

## CPPU对网纹甜瓜果实生长发育和品质的影响

石瑜<sup>1,2</sup>, 王敬民<sup>2</sup>, 叶红霞<sup>1</sup>, 汪俏梅<sup>1</sup>, 汪炳良<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>浙江大学蔬菜研究所, 杭州310029; <sup>2</sup>淄博市农业科学研究院蔬菜研究所, 山东淄博255033

**摘要:** 网纹甜瓜(*Cucumis melo* var. *reticulatus*)是葫芦科甜瓜属的变种, 是厚皮甜瓜的一种。在我国南方地区, 由于光照弱、雨水多, 网纹甜瓜果实品质和贮藏性并不理想。本试验以网纹甜瓜品种‘浙甬2号’为材料, 对开花期子房进行不同浓度 *N*-(2-氯-4-吡啶基)-*N'*-苯脲(CPPU)喷施处理, 以探讨CPPU处理对坐果率、果实生长发育及果实品质的影响。结果表明, 在本试验所及浓度范围内, CPPU处理开花期子房, 可以提高坐果率, 加快果实生长, 增加成熟果实重量; 不同CPPU处理浓度对成熟果实糖及维生素C含量的影响存在一定差异, 10 mg·L<sup>-1</sup>尤其是20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理提高了果实可溶性糖、蔗糖、果糖、葡萄糖以及维生素C含量, 而30 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理成熟果实, 其糖分和维生素C含量反而低于对照。表明适宜的CPPU处理浓度可以促进网纹甜瓜坐果及果实发育, 增加果实产量, 提升果实品质。本研究结果为CPPU在网纹甜瓜生产上的合理应用提供了一定的理论和实践依据。

**关键词:** CPPU; 网纹甜瓜; 坐果率; 单瓜重; 糖

甜瓜是一种高档水果, 是世界上重要的园艺作物。中国的甜瓜种植面积和产量是世界第一, 近年来成为北方设施生产的主要作物之一(吕星光等2016)。网纹甜瓜(*Cucumis melo* var. *reticulatus*)营养丰富、甘甜爽口、风味独特, 深受大众喜爱(张永平等2014), 市场需求非常大, 栽培网纹甜瓜具有良好的经济和社会效益。

甜瓜的花是虫媒花, 属于同株异花授粉作物。在设施生产上, 网纹甜瓜常由于温度低、光照弱、阴雨天气多和两性花雄蕊发育迟缓等问题, 引起授粉受精不良, 造成果实的败育, 称为“化瓜”。因此, 生产上常采用人工授粉促进果实的发育(许敏和黄作喜2009), 且只能在开花当天进行人工授粉, 若种植面积较大, 需投入较多劳动力和生产成本。如遇低温、阴雨等, 坐果会很困难, 将直接影响产量。因此, 研究网纹甜瓜果实坐果和发育, 对于提高生产效率、促进坐果很有必要。

种子植物果实的坐果和发育均取决于授粉受精。授粉受精产生的激素促进了细胞分裂, 从而促进了果实发育(Ben-Cheikh等1997; Nitsch 1971; Pharis和King 1985)。与人工授粉相比, 施用植物生长调节剂可以诱导单性结实, 有效地促进坐果, 提高产量。植物生长调节剂在生产上有重要的应用, 但因其果实成熟中的作用机理尚未明确, 在多种园艺作物中施用浓度及施用时间的研究报道并不多见(Gianfagna 1995)。有关研究表明, 多种作物的坐果和发育(袁军等2004; 郭泳等2012)均受到细胞分裂素的影响, 但该激素对网纹甜瓜果实

发育和品质改良的研究很少。*N*-(2-氯-4-吡啶基)-*N'*-苯脲[*N*-(2-chloro-4-pyridyl)-*N'*-phenylurea, CPPU]是一种人工合成的细胞分裂素, 其生理作用是促进细胞分裂, 器官分化, 抑制顶端优势, 诱导单性结实, 防止衰老等。CPPU在生产上被广泛应用, 可以促进苹果、梨等(袁军等2004)果实的增大, 提高果树和蔬菜的产量(罗正荣1993)。

本试验研究了3种浓度的CPPU处理对网纹甜瓜坐果率、生长发育、果实产量和品质的影响, 旨在为网纹甜瓜生产中CPPU的合理施用提供更为科学的理论依据。

## 材料与amp;方法

### 1 植物材料

试验于浙江大学蔬菜研究所进行, 供试网纹甜瓜(*Cucumis melo* L. var. *reticulatus* Naud.)品种‘浙甬2号’的种子于2015年2月23日播种, 3月25日定植于日光温室。所有植株均采用单蔓整枝, 在12节左右子蔓留瓜, 以保证果实大小一致。开花期进行人工授粉或用CPPU处理并挂牌标记, 果实坐住后一株选留一个果实。开花授粉45 d后采收果实。田间管理与一般生产管理相同。

收稿 2017-07-03 修定 2017-11-28

资助 国家科学技术支撑项目(2013BAD20B02)、浙江省重大育种专项(2016C02051-4-3)、山东省现代农业产业技术体系蔬菜创新团队(SDAIT-05-16)和淄博市科学技术发展计划项目(2016kj010053)。

\* 通讯作者(E-mail: blwang@zju.edu.cn)。

## 2 试验处理

本试验选取了10、20、30 mg·L<sup>-1</sup>三个不同的CPPU浓度, 对照进行人工授粉。选择着生于植株12~13叶节、发育相对一致的结实花进行CPPU处理。在处理前一天将花朵去雄并套袋, 开花当天进行以下处理: 人工授粉处理是将当天开放的雄花花瓣去除后, 用雄蕊轻涂该花朵的柱头, 直至表面有明显的花粉; CPPU处理是用手持喷雾器将CPPU溶液均匀喷施于结实花子房上(每个子房约0.5 mL), 之后分别挂牌标记, 每小区20株, 随机排列, 每个处理设置3次重复。

开花45 d果实成熟时, 采收无病虫害、无机械损伤的成熟果实, 并保留果柄, 每个小区取3个果实用于相关指标的测定。取样时切取果肉中间厚度1 cm左右的部分, 每个果实进行3次重复取样。其中维生素C在取样后立即测定, 剩余样品储存于-80°C低温冰箱以备测定果实的糖类含量。

## 3 实验方法

处理后5 d坐果稳定后调查果实的坐果率。

处理后5~45 d, 每5 d取样一次, 用电子天平测定果实重量; 果实纵剖后用游标卡尺测量果实纵径和横径, 以果实果蒂到果脐的最大距离为纵径, 果实的赤道线直径为横径, 每个果实纵径和横径分别测2次, 每小区测定2个果实, 取平均值。果形指数计算公式为: 果形指数=果实纵径/果实横径。

蔗糖、果糖、葡萄糖和可溶性糖含量均参考管学玉(2006)的方法进行测定。参考金洪等(2006)的方法测定维生素C含量。

## 4 统计分析

采用随机区组试验设计, 每次测定重复3次。统计分析采用SPSS软件11.5版本, 用Origin 8.0作图。数值为有标准差的平均值。

## 实验结果

### 1 CPPU对坐果率及果实生长发育的影响

#### 1.1 坐果率

在大多数瓜类作物中, 天然的单性结实出现较少, 只出现在黄瓜品种中。因此, 对于大多数瓜类作物, 授粉受精是果实正常发育必不可少的生理进程。由表1可知, 人工授粉果实的坐果率为95.6%, 而经3种浓度CPPU处理后, 果实的坐果率

表1 CPPU处理对果实坐果率的影响

Table 1 Effects of CPPU treatment on fruit setting rate

CPPU浓度/mg·L <sup>-1</sup>	处理花数/朵	坐果数/个	坐果率/%
对照	68	65	95.6
10	67	67	100.0
20	69	69	100.0
30	65	63	96.9

均有明显提高, 分别达到了100%、100%和96.9%。说明3个浓度的CPPU均能明显地提高网纹甜瓜的坐果率。

#### 1.2 果实横径和纵径

随着果实发育, 无论是人工授粉或是3个浓度的CPPU处理, 果实纵径与横径均有基本一致的变化趋势, 其中, 在开花后40 d内, 果实纵径的增长量大于果实横径; 与对照相比, 经CPPU处理, 果实的横径和纵径均有显著增大。从图1可以看出, 处理后5~25 d, 随着果实的快速膨大, 3种浓度CPPU处理与对照果实横径、纵径的差值也逐渐加大。25~45 d时果实生长速度减慢, 各个CPPU处理与对照的差值也趋于稳定, 果实纵径的平均值比对照增加约1.5 cm, 果实横径的平均值增长约1 cm。比较3种CPPU浓度处理后发现, 20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理的果实横径和纵径明显大于其他处理, 10 mg·L<sup>-1</sup>次之, 30 mg·L<sup>-1</sup>再次。

#### 1.3 果形指数和单瓜重

果形指数和单瓜重是果实商品品质的重要指标。经3种浓度CPPU处理, 网纹甜瓜果形指数和单瓜重的变化如图2所示, 在处理5~25 d, 果实的果形指数呈下降的变化趋势, 3种浓度CPPU处理果实的果形指数均低于对照。这一阶段果实的单瓜重快速升高, 且各处理与对照果实的重量无明显差异。在处理25~45 d, 果形指数的变化均较为平缓, 果形指数稳定在0.8~1.0, 且各处理与对照的果形指数差异较小。在处理25~45 d, 果实的单瓜重出现稳步上升的变化趋势, 各个CPPU处理单瓜重明显高于对照。比较3个浓度CPPU处理结果发现, 20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理的果形指数最低, 而该处理的单瓜重最高。

### 2 CPPU处理对网纹甜瓜果实品质的影响

#### 2.1 糖类含量

甜瓜中的可溶性糖主要由蔗糖、果糖和葡萄

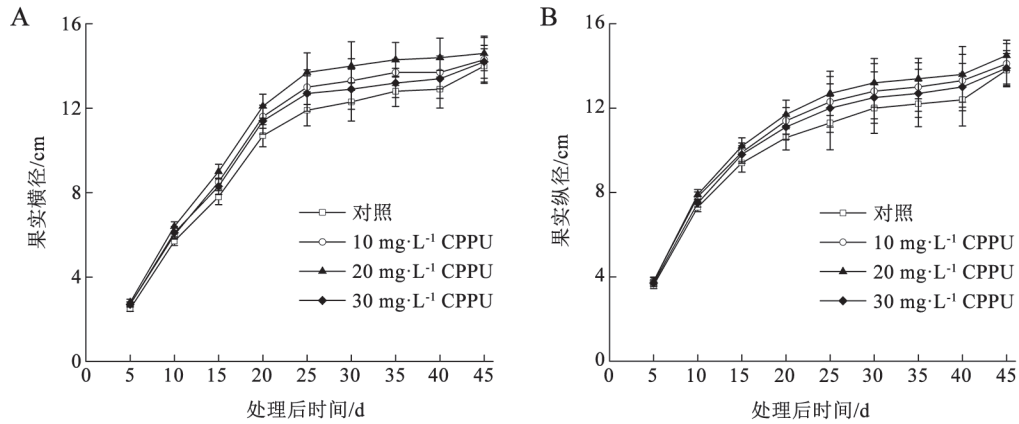


图1 CPPU处理对果实横径和纵径的影响

Fig.1 Effects of CPPU treatment on fruit horizontal and vertical diameters

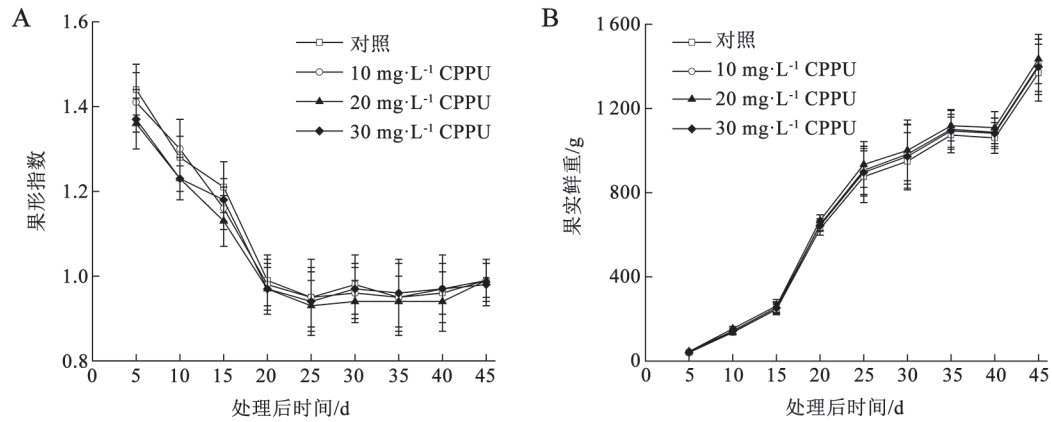


图2 CPPU处理对果实果形指数和果实鲜重的影响

Fig.2 Effects of CPPU treatment on fruit shape index and fresh weight

糖组成。由图3可知, CPPU处理对成熟果实蔗糖、果糖和葡萄糖以及可溶性糖含量均有显著的影响。20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理的糖类含量最高, 10 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理次之, 30 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理最低, 其中20和10 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理果实的几种糖类含量均明显高于对照, 而30 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理, 其蔗糖含量略高于对照, 果糖、葡萄糖和可溶性糖含量则低于对照。

## 2.2 果实维生素C含量

CPPU处理对果实的维生素C含量也有一定影响。由图4可见, 20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理的维生素C含量与对照相比有显著差异; 10与30 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理对果实的维生素C含量没有明显影响, 前者数值略高于对照, 后者略低于对照。

## 讨论

“化瓜”是瓜类生产、尤其是设施生产中普遍存在的现象。低温弱光、阴雨或缺少雄花都会导致果实败育, 严重影响了甜瓜的早熟高产及生产效率的提高。解决“化瓜”及坐果率低的有效措施之一是施用植物生长调节剂诱导单性结实。CPPU与天然的嘌呤型细胞分裂素相比, 生理活性更强, 可以更有效地促进细胞分裂、加速果实生长发育。相关报道称, CPPU不仅可以促进梨、樱桃、猕猴桃(袁军等2004)、荔枝(杨明府等2015)和葡萄(刘萍等2016)果实的生长和发育, 还会促进西瓜(国家西甜瓜产业技术体系2011)和甜瓜(马德伟和宋培明2003)的坐果和果实膨大, 提高果实的单果重和产量。本试验发现, CPPU处理可明显提高甜

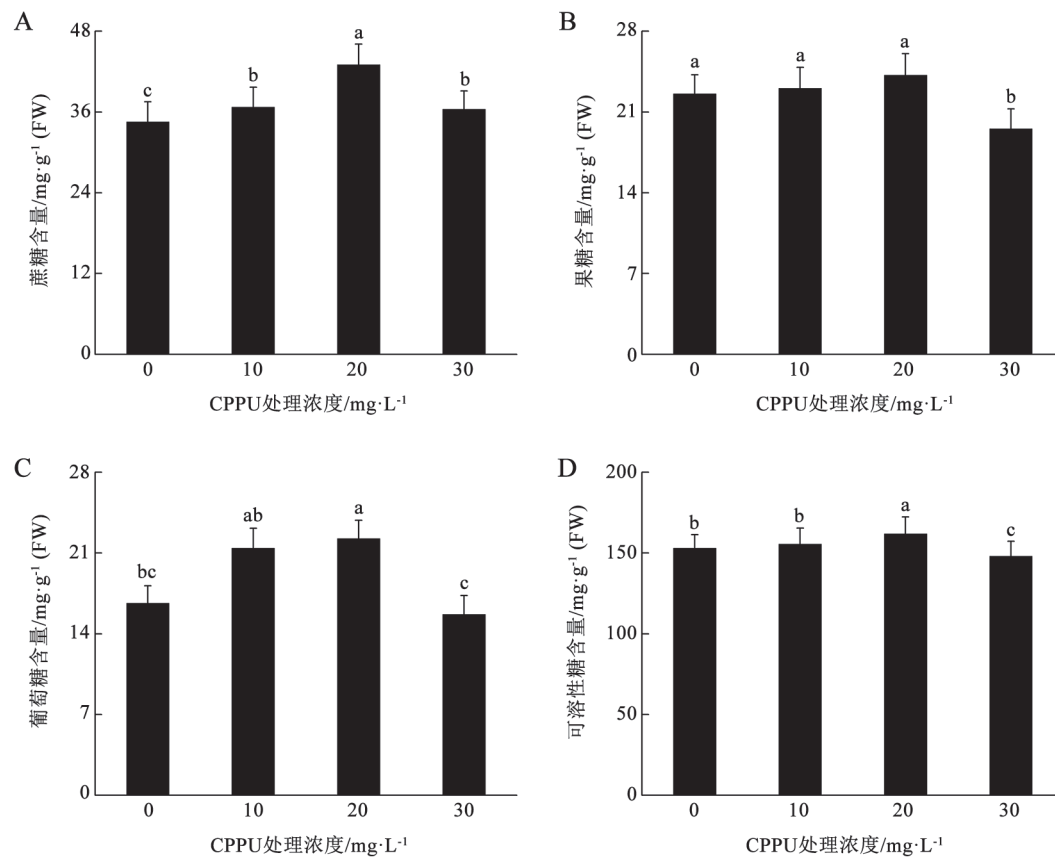


图3 CPPU处理对果实蔗糖、果糖、葡萄糖和可溶性糖含量的影响

Fig.3 Effects of CPPU treatment on fruit sucrose, fructose, glucose and soluble sugar contents

不同小写字母表示同一处理时间下不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ); 下图同此。

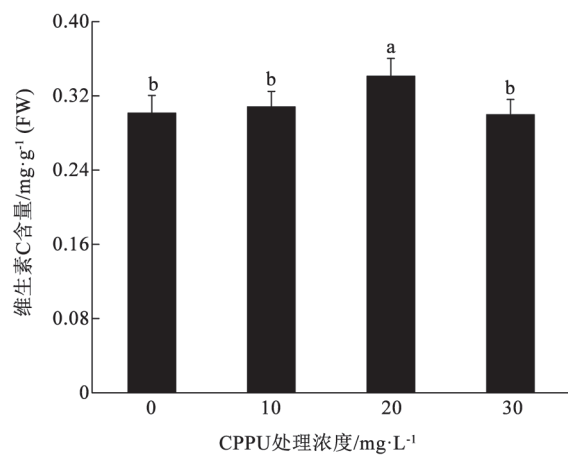


图4 CPPU处理对果实维生素C含量的影响

Fig.4 Effects of CPPU treatment on fruit vitamin C content

瓜果实的坐果率, 加快果实纵径和横径的增大, 提高果实的单瓜重。网纹甜瓜子房经CPPU处理后会更快地进入膨大期, 果实的生长指标达到甚至

超过授粉果实。因此, CPPU处理不但可以解决“化瓜”问题, 还能提高生产效率。

在生产上, 除了关注产量的提高, 更应注重果实品质的提升。瓜类作物果实的生长发育分为两个时期, 前期是果实的快速膨大期, 表现为体积和重量的显著增加, 后期是品质形成期, 表现为糖类的积累(管学玉2006)。糖类含量是甜瓜果实品质的重要指标。本研究发现, 适宜浓度的CPPU处理可以显著提高成熟网纹甜瓜果实的糖含量, 这与Hayata等(2000)、范国荣等(2006)、辛守鹏等(2017)分别在甜瓜、甜柿和葡萄上的研究结果基本一致。Hayata等(2000)发现, CPPU处理厚皮甜瓜不会影响授粉果实的可溶性固形物含量, 但会显著提高单性结实现果实的可溶性固形物含量; CPPU能改善甜柿果实碳水化合物的代谢和光合产物的积累, 提高果实的可溶性糖和淀粉含量, 从而提高果实的营养品质(范国荣等2006)。

本试验结果表明,不同浓度CPPU处理对网纹甜瓜果实品质因子(糖组分及其含量、维生素C等)的影响存在明显差异,20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理可以显著提高果实糖(特别是蔗糖和葡萄糖)及维生素C含量,30 mg·L<sup>-1</sup> CPPU处理的果实中糖及维生素C含量反而低于对照(图3和4),类似的情况前人亦有报道。如方学智等(2006)指出,低浓度的CPPU能促进猕猴桃果实的维生素C和糖类等营养成分的积累,有利于果实风味与品质的提高,而CPPU的处理浓度过高,则会改变果实的风味,降低果肉的维生素C、必需氨基酸和β-胡萝卜素含量,降低果实品质。此外,试验中观察到,高浓度CPPU处理的甜瓜果实有一定的苦味,推测可能是葫芦素(尚轶和黄三文2015),但高浓度CPPU处理导致这种苦味的机理目前尚不明确,有待进一步研究。

根据本研究结果,结合前人的研究成果,基本明确了CPPU对网纹甜瓜果实坐果、生长发育、产量和品质的影响。但CPPU对果实品质调控的机理还有待进一步研究。探讨CPPU处理果实的内源激素及糖类代谢酶的变化,将有利于阐明CPPU的作用机理。

### 参考文献

- Ben-Cheikh W, Perez-Botella J, Tadeo FR, Talon M, Primo-Millo E (1997). Pollination increases gibberellin levels in developing ovaries of seeded varieties of citrus. *Plant Physiol*, 114: 557–564
- China Agriculture Research System of Watermelon & Melon (2011). Advances of the application of CPPU in watermelons. *Chin Cucurbit Veg*, 24 (4): 39–43 (in Chinese with English abstract) [国家西甜瓜产业技术体系(2011). CPPU在西瓜上的应用研究进展. *中国瓜菜*, 24 (4): 39–43]
- Fan GR, Xiao HY, Liu SJ, Liu Y, Luo LS (2006). Influences of *N*-(2-chloro-4-pyridyl)-*N'*-phenylurea (CPPU) on starch, reducing sugar content and amylase activity of non-astringent persimmon (*Diospyros kaki* Linn). *Plant Physiol Commun*, 42 (3): 454–456 (in Chinese with English abstract) [范国荣, 肖会员, 刘善军, 刘勇, 罗来水(2006). *N*-(2-氯-4-吡啶基)-*N'*-苯基脲(CPPU)对甜柿果实中淀粉、还原糖含量和淀粉酶活性的影响. *植物生理学通讯*, 42 (3): 454–456]
- Fang XZ, Fei XQ, Ding M, Yao XH, Xie YF, Zhou LX (2006). Effect of different concentrations of CPPU on growth and nutritional quality of *Actinidia deliciosa*. *J Jiangxi Agric Univ*, 28 (2): 217–221 (in Chinese with English abstract) [方学智, 费学谦, 丁明, 姚小华, 谢义福, 周利雄(2006). 不同浓度CPPU处理对美味猕猴桃果实生长及品质的影响. *江西农业大学学报*, 28 (2): 217–221]
- Gianfagna TJ (1995). Natural and synthetic growth regulator and their use in horticultural and agronomic crops. In: Davies PJ (ed). *Plant Hormones. Physiology, Biochemistry and Molecular Biology*. London: Kluwer Academic Publishers, 751–773
- Guan XY (2006). Studies on developmental characteristics of fruit quality of netted muskmelon (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus* Naud.) (Master's thesis). Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract) [管学玉(2006). 网纹甜瓜品质形成特点的研究(硕士论文). 杭州: 浙江大学]
- Guo Y, Li TL, Qi HY, Liu WS (2012). The influence of improved No. 2 high-yield agent on thin-peel melon fruit setting and development. *Northern Hortic*, (1): 21–24 (in Chinese with English abstract) [郭泳, 李天来, 齐红岩, 刘巍姝(2012). 改良丰产剂2号对薄皮甜瓜坐果和果实发育的影响. *北方园艺*, (1): 21–24]
- Hayata Y, Niimi Y, Inoue K, Kondo S (2000). CPPU and BA, with and without pollination, affect set, growth and quality of muskmelon fruit. *HortScience*, 35 (5): 868–870
- Jin H (2010). The effect of CPPU on growth development and the endogenous hormones in cucumber (Master's thesis). Taian: Shandong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [金洪(2010). 外源CPPU对黄瓜果实生长发育及内源激素的影响(硕士论文). 泰安: 山东农业大学]
- Liu P, Chen AJ, Song YQ, He JJ, Bai XJ, Lou BH, Wei LY (2016). Effects of CPPU and GA<sub>3</sub> on secondary fruit enlargement and fruit quality in 'Wenke' grape. *China Fruits*, (5): 54–56 (in Chinese) [刘萍, 陈爱军, 宋雅琴, 何建军, 白先进, 娄兵海, 韦励业(2016). CPPU和GA<sub>3</sub>对'温克'葡萄二次果膨大及果实品质的影响. *中国果树*, (5): 54–56]
- Luo ZR (1993). A new plant growth regulator CPPU and its application in fruit trees and vegetables. *Plant Physiol Commun*, 29 (1): 297–299 (in Chinese) [罗正荣(1993). 新植物生长调节剂CPPU及其在果树和蔬菜上的应用. *植物生理学通讯*, 29 (1): 297–299]
- Lü XG, Zhou MD, Li M (2016). Effects of low temperature stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in leaves of grafted and own root muskmelon seedlings. *Plant Physiol J*, 52 (3): 334–342 (in Chinese with English abstract) [吕星光, 周梦迪, 李敏(2016). 低温胁迫对甜瓜嫁接苗及自根苗光合及叶绿素荧光特性的影响. *植物生理学报*, 52 (3): 334–342]
- Ma DW, Song PM (2003). Characteristics of CPPU and its applications in watermelon and melon production. *Chin Watermelon Muskmelon*, (2): 35–36 (in Chinese) [马德伟, 宋培明(2003). CPPU的特性及其在西瓜甜瓜生产中的应用. *中国西瓜甜瓜*, (2): 35–36]
- Nitsch JP (1971). Perennation through seeds and other structures: fruit development. In: Steward FC (ed). *Plant Physiology*, 6A. London: Academic Press, 413–501
- Pharis RP, King RW (1985). Gibberellins and reproductive development in seed plants. *Annu Rev Plant Physiol*, 36: 517–568
- Shang Y, Huang SW (2015). Bitterness metabolism in cucumber and synthetic biology. *Chin Bull Life Sci*, 27 (8): 1092–1094 (in Chinese with English abstract) [尚轶, 黄三文(2015). 黄瓜苦味物质的代谢调控与合成生物学. *生命科学*, 27 (8): 1092–1094]

- Xin SP, Geng S, Song LL, Shi ZG, Ding JB, Xia ZH, Tian GJ (2017). Effects of CPPU on photosynthesis of grape leaves at different leaf positions and fruit quality. *Nouthern Fruits*, (2): 11–13 (in Chinese with English abstract) [辛守鹏, 耿凤, 宋琳琳, 史志高, 丁建波, 夏志卉, 田桂君(2017). CPPU对葡萄不同叶位叶片光合作用及果实品质的影响. *北方果树*, (2): 11–13]
- Xu M, Huang ZX (2009). Review on research melons parthenocarpy. *Northern Hortic*, (11): 118–122 (in Chinese with English abstract) [许敏, 黄作喜(2009). 瓜类单性结实的研究进展. *北方园艺*, (11): 118–122]
- Yang MF, Hu FC, Wang XH, Lin YF (2015). CPPU and ZR treatments influence preharvest fruit drop and fruit quality of A4 seedless litchi. *South China Fruits*, 44 (1): 54–56 (in Chinese) [杨明府, 胡福初, 王祥和, 林允奋(2015). CPPU, ZR处理对A4无核荔枝采前落果及其品质的影响. *中国南方果树*, 44 (1): 54–56]
- Yuan J, Xiong BQ, Yu D, Zeng M (2004). Advances of the application of CPPU in fruit trees. *Northern Fruits*, 2 (1): 1–3 (in Chinese with English abstract) [袁军, 熊丙全, 余东, 曾明(2004). CPPU在果树上的应用研究进展. *北方果树*, 2 (1): 1–3]
- Zhang YP, Fan HW, Yang SJ, Chen YY (2014). Alleviating effects of exogenous salicylic acid on growth, photosynthesis and reactive oxygen metabolism in melon seedlings under cadmium stress. *Plant Physiol J*, 50 (10): 1555–1562 (in Chinese with English abstract) [张永平, 范红伟, 杨少军, 陈幼源(2014). 外源水杨酸对镉胁迫下甜瓜幼苗生长、光合作用和活性氧代谢的缓解效应. *植物生理学报*, 50 (10): 1555–1562]

## Effects of CPPU on fruit growth, development and quality of netted melon

SHI Yu<sup>1,2</sup>, WANG Jing-Min<sup>2</sup>, YE Hong-Xia<sup>1</sup>, WANG Qiao-Mei<sup>1</sup>, WANG Bing-Liang<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Vegetable Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;* <sup>2</sup>*Institute of Vegetable Science, Zibo Academy of Agricultural Sciences, Zibo, Shandong 255033, China*

**Abstract:** Netted melon (*Cucumis melo* var. *reticulatus*) is a variety of *Cucumis* genus in Cucurbitaceae family. It is one type of the thick-peel melon. Fruit quality and storability of netted melon are unsatisfactory due to weak sunlight and high rainfall in southern China. In this experiment, in order to investigate the effects of *N*-(2-chloro-4-pyridyl)-*N'*-phenylurea (CPPU) treatment on fruit setting rate, growth and development and quality, different doses of CPPU were sprayed onto ovaries of female flowers of netted melon (cv. 'Zhe-yong No. 2'). Results showed that within tested range of CPPU concentration, CPPU treatment of female flower ovaries elevated fruit setting rate, accelerated fruit growth and increased fruit weight of netted melon. However, little effect was observed in fruit shape index on ripe fruits. Effect of CPPU on sugar and vitamin C contents in ripe fruits varied with different CPPU concentrations. Contents of soluble sugar, sucrose, fructose, glucose and vitamin C in ripe fruits treated with 10 mg·L<sup>-1</sup> especially 20 mg·L<sup>-1</sup> CPPU were higher than those of control, while sugar and vitamin C contents in those treated with 30 mg·L<sup>-1</sup> CPPU were lower than those of control. Overall, in netted melon, suitable CPPU concentration treatment not only promoted fruit set and development, but elevated fruit yield and quality as well. And these results will provide theoretical and practical basis for reasonable application of CPPU in netted melon production.

**Key words:** CPPU; netted melon; fruit setting rate; fruit weight; sugar

Received 2017-07-03 Accepted 2017-11-28

This work was supported by the National Science and Technology Support Project (Grant No. 2013BAD20B02), Major Breeding Project of Zhejiang Province (Grant No. 2016C02051-4-3), Modern Agro-industry Technology System of Vegetable Innovation Team of Shandong Province (Grant No. SDAIT-05-16), and Science and Technology Development Project of Zibo City (Grant No. 2016kj010053).

\*Corresponding author (E-mail: blwang@zju.edu.cn).