

# 樱桃番茄对根际外源碘的吸收及生理反应特性

于文进, 姚艳, 韦慧明, 龙明华, 唐小付

(广西大学农学院, 南宁 530004)

**摘要:** 在深液流水培的营养液中添加浓度为  $1.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的碘离子栽培樱桃番茄。根系、叶片和果实的碘含量均表现随着 I 浓度提高而增加的趋势。根系的碘含量在 I 处理后 1 周迅速增加; 第 2 周降低, 此后呈现逐渐增加的趋势, 而且中高浓度处理 ( $3.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的变化趋势比低浓度处理 ( $1.0\sim 2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 明显。叶片碘含量在处理 3 周内随着时间的延长而明显增加; 第 3 周以后, 高浓度处理 ( $4.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的叶片碘含量增加趋于平缓, 而中低浓度处理 ( $1.0\sim 3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的叶片碘含量变化不明显。根系和叶片中的碘浓度在  $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度处理是根 > 叶, 在  $2.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度处理的前期是根 > 叶, 后期是叶 > 根, 说明碘在根系积累到一定量以后才向叶片转移。对成熟果实的碘含量分别与处理后 1~6 周的叶片和根系的碘含量作单因素和双因素回归分析, 说明 I 处理后第 1 周是影响果实碘含量的最重要时期, 利用叶片和根系的碘含量, 根据一元二次回归方程可预测成熟果实的碘含量。  $2.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度处理对根系的 TTC 还原量影响显著, 这种影响主要表现在营养液加 I 后 3 周以内。低浓度处理 ( $1.0\sim 2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 对叶绿素含量无显著影响, 中高浓度处理 ( $3.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 显著降低叶绿素含量。  $2.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度处理后 2 周, 叶片的净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率均显著降低, 而气孔限制值显著增高。

**关键词:** 碘; 樱桃番茄; 吸收; 根系活力; 叶绿素; 光合作用

中图分类号: S641.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2011)04-0513-07

## Absorption of exogenous iodine in rhizosphere and its effects on physiological parameters of cherry tomato plants

YU Wen-Jin, YAO Yan, WEI Hui-Ming, LONG Ming-Hua, TANG Xiao-Fu

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasi forme*) were cultured in deep flow hydroponic solution supplemented with graded levels ( $1.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of iodide (I). The results showed that the iodine content in roots, leaves and fruits increased with increasing of I concentration. After I treatment, initially, the iodine content in roots increased rapidly for the first week; a decrease in the second week followed; and afterwards, a tendency of gradual increase was observed, with more significant changes at higher concentrations of I ( $3.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) as compared to lower ones ( $1.0\sim 2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). During the first three weeks after the I treatment, the iodine content in leaves increased significantly with the passage of time; after the third week, the increase tended to slow down for the plants treated with high concentrations of I ( $4.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), while no significant changes were found at medium or low ones ( $1.0\sim 3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). For plants with I treatment of  $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the iodine content in roots was higher than that in leaves; for I treatment of  $2.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the iodine content in roots was higher than that in leaves at

收稿日期: 2011-04-26 修回日期: 2011-06-20

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 10100019-10); 南宁市科学研究与技术开发计划项目(201102032B); 南宁市青秀区科学研究与技术开发计划课题(20090202B)[Supported by Scientific Research and Technological Development Program of Guangxi(10100019-10); Scientific Research and Technological Development Program of Nanning City(201102032B); Scientific Research and Technological Development Program of Qingxiu District of Nanning(20090202B)]

作者简介: 于文进(1971-), 男, 广西临桂县人, 博士, 副教授, 主要从事蔬菜栽培生理与遗传育种工作, (E-mail) yuwjin@hotmail.com.

the early growth stage, but lower than leaves at the later growth stage, which suggested that iodine did not transfer to leaves until it had accumulated in the roots to a certain amount. Making mono-factor and two-factor regression analyses respectively of the correlation between the iodine content in ripen fruits and that in the leaves and the roots after I treatments of 1–6 weeks, we found that it was the first week after I treatment that the iodine content in fruits was affected most, and the iodine content in ripen fruits could be predicted with the iodine content in leaves and roots using the dualistic linear regression equation. The I concentration of 2.0–6.0 mg · L<sup>-1</sup> significantly affected the deoxidize amount of triphenyl tetrazolium chloride (TTC) in roots, and the influence mainly appeared within the first three weeks after adding I to the solutions. The low concentrations of I (1.0–2.0 mg · L<sup>-1</sup>) did not affect chlorophyll content significantly, but the medium or high concentration of I (3.0–6.0 mg · L<sup>-1</sup>) significantly reduced it. Two weeks after treatment with I concentration of 2.0–6.0 mg · L<sup>-1</sup>, the photosynthetic rates (*Pn*), stomatal conductance (*Gs*), intercellular CO<sub>2</sub> concentration (*Ci*), transpiration rates (*Tr*) significantly reduced, while the stomatal limitation values (*Ls*) increased significantly.

**Key words:** iodine; cherry tomato; absorption; root activity; chlorophyll; photosynthesis

碘是人体必不可少的营养元素之一,人体中的碘有 80% 以上来自植物性食品 (Ross, 2005)。加碘食盐在缓解人类摄碘量的不足发挥着重要作用 (Winger 等, 2008), 我国目前主要是通过加碘食盐作为普遍补碘的措施。对于因饮食习惯摄盐量过少或不宜摄盐过多的特殊人群, 可选择食用适宜的含碘蔬菜来达到一定的补碘目的 (Victor 等, 2009; Alexy & Kersting, 2010)。目前, 国内外通过在蔬菜栽培过程中添加外源碘培育含碘蔬菜已有报道, 但主要集中在叶菜类方面的研究, 如小白菜 (谢伶俐等, 2007; 洪春来等, 2007)、空心菜 (谢伶俐等, 2007)、菠菜 (Zhu 等, 2003; 孙向武等, 2004; Gonda 等, 2007)、芹菜 (洪春来等, 2009) 等。国内对蔬菜的食用方式多为经过烹饪后食用, 鲜食较少, 含碘叶菜经烹饪后, 可供人体吸收利用的碘大量减少。樱桃番茄 (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) 的果实具有果型小巧美观、果味浓厚、含糖量较高、营养丰富等特点, 深受广大消费者喜爱, 作为一种水果型鲜食蔬菜被广泛栽培, 培育含碘的樱桃番茄具有重要现实意义。

有关果菜类蔬菜对碘的吸收累积研究方面的报道相对较少, Gonda 等 (2007)、顾爱军等 (2004) 和石玮 (2007) 报道了番茄对碘有一定的富集作用。我们在樱桃番茄上的研究结果表明, 碘影响花序着生节位、坐果率、果实发育和单果重, 适宜浓度的碘处理能显著提高产量 (于文进等, 2010); 营养液中加入适当浓度的 I 可以获得 Vc 含量高、总酸含量较低, 对糖酸比和含水量无显著影响的含碘果实 (于文进等, 2011)。有关作物对外源碘的生理反应鲜有研究报道, 且在蔬菜上的研究还基本是空白 (姚艳等,

2009)。冯自松 (2008) 在对黑麦草进行加碘处理的研究中发现, 随着碘浓度的增加, 叶片的叶绿素含量和 SOD、CAT、POD 等保护性酶的活性表现为先增加后减少, MDA 含量则先减少后增加, 说明碘对黑麦草产生胁迫作用。本研究在深液流水培的营养液中, 通过添加不同浓度碘离子进行栽培试验, 分析樱桃番茄的根系、叶片和果实对碘的吸收特性及其相关性, 同时研究碘对樱桃番茄的根系活力、叶绿素含量以及光合速率等光合指标的影响, 初步探讨樱桃番茄对根际外源碘的生理反应。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用的樱桃番茄品种为上品 (由广西大学农学院提供), 无限生长类型, 果实红色。成苗后 (苗期 25 d) 定植于广西大学蔬菜科研基地无土栽培大棚温室中。栽培方式是深液流水培 (DFT), 营养液配方为华南农业大学番茄配方 (郭世荣, 2003)。用静置 30 h 后的自来水配制营养液, 以碘化钾为碘源 (分析纯, 天津市大茂化学试剂厂生产)。

### 1.2 试验设计与方法

采用单因素随机区组试验设计, 在营养液中添加不同浓度的 I 作为处理, 以不添加 I 为对照 (CK), 设 6 个 I 浓度处理, 分别是 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 mg · L<sup>-1</sup>, 每处理设 4 次重复, 小区面积 1.2 m<sup>2</sup>, 每小区种植 8 株 (种植规格: 25 cm × 30 cm), 共 224 株 (含 CK)。定植后 33 d (第 1 花序始花期) 在营养液中分别加入不同浓度 I。栽培过程的营养液管理、植株调整、病虫害防治等管理方法一

致。植株调整方式为单干整枝。

### 1.3 测定项目及方法

营养液添加 I 前采样 1 次, 添加 I 后每间隔 7 d 采样 1 次, 每小区采集植株相同节位叶片上的 2~3 片小叶和 20~25 g 根系作为样品。部分根系鲜样用于测定根系活力(第 7 天以后间隔 14 d 测定 1 次), 部分叶片鲜样用于测定叶绿素含量(第 7 天以后间隔 14 d 测定 1 次), 其余的根系和叶片鲜样置于 70 °C 的恒温箱中烘干用于测定碘含量。在果实成熟期, 于同一天分别采收第 2 果穗上达到完熟的果实烘干用于测定果实碘含量。

根系、叶片和果实的碘含量用硫氰酸铁—亚硝酸催化动力学法测定(GB/T 13882-92)。根系活力的测定方法采用 2, 3, 5-氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定 TTC 还原量。叶绿素含量的测定方法采用丙酮乙醇提取法, 于分光光度计上测定样品吸光度, 然后计算叶绿素含量。营养液添加 I 14 d 后采用红外线气体分析仪(IRGA)法测定相同节位叶片的光合指标。测定使用的仪器为 Li-6400 型光合作用测定系统(美国 LI-COR 公司), 采用开放气路, LED 红蓝人工光源, 光强设定为  $1\ 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 叶面温度设定为 28 °C, 外接 CO<sub>2</sub> 缓冲瓶。测定的指标包括净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )等, 气孔限制值( $L_s$ )由公式  $L_s = 1 - C_i/C_a$  计算。采用 Excel 和 DPS6.55 软件进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 樱桃番茄根系、叶片、果实对碘的吸收累积特点

图 1 显示, 营养液加入 I 后 1 周, 根系的碘含量迅速增加, 第 2 周出现降低的现象, 此后呈现逐渐增加的趋势, I 处理浓度越高根系的碘含量也越高。不同 I 浓度处理的根系碘含量的增加趋势不同, 1.0~2.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理的变化趋势相对较缓, 3.0~6.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理的增加量随着处理浓度的增高而提高。I 处理 6 周后, 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 和 6.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理的根系碘含量分别为 77.19 mg·kg<sup>-1</sup> (干样质量, 下同) 和 80.57 mg·kg<sup>-1</sup>, 两者间无显著差异, 但显著高于其它处理; 3.0 mg·L<sup>-1</sup> 和 4.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理的根系碘含量分别为 50.87 mg·kg<sup>-1</sup> 和 62.34 mg·kg<sup>-1</sup>, 这两个处理浓度与其它处理浓度的差异性均达到显著水平; 1.0 mg·L<sup>-1</sup> 和 2.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理的

根系碘含量差异不显著, 分别是 30.47 mg·kg<sup>-1</sup> 和 33.12 mg·kg<sup>-1</sup>, 显著低于其它处理。

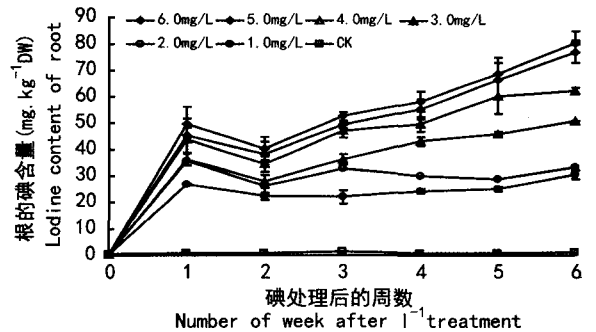


图 1 营养液中不同碘浓度处理对樱桃番茄根系碘含量的影响

Fig. 1 Effect of I<sup>-1</sup> treatment on iodine content in root of cherry tomato under nutrient solution culture

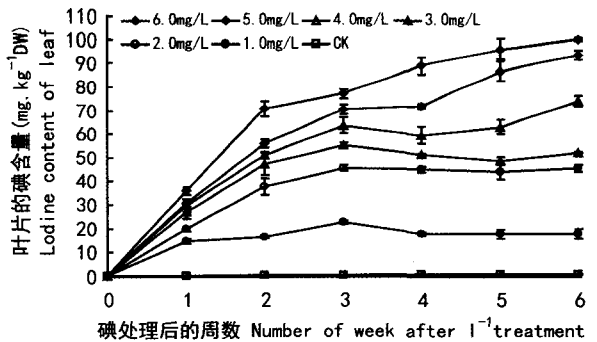


图 2 营养液中不同碘浓度处理对樱桃番茄叶片碘含量的影响

Fig. 2 Effect of I<sup>-1</sup> treatment on iodine content in leaf of cherry tomato under nutrient solution culture

由图 2 可看出, 总体上随着处理时间的延长, 叶片的碘含量增加, I 处理浓度越高叶片的碘含量也越高。至处理后第 3 周为止, 各处理的叶片碘含量均保持增加的趋势, 但是第 2 周以后的增加量明显比第 2 周以前的增加量小。第 3 周后, 各处理叶片碘含量的变化不尽相同, 6.0 mg·L<sup>-1</sup> 和 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理仍然保持增加的趋势; 4.0 mg·L<sup>-1</sup> 和 3.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理在其后 2 周略有降低, 第 5 周后又增加; 1.0 mg·L<sup>-1</sup> 和 2.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理则变化不明显。第 6 周各处理的叶片碘含量差异显著, 1.0~6.0 mg·L<sup>-1</sup> 的 6 个处理的叶片碘含量依次递增, 分别为 17.80、45.36、53.18、84.15、93.44、99.95 mg·kg<sup>-1</sup>。

与根系和叶片相似, 成熟果实的碘含量也表现出随着营养液碘浓度的提高而增加的趋势。所有处

理的果实碘含量均显著比CK高,其中 $6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的果实碘含量最高,为 $1.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是CK( $0.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的3.28倍,同时显著高于其它处理; $3.0\sim 5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理间的果实碘含量无显著差异,为 $1.07\sim 1.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是CK的2.74~2.82倍,显著高于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理; $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的果实碘含量分别为 $0.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别比CK高69.2%和92.3%(图3)。

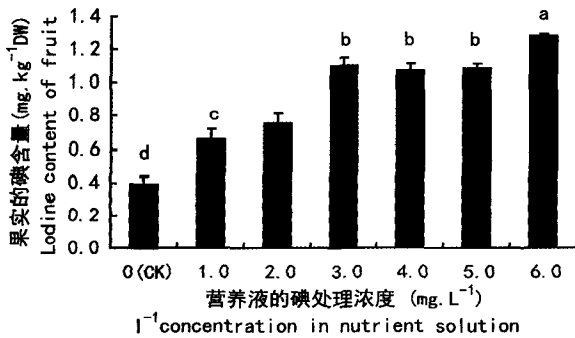


图3 营养液中不同碘浓度处理对樱桃番茄果实碘含量的影响

Fig. 3 Effect of I<sup>-</sup> treatment on iodine content in fruit of cherry tomato under nutrient solution culture

不同小写字母表示差异显著( $P\leq 0.05$ )  
Different small letters indicate significant difference at 5% level( $P\leq 0.05$ )

## 2.2 樱桃番茄根系、叶片、果实的碘含量之间的相关性

由图4得出,在本实验 $1.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ I处理浓度范围内,叶片碘含量与根系碘含量之间存在极显著的直线回归相关性,回归方程为 $Y=1.2122X$ ,相关系数为0.91,说明叶片吸收累积的碘比根系高。同时可以看出,低浓度处理( $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的分布点位于直线的下侧,且叶片碘含量略低于根系碘含量;而高浓度处理( $4.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的分布点多数位于直线的上侧,位于直线下侧的点均是处理后1周的数据,且表现为叶片碘含量低于根系碘含量,说明碘在根系累积到一定量以后才向叶片转移,转移的快慢与根际I浓度相关。

成熟果实碘含量与叶片、根系碘含量之间均存在极显著的相关性,与叶片碘含量的单因素相关系数为 $0.927\sim 0.981$ ,相关系数随着处理时间的延长而降低;与根系碘含量的单因素相关系数为 $0.921\sim 0.974$ ,后期(4~6周)的相关系数比前期(1~3周)的相关系数高;前期(1~3周)叶片的相关系数

比根系的相关系数高,而后期(4~6周)叶片的相关系数比根系的相关系数低(表1)。说明果实的碘含量受叶片和根系碘含量的共同影响,前期叶片影响大于根系,后期则是根系影响大于叶片。

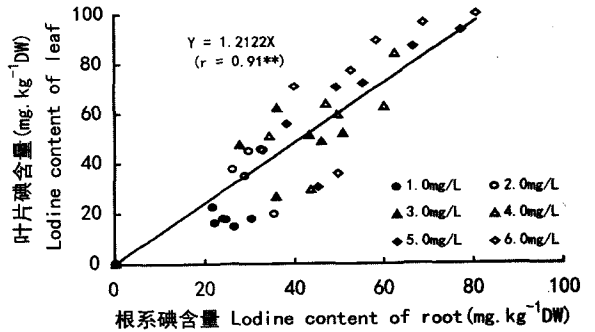


图4 樱桃番茄叶片碘含量与根系碘含量之间的相关性  
Fig. 4 Correlation between iodine content of leaf and iodine content of root in cherry tomato

\*\*表示相关性达极显著水平( $P\leq 0.01$ )

\*\* indicated significant difference at 1% level( $P\leq 0.01$ ).

以成熟果实碘含量为因变量,I处理后每周的叶片碘含量( $X_1$ )和根系碘含量( $X_2$ )为自变量,分别得出二元一次回归方程(表1)。各回归方程的决定系数均为极显著,但决定系数的值随着处理后的周数增加而降低。I处理后第1周的回归方程各项均为极显著;I处理后2~4周的回归方程除常数项为极显著以外, $X_1$ 和 $X_2$ 项均无显著性;I处理后5~6周的回归方程除常数项为显著以外, $X_1$ 和 $X_2$ 项均无显著性(表1)。说明I处理后第1周是影响果实碘含量的重要时期,利用该时期的叶片和根系的碘含量,根据回归方程 $0.0492X_1 - 0.0178X_2 + 0.4019$ 可以预测成熟果实的碘含量。

## 2.3 营养液中不同碘浓度对樱桃番茄根系活力的影响

从图5看到,营养液添加I前(0周),根系TTC还原量无显著差异;加I后第1周, $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的根系TTC还原量升高,其它处理的TTC还原量则降低,其中 $4.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度处理降幅极显著;至第3周,各处理的TTC还原量均继续表现不同程度降低;至第5周,除 $6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理降低较明显外,其它各处理的TTC还原量下降减缓并趋于稳定,与第3周的差异不显著。在各时期, $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的TTC还原量与CK无显著差异,并且从第3周开始两者保持显著高于其它处理。在第3周和第5周, $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的TTC还原量虽然显著低于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理和CK,

但显著高于 3.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理; 4.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理间的差异在各时期均不显著。以上结果表明, 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理对根系活力的影响不显著; 碘对根系活力的影响主要表现在处理后 3 周以内;

第 3 周以后, 除 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理外, 其它各处理的根系活力均趋于稳定在较低水平; I<sup>-</sup> 浓度越高, 根系活力越低, 高浓度(4.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>) 处理间的根系活力差异不显著。

表 1 樱桃番茄成熟果实的碘含量与叶片、根系的碘含量之间的相关性

Table 1 Correlation between iodine content of fruit and iodine content of leaf and root in cherry tomato

碘处理后周数 No. of week after I <sup>-</sup> treatment	单因素相关系数 Monofactorial correlation coefficient		二元一次回归方程 Dualistic linear regression equation	双因素相关 Two-factor correlation			决定系数 Coefficient of determination
	叶片 Leaf	根系 Root		回归方程各项的有意性 Significance of the parameters in dualistic linear regression equation			
				X <sub>1</sub> (叶片)	X <sub>2</sub> (根系)	常数项	
1	0.981**	0.921**	0.0492X <sub>1</sub> - 0.0178X <sub>2</sub> + 0.4019	**	**	**	0.998**
2	0.977**	0.924**	0.0121X <sub>1</sub> + 0.0011X <sub>2</sub> + 0.3940	NS	NS	**	0.949**
3	0.974**	0.948**	0.0133X <sub>1</sub> - 0.0037X <sub>2</sub> + 0.3814	NS	NS	**	0.957**
4	0.953**	0.974**	0.0021X <sub>1</sub> + 0.0119X <sub>2</sub> + 0.3601	NS	NS	**	0.952**
5	0.934**	0.961**	0.0001X <sub>1</sub> + 0.0118X <sub>2</sub> + 0.4001	NS	NS	*	0.925**
6	0.927**	0.956**	-0.0003X <sub>1</sub> + 0.0109X <sub>2</sub> + 0.3995	NS	NS	*	0.915**

表中 NS 表示无显著性; \* 表示达 5% 显著水平(P ≤ 0.05); \*\* 表示达 1% 极显著水平(P ≤ 0.01)。

NS, \* and \*\* indicated no significant difference, significant at 5% level(P ≤ 0.05) and significant at 1% level(P ≤ 0.01), respectively.

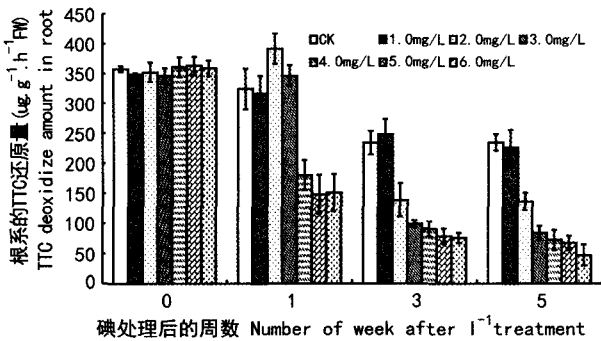


图 5 营养液中不同碘浓度处理对樱桃番茄根系 TTC 还原量的影响

Fig. 5 Effect of I<sup>-</sup> treatment on TTC deoxidize amount in root of cherry tomato under nutrient solution culture

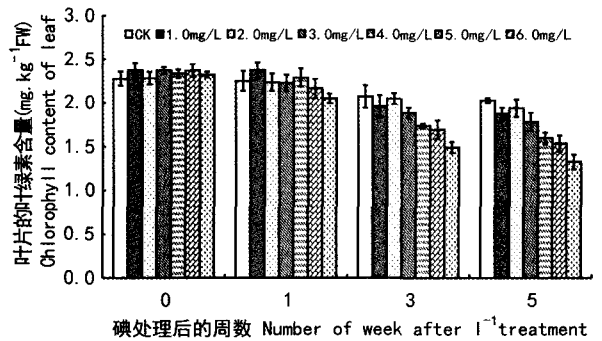


图 6 营养液中不同碘浓度处理对樱桃番茄叶片中的叶绿素含量的影响

Fig. 6 Effect of I<sup>-</sup> treatment on chlorophyll content in leaf of cherry tomato under nutrient solution culture

2.4 营养液中不同碘浓度对樱桃番茄叶片的叶绿素含量的影响

图 6 显示, 营养液添加 I<sup>-</sup> 前(0 周), 叶片的叶绿素无显著差异; 随着 I<sup>-</sup> 处理时间的延长, 各处理的叶绿素含量逐渐降低, 高浓度处理(4.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>) 的叶绿素含量比中低浓度处理(1.0~3.0 mg · L<sup>-1</sup>) 下降更明显; 第 3 周开始, 各处理的叶绿素含量趋于稳定, 与第 5 周的差异不显著。在第 1 周, 除 6.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理显著低于 CK 外, 其它处理与 CK 的差异均不显著; 在第 3 周和第 5 周, 低浓度处理(1.0~2.0 mg · L<sup>-1</sup>) 与 CK 的差异不显著; 中高浓

度处理(3.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>) 则显著低于 CK。此外, 在第 5 周, 4.0 mg · L<sup>-1</sup> 和 5.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理显著低于中低浓度处理(1.0~3.0 mg · L<sup>-1</sup>); 第 1 周开始, 6.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理的叶绿素含量一直保持最低, 至第 5 周显著低于其它处理。以上结果说明, 低浓度处理(1.0~2.0 mg · L<sup>-1</sup>) 对叶绿素含量无显著影响, 中高浓度处理(3.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>) 显著降低叶绿素含量, 浓度越高叶绿素含量越低。

2.5 营养液中不同碘浓度对樱桃番茄叶片光合指标的影响

表 2 是 I<sup>-</sup> 处理后第 2 周叶片的净光合速率(P<sub>n</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>)、蒸腾速

率( $Tr$ )、气孔限制值( $L_s$ )等光合指标的测定结果。1.0 mg · L<sup>-1</sup>处理的  $G_s$  显著比 CK 高,其余各项光合指标与 CK 间无显著差异,而且显著优于其它浓度处理。除 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理外, I 处理浓度越高,  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $Tr$  越低,而  $L_s$  则越高。2.0 mg · L<sup>-1</sup> 和

3.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理之间,除  $G_s$ 、 $C_i$  外其它光合指标差异显著;3.0 mg · L<sup>-1</sup> 和 4.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理之间,除  $C_i$ 、 $L_s$  外其它光合指标差异不显著;5.0 mg · L<sup>-1</sup> 和 6.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理之间的各项光合指标无显著差异;2.0 mg · L<sup>-1</sup> 以上的浓度处理显著提高了  $L_s$ ,同时 4.0~

表 2 营养液中不同碘浓度处理对樱桃番茄叶片光合指标的影响

Table 2 Effect of I<sup>-</sup> treatment on photosynthesis items in leaf of cherry tomato under nutrient solution culture

碘浓度处理 I <sup>-</sup> treatment (mg · L <sup>-1</sup> )	净光合速率( $P_n$ ) Photosynthetic rate (CO <sub>2</sub> μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	气孔导度( $G_s$ ) Stomatal conductance (H <sub>2</sub> O mol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度( $C_i$ ) Intercellular CO <sub>2</sub> concentration (CO <sub>2</sub> μmol · mol <sup>-1</sup> )	蒸腾速率( $Tr$ ) Transpiration rate (H <sub>2</sub> O mmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	气孔限制值( $L_s$ ) Stomatal limitation value
0 (CK)	17.07 a	0.97 b	329.78 a	10.24 a	0.12 d
1.0	17.81 a	1.56 a	327.78 a	9.29 a	0.12 d
2.0	14.00 b	0.47 c	314.78 b	6.60 b	0.17 c
3.0	7.03 c	0.17 cd	306.67 b	3.40 c	0.22 b
4.0	7.46 c	0.12 cd	285.33 c	3.08 cd	0.29 a
5.0	3.66 d	0.06 d	269.22 d	1.89 d	0.31 a
6.0	3.93 d	0.06 d	269.11 d	1.87 d	0.30 a

同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P \leq 0.05$ )。

Different small letters in the same list indicated significant difference at 5% level( $P \leq 0.05$ ).

6.0 mg · L<sup>-1</sup> 处理的  $L_s$  显著比其它浓度处理高。

### 3 结论与讨论

在栽培樱桃番茄的营养液中添加 1.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup> 碘离子进行处理,植物体内的碘含量均表现出随着 I 处理浓度提高而增加的趋势(图 1,2,3),这与在菠菜、小白菜、芹菜、辣椒、萝卜等蔬菜上的研究相类似(洪春来等,2007;Zhu 等,2003)。营养液加入 I 后 1 周,樱桃番茄根系的碘含量迅速增加,在第 2 周出现降低的现象,此后保持逐渐增加的趋势,但低浓度处理(1.0~2.0 mg · L<sup>-1</sup>)的变化趋势较中高浓度处理(3.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>)相对较缓(图 1)。营养液加入 I 后第 3 周止,各处理的叶片碘含量均保持增加的趋势,第 3 周后高浓度处理(4.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>)仍然保持增加的趋势,而中低浓度处理(1.0~3.0 mg · L<sup>-1</sup>)变化不明显(图 2)。洪春来等(2009)的研究表明,小白菜和芹菜吸收碘的速率表现为在短时间内迅速增加,随着时间的延长对碘的吸收速率逐渐下降,吸收速率随着碘浓度的提高呈现直线上升的趋势。本研究的樱桃番茄根系、叶片碘含量也表现出前期迅速增加,后期变化较缓,高浓度处理上升快的相似结果。果菜类蔬菜的食用器官对碘的吸收量一般较低,石玮(2007)研究施加碘肥后,果菜类蔬菜的可食部分碘含量在 1 mg · kg<sup>-1</sup> 左右,与本研究的樱桃番茄果实碘含量相近。碘在樱

桃番茄不同器官中的分配表现为果实碘含量最低,各处理在第 1 周根系碘含量均大于叶片碘含量,1.0 mg · L<sup>-1</sup> 浓度处理在 6 周内均为根系碘含量大于叶片碘含量,其它处理(2.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup>)则在第 2 周以后均为叶片碘含量大于根系碘含量。不同蔬菜种类对碘的吸收与积累的能力存在较大差异(于文进等,2010;姚艳等,2009),洪春来等(2007)和 Hong 等(2008)认为,碘在蔬菜体内的分布一般为根>叶>茎>果实,但萝卜肉质根的碘含量低于地上部分。本研究结果显示,在一次加 I 条件下,碘在樱桃番茄根系和叶片的浓度表现为在 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 浓度处理是根>叶,在 2.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup> 浓度处理的前期(2 周内)是根>叶,而后期(2 周后)是叶>根,说明碘在樱桃番茄的根系积累到一定量以后才向叶片转移,转移的快慢与根际 I 浓度相关。樱桃番茄的根、叶、果实的碘含量之间存在极显著的相关性(图 4、表 1),I 处理后第 1 周是影响果实碘含量的最重要时期,如果测定第 1 周的叶片碘含量( $X_1$ )和根系碘含量( $X_2$ ),根据回归方程  $0.0492X_1 - 0.0178X_2 + 0.4019$  可提前预测成熟果实的碘含量。

植物根系活力的强弱体现在脱氢辅酶的活性大小,通过测定脱氢辅酶对 TTC 的还原量表示根系活力的强弱。碘与根系某些酶活性有关(何振立,1998),本研究结果显示,除 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 浓度 I 处理对樱桃番茄根系的 TTC 还原量无显著影响外,2.0~6.0 mg · L<sup>-1</sup> 浓度 I 处理对根系的 TTC 还原量影

响显著,说明  $2.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度 I 处理对樱桃番茄根系的脱氢辅酶活性造成影响,而这种影响主要表现在营养液加入 I 后 3 周以内,第 3 周以后根系活力趋于稳定在较低水平,且高浓度 ( $4.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 处理间的差异不显著(图 5)。同时发现在  $2.0\sim 3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度处理后第 1 周内,根系的 TTC 还原量出现升高的现象,这可能是适宜的 I 浓度在一定时间内有提高根系活力的作用。

叶绿素作为一种光合色素,具有吸收和传递光能的作用,叶绿素含量与植物的氮素和矿质营养水平有关(郝建军等,2005)。本研究结果说明低 I 浓度处理 ( $1.0\sim 2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 对樱桃番茄叶片的叶绿素含量无显著影响,中高 I 浓度处理 ( $3.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 显著降低叶绿素含量,浓度越高叶绿素含量越低(图 6)。植物在逆境环境下感知胁迫作用后,会表现出光合作用下降,光合色素合成减少(Miyashita 等,2005)。低浓度碘能促进植物对氮、磷吸收,而高浓度碘则抑制植物对氮、磷吸收和干扰对钙、镁吸收(何振立,1998),氮和镁是叶绿素分子的重要组分,由于高浓度碘对樱桃番茄造成一定的胁迫或毒害作用(于文进等,2010),从而影响植株对氮和镁的吸收,导致叶绿素合成减少。

植物光合作用的过程受多种因素的影响,其中  $\text{CO}_2$  是光合作用的限制因子;水分是光合作用的影响因素之一,叶片水分不足会导致脱落酸含量激增,引起气孔关闭而使  $\text{CO}_2$  进入叶内受限制等(郝建军等,2005)。在逆境条件下,植物的光合作用都呈下降趋势,气孔限制和非气孔限制两方面的因素都可能导致  $P_n$  的降低,若  $P_n$  和  $C_i$  变化方向相同,即两者同时减小,且  $L_s$  增大时, $P_n$  的下降主要是由  $G_s$  引起,否则  $P_n$  的下降则主要由于叶肉细胞羧化能力的降低引起(Farquhar & Sharkey,1982)。 $T_r$  的高低取决于水蒸气的向外扩散力和扩散途径阻力,与气孔的开放程度相关,气孔开度大则蒸腾阻力小,气孔开度小则蒸腾阻力大,并因此影响光合作用的进行(郝建军等,2005)。研究表明,在 I 浓度为  $2.0\sim 6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的处理,樱桃番茄叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  均显著降低, $L_s$  增高,表明  $P_n$  的降低主要是由  $G_s$  引起。氮素与影响光合速率的 RuBP(核酮糖-1,5-二磷酸)羧化酶的活性密切相关,磷素是 Rubisco(核酮糖二磷酸羧化酶/加氧酶)活化酶的活化剂,氮、磷不足会影响 Rubisco 活性和 RuBP 再生速率下降,从而引起光合速率下降, $C_i$  值表现为上升

(许大全,2002)。本研究显示樱桃番茄叶片的  $C_i$  值随着 I 处理浓度的提高而下降,可能是由于碘胁迫下氮和磷的吸收受抑制引起相关的酶活性下降,气孔不均匀关闭,气孔导度降低导致的。同时还可能由于根系受高浓度 I 的胁迫或毒害作用(于文进等,2010)造成生理活性降低,导致一定程度的吸水障碍,植株为减少水分通过气孔散失而进一步引起叶片气孔的关闭。

本研究探讨了樱桃番茄的根、叶和果实对营养液中不同浓度 I 的吸收特点及相关性,利用回归相关分析方法得出加 I 处理后第 1 周是影响果实碘含量的最重要时期,并获得通过根和叶的碘含量预测成熟果实碘含量的二元一次回归方程,对栽培上合理施用碘肥获得适量含碘果实具有重要参考价值。高浓度 I 降低根系活力和叶绿素含量,影响光合作用。同时发现, $2.0\sim 3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  I 浓度处理在短时间内具有提高根系 TTC 还原量的效应,其机理有待进一步研究。此外,本研究仅探讨了加 I 后第 2 周的叶片光合反应,后期的光合速率特点及其主要影响因素是气孔限制还是叶肉细胞的光合活性,还有待进一步研究。

## 参考文献:

- 石玮. 2007. 大田蔬菜对碘的吸收与碘在蔬菜内的分布[D]. 杭州:浙江大学
- 许大全. 2002. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社
- 何振立. 1998. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京:中国环境科学出版社
- 冯自松. 2008. 稳定态碘对黑麦草生理生化特性的影响[D]. 杭州:浙江大学
- 郭世荣. 2003. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社
- 郝建军,康宗利. 2005. 植物生理学[M]. 北京:化学工业出版社
- Alexy U, Kersting M. 2010. Fruit and vegetables in the optimized mixed diet[J]. *Bioactive Foods in Promoting Health*, 131-139
- Farquhar GD, Sharkey TD. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review Plant Physiol*, 33(3): 317-345
- Gonda K, Yamaguchi H, Maruo T, et al. 2007. Effects of iodine on growth and Iodine absorption of hydroponically grown tomato and spinach[J]. *Hort Res (Japan)*, 6(2): 223-227
- Gu AJ(顾爱军), Weng HX(翁焕新), Chen JF(陈静峰), et al. 2004. Preliminary research of cultivating iodine-enriched vegetables to prevent IDD based on transformation of iodine in environment(利用海藻中的碘培育富碘蔬菜防治 IDD 病的初步研究)[J]. *Guangdong Trace Elements Sci*(广东微量元素科学), 11(7): 12-18
- Hong CL, Weng HX, Qin YC, et al. 2008. Transfer of iodine from soil to vegetables by applying exogenous iodine[J]. *Agronomy Sustainable Development*, 28(4): 575-583

(下转第 443 页 Continue on page 443)

等(1990)将其转移到琉璃草族。琉璃草族已有染色体数目报道的所有种类染色体基数都为 12, 与长蕊斑种草的染色体基数相同, 而紫草族的多数种类染色体基数都为 7 (见 <http://mobot.mobot.org/W3T/Search/ipcn.html>)。由此看来, 该植物与琉璃草族的亲缘关系比其与紫草族的关系近。

另外, 花粉形态的比较(刘家熙等, 2001)表明长蕊斑种草的花粉形状、萌发孔类型及外壁纹饰等都与琉璃草族中的琉璃草属(*Cynoglossum* L.), 盾果草属(*Thyrocarpus* Hance)的花粉形态相似, 而不同于紫草族的一些属, 如滇紫草属。这也证明长蕊斑种草与琉璃草族的类群具有密切亲缘。至于该单型的中国特有属是如何分化产生的, 还有待于更多的证据。

### 参考文献:

- 中国科学院昆明植物研究所. 1986. 云南植物志[M]. 北京: 科学出版社, 4: 675—736
- 云南植被编写组. 1987. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社: 53
- 孔宪武, 王文采. 1989. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 64 (2): 34—222
- 付立国, 洪涛. 1999. 中国高等植物[M]. 青岛出版社, 9: 280—345
- 李懋学. 1991. 植物染色体研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社: 154—155, 170—171
- 吴征镒, 陈心启. 2004. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1: 534—537
- 洪德元. 1990. 植物细胞分类学[M]. 北京: 科学出版社
- Diels. 1912. Royal Botanic Garden, Edinburgh[M]. 168
- Handel-Mazzetti. 1920. Anzeiger[M]. 239—240
- Li MX(李懋学), Chen RY(陈瑞阳). 1985. A suggestions on the standardization of karyotype analysis in plant(关于植物核型分析的标准化问题)[J]. *J Wuhan Bot Res* (武汉植物学研究), (3): 297—302
- Lui JX(刘家熙), Zhang YL(张玉龙), et al. 2001. Pollen morphology of the tribe Cynoglosseae of Boraginoideae (Boraginaceae)(中国紫草科紫草亚科琉璃草族花粉形态的研究)[J]. *Acta Phytotax Sin*(植物分类学报), 39(6): 515—522
- Ning JC(宁建长), Xi YZ(席以珍), Zhang YL(张玉龙). 1995. A comparative palynological study on the *Maharanga* and *Onosma* (Boraginaceae)(囊萼紫草属与滇紫草属花粉形态比较研究)[J]. *Acta Phytotax Sin*(植物分类学报), 33(1): 52—57
- Hong CL(洪春来), Weng HX(翁焕新), Yan AL(严爱兰), et al. 2007. Characteristics of iodine uptake and accumulation by vegetables(几种蔬菜对外源碘的吸收与积累特性)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 18(10): 2 313—2 318
- Hong CL(洪春来), Weng HX(翁焕新), Yan AL(严爱兰), et al. 2009. Dynamic characterization of iodine uptake in vegetable plants(蔬菜吸收不同形态外源碘的动力学特性)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 29(3): 1 438—1 447
- Miyashita K, Tanakamaru S, Maitani T. 2005. Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress[J]. *Environ Exp Bot*, 53 (2): 205—214
- Ross MW. 2005. Agriculture: The real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops[J]. *J Trace Elements in Medicine*, 18: 299—307
- Sun XW(孙向武), Weng HX(翁焕新), Yong WB(雍文彬), et al. 2004. The biogeochemical absorption by spinach fertilizing outer source iodine(菠菜对外源碘的生物地球化吸收)[J]. *Plant Nut Fert Sci*(植物营养与肥料学报), 10(2): 192—197
- Victor RP, Gerard NB, Ronald W. 2009. Comprehensive Handbook of Iodine[M]. London: Academic Press
- Winger RJ, Jürgen K, House DA. 2008. Technological issues associated with iodine fortification of foods[J]. *Food Sci & Tech*, 19: 94—101
- Xie LL(谢伶俐), Weng HX(翁焕新), Hong CL(洪春来), et al. 2007. Uptake of bok-choy and ipomoea aquatica forsk to iodine species(小白菜和空心菜对不同形态碘的吸收)[J]. *Plant Nut Fert Sci*(植物营养与肥料学报), 13(1): 123—128
- Yao Y(姚艳), Long MH(龙明华), Tang XF(唐小付), et al. 2009. Progress of characteristics and mechanisms of iodine absorption and accumulation in vegetables(蔬菜对外源碘的吸收和积累特性及其机理研究进展)[J]. *J Changjiang Vegetables*(长江蔬菜), (2): 39—42
- Yu WJ(于文进), Yao Y(姚艳), Li ZW(李正为), et al. 2011. Effects of iodine on fruit quality of cherry tomato in nutrient solution culture(营养液栽培中添加碘对樱桃番茄果实品质的影响)[J]. *China Vegetables*(中国蔬菜), (2): 67—72
- Yu WJ(于文进), Yao Y(姚艳), Zhao CG(赵承刚), et al. 2010. Effect of iodine on flowering, bearing and yield of cherry tomato (碘对樱桃番茄开花结果和产量的影响)[J]. *China Vegetables*(中国蔬菜), (4): 57—61
- Zhu YG, Huang YZ, Hu Y, et al. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea*) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations[J]. *Environ International*, 29: 33—37

(上接第 519 页 Continue from page 519)