DOI: 10. 11686/cyxb2025488 http://cyxb. magtech. com. cn
屈亚飞, 王腾飞, 张译尹, 等. 行比配置对宁夏引黄灌区青贮玉米/饲用高粱间作系统种间关系和光能利用效率的影响. 草业学报, 2026, 35(11): 106－118.
QU Ya-fei, WANG Teng-fei, ZHANG Yi-yin, *et al*. Effects of row ratio configuration on interspecific competition and light use efficiency of silage maize/forage sorghum intercropping systems in the Ningxia Yellow River irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 106－118.

行比配置对宁夏引黄灌区青贮玉米/饲用高粱间作系统种间关系和光能利用效率的影响

屈亚飞[1,2,3], 王腾飞[1,2,3], 张译尹[1,2,3], 孙建伟[4], 尤越[5], 石斌红[6], 李喜斌[7], 王斌[1,2,3], 梁丹妮[1,2,3*], 兰剑[1,2,3*]
(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 海原县农业农村局, 宁夏 中卫 755000; 5. 宁夏盐池县农业农村局, 宁夏 吴忠 751100; 6. 宁夏隆德县农业综合执法大队, 宁夏 固原 756300; 7. 宁夏隆德县好水乡畜牧兽医工作站, 宁夏 固原 756300)

摘要: 针对西北灌区饲草产量偏低、光能等资源利用效率不高等问题, 以青贮玉米与饲用高粱为对象, 系统探讨了不同行比配置对其间作系统种间竞争关系与光能利用效率的影响, 旨在筛选适宜宁夏引黄灌区的高效间作模式, 为饲草产能提升与农田可持续生产提供理论支撑。于 2022－2023 年在宁夏引黄灌区开展田间试验, 设置青贮玉米单作(SM)、饲用高粱单作(SS)及 5 种行比间作处理(10M2S、8M4S、6M6S、4M8S、2M10S), 系统测定干草产量、粗蛋白产量、土地当量比(LER)、种间竞争指标及光能利用情况。结果表明, 行比配置显著影响系统生产力与种间关系, 其中, 6M6S 处理表现最优, 干草产量达 25. 00 t·hm^{-2}, 较 SM 和 SS 分别提高 39. 0% 和 29. 6%, 粗蛋白产量提升效果显著; LER 为 1. 38, 土地利用率提高 38%。种间竞争分析表明, 6M6S 有效缓解青贮玉米竞争压力(A_M=0. 10), 相对拥挤系数(K_M)达 3. 25, 种间促进效应显著。光能利用方面, 6M6S 在中下层叶面积指数(LAI)、消光系数及辐射利用效率(RUE)均最高, RUE 达 3. 02 g·MJ^{-1}, 较 SM 提高 29. 1%。其他处理如 10M2S 与 2M10S 因行比失衡导致竞争加剧、冠层光分布不均; 4M8S 与 8M4S 则因冠层结构协调性不足, 辐射利用效率较低。本研究明确了 6M6S 为青贮玉米－饲用高粱间作的最优行比配置, 其在协调种间关系、优化冠层结构与提升光能利用效率方面具有显著优势, 为实现西北灌区饲草高产高效与农业可持续发展提供了重要的理论依据与技术路径。

关键词: 青贮玉米; 饲用高粱; 间作; 种间竞争; 光能利用效率

Effects of row ratio configuration on interspecific competition and light use efficiency of silage maize/forage sorghum intercropping systems in the Ningxia Yellow River irrigation area

QU Ya-fei[1,2,3], WANG Teng-fei[1,2,3], ZHANG Yi-yin[1,2,3], SUN Jian-wei[4], YOU Yue[5], SHI Bin-hong[6], LI Xi-bin[7], WANG Bin[1,2,3], LIANG Dan-ni[1,2,3*], LAN Jian[1,2,3*]
1. *School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 2. *Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan* 750021, *China*; 3. *Key Laboratory of Forage Efficient Production Mode Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan* 750021, *China*; 4. *Ningxia Haiyuan County Agricultural*

收稿日期: 2025-12-02; 改回日期: 2026-01-22
基金项目: 优质牧草提质增效关键技术研究与集成示范(NGSB-2021-15-02), 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01), 宁夏回族自治区自然科学基金(2024AAC03140), "一年两熟"人工草地可持续发展模式研究与示范项目(2021BBF02001)和宁夏抗旱节水优质饲草新品种选育与良种繁育项目(2019NYYZ0402)资助。
作者简介: 屈亚飞(1999－), 男, 甘肃平凉人, 在读硕士。E-mail: 2387700852@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: ndlanjian@163. com; liangdn@nxu. edu. cn

and Rural Bureau, *Zhongwei* 755000, *China*; 5. *Ningxia Yanchi County Agricultural and Rural Bureau*, *Wuzhong* 751100, *China*; 6. *Ningxia Longde County Agricultural Comprehensive Law Enforcement Brigade*, *Guyuan* 756300, *China*; 7. *Ningxia Longde County Haoshui Township Animal Husbandry and Veterinary Workstation*, *Guyuan* 756300, *China*

Abstract: This research investigated the problems of low forage yield and low utilization efficiency of light energy and other resources in the irrigation area of Northwest China. The aim of this study was to identify efficient intercropping patterns suitable for the Yellow River irrigation area in Ningxia, and to provide theoretical support for the improvement of forage productivity and sustainable farmland production. Specifically, silage maize (*Zea mays*) and forage sorghum (*Sorghum bicolor*) intercropping systems were studied, and the effects of different row ratio configurations on interspecific competition and light energy utilization efficiency of selected intercropping systems were investigated. Field experiments were carried out in the Yellow River irrigation area of Ningxia from 2022 to 2023. Silage maize monoculture (SM), forage sorghum monoculture (SS) and five row ratio intercropping treatments (10M2S, 8M4S, 6M6S, 4M8S, 2M10S) were set up to determine hay yield, crude protein yield, land equivalent ratio (LER), interspecific competition index and light energy utilization for this systematically varied range of intercropping systems. It was found that the row ratio configuration significantly affected the system productivity and interspecific relationships. Among the tested treatments, the 6M6S treatment was the best; the hay yield was 25.00 t·hm^{-2}, which was 39.0% and 29.6% higher than that of SM and SS, respectively, and the crude protein yield was also significantly increased compared to SM and SS. The LER for 6M6S was 1.38, and the land utilization rate was thus increased by 38%. Interspecific competition analysis showed that the 6M6S treatment effectively alleviated the competitive pressure of silage maize (A_M=0.10); the relative crowding coefficient (K_M) reached 3.25, and the interspecific promotion effect was significant. In terms of light energy utilization, 6M6S had the highest leaf area index, extinction coefficient and radiation use efficiency (RUE) in the middle and lower canopy layers, and RUE reached 3.02 g·MJ^{-1}, which was 29.1% higher than that of SM. Other treatments such as 10M2S and 2M10S exhibited intensified competition and uneven canopy light distribution due to the imbalanced row ratio. The light energy conversion efficiency of 4M8S and 8M4S was low due to the lack of coordination of canopy structure. This study clarified that 6M6S is the optimal row ratio configuration for silage maize-forage sorghum intercropping, and that this row ratio has significant advantages in coordinating interspecific relationships, optimizing canopy structure and improving light energy utilization efficiency. These results provide important theoretical and technical data for achieving high yield and high efficiency of forage production and sustainable development of agriculture in the northwest irrigation area.

Key words: silage corn; feeding sorghum; intercropping; interspecific competition; light energy utilization efficiency

饲草作为草业发展的核心生产要素,其战略地位已从过去“为畜而生”的附属角色,转变为保障国家粮食安全、践行大食物观、促进生态与经济协同发展的关键一环[1]。在“大食物观”的指导下,粮食安全不仅是口粮安全,也包括肉、蛋、奶类等动物蛋白的安全[2]。优质的饲草是生产“节粮型”畜产品的基础,相当于为牛羊等草食动物提供了“粮食”,有效减轻人畜争粮的压力,开辟了保障国家食物供给安全的新路径[3]。中国西北地区作为我国重要的畜牧业基地,属于典型的温带大陆性气候,具有日照时间长,太阳辐射强,光热资源丰富,但降水稀少、水资源相对有限等特征,这些条件非常有利于作物光合产物的积累,对提升农作物品质与产量潜力巨大[4]。长期以来,草产业和养殖业构成该地区发展的支柱产业,然而,由于农作物新品种及高效栽培技术推广应用不足,加之长期对农田“用多于养”的利用方式,导致该地区饲草产量偏低、营养品质不佳、资源利用效率低下等问题突出[5-6]。因此,在现有资源条件下,如何充分利用当地丰富的光热资源,并基于有限的水资源条件挖掘作物生产潜力,已成为推动该区域农业可持续发展的关键科学问题。

间作种植是一种基于生态学原理的农田配置策略,即在同一生长季,将两种及以上作物于同一田块按行或条带状相间种植,通过模仿自然群落的结构特征,实现作物群体的优化配置[7-8]。在间作系统中,间作优势的发挥主要依赖于种间相互作用,包括竞争、促进和互补作用[8-9]。通过优化种间配置实现作物在空间、时间和资源利用上的生态位分离与互补,是提高资源利用效率和系统生产力的关键[10]。前人研究表明,在玉米(*Zea mays*)/大豆(*Glycine max*)间作模式下,选择效应是主导作物氮素吸收的关键因素。Wang等[11]的研究证实,间作能显著促进磷吸收,在玉米/蚕豆(*Vicia faba*)体系中,28.4%的增幅主要由正补偿效应驱动;而在玉米/鹰嘴豆(*Cicer arietinum*)体系中,27.6%的增幅则由选择效应与正补偿效应协同贡献。同时,在不同作物的间作系统中,行配置比例对光能利用效率(radiation use efficiency, RUE)及光合性能具有重要影响。宫香伟等[12]发现,在糜子(*Panicum miliaceum*)/绿豆(*Vigna radiata*)间作中,2∶2和4∶4行比处理能够提高糜子的光合能力。类似地,在小麦(*Triticum aestivum*)/玉米间作系统中,王自奎[13]比较了6∶2与12∶4两种行比,发现间作小麦的RUE与单作无显著差异,而间作玉米的RUE平均降低了9%。Gou等[14]进一步研究了该体系下3种行配比(6∶2、6∶3、8∶2),发现间作小麦RUE较单作平均提高16%,而间作玉米则平均下降11%。这些研究表明,合理的行比配置可在一定程度上改善主作物的光能利用,但也可能对副作物产生抑制效应,整体效果因物种组合与行比设计而异。因此,合理选择作物品种与行比配置,以强化互补、缓解竞争,是实现间作增产增效的重要途径。行比调控的核心原理在于通过改变作物在田间的空间布局,调节冠层结构、光截获的时空分布以及根系对水分养分的竞争关系,最终实现资源利用效率的最大化。

青贮玉米因其营养价值丰富[15]、产量高、消化性好[16]等优点被广泛种植。与青贮玉米相比,饲用高粱(*Sorghum bicolor*)不仅播种成本更低,还展现出更高的生物产量潜力,以及对水分、磷和钾更强的利用效率[17]。尽管淀粉含量不足,但高的茎秆含糖量使其青贮能量值与青贮玉米相近,营养品质相当[18]。选择青贮玉米与饲用高粱进行间作,主要是因为两种作物均为C_4植物,光合效率高,能充分利用宁夏灌区丰富的太阳辐射资源;并且青贮玉米植株较高,冠层上部光截获能力强,而饲用高粱相对较矮,根系更深,水分利用效率更高,这种地上地下的生态位分化有助于减轻对光、水资源的直接竞争,并可能实现互补利用。因此,本研究以青贮玉米和饲用高粱为试验材料,在保持种植带宽一致的条件下,通过设置不同行比配置开展田间试验。重点研究行比变化对两种作物干草产量、土地当量比、种间竞争和光能利用效率的影响机制。旨在揭示不同行比配置下作物资源利用与竞争关系的调控规律,探索适宜宁夏灌区的青贮玉米与饲用高粱间作模式,以提升饲草产量并促进农田可持续利用。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于宁夏大学草学农垦茂盛公司牧草基地(106°03′ E,38°33′ N,海拔1135 m),试验周期为2022－2023年。地处中温带大陆性气候区,气候特征表现为(图1):年均温8.5 ℃,年日照时数2800～3100 h,年降水180～210 mm(秋季集中),相对湿度高达65%～70%,无霜期190 d。试验土为灰钙土,播前测定0～20 cm土层土壤性质如下:有机质10.16 g·kg^{-1}、速效氮51.20 mg·kg^{-1}、速效磷18.70 mg·kg^{-1}、速效钾128.93 mg·kg^{-1},pH 8.23。试验期间统一采用滴灌管理。

1.2 试验材料

青贮玉米品种为'先玉1321',饲用高粱品种为'绿巨人',详细信息如表1所示。

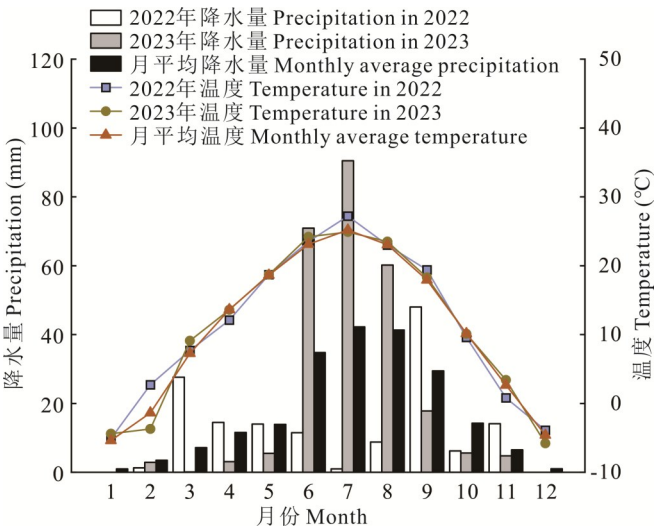

图1 试验地点气象数据

Fig. 1 The meteorological data of experimental site

表 1　试验材料详细信息

Table 1　Detailed information of test materials

材料名称 Material name	品种 Variety	纯净度 Purity (%)	发芽率 Germination rate (%)	千粒重 Thousand seeds weight (g)	来源 Source
饲用高粱 *S. bicolor*	绿巨人 Green Giant	99	98	29.74	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Industry Co., LTD
青贮玉米 *Z. mays*	先玉 1321 Xianyu 1321	98	97	373.00	宁夏农垦茂盛草业有限公司 Ningxia Agricultural Reclamation Maosheng Grass Industry Co., LTD

1.3　试验设计

本试验采用随机区组设计。共设 7 个处理(图 2),包括青贮玉米单作(SM)、饲用高粱单作(SS)以及 5 种行数配比的间作组合:10M2S、8M4S、6M6S、4M8S 和 2M10S。试验共设有 21 个小区(包含 3 次重复),单区面积为 49 m^2(7 m×7 m),区间留 2 m 宽过道。所有小区均采用宽行 70 cm、窄行 30 cm 穴播播种,株距为 23 cm。青贮玉米与饲用高粱的播种密度分别为 8.7 万株·hm^{-2}和 11.7 kg·hm^{-2},间作模式下各行播种量与单作保持一致。本试验分别于:2022 年 5 月 22 日播种,9 月 2 日收获;2023 年 5 月 21 日播种,9 月 3 日收获。青贮玉米的物候期(如乳熟期)依据《牧草饲料作物栽培学》[19]标准判定,当籽粒胚乳由浆状转为蜡状,挤破籽粒可见乳状物质渗出时,即为 1/2

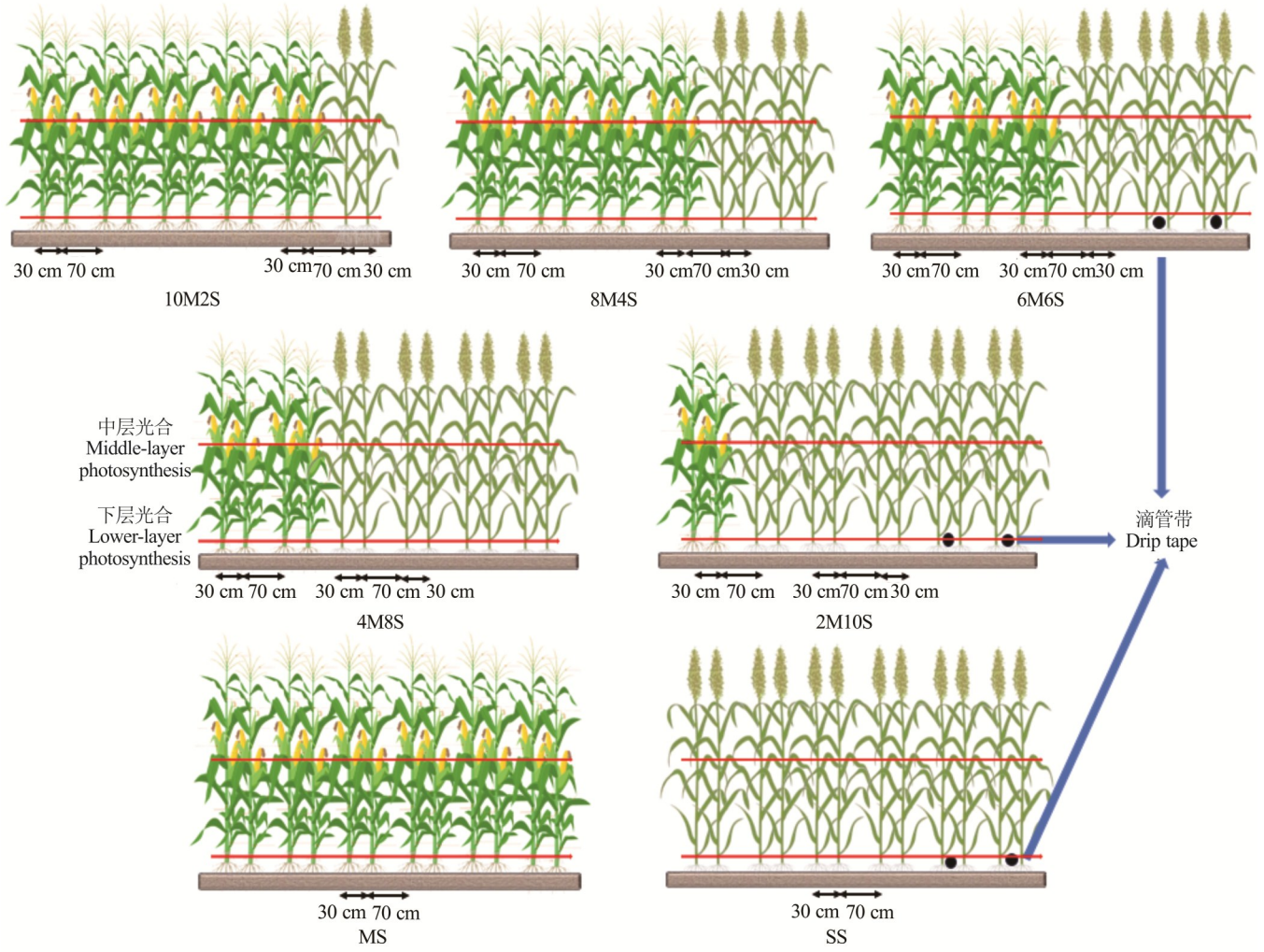

图 2　青贮玉米和饲用高粱间作田间种植模式

Fig. 2　Field planting pattern of silage maize and forage sorghum intercropping

乳线期，此时为测定和收获适宜期。生长季内采用地面滴灌，具体配置为滴灌带置于30 cm窄行中央，滴头间距20 cm。全生育期灌水4次，总灌水量为4000 $m^3 \cdot hm^{-2}$。尽管不同行比处理下两种作物比例不同，但由于滴灌带均匀布置于每个窄行，且全生育期灌水量一致，因此可保证不同行比小区内单位面积的水分供给总量相对一致，从而聚焦研究行比配置本身对竞争关系的影响。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 干草产量 在青贮玉米达到1/2乳线期时，一次性收获青贮玉米与饲用高粱。对各小区内4.6 m^2(1.0 m×4.6 m)取样面积上的两种作物分别进行测产，通过测定鲜物质产量计算其各自的生物产量与总生物产量，并统一折算为单位面积hm^2产量。

1.4.2 粗蛋白产量(crude protein yield, CPY) 粗蛋白含量(crude protein content, CP, %)使用凯氏定氮法[20]测定，并依据公式N×6.25换算氮含量。随后，基于以下公式计算粗蛋白产量(CPY, $kg \cdot hm^{-2}$)：

$$CPY = Y \times CP$$

式中：Y和CP分别表示各处理的总干草产量($t \cdot hm^{-2}$)与粗蛋白含量。

1.4.3 土地当量比(Land equivalent ratio, LER) 常用于衡量间作优势，可用其评价土地利用效率[17]。

$$LER = PLER_M + PLER_S = Y_{IM}/Y_{SM} + Y_{IS}/Y_{SS}$$

式中：$PLER_M$和$PLER_S$分别为青贮玉米和饲用高粱的偏土地当量比。Y_{IM}和Y_{IS}分别为间作条件下两种作物的产量，而Y_{SM}和Y_{SS}则为相应的单作产量。

1.4.4 竞争强度(competition intensity, A)、竞争比率(competition ratio, CR)和相对拥挤系数(relative crowding coefficient, K) 这3个指标是用以度量间作系统内种间竞争力大小的关键指标，分别采用以下公式计算[17]：

$$A_M = Y_{IM}/(Y_{SM}Z_M) - Y_{IS}/(Y_{SS}Z_S)$$

$$A_S = Y_{IS}/(Y_{SS}Z_S) - Y_{IM}/(Y_{SM}Z_M)$$

$$CR_M = (LER_M/LER_S)(Z_S/Z_M)$$

$$CR_S = (LER_S/LER_M)(Z_M/Z_S)$$

$$K_M = Y_{IM}/(Y_{SM} - Y_{IM})(Z_S/Z_M)$$

$$K_S = Y_{IS}/(Y_{SS} - Y_{IS})(Z_M/Z_S)$$

式中：Z_M和Z_S代表青贮玉米、饲用高粱在间作草地中的比例，A_M代表青贮玉米相对饲用高粱的竞争力，A_S代表饲用高粱相对青贮玉米的竞争力，K_M代表青贮玉米的相对拥挤系数，K_S代表饲用高粱的相对拥挤系数，LER_M代表间作系统中，仅考量青贮玉米单种作物时的土地当量比，LER_S代表间作系统中，仅考量饲用高粱单种作物时的土地当量比，CR_M和CR_S分别代表青贮玉米、饲用高粱的竞争比率。

1.4.5 系统生产力(system productivity, SP) 计算方法如下[21]：

$$SP = Y_{IM} \times Z_M + Y_{IS} \times Z_S$$

1.4.6 群体光合有效辐射及利用效率 在青贮玉米乳熟期，利用美国METER Group公司ACCUPAR LP-80冠层仪于晴朗无风天气的8:00－11:00时段内，测定作物群体光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)及叶面积指数(leaf area index, LAI)，每个小区测定3次。随后依据以下公式进行计算：

$$\text{透光率(light transmittance, } T) = PAR_a/PAR_b \times 100\%$$

式中：PAR_a与PAR_b($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)分别代表冠层上方与下方的光合有效辐射强度。

采用Beer定律[22]，通过公式k=－ln(T)/LAI估算冠层消光系数(k)。

截获的光合有效辐射(intercepted photosynthetically active radiation, IPAR, $MJ \cdot m^{-2}$)基于逐日太阳辐射(daily solar radiation, SR)数据计算，设定PAR占比为50%，即IPAR=$\sum 0.5SR$。IPAR值为出苗至收获期间逐日PAR值的累加。

$$\text{辐射利用效率(RUE, } g \cdot MJ^{-1}) = D_m/\text{IPAR}$$

式中：D_m代表地上部干物质积累量($g \cdot m^{-2}$)，IPAR代表所截获的光合有效辐射总量($MJ \cdot m^{-2}$)。

1.5 数据分析

采用Microsoft Excel 2016完成数据汇总与整理。利用SPSS Statistics 27.0软件进行方差分析，采用Tukey HSD方法在α=0.05显著性水平下进行多重比较。图形绘制则通过Origin 2021b软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同间作模式对产量及土地当量比的影响

方差分析显示处理效应极显著（$P<0.001$），而年份及其与处理的交互作用均不显著（表2）。基于2022－2023年两年平均结果，青贮玉米与饲用高粱带状间作显著提升饲草产量及土地利用效率。与单作相比，10M2S间作模式青贮玉米株高最高，两年平均为337.45 cm；饲用高粱在6M6S模式达到最高，两年平均为360.70 cm，较SS增加4.05%。与单作相比，6M6S间作模式干草产量平均达25.00 t·hm^{-2}，较青贮玉米单作提高41.96%，较饲用高粱单作提高33.83%。6M6S粗蛋白产量为1.77 kg·hm^{-2}，较MS提高53.91%，较SS提高20.41%。6M6S间作模式LER达1.38，较理论值1.00提高38%，表明其土地利用效率显著提升，其中6M6S青贮玉米偏土地当量比（$PLER_M=0.72$）较理论值降低28%，而饲用高粱$PLER_s=0.67$较理论值降低33%，说明二者在该配置下资源竞争相对均衡。$PLER_M$随饲用高粱行数增加而显著下降，10M2S在两年均超过理论值，表明青贮玉米在高比例下具备竞争优势；相反，$PLER_s$随玉米比例增加急剧降低，仅在2M10S和4M8S中相对较高，说明饲用高粱在窄带配置下竞争力受限（表3）。

表2 不同间作模式株高与产量的比较

Table 2 Comparison of plant height and yield in different intercropping patterns

年份 Year (Y)	处理 Treatment (T)	株高 Plant height (cm)		干草产量 Hay yield (t·hm^{-2})	粗蛋白产量 Crude protein yield (kg·hm^{-2})
		青贮玉米 Silage maize	饲用高粱 Forage sorghum		
2022	10M2S	337.00±6.11a	300.78±8.44c	22.03±0.42bc	1.65±0.01ab
	8M4S	329.33±10.88a	358.22±4.96a	24.22±0.88ab	1.75±0.13a
	6M6S	327.00±9.07a	360.33±7.60a	24.55±1.24a	1.75±0.07a
	4M8S	326.78±9.03a	335.00±5.13b	21.06±0.96c	1.47±0.02bc
	2M10S	333.67±8.45a	356.56±7.96a	20.01±0.57cd	1.42±0.04c
	MS	331.00±8.08a	－	17.61±0.52d	1.15±0.02d
	SS	－	347.56±11.63ab	18.59±0.32d	1.46±0.04bc
2023	10M2S	337.90±4.44a	301.38±10.92c	22.75±0.33bc	1.70±0.05a
	8M4S	328.60±6.46a	357.19±4.06a	23.53±1.30ab	1.75±0.13a
	6M6S	328.03±10.11a	361.07±8.13a	25.45±0.62a	1.78±0.06a
	4M8S	327.68±9.44a	335.60±8.77b	21.13±0.88cd	1.47±0.02b
	2M10S	325.57±8.33a	354.16±6.63a	19.87±0.55de	1.41±0.04b
	MS	329.47±7.14a	－	17.61±0.52e	1.15±0.02c
	SS	－	345.72±11.51ab	18.77±0.31e	1.47±0.06b
年份 Year (Y)		0.004ns	0.027ns	0.136ns	0.178ns
处理 Treatment (T)		1.917ns	29.810***	26.394***	25.050***
Y×T		0.020ns	0.028ns	0.256ns	0.068ns

注：“－”表示该处理下无对应作物数据。*、**、***分别表示在0.05、0.01、0.001水平差异显著，ns为差异不显著，同列不同小写字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著。下同。

Note: “－” indicates no corresponding crop data under this treatment. *, **, and *** indicate significant differences at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively. ns denotes no significant difference. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at the $P<0.05$ level. The same below.

2.2 不同间作模式对种间竞争的影响

双因素方差分析表明，处理对竞争强度(A)、相对拥挤系数(K)、竞争比率(CR)及系统生产力(SP)均具有极显著影响($P<0.001$或$P<0.01$)，而年份及其与处理的交互作用均不显著(表4)。青贮玉米在10M2S行比下竞争比率最高($CR_M=1.73$)，但自身竞争强度也最大($A_M=0.60$)，表明其虽具主导地位却承受强烈的种内或种间抑制；随着饲用高粱带宽增加，青贮玉米A_M显著下降，6M6S处理中A_M降至0.10(较10M2S降低83.3%)，且相对拥挤系数达3.25，明显高于理论值1，表明其竞争能力最强、种间促进效应最明显。饲用高粱则在4M8S和2M10S中表现优势，K_S达1.95和1.87，CR_S接近1(0.99和0.98)，A_S分别为−0.15和−0.17，说明其在宽幅配置下受抑制较轻，竞争力较强。系统生产力(SP)以10M2S最高(16.96)，显著高于其他处理，较4M8S提高43.1%，表明高玉米比例有利于总产提升，但6M6S仍保持中等偏高SP值，在种间竞争平衡与系统产出之间实现最优协调(图3)。6M6S行比可有效缓解玉米竞争压力、充分发挥其竞争优势，同时使高粱维持一定的竞争力，是种间关系协调、生产力稳定的最佳配置。

表3 不同间作模式土地当量比的比较

Table 3 Comparison of land equivalent ratio in different intercropping patterns

年份 Year (Y)	处理 Treatment (T)	青贮玉米偏土地当量比 $PLER_M$	饲用高粱偏土地当量比 $PLER_S$	土地当量比 Land equivalent ratio
2022	10M2S	1.11±0.02a	0.13±0.03e	1.25±0.05ab
	8M4S	0.95±0.04b	0.41±0.02d	1.35±0.03a
	6M6S	0.70±0.08c	0.66±0.02c	1.36±0.09a
	4M8S	0.38±0.01d	0.77±0.06b	1.15±0.07b
	2M10S	0.21±0.02e	0.88±0.01a	1.09±0.03b
	MS	—	—	—
	SS	—	—	—
2023	10M2S	1.15±0.06a	0.13±0.02e	1.29±0.05ab
	8M4S	0.95±0.04b	0.36±0.02d	1.31±0.06ab
	6M6S	0.73±0.07c	0.67±0.01c	1.40±0.06a
	4M8S	0.38±0.01d	0.77±0.04b	1.15±0.05bc
	2M10S	0.21±0.02e	0.86±0.01a	1.07±0.02c
	MS	—	—	—
	SS	—	—	—
年份 Year (Y)		0.244ns	0.384ns	0.015ns
处理 Treatment (T)		141.136***	279.238***	10.755***
Y×T		0.094ns	0.317ns	0.232ns

$PLER_M$：青贮玉米偏土地当量比 Partial land equivalent ratio of silage maize；$PLER_S$：饲用高粱偏土地当量比 Partial land equivalent ratio of forage sorghum.

2.3 不同间作模式对叶面积指数和消光系数的影响

双因素方差分析表明，处理对叶面积指数和消光系数均具有极显著影响($P<0.001$或$P<0.01$)，而年份及其与处理的交互作用均不显著(表4)。冠层结构分析显示(图4)，下层LAI以2M10S最高(两年均值5.59)，较10M2S提高25.6%，较MS(3.33)提高67.9%；6M6S和4M8S也高于10M2S，表明高粱比例越高，下层叶面积越发达。中层LAI以6M6S最高，较10M2S提高57.0%，较MS提高64.4%，显示宽带高粱配置更利于中层叶面积构建。消光系数分析表明，下层光截获能力以6M6S和2M10S较强，较MS分别提高21.9%和19.2%，说明高粱带宽增加有助于增强冠层基部光能拦截力；而中层消光系数则随玉米比例增加而升高，10M2S最高。2M10S和6M6S通过提升冠层中下部叶面积指数和下层消光系数，显著改善了光分布与截获效率，而10M2S虽中层k值高但叶面积不足，6M6S在叶面积构建与光截获协调性方面表现最优，兼具较高的中下层LAI和k值，且避免了极端行比的失衡风险。

2.4 不同间作模式对辐射截获量和辐射利用效率的影响

双因素方差分析结果显示，处理对辐射截获量与辐射利用效率存在极显著效应($P<0.001$)；年份及其与处理的交互作用则未达显著水平(表4)。两年平均结果显示(图5)，间作显著提升冠层光能截获能力，下层辐射截获量以2M10S最高(896.1 MJ·m^{-2})，较MS(807.5 MJ·m^{-2})提高10.9%，6M6S亦高于MS，增幅达10.5%；中层辐射截获量以6M6S最优(777.2 MJ·m^{-2})，较MS(648.6 MJ·m^{-2})提高19.8%，高于其他处理，而2M10S虽2022年表现较好，但2023年降幅达7.2%，稳定性较差。在辐射利用效率方面，6M6S和8M4S的辐射利用效率(RUE)较高，两年均值分别为3.02和3.01 g·MJ^{-1}，较MS分别提高29.1%和28.6%，较SS分别提高33.8%和33.3%，优于其他行比。6M6S行比不仅在中部冠层实现最强的光截获能力，同时维持优异的下层截获水平，并与8M4S并列具有最高的RUE，实现了“高截获−高转化”的协同优化。

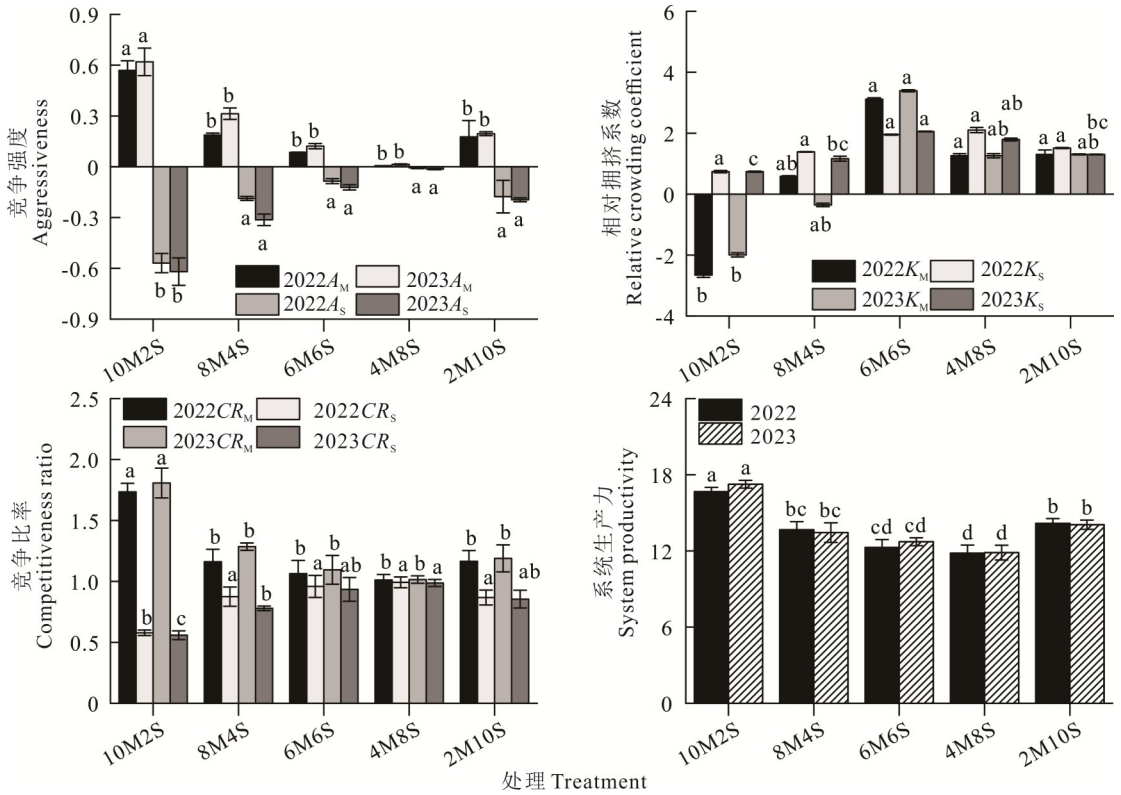

图 3　不同间作模式种间竞争比较

Fig. 3　Comparison of interspecific competition among different intercropping patterns

A_M为青贮玉米竞争力，A_S为饲用高粱竞争力，K_M为青贮玉米相对拥挤系数，K_S为饲用高粱相对拥挤系数；CR_M为青贮玉米竞争比率；CR_S为饲用高粱竞争比率；M代表青贮玉米，S代表饲用高粱，10M2S、8M4S、6M6S、4M8S、2M10S为不同行比间作处理；不同小写字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著，下同。A_M: Aggressivity of silage maize; A_S: Aggressivity of forage sorghum; K_M: Relative crowding coefficient of silage maize; K_S: Relative crowding coefficient of forage sorghum; CR_M: Competition ratio of silage maize; CR_S: Competition ratio of forage sorghum; M: Silage maize; S: Forage sorghum. Treatments 10M2S, 8M4S, 6M6S, 4M8S, and 2M10S represent different row-ratio intercropping patterns. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

表 4　不同间作模式下种间竞争、群体光合有效辐射及光能利用效率的方差分析

Table 4　Variance analysis of different intercropping patterns in interspecific competition, population photosynthetically active radiation and light utilization efficiency

因素 Factor	青贮玉米竞争力 Aggressivity of silage maize (A_M)	饲用高粱竞争力 Aggressivity of forage sorghum (A_S)	青贮玉米相对拥挤系数 Relative crowding coefficient of silage maize (K_M)	饲用高粱相对拥挤系数 Relative crowding coefficient of forage sorghum (K_S)	青贮玉米竞争比率 Competition ratio of silage maize (CR_M)	饲用高粱竞争比率 Competition ratio of forage sorghum (CR_S)	系统生产力 System productivity (SP)	叶面积指数 Leaf area index (LAI)	消光系数 Extinction coefficient (k)	截获光合有效辐射 Intercepted photosynthetically active radiation (IPAR)	辐射利用效率 Radiation use efficiency (RUE)
年份 Year	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
处理 Treatment	***	***	**	**	***	***	***	***	**	***	***
年份×处理 Year×treatment	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

2.5　不同行比配置下青贮玉米—饲用高粱的生产力、土地当量比及辐射利用效率的关系分析

不同青贮玉米—饲用高粱间作模式的干草产量与其行比配置无显著相关性，粗蛋白产量、土地当量比和辐射利用效率与行比配置均呈非线性相关性，2年的拟合关系基本一致，总体趋势显示，间作系统的粗蛋白产量、土地当量比和辐射利用效率在青贮玉米与饲用高粱行比约为1∶1时最高，并随饲用高粱行比增加而降低（图6）。

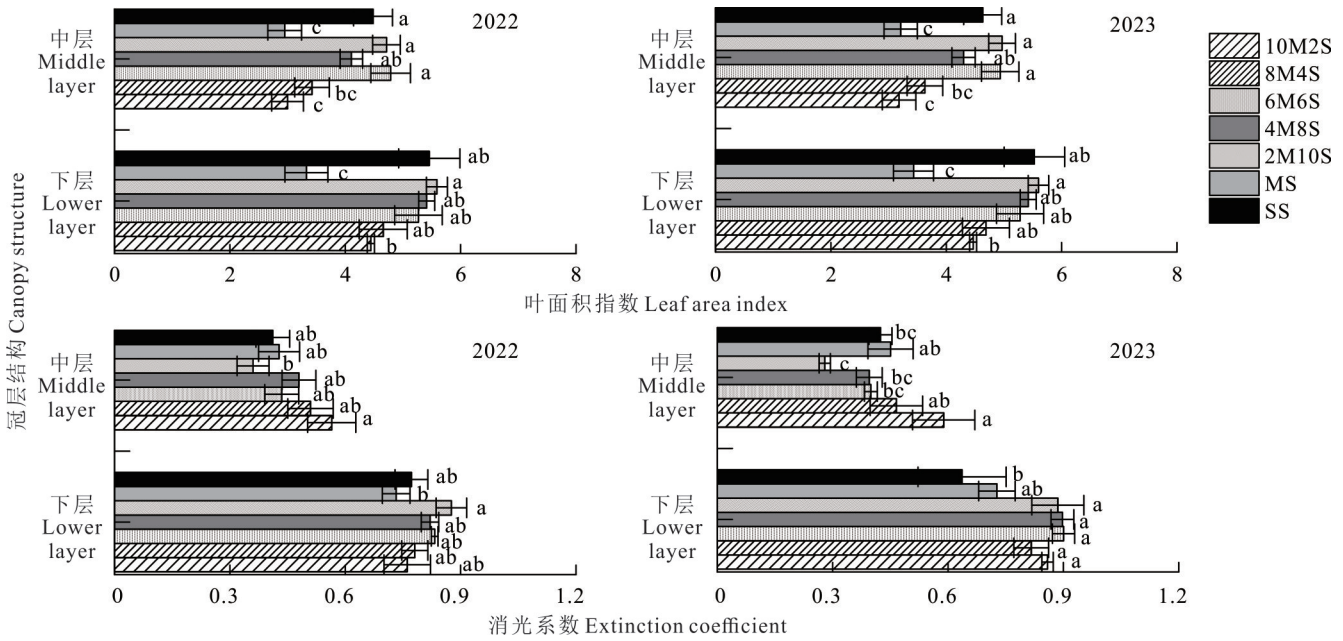

图4 不同间作模式下叶面积指数和消光系数比较

Fig. 4 Comparison of leaf area index and extinction coefficient under different intercropping patterns

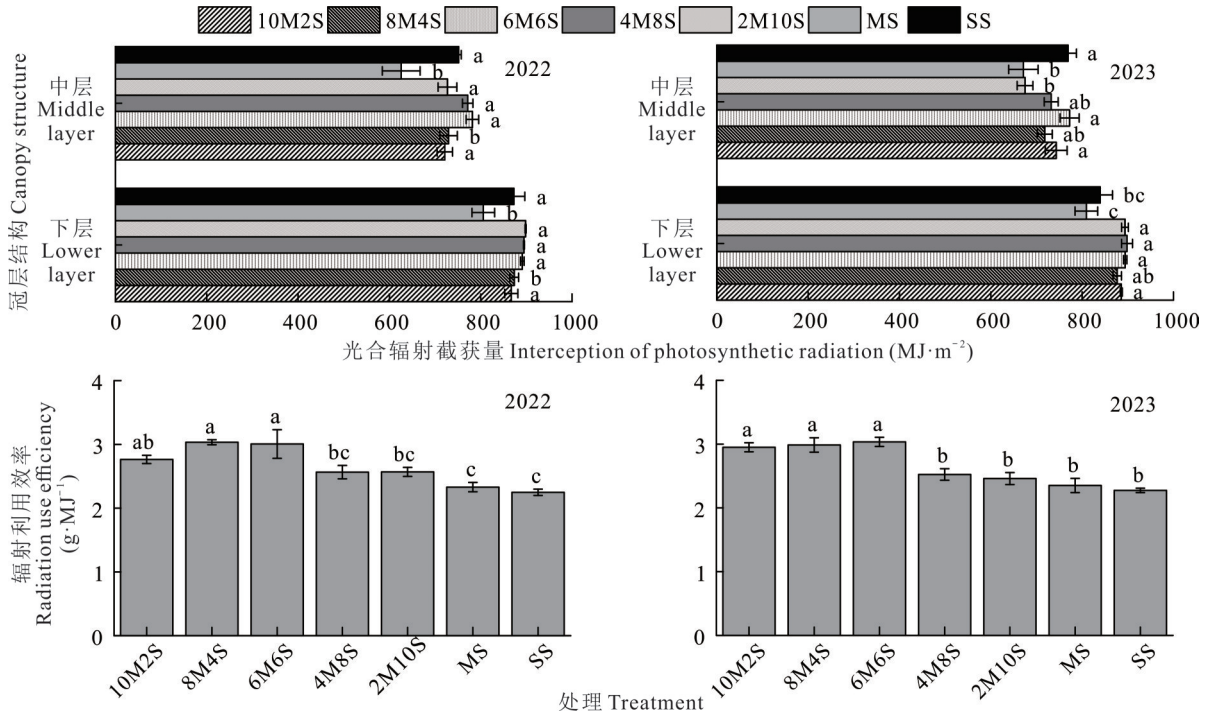

图5 不同间作模式下辐射截获量和辐射利用效率比较

Fig. 5 Comparison of intercepted photosynthetic radiation and radiation use efficiency under different intercropping patterns

3 讨论

3.1 行配比对青贮玉米—饲用高粱间作土地利用及种间关系的影响

竞争与促进是作物种间并存的基本相互作用。竞争导致物种间相互抑制,而促进则带来互利增长,二者共同决定系统的最终生产力[23]。本研究显示,所有间作行比配置的土地当量比均大于1,说明本研究条件下青贮玉米—饲用高粱间作系统是获得高产饲草、缓解畜牧业饲草供给压力的可行方案。这一结果与蚕豆—玉米带状间作[24],玉米—紫花苜蓿(*Medicago sativa*)间作[25]和豌豆(*Pisum sativum*)—玉米[26]间作的研究结果相一致。就本

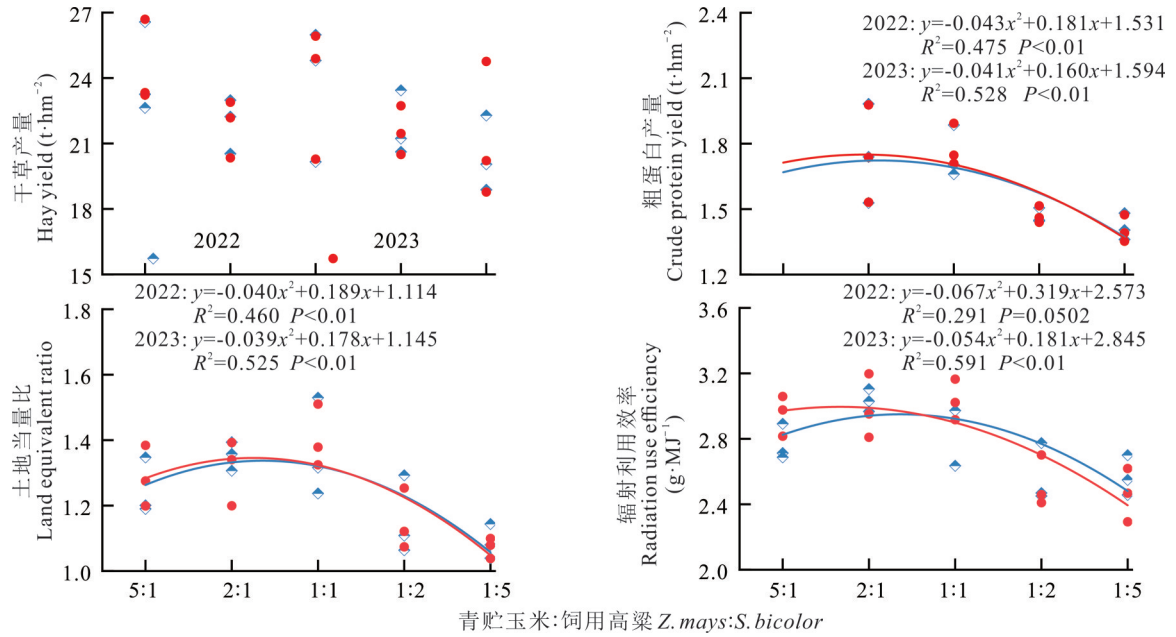

图 6　青贮玉米-饲用高粱不同行比与生产力、土地当量比和辐射利用效率的拟合

Fig. 6　Fitting of different row ratios of silage maize-forage sorghum with productivity, land equivalent ratio and radiation use efficiency

试验数据分析，10M2S、8M4S、6M6S、4M8S 和 2M10S 的平均 LER 值分别为 1.27、1.33、1.38、1.15 和 1.08，这意味着 MS 和 SS 将需要增加 8%～38% 的农田才能达到间作系统中青贮玉米和饲用高粱的产量，本研究结果与前人关于窄行距（0.60 m）大豆/玉米间作系统具有产量优势的研究结论相符[27]。该研究指出，较小的行距会显著降低矮秆作物冠层的透光率，限制其生长空间与养分积累[28]。与之类似，在本研究的青贮玉米－饲用高粱间作系统中，采用 6∶6（6M6S）的适宜行比配置，有效减轻了青贮玉米对饲用高粱的遮光不利影响，从而为饲用高粱改善了生长环境，最终促进其养分积累与产量形成。

本研究结果表明，青贮玉米与饲用高粱的间作行比显著影响种间竞争关系和系统生产力。10M2S 配置虽获得最高系统生产力（SP=16.96），但青贮玉米承受强烈的自身竞争（A_M=0.60），这主要源于高密度下的强烈种内竞争以及来自高粱的种间竞争，表明其高产以高竞争压力为代价。相比之下，6M6S 行比使玉米竞争压力大幅降低，较 10M2S 显著下降 83.3%，表明带宽的增加有效缓解了其竞争压力，为其创造了更优越的生长环境。更重要的是，其相对拥挤系数（3.25）显著大于 1，这强有力地证明了玉米从与高粱的共存中获得了显著的净收益，种间促进作用已超越竞争抑制，成为主导关系。这种关系可能源于生态位互补，如对光、水、养分资源在时间和空间上的差异化利用。然而，虽然 10M2S 处理获得了最高的 SP，证实了青贮玉米作为主栽作物在高产方面的贡献是决定性的，在单纯追求最大生物量的目标下，高玉米比例是有效的。然而，从农业可持续性与系统稳定性的角度来看，6M6S 行比更具有价值。它在保持了中等偏高 SP 的同时，成功地将系统从 10M2S 的“高强度竞争”模式转变为“高效协同”模式。该配置不仅最大限度地激发了玉米的增产潜力，还维持了高粱应有的竞争力，从而实现了系统内物种关系的优化与稳定。方差分析显示年份效应不显著，尽管 2023 年降水条件与 2022 年存在差异，但不同行比处理间的相对表现趋势一致，表明本研究所筛选的 6M6S 优化配置在年际气候波动下具有良好的稳健性。

3.2　行配比对青贮玉米－饲用高粱间作群体光资源利用效率的影响

间作作为一种可持续种植模式，能够有效调节田间微气候，特别是改善作物冠层的光环境[29]。光合有效辐射是驱动作物生命活动、有机质合成及产量形成的关键能量来源，直接影响作物的生长发育、产量与品质[30]。叶片作为光合作用的核心器官，其面积大小直接决定光能截获能力[31]。叶面积指数是衡量作物光合结构的重要指标，其增加有助于提高辐射利用效率与光合活性[32]。在本研究的青贮玉米－饲用高粱间作系统中，下层 2M10S 处理

的LAI达到最高，较MS显著提高67.9%，而中层LAI最高的处理是6M6S，较MS显著提高64.4%，表明不同配置通过改变青贮玉米与高粱的竞争关系与空间布局，塑造了截然不同的冠层微环境。这种差异本质上是由种间光竞争关系所驱动的，在2M10S配置中，高粱比例高且可能占据相对高位，增强了对下层玉米的遮阴，促使玉米通过增加下层叶面积以维持生存；而在6M6S配置中，玉米与高粱的空间分布更为均衡，光竞争相对缓和，有利于玉米在中层构建高效的光合结构，实现高效生产。2M10S处理以下层叶片维持生存；而6M6S处理则为玉米中层叶片实现高效生产。这充分体现了间作系统通过调节资源分配影响作物形态建成，进而优化群体生产力的内在机制。已有研究表明，间作系统能够显著提升高位作物的光合能力[33]，并引导更多太阳辐射资源向高秆作物分配。同时，行比配置通过调节间作群体的光截获来优化光环境，是提升系统光能利用效率的关键农艺措施。间作系统能够有效提高群体光能截获量，这一结论已得到多项研究的支持。Wang等[34]研究发现，甘蓝(*Brassica oleracea*)/玉米间作系统的光合有效辐射日截获量较单作呈上升趋势。Qiang等[35]同样报道，间作系统的辐射截获量较单作可提高15.9%～50.7%。本研究结果与上述变化趋势一致，各间作处理下青贮玉米的光合有效辐射均显著高于单作，且其累积光截获量随条带宽度增加而上升。在2M10S和10M2S等窄条带配置中，IPAR显著较低，这主要是由于窄行条件下相邻作物遮阴效应增强，种间光竞争加剧，从而限制了光能获取；而随着条带宽度增加，遮阴影响减弱，光截获条件得到改善。该现象与玉米－大豆间作系统的相关研究结果相符[27]。其内在机理在于，青贮玉米作为C_4作物，具备较高的CO_2利用效率与光合潜能；同时，间作系统中较高的叶面积指数也有助于截留更多的光合有效辐射，从而整体提升系统的光能利用效率。值得强调的是，种间光竞争并非总是负面效应，适度的竞争压力可以驱动作物形态与生理的适应性调整，如叶片的垂直分层与取向改变，从而优化群体冠层结构，实现光资源在时空维度上的更高效利用。

高粱玉米间作具有提高作物前期RUE的优势。光照强度和冠层特征的变化表明，间作受光照强度的影响较大，通过合理的叶片配置可以优化冠层内光合有效辐射的分布。IPAR值越大，表明物种的光能利用与干物质转化能力越强，其辐射利用效率(RUE)也相应更高。在本试验中，6M6S和8M4S的辐射利用效率(RUE)较高，两年平均为3.02和3.01 g·MJ^{-1}，较MS分别提高29.1%和28.6%，较SS分别提高33.8%和33.3%，说明间作系统通过合理的行配比优化光热资源在时间与空间上的分配，从而提高了对单位面积上入射太阳辐射的转化效率。

4 结论

青贮玉米－饲用高粱间作系统在宁夏引黄灌区表现出显著的产量优势和资源利用效率，其中6M6S(6行玉米∶6行高粱)行比配置在产量、土地当量比、种间竞争协调和光能利用效率方面均表现最优。该模式下干草产量达25.00 t·hm^{-2}，土地当量比为1.38，辐射利用效率为3.02 g·MJ^{-1}，其冠层结构得到优化，光资源高效截获与转化是关键。同时，6M6S行比配置有效缓解了青贮玉米的竞争压力，并发挥了显著的种间促进效应。综合产量、竞争关系和光能利用指标，6M6S为青贮玉米－饲用高粱间作的适宜行比配置，可为西北灌区饲草高效生产提供理论依据和技术支持。

参考文献 References：

[1] Li X Y, Yin X F, Zhou X L, *et al*. Countermeasures and suggestions for high quality development of forage industry in China. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 889－894.
李新一, 尹晓飞, 周晓丽, 等. 我国饲草产业高质量发展的对策和建议. 草地学报, 2020, 28(4): 889－894.

[2] Wang T F, Ma X, Liu J L, *et al*. Analysis of the yield, quality and economic benefits from multiple cropping of fodder oats in the Yellow River irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 27－37.
王腾飞, 马霞, 刘金龙, 等. 引黄灌区复种饲用燕麦种植模式产量、品质及经济效益分析. 草业学报, 2025, 34(4): 27－37.

[3] Wang J T, Sa D W, Shao L H, *et al*. Optimizing agricultural structure and accelerating the development of the forage industry. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 211－220.
王加亭, 撒多文, 邵麟惠, 等. 调整优化农业结构, 加快饲草产业发展. 草业学报, 2025, 34(2): 211－220.

[4] Ge Y Q, Wang J, Liu R, *et al*. A dataset of shallow soil moisture for alfalfa in the Ningxia irrigation area of the Yellow River.

Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1472930.

[5] Wang B, Shi J M, Wang T F, *et al*. Effect of nitrogen application on production performance and nitrogen fertilizer contribution of forage sorghum/lablab mixed cropping. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 53-63.
王斌, 史佳梅, 王腾飞, 等. 施氮对饲用高粱/拉巴豆混播草地生产性能和氮肥贡献率的影响. 草业学报, 2025, 34(4): 53-63.

[6] Feng Q, He X L, Wang B, *et al*. A study of mixed sowing effects for oat and common vetch in the Ningxia Yellow River irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(3): 107-119.
冯琴, 何小莉, 王斌, 等. 宁夏引黄灌区燕麦与箭筈豌豆的混播效果研究. 草业学报, 2024, 33(3): 107-119.

[7] Yan Z L, Ren Q, Fan Z L, *et al*. Postponed nitrogen application optimizes interspecific interactions and enhances nitrogen use efficiency in wheat-maize intercropping systems in an oasis irrigation region. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(8): 2190-2203.
闫喆林, 任强, 樊志龙, 等. 氮肥后移优化绿洲灌区小麦间作玉米种间关系提高氮素利用效率. 作物学报, 2025, 51(8): 2190-2203.

[8] Dzvene A R, Tesfuhuney W A, Walker S, *et al*. Optimizing the planting time and stand density of sunn hemp intercropping for biomass productivity and competitiveness in a maize-based system. Field Crops Research, 2023, 304: 109179.

[9] Wang B, Deng J Q, Wang T F, *et al*. Optimizing nitrogen application rates to maximize productivity while reducing environmental risk by regulating nitrogen and water utilization in mixed cropping systems. Agricultural Water Management, 2024, 303: 109053.

[10] Gong X W, Dang K, Lv S M, *et al*. Interspecific competition and nitrogen application alter soil ecoenzymatic stoichiometry, microbial nutrient status, and improve grain yield in broomcorn millet/mung bean intercropping systems. Field Crops Research, 2021, 270: 108227.

[11] Wang W, Li M Y, Zhang W, *et al*. Soil moisture drives the shift from selection to complementarity effect in the rainfed maize/faba bean intercropping system. Plant and Soil, 2024, 499: 313-328.

[12] Gong X W, Dang K, Li J, *et al*. Effects of different intercropping patterns on photosynthesis production characteristics and water use efficiency of proso millet. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 4139-4153.
宫香伟, 党科, 李境, 等. 糜子绿豆间作模式下糜子光合物质生产及水分利用效率. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4139-4153.

[13] Wang Z K. Light and water transmission and utilization in wheat/maize strip intercropping system. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
王自奎. 小麦/玉米间作复合群体光能和水分传输利用试验与模拟研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

[14] Gou F, Van Ittersum M K, Simon E, *et al*. Intercropping wheat and maize increases total radiation interception and wheat RUE but lowers maize RUE. European Journal of Agronomy, 2017, 84: 125-139.

[15] Li H L, Chai Q, Fan Z L, *et al*. Effects of reduced tillage and combined application of organic fertilizer on soil physical and chemical properties and crop yield of silage maize and lablab mixed cropping system in Hexi oasis irrigation area. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(11): 3013-3025.
李海龙, 柴强, 樊志龙, 等. 少耕及有机肥配施对河西绿洲灌区青贮玉米×拉巴豆系统土壤理化特性及作物产量的影响. 作物学报, 2025, 51(11): 3013-3025.

[16] Li R N, Li X, Liu X, *et al*. Analysis of yield and quality traits of silage maize in multi-environment trials. Journal of Maize Sciences, 2025, 33(6): 73-79.
李若楠, 李响, 刘霄, 等. 多环境试验下的青贮玉米产量及品质分析. 玉米科学, 2025, 33(6): 73-79.

[17] Wang T F, Wang B, Zhang Y Y, *et al*. Response of productivity of silage maize-forage sorghum intercropping system to row ratio configuration. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(8): 1529-1540.
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. 中国生态农业学报, 2025, 33(8): 1529-1540.

[18] Samarappuli D, Berti M T. Intercropping forage sorghum with maize is a promising alternative to maize silage for biogas production. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 515-524.

[19] Wang J G. Science of forage and feed crop cultivation (The Second Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2018.
王建光. 牧草饲料作物栽培学(第2版). 北京: 中国农业出版社, 2018.

[20] Zhang Y Y, Wang B, Wang T F, *et al*. Effects of intercropping triticale with alfalfa on system yield, resource utilization, and alfalfa seed yield. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(8): 43-53.

张译尹，王斌，王腾飞，等. 苜蓿种子田间作小黑麦对饲草产量、水分利用及苜蓿种子产量的影响. 草业学报，2025，34(8)：43－53.

[21] Li Y Y，Yu C B，Sun J H，*et al*. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2008，24(3)：223－227.
李玉英，余常兵，孙建好，等. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力. 农业工程学报，2008，24(3)：223－227.

[22] Guyen B，Lucas M. Adjusting line quantum sensing to improve leaf area index measurements and estimations in forests. MethodsX，2022，9：DOI：10.1016/j.mex.2022.101805.

[23] Xiao Y B，Li L，Zhang F S，*et al*. Interspecific competition and facilitation for nutrient in wheat and legumes intercrops. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2004，12(4)：92－95.
肖焱波，李隆，张福锁，等. 两种间作体系中养分竞争与营养促进作用研究. 中国生态农业学报，2004，12(4)：92－95.

[24] Li Y Y，Hu H S，Cheng X，*et al*. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/mazie intercropping system. Acta Ecologica Sinica，2011，31(6)：1617－1630.
李玉英，胡汉升，程序，等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响. 生态学报，2011，31(6)：1617－1630.

[25] Du G J，Bai W，Cai Q，*et al*. Effects of maize-alfalfa intercropping system on crop yields and productivity. Chinese Journal of Agrometeorology，2025，46(3)：398－408.
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. 中国农业气象，2025，46(3)：398－408.

[26] Zhao J H，Sun J H，Chen L Z，*et al*. Role of complementarity and select effect for yield advantage of maize/legumes intercropping systems. Acta Agronomica Sinica，2022，48(10)：2588－2596.
赵建华，孙建好，陈亮之，等. 玉/豆间作产量优势中补偿效应和选择效应的角色. 作物学报，2022，48(10)：2588－2596.

[27] Tan Y，Hou F L，Chai Q，*et al*. Expanding row ratio with lowered nitrogen fertilization improves system productivity of maize/pea strip intercropping. European Journal of Agronomy，2020，113(1)：125986.

[28] Wang C，Zhou L B，Zhang G B，*et al*. Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy sorghum to row ratio configurations in waxy sorghum-soybean intercropping systems. Field Crops Research，2021，263：108077.

[29] Rajesh K V，Amit C H，Ram S V，*et al*. Improving production potential and resources use efficiency of peppermint (*Mentha piperita* L.) intercropped with geranium (*Pelargonium graveolens* L. Herit ex Ait) under different plant density. Industrial Crops and Products，2013，44：577－582.

[30] Peng R D，Xu H S，Bi H X，*et al*. Accumulated photosynthetically activeradiation and its heterogeneity collectively decrease soybean yield in apple-based intercropping systems. Agronomy，2025，15(3)：581.

[31] Woittiez L S，Van Wijk M T，Slingerland M，*et al*. Yield gaps in oil palm：A quantitative review of contributing factors. European Journal of Agronomy，2017，83：57－77.

[32] Li H X，Li Q，Yu C L，*et al*. Unified estimation of rice canopy leaf area index over multiple periods based on UAV multispectral imagery and deep learning. Plant Methods，2025，21(1)：73.

[33] Cai Z C，Bi H X，Xu H S，*et al*. Distribution of photosynthetically available radiation and its effect on growth of *Arachis hypogaea* in *Malus pumila* and *Arachis hypogaea* intercropping system in loess area of Western Shanxi. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2017，45(4)：51－58.
蔡智才，毕华兴，许华森，等. 晋西黄土区苹果花生间作系统光合有效辐射及其对花生生长的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2017，45(4)：51－58.

[34] Wang Q S，Sun B D，Hao H，*et al*. Photosynthetically active radiation determining yields for an intercrop of maize with cabbage. European Journal of Agronomy，2015，69：32－40.

[35] Qiang B B，Chen S Y，Fan Z，*et al*. Effects of nitrogen application levels on soybean photosynthetic performance and yield：Insights from canopy nitrogen allocation studies. Field Crops Research，2025，326：109871.