

陈佳佳, 李 汛, 吴沿友, 等. 增施 CO₂ 条件下施硒对温室黄瓜产量及硒吸收累积的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(6): 1503-1511.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.06.021

增施 CO₂ 条件下施硒对温室黄瓜产量及硒吸收累积的影响

陈佳佳¹, 李 汛², 吴沿友¹, 段增强²

(1. 江苏大学农业装备工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 在开顶式生长箱(OTCs)内,以津美3号黄瓜为试验材料,采用在营养液中添加硒肥的水培方式,研究增施 CO₂ 对不同施硒水平下黄瓜生长发育的影响及黄瓜对硒的吸收、累积与分配的影响。结果表明,无论是否增施 CO₂,随着营养液中施硒量的增加,黄瓜产量均呈现出先增加后降低的趋势,植株各部位的硒含量及硒累积量较未施硒对照显著提高,且均表现为根>茎>果实>叶片,增施 CO₂ 处理的黄瓜果实的硒转移系数随着施硒量的增加呈上升趋势。在相同硒水平下,增施 CO₂ 整体上能提高黄瓜株高、净光合速率及产量,但对果实硒含量、硒累积量和硒转移系数基本无显著影响。CO₂ 与硒的交互作用还提高了黄瓜果实硒累积量占单株植株硒累积量的比例。当施硒量为 0.125 mg/L、CO₂ 浓度为 1 200 μmol/mol 时,黄瓜产量达到峰值,与对照(未施硒且不增施 CO₂)相比增幅达 45.1%,黄瓜果实硒含量、硒累积量较对照(未施硒且不增施 CO₂)显著增加,且硒含量在安全食用范围内。

关键词: 硒; 增施 CO₂; 黄瓜; 转移系数

中图分类号: S627; Q948.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2020)06-1503-09

Effects of selenium application on yield, selenium uptake and accumulation of cucumbers in greenhouse under elevated CO₂ condition

CHEN Jia-jia¹, LI Xun², WU Yan-you¹, DUAN Zeng-qiang²

(1. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In the open-top chambers (OTCs), Jinmei No.3 cucumber was used as the experimental material, hydroponic culture method under different atmospheric CO₂ concentrations and selenium (Se) application levels was adopted to investigate the growth of cucumber and the uptake, accumulation and distribution of Se. The results showed that the yield of cucumber increased first and then decreased with the increase of Se application in nutrient solution, the Se content and Se accumulation in all parts of the plant were significantly higher than those in the control, and the Se content followed the order of root > stem > fruit > leaf. The Se transfer coefficient of cucumber fruit increased with the increase of Se application rate under elevated CO₂ condition. At the same selenium level, increasing CO₂ improved plant height, net photosynthetic rate and yield of cucumber, but had no significant effect on Se content, Se accumulation and Se transfer coefficient of cucumber fruits. In addition, the interaction of CO₂ and Se also increased the proportion of Se accumulation in fruit to that in the whole plant. When the Se mass concentration was 0.125 mg/L and CO₂ concentration was 1 200 μmol/mol, the cucumber yield increased by 45.1% compared with the control group, and reached the peak value. Moreover, the Se content and Se accumulation in fruits increased significantly compared with the control, and the Se content was within the safe edible range.

Key words: selenium; elevated CO₂; cucumber; transfer coefficient

收稿日期: 2020-05-08

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17202026-5); 国家自然科学基金项目(41877103)

作者简介: 陈佳佳(1995-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事植物生态研究。(E-mail) jjchen1995@126.com

通讯作者: 段增强, (E-mail) zqduan@issas.ac.cn

硒是人体必需的微量元素之一^[1],具有防治克山病和大骨节病、预防癌症和心血管疾病、抗衰老、提高机体免疫能力、拮抗某些重金属元素等多种生物学功能^[2-4],与人体健康密切相关。中国是国际公认的缺硒大国,全国缺硒省份多达 22 个,缺硒土壤面积占国土总面积的 72%^[3,5-6]。近年来,富硒作物的研究日益受到关注和重视,提高作物硒含量的方式主要包括叶面喷施硒、土壤施硒和水培施硒 3 种。王晋民等^[7]对大蒜叶面喷施的试验结果表明,适宜的硒浓度可以提高大蒜的硒含量、产量和品质。冶军等^[8]研究发现,叶面喷施硒肥能够显著提高大豆的硒水平和品质,但是对大豆产量无显著影响。Keskinen 等^[9]通过土壤施硒试验得出,小麦单株硒含量随着生长期的推进呈先升后降的趋势。杜振宇等^[10-12]对萝卜、茄子、小白菜等作物的施硒试验结果表明,作物可食用部分的含硒量随着土壤施硒量的提高而显著增加,随着生育期的延长,小白菜的含硒量逐渐增加,而萝卜的含硒量逐渐降低。土壤施硒或叶面喷施硒虽然可以促进作物各器官对硒的吸收,但是存在硒吸收利用率低、硒水平不易调控等问题^[13],而水培施硒能够克服这些缺点,是生产富硒蔬菜的有效途径。

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是中国设施栽培的主要蔬菜作物之一,其栽种面积已经达到中国设施蔬菜总面积的 5%^[14]。黄瓜对硒有一定的富集能力^[15],通过农艺措施增加黄瓜中的硒含量,对于提高中国居民膳食中硒的摄入量具有重要意义。但是由于目前设施内 CO₂ 匮乏问题较为突出^[16-17],较低的 CO₂ 浓度导致作物光合速率降低、产量下降,而增施 CO₂ 能够有效解决这些问题^[18-21]。因此,本试验研究增施 CO₂ 与施硒的交互作用,探索适宜的水培供硒水平,以期高产优质富硒黄瓜的生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验于中国科学院南京土壤研究所温室开顶式生长箱(OTCs)内进行。供试黄瓜品种为津美 3 号,种子购自南京金丰种苗有限公司。

1.2 试验设计

设 2 个 CO₂ 浓度水平,分别为 400 μmol/mol[对照(C0),即大气 CO₂ 浓度]、1 200 μmol/mol(C1);

在每个 CO₂ 浓度下设 4 个供硒量水平,分别为 0 mg/L(Se0)、0.125 mg/L(Se1)、0.250 mg/L(Se2)和 0.500 mg/L(Se3)。试验共设 8 个处理(表 1),每个处理重复 4 次。

表 1 各处理的 CO₂ 浓度及硒质量浓度

Table 1 The CO₂ concentration and selenium mass concentration in each treatment

处理编号	CO ₂ 浓度 (μmol/mol)	施硒量 (mg/L)
C0Se0	400	0
C0Se1	400	0.125
C0Se2	400	0.250
C0Se3	400	0.500
C1Se0	1 200	0
C1Se1	1 200	0.125
C1Se2	1 200	0.250
C1Se3	1 200	0.500

1.3 试验方法

选取饱满、大小一致的黄瓜种子,消毒后于 25 ℃ 恒温培养室中催芽,种子露白后播种于盛有培养基质的育苗盘内,待黄瓜幼苗长至 3 叶 1 心时,选择长势一致的幼苗定植于容量为 5 L 的聚氯乙烯(PVC)水培罐中。定植 3 d 后进行增施 CO₂ 处理,处理时间为每个晴天的 9:00–17:00,CO₂ 浓度通过本课题组自主设计的 CO₂ 全自动控制系统来调节,精度可以控制在 ±50 μmol/mol。使用改良的日本山崎黄瓜营养液配方,每周更换 1 次,pH 值控制在 6.5 左右,硒肥以亚硒酸钠(Na₂SeO₃)溶液的形式加入营养液中。水培罐内自动通气处理方法为白天每通气 0.5 h 间歇 0.5 h,夜间每通气 0.5 h 间歇 1.0 h。

1.4 硒含量的测定

将收获的黄瓜植株样品分成根、茎、叶和果实 4 个部分后测定鲜质量,将各部分用蒸馏水冲洗干净后置于冷冻干燥机内进行干燥处理,用高通量组织研磨仪研磨后备用。

硒含量参照 GB 5009.93–2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》中的氢化物原子荧光光谱法^[22]进行测定,具体操作如下:称取 0.260 g 左右粉碎后的样品置于 50 ml 消煮管底部,加入 10 ml 硝酸-高氯酸(体积比为 9:1)混合酸,盖上弯颈小漏斗,静置过夜,次日将消煮管置于消煮炉内,

于 60 ℃ 加热 1.5 h、90 ℃ 加热 1.5 h、120 ℃ 加热 1.5 h、140 ℃ 加热 1.5 h 后于 160 ℃ 赶酸至剩余溶液体积为 2 ml 左右取出,待溶液冷却后加入 5 ml 浓度为 6 mol/L 的盐酸溶液,于 100 ℃ 水浴锅中加热 30 min,取出溶液,冷却后用超纯水定容至 20 ml,混匀后上机检测。检测总硒含量用原子荧光光度计(AFS-9700,北京科创海光仪器有限公司产品),参考条件如下:负高压为 340 V,灯电流为 100 mA,原子化温度为 800 ℃,炉高为 8 mm,载气流速为 500 ml/min,屏蔽气流速为 1 000 ml/min,测量方式为标准曲线法,读数为峰面积,延迟时间为 1 s,读数时间为 15 s,加液时间为 8 s,进样体积为 2 ml。试验所用玻璃器皿均在硝酸溶液(硝酸、超纯水的体积比为 1:5)中浸泡过夜,用超纯水冲洗后烘干备用。所用试剂均为优级纯,每批样品用空白样品和标准物质 GBW10014(GSB-5 圆白菜)进行质量控制。

1.5 数据分析

用 Excel 2003、SPSS 17.0 进行数据处理与分析,用 Duncan's 法进行多重比较($\alpha=0.05$),用 Origin 制图。

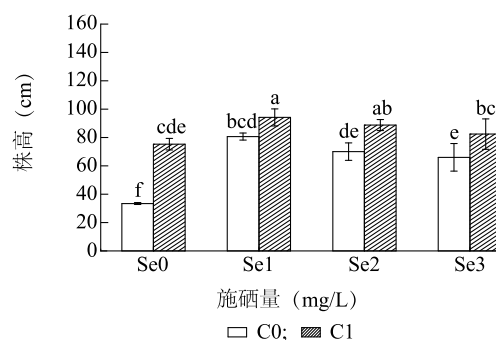
2 结果与分析

2.1 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜抽蔓期株高与茎粗的影响

从图 1 可以看出,在 C0、C1 处理下随着施硒量的增加,黄瓜株高均呈现先增加后降低的趋势,在 C1Se1 处理下达到峰值(94.19 cm);在不同施硒量处理下,与不增施 CO₂ 处理相比,增施 CO₂ 均显著提高了黄瓜的株高,其中 C1Se0、C1Se1、C1Se2、C1Se3 处理的株高分别较 C0Se0、C0Se1、C0Se2、C0Se3 增加了 125.3%、16.7%、26.0%、24.9%。从图 2 可以看出,在 Se0、Se1 处理下,C1 处理的茎粗大于 C0 处理,但是差异不显著,而在 Se3 处理下,增施 CO₂ 可以显著降低黄瓜的茎粗。由图 1、图 2 还可以看出,硒肥与增施 CO₂ 交互作用对黄瓜抽蔓期株高、茎粗均有显著影响。

2.2 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜光合作用的影响

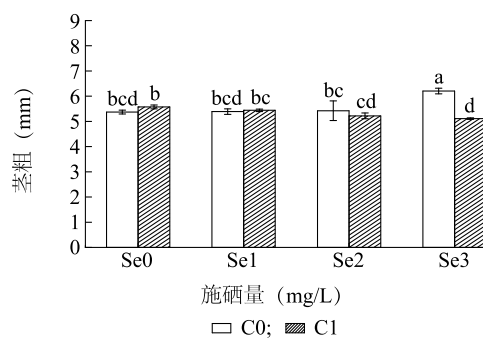
从表 2、表 3 可以看出,在相同施硒量处理下,增施 CO₂ 提高了黄瓜的净光合速率和胞间 CO₂ 浓度(Se1 处理除外),显著降低了黄瓜的蒸腾速率(Se0 处理除外),各施硒处理下增施 CO₂ 后的净光



C0:未增施 CO₂ 处理,C1:CO₂ 浓度为 1 200 $\mu\text{mol/mol}$ 。Se0、Se1、Se2、Se3 对应的施硒量分别为 0 mg/L、0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。不同处理间标有不同小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

图 1 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜抽蔓期株高的影响

Fig.1 Effects of elevated CO₂ and selenium application on plant height of cucumbers at vine growth stage



C0:未增施 CO₂ 处理,C1:CO₂ 浓度为 1 200 $\mu\text{mol/mol}$ 。Se0、Se1、Se2、Se3 对应的施硒量分别为 0 mg/L、0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。不同处理间标有不同小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

图 2 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜抽蔓期茎粗的影响

Fig.2 Effects of elevated CO₂ and selenium application on stem diameter of cucumbers at vine growth stage

合速率较不增施 CO₂ 处理的增幅为 32.4%~46.7%;在 CO₂ 处理下,随着施硒量的增加,黄瓜的净光合速率呈先增加后降低的趋势,C0Se1 处理使黄瓜净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率均达到最高值;在 C1 处理下,黄瓜的净光合速率随施硒量的增加呈先降低后增加又降低的趋势,在 C1Se2 处理下达到最高值 [23.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。综上所述,除气孔导度外,硒肥与增施 CO₂ 交互作用对黄瓜净光合速率、胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率产生了显著或极显著影响。

表 2 增施 CO₂和施硒处理黄瓜的光合作用、蒸腾作用Table 2 Photosynthesis and transpiration of cucumbers treated with CO₂ and selenium

处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO ₂ 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
C0Se0	12.2±3.1c	0.159±0.052abc	293±3c	3.76±0.88c
C0Se1	16.5±1.9bc	0.263±0.136a	336±23c	7.85±1.35a
C0Se2	14.8±1.4bc	0.250±0.021ab	323±3c	5.78±0.87b
C0Se3	14.2±0.4bc	0.157±0.038abc	331±26c	6.55±2.29ab
C1Se0	17.9±4.3b	0.128±0.028c	924±44a	3.06±0.42c
C1Se1	15.9±3.1bc	0.166±0.030abc	867±12b	2.90±0.59c
C1Se2	23.6±3.5a	0.149±0.014bc	914±45ab	3.31±0.04c
C1Se3	18.8±1.0b	0.140±0.036bc	872±44ab	3.42±0.99c

同一列数据后标有不同小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。各处理见表 1。

表 3 增施 CO₂和施硒处理对黄瓜光合作用、蒸腾作用的影响Table 3 Effects of elevated CO₂ and selenium application on photosynthesis and transpiration of cucumbers

项目	净光合速率	气孔导度	胞间 CO ₂ 浓度	蒸腾速率
Se	ns	ns	ns	*
CO ₂	***	*	***	***
Se×CO ₂	**	ns	*	*

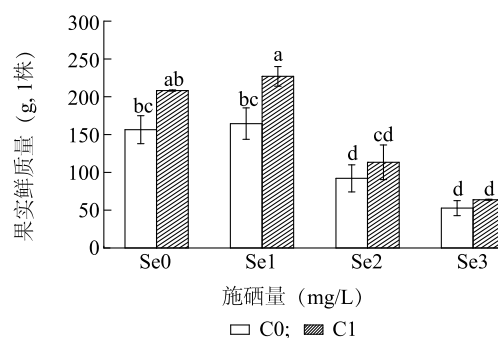
*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平有显著影响, ns 表示影响不显著 ($P > 0.05$)。

2.3 增施 CO₂和施硒处理对黄瓜产量的影响

从图 3 可以看出,在 C0、C1 处理下,与 Se0 处理相比,Se1 处理能够增加黄瓜的产量,其中 C1Se1 处理与 C0Se0 处理相比增幅较为明显,增产 45.1%,而 Se2 处理、Se3 处理明显降低了黄瓜产量,与 C0Se0 处理相比,C0Se2、C1Se2 处理的降幅为 27.5%~41.2%,C0Se3、C1Se3 处理的降幅为 59.2%~66.1%。在各施硒量下,C1 处理的果实鲜质量均高于 C0 处理,在 Se1 处理下较为明显,C1Se1 处理的果实鲜质量比 C0Se1 处理提高了 37.9%。

2.4 增施 CO₂和施硒处理对黄瓜植株各部位硒含量及硒累积量的影响

由图 4 可以看出,黄瓜各部位的硒含量随着施硒量的增加呈上升趋势,在各处理下,黄瓜各部位的硒含量均表现为根>茎>果实>叶片;在 Se1 处理下,与未增施 CO₂处理相比,增施 CO₂处理黄瓜各部位的硒含量均降低,其中茎部硒含量降低显著,降幅为 45.1%,其他部位的硒含量在增施 CO₂后降低不显著;在 Se2 处理和 Se3 处理下,与未增施 CO₂处理相比,增施 CO₂



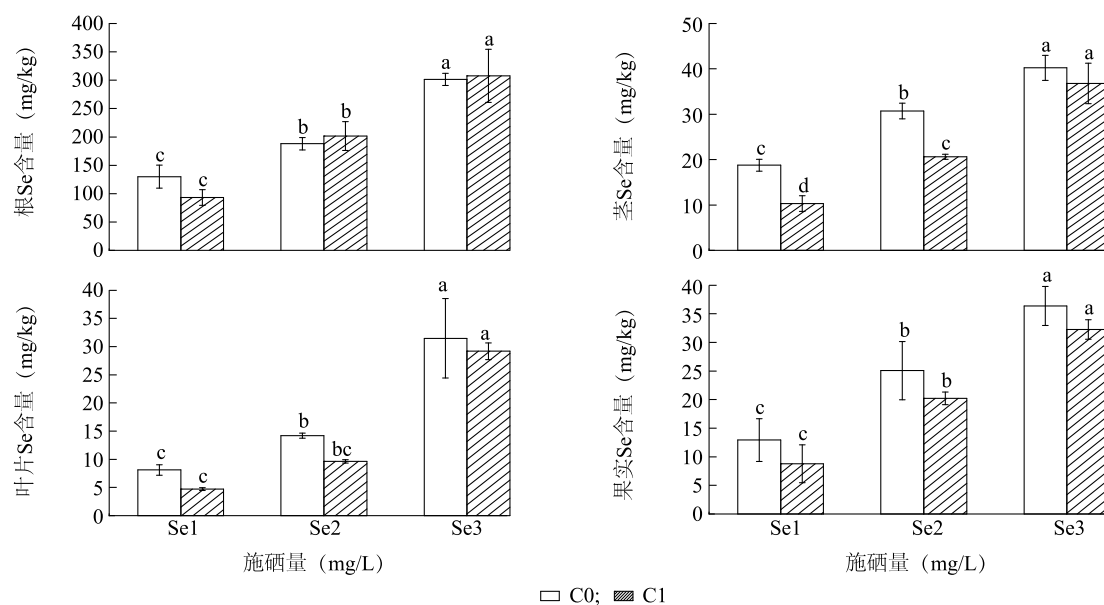
C0:未增施 CO₂处理,C1:CO₂浓度为1 200 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。Se0、Se1、Se2、Se3 对应的施硒量分别为 0 mg/L、0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。不同处理间标有不同小写字母的表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

图 3 增施 CO₂和施硒处理对黄瓜产量的影响Fig.3 Effects of elevated CO₂ and selenium application on cucumber yield

处理黄瓜根部的硒含量有所提升,增幅分别为 7.2%和 2.0%,但差异不显著,增施 CO₂处理其他部位的硒含量均较未增施 CO₂处理下降。

由图 5、图 6、图 7 可以看出,无论是否增施 CO₂,在 Se1 处理和 Se2 处理下,黄瓜各部位的硒累积量及占比整体上表现为根>茎>果实>叶片,与各部位硒含量的表现一致。由图 7 还可看出,黄瓜果实硒累积量占整株硒累积量的比例随着施硒量的增加而减小,在 Se1 处理下,果实硒累积量占比较高,为 19.46% (C0Se1)、21.89% (C1Se1);在 Se3 处理下,果实硒累积量占比较低,为 9.4% (C0Se3)、9.8% (C1Se3);在各施硒量下,增施 CO₂可提高果实硒累积量占比,提高程度随着施硒质量浓度的增加而减小;在各施硒处理中,只有 Se3 处理在增施 CO₂

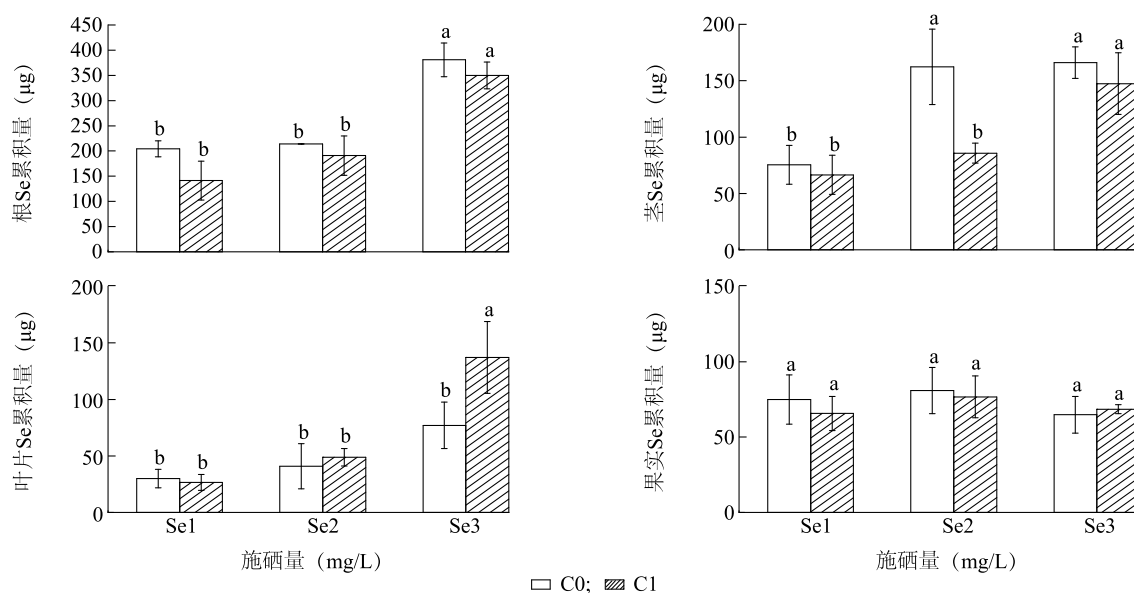
后较未增施 CO₂ 处理提高了黄瓜的整株硒累积量, (C1Se3)。
由 1 株 688.73 μg (C0Se3) 提高至 1 株 703.05 μg



C0 表示未增施 CO₂ 处理, C1 表示 CO₂ 浓度为 1 200 μmol/mol, Se1、Se2、Se3 对应的施硒量分别为 0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。不同处理间标有不同小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。对照 (C0Se0) 的硒含量非常低, 未达到仪器的检测下限, 故未在图中显示。

图 4 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜根、茎、叶片及果实硒含量的影响

Fig.4 Effects of elevated CO₂ and selenium application on selenium content in root, stem, leaf and fruit of cucumber



C0 表示未增施 CO₂ 处理, C1 表示 CO₂ 浓度为 1 200 μmol/mol, Se1、Se2、Se3 对应的施硒量分别为 0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。不同处理间标有不同小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。对照 (C0Se0) 的硒累积量非常低, 未达到仪器的检测下限, 故未在图中显示。

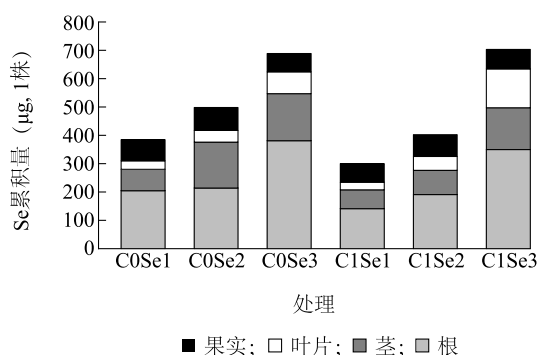
图 5 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜根、茎、叶片及果实硒累积量的影响

Fig.5 Effects of elevated CO₂ and selenium application on selenium accumulation in root, stem, leaf and fruit of cucumber

2.5 增施 CO₂ 和施硒处理对黄瓜硒转移系数的影响

为了表征黄瓜各部位硒的分布情况, 用黄瓜地

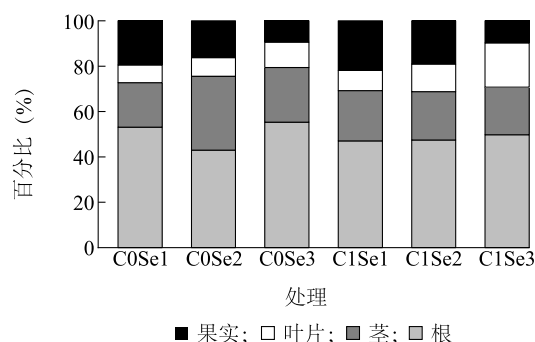
上部各器官硒含量与根部硒含量的比值 (即转移系数) 来表示, 转移系数越大, 表明作物将硒元素从根



C0:未增施CO₂处理,C1:CO₂浓度为1 200 μmol/mol。Se1、Se2、Se3对应的施硒量分别为0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。

图6 增施CO₂和施硒处理对黄瓜单株硒累积量的影响

Fig.6 Effects of elevated CO₂ and selenium application on selenium accumulation of individual cucumber



C0:未增施CO₂处理,C1:CO₂浓度为1 200 μmol/mol。Se1、Se2、Se3对应的施硒量分别为0.125 mg/L、0.250 mg/L、0.500 mg/L。

图7 增施CO₂和施硒处理对黄瓜单株硒累积分布比例的影响

Fig.7 Effects of elevated CO₂ and selenium application on selenium accumulation and distribution of individual cucumber

部运输到地上部的能力越强^[23]。从表4、表5可以看出,在不同处理下,黄瓜各部位的硒转移系数均表现为茎>果实>叶片,与硒含量的表现一致;在C0处理下,施硒量的增加对茎部硒转移系数无显著影响,叶片和果实的硒转移系数整体呈上升趋势;在C1处理下,茎和果实的硒转移系数均随着施硒量的增加而提高。在各施硒量下,增施CO₂可显著降低茎部的硒转移系数(除Se3处理),叶片和果实的硒转移系数虽略有减小但变化不明显。

3 讨论

3.1 硒与CO₂交互作用对黄瓜生长发育的影响

Biacs等^[24]、徐暄等^[25]分别通过土壤施硒、叶

表4 增施CO₂和施硒处理黄瓜的硒转移系数

Table 4 Selenium transfer coefficient of cucumber treated with CO₂ and selenium

处理	硒转移系数		
	茎	叶片	果实
C0Se1	0.135±0.016a	0.055±0.016bc	0.086±0.026b
C0Se2	0.154±0.005a	0.071±0.007b	0.133±0.023a
C0Se3	0.140±0.011a	0.109±0.019a	0.127±0.009a
C1Se1	0.101±0.019b	0.055±0.004bc	0.066±0.026b
C1Se2	0.108±0.010b	0.047±0.008c	0.087±0.010b
C1Se3	0.131±0.009a	0.108±0.009a	0.125±0.003a

同一列数据后标有不同小写字母表示具有显著差异($P<0.05$)。各处理见表1。

表5 增施CO₂和施硒处理对黄瓜硒转移系数的影响

Table 5 Effects of elevated CO₂ and selenium application on selenium transfer coefficient of cucumber

项目	茎	叶片	果实
Se	ns	***	**
CO ₂	***	ns	*
Se×CO ₂	ns	ns	ns

*、**、***分别表示在0.05、0.01、0.001水平有显著影响,ns表示影响不显著($P>0.05$)。

面喷硒试验发现,低浓度的硒能够增加胡萝卜、黄瓜的产量,施硒量过高则使产量降低;李登超等^[26-27]的试验结果显示,低浓度的硒可促进水培菠菜、小白菜生长,高浓度的硒则抑制其生长;对大蒜^[7,28-29]、马铃薯^[30]、青花菜^[31]、烤烟^[32-33]等作物的研究结果也表明,在一定范围内,作物产量随着施硒量的增加而提高,当施硒量超过一定范围后,作物的生长会受到抑制甚至造成作物死亡。本研究结果表明,与对照相比,施硒量为0.125 mg/L时,黄瓜的株高显著提高,这是因为适宜的施硒量能够提高黄瓜叶片的SOD、POD活性,增加可溶性糖含量,同时提高叶绿体的电子传递速率,从而促进植株的生长^[34];施硒量超过0.125 mg/L后,黄瓜株高的增加程度随着施硒量的增大而减小。在相同施硒量下,增施CO₂不同程度地提高了黄瓜的株高,说明增施CO₂能够促进黄瓜的生长,这与前人的研究结果一致^[35-37]。当施硒量≥0.250 mg/L时,黄瓜产量较对照显著降低,说明高质量浓度的硒会抑制黄瓜的生殖生长;在施硒量为0.125 mg/L且CO₂浓度较高的情况下,黄瓜的产量最高,较对照(C0Se0)显著增加,而只施该用量的硒肥或只提升CO₂浓度虽然也能使黄瓜增产,

但是与 C0Se0 相比差异不明显。由此可见,适宜的施硒量和 CO₂ 浓度的交互作用对黄瓜的增产表现为协同作用。

光合作用是植物代谢的基础,CO₂ 作为植物光合作用的主要底物,是决定黄瓜生长发育的关键因素之一,其浓度会直接影响光合产物的生成^[38-40]。当 CO₂ 浓度增加时,CO₂ 与 O₂ 的比值增大,可以减弱 O₂ 对 RuBP(1,5-二磷酸核酮糖)的竞争,提高 RuBP 的羧化活性,从而提高净光合速率^[41-42]。本研究结果表明,增施 CO₂ 后能够提高黄瓜的净光合速率,气孔导度虽然降低了,但是胞间 CO₂ 浓度增加,蒸腾速率相应降低。此外,诸多关于番茄、大白菜、黄瓜、草莓等作物的研究已证实了该现象^[17,20,38,41-43]。Haghighi 等^[44] 的黄瓜水培试验结果表明,施硒能够降低黄瓜的气孔导度和胞间 CO₂ 浓度,对黄瓜的净光合速率无显著影响。本研究结果显示,在大气 CO₂ 浓度下,施硒对黄瓜的净光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度均无显著影响,但增施 CO₂ 且施硒量为 0.250 mg/L 时可显著提高黄瓜的净光合速率,这可能是因为施硒提高了植物的叶绿素含量^[45],增强了黄瓜在高 CO₂ 浓度下对光能的吸收和转换能力,从而提升了植物的光合能力。另外,由于硒和硫是同族元素,在高硒质量浓度处理下,叶绿素合成酶肽链中巯基的部分硫会被硒取代^[46],而增施 CO₂ 可能会降低这种取代作用。此外,黄瓜植株通过光合作用产生的有机物和储存的能量主要用于自身生长发育,黄瓜植株的株高也能在一定程度上反映硒与 CO₂ 的交互作用对黄瓜植株光合作用的影响。

3.2 硒与 CO₂ 交互作用对黄瓜硒吸收、累积、分配及转运的影响

黄瓜对硒有一定的富集能力^[15]。本研究结果显示,随着施硒量的提高,黄瓜各部位的硒含量和硒累积量整体呈增加趋势,当施硒量大于 0.125 mg/L 时,由于高质量浓度的硒会抑制黄瓜生长,使得黄瓜产量明显降低,随着施硒量的增加,果实中的硒含量虽然大幅提升,但是硒累积量呈下降趋势。前人研究发现,大豆籽粒硒含量随着施硒量的增加而增加,当施硒量达到一定值后,籽粒的硒含量趋于平稳^[8];马铃薯块茎中的硒含量随着施硒量的增加呈先上升后下降的趋势^[30],与本试验结果有异,这是因为不同种类的蔬菜对硒的吸收能力存在差异。王玉凤等^[47] 研究发现,樱桃番茄对硒的富集能力随着

施硒量的增加呈先升高后降低的趋势,与本试验结果一致。

黄瓜吸收的硒在各部位的分配具有一定的规律性,各部位的硒含量表现为根>茎>果实>叶片。当施硒量为 0.125 mg/L 和 0.250 mg/L 时,黄瓜各部位的硒累积量顺序与硒含量表现一致;当施硒量为 0.500 mg/L 时,黄瓜果实的硒累积量低于其他各部位。施和平等^[48] 的试验结果显示,番茄在开花结实期各部位的硒含量表现为根>叶>茎>果>花,而硒累积量表现为根>果实>花>茎>叶。胡婷等^[49] 研究发现,在相同处理下,茄子各部位的硒含量表现为叶>果>茎>根,而辣椒表现为根>叶>果>茎。由此可见,不同种类蔬菜的不同部位对硒的累积能力存在差异,这可能与植物的代谢水平有关。

有研究发现,随着施硒量的增加,小白菜地上部、黑麦草叶片的硒转移系数均呈先升高后降低的趋势^[50-51],而黑麦草茎部硒转移系数却呈先降低后升高的趋势^[51]。本研究中,在大气 CO₂ 浓度下,施硒量的增加对茎部硒转移系数无显著影响,而叶片、果实的硒转移系数有所提升。目前,关于植物对亚硒酸盐的吸收机制尚未明确,多数学者认为,亚硒酸盐是通过被动扩散积累的^[52-54],而 Li 等^[55] 研究发现,植物对亚硒酸盐的摄取可能是一个积极的过程。本研究结果显示,黄瓜各部位对硒的转移系数均小于 1.000,可以认为黄瓜植株对营养液中亚硒酸盐的摄取更倾向于被动吸收。黄瓜各部位的硒转移系数与 1.000 相比均较低,根部硒含量较大,这是因为亚硒酸盐被根部吸收后很容易转化为硒代蛋氨酸等有机硒,主要在根部累积,只有少部分亚硒酸盐转化为硒酸盐和其他含硒化合物后转运到地上的茎、叶片、果实等部位^[56-57]。

关于硒与 CO₂ 的交互作用对作物富硒效果的影响,尚未有相关报道。本研究结果显示,增施 CO₂ 对黄瓜各部位硒含量的影响因施硒量的不同而异,可能是因为增施 CO₂ 后,植株的净光合速率增加^[58],从而促进了植株的碳代谢^[59-60],提高了植株对硒的需求量,但是增施 CO₂ 抑制了光呼吸^[61],使植株的氮代谢过程受到干扰^[62],导致含硫氨基酸的代谢减弱,含硒氨基酸的取代作用降低,硒含量随之降低,上述 2 个正负效应间存在一个动态平衡。对于黄瓜的果实而言,在各施硒水平下,增施 CO₂ 后黄瓜果实的硒含量有所降低,且降低幅度随施硒量的增加而

减小,但不同施硒水平间没有显著差异,可能有以下2个原因:一方面,黄瓜果实是有机物累积的主要部位,而硒与CO₂的交互作用对同化物质的分配无明显影响;另一方面,硒与CO₂的交互作用促进黄瓜生长,碳水化合物的累积会对硒含量造成稀释,施硒量增加后,硒含量随之增加,从而缓解了这种稀释作用。此外,硒与CO₂的交互作用提高了果实硒累积量占整株硒累积量的比例,但是提高程度随着施硒量的增加呈降低趋势。

4 结 论

在本试验条件下,当施硒量为0.125 mg/L且增施CO₂使其浓度为1 200 μmol/mol时,促进了黄瓜的生长发育,最大程度地提高了黄瓜产量,使黄瓜果实硒含量及硒累积量较对照显著增加,且硒含量在国标规定的安全食用范围内。

参考文献:

- [1] 丛建民. 人体内硒的生物学功能[J]. 生物学教学, 2008, 33(6): 9-10.
- [2] 张俊杰. 硒的生理功能及富硒强化食品的研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23(3): 58-60.
- [3] 张瑞华. 人体需要经常补硒[J]. 辽宁城乡环境科技, 2004, 24(5): 16-18.
- [4] 周国霞,熊正英. 硒营养的补充与运动[J]. 南阳师范学院学报, 2006, 5(3): 96-98.
- [5] 陈长兰,郇丰宁,孟雪莲,等. 硒对人体的作用机理及科学补硒方法[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 155-168, 192.
- [6] 张万业,张旭,张振华,等. 补硒的意义及对作物、饲料、牧草等补硒立法的建议[J]. 内蒙古农业科技, 2009(2): 10, 34.
- [7] 王晋民,蔡甲福. 不同硒处理对大蒜含硒量及产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 342-344.
- [8] 冶军,单维东,褚贵新. 叶面喷施硒肥对大豆产量和质量效应的初步研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(3): 506-509.
- [9] KESKINEN R, TURAKAINEN M, HARTIKAINEN H. Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 301-313.
- [10] 杜振宇,史衍玺,王清华. 土壤施硒对萝卜吸收转化硒及品质的影响[J]. 土壤, 2004, 36(1): 56-60.
- [11] 杜振宇,史衍玺,王清华. 施硒对茄子吸收转化硒和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 298-301.
- [12] 杜振宇,史衍玺,王清华. 蔬菜对硒的吸收及适宜补硒食用量[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 230-231, 267.
- [13] 尚庆茂,李平兰,高丽红. 水培生菜对硒的吸收和转化[J]. 园艺学报, 1997, 24(3): 255-258.
- [14] 王依纯,廉华,马光恕,等. 木霉不同施用方式对黄瓜幼苗质量特性及枯萎病防效的影响[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(3): 416-425.
- [15] 陈玉红,刘忠良. 硒对水培黄瓜生长的影响[J]. 中国园艺文摘, 2011, 27(3): 13-14.
- [16] 姜兆彤,杜玉斌,王春花,等. 温室释放二氧化碳气肥对草莓生产的影响[J]. 北方果树, 2018(2): 18-19.
- [17] 陶丽,崔世茂,宋阳,等. CO₂加富对番茄株高、茎粗及光合作用的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(3): 102-107.
- [18] 陈珊珊,周业凯,张志明,等. 二氧化碳施肥对樱桃番茄果实发育和品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(3): 318-326.
- [19] 王立革,郭珺,韩雄,等. 增施CO₂对设施土壤栽培番茄的生长、产量和养分吸收特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 174-181.
- [20] 袁宏霞,孙胜,张振花,等. 日光温室CO₂加富对番茄叶片光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 136-139.
- [21] 张仟雨,聂磊云,李萍,等. 大气CO₂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.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中硒的测定: GB 5009.93-2017[S]. 2017.
- [23] 万亚男,罗章,王晓芳,等. 不同形态硒对金针菇吸收和富集硒的影响[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1176-1181.
- [24] BIACS P A, DAOOD H G, KADAR I. Effect of Mo, Se, Zn, and Cr treatments on the yield, element concentration, and carotenoid content of carrot[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(3): 589-591.
- [25] 徐暄,顾艳,孙其文. 富硒氨基酸生物肥在水果型黄瓜上施用效果研究初报[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(23): 96-97.
- [26] 李登超,朱祝军,韩秋敏,等. 硒对菠菜、小白菜生长及抗氧化活性的研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21(1): 5-8.
- [27] 李登超,朱祝军,徐志豪,等. 硒对小白菜生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 353-358.
- [28] 王永勤,曹家树,李建华,等. 施硒对大蒜产量和含硒量的影响[J]. 园艺学报, 2001, 28(5): 425-429.
- [29] 院金谒,王朴,刘正兴,等. 土壤施硒对大蒜生理特性、含硒量及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(1): 19-22.
- [30] 殷金岩,耿增超,孟令军,等. 不同硒肥对马铃薯产量、硒含量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 122-127.
- [31] 王晋民,赵之重,沈增基. 叶面施硒对青花菜含硒量及产量与品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 127-130.
- [32] HAN D, LI X H, XIONG S L, et al. Selenium uptake, speciation and stressed response of *Nicotiana tabacum* L.[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 95: 6-14.
- [33] 许自成,邵惠芳,孙曙光,等. 土壤施硒对烤烟生理指标的影响

- [J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7179-7187.
- [34] 吕海祥, 田长彦, 王梓宇, 等. 外源硒对罗布麻幼苗生长及光合作用的影响[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 83-89.
- [35] LI J, ZHOU J M, DUAN Z Q, et al. Effect of CO₂ enrichment on the growth and nutrient uptake of tomato seedlings[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 343-351.
- [36] 董金龙, 李 汛, 段增强, 等. CO₂ 施肥对设施黄瓜生长和土壤氮素转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(2): 195-200.
- [37] 黄光丽, 王海莲. 增施二氧化碳对温室黄瓜生长及产量的影响[J]. 农业与技术, 2017, 37(2): 14.
- [38] 高文瑞, 李德翠, 徐 刚, 等. CO₂ 施肥对大白菜生长及光合的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 228-230.
- [39] 刘 洋, 孙 胜, 邢国明, 等. 不同浓度 CO₂ 施肥对温室黄瓜生长与产量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 53-58.
- [40] 王维超, 辛寒晓, 范学明, 等. 二氧化碳气肥在大棚黄瓜生产中的应用效果[J]. 中国农业信息, 2016(11): 98-100.
- [41] 刘金泉, 崔世茂. CO₂ 施肥对黄瓜光合作用及相关生理过程的影响研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2007, 28(3): 322-326.
- [42] 张 颖, 王金春, 薛庆林, 等. CO₂ 施肥对光合作用及相关生理过程的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 212-215.
- [43] 鲍 瑞, 张 宁. 增施 CO₂ 对温室草莓生长及光合特性的影响[J]. 农技服务, 2013, 30(10): 1095-1096.
- [44] HAGHIGHI M, SHEIBANIRAD A, PESSARAKLI M. Effects of selenium as a beneficial element on growth and photosynthetic attributes of greenhouse cucumber[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 39(10): 1493-1498.
- [45] 院金谒. 硒肥对新疆白蒜生长发育、含硒量、产量及品质影响的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.
- [46] 金小琬, 朱 茜, 黄 进, 等. 硒对叶绿体及光合作用的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(1): 288-294.
- [47] 王玉凤, 徐 暄, 孙其文. 硒处理对樱桃番茄果实发育的影响[J]. 长江蔬菜(学术版), 2011(18): 52-54.
- [48] 施和平, 张英聚, 刘振声. 番茄对硒的吸收、分布和转化[J]. 植物学报, 1993, 35(7): 541-546.
- [49] 胡 婷, 李文芳, 向昌国, 等. 硒对常见蔬菜种子萌发的影响及在植株中的分布[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 45-49.
- [50] 付冬冬, 段曼莉, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒对小白菜生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 358-365.
- [51] 田应兵, 陈 芬, 熊明标, 等. 黑麦草对硒的吸收、分配与累积[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 122-127.
- [52] SHRIFT A, ULRICH J M. Transport of selenate and selenite into *Astragalus* roots[J]. *Plant Physiology*, 1969, 44(6): 893-896.
- [53] SORS T G, ELLIS D R, SALT D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants[J]. *Photosynthesis Research*, 2005, 86(3): 373-389.
- [54] 张华华, 康玉凡. 植物吸收和转化硒的研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2013, 32(3): 270-275.
- [55] LI H F, MCGRATH S P, ZHAO F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92-102.
- [56] ARVY M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(6): 1083-1087.
- [57] 王晓芳, 陈思杨, 罗 章, 等. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 539-544.
- [58] 高 宇, 崔世茂, 宋 阳, 等. CO₂ 加富对番茄幼苗生长及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 147-149.
- [59] 蒋 倩, 朱建国, 朱春梧, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对糙米和精米中矿质营养元素含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1217-1224.
- [60] 朱维琴, 章永松, 林咸永, 等. 蔬菜 CO₂ 施肥技术现状及展望[J]. 农业与技术, 2000, 20(6): 1-5.
- [61] 张 颖, 王金春, 薛庆林, 等. 设施栽培中 CO₂ 施肥技术的应用[J]. 华北农学报, 2006, 21(增刊): 109-113.
- [62] 张树芹, 王宪泽, 赵士杰, 等. NaHSO₃ 对小麦光合速率、光呼吸及籽粒氨基酸组成的影响[J]. 麦类作物, 1999, 19(1): 44-46.

(责任编辑: 徐 艳)