

光照强度和氮素水平对玉米生长发育、光合生理及干物质积累的影响*

高志英^{1,2}, 张兆沛³, 樊 蕾¹, 杨永辉^{2,4**}

(1. 山西运城农业职业技术学院 农林与工程系, 山西 运城 044000;

2. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002;

3. 河南科技学院 实验管理中心, 河南 新乡 453000;

4. 农业农村部作物高效用水原阳科学观测实验站, 河南 原阳 453514)

摘要:【目的】探明光氮互作条件下玉米生长发育特征及光合生理机制, 为通过合理施肥缓解玉米弱光胁迫提供科学依据。【方法】采用盆栽试验, 研究不同光照强度和氮素水平对玉米生长发育、光合生理及干物质积累的影响。【结果】中低氮水平下, 遮阴处理的玉米生育后期株高较自然光处理有所降低; 不同施氮水平灌浆期上部叶、穗位叶和下部叶叶面积也均小于自然光处理, 下降幅度分别为 13.0%~35.9%、6.1%~28.5% 和 9.7%~26.4%, 生育前期功能叶片叶绿素含量和全生育期净光合速率也有不同程度降低, 拔节期叶中可溶性糖含量显著下降 11.1%~46.5% ($P<0.05$); 中高氮水平下, 遮阴处理玉米总生物量显著降低 33.1%~49.7% ($P<0.05$)。遮阴条件下, 低氮处理的不同部位叶片叶面积、净光合速率及根长均高于高氮处理, 叶中可溶性糖含量及总生物量也分别较中高氮处理增加 19.4%~108.3% 和 51.1%~85.6%。【结论】遮阴条件下, 玉米生长发育受抑制且低氮处理较中高氮处理更有助于玉米干物质累积。

关键词: 光照强度; 氮素水平; 玉米; 生长发育; 光合生理; 干物质积累

中图分类号: S 513.062

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 02-0187-09

Effects of Light Intensity and Nitrogen Level on the Growth, Photosynthetic Physiology and Dry Matter Accumulation of Maize

GAO Zhiying^{1,2}, ZHANG Zhaopei³, FAN Lei¹, YANG Yonghui^{2,4}

(1. Department of Agriculture-Forestry and Engineering, Yuncheng Agricultural Vocational Technology College,

Yuncheng 044000, China; 2. Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Henan Academy of

Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. Henan Institute of Science and Technology,

Xinxiang 453000, China; 4. Laboratory Management Centre, Yuanyang Experimental Station

of Crop Water Use, Ministry of Agriculture of China, Yuanyang 453514, China)

Abstract: [Purpose] As for light and nitrogen, the characteristics of growth and photosynthetic physiology of maize (*Zea mays* L.) were studied, in order to provide scientific basis for alleviating low-light stress through rational fertilization. [Methods] Pot experiments were conducted to study the effects of different light intensities and nitrogen levels on the growth, photosynthetic physiology and

收稿日期: 2018-11-01

修回日期: 2019-12-26

网络首发时间: 2020-05-29 16:38:04

*基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0301102); 商品粮大省奖励资金项目 (YNK20177518)。

作者简介: 高志英 (1981—), 女, 山西夏县人, 硕士, 副教授, 主要从事作物生态学方面的研究。

E-mail: 78037940@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 杨永辉 (1978—), 男, 陕西西安人, 博士, 副研究员, 主要从事水肥资源利用与管理研究。E-mail: yangyongh2020@126.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200529.0911.001.html>



dry matter accumulation of maize. [**Result**] Plant height of maize under shading treatment was lower than those of natural light treatment in low and middle nitrogen levels. The areas of upper leaf, ear leaf and lower leaf at the filling stage in different nitrogen levels were decreased by 13.0%-35.9%, 6.1%-28.5% and 9.7%-26.4%, respectively, compared with the natural light treatment; the chlorophyll contents of the functional leaves at the early growth stage and net photosynthetic rate at the whole growth stage were decreased to different degrees. Soluble sugar contents in leaves at the jointing stage were decreased significantly by 11.1%-46.5%, and total biomass under shading treatment was decreased by 33.1%-49.7% in middle and high nitrogen levels. The leaf areas of different parts, net photosynthetic rate and root length of low nitrogen treatment were higher than those of high nitrogen treatment, and soluble sugar content in leaves and total biomass under shading treatment were also increased by 19.4%-108.3% and 51.1%-85.6% respectively, compared with medium and high nitrogen treatments. [**Conclusion**] Under shading condition, the growth and development of maize were restrained, and low nitrogen treatment was beneficial to dry matter accumulation compared with middle and high nitrogen treatments.

Keywords: light intensity; nitrogen level; maize (*Zea mays* L.); growth; photosynthetic physiology; dry matter accumulation

玉米是全球也是中国第一大作物,在保障国家粮食安全中占有重要地位^[1-3]。光是最主要的环境因子之一,光合作用是玉米光合物质生产和产量形成的重要因素。黄淮海区域光温资源丰富,但利用率低,光能利用率仅为 1%~2%,远低于作物理论最大光能利用率 5%~6%^[4]。在温度、降水和辐射 3 个气象因素中,太阳辐射降低对玉米产量的不利影响大于前两者^[5-6]。目前由于气候变化和环境污染等问题,中国大部分地区都出现太阳辐射减弱的问题^[7];再加上玉米花粒期的阴雨天气,导致玉米减产较为严重^[8]。然而光强是作物生长过程中最难调控的环境因素之一。氮是玉米生长发育及产量形成所需要的主要营养元素之一,其营养状况的好坏,影响玉米的光合速率及干物质形成^[9-10]。玉米是高光效 C₄ 植物,对氮肥需求高而快,然而大量施用氮肥既增加种植成本,又会对农产品的品质安全和生态环境造成不良影响^[10-12]。因此,研究弱光条件下氮肥合理施用问题,对生产实践具有重要的指导意义。然而目前研究以烟草和蔬菜较多,禾本科作物的研究相对较少^[13]。如云菲等^[14]研究显示:弱光条件下增施氮肥可改善烟株的光合性能,促进体内碳氮代谢平衡。李会合等^[15]报道:低光照下控制氮肥施用量并增加钾肥用量,在莴苣上可获得良好的增产效果。最近,宋航等^[16]的研究结果显示:适

量增施氮肥可以部分弥补弱光胁迫对玉米生长发育的影响,缓解弱光胁迫对玉米氮素吸收利用的影响,提高玉米的物质生产能力,改善植株体内干物质分配,增加产量。我们先前对气孔特征的研究显示:在不同施氮水平,玉米气孔开度、气孔频度和气孔导度均随光照强度的增加而增加;但在相同光照条件下,三者皆随氮素供应的增加而降低^[17]。此基础上,我们进一步探讨光氮互作条件下玉米生长发育特征及光合生理机制,旨在为通过合理施肥减轻玉米弱光胁迫、促进玉米稳产增收提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

本试验在河南省开封市河南大学试验田进行,开封地处 N34°11'45"~35°01'20", E113°52'15"~115°15'42",土壤多为沙壤土,属黄河下游大冲积扇南翼。该区属暖温带大陆性季风型气候,年平均气温 14.24~14.50 ℃,无霜期 213~215 d,年平均降雨量为 670 mm。

1.2 试验设计

采用土培盆栽试验,选用聚乙烯塑料盆(高 34 cm,内径 36.5 cm),每盆装土 25 kg,土壤类型为黄河沉积物发育的黄潮土,土壤有机质 16.5 g/kg,全氮 0.8 g/g。

试验采用两因素随机区组试验设计,二因素分别为氮肥用量和光照条件。氮肥用量设置为纯氮 65 kg/hm² (N1)、130 kg/hm² (当地农田施肥标准, N2) 和 260 kg/hm² (N3) 3 个水平,氮肥品种选用金正大树脂包膜尿素 (N, 34%);光照条件设自然光 (L1) 和遮光 (L2) 2 个水平,自然光处理即全生育自然光照,遮光处理即在一层遮阳网罩住的遮阳棚中进行,经光合测定仪测得在自然光和遮光条件下的光合有效辐射均值分别为 1 128.44 和 576.26 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。每个处理 4 次重复,共 24 盆。6 月 25 日播种,每盆保留 2 穴,每穴 3 粒;三叶期剔苗,每穴 1 株,每盆保留 2 株;7 月 12 日一次性施入氮肥。

供试玉米品种为豫玉 22 号。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 农艺指标及干物质质量

从 5 叶期定期测量玉米株高,分别于拔节期、抽雄期、抽穗期和灌浆期测定根长;于灌浆期测定不同部位叶片长、宽和叶面积以及不同器官干质量,其中叶面积测定采用 LA-S 叶面积测定仪,干质量测定采用千分之一天平,其余均采用直尺测量。

1.3.2 光合特性

分别于拔节期、抽雄期和抽穗期,采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合测定仪测定玉米功能叶片(拔节期是最新全展叶,抽雄和抽穗期是穗位叶)光合参数。测定时间为 8:30~11:40,使用红蓝光源,光量子通量密度 (PFD) 为 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,叶室 (2 cm×3 cm) 内温度设定为 30 ℃。

1.3.3 叶绿素含量

分别于拔节期、抽雄期、抽穗期和灌浆期采集玉米功能叶片,采用 95% 乙醇浸提比色法测定其叶绿素含量。首先称取新鲜玉米叶片约 0.1 g,然后加 2 mL 95% 乙醇研磨成浆,用 95% 乙醇定容至终体积 10 mL,4 000 r/min 下离心 10 min,上清液分别于 665 和 649 nm 处测定吸光值。

1.3.4 可溶性糖含量

采用蒽酮比色法测定拔节期、抽雄期、抽穗期和灌浆期玉米功能叶片以及抽雄期、抽穗期和灌浆期茎部可溶性糖含量。首先将玉米样品 105 ℃ 杀青,65 ℃ 烘干,磨碎后称取 0.5 g,然后用 80%

乙醇提取离心,重复 3 次,合并上清液;定容至 10 mL,吸取 0.1 mL,加入 3 mL 蒽酮试剂 90 ℃ 水浴 15 min,620 nm 处测定吸光值。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2007 进行数据处理,SPSS 17.0 进行方差分析,LSD 法进行多重比较。

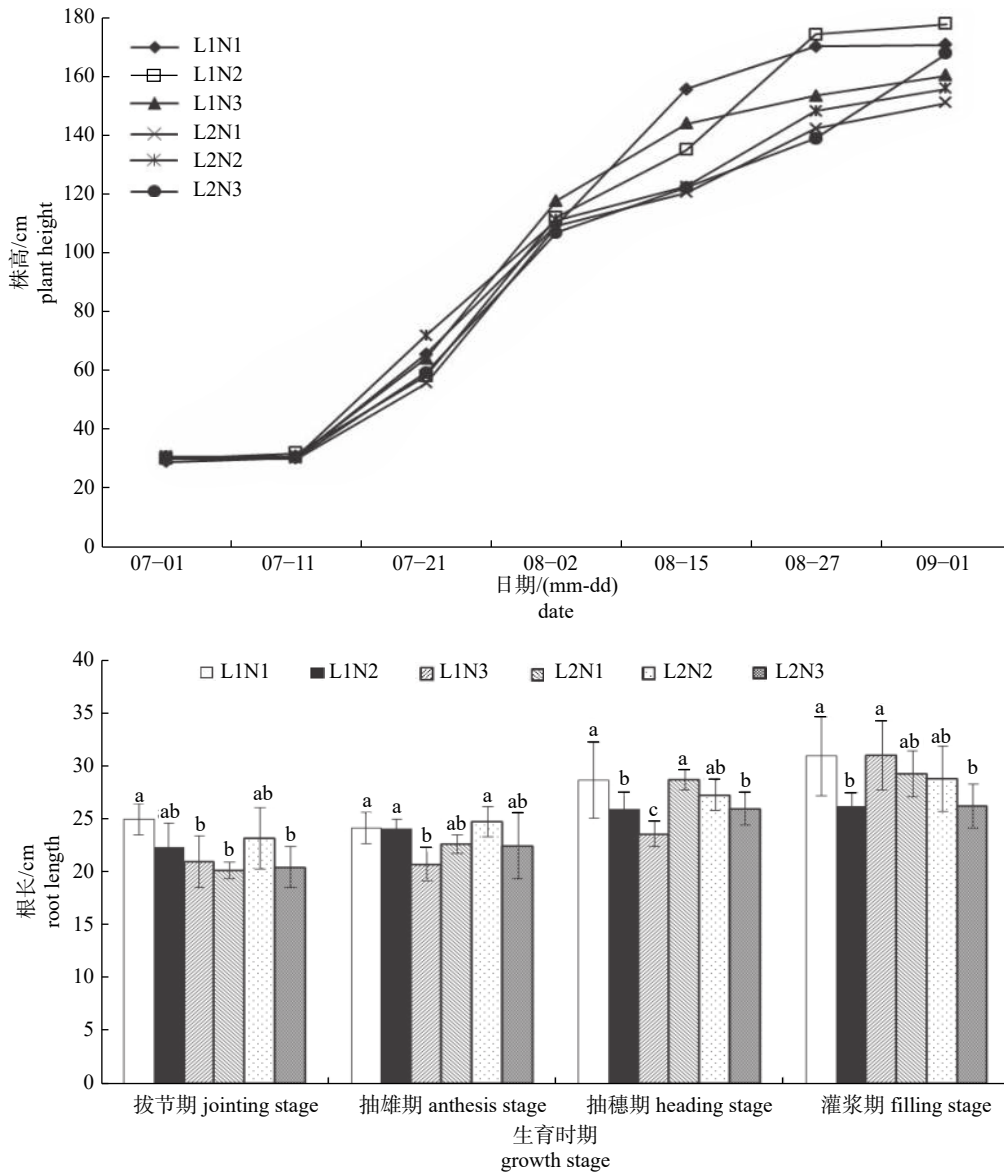
2 结果与分析

2.1 不同光照强度和氮素水平对玉米株高和根生长动态的影响

由图 1 可知:随着生育期的推进,玉米呈现先缓慢—后快速—再缓慢的生长态势,且生育前期各处理株高差异较小,后期差异逐渐增大。8 月 15 日,3 个自然光处理的玉米株高均大于遮阴处理,且以 N1 处理最高,N2 处理最低;3 个遮阴处理不同施氮量间无显著差异。之后,自然光条件下 N2 处理的玉米生长最为迅速,并逐渐超过 N1 和 N3 处理;而遮阴条件下,则以 N3 处理生长最为迅速。图 1 还显示:自然光条件下,拔节期和抽穗期玉米根长随施氮量增加而逐渐降低,抽雄期,N1 和 N2 处理间无显著差异,但均显著高于 N3 处理,而灌浆期则以 N2 处理最低;遮阴条件下,拔节期和抽雄期均以 N2 处理最高,抽穗期和灌浆期则以 N1 处理最高。该结果说明:遮阴对玉米地上部生长的抑制作用大于地下部,且高氮处理有利于地上部生长,而低氮处理有利于地下部生长。

2.2 不同光照强度和氮素水平对灌浆期玉米叶片生长的影响

表 1 显示:3 个自然光处理的不同部位玉米叶片叶长、叶宽、叶面积和叶鞘长均基本高于遮阴处理,其中穗位叶各项指标均以 N2 处理最低,N1 和 N3 处理间无显著差异;3 个遮阴处理叶长以 N1 处理最低,叶宽以 N3 处理最低,N2 处理的叶面积显著高于 N1 和 N3 处理,但其叶鞘长最低。自然光条件下,上部叶的叶长、叶宽和叶面积也均以 N2 处理最低,叶鞘长则以 N1 处理最高;3 个遮阴处理的叶长和叶面积以 N3 处理最低,N2 处理的叶宽最高,但叶鞘长最低。自然光条件下,下部叶的叶长、叶宽和叶面积以 N2 处理最低;遮阴条件下,以 N2 处理最高;两种光照条件下叶鞘长不同施氮量间均无显



注: L1N1. 自然光条件下, 施纯氮 65 kg/hm²; L1N2. 自然光条件下, 施纯氮 130 kg/hm²; L1N3. 自然光条件下, 施纯氮 260 kg/hm²; L2N1. 遮阴条件下, 施纯氮 65 kg/hm²; L2N2. 遮阴条件下, 施纯氮 130 kg/hm²; L2N3. 遮阴条件下, 施纯氮 260 kg/hm²。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Note: L1N1. the applying nitrogen amount was 65 kg/hm² under natural light condition; L1N2. the applying nitrogen amount was 130 kg/hm² under natural light condition; L1N3. the applying nitrogen amount was 260 kg/hm² under natural light condition; L2N1. the applying nitrogen amount was 65 kg/hm² under shading condition; L1N2. the applying nitrogen amount was 130 kg/hm² under shading condition; L1N3. the applying nitrogen amount was 260 kg/hm² under shading condition. Different small letters indicate significant difference between treatments at $P < 0.05$ at the same stages; the same as below.

图 1 不同光照强度和氮素水平对玉米茎秆和根系生长动态的影响

Fig. 1 Effects of different light intensities and nitrogen levels on the growth trend of the shoot and root of maize

著差异。该结果说明: 遮阴严重影响玉米不同部位叶片生长, 中氮处理的玉米叶片在自然光条件下最小, 遮阴条件下则最大。

2.3 不同光照强度和氮素水平对玉米叶片叶绿素含量的影响

图 2 显示: 自然光条件下, 拔节期和灌浆期玉米功能叶片叶绿素 a 含量以 N3 处理最低, 抽

雄期和抽穗期不同施氮量间无显著差异; 遮阴条件下, 拔节期以 N3 处理最低, 灌浆期以 N3 处理最高, 抽雄期以 N2 处理最低。自然光条件下, 拔节期叶绿素 b 含量随施氮量增加而逐渐降低, 抽穗期和灌浆期则随施氮量增加而逐渐增加; 遮阴条件下, 抽雄期以 N2 处理最低, 抽穗期以 N1 处理最低, 灌浆期以 N3 处理最低。自

表 1 不同光照强度和氮素水平对灌浆期玉米叶片生长的影响

Tab. 1 Effects of different light intensities and nitrogen levels on the growth of maize leaves at filling stage

处理 treatment	穗位叶 ear leaves				上部叶 upper leaves				下部叶 lower leaves			
	叶长/cm leaf length	叶宽/cm leaf width	叶面积/cm ² leaf area	叶鞘长/cm leaf sheath length	叶长/cm leaf length	叶宽/cm leaf width	叶面积/cm ² leaf area	叶鞘长/cm leaf sheath length	叶长/cm leaf length	叶宽/cm leaf width	叶面积/cm ² leaf area	叶鞘长/cm leaf sheath length
L1N1	81.75 a	8.10 a	662.18 a	13.90 a	73.88 a	8.55 a	631.63 a	14.08 a	87.23 a	7.93 a	691.26 a	14.50 a
L1N2	71.54 b	7.64 b	546.57 b	13.08 b	67.48 b	7.68 b	518.25 b	13.70 b	82.56 b	7.56 b	624.15 b	14.48 a
L1N3	84.32 a	8.10 a	682.99 a	13.74 a	75.30 a	8.20 a	617.46 a	13.80 b	89.88 a	7.82 a	702.86 a	14.54 a
L2N1	66.78 c	7.12 c	475.47 d	12.86 b	58.42 c	7.18 c	419.46 c	13.58 b	73.52 c	6.92 d	508.76 d	12.80 b
L2N2	72.25 b	7.10 c	512.98 c	12.07 d	60.35 c	7.48 b	451.12 c	12.12 d	79.63 b	7.08 c	563.35 c	12.70 b
L2N3	70.05 b	6.98 d	488.60 d	12.45 c	54.95 d	7.20 c	395.64 d	12.93 c	77.95 bc	6.88 d	535.91 cd	12.60 b

注: L1N1. 自然光条件下, 施纯氮 65 kg/hm²; L1N2. 自然光条件下, 施纯氮 130 kg/hm²; L1N3. 自然光条件下, 施纯氮 260 kg/hm²; L2N1. 遮阴条件下, 施纯氮 65 kg/hm²; L2N2. 遮阴条件下, 施纯氮 130 kg/hm²; L2N3. 遮阴条件下, 施纯氮 260 kg/hm²。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: L1N1. the applying nitrogen amount was 65 kg/hm² under natural light condition; L1N2. the applying nitrogen amount was 130 kg/hm² under natural light condition; L1N3. the applying nitrogen amount was 260 kg/hm² under natural light condition; L2N1. the applying nitrogen amount was 65 kg/hm² under shading condition; L2N2. the applying nitrogen amount was 130 kg/hm² under shading condition; L1N3. the applying nitrogen amount was 260 kg/hm² under shading condition. Data within the same column followed by no same letters indicate significant difference between treatments at $P<0.05$; the same as below.

然光条件下, 拔节期和抽雄期总叶绿素含量以 N3 处理最低, 抽穗期以 N3 处理最高; 遮阴条件下, 拔节期和灌浆期以 N3 处理最低, 抽雄期以 N2 处理最低, 抽穗期以 N1 处理最低。该结果说明: 遮阴对生育前期玉米叶绿素含量影响较大, 高氮处理自然光条件下生育前期含量较低, 生育后期含量较高; 遮阴条件下, 抽穗之前也表现出相似规律。

2.4 不同光照强度和氮素水平对玉米叶片光合特性的影响

表 2 显示: 3 个自然光处理的玉米净光合速率在不同生育期均高于遮阴处理, 其中 N3 处理在拔节期和抽雄期最高, 在抽穗期最低; 遮阴条件下, 不同生育期均以 N1 处理最高, N2 和 N3 处理间无显著差异。自然光条件下, N3 处理的气孔导度在拔节期和抽雄期最高, 在抽穗期最低; 遮阴条件下, 拔节期和抽穗期以 N1 处理最高, 抽穗期以 N2 处理最低。自然光条件下, 拔节期和抽雄期的胞间 CO₂ 浓度以 N2 处理最高, 抽穗期以 N3 处理最低; 遮阴条件下, 拔节期以 N1 处理最高, 抽雄期以 N2 处理最高, 抽穗期以 N3 处理最高。自然光条件下, 拔节期和抽雄期的蒸腾速率均以 N3 处理最高, 抽穗期以 N2 处理最高; 遮阴条件下, 拔节期以 N2 处理最低, 抽雄期和抽穗期以 N1 处理最高。该结果说明: 遮阴显著降低不同生育期玉米光合速率, 从而影响光合作用的进行; 自然光条件下, 高氮处

理生育前期光合速率较高; 遮阴条件下, 则以低氮处理光合速率较高。

2.5 不同光照强度和氮素水平对玉米叶和茎中可溶性糖含量的影响

可溶性糖不仅是植物体内重要的光合产物, 也具有渗透调节及保护膜结构的功能^[18]。图 3 显示: 自然光条件下, 拔节期和抽雄期的叶中可溶性糖含量, 不同施氮量间无显著差异, 但拔节期整体高于遮阴处理, 抽穗期和灌浆期则均以 N2 处理最高; 遮阴条件下, 不同生育期均以 N3 处理最低, N1 处理最高。自然光条件下, 不同生育期茎中可溶性糖含量均以 N1 处理最高, N2 和 N3 处理间无显著差异; 遮阴条件下, 抽雄期和灌浆期均以 N2 处理最高; 抽穗期以 N3 处理最高, N1 处理最低。该结果说明: 遮阴显著降低生育前期玉米叶中可溶性糖含量, 且随施氮量增加降幅逐渐增大; 自然光条件下, 低氮处理的茎中可溶性糖含量较高; 遮阴条件下, 则以中高氮处理较高。

2.6 不同光照强度和氮素水平对玉米干物质累积及分布的影响

表 3 显示: 自然光条件下, 3 个氮水平处理的玉米根和叶片干质量均无显著差异, 但根干质量均高于遮阴处理, N2 和 N3 处理的叶片干质量也显著高于遮阴处理; 遮阴条件下, 根干质量以 N3 处理最高, 叶片干质量以 N1 处理最高。自然光条件下, N2 处理的茎和叶鞘干质量显著高于

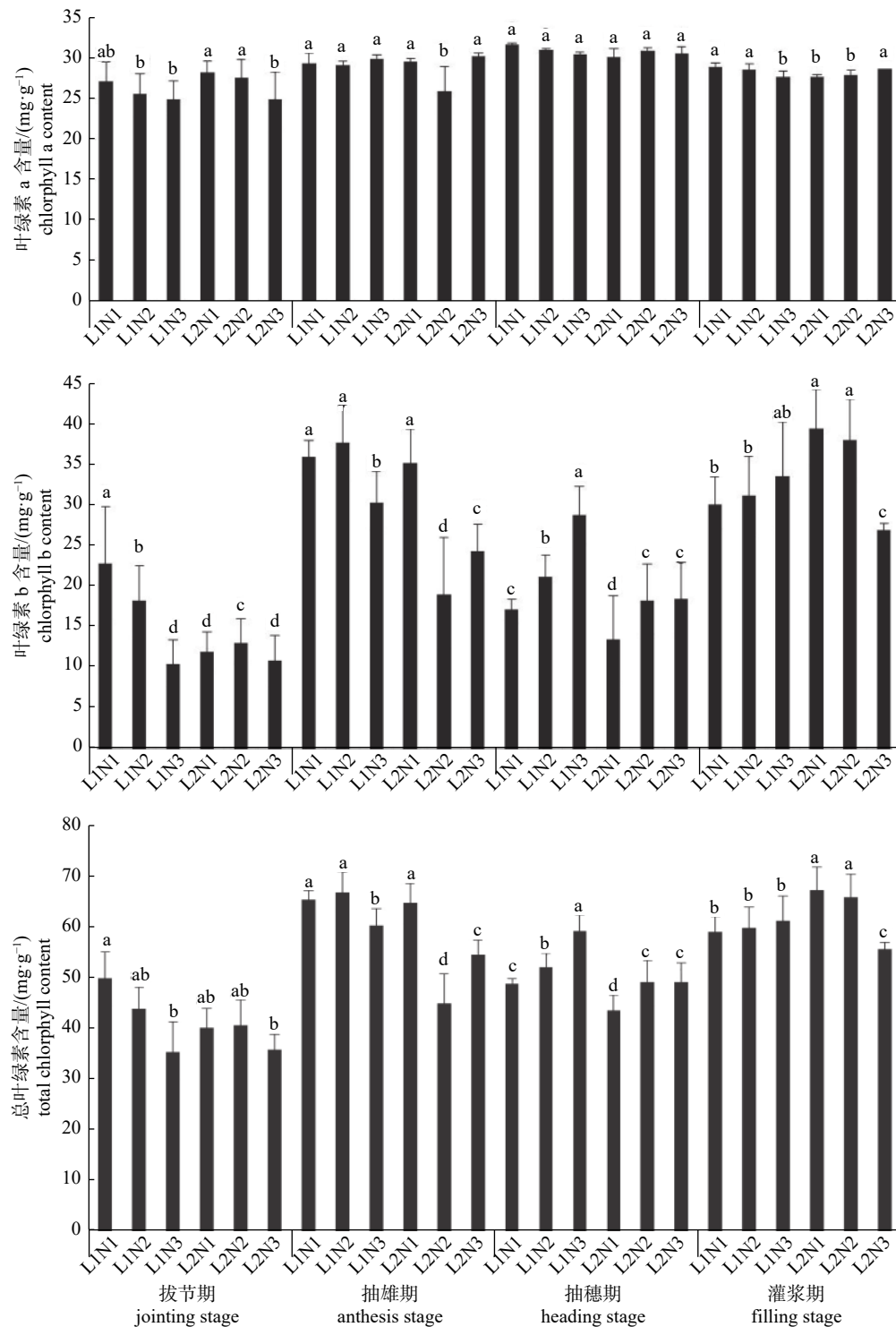


图 2 不同光照强度和氮素水平对玉米叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of different light intensities and nitrogen levels on the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll of maize leaves

N1 和 N3 处理；遮阴条件下，则以 N1 处理最高。自然光处理的花秆、花和雄蕊干质量整体均高于遮阴处理，其中 N2 处理自然光条件下最高，遮阴条件下最低。自然光条件下，N2 和

N3 处理的穗干质量显著高于 N1 处理；遮阴条件下，则以 N1 处理最高。自然光条件下，总生物量以 N2 处理最高，且显著高于遮阴时处理；遮阴条件下，则以 N1 处理最高，并高于自然光时

表 2 不同光照强度和氮素水平对玉米光合特性的影响

Tab. 2 Effects of different light intensities and nitrogen levels on the photosynthetic characteristic of maize leaves

生育期 growth period	处理 treatment	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) net photosynthetic rate	气孔导度/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) intercellular CO_2 concentration	蒸腾速率/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) transpiration rate
拔节期 jointing stage	L1N1	23.27 b	0.197 b	99.95 cd	2.773 b
	L1N2	22.07 b	0.203 b	112.69 b	2.945 b
	L1N3	26.17 a	0.229 a	95.17 d	3.839 a
	L2N1	21.13 b	0.196 b	127.14 a	2.212 c
	L2N2	14.69 c	0.127 d	104.58 c	1.984 d
	L2N3	16.03 c	0.143 c	109.39 bc	2.345 c
抽雄期 anthesis stage	L1N1	21.63 b	0.157 b	83.71 c	2.771 c
	L1N2	20.73 b	0.165 b	97.00 b	3.006 b
	L1N3	27.14 a	0.220 a	89.29 c	3.883 a
	L2N1	19.37 b	0.145 b	65.17 d	3.682 a
	L2N2	11.23 c	0.091 c	118.80 a	1.764 d
	L2N3	12.45 c	0.081 c	96.64 b	1.604 d
抽穗期 heading stage	L1N1	18.00 a	0.146 a	101.55 b	3.174 b
	L1N2	16.63 a	0.135 a	103.06 b	3.591 a
	L1N3	13.62 b	0.103 b	90.52 c	2.762 bc
	L2N1	13.66 b	0.112 b	107.96 b	2.980 b
	L2N2	9.02 c	0.067 c	92.19 c	1.751 d
	L2N3	10.43 c	0.096 b	130.72 a	2.519 c

处理。该结果说明：遮阴条件下低氮处理有助于玉米干物质累积，尤其是穗部；中高氮处理则表现为抑制玉米干物质累积。

3 讨论

光照是影响玉米光合作用及干物质生产的重要因子。本研究显示：遮阴对玉米地上部生长的抑制作用大于地下部，不同部位叶片大小均小于自然光处理，生育前期功能叶片叶绿素含量和叶中可溶性糖含量均有所降低，全生育期净光合速率也显著下降，说明遮阴抑制玉米光合作用的进行，进而影响玉米生长发育及干物质积累。前人研究显示^[18-21]：弱光胁迫下玉米光合效率明显降低，茎叶等营养器官的生物量严重降低，且总生物量主要分布在营养器官中，影响光合产物向籽粒的转运，降低产量，本研究结果与其基本一致。杜成凤等^[22]报道：玉米苗期遮阴后叶片单面积叶绿体数目减少，基粒数、基粒厚度和片层数增加，这可能是导致光合色素降低和光合速率下降的原因。此外，玉米花粒期遮阴处理影响花后籽粒发育，使粒重降低，导致其干物质总量和产量均显著下降^[23]。本试验中，中高氮水平条件

下，遮阴处理玉米穗部干质量和总干质量均显著低于自然光处理，可能是上述原因所致。

氮对玉米植株的光合物质生产、物质分配以及碳氮代谢具有重要影响，且与光照存在显著的交互作用^[24-26]。本研究显示：遮阴条件下，低氮处理的不同部位叶片大小、净光合速率及根长均高于高氮处理，从而导致叶中可溶性糖含量及总干质量也均较高，说明遮阴条件下低氮处理有利于玉米干质量累积，尤其是穗部；中高氮水平下玉米干质量积累量有所下降。关义新等^[24]报道：弱光下植株在较低供氮水平下具有较高的物质生产能力和氮素同化能力，而强光下植株的最大光合物质生产能力和氮素同化能力则出现在较高的氮素水平。EVANS^[25]报道：弱光条件下，供氮过多会使叶片 C/N 值过低、氮代谢旺盛以及光合产物的输出率降低，造成光合产物对光合器官的反馈抑制，从而不利于干物质的积累；我们的研究结果与其相符。关义新等^[26]的研究还显示：在较高的供氮水平下，高光强下叶片的 PSII 效率较高，非光化学猝灭较低，吸收的光能较多的进入光化学过程；而低光强下则有较多的光能通过天线色素以热能形式散失，较多的光能即无法进入

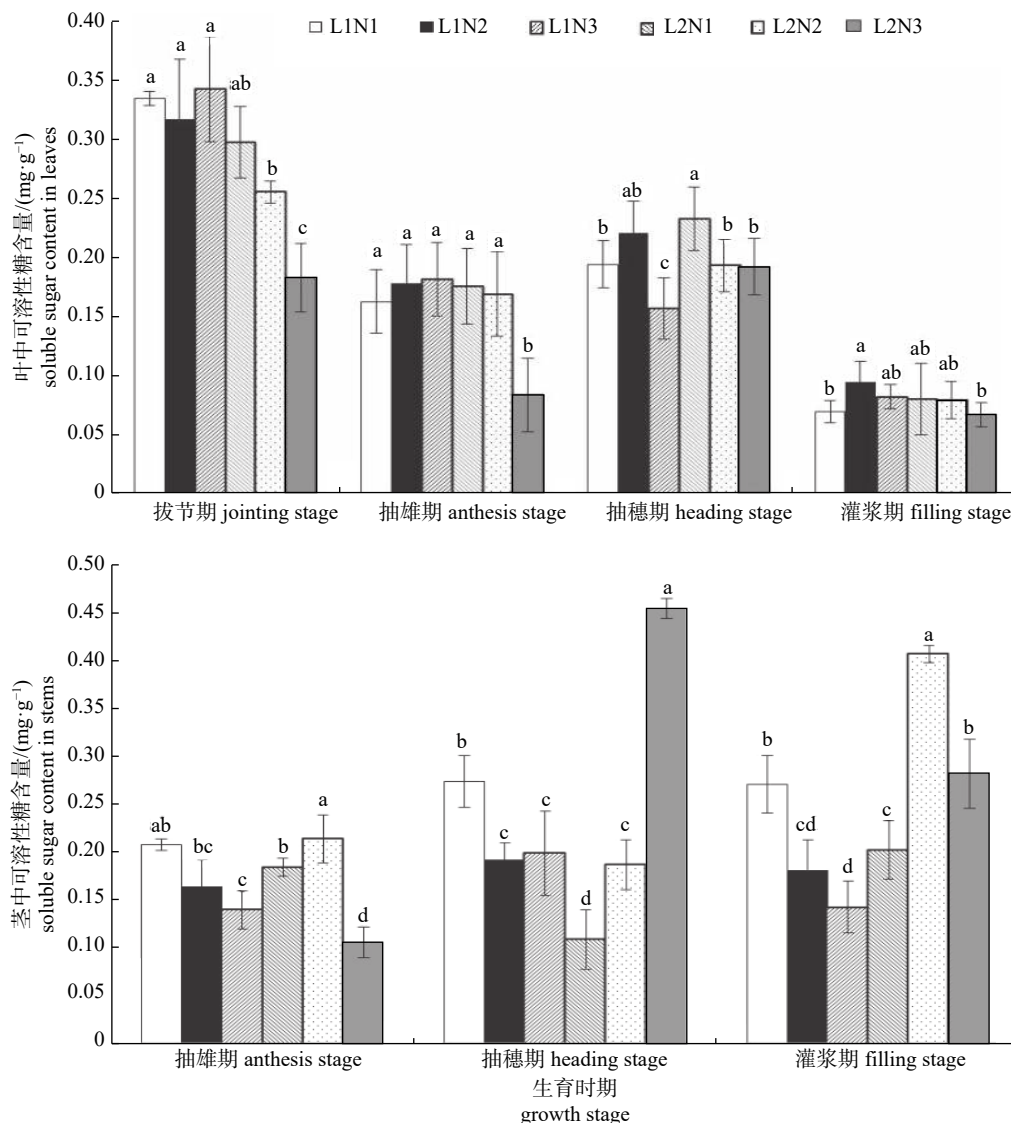


图 3 不同光照强度和氮素水平对玉米叶和茎中可溶性糖含量的影响

Fig. 3 Effects of different light intensities and nitrogen levels on the soluble sugar content in leaves and stems of maize

表 3 不同光照强度和氮素水平对玉米干物质累积及分布的影响

Tab. 3 Effects of different light intensities and nitrogen levels on the accumulation and distribution of dry matter of maize

处理 treatment	根 root	茎 shoot	叶片 leaf	叶鞘 leaf sheath	花秆 flowering stems	花 flowering	雄蕊 stamens	穗 maize ear	总生物量 total biomass
L1N1	7.80 a	21.02 b	15.43 a	9.53 b	0.41 b	1.28 b	1.69 b	31.15 c	88.31 c
L1N2	7.35 a	26.06 a	16.57 a	10.95 a	0.56 a	1.68 a	2.24 a	36.93 b	102.34 a
L1N3	7.74 a	20.90 b	16.34 a	9.46 b	0.36 bc	1.23 b	1.59 b	37.02 b	94.64 b
L2N1	6.13 c	19.50 b	16.14 a	9.91 ab	0.33 c	1.14 b	1.46 b	41.01 a	95.62 b
L2N2	4.97 d	13.71 c	11.07 b	7.34 d	0.25 d	0.58 c	0.82 c	12.78 e	51.52 d
L2N3	6.88 b	15.90 c	10.57 b	8.07 c	0.33 c	1.03 b	1.37 b	19.13 d	63.28 d

光化学过程也不能进入热耗散,而有可能以叶绿素单线激发态的形式存在,或通过产生活性氧等极为不利的方式散失。李海波等^[27]研究发现:高

肥处理叶片的各部位气孔频度均低于低肥处理,我们前期结果也表现出类似规律^[17],这可能是本试验中遮阴条件下低氮处理玉米干物质累积较高

的原因。也有报道指出:增施氮肥可提高弱光胁迫下小麦叶片对光能的捕获能力,提高光能转化效率和PSII反应中心开放部分的比例,降低非辐射能量的热耗散,有利于小麦将捕获的光能更有效地用于光合作用,进而提高净光合速率^[28],这与本试验结果不一致,可能与氮肥施用范围不同有关。本研究结果表明:自然光条件下,玉米植株的适宜氮素水平较高,而弱光条件下玉米植株的适宜供氮水平较低,因此在生产过程中,应注意光与肥的关系,尽量协调使之达到平衡。

[参考文献]

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.11.001.
- [2] XU X P, HE P, PAMPOLINO M F, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 27. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.12.013.
- [3] 张学林,徐钧,安婷婷,等.不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系[J].中国农业科学,2016,49(14):2687. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.14.004.
- [4] 任佰朝,高飞,魏玉君,等.冬小麦-夏玉米周年生产条件下夏玉米的适宜熟期与积温需求特性[J].作物学报,2018,44(1):137. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2018.00137.
- [5] 杨笛,熊伟,许吟隆,等.气候变化背景下中国玉米单产增速减缓的原因分析[J].农业工程学报,2017,33(1):231. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.zl.035.
- [6] SHI K, GU X T, LU W P, et al. Effects of weak-light stress during grain filling on the physicochemical properties of normal maize starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 202: 47. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.08.114.
- [7] 马金玉.中国地面太阳辐射长期变化特征及短期预报方法研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [8] 徐虹,张丽娟,赵艳霞,等.黄淮海地区夏玉米花期阴雨灾害风险区划[J].自然灾害学报,2014,23(5):263. DOI: 10.13577/j.jnd.2014.0534.
- [9] 朱敏,史振声,李凤海.氮素对不同基因型紫玉米光合特性及氮素利用效率的影响[J].西北农业学报,2016,25(9):1319. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2016.09.007.
- [10] WEI S S, WANG X Y, SHI D Y, et al. The mechanisms of low nitrogen induced weakened photosynthesis in summer maize (*Zea mays* L.) under field conditions[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 105: 118. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.04.007.
- [11] ZHAO B, ATA-UI-KARIM S T, LIU Z D, et al. Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter for summer maize[J]. Field Crops Research, 2017, 208: 60. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.03.010.
- [12] NING T Y, ZHENG Y H, HAN H F, et al. Nitrogen uptake, biomass yield and quality of intercropped spring and summer-sown maize at different nitrogen levels in the North China Plain[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 47: 91. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.09.059.
- [13] 王强,钟旭华,黄农荣,等.光、氮及其互作对作物碳氮代谢的影响研究进展[J].广东农业科学,2006(2):37. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874x.2006.02.016.
- [14] 云菲,刘国顺,史宏志.光氮互作对烟草气体交换和部分碳氮代谢酶活性及品质的影响[J].作物学报,2010,36(3):508. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.00508.
- [15] 李会合,田秀英,王正银.增施氮钾和光照强度对不同品种莴笋光合特性和产量的效应[J].植物营养与肥料学报,2008,14(3):564. DOI: 10.3321/j.issn.1008-505X.2008.03.025.
- [16] 宋航,周卫霞,袁刘正,等.光、氮及其互作对玉米氮素吸收利用和物质生产的影响[J].作物学报,2016,42(12):1844. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2016.01844.
- [17] 高志英,丁圣彦,谷艳芳,等.不同光环境与氮肥互作对玉米气孔特征的影响[J].河南农业科学,2008(9):15. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2008.09.011.
- [18] 李潮海,栾丽敏,尹飞,等.弱光胁迫对非转基因玉米生长发育和产量的影响[J].生态学报,2005,25:824. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.04.025.
- [19] 史建国,崔海岩,赵斌,等.花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J].中国农业科学,2013,46:4427. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.21.004.
- [20] 崔海岩,靳立斌,李波,等.大田遮阴对夏玉米光合特性和叶黄素循环的影响[J].作物学报,2013,39(3):478. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00478.
- [21] 张亚勤,杨华,祁志云,等.遮光胁迫对玉米植株性状的影响研究[J].中国农学通报,2011,27(33):40.
- [22] 杜成凤,李潮海,刘天学,等.遮阴对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响[J].生态学报,2011,31(21):6633.
- [23] 崔海岩,靳立斌,李波,等.遮阴对夏玉米干物质积累及养分吸收的影响[J].应用生态学报,2013,24(11):3099. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0533.
- [24] 关义新,林葆,凌碧莹.光、氮及其互作对玉米幼苗叶片光合和碳、氮代谢的影响[J].作物学报,2000,26(6):806. DOI: 10.3321/j.issn:0496-3490.2000.06.026.
- [25] EVANS R J. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Plant Physiology, 1983, 72(2):297. DOI: 10.1104/pp.72.2.297.
- [26] 关义新,林葆,凌碧莹.光氮互作对玉米叶片光合色素及其荧光特性与能量转换的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):152. DOI: 10.11674/zwyf.2000.0205.
- [27] 李海波,李全英,陈温福,等.氮素不同用量对水稻叶片气孔密度及有关生理性状的影响[J].沈阳农业大学学报,2003,34(5):340. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1700.2003.05.006.
- [28] 张元帅,冯伟,张海艳,等.遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(9):1177. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160207.

责任编辑:何承刚