

doi:10.7668/hbnxb.2014.05.032

嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗光合特性与矿质元素吸收的影响

谭明明, 贺忠群, 郑万刚

(四川农业大学 园艺学院, 四川 雅安 625014)

摘要:为探索嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗光合特性与矿质元素吸收的影响,选择了南瓜京欣砧三号为砧木,薄皮甜瓜 IVF09 与厚皮甜瓜 IVF117 为接穗,以自根苗为对照,采用基质栽培法研究了铜胁迫下甜瓜嫁接苗和自根苗的光合特性与矿质元素吸收。结果表明:在铜胁迫条件下,甜瓜幼苗生物量下降、光合作用受抑制、矿质元素吸收平衡破坏。但在同一胁迫条件下,嫁接苗的生物量大于自根苗,光合色素含量高于自根苗,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)显著大于自根苗,气孔限制值(L_s)小于自根苗;嫁接改善了矿质元素吸收,有效增加 K、P、Na 等的含量,减少 Cu 含量,IVF09 嫁接苗叶片 Cu 含量在 $800 \mu\text{mol/L Cu}^{2+}$ 胁迫下显著低于自根苗,仅为自根苗的 70.11%;而 IVF117 在 $400 \mu\text{mol/L Cu}^{2+}$ 胁迫下 Cu 含量显著低于自根苗,为自根苗的 86.61%。因此,嫁接减弱了铜胁迫对甜瓜幼苗光合特性与矿质元素吸收的抑制作用,缓解了铜胁迫对甜瓜幼苗的毒害作用。

关键词:甜瓜;嫁接;铜胁迫;光合特性;矿质元素

中图分类号:S652.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2014)05-0186-07

Effects of Grafting on Photosynthetic Characteristics and Mineral Elements of Melon Seedlings under Copper Stress

TAN Ming-ming, HE Zhong-qun, ZHENG Wan-gang

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The effects of grafting on photosynthetic characteristics and mineral elements of melon seedlings under copper stress in this study. Pumpkin Jingxinzhen NO.3 was carried out as stock, melon IVF09 and muskmelon IVF117 as cion, and ungrafted seedlings as control. Here, we found that, under copper stress, the biomass of melon seedlings was decreased, photosynthetic characteristics was inhibited and the absorption of mineral elements balance were destructed. But under the same stress conditions, the biomass and photosynthetic pigment content of grafted seedlings were greater than that of ungrafted seedlings. The net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) were significantly higher than that of ungrafted seedlings, but L_s was lower. Grafting to improve the absorption of mineral elements, effectively increase the content of K, P, Na, reduce the content of Cu, Cu content of IVF09 grafting seedlings in leaf was significantly lower than that ungrafted seedlings under the $800 \mu\text{mol/L Cu}^{2+}$ stress, since only that in 70.11%, the IVF117 grafting seedlings was significantly lower than that of ungrafted seedlings under $400 \mu\text{mol/L Cu}^{2+}$ stress, since 86.61%. The test results showed that the grafting reduced photosynthetic characteristics and mineral elements absorption inhibitory effect on melon seedlings under copper stress, relieve the toxic effect on copper stress of melon seedlings.

Key words: Melon; Grafting; Copper stress; Photosynthetic characteristics; Mineral elements

铜是维持植物正常生命活动所必需的微量元素之一,广泛参与各种生命活动,对于植物正常的新陈

代谢与生长发育具有极其重要的意义。但目前由于工农业的快速发展,含铜矿产的开采、冶炼厂三废的

收稿日期:2014-07-19

基金项目:四川省教育厅项目(10ZB044)

作者简介:谭明明(1989-),男,甘肃庆阳人,在读硕士,主要从事蔬菜栽培理论与技术研究。

通讯作者:贺忠群(1971-),女,重庆开县人,教授,博士,主要从事蔬菜逆境生理及生物改良研究。

排放、含铜化肥及农药的长期大量使用、城市污泥堆肥利用和含铜饲料的使用,使土壤铜污染日趋严重^[1-5]。土壤铜污染严重时,不但造成农产品重金属污染^[6-7],而且对动物^[8]、微生物^[9]及土壤酶^[10-12]有所影响,引起生态系统失调,导致生态环境恶化,甚至还会威胁到人类食品的安全,目前已成为农业、生态和环境科学领域研究的重要内容。

甜瓜(*Cucumis melo* L.)是重要的蔬菜型水果,我国各地均有栽培。近年来随着生态农业的快速发展,市场对果实品质和安全性要求日趋严格,土壤铜污染对甜瓜生长发育与产量品质的影响已引起人们的广泛重视。嫁接是一门古老而又新兴的农艺措施,已从上世纪70代就应用于甜瓜上^[13]。目前研究主要集中在高效栽培及抗病虫、抗盐、抗冷、耐高温、耐湿及耐涝等方面^[14-20]。有报道指出,嫁接是提高黄瓜^[21-23]、葡萄^[24]等园艺作物对铜、镉等重金属耐受性的有效途径,但是否会提高甜瓜对金属离子的耐受性尚不清楚。因此,本试验以白籽南瓜京欣砧三号为砧木,薄皮甜瓜 IVF09 与厚皮甜瓜 IVF117 为接穗,探索嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗光合特性与矿质元素吸收的影响,探讨嫁接提高甜瓜对铜离子耐受性的生理机制,为甜瓜生产中减轻土壤铜污染、铜素毒害及提高产量与品质提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试砧木为南瓜京欣砧三号,供试接穗为薄皮甜瓜 IVF09 与厚皮甜瓜 IVF117。

1.2 试验设计

试验于2013年下半年在中国农业科学院蔬菜花卉研究所大棚进行。选取饱满、整齐一致的京欣砧三号种子播种于复合基质($V_{\text{草炭}}:V_{\text{蛭石}}=2:1$)中,2 d后播种甜瓜接穗,待接穗子叶展平真叶显露,砧木一叶一心时采用顶插接法嫁接。

嫁接成活的幼苗缓苗5 d后,选取生长健壮一致的幼苗,以自根苗为对照,2个品种甜瓜幼苗分别采用0,400,800 $\mu\text{mol/L}$ 的 Cu^{2+} 处理,用 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 调节 Cu^{2+} 浓度,用蒸馏水配制处理液,每隔2 d浇灌一次,每钵每次浇灌40 mL。每个处理30株,重复3次。10 d后测定生物量指标,15 d后取叶片和根部测各项生理指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生物量 以茎基部至生长点记为株高,用直尺测量;以子叶下端1 cm处记为茎粗,用游标卡尺测量;用叶面积/根系扫描仪(Epson Expression

1680)扫描叶面积,由WinFOLIA软件分析得出。分别取根、茎、叶,用去离子水冲洗干净,吸水纸吸干水分,称其鲜质量;之后105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青15 min,放于75 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内72 h烘干,称其干质量。

1.3.2 叶绿素与光合参数 参照李合生^[25]的方法,用丙酮浸提法测定光合色素含量。在光强1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度25 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度60%~70%下,选择上午9:00-11:00,利用美国Li-cor公司的Li-6400便携式光合仪直接活体测定净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)与胞间 CO_2 浓度(C_i)。根据公式 $1 - C_i/C_a$ 计算出气孔限制值(L_s), C_i 为空气中 CO_2 浓度。

1.3.3 矿质元素含量 用去离子水冲洗叶片与根部,吸水纸吸干,于烘箱中100 $^{\circ}\text{C}$ 杀青10 min,在75 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,磨成粉后过孔径0.28 mm筛,准确称取0.07 g样品,加5 mL浓 HNO_3 与1 mL H_2O_2 ,消煮2 h后定容至100 mL,过滤到三角瓶,利用电感耦合等电子发射体分光光度计测量Cu、K、P、Na、Mg、Ca的含量。

1.4 数据处理

采用SPSS 13.0版软件对数据进行方差分析,用Microsoft Office Excel 2010版软件对数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗生物量的影响

从表1可以看出,在非胁迫条件下,2个品种甜瓜嫁接苗的株高、茎粗、叶面积均大于自根苗。在胁迫条件下,随着 Cu^{2+} 浓度增大,嫁接苗与自根苗生物量均呈下降趋势。在800 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} 胁迫下表现最明显,其中IVF09嫁接苗比自根苗株高、茎粗、叶面积分别增加了29.64%,95.12%,43.32%;IVF117嫁接苗比自根苗增加了4.51%,29.67%,22.14%。表明与自根苗相比嫁接苗在铜胁迫下表现出明显的生长优势。

在胁迫条件下,随着 Cu^{2+} 浓度逐渐增大,2个品种甜瓜嫁接苗与自根苗地上部、地下部的鲜干质量均降低。在相同的胁迫条件下,嫁接苗的鲜干质量均大于自根苗,且嫁接苗地上部分的鲜干质量总是大于自根苗,而地下部分的鲜干质量在400 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} 胁迫下差异不显著,但随着 Cu^{2+} 浓度增大,表现出一定的差异性。此外,嫁接苗的总鲜干质量比自根苗大,在800 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} 胁迫下表现最明显,其中IVF09嫁接苗比自根苗的鲜干质量分别增加了6.21%,8.89%;IVF117嫁接苗比自根苗的分别增加了10.41%,35.77%。同一胁迫条件下,

嫁接可相对促进幼苗的物质积累,表明嫁接苗比自根苗受到的铜胁迫抑制作用弱,随着胁迫程度加深,这种差异表现更加明显。

表 1 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗生物量的影响

Tab. 1 Effects of grafting on biomass production of melon seedlings under copper stress

品种 Cultivar	嫁接 Grafting	Cu ²⁺ /(μmol/L)	株高/cm Plant height	茎粗/mm Plant diameter	叶面积/cm ² Leaf area	地上部 Shoot		地下部 Root	
						鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight
IVF09	自根苗	0	58.33 ± 2.08cde	2.89 ± 0.08f	41.39 ± 1.55e	25.45 ± 0.45f	3.02 ± 0.07c	2.72 ± 0.32de	0.17 ± 0.02de
		400	53.33 ± 2.08de	2.74 ± 0.26f	30.81 ± 1.07g	20.85 ± 0.15h	2.47 ± 0.09de	2.15 ± 0.28e	0.16 ± 0.03e
		800	36.00 ± 7.81g	2.46 ± 0.18f	25.53 ± 4.23h	19.62 ± 0.15i	2.23 ± 0.12f	2.12 ± 0.61e	0.13 ± 0.04e
IVF09	嫁接苗	0	60.33 ± 4.73cd	5.74 ± 0.11a	51.43 ± 0.54d	28.57 ± 0.17d	3.14 ± 0.04c	2.79 ± 0.50de	0.20 ± 0.04cde
		400	54.67 ± 5.03de	5.18 ± 0.16bc	39.32 ± 1.58ef	22.35 ± 0.25g	2.60 ± 0.05d	2.46 ± 0.52e	0.19 ± 0.05e
		800	46.67 ± 1.53f	4.80 ± 0.35bcd	36.59 ± 0.60f	20.95 ± 0.05h	2.45 ± 0.05de	2.14 ± 0.21e	0.14 ± 0.02cde
IVF117	自根苗	0	70.33 ± 4.73b	4.69 ± 0.18cd	74.63 ± 1.82a	37.43 ± 0.43a	3.62 ± 0.07a	4.91 ± 0.62a	0.27 ± 0.04abc
		400	58.33 ± 2.52cde	4.52 ± 0.31d	61.50 ± 0.76bc	26.57 ± 0.27e	2.63 ± 0.08d	4.05 ± 1.17abc	0.24 ± 0.08bcd
		800	51.67 ± 1.53ef	3.91 ± 0.72e	48.70 ± 2.69d	25.73 ± 0.22f	2.27 ± 0.27ef	3.27 ± 0.48cde	0.19 ± 0.01de
IVF117	嫁接苗	0	76.67 ± 2.08a	5.75 ± 0.04a	76.17 ± 1.69a	34.22 ± 0.28b	3.69 ± 0.09a	4.20 ± 1.06abc	0.32 ± 0.02a
		400	64.67 ± 2.08bc	5.31 ± 0.27ab	64.47 ± 1.54b	30.78 ± 0.78c	3.40 ± 0.10b	4.47 ± 0.66ab	0.28 ± 0.02ab
		800	54.00 ± 2.65de	5.07 ± 0.28bc	59.48 ± 1.04c	28.36 ± 0.37d	3.14 ± 0.15c	3.66 ± 0.19bcd	0.20 ± 0.04de

注:同列不同字母表示差异达显著水平($P < 0.05$)。表 2~4,图 1~2 同。

Note: Different letters in the same column ment significant difference at 0.05 level. The same as Tab. 2~4, Fig. 1~2.

2.2 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗光合特性的影响

2.2.1 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗叶片光合色素含量的影响 由图 1 可知,在胁迫条件下,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗叶片光合色素含量都表现出相同的变化趋势,均逐渐降低,与非胁迫条件相比,差异显著。嫁接苗叶片光合色素含量高于自根苗,在

400 μmol/L Cu²⁺ 胁迫下,2 个品种嫁接苗叶片叶绿素 a、类胡萝卜素、叶绿素总量的含量(以鲜质量计)均显著高于自根苗;在 800 μmol/L Cu²⁺ 胁迫下,嫁接苗叶片叶绿素 a、类胡萝卜素显著高于自根苗。说明嫁接苗受到铜胁迫程度轻,嫁接有效抑制了铜胁迫对光合色素的破坏。

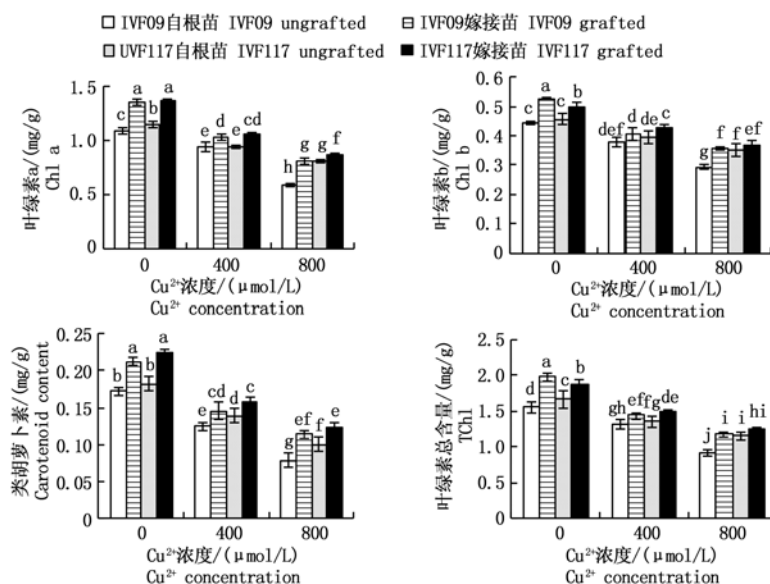


图 1 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗光合色素含量的影响

Fig. 1 Effects of grafting on photosynthetic pigments content of melon seedlings under copper stress

2.2.2 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗叶片光合参数的影响 由表 2 可知,在胁迫条件下,随着 Cu²⁺ 浓度增大,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗叶片净光合速

率(Pn)与蒸腾速率(Tr)、叶片气孔导度(Gs)与胞间 CO₂ 浓度(Ci)均受到抑制,逐渐降低,差异显著;气孔限制值(Ls)却表现出相反的变化趋势。

表 2 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗光合参数的影响

Tab. 2 Effects of grafting on photosynthetic parameters of melon seedlings under copper stress

品种 Cultivar	嫁接 Grafting	Cu ²⁺ / ($\mu\text{mol/L}$)	净光合速率 /($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Net photosynthetic rate	蒸腾速率 /($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Transpiration rate	叶片气孔导度 /($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Stomatal conductance	胞间 CO ₂ 浓度 /($\mu\text{L/L}$) Intercellular CO ₂ concentration	气孔限制值 Stomatal limitation
IVF09	自根苗	0	12.39 \pm 0.14bc	2.78 \pm 0.06d	0.33 \pm 0.00c	135.90 \pm 1.68bc	0.37 \pm 0.00h
		400	10.13 \pm 0.04e	1.91 \pm 0.03e	0.15 \pm 0.01i	128.91 \pm 2.43de	0.55 \pm 0.01d
		800	8.59 \pm 0.36f	1.32 \pm 0.01j	0.11 \pm 0.00k	106.33 \pm 1.67g	0.67 \pm 0.01a
IVF09	嫁接苗	0	13.64 \pm 0.07a	3.27 \pm 0.06d	0.36 \pm 0.01a	150.33 \pm 6.81a	0.33 \pm 0.00j
		400	11.14 \pm 0.64d	2.58 \pm 0.02b	0.26 \pm 0.01f	135.94 \pm 1.02bc	0.44 \pm 0.01g
		800	9.85 \pm 0.20e	1.61 \pm 0.00i	0.14 \pm 0.01j	120.37 \pm 1.23f	0.56 \pm 0.00d
IVF117	自根苗	0	12.81 \pm 0.45b	2.92 \pm 0.05c	0.31 \pm 0.01d	139.80 \pm 1.31b	0.34 \pm 0.00i
		400	9.94 \pm 0.25e	2.55 \pm 0.02g	0.21 \pm 0.00g	130.74 \pm 0.78cd	0.54 \pm 0.02e
		800	8.05 \pm 0.24g	1.74 \pm 0.00h	0.16 \pm 0.00h	111.51 \pm 0.24g	0.62 \pm 0.01b
IVF117	嫁接苗	0	13.35 \pm 0.24a	3.30 \pm 0.09a	0.34 \pm 0.00b	150.60 \pm 6.40a	0.33 \pm 0.00j
		400	12.00 \pm 0.15c	3.05 \pm 0.04e	0.30 \pm 0.02e	140.28 \pm 4.13b	0.48 \pm 0.01f
		800	9.88 \pm 0.13e	2.25 \pm 0.01f	0.21 \pm 0.01g	123.90 \pm 0.35ef	0.59 \pm 0.00c

与非胁迫条件下比,在 800 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 胁迫下嫁接苗与自根苗的 P_n、T_r 下降至最低,但嫁接苗叶片 P_n 与 T_r 下降幅度小于自根苗。在整个试验处理中,2 个品种嫁接苗叶片的 P_n 与 T_r 均大于自根苗,差异显著。表明嫁接苗比自根苗有更强的铜胁迫耐受性,在铜胁迫下维持较强的光合作用与蒸腾作用。

IVF09 与 IVF117 嫁接苗叶片 G_s 与 C_i 均显著大于自根苗,其中 G_s 在 400 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 下表现最为明显,IVF09 嫁接苗比自根苗增加了 69.76%,IVF117 比自根苗增加了 43.64%;C_i 在 800 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 下表现最为明显,IVF09 嫁接苗比自根苗增加了 13.21%,IVF117 比自根苗增加了 11.11%。所以,嫁接后的甜瓜幼苗受到的铜胁迫影响更小,气孔开张程度大,CO₂ 供应更为充足。

在胁迫条件下,2 个品种嫁接苗叶片的 L_s 均显著小于自根苗,在 400 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 胁迫下表现最显

著。说明在铜胁迫下,嫁接甜瓜幼苗气孔的限制作用均弱于自根苗。

2.3 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗矿质元素吸收的影响

2.3.1 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗叶片与根部 Cu 含量(以干质量计)的影响 由图 2 可知,在胁迫条件下,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗叶片与根部的 Cu 含量除 IVF09 嫁接苗叶片 Cu 含量在 400 $\mu\text{mol/L}$ 外均显著增加,但叶片的 Cu 含量低于根部,嫁接苗叶片与根部 Cu 含量低于自根苗,其中 IVF09 嫁接苗叶片 Cu 含量在 800 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 胁迫下显著低于自根苗,仅为自根苗的 70.11%;而 IVF117 在 400 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 胁迫下显著低于自根苗,为自根苗的 86.61%。在整个胁迫处理下,IVF09 与 IVF117 嫁接苗根部 Cu 含量均显著低于自根苗,在 800 $\mu\text{mol/L}$ Cu²⁺ 胁迫下表现最明显。

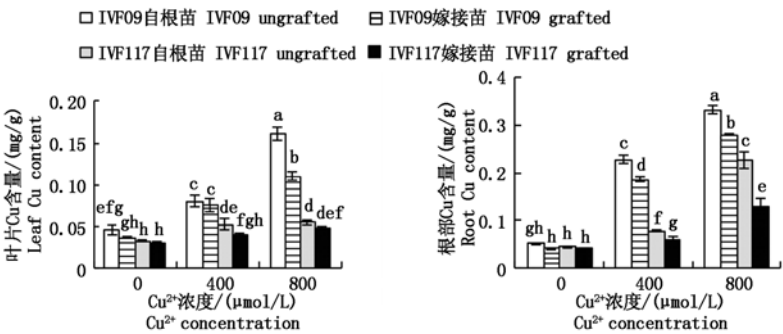


图 2 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗叶片与根部 Cu 含量的影响

Fig. 2 Effects of grafting on Cu content in leaf and root of melon seedlings under copper stress

2.3.2 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗叶片与根部其他矿质元素含量的影响 由表 3 可知,在胁迫条件下,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗叶片的矿质元素吸收

平衡遭到破坏,各元素吸收呈不同的变化趋势。嫁接苗与自根苗叶片中 K、P、S 含量均增加,Mg 含量减少;IVF09 嫁接苗与自根苗叶片中 Na 含量先增加

后减少,而 IVF117 嫁接苗与自根苗叶片中 Na 含量均减少;IVF09 与 IVF117 嫁接苗叶片 Ca 含量先减少后增加,而自根苗叶片 Ca 含量一直减少。

2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗相比,叶片的 K、P、Na 的吸收在铜胁迫下增强,Ca 吸收减弱。在 2 种不同浓度的 Cu^{2+} 胁迫下,IVF09 嫁接苗叶片 K、P、

Na 含量分别比自根苗的最大增加量为 23.21%,10.00%,28.24%,Ca 含量比自根苗的最大减少量为 48.56%。而 IVF117 嫁接苗叶片 K、P、Na 含量分别比自根苗的最大增加量为 33.53%,3.05%,41.80%,Ca 含量比自根苗的最大减少量为 60.23%。

表 3 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗叶片其他矿质元素含量的影响

Tab.3 Effects of grafting on other mineral elements content in leaf of melon seedlings under copper stress

品种 Cultivar	嫁接 Grafting	Cu^{2+} /($\mu\text{mol/L}$)	K/(mg/g)	P/(mg/g)	S/(mg/g)	Na/(mg/g)	Mg/(mg/g)	Ca/(mg/g)
IVF09	自根苗	0	24.53 \pm 0.33e	2.51 \pm 0.03c	12.32 \pm 0.44bc	1.81 \pm 0.08efg	9.34 \pm 0.77de	39.41 \pm 0.26d
		400	27.49 \pm 0.82de	2.90 \pm 0.09bc	14.42 \pm 1.31a	1.96 \pm 0.04de	8.35 \pm 0.58ef	34.10 \pm 1.17e
		800	31.13 \pm 1.20cd	3.20 \pm 0.08ab	15.94 \pm 0.82a	1.70 \pm 0.03g	7.69 \pm 0.91fg	32.59 \pm 0.56e
IVF09	嫁接苗	0	32.29 \pm 2.00cd	2.89 \pm 0.19bc	4.29 \pm 0.46f	2.06 \pm 0.06cd	7.86 \pm 0.31f	20.55 \pm 1.35h
		400	33.87 \pm 1.55bc	3.19 \pm 0.30ab	6.49 \pm 1.33de	2.36 \pm 0.09b	6.46 \pm 0.14gh	17.54 \pm 1.24i
		800	37.97 \pm 3.57ab	3.46 \pm 0.33a	7.53 \pm 1.01d	2.18 \pm 0.09c	6.32 \pm 0.68h	23.44 \pm 1.90g
IVF117	自根苗	0	25.54 \pm 2.26e	2.79 \pm 0.43bc	10.59 \pm 0.79c	2.20 \pm 0.15c	13.21 \pm 1.19a	53.58 \pm 2.97a
		400	28.45 \pm 1.90de	2.92 \pm 0.14bc	11.27 \pm 1.87bc	1.89 \pm 0.10ef	11.26 \pm 0.68b	51.37 \pm 1.01b
		800	33.43 \pm 1.56bc	2.95 \pm 0.14bc	12.52 \pm 0.89b	1.80 \pm 0.08fg	10.84 \pm 0.54bc	45.48 \pm 0.54c
IVF117	嫁接苗	0	29.19 \pm 1.81cde	2.87 \pm 0.09bc	5.43 \pm 0.65ef	2.70 \pm 0.06a	9.79 \pm 0.39cd	25.11 \pm 0.04fg
		400	37.99 \pm 6.74ab	2.99 \pm 0.40b	6.44 \pm 0.66de	2.68 \pm 0.03a	7.99 \pm 0.70f	20.43 \pm 0.70h
		800	38.87 \pm 1.80a	3.04 \pm 0.23ab	7.44 \pm 0.79d	1.86 \pm 0.11ef	7.61 \pm 1.04fg	26.14 \pm 0.70f

由表 4 可知,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗根部的矿质元素吸收平衡在铜胁迫下也遭到破坏,变化趋势表现不一致。2 个品种嫁接苗与自根苗根部 K、P 含量均增加,Na、Mg 含量均减少;此外,嫁接苗与自根苗根部中 S、Ca 含量变化也不一致,其中嫁接苗根部 S 含量一直增加,Ca 含量先减少后增加而自根苗根部 S 含量先增加后减少,Ca 含量一直减少。

2 个品种甜瓜嫁接苗根部 K、P、S、Na、Mg 的吸收在铜胁迫条件下比自根苗增强,在 2 种不同浓度

的 Cu^{2+} 胁迫下,IVF09 嫁接苗根部 K、P、S、Na、Mg 的含量分别比自根苗的最大增加量为 12.00%,63.98%,42.34%,55.76%,7.01%;Ca 含量比自根苗的最大减少量为 16.57%;IVF117 嫁接苗根部 K、P、S、Na、Mg 的含量分别比自根苗的最大增加量为 16.90%,41.98%,53.09%,69.79%,18.28%。此外,在 400 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} 胁迫下,IVF117 嫁接苗根部 Ca 含量比自根苗减少了 9.01%。

表 4 嫁接对铜胁迫下甜瓜幼苗根部其他矿质元素含量的影响

Tab.4 Effects of grafting on other mineral elements content in root of melon seedlings under copper stress

品种 Cultivar	嫁接 Grafting	Cu^{2+} /($\mu\text{mol/L}$)	K/(mg/g)	P/(mg/g)	S/(mg/g)	Na/(mg/g)	Mg/(mg/g)	Ca/(mg/g)
IVF09	自根苗	0	23.04 \pm 1.98f	3.71 \pm 0.36e	5.97 \pm 0.99f	9.23 \pm 0.41cd	4.58 \pm 0.43b	19.64 \pm 1.80ab
		400	27.27 \pm 1.09de	3.72 \pm 0.30e	7.19 \pm 0.57def	8.25 \pm 0.31de	4.24 \pm 0.04bcd	18.17 \pm 1.56b
		800	30.59 \pm 1.37bcd	4.02 \pm 0.06de	6.07 \pm 0.48f	7.44 \pm 1.02ef	3.85 \pm 0.12cd	17.15 \pm 1.63bc
IVF09	嫁接苗	0	28.63 \pm 2.33de	5.85 \pm 0.84a	7.66 \pm 0.54cde	15.25 \pm 0.58a	5.31 \pm 0.13a	19.36 \pm 2.53ab
		400	30.32 \pm 0.73bcd	6.10 \pm 0.13a	8.08 \pm 0.85bcd	12.85 \pm 1.56ab	4.29 \pm 0.14bcd	15.16 \pm 0.90c
		800	34.26 \pm 3.03ab	6.33 \pm 0.27a	8.64 \pm 0.52abc	10.82 \pm 1.02c	4.12 \pm 0.07bcd	16.86 \pm 0.65bc
IVF117	自根苗	0	24.64 \pm 3.09ef	4.02 \pm 0.23de	5.99 \pm 0.27f	9.62 \pm 0.60cd	4.70 \pm 0.39b	19.74 \pm 1.96ab
		400	28.52 \pm 2.70de	4.05 \pm 0.28de	6.58 \pm 1.06ef	6.95 \pm 0.67ef	4.22 \pm 0.25bcd	18.53 \pm 1.20ab
		800	33.25 \pm 3.91abc	4.67 \pm 0.38cd	6.31 \pm 1.02f	6.09 \pm 0.85f	3.72 \pm 0.09d	17.10 \pm 0.74bc
IVF117	嫁接苗	0	30.07 \pm 0.85cd	5.11 \pm 0.17bc	7.81 \pm 0.38cde	13.93 \pm 1.27ab	5.37 \pm 0.54a	17.49 \pm 0.76bc
		400	33.34 \pm 1.30abc	5.75 \pm 0.61ab	9.20 \pm 0.69ab	10.85 \pm 1.05b	4.72 \pm 0.63b	16.86 \pm 0.86bc
		800	35.86 \pm 1.17a	6.16 \pm 0.15a	9.66 \pm 0.49a	10.34 \pm 0.42c	4.40 \pm 0.31bc	21.09 \pm 2.17a

3 讨论

植物生物量的大小反映了植物的生长能力,直接表现在植物的株高、茎粗、叶面积、干鲜质量上。

已有报道,铜胁迫对黄瓜^[23]、柑橘^[26]、青蒿^[27]的生物量均有抑制作用。

本试验中,在铜胁迫下,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗的生物量均下降,这与在柑橘、青蒿、黄瓜等

作物中的报道一致,说明无论嫁接与否,甜瓜幼苗在铜胁迫下生物量均受到抑制。但是本试验中,在相同的胁迫条件下,由于甜瓜接穗与南瓜砧木嫁接后,砧木对接穗生长和生理特性有所影响,嫁接苗的生物量较自根苗有所增加,特别是在 $800 \mu\text{mol/L Cu}^{2+}$ 胁迫下表现明显,说明嫁接减弱了铜胁迫的抑制作用,促进了甜瓜幼苗株高、茎粗、叶面积的生长,增加了幼苗的物质积累。

光合作用是植物赖以生存的基础,是决定植物生物量大小的主要因素之一。铜胁迫不仅影响着植物的生长发育,还抑制为其生长发育提供物质基础的光合作用而间接影响生长。铜胁迫对光合特性的抑制生理反应主要是叶片光合色素含量、光合参数的变化等^[28]。

光合色素具有在光合作用中参与吸收、传递光能或引起原初光化学反应的重要作用。张自坤^[29]研究发现,黄瓜幼苗在铜胁迫下叶片光合色素含量呈下降趋势,主要可能是高浓度的 Cu^{2+} 促使叶绿体酶失活,叶绿体分解加快^[28];也可能是叶绿体蛋白上的巯基结合的铁、锌、镁离子被过剩的铜离子代替^[30]。而本试验也研究发现,在铜胁迫下,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗叶片的光合色素含量均显著下降,这与前者报道一致。同时试验结果表明,铜胁迫下嫁接苗叶片的光合色素含量高于自根苗,并且在 $400 \mu\text{mol/L Cu}^{2+}$ 胁迫下,2 个品种甜瓜嫁接苗叶片叶绿素 a、类胡萝卜素、叶绿素总含量显著高于自根苗,说明嫁接能缓解铜胁迫对甜瓜幼苗叶绿素代谢酶的降解毒害,从而维持较高的光合色素含量。

光合参数是表明光合作用强弱的重要指标。已有研究表明,番茄^[31]、西瓜^[32]在盐胁迫下,黄瓜在 NO_3^- 胁迫下^[33]与低温胁迫下^[34],其光合速率均下降。本试验中也有相似的结论,在铜胁迫下,2 个品种甜瓜嫁接苗与自根苗叶片的 Pn 与 Tr 均下降,但在同一胁迫条件下,嫁接苗叶片的 Pn 与 Tr 显著性高于自根苗,说明铜胁迫抑制了甜瓜幼苗的光合作用,而嫁接提高了铜胁迫下甜瓜幼苗的光合作用与蒸腾作用。

Gs 表示气孔的开张程度,其不但反映植物蒸腾耗水的大小,而且 Gs 大小与 Pn 密切相关,在大多数情况下, Gs 下降会造成 CO_2 供应受阻,进而造成 Pn 下降^[35]。同时, Ls 值也反映了胁迫条件对植物叶片气孔的限制作用,其值越大,说明对气孔的限制作用越强。本试验研究结果表明,随着 Cu^{2+} 浓度增加, Gs 、 Ci 减小, Ls 值增大,并且嫁接苗叶片中的 Gs 、 Ci 大于自根苗, Ls 值小于自根苗,这与嫁接苗叶

片 Pn 、 Tr 大于自根苗是相辅的。表明嫁接苗叶片的气孔限制作用弱于自根苗,胞间 CO_2 浓度大于自根苗,进而促进光合效率与蒸腾作用,提高甜瓜幼苗对铜胁迫的耐受性。

目前对胁迫条件下光合速率的下降原因仍有很大争议,特别是对气孔限制与非气孔限制。Farquhar 等^[36]认为,只有 Gs 与 Ci 同时降低时,才能表明 Pn 下降是由气孔所致,即气孔限制;许祥明等^[37]认为, Gs 下降时,而 Ci 维持不变或者上升,则 Pn 下降是由叶肉细胞光合活性下降,同化力降低等非气孔因素所致,即非气孔限制。本试验中 Pn 显著下降,且 Gs 与 Ci 也显著下降,表明 Pn 的下降主要是由于气孔限制引起的。

Cu 作为植物必需营养元素,过量的 Cu 吸收会打破养分平衡,抑制营养元素的吸收和转运。铜对植物吸收不同营养元素的影响有差异。本试验中,在铜胁迫条件下,IVF09 与 IVF117 嫁接苗根部 Cu 含量均显著低于自根苗,这主要是在铜胁迫条件下,根部是对土壤最敏感的部位,也是直接胁迫部位,并且嫁接减少了 Cu^{2+} 向叶片的运输,降低了叶片的 Cu 含量,缓解了铜素毒害作用。Graham 等^[38]研究表明, Ca 可以减轻植物铜素毒害,在土壤中施加 CaCO_3 或 CaSO_4 可以提高土壤中的 Ca 含量,显著降低柑橘小苗根中 Cu 的浓度,减轻毒害症状。在试验中,铜胁迫下甜瓜嫁接苗叶片和根部的 Ca 含量先减少后增加,而自根苗的 Ca 含量一直呈减小趋势,这说明嫁接提高了植株体内的 Ca 含量,从而会减弱铜胁迫的抑制。同时由于嫁接植株的根系体积,活跃吸收面积和总的吸收面积较自根苗有显著性优势^[39]。因此,试验中在铜胁迫条件下,嫁接苗叶片中 K 、 P 、 Na 含量与根部 K 、 P 、 Na 、 Mg 含量较自根苗增加,使植株处于良好的营养状态,从而减轻 Cu^{2+} 毒害作用,说明嫁接可维持植株养分吸收平衡与提高植株 Cu^{2+} 抗性。而试验中也发现铜胁迫下甜瓜幼苗叶片 K 、 P 与根部 K 有促进吸收,而对其 Mg 、 Ca 的吸收有抑制作用,这是因为 Cu^{2+} 对其他元素的吸收有拮抗作用。

参考文献:

- [1] Jung M C. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea [J]. *Applied Geochemistry*, 2001 (16): 1369 – 1375.
- [2] Lima J S. Copper balances in cocoa agrarian ecosystems: effects of differential use of cupric fungicides [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1994 (48): 19 – 25.
- [3] 俞 珊,付新梅,李云飞,等. 污泥土地利用中重金属

- 铜污染地下水的潜在风险研究[J]. 四川环境, 2010, 29(4): 35-37.
- [4] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
- [5] 姚丽贤, 李国良, 党志. 集约化养殖畜禽粪中主要化学物质调查[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1989-1992.
- [6] Srivastava P C, Gupta U C. Trace elements in crop production[M]. USA: Lebanon, NH: Science Publishers Inc, 1996.
- [7] 杨萍, 汪美英, 赵莉莉, 等. 滁州市土壤重金属污染及蔬菜生产安全性调查[J]. 三峡环境与生态, 2011, 33(4): 7-10, 46.
- [8] Dijendra N R, Samir M, Gargi S, *et al.* Superoxide anion mediated mitochondrial dysfunction leads to hepatocyte apoptosis preferentially in the periportal region during copper toxicity in rats[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2009(182): 136-147.
- [9] 龙健, 黄昌勇, 腾应, 等. 我国南方红壤矿山复垦土壤的微生物特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 126-128.
- [10] Ellis R J, Neish B, Trett M W, *et al.* Comparison of microbial and meiofaunal community analyses for determining impact of heavy metal contamination[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2001, 45: 171-185.
- [11] 郭单杰, 杨继飞, 李涛, 等. 不同肥料不同作物对铜污染土壤中酶活性的影响[J]. 天津农业科学, 2013, 19(11): 9-11.
- [12] 邵泉森, 张凤杰, 贲定丹, 等. 铜胁迫对土壤酶活性的影响[J]. 天津农业科学, 2014, 20(4): 21-23.
- [13] 于贤昌, 王立江. 蔬菜嫁接的研究与应用[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 1998, 29(2): 249-256.
- [14] 张文韬, 黄保健, 郭世荣, 等. 铜对空心菜光合作用及保护酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(2): 303-307.
- [15] Lee J M. Cultivation of grafted vegetables I: Current status, grafting methods and benefits[J]. *Horticultural Science*, 1994, 29: 235-236.
- [16] 于贤昌, 邢禹贤, 马红, 等. 黄瓜嫁接苗抗冷特性研究[J]. 园艺学报, 1997, 24(4): 348-352.
- [17] 范双喜, 王绍辉. 高温逆境下嫁接番茄耐热特性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(z2): 60-63.
- [18] Yetisir H, Caliskan M E, Soylu S, *et al.* Some physiological and growth responses of watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum and Nakai] grafted onto *Lagenaria siceraria* to flooding[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1/3): 1-8.
- [19] 李静. 低温弱光胁迫对甜瓜幼苗生长及生理指标的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(5): 106-109.
- [20] 刘圆, 翁倩, 王昊, 等. 甜瓜成熟过程中芳香物质形成及其与乙烯的关系[J]. 河南农业科学, 2010(5): 88-92.
- [21] Rouphael Y, Cardarelli M, Reab E, *et al.* Grafting of cucumber as a means to minimize copper toxicity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63: 49-58.
- [22] 张媛媛. 重金属镉对黄瓜幼苗生理特性的影响及嫁接缓解镉毒害的生理机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [23] Zhang Z K, Li H, Zhan Y, *et al.* Grafting enhances copper tolerance of cucumber through regulating nutrient uptake and antioxidative system[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(12): 1758-1770.
- [24] 李小红. 不同砧木嫁接矢富罗莎葡萄生长特性及对Cd胁迫响应的差异[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [25] 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.
- [26] 姜成, 申晓慧, 李春丰, 等. 铜对黄瓜和萝卜种子萌发和生长的影响[J]. 种子, 2012, 31(11): 16-17.
- [27] 李璇, 韩小丽, 郭兰萍. 土壤中的铜胁迫对青蒿生长及青蒿素的影响[J]. 中国医药杂志, 2012, 37(11): 1553-1557.
- [28] 李永杰, 李吉跃, 方晓娟, 等. 铜胁迫对白蜡幼苗叶绿素含量及光合特性影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(6): 35-37.
- [29] 张自坤, 刘作新, 张颖, 等. 铜胁迫对嫁接和自根黄瓜幼苗光合作用及营养元素吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 135-139.
- [30] 林义章, 徐磊. 铜污染对高等植物的生理毒害作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 201-204.
- [31] 陈淑芳, 朱月林, 胡春梅. NaCl胁迫对嫁接番茄生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(2): 145-149.
- [32] 朱士农, 郭世荣, 张爱慧, 等. NaCl胁迫对西瓜嫁接苗叶片抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(11): 2285-2291.
- [33] 刘燕, 王秀峰, 杨凤娟, 等. NO₃⁻胁迫对黄瓜嫁接苗生长及光合特性的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 54-58.
- [34] 刘慧英, 朱祝军, 史庆华. 低温胁迫下嫁接对西瓜光合特性及叶绿素荧光参数影响的研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2007, 25(2): 163-167.
- [35] 李汉美. 嫁接提高番茄耐盐性的生理机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [36] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [37] 许祥明, 叶和春, 李国风. 植物抗盐机理的研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(4): 379-387.
- [38] Graham J H, Timmer L W, Farddmann D. Toxicity of fungicidal copper in soil to citrus seedlings and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi[J]. *Phytopathology*, 1986(76): 66-70.
- [39] 焦自高, 王崇启, 董玉梅, 等. 嫁接对黄瓜生长及品质的影响[J]. 山东农业科学, 2000(1): 24-25.