

根际温度对黄瓜幼苗生长及生理生化指标的影响

郝 婷^{1,2}, 丁小涛¹, 余纪柱^{1*}, 金海军¹, 张红梅¹, 朱月林²

(1 上海市农业科学院园艺研究所, 上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403; 2 南京农业大学 园艺学院, 南京 210095)

摘 要: 采用营养液栽培法, 以‘春秋王 2 号’黄瓜为实验材料, 研究了 4 个根际温度梯度处理(20 °C、25 °C、30 °C、35 °C)对其幼苗生长, 地上部、地下部生理生化指标的影响, 探讨根际温度对黄瓜幼苗生长的影响机理。结果显示: (1) 黄瓜幼苗的株高、茎粗、叶面积和地上地下生物量在 25 °C 处理下都明显大于其他 3 个处理, 而在 35 °C 处理下均显著降低。(2) 20 °C、25 °C 处理下, 黄瓜幼苗叶片的净光合速率(P_n)均较大, 此时其叶片与根系中的淀粉、蔗糖、总糖含量较高且明显高于 30 °C 处理, 35 °C 根际温度处理下叶片 P_n 严重下降。(3) 根际 30 °C、35 °C 高温使得黄瓜幼苗叶片和根系中的 POD 活性升高, CAT 活性降低; 而叶片中 SOD、APX 活性均随根际温度的升高而增大, 根系中则表现出了逐渐下降趋势。(4) 叶片和根系的电解质渗漏率、丙二醛(MDA)含量在 25 °C 下最低, 而在 35 °C 处理下最高; 叶片中脯氨酸及可溶性蛋白含量在 35 °C 处理下最高, 但此时根系中含量显示最低。研究表明, 4 个根际温度中, 25 °C 最适合黄瓜幼苗的生长, 35 °C 高温直接作用部位(根系)的 2 种主要渗透调节物质脯氨酸及可溶性蛋白含量下降, 此时叶片和根系中抗氧化酶活性的变化使得细胞膜受到了明显的过氧化伤害, 根系受伤害程度加重, 从而抑制了植株整体的生长。

关键词: 黄瓜; 根际温度; 生长; 保护酶; 渗透调节物质

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Root-zone Temperature on the Growth, Physiological and Biochemical Indexes in Cucumber Seedlings

HAO Ting^{1,2}, DING Xiaotao¹, YU Jizhu^{1*}, JIN Haijun¹, ZHANG Hongmei¹, ZHU Yuelin²

(1 Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology; Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2 College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: With cucumber cultivar ‘Chunqiuwang No. 2’ as test material, the effects of four root-zone temperature gradient (20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C) on the growth, antioxidant enzymes and osmotic substance of cucumber seedlings under hydroponic cultivation were investigated. The results showed that: (1) The differences of plant height, stem diameter, leaf area, shoot and root fresh weight are significant between 25 °C treatment and the other 3 ones, especially under 35 °C treatment seedlings grew badly. (2) Net photosynthetic rate (P_n) of leaves and photosynthetic product in leaves and roots were higher obviously under 20 °C and 25 °C treatments than that under 30 °C, while P_n decreased seriously under 35 °C treatment. (3) POD activity was increased and CAT activity was decreased in the leaves and roots under the treatments of 30 °C and 35 °C. SOD and APX activities in the leaves were increased gradually, while both of them showed a reverse trend in the roots with root-zone temperature rising. (4) Leaf relative electrolyte leakage, malondial-

收稿日期: 2014-01-19; 修改稿收到日期: 2014-04-08

基金项目: 上海市科委项目(11dz1960202); 国家科技支撑项目(2011BAD43B02); 上海市农业科学院青年人才成长计划(沪农青字[2014]第 1-10 号)

作者简介: 郝 婷(1986—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事蔬菜生理与生物技术研究。E-mail: tinghao628@126.com

* 通信作者: 余纪柱, 研究员, 主要从事蔬菜设施栽培技术及黄瓜新品种选育研究。E-mail: yy2@saas.sh.cn

dehyde (MDA) content in leaves and roots displayed the lowest under 25 °C treatment and the highest under 35 °C treatment. Proline and soluble protein contents showed the highest in the leaves and the lowest in the roots when seedlings were cultivated in 35 °C. The results indicated that 25 °C was the most suitable root-zone temperature for cucumber seedlings in this research. As the main osmotic regulation substances, proline and soluble protein contents were decreased in roots, the high root-zone temperature acted directly on, and the changes of antioxidant enzyme activities in leaves and roots resulted in oxidative damage of cell membrane increasing severely under 35 °C treatment, causing the growth of the whole seedlings to be restrained seriously.

Key words: cucumber; root-zone temperature; growth; protective enzymes; osmotic regulation substances

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)性喜温、但不耐热,是葫芦科重要的经济作物,也是设施栽培中的主要蔬菜种类之一。在夏秋季栽培特别是密闭的棚室栽培中,午后气温经常超过 40 °C,地温也会高于 30 °C,甚至超过 32 °C^[1],高温对设施黄瓜生长及产量造成了严重的影响^[2]。但有研究表明,与高温相比,高根际温度对黄瓜植株根系及地上部造成的伤害更大^[3-4]。Nada 等^[5]报道,30 °C 和 38 °C 的根际高温严重抑制了黄瓜植株的生长,增大了叶片中脱落酸的含量,从而导致叶片气孔导度降低,叶片同化功能降低;Moon 等^[6]发现,15 °C 和 35 °C 的根际温度处理使黄瓜植株生长受到明显抑制,特别是 35 °C 处理使得叶片含水量、叶片中细胞分裂素及木质部渗出物含量降低。迄今为止,前人对高温引起的叶片中抗氧化酶活性及渗透调节物质含量变化的研究已经很多^[7-8],但对于根际温度变化引起的黄瓜叶片及根系抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、光合产物分布与积累的影响等还未见报道。因此,本试验以黄瓜为材料,从植株地上及地下的生理生化指标着手,探求不适宜的根际温度对黄瓜幼苗整体生长的影响机理,明确根际温度对设施蔬菜生产的重要性,为蔬菜生产中温度的控制和管理提供一定的理论指导和实践意义。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试黄瓜品种为‘春秋王 2 号’,种子由上海市农业科学院园艺研究所提供。水培通气泵为 RE-SUN AIR PUMP,购自广东日生集团有限公司。水培根部加热棒为艾柯电子显示加热棒,功率 100 W,购自新加坡仟湖集团(上海)国际贸易有限公司。

1.2 试验设计

试验于 2013 年 4 月在上海农业科学院庄行综合试验站玻璃温室的育苗区进行。将黄瓜干种子消毒、浸种催芽后播种,待两片子叶完全展平后进行

移苗。选取长势一致的健壮幼苗移栽到嵌有小孔的大小约 37.5 cm×24.5 cm×3 cm(长×宽×高)的泡沫板上,进行水培,幼苗用岩棉固定于泡沫板上,根系浸入容积约 38 cm×25 cm×20 cm(长×宽×高)装有栽培液的塑料盆中,每盆 1 板。营养液采用山崎配方,调节电导率在 2.3~2.5 mS·cm⁻¹(电导率仪型号 DDB-303A,上海镭磁公司),每隔 5 d 换 1 次营养液,定期测定栽培液的 pH 值及电导率,栽培期间用通气泵 24 h 连续通气。

待幼苗长到两叶一心时开始处理,试验依据相关文献^[5,6]设置 20 °C、25 °C、30 °C、35 °C 4 个根际温度处理(其中以 25 °C 为对照),气温为 4~5 月玻璃温室一天中正常的气温变化,平均在 28/17 °C(白天/夜间)左右,每处理 3 盆,每盆 8 株。盆底各放有 1 个加热棒,将加热棒一端放入盆底,带有 LED 显示屏的另一端放在盆外以便观察温度读数,设定到相应处理温度后仪器即开始对营养液进行加热,达到设定温度后仪器自动停止加热,并继续维持水温恒定。为确保 20 °C 温度处理恒定,试验中将该处理的栽培塑料盆浮于盛有水的大泡沫箱内,中午气温升高时将事先冻好的冰块放入外面的泡沫箱内对塑料盆中的营养液进行降温,以达到 20 °C 处理要求。处理 5 d 后(根据预备实验,处理 5 d 后各处理材料形态上差异最大)测定黄瓜植株的生长量和净光合速率,剪取每株的 3~4 片真叶及根系,去除主脉、主根,分别剪碎各自混合后贮藏于-80 °C 的冰箱中用于叶片和根系生理生化指标的测定。

1.3 测定项目与方法

用尺子测量子叶到生长点的高度作为株高;用游标卡尺测定上胚轴的茎粗;测量地上部所有叶片的长与宽,根据公式计算叶面积,叶面积(S)= $0.743 \times \text{长} \times \text{宽}$ ^[9];用蒸馏水冲洗植株,擦干后从子叶节处截断,称量其地上鲜重、地下鲜重。

用 Li-6400 型光合仪(美国 Li-COR 公司生产)于晴天上午测定叶片净光合速率(P_n),测量的光强

设置为 $600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $400\pm 10\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。电解质渗漏率采用电导法测定,脯氨酸含量采取磺基水杨酸提取法测定^[10],超氧化物歧化酶(SOD)活性参照 Giannopolitis^[11]等方法,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性参照 Nakano^[12]等方法,愈创木酚过氧化物酶(G-POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性参照 Cakmak^[13]等方法,可溶性蛋白含量参照 Bradford^[14]方法,丙二醛(MDA)含量的测定参照 Heath^[15]等方法,蔗糖、总糖、淀粉含量参照 Yemm^[16]等的方法测定。各指标每个处理重复测定 3 次。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 绘图,采用 SAS 统计软件对试验数据进行方差分析和 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 根际温度对黄瓜幼苗生长的影响

如表 1 所示,黄瓜幼苗株高在 20 ℃、25 ℃ 及 30 ℃ 的根际温度处理下均显著大于 35 ℃ 处理,并以 25 ℃ 处理最高;植株的茎粗、叶面积均在 25 ℃ 处理下最大,而在 35 ℃ 处理下最小,且与其他处理相比均差异显著;植株地上鲜重、地下鲜重在 4 个处理之间差异均显著,并表现为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}>20\text{ }^{\circ}\text{C}>30\text{ }^{\circ}\text{C}>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,从生长量来看,25 ℃ 是适合黄瓜幼苗生长的最佳根际温度,而其他温度都限制了植株的生长,35 ℃ 尤为严重。

2.2 根际温度对黄瓜幼苗叶片净光合速率及叶片与根系中淀粉、总糖、蔗糖含量的影响

黄瓜叶片 P_n 在 4 个根际温度处理间差异显著,并以 25 ℃ 处理下最高,它分别是 20 ℃、30 ℃、35 ℃ 处理下的 1.13、1.5、10.4 倍(图 1,A)。蔗糖是光合物质向外运输的主要形式,当运输到一定的组织或器官后以淀粉的形式积累并贮存。黄瓜叶片中的淀粉含量在 20 ℃ 根际温度处理下最高,其次是

25 ℃ 处理,各处理间均差异显著;而根系中淀粉含量数据显示 25 ℃ 处理下最高,并与其他处理相比差异显著,而 20 ℃、30 ℃ 处理间无显著差异(图 1,B)。黄瓜叶片和根系中总糖和蔗糖含量在 4 个根际温度处理之间变化情况基本相同,根叶中的分配情况均为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}>25\text{ }^{\circ}\text{C}>20\text{ }^{\circ}\text{C}>30\text{ }^{\circ}\text{C}$,且 25 ℃、30 ℃、35 ℃ 处理间差异显著(图 1,C、D)。可见,不同根际温度处理显著影响了黄瓜叶片的 P_n ,进而影响碳水化合物淀粉、总糖、蔗糖的形成及在根和叶中的分布情况。

2.3 根际温度对黄瓜幼苗叶片与根系中抗氧化酶活性的影响

图 2 显示,黄瓜幼苗叶片与根系中起抗氧化作用的保护酶种类不同,根系中的 G-POD 活性远远高于叶片,而其他 3 种保护酶活性则表现相反,尤其是 CAT 活性,叶片中远远大于根系。其中,黄瓜叶片 SOD、APX 活性均随着根际温度的升高而逐渐增强,而根系中则表现相反的逐渐减弱的趋势,特别是 35 ℃ 处理下两种保护酶活性显著下降(图 2,A、D);黄瓜叶片和根系中的 G-POD 活性均随根际温度升高而呈先降后升的趋势($25\text{ }^{\circ}\text{C}<20\text{ }^{\circ}\text{C}<30\text{ }^{\circ}\text{C}<35\text{ }^{\circ}\text{C}$),而 CAT 活性表现出先升后降的趋势($25\text{ }^{\circ}\text{C}>20\text{ }^{\circ}\text{C}>30\text{ }^{\circ}\text{C}>35\text{ }^{\circ}\text{C}$),且叶片的两种酶活性在处理之间均差异显著(图 2,B、C)。这说明随着根际温度的升高,不同抗氧化酶活性在同一植物器官中的活性变化趋势不尽相同,同一种抗氧化酶在不同的植物器官中的活性变化也不同,既相互协同又相互独立地发挥着保护作用。

2.4 根际温度对黄瓜幼苗叶片与根系中电解质渗漏率和丙二醛含量的影响

黄瓜幼苗叶片与根系中的电解质渗透率和 MDA 含量在 4 个根际温度处理下均表现出了先降后升的相同变化趋势,并以 25 ℃ 处理下最低,35 ℃ 处理下最高,且处理之间差异多达显著水平(图 3,

表 1 根际温度对黄瓜幼苗生长量的影响
Table 1 Effects of root-zone temperature on the growth of cucumber seedlings

生长指标 Growth index	根际温度 Root-zone temperature			
	20 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃
株高 Plant height/cm	12.83±0.29a	13.43±0.93a	12.33±0.29a	10.83±0.15b
茎粗 Stem diameter/cm	0.56±0.01b	0.60±0.02a	0.57±0.02b	0.53±0.01c
叶面积 Leaf area/cm ²	223.44±7.43b	261.87±4.35a	228.19±2.85b	206.67±5.20c
地上鲜重 Shoot fresh weight/(g·plant ⁻¹)	9.17±0.15b	10.37±0.45a	7.63±0.25c	5.47±0.51d
地下鲜重 Root fresh weight/(g·plant ⁻¹)	0.93±0.05b	1.13±0.06a	0.79±0.08c	0.66±0.02d

注:同一指标不同小写字母表示差异达 5% 的显著水平;下同。
Note: Different letters within the same index indicate significant difference at 5% level. The same as below.

A、B)。可见,较之于 25 °C 根际温度处理,其他 3 个处理均不同程度地破坏了黄瓜幼苗根叶生物膜的稳定性,导致细胞内电解质有不同程度的渗漏。

2.5 根际温度对黄瓜幼苗叶片与根系中脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响

黄瓜幼苗脯氨酸含量在叶片与根系中随根际温度变化的情况不同,叶片中脯氨酸含量在根温 35 °C

时最高,在 25 °C 时次之,而根系中脯氨酸含量在 25 °C 处理下显著高于其他 3 个处理,且以 35 °C 处理的含量最低(图 4,A)。黄瓜可溶性蛋白含量在叶片中随根际温度的升高而逐渐增加,且在 30 °C 和 35 °C 处理下均显著高于另外两个处理;而在根系中则表现出随根际温度增加而逐渐降低的相反趋势,且 4 个处理之间差异均显著(图 4,B)。

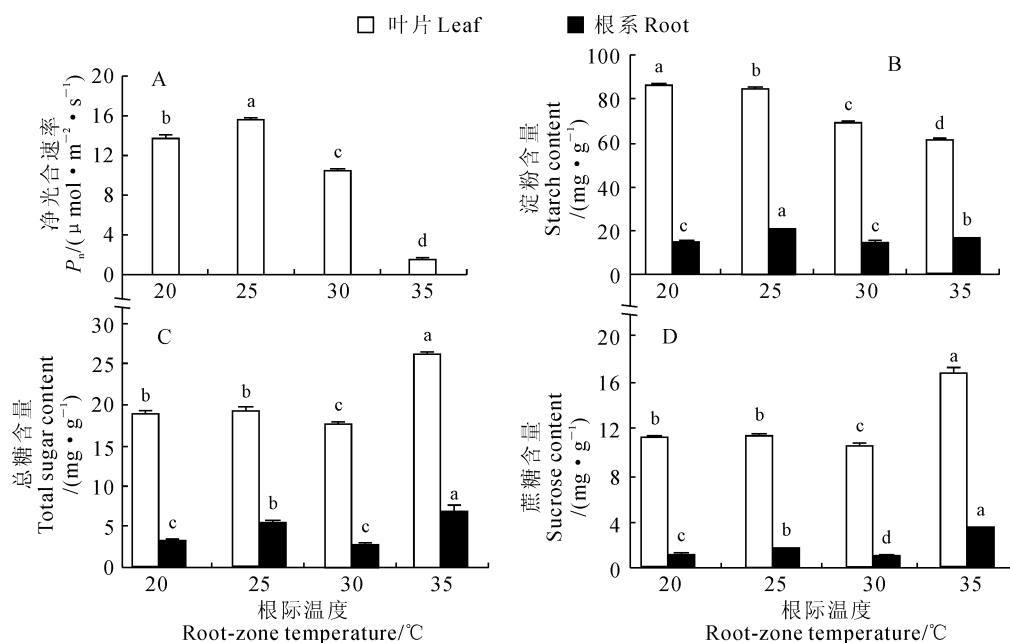


图 1 根际温度对黄瓜幼苗叶片净光合速率、碳水化合物的形成及分配的影响

Fig. 1 Effects of root-zone temperature on P_n of leaves and the formation and distribution of carbohydrates in cucumber seedlings

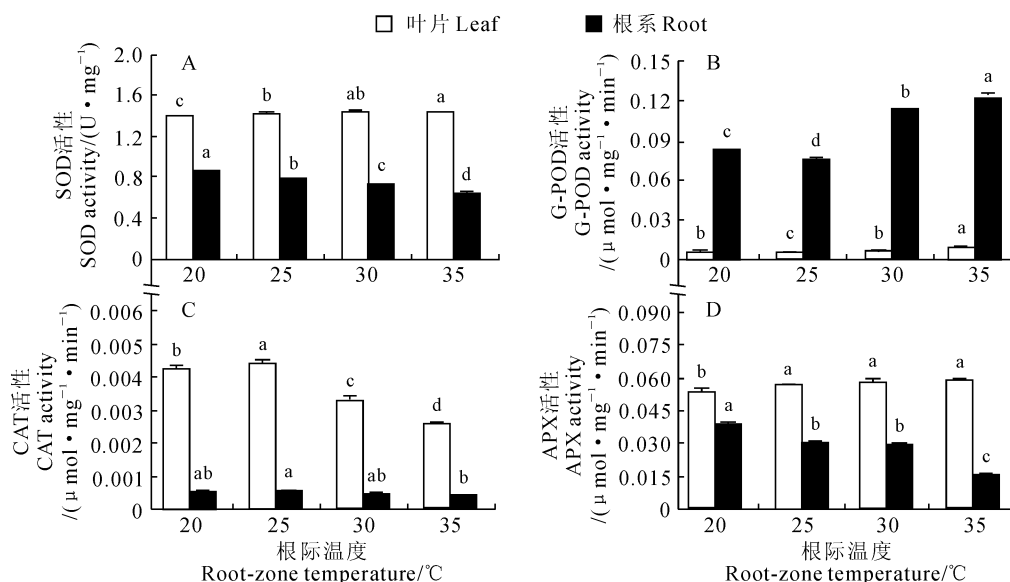


图 2 根际温度对黄瓜幼苗叶片与根系中 SOD(A)、G-POD(B)、CAT(C)和 APX(D)活性的影响

Fig. 2 Effects of root-zone temperature on SOD (A), G-POD (B), CAT (C) and APX (D) activities in leaves and roots of cucumber seedlings

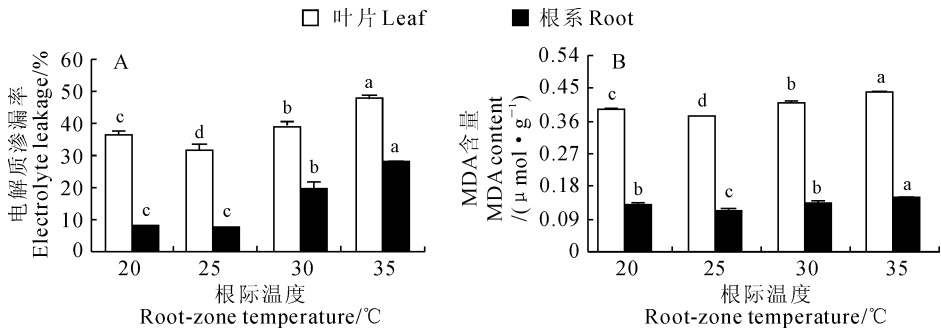


图 3 根际温度对黄瓜幼苗叶片与根系中电解质渗漏率(A)和丙二醛含量(B)的影响

Fig. 3 Effects of root-zone temperature on electrolyte leakage(A) and MDA content(B) in leaves and roots of cucumber seedlings

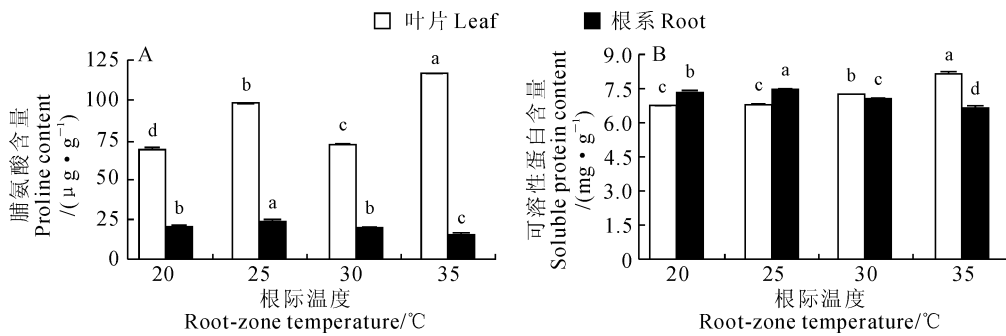


图 4 根际温度对黄瓜幼苗叶片与根系中脯氨酸(A)和可溶性蛋白含量(B)的影响

Fig. 4 Effects of root-zone temperature on proline(A) and soluble protein content(B) in leaves and roots of cucumber seedlings

3 讨 论

植物的根系对温度特别敏感,不适宜的根温会对植物的生长造成影响,导致生物量减小^[17]。本试验中的黄瓜幼苗在处理 5 d 后,相对于 25 °C 根际温度而言,其他 3 个根温处理下植株的各生长指标均有不同程度的降低;同时,20 °C、25 °C 根温处理下根系表现为正常的白色,植株生长良好,而 35 °C 处理下的根系开始发黄变褐,地上部叶片也在中午时萎蔫,植株长势差,特别是地下鲜重几乎为 25 °C 下的一半。这说明不适宜的根际温度可能直接作用于黄瓜幼苗的根部,从而影响了植物地上及地下的生长。这与孟令波等^[18]对黄瓜,裴红宾等^[19]对小麦及郭传友^[20]对彩椒的研究结果一致,都说明根系生长不良会影响植株地上部的生长量,这可能与根系对水分和养分的吸收能力有关^[21]。

光合作用是植物体极为重要的代谢过程,它的强弱直接影响植物的生长、产量及其抗逆性,因而它可作为判断植物生长及抗逆性强弱的重要指标^[22]。本试验中,黄瓜幼苗叶片的净光合速率在 25 °C 根际温度处理下最高,在 35 °C 处理下最低,说明黄瓜幼

苗根系生长需要适宜的温度,以利于叶片光合作用的进行;从光合产物来看,20 °C、25 °C 根温下黄瓜叶片制造的淀粉多,分配到根系中的比例也多,转化为体内蔗糖和总糖的含量仅次于 35 °C 处理;35 °C 处理下叶片和根系中蔗糖、总糖含量最高,叶片中淀粉含量最低,可能是该温度作为根系的一种胁迫温度,导致植物体内淀粉分解并转化为蔗糖、总糖,起到渗透调节的作用^[23]。张洁等^[24]认为短时间 35 °C 亚高温处理番茄幼苗,叶片中蔗糖转化酶(Ai 和 Ni)活性降低,蔗糖磷酸合成酶(SPS)与蔗糖合成酶(SS)活性升高可能导致果糖、葡萄糖向蔗糖的转化,本试验中根际 35 °C 高温处理下蔗糖含量的增大可能与上述酶活性变化有关。

抗氧化能力的提高及渗透调节物质的积累,是植物在逆境条件下得以生存的两种重要机制^[25],且在较高强度的胁迫水平下,二者存在着显著的相关关系^[26]。本试验中,根际高温使得黄瓜幼苗叶片和根系中的 POD 活性升高,CAT 活性降低,叶片中 SOD、APX 活性均随根温的升高而增强,而根系中则表现出了减弱的趋势,这与前人的研究结果^[27]基本一致。同时,黄瓜幼苗不同根温处理下抗氧化酶

活性不同程度的变化导致了膜脂过氧化产物 MDA 含量的不同,其在根系和叶片中都表现为 $35\text{ }^{\circ}\text{C} > 30\text{ }^{\circ}\text{C} > 20\text{ }^{\circ}\text{C} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。膜脂过氧化程度的加剧导致电解质渗漏率的增加,本试验根系和叶片中电解质渗漏率的变化证明了这一点。

植物细胞在逆境下还能主动形成渗透调节物质以适应逆境胁迫,脯氨酸是唯一可作为单线态氧猝灭剂和羟自由基清除剂的可溶性渗透调节物质,能够很好地稳定蛋白质,保护抗氧化酶^[28],它合成于植物体的叶绿体和细胞质中^[29];而植物经非致死高温锻炼后自身合成的热激蛋白,可以提高植物对致死高温的耐受性^[30],也有研究表明多种逆境能诱导形成逆境蛋白^[31]。本试验中,黄瓜叶片和根系中脯氨酸含量在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 根际温度处理下均小于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理,可能是 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下植物合成的脯氨酸量较多,分配到根系中的量也多;而在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 根温下黄瓜叶片中脯氨酸含量在 4 个处理中最大,但根系中最小,这可能是根际高温阻碍了合成的脯氨酸向根系的输送,

促使脯氨酸在叶片中的积累增加,而根系中含量减少,导致生长受阻。同时,黄瓜幼苗根叶中可溶性蛋白含量的变化也有类似的趋势,这可能是根际高温会比高温对植株造成更大伤害^[3-4]的原因之一。另外,本试验中根际高温下黄瓜叶片中抗氧化酶活性、脯氨酸和可溶性蛋白含量的变化趋势与前人研究的高温下的变化基本一致^[7-8,32],能否说明高温先使得根际温度上升,导致根际高温胁迫,才使得以上抗逆性指标发生类似的变化,这还需要进一步探索。

总之,植物生长需要适宜的温度环境。现代化设施农业生产中,炎热夏季对生长于高温环境中的黄瓜植株进行根际降温^[17]以及越冬栽培中对其根际进行加热或增温处理^[33]都促进了植株根系的生长,增加了黄瓜的产量,且对根际温度的控制较易于对气温的控制,因此,了解根际温度对植物整体生长的影响,对于设施中用于周年生产的园艺作物的栽培和管理具有重大意义。

参考文献:

- [1] MATSUOKA T, SUHARDIYANTO H. Thermal and flowing aspects of growing petty tomato in cooled NFT solution during summer[J]. *Environment Control in Biology*, 1992, **30**(3): 119—125.
- [2] TIAN J(田 婧), GUO SH R(郭世荣). Research progress on high-temperature stress injury and heat tolerance of cucumber[J]. *China Vegetables*(中国蔬菜), 2012, **1**(18): 43—52(in Chinese).
- [3] WANG Y H, TACHIBANA S. Growth and mineral nutrition of cucumber seedlings as affected by elevated air and root-zone temperatures[J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1996, **64**(4): 845—852.
- [4] TAHIR I, NAKATA N, YAMAGUCHI T, et al. Influence of high shoot and root-zone temperatures on growth of three wheat genotypes during early vegetative stages[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, **194**(2): 141—151.
- [5] NADA K, HE L X, TACHIBANA S. Impaired photosynthesis in cucumber (*Cucumis sativus* L.) by high root-zone temperature involves ABA-induced stomatal closure and reduction in ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activity[J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2003, **72**(6): 504—510.
- [6] 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**(5): 257—264.
- [7] SUN Y(孙 艳), XU W J(徐伟君). Effect of high temperature stress on the metabolism of ascorbic acid in cucumber seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*(西北农业学报), 2007, **16**(6): 164—169(in Chinese).
- [8] CAO D M(曹冬梅), WANG Y SH(王云山), KANG L F(康黎芳), et al. Effect of high temperature on jasmonic (JA) concentration and antioxidation of *Anthurium andraeanum* seedling leaf[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*(中国生态农业学报), 2007, **15**(5): 102—104(in Chinese).
- [9] PEI X B(裴孝伯), LI SH CH(李世诚), ZHANG F M(张福漫), et al. Study on leaf area calculation and its correlation with plant height of cucumber in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2005, **21**(8): 80—82(in Chinese).
- [10] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] GIANNOPOLITIS N, RIES S K. Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1977, **59**(2): 309—314.
- [12] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, **22**(5): 867—880.
- [13] CAKMAK I, MARSCHNER H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves[J]. *Plant Physiology*, 1992, **98**(4): 1 222—1 227.

- [14] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye-binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [15] HEATH R I, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1968, **125**(1): 189-198.
- [16] YEMM E W, WILLIS A J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone[J]. *The Biochemical Journal*, 1954, **57**(3): 508-514.
- [17] SONG M L(宋敏丽), WEN X ZH(温祥珍), LI Y L(李亚灵). Effect of high rhizosphere temperature on plant and metabolism: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2010, **29**(11): 2 258-2 264(in Chinese).
- [18] MENG L B(孟令波), QIN ZH W(秦智伟), LI SH M(李淑敏). Effect of high temperature stress on the root of cucumber seedling[J]. *Acta Horticulturae Sinica*(园艺学报), 2003, **30**(6): 694(in Chinese).
- [19] PEI H B(裴红宾), ZHANG Y Q(张永清), SHANGGUAN T L(上官铁梁). Effect of root zone temperature stress on antioxidant enzymes activity and root and seedling growth of wheat[J]. *Journal of Shanxi Normal University*(Nat. Sci. Edi.) (山西师范大学学报·自然科学版), 2006, **20**(2): 78-81(in Chinese).
- [20] GUO CH Y(郭传友), YU F(于 芬). Effect of root temperature on seedling growth of color pepper[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*(江西农业大学学报), 2003, **25**(1): 30-32(in Chinese).
- [21] FENG Y L(冯玉龙), LIU E J(刘恩举), SUN G B(孙国斌). Influence of temperature of root system on plant (I)——influence of root temperature on plant growth and photosynthesis[J]. *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报), 1995, **23**(3): 63-69(in Chinese).
- [22] HUI H X(惠红霞), XU X(许 兴), LI Q R(李前荣). Exogenous betaine improves photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2003, **23**(12): 2 137-2 142(in Chinese).
- [23] MCCUE K F, HANSON A D. Drought and salt tolerance: towards an understanding and application[J]. *Trends in Biotechnology*, 1990, **8**: 358-362.
- [24] ZHANG J(张 洁), QI M F(齐明芳), LI T L(李天来). Effect of sub-high temperature on production and metabolism of photosynthetic substance in tomato leaves[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*(沈阳农业大学学报), 2006, **37**(3): 304-307(in Chinese).
- [25] WANG J(王 娟), LI D Q(李德全). The accumulation of plant osmoticum and activated oxygen metabolism under stress[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报), 2001, **18**(4): 459-465(in Chinese).
- [26] WU H(武 辉), ZHANG J S(张巨松), SHI J Y(石俊毅), et al. Physiological responses of cotton seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(1): 74-82(in Chinese).
- [27] 张永平. 瓜类作物对温、光环境变化的响应: 光能利用与活性氧代[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 59-63.
- [28] WANG L Y(王丽媛), DING G H(丁国华), LI L(黎 莉). Progress in synthesis and metabolism of proline[J]. *Journal of Harbin Normal University*(Nat. Sci. Edi.) (哈尔滨师范大学·自然科学学报), 2010, **26**(2): 84-89(in Chinese).
- [29] XIE H(谢 虹), YANG L(杨 兰), LI ZH G(李忠光). The roles of proline in the formation of plant tolerance to abiotic stress[J]. *Biotechnology Bulletin*(生物技术通报), 2011, (2): 23-27, 60(in Chinese).
- [30] WANG D F, LUTHE D S. Heat sensitivity in a bentgrass variant failure to accumulate a chloroplast heat shock protein isoform implicated in heat tolerance[J]. *Plant Physiology*, 2003, **133**(1): 319-327.
- [31] ZHANG Y J(张亚军), WANG L X(王丽学), CHEN CH(陈 超), et al. Research progress in response mechanism of plants to adversity stress[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*(江西农业学报), 2011, **23**(9): 60-65(in Chinese).
- [32] LIU SH R(刘书仁), GUO SH R(郭世荣), SUN J(孙 锦), et al. Effects of proline on reactive oxygen metabolism and content of osmotic adjustment substances of cucumber under high temperature stress[J]. *Acta Agriculture Boreali-Occidentalis Sinica*(西北农业学报), 2010, **19**(4): 127-131(in Chinese).
- [33] IBARRA J L, ZERMENO G A, MUNGUÍA L J, et al. Photosynthesis, soil temperature and yield of cucumber as affected by colored plastic mulch[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica (Section B)-Soil and Plant Science*, 2008, **58**(4): 372-378.