

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*

张自坤^{1,2,3} 刘作新^{1,3**} 张颖^{1,3} 舒乔生^{1,2,3}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;
3. 辽宁省节水农业重点实验室 沈阳 110016)

摘要 以“新泰密刺”黄瓜/黑籽南瓜嫁接苗和“新泰密刺”自根苗为材料,采用日光温室水培的方法研究了铜胁迫下嫁接对黄瓜幼苗光合作用和营养元素吸收的影响。结果表明,铜(Cu²⁺)胁迫6 d后,嫁接和自根黄瓜幼苗叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量显著降低;净光合速率和气孔导度显著下降,胞间CO₂浓度随Cu²⁺离子浓度的增加而降低,但各浓度处理间差异并不显著;电解质渗漏率明显升高,细胞膜透性发生改变;根系和叶片中的营养元素(N、K、Ca、Mg)含量明显降低。嫁接黄瓜幼苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量、净光合速率、营养元素含量显著高于自根黄瓜,电解质渗漏率显著低于自根黄瓜。嫁接黄瓜幼苗叶片中Cu²⁺含量显著低于自根黄瓜,表明嫁接能够明显减少Cu²⁺向叶片的运输,缓解Cu²⁺毒害作用。

关键词 铜胁迫 黄瓜 嫁接 光合作用 营养元素吸收

中图分类号: S642.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)01-0135-05

Effect of Cu stress on photosynthesis and nutrient absorption of grafted and ungrafted cucumber seedling

ZHANG Zi-Kun^{1,2,3}, LIU Zuo-Xin^{1,3}, ZHANG Ying^{1,3}, SHU Qiao-Sheng^{1,2,3}

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Liaoning Water-saving Agriculture, Shenyang 110016, China)

Abstract Under water culture, this paper researched into the effect of copper stress on photosynthesis and nutrient absorption of grafted (*Cucumis sativus* L. “Xintaimici” / *Cucurbita ficifolia*) and ungrafted cucumber. Under 6 days of copper stress, there is significant depression in the contents of chlorophyll, carotenoid, nutrient(N, K, Ca, and Mg), and in net photosynthetic rate and stomatal conductance in both grafted and ungrafted cucumber seedling leaves. An obvious increase in electrolyte leakage is also observed. Though intercellular CO₂ concentration depresses with increase in Cu concentration, there exists no significant correlation among the treatments. The contents of chlorophyll, carotenoid and nutrient (N, K, Ca, and Mg) and the net photosynthetic rate of grafted cucumber seedling leaves are significantly higher than those in ungrafted cucumber plants. On the other hand, percent electrolyte leakage is significantly lower in grafted than that in ungrafted cucumber plants. Copper content in grafted cucumber seedling leaves is significantly lower than that in ungrafted seedling leaves. This implies that grafted cucumber plants have the strong capacity for inhibiting Cu²⁺ accumulation in leaves which alleviates copper poison.

Key words Copper stress, Cucumber, Grafting, Photosynthesis, Nutrient absorption

(Received March 19, 2008; accepted June 8, 2008)

Cu²⁺是高等植物生长发育过程中的一种重要微量营养元素,作为多种酶的组分之一,参与很多生

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-004)、国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD02A12)和辽宁省农业科技计划项目(2007212001)资助

** 通讯作者: 刘作新(1954-),男,博士,研究员,主要研究方向为土壤物理与节水农业。E-mail: liuzuoxin@iae.ac.cn

张自坤(1979-),男,汉族,在读博士,主要研究方向为设施园艺科学与工程。E-mail: zkzhang@yeah.net

收稿日期: 2008-03-19 接受日期: 2008-06-08

理代谢过程,对维持植物正常的新陈代谢及生长发育具有极其重要的意义^[1]。但 Cu^{2+} 具有累积性,过量的 Cu^{2+} 又会导致植物体的 Cu^{2+} 毒害,影响植物的正常生长,降低产品的质量^[2]。我国大、中城市郊区工业“三废”的排放及城市生活垃圾和高 Cu^{2+} 杀菌剂、杀虫剂、化肥的使用,以及采用高 Cu^{2+} 饲料等使 Cu^{2+} 大量涌入农田,导致温室土壤 Cu^{2+} 含量超标,污染环境且影响温室蔬菜的品质和安全性。当今 Cu^{2+} 污染研究大多是关于大田粮食作物,而蔬菜作物的 Cu^{2+} 污染和 Cu^{2+} 毒害却很少报道,未得到足够的重视^[3]。

黄瓜在日光温室蔬菜生产中占有主要地位,随着日光温室面积的扩大和先进栽培技术的推广普及,嫁接技术在黄瓜栽培中已得到普遍应用。嫁接对作物有多方面的改良作用,如增强作物的抗冷性^[4,5]、抗高温性^[6],抵御含钙土壤中的铁黄萎病^[7,8],增强吸收能力^[9-11],增加内源激素的合成^[12],减少持久有机污染物的吸收^[13],提高作物的抗盐能力^[14]和水分利用效率^[15]及产量^[16]等,然而关于 Cu^{2+} 胁迫下嫁接黄瓜作物生长发育的研究尚鲜见报道。本试验采用水培 Cu^{2+} 浓度过量处理,研究 Cu^{2+} 胁迫对嫁接(G)和自根(U)黄瓜幼苗净光合速率和营养元素吸收的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2007 年春季在辽宁省阜新蒙古族自治县农业科技示范园区内的日光温室进行。黄瓜品种为“新泰密刺”,砧木为云南“黑籽南瓜”。于 2007 年 3 月 16 日播种“黑籽南瓜”,3 月 18 日播种黄瓜接穗,3 月 27 日以插接法进行嫁接。3 月 27 日播自根黄瓜,待嫁接与自根黄瓜同时达 3 叶 1 心时(4 月 15 日),选取生长一致的健壮黄瓜幼苗移植栽培槽(5 m×0.4 m×0.1 m)中,每槽营养液 150 L,定植两行,株行距 20 cm×25 cm,用充氧机补充氧气。营养液中大量元素参照山崎配方^[17],微量元素参照 Arnon 配方略加修改。 Cu^{2+} 浓度用 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 调节,pH 值用 H_2SO_4 调节,保持在 5.5~6.5。试验共设 4 个 Cu^{2+} 浓度处理,即 Cu^{2+} 浓度在原营养液(Cu^{2+} 浓度为 $0.3 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)的基础上,分别增加 0(对照)、 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理。移栽缓苗 2 d 后开始胁迫处理,共 6 d,中间更换一次营养液。

1.2 测定方法

胁迫后 6 d(4 月 21 日)选取黄瓜植株上数第 2 片平展叶测叶绿素、类胡萝卜素含量、电解质渗漏率和光合参数。叶绿素和类胡萝卜素含量采用分光光

度法测定^[18],电解质渗漏率采用沈文云等的方法^[19],净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)测定采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 光合仪,测定时选择叶室内源光强、 CO_2 浓度和温度分别为 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $370 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$;全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-蒸馏法测定^[18];全钾采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-火焰光度计法测定^[18];采用干灰-原子吸收分光光度计法测定 Ca、Mg、Cu 含量^[18]。

试验数据用 SPSS13.0 软件进行方差和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 Cu^{2+} 胁迫对黄瓜幼苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

由表 1 可知, Cu^{2+} 胁迫 6 d 后,随营养液中 Cu^{2+} 离子浓度的增加黄瓜幼苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量逐渐降低。 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的自根黄瓜幼苗叶片叶绿素含量比对照分别降低 25.32%、41.77% 和 58.23%,类胡萝卜素含量分别降低 18.75%、31.25% 和 46.88%;嫁接黄瓜幼苗叶片叶绿素含量分别降低 7.95%、23.86% 和 37.50%,类胡萝卜素含量分别降低 11.43%、17.14% 和 25.71%。不同 Cu^{2+} 浓度胁迫条件下,嫁接黄瓜幼苗叶片叶绿素含量较自根黄瓜幼苗分别提高 37.29%、45.65% 和 66.67%,类胡萝卜素含量分别提高 19.23%、31.82% 和 52.94%。

从表 1 可知,嫁接和 Cu^{2+} 离子浓度均能极显著影响黄瓜幼苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量,二者的交互作用对叶绿素含量影响显著,而对类胡萝卜素含量无显著影响。

2.2 Cu^{2+} 胁迫对黄瓜幼苗叶片电解质渗漏率的影响

电解质渗漏率是检验植物受逆境胁迫后细胞膜透性的重要指标,与作物的抗性负相关^[20]。由表 1 可知,随 Cu^{2+} 胁迫的增强,电解质渗漏率升高,说明细胞膜的半透性发生改变。在 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 胁迫条件下,嫁接与自根黄瓜幼苗叶片的电解质渗漏率分别较对照增加 105.00% 和 157.14%。在各 Cu^{2+} 胁迫处理下,嫁接黄瓜幼苗叶片的电解质渗漏率均显著低于自根黄瓜幼苗,表明嫁接黄瓜幼苗在 Cu^{2+} 胁迫下较自根黄瓜能更好地保持细胞膜结构的完整性。

2.3 Cu^{2+} 胁迫对黄瓜幼苗叶片光合参数的影响

自根和嫁接黄瓜幼苗叶片的净光合速率、气孔导度均随营养液中 Cu^{2+} 浓度的增加而显著降低(表 1)。胁迫 6 d 后, $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理的自根黄瓜幼苗叶片净光合速

表 1 Cu^{2+} 胁迫下黄瓜幼苗叶片色素含量、电解质渗漏率及光合参数的变化Tab. 1 Pigment contents, electrolyte leakage and photosynthetic parameters in cucumber seedling leaves under Cu^{2+} stress

Cu^{2+} 浓度 Cu^{2+} concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content [$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$]	类胡萝卜素含量 Carotenoid content [$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$]	电解质渗漏率 Electrolyte leakage	光合速率 P_n Photosynthetic rate [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	气孔导度 G_s Stomatal con- ductance ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i Intercellular CO_2 concentration ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)
0	G	1.76±0.12	0.35±0.02	0.20±0.01	16.45±0.77	0.25±0.02	284.13±12.35
	U	1.58±0.09	0.32±0.02	0.21±0.01	15.24±0.71	0.25±0.02	282.15±10.29
10	G	1.62±0.13	0.31±0.02	0.21±0.01	15.60±0.73	0.23±0.02	278.73±13.02
	U	1.18±0.11	0.26±0.01	0.25±0.01	12.89±0.60	0.20±0.01	278.56±12.45
20	G	1.34±0.06	0.29±0.01	0.25±0.01	14.72±0.69	0.20±0.02	276.55±10.58
	U	0.92±0.04	0.22±0.01	0.34±0.02	11.60±0.64	0.16±0.01	277.38±8.74
40	G	1.10±0.08	0.26±0.01	0.41±0.02	13.64±0.62	0.15±0.02	273.78±9.65
	U	0.66±0.06	0.17±0.01	0.54±0.03	10.23±0.58	0.13±0.01	269.28±10.05
显著性 Significance							
Cu^{2+} (C)		**	**	**	**	**	NS
嫁接 (G) Grafted		**	**	**	**	**	NS
C × G		*	NS	*	NS	NS	NS

U 表示自根苗, G 表示嫁接苗; *表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著, **表示在 $\alpha=0.01$ 水平差异显著, NS 表示差异不显著。下同。U and G indicate ungrafted and grafted plants, respectively; * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. NS indicates insignificant difference. The same below.

率比对照分别降低 15.42%、23.88%和 32.87%，气孔导度分别下降 20.00%、36.00%和 48.00%，嫁接黄瓜幼苗叶片的净光合速率分别下降 5.17%、10.52%和 17.08%，气孔导度分别下降 8.00%、20.00%和 40.00%。 Cu^{2+} 胁迫下，嫁接黄瓜幼苗叶片 P_n 下降幅度显著低于自根黄瓜幼苗，表明嫁接能显著提高黄瓜幼苗抗 Cu^{2+} 胁迫能力。自根与嫁接黄瓜幼苗叶片胞间 CO_2 浓度随 Cu^{2+} 浓度的增加而降低，但各处理间差异不显著(表 1)，即使在强 Cu^{2+} 胁迫(40 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下， C_i 仅降低 4.56%和 3.64%，说明 Cu^{2+} 胁迫下，黄瓜幼苗叶片 P_n 的降低主要是由非气孔因素造成的。

由表 1 可知，嫁接和 Cu^{2+} 离子浓度均能极显著影响黄瓜幼苗叶片净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)，而对胞间 CO_2 浓度(C_i)无显著影响，二者的交互作用对 P_n 、 G_s 和 C_i 均无显著影响。

2.4 Cu^{2+} 胁迫对黄瓜幼苗根系和叶片中营养元素含量的影响

由图 1 可知，营养液中 Cu^{2+} 浓度显著影响黄瓜幼苗根系和叶片中 Cu^{2+} 含量，随营养液中 Cu^{2+} 浓度增加，黄瓜幼苗根系和叶片中 Cu^{2+} 含量显著升高。在 40 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 强胁迫条件下，嫁接和自根黄瓜幼苗根系中 Cu^{2+} 含量分别增加 22.55 倍和 27.85 倍，叶片中 Cu^{2+} 含量分别增加 1.25 倍 2.71 倍，且根系远远高于叶片中的 Cu^{2+} 含量，分别是叶片中 Cu^{2+} 含量的 80.33 倍和 61.90 倍。从图 1 还可看出，各 Cu^{2+} 胁迫处理条件下，嫁接黄瓜幼苗叶片中 Cu^{2+} 含量增加

幅度(42.22%、83.70%和 125.18%)显著低于自根黄瓜幼苗(122.99%、186.68%和 270.72%)，嫁接黄瓜幼苗叶片中 Cu^{2+} 含量只有自根黄瓜幼苗叶片 Cu^{2+} 含量的 60%~65%。

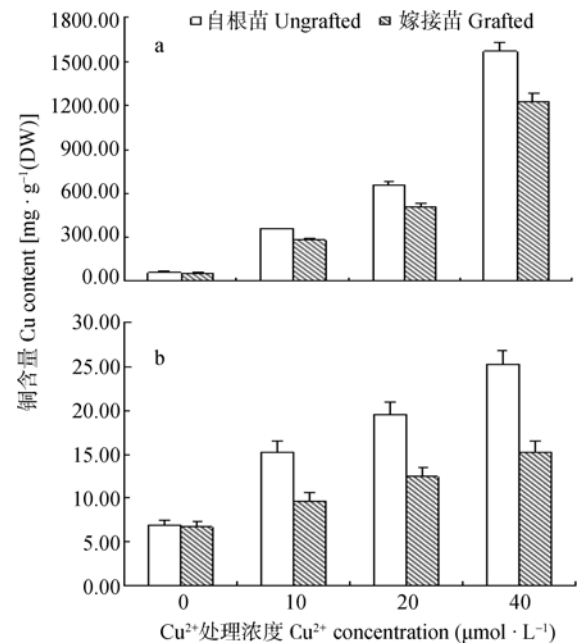


图 1 Cu^{2+} 胁迫下黄瓜幼苗根系(a)和叶片(b)的 Cu 含量
Fig. 1 Contents of Cu in roots (a) and leaves (b) of cucumber seedling leaves under Cu^{2+} stress

由表 2 可知， Cu^{2+} 浓度和嫁接均能显著影响叶片中 N、K、Ca、Mg 的含量。随着营养液中 Cu^{2+} 浓度的增加，叶片中 N、K、Ca、Mg 含量显著降低，嫁接黄瓜幼苗较自根黄瓜幼苗叶片中 N、K、Ca、Mg

表 2 Cu^{2+} 胁迫下黄瓜幼苗根系、叶片中营养元素含量
Tab. 2 Nutrient contents in cucumber seedling roots and leaves under Cu^{2+} stress $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (DW)

Cu ²⁺ 浓度 Cu ²⁺ concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	处理 Treatment	N		Ca		Mg		K	
		根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf
0	G	28.51±0.37	30.08±0.39	14.73±0.46	45.82±1.15	4.62±0.11	7.03±0.14	30.72±0.42	34.65±0.48
	U	25.58±0.33	26.66±0.34	14.35±0.44	46.35±1.38	4.85±0.12	6.85±0.13	28.65±0.35	30.52±0.32
10	G	28.12±0.36	29.38±0.38	14.18±0.42	43.25±1.05	4.45±0.08	6.95±0.15	29.21±0.39	33.74±0.35
	U	26.09±0.34	25.06±0.34	13.75±0.42	42.72±1.03	4.67±0.10	6.68±0.09	27.98±0.44	28.55±0.28
20	G	28.75±0.37	27.02±0.35	13.76±0.42	41.83±1.01	4.30±0.08	6.82±0.11	28.65±0.28	32.28±0.22
	U	25.12±0.32	23.46±0.35	13.42±0.40	39.56±0.95	4.58±0.09	6.43±0.08	26.85±0.38	27.65±0.19
40	G	27.95±0.36	24.52±0.31	13.29±0.36	40.53±1.01	4.18±0.07	6.55±0.13	27.82±0.25	29.45±0.33
	U	24.75±0.31	19.99±0.32	12.85±0.39	36.86±0.92	4.46±0.06	5.92±0.09	24.58±0.32	25.84±0.27
显著性 Significance									
Cu ²⁺ (C)		**	**	NS	*	**	**	**	**
嫁接 (G) Grafted		NS	**	**	**	**	**	**	**
C × G		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

含量高。而 Cu^{2+} 浓度和嫁接的交互作用对根系和叶片中 N、K、Ca、Mg 的含量影响均不显著。

3 结论与讨论

叶绿素是植物进行光合作用的色素，其含量的高低一定程度上反映了植物的光合能力^[1]。本试验结果表明， Cu^{2+} 胁迫条件下，植物叶片叶绿素含量均显著降低，其原因可能是由于过量的 Cu^{2+} 使叶绿体酶活性比例失调，叶绿素分解加快；同时 Cu^{2+} 与叶绿体中蛋白质上的巯基结合，或取代其中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} ，使叶绿素蛋白中心离子组成发生变化而导致失活^[3]。细胞膜是选择透过性膜，它能调节和控制细胞内外物质的运输和交换，其透性是评定植物对污染物反应的指标之一^[3]。

本试验中，嫁接黄瓜幼苗叶片的电解质渗漏率显著低于自根黄瓜幼苗，表明在 Cu^{2+} 胁迫条件下，嫁接能显著提高植物保护细胞膜和细胞膜功能完整性的能力。 Cu^{2+} 胁迫下，黄瓜幼苗叶片的净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)明显降低，但胞间 CO_2 浓度下降并不明显，表明气孔关闭并不是 P_n 下降的直接原因，这与前人的研究一致^[21]。

在 Cu^{2+} 胁迫环境中生长的植物可将大部分 Cu^{2+} 积累在根系中，以减少 Cu^{2+} 对地上部的危害^[22]。本试验中嫁接和自根黄瓜幼苗根系中 Cu^{2+} 含量分别是叶片的 80.33 倍和 61.90 倍，与前人研究结果一致。嫁接黄瓜幼苗叶片中 Cu^{2+} 含量显著低于自根黄瓜，表明嫁接可有效阻止过量的 Cu^{2+} 输送到叶片，从而减轻 Cu^{2+} 的毒害作用。阻止或减少 Cu^{2+} 在叶片中的过量积累是嫁接黄瓜幼苗净光合速率显著高于自根

黄瓜幼苗的主要机制。

Cu^{2+} 胁迫抑制其他营养元素的吸收，主要是由于 Cu^{2+} 对根系的伤害和吸收拮抗作用，进而影响矿物质代谢和植株的营养状况，产生毒害作用^[3]。本试验中，随着营养液中 Cu^{2+} 浓度的增加，叶片中 N、K、Ca、Mg 含量显著降低。而嫁接可使黄瓜幼苗叶片在 Cu^{2+} 胁迫下保持较高的营养元素含量(与自根黄瓜幼苗相比)，使植株处于较好营养状况，进而减轻过量 Cu^{2+} 产生的毒害作用。

嫁接后植株根系体积、活跃吸收面积和总吸收面积均比自根苗有明显优势^[23]，吸收 N、P、K、Ca、Mg 的能力显著增强^[24]，抗氧化物质含量增加^[25]，提高了植株对营养元素的利用效率及叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量，增强了叶片的光合作用能力和各种营养物质的合成数量^[26,27]。在 Cu^{2+} 胁迫下，嫁接后植株减少了 Cu^{2+} 向叶片中的运输，降低了叶片中的 Cu^{2+} 含量，缓解了 Cu^{2+} 毒害作用，使植株细胞膜结构和功能保持较好的完整性，叶片保持较高的净光合速率，整个植株处于较佳的营养状态。

参考文献

- [1] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [2] 王友保, 刘登义. Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 773-776
- [3] 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
- [4] Bulder H. A. M., Dennijs A. P. M., Speek E. J., et al. The effect of low root temperature on growth and lipid composition of low temperature tolerant rootstock genotypes for cucumber [J]. Journal of Plant Physiology, 1991, 138: 661-666
- [5] 于贤昌, 邢禹贤. 不同砧木与接穗对黄瓜嫁接苗抗冷性的影响[J]. 中国农业科学, 1998, 31(2): 41-47

- [6] Rivero R. M., Ruiz J. M., Sanchez E., *et al.* Does grafting provide tomato plants an advantage against H_2O_2 production under conditions of thermal shock? [J]. *Physiologia Plantarum*, 2003, 117: 44–50
- [7] Romera F. J., Alcántara E., de la Guardia M. D. Characterization of the tolerance to iron chlorosis in different peach rootstocks grown in nutrient solution. I. Effect of bicarbonate and phosphate [J]. *Plant and Soil*, 1991, 130: 121–125
- [8] Shi Y., Byrne D. H., Reed D. W., *et al.* Iron chlorosis development and growth response of peach rootstocks to bicarbonate [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1993, 16: 1039–1046
- [9] Bavaresco L., Fregoni M., Frascini P. Investigations on iron uptake and reduction by excised roots of different grapevine rootstocks and a *V. vinifera* cultivar [J]. *Plant and Soil*, 1991, 130: 109–113
- [10] Ruiz J. M., Belakbir A., Romero L. Foliar level of phosphorus and its bioindicators in *Cucumis melo* grafted plants. A possible effect of rootstocks [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 149: 400–404
- [11] Ruiz J. M., Belakbir A., López-Cantarero I., *et al.* Leaf-macronutrient content and yield in grafted melon plants. A model to evaluate the influence of rootstock genotype [J]. *Scientia Horticulturae*, 1997, 71: 227–234
- [12] Proebsting W. M., Hedden P., Lewis M. J., *et al.* Gibberellin concentration and transport in genetic lines of pea—Effects of grafting [J]. *Plant Physiology*, 1992, 100: 1354–1360
- [13] Otani T., Seike N. Comparative effects of rootstock and scion on dieldrin and endrin uptake by grafted cucumber (*Cucumis sativus*) [J]. *Journal of Pesticide Science*, 2006, 31: 316–321
- [14] Estan M. T., Martínez-Rodríguez M. M., Pérez-Alfocea F., *et al.* Grafting raises the salt tolerance of tomato through limiting the transport of sodium and chloride to the shoot [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56: 703–712
- [15] Cohen S., Naor A. The effect of three rootstocks on water use, canopy conductance and hydraulic parameters of apple trees and predicting canopy from hydraulic conductance [J]. *Plant Cell and Environment*, 2002, 25: 17–28
- [16] Ruiz J. M., Romero L. Nitrogen efficiency and metabolism in grafted melon plants [J]. *Scientia Horticulturae*, 1999, 81: 113–123
- [17] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [19] 沈文云, 侯锋. 低温对杂交一代黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. *华北农学报*, 1995, 10(1): 56–59
- [20] 李建勇, 张振贤, 葛均青, 等. 冬季田间冻害胁迫对露地越冬甘蓝膜系统的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 58–60
- [21] Alaoui-Sosse B., Genet P., Vinit-Dunand F., *et al.* Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents [J]. *Plant Science*, 2004, 166: 1213–1218
- [22] 刘永厚, 黄细花. 铜对紫云英固氮作用及养分吸收的影响[J]. *土壤肥料*, 1993 (5): 23–27
- [23] 焦自高, 孙春华. 嫁接对黄瓜生长及品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2000 (1): 26
- [24] 曾义安, 朱月林, 黄保健, 等. 黑籽南瓜砧木对黄瓜生长结实、抗病性及营养元素含量的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2004, 13(4): 15–19
- [25] 李志英, 卢育华. 土壤低温对嫁接黄瓜生理生化特性的影响[J]. *园艺学报*, 1998, 25(3): 258–263
- [26] 孙艳, 黄炜, 田霄鸿, 等. 黄瓜嫁接苗生长状况、光合特性及养分吸收特性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 181–185, 209
- [27] 张衍鹏, 于贤昌, 张振贤, 等. 日光温室嫁接黄瓜的光合特性和保护酶活性[J]. *园艺学报*, 2004, 31(1): 94–96