



彭良斌,周杰,马怀英,臧华栋,靳建刚,薛志强,杨亚东,曾昭海.燕麦与马铃薯带状间作产量优势及土地利用效率[J].中国农业大学学报,2023,28(03):38-49.
PENG Liangbin, ZHOU Jie, MA Huaiying, ZANG Huadong, JIN Jiangang, XUE Zhiqiang, YANG Yadong, ZENG Zhaohai. Yield advantage and land utilization of oat and potato strip intercropping system[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(03): 38-49.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.03.04

燕麦与马铃薯带状间作产量优势及土地利用效率

彭良斌¹ 周杰¹ 马怀英¹ 臧华栋¹ 靳建刚² 薛志强² 杨亚东^{1*} 曾昭海¹

(1. 中国农业大学 农学院,北京 100193;

2. 山西农业大学 生态农牧研究所,山西 右玉 037200)

摘要 为探究北方半干旱地区燕麦与马铃薯带状间作对作物产量和土地利用效率的影响,于2019—2021年在山西省右玉县开展3年的大田试验,设置燕麦单作、马铃薯单作和燕麦与马铃薯带状间作3种植模式,分析了3种植模式产量效应以及间作模式的土地当量比(LER)和边行效应。结果表明:燕麦与马铃薯带状间作表现出明显的增产效应,3年试验期间的土地当量比分别为1.11、1.07和1.17。间作边1行燕麦籽粒产量显著高于间作其他边行和单作行,2019—2021年,间作边1行产量对间作燕麦籽粒产量贡献率为35.6%~38.5%。产量构成分析显示,地上部生物量、有效穗和穗粒数的增加是间作边1行燕麦籽粒产量提高的决定因素。与马铃薯单作相比,间作边1行马铃薯单株块茎重和商品薯重均降低,导致间作马铃薯产量下降1.0%~26.2%。综上所述,燕麦与马铃薯带状间作增加了土地利用效率,具有较好的产量效应,燕麦边行效应是间作产量优势的重要原因。

关键词 燕麦 || 马铃薯; 产量; 土地当量比; 边行效应

中图分类号 S344.2

文章编号 1007-4333(2023)03-0038-12

文献标志码 A

Yield advantage and land utilization of oat and potato strip intercropping system

PENG Liangbin¹, ZHOU Jie¹, MA Huaiying¹, ZANG Huadong¹, JIN Jiangang², XUE Zhiqiang²,
YANG Yadong^{1*}, ZENG Zhaohai¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Ecological Agriculture and Animal Husbandry Research Institute, Shanxi Agricultural University, Youyu 037200, China)

Abstract In order to investigate the impact of oat and potato strip intercropping on crop yields and land utilization rate in the semi-arid northern China, a 3-year field experiment (2019-2021) was carried out in Youyu County, Shanxi Province. The experiment contained 3 cropping systems, which were sole oat cropping, sole potato cropping and oat and potato strip intercropping. The yield effect, land equivalent ratio (LER), and border row effect of intercropping system were studied. The results showed that: Oat and potato strip intercropping had significant yield advantage and the LERs were 1.11, 1.07, and 1.17 in the three years, respectively. The grain yield of oat in intercropping border 1 row was significantly higher than that in other intercropping rows and sole row, which contributed approximate 35.6% to 38.1% of the total grain yield of intercropping system in 2019 - 2021. Furthermore, yield composition analysis showed that the increased aboveground biomass, ear number and kernel number per ear were the determinants for the increased grain yield of one row oat planting in intercropping border. On the contrary, the lower tuber yield per plant and marketable yield per plant of potato in one row potato planting in intercropping border resulted in about 1.0% to

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 国家燕麦荞麦产业技术体系(CARS07-B-5)

第一作者: 彭良斌(ORCID:0000-0002-1331-6835), 硕士研究生, E-mail: s20203010008@cau.edu.cn

通讯作者: 杨亚东(ORCID:0000-0002-8970-7277), 副教授, 主要从事多样化种植制度研究, E-mail: yadong_tracy@cau.edu.cn

26.2% decrease in potato yield of intercropping. In conclusion, the oat and potato strip intercropping increased LER and had yield advantages, and the border row effect of oat was responsible for the strip intercropping yield advantage.

Keywords oat and potato intercropping; yield; land equivalent ratio; border row effect

旱作农业在保障我国粮食安全中占据越来越重要的战略地位,种植规模约占全国耕地面积的55%^[1],其粮食产量占全国粮食总产量的比例也从1980年的41%提高到2020年的55%^[2]。北方半干旱地区是我国重要的旱作农业生产区域,以玉米、燕麦、马铃薯、豆类和杂粮为主要种植作物。但该区域农业生产中面临干旱、土壤养分流失、土壤风蚀以及耕地利用集约度较低等问题限制了该区域农业的可持续发展^[3]。

间作是指在同一块土地上同时栽培两种或两种以上作物的种植方式^[5]。已有研究表明,间作可以提高光能、水分和养分等资源利用率^[6-9],以及增加作物产量与产量稳定性^[10-11]。带状间作作为一种重要的间作形式,相较于行间作具有以下优势:可利用小型机械同时播种和同时收获,提高了生产效率;作物共生期时间长,生态位差异较大,有利于提高系统光能、水分和养分利用率^[12],在可持续农业中扮演越来越重要的角色。程彬等^[13]研究发现玉米与大豆带状间作时,宽行种植增加了大豆单株分枝数和有效荚数,提高大豆荚果产量,但窄行种植导致大豆单株分枝数降低,单株无效荚数增加,进而降低荚果产量。通常,窄带间作难以利用机械进行管理,而宽带间作更容易实现机械化作业,但条带加宽后会导致种间相互作用减少,对作物产量的促进作用也会减弱^[14]。Wang等^[15]研究了玉米和花生带状间作模式中边行比例对玉米和花生产量的影响,发现产量响应可以通过改变边界行比例来调节,但对带状间作系统中边行产量的贡献及其形成机制的研究仍不足。

燕麦(*Avena sativa* L.)属禾本科燕麦属,属于一年生粮饲兼用作物,在北方半干旱地区表现出较好的生态适应性和耐旱性,能最大限度地利用自然降水,所需氮肥投入较低,种植燕麦也有利于减少土壤侵蚀,具有治理土地荒漠化的作用^[16-17]。马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是茄科作物,也是我国北方半干旱地区的重要作物之一。马铃薯生产的水氮投入量高,对农业生态环境的威胁大,同时连作后会导​​致病害发病率高,以及土壤风蚀加重等问题^[4]。利用燕麦与马铃薯构建带状间作是一种减少过量施

肥、高效利用自然降水、避免水土流失等问题有效途径,也能缓解马铃薯由于长期连作导致的生产问题。但关于该区域燕麦与马铃薯带状间作模式的产量效应及其机制的研究尚未见报道。本研究在北方典型半干旱区山西省右玉县开展燕麦与马铃薯带状间作试验,基于3年的大田试验,分析了带状间作模式的产量效应,旨在探究带状间作对燕麦和马铃薯产量优势及土地利用效率,以期为该模式在北方半干旱地区推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2019—2021年在山西省朔州市右玉县农业科学院实验基地(40°18' N, 112°33' E)进行田间试验。该地区属于温带大陆性季风气候,年平均日照数2 900 h,年平均降雨量423 mm,年平均气温约为4.5 °C,平均无霜期120 d。试验地土壤类型为粟钙土,试验开始前0—20 cm耕层土壤基本理化性质为:pH 8.1,有机碳含量5.9 g/kg,全氮含量0.67 g/kg,矿质氮含量6.1 mg/kg,速效磷含量26.2 mg/kg,速效钾含量93.0 mg/kg。2019年之前试验地多年种植燕麦,燕麦氮、磷肥施用量每年均保持一致,分别为N 75 kg/hm²和P₂O₅ 75 kg/hm²,未施用钾肥。试验期间月平均气温和月降雨量,见图1。

1.2 试验设计及田间管理

采用随机区组试验设计,设置燕麦单作、马铃薯单作和燕麦与马铃薯带状间作3个处理,每个处理4次重复,小区面积60 m²(5 m×12 m)。燕麦与马铃薯带状间作处理依据当地小型农机种植宽度进行设计,间作条带宽4 m,其中燕麦和马铃薯各2 m,每个小区包含3个间作条带,每个间作带种植8行燕麦、3行马铃薯。单作和间作处理中,燕麦行距均为25 cm,采用条播,播种量为150 kg/hm²;马铃薯株距为25 cm,行距为67 cm,播种量为6 000株/hm²;间作处理中燕麦与马铃薯间作行距为46 cm。

供试燕麦和马铃薯品种分别为‘坝菽14号’和‘冀张薯12号’。单作和间作燕麦和马铃薯施肥量相同,其中燕麦氮、磷、钾施用量分别为N 90 kg/hm²、

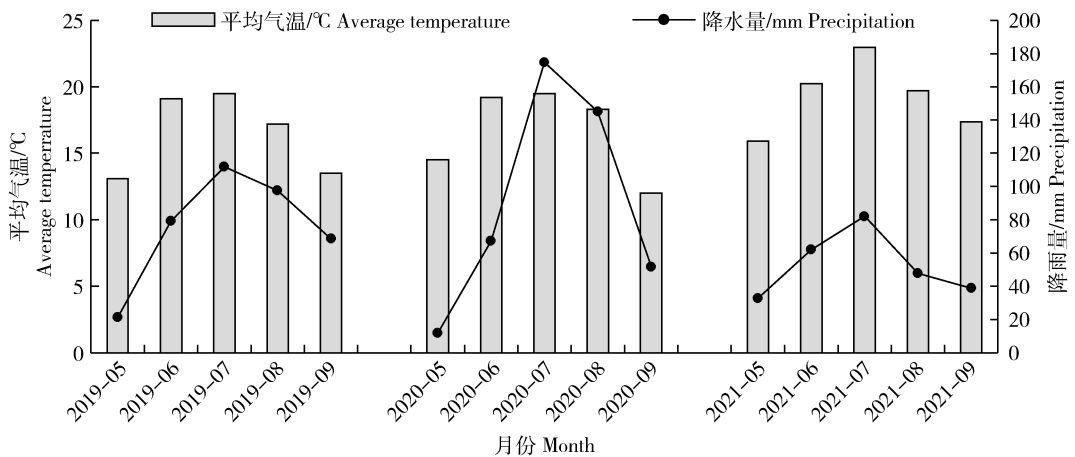


图1 2019—2021年燕麦和马铃薯生育期月平均气温和月降雨量

Fig. 1 Monthly average temperature and accumulated precipitation during oat and potato growing periods from 2019 to 2021

P_2O_5 60 kg/hm² 和 K_2O 30 kg/hm², 马铃薯氮、磷、钾施用量分别为 N 240 kg/hm²、 P_2O_5 96 kg/hm² 和 K_2O 480 kg/hm²。所有肥料均于播种前作为基肥一次性施入。试验期间灌溉时间和灌溉量根据当年降雨情况以及土壤墒情确定, 2019年分别于05-17、06-09和07-08进行灌溉, 每次灌溉量均为35 mm; 2020年于05-13、06-07和07-07进行灌溉, 每次灌溉量均为30 mm; 2021年于06-03、07-03和07-15进行灌溉, 每次灌溉量均为50 mm。采用人工播种、起垄和收获。燕麦和马铃薯播种和收获时间一致, 3年的播种日期分别为2019-05-15、2020-05-11和2021-05-24, 收获日期分别为2019-09-21、2020-09-27和2021-09-17。

1.3 产量及产量构成测定

1.3.1 燕麦

单作燕麦于成熟期每个小区取2个2 m² (2 m × 1 m) 样方; 为观测带状间作对各边行燕麦籽粒产量的影响, 间作小区分别按边1、2、3、4行(靠近马铃薯的作为边1行的燕麦, 各边行面积占比均为25%) 分别取2 m 样段, 自然风干后测定其燕麦籽粒产量。单作燕麦于小区中另外取2个50 cm 样段, 间作燕麦于中间条带每个边行取2个50 cm 样段, 分别对各边行燕麦测定有效穗、穗粒数、千粒重; 样品于105 °C 杀青30 min, 85 °C 烘干至恒重, 测定地上部生物量。

1.3.2 马铃薯

单作马铃薯于成熟期每个小区从中间2行连续

取8株; 为测定带状间作对各边行马铃薯产量的影响, 间作小区分别按边1、2行(靠近燕麦的作为边1行的马铃薯, 边1行面积占比为66.7%, 边2行面积占比为33.3%) 取样。于中间条带边1行和边2行分别连续取8株, 测定鲜薯重量。单作马铃薯于小区中另外随机取3株长势一致的马铃薯, 间作马铃薯于中间条带每个边行另外取3株长势一致的马铃薯, 测定鲜薯重量、鲜薯数量、商品薯重量、商品薯数量。

1.4 土地当量比计算

土地当量比(land equivalent ratio, LER)用于衡量间作产量优势^[18], 计算公式为:

$$LER = L_o + L_p = \frac{Y_{io}}{Y_{so}} + \frac{Y_{ip}}{Y_{sp}} \quad (1)$$

式中: L_o 和 L_p 分别为燕麦和马铃薯的偏土地当量比; Y_{so} 和 Y_{sp} 分别为燕麦单作籽粒产量和马铃薯单作鲜薯产量; Y_{io} 和 Y_{ip} 分别为燕麦间作籽粒产量和马铃薯间作鲜薯产量; 当 $LER > 1.00$ 时, 表示间作系统具有产量优势。

1.5 经济效益计算

燕麦收获籽粒后剩余的秸秆可作为干草饲料, 具有一定经济价值; 马铃薯根据品质等级分为商品薯和非商品薯, 地上部秸秆不具有经济价值。燕麦籽粒和秸秆价格分别为3.00和0.20元/kg, 商品薯和非商品薯价格分别为1.20和0.35元/kg^[27]。每个处理的净收入等于总收入减去总投入。总收入由燕麦籽粒、秸秆以及商品薯和非商品薯经济价值组成。总投入包括种子、肥料、农药、机械和劳动力, 所

有投入根据当地实际交易价进行计算。根据公式计算效益^[28]：

效益：成本比(cost ratio)=总收入/总投入 (2)

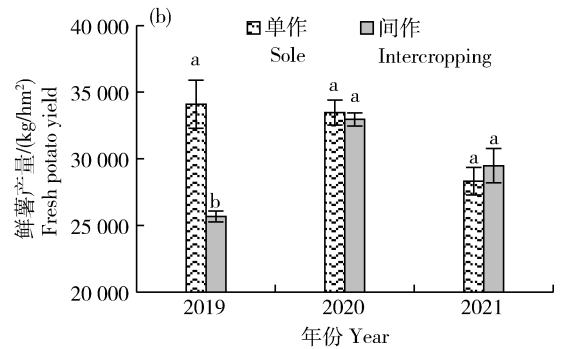
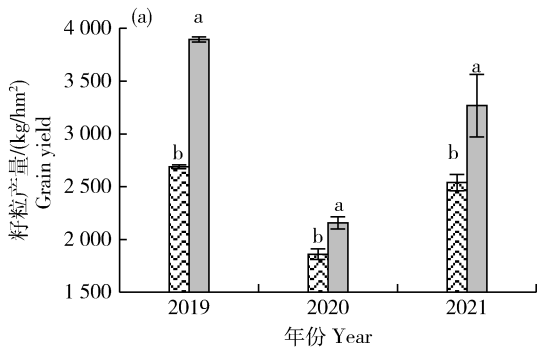
1.6 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理以及绘制图表。利用 R(version 4.1.2)对数据进行统计学分析,用最小显著差数法(Least Significant Difference, LSD; $\alpha=0.05$)对产量和产量构成数据进行多重比较。利用 R(version 4.1.2)对各行产量和产量构成数据整合进行总体的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 燕麦与马铃薯带状间作产量及土地当量比

由图 2 可知,2019—2021 年,燕麦单作籽粒产量分别为 2 690、1 860 和 2 540 kg/hm²;与单作相比,燕麦与马铃薯带状间作中燕麦籽粒产量分别提高 44.8%、15.9% 和 28.7% ($P<0.05$)。马铃薯单作鲜薯产量分别为 34 100、33 470 和 28 320 kg/hm²,仅 2019 年马铃薯间作鲜薯产量比单作降低 24.7% ($P<0.05$),其他年份均差异不显著(图 2(b))。



同一年份中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters within the same year indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

图 2 2019—2021 年燕麦籽粒产量(a)和马铃薯鲜薯产量(b)

Fig. 2 Grain yield of oat (a) and fresh yield of potato (b) from 2019 to 2021

由图 3 可知,2019—2021 年燕麦与马铃薯带状间作的土地当量比分别为 1.11、1.07 和 1.17,均 >1.00 ,表现出一定的产量优势,说明土地利用提高了。3 年试验中,燕麦与马铃薯带状间作中燕麦偏土地当量比均 >0.50 ,表明间作系统中燕麦占据优势,是间作产量优势的主要贡献者。

2.2 燕麦与马铃薯带状间作的边行效应

由图 4 可知,间作边 1 行的燕麦籽粒产量显著高于间作其他边行和单作行($P<0.05$),间作其他边行和单作行差异不显著。2019—2021 年,边 1 行对间作燕麦产量的贡献率分别为 35.6%、38.5% 和 38.1%。间作边 1 行与单作行马铃薯鲜薯产量在不同年份间差异显著,仅 2019 年的间作边 1 行马铃薯鲜薯产量比单作行降低 26.2% ($P<0.05$),其余年份均差异不显著(图 4(b))。3 年试验中,边 1 行对间作马铃薯鲜薯产量的贡献率分别为 67.3%、66.7% 和 67.4%。结果表明,间作边 1 行燕麦产量的增加是间作产量优势的重要原因。

2.3 燕麦与马铃薯带状间作的燕麦和马铃薯边行产量构成

由表 1 可知,间作显著改变燕麦地上部生物量和有效穗数,且燕麦地上部生物量、有效穗数、穗粒数和千粒重年间有显著差异。3 年试验中,间作边 1 行的燕麦地上部生物量显著高于间作其他行和

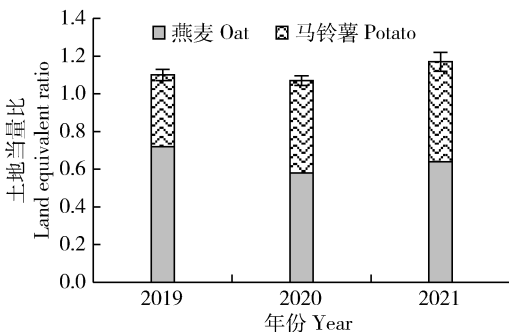


图 3 2019—2021 年燕麦与马铃薯带状间作土地当量比

Fig. 3 Land equivalent ratio of oat and potato strip intercropping from 2019 to 2021

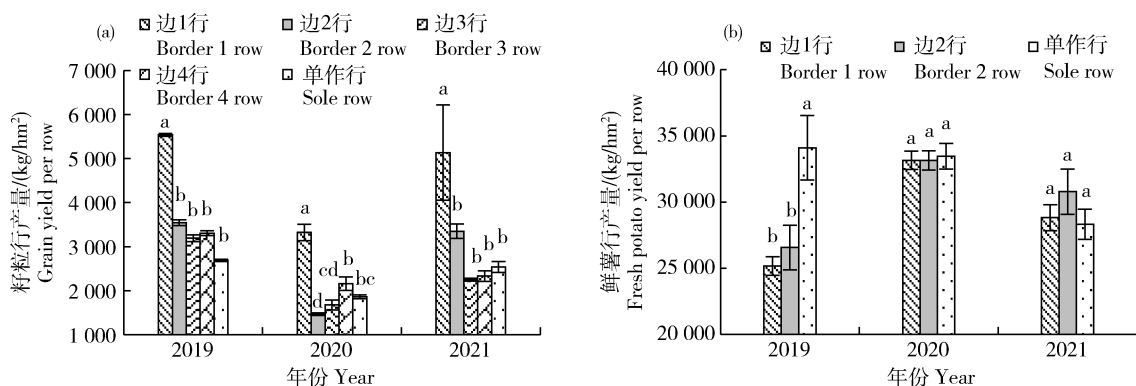


图4 2019—2021年不同行燕麦籽粒产量(a)和马铃薯鲜薯产量(b)

Fig. 4 Grain yield of oat (a) and fresh yield of potato (b) in different rows from 2019 to 2021

表1 带状间作边行和单作行燕麦地上部生物量及产量构成

Table 1 Above-ground biomass and yield components of oat in strip intercropping and sole cropping rows

年份 Year	处理 Treatment	行 Row	地上部生物量/ (kg/hm ²) Above-ground biomass	有效穗数 Ear number	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重/g 1 000-kernel weight	
2019	间作 Intercropping	单作 Sole	单作行 Sole row	8 285±302 b	57.0±3.5 b	62.0±7.1 b	27.4±0.5 a
		边1行 Border 1 row	18 325±2 722 a	69.6±8.1 ab	86.0±8.4 a	27.5±0.7 a	
		边2行 Border 2 row	10 913±1 066 b	59.3±1.9 b	62.3±3.9 b	28.0±1.0 a	
		边3行 Border 3 row	12 353±1557 b	82.6±5.1 a	70.6±3.9 ab	27.1±0.6 a	
		边4行 Border 4 row	12 600±1 348 b	74.6±8.3 ab	64.6±7.0 b	27.0±1.2 a	
2020	间作 Intercropping	单作 Sole	单作行 Sole row	8 296±440 bc	76.5±2.0 a	65.1±3.1 b	26.4±1.4 a
		边1行 Border 1 row	13 188±572 a	74.5±5.2 a	76.9±3.2 a	25.6±0.9 a	
		边2行 Border 2 row	6 500±354 d	59.5±2.9 b	78.6±2.3 a	24.6±1.0 a	
		边3行 Border 3 row	7 250±228 cd	73.0±4.1 a	72.3±4.5 ab	24.5±1.3 a	
		边4行 Border 4 row	8 735±560 b	83.8±1.9 a	63.2±3.1 b	27.3±0.7 a	

表 1(续)

年份 Year	处理 Treatment	行 Row	地上部生物量/ (kg/hm ²) Above-ground biomass	有效穗数 Ear number	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重/g 1 000-kernel weight
	单作 Sole	单作行 Sole row	9 623±673 c	60.7±4.1 b	63.1±5.4 a	28.9±0.4 a
2021	间作 Intercropping	边 1 行 Border 1 row	24 285±2 693 a	78.4±6.7 a	63.9±5.2 a	27.4±0.7 a
		边 2 行 Border 2 row	14 060±529 b	60.0±5.9 b	57.7±3.4 ab	28.0±1.2 a
		边 3 行 Border 3 row	10 425±854 bc	50.8±3.9 b	46.1±4.6 b	27.9±1.1 a
		边 4 行 Border 4 row	11 312±1 144 bc	59.0±7.6 b	55.7±4.7 ab	28.8±0.2 a
方差分析 ANOVA		年份 Year	***	***	***	***
		行 Row	***	**	ns	ns

注：同列不同小写字母表示行间差异显著($P<0.05$)。* 表示 $P<0.05$ ；** 表示 $P<0.01$ ；*** 表示 $P<0.001$ ；ns 表示差异不显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among rows ($P<0.05$). * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$; *** indicates $P<0.001$. ns indicates no significant difference. The same below.

单作行。其中,2019—2021 年间作边 1 行的燕麦地上部生物量比单作行分别增加 121.1%、59.0%和 152.3% ($P<0.05$),间作其他行和单作行差异不显著。2021 年,间作边 1 行的燕麦有效穗数比单作行高 29.2% ($P<0.05$)。2019 和 2020 年的间作边 1 行的燕麦穗粒数分别比单作行高 38.7%和 18.1% ($P<0.05$)。间作边行和单作行的燕麦千粒重均差异不显著。

由表 2 可知,间作可显著减少马铃薯单株块茎重、单株商品薯重和单株商品薯数,且马铃薯单株块茎重、单株商品薯重、单株块茎数和单株商品薯数年际间均存在显著差异。2019 和 2021 年的间作边 1 行马铃薯单株块茎重、单株商品薯重分别比单作行降低 36.8%、41.8%和 22.0%、23.0% ($P<0.05$)。2019 年,间作边 2 行相比单作行的单株商品薯重降

低 36.9% ($P<0.05$)。

2.4 燕麦与马铃薯带状间作的燕麦和马铃薯产量构成相关性分析

由表 3 可知,燕麦籽粒产量与地上部生物量呈显著正相关关系 ($P<0.05$),有效穗数与穗粒数呈显著正相关关系 ($P<0.05$),其他指标间均无显著相关关系。马铃薯产量与单株块茎重 ($P<0.05$) 和单株商品薯重 ($P<0.05$) 均呈显著正相关关系,单株块茎重与单株商品薯重 ($P<0.05$) 和单株块茎数 ($P<0.05$) 均呈显著正相关关系,单株商品薯重与单株块茎数 ($P<0.05$) 呈显著正相关关系,单株块茎数与单株商品薯数 ($P<0.05$) 呈显著正相关关系,其他指标间均无显著相关关系(表 4)。

2.5 燕麦与马铃薯带状间作的经济效益

由表 5 可知,2019 年试验地未施用肥料,2020 和

表2 带状间作边行和单作行马铃薯产量构成

Table 2 Yield components of potato in strip intercropping and sole cropping rows

年份 Year	处理 Treatment	行 Row	单株块茎重/g Tuber yield per plant	单株商品薯重/g Marketable yield per plant	单株块茎数 Tuber numbers per plant	单株商品薯数 Commodity tuber number per plant
2019	单作 Sole	单作行 Sole row	1 136.5±81.3 a	1 113.1±87.4 a	6.1±0.4 a	5.8±0.4 a
	间作 Intercropping	边1行 Border 1 row	718.8±81.8 b	648.8±75.1 b	5.0±0.3 a	4.8±0.3 a
		边2行 Border 2 row	943.8±95.2 ab	813.8±106.7 b	5.1±0.5 a	4.7±0.5 a
2020	单作 Sole	单作行 Sole row	1 104.7±109.6 a	1 063.3±107.2 a	5.3±0.2 a	4.3±0.2 a
	间作 Intercropping	边1行 Border 1 row	968.8±65.5 a	873.8±81.1 a	5.7±0.3 a	3.3±0.3 b
		边2行 Border 2 row	1 184.7±139.8 a	1 090.3±119.5 a	6.3±0.5 a	4.0±0.2 ab
2021	单作 Sole	单作行 Sole row	870.8±51.1 a	838.3±50.3 a	5.5±1.0 a	4.5±0.7 a
	间作 Intercropping	边1行 Border 1 row	679.2±45.3 b	645.8±53.7 b	4.1±1.1 a	3.3±0.8 a
		边2行 Border 2 row	712.5±52.4 b	705.8±49.1 ab	3.0±0.6 a	2.8±0.6 a
方差分析 ANOVA		年份 Year	***	**	*	**
		行 Row	**	**	ns	*

2021年均施用肥料,由于年际间施肥和灌溉的差异,导致年际间各模式的总收入、净收入和效益均有显著差异。3年试验结果均表现为间作模式净收入显著高于燕麦单作而显著低于马铃薯单作。2019—2021年,间作模式较燕麦单作净收入分别增加148.8%、298.6%和139.7% ($P<0.05$);相比马铃薯净单作收入分别降低48.0%、40.5%和23.0% ($P<0.05$)。3年中间作模式较燕麦单作经济效益分别提高13.4%、33.7% ($P<0.05$)和1.1%;2019和2020年,间作模式较马铃薯单作经济效益别降低

16.6%和4.0%,2021年,间作模式较马铃薯单作经济效益增加13.0% ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 燕麦与马铃薯带状间作系统产量与经济效益优势

与单作相比,间作系统中燕麦籽粒产量显著增加,但马铃薯产量出现一定程度降低。从土地当量比来看,燕麦与马铃薯带状间作模式具有产量优势 ($LER>1.00$),且表现出稳定的产量效应,这与李隆

表 3 燕麦产量构成因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of yield components of oat

指标 Item	产量 Yield	地上部生物量 Aboveground biomass	有效穗数 Ear number	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重 1 000-kernel weight
产量 Yield	1.000				
地上部生物量 Above-ground biomass	0.880*	1.000			
有效穗数 Ear number	0.056	0.077	1.000		
穗粒数 Kernel number per ear	0.140	0.039	0.048*	1.000	
千粒重 1 000-kernel weight	0.250	0.230	-0.290*	-0.320*	1.000

表 4 马铃薯产量构成因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis of yield components of potato

指标 Item	产量 Yield	单株块茎重 Tuber yield per plant	单株商品薯重 Marketable yield per plant	单株块茎数 Tuber numbers per plant	单株商品薯数 Commodity tuber number per plant
产量 Yield	1.000				
单株块茎重 Tuber yield per plant	0.640*	1.000			
单株商品薯重 Marketable yield per plant	0.670*	0.980*	1.000		
单株块茎数 Tuber numbers per plant	0.110	0.510*	0.420*	1.000	
单株商品薯数 Commodity tuber number per plant	-0.086	0.290	0.270	0.720*	1.000

等^[19]对间作产量研究的结果一致。3 年试验中,燕麦偏土地当量比均 >0.50 ,表明燕麦在间作系统中的生态位优势高于马铃薯,是间作系统中的优势作

物^[20]。不同年份中燕麦的偏土地当量比有所不同,其中 2019 年燕麦偏土地当量比高于 2020 和 2021 年,主要是因为 2019 年 6 月份降水量高于 2020 和

表5 燕麦与马铃薯带状间作和单作作物经济效益比较

Table 5 Economic benefits of oat and potato strip intercropping and sole crop

年份 Year	处理 Treatment	总投入/ (元/hm ²) Total input	总收入/ (元/hm ²) Total income	净收入/ (元/hm ²) Net income	效益 (总收入/总投入) Benefit (cost ratio)
2019	燕麦单作 Sole oat	2 575	9 058 c	6 483 c	3.51 b
	马铃薯单作 Sole potato	8 070	39 268 a	31 043 a	4.77 a
	间作 Intercropping	5 400	21 528 b	16 128 b	3.98 b
2020	燕麦单作 Sole oat	3 415	6 702 c	3 287 c	1.96 b
	马铃薯单作 Sole potato	12 725	34 746 a	22 021 a	2.73 a
	间作 Intercropping	8 070	21 173 b	13 103 b	2.62 a
2021	燕麦单作 Sole oat	3 415	9 124 c	5 709 c	2.67 a
	马铃薯单作 Sole potato	12 725	30 498 a	17 773 a	2.39 b
	间作 Intercropping	8 070	21 755 b	13 685 b	2.70 a
	年份 Year		**	***	***
方差分析 ANOVA	处理 Treatment		***	***	***
	年份×处理 Year×Treatment		**	***	***

2021年同期,而此时燕麦处于孕穗期,是燕麦籽粒产量形成对水分最敏感时期,充足的水分供给增加了燕麦穗粒数,是燕麦籽粒高产的保证^[21]。马铃薯偏土地当量比 <0.50 ,表明马铃薯在间作系统中属于劣势作物,其主要原因是马铃薯属于矮秆作物,邻近燕麦会对马铃薯植株形成遮蔽,使马铃薯截获光的能力降低,受光较弱,影响马铃薯长势,并导致马铃薯产量下降^[20]。

3年试验中,单作马铃薯模式因为较高的鲜薯产量,净收入最高,但2020年和2021年单作马铃薯经济效益远低于2019年,主要原因在于这2年马铃薯商品率分别为81.0%和84.1%,低于2019年的94.4%,因此成本比逐年降低。而单作燕麦因为较低的产量,净收入和经济效益较低。燕麦与马铃薯带状间作综合了马铃薯较高产量以及燕麦较高经济价值的优势,进而净收入和成本比较高^[29]。燕麦单

作、马铃薯单作、燕麦与马铃薯带状间作3年年均净收入分别为5 160、23 610和14 300元/hm²，年际间净收入变化率分别为32.3%、28.7%和11.2%，燕麦与马铃薯带状间作模式具有稳定的净收入^[30]。

3.2 燕麦与马铃薯带状间作边行产量效应

苟芳等^[22]研究发现，间作系统中边行效应是间作具有产量优势的主要来源。充分发挥边行优势，对间作系统增产具有重要作用。本研究中，间作系统燕麦具有显著的边行优势，且间作边1行燕麦籽粒产量显著高于其他边行和单作行，其对燕麦间作的产量贡献为35%~38%，远高于与马铃薯间作边1行的面积占比(25%)，主要是由于间作的边1行燕麦较间作其他行和单作行有更优越的生长环境，能获取更多光辐射。另外，燕麦具有发达根系的特征在间作边1行中更能凸显，其根系可能向马铃薯根区侵入，吸收马铃薯根区更多水分和养分资源，这也是边1行燕麦具有产量优势的重要因素^[23]。同时，间作系统中燕麦偏土地当量比均>0.50，表明间作系统中燕麦占据了较强优势，是间作产量优势的主要贡献者。光能利用率的提高也是间作增产的主要原因之一，Bedoussac等^[24]研究发现冬小麦与豌豆间作在光能获取上存在时间和空间差异，使得光能被充分利用，最终形成间作优势。本研究中，由于燕麦是高秆作物，马铃薯是矮秆作物，间作系统中燕麦和马铃薯在光获取上也存在时间和空间生态位分离，且边行燕麦更能发挥高秆优势，凸显了在利用光源上的优势。此外，满本菊等^[20]关于燕麦与马铃薯带状间作的研究发现，间作边行的燕麦旗叶蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量也较单作燕麦得到提高，这表明间作边行燕麦较高的光获取及光合效率也是边行燕麦籽粒产量增加的重要因素。对马铃薯而言，间作的行数比会直接影响其对光能的截获^[25]。已有研究也显示，燕麦与马铃薯带状间作中马铃薯产量形成的关键时期为块薯膨大期，间作的内行马铃薯较边行马铃薯的净光合速率显著提高，而此时燕麦处于孕穗期，绿色叶面积达到最大值，边行马铃薯受遮蔽影响最大^[20]。同时，该时期燕麦和马铃薯均处于生长需水最大的时期，存在水分竞争，间作边1行的马铃薯受燕麦根系的影响，根系结薯和薯块膨大过程被抑制，导致了间作边行马铃薯产量的降低^[26]。本研究中，间作边2行的马铃薯产量高于边1行，但与单作行差异不显著，表明间作系统边2行的马铃薯受燕麦遮蔽和水分竞争的影响较小，能维

持与单作相当的产量水平。

3.3 燕麦与马铃薯带状间作边行产量构成因素

3年试验中，间作边1行燕麦的地上部生物量均显著高于单作行，表明间作边1行的燕麦处于更加有利的生态位，种内竞争更弱，有利于其营养生长和生殖生长，进而提高边1行的燕麦籽粒产量。2021年，间作边1行的燕麦有效穗显著高于单作行，主要原因是边1行的燕麦能获得更多光照、水分养分等资源，有利于分蘖的产生，形成更多有效穗，进而提高籽粒产量^[31]。Wang等^[15]研究结果显示间作的边行比会影响玉米的光能截获，较高的边行比能提高玉米穗粒数。本研究中，2019和2020年的间作边1行的燕麦穗粒数均显著高于单作行，可能是由于间作边1行的燕麦较高的光能截获增加了穗粒数，进而提高了间作边1行的燕麦籽粒产量。间作和单作的燕麦千粒重差异不显著，也是保持间作燕麦产量稳定性的重要因子。受间作边1行燕麦的遮蔽作用以及间作对水分和营养元素的竞争^[20]，间作边1行的马铃薯薯块膨大过程可能受叶片过早黄化而减弱，因此导致了间作边1行的马铃薯单株块茎重和单株商品薯重均显著低于单作行。间作边2行的马铃薯受燕麦遮蔽作用减弱，种间竞争压力减少，其马铃薯单株块茎重和单株商品薯重维持与单作行一致，表现出一定的产量和品质稳定性。

4 结 论

本试验结果表明，在燕麦与马铃薯带状间作模式下，燕麦的产量显著增加，马铃薯的产量小幅下降，3年的土地当量比平均为1.12。边1行的燕麦有效穗和穗粒数增加是间作燕麦产量提高的根本原因，边1行燕麦籽粒产量对间作产量的贡献率平均为37.4%，边1行的马铃薯单株块茎重降低是间作马铃薯产量降低的主要原因。综上所述，与单作燕麦和单作马铃薯相比，燕麦与马铃薯带状间作模式具有高产、高土地利用率和稳定经济效益优势。

参考文献 References

- [1] Wang X B, Dai K, Zhang D C, Zhang X M, Wang Y, Zhao Q S, Cai D X, Hoogmoed W B, Oenema O. Dryland maize yields and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 120(1): 47-57
 - [2] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020
- Bureau of Statistics, PRC. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing,

- China Statistics Press, 2020 (in Chinese)
- [3] 罗志成. 北方旱地农业研究的进展与思考[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 4-13
Luo Z C. Progress and consideration of dryland farming research in North China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994, 12(1): 4-13 (in Chinese)
- [4] 张绪成, 于显枫, 马一凡, 侯慧芝, 王红丽, 方彦杰. 半干旱区箭舌豌豆播期对间作马铃薯生物量及水分利用效率的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1618-1626
Zhang X C, Yu X F, Ma Y F, Hou H Z, Wang H L, Fang Y J. Effects of the sowing date on aboveground biomass and water utilization of potato and spring vetch intercropping systems with vertical rotary sub-soiling tillage on a semi-arid area[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1618-1626 (in Chinese)
- [5] Willey R W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1-3): 215-231
- [6] Cahill J F Jr., McNickle G G, Haag J J, Lamb E G, Nyanumba S M, Clair C C S. Plants integrate information about nutrients and neighbors[J]. *Science*, 2010, 328(5986): 1657-1657
- [7] 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(1-2): 305-312
- [8] Yin W, Chai Q, Zhao C, Yu A Z, Fan Z L, Hu F L, Fan H, Guo Y, Coulter J A. Water utilization in intercropping: A review [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2020-11-01). DOI: doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335
- [9] Xue Y F, Xia H Y, Christie P, Zhang Z, Li L, Tang C X. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: A critical review[J]. *Annals of Botany*, 2016, 117(3): 363-377
- [10] Li L, Tilman D, Lambers H, Zhang F S. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture[J]. *New Phycologist*, 2014, 203(1): 63-69
- [11] 刘翼浩, 陈卓, 吴尧. 多熟种植: 中国农业的中流砥柱[J]. 作物杂志, 2015(6): 1-9
Liu X H, Chen F, Wu Y. Multiple cropping: The principal part of China's agriculture[J]. *Crops*, 2015(6): 1-9 (in Chinese)
- [12] Chen Z, Cui H M, Wu P, Zhao P, Zhao Y L, Sun Y C. Study on the optimal intercropping width to control wind erosion in North China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(2): 230-235
- [13] 程彬, 刘卫国, 王莉, 许梅, 覃思恩, 卢俊吉, 高阳, 李淑贤, Ali RAZA, 张熠, Irshan AHMAD, 敬树忠, 刘然金, 杨文钰. 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
Cheng B, Liu W G, Wang L, Xu M, Qin S S, Lu J J, Gao Y, Li S X, Raza A, Zhang Y, Ahmad I, Jing S Z, Liu R J, Yang W Y. Effects of planting density on photosynthetic characteristics, yield and stem lodging resistance of soybean in maize-soybean strip intercropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(19): 4084-4096 (in Chinese)
- [14] Van Oort P A J, Gou F, Stomph T J, van der Werf W. Effects of strip width on yields in relay-strip intercropping: A simulation study[J/OL]. *European Journal of Agronomy*, [2022-01-11]. DOI: doi.org/10.1016/j.eja.2019.125936
- [15] Wang R N, Sun Z X, Zhang L Z, Yang N, Feng L S, Bai W, Zhang D S, Wang Q, Evers J B, Liu Y, Ren J H, Zhang Y, van der Werf W. Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping[J/OL]. *Field Crops Research*, (2020-08-15). DOI: doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107819
- [16] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 田露, 米俊珍, 王琦, 戴云仙. 干旱胁迫下腐植酸肥料对燕麦光响应曲线的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(11): 34-44
Li Y H, Liu J H, Zhao B P, Tian L, Mi J Z, Wang Q, Dai Y X. Effect of humic acid fertilizer on the light response curve of oat under drought stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 34-44 (in Chinese)
- [17] 田露, 刘景辉, 赵宝平, 米俊珍, 李英浩, 费楠. 保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 317-324
Tian L, Liu J H, Zhao B P, Mi J Z, Li Y H, Fei N. Effects of combined application of super absorbent polymer and microbial fertilizer on oat growth and water utilization in dry farmland of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(3): 317-324 (in Chinese)
- [18] Mead R, Willey R W. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping[J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(3): 217-228
- [19] Li X F, Wang Z G, Bao X G, Sun J H, Yang S C, Wang P, Wang C B, Wu J P, Liu X R, Tian X L, Wang Y, Li J P, Wang Y, Xia H Y, Mei P P, Wang X F, Zhao J H, Yu R P, Zhang W P, Che Z X, Gui L G, Callaway R M, Tilman D, Li L. Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 943-950
- [20] 满本菊, 刘吉利, 贺锦红, 蔡明, 杨亚亚, 王志丹, 闫承宏, 杨茜, 吴娜. 燕麦马铃薯间作对燕麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(1): 118-126
Man B J, Liu J L, He J H, Cai M, Yang Y Y, Wang Z D, Yan C H, Yang Q, Wu N. Effect of oat-potato intercropping on photosynthetic characteristics and yield of oat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(1): 118-126 (in Chinese)
- [21] 李英浩, 王琦, 赵宝平, 米俊珍, 柳妍娣, 张志芬, 刘景辉. 水分和腐植酸对燕麦果聚糖代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1320-1330
Li Y H, Wang Q, Zhao B P, Mi J Z, Liu Y D, Zhang Z F, Liu J H. Effects of moisture and humic acid on the metabolism of oat fructans[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1320-1330 (in Chinese)
- [22] 苟芳, 张立祯, 董宛麟, 于洋, 邸万通, 沈姣姣. 向日葵和马铃薯间作的生育期模拟模型[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2773-2778
Gou F, Zhang L Z, Dong W L, Yu Y, Di W T, Shen J J. Simulation model for the crop development stages in sunflower-potato intercropping[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2773-2778 (in Chinese)
- [23] Zhou L L, Cao J, Zhang F S, Li L. Rhizosphere acidification of faba bean, soybean and maize[J]. *Science of the Total Environment*. 2009, 407(14): 4356-4362
- [24] 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): 37-54
- [25] 满本菊, 王建鹏, 刘吉利, 吴娜. 马铃薯豆类间作复合系统氮素吸收利用特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 153-162
Man B J, Wang J P, Liu J L, Wu N. Study on nitrogen uptake and utilization characteristics of potato and beans intercropping system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 153-162 (in Chinese)
- [26] 吴开贤, 安隳昕, 范志伟, 贺佳, 周峰, 薛国峰, 吴伯志. 玉米与马铃薯的间作优势和种间关系对氮投入的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 1006-1012
Wu K X, An T X, Fan Z W, He J, Zhou F, Xue G F, Wu B Z. Effects of nitrogen input on yields advantage and interaction of the maize and potato intercropping[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,

- 2012, 18(4): 1006-1012 (in Chinese)
- [27] 李玥. 北方半干旱区燕麦与马铃薯带状间作产量效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021
- Li Y. The yield advantages of oats and potato strip intercropping in the semi-arid area of North China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [28] Ray M, Roy D C, Zaman A. Evaluation of rice (*Oryza sativa*)-based cropping systems for increasing productivity, resource-use efficiency and energy productivity in coastal West Bengal [J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2016, 61(2): 131-137
- [29] Sun T, Feng X M, Lal R, Cao T H, Guo J R, Deng A X, Zheng C Y, Zhang J, Song Z W, Zhang W J. Crop diversification practice faces a tradeoff between increasing productivity and reducing carbon footprints [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (2021-08-19). DOI: doi.org/10.1016/j.agee.2021.107614
- [30] 林叶春, 曾昭海, 胡跃高. 春马铃薯间套两茬燕麦生产研究[J]. 中国农业大学通报, 2009, 25(8): 146-149
- Lin Y C, Zeng Z H, Hu Y G. Study on the production of intercropping spring potato and two-crop oat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(8): 146-149 (in Chinese)
- [31] 冯晓敏, 杨永, 任长忠, 胡跃高, 曾昭海. 豆科-燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1426-1434
- Feng X M, Yang Y, Ren C Z, Hu Y G, Zeng Z H. Effects of legumes intercropping with oat on photosynthesis characteristics of and grain yield [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1426-1434 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅



第一作者简介：彭良斌, 硕士研究生, 2020年9月至今就读于中国农业大学农学院, 攻读作物栽培与耕作学专业。硕士期间参与国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS07-B-5); 内蒙古自治区科技重大专项(2021SZD0017); 多样化配置提高作物水肥利用率机制研究(U21A20218)。获得2021—2022年中国农业大学硕士一等学业奖学金。



通讯作者简介：杨亚东, 博士, 中国农业大学农学院副教授, 博士生导师。长期从事生态高效种植制度构建与优化、农田碳氮循环、土壤微生物与作物互作等研究。先后主持中国博士后科学基金、国家自然科学基金青年基金等科研项目6项, 以第一或通讯作者在国内外杂志上发表论文30余篇, 其中SCI收录18篇。参编教材1部、英文专著1部, 参与制定地方标准4项。入选2020—2021年神农中华农业科技奖-优秀创新团队。