

水冷苗床不同时段根际降温对番茄幼苗生长的影响

李胜利, 张 涛, 孙治强

(河南农业大学园艺学院, 郑州 450002)

摘 要: 根际高温是影响夏季蔬菜集约化育苗主要障碍因子之一, 水冷苗床是根际降温的一种有效方式。为了科学利用水冷苗床这一根际降温装置, 该文以水冷苗床作为根际降温方式, 设置了 5 个不同的降温时段, 依次为 M1 (07:00—11:00)、M2 (11:00—15:00)、M3 (07:00—19:00)、M4 (19:00—07:00) 和 M5 (全天降温), 以根际不降温的苗床为对照。研究了水冷苗床不同时段根际降温效果及对番茄幼苗生长的影响。结果表明: 水冷苗床任一时段根际降温均降低了番茄幼苗根际日均温和最高温度, 其中处理 M3 (07:00—19:00) 和处理 M5 (全天降温) 降温效果最为显著, 番茄幼苗根际日均温分别为 23.6 和 22.6℃, 比对照苗床依次降低了 3.3 和 4.3℃。根际温度变化幅度受冷水循环时间及时段的影响, M4 (夜间降温) 处理番茄幼苗根际温度日变化曲线波动大于其他处理, 番茄幼苗根际温度日较差达到 10.3℃, 而 M3 (白天降温) 处理番茄幼苗根际温度日较差仅有 1.7℃。所有降温处理均提高了番茄幼苗干物质积累和单株叶面积, 其中 M5 (全天降温) 和 M3 (07:00—19:00) 这两个处理番茄幼苗单株干质量和叶面积均显著高于对照 ($P<0.05$)。与对照相比, M3 处理番茄幼苗的茎粗与壮苗指数分别增加了 35.1% 和 39.5%。所有根际降温处理增加了根系总长和根系表面积, 提高了叶片叶绿素含量和根系活力。从节能和培育壮苗的效果综合考虑, 水冷苗床 M3 (07:00—19:00) 白天降温是一种科学的降温方法。

关键词: 温度; 生长; 水; 根际降温; 不同时段; 番茄; 幼苗

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.027

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0192-05

李胜利, 张 涛, 孙治强. 水冷苗床不同时段根际降温对番茄幼苗生长的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 192—196. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.027 http://www.tcsae.org

Li Shengli, Zhang Tao, Sun Zhiqiang. Root-zone cooling effect of water-cooled seedling bed under different periods and its influences on growth of tomato seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 192—196. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.027 http://www.tcsae.org

0 引 言

番茄 (*Solanum Lycopersicon*) 是世界范围内主要的设施栽培作物, 也是中国设施栽培面积最大的蔬菜之一^[1]。番茄虽喜温, 但不耐高温, 适宜温度范围为 15~33℃^[2], 最适宜幼苗生长的根际温度为 20~25℃^[3]。研究表明在夏季番茄育苗时, 穴盘苗根系白天平均温度达 29.8℃, 最高温度达 35.6℃^[4]。根区高温导致幼苗质量下降, 进而影响幼苗的生长、花芽分化、坐果及果实发育, 最终影响产量和品质^[5-8]。许多研究表明, 过高的根区温度比高气温对植株的影响更大, 在协调植物对高气温、根区高温的胁迫中, 根系起着关键作用, 适宜、稳定的根区温度是植物根系生长和代谢的重要保证^[9-11]。设施温度的调控多关注气温^[12-13], 近些年根际温度的调控逐渐被重视^[14-16]。作者以地下井水为循环媒介, 设计了一种水冷式育苗床, 研究了水冷苗床对番茄穴盘苗根际降温效果和番茄幼苗生长的影响, 结果表明水冷式苗床番茄幼苗根际日均温和平均最高温分别比对照苗床降低了 4.5 和 6.5℃, 壮苗

指数比对照苗床提高了 34.9%^[17-18]。适温范围内温度的昼夜变化对番茄的物质积累、形态特征有显著影响^[19], 有研究表明, 平均气温 20℃时, 6℃左右的昼夜温差有利于番茄幼苗的营养生长^[20], 地温在一定程度上受气温昼夜变化的影响呈现小于气温的昼夜变化^[19], 而有关地温变化对番茄幼苗的影响则少见报道。本研究在前期试验的基础上, 对番茄幼苗进行不同时段冷水循环, 研究不同时段冷水循环的根际降温效果以及对根际温度变化的影响, 进一步探讨这种影响对番茄幼苗生长的效应, 从而为水冷苗床的科学应用提高理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014-06 至 2014-08 在河南农业大学郑州毛庄科教园区一育苗温室内进行, 供试番茄品种为豫艺种业公司提供的‘粉都宝石’, 采用 72 孔穴盘 (54 cm×28 cm)。根际降温采用水冷苗床, 苗床设计及布局参照李胜利等的设计方法^[17]。

1.2 试验设计

基于降低高温时段的根际温度以及探讨根际温度波动对番茄幼苗生长的影响, 并从节能的角度考虑, 试验设计了 5 个不同降温时段处理, 分别为: M1 (07:00—11:00)、M2 (11:00—15:00)、M3 (07:00—19:00)、

收稿日期: 2015-06-26 修订日期: 2015-08-26

基金项目: 河南省蔬菜产业技术体系项目 (S2010-03-03); 国家大宗蔬菜产业技术体系专项 (CARS-25-C06)

作者简介: 李胜利, 男, 河南洛阳人, 副教授, 博士, 主要从事集约化育苗方面研究。郑州 河南农业大学园艺学院, 450002。Email: lslhc@yeah.net

M4（19:00—07:00）、M5（全天降温），以不降温的作为对照，每个处理播种 25 个盘，重复 3 次。以深井水作为冷源，水经过降温苗床经出水管流回井中，每个处理采用单独的冷水循环系统，由定时器进行循环时段的控制，水流流速为 2.0 m³/h，对照 CK 穴盘直接摆放在苗床上，底部无降温装置。试验期内湿帘-风机处关闭状态，从播种后即开始进行根际降温。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 温度的测定

根据每个处理苗床长度和宽度均匀布设 9 个温度测点，采用 TRM-120 温度自动记录测试仪测定番茄幼苗根际温度，温度探头放置在穴孔 3 cm 深处，温度记录间隔时间 1 h。计算日均温、最高温、最低温、白天均温、夜间均温和昼夜温差，番茄幼苗根际温度的测定方法和数据处理参照李胜利的方法^[17]。

1.3.2 番茄幼苗生长及生理指标的测定

1) 幼苗生长指标的测定

番茄幼苗 4 片真叶时每个处理随机取 5 株用于生长指标的测定。株高和下胚轴长度采用直尺测量；茎粗采用游标卡尺测量；叶面积采用纸重法测定；幼苗干质量采用烘干称质量法测量；壮苗指数按照张振贤等的方法（壮苗指数=茎粗/株高×全株干质量）计算^[21]；另外每处理选取 5 株根系用蒸馏水洗净表面基质，然后用根系扫描仪（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。

2) 幼苗生理指标的测定

番茄幼苗 4 片真叶时每个处理随机取 5 株用于生理指标的测定。叶绿素选取第 4 片真叶，用 80% 丙酮提取测定；根系活力用 TTC 法测定。

1.4 数据处理与分析

数据采用 Microsoft excel 2003 软件进行绘图，利用 DPS7.05 进行统计分析，并运用 LSD 检验法对显著性差异（ $P<0.05$ ）进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同时段根际降温效果

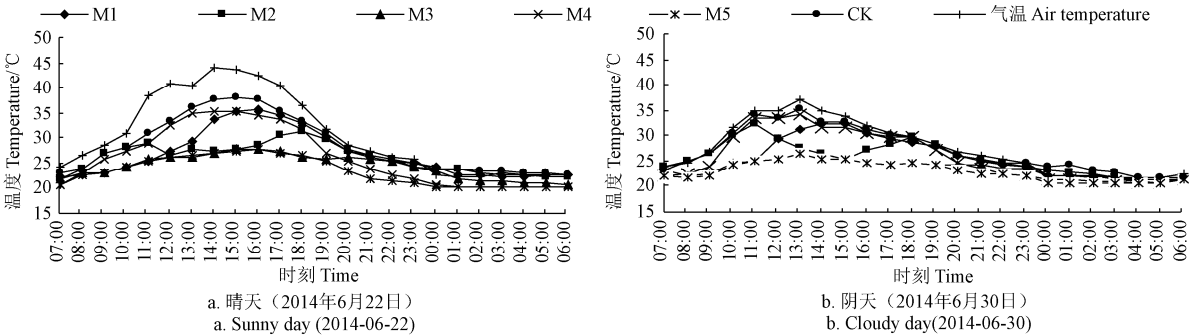
由表 1 可以看出，与对照相比，冷水循环的所有处理番茄幼苗根际温度均有一定程度的降低，降温效果受冷水循环时间的影响。其中 M3（07:00—19:00）和 M5（昼夜降温）这两个处理番茄幼苗根际日均温、白天均温和最高温度均显著低于对照。夜间降温的 M4 和昼夜降温处理 M5 番茄幼苗根际夜间均温分别为 20.8 和 20.7℃，同样显著低于其他处理和对照。所有处理根际温度的变化趋势与对照的变化趋势基本一致（图 1），但根际温度变化幅度受冷水循环时间的影响，M4（夜间根际降温）处理番茄幼苗根际温度日变化曲线波动大于对照，其他处理与对照苗床相比则较为平缓。M4 处理番茄幼苗根际温度昼夜温差达到 10.3℃，显著高于其他处理，M3 处理番茄幼苗根际温度昼夜温差在所有处理中最低，仅有 1.7℃。

表 1 不同时段降温处理番茄幼苗根际温度特征比较

Table 1 Comparison of root-zone temperature of tomato seedling among different treatments

处理 Treatment	日均温 Daily mean temperature	白天均温 Mean temperature in daytime	夜间均温 Mean temperature in night	昼夜温差 Diurnal temperature	最高温度 Daily maximum temperature	最低温度 Daily minimum temperature
M1	26.1a	29.5ab	22.8a	6.7c	34.3a	22.0a
M2	25.5a	28.2b	22.8a	5.4d	32.9a	22.0a
M3	23.6b	24.4c	22.7a	1.7f	26.4b	21.3a
M4	26.0a	31.1a	20.8b	10.3a	34.2a	21.1a
M5	22.6b	24.3c	20.7b	3.6e	26.0b	20.5a
CK	26.9a	31.1a	22.8a	8.3b	34.4a	22.1a
气温 Air temperature	28.7	34.1	23.4	10.7	39.0	22.8

注：同列大写字母不相同表示在 $P<0.01$ 水平上存在极显著性差异，小写字母为 $P<0.05$ 水平上差异显著，M1、M2、M3、M4、M5 和 CK 分别为降温时间上午 7 时至 11 时、上午 7 时至下午 3 时、上午 7 时至下午 7 时，下午 7 时至翌日 7 时、全天降温，下同。
Note: The different capital letters in the same column indicate extremely significant difference at the 0.01 probability level. The different small letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 probability level. M1, M2, M3, M4, M5 and CK indicate cooling duration from 7am to 11am, from 11am to 3pm, from 7am to 7pm, from 7pm to 7am next day and all day, the same as below.



注：M1、M2、M3、M4、M5 和 CK 分别为降温时间上午 7 时至 11 时、上午 7 时至下午 3 时、上午 7 时至下午 7 时，下午 7 时至翌日 7 时、全天降温，不降温，下同。
Note: M1, M2, M3, M4, M5 and CK indicate cooling duration from 7 am to 11 am, from 11 am to 3 pm, from 7 am to 7 pm, from 7 pm to 7 am next day, all day and no cooling, the same as below.

图 1 不同时段降温处理番茄幼苗根际温度日变化

Fig.1 Daily root-zone temperature changes of different periods of root-zone cooling

2.2 不同时段根际降温对番茄幼苗生长的影响

由表 2 可以看出, 根际降温所有处理的番茄幼苗营养生长均优于对照, 表明根际降温可以一定程度上提供给幼苗根系一个较适宜的生长环境, 从而促进幼苗地上部的生长。适宜的降温时段有利于幼苗的干物质积累和壮苗指数的提高, 昼夜降温处理 (M5) 的番茄幼苗单株干质量和叶面积均为最大, 其次为白天降温的处理 (M3)。幼苗茎粗与壮苗指数以 M3 处理最大。

表 2 不同时段根际降温对番茄幼苗生长的影响

Table 2 Effects of different periods of root-zone cooling on tomato seedling growth

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	单株干质量 Dry mass/g	叶面积 Leaf area/ cm ²	壮苗指数 Healthy index
M1	10.85d	3.61c	0.303d	40.39d	0.0101c
M2	12.80c	3.57c	0.400c	45.91c	0.0112b
M3	15.50b	4.16a	0.448b	67.37b	0.0120a
M4	12.75c	3.63c	0.407c	44.39c	0.0116ab
M5	17.15a	3.86b	0.521a	79.02a	0.0117ab
CK	11.55d	3.08d	0.322d	38.35d	0.0086d

2.3 不同时段根际降温对番茄幼苗根系的影响

由表 3 可知, 不同根际降温处理均促进了番茄幼苗根系的生长, 其中 M3 和 M5 处理番茄幼苗根系总长、根系平均直径、根系表面积和根系体积均显著高于对照。不同时段根际降温处理之间根系形态有差异, 白天降温

处理 (M3) 番茄幼苗根系表面积最大, 根系平均直径则以昼夜降温处理 (M5) 最大。综合来看, 处理 M3 和 M5 的幼苗根系在所有处理中表现最佳。

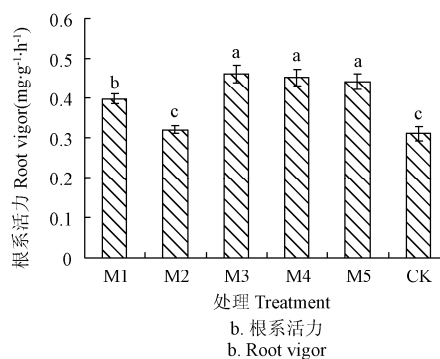
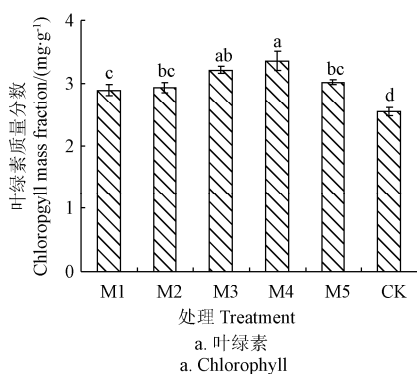
表 3 不同时段根际降温对番茄幼苗根系形态的影响

Table 3 Effects of different periods of root-zone cooling on root morphological traits of tomato seedlings

处理 Treatment	根系总长 Total length of root/(cm·m ⁻³)	根系平均直径 Average diameter of root/mm	根系表面积 Root surface area/cm ²	根系体积 Root volume/ cm ³
M1	203.93cd	0.38a	22.63c	0.26a
M2	194.05d	0.34b	23.45c	0.22b
M3	212.87c	0.33b	31.55a	0.25a
M4	315.25a	0.32b	22.28c	0.22b
M5	270.82b	0.39a	29.15b	0.24a
CK	188.68d	0.35b	19.75d	0.20c

2.4 不同时段根际降温对番茄幼苗生理特性的影响

叶绿素含量可作为反映植物光合作用的重要指标, 由图 2 可知, 与对照相比, 不同时段根际降温处理的叶绿素含量均显著增加, 其含量大小为 M4>M3>M5>M2>M1>CK, 处理 M4 的含量达到最大, 比对照提高了 32.28%, 且差异达显著水平; 根系活力反映根系吸收能力的重要指标, 由图 3 可知, 除处理 M2 与对照无显著差异外, 其他处理的根系活力都显著高于对照, 其中处理 M3 番茄幼苗根系活力最大, 比对照提高了 48.71%。



注: 不同小写字母表示各处理 0.05 水平上差异显著。

Note: The different small letters indicate significant difference at the 0.05 probability level.

图 2 不同时段根际降温对番茄幼苗叶绿素和根系活力的影响

Fig.2 Effects of different periods of root-zone cooling on chlorophyll and root vigor in tomato seedling

3 讨论

3.1 水冷苗床不同时段降温对番茄幼苗根际的降温效果

利用水冷苗床进行不同时段根际降温均降低了番茄穴盘苗根际温度, 根际降温效果取决于降温时段。其中昼夜降温的处理 (M5) 降温效果最好, 其次为白天降温的处理 (M3), 两者的幼苗根际日均温分别为 22.6℃和 23.6℃, 处于番茄幼苗根系生长的适宜温度范围^[3]。根际温度变化幅度受冷水循环时间的影响, M4 (19:00—07:00) 处理番茄幼苗根际温度日变化曲线在所有处理中波动最大, 而 M3 (07:00—19:00) 则为最小, 前者番茄幼苗根际温度昼夜温差达到 10.3℃, 而后者仅有 1.7℃, 这表明

白天根际降温有助于番茄幼苗根际温度的稳定。M1 (07:00—11:00) 和 M2 (11:00—15:00) 处理水冷循环时间均为 4 h, 但后者番茄幼苗根际日均温和昼夜温差均小于前者, 11:00 至 15:00 是一天中气温和根际温度最高的时段, 此时段水冷循环对根际温度具有“削峰”效应, 缩小昼夜温差。

3.2 水冷苗床不同时段降温对番茄幼苗生长及生理的影响

根际高温下, 番茄幼苗根系发育不良, 单位根群有更少的表面积, 同时根系活力降低^[19], 本试验中, M3 和 M5 两个处理番茄幼苗根系表面积、根系体积和根系总长均显著高于对照, 与前人的研究结论相一致^[3]。适宜的根

际温度保证了高气温下番茄幼苗根系的正常生长^[2], 提高了番茄幼苗对水分和营养的输送能力^[18], 保证了叶片正常的蒸腾作用, 而叶温可以通过蒸腾冷却低于气温很多^[4], 从而缓解了高气温下对番茄幼苗叶片的伤害, 保证了番茄幼苗正常的光合作用, 所有处理番茄幼苗的叶绿素含量和壮苗指数均显著高于对照验证了这一点。适宜、稳定的根际温度是植物根系生长和代谢的重要保证^[6], 根际温度的较大波动会引起生理功能的失调, 影响根系的吸收能力^[19], 本试验中 M3 处理不仅根际日均温在番茄幼苗生长适宜范围内, 根际温度日较差也最小, 保证了幼苗处于适宜稳定的根际环境中, 番茄幼苗壮苗指数在所有处理中表现最大。由于试验条件的限制, 没能详细研究根际日均温一致时, 根际温度昼夜温差对番茄幼苗生长的影响, 这一点需要进一步研究以探明适宜番茄幼苗生长的最适根际昼夜温差。

4 结 论

水冷苗床任一时段根际降温均降低了番茄幼苗根际日均温和最高温度, 其中白天降温 (07:00—19:00) 和全天降温效果最为显著, 番茄幼苗根际日均温分别为 23.6 和 22.6℃, 比对照苗床 (无降温措施) 依次降低了 3.3 和 4.3℃。所有降温处理均提高了番茄幼苗干物质积累和单株叶面积, 其中全天降温和白天降温 (07:00—19:00) 这两个处理番茄幼苗单株干质量和叶面积均显著高于对照 ($P<0.05$)。与对照相比, 白天降温 (07:00—19:00) 处理番茄幼苗的茎粗与壮苗指数分别增加了 35.1% 和 39.5%。从节能和培育壮苗的效果综合考虑, 水冷苗床 M3 (07:00—19:00) 白天降温是一种科学的降温方法。

【参 考 文 献】

- [1] 刘爱荣, 陈双臣, 王淼博, 等. 高温胁迫对番茄幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 145—148.
Liu Airong, Chen Shuangchen, Wang Miaobo, et al. Effects of heat stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in tomato seedlings[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(5): 145—148. (in Chinese with English abstract)
- [2] 任志雨. 根区温度对番茄生长和产量的影响[J]. 天津农业科学, 2006, 12(3): 15—16.
Ren Zhiyu. Effects of root zone temperature on growth and yield of tomato[J]. Tianjin Agricultural Science, 2006, 12(3): 15—16. (in Chinese with English abstract)
- [3] Kawasaki Y, Matsuo S, Suzuki K, et al. Root-zone cooling at high air temperatures enhances physiological activities and internal structures of roots in young tomato plants[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2013, 82(4): 322—327.
- [4] Moon J H, Boo H O, Jang I O. Effect of root-zone temperature on water relations and hormone contents in cucumber[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2007, 48: 257—264.
- [5] Camejo D, Rodriguez P, Morales M A, et al. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility[J]. Journal of Plant Physiology, 2005, 162(1): 281—289.
- [6] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2258—2264.
Song Minli, Wen Xiangzhen, Li Yaling. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review[J]. Chinese Journal of Ecology 2010, 29(11): 2258—2264. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wahid A, Gelani S, Ashraf M. Heat tolerance in plants: an overview[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61(3): 199—223.
- [8] Nkansah G O, Ito T. Effect of air and root-zone temperatures on physiological characteristics and yield of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato cultivars[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1995, 64(3): 315—320.
- [9] Xu Qingzhang, Huang Bingru. Effects of differential air and soil temperature on carbohydrate metabolism in creeping bentgrass[J]. Crop Science, 2000, 40: 1368—1374.
- [10] Allen D J, Ort D R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6(1): 36—42.
- [11] Duman I, Duzyaman E. Growth control in processing tomato seedlings[J]. Acta Horticulturae, 2005, 613: 95—102.
- [12] 王吉庆, 张百良. 几种降温措施在温室夏季降温中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 257—260.
Wang Jiqing, Zhang Bailiang. Application of some cooling measures for greenhouse cooling in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 257—260. (in Chinese with English abstract)
- [13] 柴立龙, 马承伟, 张晓慧, 等. 地源热泵温室降温系统的试验研究与性能分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 150—154.
Chai Lilong, Ma Chengwei, Zhang Xiaohui, et al. Experimental investigation and performance analysis on ground source heat pump system for greenhouse cooling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 150—154. (in Chinese with English abstract)
- [14] Moon J H, Kang Y K, Suh H D. Effect of root-zone cooling on the growth and yield of cucumber at supraoptimal air temperature[J]. Acta Horticulturae, 2007b, 761(3): 271—274.
- [15] Yasuba K, Yashiro M, Matsuo K. Effect of cooling the root zone with a duct of microporous film on the cultivation of spinach[J]. J. Japan. Soc. Hort. Sci., 2006, 75(1): 109—115.
- [16] Sasaki K T. Itagi. Effect of root cooling treatment of nutrient solution on growth and yield of tomato, cucumber and melon[J]. Environ. Control Biol., 1989, 27: 89—95.
- [17] 李胜利, 师晓丹, 夏亚真, 等. 水冷式苗床根际降温效果及其对番茄幼苗生长的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 212—218.
Li Shengli, Shi Xiaodan, Xia Yazhen, et al. Root-zone cooling effect of water-cooled seedling bed on growth of tomato seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 212 — 218. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李胜利, 夏亚真, 孙治强. 水冷苗床对番茄幼苗生理的影响[J]. 园艺学报, 2014, 41(7): 1461—1466.
- Li Shengli, Xia Yazhen, Sun Zhiqiang. Effects of root-zone cooling bed with cold water on the physiological mechanism of tomato seedling[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2014, 41(7): 1461—1466. (in Chinese with English abstract)
- [19] Gent M P N, Ma Y Z. Growth and mineral nutrition of tomato seedlings under diurnal temperature variation of the root and shoot[J]. Crop Science, 2000, 40: 1629—1636.
- [20] 毛丽萍, 李亚灵, 温祥珍, 等. 苗期昼夜温差对番茄产量形成因子的影响分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 172—177.
- Mao Liping, Li Yaling, Wen Xiangzhen, et al. Influencing analysis of diurnal temperature on yield-forming factors of tomato at seedling stage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 172—177. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张振贤, 程智慧. 高级蔬菜生理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.

Root-zone cooling effect of water-cooled seedling bed under different periods and its influences on growth of tomato seedling

Li Shengli, Zhang Tao, Sun Zhiqiang

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

Abstract: The growth and physiological metabolism of plant are greatly affected by root-zone temperature. The heat stress around root zone in hot summer is an important factor limiting the seedling growth. Compared with air temperature cooling, root-zone cooling is more economical and is an effective solution to alleviate high temperature stress. A new water-cooled seedling bed (WSD) has been proved to be an effective method to lower the root-zone temperature. In order to utilize WSD scientifically, 5 different root-zone cooling periods were designed using the WSD device for root-zone cooling of tomato (*Solanum lycopersicum*) seedling. The 5 different root-zone cooling periods were as follows: M1 (cooling from 7:00 to 11:00), M2 (cooling from 11:00 to 15:00), M3 (cooling from 7:00 to 19:00), M4 (cooling from 19:00 to 7:00) and M5 (cooling all day). Non-cooling seedling bed was used as control. The objective of this study was to investigate the cooling effect of the WSD under 5 different root-zone cooling periods and its effect on the growth of tomato seedling. The root-zone temperature, seedling growth, root morphological traits and physiological characteristics of tomato seedling were tested. The results showed as follows: The root-zone daily mean temperature and daily maximum temperature of tomato seedlings under 5 cooling periods of the WSD were all lower than those under the non-cooled seedling bed (CK) during tomato seedling period. The cooling effect of the WSD was significantly ($P<0.05$) correlated with cooling duration and cooling period. Compared with cooling during night, mean temperature in the daytime, daily mean temperature and maximum temperature for the treatments cooling during the day time were lowered significantly ($P<0.05$). Compared with other treatments, the treatment M3 (cooling from 7:00 to 19:00) and M5 (cooling all day) got the best cooling effects. The daily mean root-zone temperatures of tomato seedlings under M3 and M5 were 23.6 and 22.6°C respectively, which were lowered by 3.3 and 4.3°C respectively compared with CK during tomato seedling period. The daily variation of root-zone temperature of tomato seedlings was affected also by cooling duration and cooling period. Root-zone temperature of treatments cooling during the day time showed a small variation, while root-zone temperature of treatments cooling during the night got a big fluctuation. The daily variation of root-zone temperature under M4 was maximum among all treatments and its diurnal temperature range reached 10.3°C. In contrary, the daily variation of root-zone temperature under M3 was minimum among all treatments and its diurnal temperature range was only 1.7°C. Dry mass and leaf area per plant of tomato seedling in 5 treatments were enhanced significantly, of which the differences of the 2 growth indices between M3, M5 and CK reached significant level ($P<0.05$). Tomato seedling stem diameter and healthy index under the M3 treatment were improved by 35.1% and 39.5% respectively compared with the CK treatment. Total length of root, root surface area, chlorophyll content and root activity were all improved in the 5 treatments. Considering the factors such as energy conservation and strong seedling culturing, root zone cooling from 7:00 to 19:00 (M3) is an effective way for the scientific utilization of water-cooled seedling bed.

Key words: temperature; growth; water; root-zone cooling; different period; tomato; seedling