

孙 岩, 乔月彤, 赵 强, 等. 玉米与豆科作物间套作体系氮素吸收效应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(10): 21–28.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.10.003

玉米与豆科作物间套作体系氮素吸收效应研究进展

孙 岩¹, 乔月彤², 赵 强^{2,3}, 胡延峰¹, 朱英华³, 赵培国⁴, 宋立成¹, 夏海勇²

(1. 滨州市农业教育培训中心, 山东滨州 256601; 2. 山东省农业科学院作物研究所, 山东济南 250100;

3. 安徽农业大学农学院, 安徽合肥 230036; 4. 滨州市国盛农业科技有限公司, 山东滨州 256654)

摘要:玉米与豆科作物间套作可以提高作物对氮、磷、钾等养分的吸收能力, 从而提高土地利用当量比和耕地产能。通过查阅相关文献, 对玉米与豆科作物间套作体系氮素吸收的表观现象, 包括氮素吸收量、地上部生物量和籽粒产量等指标, 以及相关机制进行归纳总结。诸多研究结果表明, 玉米与豆科作物间套作可以提高玉米地上部氮素吸收量、地上部生物量和籽粒产量, 增长幅度分别在 6.0% ~ 57.5%、2.6% ~ 52.6% 和 14.0% ~ 64.2% 之间, 而与玉米全生育期共生间作的大豆、花生和豌豆等作物则受到抑制, 蚕豆等套作豆科作物(整个生育期中的部分时间与玉米共生, 通常与玉米错期播种/收获)则受到促进。关于玉米与豆科作物间套作体系氮素高效吸收的机制可概括为 3 个方面: 一是种间竞争作用, 由于玉米对氮素的竞争大于豆科作物, 促进玉米对氮素的竞争优势吸收; 二是作物根系相互作用和土壤微生物的存在, 促进养分循环和作物之间的氮素转移, 豆科作物固定的氮素可以被玉米吸收利用; 三是豆科作物结瘤增加, 固氮基因表达增强, 提高了自身固氮能力。在以往研究的基础上, 下一步需要加强在田间多场景(作物品种类型不同、土壤肥力梯度不同等)条件下的原位研究, 从根际生命共同体(根系-土壤-微生物)作用机制以及种间地上相互作用-地下相互作用互馈的角度, 更加全面和准确地阐明玉米与豆科作物间套作体系氮素高效吸收的机制, 并加强农机农艺融合关键调控技术的研发, 让传统间套作在现代农业中继续发光发热, 赓续农耕文明。

关键词:玉米; 豆科作物; 间套作; 氮素利用效率; 根际生命共同体

中图分类号:S344.2; S344.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)10-0021-08

作物间套作种植是指在同一地块面积上依据一定空间组合比例优化配置 2 种或 2 种以上农作物的栽培方法, 可以充分挖掘利用水、肥、气、热、光照、时间和空间等环境资源, 改善作物营养生长状况, 从而提高土地利用效率、增加系统综合产能和经济效益^[1]。与单作体系相比, 间套作体系的养分吸收量和粮食产量均优于单作, 并维持土壤肥力^[2]。玉米与豆科作物间套作是常见的一种作物间套作种植组合类型。研究发现, 豆科作物与玉米间套作种植能够提高体系对氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰、铜、锌等矿质元素的吸收利用能力^[3-6], 从而改善作物生长发育性状^[7], 最终增加总生物量和籽粒

的产量^[8]。例如, 玉米与花生共生能够防治花生叶片因缺铁所导致的失绿黄化现象的发生, 提高花生产量^[3,9]。

氮元素是作物生长发育所必需的大量元素之一, 如何提高作物氮素利用效率和合理利用氮肥是农业研究的重要方向之一。根瘤菌能够在豆科作物根系繁殖, 使得根皮层细胞形成根瘤, 赋予豆科作物生物固氮能力, 从而减少化学氮肥的使用, 促进农业可持续发展^[10]。已有许多研究表明, 谷类与豆科作物间套作体系的种间相互促进作用可以增加生物固氮能力, 提高氮素利用率, 降低土壤中过多矿质氮累积^[11-12]。

关于玉米与豆科作物间套作对玉米和豆科作物以及体系氮素吸收的影响, 前人已经做了大量的研究, 但由于试验配置和环境的差异, 导致研究结果存在诸多差异。本文系统归纳总结了玉米与豆科作物间套作体系氮素吸收的表观现象及相关机制, 并提出未来研究的方向, 以期对氮素资源的合理利用和通过间套作发展集约化生态农业提供有益借鉴。

收稿日期: 2023-10-21

基金项目: 国家重点研发计划子课题(编号: 2016YFD0300202); 山东省科技特派员创新创业共同体滨州市玉米产业服务团项目。

作者简介: 孙 岩(1969—), 女, 山东高青人, 高级农艺师, 主要从事基层农技推广和农民教育培训工作。E-mail: bzsy0898@126.com。

通信作者: 夏海勇, 博士, 副研究员, 主要从事农田粮油作物生态强化研究。E-mail: haiyongxia@cau.edu.cn。

1 间套作系统中氮素吸收的表观效应

目前,对于玉米与豆科作物间套作体系的研究已有许多,为详细了解氮素吸收的表观效应,通过查阅相关文献,笔者所在课题组总结并罗列了不同地区玉米与豆科作物间套作系统中作物地上部氮素吸收量、地上部生物量和籽粒产量与单作相比的相对变化情况(表 1),并收集了每个试验点具体的种植方式(间作/套作)、作物搭配组合、试验类型(盆栽/大田)、土壤质地和 pH 值以及种植行比等信息。

由表 1 可以看出,与大豆间作对玉米的生长整体有明显的促进作用,玉米地上部氮素吸收量、地上部生物量和籽粒产量明显高于单作,增长幅度分别在 6.0% ~ 57.5%、2.6% ~ 52.6%、14.0% ~ 64.2% 之间^[5,11,13-22];而间作对大豆的生长整体具有明显的抑制作用,降低了大豆氮素吸收。当玉米与大豆套作时,对大豆的生长整体具有明显促进作用^[23-26],原因在于套作情况下 2 种作物的共生期较短,玉米对大豆的遮阴影响小,且玉米收获后有利于大豆生长和干物质累积,发挥边行优势。玉米花生间作时,由于遮阴作用影响,抑制花生早期生长,不利于花生干物质积累和氮素吸收^[27-29]。玉米与蚕豆间作时具有明显的间作优势,玉米地上部氮吸收量、地上部生物量和籽粒产量比单作分别增加 1.5% ~ 30.5%、3.7% ~ 29.9%、0.7% ~ 23.3%,蚕豆地上部氮吸收量、地上部生物量和籽粒产量分别比单作增长 4.5% ~ 72.0%、13.9% ~ 72.0%、4.2% ~ 88.0%^[6,12,30-37]。玉米豌豆间作情况没有明显的规律,但是总体来看,玉米氮素吸收状况要优于豌豆^[38-41]。造成试验结果不同的原因涉及诸多因素。例如,不同地区每年降水量和土壤类型不同、试验设计不同,如豆科种类^[42]、行比和株距等存在差异;另外,盆栽和大田试验之间的表现会存在明显差异,甚至出现截然相反的结果。这些因素均会对作物生长发育和氮素吸收利用产生不同的影响。

Rodriguez 等从 29 篇已发表的文章中提取数据发现,与单作相比,谷类作物氮素吸收量提高 61%,而豆科作物降低 47%,但固氮量增加了 13% ~ 16%;与单作体系相比,间作体系的总氮量获取量平均提高 25%^[43]。由于种间竞争作用,豆科对氮的竞争力差,谷类作物对土壤氮获取量增加,促进豆

科生物固氮。但当肥料氮投入多时,豆科对肥料氮的吸收也会增加。通过增加间作氮固定和谷类作物土壤氮获取,持续刺激谷类作物和豆科间的氮互补利用,增加氮源利用,减少氮肥投入,从而提高可持续性。Xu 等通过数据分析发现,全球范围内玉米大豆间作体系的平均土地当量比为 1.32,而平均肥料氮当量比的数值则更高,为 1.44,即要获得与间作体系相同的产量,单作作物需要多投入 44% 的氮肥,说明间作能在减少氮肥投入的情况下提高土地生产力^[44]。

2 影响氮素吸收的因素

2.1 氮肥

氮肥是作物生长所必需的肥料,施加氮肥可以促进作物的生长,但过量施氮会造成土壤中的氮素含量过高,生态环境、生物多样性遭到破坏。过量氮肥会抑制豆科作物固氮作用,造成固氮量降低,这种现象被称为“氮阻遏”效应。较低或者过高的土壤肥力均会对间作作物的生长造成不利影响,优化氮素管理可以提高间作系统作物产量、经济效益和氮素利用效率。

Gao 等研究发现,间作体系在氮肥用量为 270 kg/hm² 时的综合经济效益好于更高氮肥投入时的综合经济效益^[45]。王雪蓉等研究表明,160 kg/hm² 施氮量时玉米 || 大豆间作体系的养分资源获取利用效果最佳^[46]。对玉米/大豆套作的研究发现,减量施氮,即 180 kg/hm² 时,大豆根际土固氮菌的数量比不施氮和常规施氮(240 kg/hm²) 分别高出 17.8% 和 5.7%,大豆根际土壤中脲酶活性和玉米根际土壤中蛋白酶和脲酶活性亦高于其他处理^[47];玉米根际土细菌数量分别增加 9.6% 和 9.8%^[48];大豆固氮量分别提高 29.7% 和 32.0%,大豆、玉米的吸氮量分别提高 12.4% 和 13.4%,氮肥利用率分别提高 117.5% 和 213.0%^[24,49]。

以上结果说明,在不降低整个间套作系统经济效益的前提下,适当减少氮肥施用,不仅可以减少氮损失,还能提高作物氮肥利用效率,避免氮污染,实现氮肥减量增效。除此之外,还可以通过氮磷配施的方式来提高间作优势。陈虹等研究发现,玉米/大豆套作模式下玉米氮磷配施以氮含量 180 kg/hm²、磷含量 70 kg/hm² 时,种间作用显著,效应最佳^[50-51]。

2.2 接种丛枝菌根真菌(AMF)和根瘤菌

土壤微生物与土壤中的物质和能量流动相关,

表 1 与单作作物相比,间套作系统作物地上部氮吸收量、地上部生物量和籽粒产量相对变化

种植方式	组合	试验类型	地区	土壤	pH 值	行比	地上部氮吸收量增幅(%)			地上部生物量增幅(%)			籽粒产量增幅(%)			参考文献
							体系	玉米	豆科作物	体系	玉米	豆科作物	体系	玉米	豆科作物	
间作	玉米∥大豆	大田	陕西	黏壤土	7.56	1:1	10.0	22.1	-22.3	35.2	52.6	-11.9	48.2	64.2	-18.1	[13]
间作	玉米∥大豆	水培	云南	—	—	—	—	24.0	-34.9	5.1	20.9	-11.9	—	—	—	[14]
间作	玉米∥大豆	盆栽	云南	旱地红壤	6.91	—	-2.0	-5.9	11.7	22.9	28.8	1.5	—	—	—	[15]
间作	玉米∥大豆	大田	广东	赤红壤	5.20	2:3	8.1	25.7	-1.1	5.2	23.9	-15.6	5.1	21.6	-11.6	[16]
间作	玉米∥大豆	盆栽	云南	红壤	6.21	—	9.0	22.7	-27.0	-1.3	7.8	-18.3	—	—	—	[17]
间作	玉米∥大豆	大田	贵州	黄壤	5.96	2:3	—	37.6	-11.9	—	27.9	-11.2	—	—	—	[5]
间作	玉米∥大豆	大田	云南	山地红壤	5.42	2:2	—	30.0	-16.9	—	—	—	—	—	—	[18]
间作	玉米∥大豆	盆栽	云南	山地红壤	6.08	—	—	57.5	-1.2	—	47.0	-14.6	—	—	—	[11]
间作	玉米∥大豆	大田	四川	—	—	2:3	-26.1	-20.5	-28.6	—	—	—	—	—	—	[20]
间作	玉米∥大豆	盆栽	东北	—	—	—	5.8	15.2	-5.1	1.0	2.6	-3.4	—	—	—	[21]
间作	玉米∥大豆	盆栽	江西	红壤	7.10	—	—	6.0	—	—	6.5	—	—	14.0	—	[22]
套作	玉米/大豆	大田	四川	—	—	1:2	15.8	-4.0	36.3	-7.1	-3.9	-18.1	-3.4	-4.4	1.0	[23]
套作	玉米/大豆	大田	四川	—	6.80	1:2	10.5	-8.6	30.6	—	-6.0	20.4	-1.6	-11.7	47.9	[24]
套作	玉米/大豆	大田	四川	—	—	2:2	—	2.4	24.4	—	—	—	—	—	25.5	[25]
套作	玉米/大豆	大田	四川	—	—	2:2	-4.0	-3.2	-4.5	-14.5	-11.1	-32.5	-8.5	-13.0	9.3	[26]
间作	玉米∥花生	大田	河南	黄潮土	7.56	2:4	20.6	13.8	-52.2	—	—	—	—	—	—	[27]
间作	玉米∥花生	大田	山东	—	—	2:4	-32.5	-35.7	-4.4	-24.5	-23.6	-31.1	-21.3	-19.8	-33.3	[28]
间作	玉米∥花生	大田	四川	—	—	2:3	-3.4	-11.7	4.9	—	—	—	—	—	—	[20]
间作	玉米∥花生	大田	河南	—	—	2:4	-34.4	-16.4	-57.4	—	—	—	—	—	—	[29]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	灌漠土	8.04	2:2	—	12.4	46.0	—	3.7	44.3	—	0.7	51.8	[30]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	灌漠土	8.10	2:3	6.8	-4.4	23.8	—	—	—	—	—	—	[31]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	黏壤土	8.20	2:4	16.9	30.5	4.5	—	—	—	—	—	—	[12]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	7.71	2:2	—	10.3	39.6	—	—	—	—	—	—	[32]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	—	2:2	—	—	—	20.5	15.7	30.8	14.0	7.8	23.7	[33]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	—	2:2	—	—	—	11.8	9.3	23.1	11.9	11.4	13.3	[33]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	8.20	2:2	15.7	1.5	28.6	—	—	—	—	—	—	[6]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	8.20	2:2	20.7	21.8	20.0	—	—	—	—	—	—	[6]
间作	玉米∥蚕豆	大田	宁夏	灰钙土	7.41	3:2	—	—	—	—	29.9	49.1	—	12.2	68.0	[34]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	8.20	2:2	—	—	72.0	—	—	72.0	—	—	88.0	[35]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	旱土	8.08	2:2	18.0	9.3	28.4	20.4	14.7	40.3	18.1	14.3	34.6	[36]
间作	玉米∥蚕豆	大田	甘肃	干旱土	8.20	2:2	20.2	29.5	15.4	12.2	11.3	13.9	16.8	23.3	4.2	[37]
间作	玉米∥豌豆	盆栽	甘肃	灌淤土	8.36	—	120.0	322.4	7.8	34.1	48.7	7.2	—	—	—	[39]
间作	玉米∥豌豆	盆栽	甘肃	黄绵土	7.50	—	-47.0	54.7	-24.2	-37.7	-59.1	-5.1	-28.8	-30.0	-17.5	[40]
间作	玉米∥豌豆	大田	甘肃	干旱土	—	3:4	—	5.0	37.0	—	26.7	28.9	—	33.0	33.0	[41]

与土壤中的养分循环紧密联系,作物的生长离不开土壤微生物的作用。因此,间套作模式下的根际微生物作用机制也是研究的热点。许多研究表明,接种 AMF 和根瘤菌均能提高间作玉米、豆科作物生物量和氮吸收,提高豆科作物向玉米转移氮量,促进间作系统产量和氮素吸收^[21,52-53]。汪新月等研究发现,接种丛枝菌根真菌后,玉米地上部氮素吸收量和地上部生物量分别增加 68.6% 和 23.2%,大豆增加 37.8% 和 8.9%;接种后,豆科根系结瘤数量和固氮量明显增加,菌丝共生网络增强,促进豆科向玉米进行氮转移,进而提高间作系统氮吸收^[17]。

2.3 种间和种内群体配置

合理分配和充分利用空间资源也是使作物生物产量上升的原因之一。地上地下资源的合理搭配才能发挥间作的最大优势^[54-55]。Zhao 等发现,增加玉米密度可以缓解土壤氮对豌豆结瘤的抑制作用,维持玉米 || 豌豆间作的生产力,同时降低对氮肥的需求^[56]。玉米 || 豌豆间作中,增加玉米密度提高了氮素供给与作物需求的同步^[57]。选择合适的种间作物组合比例也是提高间套作体系生产力的方式之一。Tan 等发现,玉米豌豆行比 3:4 的豌豆和玉米的籽粒产量分别比行比 2:4 提高了 12% 和 8%^[58]。陈等研究发现,玉米 || 豌豆 3:4 间作模式的作物氮素吸收量和氮肥利用率显著高于 2:4 间作模式^[38]。

3 间套作系统中氮素吸收优势的机制

玉米与豆科作物间套作系统种间相互作用分为地上和地下 2 个部分。研究发现,地下部的作用要大于地上部^[13]。由于地下部根系相互作用的存在,不同作物根系之间养分会发生流动。研究发现,豆科作物可以通过地下种间根系相互作用将一部分氮素转移到非豆科植物体内。Shao 等开展的¹⁵N 标记试验表明,无氮肥施用,玉米从苜蓿获取的氮量可达自身吸氮量的 4.7%^[59]。为了明确种间根系相互作用对间套作体系养分吸收的影响,诸多学者在盆栽或田间条件下通过设立根系屏障的方法来进行深入研究^[6,15,17,21,33,39]。通常设置 3 种分隔处理:(1)根系完全分隔(通过塑料/钢板),不同作物根系间的水分和养分流动受到完全阻隔;(2)根系用尼龙网分隔,但不影响根系之间养分和水分的流动;(3)根系不分隔,不同作物根系之间可以相互自由接触,完全无限制。

由表 2 可知,与根系完全分隔相比,多数情况下,尼龙网分隔和不分隔时玉米氮吸收和地上生物量相对较高,以不分隔的效果最好;而对大豆和豌豆来说,根系完全分隔时整体氮素吸收和地上生物量最高;对蚕豆来说,根系不分隔时的优势高于分隔。这一结果与之前许多大田试验结果相吻合,说明玉米与豆科作物间套作体系中根系交互对玉米有较高的养分获取优势,大豆和豌豆则处于竞争劣势,而蚕豆的表现优于其他豆科作物。

关于间套作通过地下部种间根系相互作用获得养分吸收优势,可以给出以下 3 个方面的解释。

(1)根系形态和空间分布。研究表明,间作后提高了玉米和蚕豆的根长密度、根系表面积、侧根数量、总根长和根重,拓展了根系在纵深和水平方向的空间延伸,能够增加对土壤中养分和水分的获取利用^[60]。由于豆科植物的根系较多分布在浅表层,玉米的根系能够伸展到豆根下方,使得玉米占据更多土壤空间。同时,豆科根系也会随着玉米根向下伸长,降低豆根伸长的机械阻力,增加豆根营养吸收空间^[37]。唐劲驰等研究发现,浅根型大豆促进间作物对氮和磷养分的吸收^[61]。

(2)根系营养生理。利用¹⁵N 标记分析发现,豆科作物能够提供一部分氮素供禾本科作物吸收利用,转移率为 6% ~ 11%^[62-63]。一方面,豆科作物根系自身能够释放出硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+),被与之共生的作物(如玉米)根系直接获取;另一方面,通过地下根系与真菌(如丛枝菌根)共生所构建的菌丝网络,玉米根系能够间接获取豆科作物所固定的一部分氮素^[17]。另外,豆科作物的根系通过分泌较多的酸性物质(如质子和柠檬酸等),增强酸性磷酸酶活性,活化分解土壤中的难溶性含磷化合物^[42],促进根系对无机和有机磷的吸收和生长的同时,也会增强根瘤固氮功能;并且,根系分泌物和根茬、秸秆残留物也会改善微生物群落结构和功能,从而促进养分循环,有利于作物养分吸收。豆科作物收获后残留的水分和养分也能够被尚未收获的套作玉米所吸收利用,促进玉米产量的提高。Li 等研究发现,玉米根系分泌物可以促进蚕豆根系结瘤固氮,经玉米根系分泌物处理后,蚕豆根系参与类黄酮合成的查尔酮-黄酮异构酶基因 *CFI*、生长素响应基因 *GH3.1*、结瘤基因 *ENOD93*、*ENODL2* 和 *NODL4* 和固氮基因 *FixI* 的表达均增加^[64]。

表 2 不同根系分隔处理对玉米和豆科作物地上部氮吸收量和地上部生物量的影响

组合	地区	试验类型	分隔处理	地上部氮吸收量			地上部生物量			参考文献
				玉米	豆科作物	单位	玉米	豆科作物	单位	
玉米	云南	盆栽	不分隔	31.1	10.9	mg/株	141.7	31.0	g/株	[15]
大豆			尼龙网分隔	20.1	8.7		136.9	31.9		
			完全分隔	33.1	9.8		110.0	30.6		
玉米	云南	盆栽	不分隔	60.1	13.5	mg/盆	6.9	2.8	g/盆	[17]
大豆			尼龙网分隔	51.1	15.9		6.1	3.0		
			完全分隔	49.0	18.5		6.4	3.4		
玉米	东北	盆栽	不分隔	115.1	82.5	mg/盆	8.7	4.2	g/盆	[21]
大豆			尼龙网分隔	103.0	84.8		8.6	4.3		
			完全分隔	99.9	86.9		8.5	4.4		
玉米	甘肃	盆栽	不分隔	1 037.8	475.3	mg/盆	61.6	24.2	g/盆	[39]
豌豆			尼龙网分隔	320.0	501.2		51.1	24.0		
			完全分隔	253.6	566.7		44.2	25.9		
玉米	甘肃	大田	不分隔	17.3	28.8	g/(m·2行)	—	—	—	[6]
蚕豆			尼龙网分隔	14.6	23.3		—	—		
			完全分隔	14.2	24.0		—	—		
玉米	甘肃	大田	不分隔	—	—	—	2 659	646.9	g/(m·2行)	[33]
蚕豆			尼龙网分隔	—	—		2 592	555.5		
			完全分隔	—	—		2 432	525.7		

(3)根际微生物生态。间套作 2 种不同作物的根系分泌物和残留物使土壤中的有机化合物更具多样性,从而影响微生物群落结构与功能、养分生物地球化学循环过程和植物的生长发育^[5,25,65]。研究表明,玉米∥豆科作物间作使得土壤细菌群落的丰度明显提高,在提高土壤微生态系统稳定性的同时,还能够增加土壤中氮和磷等养分的供应能力^[66-69]。脲酶和转化酶的活性以及固氮有关细菌的多样性均明显增加,土壤理化性质也得以改善^[70]。

4 结论与展望

玉米豆科作物间套作体系的总体氮素吸收优势主要来源于玉米对氮素的吸收获取优势,由于玉米对光热水肥的竞争能力大于豆科作物,间套作系统更有利于玉米吸收更多的氮素;套作情况下豆科作物的氮素吸收情况优于全生育期间作。关于玉米与豆科作物间套作体系氮素高效吸收的机制可概括为 3 个方面:一是种间竞争作用,由于玉米对光照和氮素等资源的竞争力大于豆科作物,促进玉米对氮素的优势吸收;二是作物根系相互作用和土壤微生物的存在,促进养分循环和作物之间的氮素转移,豆科作物固定的氮素可以被玉米吸收利用;三

是豆科作物结瘤增加,固氮基因表达增强,自身固氮能力提高。涉及到具体的过程和机制如图 1 所示。

关于玉米与豆科作物间套作促进豆科作物结瘤固氮机制的研究多在土培、水培等盆栽或室内条件下完成,较多关注地下种间根系相互作用,尤其根系分泌物的作用,缺乏大田试验条件下的直接研究。下一步需要加强在田间多场景(作物品种类型不同、土壤肥力梯度不同等)条件下的原位研究,并从根际生命共同体(根系-土壤-微生物)作用机制和地上相互作用-地下相互作用互馈的角度,予以更加全面和准确的阐释。

玉米与豆科作物间套作作为我国传统农业的精髓,在现代农业中正继续发光发热,继 2020 年、2022 年大豆玉米带状复合种植技术写入中央一号文件重点推广后,2023 年中央一号文件进一步明确“扎实推进大豆玉米带状复合种植”,支持在黄淮海等地区开展大豆玉米带状复合种植和粮豆轮作,加力扩种大豆油料,赓续农耕文明。在理论层面,下一步要重点加强对氮素等资源高效利用理论机制的研究,尤其关注根际生命共同体(根系-土壤-微生物)的作用机制和固碳减排“碳中和”潜力。在技术层面,在种间和种内群体配置(品种搭配、株型

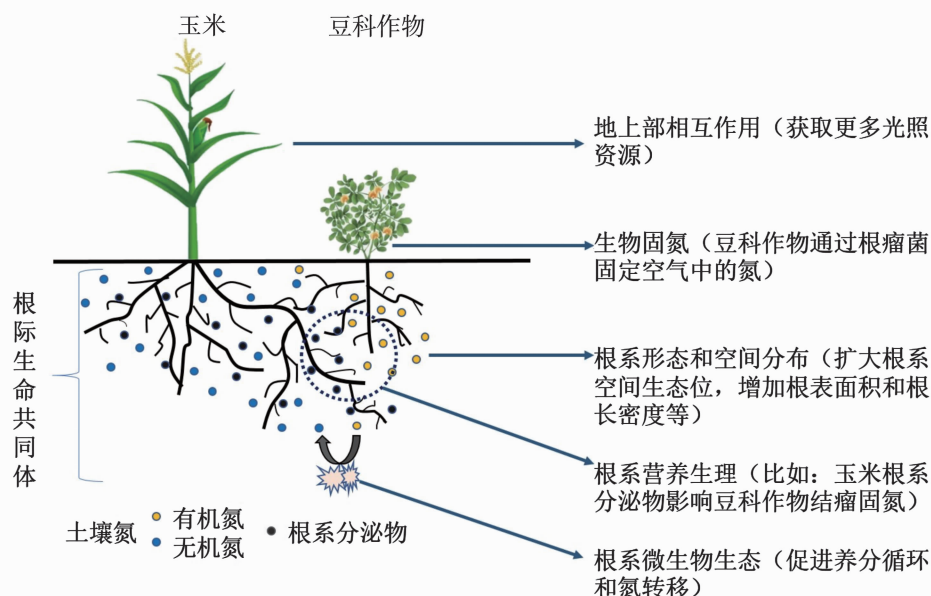


图1 地上部和地下部相互作用对玉米豆科作物间套作系统中氮素吸收的影响(过程与机制)

调控、方位角度、行内株距、行间距、带宽)、精准栽培-肥水管理-“源-库”化控、病虫害综合防控、地上-地下互馈以及农机农艺高效融合(机械化、智能化、轻简化)等方面持续开展攻关,充分挖掘种间互惠的潜能和发挥边行优势,突破提升豆科作物产能,研发完善关键调控技术,以便更好提升玉米与豆科作物间套作体系综合产能和资源利用效率,保障国家粮油安全的同时,实现绿色低碳可持续发展,使得社会、经济和生态效益最大化。

参考文献:

- [1] 付学鹏,吴凤芝,吴瑕,等. 间套作改善作物矿质营养的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(2):525-535.
- [2] Wang Z G, Jin X, Bao X G, et al. Intercropping enhances productivity and maintains the most soil fertility properties relative to sole cropping [J]. PLoS One, 2014, 9(12): e113984.
- [3] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1): 305-312.
- [4] Zhang H, Zeng F P, Zou Z G, et al. Nitrogen uptake and transfer in a soybean/maize intercropping system in the Karst region of southwest China[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(20): 8419-8426.
- [5] 刘均霞. 玉米大豆间作条件下钾素吸收利用研究[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(6): 4-5.
- [6] 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.
- [7] 闫锋,崔秀辉,王成,等. 玉米绿豆间作效应分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(27): 10931-10932.
- [8] Yang S H, Qiu J X, Xu C S, et al. Effects of intercropping patterns on dry matter accumulation and transportation of maize (*Zea mays* L.) and soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(11): 1545-1549.
- [9] Zuo Y M, Zhang F S, Li X L, et al. Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil[J]. Plant and Soil, 2000, 220(1): 13-25.
- [10] 黄家凤,李克梅,王爱英,等. 豆科植物-根瘤菌共生固氮的分子机理[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2002, 6(1): 74-78.
- [11] 李少明,赵平,范茂攀,等. 玉米大豆间作条件下氮素养分吸收利用研究[J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(50): 572-574.
- [12] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in Northwest China [J]. Plant and Soil, 2011, 342(1): 221-231.
- [13] 吕越,吴普特,陈小莉,等. 地上部与地下部作用对玉米||大豆间作优势的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 129-136, 142.
- [14] 张雷昌,汤利,董艳,等. 根系互作对间作玉米大豆氮和磷吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 611-618.
- [15] 张雷昌,汤利,董艳,等. 根系互作影响玉米大豆间作物氮吸收[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(6): 1111-1119.
- [16] 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.
- [17] 汪新月,史静,岳献荣,等. 接种 AMF 与间作对红壤上玉米和

- 大豆种间氮素竞争的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 972 – 982.
- [18] 尹元萍, 张雅琼, 申毓晗, 等. 玉米 || 大豆间作中大豆根系生长及氮磷养分吸收的特点[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6): 2305 – 2310.
- [19] 余常兵, 孙建好, 李 隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1 – 8.
- [20] 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.
- [21] Meng L B, Zhang A Y, Wang F, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen uptake and transfer in soybean/maize intercropping system[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 339.
- [22] Zhang X Q, Huang G Q, Bian X M, et al. Effects of nitrogen fertilization and root interaction on the agronomic traits of intercropped maize, and the quantity of microorganisms and activity of enzymes in the rhizosphere[J]. Plant and Soil, 2013, 368(1): 407 – 417.
- [23] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉/大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474 – 482.
- [24] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米/大豆套作系统下作物氮素吸收和利用效率的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4473 – 4482.
- [25] Fu Z D, Zhou L, Chen P, et al. Effects of maize – soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2006 – 2018.
- [26] Chen P, Du Q, Liu X M, et al. Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long – term maize – soybean relay strip intercropping system[J]. PLoS One, 2017, 12(9): e0184503.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 焦念元, 侯连涛, 宁堂原, 等. 玉米花生间作氮磷营养间作优势分析[J]. 作物杂志, 2007(4): 50 – 53.
- [30] 李玉英, 胡汉升, 程 序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆 || 玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1617 – 1630.
- [31] 叶优良, 李 隆, 孙建好, 等. 地下部分隔对蚕豆 || 玉米间作氮素吸收和土壤硝态氮残留影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 13 – 16, 53.
- [32] Li Y Y, Yu C B, Cheng X, et al. Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean[J]. Plant and Soil, 2009, 323(1): 295 – 308.
- [33] Li L, Yang S C, Li X L, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean[J]. Plant and Soil, 1999, 212(2): 105 – 114.
- [34] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil[J]. Field Crops Research, 2012, 130: 19 – 27.
- [35] 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.
- [36] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1): 147 – 161.
- [37] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia, 2006, 147(2): 280 – 290.
- [38] 陈国栋, 黄高宝, 柴 强. 不同带型及施氮条件下玉米间作豌豆的产量表现和氮肥利用率[J]. 中国土壤与肥料, 2013(3): 78 – 82.
- [39] 李 娟, 王文丽, 赵 旭, 等. 根际分隔对玉米 || 豌豆间作种间竞争及豌豆结瘤固氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 177 – 183.
- [40] 郭丽琢, 张虎天, 何亚慧, 等. 根瘤菌接种对豌豆 || 玉米间作系统作物生长及氮素营养的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 43 – 49.
- [41] Hu F L, Zhao C, Feng F X, et al. Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea[J]. Plant and Soil, 2017, 412(1): 235 – 251.
- [42] Zhou L L, Cao J, Zhang F S, et al. Rhizosphere acidification of faba bean, soybean and maize [J]. The Science of the Total Environment, 2009, 407(14): 4356 – 4362.
- [43] Rodriguez C, Carlsson G, Englund J E, et al. Grain legume – cereal intercropping enhances the use of soil – derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta – analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 118: 126077.
- [44] 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.
- [45] Gao H X, Meng W W, Zhang C C, et al. Yield and nitrogen uptake of sole and intercropped maize and peanut in response to N fertilizer input[J]. Food and Energy Security, 2020, 9(1): e187.
- [46] 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.
- [47] 付智丹, 周 丽, 陈 平, 等. 施氮量对玉米/大豆套作系统土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1463 – 1474.
- [48] 周 丽, 付智丹, 杜 青, 等. 减量施氮对玉米/大豆套作系统中

- 作物氮素吸收及土壤氨氧化与反硝化细菌多样性的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(6):1076–1087.
- [49] 雍太文,陈平,刘小明,等. 减量施氮对玉米/大豆套作系统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响[J]. 作物学报,2018,44(10):1485–1495.
- [50] 陈虹,文熙宸,曾瑾汐,等. 氮磷配施对玉米/大豆带状套作系统中土壤酶活性及速效养分的影响[J]. 华北农学报,2020,35(2):133–143.
- [51] 曾瑾汐,文熙宸,Raza M A,等. 氮磷配施对玉米–大豆套作模式下种间作用、玉米产量及干物质积累与转运的影响[J]. 草业学报,2017,26(7):166–176.
- [52] Wang G H, Sheng L C, Zhao D, et al. Allocation of nitrogen and carbon is regulated by nodulation and mycorrhizal networks in soybean/maize intercropping system [J]. *Frontiers in Plant Science*,2016,7:1901.
- [53] 房增国,赵秀芬,孙建好,等. 接种根瘤菌对蚕豆/玉米间作系统氮营养的影响[J]. 华北农学报,2009,24(4):124–128.
- [54] 原小燕,李根泽,林安松,等. 间作模式及氮、磷肥对玉米/花生间作体系产量和经济效益的影响[J]. 花生学报,2015,44(4):13–20.
- [55] 尤丹. 玉米花生间作对花生生长的影响[J]. 园艺与种苗,2020,40(11):38–40.
- [56] Zhao C, Fan Z L, Coulter J A, et al. High maize density alleviates the inhibitory effect of soil nitrogen on intercropped pea [J]. *Agronomy*,2020,10(2):248.
- [57] Fan Z L, Zhao Y H, Chai Q, et al. Synchrony of nitrogen supply and crop demand are driven via high maize density in maize/pea strip intercropping[J]. *Scientific Reports*,2019,9:10954.
- [58] Tan Y, Hu F L, Chai Q, et al. Expanding row ratio with lowered nitrogen fertilization improves system productivity of maize/pea strip intercropping [J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 113:125986.
- [59] Shao Z Q, Wang X Y, Gao Q, et al. Root contact between maize and alfalfa facilitates nitrogen transfer and uptake using techniques of foliar ^{15}N –labeling[J]. *Agronomy*,2020,10(3):360.
- [60] Ren Y Y, Wang X L, Zhang S Q, et al. Influence of spatial arrangement in maize–soybean intercropping on root growth and water use efficiency[J]. *Plant and Soil*,2017,415(1):131–144.
- [61] 唐劲驰, Mboreha I A, 余丽娜, 等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学,2005,38(6):1196–1203.
- [62] Zhang H L, Wang X Y, Gao Y Z, et al. Short-term N transfer from alfalfa to maize is dependent more on arbuscular mycorrhizal fungi than root exudates in N deficient soil[J]. *Plant and Soil*,2020,446(1):23–41.
- [63] Wang X Y, Gao Y Z, Zhang H L, et al. Enhancement of rhizosphere citric acid and decrease of $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ratio by root interactions facilitate N fixation and transfer[J]. *Plant and Soil*,2020,447(1):169–182.
- [64] Li B, Li Y Y, Wu H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N_2 fixation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2016,113(23):6496–6501.
- [65] Song Y N, Zhang F S, Marschner P, et al. Effect of intercropping on crop yield and chemical and microbiological properties in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Biology and Fertility of Soils*,2007,43(5):565–574.
- [66] Tian X L, Wang C B, Bao X G, et al. Crop diversity facilitates soil aggregation in relation to soil microbial community composition driven by intercropping[J]. *Plant and Soil*,2019,436(1):173–192.
- [67] Li Q S, Chen J, Wu L K, et al. Belowground interactions impact the soil bacterial community, soil fertility, and crop yield in maize/peanut intercropping systems[J]. *International Journal of Molecular Sciences*,2018,19(2):622.
- [68] Li Q S, Wu L K, Chen J, et al. Biochemical and microbial properties of rhizospheres under maize/peanut intercropping [J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2016,15(1):101–110.
- [69] Song Y N, Marschner P, Li L, et al. Community composition of ammonia–oxidizing bacteria in the rhizosphere of intercropped wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Biology and Fertility of Soils*,2007,44(2):307–314.
- [70] Chen J, Arafat Y, Wu L, et al. Shifts in soil microbial community, soil enzymes and crop yield under peanut/maize intercropping with reduced nitrogen levels [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 124: 327–334.

更正:《江苏农业科学》2023 年第 51 卷第 11 期论文《发展现代农业促进农村集体经济发展的路径——基于江苏省太仓市东林村的案例调查》,第一作者汪博文的单位由“南京农业大学经济管理学院”更正为“南京农业大学金融学院”。

《江苏农业科学》编辑部
2024 年 6 月 5 日