孙茜,徐凡,王湛,等.番茄苗期根际加温对其生长及水分吸收的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(3):59-65.
Sun Q, Xu F, Wang Z, et al. Effects of root zone heating on growth and water consumption of tomato seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(3):59-65.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202311004

番茄苗期根际加温对其生长及水分吸收的影响

孙茜[1,3],徐凡[1*],王湛[1],郭文忠[1],王朝军[1,2],李灵芝[2]

(1.北京市农林科学院 智能装备技术研究中心,北京,100097;2.山西农业大学 园艺学院,山西 晋中,030801;
3.神农富通(山西)农业规划设计研究有限公司,山西 太原,030000)

摘　要:[目的]本文旨在明确适宜的番茄根际加温温度,为北方早春玻璃温室中番茄苗期根际温度调控提供理论和方法依据,缓解低温环境对番茄生长的危害。[方法]在玻璃温室高架岩棉栽培条件下,采用控温加热带对番茄根际进行加温,并设置3个处理即根际不加温(CK)、根际加温至20 ℃(T20)、根际加温至25 ℃(T25),研究不同根际加温条件对早春苗期番茄生长、光合、干物质积累和水分吸收等的影响。[结果]根际加温可显著促进番茄株高、茎粗、叶片数的增加,不同时期处理T20比CK株高提高13.6%～17.0%,茎粗提高10.3%～14.3%,叶片数增加3.4%～12.5%;处理T25比CK株高提高7.2%～9.7%,茎粗提高7.7%～15.6%,叶片数增加0%～15.6%;定植后10 d,番茄净光合速率随根际温度呈先升高后降低的趋势,定植后20 d和定植后30 d,番茄净光合速率随根际温度升高而升高;根际加温促进了番茄对水分的吸收,促进了番茄茎、叶干物质积累,提早开花时间,其中处理T20比CK地上部总干重增加79.3%～85.4%,开花提早5 d,处理T25比CK地上部总干重增加29.2%～72.4%,提早开花时间3 d。[结论]T20处理番茄株高和茎粗最大、积累干物质总量最多、开花时间最早,即20 ℃是早春苗期番茄较为适宜的根际加温温度。

关键词:番茄; 根际加温; 生长; 光合; 地上部干重
中图分类号:S641.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)03-0059-07

根是植株从外界吸收水分和养分的重要器官。根系的吸收能力受温度、光照强度、根区通气状况、根际盐度等多种因素的影响[1-2]。其中,根际低温会减少根系对O_2的吸收,抑制根系呼吸,影响植株根系生理代谢,降低植株对水分、养分的吸收和运输[3-4],使地上部养分缺乏、光合作用降低,导致作物生长受阻[5]。

研究表明,根际加温可以缓解根际低温对作物生长的影响。相较于传统设施空间加温,根际加温方式节能效果显著,也可显著提高作物产量、品质等[6-7]。崔佳维等[8]研究表明,采用营养液膜技术(NFT)间歇供液条件下,营养液加温可以促进生菜地上部生长和对矿质元素的吸收,提高生菜品质。岳焕芳等[9]研究表明,日光温室冬季加温灌溉,可提高草莓品质和产量。丛琳[10]研究表明,根际加温可以提前萱草始花期,并延长开花时间。孙世君等[11]研究表明,提高根际温度可以提高黄瓜幼苗光合相关酶活性,促进光合作用以及光合产物累积。袁丁等[12]研究表明,冬季日光温室番茄基质加温至22 ℃,可提高番茄产量、品质等。

番茄是设施栽培的主要蔬菜作物之一,随着现代种植技术水平的提升,可实现周年栽培,尤其在北方番茄设施栽培可获得较高的经济效益[13]。研究表明,20～22 ℃为番茄生长的最适根温范围,9～10 ℃使番茄根毛停止生长,5 ℃以下低温抑制番茄对水分和养分的吸收[14]。而在北方冬季或者早春设施蔬菜栽培中,经常会出现倒春寒等低温环境影响蔬菜生长,特别是高架栽培方式,其栽培

收稿日期:2023-11-02　　**修回日期**:2024-03-15
基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02023);北京市农林科学院青年科研基金项目(QNJJ202307);国家自然科学基金项目(31601794);农业物联网技术北京市工程实验室(PT2023-29)
作者简介:孙茜(ORCID:0009-0006-8910-2602),硕士,研究方向:蔬菜栽培与生理,E-mail:18404985155@163.com
*通信作者**:徐凡(ORCID:0009-0009-7849-055X),博士,正高级农艺师,研究方向:设施蔬菜营养液调控,E-mail:luckyfan@126.com

架暴露于空气中,导致根际温度随气温变化明显,夜间低温现象更为严重[12]。

国外关于根际温度对作物生长的研究较多,国内针对生菜、黄瓜、番茄等根际加温虽有研究,但未见有针对早春玻璃温室番茄栽培根际加温的研究。本研究主要探讨不同根际加温条件对番茄苗期生长、光合特性和耗水量等的影响,旨在为北方早春玻璃温室中番茄苗期根际温度的调控提供理论和方法依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试番茄为圣尼斯蔬菜种子有限公司生产的欧官品种,属中早熟无限生长型,成熟后为粉色果,适合北方保护地早春种植。

试验于2019年在北京市农林科学院智能装备技术研究中心多功能连栋玻璃温室内进行,单栋温室脊高6 m,南北长33 m,东西宽11.5 m。试验期间温室内空气温湿度如图1所示,前期温室内温度较低,随试验时间推移,室内最低气温和日平均气温随着时间推移呈波动式升高,最高气温在13.73～39.85 ℃之间变化,相对湿度随时间推移呈波动式下降。试验期间室内日平均气温为13.31 ℃,最低气温为6.32 ℃,最高气温为38.56 ℃,相对湿度为52.71%。温室内温湿度由HMP155A温湿度传感器(Campbell Scientific Inc,美国)测试并由CR1000数采仪记录。

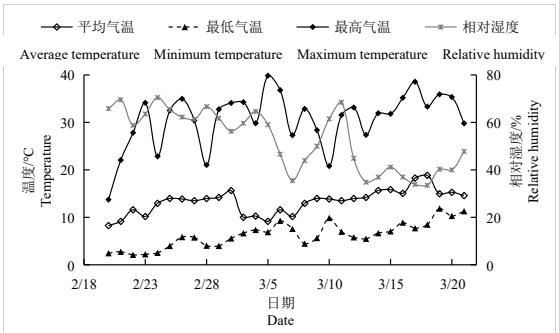


图1 试验期间温室内温度和湿度情况

Fig. 1 Temperature and relative humidity in solar greenhouse

1.2 试验设计

试验于2019年2月18日开始,在番茄六叶一心时,选取长势一致的番茄苗统一定植于岩棉条上,岩棉条选用进口Grodan岩棉(标准岩棉条尺寸为100 cm×20 cm×7.5 cm)。试验采用双孔定植,定植密度为3.75 株·m^{-2}。每处理设3次重复,每重复种植4株。定植前用EC值为1.5 mS·cm^{-1}的营养液浸泡岩棉,使岩棉充分浸透。营养液大中量元素为日本山崎番茄专用配方,微量元素为通用配方,详见表1。灌溉方式为滴灌,采用定时不定量灌溉,每天灌溉时段为9:00-17:00,灌溉间隔1 h,灌溉量通过定时器控制灌溉时长来调整,随着环境变化和植株的生长调控营养液的灌溉时长(即调整灌溉量),保证苗期番茄营养液回液量为灌溉量的15%～20%,以达到淋洗的作用。回液通过栽培槽底部的导流槽和回液导管排出收集,定植后缓苗10 d后,开始每天灌溉并收集测量根部回液量。

表1 营养液配方

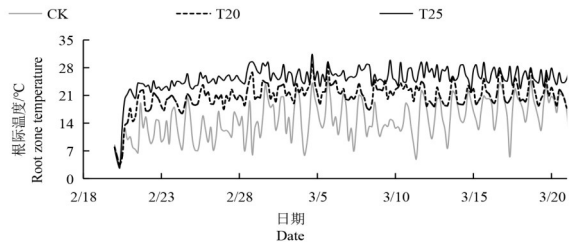
Table 1 Nutrition solution formulation

分类 Type	化学物质 Chemical substances	浓度/(mg·L^{-1}) Concentration
A液	$Ca(NO_3)_2·4H_2O$	354
	KNO_3	404
B液	$NH_4H_2PO_4$	77
	$MgSO_4·7H_2O$	246
C液	EDTA－2NaFe	25
	H_3BO_3	2.86
	$MnSO_4·4H_2O$	2.13
	$ZnSO_4·7H_2O$	0.22
	$CuSO_4·5H_2O$	0.08
	$(NH_4)Mo_7O_24·4H_2O$	0.02

每处理定株观察番茄的生长情况。定植后开始根际加温处理,由时间温度控制器控制电加热带的加热时间,当根际温度低于设定温度时即开始加热,达到或者超过设定温度后停止加热。番茄苗期根系生长的平均适温范围为20～22 ℃,结合温室环境和能耗等实际情况,本试验共设计3个处理,其中1个为根际无加温对照处理(CK),另2个为根际加温处理,加热温度分别为(20±2) ℃(T20)和(25±2) ℃(T25)。3月21日加温结束,共计加温时间29 d。根际温度由热电偶线测量,由CR1000数采仪采集并记录。

1.3 测定指标与方法

植株形态的指标:每处理选择3株番茄进行定株观测,每7 d测量1次番茄植株的株高、茎粗。株



CK为根际无加温,T20为根际加温20 ℃,T25为根际加温25 ℃

CK: no root zone heating; T20: root zone heating at 20 ℃; T25: root zone heating at 25 ℃

图2　试验期间不同处理根际温度变化情况

Fig. 2　Variation of root zone temperature in different treatments

高用直尺测量,为岩棉块上表面至生长点的距离,茎粗为茎基部子叶处直径,用游标卡尺测量。

光合指标的测定:定植后每隔10 d于上午11:00-12:00测定光合指标,包括净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)和胞间CO_2浓度(Ci),用CIRAS-3便携式植物光合仪测定,叶片选择从上部数第5片完全展开叶。每株测3次,每处理测3株植株。

耗水量、干重测定:番茄缓苗后,每天测定番茄的灌溉量和回液量,以此计算植株日耗水量。在定植时、定植后14 d和定植后28 d,各处理分别随机选取番茄3株,将茎、叶分开,在105 ℃杀青30 min后,于85 ℃烘干至恒重,分别称茎、叶干重。

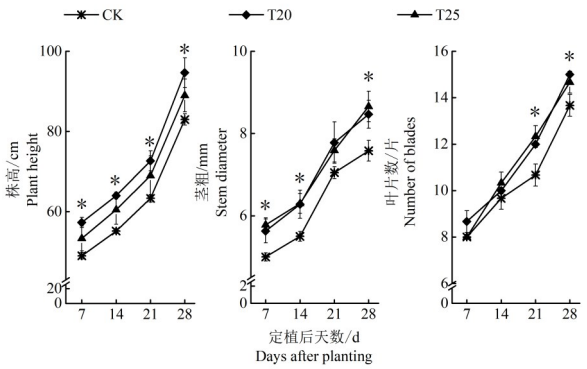
1.4　数据处理与分析

采用Duncan多重比较法分析差异显著性。运用Excel 2010进行数据计算,用SPSS 22软件进行数据统计分析,用Excel 2010和Origin 2016作图。

2　结果与分析

2.1　不同根际加温后番茄苗期生长特征

图3为不同处理株高、茎粗和叶片数随定植时间的变化情况。由图3可知,各处理株高、茎粗和叶片数均随定植时间的延长而逐渐升高。在定植后7～21 d株高增长缓慢,21 d后增长迅速。在各测量时期,株高均表现为T20最高,T25次之,CK最低,T20与T25各测量时期株高无明显差异,T20株高比CK高14.1%～17.0%,差异显著。T25与CK相比,株高无明显差异(除第14 d外)。各处理茎粗与株高的变化趋势不同。各处理茎粗表现为慢-快-慢的增长趋势。在定植后14～21 d增长速率最快。在各测量时期,T20与T25茎粗无明显差异,但均显著高于CK(除第21 d外)。各处理叶片数在定植前14 d无明显差异,在定植14 d后,差异开始显现,在定植后21 d和28 d,T20比CK叶片数各增加1.33片,差异显著,T25比CK分别增加1.67片和1.00片,差异显著,T20与T25之间叶片数无明显差异。可见根际加温可以促进苗期番茄株高和茎粗的增长,促进叶片分化与生长,且效果显著。



CK为根际无加温,T20为根际加温20 ℃,T25为根际加温25 ℃。*表示差异显著($P<0.05$)

CK: no root zone heating; T20: root zone heating at 20 ℃; T25: root zone heating at 25 ℃. * indicated significantly differences at $P<0.05$

图3　不同根际温度对番茄苗期生长的影响

Fig. 3　Effect of different root zone temperatures on the growth of tomato seedlings

2.2　不同根际加温后番茄苗期光合特性

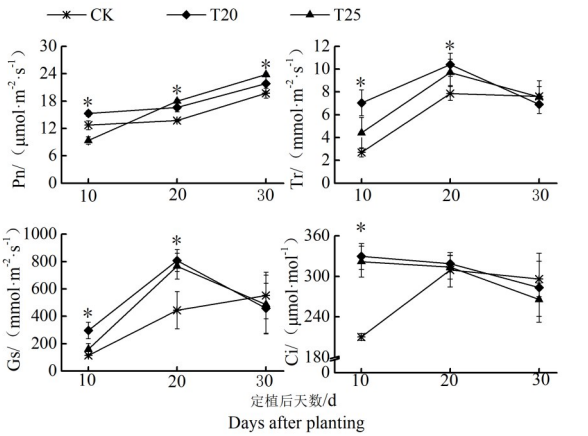
从图4可以看出,提高根际温度对番茄苗期光合特性参数产生影响。定植后10 d,T20叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO_2浓度均为最高,显著高于其它2个处理(T25胞间CO_2浓度除外);T25处理由于光合速率低,消耗的CO_2少,因此胞间CO_2浓度较高,而CK光合速率居中,但其气孔导度小,进入细胞的CO_2少,消耗大,因此胞间CO_2浓度最低。定植后20 d,T20和T25叶片净光合速率分别比CK高20.6%和32.0%,差异显著,T20与T25之间无明显差异;T20叶片蒸腾速率和气孔导度最高,分别比CK高32.0%和81.5%,差异显著,T20与T25之间无明显差异;T25叶片蒸腾速率与CK无明显差异,但叶片气孔导度显著高于CK;胞间CO_2浓度在定植20 d后各处理间无明显差异。定植后30 d,根际加温结束,

气温回升,叶片净光合速率变化规律同定植后20 d相似,T20和T25叶片净光合速率显著高于CK,但前二者之间无明显差异。各处理叶片蒸腾速率、气孔导度和胞间CO_2浓度均无明显差异。可见根际加温总体上提高了番茄叶片净光合速率,促进叶片气孔开放,提高叶片气孔导度,提高了蒸腾速率。气温回升后,处理结束,除光合作用仍有差异外,其它3项指标差异均不显著。

2.3 不同根际加温后番茄苗期干重和开花特性

由表2可以看出,定植后14 d和定植后28 d各处理茎、叶干重均明显增加。相同时间段内,T20番茄植株茎、叶干重均为最大,在定植后14 d和28 d均显著高于CK。说明根际适当加温可以促进番茄植株养分吸收,促进干物质积累。

各处理开花时间明显不同,T20第一穗花开花时间为3月15日,开花时间最早,T25开花时间推迟了3 d,CK第一穗花开花时间最迟,为3月20日,比T20开花延迟5 d。说明苗期根际加温可以促进番茄提早开花时间,以根际加温20 ℃效果最显著。



CK为根际无加温,T20为根际加温20 ℃,T25为根际加温25 ℃。*表示差异显著($P<0.05$)

CK: no root zone heating; T20: root zone heating at 20 ℃; T25: root zone heating at 25 ℃. * indicated significantly differences at $P<0.05$

图4 不同根际温度对番茄苗期光合的影响

Fig. 4 Effects of different root zone temperatures on the photosynthetic characteristics of tomato seedlings

表2 不同根际温度对番茄苗期干重的影响

Table 2 Effects of different root zone temperatures on dry matter weight of tomato seedlings **单位:g**

处理 Treatments	定植后0 d 0 d after planting		定植后14 d 14 d after planting		定植后28 d 28 d after planting	
	茎/g Stem	叶/g Leaf	茎/g Stem	叶/g Leaf	茎/g Stem	叶/g Leaf
CK	0.53±0.02a	1.26±0.03a	2.19±0.18b	4.88±0.33b	3.26±0.21b	8.91±0.91b
T20	0.55±0.03a	1.26±0.03a	3.49±0.21a	9.19±0.75a	5.86±0.69a	16.70±0.98a
T25	0.55±0.01a	1.25±0.02a	2.26±0.16b	5.60b±0.89	4.92±0.83ab	16.06a±3.15

注:同列小写字母不同表示在0.05水平上差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated statistically differences among treatments ($P<0.05$)

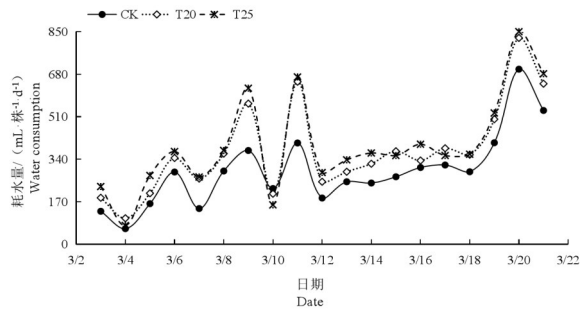
2.4 不同根际加温后番茄苗期日耗水量变化特征

图5为不同根际加温处理番茄日耗水量变化,可以看出各处理番茄日耗水量随定植时间延长逐渐增加。一方面是由于番茄生长,植株本身需水量的增加,另一方面由于天气逐渐变暖,气温升高,辐射增加,番茄蒸腾作用加大。气温对番茄耗水影响较为明显,3月6日、3月10日和3月19日气温升高,蒸腾增大,各处理番茄耗水量明显增加。T20和T25平均日耗水量分别为376.67 mL和398.05 mL,明显高于CK(日平均耗水量294.21 mL)。说明根际加温可以促进苗期番茄幼苗对水分的吸收。

3 讨论

根系的生长情况直接影响植株对水分和养分的吸收。根际低温下,呼吸作用减弱,根系活力降低,根系生长缓慢[15]。本研究中,未加温条件下,早春实测最低根际温度仅为4.9 ℃,而采用时间温度控制器控制电加热带加温后,控制效果良好,明显提高了根际温度。

蒸腾作用是根系吸收水分和养分的动力。根际低温影响番茄对水分和养分吸收的原因主要在于:(1)根际低温环境,影响根系细胞膜结构,束缚水增多,对水的粘性增大,水分的传导速率减小,限制了根系对水分的吸收[16];(2)根际低温条件,



CK为根际无加温,T20为根际加温20 ℃,T25为根际加温25 ℃

CK: no root zone heating; T20: root zone heating at 20 ℃; T25: root zone heating at 25 ℃

图5　不同根际温度对番茄苗期日耗水量的影响

Fig. 5　Effects of different root zone temperatures on water consumption of tomato seedlings

影响植株根系生长,减少了根系对水分的吸收面积[17];(3)根际低温影响了植株叶片的蒸腾作用,限制了植株对水分的吸收和运输。本试验结果表明,根际加温至20 ℃或25 ℃后,番茄日耗水量显著高于对照。这与Awal等[18]研究结果一致:提高根际温度,增加了植株的蒸腾拉力,促进了番茄对水分的吸收与运输。

光合作用是植株积累有机物的重要途径,受多种环境因素影响。黎雪[19]研究表明根际温度也是影响植株光合的重要因素,根际温度与植株的光合速率显著相关($P<0.01$)。本研究结果也表明,根际加温有利于提高番茄叶片的光合作用。与对照相比,根际加温至20 ℃后叶片光合作用显著增强。郝婷等[20]的研究结果与此相似,但其研究结果是在根际温度为25 ℃时黄瓜净光合速率最大。这可能是由于番茄和黄瓜对根际温度的耐受性不同所导致差异。

植株生长是多方面共同作用的结果,而健康发达的根系是植株生长的根本,适宜的环境可促进根系的生长。根际低温限制植株生长一方面是由于根际低温造成根系生长缓慢,根系向上部运输水分和养分速率降低,导致植株可用养分减少,生长受到限制,干物质积累降低[21];另一方面可能是根际低温间接抑制了植株的光合作用,导致光合产物积累减少,影响了植株的生长和干物质的积累。Solfjeld等[22]研究发现,根区温度从2 ℃升高到17 ℃时,桦树的株高、干重、叶面积等均随根部温度的升高而增加。Yan等[6]研究发现,根部温度为20 ℃时,黄瓜幼苗的株高、节间长、总干重等均显著大于根部温度为12 ℃时。本研究发现,与对照相比,早春根际加温可以显著促进番茄株高、茎粗的生长,提高番茄地上部干物质总量,这与前人研究结果一致[15]。因此,在寒冷季节根际适宜的加温有利于番茄的生长。

此外,开花是植株从营养生长向生殖生长转变的关键点,同样受很多种因素的影响[23],研究表明,低温以及弱光条件下,番茄开花速度减慢[24-25],这与本研究结果根际加温可提早开花时间相一致。根际加温后促进了番茄根系和植株的生长,增强光合作用以及光合产物的积累,促进花器官发育,使开花时间提前,而对照组可能由于根温过低,水分养分供应不足,酶活性降低而影响其开花,造成开花延迟。

4　结论

综上所述,通过加热带可以很好地调控根际温度,保持根际温度环境的稳定。根际加温有利于番茄根系生长,促进番茄的光合作用、对水分的吸收,最终表现为促进番茄生长、干物质积累并使开花时间提前。其中根际加温至20 ℃时,促进效果最佳,是番茄苗期根际温度调控的最优选择。

参　考　文　献

[1]高佳,史建国,董树亭,等. 花粒期光照强度对夏玉米根系生长和产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(11):2104-2113.
Gao J, Shi J G, Dong S T, et al. Effect of different light intensities on root characteristics and grain yield of summer maize (*Zea mays* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2104-2113.

[2]黄清荣,祁琳,柏新富. 根环境供氧状况对盐胁迫下棉花幼苗光合及离子吸收的影响[J]. 生态学报,2018,38(2):528-536.
Huang Q R, Qi L, Bai X F. Effects of rhizosphere aeration on photosynthesis and ion absorption in cotton seedlings under salt stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 528-536.

[3]He J, Qin L, Lee S K. Root-zone CO_2 and root-zone temperature effects on photosynthesis and nitrogen metabolism of aeroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the tropics [J]. Photosynthetica, 2013, 51(3): 330-340.

[4]Yan Q Y, Duan Z Q, Mao J D, et al. Effects of root-zone temperature and N, P, and K supplies on nutrient uptake of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings in hydroponics[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58(6): 707-717.

[5]牛贞福,温凯,马海艳,等. 适宜北方冬季日光温室长期夜间亚低温番茄品种的筛选研究[J]. 吉林农业科学,2015,40(6):90-93.
Niu Z F, Wen K, Ma H Y, et al. Screening of tomato varieties

suitable for long term sub low night temperature of winter solar greenhouse in northern China[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences,2015,40(6):90-93.

[6]周金平,卜崇兴,黄丹枫,等. 可调节根际温度的无土栽培系统在冬季番茄生产中的应用分析[J]. 中国蔬菜,2020(8):41-47.
Zhou J P,Bu C X,Huang D F,et al. Application and analysis of soilless culture system with adjustable rhizosphere temperature in winter tomato production[J]. China Vegetables,2020(8):41-47.

[7]李刚,刘超,刘叶琼,等. 冬季设施番茄生产石墨烯电热膜基质加温效果研究[J]. 中国野生植物资源,2023,42(10):63-67.
Li G,Liu C,Liu Y Q,et al. Study on the effect of graphene electrothermal film substrate heating in winter facilities tomato production[J]. Chinese Wild Plant Resources,2023,42(10):63-67.

[8]崔佳维,余纪柱,丁小涛等.营养液加温促进NFT水培生菜的生长、品质提成和养分吸收[J/OL].分子植物育种,2023:1-10[2024-03-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230928.0948.002.html.
Cui J W, Yu J Z, Ding X T, Plant Growth, Quality and Elemental Absorption of Lettuce as Affected by Nutrient Solution Heating in Intermittent Fluid Supply Nutrient Film Techninque System[J/OL]. Molecular Plant Breeding,2023:1-10[2024-03-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230928.0948.002.html.

[9]何芬,侯永,尹义蕾,等. 不同栽培模式下温室草莓根区加温环境测试与分析[J]. 北方园艺,2022(1):59-64.
He F,Hou Y,Yin Y L,et al. Test and analysis of strawberry root zone heating environment in greenhouse under different cultivation modes[J]. Northern Horticulture,2022(1):59-64.

[10]丛琳. 根区土壤加温及LED补光调控萱草花期生理及分子机制的研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2022.
Cong L. Study on the root-zone soil heating and LED supplementary light on flower stage regulation physiological and molecular mechanism of *Hemerocallis* spp.[D]. Shanghai:Shanghai Institute of Technology,2022.

[11]孙世君,付崇毅,崔世茂,等. 根区温度对黄瓜嫁接苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(8):71-80.
Sun S J,Fu C Y,Cui S M,et al. Effects of root-zone temperature on carbon and nitrogen metabolism and activities of related enzymes of cucumber seedlings[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2018,46(8):71-80.

[12]袁丁,武占会,季延海,等. 日光温室冬季基质加温效果及对番茄生长和品质的影响[J]. 中国蔬菜,2019(10):39-43.
Yuan D,Wu Z H,Ji Y H,et al. Effect of substrate heating on tomato growth and quality in solar greenhouse in winter[J]. China Vegetables,2019(10):39-43.

[13]韩瑛祚,赵颖,刘爱群,等. 基于灌水下限和灌水额调控的设施番茄灌溉施肥制度研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(5):51-60.
Han Y Z,Zhao Y,Liu A Q,et al. Research on fertigation regime for greenhouse tomato based on irrigation threshold and irrigation amount regulation[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition),2023,43(5):51-60.

[14]王秀峰. 蔬菜栽培学各论:北方本[M]. 4版. 北京:中国农业出版社,2011:60-67.
Wang X F, Zhou B L, Yu X H, et al, Special Olericulture science:Northern Edition[M]. Fourth Edition. Beijing: China Agriculture Press,2011:60-67.

[15]沈文远,陈昕钰,余徐润,等. 根际温度胁迫对小麦根系形态及生理影响的研究进展[J]. 作物杂志,2022(6):23-32.
Shen W Y,Chen X Y,Yu X R,et al. Advance of effects of rhizosphere temperature stress on morphology and physiology of wheat root[J]. Crops,2022(6):23-32.

[16]Kaufmann M R. Leaf water stress in *Engelmann spruce*: influence of the root and shoot environments[J]. Plant Physiology,1975,56(6):841-844.

[17]Lee S H,Singh A P,Chung G C. Rapid accumulation of hydrogen peroxide in cucumber roots due to exposure to low temperature appears to mediate decreases in water transport[J]. Journal of Experimental Botany,2004,55(403):1733-1741.

[18]Awal M A,Ikeda T,Itoh R. The effect of soil temperature on source - sink economy in peanut (*Arachis hypogaea*)[J]. Environmental and Experimental Botany,2003,50(1):41-50.

[19]黎雪. 融合根温的奶油生菜光合速率模型预测[J]. 山西农业科学,2023,51(3):257-263.
Li X. Prediction of photosynthetic rate model of cream lettuce integrating root temperature[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2023,51(3):257-263.

[20]郝婷,丁小涛,余纪柱,等. 根际温度对黄瓜幼苗生长及生理生化指标的影响[J]. 西北植物学报,2014,34(6):1245-1251.
Hao T, Ding X T, Yu J Z, et al. Effect of root-zone temperature on the growth, physiological and biochemical indexes in cucumber seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2014,34(6):1245-1251.

[21]Hussain S,Maqsood M A. Root zone temperature influences nutrient accumulation and use in maize[J]. Pakistan Journal of Botany,2011,43(3):1551-1556.

[22]Solfjeld I,Johnsen Ø. The influence of root-zone temperature on growth of *Betula pendula* Roth[J]. Trees,2006,20(3):320-328.

[23]余成华,陈丹,杨秋雄,等. 植物开花过程对温度变化的响应研究进展[J]. 湖南农业科学,2022(4):96-100.
Yu C H,Chen D,Yang Q X,et al. Research progress on the opening and closing of plant flowers in response to temperatures[J]. Hunan Agricultural Sciences,2022(4):96-100.

[24]朱丽云,杨再强,李军,等. 花期低温寡照对番茄开花坐果特性及果实品质的影响[J]. 中国农业气象,2017,38(7):456-465.
Zhu L Y,Yang Z Q,Li J,et al. Effect of low temperature and

weak light at flowering stage on flower-fruit characteristics of tomato[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(7):456-465.

[25]张荣萍,马均,蔡光泽,等. 开花期低温胁迫对四川攀西稻区水稻开花结实的影响[J]. 作物学报,2012,38(9):1734-1742.

Zhang R P, Ma J, Cai G Z, et al. Effects of low temperature stress during flowering stage on flowering and seed setting of rice in panxi region, Sichuan Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(9):1734-1742.

Effects of root zone heating on growth and water consumption of tomato seedlings

Sun Qian[1,3], Xu Fan[1*], Wang Zhan[1], Guo Wenzhong[1], Wang Chaojun[1,2], Li Lingzhi[2]

(*1.Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2.College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 3.Shennongfutong(Shanxi) Agricultural Planning and Design Research Co., Ltd., Taiyuan 030000, China*)

Abstract: [Objective] In the northern winter or early spring greenhouse vegetable cultivation, low temperature environments such as late frosts often affect the growth and development of vegetables. Root zone temperature (RZT) is one of the important factors affecting tomato growth, especially in soilless cultivation systems where it is greatly affected by the environment. This study aimed to clarify the appropriate root zone heating temperature for tomato seedlings and provide theoretical and methodological support for regulating RZT in early spring glass greenhouses in the northern regions, alleviating the damage caused by low temperature to tomato growth. [Methods] Under the conditions of elevated rockwool cultivation in a glass greenhouse, root zone heating was applied to tomatoes using a temperature-controlled heating belt. Three treatments were set: no root zone heating (CK), root zone heating to 20 ℃ (T20), and root zone heating to 25 ℃ (T25). The effects of different root zone heating conditions on the growth, photosynthesis, dry matter accumulation, and water consumption of early spring tomato seedlings were studied. [Results] The results indicated that root zone heating significantly promoted the increase in tomato plant height, stem diameter, and leaf number. Compared with CK treatment, the T20 treatment increased plant height by 13.6% to 17.0%, stem diameter by 10.3% to 14.3%, and leaf number by 3.4% to 12.5% at different stages. The T25 treatment increased plant height by 7.2% to 9.7%, stem diameter by 7.7% to 15.6%, and leaf number by 0% to 15.6% compared with CK. Ten days after planting, the net photosynthetic rate of tomatoes increased and then decreased with increasing root zone temperature, while 20 and 30 days after planting, the net photosynthetic rate increased with increasing root zone temperature. Root zone heating promoted water absorption by tomatoes, promoted stem and leaf dry matter accumulation, and accelerated flowering. The T20 treatment increased aboveground dry weight by 79.3% to 85.4% compared with CK and accelerated flowering by 5 days. The T25 treatment increased aboveground dry weight by 29.2% to 72.4% and accelerated flowering by 3 days. [Conclusion] The T20 treatment resulted in the greatest plant height and stem diameter, the highest total accumulation of dry matter, and the earliest flowering time, indicating that 20℃ is the most suitable root zone heating temperature for early spring tomato seedlings.

Keywords: Tomato, Root zone heating, Growth, Photosynthesis, Shoot dry weight

(编辑:郭玥微)