

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.034

引用格式:张丽娟, 谢开云, 颜安, 等. 青贮玉米与甜高粱/籽粒玉米间作系统的生产性能研究[J]. 草地学报, 2026, 34(5):1942—1952

ZHANG Li-juan, XIE Kai-yun, YAN An, et al. Research on the Production Performance of Intercropping Systems of Silage Corn and Sweet Sorghum/Grain Corn[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1942—1952

青贮玉米与甜高粱/籽粒玉米间作系统的生产性能研究

张丽娟, 谢开云*, 颜安, 王岚, 崔荷婷, 朱震

(新疆农业大学草业学院/西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究青贮玉米(*Zea mays* L.)与甜高粱(*Sorghum bicolor*)/籽粒玉米不同间作模式对饲草产量、品质及种间关系的影响,并筛选最优间作配置模式,本试验以青贮玉米(S)、甜高粱(T)和籽粒玉米(M)单作为对照,设置了6种间作模式(S_4T_2 :4行青贮玉米:2行甜高粱; S_3T_3 :3行青贮玉米:3行甜高粱; S_2T_4 :2行青贮玉米:4行甜高粱; S_4M_2 :4行青贮玉米:2行籽粒玉米; S_3M_3 :3行青贮玉米:3行籽粒玉米; S_2M_4 :2行青贮玉米:4行籽粒玉米)。结果表明:与单作相比,间作显著影响各饲草作物的农艺性状($P<0.05$)。 S_3T_3 处理的鲜草产量最高,达 $107.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。 S_3M_3 处理的干草产量、粗蛋白产量和粗蛋白含量均最高,分别为 $36.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $3.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和9.6%,较青贮玉米单作分别提高17.3%、14.6%和58.2%。间作显著提高了土地当量比(Land equivalent ratio, $LER=1.1\sim1.4$),表明系统具有产量优势。其中, S_2T_4 、 S_3T_3 、 S_2M_4 和 S_3M_3 处理中青贮玉米表现出更强的相对竞争力和营养竞争比率(Aggressivity, $A>0$; Competitive ratio, $CR>1$)。综合分析,3行青贮玉米与3行甜高粱间作(S_3T_3)为最佳模式,可有效提升作物产量与品质。

关键词:间作;青贮玉米;生产性能;营养品质;种间竞争

中图分类号:S513;S548

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1942-11

Research on the Production Performance of Intercropping Systems of Silage Corn and Sweet Sorghum/Grain Corn

ZHANG Li-juan, XIE Kai-yun*, YAN An, WANG Lan, CUI He-ting, ZHU Zhen

(College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology in the Western Arid Desert Region, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To explore the effects of different intercropping patterns of silage corn (*Zea mays* L.) and sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) / grain corn (*Z. mays*) on forage yield, quality, and interspecies relationships, and to identify the optimal intercropping configuration, this experiment used silage corn (S), sweet sorghum (T), and grain corn (M) as controls, setting up six intercropping patterns: S_4T_2 (4 rows of silage corn: 2 rows of sweet sorghum); S_3T_3 (3 rows of silage corn: 3 rows of sweet sorghum); S_2T_4 (2 rows of silage corn: 4 rows of sweet sorghum); S_4M_2 (4 rows of silage corn: 2 rows of grain corn); S_3M_3 (3 rows of silage corn: 3 rows of grain corn); S_2M_4 (2 rows of silage corn: 4 rows of grain corn). The results indicated that intercropping significantly affected the agronomic traits of the forage crops compared to sole cropping ($P<0.05$). The fresh grass yield of the S_3T_3 treatment was the highest, reaching $107.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; the S_3M_3 treatment exhibited the highest yields of hay, crude protein yield, and crude protein content, measuring $36.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $3.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and 9.6%, respectively, an increase of 17.3%, 14.6%, and 58.2% compared to sole silage corn. Intercropping signifi-

收稿日期:2025-09-03;修回日期:2025-11-09

基金项目:新疆三农骨干人才培养项目(2022SNGGCCC019);新疆维吾尔自治区青年科技拔尖人才项目(2022TSYCCX0044)资助

作者简介:张丽娟(1999-),女,汉族,甘肃渭源人,硕士研究生,主要从事草地管理与牧草生产研究, E-mail:17339887841@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:xjndxky@xjau.edu.cn

cantly improved the Land Equivalent Ratio ($LER=1.1\sim1.4$), indicating a yield advantage in the system. Notably, S_2T_4 , S_3T_3 , S_2M_4 , and S_3M_3 treatments demonstrated stronger aggressivity and competitive ratio (Aggressivity, $A>0$; Competitive ratio, $CR>1$) for silage corn. Comprehensive analysis revealed that the intercropping of 3 rows of silage corn with 3 rows of sweet sorghum (S_3T_3) was the optimal pattern for effectively enhancing crop yield and quality.

Key words: Intercropping; Silage corn; Production performance; Nutritional quality; Interspecific competition

随着我国畜牧业快速发展,饲草料的需求量日益增加。青贮玉米(*Zea mays* L.)作为我国畜牧业发展必需的重要饲草,也是“粮改饲”政策的主推饲草作物,从2016年到2024年种植面积增加了近2倍(从 $1.1\times10^6\text{ hm}^2$ 增加到 $3.0\times10^6\text{ hm}^2$)^[1],成为全世界范围内分布较广和种植面积最大的饲用作物之一^[2]。玉米作为我国主要的农作物,按用途可分为籽粒玉米、青贮玉米和鲜食玉米三类^[3]。青贮玉米是指以全株(包括茎、叶、果穗)为收获对象,经过切碎、密封发酵(青贮)后制成饲料的玉米品种。其核心目标是最大化生物产量和营养品质,为反刍动物(如牛、羊)提供优质粗饲料^[4]。与籽粒玉米相比,青贮玉米具有生物产量高、纤维品质好、持绿性好、抗性强、摄入量高、消化率高、营养物质含量高、适宜制作优质青贮的优点。籽粒玉米是以收获成熟干燥籽粒为主要目标的玉米品种,富含淀粉、蛋白质、脂质等营养物质,是公认的“饲料之王”^[5],也是我国播种面积最大、产量最高的重要粮食、饲料和经济兼用作物^[6-7],但其在生物量产量、全株利用率以及抗逆性方面不及青贮玉米^[8]。甜高粱(*Sorghum bicolor*)是一种起源于非洲的禾本科高粱属植物,因其茎秆中富含高浓度蔗糖和汁液而得名。不仅具有生物量高、营养物质丰富、含糖量高、适口性好的优点,而且具有耐旱、耐贫瘠、抗盐碱等特性^[9-10],被誉为“生物能源之星”。但在单独制作青贮时因其含水量大,糖分转化与发酵稳定性不足,容易导致青贮失败或适口性下降^[11]。目前,国内外关于青贮玉米、甜高粱和籽粒玉米的研究主要围绕单作模式下品种筛选、水肥管理、收获加工等措施对其产量和品质的影响^[12-14],而对间作模式的研究主要仅见玉米-大豆(*Glycine max* L.)带状间作^[15]、青贮玉米与紫花苜蓿(*Medicago sativa*)间作^[16]、青贮玉米/拉巴豆(*Lablab purpureus* L.)^[17]、甜高粱-拉巴豆^[18]等豆禾间作模式,青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米等禾本科类作物进行间作,有助于建立光温水肥及土地资源高效利用的高产稳产的饲草基地,促进新疆饲草业的快速发展。而关于青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米等禾本科类作物间作的饲草产量、营养品质

及种间竞争影响的相关研究未见报道。本研究根据三种饲草作物的生长特性,以青贮玉米、甜高粱和籽粒玉米单播为对照,设置青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米6种间作模式,开展间作研究,以农艺性状、饲草产量、营养品质及种间竞争为研究指标,来优化间作模式和比例,以期新疆地区青贮玉米等饲草作物高产高效栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年5月3日—9月30日在新疆农业大学三坪综合实践基地($87^{\circ}21'01''\text{E}$, $43^{\circ}56'23''\text{N}$, 海拔680 m)进行,该地气候类型属于温带大陆性半干旱气候,夏季炎热少雨,冬季寒冷多雪。年均日照时间为2880.4 h,年降水量230~300 mm(图1),年均蒸发量2468 mm。无霜期163 d,年均气温 7.2°C ,最高气温 42°C ,土壤为含砾砂壤土(有机质含量为 $13.128\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量为 $1.212\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮含量为 $46.471\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷含量为 $0.185\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷含量为 $13.452\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾含量为 $16.258\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量为 $239.745\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH值为8.36)。

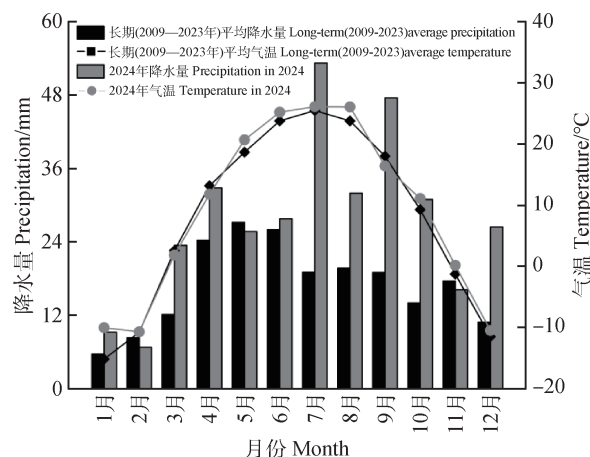


图1 2024年试验地不同降水量和气温

Fig. 1 The different precipitation and temperature in the experimental area in 2024

1.2 试验材料

供试材料为青贮玉米品种‘金刚青贮50’,甜高粱品种为‘大力士’,籽粒玉米品种为‘新引KWS2546’,分别由新疆七彩农业有限公司、百绿(天津)国际草业有限公司和新疆华西种业有限公司提供。

1.3 试验设计

采用随机区组试验设计,以青贮玉米(S)、甜高粱(T)、籽粒玉米(M)单作为对照,设置6个间作处理,分别为青贮玉米和甜高粱4:2间作(S_4T_2)、青贮玉米和甜高粱3:3间作(S_3T_3)、青贮玉米和甜高粱2:4间作(S_2T_4)、青贮玉米和籽粒玉米4:2间作(S_4M_2)、青贮玉米和籽粒玉米3:3间作(S_3M_3)、青贮玉米和籽粒玉米2:4间作(S_2M_4)。每个处理3次重复,共27个试验小区。小区面积 $10\text{ m}\times 4.8\text{ m}=48\text{ m}^2$,播种行距0.4 m,株距0.25 m,青贮玉米和籽粒玉米播种量为 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,甜高粱播种量为 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。均为单株穴播,小区间隔1 m。播前整地结合翻耕,基肥与青贮玉米拔节期和大喇叭口期追肥的比例为3:4:3,即在青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米生长期间共施入N: $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 : $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O : $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。田间管理与当地生产措施保持一致。

1.4 测定指标与方法

(1)在青贮玉米乳熟期测定农艺性状(株高、茎粗、穗位高、单株鲜重)和生产性能(鲜草重量、干物质含量、粗蛋白产量)等指标,具体方法:

株高和茎粗:在每个小区随机选取10株青贮玉米和10株甜高粱/籽粒玉米测量垂直高度,从地表起第3茎节处用游标卡尺测量茎粗。

穗位高:在每个小区随机选取10株青贮玉米和10株籽粒玉米垂直测量到穗位叶的高度。

单株鲜重:在每个小区随机选取10株青贮玉米、甜高粱和籽粒玉米称量。

鲜草产量:在青贮玉米乳熟期收获时取中间6行完整植株测产,测定鲜草产量。

干物质含量(Dry matter content, DMC%):测定鲜草产量后,将相同处理每行各取5株混合粉碎取500g 105°C 杀青30 min, 80°C 烘干至恒重测定干物质含量。

(2)将测定干物质产量后的样品用粉碎机

(FW100型)粉碎后过40目筛,用凯式定氮法测定牧草粗蛋白(Crude protein, CP)含量,索氏抽提法测定粗脂肪(Ether extract, EE)含量, VanSoest法测定中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量,蒽酮硫酸法测定淀粉(Starch, ST)含量等指标,粗蛋白产量、干物质采食量、可消化干物质、相对饲喂价值等指标通过以下公式计算:

粗蛋白产量(Crude protein yield):

$$CPY=CP\times DM \quad (1)$$

式中CP为牧草粗蛋白含量(%);DM为干物质产量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

干物质采食率(Dry matter intake, DMI, %),

$$DMI(\%)=120/NDF \quad (2)$$

干物质消化率(Digestible dry matter, DDM, %),

$$DDM(\%)=88.9-0.779\times ADF \quad (3)$$

相对饲喂价值(Relative feeding value, RFV, %),

$$RFV(\%)=DMI\times DDM/1.29 \quad (4)$$

(3)土地当量比及种间关系

相对相互作用指数(Relative interaction intensity, RII):为了分析不同间作模式中作物间的竞争和促进强度计算^[19]

$$RII=\frac{Y_{\text{间作}}-Y_{\text{单作}}}{Y_{\text{间作}}+Y_{\text{单作}}} \quad (5)$$

式中: $Y_{\text{间作}}$ 表示作物间作的地上生物量, $Y_{\text{单作}}$ 表示作物单作的地上生物量。式中, $RII<0$ 时表示竞争, $RII>0$ 时表示促进。

土地当量比(Land equivalent ratio, LER):是评价间作系统具有产量优势的重要指标,为两种或多种作物间作产量与相应单作产量比值的总和,其值的大小表示土地资源利用效率的高低^[20]。

$$LER_a=\frac{Y_{si}}{Y_s}+\frac{Y_{ti}}{Y_t} \quad (6)$$

$$LER_b=\frac{Y_{si}}{Y_s}+\frac{Y_{mi}}{Y_m} \quad (7)$$

式中:LER表示青贮玉米和饲草作物间作中的土地当量比; $LER>1$,说明间作系统存在产量优势; $LER<1$,说明间作系统产量具有劣势。 Y_s , Y_t , Y_m 分别表示青贮玉米、饲用甜高粱和籽粒玉米单作时的饲草产量, Y_{si} , Y_{ti} , Y_{mi} 分别表示青贮玉米、饲用甜高粱和籽粒玉米间作时的产量,下同。

相对竞争力(Aggressivity, A):是指两种饲草的产量相对增幅比^[21]。计算公式如下:

$$A_a = \frac{Y_{si}}{Y_s} - \frac{Y_{ti}}{Y_t} \quad (8)$$

$$A_b = \frac{Y_{si}}{Y_s} - \frac{Y_{mi}}{Y_m} \quad (9)$$

式中: A 为青贮玉米相对于饲草作物的竞争能力; $A>0$,表明该物种竞争能力强于其他物种; $A<0$,表明该物种竞争能力弱于其他物种。

营养竞争比率(Competitive ratio, CR):是评估间作系统中作物种间竞争的另一个指标^[22]。它衡量间作系统中一种作物与另一种作物的竞争程度^[23]

$$CR_a = \frac{(Y_{si}/Y_s)}{(Y_{ti}/Y_t)} \quad (10)$$

$$CR_b = \frac{(Y_{si}/Y_s)}{(Y_{mi}/Y_m)} \quad (11)$$

式中: CR 表示该物种相对于饲草作物的营养竞争比率。 $CR>1$,表明该物种的营养竞争能力强于其他物种; $CR<1$,表明该物种的营养竞争能力弱于其他物种。

1.5 数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2013 进行汇总,结果采用平均值和标准误的方式表示,利用 SPSS Statistics 26.0 进行方差分析和独立样本 T 检验,使用 Origin 2024 制图。

2 结果与分析

2.1 间作模式对青贮玉米、甜高粱和籽粒玉米农艺性状的影响

间作模式下,青贮玉米的株高在 S_3T_3 和 S_4M_2 处理显著高于 S_2T_4 和 S 处理 ($P<0.05$),为 350.0 cm 和 352.3 cm,较对照分别高出 3.8% 和 4.5%;间作处理下青贮玉米的茎粗均显著高于单作处理 (S) ($P<0.05$),其中 S_3T_3 处理下茎粗最大,为 29.9 cm,较对照高 12.8%;穗位高在 S_4M_2 和 S_3M_3 处理下显著高于 S_2T_4 处理 ($P<0.05$),分别为 193.3 cm 和 193.0 cm,较对照高 4.0% 和 3.9%;单株鲜重在 S_4M_2 处理显著高于单作处理 ($P<0.05$),为 1.0 kg,较对照高 10%;干物质含量在 S_4T_2 , S_3T_3 , S_3M_3 和 S_2M_4 处理均显著高于单作 S 处理 ($P<0.05$),所有处理的干物质含量均大于 30.0%。甜高粱的株高在 S_3T_3 处理显著高于 S_2T_4 和 T 处理 ($P<0.05$),为 374.3 cm,干物质含量在 S_2T_4 处理显著高于 S_3T_3 和

T 处理 ($P<0.05$),所有处理的干物质含量均小于 30%,株高和单株鲜重各处理间差异不显著。籽粒玉米的株高、茎粗和穗位高、单株鲜重各处理间差异不显著, S_4M_2 和 M 处理的干物质含量显著高于其他处理 ($P<0.05$),为 48.3% 和 46.7% (表 1)。

青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米间作时,间作对青贮玉米株高、茎粗、单株鲜重和干物质含量均具显著影响 ($P<0.05$),间作对甜高粱株高、茎粗和干物质含量均具有显著影响 ($P<0.05$)。表明相较于单作模式,不同间作模式下可显著提升青贮玉米和甜高粱的相关农艺性状指标,但对籽粒玉米的相关农艺性状指标提升效果不显著。

2.2 间作模式对饲草产量和粗蛋白产量的影响

青贮玉米、甜高粱和籽粒玉米单作时鲜草产量有显著差异 ($P<0.05$),其中甜高粱鲜草产量最高,为 $107.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是青贮玉米,为 $87.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,籽粒玉米最低,为 $61.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;由于其干物质含量具有差异,导致其干草产量也有显著差异 ($P<0.05$),籽粒玉米最高,为 $28.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,甜高粱最低,为 $23.3 \text{ t} \cdot \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。青贮玉米粗蛋白产量最高,为 $2.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,甜高粱的蛋白产量最低,为 $1.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,仅为青贮玉米的 41.21%。青贮玉米分别与甜高粱和籽粒玉米间作时, S_3T_3 和 T 处理的鲜草产量最高,分别达到 $107.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $107.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于其他间作 (S_4T_2 , S_4M_2 , S_3M_3 , S_2M_4) 处理和单作 (S 和 M) 处理 ($P<0.05$, 图 2); S_3T_3 和 S_3M_3 处理的干草产量最高,分别达到 $36.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $36.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于其他间作 (S_2T_4 和 S_2M_4) 处理和单作 (S , T 和 M) 处理 ($P<0.05$, 图 3)。 S_3M_3 处理的粗蛋白产量最高,与其他处理有显著差异,较青贮玉米 (S) 单作显著提高 37.46%; S_3M_3 和 S_4M_2 处理的干物质含量与其他处理有显著差异 ($P<0.05$),较青贮玉米单作 (S) 显著提高 28.10% 和 29.73% (图 3)。

2.3 营养品质

青贮玉米、甜高粱和籽粒玉米单作时营养品质有显著差异 ($P<0.05$)。其中青贮玉米的粗蛋白含量和干物质消化率最高,分别为 9.3% 和 68.4%,其次为籽粒玉米,分别为 8.3% 和 66.1%,甜高粱最低,分别为 6.9% 和 62.1%;甜高粱的中性洗涤纤维含量和酸性洗涤纤维含量最高,为 57.8% 和 34.8%,其次为青贮玉米,为 49.8% 和 26.7%,籽粒

表 1 不同间作模式对青贮玉米、甜高粱/籽粒玉米农艺性状的影响

Table 1 Agronomic characteristics of silage corn, sweet sorghum/ grain corn under different intercropping modes

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thickness/mm	穗位高 Ear height/cm	单株鲜重 Fresh weight per plant/kg	干物质含量 Dry matter/%
青贮玉米(S)	S ₄ T ₂	343.3±0.37 ^{ab}	29.5±1.20 ^a	183.2±4.42 ^{ab}	1.0±0.10 ^{ab}	39.0±0.02 ^{ab}
	S ₃ T ₃	350.0±1.00 ^a	29.9±1.47 ^a	180.2±1.62 ^{ab}	1.0±0.08 ^{ab}	41.3±0.01 ^a
	S ₂ T ₄	341.7±6.66 ^b	29.7±0.62 ^a	176.9±4.85 ^b	1.0±0.07 ^{ab}	34.4±0.03 ^{bc}
	S ₄ M ₂	352.3±3.21 ^a	29.3±2.11 ^a	193.2±6.15 ^a	1.1±0.09 ^a	33.9±0.03 ^{bc}
	S ₃ M ₃	346.7±2.08 ^{ab}	28.0±1.02 ^{ab}	193.0±12.23 ^a	1.0±0.15 ^{ab}	37.6±0.02 ^{ab}
	S ₂ M ₄	348.3±2.08 ^{ab}	27.2±2.07 ^{ab}	186.4±13.57 ^{ab}	1.0±0.07 ^{ab}	37.9±0.06 ^{ab}
	S	337.3±7.51 ^b	26.5±0.75 ^b	185.5±1.11 ^{ab}	0.9±0.02 ^b	31.23±0.01 ^c
间作×单作	df	19	19	19	19	19
Intercropping× Monoculture	F 值	0.287	1.474	5.745	2.876	0.796
	P 值	0.012	0.023	0.993	0.034	0.03
甜高粱(T)	S ₄ T ₂	362.2±6.03 ^{ab}	26.5±0.44 ^a	—	1.0±0.16 ^a	27.3±0.06 ^{ab}
	S ₃ T ₃	374.3±19.60 ^a	26.9±1.73 ^a	—	1.1±0.08 ^a	26.4±0.01 ^b
	S ₂ T ₄	348.3±4.62 ^{bc}	25.4±1.03 ^a	—	1.0±0.08 ^a	27.6±0.05 ^a
	T	341.0±7.51 ^c	26.9±1.20 ^a	—	1.1±0.04 ^a	21.6±0.03 ^c
间作×单作	df	10	10	—	10	10
Intercropping× Monoculture	F 值	2.344	0.041	—	3.376	0.105
	P 值	0.050	0.479	—	0.770	0.046
籽粒玉米(M)	S ₄ M ₂	298.3±8.74 ^a	25.0±2.26 ^a	124.9±4.92 ^a	0.6±0.20 ^a	48.3±0.01 ^a
	S ₃ M ₃	285.7±6.03 ^a	27.56±1.66 ^a	122.0±9.88 ^a	0.8±0.13 ^a	43.3±0.01 ^b
	S ₂ M ₄	294.3±3.79 ^a	23.9±1.56 ^a	136.0±10.91 ^a	0.6±0.13 ^a	42.7±0.02 ^b
	M	294.6±5.51 ^{ab}	27.0±1.86 ^a	128.9±7.93 ^a	0.6±0.09 ^a	46.7±0.02 ^a
间作×单作	df	10	10	10	10	10
Intercropping× Monoculture	F 值	0.252	0.148	5.171	1.356	2.237
	P 值	0.724	0.337	0.698	0.749	0.310

注:S表示青贮玉米单播,T表示甜高粱单播,M表示籽粒玉米单播,S₄T₂表示4行青贮玉米:2行甜高粱,S₃T₃表示3行青贮玉米:3行甜高粱,S₂T₄表示2行青贮玉米:4行甜高粱,S₄M₂表示4行青贮玉米:2行籽粒玉米,S₃M₃表示3行青贮玉米:3行籽粒玉米,S₂M₄表示2行青贮玉米:4行籽粒玉米;同列相同作物不同小写字母表示不同种植比例间差异显著($P<0.05$),“—”无数据,下同

Note: S stands for silage maize monoculture, T stands for sweet sorghum monoculture, M stands for grain maize monoculture, S₄T₂ stands for 4 rows of silage maize: 2 rows of sweet sorghum, S₃T₃ stands for 3 rows of silage maize: 3 rows of sweet sorghum, S₂T₄ stands for 2 rows of silage maize: 4 rows of sweet sorghum, S₄M₂ stands for 4 rows of silage maize: 2 rows of grain maize, S₃M₃ stands for 3 rows of silage maize: 3 rows of grain maize, S₂M₄ stands for 2 rows of silage maize: 4 rows of grain maize; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences in planting ratios ($P<0.05$), “—” indicates no data, and the same applies below

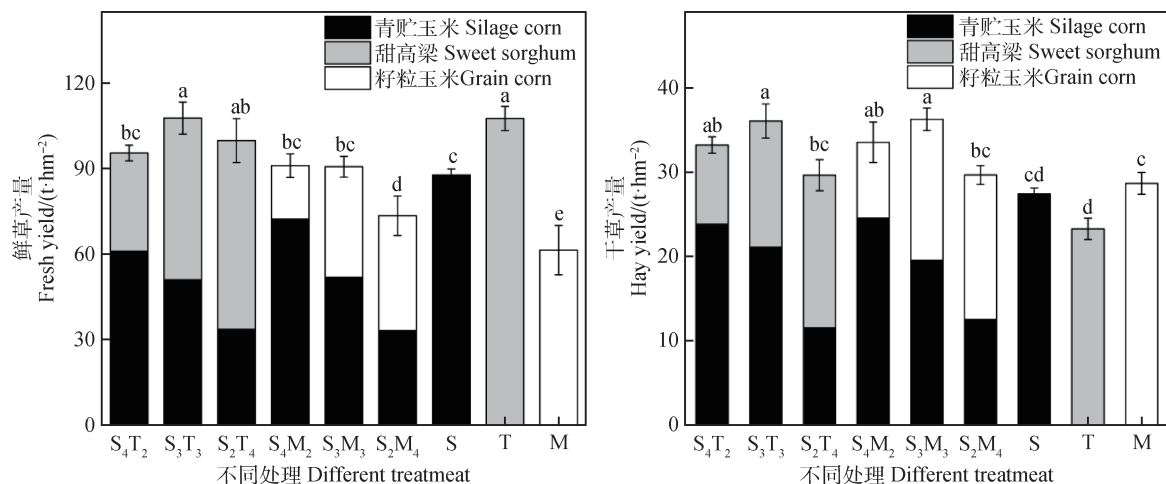


图 2 不同间作模式下饲草的鲜草产量和干草产量

Fig. 2 The fresh forage yield and hay yield of forage under different intercropping patterns

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different letters indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below

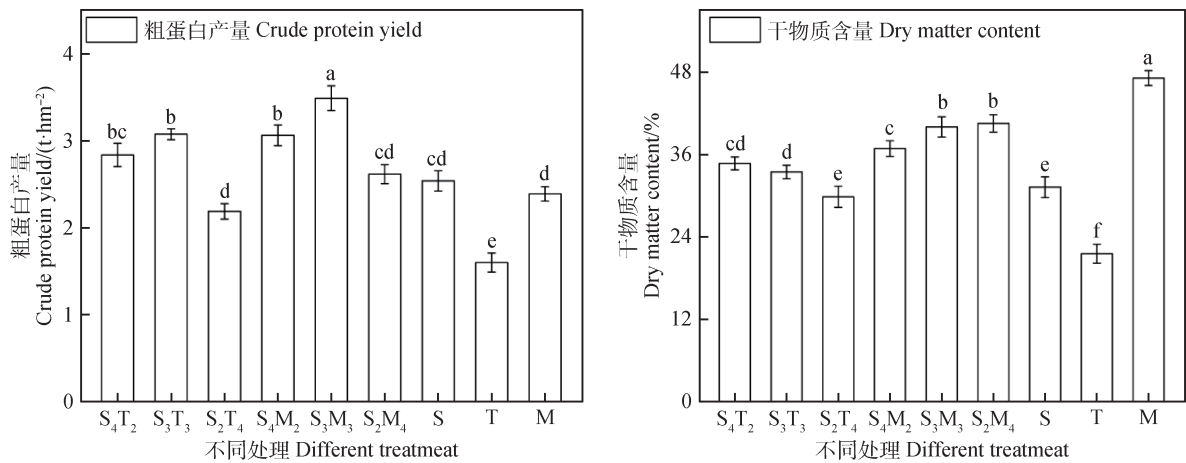


图3 不同间作模式下饲草的粗蛋白产量和干物质含量

Fig. 3 The crude protein yield and dry matter content of forage under different intercropping patterns

玉米最低,为47.7%和29.6%;籽粒玉米的粗脂肪含量、干物质采食率、淀粉含量和相对饲喂价值最高,为4.6%,2.5%,36.6%和128.6,其次为青贮玉米,为4.5%,2.4%,27.6%和127.3,甜高粱最低,为2.4%,2.2%,20.8%和104.5。

青贮玉米分别与甜高粱和籽粒玉米间作时粗脂肪含量、粗蛋白含量、淀粉含量、中性洗涤纤维含量、酸性洗涤纤维含量、干物质采食率、干物质消化率和相对饲喂价值均有显著差异($P < 0.05$)。粗脂肪含量为S₃M₃处理最高,为5.0%,显著高于S₃T₃, S₂T₄和T处理($P < 0.05$),较S处理提高12.3%。粗蛋白含量在S₃M₃处理最高,为9.6%,显著高于S₄T₂, S₃T₃, S₂T₄, S₂M₄, T和M处理($P < 0.05$),较S处理提高4.0%,与其他处理无显著差异。中性洗涤纤维含量和酸性洗涤纤维含量在T处理最高,为55.0%和34.8%,显著高于其他处理($P < 0.05$)。干物质采食率在S₃M₃处理最高,为2.7%,显著高于S₂T₄, S和T处理($P < 0.05$),较S处理提高了12.5%,与其他处理无显著差异。干物质消化率在S₄M₂处理最高,为70.2%,显著高于T和M处理($P < 0.05$),较S处理提高1.1%,与其他处理无显著差异。淀粉含量在M处理最高,为36.6%,显著高于其他处理($P < 0.05$),间作处理S₃T₃, S₄M₂, S₃M₃和S₂M₄淀粉含量都在30.0%以上,较S处理分别提高9.92%,10.79%,28.2%和30.2%,间作处理S₄T₂和S₂T₄淀粉含量都在30.0%以下,较S处理提高6.1和降低0.7%。相对饲喂价值在S₃M₃处理最高,为144.7,显著高于S₄T₂, S₃T₃, S, T和M处理($P < 0.05$),与其他处理无显著差异(图4)。

2.4 不同间作模式对土地当量比和种间关系的影响

青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米间作时具有显著的产量优势、资源利用及竞争优势($P < 0.05$)。不同间作处理间RII存在显著差异($P < 0.05$),且均为正数($RII > 0$),即相较于青贮玉米单作(S)处理,青贮玉米与甜高粱/籽粒玉米间作对青贮玉米的生长表现为促进作用;所有间作处理的 $LER > 1$,说明间作系统存在产量优势, S₃T₃处理LER最高,为1.4,显著高于S₂M₄处理($P < 0.05$); S₄T₂, S₃T₃, S₄M₂和S₂M₄处理的青贮玉米相对竞争力和营养竞争比率强于甜高粱和籽粒玉米($A > 0, CR > 1$), S₂T₄和S₂M₄处理青贮玉米相对竞争比和营养竞争比率弱于甜高粱和籽粒玉米($A < 0, CR < 1$)(表2)。

2.5 主成分综合评价(PCA)

对干草产量(X_1)、干物质含量(X_2)、粗蛋白(X_3)、粗脂肪(X_4)、中性洗涤纤维(X_5)、酸性洗涤纤维(X_6)、淀粉(X_7)和相对饲喂价值(X_8)进行PCA分析,提取了两个主成分,累计方差贡献率为89.625%。通过第一主成分、第二主成分的特征向量值,得出第一主成分的特征值为6.079,第二主成分的特征值为1.0905(表3)。得出各主成分综合得分线性方程,以各主成分对应的方程相对贡献率作为权重建立综合评价模型:

$$Y_1 = 0.44X_1 - 0.22X_2 + 0.13X_3 - 0.17X_4 - 0.14X_5 - 0.39X_6 - 0.16X_7 + 0.24X_8$$

$$Y_2 = -0.26X_1 + 0.41X_2 + 0.08X_3 + 0.36X_4 - 0.09X_5 + 0.20X_6 + 0.36X_7 - 0.01X_8$$

$$Y = (6.029Y_1 + 1.090Y_2) / 7.119$$

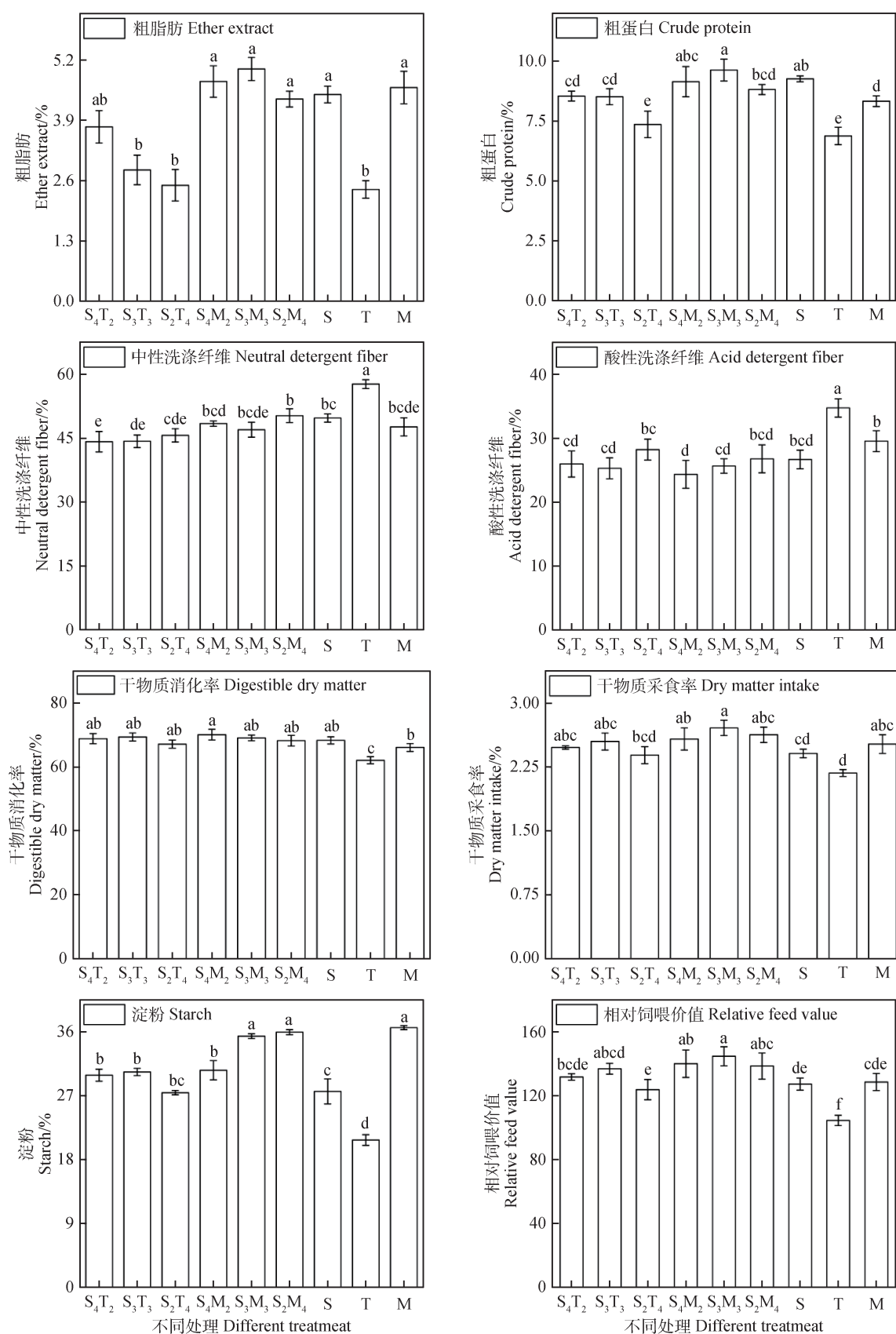


图 4 不同间作模式下饲草营养品质

Fig. 4 Nutritional quality of forage under different intercropping modes

表 2 青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米土地利用及种间竞争

Table 2 Land use and interspecific competition between silage corn and sweet sorghum and grain corn

处理 Treatment	相对相互 指数 RII	土地当量比 LER	相对竞争力 A	营养竞争 比率 CR
S ₄ T ₂	0.1±0.01 ^a	1.3±0.25 ^{ab}	0.5±0.16 ^a	2.3±0.34 ^a
S ₃ T ₃	0.1±0.01 ^a	1.4±0.18 ^a	0.1±0.04 ^b	1.2±0.09 ^b
S ₂ T ₄	0.0±0.01 ^b	1.2±0.13 ^{ab}	-0.4±0.16 ^c	0.5±0.13 ^b
S ₄ M ₂	0.1±0.01 ^a	1.2±0.07 ^{ab}	0.6±0.02 ^a	2.8±0.30 ^a
S ₃ M ₃	0.1±0.01 ^a	1.3±0.05 ^{ab}	0.1±0.02 ^b	1.2±0.01 ^b
S ₂ M ₄	0.0±0.01 ^b	1.1±0.04 ^b	-0.2±0.02 ^c	0.7±0.03 ^b

通过上述模型计算出每个处理的综合得分并进行综合排名,S₃T₃处理的得分最高,为 2.39,根据得分从高到低为 S₃T₃>S₃M₃>S₄M₂>S₄T₂>S₂M₄>S>S₂T₄>M>T(表 4)。

表 3 各因子特征向量与主成分特征值和累计贡献率

Table 3 Eigenvectors, principal component eigenvalues and cumulative contribution rates of each factor

项目 Items	主成分 Principal component	
	I	II
干草产量 Hay yield	0.44	-0.26
干物质含量 DM	-0.22	0.41
粗蛋白 CP	0.13	0.08
粗脂肪 EE	-0.17	0.36
中性洗涤纤维 NDF	-0.14	-0.09
酸性洗涤纤维 ADF	-0.39	0.20
淀粉 ST	-0.16	0.36
相对饲喂价值 RFV	0.24	-0.01
特征值 Eigenvalue	6.079	1.090
方差贡献值 Variance contribution rate/%	45.003	44.612
累积贡献值 Cumulative contribution rate/%	45.003	89.625

表 4 不同处理综合得分及排序

Table 4 Comprehensive scores and ranking of different treatments

处理 Treatment	主成分 I Principal component 1	主成分 II Principal component 2	综合得分 Comprehensive	排序 Ranking
S ₄ T ₂	1.21	-0.34	0.97	4
S ₃ T ₃	2.98	-0.91	2.39	1
S ₂ T ₄	-0.34	-1.04	-0.45	7
S ₄ M ₂	2.11	0.08	1.80	3
S ₃ M ₃	2.22	0.83	2.01	2
S ₂ M ₄	-0.34	1.05	-0.13	5
S	-0.44	-0.01	-0.38	6
T	-4.44	-1.39	-3.98	9
M	-2.96	1.72	-2.25	8

3 讨论

3.1 不同间作模式对青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米间作产量的影响

间作是提升农田生态系统生物多样性的一种

重要农业实践,通过利用不同农作物的生物学特性差异以及合理配比,优化和提高农业资源的利用效率,进而实现增产增效。间作在中国乃至全世界范围内广泛应用^[24],在中国西北地区开展的为期 12 年的研究表明,长期间作的产量相比单作平均能够提高 22%^[25]。其中,豆/禾间作是最为常见的间作方式,它充分利用了豆类与禾本科作物在株型结构、根系构型及养分利用等方面的差异,提高光照、空间、水分和养分等资源的利用效率,从而提升了间作系统的生产力^[26-28]。此外,禾谷类作物的间作模式也因产量和品质等优势受到关注。本研究结果表明,与单作相比,间作模式的鲜草产量提高了 22.81%~32.28%,干草产量提高了 7.5%~24.4%。其中青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米 3:3 间作模式具有显著的产量优势,这一研究结果与孙颖琦等^[29]在张家口的研究表明 2 行青贮玉米和 4 行饲用谷子间作时获得的生物量最高,徐艳霞等^[30]在齐齐哈尔的研究表明,2 行青贮玉米和 2 行籽粒玉米间作时鲜干草产量最高,王腾飞等^[31]在宁夏引黄灌区开展的青贮玉米-饲用高粱间作试验表明,青贮玉米和甜高粱 6:6 间作模式在干物质积累、系统产量和土地利用方面具有显著优势一致,说明合理的间作行配比,可以有效提高饲草产量。高产的主要机理是青贮玉米在生长初期的生长速率较高,而甜高粱则在后期生长速率高于青贮玉米^[31]。有研究显示,两者的间作模式能够充分利用其生长速率的差异,形成波浪形的冠层结构,使得作物群体上部的平面受光转变为立体受光,从而增加了光照面积、提高了光照强度,改善了冠层内的通气性,进而提升了光合速率和叶面积等生理指标^[32]。这些变化促进了各间作作物的生长,进而提高了单位面积的饲草产量^[33-34]。此外,青贮玉米和籽粒玉米的间作优化了群体结构,青贮玉米株高较高,而籽粒玉米株高较矮,两者间作能够充分发挥边际增产效应,改善群体的通风和透光条件,提升光能的利用效率,最终增加了群体的产量^[32,35]。

3.2 不同间作模式对饲草营养品质的影响

配比合理的间作模式不仅有助于提高饲草产量,而且对饲草品质的提升也有显著作用。本研究结果表明,青贮玉米与甜高粱及籽粒玉米的不同间作模式在饲草品质方面存在显著差异。其中,青贮玉米与籽粒玉米 3:3 间作处理的粗蛋白含量最高,显

著高于其他间作模式及青贮玉米和籽粒玉米的单作处理。董姗^[36]的研究表明,与青贮玉米单作相比,青贮玉米与拉巴豆的间作可显著提高鲜草产量与粗蛋白(CP)含量,平均增幅分别为8.22%和35.20%,与本研究结果一致。此外,由于籽粒玉米淀粉和干物质含量较高,该作物在与青贮玉米的3:3间作模式下,其淀粉含量显著提升,均显著高于其他处理,青贮玉米与甜高粱间作处理(S_3T_3 和 S_4T_2)饲草淀粉含量和干物质含量均大于30%,相较于单作处理,间作处理的中性洗涤纤维含量和酸性洗涤纤维含量有所降低。李钢等^[37]在黑龙江北部的研究显示,采用不同品种青贮玉米进行混播时,其干物质含量显著高于单播,同时能提高粗蛋白、淀粉含量并降低中性洗涤纤维含量与酸性洗涤纤维含量。王斌等^[38]在宁夏固原进行的试验也证实青贮玉米与拉巴豆的混播处理在粗灰分含量、粗蛋白含量、粗脂肪含量、中性洗涤纤维含量和酸性洗涤纤维含量等营养指标上均优于单播处理,与本研究结果一致。在青贮玉米与籽粒玉米的间作模式中,青贮玉米具有较高的生物量,而籽粒玉米则富含淀粉,二者互补优势明显。在青贮玉米与甜高粱的间作中,甜高粱具有生物量大、含糖量高的优势,但其青贮过程中常面临含水量过高的问题。通过与青贮玉米间作,能够有效克服该劣势,提升整体青贮品质^[39]。在综合营养品质方面, S_3M_3 处理和 S_3T_3 处理(青贮玉米与籽粒玉米3:3和甜高粱3:3间作)下的粗脂肪含量、干物质采食率与相对饲喂价值均达到最高,显著优于其他处理,进一步表明合理的间作模式在优化产量和品质方面具有显著优势。

3.3 青贮玉米与甜高粱/籽粒玉米间作对土地利用及种间竞争的影响

大量研究表明,间作系统的土地当量比(LER)介于1.2~1.3之间,说明与作物单播种植相比,间作模式的单位土地产出更高^[40]。一项全球范围内涉及41个国家126项研究的分析表明,与作物单播种植相比,间(混)作系统的产量提高了38%,LER平均值达到1.38^[41]。另外一项综合分析研究表明,间(混)作系统可提高土地利用效率,其中超过3/4间混作模式的土地当量比数值超过1,表明其单位土地产出优于作物单播种植^[42]。本研究结果表明,青贮玉米与籽粒玉米及甜高粱的间作模式的LER均大于1,其中 S_3T_3 和 S_3M_3 处理的LER最高,分别为1.43和1.30,表明间作系统

具有产量优势,土地利用效率高于单作,这与前人研究结果一致。在青贮玉米与甜高粱/粒玉米的不同间作模式下, S_4T_2 、 S_3T_3 、 S_4M_2 和 S_3M_3 处理的青贮玉米种间竞争力和较高的营养竞争比率强于青贮玉米和籽粒玉米,这表明,这些间作模式下,青贮玉米在资源获取和利用方面占据了优势。然而,在 S_2T_4 和 S_2M_4 处理下,青贮玉米的种间竞争力和营养竞争比率弱于甜高粱和籽粒玉米,说明这些模式下青贮玉米的资源利用效率相对较低。综合来看,青贮玉米与甜高粱及籽粒玉米的3:3间作模式,通过减弱种间竞争,有效促进了作物对养分的吸收与利用,进而促进了系统生物量的增加和产量的提升。这一结果支持了先前的研究发现,即适当的作物配比能通过优化资源分配,增强系统的整体生产力。

4 结论

本研究结果显示,青贮玉米与甜高粱和籽粒玉米间作系统生产性能和营养品质综合排名第一的为 S_3T_3 (3行青贮玉米:3行甜高粱)处理,LER为1.4,表明其在资源竞争中占优势且种间协调性好,可显著改善牧草营养品质,该处理为6个间作模式中提高生产力和土地利用效率的最佳间作模式,适合在新疆地区推广种植。

参考文献

- [1] 鲁珊,肖荷霞,徐玉鹏,等. 青贮玉米发展现状及高产高效栽培技术[J]. 作物研究,2019,33(6):590-591
LU S, XIAO H X, XU Y P, et al. Development status of silage maize and high yield and high efficiency cultivation techniques[J]. Crop Research, 2019, 33(6): 590-591
- [2] 吴鹏鑫,王胜男,王嘉麟,等. 基于主成分分析和隶属函数分析研究刈割期和留茬高度对全株玉米青贮饲用价值的影响[J]. 动物营养学报,2024,36(6):4022-4035
WU P X, WANG S N, WANG J L, et al. Effects of cutting period and stubble height on feeding quality of whole-plant corn silage based on principal component analysis and membership function analysis [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(6): 4022-4035
- [3] 王天元. 切削式鲜食玉米脱粒机构的设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020:1-2
WANG T Y. Design and experiment of cutting fresh corn threshing mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 1-2
- [4] 盘道兴,李凡,何鸿源,等. 不同微生物菌剂对全株玉米青贮感官评价效果的影响[J]. 粮食与饲料工业,2021(3):26-29
PAN D X, LI F, HE H Y, et al. Effects of different microbial

- agents on sensory evaluation of whole corn silage[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2021(3):26-29
- [5] 刘贺贺,祁晓慧,乔光华,等. 北方农牧交错带县域农牧业产业发展规划实证研究——以内蒙古化德县为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(5):113-121
- LIU H H, QI X H, QIAO G H, et al. Empirical research on the development planning of agriculture and animal husbandry industry in northern farming-pastoral ecotone counties—taking Huade county, Inner Mongolia as an example[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(5):113-121
- [6] 王进斌,谢军红,李玲玲,等. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(1):60-69
- WANG J B, XIE J H, LI L L, et al. Effects of nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of maize in arid areas of central Gansu, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(1):60-69
- [7] 王鹏飞,于爱忠,王凤,等. 干旱地区绿肥还田条件下减氮对玉米农艺性状、产量及籽粒品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(13):2552-2563
- WANG P F, YU A Z, WANG F, et al. Effects of reducing nitrogen application on maize agronomic traits, grain yield and quality under green manure returning to field system in arid areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(13):2552-2563
- [8] 徐春丽. 氮肥和种植密度对不同品种玉米生长及养分吸收的影响[D]. 重庆:西南大学, 2018:71-72
- XU C L. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the growth and nutrient uptake of different varieties of maize[D]. Chongqing: Southwest University, 2018:71-72
- [9] 李珊珊,李飞,白彦福,等. 甜高粱饲用价值及饲喂奶牛技术[J]. *草业科学*, 2017, 34(7):1534-1541
- LI S S, LI F, BAI Y F, et al. Sweet sorghum feeding value and feeding dairy cows technology[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(7):1534-1541
- [10] 张景龙,沈益新,刘信宝,等. 高粱苗期耐低磷能力的综合评价及代表性评价指标筛选[J]. *草地学报*, 2024, 32(1):179-187
- ZHANG J L, SHEN Y X, LIU X B, et al. Comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance and screening of representative evaluation indexes at sorghum seedling[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1):179-187
- [11] 陈昊,魏玉明,焦婷,等. 不同混合比例和添加剂对藜麦全株和甜高粱混合青贮品质的影响[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250709.1201.004,2025-07-09/2025-08-29>
- CHEN H, WEI Y M, JIAO T, et al. Effects of different mixing ratios and additives on the quality of mixed silage of whole quinoa and sweet sorghum[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250709.1201.004,2025-07-09/2025-08-29>
- [12] 韦文华,李盼,邵冠贵,等. 西北灌区青贮玉米产量及品质对减量灌水与有机无机肥配施的响应[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(8):1521-1534
- WEI W H, LI P, SHAO G G, et al. Response of silage maize yield and quality to reduced irrigation and combined organic-inorganic fertilizer in northwest irrigation areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(8):1521-1534
- [13] 倪旺,梁丹妮,时兴伟,等. 灌溉次数和施氮量对甜高粱生产性能及光合特性的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(1):294-301
- NI W, LIANG D N, SHI X W, et al. Effects of irrigation frequency and fertilizer application rate on production performance and photosynthetic characteristics of sweet sorghum[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1):294-301
- [14] Сторожик Л И, Музика О В. Features of formation of productivity of sweet sorghum hybrids depending on the influence of agrotechnical factors: width of row spacing, crop density and processing by growth regulator[J]. *Plant Varieties Studying and Protection*, 2019, 15(2):171-181
- [15] 田艺心,朱金英,李春燕,等. 间作模式对玉米/大豆间作系统光合、产量及种间竞争力的影响[J]. *核农学报*, 2025, 39(8):1775-1785
- TIAN Y X, ZHU J Y, LI C Y, et al. Effects of intercropping patterns on photosynthesis, yield and interspecific competitiveness of maize/soybean intercropping system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(8):1775-1785
- [16] 陈彦龙,齐帅,许瑞轩,等. 河西走廊玉米-苜蓿间作体系行数与密度对玉米生产性能的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(6):2013-2022
- CHEN Y L, QI S, XU R X, et al. Effects of planting row number and density of corn-alfalfa intercropping system on maize performance in Hexi Corridor[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(6):2013-2022
- [17] 李文彬,朱俊峰,梁天柱,等. 不同水平施氮量的旱地玉米-拉巴豆间作栽培对产量、混贮营养及能值的影响[J]. *饲料研究*, 2022, 45(23):105-108
- LI W B, ZHU J F, LIANG T Z, et al. Effect of dryland corn-*Lablab purpureus* intercropping with different levels of nitrogen application on yield, mixed storage nutrition and emergy index[J]. *Feed Research*, 2022, 45(23):105-108
- [18] 董志晓,何润濠,况鉴洋,等. 成都平原甜高粱间作拉巴豆对混合饲草产量及品质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(7):1578-1583
- DONG Z X, HE R H, KUANG J Y, et al. Effects of sweet sorghum intercropping with *Lablab purpureus* on yield and quality of mixed forage in Chengdu Plain, China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7):1578-1583
- [19] SU Y, YU R P, XU H S, et al. Crop cultivar mixtures stabilize productivity, partly *via* facilitation, when conditions are less benign[J]. *Field Crops Research*, 2023, 302:109046
- [20] YANG W T, LI Z X, WANG J W, et al. Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146:44-50
- [21] LITHOURGIDIS A, DORDAS C, DAMALAS C A, et al. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(4):396-410

- [22] WILLEY R W, RAO M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops[J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(2):117-125
- [23] ZHANG G G, YANG Z B, DONG S T. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(1):66-73
- [24] YANG H, ZHANG W P, LI L. Intercropping: feed more people and build more sustainable agroecosystems[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 8(3):373-386
- [25] LI X F, WANG Z G, BAO X G, et al. Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11):943-950
- [26] DU J B, HAN T F, GAI J Y, et al. Maize-soybean strip intercropping: achieved a balance between high productivity and sustainability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4):747-754
- [27] 吴玉环, 王自奎, 刘亚男, 等. 带幅设计对玉米/苜蓿间作群体光环境特征及光能利用效率的影响[J]. *草业学报*, 2022, 31(3):144-155
- WU Y H, WANG Z K, LIU Y N, et al. Effects of row configuration on characteristics of the light environment and light use efficiency in maize/alfalfa intercropping[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3):144-155
- [28] WANG R N, SUN Z X, ZHANG L Z, et al. Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2020, 253:107819
- [29] 孙颖琦, 王钰文, 范晓庆, 等. 青贮玉米与饲用谷子间作对产量相关性状的影响[J]. *草业科学*, 2023, 40(12):3138-3149
- SUN Y Q, WANG Y W, FAN X Q, et al. Effects of silage maize and feeding millet intercropping on their yield[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12):3138-3149
- [30] 徐艳霞, 杨翌, 王洪宝, 等. 青贮玉米与籽粒玉米间作生产性能和营养品质综合评价[J]. *饲料研究*, 2024, 47(11):114-119
- XU Y X, YANG Z, WANG H B, et al. Evaluation of production performance and nutritive values of inter-cropping between silage maize and grain maize[J]. *Feed Research*, 2024, 47(11):114-119
- [31] 王腾飞, 王斌, 张译尹, 等. 青贮玉米-饲用高粱间作系统生产力对行比配置的响应[J]. *中国生态农业学报*, 2025, 33(8):1529-1540
- WANG T F, WANG B, ZHANG Y Y, et al. Response of productivity of silage maize-forage sorghum intercropping system to row ratio configuration[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(8):1529-1540
- [32] 刘天学, 李潮海, 付景, 等. 不同基因型玉米间作的群体质量[J]. *生态学报*, 2009, 29(11):6302-6309
- LIU T X, LI C H, FU J, et al. Population quality of different Maize (*Zea mays* L.) genotypes intercropped[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):6302-6309
- [33] 杜建民, 王占军, 汪威, 等. 宁夏灌区青贮玉米/饲用高粱带状间作混收混贮技术[J]. *宁夏农林科技*, 2023, 64(9):10-13
- DU J M, WANG Z J, WANG W, et al. Strip intercropping and mixed harvesting and storage technology of silage corn/feed sorghum in Ningxia irrigation area[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2023, 64(9):10-13
- [34] 韩静, 王一帆, 高玉红, 等. 胡麻间作模式对作物养分吸收利用及产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(6):997-1008
- HAN J, WANG Y F, GAO Y H, et al. Effect of crop nutrient uptake utilization and yield in the flax intercropping pattern[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(6):997-1008
- [35] 史振声, 朱敏, 李凤海, 等. 玉米不同品种间作的增产效果研究[J]. *玉米科学*, 2008, 16(2):107-109
- SHI Z S, ZHU M, LI F H, et al. Research on yield-increasing of different kinds of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(2):107-109
- [36] 董姗. 密度和施氮对河西灌区青贮玉米/拉巴豆间作体系饲草产量、品质和水分利用的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2021:18-28
- DONG S. Effects of density and nitrogen application on yield, Quality and Water Utilization of Forage Crops in Silage Maize/Lablab Bean Intercropping System in Hexi Irrigation Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021:18-28
- [37] 李钢, 刘惠青, 高飞, 等. 混播对青贮玉米产量和品质的影响[J]. *草地学报*, 2008, 16(4):417-421
- LI G, LIU H Q, GAO F, et al. Effects of mixed planting on yield and feed value of silage corn[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(4):417-421
- [38] 王斌, 董秀, 李满有, 等. 不同播量拉巴豆与青贮玉米混播对草地生产性能及牧草品质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(4):828-834
- WANG B, DONG X, LI M Y, et al. Effects of mixed planting of *Dolichos lablab* with different sowing rates and silage corn on grassland productivity and forage quality [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4):828-834
- [39] 孙健雄, 刘兴华, 程芳梅, 等. 甜高粱-玉米复种与混合青贮对生物量和青贮品质的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2023, 40(2):48-53
- SUN J X, LIU X H, CHENG F M, et al. Effects of strip intercropping of sweet sorghum and corn and their mixed storage as silage on their biomass and silage quality[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2023, 40(2):48-53
- [40] LI C J, HOFFLAND E, KUYPER T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains [J]. *Nature Plants*, 2020, 6(6):653-660
- [41] YU Y, STOMPH T J, MAKOWSKI D, et al. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198:269-279
- [42] HAUGGAARD-NIELSEN H, JENSEN E S. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability [J]. *Field Crops Research*, 2001, 72(3):185-196