

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.030

引用格式:刘盼婷,张朝辉,张邦彦,等.盐碱地湖南稷子间作大豆对作物光合特性和生产性能的影响[J].草地学报,2026,34(3):1077-1086

LIU Pan-Ting, ZHANG Chao-Hui, ZHANG Bang-Yan, et al. Effects of Intercropping Soybean with Hunan Millet on Photosynthetic Characteristics and Production Performance Under Saline and Alkaline Conditions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1077-1086

盐碱地湖南稷子间作大豆对作物光合特性和生产性能的影响

刘盼婷,张朝辉,张邦彦,武晋民,张家豪,蔺美玲,张百合,王彬*
(宁夏大学农学院,宁夏银川750021)

摘要:本研究旨在探讨湖南稷子(*Echinochloa frumentacea*)与大豆(*Glycine max*)在盐碱地中间作,通过光合作用特性及生产性能的测定,确立最优间作模式,为盐碱地的开发利用提供新的解决方案。本研究设置湖南稷子单作(HS),大豆单作(DS),湖南稷子和大豆间作2:2种植(H_2D_2),2:4种植(H_2D_4),4:2种植(H_4D_2)和4:4种植(H_4D_4)共6个种植模式,通过对这两种作物的光合作用特性、生产性能以及湖南稷子的营养品质进行综合评估,以期获得最优的间作配置。研究结果显示,间作模式显著促进了湖南稷子和大豆的生长状况。间作行比下, H_2D_4 , H_4D_2 , H_4D_4 土地当量比均大于1,其中 H_2D_4 土地当量比最高,为1.18;在 H_2D_4 处理下,湖南稷子的净光合速率(Pn)为 $45.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,气孔导度(Gs)为 $0.0518 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,蒸腾速率(Tr)为 $3.36 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,均较单作表现优异,同时, H_2D_4 处理下的湖南稷子在营养品质方面也表现最优,粗蛋白含量高达10.03%,且粗灰分、粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维以及相对饲用价值等指标均表现良好。通过主成分分析进一步验证, H_2D_4 模式综合表现最佳,该间作行比配置有利于营造理想的群体冠层内部光环境,从而实现了湖南稷子产量品质与大豆产量的双重提升。

关键词:湖南稷子;间作;生产性能;营养品质

中图分类号:S344.2;S516

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1077-10

Effects of Intercropping Soybean with Hunan Millet on Photosynthetic Characteristics and Production Performance Under Saline and Alkaline Conditions

LIU Pan-ting, ZHANG Chao-hui, ZHANG Bang-yan, WU Jin-min, ZHANG Jia-hao,
LIN Mei-ling, ZHANG Bai-han, WANG Bin*

(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: This study aimed to explore intercropping of Hunan millet and soybean in saline-alkali soils. By assessing the photosynthetic characteristics and agronomic performance, the optimal intercropping pattern was identified, providing new solutions for the development and utilization of saline-alkali land. The study included six planting patterns: Hunan millet sole crop (HS), soybean sole crop (DS), 2:2 (H_2D_2), 2:4 (H_2D_4), 4:2 (H_4D_2), and 4:4 (H_4D_4). The photosynthetic characteristics, agronomic performance, and nutritional quality of Hunan millet were comprehensively evaluated to determine the best intercropping configuration. The results showed that intercropping significantly promoted the growth of both Hunan millet and soybean. Among the intercropping patterns, the land equivalent ratios (LER) of H_2D_4 , H_4D_2 , and H_4D_4 were greater than 1, with H_2D_4 showing the highest LER of 1.18. Under the H_2D_4 treatment, the net photosynthetic rate (Pn) of Hunan millet was $45.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, stomatal conductance (Gs) was $0.0518 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and transpiration rate

收稿日期:2025-03-12;修回日期:2025-04-15

基金项目:国家重点研发计划“黄河上游河套平原节水控盐产能提升技术模式与应用”(2021YFD1900600)资助

作者简介:刘盼婷(2001-),女,汉族,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事作物栽培研究,E-mail:17693187410@163.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: wb_y2004@nxu.edu.cn

(Tr) was $3.36 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, all of which were superior to those of the sole crop. Additionally, Hunan millet under the H_2D_4 treatment showed optimal nutritional quality, crude protein content reaching 10.03%, and other indicators such as crude ash, crude fat, acid detergent fiber, neutral detergent fiber, and relative feed value all performed well. Principal component analysis further confirmed that the H_2D_4 pattern performed the best overall. This intercropping configuration promoted an ideal light environment within the plant canopy, leading to enhanced both yield and quality of Hunan millet and soybean.

Key words: Hunan millet; Intercropping; Production performance; Nutritional quality

土壤盐碱化是指水溶性盐在土壤中的积累达到影响农业生产、环境健康和经济福利的水平。土壤盐碱化不仅会破坏土壤物理结构和化学结构,还会影响作物生长和粮食产量^[1]。据统计,全球有10亿公顷的土地遭受盐碱化影响,其中包括超过20%的灌溉耕地^[2],我国盐渍化土地面积大约1亿公顷,主要分布在东北、西北等地区^[3]。随着全球人口持续增加,国际农业结构性危机和粮食安全风险日益突出,加强盐碱地治理和保护耕地资源已成为当前亟需解决的问题^[4]。

间作是指在同一田地上和同一生长期,分行或分带相间种植两种或两种以上作物的种植方式^[5],这种种植方式不仅可以提高土地利用效率,增加光能利用,还可以改善作物的通风透光条件,充分发挥边行优势的增产作用^[6]。大量研究表明,禾豆间作在一定程度上可以改变作物生长形态及产量变化^[7-9],对农田生态系统产能提升与资源有效利用均具有正向可持续效应^[10]。Li等^[11]研究结果表明间作的作物产量比单一栽培的作物产量提高了22%,并且具有更高的年际稳定性。湖南稷子(*Echinochloa frumentacea*)作为一种一年生禾本科牧草,具有茎秆柔软、适口性好、叶量丰富和营养价值高等优势,从而成为一种高产、优质草料兼用牧草^[12],能在盐分含量达0.6%、pH值为9.3的盐碱荒地上萌发并生长,是盐碱地改良的理想作物^[13]。程云龙^[14]的研究表明湖南稷子间作豆科可以优化湖南稷子对营养元素的吸收与转化,提高土地利用效率,促进资源高效利用。

为此,本研究通过在盐碱地进行大豆(*Glycine max*)和湖南稷子间作,探究不同间作模式下的大豆、湖南稷子的光合特性和生产性能及相互关系,为盐碱地合理高效开发利用的间作种植模式提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2023年在宁夏平罗县宝丰镇进行,该地区属于半干旱沙漠性气候,年平均降水量为

173.2 mm,年平均温为8.5℃,土壤为中度盐碱地,0~20 cm的土壤pH值为8.87,全盐含量为 $3.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $12.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮为 $73.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为 $25.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $85.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,20~40 cm的土壤pH为8.81,全盐为 $3.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质为 $24.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮为 $9.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为 $20.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $89.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验共设置6个处理:湖南稷子单作(HS),大豆单作(DS),湖南稷子与大豆2:2间作(H_2D_2)、湖南稷子与大豆2:4种植(H_2D_4)、湖南稷子/大豆4:2种植(H_4D_2)、湖南稷子/大豆4:4种植(H_4D_4),每个处理重复3次,共18个处理。小区面积为 40 m^2 ($5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$),湖南稷子和大豆均为单株穴播,行距均为20 cm,湖南稷子穴距24 cm,大豆穴距10 cm。湖南稷子 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,大豆 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,湖南稷子品种为‘海子一号’,由千叶青公司提供,大豆品种为‘齐黄34’,由北京百斯特草业有限公司提供,如图1所示。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标测定 大豆成熟期及湖南稷子播种后105天测定以下指标:各处理随机选取20株长势相同的湖南稷子与大豆,采用卷尺和游标卡尺测量株高(Plant height, PH)和茎粗(Stem diameter, SD)。

1.3.2 光合性能的测定 在大豆的初花期以及湖南稷子播种后的第105天,使用Li 6400便携式光合仪的标准叶室,设置自然光照强度,光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)为2000~2200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,参比室的 CO_2 浓度为 $380 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,在8:00—10:00,对湖南稷子的倒二倒三叶和大豆倒数第三复叶的中间小叶进行了光合生理特性的测量,这些指标包括净光合速率(Net photosynthetic rate, Pn),气孔导度(Stomatal conductance, Gs),胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, Ci),以及蒸腾速率(Transpiration rate, Tr)。

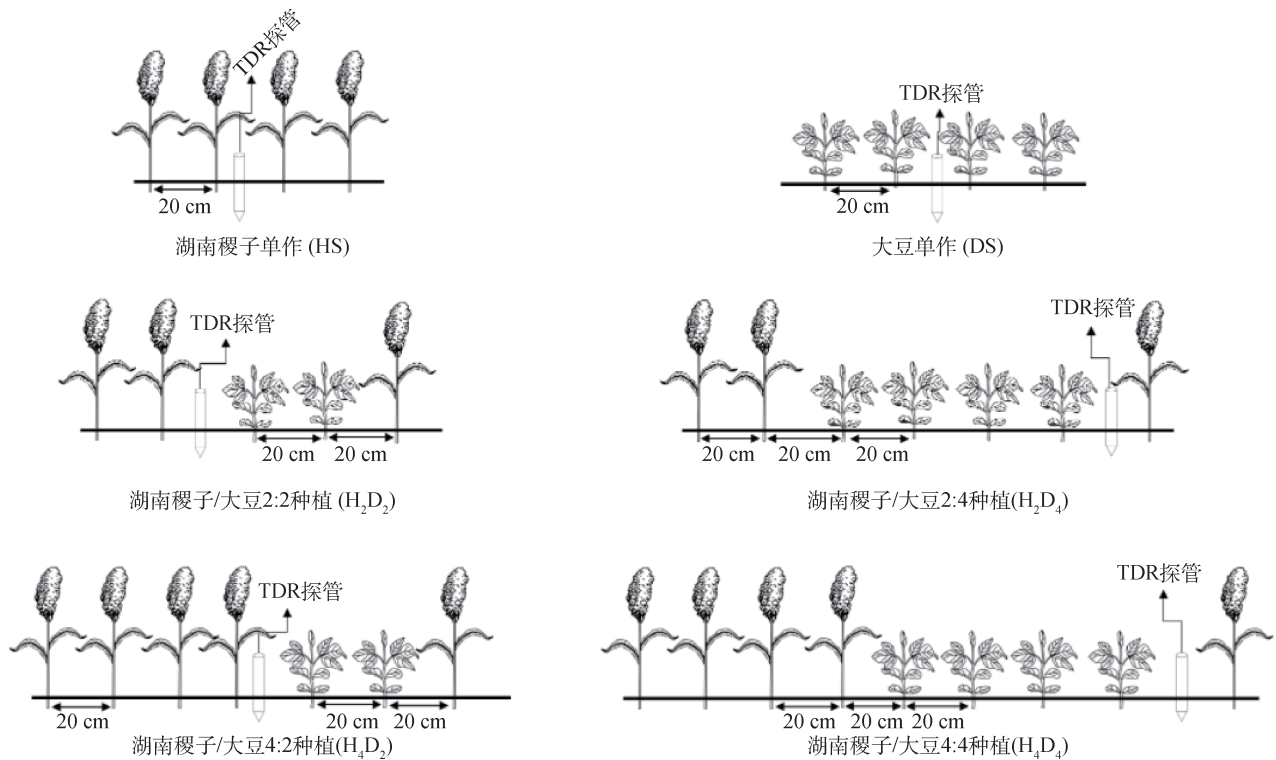


图1 湖南稷子-大豆间作模式

Fig. 1 Hunan Millet-Soybean intercropping pattern

1.3.3 产量和品质的测定 湖南稷子干草产量:在湖南稷子播种后105天,通过随机选取1 m²区域植株进行人工刈割并称重,随后取1 kg样本自然阴干后折算公顷产量;湖南稷子营养成分测定:湖南稷子样本经粉碎过筛后,依据《饲料及饲料添加剂质量检测方法与品质管理》^[15],产量与品质检测标准,测定粗灰分(Crude ash, CA)、粗脂肪(Ether extract, EE)、粗蛋白(Crude protein, CP)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量,并据此计算相对饲喂价值(Relative feed value, RFV):

$$RFV = (88.90.779 \times ADF) \times (120/NDF) / 1.29$$

$$CA(\%) = \frac{\text{灼烧后残留灰分质量(g)}}{\text{试样质量(g)}} \times 100\%$$

$$EE = \frac{\text{萃取后的质量(g)}}{\text{试样质量(g)}} \times 100\%$$

$$CP(\%) = \text{总氮含量}(\%) \times 6.25$$

$$ADF(\%) = \frac{\text{酸洗后残留物质量(g)}}{\text{试样质量(g)}} \times 100\%$$

$$NDF(\%) = \frac{\text{中性洗涤后残留物质量(g)}}{\text{试样质量(g)}} \times 100\%$$

大豆产量测定:大豆成熟期,基于每小区9株

均势植株的产量测定并计算公顷产量。

1.3.4 土地当量比的测定 土地当量比(Land equivalent ratio, LER)是衡量间作系统生产效率的指标,表示达到相同产量时,间作所需土地面积与单作所需土地面积的比例。湖南稷子和大豆间作LER的计算公式为

$$R_{LE} = \frac{Y_{hg}}{Y_{hh}} + \frac{Y_{dh}}{Y_{dd}}$$

其中, R_{LE} 为湖南稷子与大豆间作土地当量比, Y_{hg} 是间作湖南稷子的产量, Y_{hh} 是单作湖南稷子的产量; Y_{dh} 是间作中大豆的产量, Y_{dd} 是单作大豆的产量。

1.4 数据分析

本研究采用Excel 2021进行数据预处理分析,利用SPSS 26.0进行描述性统计分析、方差分析、主成分分析;用Origin 2022和R 4.3.3制作图表。

2 结果与分析

2.1 间作对湖南稷子和大豆生长指标的影响

间作显著影响大豆和湖南稷子PH($P < 0.05$)。 H_2D_2 、 H_2D_4 、 H_4D_2 和 H_4D_4 处理的PH均高于HS处理,

分别为 46.1%, 47.6%, 39% 和 42.5%。与 DS 相比, H_2D_2 , H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理下大豆 PH 分别增加了 17.5%, 33%, 36.1% 和 41% ($P < 0.05$)。在植物 SD 上, 与 HS 相比, H_2D_2 , H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理下湖南稷子的 SD 显著增加 28.6%, 49.9%,

39.2% 和 40.7% ($P < 0.05$)。与 DS 处理相比, H_2D_2 处理显著降低 ($P < 0.05$), H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理与 DS 处理无显著差异。与 HS 处理相比, H_2D_2 , H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理的湖南稷子干物质 (Dry matter, DM) 无显著变化 (图 2)。

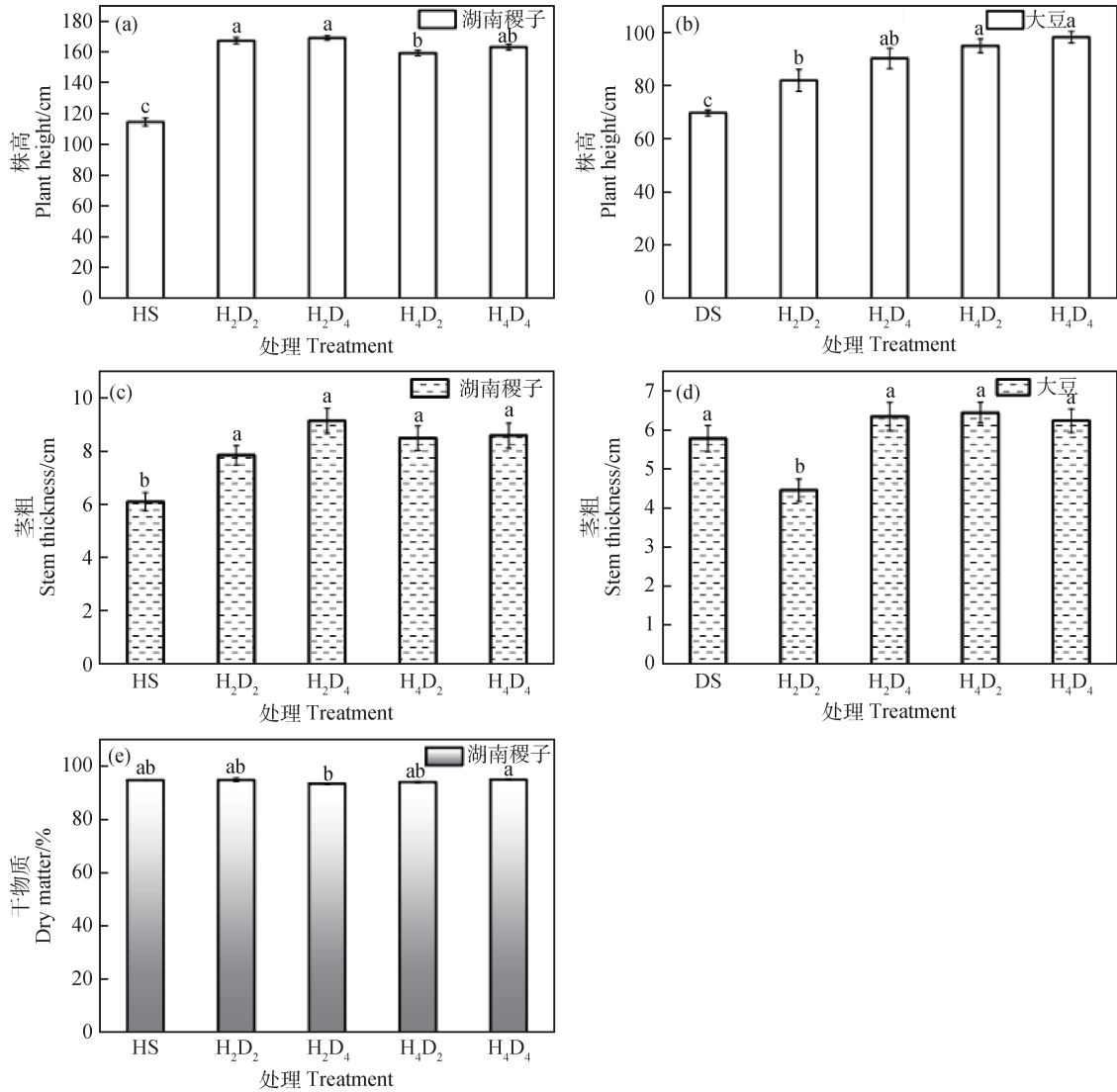


图 2 不同间作下湖南稷子和大豆株高、茎粗

Fig. 2 Plant height and stem thickness of Hunan Millet and Soybean under different intercrops

注: 图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平下差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences at the 0.05 level between different treatments ($P < 0.05$). The same as below

2.2 间作对湖南稷子和大豆光合特性的影响

由表 1 可知, 湖南稷子的 H_2D_2 , H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理较 HS 处理的 Pn 分别增加 15.7%, 28.4%, 16.4% 和 11.4%, 其中 H_2D_4 处理与 HS 处理之间差异显著。与 HS 处理相比, H_2D_2 , H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理的 Ci 呈上升趋势, 较 HS 处理的 Ci 分别增加 10.52%, 8.8%, 33.7%, 29.7%。 H_2D_2 处理的 Gs 和 Tr 分别比 HS 降低了 6.6% 和 6.9%,

H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理的 Gs 分别比 HS 增加了 42.31%, 13.54% 和 14.95%; H_2D_4 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理的 Tr 分别比 HS 增加了 37.14%, 8.92% 和 12.5%。

由表 2 可知, 大豆的 H_2D_2 , H_4D_2 和 H_4D_4 处理较 DS 处理的 Pn 分别降低了 15.7%, 12.2% 和 22.9%, H_2D_4 处理增加了 8%。与 DS 处理相比, H_2D_4 处理的 Gs 和 Tr 分别增加了 33.43% 和

26.36%, H₄D₄处理的气Gs和Tr分别增加了1.7% 10.48%和11.72%, H₄D₂处理的Gs和Tr分别降低和2.93%, H₂D₂处理的Gs和Tr分别降低了10.76%和15.06%。

表1 间作对湖南稷子光合特征的影响

Table 1 Effects of intercropping on photosynthetic characteristics of Hunan Millet

处理 Treatment	净光合速率 Pn/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间CO ₂ 浓度 Ci/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	气孔导度 Gs/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
HS	35.51±1.10 ^b	174.62±2.83 ^a	0.0364 ^b	2.45±0.19 ^b
H ₂ D ₂	41.09±2.16 ^{ab}	193.00±26.09 ^a	0.0340 ^b	2.28±0.19 ^b
H ₂ D ₄	45.60±2.56 ^a	190.18±24.24 ^a	0.0518 ^a	3.36±0.14 ^a
H ₄ D ₂	41.34±0.83 ^{ab}	233.44±40.51 ^a	0.0421 ^{ab}	2.69±0.07 ^{ab}
H ₄ D ₄	39.56±1.42 ^b	226.45±12.19 ^a	0.0428 ^{ab}	2.8±0.36 ^{ab}

注:表中不同小写字母表示不同处理在0.05水平下差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences at the 0.05 level ($P<0.05$)

表2 间作对大豆光合特征的影响

Table 2 Effects of intercropping on photosynthetic characteristics of Soybean

处理 Treatment	净光合速率 Pn/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间CO ₂ 浓度 Ci/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	气孔导度 Gs/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
DS	21.99±0.88 ^{ab}	235.31±16.29 ^a	0.0353 ^b	2.39±0.11 ^{ab}
H ₂ D ₂	18.53±0.65 ^{bc}	204.09±22.00 ^a	0.0316 ^b	2.11±0.11 ^b
H ₂ D ₄	23.74±2.08 ^a	214.69±32.43 ^a	0.0471 ^a	3.02±0.30 ^a
H ₄ D ₂	19.31±1.09 ^{abc}	210.85±5.43 ^a	0.0315 ^b	2.03±0.27 ^b
H ₄ D ₄	16.96±1.93 ^c	170.92±5.53 ^a	0.0359 ^b	2.46±0.13 ^{ab}

注:表中不同小写字母表示不同处理在0.05水平下差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences at the 0.05 level ($P<0.05$)

2.3 间作对湖南稷子和大豆产量、土地当量比及湖南稷子品质的影响

如图3(a)所示, H₂D₂, H₂D₄, H₄D₂和H₄D₄处理的湖南稷子干草产量和大豆产量均显著低于HS/DS处理($P<0.05$)。HS, H₂D₂, H₂D₄, H₄D₂和H₄D₄处理的湖南稷子干草产量分别为18 668.85 kg·hm⁻², 10 299.38 kg·hm⁻², 13 934.33 kg·hm⁻², 10 933.03 kg·hm⁻², 10 821.30 kg·hm⁻²。DS, H₂D₂, H₂D₄, H₄D₂和H₄D₄处理的大豆种子产量分别为1 616.90 kg·hm⁻², 673.12 kg·hm⁻², 665.80 kg·hm⁻², 735.57 kg·hm⁻², 676.80 kg·hm⁻²。除H₂D₂处理外,其他各处理的LER均大于1(图3b)。

如图3(c-h)为间作各处理对湖南稷子品质指标的影响,与H_s处理相比, H₂D₂, H₂D₄, H₄D₂和H₄D₄处理的CP, CA, ADF和RFV均呈增加趋势, CP分别增加了36.6%, 48.79%, 38.01%和18.74%, CA分别增加了71.97%, 137.71%, 121.23%和72.5%, ADF分别增加了4.58%, 22.74%, 0.87%和10.25%, RFV分别增加了15.34%, 17.26%, 0.79%和9.53%。H₂D₂和H₂D₄处理的EE较H_s处理分别增加了9.78%和1.46%, H₄D₂和H₄D₄处理的EE较HS处理分别减少了5.62%和15.71%。H₂D₂, H₂D₄和H₄D₄处理的NDF较HS处理分别增加了7.97%, 11.93%和6.68%。

2.4 综合评价

由图4结果可知, 间作湖南稷子的DM与Ci, PH, CA, SD, CP呈极显著负相关($P<0.001$); PH与CA, SD, CP, Pn存在极显著正相关($P<0.001$); CA与SD, CP, Pn存在极显著正相关($P<0.001$); PH与RFV, CA与GS存在显著正相关($P<0.01$)。

对湖南稷子干草产量(X_1), 株高(X_2), 茎粗(X_3), Pn(X_4), Gs(X_5), Ci(X_6), Tr(X_7), CA(X_8), CP(X_9), NDF(X_{10}), ADF(X_{11})和RFV(X_{12})进行主成分分析(表3), 提取前三个主成分累积贡献率达到95.755%。

主成分对应的载荷矩阵所示, 第一主成分特征值为7.750, 贡献率为64.580%, 主要反映的是PH, SD, Pn和CA的信息, 权重系数分别为0.116, 0.124, 0.124和0.118; 第二主成分特征值为2.228, 贡献率为19.07%, 此成分中主要反映的是干草产量和Ci的信息, 权重系数为0.328和0.359, 第三主成分特征值为1.452, 贡献率为12.102%, 主要反映的是RFV的信息, 权重系数为0.400, 如表4所示。

根据相应的特征值和特征向量值, 得出各主成分综合得分。

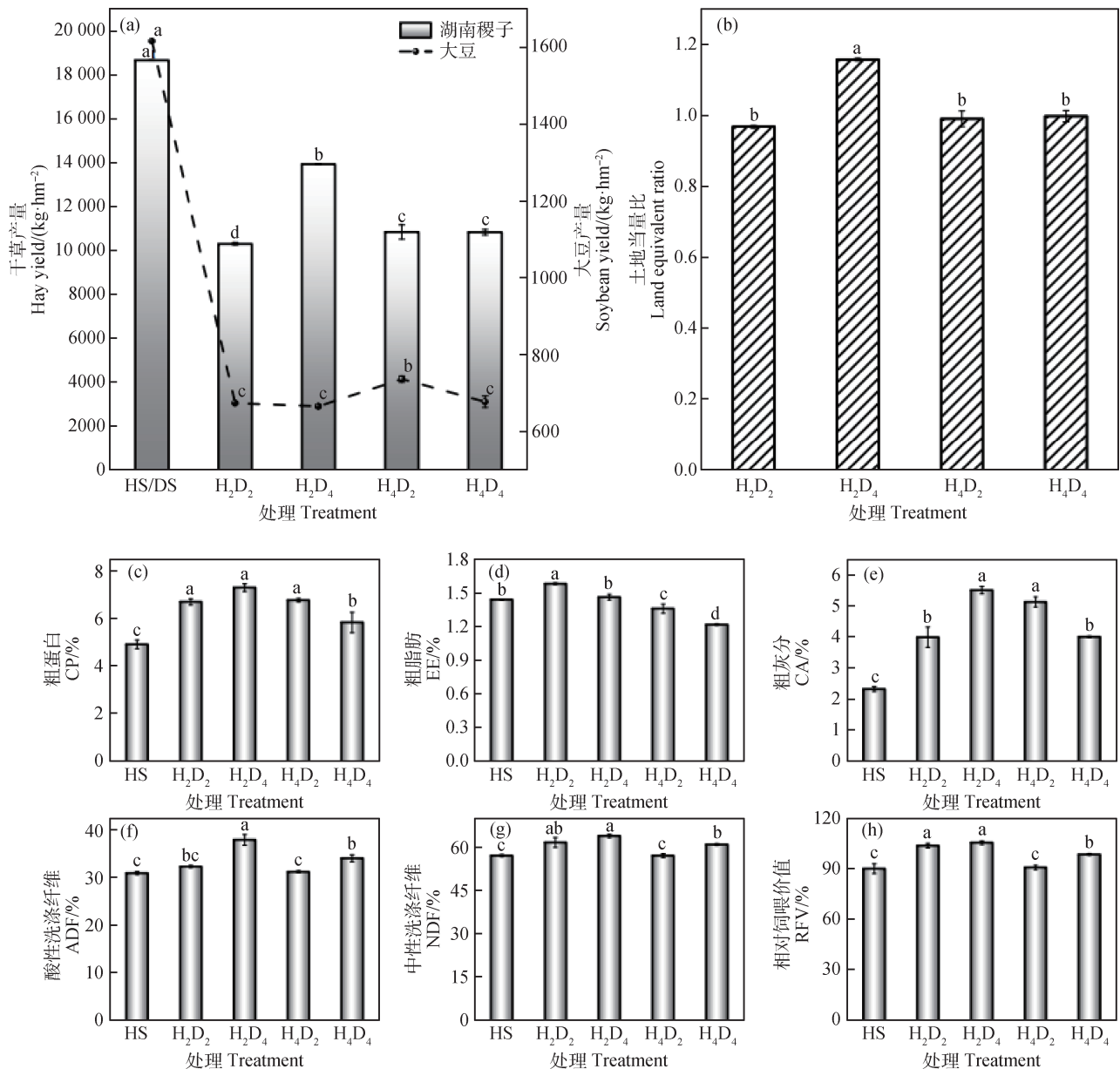


图3 不同间作下湖南稷子和大豆的产量、土地当量比以及湖南稷子营养品质变化

Fig. 3 Changes in yield, land equivalent ratio, and nutritional quality of Hunan Millet and soybean under different intercroppings

$$Y_1 = -0.21X_1 + 0.32X_2 + 0.34X_3 + 0.35X_4 + 0.28X_5 + 0.12X_6 + 0.27X_7 + 0.33X_8 + 0.32X_9 + 0.28X_{10} + 0.30X_{11} + 0.27X_{12}$$

$$Y_2 = 0.50X_1 - 0.23X_2 - 0.15X_3 + 0.04X_4 + 0.20X_5 - 0.54X_6 + 0.28X_7 - 0.14X_8 - 0.10X_9 + 0.26X_{10} + 0.35X_{11} + 0.20X_{12}$$

$$Y_3 = 0.24X_1 - 0.21X_2 + 0.11X_3 - 0.02X_4 + 0.46X_5 + 0.31X_6 + 0.43X_7 + 0.18X_8 - 0.10X_9 - 0.35X_{10} + 0.04X_{11} - 0.48X_{12}$$

$$Y = (64.583Y_1 + 19.070Y_2 + 12.102Y_3) / 95.755$$

由表5所示各主成分得分和综合得分,代入 $Y = (64.583Y_1 + 19.070Y_2 + 12.102Y_3) / 95.755$ 计

算,得出不同处理综合得分, H₂D₄得分最高为3.23, 根据得分由高到低排名依次为 H₂D₄ > H₄D₄ > H₄D₂ > H₂D₂ > HS。

3 讨论

3.1 间作对湖南稷子和大豆生长指标和产量的影响

作物的生产性能受多个农艺性状影响,滕辉升等^[16]研究发现,农艺性状指标对生物产量贡献大小依次为 SD > PH > 穗位叶面积 > 绿叶数,封亮等^[17]团队研究指出,间作可促进玉米 PH, SD 生长,从而

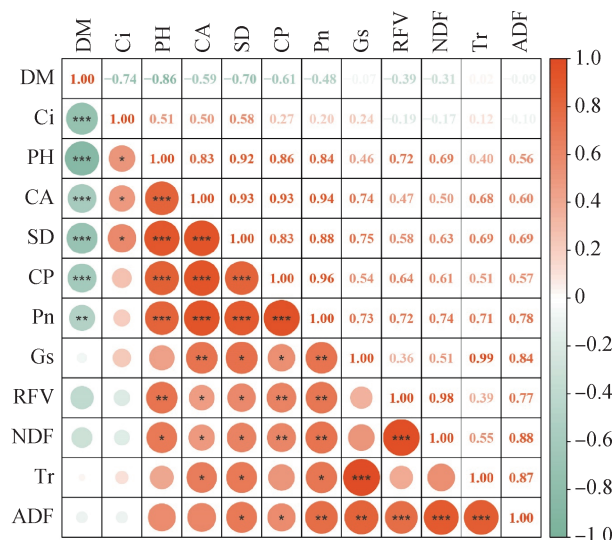


图 4 湖南稷子各指标相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of Hunan Millet indicators

注:图中星号***代表显著性为0.001、**代表显著性为0.01、*代表显著性为0.05,数值代表两个指标之间的关联度
Note: *** in the graph represents significance of 0.001, ** represents significance of 0.01, * represents significance of 0.05, and the values represent the correlation between the two indicators

有效提升作物群体生物量。本研究发现,与单作处理相比,除 H₂D₂处理降低了大豆 SD 外,其他间作处理均能提高湖南稷子和大豆的 PH 和茎粗,这与前人研究成果相似。在 H₂D₂种植模式下,湖南稷子和大豆种植密度较高,会导致两者对光照、水分和养分的竞争加剧,尤其是冠层重叠部分光照不足,影响光合作用效率^[18],而 H₂D₄种植模式下大豆比例较高,固氮作用更强,能够为湖南稷子提供更多的氮素营养^[19],H₄D₂种植模式下湖南稷子比例较高,能够充分利用上层光照,而大豆在较低层次生长,

减少了对湖南稷子的光照竞争^[20],H₄D₄种植模式下虽然密度较高,但由于湖南稷子和大豆的生态位分离,互补效应仍然显著^[21]。在 H₂D₂种植模式下,高密度会导致盐分在土壤表层积累,加剧盐胁迫,而在其他间作比例下,大豆的固氮作用和根系分泌物能够更有效地缓解盐胁迫,促进湖南稷子和大豆的生长^[22]。在 H₂D₂种植模式下,高密度会导致田间通风不良,温湿度调节能力下降,而在其他间作比例下,田间小气候更加适宜,能够降低地表温度,增加空气湿度,减少盐碱地的高温胁迫对湖南稷子和大豆生长的不利影响^[23]。在较低密度的间作比例下,土壤微生物多样性更高,有益微生物的活动更加活跃,能够分泌生长激素或分解土壤中的有害物质,间接促进湖南稷子和大豆的生长^[24-25]。

3.2 间作对湖南稷子和大豆生理指标的影响

间作种植利用不同作物对资源获取的生态位差异来提高光能和养分等利用效率,最终实现作物产量的增加^[26]。王钰云等^[27]的研究发现,谷子花生间作可以在不同程度上提高谷子叶片的 Pn, Tr, Gs 降低谷子 Ci。本研究发现,间作系统中湖南稷子与单作处理(HS)相比,间作处理的 Pn 和 Ci 均有所提高,H₂D₄,H₄D₂和 H₄D₄处理的 Gs 和 Tr 均有提高,大豆在间作与单作处理(DS)相比,H₂D₄和 H₄D₂处理的 Gs 和 Tr 均有提高。主要原因是间作处理下湖南稷子和大豆的根系分布不同,能够更充分地吸收土壤中的养分,这种互补性使得土壤养分得到更有效的利用,促进了作物的生长和光合作用^[28]。湖南稷子和大豆的株型和叶面积指数不同,在间作处理下,

表 3 主成分对应的载荷矩阵

Table 3 Load matrix corresponding to principal components

项目 Item	主成分 I	主成分 II	主成分 III
	Principal component I	Principal component II	Principal component III
	载荷 Load	载荷 Load	载荷 Load
干草产量 Hay yield	−0.074	0.328	0.201
株高 Plant height	0.116	−0.151	−0.175
茎粗 Stem diamete	0.124	−0.100	0.090
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.124	0.023	−0.014
气孔导度 Stomatal conductance	0.100	0.132	0.380
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	0.043	−0.359	0.257
蒸腾速率 Transpiration rate	0.096	0.184	0.354
粗灰分 Crude ash	0.118	−0.096	0.145
粗蛋白 Crude protein	0.115	−0.069	−0.078
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.102	0.175	−0.292
酸性洗涤纤维 Acidic detergent fiber	0.106	0.233	0.029
相对饲喂价值 Relative feeding value	0.096	0.132	−0.400

表 4 各因子特征向量与主成分特征值和累计贡献率

Table 4 Eigenvectors and principal components of each factor and their cumulative contribution rates

项目 Item	主成分 Principal component		
	I	II	III
干草产量 Hay yield	-0.207	0.496	0.242
株高 Plant height	0.324	-0.228	-0.210
茎粗 Stem diameter	0.345	-0.151	0.109
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.346	0.035	-0.020
气孔导度 Stomatal conductance	0.277	0.200	0.458
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	0.120	-0.544	0.310
蒸腾速率 Transpiration rate	0.267	0.278	0.427
粗灰分 Crude ash	0.330	-0.145	0.175
粗蛋白 Crude protein	0.320	-0.104	-0.090
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.283	0.265	-0.350
酸性洗涤纤维 Acidic detergent fiber	0.296	0.352	0.036
相对饲喂价值 Relative feeding value	0.268	0.200	-0.480
特征值 Eigenvalue	7.750	2.288	1.452
方差贡献值 Variance contribution rate/%	64.583	19.070	12.102
累计贡献值 Cumulative contribution rate/%	64.583	83.653	95.755

表 5 不同处理综合排名得分

Table 5 Comprehensive ranking scores of different treatments

处理 Treatment	主成分 I Principal component I	主成分 II Principal component II	主成分 III Principal component III	综合得分 Comprehensive	排序 Ranking
HS	-4.28	1.3	-0.39	-3.07	5
H ₂ D ₂	0.05	-0.58	-1.82	-0.36	4
H ₂ D ₄	3.52	1.77	0.63	3.23	1
H ₄ D ₂	0.19	-1.91	1.22	0.11	3
H ₄ D ₄	0.52	-0.58	0.36	0.32	2

它们可以形成不同的空间层次,充分利用不同高度的光照资源,提高了光能利用效率,从而促进了光合作用的进行^[29]。间作处理下作物的生理调节机制发生了变化,导致气孔导度增加,使更多的 CO₂ 进入叶片内部,从而提高了胞间 CO₂ 浓度,同时,气孔导度的增加也有利于植物的蒸腾作用,可以调节植物体内的水分平衡^[30-31]。

3.3 间作对湖南稷子营养价值的影响

禾豆间作对饲草作物的营养品质有明显的影响,宋雨桐等^[32]的研究表明饲草作物的 CP 含量是体现饲草品质好坏的关键指标,NDF 和 ADF 含量是衡量饲草品质及消化率的重要指标,蔺芳^[33]的研究指出,相较于单作,禾豆间作模式下饲草品质呈现显著变化:CP、CA 含量与 RFV 均有所下降,NDF 与 ADF 含量则显著上升。本研究发现:间作处理较单作处理能够提高湖南稷子 CP、CA、ADF 和 RFV,主要是间作优化了湖南稷子和大豆的养分利用

效率,减少了氮素的流失和浪费,使湖南稷子能够更好地吸收和利用氮素,促进湖南稷子的蛋白质合成,从而提高蛋白质含量。大豆的根系活动能够改善土壤结构,降低土壤 pH 值,增加土壤通气性和保水保肥能力,促进湖南稷子对矿物质(如钙、镁、磷等)的吸收,缓解盐碱地的碱性胁迫,提高湖南稷子对矿物质的吸收效率,从而使 CA 的含量得以提高^[34]ADF 主要来源于植物的细胞壁物质(如纤维素,半纤维素和木质素),通过间作,不仅能够缓解了盐碱地的胁迫,使湖南稷子能够更好地适应逆境环境,还可以使光照、养分和水分的利用效率提高,使湖南稷子的光合作用增强,能够合成更多的碳水化合物,用于细胞壁物质的积累,进而提高 ADF 含量^[35-36]。而 RFV 是评价饲草营养价值的重要指标,与 CP 含量和能量含量密切相关,间作提高了稷子的 CP 含量和光合作用效率,增加了能量物质的积累,使纤维质量得到优化,提高了饲草的消化率和适口性,进一步提升了 RFV^[37-38]。

4 结论

湖南稷子间作大豆能显著增加湖南稷子和大豆的株高($P < 0.05$),提高土地利用效率,在 H_2D_4 (2行湖南稷子间作4行大豆)模式下,湖南稷子和大豆的光合参数净光合速率,蒸腾速率和气孔导度呈现较高水平,湖南稷子的营养成分粗蛋白,粗脂肪,粗灰分及饲用价值指标酸性洗涤纤维,中性洗涤纤维,相对饲喂价值也表现优异。这表明该间作模式为植物提供了良好的光照条件,促进了高产优质的湖南稷子与大豆生长。因此, H_2D_4 是盐碱地上实现高效资源利用和良好生产效益的最佳间作行比。

参考文献

- [1] LI C Y, WANG Z C, XU Y T, et al. Analysis of the effect of modified biochar on saline-alkali soil remediation and crop growth[J]. Sustainability, 2023, 15(6):5593
- [2] NEGACZ K, MALEK Ž, DE VOS A, et al. Saline soils world-wide: Identifying the most promising areas for saline agriculture[J]. Journal of Arid Environments, 2022, 203:104775
- [3] KUMAWAT C, KUMAR A, PARSHAD J, et al. Microbial diversity and adaptation under salt-affected soils: a review[J]. Sustainability, 2022, 14(15):9280
- [4] JAT BALOCH M Y J, ZHANG W, SULTANA T, et al. Utilization of sewage sludge to manage saline-alkali soil and increase crop production: Is it safe or not?[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32:103266
- [5] MOORE V M, SCHLAUTMAN B, FEI S, et al. Plant breeding for intercropping in temperate field crop systems: a review[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:843065
- [6] DAI J, QIU W, WANG N, et al. From Leguminosae/Grass intercropping systems to see benefits of intercropping on iron nutrition[J]. Frontiers in plant science, 2019, 10:605
- [7] LI Y H, SHI D Y, LI G H, et al. Maize/peanut intercropping increases photosynthetic characteristics, ^{13}C -photosynthate distribution, and grain yield of summer maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(10):2219-2229
- [8] 董志晓, 何润濠, 况鉴洋, 等. 成都平原青贮玉米间作拉巴豆对混合饲草产量及品质的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(8):1587-1595
- [9] DONG Z X, HE R H, KUANG J Y, et al. Effects of intercropping *Dolichos lablab* with silage maize on the yield and quality of mixed forage in the Chengdu Plain, China[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(8):1587-1595
- [9] 丁婉, 邢宝龙, 冯钰, 等. 农牧交错带施氮条件下大豆和玉米间作产量及其混合青贮品质[J]. 草业科学, 2024, 41(9):2133-2142
- [9] DING W, XING B L, FENG Y, et al. Yield of soybean and corn intercropping and quality of mixed silage infarming-pastoral ecotones with nitrogen fertilization[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(9):2133-2142
- [10] RENARD D, TILMAN D. National food production stabilized by crop diversity[J]. Nature, 2019, 571(7764):257-260
- [11] 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
- [12] 陆安桥. 湖南稷子耐盐碱特性及生物改良效果研究[D]. 银川:宁夏大学, 2021:5-7
- [12] LU A Q. Saline-alkali tolerance and bioremediation potential of *Hunan Panicum*[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021:5-7
- [13] 万力生, 姜文奎, 刘升林, 等. 海子1号湖南稷子高产性能的研究[J]. 草业科学, 1991(1):13-18
- [13] WAN L S, JIANG W K, LIU S H, et al. Study on the high-yield characteristics of Hunan Millet cultivar 'Haizi 1' [J]. Pratacultural Science, 1991(1):13-18
- [14] 程云龙. 宁夏银北盐碱地湖南稷子/豆科牧草间作生物改良效应研究[D]. 银川:宁夏大学, 2024:26-27
- [14] CHENG Y L. Bio-remediation of saline-alkali soils in northern Ningxia via *Hunan panicum*-legume forage intercropping[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024:26-27
- [15] 刘沛钦. 饲料及饲料添加剂质量检测方法与品质管理[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2017, 33(8):228
- [15] LIU P Q. Quality testing methods and quality management for feed and feed additives[J]. China Animal Husbandry and Veterinary Digest, 2017, 33(8):228
- [16] 滕辉升, 张述宽, 陈天渊, 等. 青贮玉米生物产量与主要农艺性状的相关和通径分析[J]. 作物杂志, 2007(5):48-50
- [16] TENG H S, ZHANG S K, CHEN T Y, et al. Correlation and path analysis of silage maize biomass with key agronomic traits[J]. Crops, 2007(5):48-50
- [17] 封亮, 黄国勤, 杨文亭, 等. 江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7):1127-1137
- [17] FENG L, HUANG G Q, YANG W T, et al. Yields and inter-specific relationship of the maize-soybean intercropping system in the upland red soil of Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7):1127-1137
- [18] DONG B, WANG Z, EVERS J B, et al. Competition for light and nitrogen with an earlier-sown species negatively affects leaf traits and leaf photosynthetic capacity of maize in relay intercropping[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 155:127119
- [19] HAN F, GUO S, WEI S, et al. Photosynthetic and yield responses of rotating planting strips and reducing nitrogen fertilizer application in maize-peanut intercropping in dry farming areas[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:1014631
- [20] JO S G, KANG Y I, OM K S, et al. Growth, photosynthesis and yield of soybean in ridge-furrow intercropping system of soybean and flax[J]. Field Crops Research, 2022, 275:108329
- [21] PELECH E A, ALEXANDER B C S, BERNACCHI C J. Photosynthesis, yield, energy balance, and water-use of intercropped maize and soybean[J]. Plant Direct, 2021, 5(12):e365

- [22] LI X, SUN M, ZHANG H, et al. Use of mulberry-soybean intercropping in salt-alkali soil impacts the diversity of the soil bacterial community[J]. *Microbial Biotechnology*, 2016, 9(3): 293-304
- [23] WU Y, GONG W, YANG F, et al. Responses to shade and subsequent recovery of soya bean in maize-soya bean relay strip intercropping [J]. *Plant Production Science*, 2016, 19 (2): 206-214
- [24] MA H, ZHOU J, GE J, et al. Oat/soybean intercropping reshape the soil bacterial community for enhanced nutrient cycling[J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(17): 5200-5209
- [25] YAMAGUCHI T, BLUMWALD E. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities [J]. *Trends in plant science*, 2005, 10(12):615-620
- [26] CHIB, LIU J, DAI J, et al. Alternate intercropping of cotton and peanut increases productivity by increasing canopy photosynthesis and nutrient uptake under the influence of rhizobacteria[J]. *Field Crops Research*, 2023, 302:109059
- [27] 王钰云, 王宏富, 李智, 等. 谷子花生间作对谷子光合特性及产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(5):153-165
WANG Y Y, WANG H F, LI Z, et, al. Influences of millet-peanut intercropping on photosynthetic characteristics and yield of mille[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(5):153-165
- [28] SHEN L, WANG X, LIU T, et al. Border row effects on the distribution of root and soil resources in maize-soybean strip intercropping systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 233:105812
- [29] FU Z, CHEN P, ZHANG X, et al. Maize-legume intercropping achieves yield advantages by improving leaf functions and dry matter partition[J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1):438
- [30] JAMALI Z H, AI S, QASIM M, et al. Assessment of molybdenum application on soybean physiological characteristics in maize-soybean intercropping [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1240146
- [31] LAL N, BISWAS A K. Allelopathic interaction and eco-physiological mechanisms in agri-horticultural systems: a review[J]. *Erwerbs-obstbau*, 2023, 65(5):1861-1872
- [32] 宋雨桐, 王建丽, 刘杰淋, 等. 施肥和种植密度对5个燕麦品种产量和品质的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(6):149-156
SONG Y T, WANG J, LIU J L, et al. Effects of fertilization and planting density on yield and quality of five oat varieties[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6):149-156
- [33] 蔺芳. 紫花苜蓿/禾本科牧草间作提高其生产潜力和营养品质机理及家畜对其利用效果研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019:50-53
LIN F. Study on the mechanism of improvement of production-potential and nutrient quality of alfalfa/Gramineae grasses intercropping and the utilization effect of livestock [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019:50-53
- [34] PARIZ C M, COSTA C, CRUSCIOL C A C, et al. Production and soil responses to intercropping of forage grasses with corn and soybean silage[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(6): 2541-2553
- [35] SIMPSON C R, FRANCO J G, KING S R, et al. Intercropping halophytes to mitigate salinity stress in watermelon [J]. *Sustainability*, 2018, 10(3):681
- [36] ZHENG C, WANG R, ZHOU X, et al. Photosynthetic and growth characteristics of apple and soybean in an intercropping system under different mulch and irrigation regimes in the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 266:107595
- [37] ZAEEM M, NADEEM M, PHAM T H, et al. Corn-soybean intercropping improved the nutritional quality of forage cultivated on Podzols in boreal climate [J]. *Plants*, 2021, 10(5): 1015
- [38] GRIFFITHS W M, ROACH C G, CHAPMAN D F. Should forage evaluation indices include a feeding value trait? [J]. *Grass and Forage Science*, 2020, 75(3):242-252

(责任编辑 付 宸)