

氮硫互作对水培韭菜生长、营养及风味品质的影响

张焯达^{1,2,3}, 佟静^{2,3}, 武占会^{2,3}, 王丽萍¹, 王宝驹^{2,3}, 刘宁^{2,3}

(1. 河北工程大学园林与生态工程学院 河北邯郸 056038; 2. 北京市农林科学院蔬菜研究所 北京 100097; 3. 农业农村部都市农业(北方)重点实验室 北京 100097)

摘要:为探究氮硫互作对韭菜生长适应性、理论产量、营养和风味品质的影响,以及氮素和硫素在同化过程中的响应情况,试验以京韭1号品种韭菜为试材,采用水培模式种植,试验设定3个氮浓度(N1、N2、N3分别为6、12、18 mmol·L⁻¹),3个硫浓度(S1、S2、S3分别为2、4、8 mmol·L⁻¹)随机区组试验设计。结果表明,与对照相比(N1S1),合理氮硫配施(N2S1)能够不同程度提高韭菜株高、叶长、最大叶宽、假茎粗、叶片数、干鲜质量和理论产量,并对韭菜叶片可溶性糖、可溶性蛋白、总酚、类黄酮、游离氨基酸等的含量有一定的增促效果。氮素、硫素单一因素对韭菜生长及品质影响远低于元素间交互作用,隶属函数法综合评价以中氮低硫(N2S1)处理韭菜综合品质最佳,隶属函数值最高,为0.912。综合分析可见,氮素浓度12 mmol·L⁻¹(N2)、硫素浓度2 mmol·L⁻¹(S1)为水培条件下韭菜最适施肥水平。该结论为韭菜水培氮素、硫素合理配施提供理论参考依据。

关键词:韭菜;氮;硫;互作效应;隶属函数

中图分类号:S633.3 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2023)05-096-08

Effects of nitrogen and sulfur interaction on growth, nutrition and flavor quality of hydroponic Chinese chives

ZHANG Yeda^{1,2,3}, TONG Jing^{2,3}, WU Zhanhui^{2,3}, WANG Liping¹, WANG Baoju^{2,3}, LIU Ning^{2,3}

(1. College of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. Beijing Vegetable Research Institute, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Key Laboratory of Urban Agriculture of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to explore the effects of nitrogen and sulfur interaction on the growth adaptability, theoretical yield, nutrition and flavor quality of Chinese chive, the response of nitrogen and sulfur in the assimilation process was studied. The experiment used Jingjiu No.1 variety of Chinese chive as the test material, and was planted in a hydroponic mode. Three nitrogen concentrations (N1, N2, N3 = 6, 12, 18 mmol·L⁻¹) and three sulfur concentrations (S1, S2, S3 = 2, 4, 8 mmol·L⁻¹) were set in a randomized block design. The results showed that compared with the control (N1S1), reasonable nitrogen and sulfur application (N2S1) could improve the plant height, leaf length, leaf width, pseudostem diameter, leaf number, dry and fresh weight and theoretical yield of Chinese chives to varying degrees, and had a certain effect on the content of soluble sugar, soluble protein, total phenols, flavonoids and free amino acids in Chinese chives leaves. The effects of single factor of nitrogen and sulfur on the growth and quality of Chinese chives were much lower than the interaction between elements. The comprehensive quality of Chinese chives treated with medium nitrogen and low sulfur (N2S1) was the best, and the membership function value was 0.912. Comprehensive analysis showed that nitrogen concentration of 12 mmol·L⁻¹ (N2) and sulfur concentration of 2 mmol·L⁻¹ (S1) were the optimal fertilization levels for leek under hydroponic conditions. This conclusion provides a theoretical reference for the rational application of nitrogen and sulfur in hydroponic Chinese chive.

Key words: Chinese chives; Nitrogen; Sulfur; Interaction effect; Membership function

收稿日期:2023-01-15; 修回日期:2023-03-23

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-B-02);北京市农林科学院财政专项“人工光植物工厂调控韭菜风味技术及其分子机制(CZZJ202209)”;北京市农林科学院蔬菜研究中心改革与发展项目(KYCX202001-03);河北省现代农业产业技术体系露地蔬菜创新团队项目(HBCT2021200211)

作者简介:张焯达,男,在读硕士研究生,研究方向为设施园艺与无土栽培。E-mail:yedazhang2021@163.com

通信作者:王丽萍,女,教授,主要从事设施园艺与无土栽培研究。Email:wlp29@163.com

氮素是植物生长发育所需最多的营养元素,是构成蛋白质、维生素、植物激素、生物碱等重要活性物质的必需元素,在参与能量代谢和生物氧化、维系正常生命活动等方面具有重要作用^[1-3]。硫素在同化过程中与氮素在生长调节、生理生化方面作用相似,是酶化反应活性中心的必需元素,在合成营养物质和代谢产物等方面发挥重要作用^[4-8]。大量研究表明,氮硫素代谢之间存在强关联,两者中一种元素的缺乏势必会阻碍另一种元素的吸收和同化^[9-11]。许建等^[12-14]研究表明,氮硫互作在不同生长阶段对大蒜植株和鳞茎的干鲜质量等生长指标均有不同程度的增促效果,且不同程度地提高了大蒜鳞茎中可溶性蛋白、维生素C、游离氨基酸等品质指标的含量,大蒜鳞茎品质受到氮、硫单一因素影响远低于氮硫交互作用。孔灵君等^[15]在对越冬大葱研究中也得到相同结果,氮、硫对大葱生长及产量品质存在显著的互作效应,同时对大葱各器官氮、磷、钾、硫元素的转运与分配产生显著影响^[16]。

韭菜(*Allium tuberosum* Rottl. ex Spr.)是百合科典型的多年生葱属植物,因其特殊的芳香气味和独特的风味品质,在我国蔬菜市场占据重要地位。传统韭菜生产多以土壤栽培为主,易受到韭蛆等病虫害危害而使农药被过量使用,导致农药残留超标和食品安全问题。同时,由于肥料的不合理施用,致使韭菜硝酸盐含量超标,并伴随着韭菜产量与品质不稳定、不可控等问题。笔者使用安心韭菜水培技术^[17],搭载北京市农林科学院蔬菜研究所自主研发的低成本韭菜漂浮栽培系统,可以彻底解决韭蛆问题,达到农药零排放、零残留,实现韭菜周年安全生产。同时,韭菜水培技术也能精准调控肥料用量,确保试验数据科学准确。目前,针对氮硫互作对水培韭菜产量及品质调控的研究鲜有报道,笔者的研究基于韭菜新型水培系统,利用模糊评价隶属函数法建立模型,得出水培韭菜肥料最佳氮硫素配比,旨在为韭菜低成本绿色优质栽培提供施肥依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试韭菜品种为京韭1号,是由国家蔬菜工程技术研究中心育成,经北京京研益农科技发展中心生产的韭菜品种。该品种为791替代品种,具有耐寒、耐运输、生产适应性强等特性。

1.2 试验设计

试验于2022年8月19日至10月14日在北京市农林科学院蔬菜研究所连栋玻璃温室内进行。选取没有产生分蘖现象且生长一致韭菜割去前茬后移栽至水培槽中(茬口地上部分均统一在0.5 cm,保证茬次间长势一致),水培槽容积约80 L。架床使用72孔无底栽培格盘(54 cm × 28 cm),每盘面积为0.151 2 m²,每个处理在水培槽水平放置4个格盘,单处理小区面积约为0.6 m²,韭菜株行距控制在2~4 cm。在2022年9月15日收获第一茬,10月14日收获第二茬,用于生长、营养和风味品质的测定与检测。

试验采用2因子3水平原则,设置营养液不同氮硫素浓度随机区组试验设计,营养液使用优化后的日本千叶农试葱配方并用蒸馏水配制,除氮、硫素浓度外,其余离子浓度为Ca²⁺:1.0 mmol·L⁻¹,K⁺:6 mmol·L⁻¹,Mg²⁺:1 mmol·L⁻¹,PO₄³⁻:2 mmol·L⁻¹,微肥为通用配方。试验设3个氮浓度(用NaNO₃控制)和3个硫浓度(用Na₂SO₄控制)不同配施共9个处理。营养液中总氮素浓度设置为6、12、18 mmol·L⁻¹(记作N1、N2、N3),总硫素浓度分别为2、4、8 mmol·L⁻¹(记作S1、S2、S3),并以最低营养液浓度N1S1为对照(CK)。试验中不同处理NO₃⁻、NH₄⁺的物质的量之比为2:1,营养液控制在pH=6.0±0.2。试验期间每周更换营养液,防止盐分积累,除氮、硫含量不同外,其余均按常规管理。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 生长指标测定 每个处理按照随机原则在4个格盘内选取10株韭菜,并选择长势一致的植株进行测量,设置3次重复。用直尺测量韭菜株高、叶长,观察叶片数,用电子游标卡尺测量韭菜假茎粗(地上茎叶片生长点部位)、最大叶宽;韭菜地上部鲜质量和干质量采用电子天平进行称质量,将植株置于烘箱105℃下杀青20 min,随即在75℃下烘干至恒质量并称量,每次称量10株韭菜,每个处理3次重复。

1.3.2 产量测定 单位面积理论产量是将收获的4个栽培格盘(每盘面积0.151 2 m²)内的韭菜产量进行估算,计算公式如下。

$$\text{理论产量}/(\text{kg} \cdot 667 \text{ m}^2) = [\text{单个栽培格盘韭菜质量}(\text{kg}) \times 667 \text{ m}^2] / \text{单个格盘面积}(0.151 2 \text{ m}^2)$$

1.3.3 生理与品质指标测定 样品采收时每个处理随机选取10株韭菜,剪取植株地上茎部上方2~4 cm韭菜中段叶片并设置3次重复。采用硫酸-蒽酮比色法^[18]测定韭菜叶片可溶性糖含量;采用

2,6-二氯酚靛酚钠滴定法^[19]测定韭菜叶片维生素 C 含量;采用考马斯亮蓝 G-250 法^[20]测定韭菜叶片可溶性蛋白含量;采用水杨酸法^[20]测定硝酸盐含量;采用紫外分光光度法^[21]测定类黄酮和总酚含量;采用试剂盒法测定游离氨基酸和纤维素含量,试剂盒购买于上海优选生物科技有限公司。

1.4 数据分析与处理

采用模糊评价隶属函数法建立模型^[12],对韭菜叶片品质的指标数据进行标准化处理,将得到的结果建立矩阵并结合各指标的权重系数得到各指标最终的隶属函数值。权重系数是根据韭菜评价标准及相关文献^[15,22-23]科学确定的,见表 1。

表 1 韭菜品质各评价指标的权重系数

评价指标	理论产量	可溶性糖含量	维生素 C 含量	可溶性蛋白含量	硝酸盐含量	总酚含量	类黄酮含量	游离氨基酸含量	纤维素含量
权重系数	0.30	0.15	0.05	0.10	-0.20	0.20	0.20	0.10	0.10

运用 Excel 2019 进行数据处理和制图,采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,采用 DPS 19.05 软件 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 氮硫互作对韭菜植株生长的影响

由表 2 可知,整体上随着氮素与硫素水平同时提高,各生长指标大致呈现出先增后减的趋势。但在低硫水平下(S1),最大叶宽随着氮素水平提高表现为上升趋势;在中氮水平下(N2),随着硫素水平提高,叶片数无显著差异。生长指标中株高、

叶长、假茎粗均在 N2S1 处理下达到峰值,与 N1S1 处理相比分别增加了 20.67%、36.19%、24.72%;最大叶宽、叶片数分别在 N3S2、N3S1 处理下达最大值,与 N1S1 处理相比分别增加了 27.96%、39.53%,综合分析以 N2S1 处理长势最佳。各平行处理间长势不尽相同,低氮组合(N1)中 N1S1 长势较弱,除叶片数外,其余各生长指标在低氮水平下,均呈现随硫素水平提高呈先增后减的趋势;中氮组合(N2)中,N2S2 处理与 N2S3 处理长势差别不显著,说明在中氮水平下硫素水平的提高并没有对长势产生影响;高氮组合(N3)除最大叶宽外,其他各生长指

表 2 氮硫互作对韭菜植株生长的影响

处理	株高/cm	叶长/cm	最大叶宽/mm	假茎粗/mm	叶片数
N1S1	33.23±1.17 c	27.63±1.13 d	4.47±0.14 c	3.52±0.05 d	4.3±0.33 b
N1S2	39.13±0.47 ab	35.83±0.55 ab	5.62±0.16 ab	4.04±0.06 bc	5.0±0.58 ab
N1S3	36.63±0.54 b	31.93±0.44 c	5.30±0.19 ab	3.82±0.04 c	5.3±0.33 ab
N2S1	40.10±1.46 a	37.63±0.68 a	5.61±0.12 ab	4.39±0.08 a	5.7±0.33 ab
N2S2	38.17±0.27 ab	33.70±0.85 bc	5.50±0.10 ab	4.19±0.13 ab	5.7±0.33 ab
N2S3	38.30±0.69 ab	34.03±0.52 bc	5.45±0.17 ab	4.18±0.08 ab	5.7±0.67 ab
N3S1	39.03±1.75 ab	34.03±1.23 bc	5.69±0.10 a	4.28±0.13 ab	6.0±0.58 a
N3S2	37.67±0.29 ab	32.67±0.37 c	5.72±0.14 a	3.95±0.10 bc	5.3±0.33 ab
N3S3	32.87±0.63 c	28.67±0.94 d	5.16±0.14 b	3.77±0.11 cd	5.0±0.58 ab

注:表中同列数字后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

标随硫素水平上升呈现下降的趋势,说明随着氮素与硫素水平的进一步上升,氮素与硫素间交互作用增强。

2.2 氮硫互作对韭菜植株干鲜质量、含水率和产量的影响

从表 3 可以看出,整体上随着氮素与硫素水平同时提高,不同处理对韭菜植株鲜质量、干质量的影响趋势大致相同,并均在 N2S1 处理下达到最大值。与 N1S1 处理相比,N2S1 处理显著增加了韭菜植株干、鲜质量,分别增加了 66.35%、43.73%;韭菜植株含水率保持在 91.76%~92.59%,不同处理间无

显著差异;理论产量在 N2S1 处理下出现峰值,为 3 743.49 kg·667 m⁻²,同 N1S1 处理相比增产 68.75%。低氮组合(N1)对理论产量的影响趋势平稳,无显著差异;中氮组合(N2)随着硫素水平上升,理论产量呈现下降的趋势,高氮组合(N3)的理论产量则表现为先升后降,这说明氮硫素交互作用在不同氮素浓度水平下出现了分化。

2.3 氮硫互作对韭菜叶片营养品质的影响

由图 1 可以看出,营养液氮硫素水平对 4 种营养品质指标的交互作用有一定差异,且作用方向不同。其中可溶性糖含量在 N1S2 处理下达到最大值

表3 氮硫互作对韭菜干鲜质量、含水率和产量的影响

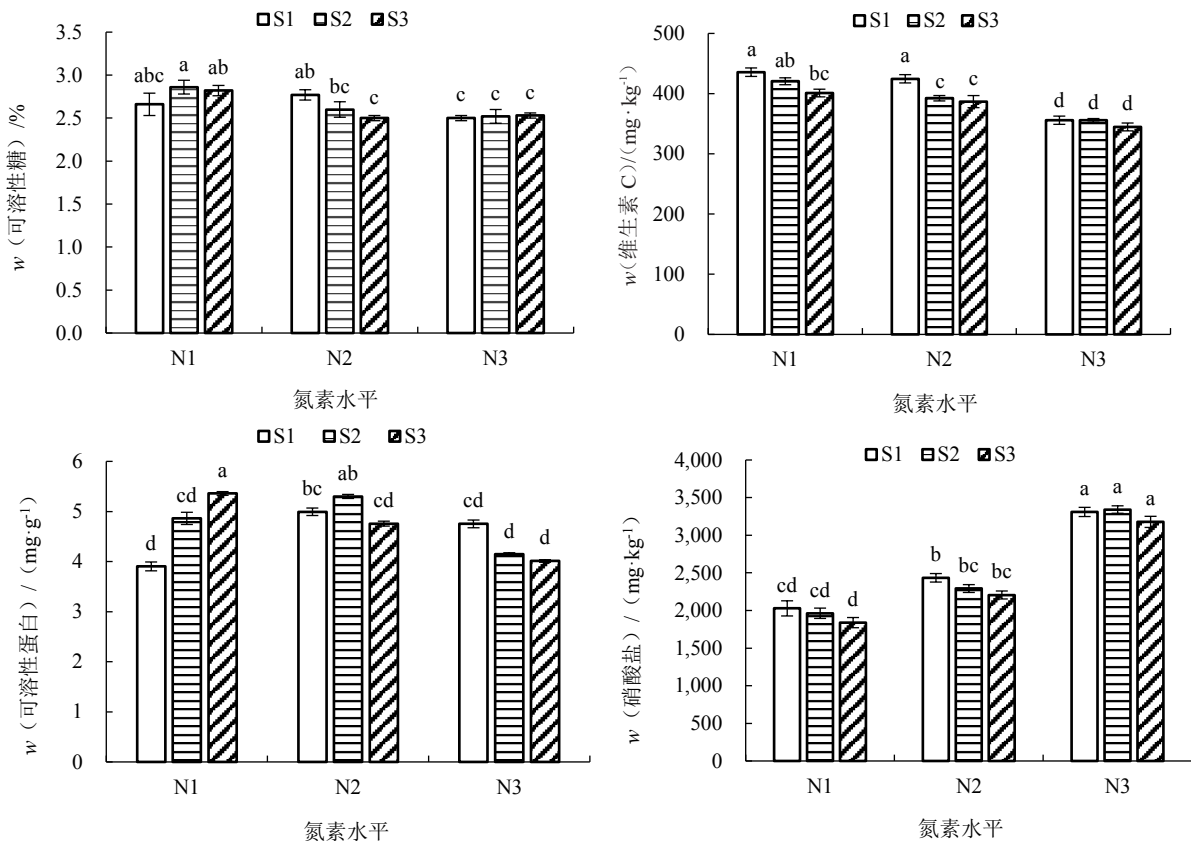
处理	鲜质量(10株)/g	干质量(10株)/g	含水率/%	理论产量/(kg·667 m ²)
N1S1	29.52±1.40 de	2.08±0.19 cd	92.41±0.22 a	2 218.33±110.08 e
N1S2	24.95±0.97 f	1.85±0.07 d	92.59±0.14 a	2 201.28±85.54 e
N1S3	26.16±1.48 ef	2.05±0.23 cd	91.76±0.17 a	2 233.97±85.49 e
N2S1	42.43±0.61 a	3.46±0.15 a	91.85±0.40 a	3 743.49±53.84 a
N2S2	32.94±0.72 cd	2.50±0.01 bc	92.40±0.15 a	2 905.92±63.74 cd
N2S3	31.29±1.24 d	2.52±0.09 bc	91.89±0.59 a	2 760.93±109.10 d
N3S1	22.38±2.10 f	1.80±0.30 d	92.08±0.55 a	1 974.83±185.62 e
N3S2	38.48±1.28 ab	2.94±0.11 b	92.37±0.10 a	3 394.70±112.80 b
N3S3	35.80±1.85 bc	2.87±0.13 b	91.99±0.07 a	3 158.54±163.65 bc

(2.86%),在 N3S1 处理下最低(2.50%),与 N3S1 处理相比,N1S2 处理可溶性糖含量显著增加 14.40%。氮素与硫素水平提高,维生素 C 含量表现为下降趋势,且维生素 C 含量分别在 N1S1 和 N3S3 处理下达到峰值(435.61 mg·kg⁻¹)和最低值(344.65 mg·kg⁻¹),与 N3S3 处理相比,N1S1 处理维生素 C 含量显著增加 26.39%。在 N3 处理下,可溶性糖和维生素 C 含量均值表现为最低,说明氮素水平过高会导致两者合成受到抑制。可溶性蛋白含量受氮硫素交互作用影响比较明显,各水平处理含量差异较大,其含量在 N1S3 处理下出现最大值

(5.36 mg·g⁻¹),与 N1S1 处理相比显著增加 37.30%。硝酸盐含量响应氮素与硫素水平较为强烈,其含量随氮素水平提高呈显著上升趋势,但硫素水平提高则会抑制其合成。硝酸盐含量在 N3S2 处理下达到最大值(3 341.24 mg·kg⁻¹),N2S1 与 N1S1 处理与之相比分别显著减少 27.14%、39.30%。

2.4 氮硫互作对韭菜叶片风味品质的影响

由图 2 可以看出,氮硫素水平对韭菜 4 种风味品质指标影响比较大,但交互作用强度不同。氮硫素交互作用对总酚和类黄酮含量的影响强度一致,其中总酚含量分别在 N3S2 和 N3S3 处理下达到峰



注:不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

图1 氮硫互作对韭菜营养品质的影响

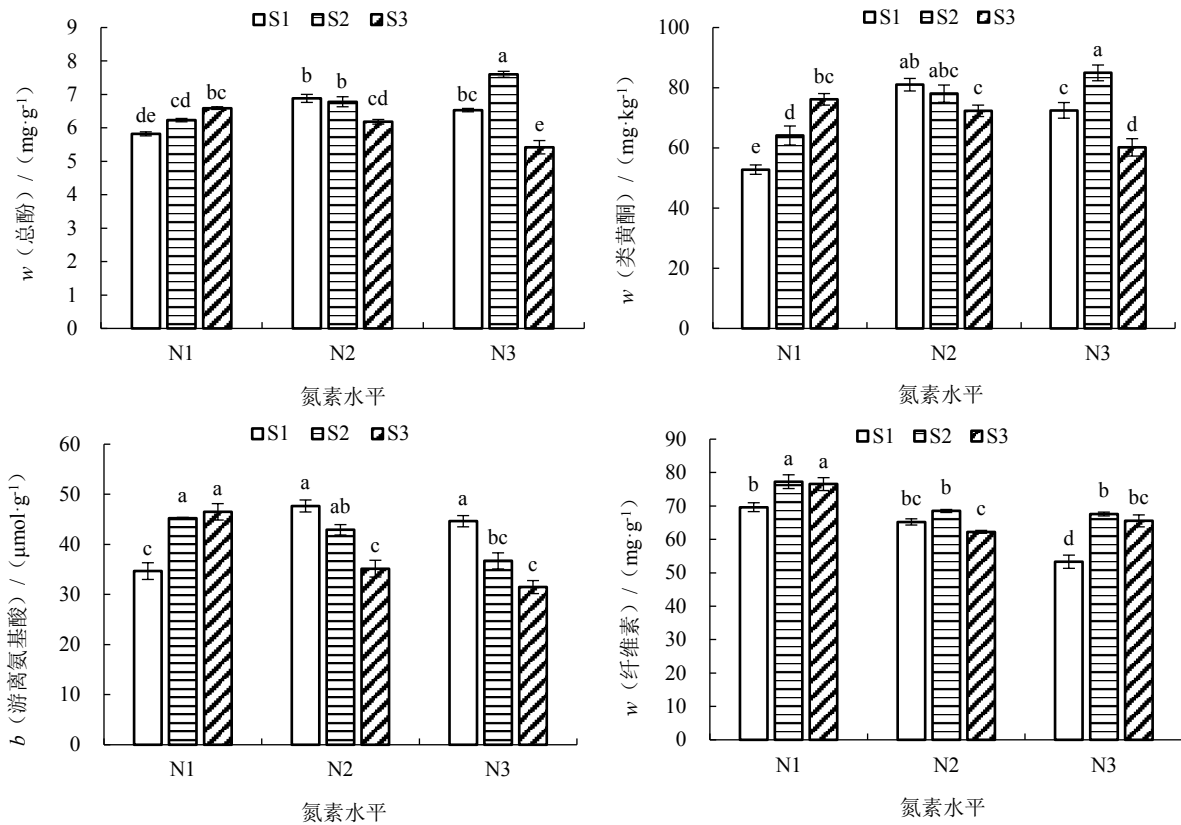


图2 氮硫互作对韭菜风味品质的影响

值($7.60 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和最低值($5.42 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),与 N3S3 处理相比, N3S2 处理总酚含量显著增加 40.22%; 类黄酮含量分别在 N3S2 和 N1S1 处理下达到峰值($84.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和最低值($52.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),与 N1S1 处理相比, N3S2 处理类黄酮含量显著增加 60.91%; 游离氨基酸含量在 N2S1 处理下最高($47.67 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$),同 N1S1 处理相比显著增加 37.50%; 纤维素含量在 S1 和 S2 水平下,随着氮素水平提高表现为下降趋势,但随着硫素水平提高则呈先增加后减少的趋势,其含量在 N1S2 处理下达到最大值($77.28 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),同 N1S1 处理相比显著增加 10.97%。

2.5 氮硫互作对韭菜植株农艺性状影响结果的方差分析

由表 4 可知,韭菜植株农艺性状对营养液氮素(N)、硫素(S)、氮硫素交互作用(N×S)的响应情况不同。氮硫素交互作用对韭菜株高、叶长、最大叶宽、假茎粗、鲜质量、干质量和理论产量影响的 *P* 值均接近 0 或等于 0,这说明氮硫素交互作用对以上指标的影响均达到极显著效应,而氮素或硫素单一因素对以上指标的影响均没有显著差异。其中叶长、鲜质量和理论产量氮硫素交互作用的 *F* 值分别达到了 19.212 0、30.463 0 和 31.363 0,极显著高于其他生长指标,表明氮硫素交互作用对叶长、鲜质

表4 氮硫互作对韭菜植株农艺性状影响结果的方差分析

变异来源	株高	叶长	最大叶宽	假茎粗	叶片数	鲜质量	干质量	含水率	理论产量
<i>P</i> 值									
N	0.533 4	0.474 3	0.459 3	0.197 8	0.268 9	0.445 1	0.328 4	0.501 0	0.311 1
S	0.616 5	0.696 4	0.572 3	0.804 4	1.000 0	0.985 7	0.994 0	0.052 9	0.938 0
N×S	0.000 4	0.000 0	0.000 7	0.001 5	0.358 3	0.000 0	0.000 0	0.837 3	0.000 0
<i>F</i> 值									
N	0.738 0	0.904 0	0.965 0	2.497 0	1.857 0	0.998 0	1.490 0	0.826 0	1.586 0
S	0.547 0	0.397 0	0.644 0	0.230 0	0.000 0	0.014 0	0.006 0	6.693 0	0.065 0
N×S	8.883 0	19.212 0	8.029 0	6.859 0	1.167 0	30.463 0	13.118 0	0.335 0	31.363 0

注: N、S、N×S 分别表示氮素、硫素、氮硫素交互作用; $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 分别表示处理间差异达到显著、极显著水平,下同。

量和理论产量影响的强度更大。株高、最大叶宽、假茎粗和干质量氮硫素交互作用的 F 值则围绕在 6.859~13.118,说明氮硫素交互作用对韭菜株高、最大叶宽、假茎粗和干质量的影响规律较为一致;而针对含水率而言,氮素、硫素、氮硫素交互作用对此均没有显著效应,但硫素水平的 P 值接近显著水平,硫素作用更加明显。

2.6 氮硫互作对韭菜叶片品质影响结果的方差分析

表 5 反映了韭菜叶片品质对营养液氮素(N)、硫素(S)、氮硫素交互作用(N×S)的响应情况。结果表明,氮素、硫素、氮硫素交互作用对可溶性糖含量均没有显著效应,但氮硫素交互作用接近显著水平。氮素水平对维生素 C 含量呈极显著效应($F=41.627$),硫素水平对维生素 C 含量影响接近显著效

应,氮硫素交互作用对维生素 C 含量没有显著影响。氮硫素交互作用对韭菜可溶性蛋白含量、总酚含量、类黄酮含量和游离氨基酸含量影响的 P 值等于 0,均表现为极显著效应,且氮素和硫素单一水平对这些指标的影响均没有显著差异,这表明可溶性蛋白、总酚、类黄酮和游离氨基酸含量在水培韭菜中存在相同的响应规律。其中氮硫素交互作用对可溶性蛋白含量影响的 F 值达到 80.351,极显著高于其他指标,说明可溶性蛋白含量对氮硫素交互作用的响应更加凸显。另外,氮素和硫素水平分别对硝酸盐含量呈极显著和显著效应,其氮素对硝酸盐含量影响的 F 值高达 741.627,远超其他指标,氮素影响十分显著,而氮硫素交互作用不显著。纤维素含量主要受氮素和氮硫素交互作用影响,呈极显著效应,氮素作用显著,硫素作用不显著。

表 5 氮硫互作对韭菜叶片品质影响结果的方差分析

变异来源	可溶性糖含量	维生素 C 含量	可溶性蛋白含量	硝酸盐含量	总酚含量	类黄酮含量	游离氨基酸含量	纤维素含量
P 值								
N	0.119 8	0.002 1	0.433 6	0.000 0	0.780 8	0.461 6	0.715 6	0.044 3
S	0.893 3	0.052 1	0.903 8	0.016 2	0.446 3	0.739 4	0.728 1	0.142 0
N×S	0.055 3	0.137 1	0.000 0	0.782 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 7
F 值								
N	3.779 0	41.627 0	1.037 0	741.627 0	0.263 0	0.994 0	0.364 0	7.499 0
S	0.116 0	6.766 0	0.104 0	13.691 0	0.994 0	0.326 0	0.344 0	3.308 0
N×S	2.832 0	2.004 0	80.351 0	0.433 0	44.722 0	22.005 0	29.549 0	8.022 0

2.7 韭菜叶片品质性状的相关性分析

由表 6 可知,韭菜叶片中可溶性糖含量与维生素 C、游离氨基酸、纤维素含量均呈极显著正相关,且与可溶性蛋白和总酚含量呈正相关,但相关性不显著;维生素 C 含量与可溶性蛋白、游离氨基酸含量呈正相关,与纤维素含量呈显著正相关;可溶性蛋白含量与总酚和纤维素含量呈正相关,与类黄酮

和游离氨基酸含量呈极显著正相关;总酚含量与类黄酮含量呈极显著正相关,相关系数达到 0.832,在所有品质指标中相关系数最大。

硝酸盐含量除了与总酚和类黄酮含量呈正相关外,与可溶性糖、维生素 C、可溶性蛋白和纤维素含量相关系数分别为-0.603、-0.804、-0.449 和-0.629,均呈显著或极显著负相关;类黄酮含量与可溶性糖、

表 6 韭菜叶片品质性状的相关性分析

项目	可溶性糖含量	维生素 C 含量	可溶性蛋白含量	硝酸盐含量	总酚含量	类黄酮含量	游离氨基酸含量	纤维素含量
可溶性糖含量	1.000							
维生素 C 含量	0.558**	1.000						
可溶性蛋白含量	0.375	0.236	1.000					
硝酸盐含量	-0.603**	-0.804**	-0.449*	1.000				
总酚含量	0.029	-0.084	0.327	0.194	1.000			
类黄酮含量	-0.095	-0.222	0.488**	0.195	0.832**	1.000		
游离氨基酸含量	0.554**	0.307	0.769**	-0.275	0.437*	0.404*	1.000	
纤维素含量	0.648**	0.476*	0.163	-0.629**	0.005	-0.137	0.185	1.000

注: *、** 分别表示品质间相关性达到显著和极显著水平。

维生素 C 和纤维素含量均呈负相关,但相关性并不显著;游离氨基酸含量与总酚、类黄酮含量均呈显著正相关,与纤维素含量相关性不显著。

2.8 韭菜品质综合评价

表 7 为不同处理间品质指标的隶属函数值和

累加的最终隶属函数值,以及最终的排名结果。结果表明,N2S1 处理隶属函数值最高(0.912),品质最好,排名第一;N1S3 和 N2S2 处理分别位列第二和第三,品质较好;N3S3 隶属函数值最低(0.139),品质最差,排名第九。

表 7 韭菜品质综合评价结果

处理	理论产量	可溶性糖含量	维生素 C 含量	可溶性蛋白含量	硝酸盐含量	总酚含量	类黄酮含量	游离氨基酸含量	纤维素含量	隶属函数值	排名
N1S1	0.041	0.066	0.050	0.000	-0.025	0.037	0.000	0.020	0.068	0.256	7
N1S2	0.038	0.150	0.042	0.066	-0.017	0.074	0.071	0.085	0.100	0.609	4
N1S3	0.044	0.132	0.031	0.100	0.000	0.107	0.145	0.093	0.097	0.749	2
N2S1	0.300	0.113	0.044	0.075	-0.079	0.134	0.176	0.100	0.050	0.912	1
N2S2	0.158	0.044	0.026	0.096	-0.060	0.125	0.157	0.071	0.063	0.679	3
N2S3	0.133	0.002	0.023	0.059	-0.049	0.070	0.122	0.023	0.037	0.419	6
N3S1	0.000	0.000	0.006	0.058	-0.196	0.102	0.122	0.081	0.000	0.174	8
N3S2	0.241	0.009	0.006	0.017	-0.200	0.200	0.200	0.032	0.060	0.564	5
N3S3	0.201	0.012	0.000	0.007	-0.178	0.000	0.046	0.000	0.051	0.139	9

3 讨论与结论

前人研究表明,因化肥施用而使作物产量增加,其中氮肥的贡献率超过 50%^[1]。百合科蔬菜是典型的喜硫作物,而韭菜作为百合科葱属植物,需硫量大。韭菜挥发性芳香物质主要由以二硫化物、三硫化物为代表的含硫化合物所构成,这表明硫素在调控韭菜风味品质方面有重要意义^[24]。目前针对氮硫互作对百合科作物影响的研究已有报道,Tilahun 等^[25]在评估氮硫素对洋葱品质、养分吸收等影响的研究中认为,氮硫交互作用显著提高了洋葱株高、叶面积指数、鳞茎干鲜质量和品质参数。施用氮素 200 kg·hm⁻² 和硫素 45 kg·hm⁻² 的产量最高,且氮素和硫素的吸收量最大。Przygocka 等^[26]在解释氮肥和硫肥用量逐渐增加对洋葱生物量动态的影响时发现,洋葱的产量随着施硫率逐渐增加,但与施氮水平无关;在对洋葱吸收总氮和硫素动态及器官分配研究时发现,在鳞茎生长的线性阶段中,最大氮素积累率与预期产量呈正相关,其速率的影响仅因鳞茎生长的相对速度波动而略有改变,过高的氮素率会大大降低洋葱硫素积累的速度,从而导致产量下降。这证实了氮硫素代谢不仅存在强关联,且氮硫互作会直接影响作物产量和品质。目前针对水培韭菜最佳氮硫素配比的研究还鲜有报道,这对提升韭菜产量和风味品质等具有重要意义,同时可以对百合科作物施肥提供借鉴依据。

卢凤刚等^[27]、杜红艳等^[28]在对不同品种水培韭

菜供氮水平研究中发现,适合用于水培韭菜的营养液氮素水平均为 8~12 mmol·L⁻¹,杜红艳等同时认为氮素浓度维持在 10 mmol·L⁻¹ 时韭菜生长状况及产量最佳,氮素浓度在 12 mmol·L⁻¹ 时韭菜维生素 C 和粗纤维等品质最佳。季延海等^[24]在对水培韭菜供硫水平研究中发现,硫素浓度在 2 mmol·L⁻¹ 时含硫化合物总含量最高,硫素浓度在 2~3 mmol·L⁻¹ 时韭菜产量最高,营养液中硫素浓度以 2~3 mmol·L⁻¹ 时为最佳。笔者在研究氮硫互作对水培韭菜生长状况时发现,韭菜生长指标中株高、叶长、假茎粗、叶片数的峰值均出现在低硫组合(S1=2 mmol·L⁻¹),其中株高、叶长、假茎粗的峰值同时出现在中氮组合(N2=12 mmol·L⁻¹),最大叶宽和叶片数的峰值同时出现在高氮组合(N3=18 mmol·L⁻¹)中出现,这说明氮素作为大量元素,氮素浓度的增加会促进韭菜的生长,而硫素作为中量元素,硫素浓度提升虽能改善作物风味品质,但可能会对生长造成抑制。再进一步对农艺性状方差分析时发现,几乎所有农艺性状对氮硫素交互作用(N×S)的响应表现为极显著效应,这和许建等^[14]在大蒜花茎伸长期上的研究一致。值得注意的是,硫素单一因素对叶片数的 P 值等于 1 而 F 值等于 0,这很大程度上说明硫素对水培韭菜的叶片数影响不大,需要进一步验证。

氮硫互作对水培韭菜营养及风味品质的影响及方差分析表明,营养液氮硫素水平对 4 种营养品质和 4 种风味品质指标的交互作用有一定差别。可溶性蛋白、总酚、类黄酮、游离氨基酸、纤维素等

的含量对氮硫素交互作用的响应都达到极显著水平,维生素C和硝酸盐含量对氮素水平的响应达到极显著水平,而硫素水平仅对硝酸盐含量相应表现为显著水平。硝酸盐含量受单因素水平影响较大,与氮素水平呈正相关,这和张丽娟等^[29]、牛天航等^[30]在韭菜上的研究一致。游离氨基酸含量在低氮(N1)水平下随硫素浓度增加表现为上升趋势,中氮(N2)和高氮(N3)水平则与之相反。纤维素含量在不同氮素水平下均随硫素浓度增加表现为先升后降的趋势,且在低硫(S1)和中硫(S2)水平下,纤维素含量随氮素水平增加表现为下降趋势,这说明纤维素含量受氮素水平影响较大,氮素水平的增加抑制了纤维素的合成。

笔者探讨了氮硫互作对韭菜植株生长及叶片营养和风味品质的影响,同时分析了韭菜农艺性状和品质指标对氮硫素的响应情况及品质间的相关性。并以韭菜叶片品质作为评价指标,利用隶属函数法建立矩阵综合评价韭菜叶片品质。结果表明,中氮低硫(N2S1)处理下韭菜综合品质的隶属函数值为0.912,排名最高,品质最佳。笔者的研究仅对水培模式下韭菜生长及品质对氮硫互作的响应作出解释,其他栽培模式下则需进一步探讨。目前,笔者正进一步研究氮硫互作对韭菜辛辣性、氮素与硫素同化关键酶的影响,从生理学角度解析韭菜辛辣性与氮素、硫素同化能力之间的关系。

综上所述,在水培种植模式下,氮素与硫素水平不仅单方面会对韭菜生长发育和品质产生调控作用,氮素与硫素之间还存在强互作关系,合理氮硫配施会在一定程度上提高韭菜产量和品质。氮素浓度为 $12\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、硫素浓度为 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 是水培韭菜最适的氮素与硫素施肥水平。

参考文献

- [1] 吴巍,赵军.植物对氮素吸收利用的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(13):75-78.
- [2] 李诗奇,李政,王仙宇,等.植物对氮磷元素吸收利用的生理生态学过程研究进展[J].山东农业科学,2019,51(3):151-157.
- [3] 王平,陈举林.植物氮素吸收过程研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(1):33-35.
- [4] KHAR A, BANERJEE K, JADHAV M R, et al. Evaluation of garlic ecotypes for allicin and other allyl thiosulphinates[J]. Food Chemistry, 2011, 128(4):988-996.
- [5] SINGH M V, SAHA J K. A review of the sulphur research activities of the IACR- AICRP micro- and secondary nutrients project[J]. Sulphur in Agriculture, 1995, 19:35-47.
- [6] 吴宇,高蕾,曹民杰,等.植物硫营养代谢、调控与生物学功能[J].植物学通报,2007,24(6):735-761.
- [7] 谢瑞芝,董树亭,胡昌浩.植物硫素营养研究进展[J].中国农学通报,2002,18(2):65-69.
- [8] 李国强,朱云集,沈学善.植物硫素同化途径及其调控[J].植物生理学通讯,2005,41(6):699-704.
- [9] 周杰,王东,满建国,等.高氮条件下硫氮互作对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):42-51.
- [10] KHAN N A, MOBIN M, SAMIULLAH. The influence of gibberellic acid and sulfur fertilization rate on growth and S-use efficiency of mustard (*Brassica juncea*) [J]. Plant and Soil, 2005, 270(1/2):269-274.
- [11] GUARDA G, PADOVAN S, DELOGU G. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(2):181-192.
- [12] 许建,贾凯,朱君芳,等.适宜的氮硫配施提高基质栽培大蒜鳞茎品质[J].农业工程学报,2017,33(4):203-208.
- [13] 许建,贾凯,朱君芳,等.氮硫互作提高大蒜氮、硫含量及其关键同化酶活性[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):434-443.
- [14] 许建,贾凯,朱君芳,等.氮硫互作对大蒜植株生长的影响[J].中国农学通报,2017,33(35):81-87.
- [15] 孔灵君,徐坤,王磊,等.氮硫互作对越冬大葱生长及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1272-1278.
- [16] 孔灵君,徐坤,何平,等.氮硫互作对大葱氮、磷、钾、硫吸收分配特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):172-178.
- [17] 季延海,刘明池,梁浩,等.安心韭菜水培技术[J].农业工程技术,2018,38(28):16-19.
- [18] 张以顺,黄霞,陈玉凤.植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [19] 蔡庆生.植物生理学实验[M].北京:中国农业大学出版社,2013.
- [20] 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.
- [21] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [22] 刘灿玉,樊继德,陆信娟,等.添加NBPT下氮肥减施对大蒜生长、产量及品质的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(3):398-402.
- [23] 尹守恒,李志强,张明,等.优质韭菜评价标准和栽培技术要点[J].农业科技通讯,2017(12):319-320.
- [24] 季延海,武占会,钟启文,等.不同浓度硫素对韭菜产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1112-1119.
- [25] TILAHUN M, TENA W, DESTA B. Effects of different nitrogen and sulfur fertilizer rates on growth, yield, quality and nutrient uptake of onion (*Allium cepa* L.) at Shewa Robit, North Shewa, Ethiopia[J]. The Open Biotechnology Journal, 2021, 15(1):59-67.
- [26] PRZYGOCKA-CYNA K, BARLÓG P, GRZEBISZ W, et al. Onion (*Allium cepa* L.) yield and growth dynamics response to In-season patterns of nitrogen and sulfur uptake[J]. Agronomy-Basel, 2020, 10(8):1146.
- [27] 卢凤刚,陈贵林,吕桂云,等.不同供氮水平对韭菜产量和品质的影响[J].园艺学报,2005,32(1):131-133.
- [28] 杜红艳,于平彬,季延海,等.不同氮素浓度对水培韭菜生长发育与品质的影响[J].中国蔬菜,2015(5):45-48.
- [29] 张丽娟,汪金山,曲继松,等.不同氮素剂量对沙质土壤设施韭菜生长发育及品质的影响[J].北方园艺,2021(22):66-73.
- [30] 牛天航,何志学,颜建明,等.不同施肥处理对大棚越冬韭菜产量、品质及养分利用的影响[J].中国瓜菜,2020,33(7):64-70.