

不同施氮量对小麦蚕豆间作体系中产量和根系特征的影响

刘英超^{1, 2}, 万山平², 黄敏¹, 郑毅^{2, 3*}

(1. 昆明学院农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214; 2. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 3. 云南开放大学乡村振兴教育学院, 云南 昆明 650101)

摘要: 通过盆栽试验, 以小麦 (*Triticum aestivum*) 和蚕豆 (*Vicia faba*) 为研究对象, 分别设置根系分隔 [尼龙分隔 (MB)、塑料分隔 (PB)、无分隔 (NB)] 3 种植方式, 系统探讨间作条件下, 不同施氮量小麦、蚕豆根系形态变化特征, 为进一步探明间作体系作物的增产机制提供依据。结果表明: 随施氮量增加, 小麦产量增加; 蚕豆根系直径、表面积增加。低氮量条件 (N/2) 下, 与塑料分隔 (PB) 和尼龙分隔 (MB) 相比, 无分隔 (NB) 小麦根长分别增加 0.66% 和 2.61%, 根系表面积分别增加 56.14% 和 52.75%, 比根长分别增加 18.55% 和 64.92%, 比表面积分别增加 64.04% 和 82.98%; 无分隔 (NB) 蚕豆产量分别增加 26.29% 和 34.84%, 根系干重分别增加 35.1% 和 45.4%, 根系表面积分别增加 72.66% 和 29.12%, 根系直径分别增加 66.67% 和 14.82%, 根系体积分别增加 9.55% 和 5.91%, 比表面积分别增加 165.62% 和 134.76%。小麦产量与根长和根系表面积呈正相关, 而蚕豆产量与根长呈负相关, 与根系比表面积呈正相关。不同间作体系, 作物之间根系形态变化是影响产量变化的表面驱动因子, 低氮量环境下, 根系间作程度越高, 效果越明显。

关键词: 小麦; 蚕豆; 根系分隔; 施氮量; 产量; 根系形态

氮素是作物的“粮食”, 是作物高产的重要保障^[1]。近年来, 由于我国耕地面积不断缩减, 农民过量施氮的现象普遍存在。长期过量施氮不仅增加种植成本, 还会导致土壤质量下降和农业面源污染。因此, 需要在保障作物产量和耕地地力的基础上提高氮肥利用率^[2]。间套作作为我国传统农业的精髓, 具有充分利用资源和提高养分利用效率的特点^[3]。豆科禾本科间作系统中, 两种作物不仅可以充分利用水热等资源^[4], 而且豆科作物可以有效固定空气中的氮素, 这些氮素通过各种途径向与之间作的禾本科作物转移, 或者通过残留供后茬作物利用^[5], 禾本科作物则通过竞争土壤有效氮, 促进豆科作物固定空气中的氮, 进而提高单位土地面积的生产力, 降低氮肥的投入量^[6]。

小麦 (*Triticum aestivum*) 与蚕豆 (*Vicia faba*) 间作

是典型豆科禾本科作物间作种植模式, 也是我国云南省乃至西南地区的一种普遍种植方式^[7]。已有研究表明, 小麦与蚕豆间作明显增加了作物根系干重、根冠比和比根长, 促进了小麦和蚕豆根系在不同层次土壤中的分布, 有利于间作群体的养分吸收^[8-9]。但关于不同间作程度下的小麦 // 蚕豆根系形态差异尚未见报道。另有研究表明, 氮肥量明显影响植物根长、根系直径和根系表面积等根系形态, 促进养分吸收和利用^[10], 但不同施氮量不同间作程度下的小麦 // 蚕豆根系形态差异尚不清楚。因此, 本研究以小麦与蚕豆间作体系为对象, 通过盆栽试验, 探讨不同施氮量下小麦与蚕豆间作体系根系形态的差异, 并从根系形态变化的角度进一步解析促进该间作群体产量变化的作用, 旨在为促进小麦蚕豆间作体系氮养分高效吸收和合理施用氮肥提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种为云麦-52, 蚕豆为玉溪大粒豆, 种子由云南省农业科学院粮食作物研究所提供。试验为盆栽试验, 所用盆钵高 240 mm、底部直径 195 mm, 每盆装土 10 kg。供试肥料: 氮肥为尿素 (N 46%)、磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 14%)、

收稿日期: 2023-04-01; 录用日期: 2023-05-18

基金项目: 云南省地方本科高校基础研究联合专项项目 [202101BA070001-235、2019FH001-(056)]; 云南省科技特派员项目 (ZX20210083); 云南省外国专家引智项目 (202305AP350003); 昆明学院人才引进科研启动项目 (YJL2005)。

作者简介: 刘英超 (1988-), 副研究员, 博士, 主要从事间作水分利用与养分吸收关系研究。E-mail: liuyingchao_1988@163.com。

通讯作者: 郑毅, E-mail: yzheng@ynau.edu.cn。

钾肥为硫酸钾 (K_2O 50%)。供试土壤为云南农业大学后山红壤, 土壤基本理化性状: 有机质 $28.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 6.08, 碱解氮 $68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $137 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验设间作根系分隔方式和氮素施用量两组处理, 其中间作根系分隔方式设小麦 // 蚕豆根系尼龙分隔 (MB, 尼龙网孔径为 0.05 mm , 养分、水分可正常通过, 作物根系间无交互作用)、小麦 // 蚕豆根系塑料分隔 (PB, 作物根系之间无交互作用)、小麦 // 蚕豆根系无分隔 (NB, 作物根系完全交互) (图 1)。氮素施用设低氮 N/2 (常规施氮量的一半)、常规施氮 N、高氮 3N/2 (常规施氮量的 1.5 倍), 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复, 试验期间所有盆钵随机排列。



图 1 小麦蚕豆间作根系分隔示意图

1.3 种植与管理

试验种子先用自来水浮选去除瘪粒, 剩下均匀饱满的种子, 将种子均匀分布于湿润滤纸上, 用不透光的黑布遮盖, 在恒温 (20°C) 下放置发芽。种子萌发至两叶一心时, 将均匀一致的幼苗取出, 用水小心冲洗后移栽。作物按照分隔方式分两行种植 (小麦种植一侧, 分隔另一侧种植蚕豆), 每盆种植蚕豆 6 株、小麦 12 株。试验所用肥料均按纯养分计算, 常规氮肥用量为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1/2 为基肥, 1/2 为追肥, 并于小麦拔节期追施。追施时仅施用于间作处理的小麦一侧, 蚕豆均不施用追肥。磷肥用量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 钾肥用量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷、钾肥全部作为基肥一次性施入。试验过程中, 所有小麦和蚕豆均采用统一的管理措施, 初次浇水土壤水分达到田间持水量的 70%, 其他时间定期按需浇水, 人工除杂草和松土等。

1.4 采样及测定

小麦生长到分蘖期、蚕豆生长到分枝期 (第 60 d) 时, 分别采集小麦和蚕豆的地上和地下部分, 将长势均匀的小麦和蚕豆整盆土转移出来, 轻轻地将植株从土壤中分离开, 植株分为根、茎、叶, 分别用水冲洗干净, 茎、叶放入 110°C 烘箱杀青 30 min, 后调至 75°C 烘至恒重, 分别称其干重, 作物

成熟期 (第 150 d) 收获籽粒测定其产量。

植物根系经数字化扫描仪 (Epson Expression 1600 pro. Model EU-35, 日本) 扫描后得到分辨率为 720 dpi 的图片, 运用 WINRHIZO (Version 4.0b, Rengent Instruments Inc., 加拿大) 对根系总长 (RL)、根体积 (RV)、根表面积 (SA) 和平均根直径 (RAD) 等指标进行定量化分析。将扫描后的根系装入信封, 做好标记, 置于 80°C 烘箱内烘干至恒重 (48 h), 利用电子天平 (精度 0.0001 g) 称量根系的干物质质量 (RDM)。

比根长及比根表面积计算:

$$\text{比根长 (SRL, cm} \cdot \text{g}^{-1}) = \text{RL/RDM}^{[11]} \quad (1)$$

$$\text{比表面积 (SRA, cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) = \text{SA/RDM}^{[11]} \quad (2)$$

应用土地当量比 (LER) 作为衡量间作产量优势的指标^[11]。

$$\text{LER}_i = Y_{\text{NBW}}/Y_{\text{MBW}} + Y_{\text{NBF}}/Y_{\text{MBF}} \quad (3)$$

$$\text{LER}_{ii} = Y_{\text{NBW}}/Y_{\text{PBW}} + Y_{\text{NBF}}/Y_{\text{PBF}} \quad (4)$$

式中: LER_i 表示无分隔相对尼龙分隔的土地当量比, LER_{ii} 表示无分隔相对塑料分隔的土地当量比; Y_{MBW} 表示尼龙分隔小麦产量, Y_{PBW} 表示塑料分隔小麦产量, Y_{NBW} 表示无分隔小麦产量; Y_{MBF} 表示尼龙分隔蚕豆产量, Y_{PBF} 表示塑料分隔蚕豆产量, Y_{NBF} 表示无分隔蚕豆产量; $\text{LER}_i > 1$ 时表示无分隔相对尼龙分隔具有产量优势, $\text{LER}_{ii} > 1$ 时表示无分隔相对塑料分隔具有产量优势。

1.5 数据处理

试验数据采用 Origin 2021、SPSS 19.0 进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量和不同间作方式对小麦、蚕豆产量的影响

由图 2 可以看出, 相同分隔方式下, 随施氮量增加, 小麦产量增加。与低氮 (N/2) 处理相比, 常规施氮 (N) 与高氮水平 (3N/2) 下塑料分隔 (PB) 和尼龙分隔 (MB) 小麦产量明显增加。由图 2 还可以看出, 低氮 (N/2) 水平下, 与塑料分隔 (PB) 和尼龙分隔 (MB) 相比, 无分隔 (NB) 蚕豆产量分别增加 26.29% 和 34.84%; 常规施氮 (N) 水平下, 与尼龙分隔 (MB) 相比, 塑料分隔 (PB) 和无分隔 (NB) 蚕豆产量分别增加 30.16% 和 32.54%。

由图 3 可以看出, 无分隔土地当量比高于尼龙分隔和塑料分隔, 随施氮量增加, 无分隔产量优势逐渐不明显。

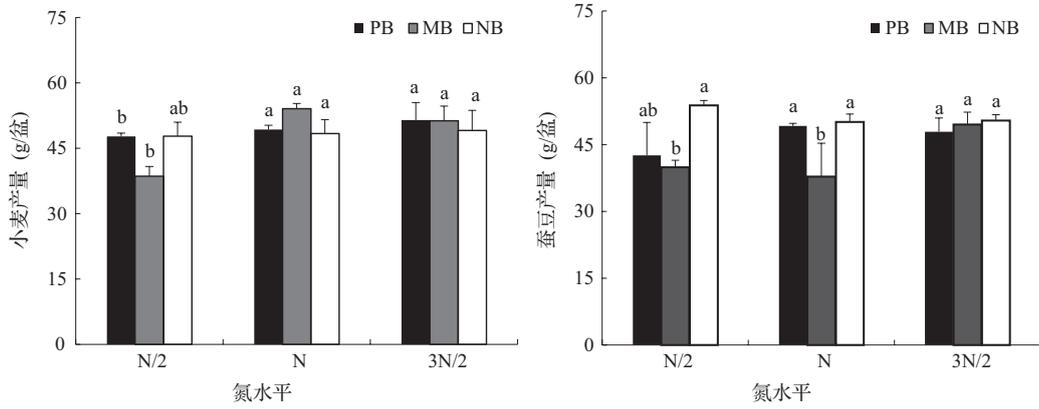


图2 不同氮水平及分隔方式下小麦、蚕豆产量

注：不同小写字母表示同种作物不同处理间差异达到5%显著水平。图4同。

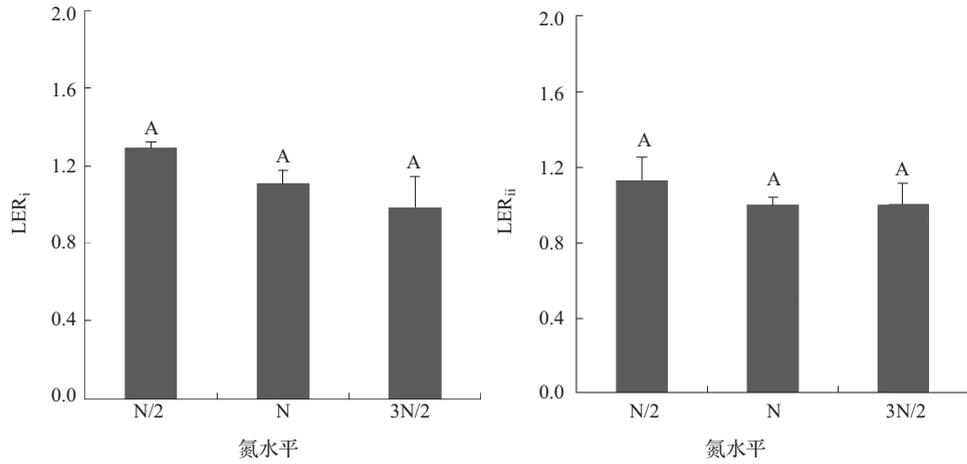


图3 不同氮水平及分隔方式下土地当量比

注：不同大写字母表示不同处理间差异达到5%显著水平。

2.2 施氮量和不同间作方式对作物根系干重的影响

由图4可以看出，随施氮量增加，作物根系干重没有随之增加。相同氮水平条件下，与无

分隔(NB)和尼龙分隔(MB)相比，塑料分隔(PB)条件下，低氮(N/2)条件下小麦根系干重增加127.59%~177.57%，常规施氮(N)条件下增

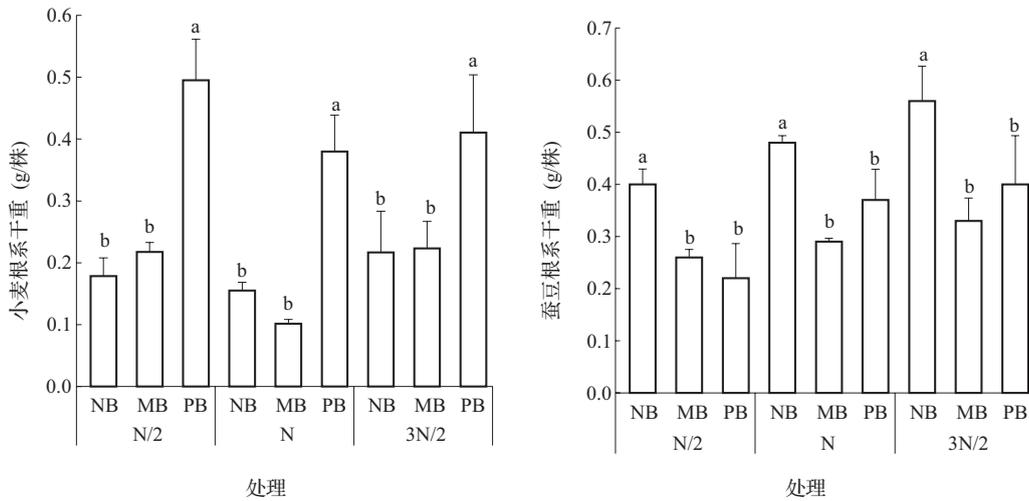


图4 小麦与蚕豆根系干重

加 145.16% ~ 273.77%，高氮 (3N/2) 条件下增加 83.83% ~ 89.49%。与之相反，相同氮水平下，与无分隔 (NB) 相比，低氮 (N/2) 条件下尼龙分隔 (MB) 和塑料分隔 (PB) 蚕豆根系干重减少 35% ~ 45%，常规施氮 (N) 条件下减少 39.58% ~ 22.91%，高氮 (3N/2) 条件下减少 41.07% ~ 28.57%。

2.3 施氮量和不同间作方式对作物根系表观形态的影响

由表 1 可以看出，与低氮 (N/2) 和常规施氮 (N) 相比，高氮 (3N/2) 条件下，无分隔 (NB) 小麦根系长度增加，体积增加；尼龙分隔 (MB) 小麦根系长度增加，直径增加，体积增加。表 1 还表明，与尼龙分隔 (MB) 和塑料分隔 (PB) 相比，低氮 (N/2) 条件下，无分隔 (NB) 小麦根长分别增加 0.66% 和

2.61%，根系表面积分别增加 56.14% 和 52.75%；常规施氮 (N) 条件下，无分隔 (NB) 小麦根系表面积增加 48.28% 和 42.35%。

由表 2 可以看出，与低氮 (N/2) 和常规施氮 (N) 相比，高氮 (3N/2) 条件下，尼龙分隔 (MB) 蚕豆根系表面积增加，根系体积减少；塑料分隔 (PB) 蚕豆根系表面积增加，直径增加；无分隔 (NB) 蚕豆根系直径增加，体积减少。

表 2 还表明，与尼龙分隔 (MB) 和塑料分隔 (PB) 相比，无分隔 (NB) 蚕豆低氮 (N/2) 条件下根系表面积分别增加 72.66% 和 29.12%，直径分别增加 66.67% 和 14.82%，体积分别增加 9.55% 和 5.91%；常规施氮 (N) 条件下，根系表面积分别增加 18.86% 和 31.14%，体积分别增加 27.23% 和 341.81%；高氮条件下根系表面积增加，直径和体积明显增加。

表 1 不同施氮量与种植方式下小麦的根系形态

作物	氮水平	种植模式	长度 (cm)	表面积 (cm ²)	平均直径 (mm)	根系体积 (cm ³)
小麦	N/2	NB	425.22 ± 14.50c	96.44 ± 2.80a	0.72 ± 0.0051a	1.65 ± 0.0666d
		MB	422.41 ± 11.87c	42.30 ± 1.57e	0.34 ± 0.0117e	1.42 ± 0.0463de
		PB	414.10 ± 6.09c	45.57 ± 2.49e	0.36 ± 0.0094e	3.05 ± 0.0224a
	N	NB	410.09 ± 12.25c	78.00 ± 2.15b	0.60 ± 0.0076b	1.24 ± 0.0363ef
		MB	382.70 ± 21.07c	40.34 ± 1.31e	0.34 ± 0.0022e	0.90 ± 0.0091f
		PB	557.06 ± 12.37a	44.97 ± 1.61e	0.31 ± 0.0043f	2.87 ± 0.2203ab
	3N/2	NB	478.59 ± 11.54b	67.37 ± 4.50c	0.52 ± 0.0028c	2.04 ± 0.2900c
		MB	589.80 ± 13.33a	59.25 ± 0.70d	0.41 ± 0.0036d	1.43 ± 0.0093de
		PB	560.47 ± 9.49a	72.44 ± 0.50bc	0.52 ± 0.0060c	2.55 ± 0.0467b
显著性						
氮水平 (T)			ns	*	ns	ns
种植模式 (P)			*	ns	ns	ns
T × P			*	**	ns	ns

注：不同小写字母表示作物在相同指标下差异显著 ($P \leq 0.05$)；* 表示 $P < 0.05$ ；** 表示 $P < 0.01$ ；ns 表示不显著。表 2 同。

表 2 不同施氮量与种植方式下蚕豆的根系形态

作物	氮水平	种植模式	长度 (cm)	表面积 (cm ²)	平均直径 (mm)	根系体积 (cm ³)
蚕豆	N/2	NB	306.36 ± 10.16e	96.81 ± 4.51a	0.90 ± 0.0086a	2.41 ± 0.0361a
		MB	572.83 ± 10.01a	56.07 ± 1.56d	0.54 ± 0.0242d	2.20 ± 0.0463b
		PB	445.63 ± 18.69c	72.40 ± 0.37c	0.62 ± 0.0016c	2.07 ± 0.0076c
	N	NB	351.02 ± 9.00d	100.14 ± 1.38a	0.54 ± 0.0034d	2.43 ± 0.0464a
		MB	478.26 ± 8.89b	76.36 ± 2.07c	0.69 ± 0.0146b	1.91 ± 0.0468d
		PB	435.46 ± 6.53c	90.76 ± 0.90b	0.65 ± 0.0043bc	0.55 ± 0.0151g
	3N/2	NB	607.00 ± 18.73a	98.75 ± 3.29a	0.92 ± 0.0469a	1.84 ± 0.0013d
		MB	409.90 ± 5.49c	91.58 ± 1.25b	0.66 ± 0.0033bc	1.31 ± 0.0053f
		PB	489.99 ± 9.03b	95.39 ± 0.49ab	0.86 ± 0.0246a	1.73 ± 0.0050e
显著性						
氮水平 (T)			ns	*	*	ns
种植模式 (P)			ns	ns	*	*
T × P			ns	ns	**	ns

2.4 施氮量和不同间作方式对作物比根长、比表面积的影响

由表 3 可以看出, 与高氮 (3N/2) 相比, 尼龙分隔 (MB) 和塑料分隔 (PB) 方式下, 低氮 (N/2) 小麦比根长和比表面积均减少; 与高氮 (3N/2) 相比, 低氮 (N/2) 和常规施氮 (N) 蚕豆尼龙分隔 (MB) 方式下比根长分别增加 48.38% 和 1.13%, 比表面积分别增加 34.17% 和 12.77%。

由表 3 还可以看出, 与尼龙分隔 (MB) 和塑料分隔 (PB) 相比, 无分隔 (NB) 小麦低氮 (N/2) 条件下比根长分别增加 18.55% 和 64.92%, 比表面积分别增加 64.04% 和 82.98%; 常规施氮 (N) 条件下仅比表面积增加。类似的, 与尼龙分隔 (MB) 和塑料分隔 (PB) 相比, 无分隔 (NB) 蚕豆低氮 (N/2) 条件下比表面积分别增加 165.62% 和 13.15%。

表 3 施氮量和种植方式对作物比根长、比表面积的影响

作物	种植模式	比根长 (cm · g ⁻¹)			比表面积 (cm ² · g ⁻¹)		
		N/2	N	3N/2	N/2	N	3N/2
小麦	NB	2384.41 ± 65.92CDE	2645.74 ± 74.22B	2208.88 ± 50.18CD	540.79 ± 12.72b	503.23 ± 13.02a	310.94 ± 19.55d
	MB	1942.11 ± 60.88C	3764.26 ± 200.67A	2640.90 ± 42.66DE	194.48 ± 8.07ef	396.79 ± 12.48c	265.30 ± 2.25f
	PB	836.57 ± 16.13F	1465.95 ± 26.98F	1365.15 ± 30.44E	92.06 ± 6.61g	118.34 ± 3.50g	176.44 ± 1.59e
显著性							
氮水平 (T)		ns			ns		
种植模式 (P)		*			ns		
T × P		*			ns		
作物	种植模式	比根长 (cm · g ⁻¹)			比表面积 (cm ² · g ⁻¹)		
		N/2	N	3N/2	N/2	N	3N/2
蚕豆	NB	765.90 ± 25.40E	731.29 ± 18.74E	731.96 ± 9.81E	372.35 ± 17.35a	312.97 ± 3.10b	277.52 ± 3.78c
	MB	2203.19 ± 38.48A	1501.59 ± 22.51C	1484.82 ± 27.38C	140.18 ± 3.89f	159.08 ± 4.32ef	176.34 ± 5.87e
	PB	2025.59 ± 84.96B	1292.59 ± 24.02D	1517.50 ± 46.83C	329.09 ± 1.70b	270.65 ± 3.73c	238.48 ± 1.23d
显著性							
氮水平 (T)		ns			*		
种植模式 (P)		ns			*		
T × P		ns			**		

注: 不同大写字母表示同种作物比根长差异显著 ($P \leq 0.05$), 不同小写字母表示同种作物比表面积差异显著 ($P \leq 0.05$); * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; ns 表示不显著。

2.5 根系形态与植株产量的相关性

由图 5 可以看出, 小麦产量与根长、根系表面积呈正相关关系。说明随着小麦根系根长和小麦根系表面积增大, 小麦养分吸收利用增加, 进而增加

作物产量。由图 6 可以看出, 蚕豆产量与根长呈负相关, 与根系比表面积呈正相关, 说明根长增长不利于产量增加, 而根系比表面积增大, 有利于作物养分吸收利用, 进而增加作物产量。

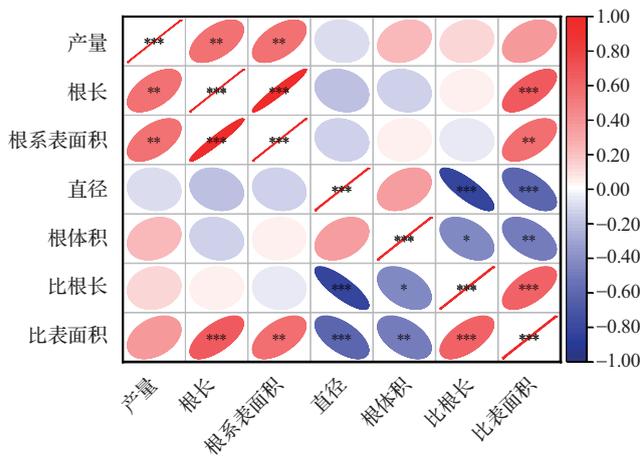


图 5 小麦根系形态与作物产量相关性

注: * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$ 。下同。

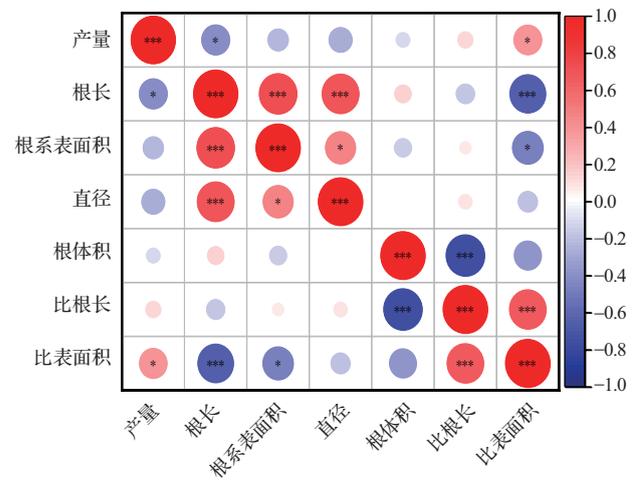


图 6 蚕豆根系形态与作物产量相关性系数

3 讨论

3.1 施氮量和不同间作方式下小麦、蚕豆的产量

研究表明,相同分隔方式下,随施氮量增加,小麦产量增加,尤其是塑料分隔(PB)与尼龙分隔(MB)方式下效果显著。与低氮(N/2)处理相比,常规施氮(N)与高氮水平(3N/2)小麦产量增加了3.35%~40.16%。但常规施氮与高氮相比,产量增加不明显,说明过量施氮并不能提高小麦产量,这与前人研究结果一致^[12]。与小麦不同,随施氮量增加,除尼龙分隔(MB)蚕豆产量增加外,塑料分隔(PB)和无分隔(NB)方式蚕豆产量变化并不明显。这一方面可能是因为低氮环境增加了间作种植对养分的竞争程度^[13],而增施氮肥可缓解竞争压力,促进作物产量增加^[14-16];另一方面,在小麦蚕豆间作体系中,间作的产量优势主要是种间营养生态位发生了分化^[17],蚕豆因为具有自身固氮功能而减少对土壤有效氮的吸收,可将土壤中的有效氮节约供给与之相伴的作物小麦利用^[18]。塑料分隔(PB)与无分隔(NB)方式地下部根系具有完全影响或不影响因素,对水分、养分吸收利用也具有完全影响,尼龙分隔(MB)根系时,地下部具有半交互作用,水分、养分可以通过尼龙网相互流动,根系之间没有交互影响^[19-22],因此,对小麦蚕豆间作产量增加效应更明显。

3.2 施氮量和不同间作方式下小麦、蚕豆的根系形态

已有研究表明,根系形态变化对植物养分吸收起着决定作用^[23-24],根长、根表面积和根直径等指标均可影响根系摄取土壤养分的能力^[25-26],但间作种植可通过改变作物根系形态促进作物对养分的吸收利用^[27]。本研究结果表明,低氮(N/2)和常规施氮(N)条件下,与尼龙分隔(MB)和塑料分隔(PB)相比,根系无分隔(NB)小麦根长、根系表面积、根系体积明显增加,而高氮条件下,尼龙分隔(MB)与塑料分隔(PB)小麦根长与根系表面积比无分隔(NB)增加效果更明显。同样地,低氮(N/2)和常规施氮(N)条件下,与尼龙分隔(MB)和塑料分隔(PB)相比,无分隔(NB)蚕豆根系表面积、直径、根系体积明显增加。说明低氮(N/2)和常规施氮(N)条件下,间作体系作物对养分竞争更激烈^[28],迫于对养分的强烈需求,根系需不断生长和变化,最大限

度地获取水分、养分等资源,而间作根系交互作用越明显,根系变化体现越明显^[29]。可以推测,间作可能是通过增加小麦的根长,增加根系体积,进而增大根表面积。而与之间作的蚕豆,养分竞争能力弱于小麦,间作作物根系交互作用越大,养分竞争作用越明显,相应地,根系指标变化表现也越明显^[30-32]。这些结果可能对小麦-蚕豆间作体系促进养分吸收的根系应答机理提供有利的证据。

3.3 小麦蚕豆间作作物产量与根系特征的关系

有研究表明,地下部水分和养分及根系的相互作用可以提高作物氮素累积吸收量,进而提高作物产量^[33]。本研究结果显示,小麦产量与根长和根系表面积呈正相关(图5),而蚕豆产量与根长呈负相关,与根系比表面积呈正相关(图6)。间作和施氮增加小麦根长、减少小麦根系平均直径的结果(表1)可以更好地解释低氮量环境下,间作可以促进小麦对氮素的吸收;而蚕豆在间作条件下显著增加其表面积,这是间作提高作物氮吸收的重要原因。小麦根系越长,根系表面积越大,与土壤接触面积就越广泛^[34],对水分、养分的吸收范围也越大,这样充分增强了小麦的竞争能力,在生长中表现出优势^[35]。与之相伴作物-蚕豆,由于自身固氮功能,减少根系大量伸长,增加表面积吸收水分和除氮素外的其他营养,与小麦相比,其竞争能力弱^[36],但并不影响间作整体产量的增加(无分隔产量>塑料分隔)。

4 结论

小麦蚕豆产量随施氮量增加而增加,常规施氮与高施氮量之间无显著差异。

低氮条件下,间作根系交互作用越大,小麦根长、根系表面积、比根长越大;蚕豆直径、根系体积、比表面积越大。

小麦产量与根长和根系表面积呈正相关,而蚕豆产量与根长呈负相关,与根系比表面积呈正相关。说明间作体系,作物之间根系形态变化是影响产量变化的表面驱动因子,低氮量环境下,根系间作程度越高,效果越明显。

参考文献:

- [1] 王雪蓉,张润芝,李淑敏,等.不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(9):1354-1363.
- [2] 丁红,张智猛,戴良香,等.水分胁迫和氮肥对花生根系形

- 态发育及叶片生理活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (2): 450-456.
- [3] Tang X, Placella S A, Davde F, et al. Phosphorus availability and microbial community in the rhizosphere of intercropped cereal and legume along a P-fertilizer gradient [J]. Plant and Soil, 2011 (407): 1-16.
- [4] Brooker R W, Bennett A E, Cong W F, et al. Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology [J]. New Phytologist, 2015, 206 (1): 107-117.
- [5] Yu Y, Stomph T J, Makowski D, et al. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management [J]. Field Crops Research, 2016, 198 (1): 269-279.
- [6] Tosti G, Farneselli M, Benincasa P, et al. Nitrogen fertilization strategies for organic wheat production: Crop yield and nitrate leaching [J]. Agronomy Journal, 2016 (108): 770-781.
- [7] Liu Y C, Yin X H, Xiao J X, et al. Interactive influences of intercropping by nitrogen on flavonoid exudation and nodulation in faba bean [J]. Scientific Reports, 2019, 9 (4818): 1-9.
- [8] McCormack M L, Dickie I A, Eissenstat D M, et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes [J]. New Phytologist, 2015, 207 (3): 505-518.
- [9] 柏文恋, 张梦瑶, 刘振洋, 等. 小麦与蚕豆间作体系根系形态与磷吸收的定量解析 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (4): 1317-1326.
- [10] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 等. 不同磷水平下玉米大豆-间作系统根系形态变化 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (9): 3223-3230.
- [11] Shen Y, Umaa M N, Li W, et al. Coordination of leaf, stem and root traits in determining seedling mortality in a subtropical forest [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 446 (1): 285-292.
- [12] Yang W, Li C, Wang S, et al. Influence of biochar and biochar-based fertilizer on yield, quality of tea and microbial community in an acid tea or chard soil [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 166: 104005.
- [13] Dwivedi A, Singh A, Naresh R K, et al. Towards sustainable intensification of maize (*Zea mays* L.) +legume intercropping systems: experiences: challenges and opportunities in India: A critical review [J]. Journal of Pure & Applied Microbiology, 2016, 10 (1): 725-740.
- [14] Li X, Dong J L, Chu W Y, et al. Adsorption efficiency of a continuous trapping system and its use for the collection of root exudates from cucumber [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178 (1): 963-975.
- [15] Zhang Y, Liu J, Zhang J, et al. Row Ratios of intercropping maize and soybean can affect agronomic efficiency of the system and subsequent wheat [J]. Plos One, 2015, 10 (6): 1-16.
- [16] Xu Z, Li C J, Zhang C C, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use: A meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2020, 246 (1): 1-46.
- [17] Fan F L, Zhang F S, Song Y N, et al. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems [J]. Plant and Soil, 2006, 283 (1): 275-286.
- [18] Corre-hellou G, Brisson N, Launay M, et al. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies [J]. Field Crops Research, 2007, 103 (1): 76-85.
- [19] 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, 19 (1): 3702-3713.
- [20] 柴强, 殷文. 间作系统的水分竞争互补机理 [J]. 生态学杂志, 2017, 36 (1): 233-239.
- [21] Latati M, Blavet D, Alkama N, et al. The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil [J]. Plant & Soil, 2014, 385 (1-2): 1-11.
- [22] Hu F L, Gan Y T, Cui H Y, et al. Intercropping maize and wheat with conservation agriculture principles improves water harvesting and reduces carbon emissions in dry areas [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 74 (1): 9-17.
- [23] Umaña M N, Cao M, Lin L X, et al. Trade-offs in above-and below-ground biomass allocation influencing seedling growth in a tropical forest [J]. Journal of Ecology, 2021, 109 (1): 1184-1193.
- [24] Fernandes A M, Soratto R P, Gonsales J R. Root morphology and phosphorus uptake by potato cultivars grown under deficient and sufficient phosphorus supply [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 80 (1): 190-198.
- [25] 张旭东, 王智威, 韩清芳, 等. 玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应 [J]. 生态学报, 2016, 36 (10): 2969-2977.
- [26] 陈志君, 孙仕军, 张旭东, 等. 东北雨养区覆膜和种植密度对玉米田间土壤水分和根系生长的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31 (1): 224-235.
- [27] 陈海英, 余海英, 陈光登, 等. 低磷胁迫下磷高效基因型大麦的根系形态特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (10): 3020-3026.
- [28] Boonman C C F, Langevelde F V, Oliveras I, et al. On the importance of root traits in seedlings of tropical tree species [J]. New Phytologist, 2020, 227 (1): 156-167.
- [29] Lambers H, Shane M W, Cramer M D, et al. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits [J]. Annals of Botany, 2006, 98 (1): 693-713.
- [30] 张梦瑶, 肖靖秀, 汤利, 等. 不同磷水平下小麦蚕豆间作对根际有效磷及磷吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,

- 2019, 25 (7): 1157-1165.
- [31] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65 (1): 61-71.
- [32] Li C J, Dong Y, Li H G, et al. Shift from complementarity to facilitation on P uptake by intercropped wheat neighboring with faba bean when available soil P is depleted [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (18663): 1-8.
- [33] 王宇蕴, 李兰, 王瑞雪, 等. 不同磷水平下小麦-蚕豆间作根系形态的变化及其与内源激素的关系 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (9): 3033-3039.
- [34] 杨振亚, 周本智, 陈庆标, 等. 干旱对杉木幼苗根系构型及非结构性碳水化合物化合物的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (18): 6729-6740.
- [35] 杜丽思, 李铷, 董玉梅, 等. 胜红蓟种子萌发/出苗对环境因子的响应 [J]. *生态学报*, 2019, 39 (15): 5662-5669.
- [36] 张亮. 黄土高原旱作春玉米根-冠协同关系及其调控 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.

Effects of nitrogen application rates on yield and root characteristics in wheat and faba bean intercropping system

LIU Ying-chao^{1, 2}, WAN Shan-ping², HUANG Min¹, ZHENG Yi^{2, 3*} (1. College of Agronomy and Biology Science, Kunming University, Kunming Yunnan 650214; 2. College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 3. Yunnan Rural Revitalization Institution, Yunnan Open University, Kunming Yunnan 650101)

Abstract: Through pot experiment of wheat // faba bean root nylon separation (MB), wheat // faba bean root plastic separation (PB), wheat // faba bean root no separation (NB), the root morphological characteristics of wheat and faba bean were systematically explored under different nitrogen application levels and intercropping conditions to provide a basis for further exploring the mechanism of crop yield in the intercropping system. The results showed that the yield of wheat, the diameter and surface area of faba bean root were all increased with the increase of nitrogen application rate. Under deficient nitrogen (N/2) condition, compared with PB and MB, the wheat root length of NB were increased by 0.66% and 2.61%, root surface area of wheat were increased by 56.14% and 52.75%, and specific root length of wheat were increased by 18.55% and 64.92%, specific root surface area of wheat were increased by 64.04% and 82.98%, respectively; the faba bean yield of NB were increased by 26.29% and 34.84%, root dry weight were increased by 35.1% and 45.4%, root surface area of faba bean were increased by 72.66% and 29.12%, root diameter of faba bean were increased by 66.67% and 14.82%, root volume of faba bean were increased by 9.55% and 5.91%, specific root surface area of faba bean were increased by 165.62% and 134.76%, respectively. The yield of wheat was positively correlated with root length and root surface area, while the yield of faba bean was negatively correlated with root length and positively correlated with specific root surface area. In different intercropping system, root morphological changes between crops were the surface driving factors affecting yield changes. Under low nitrogen environment, the higher the degree of root intercropping, the more obvious the effect.

Key words: *Tricum aestivum*; *Vicia faba*; root barriers; nitrogen application; yield; root morphology