

李 芮,李建设,高艳明,等. 农用硒肥对采后植物工厂水培生菜品质的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):159-165.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.20.025

农用硒肥对采后植物工厂水培生菜品质的影响

李 芮¹, 李建设^{1,2}, 高艳明^{1,2}, 李邦耀¹

(1. 宁夏大学农学院,宁夏银川 750021; 2. 宁夏现代设施园艺工程技术研究中心,宁夏银川 750021)

摘要:以富兰德里奶油生菜为试材,通过采后施加浓度为0(CK)、0.25、0.50、1.00 mg/L的4种不同农用硒肥,研究采后施用不同种类及浓度的农用硒肥对植物工厂水培生菜处理24 h后品质及硒含量的影响。结果表明,采后施用农用硒肥可以提高生菜的品质和硒含量。1.00 mg/L硒元素水溶调理剂处理,硒含量最高(97.38 μg/kg),其次是0.50 mg/L螯合硒微量元素水溶肥处理(78.05 μg/kg),二者显著高于其他处理;采后施用农用硒肥可提高生菜的根系活力、可溶性总糖、纤维素、淀粉含量,降低硝酸盐、丙二醛含量。对其品质指标进行主成分分析,综合品质最好的是0.50 mg/L螯合硒微量元素水溶肥处理,*D*值为0.94,其次是1.00 mg/L硒元素水溶调理剂处理(*D*值为0.77)。兼顾叶片硒含量、施肥成本和品质,以0.50 mg/L螯合硒微量元素水溶肥最佳。0.50 mg/L螯合硒微量元素水溶肥采后处理24 h有利于水培生菜叶片富硒,且施肥成本较低,提高了水培生菜的品质及抗逆性。因此,0.50 mg/L螯合硒微量元素水溶肥处理为植物工厂水培生菜采后富硒的最佳农用硒肥及浓度。

关键词:生菜;植物工厂;采后施肥;农用硒肥;品质;硒含量

中图分类号: S636.206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)20-0159-07

叶用莴苣又称为生菜。奶油生菜是莴苣的一个变种,味道甘甜微苦,颜色翠绿,口感爽脆芳香,因适合生吃而得名,属菊科莴苣属^[1]。生菜在广大群众的日常生活中占有重要的地位,是居民生活食物中的必需品^[2]。随着生活水准的改善,消费者对生菜的安全性和品质要求也逐步提升,传统的种植方式难以确保产品的安全卫生。植物工厂内种植的生菜不受四季限制,全年皆可种植,品质好、周期短、无病虫害,解决了连坐障碍问题,还能最大限度避免农药的使用,受到众多消费者的喜爱^[3]。

硒是人体、动物、植物必需的微量元素,有抗氧化、防癌抗癌、拮抗重金属毒性、协同抗氧化等作用^[4]。硒在自然界含量稀少,且分布不均,全世界有40多个国家和地区缺硒,在我国约有72%的土地属于贫硒或缺硒土壤^[5]。人体缺硒会导致许多疾病。因此,缺硒被认为是世界上最需要解决的问题之一。适量的硒有利于植物的生长发育和矿物质的吸收利用,同时,它还能增强抵御生物和非生

物胁迫的能力^[6]。与一般蔬菜相比,富硒蔬菜具有安全、方便易得、成本低、补硒效果好、便于商业化推广和以食补代替药补等优点。在提高蔬菜硒含量的方面,大量研究已充分证实,采前施用外源硒可以显著提高蔬菜硒含量和品质^[7-9]。

目前,仅少数研究表明采后施肥可以提高果蔬品质,田永强等研究了采后对温室甜樱桃喷施叶面肥的影响,结果发现采后喷施叶面肥,甜樱桃叶片的鲜质量和干质量没有变化,但增加了叶片叶绿素含量和净光合速率^[10]。赵晓彤等研究了采后亚硒酸钠处理对低温贮藏品质的影响,结果表明,2.0 mg/L亚硒酸钠浸泡20 min处理可延缓菠菜及油麦菜失质量率的上升,抑制叶绿素含量的下降,减缓菠菜腐烂率及油麦菜褐变度的上升,延长其贮藏保鲜期^[11]。但针对于蔬菜采后硒处理研究较少。

本研究选用目前市场上在售的4种农用硒肥,开展了对水培生菜采后添加不同农用硒肥及浓度的筛选试验,研究采后施硒24 h对水培生菜品质的影响,旨在为植物工厂水培生菜采后施硒的推广和应用提出可参考的意见和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2020年5月下旬开始,试验地点为银川

收稿日期:2021-01-08

项目基金:宁夏“十三五”重大科技项目(编号:2018BBF02012)。

作者简介:李 芮(1997—),女,宁夏银川人,硕士研究生,主要从事设施蔬菜栽培生理与生态研究。E-mail:846665179@qq.com。

通信作者:高艳明,硕士,教授,主要从事设施蔬菜栽培生理与生态研究。E-mail:myangao@163.com。

国家农业科技园区(宁夏贺兰园艺产业园)科研开发区植物工厂。供试生菜品种为荷兰富兰德里奶油生菜,购买于北京云靴科技有限责任公司。于 5 月 25 日将荷兰富兰德里奶油生菜种子播种于 96 孔穴盘进行育苗,于 6 月 1 日进行分苗,6 月 7 日定植到泡沫栽培槽(长×宽×高为 480 cm×40 cm×5 cm)内,株距 12.6 cm,行距 10 cm。处理前均以日本园试生菜配方均衡营养液进行供液,每天 07:00—19:30 为有效循环供给营养液时间,定植后 35 d 收获(7 月 12 日)。

收获当天在水培营养液中加入不同农用硒肥,形成硒浓度为 0、0.25、0.50、1.00 mg/L 的 4 个浓度梯度处理。农用硒肥分别为硒元素水溶调理剂(天津市汉邦植物保护剂有限责任公司,含硒量 $\geq 0.5\%$,存在形态:络合态硒,形态:固态,包装规格:200 g/袋)、螯合硒微量元素水溶肥(山东绿陇作物营养有限公司,含硒量 ≥ 15 g/L,存在形态:螯合硒,形态:液态,包装规格:1 000 mL/瓶)、农博士硒肥(济南农博士绿色肥料有限公司,含硒量 ≥ 20 g/L,形态:液态,包装规格:500 mL/瓶)、希之源富硒营养液(成都新朝阳作物科学有限公司,含硒量 ≥ 2 g/L,形态:液态,包装规格:250 mL)。试验中所用营养液配方为日本园试生菜配方均衡营养液。

1.2 试验设计

试验为双因素试验,第 1 个因素为不同农用硒肥,共采用 4 种农用硒肥:T1(硒元素水溶调理剂)、T2(螯合硒微量元素水溶肥)、T3(农博士硒肥)、T4(希之源富硒营养液);第 2 个因素为不同硒肥浓度,共 4 个浓度梯度:C1(0.25 mg/L)、C2(0.50 mg/L)、C3(1.00 mg/L)、不添加硒肥(CK),见表 1,共 13 个处理,每个处理 5 株,重复 3 次。在桶状塑料碗(上半径 14 cm、下半径 9.2 cm、高 8.5 cm)中添加 250 mL 水培营养液,配制成浓度为 0、0.25、0.50、1.00 mg/L 的 4 种不同农用硒肥,将收获后的水培生菜根部分别放进桶状塑料碗中浸泡 24 h,在生菜添加硒肥 24 h 后,进行各项指标的测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生菜生理指标测量 每个处理选定 3 株,再取可食用叶片用清水清洗,吸干水分,叶绿素含量采用手持叶绿素仪测量。根系活力测定采用 TTC 法;丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸比色法^[12]。

1.3.2 生菜品质测定 维生素 C 含量测定采用钼蓝比色法;可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝

表 1 不同农用硒肥及浓度处理

| 处理 | 农用硒肥 | 硒浓度 (mg/L) |
|------|------------|------------|
| CK | 不添加 | 0 |
| T1C1 | 硒元素水溶调理剂 | 0.25 |
| T1C2 | 硒元素水溶调理剂 | 0.50 |
| T1C3 | 硒元素水溶调理剂 | 1.00 |
| T2C1 | 螯合硒微量元素水溶肥 | 0.25 |
| T2C2 | 螯合硒微量元素水溶肥 | 0.50 |
| T2C3 | 螯合硒微量元素水溶肥 | 1.00 |
| T3C1 | 农博士硒肥 | 0.25 |
| T3C2 | 农博士硒肥 | 0.50 |
| T3C3 | 农博士硒肥 | 1.00 |
| T4C1 | 希之源富硒营养液 | 0.25 |
| T4C2 | 希之源富硒营养液 | 0.50 |
| T4C3 | 希之源富硒营养液 | 1.00 |

G-250 染色法;可溶性糖、淀粉、纤维素含量测定采用蒽酮比色法;硝酸盐含量测定采用水杨酸-硫酸比色法;还原性糖含量测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[12]。另取一部分新鲜植株叶片于烘箱内 105 ℃杀青 15 min,然后 80 ℃烘干,过 0.50 mm 筛,总硒含量采用硝酸湿式消解-电感耦合等离子体发射光谱仪测定(ICP-OES)^[13]。

1.4 数据处理与分析

试验数据统计使用 Excel 2019;数据分析使用 SPSS 25.0,差异显著性分析使用 Duncan 新复极差($P < 0.05$),以及主成分分析、隶属函数分析,数据以平均值 \pm 标准误表示;用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 农用硒肥对采后生菜叶片硒含量的影响

与土壤施硒相比,水培富硒法不仅可以减少硒施量,还可以提高蔬菜中硒的含量^[14]。在水培营养液中吸附和固定硒的物质很少,充分保证施入硒的生物有效性,因而水培蔬菜对硒的吸收利用率较高^[15]。由表 2 可知,硒含量表现为 T4C3 > T4C2 > T1C3 > T2C2 > T2C1 > T3C3 > T4C1 > T3C2 > T1C2 > T1C1 > T3C1 > T2C3 > CK。经过不同农用硒肥及浓度的处理后,生菜的叶片总硒含量均比对照显著增加。其中 T4C2 和 T4C3 叶片硒含量显著高于 CK,分别较 CK 增加 243.56% 和 384.55%,且其生菜叶片中的硒含量超出《食品中硒限量卫生标准》范围^[16]。在《食品中硒限量卫生标准》硒安全含量范

围内, T1C3 处理的生菜叶片中硒含量显著高于 T2C2, 较 T2C2 增加了 24.77%。T2C1 与 T2C2 处理间无显著性差异。T1C1、T1C2、T2C3、T3C1 处理之间叶片的硒含量也无显著性差异。根据不同处理间施用农用硒肥的种类和浓度, 计算各处理的成本。成本表现为 CK < T3C1 < T2C1 < T3C2 < T2C2 < T3C3 < T1C1 = T2C3 < T1C2 < T4C1 < T1C3 < T4C2 < T4C3。从叶片硒含量和农用硒肥成本 2 个方面因素综合考虑, T2C2 处理提高了生菜叶片硒含量, 并且在农用硒肥的施用成本上花费较少, 以最少的投入换取了最大的效益。

表 2 生菜叶片硒含量及农用硒肥成本

| 处理 | 硒含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$) | 成本 (元/1 000 棵) |
|------|------------------------------------|-------------------|
| CK | 33.72 \pm 0.04h | 0 |
| T1C1 | 49.41 \pm 3.71g | 1.00 |
| T1C2 | 49.48 \pm 2.89g | 2.00 |
| T1C3 | 97.38 \pm 0.67c | 4.00 |
| T2C1 | 69.02 \pm 2.90de | 0.25 |
| T2C2 | 78.05 \pm 3.26d | 0.50 |
| T2C3 | 44.94 \pm 4.15g | 1.00 |
| T3C1 | 47.37 \pm 2.82g | 0.23 |
| T3C2 | 55.07 \pm 1.16fg | 0.45 |
| T3C3 | 64.16 \pm 6.21ef | 0.90 |
| T4C1 | 55.18 \pm 3.95fg | 2.10 |
| T4C2 | 115.85 \pm 5.17b | 4.20 |
| T4C3 | 163.39 \pm 5.02a | 8.40 |

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

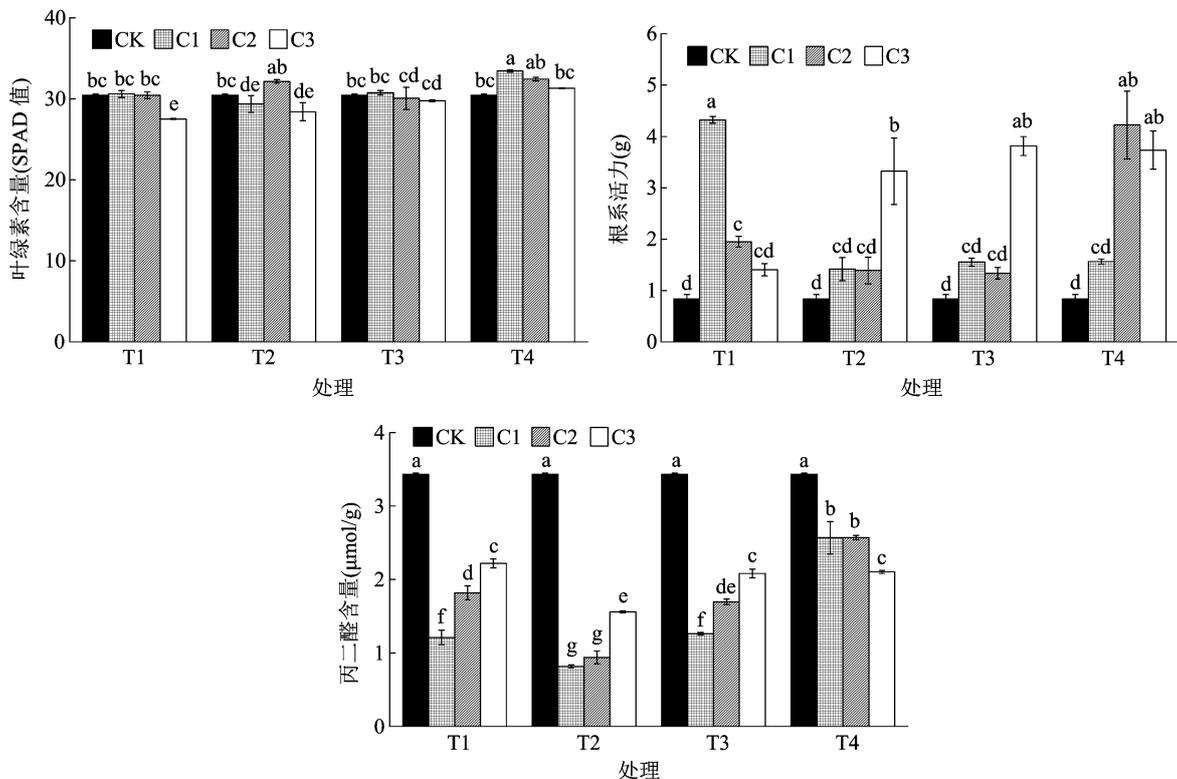
2.2 农用硒肥对采后生菜生理指标的影响

由图 1 可知, 对照组处理的叶绿素含量为 30.47, T2C2、T3C1、T4C1、T4C2、T4C3 各处理的叶绿素含量较对照组, 分别增加了 5.46%、0.97%、9.73%、6.44%、2.72%。T2 农用硒肥在浓度为 C2 (0.50 mg/L) 时叶绿素含量最大, 为 32.13。T1、T3、T4 农用硒肥随着硒浓度的增加整体呈现下降趋势, T1C3、T2C1、T2C3、T3C3 各处理比对照分别下降了 9.75%、3.63%、6.79%、2.31%。其他处理的生菜叶绿素含量与对照没有显著性差异。对生菜根系活力数据进行比较可以看出, CK 的根系活力最低。施用硒元素水溶调理剂 (T1) 的根系活力最大, 在此农用硒肥下又以浓度为 0.25 mg/L 的根系活力最高, 达到 4.32。在施用硒浓度上以 1.00 mg/L 的根系活力增长最大, 施加 1.00 mg/L 的农博士硒肥的

T3C3 根系活力相比于对照增加了 2.98, 达到了 3.82。施用 0.25 mg/L 的农用硒肥对生菜的根系活力影响较小, T1C3、T2C1、T2C2、T3C1、T3C2、T4C1 处理之间根系活力无显著差异。植物在逆境胁迫下的损伤 (或衰老) 与活性氧积累诱发的膜脂过氧化作用密切相关, 丙二醛是膜脂过氧化作用的产物, 丙二醛含量的高低可以反映膜脂过氧化作用的强弱^[17]。因此, 测定丙二醛含量可以了解膜脂氧化的程度, 以间接测定膜系统的受损程度和植物的抗逆性^[12]。采后添加硒浓度为 0.25、0.50、1.00 mg/L 的各处理, 与对照相比丙二醛含量均有不同程度的下降, 且丙二醛含量与硒浓度呈现正相关。T2C1 与 T2C2 的丙二醛含量最低, 分别为 0.82、0.94 $\mu\text{mol}/\text{g}$, 并显著低于其他处理, 说明低浓度的农用硒肥有利于提高生菜的逆境胁迫能力。

2.3 农用硒肥对采后生菜体内维生素 C、硝酸盐、可溶性蛋白含量的影响

维生素 C 是植物代谢过程不可或缺的产物, 在植物的抗氧化能力、光合作用、代谢调控方面起着关键作用^[18]。如图 2 所示, 采后添加农用硒肥结果显示, 除 T1C1、T1C2、T2C3、T3C1 外, 其他处理比对照组维生素 C 含量均略有增加, 且处理 T1C3、T2C2、T4C3 的维生素 C 含量相对于对照均有显著性增加。处理 T4C3 的维生素 C 含量显著高于对照, 其每 100 g 生菜中维生素 C 含量为 25.93 mg。T1C1、T1C2、T2C3、T3C1 处理的维生素 C 含量相比对照分别降低了 10.73%、4.24%、2.71%、13.18%。由图 2 可知, 施用农用硒肥, 可以降低生菜中硝酸盐的含量。硝酸盐含量表现为 T1C3 > CK > T4C3 > T1C2 > T3C3 > T1C1 > T2C1 > T2C2 > T2C3 > T4C2 > T3C2 > T3C1 > T4C1。T4C1 含量最低, 为 460.62 mg/kg, 较对照处理降低了 27.62%。T2 螯合硒微量元素水溶肥处理中, 生菜中硝酸盐含量差异不显著。T1、T3、T4 农用硒肥处理的硝酸盐含量随着硒浓度的增加逐步增大, 其中 T1C3 处理的硝酸盐含量最大, 为 651.23 mg/kg, 这可能由于较高浓度硒 C3 (1.00 mg/L) 导致营养液浓度过高, 产生盐胁迫, 从而硝酸盐含量增加。蛋白质是蔬菜中重要的组成部分, 对果蔬品质和口感都有一定的影响^[19]。添加农用硒肥的处理组除了 T1C1 之外, 可溶性蛋白含量均有增加。T4C3 可溶性蛋白含量最高, 为 1.30 mg/g, 比对照增加了 187.02%; T1C3



柱状图上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下图同

图1 农用硒肥对采后生菜生理指标的影响

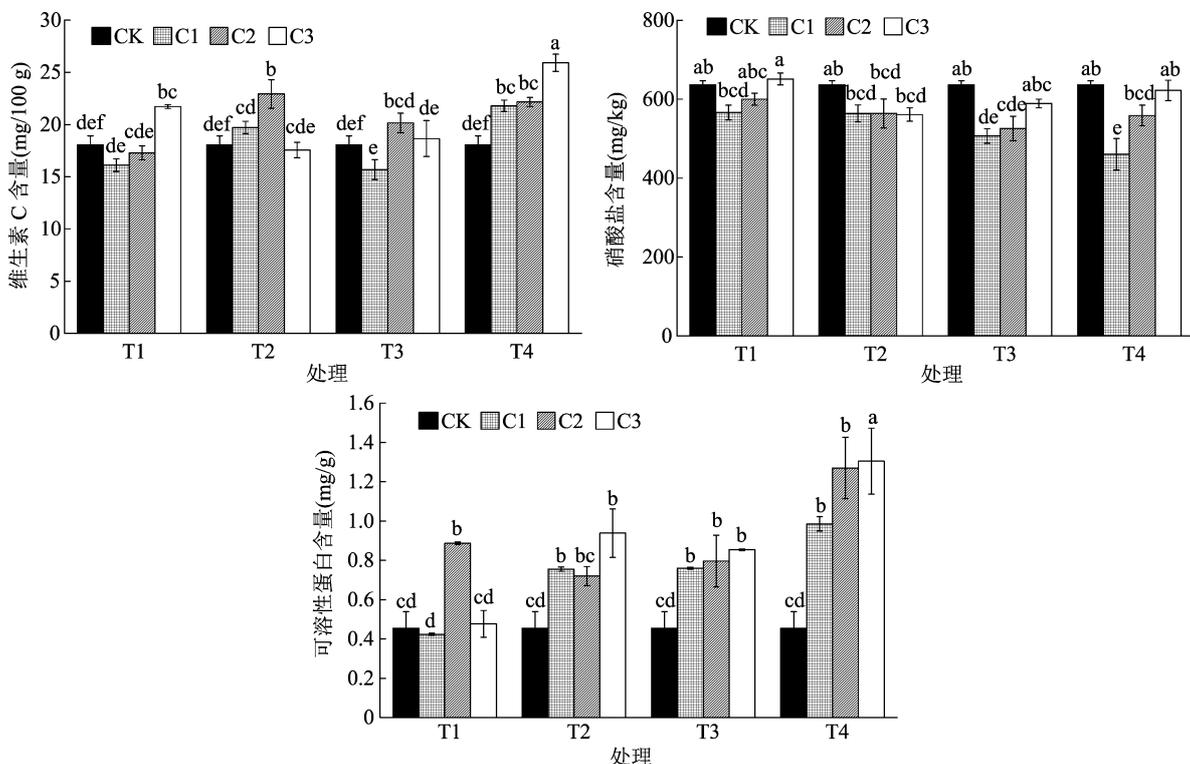


图2 农用硒肥对采后生菜体内维生素C、硝酸盐、可溶性蛋白的影响

处理与对照没有显著差异;T1C1处理后的生菜可溶性蛋白含量比对照降低了6.93%。T3农用硒肥

中,不同施硒浓度对生菜叶片中可溶性蛋白含量影响没有显著差异。0.50、1.00 mg/L农用硒肥处理

增加了生菜中可溶性蛋白含量。

2.4 硒肥对采后生菜体内糖、淀粉、纤维素含量的影响

在植株的叶、茎和根中皆有不同含量的可溶性糖存在,可溶性糖是光合作用的初级产物,再由它形成淀粉、纤维素、蛋白质和脂肪等其他化合物^[20]。如图3所示,采后添加不同种类和浓度的农用硒肥的处理,与对照相比,各处理生菜的可溶性总糖含量均有不同程度的提高。T2C2的可溶性总糖含量最高,为9.66 mg/g。T1C3、T3C2和T3C3的可溶性总糖含量较低,分别为5.58、5.55、5.49 mg/g。T2螯合硒微量水溶肥到浓度为0.50 mg/L时可溶性总糖含量最大。这说明T2C2处理的生菜生长环境相比其他处理较好,能提高生菜的可溶性总糖的含量。植物的新器官和新组织都是利用糖来发育的,植株中还原糖含量的测定可以探究植物体内的碳氮代谢^[21]。生菜施用农用硒肥能使还原糖含量增加,其中T1C3处理增幅最大,比对照增加了30.27%。其次,T3C3增加了21.24%,增加最低的为T4C2,仅增加了0.84%。还原糖含量与硒浓度呈现正相关趋势。T2农用硒肥中,T2C1与T2C2处理之间无显著性差异。T2C3较对照增加了13.10%。T3农用硒肥下,T3C1、T3C2相比对照降

低了,分别为20.38、22.07 mg/g。施硒能提高生菜叶内淀粉含量,与CK相比,各处理生菜的淀粉含量均增加。每个处理组中硒浓度在0.50 mg/L下的淀粉含量在同一处理组中会偏高。T2C2处理下淀粉含量最高,为3.88 mg/g,与CK相比,有显著性差异,变化率为91.08%。说明T2C2处理较其他处理而言,能较大程度提高生菜叶片中淀粉的含量。T3、T4农用硒肥下与CK相比增幅较小,变化率分别为27.53%、33.33%、13.10%和12.10%、44.56%、9.24%。纤维素含量可以评价生菜的脆度与口感。施硒处理后,生菜叶片的纤维素含量与硒浓度呈现正相关趋势,与对照相比增加幅度分别为1.26%、18.16%、28.47%、24.05%、28.61%、25.44%、23.85%、27.25%、31.41%、13.94%、31.67%、63.80%。T2农用硒肥间没有显著性差异。T4农用硒肥间存在显著差异。T4C3含量最高,为87.33 mg/g;CK含量最低,为53.31 mg/g;这表明施硒可增加生菜纤维素的含量,提高生菜品质。

2.5 农用硒肥对采后生菜品质影响的主成分分析

在多个生菜品质指标下,通过单一的指标不能综合确定哪一个处理下生菜品质较好,因此,通过主成分分析,可以更加科学地筛选出相对较好的农用硒肥和浓度。在蔬菜硒安全范围内,取CK、T1C1、

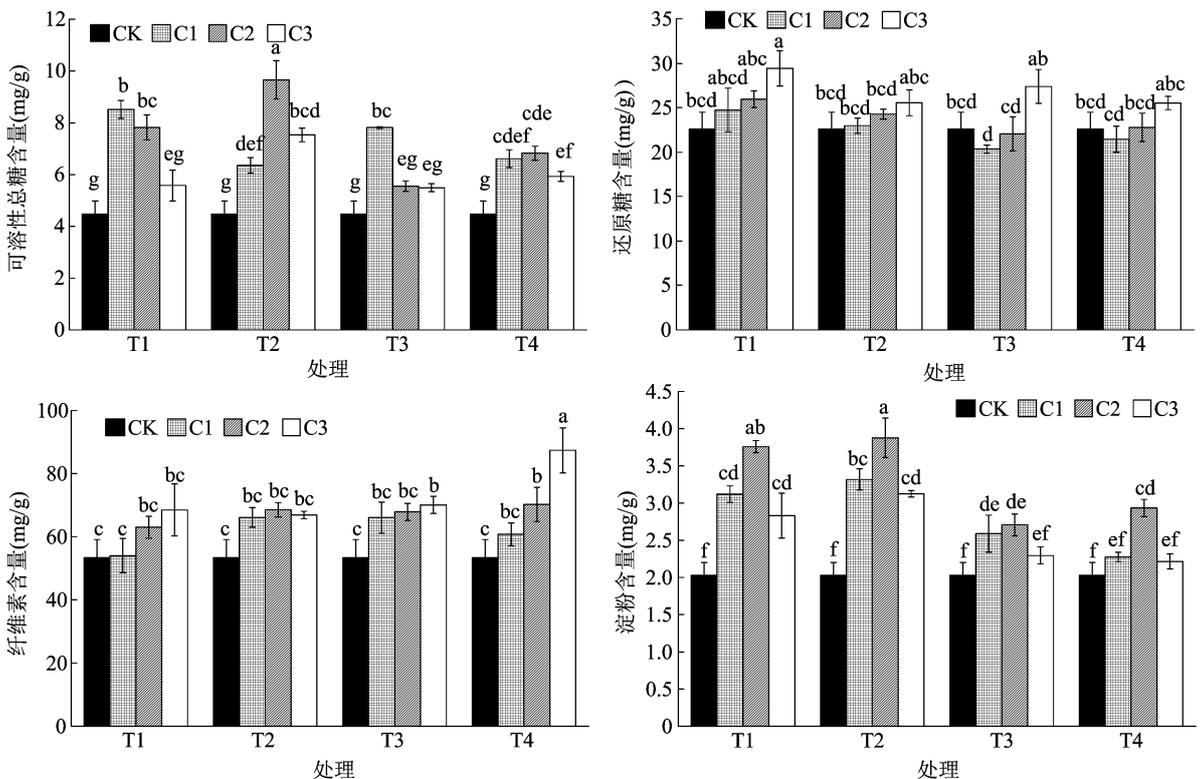


图3 农用硒肥对采后生菜体内糖、淀粉、纤维素的影响

T1C2、T1C3、T2C1、T2C2、T2C3、T3C1、T3C2、T3C3、T4C1 共 11 个处理结果进行主成分分析,通过主成分分析,可以从原始的 10 个品质指标中提取 4 个主成分。 D 值为生菜品质的综合指标, D 值越大表示该处理的品质越好。从表 3 可以看出,T2C2 处理得分最高,为 0.94,说明其综合品质在这 11 个处理下

最好;其次是 T1C3 处理,为 0.77;T2C1 处理 D 值为 0.70,T1C2 处理 D 值为 0.66,略低于 T2C1 处理,表明其综合品质比 T2C1 差一点;T3C2 处理 D 值为 0.60,说明其综合品质比其他 6 个处理好。综合得分排名依次是 T2C2 > T1C3 > T2C1 > T1C2 > T3C2 > T2C3 > T4C1 > T3C1 > T1C1 > CK > T3C3。

表 3 农用硒肥对采后生菜品质影响的综合指标值、隶属函数值、 D 值及综合评价

| 处理 | 综合指标值 | | | | 隶属函数值 | | | | D 值 | 排序 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| | F1 | F2 | F3 | F4 | U(X1) | U(X2) | U(X3) | U(X4) | | |
| CK | -2.49 | -2.45 | -0.78 | 1.12 | 0.04 | 0.13 | 0.52 | 0.79 | 0.47 | 10 |
| T1C1 | -0.13 | 0.86 | -3.26 | 0.42 | 0.54 | 0.83 | 0.00 | 0.61 | 0.47 | 9 |
| T1C2 | 0.46 | 1.08 | -0.37 | 0.26 | 0.67 | 0.88 | 0.60 | 0.57 | 0.66 | 4 |
| T1C3 | -2.66 | 1.65 | 1.55 | 0.70 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.69 | 0.77 | 2 |
| T2C1 | 0.28 | 0.60 | 0.61 | 0.28 | 0.63 | 0.78 | 0.81 | 0.58 | 0.70 | 3 |
| T2C2 | 2.01 | 1.17 | 0.94 | 1.96 | 1.00 | 0.90 | 0.87 | 1.00 | 0.94 | 1 |
| T2C3 | 0.25 | 1.38 | -0.24 | -1.46 | 0.62 | 0.94 | 0.63 | 0.14 | 0.53 | 6 |
| T3C1 | 1.26 | -0.93 | -0.81 | -0.57 | 0.84 | 0.45 | 0.51 | 0.37 | 0.49 | 8 |
| T3C2 | 0.28 | -0.89 | 1.12 | -0.39 | 0.63 | 0.46 | 0.91 | 0.41 | 0.60 | 5 |
| T3C3 | -1.02 | 0.62 | 0.45 | -2.03 | 0.35 | 0.78 | 0.77 | 0.00 | 0.45 | 11 |
| T4C1 | 1.76 | -3.07 | 0.79 | -0.29 | 0.95 | 0.00 | 0.84 | 0.44 | 0.52 | 7 |
| 权重 | | | | | 0.12 | 0.23 | 0.30 | 0.35 | | |

3 结论与讨论

近 10 年来,随着人们对硒元素认识的加深,我国富硒农产品备受市场关注和喜爱,呈现出良好的发展前景,研究人员研发了一系列自然或人工转化的硒制品、含硒农作物和硒肥^[22-23]。前人通过研究发现,对农作物施以适量的外源硒可以促进作物生长,增加产量并提高质量。黄雪梅等研究发现,适宜浓度的亚硒酸钠(0.5 mg/L)培养可以提高生菜的有机硒含量,并分别提高生菜的株高、维生素 C 含量和总酚含量^[19]。刘嘉兴等研究发现,对生菜叶片喷施稀释 400 倍生态纳米硒可提高生菜的叶绿素、可溶性蛋白、还原糖和维生素 C 的含量,降低生菜的硝酸盐含量^[24]。王翰霖等研究表明,对水稻籽粒喷施螯合硒叶面肥,其硒含量安全性较高^[25];孙崇庆等研究发现,农用硒肥能显著提高水培生菜的维生素 C 和硒含量,降低生菜的硝酸盐含量,并有利于生菜的生长和提高生菜的产量^[26]。李乐等研究发现,适宜外源硒浓度,增加了植株干物质含量,改善品质,提高产量和促进矿质元素吸收^[27]。以上研究结果均是在全生育期添加外源硒肥研究得出的。而这与本试验在采后添加外源硒试验研究结果相似。

施用硒元素的时间也对植物物质积累有一定影响。黄皓婷等研究发现,采收前 1 周微生物富硒菌肥喷施叶面能够显著提高快菜的单株质量、主根长度、叶片长度,硒含量、可溶性蛋白质含量与维生素 C 含量^[8]。徐云等研究发现,硒能促进植物生长初期的糖代谢,提高可溶性糖含量和 α -淀粉酶活力,处理 1 周和 2 周后,硒开始抑制植株糖代谢,富里酸可减轻这种抑制作用^[28]。尚庆茂等研究了在收获前 5、10、15、20 d 添加硒,测定收获后水培生菜叶片中总硒和有机硒含量,发现在采收前 10 d 加硒处理的叶片中总硒和有机硒含量为最高^[15]。以上是采前加硒研究中得出的结论。本研究发现,采后添加硒肥也可提高生菜叶片硒含量和品质,这与上述研究结果一致。

本试验采用植物工厂水培方式对生菜采后添加农用硒肥 24 h,结果表明:对水培生菜采后施硒 24 h,可以提高生菜叶片中硒积累量。在本试验中,除 0.50 mg/L 希之源富硒营养液(T4C2)、1.00 mg/L 希之源富硒营养液(T4C3)处理的生菜中的含硒量超标外,其他处理的生菜中的硒含量均在蔬菜的硒限量范围内。在蔬菜的硒安全含量范围内,施用 1.00 mg/L 的硒元素水溶调理剂(T1C3),生菜叶片中的硒积累量最大,是对照的 2.89 倍。采后不同农

用硒肥及浓度处理均促进了根系活力,提高了维生素 C、可溶性糖、纤维素、淀粉含量,降低了丙二醛含量。这与尚庆茂等研究结果^[29]相似,添加 0.50 mg/L 亚硒酸钠对水培生菜的可溶性糖、还原性糖、维生素 C 和叶绿素含量有所提高。植物品质的影响因不同农用硒肥和浓度而有明显差异。T4 希之源富硒营养液、T3 农博士硒肥处理、T2 螯合硒微量元素水溶肥还可提高生菜中可溶性蛋白含量,降低硝酸盐含量。一方面,硒以硒代含硫氨基酸如 Se - Cys 和 Se - Met 形式直接参与蛋白质合成,从而降低了游离氨基酸中 Cys 和 Met 的含量;另一方面,硒是植物体内一种 tRNA 核糖核酸链的组成成分,具有转运氨基酸的功能,因此对其他游离氨基酸也有影响^[30]。硒能提高硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性,通过硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用还原硝酸盐,从而降低生菜中的硝酸盐含量^[31]。

综上所述,采后施用农用硒肥 24 h 可以提高生菜品质和叶片硒含量,达到与全生育期施硒的相似效果,并明显减少施肥量和施肥时间。对生菜采后添加农用硒肥 24 h,以 0.50 mg/L 的螯合硒微量元素水溶肥(T2C2)的生菜叶片硒含量较高,施肥成本较低,同时生菜品质比其他处理较好,经济效益较高。因此,0.50 mg/L 的螯合硒微量元素水溶肥(T2C2)处理为植物工厂水培生菜采后富硒的最佳农用硒肥及浓度。但这仅仅是采后添加农用硒肥单一时间对水培生菜试验的结果,而采后农用硒肥对水培生菜的最佳添加时间及其在其他蔬菜上的肥效,还需后期进一步探索和研究。

参考文献:

[1]徐碧芳. 食物营养生治病速查全书[M]. 北京:中医古籍出版社,2015:26-27.

[2]张平真. 蔬菜贮运保鲜及加工[M]. 北京:中国农业出版社,2002:152.

[3]滕巍,马艺莽,马燕,等. 植物工厂水培生菜的栽培环境研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2018(5):156-158.

[4]程伯容,聚山见,岳淑蓉,等. 硒粮与人体硒水平[J]. 中国环境科学,1982,2(5):28-31.

[5]王立平,刘永贤,李秀杰,等. 我国富硒农产品标准的现状、问题与对策[J]. 农产品质量与安全,2017(5):24-27.

[6]Reynolds R J B, Pilon - Smits E A H. Plant selenium hyperaccumulation—Ecological effects and potential implications for selenium cycling and community structure [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*,2018,1862(11):2372-2382.

[7]冯两蕊,杜慧玲,王曰鑫. 叶面喷施硒对生菜富硒量及产量与品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2007,27(3):

291-294.

[8]黄皓婷,王浩然,周慧妍,等. 叶面喷施微生物富硒菌肥对快菜产量及品质的影响[J]. 中国农学通报,2019,35(25):66-71.

[9]肖真真,李启明,焦自高,等. 叶面喷施外源硒营养液对甜瓜产量和品质的影响[J]. 蔬菜,2019(9):23-27.

[10]田永强,聂国伟,李凯,等. 采后喷施叶面肥对温室甜樱桃叶片部分生理指标的影响[J]. 农学学报,2019,9(11):34-37.

[11]赵晓彤,刘亚平,王愈,等. 采后亚硒酸钠处理对菠菜和油菜菜贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工,2020,20(5):48-54.

[12]高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[13]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:359-362.

[14]Zhang M, Hu C X, Zhao X H, et al. Impact of molybdenum on Chinese cabbage response to selenium in solution culture[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*,2012,58(5):595-603.

[15]尚庆茂,李平兰,高丽红. 水培生菜对硒的吸收和转化[J]. 园艺学报,1997,24(3):255-258.

[16]中国国家标准(GB)题录总汇[J]. 世界标准信息,2001(11):27-96.

[17]郑爱珍,刘传平,沈振国. 镉处理下青菜和白菜 MDA 含量、POD 和 SOD 活性的变化[J]. 湖北农业科学,2005,44(1):67-69.

[18]郭新波,唐岳立,孙小芬,等. 高等植物维生素 C 和维生素 E 代谢调控[J]. 植物生理学报,2011,47(8):731-744.

[19]黄雪梅,岳顺念,王瑞瑞. 不同浓度亚硒酸钠对水培生菜富硒品质的影响[J]. 广东农业科学,2018,45(1):29-33.

[20]杨旭,邹志荣,贺志群,等. 蔬菜无土栽培营养液中的氮素及其调控[J]. 西北植物学报,2003,23(9):1644-1649.

[21]卢敏敏. 不同浓度硒对水培生菜品质的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(7):2930-2931,2954.

[22]陈玉珍,白音达来,贾立国,等. 富硒蔬菜的研究意义及其开发利用现状[J]. 北方园艺,2018(18):152-156.

[23]陈佳佳,李汛,吴沿友,等. 增施 CO₂ 条件下施硒对温室黄瓜产量及硒吸收累积的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(6):1503-1511.

[24]刘嘉兴,李旭芬,石玉,等. 叶面喷施生态纳米硒对生菜品质的影响[J]. 浙江农业科学,2019,60(5):803-806.

[25]王翰霖,刘晓彤,白建忠,等. 不同叶面硒肥对水稻各组织器官硒含量的影响[J]. 宁夏农林科技,2017,58(10):27-29.

[26]孙崇庆,马晓春,高艳明,等. 硒肥对植物工厂水培生菜生长及品质的影响[J]. 中国瓜菜,2020,33(6):24-29.

[27]李乐,田敏娇,高艳明,等. 硒肥对基质培番茄生长和矿质元素积累的影响[J]. 浙江农业学报,2020,32(2):253-261.

[28]徐云,刘俊华,王子健,等. 硒和环境中富里酸对小麦幼苗糖代谢的影响[J]. 环境科学学报,1998,18(4):401-406.

[29]尚庆茂,高丽红,李式军. 硒素营养对水培生菜品质的影响[J]. 中国农业大学学报,1998(3):67-71.

[30]李应生,李亚男,陈大清. 硒的生物学功能及植物的富硒机理[J]. 湖北农学院学报,2003,23(6):476-480.

[31]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.