中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):190-200
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2026013

生物炭对胡麻//豌豆系统作物干物质转运、产量及种间竞争的影响

张鹏[1,2,3],晁长艳[1,2,3],高玉红[1,2,3*],王一帆[1],剡斌[1,2,3],卢培娜[1],吴兵[4],郭丽琢[1,2,3],王浩然[3]
(1. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃 兰州,730070;
2. 甘肃省高校种业产业研究院,甘肃 兰州,730070;
3. 甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州,730070;
4. 甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃 兰州,730070)

摘要:为明确生物炭施用对胡麻//豌豆系统生产力及种间关系的影响,通过田间裂区试验,研究不同生物炭施用量(C0,0 t/hm^2;C1,10 t/hm^2;C2,20 t/hm^2)和种植模式(单作胡麻、单作豌豆、胡麻//豌豆间作)对胡麻和豌豆干物质积累、转运、产量构成、籽粒产量及间作系统种间竞争力的影响。结果表明,连续2年施用生物炭可显著增加胡麻和豌豆植株干物质积累量、干物质最大增长速率和平均增长速率,且随生物炭用量的增加而增加,但在连续施用第3年,20 t/hm^{2}生物炭的作用效果反而低于10 t/hm^{2}生物炭;不同间作系统中,间作较单作显著促进了胡麻干物质积累与转运,其花前干物质转运量、转运率、贡献率及花后干物质积累量较单作显著高出61.03%、42.87%、29.88%和13.85%,而豌豆的花前干物质转运量、转运率和贡献率在单作系统下表现更佳。相对于不施生物炭,2022年C2处理下,胡麻有效蒴果数和产量显著增加13.30%和12.81%,豌豆单株结荚数、每荚粒数和产量显著增加30.44%、17.00%和20.46%,2023年C1处理最佳,胡麻和豌豆产量分别增加13.52%和18.42%。相对于单作,胡麻在间作模式下两年产量平均显著增加18.26%,豌豆在单作下产量更高,2022年在各生物炭水平平均显著增加9.47%,2023年在不施生物炭水平显著增加7.81%;在胡麻//豌豆系统中,胡麻相对竞争力大于0,竞争比率大于1,为优势作物,豌豆则为劣势作物,且各生物炭水平下土地当量比均大于1,间作种植模式有明显产量优势。综上表明,施用生物炭可显著增加胡麻//豌豆系统干物质积累、转运,从而提高胡麻和豌豆籽粒产量,但长期过多生物炭累积不利于其产量的增幅。

关键词:生物炭;胡麻//豌豆;干物质;产量;种间竞争
中图分类号:S565.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-9084(2026)05-0190-11

Effects of biochar on dry matter transport, yield and interspecific competition of crops in flax//pea system

ZHANG Peng[1,2,3], CHAO Chang-yan[1,2,3], GAO Yu-hong[1,2,3*], WANG Yi-fan[1], YAN bin[1,2,3], LU Pei-na[1], WU Bing[4], GUO Li-zhuo[1,2,3], WANG Hao-ran[3]
(1. *State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Seed Industry Research Insitute of Gansu Provincial University, Lanzhou* 730070 *China*; 3. *College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*; 4. *College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: In order to clarify the effect of biochar on product and interspecific relationship of flax // pea intercropping system, a field split-plot experiment was conducted using 3 biochar application rates (C0, 0 t/hm^2; C1, 10 t/hm^2; C2, 20 t/hm^2) and different planting patterns (as monoculture flax; monoculture pea, intercropping of flax // pea). The two crops' dry matter accumulation, translocation, yield components were investigated, as well as grain yield and interspecific competitiveness under intercropping system of flax and pea. Results showed that biochar applications for two consecutive years could significantly increase dry matter, maximum growth rate and average

收稿日期:2026-01-19
基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-14-1-16);甘肃省科技重大专项(23ZDNA008);甘肃省技术创新引导计划项目(23CXNA0035);省部共建干旱生境作物学国家重点实验室(甘肃农业大学)开放基金课题(GSCS-2024-15)
作者简介:张鹏(2000-),男,硕士研究生,主要从事作物栽培与生态生理理论与技术研究,E-mail:824949445@qq.com
* 通讯作者:高玉红(1978-),女,教授,主要从事作物高产高效栽培理论与技术研究,E-mail:gaoyh@gsau.edu.cn

growth rate of both crops, which increased with the biochar dosage. However, in the third year of continuous application, the effect of 20 t/hm^2 biochar was lower than that of 10 t/hm^2 biochar. In different intercropping systems, intercropping significantly promoted dry matter accumulation and transport of flax compared with monoculture, the pre-anthesis dry matter transport, transport rate, contribution rate and post-anthesis dry matter accumulation were significantly higher than monoculture by 61.03%, 42.87%, 29.88% and 13.85%, while for pea, pre-anthesis dry matter transport, transport rate and contribution rate were better in monoculture system. Compared with no biochar application, the effective capsule number and yield of flax increased significantly by 13.30% and 12.81% under C2 treatment in 2022; and pod number per plant, grain number per pod and yield of pea increased significantly by 30.44%, 17.00% and 20.46%, respectively. In 2023, C1 treatment was the best, and flax and pea yields increased by 13.52% and 18.42% respectively. Compared with monoculture, sesame under intercropping had an average significant increase of 18.26% in yield over two years. Peas had higher yields under monoculture. In 2022, there was an average significant increase of 9.47% across all levels of biochar. In 2023, there was a significant increase of 7.81% at the no-biochar level. In the flax // pea system, the relative competitiveness of flax was greater than 0, and the competition ratio was greater than 1, which was the dominant crop, while pea was the inferior crop. The land equivalent ratio under each biochar level was greater than 1, and the intercropping planting mode had obvious yield advantage. In summary, the application of biochar could significantly increase dry matter accumulation and transport of the flax // pea system, thereby increasing both grain yields of flax and pea, but long-term excessive biochar accumulation is not conducive to yield.

Key words: biochar; flax//peas; dry matter; yield; interspecific competition

胡麻,即油用亚麻(*Linum usitatissimum* L.),属亚麻科亚麻属一年或多年生草本植物,是世界五大油料作物之一,更是我国西北干旱半干旱地区的重要特色油料作物[1,2]。目前,该地区种植模式单一、资源利用效率偏低,严重制约胡麻等作物的高产与稳产[3]。胡麻产量的形成高度依赖其生育期内干物质的积累,以及干物质向籽粒的高效转运[4]。但该地区种植模式长期传统单一,面临生长资源供给不足的问题,干物质积累受限,以至于难以实现从“源”到“库”的高效转运,限制籽粒产量的进一步提升。间作作为一种能够优化资源配置的高效农业种植模式,已被广泛应用于干旱区的农业生产实践中[5,6]。豆科作物与非豆科作物间作是目前最常见的种植模式,通过两种作物的双向互补实现光、热、水、肥等环境资源的优化配置[7],豆科作物通过根瘤菌固氮为非豆科作物提供氮素,活化土壤养分,同时通过植株覆盖减少水分蒸发、借助多样性种植降低病虫害[8,9]。胡麻耐寒耐旱、生长周期相对固定[10],与豆科作物的抗逆性、生长周期形成互补,二者协同作用下,能有效缓解胡麻生长过程中的养分短缺、水分不足等问题,促进其干物质积累与“源库转运”效率提升,为胡麻高产稳产打下基础[11]。胡麻//豌豆是西北干旱半干旱区构建高效、稳定作物体系的典型栽培模式,两者在氮素、保水及土壤结构上的互补效果可以有效应对干旱高温、降水稀少等地域特征,能提高作物地上部生物量及生产力,因此被广泛应用[12]。

近年来,生物炭作为一种新型土壤改良剂,因孔隙结构发达、吸附能力强等特点,应用广泛[13,14]。研究表明,生物炭施用可以改善土壤孔隙结构,提升土壤持水能力,促进土壤团聚体的形成与稳定,进而改善根系穿透环境[15],促进根系生长发育,增强地上部光合能力,进而增加干物质积累量[16,17]。研究表明,生物炭可显著提高谷子[18]、小麦[19]等作物开花前的干物质积累量,促进干物质的转运效率及其对籽粒的贡献率,增加产量。目前,单一的生物炭和间作对小麦、玉米等作物的增产效应已有大量研究[20,21],但互作效应尚不明确。本研究通过测定不同处理下胡麻和豌豆的干物质积累量,利用Logistic方程拟合其积累曲线,分析生物炭对干物质向籽粒转运效率的影响,结合土地当量比及种间竞争力指数,评价生物炭施用后间作系统的互补效应与竞争优势,以期为干旱区构建高效、稳定的作物生产体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

基于2021年定位试验,本试验于2022-2023年

在定西市农业科学院油料研究所开展。试验地处黄土高原丘陵沟壑区(N35°48′、E104°49′),海拔约2050 m,年均气温6.3℃,平均日照时数2453 h,无霜期140 d左右,年降水量约390 mm,年蒸发量达1500 mm,属典型旱作农业气候,农田土壤为黄绵土。供试土壤理化性质为有机碳9.12 g/kg、全氮0.81 g/kg、碱解氮48.91 mg/kg、速效磷27.43 mg/kg、速效钾108.30 mg/kg、pH 8.14。

1.2 试验设计

本试验采用二因素裂区设计,主区为不同种植模式,设置3个水平,分别为:MF:单作胡麻,播种量为750万株/hm²;MP:单作豌豆,播种量为75万株/hm²;I:胡麻//豌豆(IF:间作胡麻,IP:间作豌豆);副区为不同生物炭施用量,设置3个水平,分别为:C0:未添加生物炭处理;C1:添加10 t/hm²生物炭处理;C2:添加20 t/hm²生物炭处理。共设置9个处理,每个试验处理设置3次重复,共27个小区,小区间走道40 cm,重复间走道50 cm。胡麻//豌豆:胡麻带宽80 cm,种4行,豌豆带宽60 cm,种3行,行距均为20 cm,一个间作带宽1.4 m,每个小区共3个组合带,胡麻和豌豆单间作种植密度一致,胡麻与豌豆同期播种。

供试胡麻和豌豆品种分别为定碗8号和陇亚11号,试验肥料为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P_2O_5 20%)和硫酸钾(含K_2O 52%),氮、磷、钾施肥量分别为150 kg/hm²(N)、90 kg/hm²(P_2O_5)和52.5 kg/hm²(K_2O),其中全部磷肥、钾肥及2/3氮肥作为基肥一次性施入,剩余1/3氮肥在胡麻现蕾期前追施。生物炭材料为玉米秸秆制得(炭化温度400~450℃),粒径0.30~0.35 cm,pH 10.8,碳、氮、磷、钾含量分别为66%、1.8%、0.7%和1.9%,自2021年起每年播种前一次性将生物炭撒施于地表,通过旋耕混入耕层。其余田间管理措施与当地常规管理一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 *地上部干物质积累及转运* 分别在胡麻苗期、现蕾期、盛花期、青果期、成熟期和豌豆苗期、开花结荚期、鼓粒期、成熟期,按五点采样法取小区长势基本一致的胡麻10株、豌豆5株,将植株地上部分按茎、叶、籽粒等器官分类装入样品袋,将样品袋放入105℃烘箱中杀青30 min,之后80℃烘至恒重,测定各部位重量,地上干物质积累量为各部位干重之和。

地上部干物质转运公式如下[22]:

$$\text{花前干物质转运量}(kg/hm^2) = (\text{开花期} - \text{成熟期})\text{营养器官干物质积累量} \quad (1)$$

$$\text{花前干物质转运率}(\%) = \text{花前干物质转运量}/\text{开花期营养器官干物质积累量} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{花前干物质贡献率}(\%) = \text{花前干物质转运量}/\text{成熟期籽粒干物质积累量} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{花后干物质积累量}(kg/hm^2) = \text{成熟期籽粒干物质积累量} - \text{花前干物质转运量} \quad (4)$$

$$\text{花后干物质积累贡献率}(\%) = \text{花后干物质积累量}/\text{成熟期籽粒干物质积累量} \times 100\% \quad (5)$$

1.3.2 *地上部干物质积累过程拟合* 采用Logistic回归方程拟合胡麻和豌豆干物质动态累积过程[23]。

$$Y = A/1 + e^{k(x_c - x)} \quad (6)$$

式中,Y为植株地上部干物质总积累量(kg/hm²),A为理论最大地上部干物质积累量(kg/hm²),k为初始增长速率(kg/d),x_c为出苗后最大增长速率出现的天数(d),x为出苗后天数。当Y=A/2时,增长速率达最大值,最大增长率Vmax=(k×A)/4,干物质平均增长速率Va=干物质总积累量/干物质积累时间。

1.3.3 *产量及产量构成* 在作物成熟期,每小区随机选取具有代表性的胡麻20株,豌豆10株,风干后室内考种,分别测定胡麻有效果数、每果粒数、千粒重和豌豆单株结荚数、每荚粒数、百粒重。

产量按小区单打单收,晒干后称取胡麻和豌豆籽粒重量。

1.3.4 *种间竞争力及土地当量比指标* (1)种间相对竞争力(A),表示作物之间竞争能力大小,公式如下[24]:

$$A_F = Y_{F-I}/Y_{F-M} - Y_{P-I}/Y_{P-M} \quad (7)$$

式中,A_F代表胡麻相对于豌豆竞争能力大小,Y_{F-I}、Y_{P-I}为单位面积间作胡麻豌豆的籽粒产量(kg/hm²),Y_{F-M}、Y_{P-M}为单位面积单作胡麻和豌豆的籽粒产量(kg/hm²),下同。$A_F>0$,代表胡麻竞争力强于豌豆,反之,则豌豆竞争力强于胡麻。

(2)竞争比率(C),表示作物之间竞争的一种指标,公式如下[25]:

$$C_F = (Y_{F-I}/Y_{F-M})/(Y_{P-I}/Y_{P-M}) \quad (8)$$

式中,C_F代表胡麻相对于豌豆的竞争比率,$C_F>1$,代表胡麻竞争力强于豌豆,反之豌豆强于胡麻。

(3)土地当量比(LER),是衡量相同种植面积下作物的土地利用优势,公式如下[26]:

$$LER = LER_F + LER_P = Y_{F-I}/Y_{F-M} + Y_{P-I}/Y_{P-M} \quad (9)$$

式中,LER_F、LER_P分别代表胡麻和豌豆的相对土地当量比,LER>1代表间作系统有产量优势,LER<1代表间作系统为产量劣势。

1.4 数据分析

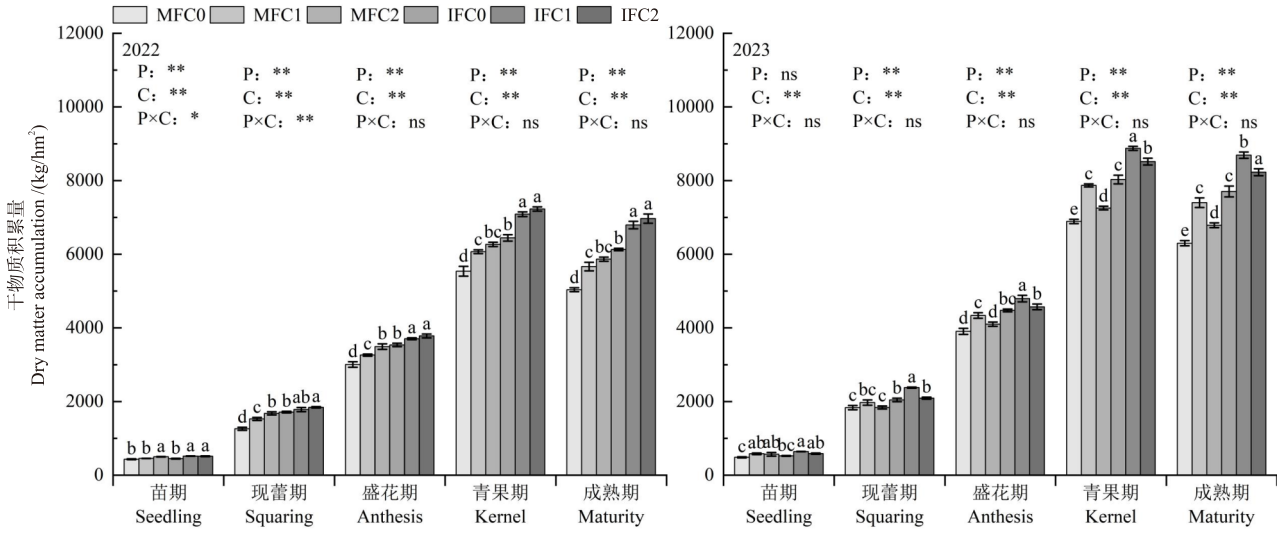
采用Excel 2021数据整理;SPSS 27.0数据统计软件进行方差分析和相关性分析;Origin 2024进行作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对胡麻//豌豆系统干物质积累及转运的影响

2.1.1 生物炭对胡麻//豌豆系统干物质积累量的影响 由图1可知,两年各处理胡麻干物质积累量均随生育进程的推进呈先升后将降的趋势,于青果期达到最高值,且各生育时期均表现为2023年大于2022年。生物炭和种植模式对现蕾期-成熟期胡麻干物质积累影响显著,同一种植模式下,2022年在除苗期外,其余各生育时期内干物质积累量均随生物炭施用量的增加而增加,表现为C2>C1>C0,C2较C0平均显著增加14.92%,盛花期-成熟期,C1较C0平均显著增加9.36%,2023年与2022年趋势不同,表现为C1>C2>C0,盛花期-成熟期,C1较C0平均显著增加12.22%,在青果期和成熟期,C2较C0显著增加5.68%和7.27%。同一生物炭水平下,两年胡麻现蕾期-成熟期干物质积累量均为IF>MF,在C0、C1、C2水平,IF较MF平均分别显著增加19.58%、16.06%和14.52%。生物炭和种植模式互作对现蕾期干物质积累量影响显著,在IFC2处理下达到最大值,较单作模式下不施生物炭显著增加46.43%(2022年)。

与胡麻不同,随生育进程的推进,豌豆干物质积累量不断增加(图2)。生物炭和种植模式对豌豆开花结荚期-成熟期干物质积累影响显著,同一种植模式下,生物炭对两个生长季豌豆干物质积累影响不同,2022年随生物炭施用量而增加,开花结荚期-成熟期,C2、C1较C0平均显著增加28.00%、19.17%,在鼓粒期和成熟期,C2较C1显著增加8.08%和7.42%,2023年则表现为C1>C2>C0,各生育时期,C1较C0平均显著增加23.58%,开花结荚期-成熟期,C2较C0平均显著增加19.84%,成熟期C1较C2显著增加5.66%。同一生物炭水平下,与胡麻不同,豌豆干物质积累量为M>I,单作与间作相比,成熟期干物质积累量在C0、C1和C2水平下平均显著增加13.67%、21.40%和18.54%。生物炭与种植模式对豌豆鼓粒期和成熟期干物质积累量影响的互作效应显著,均在M2C2处理下达到最大



注:*和**分别表示差异达0.05和0.01水平,ns表示差异不显著;P:种植模式;C:生物炭;P×C:表示种植模式和生物炭互作;MF:单作胡麻;MP:单作豌豆;I:间作,即胡麻//豌豆,其中IF是间作胡麻,IP是间作豌豆;C0:未添加生物炭处理;C1:添加10 t/hm²生物炭处理;C2:添加20 t/hm²生物炭。柱上不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著;下同

Note: * and **: differences at 0.05 and 0.01, respectively; ns: difference not significant; P: planting pattern; C: biochar; P×C: interaction between planting pattern and biochar; MF: monocropping of oil flax; MP: monocropping of pea; I: intercropping, i.e., oil flax/pea, where IF is intercropped oil flax, and IP is intercropped pea; C0: control treatment without biochar addition; C1: 10 t/hm² biochar addition; C2: 20 t/hm² biochar addition. Different lowercase letters on columns indicate significant differences between treatments at 0.05 level. Same as below

图1 施用生物炭后不同种植模式下的胡麻干物质积累

Fig. 1 Flax dry matter accumulation under different planting patterns after using biochar

值,较间作不施生物炭显著增加40.53%和47.51%(2022年)。综上说明,施用生物炭能够显著增加胡麻和豌豆干物质积累量,但随施用年份增长,高生物炭施用量反而不如低生物炭施用量,间作能够显著增加胡麻干物质积累量,豌豆相反,单作下干物质积累量更高。

2.1.2 生物炭对胡麻//豌豆系统干物质积累动态模型分析 对胡麻干物质积累量进行Logistic回归分析,两年方程决定系数(R^2)均在0.9500以上,说明拟合方程对干物质积累动态的模拟较为理想(表1)。同一种植模式下,施用生物炭会增加胡麻干物质积累最大增长速率和平均增长速率,两年时间,Vmax在单作下C1水平最高,间作下C2水平最高,与C0相比,两年平均增加7.96%、9.40%,Va在2022年随生物炭施用量的增加而增加,单作和间作下,C2、C1较C0分别增加16.05%、12.14%和13.64%、10.87%,2023年则表现为C1>C2>C0,C1、C2较C0分别增加16.41%、6.82%和12.70%、6.90%。同一生物炭水平下,两年Vmax和Va均在IF处理最高,较MF两年平均增加6.29%~18.01%和17.29%~20.51%。生物炭和种植模式综合作用下,两年Vmax均在IFC2处理最高,较MFC0增加20.04%和22.64%,Va在2022年IFC2处理最高,2023年IFC1处理最高,较MFC0增加37.31%和35.32%。

由表1可知,豌豆两年方程决定系数(R^2)均在0.9800以上,说明该模型能较好反应不同处理下豌豆干物质积累量的变化过程。同一种植模式下,2022年Vmax和Va均随生物炭施用量的增加而增加,在C2处理下,较C0分别增加21.42%和22.15%,与2022年不同,2023年Vmax和Va均在C1处理下最高,与C0相比分别增加23.66%和25.14%。同一生物炭水平下,豌豆与胡麻不同,两年Vmax和Va均表现为MP>IP,各生物炭施用量下,M2较I2两年平均增加3.06%~10.98%和11.49%~20.76%。生物炭和种植模式综合作用下,2022年Vmax和Va在MPC2处理最高,2023年在MPC1处理最高。综上说明,间作模式下搭配施用生物炭有利于维持胡麻较高的干物质积累速率,而豌豆在单作模式下表现最优。

2.1.3 生物炭施用对胡麻//豌豆系统干物质转运的影响 年份、种植模式及生物炭显著影响胡麻花前干物质转运量、花后干物质积累量和花前花后干物质转运贡献率(表2)。从不同生物炭水平看,两年花前转运量、转运率、贡献率和花后积累量分别在C2和C1水平最高,较C0处理平均显著高出42.88%、29.63%、20.91%和11.28%,施用生物炭会显著降低花后干物质对籽粒的贡献率,两年分别在C2和C1水平最低,较C0显著降低4.79%和7.00%。从同一生物炭水平不同种植模式看,2022年和2023年胡麻花前转运量、转运率、贡献率和花后积累量均在IF处理下提高,较MF分别显著提高61.03%、42.87%、29.88%和13.85%,花后干物质对籽粒的贡献率在IF处理较MF显著降低8.17%。生物炭和种植模式互作对胡麻花后干物质积累量影响显著,2022年和2023年分别在IFC2和IFC1处理最高,较不施生物炭在单作模式下分别显著高出32.32%和19.09%。说明生物炭和间作均有利于促

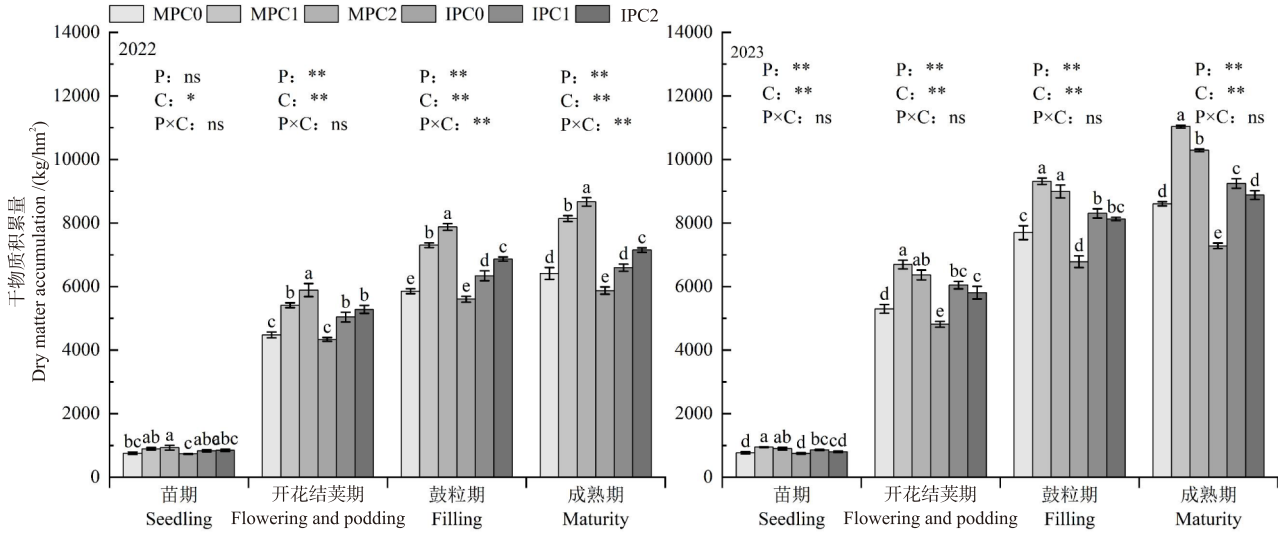


图2 施用生物炭后不同种植模式下的豌豆干物质积累

Fig. 2 Dry matter accumulation of peas under biochar and different planting patterns

表1 生物炭和种植模式对胡麻和豌豆干物质积累的Logistic方程回归分析

Table 1 Logistic equation regression analysis of biochar and planting patterns on dry matter accumulation of flax and pea

作物 Crop	年份 Year	处理 Treatments	方程模型 Equation model	V_{max}/(kg/hm²/d)	V_a/(kg/hm²/d)	R^2
胡麻 Flax	2022	MFC0	$y=5452.35/(1+e^{8.94-0.13t})$	173.45	50.48	0.9593
		MFC1	$y=6114.00/(1+e^{8.14-0.12t})$	176.94	56.61	0.9611
		MFC2	$y=6327.21/(1+e^{7.73-0.11t})$	175.63	58.59	0.9625
		IFC0	$y=6588.23/(1+e^{7.75-0.11t})$	182.03	61.00	0.9666
		IFC1	$y=7304.33/(1+e^{8.02-0.11t})$	205.84	67.63	0.9639
		IFC2	$y=7486.89/(1+e^{7.92-0.11t})$	208.21	69.32	0.9650
	2023	MFC0	$y=6704.23/(1+e^{6.82-0.10t})$	162.48	54.07	0.9867
		MFC1	$y=7804.07/(1+e^{6.79-0.09t})$	185.07	62.94	0.9908
		MFC2	$y=7161.38/(1+e^{6.81-0.10t})$	171.78	57.75	0.9909
		IFC0	$y=8050.03/(1+e^{6.80-0.09t})$	190.85	64.92	0.9934
		IFC1	$y=9072.41/(1+e^{6.37-0.09t})$	199.18	73.16	0.9934
		IFC2	$y=8606.51/(1+e^{6.73-0.09t})$	199.26	69.41	0.9935
豌豆 Pea	2022	MPC0	$y=6496.63/(1+e^{5.51-0.11t})$	172.73	73.83	0.9994
		MPC1	$y=8295.38/(1+e^{5.44-0.10t})$	212.28	94.27	0.9992
		MPC2	$y=8793.62/(1+e^{5.62-0.11t})$	234.94	99.93	0.9995
		IPC0	$y=5969.49/(1+e^{5.71-0.11t})$	169.35	67.84	0.9999
		IPC1	$y=6674.82/(1+e^{5.86-0.12t})$	197.54	75.85	0.9999
		IPC2	$y=7271.49/(1+e^{5.86-0.12t})$	211.02	82.63	0.9999
	2023	MPC0	$y=8295.87/(1+e^{10.64-0.19t})$	392.31	80.54	0.9931
		MPC1	$y=10410.52/(1+e^{10.17-0.18t})$	470.48	101.07	0.9815
		MPC2	$y=9815.82/(1+e^{10.64-0.19t})$	465.59	95.30	0.9887
		IPC0	$y=7116.51/(1+e^{11.05-0.20t})$	354.67	69.09	0.9974
		IPC1	$y=8879.63/(1+e^{11.29-0.20t})$	451.82	86.21	0.9925
		IPC2	$y=8599.14/(1+e^{11.47-0.21t})$	443.72	83.49	0.9953

注:V_{max}:干物质最大增长率;V_a:干物质平均增长率

Note: V_{max}: maximum growth rate of dry matter; V_a: average growth rate of dry matter

进胡麻花前干物质向籽粒转运和花后干物质积累,但花后干物质对籽粒的贡献率有所降低,且持续施用20 t/hm²生物炭会使胡麻花前干物质转运量、转运率、贡献率和花后干物质积累量的增幅降低。

由表2可知,年份、种植模式及生物炭对豌豆花前干物质的转运量、转运率、贡献率及花后贡献率影响显著。从不同生物炭水平看,两年豌豆花前转运量、转运率和贡献率分别在C2和C1水平最高,与C0处理相比,平均分别显著增加50.03%、18.63%和30.64%,两年花后干物质对籽粒的贡献率分别在C2和C1处理下最低,分别较C0平均显著降低12.95%和17.91。从同一生物炭水平不同种植

模式看,单作处理的豌豆花前转运量、转运率和贡献率均显著低于间作处理,IP较MP分别平均显著降低16.37%、9.10%和15.37%,花后积累量和贡献率在间作处理下高,较单作分别显著增加10.00%和11.44%。生物炭与种植模式对豌豆花前干物质转运量影响的互作效应显著,两年分别在MPC2和MPC1处理中表现最佳,分别较其他处理平均显著提高35.79%和30.67%。综上所述,间作模式与生物炭配施可以促进胡麻与豌豆花前干物质向籽粒高效转运,是提升该间作系统生产力的有效途径。

2.2 生物炭施用对胡麻//豌豆系统作物产量构成因子的影响

由表3可知,年份间气候差异显著影响胡麻和豌豆各产量构成因子及产量(除胡麻千粒重),种植模式、生物炭显著影响胡麻和豌豆各产量构成因子及产量,种植模式和生物炭对胡麻产量和豌豆每荚粒数影响的交互作用显著。同一种植模式下,两年胡麻和豌豆各产量构成因子及产量(除胡麻千粒重)均在施用生物炭下显著高于其他处理,2022年C2水平最高,较C0胡麻有效蒴果数和产量分别显著增加13.30%和12.81%,豌豆单株结荚数、每荚粒数、百粒重和产量分别显著增加30.44%、17.00%、7.62%和20.46%;2023年则在C1水平最高,胡麻有效蒴果数和产量显著增加13.61%和13.52%,豌豆单株结荚数、每荚粒数、百粒重和产量

表2 施用生物炭后不同种植模式下的胡麻和豌豆花前花后干物质转运

Table 2 Dry matter transport of flax and pea before and after anthesis under biochar and different planting patterns

年份 Year	处理 Treatment	胡麻 Flax					豌豆 Pea				
		花前同化物 Assimilates before anthesis			花后同化物 Assimilates after anthesis		花前同化物 Assimilates before anthesis			花后同化物 Assimilates after anthesis	
		转运量 TA /(kg/hm²)	转运率 TE /%	贡献率 CR /%	积累量 Acc (kg/hm²)	贡献率 CR /%	转运量 TA /(kg/hm²)	转运率 TE /%	贡献率 CR /%	积累量 Acc /(kg/hm²)	贡献率 CR /%
2022	MC0	382.62e	12.76c	17.85e	1760.53d	82.15a	760.51e	16.99e	35.35cd	1390.40d	64.65bc
	MC1	486.62d	14.91bc	20.10de	1932.56c	79.90ab	1152.23b	20.29b	41.75b	1607.52b	58.25d
	MC2	532.09cd	15.27b	21.15cd	1983.20c	78.85bc	1248.36a	21.18a	45.94a	1468.27cd	54.06e
	IC0	590.98c	16.70b	22.80c	2000.00c	77.20c	703.58e	16.23f	31.58e	1524.33c	68.42a
	IC1	777.97b	21.01a	25.87b	2226.72b	74.13d	892.94d	17.73d	34.34de	1707.52a	65.66ab
	IC2	865.04a	22.86a	27.10a	2329.51a	72.90d	998.5c	18.91c	38.09c	1622.61b	61.91c
2023	MC0	600.67f	15.40c	20.11d	2386.15d	79.89a	1077.63d	20.32c	36.57d	1866.51c	63.43b
	MC1	908.56d	20.97b	25.94bc	2593.23c	74.06bc	1583.41a	23.66a	48.40a	1688.53d	51.60e
	MC2	731.97e	17.87c	23.76c	2347.69d	76.24b	1428.64b	22.45b	44.95b	1749.56d	55.05d
	IC0	1026.44c	22.95b	27.92b	2648.00c	72.08c	908.44e	18.89d	30.25e	2094.90a	69.75a
	IC1	1383.89a	28.88a	32.75a	2841.66a	67.25d	1336.53b	22.08b	42.23c	1827.07c	57.77c
	IC2	1215.77b	26.63a	30.80a	2729.78b	69.20d	1186.45c	20.44c	37.45d	1980.85b	62.55b
显著性(*P*值) Significance (*P* value)											
年份 Year (Y)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
种植模式 Planting mode (P)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
生物炭 Biochar (C)		**	**	**	**	**	**	**	**	ns	**
Y×P		**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
Y×C		**	*	*	**	*	**	*	**	**	**
P×C		ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns
Y×P×C		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:TA:转运量;TE:转运率;CR:贡献率;Acc:积累量;表中不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著;下同

Note: TA: Translation amount; TE: Translation rate; CR: Contribution rate; Acc: Accumulation; The different lowercase letters in the table indicated that there was a significant difference between the treatments at the 0.05 level. Same as below

分别显著增加23.98%、12.77%、7.82%和18.42%。同一生物炭下,胡麻两年有效蒴果数、每果粒数和产量均为I>M,与单作相比,两年平均显著增加16.38%、9.31%和18.26%;豌豆则为M>I,与间作相比,2022年在各生物炭水平下,单作模式的产量平均显著增加9.47%,2023年在C0水平下,单作模式的单株结荚数、每荚粒数、百粒重和产量显著增加16.53%、13.49%、6.43%和7.81%。种植模式和生物炭互作模式下,胡麻产量和豌豆每荚粒数分别在间作和单作的C2(2022年)、C1(2023年)处理下达到最大值,较C0相比,分别显著增加33.61%、33.95%和27.89%、23.34%。综上所述,同一生物炭水平,间作种植会增加胡麻各产量构成因子及产量,而豌豆相反,在单作种植下更高,生物炭施用显著增加胡麻和豌豆各产量构成因子及产量,但连续三年施用20 t/hm²生物炭会使其促进效果降低。

2.3 生物炭对胡麻//豌豆系统种间竞争及土地当量比的影响

由图3可知,两年各生物炭水平下,胡麻相对种间竞争力均大于0,竞争比率均大于1,豌豆则相反,相对种间竞争力均小于0,竞争比率均小于1,胡麻相对种间竞争力在2023年C1水平最高,较C0、C1显著增加20.83%、16.00%,表明在胡麻和豌豆间作系统中,胡麻竞争力要高于豌豆。对不同生物炭处理下土地当量比分析表明,胡麻和豌豆偏土地当量比均在施用生物炭后增加,2022年在C2水平最高,较C0显著增加12.75%和25.66%,2023年在C1水平最高,较C0显著增加19.78%和19.88%,从整个间作系统来看,两年土地当量比均大于1,说明间作存在产量优势,2022年和2023年分别在C2和C1处理下的LER最高,间作优势最明显。

3 讨论

干物质是光合作用最终产物,其积累量与产量形成关系密切,受环境和栽培措施的共同影响[27,28]。研究表明,生物炭因其多孔结构和表面特性,能够改善土壤持水性、增强养分保留、并调节微生物活动,从而促进作物生长[29]。本研究发现,施用生物炭

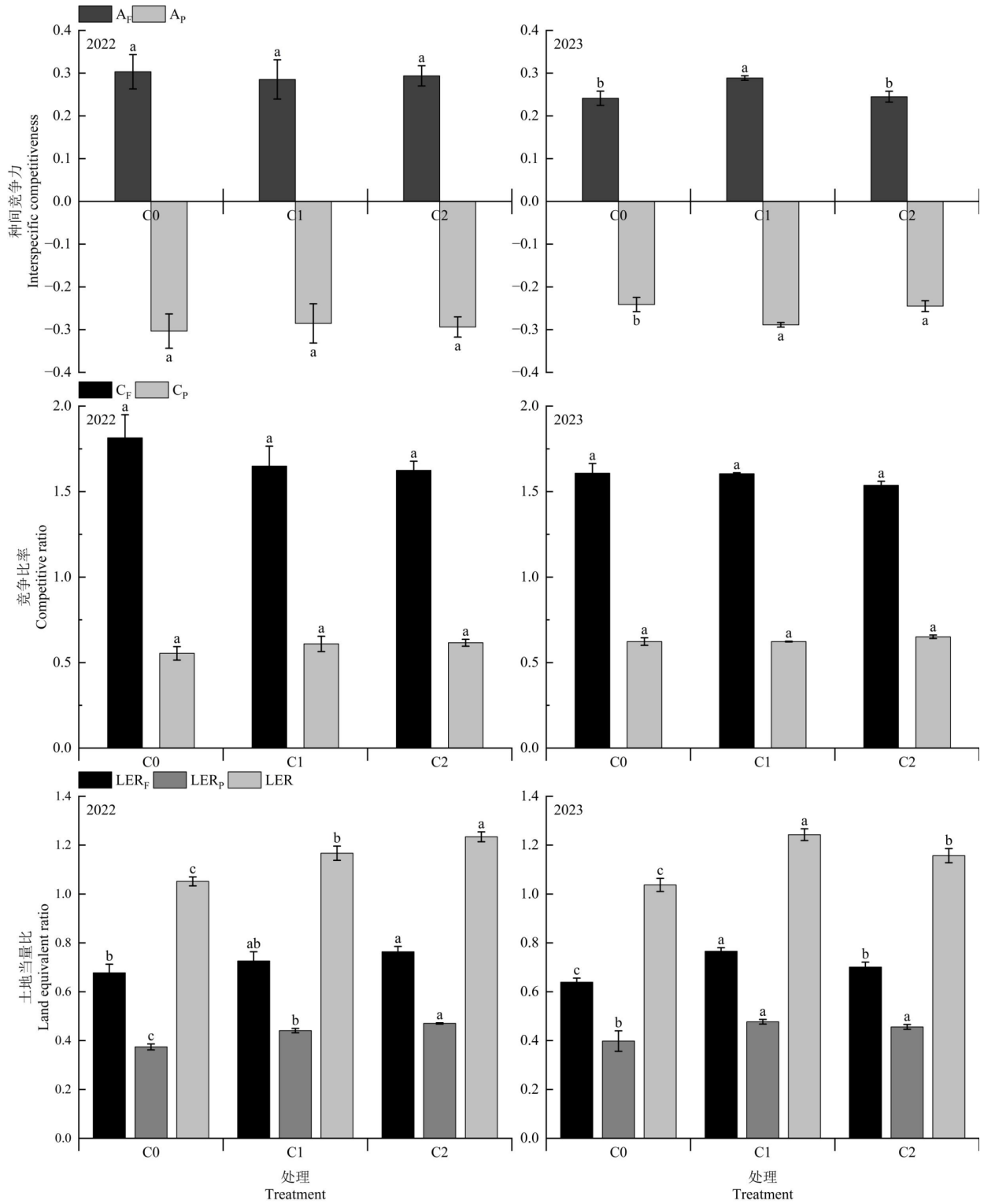
表3 施用生物炭后不同种植模式下胡麻和豌豆产量构成因子及产量

Table 3 Yield components and yield of flax and pea under biochar and different planting patterns

年份 Year	处理 Treatment	胡麻 Flax				豌豆 Pea			
		有效蒴果数 Effecive pods per plant	每果粒数 Seed number per pod	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(kg/hm^2)	单株结荚数 Pod number per plant	每荚粒数 Seed number per pod	百粒重 100-grain weight /g	产量 Yield /(kg/hm^2)
2022	MC0	10.53d	6.93d	6.60c	1343.15d	3.33c	4.14c	17.67d	1750.92c
	MC1	11.00cd	7.20cd	6.73bc	1419.18d	4.05b	4.48ab	19.91a	1959.75ab
	MC2	11.93bc	7.27bcd	6.83abc	1515.30c	4.79a	4.67a	19.31ab	2016.63a
	IC0	12.80ab	7.60abc	6.83abc	1590.98c	3.29c	3.65d	17.37d	1527.91d
	IC1	12.93a	7.67ab	6.90ab	1704.70b	3.74b	4.29bc	18.99bc	1800.47c
	IC2	13.60a	7.87a	7.00a	1794.55a	3.85b	4.43abc	18.40c	1921.12b
2023	MC0	13.73d	6.97d	6.72b	1586.83e	4.70c	4.49b	19.87c	1944.14c
	MC1	15.67c	7.66bc	6.85ab	1701.80d	5.63a	4.87a	21.23ab	2271.94a
	MC2	14.07d	7.23cd	6.78ab	1679.67d	5.37ab	4.69b	21.58a	2178.20ab
	IC0	15.73bc	7.93ab	6.89ab	1774.44c	4.03d	3.95c	18.67d	1803.34d
	IC1	17.80a	8.20a	7.06a	2125.56a	5.17abc	4.62b	20.31bc	2163.60ab
	IC2	16.47b	8.00ab	7.03ab	1945.55b	4.94bc	4.54b	20.81abc	2067.31b
显著性(P值) Significance (P value)									
年份 Year (Y)		**	**	ns	**	**	**	**	**
种植模式 Planting mode (P)		**	**	**	**	**	**	**	**
生物炭 Biochar (C)		**	*	*	**	**	**	**	**
Y×P		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Y×C		**	ns	ns	**	*	*	ns	**
P×C		ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns
Y×P×C		ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns

可显著增加胡麻和豌豆各生育期干物质积累量,通过Logistic模型分析发现,生物炭显著增加两种作物的最大增长速率和平均增长速率,这与前人研究结果一致[20]。进一步研究发现,在连续施用生物炭第三年,10 t/hm^{2}生物炭处理对作物生长促进效果优于20 t/hm^{2}生物炭处理。这可能因为土壤中生物炭积累过多,改变土壤微环境,不仅直接抑制作物根系发育与功能,还可能通过"根 冠"信号传递影响地上部生长,限制植株光合生产能力[30,31]。大量研究指出,禾豆间作通过对光、热等资源的利用和豆科作物固氮作用,促进禾本科作物干物质积累[32,33]。本研究发现,间作对两种作物干物质积累存在种间差异。在间作条件下,胡麻干物质积累量、最大增长速率和平均增长速率均显著高于单作,这可能是因为豌豆固氮为系统补充氮源,以及间作提高光热资源的利用[34]。相反,豌豆在间作中干物质积累受到抑制,说明其在与胡麻的竞争中处于劣势,这与前人研究结果一致[35]。生物炭与间作表现出协同效应,在IFC2或IFC1处理下,胡麻的干物质积累达到最佳水平,说明生物炭能够进一步增强间作系统中优势作物的生长优势。干物质向籽粒的转运直接影响产量形成,研究表明,间作可优化作物的"源库"关系,促进同化物向强势库器官分配[36]。本研究进一步发现,间作配合生物炭施用,不仅能显著提高胡麻花前干物质的转运量、转运率及其对籽粒的贡献率,还可增加花后干物质积累量。豌豆则与胡麻不同,其在单作条件下配施生物炭处理的转运率更高,这可能因为单作更有利于豌豆充分获取光热资源。

作物产量是各产量构成因子协同作用的结果,而产量构成又直接受干物质积累与分配的调控[37]。本研究发现,施用生物炭显著增加胡麻有效蒴果数、豌豆单株结荚数、每荚粒数和百粒重,进而显著增加两种作物籽粒产量。这一作用与生物炭改善土壤理化性质、促进作物养分吸收及增强光合生产力密切相关[38]。与干物质积累规律相似,各产量构成因子和籽粒产量对生物炭施用也表现出年际差异。在连续施用第三年,10 t/hm^{2}生物炭处理对两种作物各产量构成因子和籽粒产量的提升均高于20 t/hm^{2}生物炭处理。这说明长期过量施用生物炭可能导致增产幅度下降,减弱胡麻和豌豆光合产物向籽粒的分配,2023年胡麻和豌豆干物质转运率在C1



注:A_F:胡麻种间相对竞争力;A_P:豌豆种间相对竞争力;C_F:胡麻竞争比率;C_P:豌豆竞争比率;LER_F:胡麻相对土地当量比;LER_P:豌豆相对土地当量比;LER:土地当量比

Note: A_F: Interspecific relative competitiveness of flax; A_P: Interspecific relative competitiveness of peas; C_F: Flax competition ratio; C_P: Pea competition ratio; LER_F: Flax relative land equivalent ratio; LER_P: Pea relative land equivalent ratio; LER: Land equivalent ratio

图3 施用生物炭后胡麻//豌豆的种间竞争及土地当量比

Fig. 3 Interspecific competition and land equivalent ratio of flax//pea cropping under biochar

处理下要高于C2处理的12.87%和6.71%。这种抑制效应可能源于根系发育受阻,生物炭的多孔结构有利于改善土壤持水性和促进根系生长,但在土壤中累计至一定阈值时,可能导致根际微环境趋于饱

和,从而限制根系对水分和养分的吸收[39],这种根系功能的受限最终会抑制光合作用产物的合成和向籽粒的转运[40]。种植模式也影响作物产量表现,本研究发现,间作显著增加胡麻产量构成因子和籽粒产量,而对豌豆表现出抑制作用。这是种间竞争力不对称的表现[41]。对相对种间竞争力及竞争比率分析发现,在间作系统中胡麻处于竞争优势(相对竞争力>0,竞争比率>1),而豌豆处于竞争劣势。这与禾豆间作系统中禾本科作物常为优势作物类似[42],这是因为胡麻根系较为发达、分布较深且具有较高的光合饱和点,能更有效地吸收土壤深层水分和养分,对光热资源的利用效率较高,能够维持更高的光合生产力,在间作系统中占据优势,而豌豆根系分布相对浅且主要依赖根瘤固氮,在与胡麻竞争资源时,其根系对土壤养分的利用效率较低,在间作中光合产物转运率低于单作,导致生长受抑[43]。土地当量比(LER)是评估间作系统产量优势的关键指标[44]。本研究中,各生物炭处理下的LER均大于1,表明胡麻//豌豆系统具有明显的产量优势,这与前人研究结果一致[45]。施用生物炭后,胡麻与豌豆各自的偏土地当量比及系统总土地当量比均达到最高,说明生物炭的添加不仅促进了单一作物的生长,更重要的是通过改善土壤基础条件,优化种间互作关系,提升间作系统的整体生产力。

4 结论

本研究结果表明,在胡麻//豌豆系统中,施用生物炭可显著增加胡麻和豌豆干物质积累量及其向籽粒的转运,尤其显著增加花前干物质转运量和花后积累量,进而显著增加两作物产量构成因子和籽粒产量。间作模式下,胡麻为优势作物,获得更高产量,而豌豆为劣势作物,在单作中表现更优。此外,第三年施用生物炭发现,10 t/hm^{2}生物炭施用的增产效果逐渐优于20 t/hm^{2}生物炭的施用,说明长期过量施用会降低其促进效应,因此在生物炭实际应用中,其施用量并非越多越好,应结合当地土壤特性和气候条件,并随施用年限和土壤状态的变化调整其施用量。

参考文献:

[1] 欧巧明, 叶春雷, 李进京, 等. 油用亚麻品种资源主要性状的鉴定与评价[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(5): 623-633.

[2] 王海娣, 张勇, 高玉红, 等. 胡麻籽粒产量及相关农艺性状对多元化轮作模式的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(12): 52-65.

[3] 王立光, 叶春雷, 陈军, 等. 轮作小麦消减胡麻连作障碍的效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 158-163+184.

[4] 贾玲玲, 高玉红, 李喜强, 等. 氮钾肥配施对旱地胡麻氮钾素利用及抗倒伏特性的调控研究[J]. 土壤通报, 2025, 56(4): 1063-1074.

[5] 柴继宽, 赵桂琴, 张丽睿, 等. 施氮及间作对燕麦干物质积累、分配和氮素吸收利用的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(1): 88-98.

[6] Brooker R W, Bennett A E, Cong W F, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. New Phytol, 2015, 206(1): 107-117. DOI:10.1111/nph.13132.

[7] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 作物间套作群体光能截获和利用机理研究进展[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1057-1066.

[8] Raseduzzaman M, Jensen E S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis [J]. Eur J Agron, 2017, 91: 25-33. DOI: 10.1016/j.eja.2017.09.009.

[9] Zheng B C, Zhou Y, Chen P, et al. Maize - legume intercropping promote N uptake through changing the root spatial distribution, legume nodulation capacity, and soil N availability[J]. J Integr Agric, 2022, 21(6): 1755-1771. DOI:10.1016/s2095-3119(21)63730-9.

[10] 宋夏夏, 王利民, 张建平, 等. 胡麻株高QTL定位与候选基因功能分析[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(6): 26-32.

[11] 杨萍, 李杰, 剡斌, 等. 胡麻/大豆间作体系下施氮对胡麻干物质积累和产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(4): 489-497.

[12] 王红梅, 李雨阳, 俞华林, 等. 白银市刘川灌区胡麻套种豌豆栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2017, (2): 88-89.

[13] Gul S, Whalen J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils[J]. Soil Biol Biochem, 2016, 103: 1-15. DOI: 10.1016/j. soilbio.2016.08.001.

[14] 孙晨, 胡树平, 孙继颖, 等. 氮肥配施生物炭对土壤性状及春玉米根系特性的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(3): 93-100.

[15] 冯中洲, 叶泽杰, 翟文露, 等. 长期施用生物炭对潮土理化特性和小麦产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(1): 49-56.

[16] 宋世龙, 杨卫君, 陈雨欣, 等. 氮肥减量配施生物炭对北疆灌区春小麦光合和干物质转运特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(3): 311-320.

[17] Sun C, Sun J Y, Gao J L, et al. Comprehensive applica-

tion of bio-char and nitrogen fertilizer in dry-land maize cultivation [J]. Sci Rep, 2022, 12: 13478. DOI: 10.1038/s41598-022-16971-0.

[18] 李博洋, 叶茵, 楚睿雯, 等. 施加生物炭对谷子干物质积累、转运、分配和土壤理化性质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(3): 695-708.

[19] 桑丽智, 周捷, 吴锁智, 等. 生物炭对旱地冬小麦产量、水氮利用及土壤养分的影响[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(5): 679-687.

[20] 梁淼, 李盼, 赵连豪, 等. 土壤调理剂与缓释氮肥对小麦干物质积累及产量的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(2): 470-484.

[21] Gudade B A, Malik G C, Das A, et al. Effect of biochar levels and integrated nutrient-management practices on agro-physiological performance and productivity of maize (*Zea mays*)[J]. Indian J Agron, 2023, 67(4): 380-385. DOI:10.59797/ija.v67i4.142.

[22] 秦文利, 智健飞, 谢楠, 等. 绿肥部分替代化肥对玉米干物质积累与产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(13): 2549-2567.

[23] 尚永盼, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿洲灌区绿肥还田利用方式对玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(3): 686-694.

[24] 任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 等. 小麦||蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1890-1900.

[25] 任媛媛, 张莉, 郁耀闯, 等. 大豆种植密度对玉米/大豆间作系统产量形成的竞争效应分析[J]. 作物学报, 2021, 47(10): 1978-1987.

[26] 林文磊, 吕美琴, 施迎迎, 等. 玉豆间作对大豆生长发育、产量、品质及群体经济产值的影响[J]. 大豆科学, 2024, 43(3): 342-351.

[27] 王志丹, 代晓华, 刘吉利, 等. 生物炭对宁夏干旱地区玉米生长及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(1): 74-82.

[28] 张盼盼, 胡静一, 王佳芯, 等. 膜际玉米大豆间作模式对大豆光合生理特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2025, 34(5): 797-807.

[29] 何安乐, 兴露, 杨根达, 等. 基质土和生物炭添加对马铃薯生长及土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2025, 56(6): 1673-1683.

[30] Ghaedi M, Bijanzadeh E, Behpouri A, et al. Biochar application affected biochemical properties, yield and nutrient content of safflower under water stress[J]. Sci Rep, 2024, 14: 20228. DOI:10.1038/s41598-024-71131-w.

[31] 聂媛卿, 王俊, 季杨贝贝, 等. 生物炭还田对稻田土壤和水稻根系形态生理影响的研究进展[J]. 杂交水稻, 2025, 40(1): 5-12.

[32] 付浩川, 李成, 李贺男, 等. 不同禾豆间作模式对作物产量及水氮利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(3): 200-209.

[33] Zhang W P, Gao S N, Li Z X, et al. Shifts from complementarity to selection effects maintain high productivity in maize/legume intercropping systems[J]. J Appl Ecol, 2021, 58(11): 2603-2613. DOI: 10.1111/1365-2664.13989.

[34] 宁堂原, 焦念元, 安艳艳, 等. 间套作资源集约利用及对产量品质影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 159-163.

[35] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50-58.

[36] 焦念元, 李吉明, 汪江涛, 等. 氮磷对玉米花生间作蛋白质与氮代谢特点的影响[J]. 作物杂志, 2014, 30(6): 99-105.

[37] 李翔宇, 季欣杰, 王雪莲, 等. 秸秆还田配施氮肥对春玉米产量和籽粒品质的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(3): 696-712.

[38] 秦德志, 崔文芳, 陈静, 等. 滴灌下氮肥减量配施生物炭对玉米大豆间作系统光合特性和产量的影响[J]. 大豆科学, 2024, 43(3): 332-341.

[39] Wang Z H, Wang H Y, Zhao C J, et al. Effects of biochar on the microenvironment of saline-sodic soil and maize growth [J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2859. DOI:10.3390/agronomy12112859.

[40] Yang J C, Zhang J H. Approach and mechanism in enhancing the remobilization of assimilates and grain-filling in rice and wheat[J]. Chin Sci Bull, 2018, 63(28/29): 2932-2943. DOI:10.1360/n972018-00577.

[41] 任旭灵, 滕园园, 王一帆, 等. 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 860-869.

[42] 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[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4168-4177.

[43] 张雪, 王一帆, 高玉红, 等. 胡麻与禾豆间作对其光合特性和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(7): 983-993.

[44] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 等. 玉米-大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 642-650.

[45] 张钰婷, 臧军蕊, 张志新, 等. 生物炭对紫花苜蓿/玉米间作系统氮吸收的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(4): 1217-1223.

(责任编辑:郭学兰)