

不同施氮量下玉米花生间作不同玉米行 对土地当量比和产量贡献的研究

赵凤艳¹, 张勇勇², 冯 晨¹, 白 伟¹, 郑家明¹, 蔡 倩¹,
张 哲¹, 杨 宁¹, 向午燕¹, 孙占祥^{1*}, 冯良山^{1*}

(1. 辽宁省农业科学院耕作栽培研究所, 辽宁 沈阳 110161;
2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要: 评价不同施氮量下玉米花生间作系统中作物种间互作对不同行玉米生长发育、干物质积累、产量及其构成因素的影响。于 2019—2020 年, 利用长期定位微区试验, 设置 3 个施氮量 (N0: $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、N150: $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、N300: $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理和 2 种植模式 (玉米花生间作: IM、玉米单作: SM), 以玉米为研究对象, 分析间作系统中不同行玉米竞争优势、土地当量比、干物质积累及产量对施氮量的响应。在间作系统中玉米的竞争能力显著强于花生, 但毗邻花生带的玉米行 (IM1) 与远离行 (IM2) 间无显著差异。玉米花生间作土地当量比大于 1, 土地生产力提高 15% ~ 23%, 具有间作优势; 而随着施氮量增加, 玉米竞争能力增强。间作显著增加了玉米产量, IM1 产量较 SM 处理增幅为 37.8% ~ 65.3%, IM2 较 SM 处理增幅 26.4% ~ 56.1%, 2019 年氮肥施用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时玉米土地当量比表现出边行效应。玉米产量变化趋势为 $\text{N150} > \text{N300} > \text{N0}$ 。施氮可增加玉米穗粒数和千粒重。间作通过影响成穗数和穗粒数来影响产量, 而氮肥通过影响穗粒数来影响产量。间作玉米氮肥农学效率比单作玉米提高 92.4%; N300 的玉米氮肥农学效率比 N150 低 60.4%。在玉米花生间作系统中, 适宜施氮量 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下间作可显著促进玉米生长发育、干物质积累, 提高玉米产量和氮肥农学效率, 表现出产量边行效应, 但并没有表现出氮肥利用边行效应。

关键词: 间作; 氮肥; 种间竞争; 土地当量比; 产量

施用氮肥对维持我国粮食产量、保证粮食安全具有重要的作用, 但大量施用化学氮肥也会造成温室气体排放量增加、土壤酸化、土壤生态系统失衡等一系列生态环境问题^[1-2]。如何提高氮肥利用率, 减少氮肥施用并维持产量, 是重大科学问题。玉米花生间作可通过根系互作, 形成氮素补偿效应等间作优势, 有效提高氮素利用率^[3-4]。而通过分析不同施氮水平下间作系统中不同行对间作系统土地当量比和产量的贡献, 可以为进一步提高间作系统氮肥利用效率奠定理论基础。

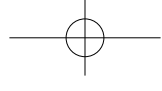
间作是我国传统农业的重要栽培模式。禾本科豆类间作是农业生产中最常见的高效间作模式, 该模式通过作物生态位差异实现资源互补 (光、水、养分等) 及利用豆科作物的固氮作用等优势, 可提高资源利用效率和土地当量比, 使土地生产力表现出较强优势^[5-7]。禾本科豆科间作优势主要体现在高秆作物 (禾本科) 上, 以玉米花生间作为例, 与单作相比, 玉米花生间作可提高玉米利用强光的能力和花生利用弱光的能力, 玉米光截获、光能利用效率均升高^[8]; 同时由于玉米和花生的根系生长和分布特点不同, 花生是浅根作物, 而玉米是深根作物, 根系之间形成互补效应。同时, 玉米花生间作根系互作可使玉米竞争花生固定的氮素, 表现出氮素利用优势^[9-11]。研究表明, 玉米花生间作可提高土壤氮资源利用率, 减少对合成氮的需求^[12]。间作玉米根系表面积和根系总生物量增加, 根系可伸长至花生根系底部, 甚至相邻两垄花生之间的垄沟, 有利于吸收花生固定的氮素^[13-14]。

收稿日期: 2022-05-20; 录用日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金 (31901124, 32071551); 中国博士后科学基金 (2020M670788); 辽宁省博士启动 (2019-BS-136); 辽宁省农业科学院院长基金 (2020MS0502); 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLYC1908013, 3205304)。

作者简介: 赵凤艳 (1990-), 副研究员, 博士, 主要从事养分资源高效利用研究。E-mail: zfyasyau@163.com。

通讯作者: 孙占祥, E-mail: sunzhanxiang@sohu.com; 冯良山, E-mail: fenglsh@163.com。



无论是地上对光照等资源的竞争,还是地下根系之间的互作,毗邻行受到的影响均要大于非毗邻行,亦即边行效应,它是间作产量优势的重要贡献者。由于边行效应主要来源于作物之间的互作,因此,边行效应随着种植条带的变宽而逐渐被稀释^[15],是边行效应研究的主要方面。而氮肥施用同样可以对不同作物之间的互作产生影响,例如施用氮肥可以显著减少作物之间对氮素的竞争^[16],因此,认为氮肥施用量也是影响边行效应的重要因素。另一方面,花生固定的富余氮素供给玉米生长发育,减少玉米氮肥需求量,是玉米花生间作提高氮肥利用率的主要原因之一^[17]。因此,不同行之间玉米必然存在氮素利用效率的差异(这里我们定义为氮素利用边行效应)。但是花生固氮对外源氮素极其敏感,过低或过量施用氮肥都会降低花生的固氮能力^[18],而花生固氮能力的下降会降低间作系统氮素补偿效应,所以必然影响到氮素利用边行效应。然而,之前研究多集中在间作种植密度、条带宽度等对产量边行效应影响方面,而对氮肥施用量是否会对边行效应(包括产量边行效应和氮肥利用边行效应)产生影响的研究较少,因而探讨适量施氮来最大化边行效应以及在此背景下氮肥的利用效率对指导田间生产以发挥间作优势(包括生物量优势和氮肥利用优势)具有重要的意义。鉴于此,本研究探讨不同施氮量下玉米花生间作系统中边行竞争对土地当量比的贡献、玉米生长发育、干物质积累和产量的影响,以探明玉米边行效应对施氮量的响应,为优化间作模式、实现间作系统高产高效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019—2020年在辽宁省沈阳市辽宁省农业科学院的玉米花生间作定位微区试验场(北纬41° 82' 53",东经123° 55')进行。定位试验始于2015年,本研究选取2019—2020年数据进行分析。该地区属于北温带湿润—半湿润季风气候,年均温7.0~8.1℃,无霜期148~180 d,10℃以上积温3350℃,年均蒸发量1440 mm。年均降水量600~800 mm,降水量主要集中在6—9月,约占全年总降水量的85%。定位试验开始前供试土壤耕层容重1.38 g·cm⁻³,有机质15.2 g·kg⁻¹,全氮0.62 g·kg⁻¹,

有效磷25.4 mg·kg⁻¹,速效钾64.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与材料

本研究采用双因素(3个施氮水平×2种植模式)随机区组设计。施氮水平分别为0 kg·hm⁻²(N0)、150 kg·hm⁻²(N150)、300 kg·hm⁻²(N300);种植模式分别为玉米单作(SM)和玉米花生间作(IM,玉米为研究对象),共6个处理,每个处理3次重复。小区面积为8.0 m²(4.0 m×2.0 m),本试验设计主要研究根系互作以及氮肥量对间作优势的影响,因此各小区间采用深度为1 m的聚丙烯板隔离,防止小区间根系、养分和水分交互。玉米和花生单作处理微区内分别种植4行玉米和4行花生,玉米花生间作处理采用2行玉米和2行花生间作模式,玉米和花生种植面积各占50%。所有处理行距均为50 cm,玉米株距为33 cm,花生穴距为13.3 cm(一穴双株)(图1)。

玉米和花生品种分别为“郑单958”和“白沙1016”。使用尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和硫酸钾(K₂O 50%)作为氮、磷和钾肥,磷肥和钾肥施用量分别为90和105 kg·hm⁻²,所有肥料均于播种时一次性条施。生育期内不进行灌溉,其他田间管理一致。2019年5月18日播种,9月24日收获;2020年5月16日播种,9月26日收获。

1.3 测定指标与计算公式

1.3.1 测定指标

于2019年9月24日和2020年9月26日收获玉米和花生。对单、间作各小区玉米和花生均按行取样,间作模式IM1、IM2、IP1和IP2行均取样,单作玉米和花生选取1行,每行避开小区边缘及生育期取样点0.4 m,玉米每行选取1.65 m行长(5株),花生每行选取1 m行长(6穴)。样品晾干后(玉米含水量约15.5%,花生约19%)进行产量测定,并统计玉米每株成穗数、每穗粒数、千粒重等产量构成因素。间作2种作物的土地面积占比均为50%,每一行为25%,间作每行单位面积产量应计算为实际单位面积产量的25%,即均一化产量。

1.3.2 计算公式

相对竞争比率:是比较间作系统中作物竞争能力的一种指标,公式如下:

$$ACR_m = (Y_{im}/Y_{sm}) / (Y_{ip}/Y_{sp}) \times (\mu_p/\mu_m) \quad (1)$$

$$ACR_p = (Y_{ip}/Y_{sp}) / (Y_{im}/Y_{sm}) \times (\mu_m/\mu_p) \quad (2)$$

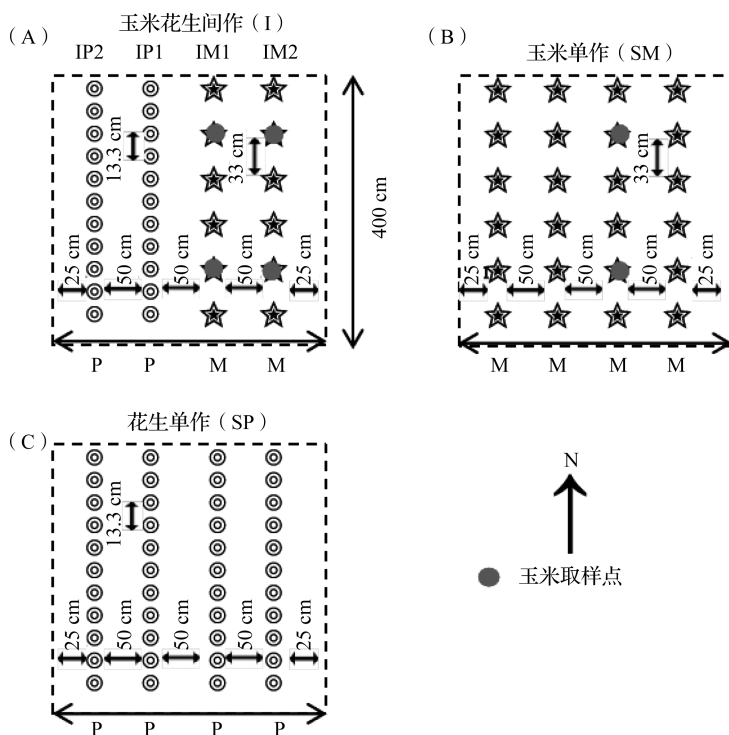


图1 小区及取样示意图

注: M、P 分别表示玉米、花生, IM1、IM2 分别表示毗邻和远离花生带的玉米行, IP1、IP2 分别表示毗邻和远离玉米带的花生行。

式中, ACR_m 和 ACR_p 分别表示间作系统玉米和花生相对竞争比率; Y_{sm} 、 Y_{im} 和 Y_{sp} 、 Y_{ip} 分别表示单、间作玉米产量和单、间作花生产量; μ_m 和 μ_p 分别表示间作系统玉米和花生种植面积占比。当 $ACR_m > ACR_p$ 时, 表示间作系统玉米竞争能力强于花生, 反之则玉米竞争能力弱于花生。

土地当量比: 是衡量土地利用效率的重要指标之一, 公式如下:

$$LER = LER_m + LER_p = (Y_{im}/Y_{sm}) + (Y_{ip}/Y_{sp}) \quad (3)$$

式中, LER 为土地当量比, LER_m 和 LER_p 分别表示间作玉米和花生偏土地当量比, 即单位面积间作产量与单作产量的比值, 也称为相对产量。若 $LER > 1$, 表示具有间作优势, 提高了土地利用效率; 若 $LER < 1$, 具有间作劣势, 降低了土地利用效率。若本研究中间作模式玉米每一条垄 $LER_m > 0.25$, 表示间作提高了玉米产量, 具有间作优势; 反之亦然。

氮肥农学效率: 表示单位面积施氮量增加的产量, 用来衡量作物的氮素吸收利用能力, 公式如下:

$$\text{氮肥农学效率} (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (Y_n - Y_0) / F_n \quad (4)$$

式中, Y_n 和 Y_0 分别表示施氮小区单位面积玉米产量和不施氮小区单位面积玉米产量, F_n 表示单位面积施氮量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 对所得数据进行整理和作图, 运用 SPSS 23.0 进行方差分析和线性回归分析, Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施氮量对间作系统中玉米花生种间竞争力的影响

通过对不同施氮量条件下玉米花生间作系统种间相对竞争比率分析表明, 2019 和 2020 年 3 个施氮水平下间作系统中玉米的竞争能力均显著强于花生 ($P < 0.05$), 相对竞争比率变化趋势为 $IM1 > IM2 > IP2 > IP1$, 且随着施氮量增加, 玉米竞争能力增强, 花生竞争能力减弱 (图 2), 表明在间作系统中玉米为优势作物, 而花生为劣势作物。

2.2 施氮量和种植模式对土地当量比的影响

整个间作系统土地当量比分析结果表明, 2019 和 2020 年各施氮量下, 间作模式土地当量比均大于 1, N_0 、 N_{150} 和 N_{300} 土地当量比 2 年平均值分别为 1.15、1.23 和 1.18, 不同氮肥施用量下无显著变化 (图 3A 和 B, $P > 0.05$)。说明间作提高了土地生产力, 间作优势明显。

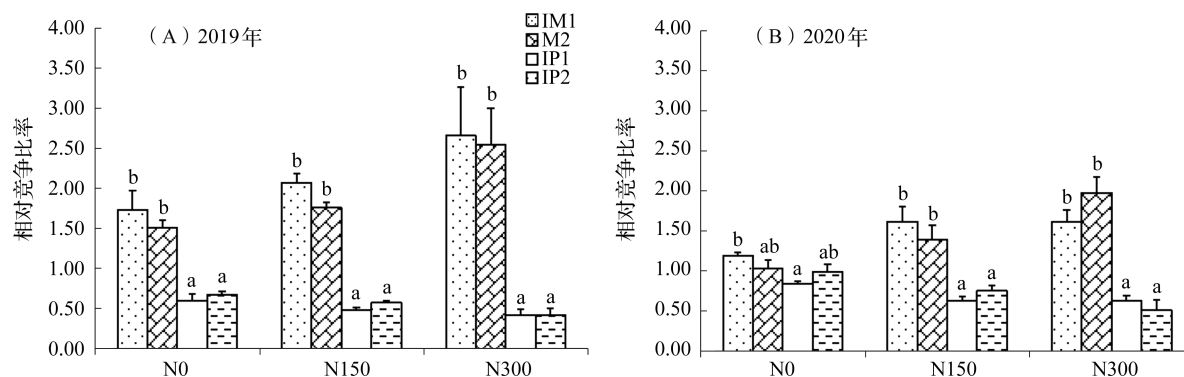


图2 不同施氮水平下间作系统玉米和花生的相对竞争比率

注: 图中数值为平均数 $\pm$ 标准误; 同一施氮水平不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

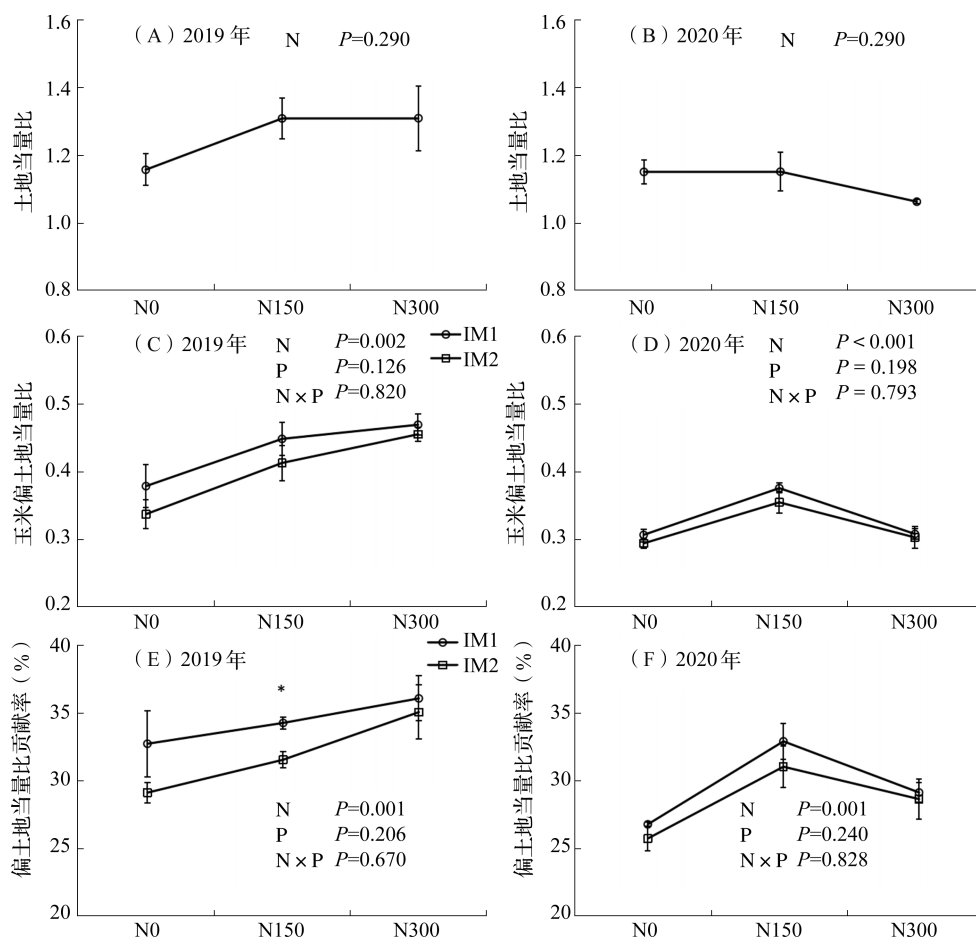


图3 不同施氮水平下间作系统土地当量比、玉米偏土地当量比和各行玉米偏土地当量比贡献率

注: N、P、N x P 分别表示氮肥水平、种植模式、氮肥水平和种植模式交互作用。

施氮量对玉米偏土地当量比有较大影响 (图 3C 和 D)。2019 年 N150 和 N300 的偏土地当量比显著高于 N0 ($P < 0.01$); 2020 年 N150 的偏土地当量比显著高于 N0 和 N300 ($P < 0.01$); 偏土地当量比 2 年平均值表现为 $N150 > N300 > N0$, 分别为 0.40、0.38 和 0.33。2019 和 2020 年 IM1 和 IM2 间偏土地当量比差异不显著, 2 年偏土地当量比平均值分别

为 0.38 和 0.36。

对间作模式每一行玉米偏土地当量比对整个间作系统土地当量比的贡献率进行分析 (图 3E 和 F)。2019 年 N300 和 N150 的偏土地当量比贡献率显著高于 N0 ($P < 0.01$); 2020 年 N150 的偏土地当量比贡献率显著高于 N300 和 N0 ($P < 0.01$)。偏土地当量比贡献率 2 年平均值表现为 $N150 > N300 > N0$, 分



别为 32.3%、32.1% 和 28.4%。2019 和 2020 年 IM1 和 IM2 间偏土地当量比贡献率差异不显著 ($P>0.05$), 2 年偏土地当量比贡献率平均值分别为 31.9% 和 30.1%, 仅 2019 年施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, IM1 偏土地当量比贡献率显著高于 IM2。

2.3 施氮量和种植模式对产量的影响

方差分析表明, 玉米均一化产量受施氮量、种植模式、年份及施氮量与种植模式交互作用显著影响 (表 1, $P<0.01$)。2019 年玉米产量在不同施氮量下的变化趋势为 $\text{N150}>\text{N300}>\text{N0}$, 2020 年表现为 $\text{N300}>\text{N150}>\text{N0}$ 。在所有施氮量处理下, IM1 和 IM2 玉米产量均高于 SM 的 25%, 即间作显著增加了玉米产量, 其中 $\text{IM1}>\text{IM2}$, 但二者无显著差异。在 N0、N150 和 N300 处理下, IM1 和 IM2 玉米 2 年均一化产量平均值分别比 SM 的 25% 提高了 37.8% 和 26.4%、65.3% 和 53.7%、60.0% 和 56.1% (表 1)。说明在同等种植面积上间作模式玉米产量高于单作, 玉米产量在间作模式中表现出较强优势, 且施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 该优势更明显。

表 1 不同施氮水平下单、间作玉米产量

氮肥水平 (N)	种植模式 (P)	玉米产量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	
		2019 年	2020 年
N0	SM	$702.9 \pm 42.9\text{b}$	$596.7 \pm 14.4\text{b}$
	IM1	$264.6 \pm 22.7\text{a}$	$183.1 \pm 6.6\text{a}$
	IM2	$235.2 \pm 15.0\text{a}$	$175.6 \pm 4.6\text{a}$
N150	SM	$1032.4 \pm 112.7\text{b}$	$933.0 \pm 15.9\text{b}$
	IM1	$461.5 \pm 25.2\text{a}$	$350.6 \pm 5.9\text{a}$
	IM2	$424.4 \pm 27.2\text{a}$	$331.0 \pm 15.3\text{a}$
N300	SM	$995.6 \pm 51.1\text{b}$	$1043.2 \pm 51.9\text{b}$
	IM1	$466.0 \pm 15.7\text{a}$	$349.5 \pm 8.3\text{a}$
	IM2	$451.8 \pm 10.4\text{a}$	$343.7 \pm 18.3\text{a}$
P 值	氮肥水平 (N)	<0.001	
	种植模式 (P)	<0.001	
	年份 (Y)	<0.001	
	N × P	0.003	
	N × Y	0.602	
	P × Y	0.476	
	N × P × Y	0.263	

注: 同一列不同小写字母代表同一施氮量条件下单、间作间差异显著 ($P<0.05$)。

由表 2 可知, 种植模式、年份、种植模式和年份交互作用对玉米成穗数的影响达到显著水平

表 2 不同施氮水平下单、间作玉米产量构成因素的变化

年份	氮肥水平	种植模式	成穗数 (穗 · 株 ⁻¹)	穗粒数 (粒 · 穗 ⁻¹)	千粒重 (g)
2019	N0	SM	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$397.5 \pm 32.6\text{a}$	$346.0 \pm 5.5\text{a}$
		IM1	$1.33 \pm 0.33\text{a}$	$400.4 \pm 46.5\text{a}$	$414.2 \pm 6.8\text{b}$
		IM2	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$291.4 \pm 30.6\text{a}$	$367.3 \pm 10.6\text{a}$
	N150	SM	$1.13 \pm 0.13\text{a}$	$483.3 \pm 45.2\text{a}$	$369.3 \pm 10.8\text{a}$
		IM1	$1.60 \pm 0.23\text{a}$	$529.7 \pm 42.9\text{a}$	$374.4 \pm 17.1\text{a}$
		IM2	$1.27 \pm 0.27\text{a}$	$511.7 \pm 50.9\text{a}$	$376.1 \pm 5.4\text{a}$
	N300	SM	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$492.0 \pm 49.1\text{a}$	$386.9 \pm 22.4\text{a}$
		IM1	$1.73 \pm 0.27\text{b}$	$549.9 \pm 41.1\text{a}$	$395.7 \pm 12.8\text{a}$
		IM2	$1.47 \pm 0.13\text{ab}$	$479.1 \pm 29.6\text{a}$	$391.0 \pm 9.6\text{a}$
2020	N0	SM	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$336.5 \pm 40.2\text{a}$	$285.4 \pm 14.6\text{a}$
		IM1	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$406.4 \pm 35.0\text{a}$	$317.9 \pm 12.9\text{a}$
		IM2	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$380.7 \pm 17.9\text{a}$	$302.2 \pm 12.9\text{a}$
	N150	SM	$1.00 \pm 0.00\text{a}$	$476.0 \pm 32.7\text{a}$	$340.6 \pm 15.1\text{a}$
		IM1	$1.20 \pm 0.12\text{a}$	$563.7 \pm 34.1\text{a}$	$376.5 \pm 0.8\text{a}$
		IM2	$1.07 \pm 0.07\text{a}$	$552.1 \pm 35.4\text{a}$	$355.8 \pm 10.2\text{a}$
	N300	SM	$1.07 \pm 0.07\text{a}$	$478.3 \pm 32.4\text{a}$	$366.7 \pm 1.6\text{a}$
		IM1	$1.13 \pm 0.07\text{a}$	$587.5 \pm 21.6\text{b}$	$374.8 \pm 3.0\text{a}$
		IM2	$1.07 \pm 0.07\text{a}$	$466.3 \pm 34.8\text{a}$	$356.5 \pm 8.1\text{a}$
P 值	氮肥水平 (N)		0.066	<0.001	<0.001
	种植模式 (P)		0.003	0.005	0.001
	年份 (Y)		0.002	0.477	<0.001
	N × P		0.753	0.406	0.134
	N × Y		0.480	0.909	<0.001
	P × Y		0.050	0.266	0.965
	N × P × Y		0.761	0.641	0.282

($P<0.05$)；施氮量和种植模式对穗粒数影响达显著水平 ($P<0.01$)；施氮量、种植模式、年份、施氮量和年份交互作用对千粒重有显著影响 ($P<0.01$)。2019 和 2020 年 N150、N300 处理的玉米穗粒数和千粒重 2 年平均数分别为 519.4 粒·穗⁻¹ 和 365.5 g、508.8 粒·穗⁻¹ 和 378.6 g，均显著高于 N0 处理 (368.8 粒·穗⁻¹ 和 338.8 g) ($P<0.05$)，但 N150 和 N300 处理间无显著差异 ($P>0.05$)；成穗数在各施氮量处理下无显著差异 ($P>0.05$)。在 N0 和 N150 处理下，2019 和 2020 年 SM 和 IM1、

IM2 的成穗数、穗粒数均无显著差异；在 N300 处理下，IM1 的成穗数、穗粒数 2 年平均数分别较 SM 增加 38.2% 和 17.2%。除 2019 年 N0 处理外，其他氮处理 SM 和 IM1、IM2 的千粒重均无显著差异。

以千粒重、成穗数和穗粒数为自变量，产量为因变量进行回归分析 (表 3)，结果表明，无论是 2019 年，还是 2020 年，成穗数是对产量贡献最大的因子 ($P_{2019}=0.001$, $P_{2020}=0.004$)，穗粒数次之 ($P_{2019}=0.004$, $P_{2020}=0.005$)，而千粒重对产量的贡献最小。且 2019 年，千粒重对产量的影响不显著 ($P_{2019}=0.215$, $P_{2020}=0.011$)。

表 3 产量构成线性回归模型分析结果

年份	参数	估计值	标准误	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	<i>F</i>	<i>R</i> ²
2019	千粒重 (g)	3.27	2.56	1.28	0.215	8.81	0.474
	成穗数 (穗·株 ⁻¹)	619.9	171.4	3.62	0.001		
	穗粒数 (粒·穗 ⁻¹)	1.52	0.467	3.25	0.004		
2020	千粒重 (g)	3.67	1.335	2.75	0.011	27.32	0.752
	成穗数 (穗·株 ⁻¹)	1110.6	345.0	3.22	0.004		
	穗粒数 (粒·穗 ⁻¹)	1.11	0.362	3.08	0.005		

2.4 施氮量和种植模式对玉米氮肥农学效率的影响
从玉米氮肥农学效率看，2019 和 2020 年氮肥农学效率均随施氮量增加而降低，施氮量为 300 kg·hm⁻² 时 2 年平均值比施氮量 150 kg·hm⁻²

低 60.4%；间作可提高玉米氮肥农学效率，2 年玉米氮肥农学效率平均值整体表现为 IM>SM，分别为 33.1 和 17.2 kg·kg⁻¹，IM 较 SM 处理提高 92.4% (图 4)。

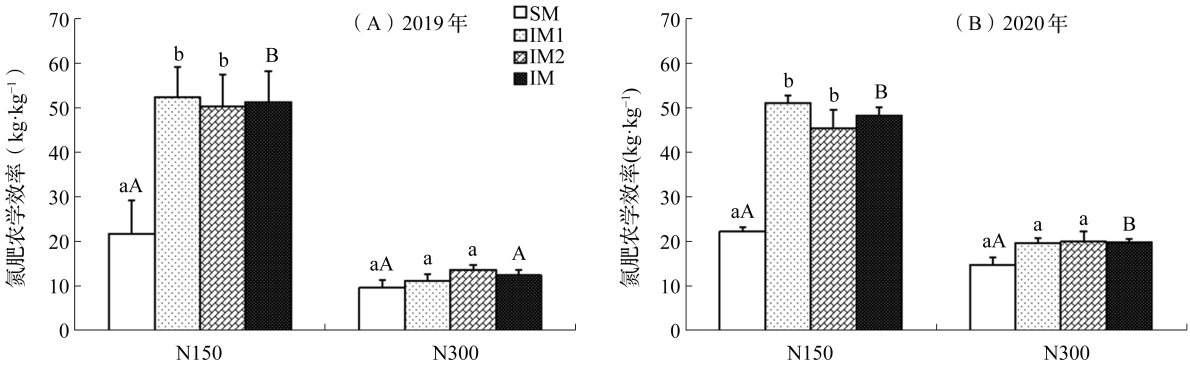


图 4 不同施氮水平下玉米氮肥农学效率

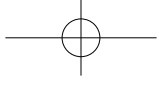
注：SM、IM1、IM2、IM 分别表示玉米单作、间作系统毗邻和远离花生带的玉米行、IM1 和 IM2 之和；同等施氮量条件下不同大写字母表示单、间作玉米间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 间作配施氮肥条件下的种间竞争关系和土地当量比分析

在同一生境内某一种作物的相对竞争比率越大表明对临近作物的竞争能力越强^[19-20]。在本试验中玉米花生间作系统中玉米的种间竞争能力大

于花生，玉米处于竞争优势 (图 2)，这可能是由于玉米在光照利用方面具有优势^[21-22]。但是毗邻花生带玉米行 (IM1) 的竞争能力与远离花生带行 (IM2) 没有显著差异，这一结果也可以从不同玉米行对土地当量比的贡献率得出 (图 3)。这可能是由于远离花生行玉米根系能够伸长至花生根系底部，可以利用花生固定氮素^[14]。



在本研究中,随着氮肥施用量的增加,玉米的竞争优势逐渐扩大(图2),然而玉米各行对间作系统整体土地当量比贡献率的差异随着施氮量的增加而降低(图3),表明随着玉米对花生固定氮素依赖的降低(即氮补偿效应减弱)^[23],玉米出现边行优势的可能性越来越低,对花生固定氮素的吸收利用是边行效应的重要来源之一。

土地当量比是衡量土地利用效率的重要指标^[24]。诸多研究表明玉米花生间作能够提高土地当量比和土地生产力,土地当量比可达1.08~1.33,表现出明显的间作优势^[25-27]。在本研究中,2019—2020年间作模式土地当量比为1.15~1.23,土地利用率提高15%~23%,具有间作优势,但该优势未随着施氮量升高而升高(图3),这说明间作效应受施氮量的影响。2019年每行玉米对土地当量比的贡献在施用较少氮肥时毗邻行要显著高于非毗邻行,表明在气候适宜条件下施用较少氮肥存在着边行效应。这可能是在较低氮肥施用环境下,对产量起限制作用的主要因子为氮素供应,而毗邻行玉米可通过根系延伸,吸收花生固定的氮素,缓解氮限制,从而表现出边行效应^[15]。而当施用氮肥量较高时,氮素不再是主要的限制因素,因此边行效应减弱。焦念元等^[27]研究表明施氮量对土地当量比有明显调控作用,2:4间作模式土地当量比趋势为 $N_{180} > N_{360} > N_0$,2:8间作模式土地当量比趋势为 $N_0 > N_{180} > N_{360}$,即氮肥施用量过高对土地利用率表现出负面影响。

3.2 间作配施氮肥条件下玉米产量组成分析

虽然从某一施氮水平来看,不同行玉米产量之间没有显著差异,但是整体上不同种植模式(包括不同的玉米行)对玉米产量有显著的影响(表1),且种植模式和氮肥之间存在着互作效应($P_{N \times P} = 0.003$),表明氮肥施用对边行效应具有显著作用。这可能是由于过高和过低的氮肥量都不利于间作系统中玉米花生互作优势的发挥。花生固氮需要外源氮素启动,较低氮素水平不能达到花生固氮启动阈值。吴海宁等^[11]研究表明,在一定的氮肥阈值内,减施氮肥不利于间作花生根际土壤固氮微生物的生长繁殖,土壤固氮微生物丰度和多样性均会随着氮肥减施而降低。而在高氮条件下,氮不是玉米生长限制因子,玉米生长反而受到高氮养分的胁迫(例如叶面积指数不再升高,根系生物量降低^[28]等),影响玉米植株对除氮素外其他养分的利用^[29]。

通过对产量构成进行分析,结果表明种植模式对成穗数、穗粒数和千粒重均有显著的影响(P 值均小于0.01),但是氮肥和种植模式之间并没有交互作用(表2),结合回归分析结果(表3),表明不同种植模式通过影响成穗数和穗粒数来影响产量,而氮肥主要通过影响穗粒数来影响产量。

3.3 间作配施氮肥条件下氮肥农学效率分析

氮肥农学效率是评价作物氮素吸收能力和农田氮肥利用率的指标之一^[30]。赵萍萍等^[31]研究表明,随施氮量的增加(由70至350 kg·hm⁻²),玉米氮肥农学效率降低,施氮量不足时,虽然可提高氮肥农学效率,但是产量收益明显降低,而高量施用氮肥不仅氮肥农学效率低,而且对生态环境也会产生负面效应。本研究结果表明,施氮量为150 kg·hm⁻²时的间作氮肥农学效率要高于施氮量为300 kg·hm⁻²时的农学效率,这与前人的研究结果一致^[32-33]。这可能与高氮肥施用量抑制花生根系结瘤固氮有关。王桂花^[33]研究表明,玉米大豆间作促进了玉米根系生长发育,且玉米地下部氮含量、大豆标记的¹⁵N向玉米转移量及其占玉米吸氮量均显著高于单作玉米,表明间作可以通过调节玉米根系生长来促进对豆科固氮的吸收利用,从而减少对化学氮肥的依赖,提高氮肥利用效率。本研究中,氮肥农学效率虽然使用150 kg·hm⁻²时毗邻行氮肥利用效率略有升高(图4),但是没有表现出显著的边行效应,这也从侧面说明在玉米花生2:2间作系统中玉米行仍然有氮素补偿效应存在。未来需要在考虑氮肥施用量的同时针对不同间作宽幅研究氮肥的边行效应,以期制定更加资源节约型的间作系统提供理论依据。

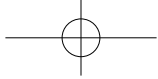
4 结论

玉米花生间作系统中玉米表现出很强的竞争优势,其原因主要是玉米在光照、氮素利用等方面占据竞争优势。在适宜的气候条件和氮肥施用下,玉米花生间作表现出边行优势,其中对玉米产量其重要贡献为成穗数和穗粒数。2:2玉米花生条带间作并没有表现出明显的氮肥利用效率边行优势,未来需要针对不同宽幅比例的玉米花生条带间作的氮肥利用效率边行效应进行研究。

参考文献:

- [1] Yin C, Fan F L, Song A L, et al. The response patterns of community traits of N₂O emission-related functional guilds

- to temperature across different arable soils under inorganic fertilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 108: 65–77.
- [2] Yu H L, Ling N, Wang T T, et al. Responses of soil biological traits and bacterial communities to nitrogen fertilization mediate maize yields across three soil types [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 61–69.
- [3] 焦念元. 玉米花生间作复合群体中氮磷吸收利用特征与种间效应研究[J]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [4] Shao Z Q, Zheng C C, Postma J A, et al. Nitrogen acquisition, fixation and transfer in maize/alfalfa intercrops are increased through root contact and morphological responses to interspecies competition [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (8): 2240–2254.
- [5] 杨小琴, 王洋, 齐晓宁, 等. 玉米间作体系的光合生理生态特征[J]. *土壤与作物*, 2019, 8 (1): 70–77.
- [6] Jensen E S, Carlsson G, Hauggaard-Nielsen H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: a global-scale analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, 40: 1–9.
- [7] 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.
- [8] 张东升. 风沙半干旱区玉米/花生间作光能高效捕获和利用[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [9] 刘颖, 王建国, 郭峰, 等. 玉米花生间作对作物干物质积累和氮素吸收利用的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2020, 42 (6): 994–1001.
- [10] 刘剑钊, 袁静超, 周康, 等. 不同氮肥施用水平对春玉米光合特性及产量构成的影响[J]. *玉米科学*, 2019, 27 (5): 151–157.
- [11] 吴海宁, 黄志鹏, 唐秀梅, 等. 氮肥减施对花生根际土壤固氮微生物多样性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (16): 93–97.
- [12] Bedoussac L, Etienne-Pascal J, Hauggaard-Nielsen H, et al. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 35: 911–935.
- [13] Zheng B, Zhang X, Chen P, et al. Improving maize's N uptake and N use efficiency by strengthening roots' absorption capacity when intercropped with legumes [J]. *Peer J*, 2021, 9 (6): e11658.
- [14] Jiao N, Wang F, Ma C, et al. Interspecific interactions of iron and nitrogen use in peanut (*Arachis hypogaea* L.)-maize (*Zea mays* L.) intercropping on a calcareous soil [J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, 128: 126303.
- [15] 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.
- [16] Sadras V O, Thomas D, Cozzolino D, et al. Wheat yield response to nitrogen from the perspective of intraspecific competition [J]. *Field Crops Research*, 2019, 243: 107632.
- [17] 房增国. 豆科/禾本科间作的氮铁营养效应及对结瘤固氮的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [18] Feng M M, Aams J M, Fan K K, et al. Long-term fertilization influences community assembly processes of soil diazotrophs [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 126: 151–158.
- [19] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, et al. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems [J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34 (4): 287–294.
- [20] 罗晓棉, 林文雄. 福建山区玉米与花生不同间作比例对产量的影响及其生态机制[J]. *福建农业学报*, 2016, 31 (4): 338–344.
- [21] 张晓娜, 陈平, 庞婷, 等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2017, 35 (4): 484–490.
- [22] Zhang W P, Gao S N, Li Z X, et al. Shifts from complementarity to selection effects maintain high productivity in maize/legume intercropping systems [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58: 2603–2613.
- [23] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 玉米花生间作效应研究进展[J]. *辽宁农业科学*, 2016 (1): 41–46.
- [24] 孟维伟, 高华鑫, 张正, 等. 不同玉米花生间作模式对系统产量及土地当量比的影响[J]. *山东农业科学*, 2016, 48 (12): 32–36.
- [25] 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.
- [26] 沙德剑. 玉米花生带状间作下作物群体质量及产量效益分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [27] 焦念元, 宁堂原, 赵春, 等. 施氮量和玉米-花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34 (4): 706–712.
- [28] Ordóñez R A, Castellano M J, Danalatos G N, et al. Insufficient and excessive N fertilizer input reduces maize root mass across soil types [J]. *Field Crops Research*, 2021, 267: 108142.
- [29] Zou Y, Zhang F. Iron and zinc biofortification strategies in dicot plants by intercropping with gramineous species. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29: 63–71.
- [30] 张福锁, 王激清, 张卫锋, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 915–924.
- [31] 赵萍萍, 王宏庭, 郭军玲, 等. 氮肥用量对夏玉米产量、收益、农学效率及氮肥利用率的影响[J]. *山西农业科学*, 2010, 38 (11): 43–46, 80.
- [32] 马星竹, 郝小雨, 高中超, 等. 氮肥用量对土壤养分含量、春玉米产量及农学效率的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24 (6): 131–135.
- [33] 王桂花. 大豆/玉米间作中双接种AM真菌和根瘤菌对氮、碳分配的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.



Contribution of different maize rows to land equivalent ratio and yield of maize and peanut intercropping under different N application rates

ZHAO Feng-yan¹, ZHANG Yong-yong², FENG Chen¹, BAI Wei¹, ZHENG Jia-ming¹, CAI Qian¹, ZHANG Zhe¹, YANG Ning¹, XIANG Wu-yan¹, SUN Zhan-xiang^{1*}, FENG Liang-shan^{1*} (1. Institute of Crop Cultivation and Farming System, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110161; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang Liaoning 110866)

Abstract: The effects of interspecific interaction on growth and development, dry matter accumulation, yield and yield composition of maize in different rows in a maize and peanut intercropping system with different nitrogen application rates were evaluated. In 2019–2020, based on a long-term micro-area experiment and using maize as the research crop, three nitrogen application rates (N0: 0 kg · hm⁻², N150: 150 kg · hm⁻², N300: 300 kg · hm⁻²) and two planting patterns (IM: maize and peanut intercropping; SM: maize monocropping) were set up, the responses of competitive advantage, land equivalent ratio, dry matter accumulation and yield of maize in different rows to nitrogen applications in intercropping system were analyzed. In the intercropping system, the competitive ability of maize was significantly stronger than that of peanuts, but there was no difference between the maize row adjacent to the peanut belt (IM1) and the distant row (IM2). Maize-peanut intercropping had an intercropping advantage with land equivalent ratio greater than 1 and 15%–23% increase in land productivity; while maize competitiveness increased with increased nitrogen application. Intercropping significantly increased maize yield by 37.8%–65.3% in IM1 over SM and 26.4%–56.1% in IM2. In 2019, 150 kg · hm⁻² nitrogen fertilizer showed a land equivalent ratio border row effect. The trend of maize yield was N150>N300>N0. Nitrogen application increased maize ears grain number and thousand grain weight. Intercropping affected yield by affecting number of ears and number of grains, while nitrogen fertilization affected yield by affecting number of grains. Nitrogen fertilizer agronomic efficiency of intercropped maize was 92.4% higher than that of monocropped maize; nitrogen fertilizer agronomic efficiency of N300 was 60.4% lower than that of N150. In the maize-peanut intercropping system, appropriate nitrogen application rate (150 kg · hm⁻²) significantly promoted maize growth, dry matter accumulation, and improved maize yield and showed a yield border row effect, but not a nitrogen fertilizer agronomic efficiency border row effect.

Key words: intercropping; nitrogen fertilizer; interspecific competition; land equivalent ratio; yield