



张烨达, 佟静, 王宝驹, 刘宁, 季延海, 梁浩, 王丽萍, 武占会. 氮硫互作对韭菜总辛辣程度及其同化关键酶的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(08): 95-108.
ZHANG Yeda, TONG Jing, WANG Baoju, LIU Ning, JI Yanhai, LIANG Hao, WANG Liping, WU Zhanhui. Effects of nitrogen and sulfur interaction on the gross flavor intensity and activities of key enzymes in Chinese chives[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(08): 95-108.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.08

氮硫互作对韭菜总辛辣程度及其同化关键酶的影响

张烨达^{1,2} 佟静^{1*} 王宝驹¹ 刘宁¹ 季延海¹ 梁浩¹ 王丽萍² 武占会^{3*}

(1. 北京市农林科学院 蔬菜研究所/农业农村部华北都市农业重点实验室, 北京 100097;

2. 河北工程大学 园林与生态工程学院, 河北 邯郸 056038;

3. 北京市农林科学院 国有资产与基地管理处, 北京 100097)

摘要 为明确氮硫互作对韭菜植株总辛辣程度和氮、硫素同化关键酶活性的影响,以韭菜品种‘京韭一号’为试材,采用水培模式处理,试验设定3个氮浓度(6、12和18 mmol/L),3个硫浓度(2、4和8 mmol/L),随机区组试验,在植株生长至第7、14、21和28天这4个不同生育周期节点时分别测定韭菜叶片的酶促丙酮酸(EPY)含量及硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、ATP-硫酸化酶(ATPS)和氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶(OAS-TL)活性的动态变化。结果表明:EPY含量在植株生长至7、14与21 d时明显低于28 d;不同生育周期节点NR活性差异显著,氮硫素交互作用明显;GS活性响应程度剧烈并以植株长至28 d时水平最低;ATPS活性在植株长至7 d时水平最低且在中后期响应并不十分显著;OAS-TL活性呈现出平稳上升的趋势,但对氮硫素水平的敏感程度不及其他同化酶。韭菜发育过程中,氮素、硫素单一效应总体远低于元素间交互作用,氮硫素交互作用占据主导地位。韭菜植株硫素同化能力的提升与氮素水平密切相关,氮、硫素参与彼此的同化过程。综合考虑,建议水培韭菜营养液的氮素浓度为12 mmol/L,硫素浓度为2~4 mmol/L。该结论为水培韭菜氮、硫元素合理配施提供理论依据。

关键词 韭菜; 氮; 硫; 辛辣程度; 酶活性; 互作效应

中图分类号 S633.3

文章编号 1007-4333(2024)08-0095-14

文献标志码 A

Effects of nitrogen and sulfur interaction on the gross flavor intensity and activities of key enzymes in Chinese chives

ZHANG Yeda^{1,2}, TONG Jing^{1*}, WANG Baoju¹, LIU Ning¹, JI Yanhai¹,
LIANG Hao¹, WANG Liping², WU Zhanhui^{3*}

(1. Beijing Vegetable Research Center/Key Laboratory of Urban Agriculture (North) of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. College of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3. State Assets and Base Management Division, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract In order to clarify the effects of nitrogen and sulfur interaction on the total spiciness level of Chinese chive plants and the activities of key enzymes for nitrogen and sulfur assimilation, one Chinese chive variety ‘Jingjiu No. 1’ was used as the test material and treated with hydroponic mode. Treatments of three different

收稿日期: 2023-07-15

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资助项目(CARS-24-B-02);北京市农林科学院青年科研基金资助项目(QNJJ202248);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20210402);河北省现代农业产业技术体系蔬菜创新团队项目(HBCT2021200211);河北省自然科学基金资助项目(C2021402014);北京市农林科学院蔬菜研究中心改革与发展项目(KYCX202306)

第一作者: 张烨达(ORCID: 0009-0003-8142-8454), 硕士研究生, E-mail: yedazhang2021@163.com

通讯作者: 佟静(ORCID: 0009-0007-1963-2285), 博士, 助理研究员, 主要从事蔬菜栽培生理与品质调控研究, E-mail: tongjing@nercv.org

武占会(ORCID: 0000-0003-2753-0645), 研究员, 主要从事蔬菜设施栽培、无土栽培、蔬菜栽培生理等研究, E-mail: wuzhanhui@nercv.org

nitrogen concentrations (N1, N2, N3=6, 12, 18 mmol/L) and three different sulfur concentrations (S1, S2, S3=2, 4, 8 mmol/L) combination were set in a randomized block design. The dynamic changes of enzymatic pyruvate content (EPY) and activities of nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS), ATP-sulfatase (ATPS) and oxyacetylserine (thiol) lyase (OAS-TL) in leaves of Chinese chives were determined at four different growth stages of 7 d, 14 d, 21 d and 28 d. The results showed that: The content of EPY at the first three periods of 7 d, 14 d and 21 d was significantly lower than that at the 28 d period. There were significant differences in NR activity in different growth cycles, and the interaction between nitrogen and sulfur was obvious. The response of GS activity was intense and its lowest level occurred at 28 d. The activity of ATPS was the lowest at 7 d and the response was not very significant in the middle and late stages. The activity of OAS-TL showed a steady upward trend, but its sensitivity to nitrogen and sulfur was lower than other assimilation enzymes. In summary, during the development of Chinese chive, the single effect of either nitrogen or sulfur is generally much lower, and the interaction between nitrogen and sulfur is dominant. The improvement of sulfur assimilation ability of Chinese chive plants is closely related to nitrogen level, and nitrogen and sulfur participate in each other's assimilation process. Considering comprehensively, the nitrogen concentration of the hydroponic Chinese chive nutrient solution is 12 mmol/L, and the sulfur concentration is 2 to 4 mmol/L is recommended. This study provides a theoretical basis for the rational application of nitrogen and sulfur elements in hydroponic Chinese chives.

Keywords Chinese chives; nitrogen; sulfur; flavor intensity; enzyme activities; interaction effect

氮素是植物生长发育需求量最大的元素之一,直接影响植株体内的营养代谢和物质循环,是构成蛋白质、核酸、辅酶及生物碱等重要活性物质的必需元素^[1-3]。硫素作为第四大营养元素是酶化反应活性中心的必需元素,百合科和十字花科作物含硫量大于磷,能促进百合科和十字花科作物次生含硫化合物合成,在细胞代谢中具有关键作用^[4-6]。众多研究表明,氮硫素营养代谢过程中存在强关联,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^[7-10]。许建等^[8]证实硝酸还原酶(NR)和ATP硫酸化酶(ATPS)等酶活性的提高增加了大蒜氮、硫同化能力,而谷氨酰胺合成酶(GS)则通过降低酶活性促进氮的同化。孔灵君等^[11]则表明,硫能提高大葱GS活性与氮素营养水平,但高硫水平会使大葱叶片NR和GS活性降低,导致植株对氮、硫的吸收利用下降。

韭菜(*Allium tuberosum* Rottler. ex Spr)是百合科典型的多年生葱属植物,需硫量大。有机硫化物S-烷基半胱氨酸亚砷(S-alk(en)yl cysteine sulfoxides, CSOs)是存在于韭菜等葱属植物中的一类风味前体物质,具有非挥发性、无味且稳定的特点,因其丰富的营养与药用价值而成为研究热点^[12-14]。韭菜叶片组织受到挫伤或浸泡后,存在于液泡中的蒜氨酸酶通过C-S键的断裂使CSOs分子裂解为亚磺酸、酶促丙酮酸和氨^[15]。亚磺酸自身不稳定通过自发反应降解为一系列具有刺激性气味

的挥发性有机硫化物,并释放出葱属植物的特征香气,这不仅可以保护葱属植物免受植物病原体侵害,还具有一定的医疗保健功效^[12,15-17],而酶促丙酮酸则能较稳定的保留下来,用于评估韭菜的总辛辣程度。目前,针对氮硫互作对水培韭菜辛辣性及同化关键酶影响的研究鲜有报道,因此本研究探究了营养液氮硫素不同浓度配施对韭菜不同生育周期节点总辛辣程度及氮硫素同化关键酶活性的影响,从生理学角度挖掘氮硫互作的周期性影响机制,为韭菜低成本优质栽培提供施肥依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于2022年8月19日—2022年10月14日在北京市农林科学院蔬菜研究所(39°44' N、116°29' E)连栋玻璃温室内进行。以‘京韭一号’品种韭菜为试验材料,采用深液流栽培方式(DFT),选取色泽、外观与长势均一致的韭菜植株利用自动收割机统一割去前茬,随即移栽至水培槽中净化培育(地上茬口部位控制在5 mm,保证平行处理间长势一致),苗床使用72孔无底栽培格盘(54 cm×28 cm),每个处理使用单个水培槽并水平放置4个苗床(小区样本群体,总小区面积约为0.6 m²),水培槽容积约80 L。

1.2 试验设计

营养液使用优化后的日本千叶农试葱配方,微肥使用通用配方并利用去离子水配制。试验采用

2 因子 3 水平原则,设置氮素与硫素浓度为变量,设 3 个氮素水平(N1、N2 和 N3 分别为 6、12 和 18 mmol/L),3 个硫素水平(S1、S2 和 S3 分别为 2、4 和 8 mmol/L),随机区组试验设计,不同氮素与硫素浓度配施共 9 个处理(表 1)。试验氮素与硫素水平分别用 NaNO₃ 和 Na₂SO₄ 调节,并以最低营养液浓度(N1S1)为对照(CK)。试验不同处理间 C(NO₃⁻):C(NH₄⁺)均为 2:1,营养液 PH 控制在(6.0±0.2)。试验期间每 7 d 更换一次营养液,防止盐分积累,除氮素与硫素浓度不同外,其余均统一常规管理。

表 1 不同氮素和硫素水平组合试验设计
Table 1 Different nitrogen and sulfur block experimental design

处理 Treatment	离子浓度/(mmol/L) Ionic concentration						
	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻
N1S1	6	1	1	2	4	2	2
N1S2	6	1	1	2	4	2	4
N1S3	6	1	1	2	4	2	8
N2S1	6	1	1	2	8	4	2
N2S2	6	1	1	2	8	4	4
N2S3	6	1	1	2	8	4	8
N3S1	6	1	1	2	12	6	2
N3S2	6	1	1	2	12	6	4
N3S3	6	1	1	2	12	6	8

试验在 2022 年 9 月 15 日收获第一茬,10 月 14 日收获第二茬。在第二茬韭菜生长至第 7 天(9 月 23 日)、第 14 天(9 月 30 日)、第 21 天(10 月 7 日)与第 28 天(10 月 14 日)上午 10:00 进行样品的采收。采收时设置 3 次重复,每个重复随机选取 10 株韭菜,剪取植株茎部上方 2~4 cm 韭菜中段叶片,随即液氮处理速冻,贮存于-80℃超低温冰箱中,用于测定韭菜辛辣程度与氮素、硫素同化关键酶活性。

1.3 项目测定及方法

1.3.1 韭菜总辛辣程度的测定

韭菜辛辣性的测定参照 Liu 等^[12]的方法,通过测定 CSOs 裂解产物酶促丙酮酸(EPY)的含量评估韭菜的辛辣程度。

1.3.2 韭菜氮素与硫素同化关键酶活性的测定

按照北京索莱宝试剂盒的方法对硝酸还原酶活性和谷氨酰胺合成酶活性进行测定,按照上海酶标试剂盒的方法对 ATP 硫酸化酶活性与氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶活性进行测定。

1.4 数据分析及处理

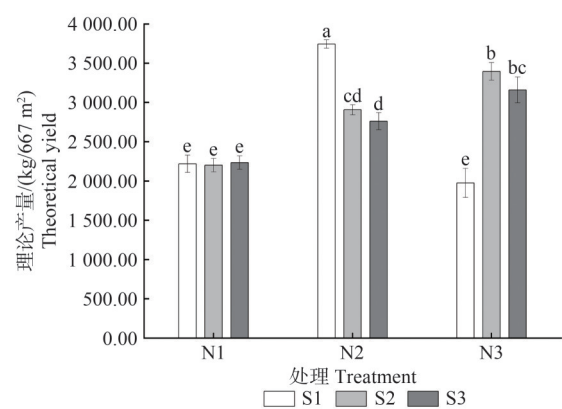
利用模糊评价隶属函数法对韭菜植株各指标

的标准化数据建立模型^[18],结合各指标的相应权重系数建立矩阵,获得各指标及累加的隶属函数值并用于品质综合评价。其中理论产量、EPY 含量与 NR、GS、ATPS、OAS-TL 活性等评价指标的权重系数分别为 0.20、0.20、0.15、0.15、0.15 和 0.15。采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和统计分析,采用 DPSS 19.05 软件 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验,并采用 OriginPro 2021 制图。

2 结果与分析

2.1 氮硫互作对韭菜植株理论产量的影响

从课题组前期得到的数据^[18]可知,氮硫互作对韭菜植株理论产量的影响效应显著(图 1)。理论产量在 N2S1 处理下达到最大值(3 743.49 kg/667 m²),同 N1S1 处理相比增产 68.75%。理论产量在低氮组别(N1)中无显著差异;中氮组别(N2)营养液硫素浓度的上升则抑制了理论产量;高氮组别(N3)中,以中硫浓度(S2)产量最大,显著高于同组其他硫素浓度处理。这表明随着氮硫元素交互作用的进一步增强,理论产量在不同营养液氮素水平下出现了分化。



柱上不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)。N1、N2和N3分别为氮浓度6、12和18 mmol/L, S1、S2和S3分别为硫浓度2、4和8 mmol/L。下同。

Different small letters above the bars mean significant difference among treatments at the 0.05 level. N1, N2 and N3 are 6, 12 and 18 mmol/L of concentration, respectively. S1, S2 and S3 are 2, 4 and 8 mmol/L of concentration, respectively. The same below.

图1 氮硫互作对韭菜植株产量的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen and sulfur interaction on theoretical yield in Chinese chive leaves

2.2 氮硫互作对韭菜叶片总辛辣程度的影响

韭菜叶片总辛辣程度通过半胱氨酸亚砷水解反应生成的酶促丙酮酸的含量来估计(图2)。酶促丙酮酸含量在4个时期节点响应氮硫互作的强度不同。植株生长至7、14与21 d时酶促丙酮酸含量明显低于28 d时。植株长至7 d时,在不同氮素水平下,酶促丙酮酸含量均随硫素水平升高而增大,均以高硫(S3)水平含量最高;该现象在低氮水平(N1)下尤为显著,其含量分别在N1S3处理和NIS1处理下达到峰值(8.68 $\mu\text{mol/g}$)和最低值(4.11 $\mu\text{mol/g}$)。植株长至14 d时,酶促丙酮酸含量在低氮和中氮水平(N2)下均随硫素水平升高而呈现先增后减趋势,而在低硫(S1)和高硫水平下均随氮素水平升高无显著变化,其含量分别在N2S2处理和N3S2处理下达到峰值(7.11 $\mu\text{mol/g}$)和最低值(3.77 $\mu\text{mol/g}$)。植株长至21 d时,整体上酶促丙酮酸含量在不同氮素水平下差异不大,且在低氮水平下无显著差异;其含量保持在4.89(N1S1)~6.16 $\mu\text{mol/g}$ (N2S3),

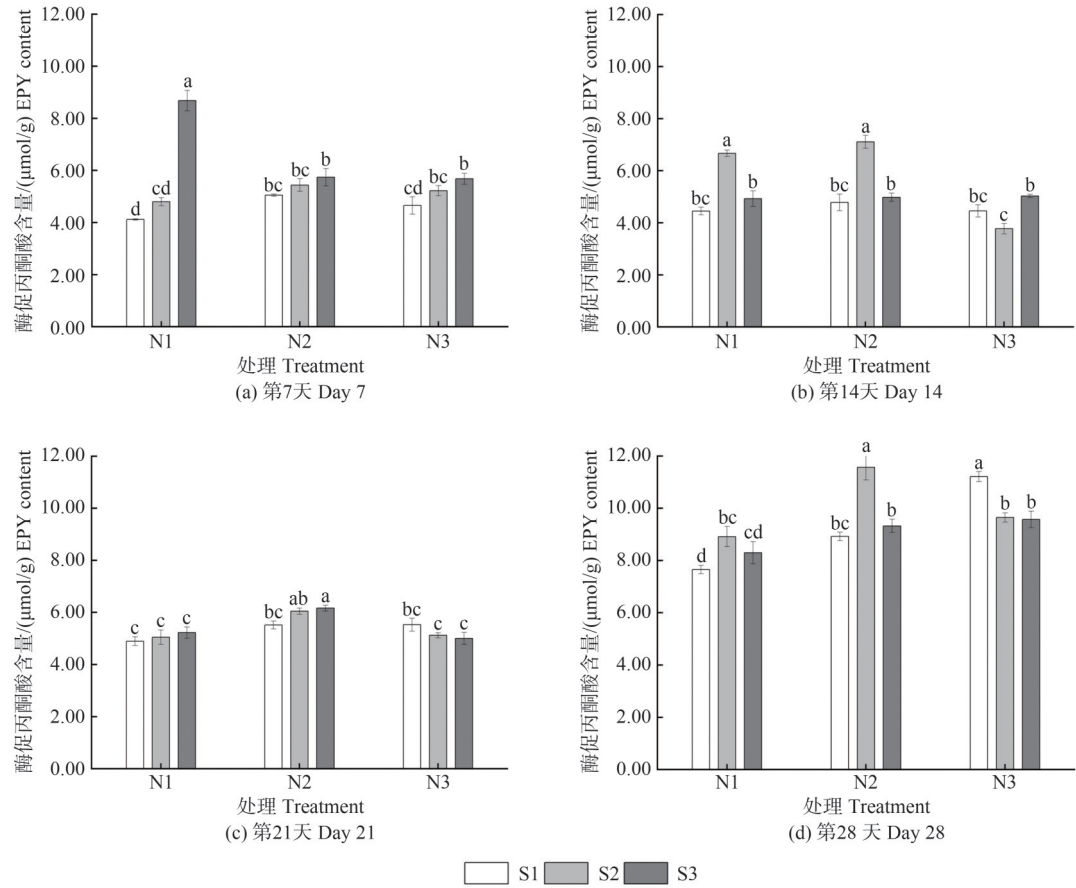


图2 氮硫互作对韭菜叶片总辛辣程度的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen and sulfur interaction on gross flavor intensity in Chinese chive leaves

明显低于其他 3 个时期节点。植株长至 28 d 时, 韭菜生长进入收获期, 各水平处理酶促丙酮酸含量均在 $7 \mu\text{mol/g}$ 以上, 韭菜特征风味更加凸显; EPY 含量在 N2S2 处理下达到峰值 ($11.56 \mu\text{mol/g}$), 与 N1S1 处理 ($7.65 \mu\text{mol/g}$) 相比增加 51.11%。

2.3 氮硫互作对韭菜叶片硝酸还原酶活性的影响

硝酸还原酶是氮素同化过程中的关键限速酶。由图 3 可见, 不同生育周期节点韭菜叶片硝酸还原酶活性差异显著, 氮硫素交互作用明显。植株长至 7 d 时, 在不同氮素水平下, 硝酸还原酶活性均随硫素水平升高而呈现出先增后减趋势, 并均在中硫水

平(S2)出现最高值。14 d 时, 在中氮(N2)和高氮水平(N3)下, NR 活性随硫素水平升高则表现出下降趋势。21 与 14 d 时硝酸还原酶活性在低氮水平下响应相似, 均在低氮低硫处理下为最低值, 分别为 8.14 和 7.20 U/g, 且硫素增施均能在 N1 水平下刺激该酶活性。植株长至 28 d 时, 在不同氮素与硫素水平下, 该酶活性响应强烈并表现出较规律的一致性, 均随硫素水平升高表现为先增后减趋势, 且均在中硫水平出现最高值, 高硫水平(S3)出现最低值; 同时, 该时期节点酶活性在 N1S2 处理下达到最高值 (31.84 U/g), 在 N3S3 处理下达到最低值 (13.19 U/g)。

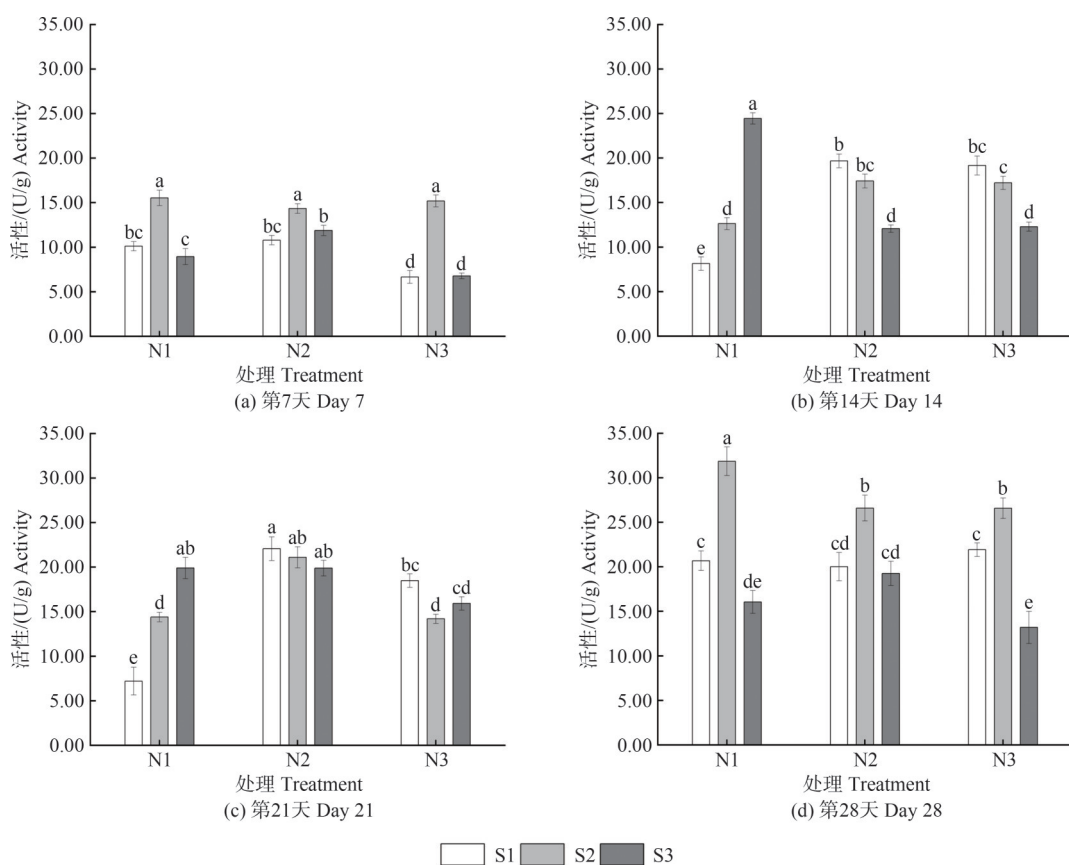


图 3 氮硫互作对韭菜叶片硝酸还原酶活性的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen and sulfur interaction on NR activity in Chinese chive leaves

2.4 氮硫互作对韭菜叶片谷氨酰胺合成酶活性的影响

谷氨酰胺合成酶调控铵根离子与谷氨酸结合为谷氨酰胺, 是植株氮同化的关键步骤。由图 4 可知, 谷氨酰胺合成酶活性响应氮硫互作的强度不一, 整体上其活性在韭菜整个生育时期呈现出先升高后降低的趋势, 植株长至 28 d 时要远低于其他时

期节点。植株长至 7 d 时, 谷氨酰胺合成酶活性在不同氮素水平下均随硫素水平升高呈下降趋势, 且在高硫水平(S3)下活性无显著差异, 这表明硫素的增施在该时期节点抑制了酶的活性。在植株长至 14 与 21 d 时, 谷氨酰胺合成酶活性在低氮(N1)和高氮(N3)处理下影响趋势较为一致, 但在高氮水平下差异更为明显; GS 活性分别在 N3S1 处理(14 d)和

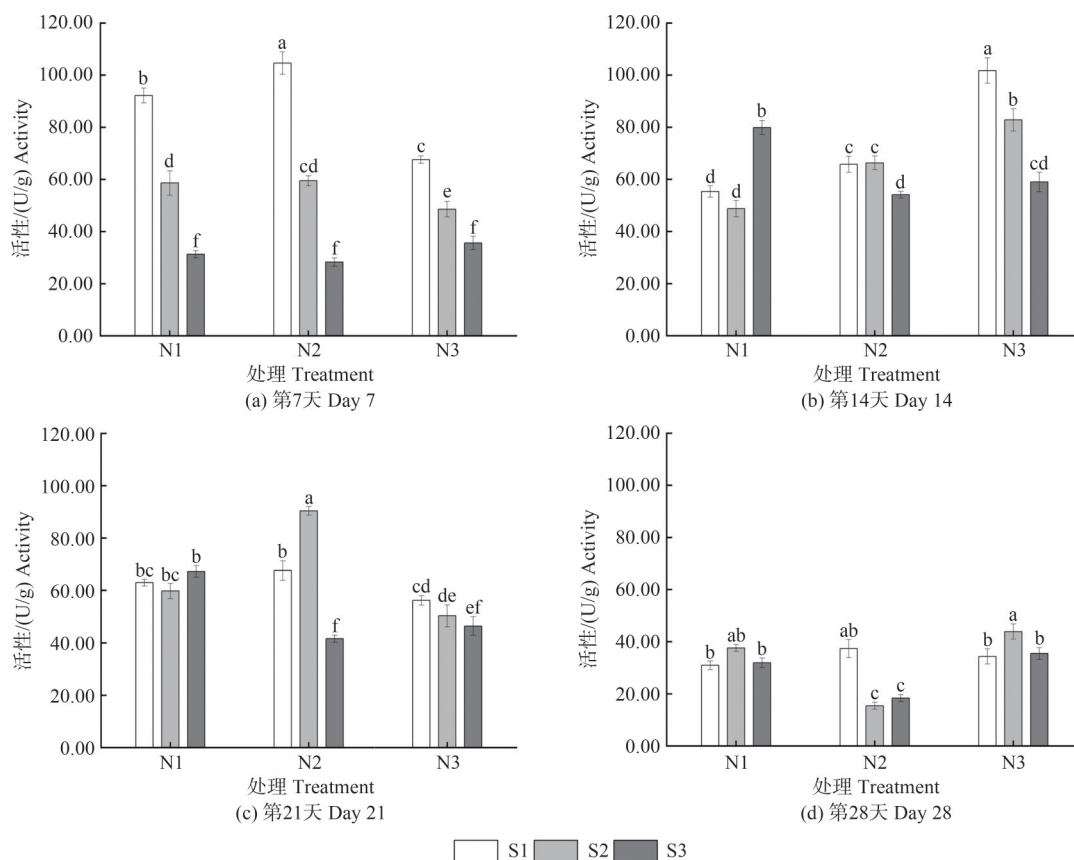


图4 氮硫互作对韭菜叶片谷氨酰胺合成酶活性的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen and sulfur interaction on GS activity in Chinese chive leaves

N2S3 处理 (21 d) 下达到最大值 (101.70 U/g, 90.36 U/g)。28 d 时, GS 活性显著降低, 最高值仅为 43.88 U/g (N3S2 处理), 与 7、14、21 d 时峰值相比分别降低了 58.04%、56.85% 和 51.44%。

2.5 氮硫互作对韭菜叶片 ATP 硫酸化酶活性的影响

ATP 硫酸化酶活性在响应韭菜生育的中后期差异并不十分显著, 但要远高于韭菜长至 7 d 时 (图 5)。植株长至 7 d 时, 酶活性随氮素、硫素水平升高均表现出下降趋势, 在 N1S1 处理下达到最高值 (62.30 U/L), 在 N3S3 处理下达到最低值 (28.07 U/L), 与 N1S1 处理相比降低 54.90%, 说明在该时期节点氮素和硫素的增施抑制了酶的活性。在 14 和 21 d 时, 中氮 (N2) 与高氮水平 (N3) 中 N2S3 处理与 N3S3 处理均在同氮素水平下达到最高值, 且这 2 个时期节点同时在 N1S1 处理下达到最低值, 分别为 87.85 和 70.75 U/L。28 d 时, ATPS 活性响应氮硫素水平的趋势较为平稳, 分别在 N2S2 处理和 N3S2 处理下达到最高值 (110.10 U/L) 和最低值 (88.10 U/L),

N3S2 处理与 N2S2 处理相比活性仅降低 20%。

2.6 氮硫互作对韭菜叶片氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶活性的影响

由图 6 可知, 在响应氮硫互作的韭菜全发育周期中, 氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶活性大体上呈现出平稳上升的趋势。植株长至 7 和 14 d 时, 酶活性分别在 N2S1 处理 (7 d) 和 N3S1 处理 (14 d) 下达到最高值 (189.17 U/L, 197.01 U/L), 并均在 N1S1 处理下出现最低值。OAS-TL 活性在 2 个时期节点的波动区间较为一致, 两时期节点的最高值和最低值分别相较, 均无显著差异。植株长至 21 和 28 d 时, 在低氮和中氮水平下, 酶活性响应氮硫素水平的趋势相同, 同时两时期节点的最高值均在高氮处理组中出现, 分别为 N3S1 处理 (249.76 U/L) 和 N3S3 处理 (307.11 U/L), 与同时期节点的最低值相比, 分别涨幅 25.6% 和 29.5%。

2.7 氮硫互作对韭菜叶片总辛辣程度及氮、硫素同化关键酶影响的均值分析

韭菜酶促丙酮酸含量、氮素与硫素同化关键酶

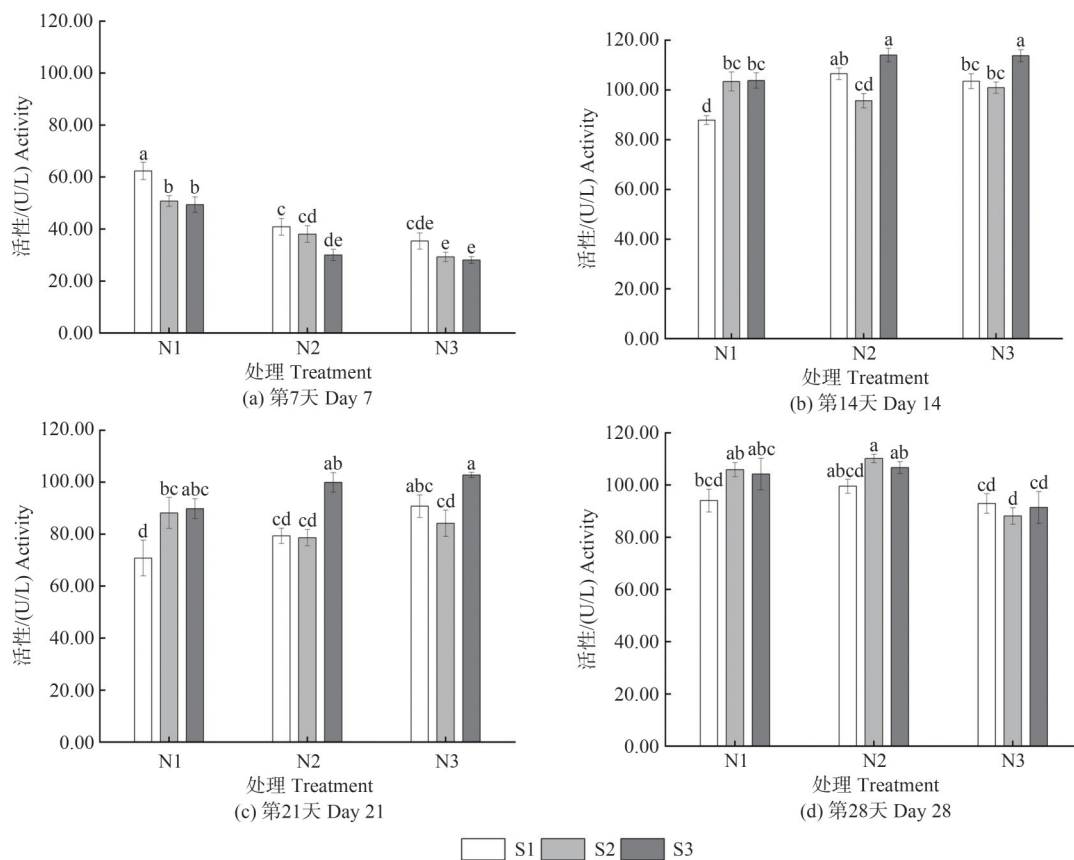


图5 氮硫互作对韭菜叶片ATP硫酸化酶活性的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen and sulfur interaction on ATPS activity in Chinese chive leaves

活性在韭菜发育不同周期节点对营养液不同氮、硫素水平下的影响趋势见表2。酶促丙酮酸含量在植株长至7 d时随氮素水平增加呈现下降趋势;在14和21 d时表现为先增后减趋势;在28 d时则呈上升趋势,但在该时期节点N2与N3水平无显著差异。

硝酸还原酶活性在7 d时随氮素和硫素水平增加均表现为先增后减趋势。在14和21 d时其活性随着氮素水平增加呈现先增后减趋势,而随着硫素水平增加则呈上升趋势。在28 d时,硝酸还原酶活性随着硫素水平增加呈先增后减趋势;随氮素水平增加则表现为下降趋势,但处理组间无显著差异。在植株长至7、14和28 d这3个时期节点,谷氨酰胺合成酶活性均随硫素水平增加表现为下降趋势,其活性均在S1水平下最高,3个时期节点中以7 d时响应强度更为显著,S2、S3水平相较于S1水平分别降低了36.97%和64.00%。

ATP硫酸化酶在韭菜发育全周期中,活性响应氮素与硫素水平的规律十分一致。酶活性在7 d时随氮素和硫素水平增加均表现为下降趋势,在14与

21 d时表现为上升趋势,在28 d时则表现为先上升后下降的趋势。在28 d时,酶活性在硫素水平下虽有波动,但未达到显著水平。氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶在4个时期节点响应氮硫互作的强度较为相同,在7、14与21 d时,其活性随着硫素水平增加均无显著效应,响应强度不及其他关键酶。而28 d时,酶活性随氮素和硫素水平增加均出现小幅度的上升趋势,硫素水平下表现更为凸显,S3相较于S1、S2水平分别提高了13.96%和12.95%。

2.8 氮硫互作对韭菜叶片总辛辣程度及氮、硫素同化关键酶影响的方差分析

韭菜酶促丙酮酸含量、氮素与硫素同化关键酶活性在韭菜发育不同周期节点对营养液氮素(N)、硫素(S)和氮硫素交互作用(N×S)的响应情况见表3。酶促丙酮酸含量除了在21 d时的氮硫素交互作用对其响应为接近显著水平,其余3个时期节点均响应为极显著水平($P=0.0000$)。

硝酸还原酶活性和谷氨酰胺合成酶活性在韭菜发育的全周期节点中,氮硫素交互作用均对其响

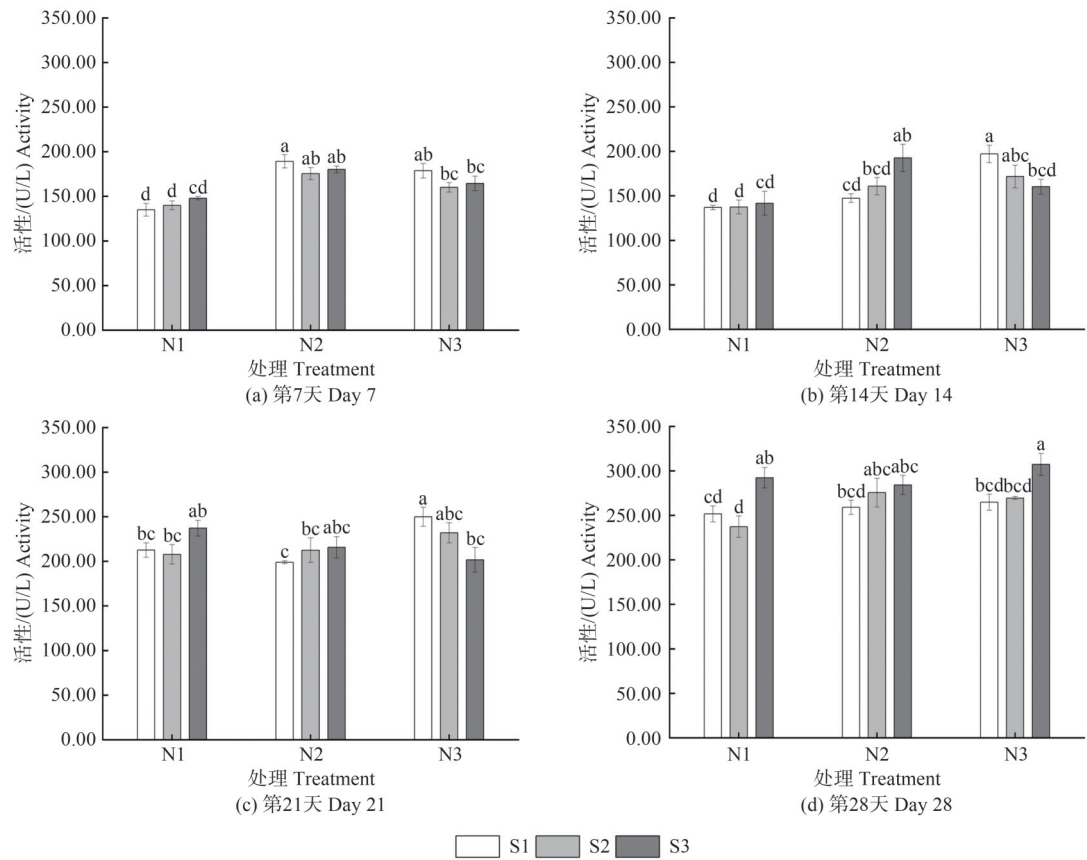


图6 氮硫互作对韭菜叶片氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶活性的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen and sulfur interaction on OAS-TL activity in Chinese chive leaves

应为极显著水平。其中硝酸还原酶活性在植株长至7和28 d时受到的硫素效应高于氮素,其活性对硫素的响应均达到了显著水平。在14 d时,氮素和硫素单一水平对硝酸还原酶活性的效应基本相当且均不显著($P>0.05$),但氮硫素交互作用对其响应的 F 值却高达93.160,极显著高于氮素和硫素单一水平,且远超其他3个时期节点。另外,谷氨酰胺合成酶活性在植株长至7 d时受到的硫素效应高于氮素效应,且硫素效应对其活性的响应达到了显著水平,但其余3个时期节点氮素对该酶活的效应均高于硫素效应,但差异并不显著。

ATP 硫酸化酶活性在7 d时受到的氮素效应高于硫素,氮素对其响应的 F 值为61.535,达到极显著水平,硫素效应达到显著水平,而氮硫素交互作用并不显著。在植株长至14和21 d时,硫素效应对该酶活性的影响均高于氮素效应,氮硫素交互作用对其活性的响应分别为极显著水平和接近显著水平。氮素效应在28 d时对ATP 硫酸化酶活性呈显著水平,硫素效应和氮硫素交互作用在该时期节点

对其活性则不显著。氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶活性在7、14和21 d这3个时期节点受到的氮素效应高于硫素,但仅在7 d时其氮素效应达到极显著水平,在该时期节点的响应强度居首位($F=21.012$)。28 d时,硫素效应对其响应达到显著水平,其强度高于氮素效应和元素间交互作用。

2.9 韭菜植株品质综合评价

平行处理间根据不同指标的权重系数得到的隶属函数值和累加的最终隶属函数值,以及排名结果见表4。结果表明,N2S2处理隶属函数值最高(0.709),品质最优,排名第一;N2S1和N1S3处理分别位列第二和第三,品质较优;N1S1隶属函数值最低(0.190),品质最差,排名第九。

3 讨论

3.1 氮硫互作对韭菜叶片总辛辣程度的影响

S-烃基半胱氨酸亚砷作为韭菜、洋葱、大葱和大蒜等葱属植物独特的次级代谢产物,是各种挥发性有机硫化物的前体物质,一般通过测定其分解产

表 2 氮硫互作对韭菜叶片辛辣程度及氮、硫素同化关键酶影响的均值分析

Table 2 Mean value analysis of N and S interaction on activities of gross flavor intensity and key enzymes of nitrogen and sulfur assimilation in Chinese chive leaves

指标类型 Index types	生长天数/d Vegetative day	处理 Treatment					
		N1	N2	N3	S1	S2	S3
酶促丙酮酸含量/(μmol/g) EPY content	7	5.86 aA	5.41 bAB	5.18 bB	4.60 cB	5.15 bB	6.70 aA
	14	5.35 aA	5.62 aA	4.41 bB	4.56 cB	5.85 aA	4.98 bB
	21	5.05 bB	5.91 aA	5.22 bB	5.31 aA	5.40 aA	5.46 aA
	28	8.28 bB	9.93 aA	10.14 aA	9.26 bB	10.04 aA	9.06 bB
硝酸还原酶活性/(U/g) NR activity	7	11.52 aA	12.33 aA	9.54 bB	9.18 bB	15.01 aA	9.20 bB
	14	15.07 bA	16.38 aA	16.21 abA	15.65 aA	15.75 aA	16.26 aA
	21	13.83 cB	21.01 aA	16.19 bB	15.91 bB	16.55 bAB	18.57 aA
	28	22.85 aA	21.95 aA	20.55 aA	20.87 bB	28.33 aA	16.16 cC
谷氨酰胺合成酶活性/ (U/g) GS activity	7	60.68 aA	64.10 aA	50.67 bB	88.10 aA	55.53 bB	31.72 cC
	14	61.31 bB	62.04 bB	81.16 aA	74.26 aA	65.94 bB	64.32 bB
	21	63.32 aA	66.51 aA	50.96 bB	62.25 aA	66.80 aA	51.75 bB
	28	33.48 bA	23.70 cB	37.89 aA	34.20 aA	32.30 abAB	28.57 bB
ATP 硫酸化酶活性/(U/L) ATPS activity	7	54.13 aA	36.28 bB	30.89 cB	46.15 aA	39.34 bB	35.81 bB
	14	98.33 bB	105.40 aA	106.03 aA	99.29 bB	99.96 bB	110.51 aA
	21	82.87 bA	85.93 abA	92.51 bA	80.25 bB	83.62 bB	97.44 aA
	28	101.34 aA	105.40 aA	90.78 bB	95.45 aA	101.35 aA	100.71 aA
氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶 活性/(U/L) OAS-TL activity	7	140.88 cB	181.59 aA	167.72 bA	167.57 aA	158.46 aA	164.16 aA
	14	138.61 bB	166.88 aA	176.30 aA	160.40 aA	156.60 aA	164.79 aA
	21	219.12 aA	208.99 aA	227.74 aA	220.37 aA	217.35 aA	218.12 aA
	28	260.31 bA	272.78 abA	280.40 aA	258.37 bB	260.67 bB	294.43 aA

注：同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。下同。

Note: Values followed by different small and capital letters within same column mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

物(酶促丙酮酸含量)评估葱属植物的有机硫化物,是衡量葱属植物营养品质的关键指标^[12,19-20]。Randle^[21]在研究高氮对洋葱品质和鳞茎风味的影响时发现,营养液氮素浓度从0.22 g/L 上升至0.78 g/L 时,酶促丙酮酸含量也呈线性增长,而氮素浓度上升至0.97 g/L 时,洋葱鳞茎中丙酮酸含量略有降低。本试验中,韭菜进入收获期时(28 d),在中硫供应下氮素浓度从12 mmol/L 升至18 mmol/L 时也得到相同的研

究结果。

Kim 等^[22]研究表明,洋葱丙酮酸含量与施用氮素、硫素量呈正相关,与试验所用品种无关。Liu 等^[23]发现,增加供硫水平可以显著提高所有供试大葱的N、S 吸收量及辛辣程度。Perner 等^[24]、孔灵君等^[20]也表明,与低硫供应相比,供硫量增加提高了韭菜的丙酮酸含量,有助于韭菜产生大量有机硫化物。与以上研究结果相同的是,本试验结果(28 d 时)中

表3 氮硫互作对韭菜叶片总辛辣程度及氮、硫素同化关键酶影响的方差分析

Table 3 ANOVA analysis of N and S interaction on activities of gross flavor intensity and key enzymes of nitrogen and sulfur assimilation in Chinese chive leaves

指标类型 Index types	变异来源 Variation	7 d		14 d		21 d		28 d	
		F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值
酶促丙酮酸 EPY	N	0.248	0.791 4	1.132	0.407 7	5.987	0.062 7	2.506	0.197 0
	S	2.426	0.204 2	1.221	0.385 6	0.174	0.846 3	0.648	0.570 6
	N×S	23.913	0.000 0	23.061	0.000 0	2.878	0.052 7	13.204	0.000 0
硝酸还原酶 NR	N	2.189	0.228 0	0.031	0.969 7	1.979	0.252 7	0.525	0.627 1
	S	12.047	0.020 3	0.007	0.993 4	0.284	0.767 1	14.735	0.014 3
	N×S	6.715	0.001 7	93.160	0.000 0	19.293	0.000 0	4.024	0.016 7
谷氨酰胺合成酶 GS	N	1.157	0.401 4	1.103	0.415 4	0.888	0.479 4	2.016	0.248 0
	S	18.734	0.009 3	0.248	0.791 6	0.785	0.515 8	0.313	0.747 5
	N×S	15.650	0.000 0	32.423	0.000 0	30.638	0.000 0	15.453	0.000 0
ATP硫酸化酶 ATPS	N	61.535	0.001 0	1.154	0.402 2	1.502	0.326 1	7.640	0.043 0
	S	11.487	0.022 0	2.497	0.197 8	5.143	0.078 4	1.407	0.344 7
	N×S	1.005	0.430 9	6.315	0.002 3	2.480	0.080 7	1.448	0.259 1
氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶 OAS-TL	N	21.012	0.007 6	2.714	0.180 0	0.578	0.602 0	2.104	0.237 4
	S	1.039	0.433 2	0.119	0.891 2	0.016	0.984 0	8.336	0.037 4
	N×S	1.557	0.228 5	4.126	0.015 2	3.980	0.017 4	1.278	0.315 1

注:N,S和N×S分别表示氮素、硫素和氮硫素交互作用; $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 分别表示处理间差异达到显著和极显著水平。
Note: N, S and N×S indicate nitrogen, sulfur, interaction between nitrogen and sulfur, respectively; $P<0.05$, $P<0.01$ indicated that the difference between treatments was significant and highly significant.

表4 韭菜品质综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation results of Chinese chives

处理 Treatment	理论产量 Theoretical yield	酶促丙酮酸 含量 EPY content	硝酸还原酶 活性 NR activity	谷氨酰胺 合成酶活性 GS activity	ATP硫酸 化酶活性 ATPS activity	氧乙酰丝氨 酸(硫醇)裂 解酶活性 OAS-TL activity	隶属函数值 Subordinate function values	排名 Ranking
N1S1	0.028	0.000	0.000	0.112	0.039	0.012	0.190	9
N1S2	0.026	0.095	0.127	0.070	0.142	0.000	0.461	8
N1S3	0.029	0.133	0.104	0.077	0.139	0.086	0.569	3
N2S1	0.200	0.070	0.119	0.150	0.074	0.064	0.677	2
N2S2	0.105	0.200	0.150	0.101	0.062	0.091	0.709	1
N2S3	0.089	0.113	0.076	0.000	0.150	0.134	0.562	4
N3S1	0.000	0.105	0.090	0.133	0.062	0.150	0.540	5
N3S2	0.161	0.059	0.122	0.094	0.000	0.099	0.534	6
N3S3	0.134	0.092	0.009	0.039	0.104	0.099	0.478	7

酶促丙酮酸含量也与氮素水平呈线性关系,在N3水平下其均值含量达到10.14 $\mu\text{mol/g}$ 。不尽相同的是,在供硫水平上酶促丙酮酸含量仅在中硫处理($S_2=4\text{ mmol/L}$)达到最高值,且在该时期节点不同氮素水平下,其含量在 S_3 水平下均低于 S_2 水平,这与许建等^[25]在大蒜上的研究结果一致。原因可能为韭菜在响应不同浓度的硫素水平时表现出不同的敏感强度,存在硫素的最佳阈值。同时发现,在 N_1 水平下,当硫素水平从 S_1 升至 S_2 时酶促丙酮酸含量的涨幅要显著低于 N_2 水平,这说明低氮供应会降低植株对硫素的敏感强度,元素间交互作用减弱。在对韭菜叶片EPY含量进行方差分析时发现,韭菜发育前期(7和14 d)的氮硫素交互作用要高于中后期(21和28 d),但其强度均处于接近显著水平或达到极显著水平,显著高于氮素或硫素单一效应;并且硫素在7和14 d时对其含量的响应要高于氮素效应,而在21和28 d时却恰恰相反,这表明在影响韭菜辛辣程度的全周期中,相较于氮素水平韭菜植株前期更依赖于营养液硫素水平,而中后期更依赖于氮素水平。

3.2 氮硫互作对韭菜叶片氮素同化关键酶活性的影响

经根系吸收的氮素主要以 NO_3^- 和 NH_4^+ 这2种形态存在,硝酸还原酶经 NO_3^- 诱导在根部细胞质中将硝态氮催化为亚硝态氮,最后还原为铵态氮,硝酸还原酶是氮素同化的关键限速酶^[2,26]。转化形成的铵态氮与环境中吸收的铵态氮同步进入谷氨酸合酶循环,先与谷氨酰胺合成酶作用合成谷氨酰胺,并进一步形成有机态氮(谷氨酸),谷氨酸作为其他氨基酸和酰胺的前体物质会与多种活化物质转化为植株可以直接利用的含氮化合物^[1,27]。卢凤刚等^[28]在水培韭菜的研究表明,营养液氮素浓度在2~20 mmol/L, NR活性与氮素浓度呈线性正相关。牛天航等^[29]则发现普通化肥常规施肥与减量施用50%相比,韭菜NR活性没有发生显著变化。

本试验结果表明,在韭菜不同发育周期节点中NR活性均以 N_2 水平最高($P<0.05$),这与许建等^[8]在大蒜幼苗期以相同低硫或中硫供应时结果一致。并且NR活性在响应硫素浓度上,其活性峰值均在 S_2 或 S_3 水平中出现,但在14 d时结果并不显著。许建等^[8]同时发现,大蒜幼苗期适当提高氮素水平能显著增加NR活性,低氮供应时硫的增施也能刺

激NR活性提高,但高氮供应则能显著抑制酶的活性,本研究在韭菜发育中期(21 d)亦得到相同结果。而GS活性峰值均在 N_2 或 N_3 水平中最高,这说明GS与NR相比对氮素浓度存在更强的偏好性,同时GS活性在响应硫素浓度时,除发育中期(21 d)外,其峰值均在 S_1 水平中出现,且该时期节点GS活性虽在 S_2 水平下最高,却与 S_1 相比并不显著,这说明NR与GS相较对硫素水平更为敏感。在韭菜发育全周期中,氮硫素交互作用($N\times S$)对于NR、GS活性均为极显著效应($P=0.0000$),且在韭菜发育至14 d时,其效应程度(F 值)均在全周期节点中最高,并远超氮素或硫素单一效应。在7 d时硫素效应在响应NR、GS酶活性时也达到了显著或极显著水平,在此后氮素和硫素效应此消彼长,参与到韭菜发育的全周期中,并维系氮素同化能力的动态平衡。

3.3 氮硫互作对韭菜叶片硫素同化关键酶活性的影响

ATP硫酸化酶(ATPS)参与硫酸盐的活化,催化 SO_4^{2-} 生成5'-腺苷磷酸硫酸(APS)^[30-31],是硫素同化的第一步。氧乙酰丝氨酸(硫醇)裂解酶催化氧乙酰丝氨酸(OAS)与硫化氢(H_2S)结合生成半胱氨酸,也被称为半胱氨酸合成酶^[32-33]。半胱氨酸是植物合成的第一个含硫有机物,是无机硫同化形成有机硫的核心步骤,其合成在硫素同化过程处于中心位置,也是氮、硫素代谢中的主要调控环节^[19,34-35]。孔灵君等^[11]在研究硫对大葱氮硫同化关键酶活性的影响时发现,ATPS活性在大葱发育不同时期节点均以最低硫素浓度处理($S=0.01\text{ mmol/L}$)最高,且在大葱缓苗越夏期与假茎充实期时,当硫素浓度从2.01 mmol/L升至6.01 mmol/L,ATPS活性无显著差异。而OAS-TL活性在叶丛速生期与假茎充实期均在中高硫素浓度处理($S=4.01\text{ mmol/L}$)最高,但在缓苗越夏期不同硫素浓度下其活性均无显著差异,这与本研究在韭菜发育前中期(7、14和21 d)的结果相同。而在韭菜发育至收获期(28 d)时,不同氮素浓度下硫的增施均能刺激OAS-TL活性的提高,这也与孔灵君等^[11]的研究结果一致。许建等^[8]在大蒜的研究表明,ATPS活性在应答硫素水平时与氮素水平密切相关,在鳞茎膨大中期硫的增施能够刺激酶活性提高。本研究结果表明,ATPS活性在韭菜发育前期(7 d)与氮硫素水平均呈负相关并显著低于中后期,这说明发育前期

ATPS活性对其敏感程度较低,且低硫供应时较高的ATPS活性有利于提高植株对硫素的同化吸收^[11]。韭菜发育至中后期(14 d、21 d)时,植株对硫素的同化能力显著提高,且ATPS活性与氮硫素水平均呈正相关。方差分析显示,ATPS与OAS-TL发育前期(7 d)受到的氮素效应均高于硫素效应及元素间交互作用,且在全周期节点内其受到的效应程度也为最高(F 值),这说明植株发育前期硫素同化能力的提高是十分依赖氮素水平的,氮硫素同化过程存在密切交互作用^[36-39]。

4 结 论

本研究通过设置营养液不同氮素和硫素浓度处理组合,从生理学角度挖掘氮硫素同化过程的响应机制,并通过均值和方差分析,洞悉韭菜辛辣程度及关键酶活对氮硫素水平的作用趋势和效应程度。结果表明,氮硫素交互作用在全周期内具主导地位。EPY含量在生育前期受制于硫素水平,中后期受制于氮素水平;氮素同化关键酶中NR对硫素水平表现出更高的敏感程度,GS对氮素水平存在更强的偏好性;硫素同化能力的提升与氮素水平密不可分,氮硫素参与彼此的同化过程并存在密切交互作用。综合分析可知,氮硫互作显著影响韭菜产量、风味物质含量及关键酶活性,建议水培韭菜营养液氮素浓度为12 mmol/L,硫素浓度为2~4 mmol/L。

参考文献 References

- [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
Wu W, Zhao J. Advances on plants' nitrogen assimilation and utilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13): 75-78 (in Chinese)
- [2] 刘海光,罗振,董合忠. 植物硝态氮吸收和转运的调控研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(6): 192-201
Liu H G, Luo Z, Dong H Z. Research progress on the regulation of NO_3^- uptake and transport in plant[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(6): 192-201 (in Chinese)
- [3] Perchlik M, Tegeder M. Leaf amino acid supply affects photosynthetic and plant nitrogen use efficiency under nitrogen stress [J]. *Plant Physiology*, 2018, 178(1): 174-188
- [4] 秦蕾,尹庆喆,马慧丽,张智慧,刘督,盖淑婷,王勇. 硫、硒处理对洋葱产量及主要功能成分的影响[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(3): 17-25
Qin L, Yin Q Z, Ma H L, Zhang Z H, Liu D, Gai S T, Wang Y. Effects of sulfur and selenium treatments on yield and main functional components accumulation of onion (*Allium cepa*) [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2023, 54(3): 17-25 (in Chinese)
- [5] 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
Xie R Z, Dong S T, Hu C H. Research progress of plant sulfur nutrition[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(2): 65-69 (in Chinese)
- [6] Khar A, Banerjee K, Jadhav M R, Lawande K E. Evaluation of garlic ecotypes for allicin and other allyl thiosulphinates[J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(4): 988-996
- [7] 周杰,王东,满建国,谷淑波,陈茂学,于振文. 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
Zhou J, Wang D, Man J G, Gu S B, Chen M X, Yu Z W. Effects of interaction of nitrogen and sulfur on seedling growth, uptake and utilization of nitrogen and sulfur of winter wheat under high nitrogen conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 42-51 (in Chinese)
- [8] 许建,贾凯,朱君芳,胡梅,王娜,高杰. 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
Xu J, Jia K, Zhu J F, Hu M, Wang N, Gao J. Nitrogen and sulfur interaction increase their assimilation and activities of key enzymes in garlic[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 434-443 (in Chinese)
- [9] 孔灵君,徐坤,何平,王磊. 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
Kong L J, Xu K, He P, Wang L. Influence of interaction between nitrogen and sulfur on N, P, K and S absorption and distribution of Chinese spring onion[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 172-178 (in Chinese)
- [10] 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
- [11] 孔灵君,徐坤,张永征,何平. 硫对大葱生长及氮硫同化关键酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(12): 2505-2512
Kong L J, Xu K, Zhang Y Z, He P. Effects of sulfur on growth and key enzyme activities involved in nitrogen and sulfur assimilation in Chinese spring onion[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(12): 2505-2512 (in Chinese)
- [12] Liu N, Tong J, Hu M M, Ji Y H, Wang B J, Liang H, Liu M C, Wu Z H. Transcriptome landscapes of multiple tissues highlight the genes involved in the flavor metabolic pathway in Chinese chive (*Allium tuberosum*) [J]. *Genomics*, 2021, 113(4): 2145-2157
- [13] Liu N, Hu M M, Liang H, Tong J, Xie L, Wang B J, Ji Y H, Han B B, He H J, Liu M C, Wu Z H. Physiological, transcriptomic, and metabolic analyses reveal that mild salinity improves the growth, nutrition, and flavor properties of hydroponic Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler ex Spr) [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1000271
- [14] Tong J, Hu M M, Han B B, Ji Y H, Wang B J, Liang H, Liu M C, Wu Z H, Liu N. Determination of reliable reference genes for gene expression studies in Chinese chive (*Allium tuberosum*) based on the transcriptome profiling[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 16558
- [15] Yoshimoto N, Saito K. S-Alk(en)ylcysteine sulfoxides in the genus *Allium*: proposed biosynthesis, chemical conversion, and bioactivities [J].

- Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(16): 4123-4137
- [16] 韩贝贝, 王宝驹, 佟静, 刘明池, 武占会, 孟艳玲, 刘宁. 氨基酸处理对水培韭菜产量、品质及风味的影响[J]. *中国蔬菜*, 2022(5): 74-80
- Han B B, Wang B J, Tong J, Liu M C, Wu Z H, Meng Y L, Liu N. Effects of amino acid treatments on growth, quality, and yield of hydroponic Chinese chive[J]. *China Vegetables*, 2022(5): 74-80 (in Chinese)
- [17] Chen C, Cai J, Ren Y H, Xu Y, Liu H L, Zhao Y Y, Chen X F, Liu Z B. Antimicrobial activity, chemical composition and mechanism of action of Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler) extracts[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1028627
- [18] 张烨达, 佟静, 武占会, 王丽萍, 王宝驹, 刘宁. 氮硫互作对水培韭菜生长、营养及风味品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(5): 96-103
- Zhang Y D, Tong J, Wu Z H, Wang L P, Wang B J, Liu N. Effects of nitrogen and sulfur interaction on growth, nutrition and flavor quality of hydroponic Chinese chives[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(5): 96-103 (in Chinese)
- [19] 王小芳, 杨玲娟, 董晓宁, 李志孝, 焦成瑾. 植物半胱氨酸合成及调控研究进展[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(1): 37-48
- Wang X F, Yang L J, Dong X N, Li Z X, Jiao C J. Advancement in research on synthesis and regulation of cysteine in plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2011, 47(1): 37-48 (in Chinese)
- [20] 孔灵君, 徐坤, 王磊, 何平, 张永征. 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
- Kong L J, Xu K, Wang L, He P, Zhang Y Z. Influence of nitrogen and sulfur interaction on growth and quality of Chinese spring onion[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1272-1278 (in Chinese)
- [21] Randle W. Increasing nitrogen concentration in hydroponic solutions affects onion flavor and bulb quality[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2000, 125(2): 254-259
- [22] Kim H Y, Jackson D, Adhikari K, Riner C, Sanchez-Brambila G. Relationship between consumer acceptability and pungency-related flavor compounds of *Vidalia* Onions [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(10): 2396-2402
- [23] Liu S Z, He H J, Feng G, Chen Q. Effect of nitrogen and sulfur interaction on growth and pungency of different pseudostem types of Chinese spring onion (*Allium fistulosum* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 121(1): 12-18
- [24] Perner H, Schwarz D, Krumbein A, George E. Influence of sulfur supply, ammonium nitrate ratio, and arbuscular mycorrhizal colonization on growth and composition of Chinese chive[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130(3): 485-490
- [25] 许建, 贾凯, 朱君芳, 胡梅, 王娜, 高杰. 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
- Xu J, Jia K, Zhu J F, Hu M, Wang N, Gao J. Combined application of nitrogen and sulfur improving quality of substrate culture garlic bulbs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 203-208 (in Chinese)
- [26] 李晨阳, 孔祥强, 董合忠. 植物吸收转运硝态氮及其信号调控研究进展[J]. *核农学报*, 2020, 34(5): 982-993
- Li C Y, Kong X Q, Dong H Z. Nitrate uptake, transport and signaling regulation pathways[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(5): 982-993 (in Chinese)
- [27] 欧立军, 康林玉, 赵激, 陈娟, 刘周斌. 作物氮素吸收与利用研究进展[J]. *北方园艺*, 2018(7): 151-156
- Ou L J, Kang L Y, Zhao J, Chen J, Liu Z B. Research progress in nitrogen uptake and utilization of crops [J]. *Northern Horticulture*, 2018(7): 151-156 (in Chinese)
- [28] 卢凤刚, 陈贵林, 吕桂云, 任良玉. 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
- Lu F G, Chen G L, Lv G Y, Ren L Y. Effects of different nitrogen concentrations on yield and quality of Chinese chive [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(1): 131-133 (in Chinese)
- [29] 牛天航, 何志学, 颜建明, 毛震宇, 何东霞, 秦海娟. 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
- Niu T H, He Z X, Xie J M, Mao Z Y, He D X, Qin H J. Effects of different fertilization treatments on yield, quality and nutrient utilization of wintering Chinese chives in greenhouse [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33(7): 64-70 (in Chinese)
- [30] Hatzfeld Y, Lee S M, Lee M S, Leustek T, Saito K. Functional characterization of a gene encoding a fourth ATP sulfurylase isoform from *Arabidopsis thaliana* [J]. *Gene*, 2000, 248(1/2): 51-58
- [31] 吴宇, 高蕾, 曹民杰, 向成斌. 植物硫营养代谢、调控与生物学功能[J]. *植物学通报*, 2007, 42(6): 735-761
- Wu Y, Gao L, Cao M J, Xiang C B. Plant sulfur metabolism, regulation, and biological functions [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 42(6): 735-761 (in Chinese)
- [32] Ikegami F, Itagaki S, Murakoshi I. Purification and characterization of two forms of cysteine synthase from *Allium tuberosum* [J]. *Phytochemistry*, 1992, 32(1): 31-34
- [33] Hell R, Bork C, Bogdanova N, Frolov I, Hauschild R. Isolation and characterization of two cDNAs encoding for compartment specific isoforms of O-acetylserine (thiol) lyase from *Arabidopsis thaliana* [J]. *FEBS Letters*, 1994, 351(2): 257-262
- [34] Kopriva S. Regulation of sulfate assimilation in *Arabidopsis* and beyond[J]. *Annals of Botany*, 2006, 97(4): 479-495
- [35] 张欢欢, 王晓清, 郝曜山, 王亦学, 孙毅, 吴慎杰. 大蒜半胱氨酸合成酶基因家族鉴定及表达分析[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(9): 2832-2841
- Zhang H H, Wang X Q, Hao Y S, Wang Y X, Sun Y, Wu S J. Identification and gene expression pattern of cysteine synthases gene family in garlic[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(9): 2832-2841 (in Chinese)
- [36] Tian W F, Wilson T, Chen G J, Guttieri M J, Nelson N O, Fritz A, Smith G, Li Y H. Effects of environment, nitrogen, and sulfur on total phenolic content and phenolic acid composition of winter wheat grain [J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98(4): 903-911
- [37] Shivendra K, Ramdeo S, Small Ian M, Sheeja G, Kelly O G, Marois James J, Wright David L. Interactive effects of nitrogen and sulfur nutrition on growth, development, and physiology of *Brassica carinata* A Braun and *Brassica napus* L [J]. *Sustainability*, 2021, 13(13): 7355
- [38] Liu S R, Cui S, Ying F Y, Nasar J, Wang Y, Gao Q. Simultaneous improvement of protein concentration and amino acid balance in maize grains by coordination application of nitrogen and sulfur [J]. *Journal of*

Cereal Science, 2021, 99: 103189

var Italica L.[J]. *Baghdad Science Journal*, 2021, 18(3): 501-508

[39] Karomi K M F, Jwad K N, Anwar A Z, Saheb A N. Effects of nitrogen and sulfur sprays on the growth and production of broccoli *Brassica oleracea*

责任编辑:董金波



第一作者简介:张烨达,硕士研究生,中共预备党员,就读于河北工程大学园林与生态工程学院,主要研究方向为设施园艺与无土栽培。硕士期间,多次投身于新冠疫情防控志愿服务、学术志愿服务以及党支部主题活动,担任研究生“三助”岗位,并参加多项国内外学术报告会。荣获“疫情防控优秀志愿者”,现已连续三年获“研究生一等学业奖学金”,以第一作者在北大核心期刊发表2篇论文。



通信作者简介:佟静,博士,北京市农林科学院蔬菜研究所助理研究员,国家特色蔬菜产业技术体系土肥水管理岗位团队成员。研究方向为蔬菜水肥高效利用与品质调控。近年来主要从事韭菜、加工辣椒、洋葱等特色蔬菜和莲藕、茭白、水芹等水生蔬菜的水肥高效利用与品质调控研究。曾参加十三五国家重点研发、十三五、十四五现代农业产业技术体系、林业公益项目以及北京园林绿化局、北京市农委等省部级项目10余项,主持院级项目2项。发表研究论文20余篇,其中SCI论文7篇;授权专利3项,参编行业标准1项。



通信作者简介:武占会,男,博士,北京市农林科学院研究员,国家特色蔬菜产业技术体系岗位科学家,中国园艺学会常务理事、中国农业工程学会设施园艺工程专委会委员、北京蔬菜学会常务理事。主要从事蔬菜设施栽培、无土栽培、蔬菜栽培生理等研究。主持多项科技部、农业农村部、北京市科委项目。获省级科技进步奖5项;发表科研论文110多篇;主编著作3部,发明专利4项,发布地方行业标准2项。