文章编号:1000-7601(2025)05-0129-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.13

西北旱区基于玉米的间套复种多样化种植模式效率评价

史多鹏,张立勤,崔云玲,孙和折

(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所,甘肃 兰州 730070)

摘 要:于 2024 年在甘肃省白银市靖远县北滩镇景滩村开展大田试验,通过设置 4 种种植模式(T1:玉米单作;T2:玉米大豆间作;T3:玉米套种豌豆-复种娃娃菜;T4:玉米套种小麦-复种绿肥),评估多样化种植模式对玉米生产效率和土地利用的影响。结果表明,多样化种植模式(T2~T4)的土地当量比(*LER*)均大于 1,且玉米净面积产量较单作模式(T1)显著提高 49.09%~79.98%,其中 T3 处理玉米净面积产量最高,达到 33 751.74 kg·hm^{-2}。T2 处理玉米株高和叶面积在各生育阶段均表现最优;其水分利用效率(*WUE*)最高(46.24 kg·hm^{-2}·mm^{-1}),较 T1 处理提高 64.15%。玉米的累积相对效率(*CRE*)和竞争力(*CI*)与其最终产量呈显著正相关关系;T2 和 T3 模式在玉米生育前期具有更高的累积相对效率,为后期高产奠定了基础。T4 处理的玉米产量稳定性和可持续性最佳,其可持续产量指数(*SYI*)和产量稳定性(*SY*)分别为 0.46 和 0.45。综上,多样化种植模式能够显著提高土地利用效率和玉米产量,其中玉米套种小麦-复种绿肥模式综合表现较佳,是适宜西北旱区的多样化种植模式。

关键词:玉米;多样化种植;产量稳定性;种间竞争;土地利用;西北旱区

中图分类号:S513;S344 **文献标志码**:A

Efficiency assessment of maize-based diversified cropping systems, including intercropping, relay cropping, and multiple cropping in Northwest China arid regions

SHI Duopeng, ZHANG Liqin, CUI Yunling, SUN Hezhe

(*Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: A field experiment was conducted in 2024 at Jingtan Village, Beitan Town, Jingyuan County, Baiyin City, Gansu Province, to evaluate the impact of diversified cropping systems on maize production efficiency and land utilization. Four treatments were established: T1 (maize monoculture), T2 (maize-soybean intercropping), T3 (maize-pea relay cropping then multiple cropping baby Chinese cabbage), and T4 (maize-wheat relay cropping then multiple cropping green manure). The results showed that diversified systems (T2~T4) exhibited land equivalent ratio (*LER*) exceeding 1. Compared with monoculture (T1), maize net area yield significantly increased by 49.09% to 79.98%, with T3 achieving the highest yield (33 751.74 kg·hm^{-2}). Treatment T2 exhibited optimal maize plant height and leaf area across all growth stages and recorded the highest water use efficiency (*WUE*, 46.24 kg·hm^{-2}·mm^{-1}), representing a 64.15% improvement over T1. Cumulative relative efficiency (*CRE*) and competitiveness (*CI*) of maize showed a significant positive correlation with final yield. Systems T2 and T3 demonstrated higher cumulative relative efficiency during early growth stages, establishing the foundation for subsequent high yield. Treatment T4 displayed superior maize yield stability and sustainability, with sustainable yield index (*SYI*) and stability of maize yield (*SY*) values of 0.46 and 0.45, respectively. In conclusion, diversified cropping systems significantly enhance land use efficiency and maize yield. The maize-wheat relay cropping

收稿日期:2024-12-17 **修回日期**:2025-02-17

基金项目:国家重点研发计划项目"产能提升和资源高效利用的作物多样化体系设计与模式构建"(2022YFD1900202)

作者简介:史多鹏(1995-),男,甘肃山丹人,硕士,助理研究员,主要从事施肥及其环境研究。E-mail:duoduo17829081609@163.com

通信作者:张立勤(1969-),男,甘肃张掖人,研究员,主要从事作物栽培与节水农业研究。E-mail:lqzhang1993@163.com

then multiple cropping green manure system (T4) demonstrated optimal integrated performance, representing a suitable diversified cropping pattern for Northwest China arid regions.

Keywords: maize; diversified cropping; stability of maize yield; interspecific competition; land use; Northwest China arid regions

粮食安全是中国经济发展和社会稳定的重要保障。尽管我国农业生产率在过去50年里以每年4.6%的速度稳步增长,但由于人口众多(约占全球20%),而耕地仅占全球9%[1-2],粮食供需矛盾仍较突出。同时,随着人们饮食结构的日益多样化,粮食生产压力进一步加大[3]。此外,中国农田面积规模普遍偏小,易受自然灾害影响,且长期过度依赖化肥农药等化学投入品,导致环境污染加剧、食品安全隐患增多和生物多样性损失严重等问题[4]。

间、套作的多样化种植是我国重要的耕作制度,能够提供水分、生物多样性和土壤相关生态系统服务,可以实现产量和其他生态系统之间协调发展和互利双赢,对于保证粮食安全及粮食需求多样化有重要意义[5]。不少学者在多样化种植方面取得了良好的研究成果。Li 等[6]研究表明,玉米、小麦间作模式下小麦增产显著且产量稳定性强,较单作小麦产量提高20%以上;Costa 等[7]研究发现,环境因子造成减产518 kg·hm^{-2}时,两种作物间作种植不仅会补偿这一损失,还会使系统产量增加310 kg·hm^{-2};林洪鑫等[8]发现,即使在不施氮条件下,木薯‖花生较其单作的经济效益增量也在0.25万元以上。多样化种植增效主要基于不同作物的时空位的差异互补。当种间竞争低于种间相互作用时,间作较单一种植模式表现出优势,这种时间、空间生态位分离引发的竞争与恢复理论是间作优势的关键推动力,而不同间作作物的种间互作也存在差异[9]。目前我国多样化种植体系较为混乱,间、套作体系仍缺乏因地制宜的可行性设计,适宜西北旱地的可行性种植体系尚不明确,时空资源的利用效率仍有待提高。

本研究基于玉米的多样化种植,通过选取不同搭配作物,以及"共生期+复种期"的双阶段种植模式,分析不同种植模式下玉米不同行效应的小环境生长动态变化以及产能差异,以期评价筛选适宜西北旱区的高效种植体系,为该区域农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2024年在甘肃省白银市靖远县北滩镇景滩村(104°53′17″E,37°4′33″N)二社承包农户地中进行,试验区属于温带干旱气候,海拔1 585.6 m,平均气温10.4℃,多年平均降水量209 mm,无霜期165 d,年日照时数2 218.5 h,利用黄河水实施提灌。试验地土壤为灰钙土,耕层土壤pH值为8.37,全盐70 mg·kg^{-1},有机质13.5 g·kg^{-1},有效磷33.4 mg·kg^{-1},速效钾171 mg·kg^{-1},水解氮71.4 mg·kg^{-1},属于中产田。

1.2 供试材料与试验设计

供试玉米品种为'先玉1483',大豆品种为'陇中黄602',豌豆品种为'陇豌6号',小麦品种为'宁春11号',娃娃菜品种为'金童1号',绿肥为'箭筈豌豆'。供试肥料为尿素(N 46%)和过磷酸钙(P_2O_5 16%)。

试验为单因素完全随机区组设计,共设4个基于玉米的多样化组合种植体系处理:单作玉米(T1)、玉米大豆间作(T2)、玉米套种豌豆-复种娃娃菜(T3)和玉米套种小麦-复种绿肥(T4),同时设置大豆(SS)、豌豆-娃娃菜复种(SP-SB)和小麦-绿肥复种(SW-SG)的种植模式(种植规格同多样化种植体系内对应作物种植规格),具体种植模式及规格见图1(见135页)。小区内作物南北向种植,T2~T4处理种植带幅3 m(玉米和间作作物各1.5 m),玉米种植带播前覆膜。T2~T4种植模式有3个间作组合带,小区面积162 m^2(9 m×18 m),每个处理3次重复,小区随机排列。玉米、大豆、豌豆和娃娃菜(豌豆收获后复种至豌豆带幅内)采用点播器人工点播,出苗后间苗以保证1穴1株;小麦采用播种机行播,播种量为330 kg·hm^{-2};绿肥(小麦收获后复种至小麦带幅内)采用撒播,播种量为150 kg·hm^{-2}。田间灌溉采用漫灌,T1和T2处理灌溉定额为570 mm,T3和T4处理灌溉定额为720 mm。所有处理磷肥全部基施,结合播前整地基施P_2O_5 180 kg·hm^{-2}和纯氮112 kg·hm^{-2}(以尿素46%换算),氮肥追施情况见表1,均随灌水施入。玉米和大豆播种与收获日期均分别为4月10日和10月8日;豌豆播种和收获日期分别为3月16日和7月1日;小麦播种和收获日期分别为3月15日和7月21日;娃娃菜和绿肥播种和收获日期均分别为7月27日和10月8日。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 样品采集与测定 于玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、成熟期,各小区分别采集玉米(同

表 1　不同种植模式氮肥追施情况/(kg · hm^{-2})

Table 1　Nitrogen fertilizer application for different cropping patterns

处理 Treatment	小麦 Wheat	玉米 Maize			娃娃菜 Baby Chinese cabbage	
	拔节期 Jointing stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Vegetative stage	吐丝期 Silking stage	连座期 Rosette stage	包芯期 Hearting stage
T1		112.5	112.5	112.5		
T2		112.5	112.5	37.5		
T3		112.5	112.5	37.5	45.0	30.0
T4	52.5	112.5	112.5	37.5		

时采集大豆、豌豆、小麦、娃娃菜及箭筈豌豆)边行、中行各 5 株植株,测定干物质量。同时测定玉米的株高和叶面积。

于收获期在各小区每种作物种植带,确定 6 m^2 的测产区,进行作物产量测定,单作作物计产面积相同。玉米和配对作物占地比为 1∶1,净面积折算时乘以 2。

作物播种前和玉米收获后,采用土钻法分 6 层(0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm,30~40 cm,40~70 cm,70~100 cm)取 0~100 cm 土层土样,用烘干法测定土壤质量含水量(*SWC*)。

1.3.2　相关指标计算方法　(1)玉米累积相对效率指数(*CRE*)。在多样化种植体系中,累积相对效率指数反映了具体时间段内玉米相对共生作物生长比例变化,在某时间段内玉米累积相对指数>1,表示该时间段内玉米比例生长大于共生期内配对作物[10],其计算公式如下:

$$CRE = \frac{DW_{\mathrm{m-ic}t2}/DW_{\mathrm{m-ic}t1}}{DW_{x-\mathrm{ic}t2}/DW_{x-\mathrm{ic}t2}} \tag{1}$$

式中,*DW* 代表实际面积生物量(由作物干质量换算,kg · hm^{-2});m−ic 代表间作玉米;*x*−ic 代表间作玉米的配对作物;*t*1、*t*2 代表不同时间段。

(2)土地当量比(*LER*)。土地当量比用于衡量多样化种植相较于单作的优势,其意义在于精准核算单作种植达到与多样化种植同等作物产量时所需投入的耕地面积,以此直观对比单作和多样化种植模式在土地利用效率上的差异[9]。

$$LER = \sum_{k=x}^{n} \frac{y_{\mathrm{ik}}}{y_{\mathrm{sk}}} \tag{2}$$

式中,y_{ik}和 y_{sk}分别代表某作物间作和单作的实际产量(kg · hm^{-2}),考虑到复种体系的土地利用需进行当量比作加和(例如,T3 种植体系土地当量比为 $y_{\mathrm{im}}/y_{\mathrm{sm}}+y_{\mathrm{ip}}/y_{\mathrm{sp}}+y_{\mathrm{ib}}/y_{\mathrm{sb}}$,m 为玉米,p 为豌豆,b 为娃娃菜);$y_{ik}/y_{sk}$为该作物偏土地当量比。

(3)玉米与搭配作物共生期内竞争力(*CI*)。竞争力也叫实际植物侵略性指数,表征了多样化种植体系中作物共生期内一种作物相对另一种作物(配对作物)对养分等有关资源的竞争力[10]。

$$CI = \frac{DW_{\mathrm{im}}}{DW_{\mathrm{sm}} \times P_{\mathrm{m}}} - \frac{DW_{ix}}{DW_{sx} \times P_{x}} \tag{3}$$

式中,i 和 s 分别代表单作和间作;m 代表玉米,*x* 代表配对作物;*P* 代表多样化种植体系中作物占地比例。当玉米竞争力>0,表明共生期内玉米竞争力强于配对作物。

(4)体系玉米产量稳定性。体系产量稳定性用来评估不同种植模式对作物产量稳定性的影响。某种植模式稳定性数值越大,该种植模式应对气候和其他环境因素对作物产量影响的能力越强[11]。

$$CV = \sigma/\bar{Y} \tag{4}$$

$$SYI = (Y - \sigma)/Y_{\max} \tag{5}$$

$$SY = -CV + SYI \tag{6}$$

式中,*CV* 为产量稳定性的变异系数,变异系数越小,产量越稳定;σ 为标准差(kg · hm^{-2});$\bar{Y}$ 为平均玉米产量(kg · hm^{-2});*SYI* 为可持续产量指数;$Y_{\max}$为 4 种种植体系间最大的玉米产量(kg · hm^{-2});*SY* 为体系产量稳定性。*SY* 和 *SYI* 是用于衡量玉米产量稳定性和可持续性的重要指标。

(5)玉米水分利用效率(*WUE*)。玉米水分利用效率是指单位体积水产生的玉米产量。

$$SWS = SWC \times \rho_{\mathrm{b}} \times SD \tag{7}$$

$$ET = M + \Delta SWS \tag{8}$$

$$WUE = y/ET \tag{9}$$

式中,*SWS* 为土壤储水量(mm);*SWC* 为土壤质量含水量(%);ρ_{b}为土壤容重(g · cm^{-3});*SD* 为土层深度(mm);*ET* 为玉米全生育期耗水量(mm);*M* 为玉米生育季降水量(mm);ΔSWS 为土壤储水量的变化(mm);*WUE* 为玉米水分利用效率(kg · hm^{-2} · mm^{-1});*y* 为玉米净面积产量(kg · hm^{-2})。

1.4　数据分析

使用 Excel 2019 进行数据整理,采用 R 4.32 软件进行图形绘制和处理间差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植体系中玉米生长动态变化

如表 2 所示为多样化种植体系中玉米的生长动态变化,T2、T3 处理玉米株高和叶面积在生育季各阶段均高于 T4 处理,各处理边行玉米株高、叶面积均低于中行玉米。

玉米播种后 37 d 为玉米生长初期,T2、T3 处理玉米株高分别为 35.13 cm 和 37.05 cm,较 T4 处理显著提高 2.51%~8.11%;各处理中行玉米株高均显著高于边行玉米,增幅为 11.66%~22.14%。玉米播种后 53 d 为玉米营养生长旺盛期,T3 处理玉米株高最高(93.08 cm),显著高于 T2 和 T4 处理,增幅分别为 7.47%和 19.10%;T2、T3 处理玉米叶面积分别较 T4 处理显著提高 36.88%和 36.66%,各处理中行玉米叶面积较边行玉米显著提高 44.86%~56.54%。玉米播种后 69 d 为玉米营养生长旺盛期,T2、T3 处理玉米株高较 T4 显著提高 11.09%~14.16%,T3、T4 处理中行玉米株高分别较边行显著提高 17.98%和 12.15%;T2、T3 处理叶面积较 T4 处理显著提高,增幅分别为 33.09%和 16.25%,T3、T4 处理中行玉米叶面积分别较边行玉米显著提高 22.33%和98.26%。玉米播种后 99 d 为玉米营养生长向生殖生长过渡期,T2、T3 处理玉米株高和叶面积显著高于 T4 处理,两指标增幅分别为 8.94%~12.47%和 16.50%~34.83%;T4 处理中行玉米叶面积较边行提高 42.71%。玉米播种后 135 d,玉米进入生殖生长关键期,T2、T3 处理株高和叶面积均较 T4 显著提高,两指标分别增加 7.33%~16.23%和 22.76%~38.11%;T3、T4 处理中行玉米株高分别为 275.47 cm 和 258.47 cm,较其处理下边行玉米株高分别提高 7.52%和 9.10%。

2.2 不同种植体系中玉米累积相对效率指数

不同种植体系中玉米与其搭配作物在共生期内累积相对效率指数如表 3 所示,当玉米累积相对效率指数>1,表明该时段玉米比例生长大于其共生期内配对作物。T2 处理下玉米播种后 37~53 d 其比例生长大于大豆(玉米累积相对效率指数>1),播种后 53~69 d 两者趋于一致,播种后 135~174 d,玉米比例生长均低于大豆(玉米累积相对效率指数<1);T3 处理下玉米播种后 37~53 d 其比例生长大于豌豆,播种后 53~69 d 玉米比例生长与豌豆趋于一致,播种后 135~174 d(复种娃娃菜后)玉米比例生长低于娃娃菜;T4 处理下玉米播种后 37~99 d 其比例生长均低于小麦,播种后 135~174 d(复种绿肥后),玉米比例生长高于绿肥。

表 2 不同种植体系中玉米株高和叶面积动态变化

Table 2 Dynamic changes in maize plant height and leaf area in different cropping systems

处理 Treatment	玉米播种后天数 Days after maize sowing/d	株高/cm Plant height	叶面积/cm^2 Leaf area
T2-O	37	33.19±4.28Ab	
T2-M		37.06±4.34Aa	
T3-O		31.08±3.68Ab	
T3-M		37.04±4.57Aa	
T4-O		30.85±4.52Bb	
T4-M		37.68±4.49Ba	
T2-O	53	85.95±12.91Ba	1596.56±350.52Ab
T2-M		87.27±16.10Ba	2312.87±666.77Aa
T3-O		89.22±12.21Aa	1576.60±641.39Ab
T3-M		96.93±9.89Aa	2326.41±611.87Aa
T4-O		74.00±9.74Ca	1113.27±416.55Bb
T4-M		82.31±10.17Ca	1742.75±712.26Ba
T2-O	69	164.40±20.15Aa	3786.27±1008.56Aa
T2-M		166.80±22.07Aa	4129.01±1263.92Aa
T3-O		156.13±22.49Ab	3109.69±755.29Bb
T3-M		184.20±17.98Aa	3803.98±627.59Ba
T4-O		140.53±14.10Bb	1994.01±655.20Cb
T4-M		157.60±11.49Ba	3953.31±887.05Ca
T2-O	99	284.92±11.19Aa	6272.78±1765.66Aa
T2-M		272.98±35.86Aa	5976.67±2454.21Aa
T3-O		263.80±37.80Aa	5056.20±1281.34ABa
T3-M		276.60±11.91Aa	5528.24±1939.63ABa
T4-O		240.73±18.12Ba	3743.22±1033.93Bb
T4-M		255.33±22.92Ba	5341.79±2055.81Ba
T2-O	135	287.00±24.01Aa	4680.77±1017.28Aa
T2-M		288.73±19.31Aa	4924.29±1295.35Aa
T3-O		256.20±22.31Bb	4256.01±712.58Aa
T3-M		275.47±12.48Ba	4281.01±1104.26Aa
T4-O		236.90±18.27Cb	3235.20±818.68Ba
T4-M		258.47±14.92Ca	3719.20±1287.77Ba

注:同列不同大写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一处理下不同行之间差异显著($P<0.05$);O、M 分别代表边行、中行位置下的玉米。下同。

Note: Different capital letters in the same column indicate differences among treatments ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate differences among rows within the same treatment ($P<0.05$). "O" and "M" represent maize in the outer row and middle row positions, respectively. The same below.

玉米播种后 37~53 d,T2 和 T3 处理玉米累积相对效率指数均大于 1,分别较 T4 处理(0.36)显著提高 269.44%和 555.56%。玉米播种后 53~69 d,T2 和 T3 处理玉米累积相对效率指数分别较 T4 处理(0.28)显著提高 242.86%和 189.29%;T2 和 T3 处理边行玉米累积相对效率指数均大于 1,而其中行玉米累积相对效率指数均小于 1,两处理边行玉米累积相对效率指数分别较中行显著提高 200.00%和 154.35%。玉米播种后 69~99 d,T2 和 T4 处理玉米累积相对效率指数均小于 1,且 T2 较 T4 处理显著提高 300.00%。玉米播种后 135~174 d,T4 处理玉米累积相对效率指数(3.12)分别较 T2 和 T3 显著提高 43 倍和 156 倍。

2.3　不同种植体系中玉米净面积产量和水分利用效率

如表 4 所示,T1 处理玉米净面积产量为 18 752.85 kg · hm^{-2},T2~T4 处理玉米净面积产量较 T1 处理显著提高 49.09%~79.98%。T4 处理玉米净面积产量为 27 959.45 kg · hm^{-2},T2 和 T3 处理玉米净面积产量分别较 T4 处理显著提高 16.12%和 20.72%。T1 处理玉米水分利用效率为 28.17 kg · hm^{-2} · mm^{-1},T2~T4 处理玉米水分利用效率较 T1 处理显著提高 12.03%~64.15%。T2 处理玉米水分利用效率最高,为 46.24 kg · hm^{-2} · mm^{-1},显著高于 T3 和 T4 处理,增幅为 28.09%~46.48%;T3 处理玉米水分利用效率较 T4 处理显著提高 14.48%。

表 3　不同种植体系中玉米与搭配作物共生期内累积相对效率指数

Table 3　Cumulative relative efficiency index of maize and companion crops during the co-cultivation period in different cropping systems

处理 Treatment	配对作物 Companion crop	玉米播种后天数 Days after maize sowing/d	累积相对效率指数 Cumulative relative efficiency index
T2-O	S	37~53	1.38±0.41Ba
T2-M			1.28±0.67Ba
T3-O	P		2.20±0.53Aa
T3-M			2.52±1.04Aa
T4-O	W		0.24±0.15Ca
T4-M			0.47±0.17Ca
T2-O	S	53~69	1.44±0.94Aa
T2-M			0.48±0.30Aa
T3-O	P		1.17±0.28Aa
T3-M			0.46±0.22Aa
T4-O	W		0.38±0.24Ba
T4-M			0.17±0.07Ba
T2-O	S	69~99	0.57±0.31Ab
T2-M			0.95±0.08Aa
T4-O	W		0.16±0.03Ba
T4-M			0.21±0.06Ba
T2-O	S	135~174	0.63±0.19Ba
T2-M			0.57±0.18Ba
T3-O	B		0.03±0.00Ba
T3-M			0.02±0.00Ba
T4-O	G		3.41±1.38Aa
T4-M			2.84±1.00Aa

注:S、P、W、B 及 G 分别代表大豆、豌豆、小麦、娃娃菜及绿肥箭筈豌豆。

Note: S, P, W, B, and G represent soybean, pea, wheat, baby Chinese cabbage, and green manure *Vicia sativa* L., respectively.

2.4　不同种植体系中玉米产量构成及其稳定性和可持续性

如表 5 所示,T2 处理玉米穗粒数为 520.00 粒,较 T4 处理显著提高 11.52%;T3 处理成穗数为16.59 穗 · m^{-2},较 T4 处理提高 15.45%。变异系数、可持续产量指数以及玉米产量稳定性可以综合衡量该种植体系玉米产量稳定性,有助于评估种植体系的可持续性。变异系数越小、可持续产量指数及玉米产量稳定性越大,说明该体系应对外界变化的能力越高、种植体系越稳定。T4 处理变异系数最小(0.01),可持续产量指数和玉米产量稳定性最高,分别为 0.46 和 0.45;玉米产量稳定性排序为 T4>T3>T2。

2.5　不同种植体系中玉米偏土地当量比及土地当量比

如表 6 所示,T2~T4 处理土地当量比均大于 1,其中 T4 处理土地当量比为 1.93,分别较 T2 和 T3 处理显著提高 56.91%和 16.27%;T3 土地当量比为1.66,较 T2 处理显著提高 34.96%。T2~T4 处理玉米偏土

表 4　不同种植体系中玉米净面积产量和净面积水分利用效率

Table 4　Net area yield and net area water use efficiency of maize in different cropping systems

处理 Treatment	净面积产量 Net area yield /(kg · hm^{-2})	净面积水分利用效率 Net area water use efficiency /(kg · hm^{-2} · mm^{-1})
T1	18752.85±976.17c	28.17±2.31d
T2	32466.10±1713.23a	46.24±0.80a
T3	33751.74±1269.70a	36.13±2.02b
T4	27959.45±142.95b	31.56±1.49c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column denote the significant differences among various treatments (P<0.05). The same below.

表 5　不同种植体系中玉米产量构成及产量稳定性与体系可持续性

Table 5　Components of maize yield, yield stability and system sustainability in different cropping systems

处理 Treatment	穗粒数 Spikelet number	千粒重/g 1000-grain weight	成穗数/(穗 · $^{-2}$) Ear number/(Ears · m^{-2})	变异系数 Variable coefficient	可持续产量指数 Sustainable yield index	玉米产量稳定性 Stability of maize yield
T2-O	535.60±34.04Aa	341.51±28.47Aa	14.74±1.05ab	0.09	0.420	0.33
T2-M	504.40±53.64Aa	343.33±14.47Aa				
T3-O	489.47±41.01ABa	351.87±6.81Aa	16.59±1.03a	0.07	0.437	0.36
T3-M	443.13±68.65ABa	352.19±16.72Aa				
T4-O	414.00±41.05Ba	336.52±11.91Aa	14.37±0.78b	0.01	0.460	0.45
T4-M	481.07±95.59Ba	339.58±2.08Aa				

地当量比均大于 0.5,T3 处理玉米偏土地当量比为 0.90,较 T4 处理显著提高 20.00%。

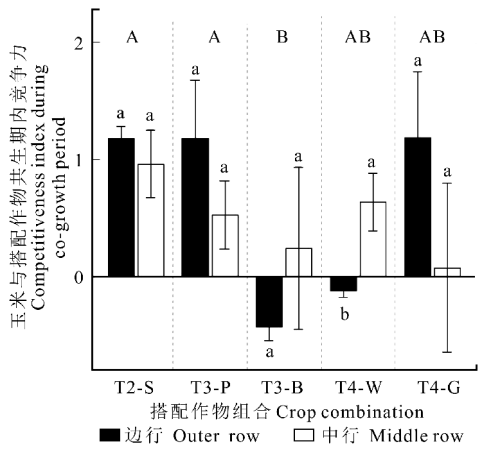
2.6 不同种植体系中玉米与搭配作物共生期内竞争力

玉米与其搭配作物在共生期内的竞争力,也称玉米侵略指数,当竞争力大于 0,表明玉米相较搭配作物有竞争优势。如图 2 所示,除 T3 处理复种娃娃菜时玉米竞争力为-0.09,其他体系中玉米竞争力均大于 0,T2(搭配作物为大豆)和 T3 处理(搭配作物为豌豆)玉米竞争力分别为 1.07 和 0.86,显著高于 T3 处理搭配娃娃菜时的玉米竞争力。各体系内边行、中行玉米与其搭配作物在共生期内的竞争力各有差异:T3 处理复种娃娃菜时边行玉米竞争力为-0.42,而中行玉米竞争力处于优势(0.25);T4 处理搭配作物为小麦时,边行玉米竞争力为-0.12,而中行玉米竞争力处于优势(0.64)。

表 6 不同种植体系中土地当量比及玉米偏土地当量比

Table 6 Land equivalent ratio and maize partial land equivalent ratio in different cropping systems

处理 Treatment	玉米偏土地当量比 Partial land equivalent ratio for maize	土地当量比 Land equivalent ratio
T2	0.87±0.08ab	1.23±0.10c
T3	0.90±0.07a	1.66±0.77b
T4	0.75±0.04b	1.93±0.18a



注:不同大写字母表示不同处理间的差异性($P<0.05$),不同小写字母表示同一处理下不同行之间的差异性($P<0.05$);S、P、B、W、G 分别代表大豆、豌豆、小麦、娃娃菜及绿肥箭筈豌豆。

Note: Different capital letters indicate differences among treatments ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate differences among rows within the same treatment ($P<0.05$). S, P, B, W, and G represent soybean, pea, wheat, baby Chinese cabbage, and green manure *Vicia sativa* L., respectively.

图 2 不同种植体系中玉米与搭配作物共生期内竞争力

Fig.2 Competitiveness index of maize and companion crops during co-growth period in different cropping systems

2.7 不同种植体系中玉米产量与其竞争力的关系

图 3 为玉米净面积产量与其竞争力的关系。玉米相对大豆、豌豆和小麦的竞争力与玉米净面积产量呈显著正相关关系,随玉米相对竞争力的提高,玉米净面积产量逐渐上升,在置信区间内,边行玉米相对竞争力更符合这一变化趋势。对比而言,T4 处理玉米相对小麦竞争力最低,为-0.22~1.03,对应玉米净面积产量为 27 955.24~28 109.39 kg·hm^{-2}。

3 讨 论

3.1 种间配置对光能利用的影响

研究发现,在多样化种植体系里,作物产量发生变化的关键原因在于种间配置所引发的时空生态位分离[12-13]。相较单一种植,间、套、复作种植增加了侧光的截留,最大限度利用太阳辐射,实现分层利用,影响主栽作物的生长和光能利用[14-15]。前人研究表明,间作玉米株高在小麦收获后从 1.2 m 增至 1.8 m,叶面积指数从 2.5 增加到3.8,直接促进了光能利用效率的提升,使得间作玉米在后期能够更有效地进行光合作用,从而提高干物质积累和最终产量[6]。本研究中,T2、T3 种植体系中各生育阶段玉米株高和叶面积均高于 T4 种植体系,T3 种植体系中玉米株高和叶面积在玉米播种后 69 d 时低于 T2 种植体系,在玉米播种后 99 d 时该种植体系又与 T2 种植体系中玉米株高和叶面积达到同一水平。豆科植物通过生物固氮提高了系统中总氮浓度,氮是玉米生长的关键营养元素[16],使得这两种种植体系玉米株高和叶面积较高,光能利用率高;而 T3 种植体系中玉米株高和叶面积发生变动,可能是因为豌豆较玉米早种早收,对晚收的玉米生长有较强的恢复作用[17]。本研究中,T4 种植体系中玉米株高和叶面积在所有生育时期均低于其他种植体系,除缺少豆科的固氮补源作用外,可能是小麦在玉米播前已经播种生长,根系提前占据了土壤孔隙来更好地竞争资源,使得玉米在生长中处于劣势[18]。

3.2 种间配置对土地利用与种植系统稳定性的影响

通过合理的种间配置开展种植,可让作物于生长时间和空间上实现互补,充分利用资源,进而提升土地生产力,保障体系作物产量的稳定性与可持续性是多样化生态系统的优势[1,5]。本研究表明,各多样化种植体系土地当量比均大于 1,且玉米是主要贡献作物。这说明多样化种植体系是一种双赢的种植模式,且复种会进一步提高土地利用和产

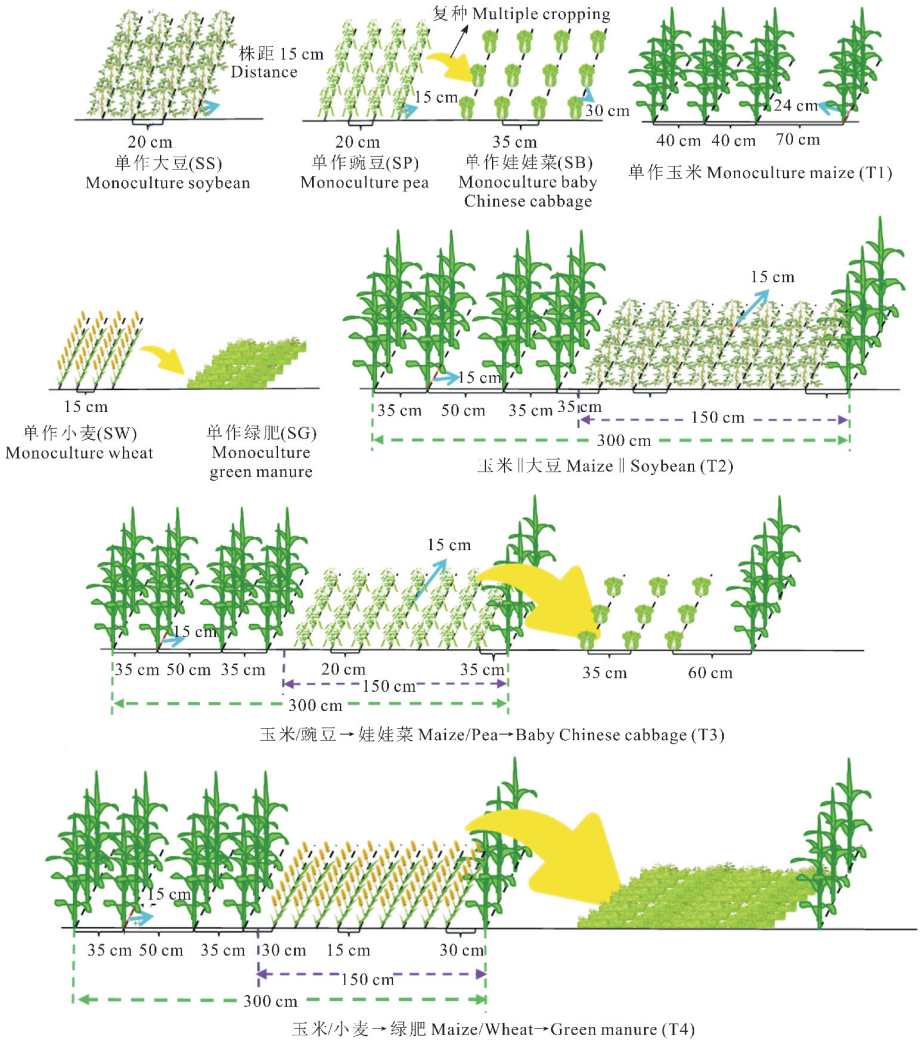
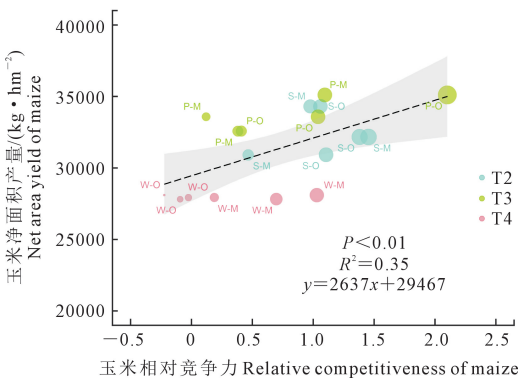


图 1　种植模式示意图

Fig.1　Schematic diagram of cropping patterns



注:图中气泡大小反映竞争力的大小。

Note: The size of the bubbles reflects the magnitude of competitiveness.

图 3　玉米净面积产量与玉米相对竞争力的关系

Fig.3　Relationship between maize net area yield and maize relative competitiveness

出,这与前人研究结果一致[16]。对自然生态系统的研究发现,生物多样性与生态系统稳定性显著相关,生物多样性越高,群落中草地生物量的变异系数越小,系统越稳定[19]。本研究也发现,添加复种的多样化种植体系中玉米的产量及其稳定性与可持续性比 T2 种植体系高,而 T4 种植体系中玉米产量稳定性和可持续性优于 T3 种植体系,可能是复种娃娃菜增加了其对玉米、水、肥、光、热等资源的竞争,而复种绿肥则提高了玉米对光能的利用[20]。

3.3　种间配置对水分利用的影响

本研究发现,多样化种植体系(T2~T4 处理)玉米水分利用效率高于单作,这可能源于作物根系的分布优化和最大需水期的分异[21]。本研究中,高叶面积和株高的高光截获以及固氮作用共同促进了 T2 植体系中玉米水分利用效率的提高,使其显著高于其他种植体系;T4 种植体系中,为了适应小麦更高的竞争力,选择边行的弱势发育,减缓资源竞争的同时降低了水分利用效率,同时玉米生育前期需水没有小麦迫切,后期需水时,边行已经适应了低水需求[22];T3 种植体系中,复种阶段的灌水用来满

足娃娃菜的生长需求,使得生育期耗水量增加,从而导致该体系玉米水分利用效率低于 T2 种植体系,而相较大豆和玉米的同种同收,豌豆最大需水期恰好与玉米错开[23]。

3.4 种间竞争力与产量表现的关系

在玉米参与的间套作、复种的种植体系中,不同作物和不同共生阶段均对玉米的生长、产量形成有显著影响[24]。玉米累积相对效率指数反映了多样化种植体系中玉米相对搭配作物共生期内的生长比例[10]。本研究中,玉米生长前期,与豆科间作表现为玉米累积相对效率指数大于 1,即玉米生长比例高于豆科,后期则表现为玉米生长比例小于搭配作物(包括豌豆收后复种娃娃菜);T4 种植体系中,玉米与小麦共生期内玉米生长比例均低于小麦,复种绿肥后,其生长比例大于绿肥。最终玉米产量的表现为禾-豆科间作(T2 和 T3)的种植体系最高。究其原因在于种间竞争力的差异,玉米/小麦体系中,玉米属于劣势作物[25-26],在玉米和小麦共生期内,中行和边行玉米累积相对效率指数一直低于小麦,虽然复种绿肥后,玉米生长比例和竞争力高于绿肥,但其最终产量仍不及禾本-豆科为主体系中的玉米产量。而禾-豆间作丰富了氮素利用,使得玉米后期生长比例虽低于配对的豆科作物,仍保持极高竞争力,使其不论干物质累积还是产量,抑或是对光的捕获都高于禾-禾间作的 T4 种植体系[27-29]。本研究还发现,生长初期玉米累积相对效率指数越高,后期产量越高,可见在群体环境中,初期生长良好的玉米植株在时空和资源竞争中更具优势,同时可能为后期出现的不良环境做好了抗逆准备[30-31]。

4 结 论

多样化种植模式玉米净面积产量及水分利用效率均优于单作模式,分别较单作提高 49.09%~79.98%和 12.03%~64.15%。就多样化种植体系而言,玉米间作大豆和玉米套种豌豆-复种娃娃菜模式下玉米株高和叶面积较玉米套种小麦-复种绿肥模式在各阶段均有优势,进入生殖阶段(玉米播种后 135 d)后两指标分别增加 7.33%~16.23%和 22.76%~38.11%;玉米间作大豆和玉米套种豌豆-复种娃娃菜模式下玉米净面积产量较玉米套种小麦-复种绿肥模式提高 16.12%~20.72%,而玉米套种小麦复种-绿肥模式玉米可持续产量指数(0.46)和产量稳定性(0.45)最高;玉米套种小麦-复种绿肥模式下,复种绿肥后玉米累积相对效率指数较玉米间作大豆和玉米套种豌豆-复种娃娃菜模式分别提高 43 倍和 156 倍,竞争力达 0.63。综合玉米产量、土地利用效率、系统稳定性和可持续性等因素可知,玉米套种小麦-复种绿肥模式通过复种绿肥减少了资源竞争,提高了土地利用效率,增强了系统的稳定性和可持续性,可作为西北旱区较适宜的多样化种植模式。

参 考 文 献:

[1] WANGER T C, RAVELOARITIANA E, ZENG S Y, et al. Co-benefits of agricultural diversification and technology for the environment and food security in China[J]. Nature Food, 2024, 5(12): 965-968.

[2] 刘丽, 孙炜琳, 王国刚, 等. 耕地“提质扩容”对中国粮食生产的影响分析[J]. 自然资源学报, 2024, 39(11): 2601-2618.
LIU L, SUN W L, WANG G G, et al. The influence of cultivated land “improving quality and expanding capacity” on grain production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(11): 2601-2618.

[3] 晁娜娜, 杨汭华. 耕地规模、农业保险认知及其潜在需求的多样化——基于全国 6492 个粮食种植户的考察[J]. 财经科学, 2017, (5): 67-79.
CHAO N N, YANG R H. Cultivated land scale, cognition of agricultural insurance and diversification of potential demand of agricultural insurance products — based on the survey of 6492 grain growers in China[J]. Finance & Economics, 2017, (5): 67-79.

[4] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1094-1109.
HU W Y, TAO T T, TIAN K, et al. Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1094-1109.

[5] 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.
LI L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 403-415.

[6] LI L, SUN J H, ZHANG F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 173-181.

[7] COSTA A, BOMMARCO R, SMITH M E, et al. Crop rotational diversity can mitigate climate-induced grain yield losses[J]. Global Change Biology, 2024, 30(5): e17298.

[8] 林洪鑫, 潘晓华, 袁展汽, 等. 施氮和木薯-花生间作对作物产量和经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 947-958.
LIN H X, PAN X H, YUAN Z Q, et al. Effects of nitrogen application and cassava-peanut intercropping patterns on crop yields and economic benefit[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 947-958.

[9] 赵建华, 李春杰, 孙建好, 等. 大豆品种及品种混合与玉米间作对玉米/大豆间作生产力的影响[J]. 大豆科学, 2024, 43(6): 725-734.
ZHAO J H, LI C J, SUN J H, et al. Effects of soybean varieties and mixed soybean intercropped with maize on productivity of maize/soybean intercropping systems[J]. Soybean Science, 2024, 43(6): 725-734.

[10] BEDOUSSAC L, JUSTES E. A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops[J]. Field Crops

Research, 2011, 124(1): 25-36.

[11] TAO D X, DELGADO-BAQUERIZO M, ZHOU G Y, et al. Maize-alfalfa intercropping alleviates the dependence of multiple ecosystem services on nonrenewable fertilization[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 373: 109141.

[12] WANG W, LI M Y, GONG D S, et al. Water use of intercropped species: Maize-soybean, soybean-wheat and wheat-maize[J]. Agricultural Water Management, 2022, 269: 107690.

[13] WANG X C, DENG X Y, PU T, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to increasing soil phosphorus availability in relay intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2017, 204: 12-22.

[14] 董勇杰, 张刁亮, 李越, 等. 不同施氮量下玉米生长及产量对间作豆科绿肥的响应[J]. 中国农业科学, 2024, 57(10): 1900-1914.
DONG Y J, ZHANG D L, LI Y, et al. Response of maize growth and yield with different nitrogen application rates to intercropped leguminous green manure[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(10): 1900-1914.

[15] 刘志鹏, 苟志文, 柴强, 等. 干旱灌区绿肥对多样化种植小麦玉米产量性能指标的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(9): 2415-2424.
LIU Z P, GOU Z W, CHAI Q, et al. Effect of green manure on wheat and maize yields in diversified cropping patterns in an arid irrigated agricultural area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(9): 2415-2424.

[16] 杨昭, 柴强, 王玉, 等. 河西绿洲灌区减量灌溉下绿肥对小麦光合源及产量的补偿效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1003-1014.
YANG Z, CHAI Q, WANG Y, et al. Compensation of green manure on photosynthetic source and yield loss of wheat caused by reduced irrigation in Hexi Oasis Irrigation Area[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(6): 1003-1014.

[17] DONG N, TANG M M, ZHANG W P, et al. Temporal differentiation of crop growth as one of the drivers of intercropping yield advantage[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3110.

[18] 苗庆丰, 温雅琴, 倪东宁, 等. 小麦玉米间作畦沟分灌作物根系生长特征研究[J]. 节水灌溉, 2025, (1): 37-40, 50.
MIAO Q F, WEN Y Q, NI D N, et al. Study on root growth characteristics of wheat maize intercropping under border furrow irrigation pattern[J]. Water Saving Irrigation, 2025, (1): 37-40, 50.

[19] SNAPP S S, BLACKIE M J, GILBERT R A, et al. Biodiversity can support a greener revolution in Africa[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(48): 20840-20845.

[20] 苟志文, 殷文, 柴强, 等. 干旱灌区小麦间作玉米麦后复种绿肥的可持续性分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(7): 1319-1331.
GOU Z W, YIN W, CHAI Q, et al. Analysis of sustainability of multiple cropping green manure in wheat-maize intercropping after wheat harvested in arid irrigation areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(7): 1319-1331.

[21] 袁金华, 俄胜哲, 车宗贤. 灌溉定额和绿肥交互作用对小麦/玉米带田产量和养分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 223-234.
YUAN J H, E S Z, CHE Z X. Effects of irrigation quota and green manure interaction on crop yield and nutrition utilization in the wheat/corn intercropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(2): 223-234.

[22] JALLOH A A, MUTYAMBAI D M, YUSUF A A, et al. Maize edible-legumes intercropping systems for enhancing agrobiodiversity and belowground ecosystem services[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 14355.

[23] 郑浩飞, 逄蕾, 孙建好, 等. 玉米||豌豆间作体系生产力对覆膜方式及化肥施用量的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(10): 1639-1649.
ZHENG H F, PANG L, SUN J H, et al. Responses of productivity to film mulching patterns and chemical fertilizer application rates in maize||pea intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(10): 1639-1649.

[24] 王得焕, 田世忠. 马铃薯间作玉米复种烟叶高产高效栽培技术[J]. 作物杂志, 2005, (1): 43-44.
WANG D H, TIAN S Z. High-yield and high-efficiency cultivation techniques of potato intercropping with maize and relay-cropping tobacco[J]. Crops, 2005, (1): 43-44.

[25] ZHAO J H, BEDOUSSAC L, SUN J H, et al. Competition-recovery and overyielding of maize in intercropping depend on species temporal complementarity and nitrogen supply[J]. Field Crops Research, 2023, 292: 108820.

[26] 刘广才, 杨祁峰, 李隆, 等. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 477-484.
LIU G C, YANG Q F, LI L, et al. Intercropping advantage and contribution of above- and below-ground interactions in wheat-maize intercropping[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(2): 477-484.

[27] 李越, 樊志龙, 张刁亮, 等. 生物炭和间作鲜食豌豆对氮肥减量下玉米产量的促进效应[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 178-188.
LI Y, FAN Z L, ZHANG D L, et al. Promotional effects of biochar and intercropping fresh peas on yield of maize with reduced application of nitrogen fertilizer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 178-188.

[28] 孙建好, 赵建华, 李伟绮, 等. 施氮对玉米||大豆间作产量稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报:中英文, 2025, 33(6): 1138-1145.
SUN J H, ZHAO J H, LI W Q, et al. Effect of nitrogen application on yield stability of maize||soybean intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2025, 33(6): 1138-1145.

[29] 董奎军, 张亦涛, 刘瀚文, 等. 玉米大豆间作减量施氮对当季作物农艺性状、经济效益和后茬小麦产量的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(22): 4495-4506.
DONG K J, ZHANG Y T, LIU H W, et al. Effects of nitrogen reduction application of summer maize-soybean intercropping on agronomic traits and economic benefits as well as its yield of subsequent wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(22): 4495-4506.

[30] 胡玉超, 谢飞, 张开京, 等. 甜玉米抗非生物胁迫研究进展[J/OL]. 分子植物育种, 2024: 1-8(2022-08-04). https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220804.0858.002.
HU Y C, XIE F, ZHANG K J, et al. Research progress on resistance to abiotic stress in sweetcorn[J]. Molecular Plant Breeding, 2024: 1-8(2022-08-04). https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220804.0858.002.

[31] 王存凯, 陈鹏飞, 陶洪斌, 等. 玉米产量潜力及超高产物质积累途径优化分析方法[J]. 中国生态农业学报, 2014, (12): 1414-1423.
WANG C K, CHEN P F, TAO H B, et al. Optimized FAO-AEZ model for estimation of maize yield potential and dry matter accumulation for super-high yield cultivation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, (12): 1414-1423.