中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):155-167
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025288

植物工厂环境下红蓝光配比对花生生长发育和农艺性状的影响

魏显鸥,金宇豪,高斌,文双雅,高倩文,高志强*
(湖南农业大学农学院,湖南 长沙,410128)

摘要:为了探明植物工厂环境下红蓝光配比(R∶B)对花生生长发育、产量及品质的调控效应,以铁岭四粒红花生品种为材料,采用16L/8D循环处理,在光量子通量密度为500 μmol·m^{-2}·s^{-1}前提下,固定使用25%白光,其余75%的光源设置为5种红蓝光配比,它们是R∶B为0∶1(T1)、1∶3(T2)、1∶1(T3)、3∶1(T4)、1∶0(T5),研究在恒定白光基础上补充不同的红蓝光配比对花生生长发育及农艺性状的影响。结果表明:红光占比高的处理组(T3、T4、T5)花生的主茎高和侧枝长显著高于红光占比低的处理(T1、T2),而茎粗则呈相反趋势。红光占比高的处理组有利于干物质积累,其中以T4处理最优;蓝光占比高有利于光合产物向荚果转运,但结合产量和品质指标来看,促进其转运的多为幼果和秕果,并不具备经济价值,红光占比高则有利于生成饱果。光合作用方面,T4处理显著提高了花生的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)及蒸腾速率(T_r),而胞间CO_2浓度(C_i)各处理间均无显著差异;同时红光占比高的处理显著促进了光化学猝灭系数(qP)、最大荧光效率(F_v/F_m)及有效光量子产量(F_v'/F_m'),其中T4处理最优;蓝光占比高的处理显著增加了非光化学猝灭系数(NPQ),以T1处理最优;从产量及品质来看,T4处理的单株生产力最优,含油量最高;过高或过低的红光占比都会使其指标有所下降。综上所述,在恒定白光的基础上同时增加适当比例的红光和蓝光,以R∶B=3∶1(T4)效果最好,可促使花生形成良好的生长发育状态,提高叶片光系统Ⅱ中心活性,增强光合性能,有利于花生干物质积累及产量和品质的提升,因此可作为花生植物工厂栽培的适宜红蓝光配比。

关键词:植物工厂;红蓝光配比;花生;光合特性;叶绿素荧光;产量;品质
中图分类号:S565.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-9084(2026)04-0155-13

Effects of different R∶B light ratios on growth, development, and agronomic traits of peanut in plant factory

WEI Xian-ou, JIN Yu-hao, GAO Bin, WEN Shuang-ya, GAO Qian-wen, GAO Zhi-qiang*
(*College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China*)

Abstract: To investigate the effects of red-blue light ratios (R∶B) on peanut growth, yield and quality in plant factory, cultivar Tieling Silihong was used as material under 16L/8D light-dark cycle. At 500 μmol·m^{-2}·s^{-1} photosynthetic photon flux density (PPFD), white light was fixed at 25% of total light intensity, and the rest 75% was set as 5 R∶B ratio treatments, which were 0∶1 (T1), 1∶3 (T2), 1∶1 (T3), 3∶1 (T4) and 1∶0 (T5). Light ratio effects on peanut growth, development and agronomic traits were systematically investigated. Results showed that high red treatments (T3/T4/T5) significantly increased main stem height and lateral branch length but decreased stem diameter. High red favored dry matter accumulation, with T4 optimal. High blue promoted photosynthate translocation to pods, yet most were uneconomical young/shrunken pods, while high red facilitated plump pod formation. For photosynthetic parameters, T4 treatment significantly elevated peanut P_n, G_s and T_r, while C_i showed no significant difference across all treatments, and optimally enhanced qP, F_v/F_m and F_v'/F_m'. In contrast, high blue significantly increased NPQ, with T1 the best. For yield and quality, T4 achieved the highest per-plant productivity and oil content, while excessively high or low red reduced these indicators. In conclusion, R∶B= 3∶1 (as T4) was optimal for Tieling Silihong cultivation in plant factories, for promoting growth, enhancing photosystem Ⅱ activity and photo-

收稿日期:2025-12-15
基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2024JJ5193)
作者简介:魏显鸥(2000-),女,硕士研究生,主要研究方向为作物信息科学与技术,E-mail: 1508433011@qq.com
* 通讯作者:高志强(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向为作物信息科学、智慧农业工程,E-mail: gzq@hunau.edu.cn

synthetic performance, thus facilitates dry matter accumulation, and improves yield and quality.

Key words: plant factory; red-blue light ratio; peanut; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence; yield; quality

花生(*Arachis hypogaea* L.)隶属于豆科蝶形花亚科落花生属,为一年生草本植物,是我国种植规模大、总产量高、食用与加工范围广的油料作物及经济作物,目前仍供不应求,因此实现花生高产稳产,对我国油脂安全具有重要意义[1-3]。植物工厂是指在全封闭的设施内,通过自动化控制植物的生长环境实现高效稳定的生产方式[4]。在植物工厂内栽培的作物可突破露地栽培的限制,特别是低温、寡照、干旱、暴雨等各类不可控自然气象胁迫所造成的不利影响[5,6]。

光环境调控在植物工厂中处于核心地位,光不仅是光合作用的能量来源,更是调控植物形态建成和代谢过程的关键信号[7,8]。除了光强和光周期以外,光谱组成也发挥着重要的作用[9]。光谱的组成对植物的生长发育的调控存在差异,不同波长的光通过光敏色素、隐花色素等受体介导的信号网络参与调控,包括植物从基因表达到整体形态的多种生理响应[10]。红光(600~700 nm)和蓝光(400~500 nm)作为叶绿素吸收的主要波段,在驱动光合作用的同时,也通过复杂的协同与拮抗作用调控光形态建成,使红蓝光配比成为人工光环境下调控作物生长的关键参数[11]。金彦君的研究结果表明,相较于白光,红光有利于增加马铃薯植株的株高、根表面积及叶绿素含量,蓝光有利于增加其根表面积,光合效率、蒸腾速率等产量及品质指标[12]。在生菜栽培体系中,李源源的研究表明,与纯白光处理相比,以红光与远红光配比为1.6的光源照射14 d可以显著促进生菜鲜质量、可溶性糖和抗坏血酸含量的积累,显著降低生菜的叶绿素a、叶绿素b、可溶性蛋白等指标,产量也更高[13]。王君认为,设置光强为200 μmol·m^{-2}·s^{-1}的红蓝光LED植物工厂中,红蓝光比例为8时是生菜光合作用、光能及电能利用效率的转折点,配比不小于8可保证生菜的高效生产[14]。针对浆果类作物,文莲莲发现,红蓝白光比为3∶1∶1的处理番茄幼苗形态建成和光合特性最优,番茄幼苗叶片结构改善,幼苗光合效率提高,有利于壮苗培育[15]。李家乐发现,播种24 d后,以纯白光为对照,红蓝白光比为2∶1∶3时株高、茎粗、叶面积、叶片数、地上部鲜质量最高并显著高于其他处理[16]。罗媛的研究表明,纯红光补光可有效地促进设施番茄的生长发育,其中对植株的株高、茎粗、叶面积和产量的增加影响最大[17]。刘玉兵发现,红蓝光比3∶1及6∶1能显著提高辣椒幼苗叶片吸收、捕获光量子的能力,保护光合系统膜完整,促进光合电子的顺畅传递,是辣椒幼苗生长发育较佳的光照环境[18]。

花生植物工厂栽培可解除传统农业的季节限制,推动绿色生态农业的发展,通过精准化栽培生产,有效排除有害物质,生产无公害,无污染,无残留作物[19,20]。然而目前植物工厂条件的摸索过程中,关于不同光谱组成处理的研究多集中于生菜、番茄、辣椒等经济作物或蔬菜中[21-23]。针对于光谱组成对花生生长发育的影响相对不足。有人认为花生苗期红蓝光比为7∶3时有利于幼苗的生长,开花期时红蓝光1∶1有利于叶绿素的合成和积累,结荚期红蓝光3∶7有利于花生荚果生长和产量的提高[24]。虽然已有研究探讨了单色光、遮光以及红蓝组合光处理对花生幼苗某些生理指标的影响[25],但这些简化条件与植物工厂实际采用的复合光源环境存在显著差异。还有研究指出,红蓝光组合并不能完全满足植物对光的需求,红蓝光组合仍缺少植物生长所需的其他波段光谱,导致植物的光敏色素有一部分不能做出响应,进而阻碍植物的生长发育[26-28]。因此,在固定白光背景下,系统研究红蓝光配比对花生全生育期生长、光合、物质分配及产量品质的综合调控效应,尚缺乏系统报道。

因此,为阐明植物工厂环境下红蓝光配比对花生“形态-生理-产量-品质”链条的定量调控规律,本研究以广泛栽培的铁岭四粒红花生为材料,在植物工厂精确控制的环境中,于固定比例白光背景上,设置一系列梯度的红蓝光配比处理,旨在系统探究不同R∶B处理对花生关键农艺性状、光合气体交换参数、叶绿素荧光特性、各器官干物质积累与分配动态,以及最终荚果产量与籽粒营养品质的影响。本研究通过利用铁岭四粒红这一具有稳定遗传背景的典型油用型花生品种,研究在可控条件下红蓝光配比对花生生长发育与产量品质形成的调控效应,期望可以明确一套红蓝光配比方案,适用于花生植物工厂化栽培,从而解析高产优质的生理生态基础,为构建花生高光效、低能耗、高产出的植物工厂光环境智能调控体系提供直接依据与关键

参数,推动花生育种加速与产业化生产的进程。

1 材料和方法

1.1 材料

选用经长期驯化选育的地方优良品种铁岭四粒红花生作为试验材料。铁岭四粒红在东北花生产区种植广泛,对温带气候条件适应性良好,抗旱耐瘠薄,生育期约130 d,株型直立,株高40.6 cm,单株结果数约11个,单株生产力约15.3 g,百果重约116 g,出仁率约76%,粗脂肪含量约50.40%,粗蛋白含量约31.68%。

1.2 试验条件

本试验于2025年1月5日至2025年4月2日,在湖南农业大学智能温室植物工厂内进行。该植物工厂内部采用保湿绝缘材料,室内配备温度、湿度和CO_2传感器,能够实现对空气温度、空气相对湿度和室内CO_2浓度的实时监测与自动控制[29]。种植厢安装的量子板植物灯可形成人工光源系统,高度可随植株高度调整;培养基质中安装土壤温度、含水量和电导率传感器,实时监测培养基质的环境因子。植物工厂控制系统实现对环境指标和培养条件远程监测和自动控制,包括调温、调湿、调光和补施CO_2等(图1)。

植物工厂的人工光源使用的量子板植物灯由相关色温Tc为4843 K的白光灯珠(W)、450 nm蓝光灯珠(B)和660 nm远红光灯珠(R)组成可无极调控的3种光源LED灯珠组合设计,距离量子板植物灯50 cm高度实测光量子通量密度(PPFD)分别为:白光600 μmol·m^{-2}·s^{-1}、660 nm红光600 μmol·m^{-2}·s^{-1}、450 nm蓝光400 μmol·m^{-2}·s^{-1}。通过植物工厂控制系统的"光源控制"模块可形成不同的光谱组成。

1.3 农事操作与试验设计

1.3.1 农事操作 采用盆栽试验设计,栽培容器为直径19.5 cm、高18 cm的塑料盆,内盛3.5 L由长春产长效缓释育苗基质(有机质与腐殖酸总含量≥55%,pH值为5.5~7.0)与蛭石(粒径1~3 mm)按体积比1∶2混合而成的栽培基质。供试花生种子经精选后,于铺设有岩棉和滤纸的发芽床中遮光催芽,待胚根长至约1 cm时,播种于已浇透水的基质中,深度控制在1 cm。植株的整个生育期生长环境恒定,空气温度维持在(28±1)℃,相对湿度控制在(70±5)%。CO_2浓度设定为425~500 μmol·mol^{-1},并通过自动系统进行补充与调节。水肥供应采用滴灌系统进行精确管理。基质含水量通过定期滴灌自来水,始终维持在田间持水量的65%~85%范围内。自出苗开始,每隔1 d通过滴灌施用一次改良的Hoagland营养液,前期每盆50 mL,一周后增至100 mL,直至出苗后第59 d停止。

1.3.2 试验设计 前期研究发现,铁岭四粒红在PPFD 500 μmol·m^{-2}·s^{-1}、光周期为16L/8D的条件下综合表现最好,因此,所有处理的光量子通量密度PPFD恒定在500 μmol·m^{-2}·s^{-1},其中白光占比固定

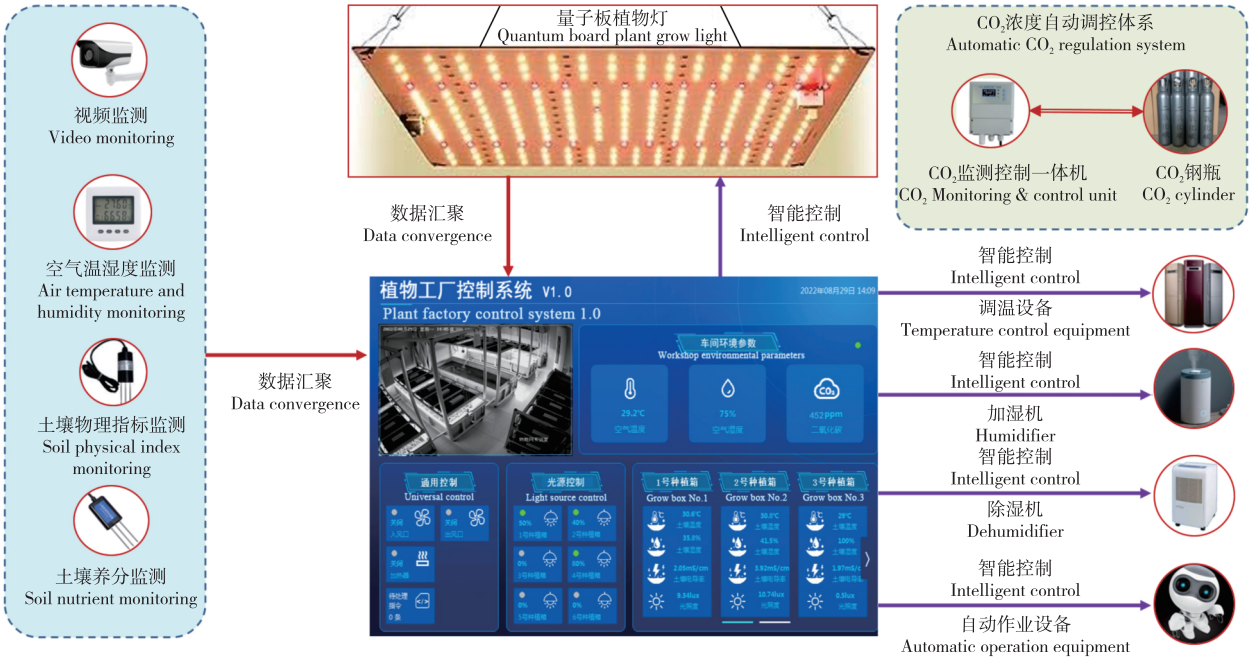


图1 植物工厂控制系统及其物联网架构

Fig. 1 Plant factory control system and its internet of things (IoT) architecture

表1 红蓝光配比试验(PPFD为500 μmol·m^{-2}·s^{-1})

Table 1 Red-blue light ratio treatments (PPFD = 500 μmol·m^{-2}·s^{-1})

处理 Treatment(25%W+R:B)	白 White	红 Red	蓝 Blue
T1:25%W+75%B	125	0	375
T2:25%W+18.75%R+56.25%B	125	93.75	281.25
T3:25%W+37.50%R+37.50%B	125	187.50	187.50
T4:25%W+56.25%R+18.75%B	125	281.25	93.75
T5:25%W+75%R	125	375	0

注:W、R、B:分别指白光、红光、蓝光。本试验采用的光量子通量密度(PPFD)为500 μmol·m^{-2}·s^{-1}

Note: W, R, and B refer to white light, red light, and blue light, respectively. The photosynthetic photon flux density (PPFD) in this experiment is 500 μmol·m^{-2}·s^{-1}..

为25% PPFD,红光与蓝光共同占比75%。设置5个红蓝光配比处理:T1为0∶1、T2为1∶3、T3为1∶1、T4为3∶1、T5为1∶0. 每个处理60盆,每盆种植1株花生,共300株。具体参数配置见表1。

1.4 数据采集

1.4.1 *农艺性状* 于苗期(出苗后20 d)、开花下针期(出苗后40 d)、结荚期(出苗后60 d)和成熟期,每个时期选取5株具有代表性的植株,测定其主茎高、第一对侧枝长及茎基宽。

1.4.2 *干物质积累* 在上述各生育时期选取具有代表性的5株花生植株,分解为根、茎、叶、叶柄、荚果等,置于烘箱内105℃杀青30 min,再80℃烘至恒重,测量各器官干物质重量。

1.4.3 *光合参数* 于苗期、开花下针期、结荚期,分别选取5株具有代表性的花生植株,选取主茎倒数第三片复叶,采用LI-Cor6800光合作用测定仪,使用仪器配套的透明叶室进行测定。叶室环境参数统一控制在CO_2浓度400 μmol·mol^{-1}、空气相对湿度70%。测定指标包括净光合速率(P_n)、胞间CO_2浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)及气孔导度(G_s)。

1.4.4 *叶绿素荧光参数* 于苗期、开花下针期、结荚期,选取具有代表性的5株花生植株,使用Flour-Pen FP 110手持式叶绿素荧光仪进行测量,测定对象同样为植株的倒数第三片完全展开的复叶。测量前需用专用的叶夹对选定的叶片进行30 min的暗适应处理。测定指标包括:非光化学猝灭(NPQ)、光化学猝灭系数(qP)、最大光化学量子产量(F_v/F_m)、有效光化学量子产量(F_v'/F_m')等。

1.4.5 *产量与品质* 在生理成熟期,根据各处理植株成熟度表现,分批次收获所有植株。对每株单独进行摘果、去除杂质,经自然风干后统计单株荚果产量。同时记录各处理的单株总果数、饱果数、秕果数、幼果数,以及单株总果重、饱果重、秕果重和幼果重。籽粒品质采用近红外成分分析仪DA7200测定,主要指标包括籽仁含油量、蛋白质含量、油酸含量和亚油酸含量。

单株生产力=(饱果重+秕果重)/考种株数

饱果率=[饱果重/(饱果重+秕果重)]×100%

饱仁率=(饱仁重/籽仁总重)×100%

出仁率=[籽仁总重/(饱果重+秕果重)]×100%

1.5 数据分析

利用SPSS23采用单因素ANOVA分析,进行方差齐性检验,Microsoft Excel 2019进行数据整合,OriginPro 2025进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同红蓝光配比对花生植株生长指标的影响

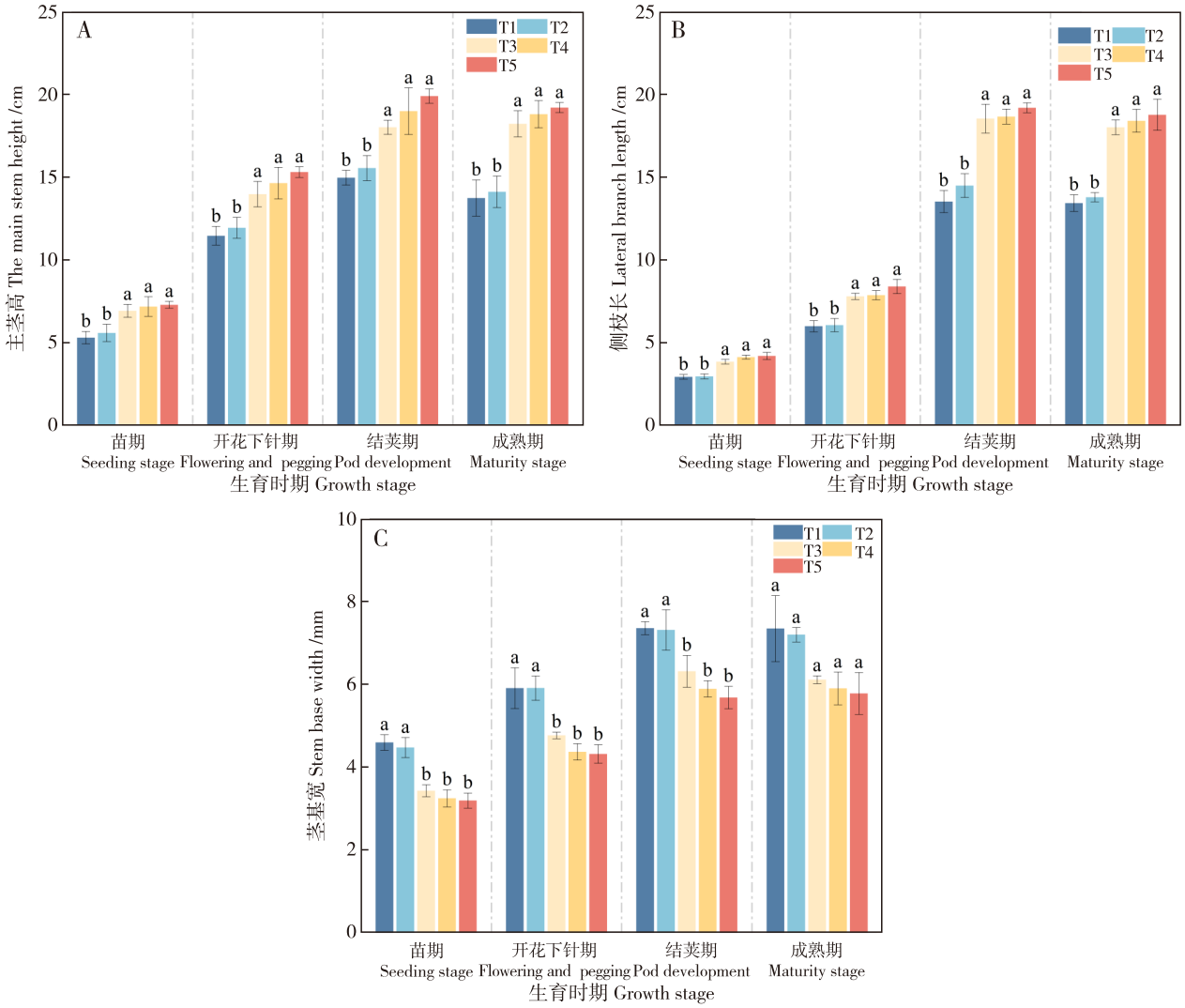
图2A显示,花生植株的主茎高随生育进程呈现先增加后下降趋势,并于结荚期达到最高。在各处理间花生主茎高均随着红蓝光比例中红光占比的升高呈现逐渐增加的趋势,在花生各生育期均在T5处理达到最大值T1处理达到最小值,处理间差异显著,综合表现均为T5>T4>T3>T2>T1。

图2B表明,花生侧枝长随生育进程呈现先增加后下降趋势,并于结荚期达到最大。各时期花生侧枝长随着红蓝光比例中红光比例的增加而增加。各生育时期均在T5处理达到最大,T1处理达到最小,处理间差异显著综合表现为T5>T4>T3>T2>T1。

图2C看出,花生茎基宽随生育进程呈现先增加后下降趋势,并于结荚期达到最大。各时期花生茎基宽随着红蓝光比例中红光比例的增加而减小且均在T1处理达到最大,T5处理达到最小,处理间差异显著,综合表现为T1>T2>T3>T4>T5。

2.2 不同红蓝光配比对花生植株干物质积累的影响

如表2所示,随着生育进程的推进各器官的干重呈现逐渐增加的趋势,在成熟期达到峰值,不同处理间的干物质量差异显著,主要体现在以下几个



注:不同小写字母表示处理间差异显著性($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05. Same as below

图2 不同红蓝光配比下的植株生长指标

Fig. 2 Plant growth indicators under different R∶B light ratios

方面,总干重方面,各时期T4处理均表现最优的干物质积累特性,在成熟期达到了37.62 g较T1、T2、T3、T5处理增加了14.52%、12.74%、6.42%、15.83%。在叶片干重方面,均表现为随着红光比例的增加呈先增加后减少趋势,除开花下针期外,各处理间均存在显著差异性,在成熟期T4处理较T1处理显著增加了33.47%。在叶柄干重方面,苗期、开花下针期、结荚期叶柄干重随红光比例的增加呈现先增加后下降趋势,除苗期外其他各时期存在显著差异。在茎干重方面,各时期茎干重均随着红光比例的增加呈现先增加后减小趋势,除结荚期外,其他时期均在T4处理达到最大值,T1处理达到最小值。结荚期T3、T4处理显著高于T1、T2、T5处理。在成熟期T4较其他处理显著增加了25.49%、23.87%、6.37%、18.15%。在根干重方面,各时期的根干重随红光比例的增加呈先增加后减小趋势,各时期均在T4达到最大值,除结荚期外均在T1达到最小值,在成熟期T4处理较T1、T2处理分别显著增加了17.47%、17.87%。在荚果方面,开花下针期和结荚期荚果干重随红光比例的增加呈先增加后下降趋势,在T4达到最大值,T1达到最小值,成熟期T4处理较T2和T5处理显著增加了12.27%、21.75%。

从表3中可以看出,干物质分配规律随生育进程的推进发生了显著转变,苗期及开花下针期,各器官干重分配比例为:叶片>荚果>茎>根>叶柄。结荚期及成熟期,各器官干物质分配比例转化为:荚果>叶片>茎>根>叶柄。红蓝光配比对干

表2 不同红蓝光配比下的花生各生育期干物质积累

Table 2 Dry matter accumulation of peanut at various growth stages under 5 R∶B light ratios

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	各器官干重 Dry weight of each organ/g				
		叶片 Leaf	叶柄 Petiole	茎 Stem	根 Root	荚果 Pod fruit
苗期 Seedling stage	T1	1.43±0.05b	0.23±0.04a	0.62±0.05a	0.93±0.06d	--
	T2	1.50±0.03b	0.24±0.03a	0.63±0.02a	1.04±0.04cd	--
	T3	1.60±0.05b	0.27±0.04a	0.71±0.06a	1.24±0.05ab	--
	T4	1.80±0.07a	0.29±0.04a	0.74±0.03a	1.29±0.08a	--
	T5	1.55±0.08b	0.25±0.04a	0.65±0.06a	1.11±0.04bc	--
开花下针期 Flowering and pegging stage	T1	4.18±0.30a	0.81±0.02b	2.13±0.09c	2.00±0.11b	2.16±0.13c
	T2	4.42±0.33a	0.84±0.05b	2.15±0.07c	2.07±0.10b	2.25±0.06bc
	T3	5.00±0.28a	1.01±0.05a	2.53±0.07ab	2.51±0.06a	2.54±0.13ab
	T4	5.07±0.22a	1.01±0.03a	2.58±0.13a	2.70±0.06a	2.62±0.01a
	T5	4.58±0.25a	0.85±0.06b	2.28±0.09bc	2.20±0.13b	2.40±0.01abc
结荚期 Pod development stage	T1	6.05±0.18ab	1.57±0.06b	3.02±0.13b	2.87±0.21b	9.23±0.34d
	T2	6.70±0.22b	1.62±0.04b	3.07±0.15b	3.17±0.10ab	9.77±0.26cd
	T3	7.81±0.13a	1.71±0.05ab	3.94±0.18a	3.51±0.13a	11.6±0.54ab
	T4	7.78±0.37a	1.85±0.08a	3.93±0.10a	3.59±0.12a	12.12±0.50a
	T5	6.87±0.37b	1.72±0.05ab	3.13±0.20b	3.26±0.18ab	10.64±0.46bc
成熟期 Maturity stage	T1	7.14±0.24b	1.76±0.12ab	3.06±0.14c	2.92±0.19b	17.98±0.23ab
	T2	8.25±0.30ab	1.92±0.09a	3.10±0.13c	2.91±0.05b	17.20±0.45bc
	T3	9.41±0.36a	1.33±0.07c	3.61±0.07ab	3.35±0.14a	17.65±1.08abc
	T4	9.53±0.78a	1.52±0.06bc	3.84±0.24a	3.43±0.15a	19.31±0.53a
	T5	8.62±0.22a	1.66±0.15ab	3.25±0.15bc	3.10±0.09ab	15.86±0.58c

物质分配的影响体现为蓝光比例的增加会促进干物质向荚果转运。在营养生长为主的苗期,光合产物主要分配至叶片(占单株总干重的41.86%~44.51%)和根系(29.11%~32.44%),进入开花下针期,随着生殖生长的启动,荚果开始积累干物质,分配比例为18.72%~19.47%,同时各营养器官的分配比例相应下降。至结荚期,荚果成为最主要的分配中心,其比例增至40.16%~41.53%,超过叶片成为占比最高的器官。最后到成熟期,生殖生长占据主导地位,荚果的干物质分配比例达到最高,范围为48.83%~54.73%。与之相对应的,根、茎、叶的分配比例则降至较低水平。红蓝光配比对成熟期的最终分配效率产生影响,从相对分配效率来看,T1处理在成熟期将最高比例的干物质分配至荚果(54.73%)。相比之下,总生物量更高的T3、T4处理,其荚果分配比例分别为49.92%、51.32%,均低于T1处理。这表明,红蓝光配比对干物质分配的影响体现为蓝光比例的增加会促进干物质向荚果转运。

2.3 不同红蓝光配比对花生植株光合特性的影响

图3A表明,花生植株的P_n随生育进程呈现先增加后下降趋势,其中苗期植株随着红蓝光比例中红光比例的增加呈现先增大后减小趋势,在T4处理达到最大值,T1处理达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T4>T3>T5>T2>T1。在开花下针期P_n随红光比例的增加呈现逐渐增大的趋势,在T5达到最大值,在T1达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T5>T4>T3>T2>T1。在结荚期P_n随着红光比例的增加呈现先增大后减小趋势,在T4达到最大值,T1达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T4>T5>T3>T2>T1。

图3B可以看出,花生植株C_i随生育进程呈现先下降后上升的趋势,其中苗期在T1达到最大值T4达到最小值,综合表现为T1>T2>T5>T3>T4。开花下针期在T1处理达到最大值,T5处理达到最小值,综合表现为T1>T2>T3>T4>T5。至结荚期在T1达到最大值,T4达到最小值,综合表现为T1>T2>T3>T5>T4,各处理间均无显著差异。

图3C结果呈现,在生育各时期G_s随红光比例的增加呈现先增加后减小趋势,并在T4达到最大值,T1达到最小值,各处理间差异显著。其中苗期综合表现为T4>T3>T5>T2>T1,开花下针期及结荚期表现为T4>T5>T3>T2>T1.

图3D表明,在生育各时期T_r均随红光比例的增

表3 不同红蓝光配比下的花生各生育期干物质转运情况

Table 3 Dry matter translocation of peanut at various growth stages under 5 R:B light ratios

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	各器官干重分配比例 Dry redistribution ratio of each organ /%					总干重 Total dry weight /g
		叶片 Leaf	叶柄 Petiole	茎 Stem	根 Root	荚果 Pod fruit	
苗期 Seeding	T1	44.51	7.04	19.33	29.11	--	3.21±0.11d
	T2	43.93	7.10	18.59	30.38	--	3.41±0.05cd
	T3	41.86	7.06	18.63	32.44	--	3.82±0.07ab
	T4	43.77	7.05	17.90	31.27	--	4.11±0.11a
	T5	43.50	7.03	18.35	31.12	--	3.55±0.13bc
开花下针期 Flowering and pegging	T1	37.01	7.21	18.89	17.74	19.15	11.29±0.26c
	T2	37.68	7.13	18.35	17.65	19.18	11.72±0.36bc
	T3	36.77	7.42	18.65	18.44	18.72	13.60±0.21a
	T4	36.26	7.22	18.45	19.32	18.75	13.99±0.39a
	T5	37.21	6.94	18.54	17.84	19.47	12.31±0.33b
结荚期 Pod development	T1	26.60	6.91	13.26	12.64	40.60	22.75±0.39c
	T2	27.53	6.66	12.26	13.03	40.16	24.32±0.52b
	T3	27.35	5..99	13.78	12.28	40.60	28.57±0.51a
	T4	26.58	6.33	13.43	12.25	41.41	29.26±0.69a
	T5	26.81	6.70	12.22	12.73	41.53	25.62±0.35b
成熟期 Mature	T1	21.74	5.35	9.30	8.88	54.73	32.85±0.52bc
	T2	24.71	5.75	9.29	8.72	51.53	33.37±0.61bc
	T3	26.61	3.77	10.21	9.48	49.92	35.35±1.22ab
	T4	25.33	4.04	10.20	9.12	51.32	37.63±0.91a
	T5	26.52	5.10	9.99	9.56	48.83	32.48±0.88c

加呈现先增加后减小趋势,且均在T4达到最大值,T1达到最小值,处理间差异显著,苗期综合表现为T4>T3>T5>T2>T1。开花下针期及结荚期综合表现为T4>T5>T3>T2>T1。

2.4 不同红蓝光配比对花生植株叶绿素荧光参数的影响

图4A所示,花生植株的NPQ随生育进程呈现先增加后下降趋势,其中苗期植株,在T4处理达到最大值,T1处理达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T4>T5>T3>T2>T1。在开花下针期NPQ随红光比例的增加呈现减小的趋势,在T1达到最大值,T5达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T1>T2>T4>T3>T5。在结荚期NPQ随着红光比例的增加呈现减小趋势,在T1达到最大值,T5达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T1>T4>T3>T2>T5。

图4B表明,花生植株qP随生育进程呈现先增加后下降的趋势,苗期在T3达到最大值,T1达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T3>T4>T5>T2>T1,开花下针期在T4达到最大值,T2达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T4>T3>T1>T5>T2。结荚期T3达到最大值,T5达到最小值,各处理间差异显著,综合表现为T3>T4>T1>T2>T5。

图4C所呈现的结果表明,苗期F_v/F_m在T4达到最大值,T1达到最小值,各处理间差异显著。其中苗期综合表现为T4>T2>T5>T3>T1,开花下针期F_v/F_m在T5达到最大值T3达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T5>T4>T1>T2>T3。结荚期F_v/F_m在T5达到最大值,T1达到最小值,处理间差异显著,综合表现为T5>T2>T4>T3>T1。

图4D显示,各时期的F_v'/F_m'均在T4处理达到最大值,T1处理达到最小值且处理间差异显著,其中苗期的综合表现为T4>T3>T5>T2>T1,开花下针期及结荚期为T4>T5>T3>T2>T1。

2.5 不同红蓝光配比对花生植株产量及品质的影响

2.5.1 不同红蓝光配比对花生产量指标的影响 从表4中可知,不同红蓝光配比对花生产量构成因素影响不同,其中单株幼果在各处理间虽无显著差异,但在T5条件下最高。单株幼果重在T5达到最大值T4达到最小值,显著高于T4处理66.67%。单株秕果数在T1达到最大值T4达到最小值,显著高于T4处理73.22%。单株秕果重在T5达到最大值T4达到最小值,显著高于T4处理87.06%。秕仁数在T5达到最大值T4达到最小值,显著高于T4处理

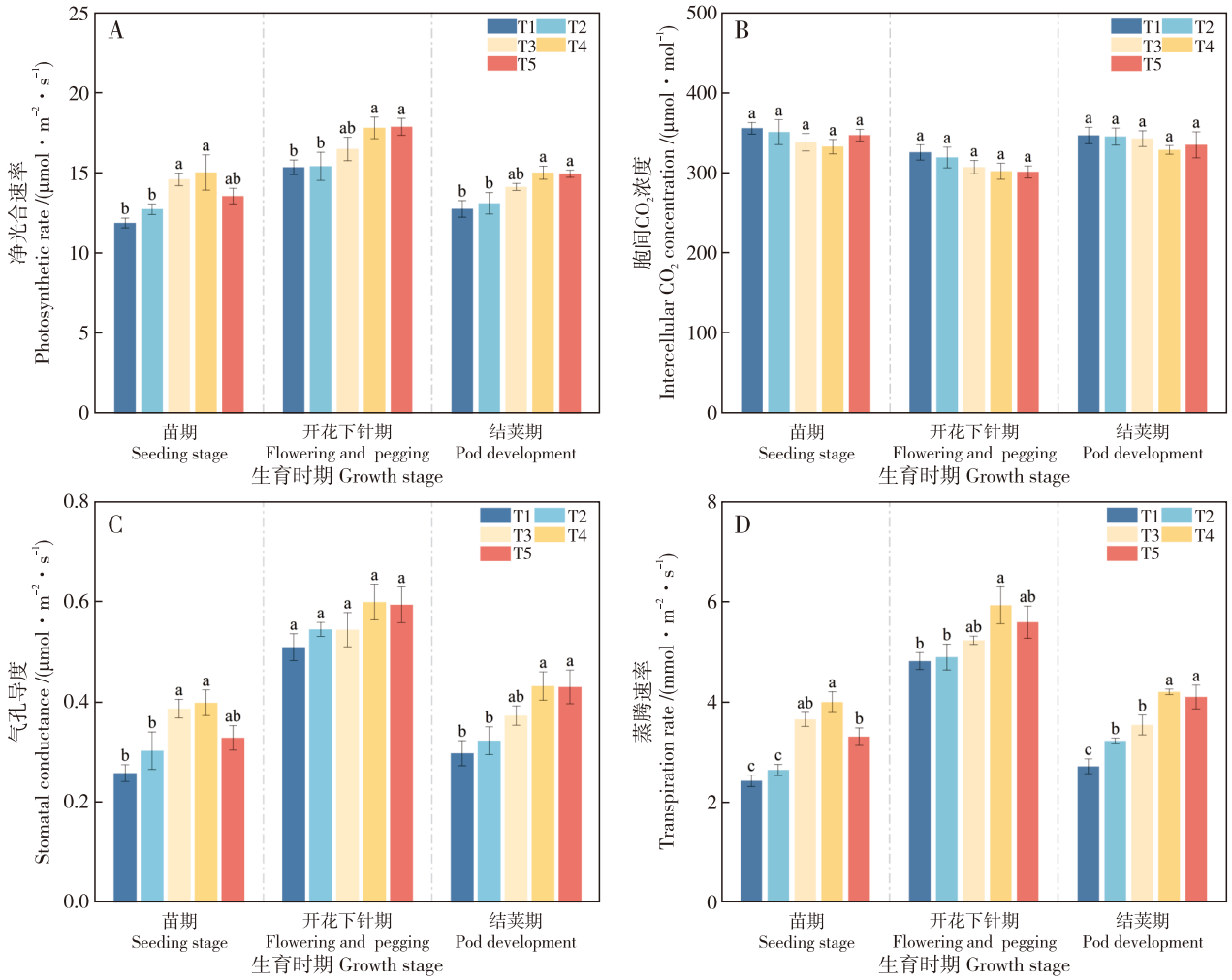


图3 不同红蓝光配比下的花生各生育期光合指标

Fig. 3 Photosynthetic indicators of peanut at various growth stages under 5 R∶B light ratios

75.67%。秕仁重在T5达到最大值T4达到最小值，显著高于T4处理126.01%。单株饱果数在T4达到最大值T1达到最小值，显著高于T1处理18.37%。单株饱果重在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理32.43%。饱仁数在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理25.91%。饱仁重在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理24.07%。单株生产力在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理23.91%。籽仁数在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理14.12%。籽仁重在T4处理达到最大值T1达到最小值，显著高于T1处理17.12%。出仁率在T5达到最大值T1达到最小值，显著高于T1处理11.59%。饱果率在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理6.74%。饱仁率在T4达到最大值T5达到最小值，显著高于T5处理6.59%。

2.5.2 不同红蓝光配比对花生植株品质的影响

从表5中可知，不同红蓝光配比对花生各项品质指标的影响不同，含油量随红蓝光中红光比例增加呈现先增加后下降趋势，在T4时达到最大值，T5时达到最小值，相较于T5处理高1.70%；蛋白质含量随红光比例的增加呈先增加后下降趋势，在T3时达到最高值，T4时则达到最小值，T3相较于T4高15.22%；油酸在T2处理时达到最高值，在T5处理时达到最小值，相较于T5高0.90%；亚油酸在T4时达到最高值，T2处理时达到最小值，相较于T2高2.28%。油酸与亚油酸比值在T2处理时达到最大值，在T5处理时达到最小值，相较于T5高3.2%。

3 讨论与结论

3.1 红蓝光比例对花生生长发育的影响

光谱组成对植物的生长发育具有重要的调控作用，红蓝光被认为是植物的最优光合光谱，可调控光敏形态并驱动CO_2同化，显著影响光系统结构[30,31]。刘慧莲的研究表明，红光可以促进番茄幼苗茎的伸长，叶面积的扩展，蓝光下植株较矮但更

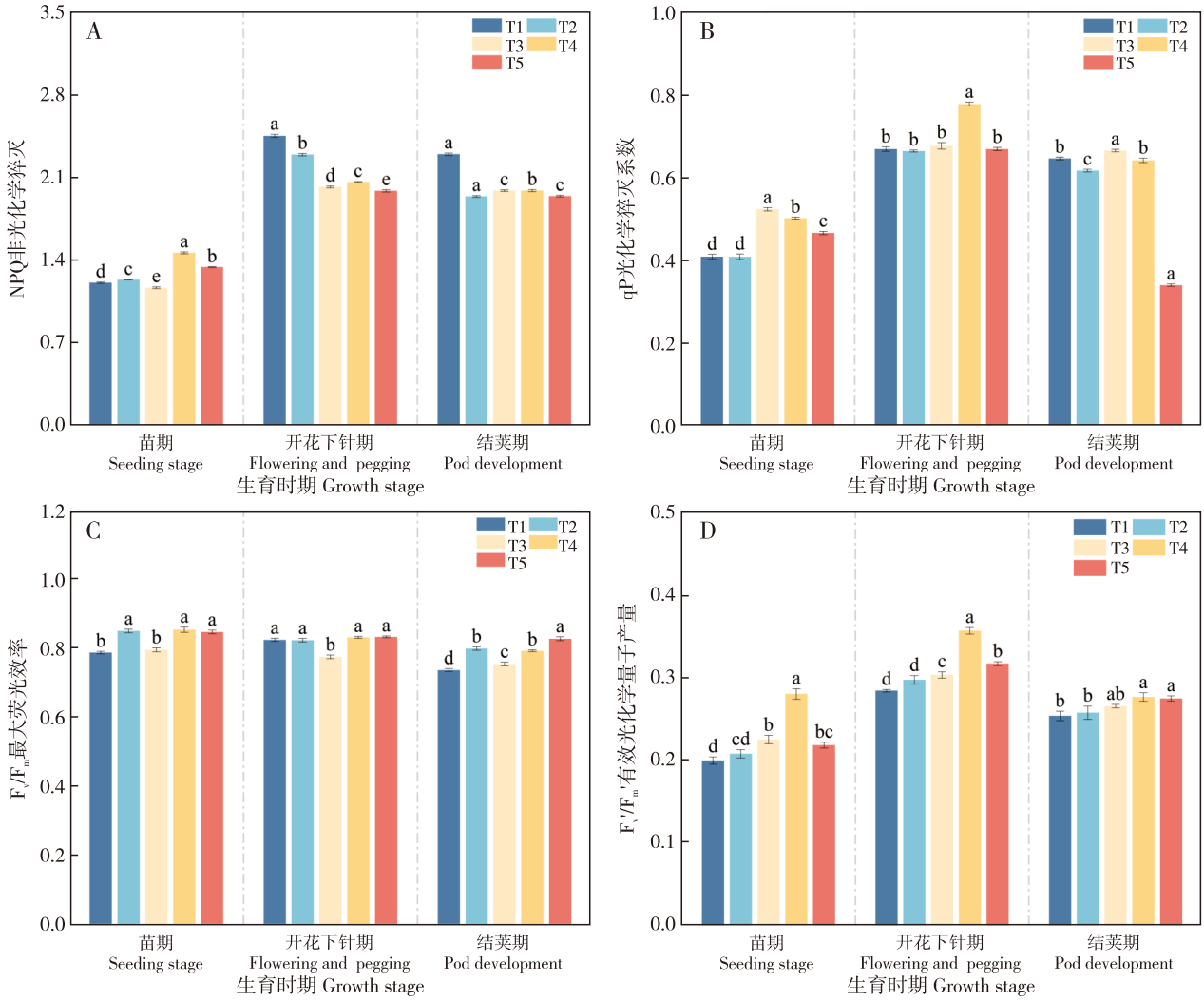


图4 不同红蓝光配比下的花生各生育期叶绿素荧光参数

Fig. 4 Chlorophyll fluorescence parameters of peanut at various growth stages under 5 R∶B light ratios

为健壮[32],同时大量研究表明红光比例的增加有利于植物形态的生长以及干物质的积累,而蓝光有利于茎粗的生长,使其株低茎粗,不易倒伏[33-35]。本试验研究表明,在光照强度相同的条件下,随着红光占比的提高,花生的主茎增高,侧枝增长,茎基宽减小,各器官的干物质积累明显增加,相对地,蓝光占比的增加则会引起植株的茎基宽增加,抑制植株的生长发育,导致其干物质积累下降。结合产量与干物质积累的数据来看,蓝光占比高的处理组,虽促进了干物质向荚果的转运,但此类转运更多发生于荚果发育的早期(幼果阶段),该处理下荚果膨大与籽粒充实过程受阻,最终表现为幼果、秕果比例显著升高。而红光占比较高的处理组,更有利于光合产物向发育后期的饱果中分配,该处理促进籽粒灌浆与干物质积累,因此在产量指标中可看出饱果占比更高,经济价值更优,这与前人的结果类似。

3.2 红蓝光比例对花生光合特性的影响

光合色素是光合作用的基础,光谱组成直接影响光合色素的合成,从而影响植物的光合作用[36,37]。韩丽的研究结果表明适当地增加红蓝光比例,促进了光合作用,大豆长势良好[38]。Soufi 的研究表明红蓝光比 3∶1 能够显著提高洛洛红生菜的叶片气孔导度、净光合速率以及蒸腾速率,大幅度改善了植株的光合效率[39]。姜岳丛的研究表明红蓝光比 3∶1 处理下生菜净光合速率最高、干烧心率最低,且生长状况优于单色光处理[40]。本试验研究表明,红光比例的增加会使花生植株的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)及气孔导度(G_s)增加,且均在红蓝光比为 3∶1 时达到最高值,而在白光的基础上加入单一的红光处理则会出现抑制现象,使各指标下降,与前人的研究类似。从光合生理机制来看,花生叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素的吸收主要集中于红光区(600 ~ 700 nm)与蓝光区(400 ~ 500 nm),推测 T4 处理可

表4 不同红蓝光比例下的花生单株产量及产量构成因素

Table 4 Yield per plant and yield components of peanut under 5 R∶B light ratios

处理Treatment	T1	T2	T3	T4	T5
单株幼果数 Number of immature pods per plant	6.53±0.23a	6.40±0.23a	7.13±0.17a	5.53±0.13a	7.40±0.16a
单株幼果重 Weight of immature pod per plant	0.28±0.01b	0.27±0.01b	0.28±0.01b	0.21±0.01c	0.35±0.01a
单株秕果数 Number of partially-filled pods per plant	2.20±0.11a	1.93±0.12ab	1.53±0.13bc	1.27±0.12c	2.13±0.09a
单株秕果重 Weight of partially-filled pods per plant	1.48±0.05a	1.14±0.03b	0.91±0.03c	0.85±0.03c	1.59±0.05a
秕仁数 Number of partially-filled kernels	4.47±0.19b	4.40±0.16b	3.33±0.13c	3.00±0.17c	5.27±0.18a
秕仁重 Weight of partially-filled kernels	0.87±0.03b	0.78±0.03b	0.57±0.02c	0.46±0.02d	1.04±0.03a
单株饱果数 Number of fully-filled pods per plant	9.80±0.39b	10.73±0.44ab	10.53±0.39ab	11.60±0.38a	10.00±0.34b
单株饱果重 Weight of fully-filled pods per plant	15.21±0.60bc	15.42±0.74abc	15.68±0.49ab	17.56±0.50a	13.26±0.43c
饱仁数 Number of fully-filled kernels	27.80±0.91b	26.67±0.84b	27.87±0.87b	32.07±0.89a	25.47±1.02b
饱仁重 Weight of fully-filled kernels	10.58±0.33b	11.36±0.26b	11.71±0.36ab	12.94±0.48a	10.43±0.38b
单株生产力 Yield per plant	16.69±0.61ab	16.56±0.74ab	16.58±0.49ab	18.40±0.51a	14.85±0.42b
籽仁数 Total number of kernels	32.27±0.98ab	31.07±0.90b	31.20±0.84b	35.07±0.94a	30.73±1.03b
籽仁重 Total kernel weight	11.45±0.34b	12.14±0.26ab	12.29±0.36ab	13.41±0.48a	11.47±0.37b
出仁率 Percentage of kernels	0.69±0.01c	0.74±0.02ab	0.74±0.01ab	0.73±0.01bc	0.77±0.01a
饱果率 Percentage of fully-filled pods	0.91±0.00c	0.93±0.00b	0.94±0.00a	0.95±0.00a	0.89±0.00d
饱仁率 Percentage of fully-filled kernels	0.92±0.00c	0.94±0.00c	0.95±0.00b	0.97±0.00a	0.91±0.00d

表5 不同红蓝光配比下的花生品质指标

Table 5 Peanut quality under 5 R∶B light ratios

处理 Treatment	含油量 Oil content %	蛋白质含量 Protein content %	油酸含量 Oleic acid content %	亚油酸含量 Linoleic acid content%	油酸与亚油酸比值 Oleic to linoleic acid ratio
T1	54.16±0.30bc	20.33±0.24b	43.52±0.06a	33.94±0.04b	1.28±0.00ab
T2	54.28±0.12abc	20.73±0.11ab	43.56±0.07a	33.80±0.05b	1.29±0.01a
T3	54.83±0.03ab	21.11±0.06a	43.19±0.04b	33.81±0.10b	1.28±0.01b
T4	54.97±0.08a	18.32±0.07c	43.41±0.05ab	34.57±0.06a	1.26±0.01c
T5	54.05±0.17c	18.70±0.13c	43.17±0.07b	34.44±0.04a	1.25±0.00c

最大激活叶绿素与类胡萝卜素的光能捕获效率,同时避免单一红光导致的光合色素比例失衡、单一蓝光引发的光合机构光抑制,进而提升光系统Ⅱ的最大光化学量子产量(F_v/F_m)与净光合速率(P_n)且该配比下花生叶片的气孔导度(G_s)与胞间CO_2浓度(C_i)维持在适宜水平。从分子调控层面初步推测来看,T4可能通过上调花生光受体相关基因(如光敏色素基因*PhyA*/*PhyB*)、隐花色素基因(*Cry1*/*Cry2*)的表达水平,传递光信号至下游光形态建成相关通路,进而调控光合碳代谢关键基因(如*Rubisco*、*FBPase*)及

产量品质相关基因的表达,最终优化T4处理产量构成性状,提升产量潜力[41,42]。有研究表明,光通过调控叶片解剖结构、光合电子传递及卡尔文循环酶活性,影响植物光形态建成与光合作用。李伟的研究表明随着红蓝光比例中红光占比的增加,韭菜的最大荧光效率呈逐渐增加的趋势,在红蓝光9∶1的高红光比例处理时达到最大值[43]。潘可可的研究表明,相同光照强度下,红蓝光7∶3处理组的金线莲其最大光合效率、有效光化学量子产量均显著高于红蓝光占比3∶7的处理,同时光合电子效率同步提升[44]。樊小雪的研究表明红蓝光7∶3其叶绿素荧光参数显著优于红蓝光占比为3∶7的处理,红光占比的增加间接促进了光化学相关荧光的优化,保障了植株的高效光合作用[45]。本试验研究表明,在花生不同生育期qP、F_v/F_m、F_v'/F_m'随红光比例的增加呈先增加后下降趋势,而NPQ则与之相反,这与上述前人的试验结果相似。综合来看T4(R∶B=3∶1)具有较高的qP和较低的NPQ,这表明T4(R∶B=3∶1)有利于花生植株的PSⅡ反应中心电子传递,提高PSⅡ反应中心电子传递效率,减少热耗散,提高光能利用效率。

3.3 红蓝光比例对花生产量及品质的影响

李伟的研究表明,随着红蓝光比例中红光占比的增加,韭菜的产量持续增加,红蓝光9∶1处理的产量较白光处理显著增加了57.19%,且红光占比的增加还促进了氮氧化物等特定风味物质的生成[43]。本试验研究表明,随着红光占比的增加,在T4(R∶B=3∶1)单株生产力及含油量均达到最高,而过高比例的红光T5处理可能会导致其产量和品质有下降趋势;而蓝光比例的增加不利于产量的提升但促进了油酸的提升。这与高波的研究结果类似,红蓝光3∶1的处理,芹菜的株高、叶片数、叶柄长等生长指标最优,可溶性糖含量更高且硝酸盐的含量低,显著增加了其单株产量与品质[46]。

本试验结果表明,随着红光比例的增加,花生的生长指标、光合参数、叶绿素荧光参数均呈现上升的趋势,而过高比例的红光会出现抑制现象,其中T4处理(R∶B=3∶1)表现最优,该处理显著改善了植株的生长形态,促进了其干物质的积累,提高了净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、光化学猝灭系数(qP)、最大荧光效率(F_v/F_m)、有效光化学量子产量(F_v'/F_m')。在产量方面该处理综合表现最优,其单株生产力显著高于其他处理,并且产出的为具有经济价值的果实。品质方面,花生作为重要的油料作物,含油量是其重要的品质指标,而T4处理较其他处理显著增加了花生的含油量。后续可深入探究其分子与激素调控通路,开展靶向性实验,测定光受体基因、光合碳代谢关键基因及内源激素的表达与含量变化,明确花生生长发育的分子调控网络与激素平衡机制,为植物工厂花生光谱组成的分子育种与栽培技术融合提供精准理论支撑。

综合其生长形态、产量、品质及经济效益,本研究认为白光为总光强的25%,其余75%按红蓝光比为3∶1的生长条件为植物工厂栽培花生的最佳红蓝光配比方案。

参考文献:

[1] Chen T T, Wang X Y, Wang Y, et al. Seasonal differences in yield and fertilizer use efficiency of different low-calcium-tolerant peanut varieties in response to the timing and splitting of calcium application in Southern China[J]. Eur J Agron, 2023, 151: 126988. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126988.

[2] 李先翠,李保国,姜元荣,等.光照处理对花生萌发过程中营养成分和活性成分的影响[J].食品与发酵业,2021,47(4):47-53. DOI: 10.13995/j. cnki. 11-1802/ts.025286.

[3] 李佳辰,李孝忠,白子明.全球花生贸易格局演变及政策启示[J].中国油脂,2022,47(2):8-15. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210245.

[4] 郭世荣.无土栽培学[M].北京:中国农业出版社,2011.

[5] 杨其长,魏灵玲,刘文科,等.植物工厂系统与实践[M].北京:化学工业出版社,2023:167.

[6] Dai M D, Tan X F, Ye Z R, et al. Optimal light intensity for lettuce growth, quality, and photosynthesis in plant factories[J]. Plants, 2024, 13(18): 2616. DOI: 10.3390/plants13182616.

[7] 胡阳,江莎,李洁,等.光强和光质对植物生长发育的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009(4):296-303.

[8] 李汉生,徐永.光照对叶绿素合成的影响[J].现代农业科技,2014(21):161-164.

[9] 林魁,黄枝,金心怡,等.植物生长光调控应用研究进展[J].热带作物学报,2017,38(6):1163-1170.

[10] Legris M, Ince Y Ç, Fankhauser C. Molecular mechanisms underlying phytochrome-controlled morphogenesis in plants[J]. Nat Commun, 2019, 10: 5219. DOI: 10.1038/s41467-019-13045-0.

[11] 李志鑫,刘嘉伟,成永三,等.LED补光对温室罗勒生长和品质的影响[J].山西农业科学,2024,52(3):21-28.

[12] 金彦君,祝洪沙,王金禹,等.不同光质对马铃薯生长及光合特性的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(2):45-53.DOI:10.13432/j.cnki.jgsau.2024.02.006.

[13] 李源源,吴翠南,吴雪,等.植物工厂红光与远红光配比对生菜产量和品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(11):73-83.DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.11.008.

[14] 王君,仝宇欣,杨其长.LED光源红蓝光配比对生菜光合作用及能量利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(14):234-240.

[15] 文莲莲,李岩,秦利杰,等.白光与红蓝光比例对番茄壮苗及光合特性的影响[J].植物生理学报,2018,54(7):1223-1232.DOI:10.13592/j.cnki.ppj.2018.0095.

[16] 徐少南,李莹,叶林,等.不同光质配比对番茄幼苗生长、光合特性及抗氧化酶活性的影响[J].华北农学报,2025,40(S1):121-129.

[17] 罗媛,叶林,郭文忠,等.红蓝光补光对设施番茄生长发育及荧光特性的影响[J].中国农业气象,2024,45(5):506-516.

[18] 刘玉兵,陈海燕,王军伟,等.LED红蓝光质调控辣椒幼苗生长的光合机制研究[J].河南农业科学,2021,50(7):145-153. DOI: 10.15933/j. cnki. 1004-3268.2021.07.017.

[19] 辛敏,仝宇欣,杨其长,等.利用室外冷源空气的植物工厂降温节能效果分析[J].中国农业气象,2015,36(3):287-295.

[20] 孙漫莹,宋杰,胡启相,等.植物工厂关键技术发展[J].农业工程,2018,8(6):62-66.

[21] 代绿叶,钟梦江,韩莹琰.不同LED光质对紫叶生菜生理特性及品质的影响[J].北京农学院学报,2023,38(3): 52-58+64. DOI: 10.13473/j. cnki. issn. 1002-3186.2023.0310.

[22] 王琦,谭占明,程云霞,等.不同比例红蓝光夜间补光对番茄生长生理的影响[J].山东农业科学,2024,56(9):58-66.DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2024.09.008.

[23] 张谨薇,孟清波,马万成,等.LED光源对辣椒幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 中国瓜菜, 2021, 34 (6): 60-63+67. DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2021.0149.

[24] 刘丹.LED光源对花生以及黄瓜幼苗生长的影响[D].南京: 南京农业大学, 2013.

[25] 闫萌萌,王铭伦,王洪波,等.光质对花生幼苗叶片光合色素含量及光合特性的影响[J].应用生态学报,2014, 25 (2) : 483-487. DOI: 10.13287/j. 1001-9332.2014.0052.

[26] Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, et al. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes[J]. HortScience, 2004, 39(7): 1617-1622. DOI:10.21273/hortsci.39.7.1617.

[27] Park Y, Runkle E S. Investigating the merit of including far-red radiation in the production of ornamental seedlings grown under sole-source lighting[J]. Acta Hortic, 2016 (1134) : 259-266. DOI: 10.17660/actahortic.2016.1134.35.

[28] Paik I, Huq E. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks[J]. Semin Cell Dev Biol, 2019, 92: 114-121. DOI: 10.1016/j.semcdb.2019.03.007.

[29] 陈龙 高志强 金宇豪.植物工厂条件下不同光通量密度对水稻生长发育的影响[J].中国稻米,2025,31(3):30-36.

[30] Lin K H, Huang M Y, Huang W D, et al. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*)[J]. Sci Hortic, 2013, 150: 86-91. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.10.002.

[31] Santin M, Ranieri A, Castagna A. Anything new under the Sun? an update on modulation of bioactive compounds by different wavelengths in agricultural plants [J]. Plants, 2021, 10 (7) : 1485. DOI: 10.3390/plants10071485.

[32] 刘慧莲,姜倩倩.不同LED光质对番茄幼苗生长的影响[J].北方园艺,2020(18):38-42.

[33] 问涛,焦学磊,刘晓英,等.光谱分布对大豆子叶节再生的影响[J].大豆科学,2015,34(5):826-832.

[34] 郑洁,胡美君,郭延平.光质对植物光合作用的调控及其机理[J].应用生态学报,2008,19(7):1619-1624.DOI:10.13287/j.1001-9332.2008.0264

[35] 黄丹丹,杨华,李晓燕,等.LED补光对温室内大豆光合特性及产量的影响[J].云南大学学报,2016,38(6):965-973.

[36] Tholen D, Pons T L, Voesenek L A C J, et al. Ethylene insensitivity results in down-regulation of Rubisco expression and photosynthetic capacity in tobacco [J]. Plant Physiol, 2007, 144 (3) : 1305-1315. DOI: 10.1104/pp.107.099762.

[37] Yang F, Zhao C, Yan M, et al. Effects of different cultivation modes on the leaf photosynthetic characteristics and yield of summer-sowing peanut [J]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao = The Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (3) : 747-52. DOI: 10.13287/j. 1001-9332.2013.0183

[38] 韩丽,李健春,李英双,等.红蓝光配比对大豆生长及结实的影响[J].中国油料作物学报,2018,40(2):233-240.

[39] Soufi H R, Roosta H R, Fatehi F, et al. Spectral composition of LED light differentially affects biomass, photosynthesis, nutrient profile, and foliar nitrate accumula-

tion of lettuce grown under various replacement methods of nutrient solution[J]. Food Sci Nutr, 2023, 11(12): 8143-8162. DOI:10.1002/fsn3.3735.

[40] 姜岳丛,佟静,武占会,等.不同光质对植物工厂生菜干烧心及品质的影响[J].蔬菜,2023(6):10-17.DOI:10.26924/j.cnki.sczz.2023.06.002.

[41] 殷丛培,石昭瑾,田成,等.红蓝光对植物光合碳同化和生长发育的影响研究进展[J].应用生态学报,2025,36(7):2246-2256. DOI:10.13287/j.1001-9332.202507.007.

[42] 高宇,曾瑞儿,姚苏哲,等.花生氮敏感品种及评价指标的筛选[J].华南农业大学学报,2023,44(5):794-802.

[43] 李伟,佟静,王丽萍,等.红蓝光配比对韭菜生长及风味品质的影响[J].中国农学通报,2024,40(34):70-76.

[44] 潘可可,王克磊,李斌奇,等.不同比例红蓝光及光照强度对金线莲生理及叶绿素荧光特性的影响[J].热带作物学报,2022,43(8):1628-1635.

[45] 樊小雪,杨亚娜,徐刚.不同光质处理对樱桃番茄生长发育和叶绿素荧光的影响[J].福建农业学报,2019,34(9):1026-1031.

[46] 高波,杨振超,李万青,等.3种不同LED光质配比对芹菜生长和品质的影响[J].西北农业学报,2015,24(12):125-132.

(责任编辑:郭学兰)