



陈伟龙,唐心苑,林可欣,王可禹,丁一鸣,连锴烽,苏潼,陈仁,刘文科,王振伟,周炜朋.LED红蓝光质比和叶面锌肥种类对生菜生长、品质及矿质元素吸收的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(04):107-121.

CHEN Weilong, TANG Xinyuan, LIN Kexin, WANG Keyu, DING Yiming, LIAN Kaifeng, SU Tong, CHEN Ren, LIU Wenke, WANG Zhenwei, ZHOU Weipeng. Effects of LED red and blue light quality ratio and foliar zinc fertilizer type on the growth, quality and mineral element absorption of lettuce[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(04): 107-121.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.09

LED红蓝光质比和叶面锌肥种类对生菜生长、品质及矿质元素吸收的影响

陈伟龙¹ 唐心苑¹ 林可欣¹ 王可禹¹ 丁一鸣¹ 连锴烽¹ 苏潼¹
陈仁^{1*} 刘文科^{2*} 王振伟^{1,3} 周炜朋¹

(1. 佛山大学 物理与光电工程学院/粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东 佛山 528225;

2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业农村部设施农业节能与废弃物处理
重点实验室, 北京 100081)

3. 佛山大学 农业与生物工程学院, 广东 佛山 528225;

摘 要 为探究人工光源植物工厂生产中不同LED红蓝光质比及叶面锌肥种类对水培生菜生长、品质及矿质元素吸收的影响,以‘意大利耐抽苔生菜’(*Lactuca sativa* L.)为供试材料,设置LED红蓝光质比为3:1的高红光(3R1B)、1:1的红蓝光相等(1R1B)、1:3的高蓝光(1R3B)3个处理,光强均为200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,以及硫酸锌(ZnSO_4)、纳米氧化锌(nano-ZnO)、甘氨酸锌(ZnGly)3种锌肥叶面喷施,浓度均为1.54 mmol/L,以喷施去离子水(ddH_2O)为对照(CK)。结果表明:1)喷施同种叶面锌肥时,随着蓝光比例的增加,生菜的地上部鲜重、干重和株高均呈逐渐减少趋势;而生菜叶片的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的含量则均呈逐渐增加的趋势,1R3B较3R1B分别平均增加30.9%、36.5%和32.1%;可溶性糖、可溶性蛋白、类黄酮和总酚含量也均显著增加,1R3B较3R1B分别平均提升28.6%、24.1%、107.2%和89.3%。2)相同光质(1R1B)下,nano-ZnO处理的生菜地上部、地下部鲜重和干重均显著高于 ZnSO_4 和 ZnGly 处理,其中3R1B中nano-ZnO处理的地上部鲜重和干重较CK分别提升4.4和1.9倍。与CK相比,叶面喷施3种锌肥均可显著提高生菜中硝酸盐的含量,同时降低可溶性糖和可溶性蛋白含量。1R1B中,喷施3种锌肥的生菜叶片Zn含量均显著高于CK,1R1B中,nano-ZnO处理的叶片Zn含量是CK的41.4倍,但叶片Mg、Mn和Fe含量分别较CK降低68.3%、73.2%和59.7%。3)同时,红蓝光质比和叶面锌肥种类二者交互可显著影响生菜地上部叶的鲜重和干重、地下部根的鲜重和干重、株高、根长,以及硝酸盐、可溶性糖、可溶性蛋白质、类黄酮、总酚、Ca、Mg、Zn、Mn、Fe、B的含量。因此,人工光源植物工厂环境下,高蓝光可显著改善生菜的品质,高红光则可显著增加生菜的产量;叶面喷施nano-ZnO处理的生菜产量和Zn含量均显著高于其他种类的锌肥,且高红光时效果更优,喷施nano-ZnO还可有效缓解 Zn^{2+} 与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 的拮抗效应。

关键词 植物工厂; 纳米氧化锌; 红蓝光; 品质; 矿质元素

中图分类号 S625.4

文章编号 1007-4333(2026)04-0107-15

文献标志码 A

收稿日期: 2025-05-04; 接受日期: 2025-07-08

基金项目: 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室项目(2020B1212030010); 佛山市智慧植物工厂工程技术研究中心(佛科[2019]125号); 粤港澳大湾区(佛山)先进制造业国家卓越工程师创新研究院联合培养扶持项目(2023FCXM017); 佛山大学2025年学生学术基金项目; 佛山大学2025年实验室开放创新基金

第一作者: 陈伟龙(ORCID:0009-0003-0379-5742), 硕士研究生, E-mail: CWL849664279@outlook.com

通讯作者: 陈仁(ORCID:0009-0004-2086-7573), 讲师, 主要从事植物工厂与植物照明研究, E-mail: chenren@fosu.edu.cn

刘文科(ORCID:0009-0004-2086-7573), 研究员, 主要从事植物工厂与植物照明研究, E-mail: liuwenke@caas.cn

Effects of LED red and blue light quality ratio and foliar zinc fertilizer type on the growth, quality and mineral element absorption of lettuce

CHEN Weilong¹, TANG Xinyuan¹, LIN Kexin¹, WANG Keyu¹, DING Yiming¹,
LIAN Kaifeng¹, SU Tong¹, CHEN Ren^{1*}, LIU Wenke^{2*},
WANG Zhenwei^{1,3}, ZHOU Weipeng¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering/Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Technology, Foshan University, Foshan 528225, China;

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

3. School of Agriculture and Biological Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China;

Abstract To explore the effects of different LED red and blue light quality ratios and foliar zinc fertilizer types on the growth, quality and mineral element absorption of hydroponic lettuce under artificial light plant factory conditions, ‘Italian non-heading lettuce’ (*Lactuca sativa* L.) was used as the test material. Three treatments were set up with LED red and blue light quality ratios of 3:1 (high red light, 3R1B), 1:1 (equal red and blue light, 1R1B), and 1:3 (high blue light, 1R3B), all with a light intensity of 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. Three types of zinc fertilizers, namely zinc sulfate (ZnSO_4), nano-zinc oxide (nano-ZnO), and zinc glycinate (ZnGly), were foliar sprayed at a concentration of 1.54 mmol/L, with deionized water (ddH_2O) spray as the control (CK). The results showed that: 1) When the same type of foliar zinc fertilizer was sprayed, with the increase of the blue light ratio, the fresh weight, dry weight and plant height of the lettuce above ground gradually decreased; while the contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and total chlorophyll in the leaves gradually increased. Compared with 3R1B, the contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and total chlorophyll in the 1R3B treatment increased by an average of 30.9%, 36.5% and 32.1%, respectively. The contents of soluble sugar, soluble protein, flavonoids and total phenols also significantly increased, with an average increase of 28.6%, 24.1%, 107.2% and 89.3%, respectively. 2) Under the same light quality (1R1B), the fresh weight and dry weight of the aboveground and underground parts of lettuce in the nano-ZnO treatment were significantly higher than those in the ZnSO_4 and ZnGly treatments. Among them, the fresh weight and dry weight of the aboveground part of lettuce in the 3R1B treatment with nano-ZnO were 4.4 and 1.9 times higher than those in the CK treatment, respectively. Compared with CK, the foliar spraying of the three types of zinc fertilizers could significantly increase the nitrate content in lettuce, while the contents of soluble sugar and soluble protein decreased. Under 1R1B, the Zn content in the leaves of lettuce sprayed with the three types of zinc fertilizers was significantly higher than that in the CK treatment. Under 1R1B, the Zn content in the leaves of the nano-ZnO treatment was 41.4 times that of the CK treatment. However, the contents of Mg, Mn and Fe in the leaves were significantly reduced by 68.3%, 73.2% and 59.7%, respectively. 3) Meanwhile, the interaction between the red and blue light quality ratio and the type of foliar zinc fertilizer could significantly affect the fresh weight and dry weight of the above-ground leaves, the fresh weight and dry weight of the underground roots, plant height, root length, as well as the contents of nitrate, soluble sugar, soluble protein, flavonoids, total phenols, Ca, Mg, Zn, Mn, Fe and B. Therefore, under artificial light plant factory conditions, the high blue-light sources can significantly improve the pigment and quality indicators of lettuce, while the high red-light ratio can significantly increase the yield of lettuce. The yield and Zn content of lettuce foliar sprayed with nano-ZnO were higher than those of other zinc fertilizers, and the effect was better under high red-light ratio. Moreover, foliar spraying of nano ZnO could effectively alleviate the antagonistic effects of Zn ions on Ca, Fe and Mn mineral ions.

Keywords plant factory with artificial light; nano-ZnO; red and blue light; quality; mineral elements

人工光源植物工厂(plant factories with artificial lighting, PFAL)是一种通过人工环境精准控制光、温、湿、气、营养等条件实现作物周年高效生产的设施农业模式,其核心优势在于突破自然环境的限制,通过水培技术实现资源高效利用,缩短生长周期,并显著减少病虫害风险,其已成为实现叶菜类作物周年优质生产的重要设施^[1-2]。光是植物生长发育过程中重要的调控因子,对植物同化物分配和品质形成具有重要影响。LED光源具有光谱可调、冷光源、能效高、寿命长等特性,使其能够通过光谱组合精准匹配植物生长需求,为PFAL光环境调控带来革命性变革。生菜因生长周期短、营养价值高,成为PFAL主要栽培的作物,其光合特性与品质形成对光环境条件极为敏感^[3]。植物工厂生产的功能性蔬菜,因其富含抗坏血酸(VC)和抗氧化物质等,深受消费者欢迎^[3]。富含锌(Zn)和硒(Se)等微量元素的蔬菜被证实具有增强免疫调节、促进代谢稳态、降低慢性病风险等多重生理功能^[4-5]。因此,通过优化LED光谱等光环境调控措施以提高生菜等叶菜类作物中VC、抗氧化物质及Zn、Se等微量元素含量的研究对提升人工光源植物工厂生产的功能性蔬菜的品质、满足消费者健康需求和推动设施农业向高效化、功能化方向发展具有重要意义。

Zn是植物必需的微量元素,参与酶激活、基因表达、蛋白质合成及抗氧化防御等生理代谢过程^[4-5]。Zn作为碳酸酐酶、超氧化物歧化酶(SOD)等300多种酶的辅因子^[6],通过调控光合碳同化、活性氧(ROS)清除及矿质代谢维持植物正常生长^[7]。缺锌会抑制叶绿素合成、降低光合速率,导致叶片黄化与生物量下降;而Zn过量则会引发离子竞争性吸收障碍,干扰Ca、Mg等元素代谢,加剧氧化损伤。近年来,叶面喷施锌肥方式成为研究热点,Zou等^[8]研究发现,叶面喷硫酸锌(ZnSO_4)可显著提高小麦籽粒锌含量,纳米氧化锌(nano-ZnO)和甘氨酸锌(ZnGly)因高生物活性与低毒性^[9],在生菜^[10-11]、番茄^[4-5]等作物中表现出促进生长和提升品质的双重功效。此外,管庆林等^[12]研究发现,Zn与N、P等元素的协同作用可通过调控硝酸还原酶活性,降低蔬菜硝酸盐含量,同时增加可溶性糖和必需氨基酸的积累,从而改善蔬菜的营养品质。已有研究发现,nano-ZnO较 ZnSO_4 在改善产量和促进生物量方面显示出了良好的效果,可以替代传统的锌营养

源^[13-14]。锌肥与光的协同作用影响着植物的生长发育,也影响着植物的吸收和代谢,不同光质对植物生长和代谢具有特异性调控作用^[14]。Di等^[15]研究发现,红光(600~700 nm)对株高、叶片发育和光合作用具有促进作用;蓝光(400~500 nm)则能增强光合色素合成、改善光系统活性,并通过调节气孔导度优化光合效率。Ren等^[16]研究表明,红蓝光组合可通过提升叶绿素含量和叶绿素荧光参数(F_v/F_m 、 qP 等)增强水稻秧苗光合作用,同时调控光合基因表达及核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)活性以促进植物生长。张帅等^[17]研究了4种红蓝光质比(4:1、1:3、1:4、2:1)对生菜生长的影响,其中红蓝光光质比为4:1对生菜生长最有利。郑玮璇等^[18]探究不同LED红蓝光比例对于生菜生长的影响,结果表明红光能促进生菜地上部生长,红蓝光光质比为6:3时对生菜的生长最有利。王哲等^[19]研究发现,红蓝光质比例为3:1最有利于芹菜生长。然而,植物工厂水培叶菜仍存在品质较低的问题。尽管光质调控可改善形态指标,但Zn含量是决定叶菜营养品质的关键因素^[20]。Khudsar等^[20]研究表明,缺Zn会抑制较多的酶活性、降低光合色素含量,并影响硝酸盐代谢与矿质元素吸收。例如,缺Zn的生菜叶片中叶绿素a/b下降,硝酸盐积累增加,而可溶性糖、蛋白质及抗氧化物质含量显著降低^[21-23]。

当前的研究多聚焦单一因素(Zn或光质)对植物的影响,然而对锌肥种类与光质协同对植物工厂水培蔬菜产量和品质调控的研究尚未见报道。本研究在植物工厂环境条件下,设置高红光、红蓝光相等和高蓝光3种LED光质,及 ZnSO_4 、纳米氧化锌、甘氨酸锌3种叶面锌肥处理,分析协同效应对生菜生长、品质及矿质元素吸收的影响,旨在探究人工光源植物工厂生产中不同光质配比和锌肥种类对水培生菜生长、品质及矿质元素吸收的影响,以为设施农业的叶菜高产优质生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2024年4—6月在佛山大学物理与光电工程学院人工光源植物工厂内开展。试验期间严格控制环境参数,温度维持在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(60\pm 5)\%$, CO_2 浓度稳定在 $421\sim 425\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。选用中国农业科学院蔬菜花卉研究所培育的‘意大

利耐抽苔生菜' (*Lactuca sativa* L.) 作为供试材料。将生菜种子置于湿润海绵育苗块(长×宽×高为2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm)中黑暗培养。发芽后转入光强(即光合光子通量密度, photosynthetic photon flux density, PPFD)为200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 红蓝光质比为3:1(红光658.5 nm, 蓝光446.6 nm)的LED光源下培养15 d。处理前的过渡期为5 d, 将PPFD提升至200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 并保持原光质比。

水培系统采用Hoagland营养液配方, 通过每天2 h的增 O_2 处理保障根系供氧。生菜幼苗培育阶段采用长宽高为200 cm×60 cm×8 cm的育苗架水培槽进行水培培养。培养系统初始营养液深度设定为6 cm, 其pH为6.5, EC为1.1 mS/cm。培养过程中每3 d补充1次含Zn营养液至初始液位高度, 每次补充后使用 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{NaOH}$ 将营养液pH和EC重新调节至初始设定值。当生菜进入过渡期和喷施期时, 选取生长状态一致的幼苗进行移栽。每个处理设置10株生菜, 定植于长宽高为68 cm×48 cm×10 cm的蓝色塑料水培盒中。该阶段初始营养液深度调整为8 cm, pH和EC分别设定为6.5和1.8 mS/cm。每3 d补充1次不含Zn的营养液至初始液位高度, 并同样对营养液pH和EC进行重新校准, 确保处理间生长环境参数的一致性。

1.2 试验设计

采用双因素完全随机试验设计, 设置红蓝光质比为3:1的高红光(3R1B)、1:1的红蓝光质相等(1R1B)、1:3的高蓝光(1R3B)3个LED光质处理, 光强均为200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 光照时间16 h(6:00—22:00), 黑暗时间8 h(22:00—次日6:00); 叶面喷施硫酸锌(ZnSO_4)、纳米氧化锌(nano-ZnO)、螯合锌(ZnGly)3种锌肥处理, 浓度均为1.54 mmol/L, 以喷施 ddH_2O 为对照(CK), 每2 d单株叶面喷施5 mL处理液, 累计5次; 共12个处理。末次喷施48 h后进行采收, 测定生理指标。

1.3 测定方法

每处理随机选取5株, 分离地上部和根系后立即测定鲜重、株高及根长指标。然后105℃杀青30 min后, 75℃干燥至恒重, 测定干重。另选取植株相同部位的叶片, 经清水及 ddH_2O 各冲洗3次后吸干表面水分。一部分新鲜叶片经液氮速冻, 于-80℃研磨至粉末状, -80℃超低温保存, 用于品质成分分析; 另一部分新鲜叶片经105℃杀青

30 min、75℃干燥至恒重后, 用高速粉碎机粉碎并过40目筛, 收集筛下粉末状干样, 密封保存于干燥器中, 用于矿质元素含量的检测。

在生菜采收后, 将生菜从基部切开, 用纸巾将根部的水分吸干后, 用电子天平测量生菜的地上部鲜重和地下部鲜重。光合色素含量的测定参照丙酮-乙醇双溶剂萃取法^[24]; 硝酸盐含量测定参照水杨酸-硫酸比色法^[25]; 可溶性糖含量参照蒽酮-乙酸乙酯比色法^[26]; 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝G-250比色法^[27]; 类黄酮含量测定参照硝酸铝-亚硝酸钠比色法^[28]; 总酚含量测定参照Folin-Ciocalteu比色法^[29]; Ca、Mg、Zn、Mn、Fe、B矿质元素含量测定参照电感耦合等离子体发射光谱法测定^[30]。

1.4 数据统计及分析

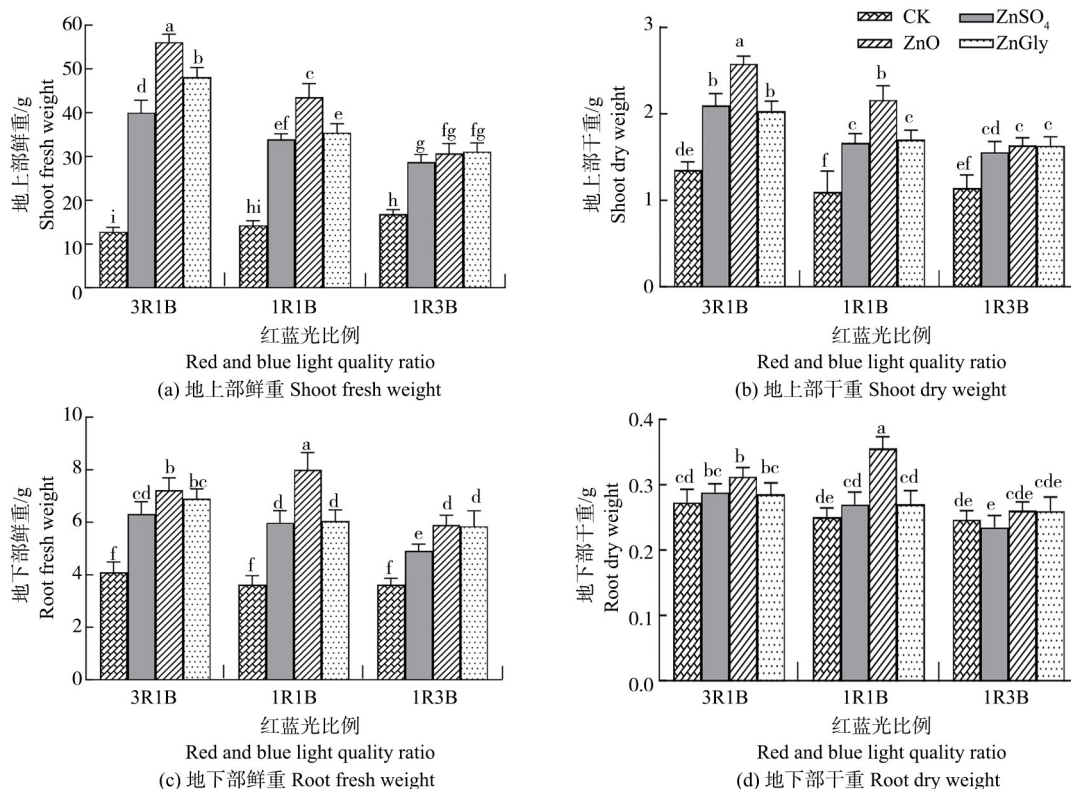
试验数据经Excel 2019整理后, 采用SPSS 27.0软件对数据进行分析。叶面锌肥种类和红蓝光质比互作对生菜各参数的影响采用双因素方差分析, 其他数据采用单因素方差分析。Prism 9完成图表可视化。

2 结果与分析

2.1 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜生长的影响

由图1可知, 在相同红蓝光比例(1B1R)下, ZnSO_4 、nano-ZnO和ZnGly处理的生菜地上部干、鲜重及地下部鲜重均显著高于喷施 ddH_2O 的对照(CK), 仅有nano-ZnO的地下部干重显著高于CK。随蓝光占比提升, 各锌肥处理地上部生物量均呈下降趋势, ZnSO_4 和ZnGly处理地下部生物量也同步降低, 而nano-ZnO处理则呈现先增后降趋势。红蓝光质比为3:1(3R1B)条件下, nano-ZnO处理的生菜地上部鲜重和干重分别达55.11和2.58 g, 较CK提升4.4和1.9倍; 1R1B下, 生菜的地下部鲜重和干重达峰值, 分别为7.99和0.36 g, 较CK高2.2和1.4倍。3R1B和1R1B中nano-ZnO的地上部生物量显著优于 ZnSO_4 和ZnGly, 但在红蓝光质比为1:3(1R3B)条件下三者无显著差异。

由图2可知, 1R1B条件下, ZnSO_4 、nano-ZnO和ZnGly处理生菜株高均显著高于CK; 但1R3B条件下, 仅nano-ZnO和ZnGly处理可显著促进根长的生长, ZnSO_4 的根长与CK无显著差异。随蓝光占比



3R1B, 1R1B and 1R3B 分别为红蓝光质比 3:1、1:1 和 1:3。ZnSO₄, nano-ZnO 和 ZnGly 分别为硫酸锌、纳米氧化锌、甘氨酸锌; CK 为喷施去离子水(ddH₂O)的对照。不同的小写字母代表不同处理之间存在显著差异(Duncan 检验, $P < 0.05$)。下同。

3R1B, 1R1B and 1R3B represent LED red and blue light quality ratios of 3:1, 1:1 and 1:3, respectively. ZnSO₄, nano-ZnO and ZnGly represent zinc sulfate, nano-zinc oxide and zinc glycinate fertilizer, respectively. CK represent deionized water. Different small letters indicate significant differences between treatments by Duncan's multiple range test at 0.05 level. The same below.

图1 不同红蓝光质比和锌肥处理下生菜地上部和地下部的鲜重和干重

Fig. 1 The fresh weight and dry weight of the aboveground and underground parts of lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

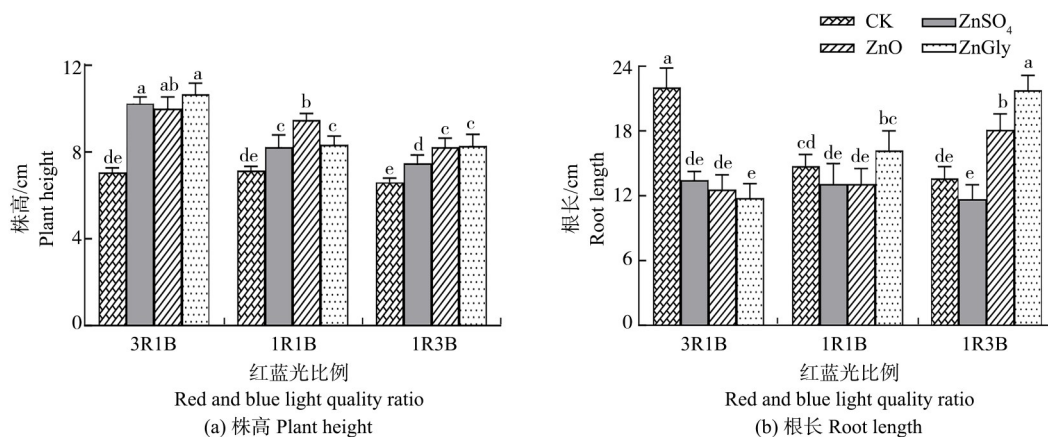


图2 不同红蓝光质比和锌肥处理下生菜的株高和根长

Fig. 2 The plant height and root length of lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

增加,各锌肥处理的株高均呈下降趋势。3R1B 条件下, ZnSO₄、nano-ZnO 及 ZnGly 处理的株高较 CK

分别提升 44.8%、41.5% 和 50.9%, 但根长较 CK 低 39.1%、42.9% 和 46.6%。

2.2 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜叶绿素含量的影响

由表1可知,不同红蓝光质比条件下,ZnSO₄、nano-ZnO和ZnGly处理均可显著提升生菜叶绿素a、b及总叶绿素含量。各处理中,随蓝光比例增加,叶绿素a、b及总叶绿素含量均呈递增趋势。在3R1B和1R1B条件下,各处理的叶绿素a、b及总叶绿素含量由高到低均为ZnGly>nano-ZnO>

ZnSO₄>CK。3R1B中,ZnGly处理的叶绿素a、b及总叶绿素含量分别为0.692、0.170、0.862 mg/g;1R1B中分别提升至0.814、0.201、1.014 mg/g。而在高蓝光(1R3B)下,nano-ZnO处理叶绿素a、总叶绿素含量均显著高于ZnGly,但ZnGly的叶绿素b含量显著高于ZnSO₄、nano-ZnO和CK,各处理的总叶绿素含量由高到低为nano-ZnO>ZnGly>ZnSO₄>CK。

表1 不同红蓝光质比和叶面锌肥种类处理下生菜的叶绿素含量变化

Table 1 Photosynthetic pigment content in lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments mg/g

红蓝光质比 Red and blue light quality ratio	锌肥种类 Zinc species	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	叶绿素总量 Total chlorophyll
3:1(3R1B)	ZnSO ₄	0.620±0.024 ^{fg}	0.148±0.006 ^f	0.768±0.030 ^{ef}
	nano-ZnO	0.665±0.041 ^{ef}	0.163±0.008 ^e	0.827±0.048 ^{de}
	ZnGly	0.692±0.033 ^e	0.170±0.006 ^{de}	0.862±0.040 ^d
	CK	0.592±0.032 ^g	0.129±0.012 ^g	0.721±0.043 ^f
1:1(1R1B)	ZnSO ₄	0.751±0.017 ^{cd}	0.180±0.006 ^d	0.931±0.022 ^c
	nano-ZnO	0.797±0.024 ^{bc}	0.194±0.006 ^{bc}	0.991±0.031 ^{bc}
	ZnGly	0.814±0.026 ^{ab}	0.201±0.004 ^{ab}	1.014±0.023 ^{ab}
	CK	0.703±0.011 ^{de}	0.162±0.008 ^e	0.866±0.008 ^d
1:3(1R3B)	ZnSO ₄	0.838±0.047 ^{ab}	0.202±0.008 ^{ab}	1.040±0.054 ^{ab}
	nano-ZnO	0.866±0.019 ^a	0.208±0.003 ^{ab}	1.073±0.022 ^a
	ZnGly	0.857±0.043 ^a	0.211±0.009 ^a	1.068±0.049 ^a
	CK	0.801±0.024 ^{bc}	0.182±0.009 ^{cd}	0.982±0.019 ^{bc}

2.3 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜硝酸盐含量的影响

由图3可知,不同红蓝光质比处理下,ZnSO₄、

nano-ZnO及ZnGly处理均可显著提升生菜叶片硝酸盐含量。3R1B和1R1B条件下,nano-ZnO处理的叶片硝酸盐含量分别为2.68和2.51 mg/g,均显著低于

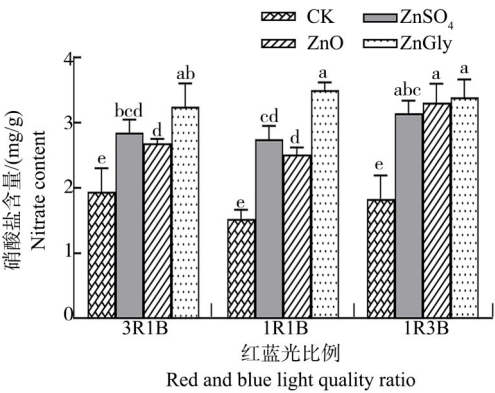


图3 不同红蓝光质比和叶面锌肥处理下生菜叶片的硝酸盐含量

Fig. 3 Nitrate content in lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

ZnSO₄和ZnGly,其中1R1B下 nano-ZnO 处理的硝酸盐含量分别较 ZnSO₄和 ZnGly 低 12.3% 和 15.7% ($P<0.05$),但仍较 CK 高 18.4% ($P<0.05$)。随着蓝光比例的增加,ZnSO₄和 nano-ZnO 处理的硝酸盐积累均呈先降后升趋势,而 ZnGly 处理则呈持续上升趋势;1R3B 下,3种锌肥处理的硝酸盐含量无显著差异,且均达到各自处理组的峰值。

由图4可知,不同红蓝光质比条件下,ZnSO₄、nano-ZnO 及 ZnGly 均可显著降低生菜可溶性糖积累;但随蓝光占比的增加可溶性糖含量均呈上升趋势,各锌肥处理间差异不显著。3R1B 条件下,ZnSO₄处理的可溶性糖含量均显著高于 nano-ZnO

和 ZnGly。不同的锌肥处理均在 1R3B 达到峰值,但仍较 CK 低 21%~35%。各红蓝光质比条件下,3种锌肥处理的生菜可溶性蛋白积累均显著低于 CK ($P<0.05$),且随着蓝光比例的增加,各叶面锌肥处理的可溶性蛋白含量均呈上升趋势。3R1B 中,ZnGly 处理的可溶性蛋白含量最低,为 1.82 mg/g,显著低于 ZnSO₄和 nano-ZnO 处理,而 CK 的可溶性蛋白含量最高(3.26 mg/g);1R1B 和 1R3B 条件下,nano-ZnO 处理的可溶性蛋白含量均显著高于 ZnSO₄和 ZnGly 处理,其中 1R3B 下 nano-ZnO 处理的含量达 2.98 mg/g,较同光质条件的 ZnSO₄高 18.5%、较 ZnGly 高 24.2% ($P<0.05$)(图4(b))。

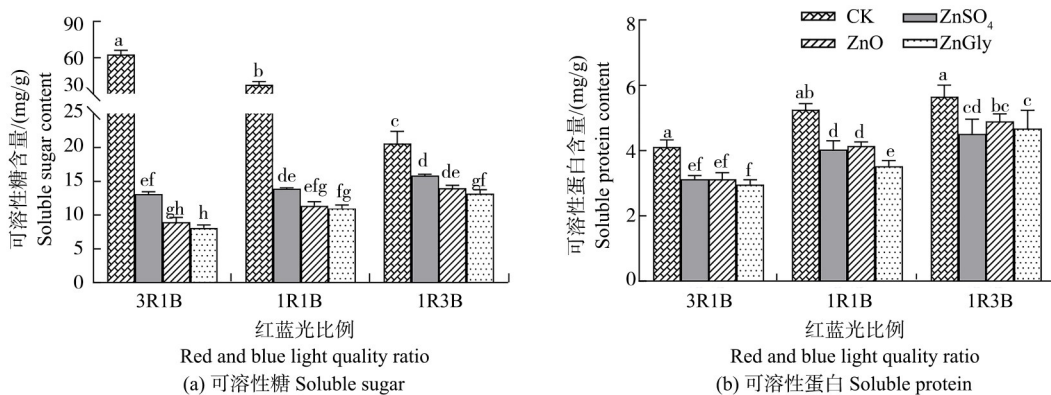


图4 不同红蓝光质比和叶面锌肥处理下生菜叶片的可溶性糖和可溶性蛋白含量

Fig. 4 Soluble sugar and soluble protein contents in lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

由图5可知,蓝色光质比例提升可显著促进CK、ZnSO₄、nano-ZnO、ZnGly 的生菜叶片类黄酮及总酚含量,且均在高蓝光(1R3B)条件下最为显著。1R3B 下,nano-ZnO 处理的两类代谢物含量均为最高,分别为 6.41 mg/g(类黄酮)和 2.74 mg/g(总酚);而 3R1B 中,ZnGly 处理的两类代谢物含量最低,分别为 1.82 mg/g(类黄酮)和 0.63 mg/g(总酚)。在高红光条件(3R1B)下,nano-ZnO 和 ZnGly 处理可显著抑制两类物质的合成,较 CK 降幅达 38%~56%;但在高蓝光条件(1R3B)下,nano-ZnO 处理的类黄酮含量较 CK 高 22.5%,显著优于 ZnSO₄和 ZnGly 处理。不同光质条件的两类代谢物含量由高到低均为 3R1B>1R1B>1R3B。1R3B 中,CK 的类黄酮和总酚含量较 3R1B 分别提升 89.0% 和 92.5%,锌肥处理的提升幅度分别为 76.3%~207.2%(类黄酮)和 87.3%~335.0%(总酚)。

2.4 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜矿质元素的影响

由图6可知,不同红蓝光质比条件下,3种锌肥处理均可显著提升生菜叶片的 Zn 含量($P<0.05$),其中 nano-ZnO 处理效果最显著,3R1B、1R1B、1R3B 条件下叶片 Zn 含量分别达 319.6、320.2、197.2 mg/kg,分别较 CK 高 32.4、41.4、14.7 倍(图6(a))。ZnSO₄处理的生菜 Zn 含量随蓝光比例增加呈先降后升趋势;nano-ZnO 处理的 Zn 含量在 3R1B 和 1R1B 间无显著差异,仅在高蓝光(1R3B)下显著低于其在低蓝光条件下的含量,但仍显著高于 ZnSO₄、ZnGly 处理和 CK;ZnGly 处理的 Zn 含量在 1R1B 出现低谷,显著低于其在 3R1B 和 1R3B 条件下的含量($P<0.05$)。

不同红蓝光比例下,ZnSO₄、nano-ZnO 及 ZnGly 处理的生菜叶片 Mn 含量均显著低于 CK(图6(b))。

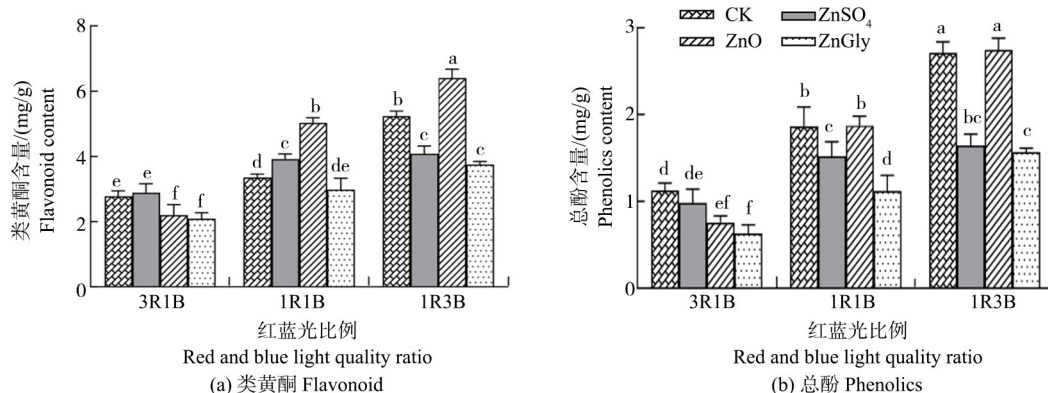


图5 不同红蓝光质比和叶面锌肥处理下生菜叶片的类黄酮和总酚含量

Fig. 5 Flavonoid and phenolics content in lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

随蓝光比例的增加,CK、ZnSO₄及 nano-ZnO 处理 Mn 含量均呈逐渐递减的趋势,而 ZnGly 处理呈先升后降趋势。3R1B 和 1R1B 下,3 种锌肥处理均能显著抑制生菜叶片 Fe 的积累($P < 0.05$) (图 6(c))。随蓝光比例增加,CK、ZnSO₄及 nano-ZnO 处理的叶片 Fe 含量持续下降,且各光质条件下,nano-ZnO 处

理的 Fe 含量均显著高于 ZnSO₄和 ZnGly 处理($P < 0.05$)。3R1B 和 1R1B 条件下,ZnSO₄、nano-ZnO 及 ZnGly 处理均可显著抑制生菜叶片 B 的积累,降幅达 27%~42%。1R3B 中,ZnSO₄和 nano-ZnO 处理叶片的 B 含量较 CK 分别降低 18.5% 和 14.3% ($P < 0.05$) (图 6(d))。

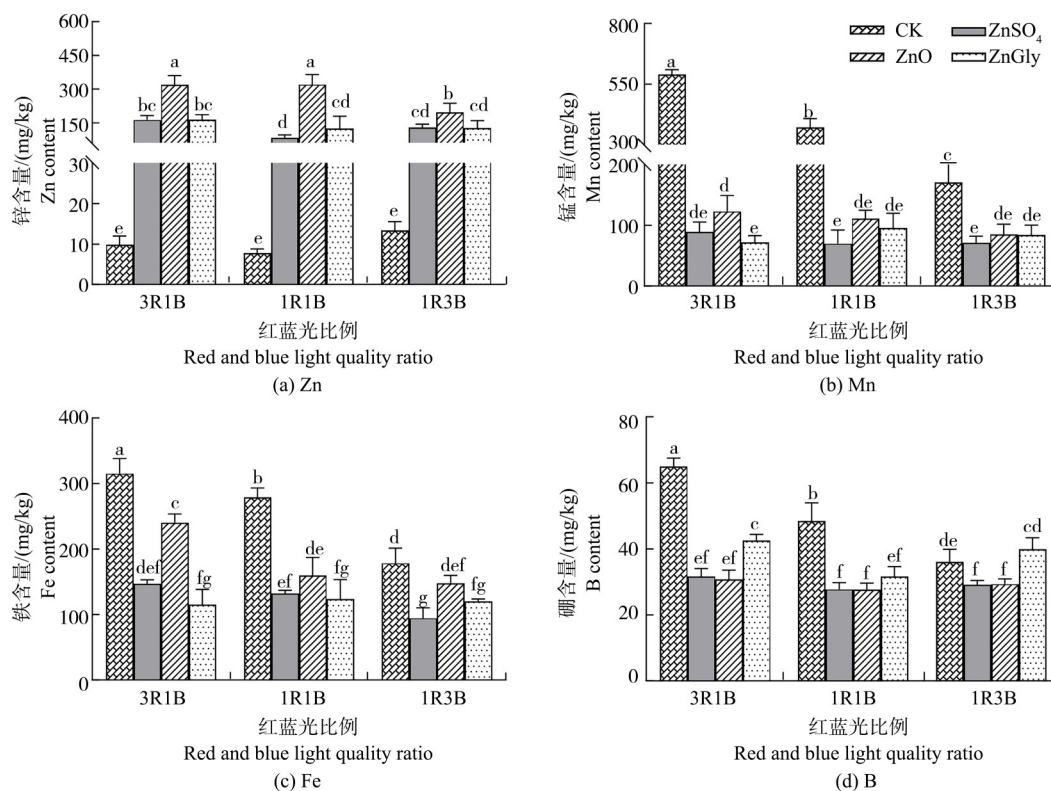


图6 不同红蓝光质比和叶面锌肥处理下生菜叶片的 Zn、Mn、Fe、B 含量

Fig. 6 Zn, Mn, Fe and B contents in lettuce under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

由图 7 可知,随着蓝光比例升高,CK、nano-ZnO 及 ZnGly 处理的 Ca 含量均呈显著递减趋势($P<0.05$),而 ZnSO₄ 处理呈现先降后升的趋势。3R1B 下,各锌肥处理的叶片 Ca 含量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 nano-ZnO 处理降幅最小(25.1%),显著高于 ZnSO₄ (降幅 32.6%)和 ZnGly (降幅 30.9%);1R1B 条件下,仅 nano-ZnO 处理的 Ca 含量

显著高于 CK($P<0.05$);1R3B 条件下,所有叶片喷施处理的 Ca 含量均达最低值,且各锌肥处理间无显著差异。不同光质条件下,3 种锌肥处理均显著抑制 Mg 积累($P<0.05$),且光质梯度对不同锌肥的调控效应存在差异(图 7(b))。随蓝光比例升高,CK、ZnSO₄ 及 nano-ZnO 的 Mg 含量呈逐渐递减的趋势,ZnGly 处理则呈先降后升的趋势。

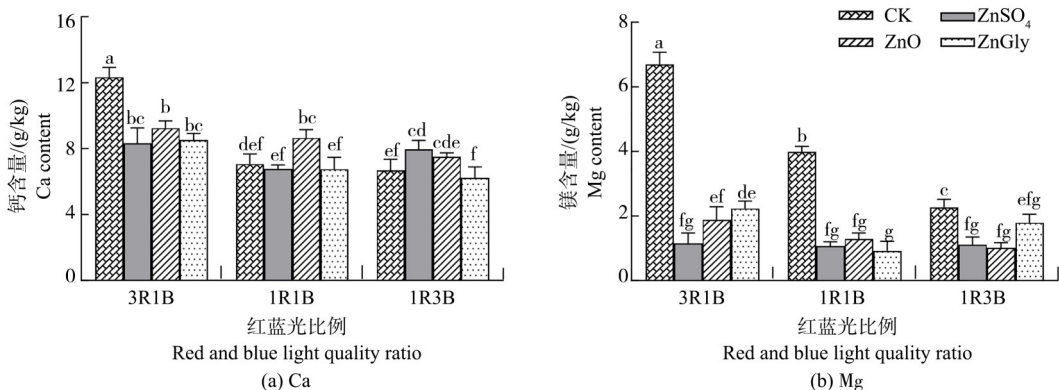


图 7 不同红蓝光质比和叶面锌肥处理下生菜叶片的 Ca、Mg 含量

Fig. 7 Ca and Mg contents in lettuce leaves under different red and blue light quality ratios and exogenous zinc species treatments

2.5 红蓝光质比及叶面锌肥种类互动对生菜各项指标的影响

由表 2 可知,不同红蓝光质比和叶面锌肥种类互动可显著影响生菜的生长,包括地上部叶鲜重和干重、地下部根鲜重和干重、株高、根长,

以及硝酸盐、可溶性糖、可溶性蛋白质、类黄酮、总酚含量($P<0.001$)。同时,红蓝光质比和叶面锌肥种类互动对生菜叶片 Ca、Mg、Zn、Mn、Fe、B 的矿物质积累均有显著影响($P<0.001$)(表 3)。

表 2 红蓝光质比和叶面锌肥种类互动对生菜生长形态、产量和品质影响

Table 2 The interaction effects of red and blue light quality ratios and exogenous zinc species on the growth morphology, yield and quality of lettuce

指标 Index	地上部叶鲜重 Leaves fresh weight above ground	地下部根鲜重 Roots fresh weight under ground	地上叶干重 Leaves dry weight above ground	地下部根干重 Roots dry weight under ground	株高 Plant height	根长 Root length
光质×锌肥 Light quality× zinc fertilizer	***	***	***	***	***	***
指标 Index	硝酸盐含量 Nitrate content	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白质 Soluble protein	类黄酮 Flavonoid	总酚 Total phenols	
光质×锌肥 Light quality× zinc fertilizer	***	***	***	***	***	

注:***在 $P<0.001$ 水平上显著。下同。

Note: Significant at the $P<0.001$ probability level. The same below.

表3 红蓝光质比和叶面锌肥种类互动对生菜叶片Ca、Mg、Zn、Mn、Fe、B含量的影响
Table 3 Interaction effects of red and blue light quality ratios and exogenous zinc species on the contents of Ca, Mg, Zn, Mn, Fe, and B in lettuce leaves

指标 Index	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	B
光质×锌肥 Light quality×zinc fertilizer	***	***	***	***	***	***

3 讨论

3.1 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜生长发育的影响

红光和蓝光是调控植物形态建成及光合产物的核心光质^[31]。Kong等^[32]研究发现,高蓝光比例可使生菜冠层面积缩减,光合速率降低,导致生物量显著降低。Lee等^[33]对比不同光谱组合的研究发现,与白光相比,红光处理的生菜地上部鲜重显著增加,表明红光可显著促进生物量积累。本研究证实,随蓝光比例的增加,各锌肥处理的生菜地上部鲜重均呈显著下降趋势(图1),该现象与蓝光抑制细胞伸长及加速次生代谢物合成的双重效应密切相关^[34]。在锌肥种类方面,nano-ZnO处理在促进生菜生物量积累上展现出显著优势(图1)。Saini等^[13]发现,nano-ZnO处理的草莓产量分别比传统锌肥ZnSO₄、EDTA-ZnNa₂高15%和9%。Garza-Alonso等^[14]研究证实,nano-ZnO处理的生菜生物量显著高于ZnSO₄,与其缓释特性和高生物利用度相关。本试验中,高红光条件(3R1B)配合 nano-ZnO 处理可使生菜地上部鲜重和干重达55.11和2.58 g,较CK提升4.4和1.9倍,显著优于ZnSO₄和ZnGly处理(图1)。这一结果可能与高红光条件通过促进茎部细胞分裂与伸长,协同 nano-ZnO 纳米颗粒的高比表面积特性^[14],显著提升了锌元素的叶面渗透效率^[13],而高蓝光条件可能通过增强气孔闭合阻抗纳米颗粒转运,导致叶片中锌积累量下降。

3.2 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜叶绿素含量的影响

红光和蓝光对光合色素积累均具有积极调控作用^[35]。Li等^[35]研究表明,白光再补充蓝光可提升紫叶生菜叶绿素a、b的含量。Johkan等^[36]发现蓝光处理可显著提高红叶生菜叶绿素a、b和类胡萝卜素的含量。本研究结果显示,随蓝光比例的增加,各锌肥处理的生菜叶绿素a、b及总叶绿素含量平均提

升18.6%,且在高蓝光(1R3B)条件下达峰值(表1);这与蓝光调控叶绿体发育及光形态建成信号通路密切相关^[37]。Zn²⁺供应充足与否直接影响叶绿素的代谢。Roosta等^[38]研究发现,缺Zn使生菜总叶绿素含量显著降低,PSII最大光化学效率(F_v/F_m)下降,表明缺Zn将导致光合电子传递链受损。本试验中,3种叶面锌肥处理均可显著提升叶绿素含量,其中1R3B中 nano-ZnO 处理的效果最优,叶绿素a和总叶绿素含量分别达0.866和1.073 mg/g,显著优于ZnGly和ZnSO₄处理(表1),可能与纳米颗粒缓释Zn²⁺、蓝光激活Zn²⁺转运蛋白基因表达有关^[38-39];3R1B下,ZnGly凭借螯合结构优势,叶绿素b含量显著高于其他锌肥(表1)。传统锌肥ZnSO₄在高蓝光下叶绿素积累增幅仅5.9%,显著低于 nano-ZnO (9.3%)和ZnGly (8.7%),反映其生物利用度不足^[14]。

3.3 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜品质的影响

红光和蓝光组合下补充绿光可提升生菜叶片的硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)等关键酶活性^[39]。Fan等^[40]研究发现,蓝光处理可使小白菜NR、NiR基因表达水平提升,酶活性可达白光处理的1.8倍,说明蓝光通过激活氮同化基因,从而促进硝酸盐转化。本研究发现,不同红蓝光质比和叶面锌肥种类互动对生菜硝酸盐积累具有极显著影响($P<0.001$)。1R1B条件下喷施1.54 mmol/L nano-ZnO 的处理可使硝酸盐含量降至2.51 mg/g,显著低于ZnGly处理,略低于ZnSO₄(图3)。这可能是纳米颗粒表面特性增强了硝酸还原酶稳定性,而高红光(3R1B)可通过促进Zn²⁺吸收,从而强化氮代谢效率^[40-41]。

姜岳丛等^[41]研究表明,蓝光处理可使生菜可溶性蛋白含量显著高于红光处理,这与蓝光促进核糖体生物合成相关^[42]。张帆等^[42]研究发现红光更利于可溶性糖积累,这与红光诱导蔗糖磷酸合成酶活性上调有关。本试验中,随蓝光比例的增加可溶性

糖及可溶性蛋白含量也均有所增加,但各种锌肥处理的可溶性蛋白和可溶性糖积累均显著低于喷施 ddH₂O 的对照(CK)(图4)。该现象与 Roosta 等^[38]发现的缺锌胁迫诱导渗透调节物质积累的结果一致。Roosta 等^[38]研究证实,锌供应不足会导致生菜渗透调节物质(脯氨酸、可溶性糖和总酚)含量升高,同时降低光合色素含量和 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m);而适量 Zn 肥供应可通过激活 SOD 等抗氧化系统降低氧化应激对细胞造成的伤害,从而维持细胞稳态。本试验中,1R3B 配合喷施 nano-ZnO 处理的叶片可溶性糖含量(13.97 mg/g)较 ZnSO₄ 低 11.8%(图4(a)),这一结果说明纳米颗粒可能通过调节糖转运蛋白 SWEET 家族表达影响糖的转运与分配^[43]。

类黄酮和总酚等次生代谢产物也受光质-锌互作调控^[14,37,44]。蓝光通过激活光受体 CRY1/2 信号通路,上调苯丙烷代谢关键酶基因(PAL、CHS、FLS)表达^[44]。本试验中,1R3B 下 nano-ZnO 处理的叶片类黄酮和总酚含量分别较 3R1B 提升 207% 和 335%(图5),这一结果与 Li 等^[37]、姚兰^[44]和 Ouzounis 等^[45]的结论一致,可能是蓝光可诱导 MYB-bHLH-WD40 转录复合体形成,激活黄酮合成酶基因表达^[44]。nano-ZnO 通过产生活性氧触发苯丙氨酸解氨酶活性上调^[14];光质-锌协同促进了 UDP-葡萄糖基转移酶(UGT)表达,增强黄酮糖苷化修饰^[46]。

Zn 与 N 元素的协同作用可调控氮代谢相关酶活性,优化氮素转化效率^[12];而 nano-ZnO 具有高生物利用度及缓释特性,可显著提升作物生物量积累^[14]。二者与高红光(3R1B)条件结合时,既能通过促进茎部细胞分裂和伸长强化生物量积累^[33],又能通过 nano-ZnO 提升锌元素叶面渗透效率,进而优化氮素转化^[12],最终使硝酸盐含量控制在 2.68 mg/g 的较低水平;而高蓝光条件(1R3B)配合施用 nano-ZnO 处理,可显著提高类黄酮、总酚等次生代谢产物含量,进而显著改善生菜的营养品质,这与 Gam 等^[46]的结论一致。

3.4 红蓝光质比及叶面锌肥种类对生菜矿质元素的影响

光质通过调节光受体信号通路及元素转运蛋白活性,影响矿质元素吸收^[47]。黄胜^[48]发现,高红光结合 50 μ mol/L 外源锌肥喷施可使生菜 N、P、K

等大量元素及 Fe、Mn 等微量元素积累量提升。本试验证实,3R1B 配合 nano-ZnO 处理可使生菜叶片的 Ca (1.87 mg/g)、Mg (2.34 mg/g)、Zn (320.2 mg/kg) 等元素积累量均达最大值,较 1R3B 提升 41%~67%。这与红光促进质子泵活性及细胞壁松弛素分泌的协同效应,引起矿质元素的吸收和转运相关^[47]。光质-锌肥形态互作对元素吸收的影响呈现显著差异性^[48]。各光质条件中,nano-ZnO 处理较 ZnSO₄ 和 ZnGly 均可显著提高叶片 Fe、Mn 和 Ca 的含量(图6和图7);可能是 nano-ZnO 的纳米颗粒表面羟基基团使阳离子交换能力增强^[14];光照作用下,nano-ZnO 产生的电子空穴对可控金属转运蛋白(如 IRT1、NRAMP)表达^[47];缓释特性可维持根际的 Zn²⁺ 浓度稳态^[48]。本研究的喷施 ddH₂O 对照(CK)中,蓝光比例增加可导致 Ca、Mg、Fe 等元素流失加剧,降幅为 52%~76%(图6和图7)。这与 Pennisi 等^[49]发现的罗勒香草在红蓝光质比为 1:3 的条件可促进 Ca、Mg 和 Fe 积累的结论存在差异,表明高蓝光对不同植物矿质元素吸收的影响可能不同。

矿质元素间的拮抗效应在 Zn 与 Ca、Mg 元素之间尤为显著^[50-51]。本试验发现,叶面喷施锌肥(尤其是 nano-ZnO)可使生菜中 Zn 的含量提升了 14.7~41.4 倍,但导致 Mg、Mn 等元素的含量显著下降(图6和图7)。这一发现与余丹萍等^[50]所报道的缺 Zn 会诱导 Ca、Mg 超积累的结论不一致。这可能是由于 Zn²⁺ 与二价阳离子 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 竞争载体结合位点,抑制后者吸收^[50];Zn²⁺ 过量会激活重金属 ATP 酶(HMA)转运蛋白,促进 Mn 等元素外排^[50]。Saini 等^[13]研究表明,纳米锌可通过纳米效应缓解离子拮抗,600 μ g/g 纳米锌处理可使草莓果实中 Zn 积累量达传统锌肥的 1.8 倍,同时维持 Fe、Mn 的水平。

光环境优化与锌肥形态选择对元素平衡具有重要意义^[15]。3R1B 处理中 nano-ZnO 处理形成叶片矿质元素的最优比例,Zn:Ca:Mg=171.00:1.00:1.25,更接近生菜生长需求的理想比值(150.00:1.00:1.00)^[48];且使 Fe、Mn 保持在功能阈值,Fe>15 mg/kg, Mn>5 mg/kg; B 含量控制在 0.92~1.24 mg/kg 的安全范围^[44]。Kopsell 等^[51]在西兰花中的研究得到相似的结论,即适宜红蓝光质比与微量元素配合可促进矿质元素的协同积累。本试验中,在相同光质条件下,叶面喷施 nano-ZnO

较 ZnSO_4 和 ZnGly 表现出更显著的营养强化效应(图6和图7),与 Saini 等^[13]研究结果一致。Guo 等^[50]研究证实,锌对植物矿质元素吸收的调控具有显著差异化特征,其核心与离子竞争、转运蛋白活性调控相关。本研究发现,光质与锌肥的互作会加剧这一差异化调控效应;高红光(3R1B)条件下, nano-ZnO 处理通过减弱离子竞争效应,使 Ca、Mg 元素含量较 ZnSO_4 处理高 31% 和 27%(图7);但在高蓝光(1R3B)条件下,其 Fe、Mn 含量较高红光(3R1B)降低 42% 和 35%(图6),说明蓝光可能通过调控金属转运蛋白基因表达改变元素吸收的选择性^[47]。此外, ZnGly 处理在红蓝光质相等(1R1B)下,叶片 Ca 含量提升了 14.3%(图7),其螯合结构可能通过配体交换机制缓解锌-钙拮抗作用^[21]。

4 结 论

不同 LED 红蓝光质比处理中, nano-ZnO 均可显著促进生菜地上部鲜重和干重的提升,效果优于 ZnGly 和 ZnSO_4 , 且高红光(3R1B)条件下增产效果更为显著,生菜地上部鲜重较喷施 ddH_2O 的对照(CK)提升 4.4 倍。随蓝光比例的增加,生菜叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量均呈逐步升高的趋势;高蓝光(1R3B)条件下喷施 ZnGly 处理的总叶绿素含量最优,显著高于其他锌肥处理。类黄酮和总酚含量随蓝光比例增加呈增加趋势,其中 1R3B 的 nano-ZnO 处理叶片类黄酮含量显著高于 ZnSO_4 和 ZnGly 处理。3 种锌肥处理均可降低叶片可溶性糖和可溶性蛋白的积累,且含量均显著低于 CK。高红光条件(3R1B)下, nano-ZnO 处理显著促进叶片 Zn 的富集,但会通过离子拮抗作用导致 Ca、Mg、Fe 等矿质元素含量显著降低。高蓝光(1R3B)可在一定程度上缓解部分矿质元素的吸收抑制,但 nano-ZnO 处理显著降低了叶片中 Fe、Mn 的含量。综上,高蓝光光源可显著改善生菜的品质指标,高红光可显著增加生菜的产量;叶面喷施 nano-ZnO 处理的生菜叶片的 Zn 含量和产量均显著高于其他锌肥,高红光条件下效果更好,且喷施 nano-ZnO 可有效缓解 Zn^{2+} 与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 的离子拮抗效应。

参考文献 References

- [1] Bantis F, Smirnakou S, Ouzounis T, Koukounaras A, Ntagkas N, Radoglou K. Current status and recent achievements in the field of horticulture with

- the use of light-emitting diodes (LEDs)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 235: 437-451
- [2] Chen X L, Xue X Z, Guo W Z, Wang L C, Qiao X J. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 200: 111-118
- [3] 樊小雪, 宋波, 徐海, 陈龙正, 徐志刚, 袁希汉. 不同 LED 光源对生菜生长和品质的影响[J]. 湖北民族学院学报:自然科学版, 2015, 33(3): 330-333
- Fan X X, Song B, Xu H, Chen L Z, Xu Z G, Yuan X H. Effects of different light emitting diodes on growth and quality of lettuce[J]. *Journal of Hubei University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2015, 33(3): 330-333 (in Chinese)
- [4] Hafeez B. Role of zinc in plant nutrition: A review[J]. *American Journal of Experimental Agriculture*, 2013, 3(2): 374-391
- [5] Noman A, Aqeel M, Khalid N, Islam W, Sanaullah T, Anwar M, Khan S, Ye W F, Lou Y G. Zinc finger protein transcription factors: Integrated line of action for plant antimicrobial activity[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2019, 132: 141-149
- [6] McCall K A, Huang C C, Fierke C A. Function and mechanism of zinc metalloenzymes[J]. *Journal of Nutrition*, 2000, 130(5): 1437-1446
- [7] 张莉, 任媛媛, 张岁岐. 锌缺乏对植物生长发育的影响[J]. 现代农业研究, 2020, 26(5): 54-55
- Zhang L, Ren Y Y, Zhang S Q. Effects of zinc deficiency on plant growth and development[J]. *Modern Agriculture Research*, 2020, 26(5): 54-55 (in Chinese)
- [8] Zou C Q, Zhang Y Q, Rashid A, Ram H, Savasli E, Arisoy R Z, Ortiz-Monasterio I, Simunji S, Wang Z H, Sohu V, Hassan M, Kaya Y, Onder O, Lungu O, Mujahid M Y, Joshi A K, Zelenskiy Y, Zhang F S, Cakmak I. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2): 119-130
- [9] Moroney J V, Bartlett S G, Samuelsson G. Carbonic anhydrases in plants and algae[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(2): 141-153
- [10] Sturikova H, Krystofova O, Huska D, Adam V. Zinc, zinc nanoparticles and plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 349: 101-110
- [11] Grewal H S, Williams R. Alfalfa genotypes differ in their ability to tolerate zinc deficiency[J]. *Plant and Soil*, 1999, 214(1): 39-48
- [12] 管庆林, 朴晟源, 袁华恩, 秦艳青, 张思唯, 王俊, 雷云康, 向欢, 赵铭钦. 锌锰硼配施对雪茄烟叶矿质元素含量及其干物质积累的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(9): 128-136
- Guan Q L, Piao S Y, Yuan H E, Qin Y Q, Zhang S W, Wang J, Lei Y K, Xiang H, Zhao M Q. Effects of combined application of zinc, manganese and boron on mineral elements contents and dry matter accumulation of cigar leaves[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(9): 128-136 (in Chinese)
- [13] Saini S, Kumar P, Sharma N C, Sharma N, Balachandrar D. Nano-enabled Zn fertilization against conventional Zn analogues in strawberry (*Fragaria × Ananassa* Duch)[J/OL]. *Scientia Horticulturae*, (2021-02-19). DOI: doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110016
- [14] Garza-Alonso C A, Juárez-Maldonado A, González-Morales S, Cabrera-De la Fuente M, Cadenas-Pliego G, Morales-Díaz A B, Trejo-Téllez L I,

- Tortella G, Benavides-Mendoza A. ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce[J/OL]. *Heliyon*, (2023-01-06). DOI: doi. org/10.1016/j.heliyon.2022.e12787
- [15] Di Q H, Li J, Du Y F, Wei M, Shi Q H, Li Y, Yang F J. Combination of red and blue lights improved the growth and development of eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings by regulating photosynthesis[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40(4): 1477-1492
- [16] Ren M F, Liu S Z, Tang C Z, Mao G L, Gai P P, Guo X L, Zheng H B, Tang Q Y. Photomorphogenesis and photosynthetic traits changes in rice seedlings responding to red and blue light[J/OL]. *International Journal of Molecular Sciences*, (2023-07-12). DOI:doi. org/10.3390/ijms241411333
- [17] 张帅, 文尚胜, 梁依倩, 陈心雅, 陈浩伟, 庞培元. LED光质对于生菜生长的影响[J]. 照明工程学报, 2016, 27(5): 72-76,77
- Zhang S, Wen S S, Liang Y Q, Chen X Y, Chen H W, Pang P Y. The effect of LED light quality on the growth of lettuce [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(5): 72-76,77 (in Chinese)
- [18] 郑玮璇, 王涛, 陈永快, 陈发兴. LED光源红蓝光配比对生菜生长和品质的影响[J]. 东南园艺, 2019, 7(3): 1-6
- Zheng W X, Wang T, Chen Y K, Chen F X. Effect of LED light with different ratios of red to blue light on growth and quality of lettuce [J]. *Southeast Horticulture*, 2019,7(3):1-6 (in Chinese)
- [19] 王哲, 王宇航, 王晓庆, 樊怀福. 植物工厂LED光质调控对芹菜生长及产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(2): 340-344
- Wang Z, Wang Y H, Wang X Q, Fan H F. Effect of LED light quality control on celery growth and yield in plant factory [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(2): 340-344 (in Chinese)
- [20] Khudsar T, Mahmooduzzafar I M, Sairam R K. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua* [J]. *Biologia Plantarum*, 2004, 48(2): 255-260
- [21] Ghasemi S, Khoshgoftarmansh A H, Hadadzadeh H, Afyuni M. Synthesis, characterization, and theoretical and experimental investigations of zinc (II)-amino acid complexes as ecofriendly plant growth promoters and highly bioavailable sources of zinc[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, 32(2):315-323
- [22] Dou H J, Niu G H, Gu M M, Masabni J G. Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments[J/OL]. *Horticulturae*, (2017-06-01). DOI: doi. org/10.3390/horticulturae3020036
- [23] McCree K J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data[J]. *Agricultural Meteorology*, 1972, 10: 443-453
- [24] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 赵晓芳, 戚建莉, 张露荷, 张广忠. 分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J]. 草业科学, 2018, 35(8): 1965-1974
- Hu B F, Huang H L, Ji Y Z, Zhao X F, Qi J L, Zhang L H, Zhang G Z. Evaluation of the optimum concentration of chlorophyll extract for determination of chlorophyll content by spectrophotometry[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1965-1974 (in Chinese)
- [25] 李帮秀, 张贺翠, 王三根, 万华方, 杨昆, 刘文清. 蔬菜硝酸盐含量测定方法的改进[J]. 植物生理学报, 2014, 50(11): 1749-1752
- Li B X, Zhang H C, Wang S G, Wan H F, Yang K, Liu W Q. An improved testing method for determining nitrate contents in fresh vegetable[J]. *Plant Physiology Communications*, 2014, 50(11): 1749-1752 (in Chinese)
- [26] 丁雪梅, 张晓君, 赵云, 谭智敏, 李玉梅, 王鹏, 唐鸿宇, 丛彦龙, 包国章, 马骥超, 张金玉, 沈景林. 蒽酮比色法测定可溶性糖含量的试验方法改进[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(23): 230-233
- Ding X M, Zhang X J, Zhao Y, Tan Z M, Li Y M, Wang P, Tang H Y, Cong Y L, Bao G Z, Ma J C, Zhang J Y, Shen J L. Improvement of the test method for the determination of soluble sugar content by anthrone colorimetry [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(23): 230-233 (in Chinese)
- [27] 焦洁. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定苜蓿中可溶性蛋白含量[J]. 农业工程技术, 2016, 36(17): 33-34
- Jiao J. Determination of soluble protein in alfalfa by coomassie brilliant blue G-250 staining method[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2016, 36(17): 33-34 (in Chinese)
- [28] 王立业, 牛江秀, 王真真, 吴玉琦, 马紫玉, 王艳艳, 于志斌. 景天三七根、茎、花、叶中总黄酮含量测定[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(23):131-135
- Wang L Y, Niu J X, Wang Z Z, Wu Y Q, Ma Z Y, Wang Y Y, Yu Z B. Determination of total flavonoids in roots, stems, flowers and leaves of *Sedum aizoon* L.[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(23): 131-135 (in Chinese)
- [29] 熊汝琴, 李平, 王锐. Folin-Ciocalteu 比色法测定昭通青椒总酚含量[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 140-143
- Xiong R Q, Li P, Wang R. Determination of total phenols in Zhaotong *Zanthoxylum schinifolium* by Folin-Ciocalteu colorimetry [J]. *China Condiment*, 2019, 44(10): 140-143 (in Chinese)
- [30] 张玉忠, 李成林, 赵长庆. 铁(III)-2,2'-联吡啶分光光度法测定维生素C和头孢氨苄[J]. 安徽师大学报:自然科学版, 1998, 21(2): 156-158
- Zhang Y Z, Li C L, Zhao C Q. Spectrophotometric determination of vitamin c and cephalixin using iron (III)-2,2'-bipyridine system[J]. *Journal of Anhui Normal University:Natural Science*, 1998, 21(2):156-158 (in Chinese)
- [31] Castillo-González J, Ojeda-Barrios D, Hernández-Rodríguez A, González-Franco A C, Robles-Hernández L, López-Ochoa G R. Zinc metalloenzymes in plants[J]. *Interciencia*, 2018, 43(4): 242-248
- [32] Kong Y Y, Nemali K. Blue and far-red light affect area and number of individual leaves to influence vegetative growth and pigment synthesis in lettuce[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2021-07-08). DOI:doi. org/10.3389/fpls.2021.667407
- [33] Lee J H, Kwon Y B, Roh Y H, Choi I L, Kim J, Kim Y, Yoon H S, Kang H M. Effect of various LED light qualities, including wide red spectrum-LED, on the growth and quality of mini red romaine lettuce (cv green)[J/OL]. *Plants*, (2023-05-22). DOI:doi. org/10.3390/plants12102056
- [34] Bugbee B. Toward an optimal spectral quality for plant growth and development: The importance of radiation capture[J]. *Acta Horticulturae*, 2016(1134): 1-12
- [35] Li Y, Xin G F, Liu C, Shi Q H, Yang F J, Wei M. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO₂ assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings[J/OL]. *BMC Plant Biology*, (2020-07-06). DOI: doi. org/10.1186/s12870-020-02523-z

- [36] Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida S N, Yoshihara T. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce[J]. *HortScience*, 2010, 45(12): 1809-1814
- [37] Li Y M, Wu L Y, Jiang H Z, He R, Song S W, Su W, Liu H C. Supplementary far-red and blue lights influence the biomass and phytochemical profiles of two lettuce cultivars in plant factory[J/OL]. *Molecules*, (2021-12-06). DOI:doi.org/10.3390/molecules26237405
- [38] Roosta H R, Estaji A, Niknam F. Effect of iron, zinc and manganese shortage-induced change on photosynthetic pigments, some osmoregulators and chlorophyll fluorescence parameters in lettuce[J]. *Photosynthetica*, 2018, 56(2): 606-615
- [39] Bian Z H, Cheng R F, Wang Y, Yang Q C, Lu C G. Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 153: 63-71
- [40] Fan X X, Xue F, Song B, Chen L Z, Xu G, Xu H. Effects of blue and red light on growth and nitrate metabolism in pakchoi[J]. *Open Chemistry*, 2019, 17(1): 456-464
- [41] 姜岳丛, 佟静, 武占会, 白宝锁, 王丽萍, 王宝驹, 梁浩, 刘宁. 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
Jiang Y C, Tong J, Wu Z H, Bai B S, Wang L P, Wang B J, Liang H, Liu N. Effects of different lights on tipburn and quality of lettuce in plant factory[J]. *Vegetables*, 2023(6): 10-17 (in Chinese)
- [42] 张帆, 秦志翔, 郝文琴, 成永三, 张毅, 石玉. 不同光质下外源硒对水培生菜生长和品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(2): 245-255
Zhang F, Qin Z X, Hao W Q, Cheng Y S, Zhang Y, Shi Y. Effect of exogenous selenium on growth and quality of hydroponic lettuce under different light qualities[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(2): 245-255 (in Chinese)
- [43] Liang Z H, Pan X Q, Li W, Kou E F, Kang Y Y, Lei B F, Song S W. Dose-dependent effect of ZnO quantum dots for lettuce growth[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(15): 10141-10149
- [44] 姚兰. LED光对菘蓝毛状根生长、不定芽形成和黄酮化合物积累的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2023
Yao L. The influence of LED lights on growth, adventitious bud differentiation and flavonoid biosynthesis of *Isatis tinctoria* L. hairy root cultures[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2023 (in Chinese)
- [45] Ouzounis T, Razi Parjikolaei B, Fretté X, Rosenqvist E, Ottosen C O. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa* [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2015-01-26). DOI:doi.org/10.3389/fpls.2015.00019
- [46] Gam D T, Khoi P H, Ngoc P B, Linh L K, Hung N K, Anh P T L, Thu N T, Hien N T T, Khanh T D, Ha C H. LED lights promote growth and flavonoid accumulation of *Anoectochilus roxburghii* and are linked to the enhanced expression of several related genes[J/OL]. *Plants*, (2020-10-12). DOI:doi.org/10.3390/plants9101344
- [47] 陈晓丽, 郭文忠, 薛绪掌, Morewane Mmanke Beauty. 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
Chen X L, Guo W Z, Xue X Z, Beauty M B. Effects of LED spectrum combinations on the absorption of mineral elements of hydroponic lettuce[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1394-1397 (in Chinese)
- [48] 黄胜. 光质和锌肥耦合对生菜品质和锌富集的影响[D]. 广州:华南农业大学, 2018
Huang S. Effects of coupling of light quality and zinc fertilizer on quality and zinc accumulation of lettuce[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [49] Pennisi G, Blasioli S, Cellini A, Maia L, Crepaldi A, Braschi I, Spinelli F, Nicola S, Fernandez J A, Stanghellini C, Marcelis L F M, Orsini F, Gianquinto G. Unraveling the role of red: blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2019-03-13). DOI: doi.org/10.3389/fpls.2019.00305
- [50] 余丹萍, 李取生, 王立立, 徐智敏, 郭世鸿, 胡妮, 陈惠君. 缺Fe/Zn及盐胁迫下莴菜对Cd及矿质元素的吸收与IRT1表达的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 234-239
Yu D P, Li Q S, Wang L L, Xu Z M, Guo S H, Hu N, Chen H J. Cadmium and mineral element accumulation and IRT1 gene expression of *Amaranthus hybridus* L. under iron/zinc deficiencies or salt stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 234-239 (in Chinese)
- [51] Kopsell D A, Sams C E, Barickman T C, Morrow R C. Sprouting broccoli accumulate higher concentrations of nutritionally important metabolites under narrow-band light-emitting diode lighting[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2014, 139(4): 469-477

责任编辑:吕晓梅



第一作者简介: 陈伟龙, 佛山大学农业与生物工程学院农艺与种业专业硕士研究生。参与粤港澳大湾区(佛山)先进制造业国家卓越工程师创新研究院联合培养扶持项目(2023FCXM017)、佛山大学2025年学生学术基金项目 and 佛山大学2025年实验室开放创新基金项目。2024—2025年荣获佛山大学学业二等奖奖学金。



通讯作者简介: 陈仁, 博士, 硕士生导师, 曾任佛山大学物理与光电工程学院光源与照明系教师党支部书记兼系主任(2017—2025年)。主要从事植物照明和植物营养学及照明装置研究。主持广东高校科技成果转化中心中试项目、佛山市智慧植物工厂工程技术研究中心和广东省健康照明工程技术研究中心课题等项目。2019年获得学校“双带头人工作室”称号, 2019年被评为优秀教师, 广东省LED光源标准化技术委员会(GDTC20)委员, 广东省照明学会理事会成员。以第一作者或通讯作者身份发表论文18篇(含SCI论文9篇)。作为第一发明人已申请LED专利17件, 授权13项(3项发明专利)。曾主持设计60多项照明工程, 包括植物工厂组培照明、广州路灯EMC节能改造、亚运场馆和大运场馆体育转播照明系统设计与建设工程, 设计金额超过1.5亿。参编了广东省学会团体标准1项。指导本科毕业生论文60多名, 优秀毕业论文13篇, 研究生升学16名, 培养研究生6名, 指导学生获得中国国际“互联网”大学生创新创业大赛国赛铜奖等奖项23项, 指导学生攀登计划等项目20多项。



通讯作者简介: 刘文科, 中共党员, 博士, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员, 博士生导师(农业生物环境工程与能源工程专业), 佛山大学岭南讲座教授。现任中国照明学会农业照明专业委员会委员、中国光学学会农业专业委员、中国照明学会学术工作委员会委员、中国照明学会科普工作委员会委员。现兼任《中国农业气象》《照明工程学报》《中国照明电器》《蔬菜》的编委、教育部学位中心学位论文评议专家、中国科协财政项目评审专家、科技部重点领域创新团队“农业生物环境科学与工程创新团队”骨干。主持国家863课题、国家自然科学基金面上项目、国家重点研发计划项目课题等科研任务10余项, 主持企业横向项目10余项, 完成企事业单位委托植物工厂与植物照明领域技术培训与技术服务20余次。至今, 以第一作者和通讯作者身份发表文章300余篇。获得发明专利6件, 获得国家科技进步奖2项, 北京市科学技术奖2项, 其他省部级科技奖励7项。已培养硕博研究生20余人。