

许建民, 颜志明, 史培华, 等. 不同光谱及其组合对马铃薯干物质积累和分配的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 32-38.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.005

不同光谱及其组合对马铃薯干物质积累和分配的影响

许建民^{1,2}, 颜志明^{1,2}, 史培华¹, 仇学文¹

(1. 江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212400; 2. 江苏现代园艺工程技术中心, 江苏 句容 212400)

摘要: 以马铃薯品种转心乌为试验材料, 研究纯蓝光、蓝光: 红光=1:3、蓝光: 红光=1:5、蓝光: 红光=1:7 和纯红光 5 种不同光谱对马铃薯农艺性状及干物质积累和分配的影响, 运用 Logistic 模型对马铃薯干物质积累进行拟合, 分析比较了模型的关键参数。结果表明, 红光可以有效促进马铃薯株高和茎粗的增加; 马铃薯整株干物质和块茎干物质积累, 依次为蓝光: 红光=1:7>蓝光: 红光=1:5>纯红光>蓝光: 红光=1:3>纯蓝光; 马铃薯整株和块茎干物质的积累遵循 Logistic 生长规律, 呈明显的倒“S”形, 结薯基本都在改变光周期之后; 蓝光: 红光=1:7 处理干物质积累的增长持续时间(Δt)和平均积累速度(V_{mean})在所有处理中最高, 块茎干质量与根+茎+叶干质量的差值最大。综合分析认为, 光谱成分的变化可以显著影响马铃薯干物质的积累与分配, 蓝光: 红光=1:7 组合是马铃薯设施栽培条件下较适合光源。

关键词: 马铃薯; 光谱; 干物质; 积累; 分配

中图分类号: S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0032-07

Effects of different spectra and their combinations on dry matter accumulation and distribution in potato

XU Jian-min^{1,2}, YAN Zhi-ming^{1,2}, SHI Pei-hua¹, QIU Xue-wen¹

(1. Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China; 2. Engineering and Technical Center for Modern Horticulture, Jurong 212400, China)

Abstract: Using the potato variety zhuanxinwu as the test material, effects of blue light, blue-red light (1:3), blue-red light (1:5), blue-red light (1:7) and red light. On the agronomic traits and dry matter accumulation and distribution of potato were studied. The logistic model was used to fit the dry matter accumulation of potato, and the key parameters of the model were analyzed and compared. The results showed that red light could effectively increase the plant height and stem diameter of potato. The whole plant dry matter and tuber dry matter of potato followed the order of blue-red light (1:7)>blue-red light (1:5)>red light>blue-red light (1:3)>blue light. The accumulation of potato whole plant and tuber dry matter followed the logistic growth law and showed a distinct inverted “S” shape. In addition, the tuber formation basically occurred after changing the photoperiod. The growth duration(Δt) and average accumulation rate (V_{mean}) of dry matter accumulation were highest under the treatment of blue-red light (1:7), and the difference of dry weight between tuber and the root + stem + leaf was the largest. According to the comprehensive analysis, the changes of spectral

composition can significantly affect the accumulation and distribution of dry matter in potato. The blue-red light (1:7) is the suitable light source for protected cultivation of potato.

Key words: potato; spectrum; dry matter; accumulation; distribution

收稿日期: 2019-07-24

基金项目: 江苏农林职业技术学院院级课题(2016kj002); 江苏高校“青蓝工程”项目

作者简介: 许建民(1981-), 男, 甘肃张掖人, 硕士, 副教授, 主要从事设施园艺光环境控制研究。(Tel) 13952995653; (E-mail) jsnlxjm@vip.163.com

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.),又名土豆,茄科茄属,原产于南美洲安第斯山区,其营养价值高、易繁殖、产量高,用途广泛,与小麦、水稻和玉米并称为世界四大作物。中国是马铃薯的第一生产大国,播种面积和产量占世界四分之一。2015年启动马铃薯主粮化战略后,人均消费以每年6.9%的速度激增,人均消费已远超世界平均水平^[1-2]。

LED作为一种新型光源,发热量小,波长可人工选择定制,已被国内外广泛应用于人工补光领域。对草莓、莴苣、生菜、番茄等十几种蔬菜作物的研究表明,红光可有效促进茎的生长,而蓝光可抑制叶片的展开与下胚轴的伸长,合适的复合光可以比传统的荧光灯更能促进作物的生长^[3-4]。LED对马铃薯生长影响的研究大部分集中在组培苗的培育阶段^[5-6],对马铃薯干物质积累和分配的研究主要集中在栽培方式方面^[7-9],缺乏光谱对马铃薯生长过程中干物质积累和分配的动态观察和分析。

本试验采用红蓝单色光谱和红蓝复合光谱,研究光质对马铃薯生长过程的动态影响,用合适的数学模型分析不同光谱对马铃薯干物质的积累和分配的影响,从植物生理生态的角度解读马铃薯生长过程中光质的作用机制,为设施栽培条件下马铃薯生产选择合适的人工光源。

1 材料与方法

1.1 试验设计与方法

马铃薯品种为转心乌,由江苏农林职业技术学院组培室提供。试验在江苏农林职业技术学院人工气候室内进行,将脱毒组培苗扦插在基质为纯蛭石的营养钵(营养钵直径11.5 cm,高12.5 cm)中。设置5个光处理小区,分别为纯蓝光(B)、纯红光(R),蓝光:红光=1:3(B1R3)、蓝光:红光=1:5(B1R5)和蓝光:红光=1:7(B1R7),每个小区30盆。定植20 d后,每隔2 d喷施2% KH_2PO_4 溶液1次。环境湿度控制在70%±10%,白天温度为(25±2)℃,夜间温度为(15±2)℃。前30 d光周期为16 h(昼)/8 h(夜),后60 d光周期为8 h(昼)/16 h(夜)。光谱测定使用光谱彩色照度计(杭州远方(EVERFINE) SPIC-200A 光谱彩色照度计),光照度设置为400 $\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$ (美国LI-COR公司LI-250A照度计),光谱如图1所示。

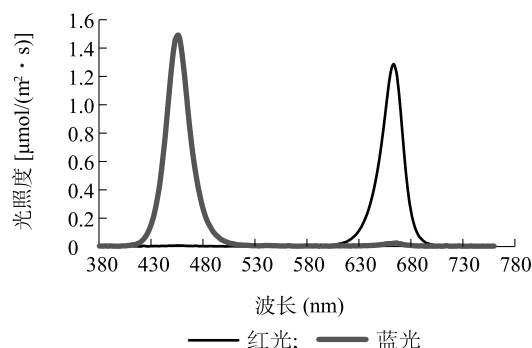


图1 光谱能量分布

Fig.1 Distribution of spectral energy

1.2 样品采集与测定

分别于定植后第0 d、30 d、40 d、50 d、65 d、80 d和95 d取样7次,在每个处理下选取长势一致、健壮无病虫害的5株,清水洗净整株后用直接测量法测定其株高,用游标卡尺法测定顶端下5 cm处茎粗,按根、茎、叶和块茎4个部分测定其干物质含量,第95 d时测定的数值为最终收获量。

1.3 生长模型的选择及计算

在前人研究的基础上,选择经典的Logistic模型拟合马铃薯全生育期的干物质积累,其公式为:

$$y = \frac{c}{1 + e^{(a-bt)}} \quad (1)$$

c 是干物质的最大积累上限, a 和 b 为常数, t 是定植后的天数。

对公式(1)求一阶导数并适当变换可求得生长期的干物质最大积累速度出现的时间(t_{\max})及该点的瞬时速度(V_{\max});求二阶导数并解方程可以得到干物质快速积累的2个拐点,即起点(t_1)和终点(t_2)。

$$t_{\max} = a/b \quad (2)$$

$$V_{\max} = cbe^{(a-bt)} / [1 + e^{(a-bt)}]^2 \quad (3)$$

$$t_1 = (a - 1.317)/b \quad (4)$$

$$t_2 = (a + 1.317)/b \quad (5)$$

1.4 数据处理

数据处理采用SPSS20.0软件进行方差及相关性分析,显著性检验采用Duncan's法,用OriginPro 9进行数据拟合和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同光谱对马铃薯生长的影响

由表1可见,光谱成分的变化对马铃薯收获时农艺性状影响显著。株高随着光谱组合中红光比例的

增加而增加,R 处理的株高最高,B 处理的株高最低,差异显著。R 处理的茎粗同样也大于 B 处理,复合光处理中茎粗同样随着红光比例的增加而增加,而且 B1R7 处理的茎粗大于 R 和 B 处理的茎粗,合适的复合光有利于茎粗的增加。单株结薯个数和单株块茎质量是表征马铃薯田间产量的重要指标,单株块茎质量 B1R7 处理最高,与 R 和 B 处理差异显著,R 处理单株块茎质量大于 B 处理,随着复合光处理中红光比例的增加,单株块茎质量也相应增加;单株结薯个数以 B1R7 处理最高,达 3.33 个,显著高于其他处理;B 处理虽高于 R 处理,但无显著差异;平均单薯质量以 R 处理最高,但与 B1R5 处理无显著差异,B1R3 处理、B1R7 处理与 B 处理之间无显著差异,也没有随着光谱中单色光比例的变化而变化。

表 1 不同光谱对马铃薯收获时农艺性状的影响

Table 1 Effect of different spectra on agronomic traits of potato

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	单株结 薯个数	单株块茎 质量 (g)	平均单薯 质量 (g)
B	18.35c	2.96b	1.67b	0.83c	0.50b
B1R3	20.09c	2.61c	1.00b	0.87c	0.87b
B1R5	34.46b	2.94b	1.33b	1.51b	1.13a
B1R7	39.00b	3.56a	3.33a	1.87a	0.56b
R	54.29a	3.38a	1.30b	1.53b	1.18a

B: 纯蓝光; B1R3: 蓝光: 红光 = 1: 3; B1R5: 蓝光: 红光 = 1: 5; B1R7: 蓝光: 红光 = 1: 7; R: 纯红光。同一列数据后不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同光谱对马铃薯收获时不同器官干质量的影响

由表 2 可见,不同光谱对马铃薯各器官之间干质量的影响显著,B 和 B1R3 处理之间无显著性差异,但 B、B1R3 处理与 B1R5、B1R7 处理相比,其整株及各器官干质量存在显著差异。整株干质量依次为 B1R7 > B1R5 > R > B1R3 > B,说明整株干质量随着复合光谱中红光比例的增加而增加,单色红光在整株干物质的积累上优于单色蓝光,此规律也同样存在于根、茎、叶和块茎的干质量;对收获指数的分析结果显示,B1R7 和 B1R5 处理之间无显著差异,和其余处理间差异显著。B1R7 的光谱组合有利于马铃薯各器官及整株干物质的积累。

2.3 不同光谱对马铃薯干物质积累关键参数的影响

由图 2 可见,马铃薯从定植到收获,整株干物质

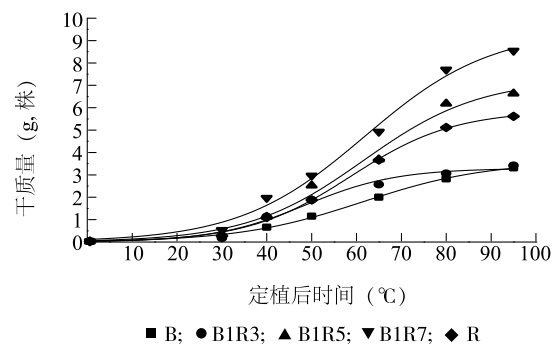
的积累可明显分为 3 个阶段,前 40 d 植株干物质积累较慢;第 40 d 开始干物质积累速度明显加快,呈直线增长的趋势;第 80 d 开始增长速度减缓,部分处理甚至呈现下降趋势;证明在整个生长期干物质的积累主要集中在第 40~80 d,生长曲线呈典型的倒“S”曲线,符合 Logistic 生长曲线规律。不同处理之间,B1R7 处理干物质的积累始终优于其他 4 种处理,R 处理干物质的积累速度也一直高于 B 处理;复合光处理中随着红光比例的增加其干物质积累速度也相应增加,B1R3 处理,定植 80 d 后干质量几乎不再增加。

表 2 不同光谱对马铃薯干质量的影响

Table 2 Effect of different spectra on dry weight of potato

处理	干质量					收获 指数
	整株(g)	根(g)	茎(g)	叶(g)	块茎(g)	
B	3.32c	0.05b	0.11c	0.72c	2.44c	0.7359b
B1R3	3.42c	0.05b	0.12c	0.74c	2.50c	0.7318b
B1R5	6.64b	0.09a	0.20b	1.31ab	5.05b	0.7599a
B1R7	8.54a	0.08a	0.30a	1.57a	6.60a	0.7721a
R	5.61b	0.06b	0.34a	1.19b	4.02b	0.7167b

B、B1R3、B1R5、B1R7、R 处理见表 1 注。同一列数据后不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。



B、B1R3、B1R5、B1R7、R 处理见表 1 注。

图 2 不同光质处理下马铃薯植株干物质积累动态

Fig. 2 Dynamics of dry matter accumulation in potato under different treatments

采用 Logistic 方程对生长曲线的拟合结果(表 3)显示,其相关性都在 0.97 以上,证明该方程能有效反应马铃薯干物质的积累,适用于马铃薯干物质的数据拟合。 t_1 是干物质快速积累的起始时间,B1R3 处理的 t_1 开始最早,第 34 d 起干物质的积累就呈快速增长,但其持续时间却是最短,仅 27 d,显著低于其他处理。 Δt 是干物质快速积累的持续时

间,B1R7 和 B 处理的持续时间最长,但 B 处理 V_{mean} 较低;B1R7 处理的 Δt 和 V_{mean} 都是 5 种处理最大

值,B1R7 处理的干物质的积累量也是 5 种处理的最高值。

表 3 不同光谱下马铃薯整株干物质积累方程及相关参数

Table 3 Logistic equation of dry matter accumulation and related parameters of potato under different treatments

处理	拟合方程	t_0	t_1	t_2	V_{max}	V_{mean}	Δt	R^2
B	$Y=3.59/(1+e^{4.44-0.07t})$	63	45	82	0.06	0.06	37	0.997 6
B1R3	$Y=3.29/(1+e^{4.76-0.10t})$	48	34	61	0.08	0.07	27	0.975 7
B1R5	$Y=7.27/(1+e^{4.74-0.08t})$	59	43	76	0.15	0.13	33	0.981 7
B1R7	$Y=9.47/(1+e^{4.41-0.07t})$	63	44	82	0.17	0.14	38	0.990 2
R	$Y=5.87/(1+e^{5.11-0.09t})$	57	42	71	0.13	0.12	29	0.997 5

B、B1R3、B1R5、B1R7、R 处理见表 1 注。

2.4 不同光谱对马铃薯块茎及根、茎、叶之间干物质分配的影响

图 3 可见,马铃薯块茎干物质的积累与整株干物质的积累趋势基本相似,也呈明显的倒“S”曲线,也可以用 Logistic 方程拟合。复合光处理,第 40 d 后根、茎、叶的干质量不再显著增加,块茎的干质量增长速度加快,块茎的干质量明显大于根、茎、叶干质量的总和,随着时间的增加,两者之间的差距越来越明显,呈现明显的“剪刀差”,“剪刀差”的开口随着时间增长和复合光谱中红光比例的增加而增加,收获时达到最大值。单色光处理中,R 处理块茎干

质量明显大于 B 处理,而且 R 处理的剪刀差开口也大于 B 处理,但小于 B1R7 处理,证明 B1R7 光谱组合有利于块茎干物质的积累。

由表 4 中的拟合公式的相关系数可知,Logistic 公式对马铃薯块茎干物质的积累也是合适的,因 R^2 都大于 0.98。B1R7 处理的 Δt 和 V_{mean} 都是 5 种处理的最大值,由表 2 得知 B1R7 处理块茎干物质也是最高值,可证 Δt 和 V_{mean} 同样是影响马铃薯块茎干物质累积的 2 个重要参数,其增大与减小将直接影响马铃薯块茎干物质的积累。

表 4 不同光谱下马铃薯块茎干物质积累方程及相关参数

Table 4 Logistic equation of dry matter accumulation and related parameters of potato tuber under different treatments

处理	拟合方程	t_0	t_1	t_2	V_{max}	V_{mean}	Δt	R^2
B	$Y=2.35/(1+e^{6.32-0.11t})$	57	45	69	0.06	0.06	24	0.986 5
B1R3	$Y=2.37/(1+e^{6.09-0.12t})$	51	40	62	0.07	0.06	22	0.979 6
B1R5	$Y=5.13/(1+e^{6.33-0.11t})$	58	46	70	0.14	0.12	24	0.994 5
B1R7	$Y=6.73/(1+e^{5.74-0.1t})$	57	44	71	0.17	0.15	27	0.991 9
R	$Y=3.95/(1+e^{8.21-0.15t})$	55	46	64	0.15	0.13	18	0.994 0

B、B1R3、B1R5、B1R7、R 处理见表 1 注。

由表 3 和表 4 对比可知,块茎干物质快速积累的最大时间 t_0 要早于整株 2~7 d,块茎干物质积累的 Δt 小于整株干物质积累的 Δt ,2 个 Δt 之间的差异大约也是 2~7 d,说明是该时间段马铃薯体内源库转换,结薯的时间除 B 处理外都发生在光周期调整之后,马铃薯受到外界胁迫时会加速光合产物向块茎的积累,证明蓝光对马铃薯的胁迫较严重。不同光谱处理之间,马铃薯块茎干物质与整株干物质的积累规律基本相同。

2.5 不同光谱对马铃薯各器官间干物质分配规律的影响

由表 5 可知,马铃薯干物质在不同器官之间的分配比例随着生长时间的增加而呈现不同的分配特性。前 40 d 光照主要以长日照为主,马铃薯的生长主要以营养生长为主,干物质的分配比例以叶片为最高,光合产物主要用于叶片数量和叶面积的增加;第 40 d 后,块茎中干物质的比例逐渐增加,并明显大于根、茎和叶,表明马铃薯干物质的分配已主要向

块茎转移,光合产物更多地流向块茎,到收获时已有75%左右的干物质储存在块茎中,22%左右的储存在叶片中,根和茎的干质量只占整株干质量很小的一部分。

不同处理间的对比显示,马铃薯各器官间干物质的分配比例因时间不同而略有差异。收获时

B1R7 和 B1R5 处理干物质分配到块茎中的比例高于 B1R3 和单色光处理,说明复合光中红光比例的增加有利于干物质的积累,但并不是 100% 红光就是最佳,单色光中红光优于蓝光;复合光优于单色光,证明在红光中增加适当比例的蓝光有利于马铃薯各器官中干物质的积累。

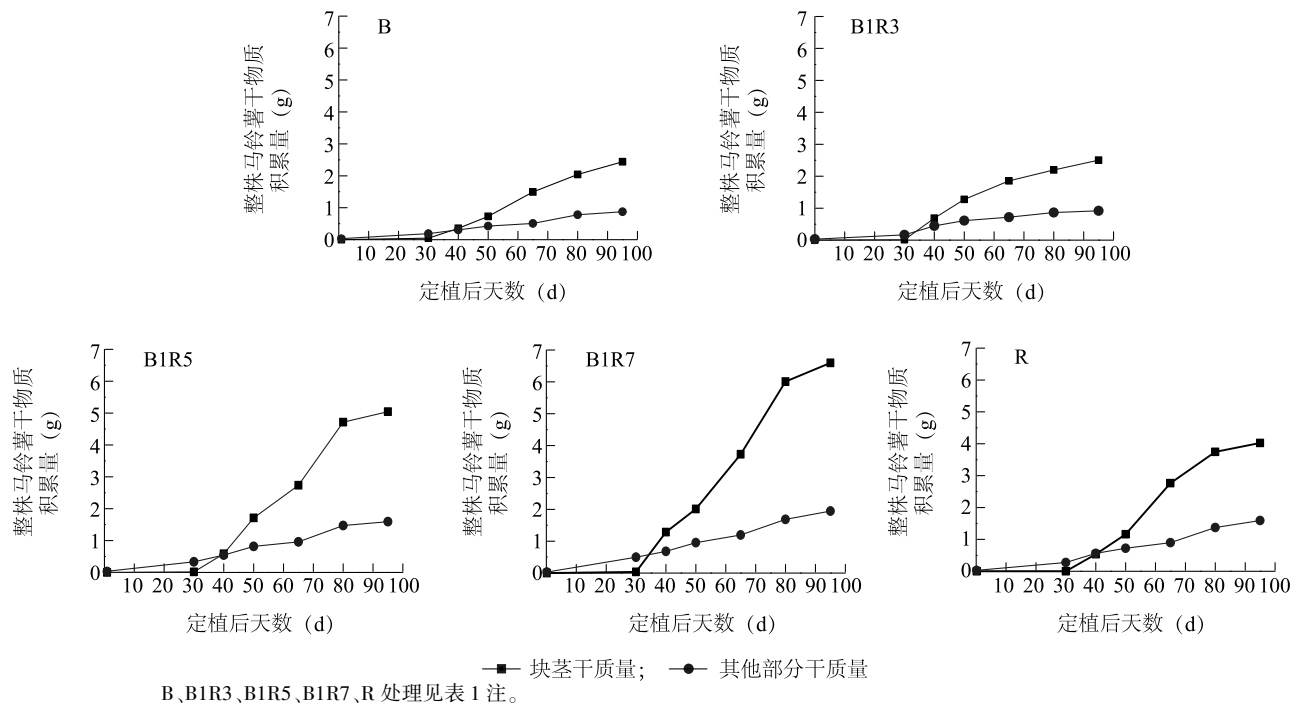


图3 不同光谱处理下马铃薯块茎和根、茎、叶干物质积累动态

Fig.3 Dry matter accumulation dynamics of tuber and root+stem+leaf in potato under different treatments

3 讨论

3.1 不同光谱对马铃薯生长的影响

光作为植物生长发育中的重要因子贯穿于植物整个生命周期,弱光可以调节植物形态的建成,强光可以影响植物的生长发育,光谱对植物生长的影响最为复杂,可见光波长范围广,影响植物生长的方方面面。本试验中,R处理的株高最高,B处理的株高最低,与Liu等^[10]和曹刚等^[11]的研究结果也基本一致,证明红光可以促进茎的伸长,进一步的研究结果表明,主要是由于红光可以提高植株中吲哚乙酸的含量,从而促进株高的增加。Chen等^[12]对叶用莴苣的研究结果显示,组合光谱在生物量的积累方面优于单色光,闻婧等^[13]的研究结果表明,叶用莴苣在蓝红光1:8处理下生物量高于蓝红光1:6和蓝红光1:10;Poulet等^[14]对叶用莴苣的研究结果却

显示蓝红光1:19处理干物质含量最高,本试验中B1R7处理马铃薯整株的干物质和块茎的干物质质量都是最高,这些均证实复合光谱组合中应以红色为主,且红光的比例要远高于蓝光,陈祥伟等^[15]对乌塌菜的研究结果也证实蓝红光1:7处理的干物质质量要高于红色和蓝色单色光处理。当然由于物质和品种的差异蓝红光的比例也略有差异。

3.2 Logistic模型对马铃薯生长及干物质积累的拟合

用数据模型拟合植物生长的过程是农业信息技术的研究重点,同样也是作物生产实现工厂化和精细化的重要基础。常见拟合模型主要有Logistic模型、指数-线性模型^[16]和一些自建模型^[17-18],马铃薯生长中干物质积累拟合中常用Logistic模型,刘星等^[9]运用该模型拟合了连作对马铃薯干物质积累和分配的影响,张书乐^[19]对有机肥替代化肥栽培下的马铃薯生长和干物质分配进行拟合,两者的拟合

相关性系数都在 0.96 以上;本试验中也采用 Logistic 模型分别拟合光谱对马铃薯整株和块茎干物质积累的过程,相关系数都在 0.98 以上,该模型还能得出干物质快速积累的起始点、终止点,块茎干物质积累的平均速度及瞬时最大速度,拟合值与实际观察值之间无显著差异,证明 Logistic 模型完全适用于马铃薯的干物质积累拟合。

表 5 不同光谱对马铃薯各器官间干物质分配比例的影响

Table 5 Effect of different spectra on potato dry matter distribution in organs

生育时期	处理	干物质分配比例(%)			
		根	茎	叶	块茎
第 30 d	B	0.09b	0.11c	0.60b	0.20a
	B1R3	0.08b	0.15bc	0.70a	0.07b
	B1R5	0.13a	0.19b	0.62b	0.05b
	B1R7	0.15a	0.22ab	0.56b	0.07b
	R	0.13a	0.29a	0.57b	0.00c
第 40 d	B	0.06ab	0.06b	0.34a	0.54b
	B1R3	0.06ab	0.06b	0.27ab	0.61a
	B1R5	0.05c	0.10ab	0.32a	0.52b
	B1R7	0.04c	0.07b	0.24b	0.65a
	R	0.08a	0.16a	0.27ab	0.49b
第 50 d	B	0.04a	0.07b	0.26a	0.63b
	B1R3	0.05a	0.05b	0.22b	0.68a
	B1R5	0.05a	0.07b	0.20b	0.68a
	B1R7	0.04a	0.08b	0.20b	0.68a
	R	0.04a	0.13a	0.21b	0.62b
第 65 d	B	0.02a	0.03b	0.21ab	0.75a
	B1R3	0.02a	0.03b	0.23a	0.72b
	B1R5	0.02a	0.04b	0.20ab	0.74ab
	B1R7	0.01a	0.04b	0.19ab	0.76a
	R	0.02a	0.06a	0.16b	0.75a
第 80 d	B	0.02a	0.03b	0.23a	0.72b
	B1R3	0.01a	0.03b	0.23a	0.72b
	B1R5	0.01a	0.03b	0.19ab	0.76a
	B1R7	0.01a	0.04b	0.17b	0.78a
	R	0.01a	0.06a	0.20ab	0.73b
第 95 d	B	0.01a	0.03b	0.22a	0.74b
	B1R3	0.01a	0.04b	0.22a	0.73b
	B1R5	0.01a	0.03b	0.20ab	0.76a
	B1R7	0.01a	0.03b	0.18b	0.77a
	R	0.01a	0.06a	0.21a	0.72b

B、B1R3、B1R5、B1R7、R 处理见表 1 注。相同生育期同一列数据后不同字母代表差异显著($P \leq 0.05$)。

3.3 不同光谱对马铃薯干物质积累和分配的影响

马铃薯不同于番茄等其他茄果类蔬菜,块茎是其最主要的营养器官,叶片产生的大部分光合产物需要向下运输再贮藏在块茎中,因此马铃薯块茎干物质的积累主要决定于 2 个方面,一是叶片合成光合产物的多少,二是从叶片到地下块茎转运率的大小。本试验中,块茎和根+茎+叶干物质的积累在第 30~40 d 达到平衡,之后干物质的积累主要向块茎集中,而根+茎+叶的干物质不再显著增加,证明第 40 d 之后马铃薯叶片合成的光合产物主要向下运输,促进马铃薯块茎的增大,少量用于维持根、茎、叶自身生长的需要。

干物质的分配因植物种类的不同和各种环境因子及激素作用而不同。Blom 等^[20]对番茄, Nhut 等^[21]对草莓和魏星等^[22]对菊花组培的研究结果显示,红蓝复合光中增加红光的比例可以增加植物叶面积、提高叶绿素含量和干物质产量,同时促进光合产物向营养器官分配。本研究结果表明,未结薯前干物质主要积累在叶片中,开始结薯后干物质主要向块茎集中,根、茎、叶中干物质的比例逐渐下降,几种光谱组合中以 B1R7 处理变化最为明显,但本试验中马铃薯未开花,因此无法分析其营养器官和生殖器官之间的分配关系。

4 结 论

光谱可以显著影响马铃薯的生长及干物质的积累和分配。纯红光与纯蓝光相比可以有效地增加株高、茎粗、单株干质量和块茎质量,但都低于 B1R5 和 B1R7 处理;B1R7 处理茎粗、整株干质量、块茎产量及干物质积累速度等指标均优于单色光和其余红光蓝光组合,说明合适的红光蓝光组合有利于马铃薯的生长及块茎发育。

参考文献:

- [1] 刘 洋,高明杰,罗其友,等. 世界马铃薯消费基本态势及特点[J].世界农业,2014(5):119-124,216.
- [2] 关佳晨,蔡海龙. 我国马铃薯生产格局变化特征及原因分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(3):92-100.
- [3] 龙家焕,浦 敏,黄志午,等. 光谱调控植物生长发育的研究进展[J].照明工程学报,2018,29(4):8-16.
- [4] 许大全,高 伟,阮 军. 光质对植物生长发育的影响[J].植物生理学报,2015(8):1217-1234.
- [5] MA X F, WANG Y, LIU M X, et al. Effects of green and red lights

- on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets *in vitro* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 190:104-109.
- [6] MATSUDA R, YAMANO T, MURAKAMI K, et al. Effects of spectral distribution and photosynthetic photon flux density for overnight LED light irradiation on tomato seedling growth and leaf injury [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 198:363-369.
- [7] 高聚林, 刘克礼, 张宝林, 等. 马铃薯干物质积累与分配规律的研究 [J]. *中国马铃薯*, 2003, 17(4):209-212.
- [8] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 等. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2):423-430.
- [9] 刘 星, 张书乐, 刘国锋, 等. 连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响 [J]. *作物学报*, 2014, 40(7):1274-1285.
- [10] LIU M, XU Z, GUO S, et al. Evaluation of leaf morphology, structure and biochemical substance of balloon flower (*Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC.) plantlets *in vitro* under different light spectra [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 174(1):112-118.
- [11] 曹 刚. 不同 LED 光质对黄瓜和结球甘蓝苗期生长、光合特性及内源激素的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [12] CHEN X L, YANG Q C. Effects of intermittent light exposure with red and blue light emitting diodes on growth and carbohydrate accumulation of lettuce [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 234:220-226.
- [13] 闻 婧, 鲍顺淑, 杨其长, 等. LED 光源 R/B 对叶用莴苣生理性状及品质的影响 [J]. *中国农业气象*, 2009, 30(3):413-416.
- [14] POULET L, MASSA G D, MORROW R C, et al. Significant reduction in energy for plant-growth lighting in space using targeted LED lighting and spectral manipulation [J]. *Life Sciences in Space Research*, 2014, 2:43-53.
- [15] 陈祥伟, 刘世琦, 王 越, 等. 不同 LED 光源对乌塌菜生长、光合特性及营养品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7):1955-1962.
- [16] 杨再强, 张继波, 李永秀, 等. 红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(8):2498-2505.
- [17] 李 昊, 谭方颖, 王建林, 等. 华北地区夏玉米干物质分配系数的模拟 [J]. *中国农业气象*, 2016, 37(3):335-342.
- [18] 刘铁梅. 小麦光合生产与物质分配的模拟模型 [D]. 南京: 南京农业大学, 2000.
- [19] 张书乐. 有机肥替代部分化肥对马铃薯干物质积累与分配以及对土壤生物学性状的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [20] BLOM T J, ZHENG Y B. The response of plant growth and leaf gas exchange to the speed of lamp movement in a greenhouse [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 119(2):188-192.
- [21] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H, et al. Responses of straw-berry plantlets cultured *in vitro* under super bright red and blue-emitting diodes (LED) [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2003, 73:43-52.
- [22] 魏 星, 顾 清, 戴艳娇, 等. 不同光质对菊花组培苗生长的影响 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(12):344-349.

(责任编辑: 陈海霞)