

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.004

王瑞, 李奕林, 喻敏, 等. 过氧化脲及尿素配比对水培上海青生长及品质的影响. 土壤, 2022, 54(2): 240–246.

过氧化脲及尿素配比对水培上海青生长及品质的影响^①

王 瑞^{1,2,3}, 李奕林², 喻 敏^{1*}, 施卫明^{1,2}

(1 佛山科学技术学院国际膜生物学与环境研究中心, 广东佛山 528000; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 水培蔬菜中硝酸盐富集及供氧状况是当前水培体系亟待解决的问题。为降低水培上海青 *Brassica campestris* ssp. *Chinensis*(L.) 硝酸盐含量, 本研究分别通过部分尿素替代日本园试配方中硝酸盐, 以及不同过氧化脲(UHP)与尿素配比的方式, 探究减硝增氧对水培叶菜生长及品质的影响。首先以 30%、40%、50%、100% 尿素替代硝态氮来优化日本园试配方, 其中 50% 尿素替代处理能显著提高叶菜产量, 同时对根系有明显促生作用。然后在此基础上以 10%、30%、50% 和 80%UHP 替代改良日本园试配方中的尿素, 从而确定 UHP、尿素及硝态氮的最佳比例。结果表明: 随着 UHP 浓度的增加, 营养液中溶解氧浓度显著增加, 与对照相比, 施用 UHP 的处理溶解氧浓度提高 7.63%~39.70%。与对照相比, 30%UHP 处理增产 27.65%, 总根长、根表面积、根粗、根体积及根尖数分别增加 24.68%、36.92%、16.90%、28.19% 和 28.89%, 但高浓度(50% 和 80%)UHP 处理显著抑制上海青生长。30%UHP 处理显著提高上海青叶绿素含量及 VC 含量, 与对照相比, 分别增加 71.25% 和 34.91%。随着 UHP 浓度的增加, 上海青叶片硝酸盐含量呈下降趋势, 与对照相比, 10%、30%、50% 和 80%UHP 处理硝酸盐含量显著降低 3.89%、9.69%、22.71% 和 26.87%。因此, 在蔬菜水培栽培管理中, 适量增氧减硝能够刺激根系发育, 同时有利于提高上海青的产量及品质, 其中 UHP: 尿素: 硝酸盐中氮含量比例为 3: 7: 10 为最佳配比。

关键词: 水培; 上海青; 过氧化脲; 尿素; 品质

中图分类号: S636 **文献标志码:** A

Effects of Urea Hydrogen Peroxide and Urea Ratios on Growth of *Brassica campestris* in Hydroponic Culture

WANG Rui^{1,2,3}, LI Yilin², YU Min^{1*}, SHI Weiming^{1,2}

(1 International Research Center for Membrane Biology and Environment, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Nitrate enrichment and oxygen supply in hydroponic vegetables are urgent problems that need to be solved in the current hydroponic system. In order to reduce the nitrate content of *Brassica campestris* ssp. *Chinensis* (L.) in hydroponic culture, firstly, urea was used to replace partial nitrate in the Japanese garden test nutrition solution, and then different ratios of urea-hydrogen peroxide (UHP) to urea were designed to study the effects of nitrate reduction and increment oxygen on the growth and quality of *B. campestris* in hydroponic. First of all, 30%, 40%, 50% and 100% urea were used to replace nitrate to optimize the Japanese garden test nutrition solution. Compared to the control treatment, 50% urea substitution treatment significantly increased the yield and had a significant effect on root growth of *B. campestris*. Furthermore, 10%, 30%, 50% and 80%UHP were used to replace partial urea in the modified Japanese garden test nutrition solution to determine the best ratio of UHP to urea and nitrate. The results showed that with increase of UHP concentration, the dissolved oxygen concentration in the nutrient solution increased significantly by 7.63%–39.70% compared with the control. Moreover, the yield of 30%UHP treatment increased by 27.65% compared with the control, as well as the total root length, root surface area, average root diameter, root volume and root tip number respectively increased by 24.68%, 36.92%, 16.90%, 28.19% and 28.89%, however the growth of *B. campestris*

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31872957)资助。

* 通讯作者(yumin@fosu.edu.cn)

作者简介: 王瑞(1993—), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事蔬菜养分高效利用生理机制及菜地养分面源污染研究。E-mail: rwang@issas.ac.cn

significantly inhibited in 50% and 80% of UHP treatments. Chlorophyll and VC contents in 30%UHP treatment were significantly increased by 71.25% and 34.91%, respectively, than the control. With increase of UHP concentration, the nitrate content of leaves showed a downward trend, nitrate content significantly decreased by 3.86%, 9.69%, 22.71% and 26.87% respectively in 10%, 30%, 50% and 80%UHP treatments compared with the control. It was concluded that appropriate nitrate reduction and increment of oxygen could stimulate root development, improve yield and quality of *B. campestris*. The optimized ratio of nitrogen content in UHP : urea : nitrate was 3 : 7 : 10.

Key words: Hydroponics; *Brassica campestris*; Urea-hydrogen peroxide; Urea; Quality

在蔬菜水培营养液配方中,日本园试配方的叶菜类蔬菜产量显著高于 Hoagland's 营养液配方^[1],但日本园试配方中硝态氮含量高于 Hoagland's 营养液配方。由于蔬菜根系对硝态氮的吸收量大于其体内还原同化量,叶菜类蔬菜极易富集硝酸盐,虽无害于植物本身,却易危害人体健康^[2]。现在已有一些关于酰胺态氮进行部分替代硝态氮的研究。任广涛等^[3]以不同比例酰胺态氮替代日本园试配方中的无机氮(硝态氮和铵态氮)培养叶用莴苣,随着酰胺态氮浓度的增加,叶用莴苣体内硝酸盐含量有降低的趋势,酰胺态氮占全氮 15% 处理的莴苣产量最高。尿素作为一种酰胺态氮,不能作为唯一氮源用于水培,尿素用量过大时容易造成铵盐中毒,导致蔬菜生长缓慢。研究表明,用尿素作为唯一氮源的营养液栽培生菜时,生菜叶片在生长后期出现萎蔫,新叶边缘焦枯,根系变黑腐烂^[4]。

氧是维持植物正常呼吸的重要因子,作物根系需要充足的氧气供应才能维持正常的新陈代谢,而水中的氧气供给只有空气的十万分之一,在水培中经常由于根际缺氧而使作物生长缓慢,水分及养分吸收能力减弱,从而影响地上部分生长,导致产量下降,造成经济损失^[5-6]。因此,供氧状况是水培系统中技术管理的关键^[7]。当前水培的增氧措施主要包括营养液流动法、喷雾法、滴灌法、微纳米气泡技术等利用机械和物理的方法增加营养液与空气的接触机会,增加氧在营养液中的扩散能力,从而提高营养液中氧气的含量^[8]。研究表明,微纳米气泡的曝气增氧能有效促进水培生菜根系的生长发育,与营养液循环流动处理相比,生菜增产 37.3%~45.9%^[6]。周云鹏等^[9]通过微纳米气泡加氧灌溉对温室水培蔬菜的研究结果表明,微纳米气泡灌溉可以提高水培蔬菜产量及品质,促进根系发育,适宜的加氧灌溉质量浓度为 10~20 mg/L。目前关于化学增氧的研究报道相对较少。但有研究表明,以过氧化氢为氧气来源的增氧剂对植物生长有促进作用^[10]。对水培或淹水木瓜施用过氧化氢或过氧化钙可以缓解低氧胁迫,根部区域的富氧环境促进淹水后木瓜的复苏^[11]。目前所用的增氧剂包括过氧化

氢、过氧化钙、过氧化钠、过氧化脲(urea hydrogen peroxide, UHP)等,由于过氧化氢、过氧化钙及过氧化钠的过氧化物含活性氧量较少、稳定性差^[12],本试验将 UHP 作为增氧剂。UHP 是尿素和过氧化氢所形成的加合物,常温下稳定性好,活性氧含量高、释放可控。为探究 UHP 增氧减硝对水培上海青的影响,本试验改良日本园试配方,首先确定尿素替代硝酸盐的最佳用量,然后在此基础上以 UHP 替代部分尿素,确定 UHP、尿素及硝态氮的最佳比例,从而为减少蔬菜硝酸盐含量、改善水培的氧气环境提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蔬菜品种选用不结球白菜中青菜类的一个品种,上海青 *Brassica campestris* ssp. *Chinensis*(L.),购自南京。

1.2 试验设计

将上海青种子用 1% 次氯酸钠表面消毒 15 min,漂洗后在 25℃去离子水中浸泡过夜,播种于蛭石-草炭基质中培养。待种子长出 2~3 片真叶后,将其转移至装有 1/2 浓度的日本园试营养液的周转箱中培养,培养 9 d(每 3 d 更换 1 次营养液)后将上海青移入尿素替代部分硝态氮的日本园试配方营养液中培养。试验采用日本园试配方为对照,在总含氮量不变的前提下用尿素代替硝酸钙,设置尿素替代硝酸盐比例为 30%、40%、50% 和 100% 处理,为了保证所有处理中硝态氮用量一致(氮含量为 224 mg/L),以硝酸补充余下的氮(其配方详见表 1)。所配营养液以 1 mol/L 的氢氧化钠溶液调至 pH 5.8。微量元素采用通用配方,25 mg/L Fe-EDTA, 2.86 mg/L H₂BO₃, 0.22 mg/L ZnSO₄·7H₂O, 0.08 mg/L CuSO₄·7H₂O, 2.13 mg/L MnSO₄·4H₂O, 0.025 mg/L (NH₄)₆MoO₂₄·4H₂O。试验共 5 个处理,每个处理重复 3 次,随机排列。每个处理用 1 L 烧杯(烧杯缠上黑色不透光胶带),每个烧杯定植 2 株上海青,每 3 d 换 1 次营养液,无增氧措施。

45 d 收获时测定上海青的产量,从而确定尿素的最佳用量。试验于中国科学院南京土壤研究所进行,光照培养箱光照时间 16 h,光强为 300 μmol/(m²·s),白天温度 25℃,夜间 20℃,相对湿度为 67%。

表 1 不同尿素及硝态氮配比的营养液配方
Table 1 Different urea and nitrate ratios in nutrient solution

处理	硝酸钾(mg/L)	磷酸二氢铵(mg/L)	七水硫酸镁(mg/L)	硝酸(mg/L)	尿素(mg/L)	氯化钙(mg/L)	四水硝酸钙(mg/L)
CK(园试配方)	808	153	493	0	0	0	945
30% 尿素	808	153	493	201.6	144	444	0
40% 尿素	808	153	493	100.8	192	444	0
50% 尿素	808	153	493	0	240	444	0
100% 尿素	0	153	493	0	480	444	0

在上述试验的基础上,选取 50% 尿素替代日本园试配方中的硝酸盐进行以下试验。种子萌发处理同上述试验。以日本园试配方为对照,基于等氮量原则(所有处理施氮量一致),以硝酸钾、尿素和 UHP 为氮源,UHP 设置 4 个浓度,分别以 10%、30%、50% 和 80%UHP 替代尿素(其配方详见表 2),微量元素采用通用配方,同上。所配营养液以 1 mol/L 的氢氧化

钠溶液调至 pH 5.8。试验共 5 个处理,每个处理重复 3 次,随机排列。并设置不种上海青的 5 个处理,监测 3 d 内不同处理营养液的溶解氧浓度。于收获期(45 d)测定上海青产量、根系指标(总根长、根表面积、根体积、根直径、根尖数)、叶绿素含量、品质指标(硝酸盐含量、VC 含量)。试验地点及培养条件同上,无其他增氧措施。

表 2 不同 UHP 及尿素配比的营养液配方
Table 2 Different urea-hydrogen peroxide and urea ratios in nutrient solution

处理	硝酸钾(mg/L)	磷酸二氢铵(mg/L)	七水硫酸镁(mg/L)	尿素(mg/L)	氯化钙(mg/L)	UHP(mg/L)	四水硝酸钙(mg/L)
CK(园试配方)	808	153	493	0	0	0	945
10%UHP	808	153	493	216	444	36.8	0
30%UHP	808	153	493	168	444	110.4	0
50%UHP	808	153	493	120	444	184	0
80%UHP	808	153	493	48	444	294.4	0

1.3 分析测定方法

采用 WinRHIZO(Pro 2012)根系分析系统测定根系指标;采用丹麦 Unisense 微电极系统(OX50,φ=40~60 μm)测定营养液中溶解氧浓度;采用叶绿素仪 CCM-200(Opti- Sciences, 美国)测定叶绿素含量,叶绿素仪数值与叶片中叶绿素含量相关性较高,可用于测定叶绿素^[13];采用分光光度法测定(GB 5009.33—2016)硝酸盐含量^[14];采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定(GB/T 5009.86—2016)VC 含量^[15]。

1.4 数据处理

使用 Excel 2003 程序和 SPSS statistics 20 统计分析软件进行数据处理,Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同尿素及硝态氮配比对上海青生长的影响

由表 3 可以看出,不同处理间上海青叶片数无显著差异。50% 尿素处理上海青产量(地上部鲜重)明显高于其他处理,与 CK 相比,50% 尿素处理产量增

表 3 不同尿素及硝态氮配比对水培上海青生物量的影响
Table 3 Effects of different urea and nitrate ratios on growth of *B. campestris*

处理	叶片数(片/株)	地上部鲜重(g/株)	地上部干重(g/株)	地下部鲜重(g/株)	地下部干重(g/株)
CK	12 a	72.1 b	3.18 b	5.23 b	1.03 b
30% 尿素	13 a	73.9 ab	3.25 ab	6.26 ab	1.31 ab
40% 尿素	14 a	72.4 b	3.11 b	6.73 ab	1.36 ab
50% 尿素	14 a	75.8 a	4.02 a	7.11 a	1.43 a
100% 尿素	12 a	63.3 c	2.21 c	4.96 b	1.16 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著,下同。

加 5.13%; 而 100% 尿素处理产量最低, 与 CK 相比, 100% 尿素处理产量降低 12.21%。与 CK 相比, 50% 尿素处理的上海青根鲜重显著增加 35.95%。由此, 本试验初步筛选 50% 尿素替代部分硝态氮。

2.2 不同 UHP 与尿素比对营养液溶解氧浓度的影响

监测 3 d 内不同处理营养液的溶解氧浓度, 可见, 添加 UHP 后营养液中溶解氧浓度始终高于 CK, 且溶解氧浓度随着 UHP 浓度的增加而增加(图 1)。UHP 在水中缓慢释放氧气, 在 8 h 时, 溶解氧浓度最高, 各处理表现为 80%UHP(336.26 $\mu\text{mol/L}$)>50%UHP(312.71 $\mu\text{mol/L}$)>30%UHP(288.41 $\mu\text{mol/L}$)>10%UHP(267.24 $\mu\text{mol/L}$)>CK, 不同处理间差异显著($P<0.05$)。此后, 随着时间的推移, 溶解氧浓度呈降低趋势。

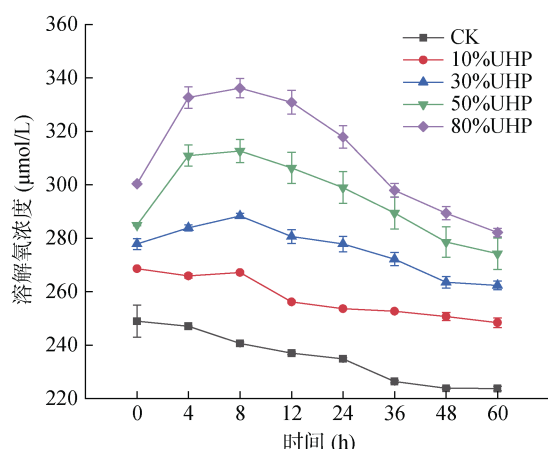
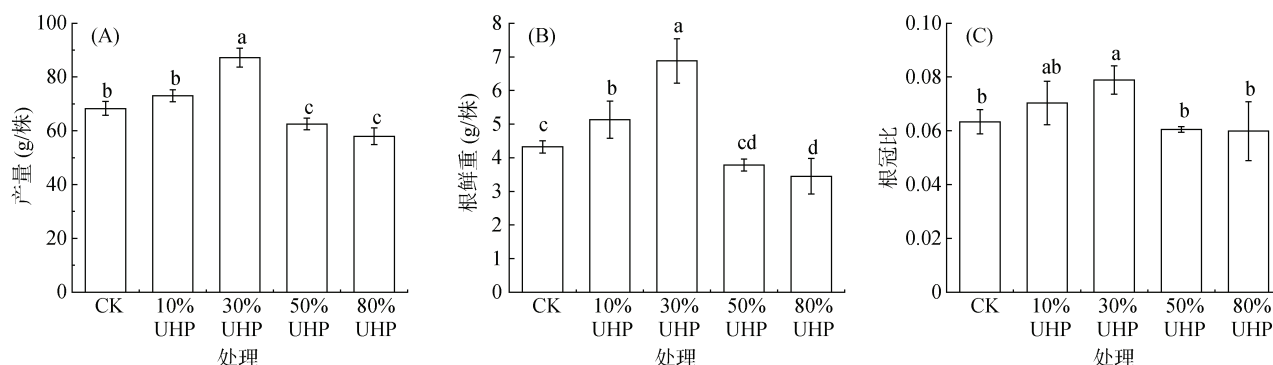


图 1 不同 UHP 与尿素配比营养液溶解氧浓度

Fig. 1 Dissolved oxygen concentrations of different UHP and urea ratios

2.3 不同 UHP 与尿素比对上海青生长的影响

由图 2A 可以看出, 30%UHP 处理上海青产量与其余各处理之间差异达到了显著水平, 与 CK 相比,



(图中不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 2 不同 UHP 与尿素比对上海青产量(A)、根鲜重(B)、根冠比(C)的影响

Fig. 2 Effects of different UHP and urea ratios on yield (A), root fresh weight (B), root-shoot ratio (C) of *B. campestris*

30%UHP 处理增产 27.65%; 10%UHP 处理和 CK 的产量无显著差异; 50%UHP 和 80%UHP 处理出现明显减产效应, 相对于 CK, 分别显著减产 8.45% 和 15.19%, 但二者之间无显著性差异。30%UHP 和 10%UHP 处理的根鲜重显著高于 CK, 较 CK 分别增加 18.83% 和 59.26%(图 2B); 50%UHP 处理与 CK 根鲜重无显著差异, 80%UHP 处理根鲜重较 CK 显著减少 20.14%。与 CK 相比, 30%UHP 处理的根冠比显著提高 25.15%, 其他处理根冠比与 CK 无显著性差异(图 2C)。

2.4 不同 UHP 与尿素比对上海青根系发育的影响

增氧可以有效促进蔬菜根系发育, 其中 30%UHP 处理显著提高蔬菜根系总根长、根表面积、根粗、根体积及根尖数。与 CK 相比, 30%UHP 处理根系总根长增加 24.68%、根表面积增加 36.92%、根粗增加 16.9%、根体积增加 28.19%、根尖数增加 28.89%。但 50%UHP 及 80%UHP 处理显示出对蔬菜根系发育有明显抑制作用(表 4)。与 CK 相比, 50%UHP 处理根平均直径显著减少 10.13%; 80%UHP 处理根表面积显著减少 3.3%、根平均直径减少 15.2%、根体积减少 13.87%、根尖数减少 8.63%(表 4)。

2.5 不同 UHP 与尿素比对上海青叶片叶绿素指数的影响

从图 3 可以看出, 30%UHP 处理的叶绿素含量较其他处理的差异达到了显著水平($P<0.05$), 其叶绿素含量最高, 较 CK 增加 71.25%; 10%UHP 处理和 CK 的叶绿素含量次之, 二者之间无显著差异; 50%UHP 和 80%UHP 处理叶绿素含量开始下降, 与 CK 相比, 分别降低 9.89% 和 13.57%, 其中 80%UHP 处理与 CK 的叶绿素含量差异达显著水平($P<0.05$)。

表 4 不同 UHP 与尿素配比对上海青根系发育的影响

Table 4 Effects of different urea-hydrogen peroxide and urea ratios on root development of *B. campestris*

处理	总根长(cm)	根表面积(cm ²)	根平均直径(mm)	根体积(cm ³)	根尖数
CK	979 ± 145 bc	100.37 ± 1.65 c	0.35 ± 0.003 b	0.94 ± 0.03 bc	2 814 ± 139 c
10%UHP	1 104 ± 64 ab	103.39 ± 1.36 b	0.37 ± 0.008 b	0.97 ± 0.01 bc	3 090 ± 73 b
30%UHP	1 221 ± 79 a	137.42 ± 0.82 a	0.41 ± 0.012 a	1.21 ± 0.02 a	3 627 ± 125 a
50%UHP	937 ± 92 bc	98.78 ± 1.56 cd	0.31 ± 0.009 c	0.88 ± 0.07 c	2 781 ± 101 c
80%UHP	858 ± 118 c	97.06 ± 1.61 d	0.30 ± 0.013 c	0.81 ± 0.03 d	2 571 ± 87 d

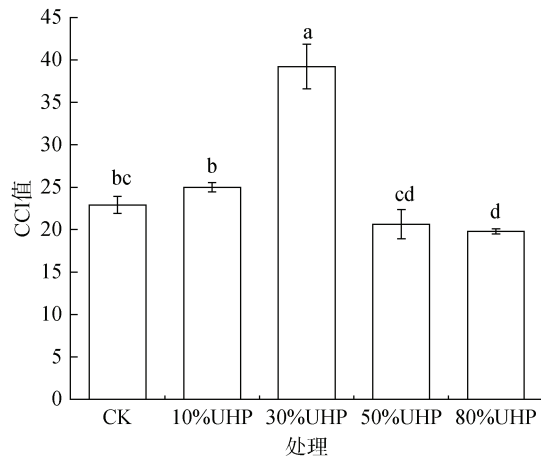


图 3 不同 UHP 与尿素配比对上海青相对叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of different UHP and urea ratios on CCI value of *B. campestris*

2.6 不同 UHP 与尿素配比对上海青品质的影响

随着 UHP 用量的增加, 叶片硝酸盐含量呈现明显降低趋势(图 4A), 说明 UHP 替代硝态氮可明显降低上海青硝酸盐含量, 与 CK 相比, 30%UHP、50%UHP 和 80%UHP 处理分别降低 9.69%、22.71% 和 26.87%。各处理 VC 含量大小顺序是 30%UHP > 10%UHP > CK > 50%UHP > 80%UHP(图 4B), 与 CK 相比, 30%UHP 处理 VC 含量显著增加 34.91%,

50%UHP 和 80%UHP 处理 VC 含量显著降低 8.34% 和 19.63%, 水培营养液配方中适量的 UHP 含量可以提高蔬菜 VC 含量。

3 讨论

在用尿素代替硝酸盐试验中, 50% 尿素替代硝酸盐效果最好, 与 CK 相比, 上海青产量提高 5.13%(表 3)。吕国华等^[16]在 Hoagland's 营养液配方中以酰胺态氮部分取代硝态氮, 显著提高了大白菜产量, 在适宜氮素用量下, 以硝态氮: 酰胺态氮为 1: 1 时产量最高, 同时可显著降低大白菜硝酸盐含量。本研究 50%尿素替代硝酸盐的结果与之一致; 而 100% 尿素替代硝酸盐处理上海青减产 12.21%(表 3)。刘菊莲和李建设^[17]的研究表明, 选用日本园试配方水培小白菜, 加尿素能够降低营养液 pH, 40% 尿素替代硝酸盐处理的小白菜产量最高, 并且能够有效降低叶片硝酸盐含量并提高小白菜的品质; 100% 尿素处理产量最低。本研究完全用尿素替代硝酸盐的结果与之一致, 即水培营养液中尿素含量过高会抑制蔬菜的生长。这可能是因为: ①尿素通过微生物水解后被作物所吸收利用, 在水培条件下, 虽然作物可以以分子态吸收尿素, 但作物体内脲酶活性相对较低, 从而仅能同化根系吸收的部分尿素^[18]; ②尿素易水解

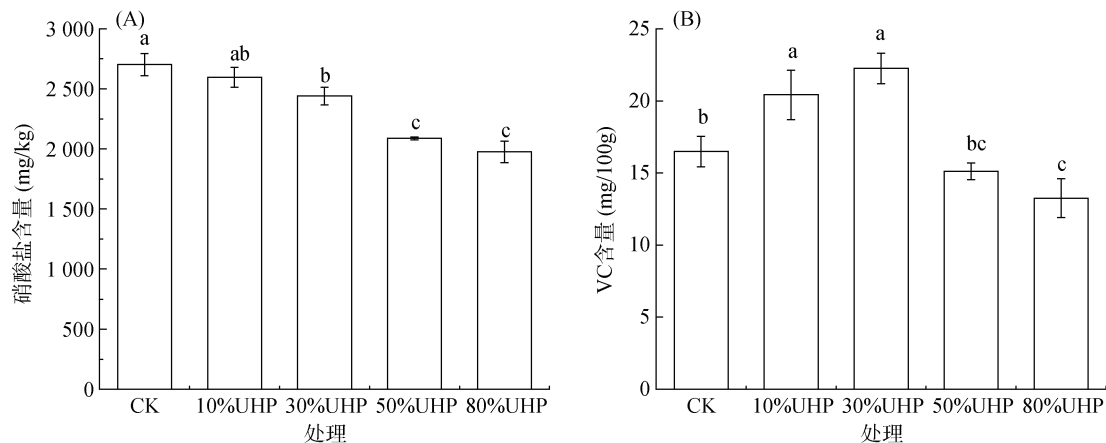


图 4 不同 UHP 与尿素配比对上海青硝酸盐含量(A)和 VC 含量(B)的影响

Fig. 4 Effects of different UHP and urea ratios on nitrate content (A), and VC content (B) of *B. campestris*

成铵态氮,作物吸收铵态氮后可能导致营养液的 pH 急剧下降,引起根部病害的同时也会减少作物对养分的吸收^[19-20];③尿素水解的一些有毒副产物,例如氰酸铵和氨基甲酸铵,或制造过程的副产物,如缩二脲,也可能对作物造成损害^[21]。

本试验在明确尿素替代硝酸盐的最佳配比后,使用不同比例的 UHP 替代尿素,试验结果表明,随着 UHP 浓度的增加,上海青产量呈现先上升后下降的趋势,以 30%UHP 替代尿素的增产效果最为显著,与 CK 相比,30%UHP 处理的上海青产量提高 27.65%。这说明 30%UHP 处理可以改善水培系统中的通气状况,3 d 内的监测结果也表明,UHP 在水中缓慢释放氧气,30%UHP 处理的溶解氧浓度为 262.36 ~ 288.41 $\mu\text{mol/L}$,显著高于 CK(223.78 ~ 249.0 $\mu\text{mol/L}$, $P < 0.05$, 图 1),能够为蔬菜生长创造适宜的根际氧环境。50%UHP 和 80%UHP 处理抑制上海青的生长,与 CK 相比,产量下降 8.45% 和 15.19%(图 2A)。高强等^[22]也在研究 UHP 对甜瓜生长的影响中发现,1 m^3 水分别加入 1.1 和 2.1 kg UHP 处理的平均单果质量均小于对照。这可能是因为 UHP 浓度过高会由于其具有较强的氧化性而对蔬菜根系生长造成伤害(表 4),从而造成减产。赵霞等^[23]研究不同根际溶氧量对水稻生长的影响发现,与中氧处理(溶解氧含量为 2.3 ~ 5.5 mg/L)相比,高氧处理(溶解氧含量为 65 ~ 8.0 mg/L)将减弱增氧对水稻根系生长及干物质积累的促进作用。这种现象的产生可能与根系表面较高浓度的溶氧量促使活性氧的产生从而抑制根系生长有关。氧气浓度的提高能够促进蔬菜的有氧呼吸,但持续高氧浓度下,植物生长会产生不同程度的氧伤害,影响其生长发育^[9]。蔬菜根系作为最先感知增氧的部位,在 80%UHP 处理下,根长、根粗以及根数量均显著减少。研究表明,高浓度外源 H_2O_2 会抑制拟南芥根系的生长^[24],当 H_2O_2 浓度为 2 mmol/L 时,拟南芥根系停止生长^[25]。由此可以得出,氧调控根系形态特征变化可能是导致上海青产量差异的主要原因之一。与 CK 相比,30%UHP 处理无论根系总根长、根表面积、根粗、根体积以及根尖数均显著增加(表 4)。30%UHP 处理对根系的显著促生作用使蔬菜吸收更多养分进而促进上海青地上部产量的形成,这与前人的研究结果一致。张慧娟等^[6]利用微纳米气泡技术水培紫叶生菜,加氧处理的紫叶生菜植株高于对照,叶片丰满肥大,单株根长比对照组显著增加 13.6%($P < 0.05$)。因此,可以认为水培条件下施用 UHP 可以达到和增氧灌溉同样的促进蔬菜根系生长

的作用,其中 30%UHP 替代尿素效果最优。

CCI 值与叶片中叶绿素含量相关性较高,可用于表征植物相对叶绿素含量^[13]。随着氧质量浓度增加,叶绿素含量呈现先升高后降低趋势。与 CK 相比,30%UHP 处理叶绿素含量显著增加 71.25%,50%UHP 和 80%UHP 处理叶绿素含量分别减少 9.89% 和 13.57%(图 3A)。这可能是由于高氧处理下植株生长过快,营养液中营养元素供给不足从而使叶绿素含量相对较低^[26]。叶绿素是植物光合作用吸收光能的主要物质,其含量高低与植物的光合速率密切相关^[27],叶绿素含量降低会影响上海青叶片光合性能和干物质的积累,从而导致减产。硝酸盐含量的高低是衡量蔬菜品质的一个重要指标,从图 4A 可以看出,随着 UHP 用量的增加,硝酸盐含量呈现明显降低趋势,表明用 UHP 替代硝态氮可明显降低蔬菜叶片硝酸盐含量。在 UHP 和尿素总氮量不变的情况下,随着 UHP 比例增加,叶片的硝酸盐含量反而降低,这可能是因为低浓度 UHP 处理下,由于蔬菜的生物量增加引起的稀释效应;而在高浓度 UHP 处理下,蔬菜根系发育受到抑制,对养分的吸收利用效率低导致的。而 VC 含量随 UHP 浓度的增加呈现先升高后下降的趋势(图 4B),与 CK 相比,30%UHP 处理 VC 含量显著增加 34.91%,表明适量的 UHP 含量能够改善上海青 VC 含量,提高上海青品质。

4 结论

尿素可以作为氮源替代水培营养液中部分硝酸盐,尿素浓度过高会抑制蔬菜的生长,以 50% 尿素替代日本园试配方中的硝态氮提高上海青产量的效果最为显著。UHP 作为化学增氧剂可以改善水培的通气环境,其溶解氧浓度维持在 262.36 ~ 288.41 $\mu\text{mol/L}$ 可以促进上海青根系发育、提高产量及品质,但 UHP 浓度过高会抑制上海青生长发育,导致减产。可见,在蔬菜水培栽培管理中,适量增氧减硝能够刺激根系发育,提高上海青的产量及品质,UHP: 尿素: 硝酸盐中氮含量比例为 3: 7: 10 为最佳配比,与对照相比,此配比上海青增产 27.65%、叶绿素含量及 VC 含量分别增加 71.25% 和 34.91%,硝酸盐累积量减少 9.66%。

参考文献:

- [1] 李灿,吴朝江,李广彬,等. 水培营养液配方对不同叶菜产量和品质的影响[J]. 长江蔬菜,2019(6): 62-66.
- [2] 汪李平,李式军. 不同氮素形态及配比对水培生菜铁营养的影响[J]. 安徽农业大学学报,1995,22(3): 266-271.

- [3] 任广涛, 梁洪涛, 金荣荣, 等. 酰胺态氮对水培叶用莴苣硝酸盐污染控制的影响[J]. 北方园艺, 2009(1): 17–19.
- [4] 罗健. 水培营养液中尿素的转化和蔬菜对尿素作氮源的反应[J]. 华南农业大学学报, 1992, 13(4): 32–38.
- [5] 黄金秋, 王秀峰, 宋述尧, 等. 不同供气条件对水培黄瓜幼苗生长的影响[J]. 山东农业科学, 2009, 41(5): 41–44.
- [6] 张慧娟, 薛晓莉, 林少航, 等. 微纳米气泡发生技术及其在水培增氧上的应用[J]. 蔬菜, 2019(1): 59–65.
- [7] 徐志豪, 张德威. 改善水培作物根际氧气供给的原理和实践[J]. 浙江农业学报, 1994, 6(1): 44–48.
- [8] 薛晓莉, 杨文华, 张天柱. 营养液微纳米气泡增氧消毒技术[J]. 农业工程技术, 2017, 37(1): 46–50.
- [9] 周云鹏, 徐飞鹏, 刘秀娟, 等. 微纳米气泡加氧灌溉对水培蔬菜生长与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 98–100, 104.
- [10] 梁喜献. 控释增氧剂对水培植物的影响[J]. 广西热带农业, 2009(6): 74–76.
- [11] Thani Q A, Schaffer B, Liu G D, et al. Chemical oxygen fertilization reduces stress and increases recovery and survival of flooded *Papaya* (*Carica papaya* L.) plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 202: 173–183.
- [12] 张翠荣. 过氧化脲的制备及应用概况[J]. 广东化工, 2004, 31(1): 4–5.
- [13] 周小生, 周月琴, 庞磊, 等. 叶绿素仪 CCM-200 在测定茶树叶片叶绿素和氮素含量上的应用[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(1): 150–153.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理局. 食品安全国家标准食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定: GB 5009. 33–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 10–12.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定: GB/T 5009.86—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 7–8.
- [16] 吕国华, 王洪礼, 田丽萍, 等. 氮素形态及配比与大白菜体内硝酸盐的积累[J]. 石河子农学院学报, 1995, 13(2): 29–32.
- [17] 刘菊莲, 李建设. 不同尿素用量对 DFT 水培小白菜的影响[J]. 吉林蔬菜, 2007(4): 60–62.
- [18] 刘高琼, 李式军. 酰胺态氮对水培白菜产量和硝酸盐积累影响的季节性差异[J]. 南京农业大学学报, 1993, 16(2): 111–113.
- [19] Harper J E. Uptake of organic nitrogen forms by roots and leaves[M]//Nitrogen in Crop Production. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2015: 165–170.
- [20] Luo J, Lian Z H, Yan X L. Urea transformation and the adaptability of three leafy vegetables to urea as a source of nitrogen in hydroponic culture[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1993, 16(5): 797–812.
- [21] Goyal S S, Huffaker R C. Nitrogen toxicity in plants[M]//Nitrogen in Crop Production. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2015: 97–118.
- [22] 高强, 周勃, 任海龙, 等. 增氧灌溉对大棚甜瓜生长、品质和产量的影响[J]. 北方园艺, 2020(2): 46–51.
- [23] 赵霞, 徐春梅, 王丹英, 等. 根际溶氧量对分蘖期水稻生长特性及其氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3733–3742.
- [24] Dunand C, Crèvecoeur M, Penel C. Distribution of superoxide and hydrogen peroxide in *Arabidopsis* root and their influence on root development: Possible interaction with peroxidases[J]. *The New Phytologist*, 2007, 174(2): 332–341.
- [25] 张晓燕, 刘广千, 赵佳, 等. 过氧化氢对拟南芥根生长的影响[J]. 现代农业科技, 2010(23): 19, 21.
- [26] 郑小兰, 侯亚兵, 王瑞娇, 等. 根际氧浓度对番茄幼苗生长发育的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(4): 208–214.
- [27] 杜长玉, 李东明, 庞全国. 大豆连作对植株营养水平、叶绿素含量、光合速率及其产物影响的研究[J]. 大豆科学, 2003, 22(2): 146–150.