

光氮互作对芹菜幼苗生长及生理特性的影响

苗妍秀^{1,2} 蔡润¹ 高星星¹ 李斌^{1,2} 侯雷平^{1,2*}

(1. 山西农业大学 园艺学院(部), 山西 晋中 030801;

2. 山西省设施蔬菜提质增效协同创新中心, 山西 晋中 030801)

摘要 光质和施氮量是影响芹菜生长发育的关键因素,适宜的光氮组合能有效提升芹菜幼苗质量。为优化芹菜工厂化育苗,本试验设置2种光质(白光,W;蓝光,B)和2种施氮量(8 mmol/L KNO₃,高氮,H;4 mmol/L KNO₃,低氮,L),以WH为对照,研究光氮互作对芹菜幼苗生长、生理代谢和元素积累的影响。结果表明:与WH相比,WL和BH处理的芹菜全株干重分别显著减少43.18%和55.07%,WL处理的叶片和叶柄中硝酸盐、可溶性蛋白质和总游离氨基酸质量分数均显著降低,BH处理的叶片和叶柄中硝酸盐、可溶性蛋白质和矿质元素质量分数显著增加,而叶片中可溶性糖、丙氨酸族和丝氨酸族氨基酸质量分数均显著降低。然而BL处理的芹菜全株干重比WH显著增加32.18%,叶片可溶性蛋白质、叶柄组氨酸(His)和脯氨酸(Pro)质量分数均显著增加。利用隶属函数分析对芹菜幼苗生长发育进行综合评价发现,BL处理表现最优。综上所述,蓝光和低氮组合能促进芹菜干物质积累,提高可溶性蛋白质和游离氨基酸质量分数,进而促进芹菜幼苗生长发育。

关键词 光质; 施氮量; 芹菜; 游离氨基酸; 元素

中图分类号 S626; TS255

文章编号 1007-4333(2020)10-0077-12

文献标志码 A

Effects of light-nitrogen interaction on the growth and physiological characteristics of celery seedlings

MIAO Yanxiu^{1,2}, CAI Run¹, GAO Xingxing¹, LI Bin^{1,2}, HOU Leiping^{1,2*}

(1. College of Horticulture (Department), Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. Collaborative Innovation Center of Quality and Profit Improvement for the Protected Vegetables of Shanxi Province, Jinzhong 030801, China)

Abstract Light quality and nitrogen content are both key factors in celery growth and development, appropriate combination of light and nitrogen promotes celery seedling quality. In order to optimize celery seedlings culture, celery seedlings were exposed to two kinds of light quality (White light, W; Blue light, B) and two kinds of nitrogen contents (8 mmol/L KNO₃, high nitrogen, H; 4 mmol/L KNO₃, low nitrogen, L), WH was used as control. The effects of light-nitrogen interaction on the celery growth, physiological metabolism and nutrient accumulation of celery seedlings were investigated. The results showed that: Compared with WH, WL and BH treatments significantly decreased whole plant dry weight by 43.18% and 55.07%, respectively. WL treatment also significantly reduced nitrate, soluble protein and total free amino acid contents in celery leave and petiole. BH treatment significantly increased nitrate, soluble protein and nutrient contents in leaves and petioles, whereas the treatment significantly decreased the contents of soluble sugars, amino acids of alanine group and serine group in leaves. BL treatment significantly increased whole plant dry weight by 32.18%, enhanced nitrate and soluble protein contents in leave, and histidine (His) and proline (Pro) contents in petiole when compared with WH. The results of comprehensive evaluation of celery growth and development

收稿日期: 2020-05-28

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目子课题(201703D211001-04-03); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0382); 山西农业大学博士科研启动项目(2016YJ08)

第一作者: 苗妍秀, 讲师, 博士, 主要从事设施环境调控与园艺植物栽培生理研究, E-mail: miaoyanxiu@163.com

通讯作者: 侯雷平, 教授, 主要从事设施环境调控与园艺植物栽培生理研究, E-mail: sxndhlp@126.com

with membership function analysis indicated that BL treatment was the best among all treatments. In conclusion, the combination of blue light and low nitrogen content increased plant dry weight, soluble protein and free amino acid contents, and finally promoted celery seedling growth and development.

Keywords light quality; nitrogen content; celery; free amino acid; nutrient

光质是植物生长发育的重要光环境因素,对植株形态建成和生理代谢起到重要的调节作用^[1-3]。蓝光是植物吸收可见光的主要波段,且蓝光光源已被成功应用于植物栽培。蓝光不仅影响植株生长发育,还参与调控植物生理代谢过程。通过对芹菜、生菜和番茄等大量园艺作物的研究发现,与白光相比,蓝光可显著提高植物的总氮、可溶性蛋白质质量分数、硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性^[4-6],蓝光还促进营养元素积累。通过对青花菜、叶用莴苣、番茄等蔬菜的大量研究表明,蓝光能显著增加大量元素 N、Ca、P、K、Mg 和 S,以及微量元素 Cu、Fe、B、Mn、Mo 和 Zn 的积累^[7-8]。然而,因为目前工厂化育苗过程中光环境调控手段受限,易导致幼苗质量参差不齐,不利于蔬菜高效优质生产,因此合理使用光调控技术对有效提升蔬菜幼苗质量具有重要意义。

氮是植物生长需求量最大的营养元素,是主要代谢产物蛋白质、游离氨基酸和糖类等的组成部分,适量施用氮肥可提高植株全氮、可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖质量分数^[9-10]。已有研究表明,日本山崎营养液配方中 8 mmol/L 氮浓度比 4 mmol/L 氮浓度更有利于提升芹菜的元素利用效率、产量和品质^[11]。然而,过量施氮则抑制植株主要糖类物质的合成,导致代谢紊乱并抑制生长。传统设施农业中常常出现氮肥施用不当、抑制植株生长发育的现象,因此如何合理施用氮肥来促进植株生长发育已成为亟待解决的问题^[12-13]。光质和氮肥都是影响植株生长发育、生理代谢及营养元素积累的重要环境因素,以往的研究往往集中于单一光质或氮肥对植株生长发育的影响,关于光氮互作对植株生长发育和生理代谢的影响及综合评价的研究较少^[10,14-15]。

芹菜是一种世界范围广泛栽培的具有较高营养价值的绿叶蔬菜,富含蛋白质、碳水化合物、膳食纤维及钙、磷、钠和铁等 20 多种营养元素。芹菜育苗是其栽培的重要环节,对芹菜高产优质生产具有重要意义。本研究拟以芹菜幼苗为试材,分析光氮互作对芹菜幼苗生长、生理代谢及营养元素积累的影响,旨在为培育芹菜壮苗提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用“文图拉”西芹为试验材料,将芹菜种子浸泡 24 h 后,将其置于 16 °C 的光照培养箱中进行催芽,待种子出芽后,将其播种在装有基质(草炭、蛭石、珍珠岩体积比为 3 : 1 : 1)的营养钵(直径 12 cm,高 12 cm,一株幼苗一盆)内,置于人工气候室进行培养,昼/夜温度为 28 °C/18 °C,光照 12 h/d,光强 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,相对湿度为 60%~70%,使用 1 倍浓度的日本园式配方营养液进行灌溉。

1.2 试验设计

芹菜幼苗的第 6 片真叶完全展开时,挑选长势一致的幼苗开始处理,4 个处理分别是白光和高施氮量(WH,对照),白光和低施氮量(WL)处理,蓝光和高施氮量(BH)处理及蓝光和低施氮量(BL)处理。其中,白光和蓝光使用 LED 灯管(杭州冬风环境科技有限公司)提供,白光的波长范围为 400~720 nm,蓝光的波长范围为 400~500 nm,波峰为 440 nm,光谱分布采用 StarLine AvaSpec-2048 光纤光谱仪(荷兰爱万提斯科技公司)进行测定,具体光谱分布见图 1。高氮和低氮处理中 N 分别为 8 mmol/L 和 4 mmol/L KNO_3 ,低氮处理中使用 4 mmol/L KCl 补足 K^+ ,营养液根据日本园式营养液进行部分调整,其他成分均未改变,依次为 4 mmol/L CaCl_2 , 1.33 mmol/L $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 2 mmol/L MgSO_4 , 50.99 $\mu\text{mol}/\text{L}$ EDTA-2NaFe, 46.26 $\mu\text{mol}/\text{L}$ H_3BO_3 , 9.55 $\mu\text{mol}/\text{L}$ MnSO_4 , 0.77 $\mu\text{mol}/\text{L}$ ZnSO_4 , 0.32 $\mu\text{mol}/\text{L}$ CuSO_4 , 0.017 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ ^[16]。处理第 9 天进行取样,所有试验进行 3 次重复,每次重复 18 棵芹菜幼苗。

1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 芹菜幼苗生长指标测定

使用扫描仪(日本 EPSON Perfection V800 photo)对芹菜幼苗叶片进行图像扫描,使用 ImageJ 软件分析叶面积。随后将芹菜植株放入烘箱,105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干 48 h,记录叶片、叶柄和根的干重。每个处理 3 次重复。

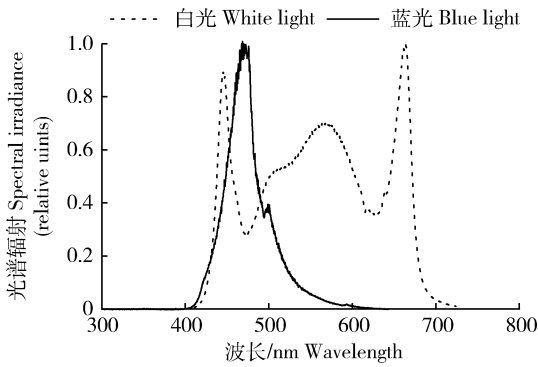


图 1 LED 灯的相对光谱分布图

Fig. 1 Relative spectral distribution of white light and blue light

1.3.2 芹菜幼苗生理指标测定

测定芹菜幼苗叶片中叶绿素、叶片和叶柄中可溶性蛋白质、可溶性糖、硝酸盐和游离氨基酸质量分数。叶绿素使用 95% 乙醇提取法测定,可溶性蛋白质使用考马斯亮蓝法测定,可溶性糖使用蒽酮比色法测定,硝酸盐使用水杨酸比色法测定^[17]。称取 0.1 g 干样,使用 2% 磺基水杨酸方法提取并利用 HITACHI-L-8800 氨基酸分析仪(日本日立)测定芹菜叶片和叶柄中游离氨基酸^[18]。每个处理 4 次重复。

1.3.3 芹菜幼苗矿质元素测定

充分研磨芹菜幼苗叶片和叶柄干样(0.5 mm),并称取 0.2 g 样品,使用浓 H_2SO_4 和 H_2O_2 混合液消煮^[8]。使用蒸馏法测定 N 元素,使用 AA-6200 原子吸收分光光度计测定 K、Ca、Na、Mg、Fe 和 Zn 元素。每个处理 4 次重复。

1.4 数据分析

使用 SPSS 20.0 (IBM 公司,美国) One-way ANOVA 对数据进行单因素方差分析,利用 Two-way ANOVA 双因素分析比较变异来源(光质, L; 施氮量, N; 光质和施氮量的互作效应, $L \times N$), Duncan 检验法对显著性差异($P < 0.05$)进行多重比较。采用 Pearson 相关性分析对芹菜品质指标间的相关性进行比较,使用隶属函数分析方法对芹菜品质进行综合评价^[19]。

2 结果与分析

2.1 光氮互作对芹菜幼苗生长的影响

光质和施氮量在芹菜幼苗生长和叶片色素指标上存在显著的互作效应,并且光质和施氮量各自对

全株干重、叶柄干重、根干重和色素质量分数均有显著影响(表 1)。与 WH 相比, WL 处理和 BH 处理的芹菜幼苗全株干重、叶片干重、根干重和叶面积均显著减少, BH 处理的芹菜幼苗叶片中叶绿素 a 和类胡萝卜素质量分数均显著增加,而 BL 处理的全株干重和叶柄干重分别显著增加 32.18% 和 141.21%。

2.2 光氮互作对芹菜幼苗生理代谢的影响

光质和施氮量仅在芹菜幼苗叶片硝酸盐上存在极显著的互作效应,而光质和施氮量各自对硝酸盐、可溶性蛋白质和可溶性糖具有显著影响(图 2)。与 WH 相比, WL 处理的芹菜幼苗叶片和叶柄中的硝酸盐和可溶性蛋白质质量分数均显著减少,但叶片和叶柄中的可溶性糖质量分数显著增加, BH 处理的叶片和叶柄中硝酸盐和可溶性蛋白质质量分数均显著增加,但叶片中的可溶性糖质量分数显著减少, BL 处理的叶片硝酸盐和可溶性蛋白质质量分数显著增加 53.68% 和 128.65%。

整体看,芹菜幼苗的游离氨基酸在叶片和叶柄中均有分布,且叶片游离氨基酸约是叶柄的 2~4 倍。与 WH 相比, WL 处理和 BH 处理的芹菜幼苗叶片和叶柄中大部分游离氨基酸(如 Gly、Cys、Lys、Arg、Ser、His、Tyr、Ile、Phe、Val 和 Thr)质量分数显著降低, BL 处理的叶片中大部分游离氨基酸(Gly、Leu、Ala、Asp、His、Tyr、Ile、Glu、Phe、Val、Lys 和 Pro)质量分数都不同程度上升,其中 His 和 Pro 质量分数显著上升(图 3)。

根据氨基酸在植物体内合成途径不同,将以上 17 种游离氨基酸归为 6 类氨基酸(表 2)。双因素分析结果发现,光质和施氮量在这 6 类氨基酸中均存在显著的互作效应,光质对总氨基酸、谷氨酸族氨基酸、芳香族氨基酸和组氨酸族氨基酸有显著影响,而施氮量则没有显著影响。与 WH 相比, WL 处理的芹菜幼苗叶片和叶柄中总游离氨基酸、天冬氨酸族氨基酸、丙氨酸族氨基酸、芳香族氨基酸、丝氨酸族氨基酸和组氨酸族氨基酸质量分数显著减少, BH 处理的叶片和叶柄中丙氨酸族氨基酸和丝氨酸族氨基酸质量分数显著减少。

2.3 光氮互作对芹菜幼苗元素积累的影响

与 CK 相比, BH 处理的芹菜叶片 N 和 Na 显著增加且 Zn 显著降低,叶柄中 K 和 Na 显著增加,而 WH 和 BL 处理的元素积累差异不显著(图 4)。

表 1 光氮互作对芹菜幼苗生长和叶片色素的影响

Table 1 Effects of light-nitrogen interaction on growth and leaf pigments in celery seedlings

处理 Treatment	全株干重/g Whole plant dry weight	叶片干重/g Leaf dry weight	叶柄干重/g Petiole dry weight	根干重/g Root dry weight	叶面积/cm ² Leaf area	叶绿素 a		叶绿素 b		类胡萝卜素	
						质量分数/ (mg/g)	Chlorophyll a mass fraction	质量分数/ (mg/g)	Chlorophyll b mass fraction	质量分数/ (mg/g)	Carotenoid mass fraction
WH	1.21±0.07 b	0.65±0.01 a	0.23±0.05 b	0.33±0.03 a	360.94±46.64 a	0.68±0.07 b	0.21±0.05 a	0.12±0.02 b			
WL	0.69±0.03 c	0.32±0.03 b	0.17±0.02 b	0.19±0.04 b	228.18±16.75 b	0.61±0.02 b	0.15±0.01 a	0.15±0.01 ab			
BH	0.54±0.06 c	0.20±0.06 b	0.13±0.04 b	0.21±0.01 b	216.71±42.31 b	0.83±0.03 a	0.23±0.01 a	0.18±0.01 a			
BL	1.60±0.17 a	0.84±0.13 a	0.56±0.11 a	0.20±0.02 b	407.09±28.33 a	0.65±0.02 b	0.19±0.03 a	0.15±0.01 ab			
L	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*		*
N	*	ns	*	*	ns	*	ns	ns	ns		ns
L×N	***	***	**	ns	**	ns	ns	ns	ns		*

注:同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。L,光质;N,施氮量;L×N,光质和施氮量互作; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; ns,差异不显著,下同。Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$); L, light quality; N, nitrogen content; L×N, light-nitrogen interaction; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$; ns indicates no significant difference. The same as below.

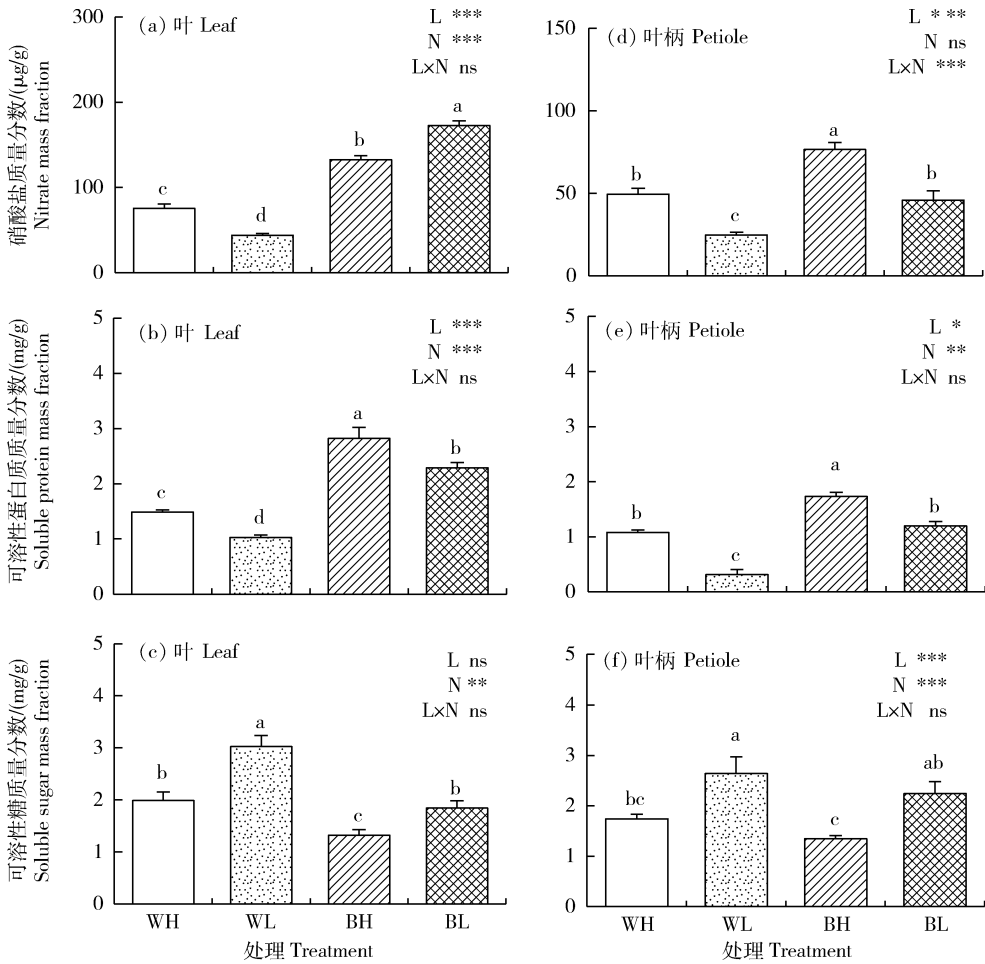


图 2 光氮互作对芹菜幼苗生理代谢的影响

Fig. 2 Effects of light-nitrogen interaction on physiological metabolism in celery seedlings

2.4 芹菜幼苗生理特性的相关性分析

针对光氮互作下芹菜幼苗叶片生理特性进行相关性分析发现, N 和可溶性蛋白质与类胡萝卜素呈显著正相关 ($P < 0.05$), 硝酸盐和氨基酸 (His、Tyr、Val 和 Pro) 与可溶性蛋白质呈显著正相关 ($P < 0.05$), N 和硝酸盐与可溶性糖呈极显著负相关 ($P < 0.01$) (图 5)。

2.5 芹菜幼苗生长发育综合评价

使用隶属函数分析对芹菜生长发育进行综合评价, 结果表明 BL 处理的芹菜生长发育状态最优, 其次为 WH 和 BH 处理, 最后为 WL 处理 (表 3)。

3 讨论

光质和施氮量影响芹菜幼苗形态建成和叶片色素质量分数。本试验中, 单一因素即蓝光或低施氮量 (BH 处理和 WL 处理) 均显著降低芹菜全株干重和叶面积 (表 1), 这与国内外学者的研究结果基本

保持一致。通过对黄瓜、番茄、菊花、矮牵牛等园艺作物的研究发现, 与白光相比, 蓝光照射下植株叶片的光合速率和碳水化合物降低减少, 导致干物质积累降低^[20-22]。大量研究表明施氮量减少, 会降低植株氮代谢, 减缓蛋白质合成和植株干重^[23-24]。然而, 有趣的是, 本试验中蓝光和低氮组合 (BL 处理) 显著提升芹菜全株干重和叶柄干重, 这主要是由于光质和施氮量存在极显著互作效应, 增强氮代谢, 促进硝酸盐、大部分游离氨基酸和可溶性蛋白质大量积累 (图 2 和图 3)。碳氮代谢互为基础、互相促进, 良好的氮代谢供给碳代谢所需的酶和色素, 进而促进碳代谢进程和碳水化合物积累^[25]。此外, 本试验中 BH 处理显著提高叶绿素 a 质量分数, 这主要是由于蓝光照射下, 蓝光受体隐花色素 (CRY) 和向光色素 (PHOT1) 诱导叶绿素合酶基因 *CLH2* 表达, 促进叶绿素合成, 同时, 蓝光还有利于叶绿体发育和叶绿素形成^[26-27]。

表2 光氮互作对芹菜幼苗叶片和茎中六类氨基酸质量分数的影响
Table 2 Effects of light-nitrogen interaction on mass fraction of six group amino acids in leave and stem of celery seedlings

部位 Section	处理 Treatment	μg/g						
		总游离 氨基酸 Total free amino acid	谷氨酸族 氨基酸 Glutamate group amino acid	天冬氨酸 族氨基酸 Aspartic acid group amino acid	丙氨酸族 氨基酸 Alanine group amino acid	芳香族 氨基酸 Aromatic group amino acid	丝氨酸族 氨基酸 Serine group amino acid	组氨酸族 氨基酸 Histidine group amino acid
叶 Leaf	WH	8 184.42±1 036.59 ab	3 225.49±607.30 ab	1 558.62±250.52 ab	1 413.08±168.82 a	1 298.97±108.64 ab	415.30±48.67 a	272.95±21.48 ab
	WL	3 691.59±598.00 c	1 553.96±371.80 b	753.25±87.30 c	599.33±141.39 b	454.75±88.29 c	243.33±47.16 b	86.97±17.65 c
	BH	5 981.39±916.25 bc	2 874.5±425.58 ab	1 054.48±168.65 bc	778.06±167.23 b	883.19±169.82 bc	206.39±32.19 b	184.78±34.56 b
	BL	10 395.62±1 304.72 a	4 463.55±780.27 a	1 796.73±158.50 a	1 750.45±179.15 a	1 647.06±188.49 a	387.34±35.67 a	350.51±36.94 a
叶柄 Peti- ole	L	*	*	ns	ns	*	ns	*
	N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	L×N	***	*	***	***	***	**	***
叶柄 Peti- ole	WH	2 778.62±341.75 ab	886.20±182.35 b	803.62±151.58 a	456.81±62.77 a	227.97±51.81 ab	359.14±44.39 ab	44.89±6.13 b
	WL	1 161.77±218.59 c	363.01±67.35 b	335.16±61.80 b	187.68±39.50 b	97.59±19.19 c	161.82±30.61 b	16.51±3.73 c
	BH	1 963.89±447.46 bc	959.75±262.70 b	449.71±89.61 ab	187.32±32.02 b	150.56±26.71 bc	181.68±55.35 b	34.88±8.11 bc
	BL	3 684.96±498.89 a	1 690.55±218.75 a	737.20±120.84 a	402.79±59.27 a	290.27±17.65 a	489.50±122.01 a	74.65±6.76 a
叶柄 Peti- ole	L	*	**	ns	ns	ns	ns	**
	N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	L×N	**	**	**	***	**	**	***

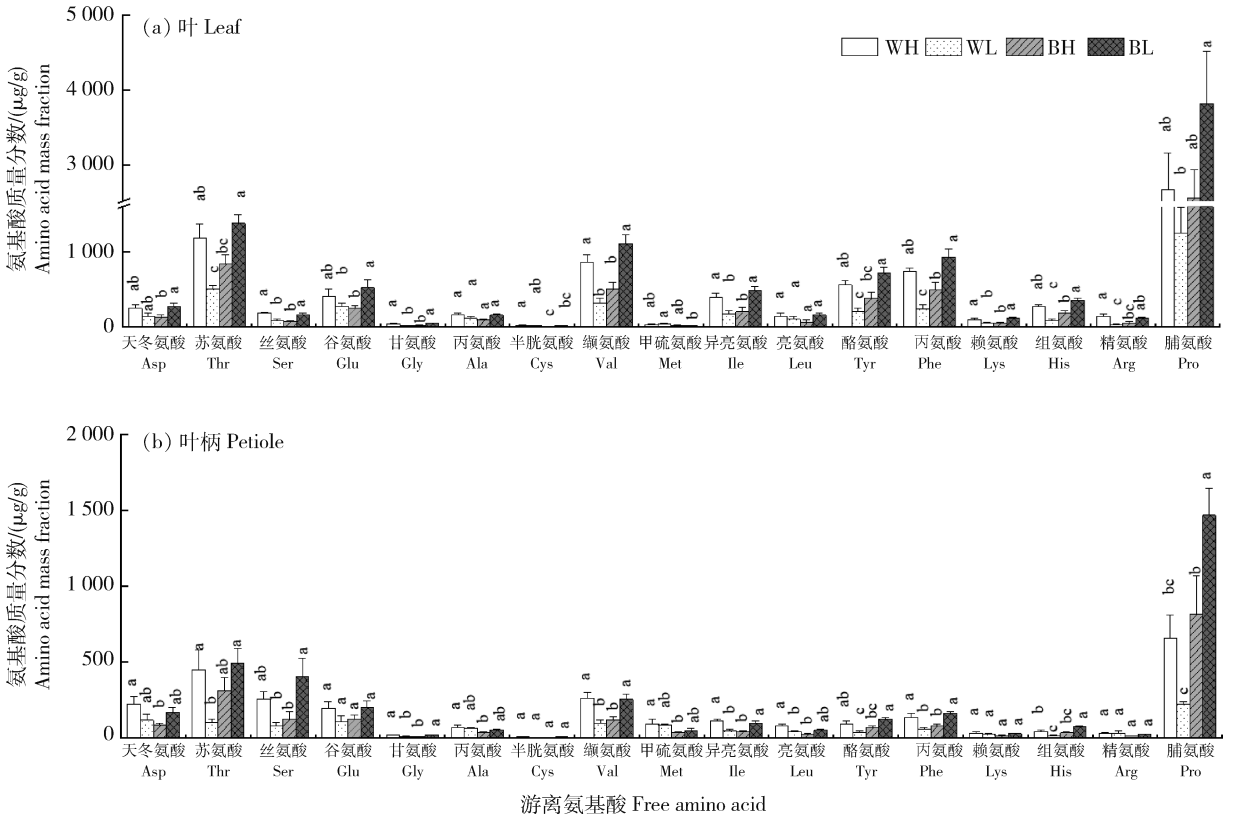


图 3 光氮互作对芹菜幼苗叶片和叶柄中游离氨基酸的影响

Fig. 3 Effects of light-nitrogen interaction on free amino acid of leaf and petiole in celery seedlings

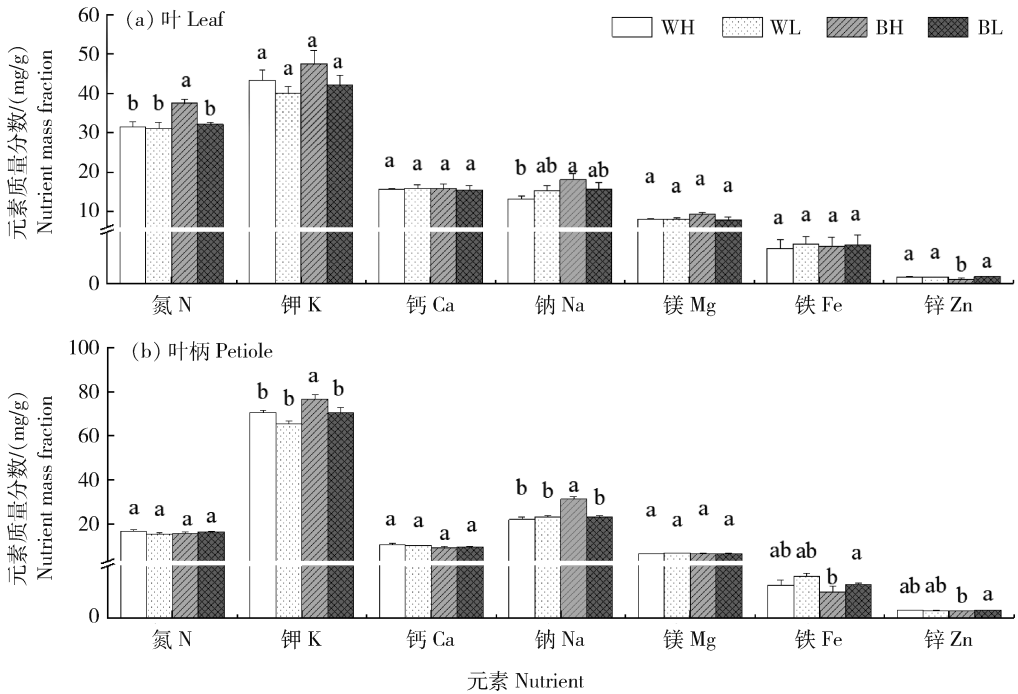


图 4 光氮互作对芹菜幼苗叶片和叶柄中元素积累的影响

Fig. 4 Effects of light-nitrogen interaction on nutrient accumulation in leaf and petiole of celery seedlings

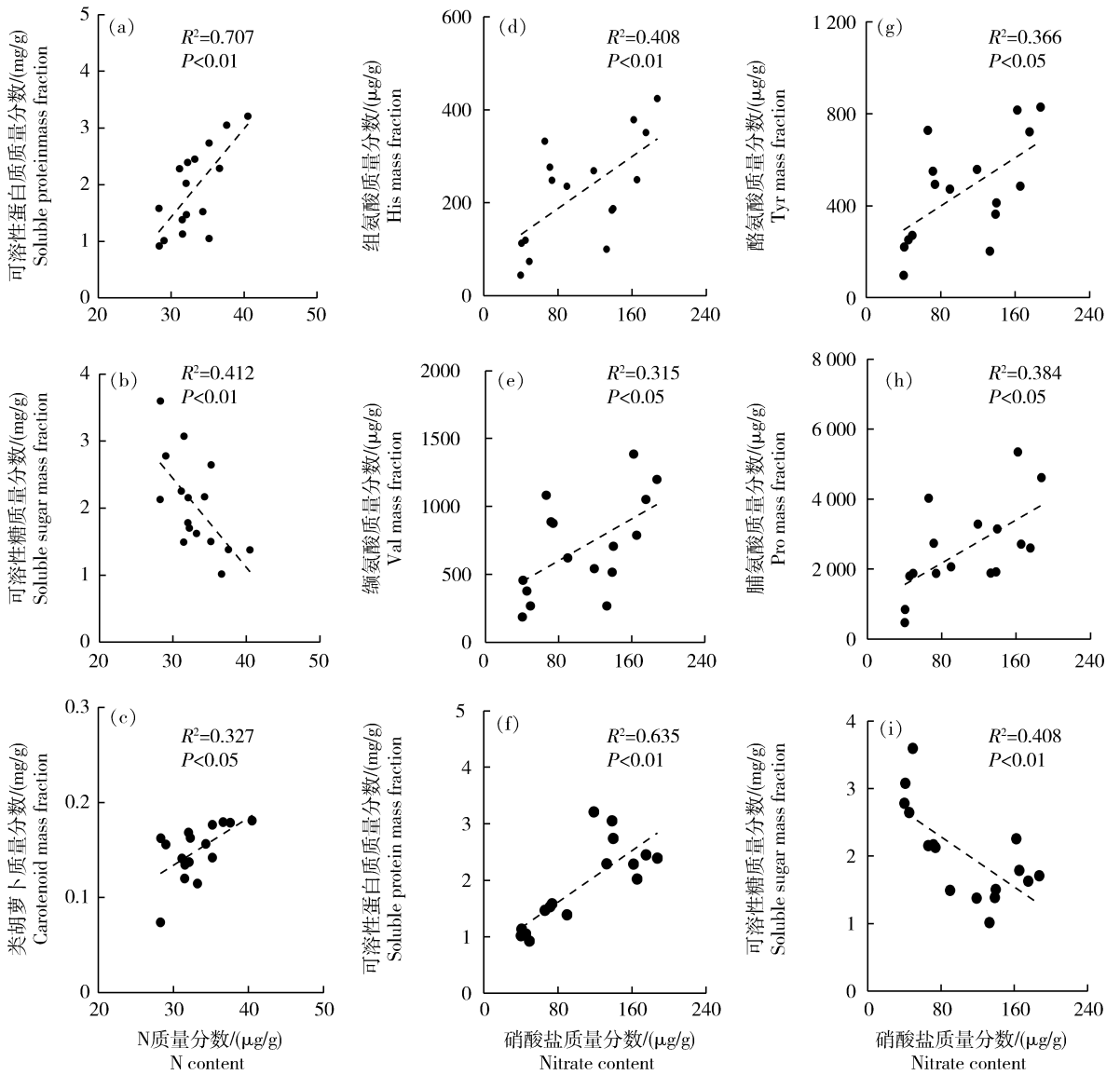


图5 光氮交互下芹菜幼苗叶片品质的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of quality under light-nitrogen interaction in leaves of celery seedlings

表3 光氮交互下芹菜幼苗生长发育隶属函数综合评价系数表

Table 3 Membership function analysis for celery seedlings growth and development under light-nitrogen interaction

处理 Treat- ment	全株 Whole plant dry weight	叶片 Leaf					叶柄 Petiole					综合评 价值 Compre- hensive evaluation value	排名 Rank
		可溶性 蛋白质 Soluble protein	可溶 性糖 Soluble sugar	总氨 基酸 Total amino acid	N	Ca	可溶性 蛋白质 Soluble protein	可溶 性糖 Soluble sugar	总氨 基酸 Total amino acid	N	Ca		
WH	0.66	0.55	0.63	0.80	0.45	0.79	0.72	0.58	0.78	0.67	1.00	0.72	2
WL	0.40	0.40	1.00	0.40	0.40	0.99	0.40	1.00	0.40	1.00	0.40	0.59	4
BH	0.56	1.00	0.40	0.60	1.00	1.00	1.00	0.40	0.59	0.40	0.56	0.69	3
BL	1.00	0.82	0.58	1.00	0.51	0.40	0.77	0.82	1.00	0.70	0.80	0.74	1

光质和施氮量影响芹菜幼苗的生理代谢。硝酸盐是植物吸收外界氮素的主要形式,硝酸盐被植物吸收后,经过酶的催化作用,转化为蛋白质^[6,28]。本试验中,BH 处理和 BL 处理的芹菜硝酸盐质量分数和可溶性蛋白质的质量分数明显高于 CK,说明蓝光促进氮代谢(图 2)。蓝光促进植株总氮升高,提高氮代谢关键酶(NR、GS 和 GOGAT)活性及其基因(NR、NiR、GS2、FdGOGAT 和 LEAS1)的相对表达量,促进植株氮代谢和蛋白质合成^[6]。同时,蓝光还抑制蛋白质降解,促使蛋白质质量分数保持较高水平^[29]。本试验中,WL 处理中硝酸盐和可溶性蛋白质质量分数显著降低,说明低施氮量导致芹菜氮代谢水平下降,这与前人在水稻和生菜中的研究结果基本一致^[10,30]。而氮代谢和碳代谢紧密相关,两者共同竞争能量和还原力。低施氮量下植株氮代谢减慢,能量和还原力充足,促使碳代谢进程且积累大量碳水化合物,这也证实光氮互作下芹菜硝酸盐和可溶性糖呈极显著负相关(图 2 和图 5)。

游离氨基酸是植物重要的生命物质,参与植物的生长发育,并且能灵敏的响应外界环境变化^[31-32]。在本试验 4 个处理中,WL 处理的总氨基酸和六类氨基酸的质量分数均为最低,说明低施氮量导致芹菜游离氨基酸质量分数降低(表 2)。这与前人在茶树上的研究结果基本一致^[33]。外界氮素水平调控氮代谢关键酶活性,施氮量降低,Gs 和 GOGAT 活性显著降低,氨基酸合成速率减缓^[23]。本试验中,谷氨酸族氨基酸占总氨基酸质量分数 31%~48%,包括谷氨酸(Glu)、精氨酸(Arg)和脯氨酸(Pro)(图 3 和表 2)。其中 Glu 是植物合成有机氮化合物的第一步,是合成其他氨基酸的主要氮源,在一定程度上决定了大部分氨基酸的质量分数高低^[34]。Pro 占总氨基酸质量分数 23%~43%,占谷氨酸族氨基酸质量分数 61%~89%,是芹菜叶片和叶柄中质量分数最多的氨基酸。在 4 个处理中,BL 处理的芹菜叶片和叶柄中 Pro 质量分数最高。这说明芹菜叶片中硝酸盐大量积累,促进 Pro 大量合成,有助于调节细胞渗透势并维持蛋白质结构。同时,Pro 与糖类发生美拉德反应,产生香气,会提升风味品质^[35]。本试验中,天冬氨酸族氨基酸约占总氨基酸质量分数 18%~29%,包括天冬氨酸(Asp)、苏氨酸(Thr)、甲硫氨酸(Met)和赖氨酸(Lys)。Glu 在天冬氨酸转氨酶的作用下形成 Asp,Asp 在一系列酶的催化作用下形成 Lys、Met 和 Thr^[36]。与 WH 相比,WL

处理中芹菜叶片和叶柄中硝酸盐浓度显著降低,氨基酸合成原料不足导致 Glu 和 Asp 质量分数下降,同时也影响天冬氨酸族氨基酸的合成,即 Lys 和 Thr 质量分数显著下降。丙氨酸族氨基酸约占总氨基酸质量分数 10%~17%,包括缬氨酸(Val)、亮氨酸(Leu)和异亮氨酸(Ile),他们都是由 Thr 转化形成,芹菜叶片和叶柄中丙氨酸族氨基酸与 Thr 变化趋势基本一致。以上结果也证明,植株体内硝酸盐质量分数在很大程度上决定氨基酸质量分数,也解释了氨基酸(His、Tyr、Val 和 Pro)和硝酸盐呈显著正相关的原因(图 5)。

大量元素和微量元素积极参与植株的形态建成、初级和次级生理代谢及信号传导过程。本试验中 BH 处理中芹菜叶片 N 和 Na、叶柄中 K 和 Na 均显著高于 CK,说明蓝光促进元素积累(图 4)。这与前人在番茄^[37]和黄瓜^[8]上的研究结果基本一致。蓝光有效促进 N 吸收,并提高氮代谢关键酶活性,促进无机氮向游离氨基酸和可溶性蛋白等有机氮化合物的转化(图 2 和表 2)。芹菜叶片中 K 和 Na 同时积累,这是因为两者主要通过 K⁺ 吸收蛋白通道 AKT1 和 HAK5 被植株持续吸收并运输到叶片,从而促进 K⁺/Na⁺ 平衡和维持细胞结构完整性^[38]。

4 结 论

光质和施氮量对芹菜干物质积累、生理代谢和元素积累存在显著的互作效应。与对照相比,白光和低氮组合中芹菜全株干重、硝酸盐、可溶性蛋白质和游离氨基酸质量分数均显著降低,蓝光和高氮组合中全株干重、可溶性糖和游离氨基酸质量分数显著减少,而硝酸盐、叶片 N、Na 与叶柄中 K、Na 显著增加,蓝光和低氮组合中芹菜全株干重、游离氨基酸和可溶性蛋白质质量分数均显著上升。因此,蓝光和低氮组合条件下芹菜幼苗质量最优。

参考文献 References

- [1] Naznin M, Lefsrud M, Gravel V, Azad M. Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content, and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper in a controlled environment [J]. *Plants*, 2019, 8(4): 93
- [2] 苗妍秀,陈青云,曲梅,高丽红,侯雷平,李斌. 黄瓜红蓝光育苗对其定植后生长、光合特性以及产量的影响[J]. 园艺学

- 报, 2019, 46(7): 1388-1398
- Miao Y X, Chen Q Y, Qu M, Gao L H, Hou L P, Li B. Effects of red and blue lights on growth, photosynthetic characteristics and yield of cucumber plants [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(7): 1388-1398 (in Chinese)
- [3] 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, 51(8): 1217-1234
- Xu D Q, Gao W, Ruan J. Effects of light quality on plant growth and development [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1217-1234 (in Chinese)
- [4] 宁宇, 邓惠惠, 李清明, 米庆华, 韩宾, 艾希珍. 红蓝光质对芹菜碳氮代谢及其关键酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(1): 112-118
- Ning Y, Deng H H, Li Q M, Mi Q H, Han B, Ai X Z. Effects of red and blue light quality on the metabolites and key enzyme activities of carbon-nitrogen metabolism in celery[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(1): 112-118 (in Chinese)
- [5] Wang J, Lu W, Tong Y X, Yang Q C. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 250
- [6] 王丽伟, 李岩, 辛国凤, 魏珉, 杨其长, 米庆华. 红蓝光质对番茄幼苗氮水平和代谢关键酶及基因表达的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(4): 768-776
- Wang L W, Li Y, Xin G F, Wei M, Yang Q C, Mi Q H. Effects of red and blue light quality on nitrogen levels, activities and gene expression of key enzymes involved in nitrogen metabolism from leaves of tomato seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(4): 768-776 (in Chinese)
- [7] Kopsell D A, Sams C E. Increases in shoot tissue pigments, glucosinolates, and mineral elements in sprouting broccoli after exposure to short-duration blue light from light emitting diodes [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2013, 138(1): 31-37
- [8] Miao Y X, Chen Q Y, Qu M, Gao L H, Hou L P. Blue light alleviates 'red light syndrome' by regulating chloroplast ultrastructure, photosynthetic traits and nutrient accumulation in cucumber plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108680
- [9] Crous K Y, O'Sullivan O S, Zaragoza-Castells J, Bloomfield K J, Negrini A C A, Meir P, Turnbull M H, Griffin K L, Atkin O K. Nitrogen and phosphorus availabilities interact to modulate leaf trait scaling relationships across six plant functional types in a controlled-environment study[J]. *New Phytologist*, 2017, 215(3): 992-1008
- [10] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 龚金龙, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 12-22
- Hu Y J, Zhu D W, Xing Z P, Gong J L, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Modifying nitrogen fertilization ratio to increase the yield and nitrogen uptake of super japonica rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1): 12-22 (in Chinese)
- [11] 乔源, 胡笑涛, 王瑞, 张栋. 氮素对水培芹菜产量、品质及元素利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 16-20
- Qiao Y, Hu X T, Wang R, Zhang D. Analysis on yield, quality and nutrients utilization efficiency of hydroponic celery influenced by nitrogen levels[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8): 16-20 (in Chinese)
- [12] 崔瑾, 徐志刚, 邸秀茹. LED在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249-253
- Cui J, Xu Z G, Di X R. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8): 249-253 (in Chinese)
- [13] Liang X S, Gao Y N, Zhang X Y, Tian Y Q, Zhang Z X, Gao L H. Effect of optimal daily fertigation on migration of water and salt in soil, root growth and fruit yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in solar-greenhouse [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e86975
- [14] 李岩, 王丽伟, 文莲莲, 魏珉, 史庆华, 杨凤娟, 王秀峰. 红蓝光质对转色期间番茄果实主要品质的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(12): 2372-2382
- Li Y, Wang L W, Wen L L, Wei M, Shi Q H, Yang F J, and Wang X F. Effects of red and blue light qualities on main fruit quality of tomato during color-turning period [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(12): 2372-2382 (in Chinese)
- [15] 高波, 杨振超, 李万青, 王晓旭, 丁娟娟, 耿凤展, 蔡华, 王达菲. 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
- Gao B, Yang Z C, Li W Q, Wang X X, Ding J J, Geng F Z, Cai H, Wan D F. Effects of three different red and blue LED light ratio on growth and quality of celery [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(12): 125-132 (in Chinese)
- [16] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
- Guo S R. *Soilless Culture* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011 (in Chinese)

- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [18] Li Y, Qi H Y, Jin Y Z, Tian X B, Sui L L, Qiu Y. Role of ethylene in biosynthetic pathway of related-aroma volatiles derived from amino acids in oriental sweet melons (*Cucumis melo* var *makuwa* Makino)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 201(201): 24-35
- [19] 申宝营, 李毅念, 赵三琴, 丁为民, 惠娜, 李洁. 暗期补光对黄瓜幼苗形态调节效果及综合评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 201-208
- Shen B Y, Li Y N, Zhao S Q, Ding W M, Hui N, Li J. Effect of dark period lighting regulation on cucumber seedling morphology and comprehensive evaluation analysis and comprehensive evaluation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 201-208 (in Chinese)
- [20] Miao Y X, Wang X Z, Gao L H, Chen Q Y, mei Q. Blue light is more essential than red light for maintaining the activities of photosystem II and I and photosynthetic electron transport capacity in cucumber leaves [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 87-100
- [21] Zheng L, van Labeke M C. Effects of different irradiation levels of light quality on *Chrysanthemum* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 233: 124-131
- [22] Wollaeger H, Runkle E S. Growth and acclimation of impatiens, salvia, petunia, and tomato seedlings to blue and red light[J]. *Hortscience*, 2015, 50(4): 522-529
- [23] 向芬, 李维, 刘红艳, 周凌云, 银霞, 曾泽萱. 氮素水平对茶树叶片氮代谢关键酶活性及非结构性碳水化合物的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9052-9057
- Xiang F, Li W, Liu H Y, Zhou L Y, Yin X, Zeng Z X. Effects of nitrogen levels on key enzyme activities and non-structural carbohydrates in nitrogen metabolism in tea leaves [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9052-9057 (in Chinese)
- [24] 庞永磊, 王凤新, 黄泽军, 李斌, 胡芳东, 夏英三. 适宜施氮钾水平提高滴灌秋茶的产量及品质[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 98-103
- Pang Y L, Wang F X, Huang Z J, Li B, Hu F D, Xia Y S. Improving yield and quality of autumn tea with drip irrigation under appropriate nitrogen and potassium fertilization [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(24): 98-103 (in Chinese)
- [25] Boussadia O, Steppe K, Zgallai H, Ben El Hadj S, Braham M, Lemeur R, van Labeke M C. Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthesis, carbohydrate status and biomass production in two olive cultivars ‘Meski’ and ‘Koroneiki’[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 123(3): 336-342
- [26] Banaś A K, Labuz J, Sztatelman O, Gabryś H, Fiedor L. Expression of enzymes involved in chlorophyll catabolism in *Arabidopsis* is light controlled[J]. *Plant Physiology*, 2011, 157(3): 1497-1504
- [27] Su N N, Wu Q, Shen Z G, Xia K, Cui J. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings [J]. *Plant Growth Regulation*, 2014, 73(3): 227-235
- [28] 孙娜, 魏琨, 李岩, 王秀峰, 杨凤娟, 史庆华. 光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(1): 80-88
- Sun N, Wei M, Li Y, Wang X F, Yang F J, Shi Q H. Effects of light quality on carbon and nitrogen metabolism and enzyme activities in tomato seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(1): 80-88 (in Chinese)
- [29] Chen Y Y, Zhou B, Li J L, Tang H, Tang J C, Yang Z Y. Formation and change of chloroplast-located plant metabolites in response to light conditions[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(3): 654
- [30] 丁文雅, 林若筠, 周伟伟, 周恺, 林咸永. 不同供氮水平下雾培与水培生菜生长和营养品质差异的比较[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(6): 703-712
- Ding W Y, Lin R Y, Zhou W W, Zhou K, Lin X. Comparison on the difference of growth and nutritional quality for lettuce (*Lactuca sativa* L)/between aeroponic and hydroponic cultivation systems under different nitrogen levels[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2016, 42(6): 703-712 (in Chinese)
- [31] Hediji H, Djebali W, Cabasson C, Maucourt M, Baldet P, Bertrand A, Zoghalmi L B, Deborde C, Moing A, Brouquisse R, Chaibi W, Gallusci P. Effects of long-term cadmium exposure on growth and metabolomic profile of tomato plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(8): 1965-1974
- [32] 宋奇超, 曹凤秋, 巩元勇, 程晓园, 毕昕媛, 刘来华. 高等植物氨基酸吸收与转运及生物学功能的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1507-1517
- Song Q C, Cao F Q, Gong Y Y, Cheng X Y, Bi X Y, Liu L H. Current research progresses of amino acids uptake,

- transport and their biological roles in higher plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1507-1517 (in Chinese)
- [33] 刘健伟. 基于组学技术研究氮素对于茶树碳氮代谢及主要品质成分生物合成的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016
- Liu J W. Omics-based study on the metabolism of C/N and biosynthesis of main quality related components in tea plants affected by nitrogen [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 (in Chinese)
- [34] 武姣娜, 魏晓东, 李霞, 张金飞, 谢寅峰. 植物氮素利用效率的研究进展[J]. 植物生理学报, 2018, 54(9): 1401-1408
- Wu J N, Wei X D, Li X, Zhang J F, Xie Y F. Research progress in nitrogen use efficiency in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 2018, 54(9): 1401-1408 (in Chinese)
- [35] 黎旺姐. 不同生长温度和施氮量对烟草叶片中游离氨基酸含量及其代谢的效应[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016
- Li W J. Effects of different growth temperature and nitrogen fertilization on amino acid content and its metabolism in tobacco leaves [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016 (in Chinese)
- [36] 高肖飞. 植物叶片中游离氨基酸的测定及其对大气氮沉降的响应[D]. 南昌: 南昌大学, 2015
- Gao X F. Determination of free amino acids in plant leaves and their response to atmospheric nitrogen deposition [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015 (in Chinese)
- [37] O'Carrigan A, Babla M, Wang F F, Liu X H, Mak M, Thomas R, Bellotti B, Chen Z H. Analysis of gas exchange, stomatal behaviour and micronutrients uncovers dynamic response and adaptation of tomato plants to monochromatic light treatments [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 82: 105-115
- [38] 陈鹏程, 陈析丰, 马伯军, 顾志敏. 植物耐盐性与钠离子动态平衡研究进展[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2016(2): 207-214
- Chen P C, Chen X F, Ma B J, Gu Z M. Na⁺ homeostasis and salt tolerance of plants [J]. *Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences Edition*, 2016(2): 207-214 (in Chinese)

责任编辑: 袁文业