

孙翔龙, 冯良山, 杨宁, 等. 辽西半干旱区玉米花生间作对不同降水年型下产量与水分利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(5): 530-537.

SUN Xianglong, FENG Liangshan, YANG Ning, et al. Effects of maize and peanut intercropping on yield and water use efficiency under different precipitation years in semi-arid region of western Liaoning[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(5): 530-537.

辽西半干旱区玉米花生间作对不同降水年型下产量与水分利用效率的影响

孙翔龙^{1a}, 冯良山², 杨宁^{1b}, 张诗行², 夏桂敏^{1a}

(1. 沈阳农业大学 a. 水利学院, b. 植物保护学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁省农业科学院, 沈阳 110161)

摘要: 针对辽西半干旱地区降雨不足、水资源分布不均等问题, 筛选出更具有韧性的适应气候变化的种植模式, 通过田间试验, 以玉米(MS)和花生(PS)单作为对照, 研究玉米花生2行/2行(M2P2)、玉米花生4行/4行(M4P4)和玉米花生8行/8行(M8P8)这3种间作种植模式对不同降水年型下的产量和水分利用效率的影响。结果表明: 不同降水年型中玉米花生间作LER均大于1, 3年M2P2、M4P4和M8P8处理土地当量比(land equivalent ratio, LER)分别为1.02~1.08, 1.10~1.15, 1.07~1.08, 表明能够提高农田的生产力。随着间作条带宽度增加, 玉米的间作优势和花生的间作劣势均减弱。玉米具有边行优势, 花生则存在边行劣势, 同一间作处理中边1行玉米产量显著高于其他边行和玉米单作, 边1行花生产量则显著低于其他边行和花生单作。发挥玉米的边行优势, 降低花生的边行劣势, 是实现玉米花生间作高产高效的重要途径。玉米花生间作具有稳产性, 其主要原因是不同降水年型的间作玉米产量以及收获指数差异不显著。随着间作带幅变小间作玉米收获指数、单位面积穗数、穗粒数和百粒重有增加趋势, 而间作花生则下降。不同降水年份间, 玉米单位面积穗数和穗粒数、花生单位面积荚数和荚粒数差异显著, 玉米和花生百粒重差异不显著。不同降水年型中M4P4的LER和WER均最高(1.09~1.15), 是适宜在辽西半干旱地区的间作种植模式。

关键词: 玉米花生间作; 抗旱稳产; 水分利用效率; 不同降水类型; 辽西半干旱区

中图分类号: S

文章编号: 1000-1700(2024)05-0530-08

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Maize and Peanut Intercropping on Yield and Water Use Efficiency under Different Precipitation Years in Semi-arid Region of Western Liaoning

SUN Xianglong^{1a}, FENG Liangshan², YANG Ning^{1b}, ZHANG Shihang², XIA Guimin^{1a}

(1.a. College of Water Conservancy College, 1.b. College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient rainfall and unequal distribution of water resources in the semi-arid region of western Liaoning, a more resilient planting model adapted to climate change was selected. This study conducted field experiments and compared with maize (MS) and peanut (PS) as the control, the effects of intercropping patterns of maize peanut 2 rows /2 rows (M2P2), maize peanut 4 rows /4 rows (M4P4) and maize peanut 8 rows /8 rows (M8P8) on yield and water use efficiency in different precipitation years were studied. The three-year M2P2, M4P4 and M8P8 treatment LER were 1.02-1.08, 1.10-1.15 and 1.07-1.08, respectively. Research has shown that intercropping of maize and peanut has

收稿日期: 2024-08-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071551); 国家重点研发计划项目(2023YFD1500900); 沈阳市重点研发计划项目(23-409-2-06)

第一作者: 孙翔龙(1995-), 男, 博士研究生, 从事农业高效用水与生态环境研究, E-mail: sunxl828@163.com

通信作者: 夏桂敏(1973-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事农业与生态节水理论及技术研究, E-mail: xiagm1229@126.com

increased the productivity in different precipitation years ($LER>1$). As the intercropping stripes turned widened, the intercropping advantages of maize and the intercropping disadvantages of peanut were both weakened. Maize had edge row advantages in the intercropping system, while peanuts had edge row disadvantages. In the same intercropping treatment, the maize yield per plant in edge row was significantly higher than that in other rows and sole-cropped maize, while the peanut yield per plant in edge row was significantly lower than that in other rows and sole-cropped peanut. Increasing the edge row advantage of maize and reducing the edge row disadvantage of peanut are important ways to achieve high yield and efficiency in maize and peanut intercropping system. Maize was the main factor for stable production in the intercropping of maize and peanut, and there was no significant difference in maize yield and harvest index in different precipitation year types. As the intercropping stripes turned narrower, the harvest index, number of ears per unit area, number of grains per ear, and hundred grain weight of intercropped maize showed an increasing trend, while these were the opposite in intercropping peanut. There were significant differences in the number of ears and grains per unit area of maize and the number of pods and grains per unit area of peanut in different precipitation years, while there was no significant difference in the hundred grain weight of maize and peanut. The LER and WER of M4P4 were the highest (1.09–1.15) among different precipitation year types. Intercropping pattern suitable for semi-arid area of Western Liaoning.

Key words: corn peanut intercropping; drought resistant and stable production; water use efficiency; different precipitation types; semi-arid region of Western Liaoning

随着全球气候变暖,旱灾等自然灾害逐渐增多,给农业生产和农民收入带来了严重的损失,人们更期望构建具有干旱等逆境适应“弹性”的种植模式,以保障农业稳产^[1]。间作是指在同一块田地里同时种植两种或两种以上作物的种植模式^[2-3]。相关研究证明,干旱等逆境发生时适宜的间作模式,通过增加农田系统的生物多样性有利于提高逆境条件下的水分利用效率和生产能力,增强系统对干旱逆境的适应“弹性”^[4]。只有适宜的间作组合才能实现间作系统增产增效^[5-6]。例如,适宜冠层结构的作物组合^[7-8],根系深浅搭配的作物组合^[9-10]及生长期错位的作物组合^[11-12],能更好地利用作物间作在时间和空间上的互补优势,从而提高系统的产量和水分利用效率。

辽西半干旱区地处科尔沁沙地南部,区域年降水量仅350~500 mm,且年际间变化较大,导致作物产量不高和年际间波动较大。区域主要作物是玉米和花生。玉米是重要的粮食作物,虽然水分利用效率较高,但高大的植株和剧烈的蒸腾蒸发导致玉米绝对需水量大^[13],因此,玉米单一种植水分需求很难得到满足。花生是高效益的经济作物,与玉米相比需水量较少,具有较强的抗旱能力^[14]。玉米与花生间作存在种间互补性,有利于平衡旱地有限的水分供应,协调玉米和花生的水分需求,提高农业生产系统的抗旱能力和生产力^[15],因此玉米花生间作已经成为区域重要的耕作制度之一,在农业生产中发挥了重要作用,并获得了广泛关注。以往研究表明,与单作相比,玉米与花生间作拥有更加紧密的冠层结构,花生枝叶茂盛、株高较矮,具有良好的地表覆盖作用^[16],不仅可减少边界层扩散阻力和土壤水分蒸发,有利于空气的流动并显著提高作物群体蒸腾效率,更能在玉米和花生冠层分层阻拦减少雨水和灌溉水的深层渗漏和地表径流量,提高土壤蓄水能力和降水的利用率,能显著提高水分利用效率^[17]。玉米和花生间作,还可以错开作物需水关键期、减弱种间竞争,这也是玉米与花生间作水分高效利用的重要原因^[18]。但关于玉米花生间作不同降水年型下生产力和水分利用效率研究较少。本研究通过系统研究不同降水年型下玉米花生间作作物产量、产量性状及水分利用效率,以为区域作物间作种植制度发展提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2021–2023年在辽宁省朝阳市建平县灌溉试验站(41°47′18″N, 119°18′36″E,海拔512 m)进行。区域地位于干旱和半干旱气候之间的过渡地带,属季风大陆性气候,年平均气温7.1℃,有效积温3 200℃,无霜期125~133 d,年平均蒸发量1 800 mm,年平均降水量451.2 mm;春季降水量年际变化

大,干旱频繁。沙质和壤土质地的褐土占主导地位,土壤的最大田间持水量为25.4%,容重为 $1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质含量为1.21%,全氮含量为 $320\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $13.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾含量为 $110.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2021,2022,2023年作物生育期降水量分别为527 mm(丰水年型)、283.6 mm(平水年型)和233.7 mm(干旱年型)。

1.2 试验设计

玉米和花生品种分别为郑单958和白沙1016,试验设5个处理,分别为玉米单作(MS)、花生单作(PS)、2行花生2行玉米间作(M2P2)、4行花生4行玉米间作(M4P4)、8行花生8行玉米间作(M8P8)。每种处理重复4次。每个小区面积为 200 m^2 ($10\text{ m}\times 20\text{ m}$)。种植行向为南北,行距50 cm。玉米种植密度 $67\ 300\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,花生种植密度 $268\ 000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2021,2022,2023年播种日期分别为5月12日、5月13日和5月15日,收获日期分别为9月30日、9月29日和10月2日。

1.3 调查内容与方法

1.3.1 作物干物质积累量 作物收获时测定20株玉米和 1 m^2 花生干物质积累量。

1.3.2 作物产量 作物收获后,各小区单打单收测定小区产量,同时选取3 m长代表性边行,测定各处理不同边行作物产量,并各取20穗玉米和 1 m^2 花生风干后进行室内考种。

1.3.3 土壤水分 作物播种前和收获后采用土钻法测定0~100 cm土壤含水量,每10 cm为一个土壤层次。

1.4 数据处理

1.4.1 土地当量比 土地当量比(land equivalent ratio, *LER*)是指同一农田中两种或两种以上作物间作时的产量与各个作物单作时的产量之比,表示获得相同产量单作种植需要的土地与间作的比值,用来评价间作种植土地利用效率的重要指标^[14]。

$$LER = LER_A + LER_B = \frac{Y_{\text{int},A}}{Y_{\text{mono},A}} + \frac{Y_{\text{int},B}}{Y_{\text{mono},B}} \quad (1)$$

式中: $Y_{\text{int},A}$ 和 $Y_{\text{int},B}$ 是作物A和B间作时的产量; $Y_{\text{mono},A}$ 和 $Y_{\text{mono},B}$ 是作物A和B单作时的产量; LER_A 和 LER_B 是作物A和B的偏土地当量比。若 LER 大于1,即表示间作比单作土地利用效率高。

1.4.2 水分利用效率 水分利用效率(water use efficiency, *WUE*)指单位体积水生产的作物产量,如式(2)。

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中: Y 为玉米单位面积产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); ET 为作物全生育期内总需水量(mm)。

1.4.3 水分当量比 间作系统水分利用效率采用水分当量比(water equivalent ratio, *WER*)进行评价^[19]。*WER*表示获得相同产量作物单作种植需要的水量与间作的比值,若 WER 大于1,即表示间作比单作水分利用效率高;小于1则说明间作水分利用效率低于单作。

$$WER = WER_A + WER_B = \frac{(Y_{\text{int},A}/WU_{\text{int}})}{(Y_{\text{mono},A}/WU_{\text{mono},A})} + \frac{(Y_{\text{int},B}/WU_{\text{int}})}{(Y_{\text{mono},B}/WU_{\text{mono},B})} = \frac{WUE_{\text{int},A}}{WUE_{\text{mono},A}} + \frac{WUE_{\text{int},B}}{WUE_{\text{mono},B}} \quad (3)$$

式中: WU_A 和 WU_B 是作物A和B单作的水分利用效率; $WU_{\text{int},A}$ 和 $WU_{\text{int},B}$ 是作物A和B间作的水分使用量。*WUE*是由作物A和作物B的各自产量与整体的水分消耗计算而来,这与计算 LER 类似。

1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2010进行分析,采用DPS 9.01对数据进行显著分析($p<0.05$),采用Origin 2024进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同间作模式作物产量与土地当量比

对2021-2023年作物产量进行研究,结果表明种植模式会显著影响产量(表1),几种玉米花生间作模式 LER 均大于1,说明玉米花生间作能够提高农田的生产力,总体上,M4P4的土地当量比最高(1.10~1.15),其次为M8P8(1.07~1.08),M2P2相对较低(1.02~1.06)。间作模式中玉米产量随着间作带幅变小产量提高,花生随着间作带幅变小产量降低。2023年为干旱年型,土地当量比相对其他年份较

高,说明玉米花生间作在干旱年型优势更明显。在间作系统中,玉米相对产量($pLER$)均高于其在间作系统中的占比,表明玉米具有显著间作优势,其中M2P2和M4P4的玉米产量均高于M8P8。单作玉米产量在不同年份之间存在显著差异,说明区域单作玉米受气候影响较大,而间作玉米在不同年份间差异不显著,说明间作种植对玉米具有稳产作用。花生相对产量显著低于其在间作系统中的占比,表明花生在间作系统中为劣势作物,M2P2花生产量显著低于M4P4和P8P8花生产量。花生无论单作还是间作不同年份间产量均有显著变化,说明相对玉米,间作花生并不具有稳产效果。

表1 作物产量与土地当量比

Table 1 Crops yield and land equivalent ratio

年份 Year	种植模式 Planting system	玉米产量/(g·m ⁻²) Maize yield		花生产量/(g·m ⁻²) Peanut yield		$pLER_m$	$pLER_p$	LER
		间作 Intercropping	单作 Sole	间作 Intercropping	单作 Sole			
		2021	M2P2	726 ^a				
	M4P4	686 ^b	1 073	212 ^a	456	0.64 ^{ab}	0.46 ^a	1.10 ^a
	M8P8	653 ^c		216 ^a		0.61 ^b	0.47 ^a	1.08 ^a
2022	M2P2	663 ^a		110 ^b		0.67 ^a	0.36 ^b	1.03 ^b
	M4P4	660 ^a	956	135 ^b	333	0.65 ^a	0.44 ^a	1.09 ^a
	M8P8	572 ^b		161 ^a		0.60 ^b	0.47 ^a	1.07 ^a
2023	M2P2	638 ^a		102 ^c		0.77 ^a	0.29 ^c	1.06 ^b
	M4P4	618 ^b	861	134 ^a	356	0.77 ^a	0.38 ^b	1.15 ^a
	M8P8	564 ^c		143 ^a		0.65 ^b	0.45 ^a	1.10 ^b
平均值 Mean	M2P2	676 ^a		123 ^c		0.70 ^a	0.33 ^b	1.03 ^b
	M4P4	655 ^b	963	160 ^b	382	0.68 ^a	0.43 ^a	1.11 ^a
	M8P8	596 ^c		173 ^a		0.62 ^b	0.46 ^a	1.08 ^a
	处理 Treatment	0.041	-	0.035	-	0.036	0.033	0.044
p	年份 Year	0.058	0.017	0.043	0.035	0.186	0.179	0.098
	处理×年份 Treatment×Year	0.415	-	0.218	-	0.435	0.384	0.462

注:不同小写字母表示同一年不同种植模式间差异显著($p<0.05$),下同。

Note: The different lowercase letters indicates significant difference in different planting systems in the same year ($p<0.05$), the same below.

2.2 不同间作模式收获指数

不同处理玉米和花生的收获指数如图1,单作玉米的收获指数(0.45~0.48)低于间作玉米(0.48~0.56),单作花生的收获指数(0.46~0.49)高于间作花生(0.28~0.44)。间作玉米总体上随着间作带幅的

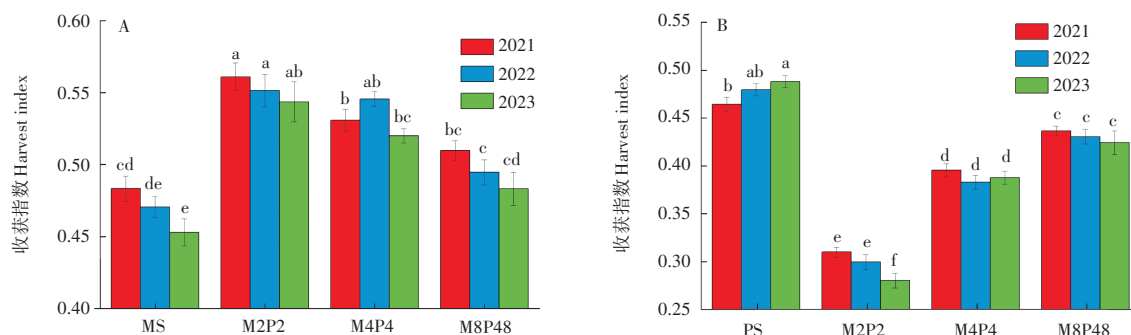


图1 不同种植模式玉米和花生收获指数

Figure 1 Harvest index of maize and peanut in different planting system

变小收获指数有所提高,间作花生随着间作带幅的变小收获指数有所下降。干旱年型单作玉米收获指数显著低于丰水年型,但间作玉米相同间作模式下丰水年型、平水年型和干旱年型收获指数差异不显著。干旱年型的单作花生收获指数高于丰水年型,说明一定程度下干旱有利于提高单作花生收获指数,M4P4和M8P8收获指数年际间差异不显著,M2P2干旱年型收获指数低于丰水年型和平水年型,这可能由于干旱年型受玉米的水分竞争胁迫导致。

2.3 不同间作模式作物产量性状

因为玉米花生间作会降低玉米和花生在单位面积内的种植密度,因此,间作条件下玉米和花生单位面积的穗数和荚数会显著下降(表2)。因为玉米在间作系统中有间作优势,所以随着种植宽幅的变小,单位面积穗数有增加趋势,同时穗粒数和百粒重也有增加趋势。花生在间作条件下呈间作劣势,因此随着间作宽幅的变小,单位面积荚数、荚粒数和百粒重均有下降趋势。不同降水年型间,玉米单位面积穗数和穗粒数、花生单位面积荚数和荚粒数差异显著,说明易受气候环境影响;玉米和花生百粒重差异不显著,说明受环境效应较小。

表2 不同种植模式作物产量性状
Table 2 Crop yield traits in differentment planting systems

年份 Year	种植模式 Planting system	玉米 Maize			花生 Peanut		
		穗数/(ears·m ⁻²) Ear number	穗粒数/(kernels·ear ⁻¹) Kernel number	百粒重/g 100-kernal weight	荚数/(pods·m ⁻²) Pod number	荚粒数/(seed·pod ⁻¹) Seed number	百粒重/g 100-seed weight
2021	M2P2	3.49 ^b	622 ^a	33.4 ^a	81.7 ^c	1.74 ^c	105.1 ^b
	M4P4	3.43 ^{bc}	579 ^b	32.7 ^b	105.8 ^b	1.81 ^b	109.8 ^b
	M8P8	3.39 ^c	595 ^c	32.0 ^c	109.5 ^b	1.83 ^b	111.1 ^a
	MS/PS	6.53 ^a	519 ^d	30.1 ^d	220.2 ^a	1.86 ^a	110.8 ^a
2022	M2P2	3.47 ^b	466 ^a	33.3 ^a	75.6 ^d	1.62 ^c	90.0 ^d
	M4P4	3.41 ^b	573 ^a	33.0 ^{bc}	81.5 ^c	1.71 ^b	100.6 ^c
	M8P8	3.32 ^c	556 ^b	31.0 ^c	86.2 ^b	1.76 ^a	102.5 ^b
	MS/PS	6.49 ^a	493 ^c	29.9 ^d	174.3 ^a	1.78 ^a	103.7 ^a
2023	M2P2	3.40 ^b	573 ^a	32.7 ^a	66.2 ^c	1.66 ^c	91.7 ^d
	M4P4	3.33 ^b	568 ^b	32.1 ^a	83.8 ^b	1.67 ^c	94.6 ^c
	M8P8	3.27 ^c	546 ^c	31.5 ^b	85.8 ^b	1.72 ^b	101.3 ^b
	MS/PS	6.28 ^a	465 ^d	29.5 ^c	184.8 ^a	1.83 ^a	104.1 ^a
平均值 Mean	M2P2	3.45 ^b	592 ^a	30.0 ^a	74.5 ^d	1.68 ^c	95.6 ^c
	M4P4	3.39 ^{bc}	583 ^a	32.6 ^{ab}	90.4 ^c	1.73 ^b	101.6 ^b
	M8P8	3.32 ^c	566 ^b	31.5 ^b	93.9 ^b	1.77 ^{ab}	105.0 ^a
	MS/PS	6.43 ^a	492 ^c	29.9 ^c	193.1 ^a	1.82 ^a	106.2 ^a
	处理 Treatment	0.000	0.001	0.012	0.005	0.000	0.002
<i>p</i>	年份 Year	0.002	0.010	0.752	0.013	0.008	0.083
	处理×年份 Treatment×Year	0.576	0.352	0.088	0.636	0.004	0.002

2.4 不同间作模式边行产量效应

边行效应是间作系统增产增效的重要原因。对玉米花生不同边行的作物产量进行测定(图2)。玉米具有边行优势,在相同间作处理中边1行的玉米产量显著高于其他边行及单作产量。花生则存在边行劣势,相同间作处理中边1行花生产量则显著低于其他边行和花生单作。因此,要实现玉米花生间作高产高效,需要更多发挥玉米的边行优势,而降低花生的边行劣势。2021-2023年,M2P2、

M4P4、M8P8 边行单株产量分别为 194~222, 190~217, 183~209 g, 玉米单作为 149~166 g, M2P2、M4P4、M8P8 边行花生单株产量分别为 7.72~11.7, 8.66~13.7, 9.34~14.8 g, 花生单作为 12.4~17.3 g。

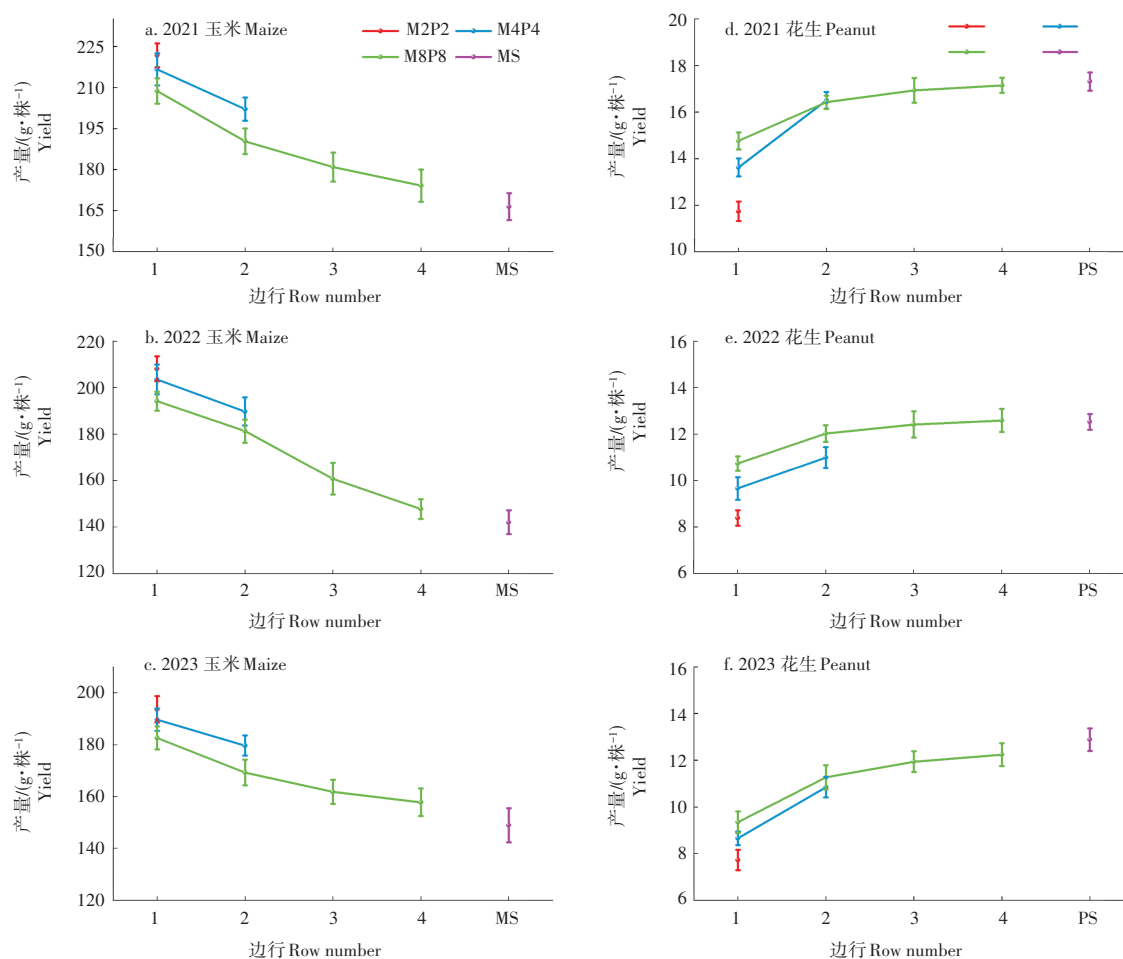


图2 玉米花生不同边行产量效应(2021-2023年)

Figure 2 Yield of each row of maize and peanut in intercropping(2021-2023)

2.5 不同间作模式水分利用效率

通过对玉米和花生间作水分利用效率进行分析(表3),由于间作系统单一作物种植密度降低,间作种植玉米和花生的水分利用效率均低于单作。间作玉米水分利用效率随着间作条带宽幅的增加呈下降趋势,间作花生则随着间作条带宽幅的增加呈上升趋势。水分当量比(WER)是评价间作系统水分利用情况的直接指标,M2P2玉米偏水分当量比(WER_m)在不同年份始终较高,M8P8始终较低,但M2P2花生偏水分当量比(WER_p)始终相对较低,M8P8始终较高。从整体分析,M4P4的WER在不同年份始终较高,M2P2则始终相对较低。其中,2021年为丰水年,2022年为平水年,M4P4和M8P8的WER差异不显著,2023年为干旱年,M4P4的WER高于M8P8,说明几种种植模式中M4P4的水分利用效率最高。

3 讨论与结论

间作系统主要通过不同作物在时间和空间上的合理配置来高效利用自然资源,进而提高土地生产力和稳产性^[20-22]。本项研究表明,玉米花生间作LER均大于1,说明玉米花生间作是一种互惠的种植模式,能够提高农田的生产力,这与以往的研究结果一致^[23]。在干旱年型间作优势更为明显,说明玉米花生间作具有一定稳产性。以往研究表明其原因可能主要包括两个方面,一方面玉米花生间作

表3 玉米花生不同种植模式水分利用效率和水分当量比

年份 Year	种植模式 Cropping system	水分利用效率/(g·m ⁻² ·mm ⁻¹) WUE		玉米偏水分当量比 WER _m	花生偏水分当量比 WER _p	水分当量比 WER
		WUE _m	WUE _p			
2021	M2P2	1.70 ^b	0.38 ^c	0.73 ^a	0.34 ^b	1.07 ^b
	M4P4	1.59 ^c	0.50 ^b	0.69 ^b	0.45 ^a	1.14 ^a
	M8P8	1.53 ^c	0.51 ^b	0.66 ^b	0.46 ^a	1.12 ^a
	单作 Sole	2.31 ^a	1.11 ^a			
2022	M2P2	2.27 ^b	0.39 ^c	0.76 ^a	0.36 ^c	1.13 ^b
	M4P4	2.22 ^b	0.48 ^{bc}	0.75 ^a	0.45 ^b	1.19 ^a
	M8P8	1.91 ^c	0.59 ^b	0.64 ^b	0.54 ^a	1.18 ^a
	单作 Sole	2.96 ^a	1.08 ^a			
2023	M2P2	2.36 ^a	0.39 ^c	0.77 ^a	0.28 ^b	1.05 ^b
	M4P4	2.25 ^a	0.51 ^b	0.74 ^a	0.36 ^a	1.10 ^a
	M8P8	2.04 ^b	0.54 ^b	0.67 ^b	0.39 ^a	1.06 ^b
	单作 Sole	3.05 ^a	1.40 ^a			
平均值 Mean	M2P2	2.10 ^b	0.39 ^c	0.75 ^a	0.33 ^b	1.08 ^b
	M4P4	2.03 ^b	0.50 ^b	0.73 ^a	0.42 ^a	1.14 ^a
	M8P8	1.83 ^c	0.54 ^b	0.66 ^b	0.46 ^a	1.12 ^a
	单作 Sole	2.78 ^a	1.20 ^a			

中两种作物对水分的需求程度不同,通过冠层的分配或根系竞争,高秆高耗水的作物相对低秆低耗水的作物能够获得更多降水,由此实现降水在种间优化利用^[24];另一方面两种作物根系深度不同,能够在土壤纵向空间上合理利用表层和深层的水分资源^[25]。除了上述原因,本研究表明玉米花生间作的稳产性主要表现在不同降水年型间作玉米产量以及收获指数差异不显著,单作玉米在干旱年型的收获指数显著低于丰水年型,由此说明玉米花生间作稳产性的关键因素是玉米。

很多研究表明玉米花生间作能够提高农田的生产力^[2,21],间作系统中玉米为优势作物,产量显著增加,花生为劣势作物,产量下降明显,会很大程度抵消玉米的增产效应,影响间作系统生产力^[21]。株高低的花生间作劣势可能是由于高植株的玉米遮阴造成的^[26],离高作物边界远的行通常产量最高^[27],较宽条带往往对矮秆作物内排的阴影效果会得到一定缓解^[21]。这与本研究结果一致,随着间作条带宽度增加玉米的间作优势降低,花生的间作劣势则减弱。边行效应是间作系统增产增效的重要原因^[21],因此要实现玉米花生间作增产效应,需要更多发挥玉米的边行优势,而降低花生的边行劣势。本研究发现玉米花生间作具有稳产性,其主要因素是玉米,不同降水年型间作玉米产量以及收获指数差异不显著。随着间作带幅变小间作玉米收获指数、单位面积穗数、穗粒数和百粒重有增加趋势,因此产量有所提高,而间作花生则下降。在半干旱区水分是影响间作效应的重要因素^[28],本研究表明干旱年型单作玉米收获指数显著低于丰水年型,干旱年型的花生收获指数要高于丰水年型,说明一定程度上干旱有利于提高单作花生收获指数。间作种植的M4P4和M8P8收获指数年际间差异则不显著,但M2P2干旱年型收获指数低于丰水年型和平水年型,这可能由于干旱年型受玉米的水分竞争胁迫导致。不同降水年型间,玉米单位面积穗数和穗粒数、花生单位面积荚数和荚粒数差异显著,说明易受气候环境影响,玉米和花生百粒重差异不显著,说明受环境效应较小。3种降水年型中M4P4的水分利用效率最高,综合产量及其稳定性等指标,认为其更适宜在辽西等半干旱地区推广。

参考文献:

- [1] 赵宗慈,罗勇,黄建斌.回顾IPCC30年(1988—2018年)[J].气候变化研究进展,2018,14(5):540—546.
- [2] FENG C,SUN Z X,ZHANG L Z,et al.Maize/peanut intercropping increases land productivity:A meta-analysis[J].Field Crops Research,2021,270:108208.
- [3] PELECH E A,EVERS J B,PEDERSON T L,et al.Leaf,plant, to canopy:A mechanistic study on aboveground plas-

- ticity and plant density within a maize - soybean intercrop system for the Midwest,USA[J].Plant,Cell & Environment,2023,46(2):405-421.
- [4] 何忠军,张秀英,龙德祥,等.秦巴山地玉米套种条件下大豆品种丰产及稳产性分析[J].湖北农业科学,2022,61(16):47-51.
- [5] 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):98-107.
- [6] 赵婷婷,伊 森,建国,等.不同玉米||花生模式对花生产量及氮和钙养分吸收的影响[J].中国油料作物学报,2024,46(3):575-585.
- [7] CHAI Q,QIN A Z,GAN Y T,et al.Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape,pea, and wheat in arid irrigation areas[J].Agronomy for Sustainable Development,2014,34(2):535-543.
- [8] 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,2022,30(11):1750-1761.
- [9] XIA H Y,ZHAO J H,SUN J H,et al.Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates[J].Field Crops Research,2013,150:52-62.
- [10] 王一帆,刘华清,赵西宁,等.禾豆间作系统水分和根系分隔对牧草氮素吸收利用及转移的影响[J].水土保持学报,2024,38(4):279-287.
- [11] ZHANG W P,LIU G C,SUN J H,et al.Temporal dynamics of nutrient uptake by neighbouring plant species:Evidence from intercropping[J].Functional Ecology,2017,31(2):469-479.
- [12] 李 玲,康 郁,王沛娟,等.枣棉间作下空间布局对棉花耗水特征的影响[J].塔里木大学学报,2021,33(2):54-61.
- [13] 任 强,徐 珂,樊志龙,等.小麦玉米间作氮肥后移利于减少土壤蒸发提高水分利用效率[J].中国农业科学,2024,57(7):1295-1307.
- [14] HALILOU O,HAMIDOU F,TAYA B K,et al.Water use,transpiration efficiency and yield in cowpea (*Vigna unguiculata*) and peanut (*Arachis hypogaea*) across water regimes[J].Crop and Pasture Science,2015,66(7):715.
- [15] 高砚亮,孙占祥,白 伟,等.辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3702-3713.
- [16] TAHIR M,LÜ Y J,GAO L,et al.Soil water dynamics and availability for citrus and peanut along a hillslope at the Sunjia Red Soil Critical Zone Observatory (CZO)[J].Soil and Tillage Research,2016,163:110-118.
- [17] EL-MEHY A A,TAHA A M,ABD-ALLAH A M M.Maximizing land and water productivity by intercropping sunflower with peanut under sprinkler irrigation[J].Alexandria Science Exchange Journal,2018,39(1):144-160.
- [18] RAO M R,WILLEY R W.Evaluation of yield stability in intercropping:Studies on *Sorghum*/pigeonpea[J].Experimental Agriculture,1980,16(2):105-116.
- [19] MAO L L,ZHANG L Z,LI W Q,et al.Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J].Field Crops Research,2012,138:11-20.
- [20] SHARMA R C,BANIK P.Baby corn-legumes intercropping systems:I.yields,resource utilization efficiency,and soil health[J].Agroecology and Sustainable Food Systems,2015,39(1):41-61.
- [21] WANG R N,SUN Z X,ZHANG L Z,et al.Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping[J].Field Crops Research,2020,253:107819.
- [22] WANG R N,SUN Z X,BAI W,et al.Canopy heterogeneity with border-row proportion affects light interception and use efficiency in maize/peanut strip intercropping[J].Field Crops Research,2021,271:108239.
- [23] 高砚亮,孙占祥,白 伟,等.玉米||花生间作系统作物产量及根系空间分布特征的影响[J].玉米科学,2016,24(6):79-87.
- [24] FENG L S,SUN Z X,ZHENG M Z,et al.Productivity enhancement and water use efficiency of peanut-millet intercropping[J].Pak J Bot,2016,48:1459-1466.
- [25] 宫香伟.糜子/绿豆间作模式下糜子群体对光、水、肥资源的响应及减氮增效机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [26] LIU X,RAHMAN T,SONG C,et al.Changes in light environment,morphology,growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J].Field Crops Research,2017,200:38-46.
- [27] WANG Q,ZHANG D S,ZHANG L Z,et al.Spatial configuration drives complementary capture of light of the understory cotton in young jujube plantations[J].Field Crops Research,2017,213:21-28.
- [28] ZHANG C,DONG Y,TANG L,et al.Intercropping cereals with faba bean reduces plant disease incidence regardless of fertilizer input: A meta-analysis[J].Eur J Plant Pathol,2019,154:931-942.