

DOI: 10.5846/stxb201305121020

高阳, 申孝军, 杨林林, 李新强, 黄玲, 巩文军, 段爱旺. 不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 815-822.

Gao Y, Shen X J, Yang L L, Li X Q, Huang L, Gong W J, Duan A W. Effects of water and nitrogen on interception, competition and utilization of radiation in a maize-soybean intercropping system. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 815-822.

不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响

高 阳¹, 申孝军¹, 杨林林², 李新强¹, 黄 玲³, 巩文军⁴, 段爱旺^{1,*}

1 中国农业科学院农田灌溉研究所, 农业部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453003

2 北京农业职业学院, 北京 102442

3 河南科技学院生命科技学院, 新乡 453003

4 河南省焦作市广利灌区管理局, 焦作 454550

摘要:通过田间试验研究了不同水氮处理对玉米-大豆间作群体的光能截获、竞争与利用的影响。试验设置充分供水和水分亏缺两种水分处理以及施氮(亩施纯氮 7.5 kg)和不施氮两种氮肥处理。结果表明,在生育中后期,同一氮肥处理条件下,充分供水处理间作作物的光能截获率显著高于水分亏缺处理;相同水分条件下,施氮处理间作大豆的光能截获率略高于不施氮处理,但未达到显著水平,而施氮处理间作玉米的光能截获率则显著高于不施氮处理。从播后第 64 天到成熟,同一氮肥处理条件下,充分供水提高了间作玉米的光能竞争比,但却降低了间作大豆的光能竞争比。从播后第 73 天到成熟,相同水分条件下,施氮处理间作玉米的光能竞争比显著高于不施氮处理,而大豆的光能竞争比在两个氮肥处理间则没有显著差异。充分供水条件下,施氮处理间作玉米的光能利用效率(LUE)为 3.87 g/MJ,略高于不施氮处理(3.81 g/MJ);水分亏缺条件下,施氮处理间作玉米的 LUE(3.86 g/MJ)比不施氮处理(3.72 g/MJ)高 3.6%。充分供水条件下,施氮处理间作大豆的 LUE(1.62 g/MJ)比不施氮处理(1.57 g/MJ)高 3.2%;水分亏缺条件下,施氮处理间作大豆的 LUE 为 1.55 g/MJ,与不施氮处理(1.54 g/MJ)基本相同,表明与氮肥处理相比,水分状况对大豆 LUE 的影响更为明显。

关键词:玉米-大豆间作;光合有效辐射;竞争;光能利用效率;水分状况;氮肥使用状况

Effects of water and nitrogen on interception, competition and utilization of radiation in a maize-soybean intercropping system

GAO Yang¹, SHEN Xiaojun¹, YANG Linlin², LI Xinqiang¹, HUANG Ling³, GONG Wenjun⁴, DUAN Aiwang^{1,*}

1 Key Laboratory of Crop Water Use and Its Regulation, Ministry of Agriculture/Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China

2 Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 102442, China

3 College of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

4 Guangli Irrigation Authority, Jiaozuo 454550, China

Abstract: The growing population is driving global demand for increased agricultural production while arable land is being lost with urbanization and degradation. Intercropping is often a reliable way of using land and other resources more effectively. Maize-soybean intercropping may raise land productivity by improving the use efficiency of water, nutrient, and radiation resources. Water and fertilizer conditions have obvious influences on canopy growth and development, thus affect

基金项目:国家自然科学基金项目(51109213);公益性行业(农业)科研专项(201203077)

收稿日期:2013-05-12; 网络出版日期:2014-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duanaiwang@aliyun.com

radiation capture and utilization. However, few experiments were carried out to investigate effects of different water and nutrients combinations on radiation capture, competition and utilization in intercropping system. Therefore, an experiment was carried out to investigate effects of different water and nitrogen levels on radiation interception, competition and utilization in a maize-soybean strip intercropping system. The intercropping system consisted of two rows of maize and three rows of soybean flanked each other. The experiment design was consisted of 2 water levels, as sufficient water supply (soil moisture low limit was set as 75% of the field capacity) and water deficit (soil moisture low limit was set as 60% of the field capacity), and 2 nitrogen levels, as nitrogen application of 7.5 kg N per 667 m² and no nitrogen application. The total number of treatments was 4 and 3 replications were arranged. Experimental results indicated that under same nitrogen application level, the fraction of radiation intercepted by the intercropped crops on sufficient water supply plots was higher than those on water deficit plots during the medium-late stage. Under same water level, the fraction of radiation interception of the intercropped soybean on nitrogen application plots was slightly greater than that on no nitrogen application plots, but the difference was not significant. However, the radiation interception fraction of the intercropped maize on nitrogen application plots was significantly greater than that on the no nitrogen plots. For the treatments with same nitrogen application, the radiation competition ratio of the intercropped maize increased and the radiation competition ratio of the intercropped soybean decreased as the water supply was improved during the period of 64 days after sowing to maturity. Under same water application level, the radiation competition ratio of the intercropped maize on nitrogen application plots was significantly greater than that on no nitrogen plots during the period of 73 days after sowing to maturity, while it was not significant that the difference between the radiation competition ratios of the intercropped soybean on the two nitrogen treatments. For sufficient water supply treatments, light use efficiency (LUE) of the intercropped maize was 3.87 g/MJ on nitrogen application plots, and slightly higher than that (3.81 g/MJ) on no nitrogen application plots. However, for water deficit treatments, LUE of the intercropped maize was 3.86 g/MJ on nitrogen application plots and 3.72 g/MJ on no nitrogen application plots, an increasing of 3.6%. Under sufficient water supply, LUE of the intercropped soybean on nitrogen application plots (1.62 g/MJ) was higher than that on no nitrogen application plots (1.57 g/MJ) by 3.2%, while, a LUE of 1.55 g/MJ for the intercropped soybean on nitrogen application plots was nearly same to a LUE of 1.54 g/MJ on no nitrogen application plots under water deficit. It can be deduced that the influence of water condition on LUE of intercropped soybean was more significant than that of nitrogen condition.

Key Words: maize-soybean intercropping; photosynthetically active radiation; competition; light use efficiency; water condition; nitrogen application

作物能够用来进行光合作用那部分太阳辐射,一般定义在 400—700 nm 波段,即光合有效辐射(PAR)。光能截获率(F)和光能利用效率(LUE)表征了作物群体对辐射资源的捕获和利用效率^[1]。当不受水分、养分、病虫害等因素限制时,作物群体生物量与光能截获量呈正相关关系^[2-3]。与单作种植相比,间作群体冠层的空间分布更有利于光能的截获,高矮作物间作群体尤为明显,因此,间作种植通常可获得更高的光能截获量和利用效率^[1, 4-7]。

近年来,我国氮肥用量不断增加,但作物产量并未随氮肥用量的增加而增加,氮肥利用率在 30%—40%,大部分氮素从不同途径损失掉。在谷类-豆科间作系统中,豆科作物具有很好的固氮能力,这些氮素可通过各种转移途径被谷类作物所利用。谷类和豆科作物间作能够提高总产量、并保持产量的稳定性^[8-9];同时还可以利用豆科作物固定的生物氮,进而减少氮肥的施用量^[10-12]。玉米-大豆间作群体内,玉米产量的增加主要由于可利用光能的增加以及大豆固氮对玉米氮营养的贡献,而大豆产量的减少则主要由于玉米对大豆的遮光,减少了大豆可利用的光能^[13]。间作作物对光能的截获主要取决于叶面积指数和冠层结构^[14-15]。水肥条件会改变作物的冠层发育动态和冠层结构,进而影响作物对光能的截获和利用。已有的间作群体的水肥管理研究

多集中于间作作物间对养分的竞争、吸收与利用,而较少关注不同水肥状况对间作作物间光能竞争与利用的影响。因此,本文在玉米-大豆 2:3 间作模式下,研究了不同水分状况下,减施氮肥对间作作物的光能截获、竞争及利用的影响,旨在为制定间作群体适宜的水肥管理措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012 年 4 月—9 月在位于河南省焦作市的广利灌区灌溉试验站 (35.07 °N, 112.92 °E, 150 m) 进行。试验点多年平均气温 14.5℃, 多年平均降雨量 593 mm, 无霜期 216—240 d, 日照时数 2200—2400 h。土壤类型属粉砂质黏土, 土质分布均匀, 在该地区具有代表性。0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—200 cm 土层的土壤容重分别为 1.40、1.46、1.44、1.42 和 1.47 g/cm³, 各层的田间持水量分别为 26%、27.3%、28.5%、27.6% 和 28.2% (质量含水量)。土壤基本肥力参数为: 耕层土壤有机质 12.3 g/kg, 碱解氮 66.4 mg/kg, 速效磷 12.5 mg/kg, 速效钾 72.6 mg/kg。

供试玉米 (*Zea mays* L.) 品种为“先玉 335”, 大豆 (*Glycine max*) 品种为“临豆 10 号”。试验设水分和氮肥两个因子, 水分设水分亏缺 (I0: 壤水分控制下限为田间持水量的 60%) 和充分供水 (I1: 土壤水分控制下限为田间持水量的 70%) 2 种; 氮肥设不施氮肥 (N0) 和施氮 (N1: 每亩施纯氮 7.5 kg) 2 种, 随机区组设计, 共 4 个处理, 每个处理 3 次重复。计划湿润层深度设定为: 苗期 40 cm, 拔节期 60 cm, 抽雄-成熟期 100 cm。间作种植模式为玉米-大豆 2:3 种植, 试验小区面积为 6.0 m×10 m。间作模式的玉米行与大豆行相距 30 cm, 玉米行距 30 cm、株距 30 cm, 大豆行距 30 cm、株距 20 cm。玉米和大豆同时播种, 播种日期为 2012 年 4 月 7 日。种植方向为南北行向, 足墒播种。施氮处理的 50% N 作为基肥施入, 剩余的 50% N 在玉米拔节期追施。基肥在翻地前施用在整个小区内, 追施的 N 肥只施用在玉米条带内。玉米于 2012 年 8 月 24 日收获, 大豆于 2012 年 9 月 4 日收获。试验在大田下进行, 人工除草。当土壤水分达到灌水控制下限时, 进行灌水, 灌水上限为田间持水量, 灌水方式为喷灌。

1.2 测定指标

1.2.1 PAR 截获率和消光系数

在播后第 30 天开始至收获, 每隔 7—10d 采用 Li-190SA 和 Li-191SA 光量子传感器 (Li-cor 公司, 美国) 分别观测冠层上方 20 cm 处的入射 PAR 和冠层底部 (地表处) 的 PAR, 用 Li-1400 数据采集器 (Li-cor 公司, 美国) 自动记录数据。具体取样时间分别为播后第 30、41、50、63、73、84、93、104、121、132 天和第 147 天。观测在小区的中间位置进行, 每次观测分 3 个时间段进行, 分别为 9:00—9:30、12:00—12:30 和 15:00—15:30。观测时每个处理持续记录 5 min, 每 5 s 记录 1 次数据。每个处理观测时, 在玉米条带冠层上方放置 1 个 Li-190SA 传感器, 在玉米条带冠层底部放置 1 个 Li-191SA 传感器; 在大豆条带冠层上方放置 5 个 Li-190SA 传感器 (垂直行向, 间距 10 cm), 在大豆条带冠层底部放置一个 Li-191SA 传感器。

消光系数用下式计算:

$$k = \frac{-\ln \frac{\text{TPAR}}{\text{IPAR}}}{\text{LAI}} = \frac{\ln(1/F)}{\text{LAI}} \quad (1)$$

式中, k 为消光系数, LAI 为叶面积指数, TPAR 为透过冠层的 PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), IPAR 为冠层上方入射 PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), F 为 PAR 截获率。

1.2.2 地上部生物量和叶面积指数

在测定 PAR 截获率的同时, 取样测定地上部生物量和叶面积。为减小边际效应的影响, 在小区的中间位置选择样本, 每个小区分别取 5 株玉米和 5 株大豆, 采集的鲜样品在 105 °C 下杀青 30 min 后, 在 80 °C 下烘 24 h 后称重记录干物质量。

采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

使用扫描仪扫描玉米和大豆的叶片,通过图像处理得到叶面积系数 0.70 和 0.75;然后经过验证,表明所得到的叶面积系数是合理的。均以全田的面积计算间作作物的叶面积指数。

1.2.3 间作作物光竞争比和光能利用效率的计算

通过修正 Wallace 提出的光竞争比模型^[16],间作群体内玉米大豆的光竞争比用下式计算:

$$R_{\text{maize}}^{\text{PAR}} = \frac{F_{\text{maize}} / (1 - \exp(-k_{\text{maize}} \cdot \text{LAI}_{\text{maize}}))}{F_{\text{soybean}} / (1 - \exp(-k_{\text{soybean}} \cdot \text{LAI}_{\text{soybean}}))} \quad (2)$$

$$R_{\text{soybean}}^{\text{PAR}} = \frac{F_{\text{soybean}} / (1 - \exp(-k_{\text{soybean}} \cdot \text{LAI}_{\text{soybean}}))}{F_{\text{maize}} / (1 - \exp(-k_{\text{maize}} \cdot \text{LAI}_{\text{maize}}))} \quad (3)$$

式中, R^{PAR} 为光竞争比, F 为光截获率, k 为消光系数, LAI 为叶面积指数。

光能利用效率 (LUE) 用下式计算:

$$\text{LUE} = \frac{W}{I_0 \cdot F} \quad (4)$$

式中, LUE 为光能利用效率 (g/MJ), W 为地上部生物量 (g/m^2), I_0 为入射 PAR 量 (MJ/m^2), F 为光截获率。

1.2.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据分析、制图。用 DPS12.50 统计分析软件进行方差分析和显著性检验 (Duncan 新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 降雨情况、叶面积指数与消光系数

图 1 给出了 2012 年生育期的降雨情况。2012 年生育期内降雨量为 346.4 mm。7 月份以前的降雨量为 65.4 mm, 约为生育期总降雨量的 19%, 而且每次的降雨强度较小; 降雨强度在 20 mm 以上的降雨均发生在 7—9 月份。

图 2 给出了不同水氮处理下间作群体内玉米和大豆叶面积指数的变化过程。在播后第 50 天以前, 间作作物的 LAI 在不同处理间没有显著差异。在播后第 64 天到成熟, 相同氮肥处理条件下, 充分供水处理间作作物的 LAI 显著高于水分亏缺处理。充分供水条件下 (I1 处理), 从播后第 84 天到成熟, 不施氮处理 (I1N0) 间作

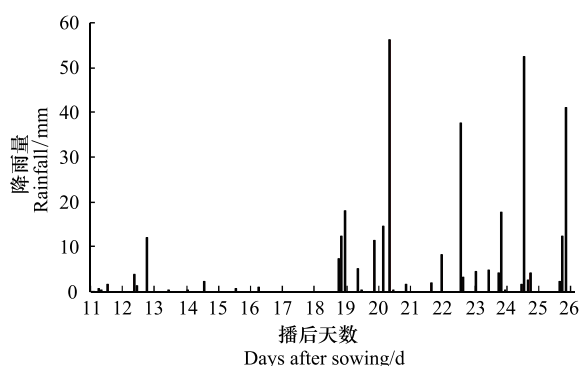


图 1 2012 年生育期内降雨情况

Fig.1 Rainfall during the growing season of 2012

玉米的 LAI 显著低于施氮处理 (I1N1); I1N0 处理间作大豆的 LAI 低于 I1N1 处理, 但只在播后第 84 天—第 93 天达到显著水平。结果表明, 水分充足条件下, 间作群体内玉米的 LAI 受施氮量影响较为明显, 而施氮量只在生长旺盛期显著影响间作大豆的 LAI 。水分亏缺处理 (I0) 间作玉米和大豆的 LAI 显著低于充分供水处理 (I1)。水分亏缺条件下, 从播后第 73 天到成熟, 不施氮处理 (I0N0) 间作玉米的 LAI 显著低于 I0N1 处理; I0N0 处理间作大豆的 LAI 低于 I0N1 处理, 但只在播后第 93 天—第 104 天达到显著水平。

图 3 给出了不同水氮处理玉米和大豆的消光系数。 $\ln(1/F)$ 与 LAI 有较好的相关性, 相关系数 $r > 0.99$ 。充分供水条件下, 施氮处理 (I1N1) 和不施氮处理 (I1N0) 玉米的消光系数分别为 0.45 和 0.44; 水分亏缺条件下, I0N1 和 I0N0 处理玉米的消光系数分别为 0.41 和 0.42。充分供水条件下, I1N1 和 I1N0 处理大豆的消光系数均为 0.50; 水分亏缺条件下, I0N1 和 I0N0 处理大豆的消光系数均为 0.52。

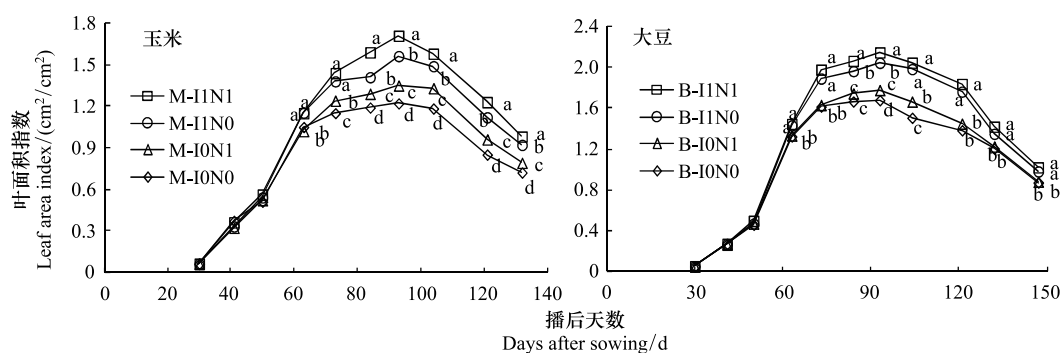


图2 不同水氮处理下间作玉米和大豆叶面积指数的变化过程

Fig.2 Changes in leaf area index of maize and soybean in intercropping with different water and nitrogen treatments

M: 玉米; B: 大豆; I1N1: 充分供水+施氮处理; I1N0: 充分供水+不施氮处理; I0N1: 水分亏缺+施氮处理; I0N0: 水分亏缺+不施氮处理

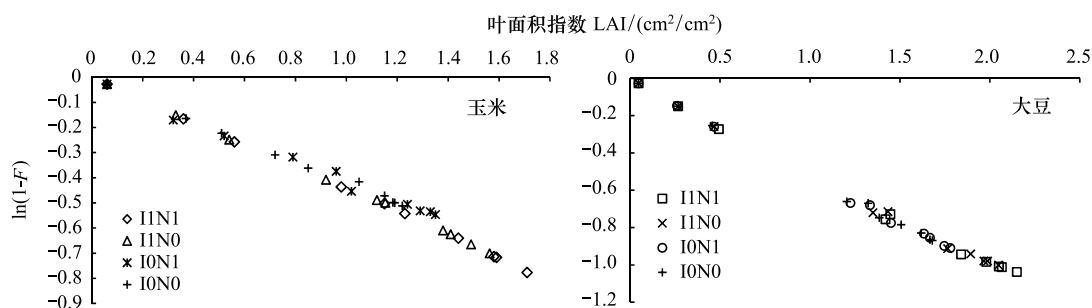


图3 不同水氮处理玉米和大豆的消光系数

Fig.3 Extinction coefficient of maize and soybean with different water and nitrogen treatments

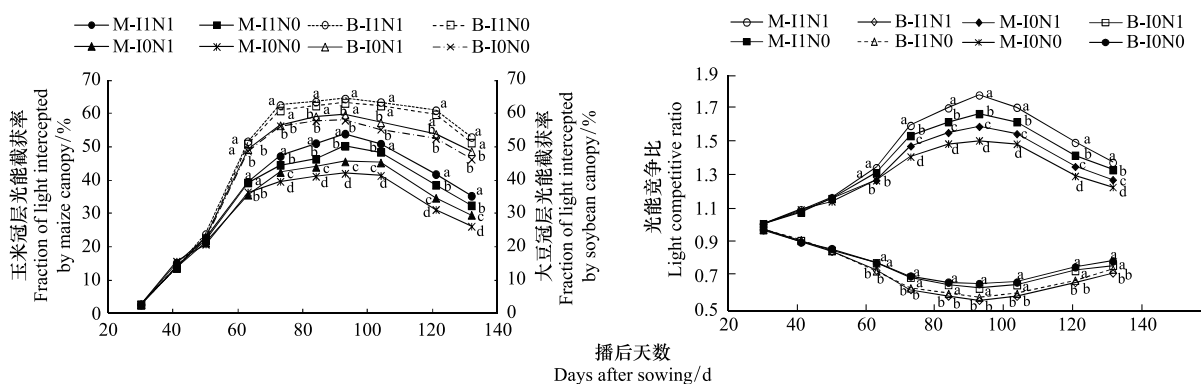


图4 不同水氮处理间作群体内玉米和大豆的光能截获率和竞争比

Fig.4 Light interception ratio and light competitive ratio of maize and soybean canopies in intercropping with different water and nitrogen treatments

2.2 光能截获率与竞争比

图4给出了不同水氮处理间作玉米和大豆冠层光能截获率的动态变化。播后第50天以前,由于叶面积指数较小,不同处理间的光能截获率没有显著差异。从播后第64天到成熟,相同氮肥处理条件下,充分供水处理间作作物的光能截获率显著高于水分亏缺处理。从播后第73天到成熟,相同水分条件下,施氮处理间作大豆的光能截获率略高于不施氮处理,但未达到显著水平;而施氮处理间作玉米的光能截获率则显著高于不施氮处理。

不同水氮处理间作玉米和大豆光能竞争比的变化过程(图4)。由高秆作物-玉米与矮秆作物-大豆组成

的间作群体内,玉米的光能竞争能力高于大豆。从播后第 64 天到成熟,同一氮肥处理条件下,充分供水处理间作玉米光能竞争比显著高于水分亏缺处理。从播后第 73 天到成熟,相同水分条件下,施氮处理间作玉米的光能竞争比显著高于不施氮处理。从播后第 64 天到成熟,同一氮肥处理条件下,充分供水处理间作大豆的光能竞争比显著低于水分亏缺处理;同一水分条件下,大豆的光能竞争比在两个氮肥处理间没有显著差异。

2.3 生物量积累与光能利用效率

图 5 给出了不同水氮处理间作玉米和大豆地上部生物量的动态变化。从出苗至播后第 84 天,不同处理间的生物量没有显著差异。播后第 84 天以后,同一氮肥处理条件下,充分供水处理(I1)的生物量高于水分亏缺处理(I0),在大部分取样测定时可达到显著水平。到收获时,同一氮肥处理下,充分供水处理玉米和大豆的生物量分别比水分亏缺处理玉米和大豆的生物量高 11% 和 26%,表明大豆生物量的积累对水分亏缺更为敏感。同一水分处理下,施氮处理的干物质量高于不施氮处理,但总体上未达到显著水平。到收获时,同一水分处理下,施氮处理玉米和大豆的生物量比不施氮处理约高 5%。

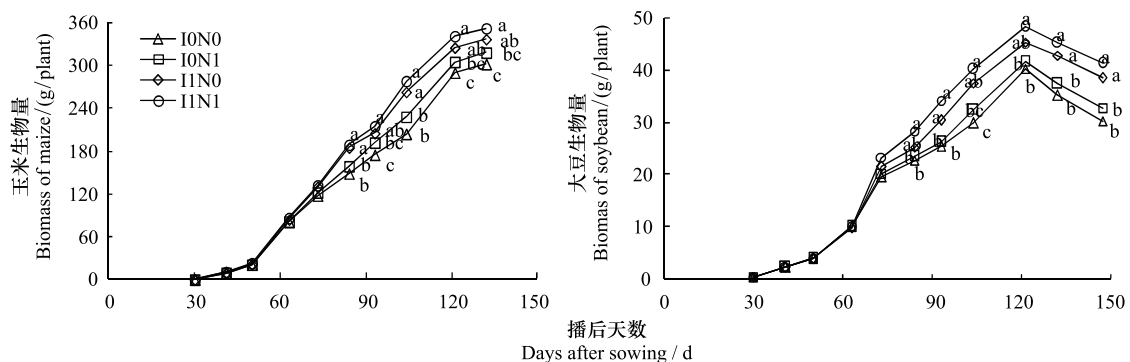


图 5 不同水氮处理下间作玉米和大豆生物量积累过程

Fig.5 Accumulated aboveground biomass of maize and soybean in intercropping with different water and nitrogen treatments

图 6 给出了不同水氮处理间作群体内玉米和大豆的光能利用效率(LUE)。与 C3 作物大豆相比,C4 作物玉米有着较高的光能利用效率。观测期间内间作玉米的 LUE 总体上都高于 2.0 g/MJ。充分供水条件下,施氮处理(I1N1)间作玉米的 LUE 为 3.87 g/MJ,略高于不施氮处理(I1N0)间作玉米的 LUE(3.81 g/MJ)。水分亏缺条件下,施氮处理(I0N1)间作玉米的 LUE(3.86 g/MJ)与 I1N1 处理间作玉米的 LUE 基本相同,但比不施氮处理(I0N0)间作玉米的 LUE(3.72 g/MJ)高 3.6%。结果表明,在水分亏缺条件下,合理施用氮肥,玉米-大豆间作群体内玉米仍可获得较高的光能利用效率。

I1N1 处理间作大豆的 LUE(1.62 g/MJ)比 I1N0 处理大豆的 LUE(1.57 g/MJ)高 3.2%。水分亏缺条件下,施氮处理(I0N1)间作大豆的 LUE 为 1.55 g/MJ,与 I0N0 处理间作大豆的 LUE(1.54 g/MJ)基本相同,但比 I1N1 处理间作大豆的 LUE 低 4.3%;而 I0N0 处理间作大豆的 LUE 比 I1N0 处理低 1.9%。结果表明,玉米-大豆间作群体内,与氮肥处理相比,水分状况对大豆光能利用效率的影响更大。

3 讨论和结论

作物群体的受光能力和内部光分布特征影响其光合作用,而冠层的形态结构是影响作物群体光分布与光

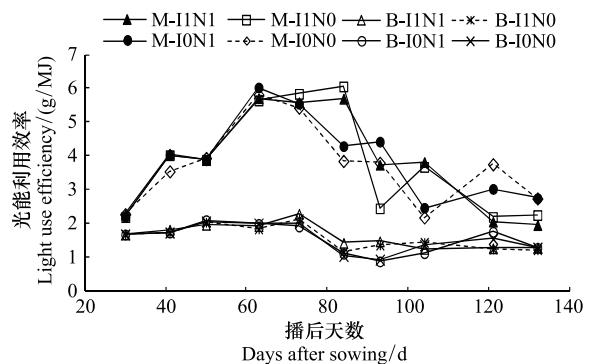


图 6 不同水氮处理下间作群体玉米和大豆的光能利用效率

Fig.6 Light use efficiency (LUE) of maize and soybean in intercropping with different water and nitrogen treatments

能利用重要因素^[17]。冠层的结构和功能受到诸如品种、气候、栽培措施等多种因素的调控,其中,水分与氮肥施用量是影响冠层结构特征的主要因素^[18-21]。本试验结果表明,不同水氮处理对玉米-大豆间作群体的冠层发育具有显著影响。在同一水分条件下,不施氮会降低间作玉米和大豆的 LAI;而在相同的氮肥处理条件下,水分亏缺则会显著降低间作作物的 LAI。冠层结构的改变会影响间作作物对光能的竞争和利用。

近年来,为追求高产,氮肥施用量越来越高,这种栽培方式往往造成冠层结构较不合理,适量施氮是塑造高效冠层结构、提高冠层光合性能和后期干物质生产,从而提高产量的一个重要途径^[17]。李文学^[22]等指出,与小麦-玉米间作群体相比,玉米-蚕豆间作群体在不施氮肥或少量施用氮肥的情况下产量显著提高,其主要原因可能是在氮素缺乏条件下,蚕豆固定的氮可通过间接或直接的途径传递给玉米^[23],而少量的施用氮肥,能够刺激豆科作物固氮,提高其固氮能力^[24]。在不施氮肥的情况下,虽然小麦-蚕豆内豆科作物固定的 N 很低,但间作种植仍提高了小麦的籽粒产量和含 N 量^[25]。Hauggaard-Nielsen 等^[26]与 Ghaley 等^[27]同样认为,较低的土壤 N 水平仍能够体现出谷类-豆科作物间作群体的优势。

作者在 2006 到 2008 年进行的玉米-大豆间作试验中,采用的是与本文相同的间作种植模式,充分供水但施氮量为每亩施纯氮 16 kg,其玉米的 LUE 为 3.12 g/MJ^[7],低于本文的 I1N1 处理玉米的 3.87 g/MJ;其大豆的 LUE 为 1.63 g/MJ^[7],与本文 I1N1 处理大豆的 LUE(1.62 g/MJ)相近。光能利用效率的差异主要是由作物的品种不同所造成的,2006—2008 年试验使用的玉米品种为“郑单 958”,大豆品种为“豫豆 22”。然而,2006—2008 年间作玉米收获时的地上部生物量分别为 345.23 g/株,略低于本试验 I1N1 处理玉米的地上部生物量 353.32 g/株,这一方面说明本试验所用玉米品种(先玉 335)的光能转化效率较高,另一方面也表明本试验充分供水处理的氮肥施用量能够满足玉米-大豆间作群体内玉米的氮肥需求。本试验与 2006—2008 年试验间作大豆的地上部生物量基本相同(2006—2008 年为 41.36 g/株;本试验为 41.24 g/株),这同样表明本试验充分供水处理的氮肥施用量能够满足玉米-大豆间作群体内大豆的氮肥需求。在氮肥减半的情况下,充分供水处理间作作物仍可获得较高的 LUE 和生物量,这可能是由于种间的相互作用提高了氮肥的利用效率。因此,在豫北地区土壤肥力适中的情况下,适当降低玉米-大豆间作群体的氮肥施用量,仍可获得较高的产量。

参考文献 (References):

- [1] Zhang L, van der Werf W, Bastiaans L, Zhang S, Li B, Spiertz J H J. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 29-42.
- [2] Sinclair T R, Muchow R C. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy*, 1999, 65: 215-265.
- [3] Tsubo M, Walker S, Mukhala E. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Research*, 2011, 71(1): 17-29.
- [4] Willey R W. Resource use in intercropping systems. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1/3): 215-231.
- [5] Rodrigo V H L, Stirling C M, Teklehaimanot Z, Nugawela A. Intercropping with banana to improve fractional interception and radiation use efficiency of immature rubber plantations. *Field Crops Research*, 2001, 69(3): 237-249.
- [6] Awal M A, Koshi H, Ikeda T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139(1/2): 74-83.
- [7] Gao Y, Duan A W, Qiu X Q, Sun J S, Zhang J P, Liu H, Wang H Z. Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean. *Agronomy Journal*, 2010, 102(4): 1149-1157.
- [8] Tsubo M, Walker S, Ogindo H O. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions. I. Model development. *Field Crops Research*, 2005, 93(1): 10-22.
- [9] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research*, 2001, 70(2): 101-109.
- [10] 李玉英, 胡汉升, 程序, 孙建好, 李隆. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响. *生态学报*, 2011, 31(6): 1617-1630.
- [11] Li L, Yang S C, Li X L, Zhang F S, Christie P. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant and Soil*, 1999, 212(2): 105-114.
- [12] 张恩和, 李玲玲, 黄高宝, 黄鹏, 柴强. 供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系的调控. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 939-942.
- [13] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 申孝军. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1248-1254.
- [14] Lantinga E A, Nassiri M, Kropff M J. Modelling and measuring vertical light absorption within grass-clover mixtures. *Agricultural and Forest*

- Meteorology, 1999, 96(1/3): 71-83.
- [15] Bastiaans L, Kropff M J, Goudriaan J, van Laar H H. Design of weed management systems with a reduced reliance on herbicides poses new challenges and prerequisites for modelling crop-weed interactions. *Field Crops Research*, 2000, 67(2): 161-179.
- [16] Wallace J S. Evaporation and radiation interception by neighbouring plants. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(543): 1885-1905.
- [17] 董树亭, 胡昌浩, 岳寿松, 王群瑛, 高荣岐, 潘子龙. 夏玉米群体光合速率特性及其与冠层结构、生态条件的关系. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, 16(4): 372-379.
- [18] Westgate M E, Forcella F, Reicosky D C, Somsen J. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crops Research*, 1997, 49(2): 249-258.
- [19] 李潮海, 刘奎, 周苏玫, 栾丽敏. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应. *作物学报*, 2002, 28(2): 265-269.
- [20] 杨国虎, 李新, 王承莲, 罗湘宁. 种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究. *西北农业学报*, 2006, 15(5): 57-60, 64-64.
- [21] 吕丽华, 赵明, 赵久然, 陶洪斌, 王璞. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2624-2632.
- [22] 李文学, 孙建好, 李隆, 张福锁. 不同施肥处理与间作形式对带田中玉米产量及氮营养状况的影响. *中国农业科技导报*, 2001, 3(3): 36-39.
- [23] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field Crops Research*, 1993, 34(3/4): 335-356.
- [24] van Chris K, Christopher H. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research*, 2000, 65(2/3): 165-181.
- [25] Tosti G, Guiducci M. Durum wheat-faba bean temporary intercropping: Effects on nitrogen supply and wheat quality. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(3): 157-165.
- [26] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65(3): 289-300.
- [27] Ghaley B B, Hauggaard-Nielsen H, Hogh-Jensen H, Jensen E S. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 73(2/3): 201-212.