文章编号:1000-7601(2024)06-0061-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2024.06.07

种植模式对作物产量及间作系统种间关系的影响

冉漫雪,孙东宝,丁军军

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业农村部旱地节水农业重点实验室,北京 100081)

摘 要:为探究北方旱作区高效合理的种植模式,选取玉米和毛叶苕子为材料进行田间试验,采用完全随机区组设计,通过轮作和连作与间作和单作相结合,共设置玉米轮作单作、毛叶苕子轮作单作、玉米连作单作、毛叶苕子连作单作、玉米/毛叶苕子轮作间作(玉米轮作间作、毛叶苕子轮作间作)、玉米/毛叶苕子连作间作(玉米连作间作、毛叶苕子轮作间作)共 6 种种植模式,研究作物产量对种植模式变化的响应特征,以及轮作和连作对间作系统中种间关系及生物多样性效应的影响。结果表明:与连作相比,轮作使毛叶苕子产量显著提升 12.66%~21.11%;间作相比于单作使玉米产量显著提升 21.92%~26.66%,而使毛叶苕子产量显著降低 7.46%~16.43%。不同种植模式中间作系统的土地当量比为 1.04~1.09,与单作相比,间作系统存在间作优势,由于玉米的偏土地当量比大于毛叶苕子,且作物竞争强度均小于 0,因此间作系统中作物的种间竞争大于种内竞争,且玉米是间作中的优势作物。当种植制度由连作改变为轮作,可通过显著减少种间竞争的方式,驱动玉米和毛叶苕子间作系统增产增效的生物多样性效应由选择效应向互补效应转变。生物多样性效应与作物增产率之间的相关性结果表明,互补效应和净效应与毛叶苕子增产率均呈显著正相关关系,在间作系统中,产量优势源于系统中劣势作物的产量提升。综上所述,山西晋中旱作农业区实施玉米/毛叶苕子轮作间作种植模式可通过改变作物种间竞争关系来提高土地生产力,在当地农业生产中具有应用价值。

关键词:轮作;间作;作物产量;种间关系;选择效应;互补效应

中图分类号:S344 **文献标志码**:A

Effects of cropping patterns on crop yields and interspecific relationships in intercropping systems

RAN Manxue, SUN Dongbao, DING Junjun

(*Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Dry Farming and Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In order to explore the efficient and reasonable planting pattern in the northern dry-crop area, maize and hairy-leaved camas were selected as materials for the field experiment, which was conducted in a completely randomized block design, combining rotational cropping and continuous cropping with intercropping and monocropping. Six experimental treatments were set up: maize rotation and monocropping, hairy vetch rotation and monocropping, maize continuous and monocropping, hairy vetch continuous and monocropping, maize/ hairy vetch rotation and intercropping (maize rotational intercropping, hairy vetch rotational intercropping), and maize/hairy vetch continuous and intercropping (maize continuous and intercropping, hairy vetch rotational and intercropping). The response of crop yields to changes in cropping patterns, and the effects of crop rotation and succession on interspecific relationships and biodiversity effects in intercropping systems was examined. The results showed that crop rotation significantly increased the yield of hairy vetch by 12.66%~21.11%, compared to continuous cropping under the same cropping pattern. Under the same cropping system, intercropping significantly increased maize yield by

收稿日期:2024-04-07 **修回日期**:2024-05-27

基金项目:国家重点研发计划课题“黄土高原旱作适水改土与产量提升技术模式与应用”(2021YFD1900705)

作者简介:冉漫雪(1999-),女,贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为农业资源开发与利用。E-mail:2329697098@qq.com

通信作者:孙东宝(1979-),男,山东济宁人,副研究员,主要从事生态学和旱地农业研究。E-mail:sundongbao@caas.cn

21.92%~26.66% and reduced hairy vetch yield by 7.46%~16.43% compared to monocropping. The land equivalent ratios of the intercropping systems in different cropping patterns ranged from 1.04 to 1.09 and there was a yield advantage of intercropping over monocropping. The biased land equivalent ratio of maize was greater than that of maize, and the intensity of crop competition was less than 0. Therefore, interspecific competition was greater than intraspecific competition in the intercropping system, and maize was the dominant crop in the intercropping. Changing the cropping system from continuous cropping to rotational cropping could shift the biodiversity effect driving yield and efficiency gains in maize and hairy vetch intercropping systems from a selection effect to a shift toward a complementary effect by significantly reducing interspecific competition. By analysing the correlation between biodiversity effects and crop yield increases, it was concluded that both complementary effect and net effect were significantly and positively correlated with yield increases in hairy vetch, and that yield advantages in intercropping systems stemmed from yield enhancement of the disadvantaged crops in the system. In summary, implementing the maize/hairy-leaved camas rotational intercropping system in the dry farming regions of Jinzhong, Shanxi Province enhanced land productivity by changing the competitive dynamics between crop species, demonstrating significant value for local agricultural practices.

Keywords: crop rotation; intercropping; crop yield; interspecific relationship; selection effect; complementary effect

在我国农业发展中,集约化种植对提高粮食产量贡献重大,但因其过分依赖化学肥料和农药的投入[1],可引发土壤质量退化、生物多样性降低、农作物病虫害问题加剧等一系列直接或间接危害,导致农田生态系统变得更加脆弱[2]。因此,想要实现粮食安全和农业可持续发展的目标,就需要在保障农田生态环境健康的基础上,以提高农田资源利用率和生产力为目标合理地调整农业种植模式。

轮作是最早的可持续农业实践措施之一[3],具有提高土壤质量、稳定作物生产力和减少外部化学投入以保障农田环境安全的优势,优化农田环境的同时能促进作物增产增效[4]。与单作相比,间作由于其生产力高且稳定,能够实现农田生态系统资源最大化利用,在半干旱地区得到了广泛应用[5]。集约化种植是北方旱作农业区玉米的主要种植模式,为了保证玉米产量,长期依赖肥料和农药的大量投入,导致农田土壤养分流失加剧,土壤肥力和植物养分吸收能力下降而造成作物生产力降低[6]。豆科作物具有碳氮比和代谢产物比例高以及化合物分子量低的优点,而其独有的生物固氮能力则使其成为提高农田生态系统生产力的关键因素[7]。将豆科作物纳入种植制度中利用其生物特性降低农田对于氮肥的依赖,可降低外部化学品的投入和环境污染[8]。因此禾本科与豆科作物间作作为高杆与矮杆作物、C4与C3作物的组合,是农业中典型的间作搭配模式,也是许多学者的关注热点[9],相关研究表明,采用禾本科和豆科作物间作的种植方式利于提高作物产量[10],对农田生态系统产能提升与资源有效利用均具有正向可持续效应[11]。

不同农业种植区因气候环境资源的不同而存在差异,北方旱作区是我国粮食的主产区之一,该地区长期以来实行单一的集约化种植,对农田生态系统环境安全和作物生产力产生了极大的影响。但目前对于玉米和毛叶苕子的研究主要集中于单一轮作或间作模式[10,12],且在农田生态系统中不同间作系统生物多样性效应值与生产力之间的关系尚不明确,关于玉米和毛叶苕子的不同种植体系中作物产量及其种间关系等方面尚缺乏较为深入和系统的研究。因此,本研究基于山西寿阳国家野外观测试验站,通过将玉米和毛叶苕子两种作物以间-轮作的种植模式相结合,在研究种植模式对作物生产力影响的同时,进一步探讨轮作/连作下间作系统作物种间竞争及其增产增效的生物多样性效应,确定适合该地区的玉米和毛叶苕子种植模式,旨为该地区种植结构优化和农业可持续发展提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西寿阳国家野外观测试验站(113°13′E,37°44′N,海拔1 120 m)开展,地处黄土高原东部,隶属于晋东豫西典型旱作农业区。该地位于暖温带半湿润大陆性季风气候区,干旱寒冷,四季分明,年平均气温7.4℃,无霜期约140 d。该区域属于半湿润偏旱作区,降雨年际变化大,年均降雨量为505.4mm,且年内分布不均,其中超过70%的降雨集中于7—9月。土壤以褐土为主,质地为壤土,土层深厚,pH值为8.4,有机质17.6 g·kg^{-1},全氮0.96 g

·kg^{-1},有效磷 1.8 mg·kg^{-1},速效钾 25.2 g·kg^{-1}。玉米是当地的主要农作物,且当地种植模式为一年一熟。

1.2　试验设计

该试验始于 2021 年,本研究于 2022—2023 年开展,选取玉米(M)和毛叶苕子(V)两个不同种类的农作物,其中玉米供试品种为'V1688',毛叶苕子供试品种为'郑州 7406'。玉米和毛叶苕子同时播种和收获,两年的播种日期分别为 2022 年 4 月 28 日和 2023 年 5 月 1 日,分别于 2022 年 10 月 6 日和 2023 年 10 月 11 日收获测产。

试验采用完全随机区组设计,共设 6 种种植模式:(1)玉米轮作单作(R-MM):玉米-毛叶苕子轮作单作中玉米茬;(2)毛叶苕子轮作单作(R-MV):玉米-毛叶苕子轮作单作中毛叶苕子茬;(3)玉米连作单作(C-MM);(4)毛叶苕子连作单作(C-MV);(5)玉米/毛叶苕子轮作间作(R-I,玉米轮作间作以 R-IM 表示,毛叶苕子轮作间作以 R-IV 表示);(6)玉米/毛叶苕子连作间作(C-I,玉米连作间作以 C-IM 表示,毛叶苕子连作间作以 C-IV 表示)。各处理 3 次重复,共计 18 个小区,每个小区面积为 200 m^2(4 m×50 m)。各种植模式在不同年份的具体作物种植情况见表 1。

单作处理小区中,玉米和毛叶苕子的种植行数分别为 8 行和 20 行;间作处理小区分为两个条带,玉米带和毛叶苕子带的种植面积相同均为 2 m^2,其行数分别为 4 行和 10 行。各处理中玉米的行距均设置为 60 cm、株距为 30 cm;毛叶苕子的行距均为 20 cm、株距为 15 cm,其中在间作系统中玉米行和毛叶苕子行的间距为 20 cm。各处理中作物的种植密度相同,玉米和毛叶苕子的种植密度分别为 6.7 万株·hm^{-2}和 33 万株·hm^{-2}。

试验中各处理的需肥量、中耕除草、培土等田间管理措施均保持一致,其中施肥措施参考当地传统施肥,所用化肥为缓释掺混肥,在播种前作底肥一次性施入,全生育期内不追肥且无灌溉措施,施肥量为 850 kg·hm^{-2},其养分含量为N∶P_2O_5∶K_2O=28∶12∶5,总养分含量≥45%。

1.3　样品采集及方法

收获时,单作玉米与间作玉米产量的测定方法相同,均为在小区内随机连续收获中间 4 行玉米,收获长度范围为 4 m。毛叶苕子作为绿肥其生物量即为产量,在单作和间作中测产方式相同,即均在小区内选取 1 m^{2}样方进行刈割收获。

表 1　2021—2023 年各种植模式中作物种植情况

Table 1　Crop cultivation by cropping pattern in different years

种植模式 Planting pattern	年份 Year		
	2021	2022	2023
R-MM(R-MV)	玉米单作 Maize monocropping	毛叶苕子单作 Hairy vetch monocropping	玉米单作 Maize monocropping
R-MV(R-MM)	毛叶苕子单作 Hairy vetch monocropping	玉米单作 Maize monocropping	毛叶苕子单作 Hairy vetch monocropping
C-MM	玉米单作 Maize monocropping	玉米单作 Maize monocropping	玉米单作 Maize monocropping
C-MV	毛叶苕子单作 Hairy vetch monocropping	毛叶苕子单作 Hairy vetch monocropping	毛叶苕子单作 Hairy vetch monocropping
R-I	玉米/毛叶苕子间作 Maize/hairy vetch intercropping	毛叶苕子/玉米间作 Hairy vetch/maize intercropping	玉米/毛叶苕子间作 Maize/hairy vetch intercropping
C-I	玉米/毛叶苕子间作 Maize/hairy vetch intercropping	玉米/毛叶苕子间作 Maize/hairy vetch intercropping	玉米/毛叶苕子间作 Maize/hairy vetch intercropping

1.4　相关指标计算方法

(1)土地当量比。应用土地当量比(*LER*)可衡量间作系统产量优势[13]:

$$LER = PLER_M + PLER_V = (Y_{IM}/Y_{MM}) + (Y_{IV}/Y_{MV}) \quad (1)$$

式中,$PLER_M$和$PLER_V$分别代表玉米和毛叶苕子的偏土地当量比;Y_{IM}和Y_{IV}分别代表玉米和毛叶苕子在间作系统中的产量;Y_{MM}和Y_{MV}分别代表玉米和毛叶苕子在单作系统中的产量。

(2)间作系统中的相对竞争强度[14]:

相对竞争强度(*RCI*)表示间作系统中作物各竞争能力,可以根据作物产量计算得出,用于比较种内和种间竞争的大小,当*RCI*>0,表示种内竞争大于种间竞争,当*RCI*<0,表示种内竞争小于种间竞争。

$$RCI_M = [(Y_{MM} \times P_a) - Y_{IM}]/(Y_{MM} \times P_a) \quad (2)$$

$$RCI_V = [(Y_{MV} \times P_b) - Y_{IV}]/(Y_{MV} \times P_b) \quad (3)$$

式中,RCI_M和RCI_V分别代表间作系统中玉米和毛叶苕子的相对竞争强度;Y_{IM}和Y_{IV}分别代表玉米和毛叶苕子在间作系统中的产量;Y_{MM}和Y_{MV}分别代表玉米和毛叶苕子在单作系统中的产量;P_a和P_b表示间作系统中作物所在的种植面积比例,在本研究中,间作小区的玉米和毛叶苕子的面积相同,因此间作比例系数均为 0.5。

(3)间作系统作物竞争力[15]:

间作系统作物竞争力(*A*)表示间作系统中某一作物对另一作物的竞争能力,本研究计算的是玉米

对毛叶苕子的竞争力：

$$A_M = Y_{IM}/(Y_{MM} - P_a) - Y_{IV}/(Y_{MV} - P_b) \quad (4)$$

式中，各项表示的含义与上述公式相同。

(4)生物多样性净效应(NE)、选择效应(SE)和互补效应(CE)[16-17]：

单作中加权产量的平均值被称为“预期产量 Y_{exp}”，其计算是采用加权平均法，基于物种单作时的产量和其在间作系统中的所占面积比例进行计算：

$$Y_{exp} = Y_{MM} \times P_a + Y_{MV} \times P_b \quad (5)$$

$$\Delta Y = NE = Y_{obs} - Y_{exp} = N\overline{\Delta RY}\,\overline{M} + N\mathrm{Cov}(\Delta RY, M) \quad (6)$$

$$CE = N\overline{\Delta RY}\,\overline{M} \quad (7)$$

$$SE = N\mathrm{Cov}(\Delta RY, M) \quad (8)$$

$$\Delta RY = RY_{obs} - RY_{exp} = (Y_i/Y_M) - P \quad (9)$$

式中，Y_{exp}作为预期产量表示的是单作中加权产量的平均值；Y_{MM}和 Y_{MV}分别代表玉米和毛叶苕子在单作系统中的产量；P_a和 P_b均为 0.5；ΔY 表示间作系统的产量增量，也称净效应(NE)；Y_{obs}表示间作系统中的实际产量，为各作物产量的加权平均值；互补效应(CE)的计算中 N 为间作系统中物种的数量(本研究中 $N=2$)；ΔRY 指间作产量与预期产量的差值；M 指作物单作时的产量。

1.5 数据处理及统计分析

采用 Microsoft Excel 进行数据汇总处理，使用 SPSS Statistics 26 和 Origin 2019 进行数据统计分析和绘图，利用 LSD 法进行处理间显著性比较($P<0.05$)，采用线性回归分析生物多样性效应与作物增产率的相互关系。

2 结果与分析

2.1 种植模式对作物生产力的影响

2.1.1 玉米产量 通过对比 2022—2023 年不同种植模式中玉米产量可知(表 2)，在轮作/连作下，轮作处理的玉米籽粒产量高于连作处理。其中，在间作中，2022 年和 2023 年 R-IM 处理的玉米籽粒产量较 C-IM 分别提升 9.81%和 10.69%($P>0.05$)；在单作中，R-MM 和 C-MM 相比其籽粒产量在 2 a 中分别提升7.58%和 13.04%($P>0.05$)。

在间作/单作下，间作相较单作可显著提高玉米产量。具体表现为在轮作中，R-IM 相较 R-MM 的玉米籽粒产量在 2022 年和 2023 年分别显著提升 26.66%和 21.92%；在连作中，C-IM 相较 C-MM 玉米籽粒产量在 2 a 中分别显著提升 24.09%和 24.50%。

通过对不同年份、种植制度和种植方式下玉米产量进行方差分析(表 2)，种植年份、轮作/连作和间作/单作都对玉米籽粒产量具有极显著影响($P<0.001$)；此外，年份和轮作/连作的交互作用、年份和间作/单作的交互作用、轮作/连作和间作/单作的交互作用以及年份和轮作/连作和间作/单作三者之间的交互作用都对玉米产量无显著影响($P>0.05$)。说明轮作/连作是影响玉米产量的主要因素，玉米在轮作及间作处理中比在连作和单作具有更显著的产量优势。

2.1.2 毛叶苕子产量 轮作/连作对毛叶苕子产量的影响存在显著差异，相同种植模式下，轮作处理的毛叶苕子产量显著高于连作处理。R-IV 相较 C-IV 毛叶苕子产量在 2 a 中分别显著提升16.98%和 21.11%；R-MV 处理的产量在 2022 年和 2023 年较 C-MV 分别显著提升 12.66%和14.81%(表 3)。

表 2 不同种植模式对玉米籽粒产量的影响

Table 2 Effect of different cropping patterns on maize grain yield

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm^{-2})
2022	R-IM	12779.66±657.21a
	R-MM	10089.96±523.41b
	C-IM	11637.81±718.26a
	C-MM	9378.67±610.94b
2023	R-IM	14213.11±188.24a
	R-MM	11658.11±216.64bc
	C-IM	12839.94±673.68ab
	C-MM	10313.12±813.80c
方差分析 Variance analysis	F	P
年份 Year (Y)	37.329	<0.001***
轮作/连作 Crop rotation/continuous (R)	24.293	<0.001***
间作/单作 Intercropping/monocropping (I)	133.102	<0.001***
Y×R	0.646	0.433
Y×I	0.272	0.609
R×I	0.566	0.463
Y×R×I	0.043	0.839

注：表中数值均为平均值±标准差；不同小写字母表示相同年份内不同处理间差异显著($P<0.05$)；*、**和***分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平差异显著。下同。

Note: All values in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments in the same year ($P<0.05$). *, **, and *** represent significant differences at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively. The same below.

与单作相比,玉米/毛叶苕子间作可显著降低毛叶苕子产量。2022—2023 年,在轮作下,R-IV 与 R-MV 相比,其毛叶苕子产量显著降低 13.23%和 7.46%;在连作下,C-IV 产量较 C-MV 分别显著降低 16.43%和 12.27%。

方差分析结果显示(表 3),种植年份、轮作/连作和间作/单作以及年份和轮作/连作的交互作用对毛叶苕子产量有显著影响($P<0.05$)。可见在轮作/连作下,间作系统中毛叶苕子的生物量低于单作,毛叶苕子在间作系统中表现出劣势,但与连作相比,轮作可显著增加毛叶苕子产量。

2.2　种植模式对作物产量土地当量比的影响

土地当量比(*LER*)是衡量间作系统土地生产力的重要指标,对轮作/连作中玉米、毛叶苕子两种作物间作产量土地当量比进行分析。如图 1 所示,轮作间作(R-I)在 2022 年和 2023 年的 *LER* 分别为 1.07和 1.09,连作间作(C-I)在 2022 年和 2023 年的 *LER* 分别为 1.04 和 1.06。2022 年,R-I 处理下玉米、毛叶苕子的偏土地当量比 $PLER_M$、$PLER_V$分别为 0.64 和 0.43,占比分别为 59.10%和 40.90%;C-I 处理下玉米、毛叶苕子的偏土地当量比 $PLER_M$、$PLER_V$ 分别为0.62和 0.42,占比分别为 58.46%和 41.54%。2023 年,R-I 处理下玉米和毛叶苕子的偏土地当量比 $PLER_M$、$PLER_V$ 分别为 0.62 和0.47,占比分别为 56.40%和 43.60%;C-I 处理下玉米、毛叶苕子的偏土地当量比 $PLER_M$、$PLER_V$分别为0.63和 0.43,占比分别为 57.08%和 42.92%。2 a 试验间作处理的 *LER* 均大于 1,表明间作模式相比单作具有明显的产量优势,可以提高土地生产力,而其中玉米作为禾本科作物对间作优势的贡献均大于豆科作物(毛叶苕子)。

2.3　间作系统中作物竞争效应比较

轮作/连作下各间作体系中作物的相对竞争强度均小于 0(表 4),表明在轮作和连作中,间作系统中均表现为种间竞争大于种内竞争,主要是玉米、毛叶苕子两种作物对于农田环境资源的竞争;通过比较间作体系中玉米对毛叶苕子的竞争力发现,玉米对毛叶苕子的竞争力均大于 0,在 2023 年,R-I 处理中玉米对毛叶苕子的竞争力显著低于 C-I 处理。表明间作系统中玉米对于土地资源的竞争力强于毛叶苕子,玉米为间作系统中的优势作物,而毛叶苕子处于相对劣势地位;与连作相比,轮作间作可以显著减少种间竞争。

表 3　不同种植模式对毛叶苕子产量的影响

Table 3　Effect of different cropping patterns on hairy vetch yield

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm^{-2})
2022	R-IV	4940.00±52.92b
	R-MV	5693.00±119.65a
	C-IV	4223.00±50.33c
	C-MV	5053.33±230.29b
2023	R-IV	6673.07±108.47b
	R-MV	7210.97±77.02a
	C-IV	5509.83±378.70d
	C-MV	6280.63±91.56c
方差分析 Variance analysis	*F*	*P*
年份 Year(Y)	411.679	<0.001***
轮作/连作 Crop rotation/continuous (R)	147.434	<0.001***
间作/单作 Intercropping/monocropping (I)	103.584	<0.001***
Y×R	6.733	0.020*
Y×I	0.932	0.349
R×I	1.190	0.292
Y×R×I	0.301	0.591

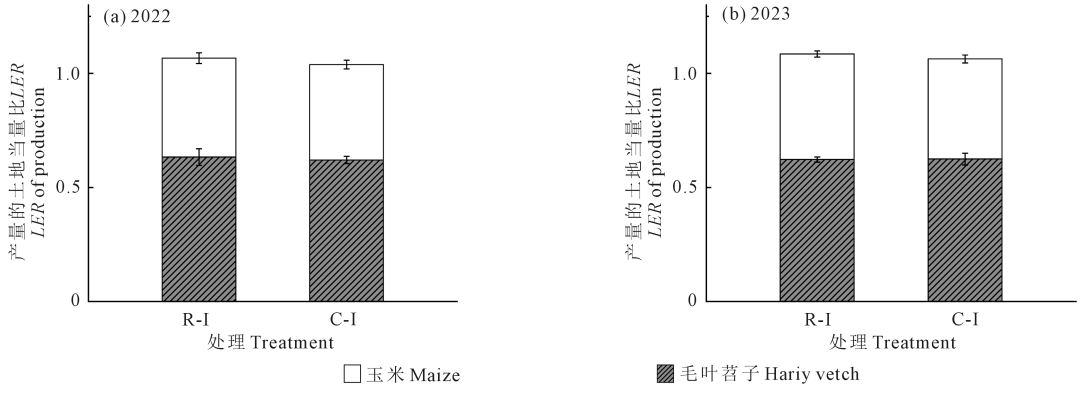

图 1　2022—2023 年间作模式下各作物的产量土地当量比

Fig.1　Yield land-equivalent ratio for each crop under the intercropping model during 2022-2023

2.4 间作系统中生物多样性效应差异

由图 2 可知,R-I 和 C-I 间作系统中作物产量的生物多样性净效应(*NE*)、选择性效应(*SE*)和互补效应(*CE*)均大于 0,表现为对作物产量的正效应,间作相比单作具有作物产量优势,但轮作/连作下间作系统中生物多样性效应组分的贡献率存在差异。R-I 处理中 *SE* 小于 *CE*,*CE* 在生物多样性净效应中占据主导地位,其贡献率在 2022 年和 2023 年分别为 54.84%和 69.79%;而 C-I 处理中 *SE* 在生物多样性净效应中占据主导地位,对 *NE* 的贡献率更大,其贡献率在 2022 年和 2023 年分别为 60.33%和 67.39%。从总体上看,由连作变为轮作后,可驱动玉米和毛叶苕子间作系统的增产增效的生物多样性效应发生转变,轮作结合间作的种植模式有助于降低种间竞争,进而提高作物生产力。

方差分析结果显示(表 5),*NE* 显著受轮作/连作的影响($P<0.05$);轮作/连作及年份和轮作/连作的交互作用可显著影响 *SE*($P<0.05$),*CE* 受年份、轮作/连作的影响均达到显著水平($P<0.05$)。

2.5 间作系统生物多样性效应与作物增产率相互关系

通过将生态系统选择效应(*SE*)、互补效应(*CE*)和净效应(*NE*)与间作系统中玉米及毛叶苕子的增产率关系进行拟合发现,*SE*、*CE*、*NE* 与玉米增产率之间均未表现出显著线性关系(图 3),而 *CE* 和 *NE* 则与毛叶苕子的增产率均呈显著正相关关系(图 4),其拟合方程分别为 $y=0.01x-18.34$、$y=0.02x-27.81$($P<0.05$)。说明在间作体系中生产力的提升及间作优势与系统中劣势作物的产量呈显著相关关系,而对于毛叶苕子而言,间作系统中 *CE* 的大小决定了其增产率的大小。

表 4 间作种植模式对各作物种间互作的影响

Table 4 Effect of intercropping cropping patterns on interspecific interactions among crop species

年份 Year	处理 Treatment	玉米相对竞争强度 Relative competitive intensity of maize	毛叶苕子相对竞争强度 Relative competitive intensity of hairy vetch	玉米对毛叶苕子的竞争力 Competitiveness of maize to hairy vetch
2022	R-I	−1.53±0.08a	−0.74±0.12a	0.40±0.03a
	C-I	−1.48±0.14a	−0.67±0.16a	0.40±0.15a
2023	R-I	−1.38±0.12a	−0.84±0.03a	0.54±0.14b
	C-I	−1.50±0.05a	−0.77±0.14a	0.73±0.16a

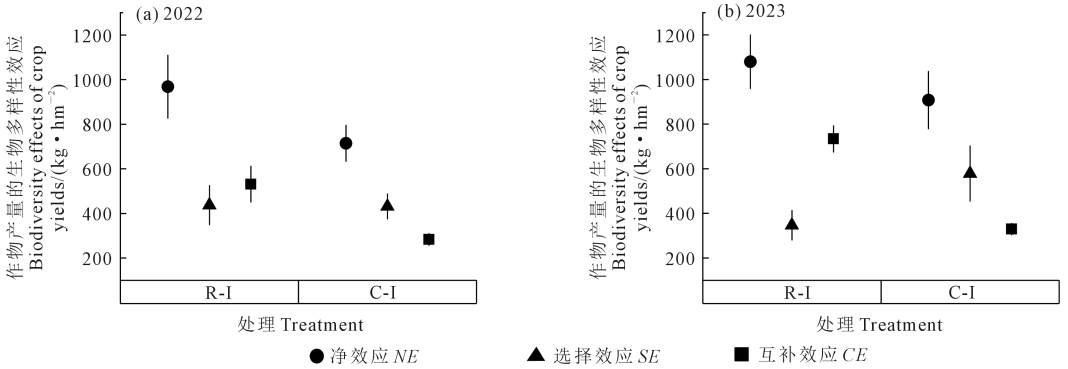

图 2 2022—2023 年间作系统作物产量的生物多样性净效应、选择效应和互补效应

Fig.2 Net effect of biodiversity, selection effect, and complementarity effect of crop yields in intercropping systems during 2022-2023

表 5 间作系统的作物产量的生物多样性净效应(*NE*)、选择效应(*SE*)和互补效应(*CE*)方差分析

Table 5 Variance analysis for net effect of biodiversity (*NE*), selection effect (*SE*), and complementation effect (*CE*) of crop yield in intercropping systems

因素 Factor	*NE*		*SE*		*CE*	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
年份 Year(Y)	4.044	0.079	1.047	0.336	5.484	0.047*
轮作/连作 Crop rotation/continuous (R)	7.116	0.028*	8.709	0.018*	39.082	<0.001***
Y×R	0.006	0.938	9.562	0.015*	4.556	0.065

3 讨 论

增加农田种植系统的生物多样性可以在减少外部农化用品投入的基础上维持或增加作物产量,这对于促进农田生态系统服务功能具有重大意义[18]。本研究通过对不同种植模式下玉米和毛叶苕子产量的研究发现,两种作物在 2 a 试验中均受轮作/连作和间作/单作的极显著影响($P<0.001$),轮作/连作对玉米和毛叶苕子产量的影响相同,均表

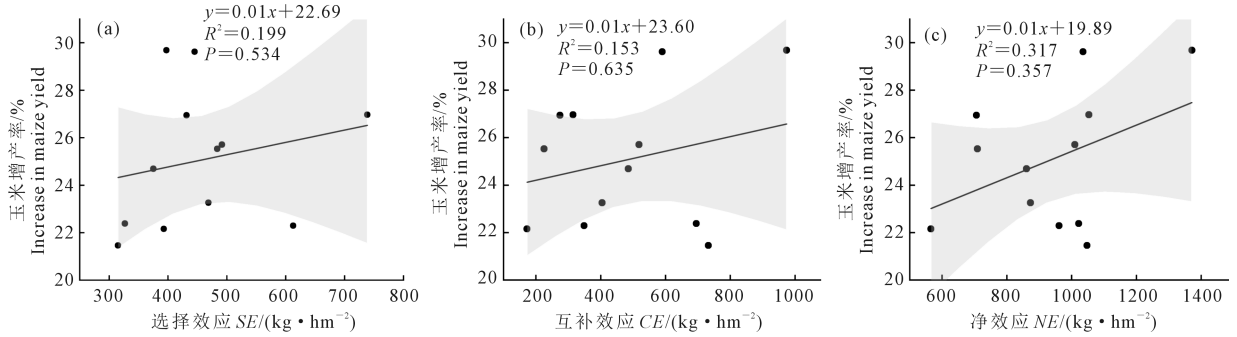

图 3　选择效应、互补效应、净效应与玉米增产率的关系

Fig.3　Relationship between selection effect, complementary effect, and net effect and yield increase in maize

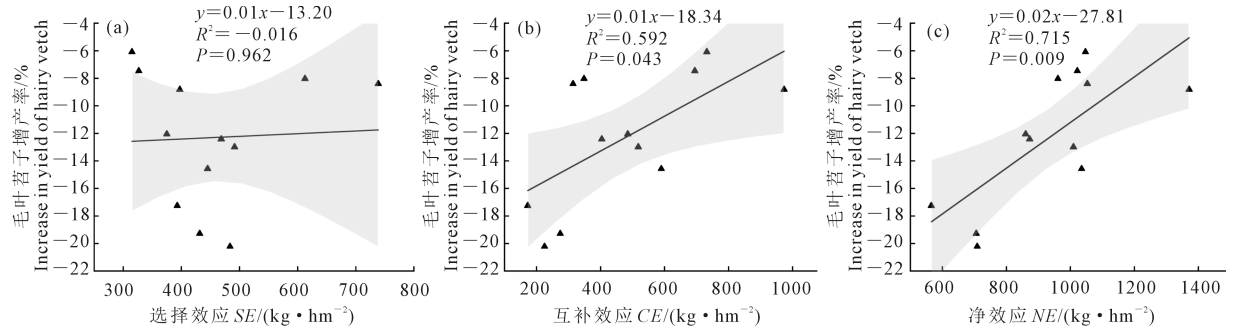

图 4　选择效应、互补效应、净效应与毛叶苕子增产率的关系

Fig.4　Relationship between selection effect, complementary effect, and net effect and yield increase in hairy vetch

现为轮作比连作下作物产量显著增加,这可能是由于通过轮作将毛叶苕子引入种植系统中,使得豆科作物后茬残留于土壤中,增加了土壤氮素养分并提高了土壤碳利用率及稳定性[19]。Zhao 等[18]研究表明,与非豆科植物种植系统相比,豆科作物的存在增加了作物残留和生物固氮,使禾本科作物产量提高 20%。Chen 等[20]研究发现,与连作相比,作物轮作以通过增强植物养分吸收能力并提高养分利用效率的方式,使作物地上部生物量显著增加 23%,这也进一步证实了多样化种植系统的资源利用效率高于单一种植系统[21]。

本研究还发现,间作/单作对玉米和毛叶苕子产量的影响存在差异,玉米间作处理的产量显著高于单作,而毛叶苕子则相反,其在间作处理中的产量显著低于单作处理。总体而言,各间作处理的 *LER* 均大于 1,与单作相比,玉米和毛叶苕子间作存在明显的产量优势。Zhang 等[22]在研究玉米与豆科作物间作时,也发现间作存在明显的产量优势,即玉米/大豆和玉米/花生间作系统的 *LER* 均大于 1,同样发现间作显著提高了玉米产量,但大豆和花生等豆科作物的产量降低。造成禾本科和豆科作物间作系统中产量存在差异的原因可能如下:与豆科作物相比,玉米植株具备更强的光拦截能力和根系延伸能力,使其在间作系统中占据竞争优势地位[23],因此减少玉米种内竞争以获取豆科作物固定的氮素营养[24],有助于提高间作系统中玉米的生物量和产量;而玉米对豆科作物的遮蔽作用,加之根系分布的限制和资源利用效率的降低,是其在间作系统中产量降低的主要原因[23]。这与本研究结果一致,在玉米和毛叶苕子间作体系中,作物种间竞争大于种内竞争,主要是玉米和毛叶苕子对于环境资源的竞争,其中玉米处于竞争优势地位,而毛叶苕子则处于相对劣势状态。Wang 等[25]的研究同样证实了在间作系统下,由于环境资源的有效化利用使玉米平均产量提高了 8%~29%。

本研究表明,在玉米和毛叶苕子的 C-I 系统中,*SE* 对于 *NE* 的贡献率大于 *CE*,而在 R-I 系统中,*CE* 对于 *NE* 的贡献率大于 *SE*,表明由连作转变为轮作,可通过降低间作系统中玉米和毛叶苕子的种间竞争,实现生物多样性效应由 *SE* 向 *CE* 转变。其原因可能是当轮作种植系统中引入毛叶苕子后,其作为豆科绿肥,根系分布较浅,土壤中水分利用深度在 0~40 cm 左右,因耗水量小于其他作物,可通过增加土壤贮水量的方式为后茬作物提供较为丰富的水分资源[26],从而降低了间作系统的种间竞争。Malhi 等[27]研究也表示毛叶苕子作为绿肥在农

田生态系统中具有维持土壤水分和改善土壤结构的作用,较连作相比,将其引入轮作系统中可提高作物产量和经济效益。Lasisi 等[28]研究发现,与对照处理相比,在包含豆科作物的轮作系统中,后茬作物的土壤水分利用效率显著增加,说明豆科作物在干旱地区的轮作中可用于优化水资源和提高增产潜力。这也与 Wang 等[29]的研究结果类似,即土壤水分有效性是驱动间作作物种间关系和生物多样性效应转变的关键因素,提高土壤水分有效性有助于削弱种间竞争,使得生物多样性效应由 *SE* 主导转变为 *CE* 主导,从而提高系统生产力。此外,通过分析两作物增产率与生物多样性效应之间的关系发现,毛叶苕子增产率与 *CE* 和 *NE* 呈显著正相关关系,说明间作中的 *CE* 促进了毛叶苕子增产,同时毛叶苕子的增产率对间作系统产量优势起决定作用,这也与赵建华等[30]的研究结果相似。

4 结 论

(1)轮作相比于连作显著提升了毛叶苕子的产量。其中,R-I 处理毛叶苕子产量较 C-I 提升了 16.98%~21.11%;R-M 处理毛叶苕子产量较 C-M 提升了 12.66%~14.81%。

(2)间作相比于单作可显著增加玉米产量,同时显著降低了毛叶苕子产量。其中,R-I 较 R-M 玉米产量显著提升 21.92%~26.66%,而毛叶苕子产量则显著降低 7.46%~13.23%;C-I 较 C-M 玉米产量显著提升 24.09%~24.50%,而毛叶苕子产量则显著降低 12.27%~16.43%。

(3)轮作/间作下,基于作物产量的间作系统土地当量比介于 1.04~1.09,玉米/毛叶苕子间作存在明显产量优势,同时玉米的偏土地当量比大于毛叶苕子,间作中作物竞争强度均小于 0,表现为作物种间竞争大于种内竞争,且玉米是间作系统中的优势作物。

(4)R-I 的种植模式可通过降低间作系统种间竞争的方式来提高作物生产力。间作系统生物多样性净效应(*NE*)、选择效应(*SE*)和互补效应(*CE*)均大于 0,其中 C-I 中 *SE* 大于 *CE*,其对 *NE* 的贡献率为 60.33%~67.39%,而在 R-I 中 *CE* 大于 *SE*,其对 *NE* 的贡献率为 54.84%~69.79%,说明由 C-I 改变为 R-I 可驱动玉米和毛叶苕子间作系统增产增效的生物多样性效应由 *SE* 转变为 *CE*。*CE* 和 *NE* 与毛叶苕子增产率均呈显著正相关关系,在间作系统中产量优势源于系统中劣势作物的产量提升。

综合分析不同种植模式下作物产量、种间竞争关系和生物多样性效应等因素,推荐玉米毛叶苕子轮作间作可作为山西晋中旱作农业地区适宜的高效种植模式。

参 考 文 献:

[1] GU B J, ZHANG X M, LAM S K, et al. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands[J]. Nature, 2023, 613(7942): 77-84.

[2] GARNETT T, APPLEBY M C, BALMFORD A, et al. Agriculture. sustainable intensification in agriculture: premises and policies[J]. Science, 2013, 341(6141): 33-34.

[3] WHITE K D. Fallowing,crop rotation,and crop yields in Roman times[J]. Agricultural History, 1970, 44(3): 281-290.

[4] OUDA S, ZOHRY A E H, NORELDIN T, et al. Crop rotation maintains soil sustainability[M]. Cham: Springer, 2018: 55-76.

[5] YIN W, CHAI Q, ZHAO C, et al. Water utilization in intercropping: areview[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106335.

[6] 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.

[7] WANG Y, SHI M F, ZHANG R Y, et al. Legume-potato rotation affects soil physicochemical properties, enzyme activity, and rhizosphere metabolism in continuous potato cropping[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 132.

[8] LIU C, PLAZA B D, COULTER J A, et al. Diversifying crop rotations enhances agroecosystem services and resilience[J]. Advances in Agronomy, 2022, 173: 299-335.

[9] MAHMOUD R, CASADEBAIG P, HILGERT N, et al. Species choice and N fertilization influence yield gains through complementarity and selection effects in cereal-legume intercrops[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2022, 42(2): 12.

[10] 王佳旭, 朱凯, 张志鹏, 等. 高粱花生间作对不同单行作物根系性状及土壤微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 51-59.
WANG J X, ZHU K, ZHANG Z P, et al. Effects of sorghum-peanut intercropping on root traits and soil microorganisms of single-row crops[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(4): 51-59.

[11] RENARD D, TILMAN D. National food production stabilized by crop diversity[J]. Nature, 2019, 571(7764): 257-260.

[12] 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.
CAI Q, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Dry matter accumulation,allocation,yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(5): 909-920.

[13] RAO M R, WILLEY R W. Evaluation of yield stability in intercropping:studies on sorghum/pigeonpea[J]. Experimental Agriculture, 1980, 16(2): 105-116.

[14] DHIMA K V, LITHOURGIDIS A S, VASILAKOGLOU I B, et al. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio[J]. Field Crops Research, 2007, 100(2/3): 249-256.

(下转第 79 页)