

DOI: 10.12357/cjea.20230753

董明, 张谦, 王燕, 王树林, 冯国艺, 梁青龙, 祁虹, 赵贵元. 棉-粮-油菜宽带轮作提升作物产量和光能利用率[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1159–1169

DONG M, ZHANG Q, WANG Y, WANG S L, FENG G Y, LIANG Q L, QI H, ZHAO G Y. Broadband crop rotation of cotton-grain-rape improved crop yield and light utilization efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(7): 1159–1169

棉-粮-油菜宽带轮作提升作物产量和光能利用率*

董 明, 张 谦, 王 燕, 王树林, 冯国艺, 梁青龙, 祁 虹**, 赵贵元

(河北省农林科学院棉花研究所/农业农村部黄淮海半干旱区棉花生物学与遗传育种重点实验室/

国家棉花改良中心河北分中心 石家庄 050051)

摘 要: 棉-粮-油菜宽带轮作种植模式, 能够充分利用农田资源, 但种植体系内不同作物光能资源利用特性尚不明确。本研究在田间设置棉花单作(对照)、小麦-玉米一年两熟(对照)和棉花-小麦-玉米-油菜宽带轮作(以下简称“宽带轮作”)3 种植模式, 测定棉花、玉米和小麦的产量、地上部干物质重以及叶面积指数、消光系数、光能截获量等指标。结果表明, 与棉花单作比较, 棉花宽带轮作单位面积产量和地上部干物重分别显著增加 15.20% 和 10.35%。与小麦-玉米一年两熟比较, 玉米和小麦宽带轮作的单位面积产量分别显著增加 21.61% 和 11.53%, 玉米地上部干物质重显著增加 6.17%。7 月 16 日(盛花期)至 9 月 13 日(吐絮期), 棉花宽带轮作叶面积指数比棉花单作显著增加 7.21%~12.76%, 7 月 24 日(盛花期)和 8 月 4 日(盛铃期), 棉花宽带轮作光能截获率比棉花单作分别显著降低 3.59% 和 3.24%。玉米和小麦宽带轮作的叶面积指数、消光系数和光能截获率未发生显著变化。与棉花单作、小麦-玉米一年两熟比较, 棉花宽带轮作和玉米宽带轮作的全生育期光能截获量分别显著降低 3.14% 和显著增加 0.76%, 小麦宽带轮作的全生育期光能截获量未发生显著变化, 棉花、玉米和小麦的光能利用率分别显著增加 18.81%、6.76% 和 14.10%。本试验条件下, 边行优势和轮作效应同时发挥作用增加了棉花、玉米和小麦的单位面积产量以及棉花和玉米的地上部干物质重, 改善作物干物质的积累和分配, 进而提升棉花、玉米和小麦的光能利用率。该研究明确了棉-粮-油菜宽带轮作对作物产量和冠层光能利用率的影响, 可为该模式的推广应用提供理论基础。

关键词: 棉花; 玉米; 小麦; 宽带轮作; 产量; 光能利用

中图分类号: S562

Broadband crop rotation of cotton-grain-rape improved crop yield and light utilization efficiency*

DONG Ming, ZHANG Qian, WANG Yan, WANG Shulin, FENG Guoyi, LIANG Qinglong, QI Hong **, ZHAO Guiyuan

(Institute of Cotton, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Key Laboratory of Cotton Biology and Genetic Breeding in Huanghuaihai Semi-Arid Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Hebei Branch of National Cotton Improvement Center, Shijiazhuang 050051, China)

* 河北省农林科学院基本科研业务费(2023070101)、国家棉花产业技术体系(CARS-15-18)和河北省现代农业产业技术体系创新团队建设项目的(HBCT2023070203)资助

** 通信作者: 祁虹, 主要研究方向为棉花栽培及生理生态。E-mail: qihong83@126.com

董明, 主要研究方向为棉花栽培及生理生态。E-mail: dddongming@126.com

收稿日期: 2023-12-20 接受日期: 2024-03-26

* This study was supported by the Basic Research Funds of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences (2023070101), China Agriculture Research System-Cotton (CARS-15-18), and Hebei Province Modern Agricultural Industrial Technology System Innovation Project (HBCT2023070203).

** Corresponding author, E-mail: qihong83@126.com

Received Dec. 20, 2023; accepted Mar. 26, 2024

Abstract: Cotton-grain-rape broadband crop rotation can efficiently utilize farmland resources; however, the utilization characteristics of the light energy resources of different crops in this planting system are still unclear. Three treatments were used in this study: cotton monoculture (T1), wheat-maize rotation (T2) and broadband crop rotation of cotton-grain crop-rape (T3). The yields of cotton, maize, and wheat, and dry matter weight, leaf area index, extinction coefficient, light energy interception, and other indicators were determined. Compared with T1, T3 increased the yields and dry weight of cotton by 15.20% and 10.35%, respectively. Compared with T2, T3 increased the yields of maize and wheat by 21.61% and 11.53%, respectively, and the dry weight of maize increased by 6.17%. From July 16th to September 13th, the leaf area index of T3 significantly increased by 7.21%–12.76%, compared to that of T1. In July 24th and August 4th, the light interception rate of cotton of T3 significantly decreased by 3.59% and 3.24%, respectively, compared to that of T1. The leaf area index, extinction coefficient, and PAR (photosynthetically active radiation) interception efficiencies of maize and wheat did not differ significantly under different treatments. Compared with T1 and T2, the light interception of the entire growth period of cotton was reduced by 3.14% in T3, while the light interception of the entire growth period of maize increased by 0.76% significantly. No significant difference was noted in light interception throughout the wheat growth period. The light-use efficiencies of cotton, maize, and wheat increased significantly by 18.81%, 6.76%, and 14.10%, respectively. In this experiment, the edge row advantage and rotation effect simultaneously increased the yield of cotton, maize, and wheat as well as the above-ground dry matter weight of cotton and maize, improved the accumulation and distribution of crop dry matter, and thereby enhanced the light energy utilization efficiency of cotton, maize, and wheat. This study clarified the effects of cotton-grain-rape broadband crop rotation on the yield and canopy light energy utilization of cotton, maize, and wheat, providing a theoretical basis for the promotion and application of this model.

Keywords: Cotton; Maize; Wheat; Broadband rotation; Yield; Light use efficiency

轮作、间作、套种等复种制度,是优化农田资源配置、提高土地生产力的重要途径^[1]。轮作通过不同类型作物轮换种植,能有效缓解作物连作导致的土壤质量下降^[2]、病虫害加重^[3]、农田生态多样性降低^[4]、土壤微生物多样性失衡^[5]等问题,是打破连作障碍、平衡土壤肥力^[6]、提高作物单产的重要手段。棉田间作、套种主要根据作物时空生态位差异,在棉田冬闲期或棉花(*Gossypium* spp.)生育前期行间种植其他作物,不仅充分利用棉田的土地空间和光热资源,而且增加了单位面积经济产出,提高了土地利用效率。同时棉田间作、套种还能够更多地发挥作物边行优势,提高单位面积土地生产力,增强农田生态系统稳定性。以粮棉轮作、棉麦套种^[7]为代表的棉田轮作、间套作种植制度曾在黄河流域棉区广泛存在,并对提高棉田综合收益方面起到了重要作用。然而,由于涉及多种作物,棉田复种制度往往管理较为繁琐,并且传统棉田间套作体系中各作物均为窄行种植,不便于农机田间操作^[8],因此劳动力投入相较于单作更高,无法适应规模化管理。近年来,随着耕地流转集中以及农村劳动力成本不断上涨,这一问题愈发突出,成为限制棉田复种发展和应用的主要障碍。同时,棉田复种制度使得土壤养分的消耗大幅增加,如何维持土壤肥力平衡、实现用养结合,也是保障棉田可持续生产的重要问题。前人研究表明,种植绿肥作物能够改善土壤团聚体结构^[9],增加土壤养分,提高土壤肥力和肥料利用率^[10],可作为棉田复种体系中改良土壤结构、维持养分平衡的

重要手段。

基于以上原因,以充分利用资源、便于机械化操作为原则,在传统棉田间套作基础上,设计了一种棉-粮-油菜(*Brassica napus*)宽带轮作种植模式,其中粮食作物为玉米(*Zea mays*)和小麦(*Triticum aestivum*)。操作方式为依据复种体系内不同作物农机操作幅宽设置(本试验设置条带宽幅为6 m),条带内作物实行轮作,顺序为棉花-小麦-玉米-油菜,相邻条带轮作顺序为玉米-油菜-棉花-小麦,轮作周期2年:即第一年A、C带种植棉花,收获后种植冬小麦,B、D带种植夏玉米,夏玉米收获后种植油菜;第二年A、C带接上一年先后种植冬小麦和夏玉米,夏玉米收获后种植油菜,B、D带接上一年油菜青苗翻压后种植棉花,收获后种植冬小麦(图1)。相邻条带夏秋季为棉花和玉米间作,冬春季为小麦和油菜间作。该模式在部分保留棉田间套作优势基础上,采取宽带种植,使农机无需改装即可实现机械化操作,能够显著降低人工投入,适应规模化管理。但该模式下光能资源利用特性的变化尚不明确。本试验通过不同种植模式的对比研究,探究粮-棉-油菜宽带轮作模式对不同作物生产及群体光能利用特性的影响,进而为该模式的优化及推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2019—2020年在河北省曲周县西漳头村河北省农林科学院棉花研究所试验基地(36.78°N,

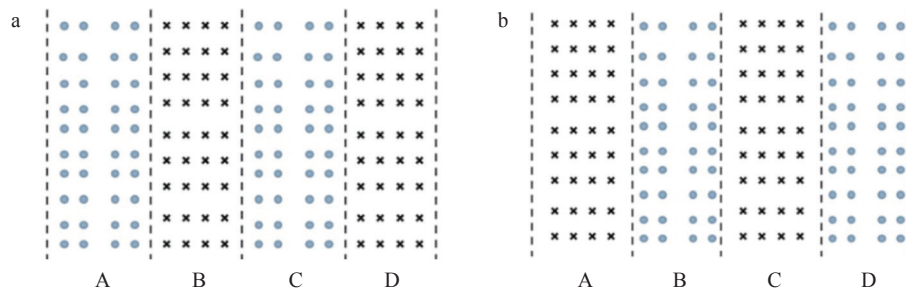


图1 棉花-小麦-玉米-油菜宽带轮作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wide-stripe rotation of cotton, wheat, maize and rape

a: 宽带轮作第一年种植图; b: 宽带轮作第二年种植图。●为棉花或小麦; ×为玉米或油菜。a: broadband crop rotation planting map of the first year; b: broadband crop rotation planting map of the second year. ● means cotton or wheat; × means maize or rape.

114.95°E) 进行, 该试验地各轮作处理已连续种植4年。该地区为暖温带大陆季风性气候, 春季干旱多风、夏季炎热多雨。供试土壤为黏质壤土, 全氮含量 $1.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷含量 $36.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $271.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质含量 $19.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计与方法

试验设置3个处理: T1, 棉花单作; T2, 小麦-玉米一年两熟; T3, 棉花-小麦-玉米-油菜宽带轮作。其中T1、T2为连作对照。棉花供试品种为‘冀863’, 行距76 cm, 密度 $70\ 200 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 播前施用纯N $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 不追肥。2020年4月25日播种, 2020年10月25日收获。小麦供试品种为‘鲁原502’, 播种量 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 行距17 cm, 播前施用纯N $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期追施纯N $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2019年10月30日播种, 2020年6月2日收获。玉米供试品种为‘郑单958’, 行距60 cm, 株距25 cm, 密度 $66\ 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 玉米播种前施用纯N $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 不施用追肥。2020年6月9日播种, 2020年9月15日收获。不同处理间相同作物种植密度一致。油菜播种方式为撒播, 不施用肥料, 作绿肥使用, 不收获籽粒, 播种时间为2019年9月25日, 压青时间为2020年4月5日。其中棉花-小麦-玉米-油菜宽带轮作种植模式相邻作物间距为棉花、玉米间距68 cm, 棉花、小麦间距46.5 cm。作物南北行向种植, 其他管理同大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生物产量

在作物收获期(棉花9月10日, 玉米10月20日, 小麦6月3日), T1、T2处理各小区随机选取长势均匀的10棵单株; T3处理棉花和玉米按照边行、中间行, 小麦按照边行、边2行和中间行各随机选取长势均匀的10棵单株。各作物按器官分解后 105°C 杀

青30 min, 80°C 烘干至恒重后称重。

1.3.2 经济产量

棉花吐絮期, T1处理每个小区连续选取20棵单株, 调查实际产量、单株铃数、铃重。T2处理, 玉米成熟期, 每个小区连续选取20棵单株, 调查实际产量、玉米穗数、穗粒数、千粒重。小麦成熟期, 每个小区测定1 m双行实际产量、穗数、穗粒数和千粒重。

T3处理下, 棉花和玉米边行与中间行分别测产, 小麦边行、边2行和中间行分别测产, 条带内单位面积产量按照行数比例加权, 计算平均值。

T3处理棉花或玉米单位面积产量计算公式如下:

$$Y_r = (2 \times Y_{rs} + (n-2) \times Y_{rm}) / n \quad (1)$$

式中: Y_r 为T3处理的棉花或玉米产量, Y_{rs} 为T3-边行产量, Y_{rm} 为T3-中间行产量, n 为棉花或玉米行数。

T3处理小麦单位面积产量计算公式如下:

$$Y_{rw} = (2 \times Y_{rws} + 2 \times Y_{rwi} + (n-4) \times Y_{rwm}) / n \quad (2)$$

式中: Y_{rw} 为T3处理小麦产量, Y_{rws} 为T3-边行产量, Y_{rwi} 为T3-边2行产量, Y_{rwm} 为T3-中间行产量, n 为小麦行数。

T3处理的棉花、玉米和小麦的叶面积指数、消光系数、光能截获率、光能截获量、光能利用率和棉花、玉米生物产量及产量构成因素均按照公式(1)计算。T3处理的小麦生物产量和产量构成因素按照公式(2)计算。

1.3.3 复种指数(MCI)和土地当量比(LER)

$$\text{MCI} = (A_c + A_w + A_m + A_r) / A_t \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_c 为棉花种植面积, A_w 为小麦种植面积, A_m 为玉米种植面积, A_r 为油菜种植面积, A_t 为耕地总面积。

$$\text{LER} = Y_{rc} / Y_c + (Y_{rm} + Y_{rw}) / (Y_m + Y_w) \quad (4)$$

式中: Y_{lc} 为宽带轮作棉花产量, Y_c 为棉花单作产量, Y_{lm} 为宽带轮作玉米产量, Y_{lw} 为宽带轮作小麦产量, Y_m 为小麦-玉米一年两熟玉米产量, Y_w 为小麦-玉米一年两熟小麦产量。

1.3.4 叶面积指数

2020 年 5 月 18 日至 9 月 13 日, 每隔 10 d 左右, 测定棉花叶面积; 2020 年 6 月 19 日至 9 月 20 日, 每隔 10 d 左右, 测定玉米叶面积; 2020 年 2 月 26 日至 6 月 6 日, 每隔 10 d 左右, 测定小麦叶面积。棉花、玉米和小麦叶面积均采用比叶重法测定^[11], 计算公式如下:

$$LAI = LA \times d / 10\,000 \quad (5)$$

式中: LA 为作物叶面积 (m^2), d 为种植密度 (株· hm^{-2}), LAI 为叶面积指数。

1.3.5 光合有效辐射强度

1.3.5.1 日光合有效辐射水平分布

8 月 17 日 6:00—18:00, 自东向西测定距离玉米带 50 cm、100 cm、150 cm、200 cm、250 cm、300 cm、350 cm、400 cm、450 cm、500 cm、550 cm 处棉花

带顶部光合有效辐射强度, 记录传感器的瞬时光合有效辐射光子通量密度 (photosynthetic photon flux density, PPFD) 读数, 每 1 h 测定一次。

1.3.5.2 生育期光合有效辐射截获

2020 年 2 月 26 日至 2020 年 9 月 20 日, 每隔 10 d 左右, 选择晴天 11:00—13:00, 利用植物冠层分析仪 (GCX-A, 中国) 测定不同作物冠层顶部和底部的光子通量密度。测定时移动探杆, 记录传感器光子通量密度读数。作物中间行冠层顶部读取光子通量密度, 记作 I_0 , 作物中间行冠层底部读取 a、b、c、d、e 5 点数据计算平均值, 记作 I 。作物边行冠层顶部读取光子通量密度, 记作 I_{0m} , 作物边行冠层底部读取 1、2、3、4、5 等 5 点数据计算平均值, 记作 I_m (图 2)。按照公式 (6)-(14) 计算消光系数 (k)、光能截获率 (f)、日光能截获量 (IPAR) 和光能利用率 (LUE)。试验地旁装有 iMetos PRO 农业物联网气象站, 逐日记录全年有效光合辐射量, 以每日的光合辐射总量作为当日达到作物冠层顶端的光合有效辐射量 (Q)。

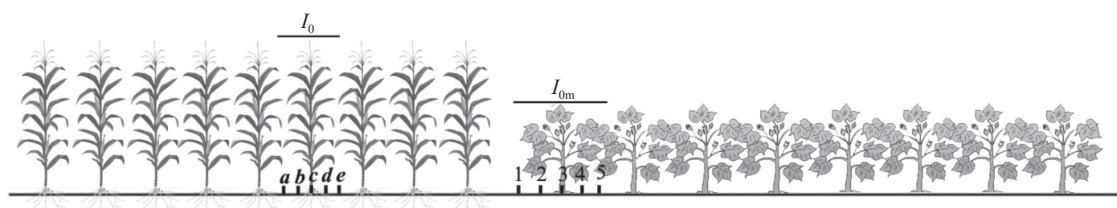


图 2 宽带轮作系统中的测定位点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement points in broadband crop rotation system

1.3.6 作物消光系数的计算

间作中间行或者非间作作物消光系数 (k):

$$k = -\frac{1}{LAI} \times \ln \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

式中: LAI 为作物叶面积指数, I 为冠层底部光子通量密度, I_0 为冠层顶部光子通量密度。

间作边行作物消光系数 (k_m):

$$k_m = -\frac{1}{L} \times \ln \frac{I_m}{I_{0m}} \quad (7)$$

式中: L 为边行叶面积指数, I_m 为边行冠层底部光子通量密度, I_{0m} 为边行冠层顶部光子通量密度。

1.3.7 光能截获率的计算

间作中间行或非间作作物的透光率 (T):

$$T = I / I_0 \quad (8)$$

式中: I 为冠层底部光子通量密度, I_0 为冠层顶部光子通量密度。

间作边行作物透光率 (T_m):

$$T_m = I_m / I_{0m} \quad (9)$$

式中: I_m 为到达作物边行底部的光量子通量密度, I_{0m} 为到达作物边行顶部的光量子通量密度。

间作中间行或非间作作物的光能截获率 (f):

$$f = 2 \times T / (1 + T) \quad (10)$$

间作边行作物光能截获率 (f_m):

$$f_m = 2 \times T_m / (1 + T_m) \quad (11)$$

1.3.8 光能截获量的计算

间作中间行或非间作作物的光能截获量 (IPAR):

$$IPAR = Q \times f \quad (12)$$

式中: Q 为日光合有效辐射量 ($MJ \cdot m^{-2}$)

间作边行作物光能截获量 ($IPAR_m$):

$$IPAR_m = Q \times f_m \quad (13)$$

1.3.9 光能利用率 (LUE) 的计算:

$$LUE = \frac{Y_{\text{biomass}}}{IPAR} \quad (14)$$

式中: Y_{biomass} 为作物地上部干物质重 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

1.4 数据处理与分析

在 Microsoft Excel 软件中进行数据处理, 利用 SPSS 16.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 棉-粮-油菜宽带轮作对不同作物叶面积指数的影响

叶面积指数是作物冠层结构重要的特征之一。不同处理棉花的 LAI 均呈单峰曲线变化, 峰值及出现时间无显著差异 (图 3A), 但 7 月 16 日 (盛花期) 至 9 月 13 日 (吐絮期) T3 处理棉花 LAI 比 T1 处理分

别显著增加 12.76%、8.13%、9.42%、11.16%、7.51% 和 7.21%。棉-粮-油菜宽带轮作模式下棉花带内不同位置的 LAI 表现也不相同, 7 月 2 日 (初花期) 至 7 月 24 日 (盛花期), T3-边行 LAI 显著低于中间行, 而 8 月 17 日 (盛铃期) 至 9 月 13 日 (吐絮期), T3-边行棉花 LAI 显著高于 T3-中间行。

与 T2 处理比较, T3 处理玉米的 LAI 没有明显变化 (图 3B)。T3 处理不同位置比较表明, T3-中间行与 T2 处理的 LAI 无显著差别, 但二者进入 9 月 10 日 (灌浆期) 以后 T3-中间行 LAI 均显著低于 T3-边行。

不同处理小麦的 LAI 也无显著变化 (图 3C)。但 5 月 6 日 (灌浆期) 至 6 月 6 日 (成熟期), T3-边行的 LAI 始终高于 T3-中间行, 表明宽带轮作对小麦 LAI 没有显著影响, 但提升了边行小麦 LAI。

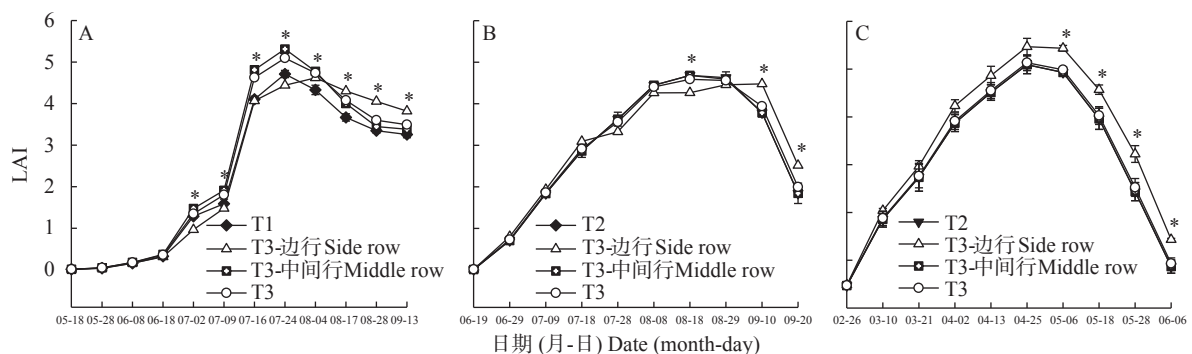


图 3 不同作物种植方式对棉花 (A)、玉米 (B) 和小麦 (C) 叶面积指数 (LAI) 的影响

Fig. 3 Effects of different planting methods on leaf area index (LAI) of cotton (A), maize (B), and wheat (C)

T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带轮作。*表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. * indicates significant differences among treatments at $P < 0.05$.

2.2 棉-粮-油菜宽带轮作对不同作物冠层光能截获特性的影响

棉花生育期内消光系数呈现“L”型曲线变化 (图 4A), 在 5 月 28 日 (苗期) 至 7 月 16 日 (盛花期) 下降, 之后稍有增长, 8 月 4 日 (盛铃期) 至 8 月 17 日 (盛铃期) 边行消光系数显著低于中间行。棉花光能截获率先升高后下降 (图 4B), 7 月 24 日 (盛花期) 和 8 月 4 日 (盛铃期), T3 处理棉花光能截获率显著低于 T1 处理, 分别降低 3.59% 和 3.24% ($P < 0.05$)。比较 T3 不同位置, 7 月 24 日 (盛花期) 至 8 月 4 日 (盛铃期) T3-边行的棉花光能截获率比 T3-中间行显著降低 15.81% 和 14.17% ($P < 0.05$), 而 T3-中间行与 T1 处理并无显著差异。

玉米生育期内消光系数和光能截获率 T2 与 T3 处理无显著差异 (图 4C, 4D)。T3 处理边行与中间行

在生育期前期和中期均无显著差别, 仅在 9 月 20 日 (灌浆期), T3-边行光能截获率比 T3-中间行显著增加 7.52%。

小麦消光系数在生育期内有 3 个峰值, 分别在 4 月 2 日 (孕穗期)、4 月 13 日 (孕穗期) 和 6 月 6 日 (成熟期)。T3 处理小麦消光系数与 T2 处理无显著差异 (图 4E)。比较 T3 处理不同位置, 边行与中间行在生育前期无显著差异, 5 月 28 日 (灌浆期) 至 6 月 6 日 (成熟期), T3-边行的消光系数比 T3-中间行分别显著降低 22.34% 和 26.46%。小麦光能截获率随着生育期先升高后下降, 不同处理间及不同位置间不存在显著差异 (图 4F)。

在棉花带内, 日出后至日落 (6:00—18:00) 每隔 1 h 测定不同水平位置冠层顶部光合有效辐射强度, 结果显示, 上午 7:00—10:00 时, 距离玉米带 0~100 cm

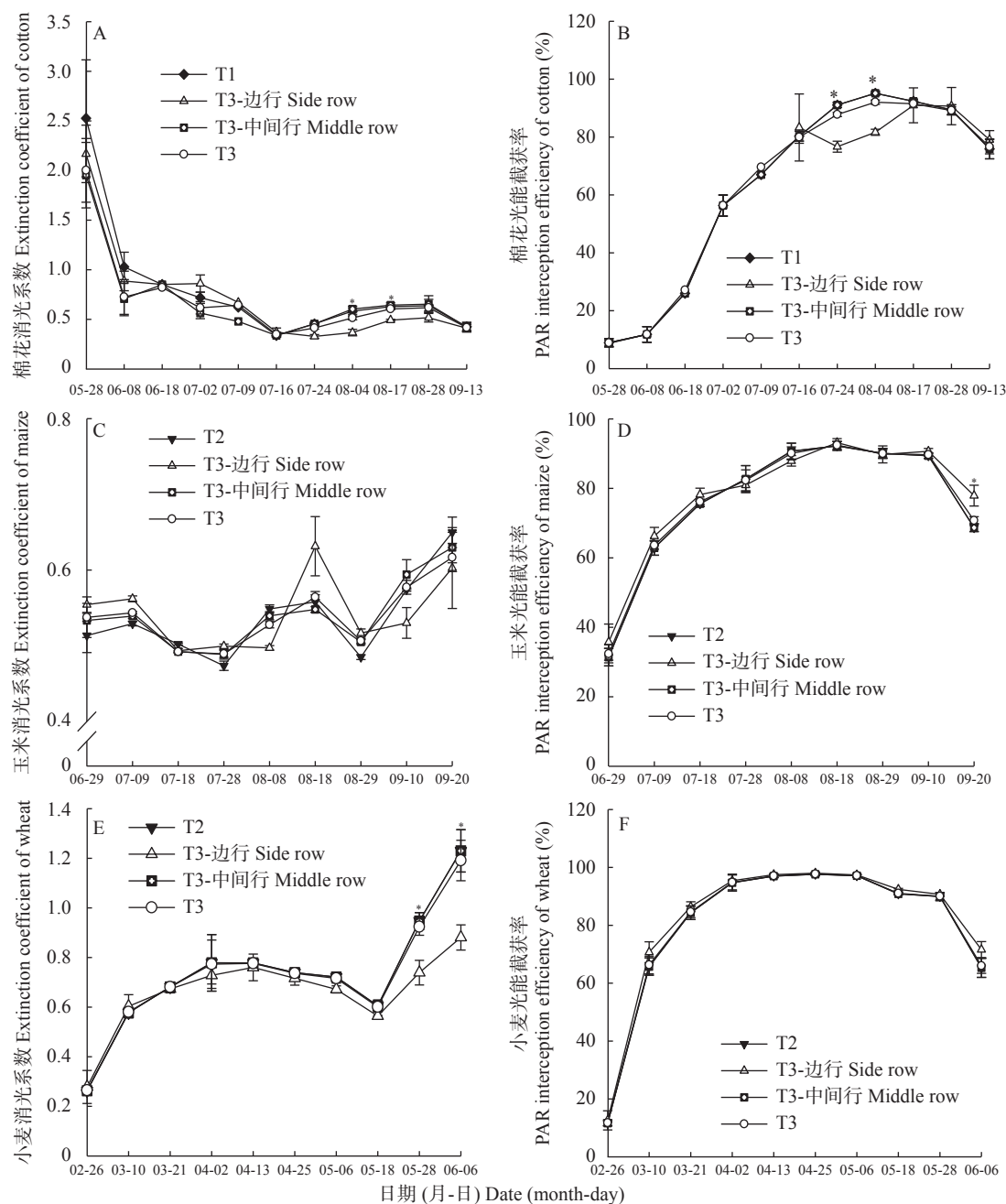


图 4 不同种植方式对棉花、玉米和小麦消光系数和光能截获率的影响

Fig. 4 Effects of different planting methods on extinction coefficient and PAR (photosynthetically active radiation) interception efficiency of cotton, maize, and wheat

T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带薪作。*表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. * indicates significant differences among treatments at $P < 0.05$.

范围内棉花带冠层顶部光合有效辐射降低,以 8:00—9:00 时降低幅度最大。14:00—18:00 时,距离玉米带 500~600 cm 范围内棉花带冠层顶部光合有效辐射降低,以 16:00—17:00 时降低幅度最大 (图 5A)。对棉花带不同冠层顶部水平位置的 PAR 日积累量统计结果表明 (图 5B), 距离玉米带 50 cm、100 cm、500 cm 和 550 cm 棉花冠层顶部日积累 PAR 分别比距离玉米带 150~450 cm 平均值分别降低 7.39%、

2.67%、2.57% 和 7.26%, 表明玉米与棉花共生期, 玉米带遮光主要影响棉花带两侧边行。

2.3 棉-粮-油菜宽带薪作对不同作物光能截获量的影响

与 T1 处理比较, 棉花 T3-边行、T3-中间行和 T3 处理全生育期光能截获量分别减少 7.19%、1.79% 和 3.14% ($P < 0.05$, 图 6A)。不同位置比较发现, T3-边行棉花全生育期光能截获量较 T3-中间行显著

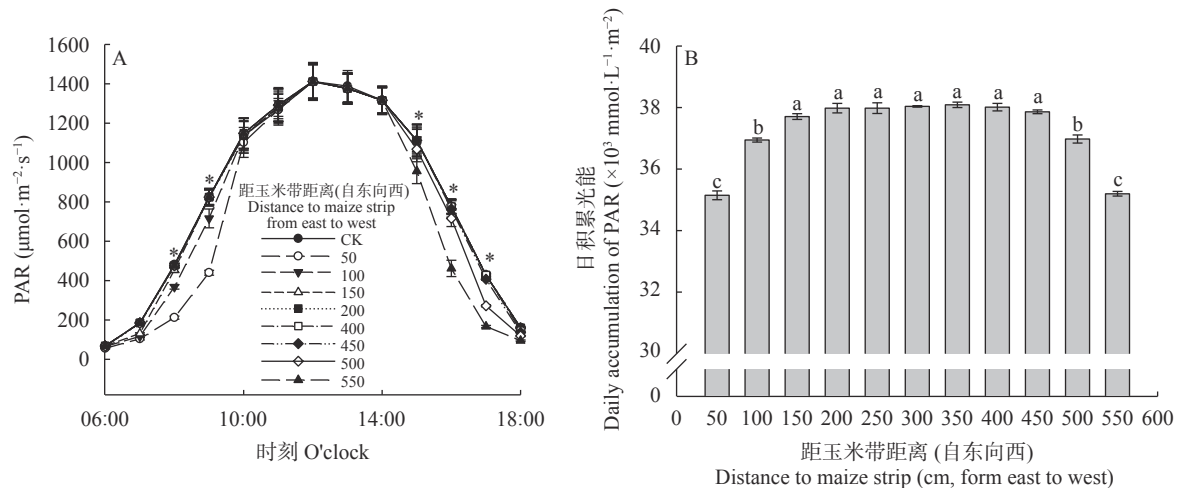


图 5 棉-粮-绿肥多作物轮作对棉花冠层顶部光合有效辐射 (PAR) 的影响

Fig. 5 Effects of different planting methods on PAR (photosynthetically active radiation) of cotton canopy

A: 棉花冠层顶部 6:00—18:00 有效光合辐射量; B: 棉花冠层顶部距玉米带 50~550 cm 冠层顶部日积累光合有效辐射。T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带轮作。左图中*表示不同距离间差异显著 ($P<0.05$), 右图中不同小写字母表示不同距离间差异显著 ($P<0.05$)。A: PAR at the top of cotton canopy from 6:00 am to 18:00 pm; B: daily accumulation of PAR at the top of cotton canopy from 50 cm to 550 cm away of the maize. T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. In left figure, * indicates significant differences among different distances at $P<0.05$. In right figure, different lowercase letters indicate significant differences among different distances at $P<0.05$.

降低 5.82%。

与 T2 处理比较, 玉米 T3-边行和 T3 处理全生育期光能截获量分别显著增加 2.45% 和 0.76% ($P<0.05$, 图 6A)。T3-边行生育期光能截获量显著高于 T3-中间行。

小麦 T3 处理全生育期光能截获量与 T2 处理无显著差异 (图 6A)。不同位置小麦全生育期光能截获量也未发生显著变化。

T3-边行、T3-中间行和 T3 处理的全年光能截获量较 T1 处理显著增加, 较 T2 处理显著降低 ($P<0.05$, 图 6B)。T3-边行全年光能截获量与 T3-中间行无显著差异。

2.4 棉-粮-油菜宽带轮作对不同作物产量和土地利用效率的影响

不同处理棉花、玉米、小麦生物产量结果如图 7 所示。棉花 T3 处理干物质总重较 T1 处理增加

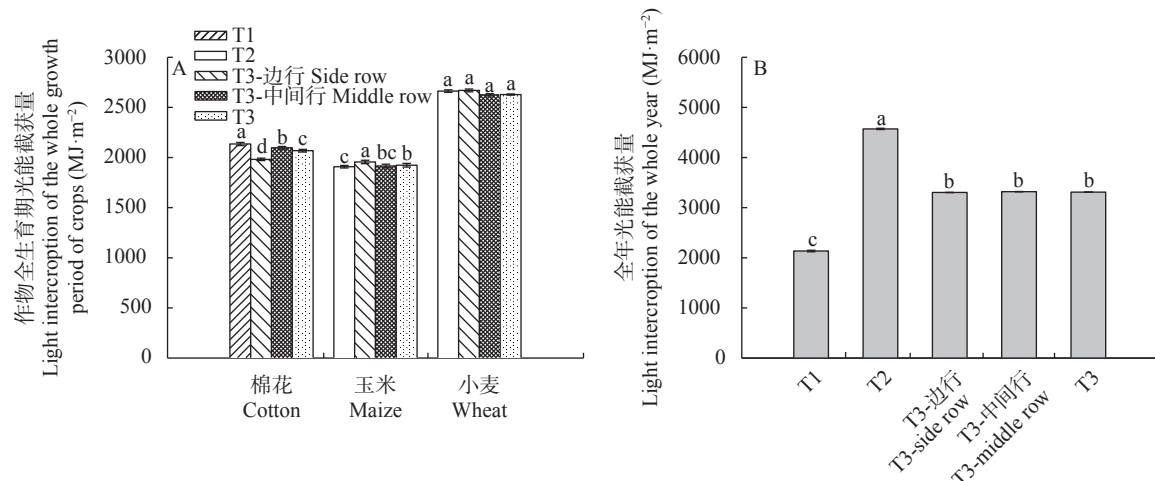


图 6 不同种植方式对棉花、玉米和小麦全生育期光能截获量 (A) 和全年光能截获量 (B) 的影响

Fig. 6 Effects of different planting methods on light interception of the whole growth period (A) and the whole year (B) of cotton, maize and wheat

T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带轮作。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$.

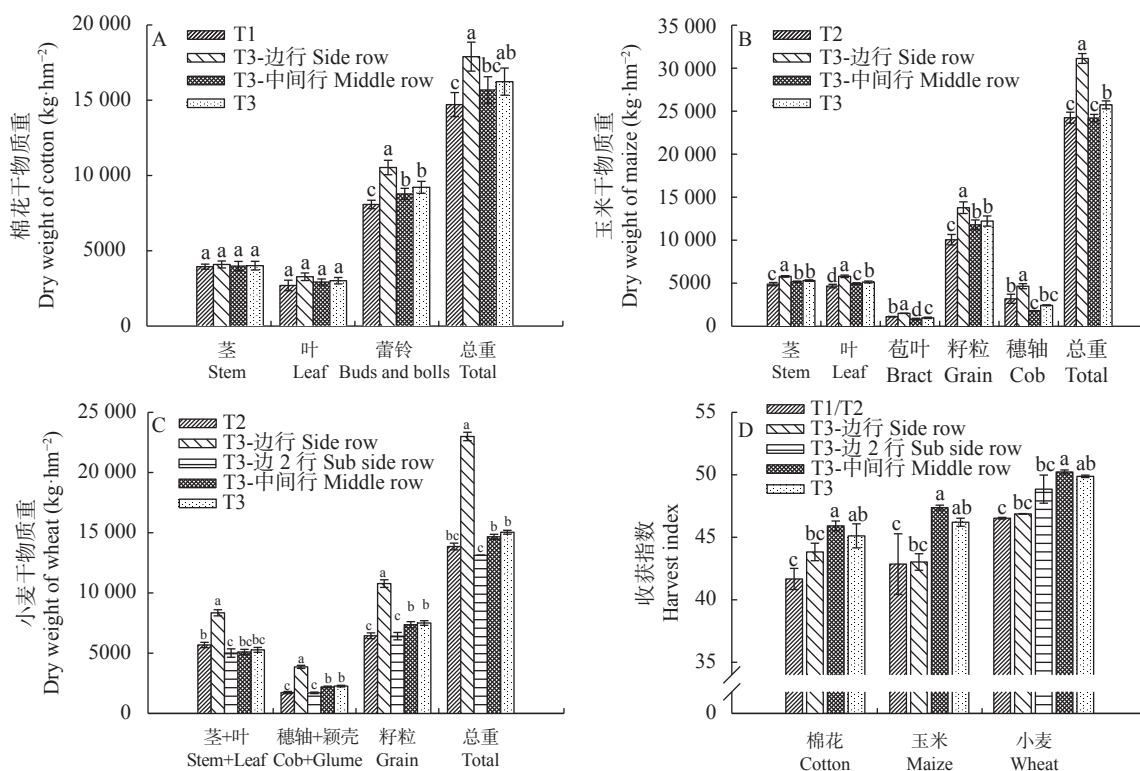


图 7 不同种植方式对棉花、玉米和小麦干物质重的影响

Fig. 7 Effects of different planting methods on dry matter weight of cotton, maize, and wheat

T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带薪轮作。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

10.35% ($P < 0.05$, 图 7A), 主要为蕾铃干物质重增加所致。条带不同位置棉花干物质重结果显示, T3 处理棉花边行干物质总重与蕾铃干重分别比中间行增加 14.13% 和 20.00% ($P < 0.05$), 茎、叶干重无显著差异。玉米 T3 处理干物质总重较 T2 处理显著增加 6.17% ($P < 0.05$, 图 7B), 其中茎、叶和籽粒均较 T2 处理显著增加。条带不同位置干物质重结果表明, 玉米 T3-边行干物质总重、茎、叶及籽粒干物质重分别比 T3-中间行显著增加 28.63%、12.00%、17.24% 和 16.90%。小麦 T3 处理干物质总重与 T2 处理不存在显著差异 (图 7C), 而穗轴+颖壳以及籽粒干物质重分别较 T2 处理增加 31.02% 和 16.37%, T3 与 T3-中间行不同器官干物质重无显著差异。

T3 处理显著增加了棉花、玉米和小麦的收获指数 ($P < 0.05$, 图 7D)。与 T1 处理比较, T3 处理棉花的收获指数显著增加 8.27%。不同位置比较发现, T3-中间行收获指数较 T3-边行显著增加 4.77%。与 T2 处理比较, T3 处理玉米收获指数显著增加 7.82%。条带不同位置比较发现, T3-中间行收获指数比 T3-边行显著增加 10.12%, 并且 T3-中间行收获指数显著高于 T2 处理, 但 T3-边行与 T2 差异不显著。与棉花、

玉米结果相似, 小麦 T3 处理收获指数显著高于 T2 处理, T3-中间行收获指数显著高于 T3-边行。

T3 处理对棉花、玉米和小麦的产量及构成因素均有显著影响 (图 8, 表 1)。棉花带 T3-边行、T3-中间行和 T3 单位面积产量较 T1 处理分别显著增加 29.57%、10.48% 和 15.20% ($P < 0.05$)。对产量构成因素的分析表明, 与 T1 处理相比, 棉花 T3-边行、T3-中间行和 T3 处理单株铃数均显著增加, T3-边行单铃重显著增加, 但 T3 和 T3-中间行无显著变化 (表 1)。

玉米产量结果与棉花相似, T3-边行、T3-中间行和 T3 单位面积产量分别较 T2 处理增加 37.02%、17.21% 和 21.61% ($P < 0.05$), T3 单位面积产量与中间行无显著性差异。产量构成结果表明, T3 处理及 T3-中间行仅玉米穗粒数较 T2 处理显著增加, 穗数和千粒重无差异; 但 T3-边行穗粒数、穗数和千粒重均显著高于 T2 处理 (表 1)。

小麦 T3-边行、T3-边 2 行和 T3 单位面积产量分别比 T2 显著增加 107.84%、17.51% 和 11.53%, T3 单位面积产量比 T3-中间行增加 6.08%, 表明边行优势在增产中发挥关键作用。产量构成结果显示, 与 T2 处理比较, 小麦 T3-边行、T3-边 2 行、T3-中间

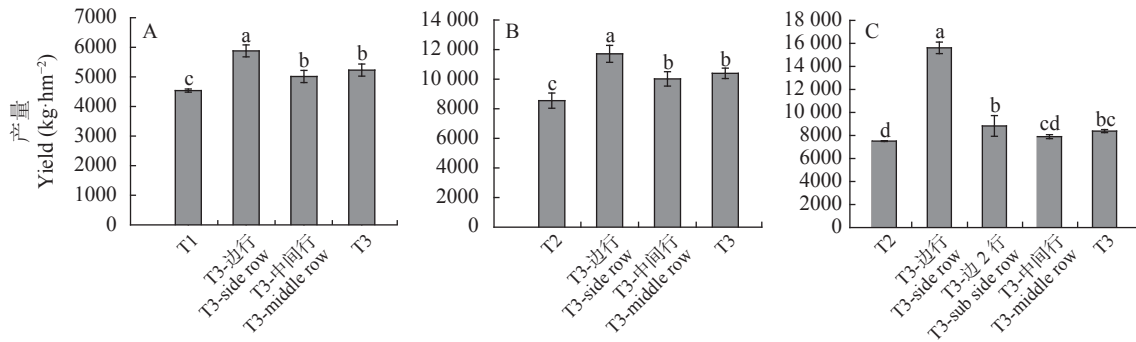


图 8 不同种植方式对棉花 (A)、玉米 (B) 和小麦 (C) 单位面积产量的影响

Fig. 8 Effects of different planting methods on the yield of cotton (A), maize (B) and wheat (C)

T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带轮作。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$.

表 1 不同种植方式对棉花、玉米和小麦产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different planting methods on yield components of cotton, maize and wheat

处理 Treatment	棉花 Cotton			玉米 Maize			小麦 Wheat		
	株数 Plants ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单铃铃数 Boll number per plant	单铃重 Single boll weight (g)	穗数 Spikes ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	穗数 Spikes ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)
T1	7.02±0.04a	12.6±0.3c	6.05±0.21b	—	—	—	—	—	—
T2	—	—	—	6.60±0.03b	503.1±33.6b	301.7±5.5b	608.1±18.0b	32.7±0.7b	38.3±0.3c
T3	7.02±0.03a	14.0±0.7b	6.28±0.07ab	6.78±0.08b	591.7±18.1a	304.0±3.1b	621.0±3.0b	35.6±0.4b	40.3±0.1b
T3-边行 T3-side row	7.02±0.04a	15.5±0.7a	6.35±0.07a	7.48±0.38a	596.8±8.5a	308.9±3.9a	851.0±27.2a	45.0±2.1a	42.7±0.7a
T3-边2行 T3-sub side row	—	—	—	—	—	—	631.7±47.5b	35.3±1.8b	40.9±0.6b
T3-中间行 T3-middle rows	7.02±0.03a	13.4±0.7b	6.25±0.07ab	6.60±0.05b	590.4±23.6a	302.4±2.9b	586.6±6.8b	34.3±0.4b	40.1±0.0b

同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level.

行和 T3 处理千粒重显著增加 (表 1)。

与棉花单作比较, 棉-粮-绿肥宽带轮作体系提升了棉田复种指数和土地当量比。与一年两熟比较, 棉-粮-绿肥宽带轮作体系仅提升了土地当量比, 宽带轮作体系的土地利用效率比对照处理提升 17.00% (表 2)。

2.5 棉-粮-油菜宽带轮作对不同作物光能利用率的影响

不同处理下作物光能利用率变化如图 9 所示。T3 处理下, 棉花、玉米、小麦光能利用率较对照分

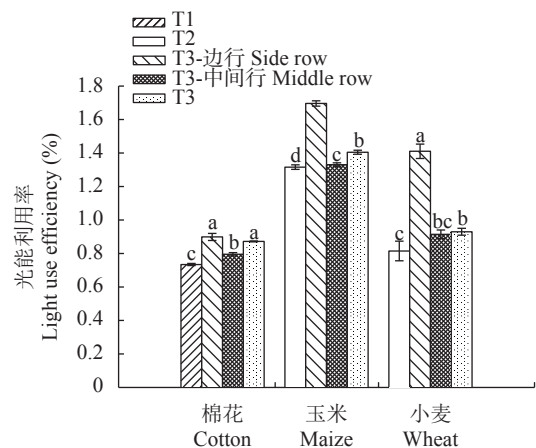


图 9 不同种植方式对棉花、玉米和小麦光能利用率的影响

Fig. 9 Effects of different planting methods on light use efficiency of cotton, maize and wheat

T1: 棉花单作; T2: 小麦-玉米一年两熟; T3: 棉-粮-油菜宽带轮作。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。T1: cotton monoculture; T2: wheat-maize rotation; T3: broadband crop rotation of cotton-grain-rape. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$.

表 2 不同种植方式的复种指数和土地当量比
Table 2 Multiple-crop index and land equivalent ratio of different planting methods

处理 Treatment	复种指数 Multiple-crop index	土地当量比 LER
T1	1.00	1.00
T2	2.00	1.00
T3	2.00	1.17

别提高 18.81%、6.76% 和 14.10%。对不同位置结果的分析表明,棉花与玉米相似,T3-边行和中间行光能利用率均较对照显著提高,小麦则有所不同,仅 T3-边行显著提高,T3-中间行与对照无显著变化。

3 讨论和结论

3.1 边行效应和轮作效应共同发挥作用促进作物产量提升

本研究中,棉-粮-油菜宽带轮作的土地当量比达到 1.17,表明宽带轮作系统具有产量优势。这与人关于玉米和棉花^[12]、小麦和棉花间作^[13]的研究结果一致。边际效应在高矮秆作物复合间作群体结构增加生物产量和经济产量方面发挥重要作用^[14]。本研究表明,与连作处理比较,边行棉花、边行玉米和边行小麦干物质重显著增加,但收获指数未显著变化,表明边行效应在干物质增加过程中发挥作用。中间行棉花、中间行玉米和中间行小麦的收获指数显著增加,但干物质未发生显著变化,表明轮作效应在干物质分配中发挥作用,促进作物经济系数的提升。值得注意的是,棉花玉米间作边行存在竞争,并且在棉花与玉米共生期间,7月15日以后玉米对棉花边行产生遮蔽作用,但棉花边行产量不降反增。有研究表明带状轮作种植系统中存在的边行效应和轮作效应弱化了种间竞争,使资源得到合理利用,竞争作用减弱,互补作用增强^[15],进而增加了棉花生物产量,与本研究结果一致。

3.2 棉-粮-油菜宽带轮作改变了作物干物质积累和分配

干物质是光合作用产物的最终形态,是产量形成的物质基础^[16],其积累、合理分配及转运是提高作物产量的关键^[17],影响成熟期结实器官的分配量。本研究中,宽带轮作体系内不同作物器官干物质的积累和分配均发生变化。一方面,棉花、玉米的生物产量均较对照显著增加,另一方面经济器官干物质占比显著提升,棉花、玉米和小麦的收获指数均较连作对照显著提高,棉花籽棉、玉米籽粒和小麦籽粒在植株干物质提升的贡献率分别为 73.67%、145.33% 和 89.15%。此结果表明棉-粮-绿肥宽带轮作体系内作物干物质更多地分配到经济器官。宽带轮作体系内作物光合产物积累能力增强,同时向经济价值器官转移比例提升,生物产量增加与经济系数提高共同作用促进了产量提升^[18]。

3.3 棉-粮-油菜宽带轮作通过提高光合作物产量而非光能截获提升作物光能利用率

作物群体的光能利用率与作物的干物质生产能

力密切相关^[19],作物的生长和最终产量取决于光能截获量和光能利用率^[20]。本研究中棉花、玉米和小麦的光能利用率显著提升,玉米截获量增长 0.76%,棉花、小麦光能截获量并未增加。此结果表明棉-粮-油菜宽带轮作主要通过提高光合作物产量提升作物光能利用率,而非光能截获量。

叶面积指数是反映光能利用的叶片特征之一。本研究结果显示,宽带轮作棉花开花后(盛花期至吐絮期) LAI 显著高于单作棉花,由于受到玉米遮阴影响,棉花光能截获量并未增加,但产量显著增加。表明宽带轮作体系棉花通过增加群体生育后期 LAI 以减少玉米遮阴带来的影响,以适应弱光环境^[21]。开花后较大的光合面积且在后期下降缓慢是高产群体的重要特征之一^[22],棉花盛铃期以后的群体光合速率决定了棉花产量的高低^[23],间作能提高间作群体中弱势作物的光能利用效率^[24]。综合以上研究,宽带轮作体系棉花生育后期较大的 LAI 有利于棉花群体对有限光能的利用,提升光合速率,进而增加光合产量,提升了光能利用率,满足了棉花生育后期对光合的需求,为棉花对有限光能的高效利用及高产的形成奠定了基础。

本研究中,宽带轮作种植模式提升了复种指数和土地利用率,同时能够通过边行效应和轮作效应共同作用,优化棉花的叶面积指数,提升棉花、玉米和小麦的光能利用率,满足棉花、玉米和小麦所需的光照资源,改善作物干物质积累和分配,增加了棉花、玉米和小麦单位面积产量,为棉花、玉米和小麦高产及群体产量发挥奠定了基础。

参考文献 References

- [1] ANDREWS D J, KASSAM A H. The importance of multiple cropping in increasing world food supplies[D]. Multiple Cropping, 1976, 27: 1-10
- [2] 李文娇, 杨殿林, 赵建宁, 等. 长期连作和轮作对农田土壤生物学特性的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 173-178
- [3] LI W J, YANG D L, ZHAO J N, et al. Progress on effects of long-term continuous cropping and rotation systems on farmland soil biological characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 173-178
- [4] 刘建国. 新疆棉花长期连作的土壤环境效应及其化感作用的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 3-11
- [5] LIU J G. Effects on soil environments of long-term succession cropping and allelopathy mechanism of cotton in Xinjiang[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 3-11
- [6] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415
- [7] LI L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives[J]. Chinese

- Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 403–415
- [5] 陈虹, 杨磊, 张风华. 新疆长期棉花连作对土壤理化性状与线虫群落的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4263–4271
CHEN H, YANG L, ZHANG F H. Effects of continuous cotton monocropping on soil physicochemical properties and nematode community in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4263–4271
- [6] 吕晴晴, 何宁, 张永江, 等. 间作和轮作通过根冠互作调控作物产量形成的生理生态机制[J]. 植物生理学报, 2023, 59(7): 1277–1290
LÜ Q Q, HE N, ZHANG Y J, et al. Eco-physiological mechanism of crop yield formation regulated by intercropping and rotation through root-shoot interaction[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(7): 1277–1290
- [7] 赵欣欣. 密度与施氮量对麦套棉花产量形成和资源利用的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2021
ZHAO X X. The effect of density and nitrogen application on yield formation and resource utilization of cotton in cotton intercropped with wheat[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021
- [8] 翟雷霞, 李继军, 李文蕾, 等. 冀中南地区棉麦间作套种高产栽培技术[J]. 棉花科学, 2017, 39(5): 48–50
ZHAI L X, LI J J, LI W L, et al. High-yield cultivation techniques of cotton-wheat intercropping in central and southern Hebei Province[J]. Cotton Sciences, 2017, 39(5): 48–50
- [9] YANG Z P, ZHENG S X, NIE J, et al. Effects of long-term winter planted green manure on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of reddish paddy soil under a double-rice cropping system[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(8): 1772–1781
- [10] 庾振宇, 方畅宇, 刘芳禧, 等. 绿肥配施氮肥对双季稻产量和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 320–327
YU Z Y, FANG C Y, LIU F X, et al. Effects of green manure with nitrogen fertilizer on the yield and nutrient absorption of double-cropping rice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 320–327
- [11] 刘谿源, 王纪华, 杨贵军, 等. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 220–224
LIU R Y, WANG J H, YANG G J, et al. Comparison of ground-based LAI measuring methods on winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 220–224
- [12] 崔爱花, 孙巨龙, 刘帅, 等. 三种间作模式对棉花产量和品质及棉田效益的影响比较[J]. 棉花科学, 2021, 43(2): 22–28
CUI A H, SUN J L, LIU S, et al. Comparison of the effects of three intercropping patterns on cotton yield and quality and cotton benefits[J]. Cotton Sciences, 2021, 43(2): 22–28
- [13] 王树林, 刘文艺, 祁虹, 等. 麦棉套作模式下施氮量对小麦产量及氮素吸收量的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(6): 10–13, 51
WANG S L, LIU W Y, QI H, et al. Effects of nitrogen amount on wheat yield and nitrogen absorption amount in wheat-cotton intercropping system[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2015, 19(6): 10–13, 51
- [14] LI Q Z, SUN J H, WEI X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1): 147–161
- [15] 雍太文, 刘小明, 宋春, 等. 种植方式对玉米-大豆套作体系中作物产量、养分吸收和种间竞争的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 659–667
YONG T W, LIU X M, SONG C, et al. Effect of planting patterns on crop yield, nutrients uptake and interspecific competition in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 659–667
- [16] 杨玲, 郭茹, 刘洋, 等. 宁夏引黄灌区玉豆间作和带状轮作模式对玉米水氮利用及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(6): 755–765
YANG L, GUO R, LIU Y, et al. Effects of maize-soybean intercropping and strip rotation on water, nitrogen utilization and yield of maize in Yellow River irrigated area of Ningxia[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(6): 755–765
- [17] 高小丽, 孙健敏, 高金锋, 等. 不同绿豆品种花后干物质积累与转运特性[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1715–1721
GAO X L, SUN J M, GAO J F, et al. Accumulation and transportation characteristics of dry matter after anthesis in different mung bean cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1715–1721
- [18] 郑红裕. 播期、密度与施氮量对油菜收获指数的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015: 1–8
ZHENG H Y. Study on the effects of sowing date, plant density and nitrogen fertilizing on harvest index of rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015: 1–8
- [19] 杨国敏, 孙淑娟, 周勋波, 等. 群体分布和灌溉对冬小麦农田光能利用的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1868–1875
YANG G M, SUN S J, ZHOU X B, et al. Effects of population distribution pattern and irrigation schedule on radiation utilization in winter wheat farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1868–1875
- [20] LI Y C, DAI H Y, CHEN H. Effects of plant density on the aboveground dry matter and radiation-use efficiency of field corn[J]. PLoS One, 2022, 17(11): e0277547
- [21] 任梦露, 刘卫国, 刘小明, 等. 荫蔽信号对大豆幼苗生长和光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 499–505
REN M L, LIU W G, LIU X M, et al. Effect of shading signal on growth and photosynthetic characteristics of soybean seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 499–505
- [22] 刘金印, 张恒善, 王大秋. 豆种植密度和群体结构指标的研究[J]. 大豆科学, 1987, 6(1): 1–10
LIU J Y, ZHANG H S, WANG D Q. Studies on soybean plant density and its index of population structure[J]. Soybean Science, 1987, 6(1): 1–10
- [23] 张旺锋, 李正河, 李蒙春, 等. 北疆高产棉花 (2250 kg/hm²) 群体光合、呼吸特性及其与产量关系的研究[J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 1998(S1): 71–76
ZHANG W F, LI Z H, LI M C, et al. Study on photosynthesis and respiration characteristics of high-yielding cotton (2250 kg/hm²) population in northern Xinjiang and their relationship with yield[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1998(S1): 71–76
- [24] 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
WANG Z K, WU P T, ZHAO X N, et al. A review of light interception and utilization by intercropped canopies[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 1057–1066