

单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率 及产量的影响*

高 阳^{1,2} 段爱旺^{1,2**} 刘祖贵^{1,2} 申孝军¹ 刘战东¹ 陈金平¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所 新乡 453003;
2. 农业部作物需水与调控重点开放实验室 新乡 453003)

摘 要 通过两个生长季(2006~2007年)的大田试验,研究了1:3和2:3两种间作模式及单作种植对玉米和大豆群体辐射截获与利用以及产量的影响。结果表明,单作玉米、单作大豆、1:3间作和2:3间作的消光系数分别为0.45、0.60、0.53和0.52。播后第79d前,间作和单作玉米的干物质量间差异不显著;此后,1:3间作玉米的干物质量极显著高于单作玉米,1:3和2:3间作模式之间玉米干物质量的差异显著;观测期内,大豆干物质量单作和间作间差异显著。玉米/大豆1:3间作群体的辐射利用率($3.51 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)和2:3间作群体的辐射利用率($3.49 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)约为单作大豆辐射利用率($1.24 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)的2.8倍,但略低于单作玉米($3.56 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。虽然单作玉米和大豆的籽粒产量均高于间作群体内玉米和大豆的籽粒产量,但间作群体的总产量分别比单作玉米和大豆的产量高约6.0%和320%;间作种植收入比单作玉米高56%~60%,比单作大豆高70%~74%。本研究表明,间作种植能够通过更有效地利用光能来增加作物产量,进而提高农民收入。

关键词 玉米 大豆 间作 消光系数 辐射利用率 产量

中图分类号: S161.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)01-0007-06

Effect of monoculture and intercropping on radiation use efficiency and yield of maize and soybean

GAO Yang^{1,2}, DUAN Ai-Wang^{1,2}, LIU Zu-Gui^{1,2}, SHEN Xiao-Jun¹, LIU Zhan-Dong¹, CHEN Jin-Ping¹

(1. Institute for Farmland Irrigation Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China;
2. Key Lab for Crop Water Requirement and Regulation of Ministry of Agriculture, Xinxiang 453003, China)

Abstract Field experiments were conducted to investigate the effect of two intercropping patterns (maize-soybean 1:3 and 2:3) and corresponding monoculture on the capture and use of solar radiation and on yields of maize and soybean in two growing seasons (2006 and 2007). Results show that light extinction coefficients of monocultured maize and soybean, and 1:3 and 2:3 intercropping are 0.45, 0.60, 0.53 and 0.52 respectively. There is no significant maize biomass difference between the intercropping and monoculture before 79 days after sowing. After the 79-day period, maize biomass in 1:3 intercropping becomes significantly higher than that of maize monocultured at 0.01 probability level. There is a significant difference in maize biomass between 1:3 and 2:3 intercropping at 0.05 probability level. Soybean biomass of intercropping and monoculture is significantly different. RUE value of 1:3 ($3.51 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$) and 2:3 intercropping ($3.49 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$) is about 2.8 times that of monocultured soybean ($1.24 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$). However, it is slightly less than that of the monocultured maize ($3.56 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$). Grain yields for monocultured maize and soybean are more than those for intercropping treatments. However, total yields for intercropping treatments are 6.0% and 320% higher than the yields for monocultured maize and soybean respectively. Incomes from the two intercropping systems are 56%~60% and 70%~74% higher than those from monocultured maize and soybean. The findings suggest that intercropping may help increase crop production through more efficient utilization of solar radiation, hence increase farmers' income.

* 国家自然科学基金项目(50679082)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA100209)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(JBKY0032007018CAAS, 2007-14)和商丘农田生态系统国家野外观测研究站开放基金资助

** 通讯作者: 段爱旺(1963~), 男, 汉族, 博士, 研究员, 主要从事作物高效用水研究。E-mail: duanaiwang@yahoo.com.cn
高阳(1978~), 男, 蒙古族, 博士研究生, 研究方向为节水灌溉基础理论与技术。E-mail: gylcx0944@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-12-07 接受日期: 2008-03-24

Key words Maize, Soybean, Intercropping, Light extinction coefficient, Radiation use efficiency, Yield

(Received Dec. 7, 2007; accepted March 24, 2008)

现代农业生产中,为了获得较高产量已采用了许多方法,包括提高水分和养分、太阳辐射和 CO_2 以及土地的利用效率。但是有些农业资源越来越少,对农业生产构成了威胁^[1]。然而,太阳辐射量相对保持稳定,是一种可更有效地用于粮食生产的资源。随我国人口快速增长,人均耕地面积逐渐减少。为保证粮食供给,不仅需要提高单位面积单季的产量,而且需要提高复种指数,使有限的耕地资源得到最充分的利用。间作是一种在时间和空间上实现种植集约化的种植方式,能够提高光能利用率,同时可充分地利用温、水、肥等资源,从而提高单位面积产出效率^[2]。为了评价作物对光合有效辐射的利用率, Biscoe 和 Gallagher 提出了 3 个重要指标: 辐射截获率(F)、辐射利用率(RUE)、收获指数(HI)^[3]。在过去的几十年中,研究人员对间作模式下辐射的截获与利用进行了诸多研究^[4-8]。

作物生育期内辐射截获率取决于冠层叶面积^[3,9-11]。对于单作和间作系统,作物生物量都与辐射截获量呈正相关^[9,12]。Marshall 和 Willey 通过研究粟/花生间作群体的光能利用,认为间作粟和单作粟的 RUE 相近,但间作花生的 RUE 比单作高 45%^[13]。Harris 等研究了高粱/花生间作群体的 RUE ,发现间作高粱的 RUE 比单作低 20%,但间作花生的 RUE 比单作高 20%^[14]。降低高粱的 RUE ,增加花生的 RUE 导致高粱/花生间作没有产量优势^[15]。Tsubo 等使用这 3 个指标评价了玉米/大豆 1:1 间作系统,结果表明,间作 F 高于单作,单作玉米的 RUE 高于其他种植模式,种植系统间 HI 没有差异,种植方式对 F 、 RUE 和 HI 没有影响^[16]。从这些结果可知,间作群体在辐射截获和利用总效率上与单作玉米相等。因此,单作玉米和单作大豆种植在同一区域时,间作的辐射截获效率高于单作。Tsubo 和 Walker 认为间作和单作玉米的 RUE 没有差异,而间作大豆的 RUE 高于单作,这可以解释间作的产量优势^[6]。对于玉米/花生间作群体,Awal 等指出与玉米间作降低了花生的消光系数,间作群体的 RUE 是单作花生的 2 倍多,但略低于单作玉米^[1]。

玉米/大豆间作种植是我国北方普遍实施的一种种植模式^[17],可充分利用光、热、水和养分资源,实现粮油同步增产。研究玉米/大豆间作群体内的光能截获与利用,对于选择和确定适宜的间作种植模式及建立科学合理的管理措施都十分重要。为此,本研究系统地观测了光合有效辐射在玉米/大豆间

作冠层内的分布规律,对玉米/大豆不同间作种植模式下两种作物的光合有效辐射利用率进行了分析研究。

1 材料和方法

1.1 试验方法

试验于 2006~2007 年在位于河南省商丘市的商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站进行。研究站地理位置为东经 115.4° ,北纬 34.27° ,海拔 51 m。试验点多年平均降雨量为 705.1 mm,多年平均蒸发量为 1 751 mm。土壤类型为潮土。

供试玉米品种为“郑单 958”(“豫玉 33”),大豆品种为“豫豆 22”。玉米和大豆同时播种,播种日期为 2006 年 4 月 22 日和 2007 年 4 月 16 日;玉米的收获日期为 2006 年 8 月 20 日和 2007 年 8 月 18 日,大豆的收获日期为 2006 年 8 月 27 日和 2007 年 8 月 25 日。试验设置 4 种植模式处理,分别为单作玉米(M)、单作大豆(B)、玉米/大豆 1:3 种植(I1)和玉米/大豆 2:3 种植(I2),重复 4 次。试验小区面积为 $6.0\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。单作玉米行距 50 cm,株距 30 cm;单作大豆行距 30 cm,穴距 20 cm。间作中玉米行与大豆行相距 30 cm(玉米与大豆相邻行的距离);玉米行距 30 cm,株距 30 cm;大豆行距 30 cm,穴距 20 cm。试验在大田条件下进行,灌水、施肥及作物管理按当地习惯进行,以充分保证作物生长发育需求为基础。

1.2 指标的测定与计算

1.2.1 光合有效辐射截获率

在播后第 30~100 d,每隔 7~10 d 观测冠层的光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)截获状况。观测选择在晴天,使用 LI-COR 公司的 LI-190SA 和 LI-191SA 光量子传感器分别观测冠层上方(冠层上方 20 cm 处)的入射光合有效辐射和冠层内(地表处)的光合有效辐射,用 LI-1000 数据采集器自动记录数据。每次观测分 3 个时间段进行,分别为 7:30~8:40、11:30~12:40 和 15:30~16:40。观测时每个处理持续记录 20 min,取平均值。

观测 PAR 在冠层内的空间分布状况时,在与行水平垂直的方向上每 10 cm 观测 1 次,记录 10 个数据后换到下一个位置观测。

1.2.2 生物量和叶面积

生育期内每 7 d 测定 1 次地上部生物量,每个小区取 5 株作为 1 个样本。玉米样本分为叶片、茎秆、

穗部分别测定; 大豆样本分为叶片、茎秆、豆荚分别测定。采集的鲜样品在 105 °C 下杀青 1 h 后, 80 °C 下烘 24 h 后称重。

生育期内每 7 d 用量测法观测作物叶面积: 玉米叶面积 = 长 × 宽 × 0.70, 大豆叶面积 = 长 × 宽 × 0.75。均以全田的面积计算单作和间作作物的叶面积指数 (Leaf area index, LAI)。每个小区取 5 株作为样本。

1.2.3 光合有效辐射截获利用率的计算

玉米/大豆间作群体内, 第 1 层玉米截获的辐射率(F_{M1})为:

$$F_{M1} = 1 - \exp(-K_M L_{M1}) \quad (1)$$

式中, L_{M1} 为第 1 层玉米的 LAI, K_M 为玉米的消光系数。利用 Keating 和 Carberry^[15] 的方程, 第 2 层玉米和大豆截获的辐射率(F_{M2} 和 F_B)为:

$$F_{M2} = \frac{K_M L_{M2}}{K_M L_{M2} + K_B L_B} \times [1 - \exp(-K_M L_{M2} - K_B L_B)] \quad (2)$$

$$F_B = \frac{K_B L_B}{K_M L_{M2} + K_B L_B} \times [1 - \exp(-K_M L_{M2} - K_B L_B)] \quad (3)$$

式中, L_{M2} 和 L_B 为第 2 层玉米和大豆的 LAI, K_B 为大豆的消光系数。假定叶片随机分布, 用下式计算 L_{M1} 和 L_{M2} :

$$L_{M1} = \frac{h_M - h_B}{h_M} L_M \quad (4)$$

$$L_{M2} = \frac{h_B}{h_M} L_M \quad (5)$$

式中, h_M 和 h_B 为玉米和大豆冠层高度, L_M 为整株玉米的叶面积指数。

玉米和大豆的辐射利用率(RUE)用下式计算:

$$RUE_M = \frac{W_M}{I_0(F_{M1} + F_{M2})} \quad (6)$$

$$RUE_B = \frac{W_B}{I_0 F_B} \quad (7)$$

式中, W_M 和 W_B 分别为玉米和大豆的干物质, I_0 为辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), F_B 为大豆的辐射截获率。

应用统计分析软件 SPSS13.0 进行 LSD 单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式的叶面积指数与辐射截获

图 1 给出了播后第 30 ~ 110 d 各处理的叶面积指数变化。播后第 80 d 单作玉米的 LAI 达到最大值 3.69, 单作大豆的 LAI 也达到最大值 6.02。此时, 间作处理 I1 玉米的 LAI 低于单作玉米, I2 处理玉米的 LAI 与单作玉米的 LAI 相近(相差小于 0.5)。间作 I1 和 I2 处理大豆的 LAI 均低于单作大豆的 LAI。I2 处理的 LAI 略大于 I1 的 LAI (相差小于 0.8)。I1 和 I2 处理的群体的 LAI 均小于单作大豆, 但高于单作玉米。

各处理的光合有效辐射截获率(F)的对数与叶面积指数有较好的相关性($R^2 > 0.95$) (图 2)。 $\ln(1-F)$ 与 LAI 的比值为消光系数(k)。单作玉米的 k 值为 0.45, 单作大豆的 k 为 0.60; I1 的 k 为 0.53, 几乎与 I2 ($k = 0.52$) 相等; k 值的范围为 0.3 ~ 1.5。Jones 指出水平分布叶片的 k 值大于 1.0, 非水平分布叶片的 k 值小于 1.0^[18]。本研究中, 各处理的 k 值都小于 1.0, 表明叶片为非水平分布。但与其他 3 个处理相比, 单作大豆有较大的 k 值, 表明单作大豆的叶片较其他 3 个处理的叶片更水平^[16]。

2.2 不同种植方式冠层内 PAR 透射率

从图 3 可以看出, 单作玉米冠层内, 5 月 31 日辐射几乎全部到达地面, 表现为行间 20 ~ 40 cm 的 PAR 透射率接近 100%。此后, 随玉米冠层发育, PAR 透射率逐渐降低。单作大豆冠层内 PAR 透射率与单作玉米变化相似, 只是 PAR 透射率比单作玉米下降快。间作群体只观测了半个条带内的 PAR 透射率分布(图 3)。间作冠层内, 在接近大豆种植行处, PAR 透射率明显下降。在 6 月 16 日之前, 间作冠层内 PAR 分布的空间变化很明显; 此后, 由于叶面积指数增加, 从玉米行到大豆行间 PAR 透射率变化已不明显。

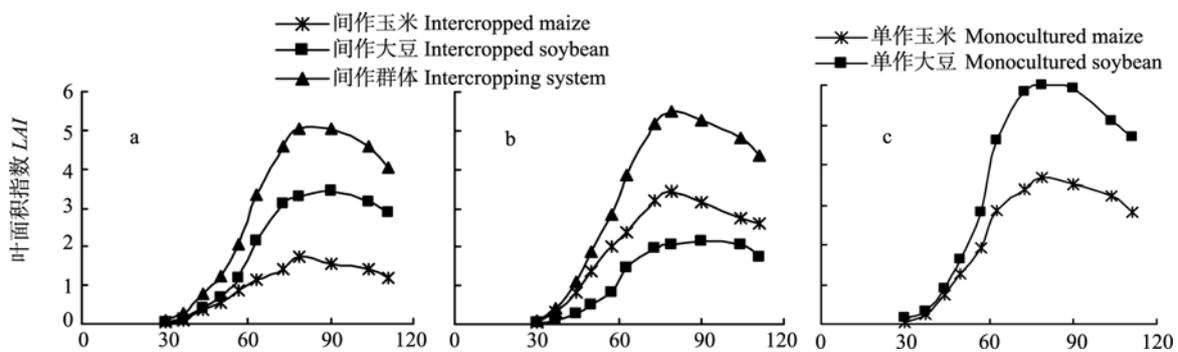


图 1 间作 I1(a)和 I2(b)及单作玉米和大豆(c)的叶面积指数

Fig.1 Leaf area index (LAI) of maize and soybean under intercropping systems I1(a), I2(b) and monoculturing system (c)

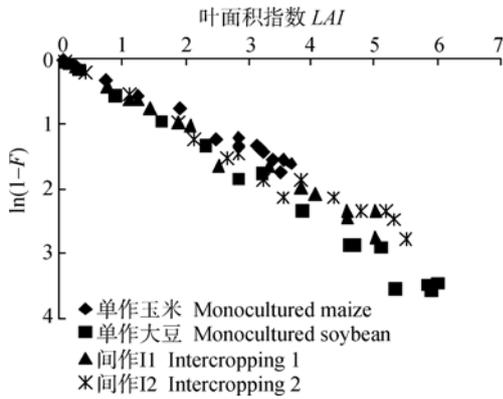


图 2 不同处理叶面积指数与光合有效辐射截获率的关系

Fig. 2 Relationship between LAI and radiation trapping rate in different cropping systems

2.3 不同种植方式下作物的干物质积累与辐射利用率

不同种植方式下玉米和大豆地上部生物量积累情况见表 1。播后第 79 d 以前，玉米干物质量不同种植方式间差异不显著；此后，间作 I1 处理的玉米干物质量极显著高于单作玉米，I1 和 I2 处理间差异显著。生育期内，大豆干物质量不同种植方式间差异不显著。

图 4 为不同种植方式下作物群体的辐射利用率。在整个观测时期内，单作和间作 I1 处理玉米的辐射利用率均大于 $2.0 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。间作玉米和单作玉米的辐射利用率变化趋势基本相似，间作 I1 玉米的平均辐射利用率为 $3.44 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ，I2 为 $3.39 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ；单作玉米的平均辐射利用率为 $3.56 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。无论是单作还是间作，大豆的辐射利用率均低于玉米，这是因为 C_4 植物能转化更多的能量。间作 I1 大豆的平均辐射利用率为 $1.33 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ，I2 为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ，单作大豆的平均值为 $1.24 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。I1 间作群体的平均辐射利用率为 $3.51 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ，I2 间作群体的平均辐射利用率为 $3.49 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ，略低于单作玉米，但高于间作群体玉米的辐射利用率，更是明显地高于大豆的辐射利用率(2.8 倍)。

2.4 不同种植方式下作物籽粒产量

从表 2 可以看出，单作玉米的籽粒产量极显著高于间作 I1 和 I2 处理，玉米产量 I1 和 I2 处理间差异不显著。单作大豆的籽粒产量显著高于间作 I1 处理，极显著高于间作 I2 处理；大豆产量 I1 和 I2 处理间差异不显著。玉米单作时籽粒产量最高，玉米/大

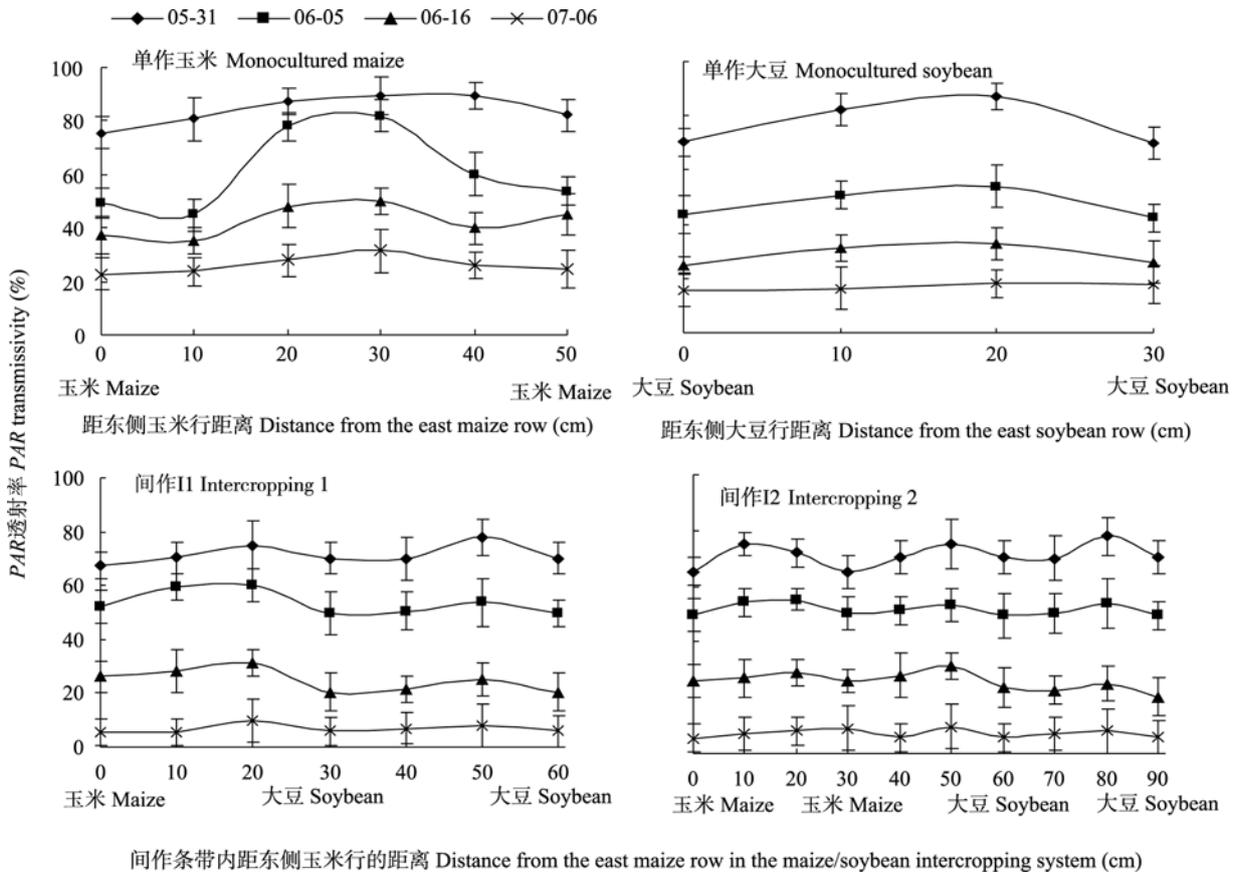


图 3 不同时期不同种植方式下作物冠层内 PAR 透射率变化
Fig.3 PAR transmissivity through crop canopy of each treatment in different time

表 1 2007 年单作和间作条件下玉米与大豆的地上部干物质积累

Tab. 1 Accumulation of above ground dry matter of maize and soybean in monocultures and intercropping in 2007 g·plant⁻¹

播后天数 Days after sowing	玉米 Maize			大豆 Soybean		
	单作 Monoculture	间作 I1 Intercropping 1	间作 I2 Intercropping 2	单作 Monoculture	间作 I1 Intercropping 1	间作 I2 Intercropping 2
19	0.17±0.03a	0.13±0.03a	0.14±0.05a	0.21±0.01a	0.22±0.04a	0.19±0.04a
27	0.54±0.08a	0.51±0.04a	0.56±0.11a	0.39±0.03a	0.37±0.03a	0.34±0.06a
35	2.18±0.66a	2.30±0.50a	2.08±0.45a	0.83±0.10a	0.85±0.17a	0.75±0.21a
43	11.09±2.39a	11.23±1.80a	11.41±2.38a	1.96±0.39a	1.84±0.27a	2.26±0.54a
49	21.60±3.14a	22.08±2.02a	21.74±1.63a	4.20±0.19a	3.44±0.34a	3.80±0.32a
55	41.34±9.19a	41.43±6.03a	41.44±5.53a	5.84±0.98a	7.55±0.50a	6.66±1.52a
63	73.77±12.07a	84.20±13.05a	75.66±14.82a	12.24±0.83a	13.77±2.63a	10.07±1.23a
69	89.23±15.06a	113.56±11.58a	94.79±16.98a	18.94±0.82a	22.42±5.44a	18.99±4.20a
79	133.23±12.36bB	177.10±12.04aA	142.23±14.94bAB	29.02±2.54a	30.12±3.56a	25.37±6.70a
90	172.06±11.53bB	240.10±19.30aA	197.45±13.39bAB	32.56±2.64a	34.56±3.84a	32.56±8.20a
104	228.45±11.05cB	310.12±12.46aA	264.56±14.35bB	39.56±7.50a	41.12±7.85a	40.53±7.50a
114	280.65±14.10cB	350.23±14.04aA	320.45±19.87bAB	44.56±10.13a	46.56±9.14a	47.56±5.16a
124	301.23±21.78cB	370.56±25.41aA	345.23±21.95bAB	43.23±7.84a	44.63±4.97a	45.36±5.94a
131				40.23±7.44a	42.35±5.55a	41.36±5.97a

不同大小写字母分别表示处理间在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。Different capital and small letters mean significant difference among treatments at $P<0.01$ and $P<0.05$.

表 2 不同种植方式下作物籽粒产量

Tab.2 Grain and pod yield of maize and soybean under different cropping systems kg·hm⁻²

产量 Yield	玉米 Maize			大豆 Soybean			间作群体 Intercropping system	
	单作 Monoculture	间作 I1 Intercropping 1	间作 I2 Intercropping 2	单作 Monoculture	间作 I1 Intercropping 1	间作 I2 Intercropping 2	I1	I2
		9 560.60aA	8 145.36bB	8 339.52bB	2 398.81aA	1 945.84bAB	1 799.65bB	10 091.20a

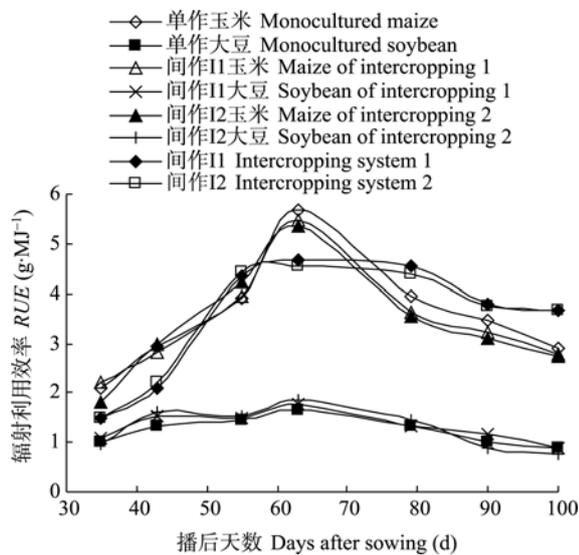


图 4 不同种植方式下作物的辐射利用率
Fig. 4 RUE for different cropping systems

豆间作时, 玉米的实播面积减少, 播种密度降低, 玉米籽粒产量也随之下落, I1 间作玉米籽粒产量约为单作的 85%, I2 为 87% (表 2)。这说明在该种间作

模式下, 单行玉米的增产效果不足以弥补大豆占用面积所引起的籽粒产量下降。I1 间作大豆的籽粒产量约为单作的 81%, I2 为 75%。表明当大豆与玉米间作时, 由于玉米的遮荫, 使大豆籽粒产量下降。但是, 玉米/大豆间作的总籽粒产量仍高于单作, I1 和 I2 群体间作总籽粒产量比单作玉米的籽粒产量约增加 6%, 比单作大豆的籽粒产量约增加 320%。2:3 间作(I2)群体的总产量略高于 1:3 间作(I1), 但差异不显著。

3 小结

间作群体内作物间的相互作用对光环境影响较大, 而光环境的改变最终会影响间作群体的籽粒产量, 因此, 准确观测辐射在冠层内的分布将有助于揭示间作种植的产量优势机理。间作冠层内多种作物叶片相互重叠对辐射的传输影响较大。本文只在行内每隔 10 cm 观测了光合有效辐射的空间分布, 为了更细致地研究间作冠层内的辐射分布, 应以更小的距离步长观测光分布, 同时还应观测不同高度的光合有效辐射量, 这样能更为准确地描述间作冠

层的光环境。试验结果表明,玉米/大豆以 1:3 和 2:3 间作,群体的消光系数高于单作玉米,但低于单作大豆。对于间作种植,只计算了群体的消光系数,这是由于大豆叶片和玉米下部冠层的叶片相混合,难以准确观测和区分两种作物叶片截获的辐射量。

本研究表明,玉米/大豆间作群体的辐射利用率虽略低于单作玉米,但约为单作大豆的 2.8 倍;间作群体总籽粒产量比单作玉米约增加 6.0%,比单作大豆约增加 320%。河南地区玉米和大豆的收购价格约为 1.2 元·kg⁻¹ 和 4.4 元·kg⁻¹。按此价格计算,单作玉米和单作大豆每公顷的收入约为 11 472.72 元和 10 554.75 元;而 1:3 和 2:3 间作每公顷的收入约为 18 336.13 元和 17 925.88 元。间作种植每公顷的收入比单作玉米高 56%~60%,比单作大豆高 70%~74%。这表明,间作种植能够通过更有效地利用光能来增加作物产量和经济效益,有利于保障粮食安全和提高农民收入。

本文只研究了玉米/大豆 1:3 和 2:3 间作种植模式下的辐射利用率,为了促进间作系统的发展,还应根据当地的气候条件,研究不同组合方式下的辐射利用率,以确定最优的间作种植模式。

参考文献

- [1] Awal M. A., Koshi H., Ikeda T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2007, 139: 74-83
- [2] Willey R. W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agric. Water Manage.*, 1990, 17: 215-231
- [3] Biscoe P. V., Gallagher J. N. Weather, dry matter production and yield[M]//Landsberg J. J., Cutting C. V. *Environmental Effects on Crop Physiology*. London: Academic Press, 1977
- [4] Ofori F., Stern W. R. Cereal-legume intercropping systems[J]. *Adv. Agron.*, 1987, 41: 41-90
- [5] Black C., Ong C. Utilization of light and water in tropical agriculture[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, 104: 25-47
- [6] Tsubo M., Walker S. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2002, 110: 203-205
- [7] 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
- [8] 高国治, 王明珠, 张斌. 低丘红壤南酸枣-花生复合系统作物种间水肥光竞争的研究. II. 南酸枣与花生利用光能分析[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 92-94
- [9] Sivakumar M. V. K., Virmani S. M. Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1984, 31: 131-141
- [10] Reddy M. S., Willey R. W. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/groundnut[J]. *Field Crops Res.*, 1981, 4: 13-24
- [11] Watiki J. M., Fukai S., Banda J. A., *et al.* Radiation interception and growth of maize/cowpea intercrop as affected by maize plant density and cowpea cultivar[J]. *Field Crops Res.*, 1993, 35: 123-133
- [12] Kiniry J. R., Jones C. A., O'Tode J. C., *et al.* Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species[J]. *Field Crops Res.*, 1989, 20: 51-64
- [13] Marshall B., Willey R. W. Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet-groundnut[J]. *Field Crops Res.*, 1983, 7: 141-160
- [14] 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 Res.*, 1987, 17: 259-272
- [15] Keating B. A., Carberry P. S. Resource capture and use in intercropping: solar radiation[J]. *Field Crops Res.*, 1993, 34: 273-301
- [16] Tsubo M., Walker S., Mukhala E. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations[J]. *Field Crops Res.*, 2001, 71: 17-29
- [17] 刘秀珍, 张阅军, 杜慧玲. 水肥交互作用对间作玉米、大豆产量的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 75-77
- [18] Jones H. G. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992