

不同施氮水平下小麦/玉米套作 群体产量和水氮利用

李孟浩^{1,2}, 李倩倩^{1,2}, 刘朋召^{1,2}, 张鹏飞^{1,2}, 陈小莉^{1,2}, 任小龙^{1,2}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过 2018—2020 年连续两年田间试验, 以小麦/玉米套作群体为试验对象, 研究 N0、N1 和 N2 3 个水平下(施 N 量分别为小麦 0、120 kg·hm⁻²和 240 kg·hm⁻², 玉米 0、180 kg·hm⁻²和 360 kg·hm⁻²)小麦/玉米套作群体产量、土地当量比与土壤水分利用的差异。结果表明:小麦/玉米套作具有明显的产量与水分利用优势, 与单作相比, 套作小麦产量提高 21.34%~27.80% ($P<0.05$), 产量优势主要来源于边 1 行与边 2 行的增产, 而套作玉米表现受氮肥供应的调控, 在 N0 与 N1 水平下套作产量减少 3.02%~11.43%, 仅在 N2 水平下高于单作玉米; 小麦/玉米套作群体的土地当量比(LER)在 1.04~1.16, 具有土地利用优势; 在相同产量下小麦/玉米套作群体比单作群体的耗水量更少, 水分利用效率更高, 其中在 N1 水平下耗水量减少最为明显, 两年内平均减少消耗 47.30 mm 的水分, 而水分利用效率比单作系统提高 2.77%~6.46%, 小麦/玉米套作群体在 3 个施氮水平下均表现出节水与水分利用优势; 套作种植还可以提高小麦和玉米的氮肥农学利用率及小麦的氮肥偏生产力, 两年内套作小麦的氮肥偏生产力和氮肥农学利用率最高可达 64.17 kg·kg⁻¹和 11.17 kg·kg⁻¹。因此在半湿润区雨养条件下具有发展小麦/玉米套作种植模式的可行性。

关键词:小麦/玉米套作; 施氮水平; 产量; 水分利用效率; 氮肥农学利用率

中图分类号:S512.1; S513; S344.3 **文献标志码:**A

Yield, water and nitrogen utilization in the wheat-maize intercropping system under different nitrogen levels

LI Menghao^{1,2}, LI Qianqian^{1,2}, LIU Pengzhao^{1,2}, ZHANG Pengfei^{1,2}, CHEN Xiaoli^{1,2}, REN Xiaolong^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Crop Physiological Ecology and Tillage in North Western Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In this study, a two-year field experiment was conducted to explore the yield and water use efficiency of wheat-maize intercropping system under three nitrogen application levels: N0, N1, and N2 represent 0, 120, and 240 kg·hm⁻² for wheat and 0, 180, and 360 kg·hm⁻² for maize, respectively. The yield of intercropped wheat was significantly increased by 21.34%~27.80% than that of sole wheat during both years, and the yield advantage of intercropped wheat mainly came from the yield increase of border-1-row and border-2-row. However, the yield disadvantage of intercropped maize was mainly through the decrease of border rows. The yield of intercropped maize was affected by nitrogen rates, where maximum reduction (3.02%~11.43%) for N0 and N1 levels during both years, only higher than that of sole maize under N2 level. Compared with sole maize cropping, the grain yield of inner maize was increased by 6.27%~12.68%. In the two-year experiment period, the LER of wheat-maize intercropping was between 1.04~1.16, which had the advantage of land use. The water consumption of wheat-maize intercropping system was less than that of sole crops with same yield, and the maximum reduction in water consumption was observed for N1 level, and the average water consumption of the intercropping system was 47.30 mm less than that of the sole crops during both years of experiment. The water use efficiency of wheat-maize intercrop-

ping system was increased by 2.77%~6.46% than that of sole crops during both years. The wheat-maize intercropping system had the advantages of water saving and water use under three nitrogen application levels. Intercropping also improved the nitrogen agronomic utilization efficiency of wheat and maize and the nitrogen partial productivity of wheat. Within two years, the nitrogen partial productivity and nitrogen agronomic utilization efficiency of intercropping wheat reached $64.17 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $11.17 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$. These results suggest that wheat-maize intercropping system should be more feasible to develop under rain fed condition in semi humid area.

Keywords: wheat-maize intercropping; nitrogen application levels; yield; water use efficiency; agronomic efficiency of nitrogen

陕西关中地区光热资源优越,但水资源不足,灌水资源更是有限,该区域典型的“冬小麦-夏玉米”一年两熟种植模式是以消耗大量资源为特征的灌溉农业,降水资源利用不充分,不仅不利于水资源可持续利用,还影响着农业系统的稳定性。因此,探究关中地区雨养条件下小麦/玉米套作系统的产量和水分利用,对雨养地区发展小麦/玉米套作种植具有重要意义。许多地区的灌溉农业由于气候变化和地下水过度消耗而面临着巨大的威胁^[1-2],雨养农业在农业生产中越来越重要,它以全世界 80%左右的耕地总面积,生产了世界 60%的粮食,对粮食安全有着举足轻重的影响。同时,为推进耕地永续利用和农业可持续发展,我国越来越重视对耕地资源的保护,2016 年中央一号文件就提出实行农田休耕来应对耕地质量退化,世界上许多国家如美国^[3]和澳大利亚^[4]等实施土地休耕。有研究表明,休耕在保护耕地资源的同时造成了粮食减产 13%^[5]。因此,亟需寻找一个生态友好又能够集约高效利用降水资源的农业发展方式,在有效保护耕地资源的同时保障粮食安全,实现农业的持续发展和绿色发展。套作种植模式在世界范围内广泛应用。国内外科学研究和生产实践均表明,套作是一种可持续农业发展模式,具有增产稳产的优势^[4,6-7],能够充分利用光热和水分养分资源^[8-9],提高土地利用率^[10-11],套作正是一种基于生物多样性的可持续农业发展的有效途径^[12]。已有的研究主要集中在充分或补充灌溉条件下,对雨养条件下套作群体的研究较少。本研究以小麦/玉米套作群体为试验对象,通过分析不同施氮水平下小麦/玉米套作群体产量、土地当量比与土壤水分利用的差异,旨在为探索雨养地区发展小麦/玉米套作种植的可行性研究提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018—2019 年和 2019—2020 年在陕西

省杨凌高新产业示范区中国旱区节水农业研究院(34°18'N,108°04'E)进行,试验地位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上,属暖温带半湿润偏旱型气候,海拔为 467 m。近 20 年年均气温 13.4℃,≥0℃积温 4 800℃,≥10℃积温 4 143℃,年均日照时数为 2 196 h,无霜期 220 d。冬、春季降水偏少,近 30 年平均降雨量为 521 mm,60%~70%降雨集中在 7—9 月,年均蒸发量 993.2 mm,干旱指数为 1.30~1.59。土壤质地类型为粉质粘壤土,土壤颗粒组成为<0.01 mm 粒级占 51.9%,0.01~0.05 mm 占 42.3%,0.05~2 mm 占 5.8%。试验田 0~30 cm 耕层土壤化学性质如表 1 所示,耕层土壤容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量为 24%,pH 值为 8.25。

试验期间的气温和降水量见图 1。气象资料(气温和降水量)由田间农业气象站每半小时记录一次(Vantage Pro2, Davis Instruments, Hayward, CA, USA),由图 1 可知,两年作物生育期内的月均气温和降水量差异显著。2018—2019 年与 2019—2020 年生育期内总降水量分别为 514.4、656.8 mm,2018—2019 年降水量较少,2019—2020 年月均气温比 2018—2019 年低 4.17℃。

1.2 试验设计

供试材料为当地主栽冬小麦品种小偃 22 号,春玉米品种为郑单 958。试验设种植模式(P)和施氮水平(N)2 个试验因素,其中种植模式设单作小麦、单作玉米和小麦/玉米套作 3 种模式,施氮量分为 N0、N1、N2 3 个水平(分别对应于小麦 0、120、240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米 0、180、360 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),每个处理设置 3 次重复,田间随机排列。在小麦播前对该地进行耕作并划分小区,每个小区的面积为 52.5 m^2 (10.5 m×5 m),相邻小区之间留 50 cm 宽的隔离区并起垄,以防止水分养分发生侧向运移。

小麦行距 20 cm,播种密度 360 万粒· hm^{-2} 。玉米行距 50 cm,株距 30 cm,播种密度为 66 667 株· hm^{-2} 。在套作小区中相邻的小麦和玉米行距为 30 cm,由 3 条完整的小麦/玉米套作条带组成,带向

表 1 试验田耕层(0~30 cm)土壤化学性状
Table 1 Chemical properties of plough layer (0~30 cm) soil in experimental field

土层深度 Soil depth /cm	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	矿质氮 Mineral N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)
0~30	1.29	1.13	5.88	58.5	47.24	107.57	12.22

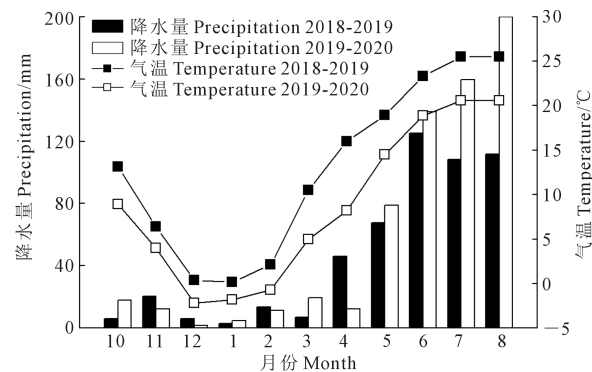


图 1 试验期间月均气温和降水量

Fig.1 Monthly average temperature and precipitation throughout the 2018-2019 and 2019-2020

南北,每个条带由 8 行小麦(条带 1.6m 宽)和 4 行玉米(条带 1.9 m 宽)组成(图 2),小麦和玉米分别占套作小区面积的 46%和 54%。试验中氮、磷、钾肥料分别用尿素(N:46%)、过磷酸钙(P₂O₅:16%)和水溶硫酸钾(K₂O:52%)。小麦、玉米施磷量均为 180 kg·hm⁻²、施钾量为 39 kg·hm⁻²,均作为基肥一次性施入。小麦氮肥作为基肥一次性施入,玉米氮肥作基肥施 50%,追肥 50%。小麦于 2018 年 10 月 11 日人工开沟条播,2019 年 6 月 7 日收获;春玉米于 2019 年 4 月 9 日播种,2019 年 8 月 18 日收获,两种作物共生期长 58 d。2019 年小麦为 10 月 11 日播种,2020 年 6 月 2 日收获;玉米于 2020 年 4 月 6 日播种,2020 年 8 月 13 日收获,两种作物共生期长 57 d。除草、施肥和其他的田间管理依照当地习惯进行。

由于套作小区中小麦条带和玉米条带的东西两侧位置对称,因此,套作小麦条带分为边 1 行(R1)、边 2 行(R2)、边 3 行(R3)和边 4 行(R4),其中边 1 行统计为边行,其余统计为内行;套作玉米条带则分为边行(Row1)和内行(Row2)。

1.3 测定指标

1.3.1 产量 小麦在收获期单作和套作的收获面积均为 4.8 m²(相邻的 8 行 3 m 长的小麦样段),分行进行人工收割,风干后装袋脱粒测产,计算单位面积产量时籽粒含水率为 13%。玉米在收获期单作和套作的收获面积均为 6 m²(相邻的 4 行 2 m 长

的玉米样段),分行单独收割装袋,风干后脱粒测产,计算单位面积产量时籽粒含水率为 13%。

1.3.2 作物耗水量(ET) 采用土壤水平衡法计算。可根据式(1)计算。

$$ET = \Delta W + P + I - R$$
 (1)

式中,ET 为耗水量(mm),ΔW 为计算时段初和时段末土壤储水量之差(mm),P 为降水量(mm),I 为灌溉量,R 为地表径流量。在本试验条件下无灌溉,地块很少发生地表径流,因此忽略不计。

土壤储水量采用式(2) 计算。

$$W = \rho \times h \times w \times 10$$
 (2)

式中,W 为土壤贮水量(mm),ρ 为土壤容重(g·cm⁻³),h 为土层厚度(cm),w 为土壤水分含量(%)。

土壤水分含量采用烘干法进行测定,测定深度为 0 ~ 200 cm 土层,每 10 cm 一个土层。单作处理,在各小区单作作物的中间选取 2 个点进行测定,套作系统分别在小麦带中间、玉米带中间和小麦玉米之间布设 3 点测定,三点保持在同一直线上,每个点重复取土样两次。土样在 105℃ 温度下烘干至恒重后测定干重,然后计算土壤含水量,并根据土壤容重换算为体积含水量。

土壤含水量根据式(3) 计算。

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\%$$
 (3)

其中,w 为土壤含水量(%),W₁ 为烘干前土壤质量(g),W₂ 为烘干后土壤质量(g)。

1.3.3 相对竞争力 套作群体中作物之间的竞争能力用作物竞争力(Aggressivity)^[13] 表示,采用式(4)计算。

$$A_{WM} = \frac{Y_{IW}}{Y_{SW} \cdot P_W} - \frac{Y_{IM}}{Y_{SM} \cdot P_M}$$
 (4)

式中,A_{WM} 表示套作小麦相对于套作玉米的竞争力;Y_{IW} 和 Y_{SW} 分别为套作小麦和单作小麦的产量(t·hm⁻²),Y_{IM} 和 Y_{SM} 分别为套作玉米和单作玉米的产量(t·hm⁻²)。P_M 和 P_W 分别为小麦和玉米在套作群体中所占的种植比例,本试验中 P_M = 0.543,P_W = 0.457。A_{WM} > 0 时表示小麦在套作群体中相对于玉米处于竞争优势,反之则处于竞争劣势。

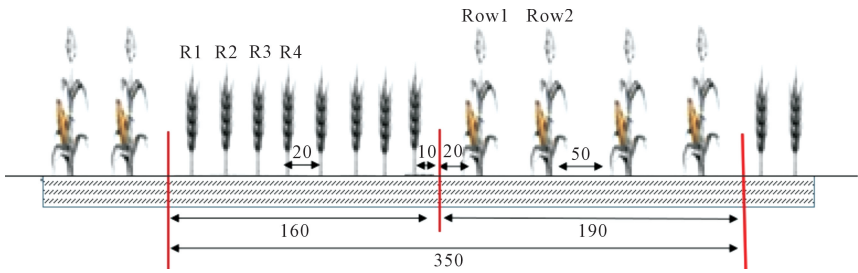


图 2 套作处理田间示意图/cm

Fig.2 Layout of wheat-maize intercropping treatment in field

1.3.4 水分利用效率(*WUE*) 采用式(5) 计算。

$$WUE = \frac{Y}{WU} \tag{5}$$

式中,*WUE* 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$),*Y* 为
单位面积的籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),*WU* 为耗水
量(mm)。

Morris 等^[14] 提出用 ΔWU 、 ΔWUE 来评估间
(套) 作系统相对于单作系统的耗水量及水分利用
效率优势。

$$\Delta WU = \frac{WU_{IC}}{P_W \cdot WU_{SW} + P_M \cdot WU_{SM}} - 1 \tag{6}$$

$$\Delta WUE = \frac{WUE_{IC}}{P_W \cdot WUE_{SW} + P_M \cdot WUE_{SM}} - 1 \tag{7}$$

式中,*WU_{IC}*、*WU_{SW}* 及 *WU_{SM}* 分别为套作群体、单作小
麦及单作玉米的耗水量,*WUE_{IC}*、*WUE_{SW}* 及 *WUE_{SM}*
分别为套作群体、单作小麦及单作玉米的水分利用效
率,其余符号意义同公式(4)。 $\Delta WU < 0$ 表明套作
系统耗水量小于单作系统的加权平均值,反之则大
于单作系统的加权平均值; $\Delta WUE < 0$,表明套作系
统的水分利用效率小于单作系统的加权平均值,反
之则大于单作系统的加权平均值。

1.3.5 土地当量比 套作群体的产量优势通常采
用土地当量比(*LER*) 表示。

$$LER = \frac{Y_{IW}}{Y_{SW}} + \frac{Y_{IM}}{Y_{SM}} \tag{8}$$

式中,*Y_{IW}* 和 *Y_{SW}* 分别为套作小麦和单作小麦的产
量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$);*Y_{IM}* 和 *Y_{SM}* 分别为套作玉米和单作玉米
的产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。当 *LER* > 1 时表示套作具有产量
优势,反之则说明套作相对于单作没有产量优势。

1.3.6 氮肥偏生产力(*NPFP*) 采用式(9) 计算。

$$NPFP = \frac{Y_N}{N} \tag{9}$$

式中,*Y_N* 为施氮区籽粒产量(kg),*N* 为施氮区施氮
量(kg)。

1.3.7 氮肥农学利用率(*NAE*) 采用式(10) 计算。

$$NAE = \frac{Y_N - Y_0}{N} \tag{10}$$

式中,*Y_N* 为施氮区籽粒产量(kg),*Y₀* 为不施氮区籽
粒产量(kg),*N* 为施氮区施氮量(kg)。

1.4 数据分析

本试验采用 Excel 2016 对原始数据进行初步整
理,采用 SPSS 20 软件对数据进行方差分析、相关性
分析和显著性检验,采用 Origin 2016 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下小麦/玉米套作群体产量与土
地当量比

2.1.1 产量 表 2 显示不同施氮水平下单作和套
作作物的产量,2018—2019 年小麦产量相比 2019—
2020 年显著增加($P < 0.05$),而玉米的产量降低($P < 0.01$),在两年试验期内表现出显著的年际差异。各
施氮水平下套作小麦的产量均显著高于单作小麦,
具体表现为套作小麦的产量与单作小麦相比,
2018—2019 年 *N0*、*N1* 及 *N2* 水平下分别提高
25.69%、24.80% 及 25.40%,在 2019—2020 年分别
提高 21.34%、24.69% 及 27.80%。就玉米而言,其产
量表现受到氮肥供应的影响,在 *N0* 与 *N1* 水平下,
套作玉米的产量表现出减产劣势,其产量较单作玉
米在 2018—2019 年分别降低 6.34% 与 3.02%,在
2019—2020 年分别降低 11.43% 与 3.59%,差异均达
到显著水平($P < 0.05$),而在 *N2* 水平下套作玉米产
量高于单作玉米,在两年内分别提高 4.71% 和
6.24%。在相同种植模式下,施氮显著提高小麦产
量($P < 0.001$),与 *N0* 相比,单作小麦在 *N2* 水平下两
年分别提高 35.38% 和 47.48%,套作小麦在 *N2* 水平
下两年分别提高 35.06% 和 55.36%。施氮对玉米产
量具有明显促进作用($P < 0.05$),单作玉米在 *N2* 水
平下与 *N0* 相比两年分别提高 11.84% 和 18.36%,与
N0 相比,套作玉米在 *N2* 水平下两年分别提高
25.03% 和 41.98%。

表 2 不同施氮水平下作物单作和套作种植的产量
Table 2 Yields of sole and intercropping under different nitrogen treatments/(t·hm⁻²)

年份 Year	施氮水平 Nitrogen rate	小麦 Wheat		玉米 Maize	
		单作 Sole crop	套作 Intercrop	单作 Sole crop	套作 Intercrop
2018–2019	N0	5.06 cB	6.36 cA	8.36 bA	7.83 cB
	N1	6.17 bB	7.70 aA	8.95 abA	8.68 bB
	N2	6.85 aB	8.59 aA	9.35 aA	9.79 aA
2019–2020	N0	4.17 cB	5.06 cA	8.66 cA	7.67 cB
	N1	5.71 bB	7.12 bA	9.18 bA	8.85 bB
	N2	6.15 aB	7.86 aA	10.25 aB	10.89 aA
ANOVA					
年份 Year (Y)			0.031		0.007
施氮 Nitrogen (N)			<0.001		0.012
种植模式 Planting system (P)			<0.001		0.028
年份×施氮水平 Y×N			0.654		0.482
年份×种植模式 Y×P			0.043		0.126
种植模式×施氮水平 P×N			0.259		0.037
年份×施氮水平×种植模式 Y×P×N			0.835		0.536

注:同行不同大写字母代表单作和套作种植产量差异显著($P<0.05$),同列中不同小写字母表示施氮对产量的影响显著($P<0.05$)。单作作物和套作作物的产量均在同等土地面积的基础上计算得出。

Note: Different capital letters indicate significant differences under the same nitrogen between sole crop and intercrop ($P<0.05$); Different lowercases represent significant differences between different nitrogen ($P<0.05$). The values for the intercropped wheat and maize are on an equivalent basis of comparable land area of the sole crops.

2.1.2 土地当量比 由图 3 可以看出两年试验期内,在雨养条件下小麦/玉米套作系统土地当量比(LER)为 1.04~1.16,即生产相同产量,单作比套作模式要多占用 4%~16%的耕地。在 3 种施氮水平下土地当量比均大于 1,说明 8:4 这种小麦/玉米带状套作均具有土地利用优势。同时,施氮处理下的土地当量比均大于 N0 处理,表明适当增施氮肥可以促使套作群体发挥更大的土地利用优势。此外,两年内套作小麦的偏土地当量比 $PLER_w$ (0.55~0.58) 均大于小麦条带在套作群体中的比例 (45.7%);而套作玉米的偏土地当量比 $PLER_m$ 与其在套作群体中所占条带 (54.3%) 相比,两年内均在 N0 与 N1 水平下表现出劣势,为 0.48~0.53,而在 N2 水平下表现出土地利用优势,两年内分别为 0.57 和 0.58,两年内 $PLER_m \leq PLER_w$ 。这说明在小麦/玉米套作种植模式下,套作小麦增产是套作群体具有土地利用优势的主要贡献来源,在 N2 水平下土地利用优势共同来源于套作小麦和套作玉米。

2.1.3 小麦/玉米套作群体产量边行表现 通过比较两年内套作各行小麦和单作小麦行中 1 m 行长的籽粒产量(图 4),发现套作小麦边行显著高于内行和单作行,具体表现为边 1 行和边 2 行增产优势明显,显著高于单作行;而边 3 行和边 4 行之间的差异不显著,同时相较单作行增产也不显著。在 N0、N1 及 N2 3 个施氮水平下,2018—2019 年,边 1 行比单作行分别增产 143.56%、130.09%、125.00%,边 2 行比单作行分别增产 56.43%、50.44%、48.33%;2019—2020 年,在 N0、N1 及 N2 3 个施氮水平下,边 1 行比单作行分别增产 128.57%、115.45%、113.04%,边 2 行比单作行分别增产 74.49%、67.27%、65.21%,两年的差异均达到显著水平($P<0.05$),表明随着施氮水平升高,边行小麦的产量与单作小麦差距减小。

两年内套作边行、内行玉米和单作玉米行中 1 m 行长的籽粒产量比较如图 5 所示,套作边行玉米相较于单作玉米行显著降低,2019—2020 年,在 N0、N1 及 N2 3 个施氮水平下,套作边行玉米 1 m 行长籽粒产量比单作玉米分别降低 16.86%、18.38%和 12.67% ($P<0.05$);而套作内行玉米 1 m 长籽粒产量与单作相比有所提高,在 N0、N1 及 N2 3 个施氮水平下比单作玉米分别增加 6.27%、7.72%和 12.68% ($P<0.05$),说明了玉米在套作系统中劣势主要来源于边行的减产,内行产量的增加减轻了套作对玉米产量造成的不利影响。

氮肥对套作玉米边行、内行和单作行的籽粒产量表现各有不同,两年平均值显示,N1、N2 相较于 N0,使套作边行玉米籽粒产量分别增加 9.61%和 21.56%,使套作内行玉米籽粒产量分别增加了 9.75%和 18.55%,使单作行玉米籽粒产量分别增加 6.67%和 12.08%。由此可见氮肥对套作边行玉米籽粒产量的增加促进作用更大,其次是套作内行玉米,对单作玉米的促进作用最小,且在 N2 水平下促进作用最为明显,这为合理构建套作群体,提高套作体系产量效益提供了可行性。

2.2 套作小麦相对于玉米的种间竞争能力

共生期内小麦相对于玉米的竞争能力(A_{wm})根据套作小麦和套作玉米地上部干物质积累量计算得出。由图 6 可知,两年试验中不同施氮处理下小麦相对于玉米种间竞争能力变化趋势相似,同时套作小麦相对于套作玉米的竞争强度 A_{wm} 随着时间的推进而发生变化, A_{wm} 值在共生期呈现为单峰曲线,至玉米播种后 45~50 d 达到峰值。两年内 3 个施氮水平下的种间竞争能力均大于 0,表明了共生期内小麦的竞争力强于玉米,在小麦/玉米套作系统中,小麦

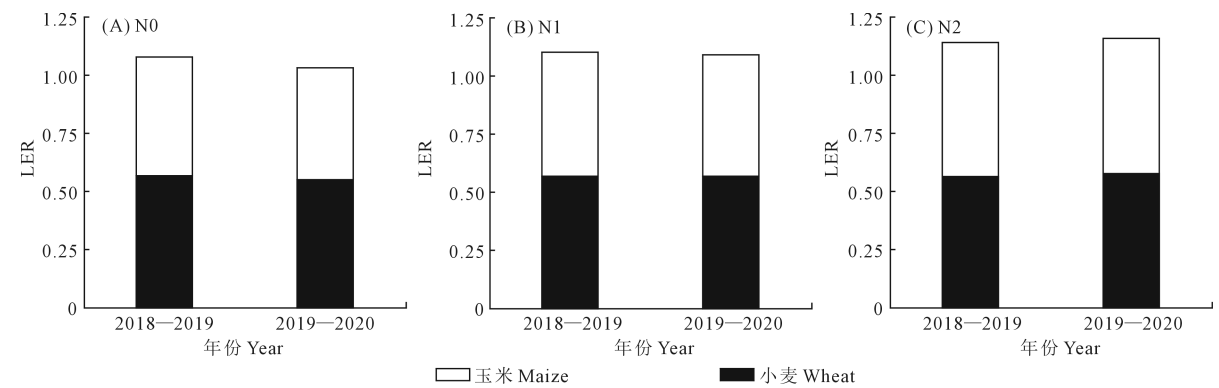


图 3 两年内不同施氮水平下小麦/玉米套作群体的土地当量比 (LER)

Fig.3 LER of wheat/maize intercropping system under different nitrogen levels in two years

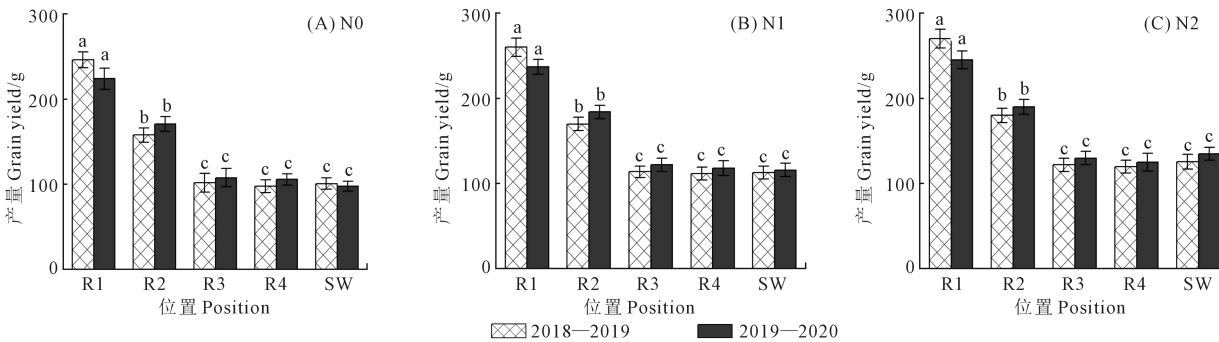


图 4 不同施氮水平下套作小麦不同行与单作小麦籽粒产量的对比 (每米植株产量)

Fig.4 Grain yield at different rows in intercropped wheat and sole wheat under different nitrogen treatments (grain yield per meter)

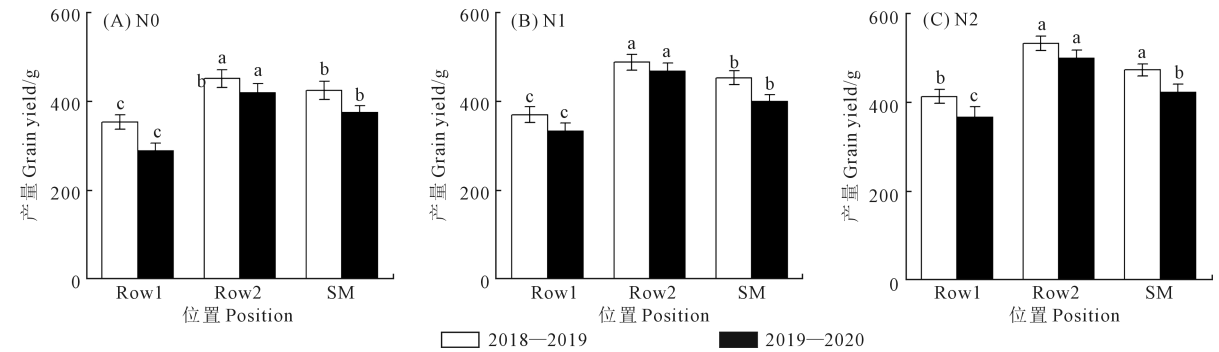


图 5 不同施氮水平下套作玉米不同行与单作玉米产量的对比 (每米植株产量)

Fig.5 Grain yield at different rows in intercropped maize and sole maize under different nitrogen treatments (grain yield per meter)

是优势作物,玉米在与小麦共生期内处于不利地位,施氮对这种竞争力有一定的缓解作用,施氮处理(N1、N2)的 A_{WM} 始终低于不施氮(N0)处理。

2.3 不同施氮水平下小麦/玉米套作系统耗水量与水分利用效率

表 3 显示了两年试验期内从小麦播种至玉米收获后单作系统和套作系统在不同施氮水平下的耗水量(WU)及套作相对于单作耗水量的变化(ΔWU)。同一种植模式中 N2 水平下作物的耗水量

显著高于 N1 与 N0,与 N0 相比,两年内单作小麦耗水量分别增加了 14.72%和 16.78% ($P<0.05$),单作玉米耗水量分别增加 13.01%和 13.55% ($P<0.05$),小麦/玉米套作系统的耗水量分别增加 10.14%和 13.05% ($P<0.05$),达 479.85 mm 和 497.90 mm。两年试验期内小麦/玉米套作系统相对于单作系统的耗水量的变化(ΔWU)均小于 0,说明小麦/玉米套作系统的耗水量均低于单作系统,两年内在 3 个施氮水平下小麦/玉米套作系统的耗水量相比单作系统

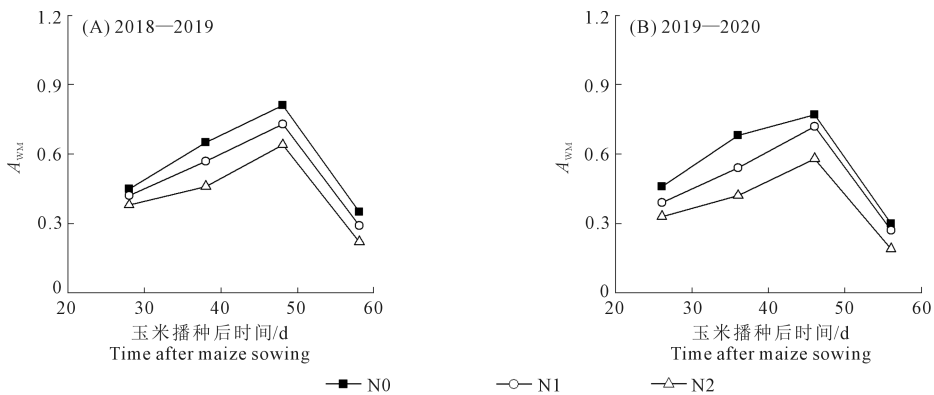


图 6 不同施氮水平下小麦/玉米套作共生期内小麦相对于玉米的种间竞争力(A_{WM})的动态变化

Fig.6 Dynamic aggressivity of wheat relative to maize during the co-growth stage (A_{WM}) under different nitrogen treatments

表 3 不同施氮水平下单作和套作系统的耗水量(WU)及套作系统相对于单作耗水量的变化(ΔWU)

Table 3 Water use and changes in water use of intercropping relative to sole crops under different nitrogen treatments					
年份 Year	施氮水平 Nitrogen rate	WU/mm			$\Delta WU/\%$
		单作小麦 Sole wheat	单作玉米 Sole maize	套作 Inter cropping	
2018–2019	N0	391.16c	483.35c	435.66c	–1.26
	N1	426.58b	525.39b	458.47b	–4.95
	N2	448.72a	546.24a	479.85a	–4.35
2019–2020	N0	377.97c	509.58c	449.27c	–0.04
	N1	415.75b	543.29b	461.65b	–4.82
	N2	441.38a	578.64a	497.90a	–3.49

注:同列的不同小写字母表示不同施氮水平下差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercases in the same column indicate significant differences between different nitrogen levels ($P<0.05$). The same below.

减少0.04%~4.95%。其中在 N1 水平下耗水量减少的最为明显,两年分别减少 4.95%和 4.82%,这意味着在 N1 水平下两年内套作系统比单作系统平均少消耗水分 47.30 mm。在 N0 水平下节水优势不明显,小麦/玉米套作系统的耗水量相比单作系统分别在两年内减少 0.04%和 1.26%,少消耗水分 0.38 mm 和 11.99 mm,在 N2 水平下耗水量两年内分别减少41.41 mm和 33.47 mm。

两年试验期内从小麦播种至玉米收获后单作系统和套作系统在不同施氮水平下的水分利用效率(WUE)及套作相对于单作水分利用效率的变化(ΔWUE)见表 4。同一种植模式中施氮提高了水分利用效率,但在不同施氮水平下差异的显著性表现不一,但均在 N2 水平下作物的水分利用效率达到最高。两年内单作玉米的水分利用效率最高,套作系统的水分利用效率介于单作小麦和单作玉米之间,

表 4 不同施氮水平下单作和套作系统的水分利用效率(WUE)及套作系统相对于单作水分利用效率的变化(ΔWUE)

Table 4 Water use efficiency and changes in water use efficiency of intercropping relative to sole crops under different nitrogen treatments					
年份 Year	施氮水平 Nitrogen rate	$WUE/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1})$			$\Delta WUE/\%$
		单作小麦 Sole wheat	单作玉米 Sole maize	套作 Inter cropping	
2018–2019	N0	12.94c	16.95a	15.73c	2.77
	N1	14.46b	17.03a	16.75b	6.08
	N2	15.27a	17.12a	17.10a	5.12
2019–2020	N0	11.03b	16.67b	14.71b	3.07
	N1	13.73a	16.90b	16.45a	6.46
	N2	14.13a	17.71a	16.82a	5.24

两年内小麦/玉米套作系统相对于单作系统的水分利用效率的变化(ΔWUE)均大于 0,说明了小麦/玉米套作系统的水分利用效率均高于单作系统,小麦/玉米套作系统与单作系统相比具有水分利用优势。两年内在 3 个施氮水平下小麦/玉米套作系统与单作系统相比,其水分利用效率提高了2.77%~6.46%。在 N1 水平下小麦/玉米套作系统相对于单作系统 ΔWUE 最大,两年内均值达到6.27%,而在 N0 水平下水分利用优势最小。

2.4 不同施氮水平下小麦/玉米套作系统的氮肥偏生产力和氮肥农学利用率

两年试验期内小麦/玉米套作系统在不同施氮水平下的氮肥偏生产力(NPFP)和氮肥农学利用率(NAE)如表 5 所示。从表中得知,套作种植可以显著提高小麦的氮肥偏生产力($P<0.05$),而套作玉米的氮肥偏生产力仅在 N2 处理下高于单作玉米。两年内,随着施氮量的增加小麦和玉米的氮肥偏生产力均显著降低,小麦氮肥偏生产力在套作种植模式的 N1 处理下最高,两年分别为 64.17 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 59.33 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而玉米在单作种植模式的 N1 处理

下最高,两年分别为 49.72 kg · kg⁻¹ 和 51.00 kg · kg⁻¹。套作小麦和套作玉米的氮肥农学利用率均高于相应单作,这表明套作种植可以提高作物的氮肥农学利用率,且两年内套作和单作小麦的氮肥农学利用率的差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。2019—2020 年套作玉米的氮肥农学利用率显著高于单作玉米,而在 2018—2019 年两者并无显著差异。

表 5 不同施氮水平下小麦/玉米套作系统的氮肥偏生产力 (NPFP) 和氮肥农学利用率 (NAE)

Table 5 Nitrogen partial productivity (NPFP) and nitrogen agronomic utilization efficiency (NAE) of wheat/maize intercropping system under different nitrogen application levels

年度 Year	施氮水平 Nitrogen rate	种植模式 Planting pattern	NPFP/(kg · kg ⁻¹)		NAE/(kg · kg ⁻¹)	
			小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize
2018—2019	N0	单作 Sole crop				
		套作 Intercrop				
	N1	单作 Sole crop	51.42bB	49.72aA	9.25abA	3.28aA
		套作 Intercrop	64.17aA	48.22aA	11.17aA	4.72aA
	N2	单作 Sole crop	28.54dB	25.97bA	7.46bB	2.75aB
		套作 Intercrop	35.79cA	27.19bA	9.29abA	5.44aA
2019—2020	N0	单作 Sole crop				
		套作 Intercrop				
	N1	单作 Sole crop	47.58bB	51.00 aA	12.83 bB	2.89cB
		套作 Intercrop	59.33 aA	49.17 aA	17.17 aA	6.56 abA
	N2	单作 Sole crop	25.63dB	28.47 bA	8.25 cB	4.42 bcB
		套作 Intercrop	32.75cA	30.25 bA	11.67 bA	8.94 aA

注:同列不同大写字母表示同一施氮水平内单作和套作的差异显著 ($P<0.05$),同列不同小写字母表示同一年内不同施氮水平的差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different capital letters in the same column indicated that there was significant difference between monoculture and interplanting at the same nitrogen application level ($P<0.05$), different lowercase letters in the same column indicate significant differences in the same year ($P<0.05$).

3 讨 论

3.1 不同施氮水平下小麦/玉米套作的产量

套作能够提高作物产量已经得到国内外研究者的广泛证实^[10,15-18]。Gou 等^[19]通过在荷兰的小麦/玉米套作研究发现,小麦和玉米在套作种植模式下的产量均高于单作。而本试验结果表明,两年内套作种植提高小麦产量 21.3%~27.8%,而套作玉米产量表现受氮肥调控,仅在 N2 水平下高于单作玉米。这可能是由于充足的氮能够促进玉米对水分吸收利用,有利于小麦收获后边行玉米的恢复生长,缓解边行减产带来的不良影响。两年试验期内小麦和玉米的产量表现出明显年际差异,2019—2020 年小麦产量较 2018—2019 年产量低,而玉米较 2018—2019 年高,这是由于 2019—2020 年的玉米生育期降水量较 2018—2019 年显著增加,充足的降水和氮肥供应可以充分发挥水氮协同效应,促进玉米更好地生长发育^[20]。

有关套作小麦产量边行表现的相关研究较多^[21-22],均表明边行的产量优势是套作小麦增产的

小麦的氮肥农学利用率随着施氮量的增加显著降低,且在套作种植模式的 N1 处理下达到最高,分别为 11.17 kg · kg⁻¹和 17.17 kg · kg⁻¹;而玉米的氮肥农学利用率仅在 2018—2019 年的单作处理中呈现降低趋势,其余处理中玉米氮肥农学利用率随着施氮量的增加而增加,两年内均在套作种植模式的 N2 处理下达到最高,两年分别为 5.44 kg · kg⁻¹和 8.94 kg · kg⁻¹。

重要因素。胡新元等^[23]等通过在河西绿洲灌区进行不同带型的小麦/玉米套作研究发现,套作小麦的边行效应在 3 行内表现明显,而第 4 行之后基本上无边行优势。这与本试验研究结果略有不同,本试验结果表明套作小麦的边行主要体现在边 1 行和边 2 行,第 3 行之后无显著差异。本试验结果表明玉米在套作群体中表现为产量劣势,主要是由边行减产造成的,而胡新元等^[23]等认为边行玉米较内行玉米增产 1.8%~5.6%,这与本试验结果相反,可能是由于绿洲灌区年降水较少,当地农业生产需补充灌溉以满足植株生长发育,也有研究表明灌溉能够缓解甚至消除套作玉米的边行劣势,并且增强内行优势。在小麦/玉米套作体系中,共生期结束后边行玉米表现出明显劣势,其产量显著低于单作玉米^[24],这与本试验结果相似,小麦/玉米套作群体中玉米在共生期内竞争力弱于小麦,导致前期的生长发育受到限制,直至小麦收获后玉米也未能完全地恢复生长。之前许多研究已经证明套作群体具有产量优势,例如小麦/玉米套作^[10]、糜子/绿豆套作^[15]、玉米/苜蓿^[16]、玉米/大豆^[17]等,然而这些研

究大多数是充分灌溉或补充性灌溉条件下进行,本研究中在雨养条件下的套作群体具有产量与土地优势,这对于具有相似降水量地区的农业发展有一定的参考价值。

3.2 不同施氮水平下小麦/玉米套作的土地利用和水分利用

套作种植能够提高土地利用^[9-10], Zhang 等^[25]在小麦棉花复合系统研究中表明其当地土地当量比(LER)为 1.28~1.39, LER 均大于 1,说明具有土地利用优势,这与本试验结果一致,在半湿润区雨养条件下小麦/玉米套作的土地当量比为 1.04~1.16,这表明半湿润区雨养条件下小麦/玉米套作群体仍可稳定发挥套作优势。也有研究表明,套作种植水分利用效率比相应单作高,但耗水量没有显著差异^[26-27]。与该结果不同,套作系统具有通过增产来提高水分利用的优势,生产相同产量套作群体的耗水量比单作更少,说明套作种植具有水分利用优势^[10,28-30]。套作种植增加了地表覆盖度,可以减少土壤蒸发,增加水分入渗,能改善作物生长环境中的水分状况,进而提升了套作的水分利用优势。王仰仁等^[31]通过 30 余种间套作作物需水量的研究表明,在同等条件下,间套作作物田间耗水量较单作种植减少 7%,大大提高水分利用效率。这与本试验研究结果一致,套作群体具有节水优势和更高的水分利用效率,小麦/玉米套作群体的耗水量与单作种植相比耗水量减少 0.04%~4.95%,同时水分利用效率也提高了 2.77%~6.46%。在雨养农业中,有限的降水常常是制约产量的主要因素,复合群体具有节水和水分利用优势,对促进区域水资源高效持续利用具有一定的理论参考。

4 结 论

1) 小麦/玉米套作具有明显的产量优势和土地利用优势。与单作相比,套作小麦的产量提高了 21.34%~27.80% ($P<0.05$),其产量优势主要来源于边 1 行与边 2 行的增产;而套作玉米表现受氮肥供应的调控,在 N0 与 N1 水平下套作产量减少了 3.02%~11.43%,仅在 N2 水平下高于单作玉米。两年内小麦/玉米套作群体的土地当量比 LER 介于 1.04~1.16,具有土地利用优势。

2) 小麦/玉米套作具有水分利用和养分利用优势。在相同产量下小麦/玉米套作群体比单作群体的耗水量更少而水分利用效率更高,其中在 N1 水平下耗水量减少最为明显,两年内平均少消耗水分 47.30 mm;而水分利用效率比单作系统提高 2.77%

~6.46%,小麦/玉米套作群体在 3 个施氮水平下均表现出节水与水分利用优势。此外,套作种植还可以提高小麦和玉米的氮肥农学利用率以及小麦的氮肥偏生产力,两年内套作小麦的氮肥偏生产力和氮肥农学利用率最高可达 64.17 kg · kg⁻¹ 和 11.17 kg · kg⁻¹。而玉米的氮肥偏生产力以单作最高,故如何提高小麦/玉米套作系统中玉米的产量和氮肥利用,成为进一步提高小麦/玉米套作系统产量的关键。

3) 8:4 小麦/玉米套作种植模式适用于小型播种机的机械化作业。因此,在半湿润区可适当发展施氮处理的套作种植模式,在确保增产稳产的同时实现对土壤、降水及肥料等资源的集约高效利用。

参 考 文 献:

- [1] CAO G L, ZHENG C M, SCANLON B R, et al. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 159-175.
- [2] CHEN J Y, TANG C Y, SHEN Y J, et al. Use of water balance calculation and tritium to examine the dropdown of groundwater table in the piedmont of the North China Plain (NCP) [J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(5): 564-571.
- [3] SINGH P, FLURY M, SCHILLINGER W F. Predicting seed-zone water content for summer fallow in the Inland Pacific Northwest, USA [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 94-104.
- [4] CANN D J, HUNT J R, MALCOLM B. Long fallows can maintain whole-farm profit and reduce risk in semi-arid south-eastern Australia [J]. *Agricultural Systems*, 2020, 178: 102721.
- [5] XIAO D P, SHEN Y J, QI Y Q, et al. Impact of alternative cropping systems on groundwater use and grain yields in the North China Plain region [J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153: 109-117.
- [6] RASEDUZZAMAN M, JENSEN E S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 91: 25-33.
- [7] GAO Y, DUAN A W, SUN J S, et al. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2008, 111(1/2): 65-73.
- [8] 殷文, 赵财, 于爱忠, 等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响 [J]. *作物学报*, 2015, 41(4): 633-641.
- [9] YIN W, ZHAO C, YU A Z, et al. Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4): 633-641.
- [9] WANG Z K, ZHAO X N, WU P T, et al. Border row effects on light interception in wheat/maize strip intercropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 1-13.
- [10] MA L S, LI Y J, WU P T, et al. Effects of varied water regimes on root development and its relations with soil water under wheat/maize intercropping system [J]. *Plant and Soil*, 2019, 439(1): 113-130.
- [11] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 19-26.

- CHAI Q, HU F L, CHEN G P. Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 19-26.
- [12] MARTIN-GUAY M O, PAQUETTE A, DUPRAS J, et al. The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 767-772.
- [13] RAO M R, WILLEY R W. Evaluation of yield stability in intercropping: studies on sorghum/pigeonpea [J]. Experimental Agriculture, 1980, 16(2): 105-116.
- [14] MORRIS R A, GARRITY D P. Resource capture and utilization in intercropping: water [J]. Field Crops Research, 1993, 34 (3/4): 303-317.
- [15] 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[J].中国农业科学,2019,52(22):4139-4153.
- 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[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 4139-4153.
- [16] SUN T, LI Z Z, WU Q, et al. Effects of alfalfa intercropping on crop yield, water use efficiency, and overall economic benefit in the Corn Belt of Northeast China [J]. Field Crops Research, 2018, 216: 109-119.
- [17] DU J B, HAN T F, GAI J Y, et al. Maize-soybean strip intercropping: achieved a balance between high productivity and sustainability [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(4): 747-754.
- [18] 李隆,杨思存,孙建好,等.小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用[J].应用生态学报,1999,10(2):70-73.
- LI L, YANG S C, SUN J H, et al. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, (2): 70-73.
- [19] GOU F, VAN ITTERSUM M K, WANG G Y, et al. Yield and yield components of wheat and maize in wheat-maize intercropping in the Netherlands[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 76: 17-27.
- [20] 王小彬,代快,赵全胜,等.农田水氮关系及其协同管理[J].生态学报,2010,30(24):7001-7015.
- WANG X B, DAI K, ZHAO Q S, et al. Opinions on water-nitrogen relations and their synergic management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 7001-7015.
- [21] GAO Y, WU P T, ZHAO X N, et al. Growth, yield, and nitrogen use in the wheat/maize intercropping system in an arid region of north-western China[J]. Field Crops Research, 2014, 167: 19-30.
- [22] LI Y J, MA L S, WU P T, et al. Yield, yield attributes and photosynthetic physiological characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) /maize (*Zea mays* L.) strip intercropping [J]. Field Crops Research, 2020, 248: 107656.
- [23] 胡新元,郭天文,邱进怀,等.河西绿洲灌区小麦/玉米带田高效种植方式研究[J].甘肃农业科技,2001,(5):11-13.
- HU X Y, GUO T W, QIU J H, et al. Research on high-returning-multi-cropping (wheat/maize) pattern in irrigation district of Hexiaoasis [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2001, (5): 11-13.
- [24] LI L, SUN J H, ZHANG F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting [J]. Field Crops Research, 2001, 71 (3): 173-181.
- [25] ZHANG L, VAN DER WERF W, ZHANG S, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2007, 103(3): 178-188.
- [26] 柴强,杨彩红,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):105-110.
- 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): 105-110.
- [27] 张凤云,吴普特,赵西宁,等.间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J].应用生态学报,2012,23(5):1400-1406.
- ZHANG F Y, WU P T, ZHAO X N, et al. Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1400-1406.
- [28] 柴强,杨彩红,黄高宝.交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响[J].作物学报,2011,37(9):1623-1630.
- CHAI Q, YANG C H, HUANG G B. Water use characteristics of alternately irrigated wheat/maize intercropping in oasis region of north-western China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(9): 1623-1630.
- [29] 李恩慧,穆阳阳,何亚男,等.小麦和苜蓿套作种植对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):54-58, 65.
- LI E H, MU Y Y, HE Y N, et al. Effects of wheat/alfalfa intercropping systems on soil moisture and water utilization efficiency [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 54-58, 65.
- [30] 彭霄,蒲甜,杨峰,等.灌水时间和灌水比例对单套作玉米产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2019,52(21):3763-3772.
- PENG X, PU T, YANG F, et al. Effects of irrigation time and ratio on yield and water use efficiency of maize under monoculture and intercropping [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (21): 3763-3772.
- [31] 王仰仁,杨丽霞.作物组合种植的需水量研究[J].灌溉排水,2000,19(4):64-67.
- WANG Y R, YANG L X. Study on crop water requirement under intercropping [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19(4): 64-67.