

大豆玉米带状复合种植示范推广 与应用基础研究进展

常洪庆¹, 陈银银¹, 高意帆¹, 李思源¹, 董淑雅¹,
陈瑞雪¹, 张学林¹, 刘天学¹, 李鸿萍^{1,2}

(1. 河南农业大学农学院/省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室/作物生长发育调控教育部重点实验室, 郑州 450000;

2. 农业农村部农业监测预警重点实验室, 北京 100081)

摘要: 近年来, 随着国民生活条件改善, 人们对大豆加工产品需求日益增加, 但受耕地、气候等因素限制, 无法保持玉米种植面积不变, 额外增加大豆种植。黄淮海等地区大豆玉米同期播种的间作模式应用基础研究相对较少, 同期播种较非同期播种在光、热、水、肥、气等资源配置方面带来更多的生产问题, 亟待明确大豆玉米间作种植时带型配置、光资源利用、品种搭配、杂草治理和农机具配套等技术。本文通过综述大豆玉米间套作农机农艺融合、资源高效利用、高产高效栽培管理等研究, 为大豆玉米间作带状复合种植的增产高效机理和推广利用提供理论参考。

关键词: 玉米; 大豆; 套作; 间作; 高产高效

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Advances in Basic Research on the Demonstration, Extension and Application of Soybean-Maize Strip Intercropping Planting

CHANG Hong-qing¹, CHEN Yin-yin¹, GAO Yi-fan¹, LI Si-yuan¹, DONG Shu-ya¹,
CHEN Rui-xue¹, ZHANG Xue-lin¹, LIU Tian-xue¹, LI Hong-ping^{1,2}

(1. College of Agriculture, Henan Agricultural University / National Key Laboratory of Wheat and
Maize Crop Science / Key Laboratory of Regulating and Controlling Crop Growth
and Development, Ministry of Education, Zhengzhou 450000;

2. Key Laboratory of Agricultural Monitoring and Early Warning Technology,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, with the improvement of national living conditions, people demand for soybean processing products has been increasing. However, due to the constraints of cultivated land, climate and other factors, it is impossible to increase the additional soybean planting area while maintaining the same maize planting area. There is relatively little basic research on the application of intercropping models for soybean maize in the Huang-huaihai regions. The simultaneous sowing is more effective than non simultaneous sowing in terms of light, heat, water, fertilizer. It is urgent to clarify the technologies of soybean and maize intercropping in terms of belt configuration, light resource utilization, variety matching, weed control and agricultural machinery support. This article reviews the integration of agricultural machinery, efficient utilization of resources, and high yield and efficient cultivation management technologies in soybean maize intercropping, with the aim of providing theoretical research for further expanding the promotion and utilization of intercropping soybean maize strip composite planting.

Key words: Maize; Soybean; Strip intercropping; Intercropping; High yield and efficiency

录用日期: 2024-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300904)、农业农村部农业监测预警技术重点实验室开放课题(JCYJKFKT2202)

作者简介: 常洪庆(1999-), 男, 山东平原人, 硕士, 研究方向为大豆玉米高产高效复合种植。E-mail: chq15253490454@163.com

李鸿萍和刘天学为本文通信作者。E-mail: hongpingli2019@163.com E-mail: tianxueliu2005@163.com

大豆作为主要油料作物,自加入世界贸易组织以来,对外进口大豆依赖严重(图1)。2022年我国大豆进口总量达9 100万t,但年产量约为2 000万t,大豆自给自足的形势依旧严峻。玉米是我国第一大粮食作物,为保障国家粮食安全发挥了重要作用^[1]。2015年以来玉米产量稳定维持在2.6亿t以上,预测到2025年我国玉米总需求量将达3.18亿t,其中饲用玉米需求将突破2亿t,深加工玉米需求达

9 000万t^[2]。黄淮海地区作为我国六大玉米主产区之一,2022年夏玉米总产量达8 562万t,约占全国玉米产量的33%。为充分利用周年光热资源,该区常年种植制度为小麦-玉米一年两熟,因此,增加大豆的种植面积需缩减玉米种植面积。为解决大豆与玉米争地矛盾,减少大豆对进口的依赖,保障我国大豆生产的自给自足,传统的大豆玉米带状复合种植日益引起人们重视。

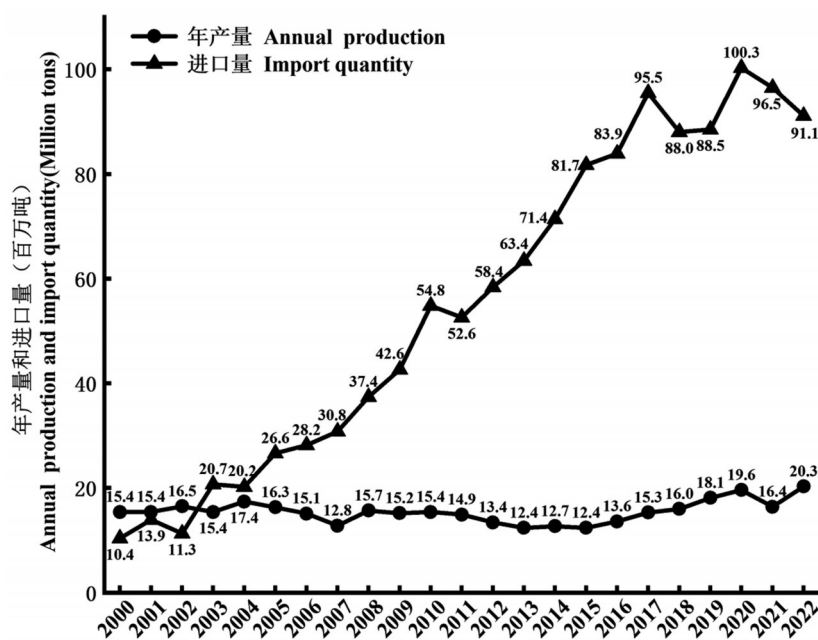


图1 中国大豆年产量和进口量

Fig.1 Annual soybean production and import in China

大豆玉米带状复合种植可发挥时空生态位互补的特点,充分利用地上株高差和地下水肥资源利用差的耦联作用,协调光热水肥资源高效利用。相较于大豆和玉米单作种植,复合种植模式光资源利用效率可提高1.50倍和1.16倍^[3]。此外通过大豆根瘤菌的共生固氮,改善了土壤物质循环和能量流动,丰富了土壤微生境,克服连作障碍,发挥土壤资源的合理利用,使土壤质量提升,对土壤健康发展、生产力提升和保育起到积极作用。复合种植在有限耕地条件下获得最大的经济效益,为解决豆玉争地矛盾指明了方向。传统大豆玉米带状复合种植存在施肥过多、播种质量不高、缺苗断垅、品种搭配不当、带型模式与农机不配套、种植密度偏低、产量与经济效益不高问题。本文综述前人在大豆玉米带状复合种植中带型配置、品种鉴定、光热资源利用、土壤地力提升、农机农艺融合和绿色可持续发展等方面的研究,为大豆玉米间作带状复合种植增产机理及经济效益提高提供理论和技术支撑。

1 大豆玉米带状复合种植带型配置及品种搭配

1.1 带型配置

为实现大豆玉米带状复合种植中“玉米基本不减产,增收100~130 kg大豆”的目标,探究大豆玉米带型搭配具有重要意义。西南及南方地区三熟不足、两熟有余,大豆玉米复合种植以套作为主,大豆一般在玉米生长的中后期播种;西北地区由于光热资源有限、水资源短缺,为一年一熟种植模式,采用秸秆覆盖免耕间作;黄淮海地区属于典型的一年两熟区,大豆玉米为间作种植模式。

大豆玉米不同带宽配置对产量均存在显著影响。杨文钰团队改变传统套作等行播种,采用60~70 cm大豆玉米带间距,提高了作物产量^[4]。这是由于改良套作后不仅使玉米有效利用了边行优势,还增加大豆冠层透光率,且更适宜小型拖拉机作业。适宜的两个作物带间距可以减少玉米的种内竞争,

提高套作群体产量。相较于单作玉米,大豆玉米生产单元带宽为2.0、2.4和2.8 m时产量分别降低6.4%、19.4%和44.1%,群体产量提高13.5%、3.8%和12.4%^[5]。王甜研究发现,带间距扩大有利于大豆干物质积累和花前营养器官向荚果转移干物质^[6]。舒泽兵等发现,大豆玉米带间距增加导致玉米株距减小,使鲜食玉米总收获量降低^[7]。巨鹏飞研究发现,随大豆种植行距缩小至40 cm,大豆的株高随之增高,茎粗减小,产量增加^[8],因此,适宜间作带带宽需综合考虑大豆玉米产量,保证综合收益最大。

研究表明,随大豆带宽占复合种植生产单元宽的比重降低,大豆生物量、百粒重等产量性状逐渐降低,相较于2:2(大豆玉米行比,下同)、3:2模式,4:2

模式减少了害虫的发生,提高了土壤氮代谢相关酶活性,提高了大豆产量^[9-10]。高阳等通过对大豆玉米间作系统光环境特性进行观测发现,内行大豆接受的日平均光量子通量密度比边行高10%,进入生殖生长期后内行株高、生物量也高于边行^[11]。在大豆玉米2:2间作模式下,大豆叶绿素含量相较于单作变化更大,其次是3:2、4:2模式,这是因为大豆带播种行数的减少加重玉米对大豆的遮蔽,进而影响叶绿素合成^[12]。综上,以2:4模式为主导,选择大豆玉米间距60~70 cm、大豆行距30 cm、玉米行距40 cm的间套作模式适宜我国大部分地区大豆玉米带状复合种植(图2)。

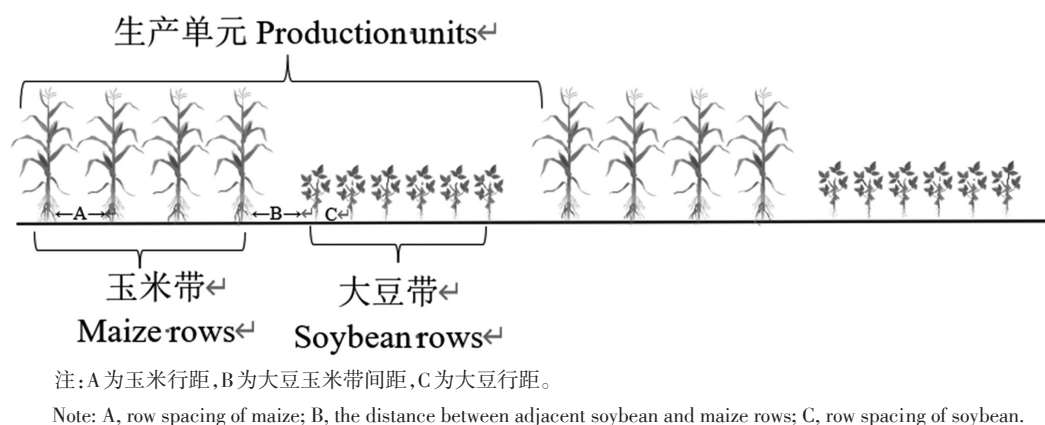


图2 大豆玉米带状复合种植示意图

Fig.2 The diagram of soybean-maize strip intercropping planting

1.2 大豆玉米带状复合种植中玉米品种特征

大豆玉米带状复合种植中玉米株型紧凑程度与大豆受遮阴程度直接相关,进而影响大豆植株形态建成、受精结实和产量。品种搭配上,紧凑型玉米与晚熟大豆品种复合种植可提高群体透光率,有利于土地当量比提高。研究发现,随玉米株型扩展,大豆缺苗及苗期的倒伏等情况加剧,株高增加,茎粗变小^[13],说明平展型或稀植大穗型玉米不适合带状复合种植。带状复合种植条件下玉米密度增大,随着种植密度的提高,玉米株高增加,茎粗、穗粗均变细,果穗变短,穗位高增加,倒伏风险加大,造成玉米自身产量降低。因此带状复合种植中玉米品种选育,需全面考虑耐密性和抗倒伏性。在大豆玉米带状复合种植中通过化控技术,可缩短玉米1~10节各节间长度,降低株高、穗位高及重心,从而提高玉米抗倒能力^[14]。在品种选择上还要考虑地区间差异,黄淮海地区玉米品种需要突出耐高温干旱、抗锈病等特点;西北地区由于干旱缺水、玉米生育期积温不足

等原因,玉米品种需要突出耐旱、增产潜力大等特点;西南及南方地区由于雨水多,玉米品种需要突出苗期耐涝、耐伏旱等特点。

1.3 大豆玉米带状复合种植中大豆品种特征

间套作条件下,大豆受隐蔽影响,避荫反应明显,表现出茎伸长、株高增加、叶面积减小等性状,进而导致产量降低。通过对间作条件下大豆弱光胁迫的适应性分析评价发现,株高、有效分枝数、单株叶面积、单株荚数、百粒重等对弱光响应更加敏感,可作为耐阴品种筛选依据^[15]。套作模式中大豆品种以晚熟为主,这主要因为晚熟品种氮素积累缓慢阶段与大豆玉米共生期相同,玉米收获后的氮素快速积累阶段不受影响,保证了晚熟大豆品种氮素积累^[16]。晚熟品种在与紧凑型玉米间作时表现出强耐阴性,具有较高的株高和叶面积指数、更粗的茎秆、较低的倒伏率等。刘卫国等通过对玉米套作大豆各性状主成分分析表明,套作大豆高产需要选择分枝能力强的品种^[17]。与玉米品种选择类似,大豆品种

也需要考虑地区差异,黄淮海地区应突出花荚期耐阴耐旱、鼓粒期耐涝等特点;西南及南方地区要突出耐干旱等特点;西北地区突出耐干旱等特点。综上,选育大豆品种需重点关注耐荫、抗倒、耐密、熟期适宜、种子高活力、宜机收的高产品种。

2 大豆玉米带状复合种植肥水管理

2.1 施肥管理

合理施肥是实现产量的保证。与单作相比,间套作栽培可以减少肥料的投入,节约资源。间作可以减少土壤无机氮积累,从而减少了硝酸盐淋洗^[18]。研究表明,减施氮肥处理的大豆、玉米产量分别较常规施氮增加了5.0%和7.0%^[19]。进一步研究发现,与单作玉米和单作大豆相比较,大豆玉米套作体系优势随施氮量增加而降低,这可能是由于套作模式下减少氮肥施用可提高N、P、K吸收量^[20]。陈勇等研究表明,在减氮条件下可显著提高大豆固氮率和固氮量的稳定性,并且大豆的固氮效率随大豆种植比例的增加而增加^[21]。此外为避免密肥不协调,出现烧苗、脱肥等问题,在间套作施肥时需注意施肥距离。和常规施肥相比,在距离玉米15~30 cm处施肥可以明显提高玉米的灌浆速率,增加粒重^[22]。作物对磷的吸收具有中间促进作用,由于根际土壤磷酸酶活性提高,间作玉米对磷的吸收能力强于大豆。通过对不同磷水平研究发现,在中等施肥水平的基础上减半施磷,玉米仍具有较高的磷吸收量^[23],因此在一定程度上减施磷肥仍可维持作物磷吸收。除磷肥外,间作促进了玉米对钾元素的吸收,抑制大豆钾元素吸收,马铃薯玉米间作中也有类似现象^[24-25]。目前,对豆科和禾本科复合种植钾肥差异吸收研究相对较少,但钾肥需求量持续增加,若钾肥比例过低,则会减少氮磷的利用率^[26]。综上,由于大豆自身较强的生物固氮能力,大豆玉米需肥量不同,需要分别控制施肥,保证玉米氮肥需求,大豆不施或少施氮肥。未来研究重点应该关注大豆玉米复合种植中如何更合理高效利用肥料,如加大玉米带缓控施肥用量,避免密肥不协调。

2.2 水分管理

复合种植条件下作物具有更高的水分利用效率。相较于单作而言,间套作时作物生育期总需水量虽然大于单作,但小于相应耗水量的加权平均值,即整个间作过程水分利用效率高于单作^[27]。玉米与豆科作物间作时由于根系空间分布的不同实现了水分利用互补,大豆根量80%集中在5~20 cm土层,玉米主体根系分布在0~40 cm土层;玉米通过蒸腾

提水作用,将深层根区以下的水分运输到根层,进一步减少水分的竞争,有助于水分利用互补^[28]。与传统漫灌不同,调亏交替灌溉、喷灌、滴灌等节水灌溉措施可进一步提高土壤水分利用效率,复合种植条件下节水灌溉优势更加明显。小米/玉米间作交替灌溉条件下,相较于单作玉米水分利用效率提高约35%^[29]。适宜密度可通过改善光热资源等调节冠层局部小气候,改善蒸腾作用和根系水分吸收,进而影响水分利用效率。在极端天气情况下,间作通过增加作物多样性,提升对极端环境的敏感性,来缓解高温干旱等极端天气的负面影响。但大豆玉米间套作时仍应注意田间灌溉状况,灌溉条件特别差的旱作区则不建议种植,避免因缺水影响播种和出苗。同时,因大豆易拍苗不宜大水漫灌,根据生育期情况待玉米浇蒙头水后,墒情合适时再播种大豆。

3 大豆玉米带状复合种植对土壤微生物环境的影响

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成因子,土壤微生物多样性受水肥管理、种植方式等影响。通过土壤水分调节试验发现,水分变化显著加剧微生物群落的变化,使微生物数量减少,抑制微生物分解土壤有机物。在高水位时水分变异增强却促进土壤团聚体分散,弥补了因微生物分解抑制导致的土壤有机质减少^[30]。在豆玉间作模式下,玉米根际土壤中子囊菌门真菌表达丰度增加,担子菌门真菌表达降低,且不同间作模式下土壤微生物分类单元差异显著^[31]。土壤养分丰缺直接关系到作物产量,而土壤微生物直接参与了养分循环。越来越多的学者开始重点关注土壤微生物组成、结构与功能,特别是对根际生命共同体(植物-根系-根际-菌丝际土体及其微生物)的研究。带状复合种植不仅在大豆玉米之间具有种间互促作用,同时提高了种间与微生物的互作。赵薇等研究发现,氨氧化细菌、氨氧化古菌基因丰度间作低于单作,硝化作用减弱,导致土壤硝态氮含量和强度降低^[32],进一步表明了带状复合种植条件下作物与微生物之间的互作。此外,带状复合种植条件下,病原菌数量显著降低。间作条件下根际微生物数量、多样性增加,与病原微生物竞争养分增加,导致病原菌生存空间减少。杨阳研究表明,间作根际微生物控制土传病害的机理包括生防菌对病原菌的拮抗作用、缓解化感自毒作用、诱导植物系统抗性等^[33]。未来基于根际生命共同体研究基础,在大豆玉米带状复合种植研究中发掘菌群在增产、抗逆等方面的功能潜力值得深入研究。

4 大豆玉米带状复合种植对温室气体排放影响

近年来,随着全球气候变暖,温室气体排放受到越来越多关注,农业系统温室气体主要包括 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 。玉米大豆带状复合种植可以减少氮肥使用,固氮减排,有效减少温室气体排放。研究发现,与单作相比,间作减少了4.0%~8.9% CO_2 累积排放量,减少了32.2%~36.6% N_2O 排放量^[34]。陈津赛认为, N_2O 排放量降低是由于间作模式改变土壤水热状况,改变根系土壤菌群组成、结构,进而降低 N_2O 排放量^[35]。通过氮肥基施和加追氮肥的模式,大豆玉米间作可以有效减少温室气体的排放量^[36]。玉米灌浆期需肥量大,基追模式与玉米需肥规律吻合,降低了土壤活性氮库储存,同时间作大豆能有效降低土壤活性氮浓度,减少氧化亚氮排放速率。带状复合种植在 CO_2 减排方面表现出同样潜力。赵德强根据结构方程模型得出,土壤 NO_3^- 和 NH_4^+ 含量对 CO_2 减排潜力起决定性作用^[36]。通过精准施肥、水肥一体化等可以提高肥料利用效率,减少肥料投入,进而达到减少碳排放目标。未来温室气体排放问题仍是农业生产关注的焦点,带状复合种植通过调节土壤微环境及微生物因子对减排具有明显效果,如何结合节水节肥等因子更好地发挥间作减排作用需要开展大量研究。

5 大豆玉米带状复合种植除草剂选用和全程机械化

大豆玉米复合种植中杂草防治应遵循“化学措施为主,其他措施为辅;土壤封闭为主,茎叶喷施为辅;科学施药,安全高效,因地制宜,节本增收”的原则。戴炜等通过盆栽模拟大豆玉米间作筛选出了二甲戊灵、精异丙甲草胺等5种土壤处理剂和灭草松、噻吩磺隆等5种茎叶处理剂^[37],其中二甲戊灵使用后对大豆玉米无毒害作用;茎叶处理中灭草松处理后大豆玉米与清水处理表现无差异;噻吩磺隆处理后的玉米、大豆的株高受到抑制,茎增粗,但药害能恢复,且除草效果高于其他处理。杜晓军等筛选了适合玉米、大豆地两用除草剂乙草胺和扑草净混合使用^[38]。玉米、大豆共生条件下的除草剂相对较少,需要深入研发。由于玉米和大豆分别属于单子叶植物和双子叶植物,在除草剂使用时,需要注意防漂移。为解决上述问题,可以选择具有安全剂的除草剂、培育转基因玉米、大豆等。当前,我国还未批准转基因抗除草剂大豆商业化推广,但早在20世纪

就开始了转基因作物研究。2019年,转基因耐除草剂大豆DBN9004、中黄6106和SHZD3201已经获得农业转基因生物安全证书^[39],未来抗除草剂大豆将会在间作中发挥重大作用。

农业机械化是农业现代化的重要组成部分,是提高作业效率、实现现代农业的重要环节。实现间套作模式种管收的机械化是规模化推广的关键问题。精量播种是保证间套作密度、提高播种质量的前提。需要优先选用与行比配置相适应的大豆玉米带状复合种植播种机。分别选择大豆和玉米的播种机开展带状复合种植时,配备北斗导航系统,以保障衔接行距。不同玉米播种区还存在区域问题。黄淮海地区由于麦茬影响,导致机械化作业时存在秸秆堵塞、出苗不整齐等^[40];西南地区由于丘陵地形,导致适宜机械设备少^[41];西北地区由于覆膜播种,导致残膜污染、种孔异位等^[42]。因此,针对不同地区问题,需要机械满足个性化调配服务,为精量播种提供保证。

参考文献:

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (11): 1941-1959. (in Chinese)
- [2] 仇焕广,李新海,余嘉玲.中国玉米产业:发展趋势与政策建议[J].农业经济问题,2021(7):4-16.
QIU H G, LI X H, YU J L. China maize industry: Development trends and policy suggestions[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021(7): 4-16. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] DU J B, HAN T, GAI J, et al. Maize-soybean strip intercropping: Achieved a balance between high productivity and sustainability[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(4): 747-754.
- [5] LIANG B, MA Y, SHI K, et al. Appropriate bandwidth achieves a high yield by reducing maize intraspecific competition in additive maize-soybean strip intercropping[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 142.
- [6] 王甜.田间配置对间作大豆叶片光合功能、物质积累分配及产量形成的影响研究[D].雅安:四川农业大学,2020.
- [7] 舒泽兵,罗万宇,蒲甜,等.基于高产与高效条件下鲜食玉米鲜食大豆带状间作田间配置技术优化[J].作物学报,2023,49(4): 1140-1150.
SHU Z B, LUO W Y, PU T, et al. Optimization of field configuration technology of strip intercropping of fresh corn and fresh soybean based on high yield and high efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(4): 1140-1150. (in Chinese)
- [8] 巨鹏飞.玉米大豆间作种植行向及田间配置研究[D].南京:南京农业大学,2019.
- [9] LI L, CHEN F, XING G. Effects of fertilizer level and intercropping

- planting pattern with corn on the yield-related traits and insect community of soybean[J]. *Agronomy*, 2022, 12(12).
- [10] 罗万宇,唐庄峻,任永福,等. 带宽、行比对鲜食玉米间作鲜食大豆群体产量效益的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(4): 442–451.
- LUO W Y, TANG Z J, REN Y F, et al. Effects of bandwidth and row ratio on population yield and benefit of fresh maize intercropping with fresh soybean[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2019, 37(4): 442–451. (in Chinese)
- [11] 高阳,段爱旺,刘祖贵,等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. *应用生态学报*, 2008(6): 1248–1254.
- GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(6): 1248–1254. (in Chinese)
- [12] 韦柳佳,黄莉,张雅琼,等. 玉米/大豆间作模式及效应分析[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(1): 67–72.
- WEI L J, HUANG L, ZHANG Y Q, et al. Analysis on intercropped patterns and effect in maize/soybean intercropping system[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(1): 67–72. (in Chinese)
- [13] 伍晓燕. 不同株型玉米对套作大豆形态生理及产量品质影响的研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2007.
- [14] 陈喜凤. 米豆条带间作体系产量效应分析及其抗倒机制研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2020.
- [15] 谭春燕. 大豆对间作弱光胁迫的适应性研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2018.
- [16] 刘增禹,伍晓燕,杨文钰,等. 玉米株型对套作大豆氮素积累、转运和籽粒蛋白质产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(6): 574–581.
- LIU Z Y, WU X Y, YANG W Y, et al. Effect of corn plant type on soybean nitrogen accumulation, translocation and seed protein yield under corn/soybean relay-strip cropping system[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(6): 574–581. (in Chinese)
- [17] 刘卫国,邹俊林,袁晋,等. 套作大豆农艺性状研究[J]. *中国油料作物学报*, 2014, 36(2): 219–223.
- LIU W G, ZOU J L, YUAN J, et al. Research on the agronomic traits of relay cropping soybean[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, 36(2): 219–223. (in Chinese)
- [18] 李玉英,孙建好,余常兵,等. 施氮量和蚕豆/玉米间作对土壤无机氮时空分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 815–823.
- LI Y Y, SUN J H, YU C B, et al. Effects of nitrogen fertilization application and faba bean/maize intercropping on the spatial and temporal distribution of soil inorganic nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(4): 815–823. (in Chinese)
- [19] 董茜,雍太文,刘小明,等. 施氮方式对玉米-大豆套作体系中作物产量及玉米籽粒灌浆特性的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(11): 2028–2039.
- DONG Q, YONG T W, LIU X M, et al. Effect of nitrogen application methods on crop yield and grain filling characteristics of maize in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(11): 2028–2039. (in Chinese)
- [20] 雍太文,刘小明,刘文钰,等. 减量施氮对玉米-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.
- YONG T W, LIU X M, LIU W Y, et al. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize soybean relay strip intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 474–482. (in Chinese)
- [21] 陈勇,杨可攀,段富媛,等. 减氮对甜玉米/大豆间作系统大豆结瘤固氮特性的影响[J]. *生态科学*, 2022, 41(4): 1–8.
- CHEN Y, YANG K P, DUAN F Y, et al. Effect of reduced nitrogen application on nodulation characteristics of soybean in sweet maize/soybean intercropping system[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(4): 1–8. (in Chinese)
- [22] 文熙宸,王小春,邓小燕,等. 玉米-大豆套作模式下氮肥运筹对玉米产量及干物质积累与转运的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(3): 448–457.
- WEN X C, WANG X C, DENG X Y, et al. Effects of nitrogen management on yield and dry matter accumulation and translocation of maize in maize-soybean relay-cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(3): 448–457. (in Chinese)
- [23] 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.
- TAN X M, PAN H N, XIAO J X, et al. Root morphological changes in maize and soybean intercropping system under different phosphorus levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3223–3230. (in Chinese)
- [24] 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.
- LIU J X. Study on potassium absorption and utilization under maize-soybean intercropping conditions[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2011, 52(6): 4–5. (in Chinese)
- [25] 周龙,吕玉,朱启林,等. 施氮与间作对玉米和马铃薯钾吸收与分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1485–1493.
- ZHOU L, LÜ Y, ZHU Q L, et al. Effects of nitrogen application and intercropping on potassium uptake and distribution in maize and potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1485–1493. (in Chinese)
- [26] 谢建昌,周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. *土壤*, 1999(5): 244–254.
- XIE J C, ZHOU J M. Progress in soil potassium research and potash fertilizer use in China[J]. *Soils*, 1999(5): 244–254. (in Chinese)
- [27] 刘英超,汤利,郑毅. 玉米马铃薯间作作物的土壤水分利用效率研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2013, 28(6): 871–877.
- LIU Y C, TANG L, ZHENG Y. Researches on soil water use efficiency in maize-potato intercropping system[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2013, 28(6): 871–877. (in Chinese)
- [28] NOBUHITO S, KATSUYA Y. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift?—Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters[J]. *Field Crops Research*, 2003, 86(2): 167–173.

- [29] CAIHONG Y, GAOBAO H, QIANG C, et al. Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the oasis field of northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 426–432.
- [30] CHEN K, HUO T, ZHANG Y, et al. Response of soil organic carbon decomposition to intensified water variability co-determined by the microbial community and aggregate changes in a temperate grassland soil of northern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2023, 176: 108875.
- [31] 瓮巧云, 黄新军, 许翰林, 等. 玉米/大豆间作模式对青贮玉米产量、品质及土壤营养、根际微生物的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(2): 462–470.
- WENG Q Y, HUANG X J, XU H L, et al. Effects of corn/soybean intercropping model on yield, quality, soil nutrition and rhizosphere microorganisms of silage corn[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2): 462–470. (in Chinese)
- [32] 赵 薇, 伊文博, 王 顶, 等. 间作对马铃薯种植土壤硝化作用和硝态氮供应的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4171–4179.
- ZHAO W, YI W B, WANG D, et al. Effects of intercropping on soil nitrification and nitrogen supply in potato field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4171–4179. (in Chinese)
- [33] 杨 阳, 姚槐应. 间作下根际微生物控制土传病害的研究进展[J]. *武汉工程大学学报*, 2021, 43(4): 381–390.
- YANG Y, YAO H Y. Progress in control of soil-borne diseases by rhizosphere microorganisms under intercropping[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2021, 43(4): 381–390. (in Chinese)
- [34] 黄坚雄, 隋 鹏, 高旺盛, 等. 华北平原玉米 || 大豆间作农田温室气体排放及系统净温室效应评价[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 66–74.
- HUANG J X, SUI P, GAO W S, et al. Effect of maize-soybean intercropping on greenhouse gas emission and the assessment of net greenhouse gas balance in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 66–74. (in Chinese)
- [35] 陈津赛, 王广帅, 张莹莹, 等. 玉米大豆间作对农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 32–40.
- CHEN J S, WANG G S, ZHANG Y Y, et al. The effects of soybean-maize intercropping on N₂O emission from soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 32–40. (in Chinese)
- [36] 赵德强. 玉米大豆不同行比间作对 AMF 侵染及温室气体排放的影响[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2020.
- [37] 戴 炜, 杨继芝, 王小春, 等. 不同除草剂对间作玉米大豆的药剂及除草效果[J]. *大豆科学*, 2017, 36(2): 287–294.
- DAI W, YANG J Z, WANG X C, et al. The influence of different herbicides on intercropping soybean and maize[J]. *Soybean Science*, 2017, 36(2): 287–294. (in Chinese)
- [38] 杜晓军, 崔锡花, 姜 成, 等. 玉米、大豆地两用除草剂的筛选[J]. *延边大学农学报*, 2001(4): 282–286.
- DU X J, CUI X H, JIANG C, et al. The screening of current herbicide both used for maize and soybean[J]. *Agricultural Science Journal of Yanbian University*, 2001(4): 282–286. (in Chinese)
- [39] 李东阳, 肖 冰, 张旭冬, 等. 转基因耐除草剂大豆发展现状与展望[J]. *大豆科学*, 2022, 41(6): 733–739.
- LI D Y, XIAO B, ZHANG X D, et al. Development status and prospect of genetically modified herbicide tolerant soybean[J]. *Soybean Science*, 2022, 41(6): 733–739. (in Chinese)
- [40] 石 宏, 李 达. 目前国内外播种机械发展走向(I)[J]. *农业机械化与电气化*, 2000(1): 47.
- SHI H, LI D. At present, the development trend of seeding machinery at home and abroad(I)[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2000(1): 47. (in Chinese)
- [41] 陈金虎. 中国农业机械化发展存在问题分析与对策研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012.
- [42] 马 蕾, 吕金良. 我国农用地膜使用现状及回收机制研究[J]. *农业科技通讯*, 2019(11): 19–23.
- MA L, LÜ J L. Research on the current situation and recycling mechanism of agricultural mulch film in China[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(11): 19–23. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)