DOI:10.11686/cyxb2026001 http://cyxb.magtech.com.cn
代欣哲，任文，张伟，等. 黄土高原半干旱区紫花苜蓿/黑麦草间作系统空间配置优化对水光利用的调控效应. 草业学报，2026，35(12)：1－15.
DAI Xin-zhe, REN Wen, ZHANG Wei, *et al*. Regulatory effects of spatial configuration optimization on water- and radiation-utilization of alfalfa/ryegrass intercropping systems in the semi-arid Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(12): 1－15.

黄土高原半干旱区紫花苜蓿/黑麦草间作系统空间配置优化对水光利用的调控效应

代欣哲[1]，任文[2]，张伟[1]，陈文青[1*]，张志新[1*]
（1. 西北农林科技大学草业与草原学院，陕西 杨凌 712100；2. 中国农业科学院农田灌溉研究所，河南 新乡 453002）

摘要：黄土高原水热时空分布不均是限制牧草生产与资源利用的现实因素，优化空间配置以提升间作系统水光协同效应对于发挥牧草生产潜力具有重要意义。本研究以紫花苜蓿和多年生黑麦草为对象，旨在探索一种基于空间配置优化的豆禾复合种植模式，通过揭示水光利用机制来提升间作系统的生产力。设置常规间作(I)、交叉间作(C)、宽窄行交叉间作(C-bn)、区块间作(Sb)和区块内混合间作(Ss)5种复合种植模式，系统测定并分析了不同模式下的牧草产量、土地利用率、边界效应和水分与光能的利用效率。结果表明，随建植年限增加，不同种植模式在产量与资源利用方面的表现差异显著。C-bn、Sb 和 Ss 处理的牧草产量在 2024 年初花期达到最大值，较 I 处理分别提高 23.40%、10.34% 和 10.84%。各复合种植模式的紫花苜蓿土地当量比显著高于 I 处理，2023 和 2024 年分别提升 4.11% 和 13.20%，其中 C、C-bn 和 Sb 处理较 I 处理显著增强了边界效应。此外，空间配置优化促进了水光的高效利用。在维持 0～60 cm 土层较高含水率的基础上，C-bn 和 Ss 处理的水分利用效率较 I 处理分别提升了 29.03% 和 7.22%；同时，这两种模式下紫花苜蓿的光能利用效率也相应提升了 27.43% 和 18.29%，有效提升了光、水资源的协同利用效率。综上，C-bn 模式通过优化空间配置有效缓解了种间竞争，并通过改善土壤水分环境提升了光能利用效率，实现了水光资源协同利用与牧草高产。该模式展现出较优的资源耦合效应与生产潜力，适合在黄土高原半干旱地区推广应用，为半干旱地区间作水热高效利用提供了科学依据和技术途径。

关键词：紫花苜蓿；多年生黑麦草；间作系统；播种方式；空间配置；水光利用；边界效应

Regulatory effects of spatial configuration optimization on water- and radiation-utilization of alfalfa/ryegrass intercropping systems in the semi-arid Loess Plateau

DAI Xin-zhe[1], REN Wen[2], ZHANG Wei[1], CHEN Wen-qing[1*], ZHANG Zhi-xin[1*]
1. *College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*; 2. *Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang* 453002, *China*

Abstract: The uneven spatiotemporal distribution of hydrothermal resources on the Loess Plateau is a major limiting factor for forage production and resource utilization. Therefore, optimizing the spatial configuration to enhance water-radiation synergy within intercropping systems is critical for maximizing forage production potential. Focusing on alfalfa (*Medicago sativa*) and perennial ryegrass (*Lolium perenne*), we tested several legume－grass intercropping models to determine the best spatial configuration, and explored the underlying mechanisms of enhanced water and radiation utilization with an ultimate goal to increase system productivity. Five intercropping patterns were

收稿日期：2026-01-06；改回日期：2026-03-16
基金项目：杨凌示范区科技计划项目(2024NY-01)资助。
作者简介：代欣哲(2000－)，男，内蒙古呼和浩特人，在读硕士。E-mail: grubbyshinoda@nwafu.edu.cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail: chen_wq@nwsuaf.edu.cn, zhixin@nwafu.edu.cn

established: conventional intercropping (I), cross intercropping (C), wide-narrow row cross intercropping (C-bn), block intercropping (Sb), and mixed intercropping within blocks (Ss). The forage yield, land equivalent ratio (LER), border effects, and water- and radiation-use efficiencies under the different patterns were analyzed. The results show that the performance of the various planting patterns in terms of yield and resource utilization differed significantly across time. Specifically, forage yields in the C-bn, Sb, and Ss patterns reached their maxima at the flowering stage in 2024, being 23.40%, 10.34%, and 10.84% higher, respectively, than that of pattern I. The LER of alfalfa was significantly higher in the optimized intercropping patterns than in pattern I, with increases of 4.11% in 2023 and 13.20% in 2024; furthermore, the border effects were significantly stronger in the C, C-bn, and Sb patterns than in pattern I. Optimization of spatial configuration facilitated the efficient utilization of water and radiation. By maintaining higher soil moisture in the 0—60 cm profile, the C-bn and Ss patterns increased the water use efficiency by 29.03% and 7.22%, respectively, compared with that in pattern I. Concurrently, the radiation use efficiency of alfalfa in these two patterns was 27.43% and 18.29% higher, respectively, than that in pattern I, indicating that the C-bn and Ss patterns effectively improved the synergistic use of water and radiation resources. In conclusion, the C-bn pattern effectively reduced interspecific competition through its optimized spatial configuration and improved radiation use efficiency by enhancing the soil moisture environment. This resulted in higher forage yields and promoted the synergistic use of water and radiation resources. The C-bn pattern exhibited superior resource-coupling effects and high production potential, it is recommended for widespread adoption in the semi-arid regions of the Loess Plateau. The results of this study offer a robust scientific basis and technical pathway for the efficient utilization of water-heat resources in semi-arid intercropping systems.

Key words: *Medicago sativa*; *Lolium perenne*; intercropping system; sowing method; spatial configuration; water-radiation utilization; border effect

黄土高原拥有丰富的光热资源,但降水稀少且季节分配不均[1],这种水热时空分布不均是限制该地区农业生产力的核心因素之一[2]。在此生境下,受严重的水分亏缺胁迫,植物常因生理干旱而关闭气孔,进而造成光能利用效率降低[3],致使其生产潜力难以充分发挥。当前农业生产中,虽然间作制度因其资源互补优势而被广泛应用[4],但现有种植模式仍未充分发挥水光资源的利用潜力。在有限的水分条件下,水分亏缺往往制约光能转化,导致水光资源利用效率普遍低下,限制了植物群体光能利用潜力的最大化,进而制约了区域作物产量潜力和土地生产力的充分释放。

间作的核心优势在于通过调控种间关系实现对资源的集约化利用[5],该种植方式利用不同植物在时间和空间分布上的差异,能够有效缓解作物对资源的直接竞争,通过促进种间互补效应来提升群体产量[6]。然而,当前的间作模式在空间利用上仍存在局限性,使种间关系失衡与土地资源的低效利用。特别是在黄土高原半干旱区,不合理的条带宽度和行距配置往往使早期冠层覆盖不足,这不仅会导致高强度的土壤蒸发[7],还会加剧系统内的水资源竞争[8],进而因水分亏缺抑制光能的高效利用[9]。地下部具有强扩张性根系的多年生植物,会加剧群体对有限土壤水分的争夺[10],由此引发的水分胁迫导致气孔关闭并限制CO_2吸收;地上部由于竞争关系,系统截获的光照无法被有效利用,加剧了冠层底部植物的光亏缺[11]。因此,优化空间配置是缓解上述水光资源竞争、发挥间作群体生态位互补优势的关键。合理的空间配置通过优化群体的几何排布,降低了植物对资源的直接竞争强度,并基于生态位分离机制协调种间关系[12]。该配置不仅利用立体种植结构增加地表覆盖、减少无效蒸发,还通过根系时空分布差异缓解水分竞争[13]。此外,它优化了冠层截光分布与透光、通风条件[14],促进边行作物截获更多侧方光照,提升群体光合有效辐射的截获量[15],最终通过驱动水光高效利用实现系统增产。综上,为突破现有间作模式在半干旱区水分胁迫及水热不同期条件下光水耦合受限的瓶颈,须厘清空间配置如何优化并驱动光水利用,这是构建黄土高原高效复合种植模式的理论关键。将上述空间配置理论应用于生产实践,构建结构合理、资源利

用高效的人工草地种植体系，是缓解黄土高原区域生态修复与饲草供给矛盾的重要途径。鉴于此，本研究以该区域常见的多年生牧草紫花苜蓿（*Medicago sativa*）和多年生黑麦草（*Lolium perenne*）为对象，利用其根系空间生态位差异与豆禾互补优势，通过设置多种复合种植模式，旨在：1）分析并比较紫花苜蓿和多年生黑麦草在不同复合方式下取得的生产力和土地利用性能；2）揭示紫花苜蓿和多年生黑麦草在不同复合方式下的光能和水分利用与竞争之间的关系；3）评估紫花苜蓿和多年生黑麦草在不同复合方式下的光水利用效益。本研究拟通过空间布局的优化调控实现水热资源的高效利用，并以此为基础提出新型间作配置方案，为构建半干旱地区节水增产型牧草生产系统提供支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2023－2024 年在陕西省延安市安塞区杜庄村（36°55′23″ N，109°10′30″ E，海拔约 1100 m）进行。该地属中温带大陆性半干旱季风气候，年平均气温 8.8 ℃，极端最高气温 36.8 ℃，极端最低气温－23.6 ℃；多年平均降水量为 505.4 mm，且主要集中在 8－10 月。2023 和 2024 年生育期（4－10 月）总降水量分别为 443.6 和 386.0 mm（表 1）。年蒸发量为 1669.2 mm，无霜期为 157 d。土壤类型为沙壤土，表层（0～30 cm）土壤容重为 1.36 g·cm^{-3}，有机质含量为 4.25 g·kg^{-1}，全 N 含量为 0.31 g·kg^{-1}，全 P 含量为 3.54 g·kg^{-1}。试验地前茬作物为玉米（*Zea mays*）。试验开展前，对地块进行了深度 30 cm 的机械深翻及旋耕平整处理。

1.2　试验设计

试验采用单因素随机区组设计，共设计了 5 种紫花苜蓿和黑麦草的复合间作模式，即 5 种处理，包括常规间作（行距 20 cm，简称 I）、交叉间作（行距 20 cm，简称 C）、宽窄行交叉间作（宽行距 30 cm，窄行距 10 cm，简称 C-bn）、区块间作（区块大小 50 cm×50 cm，区块间距 10 cm，简称 Sb）和区块内混合间作（区块大小 50 cm×50 cm，其中紫花苜蓿与黑麦草的种植面积各占区块总面积的 50%，区块间距 10 cm，简称 Ss）（图 1）。每个处理重复 3 次，共计 15 个小区；小区面积 4 m×4 m，过道 1 m。紫花苜蓿播量为 22.5 kg·hm^{-2}，多年生黑麦草播量为 6.0 kg·hm^{-2}。采用人工播种紫花苜蓿和多年生黑麦草，播深 2～3 cm。

表 1　试验区 2023–2024 年及近 20 年（2005–2024 年）生长季逐月平均气温与降水量

Table 1　Monthly mean temperature and precipitation during the growing season at the experimental site in 2023, 2024, and the 20-year average (2005–2024)

气候变量 Climate variables	年份 Year	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sept.	10 月 Oct.
气温 Temperature (℃)	2023	10.6	15.9	20.5	22.8	21.9	17.5	10.4
	2024	14.6	18.8	21.8	24.9	22.4	19.4	11.0
	2005－2024	12.2	16.8	20.8	22.5	21.3	16.1	9.7
降水 Precipitation (mm)	2023	82.0	50.0	52.8	92.8	44.8	96.2	25.0
	2024	19.8	16.8	21.8	40.4	161.2	74.6	51.4
	2005－2024	26.1	39.3	44.4	124.3	105.4	77.8	41.7

供试紫花苜蓿及多年生黑麦草品种分别为‘龙牧 801’及‘麦迪’（Mathilde）。播种期为 2023 年 7 月 15 日，次年 4 月 10 日补播一次。紫花苜蓿和多年生黑麦草均于初花期和收获期刈割取样（2023 年 10 月 20 日进行第 1 茬刈割，2024 年 8 月 15 日及 10 月 10 日分别进行第 1 茬及第 2 茬刈割）。土壤样品分别于 2023 年 10 月 21 日、2024 年 4 月 7 日、2024 年 6 月 2 日、2024 年 8 月 18 日及 2024 年 10 月 15 日进行采集。2023 年 8 月进行人工除草。在雨养条件下，土壤含水量满足间作系统中两种牧草作物播种和生长的需求，故试验期间全过程未灌溉。

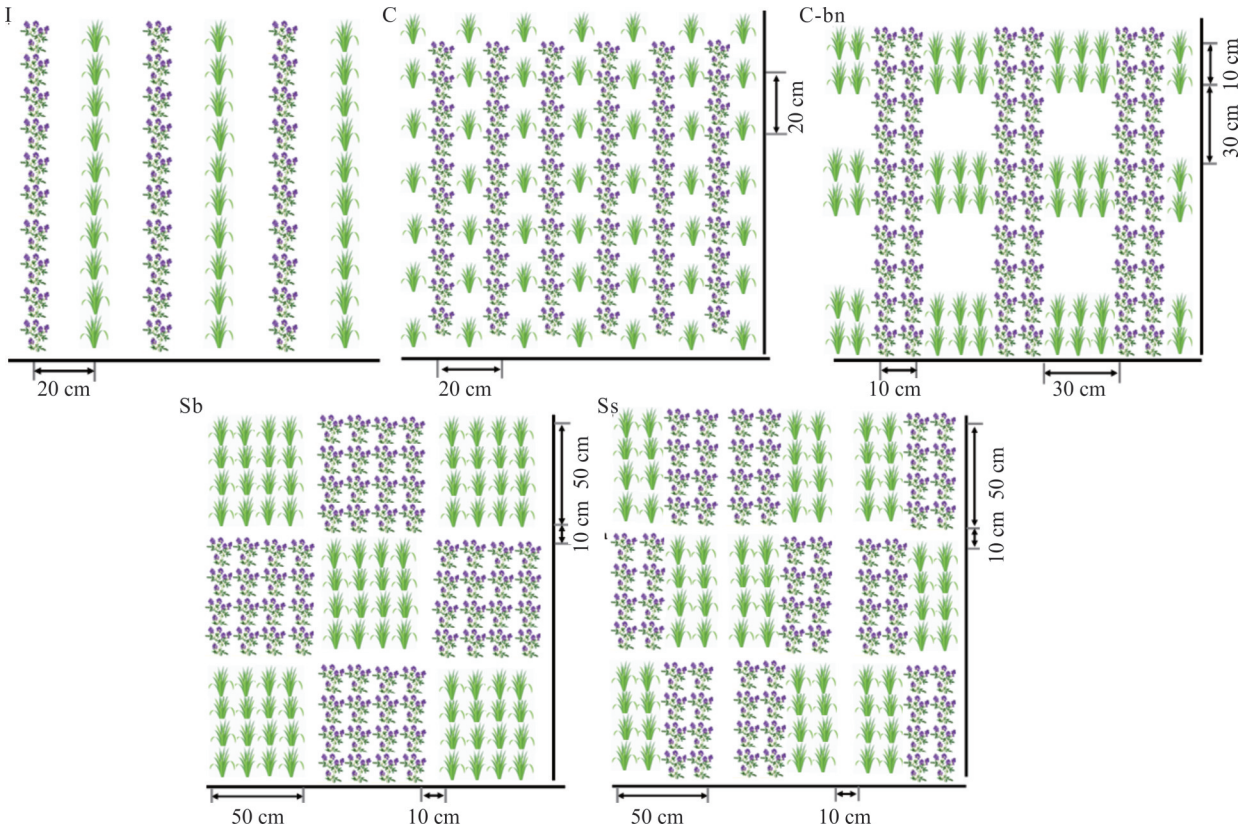

图1 不同复合种植系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different intercropping patterns

I: 紫花苜蓿和黑麦草的常规间作 Conventional intercropping of alfalfa and ryegrass; C: 紫花苜蓿和黑麦草垂直相交的间作 Crossing intercropping of alfalfa and ryegrass; C-bn: 紫花苜蓿和黑麦草改变行距时的垂直相交的间作 Crossing intercropping with modified row spacing of alfalfa and ryegrass; Sb: 紫花苜蓿和黑麦草各自成50 cm×50 cm的区块的种植模式 Single-species block pattern with a 50 cm×50 cm block of alfalfa and ryegrass; Ss: 紫花苜蓿和黑麦草各以50%的比例组成一个50 cm×50 cm区块的复合种植模式 Mixed planting pattern with a 1∶1 ratio of alfalfa to ryegrass in 50 cm×50 cm blocks; 下同 The same below.

1.3 数据收集

1.3.1 牧草产量 在间作小区内,针对两种牧草分别随机选取3个20 cm×20 cm的样方,将样方内的植株全部刈割,留茬高度3~5 cm[16]。植株收获后在105 ℃下杀青30 min,然后在80 ℃下烘干至恒重,称重并换算为单位面积(hm^2)产量。

预期产量(expected yield, EY)是在假设种内竞争和种间竞争相等的情况下的牧草产量[17]。根据紫花苜蓿和黑麦草的单作产量及其种植比例计算不同种植模式预期产量:

$$EY = EY_A + EY_R = Y_A Z_{A,I} + Y_R Z_{R,I}$$

式中:EY_A和EY_R分别代表紫花苜蓿和黑麦草的预期产量($kg \cdot hm^{-2}$),即按照间作系统中紫花苜蓿和黑麦草所占比例的紫花苜蓿单播产量和黑麦草单播产量;Y_A和Y_R分别代表紫花苜蓿和黑麦草的单作产量($kg \cdot hm^{-2}$);$Z_{A,I}$和$Z_{R,I}$分别代表紫花苜蓿和多年生黑麦草在间作系统中种植的比例。如果实际产量≤预期产量,则没有间作优势;如果实际产量>预期产量,则存在间作优势。

1.3.2 土地当量比 土地当量比(land equivalent ratio, LER)是衡量间作优势的重要指标,其计算方法为间作系统中各组分作物的产量与其对应单作产量的比值之和[18]。

$$LER = LER_A + LER_R = \frac{Y_{A,I}}{Y_A} + \frac{Y_{R,I}}{Y_R}$$

式中:LER_A、LER_R分别表示紫花苜蓿和多年生黑麦草偏土地当量比,$Y_{A,I}$、$Y_{R,I}$分别表示间作紫花苜蓿和多年生黑麦草的间作产量($kg \cdot hm^{-2}$)。当$LER>1$,表示存在间作优势;当$LER<1$,则表示存在间作劣势。

1.3.3　实际产量损失　　实际产量损失(actual yield loss, AYL)是基于单作产量来评价牧草在间作系统中生产能力的重要指标[19],反映了间作牧草相对于单作的产量增益或损失比例。AYL为正值表示存在间作优势,为负值则表示存在产量损失。

$$AYL = AYL_A + AYL_R = \left[\left(\frac{Y_{A,I}}{Y_A \times Z_{A,I}}\right) - 1\right] + \left[\left(\frac{Y_{R,I}}{Y_R \times Z_{R,I}}\right) - 1\right]$$

式中:AYL_A、AYL_R分别表示紫花苜蓿和黑麦草偏实际产量损失。

1.3.4　交界面密度　　交界面密度(interface density, ID)可用于计算单位土地面积上两种牧草相互接触的边界线总长度[20]。

$$ID = \frac{L_i}{A_t}$$

式中:L_i为小区内两种牧草交界线的总长度(m);A_t为小区面积(m^2)。间作带宽度越小,交界面密度越高,反映出单位面积内边界效应的空间作用范围更广。

1.3.5　边界效应指数　　边界效应指数(border effect index, BEI)指牧草交界处产量与非交界处(间作内部行或单作)产量的比值,用于衡量间作系统的边界生产效率[21]。

$$BEI = \frac{Y_b}{Y_i}$$

式中:Y_b表示边行牧草的单位面积产量($kg \cdot hm^{-2}$);Y_i表示内行(受边行影响最小的中心行)牧草的单位面积产量($kg \cdot hm^{-2}$)。若$BEI > 1$,表示存在正向的边行优势,若$BEI < 1$,则表示存在负向的边行劣势。

1.3.6　土壤含水率　　在紫花苜蓿和黑麦草的关键生育期和刈割期使用土钻(内径 3.8 cm)在间作系统的行内、行间等多个采样点采集 0～10、10～20、20～40、40～60、60～80 及 80～100 cm 土层土壤样品,使用烘干法[22]测定土壤样品含水率。

1.3.7　牧草水分利用效率　　水分利用效率(water use efficiency, WUE)的测算基于土壤蓄水量、牧草水分利用量和牧草产量。土壤蓄水量(soil water storage, SWS)可由各土层土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)、土层深度(cm)和土壤质量含水率(%)三者的乘积计算得出[23]。牧草水分利用量指牧草在特定生长时间内所消耗的总水量(mm),可根据水分平衡原理得出,鉴于试验地地势平坦、地下水位较深(>30 m),且全程雨养无灌溉,计算中地表径流、深层渗漏、地下水毛管上升及灌溉水输入均忽略不计[24]。

牧草水分利用效率由单位面积牧草产量(yield, Y, $kg \cdot hm^{-2}$)与牧草全生育期水分利用量(water use, WU, mm)的比值得出[25],单位为$kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$。

$$WUE = \frac{Y}{WU}$$

1.3.8　牧草叶片 SPAD　　采用便携式叶绿素仪测定叶片相对叶绿素含量(SPAD)。测定位点包括各间作小区内紫花苜蓿和黑麦草条带或区块的非交界处与交界处。每个位点随机选取 3 株长势一致的植株,测定其顶部完全展开叶并取平均值。

1.3.9　牧草光能利用效率　　光能利用效率(radiation use efficiency, RUE)由牧草积累的生物量与截获的光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)的比值计算得出[26],单位为$g \cdot MJ^{-1}$。

$$RUE = \frac{Y}{PAR_I},\ PAR_I = PAR_i \times f_{PAR} = PAR_i \times \left(1 - \frac{PAR_t}{PAR_i}\right)$$

式中:Y表示一定时间内积累的干物质含量($g \cdot m^{-2}$),PAR_I表示同一时间内群体截获的光合有效辐射量($MJ \cdot m^{-2}$);PAR_i表示入射到冠层顶部的总光合有效辐射($MJ \cdot m^{-2}$);f_{PAR}表示光合有效辐射截获率;PAR_t是穿透冠层底部的总光合有效辐射($MJ \cdot m^{-2}$)。

1.4　数据分析

使用 Excel 2021 软件对数据进行记录与汇总,使用 SPSS 软件(版本 27.0, SPSS Inc., 芝加哥, 美国)进行数

理统计分析,使用Origin(版本2025, OriginLab Corporation, 北安普顿, 美国)进行绘图。对不同复合种植模式的产量、水分、光能利用和竞争性状进行方差分析(ANOVA),并采用最小显著差异法(LSD)在0.05水平上进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对紫花苜蓿和黑麦草产量的影响

两年内,复合种植模式牧草产量均显著高于预期产量($P<0.05$),2023和2024年分别提高64.83%和90.10%(图2)。2024年初花期,C-bn处理的牧草总产量(7338.69 kg·hm^{-2})及紫花苜蓿产量较常规间作(I)分别显著提高23.40%和33.47%($P<0.05$)。此外,两年内各复合种植模式的黑麦草产量较I处理均无显著差异($P>0.05$)。

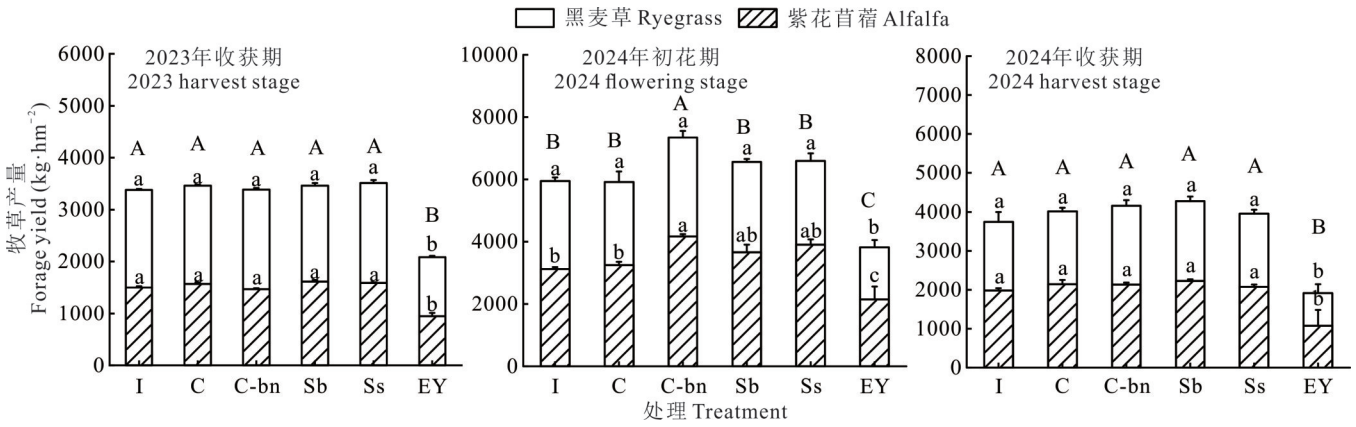

图2 不同复合种植模式的牧草产量

Fig. 2 Forage yield under different intercropping patterns

不同小写字母表示同种牧草的产量在不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示两种牧草产量的总和在不同处理间差异显著($P<0.05$);EY为预期产量。下同。Different lowercase letters indicate significant differences in yield of the same forage species among treatments ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences in the sum of the two forage yields among treatments ($P<0.05$). EY: Expected yield. The same below.

2.2 不同种植模式下土地利用效率及生产性能的比较

复合种植模式的LER优于常规间作(I)(图3)。2023年,Sb和Ss处理的苜蓿LER较I处理分别提升7.59%和6.33%;至2024年初花期,C-bn处理表现最为突出,其苜蓿LER高达0.97,较I处理显著提升32.88%($P<0.05$);在2024年收获期,C-bn处理的苜蓿LER和Sb处理的黑麦草LER较I处理分别显著提升了8.75%和14.67%($P<0.05$)。实际产量损失(AYL)方面,各处理的AYL值均为正数,表明各复合模式均存在产量优势。具体而言,C-bn处理在2024年初花期的苜蓿AYL达到0.79,较I处理显著提升了259%($P<0.05$);2024年收获期,C、C-bn和Ss处理的苜蓿AYL较I处理分别显著提升了85.71%、74.29%和71.43%($P<0.05$)。此外,Sb处理在2024年收获期显著提高了黑麦草AYL,较常规间作I处理提升了15.12%($P<0.05$)。

2.3 不同种植模式的边界效应

各间作系统的边界效应指数均大于1,表明均存在边界优势,边界行牧草产量高于内行牧草产量(图4);其中C处理表现出最大的边界效应指数,达1.73,较常规间作(I)显著提升61.05%($P<0.05$);4种复合种植模式较I平均改善26.56%。常规间作(I)的交界面密度为2 m·m^{-2},各复合种植模式C、C-bn、Sb和Ss的交界面密度均超过3 m·m^{-2},分别为3.23、3.57、3.44和3.66 m·m^{-2},较I处理平均增大75%。

2.4 不同种植模式的土壤含水率

土壤含水率随土层深度增加总体呈下降趋势,多集中在16%~19%(图5)。不同种植模式下不同深度的土

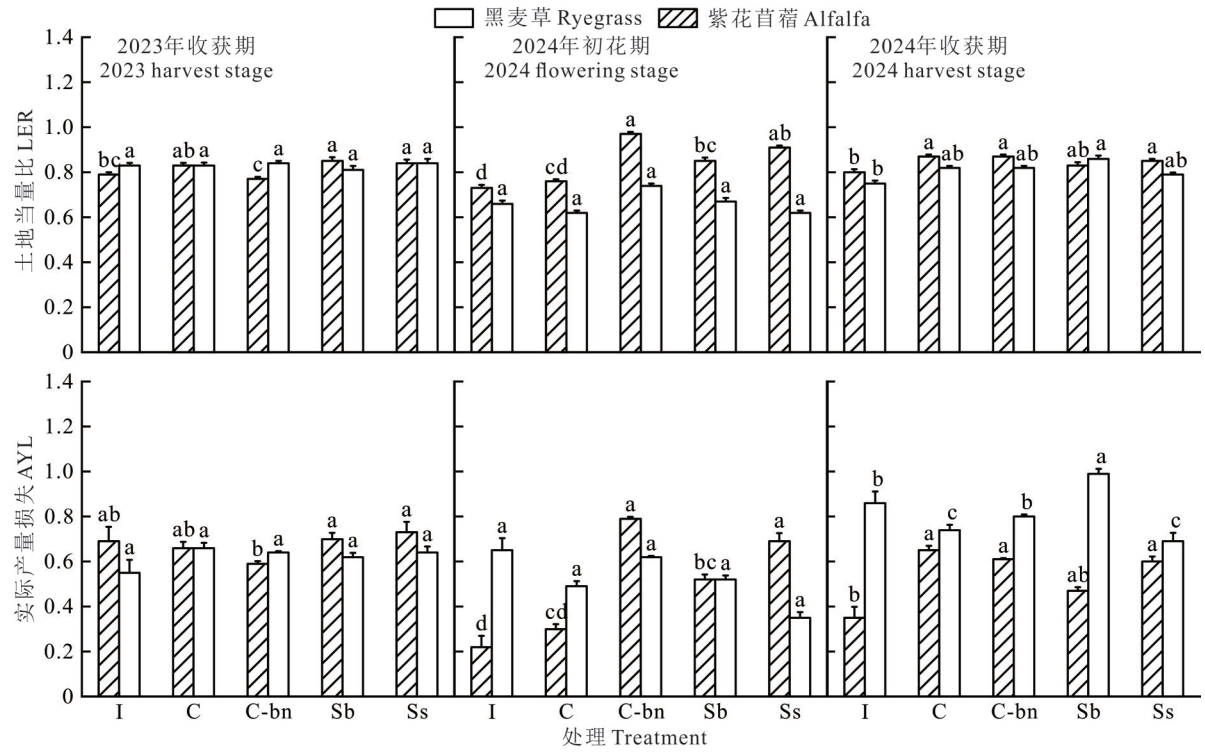

图 3　不同复合种植模式紫花苜蓿、黑麦草的土地当量比和实际产量损失

Fig. 3　Land equivalent ratio (LER) and actual yield loss (AYL) of alfalfa and ryegrass under different intercropping patterns

不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$); 下同 The same below.

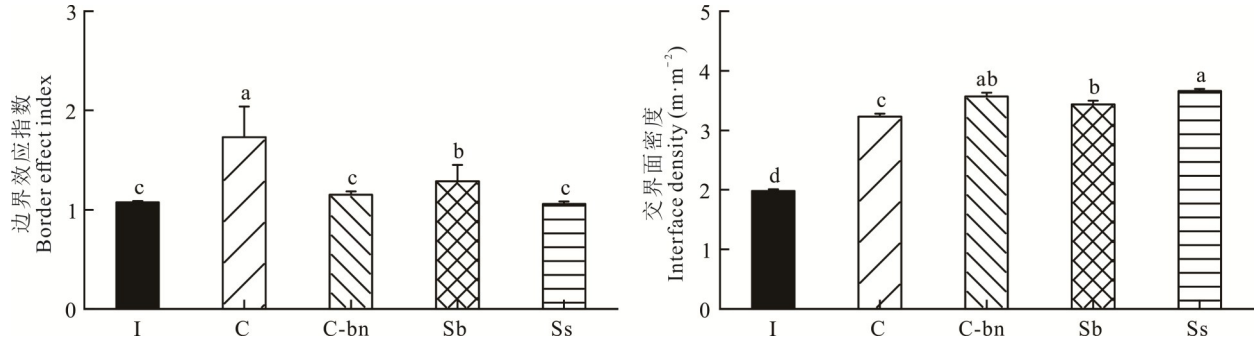

图 4　不同复合种植模式的边界效应指数与交界面密度

Fig. 4　Border effect index and interface density under different intercropping patterns

壤含水率存在显著差异,0～50 cm 土层内 C-bn 和 Ss 处理的土壤含水率显著高于常规间作(I)($P<0.05$)。在 0～10 cm 和 10～20 cm 土层,C、C-bn、Ss 处理的土壤含水率较 I 处理分别显著提高 3.51%、4.85%、4.65%。在 20～40 cm 土层,C-bn 和 Ss 处理土壤含水率较 I 处理分别显著提高 4.43% 和 5.22%($P<0.05$)。在 40～60 cm 土层中,仅 C-bn 处理的土壤含水率显著高于 I 处理,增幅达 4.53%($P<0.05$)。在 60～100 cm 土层中,各处理的土壤含水率无显著差异($P>0.05$)。

2.5　不同种植模式的水分利用效率

各处理的水分利用效率(WUE)存在显著差异($P<0.05$),其中 C-bn 处理在各时期均表现出最显著优势。C-bn 处理的 WUE 在 2023 年收获期和 2024 年初花期较常规间作(I)分别显著提升 40.06% 和 31.27%($P<0.05$)。此外,各间作模式的 WUE 均显著高于基于预期产量(EY)求得的单作 WUE($P<0.05$),存在间作优势。

2.6 不同种植模式的光截获率与叶片SPAD

2023和2024年紫花苜蓿和黑麦草的植株光截获率均表现出一致的垂直分布规律(图7),呈下层>中层>上层的特征,下层的光截获率为73%~89%,上层的光截获率为17%~33%。2024年收获期牧草光截获率普遍高于2023年收获期;2024年,从初花期到收获期,光截获率在大多数处理中呈上升趋势,尤其是在中层冠层和下层冠层。在各处理间,2023年收获期C-bn、Ss处理的紫花苜蓿的光截获率与常规间作(I)有显著差异($P<0.05$)。

叶片SPAD值受物种因素影响显著,紫花苜蓿采样点(A、A_C)的SPAD值始终显著高于黑麦草采样点(R、R_C)(图8,$P<0.05$)。两年内,C-bn处理的平均叶片SPAD值显著高于C处理($P<0.05$),而与Sb处理差异不显著($P>0.05$)。此外,在同一处理下,同一种牧草的SPAD值在间作与单作点位间差异不显著($P>0.05$)。

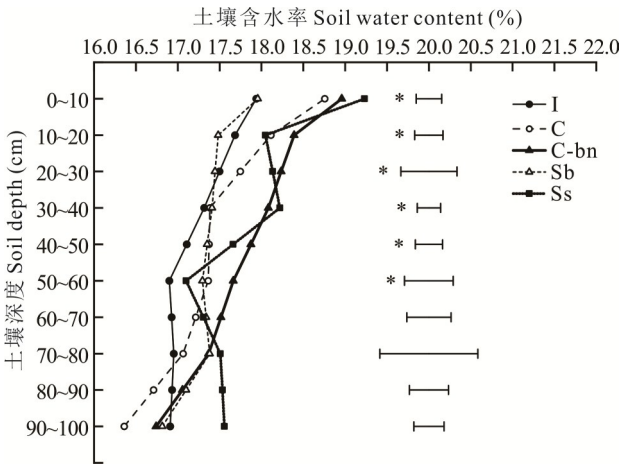

图5 不同复合种植模式0~100 cm土层土壤含水率

Fig. 5 Soil water content in the 0–100 cm soil depth under different intercropping patterns

*: 根据LSD检验,同一深度下土壤含水率较常规间作(I)存在显著差异($P<0.05$) A significant difference in soil water content at the same depth compared to conventional intercropping (I), as determined by the least significant difference (LSD) test at the 0.05 level.

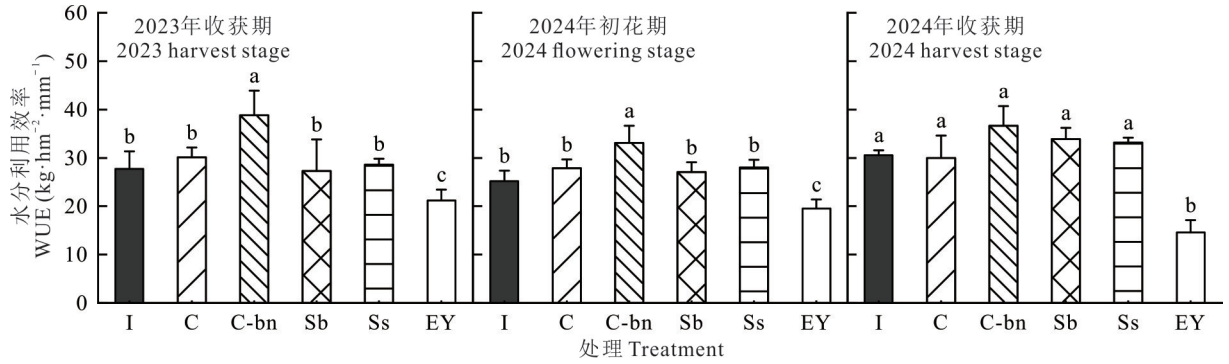

图6 不同复合种植模式的水分利用效率

Fig. 6 Water use efficiency under different intercropping patterns

2.7 不同种植模式的光能利用效率

从2023至2024年光能利用效率(RUE)呈上升趋势。2024年多数复合种植模式RUE均高于常规间作(I)(图9),其中,初花期C-bn处理最优,其RUE较I处理显著提升了18.93%($P<0.05$)。至2024年收获期,各间作处理RUE无显著差异,但均显著高于基于预期产量(EY)求得的单作RUE($P<0.05$),存在间作优势。

3 讨论

3.1 空间优化方式对间作系统生产力与种间关系的调控效应

随着种植年限增加,紫花苜蓿逐渐取代黑麦草成为间作系统的优势作物,其生产潜力的释放是驱动系统次年增产的重要因素。在建植当年,间作系统尚处于构建阶段,紫花苜蓿的竞争优势尚未完全显现,其原因在于紫花苜蓿作为多年生豆科牧草,在建植初期优先将光合产物分配到地下根系构建[27],且同期降水不足进一步延缓了苜蓿的生长和冠层构建[28],致使光能截获与利用率降低,地上部生长相对缓慢[29]。这一现象在2023年的土地当量比(LER)和产量数据中得到了反映(图2、图3),此时系统的产量优势主要由早期生长较快的黑麦草贡献。多年

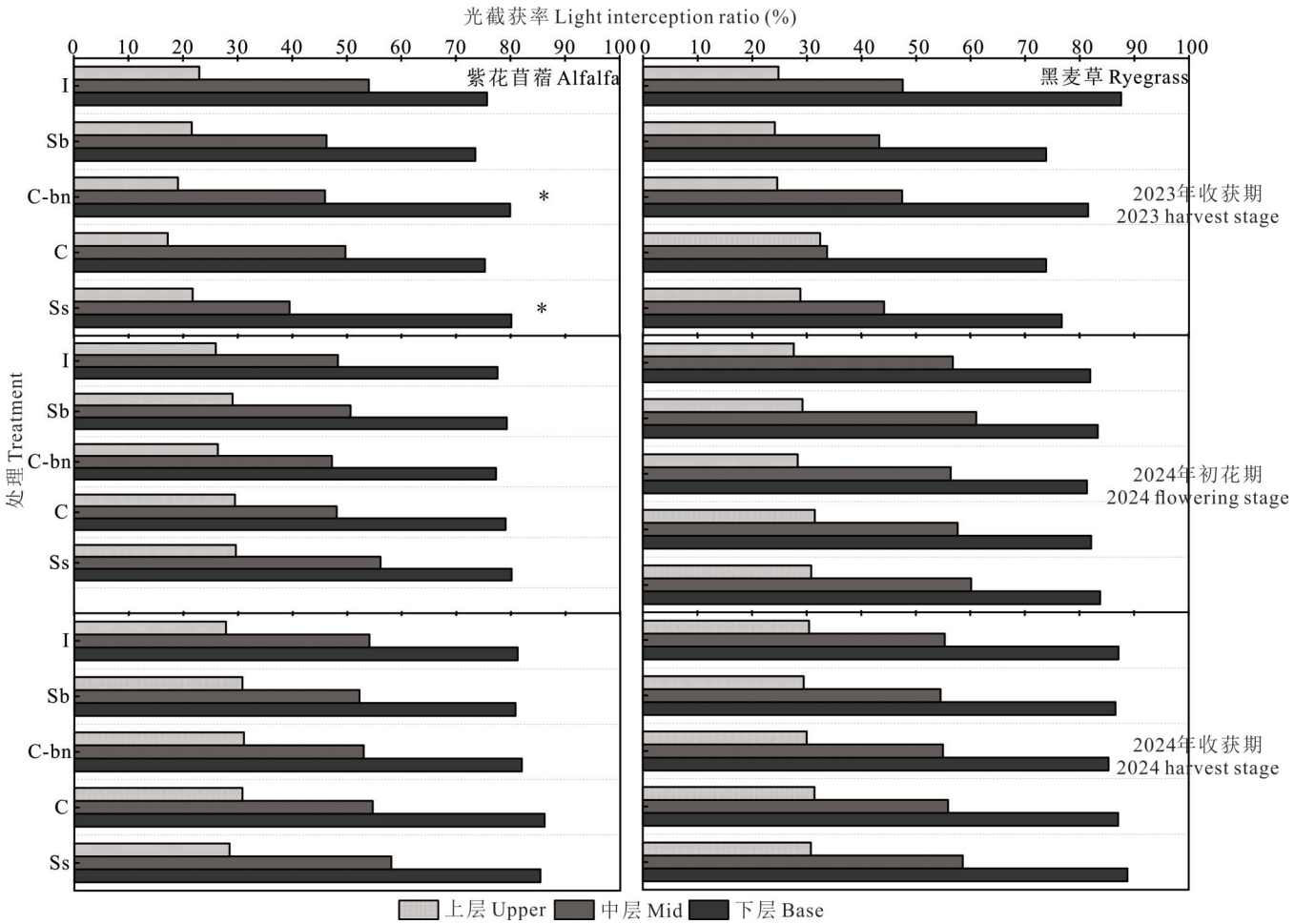

图7　不同复合种植模式下不同冠层高度的光截获率

Fig. 7　Light interception ratio at different canopy heights under different intercropping patterns

*：根据LSD检验，复合种植模式与I处理的平均光截获率之间存在显著差异（$P<0.05$） A significant difference in mean light interception ratio between the intercropping patterns and treatment I, as determined by the least significant difference (LSD) test at the 0.05 level.

生黑麦草建植迅速且苗期生长速率高，能够优先占据浅层土壤生态位并高效截获光热资源[30]，在一定程度上弥补了紫花苜蓿建植初期的生产力劣势。而在建植次年，由于多年生黑麦草根系分布较浅，无法有效利用深层土壤水分[31]，在生育后期生长势减弱，导致其持续生产能力受限[32]。相比之下，紫花苜蓿生物量的快速积累表明其间作竞争力已显著增强（图2）。这主要得益于紫花苜蓿深层根系网络的建成，增强了其对深层土壤水分和养分的吸收能力，从而在与黑麦草的竞争中占据了更有利的生态位[33]。此外，2024年初花期紫花苜蓿偏土地当量比显著提升（图3），表明竞争力恢复，这可能由于紫花苜蓿自身的生物固氮特性，该特性在减少土壤速效氮消耗的同时，有效削弱了与黑麦草间的养分争夺[34]。这种紫花苜蓿竞争力随建植年限递增的规律与现有多年生豆禾间作系统的研究结果相一致[30]。

不同的空间配置模式通过改变种间空间分布格局增强了边界效应，并有效调控了种间竞争，驱动了各模式下系统产量的差异[35]。本研究发现，宽窄行交叉间作（C-bn）通过构建高密度种间界面接触与宽窄行交替的复合空间结构，弱化了种间竞争并有利于增强种间互补效应。首先，该模式种间交界面密度高，增加了有效边界空间（图4），正向边界效应显著增强，提高了处于边界优势生态位的植株比例，强化了其对侧方光热资源的截获效率，促进边缘生长优势向系统整体产量转化，这与Wang等[36]关于边行比例决定种间互作强度的研究结论一致。其次，该模式利用宽行距构建了必要的种间竞争缓冲空间，有效缓解了黑麦草对紫花苜蓿的侧向遮阴胁迫及根系交错区的养分竞争压力，为处于竞争劣势的紫花苜蓿提供了充足的生长发育空间，这进一步证实了宽行距配置在减轻禾

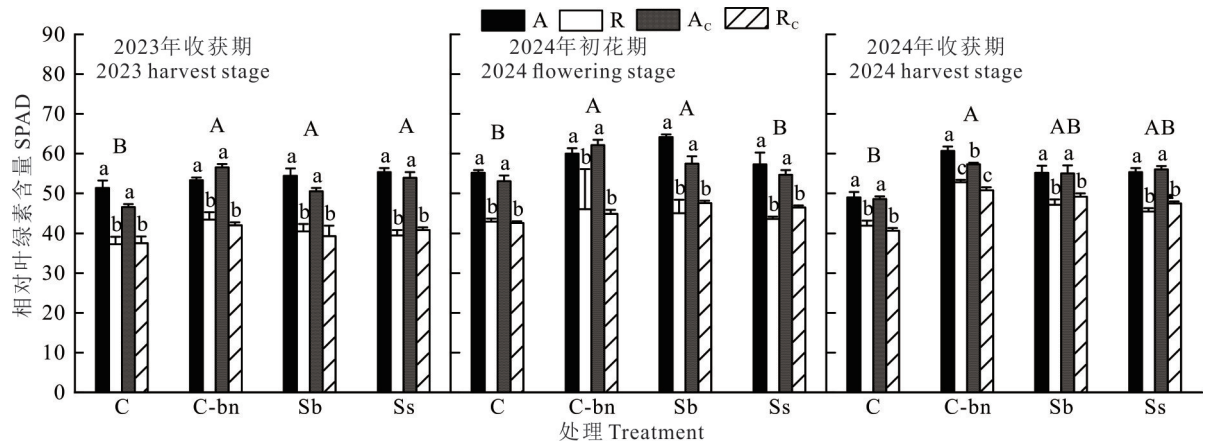

图8 不同复合种植模式下不同采样点的叶片SPAD

Fig. 8 Leaf SPAD values at different spatial positions under different intercropping patterns

图中4个位点分别为A(表示间作系统内紫花苜蓿非交界处采样点)、R(表示间作系统内黑麦草非交界处采样点)、A_C(表示C、C-bn中与黑麦草条带相交叉的苜蓿采样点或Sb、Ss中与黑麦草区块相接的苜蓿采样点)和R_C(表示C、C-bn中与苜蓿条带相交叉的黑麦草采样点或Sb、Ss中与苜蓿区块相接的黑麦草采样点)。不同小写字母表示同一处理内不同位点叶片SPAD值存在显著差异($P<0.05$),不同大写字母表示各位点平均叶片SPAD值在不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。The Figure illustrates four sampling points: A represents the alfalfa sampling point in the non-interface area within the intercropping system; R represents the ryegrass sampling point in the non-interface area within the intercropping system; A_C denotes the alfalfa sampling point intersecting with ryegrass strips (in treatments C and C-bn) or adjacent to ryegrass blocks (in treatments Sb and Ss); and R_C denotes the ryegrass sampling point intersecting with alfalfa strips (in treatments C and C-bn) or adjacent to alfalfa blocks (in treatments Sb and Ss). Different lowercase letters indicate significant differences in leaf SPAD values among different positions within the same treatment ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences in mean leaf SPAD values among different treatments ($P<0.05$).

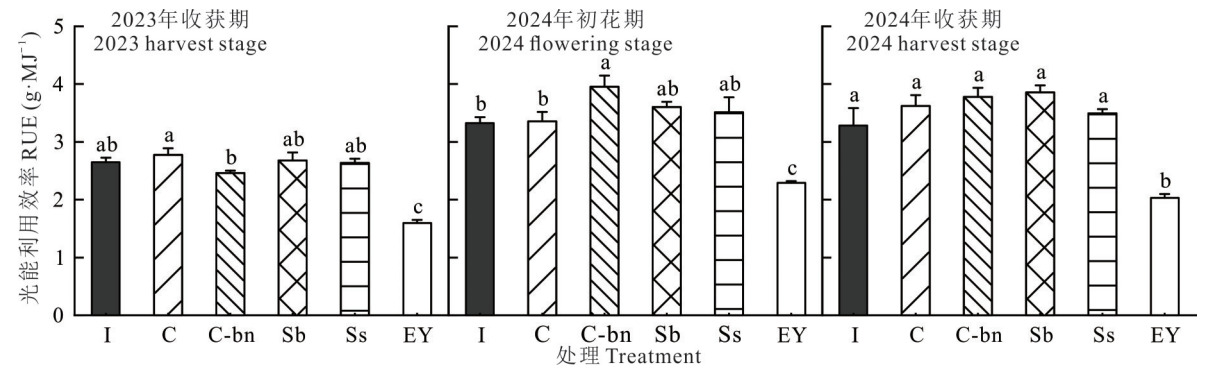

图9 不同复合种植模式的光能利用效率

Fig. 9 Radiation use efficiency under different intercropping patterns

本科对豆科光抑制方面的关键作用,与Cheng等[37]的研究结论相符。同时窄行距配置通过提高种植密度优化了群体结构,提高了单位面积内的光能截获效率,弥补了宽行间距造成的土地空间损失,保障系统的高产[38]。在此空间构型下,紫花苜蓿的深根系与黑麦草的浅根系在垂直空间上实现了更理想的生态位分离[39],既减少了对同一土层资源的直接竞争,又通过高频的根际接触促进了豆科固氮产物的传递与利用,促进了豆禾种间互补[40]。进一步地,行距优化所带来的冠层微气候改善,以及根系分泌物介导的根际养分活化等潜在生物学过程[41],亦是驱动C-bn模式实现高产的重要因素。常规间作(I)和区块内混合间作(Ss)受制于狭窄行距或高密度混生环境,加剧了种间非对称竞争;黑麦草在建植初期对资源的优先占据抑制了紫花苜蓿生长,致使系统内竞争强度超过互补效应。交叉间作(C)虽扩展了种间接触界面,但其在建植次年的产量及黑麦草实际产量损失(AYL)并未优于I模式(图2、图3),这可能是因为在维持窄行距配置的前提下,仅仅增加接触界面反而因缺乏足够的空间缓冲,进一步扩大了种间竞争的发生区域。当牧草间距过近时,种间对光、水等资源的竞争往往会超过其生态位互补效应[42]。而区块间作(Sb)虽利用空间隔离削弱了种间直接竞争,但其增产幅度显著低于C-bn(图2),这可能受限于区块中

心区域的种内竞争，使得系统的资源互补效应难以充分转化为系统生产力。

3.2 空间优化方式对间作系统水分和光能利用的调控效应

空间配置的优化通过改变地上的冠层结构和地下的根系分布，影响了间作系统的水分消耗与光能捕获，进而决定了系统的产量。根据试验期间的气象数据（表 1），该地区降水主要集中在夏末秋初（8－10 月降水占全年 60％以上），而作物快速生长的春夏季（4－6 月）降水相对匮乏，降水与作物需水关键期的错位加剧了春夏季间作系统土壤水分的供需矛盾，导致间作群体在生长旺季均面临不同程度的水分胁迫与种间竞争；因此，通过空间配置优化缓解这种季节性水分限制，发挥对有限降水的利用潜力尤为关键。本研究发现，C-bn 模式通过促进种间空间生态位互补，显著提升了系统的水分利用效率（WUE），并调节了种间水分利用模式[43]。C-bn 模式的 WUE 显著优于常规间作（I）（图 6），得益于其宽窄行配置，宽行形成了有效的地下根系缓冲带，减少了生态位重叠区的无效水分消耗，窄行则维持了高频的根际接触，保证了水分的互补利用[44]；该空间配置有利于 0～50 cm 土层水分的恢复（图 5），能有效缓解紫花苜蓿的水分胁迫，使苜蓿在利用浅层水分的同时，充分发挥深根吸水特性，这一结论与 Homulle 等[45]的研究结果一致。而常规间作（I）可能因缺乏足够的空间隔离导致作物根系在浅层高度重叠，加剧了黑麦草对水分的争夺[46]。其他复合模式虽较常规间作（I）有所改善，但仍因行距配置单一或种间空间布局不合理，并未充分缓解水分竞争。交叉间作（C）在 0～40 cm 土层的土壤含水率未较常规间作（I）得到显著改善（图 5），因此仅改变行向配置难以有效缓解种间根系的水分竞争。区块内混合间作（Ss）由于局部混作密度较高，难以有效缓解区域内的水分竞争。而区块间作（Sb）虽然在空间上实现了种间分离，但其非连续的区块分布使得边界效应局限于区块边缘，区块中心区域的生境趋于单作化，引发了较强的种内水分竞争，从而限制了系统水分利用效率的提升。

其次，在光能利用方面，空间配置优化主要通过提升紫花苜蓿的光能利用效率（RUE）来驱动间作优势。试验期间 5－8 月为牧草生长旺盛期，种间光竞争激烈，生长势较强的黑麦草对生长势较弱的紫花苜蓿形成遮阴，限制了后者的光能利用[47]。本研究发现，C-bn 模式通过宽窄行配置显著改善了系统内部的光照分布，较常规间作有效削弱了种间光竞争，提升了紫花苜蓿光能利用效率（图 9），这主要由于该模式较高的种间交界面密度有效扩展了紫花苜蓿的有效光截获空间[48]。在该模式中，宽行构建了有效的透光通道，改善了常规间作中郁闭的冠层结构，使原本处于冠层底部的紫花苜蓿叶片能够捕获更多的侧方光照与漫射辐射，缓解了禾本科作物的遮阴影响；窄行通过局部密植补偿宽行空间损失，维持较高的群体光能截获量。这种冠层光环境的优化直接反映在牧草的生理特征上：C-bn 模式下紫花苜蓿叶片保持了较高的 SPAD 值（图 8），展现出更强的光合潜力[49]。相较之下，其他模式由于空间配置的局限未能有效改善间作系统的光环境。常规间作（I）由于缺乏有效的空间调控，难以弥合物种间因生长势不同而导致的光能截获差异，长势占优的黑麦草对冠层底部的紫花苜蓿造成了严重的遮阴，使苜蓿的光能利用效率受损[47]。尽管交叉间作（C）采用了垂直交叉结构，但受限于与常规间作同样的较窄行距，冠层底部光截获率未得到显著改善（图 7），这表明仅改变行向配置无法有效优化系统受光环境，与 Feng 等[38]关于行距配置决定光分布质量的观点相符；而区块间作（Sb）与区块内混合间作（Ss）虽在区块边界存在光照优势，但由于区块内部的密植导致牧草相互遮阴，限制了区块内部受光条件和光能利用效率。

光水资源的协同利用是驱动间作系统高产的基础[50]，空间配置优化通过调节“牧草－土壤－大气”系统中的水热通量与光合代谢过程，直接影响资源的利用效率。研究发现，C-bn 模式通过构建宽窄行交替的空间结构，建立了光能截获与水分利用之间的正向互馈机制，从而实现了水光互促利用。C-bn 模式对冠层光环境的改善不仅提高了光能截获，更通过调控光合产物的分配间接提升了作物的水分获取能力：宽窄行配置带来的高光效促进了光合同化产物的积累，促使更多碳源被输送至地下部根系[51]，促进了根系的生长与形态建成，从而显著增强了牧草对深层土壤水分的吸收能力；同时，良好的冠层通风条件维持了适宜的蒸腾拉力，驱动水分更多地通过生产性蒸腾输送至地上部，有效减少了棵间土壤的无效蒸发损耗[52]。其次，C-bn 模式良好的水分条件协同促进了光能的高效利用。该模式保持了较高的 0～50 cm 土层含水率（图 5）和系统 WUE（图 6），有效缓解了牧草生理干旱，避免了水分亏缺引起的气孔导度受限[53]，保障了光合底物 CO_2 的顺畅供给，使得牧草捕获的光能被高效同化为干物

质,有效缓解了水分胁迫对光合作用的抑制[54]。此外,可推测这种水分优势也与种间根系的生态位互补促进了深层水分的获取有关[50]。常规间作(I)和交叉间作(C)受限于较窄的行距配置,一定程度上限制了水光互促,进一步验证了行距配置对水光利用效率的影响[38]。而区块间作(Sb)和区块内混合间作(Ss)由于区块内部密植程度较高,加剧了种间竞争,降低了资源利用效率。一方面,系统内受光不均导致光合产物合成不足,限制了根系发育与吸水动力,阻碍了水分向光合器官的运输[55];另一方面,0~40 cm土壤含水率未见显著改善(图5),水分亏缺引起气孔关闭和碳同化受阻,两者共同加剧了系统水光利用效率的下降[56]。

本研究的局限性在于未直接测定根系指标,对地下部种间互作机制的分析主要基于土壤水分和地上部生理特征的推论。未来研究应结合根系观测技术,定量解析根系在光水资源利用中的贡献。此外,从农业机械化与产业化应用的角度考量,不同复合种植模式在田间可操作性上存在差异。常规间作(I)、交叉间作(C)与宽窄行交叉间作(C-bn)呈条带状分布,其农艺构型与现行机械化播种及收获作业的兼容度较高;而区块间作(Sb)与区块内混合间作(Ss)因呈区块化布局,难以兼容现行常规农机装备,目前尚不具备规模化生产与直接推广的条件。本研究将Sb和Ss模式纳入试验处理,旨在进一步探究和评估不同空间布局对牧草竞争关系及水光利用效率的具体调控效应。综合试验结果表明,宽窄行交叉间作(C-bn)在提升系统产量及促进水光资源高效协同利用方面优势显著,且具备机械化作业条件。在未来应用中,可结合实际生产需求进一步优化该模式的行距与带幅宽度等农艺参数,为黄土高原半干旱区高效复合种植技术的集成与规模化推广提供参考。

4 结论

本研究表明,宽窄行交叉间作(C-bn)通过优化间作群体空间配置,有效缓解了紫花苜蓿与黑麦草的种间水光资源竞争。该种植模式显著提升了间作系统的水分利用效率与光能利用效率,实现了水光互促与间作系统生产力的提高,是适宜黄土高原半干旱区推广应用的高效复合种植模式。

参考文献 References:

[1] Lin S, Wang Y R. Spatial-temporal evolution of precipitation in China Loess Plateau. Journal of Desert Research, 2007(3): 502-508.
林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变. 中国沙漠, 2007(3): 502-508.

[2] Kang S Z, Hao X M, Du T S, *et al*. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. Agricultural Water Management, 2017, 179: 5-17.

[3] Zhou H L. Response process and mechanism of water use in maize leaves to progressive drought. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2020.
周怀林. 玉米叶片水分利用的干旱响应过程与机制研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2020.

[4] Yu X, Xiao S H, Li S J, *et al*. Review on crop yield and nitrogen utilization in cereal-legume intercropping system. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2601-2609.
俞霞, 肖世豪, 李淑娟, 等. 禾本科-豆科间作模式中作物产量和氮素利用的研究进展. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2601-2609.

[5] Xu H B, Hu J M, Luo G W, *et al*. Intercropping-driven maize yield gain depending on regional environments, planting conditions, and production managements: A global-scale evidence. European Journal of Agronomy, 2025, 168: 127622.

[6] Yang H, Zhou Y, Chen P, *et al*. Effects of nutrient uptake and utilization on yield of maize-legume strip intercropping system. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(6): 1476-1487.
杨欢, 周颖, 陈平, 等. 玉米-豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响. 作物学报, 2022, 48(6): 1476-1487.

[7] Zhou Y, Lambrides C J, Fukai S. Associations between drought resistance, regrowth and quality in a perennial C_4 grass. European Journal of Agronomy, 2015, 65: 1-9.

[8] Li L, Tilman D, Lambers H, *et al*. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. New Phytologist, 2014, 203(1): 63-69.

[9] Zhang H F, Pang G B, Fu Y R, *et al*. Effects of water stress at different growth stages on chlorophyll fluorescence parameters

and yield of grape. Water Saving Irrigation, 2024(7): 1－7.
张海峰, 庞桂斌, 付玉荣, 等. 不同生育期水分胁迫对葡萄叶绿素荧光参数指标和产量的影响. 节水灌溉, 2024(7): 1－7.

[10] Patra S, Parihar C M, Mahala D M, *et al*. Influence of long-term tillage and diversified cropping systems on hydro-physical properties in a sandy loam soil of north-western India. Soil and Tillage Research, 2023, 229: 105655.

[11] Fan Z, Qiang B, Zhang X, *et al*. Optimizing light and nitrogen distribution in maize－soybean intercropping systems to enhance crop yield. European Journal of Agronomy, 2026, 172: 127853.

[12] Zhang F, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. Plant and Soil, 2003, 248: 305－312.

[13] Wu L B, Wang L L, Wang J W, *et al*. Effects of different carbon returning methods on grain yield, quality and water use efficiency of maize in dryland of the Loess Plateau. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(14): 2751－2765.
武凌彬, 王林林, 王江文, 等. 不同增碳方式对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2025, 58(14): 2751－2765.

[14] Cui L, Yang W Y, Huang N, *et al*. Effects of maize plant types on dry matter accumulation characteristics and yield of soybean in maize－soybean intercropping systems. The Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2414－2420.

[15] Wang F, Guo B B, Sun Z G, *et al*. Effects of elevated temperature and CO_2 concentration on growth and yield of maize under intercropping with peanut. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(11): 2220－2231.

[16] Guo H, Hou S, Zhang Y, *et al*. Incorporation alfalfa with annual forage enhances even water use and maintains forage yield resilience in a semiarid region. Agricultural Water Management, 2025, 320: 109838.

[17] Weih M, Karley A J, Newton A C, *et al*. Grain yield stability of cereal-legume intercrops is greater than sole crops in more productive conditions. Agriculture, 2021, 11: 255.

[18] Du G J, Bai W, Cai Q, *et al*. Effects of maize－alfalfa intercropping system on crop yields and productivity. Chinese Journal of Agrometeorology, 2025, 46(3): 398－408.
杜桂娟, 白伟, 蔡倩, 等. 玉米－紫花苜蓿间作模式对作物产量及土地生产力的影响. 中国农业气象, 2025, 46(3): 398－408.

[19] Ren Y Y, Wang Z L, Wang X L, *et al*. The effect and mechanism of intercropping pattern on yield and economic benefit on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4168－4177.
任媛媛, 王志梁, 王小林, 等. 黄土塬区玉米大豆不同间作方式对产量和经济收益的影响及其机制. 生态学报, 2015, 35(12): 4168－4177.

[20] Vander Meer J H. The ecology of intercropping. London: Cambridge University Press, 2012: 176－188.

[21] Li L, Sun J H, Zhang F S, *et al*. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123－137.

[22] Guo X X, Ma Z H, Zhang X Q, *et al*. Effects of different strip intercropping of soybean on soil hydrothermal dynamics and soybean yield. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(12): 175－186.
郭星星, 马子惠, 张向前, 等. 玉豆带状间作模式对土壤水热动态变化及大豆产量的影响. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 175－186.

[23] Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil hydrodynamics. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988.

[24] Wang J X, Hu J Y, Zhang W, *et al*. Effects of different mulching methods on the production of photosynthetic substances and water use efficiency of intercropped maize. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(3): 460－477.
王佳芯, 胡静一, 张巍, 等. 覆膜方式对间作玉米光合物质生产及水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2025, 58(3): 460－477.

[25] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Water. Field Crops Research, 1993, 34: 303－317.

[26] Grigera G, Oesterheld M. Variability of radiation use efficiency in mixed pastures under varying resource availability, defoliation and time scale. Grassland Science, 2021, 67(2): 156－166.

[27] Sun J, Yang G, Zhang W, *et al*. Effects of heterogeneous salinity on growth, water uptake, and tissue ion concentrations of alfalfa. Plant and Soil, 2016, 408(1): 415－429.

[28] Raza M A, Gul H, Wang J, *et al*. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. Journal of Cleaner Production, 2021, 308: 127254.

[29] Wang Y, Zhang Q, Ju M, *et al*. Alfalfa photosynthesis under partial root-zone drying: Diurnal patterns and its non-stomatal limitations. Plants, 2025, 14(11): 1573.

[30] Bedoussac L, Journet E P, Hauggaard-Nielsen H, *et al*. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming: A review. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35: 911-935.

[31] Wedderburn M, Crush J, Pengelly W, *et al*. Root growth patterns of perennial ryegrass under well-watered and drought conditions. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2010, 53(4): 377-388.

[32] Katova A, Marinov-Serafimov P, Golubinova I, *et al*. Can we increase the drought tolerance of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) to preserve grassland ecosystem services? A case study with three Bulgarian varieties. Plants, 2025, 14: 3704.

[33] Wang Y F, Liu H Q, Zhao X N, *et al*. Effects of water and root separation on nitrogen uptake, utilization and transfer in a gramineae-legume intercropping system. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 279-287.
王一帆, 刘华清, 赵西宁, 等. 禾豆间作系统水分和根系分隔对牧草氮素吸收利用及转移的影响. 水土保持学报, 2024, 38(4): 279-287.

[34] Luo F, Liu W, Mi W, *et al*. Legume-grass mixtures increase forage yield by improving soil quality in different ecological regions of the Qinghai-Tibet Plateau. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1280771.

[35] Brooker R W, Maestre F T, Callaway R M, *et al*. Facilitation in plant communities: The past, the present, and the future. Journal of Ecology, 2008, 96: 18-34.

[36] Wang R, Evers J B, Liu Y, *et al*. Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping. Field Crops Research, 2020, 253: 107819.

[37] Cheng B, Wang L, Liu R, *et al*. Shade-tolerant soybean reduces yield loss by regulating its canopy structure and stem characteristics in the maize-soybean strip intercropping system. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 848893.

[38] Feng L, Raza M A, Chen Y, *et al*. Narrow-wide row planting pattern improves the light environment and seed yields of intercrop species in relay intercropping system. PLoS One, 2019, 14(2): e0212885.

[39] Chen P, Du Q, Liu X, *et al*. Effects of reduced nitrogen application rates on yield and nitrogen use efficiency in a maize - soybean relay strip intercropping system. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2021, 184(2): 293-302.

[40] Zhang W P, Liu G C, Sun J H, *et al*. Temporal dynamics of nutrient uptake by neighbouring plant species: Evidence from intercropping. Functional Ecology, 2017, 31(2): 469-479.

[41] Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, *et al*. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N_2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. Field Crops Research, 2009, 113(1): 64-71.

[42] Li Y S, Huang X, Luo J H, *et al*. Effects of different bandwidth and row ratios on yield and nitrogen efficiency of maize/soybean by relay strip intercropping. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(4): 863-871.
李银水, 黄翔, 罗金华, 等. 不同带宽行比对玉米/大豆带状间套作群体产量和氮素效率的影响. 中国油料作物学报, 2024, 46(4): 863-871.

[43] Liang J, He Z, Shi W. Cotton/mung bean intercropping improves crop productivity, water use efficiency, nitrogen uptake, and economic benefits in the arid area of Northwest China. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106277.

[44] Rahman T, Ye L, Liu X, *et al*. Water use efficiency and water distribution response to different planting patterns in maize-soybean relay strip intercropping systems. Experimental Agriculture, 2017, 53(4): 543-561.

[45] Homulle Z, George T S, Karley A J. Root traits with team benefits: Understanding belowground interactions in intercropping systems. Plant and Soil, 2022, 471: 1-26.

[46] Li L, Sun J, Zhang F, *et al*. Root distribution and interactions between intercropped species. Oecologia, 2006, 147(2): 280-290.

[47] Zhou Y Y, Xie Z W, Zhong P G, *et al*. Quantification of row orientation effects on radiation distribution in maize-soybean intercropping based on functional-structural plant model. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(10): 1882-1899.
周也莹, 谢子文, 钟培阁, 等. 基于功能-结构模型的玉米大豆间作不同行向辐射分布研究. 中国农业科学, 2024, 57(10): 1882-1899.

[48] Liu X, Rahman T, Song C, *et al*. Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping. Field Crops Research, 2018, 224: 91-101.

[49] Fan Y, Chen J, Cheng Y, *et al*. Effect of shading and light recovery on the growth, leaf structure, and photosynthetic performance of soybean in a maize-soybean relay-strip intercropping system. PLoS One, 2018, 13(5): e0198159.

[50] Gong X W. Responses of light, water and fertilizer and the mechanism of reducing nitrogen and increasing efficiency in proso millet/mung bean intercropping system. Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

宫香伟. 糜子/绿豆间作模式下糜子群体对光、水、肥资源的响应及减氮增效机制研究. 陕西：西北农林科技大学，2021.

[51] Wang L，Zhou T，Cheng B，*et al*. Variable light condition improves root distribution shallowness and P uptake of soybean in maize/soybean relay strip intercropping system. Plants，2020，9(9)：1204.

[52] Shen L Q，Hu F L，Tuo M W，*et al*. Effects of intercropping belt type and mulching method on yield and water use efficiency in maize－pea systems. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica，2025，34(10)：1781－1790.
申龙强，胡发龙，拓明文，等. 带型及覆盖方式对玉米‖豌豆产量及水分利用效率的影响. 西北农业学报，2025，34(10)：1781－1790.

[53] Yao Z，Yu S M，Wang Q，*et al*. Water physiology and anatomical structure of *Medicago sativa* leaves in response to water stress. Acta Agrestia Sinica，2025，33(3)：823－830.
姚泽，于思敏，王祺，等. 紫花苜蓿叶片水分生理及其解剖结构的水分胁迫响应. 草地学报，2025，33(3)：823－830.

[54] Chen P，Xian G，Pu T，*et al*. Soybean－maize intercropping combined with water management enhances leaf traits to obtain yield benefits in semi-arid regions. Field Crops Research，2025，327：109869.

[55] Wang X C，Yang W Y. Review on relationship of source-sink and crop yield under shading stress in intercropping systems. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2019，41(2)：292－299.
王兴才，杨文钰. 基于间套作弱光胁迫下作物源库协调与产量研究进展. 中国油料作物学报，2019，41(2)：292－299.

[56] Bakhshy J，Zehtab-Salmasi S，Ghassemi-Golezani K，*et al*. The interactive effects of water and shade stresses on field performance of soybean. International Journal of Agronomy and Plant Production，2013，4：2330－2334.