

张子昆,林碧英,杨永森,等. 加富 CO₂ 环境下不同红蓝光配比对薺菜生长、品质和固碳量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(1):136–142.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.01.020

加富 CO₂ 环境下不同红蓝光配比对薺菜生长、品质和固碳量的影响

张子昆,林碧英,杨永森,陈 风,伊光捷,张晓瑾,刘燕飞

(福建农林大学园艺学院,福建福州 350002)

摘要:探讨加富 CO₂ 下不同光质对薺菜生长、品质和固碳量的影响,为缓解设施内早春栽培弱光胁迫和 CO₂ 缺乏提供解决方案,同时为设施农业的固碳–高产、优质栽培一体化研究和减少农业碳排放提供参考依据。以薺菜闽蔬三丫为材料,设置 A1(R:B=2:1)、A2(R:B=3:1)、A3(R:B=4:1)、A4(R:B=5:1)4 个处理,同时以 CK0(白光处理不加施 CO₂)、CK1(白光处理加施 CO₂)为对照,分析在加富 CO₂ 环境下 A1、A2、A3、A4 处理对薺菜生长、品质和固碳量的影响。结果表明,CK1 相比 CK0 能显著提高薺菜株高、茎粗和产量,同时显著增加薺菜的可溶性糖、维生素 C 含量和固碳量,并降低薺菜的硝酸盐含量。在加富 CO₂ 环境下,使用红蓝光配比处理的薺菜株高、茎粗和产量均高于 CK1,薺菜的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 含量和固碳量相比 CK1 有显著性提升,同时薺菜的硝酸盐含量相比 CK1 有显著性降低,其中以 R:B=4:1(A3)处理效果最佳。因此,加富 CO₂ 能显著促进薺菜的生长、提高产量、品质和固碳量,并以 R:B=4:1(A3)处理显著促进薺菜的生长,提高产量、品质和固碳量效果最佳。

关键词:薺菜;加富 CO₂;红蓝光配比;营养品质;固碳量

中图分类号:S636.901 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)01–0136–07

薺菜(*Ipomoea aquatica*),别称空心菜、竹叶菜等,是旋花科甘薯属,以绿叶和嫩茎供食用,一年生或多年生蔬菜,原产于我国的热带多雨地区^[1]。近年来,随着薺菜设施栽培面积的逐年扩大,如何提高薺菜产量成为科研机构以及各大企业关注的焦点。CO₂ 是光合作用的主要原料之一,其浓度与植物的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用密切相关^[2]。设施栽培由于其密闭环境容易导致 CO₂ 亏缺现象的发生,严重影响设施内作物的生长和发育。而增施 CO₂ 能够显著提高设施内作物的产量和品质,是设施蔬菜增产提质的有效措施之一^[3]。Pan 等认为,CO₂ 浓度上升有利于促进植物产量和品质的提高^[4]。目前,全球气候变暖状况加剧,大气中 CO₂ 浓度不断上升,因此减少温室气体排放及增加碳吸收受到国内和国际社会的广泛关注^[5]。我国农业

活动产生的温室气体排放比例为 16%~17%^[6–7],我国承诺 2030 年前达到碳达峰,2060 年达到碳中和^[8]。因此,在巨大的温室气体减排任务下,我国急需提高资源利用率,发展低碳农业^[6]。光作为植物生长发育过程中的环境因子之一,从能量和信号 2 个方面在植物生命活动的各类生化反应中发挥着极其重要的作用^[9]。弱光胁迫导致植物生长异常,王惠哲等认为,弱光胁迫下,植株产量和品质都有显著性下降。福建地区早春薺菜种植一般在设施大棚内,但由于设施覆盖材料和早春气候条件影响,设施内往往产生弱光胁迫和 CO₂ 缺乏等逆境^[10]。因此,如何在设施内提高薺菜的光合作用,对薺菜产量和品质提高尤为重要。本研究分析在加富 CO₂ 条件下不同红蓝光比对薺菜生长及品质的影响,以期缓解设施内早春薺菜栽培弱光胁迫和 CO₂ 缺乏提供解决方案,为加富 CO₂ 环境下不同红蓝光配比可促进薺菜的生长,提高其产量、品质和固碳量的研究提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为薺菜,品种为闽蔬三丫,种子购于

收稿日期:2022–03–03

基金项目:福建省科技重大专项(编号:2018NZ0002–2);福建农林大学科技创新项目(编号:CXZX2020141C)。

作者简介:张子昆(1997–),福建漳州人,硕士研究生,主要从事蔬菜栽培与设施环境调控研究。E-mail:694261564@qq.com。

通信作者:林碧英,主要从事蔬菜栽培生理与设施环境调控及无土栽培技术研究。E-mail:lby3675878@163.com。

福州闽蔬农业科技有限公司。

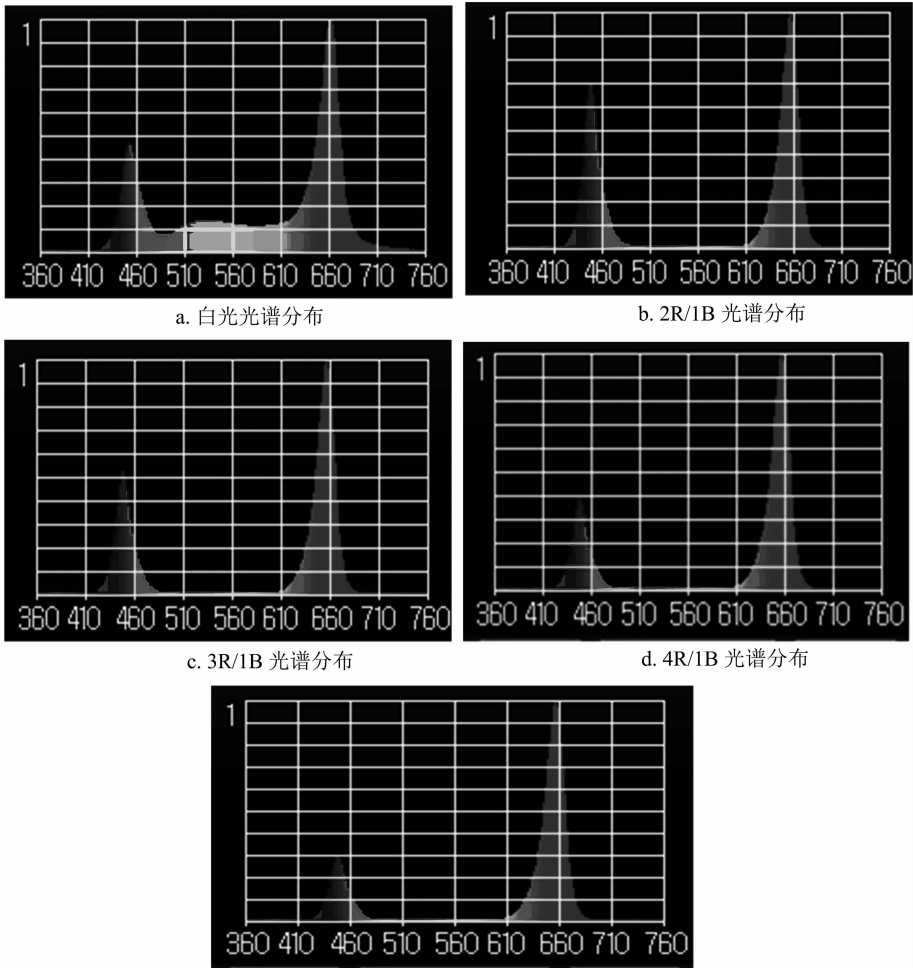
1.2 试验设计

试验于 2021 年 3 月 10 日至 9 月 30 日在福建农林大学设施温室内进行。试验 LED 光源包括红蓝光[红光(R)峰值波长为 660 nm、蓝光(B)峰值波长为 450 nm)、白光(波长范围为 410 ~ 760 nm],均购于福建三安科技有限公司。CO₂ 采用钢瓶液态 CO₂,从福州中铭生物科技有限公司购得。种子进行常规温汤浸种,播于多功能蓄水式育苗盆(基质配比为草炭:蛭石:珍珠岩=3:1:1),待幼苗长到 2 叶 1 心时,随机选取长势一致的幼苗进行处理,将多功能蓄水式育苗盆置于培养箱(每个培养箱大小为 1.0 m×0.5 m×0.5 m)中,在每个培养箱中进行不同红蓝光配比处理,各处理调整植物大部分叶面与光源的距离均为 25 cm,光照度为 (250 ± 5) μmol/(m² · s),光周期为 12 h,同时每天 10:00—12:00 向培养箱中通入 CO₂,用转子流量计使柜体内 CO₂ 浓度维持在 (1 000 ± 50) μL/L,并每

隔 30 min 用艾科微克 CO₂ 测定仪(美国产)对各棚内的 CO₂ 浓度进行测定核实,其余时间不补充。其他环境因子可控,白天温度为 (30 ± 1) °C,夜晚温度为 (24 ± 1) °C,培养箱内湿度为 60% ~ 70%。LED 光质设置 5 个处理,CO₂ 设置 2 个处理(表 1)。试验处理开始后 25 d 即采收期,每个样品随机选取 10 株,对形态指标、含水量和营养相关指标重复测定 3 次,结果取平均值(表 1、图 1)。

表 1 试验处理设计

处理	光源处理	CO ₂ 通入量 (μL/L)
CK0	白光处理	0 ± 0
CK1	白光处理	1 000 ± 50
A1	R : B = 2 : 1	1 000 ± 50
A2	R : B = 3 : 1	1 000 ± 50
A3	R : B = 4 : 1	1 000 ± 50
A4	R : B = 5 : 1	1 000 ± 50



e. 5R/1B 光谱分布

图1 不同试验处理的光谱分布

1.3 形态指标及相关生理指标测定与方法

1.3.1 株高、茎粗、鲜质量的测定 株高采用精确度为 1 mm 的游标卡尺进行测量,从根茎分界处到生长点的高度为株高;茎粗采用精确度为 0.01 mm 的电子游标卡尺进行测量,以子叶下部节间 1 cm 为基准;鲜质量采用精确度为 0.01 g 电子天平进行测量。

1.3.2 根系生长的测定 利用根系扫描仪 Epson Perfection 4990 PHOTO 进行扫描、根系分析系统 WinRHIZO 进行分析,得到根总长。

1.4 品质及硝酸盐指标测定

1.4.1 可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 含量的测定 可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[11]测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法^[11]测定,维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚比色法^[11]测定。

1.4.2 硝酸盐含量的测定 硝酸盐含量采用浓硫酸-水杨酸比色法^[11]测定。

1.4.3 地上部固碳量 王首吉等认为,植物每产生 1 g 干物质需要固定 1.63 g CO₂^[12-13],可根据栽培和采收时薺菜的干物质量计算其地上部固碳量,计算公式为

$$W=1.63\times\frac{a}{a+b}\times r\times\rho。$$

式中:W 表示地上部固碳量,g/m²;a 表示采收时地上部分干质量,g;b 表示采收时地下部分干质量,g;r 表示干物质净积累量,g/株,由采收时干物质量减去栽培时干物质量得到;ρ 表示栽培密度,株/m²,本研究栽培密度为 100 株/m²。

1.5 数据处理

试验所得数据采用 Excel 2003 和 DSP 9.5 软件数据进行统计分析。采用 Duncan’s 新复级差法进行差异显著分析(α=0.05),利用 Prism 8.0 软件作图。图表中数据为“平均值±标准差”。

2 结果与分析

2.1 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜生物量的影响

2.1.1 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对株高、茎粗、鲜质量的影响 株高、茎粗、鲜质量、根总长是衡量植物生长的重要指标。由表 2、图 2 可知,处理 25 d 后,CK1 的株高、茎粗、鲜质量、根总长比 CK0 分别提高 76.2%、45.4%、19.1%、78.9%,除了茎粗外,其他均呈显著差异。在加富 CO₂ 环境下,不同光源处理株高从大到小依次为 A3>A2>A4>A1>CK1,其中 A3、A2、A4、A1 比 CK1 分别提高 33.3%、20.7%、20.6%、7.5%,且均与 CK1 存在显著性差异;各处理茎粗从大到小依次为 A3>A4>A2>A1>CK1,其中 A3、A4、A2、A1 比 CK1 分别提高 60.6%、45.5%、21.9%、11.7%,且均与 CK1 存在显著性差异。各处理鲜质量从大到小依次为 A3>A2>A4>A1>CK1,其中 A3 鲜质量最高,达到 42.98 g,比 CK1 高 54.3%,A2、A4、A1 比 CK1 分别提高 48.4%、41.1%、18.6%,均与 CK1 存在显著性差异;各处理根总长从大到小依次为 A3>A2>A4>A1>CK1,均与 CK1 存在显著性差异。

表 2 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜生长的影响

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	鲜质量 (g)	根总长 (cm)
CK0	18.01±0.44e	8.43±0.24e	23.39±0.41f	143.80±4.69f
CK1	31.73±1.11d	12.26±0.08e	27.86±0.21e	257.28±4.06e
A1	34.11±1.35c	13.70±0.52d	33.05±0.74d	286.24±6.02d
A2	38.29±0.62b	14.94±0.97c	41.33±0.34b	327.00±5.67b
A3	42.31±0.95a	19.69±0.33a	42.98±0.72a	370.74±6.45a
A4	38.26±1.06b	17.84±0.98b	39.31±0.32c	314.61±4.34c

注:同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

2.1.2 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜含水量的影响 植物体内都含有水分,生长活跃和代谢旺盛的植物和细胞的含水量高。由表 3 可知,各处理植株含水量中,CK1 比 CK0 提高 0.1%。在加富 CO₂ 环境下,不同红蓝光配比处理植物含水量从高到低依次为 A3>A4>A2=A1>CK1,其中 A3 含水

量最高,达到 94.7%,比 CK1 提高 2.0%,各处理间均存在显著性差异。

2.2 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜营养品质及硝酸盐的影响

2.2.1 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜可溶性糖的影响 植物体内的碳营养状况以及农产品的



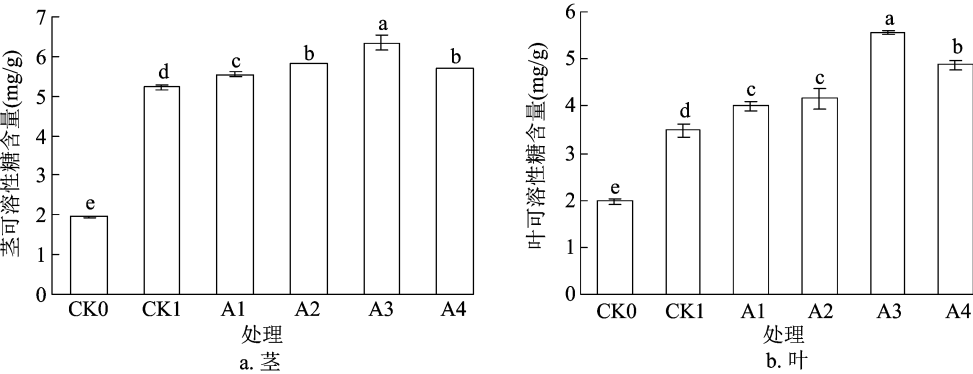
图2 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜生长的影响

表 3 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜含水量的影响

处理	植物含水量(%)
CK0	92.3 ± 0.4e
CK1	92.8 ± 0.1d
A1	92.9 ± 0.1c
A2	92.9 ± 0.1c
A3	94.7 ± 0.1a
A4	93.6 ± 0.1b

品质常以可溶性糖含量作为重要参考指标^[14]。由图 3 可知,处理后 25 d,CK1 茎和叶中可溶性糖含量

与 CK0 差异显著,其中茎和叶中可溶性糖含量分别提高 167.6%、75.3%。在加富 CO₂ 环境下,不同红蓝光配比处理茎和叶中可溶性糖含量与 CK1 都存在显著性差异,其中各处理茎中可溶性糖含量从大到小依次为 A3 > A4 > A2 > A1 > CK1,其中 A3、A4、A2、A1 较 CK1 分别提高 21.4%、11.5%、9.1%、6.1%;各处理叶中可溶性糖含量从大到小依次为 A3 > A4 > A2 > A1 > CK1,其中 A3、A4、A2、A1 较 CK1 分别提高 60.0%、40.3%、19.5%、15.0%,同时 A3 与其他处理存在显著性差异。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同
图3 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜可溶性糖的影响

2.2.2 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜可溶性蛋白的影响 蛋白质作为细胞中含量最丰富的生物大分子之一,是生物体结构和功能最重要的物质基础^[15]。由图 4 可知,处理后 25 d,CK1 茎和叶中可溶性蛋白含量与 CK0 差异显著,其中茎和叶中可溶性蛋白含量分别提高 14.9%、60.3%。在加富 CO₂ 环境下,不同红蓝光配比处理茎和叶中可溶性蛋白含量与 CK1 都存在显著性差异,各处理茎中可溶性蛋白从大到小依次为 A3 > A4 > A2 > A1 >

CK1,其中 A3、A4、A2、A1 较 CK1 分别提高 66.1%、39.4%、30.3%、17.6%,同时 A3 与其他处理存在显著性差异;各处理叶中可溶性蛋白含量排列为 A3 > A4 > A2 > A1 > CK1,其中 A3、A4、A2、A1 较 CK1 分别提高 37.2%、19.4%、16.0%、9.0%,同时 A3 与其他处理存在显著性差异。

2.2.3 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜维生素 C 含量的影响 植株中维生素 C 含量是衡量植株营养品质的一个重要指标。由图 5 可知,处理后 25 d,

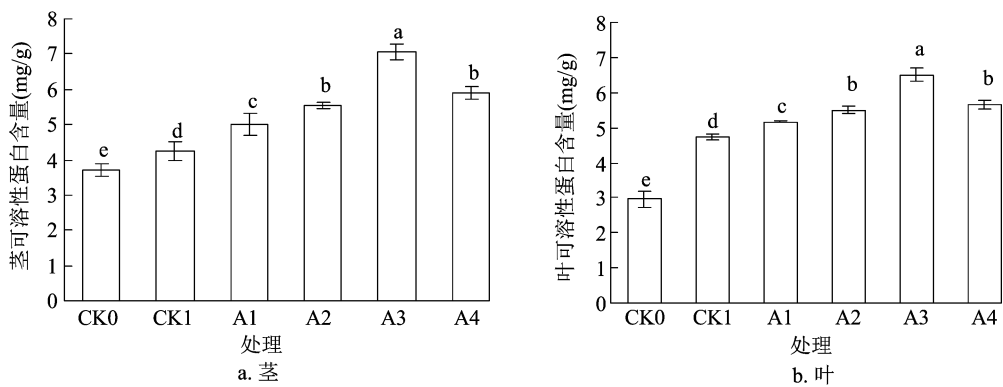


图4 加富 CO₂ 下不同红蓝光对比对薹菜可溶性蛋白的影响

CK1 茎和叶中维生素 C 含量与 CK0 茎和叶中维生素 C 含量相比具有显著性差异,其中茎和叶中维生素 C 含量分别提高 6.3%、49.5%。在加富 CO₂ 环境下,不同红蓝光配比处理茎和叶中维生素 C 含量与 CK1 都存在显著性差异,其中各处理茎中维生素 C 含量从大到小依次为 A3 > A4 > A2 > A1 > CK1,

A3、A4、A2、A1 较 CK1 分别提高 22.8%、19.3%、13.9%、4.2%,同时 A3 与其他处理存在显著性差异;各处理叶中维生素 C 含量从大到小依次为 A3 > A2 > A4 > A1 > CK1, A3、A2、A4、A1 较 CK1 分别提高 16.8%、9.4%、6.2%、4.5%,同时 A3 与其他处理存在显著性差异。

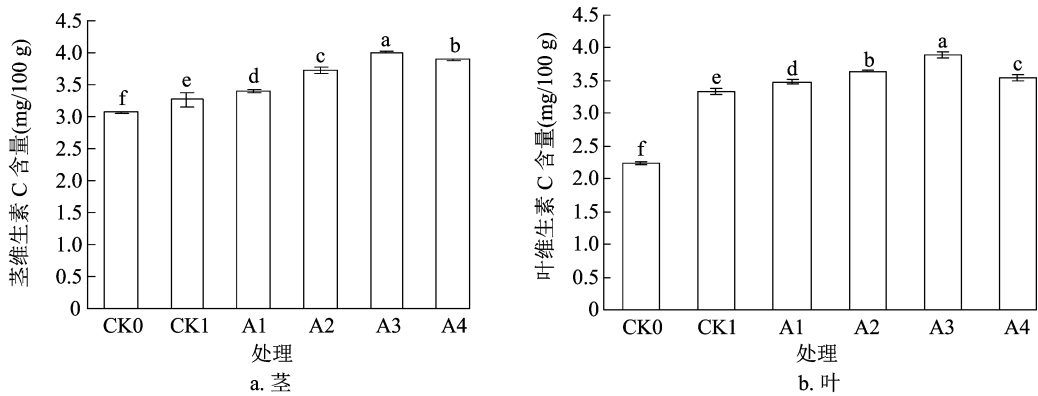


图5 加富 CO₂ 下不同红蓝光对比对薹菜维生素 C 的影响

2.2.4 加富 CO₂ 下不同红蓝光对比对植物硝酸盐的影响 叶菜类蔬菜常常含有大量的硝酸盐,在烹调过程中容易转化为亚硝酸盐,从而危害人体健康^[16]。由图 6 可知,处理后 25 d,CK1 茎和叶中硝酸盐含量与 CK0 茎和叶中硝酸盐含量相比具有显著性差异,其中茎和叶中硝酸盐含量分别降低 9.9%、8.5%。在加富 CO₂ 环境下,不同红蓝光配比处理中,A2、A3、A4 茎中硝酸盐含量相比 CK1 茎中硝酸盐含量略有降低,但不具有显著性差异,A1 茎中硝酸盐含量相比 CK1 茎中硝酸盐含量具有显著性差异,降低 18.2%;各处理叶中硝酸盐含量从大到小依次为 CK1 > A3 > A1 > A4 > A2,其中 A2、A4、A1、A3 较 CK1 分别降低 13.2%、12.5%、

6.7%、6.6%,同时各处理均与 CK1 存在显著性差异。在所有试验处理,硝酸盐含量均在我国规定的硝酸盐安全范围。

2.3 加富 CO₂ 下不同红蓝光对比对薹菜地上部固碳量的影响

不同红蓝光质处理对薹菜地上部固碳量具有显著影响。由表 4 可知,处理 25 d 后,各处理植株地上部固碳量中,CK1 比 CK0 提高 49.0%。在加富 CO₂ 环境下,不同红蓝光配比处理中,各处理地上部固碳量从大到小依次为 A3 > A2 > A4 > A1 > CK1;地上部固碳量中 A3、A2、A4、A1 比 CK1 分别提高 95.0%、78.2%、62.0%、43.8%,且均与 CK1 存在显著性差异。

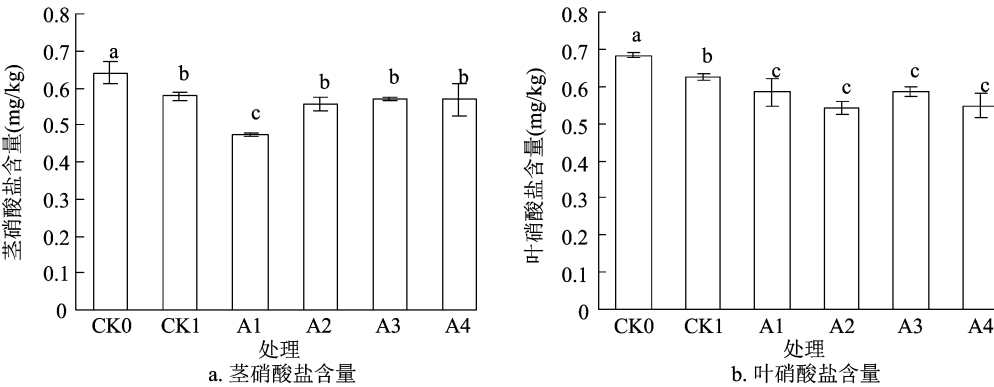


图6 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜硝酸盐的影响

表 4 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜地上部固碳量的影响

处理	地上部固碳量 (g/m ²)
CK0	279.77 ± 2.13f
CK1	416.96 ± 1.70e
A1	599.61 ± 10.14d
A2	742.99 ± 5.56b
A3	812.89 ± 7.70a
A4	675.52 ± 11.18c

3 讨论与结论

3.1 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜生长的影响

CO₂ 是影响设施蔬菜生长的环境因素之一。张仟雨等认为,CO₂ 的提高能显著提高白菜的单株产量^[17]。周成波认为,LED 红蓝组合光处理相比白光可以提高白菜的株高和产量^[18]。黎庭耀等认为,使用红蓝复合光补光处理的叶菜类蔬菜的鲜质量、株高、根长显著高于白光补光^[19]。本研究结果显示,CK1 较 CK0 的株高、茎粗、鲜质量和根总长均有显著性提升,其中株高提升最显著,表明加施 CO₂ 有利于促进薺菜的生长,这与陈丹艳等在生菜上的研究结果^[20]一致。另外本研究还发现,加富 CO₂ 环境下,使用不同红蓝光配比处理相比 CK1 均可显著提高薺菜的株高、茎粗、鲜质量和根总长,其中以 A3 提高效果最好,表明在加富 CO₂ 环境下使用适宜的红蓝光有利于促进薺菜的生长。

3.2 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜营养品质及硝酸盐的影响

CO₂ 富集,有利于提高植物的产量与品质及其体内的可溶性糖含量^[21]。可溶性糖是光合作用积

累的重要产物,可溶性蛋白则是植株体内形成代谢重要的调节物质。光质对于植物体内碳水化合物和蛋白质代谢也有调控作用,学者针对生菜^[22]、乌塌菜^[23]、薺菜^[24] 等进行研究,发现红蓝组合光有利于提高蔬菜的光能利用率,促进碳氮代谢,增加物质积累,提高营养品质。本研究发现,CK1 较 CK0 的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、维生素 C 含量有显著性提升,这与宋蜜蜂等的研究结果^[25-26] 一致,其中植株中可溶性糖含量提升幅度最大,表明增施 CO₂ 主要影响薺菜的碳代谢,增加碳代谢产物的积累,有利于提高薺菜的品质;同时,CK1 较 CK0 硝酸盐含量降低,表明增施 CO₂ 有利于降低薺菜的硝酸盐含量,这与都韶婷等的研究结果^[27-28] 一致。本研究还发现,在加富 CO₂ 环境下,使用不同红蓝光配比处理相比 CK1 均可显著提高薺菜的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和维生素 C 含量,所有处理中 A3 提高效果最好,A3 处理植株茎中可溶性蛋白含量提升效果最好,而植株叶中可溶性糖含量提升最显著,表明在加富 CO₂ 环境下,使用适宜的红蓝光有利于提高薺菜的营养品质。

3.3 加富 CO₂ 下不同红蓝光配比对薺菜地上部固碳量的影响

自然固碳法主要是利用陆地植物的固碳功能^[29],目前自然固碳研究多基于森林、草原生态系统等,关于设施农作物固碳的研究相对较少。本研究结果表明,CK1 较 CK0 的地上部固碳量有显著性提升,这与陈丹艳的研究结果^[30] 一致。宁宇等认为,红蓝光组合中提高红光比例能够提高芹菜的净光合速率并促进碳同化^[31]。本研究还发现,加富 CO₂ 环境下,使用不同红蓝光配比处理相比 CK1 可以显著促进薺菜地上部固碳量的提高,其中以 A3 提高效果最好,表明在加富 CO₂ 环境下使用适宜的

红蓝光有利于提高薺菜的地上部固碳量。

综上可知,增施 CO_2 后,薺菜的产量和营养品质指标有显著性提高,硝酸盐含量显著降低,且符合我国规定的硝酸盐安全范围。在加富 CO_2 环境下,使用不同红蓝光配比处理相比白光处理均对薺菜的生长和营养品质指标有显著的提高作用,其中以 A3 处理(R : B = 4 : 1)效果最佳。因此,在设施内加富 CO_2 环境下,使用 R : B = 4 : 1 红蓝光配比处理,不仅能缓解设施内早春栽培弱光胁迫和 CO_2 缺乏,且使薺菜加快生长、提早采收上市,进而实现其经济价值。同时,本试验量化了薺菜的固碳量,为设施农业的固碳 - 高产栽培一体化研究提供了参考依据,对实现减少农业的碳排放具有参考作用,同时也为后期的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1]王希强. 空心菜优质高产栽培技术[J]. 现代农业科技,2010(21):128,140.
- [2]张振花,袁宏霞,刘 洋,等. 温室番茄对增施不同浓度 CO_2 的光合响应[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(4):1010 - 1018.
- [3]金奖铁,李 扬,李荣俊,等. 大气二氧化碳浓度升高影响植物生长发育的研究进展[J]. 植物生理学报,2019,55(5):558 - 568.
- [4]Pan T H, Ding J J, Qin G G, et al. Interaction of supplementary light and CO_2 enrichment improves growth, photosynthesis, yield, and quality of tomato in autumn through spring greenhouse production [J]. HortScience, 2019, 54(2):246 - 252.
- [5]Li N, Chen M X, Gao X M, et al. Carbon sequestration and Jerusalem artichoke biomass under nitrogen applications in coastal saline zone in the northern region of Jiangsu, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 568:885 - 890.
- [6]刘宇峰,原志华,郭玲霞,等. 中国农作物生产碳足迹及其空间分布特征[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2577 - 2587.
- [7]田 云,张俊彪,李 波. 基于投入角度的农业碳排放时空特征及因素分解研究——以湖北省为例[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(6):752 - 755.
- [8]Gan Y T, Liang C, Chai Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production [J]. Nature Communications, 2014, 5:5012.
- [9]王达菲,杨振超,蔡 华,等. LED 连续光 and 不同频率间歇光对黄瓜幼苗生长及光合特性的影响[J]. 北方园艺,2016(19):55 - 59.
- [10]王惠哲,庞金安,李淑菊,等. 弱光对春季温室黄瓜生长发育的影响[J]. 华北农学报,2005,20(1):55 - 58.
- [11]王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006.

- [12]王首吉,杜 虹,梅志平,等. 春季深澳湾龙须菜固碳量及其影响因素[J]. 海洋环境科学,2016,35(3):343 - 348.
- [13]胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报,2015,39(2):140 - 158.
- [14]Yu X Y, Fan J D, Kong Q G, et al. Antisense acid invertase (*Mail*) gene alters soluble sugar composition and size in transgenic muskmelon fruit[J]. Acta Horticulturae, 2007(763):237 - 244.
- [15]张士秀. 稀土对作物体内蛋白质、氨基酸及效应物影响研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2010.
- [16]李 辉,张 涛. 不同叶菜类蔬菜对硝酸盐积累差异的研究[J]. 安徽农学通报,2008,14(13):100 - 102.
- [17]张仟雨,聂磊云,李 萍,等. 大气 CO_2 浓度升高对小白菜生长发育及品质的影响[J]. 山西农业科学,2017,45(3):428 - 432.
- [18]周成波. 光质对小白菜生长及生理特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2017.
- [19]黎庭耀,李桂花,陈汉才,等. 不同光源对几种叶菜生长的影响[J]. 蔬菜,2015(10):21 - 23.
- [20]陈丹艳,杨振超,孔 政,等. CO_2 对生菜生长和固碳量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(6):108 - 114.
- [21]Helyes L, Lugasi A, Péli E, et al. Effect of elevated CO_2 on lycopene content of tomato (*Lycopersicon lycopersicum* L. Karsten) fruits[J]. Acta Alimentaria, 2011, 40(1):80 - 86.
- [22]梁 祎,郝文琴,石 玉,等. 不同光质下外源锌对水培生菜生长和品质的影响[J]. 北方园艺,2021(18):7 - 13.
- [23]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.
- [24]刘亚男. 不同 LED 光质对水培薺菜生长、品质及相关酶的研究[D]. 福州:福建农林大学,2019.
- [25]宋蜜蜂. 大气 CO_2 浓度升高对油菜光合生理及产量品质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2009.
- [26]赵 燕. 光环境对薺菜生长、产量及品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
- [27]都韶婷,章永松. 增施 CO_2 降低小白菜硝酸盐积累的机理研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1509 - 1514.
- [28]谢鑫鑫,陈满堂,林碧英. 不同浓度 CO_2 对薺菜产量和品质的影响[J]. 热带作物学报,2012,33(12):2166 - 2170.
- [29]Bayer A D, Pugh T A M, Krause A, et al. Historical and future quantification of terrestrial carbon sequestration from a Greenhouse - Gas - Value perspective[J]. Global Environmental Change, 2015, 32:153 - 164.
- [30]陈丹艳. 植物工厂中光强、 CO_2 、营养液调控对生菜和番茄生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [31]宁 宇,邓惠惠,李清明,等. 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.