

水冷苗床对番茄幼苗生理的影响

李胜利*, 夏亚真, 孙治强

(河南农业大学园艺学院, 郑州 450002)

摘 要: 为探明水冷苗床促进番茄幼苗健壮生长的机理, 以‘粉都 77’番茄为材料, 调查了水冷苗床和常规苗床下番茄幼苗根系形态、养分吸收及生理生化指标。结果表明: 水冷苗床提高了幼苗根系的吸收面积、根系活力(茎流速率和根系呼吸速率)和养分吸收能力。水冷苗床番茄幼苗地上部 N、Ca 和 Mg 含量显著高于对照, 而根系 P、Ca 和 Mg 含量显著低于对照。根际降温措施不仅提高了番茄幼苗根系抗氧化能力, 也显著提高了幼苗的抗氧化能力。水冷苗床作为一种新的根际降温方式, 可以缓解夏季高温对番茄幼苗生长的不利影响。

关键词: 番茄; 幼苗; 根际降温; 生理机能

中图分类号: S 641.2

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2014) 07-1461-06

Effects of Root-zone Cooling Bed with Cold Water on the Physiological Mechanism of Tomato Seedling

LI Sheng-li*, XIA Ya-zhen, and SUN Zhi-qiang

(College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to explore the physiological and biochemical mechanism of tomato seedling growth promoted by root-zone cooling, tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings were cultivated in cooling bed and non-cooling bed as control. Plant root morphological traits, nutrient uptake and physiological characteristics of tomato seedlings were tested. The results showed as follows: Root surface area, root activity (sap flow velocity and root respiration rate) and nutrient uptake of tomato seedlings were improved significantly. Compared with the control bed treatment, shoot N, Ca and Mg contents of tomato seedling in cooling bed were significantly higher, but root P, Ca and Mg contents were lower. Antioxidant ability both in root and leaf of tomato seedling were promoted by root-zone cooling. This study indicated that root-zone cooling by cooling bed with cold water could alleviate high air temperature injury for intensive seedling production in summer.

Key words: tomato; seedling; root-zone cooling; physiological mechanism

植物根系的代谢直接影响地上部的生长, 过高的根际温度比高温对植物的影响更大 (Moon et al., 2007a; Tahir et al., 2008; 宋敏丽 等, 2010)。由于生长空间的限制, 集约化育苗方式下番茄幼苗更容易遭受逆境胁迫 (Allen & Ort, 2001; Duman & Duzyaman, 2005)。夏季设施常用的降温

收稿日期: 2014 - 03 - 26; 修回日期: 2014 - 06 - 12

基金项目: 河南省大宗蔬菜产业技术体系专项 (S2010-03-03); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-25-C06)

* E-mail: lslhc@yeah.net

方法有热交换器 (Gelder et al., 2005)、湿帘风机和喷雾降温系统 (Dannehl et al., 2012) 等。这些方式运行成本太高, 在高湿环境下效果较差, 对根际降温效果不明显。近些年根际降温作为一种有效的降温方式逐渐被认识。Nkansah 和 Ito (1995) 的研究表明, 当番茄根系温度降低到 25 °C 时, 与没有降温的植株相比, 叶面积和株高均有增加, 产量也有提高, Moon 等 (2007b) 在黄瓜上也得到了相同的结果。He 等 (2001)、Hidaka 等 (2008)、Yudi 和 Yuki (2012) 报道, 在高气温下通过降低根际温度可以提高叶菜的产量和品质。Kawasaki 等 (2013) 报道, 根系降温可以改善番茄的根系结构, 增强根系吸收能力。在降温技术研究方面, Yasuba 等 (2006) 通过在土壤中埋设通气的多孔管道来降低根际温度, 以此提高夏季茼蒿的品质。上述研究在实验室控温条件下证明了根际降温的有效性。但在集约化育苗方式下, 根际降温对幼苗生长影响的研究则少见报道, 另外低耗能的根际降温技术的信息也很有限。作者根据番茄集约化育苗使用穴盘的特点, 设计了一种水冷式育苗床, 以冷水作为降温媒介, 采用梯形排管作为冷却管道, 在前期的研究表明, 与对照苗床相比, 水冷苗床日均温降低了 4.5 °C, 番茄幼苗壮苗指数提高了 34.9% (李胜利 等, 2014)。本试验在前期的基础上, 进一步研究了水冷苗床对番茄幼苗根系形态、养分吸收及生理生化指标的影响, 以此阐明水冷苗床促进幼苗生长的机理。

1 材料与方法

1.1 材料、水冷苗床的结构及降温效果

供试番茄 (*Solanum lycopersicon*) 品种为 ‘粉都 77’, 由河南豫艺种业公司提供。试验于 2013 年 6 月至 8 月在河南农业大学科教园区育苗温室内进行, 温室内设 4 排移动式钢架育苗床, 每个苗床宽 1.6 m, 长 50 m, 高 1 m。选中间的 2 个作为试验苗床, 每 15 m 作为一个小区, 共设置 6 个小区, 其中 3 个作为水冷苗床, 3 个为常温对照苗床, 随机排列。每个小区面积 24 m², 摆放 72 孔穴盘 125 个。对照苗床按照常规育苗方法, 穴盘直接放在钢架苗床上。

水冷苗床直接铺设在钢架苗床上, 由进水管、冷水管、回水管、单向控制阀等组成。冷水管采用梯形排管以增大与穴盘的接触面积, 冷水管在钢架苗床东西间隔 5 cm 摆放, 梯形管两端分别并连接在进水管和出水管上, 连接处均由阀门控制。低温井水在冷水管中循环, 吸收穴盘中的热量从而降低幼苗根际温度。采用 72 孔黑色方形孔穴盘 (54 cm × 28 cm), 穴盘厚度 1.0 mm, 高度 5 cm, 穴盘直接卡在冷水管道上 (李胜利 等, 2014)。采用地下约 50 m 深的井水作为冷源, 井水先注入到贮水罐 (5 t), 然后通过地下管道进入水冷苗床, 经出水管流回井中, 水流流速为 2.0 m³ · h⁻¹。

育苗期间, 温室内平均气温为 31.5 °C, 平均最高气温 40.2 °C, 平均最低气温 24.5 °C。水冷苗床番茄幼苗根际日平均温度、白天平均温度和夜间平均温度范围分别为 21.5 ~ 26.1、23.5 ~ 28.6 和 19.5 ~ 23.5 °C; 对照苗床分别为 25.2 ~ 29.9、26.7 ~ 35.0 和 21.2 ~ 26.5 °C。水冷苗床和对照苗床日均温平均值分别为 24.0 °C 和 28.0 °C。

1.2 测试内容及测定方法

1.2.1 幼苗根系形态

在幼苗出土后 30 d, 每处理选取 6 株用蒸馏水洗净根系表面基质, 用根系扫描仪 (Epson perfection 4990 Photo) 进行扫描, 采用根系形态学和结构分析应用系统 (Winrhizo 2012b 软件) 分析根系总长度、根系表面积、根系直径及根系体积。

1.2.2 幼苗矿质元素

在番茄幼苗 5 片真叶时, 每个处理随机取 6 株, 将植株分解为地上部和地下部烘干, 称量干物

质量后粉碎，过筛（网孔直径为 0.28 mm）。采用水杨酸钠—次氯酸钠比色法测定 N 含量，采用钒钼黄比色法测定 P 含量，采用 TAS-986 原子吸收分光光度计法测定 K、Ca 和 Mg 的含量。

1.2.3 幼苗茎流速率、根系呼吸速率和叶片水势

2013 年 7 月 11 日（晴天，幼苗五叶一心），每个处理选择有代表性的 6 株幼苗进行测试。

茎流速率：利用包裹式茎流计（Flow32, Dynamax, USA）从 08:00—16:00 测定茎流速率，采集间期为 10 min，取测试期间的平均值。

根系呼吸速率：将根系切成 3 mm 长的片段，浸入到 20 mmol·L⁻¹（pH 6.8）磷酸钾缓冲液，在室温下用 Clark 型氧电极测定其呼吸耗氧速率，呼吸参数的测定和计算参照 Kawasaki 等（2013）的方法，呼吸速率以每克根系（鲜质量）每 1 h 内消耗氧的纳摩尔数表示 nmol·g⁻¹·h⁻¹。

叶片水势：用露点水势仪（WP4, USA）测定叶片水势，测定时选取番茄幼苗最上部展开叶测定，从早上 08:00—16:00 每 2 h 测定 1 次，取测试期间的平均值。

1.2.4 幼苗叶片及根系 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量

2013 年 7 月 10 日（晴天，幼苗 5 叶 1 心），育苗温室内 11:00—15:00 的平均气温为 39.2 °C，水冷苗床平均根际温度 24.8 °C，对照苗床平均根际温度 30.2 °C，在这一阶段气温达到了高温胁迫的程度。在 15:00 每个处理选取 9 株，取第 3、4 片真叶和根系进行测试。丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法，超氧化物歧化酶（SOD）活性采用 NBT 法（以抑制 NBT 光化学还原的 50% 的酶量为 1 个酶活性单位），过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法（以每 min OD₄₇₀ 变化 0.1 为 1 个酶活单位），过氧化氢酶（CAT）活性采用过氧化氢法测定。

1.3 数据分析方法

采用 DPS7.05 和 Microsoft Excel 2003 处理数据，利用 DPS7.05 进行统计分析，利用 Microsoft Excel 2003 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 水冷苗床对番茄幼苗根系形态的影响

水冷苗床根际降温促进了幼苗根系的生长，根系总长、根系表面积和根系体积分别比对照提高了 19.6%、52.6% 和 17.0%，但根系平均直径与对照无显著差异（表 1）。单位根系体积的根系表面积（RSA/RV）是反映根系根毛发育的一个指标，其值越高表明单位根群有更多的表面积，根系根毛发育良好。水冷苗床根际降温处理的番茄幼苗 RSA/RV 值为 0.089，是对照的 1.25 倍。

表 1 根际降温对番茄幼苗根系形态的影响
Table 1 Effects of root-zone cooling on root morphological traits of tomato seedlings

| 处理 Treatment | 根系总长/cm Total length of root | 根系表面积/cm ² Root surface area | 根系体积/mm ³ Root volume | 根系平均直径/mm Average diameter of root | 根系表面积/根系体积 RSA/RV |
|---------------------|---------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 水冷苗床 Cooling bed | 45.23 ± 4.12 a | 7.66 ± 0.38 a | 82.36 ± 9.72 a | 0.57 ± 0.05 a | 0.093 ± 0.008 a |
| 对照苗床 Control bed | 37.83 ± 3.28 b | 5.02 ± 0.34 b | 70.40 ± 7.56 b | 0.53 ± 0.04 a | 0.071 ± 0.005 b |

注：同列数字小写字母相同表示在 $P < 0.05$ 水平上不存在显著性差异。

Note: Values within a column followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by t -test ($n = 6$).

2.2 水冷苗床对番茄幼苗矿质元素吸收的影响

测试了番茄幼苗茎叶和根系的矿质元素含量 (图 1), 根际降温处理的幼苗地上部 N、Ca 和 Mg 的含量均高于对照, 地下部 N 和 K 元素与对照无显著差异, 而 P、Ca 和 Mg 则显著低于对照。每株番茄吸收的总养分量由每株的元素含量乘以每株的干质量得到, 根际降温极大提高了高温下幼苗对养分的吸收能力, 除 K 元素与对照差异不显著外, 其余 4 种元素的总吸收量都显著高于对照 (图 2)。

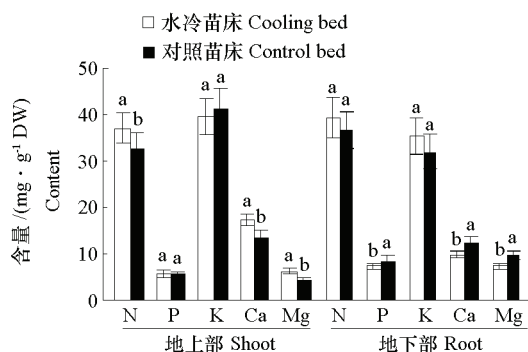


图 1 水冷根际降温苗床对番茄幼苗营养元素含量的影响
Fig. 1 Effects of root-zone cooling on nutrient content

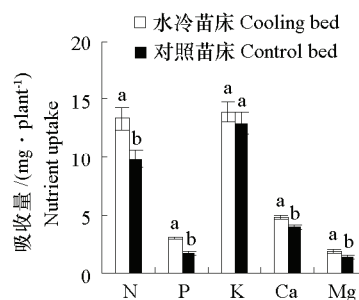


图 2 水冷根际降温苗床对番茄幼苗营养元素吸收的影响
Fig. 2 Effects of root-zone cooling on total nutrient uptake

2.3 水冷苗床对番茄幼苗生理活性的影响

在番茄幼苗 5 片真叶期选择晴天 (8—16 时, 水冷苗床平均根际温度 26.0 °C, 对照苗床 32.4 °C, 育苗室日均气温 34.9 °C, 最高气温 42.5 °C), 测试此期间幼苗的根系呼吸速率、茎流速率和叶片水势的日变化, 从图 3 可以看出, 水冷苗床根系的平均呼吸速率、茎流速率分别为对照的 1.26 倍和 1.35 倍, 而对照苗床幼苗叶片水势比水冷苗床降低了 35.9%, 表明其叶片水分状况较差。

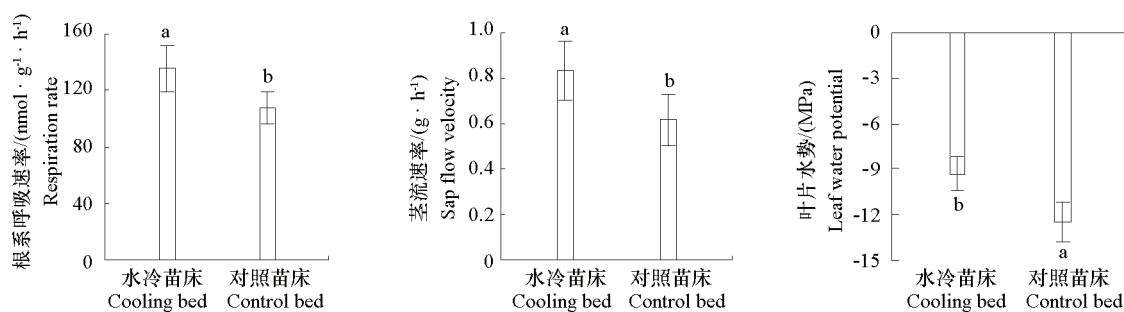


图 3 水冷苗床与对照苗床番茄幼苗生理指标
Fig. 3 Physiological characteristics of tomato seedlings in root-zone cooling bed and control bed

2.4 水冷苗床对番茄幼苗叶片和根系抗氧化酶活性的影响

如图 4 显示, 与对照相比, 根际降温显著提高了番茄幼苗根系 SOD、POD、CAT 活性, 降低了 MDA 含量, 避免了细胞膜的膜脂过氧化, 达到维持根系细胞正常活动的目的。同样的趋势, 根际降温处理番茄幼苗叶片 SOD、POD、CAT 活性比对照依次提高了 17.9%、40.8%和 18.1%, MDA 含量降低了 28.4%, 表明根系降温可减轻高温胁迫下幼苗叶片膜脂过氧化反应的发生, 有效缓解高温

胁迫对幼苗叶片造成的伤害。

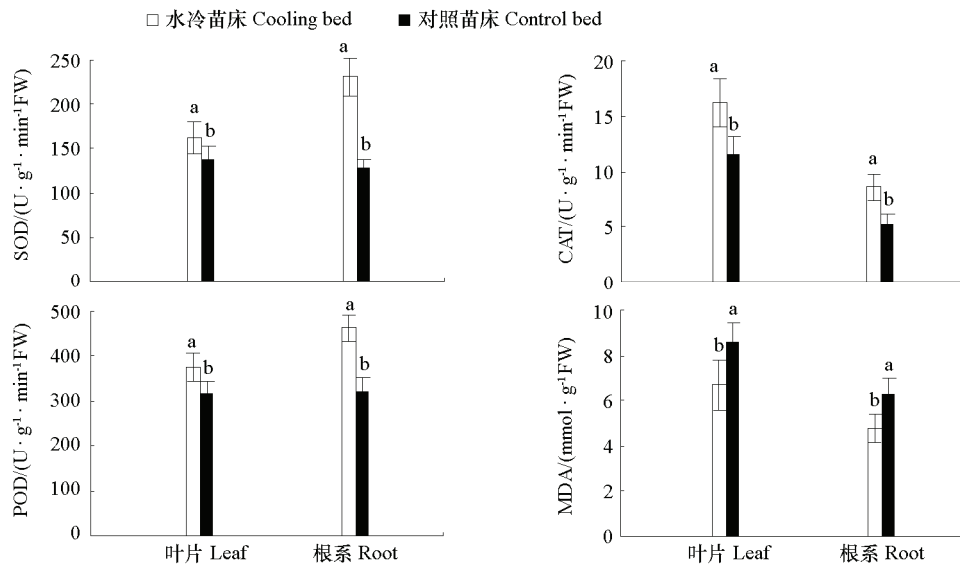


图4 根际降温对番茄幼苗叶片和根系 SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of root-zone cooling on SOD, CAT, POD activities and MDA content in leaves and roots of tomato seedlings

3 讨论

番茄幼苗根系最适生长温度为 $20 \sim 25^{\circ}C$ (Kawasaki et al., 2013), 当气温超过 $30^{\circ}C$ 时幼苗光合作和相对生长速率显著降低 (Gent, 1986; Nkansah & Ito, 1995)。育苗期间温室内平均气温为 $31.5^{\circ}C$, 这个温度足以对番茄幼苗生长造成影响。育苗期内水冷苗床平均根际温度为 $24.0^{\circ}C$, 基本处于根系适宜生长温度范围内, 而对照苗床平均温度为 $28.0^{\circ}C$ 。水冷苗床保证了高气温下番茄幼苗适宜的根系生长温度。高气温下根际降温对番茄幼苗的直接影响是促进了根系的生长 (Fujishige et al., 1991)。

茎流速率和根系呼吸速率是反映根系活力的重要指标 (Yamaguchi & Tsuno, 1995), 水冷苗床处理提高了番茄幼苗茎流速率和根系呼吸速率, 这表明高气温下通过根际降温措施可以提高番茄幼苗对水分和营养的输送能力 (Klock et al., 1997)。研究发现水冷苗床番茄幼苗茎叶 Ca 和 Mg 含量显著高于对照, 而根系 Ca 和 Mg 的含量显著低于对照, 根系和茎叶中 Ca、Mg 完全相反的结果揭示了随着根系活力的增强植株运输 Ca、Mg 的能力得到了提高 (Kawasaki et al., 2013)。Xu 和 Huang (2000) 研究认为在根际温度为 $35^{\circ}C$ 时, 冷季性草对 K 素的吸收显著降低, 而本试验中水冷苗床与对照苗床番茄幼苗 K 素的含量无显著差异, 这可能是与两者的试验温度范围有关, 本研究中对照苗床根际平均温度为 $28^{\circ}C$, 根际温度继续升高是否影响番茄幼苗对 K 素的吸收需要进一步研究。

水冷苗床根际降温措施在显著提高幼苗根系 SOD、POD 和 CAT 活性, 降低 MDA 含量的同时, 有效减轻了高气温下幼苗叶片的膜脂过氧化反应。这是由于水冷苗床番茄幼苗根系生长在适宜的温度范围内, 与对照苗床相比, 根系吸水正常, 疏导组织的导水力和气孔导度提高, 显著增强了蒸腾作用, 而叶温可以通过蒸腾冷却低于气温很多 (Moon et al., 2007b), 从而缓解了高气温下对番茄幼苗叶片的伤害。

本试验在冷水不间断循环下, 单位面积苗床每日的冷水循环量为 $2.0 m^3 \cdot m^{-2}$ (耗电量 $0.6 kWh$), 按照冷水循环期 35 d, 单位面积成苗量为 $350 株 \cdot m^{-2}$, 折算出每株番茄幼苗耗电量为 $0.06 kWh$,

大大低于湿帘风机的耗能量。但冷水苗床安装需要梯形冷水管和控制阀等部件,需要增加投入。随着管材的优选和配套管件实现批量生产,冷水苗床的建造成本会显著降低。另一方面,科学的冷水循环模式需进一步研究以提高水冷苗床温度的均匀性和降低能耗。

References

- Allen D J, Ort D R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends in Plant Science*, 6 (1): 36 - 42.
- Dannehl D, Huber C, Rocksch T, Huyskens-Keil S, Schmidt U. 2012. Interactions between changing climate conditions in a semi-closed greenhouse and plant development, fruit yield, and health-promoting plant compounds of tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 138: 235 - 243.
- Duman I, Duzyaman E. 2005. Growth control in processing tomato seedlings. *Acta Horticulturae*, 613: 95 - 102.
- Fujishige N, Sugiyama T, Ogata R. 1991. Effect of root temperature on the flower formation and fruit yield of tomatoes. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 60: 97 - 103.
- Gent M P. 1986. Carbohydrate level and growth of tomato plants II the effect of irradiance and temperature. *Plant Physiology*, 81 (4): 1075 - 1079.
- Gelder A de, Heuvelink E, Opdam J J G. 2005. Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouse. *Acta Horticulturae*, 691: 549 - 552.
- He J, Lee S K, Dodd I C. 2001. Limitations to photosynthesis of lettuce grown under tropical conditions: Alleviation by root-zone cooling. *Journal of Experimental Botany*, 52 (359): 1323 - 1330.
- Hidaka K, Yasutake D, Kitano M, Takahashi T, Sago Y, Ishikawa K, Kawano T. 2008. Production of high quality vegetable by applying low temperature stress to roots. *Acta Horticulturae*, 801: 1431 - 1436.
- Kawasaki Yasushi, Matsuo Satoshi, Suzuki Katsumi, Kanayama Yoshinori, Kanahama Koki. 2013. Root-zone cooling at high air temperatures enhances physiological activities and internal structures of roots in young tomato plants. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 82 (4): 322 - 327.
- Klock K A, Taber H G, Graves W R. 1997. Root respiration and phosphorus nutrition of tomato plants grown at 36 °C root-zone temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122 (2): 175 - 178.
- Li Sheng-li, Shi Xiao-dan, Xia Ya-zhen, Sun Zhi-qiang. 2014. Root-zone cooling effect of water-cooled seedling bed on growth of tomato seedling. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30 (7): 212 - 218. (in Chinese)
- 李胜利, 师晓丹, 夏亚真, 孙治强. 2014. 水冷式苗床根际降温效果及其对番茄幼苗生长的影响. *农业工程学报*, 30 (7): 212 - 218.
- Moon J H, Boo H O, Jang I O. 2007a. Effect of root-zone temperature on water relations and hormone contents in cucumber. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 48: 257 - 264.
- Moon J H, Kang Y K, Suh H D. 2007b. Effect of root-zone cooling on the growth and yield of cucumber at supraoptimal air temperature. *Acta Horticulturae*, 761: 271 - 274.
- Nkansah G O, Ito T. 1995. Effect of air and root-zone temperatures on physiological characteristics and yield of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 64 (3): 315 - 320.
- Song Min-li, Wen Xiang-zhen, Li Ya-ling. 2010. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 29 (11): 2258 - 2264. (in Chinese)
- 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 2010. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述. *生态学杂志*, 29 (11): 2258 - 2264.
- Tahir I, Nakata N, Yamaguchi T. 2008. Influence of high shoot and root-zone temperatures on growth of three wheat genotypes during early vegetative stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 94: 141 - 151.
- Xu Q Z, Huang B R. 2000. Effects of differential air and soil temperature on carbohydrate metabolism in creeping bentgrass. *Crop Science*, 40: 1368 - 1374.
- Yamaguchi T, Tsuno Y. 1995. Analysis of factors concerning bleeding rate from the basal part of stem in rice plants. *Journal of Japanese Crop Science*, 64: 703 - 708.
- Yasuba Ken-ichiro, Yashiro Mikio, Matsuo Kentaro. 2006. Effect of cooling the root zone with a duct of microporous film on the cultivation of spinach. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 75 (1): 109 - 115.
- Yudi Chadirin, Yuki Sago. 2012. Application of temperature stress to root zone of spinach. *Environment Control Biotechnology*, 50 (3): 199 - 207.