

玉米//花生体系氮素营养研究进展

张毅^{1,2} 张佳蕾¹ 郭峰¹ 李新国¹ 万书波¹

(1. 山东省农业科学院 生物技术研究中心、山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室, 山东 济南 250100;

2. 青岛农业大学 农学院, 山东 青岛 266109)

摘要 豆科作物生物固氮作用受环境中氮素严格调控,在较多化合氮条件下结瘤少固氮能力差。目前尚缺乏耐高氮根瘤的筛选与利用,而豆科作物与其他作物实行间、套作,是充分发挥根瘤固氮和提高氮素利用效率的有效途径。玉米//花生是典型的间作模式,近年来在玉米和花生主产区推广较快。本文回顾了前人对禾本科//豆科作物间作体系氮素营养的研究进展,阐述了玉米//花生对花生生物固氮的影响,丰富完善了间作氮素营养理论,并为玉米//花生高产高效栽培提供理论依据。

关键词 玉米;花生;间作;氮素;研究进展

中图分类号 S565.2

文献标识码 A

0 引言

中国作为一个典型的资源约束型国家,耕地面积不到世界 10%,且耕地面积逐年下降,自然资源的紧缺限制了粮食生产的进一步提高。2017 年,中国粮食(含大豆)进口超过 1.3 亿 t,同比增加了 13.9%,进口量占到我国粮食产量的 20%;其中大豆进口 9500 多万 t,相当于 5300 万 ha 耕地产出,我国油料自给率不足 32%^[1]。同时,粮食增产的环境代价巨大:一是化肥施用过多。我国耕地仅占全球的 7%左右,但化肥消费量却占世界化肥消费总量的 35%,单位耕地面积的化肥用量为世界平均的 3 倍多。过量的施用化肥不仅达不到增产的目的,往往还会造成减产和降低肥料利用率,长期大量不合理施用化肥也造成耕地质量退化,如土壤结构变差、土壤酸化、土壤次生盐渍化等;二是农药使用严重超标。中国是世界上农药使用量最大的国家,每年大约有 170 多万 t 农药用于农、牧、林业,但仅有约 30%作用于目标生物;三是环境污染加重。化肥和农药的使用量呈逐年上升趋势,造成农田面源污染和农产品质量问题日益凸显。

据统计,每年收获农产品要从土壤中带走约 1.1 亿 t 氮素,施用氮肥可提供约 4000 万 t,其余所需的 7000 万 t 由生物固氮补给,农业生产中所需的近 70%的氮是由豆科作物与根瘤菌共生固氮提供,但化学肥料的过量使用限制了豆科作物自身固氮能力的发挥。豆科作物与根瘤菌形成的共生固氮体系结瘤和固氮情况,受环境中可利用氮素的严格调控,在较高化合氮的条件下不合成固氮酶,这一特性被称为“氮阻遏”效应。在高水平外源氮条件下,豆科作物生物固氮能力减弱^[2,3],氮素对根瘤固氮的抑制程度与施肥量呈正相关^[4]。而目前对耐高氮的根瘤菌筛选利用较少,要想充分利用豆科作物的固氮作用,除了合理的减少氮肥的施用外,豆科作物与其他作物实行间、套作,是充分发挥根瘤固氮和提高氮素利用效率的有效途径。国内外大量研究表明,豆科与禾本科作物间作有利于作物对氮素的吸收和积累^[5-7],这是因为禾本科作物竞争吸收土壤有效氮,使其维持在相对较低的水平,缓解豆科植物的“氮阻遏”效应,并促进豆科作物的根瘤固氮^[8-12]。目前,对豆科作物根瘤固氮影响因素研究,以及禾本科作物对豆科作物固氮影响的研究较多,并基本阐明了其作用机理。本文在系统阐述了禾本科和豆科间作体系氮素营养研究进展的基础上,分析了玉米//花生对花生根瘤固氮的影响,旨在为玉米//花生间作体系氮素高效利用提供理论依据。

收稿日期:2018-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31601252,31571605);现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-13);国家重点研发计划项目(2018YFD021000);山东省农业科学院农业科技创新工程(CXGC2018D04,CXGC2018E13)资助

通讯作者:张佳蕾,男,汉族,博士,副研究员,研究方向:花生栽培生理生态,E-mail:zhangjialei19@163.com.

1 间作体系氮素营养研究现状

1.1 施氮对豆科作物生物固氮的影响

氮素是作物生长发育必需的三大营养元素之一,与作物产量和品质的形成关系密切,氮肥在保障粮食安全和农业生产中扮演着重要的角色.但过量的氮肥施用,往往会造成严重的环境污染和生态问题,如水体富营养化、土壤板结和作物病虫害加重等^[13,14].长期实践证明,豆科作物具有很强的根瘤固氮能力,土壤氮含量与豆类作物固氮效率关系密切.在豆科作物生长早期,低水平的土壤氮含量会降低其结瘤能力和固氮量,其主要原因是作物根系功能尚未完全发育,结瘤固氮作用尚未发挥,施用少量的“启动氮”可以缓解前期的缺氮症状.而豆科作物在生长发育期间,过高的土壤氮含量也会抑制结瘤和根瘤菌的固氮酶活性,从而减弱其生物固氮能力^[15].研究发现,随着外源供氮水平的升高,大豆生物固氮能力逐渐减弱,生物固氮量占总吸氮量的比重呈现下降趋势,说明高水平外源氮条件下,大豆的生物固氮能力受到了抑制^[2,16].杨子文等通过盆栽试验发现较低供氮水平对大豆根瘤菌无抑制作用,而 4.0 mmol/L 处理下大豆固氮百分率显著低于对照处理,表明 4.0 mmol/L 的供氮水平可能已超过了大豆根瘤菌最高耐性^[3].王树起等研究结果表明,适量的氮肥对根瘤形成和生长有显著的促进作用,当植物氮素供不应求时会抑制根瘤的生长,但当氮素施用量供大于求时也会抑制根瘤的形成^[17].以上研究均证明了豆科作物“氮阻遏”现象的存在,近年来“氮阻遏”效应的相关研究也得到了国内外学者的关注^[18,19].

Marsher 指出,花生在播种前施用一定量的氮肥,可以促进生育前期根瘤的形成与生长,且对花生的生物固氮作用无显著的负面影响^[20].孙彦浩等研究表明,花生根瘤菌固氮活动对外源氮肥非常敏感,其固氮量与氮肥用量呈显著负相关^[21].房增国等也指出花生根瘤菌的固氮活动对氮肥用量比较敏感,在过量施用氮肥时,根瘤菌的固氮量与氮肥用量呈显著的负相关^[22].想充分利用豆科作物的固氮作用,除了合理的减少氮肥的施用外,豆科作物与其他作物实行合理间、套作,是充分发挥根瘤固氮和提高氮素利用效率的有效途径^[6-10].间作复合群体中,不同作物间适度的竞争可以在整个系统层面上提高养分利用效率和群体的产量,但当间作系统中不同作物间的竞争作用过大时,互利性必然会下降.禾本科和豆科作物间作系统由于不同作物生物学特性和氮素利用之间存在差异,进行合理调控可充分发挥豆科作物生物固氮优势.因此提高豆科作物的固氮能力,减缓“氮阻遏”问题的关键是要明确不同豆科作物“氮阻遏”的界限水平以及明确两种作物的需氮特征与目标产量之间的相关关系.研究表明,玉米花生 2:4(玉米和花生行数)间作模式花生产量最高,3:4 间作模式系统产量最高,其间作玉米、花生产量均有提高^[23].

1.2 氮肥对豆科作物结瘤固氮影响的机理

结瘤是一个高耗能的过程,同时,根瘤还需要大量的碳水化合物来支持被固定氮的同化以及根瘤的生长和代谢,促进结瘤其关键是在根瘤菌和寄主两种生物之间建立一种平衡且互利的关系.结瘤基因的作用决定了根瘤的形成,结瘤基因主要功能是在共生关系的早期调控信号分子的产生和交流,主要包括植物根系分泌的黄酮类化合物作用于根瘤菌的 nod D 蛋白,激活的 nod D 蛋白再激活其他 nod 基因表达并合成根瘤菌的应答信号结瘤因子,根瘤菌分泌到环境中的结瘤因子有效刺激宿主植物,导致根毛变形和弯曲,根瘤菌从该位点入侵并形成侵入线,最终导致根瘤形成.该过程也被称为植物与根瘤菌的分子对话.结瘤基因从功能上可分为调节基因和结构基因,调节基因对植物信号分子产生应答后激活其他结瘤基因转录.

豆科作物与根瘤菌的共生固氮作用为农业生产提供了重要的氮素来源,但仅靠豆科作物本身的固氮作用不能满足作物对氮素营养的需求.研究表明,豆科作物与根瘤菌形成的共生固氮体系结瘤和固氮情况,受环境中不同形态氮素的严格调控^[24],根毛变形之前铵态氮就能抑制结瘤,在根毛变形之后和皮层细胞分裂之前过量硝态氮抑制结瘤^[25].其可能的机理是硝态氮可以使植物根部产生特殊的多肽分子,这些多肽分子进一步被根部的类受体激酶识别,并通过抑制结瘤必需元件的表达而抑制根瘤的形成,同时,硝态氮是环境介质中影响豆科作物共生固氮的重要因素,说明硝态氮对豆科作物结瘤和固氮的抑制可能与豆科作物对根瘤数的自我调控有一定关联.而铵态氮对结瘤固氮的抑制机理则可能是通过抑制植物类黄酮对根瘤菌结瘤基因转录的诱导,从而影响根瘤菌结瘤基因的表达而干扰结瘤与固氮^[26,27].另外研究还发现在侵染豆科作

物的过程中,根瘤菌中铵态氮吸收和同化相关基因的启动子被关闭,在随后的分化阶段与铵态氮代谢相关的调控基因的表达被下调^[28].而化合态氮对豆科作物结瘤固氮影响机理还没有解释清楚,有待进一步研究.

1.3 豆科与禾本科间作的优势及类型

间作可以显著提高土地利用效率,由于间作形成的作物复合群体提升了作物的群体密度,对阳光的截取与吸收增加,从而提高了群体的光合效率^[29];同时,两种作物间的间作还可以产生互补、互利的的作用,例如,宽窄行间作或带状间作中的高秆作物具有一定的边行优势、豆科与禾本科间作有利于补充土壤的氮消耗等.间作的两种作物之间除了互利作用外也存在竞争关系,如在缺乏水和肥料的情况下,地下部分的根系对水分和养分的竞争将会成为主要竞争,因此间作比单作更能充分利用土壤肥力资源,根系形态和根系活力的差异是造成作物营养吸收差异的主要原因之一.研究表明,玉米花生间作系统中,作物细根生长减少,有利于粗根系的生长,并且两种作物的根系在表层土壤中的分布较为密集,表明间作影响了作物根的生长与分布^[30].合理搭配不同种植类型、不同生育期和不同种植间距的作物有助于提高间作效果.

作为一种可持续种植模式,豆科和禾本科间作系统正受到许多国家的关注^[31],同时在保障全球粮食安全和油脂安全方面也扮演者重要的角色.在我国,豆科与禾本科间作种植体系有着悠久历史,早在公元前1世纪西汉《汜胜之书》中已有关于瓜豆间作的记载.公元6世纪《齐民要术》叙述了桑与绿豆或小豆间作、葱与胡荽间作的经验.明代以后麦豆间作、棉薯间作等已较普遍,其他作物的间作也得到发展.20世纪60年代以来间作面积迅速扩大,有高、矮秆作物间作和不同作物种类间作,如粮食作物与经济作物、绿肥作物、饲料作物的间作等多种类型,其中尤其以禾本科与豆科作物间作为最为普遍,如玉米与大豆间作、玉米与花生间作、小麦与蚕豆间作等,广泛分布于东北、华北、西北和西南各地.从间作种植分布的情况来看,西北部主要以小麦//大豆、小麦//蚕豆、玉米//蚕豆的间作模式为主,南部主要以小麦//蚕豆为主^[32],东部、黄淮海地区主要以玉米//花生间作模式为主.从世界范围来看,豆科禾本科间作体系也被广泛应用于大多数温带及热带地区,为保障当地的粮食安全做出了巨大贡献^[33].

1.4 间作禾本科对豆科“氮阻遏”的减缓效应

国内外大量研究表明,豆科作物与禾本科作物间作,因禾本科作物通过竞争吸收土壤有效氮,降低土壤有效氮的残留,增加了豆科作物生物固氮从而促进了氮素的互补利用.间作中竞争土壤和肥料氮能力强的禾本科作物可以使竞争能力弱的豆科作物固定大气氮的能力得到加强,减轻豆科植物的“氮阻遏”效应.

禾本科作物减缓豆科作物“氮阻遏”效应的主要机理,一是禾本科作物对氮素的竞争吸收能力强,有效减轻了土壤氮素对豆科作物固氮酶活性的抑制.大量国内外学者的研究表明,禾本科与豆科作物间作有利于作物对氮素的吸收和积累,提高氮素利用效率,这主要是因为豆科作物能够通过各种方式向禾本科作物输送氮素^[34,35].植株间养分的传递方式多种多样,如养分的直接扩散、根外菌丝的直接吸收、菌丝桥等^[36].褚贵新等证明了在水稻//花生的共生期内花生向水稻进行了氮素转移^[37].Hamel等认为,禾豆间作会使作物间形成菌丝桥,为不同作物间养分的转移提供了直接通道,其中包括氮素的传递^[38,39].艾为党等人也证实了此观点,证明玉米和花生根尖形成的菌丝桥能够传递氮,且花生传递给玉米的氮量要明显高于玉米传递给花生的氮量^[40].正是由于禾本科作物对土壤氮素的竞争吸收,降低了土壤氮素的含量从而减轻了土壤氮素对豆科作物固氮酶活性的抑制,极大的提高了豆科作物的生物固氮能力^[22,41].

二是由于禾本科作物对土壤氮素的消耗,豆科作物更依赖自身的生物固氮来满足其氮素营养需求,这可能是提高豆科作物固氮量的主要原因.种间竞争作用是间作优势的重要决定因素^[42,43].根系作为作物吸收水分和养分的主要器官,根际也是间作作物产生养分竞争和互利的主要场所,会影响作物水分、养分的利用、作物的化感作用以及植物对环境胁迫的适应性等^[44].根构型是指根在土壤中的空间形态和分布,决定了植物获取土壤中营养资源的能力,它是由基因型和环境因素共同决定的,如土壤含水量、养分含量及分布等.在环境胁迫条件下,植株根系通过改变形态、与微生物互作的适应性变化等方式,提高对营养的吸收能力^[45].有学者指出,玉米//蚕豆体系中玉米的根长随着供磷水平的增加而显著增加^[46],间作的部分玉米根系与处于上层蚕豆根系交错连接^[47].在玉米花生间作群体内,作物根系的发育程度、分布范围、根系分泌物等随着群体的变化会发生相应的改变.同时,也受到附近根系的竞争作用大小的影响^[48].房增国等人研究表明,玉

米花生混作降低了混作花生根际土壤硝态氮的浓度,增加了花生根瘤数,从而提高了单株根瘤固氮酶活性^[49].间作同样也影响根系的形态学特征,如小麦间作蚕豆中间作小麦的根重、根长和表面积较单作显著提高^[50];玉米与花生间作时,根半径减小,根长增加,侧根数目和长度增加,从而提高了竞争条件下对土壤中移动比较差的营养元素的吸收^[51].

三是间作系统中豆科作物矿质营养的改善提高了其固氮量.生产中花生缺铁黄化现象十分严重而普遍,成为制约花生高产稳产的重要因素.铁是植物生长发育所必需的营养元素,也是叶绿素的重要组成成分,其含量与叶绿素含量呈正相关,因此,铁对植物光合作用的影响较大.缺铁会引起叶绿体基粒减少,间质部分增大,从而导致叶绿素含量降低,叶绿体的变小甚至分解,并且铁元素很难转移并被再利用,因此首先导致新生叶片的失绿黄化,进而引起上部叶片不同程度地失绿,明显抑制作物的光合速率,降低光合产物数量,影响作物生长发育^[52,53].铁直接参与豆科作物的固氮,是固氮酶、豆血红蛋白等含铁蛋白的重要组成部分,缺铁将抑制豆科作物的固氮酶活性,影响作物产量及品质^[54].研究发现通过间作能明显的改善花生的铁素营养,玉米花生间作能显著增加豆科作物根系质外体铁库的积累,从而提高花生根系质外体铁含量 2 倍以上^[55],而铁营养的提高能够促进花生根瘤的形成和生长发育,使得固氮酶活性提高,从而增强花生的固氮能力^[56].

另外间作还改善了豆科作物对磷(P)的吸收.P 在作物生长和发育中有着至关重要的作用,也是肥料中的第二大元素.它直接参与光合作用的同化和光合磷酸化,施用 P 肥可以减少植物叶片中的光能热耗散,促进叶片对光能的传递和转化,提高植物在逆境下的光能利用能力^[57],土壤缺乏 P 将会限制农作物的生长.焦念元等研究结果表明,施 P 有利于提高间作花生功能叶片的叶绿素含量,改变叶绿素构成可以增强光能的捕获和转化能力,从而提高叶片对弱光的利用能力,而并非提高了羧化和固定 CO₂ 的能力,从而提高产量,同时土地当量比提高了 6.2%~9.3%^[58].研究发现,根系分泌物也能调控植物根际的养分供应.由于豆科作物的生物固氮作用或根际有机酸的分泌导致根际 pH 值降低,其在活化土壤磷方面发挥着重要作用^[59].Song 等人的研究表明间作能够提高土壤中磷的有效性^[60].在玉米花生间作体系中,由于玉米吸收 P 的速率增加表现为对其生长发育的促进作用;虽然花生处于营养竞争劣势,但单株 P 含量也表现明显提高,这可能是由于玉米处于间作优势,对 P 的吸收能力高于花生,同时,花生根分泌物活化土壤中的 P 被玉米吸收利用^[61].由于间作系统改善了豆科作物的矿质营养,刺激豆科作物的生物固氮也可能是提高豆科作物固氮量的另一种机制.

2 玉米//花生栽培的理论基础与潜力

玉米//花生作为一种典型的禾本科作物与豆科作物间作模式,大面积分布于我国黄淮海地区、东北地区以及集中种植花生的区域,能够合理利用空间和资源,能充分发挥玉米边缘行效应和花生根瘤固氮作用,是能同步增产油料作物与粮食作物的种植制度^[23,62].有研究表明,间作条件下,玉米功能叶片的光补偿点、光饱和点以及光饱和时的净光合速率显著提高,玉米对强光的利用能力增强,花生对弱光的利用能力提升^[63],花生的叶绿素含量随着遮荫时间的延长而相对增加^[64].花生适应性较广,在干旱山区、平原地区均可种植,且经济效益较高^[65],是我国重要的油料作物.花生与玉米等高秆类作物间作,形成的多层次农田生态系统,有利于群体抗病性的提高,群体叶面积系数增加,群体光能利用率和冠层的净同化率提高,一定程度上延长了群体光合作用时间,因此能获得比单一种植更高的产量^[66].花生具有很强的生物固氮能力,在自身生长的氮素需求以外,还可以直接或间接将其固定的氮素转移给邻近的玉米,从而为间作体系提供了氮素营养保证^[67,68].

自 2010 年起,山东省农业科学院围绕国家粮油安全形势需要,坚持“不与粮争地,不与人争粮”的发展思路,开展了“以粮为主,稳粮增油”的花生//玉米粮油均衡增产模式研究,探索适宜于机械化的粮油高效稳产的生产模式.玉米花生宽幅间作种植是在传统间套作的基础上创新发展而来.玉米花生宽幅间作,不仅能够充分利用边缘行优势,实现年际间交替轮作,而且实现了作物和谐共生,适合机械化作业的一季双收种植,能够充分发挥作物间高矮秆、须根直根系、需氮多与需磷钾多的互补效应.它具有共生固氮、高产高效、资源利用率高、改善土壤环境、增强群体抗逆性等优点,可以充分利用不同层次的空间和光能,大大提高了资源利用

率。目前,山东省农业科学院在模式及品种筛选、水氮运筹、关键共性技术、配套农机研发等方面取得了阶段性重要成果,在山东省德州、菏泽、聊城、枣庄、东营和青岛以及广西、四川、贵州、新疆、辽宁等地进行了规模化试验示范,均取得良好的实际生产效果。多年多点试验结果表明,与单作玉米相比,玉米//花生土地利用率和氮肥利用率均提高10%以上,玉米花生生比为3:4模式下每667 m²可收获夏玉米600 kg+夏花生150 kg以上,3:6模式每667 m²可收获夏玉米550 kg+花生180 kg以上,每667 m²可直接增加经济效益500元以上,具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。

稳定持续增加粮食产量,提高油料自给率,降低肥药投入,增加农民收入等是农业供给侧结构性改革的主要目标。《国务院办公厅关于加快转变农业发展方式的意见》(国办发[2015]59号文)指出,要结合当地实际生产情况大力推广轮作间套作模式,促进土地种植、养护相结合,科学规划、利用耕地资源,大力支持发展生态型复合种植农业,重点推进东北和黄淮海地区玉米/花生间作套作模式,促进农业生产的可持续发展。《山东省油料(花生)产业提质增效转型升级实施方案》明确提出大力发展小麦-玉米//花生(间作)模式,将夏玉米纯作向玉米、花生间作调转,提高自然资源利用率。科学实践证明,花生玉米宽幅间作是一种高效生态种植模式,同时能够兼顾粮经饲,是一种促进农牧业结合的重要生产模式,该模式的大面积示范应用有利于推进农业供给侧结构改革。在国家政策大力支持下,玉米//花生将迎来更广阔的发展空间。

3 展望

我国农业面临着环境污染、能源短缺的突出的问题,粮食安全同样也面临着巨大的挑战,因此,利用现代科学技术来发展农业生产尤为重要。玉米作为一种关键的粮食作物,具有保证粮食安全不可替代的作用;同时,花生作为重要的经济油料作物,具有良好的社会效益。间套作作为中国传统农业的精髓,合理的间套作模式不仅能高效集约化农业资源,而且是增加农田生态系统中生物多样性的有效措施之一,是发展可持续农业的重要举措。玉米//花生是优良的间套作模式,通过种植模式与生产技术的创新,玉米//花生完全可以实现玉米产量不减或略减、同步增收花生,缓解粮油争地矛盾和油料供需矛盾,在理论和实践上都是可行的。在保证玉米单产与总产稳定的前提下,着力研究创新和推广应用新型粮油均衡增产增效模式,有利于提升我国主要粮油作物的综合生产能力,特别是解决国家长期依赖油料进口的问题具有重大意义。因此,玉米花生间作系统符合我国新时期农业发展的目标。

山东是我国花生生产大省,经过多年的改革、创新和发展,目前花生已成为山东省主要的油料、经济作物。2002-2013年全省花生播种面积平均约为82.7万ha,约占全国的18%,12年平均产量约350万t,约占全国的24%,12年平均单产为4080 kg/ha,为全国1.28倍。近几年全省花生生产基本稳定。此外,全省年出口花生占全国出口花生总量60%以上,是山东省出口创汇最多的农产品。如每年能在山东省60%-70%的粮油作物耕地推广应用该模式,即推广220万ha可实现以下目标:增粮118万t(间作茬小麦增收300 kg/ha×推广193.3万ha);花生主产田间作增收玉米2250 kg/ha×推广26.7万ha);增油348万t(玉米主产田间作增收花生1800 kg/ha×推广193.3万ha);增优质饲料300万吨(玉米主产田间作增收花生秸秆1800 kg/ha×推广193.3万ha);减少化肥施用30多万t、农药用量1万t(每亩间作田减少化肥、农药用量10%左右);节本增效约200多亿元,其经济效益、社会效益和生态效益十分显著。

然而,目前仍然存在着一些问题:(1)我国国土区域辽阔,不同的气候、土壤等生态差异,造成玉米花生间作占地比例、施肥量、施肥时期等存在着较大差异。(2)玉米花生间作系统的抗逆性机理研究还不够深入、完全,以及间作养分利用的根际动态研究还不够明确。(3)由于物理遮盖等作用,间作通常能够降低病虫害的发生几率,少数情况下病虫害加剧,目前尚缺乏间作模式的病虫害发生与防治研究。(4)适宜不同生态区种植模式的配套机械改进及研制相对落后,特别是规模化后花生果收获后烘晒储藏问题突出。(5)缺乏技术培训、缺乏技术指导、缺乏样板示范,技术到位率低。

针对上述问题,今后研究和推广玉米//花生宽幅间作模式的重点应围绕以下几方面(1)进一步筛选适宜不同生态区的粮油均衡增产模式和品种,扩大示范推广面积。如玉米应选择紧凑、矮秆、中熟、单株生产力高的品种,花生应选择耐阴、中熟、大果、优质品种,筛选适宜不同生态区粮油均衡增产种植模式,加大推广力

度;(2) 改进适宜不同生态区种植模式的配套农机具. 研究完善一体化播种机,实现玉米施肥、贴茬直播+花生深松(旋耕)、施肥、播种、覆膜、打孔、覆土等多程序一次性完成;改进花生播种机械为 1+1+8 模式,在灭茬、旋耕后一次性实现施肥+起垄+播种+拌种+除草+覆膜+打孔+覆土;改进花生联合收获机,提高花生联合收获效率,降低生产成本;(3) 加强理论研究. 在间作体系水肥高效利用、抗逆防病防虫、碳氮固定排放、增产机理与分子机制等基础研究领域进行更广阔更深入的研究;(4) 加快生产技术的标准化、规范化. 研究适合不同生态区、不同土壤类型、不同肥力条件下的间套作密度、肥水管理、植保等标准化技术,加快粮油均衡增产技术的标准化、规范化;(5) 玉米//花生模式能有效代替轮作休耕,为农业供给侧结构性改革和新旧动能转换提供了很好的科技支撑. 建议政府能够出台相关补贴政策,将间作种植模式纳入政府补贴范围,引导支持该模式的推广和应用.

参 考 文 献

- [1] 万书波. 农业供给侧结构性改革背景下花生生产的若干问题[J]. 花生学报, 2017, 46(2): 60-63.
- [2] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同供 N 方式对大豆生长和结瘤固氮的影响[J]. 大豆科学, 2009, 2(5): 859-862.
- [3] 杨子文, 沈禹颖, 谢田玲, 等. 外源供氮水平对大豆生物固氮效率的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 574-579.
- [4] Eaglesham A R J. Aerial stem nodules on *aeschynomene* spp[J]. Plant Science Letters, 1983, 29(2/3): 265-273.
- [5] 李秋祝, 余常兵, 胡汉升, 等. 不同竞争强度间作体系氮素利用和土壤剖面无机氮分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 777-785.
- [6] 肖靖秀, 汤利, 郑毅, 等. 大麦//蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 499-503.
- [7] Bedoussac L, Justes E. Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat-winter pea intercrop[J]. Plant and Soil, 2010, 330(1/2): 37-54.
- [8] Ledgard S F. Assessing nitrogen transfer from legumes to associated grass[J]. Soil Biochem, 1985, 17(4): 575-577.
- [9] Xiao Y, Li L, Zhang F. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques[J]. Plant and Soil, 2004, 262(1/2): 45-54.
- [10] Willey R W. Agronomy and research approaches[J]. Field Crop Abstracts, 1979, 32, 1-10.
- [11] Chalk P M. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations a review[J]. Aust J Agric Res, 1997, 49(3): 303-316.
- [12] Rerkasem B K, Rerkasem M B, Peoples D F. Measurement of N_2 fixation in maize-rice bean intercrops[J]. Plant and Soil, 1988, 108(1): 125-135.
- [13] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [14] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping[J]. Field Crops Research, 2001, 70(2): 101-109.
- [15] Nicolas Cafaro La Menza, Juan Pablo Monzon, James E Specht, et al. Is soybean yield limited by nitrogen supply[J]. Field Crops Research, 2017, 213: 204-212.
- [16] 刘莉, 周俊初, 陈华癸. 不同化合态氮浓度对大豆根瘤菌结瘤和固氮作用的影响[J]. 中国农业科学, 1998, 31(4): 87-89.
- [17] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(2): 176-179.
- [18] Chu G X, Shen Q R, Cao J L. Nitrogen fixation and N transfer from peanut to rice cultivated in aerobic soil in an intercropping system and its effect on soil N fertility[J]. Plant and Soil, 2004, 263(1): 17-27.
- [19] Salvagiotti F, Cassman K G, Specht J E, et al. Nitrogen uptake fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review[J]. Field Crops Research, 2008, 11(1): 1-13.
- [20] Marsh H. Mineral Nutrition of Higher Plant[M]. London, UK: Academic press, Inc, 1986.
- [21] 孙彦浩, 陈殿绪, 张礼凤. 花生施氮肥效果与根瘤菌固 N 的关系[J]. 中国油料作物学报, 1998, 20(3): 70-72.
- [22] 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.
- [23] 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定量比的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(12): 32-36.
- [24] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦//蚕豆间作中的种间氮营养差异比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 396-400.
- [25] Barbulova A, Rogato A, D Apuzzo E, et al. Differential effects of combined N sources on early steps of the Nod factor-dependent transduction pathway in *Lotus japonicas*[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2007, 20(8): 994-1003.
- [26] Baev N, Kondorosi A. Nucleotide sequence of the rhizobium meliloti nod Igene located in n5 of the nod regulon[J]. Plant Molecular Biology, 1992, 18(4): 843-846.

- [27] M Libault. The carbon-nitrogen balance of the nodule and its regulation under elevated carbon dioxide concentration[J]. Biomed Research International, 2014, 2014(6): 507-946.
- [28] Patriarca E J, Tate R, Iaccarino M. Key role of bacterial NH₄⁽⁺⁾ metabolism in rhizobium-plant symbiosis[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2002, 66(2): 203-22.
- [29] Willey R. W. Resources use in intercropping systems[J]. Agricultural Water Management, 1990, 17(1): 215-231.
- [30] 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.
- [31] Gliessman S R. Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems[M]. New York: CRC Press, 2007.
- [32] 乔鹏, 汤利, 郑毅, 等. 不同抗性小麦品种与蚕豆间作条件下的养分吸收与白粉病发生特征[J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(5): 1086-1093.
- [33] Mucheru-Muna M, Pypers P, Mugendi D, et al. A staggered maize-legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of central Kenya[J]. Field Crop Research, 2010, 115(2): 132-139.
- [34] Sharma O P A, Gupta A K. Nitrogen-phosphorus nutrition of pearl millet as influenced by intercrop legumes and fertilizer levels[J]. Plant nutrition, 2002, 25(4): 833-842.
- [35] H Xiong, H Shen, L Zhang, et al. Comparative proteomic analysis for assessment of the ecological significance of maize and peanut intercropping[J]. Journal of Proteomics, 2013, 78(1): 447-460.
- [36] Ta T C, Faris M A. Species variation in the fixation and transfer of nitrogen from legumes to associated grasses[J]. Plant and Soil. 1987, 98(2): 265-274.
- [37] 褚贵新, 沈其荣, 张娟, 等. 用¹⁵N富积标记和稀释法研究旱作水稻/花生间作系统中氮素固定和转移[J]. 植物营养与肥科学报, 2003, 9(4): 385-389.
- [38] Hamel C, U Barrantes-Cartin, V Furlan, et al. Endomycorrhizal fungi in nitrogen transfer from soybean to maize[J]. Plant and Soil, 1991, 138(1): 33-40.
- [39] Johansen A, A Jakobsen, E S Jensen. Hyphal transport by a besicular-arbuscular mycorrhizal fungus of N applied to the soil as ammonium or nitrate[J]. Biology and Fertility of Soils, 1993, 16(1): 66-70.
- [40] 艾为党, 李晓林, 左元梅, 等. 玉米、花生根间菌丝桥对氮传递的研究[J]. 作物学报, 2000, 26(4): 474-481.
- [41] Izaurralde R C, McGill W B, Juma N G. Nitrogen fixation efficiency, interspecies N transfer, and root growth in barley-field pea intercrop on a Black Chernozemic soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 13(1): 11-16.
- [42] Dapaah H K, Asafu-Agyei J N, Ennin S A, et al. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops[J]. Agriculture Science and Technology, 2003, 140(140): 73-82.
- [43] Ndakidem P A. Manipulating legume/cereal mixtures to optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems[J]. African Journal of Biotechnology, 2006, 5(25): 2526-2533.
- [44] Marl'a M C, Jorge M V, Flavio H G B, et al. The effect of root exudates on root architecture in Arabidopsis thaliana[J]. Plant Growth Regulation, 2011, 64(3): 241-249.
- [45] Fukaki H, Okushima Y, Tasaka M. Regulation of lateral root formation by auxin signaling in Arabidopsis[J]. Plant Biotechnology Journal, 2005, 22(5): 393-399.
- [46] Zhang D S, Zhang C C, Tang X Y, et al. Increased soil phosphorus availability induced by faba bean root exudation stimulates root growth and phosphorus uptake in neighbouring maize[J]. New Phytologist, 2016, 209(2): 823-831.
- [47] Li L, Sun J H, Zhang F S. Intercropping with wheat leads to greater root weight density and larger below-ground space of irrigated maize at late growth stages[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(1): 61-67.
- [48] Marl'a M C, Jorge M V, Flavio H G B, et al. The effect of root exudates on root architecture in Arabidopsis thaliana[J]. Plant Growth Regulation, 2011, 64(3): 241-249.
- [49] 房增国, 左元梅, 李隆, 等. 玉米-花生混作对系统内氮营养的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 63-64.
- [50] 张恩和, 李玲玲, 黄高宝, 等. 供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系调控[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 939-942.
- [51] Zuo Yuanmei, Zhang Fusuo. Effect of peanut mixed cropping with gramineous species on micronutrient concentrations and iron chlorosis of peanut plants grown in a calcareous soil[J]. Plant Soil, 2008, 306: 23-36.
- [52] 左元梅, 李晓林, 王永岐, 等. 玉米花生间作对花生铁营养的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 1997, 3(2): 153-157.
- [53] Guerinot M L, Yi Y. Iron: Nutritious, noxious and not really available[J]. Plant Physiology, 1994, 104(3): 815-820.
- [54] Levier K. Iron uptake by symbiosomes from soybean root nodules[J]. Plant Physiol, 1996, 111(3): 893-900.
- [55] 左元梅, 刘永秀, 张福锁. 与玉米混作改善花生铁营养对其根瘤形态结构及豆血红蛋白含量的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(1): 33-38.
- [56] 刘永秀, 左元梅, 张福锁, 等. 玉米-花生混作对改善花生铁营养及固氮的影响[J]. 土壤通报, 1999, 30(2): 55-56.

- [57] 段东平,徐炳成,牛富荣,等.水分和磷肥对达乌里胡枝子不同叶位叶绿素荧光参数特征的影响[J].草业科学,2012,29(3):422-428.
- [58] 焦念元,杨萌珂,宁堂原,等.玉米花生间作和磷肥对间作花生光合特性及产量的影响[J].植物生态学报,2013,37(11):1010-1017.
- [59] Li H G, Shen J B, Zhang F S, et al. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and mono cropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(2): 79-91.
- [60] 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, maize, and faba bean[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(5): 565-574.
- [61] 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):50-52.
- [62] 章家恩,高爱霞,徐华勤,等.玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1597-1602.
- [63] 焦念元,赵春,宁堂原,等.玉米-花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响[J].应用生态学报,2008,19(5):981-985.
- [64] 刘燕.玉米花生间作体系中花生适应弱光的光合机理[D].河南科技大学,2015.
- [65] 万书波.中国花生栽培学[M].上海:上海科技出版社,2003.
- [66] Trenbath B R. Intercropping for the management of pests and diseases[J]. *Field Crops Research*, 1993, (34): 381-405.
- [67] Ta T C, Farris M A. Species variation in the fixation and transfer of nitrogen from legumes to associated grasses[J]. *Plant & Soil*, 1987, 98(2): 265-274.
- [68] 叶优良.间作对氮素利用和水分利用效率的影响[D].北京:中国农业大学,2003.

Research Progress of Nitrogen Nutrition in Maize//Peanut System

ZHANG Yi^{1,2} ZHANG Jia-lei¹ GUO Feng¹ LI Xin-guo¹ WAN Shu-bo¹

(1. Biotechnology Research Center, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Ecological Physiology of Shandong Province, Jinan 250100, China;

2. School of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract The biological nitrogen fixation of leguminous crops is strictly regulated by the nitrogen in the environment and the ability to fix nitrogen is low under the condition of more nitrogen. At present, there is still a lack of screening and utilization of nitrogen-tolerant nodules and intercropping of leguminous crops with other crops is an effective way to fully exert nodule nitrogen fixation and increase nitrogen use efficiency. Maize//peanut is a typical intercropping pattern, and in recent years, it has been popularized rapidly in the main producing areas of maize and peanut. This article reviewed the previous research progress on nitrogen in gramineae//leguminous crops system, discussed the effects of maize//peanut intercropping on biological nitrogen fixation of peanuts, and enriched the theory of nitrogen nutrition in intercropping, also provided theoretical basis for high-yield and high-efficiency cultivation of maize//peanut.

Key words corn; peanut; intercropping; nitrogen; research progress