



郭浩赞, 赵子璇, 孟宏宇, 黄伟, 刘光敏, 仝宇欣, 何洪巨. 植物工厂不同营养液浓度对油菜芽苗菜生长、光合性能和营养品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11):83-93.

GUO Haoyun, ZHAO Zixuan, MENG Hongyu, HUANG Wei, LIU Guangmin, TONG Yuxin, HE Hongju. Effects of different nutrient concentrations on the growth, photosynthesis and nutritional quality of rape sprouts cultivated in a plant factory[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11):83-93.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.09

植物工厂不同营养液浓度对油菜芽苗菜生长、光合性能和营养品质的影响

郭浩赞^{1,2} 赵子璇² 孟宏宇² 黄伟² 刘光敏¹ 仝宇欣^{3*} 何洪巨^{1*}

(1. 北京市农林科学院 农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097;

2. 河北北方学院 农林科技学院, 河北 张家口 075000;

3. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要 为探究不同营养液浓度对油菜芽苗菜生长及营养品质的影响,以‘京冠1号’绿油菜为研究对象,在环境条件保持一致的情况下,将标准山崎营养液(CK)按浓度设置为0.5倍($T_{0.5}$)、1倍(CK)、1.5倍($T_{1.5}$)、2倍(T_2)和2.5倍($T_{2.5}$),共5个处理,对油菜芽苗菜进行研究。结果表明:1)随着营养液浓度的增加,油菜芽苗菜的生长、生物量和含水率等均呈上升趋势,在 $T_{2.5}$ 处理下长势最佳; $T_{2.5}$ 处理下Chl a、Chl b及Chl(a+b)含量显著高于CK($P<0.05$),较CK分别提高了9.0%、7.4%和8.6%。2)各处理的维生素C含量在 $T_{1.5}$ 处理下最高,较CK提高了5.9%;粗蛋白含量在 $T_{2.5}$ 处理下最高,较CK提高了14.9%; $T_{2.5}$ 处理促进了油菜芽苗菜对氮、钾、钙和镁的吸收,降低了对锰的吸收。3)硫苷总含量从大到小排序依次为 $T_{0.5}>T_2>CK>T_{1.5}>T_{2.5}$,在各处理中均检测到10种硫苷组分, $T_{0.5}$ 处理显著提升了脂肪族硫苷及硫苷组分中PRO(2-羟基-3-丁烯基硫苷)、SIN(2-丙烯基硫苷)、NAP(3-丁烯基硫苷)、GBN(4-戊烯基硫苷)和4OH(4-羟基吡咯基-3-甲基硫苷)含量($P<0.05$); $T_{2.5}$ 处理显著提升了吡咯族硫苷含量($P<0.05$)。综上, $T_{2.5}$ 处理为油菜芽苗菜生长和品质提升的适宜营养液浓度。

关键词 芽苗菜; 设施栽培; 营养液配比; 硫代葡萄糖苷

中图分类号 S636.9

文章编号 1007-4333(2024)11-0083-11

文献标志码 A

Effects of different nutrient concentrations on the growth, photosynthesis and nutritional quality of rape sprouts cultivated in a plant factory

GUO Haoyun^{1,2}, ZHAO Zixuan², MENG Hongyu², HUANG Wei²,
LIU Guangmin¹, TONG Yuxin^{3*}, HE Hongju^{1*}

(1. Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. College of Agriculture and Forestry Science and Technology, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China;

3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2023-11-14

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项基金项目(KJCX20230212, KJCX20210437); 现代农业产业技术体系北京市创新团队建设专项(BAIC01-2023)

第一作者: 郭浩赞(ORCID:0009-0004-7596-4987), 硕士研究生, E-mail: 2509660594@qq.com

通讯作者: 仝宇欣(ORCID:0000-0002-5007-1152), 研究员, 主要从事设施(温室和植物工厂)精准环境控制及节能技术、光/电生物学、植物高效栽培技术研究, E-mail: tongyuxin@caas.cn

何洪巨(ORCID:0000-0001-6727-1487), 研究员, 主要从事农产品营养品质评价和功能性食品加工的研究, E-mail: hehongju@iapn.org.cn

Abstract In order to explore the effects of different nutrient solution concentrations on the growth and nutritional quality of rapessedd spouts, the standard Yamazaki nutrient solution (CK) was set to 0.5 times ($T_{0.5}$), 1 time (CK), 1.5 times ($T_{1.5}$), 2 times (T_2), and 2.5 times ($T_{2.5}$) under the condition that the environmental conditions were the same. The results indicate that: 1) With the increase of nutrient solution concentration, the growth, biomass, and moisture content of rape sprouts showed an upward trend, and the growth was the best under $T_{2.5}$ treatment, and the contents of the Chlorophyll a, Chlorophyll b, and Chlorophyll (a+b) under $T_{2.5}$ treatment were significantly higher than those under CK ($P < 0.05$), which increased by 9.0%, 7.4%, and 8.6%, respectively. 2) The vitamin C content of each treatment was the highest under $T_{1.5}$ treatment, which was 5.9% higher than that under CK. The crude protein was the highest funder $T_{2.5}$ treatment, which was 14.9% higher than that under CK; $T_{2.5}$ treatment promoted the absorption of nitrogen, potassium, calcium, and magnesium, while reduced the absorption of manganese. 3) The total content of glucosinolates was $T_{0.5} > T_{2.0} > CK > T_{1.5} > T_{2.5}$, and 10 glycoside components were detected in each treatment, and $T_{0.5}$ treatment significantly increased the content of PRO (Progoitrin), SIN (Sinigrin), NAP (Gluconapin), GBN (Glucobrassicinapin), and 4OH (4-Hydroxyglucobrassicin) in aliphatic sulfur glycosides and sulfur glycoside components ($P < 0.05$); $T_{2.5}$ treatment significantly increased the content of indole glucosides ($P < 0.05$). In conclusion, $T_{2.5}$ treatment can be recommended as a suitable nutrient solution concentration for improving growth and quality of rape sprouts in current experiment.

Keywords sprout seedlings; facility cultivation; nutrient solution ratio; Glucosinolates

近年来,具有营养价值和保健功能的安全绿色蔬菜^[1]受到人们越来越多的关注。芽苗菜作为一种新型“活体”绿色健康蔬菜^[2],因其营养丰富、清香鲜嫩、安全无农药残留且具有一定的保健功能等特点,受到消费大众的喜爱^[3-4]。油菜芽苗菜除具有上述优点外,还属于药食同源植物,富有硫代葡萄糖苷,可降低癌症发生率;同时含有多种营养元素和丰富的膳食纤维,具有通便功效;油菜中的酚类物质、黄酮醇和花青素等生物活性物质,具有延缓衰老、预防肥胖和抗辐射等功能作用^[5],油菜芽苗菜在促进身体健康、改善膳食营养结构和酸碱平衡等方面均具有积极的影响。鉴于此,油菜芽苗菜的设施高效栽培产业得到蓬勃发展,一些农业发达国家的芽苗菜生产已走向了植物工厂之路^[6-7]。植物工厂可以人为控制环境条件,为植物生长提供适宜的环境^[8-9],但是由于前期投入和运行成本较高,实际生产仍以大棚等简易的设施生产为主^[10]。致使设施产品质量良莠不齐及价格低廉,始终无法迈入高档蔬菜行列,严重阻碍了高品质芽苗菜产业的发展。通过不同营养液配比来提高芽苗菜产量和品质,发展药食两用价值的高附加值芽苗菜,提升芽苗菜的投入产出比,进而提高经济效益,可以带动芽苗菜产业的快速发展^[11-12]。

近几年,植物工厂中芽苗菜在营养液方面大多是从增加外源物质的角度进行研究,而成熟的营养液配方,如日本园试、日本山崎和Hoglang配方等,

对油菜芽苗菜生长及品质影响的研究鲜有报道。现有研究表明:蕹菜芽苗菜、香椿芽苗菜和萝卜芽苗菜喷施GA-3可显著提高其高度,增加产量^[13];用外源硝酸钠(SNP)处理过的香椿芽苗菜的发芽势、发芽率、干重、鲜重、芽长和根长等生长指标均得到极大改善^[14];葡萄糖和赤霉素协同处理能提高芥蓝芽苗菜品质^[15]。Yang等^[16]研究发现 $ZnSO_4$ 可以增加西兰花芽苗的总硫苷、总酚、异硫氰酸酯和抗坏血酸物质的含量。Hu等^[17]研究发现在西兰花发芽时采用 K_2SO_4 处理,硫苷含量会出现不同规律的变化。Sim等^[18]和Jeong等^[19]研究表明,蔗糖和 $CaCl_2$ 可以促进养麦芽体中多酚类、黄酮类和维生素C等生物活性物质的积累,同时提高养麦芽苗菜的抗氧化活性。以上研究均为植物工厂中改善芽苗菜产量和品质提供了一定的理论依据和技术支撑。

芽苗菜因其自身特点,生产过程中对各种环境因素要求比较严格,为了提高芽苗菜经济效益和附加值,只有在科学指导的前提下进行生产,才能保证产品的品质^[20-21]。营养液作为保证芽苗菜高产优质生产的关键因素之一,其不同配比对芽苗菜的生长和营养品质的研究鲜有报道,油菜芽苗菜中最主要的营养成分硫苷含量的营养液调控措施亦尚不清楚。基于此,本研究在植物工厂其他环境因子(光环境、温度和 CO_2 浓度等)保持一致的条件下,探究不同营养液配比对油菜芽苗菜生长及营养品质

的影响,以筛选出水培油菜芽苗菜适宜的营养液配方浓度,为提升油菜品质及植物工厂化生产提供科学的理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年 9—12 月在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所植物工厂内进行。试验材料选用绿油菜(‘京冠 1 号’),由北京市农林科学院蔬菜研究中心提供。选取饱满且均匀一致的油菜种子播种在用自来水浸湿后的海绵块中(2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm),然后置于 23℃ 培养箱中催芽 2 d,种子露白后置于光下培养。栽培平面光合光子通量密度(PPFD)为 150 μmol/(m²·s),相对湿度保持在 75% 左右。此阶段每 5 d 更换一次营养液,营养液 pH 为 5.5~6.5,EC 值保持不变。10 d 后挑选长势一致的油菜定植到另一育苗盘中(54 cm×28 cm×24 cm)备用。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验设置 5 个处理:以 1 倍标准山崎营养液配方为 CK,将标准山崎营养液大量元素配方(CK)设置为 0.5 倍(T_{0.5})、1.5 倍(T_{1.5})、2 倍(T₂)和 2.5 倍(T_{2.5})标准山崎营养液配方,每个处理 32 棵,设置 3 次重复。试验期间,每 2 d 更换一次营养液。栽培周期为 14 d。植物工厂内环境参数:试验所用的光源为 LED 灯板,光质为红:绿:蓝=2:1:1,光照强度为 200 μmol/(m²·s),光照时间 16 h;光期温度为 24℃,暗期温度为 17℃,CO₂浓度为 600 ppm,相对湿度(RH) 75%,pH 为 5.5~6.5;T_{0.5}处理 EC 值为 0.4 mS/cm、CK 处理 EC 值为 1 mS/cm、T_{1.5}处理 EC 值为 1.5 mS/cm、T₂处理 EC 值为 1.9 mS/cm 和 T_{2.5}处理 EC 值为 2.3 mS/cm。标准山崎营养液配方:Ca(NO₃)₂·4H₂O:236 mg/L、KNO₃:404 mg/L、NH₄H₂PO₄:57 mg/L 和 MgSO₄·7H₂O:123 mg/L;通用微量元素配方:Na₂Fe-EDTA:42 mg/L、H₃BO₃:2.86 mg/L、MnSO₄·4H₂O:2.13 mg/L、ZnSO₄·7H₂O:0.22 mg/L、CuSO₄·5H₂O:0.08 mg/L 和(NH₄)₆MO₇·4H₂O:0.02 mg/L。

1.2.2 精密仪器和药品规格

本研究所用的仪器规格:叶面积用美国 NE 生产的 LI-3100C 叶面积测量仪测定,样品保存用德国

Memmert GmbH 生产的 U-60 多用干燥箱,光合色素用日本 SHIMADZU 生产的 UV-1800 紫外分光光度计测定,样品冻干用北京博医康实验仪器(北京)有限公司生产的 Pilot10-15M 真空冷冻干燥机,粉碎用天津泰斯特仪器有限公司生产的 FW100 粉碎机,氮含量及粗蛋白含量用瑞典福斯分析有限公司生产的 KjeltacTM 8400 全自动凯氏定氮仪测定,矿质元素含量用日本岛津公司生产的 ICPE-9000 电感耦合等离子体发射光谱仪和日本大和科学生产的 FP41 马福炉测定。

本研究所用到的 Ca(NO₃)₂·4H₂O、KNO₃、NH₄H₂PO₄、MgSO₄·7H₂O、Na₂Fe-EDTA、H₃BO₃、MnSO₄·4H₂O、ZnSO₄·7H₂O、CuSO₄·5H₂O 与(NH₄)₆MO₇·4H₂O 为 500 g AR 分析纯。

1.2.3 测定内容及方法

1.2.3.1 生长指标的测定 试验处理 14 d 后,每个处理随机选取 15 株油菜,用刻度直尺测量幼苗株高和最大根长,用游标卡尺测量茎粗。测量鲜重(地上部与地下部分开):取植物地上部和地下部,用吸水纸吸干表面水分,然后称重;将鲜样放在信封中做好标记置于 80℃ 烘箱中烘干至恒重,计算出总鲜重及总干重。采用拍照法观看油菜整体形态,用叶面积测量仪测出叶面积。

光合色素采用乙醇浸提法,首先用叶片打孔器取已知体积的新鲜叶片圆片 3 片(约 2.85 cm²),避开叶脉,进行光合色素叶绿素 a(Chl a)与叶绿素 b(Chl b)含量的测定。将取好的叶片放入 15 mL 离心管中,加 10 mL 95% 乙醇黑暗提取 4 d,期间进行数次震荡,至叶片组织完全变白;以 95% 乙醇做参比,用紫外分光光度计分别在波长 649 和 665 nm 下测定吸光度。根据以下公式计算出不同处理下油菜叶片各色素的含量^[22]。各色素浓度的计算公式如下:

$$\text{叶绿素 a} = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 b} = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (2)$$

式中: A_{665} 是待测样品在波长 665 nm 下的吸光度; A_{649} 是待测样品在波长 649 nm 下的吸光度。

各色素含量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} & \text{叶绿体色素含量} \\ &= \frac{\text{叶绿体色素浓度} \times \text{提取液体积} \times \text{稀释倍数}}{\text{鲜重} \times 1000} \end{aligned}$$

1.2.3.2 营养指标的测定 维生素 C 参考食品安全国家标准《GB 14754—2010》^[23]的方法进行测

定。粗蛋白及氮含量参考食品国家安全标准《GB 5009.5—2016》^[24]方法进行测定:准确称取0.5 g油菜粉末(冻干样品)放到蛋白质消解管中,再往管中加入一片消解片,加入10 mL浓硫酸(分析纯);然后将蛋白质消解管放到蛋白消解仪上,消解3 h,待温度冷却后,将蛋白质消解管放入到全自动凯氏定氮仪中,即可设定程序进行测定。油菜全磷、全钾、钙、镁和铁含量参考食品国家安全标准《GB 5009.268—2016》^[24]的方法进行测定:准确称取0.5 g油菜冻干样品于坩埚中,置于马弗炉中,首先300℃灰化3 h,然后600℃灰化6 h,冷却取出,加10 mL硝酸溶液溶解,并定容至25 mL混匀备用,同时做空白试验。样品消解后过滤,由电感耦合等离子体发射光谱仪测定。硫代葡萄糖

苷含量参照刘倩男等^[25]方法测定。

1.3 数据分析

试验数据采用SPSS 21.0软件进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著;通过Duncan做多重比较,将所得数据利用Excel 2010软件进行处理和作图。

2 结果与分析

2.1 不同营养液浓度对油菜芽苗菜生长的影响

随着营养液浓度增加,油菜芽苗菜的生长指标整体呈现上升趋势。由表1可知, $T_{0.5}$ 处理下的生长指标均最小; $T_{2.5}$ 处理下,除了茎粗与 T_2 处理差异不明显以外,株高、根长和叶面积均显著高于其他处理($P<0.05$), $T_{2.5}$ 处理的株高、茎粗、根长和叶面积较CK分别显著增加了56.6%、50.0%、68.8%和64.8%($P<0.05$)。

表1 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜生长指标的影响

Table 1 Effects of different nutrient solution concentrations on rape sprouts growth indicators

处理 Treatment	株高/cm Height	茎粗/mm Stem diameter	根长/cm Root length	叶面积/cm ² Leaf area
$T_{0.5}$	6.1±0.2d	1.3±0.1b	10.0±0.2d	55.2±1.3d
CK	7.6±0.3c	1.4±0.2b	10.9±0.1cd	73.8±3.3c
$T_{1.5}$	8.4±0.0c	1.4±0.1b	11.8±0.6c	93.4±4.4b
T_2	10.7±0.4b	1.8±0.3ab	15.5±0.4b	103.4±3.0b
$T_{2.5}$	11.9±0.8a	2.1±0.3a	18.4±0.2a	121.6±3.9a

注: $T_{0.5}$ 表示0.5倍标准山崎营养液配方,CK表示1倍标准山崎营养液配方, $T_{1.5}$ 表示1.5倍标准山崎营养液配方, T_2 表示2倍标准山崎营养液配方, $T_{2.5}$ 表示2.5倍标准山崎营养液配方。同列不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著。下同。

Note: $T_{0.5}$, 0.5 times the standard Yamazaki nutrient solution formula; CK, 1 times the standard Yamazaki nutrient solution formula; $T_{1.5}$, 1.5 times the standard Yamazaki nutrient solution formula; T_2 , 2 times the standard Yamazaki nutrient solution formula; $T_{2.5}$, 2.5 times the standard Yamazaki nutrient solution formula. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. The same below.

2.2 不同营养液浓度对油菜芽苗菜生物量的影响

随着营养液浓度增加,油菜芽苗菜的干鲜重整体呈上升趋势(表2)。 $T_{0.5}$ 处理下的干鲜重与CK之间差

异不显著($P<0.05$)。 $T_{1.5}$ 、 T_2 和 $T_{2.5}$ 处理下的油菜芽苗菜地上部干鲜重显著高于CK($P<0.05$)。说明营养液浓度的增加有利于油菜芽苗菜产量的提升。

表2 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜生物量的影响

Table 2 Effects of different nutrient solution concentrations on rape sprouts biomass

处理 Treatment	地上部鲜重/g Fresh weight of aboveground	地下部鲜重/g Fresh weight underground	地上部干重/g Aboveground dry weight	地下部干重/g Underground dry weight
$T_{0.5}$	2.91±0.22d	0.12±0.01c	0.21±0.03c	0.01±0.00b
CK	3.20±0.13d	0.22±0.03bc	0.22±0.02c	0.01±0.00b
$T_{1.5}$	5.10±0.21c	0.20±0.03bc	0.32±0.02b	0.02±0.00b
T_2	6.20±0.11b	0.43±0.11ab	0.40±0.01a	0.02±0.01ab
$T_{2.5}$	6.93±0.43a	0.51±0.08a	0.41±0.03ab	0.03±0.01a

2.3 不同营养液浓度对油菜芽苗菜光合色素含量的影响

油菜芽苗菜的叶绿素 a 和叶绿素总含量随着营养液浓度增加整体呈上升趋势。由表 3 可知, $T_{0.5}$ 处理的叶绿素 a 和叶绿素总含量与 CK 之间无差异, 但叶绿素 b 含量显著低于 CK ($P<0.05$)。 $T_{1.5}$ 处理的叶绿素 a 和叶绿素总含量显著高于 CK ($P<0.05$)。 T_2 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量与 CK 差异不显著。 $T_{2.5}$ 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总含量较 CK 分别显著提高了 9.0%、7.4% 和

8.6% ($P<0.05$); 各处理的叶绿素 a/b 均高于 CK。

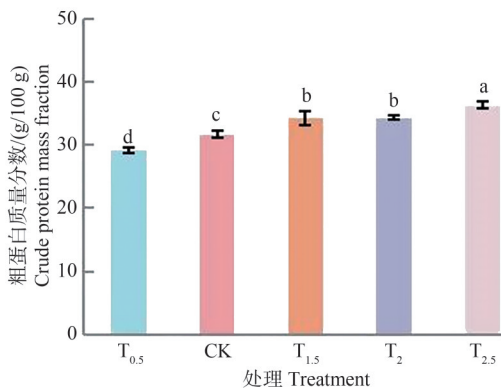
2.4 不同营养液浓度对油菜芽苗菜营养品质的影响

油菜芽苗菜的粗蛋白含量随着营养液浓度的增加整体呈上升趋势。由图 1(a) 可知, $T_{2.5}$ 处理显著提高了粗蛋白含量, 较 CK 提高了 14.9% ($P<0.05$); $T_{0.5}$ 处理的粗蛋白含量最低, 较 CK 显著降低了 7.9% ($P<0.05$)。 $T_{1.5}$ 处理显著提高了油菜芽苗菜 Vc 含量, 且较 CK 显著提高了 5.9% ($P<0.05$); $T_{0.5}$ 、 T_2 和 $T_{2.5}$ 处理分别较 CK 显著降低了 26.4%、11.4% 和 7.9% ($P<0.05$, 图 1(b))。

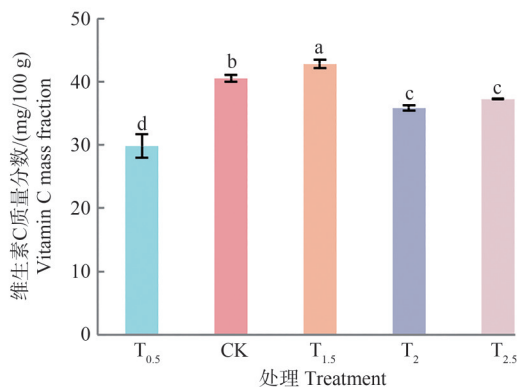
表 3 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜光合色素的影响

Table 3 Effects of different nutrient solution concentrations on photosynthetic pigment of rape sprouts

处理 Treatment	叶绿素 a 质量分数/(mg/g) Chlorophyll a mass fraction	叶绿素 b 质量分数/(mg/g) Chlorophyll b mass fraction	叶绿素 a+b 质量分数/(mg/g) Chlorophyll a+b mass fraction	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
$T_{0.5}$	153.3±4.8c	61.9±2.1d	215.2±6.9c	2.5±0.0a
CK	157.8±1.6bc	68.0±1.1bc	225.7±2.7bc	2.3±0.0d
$T_{1.5}$	173.1±0.7a	71.4±0.5ab	244.5±1.3a	2.4±0.0b
T_2	164.4±3.3ab	66.7±1.2c	231.1±4.5b	2.5±0.0a
$T_{2.5}$	172.0±1.8a	73.0±1.0a	245.0±2.8a	2.4±0.0c



(a) 对油菜芽苗菜粗蛋白的影响
(a) Effects of different nutrient solution concentrations on crude protein of rape



(b) 对油菜芽苗菜维生素C的影响
(b) Effects of different nutrient solution concentrations on Vitamin C of rape

图 1 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜营养品质的影响

Fig. 1 Effects of different nutrient solution concentrations on nutritional quality of rape

2.5 不同营养液浓度对油菜芽苗菜矿质元素吸收情况的影响

油菜芽苗菜对氮的吸收随着营养液浓度的增加呈上升趋势(表 4), 除 $T_{0.5}$ 处理明显低于 CK 外, 其他处理均显著高于 CK ($P<0.05$), 在 $T_{2.5}$ 处理下达到最大值; 对磷的吸收量呈现先上升后下降再上升的趋势, 在 CK 处理下最大, 且各处理均显著低于 CK ($P<0.05$); 对钾、钙和镁的吸收量均以 $T_{2.5}$ 处理下最高, 且显著高于其他处理 ($P<0.05$); 对铁的吸

收先增加后减少, 以 CK 处理最高, $T_{2.5}$ 处理最低; 对锰的吸收量随着营养液浓度的增加反而呈下降趋势, 在 $T_{0.5}$ 处理下吸收量最高, 在 $T_{2.5}$ 处理下最低。

2.6 不同营养液浓度对油菜芽苗菜硫代葡萄糖苷组分含量的影响

不同营养液浓度处理后, 各处理油菜芽苗菜中均检测到 10 种硫苷组分, 其中, 包括 5 种脂肪族硫苷、4 种吲哚族硫苷和 1 种芳香族硫苷(表 5)。

在 5 种脂肪族硫苷中, 2-羟基-3-丁烯基硫苷

表4 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜矿物质含量的影响

Table 4 Effects of different nutrient solution concentrations on mineral contents of rape mg/g

处理 Treatment	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
T _{0.5}	46.5±0.5d	4.9±0.0e	53.5±0.3e	18.0±0.1d	3.8±0.0e	0.11±0.0b	0.3±0.0a
CK	50.6±0.6c	6.3±0.0a	77.0±0.5b	21.9±0.2c	5.0±0.0b	0.14±0.0a	0.2±0.0b
T _{1.5}	54.6±1.3b	5.9±0.0c	74.0±0.7c	20.9±0.0c	4.6±0.0d	0.12±0.0c	0.2±0.0c
T ₂	54.9±0.3b	5.6±0.0d	68.5±0.3d	22.0±0.1b	4.8±0.0c	0.11±0.0c	0.1±0.0d
T _{2.5}	58.1±0.6a	6.1±0.0b	81.5±0.3a	23.8±0.0a	5.1±0.0a	0.09±0.0d	0.1±0.0e

表5 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜硫代葡萄糖苷组分含量的影响

Table 5 Effects of different nutrient solution concentrations on glucosinolates component contents of rape μmol/g

处理 Treatment	脂肪族 Aliphatic group					吲哚族 Indole group				芳香族 Aromatic
	PRO	SIN	RAA	NAP	GBN	4OH	GBC	4ME	NEO	NAS
T _{0.5}	2.2a	0.03a	0.3b	9.9a	2.3a	0.2a	0.3c	0.4d	0.2d	1.3b
CK	2.0b	0.03b	0.2c	5.7c	1.5b	0.1d	0.4a	0.3e	0.3b	1.4a
T _{1.5}	2.0b	0.02b	0.4a	5.6c	1.1d	0.1b	0.3b	0.4b	0.2c	1.2c
T ₂	1.9b	0.02b	0.1c	7.4b	1.3c	0.1c	0.2d	0.4c	0.2c	1.0e
T _{2.5}	1.4c	0.02b	0.3ab	4.6d	0.5e	0.1b	0.4a	0.5a	0.3a	1.1d

注:PRO为2-羟基-3-丁烯基硫苷;SIN为2-丙烯基硫苷;RAA为4-甲基硫氧丁基硫苷;NAP为3-丁烯基硫苷;GBN为4-戊烯基硫苷;4OH为4-羟基吲哚基-3-甲基硫苷;GBC为3-甲基吲哚基硫苷;4ME为4-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷;NEO为1-甲基吲哚基-3-甲基硫苷;NAS为2-苯乙基硫苷。

Note: PRO, Progoitrin; SIN, Sinigrin; RAA, Glucoraphanin; NAP, Gluconapin; GBN, Glucobrassicinpin; 4OH, 4-Hydroxyglucobrassicin; GBC, Glucobrassicin; 4ME, 4-Methoxyglucobrassicin; NEO, Neoglucobrassicin; NAS, Gluconasturtiin.

(PRO)含量随着营养液浓度的增加呈下降趋势,T_{0.5}处理的PRO含量最高,比CK显著提高了10.0%($P<0.05$);T_{2.5}处理较CK显著减少了30.0%($P<0.05$)。随着营养液浓度的增加,油菜芽苗菜中2-丙烯基硫苷(SIN)含量在T_{0.5}处理下达到最高,且显著高于CK($P<0.05$),其余处理与CK之间差异不显著。4-甲基硫氧丁基硫苷(RAA)含量在T_{1.5}处理时达到最大,为0.4 μmol/g,是CK处理的2倍;T_{2.5}处理仅次于T_{1.5}处理,位居第二。3-丁烯基硫苷(NAP)硫苷含量在T_{0.5}处理时最大,是CK处理的1.7倍;在T_{2.5}处理时最小,较CK减少了19.3%。4-戊烯基硫苷(GBN)含量在T_{0.5}处理最高,比CK显著提高了53.3%($P<0.05$);除T_{0.5}处理外,其余处理均显著低于CK($P<0.05$),其中T_{2.5}处理较CK减少了66.7%。

在4种吲哚族硫苷中,4-羟基吲哚基-3-甲基硫苷(4OH)含量在T_{0.5}处理最高,且各处理均显著高于CK($P<0.05$)。3-甲基吲哚基硫苷(GBC)含量在T_{2.5}处理时最大,为0.4 μmol/g,与CK之间无显

著性差异,其余处理均显著低于CK($P<0.05$)。4-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷(4ME)含量在T_{2.5}处理下最高,为0.5 μmol/g,是CK处理的1.7倍,且其余各处理均显著高于CK($P<0.05$)。1-甲基吲哚基-3-甲基硫苷(NEO)含量随着营养液浓度的增加,呈现先上升后下降又上升的趋势,且在T_{2.5}处理时达最大值,为0.3 μmol/g;T_{0.5}处理含量最低,T_{1.5}与T₂处理之间无显著性差异,但显著高于CK($P<0.05$)。

芳香族硫苷2-苯乙基硫苷(NAS)随着营养液浓度增加先升高后降低。在CK处理下含量最高,为1.4 μmol/g,均显著高于其他处理($P<0.05$)。油菜芽苗菜中NAS含量从大到小依次排序为CK>T_{0.5}>T_{1.5}>T_{2.5}>T₂处理。

2.7 不同营养液浓度对油菜芽苗菜硫代葡萄糖苷总含量的影响

不同营养液浓度处理后对油菜芽苗菜的硫代葡萄糖苷总含量有显著影响(图2)。在T_{0.5}处理下油菜的硫苷总含量最高,为16.9 μmol/g,是CK处理的1.4倍。T₂处理下的硫苷总含量仅次于T_{0.5}处

理,位居第二,较CK显著提高了6.5%。 $T_{2.5}$ 处理下的硫苷总含量最低,较CK处理显著减少了21.4%。 $T_{1.5}$ 处理与CK之间无显著性差异。不同营养液浓度处理下油菜中硫苷总含量从大到小排序为 $T_{0.5} > T_2 > CK > T_{1.5} > T_{2.5}$ 处理。由此可以看出, $T_{0.5}$ 处理能显著提升油菜芽苗菜中的硫苷总含量($P < 0.05$)。

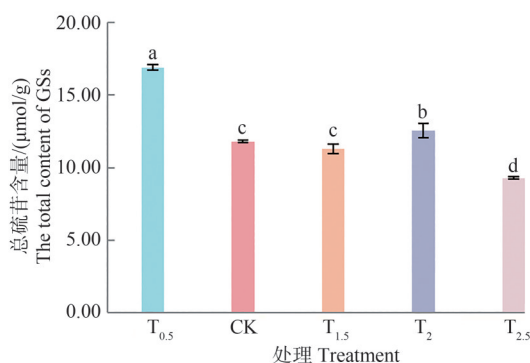


图2 不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜硫代葡萄糖苷总含量的影响

Fig. 2 Effects of different nutrient solution concentrations on the content of total glucosinolates of rape

3 讨论

营养液是水培的核心,是植物生长发育的营养来源。不同植物对营养元素的敏感性不同,浓度过高会引起盐分胁迫,浓度过低则会导致养分不足,而且不合适的配方、浓度和用量都会导致植物生理性病害的发生,降低油菜芽苗菜的产量与品质。本研究结果表明,不同山崎营养液浓度处理对油菜芽苗菜的生长及营养品质差异显著,较高浓度山崎营养液有利于油菜芽苗菜的生长发育及品质的改善。

大量试验表明,植物生长和产量常随着营养液浓度的升高而增加,但是营养液浓度升高到一定程度以后,则逐渐降低^[26]。李政璞^[27]研究发现随着营养液浓度的增加,水芹生物量呈现先升高后降低的趋势,其中1.5倍山崎鸭儿芹营养液浓度处理表现最佳。孟莉^[28]和张二震等^[29]也发现随着营养液浓度的增加,蔬菜生物量和产量先上升后下降。本试验中,随着营养液浓度的增加,油菜芽苗菜的生长整体呈现上升趋势,在 $T_{0.5}$ 处理下的长势最弱,而 $T_{2.5}$ 处理显著提升了油菜芽苗菜的生物量。本研究环境条件下设置的营养液浓度梯度尚未达到油菜

芽苗菜的吸收上限,因此未对油菜芽苗菜的生长产生抑制。由于前人在油菜芽苗菜适宜营养液浓度方面的研究较少,本研究参考生菜的营养液浓度范围进行设置,因品种不同产生了不同的研究结果。

叶绿素是植物光合作用必不可少的,其含量与植株长势在一定范围内成正相关^[30]。韩琳等^[31]以清水为对照,设置2.0、2.6、3.2和3.8 mS/cm这4个浓度处理,结果表明随着营养液浓度的增加,叶绿素总含量呈先上升后下降的趋势,且在2.6 mS/cm浓度处理下的生菜叶绿素含量最高。本研究表明,随着营养液浓度增加,油菜芽苗菜叶绿素总含量总体呈上升的趋势,且在 $T_{0.5}$ 处理下叶绿素总含量最低,在 $T_{2.5}$ 处理下的最高。 $T_{2.5}$ 处理下EC值为2.3 mS/cm,生菜叶绿素在2.6 mS/cm下含量最高,超过最高浓度上限后才开始下降,本试验设置的浓度梯度尚未达到浓度上限,在此范围内叶绿素含量与浓度呈正相关。李杰等^[32]还发现营养液EC值低于或者高于1.5 mS/cm均会显著降低蕹菜叶绿素含量。本试验中 $T_{0.5}$ 处理下的EC值为0.5 mS/cm, $T_{1.5}$ 处理下的EC值为1.5 mS/cm, $T_{2.5}$ 处理下的EC值大于 $T_{1.5}$ 处理,但是 $T_{1.5}$ 处理与 $T_{2.5}$ 处理之间的叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量无显著性差异。这一结果与李杰的研究结果不同,可能是作物品种不同;也可能是 $T_{2.5}$ 处理下的油菜芽苗菜根系面积扩大,增加了对镁的吸收,而镁最重要的功能是参与光合作用,合成叶绿素,所以 $T_{2.5}$ 处理下的油菜芽苗菜叶绿素含量增加,但是具体原因还需进一步研究^[33-34]。

油菜芽苗菜主要营养品质包括维生素C、粗蛋白和矿物质等指标。本研究随着营养液浓度的增加,油菜芽苗菜中的维生素C含量呈现先增加后降低的趋势,且在 $T_{1.5}$ 处理下含量最高。李杰等^[32]研究表明随着EC值的增大,蕹菜的维生素C含量先升高后降低,且EC值为1.5 mS/cm时维生素C含量最高,这一研究发现与本试验研究结果一致。刘春梅等^[35]发现,随着施氮量的增加,粗蛋白含量逐渐增加,但增加到一定量时,籽粒粗蛋白会下降。而本研究发现粗蛋白含量随着营养液浓度的增加呈上升趋势,在 $T_{2.5}$ 处理下的含量最高,与刘春梅等^[35]结果不同。可能与本试验营养液浓度范围的设置未达到油菜芽苗菜吸收上限有关。

营养液中含有植物生长发育所必需的各种营

养元素,水培生产的成功与否,取决于营养液配方和浓度是否合适和能否满足植物对营养的需求。前人研究发现,低浓度营养液能够促进植物对养分的吸收利用^[36]。在一定范围内随着营养液浓度的增加,植株长势增加,若超过各元素含量的上限会对植株生长产生抑制作用。本试验中随着营养液浓度的增加,油菜芽苗菜对铁的吸收呈现先上升后下降的趋势,对锰的吸收呈下降趋势,对磷、钾、钙和镁的吸收呈现先上升后下降再上升的趋势,这一结果与季延海等^[37]和李嘉炜等^[38]研究有所不同。可能是后期植物根系不断扩大,加大了吸收面积,降低了各元素间的拮抗作用,或者是环境条件不同所致。本研究对氮的吸收随着营养液浓度增加而增加,可能是因为油菜芽苗菜本身对氮的需求大,而设置的浓度范围内氮水平未达到油菜芽苗菜的吸收上限所致^[39]。

硫代葡萄糖苷是植物体内一种含氮含硫的次生代谢产物^[40]。前人试验结果表明,环境条件、植物代谢状况和营养液等都会不同程度的影响植物体内硫代葡萄糖苷的含量^[41]。有研究发现,喷施 K_2SO_4 溶液可显著提高西兰花芽苗体内总硫苷的含量^[42]。也有研究表明,西兰花和小白菜芽苗通过 $ZnSO_4$ 联合 Na_2SeO_3 处理,能够有效促进硫苷积累^[43]。本试验中随着营养液浓度的增加,硫苷总含量整体呈下降趋势, $T_{0.5}$ 处理的硫苷总含量最高, $T_{2.5}$ 处理最低。这一结果与刘萌等^[44]、张建国^[45]和初婷等^[46]的研究基本一致。表明低浓度对硫代葡萄糖苷具有促进作用,营养液浓度过高反而会降低硫苷的含量^[47-48]。油菜芽苗菜富含多种硫苷,比如RAA和GBC具有抗癌和抗肿瘤功效,长期食用能降低多种癌症发生的危险,但是硫苷带来的也并不都是正面效果,高浓度的硫苷也会产生一定的毒性,对人体产生危害^[49-50]。研究表明PRO等硫苷成分可以导致人类和牲畜的甲状腺肿大^[51-52],而且某些硫苷降解产物具有气味,其中芸薹属植物的苦味与NAP硫苷含量呈正相关^[53]。本试验在各处理的油菜芽苗菜中均检测到10种硫苷组分,包括5种脂肪族硫苷、4种吲哚族硫苷和1种芳香族硫苷。其中,脂肪族硫苷作为主要的硫苷类型,决定了油菜芽苗菜的总硫苷含量变化,而NAP硫苷为脂肪族硫苷的优势硫苷,在油菜芽苗菜中含量最高。本试验结果表明,随着营养液浓度的增加,PRO含量呈下

降趋势, $T_{0.5}$ 处理的PRO含量最高, $T_{2.5}$ 处理下最低;NAP含量在 $T_{0.5}$ 处理最高, $T_{2.5}$ 处理最低;RAA含量在 $T_{2.5}$ 处理最高。因此,高浓度营养液可以在增加有益硫苷含量的同时,还能减少对人体有害的硫苷含量。

4 结 论

植物工厂条件下,不同营养液浓度处理对油菜芽苗菜生长及营养品质影响显著。在本试验条件下,油菜芽苗菜的长势随着营养液浓度增加而增加,在 $T_{2.5}$ 处理下最佳,且株高、茎粗、根长和叶面积较CK分别增加了56.6%、50.0%、68.8%和64.8%; $T_{2.5}$ 处理下的叶绿素含量和粗蛋白最高; $T_{2.5}$ 处理显著促进了油菜芽苗菜对大量元素氮、钾、钙和镁的吸收,降低了对微量元素锰的吸收。且 $T_{2.5}$ 处理显著提升了有益硫苷含量,同时降低了对身体有害的PRO含量以及影响油菜芽苗菜苦味的NAP硫苷含量。通过综合评价油菜生长以及品质指标,在本研究条件下, $T_{2.5}$ 处理可被推荐为油菜芽苗菜生长和品质提升的适宜营养液浓度。但由于本研究设置的营养液浓度范围尚未达到油菜芽苗菜吸收上限,因此,水培油菜芽苗菜营养液配方的适宜浓度还需进一步探究。

参考文献 References

- [1] 武琳苑,李雅旻,刘厚诚.植物工厂条件下5种十字花科蔬菜的生长和品质比较[J].长江蔬菜,2020(20):41-45
Wu L Y, Li Y M, Liu H C. Comparative test of growth and quality of five cruciferous vegetables in artificial light plant factory conditions[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2020(20): 41-45 (in Chinese)
- [2] 崔海,刘智,李洪磊,周鹏泽,刘少泉,惠治兵.几种芽苗菜生长及品质比较[J].农业与技术,2022,42(4):5-9
Cui H, Liu Z, Li H L, Zhou P Z, Liu S Q, Hui Z B. Comparison of growth and quality of several sprouts[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(4): 5-9 (in Chinese)
- [3] Koyama M, Nakamura C, Nakamura K. Changes in phenols contents from buckwheat sprouts during growth stage [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 86-93
- [4] Lee J, Hwang Y S, Lee J D, Chang W S, Choung M G. Metabolic alterations of lutein, β -carotene and chlorophyll a during germination of two soybean sprout varieties[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 3177-3182
- [5] 刘佳佳,蒋娜娜,肖美丽,付东辉.油菜芽苗菜种植方法[J].长江蔬菜,2020(10):34-36
Liu J J, Jiang N N, Xiao M L, Fu D H. Cultivation method seedling sprouts of *Brassica napus* [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2020 (10): 34-36 (in Chinese)

- [6] 梁鹏. 芽苗菜保鲜与初加工工艺研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2017
Liang P. Study on fresh sprouts preservation and primary processing technology[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [7] 李宗哲, 李德远, 苏丹, 葛政委. 我国芽苗菜生产现状及发展对策研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(23): 193-196
Li Z Z, Li D Y, Su D, Ge Z W. The production status and development strategies of sprouts[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(23): 193-196 (in Chinese)
- [8] Barbosa G L, Gadelha F D, Kublik N, Proctor A, Reichelm L, Weissinger E, Wohlleb G M, Halden R U. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs conventional agricultural methods[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(6): 6879-6891
- [9] Cifuentes-Torres L, Mendoza-Espinosa L G, Correa-Reyes G, Daesslé L W. Hydroponics with wastewater: A review of trends and opportunities[J]. *Water and Environment Journal*, 2021, 35(1): 166-180
- [10] 王艳杰. 有机芽苗菜生产概述[J]. 特种经济动植物, 2020, 23(11): 47-48
Wang Y J. Overview of organic sprouts production[J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2020, 23(11): 47-48 (in Chinese)
- [11] 袁星星, 陈新, 陈华涛, 崔晓艳, 顾和平, 张红梅. 豆类芽苗菜生产技术研究现状及发展方向[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 136-139
Yuan X X, Chen X, Chen H T, Cui X Y, Gu H P, Zhang H M. Research status and development direction of bean sprout production technology[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 136-139 (in Chinese)
- [12] 兰成云, 王俊峰, 孙杨, 缪军, 吕晓惠, 韩伟. 芽苗菜研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(33): 5-7
Lan C Y, Wang J F, Sun Y, Miao J, Lv X H, Han W. Research progress of bud seedling vegetables in China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(33): 5-7 (in Chinese)
- [13] 蔡丛希, 侯秋梅, 汪炳良, 汪俏梅. 油菜素甾醇对萝卜芽菜生物活性物质的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(7): 1419-1425
Cai C X, Hou Q M, Wang B L, Wang Q M. Effect of brassinosteroids on the bioactive compounds in radish sprouts [J]. *Agricultural Sciences*, 2017, 31(7): 1419-1425 (in Chinese)
- [14] 穆红梅, 董仲国, 杨鑫, 蔡连捷. 外源一氧化氮对香椿芽苗菜种子发芽及生长的影响[J]. 聊城大学学报: 自然科学版, 2011, 24(3): 83-86
Mu H M, Dong Z G, Yang X, Cai L J. Effect of exogenous nitric oxide on the seed germination and growth of *Toona sinensis roem* [J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science Edition*, 2011, 24(3): 83-86 (in Chinese)
- [15] Miao H Y, Wang M Y, Chang J Q, Tao H, Sun B, Wang Q M. Effects of glucose and gibberellic acid on glucosinolate content and antioxidant properties of Chinese kale sprouts [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2017, 18(12): 1093-1100
- [16] Yang R Q, Guo L P, Jin X L, Shen C, Zhou Y L, Gu Z X. Enhancement of glucosinolate and sulforaphane formation of broccoli sprouts by zinc sulphate via its stress effect [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 13: 345-349
- [17] Hu K L, Zhu Z J, Zang Y X, Hussain S A. Accumulation of glucosinolates and nutrients in pakchoi (*Brassica campestris* L ssp *chinensis* var *communis*) two cultivar plants exposed to sulfur deficiency [J]. *Horticulture Environment, and Biotechnology*, 2011, 52(2): 121-127
- [18] Sim U, Sung J, Lee H, Heo H N, Jeong H S, Lee J. Effect of calcium chloride and sucrose on the composition of bioactive compounds and antioxidant activities in buckwheat sprouts [J]. *Food Chemistry*, 2020, 312: 126075
- [19] Jeong H, Sung J, Yang J, Kim Y H, Jeong H S, Lee J. 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
- [20] Goyal A, Siddiqui S, Upadhyay N, Soni J. Effects of ultraviolet irradiation, pulsed electric field, hot water and ethanol vapours treatment on functional properties of mung bean sprouts [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(4): 708-714
- [21] Sikin A M, Zoellner C, Rizvi S S H. Current intervention strategies for the microbial safety of sprouts [J]. *Journal of Food Protection*, 2013, 76(12): 2099-2123
- [22] 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 H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [23] GB 14754—2010 食品添加剂 维生素C(抗坏血酸)[S]. 中华人民共和国卫生部, 2010
GB 14754—2010 Food additive vitamin C (ascorbic acid) [S]. Ministry of Health of the People's Republic of China, 2010 (in Chinese)
- [24] GB 5009.5—2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
GB 5009.5—2016 Determination of protein in food [S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese)
- [25] 刘倩男, 黄伟, 丁云花, 王亚钦, 胡丽萍, 赵学志, 何洪巨, 刘光敏. 青花菜中硫代葡萄糖苷 RAA 和 GBC 的近红外光谱快速测定[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4497-4506
Liu Q N, Huang W, Ding Y H, Wang Y Q, Hu L P, Zhao X Z, He H J, Liu G M. Rapid determination of glucosinolates RAA and GBC in broccoli by near-infrared spectroscopy [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4497-4506 (in Chinese)
- [26] 周元清. 营养液供应对雾培生菜产量和营养品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
Zhou Y Q. Effect of nutrient solution supply on yield and nutritional quality of aerobically grown lettuce (*Lactuca Sativa* L) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese)
- [27] 李政璞. 不同影响因子对无土栽培水芹生长和品质的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020
Li Z P. Effects of different influencing factors on growth and quality of soilless cultivated water dropwort [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020 (in Chinese)
- [28] 孟莉. 不同浓度营养液对生菜管道水培的影响[J]. 乡村科技, 2021, 12(33): 59-61
Meng L. Effect of different concentrations of nutrient solution on pipeline hydroponics of lettuce [J]. *Rural Science and Technology*, 2021, 12(33): 59-61 (in Chinese)
- [29] 张二震, 刘慧英, 温泽林, 翟晨, 张占畅, 李汉钊. 不同电导率营养液对苦苣生长、产量与品质的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2017, 35(4): 438-443
Zhang E Z, Liu H Y, Wen Z L, Zhai C, Zhang Z C, Li H Z. Effects of different electrical conductivity levels of nutrient solution on the growth, yield and quality of endive [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2017, 35(4): 438-443 (in Chinese)
- [30] 汪玉洁, 郑胤建, 苏蔚, 刘厚诚. 不同光质对豌豆芽苗菜生长和品质的影响[J]. 广东农业科学, 2013, 40(24): 32-34

- Wang Y J, Zheng Y J, Su W, Liu H C. Effect of different light quality on the growth and quality of pea sprouts and vegetables [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(24): 32-34 (in Chinese)
- [31] 韩琳, 李东泽. 营养液浓度对水培生菜的影响[J]. 中国园艺文摘, 2017, 33(11): 47, 189
- Han L, Li D Z. Effect of nutrient solution concentration on hydroponic lettuce [J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2017, 33(11): 47, 189 (in Chinese)
- [32] 李杰, 杨萍. 不同电导率营养液对菠菜生长、品质及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(12): 82-86
- Li J, Yang P. Effect of different EC values of nutrient solution on the growth, quality, and yield of water spinach [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33(12): 82-86 (in Chinese)
- [33] 侯喜林, 张增翠, 曹寿椿, 侯沛. 不结球白菜新组合主要营养品质比较试验[J]. 中国蔬菜, 2001(2): 26-27
- Hou X L, Zhang Z C, Cao S C, Hou P. Comparative experiment on the main nutritional quality of a new combination of non-heading Chinese cabbage [J]. *Chinese Vegetables*, 2001(2): 26-27 (in Chinese)
- [34] Zhao H Q, Zhou Q P, Zhou M, Li C X, Gong X L, Liu C, Qu C X, Si W H, Hong F S. Magnesium deficiency results in damage of nitrogen and carbon cross-talk of maize and improvement by cerium addition [J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 148(1): 102-109
- [35] 刘春梅, 王孟雪, 孙海燕, 于立红, 孙志超, 强斌斌. 施氮水平对芸豆叶片氮代谢酶活性和氮吸收及营养品质的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(3): 16-21
- Liu C M, Wang M X, Sun H Y, Yu L H, Sun Z C, Qiang B B. Effect of nitrogen application levels on nitrogen metabolism enzyme activities, nitrogen absorption, and nutritional quality of kidney bean leaves [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(3): 16-21 (in Chinese)
- [36] 王瑞, 胡笑涛, 王文娥, 苏苑君, 乔源, 张栋. 菠菜水培不同营养液浓度的产量、品质、元素利用效率主成分分析研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(S1): 206-212
- Wang R, Hu X T, Wang W E, Su Y J, Qiao Y, Zhang D. Different concentrations of nutrient solution based on principal component analysis comprehensive evaluation of hydroponic spinach [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(S1): 206-212 (in Chinese)
- [37] 季延海, 武占会, 于平彬, 梁浩, 刘明池. 不同营养液浓度对水培韭菜生长适应性的影响[J]. 中国蔬菜, 2017(11): 53-56
- Ji Y H, Wu Z H, Yu P B, Liang H, Liu M C. Effect of nutrient solution with different concentration on growing adaptability of Chinese chive under water culture condition [J]. *China Vegetables*, 2017(11): 53-56 (in Chinese)
- [38] 李嘉炜, 陈潇, 常静静, 宋钊, 何裕志, 张白鸽. 可溶性盐浓度影响南瓜幼苗生长和荧光响应特性[J]. 中国农学通报, 2022, 38(18): 70-78
- Li J W, Chen X, Chang J J, Song Z, He Y Z, Zhang B G. Electrical conductivity affects the growth and fluorescence response characteristics of pumpkin seedlings [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(18): 70-78 (in Chinese)
- [39] 张传召, 张兆冬, 马万征, 郑庆瑶, 邹长明, 万梦, 徐彦涵. 不同营养液浓度下温室黄瓜营养元素含量上限的确定[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 63-66, 69
- Zhang C Z, Zhang Z D, Ma W Z, Zheng Q Y, Zou C M, Wan M, Xu Y H. Determination of the upper limit of nutrient content of cucumber in greenhouse under different nutrient solutions [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(2): 63-66, 69 (in Chinese)
- [40] 姚小桐, 张润芝, 许宁, 张春怡, 王雪蓉, 李淑敏. 不同品种芸苔属蔬菜中硫代葡萄糖苷含量的比较分析[J]. 北方园艺, 2018(21): 30-36
- Yao X T, Zhang R Z, Xu N, Zhang C Y, Wang X R, Li S M. Analysis of glucosinolate content in different Brassica vegetables [J]. *Northern Horticulture*, 2018(21): 30-36 (in Chinese)
- [41] 王树东. 十字花科芽菜硫苷鉴定及其强化研究[D]. 河北: 河北北方学院, 2021
- Wang S D. Fortification of glucosinolates in *Cruciferae* sprouts [D]. Hebei: Hebei North University, 2021 (in Chinese)
- [42] 董春华, 文石林, 荣湘民, 刘强, 宋海星, 张玉平, 高菊生. 喷施 KCl 对油菜光合产物及籽粒产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18031-18034
- Dong C H, Wen S L, Rong X M, Liu Q, Song H X, Zhang Y P, Gao J S. Effects of spraying KCl solution on photosynthate and grain yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(32): 18031-18034 (in Chinese)
- [43] 韩宇, 朱振宇, 沈敏熙, 程雨薇, 尹永祺, 方维明. 高温胁迫下硒硫互作调控西兰花芽苗生理及萝卜硫素代谢研究[J]. 核农学报, 2020, 34(6): 1350-1358
- Han Y, Zhu Z Y, Shen M X, Cheng Y W, Yin Y Q, Fang W M. Study on the regulation of selenium sulfur interaction on physiology and radish sulfur metabolism of broccoli flower bud seedlings under high temperature stress [J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2020, 34(6): 1350-1358 (in Chinese)
- [44] 刘萌, 何洪巨, 黄晓欣, 刘光敏, 张俊花, 黄伟. 外源物质亚硒酸钠处理对西兰花营养品质和硫苷含量的影响[J]. 北方园艺, 2021(21): 1-7
- Liu M, He H J, Huang X X, Liu G M, Zhang J H, Huang W. Effects of exogenous substance Na_2SeO_3 treatment on nutritional quality and glucosinolate content of broccoli [J]. *Northern Horticulture*, 2021(21): 1-7 (in Chinese)
- [45] 张建国. 小白菜 CYP83A1 和 CYP83B1 的遗传转化以及外源硫素对硫代葡萄糖苷合成的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017
- Zhang J G. Transformation of CYP83A1 and CYP83B1 and effects of exogenous sulfur on glucosinolate synthesis in pakchoi [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017 (in Chinese)
- [46] 初婷, 彭畅, 郭丽萍. MgSO_4 处理对西兰花芽苗菜生理活性物质和抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 53-59
- Chu T, Peng C, Guo L P. Effect of MgSO_4 treatment on bioactive compounds and antioxidant activity in broccoli sprouts [J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 53-59 (in Chinese)
- [47] Aires A, Rosa E, Carvalho R. Effect of nitrogen and sulfur fertilization on glucosinolates in the leaves and roots of broccoli sprouts (*Brassica oleracea* var *italica*) [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(10): 1512-1516
- [48] Pérez-Balibrea S, Moreno D A, García-Viguera C. Glucosinolates in broccoli sprouts (*Brassica oleracea* var *italica*) as conditioned by sulphate supply during germination [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(8): C673-C677
- [49] Wang P, Cao W X, Yang L M, Zhang Y Y, Fang Z Y, Zhuang M, Lv H H, Wang Y, Cheng S H, Ji J L. Glucosinolate biosynthetic genes of cabbage: Genome-wide identification, evolution, and expression analysis [J]. *Genes*, 2023, 14(2): 476
- [50] Shi H M, Zhao Y, Sun J H, Yu L L, Chen P. Chemical profiling of glucosinolates in cruciferous vegetables-based dietary supplements using ultra-high performance liquid chromatography coupled to tandem high resolution mass spectrometry [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 61: 67-72

- [51] 魏世锦. 茉莉酸甲酯和水杨酸对西兰花硫代葡萄糖苷含量调控和营养品质的影响[D]. 河北:河北北方学院, 2021
- Wei S J. Effects of methyl jasmonic acid and salicylic acid on regulation of glucosinolate content and nutritional quality of broccoli[D]. Hebei: Hebei North University, 2021 (in Chinese)
- [52] 秦晗. 新型甘蓝型油菜硫代葡萄糖苷表型及遗传分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021
- Qin H. Phenotypic and genetic analysis of glucosinolates in new-type *Brassica napus*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [53] 陈新娟, 周胜军, 杨悦俭, 朱祝军. 3个芜菁品种硫代葡萄糖苷含量的比较研究[J]. 浙江农业科学, 2009, 50(2): 415-417
- Chen X J, Zhou S J, Yang Y J, Zhu Z J. Comparative study on glucosinolates content of three turnip varieties[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2009, 50(2): 415-417 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 郭浩赟, 硕士研究生, 1999年出生, 2023年6月毕业于河北北方学院农艺与种业专业。现任职于中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所。研究生期间曾在北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所实习一年。在校期间连续2年获得奖学金, 分别为新生入学奖学金和三等奖学业奖学金。参与现代农业产业技术体系河北省创新团队建设项目; 以第一作者身份发表一篇文章, 以第二、第三作者身份分别发表一篇文章。



通讯作者简介: 仝宇欣, 研究员, 现任职于中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所。主要从事设施(温室和植物工厂)精准环境控制及节能技术、光/电生物学、植物高效栽培技术研究。2012年以来, 主持承担国家重点研发计划项目、国家科技 863 计划课题、科技部中罗国际合作项目、留学回国启动基金和引智示范等相关项目 20 余项。作为主要完成人参加省部级项目 6 项。在设施精准环境控制和高效栽培等方面发表学术论文 60 余篇, 主编学术专著《数字化植物工厂理论与实践》《设施园艺热泵技术及应用》2 部, 参编中英文著作各 2 部, 获得授权专利 40 余件, 并获得美国农业生物工程师学会(ASABE)2013 年度最佳论文奖、国家科技进步二等奖、中华农业科技奖等奖励 10 余项。



通讯作者简介: 何洪巨, 研究员, 现任职于农产品加工与食品营养研究所, 主要从事农产品营养品质评价和功能性食品加工的研究。开展蔬菜资源营养品质综合评价、营养强化蔬菜功能成分的代谢与调控技术、蔬菜质量安全分析技术标准与风险评估、蔬菜供应链营养品质保持技术、营养配餐、膳食定制与功能性蔬菜保健食品的系统研究。共主持 46 项课题, 发表研究论文 203 篇(SCI 论文 46 篇); 编写专业著作 13 部, 获得国家发明专利 8 项, 承担编写国家、行业标准 12 项。