

夜间低温对番茄幼苗磷素吸收及转运的影响

刘玉凤¹, 王珍琪¹, 宁晓峰², 倪 洋³, 李天来^{1*}

(1 沈阳农业大学 园艺学院, 设施园艺省部共建教育部重点实验室, 环渤海湾地区设施蔬菜优质高效生产协同创新中心, 沈阳 110866; 2 沈阳农业大学 工程学院, 沈阳 110866; 3 辽宁省沈阳市康平新城区顺山社区, 沈阳 110866)

摘 要:以‘辽园多丽’番茄幼苗为试材, 采用营养液栽培模式, 以夜温 15℃ 为对照, 对夜间低温(6℃)影响番茄幼苗磷素吸收及转运过程的因素进行研究。结果显示: (1) 夜间低温胁迫导致番茄幼苗根系活力受到显著抑制。 (2) 夜间低温条件下, 番茄幼苗根系中酸性磷酸酶活性无明显变化, 而其地上部酸性磷酸酶活性增强, 且以叶片中活性增加较大。 (3) 夜间低温胁迫使根系中磷酸盐转运蛋白基因 *LePT1* 和 *LePT2* 的相对表达量较对照增加, 地上部磷酸盐转运蛋白基因 *LePT1* 的表达受到抑制, 且叶片中受到的抑制作用更显著。 (4) 夜间低温胁迫处理营养液中剩余磷素含量始终多于对照; 其番茄幼苗地下部和地上部中磷素绝对含量均下降, 且叶片比茎的下降幅度更大。 (5) 夜间低温胁迫使番茄幼苗伤流强度下降, 伤流液中磷素含量随着处理天数的增加而增加, 在处理第 9 天时极显著高于对照。研究表明, 夜间低温导致番茄幼苗根系活力降低, 诱导植株中磷酸盐转运蛋白基因 *LePT1* 的表达下调以及伤流强度降低, 从而引起磷素由茎向叶片中的转运过程受到明显抑制。

关键词: 番茄幼苗; 夜间低温; 磷素吸收; 磷素转运

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effects of Low Temperature on Phosphorus Absorption and Transport of Tomato Seedlings

LIU Yufeng¹, WANG Zhenqi¹, NING Xiaofeng², NI Yang³, LI Tianlai^{1*}

(1 College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Key Lab of Protected, Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Protected Vegetable Surround Bohai Gulf Region, Shenyang 110866, China; 2 Institute of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3 Shenyang City Kangping New City Shunshan Community, Shenyang 110866, China)

Abstract: With Tomato ‘Liaoyuan Duoli’ as the materials of this experiment, using the mode of nutrient solution cultivation, the compared seedlings was cultivated as normal temperature as 15 °C of nighttime, set the temperature of nighttime as low as 6 °C to cultivate seedlings, we analyzed the factors affecting the absorption and transport processes of phosphorus of tomato seedlings in low night temperature. Results showed that: (1) the root activity of tomato seedlings was significantly inhibited by low temperature stress at night; (2) Under the condition of low temperature, there is no apparent change in the activity of acid phosphatase in the root of tomato seedlings, but the activity of acid phosphatase has strengthened in the

收稿日期: 2016-08-23; 修改稿收到日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(31301813); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20132103120007); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划(2015040); 农业部现代农业产业体系建设专项(CARS-25); 辽宁省重大科技攻关项目(2014215011); “十二五”科技攻关项目(2015103003); 中央财政农业科技推广项目(GCNT-LN-17)

作者简介: 刘玉凤(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: lyf-3939@163.com

* 通信作者: 李天来, 博士, 教授, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: tianlaili@126.com

aboveground parts and the activity of leaves increased significantly; (3) The relative expression of tomato phosphate transporter gene *LEPT1* and *LEPT2* increased in the roots by low temperature at night, *LEPT1* phosphate transporter gene expression is suppressed in the aboveground, which is more apparent in leaves; (4) The P residue is higher than that in the control under treatment of low temperature stress at night; the concentration of phosphorus in the parts of seedling either underground or aboveground decreased, Such decline in the leaves is higher than that of the stems; (5) The bleeding intensity of tomato seedling decreased; P concentration in the bleeding sap increased with experiment period and significantly higher than that of control in the 9th day. These results showed that the root activity of tomato seedlings significantly decreased by low temperature at night; the low temperature made phosphate transporter gene *LePT1* expression and the intensity of the bleeding sap decreased, which caused the transport of phosphorus from the stem to the leaf was inhibited.

Key words: tomato seedlings; low night temperature; phosphorus absorption; phosphorus transport

在中国北方设施番茄的栽培过程中,温度对其生长发育起着关键作用,是一个重要的环境因子。尤其是秋冬和早春季节,夜间低温是制约设施番茄高产优质的主要障碍因子之一^[1-3]。前人研究表明,夜间低温抑制了番茄幼苗对磷素的吸收,限制了磷素向地上部的转运^[4];低温胁迫显著抑制辣椒对矿质元素的吸收、运输及分配,在一定温度范围内,植株地上部 N、P、K 含量随着处理温度的降低而降低^[5];低温处理下增施磷肥能提高西瓜幼苗叶片中可溶性糖和脯氨酸含量,从而增强植株的抗寒能力^[6];适宜供磷时,大豆根系的生长发育速率增强^[7],地下部和地上部的生物量升高,根长、根系体积及干重均有不同程度的增加^[8]。

磷素是植物生长必需的大量矿质元素,长期以来,植物的磷素营养一直是植物营养学研究的热点之一。黄宇^[9]研究结果表明,酸性磷酸酶(APase)能使不易被植物吸收的有机磷转变为植物易吸收利用的无机磷酸盐,从而使植株体内仅有的磷得到多次重复利用;番茄磷酸转运蛋白基因 *LePT1* 在根系和地上部都有表达,*LePT2* 只在根系中表达^[10-11];处于磷饥饿状态下的番茄,*LePT1* 和 *LePT2* 基因在根系中的 mRNA 转录水平迅速增强,而对其适当供磷后,其表达量又会急剧下降^[12]。关于植物对磷素的吸收、运输和分布的机理,是植物学中长期探讨和争论的一个较为复杂的问题,至今仍处于推理和假说阶段^[13]。本试验以番茄品种‘辽园多丽’为试材,25℃/15℃(昼/夜)为对照,研究夜间低温 25℃/6℃(昼/夜)处理下,番茄幼苗对磷素吸收及转运情况的变化,为今后从分子水平上全面阐明植物对矿质营养的吸收和转运机理奠定基础,并为冬春季番茄设施栽培和耐低温育种提供指导和理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料 with 处理

试验以‘辽园多丽’番茄品种为试材,于 2012 年 6 月在沈阳农业大学北山基地的现代化日光温室内开始进行。穴盘育苗,待植株长到四叶一心时,移植于装有日本山崎配方营养液的水培槽中进行水培,并移至人工气候室,以夜温 15℃为对照,进行每天 11 h 夜温 6℃的低温处理。具体操作如下:低温处理的植株每晚 18:00 将温度调至 6℃,第 2 天早上 6:00 将温度调至 25℃,对照组昼/夜温度为 25℃/15℃,持续处理 7 d,处理期间光周期均为 12 h,光照为自然光照($300\sim600\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$);每个处理 15 株,3 次重复,采用单株取样,测定叶为完全展开的第 4 片功能叶。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 根系活力和伤流强度 (1)根系活力:番茄幼苗根系活力的测定采用 TTC(氯化三苯基四氮唑)法^[14]。(2)伤流强度:分别于低温处理 1、3、5、7、9 d 后,在夜间 6℃低温处理及正常夜温 15℃对照中选取 6 株长势良好并一致、生长形态相近的番茄植株,进行伤流液的收集。具体操作步骤如下:将脱脂棉用稀盐酸、蒸馏水清洗后烘干,剪成小块,备用;刀片用酒精消毒后待用;于上午 8:00,在距根基 4 cm 处用酒精消毒过的刀片快速切断茎秆,并用蒸馏水冲洗切口,用准备好的小块脱脂棉包住切口,再用保鲜膜完全覆盖住脱脂棉,最后用橡皮筋扎紧保鲜膜;当天下午 4:00,取下脱脂棉放入注射器中,进行挤压,使收集到的伤流液流入离心管(已称好重量),差量法获得伤流量。伤流强度=伤流量/收集时间(本试验中伤流量为 6 株植株总伤流量)。

1.2.2 磷素含量和中酸性磷酸酶活性 番茄幼苗根、茎、叶中酸性磷酸酶活性的测定采用分光光度法^[15];营养液中剩余磷含量测定采用分光光度法^[16];番茄幼苗根、茎、叶中磷素含量的测定采用钼锑抗比色法^[17],磷素绝对含量的计算公式为:磷素绝对含量(mg)=测得磷素含量(mg·g⁻¹)×组织干重(g);番茄幼苗伤流液中磷素含量测定采用磷钼蓝比色法^[18]。

1.2.3 *LePT1* 和 *LePT2* 相对表达量 番茄幼苗根、茎、叶中磷转运蛋白基因 *LePT1*、*LePT2* 相对表达量的检测采用 QRT-PCR 法^[19];根据 GenBank 和 SGN 数据库中番茄 *LePT1* 和 *LePT2* 基因的 cDNA 已知序列及其特性,利用 Primer 5.0 软件设计引物,并进行 BLAST 分析,以确保引物的特异性,引物序列详见表 1。

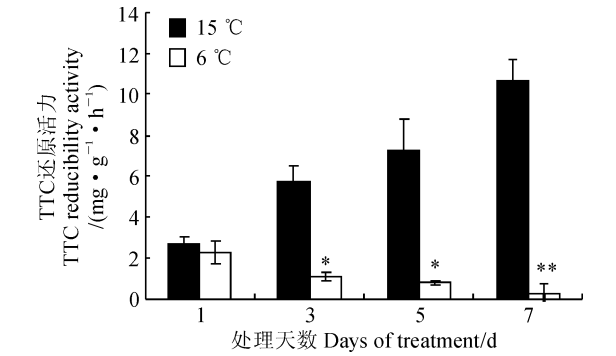
1.3 数据处理

数据采用 DPS 软件进行处理,采用 Dun-can 新复极差法进行差异显著性检验,采用 Excel 作图。各指标值表示为平均值±标准差。

表 1 番茄磷转运蛋白基因 *LePT1-2* 的引物序列

Table 1 The primer-sequences of phosphate transporter gene *LePT1-2* of tomato

基因名 Category	引物序列 Primer sequence (5'→3')
<i>LePT1</i>	F: TATTGGTTCAACAGTCCCTCAG R: GTGTAACGGGCAGTTTCAGG
<i>LePT2</i>	F: GTGGTGATTACCCCTTTGTCCG R: GAATACCGCCGCTATGAATG



* 和 * * 分别表示同期对照(15 °C)和低温处理(6 °C)间在 0.05 和 0.01 水平存在显著性差异;下同
图 1 夜间低温对番茄幼苗根系活力的影响
* and * * indicate significant difference between control(15 °C) and treatment(6 °C) at 0.05 and 0.01 levels, respectively; The same as below.

Fig. 1 Effects of low night temperature on root activity of tomato seedlings

2 结果与分析

2.1 夜间低温对番茄幼苗根系活力的影响

随着处理天数的延长,番茄幼苗的根系活力在正常夜间温度 15 °C(对照)下呈显著逐渐升高趋势,而在夜间低温 6 °C 处理下表现出逐渐下降的趋势(图 1);夜间低温处理番茄幼苗的根系活力在第 1 天时与对照相比无显著差异,但是随着处理天数的增加与对照差异开始迅速加大,在第 7 d 时下降到仅为对照的 3%,根系活力间的差异达到极显著水平($P<0.01$)。可见,夜间低温胁迫显著抑制了番茄幼苗根系活力,且时间越长抑制作用越强。

2.2 夜间低温对番茄幼苗中酸性磷酸酶活性的影响

图 2 显示,随着处理天数的延长,夜间低温和正常夜温处理番茄幼苗根系酸性磷酸酶活性均变化不明显,对照基本维持在 2.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,夜间低温处理略低于对照,保持在 2.1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$

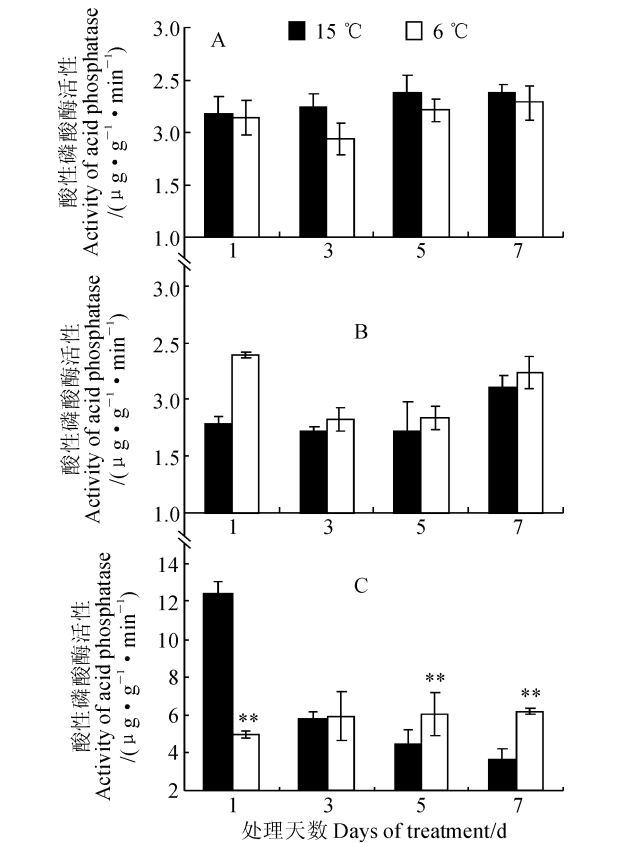


图 2 夜间低温对番茄幼苗根(A)、茎(B)、叶(C)中酸性磷酸酶活性的影响
Fig. 2 Effects of low night temperature on the activity of acid phosphatase in roots (A), stems (B) and leaves (C) of tomato seedlings

左右,但两者始终未达到显著差异水平(图 2,A)。番茄幼苗茎中酸性磷酸酶活性在正常夜温下基本保持不变,于处理第 7 天时略有升高;而在夜间低温处理下,番茄幼苗茎中酸性磷酸酶活性呈先降低后升高的趋势,并且始终高于对照;但其间两者差异始终未达到显著水平(图 2,B)。与根茎中的变化不同,番茄幼苗叶片中酸性磷酸酶活性正常夜温下随着处理天数的延长呈显著下降趋势,而在夜间低温处理下略有升高,并基本维持在 $5.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右;在处理第 3 天之后,夜间低温处理酸性磷酸酶活性开始极显著高于对照($P<0.01$),且与对照间差距随着处理天数的延长逐渐增大(图 2,C)。以上结果说明夜间低温对番茄幼苗根茎中酸性磷酸酶活性无显著影响,而明显增强了处理后期叶片中酸性磷酸酶活性。

2.3 夜间低温对番茄幼苗中 *LePT1* 和 *LePT2* 基因相对表达量的影响

由图 3 可以看出,随着处理时间的延长,番茄幼苗根系中 *LePT1* 基因相对表达量在夜间低温处理下呈降-升-降-升的变化趋势,而在正常夜温下呈降-升-降-升的变化趋势,但相对表达量(RQ 值)基本保持在 0.73 左右;两者间相比较,夜间低温处理的表达

量仅在第 7 天才极显著高于对照($P<0.01$),其余时间均无显著差异(图 3,A)。番茄幼苗根系中 *LePT2* 基因表达量在夜间低温处理下表现出先降后升的趋势,而在正常夜温下呈降-升-降-升波动变化,但 RQ 值基本保持在 0.94 左右;随着处理天数的延长,夜间低温处理 *LePT2* 基因表达量逐渐高于对照,且与对照间差距逐渐增大,并在处理第 3 天后达到极显著水平(图 3,B)。

番茄幼苗茎中 *LePT1* 基因相对表达量正常夜温下呈先降后升再降的变化趋势,并在第 3 天时达到最大值;而其在夜间低温处理下总体上也呈先升后降的变化趋势,并在第 1 天时达到最大值并显著高于对照,随后便显著低于对照($P<0.05$),其在第 7 天时仅为对照的 27.9%(图 3,C)。与茎中的表达情况一致,叶片中 *LePT1* 基因的相对表达量在正常夜温下也呈先降后升再降的变化趋势,于第 3 天时达到最大值;而其在夜间低温处理下随着处理天数的延长也呈先升后降的趋势,并在第 1 天时达到最大值,并极显著高于对照($P<0.01$),随后骤然持续下降且始终低于对照,在第 7 天时仅为对照的 24.7%(图 3,D)。以上结果说明,随着夜间低温胁迫时间的延长,番茄幼苗中磷素由茎向叶片中的转

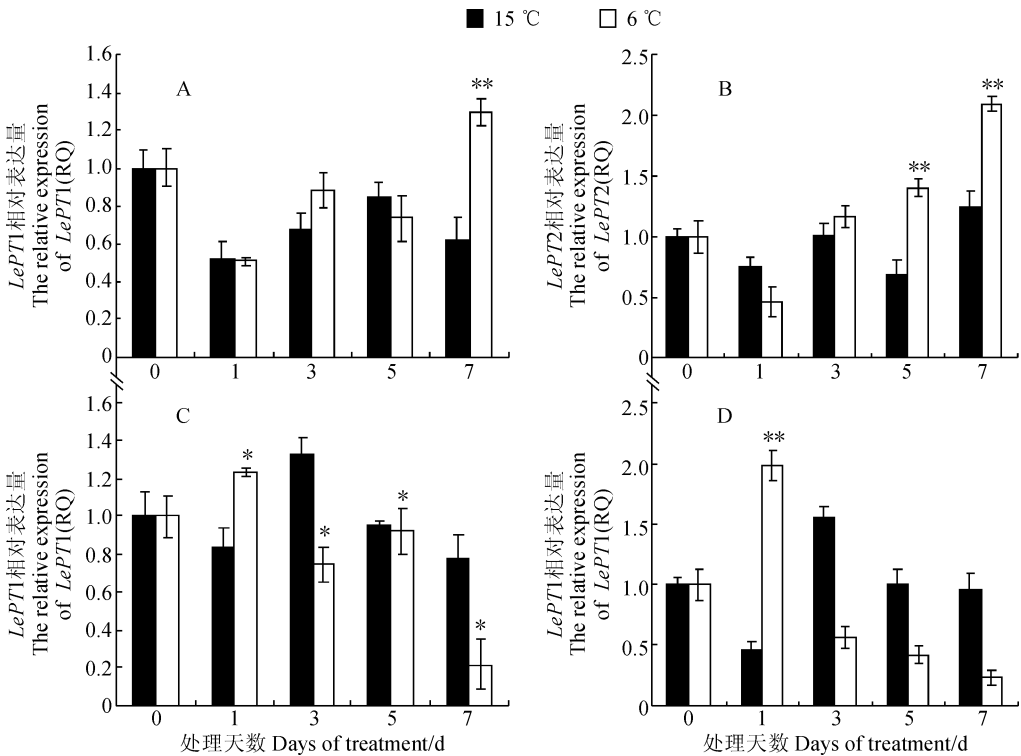


图 3 夜间低温对 *LePT1* 和 *LePT2* 基因在番茄幼苗根(A、B)、茎(C)、叶(D)中相对表达量的影响

Fig. 3 Effects of low night temperature on the relative expression of *LePT1* and *LePT2* gene in roots (A,B), stems (C) and leaves (D) of tomato seedlings

运过程受到更强烈的抑制。

2.4 夜间低温对番茄幼苗根茎叶中磷素绝对含量的影响

图 4 显示,随着处理天数的增加,夜间低温和正常夜温下营养液中剩余磷素含量都呈逐渐下降趋势,与对照(夜温 15 ℃)相比,夜间低温处理(6 ℃)的下降趋势不明显,且其剩余磷素含量始终高于对照,但差异并未达到显著水平(图 4,A)。正常夜温和夜间低温处理番茄幼苗植株根系干重中磷素绝对含量随着处理时间均呈先增加再降低的趋势,并分别在处理第 5 天和第 3 天达到最大值;夜间低温处理磷素绝对含量在 0~3 d 中始终高于对照,随后急

剧下降并极显著低于对照($P<0.01$),到第 7 天时仅为对照植株的 59%(图 4,B)。同时,正常夜温和夜间低温处理番茄幼苗茎中磷素绝对含量随着处理时间均呈先降低后逐渐升高的相同变化趋势,并均在处理第 1 天时达到最低值,其间夜间低温处理始终低于对照(图 4,C)。另外,正常夜温和夜间低温处理番茄幼苗叶片中磷素绝对含量随着处理时间延长总体上均呈先下降再上升的趋势,并均在处理第 1 天有最低值;只是正常夜温番茄幼苗叶片中磷素绝对含量在处理 1 d 后逐渐大幅增加,而同期夜间低温处理叶片中磷素绝对含量则变化不明显;与对照相比,夜间低温处理使番茄幼苗叶片中磷素绝对含

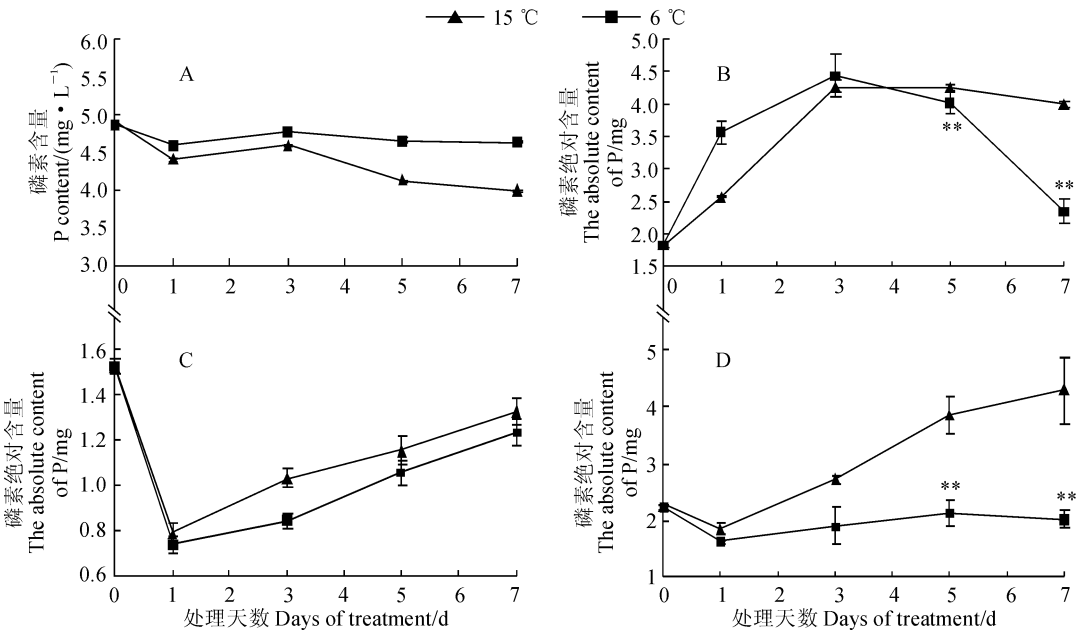


图 4 夜间低温条件下营养液中剩余磷素含量(A)和番茄幼苗根(B)、茎(C)、叶(D)中磷素绝对含量

Fig. 4 The P residual content in the nutrient solution(A)and absolute content of P in roots (B), stems (C) and leaves (D) of tomato seedlings under low night temperature

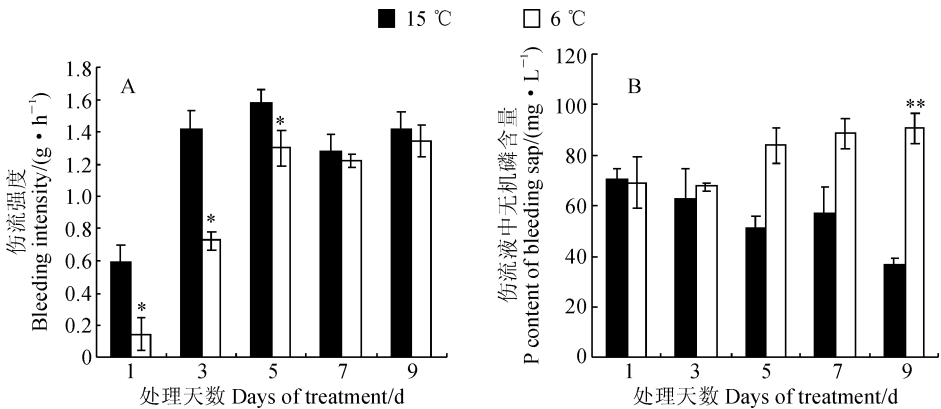


图 5 夜间低温对番茄幼苗伤流强度和伤流液中磷素含量的影响

Fig. 5 Bleeding intensity and P content of bleeding sap of tomato seedlings under low night temperature

量降低,且随着处理时间的延长差异逐渐加大,在处理第 5、7 天已达到极显著水平($P < 0.01$),到第 7 天时已下降到仅为对照的 47%(图 4,D)。以上结果说明夜间低温胁迫抑制了番茄幼苗磷素的吸收及向地上部的转运。

2.5 夜间低温对番茄幼苗伤流强度和伤流液中磷素含量的影响

图 5,A 显示,夜间低温和正常夜温处理番茄幼苗植株的茎伤流强度随处理时间的变化趋势大致相同:即伤流强度在 1~5 d 之间逐渐增大的,随后趋于平缓或稍有下降,但降幅微小;但是,夜间低温处理番茄幼苗植株的伤流强度始终低于同期正常夜温对照,且在前 5 d 差异达到显著水平($P < 0.05$)。同时,番茄幼苗茎伤流液中磷素含量正常夜温下随着处理时间的延长呈下降趋势,而在夜间低温处理下却随着处理天数的增加而增加(图 5,B);与对照相比较,夜间低温处理伤流液中磷素含量除第 1 天外均不同程度增加,且第 9 天时增幅达到极显著差异水平($P < 0.01$)。以上结果说明,夜间 6 °C 低温处理对番茄幼苗水分和养分的转运过程起到了抑制作用,磷素在随伤流液向叶片中转运过程同时受到显著抑制。

3 讨论

3.1 夜间低温对番茄幼苗磷素吸收的影响

根系活力是判断植株根系生长发育良好与否的重要指标之一,也是反映根系吸收功能的一项综合指标。樊怀福等^[20]研究发现,番茄幼苗受到低温处理后,其根系活力在感受低温初期增强,但在遭受长时间低温胁迫后开始下降,直至失去活力。本研究表明,番茄幼苗植株根系具有适应调节能力,在感应低温胁迫初期不会立即表现出活力下降的趋势,但随着胁迫时间的延长,根系活力会显著下降;同时,本研究中正常夜温处理幼苗根系活力随着处理天数的延长变化明显,与前人^[21]研究结果略有出入。这可能是由于本研究采用营养液培养,洗根放入营养液后需先缓苗 3~5 d,在刚长出新根时开始处理,处理初期时测定根系活力所取样品还是老根居多,随着处理时间的延长所取样品中新根逐渐增多,活力也随之明显增强。

植物在缺磷条件下,植株外部形态以及内部生理生化过程都会产生一系列变化,磷酸酶活性增强便是其中一种较为显著的变化,尤其是酸性磷酸酶活性的增强^[22-23]。酸性磷酸酶是一种适应性诱导

酶,在植物中具有活性高、分布广的特点,它与介质中磷素的供应状况存在密切联系,并且在植物的磷代谢过程中起着关键作用^[24-25]。本试验结果表明,在夜间 6 °C 低温处理以及正常夜温 15 °C 对照中,番茄幼苗根系中的酸性磷酸酶活性均无明显变化,这说明植物没有获得磷饥饿诱导光系统 I(PSI)信号的诱导,处理 7 d 中植株赖以生存的营养液中磷素含量是充足的。

磷素对于维持植物正常的生长发育起着至关重要的作用,植物在受到低磷胁迫时会调控(上调/下调)一系列磷吸收相关基因的表达,从而最大限度地从介质中获取磷素及维持体内磷的平衡^[26]。本试验结果表明,番茄幼苗根系中 *LePT1* 和 *LePT2* 基因的表达情况在正常夜温 15 °C 下趋于稳定,而在夜间 6 °C 低温处理下则会产生明显变化,具体表现为 *LePT1* 基因相对表达量总体上呈增加趋势,在感受低温胁迫第 7 天时显著高于对照,而同期 *LePT2* 基因相对表达量随着低温处理天数的延长逐渐增加。但从营养液中剩余磷素含量来看,夜间 6 °C 低温处理的营养液中磷素剩余含量始终比对照多,又说明虽然夜间低温处理下磷酸盐转运蛋白基因 *LePT1* 和 *LePT2* 表达量有所增加,但根系磷素的吸收还是受到抑制。

3.2 夜间低温对番茄幼苗磷素转运的影响

本研究结果表明,夜间 6 °C 低温处理会提高番茄幼苗地上部酸性磷酸酶活性,说明此条件下植株地上部已获得磷饥饿诱导(PSI)信号的诱导,磷素在从地下部向地上部运输过程中受阻,导致地上部磷素供应不足。同时,夜间 6 °C 低温处理下,番茄幼苗茎中酸性磷酸酶活性处于 $1.8 \sim 2.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间,而叶片中酸性磷酸酶活性更高($4.9 \sim 6.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$),说明叶片中受到磷饥饿信号诱导更强烈,磷缺乏现象更为严重,磷素由茎向叶片中转运过程强烈受阻。

本试验对地上部 *LePT1* 基因表达情况的研究结果表明,番茄幼苗本身具有适应调节能力,在感受夜间低温胁迫初期,自身抗逆机制发挥作用,促进了 *LePT1* 基因在地上部的表达,但是随着胁迫时间的延长,*LePT1* 基因的表达明显受到抑制,且胁迫时间越长,抑制作用越显著。同时,与茎相比,*LePT1* 基因在叶片中的相对表达量下降速率更大,又说明其在叶片中受到的抑制作用更显著,即磷素在由茎向叶片的转运过程中受到更强烈的抑制。

进一步对番茄幼苗地下部与地上部中的磷素绝

对含量比较发现,与对照(正常夜温 15 ℃)相比,在感受夜间 6 ℃低温胁迫初期,地下部中磷素绝对含量不但没有下降反而有所提高,但是茎和叶片中的磷素绝对含量始终比对照低,这充分说明夜间低温胁迫抑制了磷素向地上部的转运。同时,在夜间 6 ℃低温处理下,幼苗茎中的磷素绝对含量是随着处理天数的增加而增加的,而叶片中这种增加趋势不再明显,基本保持稳定,并且与对照间的差距随着处理天数的延长而增大,到第 7 天时仅为对照的 47%,这也充分说明磷素由茎向叶片中转运过程受到强烈抑制。

将植物的嫩茎切断后其断面流出汁液称为植物的伤流现象,流出的液体即为伤流液,是植物木质部中的汁液受根压作用从导管向地上部转移而流出。伤流液流量的大小和组成成分可以作为判断植株根系代谢能力强弱以及根冠之间联系情况的重要指标^[27-28]。通常在试验中会用伤流强度作为衡量植株伤流情况的重要指标,伤流强度是指植株在单位时间内流出的伤流液量^[29]。同时,伤流液中的无机元素、氨基酸以及可溶性糖等物质是植株进行根冠间交流的重要形式^[30]。本试验对伤流液的研究结

果表明,夜间 6 ℃低温处理会降低番茄幼苗的伤流强度,表明夜间 6 ℃低温处理对番茄幼苗水分和养分的转运过程起到了抑制作用。而夜间 6 ℃低温处理下,伤流液中磷素含量随着处理天数的增加而增加,除第 1 天磷素含量稍低于对照,随后均高于对照;同时,与对照相比,夜间 6 ℃低温处理使番茄幼苗叶片中磷素绝对含量降低,且随着处理时间的延长,下降比率逐渐增大。这些结果说明夜间 6 ℃低温处理下番茄幼苗的磷素在随伤流液向叶片中转运过程受到显著抑制。

综上所述,夜间低温环境下,番茄幼苗根系活力显著下降是导致磷素吸收过程受到抑制的主要因素;夜间低温胁迫抑制了磷素向地上部的转运,且对由茎向叶片中转运过程的抑制作用更显著;磷酸盐转运蛋白基因在磷素转运过程中发挥重要作用,夜间低温下转运蛋白基因表达受到抑制以及伤流强度下降是导致磷素转运过程受阻的主要原因。本试验通过对夜间低温影响番茄幼苗磷素吸收及转运的内在因素的分析,为合理使用磷肥提高冬春季节设施番茄产量,改善设施番茄品质提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 林 多,魏毓棠,王世刚. 番茄耐低温研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2000, 31(6):585-589.
LIN D, WEI Y T, WANG S G. Studies on low temperature tolerance in tomato[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(6):585-589.
- [2] 刘慧英,朱祝军,吕国华,等. 低温胁迫下西瓜嫁接苗的生理变化与耐冷性关系的研究[J]. 中国农业科学,2003, 36(11): 1 325-1 329.
LIU H Y, ZHU Z J, LÜ G H, *et al.* Study on relationship between physiological changes and chilling tolerance in grafted watermelon seedlings under low temperature stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11):1 325-1 329.
- [3] 李国强,齐明芳,李天来,等. 夜间低温后恢复期番茄幼苗光合作作用和生长发育的变化[J]. 沈阳农业大学学报,2006, 37(3): 491-494.
LI G Q, QI M F, LI T L, *et al.* Change of photosynthesis and growth of tomato seedlings in recovery after night sub-low temperature[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(3):491-494.
- [4] 倪 洋,张 雪,刘玉凤,等. 夜间低温对番茄幼苗吸收矿质元素的影响[J]. 华北农学报,2013, 28(4): 93-97.
NI Y, ZHANG X, LIU Y F, *et al.* Effects of low night temperature on mineral elements absorption of tomato seedlings [J]. *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 2013, 28(4): 93-97.
- [5] 郭晓冬. 低温弱光对日光温室辣椒生长及其生理功能的影响[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学, 2008.
- [6] 陈 钢. 磷水平对西瓜产量、品质、养分吸收及幼苗耐冷性影响的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.
- [7] 曹爱琴,严小龙. 不同供磷条件下大豆根构型的适应性变化[J]. 华南农业大学学报,2001, 22(1):92-93.
CAO A Q, YAN X L. Adaptation of soybean root architecture under different P conditions[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2001, 22(1):92-93.
- [8] 金 剑,王光华,刘晓冰,等. 不同施磷量对大豆苗期根系形态性状的影响[J]. 大豆科学,2006, 25(4):360-364.
JIN J, WANG G H, LIU X B, *et al.* Effect of different phosphorus regimes on root morphological characteristics of soybean seedling[J]. *Soybean Science*, 2006, 25(4):360-364.
- [9] 黄 宇. 甘蓝型油菜酸性磷酸酶与磷营养关系的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2007.
- [10] 韩胜芳. 水稻磷素吸收的生理和分子基础研究[D]. 河北保定:河北农业大学, 2009.
- [11] 洪 帅. 番茄磷转运蛋白基因 *LePT1* 和 *LePT2* 在水稻中的功能鉴定[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [12] LIU C M, MUCHHAL U S, UTHAPPA M. Tomato phosphate transporter genes are differentially regulated in plant tissues by phosphorus [J]. *Plant Physiology*, 1998, 116:

91-99.

[13] 赵素娥. 植物对矿质元素的吸收、运输和分配[J]. 生物学通报, 1985, (8): 1-3.

ZHAO S E. Plants absorb mineral elements, transport and distribution[J]. *Bulletin of Biology*, 1985, (8): 1-3.

[14] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 30-31.

[15] 刘渊, 李喜焕, 孙星, 等. 磷胁迫下大豆酸性磷酸酶活性变化及磷效率基因型差异分析[J]. 植物遗传资源学报, 2012, **13**(4): 521-528.

LIU Y, LI X H, SUN X, *et al.* Variation of acid phosphatase activity and analysis of genotypic difference in P efficiency of soybean under phosphorus stress[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012, **13**(4): 521-528.

[16] 韩丙军, 何秀芬, 张月, 等. 叶面肥中磷含量测定方法的比较[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (6): 83-86.

HAN B J, HE X F, ZHANG Y, *et al.* Study on the method for the determination of phosphorus content in foliar fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (6): 83-86.

[17] 李会娟. 两种植物磷含量的检测方法比较研究[J]. 农艺学, 2012, (11): 16-17.

LI H J. Comparative study on determination of phosphorus content in two kinds of plant[J]. *Agronomy*, 2012, (11): 16-17.

[18] 袁东, 封雪松, 付大友, 等. 饲料中总磷、无机磷和有机磷的含量测定[J]. 四川轻化工学院学报, 2002, **15**(4): 42-47.

YUAN D, FENG X S, FU D Y, *et al.* Determination of total phosphorus, inorganic phosphorus and organic phosphorus in feeds[J]. *Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology*, 2002, **15**(4): 42-47.

[19] 胡丹丹, 顾金刚, 姜瑞波, 等. 定量 RT-PCR 及其在植物学研究中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(3): 520-525.

HU D D, GU J G, JIANG R B, *et al.* Quantitative RT-PCR and its application in botany research[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, **13**(3): 520-525.

[20] 樊怀福, 蒋卫杰, 郭世荣. 低温对番茄幼苗植株生长和叶片光合作用的影响[J]. 江苏农业科学, 2005, (3): 89-91.

FAN H F, JIANG W J, GUO S R. Effects of low temperature on the growth and photosynthesis of tomato seedlings[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2005, (3): 89-91.

[21] 黄芳. 夜间温度对番茄生长的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2002.

[22] KUMMEROVA M. Localization of acid phosphatase in maize root under phosphorus deficiency[J]. *Biol. Plant*, 1986, **28**: 270-274.

[23] 宋克敏, 焦新之, 李琳, 等. 磷酸饥饿时番茄幼苗酸性磷酸酶活性的变化与 Pi 吸收的关系[J]. 云南植物研究, 1999, **21**(1): 101-108.

SONG K M, JIAO X Z, LI L, *et al.* Relationship between the changes of acid phosphatase activities and pi- uptake of tomato seedlings during phosphate starvation[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1999, **21**(1): 101-108.

[24] 丁洪, 李生秀, 郭庆元. 酸性磷酸酶活性与大豆耐低磷能力的相关研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, **3**(2): 123-128.

DING H, LI S X, GUO Q Y. Study on correlation between acid phosphatase activity and low phosphorus tolerance of soybean[J]. *Plant Nutrition And Fertilizer*, 1997, **3**(2): 123-128.

[25] 樊明寿, 徐冰, 王艳. 缺磷条件下玉米根系酸性磷酸酶活性的变化[J]. 中国农业科技导报, 2001, **3**(3): 33-36.

FAN M T, XU B, WANG Y. Acid phosphatase activities of intact roots and ground root tissues of maize grown in high P or low P nutrient solution[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, **3**(3): 33-36.

[26] RAGHOTHAMA K G. Phosphate acquisition. Annu. Rev. Plant Physiol [J]. *Plant Molecular Biology*, 1999, **150**: 665-693.

[27] 董学会, 段留生, 何钟佩, 等. 30% 己乙水剂对玉米根系伤流液及其组分的影响[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(3): 587-591.

DONG X H, DUAN L S, HE Z P, *et al.* Effects of 30% diethyl-amino-ethyle-hexanoate ethephon soluble concentrate on roots bleeding sap and its components of *Zea mays*[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2005, **25**(3): 587-591.

[28] 徐新娟, 卢颖林, 李庆余, 等. 增铵营养对番茄植株伤流液组分及含量的影响[J]. 土壤, 2009, **41**(5): 806-811.

XU X J, LU Y L, LI Q Y, *et al.* Effects of enhanced ammonium nutrition on composition and content of tomato xylem sap in two growing stages[J]. *Soils*, 2009, **41**(5): 806-811.

[29] 姚万山, 宋连启, 郭宏敏, 等. 夏玉米高产群体生理动态质量指标的研究[J]. 华北农业学报, 1999, **14**(4): 55-59.

YAO W S, SONG L Q, GUO H M, *et al.* Physiological index of summer corn high-yield cultivation[J]. *Acta Agriculturae Boreali- Sinica*, 1999, **14**(4): 55-59.

[30] 田晓莉, 杨培珠, 何钟佩, 等. 棉花根-冠关系的研究-根系伤流液及叶片中内源激素的变化[J]. 中国农业大学学报, 1999, **4**(5): 92-97.

TIAN X L, YANG P Z, HE Z P, *et al.* Changes of endogenous hormones in root exudates and leaf of cotton and the relation between root and growing stem[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1999, **4**(5): 92-97.

(编辑: 裴阿卫)