

外源褪黑素对番茄缺钙胁迫的缓解效应

李晓彤, 杨婉莹, 孙莎莎, 巩彪, 史庆华*

山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室/农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站, 山东泰安271018

摘要: 本试验以‘Ailsa Craig’番茄为试验材料, 采用营养液水培减少钙含量方式模拟缺钙胁迫, 研究了不同浓度褪黑素对番茄缺钙胁迫的缓解效应。试验结果表明, 缺钙处理10 d后, 番茄植株生长发育受阻, 植株矮小瘦弱, 幼叶边缘变黄, 顶端生长点萎缩坏死。施加褪黑素对缺钙症状具有明显的缓解效应, 以 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理最好, 在该浓度下, 生长点相对完好, 叶绿素含量、光合速率以及对 Ca^{2+} 吸收能力显著增强, 植株长势得到明显改善。研究结果为缓解番茄缺钙引起的生理和代谢紊乱提供了新的方法, 同时为褪黑素在调控植物钙的利用方面提供了一定的理论基础。

关键词: 褪黑素; 番茄; 缺钙; 生理代谢

钙是植物所必需的营养元素之一, 在植物的生长发育过程中起重要作用。钙在地壳中的平均含量为3.65%, 通常情况下, 土壤中的钙含量较为丰富, 能够满足植物生长需求, 而石灰性土壤中作物缺钙的情况较为常见(许仙菊等2004)。植物所需要的钙主要依赖自身根部对钙的吸收以及地上部对钙的转运能力(辛建华2008)。在农业生产中, 导致植物缺钙原因主要有两个方面: 一方面是土壤缺钙, 由于近年来种植者把追求作物产量作为生产的重要目标, 导致不合理的大量施用化学氮肥, 加剧土壤钙素流失, 而大量复合肥(如磷酸铵)逐步取代了含有钙的普通磷肥, 使得农田中钙的投入量减少, 土壤的供钙量和作物所需量之间的平衡不断被破坏, 加速了土壤钙素的退化过程(史红平2016); 另一方面是生理缺钙, 尽管土壤含钙量丰富, 但是果树和蔬菜的果实上常常出现缺钙症状, 这是因为木质部是植物体内钙长距离运输的主要通道, 钙以蒸腾作用为运输动力, 幼嫩部位以及果实的蒸腾作用较小并且钙的移动性较差, 难以再运输和分配到新生部位以及果实中去, 因此容易发生缺钙现象(White和Broadley 2003)。另外, 外界环境也会影响植物对钙元素的吸收, 例如: 干旱条件会限制植物地上部钙元素的吸收; 氮肥施用过多, 会使大量的钙进入叶片, 导致叶片与果实争夺钙, 加剧钙缺乏症; 等等(Hirschi 2004)。

番茄作为最重要的设施和露地栽培的蔬菜种类, 是一种喜钙的蔬菜, 在生产过程中复种指数高,

盲目施肥严重, 钙素的缺失容易导致细胞壁结构遭到破坏(卢明等2018), 常常出现脐腐病等由于缺钙引起的生理性病害, 因此, 研究番茄钙利用的调控措施具有重要的理论和实践意义。

褪黑素(melatonin, MT; 化学名称为 N -乙酰-5-甲氧基色胺, N -acetyl-5-methoxy-tryptamine), 是色氨酸的吲哚衍生物。它是首先在牛松果体中发现(Lerner等1958)的动物激素, 1995年, 在植物中也发现了它的存在(Dubbels等1995; Hattori等1995)。随后褪黑素在植物中的研究越来越多, 受到广泛关注(Shi等2016)。研究表明褪黑素在植物的生长发育过程中起重要作用, 如促进植物侧根形成(Arno和Hernández-Ruiz 2007)和种子萌发(Posmyk等2009)等, 褪黑素可以直接清除活性氧, 也可通过激活抗氧化系统提高植物的抗氧化能力(Hu等2016)。褪黑素和IAA具有相同的合成前体——色氨酸, 并且植物对二者的生理反应也有相似之处(刘娜2015); Banuelos等(1987)发现在果实吸收钙方面IAA起到重要的作用, 周卫和林葆(2000)研究表明IAA通过促进苹果幼果中 Ca^{2+} 的共质体途径运输来促进幼果对 Ca^{2+} 的吸收。Li等(2016)研究表明当植

收稿 2018-11-26 修定 2019-01-17

资助 国家自然科学基金(31872954)、山东省现代农业产业技术体系项目(SDAIT-05-05)、山东省“双一流”学科建设项目(SYL2017YSTD06)和作物生物学国家重点实验室导向性课题(dxkt201714)。

* 通讯作者(qhshi@sdau.edu.cn)。

物处于钾缺失的环境下,外源褪黑素的添加会改善植物的生长。虽然褪黑素调控植物生长发育和适应非生物胁迫的研究取得了较大的进展,但关于其调控钙利用的研究还未见报道。因此,本研究采用营养液培养的方法,探索缺钙条件下不同浓度的褪黑素对番茄生长和生理代谢的影响,目的是为缓解番茄缺钙引起的生理紊乱提供一定的技术支撑,同时为丰富褪黑素的生理功能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2018年4~5月在山东农业大学的现代化玻璃温室内进行。温室内昼/夜温度为25~30°C/16~18°C,自然光照,相对湿度为50%~70%。试验所用的褪黑素购自美国Sigma公司。所用的番茄(*Solanum lycopersicum* L.)品种为‘Ailsa Craig’。番茄种子经过2.5%次氯酸钠消毒之后,浸种6 h,于28°C恒温培养箱催芽,待种子露白后,选取发芽一致的种子播种于装有育苗基质(草炭:蛭石,3:1)的穴盘中。待到番茄长至三叶一心时,选取长势一致的健壮苗,清洗干净根部基质后,水培于3 L黑色塑料盆内,每盆4株。采用1/4Hoagland营养液培养缓苗,缓苗7 d后,开始进行试验处理。通过前期预试验,试验设6种处理,对照(CK): Hoagland营养液;缺钙处理(T1): 采用钙含量为Hoagland营养液1%的营养液培养,模拟缺钙胁迫环境,因降低Ca(NO₃)₂所造成的氮素的缺乏,采用相应量的NaNO₃补足;外源褪黑素处理(T2~T5): 在减钙营养液的基础上施加不同浓度褪黑素,褪黑素浓度分别为0.25、0.5、1.0和2.0 μmol·L⁻¹。每种处理设置5个重复,处理后,每3 d更换一次营养液,10 d后,拍摄表型图并测定各项指标。

1.2 测定方法

植株生长: 处理10 d后,每种处理随机取样5株,测定植株的株高、茎粗、地上部与地下部鲜重。

叶绿素含量: 参照赵世杰等(2002)的方法,取处理10 d后的第3片功能叶,称取0.2 g叶片置于50 mL试管内,加入20 mL 80%丙酮,避光保存24 h,取上清液用紫外可见分光光度计于470、646和663 nm下比色。

光合参数测定: 处理10 d后,选取受光均匀的5株幼苗的第3片功能叶,于上午9:00~11:00测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间二氧化碳浓度(C_i)。以LED为光源,用PP-Systems公司生产的CIRAS-3测定,测定条件如下: 光照强度为800 μmol·m⁻²·s⁻¹,二氧化碳浓度为(380±10) μmol·L⁻¹。

钙含量测定: 将处理10 d后的植株随机选取5株,分为根、上位叶(从上至下第3片功能叶及以上的叶片)、上位茎(从上至下第3片功能叶以上的茎及叶柄)、下位叶(从上至下第3片功能叶以下的叶片)、下位茎(从上至下第3片功能叶以下的茎及叶柄) 5部分取样,分别用蒸馏水冲洗3遍,擦干,放于纸袋中,105°C杀青,50~60°C烘至恒重。植株各器官中的钙含量参照Mestre等(2012)的方法,采用原子吸收法测定。

1.3 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据处理,SPSS 17.0进行统计分析。

2 实验结果

2.1 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄幼苗表型的影响

缺钙处理10 d后番茄植株生长发育受阻,植株矮小瘦弱,叶片下垂,顶端生长点萎缩坏死,上部幼叶边缘开始变黄并逐渐坏死,长势明显变差(图1)。褪黑素处理可以显著缓解缺钙症状,随着褪黑素浓度的升高,植株长势呈现先升高后降低的趋势,以褪黑素浓度为0.5 μmol·L⁻¹植株长势最好,0.25 μmol·L⁻¹的褪黑素处理次之。

2.2 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄植株生物量的影响

由表1可以看出,与对照相比,缺钙胁迫下番茄幼苗的生长受到抑制,株高、茎粗和植株鲜重显著降低。在缺钙胁迫下,随着褪黑素浓度的增加,植株株高、茎粗、植株鲜重呈现先增加后降低的趋势;当外源褪黑素浓度为0.5 μmol·L⁻¹时,植株生物量均高于除对照以外的其他处理。但当褪黑素浓度较高时,对番茄植株生长会起到一定的抑制作用。

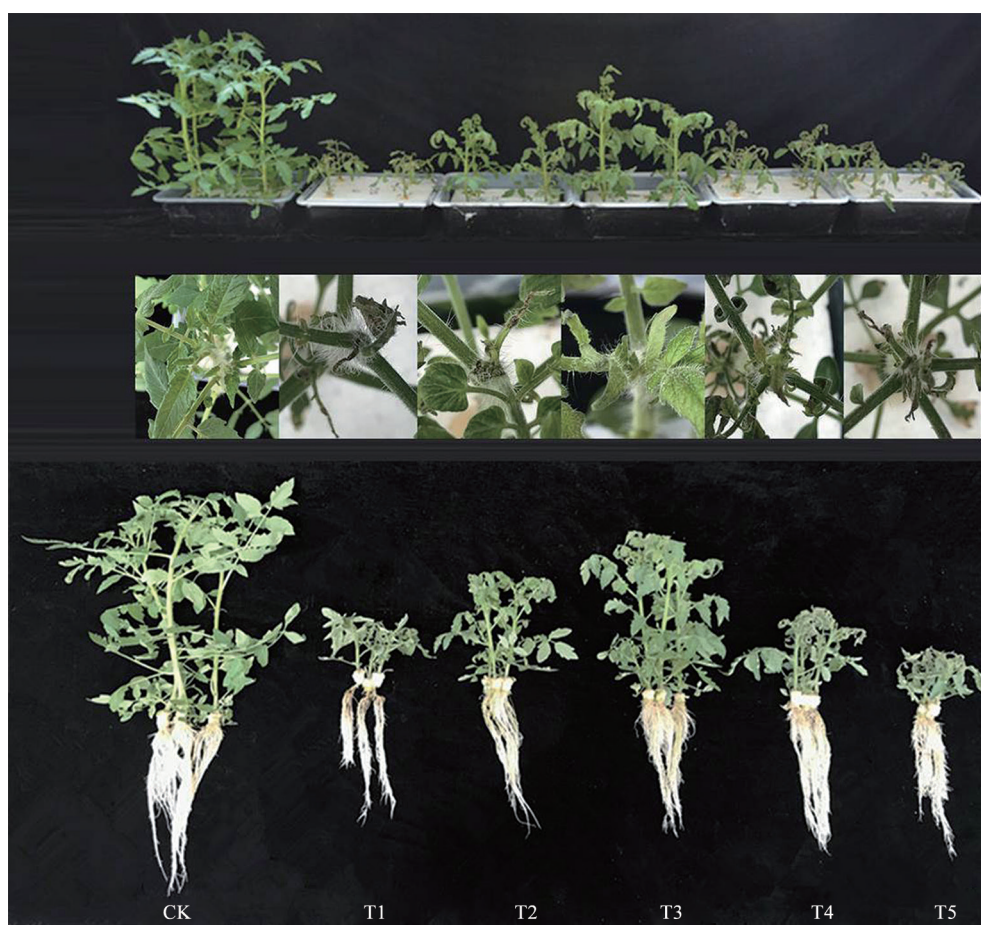


图1 不同浓度褪黑素对缺钙胁迫下番茄幼苗表型影响

Fig.1 Effects of different concentrations of melatonin on tomato seedling phenotype under calcium deficiency stress

表1 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄幼苗植株生长的影响

Table 1 Effect of exogenous melatonin on the growth of tomato under calcium deficiency stress

处理	株高/cm	茎粗/cm	地上部鲜重/g	地下部鲜重/g
CK	45.50±1.00 ^a	7.69±1.37 ^a	43.57±3.43 ^a	9.62±2.02 ^a
T1	9.67±0.58 ^e	2.62±0.26 ^c	3.30±0.47 ^c	1.39±0.17 ^d
T2	15.63±0.75 ^c	4.43±0.33 ^b	8.97±1.64 ^b	3.59±0.89 ^{bc}
T3	17.75±0.97 ^b	4.70±0.58 ^b	10.89±1.38 ^b	4.72±0.46 ^b
T4	12.17±0.29 ^d	3.17±0.21 ^c	4.55±0.68 ^c	2.36±0.18 ^{cd}
T5	9.67±0.58 ^e	2.66±0.05 ^c	3.95±0.19 ^c	1.57±0.11 ^d

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$), 表2同此。

2.3 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄光合特性的影响

缺钙胁迫下, 番茄植株的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度显著低于对照, 而施用褪黑素对缺钙胁迫下番茄的光合性能具有一定的改善效果, 与

植株生长的变化类似, 也是在浓度为 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时缓解效果最高(表2)。

由图2可以看出, 缺钙胁迫下, 番茄植株叶绿素 a 、叶绿素 b 、叶绿素 $a+b$ 、类胡萝卜素含量均

表2 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄光合参数的影响

Table 2 Effect of exogenous melatonin on the photosynthetic parameters of tomato under calcium deficiency stress

处理	净光合速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	蒸腾速率/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气孔导度/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	胞间 CO_2 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$
CK	10.87±1.86 ^a	3.95±0.89 ^a	118.67±27.20 ^a	365.00±31.58 ^a
T1	1.80±1.21 ^c	1.46±0.45 ^c	49.67±6.66 ^b	269.67±8.62 ^{ab}
T2	3.73±0.86 ^{bc}	2.60±0.66 ^b	103.00±2.65 ^a	324.33±8.14 ^{ab}
T3	5.17±0.55 ^b	2.77±0.59 ^b	113.67±5.69 ^a	326.00±26.21 ^{ab}
T4	4.06±1.43 ^b	1.15±0.10 ^c	39.00±4.30 ^{bc}	264.40±83.67 ^b
T5	3.40±1.21 ^{bc}	0.83±0.17 ^c	26.75±3.30 ^c	248.25±91.79 ^b

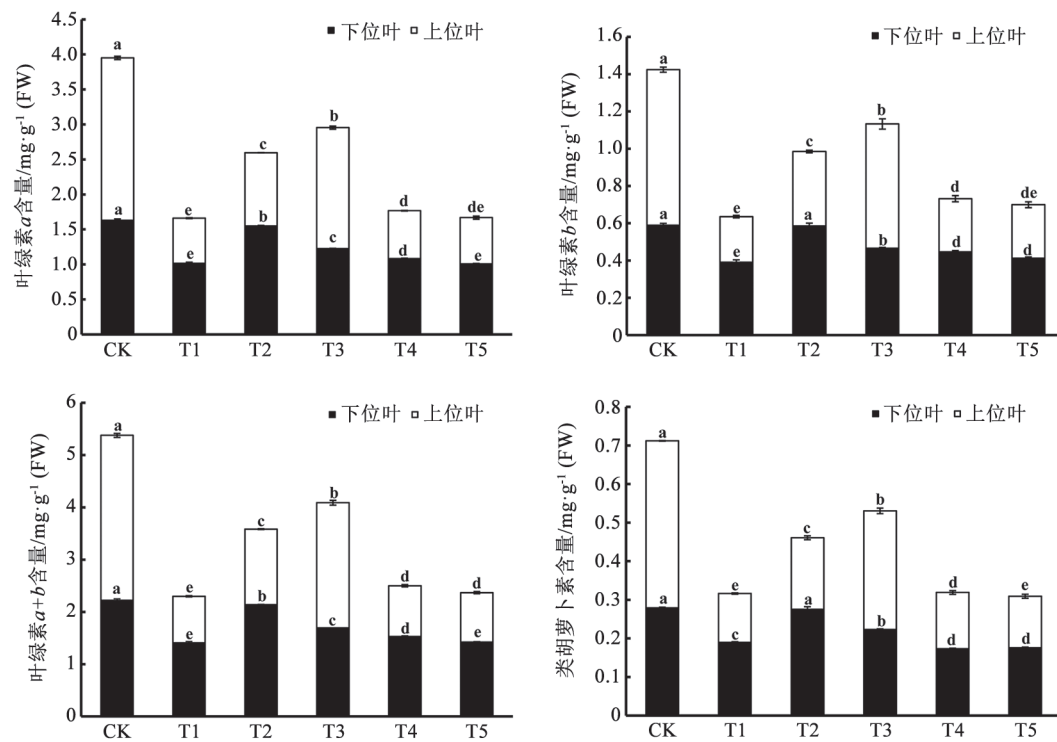


图2 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄植株叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b、类胡萝卜素含量的影响

Fig.2 Effects of exogenous melatonin on chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b and carotenoid content in tomato plants under calcium deficiency stress

图中不同的小写字母表示同一取样部位各处理间差异显著($P < 0.05$)。

显著低于对照,且植株上位叶表现尤为明显。施用不同浓度的褪黑素对缺钙胁迫下番茄叶片色素的积累具有不同程度的促进效应,与净光合作用变化相似,也以 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果最好。

2.4 外源褪黑素对缺钙胁迫下番茄幼苗钙含量和钙分配的影响

番茄叶片钙的积累量显著高于其他部位(图3-A)。缺钙处理(T1)显著降低了植株各部位的钙含

量,根、下位叶、下位茎、上位叶和上位茎钙含量分别为CK的25.28%、22.78%、9.80%、19.60%和1.66%。外源添加褪黑素影响了缺钙胁迫番茄幼苗各部位钙的分布, $0.25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的褪黑素促进了钙在各部位的积累,尤其是 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理。而当浓度较高时对钙积累的促进效果下降。正常生长状态下番茄幼苗各部位钙分布比较均一,其根部的钙含量相对较低,主要是由于

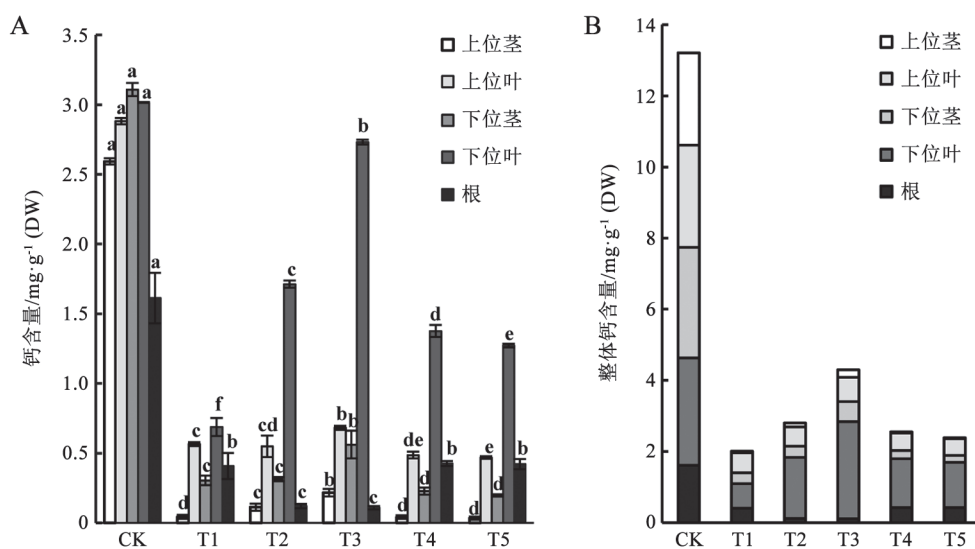


图3 外源褪黑素对低钙胁迫下番茄不同部位钙含量(A)与整体钙含量(B)的影响

Fig.3 Effects of exogenous melatonin on calcium content (A) and total calcium content (B) in different parts of tomato under calcium deficiency stress

从根部吸收的钙主要向上运输; 与对照相比, T1条件下植株整体钙含量显著降低, 上位叶钙含量占对照整体钙含量的19.6%, 上位茎钙含量占1.66%; 随着褪黑素的施加, 植株整体钙含量呈现先升高后降低的趋势, 当褪黑素浓度为 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 植株整体钙含量得到显著提升(图3-B)。

3 讨论

研究表明植株缺钙时生长发育受阻, 矮小瘦弱, 其缺乏症状首先出现在幼嫩组织, 幼叶卷曲畸形, 叶缘焦枯、失绿、变形, 出现弯钩状, 严重时生长点坏死, 叶尖和生长点呈现果胶状(辛建华2008), 这与本试验中出现的缺钙症状一致。已有不少研究发现, 缺钙胁迫下施加 CeCl_3 能有效缓解菠菜缺钙(Liu等2009); 外源喷施 CaCl_2 能有效缓解番茄缺钙症(Schmitz-Eiberger等2002)。在生产中, 合理地选择一些外源物质如生长调节剂对作物进行喷施可以调节植物的代谢过程, 缓解或者减轻逆境对园艺作物造成的伤害, 提高植株抗性进而提高产量, 改善品质(Borgea等2014)。褪黑素在缓解非生物胁迫中应用较多且效果显著, 并且因其具有较强的生物活性以及对环境友好的特点而在农作物

生产中有重要的应用潜力(Janas和Posmyk 2013)。Hu等(2018)研究表明, 外源施加褪黑素与外源施加 CaCl_2 都能减缓木薯块根生理衰退; 盐胁迫下, 与喷施单一外源物质相比, 褪黑素和 Ca^{2+} 复配处理对缓解盐胁迫具有显著的协同增效作用说明, 褪黑素与钙之间存在一定的关系。

本试验以减少营养液钙的用量来模拟缺钙胁迫, 施加不同浓度褪黑素缓解番茄缺钙, 发现了施加 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素可促进植株番茄植株生长, 减缓缺钙胁迫对植株生长的伤害。有研究表明, 叶片喷施和根际施用褪黑素提高了番茄叶片光合电子传递速率, 加强了光能向光化学反应方向的分配, 保护了类囊体膜免受伤害, 加强了ATP酶活性(杨小龙等2017), 这与本试验中施加 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素后提高胁迫下的光合特性一致。本试验施加 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素后有效提高了缺钙胁迫下叶绿素含量的积累, 叶绿素含量在一定范围内的增加可以有效增强光合作用(顾骏飞等2016), 进而增强植株蒸腾作用, 提高蒸腾拉力促进钙的吸收。钙在植株体内难以移动, 根系是植株吸收钙的主要部位(Moore等2002), 因此促进根系的生长能有效提高植株对钙的吸收, 而褪黑素能促进植物生长

并且在诱导番茄不定根发生(巩彪和史庆华2017),本试验中在缺钙胁迫下施加外源 $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素显著提高了植株的株高、茎粗、地上部和地下部鲜质量,可能是褪黑素促进了植株生长从而缓解番茄缺钙症状。褪黑素与IAA有共同的合成前体,并且植物对二者的生理作用相近(刘娜2015),IAA处理能够促进黄冠梨果皮钙含量增加(韩彦肖等2011),而在植物中褪黑素使钙含量增加还未见报道。但在动物上的试验研究表明将褪黑素加入载有 Ca^{2+} 荧光指示剂的寄生虫中时,能够诱导细胞内 Ca^{2+} 浓度的增加(Hotta等2000);补充外源褪黑素可以显著提高骨质疏松的大鼠骨密度,提高血钙水平,减少骨矿物质流失,与碳酸钙有协同作用,褪黑素与碳酸钙联合用药能有效缓解大鼠的骨质疏松(Zhu等2018);说明褪黑素的施加能够有效提高动物体内钙的含量。本试验中,施加外源褪黑素能够促进番茄缺钙胁迫下钙的高效利用,从而缓解钙胁迫对番茄造成的影响,但关于其机理还需后续深入研究。

参考文献(References)

- Arnao MB, Hernández-Ruiz J (2007). Melatonin promotes adventitious and lateral root regeneration in etiolated hypocotyls of *Lupinus albus* L. *J Pineal Res*, 42 (2): 147–152
- Banuelos GS, Bangerth F, Marschner H (1987). Relationship between polar basipetal auxin transport and acropetal Ca^{2+} transport into tomato fruits. *Physiol Plant*, 71 (3): 321–327
- Borges AA, Jiménez-Arias D, Expósito-Rodríguez M, et al (2014). Priming crops against biotic and abiotic stresses: MSB as a tool for studying mechanisms. *Front Plant Sci*, 5: 642
- Dubbels R, Reiter RJ, Klenke E, et al (1995). Melatonin in edible plants identified by radioimmunoassay and by high performance liquid chromatography-mass spectrometry. *J Pineal Res*, 18 (1): 28–31
- Gong B, Shi QH (2017). Review of melatonin in horticultural crops. *Sci Agr Sin*, 50 (12): 2326–2337 (in Chinese with English abstract) [巩彪, 史庆华(2017). 园艺作物褪黑素的研究进展. *中国农业科学*, 50 (12): 2326–2337]
- Gu JF, Zhou ZX, Li ZK, et al (2016). Effects of the mutant with low chlorophyll content on photosynthesis and yield in rice. *Acta Agro Sin*, 42 (4): 551–560 (in Chinese with English abstract) [顾骏飞, 周振翔, 李志康等(2016). 水稻低叶绿素含量突变对光合作用及产量的影响. *作物学报*, 42 (4): 551–560]
- Han YX, Wang YB, Wang YR, et al (2011). Effects of IAA and NAA on calcium content in peel of Huangguan pear. *Hebei Agr Sci*, 15 (11): 31–34 (in Chinese with English abstract) [韩彦肖, 王永博, 王亚茹等(2011). IAA和NAA处理对黄冠梨果皮钙含量的影响. *河北农业科学*, 15 (11): 31–34]
- Hattori A, Migitaka H, Iigo M, et al (1995). Identification of melatonin in plants and its effects on plasma melatonin levels and binding to melatonin receptors in vertebrates. *Biochem Mol Biol Int*, 35 (3): 627–634
- Hirschi KD (2004). The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiol*, 136 (1): 2438–2442
- Hotta CT, Gazarini ML, Beraldo FH, et al (2000). Calcium-dependent modulation by melatonin of the circadian rhythm in malarial parasites. *Nat Cell Biol*, 2 (7): 466–468
- Hu W, Hou X, Xia Z, et al (2016). Genome-wide survey and expression analysis of the calcium-dependent protein kinase gene family in cassava. *Mol Genet Genomics*, 291 (1): 241–253
- Hu W, Tie W, Ou WJ, et al (2018). Crosstalk between calcium and melatonin affects postharvest physiological deterioration and quality loss in cassava. *Postharvest Biol Tec*, 140: 42–49
- Janas KM, Posmyk MM (2013). Melatonin, an underestimated natural substance with great potential for agricultural application. *Physiol Plant*, 35 (12): 3285–3292
- Lerner AB, Case JD, Takahashi Y, et al (1958). Isolation of melatonin, the pineal gland factor that lightens melanocytes I. *J Amer Chem Soc*, 80 (10): 2587
- Li C, Liang B, Chang C, et al (2016). Exogenous melatonin improved potassium content in *Malus* under different stress conditions. *J Pineal Res*, 61 (2): 218–229
- Liu C, Cao WQ, Lu Y, et al (2009). Cerium under calcium deficiency influence on the antioxidative defense system in spinach plants. *Plant Soil*, 323 (1–2): 285–294
- Liu N (2015). Mitigating effects of exogenous melatonin, nitric oxide and their interaction on alkaline stress of tomato seedlings (dissertation). Taian, Shandong: Shandong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [刘娜(2015). 外源褪黑素和一氧化氮及其互作对番茄幼苗碱胁迫缓解效应的研究(学位论文). 山东泰安: 山东农业大学]
- Lu M, Hong S, Ju H L et al (2018). Influence of calcium on peduncle cracking of pineapple (*Ananas comosus* cv. ‘Tainon 17’) and its physiological mechanism. *Plant Physiol J*, 54 (4): 565–573 (in Chinese with English abstract) [卢明, 洪珊, 剧虹伶等(2018). 施钙对‘台农17号’菠萝裂柄的生理影响及效果. *植物生理学报*, 54 (4):

- 565–573]
- Mestre TC, Garcia-Sanchez F, Rubio F, et al (2012). Glutathione homeostasis as an important and novel factor controlling blossom-end rot development in calcium-deficient tomato fruits. *J Plant Physiol*, 169 (17): 1719–1727
- Moore CA, Bowen HC, Scrase-Field S, et al (2002). The deposition of suberin lamellae determines the magnitude of cytosolic Ca^{2+} elevations in root endodermal cells subjected to cooling. *Plant J*, 30 (4): 457–465
- Posmyk MM, Balabusta M, Wiczorek M, et al (2009). Melatonin applied to cucumber (*Cucumis sativus* L.) seeds improves germination during chilling stress. *J Pineal Res*, 46 (2): 214–223
- Schmitz-Eiberger M, Haefs R, Noga G (2002). Reduction of calcium deficiency symptoms by exogenous application of calcium chloride solutions. *Acta Hort*, 594: 535–540
- Shi HP (2016). Degradation characteristics and effect of soil calcium in guanzhong farmland (dissertation). Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University (in Chinese with English abstract) [史红平(2016). 关中农田土壤钙素状况及其退化特征研究(学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学]
- Shi H, Chen K, Wei Y, et al (2016). Fundamental issues of melatonin-mediated stress signaling in plants. *Front Plant Sci*, 7: 1124
- White PJ, Broadley MR (2003). Calcium in plants. *Ann Bot*, 92 (4): 487–511
- Xin JH (2008). Effect of calcium on growth, development, photosynthesis and material metabolism of potato (dissertation). Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese with English abstract) [辛建华(2008). 钙素对马铃薯生长发育、光合作用及物质代谢影响的研究(学位论文). 沈阳: 沈阳农业大学]
- Xu XJ, Chen MC, Zhang Q, et al (2004). Progress in study on calcium nutrition in soil and plant. *J Shanxi Agr Sci*, 32 (1): 33–38 (in Chinese with English abstract) [许仙菊, 陈明昌, 张强等(2004). 土壤与植物中钙营养的研究进展. *山西农业科学*, 32 (1): 33–38]
- Yang XL, Xu H, Li TL, et al (2017). Effects of exogenous melatonin on photosynthesis of tomato leaves under drought stress. *Sci Agr Sin*, 50 (16): 3186–3195 (in Chinese with English abstract) [杨小龙, 须晖, 李天来等(2017). 外源褪黑素对干旱胁迫下番茄叶片光合作用的影响. *中国农业科学*, 50 (16): 3186–3195]
- Zhao SJ, Shi GA, Dong XC (2002). *Techniques of Plant Physiological Experiment*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese) [赵世杰, 史国安, 董新纯(2002). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社]
- Zhou W, Lin B (2000). Study on pathways of Ca^{2+} movement in young fruit tissue of apple and its regulation by hormones. *J Plant Nutr Fert*, 6 (2): 214–219 (in Chinese) [周卫, 林葆(2000). 苹果幼果组织钙运输途径与激素调控. *植物营养与肥料学报*, 6 (2): 214–219]
- Zhu F, Liu Z, Ren Y (2018). Mechanism of melatonin combined with calcium carbonate on improving osteoporosis in aged rats. *Exp Ther Med*, 16 (1): 192–196

Effect of exogenous melatonin on alleviating calcium deficiency stress in tomato

LI Xiao-Tong, YANG Wan-Ying, SUN Sha-Sha, GONG Biao, SHI Qing-Hua*

College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Scientific Observing Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, Taian, Shandong 271018, China

Abstract: In this experiment, ‘Ailsa Craig’ tomato was used as experimental material to study the effect of exogenous melatonin on calcium deficiency. The results showed that after 10 days of calcium deficiency treatment, the growth and development of tomato plants were blocked, the plants were short and thin, the edges of young leaves turned yellow, and the shoot apical meristem of tomato was atrophied and necrotic. The application of melatonin had a significant effect on alleviating calcium deficiency, and $0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment showed the best effect. Under this concentration, the shoot apical meristem of tomato was relatively intact, the chlorophyll content, photosynthetic rate and Ca^{2+} absorption capacity were significantly enhanced, the plant growth was also significantly improved. The results will provide a new method for alleviating the physiological and metabolic disorders caused by calcium deficiency in tomato, and provide a theoretical basis for the application of melatonin in regulating plant calcium.

Key words: melatonin; tomato; calcium deficiency; physiological metabolism

Received 2018-11-26 Accepted 2019-01-17

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31872954), the Special Foundation for Modern Agricultural Industry Technology System of Shandong Province (SDAIT-05-05), the Funds of Shandong “DoubleTops” Program (SYL2017YSTD06), and the Project from State Key Laboratory of Crop Biology (dxkt201714).

*Corresponding author (qhshi@sdau.edu.cn).