

DOI: 10.11686/cyxb2025283

<http://cyxb.magtech.com.cn>

翟勇全, 马尧, 宋丽华, 等. 黑麦草间作密度对枣-草间作系统生产力、净效益和可持续性的影响. 草业学报, 2026, 35(7): 68—79.

ZHAI Yong-quan, MA Yao, SONG Li-hua, *et al.* Effects of ryegrass intercropping density on the productivity, net benefits, and sustainability of a jujube-grass intercropping system. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 68—79.

黑麦草间作密度对枣-草间作系统生产力、净效益和可持续性的影响

翟勇全^{1,2}, 马尧¹, 宋丽华^{1,2}, 曹兵^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 林木资源高效生产全国重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:为明确牧草间作密度对枣-草间作系统的影响,揭示牧草间作密度在调控系统生产力、资源竞争与互补和可持续性提升中的作用机制,确定西北干旱沙区灵武长枣行间最优间作密度。于2023和2024年在灵武长枣典型种植区设置了枣树单作(J)、黑麦草单作(G)、间作黑麦草 $15.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (J-G15)、间作黑麦草 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (J-G22.5)和间作黑麦草 $30.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (J-G30)5个处理,系统研究了枣-草间作系统中草的种植密度对土地当量比、生产力、竞争效应和可持续性等方面的影响。结果表明:黑麦草间作密度对枣树产量、牧草产量和土地当量比(LER)均有显著影响($P<0.05$),枣树和牧草产量均在J-G22.5处理下最高,相较于J和G处理,J-G22.5处理下2年枣树和牧草产量分别提高了53.69%、29.62%和12.14%、12.26%。枣树和牧草产量年际间差异极显著($P<0.001$),整体上表现为2024高于2023年。所有间作系统LER均大于1,表现出明显的间作优势,且在J-G22.5处理下最大(2.51和2.42)。J-G22.5处理在枣树和牧草增产率、竞争指数、净效应、互补效应和选择效应方面均优于其他处理。主成分和相关性分析表明,产量与净效应、互补效应及竞争指数(CI)呈极显著正相关($P<0.001$)关系,即种间互补和资源协调利用性是间作系统产量提升的关键机制。可持续性分析表明,J-G22.5和J-G30处理的可持续性指数均高于J-G15,且CI和选择效应(SE)为主要权重因子。综合考量认为,间作黑麦草 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 是西北干旱沙区灵武长枣行间最优间作密度。

关键词:枣-草间作系统;草间作密度;产量;生产力;可持续性

Effects of ryegrass intercropping density on the productivity, net benefits, and sustainability of a jujube-grass intercropping system

ZHAI Yong-quan^{1,2}, MA Yao¹, SONG Li-hua^{1,2}, CAO Bing^{1,2*}

1. School of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. National Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Yinchuan 750021, China

Abstract: The aims of this study were to clarify the effects of grass intercropping density in a jujube (*Zizyphus jujuba*)—grass intercropping system, and to elucidate the mechanisms by which grass intercropping density regulates system productivity, resource competition and complementarity, and sustainability. We aimed to determine the optimal between-row intercropping density of ryegrass (*Lolium perenne*) in a Lingwu Changzao jujube orchard located in the arid, sandy region of northwestern China. Field experiments were conducted in 2023 and 2024 in a representative Lingwu Changzao orchard. The experiment had five treatments: jujube monoculture (J), ryegrass monoculture

收稿日期:2025-07-08;改回日期:2025-09-09

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划课题(2023BEG02039)资助。

作者简介:翟勇全(1995—),男,河南上蔡人,在读博士。E-mail: zyq6692@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: bingcao2006@162.com

(G), and intercropping with ryegrass sown at $15.0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (J-G15), $22.5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (J-G22.5), and $30.0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (J-G30). The impact of ryegrass sowing density in the intercropped strip on the land equivalent ratio (LER), productivity, and competitive interactions and sustainability of the jujube—grass intercropping system was evaluated. The results show that the density of ryegrass intercropping significantly affected jujube and grass yields, as well as LER ($P < 0.05$). The yields of both jujube and grass were highest in the J-G22.5 treatment, with the 2-year jujube yields increased by 53.69% and 29.62%, while grass yields increased by 12.14% and 12.26%, respectively, compared with those in J and G. There were highly significant interannual differences in the yields of both jujube and grass ($P < 0.001$), with higher overall values in 2024 than in 2023. All intercropping treatments had a LER of > 1 , demonstrating a clear intercropping advantage. The maximum values of LER (2.51 and 2.42) were in the J-G22.5 treatment. This treatment also outperformed the others in terms of yield increase rate, competitive index (CI), net effect, complementarity effect, and selection effect. Principal component and correlation analyses indicated that yield was strongly and positively correlated with net effect, complementarity effect, and CI ($P < 0.001$). This suggests that interspecific complementarity and coordinated resource use are key mechanisms underlying yield gains in this intercropping system. The sustainability analysis showed that the J-G22.5 and J-G30 treatments were more sustainable than the J-G15 treatment, with CI and the selection effect being the primary weighting factors. Overall, integrating productivity, competition, complementarity, and sustainability, $22.5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ is recommended as the optimal between-row sowing density for intercropped ryegrass in Lingwu Changzao jujube orchards in the arid sandy region of northwest China.

Key words: jujube—grass intercropping system; grass intercropping densities; yield; productivity; sustainability

随着人们膳食结构水平的变化和对畜产品的需求量日益增加,畜牧业得到快速的发展,同时也加大了牧草资源承载压力和牧草需求缺口,如何实现牧草的有效供给已成为制约草畜产业高效发展的重要因素^[1–2]。宁夏地处中国西北内陆,是典型的农牧交错区,草食畜牧业在宁夏地区农业结构中占据着重要的地位^[3]。近年来随着“粮改饲”和退耕还林还草等政策的深入推进,宁夏草食畜牧产业得到了快速的发展,草食畜禽保有量持续上升^[4–5]。据宁夏奶产业、肉牛和滩羊产业高质量发展“十四五”规划^[5]显示,到2025年,宁夏全区奶牛存栏量将达到100万头,肉牛和滩羊饲养量分别达260万头和1750万只,为保障该发展目标的实现,至少需保障2295万t优质饲草的供应^[5–6]。但是,在当下可利用耕地资源紧缺、牧草增产潜力受限的背景下,单一化的牧草种植模式显然已无法满足畜牧业发展对饲草的刚性需求^[7–8]。为此,探索高效复合种植模式,充分发掘土地潜力,实现“粮—草—畜”产业协调发展,是缓解饲草供需矛盾、推动农业高质量发展和实现区域生态可持续的重要措施^[9–10]。

林草间作作为一种典型的生态种植模式,在提高资源利用率、优化农业系统种植结构、促进种养融合和提高林地综合效益方面具有重要作用,逐渐成为当下研究的热点问题^[11–12]。灵武长枣(*Zizyphus jujube* ‘Lingwu Changzao’)是宁夏地区特色经济林品种,在宁夏干旱沙区广泛种植,具有较高的经济价值和生态效益。传统的灵武长枣采用清耕的种植管理模式,行间留有大量空地,林下空间资源未得到有效利用^[13–14]。王晓佳^[13]和Wang等^[15]研究发现,在灵武长枣行间间作牧草不仅能够改善土壤理化性状、促进枣树生长发育和增强土壤保水保肥能力,还能增加优质牧草的产出,为当地畜牧业发展提供稳定的饲草来源,实现生态效应和经济价值的双重收益,其中以灵武长枣和多年生黑麦草(*Lolium perenne*)间作模式最优。然而,林草间作系统是一个复杂的生态系统,具有较高的环境异质性,受土壤质地、间作牧草类型与密度及生长环境等因素的影响^[4,16–18]。当前关于林草间作对土壤养分^[19]、微生物活性^[14]、系统生产力^[16]和品质^[18]等方面的影响已有诸多研究,而对间作密度这一关键调控因子的系统性研究尚不充分。间作密度是制约间作系统生产力的重要因子^[20–21],适宜的间作密度在减少系统间竞争效应,提高间作系统生物产量和土地利用效率,促进枣—草间作系统可持续发展方面有重要影响。基于此,本研究于2023和2024年在宁夏灵武长枣典型种植区开展枣草间作田间研究,旨在探究牧草间作密度对枣—草间作产量和生产力的影响,明确枣—草间作系统中的互补效应及可持续性,以期为西北干旱沙区林草复合经营提供理

论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于2023—2024年在宁夏灵武市银湖农林牧科技开发有限公司灵武长枣生产基地(106°23' E, 37°53' N; 海拔1180 m)开展。该地区属典型的大陆性季风气候, 年平均气温8.9℃, 年均降水量192.9 mm, 年均日照时数3011.0 h, 年均蒸发量1762.9 mm。试验点气象数据由自动气象站(RS-QXZM-M1, 山东, 中国)获取, 2023和2024年试验开展期间降水量分别为105.6和249.8 mm。按照干旱系数法划分降水年型^[22], 2023年为典型枯水年, 2024年为典型丰水年。试验开展期间日平均气温和日降水量如图1所示。

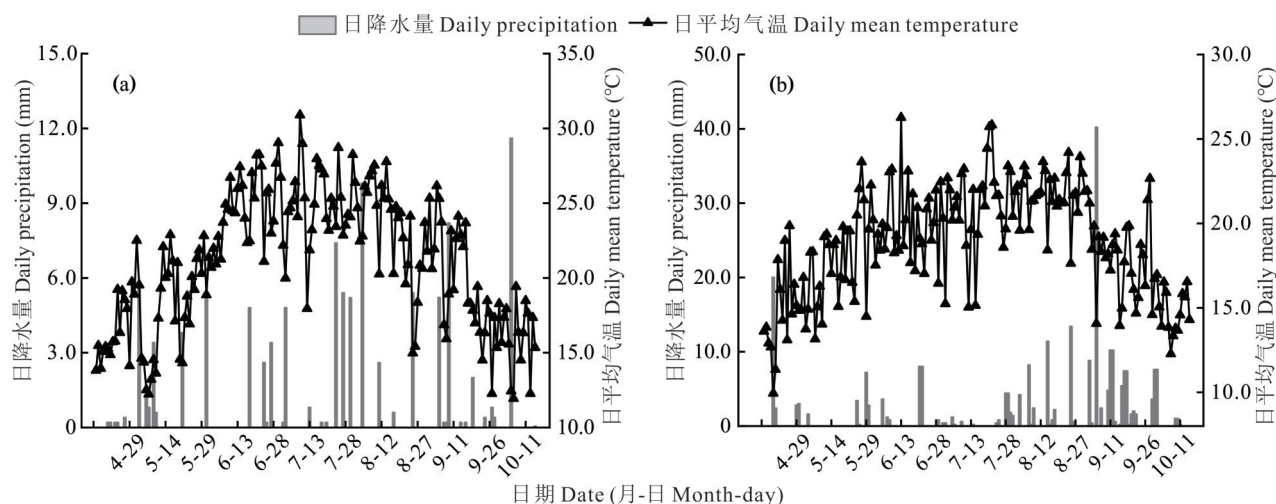


图1 2023(a)和2024(b)年试验开展期间日平均气温和日降水量

Fig.1 Daily mean temperature and precipitation during the experimental period in 2023 (a) and 2024 (b)

供试枣树品种为灵武长枣, 枣树树龄15年, 种植株距为2 m, 行距为6 m。试验点土壤类型为砂土, 0~20 cm 土层土壤容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、pH为8.45、速效氮含量为 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量为 $20.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量为 $76.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质含量为 $4.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试牧草品种为黑麦草, 购买自宁夏丰绿农林有限公司, 净度为98%, 发芽率为85%。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组试验设计, 共设置2种单作系统和3种间作系统, 分别为枣树单作(J)、黑麦草单作(G)、枣树与 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 黑麦草间作(J-G15)、枣树与 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 黑麦草间作(J-G22.5)和枣树与 $30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 黑麦草间作(J-G30), 每个处理3次重复, 共15个小区, 小区面积为 30 m^2 , 每个小区包括9株枣树, 具体田间布局图参考Ma等^[14]试验设计。牧草单作播种密度为 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 布设在距离枣园5 m、与枣园土壤条件一致的地块。牧草于2023年4月9日播种, 播种前用旋耕机深翻和耙地方式清除杂草, 牧草采用条播方式进行播种, 播种行距30 cm, 播深2~3 cm, 所有间作处理的播种方式与单作一致。牧草分别在2023年6月28日和8月24日, 2024年6月29日和8月23日进行刈割。枣树单作区定期人工除草, 保持清耕状态。各处理小区之间除种植模式存在差异外, 其余田间管理(施肥、灌溉等)均保持一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量和土地生产力的测定 分别在枣果成熟期和牧草抽穗期进行, 每个处理选取2棵枣树, 分批次摘取成熟果实, 称重后用于计算每 hm^2 产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。牧草则是记录每次刈割后的鲜草产量, 然后计算每 hm^2 产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。间作土地生产力采用土地当量比(land equivalent ratio, LER)进行评估^[21]。

1.3.2 间作系统增产率和竞争指数计算 间作系统中枣树和牧草的增产率(overyielding rate, OY)和竞争指

数(competition index, CI)计算公式如下^[13]:

$$OY(\%) = \frac{Y_i - Y_m \times P}{Y_m \times P} \times 100$$

$$CI = \frac{Y_{ji}}{Y_{jm} \times P_j} - \frac{Y_{Gi}}{Y_{Gm} \times P_G}$$

式中: Y_i 和 Y_m 分别表示间作产量和单作产量, P 表示枣树或者牧草在间作系统的土地占比, P_j 和 P_G 分别表示枣树和牧草在间作系统的土地占比, 在本研究中枣树占比为 0.5, 牧草占比为 0.5。 Y_{ji} 、 Y_{jm} 、 Y_{Gi} 、 Y_{Gm} 分别表示间作枣树产量、单作枣树产量、间作牧草产量和单作牧草产量。 $CI > 0$ 则说明枣树的竞争力强过黑麦草。

1.3.3 间作系统净效应、互补效应和选择效应计算 间作系统中净效应(net effect, NE)、互补效应(complementary effect, CE)和选择效应(selectivity effect, SE)计算公式如下^[23]:

$$SE(t \cdot \text{hm}^{-2}) = NE - CE$$

$$NE(t \cdot \text{hm}^{-2}) = (Y_{ji} + Y_{Gi}) - (Y_{jm} \times P_j + Y_{Gm} \times P_G)$$

$$CE(t \cdot \text{hm}^{-2}) = \left[\left(\frac{Y_{ji}}{Y_{jm}} + \frac{Y_{Gi}}{Y_{Gm}} \right) - 1 \right] \times \left(\frac{Y_{jm} + Y_{Gm}}{2} \right)$$

1.3.4 可持续性指数 参考 Wang 等^[24]研究中的方法, 依据 1.3.1、1.3.2 和 1.3.3 计算得到的产量、增产率、LER、竞争指数和净效应、互补效应以及选择效应等 13 个指标, 基于以下公式计算间作系统可持续性指数(sustainability index, SI):

$$SI = \sum_{t=1}^m \left(AX_{tv} \times \frac{BX_{tv}}{\sum_{t=1}^m BX_{tv}} \right) \begin{pmatrix} t=1, 2, 3 \\ v=1, 2, 3, \dots, 13 \end{pmatrix}$$

$$A_{xt} = \frac{X_{tv}}{X_{vmax}}$$

$$B_{tv} = \frac{1}{A_t X_{tv}} \times \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (A_1 X_{tv} - A_2 X_{tv})^2} \begin{pmatrix} t=1, 2, 3 \\ v=1, 2, 3, \dots, 13 \end{pmatrix}$$

式中: A_{xt} 表示第 t 个处理第 v 个变量的标准值, B_{tv} 表示第 t 个处理第 v 个变量的变异系数, X_{tv} 表示第 t 个处理第 v 个变量的数值, X_{vmax} 表示第 t 个处理第 v 个变量的最大值, m 表示每个处理的最大值。 $A_t X_{tv}$ 表示第 X 指标的标准值的平均值, BX_{tv} 表示第 X 指标的变异系数, AX_{tv} 表示第 X 指标的标准值。 $A_1 X_{tv}$ 、 $A_2 X_{tv}$ 分别表示第 X 指标第 t 个处理第 v 个变量的标准值, 也就是任意 2 个变量的标准值, 即代表任意两个标准值。

1.4 数据处理与统计分析

利用 Microsoft Excel 2023 进行数据整理, 利用 IBM SPSS Statistic 26 进行处理间单因素方差分析, 处理间多重比较采用 LSD 法, 利用 Math Type 7 进行数学公式编辑, 利用 Origin 2025 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同密度黑麦草间作对产量和土地当量比的影响

如表 1 所示, 枣树产量在两个试验年度均以 J-G22.5 最高, 且不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 相较于 J 处理, J-G22.5 处理下 2 年产量增幅分别为 53.69% 和 29.62%。其中, 2023 年 J-G30 与 J 处理间差异不显著 ($P > 0.05$), 但 2024 年 J-G30 产量显著高于 J ($P < 0.05$)。牧草产量表现为 J-G22.5 > G > J-G30 > J-G15, 且 J-G22.5 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 相较于 G, J-G22.5 处理下 2 年产量增幅分别为 12.14% 和 12.26%, 而 G、J-G30 与 J-G15 之间差异不显著 ($P > 0.05$)。此外, 枣树与牧草产量在年份间存在极显著差异 ($P < 0.001$), 2024 年总体高于 2023 年。3 种间作系统的 LER 均大于 1, 且以 J-G22.5 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 其次为 J-G15 和 J-G30。2 年平均 LER: J-G22.5 为 2.47, J-G15 为 2.21, J-G30 为 2.04, 其中 J-G22.5 比 J-G30 提高了 21.08%, 比 J-G15 提高了 11.76%。此外 LER_j 和 LER_G 均随间作密度增加先升后降, 且两者数值均大于 0.8。

表1 黑麦草间作密度对枣树产量、牧草产量和土地当量比的影响

Table 1 Effects of ryegrass intercropping density on jujube yield, grass yield, and land equivalent ratio

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)		牧草部分土地当量比 Land equivalent ratio for grass (LER_G)	枣树部分土地当量比 Land equivalent ratio for jujube (LER_J)	土地当量比 Land equivalent ratio (LER)
		枣树 Jujube	牧草 Forage			
2023	J	7.45±0.30c	—	—	—	—
	G	—	7.25±0.19b	—	—	—
	J-G15	9.44±0.25b	6.98±0.27b	0.96±0.05b	1.27±0.06b	2.23±0.07b
	J-G22.5	11.45±0.23a	8.13±0.23a	1.12±0.04a	1.53±0.07a	2.51±0.05a
	J-G30	7.08±0.17c	7.19±0.22b	0.99±0.03b	0.95±0.05c	1.95±0.07c
2024	J	24.98±0.14d	—	—	—	—
	G	—	7.83±0.18b	—	—	—
	J-G15	30.54±0.23b	7.54±0.17b	0.96±0.04b	1.22±0.02b	2.19±0.05b
	J-G22.5	32.38±0.20a	8.79±0.13a	1.12±0.03a	1.29±0.01a	2.42±0.03a
	J-G30	28.49±0.23c	7.77±0.13b	0.99±0.03b	1.14±0.01c	2.13±0.04b
年份 Year (Y)		82394.62***	91.14***	4.28**	0.00ns	2.74ns
密度 Density (D)		1253.91***	72.45***	177.40***	48.52***	222.07***
Y×D		166.32***	0.13ns	59.90***	0.00ns	39.78***

J: 枣树单作 Jujube monoculture; G: 牧草单作 Forage monoculture. J-G15、J-G22.5 和 J-G30 分别表示黑麦草间作密度为 15.0、22.5 和 30.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同列不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。J-G15、J-G22.5 和 J-G30 represent ryegrass intercropping densities of 15.0, 22.5 and 30.0 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among the different treatments in the same year ($P < 0.05$). **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: 无显著性差异 Not significant difference.

2.2 不同密度黑麦草间作下的增产率和竞争指数(CI)

由图2可知,不同密度黑麦草间作系统下,枣树和牧草增产率均大于0,其中J-G22.5处理下的枣树和牧草增产率显著高于J-G15和J-G30 ($P < 0.05$)。牧草增产率在密度处理间差异极显著 ($P < 0.001$),但在年份及其与密度的交互作用下差异不显著 ($P > 0.05$),而枣树增产率差异性仅在年际间不显著。CI受间作密度的显著影响,2023年依次为J-G22.5>J-G15>J-G30,2024年为J-G15>J-G22.5>J-G30,除2023年J-G30处理为负值外,其余处理均为正,且总体表现为2023年大于2024年。

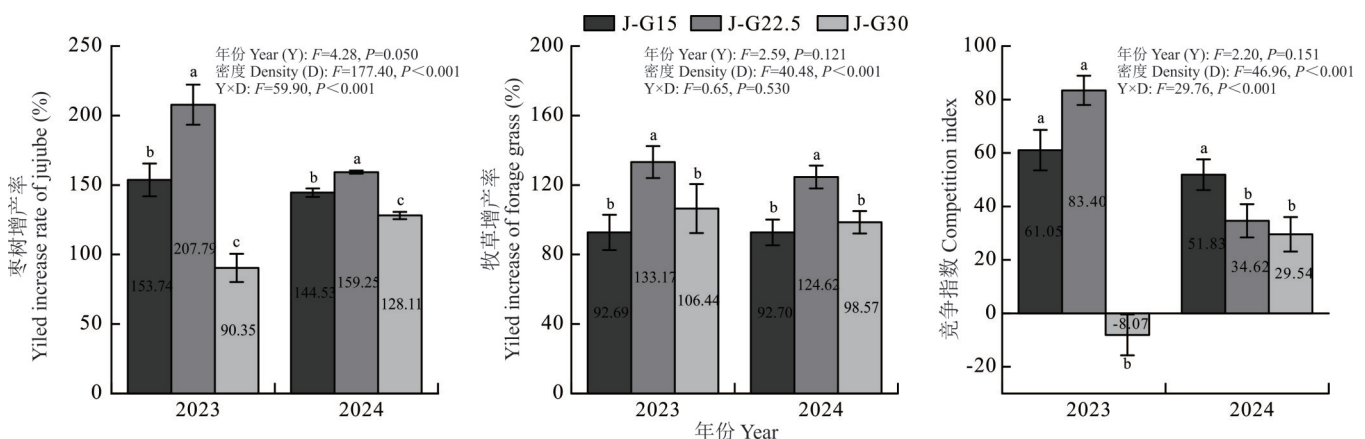


图2 黑麦草间作密度对枣树和牧草增产率及竞争指数的影响

Fig. 2 Effects of ryegrass intercropping density on yield increase rate and competitive index of jujube and grass

不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上存在显著性差异,下同。Different lowercase letters mean significantly different among the different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.3 不同密度黑麦草间作下的净效应(NE)、互补效应(CE)和选择效应(SE)

由图 3 可知,种植密度和年份对 NE、CE 和 SE 有极显著性影响($P < 0.001$),两者交互作用对 SE 和 CE 有极显著($P < 0.001$)或显著($P < 0.05$)影响,而对 NE 无显著影响($P > 0.05$)。随着黑麦草间作密度的增加,NE 和 CE 均呈先升后降趋势,在 J-G22.5 最高。与 J-G15 处理相比,2023 年 J-G22.5 处理下 NE 和 CE 分别提升 34.84% 和 76.73%,2024 年分别提升 14.26%、24.73%。与 J-G30 处理相比,2023 年 J-G22.5 处理下 NE 和 CE 分别提升 32.82% 和 76.05%,2024 年分别提升 19.69% 和 25.23%。SE 在两年间表现差异,2023 年在 J-G22.5 处理下最高,为 $0.027 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;2024 年在 J-G15 处理下最高,为 $2.220 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2024 年各密度处理下的 NE、CE 和 SE 均高于 2023 年。

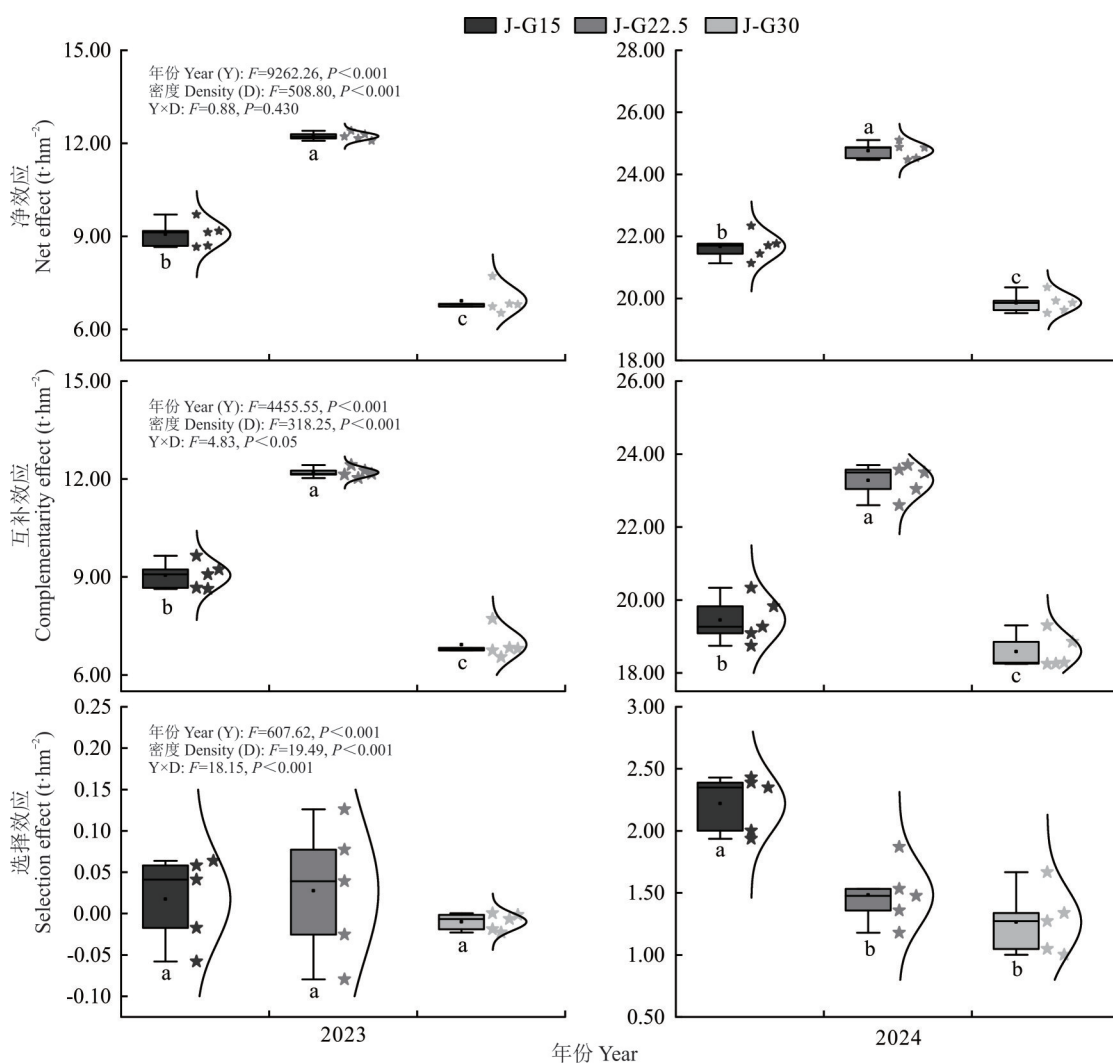


图 3 不同密度黑麦草间作系统下的净效应、互补效应和选择效应

Fig. 3 Net effect, complementarity effect, and selection effect under different ryegrass intercropping densities

2.4 竞争指数(CI)、净效应(NE)、互补效应(CE)和选择效应(SE)与产量和土地利用效率间的关联解析

由图 4 可知,在产量方面, Y 和 Y_G 与 NE、CE 和 SE 间有极显著正相关关系($P < 0.001$), Y_I 与 NE 和 CE 间有极显著正相关关系($P < 0.001$),与 SE 间无显著正相关关系($P > 0.001$)。OY_I除了与 CI 间有极显著性正相关关系外,与 NE、CE 和 SE 间均无显著相关性,而 OY_G与 NE、CE、SE 和 CI 间均无显著相关性。在土地利用效率方面,仅有 LER 和 LER_I 与 CI 间表现出极显著正相关关系。

由图 5 可知,前两个主成分(PC1 和 PC2)分别解释了间作总产量(图 5a)和土地利用效率(图 5b)总变异的

85.0%和85.5%。NE、CE、SE、Y、 Y_J 、 OY_J 和 OY_G 呈明显聚集,主要分布于PC1正方向。其中,J-G22.5处理样本主要分布于右上象限,与上述正效应变量方向一致,J-G15和J-G30样本多集中于PC1负方向,相关变量表现较弱。 LER 、 LER_G 和 LER_J 主要集中于PC1轴正方向,且与NE、CE、SE分布方向一致。同时,J-G22.5处理样本分布靠近 LER 相关向量,进一步验证其在系统资源利用和群落优势方面的协同作用更强。

2.5 可持续性分析

由图6a可知,在研究开展的两年中,J-G22.5与J-G30间作系统的可持续性指数均优于J-G15,2年间可持续性指数分别平均提升了33.87%和37.61%,表明J-G22.5与J-G30间作系统更有利于产量的稳定和可持续。由图6b可知,CI在J-G30间作系统中占有较高的权重值,SE在J-G15间作系统中占有较高的权重值,说明这两个参数是影响枣—草间作系统中产量稳定和可持续的重要因子。

3 讨论

3.1 合理的黑麦草间作密度可显著提高枣—草间作系统产量和土地生产力

作物产量不仅受到自身遗传特性和生态环境的影响,还受制于种植模式和田间管理措施的调控作用^[25-26]。研究表明,间作是提高资源利用率和系统产量的有效策略^[26-27],本研究结果对此结论予以验证。本研究发现,不同密度黑麦草间作均能提高枣树产量,相较单作(J)表现出明显优势。这是由于黑麦草具有极高的适应性,可快速覆盖土壤表面,有效减缓地表土壤侵蚀和降低土壤无效蒸发,起到保水保肥的作用^[28-29]。同时黑麦草发达的根系还能改善土壤微环境和结构,促进根际微生物的生长繁育,提高养分循环和资源的利用率^[29-30],为枣树生长营造适宜的环境,有利于产量的形成。同时整体来看,枣树和牧草产量均随间作密度增加呈现“先升后降”的趋势,产量在J-G22.5处理下达到最大值,这一结果印证了生态学中的“中等干扰假说”,与高超等^[31]的研究结果相一致。

土地当量比(LER)是衡量间作系统资源利用效率的重要指标,可用于评价复合种植方式下的土地利用效率,LER值大于1表明间作优于单作^[15,24]。本研究结果表明,3种间作系统的LER均大于1(表1),依次为J-G22.5>J-G15>J-G30,同时 LER_J 和 LER_G 也表现出先升后降趋势,进一步说明适宜的间作密度有助于枣—草系统产量的提升,而密度过高则会因种间竞争加剧而抑制这一效应^[32]。这是由于在高密度黑麦草间作下,黑麦草根系密集分布,将消耗更多的水肥资源,并迅速占据林下土壤空间,与枣树在垂直和水平空间上产生激烈的竞争,进而限制枣树对氮、磷、钾等关键营养元素的吸收^[33-34]。同时枣树为了应对资源压力会将更多的光合产物投入根系生长、信号传导和叶片生长等生理活动中,导致叶片徒长和林下遮荫加剧等,进而抑制牧草光合作用^[35-36]。此外,高密度牧草影响下,枣树的养分吸收能力虽增强,但吸收的营养物质主要用于维持抗氧化系统和根系代谢,而非果实等经济产量器官,难以转化为经济产出,导致枣树出现“营养生长旺盛、结果能力下降”的现象,从而导致系统生产力下降^[37-38]。

产量形成不仅受间作密度影响,还受到年际降水等气候因子的显著调节^[14,26]。本研究发现,虽然各间作处理均不同程度提高了枣树和牧草的产量,但在不同年份间差异极显著($P<0.001$),2024年产量高于2023年。其主

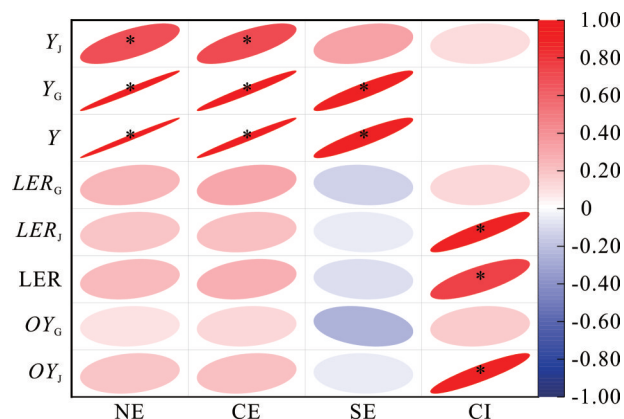


图4 竞争指数、净效应、互补效应和选择效应与产量和土地当量比间的相关关系

Fig. 4 Correlation among competition index, net effect, complementarity effect and selection effect with yield and land equivalent ratio

*: $P<0.001$. NE: 净效应 Net effect; CE: 互补效应 Complementarity effect; SE: 选择效应 Selection effect; CI: 竞争指数 Competition index; OY_J : 间作枣树增产率 Yiled increase rate of jujube under intercropping; OY_G : 间作牧草增产率 Yiled increase rate of grass under intercropping; LER: 土地当量比 Land equivalent ratio; LER_J : 间作枣树部分土地当量比 Partial LER of jujube; LER_G : 间作牧草部分土地当量比 Partial LER of grass; Y: 系统产量 System yield; Y_J : 间作枣树产量 Jujube yield under intercropping; Y_G : 间作牧草产量 Grass yield under intercropping. 下同 The same below.

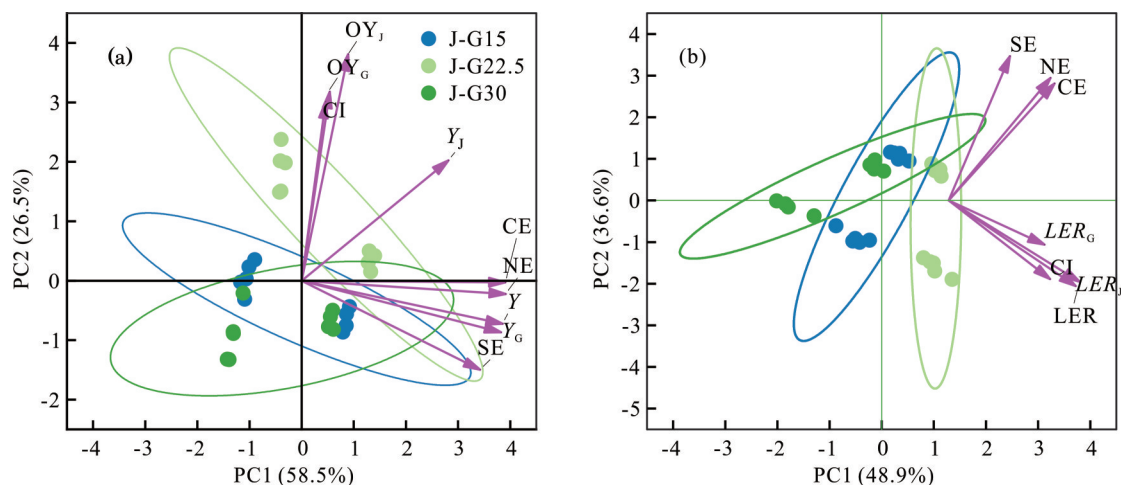


图5 竞争指数、净效应、互补效应和选择效应与产量(a)和土地当量比(b)间的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of the relationships among competitive index, net effect, complementarity effect, selection effect and yield (a) and land equivalent ratio (b)

图中椭圆表示 95% 置信水平 Ellipses in the figure represent the 95% confidence level.

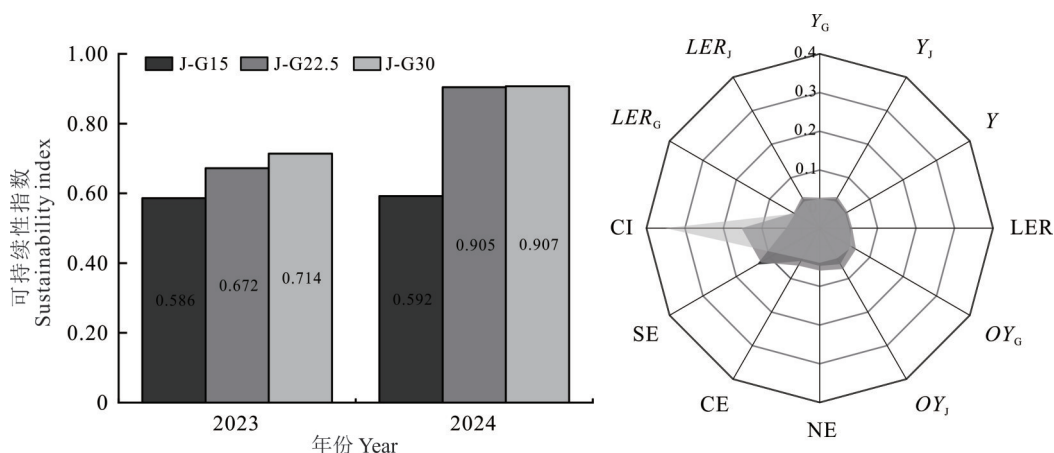


图6 不同密度黑麦草间作处理下的可持续性指数和权重值

Fig. 6 Sustainability index and indicator weights under different ryegrass intercropping treatments

要原因在于:一方面 2023 年为典型干旱年份,生长季降水量仅为 105.6 mm,2024 年则为丰水年,降水量达 249.8 mm,降水的增加有效缓解了水分胁迫,有利于枣树和黑麦草的生长发育和产量的形成。另一方面,2023 年枣树开花坐果期出现了连续高温干旱天气,导致花粉活力和授粉成功率下降,出现严重的生理性落果现象,是 2023 年枣树产量显著下降的主要原因之一^[39]。

3.2 合理的黑麦草间作密度可优化种间资源利用和提高生态互补机制

在间作系统中,不同物种之间在一定程度上存在对生存空间、光照和土壤养分等资源需求的竞争,这种竞争效应会影响枣树和牧草在间作系统中的作用与地位,进而对间作系统资源利用效率和稳定性产生影响^[15-16]。间作系统中的净效应(NE)与竞争指数(CI)是评估作物间资源利用效率与竞争—互补动态关系的重要指标,能够揭示间作系统产量提升的机制^[15,24]。CI 用于衡量间作作物间在水分、光照、养分等资源获取上的相对竞争力与抑制关系,反映系统内优势种与劣势种之间的资源分配格局^[40]。本研究表明,CI 受黑麦草间作密度影响显著,2023 年表现为 J-G22.5 > J-G15 > J-G30,2024 年为 J-G15 > J-G22.5 > J-G30,两年间仅 2023 年 J-G30 处理下 CI 值小于 0 (图 2),表明该处理下枣树在资源竞争中处于相对劣势。整体来看,间作系统中枣树多数占据竞争优势,可能与枣树和黑麦草根系分布差异有关。相对而言,枣树属于深根性植物,其主根可深入地下 1.5~2.0 m 甚至更深,水

平根系可延伸到树冠外 2 m 左右,具有较强的水分和养分获取和贮藏的能力^[13-14]。黑麦草为浅根性植物,根系主要分布在 0~40 cm 土层,更容易受到干旱的影响^[34]。总体来看,2023 年 CI 普遍低于 2024 年,这主要与 2023 年枣树开花坐果期遭遇连续高温干旱天气有关。

此外,在间作系统中,当种内资源竞争强于种间竞争时,作物之间能通过资源互补而共存,从而提高群落稳定性和系统生产力。物种间的竞争作用除了与自身特性相关外,还与间作密度密切相关^[28,34]。NE 作为衡量间作系统整体产出优势的重要指标,综合反映了系统内作物互作带来的产量增益,NE 值越大表明间作优势越显著^[24]。本研究发现,J-G15、J-G22.5 和 J-G30 间作系统下的 NE 均大于 0(图 3),这说明枣—草间作系统具有更强的生产优势。间作系统中净效应的提升机制可进一步分解为互补效应(CE)与选择效应(SE)。CE 强调物种间通过资源时空分异、功能互补等实现协同增产,而 SE 则体现优势物种在系统中主导产量贡献的能力^[23,41]。本研究表明,J-G22.5 间作处理下 NE、CE 与 SE 均较高(图 3),说明该密度组合既实现了物种间资源的有效互补,又保留了优势物种的高产特性,从而形成“互补+选择”协同驱动的增产机制^[24,41]。尽管 J-G15 间作系统下 SE 值较高,但其 CE 与 NE 较低,表明该间作系统虽然存在一定的优势种拉动作用,但在资源互补性方面存在不足,整体资源利用效率不高,从而限制了系统产量的提升(图 3)。J-G30 处理下 NE、CE 和 SE 均为最低值,表明该高密度间作系统中资源竞争显著,存在养分与光照的无效消耗,互补性和选择性优势均未能有效发挥,系统整体表现不佳。同时主成分分析(PCA)及相关性分析进一步表明,系统产量与 NE、CE 及 CI 呈极显著正相关关系(图 4 和图 5),说明间作产量提升更依赖于种间互补效应,而非单一优势种的选择效应。这一结果与 Wang 等^[15]和 Wang 等^[24]研究结果高度一致。

3.3 合理的黑麦草间作密度有利于间作系统的可持续性发展

间作系统中物种间的竞争效应和互补效应会对间作系统的可持续性产生影响,而单一指标评价往往难以全面反映系统性能。因此,采用多因素加权标准化分析方法被认为是综合评估间作系统可持续性的重要手段之一^[24,42]。本研究整合了产量、土地当量比、净效益、选择效应、竞争指数等 12 个系统功能性指标,构建了间作系统的可持续性指数(SI),从产出能力、资源协调性和系统稳定性 3 个维度综合评价不同间作密度处理下的可持续性表现。结果表明,J-G22.5 和 J-G30 处理的可持续性指数均优于 J-G15,两年平均分别提升了 33.87% 和 37.61%,说明适宜的间作密度更有利于系统产量的稳定性与可持续性。变量权重分析显示,在 J-G30 处理中,CI 权重最大,说明该系统中存在较强的种间负向作用,长期持续可能对枣树生态健康带来潜在风险^[38,43];而在 J-G15 处理中,SE 权重较高,说明该间作系统对优势物种枣树的依赖性增强,可能导致系统整体稳定性和抗逆性下降^[38,43]。因此,合理调控牧草密度是提升枣—草间作系统可持续发展的关键策略。然而,由于研究区气候波动显著,两年间降水量差异较大,可能会干扰不同密度处理对系统结构与生态服务功能的长期影响评估^[15,42]。因此,未来有必要开展长期定位试验,进一步明确不同间作密度下系统的年际响应规律,以增强研究结果的稳健性与应用指导价值。

4 结论

不同密度黑麦草间作对枣—草系统间资源竞争、互补效应及系统可持续性产生显著影响。J-G22.5 处理($22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为最优间作模式,该处理下枣树与牧草产量达最高水平,土地当量比(LER)大于 1,具有显著的间作优势与更高的资源利用效率;主成分与相关性分析结果显示,净效应、互补效应和竞争指数是产量提升的重要驱动力,这表明间作优势主要源于种间互补和资源高效协调利用。可持续性分析结果进一步指出,J-G22.5 与 J-G30 的表现优于 J-G15,且 CI 和 SE 是关键因子,综合考虑产量、LER 与可持续性,J-G22.5 更具优势。综上,在西北干旱沙区灵武长枣行间间作 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 黑麦草,是实现枣草协同增产和资源高效利用的最优间作密度。

参考文献 References:

- [1] Jin J B, Wang T, Cheng Y F, *et al.* Current situation and prospect of forage breeding in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(6): 660—665.

- 金京波, 王台, 程佑发, 等. 我国牧草育种现状与展望. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 660—665.
- [2] Oldoni H, Magalhaes G S P, Oliveira G L A, *et al.* Management zones delineation: a proposal to overcome the crop-pasture rotation challenge. *Precision Agriculture*, 2025, 26: 21.
- [3] Feng Q, He X L, Wang B, *et al.* A study of mixed sowing effects for oat and common vetch in the Ningxia Yellow River Irrigation Area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 107—119.
- 冯琴, 何小莉, 王斌, 等. 宁夏引黄灌区燕麦与箭筈豌豆的混播效果研究. 草业学报, 2024, 33(3): 107—119.
- [4] Xie J, Liu X Q, Luo M X, *et al.* Ethnobotanical study of traditional forage plants in the Gansu-Ningxia-Inner Mongolia junction zone: conservation and sustainable utilization for animal husbandry. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2023, 19: DOI: 10.1186/s13002-023-00625-0.
- [5] Zhang C, Wang Y, Zhou L H, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics and driving factors of livestock feeding structure: A case study in Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(8): 37—49.
- 张聪, 王娅, 周立华, 等. 牲畜饲养结构的时空分布特征及驱动因素——以宁夏为例. 草业学报, 2024, 33(8): 37—49.
- [6] Wang W, Zhou L. Current situation, problems and countermeasures of the grass-livestock industry chain development in Ningxia. *Ningxia Social Sciences*, 2017(Supple1): 144—149.
- 王微, 周蕾. 宁夏草畜产业链发展现状、存在问题及对策. 宁夏社会科学, 2017(增刊1): 144—149.
- [7] Chen H X. Study on evaluation of forage planting benefits in Ningxia under background of food security. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(3): 196—202.
- 陈红翔. 粮食安全背景下的宁夏牧草种植效益评价研究. 江西农业学报, 2023, 35(3): 196—202.
- [8] Guo T, Xue B, Zhou Y M, *et al.* Current status and enlightenment of production and trade of forage product in China. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 8—14.
- 郭婷, 薛彪, 周艳明, 等. 我国牧草产品生产、贸易现状及启示. 草地学报, 2019, 27(1): 8—14.
- [9] Song X L, Mi N, Mi W B, *et al.* Spatial non-stationary characteristics between grass yield and its influencing factors in the Ningxia temperate grasslands based on a mixed geographically weighted regression model. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(6): 1076—1102.
- [10] Ni Y F. Study on forage production efficiency and its influencing factors in China. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- 倪印锋. 中国牧草生产效率及其影响因素研究. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [11] Zhou F M, Su P H. Distribution variation of aboveground biomass and competitive intensity of *Lycium barbarum-Medicago sativa* intercropping. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 53—58, 66.
- 周孚明, 苏鹏海. 枸杞—苜蓿间作地上生物量分布变异及其竞争强度. 水土保持通报, 2022, 42(2): 53—58, 66.
- [12] Krüger M A, Lima T M D P, Ovan V, *et al.* Ruminant grazing lands in the tropics: Silvopastoral systems and *Tithonia diversifolia* as tools with potential to promote sustainability. *Agronomy*, 2024, 14(7): 1386.
- [13] Wang X J. Study on the ‘Lingwu Changzao’ jujube-herbage intercropping patterns and productivity characteristics in the arid sandy area, Ningxia province. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- 王晓佳. 宁夏干旱沙区灵武长枣—牧草间作模式及生产力特征研究. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [14] Ma Y, Cao B, Wang X J, *et al.* Intercropping ryegrass with ‘Lingwu Changzao’ (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Lingwu Changzao) enhances crop yield and quality in the arid regions of Northern China. *Agroforestry Systems*, 2025, 99(5): 103.
- [15] Wang X J, Cao B, Zou J, *et al.* Intercropping Gramineae herbage in semiarid jujube cultivar ‘Lingwu Changzao’ (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Lingwu Changzao) orchard improves productivity, plant nutritional quality, and soil quality. *Horticulturae*, 2022, 8(9): 834.
- [16] Dai Y S, Lu W H, Shen L, *et al.* Effects of intercropping poplar-alfalfa on growth and quality of alfalfa in forest-grass compound systems. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(5): 1182—1189.
- 代元帅, 鲁为华, 申磊, 等. 林草复合系统中杨树—紫花苜蓿间作对苜蓿生长发育及品质的影响. 新疆农业科学, 2024, 61(5): 1182—1189.
- [17] Pan K L, Guo L, Chen X, *et al.* Advance in the research on agroforestry ecosystem services. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(12): 1535—1544.
- 潘康乐, 郭梁, 陈欣, 等. 农林复合生态系统服务功能研究进展. 生态与农村环境学报, 2022, 38(12): 1535—1544.
- [18] Mathieu A, Guay M O M, Rivest D. Enhancement of agroecosystem multifunctionality by agroforestry: A global quantitative summary. *Global Change Biology*, 2025, 31(5): e70234.

- [19] Lu Y N, Gao L, Yang Y, *et al.* Effects of different fertilization models on soil characteristics and fruit characters of *Ziziphus jujube* cv. Lingwuchangzao. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(12): 2282—2299.
陆亚楠, 高露, 杨勇, 等. 不同培肥模式对灵武长枣种植园土壤特性和果实品质与产量的影响. *新疆农业科学*, 2021, 58(12): 2282—2299.
- [20] Khanal U, Stott K J, Armstrong R, *et al.* Intercropping-Evaluating the advantages to broadacre systems. *Agriculture*, 2021, 11(5): 453.
- [21] Zhu L Z, Li X Y, He J, *et al.* Development of *Lycium barbarum*-forage intercropping patterns. *Agronomy*, 2023, 13(5): DOI: 10.3390/agronomy13051365.
- [22] Wang D L, Li Y B, Zhang B B, *et al.* Explore the evolution of winter wheat production and its response to climate change under varying precipitation years in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2025, 30(9): DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109335.
- [23] Zhu L Z, He J, Tian Y, *et al.* Intercropping wolfberry with Gramineae plants improves productivity and soil quality. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110632.
- [24] Wang J B, Chen G D, Wang P J, *et al.* Optimizing cotton row configuration in jujube-cotton intercropping systems improves their productivity, net effects, and sustainability. *Agronomy*, 2024, 14(6): 1216.
- [25] Li R, Zhang Z X, Tang W, *et al.* Common vetch cultivars improve yield of oat row intercropping on the Qinghai—Tibetan Plateau by optimizing photosynthetic performance. *European Journal of Agronomy*, 2020, 117: 126088.
- [26] Li Y J, Ma L S, Wu P T, *et al.* Yield, yield attributes and photosynthetic physiological characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.)/maize (*Zea mays* L.) strip intercropping. *Field Crops Research*, 2020, 24(8): 107656.
- [27] Ma J P, Zhang Y Y, Wang T F, *et al.* Interspecific relationship and forage productivity effects in mixed sowings of *Sorghum bicolor* and *Dolichos lablab*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 111—122.
马江萍, 张译尹, 王腾飞, 等. 饲用高粱与拉巴豆混播对种间关系及草地生产力的影响. *草业学报*, 2025, 34(3): 111—122.
- [28] Wang J R, Li H M, Gong D H, *et al.* Physiological responses and the dust retention ability of different turfgrass mixture ratios under continuous drought. *Plants*, 2025, 14(11): 1667.
- [29] Xiong X, Zhu G F, Wang J Q, *et al.* A comparative study of the shade tolerance physiology and growth characteristics among several varieties of tall fescue and perennial ryegrass. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(4): 142—148.
熊雪, 朱国芬, 王佳琪, 等. 几种高羊茅和多年生黑麦草耐荫生理和生长特性的比较研究. *中国草地学报*, 2025, 47(4): 142—148.
- [30] Gu H, Wang Y, Liu S, *et al.* Enhanced soil stabilisation and growth of *Lolium perenne* through combined seeding with *Cynodon dactylon*. *Rhizosphere*, 2024, 32: 100977.
- [31] Gao C, Chen P, Du Q, *et al.* Effects of sowing date and density on stem, leaf growth, and yield formation in strip intercropping soybean. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(11): 3090—3099.
高超, 陈平, 杜青, 等. 播期、密度对带状间作大豆茎叶生长及产量形成的影响. *作物学报*, 2023, 49(11): 3090—3099.
- [32] Wang P J, Li L, Zhai Y L, *et al.* Fine root distribution and effects on belowground interspecific competition in jujube and cotton intercropping system. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(12): 25—32.
王沛娟, 李玲, 翟云龙, 等. 枣棉间作复合系统细根分布及对种间地下竞争的影响. *山东农业科学*, 2021, 53(12): 25—32.
- [33] Liu J Y, Zhou Z C, Han W X. Effects of herbaceous root growth on soil resistance to erosion under different planting densities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 40—47.
刘均阳, 周正朝, 韩玮霄. 不同种植密度下草本植物根系生长对土壤侵蚀阻力的影响. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 40—47.
- [34] Hasyati·Tuoxunjiang, Liu C, Halidai·Rehemujiang, *et al.* Effects of intercropping of jujube and forage on orchard soil nutrients and microenvironment. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(1): 327—329.
哈斯亚提·托逊江, 刘晨, 哈丽代·热合木江, 等. 红枣与牧草间作对果园土壤养分及小环境的影响. *江苏农业科学*, 2015, 43(1): 327—329.
- [35] Björn R S, Inés P R, Lars A S, *et al.* *Elymus repens* biomass allocation and acquisition as affected by light and nutrient supply and companion crop competition. *Annals of Botany*, 2017, 119(3): 477—485.
- [36] Roush M L, Radosevich S R, Wagner R G, *et al.* A comparison of methods for measuring effects of density and proportion in plant competition experiments. *Weed Science*, 1989, 37(2): 268—275.

- [37] He Y, Qiu Z K, Liu R, *et al.* Impact of mulching on soil moisture and sap flow characteristics of jujube trees. *Agronomy*, 2023, 13(11): DOI: 10.3390/agronomy13112799.
- [38] Tang M, Gao X D, Wu P T, *et al.* Effects of living mulch and branches mulching on soil moisture, temperature and growth of rain-fed jujube trees. *Plants*, 2022, 11(19): 2654.
- [39] Zhang L H, Zhao T, Huang H L, *et al.* Physiological responses of ‘Zanhuang Jujube’ and ‘Dongzao’ to drought stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 104–113.
张露荷, 赵通, 黄华梨, 等. ‘赞皇大枣’和‘冬枣’对于旱胁迫的生理响应. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 104–113.
- [40] Wang Q, Pan P, Ouyang X Z, *et al.* Intraspecific and interspecific competition intensity in mixed plantation with different proportion of *Pinus massoniana* and *Schima superba*. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(1): 49–57.
汪清, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 马尾松—木荷不同比例混交林种内和种间竞争强度. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 49–57.
- [41] Feng C, Sun Z X, Zhang L Z, *et al.* Maize/peanut intercropping increases land productivity: A Meta-analysis. *Field Crops Research*, 2021, 270: 108208.
- [42] Mei X G, Zhang L, Xu H B, *et al.* Intercropping improves plant biochemistry and soil microecology to realize healthy and sustainable production of *Platycodon grandiflorus*. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 50(7): 145529.
- [43] Thirukumaran K, Nagarajan K, Vadivel N, *et al.* Enhancing cotton production and sustainability through multi-tier cropping systems: growth, efficiency, and profitability analysis. *Agronomy*, 2024, 14(5): 1049.