

玉米与豆科作物间作提高农田生产力的机理与应用展望

张哲^{1,2,3}, 白伟^{1,2,3}, 冯良山^{1,2,3}, 冯晨^{1,2,3}, 赵凤艳^{1,2,3}, 蔡倩^{1,2,3},
向午燕^{1,2,3}, 杜桂娟^{1,2,3}, 张诗雨^{1,2,3}, 李娜^{1,2,3}, 娄义晟^{1,2,3}, 刘洋^{1,2,3},
董智^{1,2,3}, 侯志研^{1,2,3}, 梁思维^{1,2,3}, 孙占祥^{1,2,3}

(1. 辽宁省农业科学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 农业农村部东北节水农业重点实验室, 辽宁 沈阳 110161; 3. 国家农业环境阜新观测实验站, 辽宁 阜新 123100)

摘要: 间作在我国具有悠久的历史, 大量研究已表明, 玉米与豆科作物间作不仅在提高作物群体产量方面具有一定优势, 并且可以使植株地上部高效利用光温资源、地下部优化利用水分和养分资源, 进而实现资源的协同增效, 提高了旱地农田生产力。本文重点综述了玉米与豆科作物间作通过改善光、水、养分等利用提高旱地农田生产力的主要机理, 解析了玉米与豆科作物间作通过优化作物品种、养分管理、空间布局、种植密度等农艺调控措施来提高旱地农田生产力的主要途径, 并提出了玉米与豆科作物间作在应用中亟待解决的关键问题, 旨在为合理构建适宜我国旱地农田的高产稳产和资源高效型禾豆间作模式提供有力的理论和技术支撑。

关键词: 间作; 玉米; 豆科作物; 资源高效利用; 生产力

中图分类号: S-01; S344.3 文献标志码: A 文章编号: 2097-2172(2025)07-0595-011

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.07.002

The Mechanism and Application Prospect of Intercropping Maize and Leguminous Crops for Enhancing Farmland Productivity

ZHANG Zhe^{1,2,3}, BAI Wei^{1,2,3}, FENG Liangshan^{1,2,3}, FENG Chen^{1,2,3}, ZHAO Fengyan^{1,2,3}, CAI Qian^{1,2,3},
XIANG Wuyan^{1,2,3}, DU Guijuan^{1,2,3}, ZHANG Shiyu^{1,2,3}, LI Na^{1,2,3}, LOU Yisheng^{1,2,3}, LIU Yang^{1,2,3},
DONG Zhi^{1,2,3}, HOU Zhiyan^{1,2,3}, LIANG Siwei^{1,2,3}, SUN Zhanxiang^{1,2,3}

(1. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110161, China; 2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang Liaoning 110161, China; 3. National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment in Fuxin, Fuxin Liaoning 123100, China)

Abstract: Intercropping has a long history in China. A large number of studies have shown that intercropping of maize and leguminous crops not only has certain advantages in increasing the crop yield at the population level but also enables the aboveground parts of plants to efficiently utilize light and temperature resources and the underground parts to optimize the utilization of water and nutrient resources, thereby achieving the synergistic enhancement of resources and improving the productivity of dryland farming systems. This paper mainly reviews the main mechanisms by which intercropping of maize with leguminous crops improves the productivity of dryland farmland through enhancing the utilization of light, water, and nutrients. It also analyzes the main approaches by which intercropping of maize with leguminous crops can increase the productivity of dryland farmland through optimizing agronomic control measures such as crop varieties, nutrient management, spatial layout, and planting density. Moreover, it presents the key issues that need to be addressed in the application of maize and leguminous crop intercropping. It aims to provide strong theoretical and technical support for the rational construction of high-yield, stable-yield and resource-efficient intercropping patterns of cereal and legume suitable for dryland farmlands in China.

Key words: Intercropping; Maize; Leguminous crop; Resource efficiency; Productivity

收稿日期: 2025-06-15

基金项目: 辽宁省兴辽英才计划杰出人才项目(XLYC2401002); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A20217); 农业基础性长期性科技工作观测监测任务(NAES034AE02); 辽宁省农业科学院中长期基础研究专项(2025XKJS8519); 辽宁省农业科学院基础性、长期性、公益性科技工作项目(2025JCX1007)。

作者简介: 张哲(1984—), 男(满族), 辽宁开原人, 研究员, 博士, 主要从事旱地耕作制度理论与技术研究工作。Email: chick409@126.com。

通信作者: 孙占祥(1967—), 男(满族), 辽宁新宾人, 研究员, 博导, 主要从事旱地耕作制度理论与技术研究工作。Email: sunzx67@163.com。

旱地农田生产力是指在无灌溉条件下, 主要依靠自然降水进行农业生产的能力和产出水平, 它反映了耕地的生产潜力和利用效率。玉米作为中国旱地农田生产中最主要的作物之一, 国家统计局数据显示, 2024 年种植面积约 4 473.3 万 hm^2 , 产量约 2.95 亿 t, 在我国粮食作物生产中扮演着极其重要的角色。但在提高作物产量的同时, 长期大面积的集约化单一种植, 伴随着农药、化肥等的高强度投入, 破坏了生物多样性和生态平衡, 引起了土壤质量下降、温室气体排放增加、地下水污染等一系列环境问题^[1]。同时, 受气候变化影响, 全球范围内降水时间和空间尺度分布格局发生了改变。特别是由于温室效应引起的暖干化趋势加剧, 以及干旱、高温等极端天气的频发, 在一定程度上导致我国的干旱、半干旱地区农业生产应对气候变化的“韧性”减弱, 进而严重影响了我国旱地农田生产力。

间作是指在同一田块内, 2 种或 2 种以上生育期相近或相同作物分行或者分条带间隔种植的一种农业生产方式^[2]。适宜的间作模式, 由于株型及生理生态方面的差异, 在时间生态位和空间生态位上互补扩大, 能够在一定程度上高效利用光、温、水、养分以及土地等资源, 不仅提高了农田生产力, 还提升了农田生态系统的稳定性^[3-8]。玉米与不同豆科作物间作作为众多旱地农田间作体系中最主要配置之一, 其潜在优势主要是系统地上地下资源互补利用生态效应提高了农田生产力、土壤有效氮的增加和促进氮素转移减少了肥料氮的投入、土壤水分和养分优化利用提高了资源利用效率、多样化种植提高了系统应对气候变化的“韧性”等^[9]。在我国旱地农田中, 玉米与不同豆科作物间作, 玉米处于非常重要的地位^[5], 在提高系统生产力、改善作物品质、减少氮肥投入等方面已被大量研究所证实^[10-12], 这也为种植业结构调整以及农业可持续发展提供了可靠支撑。如玉米 || 大豆^[13-14]、玉米 || 花生^[15-18]、玉米 || 豌豆^[19]、玉米 || 蚕豆^[20]、玉米 || 菜豆^[21]、玉米 || 苜蓿^[22]、玉米 || 鹰嘴豆^[23]、玉米 || 油菜等诸多间作体系中, 适宜的间作配置土地生产力均表现出较强优势。因此, 发展玉米与豆科作物间作, 对于提高旱地农田生产力, 保障国家粮食安全意义重大。因此,

我们对玉米与豆科作物间作通过改善光、水、养分等利用进而提高旱地农田生产力的主要机理进行了综述, 解析了玉米与豆科作物间作通过优化作物品种、养分管理、空间布局、种植密度等农艺调控措施来提高旱地农田生产力的主要途径, 并提出了玉米与豆科作物间作应用亟待解决的关键问题, 将为合理构建适宜于我国旱地农田的稳产高产和资源高效型间作模式提供理论和实践支撑。

1 玉米与豆科作物间作提高资源利用效率的机理

1.1 光能高效利用

1.1.1 改善系统辐射时空分布 在旱地农田中, 相比单作系统, 玉米与豆科作物间作由于作物之间的株型差异, 系统内光分布得到改善, 作物群体受光表面积增加, 使得光合有效辐射增多, 特别是系统中玉米下层有效光合面积增加, 减缓了高位作物玉米对豆科作物遮光造成的生长抑制, 使其充分利用强光和弱光, 从而增加系统生产力^[24-25]。相关研究也发现, 玉米 || 花生导致光在群体中的分布发生改变, 高位作物玉米的“阳性植物光合特性”增强, 在提高其对强光的利用能力的同时, 也提高了光合物质向籽粒分配功能叶片的净光合速率; 劣势作物花生则趋向于“阴性植物特点”转化, 使其对弱光的吸收能力和转化效率提高, 实现了系统内光的优化分配利用^[26]。张东升^[27]在辽宁阜新旱地农田玉米 || 花生关于光能利用的研究也发现, 光能利用的优势主要来自系统内玉米冠层光分布时空尺度的改善和低光强散射辐射比例的增加。

1.1.2 增加系统光截获与利用 系统累积的光截获量和作物干物质生产量间存在着线性正相关关系^[28]。在旱地农田间作系统中, 间作比单作可以在空间和时间尺度上截获利用更多光能^[6]。在众多玉米与豆科作物间作体系中, 因特定的时空生态位结构表现出明显的光截获优势, 包括空间上有利于增加冠层受光面积, 促使系统中作物下层光截获的增加^[29-30]; 不同生育期有利于延长作物系统受光时间, 增加系统总截光量^[31-32]; 不同作物冠层结构间的差异改变了系统光环境, 使得作物形态结构得以重塑, 对作物光截获增加也具有一定的贡献。张东升^[27]的定位研究也发现, 玉米 || 花生可以高效捕获和利用太阳辐射, 整个系统光截

获优势主要是由于玉米比叶面积增加了光截获的同时, 也补偿了花生叶面积减小而减少的光截获量。

综上, 我们认为玉米与豆科作物间作能够实现光能高效利用, 其机理是间作系统内光分布改善, 作物光的截获率与转化效率提高; 玉米叶面积指数增大和高值持续期的增加, 作物光合作用时间延长; 高位作物玉米光饱和点和籽粒灌浆过程中的光合速率提高, 低位豆科作物光补偿点降低, 最大光化学效率(PSII)和实际光化学效率提高, 对低能量光辐射吸收和利用提高, 实现系统光能优化利用, 进而提高了旱地农田生产力^[27, 33]。

1.2 水分高效利用

1.2.1 生态位分离 水分是我国北方旱地农田限制作物生产的关键性因子, 水分分配是作物地上部和地下部共同作用的结果。在玉米与豆科作物间作系统中, 由于生态位的分离, 不同作物之间对水分的利用, 在时间和空间上具有互补效应。一方面, 地上部不同作物之间通过结构或功能的互补使得系统总蒸腾量比单作高, 并减少由于蒸发而造成水分散失, 增加有利于干物质累积和产量形成的水分比例^[34]。Walker 等^[35]在玉米 || 大豆的研究中发现, 作物蒸腾量占可用水总量的 70% 左右, 显著高于单作大豆的 67% 和单作玉米的 52%; 而地面蒸发量为可用水总量的 30% 左右, 低于单作处理。另一方面, 玉米与不同豆科作物时间和空间上耗水特征差异造成了间作系统生态位分离, 降低了不同作物间的水分竞争, 优化了系统水分的分配, 降低了土壤水分胁迫对作物生长的影响^[34]。Mao 等^[36]在玉米 || 蚕豆研究中发现, 生长早期间作豌豆比单作豌豆获得更多水分, 生长后期玉米相对于单作获得更多水分, 2 种作物关键需水期的差异, 优化了系统水分分配利用, 提高了间作体系水分利用效率。叶优良等^[37]在玉米 || 蚕豆研究中发现, 2 种作物对水分吸收具有生态位差异, 蚕豆生长期利用了玉米带土壤的水分, 玉米在生长后期也利用了蚕豆带的土壤水分, 使得系统水分用量减少, 水分利用率提高。张莹等^[38]多年的定位研究也发现, 玉米 || 大豆系统需水量与降水量的吻合程度好于单作, 土壤水分在 0 ~ 50 cm 土层间作玉米与大豆存在水分竞争, 而在 60 ~

100 cm 土层玉米和大豆存在水分互补^[39], 对水分的吸收产生了时空分异^[40], 根系的可塑性和水分的时空互补性影响间作系统水分生产力, 且增强了豆科作物夜间蒸腾作用^[41]。

1.2.2 根系提水 根系的提水作用主要是植物根系由干土层穿透到土壤水分含量较高的湿土层吸收水分, 并将水分顺水势梯度由湿土层根系转移至干土层的根系, 并进行水分释放^[42]。间作系统中不同作物种类间根系的差异性, 根系的提水作用将有利于系统土壤水分的优化分配^[43]。在玉米与豆科作物间作系统中, 由于不同作物的根系生长、分布及其功能有较大差异, 作物在不同生育期对水分的需求量也不同, 会形成水势差, 使水分进行运移、再分配, 会产生水分的补偿作用^[42]。Willey^[6]指出, 不同作物根系在空间分布不同时, 可充分利用不同土壤层次的水分; 作物对表层土壤水分出现水分竞争时, 根系较深的作物可以通过向土壤深层延伸的根吸收水分, 降低对浅层根系作物水分竞争, 增加水分吸收。高硯亮等^[17]的多年定位研究也发现, 在玉米 || 花生体系中, 2 种作物根系和耗水特征的差异, 导致玉米可能会吸收花生条带的土壤水分, 来改善自身条上土壤水分利用环境。

综上, 我们认为玉米与豆科作物间作能够实现旱地农田水分高效利用, 其机理一方面是生态位分离导致的系统作物蒸腾量增加和不同作物生育期耗水的差异, 另一方面是作物之间的相互作用, 对田间土壤水分进行再分配, 促进作物对水分的吸收利用^[44], 继而减轻因气候变化对我国旱地农田的干旱风险^[45]。

1.3 氮高效利用

1.3.1 氮素的转移 在玉米与不同豆科作物间作体系中, 豆科作物直接或间接转移氮素供给玉米是氮素高效利用原因之一。相比于玉米单作, 玉米与豆科作物间作的生态位差异, 更多的土壤氮可以被玉米吸收利用, 进而土壤中的氮素浓度降低, 同时玉米根系分泌物也能够促进豆科根系分泌类黄酮物质来诱导根瘤菌侵染豆科作物根系而结瘤固氮, 从而降低豆科作物与玉米对氮素的竞争, 达到间作系统氮素的高效利用^[46-47]。余常兵等^[48]在甘肃武威的定位研究显示, 蚕豆、大豆通

过生物固氮作用将更多的土壤氮素留给玉米使用从而有利于玉米氮的吸收和积累。Rerkasem 等^[49]研究证实,玉米与饭豆间作增加了系统中固定空气氮的比例,存在氮素从豆科作物向禾本科作物的直接转移。Van Kessel 等^[50]也证实,玉米||大豆时,大豆向玉米根间发生了“氮转移”。因此,在玉米与豆科作物间作体系中,豆科作物进行氮素转移可能主要包括不同作物根系交互发生的玉米直接吸收豆科作物条带氮的直接转移,当季玉米生育后期利用土壤中豆科作物固氮或土壤氮矿化的间接转移,以及下一季作物吸收利用残留氮素的间接转移。但值得注意的,直接或者间接的“氮转移”效应在不同的玉米与豆科作物间作体系中,受作物种类搭配、田间配置、气候特点、土壤类型等存在很大差异^[51]。

1.3.2 缓解“氮阻遏”效应 一般认为,氮肥投入导致豆科作物结瘤数量和生物固氮量下降,固氮酶不能合成,或者失去活性,生物固氮能力被显著抑制,这一现象被称为“氮阻遏”效应^[52]。Salvagiotti 等^[53]研究发现,肥料氮的施用量与大豆生物固氮量存在显著负相关关系,即存在“氮阻遏”现象。已有相关研究证实,通过玉米与不同豆科作物间作可以缓解施氮对豆科作物结瘤和固氮抑制作用,进而减缓豆科作物“氮阻遏”效应^[11, 54]。这主要是由于玉米可以大量吸收硝酸盐使土壤矿质氮维持在较低水平,且竞争利用了豆科作物根际的硝态氮或者铵态氮^[55],减小了对豆科作物固氮的抑制^[47, 56],促进了豆科作物结瘤^[57],减缓了豆科作物“氮阻遏”效应;并且,玉米根系分泌的黄酮类(Flavonoids)物质,也促进了豆科关键结瘤基因上调,进一步改善了根系固氮能力^[46]。Zhang 等^[58]、冯晨等^[59]在玉米与花生间作不同氮肥施用梯度定位研究中也证实,间作在不施氮条件下能够促进花生根瘤形成,而施氮在促进间作系统中玉米植株生长的同时,也使处于竞争弱势的花生将大量光合产物用于地上生长,减少了根瘤的形成。但间作花生可以通过促进根瘤的生长来应对玉米在遮阴及养分竞争等方面对自身的负面影响^[58-59]。同时,间作和施氮显著影响了土壤中微生物群落结构和氮循环微生物的丰度,进而对土壤潜在硝化速率(PNR)产生影响,具体表现在土壤 PNR 随着

施氮量的增加而显著升高,而花生根际土壤 PNR 要显著高于单作花生,玉米根际土壤 PNR 要显著低于单作玉米,我们推测花生根际土壤硝化潜势的提高,可为间作系统玉米提供更多可利用的硝态氮,进而减小了对花生固氮的抑制,缓解“氮阻遏”效应^[60-62]。

1.3.3 不同作物氮素需求的时空分异 在玉米与不同豆科作物间作体系中,氮素利用的生态位分离,是间作体系氮素补偿利用的主要机制^[42]。一方面是由于玉米与不同豆科作物对于氮素的需求差异较大,且氮素需求峰值的时间分异明显,进而可能导致不同作物均可以得到充足的氮素供应^[63]。特别是当氮素成为资源主要限制因子时,可以利用不同作物需氮的时间分异特性,合理的设计间作模式,优化系统内氮素供应能力,在关键时间使系统养分供应速率不低于系统氮素总体需求^[64]。另一方面是间作系统氮素需求的时空分异,这主要是由于玉米与不同豆科作物的根系生物学特性存在较大差异,特别是根系深度、根体积、根表面积等的不同使得系统内不同作物吸收利用不同条带、不同土壤层次、不同形态氮素存在差异,进而也可能促进了间作体系氮素的时空利用优势^[65]。

综上,我们认为玉米与豆科作物间作能够实现氮素高效利用,其机理是玉米可以吸收豆科作物直接或间接产生的氮素,同时间作改变了土壤微生物群落结构和氮循环微生物的丰度,影响了土壤中养分的状态和含量,并可以使豆科作物对肥料氮施用的“氮阻遏”效应得到缓解,促进豆科作物结瘤固氮;同时不同作物氮素吸收的时空分异特性,也能优化间作系统氮素的吸收和利用。

1.4 磷高效利用

1.4.1 土壤难溶性无机磷活化与利用 合理的间作能提高土壤磷的有效性,调节土壤磷库。在玉米与豆科作物间作体系中,根系互作促进了土壤磷活化^[66],豆科作物较玉米的质子释放能力更强,根际酸化明显,更多的有机酸也有利于活化和吸收利用难溶性土壤无机磷(如 Fe-P 和 Al-P),从而改善间作系统中不同作物的磷营养^[67-69]。此外,间作能够通过改变植物根际微生物数量、生物量及微生物群落结构,促进土壤中难溶态无机磷的溶解,从而增加土壤中可利用磷的含量^[70]。大量

研究也已表明, 玉米与不同豆科作物间作, 具有显著的互惠作用^[20], 系统内根系的交互作用, 使得空间上发生生态位分异, 扩大了根系对难溶性磷的吸收范围^[70], 能够加大作物对土壤中难溶性磷的利用^[4, 71-72]。

1.4.2 土壤有机磷活化与利用 植物不能直接吸收利用有机磷, 将其分解为无机磷以后才可能被植物吸收利用。一般认为, 土壤中有机磷可在植物根系向土壤中分泌酸性磷酸酶的作用下向无机磷转化^[73], 也可以通过改善根际微生物群落结构, 使土壤中更多有机磷矿化, 进而使土壤中可利用磷含量增加^[69], 促进植物对磷的吸收利用。在玉米与不同豆科作物间作体系中, 豆科作物可以通过分泌更多酸性磷酸酶, 水解土壤中的有机磷, 同时植物根际微生物群落改善, 矿化更多的有机磷, 进而促进间作群体对磷吸收利用。如 Li 等^[74]在玉米 || 鹰嘴豆、张德闪等^[75]在玉米 || 蚕豆、Inal 等^[76]在玉米 || 花生的研究中均发现, 豆科作物根际分泌的酸性磷酸酶活性显著提高, 活化了土壤中的有机磷, 提高了磷的有效性, 促进了间作群体磷的吸收利用效率。并且, 在缺磷土壤和不施磷肥条件下的玉米 || 大豆体系中, 作物根系酸性磷酸酶活性也显著提高^[77], 这也进一步说明了玉米与不同豆科作物间作可以提高磷的有效性。

综上, 我们认为玉米与豆科作物间作能够实现磷的高效利用, 其机理是由于作物根系的重构、根系分泌物的增加、土壤酶活性增强, 以及微生物群落的改变, 致使土壤中有机磷的活化和难溶态无机磷的溶解, 提高了土壤中磷的有效性和可利用磷的含量, 进而提高作物对磷营养的吸收利用。

2 玉米与豆科作物间作提高旱地农田生产力的农艺调控途径

在明确玉米与豆科作物间作实现光、水、养分等高效利用的基础上, 进一步提高旱地农田生产力和系统资源利用效率的关键在于科学调控地上地下资源竞争与互补利用的生态效应, 实现资源协同增效^[78-79]。其农艺调控途径主要包括不同间作体系作物种类和品种的选择、化学肥料的优化管理、空间结构的合理布局 and 适宜种植密度的调整等。

2.1 适宜作物品种选择

现阶段, 育种学家在作物品种的选育上主要是以单一作物高产、稳产、抗逆等为目标, 多适用于单作群体的生产。而在玉米与豆科作物间作体系中, 则需要利用作物生理特性充分发挥光能捕获利用优势, 并根据区域自然禀赋和作物所处位置选择适宜的作物品种。如作为高秆作物的玉米需要明确要进一步提高对强光的利用, 即应该以高光效作物品种为品种选育方向, 提高强光利用率, 避免光抑制和光破坏的发生, 如紧凑型玉米品种^[80], 或株高较低、叶面积指数较小的玉米品种^[81]; 相对较矮的豆科作物由于处于遮阴环境, 需要明确提高对弱光的利用, 即应该以弱光适应性强、光不敏感的品种的“阴性植物特点”品种为选育方向^[25, 82]。

目前玉米与豆科作物间作的研究中, 虽有相关作物品种的筛选研究, 但尚缺乏系统围绕特定生产环境间作群体中不同作物组合的深入研究^[83]。此外, 除了从光能利用角度考虑之外, 玉米与豆科作物间作体系中, 结合不同区域的自然特点, 作物品种的选择搭配还应考虑抗病虫和抗倒伏能力^[84], 以及发挥间作优势高水效和氮高效作物等^[51]。

2.2 施肥制度优化

在玉米与豆科作物间作体系中, 施肥水平对作物生长、养分吸收、群体产量和作物品质均具有一定影响。有研究表明, 在玉米与大豆间作中, 种植模式和施氮水平对玉米产量、主要农艺性状和生长动态均有一定影响, 且施氮效果优于间作效果^[85]。张向前等^[86]在红壤旱地上研究发现, 玉米与豆科作物间作通过合理的施肥可以达到改善作物营养品质和提高作物产量的目的。焦念元等^[87]发现, 施氮促进了玉米与花生间作体系氮、磷吸收积累, 提高了磷吸收利用效率, 但随着施氮量的增加, 玉米氮、磷吸收积累量还能保持较大增幅, 但也加大了对花生遮阴程度, 造成间作花生氮、磷吸收积累量增幅不大或略有降低。所以, 氮肥的合理施用是实现玉米与豆科作物间作系统氮素高效利用的关键^[88]。但同时也要考虑, 过度施氮造成的负面影响, 如作物减产、氮肥利用效率下降^[89], 土壤酸化^[90], 增加氮素淋失的风险^[91]。

因此, 在玉米与豆科作物间作系统中, 施肥

制度的合理制定需同时兼顾 2 种作物的需求特征。如刘文钰等^[92]在玉米 || 大豆的研究中发现, 一定时期大豆的根瘤数、根瘤重、根瘤固氮潜力和总吸氮量在氮肥减量时可显著提高, 且可以减少氮肥残留和损失, 提高氮肥利用率^[93]。焦念元等^[94-95]在玉米 || 花生中增施磷肥有利于促进光能的传递和转化, 提高花生对弱光的利用, 并能延缓玉米叶片衰老, 保持后期较高的净光合速率。在玉米与豆科作物的间作群体中, 适度的竞争可在系统水平上提高群体的产量和资源利用效率^[96]。已有研究证明, 间作作物种间互补作用的提高可以通过优化施肥来实现^[51, 97]。因此, 要精确制定玉米与豆科作物间作体系的施肥制度, 需量化不同作物间的竞争力与目标产量的相互关系。

2.3 空间结构合理布局

在玉米与豆科作物间作体系中, 空间布局主要指不同作物在群体中的占地比、株行距产生的空间占有量大小。不同作物的株型差异、行间配置决定了间作群体的空间布局, 这也影响了作物的生长发育和资源的利用^[83]。不同区域和不同作物布局也存在较大的差异。封亮等^[31]在江西红壤旱地玉米 || 大豆的研究发现, 增加 1 行大豆有利于系统增产; 刘鑫^[98]在四川玉米 || 大豆带状间作的研究发现, 当玉米 || 大豆带宽为 2.0 m, 玉米大豆行距为 0.6 m, 玉米行距和大豆行距为 0.4 m 时, 土地当量比可达到 1.42。蔡倩等^[14]在辽宁阜新地区玉米 || 大豆的研究发现, 综合间作模式作物干物质积累与分配特点、种间竞争关系、土地生产力水平等因素, 玉米与大豆 6 : 6 (6 行玉米、6 行花生) 间作模式是该地区适宜的高效种植模式; 陈国栋等^[99]在甘肃武威玉米 || 豌豆的研究发现, 氮肥利用率在 2 : 4 (2 行玉米、4 行豌豆) 间作模式下能显著提高; 赵建华等^[100]在甘肃武威玉米 || 豌豆的研究则发现, 系统产量与玉米行距呈现二次曲线相关关系; Wang 等^[101]在辽宁阜新玉米 || 花生中发现, 在 1 ~ 4 m 的宽度范围内, 边行比变化对作物的相对产量有较强的响应, 提出 2 行玉米和 4 行花生将是一个合理的选择, 且在降水较少年份, 2 行玉米和 4 行花生间作, 土地生产力和水分利用效率优势显著^[17]; 焦念元等^[87]在山东玉米 || 花生的研究发现, 2 : 4 (2 行玉米、4 行花生) 间作模式

的土地当量比显著大于 2 : 8 (2 行玉米、8 行花生) 间作模式。李含婷等^[12]在西北绿洲灌区玉米 || 绿肥的研究发现, 在不降低玉米种植密度前提下, 将箭筈豌豆插播到玉米群体当中, 结合减量 25% 施氮处理可保证玉米稳产, 具有较高的水分生产力。虽然传统间作空间布局设计原则是同种作物的行距减小, 相邻不同物种的距离扩大, 但在玉米与豆科作物间作体系中, 还需根据不同地区自然资源禀赋、作物搭配, 以及实际生产方式来逐步探索。

2.4 适度种植密度调整

在玉米与豆科作物间作体系中, 适度优化种植密度是提高系统生产力和资源利用效率的重要农艺措施之一。相关研究已表明, 作为间作体系中的优势作物, 玉米种植密度的适度增加, 可以在提高玉米产量的同时, 提高系统的土地当量比^[102]。通过降低矮秆豆科作物的种植密度, 也可以提高植株叶片的光合能力和茎秆抗折力, 降低倒伏发生, 提高作物产量^[103]。但随着玉米密度的增加, 可能导致豆科作物的产量降低^[104], 进而影响系统生产力。玉米与不同豆科作物间作, 通过优化系统中玉米种植密度, 还可以消减豆科作物的“氮阻遏”作用, 增加豆科作物的固氮量, 促进两种作物间的氮素转移, 提高氮素利用率^[105]。在玉米 || 豌豆研究中, 增加玉米种植密度能够促进系统对土壤硝态氮、氨态氮的吸收, 促进植株与土壤中碳氮的协同利用^[106], 且在玉米种植密度增加一定范围内, 氮肥利用效率显著提高^[107]。在辽宁阜新玉米 || 花生定位研究中发现, 适度增加玉米行比和密度有助于增加系统氮素吸收当量比、增强玉米对氮营养的竞争以及间作养分对产量的贡献^[16]。但是密度过高会加剧系统作物之间的养分竞争, 很可能导致负面影响, 如氮肥利用优势降低^[16]。因此, 玉米与豆科作物间作种植密度的调整是只可在一定范围内进行优化, 当然还需结合不同地区气候特征、资源禀赋、生产方式等进行深入挖掘。

上述研究成果为玉米与豆科作物间作提供了高效调控群体的实践依据。辽宁省农业科学院北方旱地耕作制度创新团队基于 20 a 以上的定位研究, 在阐明玉米与不同豆科作物间作地上地下资

源竞争和互补利用的生态机制, 揭示光、水、养分等资源协同高效利用机理基础上, 提出了针对我国北方不同地区玉米与不同豆科作物间作的稳产增效田间配置、带状分区水肥精准控制等农艺技术。这为我国旱地农田合理构建高产、高效、集约型玉米与豆科间作模式提供了有力的实践支撑。

3 玉米与豆科作物间作应用展望

间作种植在我国已具有悠久的历史, 而玉米与豆科作物间作作为我国旱地农田众多间作体系中最主要配置之一^[108-110], 随着农业科技水平逐步提升, 关于其间作、套作的理论与技术得到了进一步的挖掘和创新, 但在生产应用上仍存在一系列问题亟需解决。一是技术模式应用与当地农业经营方式不够兼容。大量研究也明确了适宜不同区域的间作模式, 但由于不同地区耕地现状和农业生产经营方式的差异, 导致研究成果与技术模式应用不够兼容, 阻碍其大规模推广。二是全流程生产配套农机装备仍缺乏。华南农业大学罗锡文院士团队和四川农业大学杨文钰教授团队均已研制出适宜西南地区丘陵地区小地块带状间作的农业生产环节的农机装备^[111], 实现了耕地、播种、管理和收获等农业生产环节的机械化作业, 但针对不同区域和不同间作模式仍迫切需要更多的试验和试制, 优化专门农机设备与服务供给, 使得玉米与豆科作物间作能够实现更大面积和范围的机械化。三是缺少适配作物品种选育研究与应用。在玉米与豆科作物间作中, 作物组合和适当的品种选择是系统成功的关键, 但这方面受到的重视程度不足, 缺乏不同区域玉米和豆科作物搭配品种的选育研究。特别是在不同区域的间作组合中, 作物品种多为选择适宜当地生产的主栽品种或根据作物基因型搭配组合, 导致群体构建中可能出现熟制不匹配、作物间不适配等问题, 直接影响了模式应用效果。四是部分间作模式总体经济效益不高, 推广应用难度大。在现有研发的玉米与豆科作物间作模式中, 多以土地当量比来衡量模式的间作优势, 缺乏针对粮食作物市场价格波动因素的考虑, 特别是当从投入产出比来看, 有时增产未必增收。比如玉米||大豆模式, 虽然在不同地区已研发出适宜相关区域的间作模

式, 且具有一定提高旱地农田生产力的优势, 但相关模式多在我国玉米主产区, 总体经济效益并不高, 导致实际生产应用中推广难度较大。

虽然玉米与豆科作物间作在应用生产过程中还存在一些问题, 但从玉米在我国旱地农田的地位和全球气候变化的影响, 以及减少化学肥料投入、支持绿色发展、满足多种食物来源(大食物观)方面, 特别是未来随着规模化、集约化生产水平的提高, 玉米与豆科作物间作在我国旱地农田中还有很大的应用空间。今后我们需要围绕间作模式的合理应用, 在经济、生态和社会效益等方面进行广泛研究, 特别是要在旱作区进行大力推广应用间作模式, 为促进我国旱地农业的增产增收, 增强抵御自然灾害能力, 保证国家粮食生产安全作出重要贡献。

参考文献:

- [1] LIU X, ZHANG Y, HAN W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [2] 王恭祯. 作物间作[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [3] 刘巽浩, 韩湘玲, 赵明斋, 等. 华北平原地区麦田两熟的光能利用、作物竞争与产量分析[J]. *作物学报*, 1981, 7(1): 63-72.
- [4] 李 隆. 间作作物种间促进与竞争作用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1999.
- [5] SERAN T H, BRINTHA I. Review on maize based intercropping[J]. *Journal of Agronomy*, 2010, 9(3): 135-145.
- [6] WILLEY R W. Resources use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17: 215-231.
- [7] REN J H, ZHANG L Z, DUAN Y, et al. Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 168-176.
- [8] ZHANG Y, DUAN Y, NIE J, et al. A lack of complementarity for water acquisition limits yield advantage of oats/vetch intercropping in a semi-arid condition[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 225: 1-9.
- [9] WILLEY R W. Intercropping-its importance and research needs. Part I. Competition and yield advantages[J]. *Field Crops Abstract*, 1979, 32: 2-10.
- [10] 褚贵新, 沈其荣, 张 娟, 等. 用 N 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]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 385–389.
- [11] LI L, YANG S C, LI X L, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between inter-cropped maize and fababean[J]. Plant and Soil, 1999, 212(2): 105–114.
- [12] 李含婷, 柴强, 王琦明, 等. 绿洲灌区不同施氮水平下玉米绿肥间作模式的水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2608–2618.
- [13] LIU S, YANG J Y, ZHANG X Y, et al. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123(10): 32–44.
- [14] 蔡倩, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 909–920.
- [15] FENG C, SUN Z X, ZHANG L Z, et al. Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2021, 270, 108208.
- [16] 冯晨, 黄波, 冯良山, 等. 不同配置对辽西玉米||花生间作系统氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(1): 61–73.
- [17] 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.
- [18] 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: 1–10.
- [19] 任旭灵, 滕园园, 王一帆, 等. 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(6): 860–869.
- [20] LI L, LI S M, SUN J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27): 11192–11196.
- [21] HUGAR H Y, PALLED Y B. Effect of intercropped vegetables on maize and associated weeds in maize–vegetable intercropping systems[J]. Karnataka Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(2): 159–161.
- [22] 杜桂娟, 白伟, 蔡倩, 等. 玉米–紫花苜蓿间作模式对作物产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业气象, 2025, 46(3): 398–408.
- [23] XIA H Y, WANG Z G, ZHAO J H, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2013, 154: 53–64.
- [24] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4324–4330.
- [25] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 7–12.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] TSUBO M, WALKER S, MUKHALA E. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations[J]. Field Crops Research, 2001, 71(1): 17–29.
- [29] 黄高宝. 作物群体受光结构与作物生产力研究[J]. 生态学杂志, 1999, 18(1): 59–65.
- [30] 乔寅英, 柴强. 带型及施氮水平对玉米间作豌豆群体光分布的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(6): 33–38; 43.
- [31] 封亮, 黄国勤, 杨文亭, 等. 江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1127–1137.
- [32] 黄高宝. 集约栽培条件下间套作的光能利用理论发展及其应用[J]. 作物学报, 1999, 25(1): 16–24.
- [33] 向午燕, 孙占祥, 冯良山, 等. 玉米花生间作作物光合生理响应机制[J]. 辽宁农业科学, 2017(5): 44–47.
- [34] 王仰仁, 杨丽霞. 作物组合种植的需水量研究[J]. 灌溉排水, 2000, 19(4): 64–67.
- [35] WALKER S, OGINDO H O. The water budget of rainfed maize and bean intercrop[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28: 919–926.
- [36] MAO L L, ZHANG L Z, LI W Q, et al. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. Field Crops Research, 2012, 138: 11–20.
- [37] 叶优良, 李隆, 孙建好. 三种豆科作物与玉米间作对水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 33–36.
- [38] 张莹, 孙占祥, 李爽, 等. 辽西半干旱区玉米/大豆单作田间耗水规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 43–46.

- [39] 蔡 倩, 孙占祥, 王文斌, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物产量及水分利用的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(7): 551–562.
- [40] ZHANG Y, SUN Z X, SU Z C. Root plasticity and inter-specific complementarity improve yields and water use efficiency of maize/soybean intercropping in a water-limited condition[J]. Field Crops Research, 2022, 282: 108523.
- [41] SUN T R, SUN Z X, ZHANG Z. Night transpiration of peanut affects interspecific water complementarity and use efficiency in maize/peanut intercropping [J]. Agricultural Water Management, 2025, 312: 109420.
- [42] 李 隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403–415.
- [43] SEKIYA N, ARAKI H, YANO K. Applying hydraulic lift in an agroecosystem: Forage plants with shoots removed supply water to neighboring vegetable crops[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1/2): 39–50.
- [44] 王 旗. 辽西风沙半干旱区玉米/花生间作系统产量及光水利用[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- [45] GUO Y J X, SUN Z X, BAI W, et al. Drought risk assessment for maize/peanut intercropping based on crop model and SPEI[J]. Agricultural Systems, 2024, 221: 104144.
- [46] LI B, LI Y Y, WU H M, et al. Root exudates drive inter-specific 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.
- [47] 李玉英, 孙建好, 李春杰, 等. 施氮对蚕豆/玉米间作系统蚕豆农艺性状及结瘤特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3467–3474.
- [48] 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.
- [49] RERKASEM B, RERKASEM K, PEOPLES M B, et al. Measurement of N_2 fixation in maize (*Zea mays* L.) – ricebean (*Vigna umbellata* [Thunb.] Ohwi and Ohashi) intercrops[J]. Plant and Soil, 1988, 108(1): 125–135.
- [50] VAN KESSEL C, ROSKOSKI J P. Row spacing effects on N_2 –fixation, N–yield and soil N up take of intercropped cowpea and maize[J]. Plant and Soil, 1988, 111(1): 17–23.
- [51] 柴 强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 19–26.
- [52] HAUGGAARD–NIELSEN H, GOODING M, AMBUS P, et al. Pea –barley intercropping for efficient symbiotic N_2 –fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 64–71.
- [53] 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, 108(1): 1–13.
- [54] FAN F L, ZHANG F S, SONG Y N, et al. Nitrogen fixation of fababean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems [J]. Plant and Soil, 2006, 283(1/2): 275–286.
- [55] CORRE–HELLOU G, FUSTEC J, CROZAT Y. Interspecific competition for soil N and its interaction with N_2 fixation, leaf expansion and crop growth in pea –barley intercrops[J]. Plant and Soil, 2006, 282(1/2): 195–208.
- [56] 肖焱波, 李 隆, 张福锁. 豆科/禾本科间作系统中氮营养研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(6): 44–49.
- [57] 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.
- [58] ZHANG Y Y, ZHAO F Y, SUN Z X, et al. Effects of maize/peanut intercropping on yield and nitrogen uptake and utilization under different nitrogen application rates [J]. Agriculture, 2024, 14: 893.
- [59] 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.
- [60] ZHANG Y Y, ZHAO F Y, SUN Z X, et al. Maize –peanut intercropping and N fertilization changed the potential nitrification rate by regulating the ratio of AOB to AOA in soils[J]. Climate Smart Agriculture, 2024, 1: 100023.
- [61] ZHANG Y Y, ZHAO F Y, FENG C, et al. Effects of maize/peanut intercropping and nitrogen fertilizer application on soil fungal community structure[J]. Agronomy, 2024, 14: 1053.
- [62] ZHAO F Y, SUN Z X, FENG L S, et al. Biological N fixation but not mineral N fertilization enhances the accumulation of N in peanut soil in maize/peanut inter-

- cropping system[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 10: 100365
- [63] 肖靖秀, 郑毅. 间套作系统中作物的养分吸收利用与病虫害控制[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 150–154.
- [64] VANDERMEER J H. The ecology of intercropping[M]. New York: Cambridge University Press, 1989.
- [65] 王艳朋, 靳静晨, 汤继华, 等. 作物氮素高效利用研究与现代农业[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 179–183.
- [66] WANG X, DENG X, PU T, et al. Contribution of inter-specific interactions and phosphorus application to increasing soil phosphorus availability in relay intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2017, 204: 12–22.
- [67] ZHOU L L, CAO J, ZHANG F S, et al. Rhizosphere acidification of faba bean, soybean and maize[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(14): 4356–4362.
- [68] 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.
- [69] 柏文恋, 郑毅, 肖靖秀. 豆科禾本科间作促进磷高效吸收利用的地下部生物学机制研究进展[J]. 作物杂志, 2018(4): 20–27.
- [70] LI L, SUN J, ZHANG F, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia, 2006, 147(2): 280–290.
- [71] XIA H Y, ZHAO J H, SUN J H, et al. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates[J]. Field Crops Research, 2013, 150(15): 52–62.
- [72] 张恩和, 黄高宝, 黄鹏. 不同供磷水平下粮豆间套种植对根系分布和根际效应的影响[J]. 草业学报, 1999(3): 35–38.
- [73] LEFEBVRE D D, DUFF S M G, FIFE C A, et al. Response to phosphate deprivation in *Brassica nigra* suspension cells enhancement of intracellular, cell surface and secreted phosphatase activities compared to increases in Pi-absorption rate[J]. Plant Physiology, 1990, 93(2): 504–511.
- [74] LI S M, LI L, ZHANG F S, et al. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping[J]. Annals of Botany, 2004, 94(2): 297.
- [75] 张德闪, 王宇蕴, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际 pH 值的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 127–133.
- [76] INAL A, GUNES A, ZHANG F, et al. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2007, 45(5): 350–356.
- [77] ADNANE B, NOYCE G L, CARLSSON G, et al. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 120: 179–188.
- [78] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31–34.
- [79] HUANG B, ZOU X J, XU H S, et al. Seedling defoliation of cereal crops increases peanut growth and yield in an intercropping system[J]. The Crop Journal, 2022, 10: 418–425.
- [80] 齐琦, 胡凯, 张敖, 等. 高产玉米‘郑单958’和‘先玉335’的灌浆和叶片光合特性的比较[J]. 植物生理学报, 2015, 51(9): 1489–1494.
- [81] MUNZ S, GRAEFF-HÖNNINGER S, LIZASO J I, et al. Modeling light availability for a subordinate crop within a strip-intercropping system[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 77–89.
- [82] 李双伟, 朱俊奇, JOCHEM B. EVERS, et al. 基于植物功能-结构模型的玉米-大豆条带间作光截获行间差异研究[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(1): 97–109.
- [83] 范虹, 殷文, 柴强. 间作优势的光合生理机制及其冠层微环境特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(11): 1750–1761.
- [84] 李潮海, 苏新宏, 孙敦立. 不同基因型玉米间作复合群体生态生理效应[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2096–2103.
- [85] 王晓维, 杨文亭, 缪建群, 等. 玉米-大豆间作和施氮对玉米产量及农艺性状的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5275–5282.
- [86] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7082–7090.
- [87] 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.
- [88] YONG T W, CHEN P, DONG Q, et al. Optimized nitrogen application methods to improve nitrogen use efficiency and nodule nitrogen fixation in a maize-soybean relay intercropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(3): 664-676.
- [89] 王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作系统干物质积累和氮素吸收动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(9): 1354-1363.
- [90] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [91] 刘金山, 戴 健, 刘 洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 112-120.
- [92] 刘文钰, 雍太文, 刘小明, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中大豆根瘤固氮及氮素吸收利用的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(5): 705-712.
- [93] 刘小明, 雍太文, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系土壤氮素残留和氮肥损失的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2267-2274.
- [94] 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.
- [95] 焦念元, 李亚辉, 杨 潇, 等. 玉米/花生间作行比和施磷对玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2959-2967.
- [96] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米光合特性差异及氮肥调控效应[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 141-149.
- [97] 赵凤艳, 张勇勇, 冯 晨, 等. 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[J]. 中国土壤与肥料, 2023(6): 129-137.
- [98] 刘 鑫. 玉豆带状间作系统光能分布、截获与利用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [99] 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.
- [100] 赵建华, 孙建好, 李 隆, 等. 改变玉米行距种植对豌豆/玉米间作体系产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1451-1456.
- [101] WANG R N, SUN Z S, 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.
- [102] 高 慧, 朱 倩, 张 荣, 等. 不同种植密度下玉米与豌豆间作对群体总产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3548-3558.
- [103] 程 彬, 刘卫国, 王 莉, 等. 种植密度对玉米-大豆带状间作下大豆光合、产量及茎秆抗倒的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4084-4096.
- [104] 陈远学, 彭丹丹, 胡 斐, 等. 玉米不同株型及种植密度对间作大豆产量和养分吸收利用的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(1): 136-146.
- [105] 陈红卫. 玉米/大豆间作氮素补偿利用的密度调控机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [106] 樊志龙. 密植提高玉米间作豌豆氮肥利用率的碳氮协同机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [107] 朱 静. 玉米密度对间作豌豆“氮阻遏”的调控效应及机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [108] 孙占祥. 东北地区旱地农业研究进展与发展对策[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(1): 4-11.
- [109] 柴 强, 胡发龙. 我国耕作制度研究进展与展望[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(1): 19-25.
- [110] 张绪成, 方彦杰. 甘肃寒旱农业生产现状及未来研究方向[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(1): 12-18.
- [111] 吴维雄, 罗锡文, 杨文钰, 等. 小麦-玉米-大豆带状复合种植机械化研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(Z1): 1-7.