

不同品种春小麦间混作对群体光合特性和水分利用效率的影响

康健,邵雪志,王砚涵,李赛如,高齐,张永平

(内蒙古农业大学农学院,内蒙古呼和浩特 010019)

摘要:为了解不同春小麦品种间混作效应,以春小麦高秆品种内麦 17 号(株高 110 cm, A)与矮秆品种农麦 482 号(株高 76 cm, B)为材料,设置行比为 4A:5B、5A:4B、3A:6B、6A:3B 共 4 种间作方式及种子质量比 1:1 混作方式(ABmix),并以 2 个品种单作为对照(ACK、BCK),比较分析了不同种植方式下小麦旗叶 SPAD 值、群体净光合速率(NCP)、干物质积累量、籽粒产量以及水分利用效率的差异。结果表明,间混作小麦花后 18 d 旗叶 SPAD 值均高于单作;各处理花后群体净光合速率均呈先升后降趋势,均于开花后 6 d 最大,其中 4A:5B 处理的群体净光合速率始终显著高于其他处理。不同间混作处理间千粒重无显著差异,但均显著高于 ACK。与单作处理相比,ABmix 处理的籽粒产量无显著变化,但 4 种间作处理的籽粒产量均显著增加,其中 4A:5B 处理的籽粒产量最高,较 ACK、BCK 分别增加了 7.94% 和 6.31%。4 种小麦间作的土地当量比均大于 1。4A:5B 处理小麦全生育期土壤耗水量、总耗水量均最低,水分利用效率最高,较 ACK、BCK 分别提高了 21.0% 和 20.8%。本试验条件下,高秆品种内麦 17 号和矮秆品种农麦 482 号在行比为 4:5 的间作方式下增产节水效果最佳。

关键词:小麦;间混作;群体净光合速率;产量;水分利用效率

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)03-0412-08

Effects of Intermixing Different Varieties of Spring Wheat on Photosynthetic Characteristics and Water Use Efficiency of the Population

KANG Jian, SHAO Xuezhi, WANG Yanhan, LI Sairu, GAO Qi, ZHANG Yongping

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: To evaluate the intercropping effects of different spring wheat varieties, four intercropping methods with different row ratios (4A:5B, 5A:4B, 3A:6B, 6A:3B) and a mixed cropping of 1:1 seed mass ratio (ABmix) were set up, using a high stem variety Neimai 17 (plant height 110 cm, A) and a dwarf stem variety Nongmai 482 (plant height 76 cm, B) as materials. Two different intercropping methods were compared and analyzed for flag leaf SPAD values, net photosynthetic rate (NCP), dry matter accumulation, grain yield, and water content under different planting methods, with two varieties as controls (ACK and BCK). The results showed that the SPAD values of flag leaves in intercropped wheat were higher than those in monoculture at 18 days after flowering. The net photosynthetic rate of the post flowering population in each treatment showed a trend of first increasing and then decreasing, reaching its maximum at 6 days after flowering. Among them, the net photosynthetic rate of the population in the 4A:5B treatment was consistently significantly higher than that in other treatments. There was no significant difference in thousand-grain weight among different intercropping treatments, but they were all significantly higher than ACK. Compared with monoculture treat-

收稿日期:2024-01-19 修回日期:2024-03-22

基金项目:内蒙古“科技兴蒙”行动重点专项(NMKJXM202201-4);内蒙古自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项(STZX202214);内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS03044)

第一作者 E-mail:3021954734@qq.com(康健)

通讯作者 E-mail:imauzyp@163.com(张永平)

ment, the grain yield of ABmix treatment showed no significant change, but the grain yield of four intercropping treatments increased significantly. The 4A:5B treatment had the highest grain yield, increased by 7.94% and 6.31% compared to ACK and BCK, respectively. The land equivalent ratio of the four intercropping methods was greater than 1. The soil water consumption and total water consumption during the entire growth period of wheat were the lowest under the 4A:5B intercropping method, but the water use efficiency was the highest, with an increase rate of 21.0% and 20.8% compared to ACK and BCK, respectively. Under the conditions of this experiment, the high stem variety Neimai 17 and the dwarf stem variety Nongmai 482 had the best yield and water saving effects under the row ratio of 4:5 intercropping.

Keywords: Wheat; Intercropping; Net canopy photosynthetic; Yield; Water use efficiency

间套作是中国传统农业的精髓,也是增加农田生物多样性、促进种植结构调整及多种经营发展的有效措施^[1]。经预测,在今后的40年里中国将有27%的粮食产量增加来源于间套作^[2]。间套作的目的是通过提高群落多样性,使作物能够充分地利用自然资源,从而增加产量^[3-7]。国内外大量研究证明,间套作种植模式具有高效利用光、热、水分和养分资源的优势^[8-10]。与传统的单一耕作方式比较,间套作的产量优势明显,如小麦||蚕豆^[11]、玉米||大豆^[12]、小麦||鹰嘴豆^[13]、小麦||棉花^[14]等,特别是高矮搭配提高了整个间作系统的光能利用效率^[15]。如果作物搭配不合理或管理不当,间套作种植模式也会出现减产现象^[16]。以往大多数研究主要集中在不同类型作物间套作系统,关于同一作物不同品种的间混作模式研究较少^[17]。

内蒙古河套平原灌区是中国优质中强筋小麦的主产区之一。进一步提升小麦产量和品质对于保障内蒙古粮食安全、增强商品小麦的竞争力具有重要意义。然而,由于土壤、水分及其他资源的制约,该地区小麦生产受到了极大限制。为充分发挥小麦品种多样性及遗传多样性优势,本研究通过设置不同春小麦品种间混作模式,系统分析不同间混作群体光合特性、物质积累、产量形成及水分利用效率的差异,明确了可统一实现高产高效的间混作模式,以期为河套灌区不同小麦品种间混作模式的应用与推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2022年在内蒙古巴彦淖尔市农牧业科学研究所园子渠试验站(40.87°N, 107.18°E)进行。该地属温带大陆性季风气候区,海拔1039

m,年平均气温6.1~7.6℃,平均日照时数3110~3300h,年平均降水量150~200mm。试验地为壤土,0~20cm土壤有机质含量15.6g·kg⁻¹,全氮含量1.04g·kg⁻¹,碱解氮含量74mg·kg⁻¹,有效磷含量13.4mg·kg⁻¹,速效钾含量149mg·kg⁻¹,pH值8.5,全盐含量1.4g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验选用春小麦品种内麦17号(A)和农麦482号(B)为材料,其株高分别为110cm、76cm。设置4种间作方式(行比分别为4A:5B、5A:4B、3A:6B、6A:3B)和1种混作种植方式(种子质量比1:1,ABmix,),以2个品种单作为对照(ACK、BCK),共7个处理。小麦采用大区设计,每个大区分为3个小区,大区面积0.18hm²(3m×60m)。小麦于2022年3月18日采用9行播种机播种,行距为11cm,播种量375kg·hm⁻²,种肥施用磷酸二铵375kg·hm⁻²。灌水、追肥及田间管理同常规生产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 旗叶 SPAD 值测定

于小麦挑旗后,采用SPAD-502(日本美能达公司)测定旗叶中部叶片SPAD值,每小区测10片旗叶,每隔6d测定1次。

1.3.2 群体光合速率测定

从小麦抽穗期群体建成后开始,使用自制同化箱(95cm×60cm×100cm)测定群体光合速率。连接CIRAS-3光合仪(英国PP-System公司)主机与同化箱进行测定,测定2~3min,记录初始CO₂值、测定时间和结束CO₂值,每隔6d测定1次。

群体表观光合速率=[(初始CO₂值-结束时CO₂值)/测定时间]×(同化室体积/同化室底面积)×(P/101.325)×[273/(273+同化室内温

度)]×(44.01/22.41)

植株群体净光合速率=群体表观光合速率-土壤呼吸速率

1.3.3 干物质积累量测定

于小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期,每小区随机选取长势均匀的 1 行取 50 cm 样段(间作处理 2 个品种各取 50 cm 样段),植株去掉根系,于 105 °C 杀青 30 min 后,80 °C 烘干至恒重并称重。

1.3.4 土壤水分含量测定及水分利用效率计算

在小麦播种前、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期,用土钻每隔 20 cm 土层取土(间作处理每个品种分别随机取土),取样深度 1 m。于 105 °C 烘箱烘干,换算各土层土壤含水量。小麦收获后挖取 0~100 cm 土壤剖面,用环刀法测定土壤容重。采用土壤水分平衡法计算不同处理下的耗水状况。

小麦全生育期耗水量=生育期降水量+灌溉量-小麦全生育期土壤贮水变化量。

不同深度土壤的贮水量=土壤质量含水量×土壤平均容重×土层深度。

水分利用效率=籽粒产量/生育期内总耗水量

1.3.5 测产及考种

小麦成熟期在每个小区取 2 m² 样点(间作处理每个品种各取 2 m² 样点),单独收获,统计总穗数,同时选取 20 株考察穗粒数。晾晒后机械脱粒并称总重及千粒重,按含水率 13% 校正籽粒重量,换算实际产量并计算土地当量比(LER)。

$$LER = \sum_{i=1}^m Y_i / Y_{ii}$$

式中, Y_i 表示第 i 个品种在间作时的产量, Y_{ii} 表示第 i 个品种在单作时的产量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021、SPSS 26.0 进行方差分析及显著性分析,多重比较采用 Duncan's 法,使用 Origin 2021 绘图。

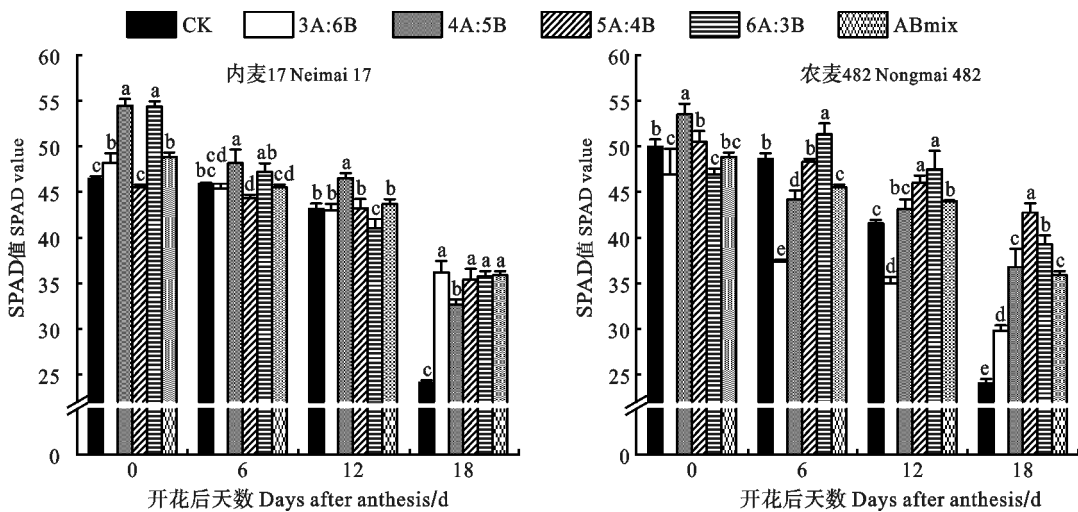
2 结果与分析

2.1 不同间混作处理下小麦旗叶 SPAD 值的变化

不同处理下小麦旗叶 SPAD 值在开花后呈下降趋势,花后 0~12 d 下降缓慢,12 d 之后急剧下降(图 1)。各处理下品种 A 花后 0~12 d 旗叶 SPAD 值均显著高于单作处理,其余处理多数与单作处理差异不显著或显著低于单作;花后 18 d,各间混作处理均显著高于单作处理。品种 B 的花后 0~18 d 旗叶 SPAD 值表现比较复杂,花后 0 d 和 6 d 分别在 4A:5B 和 6A:3B 处理下较单作处理显著提高,其余处理变化不显著或显著降低;花后 12 d 和 18 d 除 3A:6B 处理外间混作处理均显著高于单作。这表明不同品种间混作种植可提高小麦旗叶花后 SPAD 值。

2.2 不同间混作处理下小麦群体净光合速率动态变化

不同处理下小麦开花后群体净光合速率均呈先升后降趋势,在开花后 6 d 达到最大值(图 2)。其中,4A:5B 处理的群体净光合速率在花后 0 d



相同时间图柱上不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。
Different lowercase letters above the columns at same time indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in figure 3.

图 1 不同间混作处理下小麦旗叶 SPAD 值变化
Fig. 1 Changes of SPAD value in wheat flag leaf under different intercropping treatments

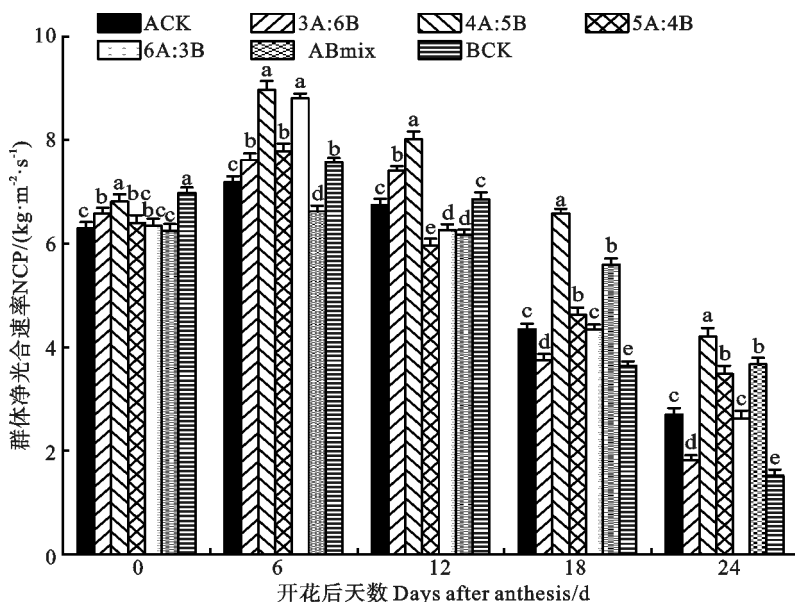


图 2 不同间混作处理下小麦群体净光合速率动态变化

Fig. 2 Dynamics of net canopy photosynthesis in wheat populations under different intercropping treatments

显著高于 ACK 处理但与 BCK 处理差异不显著, 6~24 d 均显著高于两个单作处理; 其余间混作处理表现不稳定。这也表明间混作种植可增加小麦花后群体净光合速率。

2.3 不同间混作处理下小麦的干物质积累动态

小麦拔节之前, 不同间混作处理下小麦干物质积累缓慢, 拔节期之后快速增加, 灌浆期后又变缓, 并于成熟期达到最大值(表 1)。拔节期前, 不同间混作处理间群体干物质质量无显著差异; 抽穗期除 ACK 的干物质积累量显著低于其他处理外, 其余处理间差异不显著; 开花期之后, 间混作

处理小麦的干物质积累量较单作处理均不同程度提高, 且多数差异显著, 其中 4A:5B 处理显著高于其他处理。这说明品种间混作可促进小麦花后干物质积累, 以 4A:5B 的间作模式表现最佳。

2.4 不同间混作处理下小麦的产量及其构成因素

由表 2 可见, 不同间混作处理下小麦产量及其构成因素均存在显著差异。4 个间作处理间的穗数无显著差异, 均显著高于 BCK 和 ABmix 处理, 但与 ACK 处理差异不显著; BCK 和 ABmix 处理的穗粒数显著高于其他处理, ACK 处理显著低于其他处理; 各间混作处理间的千粒重无显著

表 1 不同间混作处理下小麦干物质积累动态

Table 1 Dynamics of wheat dry matter accumulation under different intercropping treatments t · hm⁻²

处理 Treatment	生育时期 Growth stages					
	分蘖 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Anthesis stage	灌浆期 Grouting stage	成熟期 Maturity stage
ACK	0.92±0.04a	3.47±0.04a	8.72±0.02b	10.40±0.05d	16.54±0.05f	18.64±0.09f
3A:6B	0.96±0.01a	3.51±0.03a	9.01±0.04a	11.03±0.12b	16.90±0.06e	18.93±0.06e
4A:5B	0.93±0.05a	3.47±0.03a	9.07±0.03a	11.79±0.61a	18.02±0.03a	20.54±0.02a
5A:4B	0.93±0.02a	3.49±0.04a	8.97±0.10a	10.82±0.08bcd	17.22±0.14c	19.35±0.05c
6A:3B	0.90±0.02a	3.51±0.04a	9.00±0.07a	10.57±0.03cd	17.06±0.04d	19.09±0.08d
ABmix	0.94±0.06a	3.47±0.04a	9.00±0.08a	11.90±0.03a	17.42±0.07b	19.64±0.02b
BCK	0.91±0.02a	3.49±0.04a	9.00±0.06a	10.98±0.05bc	16.08±0.08j	18.45±0.04j

同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

Different lowercase letters after the values in the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in tables 2-4.

表 2 不同间混作处理下小麦产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components of wheat under different intercropping treatments

处理 Treatment	穗数 Spike/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
ACK	670.83 \pm 10.63ab	27.1 \pm 1.3c	41.95 \pm 0.48c	6 446.97 \pm 38.80c
3A:6B	741.58 \pm 41.19a	29.1 \pm 0.5b	44.36 \pm 0.27a	6 678.67 \pm 91.23b
4A:5B	701.11 \pm 70.97a	29.0 \pm 0.2b	44.54 \pm 0.78a	6 958.58 \pm 44.61a
5A:4B	709.72 \pm 37.46a	28.8 \pm 0.4b	43.60 \pm 0.33ab	6 715.93 \pm 84.08b
6A:3B	725.28 \pm 32.11a	28.1 \pm 0.3bc	43.54 \pm 0.58ab	6 704.08 \pm 32.82b
ABmix	605.83 \pm 30.87b	31.3 \pm 1.2a	44.14 \pm 0.66ab	6 533.42 \pm 29.78c
BCK	614.72 \pm 38.75b	30.7 \pm 0.5a	43.15 \pm 0.65b	6 545.25 \pm 47.96c

差异,但均不同程度高于两个单作处理。与单作处理比较,ABmix 处理的籽粒产量无显著变化,但 4 个间作处理的籽粒产量均显著增加,其中 4A:5B 处理的籽粒产量最高,分别较 ACK 和 BCK 处理提高 7.94% 和 6.31%。这表明,品种间作种植有利于小麦穗粒数和千粒重增加,尤其是增加千粒重,进而促进小麦增产。

2.5 不同间混作处理下小麦的水分利用效率

由表 3 可以看出,不同比例小麦间混作处理间土壤耗水量、全生育期总耗水量以及水分利用效率(WUE)均存在显著差异。各间混作处理土壤耗水量和全生育期总耗水量均显著低于 ACK 处理;除 5A:4B 与 3A:6B 处理外,其余间混作处

理的土壤耗水量和全生育期总耗水量均显著低于 BCK 处理;间混作处理 WUE 均显著高于 ACK 处理;除 5A:4B 与 3A:6B 处理外,其余间混作处理的 WUE 均显著高于 BCK 处理,其中 4A:5B 处理的 WUE 分别较 ACK、BCK 处理提高 21.0% 和 20.8%。可见,合理的小麦间混作种植模式可降低群体耗水量,提高水分利用效率。

2.6 不同间作处理下小麦土地当量比

由表 4 可知,高矮秆搭配(内麦 17 号 || 农麦 482 号)间作处理 3A:6B、4A:5B、5A:4B、6A:3B 的 LER 均大于 1,表现出一定的增产优势。4A:5B 处理的 LER 显著高于其余三个间作处理。

表 3 不同间混作处理下小麦耗水量及其水分利用效率

Table 3 Water consumption and water use efficiency of wheat under different intercropping treatments

处理 Treatment	降水量 Precipitation/mm	灌水量 Irrigation amount/mm	土壤水消耗量 Soil water consumption/mm	全生育期总耗水量 Total water consumption/mm	水分利用效率 Water use efficiency/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
ACK	23	300	175.48 \pm 0.84a	498.48 \pm 0.84a	12.93 \pm 0.10e
3A:6B	23	300	148.66 \pm 0.63c	471.66 \pm 0.63c	14.16 \pm 0.20c
4A:5B	23	300	113.61 \pm 1.80f	436.61 \pm 1.80f	15.94 \pm 0.14a
5A:4B	23	300	164.25 \pm 2.74b	487.25 \pm 2.74b	13.78 \pm 0.14d
6A:3B	23	300	135.01 \pm 3.34d	458.01 \pm 3.34d	14.64 \pm 0.17b
ABmix	23	300	119.69 \pm 2.39e	442.69 \pm 2.39e	14.76 \pm 0.03b
BCK	23	300	136.66 \pm 0.63c	459.66 \pm 0.63c	14.23 \pm 0.13c

表 4 不同间作处理下小麦土地当量比

Table 4 Land equivalent ratio of wheat under different intercropping treatments

处理 Treatment	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		土地当量比 LER Land equivalency ratio
	内麦 17 号 Neimai 17	农麦 482 号 Nongmai 482	
3A:6B	6 237.75 \pm 247.76c	6 899.13 \pm 99.61a	1.03 \pm 0.01c
4A:5B	7 304.15 \pm 70.41a	6 682.13 \pm 100.23ab	1.07 \pm 0.01a
5A:4B	7 019.17 \pm 135.70b	6 336.88 \pm 328.67c	1.04 \pm 0.01bc
6A:3B	7 073.42 \pm 11.03ab	6 242.42 \pm 73.15c	1.05 \pm 0.00b
CK	6 446.97 \pm 38.80c	6 545.25 \pm 47.96bc	

3 讨论

光合作用是产量形成的基础,不同株高作物间作群体内的高矮秆搭配,形成了良好的冠层结构^[18]。合理的间作模式可利用不同株高作物在田间形成空间上的差异,形成立体植株群落,能充分利用自然的光热条件,作物能够同时在不同的层次有效利用光能^[19],在作物群体生育后期保持较高光合源,优化干物质积累、分配以及转运,提高高秆作物叶片的 SPAD 值及净光合速率,但矮秆作物因为受到高秆作物遮荫等影响,导致光合性能降低^[15,20]。上述研究都是基于不同作物间作模式下,在小麦不同品种间作系统中,高矮秆品种间混作的相互作用表现为对光照与水分的利用^[21],高矮秆品种小麦间混作可以创造波浪冠层结构,使叶片分布在各个层次,提高小麦 SPAD 以及群体光合速率,改善光合性能,从而吸收更多能量,进一步积累更多干物质^[22-23],其中籽粒灌浆前期茎鞘和穗颖中积累的大量果聚糖,于灌浆后期迅速降解和转运^[24]。施成晓等^[25]通过对多品种冬小麦间作研究发现,不同品种冬小麦以 1:1 行比间作种植可以有效增加地上部生物量,且随品种多样性的增加而增加。本试验结果表明,小麦高矮秆品种不同行比配置模式下,灌浆期两品种间混作种植的旗叶 SPAD 值均显著高于对应单作,群体净光合速率下降趋势相对平缓,其中 4A:5B 配置的群体净光合速率高值持续期长,干物质积累最多。因此,合理的小麦品种组合及行比配置能够创建良好的间作群体结构,改善叶片及群体光合性能,促进干物质积累。

合理的间作配置可以使作物充分利用资源,提高作物产量^[26-27]。作物间作时,可以通过影响根系空间构型^[28]、灌浆速率和粒重^[29]、边行优势与内行积极效应^[30]以及光合作用^[31]影响产量。高矮秆作物间作时,矮秆作物由于光合能力降低导致产量下降^[32-33]。然而,由于受到机械化和熟期不一致的限制,不同类型作物间作对田间管理造成不便^[34]。因此,探索同一作物不同品种的间混作研究至关重要。有研究表明,选用适宜的小麦高矮秆品种通过行比 3:3 进行带状间作,或者按照 1:2 的比例混合播种,可以改善冠层光合性能,从而显著提高产量和水分利用效率^[17]。本研究发现,与小麦单作模式相比,混作处理的小麦产

量无显著变化,但 4 种间作处理的产量均显著增加,其中以 4A:5B 处理的产量最高。这可能是由于品种间株高差异较大,形成了良好的冠层环境,影响蒸腾作用以及光合性能,促进籽粒灌浆,最终增加产量^[35-36]。本研究采用九行播种机安装隔板,可进行不同行比播种,且收获时采取混收的方式,可减轻人工劳动力,充分利用机械化。

间作群体耗水量与作物品种、施氮量^[37]、种植模式、田间行比配置关系较大^[38],高矮秆作物间作模式下,水分利用效率高于单作,但耗水量之间差异并不明显^[39]。本研究表明,各间混作处理土壤耗水量和全生育期总耗水量均显著低于内麦 17 号单作,除 5A:4B 与 3A:6B 处理外,其余间混作处理的土壤耗水量和全生育期总耗水量均显著低于农麦 482 号单作;各间混作处理 WUE 均显著高于内麦 17 号单作,除 5A:4B 与 3A:6B 处理外,其余间混作处理的 WUE 均显著高于农麦 482 号单作。这与柴强等^[39]研究结果略有不同,可能是由于不同株高小麦间作可以避免光照直射地面,减少土壤水分蒸发,提高小麦水分利用效率^[40]。间作群体中,由于不同作物的生长发育及耗水特性不同,可以形成在时间和空间上生态位的分异,降低群体耗水量,从而提高作物的水分利用效率^[41]。赵雪娇等^[42]研究发现玉米 || 甘蓝对水分需求在时间和垂直分布上存在互补性,可以实现对水资源的高效利用。间作群体的耗水量与单作相比差异较小,但间作作物产量和效益增加,因而作物的水分利用效率显著提高^[43]。土地当量比能较好地衡量间作模式的土地利用率和增产效应。与单作处理相比,间混作具有更高的产量优势,这已在玉米套作大豆^[44]、小麦混播苜蓿^[45]等间混套作体系上得到证实。本研究小麦间作土地当量比均大于 1,间作提高了土地利用效率,具有积极增产效应,这与前人^[46]研究结果一致。不同株高小麦间作可以充分利用作物间的互补作用,提高土地及水分利用效率。

4 结论

本试验条件下,高秆品种内麦 17 号和矮秆品种农麦 482 号行比为 4:5 的间作模式可以有效改善小麦旗叶 SPAD 值,提高小麦的光合能力,具有明显的增产和节水效应,可在河套灌区小麦生产中应用推广。

参考文献:

- [1] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50.
YONG T W, YANG W Y, XIANG D B, *et al.* Production and N nutrient performance of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(1): 50.
- [2] 刘巽浩, 高旺盛. 集约持续农业工程技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2001: 45.
LIU X H, GAO W S. Intensive and sustainable agricultural engineering technology [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2001: 45.
- [3] 夏芳, 张钦, 吴若雪, 等. 高质量发展背景下农业土地利用效率减贫效应分析[J]. 天津农业科学, 2022, 28(1): 28.
XIA F, ZHANG Q, WU R X, *et al.* Analysis of poverty reduction effect of agricultural land efficiency under high-quality development [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2022, 28(1): 28.
- [4] LU X. Effect of intercropping soybean on the diversity of the rhizosphere soil arbuscular mycorrhizal fungi communities in wheat fields [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2022, 50(6): 2100014.
- [5] COWGER C, WEISZ R. Winter wheat blends (mixtures) produce a yield advantage in North Carolina [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 169.
- [6] 陈欣, 唐建军. 农业系统中生物多样性利用的研究现状与未来思考[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 54.
CHEN X, TANG J J. Utilization of biodiversity in agriculture: today and tomorrow [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 54.
- [7] LI C, HOFFLAND E, KUYPER T W, *et al.* Syndromes of production in intercropping impact yield gains [J]. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 653.
- [8] 依兵, 刘金刚, 宋殿秀, 等. 干旱地区向日葵与谷子间作的土地生产力及种间竞争力的研究[J]. 作物杂志, 2023(5): 219.
YI B, LIU J G, SONG D X, *et al.* Study on land productivity and interspecific competition of sunflower and millet intercropping in arid areas [J]. *Crops*, 2023(5): 219.
- [9] 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率的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(3): 144.
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.
- [10] 梁晓红, 曹雄, 张瑞栋, 等. 不同高粱大豆间作模式对产量及水分养分利用的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 174.
LIANG X H, CAO X, ZHANG R D, *et al.* Effects of different sorghum and soybean intercropping patterns on yield, water and nutrient use efficiency [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(3): 174.
- [11] 刘振洋, 柏文恋, 黄少欣, 等. 间作对不同氮水平下小麦产量优势形成的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 185.
LIU Z Y, BAI W L, HUANG S X, *et al.* Effect of intercropping on yield advantage formation of wheat under different nitrogen levels [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(5): 185.
- [12] 郑皓远, 陈喜凤, 郭丹阳, 等. 条带间作对玉米大豆光能利用特征、产量及经济收入的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(6): 1.
ZHENG H Y, CHEN X F, GUO D Y, *et al.* Effects of light energy utilization characteristics, yield and economic output of maize-soybean strip intercropping [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2023, 48(6): 1.
- [13] KHERIF O, SEGHOUBANI M, ZEMMOURI B, *et al.* Understanding the response of wheat-chickpea intercropping to nitrogen fertilization using agro-ecological competitive indices under contrasting pedoclimatic conditions [J]. *Agronomy*, 2021, 11(6): 1225.
- [14] ZHI X, HAN Y, XING F, *et al.* How do cotton light interception and carbohydrate partitioning respond to cropping systems including monoculture, intercropping with wheat, and direct-seeding after wheat? [J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0217243.
- [15] 吴香奇, 刘博, 张威, 等. 小麦豌豆间作对群体光合特性和生产力的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(4): 1079.
WU X Q, LIU B, ZHANG W, *et al.* Effects of wheat-pea intercropping on population photosynthetic characteristics and crops productivity [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(4): 1079.
- [16] KIAER L P, SKOVGAARD I M, ØSTERGÅRD H. Effects of inter-varietal diversity, biotic stresses and environmental productivity on grain yield of spring barley variety mixtures [J]. *Euphytica*, 2012, 185(1): 123.
- [17] 王云奇. 限水灌溉下冬小麦品种间、混作产量形成和水分利用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 181.
WANG Y Q. Study on yield formation and water use in winter wheat cultivar intercropping and mixture cropping under limited irrigation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 181.
- [18] WANG Z, ZHAO X, WU P, *et al.* Border row effects on light interception in wheat/maize strip intercropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 1.
- [19] 周涛. 灌溉下紫花苜蓿/春小麦间作系统叶性状和光利用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2024: 72.
ZHOU T. Study on leaf trait and radiation use of alfalfa/spring wheat intercropping system under irrigation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024: 72.
- [20] 范虹, 殷文, 柴强. 间作优势的光合生理机制及其冠层微环境特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(11): 1750.
FAN H, YIN W, CHAI Q. Research progress on photo-physiological mechanisms and characteristics of canopy microenvironment in the formation of intercropping advantages [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(11): 1750.
- [21] 宋雷. 株间竞争对春小麦产量形成的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2009: 43.
SONG L. The Effects of Inter-Plant Competition on Yield Formation of Spring Wheat Cultivars [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009: 43.
- [22] 王一帆, 殷文, 胡发龙, 等. 间作小麦光合性能对地上地下互作强度的响应[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 929
WANG Y F, YIN W, HU F L, *et al.* Response of photosynthetic performance of intercropped wheat to interaction intensity between above-and below-ground [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(5): 929.
- [23] 穆阳阳, 周艳丽, 杨慎骄, 等. 苜蓿-冬小麦间作叶片 SPAD 值及产量表现[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(2): 22.
MU Y Y, ZHOU Y L, YANG S J, *et al.* The leaf SPAD value and yield of alfalfa-winter wheat intercropping [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 22.
- [24] 张永平. 冬小麦节水高产栽培群体源性能特征及其调控机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 139.
ZHANG Y P. Structure and function of population photosynthetic in winter wheat under the water-saving and high-yielding cultivation condition. [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004: 139.
- [25] 施成晓. 冬小麦多品种间作对群体生长特性及产量的影响

- [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017:48.
SHI C X. Effects of winter wheat varieties intercropping on population growth characteristics and yield. [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University,2017:48.
- [26]郭奇.不同行距配置下小麦和豌豆间作对小麦生长的影响[D].太谷:山西农业大学,2021:32.
GUO Q. Effects of wheat and pea intercropping on wheat under different row spacing [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2021:32.
- [27]张金丹,范虹,杜进勇,等.小麦玉米同步增密有利于优化种间关系而提高间作产量[J].作物学报,2021,47(12):2481.
ZHANG J D, FAN H, DU J Y, *et al.* Synchronously higher planting density can increase yield via optimizing interspecific interaction of intercropped wheat and maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2021,47(12):2481.
- [28]陈艺博,杨琴,王晶晶,等.不同根构型玉米品种间作对根系分布、养分积累和产量的影响[J].核农学报,2023,37(3):594.
CHEN Y B, YANG Q, WANG J J, *et al.* Effects of intercropping on root distribution, nutrient accumulation and yield of maize with different root architecture [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2023,37(3):594.
- [29]肖珊珊,张翼飞,杨克军,等.不同熟期品种间作对春玉米籽粒灌浆、脱水特性及产量的影响[J].中国农业科学,2022,55(12):2294.
XIAO S S, ZHANG Y F, YANG K J, *et al.* Effects of intercropping with different maturity varieties on grain filling, dehydration characteristics and yield of spring maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2022,55(12):2294.
- [30]刘振洋,柏文恋,黄少欣,等.间作对不同氮水平下小麦产量优势形成的影响[J].华北农学报,2020,35(5):185.
LIU Z Y, BAI W L, HUANG S X, *et al.* Effect of intercropping on yield advantage formation of wheat under different nitrogen levels [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2020,35(5):185.
- [31]贾曼曼,肖靖秀,汤利,等.不同施氮量对小麦蚕豆间作作物产量及其光合特征的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2017,32(2):350.
JIA M M, XIAO J X, TANG L, *et al.* Effects of nitrogen supply on yields and photosynthesis characteristics of crops in wheat and broad bean intercropping [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*,2017,32(2):350.
- [32]谢辉,韩守安,王敏,等.扁桃-冬小麦间作模式下不同树形对冬小麦产量和叶片光合能力的影响[J].新疆农业科学,2021,58(9):1610.
XIE H, HAN S A, WANG M, *et al.* Effect of trees from on grain yield and photosynthetic characteristics at different growth stage of wheat under almond wheat intercropping [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*,2021,58(9):1610.
- [33]谢辉,张雯,韩守安,等.扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):704.
XIE H, ZHANG W, HAN S A, *et al.* Effect of shading degree on the grain yield and photosynthetic characteristics of wheat at the grain filling stage in an almond-winter wheat intercropping system [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2021,29(4):704.
- [34]江景涛,王东伟,杨文卿,等.我国间作播种机械化技术及装备探析[J].江苏农业科学,2021,49(14):40.
JIANG J T, WANG D W, YANG W Q, *et al.* Analysis of technology and equipment of intercropping seeding mechanization in China [J]. *Jiangsu Agricultural Science*,2021,49(14):40.
- [35]吕明洋,王俊,胡宁,等.吉林玉米带不同玉米//小麦间作模式对作物产量及水分利用率的影响[J].玉米科学,2019,27(2):106.
LÜ M Y, WANG J, HU N, *et al.* Effects of different maize//wheat intercropping systems on crop yield and water use efficiency in Jilin maize belt [J]. *Journal of Maize Sciences*,2019,27(2):106.
- [36]赵立尚,王香生,高楠楠,等.2种基因型小麦间作对籽粒灌浆特性及产量的影响[J].河南农业科学,2023,52(8):18.
ZHAO L S, WANG X S, GAO N N, *et al.* Effects of intercropping of two genotypes of wheat on grain filling characteristics and yield [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*,2023,52(8):18.
- [37]李倩倩,王星运,李孟浩,等.小麦玉米间作和氮肥对作物耗水特性及水分利用的影响[J].西北农业学报,2021,30(6):819.
LI Q Q, WANG X Y, LI M H, *et al.* Effects of wheat/maize strip intercropping and nitrogen fertilizer on crops water consumption and water use [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*,2021,30(6):819.
- [38]徐鹏,陈国栋,吴全忠,等.南疆地区田间配置对枣棉间作耗水特性的调控效应[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):46.
XU P, CHEN G D, WU Q Z, *et al.* Effects of field collocation patterns on water consumption characteristics of jujube-cotton intercropping system in Southern Xinjiang [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2019,37(5):46.
- [39]柴强,杨彩虹,陈桂平.灌溉方式对绿洲灌区小麦间作玉米耗水特性的影响[J].干旱区研究,2014,31(1):105.
CHAI Q, YANG C H, CHEN G P. Effect of irrigation patterns on water consumption of wheat-corn intercropping in irrigated area in oasis [J]. *Arid Zone Research*,2014,31(1):105.
- [40]BROOKER R W, KARLEY A J, NEWTON A C, *et al.* Facilitation and sustainable agriculture: A mechanistic approach to reconciling crop production and conservation [J]. *Functional Ecology*,2016,30(1):98.
- [41]Yin W, Feng F, Zhao C, *et al.* Integrated double mulching practices optimizes soil temperature and improves soil water utilization in arid environments [J]. *International journal of biometeorology*,2016,60(9):1423.
- [42]MORRIS R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water [J]. *Field Crop Research*,1993,34(3-4):303.
- [43]BENGOUGH A G, Mckenzie B M, Hallett P D, *et al.* Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits [J]. *Journal of Experimental Botany*,2011,62(1):59.
- [44]杨欢,周颖,陈平等.玉米-豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响[J].作物学报,2022,48(6):1476.
YANG X, ZHOU Y, CHEN P, *et al.* Effects of nutrient uptake and utilisation on yield of maize-legume strip intercropping system [J]. *Crops Journal*,2022,48(6):1476.
- [45]李恩慧,王玉慧,杨慎骄,等.小麦间套作苜蓿对土壤养分及作物养分吸收效率的影响[J].中国草地学报,2020,42(5):110.
LI E H, WANG Y H, YANG S J, *et al.* Effect of wheat-alfalfa intercropping system on soil nutrients and plant nutrient absorption efficiency [J]. *Chinese Journal of Grassland*,2020,42(5):110.
- [46]周海燕,柴强,黄高宝,等.绿洲灌区典型间作模式的产量和光能利用效率[J].甘肃农业大学学报,2012,47(6):68.
ZHOU H Y, CHAI Q, HUANG G B, *et al.* The yield and light use efficiency of different intercropping systems in the Hexi oasis irrigation area [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*,2012,47(6):68.