

DOI: 10.11686/cyxb2025267

http://cyxb.magtech.com.cn

刘志昊, 李文龙, 张晨, 等. 养殖废水灌溉下青贮添加剂对全株玉米青贮饲料品质的影响. 草业学报, 2026, 35(6): 60—72.

LIU Zhi-hao, LI Wen-long, ZHANG Chen, *et al.* Effects of silage additives on the quality of whole crop maize silage produced from plants irrigated with livestock wastewater. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(6): 60—72.

## 养殖废水灌溉下青贮添加剂对全株玉米青贮饲料品质的影响

刘志昊<sup>1</sup>, 李文龙<sup>2</sup>, 张晨<sup>2</sup>, 刘美英<sup>1\*</sup>, 陶雅<sup>2\*</sup>

(1. 内蒙古农业大学资源与环境学院, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 中国农业科学院草原研究所, 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010010)

**摘要:** 全株玉米青贮饲料是反刍动物生产中重要的粗饲料来源, 养殖废水中含有大量农作物所需的营养元素, 将养殖废水用于灌溉全株青贮玉米, 是否会影响原料品质进而影响青贮发酵品质的研究未见报道。本试验将养殖废水(W<sub>1</sub>)和地下水(W<sub>2</sub>)灌溉后的全株青贮玉米作为原料, 分别进行以下处理: 自然青贮(CK)、添加青贮邦(A<sub>1</sub>)、添加先牧1152(A<sub>2</sub>)、添加壮乐美(A<sub>3</sub>), 于青贮3和80 d后开袋取样, 测定其营养成分和发酵品质, 以期为养殖废水的合理利用并筛选适宜的青贮玉米添加剂提供实践参考。结果表明, 养殖废水灌溉增加了土壤中有效养分含量, 显著降低了青贮玉米原料的干物质含量, 显著提高了粗蛋白、酸性洗涤纤维含量。养殖废水灌溉以及不同添加剂对全株玉米青贮的营养成分和发酵品质指标均有显著影响, 二者交互作用明显。综合9项指标通过灰色关联分析法得出, 在青贮发酵的前期和稳定期, W<sub>1</sub>A<sub>1</sub>均为最优处理。综上所述, 在养殖废水灌溉条件下添加青贮邦可以提高青贮玉米‘峰单189’发酵80 d的青贮品质, 其效果优于地下水灌溉条件下自然青贮。

**关键词:** 养殖废水; 全株玉米青贮; 青贮添加剂; 发酵品质

## Effects of silage additives on the quality of whole crop maize silage produced from plants irrigated with livestock wastewater

LIU Zhi-hao<sup>1</sup>, LI Wen-long<sup>2</sup>, ZHANG Chen<sup>2</sup>, LIU Mei-ying<sup>1\*</sup>, TAO Ya<sup>2\*</sup>

1. College of Resources and Environmental Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Hohhot 010018, China; 2. Grassland Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Hohhot 010010, China

**Abstract:** Whole crop maize (*Zea mays*) silage is an important source of roughage for ruminant production. Livestock wastewater contains large amounts of many nutrients required by crops. The aims of this study, therefore, were to determine whether plants irrigated with livestock wastewater produced better silage than those irrigated with groundwater, and to determine the effects of different silage additives. Whole-plant silage maize irrigated with livestock wastewater (W<sub>1</sub>) or groundwater (W<sub>2</sub>) were used as raw materials for the following treatments: natural silage (CK), silage with added Qingzhuang (A<sub>1</sub>), silage with added Xianmu 1152 (A<sub>2</sub>), and silage with added Zhuanglemei (A<sub>3</sub>). After ensilage for 3 and 80 days, the bags were opened and sampled to determine the nutritional

收稿日期: 2025-07-01; 改回日期: 2025-09-15

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2022MS03009)资助。

作者简介: 刘志昊(2000—), 男, 内蒙古包头人, 硕士。E-mail: liu\_zhihao@emails.imau.edu.cn

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liumeiyimingmau@163.com; taoya2001@126.com

components and fermentation quality of the silages. It was found that irrigation with livestock wastewater significantly increased soil available nutrient contents, resulting in a significant decrease in the dry matter content of silage maize raw materials and a significant increase in the content of crude protein and acid detergent fiber. Livestock wastewater irrigation and different additives significantly affected the nutritional quality and fermentation quality of whole crop maize silage, and the effect of the interaction between the two factors was significant. Based on nine indicators at the early and stable stages of silage fermentation, a grey correlation analysis showed that  $W_1A_1$  (silage maize grown with livestock wastewater and addition of Qingzhuabang) was the optimal treatment. In summary, adding Qingzhuabang to whole-plant silage maize grown under livestock wastewater irrigation conditions improved the silage quality of 'Fengdan 189' silage maize after 80 days, yielding superior results compared with natural silage produced from plants irrigated with groundwater. These findings provide a practical reference for the rational utilization of livestock wastewater and the screening of suitable silage maize additives.

**Key words:** livestock wastewater; whole crop maize silage; silage additive; fermentation quality

内蒙古自治区是中国北方地区的畜牧业大省,2022年底内蒙古地区奶牛存栏量为159.0万头,位列全国第一位<sup>[1]</sup>。其首府呼和浩特市是中国的乳都城市,奶牛养殖业发展更为迅速。第二次全国污染源普查公报数据显示,畜禽养殖业水污染物氨氮排放量为11.09万t,占农业源污染的51.3%,是导致农业面源污染的主要因素之一<sup>[2]</sup>。中国的畜牧业显著污染了环境,并对水质、空气和土壤质量构成了重大威胁<sup>[3]</sup>。然而,在农田土壤中施入有机肥在促进有机农业循环上具有重要地位<sup>[4]</sup>。利用养殖废水灌溉农田,既能够为农作物提供营养物质,又能够充分利用土壤环境自净功能处理养殖废水<sup>[5]</sup>,有效地解决了农业肥水资源紧缺、养殖废水处理和资源化利用之间的矛盾,不失为一种处理养殖污染物行之有效的方法。

全株玉米(*Zea mays*)青贮饲料是反刍动物生产中重要的粗饲料来源,在优质粗饲料中占有不可替代的地位,目前也是世界范围内应用最广泛的青贮饲料<sup>[6]</sup>。养殖废水灌溉能够改变植物营养供给及土壤微生物群落的结构和丰度<sup>[7]</sup>,因此会引起植物-微生物生态体系的变化,在灌溉后是否会影响原料从而影响青贮的发酵品质尚不了解。在发酵过程中加入青贮添加剂进行质量调控,不仅可以改善发酵环境,还能抑制有害微生物活动,减少营养成分的流失,防止青贮原料腐败霉变,提高青贮营养价值<sup>[8]</sup>。为了保证养殖废水灌溉后青贮的发酵品质,本试验将养殖废水灌溉后的青贮玉米添加不同添加剂,对其营养成分、发酵品质进行分析和评价,以期养殖废水的合理利用并筛选适宜的青贮玉米添加剂提供实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

项目试验选在呼和浩特市土默特左旗地力均匀的青贮玉米生产大田。该地区位于土默川平原,属温带大陆性季风气候,海拔1022 m。冬季长而寒冷,夏季炎热,降水多集中在6—8月,年均降水量为400 mm,蒸发量为1870.3 mm,气候干燥,无霜期年平均133 d左右,年平均气温6.3℃。

### 1.2 试验材料

试验用养殖废水由呼和浩特市土默特左旗某规模化奶牛养殖场提供,养殖废水经氧化塘无害化处理后,符合国家畜禽养殖业污染物排放标准。试验用青贮玉米品种为'峰单189'。试验用青贮添加剂为青贮邦、先牧1152、壮乐美。青贮添加剂详细信息见表1。

### 1.3 试验设计

青贮玉米播种于2022年4月末,试验区设置养殖废水灌溉和地下水灌溉两个处理,3次重复,共6个试验小区。3个小区采用奶牛养殖场产生的废水灌溉( $W_1$ ),平均灌溉量为 $3000\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ;另外3个小区则采用地下水灌溉( $W_2$ ),平均灌溉量为 $3000\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,两种灌溉用水的灌溉方式均为漫灌。小区随机排列,试验地青贮玉米的种植密度为 $75000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,玉米的栽培和管理措施均保持一致,在拔节期至大喇叭口期,一次性追施尿素 $225\text{ kg}\cdot$

表1 玉米青贮添加剂菌种及生产公司

Table 1 Maize silage additive strains and production company

青贮添加剂名称 Name of silage additive	菌种 Strain	生产公司 Production corporation
青贮邦 Qingzhuabang	植物乳植杆菌 <i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	内蒙古和美科盛生物技术有限公司 Inner Mongolia Sci-Plus Biotech. Co., Ltd.
先牧 1152 Xianmu1152	植物乳植杆菌 <i>L. plantarum</i>	美国丹尼斯克有限公司 Danisco USA Inc
壮乐美 Zhuanglemei	植物乳植杆菌, 布氏乳杆菌 <i>L. plantarum</i> , <i>Lactobacillus buchneri</i>	四川高福记生物科技有限公司 Sichuan Gaofuji Biological Technology Co., Ltd

hm<sup>-2</sup>。自播种 120 d 后,同时收获两种灌溉用水处理的青贮玉米。小区采用五点取样法取样,粉碎后充分混合均匀为青贮玉米原料。

将养殖废水灌溉和地下水灌溉处理所收获的两组青贮玉米原料,以自然青贮作为对照,添加 3 种不同配方的青贮添加剂进行青贮。试验共 8 个处理(表 2),每处理设 6 个重复,发酵 3 d 时开袋检测 3 个重复,发酵 80 d 时检测另外 3 个重复。添加剂施用前按比例用蒸馏水稀释,并在经高压灭菌后的 PE 塑料膜上将青贮玉米原料与添加剂翻拌混合均匀,乳酸菌添加量为 10<sup>5</sup> cfu·g<sup>-1</sup>。将混合均匀后的样品称取 300 g 装于青贮专用聚乙烯袋内,用真空封口机(deli No. 14886, 中国)在 -85 kPa 条件下,抽气 20 s 并封口。于室温(20~25 °C)下避光发酵 3、80 d 后开袋取样,测定其营养成分和发酵品质。

表2 试验处理信息表

Table 2 Test treatment information table

处理 Treatment	处理方式 Treatment method	编号 Number
1	养殖废水灌溉青贮玉米+自然青贮 Raw materials under livestock wastewater irrigation were naturally ensiled	W <sub>1</sub> CK
2	养殖废水灌溉青贮玉米+青贮邦 Raw materials under livestock wastewater irrigation were ensiled by adding Qingzhuabang	W <sub>1</sub> A <sub>1</sub>
3	养殖废水灌溉青贮玉米+先牧 1152 Raw materials under livestock wastewater irrigation were ensiled by adding Xianmu1152	W <sub>1</sub> A <sub>2</sub>
4	养殖废水灌溉青贮玉米+壮乐美 Raw materials under livestock wastewater irrigation were ensiled by adding Zhuanglemei	W <sub>1</sub> A <sub>3</sub>
5	地下水灌溉青贮玉米+自然青贮 Raw materials under groundwater irrigation were naturally ensiled	W <sub>2</sub> CK
6	地下水灌溉青贮玉米+青贮邦 Raw materials under groundwater irrigation were ensiled by adding Qingzhuabang	W <sub>2</sub> A <sub>1</sub>
7	地下水灌溉青贮玉米+先牧 1152 Raw materials under groundwater irrigation were ensiled by adding Xianmu1152	W <sub>2</sub> A <sub>2</sub>
8	地下水灌溉青贮玉米+壮乐美 Raw materials under groundwater irrigation were ensiled by adding Zhuanglemei	W <sub>2</sub> A <sub>3</sub>

#### 1.4 测定指标与方法

**1.4.1 土壤样品采集与测定** 在青贮玉米收获期,采用五点取样法采集根际 0~20 cm 土层土壤进行土壤理化性状的测定。土壤 pH 值测定采用酸度计法(水:土=2.5:1.0);水溶性盐采用残渣烘干-质量法(水:土=1:1);全氮采用半微量凯氏法;有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法;速效钾测定采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法<sup>[9]</sup>。

**1.4.2 青贮营养成分** 将青贮玉米原料,以及青贮发酵 3、80 d 后的青贮样品称鲜重,置于恒温鼓风干燥箱(BPG-9200AH, 中国)内 105 °C 杀青 30 min, 65 °C 烘干至恒重,称干重。将烘干的样品粉碎后过 0.25 mm 筛,混合均匀装自封袋,置阴凉处,用于测定营养成分。

干物质(dry matter, DM)采用 GB/T 6435-2014 干燥法测定<sup>[10]</sup>;粗蛋白(crude protein, CP)采用 GB/T 6432-2018 凯氏定氮法测定<sup>[11]</sup>;可溶性糖(water-soluble carbohydrates, WSC)采用硫酸-蒽酮比色法测定<sup>[12]</sup>;中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)分别采用 GB/T 20806-

2022<sup>[13]</sup>和 NY/T 1459—2022 纤维法测定<sup>[14]</sup>。

**1.4.3 青贮发酵品质** 青贮饲料开袋后,精确称取样品 20 g 于锥形瓶中,加入蒸馏水(180 mL)密封瓶口放置于 4 °C 冰箱中,24 h 浸提处理后,将混合液过 4 层纱布和定量滤纸,冷冻于 -20 °C,用于测定发酵品质。

利用酸度计(DENVER UB-7,美国)测定青贮饲料浸提液的 pH 值<sup>[15]</sup>;利用高效液相色谱法(LC-20A,日本岛津公司;色谱柱:Shodex RSpark KC-811 柱,8 mm×300 mm;流动相:3 mmol·L<sup>-1</sup> HClO<sub>4</sub>溶液,流速:1 mL·min<sup>-1</sup>;柱温:50 °C;进样量:5 μL;检测器:DAD,210 nm,SPD-20A)测定乳酸(lactic acid, LA)、乙酸(acetic acid, AA)、丙酸(propionic acid, PA)和丁酸(butyric acid, BA)含量<sup>[16]</sup>。氨态氮(NH<sub>3</sub>-N)含量采用苯酚一次氯酸钠比色法测定<sup>[17]</sup>,NH<sub>3</sub>-N 含量用氨态氮占总氮(NH<sub>3</sub>-N/TN)的百分数表示。

## 1.5 数据统计分析

利用 Excel 2021 对数据进行初步编排。利用 SPSS 27.0 软件对试验数据进行分析,采用独立样本 *T* 检验分析两组独立样本的显著性,采用一般线性模型(general linear model, GLM)对发酵 3、80 d 全株玉米青贮饲料的营养成分和发酵品质进行双因素方差分析,主效应包括灌溉用水和青贮添加剂种类及其交互效应,并采用 Tukey's 法对各数据平均值进行多重比较( $P < 0.05$ 时差异显著)。利用 Origin 2024 软件绘制皮尔逊相关性热图,明确不同指标间的相关性。运用灰色关联度法对青贮品质进行综合评价<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 养殖废水灌溉对土壤理化性质的影响

两种灌溉用水处理后,土壤部分指标见表 3。与 W<sub>2</sub>相比, W<sub>1</sub>处理显著提高了土壤中有效磷、速效钾的含量( $P < 0.001$ );其余指标未见显著差异( $P > 0.05$ )。

表 3 不同灌溉用水对土壤基础理化指标的影响

Table 3 Effects of different irrigation water on soil basic physical and chemical indexes

灌溉用水 Irrigation water	pH	水溶性盐 Water-soluble salt (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium (mg·kg <sup>-1</sup> )
W <sub>1</sub>	8.61a	2.21a	1.49a	19.24a	162.26a
W <sub>2</sub>	8.86a	1.62a	1.05a	13.73b	120.94b
SEM	0.072	0.210	0.127	1.269	9.435
<i>P</i> 值 <i>P</i> -value	0.060	0.194	0.068	0.001	<0.001

注: W<sub>1</sub>, 养殖废水灌溉; W<sub>2</sub>, 地下水灌溉; 同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ); SEM, 均值标准误差。下同。

Note: W<sub>1</sub>, livestock wastewater irrigation; W<sub>2</sub>, groundwater irrigation; Different lowercase letters within a column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ); SEM, standard error of the mean. The same below.

### 2.2 养殖废水灌溉对青贮玉米原料营养成分的影响

养殖废水灌溉对青贮玉米原料营养成分的影响见表 4, W<sub>1</sub>处理下青贮玉米原料的 DM 含量显著低于 W<sub>2</sub>( $P < 0.001$ ), CP、ADF 含量显著高于 W<sub>2</sub>( $P < 0.05$ ), NDF、WSC 含量无显著差异( $P > 0.05$ )。

### 2.3 养殖废水灌溉和添加剂对玉米青贮营养成分的影响

青贮玉米原料经过密封发酵 3 d 后的营养成分见表 5。灌溉用水显著影响青贮饲料的 DM、CP、NDF、WSC 含量( $P < 0.001$ );青贮添加剂显著影响 DM、CP、NDF、ADF、WSC 含量( $P < 0.05$ );而二者的交互作用显著影响 NDF、ADF、WSC 含量( $P < 0.01$ )。综合来看, W<sub>1</sub>处理较 W<sub>2</sub>处理显著降低了玉米青贮的 DM 含量( $P < 0.05$ ),显著提高了 CP、WSC 含量( $P < 0.05$ )。A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>较 CK 使玉米青贮的 DM、CP 含量显著降低( $P < 0.05$ ), NDF、ADF、WSC 含量显著提高( $P < 0.05$ ); A<sub>3</sub>使玉米青贮的 NDF 含量显著提高( $P < 0.05$ )。W<sub>2</sub>CK 的 DM 含量显著高于除 W<sub>2</sub>A<sub>3</sub>外的 6 个处理( $P < 0.05$ )。W<sub>1</sub>A<sub>1</sub>的 WSC 含量显著高于除 W<sub>1</sub>A<sub>2</sub>外的 6 个处理( $P < 0.05$ )。

表4 不同灌溉用水对青贮玉米原料营养成分的影响

Table 4 Effects of different irrigation water on the nutritional components of silage corn raw materials

灌溉用水 Irrigation water	干物质 Dry matter (DM, %FM)	粗蛋白 Crude protein (CP, %DM)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %DM)	可溶性糖 Water-soluble carbohydrate (WSC, %DM)
W <sub>1</sub>	33.58b	10.05a	47.63a	25.57a	10.27a
W <sub>2</sub>	36.27a	8.21b	43.99a	21.02b	9.28a
SEM	0.612	0.436	1.266	1.170	0.328
P值 P-value	<0.001	0.004	0.169	0.024	0.144

表5 养殖废水灌溉和青贮添加剂在发酵3 d后对玉米青贮营养成分的影响

Table 5 Effects of livestock wastewater irrigation and silage additives on the nutritional components of maize silage after 3 days of fermentation

灌溉用水 Irrigation water	添加剂 Silage additive	DM (%FM)	CP (%DM)	NDF (%DM)	ADF (%DM)	WSC (%DM)
W <sub>1</sub>	CK	32.01cd	8.57a	43.69a	20.82ab	6.60c
	A <sub>1</sub>	31.00d	8.12a	41.97ab	19.99b	8.98a
	A <sub>2</sub>	31.25d	8.17a	41.99ab	19.45bc	8.11ab
	A <sub>3</sub>	31.61cd	8.46a	42.33ab	20.32ab	6.87c
W <sub>2</sub>	CK	35.13a	7.29b	36.75c	17.98c	6.87c
	A <sub>1</sub>	33.02bc	7.08b	43.22a	21.75a	7.10bc
	A <sub>2</sub>	33.03bc	7.03b	43.55a	21.81a	7.13bc
	A <sub>3</sub>	33.75ab	7.13b	40.13b	19.69bc	6.68c
SEM		0.291	0.133	0.504	0.267	0.178
P值 P-value	W	<0.001	<0.001	<0.001	0.523	<0.001
	A	0.001	0.020	<0.001	0.003	<0.001
	W×A	0.255	0.539	<0.001	<0.001	0.002
	W <sub>1</sub>	31.47b	8.33a	42.42a	20.15a	7.73a
	W <sub>2</sub>	33.73a	7.13b	40.91a	20.31a	6.95b
	CK	33.57a	7.93a	39.53c	19.40b	6.76b
	A <sub>1</sub>	32.01b	7.60b	42.59ab	20.87a	8.04a
	A <sub>2</sub>	32.14b	7.60b	42.93a	20.63a	7.62a
	A <sub>3</sub>	32.68ab	7.80ab	41.23b	20.01ab	6.77b

注: W, 灌溉用水; A, 青贮添加剂; W×A, 灌溉用水和青贮添加剂的交互作用; 下同。

Note: W, irrigation water; A, silage additives; W×A, the interaction between irrigation water and silage additives. The same below.

青贮玉米原料经过密封发酵80 d后的营养成分见表6。灌溉用水显著影响青贮饲料的DM、CP、NDF、ADF、WSC含量( $P<0.001$ );青贮添加剂显著影响NDF、ADF、WSC含量( $P<0.001$ );而二者的交互作用显著影响NDF、ADF、WSC含量( $P<0.001$ )。综合来看, W<sub>1</sub>较W<sub>2</sub>处理显著降低了DM、NDF、ADF含量( $P<0.05$ ),显著提高了CP、WSC含量( $P<0.05$ )。A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>较CK使玉米青贮的NDF、ADF含量显著提高( $P<0.05$ ); A<sub>1</sub>的WSC含量显著高于CK、A<sub>2</sub>和A<sub>3</sub>( $P<0.05$ )。W<sub>1</sub>A<sub>1</sub>的WSC含量显著高于其余7个处理( $P<0.05$ )。W<sub>2</sub>处理下, CK的NDF、ADF含量显著低于A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>和A<sub>3</sub>( $P<0.05$ )。

#### 2.4 养殖废水灌溉和添加剂对玉米青贮发酵品质的影响

青贮玉米发酵3 d后的发酵指标见表7。灌溉用水显著影响玉米青贮的pH值、LA和NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.001$ );青贮添加剂显著影响pH值、LA、AA和NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.05$ );而二者的交互作用显著影响pH值、LA、

表 6 养殖废水灌溉和青贮添加剂在发酵 80 d 后对玉米青贮营养成分的影响

Table 6 Effects of livestock wastewater irrigation and silage additives on the nutritional components of maize silage after 80 days of fermentation

灌溉用水 Irrigation water	添加剂 Silage additive	DM (%FM)	CP (%DM)	NDF (%DM)	ADF (%DM)	WSC (%DM)
W <sub>1</sub>	CK	29.65d	8.45a	38.60cd	19.74cd	5.00cd
	A <sub>1</sub>	29.45d	8.05a	37.71cd	18.86cd	8.57a
	A <sub>2</sub>	30.70bcd	8.18a	39.54cd	19.70cd	6.94b
	A <sub>3</sub>	29.90cd	8.36a	39.85bc	20.13bc	5.39c
W <sub>2</sub>	CK	33.67a	7.04b	37.61d	18.34d	5.54c
	A <sub>1</sub>	31.65abcd	7.11b	41.92ab	21.43ab	5.45c
	A <sub>2</sub>	32.41abc	7.16b	42.23a	21.71a	4.64d
	A <sub>3</sub>	32.93ab	7.05b	43.02a	21.94a	5.32cd
SEM		0.348	0.128	0.448	0.285	0.279
P 值 P-value	W	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A	0.165	0.442	<0.001	<0.001	<0.001
	W×A	0.164	0.087	<0.001	<0.001	<0.001
	W <sub>1</sub>	29.92b	8.26a	38.87b	19.60b	6.61a
	W <sub>2</sub>	32.67a	7.09b	41.20a	20.86a	5.27c
	CK	31.66a	7.74a	38.10c	19.04c	5.32c
	A <sub>1</sub>	30.55a	7.58a	39.82b	20.15b	7.32a
	A <sub>2</sub>	31.56a	7.67a	41.15a	20.90ab	6.02b
	A <sub>3</sub>	31.41a	7.70a	41.44a	21.04a	5.36c

表 7 养殖废水灌溉和青贮添加剂在发酵 3 d 后对玉米青贮发酵品质的影响

Table 7 Effects of livestock wastewater irrigation and silage additives on the fermentation quality of maize silage after 3 days of fermentation

灌溉用水 Irrigation water	添加剂 Silage additive	pH	乳酸 Lactic acid (LA, %DM)	乙酸 Acetic acid (AA, %DM)	丙酸 Propionic acid (PA, %DM)	丁酸 Butyric acid (BA, %DM)	氨态氮 Ammonium nitrogen (NH <sub>3</sub> -N, %TN)
W <sub>1</sub>	CK	3.77e	8.62a	1.34a	ND	ND	3.69a
	A <sub>1</sub>	3.81de	6.74bc	0.39d	ND	ND	2.90b
	A <sub>2</sub>	3.79e	7.27ab	0.54cd	ND	ND	3.38a
	A <sub>3</sub>	3.83cde	7.39ab	1.29a	ND	ND	3.74a
W <sub>2</sub>	CK	3.88bcd	6.05bcd	0.68c	ND	ND	2.44c
	A <sub>1</sub>	3.91b	5.74cd	1.03b	ND	ND	2.86b
	A <sub>2</sub>	4.08a	3.34e	1.19ab	ND	ND	2.85b
	A <sub>3</sub>	3.89bc	5.30d	0.75c	ND	ND	2.39c
SEM		0.020	0.335	0.079	—	—	0.104
P 值 P-value	W	<0.001	<0.001	0.431	—	—	<0.001
	A	<0.001	<0.001	<0.001	—	—	0.033
	W×A	<0.001	<0.001	<0.001	—	—	<0.001
	W <sub>1</sub>	3.80b	7.51a	0.89b	ND	ND	3.43a
	W <sub>2</sub>	3.94a	5.02b	0.90b	ND	ND	2.63b
	CK	3.83b	7.59a	0.95ab	ND	ND	3.07ab
	A <sub>1</sub>	3.86b	6.24b	0.78c	ND	ND	2.88b
	A <sub>2</sub>	3.94a	5.30c	0.86bc	ND	ND	3.12a
	A <sub>3</sub>	3.86b	6.35b	1.02a	ND	ND	3.06ab

注: ND, 未检出; —, 表示空值。下同。

Note: ND, not detected; —, represents a null value. The same below.

AA和NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.001$ )。综合来看,W<sub>1</sub>较W<sub>2</sub>显著提高了LA、NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.05$ ),并使pH值显著降低( $P<0.05$ );A<sub>2</sub>的pH值显著高于CK、A<sub>1</sub>、A<sub>3</sub>( $P<0.05$ ),CK的LA含量显著高于A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>( $P<0.05$ ),A<sub>1</sub>的AA含量显著低于CK和A<sub>3</sub>( $P<0.05$ )。各处理组均未检测到丙酸和丁酸。

青贮玉米发酵80 d后的发酵指标见表8。灌溉用水显著影响玉米青贮的pH值、LA和NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.05$ );青贮添加剂显著影响pH值、AA和NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.05$ );而二者的交互作用显著影响pH值、AA和NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.05$ )。综合来看,W<sub>1</sub>较W<sub>2</sub>显著提高了LA、NH<sub>3</sub>-N含量( $P<0.05$ );A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>的pH值显著低于CK和A<sub>1</sub>( $P<0.05$ ),A<sub>1</sub>的AA含量显著低于CK、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>( $P<0.05$ ),且A<sub>1</sub>的NH<sub>3</sub>-N含量显著低于CK、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>( $P<0.05$ )。各处理组均未检测到丙酸和丁酸。

表8 养殖废水灌溉和青贮添加剂在发酵80 d后对玉米青贮发酵品质的影响

Table 8 Effects of livestock wastewater irrigation and silage additives on the fermentation quality of maize silage after 80 days of fermentation

灌溉用水 Irrigation water	添加剂 Silage additive	pH	LA (%DM)	AA (%DM)	PA (%DM)	BA (%DM)	NH <sub>3</sub> -N (%TN)
W <sub>1</sub>	CK	3.79abc	13.10a	2.12a	ND	ND	8.28a
	A <sub>1</sub>	3.88a	11.97abc	0.65d	ND	ND	6.69bc
	A <sub>2</sub>	3.73bc	12.18ab	0.96c	ND	ND	7.74ab
	A <sub>3</sub>	3.77abc	11.45abcd	1.90a	ND	ND	7.93ab
W <sub>2</sub>	CK	3.84ab	8.78d	1.11c	ND	ND	5.24d
	A <sub>1</sub>	3.75abc	9.00d	1.43b	ND	ND	5.07d
	A <sub>2</sub>	3.72bc	9.39bcd	1.86a	ND	ND	5.85cd
	A <sub>3</sub>	3.67c	9.22cd	1.50b	ND	ND	5.01d
SEM		0.016	0.385	0.104	—	—	0.327
P值 P-value	W	0.030	<0.001	0.122	—	—	<0.001
	A	0.003	0.702	<0.001	—	—	0.011
	W×A	0.032	0.346	<0.001	—	—	0.034
	W <sub>1</sub>	3.79a	12.19a	1.46b	ND	ND	7.66a
	W <sub>2</sub>	3.75a	9.12b	1.51b	ND	ND	5.27b
	CK	3.82a	11.37a	1.61ab	ND	ND	6.76a
	A <sub>1</sub>	3.82a	10.19a	1.12c	ND	ND	5.72b
	A <sub>2</sub>	3.72b	10.78a	1.50b	ND	ND	6.79a
	A <sub>3</sub>	3.72b	10.34a	1.70a	ND	ND	6.47a

## 2.5 青贮发酵品质和营养成分的相关性分析

灌溉用水和添加剂处理下,发酵3 d后玉米青贮营养成分和发酵品质9个指标的皮尔逊相关性分析结果见图1。DM含量与CP、NH<sub>3</sub>-N含量呈显著负相关( $P<0.05$ );CP含量与pH值呈显著负相关( $P<0.05$ ),与LA、NH<sub>3</sub>-N含量呈显著正相关( $P<0.01$ );NDF含量与ADF含量呈显著正相关( $P<0.01$ );WSC含量与AA含量呈显著负相关( $P<0.05$ );pH值与LA含量呈显著负相关( $P<0.001$ )。

灌溉用水和添加剂处理下,发酵80 d后玉米青贮营养成分和发酵品质9个指标的皮尔逊相关性分析结果见图2。DM含量与CP、LA、NH<sub>3</sub>-N含量呈显著负相关( $P<0.05$ );CP含量与LA、NH<sub>3</sub>-N含量呈显著正相关( $P<0.001$ );NDF含量与ADF含量呈显著正相关( $P<0.001$ ),与pH值呈显著负相关( $P<0.01$ );ADF含量与pH值呈显著负相关( $P<0.01$ );WSC含量与AA含量呈显著负相关( $P<0.01$ );LA含量与NH<sub>3</sub>-N含量呈显著正相关( $P<0.001$ )。

## 2.6 不同灌溉用水和添加剂对玉米青贮品质的综合评价

在营养成分和发酵品质共9个指标中,以DM、CP、WSC、LA最高,NDF、ADF、pH、AA、NH<sub>3</sub>-N最低处理的

值为参考序列,对发酵时间为 3 d 的所有处理组进行灰色关联度分析,综合评价结果显示,品质最佳的处理是 W<sub>1</sub>A<sub>1</sub>组,其次是 W<sub>2</sub>CK、W<sub>1</sub>A<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>A<sub>3</sub>等处理组, W<sub>2</sub>A<sub>2</sub>排名最低(表 9)。

对发酵时间为 80 d 的所有处理组进行灰色关联度分析,综合评价结果显示,品质最佳的处理同样是 W<sub>1</sub>A<sub>1</sub>组,其次是 W<sub>1</sub>A<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>CK、W<sub>2</sub>A<sub>1</sub>等处理组, W<sub>2</sub>A<sub>2</sub>排名最低(表 10)。

### 3 讨论

#### 3.1 养殖废水灌溉对土壤理化性质和青贮玉米原料品质的影响

科学合理地利用养殖废水进行农田灌溉能显著增加土壤养分含量,从而减少农田化肥用量,并节约肥料资源<sup>[19]</sup>。将养殖废水灌溉农田,相当于间接给农田施入了有机肥料。有机肥含有大量的有机质及未矿化营养元素,可以有效改良土壤性质,增强土壤微生物的活性,增加了土壤固持和释放养分的能力,进而增加土壤养分<sup>[20]</sup>。在本研究中, W<sub>1</sub>处理下土壤有效磷、速效钾含量显著高于 W<sub>2</sub>处理,说明养殖废水灌溉可以使土壤中养分含量增加。

土壤盐分升高会显著抑制玉米种子的萌发率和萌发速度<sup>[21]</sup>。在盐胁迫下,玉米幼苗的生长发育均会受到抑制,导致生长迟缓、产量下降,甚至绝产<sup>[22]</sup>。而幼苗期的生长迟缓将直接导致玉米整个生育期的延长。此外有研究发现,氮肥含量过高会导致玉米植株的徒长,即茎、叶过度生长,而穗、籽粒的发育会受到抑制。这种营养生长和生殖生长之间的不平衡会使得玉米将更多的能量和资源用于茎叶的生物量积累,从而延迟开花和籽粒灌浆的进程<sup>[23]</sup>。生育期的不同会改变青贮饲料的营养成分的含量<sup>[24]</sup>。随着玉米生育期从乳熟前期至蜡熟中期的推进,DM 含量会显著升高,CP 含量降低,NDF 和 ADF 含量先降低后升高,WSC 含量呈先升高后降低<sup>[25]</sup>。本研究中, W<sub>1</sub>下的土壤全盐含量和全氮含量均高于 W<sub>2</sub>,且 W<sub>1</sub>下青贮玉米原料的 DM 含量显著低于 W<sub>2</sub>,CP、ADF、WSC 含量显著高于 W<sub>2</sub>。所以 W<sub>1</sub>土壤中全盐和全氮含量的升高可能导致了玉米生育期发生延迟。

#### 3.2 养殖废水灌溉和添加剂对全株玉米青贮营养成分的影响

由于 W<sub>1</sub>处理导致的原料差异,在青贮早期 W<sub>1</sub>的 DM 含量显著低于 W<sub>2</sub>,CP、WSC 含量显著高于 W<sub>2</sub>。W<sub>1</sub>处理的青贮玉米原料处于乳熟末期,细胞壁木质化程度较低,纤维结构相对疏松;而 W<sub>2</sub>处理的青贮玉米原料处于蜡熟前期,玉米纤维结构更致密,木质素含量较高,降解难度更大<sup>[26]</sup>。在发酵前期, W<sub>1</sub>和 W<sub>2</sub>处理下的 NDF 和 ADF 含量并无显著性差异,但在发酵稳定期 W<sub>1</sub>的 NDF 和 ADF 含量显著低于 W<sub>2</sub>,这可能是由于在发酵前期,乳酸菌、明

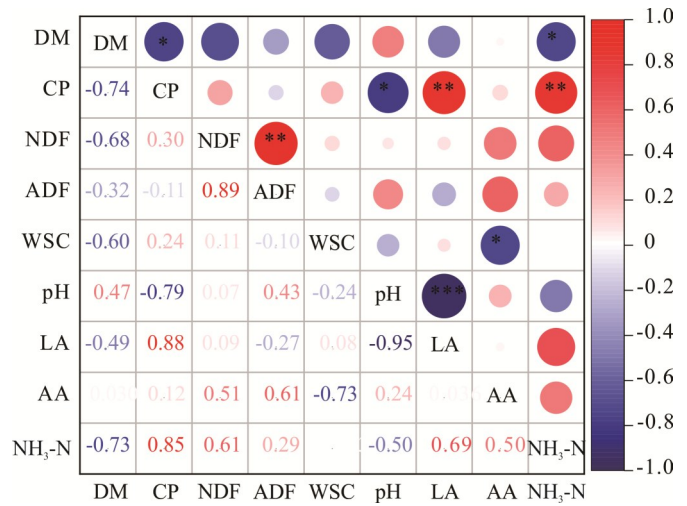


图 1 发酵 3 d 后玉米青贮品质的 Pearson 相关性分析  
Fig. 1 Pearson correlation analysis of maize silage quality after 3 days of fermentation

\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$ . DM: 干物质 Dry matter; CP: 粗蛋白 Crude protein; NDF: 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; WSC: 可溶性糖 Water-soluble carbohydrate; LA: 乳酸 Lactic acid; AA: 乙酸 Acetic acid; NH<sub>3</sub>-N: 氨态氮 Ammonium nitrogen. 下同 The same below.

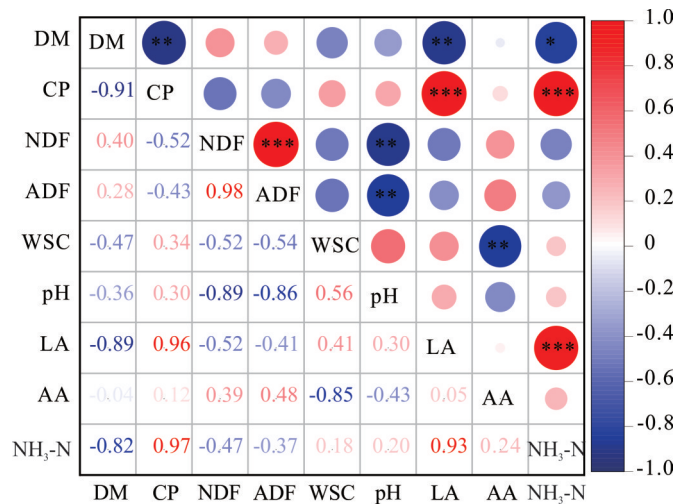


图 2 发酵 80 d 后玉米青贮品质的 Pearson 相关性分析  
Fig. 2 Pearson correlation analysis of maize silage quality after 80 days of fermentation

\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$ .

串珠菌等微生物迅速产生乳酸,但发酵环境中的酸浓度并不足以使NDF和ADF发生酸解,导致二者的NDF和ADF含量差异不大。随着发酵时间延长至80 d,由于前期建立的酸性环境相对稳定,可以使部分纤维素和半纤维素通过酸解作用被降解为WSC<sup>[27]</sup>。其中W<sub>1</sub>疏松的纤维结构更容易接触到酸并使纤维分解,导致NDF和ADF含量显著下降。而W<sub>2</sub>处理中致密的纤维结构阻碍了酸解作用,纤维分解较少,含量相对较高。

青贮前期乳酸菌的细胞呼吸和快速繁殖,会消耗青贮饲料中的部分营养物质,进而导致青贮饲料NDF和ADF比例增加<sup>[28]</sup>。本研究中,青贮发酵前期A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>的NDF、ADF均高于CK,这与前者得到的研究结果相同。添加剂A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>中的植物乳杆菌为同型发酵乳酸菌,A<sub>3</sub>中除植物乳杆菌外还添加了为异型发酵乳酸菌的布氏乳杆菌。同型乳酸发酵产LA的转化率高,能耗低,异型乳酸发酵除产LA外还产生AA和CO<sub>2</sub>,转化效率不及同型发酵乳酸菌<sup>[29]</sup>,导致了A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>在青贮发酵前期耗能较低,WSC含量显著高于CK和A<sub>3</sub>。而在青贮稳定期A<sub>1</sub>的WSC显著高于CK、A<sub>2</sub>和A<sub>3</sub>,说明A<sub>1</sub>中的乳酸菌耗能低且产酸效率高于A<sub>2</sub>,导致了WSC含量高于其余3个处理。

### 3.3 养殖废水灌溉和添加剂对全株玉米青贮发酵品质的影响

pH值能够有效地评估青贮饲料保存的完好程度并判断其是否发生变质,在合理范围之内,pH值越低,说明青贮效果越好。在发酵前期,W<sub>1</sub>的pH值显著低于W<sub>2</sub>。从原料角度分析,由于在收获时W<sub>1</sub>处理较W<sub>2</sub>拥有更高的含水量以及较高的WSC含量<sup>[30]</sup>,发酵底物比W<sub>2</sub>丰富,促使乳酸菌快速繁殖并产生大量LA,从而加速pH值的下降。所以在发酵前期,W<sub>1</sub>的pH值显著低于W<sub>2</sub>,LA含量显著高于W<sub>2</sub>。青贮中NH<sub>3</sub>-N是蛋白质分解的直接产物,其浓度与原料CP含量呈正相关<sup>[31-32]</sup>。发酵效果良好的青贮饲料中NH<sub>3</sub>-N含量应不超过TN的10%<sup>[33]</sup>。在本研究中,由于W<sub>1</sub>原料中含有较高的CP含量,导致在整个发酵时期W<sub>1</sub>的NH<sub>3</sub>-N含量均显著高于W<sub>2</sub>,但未超过TN的10%。

青贮发酵效果的差异可能是由青贮原料附生的微生物群落与外源添加剂共同导致的<sup>[34]</sup>。青贮玉米本身附着有多种微生物,包括不同种类的乳酸杆菌、酵母菌、霉菌等。当添加外源乳酸菌时,它们会与原料上原有的微生物竞争有限的营养物质和生存空间。如果外源乳酸菌的添加量不足或活力较低,可能无法有效建立优势菌群,导致青贮发酵效果不佳<sup>[35]</sup>。添加高活性的外源乳酸菌可以迅速建立优势菌群,加速青贮过程中的乳酸发酵,克服青贮料本身附着乳酸菌数量不足或活性不高的限制<sup>[36]</sup>。由于新鲜牧草附着微生物的种类和数量不同,CK本身含有的乳酸菌可能已满足其进行自然发酵。加入添加剂后反而与附生乳酸菌发生了拮抗,抑制了乳酸的生成,导致了A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>在青贮发酵前期的LA含量显著低于CK。在发酵稳定期,各添加剂处理下LA含量无差异。由于A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>为同型发酵乳酸菌,在整个发酵时期W<sub>1</sub>处理的AA含量均显著低于CK,而A<sub>3</sub>中异型发酵乳酸菌的存在使得

表9 发酵3 d玉米青贮品质灰色关联综合评价

Table 9 Grey relational comprehensive evaluation of maize silage quality after 3 days of fermentation

灌溉用水 Irrigation water	添加剂 Silage additive	关联度 Correlation degree	排名 Ranking
W <sub>1</sub>	CK	0.8365	5
	A <sub>1</sub>	0.9251	1
	A <sub>2</sub>	0.8857	3
	A <sub>3</sub>	0.8241	7
W <sub>2</sub>	CK	0.8994	2
	A <sub>1</sub>	0.8271	6
	A <sub>2</sub>	0.8112	8
	A <sub>3</sub>	0.8689	4

表10 发酵80 d玉米青贮品质灰色关联综合评价

Table 10 Grey relational comprehensive evaluation of maize silage quality after 80 days of fermentation

灌溉用水 Irrigation water	添加剂 Silage additive	关联度 Correlation degree	排名 Ranking
W <sub>1</sub>	CK	0.8321	6
	A <sub>1</sub>	0.9441	1
	A <sub>2</sub>	0.8854	2
	A <sub>3</sub>	0.8269	7
W <sub>2</sub>	CK	0.8839	3
	A <sub>1</sub>	0.8458	4
	A <sub>2</sub>	0.8190	8
	A <sub>3</sub>	0.8428	5

AA 的含量相对较高。在  $W_2$  处理下,青贮原料附着乳酸菌的类型、数量可能与  $W_1$  差异较大,导致  $A_1$ 、 $A_2$  表现出的能力与在  $W_1$  中相反。此外,一株高效的发酵菌株能够最大限度地保留青贮中的营养成分,包括 CP、WSC 和其他营养物质<sup>[37]</sup>。本研究中添加剂  $A_1$ 、 $A_2$  的菌种虽均为同型发酵乳酸菌,但通过对青贮中 WSC 的消耗以及 LA 和 AA 的含量分析得出, $A_1$  的发酵效率高于  $A_2$ 。而  $A_3$  在同型发酵乳酸菌的基础上还添加了异型发酵乳酸菌,其发酵效率不及同型发酵乳酸菌。相比之下  $A_3$  对底物中 WSC 消耗大,产 LA 含量少,而产 AA 含量高。从功能方面考虑, $A_1$  在 3 个添加剂中发酵效率最高。此外,添加剂  $A_1$  在  $W_1$  下所表现出的能力要优于  $W_2$ 。综上,由于添加剂  $A_1$  发酵效率最高,并与  $W_1$  原料中附生微生物协同作用,促使  $W_1A_1$  成为品质最优的处理。

#### 3.4 养殖废水灌溉和添加剂对全株玉米青贮品质的相关性分析

在发酵初期 LA 快速积累导致 pH 值降低,通过抑制不良微生物的活性,减少对蛋白质的降解,所以在发酵初期 pH 值与 LA 和 CP 具有显著的负相关性。青贮原料的品质决定了青贮后各成分的变化趋势<sup>[38]</sup>。随着玉米植株成熟度的提升,DM 积累显著增加,CP 含量呈下降趋势,导致了 DM 与 CP 呈显著的负相关性。在发酵过程中,高 DM 可能抑制乳酸菌和有害菌活性,减少了对可溶性蛋白的利用,间接导致 CP 降解减少<sup>[39]</sup>,从而降低  $NH_3$ -N,使 DM 与  $NH_3$ -N 表现出显著的负相关性。WSC 是乳酸菌的主要底物,当 WSC 充足时,同型发酵占主导,LA 生成增加而 AA 生成减少。有研究表明,添加糖类添加剂可显著降低 AA 比例<sup>[40]</sup>。反之 WSC 不足时异型发酵增强,AA 产量上升<sup>[41]</sup>,使 WSC 与 AA 呈显著负相关性。原料 CP 含量越高,在发酵过程中被微生物分解产生的  $NH_3$ -N 越多,有研究表明,CP 从 8% 增至 12% 时, $NH_3$ -N 从 5.2% 升至 9.8%<sup>[42-43]</sup>。此外,CP 降解产生的肽类和氨基酸可作为乳酸菌代谢前体,进一步促进 LA 合成<sup>[44]</sup>,导致了 CP 与 LA 和  $NH_3$ -N 表现出显著的正相关性。随着发酵持续进行,DM 含量会随着微生物的呼吸作用而损失<sup>[45]</sup>,并随着发酵时间的延长呈下降趋势<sup>[46]</sup>,LA 则会随着发酵的进行持续积累<sup>[47]</sup>,导致在发酵后期 DM 与 LA 表现出显著的负相关性。而 LA 的持续积累可能伴随蛋白质的缓慢水解,LA 浓度超过 6% 时, $NH_3$ -N 从 7.3% 升至 10.5%,这可能与乳酸菌自溶释放胞内蛋白酶有关<sup>[44,48]</sup>,所以在发酵后期 LA 与  $NH_3$ -N 表现出显著的正相关性。由于微生物需要对底物进行持续消耗来维持玉米青贮的低 pH 值,使 DM 含量在发酵过程中持续降低<sup>[49]</sup>;导致在 DM 中 NDF 和 ADF 含量的相对比例上升,所以在发酵后期 NDF 和 ADF 在表观上出现了与 pH 值显著的负相关性。

## 4 结论

养殖废水灌溉增加了土壤中有效养分含量,显著降低了青贮玉米原料的 DM 含量,提高了 CP、ADF 含量。养殖废水灌溉以及不同添加剂对全株玉米青贮的营养成分和发酵品质指标均有显著影响,二者交互作用明显。综合 9 项指标通过灰色关联分析法得出,在青贮发酵的前期和稳定期, $W_1A_1$  均为最优处理。综上所述,在养殖废水灌溉条件下添加青贮邦可以提高青贮玉米‘峰单 189’发酵 80 d 的青贮品质,其效果优于地下水灌溉条件下自然青贮。

## 参考文献 References:

- [1] Department of Rural Surveys of China National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook 2023. Beijing: China Statistics Press, 2023.  
国家统计局农村社会经济调查司. 2023 中国农村统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] Zou H Y, Zhang P Y, Hou S C, *et al.* Effect of phosphoric acid-microbial agent on ammonia emission reduction in liquid slurry. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(18): 253–260.  
邹宏宇, 张朋月, 侯善策, 等. 磷酸-微生物菌剂对生猪粪水氨气减排效果的影响. 农业工程学报, 2025, 41(18): 253–260.
- [3] Williams J. Contribution of livestock farming to environmental pollution in China. Journal of Animal Health, 2024, 4(1): 43–53.
- [4] Zhai C Y, Luo J M, Liu C J, *et al.* Effects of long-term manure fertilizer on saline-sodic properties and stoichiometric ratio of saline-sodic soil in Songnen plain. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(2): 153–161.

- 翟车宇, 骆静梅, 刘昌杰, 等. 长期施用有机肥对松嫩平原盐碱土壤盐碱性质和化学计量比的影响. 中国农业科技导报, 2024, 26(2): 153–161.
- [5] Lin J J, Liu D, Li T Z. Exploration of soil remediation technologies and application practices. Yangling: Northwest A & F University Press, 2019.  
林俊杰, 刘丹, 李廷真. 土壤修复技术与应用实践探究. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2019.
- [6] Wang L Y, Yan H, Li J H, *et al.* Whole maize silage nutrition composition and its influence factors: A meta-analysis. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(2): 1352–1360.  
王里彦, 严慧, 李金辉, 等. 基于Meta分析的全株玉米青贮营养成分含量及其影响因素. 动物营养学报, 2022, 34(2): 1352–1360.
- [7] Lu H L, Cui X W, Gao P, *et al.* Cattle farm sewage: A preliminary investigation on its application in lily's green production. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(28): 80–84.  
卢红玲, 崔新卫, 高鹏, 等. 养牛场污水在百合绿色生产中的应用效果初报. 中国农学通报, 2019, 35(28): 80–84.
- [8] Zhang X D, Li J, Xiao H X, *et al.* Effects of different microbial enzyme treatments on silage quality and *in vitro* fermentation characteristics of rice straw. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2380–2387.  
张现东, 李靖, 肖海翔, 等. 不同菌酶处理对水稻秸秆青贮品质和体外发酵特性的影响. 草地学报, 2025, 33(7): 2380–2387.
- [9] Bao S D. Soil analysis in agricultural chemistry (3rd Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.  
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] 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 in feedstuffs, GB/T 6435–2014. Beijing: Standards Press of China, 2014.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中水分的测定, GB/T 6435–2014. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [11] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude protein in feeds-Kjeldahl method, GB/T 6432–2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.  
国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法, GB/T 6432–2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] Murphy R P. A method for the extraction of plant samples and the determination of total soluble carbohydrates. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1958, 9(11): 714–717.
- [13] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds, GB/T 20806–2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.  
国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定, GB/T 20806–2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [14] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of acid detergent fiber (ADF) in feeds, NY/T 1459–2022. Beijing: China Agriculture Press, 2022.  
中华人民共和国农业农村部. 饲料中酸性洗涤纤维的测定, NY/T 1459–2022. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- [15] Virtanen A I, Miettinen J K. Estimation of volatile fatty acids and ammonia in silage by means of paper chromatography. Nature, 1951, 168(4268): 294–295.
- [16] Han L Y, Zhou H. Effects of ensiling processes and antioxidants on fatty acid concentrations and compositions in corn silages. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2013, 4(1): 48.
- [17] Weatherburn M W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. Analytical Chemistry, 1967, 39(8): 971–974.
- [18] Zhang N, Wu W F, Li S Y, *et al.* Comprehensive evaluation of paddy quality by different drying methods, based on gray relational analysis. Agriculture, 2022, 12(11): 1857.
- [19] Yang H H, Du J, Liu H E, *et al.* Effects of livestock wastewater irrigation on phosphorus forms content in different soil layers. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(3): 318–323.  
杨焕焕, 杜君, 刘红恩, 等. 养殖废水灌溉对不同土层磷素形态含量的影响. 中国土壤与肥料, 2021(3): 318–323.
- [20] Cheng H Y, Tang Z D, Lei Y M, *et al.* Effects of organic fertilizer partially substituting chemical fertilizer on yield, quality and soil fertility of silage maize. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1702–1712.  
程红玉, 汤振东, 雷玉明, 等. 有机肥替代部分化肥对青贮玉米产量、品质及土壤肥力的影响. 草地学报, 2025, 33(5):

1702—1712.

- [21] Zhou T F, Li R, Liu Q Q, *et al.* Analysis of salt tolerance at the germination stage of 118 maize hybrid varieties in the Northeast China. *Crops*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250902.1141.002>.  
周婷婷, 李冉, 刘倩倩, 等. 东北区 118 份玉米杂交种萌发期耐盐性分析. *作物杂志*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250902.1141.002>.
- [22] Wang R H, Li Y S, Wang J C, *et al.* Effects of salt—low temperature combined stress on growth and physiological characteristics of maize seedlings. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/36.1028.S.20250808.1349.008>.  
王瑞红, 李永生, 汪军成, 等. 盐—低温复合胁迫对玉米幼苗生长及生理特性的影响. *江西农业大学学报*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/36.1028.S.20250808.1349.008>.
- [23] Santos T O, Amaral J A T, Moulin M M. Maize breeding for low nitrogen inputs in agriculture: Mechanisms underlying the tolerance to the abiotic stress. *Stresses*, 2023, 3(1): 136—152.
- [24] Zheng L W, Tian J F, Yang W, *et al.* Effect of cultivar and growth stage on fermentation quality of maize silage. *Pratacultural Science*, 2023, 40(4): 1105—1114.  
郑立文, 田健帆, 杨蔚, 等. 品种和生育期对玉米青贮发酵品质的影响. *草业科学*, 2023, 40(4): 1105—1114.
- [25] Lin S C. Study on feeding value evaluation and difference of silage maize varieties in different harvest periods. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.  
林仕超. 不同收获期青贮玉米品种饲用价值评价及差异研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [26] Firdous R, Gilani A H. Effect of stage of growth and cultivar on chemical composition of whole maize plant and its morphological fractions. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 1999, 12(3): 366—370.
- [27] Zhao J P, Zhao J, Li J F, *et al.* Effect of different additives on fermentation quality and structural carbohydrates compositions of rice straw silage. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(1): 152—159.  
赵金鹏, 赵杰, 李君凤, 等. 不同添加剂对水稻秸秆青贮发酵品质和结构性碳水化合物组分的影响. *南京农业大学学报*, 2019, 42(1): 152—159.
- [28] Wang X J, Qi J, Che M M, *et al.* Quality and rumen fermentation characteristics of mixed silage intercropping with corn and sorghum hybrid sudan grass. *Grassland and Turf*, 2023, 43(6): 101—108.  
王晓娟, 祁娟, 车美美, 等. 玉米与高丹草间作混合青贮品质及瘤胃发酵特性. *草原与草坪*, 2023, 43(6): 101—108.
- [29] Chen P, Shi H J, Hao Y X, *et al.* Research progress on types of lactic acid bacteria and lactic acid synthesis pathway in silage. *China Feed*, 2024(19): 1—7.  
陈萍, 师慧娟, 郝怡欣, 等. 青贮乳酸菌类型和乳酸合成途径的研究进展. *中国饲料*, 2024(19): 1—7.
- [30] Der Bedrosian M C, Nestor Jr K E, Kung Jr L. The effects of hybrid, maturity, and length of storage on the composition and nutritive value of maize silage. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(9): 5115—5126.
- [31] Jayanegara A, Wardiman B, Kondo M, *et al.* Fermentative quality of silage as affected by protein level in the ensiled material: A meta-analysis. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 462(1): 012001.
- [32] García Á. Ammonia-N concentration in alfalfa silage and its effects on dairy cow performance: A meta-analysis. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 2017, 30(3): 175—184.
- [33] Zhan J Q, Chen D D, Guo T X, *et al.* Effects of different additives on silage quality of Chinese medicine residue. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3851—3857.  
詹佳琦, 陈丹丹, 郭田心, 等. 不同添加剂对中药渣青贮品质的影响. *草地学报*, 2023, 31(12): 3851—3857.
- [34] Li Y Y, Du S, Sun L, *et al.* Effects of lactic acid bacteria and molasses additives on dynamic fermentation quality and microbial community of native grass silage. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 830121.
- [35] Kalúzová M, Kačániová M, Bíro D, *et al.* The change in microbial diversity and mycotoxins concentration in corn silage after addition of silage additives. *Diversity*, 2022, 14(8): 592.
- [36] Liu J L, Liu M J, Sheng P J, *et al.* Biotechnological effects of *Lactobacillus plantarum*, cellulase, and xylanase on nutritional quality and microbial community structure of corn stover silage. *Fermentation*, 2025, 11(1): 14.
- [37] Su J Q, Xue Y, Zhang K L, *et al.* The effects of *Lactobacillus plantarum*, *Bacillus subtilis*, a lignocellulolytic enzyme system, and their combination on the fermentation profiles, chemical composition, bacterial community, and *in situ* rumen digestion of fresh waxy corn stalk silage. *Animals*, 2024, 14(23): 3442.
- [38] Sarıççek B Z, Yıldırım B, Kocabaş Z, *et al.* Effect of storage time on nutrient composition and quality parameters of maize

- silage. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 2016, 4(11): 934–939.
- [39] Yu R H, Mo F, Zhao L H, *et al.* Effect of wilting on chemical and physical characteristics of silage with corn stalk. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(6): 13–17.  
余汝华, 莫放, 赵丽华, 等. 凋萎时间对青玉米秸秆青贮饲料营养成分的影响. 中国农学通报, 2007, 23(6): 13–17.
- [40] Babaeinasab Y, Rouzbehan Y, Fazaeli H, *et al.* Chemical composition, silage fermentation characteristics, and *in vitro* ruminal fermentation parameters of potato-wheat straw silage treated with molasses and lactic acid bacteria and maize silage. Journal of Animal Science, 2015, 93(9): 4377–4386.
- [41] Wang X L, Song J M, Liu Z H, *et al.* Fermentation quality and microbial community of corn stover or rice straw silage mixed with soybean curd residue. Animals, 2022, 12(7): 919.
- [42] Yu M, Wang P, Li F H, *et al.* Fermentation quality and *in vitro* digestibility of sweet corn processing byproducts silage mixed with millet hull or wheat bran and inoculated with a lactic acid bacteria. Fermentation, 2024, 10(5): 254.
- [43] Da Silva L D, Pereira O G, Da Silva T C, *et al.* Effects of silage crop and dietary crude protein levels on digestibility, ruminal fermentation, nitrogen use efficiency, and performance of finishing beef cattle. Animal Feed Science and Technology, 2016, 220: 22–33.
- [44] Han L Y, Zhou H. Effects of ensiling processes and antioxidants on fatty acid concentrations and compositions in maize silages. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2013, 4: 1–7.
- [45] Muck R, Nadeau E, McAllister T, *et al.* Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 3980–4000.
- [46] Xu J Z. Effect of complex enzyme fermented total mixed ration on growth performance, nutrient digestion, rumen fermentation and flora in beef cattle. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2023.  
徐均钊. 复合酶发酵全混合日粮对肉牛生长性能、养分消化率、瘤胃发酵和菌群的影响. 通辽: 内蒙古民族大学, 2023.
- [47] Wang L L, Li Y F, Yu Y S, *et al.* Effects of a delayed harvest and additives on the fermentation quality of corn stalk silage. Agriculture, 2024, 14(2): 174.
- [48] Arbabi S, Ghoorchi T, Hasani S. The effect of delayed ensiling and application of propionic acid-based additives on the nutritive value, aerobic stability and degradability of maize silage. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2008, 11(24): 2646.
- [49] Guo G, Shen C, Liu Q, *et al.* The effect of lactic acid bacteria inoculums on *in vitro* rumen fermentation, methane production, ruminal cellulolytic bacteria populations and cellulase activities of corn stover silage. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(3): 838–847.