出。与 HT1 处理相比较,SLI 处理在 25℃下效果更好,水溶性碳水化合物、乳酸和挥发性脂肪酸含量更高($P<0.05$),氨态氮和好气性细菌含量较低($P<0.05$)。45℃下则相反,HT1 处理效果更优,其水溶性碳水化合物、乳酸和乙酸含量更高,氨态氮、酵母菌和好气性细菌数量较低。且 35℃和 45℃下 HT1 处理青贮饲料在有氧发酵阶段 pH 均小于 4.20,有氧稳定性更好。综上所述,HT1 处理可以提高燕麦青贮饲料的发酵质量和有氧稳定性,适合用于黄土高原夏季和初秋燕麦青贮饲料调制。

关键词:燕麦;温度;青贮;添加剂;有氧稳定性

中图分类号:S512.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)02-0053-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyecp.2021.02.008

燕麦(*Avena sativa*)分布于世界 40 多个国家,主要集中在 N 40°以北地区,包括亚洲、欧洲和北美,因此,这一地带也被称为北半球燕麦带^[1]。目前,燕麦世界种植面积约为 250 万 hm^2 ,总产量超过 4.3 亿吨^[2]。在我国,燕麦在北部和西部地区广泛种植,黄土高原是主要产区之一,包括陕西、甘肃和山西省的部分地区^[3-4]。在这些地区,燕麦是粮饲兼用作物,主要用作牲畜饲草料,在 7 月中下旬,燕麦处于灌浆至乳熟期时收获,调制成青贮饲料。但是,由于昼夜温差大、日照

时间较长,加之青贮基础设施尚不完善,燕麦青贮常常面临高温和强辐射问题。燕麦青贮饲料通常被露天堆放在水泥地面上,这可能会降低青贮包膜的气密性和对辐射和高温的抵抗能力^[5-6],并最终导致干物质含量在整个发酵和有氧饲喂过程的大量损失,尤其是在夏季和初秋。该地区 7~10 月的积温和辐射分别为 $1\,809.2^\circ\text{C}$ 和 $1\,147.6 \text{ kwh/m}^2$ ^[3]。前人的研究表明,在青贮之前使用乳酸菌接种剂接种可显著提高青贮饲料的发酵质量^[7]。但是,当在不同的条件(包括储存温度、气候和包装密度等)下对饲草青贮进行评估时,乳酸菌添加剂对青贮发酵的影响结果可能会不一致。在高温条件下,用商业乳酸菌接种对青贮饲料发酵质量几乎没有改善作用^[8]。此外,发酵过程中的温度变化可能不仅仅归因于季节变化,还存在昼夜温差和天气变化等。因此,储藏温度对青贮饲料发酵质量的影响值得研究。

青贮是一个利用微生物厌氧发酵的复杂过程,受

收稿日期:2020-04-07; 修回日期:2020-05-18

基金项目:国家燕麦荞麦产业技术体系(CARS-07-C);甘肃省科技计划重大专项(19ZD2NA002)

作者简介:琚泽亮(1991-),男,安徽宣州人,在读博士。

E-mail:juzliang@126.com

赵桂琴为通讯作者。

E-mail:zhaogq@gsau.edu.cn

到多种因素的影响,添加剂可以有效改善青贮饲料的发酵品质^[9]。在高温条件下利用温带或热带饲草及农作物调制青贮饲料会使制成的青贮饲料中乳酸浓度降低,pH 值和丁酸含量升高^[10-12]。但燕麦是喜凉爽作物,多种植于二阴山区,Chen 等^[13]发现在青藏高原地区,乳酸菌添加剂可显著降低燕麦和箭筈豌豆混合青贮的丁酸积累量,使得青贮饲料进行更多的乳酸发酵,而丙酸的施用可显著改善青贮饲料的有氧稳定性,但有关利用乳酸菌添加剂调制燕麦青贮饲料的发酵特性和有氧稳定性方面的研究较少。

因此,本研究利用商业乳酸菌添加剂和耐高温乳酸菌剂进行燕麦青贮调制,并设置不同的贮藏温度,探讨乳酸菌添加剂和温度对燕麦青贮发酵品质及有氧稳定性的影响,为改善黄土高原夏秋燕麦青贮发酵质量提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

青贮燕麦原料为陇燕 3 号燕麦(*Avena sativa* cv. Longyan No. 3),由甘肃定西民祥牧草有限公司提供。燕麦在灌浆至乳熟期刈割,经大型饲草揉搓机揉丝后,不断用水分测定仪测量含水量,待含水量达到 65%~70%时进行青贮调制。燕麦原料的主要化学成分及微生物组成见表 1。

表 1 燕麦青贮原料化学成分及微生物组成
Table 1 Chemical and microbial composition
of oats prior to ensiling

指标	值
干物质/(g·kg ⁻¹ FM)	321.4±3.3
粗蛋白/(g·kg ⁻¹ DM)	128.1±0.6
水溶性碳水化合物/(g·kg ⁻¹ DM)	183.5±4.3
中性洗涤纤维/(g·kg ⁻¹ DM)	556.1±8.1
酸性洗涤纤维/(g·kg ⁻¹ DM)	289.5±13.4
pH 值	6.02±0.02
乳酸菌(log ₁₀ cfu/g FM)	4.43±0.06
好气性细菌(log ₁₀ cfu/g FM)	7.64±0.12
霉菌(log ₁₀ cfu/g FM)	3.65±0.07
酵母菌(log ₁₀ cfu/g FM)	3.30±0.13

注:FW:鲜重;DM:干物质

1.2 试验设计

试验设无添加(CK),商业青贮添加剂 Synlac I

(SLI,亚芯生物科技有限公司)和人工筛选菌株 *Lactobacillus rhamnosus* HT1(HT1,由华南农业大学提供)3 个添加处理。乳酸菌添加剂添加量以青贮料鲜重为基准,添加量均为 10⁵ cfu/g FM,对照添加等量清水,与青贮原料充分混匀,装入 30 cm×20 cm 的聚乙烯青贮袋,每袋 500 g,装填密度为 210 kg/m³ DM,用真空包装机(SINBO Vacuum Sealer,Hong Tai Home Electrical Appliance Co. Ltd.)抽气、密封,真空包装机型号 DZ-280/2SD,真空泵功率 0.18 KW,真空极限 0.045 Mpa,各袋抽气时间均为 1 min,热封时间 3 s。每个处理分为 3 组,每组 6 次重复,置于温度分别为 25℃(T1),35℃(T2)和 45℃(T3)的恒温培养箱中保存,60 d 后采样测定青贮饲料的化学成分、微生物组成及有氧稳定性。

1.3 指标测定

1.3.1 营养指标测定及微生物分析 称取 100 g 样于 105℃灭酶 15 min 后 65℃烘干至恒重。烘干样粉碎后过 40 目筛并置于自封袋中密封保存,用于各指标测定。干物质(dry matter,DM)采用烘箱干燥法测定;pH 采用 PHS-3C 型数显酸度计测量;总氮(total nitrogen,TN)采用凯氏定氮法测定,粗蛋白(crude protein,CP)含量为总氮含量的 6.25 倍;氨态氮(ammonia nitrogen,NH₃-N)采用苯酚-次氯酸钠比色法测定;水溶性碳水化合物(water soluble carbohydrate,WSC)采用蒽酮比色法测定;中性洗涤纤维(neutral detergent fiber,NDF)与酸性洗涤纤维(acid detergent fiber,ADF)采用 Van soest 法测定。

乳酸菌(lactic acid bacteria,LAB)、好气性细菌(aerobic bacteria)、霉菌(mold)和酵母菌(yeast)分别采用 MRS 培养基、普通琼脂培养基和虎红琼脂培养基计数,培养基配方参照琚泽亮等^[14]的研究。

1.3.2 发酵品质分析 取 20 g 青贮样,加入 180 mL 去离子水于 4℃冰箱浸提 24 h,四层纱布过滤后用定性滤纸精滤,0.22 μm 滤膜过滤,用来测定 pH、乳酸及挥发性脂肪酸。采用安捷伦 1260 高效液相色谱和 G1321B 紫外荧光检测器测定乳酸(lactic acid,LA)及挥发性脂肪酸(volatile fatty acids,VFAs,包括乙酸、丙酸和丁酸)。色谱条件^[15]:SB-AQ C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×250 mm);流动相 A(甲醇):流动相 B[0.01

mol/L(NH₄)₂ HPO₄, pH = 2.70] = 3:97, 流速 1 mL/min, 进样量 20 μL, 检测波长 210 nm, 柱温 25℃。

1.3.3 有氧稳定性 将青贮饲料放入 30℃的绝缘聚苯乙烯泡沫箱中,并用纱布覆盖,分别在 0、3、6 和 9 d 测量青贮饲料的 pH 值变化^[16]。

1.4 统计分析

在进行统计分析之前,对微生物数量值进行对数转换(即每克材料菌落形成单位以 10 为底的对数)。采用 Excel 2019 对数据进行初步整理,以 SPSS 20.0 软件的 GLM 模型对所有数据进行方差的最小二乘法分析,数据分析按随机区组实验设计,阶乘排列处理因素(3 个添加剂处理(3 个贮藏温度),固定因子为重复、添加剂种类、贮藏温度及添加剂种类和贮藏温度的交互作用。当检测到显著差异时,结合 Duncan 法进行多重比较($P<0.05$)。试验误差以标准误(Standard error)表示。

2 结果与分析

2.1 燕麦青贮前化学成分及微生物组成分析

燕麦青贮前 DM 含量为 321.4 g/kg FM,具有适宜青贮的水分含量。WSC、CP 和 NDF 含量分别为 183.5、128.1 和 556.1 g/kg DM,而 ADF 则低至 289.5 g/kg DM,表明燕麦原料具有较好的营养品质。新鲜燕麦原料 pH 值为 6.02,附生乳酸菌的数量少于 5 log₁₀ cfu/g FM,好气性细菌、霉菌和酵母菌的数量分别为 7.64、3.65 和 3.30 log₁₀ cfu/g FM(表 1)。

2.2 温度和乳酸菌添加剂对燕麦青贮发酵质量的影响

乳酸菌添加剂和贮藏温度的互作效应对 WSC、LA、乙酸、丙酸、丁酸、LA/AA、VFA、NH₃-N 含量以及 LAB、好气性细菌、霉菌和酵母菌数量均有影响,但对 DM 和 pH 值影响不显著($P>0.05$)(表 2)。

表 2 温度和乳酸菌添加剂处理下燕麦青贮过程中的化学成分和 pH 值
Table 2 Effects of temperature and LAB additives on chemical composition and pH of oat silage

处理		干物质/ (g · kg ⁻¹ FM)	水溶性碳水化合物/ (g · kg ⁻¹ DM)	氨态氮/ (g · kg ⁻¹ TN)	pH 值
T1	CK	291.8 ^{cd}	54.3 ^e	37.7 ^d	3.93 ^c
	SLI	301.7 ^{bcd}	67.7 ^b	4.5 ^g	3.83 ^c
	HT1	295.7 ^{bcd}	63.8 ^c	8.3 ^f	3.86 ^c
T2	CK	284.0 ^d	47.2 ^f	44.8 ^c	3.88 ^c
	SLI	297.6 ^{bcd}	54.7 ^e	38.8 ^d	3.87 ^c
	HT1	307.7 ^{abc}	65.3 ^c	10.2 ^f	3.83 ^c
T3	CK	285.5 ^d	41.6 ^g	76.9 ^a	4.28 ^a
	SLI	309.9 ^{ab}	61.1 ^d	68.7 ^b	4.24 ^{ab}
	HT1	320.0 ^a	74.2 ^a	28.9 ^e	4.14 ^b
标准误		2.65	1.92	4.77	0.35
显著性	温度	NS	**	**	**
	添加剂	**	**	**	*
	互作	NS	**	**	NS

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),FW:鲜重;DM:干物质;TN:总氮;* , $P<0.05$; **, $P<0.01$;NS,不显著,下同

在 T1 处理下,与对照组相比,乳酸菌添加处理提高了 WSC、LA 含量及 LA/AA 值、LAB 数量($P<0.05$),降低了乙酸、NH₃-N 含量及好气性细菌和酵母菌数量($P<0.05$),同时,其霉菌和酵母菌数量低于 1.00 log₁₀ cfu/g FM,未检测到丙酸和丁酸。两个乳酸菌添加剂处理组相比,SLI 比 HT1 处理拥有更高($P<0.05$)的 WSC、LA、乙酸和 VFA 含量,NH₃-N 含量和好气性细菌数量更低,发酵质量更好(表 3)。

在 T1 和 T2 处理下,所有青贮饲料的 pH 值均

较低(<4.0),而 T3 处理下 pH 值较高(4.14~4.28)。与对照组相比,乳酸菌添加剂对 T2 处理下各指标的影响与 T1 处理中相似,DM、WSC、LA 含量和 LAB 数量增加,而乙酸、丙酸、丁酸、VFA、NH₃-N 含量及好气性细菌、霉菌和酵母菌数量减少。在 T3 处理下,与 SLI 和对照相比,HT1 处理组 pH(4.14)和 NH₃-N 含量(28.9 g/kg TN)最低,DM、WSC、LA、AA 和 VFA 含量最高,表明在高温下 HT1 处理效果更佳。

表 3 温度和乳酸菌添加剂处理下燕麦青贮过程中乳酸及挥发性脂肪酸的含量

Table 3 Effects of temperature and LAB additives on lactic acid volatile fatty acid content of oat silage

处理		乳酸/ (g·kg ⁻¹ DM)	乙酸/ (g·kg ⁻¹ DM)	丙酸/ (g·kg ⁻¹ DM)	丁酸/ (g·kg ⁻¹ DM)	乳酸/乙酸	挥发性脂肪酸/ (g·kg ⁻¹ DM)
T1	CK	29.6 ^f	17.4 ^b	10.1 ^c	5.2 ^b	1.69 ^g	32.8 ^b
	SLI	92.1 ^a	9.1 ^e	ND ^f	ND ^e	10.08 ^b	9.1 ^e
	HT1	82.0 ^b	5.3 ^f	ND ^f	ND ^e	15.56 ^a	5.3 ^f
T2	CK	13.9 ^h	28.7 ^a	24.3 ^a	8.9 ^a	0.48 ^b	61.9 ^a
	SLI	45.4 ^e	18 ^c	13.7 ^b	3.1 ^c	2.87 ^f	32.7 ^b
	HT1	77.0 ^c	18.9 ^b	5.1 ^d	ND ^e	4.09 ^e	24.0 ^c
T3	CK	11.6 ^h	5.0 ^f	2.6 ^e	1.8 ^d	2.33 ^f	9.4 ^e
	SLI	23.1 ^g	3.7 ^g	2.4 ^e	1.6 ^d	6.34 ^e	7.7 ^e
	HT1	65.8 ^d	13.7 ^d	ND ^f	ND ^e	4.78 ^d	13.7 ^d
标准误		5.74	1.52	1.53	0.57	0.884	3.41
显著性	温度	**	**	**	**	**	**
	添加剂	**	**	**	**	**	**
	互作	**	**	**	**	**	**

注:ND:未检出

与青贮之前的燕麦原料相比,所有青贮饲料中的WSC含量均显著降低,pH值也相应降低(表1,表2)。随着储存温度的升高,WSC显著下降,与T1的对照相比,在T2和T3的对照中WSC含量分别下降了13.08%和23.39%。乳酸菌添加剂可显著增加WSC含量,尤其在T3处理中,SLI和HT1分别较对照增加了46.88%和78.37%,在3种储存温度处理中增幅最大,同时,HT1的WSC含量在所有处理中最高(74.2 g/kg DM)。LA含量显示出相似的结果,与T1(29.6 g/kg DM)相比,T2(13.9 g/kg DM)和T3(11.6 g/kg DM)的对照较低($P<0.05$)。乳酸菌添加剂显著增加了LA含量,在T1处理中SLI(92.1 g/kg DM)和

HT1(82.0 g/kg DM)均达到最高值,T2处理中SLI的增幅最大(为对照的2.27倍),T3处理中HT1增幅最大(为对照的4.67倍)。

NH₃-N含量随储存温度的升高而增加,随着储存温度分别从25℃升高到35℃和45℃,对照组NH₃-N含量分别增加了18.83%和103.98%。3个储存温度下,乳酸菌添加剂均降低了NH₃-N含量。SLI与对照相比,NH₃-N含量分别降低了88.06%(T1)、13.39%(T2)和10.66%(T3);同时,HT1在高温下降低NH₃-N含量效果更明显,与对照相比,T1、T2和T3分别降低了77.98%、77.23%和62.42%。

表 4 温度和乳酸菌添加剂处理下燕麦青贮过程中主要微生物类群数量

Table 4 Effects of temperature and LAB additives on the quantity of dominant microbial groups of oat silage

处理		乳酸菌/ (log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)	好气性细菌/ (log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)	霉菌/ (log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)	酵母菌/ (log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)
T1	CK	4.89 ^d	4.60 ^a	<1.00 ^b	3.52 ^a
	SLI	6.74 ^{ab}	2.58 ^b	<1.00 ^b	<1.00 ^e
	HT1	6.54 ^b	2.78 ^b	<1.00 ^b	<1.00 ^e
T2	CK	4.28 ^c	2.97 ^b	1.12 ^a	2.38 ^b
	SLI	5.42 ^c	2.56 ^b	<1.00 ^b	1.25 ^d
	HT1	6.96 ^a	1.13 ^c	<1.00 ^b	<1.00 ^e
T3	CK	2.70 ^e	2.35 ^b	<1.00 ^b	2.26 ^b
	SLI	3.45 ^f	1.42 ^c	<1.00 ^b	1.96 ^c
	HT1	5.39 ^c	<1.00 ^d	<1.00 ^b	<1.00 ^e
标准误		0.276	0.231	0.07	0.248
显著性	温度	**	**	**	**
	添加剂	**	**	**	**
	互作	**	*	**	**

乳酸菌添加剂还可以减少好气性细菌的数量(表 4),随着储存温度的升高,与 SLI 相比,HT1 的好气性细菌数量降低幅度更大。随着温度的升高,对照的酵母数量减少。尽管乳酸菌添加剂显著减少了酵母数量,但 SLI 处理在高温下呈上升趋势,而 HT1 在控制酵母数量上效果更佳。

2.3 温度和乳酸菌添加剂对燕麦青贮发酵有氧稳定性的影响

在有氧阶段,所有处理的青贮饲料前 3 d 的 pH 值均出现轻微波动。但在 6 d 后,25℃(T1)的青贮饲料 pH 值急剧增加(平均从 3.87 增至 6.11),其次是

T2 处理(平均从 3.86 增至 4.97),最后是 T3 处理(平均从 4.22 增至 4.99)。不同处理之间 pH 值变化也不同。在 T1 下,有氧处理 6~9 d 后,与对照组相比,乳酸菌添加剂处理使 pH 显著($P<0.05$)增加;但在 T2 和 T3 下,两个乳酸菌添加剂的效果不同。有氧处理 6 d 后,SLI 处理与对照相比对 pH 值无显著影响($P>0.05$),而 HT1 使 T2 和 T3 下 pH 分别显著($P>0.05$)降低 18.56%和 26.66%。有氧处理 9 d 后,SLI 仅在 T3 时使 pH 显著($P<0.05$)下降 10.10%,而 HT1 导致 T2 和 T3 下 pH 值分别减少了 31.72%和 35.81%(图 1)。

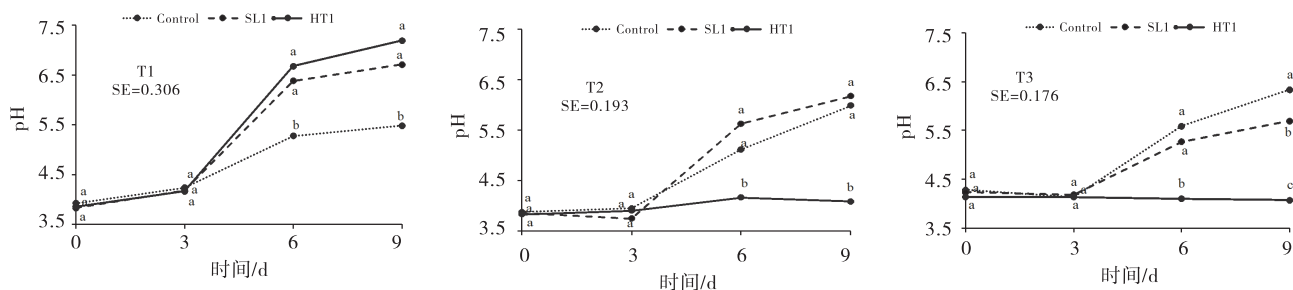


图 1 燕麦青贮料有氧阶段的 pH 值

Fig. 1 Changes in pH value of oat silages after exposure to air

注:不同小写字母表示同一时间下不同处理间差异显著($P<0.05$),SE:标准误

3 讨论

在青贮过程中,较低的 WSC 和 DM 含量可能会导致梭状芽孢杆菌发酵,并使动物对青贮饲料的采食率大大降低^[17],表明原料的 WSC 和 DM 含量对青贮发酵程度影响很大。本研究中,燕麦原料的 WSC 和 DM 含量分别为 183.5 g/kg DM 和 321.4 g/kg FM,高于 Shao 等^[18]的报道。这可能是由黄土高原较大的昼夜温差和较长的日照时间造成的。温度和日照会影响植物养分积累,较高的温度和较长的日照时间有利于光合作用,夜间较低的温度可以降低呼吸损耗,从而减少有机物的降解^[19]。对照在 25℃下发酵良好,pH 值为 3.93,NH₃-N 含量为 37.7 g/kg TN,霉菌数量小于 1.00 log₁₀ cfu/g FM,表明燕麦较高的 WSC 含量是青贮发酵成功的重要因素。对于发酵良好的青贮饲料,原料在青贮前必须有较高的 WSC 含量和足够的 LAB 数量^[20]。优质青贮取决于植物附生 LAB 的数量,不同植物附生乳酸菌数量和种类差异较大,在牧草上,抑制梭状芽孢杆菌活性的最小 LAB 数量为 5 log₁₀

cfu/g FM^[19,21]。本研究中,燕麦原料附生 LAB 数量为 4.43 log₁₀ cfu/g FM,低于 5 log₁₀ cfu/g FM。但对照青贮饲料在常温下(25℃)具有良好的发酵质量,这可能是因为青贮调制时对原料进行了揉丝和真空密封处理。Johnson 等^[22]发现秸秆揉丝处理的青贮饲料和未经处理的玉米青贮饲料相比,具有较小的纤维直径,LA 含量显著增加($P<0.05$)。青贮 60 d,所有青贮饲料中的好气性细菌、酵母和霉菌数量均减少,也验证了真空密封减少了微生物和氧气含量。

适宜的乳酸菌添加剂会在青贮发酵开始后成为优势菌,从而迅速降低 pH 值,抑制梭状芽孢杆菌的生长。当 pH 值高于 4.5 时梭状芽孢杆菌会将蛋白质和碳水化合物发酵成丁酸^[20]。同时,pH 的降低可以抑制病原性微生物的生长,避免蛋白质被降解为 NH₃-N^[18]。本研究中,与添加剂处理相比,25℃和 35℃贮藏的对照青贮饲料中丙酸、丁酸和 NH₃-N 含量更高,WSC 含量更低,45℃的对照青贮饲料具有最高的 NH₃-N 含量,表明燕麦原料附生的 LAB 不能与其他青贮微生物快速竞争,而丙酸杆菌和梭状芽孢杆菌在

青贮过程早期活性较高。Kim 和 Adesogan^[23]研究表明,储存在 40℃ 的玉米青贮饲料具有比 20℃ 更高的 pH 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量。

青贮饲料发酵涉及微生物和酶活性,根据青贮饲料发酵进程的温度曲线,常温和嗜热乳酸菌在青贮的不同阶段均具有活性^[16,24-25]。因此,青贮接种剂的开发应考虑不同菌株对温度的适应性^[26-27]。本研究中,与对照组相比,SLI 在 45℃ 下对青贮饲料 pH、丙酸、丁酸和 VFA 含量没有显著影响,说明一些 LAB 无法在高温下生长,证实了高温是限制 LAB 接种效果的重要因素之一。Chen 等^[8]也发现在高温下将 LAB 接种到牧草上对提高发酵质量没有影响。本研究中,随着温度的升高,青贮饲料 pH 值显著升高和 VFA 含量下降,对照中好气性细菌、霉菌和酵母菌数量也降低,这表明除 LAB 外,一些梭菌也被高温抑制。与 SLI 和对照青贮饲料相比,HT1 处理组在高温下 WSC、LA、乙酸和 VFA 含量更高,LAB 数量和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量更低,说明 HT1 在高温时对燕麦青贮发酵质量的提高更有效。这与 Chen 等^[8]的报道一致。

青贮饲料的有氧腐败是一个复杂的过程,由多种因素共同作用,包括温度、微生物活性和乳酸菌接种等^[24],青贮饲料有氧稳定性受温度影响很大。Wilkinson 和 Davies^[28]发现,好氧降解是由好气性细菌、酵母和霉菌利用青贮饲料中的 WSC 和乳酸进行生长繁殖引起的,导致 pH 升高、释放大热量、营养物质可利用性下降。因此,较大的 pH 值变化和较高的不良微生物数量表明青贮饲料的有氧稳定性差。在本研究中,所有青贮饲料在有氧处理前 3 d 保持稳定,25℃ 贮藏的青贮饲料在 6 d 后 pH 值急剧升高,表明变质速度加快。这可能归因于青贮后饲料中较高的 WSC 和 LA 含量。Huisden 等^[29]也报道了类似的结果,LA 或糖含量较高的青贮饲料在暴露于空气时不稳定。青贮饲料含有较多乙酸、丁酸和其他 VFA 时具有良好的有氧稳定性^[30]。本研究中,贮藏在 35℃ 的青贮饲料 pH 增幅低于 25℃ (图 1),可能是由于 T2 处理中青贮饲料 VFA 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量较高,抑制了酵母的生长,与 T1 相比,其酵母菌数量显著降低。同时,贮藏在 45℃ 的青贮饲料具有更好的需氧稳定性也说明了这一点,这与 Liu 等^[16]的结果一致。

4 结论

随着贮藏温度的升高,燕麦青贮饲料 pH 值和

$\text{NH}_3\text{-N}$ 含量显著增加,饲料品质恶化。*Lact rhamnosus* HT1 在高温下可以显著提高燕麦青贮饲料的发酵品质和有氧稳定性,降低了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及杂菌数量,并在有氧阶段使青贮饲料保持较低的 pH 值。因此,在黄土高原地区的夏季和初秋,用 HT1 调制燕麦青贮饲料可提高发酵品质及有氧稳定性。

参考文献:

- [1] Marshall A, Cowan S, Edwards S, *et al.* Crops that feed the world 9. Oats- a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. Food Security, 2013, 5(1):13-33.
- [2] Gorash A, Armonienè R, Mitchell Fetch J, *et al.* Aspects in oat breeding: nutrition quality, nakedness and disease resistance, challenges and perspectives[J]. Annals of Applied Biology, 2017, 171(3):281-302.
- [3] Li X, Li M, Ling A, *et al.* Effects of genotype and environment on avenanthramides and antioxidant activity of oats grown in northwestern China[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 73:130-137.
- [4] 张毕阳, 赵桂琴. 燕麦干草与青贮玉米不同组合对绵羊生产性能和消化代谢的影响[J]. 草原与草坪, 2018, 38(2):19-24.
- [5] Paillat J M, Gaillard F. Air-tightness of wrapped bales and resistance of polythene stretch film under tropical and temperate conditions[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(1):15-22.
- [6] Bernardes T F, Daniel J L P, Adesogan A T, *et al.* Silage review: Unique challenges of silages made in hot and cold regions[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5):4001-4019.
- [7] Kleinschmit D H, Kung L. A meta-analysis of the effects of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of corn and grass and small-grain silages[J]. Journal of Dairy Science, 2006, 89(10):4005-4013.
- [8] Chen M M, Liu Q H, Xin G R, *et al.* Characteristics of lactic acid bacteria isolates and their inoculating effects on the silage fermentation at high temperature[J]. Letters in Applied Microbiology, 2012, 56(1):71-78.
- [9] 据泽亮, 赵桂琴, 覃方铨, 等. 添加玉米粉和乳酸菌制剂对燕麦与箭筈豌豆混播捆裹青贮发酵品质的影响[J]. 草原与草坪, 2016, 36(2):59-65.
- [10] Ohshima M, Kimura E, Yokota H-O. A method of making good quality silage from direct cut alfalfa by spraying previously fermented juice[J]. Animal Feed Science and

- Technology, 1997, 66(2): 129—137.
- [11] Tjandraatmadja M, Norton B W, Macrae I C. Fermentation patterns of forage sorghum ensiled under different environmental conditions[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1991, 7(2): 206—218.
- [12] Weinberg Z G, Szakacs G, Ashbell G, *et al.* The effect of temperature on the ensiling process of corn and wheat [J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, 90(4): 561—566.
- [13] Chen L, Guo G, Yuan X, *et al.* Effects of applying molasses, lactic acid bacteria and propionic acid on fermentation quality, aerobic stability and in vitro gas production of total mixed ration silage prepared with oat common vetch intercrop on the Tibetan Plateau[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2015, 96(5): 1678—1685.
- [14] 琚泽亮, 赵桂琴, 柴继宽, 等. 不同燕麦品种在甘肃中部的营养价值及青贮发酵品质综合评价[J]. 草业学报, 2019, 28(9): 77—86.
- [15] 琚泽亮, 赵桂琴, 覃方铨, 等. 青贮时间及添加剂对高寒牧区燕麦-箭筈豌豆混播捆裹青贮发酵品质的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 148—157.
- [16] Liu Q, Zhang J, Shi S, *et al.* The effects of wilting and storage temperatures on the fermentation quality and aerobic stability of stylo silage[J]. Animal Science Journal, 2011, 82(4): 549—553.
- [17] Fraser M D, Fychan R, Jones R. Voluntary intake, digestibility and nitrogen utilization by sheep fed ensiled forage legumes[J]. Grass and Forage Science, 2000, 55(3): 271—279.
- [18] Shao T, Shimojo M, Wang T, *et al.* Effect of additives on the fermentation quality and residual mono- and di-saccharides compositions of Forage Oats (*Avena sativa* L.) and Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) silages[J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2005, 18(11): 1582.
- [19] Zhang J, Guo G, Chen L, *et al.* Effect of applying lactic acid bacteria and propionic acid on fermentation quality and aerobic stability of oats-common vetch mixed silage on the Tibetan plateau[J]. Animal Science Journal, 2015, 86(6): 595—602.
- [20] Weinberg Z G, Muck R E. New trends and opportunities in the development and use of inoculants for silage[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1996, 19(1): 53—68.
- [21] 施清平, 徐赵红, 张建国. 十个玉米品种在广州种植和青贮的潜力研究[J]. 草业学报, 2017, 26(3): 175—182.
- [22] Johnson L M, Harrison J H, Davidson D, *et al.* Corn silage management I: Effects of hybrid, maturity, and mechanical processing on chemical and physical characteristics[J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(4): 833—853.
- [23] Kim S C, Adesogan A T. Influence of ensiling temperature, simulated rainfall, and delayed sealing on fermentation characteristics and aerobic stability of corn silage [J]. Journal of Dairy Science, 2006, 89(8): 3122—3132.
- [24] Weinberg Z G, Szakacs G, Ashbell G, *et al.* The effect of temperature and *Lactobacillus amylovorus* and *Lact. plantarum*, applied at ensiling, on wheat silage[J]. Journal of Applied Microbiology, 1998, 84(3): 404—408.
- [25] 陈明霞, 刘秦华, 张建国. 耐低温乳酸菌的筛选鉴定及其对黑麦草青贮的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 409—415.
- [26] 崔棹茗, 郭刚, 原现军, 等. 青稞秸秆青贮饲料中优良乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 草地学报, 2015, 23(3): 607—615.
- [27] 李世丹, 陈仕勇, 马莉, 等. 青藏高原川西北高寒牧区黑麦青贮饲料中耐低温乳酸菌的分离与鉴定[J]. 草原与草坪, 2018, 38(6): 79—82+88.
- [28] 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.
- [29] Huisden C M, Adesogan A T, Kim S C, *et al.* Effect of applying molasses or inoculants containing homofermentative or heterofermentative bacteria at two rates on the fermentation and aerobic stability of corn silage[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(2): 690—697.
- [30] Weinberg Z G, Ashbell G, Azrieli A, *et al.* Ensiling peas, ryegrass and wheat with additives of lactic acid bacteria (LAB) and cell wall degrading enzymes[J]. Grass and Forage Science, 1993, 48(1): 70—78.