

# 线辣椒/玉米带状套作的光能截获和利用特征\*

徐强<sup>1</sup> 程智慧<sup>2</sup> 卢涛<sup>3</sup> 谢宝英<sup>4\*\*</sup>

(1. 安徽农业大学园艺学院 合肥 230036; 2. 西北农林科技大学园艺学院 杨凌 712100;  
3. 濮阳市园林绿化处 濮阳 457000; 4. 安徽农业大学理学院 合肥 230036)

**摘要** 太阳辐射的有效利用是间套作种植模式呈现产量优势的根本原因。本试验研究了线辣椒/玉米带状套作群体的叶面积指数(LAI)动态变化趋势及光合有效辐射(PAR)的截获和利用规律。试验设线辣椒单作(SC)、线辣椒/玉米套作(IMC)、玉米单作(SM)3个处理。研究表明:线辣椒和玉米的叶面积指数在生育期内均呈单峰型曲线变化,单作线辣椒和单作玉米的LAI均稍大于各自的套作;套作线辣椒的消光系数低于单作。玉米、线辣椒单作与套作整个生育期内的PAR截获量差异显著,带状套作的PAR截获量比按套作比例(0.788:0.222)对单作PAR截获量加权的平均值高42.25%。线辣椒/玉米带状套作的PAR利用效率比按套作比例对单作PAR利用效率加权的平均值高39.51%。套作玉米的干物质积累速率大于单作,套作线辣椒的干物质积累速率低于单作。套作线辣椒的干物质向茎、枝的分配比例显著低于单作,而向果实、根的分配比例分别比单作高2.8%和2.6%;套作玉米的干物质向各器官最终分配比例与单作无显著差异。与单作相比,线辣椒/玉米带状套作模式的产量优势归功于PAR截获量和利用率的提高。合理的套作可以使作物对PAR的截获和利用在时间和空间上达到互补。

**关键词** 套作 玉米 线辣椒 光合有效辐射 光能截获 光能利用率

**中图分类号:** S344.2; S161.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2010)05-0969-08

## Light interception and utilization of maize-capsicum strip relay intercrop

XU Qiang<sup>1</sup>, CHENG Zhi-Hui<sup>2</sup>, LU Tao<sup>3</sup>, XIE Bao-Ying<sup>4</sup>

(1. School of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. School of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Landscape Greening Bureau of Puyang City, Puyang 457000, China;  
4. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract** Efficient use of photosynthetic active radiation (PAR) is a major yield advantage factor in relay intercropping. This study therefore analyzed the dynamic processes of leaf area index (LAI) and the interception and utilization mechanisms of PAR in a relay intercropping system of maize and capsicum. Three treatments (sole cropping maize, sole cropping capsicum, and relay intercropping maize/capsicum) were set up. The study shows that though LAI for relay intercropping maize/capsicum is slightly lower than that for sole cropping maize and sole cropping capsicum, it exhibits a uni-peak curve for the three cropping systems. Under relay intercropping with maize, capsicum canopy light extinction coefficient (*k*) decreases. There is a significant difference in intercepted PAR between maize/capsicum relay intercropping and maize or capsicum sole cropping. The PAR intercepted amounts under maize/capsicum relay intercropping system is 42.25% higher than the weighted mean of PAR for maize and capsicum sole cropping according to their relay intercropping proportion (0.788 : 0.222). PAR use efficiency under maize/capsicum relay intercropping system is 39.51% higher than the weighted mean for maize and capsicum sole cropping. Dry-matter accumulation rate for relay intercropping maize is higher than that for sole cropping maize, whereas the opposite is the case for sole cropping capsicum. The fraction of dry-matter allocated to stems and branches in relay intercropping capsicum is slightly lower than that in sole cropping capsicum. However, the fractions of allocated dry-matter to roots and fruits in relay intercropping capsicum are respectively 2.8% and 2.6%

\* “十五”国家科技攻关计划项目(2004BA516A09)、安徽农业大学稳定和引进人才科研资助项目(yj2008-10)和2010年安徽省高校省级优秀青年人才基金项目(2010SQRL062)资助

\*\* 通讯作者: 谢宝英(1981~), 女, 硕士, 研究方向为生物数学与植物生长模拟。E-mail: xieby1014@163.com

徐强, 男, 博士, 主要从事农田生态和植物栽培生理研究。E-mail: qiang\_xu1015@163.com

收稿日期: 2010-05-05 接受日期: 2010-07-02

higher than those in sole cropping capsicum. There is insignificant difference in the fractions of allocated dry-matter to the different organs between relay intercropping and sole cropping maize. The study consequently suggests that in comparison with mono-culture, high productivity of relay intercropping is fully explainable by increasing interception and use efficiency of *PAR*. Reasonable intercropping of crops therefore complements the interception and utilization of *PAR* in space and time.

**Key words** Relay intercropping, Maize, Capsicum, Photosynthetic active radiation (*PAR*), Light interception, *PAR* use efficiency

(Received May 5, 2010; accepted July 2, 2010)

现代农业生产中,为了获得较高产量已经采用了许多措施,包括提高水分、养分、太阳辐射及土地的利用效率<sup>[1]</sup>。但有些农业资源随着利用程度的不断加强,数量越来越少,供需矛盾不断加剧,对农业生产的持续稳定发展构成了极大威胁。而太阳辐射与其他农业资源不同,在量上始终保持相对稳定,是一种可以更有效地用于农业生产的资源。目前诸多研究表明,合理的间套作种植能提高作物群体的光能利用效率<sup>[2-6]</sup>。间套作群体内作物生长环境的改变对作物产量有显著影响<sup>[7-8]</sup>。间作模式下光合有效辐射截获量日变化为双峰曲线,光合有效辐射截获量与叶面积指数有较好的相关性<sup>[9]</sup>。然而,在众多不同作物组合的间套作模式光合有效辐射截获和利用规律研究中,关于线辣椒/玉米套作种植模式的分析鲜有报道。

线辣椒是中国农产品出口创汇的名优特产,而线辣椒种植又以陕西省面积最大,占全国线辣椒种植面积的 1/4~1/3。陕西省的线辣椒种植模式主要是小麦、线辣椒、玉米“梯阶式”套种,约占当年线辣椒种植面积的 75%以上,该模式主要是当年秋播小麦,翌年麦收前 20~25 d 内,将线辣椒苗移栽到麦田预留空带内,小麦收获后,在麦茬带内每隔 6 行线辣椒套种 2 行玉米。此套作模式中,小麦与线辣椒的共生期很短(20 d 左右,线辣椒处于缓苗期),以线辣椒与玉米共生为主,共生期达 90 d 左右。线辣椒/玉米套作体系的土地当量比(*LER*)高达 1.44,线辣椒比单作增产 30%以上,另外套种还额外增收小麦 5 250~7 500 kg·hm<sup>-2</sup>,玉米增收 1 500 kg·hm<sup>-2</sup>,具有显著的产量优势<sup>[10]</sup>。然而,这多大程度上取决于辐射截获量的增加,或光能利用率的提高,或两者兼之仍不清楚。本试验依据系统观测,描述了光合有效辐射(*PAR*)在线辣椒/玉米带状套作冠层内的分布规律;评估了整个生长季内套作和单作模式下作物对光能的截获量;在 *PAR* 累积截获与干物质量增加呈线性关系的基础上计算了作物的 *PAR* 利用效率,为线辣椒/玉米带状套作模式的优质高效生产实践提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2006 年在西北农林科技大学园艺学院园艺场露地进行。园艺场位于东经 108°06'14",北纬 34°15'22",海拔 528.15 m,属大陆性暖温带季风气候,年均气温 12.9℃,年均日照 2 196 h,无霜期约 220 d。年均降雨量 660 mm,年均蒸发量 993.2 mm。供试土壤为砂壤土,耕层土壤 pH 为 7.67、EC 为 0.42 ms·cm<sup>-1</sup>,含有机质 16.98 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 1.07 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 90.06 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 45.41 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 416.91 mg·kg<sup>-1</sup>。供试玉米(*Zea mays* L.)品种为“陕高农 1 号”,西北农林科技大学农城种业提供;线辣椒(*Capsicum annuum* L. var. *acuminatum* T. R. Zhuang)品种为西北农林科技大学园艺学院选育的“陕 8819”。

采取析因试验设计,设线辣椒单作(SC)、线辣椒/玉米套作(ICM)、玉米单作(SM)3 个处理,每个处理 4 次重复。套作采用生产上推广的 6 行线辣椒:2 行玉米带状种植方式,种植带东西走向。玉米行距为 0.4 m,株距 0.35 m;线辣椒株行距均为 0.4 m;玉米与线辣椒行距为 0.24 m,1 个线辣椒/玉米套作带宽 2.88 m。单作和套作在净占地面积上的种植密度相同,套作模式中玉米占 22.2%、线辣椒占 77.8%。线辣椒留苗 62 500 穴·hm<sup>-2</sup>,每穴留苗 3 株,玉米留苗 71 400 株·hm<sup>-2</sup>。小区面积为 9.0 m×8.0 m,每小区种植 3 个套作组合带,单作玉米和单作线辣椒分别种 22 行。线辣椒育苗移栽,苗龄 60 d,5 月 20 日定植,10 月 5 日收获;玉米 6 月 10 日播种,9 月 18 日收获,两作物共生期约 90 d。基肥施用量为:N 120 kg·hm<sup>-2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 50 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 70 kg·hm<sup>-2</sup>。试验地排灌系统良好,前茬作物为西瓜,线辣椒定植前均匀翻耕,人工除草。田间管理措施按当地生产实践中的常规模式进行,以充分保证作物生长发育需求为基础。

### 1.2 测定项目与方法

#### 1.2.1 干物质量

自玉米出苗 20 d 后,每 7~10 d 测定 1 次线辣椒、玉米植株的生物量,直至收获。单作玉米每个小区

取 5 株, 单作线辣椒每个小区取 5 穴(15 株)。套作小区的取样统一在中间条带内进行, 玉米、线辣椒取样数量与各自单作相同。采集的鲜样先在 105℃ 下杀青 2 h, 然后在 80℃ 下烘 72 h 至恒重后称重。线辣椒样本在座果前分为叶(包括花)、枝、茎和根 4 部分测定, 座果后分解为叶(包括花)、枝、果、茎和根 5 部分测定。玉米样本在拔节期分为地上和地下 2 部分测定, 抽雄和吐丝期分解为茎、叶、穗和根 4 部分测定, 灌浆和成熟期分解为茎、叶、苞叶、穗轴、籽粒和根 6 部分测定。

### 1.2.2 太阳辐射及套作冠层内 PAR 分布

分别使用 LI-190SA 和 LI-191SA 光量子传感器(LI-COR, Lincoln, NE, USA)观测作物冠层顶端的入射太阳辐射强度和冠层底部的太阳辐射强度。LI-190SA 和 LI-191SA 测定的是 PAR 波段(0.4~0.7 μm), 是作物群体光特征研究关心的波段, 也是对光合作用起作用的光谱范围。每日的观测时间为 6:00~20:00, 用 LI-1400 数据采集器记录数据, 每 10 min 记录 1 次。从玉米播种后第 30 d 开始观测, 直至收获, 每隔 7~10 d 观测 1 次, 均选择在晴天进行。

测定套作群体冠层内的辐射强度分布时, 传感器水平摆放在与行向垂直横断面上的不同位置, 距地面高度为 5 cm, 分别测定玉米带的中间、玉米行、线辣椒行及线辣椒带中间、玉米和线辣椒行之间的中间位置的辐射强度(图 1)。在位于套作小区中间的条带内设置观测点, 每个采样点记录 10 个数据。数据用 LI-1400 数据采集器记录, 每 10 s 记录 1 次。观测选择在晴朗无风天气(2006 年 7 月 11 日、7 月 23 日、8 月 19 日)进行, 每次测定时间均为 12:00~14:30, 重复观测 2 次。

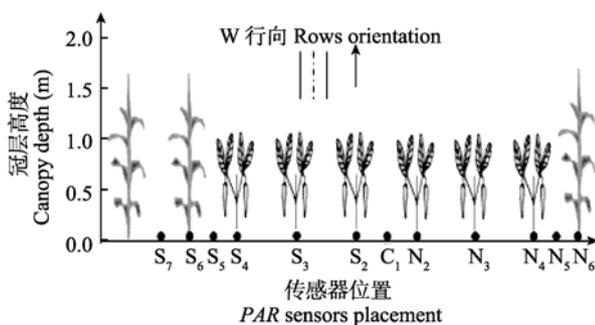


图 1 PAR 传感器在线辣椒/玉米套作体系中的摆放位置  
Fig. 1 Setting positions of PAR sensors in capsicum/maize strip relay intercropping system

W: 西 West; S: 南 South; N: 北 North; C: 中间 Center; 1~7 为从线辣椒带中间到玉米带中间不同位置的编号 1~7 are sequence codes from the centre position of capsicum strip to centre position of maize strip.

### 1.2.3 叶面积指数(LAI)和消光系数(k)的计算

使用美国 LI-COR 公司生产的 LAI-2000 冠层分析仪测定作物叶面积指数。

依参考文献[11], 按下式计算作物消光系数(k):

$$k = -\frac{1}{L} \ln \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

式中,  $I$  为冠层内辐射强度,  $I_0$  为冠层顶的太阳辐射强度,  $L$  为叶面积指数,  $k$  为消光系数。

### 1.2.4 辐射截获量的计算

根据文献[6], 单作群体的辐射截获量采用下式计算:

$$f_i = 1 - \exp(-k_i L_i) \quad (2)$$

式中,  $f_i$  为作物  $i$  冠层的辐射截获量,  $L_i$  为作物  $i$  的叶面积指数,  $k_i$  为作物  $i$  的冠层消光系数。

对于玉米/线辣椒套作群体, 冠层可以分为上下两层: 上层只包括玉米, 下层包括玉米和线辣椒。上层玉米的冠层结构与单作相似, 其辐射截获量( $f_{m-upper}$ )也可采用式(2)计算, 其中叶面积指数采用套作带单位面积内上层玉米的叶面积指数( $L_{m-upper}$ ), 消光系数采用套作带内上层玉米的消光系数( $k_{m1}$ )。

参照文献[4]给出的方程, 下层玉米和线辣椒的辐射截获量( $f_{m-lower}$  和  $f_c$ )为:

$$f_{m-lower} = \frac{k_{m2} L_{m-lower}}{k_{m2} L_{m-lower} + k_c L_c} \times [1 - \exp(-k_{m2} L_{m-lower} - k_c L_c)] \quad (3)$$

$$f_c = \frac{k_c L_c}{k_{m2} L_{m-lower} + k_c L_c} \times [1 - \exp(-k_{m2} L_{m-lower} - k_c L_c)] \quad (4)$$

式中,  $L_{m-lower}$  和  $L_c$  分别为套作带单位面积内下层玉米和线辣椒的叶面积指数,  $k_{m2}$  和  $k_c$  为套作带内下层玉米和线辣椒的消光系数。假定植株叶片随机分布, 用下式计算  $L_{m-upper}$  和  $L_{m-lower}$ :

$$L_{m-upper} = \frac{h_m - h_c}{h_m} \times L_m \quad (5)$$

$$L_{m-lower} = \frac{h_c}{h_m} \times L_m \quad (6)$$

式中,  $h_m$  和  $h_c$  分别为玉米和线辣椒的株高(cm),  $L_m$  为整株玉米的叶面积指数。

### 1.2.5 辐射利用效率(RUE)

根据文献[12], 辐射利用效率用下式计算:

$$RUE = \frac{Y_{biomass}}{I_0 \cdot f} \quad (7)$$

式中,  $Y_{biomass}$  为作物的地上部干物质量( $g \cdot m^{-2}$ ),  $I_0$  为冠层上方入射太阳辐射( $MJ \cdot m^{-2}$ ),  $f$  为作物冠层的太阳辐射截获率。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面积指数(LAI)动态和消光系数(k)

线辣椒和玉米的叶面积指数在生育期内均呈单峰型曲线变化(图 2)。单作线辣椒和单作玉米的 LAI 均稍大于各自的套作,且变化趋势相似。玉米 LAI 的增加速率大于线辣椒,播种后 84 d(8月13日)达到

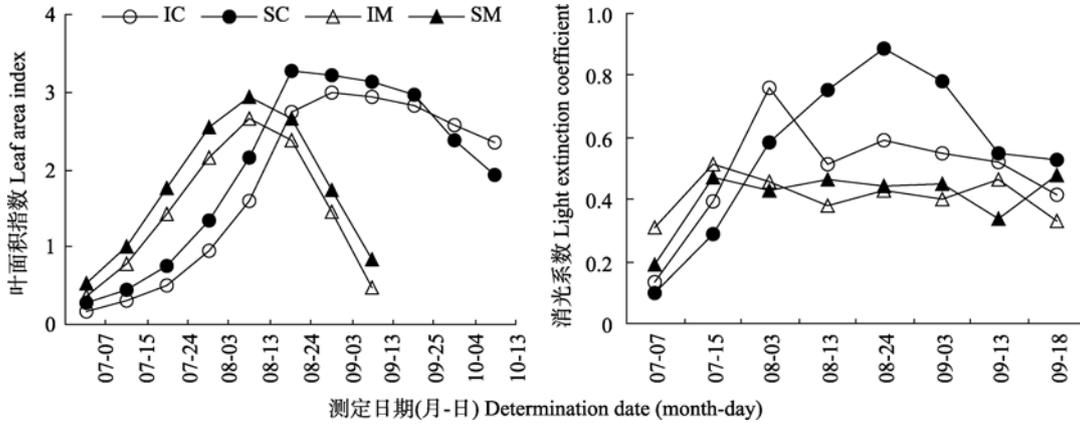


图 2 单作和套作线辣椒、玉米的叶面积指数和消光系数的变化曲线

Fig. 2 Changes of leaf area index (LAI) and light extinction coefficient (*k*) for sole cropping maize and capsicum, and their relay intercropping system

IC: 套作线辣椒 Relay intercropping capsicum; SC: 单作线辣椒 Sole cropping capsicum; IM: 套作玉米 Relay intercropping maize; SM: 单作玉米 Sole cropping maize. 下同 The same below.

图 2 还展示了不同栽培模式下线辣椒和玉米整个生长季节内冠层消光系数(*k*)的变化趋势。生长早期,各处理的冠层 *k* 值均较低,随后迅速增大。除早期生长阶段,共生期内单作和套作玉米的冠层 *k* 值变化趋势相似,变化幅度小,均低于单作和套作的线辣椒。单作线辣椒的冠层 *k* 值随生长季节推移而急剧增加,8月24日达到最大,然后迅速下降。套作线辣椒的冠层 *k* 值在8月3日以前稍高于单作,随后逐渐减小。玉米 LAI 达到最大值前的时间段内,套作玉米冠层 *k* 值低于单作。单作玉米与套作玉米的冠层 *k* 值生长季节平均值相近,差异不显著(表 1); 而套作线辣椒的冠层 *k* 值比单作低 18.4%,差异显著( $P < 0.01$ )。

表 1 单作和套作线辣椒、玉米的消光系数生长季节平均值  
Tab. 1 Seasonal mean of light extinction coefficient (*k*) of capsicum and maize under different cropping systems

种植模式 Cropping pattern	消光系数 Light extinction coefficient ( <i>k</i> )
玉米 Maize	
单作 Sole cropping	0.451±0.009b
套作 Relay intercropping	0.442±0.017b
线辣椒 Capsicum	
单作 Sole cropping	0.609±0.031a
套作 Relay intercropping	0.497±0.064b

数值为 3 次重复的平均值和标准偏差 Data are the mean of three replicates with standard deviation. 同列数据不同字母表示差异达到 1% 显著水平 Values followed by different letters within a column are significantly different ( $P < 0.01$ ). 下同 The same below.

最大值(2.95)。线辣椒 LAI 在生育期前段缓慢增加,直到开花坐果初期(7月24日,定植后 64 d)才急剧扩大,单作和套作线辣椒分别在定植后的 95 d(8月24日)和 104 d(9月3日)达到最大值。套作线辣椒 LAI 最大值出现时间相对滞后,说明其 LAI 发展受到延迟。

### 2.2 光合有效辐射(PAR)截获

图 3 为单作和套作线辣椒、玉米 PAR 截获量累积动态及不同种植模式的比较。从图 3A 可以看出,单作线辣椒、玉米的 PAR 截获量均高于套作,玉米 PAR 截获量的增加速率高于线辣椒。与单作相比,套作玉米的 PAR 截获被延迟,到生长期结束也没有得到完全弥补,这可能是先期种植的线辣椒遮荫效应延迟了后期播种的玉米苗期生长发育的结果。Zhang 等<sup>[13]</sup>在小麦/棉花套作体系的研究中报道了相似情况,先期播种的小麦对后期播种的棉花苗期生长发育有延迟效应,降低了棉花的 PAR 辐射截获量。单作玉米( $814.67 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )、单作线辣椒( $549.78 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )与套作带( $1\ 075.19 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )在整个生育期内的 PAR 截获量差异显著(图 3B),套作带的 PAR 截获量比按套作比例对单作的 PAR 截获量进行加权的平均值高 42.25%。说明线辣椒/玉米套作田中不是两种作物按一定比例(0.788 : 0.222)的简单相加,而是两种作物对 PRA 的截获有相互补偿作用,这也是线辣椒/玉米带状套作模式产量优势的生理生态基础之一。

### 2.3 光合有效辐射(PAR)利用效率

作物的 PAR 利用效率为截获单位 PAR 生产的干物质量。从表 2 可知,单作线辣椒和单作玉米的 PAR 利用效率分别为  $1.73 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$  和  $3.43 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。线辣椒/玉米套作带田的 PAR 利用效率显著高于单作线辣

表 2 单作和套作线辣椒、玉米的 PAR 利用效率  
Tab. 2 PAR use efficiency of sole cropping capsicum and maize and their relay intercropping system

种植模式 Cropping pattern	干物质质量 Dry matter weight (kg · hm <sup>-2</sup> )	PAR 利用效率 PAR use efficiency (g · MJ <sup>-1</sup> )	ΔE (%)
线辣椒单作 SC	13 746±5.34b	1.73±0.05b	
玉米单作 SM	32 721±2.17a	3.43±0.10a	
线辣椒/玉米套作 IMC	30 363±6.01a	2.94±0.28a	39.51

ΔE 为线辣椒/玉米套作 PAR 利用效率相对单作玉米和线辣椒 PAR 利用效率按套作比例的加权平均值差值。ΔE means difference between PAR use efficiency of relay intercropping system and weighted average of PAR use efficiency of sole cropping maize and capsicum according to their relay intercropping proportion in the unit area.

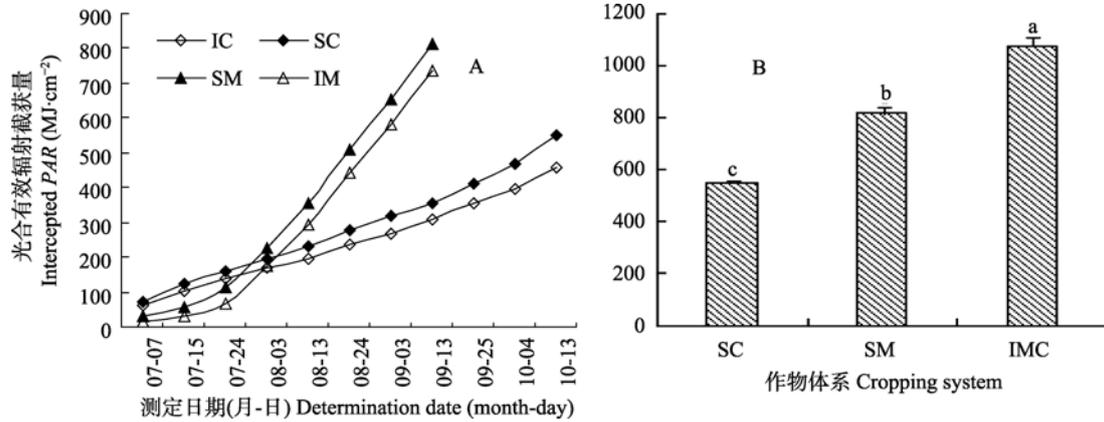


图 3 单作和套作线辣椒、玉米的累积 PAR 截获量(A)和套作与单作的 PAR 截获比较(B)

Fig. 3 Time courses of cumulative PAR interception in sole cropping capsicum and maize and their relay intercropping system (A), and comparison among sole cropping and relay intercropping systems (B)

IMC: 线辣椒/玉米套作带田 Capsicum and maize relay intercropping system. 下同 The same below.

椒( $P < 0.01$ ), 而略低于单作玉米, 差异不显著。线辣椒/玉米套作带田的 PAR 利用效率与按套作比例对单作线辣椒和玉米 PAR 利用效率进行加权平均后的值相比较, 前者高( $\Delta E$ )39.51%, 套作使得 PAR 利用效率相对于单作明显提高。套作后 PAR 利用效率的提高对线辣椒/玉米套作带田的产量优势也做出了贡献。

#### 2.4 光合有效辐射(PAR)的空间分布

线辣椒和玉米共生期间, 冠层底部 PAR 透射率在套作带跨行横断面的水平方向上差异较大(图 4)。套作玉米种植带中心(S<sub>7</sub>)水平地面 PAR 透射率(0.15±0.01)稍高于单作(0.06±0.01)。从玉米边行(S<sub>6</sub>或 N<sub>6</sub>)到线辣椒种植带中心(C<sub>1</sub>)的水平地面 PAR 透射率逐渐增加, 但套作带内所有辣椒行的冠层底部 PAR 透射率均低于单作, 单作线辣椒冠层底部 PAR 透射率为 0.87±0.03。套作带内南侧 3 行线辣椒的冠层底部 PAR 透射率平均值低于北侧 3 行。线辣椒种植带边行(与玉米相邻行)的透射率低于内行; 玉米种植带内行的透射率高于边行(与线辣椒相邻行), 靠近植株附近 PAR 透射率降低。这说明不仅玉米对线辣椒遮荫, 而且线辣椒冠层也会影响玉米下部冠层的透光。

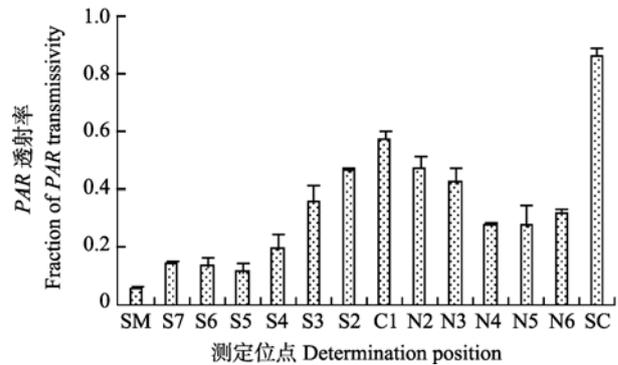


图 4 PAR 在套作系统内不同位点的透射率分布

Fig. 4 Fraction of PAR transmissivity at different positions in relay intercropping systems of capsicum and maize  
数据为 7 月 11 日、7 月 23 日、8 月 19 日 3 次测定结果的平均值。Data are averages of data collected on 11 July, 23 July and 19 Aug.

#### 2.5 干物质积累速率

单作和套作线辣椒, 在玉米出苗至吐丝的各生育期内, 干物质积累速率随着生长发育进程不断提高, 当玉米处于吐丝期时线辣椒已经进入盛果后期, 干物质积累速率达到最大值, 随后干物质积累速率降低, 套作种植降低幅度较大, 达 40.1%(表 3)。与单作相比, 套作线辣椒的干物质积累速率绝对值低于单作, 但从三叶到拔节期套作线辣椒干物质积累速率的增加量是单作的 2.5 倍, 其他生育期两者的增长量相近。线辣椒在套作带净面积上所占比例

为 78.8%，但其各生育期的干物质累积速率却低于单作 8.2%~37.2%，说明线辣椒在套作体系中处于劣势地位。

玉米植株干物质积累速率随着作物个体乃至群体的生长而加快，抽雄和吐丝期达到峰值，随后积累速率迅速下降(表 3)。套作玉米的干物质积累速率远大于单作玉米，三叶期以后均达显著水平。每公顷的套作带田中玉米仅占 0.222 hm<sup>2</sup>，但套作玉米的干物质积累速率在单作玉米的 1.1 倍以上，也从另一角度说明了套作优势。

2.6 干物质在植株各器官中的分配

套作线辣椒干物质积累的绝对数量和相对数量均低于单作，干物质向茎、枝的分配比例显著低于单作，而向果实、根的分配比例分别比单作高 2.8% 和 2.6%(表 4)，干物质向果实转移比例的提高一定程度上弥补了因茎、枝干物质累积下降所带来的产量损失，对产量优势具有很好的补偿作用。套作线辣椒干物质向根分配比例的增加，说明套作带田中种间根系存在竞争，促进了根系生长，可提高对土壤养分和水分的吸收。成熟期，套作玉米植株干物质向各器官的最终分配比例与单作无差异，套作栽培对玉米的影响较小(表 5)。套作使玉米植株干物质向茎的分配比例下降，根的分配比例增加，这种分

配方式有利于提高竞争力。

3 讨论

间作套种体系中不同组合作物的相对高度、叶面积的空间分布决定着作物群体对 PAR 的截获能力<sup>[11]</sup>。本试验中，随着冠层的发育扩展，玉米的遮荫幅度逐渐增大，套作冠层内漫射辐射相对直射辐射的比例增加，处于玉米冠层下方的线辣椒消光系数逐渐下降(图 2、表 1)。植株出苗后，消光系数增加速率越快其冠层在水平方向上扩展程度越大<sup>[14]</sup>。玉米植株的 LAI 增加速率高于线辣椒(图 2)，但单作和套作线辣椒的消光系数均高于玉米，表明玉米冠层只是在高度上的增长速度比线辣椒迅速，线辣椒叶片比玉米叶片更为水平分布。套作线辣椒的消光系数 8 月 3 日(定植 74 d)后突然下降，可能是随着玉米 LAI 达到峰值，辐射截获量增加，透射率下降，线辣椒冠层上方的漫射辐射相对直射辐射比例突然降低的结果。单作线辣椒 8 月 24 日(定植 95 d)后消光系数迅速降低，说明其在 LAI 达到最大值前 PAR 截获量已达到峰值，两者不同步。套作线辣椒的消光系数变化幅度大，速度快，表明其对高秆玉米的遮荫程度敏感。单作玉米的消光系数与套作差异不显著，这是两者的冠层结构相似，光辐射环境相近的结果。

表 3 套作和单作线辣椒、玉米的干物质积累速率

Tab. 3 Dry-matter accumulation rate of capsicum and maize in sole cropping and relay intercropping systems kg · hm<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>

种植模式 Cropping pattern	玉米生育期 Growth stages of maize					
	出苗~三叶 Seedling emergence ~third leaf	三叶~六叶 Third leaf ~sixth leaf	六叶~拔节 Sixth leaf ~jointing	拔节~抽雄 Jointing ~tasseling	抽雄~吐丝 Tasseling ~silking	吐丝~成熟 Silking ~maturity
线辣椒 Capsicum <sup>1)</sup>						
单作 Sole cropping	26.7±1.35a	84.7±3.64a	90.1±3.12a	137.4±4.08a	241.8±3.47a	201.6±2.54a
套作 Relay intercropping	21.3±1.47a	69.0±2.13b	82.7±2.53a	123.3±2.18a	211.4±1.98b	126.6±1.65b
玉米 Maize						
单作 Sole cropping	1.1±0.22a	1.6±0.07b	36.6±1.02b	313.8±1.05b	373.0±6.04b	165.8±1.33b
套作 Relay intercropping	1.7±0.17a	2.2±0.16a	50.6±2.04a	344.8±2.13a	443.1±1.26a	199.4±2.07a

1) 线辣椒与玉米同时取样 The sampling of capsicum and maize were at the same time.

表 4 线辣椒植株干物质的分配

Tab. 4 Dry-matter distribution proportions among different organs of capsicum plant %

种植方式 Cropping pattern	叶 Leaf	茎(包括茎) Stem	果实 Fruit	根 Root
单作 Sole cropping	17.7±1.02a	35.4±1.68b	23.8±1.35a	23.1±0.83a
套作 Relay intercropping	16.4±1.57a	31.3±2.09a	26.6±1.62b	25.7±1.11b

表 5 玉米植株干物质的分配

Tab. 5 Dry-matter distribution proportions among different organs of maize plant %

种植方式 Crop pattern	叶 Leaf	茎 Stem	苞叶 Maize-husk	穗轴 Maize cob shaft	籽粒 Seed	根 Root
单作 Sole cropping	12.4±0.58a	17.1±2.03a	4.5±0.49a	6.4±0.25a	36.3±1.01a	23.3±1.36a
套作 Relay intercropping	12.7±1.24a	15.2±2.11a	3.9±0.13a	5.8±0.09a	37.2±2.42a	25.2±0.95a

通过对玉米/花生<sup>[1]</sup>、小麦/棉花<sup>[6]</sup>、玉米/马铃薯<sup>[15]</sup>、高粱/豌豆<sup>[16]</sup>、小麦/玉米或小麦/大豆<sup>[17]</sup>以及玉米/大豆<sup>[18]</sup>等间套作群体的研究表明,作物冠层对PAR辐射的截获与利用决定着作物的产量,本试验结果也证明了这一点。线辣椒/玉米套作体系中玉米植株高于线辣椒,其冠层透光率大,下层线辣椒截获其透过光,使得单作透光率过高的缺陷得以补偿,从而使全生育期的平均PRA截获量提高。整个生育期内,套作线辣椒和玉米的PAR截获量分别为各自单作的83.2%和90.4%。套作带田的PAR总截获量比按套作比例对单作加权平均的PRA截获量高42.25%(图3),说明PAR截获量的增加为线辣椒/玉米套作体系的产量优势做出了较大贡献。太阳辐射从玉米冠层透过后,直射辐射减少,散射辐射增加,散射辐射有利于光合速率的提高<sup>[19-20]</sup>;线辣椒本身也属于较耐荫植物,玉米的遮荫缩短了线辣椒中午光合休眠时间;然而,减少植株中午光合休眠时间利于干物质积累<sup>[21]</sup>。线辣椒和玉米两者共生期内,它们之间竞争是非对称的,玉米通过遮荫影响线辣椒,但很少受线辣椒的影响;玉米对弱光的利用能力下降(光补偿点升高),但却相应增强了对强光的利用能力,提高了光饱和时的光合速率,这主要是由于间套作玉米处于光竞争优势,光合作用指标得到改善<sup>[22]</sup>。本试验中,套作带田的PAR利用效率相对于按套作比例对单作线辣椒和玉米PAR利用效率加权的平均值提高39.51%,说明单位干物质的生产需要截获较少的PAR,合理套作可以提高作物的光能利用率。这与其他学者对套作体系的研究结果一致,如花生与珍珠粟间作后,其PAR利用效率提高46%<sup>[23]</sup>;花生与高粱间作后PAR利用效率显著提高<sup>[24]</sup>。这可能是由于作为C<sub>3</sub>植物的花生和线辣椒在低强度光辐射下具有更高的PAR利用效率;再者,光质的改变也可导致植株的光合特性发生变化<sup>[25]</sup>,套作遮荫改变了系统内光质,花生和线辣椒的光合特性也随之发生变化,因此,玉米的遮荫造成线辣椒的损失被低PAR辐射强度下高光合速率所弥补。

太阳辐射是作物正常生长发育的重要影响因子,其在套作冠层内的空间分布状况影响着作物的产量形成,尤其对高矮作物组合的套作体系更为重要。不同冠层的两种作物间套时,可增大光辐射的截获量和改善光辐射的均匀化分布,而群体内光辐射分布均匀化又有助于提高群体光合效率<sup>[26]</sup>。高矮不同的两种作物间套作种植改变了光能的分配模式,两作物高差对低位作物可照光时间和光分布影响远大于带幅,高位作物光分布多呈“V”和“U”型,低位作物光分布与可照光时数分布多呈倒“V”和倒

“U”型<sup>[27-28]</sup>,也就是说间套作条带内光的水平分布呈不均匀性,从而使高、低组分之间及带内不同株行间产生光竞争,本试验结果也证实了这一规律(图4)。PAR透射率也受作物种植带和种植行的方向影响。如,绿豆的生长受到间作高秆作物玉米遮荫的影响,而南北行向种植时绿豆生长受遮荫的影响较小<sup>[29]</sup>;高秆作物种植行或带间较小的距离可以降低行向效应<sup>[30]</sup>。本试验地所在的陕西干制线辣椒产区,玉米/线辣椒套作种植带多为东西方向,南侧行与北侧行之间PAR辐射强度差异明显,这样可利用玉米遮荫减少病害的发生,尤其日灼病。套作种植条件下玉米地上部生物量积累和分配与单作玉米相比无显著差异,不同种植方式下线辣椒的地上部生物量积累和分配存在显著差异。套作线辣椒向根和果实的干物质转移与分配表现出移动量大、转换率高等特点,说明套作线辣椒群体的转换率高于单作。

玉米/线辣椒套作复合群体实现了对光能的分层、立体高效利用,提高了PAR截获量和光能利用率,PAR在作物群体内分布更为合理,促使线辣椒对光能的利用趋向阴性植物特点转化,而使玉米的“阳性植物光合特性”增强,这正是玉米/线辣椒套作体系表现出明显的产量间作优势,土地利用效率提高的主要原因之一。

## 参考文献

- [1] Awal M A, Koshi H, Ikeda T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139: 74-83
- [2] Marshall B, Willey R W. Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet-groundnut[J]. *Field Crops Research*, 1983, 7: 141-160
- [3] Harris D, Natarajan M, Willey R W. Physiological basis for yield advantage in a sorghum-groundnut intercrop exposed to drought. I. Dry-matter production, yield, and light interception[J]. *Field Crops Research*, 1987, 17: 259-272
- [4] Keating B A, Carberry P S. Resource capture and use in intercropping: Solar radiation[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34: 273-301
- [5] Tsubo M, Walker S, Mukhala E. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71: 17-29
- [6] Zhang L, Van Der Werf W, Bastiaans L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton[J]. *Field Crops Research*, 2008, 107: 29-42
- [7] Smith M A, Carter P R. Strip intercropping corn and alfalfa[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1998, 11: 345-353
- [8] Jurik T W, Van k. Microenvironment of a corn-soybean-oat strip intercrops system[J]. *Field Crops Research*, 2004, 90: 335-349
- [9] 高阳, 段爱旺. 冬小麦/春玉米间作模式下光合有效辐射特

- 性研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 115-118
- [10] 徐强, 程智慧, 孟焕文, 等. 玉米/线辣椒套作系统中土壤养分与根际土壤微生物、酶活性的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2747-2754
- [11] 王谦, 陈景玲, 孙治强. LAI-2000 冠层分析仪在不同植物群体光分布特征研究中的应用[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 922-927
- [12] 高阳. 玉米/大豆条带间作群体 PAR 和水分的传输与利用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009
- [13] Zhang L, Van Der Werf W, Zhang S, et al. Temperature-mediated developmental delay may limit yield of cotton in relay intercrops with wheat[J]. Field Crops Research, 2008, 106: 258-268
- [14] Black C, Ong C. Utilization of light and water in tropical agriculture[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104: 25-47
- [15] Mushagalusa G N, Ledent J F, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: Effects on growth and yield[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64: 108-188
- [16] Gilbert R A, Heilman J L, Juo A S. Diurnal and seasonal light transmission to cowpea in sorghum-cowpea intercrops in Mali[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2003, 189: 21-39
- [17] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or soybean strip intercropping. I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71: 123-137
- [18] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248-1254
- [19] Sinclair T R, Shiraiwa T, Hammer G L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation[J]. Crop Science, 1992, 32: 1281-1284
- [20] Healey K D, Rickert K G, Hammer G L, et al. Radiation use efficiency increases when the diffuse component of incident radiation is enhanced under shade[J]. Aust J Agric Res, 1998, 49: 665-672
- [21] 张振贤, 周绪元, 陈利平. 主要蔬菜作物光合与蒸腾特性研究[J]. 园艺学报, 1997, 24(2): 155-160
- [22] 张建华, 马义勇, 王振南, 等. 间作系统中玉米光合作用指标改善的研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(4): 104-106
- [23] Willey R W. Resource use in intercropping systems[J]. Agricultural Water Management, 1990, 17: 215-231
- [24] Matthews R B, Azam-Ali S N, Saffell R A, et al. Plant growth and development in relation to the microclimate of a sorghum groundnut intercrop[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 53: 285-301
- [25] 焦念元, 赵春, 宁堂原, 等. 玉米/花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 981-985
- [26] Allen J R, Sinclair L H, Lemon E R. Radiation and microclimate relationships in multiple cropping systems[J]. Field Crops Research, 1976(1): 171-200
- [27] 黄高宝. 集约栽培条件下间套作的光能利用理论发展及其应用[J]. 作物学报, 1999, 25(1): 16-24
- [28] 董宏儒, 邓振镛. 带田农业气候资源的利用[M]. 北京: 气象出版社, 1988: 13-45
- [29] Dhillon K K, Dhillon M S, Grewal D S, et al. Performance of maize and mung bean intercropping in different planting patterns and row orientations[J]. Indian Journal of Agronomy, 1991, 36: 207-212
- [30] Midmore D J. Agronomic modification of resource use and intercrop productivity[J]. Field Crops Research, 1993, 34: 357-380

## 欢迎订阅《遗传学报》和《遗传》杂志

《遗传学报》、《遗传》杂志是中国遗传学会和中国科学院遗传与发育生物学研究所主办、科学出版社出版的学术期刊, 中国精品科技期刊, 已被美国化学文摘(CA)、生物学数据库(BIOSIS)、生物学文摘(BA)、医学索引(Medical Index)、俄罗斯文摘杂志(AJ)以及 NCBI、CABI 等 20 多种国内外重要检索系统与数据库收录。刊登内容涉及遗传学、发育生物学、基因组学、细胞生物学以及分子进化等。读者对象为基础医学、农林牧渔、生命科学领域的科研与教学人员、研发人员、研究生、大学生、中学生物学教师等。

《遗传学报》2005 年获得第三届国家期刊奖提名奖, 2006~2010 年连续获得中国科协精品科技期刊工程项目(B 类)资助。《遗传学报》2009 年度的 SCI 影响因子为 0.813。

《遗传学报》(ISSN 1673-8527, CN11-5450/R)为月刊, 全年 12 期, 国内邮发代号: 2-819, 国外发行代号: M63。2011 年定价 50 元, 全年 600 元。http://www.jgenetgenomics.org

《遗传》(ISSN 0253-9772, CN11-1913/R)为月刊, 全年 12 期。国内邮发代号: 2-810, 国外发行代号: M62。2011 年定价 50 元, 全年 600 元。http://www.Chinagene.cn

欢迎订阅, 欢迎网上注册投稿, 欢迎刊登广告。

地址: 北京市朝阳区北辰西路 1 号院中国科学院遗传与发育生物学研究所 邮编: 100101

电话: 010-64807669 传真: 010-64807786

主编: 薛勇彪 E-mail: ybxue@genetics.ac.cn 编辑部主任: 李绍武 E-mail: swli@genetics.ac.cn