

韩 敏,周桂芳,王德升,等. 蔗糖对萝卜芽苗菜生长发育及营养品质的影响[J].江苏农业学报,2023,39(5):1225-1232.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.05.015

## 蔗糖对萝卜芽苗菜生长发育及营养品质的影响

韩 敏<sup>1</sup>, 周桂芳<sup>2</sup>, 王德升<sup>3</sup>, 张伟锋<sup>4</sup>, 李化冰<sup>1</sup>, 温明明<sup>1</sup>, 李媛媛<sup>1</sup>

(1.潍坊学院种子与设施农业工程学院,山东省高等学校生物化学与分子生物学重点实验室,山东 潍坊 261061; 2.潍坊职业学院,山东 潍坊 261041; 3.潍坊市峡山区太保庄街道农业综合服务中心,山东 潍坊 262502; 4.潍坊市农业技术推广中心,山东 潍坊 262199)

**摘要:** 本文以潍县萝卜为试验材料,研究了不同含量蔗糖溶液(0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%)处理对潍县萝卜芽苗菜生长发育及营养品质的影响。结果表明,0.8%蔗糖溶液处理下,潍县萝卜芽苗菜的单株鲜质量以及果糖、葡萄糖、可溶性总糖、维生素 C、总酚、类黄酮、异硫氰酸盐含量最高;0.4%蔗糖溶液处理下,潍县萝卜芽苗菜的苗高最高;1.2%蔗糖溶液处理下,潍县萝卜芽苗菜的游离氨基酸含量及 *SOD* 酶活性最高;1.6%蔗糖溶液处理下,潍县萝卜芽苗菜的可溶性蛋白质及硫代葡萄糖苷含量最高。主成分分析结果显示,14 个品质指标中提取出了 3 个主成分,累积贡献率达到 87.200%。其中主成分 1 的方差贡献率最大,且在果糖、葡萄糖、可溶性总糖含量等指标上载荷值较高,说明糖分含量对萝卜芽苗菜品质的影响较大。各处理综合得分结果表明,0.8%蔗糖溶液处理的得分最高,说明 0.8%蔗糖溶液处理萝卜芽苗菜的品质最好。因此可见,一定含量的蔗糖溶液可以有效促进萝卜芽苗菜的生长发育,显著提高其营养品质,且以 0.8%蔗糖溶液处理效果最佳。

**关键词:** 萝卜芽苗菜; 蔗糖; 生长发育; 营养品质

**中图分类号:** S631.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)05-1225-08

## Effects of sucrose on growth and nutritional quality of radish sprouts

HAN Min<sup>1</sup>, ZHOU Gui-fang<sup>2</sup>, WANG De-sheng<sup>3</sup>, ZHANG Wei-feng<sup>4</sup>, LI Hua-bing<sup>1</sup>, WEN Ming-ming<sup>1</sup>, LI Yuan-yuan<sup>1</sup>

(1.College of Seed and Facility Agricultural Engineering, Weifang University, Key Laboratory of Biochemistry and Molecular Biology in Universities of Shandong, Weifang 261061, China; 2.Weifang Vocational College, Weifang 261041, China; 3.Agricultural Comprehensive Service Center, Taibaozhuang Street, Xiashan District, Weifang City, Weifang 262502, China; 4.Weifang Agricultural Technology Promotion Center, Weifang 262199, China)

**Abstract:** In this paper, Weixian radish was used as the test material. The effects of different contents of sucrose solution (0, 0.4%, 0.8%, 1.2%, 1.6%, 2.0%) on the growth and nutritional quality of Weixian radish sprouts were studied. The results showed that the fresh weight per plant and the contents of fructose, glucose, total soluble sugar, vitamin C, total phenols, flavonoids, isothiocyanate in Weixian radish sprouts were the highest under the treatment of 0.8% sucrose solution. The seedling height of Weixian radish sprouts was the highest under the treatment of 0.4% sucrose solution. The

free amino acid content and the *SOD* activity in Weixian radish sprouts were the highest under the treatment of 1.2% sucrose solution. Weixian radish sprouts had the highest content of soluble protein and glucosinolate under the treatment of 1.6% sucrose solution. The results of principal component analysis showed that three principal components were extracted from 14 quality indices, and the cumulative contribution rate was 87.200%. Among

收稿日期:2022-08-17

**基金项目:** 山东省高校科技计划项目(J15LF04);山东省高等学校“青创科技计划”项目(2019KJF015);潍坊市科技发展规划项目(2021GX008);潍坊学院科研创新团队项目(2019-10);潍坊学院博士科研启动基金项目(2019BS11)

**作者简介:** 韩 敏(1991-),女,山东潍坊人,博士,讲师,主要从事蔬菜栽培生理研究。(E-mail)han1991min@163.com

**通讯作者:** 李媛媛, (E-mail) yylilove@126.com

them, the variance contribution rate of principal component 1 was the highest, and the loading values of fructose content, glucose content and total soluble sugar content were higher, indicating that sugar content had a greater impact on the quality of sprouts. And the comprehensive score of each treatment showed that the 0.8% sucrose solution treatment had the highest score, indicating that the quality of radish sprouts under the treatment of 0.8% sucrose solution was the best. Therefore, a certain content of sucrose solution could effectively promote the growth and development of radish sprouts and significantly improve their nutritional quality. And the treatment with 0.8% sucrose solution had the best effect.

**Key words:** radish sprouts; sucrose; growth and development; nutritional quality

萝卜芽苗菜是萝卜种子萌发形成的肥嫩幼苗,因其品质鲜嫩、风味独特、栽培方式简单、经济效益高而被广泛种植。萝卜芽苗菜中含有丰富的酚类、维生素 C、花青素、硫代葡萄糖苷等生物活性物质,具有较强的抗氧化能力,可有效增强人体免疫力<sup>[1]</sup>。此外诸多研究发现,生长环境(如温度、光照、养分等)对萝卜芽苗菜的生长发育及营养品质可产生较大影响<sup>[2-4]</sup>。

蔗糖作为植物体内碳水化合物的主要来源,不仅决定着作物的产量,还可以作为信号分子调控植物的生长发育、营养品质及逆境响应。研究结果表明,一定含量的蔗糖溶液(5%)处理可显著提高桃树体内 *SnRK1* 酶的活性,从而影响植株体内碳代谢,进而影响其生长发育<sup>[5]</sup>。Li 等<sup>[6]</sup>则发现,贮藏期间与对照相比,50 mmol/L 蔗糖溶液处理显著提高了草莓果实中葡萄糖、果糖和蔗糖含量。凌亚杰等<sup>[7]</sup>还发现,100 mmol/L 蔗糖溶液处理下草莓果实中可溶性固形物、抗坏血酸及总酚含量均显著增加,抗氧化能力显著增强。Jeong 等<sup>[8]</sup>发现,蔗糖溶液(1%、2%、3%)处理可显著提高荞麦芽的营养成分含量和抗氧化能力。

但蔗糖作为外源营养物质对萝卜芽苗菜生长发育及营养品质的影响却鲜有报道。为此本研究以潍县萝卜(十字花科,萝卜属)为试验材料,外源施加不同含量蔗糖溶液(质量百分比为 0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%),探讨蔗糖对萝卜芽苗菜生长发育及营养品质的影响,旨在为萝卜芽苗菜的高产优质栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2021–2022 年在潍坊学院种子与设施农业工程学院重点实验室进行,供试材料为潍县萝卜。

### 1.2 试验设计

(1)催芽:发芽盒中垫 3 层湿润滤纸,选取大小

均匀、颗粒饱满的 100 粒萝卜种子均匀撒播于发芽盒中,各发芽盒保持一致。然后将上述发芽盒置于 25 ℃ 黑暗环境中进行催芽。

(2)处理:待萝卜芽苗高 2~3 cm 时,转入光照培养箱(光周期为 12 h/d,光量子能量为 30  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,温度 25 ℃)中进行蔗糖溶液处理。共设 6 个不同含量蔗糖溶液处理:0(蒸馏水对照)、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%。每个处理 10 盒。每天定时喷施等体积不同浓度蔗糖溶液,连续处理 7 d。

(3)取样:处理完成后取样,并观察其生长发育情况,取样后用液氮迅速冷却并贮藏在 -20 ℃ 冰箱中,以备后续试验指标测定。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标的测定 从每处理的每盒中随机选取 15 株长势基本一致的萝卜芽苗菜,测定株高后小心取出,用吸水纸吸干植株表面的水分。其中 10 株先用电子天平测定每株鲜质量,测定完成后,放进 105 ℃ 的烘箱中先烘 15 min 杀青,后将温度调整为 75 ℃ 继续烘至恒质量,再用电子天平测定每株干质量。剩余 5 株用根系扫描仪进行根长、根直径的测定。

根据测定数值进行计算:

苗高 = 下胚轴基部至子叶顶部的距离;

单株鲜质量 = 每株鲜质量的平均值;

含水率 = [(每株鲜质量 - 每株干质量) / 每株鲜质量] × 100%。

1.3.2 品质指标的测定 参照李媛媛等<sup>[9]</sup>的方法,采用戴安 UltiMate 3000 型高效液相色谱仪测定果糖、葡萄糖含量。色谱条件:糖分析柱为安捷伦 5  $\mu\text{m}$ , 4.6 mm × 150.0 mm,流动相为乙腈:水(80:20),流速 1 ml/min,进样量 10  $\mu\text{l}$ ,柱温 33 ℃,检测器温度 33 ℃。

可溶性糖和淀粉含量的测定采用蒽酮比色

法<sup>[10]</sup>;可溶性蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝法<sup>[10]</sup>;游离氨基酸含量的测定采用酸性茚三酮显色法<sup>[10]</sup>。维生素 C 含量的测定采用 Law 等<sup>[11]</sup>的方法。

*SOD* 活性采用 NBT 还原法测定,以抑制 NBT 光化学还原 50% 所需酶量为 1 个 *SOD* 酶活单位 (U/g)<sup>[12]</sup>; *POD* 和 *CAT* 活性采用 Cakmak 等<sup>[13]</sup>的方法测定,以每 1 g 鲜质量每 1 min 内吸光值 ( $OD_{470}$ ) 的变化表示 *POD* 酶总活性 ( $\Delta OD_{470}$ ),以每 1 g 鲜质量每 1 min 内吸光值 ( $OD_{240}$ ) 的变化表示 *CAT* 酶总活性 ( $\Delta OD_{240}$ )。

采用试剂盒法测定总酚、类黄酮含量及抗氧化能力,试剂盒均由苏州科铭生物技术有限公司提供。

硫代葡萄糖苷含量的测定参照逯玉等<sup>[14]</sup>的方

法;异硫氰酸盐含量的测定参照赵功玲等<sup>[15]</sup>的方法。

#### 1.4 数据分析

使用 Excel 和 SPSS23.0 软件,进行数据处理作图及差异显著性分析。

## 2 结果分析

### 2.1 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜生长发育的影响

从表 1 中可以看出,随着蔗糖溶液含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜的苗高及单株鲜质量均呈先升高后下降的变化趋势,且分别在 0.4% 及 0.8% 达到最高值;根长则随着蔗糖溶液含量的提高呈缓慢增加的变化趋势;含水量及根直径则无明显变化。

表 1 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜生长发育的影响

Table 1 Effects of different contents of sucrose solution on the growth and development of Weixian radish sprouts

指标	蔗糖含量 (%)					
	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
苗高 (cm)	6.21±0.12ab	6.50±0.31a	5.84±0.24b	5.12±0.07c	4.88±0.16c	4.96±0.27c
单株鲜质量 (mg)	138.89±9.62ab	127.78±16.44b	148.89±8.39a	114.44±5.09b	140.00±5.77ab	140.00±5.77ab
含水量 (%)	94.70±0.46a	96.21±0.78a	95.23±1.05a	95.93±0.67a	94.28±2.44a	95.73±0.43a
根长 (cm)	9.50±1.30b	9.98±2.30b	10.13±1.21b	10.32±1.27b	13.12±2.37ab	13.96±1.85a
根直径 (mm)	0.40±0.04a	0.41±0.05a	0.41±0.05a	0.43±0.07a	0.36±0.01a	0.43±0.05a

同一行后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

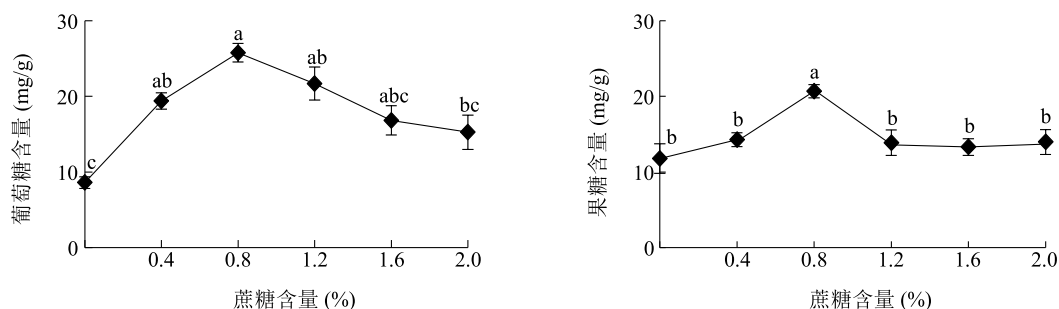
### 2.2 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜营养品质的影响

2.2.1 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中葡萄糖及果糖含量的影响 图 1 显示,随着蔗糖溶液含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜中的果糖及葡萄糖的含量均呈先升高后下降的变化趋势,且均在 0.8% 达到最高值。蔗糖溶液含量为 0.8% 时的果糖及葡萄糖含量分别比 0 (蒸馏水对照) 高 75.63%、199.65%,比蔗糖溶液含量为 0.4% 时高 44.94%、32.97%;比蔗糖溶液含量为 1.2% 时高 49.11%、18.81%;比蔗糖溶液含量为 1.6% 时高 55.45%、53.12%;比蔗糖溶液含量为 2.0% 时高 48.00%、68.87%。

2.2.2 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中可溶性总糖及可溶性蛋白质含量的影响 随着蔗糖溶液含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜中的可溶性总糖及可溶性蛋白质含量均呈先升高后下降再升

高的变化趋势;且分别在 0.8% 和 1.6% 时达到最高值 (图 2)。0.8% 蔗糖溶液处理,潍县萝卜芽苗菜中可溶性总糖的含量分别比 0、0.4%、1.2%、1.6%、2.0% 蔗糖溶液处理高 33.95%、33.39%、155.00%、84.84%、82.26%;1.6% 蔗糖溶液处理,潍县萝卜芽苗菜中可溶性蛋白质含量分别比 0、0.4%、0.8%、1.2%、2.0% 蔗糖溶液处理高 75.48%、41.43%、34.17%、56.75%、7.48%。

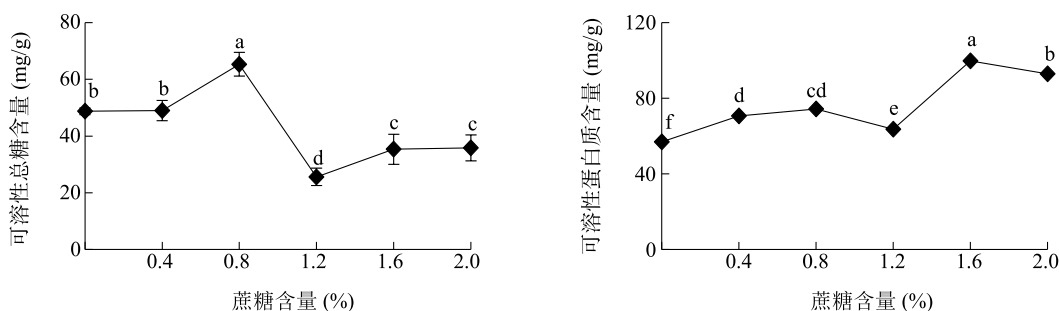
2.2.3 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中维生素 C 及游离氨基酸含量的影响 从图 3 可以看出,不同含量蔗糖溶液处理下,潍县萝卜芽苗菜中维生素 C 及游离氨基酸含量的变化趋势不同。随着蔗糖含量的不断增加,维生素 C 的含量呈先下降后升高再下降又升高最后又下降的变化趋势;而游离氨基酸含量则呈先升高后下降的变化趋势。且两者分别蔗糖溶液含量在 0.8% 和 1.2% 时达到最高值。



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 1 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中葡萄糖及果糖含量的影响

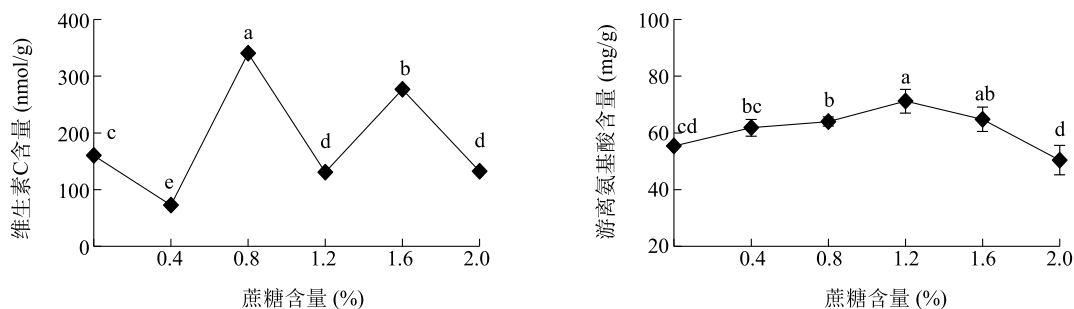
Fig.1 Effects of different contents of sucrose solution on glucose content and fructose content in Weixian radish sprouts



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 2 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中可溶性总糖及可溶性蛋白质含量的影响

Fig.2 Effects of different contents of sucrose solution on the contents of total soluble sugar and soluble protein in Weixian radish sprouts



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 3 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中维生素 C 及游离氨基酸含量的影响

Fig.3 Effects of different contents of sucrose solution on the contents of vitamin C and free amino acids in Weixian radish sprouts

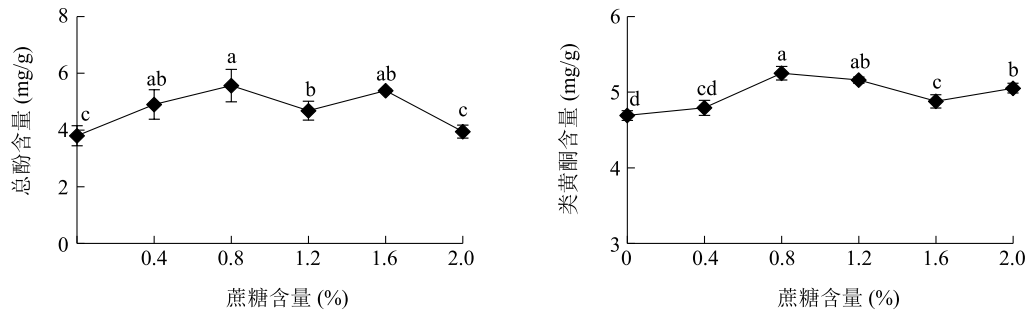
2.2.4 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中抗氧化物质含量的影响 从图 4 中可以看出,随着蔗糖溶液含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜中总酚和类黄酮含量整体上均呈先缓慢升高又缓慢下降的变化趋势,且均在 0.8% 时达到最高值。0.8% 蔗糖溶液处理,潍县萝卜芽苗菜中总酚含量分别比 0、0.4%、1.2%、1.6%、2.0% 蔗糖溶液处理的高 46.58%、13.67%、

19.02%、3.34%、41.37%;0.8% 蔗糖溶液处理,潍县萝卜芽苗菜中类黄酮含量分别比 0、0.4%、1.2%、1.6%、2.0% 蔗糖溶液处理的高 11.94%、9.60%、1.74%、7.58%、3.96%。

2.2.5 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中抗氧化酶活性及总抗氧化能力的影响 不同含量蔗糖溶液处理,潍县萝卜芽苗菜中 SOD、POD 及 CAT 酶活性的变化趋势亦不同。随着蔗糖

含量的不断增加,*SOD* 酶的活性呈先下降后上升,且在 1.2%时达到最大值后又显著下降的变化趋势;*CAT* 则正好相反,呈先升高后下降,在 0.8%处达到最低值后又显著升高的变化趋势;*POD* 酶的

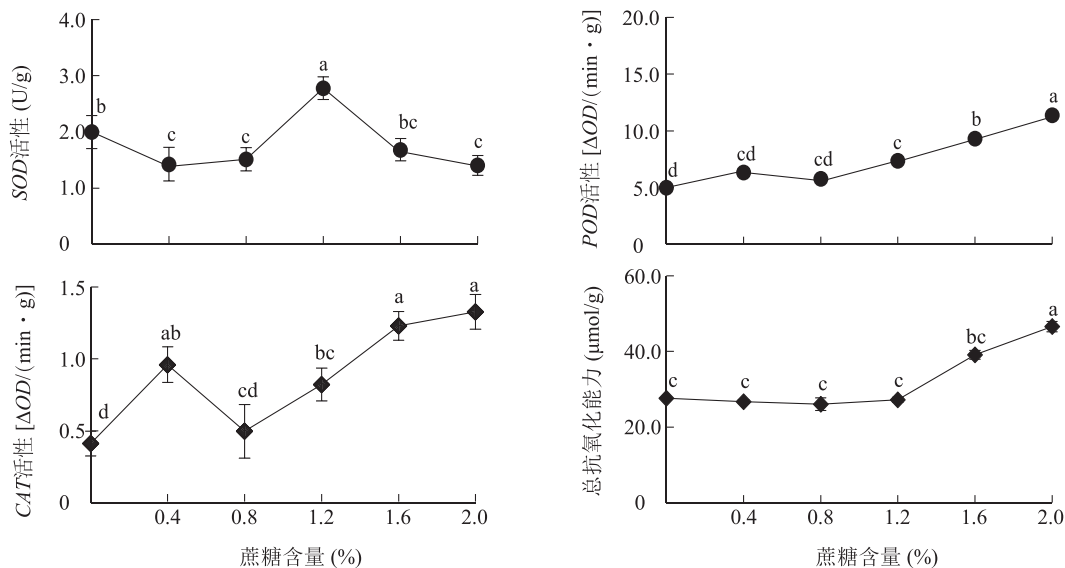
活性及总抗氧化能力则整体上均呈先平稳无明显变化,待蔗糖含量超过 1.2%后显著升高的变化趋势(图 5)。



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 4 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中总酚和类黄酮含量的影响

Fig.4 Effects of different contents of sucrose solution on the content of total phenols and flavonoids in Weixian radish sprouts



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 5 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中 *SOD*、*POD*、*CAT* 酶活性及总抗氧化能力的影响

Fig.5 Effects of different contents of sucrose solution on the activities of *SOD*, *POD*, *CAT* and total antioxidant capacity in Weixian radish sprouts

2.2.6 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中辣味物质含量的影响 图 6 显示,随着蔗糖溶液含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜中硫代葡萄糖苷含量显著增加,至 1.6%时达到最大值后又显著下降;潍县萝卜芽苗菜中异硫氰酸盐含量亦随着蔗糖溶液含量的不断增加而显著增加,至 0.8%时达到最大值后又显著下降,蔗糖溶液含量超过 1.6%后又显著增加。

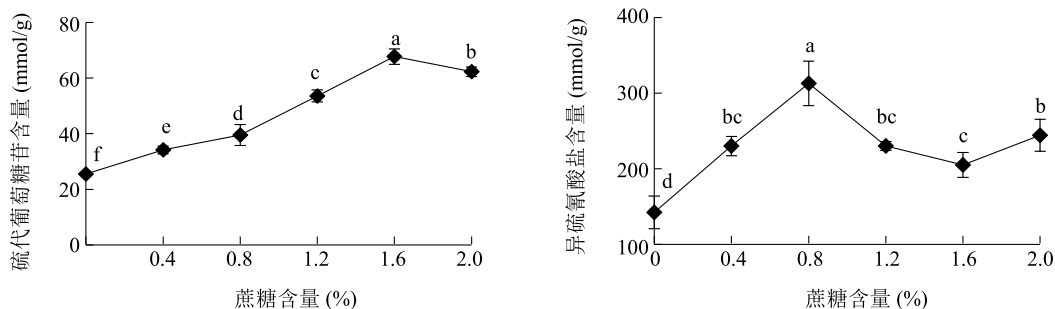
## 2.3 外源喷施不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜品质的综合影响

对不同含量蔗糖溶液处理的潍县萝卜芽苗菜的葡萄糖含量、果糖含量、可溶性总糖含量、可溶性蛋白质、维生素 C 含量、游离氨基酸含量、类黄酮含量、总酚含量、*SOD* 活性、*POD* 活性、*CAT* 活性、异硫氰酸盐含量、硫代葡萄糖苷含量及总抗氧化能力等 14 个品质指标进行主成分分析,结果显示,前 3 个



主成分的累积贡献率达到 87.200% (表 2), 说明这 3 个主成分基本保留了 14 个品质指标的大部分信息, 可对潍县萝卜芽苗菜的品质进行综合评价。此外, 14 个品质指标在 3 个主成分上的载荷值不同 (表 2)。第 1 主成分的方差贡献率为 36.660%, 为 3 个主成分中最大值, 表明第 1 主成分对萝卜芽苗菜的品质影响最大。其中果糖含量、葡萄糖含量、可溶性总糖含量等 3 个品质指标在第 1 主成分上具有较高的正载荷 (载荷值分别为: 0.804、0.703、

0.678)。第 2 主成分的方差贡献率为 33.740%, 其中具较高载荷且为正相关的品质指标主要为可溶性蛋白质含量、硫代葡萄糖苷含量、异硫氰酸盐含量、*POD* 活性、类黄酮含量、*CAT* 活性等 6 个 (载荷值分别为: 0.822、0.799、0.720、0.684、0.661、0.625); 第 3 主成分的方差贡献率为 16.800%, 主要反映的是 *SOD* 活性 (载荷值: 0.891) 和游离氨基酸含量 (载荷值: 0.750) 等 2 个品质指标的信息。



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 6 不同含量蔗糖溶液对潍县萝卜芽苗菜中硫代葡萄糖苷和异硫氰酸盐含量的影响

Fig.6 Effects of different contents of sucrose solution on the contents of glucosinolate and isothiocyanate in Weixian radish sprouts

表 2 主成分特征值、贡献率、累积贡献率及成分矩阵

Table 2 Principal component eigenvalue, contribution rate, cumulative contribution rate and component matrix

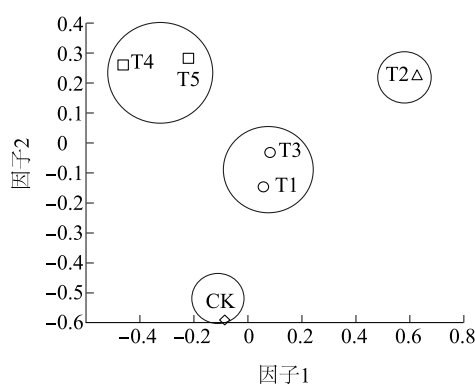
主成分	特征值	贡献率 (%)	累积 贡献率 (%)	矩阵														
				葡萄糖 含量	果糖 含量	可溶性 总糖 含量	可溶性 蛋白质 含量	维生素 C 含量	游离 氨基酸 含量	总酚 含量	类黄酮 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	总抗 氧化 能力	异硫氰 酸盐 含量	硫代 葡萄糖 苷含量	
1	5.132	36.660	36.660	0.703	0.804	0.678	-0.447	0.499	0.541	0.620	0.466	0.074	-0.712	-0.706	-0.785	0.575	-0.480	
2	4.724	33.740	70.400	0.600	0.498	-0.113	0.822	0.469	0.150	0.569	0.661	-0.330	0.684	0.625	0.548	0.720	0.799	
3	2.352	16.800	87.200	0.248	-0.261	-0.724	-0.213	-0.217	0.750	0.099	0.267	0.891	0.030	0.072	-0.217	-0.107	0.320	

以各主成分的贡献率为分配系数, 构建的萝卜芽苗菜综合评价模型为:  $Y = 0.367Y_1 + 0.337Y_2 + 0.168Y_3$ , 式中  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  分别代表第 1、2、3 主成分。根据综合评价模型, 对潍县萝卜芽苗菜的品质进行综合评价, 结果显示, 各处理综合得分排序从高到低依次为 0.8%、1.2%、1.6%、0.4%、2.0%、0 (蒸馏水对照) (表 3)。且从图 7 中还可以看出, 可以将 6 个处理分为 4 个类群, 其中 0.80% 处理因子 1 和因子 2 得分较高, 归为一类, 0.4% 和 1.2% 处理及 1.6% 和 2.0% 处理在散点图上距离最近, 可以归为一类; 0 (蒸馏水对照) 因子 1 和因子 2 得分较低, 归为一类。

表 3 各处理主成分综合得分

Table 3 Comprehensive score of principal components of each treatment

蔗糖溶液含量 (%)	因子 1 得分	因子 2 得分	因子 3 得分	综合得分	排名
0	-0.086	-0.590	-0.080	-0.755	6
0.4	0.058	-0.146	-0.055	-0.144	4
0.8	0.627	0.227	-0.116	0.738	1
1.2	0.083	-0.032	0.325	0.375	2
1.6	-0.220	0.282	0.034	0.097	3
2.0	-0.462	0.260	-0.108	-0.310	5



CK 为蒸馏水对照;T1 为 0.4%蔗糖溶液处理;T2 为 0.8%蔗糖溶液处理;T3 为 1.2%蔗糖溶液处理;T4 为 1.6%蔗糖溶液处理;T5 为 2.0%蔗糖溶液处理。

图7 萝卜芽苗菜品质因子得分散点图

Fig.7 Scatter plot of quality factors of radish sprouts

### 3 讨论

蔗糖作为大多数作物光合作用同化产物的主要运输形式,以及连接淀粉和己糖的重要代谢枢纽,在调节碳水化合物代谢、蔗糖运输和花青素积累等许多过程中起着重要作用<sup>[16]</sup>。研究发现,外源蔗糖对玉米(0.5 mmol/L蔗糖溶液)、桃(5%蔗糖溶液)等植物的生长有促进作用,但其最佳浓度因植物而异<sup>[5,17]</sup>。因此,有必要筛选适宜的外源蔗糖浓度以促进萝卜芽苗菜的生长发育。本研究结果表明,不同含量的蔗糖溶液对萝卜芽苗菜的生长有不同的影响。本研究中,随着蔗糖含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜的苗高及单株鲜质量分别在 0.4%及 0.8%蔗糖溶液处理下达到最高值后又缓慢下降,说明一定含量范围内的蔗糖溶液可以促进萝卜芽苗菜生长。

外源蔗糖还能显著增加作物中果糖、蔗糖、维生素 C、可溶性蛋白质、游离氨基酸等营养物质的含量。柴喜荣等<sup>[18]</sup>发现,叶面喷施 50 mg/L蔗糖溶液显著提高了大白菜中可溶性总糖、还原糖、蔗糖、果糖和葡萄糖含量,但高质量浓度蔗糖溶液则显著降低了大白菜中可溶性总糖含量。Tan 等<sup>[19]</sup>研究结果则表明,随着蔗糖溶液质量浓度的增加,豌豆芽中维生素 C、可溶性蛋白质、果糖和葡萄糖含量在添加 0~10 mg/L蔗糖溶液时明显增加,在添加 20~40 mg/L蔗糖溶液时逐渐下降。本研究结果也发现,随着蔗糖溶液含量的不断增加,潍县萝卜芽苗菜中果

糖、葡萄糖、可溶性总糖及维生素 C 含量均在 0~0.8%蔗糖溶液处理下总体上呈增加的趋势,0.8%~2.0%蔗糖溶液处理下总体上呈下降的趋势。可溶性蛋白质及游离氨基酸含量的变化趋势则略有不同,潍县萝卜芽苗菜中可溶性蛋白质的含量在 0~1.6%蔗糖溶液处理下总体上呈增加的趋势,1.6%~2.0%蔗糖溶液处理下总体上呈下降的趋势;游离氨基酸含量则在 0~1.2%蔗糖溶液处理下总体上呈增加的趋势,1.2%~2.0%蔗糖溶液处理下总体上呈下降的趋势。但均能说明,适宜含量的蔗糖溶液处理能有效提高萝卜芽苗菜的营养品质。

萝卜芽苗菜作为一种新型的绿色保健蔬菜,含有许多对人体健康有益的物质,如异硫氰酸盐、硫代葡萄糖苷、酚类物质、抗氧化酶等,这些物质使萝卜芽苗菜具有较强抗癌、抗氧化能力<sup>[20-21]</sup>。本研究发现,一定含量范围内的蔗糖溶液处理可以显著促进萝卜芽苗菜中有益物质的积累。本研究中,潍县萝卜芽苗菜中总酚、类黄酮、异硫氰酸盐含量均在 0.8%蔗糖溶液处理下达到最高值;SOD 酶活性及硫代葡萄糖苷含量则分别在 1.2%及 1.6%蔗糖溶液处理下达到最高值;而 POD 和 CAT 酶活性及总抗氧化能力则整体上均呈现不断增加的趋势。说明,适宜含量的蔗糖溶液处理可以显著增加萝卜芽苗菜中有益物质的含量,从而提高其营养价值。

本研究主成分分析结果表明,14 个品质指标中提取出了 3 个主成分,累积贡献率达到 87.200%。其中主成分 1 的方差贡献率最大,为 36.660%,且在果糖含量、葡萄糖含量和可溶性总糖含量上载荷值较高,说明糖分含量对芽苗菜品质的影响较大。本研究中,根据因子得分散点图,可将 6 个处理分为 4 个类群,其中 0.8%处理的因子 1 和因子 2 得分较高,归为一类,说明 0.8%处理的品质较优;0(蒸馏水对照)的因子 1 和因子 2 得分较低,归为一类,说明 0(蒸馏水对照)的品质较差;0.4%和 1.2%处理及 1.6%和 2.0%处理在散点图上距离最近,可以分别归为一类;说明 1.6%和 2.0%处理及 0.4%和 1.2%处理的品质中等,再次验证了适宜含量的蔗糖溶液处理可以显著提高萝卜芽苗菜的营养品质。此外本研究中,各处理综合得分从高到低依次为 0.8%、1.2%、1.6%、0.4%、2.0%、0(蒸馏水对照),说明蔗糖溶液含量对萝卜芽苗菜的品质影响较大。且以 0.8%处理的得分在 6 个处理中最高,说明

0.8%蔗糖溶液处理下萝卜芽苗菜的品质相对最好。

## 参考文献:

- [1] BAENAS N, GOMEZ-JODAR I, MORENO D A, et al. Broccoli and radish sprouts are safe and rich in bioactive phytochemicals[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 127: 60-67.
- [2] ZHOU C, ZHU Y, LUO Y. Effects of sulfur fertilization on the accumulation of health-promoting phytochemicals in radish sprouts[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(31): 7552-7559.
- [3] ZHANG X, SU N, JIA L, et al. Transcriptome analysis of radish sprouts hypocotyls reveals the regulatory role of hydrogen-rich water in anthocyanin biosynthesis under UV-A[J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18(1): 1-14.
- [4] DEBSKI H, WICZKOWSKI W, SZABLINSKA-PIERNIK J, et al. The application of Fe-EDTA and sodium silicate affects the polyphenols content in broccoli and radish sprouts[J]. *Biomolecules*, 2021, 11(8): 1190.
- [5] 张淑辉, 王红, 王文茹, 等. 蔗糖对桃幼苗生长发育及其 *SnRK1* 酶活性的影响[J]. *植物学报*, 2019, 54(6): 744-752.
- [6] LI D, ZHANG X, XU Y, et al. Effect of exogenous sucrose on anthocyanin synthesis in postharvest strawberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289: 112-120.
- [7] 凌亚杰, 杨子, 莫琴, 等. 外源蔗糖和 ABA 对草莓生物活性物质及抗氧化能力的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2019, 38(4): 1712-1718.
- [8] JEONG H, SUNG J, YANG J, et al. Effect of sucrose on the functional composition and antioxidant capacity of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprouts[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 43: 70-76.
- [9] 李媛媛, 王冰林, 张军, 等. 不同萝卜肉质根中可溶性糖组分及含量分析[J]. *北方园艺*, 2017(4): 4-9.
- [10] 赵世杰, 苍晶. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
- [11] LAW M Y, CHARLES S A, HALLIWELL B. Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea* L.) chloroplasts. The effect of hydrogen peroxide and of paraquat[J]. *Biochemical Journal*, 1983, 210(3): 899-903.
- [12] PROCHAZKOVA D, SAIRAM R K, SRIVASTAVA G C, et al. Oxidative stress and antioxidant activity as the basis of senescence in maize leaves[J]. *Plant Science*, 2001, 161(4): 765-771.
- [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): 1222-1227.
- [14] 逯玉, 谭建宁, 杨蕊娟, 等. 萘酚比色法测定油菜籽中硫代葡萄糖苷条件优化[J]. *中兽医医药杂志*, 2014, 33(4): 60-61.
- [15] 赵功玲, 由宏, 郝睿, 等. 萝卜苗中异硫氰酸盐的动态变化及体外抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2011, 32(13): 102-105.
- [16] LASTDRAGER J, HANSON J, SMEEKENS S. Sugar signals and the control of plant growth and development[J]. *J Exp Bot*, 2014, 65: 799-807.
- [17] 赵莹, 杨克军, 李佐同, 等. 外源糖浸种缓解盐胁迫下玉米种子萌发[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2735-2742.
- [18] 柴喜荣, 康云艳, 李旭霞, 等. 叶面喷施蔗糖对菜薹(菜心)产量和可溶性糖含量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2013, 1(20): 61-66.
- [19] TAN C, ZHANG L, DUAN X, et al. Effects of exogenous sucrose and selenium on plant growth, quality, and sugar metabolism of pea sprouts[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(7): 2855-2863.
- [20] LI R, ZHU Y. The primary active components, antioxidant properties, and differential metabolite profiles of radish sprouts (*Raphanus sativus* L.) upon domestic storage: Analysis of nutritional quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(15): 5853-5860.
- [21] GAMBA M, ASLLANAJ E, RAGUINDIN P F, et al. Nutritional and phytochemical characterization of radish (*Raphanus sativus*): A systematic review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113: 205-218.

(责任编辑:成纾寒)