



限氮条件下玉米、大豆、花生光能截获和干物质积累分析

邵云, 张杰, 李春喜, 马冠群, 侯盟, 马玥莹

(河南师范大学 生命科学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 为了探寻氮限制条件下作物光能截获特征的变化规律, 为黄淮海平原一年两熟农作制中夏播作物配置策略调整提供理论支撑, 本研究在河南省获嘉县采取裂区设计, 主区为常规施氮和不施氮 2 种施氮水平, 副区为玉米、大豆、花生 3 种不同夏播作物, 分析限氮处理条件下 3 种作物的光能截获和干物质质量相关性状的关系。在作物生育期中共选取 5 个时间点, 测量叶面积指数 (LAI)、叶夹角 (LA) 和作物冠层光合有效辐射 (PAR), 作物收获后调查其地上部干物质量和产量, 并计算冠层光合有效辐射截获率 (IPAR)、光能利用率 (LUE) 和收获指数 (HI) 等指标。结果表明: 3 种夏播作物的 LAI 与 IPAR 均在营养生长期快速增加, 而在生殖生长期呈略微下降或升高的趋势; 且与常规施氮处理相比, 不施氮处理下 3 种作物中大豆的 LAI 和 IPAR 的降幅最小, 分别为 9.52% 和 0.94%。玉米、大豆、花生在不施氮处理下的产量较常规施氮分别降低 8.31%、2.74% 和 3.35%, 其中大豆产量降幅最小。相关分析表明, 3 种作物产量与 LAI 和 IPAR 间均具有显著或极显著正相关关系; 玉米产量与 LA 具有显著或极显著的正相关关系, 而大豆的产量则与 LA 呈显著负相关, 花生的产量与 LA 呈极显著负相关。经曲线拟合, 3 种作物的产量与 LAI、LA 和 IPAR 均呈线性回归关系。另外, IPAR 与 LAI 间具有显著正相关关系, 且符合对数回归关系, 而与 LA 的相关性不显著。综上, 当氮素受限时, 与玉米和花生两种夏播作物相比, 大豆有更大的 LAI, 保持较高的 IPAR, 地上干物质量和产量降幅最小, 因此在低氮的农田土壤上种植大豆受氮限制的影响最小。

关键词: 黄淮海平原; 夏播作物; 氮限制; 光能截获; 光能利用率; 干物质量; 产量

Analysis of Light Interception and Dry Matter Accumulation of Maize, Soybean and Peanut under Nitrogen Restriction

SHAO Yun, ZHANG Jie, LI Chun-xi, MA Guan-qun, HOU Meng, MA Yue-ying

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to describe the changes of crop light interception parameters under low-nitrogen condition, and provide some proposals of allocation strategy for summer sown crops in the double-cropping area of the Huang-Huai-Hai Plain, we explained the relationship between light interception and dry matter of three summer sown crops in nitrogen limitation experiment with split-plot design in Huojia County, Henan Province, in which two nitrogen fertilizer levels of the main plot were conventional nitrogen application level and no nitrogen, and three summer sown crops of the subplot were maize, soybean and peanut, and analyzed the relationship between light interception and traits related to dry matter quality of the three crops under nitrogen restriction. So leaf area index (LAI), leaf angle (LA) and crop canopy photosynthetically active radiation (PAR) were measured continuously at five days in crop growth period, the above ground biomass and grain yield were surveyed after the crops were harvested, and canopy interception photosynthetically active radiation (IPAR), light use efficiency (LUE) and harvest index (HI) were calculated at last. The results showed that LAI and IPAR of the three summer sown crops increased rapidly during the vegetative growth period, but decreased or increased mildly during the reproductive growth period. Compared with conventional nitrogen level, LAI and IPAR of soybean in no nitrogen treatment were fallen further than those of maize and peanut, which were gone down 9.52% and 0.94% respectively. In the same way, the yield of maize, soybean and peanut in no nitrogen treatment declined by 8.31%, 2.74% and 3.35% respectively, and the reduction of soybean yield was the smallest among the three crops. Then with correlation analysis method, crops yield were all showed significant or highly significant positive correlation with LAI or IPAR; and there was significant or highly significant positive correlation between maize yield and LA, but significant negative correlation between soybean yield and LA, and highly significant correlation between peanut yield and LA. Furthermore, the yields of the three crops showed a linear regression relationship with LAI, LA and IPAR. Additionally, there was a positive logarithmic regression relationship between IPAR and LAI. In summary, in the condition of nitrogen stress, soybean maintains the largest LAI, the highest IPAR and the smallest

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目子课题 (2016YFD0300203-3, 2018YFD0300708-4)。

第一作者: 邵云 (1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事作物栽培生理生态与农业资源高效利用研究。E-mail: shaoyun73@126.com。

reduction of biomass and grain yield in the three summer sown crops. Therefore, soybean could be selected to plant in low-nitrogen farmland since it is affected least by nitrogen stress.

Keywords: Huang-Huai-Hai Plain; Summer sown crops; Nitrogen limitation; Light interception; Light use efficiency; Biomass; Yield

自 20 世纪 70 年代初开始,化肥对农作物产量的增加起到重要的推动作用^[1]。但目前农业生产中却存在化肥过量施用、盲目施用等现象。截至 2018 年,中国粮食作物(稻谷、小麦、玉米)平均化肥投入仍高达 374 kg·hm⁻²,是国际公认的化肥施用安全上限 225 kg·hm⁻² 的 1.66 倍^[2]。而过量的肥料投入对农业生态环境造成了严重的破坏。为了“加强资源保护和生态修复,推动农业绿色发展”,《全国种植业结构调整规划(2016—2020 年)》中明确指出“要调整种植业结构,在黄淮海地区恢复大豆种植面积”,以解决该区域夏季连年种植玉米致使局部土壤养分失衡等问题^[3]。轮作可以有效调节作物对土壤肥力的利用率,减少化肥的施用量^[4]。如果将需要不同营养元素的作物进行轮作,可以较全面均衡地利用土壤中的不同营养元素^[5]。

众所周知,禾谷类作物需要较多氮素,而豆类作物由于根瘤的固氮作用则需氮较少^[6]。氮肥可促进作物茎叶生长,显著增加叶片面积,从而增加叶片的光能截获,促进作物光合产物的积累^[7]。在其他条件一定的情况下,当氮素供应充足时,各种作物的光合能力都能达到最高水平;而当氮素受限时,不同作物光合能力受影响程度不同^[8];其中,氮素投入需求量较低且光合能力下降较少的作物在形成产量的同时对环境造成的污染最小。杨小琴等^[9]研究表明不同生态区作物体系的光能利用率不同,叶面积指数、光合有效辐射等参数都会受到影响,作物的形态也会发生相应的改变,以利于进一步提高光能利用效率。郑雪娇等^[10]对小麦冠层不同层次的光合有效辐射截获率与小麦干物质质量进行相关分析,发现冠层上部、中部的光合有效辐射截获率与小麦营养器官、干物质积累量、植株总干物质积累量和籽粒干物质积累量均呈显著正相关。Liu 等^[11]研究了玉米、大豆间作的遮荫效应,与单作相比,间作大豆在花期的节间长度、株高和比叶面积增加,但分枝减少。

综上,前人多从单种作物的角度研究光能利用,而在氮限制条件下对几种作物叶片生长、光合能力和作物产量进行横向比较的研究鲜见报道。本研究以黄淮海平原夏季种植面积较大的玉米、大豆、花生为研究对象,探究氮限制条件下作物的叶面积指数、叶夹角、光能截获及干物质积累的差异,旨在为该区域一年两熟农作制中夏播作物的配置

策略提供一定理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试玉米品种为洛单 958,大豆品种为驻豆 19,花生品种为罗汉果,所有作物种子均购自获嘉县农资市场。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 6—10 月在河南省新乡市获嘉县东彰仪村(35°12′N,113°36′E)进行,海拔高度 73.2 m,温带季风气候,年平均降水量 605.7 mm,年平均温度 16.1℃,地势平坦,土壤肥沃。试验区土壤类型为潮土,表层土有机质含量为 29.19 g·kg⁻¹,硝态氮和铵态氮含量分别为 21.14 和 9.61 mg·kg⁻¹,容重为 1.69 g·cm⁻³,萎蔫系数和田间持水量分别为 21.15% 和 33.44%。试验采取裂区设计,主区中设置常规施氮和限氮(不施氮肥)2 种施氮水平,玉米、大豆和花生常规施肥处理分别施纯氮 270,75 和 165 kg·hm⁻²;副区为玉米、大豆和花生 3 种不同夏播作物。共 6 个处理,3 次重复,常规施氮玉米记为 MCK,常规施氮大豆记为 SCK,常规施氮花生记为 PCK,限氮玉米记为 M-N,限氮大豆记为 S-N,限氮花生记为 P-N。同种作物其它肥料施用量保持一致,玉米、大豆和花生分别施用磷肥(P₂O₅)60,112 和 135 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)60,112 和 90 kg·hm⁻²。田间管理信息详见表 1。

表 1 作物的田间管理
Table 1 Field management of crops

管理措施 Management	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut
播种日期/(月-日) Sowing date/(month-day)	6-11	6-11	6-9
收获日期/(月-日) Harvest date/(month-day)	9-25	10-13	10-13
播种密度 Sowing density/(株·m ⁻²)	7	25	33
行距 Line spacing/mm	600	400	400
株距 Plant spacing/mm	250	100	150
播深 Sowing depth/mm	45	35	35

分别于2019年7月14日、7月29日、8月13日、8月28日和9月12日上午9:00—11:00测量光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和叶夹角(Leaf Angle, LA),5次重复;分别于玉米成熟期(9月25日)、大豆成熟期(10月13日)和花生成熟期(10月13日)取植株样品,测量地上部干物质量并进行测产^[12]。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 PAR、LAI 和 LA 使用冠层分析仪(SunScan,美国)测量 PAR 和 LAI,使用角度尺(迪基特,中国)测量 LA。

1.3.2 干物质量 采用直接烘干称量法^[13]测量植株的干物质量,将植株地上部放入烘箱中 105 ℃ 杀青 1 h,85 ℃ 烘干至恒重,称重。在作物成熟期于每个小区随机收割 4 m² 长势均匀的植株,晒干,脱粒,计产(kg·hm⁻²),3次重复。

1.3.3 光合有效辐射截获率 作物冠层的光合有效辐射截获率(Interception Photosynthetically Active Radiation, IPAR)的计算公式^[14]为: $IPAR(\%) = \frac{(PAR_1 - PAR_2)}{PAR_1} \times 100$ 。

1.3.4 光能利用率 光能利用率(Light Use Efficiency, LUE)的计算公式^[15]为: $\Sigma IPAR = IPAR \times \Sigma Q \times 0.5$, $LUE = \frac{ADM}{\Sigma IPAR}$,其中, $\Sigma IPAR$ 为生育期内 PAR 累积截获量乘以同时段太阳辐射连续监测总量的 1/2, ADM 为测定期间平均干物质增量(kg); ΣQ 为作物生育期间单位面积太阳总辐射逐日累加

量。运用埃斯屈朗方程^[16]将日照时数转换为日辐射值: $Q = Q_0 \left(a + b \cdot \frac{S}{S_0} \right)$,其中, Q 为日总辐射值(MJ·m⁻²), Q_0 为日天文辐射值(MJ·m⁻²), S/S_0 为实际日照时数与可照时数之比, a 和 b 与地理位置及季节有关,河南省内夏季取值 $a = 0.23$, $b = 0.47$;然后根据高国栋^[17]的方法逐步计算。

1.3.5 收获指数 收获指数(Harvest Index, HI) = 成熟期单株粒重/成熟期单株地上部干物质量。

1.4 数据分析

用 Excel 2007 和 SPSS 22.0 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 限氮条件下不同作物光能截获特征分析

2.1.1 叶面积指数 叶片是作物进行光合作用的主要营养器官,叶片形态的变化与作物干物质积累密切相关。由图 1 可以看出,3 种作物在全生育期内限氮处理的 LAI 都明显低于常规施氮处理,其中 M-N 平均较 MCK 低了 10.98%, S-N 平均较 SCK 低了 9.52%, P-N 平均较 PCK 低了 10.52%,即大豆在限氮处理下 LAI 降幅度最小。在 8 月 13 日前(营养生长期)3 种作物的 LAI 均呈快速上升趋势;之后生殖生长期玉米 LAI 明显下降,而大豆和花生 LAI 则趋于平缓,略有升降的变化,且两个施氮水平间差异变大。经方差分析,作物间 LAI 差异显著($P < 0.05$),大小依次是大豆 > 花生 > 玉米;同种作物的不同施氮水平 LAI 差异显著($P < 0.05$),大小为常规施氮 > 限氮。作物 LAI 与施氮水平互作效应不显著。

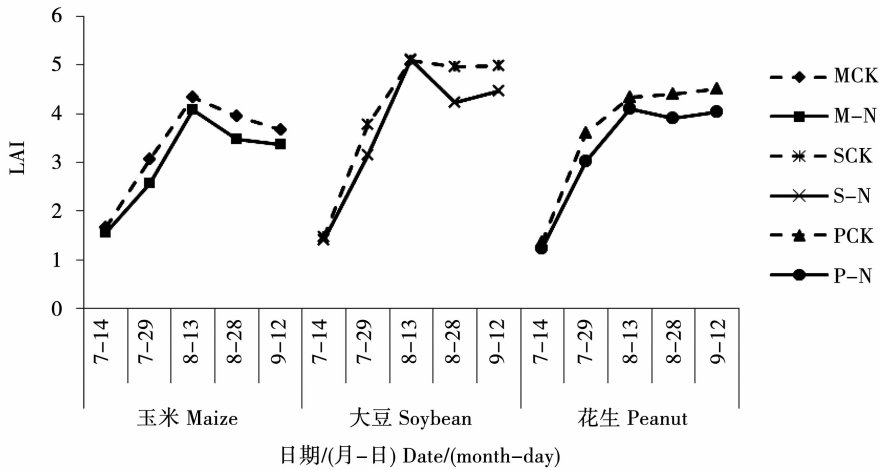


图 1 不同作物叶面积指数变化

Fig. 1 LAI changes of different crops

2.1.2 叶夹角 由图2中可以看出,整体上玉米、大豆和花生限氮处理的 LA 都高于常规施氮处理,其中 M-N 平均比 MCK 增加 10.76%,S-N 平均比 SCK 增加 6.84%,P-N 平均比 PCK 增加 7.02%,即大豆在限氮水平下的 LA 涨幅最小。3 种作物的 LA 变化呈现不同的趋势,MCK 处理的 LA 随生育期的推迟不断增大,而 M-N 则整体平缓,中期略微下降;两种施氮水平下大豆的 LA 变化趋势相同,7 月 14—29 日快速下降,7 月 29 日—9 月 12 日变化较

平缓,中间略有上升;两种施氮水平下花生的 LA 均表现为先上升再下降,但是不同施肥处理出现峰值的时间不同,P-N 处理为 7 月 29 日,PCK 处理为 8 月 28 日。3 种作物的两种施氮水平在 8 月 13 日前的 LA 相差较大,在 8 月 13 日之后差值越来越小。经方差分析,作物间 LA 的差异显著($P < 0.05$),从大到小依次是花生 > 大豆 > 玉米;同种作物不同施氮水平的 LA 差异显著($P < 0.05$),均为限氮 > 常规施氮。作物 LA 与施氮水平互作效应不显著。

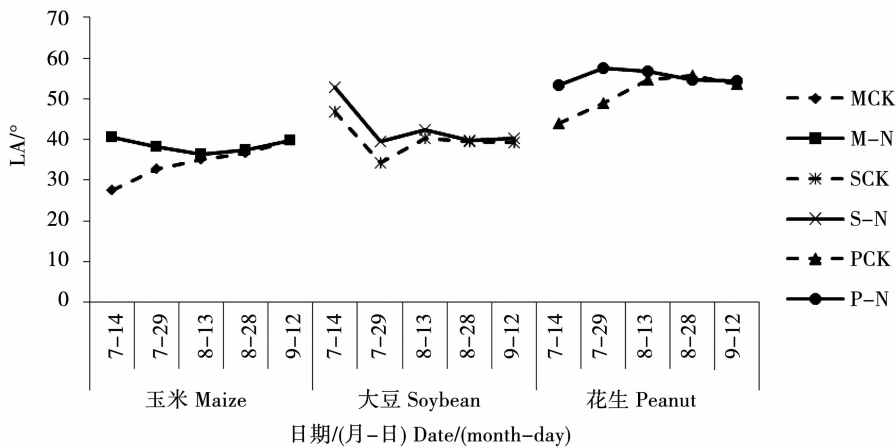


图2 不同作物叶夹角变化
Fig.2 LA changes of different crops

2.1.3 光合有效辐射截获率 作物冠层光合有效辐射截获率是有机物积累的重要前提,它随作物在不同生育期的植株形态、气象条件等因素的改变会出现不同的变化。如图3所示,3 种作物的 IPAR 都表现为前期限氮处理低于常规施氮处理,然后在中间某个时期限氮处理超过常规施氮处理(玉米在 8 月 28 日,大豆和花生在 7 月 29 日—8 月 13 日),后期限氮处理再低于常规施氮处理。M-N 平均较 MCK 减少了 5.67%,S-N 平均较 SCK 减少了

0.94%,P-N 平均较 PCK 减少了 0.97%,即大豆在限氮水平下的 IPAR 降幅最小。在整个生育期,玉米和花生的 IPAR 均随生育期的推迟出现先快速上升后小幅下降的趋势,大豆则为先快后慢的持续上升趋势。经方差分析,作物间 IPAR 的差异显著($P < 0.05$),大小依次是大豆 > 玉米 > 花生;同种作物的不同施氮水平 IPAR 的差异显著($P < 0.05$),均为常规施氮 > 限氮。作物 IPAR 与施氮水平互作效应不显著。

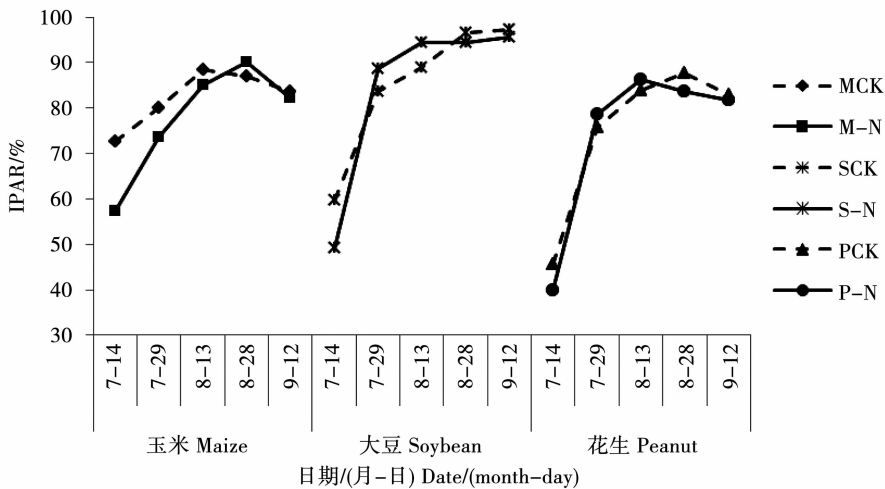


图3 不同作物光合有效辐射截获率变化
Fig.3 IPAR changes of different crops

2.2 限氮条件下不同作物干物质积累与光能利用分析

由表 2 可知,玉米、大豆和花生限氮处理的干物质量比常规施氮分别低 10.04%、5.97% 和 14.90%;产量分别低 8.31%、2.74% 和 3.35%;HI 分别低 14.81%、11.11% 和 6.82%;LUE 分别低 15.66%、11.27% 和 18.03%。经方差分析,不同作物间的干物质量、产量、HI 与 LUE 均达到极显著差异;不同施氮水平间的产量、HI 和 LUE 也达到了极

显著差异,干物质量差异显著;作物与施肥的交互作用均不显著。经多重比较,以上测量指标中,相同作物的不同施氮水平间均表现为常规施氮 > 限氮,而不同作物间干物质量、产量、LUE 均表现为玉米 > 大豆 > 花生,HI 则为玉米显著高于大豆和花生,后两者间差异不显著。总之,除 HI 外,不施氮处理中大豆的干物质量、产量和 LUE 降幅最小,故能保证在氮限制条件下光能最大化地转化为有机物积累在作物体内。

表 2 不同作物的干物质量、产量、收获指数和光能利用率
Table 2 The biomass, yield, harvest index and light use efficiency of different crops

施氮水平 Nitrogen level	作物 Crops	单株干物质量 Biomass per plant/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	收获指数 HI	光能利用率 LUE/%
常规施氮 Conventional nitrogen	玉米 Maize	239.59 ± 6.13 a	10047.34 ± 77.87 a	0.54 ± 0.02 a	0.83 ± 0.02 a
	大豆 Soybean	42.42 ± 0.93 b	5602.19 ± 144.26 b	0.45 ± 0.02 b	0.71 ± 0.01 b
	花生 Peanut	19.86 ± 0.66 c	2328.91 ± 51.63 c	0.44 ± 0.03 b	0.61 ± 0.02 c
限氮 No nitrogen	玉米 Maize	215.54 ± 11.12 a	9212.02 ± 115.79 a	0.46 ± 0.01 a	0.70 ± 0.02 a
	大豆 Soybean	39.90 ± 0.72 b	5448.52 ± 45.22 b	0.40 ± 0.01 b	0.63 ± 0.02 b
	花生 Peanut	16.90 ± 1.24 c	2250.83 ± 95.50 c	0.41 ± 0.02 b	0.50 ± 0.01 c
F 值 F value	作物 Crops	3026.48 **	9783.52 **	33.37 **	213.69 **
	氮肥 Nitrogen fertilizer	6.96 *	12.10 **	45.21 **	212.56 **
	作物 × 氮肥 Crops × Nitrogen fertilizer	2.33	1.03	3.48	1.15

表中所有数据均为平均值 ± 标准差,每一列同一施氮水平下不同小写字母表示不同作物间差异达到显著($P < 0.05$)。* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上差异显著, $n = 16$ 。

All data in the table are average values ± standard deviation, and different lowercase indicate significant differences between different crops at the same nitrogen application level in each column($P < 0.05$). * and ** is marked as significant difference at the 5% and 1% levels respectively, $n = 16$.

2.3 限氮条件下不同作物光能截获特征和产量关系分析

2.3.1 产量与光能截获特征相关分析 由表 3 可知,不同处理的产量与 LAI 或 IPAR 间均达到显著或极显著正相关水平,表明在作物生长期,内,LAI 和

IPAR 的增大能显著提高作物的产量。而玉米的产量与 LA 呈正相关,但大豆和花生的产量与 LA 则为负相关。LAI 和 IPAR 间均为显著或极显著正相关,说明 LAI 的增大能显著提高作物 PAR,而 LA 与 IPAR 则未达到显著相关。

表 3 作物产量和光能截获特征相关分析

Table 3 The correlation analysis of yield and light interception parameters

处理 Treatment	指标 Item	产量 Yield	LAI	LA	IPAR
MCK	产量 Yield	1			
	LAI	0.698 *	1		
	LA	0.823 *	0.983 **	1	
	IPAR	0.901 **	0.863 **	0.202	1
M-N	产量 Yield	1			
	LAI	0.925 **	1		
	LA	0.957 **	0.842 **	1	
	IPAR	0.801 *	0.710 *	0.195	1
SCK	产量 Yield	1			
	LAI	0.897 **	1		
	LA	-0.687 *	0.620 *	1	
	IPAR	0.923 **	0.894 **	-0.257	1
S-N	产量 Yield	1			
	LAI	0.967 **	1		
	LA	-0.821 *	-0.626 *	1	
	IPAR	0.911 **	0.852 **	-0.454	1
PCK	产量 Yield	1			
	LAI	0.912 **	1		
	LA	-0.936 **	0.349	1	
	IPAR	0.951 **	0.875 **	-0.011	1
P-N	产量 Yield	1			
	LAI	0.986 **	1		
	LA	-0.898 **	0.761 *	1	
	IPAR	0.736 *	0.942 **	0.059	1

* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上显著相关, $n=16$ 。

* and ** indicates significant correlation at 5% and 1% level respectively, $n=16$.

2.3.2 产量与光能截获特征回归分析 经曲线拟合可得,作物产量(y)与 LAI(x_1)、LA(x_2)、IPAR(x_3)呈现出极显著的线性回归关系,方程详见表 4,由回归系数可以看出,LAI 和 IPAR 增大会导致作物产量提高;而 LA 的增大会使玉米产量升高,大豆和花生的产量下降。在不同施氮水平的影响下,作物的光能截获特征出现了明显的差异,进而影响了作物的产量。在氮限制条件下,由回归系数可知,LAI 对产量的贡献率大小为玉米>大豆>花生;LA 对玉米产量影响为正向作用,因此 LA 的增加将提升产

量;LA 对大豆和花生产量的影响为负向作用,即 LA 的减小将提升产量,且影响强度为大豆>花生;IPAR 对产量的贡献率为玉米>花生>大豆。

2.3.3 IPAR 和 LAI 回归分析 由图 4 可知,经曲线拟合,不同处理的 IPAR 与 LAI 均表现为对数回归关系。不同处理的 IPAR 随着 LAI 的增大而增大,并且随着 LAI 的增大,增长速度变得迟缓。由回归系数可知,在限氮处理中,LAI 对 IPAR 的贡献率大小为大豆>花生>玉米,表明 LAI 对大豆 IPAR 影响较大。

表 4 作物产量和光能截获特征的回归方程
Table 4 The regression equation of crop yield and light interception parameters

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	<i>F</i>	<i>R</i> ²
MCK	$y_1 = 12.881x_1 + 4.271x_2 + 10.801x_3 - 221.86$	1508.74**	0.998
M-N	$y_2 = 57.485x_1 + 5.642x_2 + 9.905x_3 - 326.488$	99.75**	0.974
SCK	$y_3 = 12.929x_1 - 2.456x_2 + 5.446x_3 + 117.096$	1108.57**	0.997
S-N	$y_4 = 10.396x_1 - 6.325x_2 + 6.101x_3 + 114.098$	911.28**	0.997
PCK	$y_5 = 4.034x_1 - 4.375x_2 + 7.568x_3 + 225.139$	44.46**	0.943
P-N	$y_6 = 9.766x_1 - 4.759x_2 + 8.922x_3 + 102.985$	49.48**	0.949

* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上具有显著回归关系, *n* = 16.
* and ** indicate significant regression at 5% and 1% level respectively, *n* = 16.

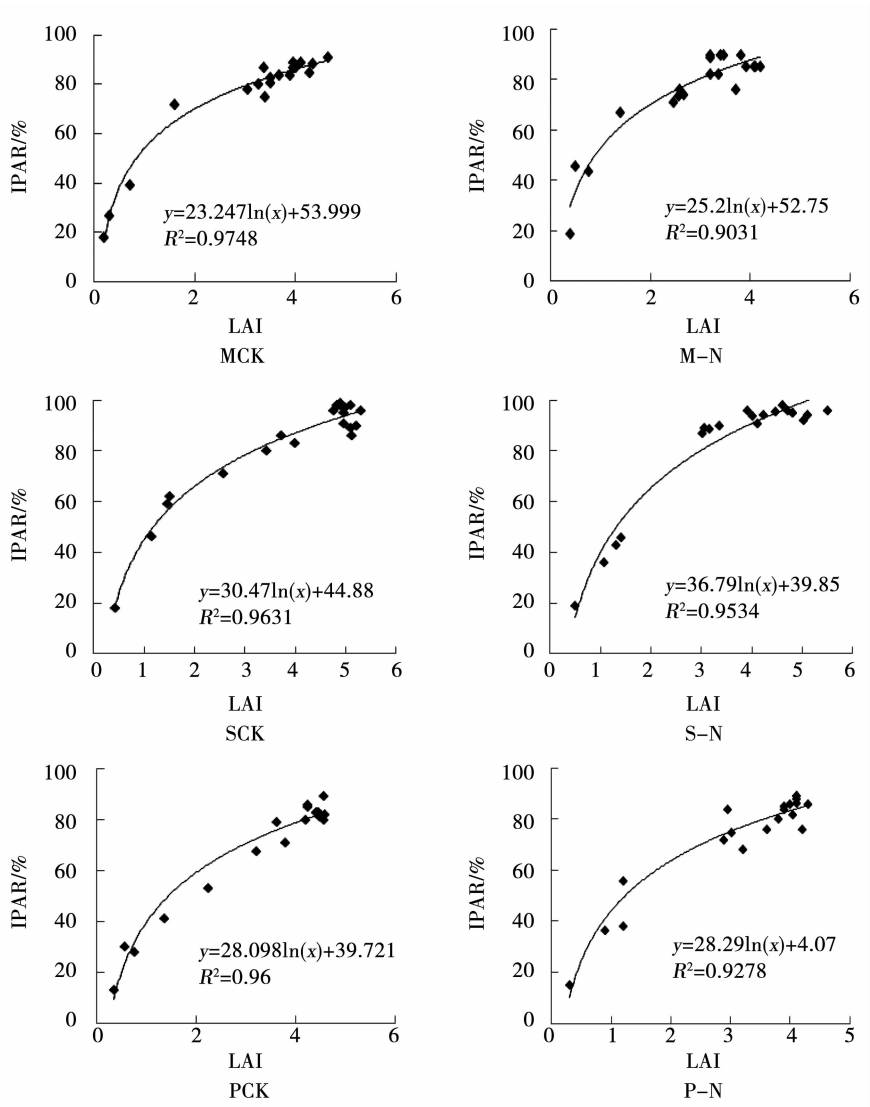


图 4 IPAR 和 LAI 回归曲线
Fig. 4 The regression curve of interception photosynthetically active radiation and leaf area index

3 讨 论

适宜的叶面积指数能够保证光热资源的有效利用,避免了作物叶片间、植株间的相互遮蔽,创造较好的冠层小气候,有利于作物干物质积累和产量提升^[18]。叶夹角反映了作物叶片的空间姿态,有研究表明适宜的叶夹角能保持作物紧凑的株型,提高叶面积指数,但在施氮量降低的情况下,叶片数将减少,为了截获较多光能,叶夹角将比正常氮素水平处理变大^[19]。本研究中,大豆在氮限制条件下,叶面积指数与叶夹角呈负相关,限氮处理的大豆叶夹角增幅最小,较其他作物株型更加紧凑。施用氮肥是促进作物生长发育的必要手段,在限氮条件下,作物生长发育迟缓,相同时期内,叶面积指数低于常规施氮处理,且随着生育期的推进呈现先增加后降低的趋势^[20]。本研究中作物叶面积指数变化趋势与刘淑静^[20]的研究结果基本一致,并且大豆在缺氮处理下因其生物固氮作用弥补了土壤限氮的不足,因此叶面积指数下降幅度最小。

在作物生长发育最快的阶段,冠层光合有效辐射截获量的增长速率也最大;而随着作物生育时期的推后,冠层内叶片密度的增大以及作物生长后期叶片的萎蔫,冠层光合有效辐射会出现不同程度的下降^[21-23]。本研究中,玉米和花生的冠层光合有效辐射均在营养生长期呈现上升趋势,随后出现下降趋势,大豆表现为持续上升,与荣旭等^[21]的研究结果基本一致。其中大豆在测量时期的光合有效辐射截获率最高,分别平均比花生和玉米高 11.37% 和 8.04%。将冠层光合有效辐射截获率和叶面积指数进行回归分析,结果显示为对数回归关系,与吕书财等^[24]的研究结果基本一致。叶面积是反映冠层结构和光能截获的叶片特征之一,大豆的光合有效辐射截获率与叶面积指数呈现显著正相关且回归系数较玉米和花生两种作物更大,这也为限氮处理下大豆有较大的冠层光能截获提供了保障。

光能利用率能较好地反映作物对于光能的同化利用,是作物干物质积累和产量构成必不可少的因素。一般农田的光能利用率仅为 0.5% ~ 1%^[25]。本研究中 M-N、S-N 和 P-N 的光能利用率分别 0.70%、0.63% 和 0.50%。虽然大豆的冠层光合有效辐射截获率高于玉米和花生,但是因其较长的生育期并未增加其生育期冠层光能截获积累量,从而导致了大豆的光能利用率最终并未高于生育期较短的玉米,但是在相同限氮条件下作物的光能利用率下降幅度最小的仍是大豆。

冠层辐射截获直接影响了作物干物质的积累

和籽粒产量提高^[26]。本研究中,3 种作物的不同施氮水平均与冠层光合截获量呈显著或极显著相关。回归分析发现,在限氮处理下,冠层光合截获的增加能提高作物的产量。氮限制条件下 3 种作物相比,大豆的叶面积指数、冠层光合截获降幅最小,从而导致了大豆的产量降幅最小,仅为 2.74%。由于产量的高低是决定种植方式优劣的重要评判标准,故作物光合有机物积累是决定产量高低的首要因子,而决定作物光合效能的影响因素之一便是叶片形态,所以生产中要优先考虑作物叶面积指数的变化对于光能截获和利用的影响。

4 结 论

与常规施氮相比,氮限制条件下在 3 种夏季作物中大豆的叶面积指数、叶夹角、冠层光合有效辐射和产量降幅最小,说明大豆对氮肥量的依赖性较小。因此在氮限制条件下,种植大豆能更好地利用光能进行干物质积累,以保证作物产量的稳定形成。

参考文献

[1] 王祖力,肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题, 2008(8):65-68. (Wang Z L, Xiao H F. Analysis of the effect of chemical fertilizer application on the increase of grain output [J]. Issues in Agricultural Economy, 2008(8): 65-68.)

[2] 郭珍. 中国粮食作物化肥施用与单产增长的相互演进态势及其地区差异分析[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2020,23(4):80-85. (Guo Z. Analysis of the mutual evolution trends and regional differences between fertilizer application and yield growth [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Social Science Edition), 2020,23(4):80-85.)

[3] 农业部关于印发《全国种植业结构调整规划(2016-2020 年)》的通知[Z]. 中华人民共和国农业部公报, 2016(5):47-55. (Notice of the ministry of agriculture on issuing the national planting industry structure adjustment plan (2016-2020) [Z]. Gazette of the Ministry of Agriculture of The People's Republic of China, 2016(5):47-55.)

[4] Uzon I M, Igwe C A, Okebalama C B, et al. Legume-maize rotation effect on maize productivity and soil fertility parameters under selected agronomic practices in a sandy loam soil [J]. Scientific Reports, 2019,9(1): 8539.

[5] Nuyen H P, Hirpky M, Jennifer O O, et al. Novel rhizobia exhibit superior nodulation and biological nitrogen fixation even under high nitrate concentration [J/OL]. FEMS Microbiology Ecology, 2020,96(2). DOI:10.1093/femsec/fiz184.

[6] Mark A, Thomas N, William T, et al. Contrasting responses of crop legumes and cereals to nitrogen availability [J]. New Phytologist, 2018,217(4):1475-1483.

[7] 曾维军. 氮、磷、钾肥对紫色小麦光合生理特性、产量及主要品质的影响[D]. 贵州:贵州大学,2019. (Zeng W J. Effects of

nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on photosynthetic physiological characteristics, yield and main quality of purple wheat[D]. Guizhou: Guizhou University,2019.)

[8] Lassaletta L, Billen G, Garnier J, et al. Nitrogen use in the global food system: Past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand [J]. Environmental Research Letters, 2016,11(9):095007.

[9] 杨小琴,王洋,齐晓宁,等. 玉米间作体系的光合生理生态特征[J]. 土壤与作物, 2019,8(1):70-77. (Yang X Q, Wang Y, Qi X N, et al. Photosynthetic physioecological characteristics of maize intercropping system [J]. Soils and Crops, 2019,8(1):70-77.)

[10] 郑雪娇, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对测墒补灌小麦冠层不同层次光截获和干物质分布的影响[J]. 应用生态学报, 2018,29(2):531-537. (Zheng X J, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Effects of nitrogen application rate on light interception and dry matter distribution at different layers in wheat canopy under supplemental irrigation based on measuring soil moisture [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(2):531-537.)

[11] Liu X, Rahman T, Song C ,et al. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2017, 200: 38-46.

[12] Li H L, Luo Y, Ma J H. Radiation-use efficiency and the harvest index of winter wheat at different nitrogen levels and their relationships to canopy spectral reflectance [J]. Crop and Pasture Science, 2011,62(3):208.

[13] 李向东, 吕凤荣, 张德奇, 等. 小麦田间测产和实际产量转换系数实证研究[J]. 麦类作物学报, 2016,36(1):69-76. (Li X D, Lyu F R, Zhang D Q, et al. Empirical study on conversion factors between yield monitoring and actual yield of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2016,36(1):69-76.)

[14] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017,28(6):1889-1898. (Wu X L, Li C S, Tang Y L, et al. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(6):1889-1898.)

[15] 徐延红, 李树岩. 气候变化对河南省小麦和玉米气候资源利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019,37(5):218-225. (Xu Y H, Li S Y. Impact of climate change on climatic resources utilization efficiency of wheat and maize in Henan Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019,37(5):218-225.)

[16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [M]. Italy: FAO Irrigation and Drainage, 1998.

[17] 高国栋. 气候学教程[M]. 北京:气象出版社, 1996. (Gao G D. Climatology course [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.)

[18] 李国强. 小麦株型建成及氮素调控研究[D]. 江苏:南京农业大学, 2011. (Li G Q. Eco-physiological characteristics and regulation approaches of wheat plant type development [D]. Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2011.)

[19] 吴正锋. 花生高产高效氮素养分调控研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014. (Wu Z F. Nitrogen management for high yield and high efficiency of peanut [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.)

[20] 刘淑静. 密度和施氮量对河北平原夏玉米产量及氮素利用的影响[D]. 河北:河北农业大学, 2019. (Liu S J. Effects of plant density and nitrogen rate on yield and nitrogen utilization of summer maize in Hebei Plain [D]. Hebei: Hebei Agricultural University.)

[21] 荣旭, 李宗毅, 李英豪, 等. 管渠灌溉对夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(2):46-56. (Rong X, Li Z Y, Li Y H, et al. Effect of canal irrigation on yield and water use efficiency of summer maize [J]. Water Saving Irrigation, 2020(2):46-56.)

[22] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 等. 带状套作大豆群体冠层光能截获与利用特征[J]. 中国农业科学, 2015,48(1):43-54. (Cui L, Su B Y, Yang F, et al. Relationship between light interception and light utilization of soybean canopy in relay strip intercropping system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(1):43-54.)

[23] 张东升. 风沙半干旱区玉米/花生间作光能高效捕获和利用[D]. 北京:中国农业大学, 2018. (Zhang D S. Study on high efficiency in capturing and using light in maize/peanut intercropping in semi-arid area [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.)

[24] 吕书财, 徐瑶, 陈国兴, 等. 大豆冠层光合有效辐射、叶面积指数及产量对种植密度的响应[J]. 江苏农业科学, 2018,46(18):68-72. (Lyu S C, Xu Y, Chen G X, et al. Response of soybean canopy photosynthetically active radiation, leaf area index and yield to planting density [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(18):68-72.)

[25] 张黛静, 马雪, 王晓东, 等. 品种与密度对豫中地区小麦光合生理特性及光能利用率的影响[J]. 麦类作物学报, 2014,34(3):388-394. (Zhang D J, Ma X, Wang X D, et al. Efficiency of variety on photosynthetic traits and light utilization efficiency of wheat in middle Henan Province [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014,34(3):388-394.)

[26] Mu X H, Chen Q W, Chen F J, et al. Dynamic remobilization of leaf nitrogen components in relation to photosynthetic rate during grain filling in maize [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 129:27-34.