

杨修一, 李圣会, 梅宇超, 等. DA-6 对水培生菜生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 32-38.

YANG Xiu-yi, LI Sheng-hui, MEI Yu-chao, et al. Effects of DA-6 on growth and physiological characteristics in hydroponic lettuce[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 32-38.

DA-6 对水培生菜生长及生理特性的影响

杨修一¹, 李圣会¹, 梅宇超¹, 杨 广¹, 孙晓慧², 赵晨浩¹, 张 民¹, 李成亮^{1*}

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 聊城市产品质量监督检验所, 山东聊城 252000)

摘 要: 在山崎生菜营养液中添加 5 个不同浓度(0、20、100、500、1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的高能植物生长调节剂 DA-6, 研究其对生菜生长及生理特性的影响。结果表明: 随着 DA-6 浓度的增加, 生菜的生物量和根系指标呈先增加后降低的趋势。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理较其他处理提升了根系活力, 并显著增加了生菜地上部干鲜重和根系干鲜重, 增幅分别达到 33.58%~742.86%、11.56%~286.79%、18.60%~264.29%和 11.12%~267.83%。高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理较对照处理降低了生菜生物量和根系活力。不同浓度的 DA-6 对生菜各项品质指标影响不同, 随着 DA-6 浓度的增加, 生菜中硝酸盐含量先降低后升高, 但抗坏血酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量则先增加后减少。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理生菜硝酸盐含量较对照处理显著降低了 23.40%, 而抗坏血酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量分别较对照处理显著增加了 24.24%、64.29%和 22.92%。此外, 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 提高了生菜叶片 SOD、POD 和 CAT 活性, 降低了 MDA 含量, 增加了叶片 SPAD 值, 提升了光合和叶绿素荧光特性。在该试验条件下, 推荐水培生菜营养液中添加浓度 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6, 既保证了水培生菜的高产又提升了品质。

关键词: 水培生菜; DA-6; 生长; 品质; 生理特性

中图分类号: S482.8 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)01-0032-07 doi:10.11654/jaes.2016-1048

Effects of DA-6 on growth and physiological characteristics in hydroponic lettuce

YANG Xiu-yi¹, LI Sheng-hui¹, MEI Yu-chao¹, YANG Guang¹, SUN Xiao-hui², ZHAO Chen-hao¹, ZHANG Min¹, LI Cheng-liang^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Liaocheng Product Quality Supervision & Inspection, Liaocheng 252000, China)

Abstract: DA-6 is a broad-spectrum and high-efficiency plant growth regulator, which has high biological activity and low toxicity. Effects of five DA-6 concentrations(0, 20, 100, 500, 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) on lettuce growth and physiological characteristics were investigated by hydroponic approach with the Yamasaki lettuce nutrient solution. The results showed that the lettuce biomass and root items firstly raised and then decreased with the increase of DA-6 concentrations. 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 treatment improved the root activity and significantly increased the dry and fresh mass of both shoot and root compared with other treatments, which reached 33.58%~742.86%, 11.56%~286.79%, 18.60%~264.29% and 11.12%~267.83%, respectively. 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 treatment reduced the lettuce biomass and root activity in comparison with 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 treatment. Different DA-6 concentrations individually impacted on the lettuce qualities. With the increase of DA-6 concentrations, the nitrate content decreased after the first raise, but the adverse trend of ascorbic acid, soluble sugar and soluble protein contents were observed. 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 treatment significantly reduced the nitrate content by 23.40% than 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 treatment.

收稿日期: 2016-08-13

作者简介: 杨修一(1992—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事植物营养与环境效应研究。E-mail: woshiyangxiuyi@163.com

* 通信作者: 李成亮 E-mail: chengliang_li11@163.com

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD11B01, 2011BAD11B02); 国家“948”重点项目(2011-G30)

Project supported: The Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2011BAD11B01, 2011BAD11B02); The Key Projects in the National "948" Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2011-G30)

Whereas, the ascorbic acid, soluble sugar and soluble protein contents of lettuce leaves with $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ DA-6 treatment significantly increased by 24.24%, 64.29% and 22.92% compared with $0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ DA-6 treatment, respectively. Meanwhile, $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ DA-6 treatment increased the SOD, POD and CAT activities, reduced the MDA content, raised the SPAD value, and improved the photosynthesis and chlorophyll fluorescence properties of lettuce leaves. Under the current experimental conditions, the hydroponic lettuce nutrient solution added in $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ DA-6 was recommended, which not only warranted the high hydroponic lettuce yield but also improved the quality.

Keywords: hydroponic lettuce; DA-6; growth; qualities; physiological characteristics

生菜(*Lactuca sativa* L.), 俗称叶用莴苣, 为 1~2 年生的草本植物, 富含各种维生素及矿物质等营养成分, 且叶片口感爽滑, 需求巨大, 种植面积不断增加, 经济价值较高^[1]。水培生菜是生菜无土栽培中发展很快的一个领域, 具有高产优质、生育期短、经济价值高等优点^[2], 但是水培营养液配方中大量使用硝酸盐等物质, 使植株中硝酸盐含量较高, 而食用硝酸盐含量高的生菜会对人体产生毒害^[3-5]。因此, 降低生菜植株的硝酸盐含量并增加其产量具有重要意义^[6]。

DA-6(己酸二乙氨基乙醇酯)是由美国科学家于 20 世纪 90 年代初首先发现的一种安全高效的作物高产优质抗逆基因诱导剂, 是 DCPTA[2-(3,4-二氯苯氧基)三乙胺]的类似物, 该化合物具有生长素、赤霉素及细胞分裂素等多种植物激素的多种功能, 可通过提高植物叶绿素、蛋白质、核酸的含量, 增强光合作用并提高植株过氧化物酶和硝酸还原酶活性, 促进细胞分裂、伸长和植株碳、氮代谢, 具有增产、早熟、改善品质及抗病、抗逆的功效, 适用于粮食、果树、蔬菜、花卉及食用菌等各类作物^[7-10]。欧阳立明等^[11]研究表明, DA-6 对水培黄瓜幼苗地上部和根系发育有明显促进作用, 并显著提高草莓叶片的光合作用及抗氧化酶活性, 从而改善草莓叶片品质^[12]。此外, DA-6 能提升草莓叶片的气孔导度、叶绿素含量和净光合速率, 延缓秋季叶片衰老, 促进植株生长^[8]; 还能增加菠萝产量, 改善其品质^[13]。Brown^[14]研究表明, 适宜浓度的 DA-6 可以增加花生的形态指标, 促进果实淀粉累积, 从而增加花生产量。DA-6 处理能增加冬枣果实单果质量, 促进生长, 发育后期促进 Vc 含量的提升, 从而促进冬枣果实品质发育^[15]。施晓明等^[16]也发现, 用适宜浓度的 DA-6 溶液浸种, 可显著提高大豆叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性, 降低丙二醛(MDA)含量, 增强植株抗逆性。

DA-6 的推广应用, 符合我国农业可持续健康发展的要求, 是大有可为的阳光产业, 而关于 DA-6 在水培生菜上的研究还未见报道。此外, 前人研究报道

中大多将 DA-6 喷施在蔬菜叶片上, 而配制成营养液由植物根系直接吸收的研究较少。在水培营养液中添加 DA-6 将比直接喷施更有利于植株的吸收利用, 可减少浓度用量, 提高使用效率, 并且省工省时, 从而降低了经济成本。此外, DA-6 喷施在植株叶片上会造成一定浪费, 添加于营养液中则避免了这个问题。因此, 本试验在水培生菜使用的营养液中添加 DA-6, 研究不同浓度 DA-6 对生菜生物量、品质及叶片生理特性的影响, 以期确定水培生菜使用的最佳 DA-6 浓度, 为 DA-6 在水培生菜上的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 5—6 月在山东省泰安市山东农业大学“土肥资源高效利用国家工程实验室”和“国家缓控释肥工程技术研究中心中试基地”的温室内进行($117^{\circ}08'E$, $36^{\circ}09'N$)。试验材料为“奶油生菜”。栽培生菜的营养液参照专门适用于生菜水培的山崎营养液, 其组成为: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 KNO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 EDTA-Fe 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 H_3BO_3 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。

1.2 试验设计

试验为单因素完全随机区组设计, 设置 0 (对照)、20、100、500、1000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 5 个 DA-6 营养液浓度处理。5 月 7 日将浸种 5 h 的生菜种子播于 50 孔的穴盘中, 基质为珍珠岩、蛭石和草炭, 待幼苗长至 3 片子叶, 叶片充分展开时, 洗净根部基质并包裹过滤棉, 于 6 月 2 日选择长势均匀的生菜移栽至水培箱(规格统一, 容积 10 L)中进行水培。每个处理 10 株, 重复 4 次, 随机排列, 每 5 d 更换一次营养液, 于 6 月 28 日进行生菜的收获和各项指标的测定。

1.3 测定项目及方法

采收时每处理收取 5 株称量地上部及根系鲜质量, 然后将生菜放入烘箱 105°C 杀青 30 min, 75°C 烘 48 h 至恒重, 烘箱内冷却后称量地上部及根系干质量。另取 5 株鲜样叶片测定植株品质和酶指标, 根系

指标使用根系扫描仪(万深 LA-S 根系扫描分析系统)进行测定。抗坏血酸采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝-G250 染色法测定;可溶性糖采用苯酚比色法测定;硝酸盐采用水杨酸法测定;根系活力采用 TTC 法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)采用比色法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[17]。

叶绿素 SPAD 值使用日本 Minolta 公司生产的 SPAD-502 叶绿素仪测定植株叶片;叶绿素荧光参数(PS II 实际光化学效率 Φ PS II、PS II 最大光化学效率 Fv/Fm、PS II 潜在光化学活性 Fv/Fo)使用英国 Hansatech 公司生产的 FMS-2 脉冲调制式荧光仪测定;叶片光合特性指标(净光合速率 Pn、气孔导度 Gs、胞间 CO₂ 浓度 Ci、蒸腾速率 Tr)采用 LI-6400XT 便携式光合速率仪测定。测定时间为 9:00—11:00。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 SAS 8.0 软件进行处理和统计分析,采用 ANOVA 进行方差分析,采用 Duncan's Multiple Range Test 方法检验各处理平均数在 $P<0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 DA-6 对生菜生长发育的影响

2.1.1 DA-6 对生菜生物量的影响

由表 1 可知,与对照相比,除高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理降低了生物量,增加了根冠比,其余添加 DA-6 处理均不同程度地提高了水培生菜的地上部和根系干鲜重,降低了根冠比,并且差异显著。随着 DA-6 浓度的增加,生菜的生物量呈先增加后降低的趋势。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理较其他处理显著增加了

生菜地上部干鲜重和根系干鲜重,增幅分别达到 33.58%~742.86%、11.56%~286.79%、18.60%~264.29% 和 11.12%~267.83%,显著减低了根冠比,降幅达到 14.29%~128.57%,但与 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理差异未达到显著水平。高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的地上部干鲜重和根系干鲜重分别较对照处理显著减少了 100%、45.47% 和 71.42%、15.89%,根冠比较对照处理显著增加了 10.34%。

2.1.2 DA-6 对生菜根系的影响

不同浓度 DA-6 处理对生菜根系影响显著,随着 DA-6 浓度的增加,生菜根系各项指标呈先增加后减少的趋势,各个处理之间差异显著(表 2)。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理较其他处理显著增加了生菜根总长度、根表面积、根体积、根尖数和根系活力,增幅分别达到 9.89%~150.88%、23.69%~358.39%、68.04%~969.41%、8.93%~127.92% 和 11.43%~39.29%。高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理根总长度、根表面积、根体积、根尖数和根系活力分别较对照处理显著减少了 56.85%、135.39%、390.81%、90.95% 和 25.81%。

2.2 DA-6 对生菜品质的影响

由表 3 可知,不同浓度的 DA-6 对生菜各项品质指标影响不同,随着 DA-6 浓度的增加,硝酸盐含量先降低后提高,但抗坏血酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量则先增加后减少。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的硝酸盐含量较对照处理显著降低了 23.40%,而抗坏血酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量分别较对照处理显著增加了 24.24%、64.29% 和 22.92%。高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的可溶性糖含量和对照处理相比差异不显著,其他指标差异显著。500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的硝酸盐、可溶性蛋白含量和对照处理相比差异显著,抗坏血酸和可溶性糖含量差异则未达到显著水平。除可溶性蛋白外,100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的其他各项品质

表 1 不同浓度 DA-6 对生菜生物量的影响

Table 1 Effect of different DA-6 concentrations on biomass of lettuce

处理 Treatment/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	单株地上部鲜重 Shoot fresh mass per plant/g·株 ⁻¹	单株根系鲜重 Root fresh mass per plant/g·株 ⁻¹	单株地上部干重 Shoot dry mass per plant/g·株 ⁻¹	单株根系干重 Root dry mass per plant/g·株 ⁻¹	根冠比 Ratio of root to shoot
0(对照)	47.35±0.83d	2.99±0.07d	0.84±0.03d	0.24±0.02d	0.29±0.01b
20	112.85±1.44b	8.54±0.05b	2.65±0.05b	0.43±0.01b	0.16±0d
100	125.90±1.02a	9.49±0.04a	3.54±0.04a	0.51±0a	0.14±0d
500	60.69±0.98c	5.48±0.02c	1.54±0.03c	0.33±0.01c	0.21±0c
1000	32.55±1.42e	2.58±0.06e	0.42±0.03e	0.14±0.01e	0.32±0.01a

注:同列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

指标与 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理相比无差异。

2.3 DA-6 对生菜生理特性的影响

2.3.1 DA-6 对生菜 SPAD 值、光合特性和叶绿素荧光特性的影响

不同浓度的 DA-6 对生菜叶片 SPAD 值、光合特性和叶绿素荧光特性指标影响不同(表 4)。叶片 SPAD 值随着 DA-6 浓度的增加先增加后降低,100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 SPAD 值较对照处理显著增加了 25.83%,1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 SPAD 值显著低于对照处理。叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)随着 DA-6 浓度的增加先增加后降低,而胞间 CO₂ 浓度(Ci)随着 DA-6 浓度的增加先降低后增加。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的叶片的 Pn、Gs 和 Tr 值较对照处理分别显著增加了 60.18%、73.33% 和 60.26%,Ci 较对照处理显著减少了 45.83%。1000 $\mu\text{g}\cdot$

L⁻¹ DA-6 处理的各项光合特性指标显著低于对照处理。叶片 PS II 实际光化学效率($\Phi\text{PS II}$)、PS II 最大光化学效率(Fv/Fm)和 PS II 潜在光化学活性(Fv/Fo)随着 DA-6 浓度的增加先增加后降低。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 $\Phi\text{PS II}$ 、Fv/Fm 和 Fv/Fo 值较对照处理分别显著增加了 6.33%、7.95% 和 17.48%。除 500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理和对照处理的 Fv/Fo 值差异不显著外,其他各处理间的光合特性指标差异显著。

2.3.2 DA-6 对生菜保护性酶活性及丙二醛含量的影响

由表 5 可知,不同浓度的 DA-6 对生菜叶片酶活性及丙二醛含量的影响不同,随着 DA-6 浓度的增加,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性先增加后减少,而丙二醛(MDA)含量则先降低后提高。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 MDA 含量较对照处理显著降低了 36.79%,而 SOD、POD 和

表 2 不同浓度 DA-6 对生菜根系的影响
Table 2 Effect of different DA-6 concentrations on root of lettuce

处理 Treatment/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	单株根总长度 Root total length per plant/ $\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$	单株根表面积 Root area per plant/ $\text{cm}^2\cdot\text{株}^{-1}$	单株根体积 Root volume per plant/ $\text{cm}^3\cdot\text{株}^{-1}$	根尖数 Root number/个	根系活力 Root activity/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$
0(对照)	994.46±6.67d	231.56±4.24d	5.55±0.09d	832.33±12.39d	0.31±0.01d
20	1 419.45±14.11b	440.67±23.12b	16.21±1.16b	1 459.00±20.22b	0.35±0b
100	1 559.77±13.54a	545.07±13.29a	27.24±1.36a	1 589.33±8.37a	0.39±0.02a
500	1 246.83±25.88c	325.67±10.02c	8.75±0.51c	1 371.33±14.19c	0.33±0c
1000	621.71±11.06e	118.91±4.93e	2.55±0.17e	697.33±12.81e	0.28±0e

表 3 不同浓度 DA-6 对生菜品质指标的影响
Table 3 Effect of different DA-6 concentrations on quality index of lettuce

处理 Treatment/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	硝酸盐 Nitrate/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	抗坏血酸 Ascorbic acid/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	可溶性糖 Soluble sugar/%	可溶性蛋白 Soluble protein/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
0(对照)	0.58±0.01b	0.33±0.01b	0.14±0.01b	3.49±0.08d
20	0.49±0d	0.40±0.01a	0.22±0.02a	4.04±0.04b
100	0.47±0.01d	0.41±0.02a	0.23±0.03a	4.29±0.03a
500	0.55±0.01c	0.35±0.01b	0.16±0ab	3.74±0.03c
1000	0.66±0.01a	0.23±0.02c	0.14±0.02b	3.17±0.07e

表 4 不同浓度 DA-6 对生菜 SPAD 值、光合特性和叶绿素荧光特性的影响
Table 4 Effects of different DA-6 concentrations on SPAD value, photosynthesis indicator and chlorophyll fluorescence parameters of lettuce

处理 Treatment/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	SPAD 值 SPAD value	光合速率 Photosynthetic rate/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气孔导度 Stomatal conductance/ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	蒸腾速率 Transpiration rate/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PS II 实际 光化学效率 $\Phi\text{PS II}$	PS II 最大 光化学效率 Fv/Fm	PS II 潜在 光化学活性 Fv/Fo
0(对照)	25.13±0.41d	13.46±0.17d	0.15±0d	115.95±1.01b	2.34±0.04d	0.79±0.83d	0.88±0.07d	7.61±0.03c
20	29.07±0.32b	19.07±0.06b	0.21±0.01b	93.97±1.38d	3.35±0.09b	0.82±0.22b	0.92±0.05b	8.45±0.14b
100	31.62±0.35a	21.56±0.33a	0.26±0.01a	79.51±1.98e	3.75±0.07a	0.84±0.34a	0.95±0.04a	8.94±0.07a
500	26.27±0.24c	16.09±0.42c	0.19±0c	106.48±1.38c	2.87±0.06c	0.81±0.98c	0.89±0.02c	7.82±0.03c
1000	22.49±0.38e	12.33±0.3e	0.13±0.01e	128.05±2.03a	2.09±0.03e	0.78±0.47e	0.86±0.06e	7.15±0.06d

表5 不同浓度 DA-6 对保护性酶活性及丙二醛的影响

Table 5 Effects of different DA-6 concentrations on enzyme activities and MDA of lettuce

处理 Treatment/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	超氧化物歧化酶 SOD/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}, \text{FW}$	过氧化物酶 POD/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}, \text{FW}$	过氧化氢酶 CAT/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}, \text{FW}$	丙二醛 MDA/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}, \text{FW}$
0(对照)	136.17±0.9d	27.74±0.59d	13.48±0.4cd	2.64±0.09b
20	156.37±1.54b	37.91±0.92b	16.45±0.96b	2.12±0.04d
100	163.85±1.18a	42.05±1.31a	22.28±0.57a	1.93±0.02d
500	144.05±1.86c	32.40±0.68c	15.80±0.54bc	2.33±0.05c
1000	124.59±1.94e	23.80±0.72e	12.26±0.59d	2.86±0.05a

CAT 活性分别较对照显著增加了 20.33%、51.59% 和 65.28%。除 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理和 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 MDA 含量差异不显著外,其他各处理之间各项酶活性指标差异显著。高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 SOD、POD 和 CAT 活性分别较对照处理显著降低了 9.29%、16.55% 和 9.95%,MDA 含量较对照处理显著提高了 8.33%。

3 讨论

较高的生物量是作物高产的前提,而物质积累又是以根系对养分的吸收为基础。细胞分裂素类植物生长调节剂能够增加植株根系表面积,促进植物对水和营养物质的吸收,进而提高植物产量和品质^[18]。DA-6 作为一种新型的植物生长调节剂,与植物激素类物质一样,具有促进植物生长、延缓衰老的作用^[19-20]。此外,DA-6 的使用可以提高不同光强下 SOD、CAT 和 APX 等保护酶活性,降低了 $\text{O}_2\cdot$ 产生速率,防止活性氧对细胞膜系统和叶绿体结构的破坏^[21],它还能改变等离子体膜,调节植物叶片气孔运动,从而促进叶绿体发育和光合作用等生理过程^[21,22]。本试验研究结果表明,不同浓度的 DA-6 对生菜叶片各种酶活性及丙二醛含量的影响不同。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 MDA 含量较对照显著降低了 36.79%,而 SOD、POD 和 CAT 活性分别较对照显著增加了 20.33%、51.59% 和 65.28%,高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 SOD、POD 和 CAT 活性则显著低于对照,MDA 含量显著高于对照。这是因为适宜浓度的 DA-6 提高了生菜叶片 SOD、POD 和 CAT 活性,增加了对植株体内自由基的清除能力,从而降低了 MDA 含量,与于彩莲等^[22]对龙葵和苗鹏飞等^[8]对草莓的研究结果类似。此外,生菜叶片 SPAD 值、Pn、Gs、Tr、 $\Phi\text{PS II}$ 、Fv/Fm 和 Fv/Fo 值都随着 DA-6 浓度的增加先增加后降低,而 Ci 值则随着 DA-6 浓度的增加先降低后增加。100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的 SPAD 值较对照显著增加了 25.83%;叶片的

Pn、Gs 和 Tr 值较对照分别显著增加了 60.18%、73.33% 和 60.26%,Ci 较对照显著减少了 45.83%,叶片 $\Phi\text{PS II}$ 、Fv/Fm 和 Fv/Fo 值较对照分别显著增加了 6.33%、7.95% 和 17.48%。这也与苗鹏飞等^[8]和梁艳萍等^[12]在草莓,梁广坚等^[23]在菠菜上的研究结果相似。为了明确 DA-6 对生菜叶片生理特性的影响,阐明其对作物生长效应影响的具体机理,还需进一步研究,同时探讨 DA-6 对生菜叶片及根系微生物的影响。

在生菜营养液中添加适宜浓度的 DA-6 提高了生菜叶片 SOD、POD 和 CAT 活性,降低了 MDA 含量,并增加了叶片 SPAD 值,优化光合和叶绿素荧光特性,从而提升了作物的产量和品质。张明才等^[24]在花生上的研究表明,低浓度 DA-6 处理作物可促进其碳水化合物代谢和物质积累,从而显著提高作物产量,并能改善作物品质。本试验中,随着 DA-6 浓度的增加,生菜的生物量呈先增加后降低的趋势,100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理较其他处理显著增加了生菜地上部干鲜重和根系干鲜重,增加了根表面积,提升了根系活力,与 Glinka^[25]在向日葵和张子龙等^[26]在水稻上的研究类似;但高浓度 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理较对照降低了生菜生物量和根系活力。这是因为 DA-6 在适宜浓度时对植物生长有促进作用,而在高浓度时对植物生长有抑制作用^[27]。梁广坚等^[23]在菠菜上的研究发现,适宜浓度 DA-6 处理菠菜能显著提高叶片 Vc 和可溶性糖含量,从而改善了菠菜的品质。本试验中,最佳浓度 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的硝酸盐含量较对照显著降低了 23.40%,而抗坏血酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量分别较对照显著增加了 24.24%、64.29% 和 22.92%,生菜品质大为提升,与周天等^[27]在野大麦上的研究结果相似。除可溶性蛋白外,100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理的其他各项品质指标与 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DA-6 处理相比无差异。因此,适宜浓度的 DA-6 通过提高生菜叶片保护性酶活性,增强叶片的光合能力来促进生菜生长,进而在增加产量的同时改善其品质。DA-6 在农作物上的使

用主要是对植株进行喷施,通常喷施浓度在 $10\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,浓度较大。本试验是在水培生菜的营养液中添加DA-6,由于植株根系直接接触营养液,吸收效率比喷施要提高很多,故所需浓度大幅降低。因此,水培营养液中添加DA-6相比直接喷施更有利于植株的吸收利用,优势明显。植株根系直接接触营养液,吸收效率比喷施提高,降低了施用浓度,但还需考虑吸收面积和总量的问题。实际生菜无土栽培生产中所需DA-6用量及回收液处理还需进一步探讨,通过研究DA-6喷施在生菜生产上的最佳用量及二者的效果对比分析,得出如何在生菜无土栽培生产中施用DA-6更为有力的依据,进而指导农业生产实践。

4 结论

在水培生菜营养液中添加适宜浓度的DA-6可以促进植株根系生长,提升根系活力,并通过调节叶片SOD、POD和CAT活性,减少MDA含量,保持植物体内活性氧代谢平衡。此外,植物光合能力加强,从而促进植株生长,增加生菜产量,同时提升生菜品质。本试验条件下,过高和过低的DA-6浓度均不利于生菜的生长,在水培生菜营养液中推荐添加的DA-6最佳浓度是 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,此浓度能够保证生菜的优质优产。

参考文献:

- [1] 宋晓晓,邹志荣,曹凯,等.不同有机基质对生菜产量和品质的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(6):154-160.
SONG Xiao-xiao, ZOU Zhi-rong, CAO Kai, et al. Effects of different organic substrates on the yield and quality of lettuce[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(6):154-160.
- [2] Blomzandstra M, Eenink H. Nitrate concentration and reduction in different genotypes of lettuce[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1986, 111(6):908-911.
- [3] 别之龙,徐加林,杨小峰.营养液浓度对水培生菜生长和硝酸盐积累的影响[J].农业工程学报,2005,21(增刊2):109-112.
BIE Zhi-long, XU Jia-lin, YANG Xiao-feng. Effects of different nutrient solution concentrations on the growth and nitrate accumulation of hydroponic lettuce[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Suppl2):109-112.
- [4] Eichholzer M, Gutzwiller F. Dietary nitrates, nitrites, and n-nitroso compounds and cancer risk: A review of the epidemiologic evidence[J]. Nutrition Review, 1998, 56(4):95-105.
- [5] Santamaria P. Review nitrate in vegetables: Toxicity, content, intake and EC regulation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(1):10-17.
- [6] 余意,杨其长,刘文科. LED短期连续光照与氮营养对水培生菜品质的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):3361-3366.
YU Yi, YANG Qi-chang, LIU Wen-ke. Effects of short-term continuous lighting with LED lamps and nitrogen nutrition conditions on quality of hydroponically grown purple lettuce[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1):3361-3366.
- [7] 陈敏资.二烷氨基乙醇羧酸酯对紫罗兰生理活性的影响[J].园艺学报,1995,22(2):201-202.
CHEN Min-zi. Effect of DA-6 on the physiological activity in matthiola incana[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1995, 22(2):201-202.
- [8] 苗鹏飞,刘国杰,李绍华,等. DA-6对秋季草莓叶片光合速率和植株生长的影响[J].应用生态学报,2007,18(12):2722-2726.
MIAO Peng-fei, LIU Guo-jie, LI Shao-hua, et al. Effects of foliar spraying DA-6 on the photosynthetic rate and plant growth of strawberry in autumn[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12):2722-2726.
- [9] 杨清,艾沙江·买买提,王志霞,等. DA-6对桃树叶片叶绿素合成途径的调控研究[J].应用生态学报,2012,39(4):621-628.
YANG Qing, MAIMAITI A, WANG Zhi-xiao, et al. Effects of DA-6 on chlorophyll biosynthesis pathway in peach leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 39(4):621-628.
- [10] 郑先福,孟磊,蒋媛媛,等.己酸二乙氨基乙醇酯的合成及应用研究[J].农药学报,2013,5(4):48-52.
ZHENG Xian-fu, MENG Lei, JIANG Yuan-yuan, et al. Study on synthesis and application of hexanoic acid 2-(diethylamino)ethyl ester[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2013, 5(4):48-52.
- [11] 欧阳立明,张舜杰,陈剑锋,等.不同植物生长物质对水培黄瓜幼苗生长和根系发育的影响[J].中国农学通报,2016,26(3):161-166.
OUYANG Li-ming, ZHANG Shun-jie, CHEN Jian-feng, et al. Effects of different plant growth substances on the growth and development of water cultured cucumber seedling[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 26(3):161-166.
- [12] 梁艳萍,牟红梅,王晶晶,等.不同光强下DA-6对草莓光合作用及抗氧化酶活性的影响[J].中国农业大学学报,2011,16(5):71-76.
LIANG Yan-ping, MU Hong-mei, WANG Jing-jing, et al. Effects of DA-6 on leaf photosynthesis and antioxidant enzyme activities of strawberry under different light intensities[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(5):71-76.
- [13] 姚艳丽,孙光明,刘忠华,等. DA-6和DCPTA对菠萝果实品质发育的影响[J].热带作物学报,2011,32(7):1218-1222.
YAO Yan-li, SUN Guang-ming, LIU Zhong-hua, et al. Effect of DA-6 and DCPTA on the quality development of pine apple[J]. Journal of Tropical Crops, 2011, 32(7):1218-1222.
- [14] Brown R H. Influence of succinic acid 2,2-dimethylhydrazide on yield and morphological characteristic of starve peanut (Arachis hypogaea L.)[J]. Crop Science, 1973, 13(5):507-510.
- [15] 谭晓红,王贵禧,陈金印,等.采前DA-6和DCPTA处理对冬枣果实品质发育的影响[J].林业科学研究,2007,20(4):485-489.
TAN Xiao-hong, WANG Gui-xi, CHEN Jin-yin, et al. Effects of DA-6 and DCPTA pre-harvest treatment on the quality promotion of 'Dongzao' jujube (Zizyphus jujube Mil. l cv. 'Dongzao') fruits[J]. Forest Research, 2007, 20(4):485-489.
- [16] 施晓明,李淑芹,许景钢,等.干旱胁迫下DA-6浸种对大豆苗期叶

- 片保护酶活性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(9): 48-51.
- SHI Xiao-ming, LI Shu-qin, XU Jing-gang, et al. Effect of soaking the seeds in DA-6 on protective enzyme activities in leaves of soybean seedling under drought stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 40(9): 48-51.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI He-sheng. Principle and technology on physiological and biochemical test of plant[M]. Beijing: Higher Educational Press, 2000.
- [18] Ookawa T, Naruoka Y, Sayama A, et al. Cytokinin effects on ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase oxygenase and nitrogen partitioning in rice during ripe-ning[J]. Crop Science, 2004, 44(6): 2107-2115.
- [19] Darusslam M, Michael A C, John W P. Auxin control of photo-assimilate transport to and with in developing grains of wheat[J]. Aust J Plant Physiol, 1998, 25(1): 69-77.
- [20] Swain S M, Reid J B, Kamiya Y. Gibberellins are required for embryo growth and seed development in pea[J]. The Plant Journal, 1997, 12(6): 1329-1338.
- [21] Pessaraklim. Handbook of Photosynthesis[M]. 2nd Edition. London: CRC Press, 2005.
- [22] 于彩莲, 刘波, 徐鑫. DA-6 强化龙葵修复高镉污染土壤的作用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3485-3490.
- YU Cai-lian, LIU Bo, XU Xin. Effect of DA-6 on enhanced remediation efficiency of Solanum nigrum L. in serious cadmium polluted soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(16): 3485-3490.
- [23] 梁广坚, 李芸瑛, 邵玲. DA-6 和 BR+GA₃ 对菠菜生长和光合速率的影响[J]. 园艺学报, 1998, 25(4): 356-360.
- LIANG Guang-jian, LI Yun-ying, SHAO Ling. Effect of DA-6 and BR+GA₃ on growth and photosynthetic rate in spinach[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1998, 25(4): 356-360.
- [24] 张明才, 何钟佩, 田晓莉, 等. 植物生长调节剂 DTA-6 对花生产量、品质及其根系生理调控研究[J]. 河南农业大学学报, 2004, 38(1): 93-95.
- ZHANG Ming-cai, HE Zhong-pei, TIAN Xiao-li, et al. Regulation of plant growth regulator DTA-6 on peanut yield and quality and its root physiology[J]. Journal of Henan University, 2004, 38(1): 93-95.
- [25] Glinka Z. Absciscic acid promotes both volume flow and iron release to the xylem in sunflower roots[J]. Plant Physiology, 1980, 65(3): 537-540.
- [26] 张子龙, 梁颖. DA-6 对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(3): 220-221.
- ZHANG Zi-long, LIANG Ying. Effects of DA-6 on seed germination and seedling growth in rice[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001, 23(3): 220-221.
- [27] 周天, 胡永军, 周晓梅, 等. DA-6 对野大麦幼苗光合作用和生长的影响[J]. 草业科学, 2004, 21(4): 32-34.
- ZHOU Tian, HU Yong-jun, ZHOU Xiao-mei, et al. Effect of DA-6 on seedling photosynthesis and growth of wild barley hordeum brevisubulatum[J]. Pratacultural Science, 2004, 21(4): 32-34.