

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2021)04-0289-11

遗传育种

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2021.04.001

红蓝LED光源对马铃薯组培苗形态生长、光合色素含量及矿质元素积累的影响

韩逸飞, 顾天行, 黄梦圆, 陈丽丽*

(宁波大学科学技术学院, 浙江 慈溪 315300)

摘要:以‘中薯7号’马铃薯品种为试验材料,以脱毒马铃薯组培苗单节茎段为外植体,采用 $100\ \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 光强的白(对照)、红、蓝及红蓝光组合4种LED光谱作照明光源培养马铃薯组培苗,研究不同LED光质对马铃薯组培苗生长及矿质元素积累的影响。结果表明,红光引起马铃薯组培苗茎秆伸长变细,增加其节间长和茎节数,降低壮苗指数;蓝光诱导组培苗茎秆矮化加粗,促进干物质积累,增加壮苗指数。蓝光和红蓝光组合显著增加叶绿素a/b的值,红光则显著降低该值。与白光相比,红光抑制马铃薯组培苗对Ca、Fe、Zn和Cu的吸收,并增加上述元素在茎中的分配率,降低其在叶中的分配率;蓝光抑制组培苗对Ca和Mn的吸收,促进P、Zn和Fe的吸收,提高P和Zn在根中的分配率,减少其在茎中的分配率。红蓝光组合增加K、P、Mg、Mn在组培苗中的总积累量,改变Ca和Fe元素在组培苗各器官中的分配情况。因此,光质显著影响马铃薯组培苗的生长和矿质元素的积累:蓝光和红蓝光组合通过增加健苗指数和P元素的积累,促进马铃薯组培苗健壮生长;红光一定程度上造成马铃薯组培苗的遮荫反应并抑制Ca等矿质元素的积累,不利于组培苗生长。研究为光源调控马铃薯组培苗生长和矿质元素代谢提供相关数据支撑和理论依据,同时为马铃薯组培苗快繁中人工光源的选择提供相关参考。

关键词:马铃薯组培苗;红光;蓝光;矿质元素

Effects of Red and Blue LED Light Source on Morphological Growth, Photosynthetic Pigment Content and Mineral Element Accumulation of Potato Plantlets Cultured *in vitro*

HAN Yifei, GU Tianxing, HUANG Mengyuan, CHEN Lili*

(College of Science and Technology, Ningbo University, Cixi, Zhejiang 315300, China)

Abstract: In the present study, with the variety 'Zhongshu 7' as the experimental material and single node cuttings of virus-free potato plantlets used as explants, the potato plantlets *in vitro* were cultured under white (used as the control), red, blue and the combination of red and blue LED light spectra with $100\ \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ illumination intensity to understand the effects of different LED light qualities on the growth and mineral element accumulation and distribution of potato plantlets cultured *in vitro*. The results indicated that red light induced elongated and slender stems of potato plantlets cultured *in vitro* with significantly increased internode length and internode number, but decreased health index. On the contrary, blue light produced dwarf and sturdy plantlets, facilitated dry matter accumulation and increased health indexes.

收稿日期: 2021-01-29

基金项目: 宁波大学科研基金(XYL20017); 宁波大学科学技术学院高层次人才科研启动经费(RC190006)。

作者简介: 韩逸飞(2001-), 男, 研究方向为光源调控植物生长发育。

*通信作者(Corresponding author): 陈丽丽, 博士, 讲师, 研究方向为光源调控植物生长发育, E-mail: chenlili2@nbu.edu.cn。

Blue light and the combination of red and blue light spectrum significantly increased the value of chlorophyll a/b, however, red light significantly decreased the ratio. Compared with white light, red light inhibited the absorption of Ca, Fe, Zn and Cu, but increased these mineral elements to distribute to the stems rather than leaves in potato plantlets *in vitro*. Blue light reduced the absorption of Ca and Mn and promoted the absorption of P, Zn and Fe with elevated distribution ratio of P and Zn in roots and decreased that in stems of potato plantlets *in vitro*. The combination of red and blue light increased the total accumulation of K, P, Mg and Mn in potato plantlets *in vitro* and altered the distribution of Ca and Fe in plantlets organs obviously. Therefore, different LED light qualities significantly affect the growth and mineral element accumulation of potato plantlet cultured *in vitro*. In summary, blue light and the combination of blue and red light promoted potato plantlets *in vitro* growth by increasing the health indexes and P element accumulation. To some extent, red light caused the shade reaction and inhibited the accumulation of Ca and other mineral elements, which was not conducive to the growth of potato plantlets cultured *in vitro*. This study provides data supports and theoretical basis for light regulation of potato plantlets growth and mineral element metabolism and also supplies relevant reference for the selection of artificial light source in the rapid propagation of potato plantlets cultured *in vitro*.

Key Words: potato plantlets *in vitro*; red light; blue light; mineral element

中国马铃薯种植面积和产量均居世界前列, 马铃薯单产却远低于世界平均水平^[1], 这与中国脱毒种薯推广使用率低有关。大田生产中, 推广使用合格种薯是马铃薯高产的重要保障^[2]; 而培养健壮的马铃薯组培苗是种薯生产的重要环节^[3,4]。

大量研究表明不同光质显著影响植物组培苗生长。红光促进大花蕙兰、草莓、菊花、蝴蝶兰、非洲菊等组培苗的节间伸长, 增加株高^[5-9]。Heo等^[10]研究发现红光抑制万寿菊和鼠尾草茎的伸长生长。蓝光则被报道抑制蝴蝶兰、草莓、铁皮石斛等组培苗的节间伸长, 降低株高^[6,8,11]。然而, 蓝光对茎的影响也有相反的报道, 蓝光下万寿菊茎最长, 是白色荧光灯下的3倍^[10]。与单色光相比, 红蓝组合光谱被广泛报道促进组培苗生长。70%红光+30%蓝光下草莓组培苗生长良好^[6]。红光比例较高的红蓝组合光谱较蓝光比例高的红蓝组合光谱更利于花蕙兰和蝴蝶兰组培苗的生长^[12]。由上述研究可知, 单色红、蓝光及红蓝组合光对植物组培苗的影响有一定的规律, 但也因物种和品种不同存在一定的差异。在光源对马铃薯组培苗生长的研究方面, Aksenova等^[13]发现红光培养的马铃薯组培苗茎长而纤细, 叶片小; 蓝光下马铃薯组培苗表现出茎秆低矮粗壮, 叶片肥大。常宏等^[14]研究表明红光有利于马铃薯组培苗叶片数的增加; 蓝光则促进组培苗干物质积累和试管薯的形成, 抑制株高生长。Ma等^[15]发现660 nm

的红光比630 nm的红光更能促进马铃薯组培苗生长。红光处理的马铃薯组培苗徒长, 而红蓝混合光处理有利于马铃薯组培苗的形根系生长、叶绿素合成及可溶性糖积累^[16]。

植物对矿质元素的吸收和利用也受到光质影响^[17,18]。研究表明, 蓝光增加叶用莴苣中大量元素Ca、P、K、Mg和微量元素Cu、Fe、Mn、B、Mo的积累量^[19]; 红光和绿光促进绞股蓝对Se和Ni的吸收^[20]; 红蓝组合促进生菜大量元素K、P、Ca、Mg和微量元素B的吸收^[17]。矿质元素K、Ca、P、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn广泛参与植物的形态建成及信号转导、渗透调节等生理过程^[21]。此外, 对组培植物来说, 了解这些矿质元素的吸收特性对优化培养基配方有重要参考作用。因此, 研究光源对组培植物矿质元素的吸收利用十分重要。

目前, 前人关于光质调控马铃薯组培苗生长方面的研究结论不尽一致, 同时缺乏不同光质对马铃薯组培苗矿质元素积累与分配方面的研究。生产上马铃薯组培苗快繁, 通常使用白色荧光灯照明, 存在光能利用率低、散热量大、能耗高、不环保等缺点。LED照明光源具有体积小、寿命长、节能环保、光谱窄、易调节等特点, 近年来已广泛被用作植物组织培养的照明光源^[22,23]。本研究采用红、蓝单色LED光源及红蓝组合LED光源作光处理, 以白色LED光源作对照, 探索不同LED光质对马铃薯组培

苗生长和矿质元素积累的影响, 以期为马铃薯组培苗快繁中人工光源的选择提供相关理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用‘中薯7号’马铃薯脱毒组培苗, 由中国农业科学院蔬菜花卉研究所马铃薯研究室提供。

1.2 试验设计

试验采用4个光质处理: (1) 100%红光(R); (2) 100%蓝光(B); (3) 70%红 + 30%蓝光组合(RB); (4) 白光(W)。其中, W作对照。

1.3 试验条件

试验在中国农业大学农学院南平房组培室内进行, 温度(23 ± 3)℃, 光周期为每天16 h(6:00~22:00)光照, 8 h(22:00至次日6:00)黑暗, 湿度(75 ± 5)%, 光合量子通量密度(Photosynthetic photon flux density, PPF)为100 μmol/m²·s。试验采用无任何激素添加的MS培养基^[24], pH调节至5.8, 每组培瓶(购于北京易生组培有限公司, 容积为350 mL)分装50 mL培养基, 在121℃下于高压锅内灭菌15 min。在超净工作台上, 用组培剪剪下具有一叶的马铃薯组培苗单节茎段(约15 mm长)作为外植体, 垂直接种至灭菌凝固后的组培瓶内, 每瓶均匀接种15个外植体, 各处理分别接种50瓶, 置于各光处理下培养4周。

1.4 指标测定

(1) 形态指标测定

测定马铃薯组培苗的株高、茎粗、株鲜重、株干重、叶片数和节间数。每个处理随机选取10株测量。叶片数和节间数计数法计数, 其中节间数仅统计有效节间数(即可用于剪切扩繁的茎段长度 > 10 mm)。鲜样置于烘箱, 先105℃杀青15 min, 再80℃烘干至恒量, 采用电子天平测定植株干、鲜重。壮苗指数 = (茎粗/株高) × 株干重。

(2) 光合色素含量测定

叶片叶绿素和类胡萝卜素含量测定采用比色法, 每个处理3个重复取平均值。

用95%乙醇提取光合色素, 以95%乙醇为空白, 在波长665, 649和470 nm下测定吸光度(A₆₆₅, A₆₄₉, A₄₇₀), 按下列公式计算:

$$C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (1)$$

$$C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (2)$$

$$C_x = (1\ 000A_{470} - 2.05C_a - 114.8C_b)/245 \quad (3)$$

式中, C_a, C_b, C_x分别为叶绿素a, 叶绿素b, 类胡萝卜素的质量浓度, 单位mg/L。

$$\text{叶绿体色素含量(mg/g)} = C \times V \times N / (W \times 1\ 000) \quad (4)$$

$$\text{叶绿素 a/b} = \text{叶绿素 a 含量} / \text{叶绿素 b 含量} \quad (5)$$

式(4)中, C为色素质量浓度(mg/L), V为提取液体积(mL), N表示稀释倍数, W为样品重量(g)。

(3) 矿质元素含量测定

采用ICP法^[25]分别测定马铃薯组培苗叶片、茎和根中Cu、Fe、Mn、Zn、K、Ca、Mg和P的含量, 每个处理6次重复。准确称取0.500 g样品粉末于预先洗净的消煮管中, 加硝酸和高氯酸的混合酸(硝酸与高氯酸体积比为87:13)5 mL, 漩涡仪混匀, 室温下消化12 h以上, 同时设定样品空白管。将消煮管置于电热消解仪上, 按照50℃ 6 h, 75℃ 2 h, 100℃ 2 h, 125℃ 3 h, 150℃ 5 h, 175℃ 2 h, 190℃ 设定升温程序, 直至煮干, 整个过程均在通风橱中进行。消煮管冷却后加入2%硝酸10 mL, 漩涡仪混匀, 置于水浴锅上70℃加热1 h, 静置过夜, 将上清液转移至离心管(如浑浊, 需3 500 r/min离心10 min)。用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定Cu、Fe、Mn、Zn、K、Ca、Mg和P的含量。用干重和测得的元素含量计算出各元素的积累量和分配率。

1.5 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2016整理数据, 采用Sigmaplot 12.5作图; 用R软件对数据进行单因素方差分析和LSD检验, 以P < 0.05为显著水平。试验数据以平均数 ± 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 不同LED光质对马铃薯组培苗形态生长的影响

光质显著影响马铃薯组培苗生长(表1)。R处理组培苗株高较对照W增加5.46 cm; B则较W降低2.54 cm。R和B处理在组培苗茎粗上则表现出与株高相反的作用效果: R较W处理的茎粗减少0.10 mm; B处理则较W茎粗增加0.14 mm。虽然在马铃薯株高

和茎粗上, RB处理与W处理并未呈现显著差异($P > 0.05$), 但RB处理株干重最高, 显著($P < 0.05$)高于W。R处理的马铃薯组培苗株鲜重和株干重最低, 均显著($P < 0.05$)低于W和其他处理。红、蓝单色光及组合光处理的组培苗叶片数和茎节数与白光处理无显著差异($P > 0.05$)。B处理的组培苗壮苗指

数最高, 显著($P < 0.05$)高于W和其他处理; RB处理次之, 显著($P < 0.05$)高于R和W处理; R处理最低, 显著($P < 0.05$)低于W和其他处理。总之, 红、蓝单色光谱和红蓝组合光谱较白光显著改变了马铃薯组培苗形态生长, 单色蓝光和红蓝组合光谱处理在一定程度上促进马铃薯组培苗壮苗生长。

表1 不同LED光质对马铃薯组培苗形态生长指标的影响

Table 1 Effects of different LED light qualities on morphological growth of potato plantlets cultured *in vitro*

指标 Parameter	处理 Treatment			
	R	B	RB	W
株高(cm) Plantlet height	12.08 ± 0.77 a	4.08 ± 0.16 c	5.57 ± 0.13 b	6.62 ± 0.47 b
茎粗(mm) Stem diameter	0.90 ± 0.03 c	1.14 ± 0.03 a	1.01 ± 0.03 b	1.00 ± 0.04 b
株鲜重(mg) Plantlet FW	194.93 ± 12.88 c	269.85 ± 33.58 a	231.63 ± 19.47 ab	212.80 ± 13.14 b
株干重(mg) Plantlet DW	21.43 ± 1.82 c	29.63 ± 3.03 ab	31.03 ± 2.15 a	25.17 ± 1.46 b
叶片数(No.) Leaf number	8.00 ± 0.37 a	7.75 ± 0.36 a	8.00 ± 0.34 a	8.00 ± 0.37 a
茎节数(No.) Node number	7.3 ± 0.50 a	5.5 ± 0.32 b	6.4 ± 0.20 ab	6.5 ± 0.48 ab
节间长(cm) Node length	2.13 ± 0.15 a	0.71 ± 0.01 c	1.21 ± 0.23 b	1.53 ± 0.20 b
壮苗指数 Health index	0.16 ± 0.01 d	0.83 ± 0.01 a	0.56 ± 0.01 b	0.38 ± 0.01 c

注: R, B和W分别表示100%红光、100%蓝光和100%白光, RB表示70%红光+30%蓝光; FW指鲜重, DW指干重。同一行数据后不同小写字母表示指标在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异。下同。

Note: R, B, and W refer to 100% red, 100% blue, and 100% white LED light; RB refers to 70% red + 30% blue LED light; FW means fresh weight; DW means dry weight. Different lowercase letters in the same row data indicate significant difference at $P < 0.05$ level. The same below.

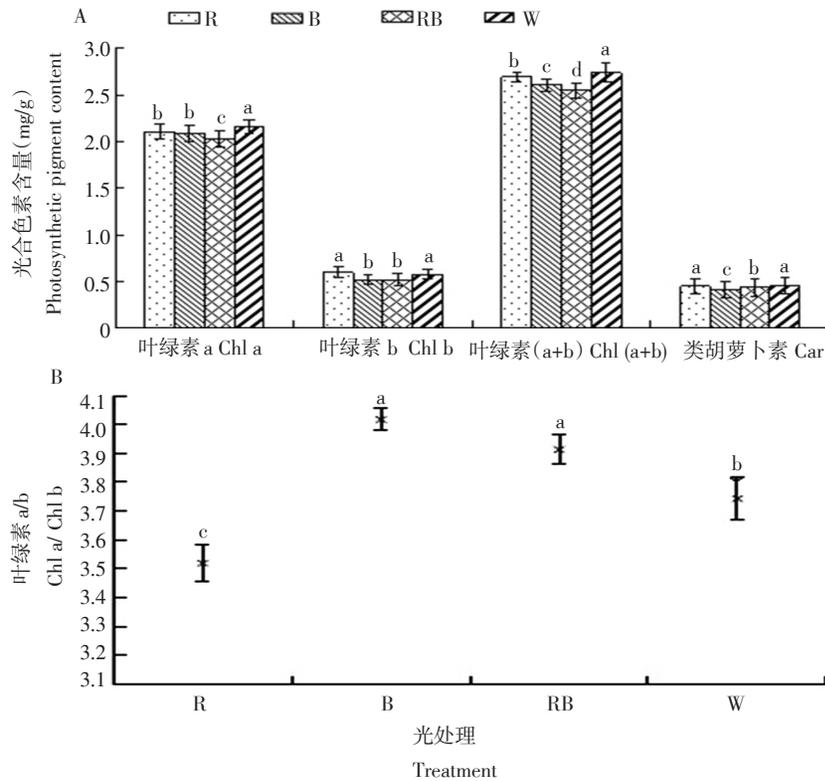
2.2 不同LED光质对马铃薯组培苗叶片光合色素含量的影响

由图1可知, 不同LED光质处理显著改变了马铃薯组培苗叶片光合色素积累。与W相比, R处理显著($P < 0.05$)降低马铃薯组培苗叶片叶绿素a和叶绿素(a+b)的含量, 但并未显著($P > 0.05$)影响叶绿素b和类胡萝卜素的含量。B和RB处理均显著($P < 0.05$)降低马铃薯组培苗叶片的叶绿素a, 叶绿素b, 叶绿素(a+b)和类胡萝卜素的含量。相反, 与W处理相比, B和RB处理却显著($P < 0.05$)增加马铃薯组培苗叶片叶绿素a/b的值; R处理则较W处理显著($P < 0.05$)降低马铃薯组培苗叶片叶绿素a/b的值。上述结果表明, 单色红光有利于马铃薯组培苗叶片叶绿素b和类胡萝卜素的积累; 单色蓝光和红蓝组合光谱则不利于马铃薯组培苗叶片光合色素的积累。

2.3 不同LED光质对马铃薯组培苗矿质元素积累与分配的影响

2.3.1 不同LED光质对马铃薯组培苗大中量元素积累的影响

与W相比, R处理显著($P < 0.05$)降低K元素在马铃薯组培苗根、茎和叶中的积累; B处理显著($P < 0.05$)降低K元素在马铃薯组培苗根中的含量, 但并未显著($P > 0.05$)影响叶中K的含量; B处理显著($P < 0.05$)增加茎中K的积累, 较对照增加12.26%; RB处理显著($P < 0.05$)降低K元素在组培苗根和叶部位的积累量, 并未显著($P > 0.05$)影响该元素在茎中的含量。与W相比, 不同LED光质处理均显著($P < 0.05$)降低Ca元素在组培苗根中的积累量; R处理显著($P < 0.05$)降低Ca在茎中的积累; B和RB处理显著($P < 0.05$)降低Ca元素在组培苗叶



注: Chl a-叶绿素a; Chl b-叶绿素b; Chl(a+b)-叶绿素a+b; Car-类胡萝卜素。R, B和W分别表示100%红光、100%蓝光和100%白光处理, RB表示70%红光+30%蓝光组合光处理。不同小写字母表示指标在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异。下同。

Note: Chl a- chlorophyll a; Chl b- chlorophyll b; Chl (a+b)-chlorophyll a + chlorophyll b; Car-carotenoid. R, B, and W refer to 100% red, 100% blue, and 100% white LED light; RB refers to 70% red + 30% blue LED light. Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level. The same below.

图1 不同LED光质对马铃薯组培苗叶片光合色素含量的影响

Figure 1 Effects of different LED light qualities on photosynthetic pigments of potato plantlets cultured *in vitro*

中的含量。与W相比, R处理显著($P < 0.05$)降低P元素在组培苗根和叶中的含量, 分别降低7.41%和26.47%; B处理显著($P < 0.05$)增加P元素在组培苗茎中含量, 较对照提高22.58%。R处理较对照显著($P < 0.05$)降低Mg元素在组培苗根和叶部位的含量, 分别降低36.13%和14.75%; B和RB处理则增加Mg元素在组培苗根和叶中的含量, 但并未达到显著水平($P > 0.05$)(图2)。总之, 单色红光处理减少K、P和Mg元素在马铃薯组培苗根和叶部位的积累量, 同时也不利于Ca元素在马铃薯组培苗根和茎部位的积累; 单色蓝光处理则显著增加K和P元素在组培苗茎中的积累量。

2.3.2 不同LED光质对马铃薯组培苗大量元素分配率及总积累量的影响

由图3可知, 马铃薯组培苗植株的K、P和Mg元素在R, B, RB和W处理下呈现出相似的积累量即 $RB > B > W > R$ 。RB处理的组培苗Ca元素的植株积累量最高, 与W基本相当; B处理的组培苗Ca元素的植株积累量最低; R处理的组培苗Ca元素的植株积累量居中。由此可见, B和RB处理提高了马铃薯组培苗植株K、P和Mg元素的总积累量。

由图3可知, B和RB处理下, 马铃薯组培苗K、P和Mg元素在各器官的分配率与W处理基本一致, 即K和P元素分配率表现为: 叶 > 茎 > 根; Mg

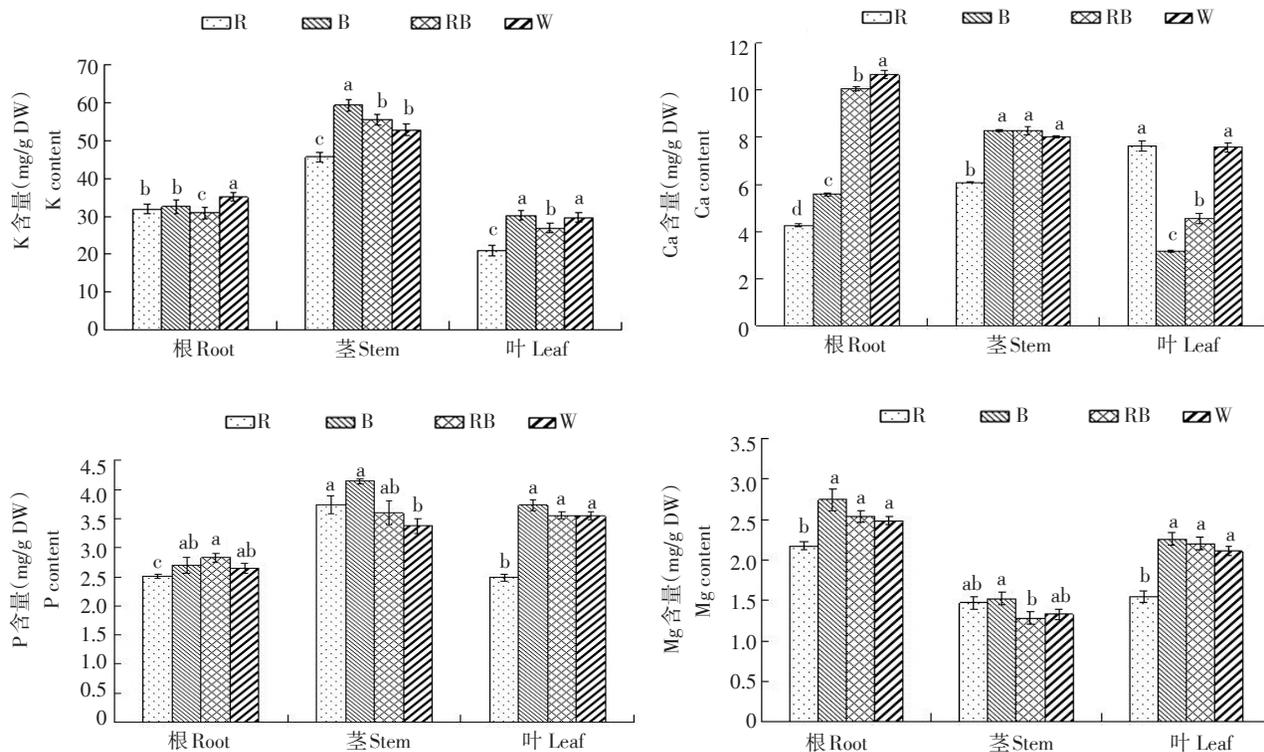


图2 不同LED光质对马铃薯组培苗根、茎和叶器官K、Ca、P和Mg元素积累的影响

Figure 2 Effects of different LED light qualities on accumulations of K, Ca, P and Mg elements in organ of roots, stems and leaves of potato plantlets cultured *in vitro*

元素分配率表现为: 叶 > 根 > 茎。R处理下, 组培苗K和P元素茎分配率均最高。总之, 单色蓝光和红蓝组合光谱处理并未明显改变K、P和Mg元素在马铃薯组培苗根、茎和叶器官中的分配率; 单色红光则明显改变了K、P、Ca和Mg元素在马铃薯组培苗各器官中的分配率。

2.3.3 不同LED光质对马铃薯组培苗微量元素积累的影响

不同LED光质显著影响Mn、Fe、Zn和Cu元素在马铃薯组培苗根、茎和叶器官中的含量(图4)。与W处理相比, B处理显著($P < 0.05$)增加马铃薯组培苗根部Fe、Zn和Cu元素的含量, 分别较对照增加24.75%、44.59%和13.33%。R处理则显著($P < 0.05$)降低组培苗根部Mn、Fe、Zn和Cu元素的积累量, 分别较对照降低16.43%、57.02%、29.36%和

44.47%。R处理显著($P < 0.05$)降低组培苗茎中Mn和Fe元素的含量, 分别较对照降低41.77%和33.89%。与对照相比, B处理并未显著($P > 0.05$)影响组培苗茎中Mn、Zn和Cu元素的积累量, 但显著($P < 0.05$)降低茎中Fe元素的含量, 较对照减少5.58%。与W相比, B和RB处理并未显著($P > 0.05$)影响组培苗叶中Mn、Zn和Cu元素的积累量; R处理的组培苗叶中Mn元素含量较对照增加36.74%, 但该处理的组培苗叶中Cu元素的含量较对照降低31.25%, 二者差异均达到显著($P < 0.05$)水平。总之, 单色蓝光显著增加马铃薯组培苗根部Fe、Zn和Cu元素的积累量; 单色红光则显著降低Mn、Fe、Zn和Cu元素的含量; 不同LED光质处理对马铃薯组培苗茎和叶中微量元素积累的影响并未表现出明显的规律性。

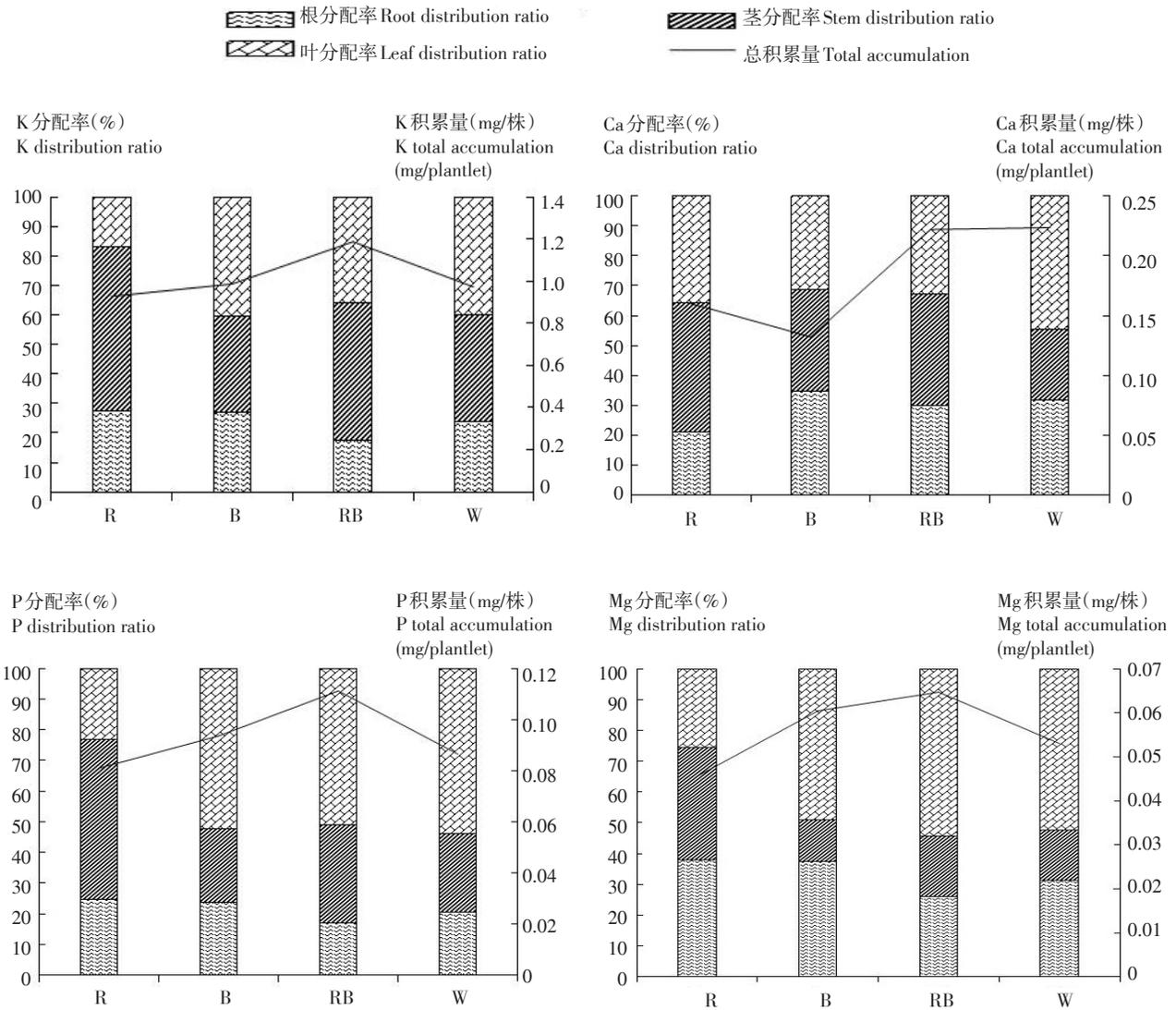


图3 不同LED光质对马铃薯组培苗根、茎和叶器官K、Ca、P和Mg元素分配率和总积累量的影响
 Figure 3 Effects of different LED light qualities on distribution ratios and total accumulations of K, Ca, P, and Mg elements in organ of roots, stems, and leaves of potato plantlets cultured *in vitro*

2.3.4 不同LED光质对马铃薯组培苗微量元素分配率及总积累量的影响

由图5可知, 与对照和其他处理相比, 马铃薯组培苗植株Zn、Fe和Cu元素的总积累量在B处理下均最高, 在R处理下均最低。与对照和其他处理相比, RB处理的组培苗植株Mn元素总积累量最高。由此可见, 单色蓝光有利于Zn、Fe和Cu元素在马铃薯组培苗中的积累, 而单色红光则减少上述元素在组培苗中的积累; 红蓝组合光谱则促进Mn元素在

组培苗中的积累。

由图5可知, 与W相比, R处理明显增加Zn、Fe和Cu元素在组培苗茎中的分配率; B处理则降低上述3种元素在茎中的分配率, 但增加这3种元素在根中的分配率。RB处理的马铃薯组培苗Mn、Zn、Fe和Cu元素在根、茎和叶器官中的分配率与对照处理的组培苗呈现基本一致的分配规律, 即在RB和W处理的组培苗中Mn元素分配率表现为: 叶 > 茎 > 根; Zn元素分配率表现为: 叶 > 根 > 茎; Fe和Cu

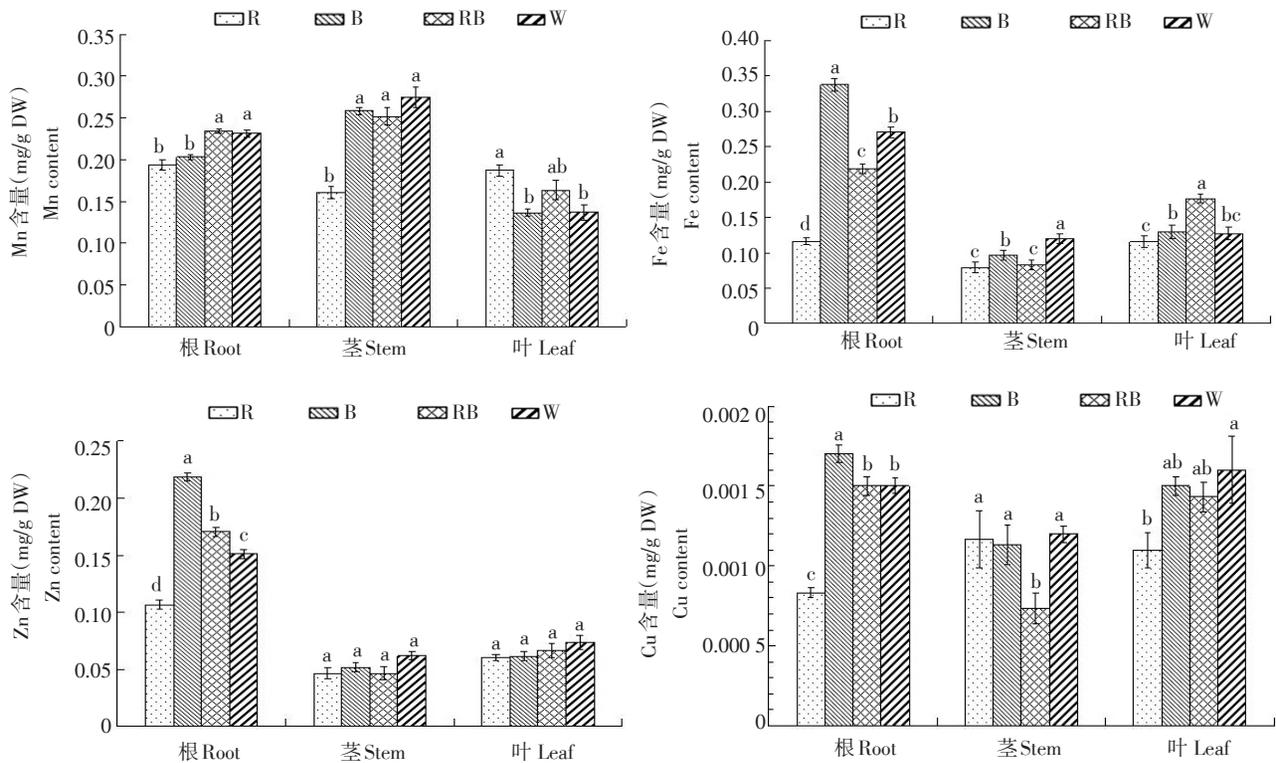


图4 不同LED光质对马铃薯组培苗根、茎和叶器官Mn、Fe、Zn和Cu元素积累的影响

Figure 4 Effects of different LED light qualities on accumulations of Mn, Fe, Zn and Cu elements in organ of roots, stems, and leaves of potato plantlets cultured *in vitro*

元素的分配率均表现为: 叶 > 根 > 茎。综上所述, 与白光相比, 单色红光和单色蓝光均明显改变Zn、Fe和Cu元素在马铃薯组培苗各器官中的分配率; 红蓝组合光谱处理的组培苗Mn、Zn、Fe和Cu元素在根、茎和叶器官中的分配率与白光处理的组培苗基本一致。

3 讨论

Aksenova等^[13]研究表明红光下生长的马铃薯组培苗叶片小且茎细长; 蓝光下生长的则表现出茎秆低矮粗壮, 叶片大而肥厚。常宏等^[14]发现单色蓝光抑制马铃薯组培苗株高生长, 促进干物质积累。本试验研究得到了类似的结果。与白光相比, 红蓝混合光处理可促进‘克新13号’马铃薯组培苗形态生长^[16], 而本试验中RB处理后各项形态指标均与W处理无显著 ($P > 0.05$) 差异, 这可能与不同品种的马铃薯组培苗对光源的响应不同有关。本研究中红光下组培苗

的节间长和茎节数(RB和W处理除外)均显著 ($P < 0.05$) 高于对照和其他处理。有研究表明, 在一定范围内增大接种茎段长度有利于组培苗生长^[26,27]。红光可以提供较多的长茎段, 因此, 红光可能更适用于组培苗扩繁, 提高扩繁效率。蓝光处理的组培苗壮苗指数显著 ($P < 0.05$) 高于对照和其他处理, 这说明蓝光促进马铃薯组培苗壮苗生长, 可能更适合培养用于温网室移栽生产原原种的组培苗。

在光质对植物光合色素积累的影响方面研究颇多, 不同的研究得到的结果有所差异^[28]。姜丽丽等^[16]发现红蓝混合光处理显著增加马铃薯组培苗叶绿素的含量, 唐道彬等^[29]在用不同光质处理马铃薯水培植株也得到类似结果。然而, 本试验中RB处理的马铃薯组培苗叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量均显著 ($P < 0.05$) 低于W处理; 同时, RB处理的组培苗叶绿素a含量低于R和B处理, 叶绿素b含量低于

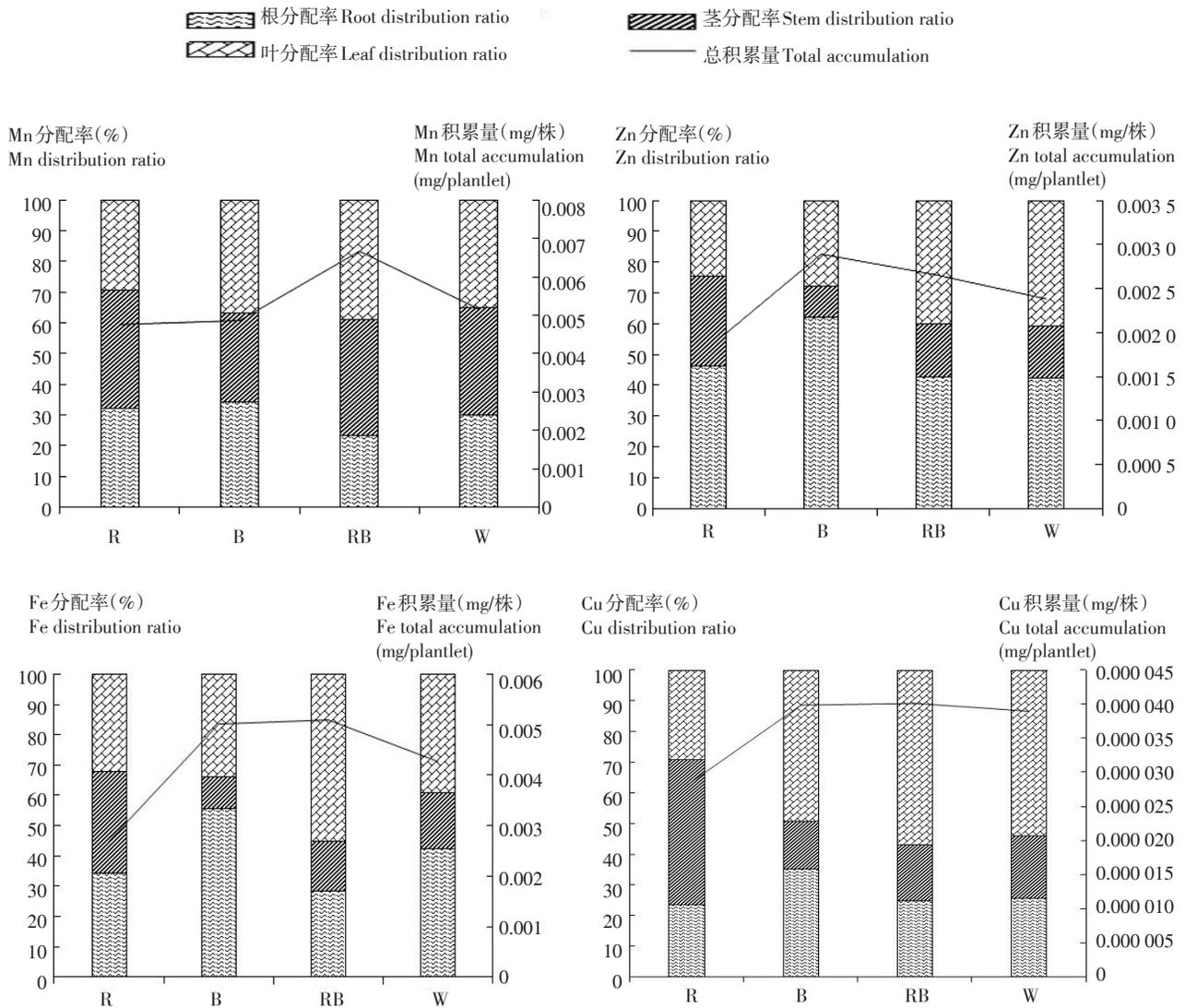


图5 不同LED光质对马铃薯组培苗根、茎和叶器官Mn、Zn、Fe和Cu元素分配率和总积累量的影响
 Figure 5 Effects of different LED light qualities on distribution ratios and total accumulations of Mn, Zn, Fe and Cu elements in organ of roots, stems, and leaves of potato plantlets cultured *in vitro*

R处理(图1A)。由此可见,在本研究中红、蓝光和红蓝光组合处理均抑制马铃薯组培苗的光合色素积累。本试验中叶绿素a/b的值在蓝光下最大,在红光下最小(图1B),这与大部分研究结果一致^[30]。阴生植物叶绿素a/b比值较小,能更好的利用遮光条件下的漫射光(蓝紫光),阳生植物则相反。马铃薯属于阳生植物,红光下组培苗叶片叶绿素a/b比值最低,且显著($P < 0.05$)低于对照和其他处理,呈现出阴生

植物的特性,这说明红光在一定程度上造成组培苗的隐蔽反应。相反,蓝光下的组培苗叶绿素a/b比值最大,且显著($P < 0.05$)高于对照和R处理,表明蓝光是适合马铃薯组培苗生长的光质,这在一定程度上解释了蓝光处理的马铃薯组培苗壮苗指数最高。

光质可以影响植物对矿质元素的吸收和分配,从而影响植物的生长发育。前人研究表明红光和蓝

光均促进绞股蓝对Ca、Fe、Zn、Cu的吸收,抑制其对P和Mn的吸收^[20]。相反,本研究发现红光不利于K、Ca、P、Mg、Mn、Fe、Zn和Cu的吸收,其中对Ca、Fe、Zn和Cu吸收的抑制最为明显;蓝光降低Ca和Mn的吸收,促进P、Zn和Cu的吸收。有研究报道红光和蓝光均增强水培生菜对Fe、Mn、Cu元素的吸收能力,降低对K、Ca和Mg元素的吸收^[17]。红光促进蒲公英对Ca、Fe、Mn、Zn元素的吸收^[18]。这表明红、蓝单色光对不同植物矿质元素的吸收的影响不尽相同,这可能与植物本身的遗传特性有关。红蓝组合光谱提高Ca、Mg、Fe元素在生菜中的积累量^[31]。此外,有研究表明红蓝组合光谱通过增加蓝莓组培苗的光合作用,促进其生长,同时显著降低蓝莓组培苗各器官对矿质元素的积累量,这与蓝莓组培苗生长过快,而相关矿质元素未得到及时补给有关^[25];在红蓝光谱中增加绿光可显著增加蓝莓组培苗对矿质元素的积累量^[25]。与之相反,本研究表明RB处理增加马铃薯组培苗K、P、Mg、Mn、Fe和Zn的总积累量,但降低了Fe、Zn、Cu 3种微量元素的吸收与积累,这可能与马铃薯组培苗整个生长期大、中量矿质元素供应充足,确保RB处理的苗在快速生长阶段能够获得所需矿质元素的及时补给;而微量元素未得到及时供给,造成积累量减少。本研究中Mg和Mn在元素含量和积累分配上对不同光质存在相似的反应,这可能与这两种元素在植物体内存在一定的相互作用有关,因这两种元素均为二价态的微量元素,其在植物体内的转运体在某些情况下是可以共用的^[25]。

因植物种类、品种,生长环境等因素影响会造成植物体内矿质元素的分配存在差异^[32]。本研究结果表明光质改变了矿质元素在马铃薯组培苗各器官中的分配率。矿质元素在植物不同器官中的比例,可在一定程度上反映出相应元素在植物体内的分配情况及在不同器官和组织之间的迁移规律^[32]。RB处理降低了叶部K、Ca、P的分配比率,这可能与红蓝光组合光质促进马铃薯组培苗的生长,消耗了相关的大中量元素,造成其叶部分配率较低有关。B处理显著增加Fe、Mn、Zn、Cu四种微量元素在叶部的分配比率,这可能与蓝光光谱下叶绿素含量较高,光合性能较强^[33],相关酶活性较高有关,因为

这些微量元素是光合作用、糖代谢等基础生命活动中生物酶的核心组成元素。总之,蓝光和红蓝光组合通过增加健苗指数和P元素的积累,促进马铃薯组培苗健壮生长;红光一定程度上造成马铃薯组培苗的隐蔽反应并抑制Ca等矿质元素的积累,不利于组培苗生长。

[参 考 文 献]

- [1] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2015(3): 1-7.
- [2] 农业部. 农业部关于推进马铃薯产业开发的指导意见农农发[2016]1号[J]. 中华人民共和国农业部公报, 2016(3): 4-7.
- [3] 程学联, 吴志勇, 时家宁. 马铃薯脱毒种薯生产技术[J]. 现代农业科技, 2011(5): 143.
- [4] 安颖蔚, 孟令文, 张辉. 马铃薯脱毒及微型薯繁育技术体系的研究与应用[J]. 杂粮作物, 2006, 26(3): 197-199.
- [5] Tanaka M, Takamura T, Watanabe H, et al. *In vitro* growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs) [J]. Journal of Pomology and Horticultural Science, 1998, 73(1): 39-44.
- [6] Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, et al. Responses of strawberry plantlets cultured *in vitro* under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs) [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2003, 73(1): 43-52.
- [7] Kim S, Hahn E, Heo J, et al. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro* [J]. Scientia Horticulturae, 2004, 101(1-2): 143-151.
- [8] 戴艳娇, 王琼丽, 张欢, 等. 不同光谱的LEDs对蝴蝶兰组培苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(5): 227-231.
- [9] Pawłowska B, Żupnik M, Szweczyk-Taranek B, et al. Impact of LED light sources on morphogenesis and levels of photosynthetic pigments in *Gerbera jamesonii* grown *in vitro* [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2018, 59(1): 115-123.
- [10] Heo J, Lee C, Chakrabarty D, et al. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED) [J]. Plant Growth Regulation, 2002, 38(3): 225-230.
- [11] 高亭亭, 斯金平, 朱玉球, 等. 光质与种质对铁皮石斛种苗生长和有效成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2012, 37(2): 198-201.
- [12] 蒋要卫. 大花蕙兰、蝴蝶兰试管苗光合自养培养体系初步建

- 立 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [13] Aksenova N P, Konstantinova T N, Sergeeva L I, *et al.* Morphogenesis of potato plants *in vitro*. I. Effect of light quality and hormones [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1994, 13(3): 143–146.
- [14] 常宏, 王玉萍, 王蒂, 等. 光质对马铃薯试管薯形成的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1891–1895.
- [15] Ma X, Wang Y, Liu M, *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.
- [16] 姜丽丽, 孟佳美, 杨丹婷, 等. LED光源不同光质对马铃薯试管苗生长的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2018, 32(5): 266–271.
- [17] 陈晓丽, 郭文忠, 薛绪掌, 等. LED组合光谱对水培生菜矿物质吸收的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1394–1397.
- [18] 陈晓丽, Morewane, 薛绪掌, 等. ICP-AES分析光谱条件对中药蒲公英无机元素吸收的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(2): 519–522.
- [19] 许莉. 光质对叶用莴苣生理特性及品质的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [20] 李馨芸. 光质对绞股蓝生长、光合作用及次生代谢产物积累的影响 [D]. 吉首: 吉首大学, 2012.
- [21] 武维华. *植物生理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] 杨其长. LED在农业领域的应用现状与发展战略 [J]. *中国科技财富*, 2011(1): 112–117.
- [23] 刘文科, 杨其长. LED植物光质生物学与植物工厂发展 [J]. *科技导报*, 2014, 32(10): 25–28.
- [24] Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures [J]. *Physiologia Plantarum*, 1962, 15(3): 473–497.
- [25] 潘美娜. 不同光质对蓝莓幼苗矿质元素和光合作用的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [26] 柴慈江, 苏卫国, 张美静. 接种茎段的部位与长度对无核枣试管苗生长的影响 [J]. *山西果树*, 2008(4): 5–6.
- [27] 朱彦涛. 油菜扩繁中茎段长度对腋芽生长发育的影响 [J]. *西北农业学报*, 2001, 10(3): 108–109.
- [28] 杨娟, 袁林颖, 邬秀宏. LED光质对植物组培苗生长特性影响及在茶树组培上的应用展望 [J]. *南方农业*, 2017, 11(22): 29–32.
- [29] 唐道彬, 张晓勇, 王季春, 等. 不同光质对水培脱毒马铃薯光合与结薯特性的影响 [J]. *园艺学报*, 2017, 44(4): 691–702.
- [30] Chen L L, Yang Y D, Jiang Y, *et al.* RNA-Seq analysis reveals differential responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets cultured *in vitro* to red, blue, green and white light-emitting diodes (LEDs) [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2019, 38(4): 1412–1427.
- [31] 伍洁. 光质比对生菜生长、品质及养分吸收的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [32] 任艳辉, 任学军, 彭飞, 等. 春小麦不同生育期各器官主要矿质元素吸收和分配的动态变化 [J]. *河北科技师范学院学报*, 2016, 30(4): 38–45.
- [33] 陈丽丽, 王浩瑛, 宫晓晨, 等. 马铃薯组培苗时期不同LED光源处理对温室移栽后植株生长和微型薯结薯的影响 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(6): 11–18.