

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.018

引用格式:白尚轩,齐帅,王正文,等.河西灌区紫花苜蓿套作玉米品种评价与筛选[J].草地学报,2026,34(9):3343—3353
BAI Shang-xuan, QI Shuai, WANG Zheng-wen, et al. Evaluation and Screening of Maize Varieties for Intercropping
With Alfalfa in the Hexi Irrigation Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3343—3353

河西灌区紫花苜蓿套作玉米品种评价与筛选

白尚轩¹, 齐帅¹, 王正文¹, 李媛², 陈彦龙¹, 张蓓¹, 殷丽楠¹, 王玲娜¹, 曹文侠^{1*}

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:为优化河西灌区紫花苜蓿-玉米套作体系并筛选适宜玉米品种,本试验以10个玉米(*Zea mays* L.)品种为材料,比较其在单作和套作条件下的农艺性状、产量及营养品质,结合结构方程模型和多准则决策模型进行综合分析。结果表明:品种、种植模式及其交互对株高、茎粗、有效株数密度、单株鲜重和干物质产量的均有极显著影响($P<0.01$)。套作下‘金张掖1706’干物质产量最高($27.12\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。‘屯玉168’穗鲜重最高(522.33 g),单株鲜重达到了 1.32 kg 。‘甘玉23’绿叶数最多,粗蛋白(Crude protein, CP)含量也最高(10.77%)。结构方程模型结果表明不同种植模式下农艺性状对干物质产量和相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)的作用路径存在差异。结合多准则决策模型结果,套作体系中玉米品种筛选应综合考虑农艺性状、产量及营养品质,其中‘甘玉23’‘金张掖1706’和‘屯玉168’可作为该区域套作体系的优选品种。

关键词:紫花苜蓿;套作;玉米;品种筛选

中图分类号:S344.3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3343-11

Evaluation and Screening of Maize Varieties for Intercropping With Alfalfa in the Hexi Irrigation Region

BAI Shang-xuan¹, QI Shuai¹, WANG Zheng-wen¹, LI Yuan², CHEN Yan-long¹, ZHANG Bei¹,
YIN Li-nan¹, WANG Ling-na¹, CAO Wen-xia^{1*}

(1. College of Prataculture, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Prataculture Ecosystem of Ministry of Education, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: To optimize the alfalfa-maize intercropping system in the Hexi Irrigation District and identify the suitable maize cultivars, 10 maize (*Zea mays* L.) cultivars were used to compare their agronomic traits, yield performance, and nutritional quality under sole-cropping and intercropping conditions. Structural equation modeling and a multi-criteria decision-making model were further employed for integrated analysis. The results showed that cultivar, cropping pattern, and their interaction had highly significant effects on plant height, stem diameter, effective plant density, fresh weight per plant, and dry matter yield ($P<0.01$). Under intercropping, ‘Jinzhangye 1706’ had the highest dry matter yield ($27.12\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$). ‘Tunyu 168’ had the highest ear fresh weight (522.33 g), and its fresh weight per plant reached 1.32 kg . ‘Ganyu 23’ had the highest number of green leaves and the highest crude protein (CP) content (10.77%). Structural equation modeling indicated that the pathways by which agronomic traits affected dry matter yield and relative feed value (RFV) differed between planting patterns. Based on the multi-criteria decision-making results, cultivar selection for the intercropping system should comprehensively consider agronomic traits, yield and nutritional quality. Among the tested cultivars, ‘Ganyu 23’ ‘Jinzhangye 1706’ and ‘Tunyu 168’ can be selected as optimal cultivars for the alfalfa/maize intercropping system in this region.

收稿日期:2026-01-19;修回日期:2026-03-14

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助

作者简介:白尚轩(1999-),男,汉族,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事饲草学方向研究, E-mail:baibing695@gmail.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail:caowx@gsau.edu.cn

Key words: Alfalfa; Intercropping; Maize; Variety screening

河西走廊是我国重要的粮食与饲草生产基地,依托典型的绿洲灌溉农业条件,玉米(*Zea mays* L.)在区域种植结构中占据核心地位^[1]。随着畜牧业发展与“粮改饲”推进,青贮玉米因高产、适口性好而成为青贮与反刍动物日粮中的重要原料,玉米生产目标也由单一增产转向粮饲兼用的综合效益导向^[2-3]。在此背景下,活秆成熟是支撑该目标的重要性状,表现为蜡熟至成熟期仍保持较强持续绿性与秸秆活性^[4]。但河西灌区干旱少雨,水资源紧缺,亟需在有限灌溉条件下兼顾玉米生产效率与饲用品质。因此,筛选具活秆成熟特征的玉米品种具有重要的生产应用价值。

间套作作为典型的集约化种植方式,通过两种作物在时间与空间上的合理配置,可显著提高资源综合利用效率^[5]。其中紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)套作青贮玉米不仅可实现粮饲兼收,还能增强系统抗逆与稳产能力^[6]。已有研究表明,青贮玉米紫花苜蓿套作可通过改变根系形态与空间分布,提升系统产量与资源利用效率^[7]。通过对行比、带宽等空间结构的优化,可改善冠层光环境并调节竞争,从而促进套作总产量提升^[8]。从系统尺度看,Xu等^[9]研究表明该模式在生产力与经济效益上可与当地传统轮作体系相当,同时能减少氮素投入,降低环境影响。高润等^[10]发现苜蓿-玉米套作可提升年牧草总产量与土地当量比,并兼具良好的杂草抑制效果。品种筛选方面,有研究表明玉米品种与种植模式互作对产量有着显著影响^[11]。在玉米-大豆间作中,陈国徽等^[12]比较了不同玉米种植组合,发现‘同玉609’适宜赣北地区的间作系统。Afrillah等^[13]研究表明,品种与施肥处理之间存在显著互作效应,可显著影响玉米植株的形态生长,其中“Exotic”品种的综合表现最佳。Yuwariah等^[14]比较了124个玉米品种,筛选出11个适应间作体系的玉米品种,并建议对这些品种在不同地点进行适应性评估。Brooker等^[15]研究指出,为准确评估品种与管理互作效应,应在单作与间作两种系统对多个种质资源进行同步比较。因此,针对紫花苜蓿-玉米套作体系,亟需将“品种×模式”互作纳入品种评价框架。

然而,目前针对河西灌区紫花苜蓿套作青贮玉米体系中品种适应性评价的研究尚显不足。在此背景下,本研究以河西灌区为试验区域,选取10个

玉米品种,在单作和套作条件下开展田间比较试验,围绕玉米的生产性能与营养品质进行系统测定与分析。本研究旨在阐明不同玉米品种在单作和套作模式下生产性能与营养品质的差异特征,揭示种植模式对品种表现的调控效应及其与关键性状之间的关系,为河西灌区玉米品种筛选与栽培模式优化提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省武威市黄羊镇(37°47'53"N, 102°53'35"E),该区域位于河西走廊东段,属典型温带大陆性干旱气候区,海拔1604.21 m,年平均气温9.7℃,年平均降水量170.3 mm,年蒸发量1994.3 mm,日照时数2 654.9 h,无霜期150 d。土壤理化性质指标如下:全盐含量1.82 g·kg⁻¹,土壤全氮含量1.22 g·kg⁻¹,碱解氮含量34.11 mg·kg⁻¹,速效磷含量9.93 mg·kg⁻¹,速效钾含量216.71 mg·kg⁻¹,土壤有机质含量2.87 g·kg⁻¹,土壤pH值为8.24。

1.2 试验材料

试验以10个玉米品种为材料,品种简介与来源见表1。

1.3 试验设计

试验设有紫花苜蓿套作玉米和玉米单作两种种植模式,玉米种植密度均为 8.25×10^4 株·hm⁻²。套作自然带带宽为230 cm,其中玉米带宽80 cm,行距40 cm,株距14 cm,种植3行,与苜蓿间距为30 cm;苜蓿带宽120 cm,种植9行,行距15 cm;单作玉米行距40 cm,株距23 cm。试验采用裂区设计,以种植模式为主区、玉米品种为副区,设置3次田间重复,每小区面积为26 m²,各处理在区组内随机布置,并设保护行。

苜蓿品种为‘甘农9号’紫花苜蓿,由甘肃农业大学草业学院提供。本试验于2023年4月26日先行播种苜蓿并持续管理,使其在2025年试验开始前形成稳定、均一的群体。同时,2023至2024年开展带状配置筛选试验(1,2,3行玉米与9行苜蓿组合比较),据此确定本研究试验采用3行玉米与9行苜蓿的带状套作配置^[16]。

表 1 参试玉米品种
Table 1 The maize varieties tested

编号 Number	参试品种 Tested varieties	育种单位 Breeding institutions	品种特点 Variety characteristics	适宜区域 Suitable areas
M1	陇单 10 号 Longdan No.10	甘肃陇玉种业科技有限公司 Gansu Longyu Seed Industry Technology Co., Ltd.	株型紧凑,抗丝黑穗病、茎腐病等,持绿性强	西北春玉米区
M2	博奥 521 Boao 521	甘肃博奥农业发展有限公司 Gansu Boao Agricultural Development Co., Ltd.	株型紧凑,抗丝黑穗病	甘肃省中晚熟玉米区
M3	五谷丰贮 1 号 Wugufengzhu NO.1	甘肃五谷种业股份有限公司 Gansu Wugu Seed Industry Co., Ltd.	株型半紧凑,抗倒伏,活秆成熟	甘肃、宁夏、新疆等
M4	屯玉 168 Tunyu 168	北京屯玉种业有限责任公司 Beijing Tunyu Seed Industry Co., Ltd.	株型半紧凑,抗大斑病、茎腐病等,活秆成熟	甘肃省中晚熟玉米区
M5	甘玉 23 Ganyu 32	甘肃种业有限公司 Gansu Seed Industry Co., Ltd.	株型紧凑,抗红叶病、茎腐病等,活秆成熟	甘肃省河西东部及陇东地区
M6	豫玉 22 Yuyu 22	甘肃种业有限公司 Gansu Seed Industry Co., Ltd.	株型半紧凑,抗穗腐病、灰斑病等,持绿性强	西北春玉米区
M7	金张掖 1706 Jinzhangye 1706	甘肃金张掖种业(集团)有限公司 Gansu Jinzhangye Seed Industry (Group) Co., Ltd.	株型半紧凑,抗瘤黑粉病,活秆成熟	甘肃、宁夏引黄灌区
M8	先玉 1225 Xianyu 1225	敦煌种业先锋良种有限公司 Dunhuang Seed Industry Pioneer Seed Co., Ltd.	株型半紧凑,抗丝黑穗病,茎腐病等,持绿性强	甘肃省河西及中部地区
M9	迪卡 R1831 Dika R1831	中种国际种子有限公司 Zhongzhong International Seed Co., Ltd.	株型半紧凑,抗丝黑穗病	西北春玉米区
M10	敦玉 260 Dunyu 260	甘肃省敦煌种业集团股份有限公司 Dunhuang Seed Industry Group Co., Ltd., Gansu Province	株型半紧凑,抗茎腐病,持绿性好	甘肃省中晚熟玉米区

苜蓿采用条播,播量为 22.5 kg·hm⁻²,行距 15 cm,带宽 120 cm,底肥施磷酸二胺 250 kg·hm⁻²,复合肥(N-P-K,15-15-15)350 kg·hm⁻²。2023 年全年刈割 2 茬,分别于 7 月 20 日和 9 月 10 日刈割,2024 年分别于 5 月 10 日、6 月 20 日、8 月 10 日、9 月 20 日刈割,共 4 茬。

玉米于 2025 年 4 月 17 日种植,采用覆膜栽培,播种方法为穴播,每穴 1 粒,播种深度 3~4 cm。玉米复合肥(N+P₂O₅+K₂O≥45%)350 kg·hm⁻²、磷酸二铵(N+P₂O₅≥64%)250 kg·hm⁻²全做基肥,播种前均匀施撒。拔节期追肥纯氮(276 kg·hm⁻²),追肥采用穴施。苜蓿施返青肥磷酸二铵 375 kg·hm⁻²。灌水为漫灌,每 15 d 灌溉一次,其余管理同当地大田。

1.4 试验方法

1.4.1 农艺性状测定 出苗后记录各个小区的有效株数密度(Effective plant density, EPD),蜡熟期(9 月 13 日)每个品种于各小区随机选取 10 株玉米(去除边行)测定株高(Plant height, PH)、茎粗(Stem diameter, SD)、绿叶数(Green leaf number, GLN)和系数法测定穗位叶面积(Ear leaf area, ELA)^[17]。

1.4.2 产量 各小区对已完成农艺性状调查的 10 株玉米进行刈割取样,留茬高度 10 cm,称重并记录穗鲜重(Fresh ear weight, FEW)和单株鲜重(Fresh weight per plant, FWPP)后 105℃烘箱杀青 30 min,65℃烘干至恒重,称量并计算干物质产量(Dry matter yield, DMY)。

1.4.3 玉米营养品质 各小区随机另选取 3 株收获后切碎并装袋,于 105℃烘箱杀青 30 min,65℃烘干至恒重粉碎后过 40 目筛(0.425 mm),制得草粉备用。具体指标及测定方法如下。粗蛋白(Crude protein, CP)含量:采用凯氏定氮法^[18]。粗脂肪(Ether extract, EE)含量:采用 FOSS Soxtec™ 8000 福斯全自动索氏脂肪提取仪测定^[19]。粗灰分(Ash)含量:采用干灰化法测定^[20]。中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量:采用尼龙袋范氏纤维法测定^[21]。并计算相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)^[22]。

干物质消化率(Digestible dry matte, DDM)=
$$88.9-0.779\times\text{ADF}\%$$

干物质采食量(Dry matter intake, DMI)=120/
$$\text{NDF}\%$$

相对饲喂价值(RFV)=(DMI×DMD)/1.29

1.4.4 数据统计与分析 采用 Microsoft Excel

2016对原始数据进行整理与初步计算,采用SPSS 27.0对各性状数据进行正态性(Kolmogorov-Smirnov)与方差齐性(Levene)检验,基于裂区设计以种植模式为主区因素、品种为副区因素,进行方差分析以检验种植模式、品种及其互作效应,采用最小显著差异法(LSD)进行均值多重比较,显著性水平设定为 $P<0.05$,极显著为 $P<0.01$ 。采用R 4.5.2(R Development Core Team)lavaan包构建结构方程模型(Structural equation modeling, SEM),采用标准化路径系数表征变量间的直接与间接效应,并结合拟合优度指标对模型进行评价。采用R 4.5.2(R Development Core Team)dplyr数据包通过熵权法确定各评价指标权重,在此基础上构建多准则决策模型—TOPSIS(Technique for order preference by similarity to an ideal solution)进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下玉米品种农艺性状各指标表现

不同玉米品种、种植模式及二者互作对PH, SD, EPD, FWPP和DMY均产生极显著影响($P<0.01$)。品种与种植模式对ELA和FEW的影响极

显著($P<0.01$),但二者互作对ELA和FEW均不显著,品种及二者互作对GLN均有极显著影响($P<0.01$)(表2)。

单作下,PH为269.00~333.50 cm,其中‘金张掖1706’显著高于除‘屯玉168’和‘敦玉260’以外的其他品种。‘五谷丰贮1号’的茎粗最粗(30.89 mm)。“陇单10号”‘五谷丰贮1号’和‘屯玉168’的绿叶数较多,均大于11个·株⁻¹。ELA集中在650~700 cm²,但‘博奥521’‘迪卡R1831’低于此范围,只有485.26 cm²和493.39 cm²。FEW最高的是‘屯玉168’‘陇单10号’,分别较‘迪卡R1831’提高了44.69%和42.29%。FWPP以‘五谷丰贮1号’和‘屯玉168’最高,分别为1.40和1.32 kg·株⁻¹(表3)。

套作下,PH以‘先玉1225’最高(309.20 cm),‘博奥521’最低(246.20 cm)。SD仍以‘五谷丰贮1号’最大(25.03 mm)。“甘玉23”和‘敦玉260’GLN分别位居第一和第二(11.71和10.83个·株⁻¹)。ELA多介于510~625 cm²,但‘迪卡R1831’和‘博奥521’偏低(496.81和461.52 cm²)。FEW最高的是‘屯玉168’(495.67 g),其次是‘甘玉23’(397.67 g)。“屯玉168”的FWPP最高(1.29 kg),‘迪卡R1831’最低(0.55 kg,表3)。

表2 生产性能及营养品质方差分析

Table 2 Analysis of variance of production traits and nutritional quality

指标 Index	玉米品种 Maize variety (M)		种植模式 Cropping pattern (C)		M×C	
	F	P	F	P	F	P
株高 Plant height	24.29	<0.01	86.21	<0.01	13.17	<0.01
茎粗 Stem diameter	9.14	<0.01	80.48	<0.01	4.81	<0.01
穗位叶面积 Ear leaf area	6.81	<0.01	44.94	<0.01	1.80	ns
绿叶数 Green leaf number	8.50	<0.01	0.08	ns	3.96	<0.01
有效株数密度 Effective plant density	46.05	<0.01	55.04	<0.01	26.19	<0.01
穗鲜重 Fresh ear weight	8.30	<0.01	59.34	<0.01	2.08	ns
单株鲜重 Fresh weight per plant	12.89	<0.01	48.81	<0.01	3.51	<0.01
干物质产量 Dry matter yield	5.29	<0.01	51.22	<0.01	2.77	<0.01
粗蛋白 Crude protein	2.58	<0.05	0.36	ns	4.31	<0.01
粗脂肪 Ether extract	13.88	<0.01	19.75	<0.01	9.67	<0.01
粗灰分 Ash	5.07	<0.01	0.70	ns	7.78	<0.01
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	12.31	<0.01	0.02	ns	16.53	<0.01
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	2.88	<0.05	6.11	<0.05	2.71	<0.05
相对饲喂价值 Relative feed value	11.09	<0.01	0.16	ns	12.82	<0.01

2.2 不同种植模式玉米品种的干物质产量

不同玉米品种和不同种植模式以及二者的交互作用对DMY的影响均为极显著($P<0.01$)(表2)。单作模式下,不同玉米品种的干物质产量介于25.00~35.80 t·hm⁻²之间,其中最高的是‘陇单10号’,其次为‘屯玉168’,二者分别较‘先玉

1225’提高了42.37%和34.32%。在套作模式下,不同玉米品种的DMY普遍介于19.00~27.20 t·hm⁻²之间,最高的为‘金张掖1706’,达27.12 t·hm⁻²,其次为‘豫玉22’和‘屯玉168’,分别为26.88和26.45 t·hm⁻²,最后为‘博奥521’最低,只有9.98 t·hm⁻²。

表 3 不同种植模式下玉米品种农艺性状

Table 3 Agronomic traits of maize varieties under different cropping patterns

种植模式 (CP) Crop- ping pattern	品种 (M) Maize variety	株高 Plant height/ cm	茎粗 Stem diameter/ mm	绿叶数 Green leaf number/个	穗位叶面积 Ear leaf area/ cm ²	穗鲜重 Fresh ear weight/g	单株鲜重 Fresh weight per plant/kg
单作 Monoculture	M1	313.60±5.36 ^b	25.54±0.79 ^{bc}	11.00±0.37 ^a	686.91±41.26 ^b	513.67±26.03 ^{ab}	1.26±0.10 ^a
	M2	269.00±2.87 ^d	24.04±0.44 ^c	7.00±0.93 ^d	485.26±38.47 ^c	417.67±12.72 ^c	0.98±0.05 ^{bc}
	M3	269.10±8.44 ^d	30.89±0.55 ^a	11.63±0.50 ^a	825.58±80.29 ^a	380.00±11.55 ^c	1.40±0.13 ^a
	M4	330.80±3.02 ^{ab}	25.76±0.87 ^{bc}	11.67±0.33 ^a	684.84±16.59 ^b	522.33±44.37 ^a	1.32±0.13 ^a
	M5	290.20±3.59 ^c	23.72±0.54 ^c	9.67±0.71 ^{abc}	683.84±51.24 ^b	435.33±55.13 ^{bc}	0.99±0.10 ^{bc}
	M6	277.60±4.18 ^d	27.28±0.78 ^b	9.50±0.85 ^{abc}	666.78±20.79 ^b	420.00±16.92 ^c	0.92±0.05 ^{bc}
	M7	333.50±2.32 ^a	25.73±1.64 ^{bc}	7.67±0.56 ^{bcd}	739.88±41.07 ^{ab}	424.33±11.33 ^c	0.98±0.06 ^{bc}
	M8	277.00±15.43 ^{cd}	25.09±1.15 ^{bc}	10.13±1.36 ^a	694.53±24.19 ^b	425.67±2.96 ^c	1.00±0.09 ^b
	M9	288.60±2.97 ^{cd}	23.15±1.05 ^c	7.33±0.33 ^{cd}	493.39±32.43 ^c	361.00±18.19 ^c	0.71±0.05 ^c
	M10	327.20±1.02 ^{ab}	25.50±0.95 ^{bc}	10.00±0.37 ^{ab}	655.36±27.37 ^b	398.67±23.78 ^c	0.94±0.08 ^{bc}
套作 Intercropping	M1	275.10±3.06 ^{cd}	22.61±1.32 ^{abc}	10.17±0.60 ^{ab}	567.36±29.15 ^{abc}	353.33±54.14 ^{bc}	0.71±0.08 ^{cd}
	M2	246.20±2.25 ^f	17.47±1.25 ^d	7.50±0.43 ^c	461.52±21.08 ^c	266.67±28.18 ^{bc}	0.60±0.07 ^d
	M3	270.75±7.66 ^{de}	25.03±0.97 ^a	9.33±0.42 ^b	571.01±68.37 ^{abc}	314.33±20.87 ^{bc}	0.91±0.06 ^b
	M4	267.38±5.50 ^{de}	24.78±0.40 ^{ab}	10.67±0.42 ^{ab}	558.12±24.86 ^{abc}	495.67±33.19 ^a	1.29±0.06 ^a
	M5	285.50±1.98 ^{bc}	24.32±0.84 ^{ab}	11.71±0.36 ^a	621.12±11.75 ^a	397.67±25.14 ^{ab}	0.97±0.04 ^b
	M6	263.80±2.82 ^{de}	22.10±0.63 ^{bc}	10.17±0.54 ^{ab}	565.16±47.97 ^{abc}	357.67±14.68 ^{bc}	0.88±0.04 ^{bc}
	M7	287.00±1.80 ^b	22.51±0.60 ^{abc}	10.00±0.52 ^b	597.95±33.34 ^{ab}	316.67±9.53 ^{bc}	0.91±0.08 ^b
	M8	309.20±4.88 ^a	19.30±0.97 ^d	7.17±0.31 ^c	539.38±34.30 ^{abc}	255.67±29.36 ^{bc}	0.66±0.05 ^d
	M9	261.00±4.43 ^e	22.43±0.67 ^{abc}	7.17±0.70 ^c	496.81±29.75 ^{bc}	322.33±39.43 ^{bc}	0.55±0.05 ^d
	M10	293.80±3.13 ^b	20.01±0.44 ^{cd}	10.83±0.60 ^{ab}	517.01±16.13 ^{abc}	238.67±15.45 ^c	0.60±0.07 ^d

注:不同小写字母表示同一种种植模式下不同品种间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among cultivars within the same cropping pattern ($P<0.05$)

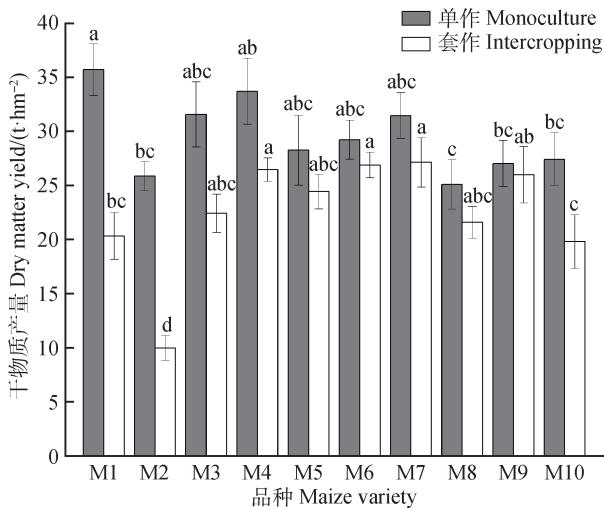


图 1 不同种植模式不同玉米品种干物质产量

Fig. 1 Dry matter yield of different cropping patterns and different maize varieties

注:不同小写字母表示同一种种植模式下不同品种间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among cultivars within the same cropping pattern ($P<0.05$). The same as below

2.3 不同种植模式玉米品种营养品质表现

品种以及二者互作对 Ash、NDF 和 RFV 的影响

极显著($P<0.01$),但种植模式对三者无显著影响。CP在模式主效应上不显著,但二者互作对其有着极显著影响($P<0.01$)。EE受品种、模式及二者互作的影响极显著($P<0.01$),对ADF有着显著影响($P<0.05$,表2)。

单作下 CP 普遍介于 9.00%~13.00% 之间,‘先玉 1225’最高(12.17%),‘陇单 10 号’和‘豫玉 22’偏低(8.80%和 7.74%)。‘甘玉 23’的 EE 最高(4.11%),显著高于除‘先玉 1225’和‘五谷丰贮 1 号’以外的其他品种。‘陇单 10 号’的 Ash 最低,为 3.33%。‘金张掖 1706’‘五谷丰贮 1 号’‘陇单 10 号’和‘博奥 521’的 NDF 均大于 50%,‘先玉 1225’含量最低(34.62%)。‘迪卡 R1831’的 ADF 最低(18.94%,图 2)。

套作下 CP 集中在 9.00%~11.00% 之间,且种植模式主效应不显著。‘迪卡 R1831’的 EE 含量最高(2.95%),其次为‘五谷丰贮 1 号’(2.93%)。‘迪卡 R1831’的 Ash 含量最低(3.61%),其次为‘豫玉 22’(3.65%),‘甘玉 23’‘金张掖 1706’的 NDF 较低,分别为 42.61%和 42.62%,ADF 含量最低的是‘迪卡 R1831’(17.72%)(图 2)。

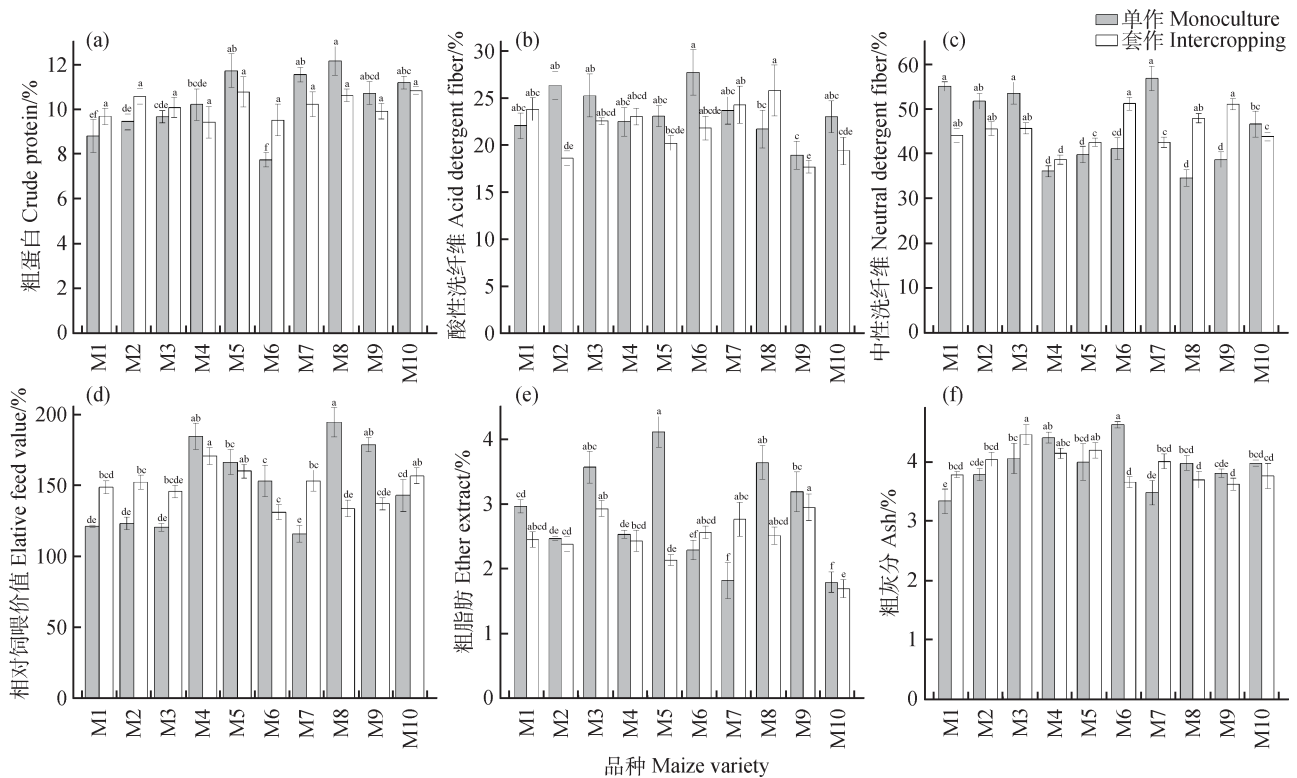


图2 不同种植模式玉米品种营养品质

Fig. 2 Nutritional quality of maize varieties under different cropping patterns

2.4 相关性分析

单作下,SD与ELA为显著正相关($P<0.05$),ELA与GLN显著正相关($P<0.05$)。PD与SD, GLN,FWPP表现为显著负相关($P<0.05$)。产量形成方面,FEW,FWPP与DMY呈显著正相关($P<0.05$)。营养指标中,CP与EE显著正相关($P<0.05$),PH与Ash显著正相关($P<0.05$)。NDF与RFV呈极显著负相关($P<0.01$,表4)。

套作下,SD与ELA显著正相关($P<0.05$),ELA与GLN呈显著正相关($P<0.05$)。FEW与SD呈显著正相关($P<0.05$),与FWPP极显著正相关($P<0.01$),PD与SD、FEW呈显著负相关($P<0.05$),且与FWPP呈极显著负相关($P<0.01$)。同时FWPP与SD,ELA,GLN均呈显著正相关($P<0.05$)。营养品质方面,NDF与RFV呈极显著负相关($P<0.01$),GLN与NDF显著负相关($P<0.05$),与RFV呈显著正相关($P<0.05$,表5)。

2.5 结构方程模型

为解析玉米关键农艺性状对产量与饲用价值形成的影响过程与作用路径,构建以PH、SD、ELA、GLN、FWPP和FEW为解释变量,以DMY

与RFV为响应变量的结构方程模型。结果表明,单作SEM拟合良好($P=0.342$,CFI=0.988)(图3)。产量形成路径中,FWPP($\beta=0.650$, $P<0.001$)、FEW($\beta=0.279$, $P<0.001$)对DMY的正向直接效应最大,而SD、ELA、PH对DMY的直接效应均不显著。品质方面,GLN对RFV具有显著正向作用($\beta=0.494$, $P<0.01$),FWPP对RFV呈显著负向效应($\beta=-0.327$, $P<0.05$)。外生性状间协方差结果显示FWPP与FEW和GLN,FEW与PH以及GLN与ELA之间均存在显著正相关($P<0.05$)。

套作SEM拟合良好($P=0.132$;CFI=0.960)(图4)。FWPP($\beta=0.453$, $P<0.05$)与PH($\beta=0.355$, $P<0.01$)对DMY均有显著正向作用。其余性状对DMY的直接效应均不显著。品质方面,FEW对RFV的正向作用最强且显著($\beta=0.746$, $P<0.01$),同时PH对RFV呈显著正向作用($\beta=0.399$, $P<0.05$)。此外,FWPP与FEW($\beta=0.720$, $P<0.01$)、FWPP与GLN($\beta=0.462$, $P<0.01$)、FEW分别于与ELA($\beta=0.442$, $P<0.01$)和SD($\beta=0.431$, $P<0.01$)以及GLN与SD($\beta=0.312$, $P<0.01$)均呈极显著正相关。但FEW与PH呈显著负相关($\beta=-0.206$, $P<0.05$)。

表 4 单作玉米生产性能与营养品质皮尔森相关性

Table 4 Pearson correlation between production traits and nutritional quality of maize under monoculture.

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	穗位叶面积 Ear leaf area	绿叶数 Green leaf number	有效株数密度 Effective plant density	穗鲜重 Fresh ear weight	单株鲜重 Fresh weight per plant	干物质产量 Dry matter yield	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Ether extract	粗灰分 Ash	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	相对饲喂价值 Relative feed value
株高 Plant height	1.00													
茎粗 Stem diameter	-0.17	1.00												
穗位叶面积 Ear leaf area	0.20	0.75 [*]	1.00											
绿叶数 Green leaf number	0.15	0.59	0.71 [*]	1.00										
有效株数密度 Effective plant density	0.26	-0.66 [*]	-0.51	-0.73 [*]	1.00									
穗鲜重 Fresh ear weight	0.49	-0.09	0.20	0.49	-0.19	1.00								
单株鲜重 Fresh weight per plant	0.11	0.66 [*]	0.66 [*]	0.80 [*]	-0.69 [*]	0.56	1.00							
干物质产量 Dry matter yield	0.52	0.40	0.51	0.55	-0.18	0.67 [*]	0.71 [*]	1.00						
粗蛋白 Crude protein	-0.33	0.11	0.17	0.31	0.49	-0.12	0.34	0.03	1.00					
粗脂肪 Ether extract	-0.56	0.01	0.14	0.27	-0.23	-0.07	0.17	0.13	0.73	1.00				
粗灰分 Ash	0.69 [*]	0.13	-0.09	0.12	0.39	0.43	0.08	0.44	0.61	0.57	1.00			
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.15	0.35	0.23	-0.14	0.00	-0.03	0.29	0.41	0.02	-0.36	0.02	1.00		
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	-0.34	0.51	0.20	0.01	-0.17	-0.04	0.21	0.00	-0.48	-0.29	0.07	0.34	1.00	
相对饲喂价值 Relative feed value	-0.07	-0.39	-0.21	0.14	-0.01	0.06	-0.27	-0.36	0.09	0.39	-0.08	-0.98 ^{***}	-0.49	1.00

注:*, **, ***分别表示 $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$ 水平下的显著性差异。下同

Note: *, **, and *** represent statistically significant differences at $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, and $P \leq 0.001$ levels, respectively. The same as below

表 5 套作玉米生产性能与营养品质皮尔森相关性

Table 5 Pearson correlation between production traits and nutritional quality of maize under intercropping

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	穗位叶面积 Ear leaf area	绿叶数 Green leaf number	有效株数密度 Effective plant density	穗鲜重 Fresh ear weight	单株鲜重 Fresh weight per plant	干物质产量 Dry matter yield	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Ether extract	粗灰分 Ash	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	相对饲喂价值 Relative feed value
株高 Plant height	1.00													
茎粗 Stem diameter	-0.00	1.00												
穗位叶面积 Ear leaf area	0.43	0.73 [*]	1.00											
绿叶数 Green leaf number	0.26	0.55	0.73 [*]	1.00										
有效株数密度 Effective plant density	0.20	0.72 [*]	0.41	-0.44	1.00									
穗鲜重 Fresh ear weight	-0.23	0.76 [*]	0.49	0.45	-0.72 [*]	1.00								
单株鲜重 Fresh weight per plant	0.00	0.73 [*]	0.64 [*]	0.63 [*]	-0.89 ^{***}	0.85 ^{**}	1.00							
干物质产量 Dry matter yield	0.28	0.73 [*]	0.65 [*]	0.42	-0.36	0.53	0.53	1.00						
粗蛋白 Crude protein	-0.58	-0.05	-0.03	0.21	0.01	0.05	-0.01	-0.30	1.00					
粗脂肪 Ether extract	-0.33	0.31	0.05	-0.43	-0.22	0.12	0.08	0.33	0.04	1.00				
粗灰分 Ash	0.61	-0.44	-0.05	-0.12	0.50	-0.38	-0.37	-0.25	-0.36	-0.60	1.00			
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	-0.19	-0.33	-0.37	-0.66 [*]	0.51	-0.47	-0.62	0.01	-0.17	0.39	0.15	1.00		
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	0.57	0.19	0.53	0.12	-0.21	0.14	0.39	0.30	-0.14	0.21	0.26	-0.25	1.00	
相对饲喂价值 Relative feed value	0.02	0.31	0.20	0.64 [*]	-0.49	0.49	0.55	-0.07	0.20	-0.46	-0.25	-0.94 ^{***}	-0.09	1.00

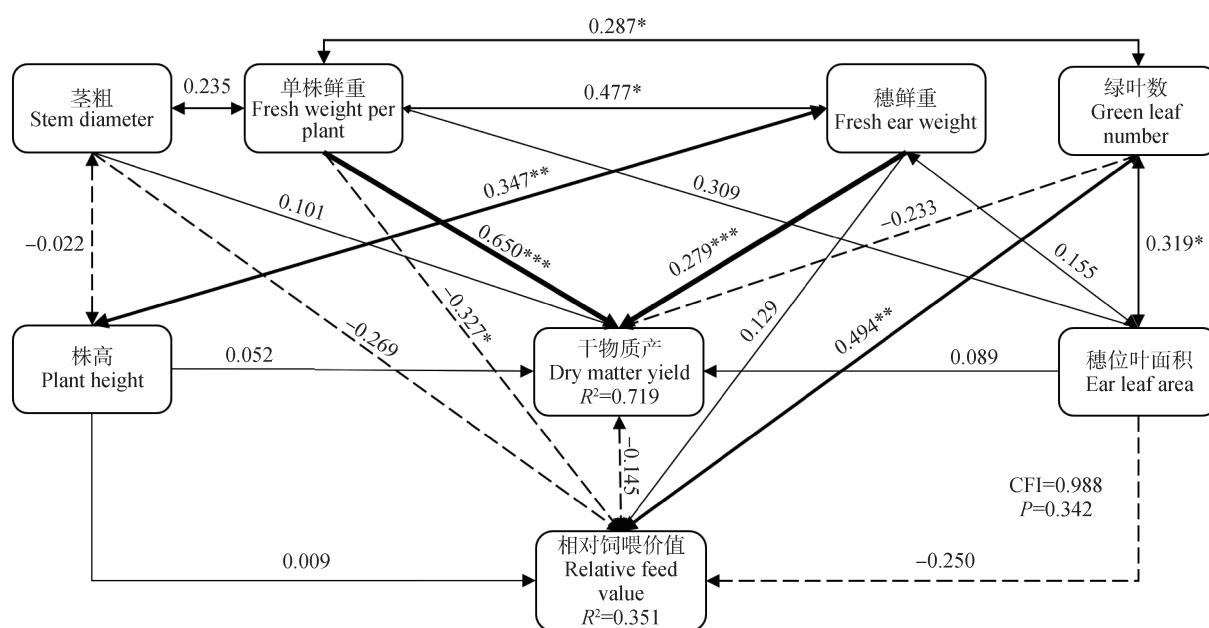


图 3 结构方程模型分析单作模式生产性能对干物质产量和 RFV 的影响路径

Fig. 3 Structural equation modeling of the pathways through which production performance affects dry matter yield and RFV under monoculture

注:实线和虚线箭头分别表示正向与负向关系,数值为标准化估计值(单向箭头为标准化路径系数,双向箭头为标准化协方差)。*, **, ***分别表示在 0.05, 0.01, 0.001 水平上差异显著。下同

Note: Solid and dashed arrows represent positive and negative relationships, respectively. The values indicating standardized estimates (single-headed arrows represent standardized path coefficients, and double-headed arrows represent standardized covariances). *, **, and *** indicate statistical significance at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively. The same as below

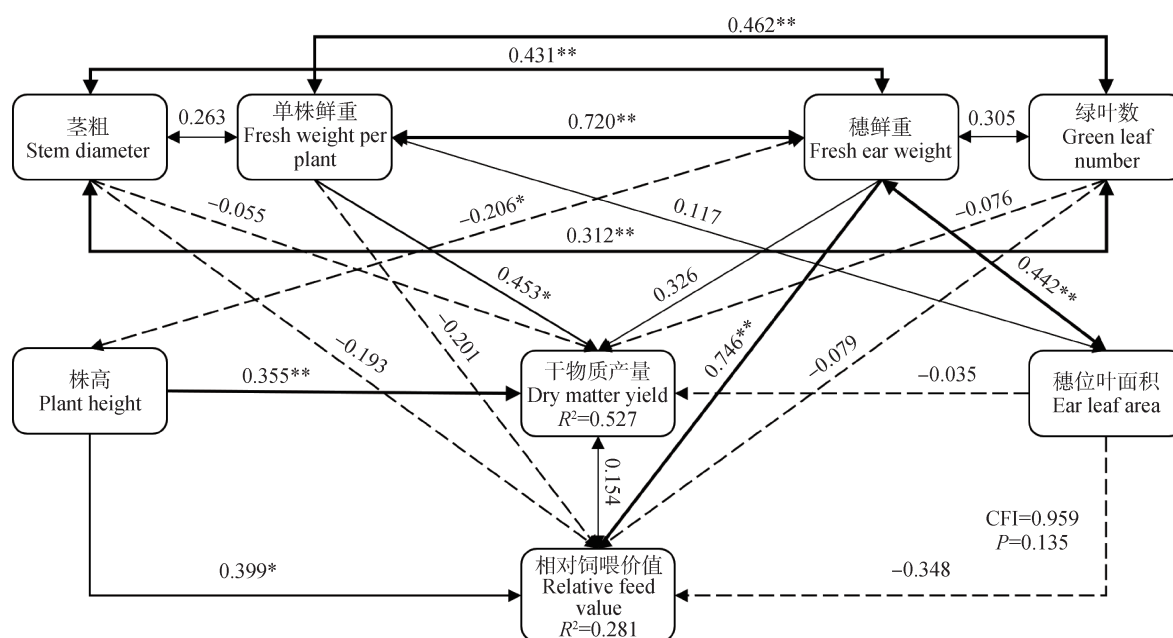


图 4 结构方程模型分析套作模式生产性能对干物质产量和 RFV 的影响路径

Fig. 4 Structural equation modeling of the pathways through which production performance affects dry matter yield and RFV under intercropping

2.6 多准则测决策模型—TOPSIS 评价

通过熵权法建立 TOPSIS 模型对不同种植模

式不同玉米品种的生产性能以及营养品质的多个指标进行综合评价分析(图 5)。结果表明,两种种

植模式下的相对接近度(C_i)存在明显差异,单作接近度由高到低的排序为‘甘玉23’>‘五谷丰贮1号’>‘先玉1225’>‘陇单10号’>‘迪卡R1831’>‘屯玉168’>‘博奥521’>‘豫玉22’>‘金张掖1706’>‘敦玉260’,套作接近度由高到低的排序为‘甘玉

23’>‘屯玉168’>‘金张掖1706’>‘敦玉260’>‘五谷丰贮1号’>‘陇单10号’>‘博奥521’>‘迪卡R1831’>‘豫玉22’>‘先玉1225’。甘玉23在单作($C_i=0.735$)、套作($C_i=0.709$)中的接近度均为最高,表现出较好的稳定性。

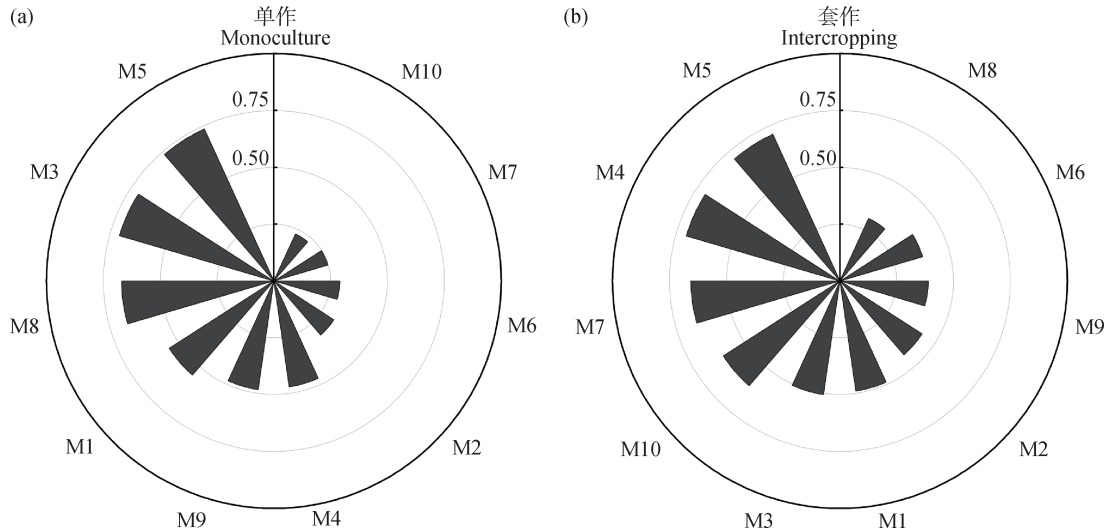


图5 不同种植模式玉米品种相对接近度

Fig. 5 Relative closeness coefficients of maize varieties under different cropping patterns

3 讨论

3.1 不同模式、不同品种对玉米生产性能的影响

不同种植模式下玉米产量与农艺性状存在显著的品种差异,且品种在间套作模式下的表现也不一致^[23-25]。这种差异常通过产量相关性状表现:生物鲜重与生物干重、持绿性等指标呈正相关,总初级生产力与绿叶面积指数显著正相关,说明维持绿叶功能期有利于生物量积累^[26-28]。廖长见等^[29]研究表明茎粗和株高等是影响玉米产量的关键农艺性状。在间套作条件下,种间竞争会改变上述性状,已有研究报道间作可导致玉米茎粗与叶面积下降^[30],苜蓿/玉米套作会显著降低玉米干物质产量^[31]。与此一致,本研究中套作模式下各品种产量较单作均有着不同程度的下降。单作条件下高产品种为‘陇单10号’和‘屯玉168’,而套作条件下转变为‘金张掖1706’‘豫玉22’和‘屯玉168’。进一步比较减产幅度,‘豫玉22’套作下减产约8.00%,‘博奥521’减产约61.40%,说明不同品种的稳产能力存在差别。方差分析结果进一步显示,PH、SD、ELA、FEW和FWPP在两种模式间差异显著,表明种植模式能够影响株型建成与产量形成。结合具体性状表现,‘屯玉168’在套作下仍保持较高FEW

与FWPP,对应其较高产量。‘博奥521’在套作下SD最低且FEW、FWPP偏低,与其大幅减产相一致。相比之下,GLN主要受品种影响且差异显著,而模式效应不显著,可能说明持绿性存在相对稳定的遗传差异且对模式变化不敏感^[32]。

3.2 不同模式、不同品种对玉米营养品质的影响

在玉米品种筛选与栽培模式优化中,研究者通常同时关注CP水平与纤维含量特征。粗蛋白是评价玉米饲用价值的重要指标。中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维直接影响反刍动物采食量和消化率,而较低的含量有利于提高其对粗饲料的采食量^[33-34]。翁巧云等^[35]研究发现,玉米一大豆间作能提高青贮玉米的粗蛋白和粗脂肪含量。本研究中,套作并没有提升玉米的粗蛋白和脂肪含量。单作模式下玉米粗蛋白的品种差异显著,且这说明在单作模式下不同品种在物质积累与营养分配上存在基因型差异。而套作模式下,各品种的粗蛋白无显著差异,且变化范围较小,结合方差分析结果,粗蛋白模式主效应不显著,但二者的交互作用极显著,说明粗蛋白更受“特定品种在特定模式”的影响,而非单一因素的影响^[36]。

3.3 不同种植模式和品种下玉米农艺性状对产量及饲用品质的路径分析

在单作条件下,干物质产量的差异主要受单株产量与穗部的共同影响。相关性分析表明,干物质产量与单株鲜重、穗鲜重均呈显著相关,表明产量形成受二者协同影响。协方差结果显示株高、绿叶数、穗位叶面积通过调节单株鲜重与穗鲜重间接影响干物质产量的形成。套作条件下的路径结构发生重构,株高成为影响干物质产量的重要节点。既往研究指出,密植或遮阴环境下玉米易产生避荫反应并表现为株高增加^[37],套作虽不等于密植,但为保持与单作相同的种植密度,往往需要缩减株距并调整空间配置,从而改变群体竞争格局,在这种条件下,植株同样可能通过增加株高来获取光照。因此,在套作系统中株高不仅是形态指标,更能反映品种对套作光环境与空间竞争的适应力。而穗重和株高呈显著负相关,植株出现避荫反应可能伴随穗部发育受限^[38],从而削弱穗重对干物质产量的解释,导致其路径系数虽为正向但未达显著。因此,品种筛选应注重综合表现,而非单一指标排序。本研究SEM以种植模式为分析单元,关注的是品种层面性状共变的节点并比较两种模式下作用路径的变化,而非强调路径系数大小。受限于各模式品种数较少,路径显著性与因果解释仍需更大样本和重复试验验证。

4 结论

品种、种植模式以及二者互作显著影响玉米农艺性状和产量表现,且套作模式下品种间干物质产量差异较大,表明单作模式产量表现不能直接反映其在套作模式中的适应性。不同种植模式下干物质产量和RFV的形成路径存在差异,其中株高、单株鲜重和穗鲜重是套作模式中品种筛选应重点关注的农艺性状。在河西灌区紫花苜蓿-玉米套作体系中,‘甘玉23’综合表现与稳定性最优,‘金张掖1706’干物质产量最高,‘屯玉168’单株产量和穗鲜重均较高,因此,这三个品种均可作为河西灌区紫花苜蓿-玉米套作体系的优选品种,可在实际应用中根据生产目标进行选择。

参考文献

[1] 樊有鹤,岳思好,南志标,等. 我国玉米种业与产业政策演进及其对草地农业发展的启示[J]. 草业学报,2025,34(3):189-203

FAN Y H, YUE S Y, NAN Z B, et al. The evolution of China's maize seed industry, relevant industrial policies and implications for grassland agriculture development[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 189-203

[2] 于法稳,黄鑫,王广梁. 畜牧业高质量发展:理论阐释与实现路径[J]. 中国农村经济,2021(4):85-99

YU F W, HUANG X, Wang G L. High-quality development of animal husbandry: theoretical interpretation and realization path[J]. *Chinese Rural Economy*, 2021(4): 85-99

[3] 王新友. 青贮玉米应用现状及其栽培措施研究进展[J]. 饲料工业,2024,45(13):139-144

WANG X Y. Research on the application of forage maize and the progress in its cultivation measures[J]. *Feed Industry*, 2024, 45(13): 139-144

[4] 郭勇,王楠. 青贮玉米种植、饲喂和收获效益分析[J]. 农业工程,2021,11(3):140-143

GUO Y, WANG N. Benefit analysis of silage corn planting, feeding and harvesting[J]. *Agricultural Engineering*, 2021, 11(3): 140-143

[5] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4):403-415

LI L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403-415

[6] 杜桂娟,白伟,蔡倩,等. 玉米-紫花苜蓿间作模式对作物产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业气象,2025,46(3):398-408

DU G J, BAI W, CAI Q, et al. Effects of maize-alfalfa intercropping system on crop yields and productivity[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2025, 46(3): 398-408

[7] MA H M, YU X Q, YU Q, et al. Maize/alfalfa intercropping enhances yield and phosphorus acquisition[J]. *Field Crops Research*, 2023(303):109136

[8] 肖宇,刘青松,阎旭东,等. 苜蓿-玉米套作种植竞争关系及空间结构分析[J]. 中国草地学报,2020,42(3):133-140

XIAO Y, LIU Q S, YAN X D, et al. Competitive relationship and spatial structure analysis of alfalfa-maize intercropping[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 133-140

[9] XU R X, ZHAO H M, LIU G B, et al. Alfalfa and silage maize intercropping provides comparable productivity and profitability with lower environmental impacts than wheat-maize system in the North China plain[J]. *Agricultural Systems*, 2022(195):103305

[10] 高润,吴波,陈燕,等. 黄淮海地区苜蓿田夏季套作青贮玉米研究初探[J]. 农学学报,2024,14(2):1-6

GAO R, WU B, CHEN Y, et al. Preliminary study on summer interplanting silage maize in alfalfa field in Huang-Huai-Hai Region[J]. *Journal of Agriculture*, 2024, 14(2): 1-6

[11] DEMIE D T, DÖRING T F, FINCKH M R, et al. Mixture × genotype effects in cereal/legume intercropping[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022(13):846720

[12] 陈国徽,曹国军,蒋发辉,等. 品种差异对玉米/大豆间作系统产量及土地生产力的影响[J]. 江西农业学报,2025,37(10):7-13

CHEN G H, CAO G J, JIANG F H, et al. Effects of variety differences on yield and land productivity of maize-soybean intercropping system[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2025, 37(10): 7-13

[13] AFRILLAH M. Agroecological model employment with intercropping between maize and soybean[J]. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 2025, 57(4):1564-1574

[14] YUWARIAH Y, SUPRIATNA J, NURAINI A, et al. Screening of maize hybrids under maize/soybean intercropping based on their combining abilities and multiple cropping components[J]. *Asian Journal of Crop Science*, 2018, 10(2):93-99

- [15] BROOKER R W, BENNETT A E, CONG W F, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1):107-117
- [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] FRANCIS C A, RUTGER J N, PALMER A F E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Crop Science*, 1969, 9(5):537-539
- [18] BRADSTREET R B. Kjeldahl method for organic nitrogen[J]. *Analytical Chemistry*, 1954, 26(1):185-187
- [19] LUQUE DE CASTRO M D, PRIEGO-CAPOTE F. Soxhlet extraction: past and present Panacea[J]. *Journal of Chromatography A*, 2010, 1217(16):2383-2389
- [20] THIEX N, NOVOTNY L, CRAWFORD A. Determination of ash in animal feed: AOAC official method 942.05 revisited[J]. *Journal of AOAC International*, 2012, 95(5):1392-1397
- [21] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10):3583-3597
- [22] SANSON D W, KERCHER C J. Validation of equations used to estimate relative feed value of alfalfa hay[J]. *The Professional Animal Scientist*, 1996, 12(3):162-166
- [23] 孟凡凡, 王博, 刘宝泉, 等. 玉米-大豆带状间作下玉米品种产量和主要农艺性状比较分析[J]. *作物杂志*, 2014(3):101-105
- MENG F F, WANG B, LIU B Q, et al. Analysis of yield and main agronomic traits of maize in maize and soybean strip intercropping system[J]. *Crops*, 2014(3):101-105
- [24] 杨继贵. 陕西关中夏播区玉米大豆带状间作模式下玉米品种筛选及株高控制技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2025:25-27
- YANG J G. Study on maize variety screening and plant height control technology under maize-soybean strip intercropping mode in summer sowing area of Guanzhong, Shaanxi Province [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2025:25-27
- [25] 王淑彬, 张鹏, 杨文亭, 等. 红壤旱地玉米大豆间作模式适宜玉米品种筛选[J]. *江西农业大学学报*, 2020, 42(1):10-19
- WANG S B, ZHANG P, YANG W T, et al. Selection of maize varieties suitable for maize soybean intercropping model in red soil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(1):10-19
- [26] 杨云, 金容, 夏清清, 等. 青贮玉米生物产量相关性状分析[J]. *现代农业科技*, 2024(16):16-19
- YANG Y, JIN R, XIA Q Q, et al. Analysis on related traits of biological yield of silage corn[J]. *XianDai NongYe KeJi*, 2024(16):16-19
- [27] GITELSON A A, PENG Y, ARKEBAUER T J, et al. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: implications for remote sensing of primary production[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014(144):65-72
- [28] 徐欣欣, 王连军, 杨军卫, 等. 品种与种植密度对榆阳地区青贮玉米引种试验的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(12):4152-4161
- XU X X, WANG L J, YANG J W, et al. Effects of variety and planting density on the introduction experiment of silage corn in Yuyang area[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(12):4152-4161
- [29] 廖长见, 王颖姮, 林建新, 等. 影响青贮玉米生物产量及品质关键农艺性状的初步分析[J]. *福建农业学报*, 2011, 26(4):572-576
- LIAO C J, WANG Y H, LIN J X, et al. Preliminary analysis on key agronomic traits relating to biomass and quality of silage maize[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(4):572-576
- [30] 姜胜男, 张淑艳, 刘殿鹏. 青贮玉米和秣食豆混播比例对群体生产机能的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(26):38-40, 43
- JIANG S N, ZHANG S Y, LIU D P. Effects of mixed sowing proportion of fodder soybean and silage maize on population production function[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(26):38-40, 43
- [31] XU R X, ZHAO H M, YOU Y L, et al. Effects of intercropping, nitrogen fertilization and corn plant density on yield, crude protein accumulation and ensiling characteristics of silage corn interseeded into alfalfa stand[J]. *Agriculture*, 2022, 12(3):357
- [32] TUCKER S L, DOHLEMAN F G, GRAPOV D, et al. Evaluating maize phenotypic variance, heritability, and yield relationships at multiple biological scales across agronomically relevant environments[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2020, 43(4):880-902
- [33] 张文浩, 林萌萌, 刘玉. 大豆-玉米混合青贮对肉牛生长性能、养分表观消化率及瘤胃发酵参数的影响[J]. *饲料研究*, 2025, 48(1):32-36
- ZHANG W H, LIN M M, LIU Y. Effects of soybean-corn mixed silage on growth performance, nutrient apparent digestibility, and rumen fermentation parameters of beef cattle[J]. *Feed Research*, 2025, 48(1):32-36
- [34] 孙芸, 蒋再慧, 谢华德, 等. 不同比例玉米秸秆全混合颗粒日粮对小尾寒羊的消化、瘤胃内发酵及生长性能的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(10):3194-3202
- SUN Y, JIANG Z H, XIE H D, et al. Effect of total mixed ration pellet with different proportions of corn straw on the digestive characteristics, ruminal fermentation and feed efficiency of small-tailed Han sheep[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(10):3194-3202
- [35] 瓮巧云, 黄新军, 许翰林, 等. 玉米/大豆间作模式对青贮玉米产量、品质及土壤营养、根际微生物的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(2):462-470
- WENG Q Y, HUANG X J, XU H L, et al. Effects of corn/soybean intercropping model on yield, quality, soil nutrition and rhizosphere microorganisms of silage corn[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2):462-470
- [36] GRABBER J H, NORTHUP C P. Biomass, stalk, grain, and root crown characteristics of silage maize hybrids interseeded with alfalfa[J]. *Crop Science*, 2025, 65(4):e70105
- [37] JAFARI F, WANG B B, WANG H Y, et al. Breeding maize of ideal plant architecture for high-density planting tolerance through modulating shade avoidance response and beyond[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2024, 66(5):849-864
- [38] LIANG B, LI J J, ZHAO X Y, et al. Effects of bandwidth on ear differentiation and grain yield formation of maize in strip intercropping[J]. *Plants*, 2025, 14(7):1081

(责任编辑 彭露茜)