

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21561

施磷对玉米 – 大豆间作结瘤固氮及氮素吸收的影响

农玉琴, 骆妍妃, 陈远权, 李金婷, 韦持章, 韦锦坚, 覃潇敏*

(广西南亚热带农业科学研究所, 广西 崇左 532415)

摘要: 通过盆栽模拟试验, 探讨不同供磷水平对玉米 – 大豆间作作物生物量、根瘤生长与固氮特性以及植株氮素吸收量的影响, 并初步分析间作植株氮素吸收与生物固氮之间的关系。结果表明: 不同磷水平下, 玉米 – 大豆间作具有显著的氮吸收优势, 氮吸收当量比 (LER_N) 介于 1.25 ~ 1.41 之间。与单作相比, 在 3 个磷水平上间作玉米的平均氮素吸收量在小喇叭口期、大喇叭口期和孕穗期分别提高 30.95%、30.50% 和 25.59%; 间作大豆的平均氮素吸收量在分枝期、开花期和结荚期分别提高 42.18%、32.25% 和 32.01%。与常规施磷水平下的单作处理相比, 玉米 – 大豆间作条件下, 磷肥减少 50% 并未降低玉米和大豆植株的氮素吸收量。在 3 个生育期, 间作及施磷均显著提高了大豆根瘤数、根瘤重以及根瘤固氮酶活性, 且磷肥减少 50% 供应时并不影响间作大豆根瘤的生长与固氮。本试验条件下, 玉米 – 大豆间作具有氮磷养分协同高效的优点, 可以减少磷肥施用。

关键词: 施磷量; 玉米 – 大豆间作; 结瘤固氮; 氮素吸收

磷不仅在植物生长发育、生理代谢与增产等方面发挥着不可替代的作用^[1], 还在豆科作物的生物固氮中扮演着十分重要的角色^[2]。磷素作为植物体内能量传递、转换的重要元素, 能直接或间接地影响豆科根瘤的形成、生长和固氮功能^[3-4]。国内外的大量研究表明, 缺磷胁迫下, 豆科作物的根瘤生长与固氮酶活性显著降低^[5-6]; 而合理施用磷肥能显著提高豆科作物的根瘤数量、根瘤重以及固氮效率^[7-8]。红壤为我国南方地区主要的耕作土壤, 由于其铁、铝等含量高, 磷肥极易被红壤固定, 而土壤中有效磷的缺乏, 严重制约了豆科作物的生物固氮及产量^[9]。因此, 在土壤普遍缺磷的条件下, 如何改善豆科作物的生物固氮功能, 已经引起了国内外的高度关注。

在禾本科 – 豆科间作模式中, 豆科作物的共生固氮作用能够减少化学氮肥的投入, 因此这种模式被认为是一种可持续发展的生态友好农业生产方式^[10]。赵财等^[11]研究结果表明, 与单作相比, 玉

米 – 豌豆间作显著增加了豌豆的有效根瘤数和根瘤重。赵雅姣等^[12]研究也发现, 间作苜蓿的根瘤数、根瘤重以及固氮酶活性均显著高于单作, 从而提高了间作玉米的氮素吸收累积。最新的研究发现, 在禾本科 – 豆科间作系统中, 如在玉米 – 蚕豆^[13]、小麦 – 蚕豆^[14]等间作体系中, 间作通过根系分泌物刺激蚕豆根瘤生长与固氮, 从而促进了间作体系的氮素吸收量。这些研究结果表明, 豆科与禾本科间作能够改善其结瘤固氮效率, 但不同施磷条件下, 间作对豆科根瘤生物固氮影响的研究尚少。

玉米 – 大豆间作是西南旱地红壤区一种传统的种植模式, 具有明显的资源高效、增产及控病等优势^[15-17]。许多研究表明, 玉米 – 大豆间作显著改善了大豆根瘤生长与固氮效率, 具有明显的氮吸收优势^[18-20]。但随着施磷水平的改变, 在玉米 – 大豆间作系统中, 大豆根瘤的生长与固氮效率会产生怎样的变化以及对间作作物氮素吸收有怎样的影响, 目前尚不清楚。因此, 本研究以玉米 – 大豆间作体系为研究对象, 通过盆栽试验探讨不同供磷水平下玉米 – 大豆间作体系的生物量、根瘤生长特性、固氮酶活性以及植株氮素吸收量等的变化, 并初步分析植株氮素吸收与生物固氮之间的关系, 旨在为该间作模式的氮、磷养分协同高效及合理施肥提供理论依据。

收稿日期: 2021-10-22; 录用日期: 2022-01-09

基金项目: 广西区自然科学基金项目 (2018GXNSFBA281128, 2018JJB130065)。

作者简介: 农玉琴 (1986-), 助理研究员, 硕士, 主要从事间作系统养分利用与病害控制。E-mail: 18378151635@163.com。

通讯作者: 覃潇敏, E-mail: qinxiaomin89@163.com。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

盆栽试验于 2019 年在广西南亚热带农业科学研究所格林温室大棚中实施。供试土壤为旱地红壤, 基本理化性状如下: 有机质 7.88 g/kg, 碱解氮 44.67 mg/kg, 有效磷 6.36 mg/kg, 速效钾 119.54 mg/kg, pH 5.12。

供试材料: 玉米 (*Zea mays* L.) 品种为桂单 -165; 大豆 (*Glycine max* L.) 品种为桂春 -15。

1.2 试验设计

盆栽试验包含磷肥水平和种植制度两因素, 施磷水平设 P₂O₅ 施用量分别为 0、50 和 100 kg (干土), 记为 P0、P50 和 P100, 其中 P100 为常规用量, P50 为用量减少 50%。种植制度设玉米单作、大豆单作与玉米 - 大豆间作 3 种植处理, 间作处理按照 1:1 种植, 即每盆玉米与大豆各 2 株, 单作处理每盆种植玉米或大豆 4 株, 每盆行株距保持一致。试验设 3 种植模式和 3 个磷水平, 共 9 个处理, 每个处理 3 个生物学重复, 分 3 次采样, 共 81 盆, 花盆随机排列。氮和钾肥用量: N 150 mg/kg (干土)、K₂O 150 mg/kg (干土), 均按照纯养分换算。

试验塑料盆规格大小为底部直径 195 mm × 高度 240 mm, 每盆装红壤 (过 2 mm 筛) 10 kg。氮肥分 2 次施用, 50% 作基肥, 剩下 50% 在拔节期追施; 氮肥追施时只施在单作玉米处理和间作处理的玉米一侧, 大豆不进行追肥; 磷肥与钾肥均作为基肥施入。整个生育期定期浇水及人工除草, 并定期调换塑料盆的摆放位置。

1.3 样品采集

在大豆分枝期、开花期、结荚期以及玉米小喇叭口期、大喇叭口期、孕穗期进行破坏性采样, 其中每盆作一个生物学重复, 每个处理采 3 盆; 单作

处理时每盆采 4 株 (玉米或大豆), 间作处理时每盆 2 种作物分别采 2 株, 然后混为一个样品。植株清洗干净后于 105 °C 杀青、75 °C 烘干至恒重, 分别称其干重计算生物量, 粉碎后用于植株全氮含量测定。然后将大豆根系清洗干净并把根瘤全部摘下, 计数, 烘干并称重; 同时采集根瘤鲜样置于 -80 °C 冰箱中, 用于固氮酶活性的分析测定。

1.4 测定项目和方 法

植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定^[21]; 根瘤固氮酶活性采用乙炔还原法进行测定^[22]。

1.5 数据统计与分 析

数据用 Excel 2010 进行平均数及标准误的计算、绘制柱状图。数据差异采用 SPSS 20.0 做单因素方差分析 (LSD 法, α=0.05)。

氮吸收土地当量比 (LER_N) = N_{IM}/N_{MM}+N_{IS}/N_{MS}, 式中, N_{IM} 和 N_{MM} 分别表示间作玉米和单作玉米植株的氮吸收量; N_{IS} 和 N_{MS} 分别表示间作大豆和单作大豆植株的氮吸收量。当 LER_N>1 时, 表现为氮吸收优势; LER_N<1 时, 则为氮吸收劣势。

2 结果与分 析

2.1 不同磷水平对玉米 - 大豆间作作物生长的影响

从表 1 可以看出, 间作显著促进玉米和大豆的生长。P0、P50 和 P100 水平下, 间作大豆生物量在分枝期较单作大豆分别显著增加 49.28%、40.80% 和 58.88%, 在开花期分别显著增加 26.99%、18.49% 和 31.94%, 在结荚期分别显著增加 27.91%、35.12% 和 30.22%; 间作玉米生物量在小喇叭口期较单作玉米分别显著增加 35.72%、20.64% 和 32.08%, 在大喇叭口期分别显著增加 58.60%、66.47% 和 58.45%, 在孕穗期分别显著增加 27.91%、35.12% 和 30.22%。以上表明, 间作种植显著促进了不同

表 1 施磷对玉米 - 大豆间作不同生育期作物生物量的影响

(g/株)

| 磷水平 | 种植模式 | 大豆 | | | 玉米 | | |
|------|------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 分枝期 | 开花期 | 结荚期 | 小喇叭口期 | 大喇叭口期 | 孕穗期 |
| P0 | M | 3.47 ± 0.18f | 7.78 ± 0.04d | 12.36 ± 0.66d | 12.71 ± 0.41d | 18.96 ± 0.52f | 30.59 ± 1.72d |
| | I | 5.18 ± 0.38d | 9.88 ± 0.68c | 15.81 ± 0.61c | 17.25 ± 0.93c | 30.07 ± 1.03d | 44.10 ± 0.68c |
| P50 | M | 4.78 ± 0.16e | 10.17 ± 0.80c | 17.37 ± 0.44c | 17.39 ± 1.25c | 24.34 ± 0.73e | 49.47 ± 2.45c |
| | I | 6.73 ± 0.13b | 12.05 ± 0.60b | 23.47 ± 0.76b | 20.98 ± 1.12b | 40.52 ± 2.86b | 69.78 ± 3.76b |
| P100 | M | 5.69 ± 0.15c | 11.71 ± 0.14b | 24.49 ± 0.89b | 21.57 ± 0.31b | 33.60 ± 1.56c | 65.28 ± 5.04b |
| | I | 9.04 ± 0.25a | 15.45 ± 0.05a | 31.89 ± 1.75a | 28.49 ± 1.96a | 53.24 ± 3.29a | 90.51 ± 5.54a |

注: M- 单作玉米 / 单作大豆, I- 间作玉米 / 间作大豆; 不同小写字母表示同一列所有处理间的差异显著 (P<0.05)。

生育期玉米和大豆植株的生长。此外，无论单作还是间作条件下，与不施磷处理相比，适当增施磷肥均显著提高了各生育期玉米和大豆植株的生物量。

2.2 不同磷水平对玉米-大豆间作作物氮素吸收的影响

2.2.1 氮吸收优势

由图 1 可以看出，P0、P50 和 P100 水平下，玉

米-大豆间作体系的氮吸收当量比 (LER_N)，在小喇叭口期/分枝期分别为 1.40、1.36 和 1.35；在大喇叭口期/开花期分别为 1.41、1.26 和 1.27；在孕穗期/结荚期分别为 1.34、1.28 和 1.25。从各生育期的试验结果可以看出， LER_N 不受磷水平的调控。以上表明，玉米-大豆间作体系具有显著的氮素吸收优势。

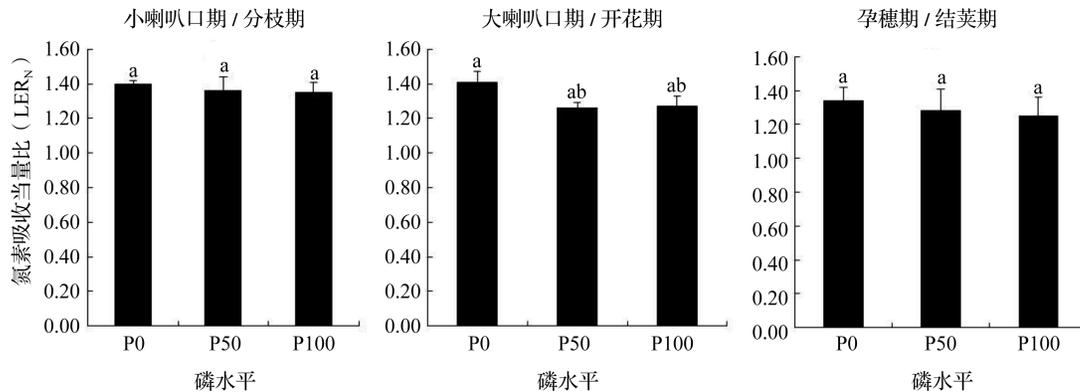


图 1 不同磷水平下玉米-大豆间作不同生育期的氮素吸收当量比 (LER_N)

注：不同小写字母表示不同磷水平下氮素吸收当量比的差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2.2 氮素吸收特征

由图 2 可以看出，与单作玉米相比，在 P0、

P50 和 P100 水平下，间作玉米植株的氮素吸收量在小喇叭口期分别显著提高 34.18%、30.11%

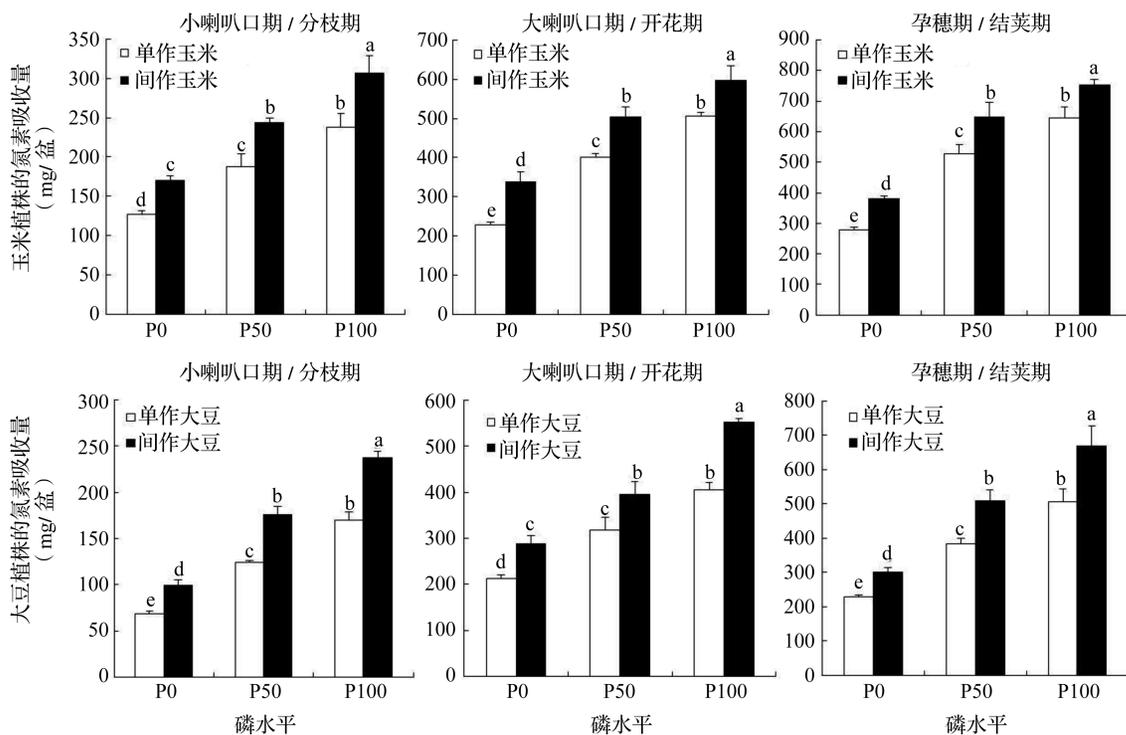


图 2 施磷对玉米-大豆间作不同生育期作物氮素吸收量的影响

注：不同小写字母表示所有处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

和 28.57%，在大喇叭口期分别显著提高 47.70%、25.95% 和 17.86%，在孕穗期分别显著提高 37.28%、22.71% 和 16.78%。P0、P50 和 P100 水平下，间作大豆植株的氮素吸收量在分枝期较单作大豆分别显著提高 45.14%、41.43% 和 39.96%，在开花期分别显著提高 35.30%、24.80% 和 36.65%，在结荚期分别显著提高 30.87%、32.87% 和 32.30%。以上表明，间作种植促进了玉米和大豆植株对氮素的吸收。

施磷也显著影响玉米和大豆植株对氮素的吸收 (图 2)。无论单作还是间作种植下，与不施磷处理 (P) 相比，合理施磷显著提高了各生育期玉米和大豆植株的氮素吸收量。此外，在各生育期，与常规施磷水平 (P100) 的单作玉米和大豆相比，低磷 (P50) 条件下间作玉米和大豆植株的氮素吸收量并不降低，表明间作种植后不影响低磷胁迫下玉米和大豆植株的氮素吸收。

2.3 不同磷水平对玉米 - 大豆间作根瘤生长的影响

2.3.1 根瘤数

由图 3 可以看出，间作显著促进了大豆根瘤的形成。与单作大豆相比，在 P0、P50 和 P100 水平下，间作大豆的根瘤数在分枝期分别显著增加 49.91%、76.85% 和 55.47%，在开花期分别显著增加 42.16%、54.91% 和 31.17%，在结荚期分别显著增加 29.68%、67.45% 和 46.02%，并且大豆根瘤数随着生育期的推进先增加后下降。同时，大豆根瘤的形成受施磷水平的显著调控。在分枝期、开花期和结荚期，P50 和 P100 水平下，单作大豆根瘤数较 P0 水平分别显著增加 64.55% 和 183.60%，142.26% 和 218.19%、102.24% 和 246.31%，间作大豆根瘤数较 P0 水平分别显著增加 94.12% 和 194.12%、163.99% 和 252.41%、161.14% 和 289.93%。同样，在各生育期，低磷水平下间作大豆根瘤数与常规施磷水平 (P100) 的单作大豆相比，并未降低。

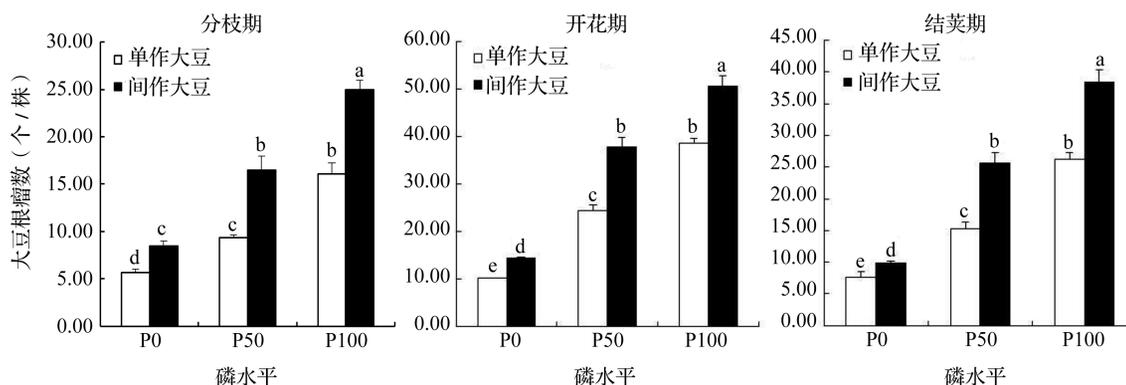


图 3 施磷对玉米 - 大豆间作不同生育期根瘤数的影响

2.3.2 根瘤重

根瘤生物量在一定程度上能够间接表明根瘤的固氮能力，即根瘤生物量越大，根瘤的固氮能力相对较强。由图 4 可以看出，间作种植显著影响大豆根瘤生物量。与单作大豆相比，在 P0、P50 和 P100 水平下，间作大豆根瘤重在分枝期分别显著提高 39.24%、69.42% 和 42.27%，在开花期分别显著提高 37.27%、69.75% 和 23.53%，在结荚期分别显著提高 24.24%、77.48% 和 31.92%，并且随着生育期的推进大豆根瘤重呈先增加后下降的趋势。同样，施磷显著影响大豆根瘤生物量。在分枝期、开花期和结荚期，与 P0 水平相比，P50 和 P100 水平下单作大豆根瘤重分别显著提高 53.16% 和 145.57%、116.36% 和 255.45%、52.52% 和 162.63%，间作大豆

根瘤重分别显著提高 86.36% 和 150.91%、167.55% 和 219.87%、117.89% 和 178.86%，并且低磷条件下间作大豆根瘤重与常规施磷水平 (P100) 的单作大豆相比无明显差异。

2.4 不同磷水平对玉米 - 大豆间作根瘤固氮酶活性的影响

固氮酶活性与根瘤固氮能力紧密相关，其活性高低反映了根瘤固氮能力的大小。由图 5 可以看出，间作显著增强了大豆固氮酶活性。在分枝期，P0、P50 和 P100 水平下间作大豆根瘤固氮酶活性较单作大豆分别显著提高 50.00%、37.35% 和 47.97%；在开花期，P0、P50 和 P100 水平下间作大豆根瘤固氮酶活性较单作大豆分别显著提高 25.35%、52.13% 和 27.59%；在结荚期，P0、P50

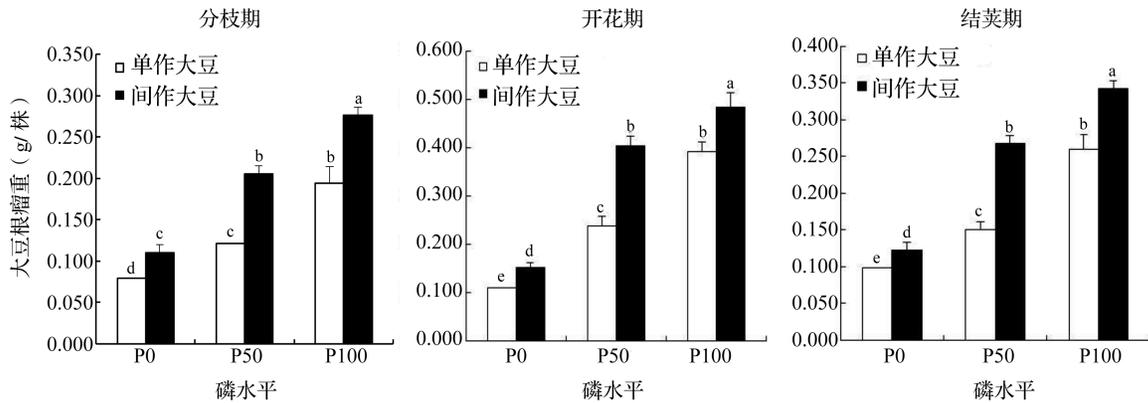


图4 施磷对玉米-大豆间作不同生育期根瘤重的影响

和 P100 水平下间作大豆根瘤固氮酶活性较单作大豆分别显著提高 61.45%、34.39% 和 37.16%。同样,大豆根瘤固氮酶活性随着生育期的推进表现为先增加后下降的趋势,在开花期根瘤固氮酶活性最强。

适当增施磷肥显著增强了大豆根瘤固氮酶活性(图5)。在分枝期、开花期和结荚期,与 P0 水平相比, P50 和 P100 水平下单作大豆根瘤固氮酶

活性分别显著提高 72.92% 和 156.25%、48.59% 和 124.65%、89.16% 和 162.65%,间作大豆根瘤固氮酶活性分别显著提高 58.33% 和 152.78%、80.34% 和 128.65%、57.46% 和 123.13%。同样,与常规施磷水平(P100)的单作大豆相比,低磷(P50)条件下间作大豆根瘤固氮酶活性并不降低,表明间作可以减缓低磷胁迫对大豆根瘤固氮能力的抑制。

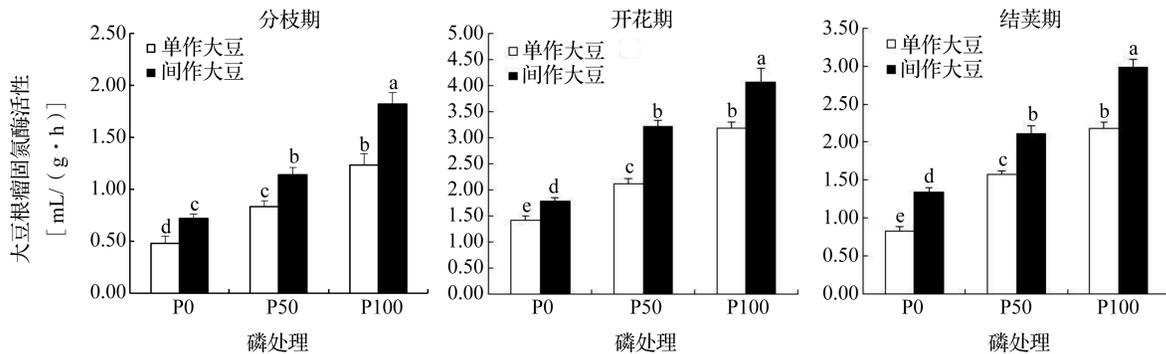


图5 施磷对玉米-大豆间作不同生育期根瘤固氮酶活性的影响

3 讨论

豆科作物因其自身的生物固氮潜力在农业生态系统中具有十分重要的地位,但是土壤中磷的有效性低已严重制约了豆科作物的结瘤固氮与产量。在苜蓿^[6]、菜豆^[23]、白羽扇豆^[24]等豆科作物中,缺磷显著抑制了根瘤的生长与固氮效率;合理供应磷肥后,根瘤数、根瘤重以及固氮效率显著增强。本试验条件下,无论单作还是间作种植,适当增施磷肥显著提高了大豆根瘤数、根瘤重以及固氮酶活性,这与前人的研究结果一致,说明大豆根瘤的生长与固氮功能也受到磷有效性的显著调控。

大量的研究结果已证实,豆科-禾本科间作能

够促进豆科作物的共生固氮,并促进与之间作禾本科的氮素吸收,能够减少氮肥的输入,是一种天然的生态友好农业生产方式。冯晨等^[25]研究结果发现,玉米-花生间作显著提高了花生根瘤数与根瘤重,明显促进了花生根瘤的形成。Liu等^[26]在小麦-蚕豆间作模式中也发现,间作蚕豆的根瘤数、根瘤重以及固氮酶活性高于单作蚕豆,并显著提高了群体的氮素吸收。本试验中,无论磷肥施用水平的高低,玉米-大豆间作均显著提高了各生育期大豆根瘤数、根瘤重以及根瘤固氮酶活性,这与前人的试验结果一致。而且在磷肥减少 50% 供应时,间作大豆根瘤数、根瘤重以及固氮酶活性与常规施磷水平的单作大豆相比,并未降低,说明玉米-大

豆间作促进了大豆的结瘤固氮。目前的研究已证实,维持根瘤内的磷平衡是豆科植物根瘤响应低磷胁迫的主要适应性机制之一^[27-28]。综上表明,低磷胁迫下,玉米-大豆间作可能是通过调控大豆根瘤内的磷平衡来维持根瘤的生长与固氮效率。

大量的研究结果表明,大部分的禾本科与豆科作物间作体系如小麦//蚕豆^[29]、玉米//花生^[30]等具有显著的氮素高效吸收优势。本研究结果也表明,玉米-大豆间作具有明显的氮素吸收优势($LER_N > 1$),表现为在各生育期间作玉米和大豆植株的氮素吸收量较单作处理同时显著增加。已有研究表明,在豆科/禾本科间作系统中,间作氮吸收优势的形成离不开豆科作物的共生固氮作用。如在水稻-花生^[31]、小麦-蚕豆^[14]、玉米-花生^[32]等间作系统中的研究发现,豆科作物生物固氮效率的增强是间作系统氮素吸收优势形成的主要原因。肖焱波等^[33]应用¹⁵N稀释技术也证实了在小麦-蚕豆间作系统中,蚕豆固定的氮素中有5%向间作小麦发生了转移,进而提高了间作小麦的氮素营养。综合前人的研究结果表明,在玉米-大豆间作系统中,大豆根瘤固氮效率的提高也是该系统氮素吸收增加的主要原因之一,但是大豆根瘤固定的氮素有多少向玉米发生转移还需要进一步深入分析。

本研究还发现,无论单作还是间作种植下,施用磷肥均显著提高了各生育期玉米和大豆植株的氮素吸收量,这可能是因为合理施用磷肥有利于促进植物的生长和氮素吸收^[34]、增强大豆根瘤共生固氮效率^[27]所致。而且与常规磷水平的单作处理相比,玉米-大豆间作体系的氮素吸收量在磷肥减少50%时并不降低,说明在玉米-大豆间作系统中,磷肥减少50%并不会影响氮素效应的发挥,存在氮、磷养分协同高效的潜力,这可能是低磷条件下间作大豆根瘤固氮效率不受影响所致。因此,在农业生产过程中,应充分利用禾本科-豆科间作系统中豆科作物的生物固氮潜力,最大限度地挖掘氮磷养分之间的协同效应,减少磷肥的投入。

4 结论

不论磷肥施用水平高低,间作显著增加了玉米、大豆植株的生物量和氮素吸收量,并显著提高了大豆根瘤数、根瘤重以及固氮酶活性,具有明显的氮吸收优势(LER_N 介于1.25~1.41之间)。适当增施磷肥显著促进了大豆根瘤的生长与固氮,并

显著提高玉米和大豆植株的生物量与氮素吸收量。玉米-大豆间作在磷肥减少50%的条件下能够维持根瘤的生物固氮潜力,并促进了作物对氮素的吸收,具有节约磷肥的空间。

参考文献:

- [1] Cordell D, White S. Life's bottleneck: Sustaining the world's phosphorus for a food secure future [J]. *Annu Rev Environ Resour*, 2014, 39: 161-188.
- [2] Valentine A J, Kleinert A, Benedito V A. Adaptive strategies for nitrogen metabolism in phosphate deficient legume nodules [J]. *Plant Science*, 2017, 256: 46-52.
- [3] Schulze J, Temple G, Temple S J, et al. Nitrogen fixation by white lupin under phosphorus deficiency [J]. *Ann Bot*, 2006, 98: 731-740.
- [4] Miao S J, Qiao Y F, Han X Z, et al. Nodule formation and development in soybeans (*Glycine max* L.) in response to phosphorus supply in solution culture [J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (1): 36-43.
- [5] Qin L, Zhao J, Tian L, et al. The high-affinity phosphate transporter GmPT5 regulates phosphate transport to nodules and nodulation in soybean [J]. *Plant Physiology*, 2012, 159: 1634-1643.
- [6] Sulieman S, Van Ha C, Schulze J, et al. Growth and nodulation of symbiotic *Medicago truncatula* at different levels of phosphorus availability [J]. *Journal of Experiment Botany*, 2013, 64: 2701-2712.
- [7] 齐敏兴, 刘晓静, 张晓磊, 等. 不同磷水平对紫花苜蓿光合作作用和根瘤固氮特性的影响 [J]. *草地学报*, 2013, 21 (3): 512-516.
- [8] Chen Z, Cui Q, Liang C, et al. Identification of differentially expressed proteins in soybean nodules under phosphorus deficiency through proteomic analysis [J]. *Proteomics*, 2011, 11 (24): 4648-4659.
- [9] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况 [J]. *土壤通报*, 2011, 42 (3): 763-768.
- [10] Hu F, Zhao C, Feng F C, et al. Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea [J]. *Plant and Soil*, 2017, 412: 235-251.
- [11] 赵财, 柴强, 乔寅英, 等. 禾豆间作对间作豌豆“氮阻遏”减缓效应的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24 (9): 1169-1176.
- [12] 赵雅姣, 刘晓静, 童长春, 等. 紫花苜蓿/玉米间作对紫花苜蓿结瘤固氮特性的影响 [J]. *草业学报*, 2020, 29 (1): 95-105.
- [13] Li B, Li Y Y, Wu H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N_2 fixation [J]. *PNAS*, 2016, 113: 6496-6501.

- [14] 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: 1–11.
- [15] 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: 107661.
- [16] Zhang R, Meng L, Li Y, et al. Yield and nutrient uptake dissected through complementarity and selection effects in the maize/soybean intercropping [J]. *Food Energy Security*, 2021, 10: 1–15.
- [17] 常玉明, 张正坤, 赵宇, 等. 玉米大豆间作对玉米主要病虫害发生及其产量的影响 [J]. *植物保护学报*, 2021, 48 (2): 332–339.
- [18] 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.
- [19] 雍太文, 董茜, 刘小明, 等. 施肥方式对玉米-大豆套作体系氮素吸收利用效率的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2014, 36 (1): 84–91.
- [20] 周贤玉, 唐艺玲, 王志国, 等. 减量施氮与间作模式对甜玉米 AMF 侵染和大豆结瘤及作物氮磷吸收的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (8): 1139–1146.
- [21] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 张晓娜, 陈平, 杜青, 等. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2019, 27 (8): 1183–1194.
- [23] Araújo A P, Plassard C, Drevon J J. Phosphatase and phytase activities in nodules of common bean genotypes at different levels of phosphorus supply [J]. *Plant and Soil*, 2008, 312: 129–138.
- [24] Thuynsma R, Valentine A, Kleinert A. Phosphorus deficiency affects the allocation of below-ground resources to combined cluster roots and nodules in *Lupinus albus* [J]. *J Plant Physiol*, 2013, 173: 1–7.
- [25] 冯晨, 冯良山, 孙占祥, 等. 辽西半干旱区不同施氮水平下玉米//花生系统对花生结瘤特性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019 (4): 127–131.
- [26] Liu Y C, Qin X M, Xiao J X, et al. Intercropping influences component and content change of flavonoids in root exudates and nodulation of Faba bean [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2017, 12: 187–192.
- [27] Lu M Y, Cheng Z Y, Zhang X M, et al. Spatial divergence of PHRPHT1 modules maintains phosphorus homeostasis in soybean nodules [J]. *Plant Physiology*, 2020, 184 (1): 236–250.
- [28] Esfahani M N, Kusano M, Nguyen K H, et al. Adaptation of the symbiotic Mesorhizobium-chickpea relationship to phosphate deficiency relies on reprogramming of whole-plant metabolism [J]. *PNAS*, 2016, 22: 4610–4619.
- [29] 刘振洋, 吴鑫雨, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作体系氮素吸收累积动态及其种间氮素竞争关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (7): 1284–1294.
- [30] 焦念元, 汪江涛, 尹飞, 等. 施用乙烯利和磷肥对玉米//花生间作氮吸收分配及间作优势的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (6): 1477–1484.
- [31] 褚贵新, 沈其荣, 李弈林, 等. ^{15}N 叶片标记法研究旱作水稻与花生间作系统中氮素的双向转移 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (2): 278–284.
- [32] 房增国, 左元梅, 赵秀芬, 等. 玉米-花生混作系统中的氮铁营养效应 [J]. *生态环境*, 2006, 15 (1): 134–139.
- [33] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38 (5): 965–973.
- [34] 杨欢, 赵浚宇, 施凯, 等. 磷素施用对鲜食糯玉米养分积累分配和产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2016, 24 (1): 148–155.

Effects of phosphorus fertilizer application on nodulation, nitrogen fixation and nitrogen uptake in maize and soybean intercropping

NONG Yu-qin, LUO Yan-fei, CHEN Yuan-quan, LI Jin-ting, WEI Chi-zhang, WEI Jin-jian, QIN Xiao-min* (Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Chongzuo Guangxi 532415)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of different phosphorus levels on crop biomass, nodule growth, nitrogen fixation and plant nitrogen uptake in maize and soybean intercropping, and preliminarily analyze the relationship between plant nitrogen uptake and biological nitrogen fixation. The results showed that maize and soybean intercropping had significant advantages in nitrogen uptake under different phosphorus levels, and the values of nitrogen absorption equivalent ratio (LER_N) ranged from 1.25 to 1.41. Compared with monocropping, the average nitrogen uptake of intercropped maize at three phosphorus levels increased by 30.95%, 30.50% and 25.59% at small belling, big belling and booting stages and that of intercropped soybean increased by 42.18%, 32.25% and 32.01% at branching, flowering and podding stages, respectively. The nitrogen uptake of intercropped maize and soybean did not reduce in the P50 treatment, compared to the corresponding monocropping in the P100 treatment. At the three growth stages, intercropping and phosphorus fertilizer application significantly increased the nodules number, nodule dry weight and nodule nitrogenase activity on soybean roots, and the reduction of phosphorus fertilizer rate by 50% did not affect the growth and nitrogen fixation of soybean nodules under intercropping. Under the tested conditions, maize and soybean intercropping had the synergistic effects in nitrogen and phosphorus uptake, and reduced the application of phosphorus fertilizer.

Key words: phosphorus rates; maize-soybean intercropping; nodulation and nitrogen fixation; nitrogen uptake