马祥和,张之玄,张丽娜,等.硒氮互作对燕麦籽粒氨基酸组成与营养价值的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(4):88-101.
Ma X H, Zhang Z X, Zhang L N, et al.Effects of selenium-nitrogen interaction on amino acid composition and nutritional value in oat grains[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(4):88-101.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202504003

硒氮互作对燕麦籽粒氨基酸组成与营养价值的影响

马祥和[1],张之玄[1],张丽娜[1],霍滢睿[1],尹雪斌[1,2],冯美臣[1],高志强[1],杨珍平[1*]

(1.山西农业大学 农学院/黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心,山西 晋中 030801;
2.安徽科技学院 长三角功能农业(食品)研究院,安徽 滁州 233100)

摘　要:[目的]随着经济的发展,公众对生活品质与营养健康更加重视,市场对燕麦等健康与富硒谷物的需求也不断扩大。探究Se(硒)、N(氮)互作对燕麦籽粒氨基酸组成及营养价值的作用,有利于实现燕麦氨基酸品质的改良,生产出足Se、更高蛋白与优质氨基酸的燕麦。[方法]以燕麦品种'晋燕19'为材料,在2022—2023年进行大田试验,采用随机区组设计,设置土壤基施Se(150 g/hm^2)、N(240 kg/hm^2)、Se+N(Se:150 g/hm^2,N:240 kg/hm^2)处理,以不施肥为对照(CK),调查花后不同时期籽粒的蛋白质和氨基酸组分含量,分析不同施肥处理下燕麦籽粒蛋白质与氨基酸组分积累差异。[结果]与CK相比,Se+N互作下籽粒蛋白质含量提升18.9%~24.7%,总氨基酸含量提升8.5%~48.9%,提升效果均优于单施N肥与单施Se肥。籽粒中检测出的16种氨基酸,除酪氨酸外,其余氨基酸含量的2年平均值皆以Se+N互作下最高,其次是单施N肥,而单施Se肥时仅有缬氨酸、酪氨酸与胱氨酸含量有所提升。此外燕麦籽粒中的限制性氨基酸如赖氨酸、缬氨酸在Se+N处理后,2年平均含量比CK显著提升28.5%和26.5%。氨基酸营养评价结果显示,与CK相比,Se+N互作的籽粒氨基酸比例更接近理想蛋白质标准,且有多种必需氨基酸的指数得分(RAA)显著提升;同时Se+N互作后籽粒必需氨基酸指数(EAAI)在种植第1年由0.45提升为0.66,第2年由0.68提升为0.75,均高于单施Se、N肥,说明Se+N互作后的燕麦籽粒氨基酸组成更佳。[结论]综上,与单施Se和N比较,Se+N互作更能提升籽粒蛋白质含量,提升籽粒氨基酸积累量,可促进籽粒中氨基酸尤其是限制性氨基酸如赖氨酸等的含量提升,能有效优化'晋燕19'燕麦籽粒的氨基酸组成与蛋白质的营养价值。

关键词:硒氮互作; 燕麦; 氨基酸组成; 氨基酸营养评价; 限制性氨基酸
中图分类号:S512.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)04-0088-14

Effects of selenium-nitrogen interaction on amino acid composition and nutritional value in oat grains

Ma Xianghe[1], Zhang Zhixuan[1], Zhang Lina[1], Huo Yingrui[1], Yin Xuebin[1,2], Feng Meichen[1], Gao Zhiqiang[1], Yang Zhenping[1*]

(*1.College of Agriculture/Co-Innovation Center for Quality and Efficiency Production of Characteristic Crops in Loess Plateau, Ministry of Education and Shanxi Province, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2. Yangtze River Delta Functional Agriculture (Food) Research Institute, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China*)

Abstract: [Objective] With economic development, growing public emphasis on quality of life and nutritional health has increased market demand for healthy, selenium-rich grains such as oats. Investigating the interaction effects between selenium (Se) and nitrogen (N) on oat grain amino acid composition and nutritional value could facilitate quality improvement, enabling

收稿日期:2025-04-02　　**修回日期**:2025-06-22
基金项目:山西省回国留学人员科研项目(2023-093);山西省现代农业产业技术体系建设专项(2025CYJSTX18-22);山西省现代农业杂粮产业技术体系(2024CYJSTX03-03)
作者简介:马祥和,硕士,研究方向:燕麦旱作栽培,E-mail:13973594024@163.com
*通信作者:杨珍平(ORCID:0000-0003-2991-3674),教授,博士生导师,E-mail:yangzhenping340@163.com

production of Se-sufficient oats with higher protein content and superior amino acid profiles. [Methods] Using the oat cultivar 'Jinyan 19' as the test material, a field experiment employed a randomized block design in 2022 and 2023. Treatments included control group (CK, no fertilization), Se (150 g/hm^2), N (240 kg/hm^2), and Se+N (Se: 150 g/hm^2, N: 240 kg/hm^2). Grain protein and amino acid composition were analyzed at different post-anthesis stages to determine accumulation patterns under different fertilization treatments. [Results] Compared to CK, Se+N co-application increased grain protein content by 18.9%~24.7% and total amino acid content by 8.5%~48.9%, outperforming individual N or Se treatments. Among 16 detected amino acids, all except tyrosine showed highest two-year average concentrations under Se+N, followed by N application alone. Sole Se application only increased valine, tyrosine, and cystine levels. Nutritional evaluation indicated that Se+N treatment produced amino acid ratios closer to ideal protein standards, enhanced ratio analysis of amino acids (RAA) scores for multiple essential amino acids, and increased Essential Amino Acid Index (EAAI) from 0.45 to 0.66 (Year 1) and 0.68 to 0.75 (Year 2), surpassing individual treatments. This demonstrates that the Se+N co-application improved the amino acid composition in oat grains more effectively than single-element treatments. [Conclusion] Compared single Se or N application, Se+N treatment better enhanced grain protein content and amino acid accumulation, particularly promoting the content of limiting amino acids such as lysine, effectively optimizing the amino acid composition and protein nutritional value of 'Jinyan 19' oat grains, suggesting that Se+N co-application represents an effective agronomic strategy for quality-oriented oat production.

Keywords: Selenium-nitrogen interactions, Oats, Amino acid composition, Amino acid nutritional evaluation, Limiting amino acids

燕麦(*Avena sativa* L.)是一种富含膳食纤维、亚油酸与β-葡聚糖等功能性成分的重要杂粮作物[1],具有降低人体血浆胆固醇水平、防止粥动脉硬化等多方面的健康功效[2]。相较于其它谷类作物,燕麦籽粒中的蛋白质含量更高,通常为11.3%~19.8%,且籽粒中必需氨基酸和非必需氨基酸含量更均衡[3],因此燕麦又被誉为"优质蛋白谷物资源"[4]。谷物蛋白质品质不同会影响动物对蛋白质与氨基酸等营养的消化率,高蛋白大麦的氨基酸消化率比低蛋白品种提升15%~20%[5],动物试验证明,低质量谷物蛋白如赖氨酸缺陷蛋白的长期摄入会导致血浆支链氨基酸浓度异常升高,诱发胰岛素抵抗[6]。食物中蛋白质的营养价值很大程度取决于其中必需氨基酸的组成和浓度,必需氨基酸的平衡性或不同氨基酸的理化特性等均会影响蛋白质品质,如蛋白质中疏水性氨基酸的比例便能直接影响其溶解性与热稳定性[6-7]。根据联合国粮农组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)评分模式的标准,赖氨酸在大多数谷类作物(如水稻[8]、燕麦[9]等)的必需氨基酸组成中含量最低,被广泛认定为第一限制性氨基酸。限制性氨基酸的含量高低影响着生物对蛋白质的整体吸收效率,在动物与人体的生长发育中不可或缺[10-11],并关系着燕麦蛋白质的营养价值。因此,丰富作物籽粒的限制性氨基酸如赖氨酸含量,对发展优质燕麦生产、减轻部分人群因氨基酸摄入量不足而导致的营养不良症状至关重要。通过施肥等栽培措施可以优化作物蛋白质和氨基酸水平,一项为期28年的长期定位试验显示,有机肥与化肥的配施可以显著提升蛋白质含量与加工品质[12]。例如,羊粪的施用可使藜麦必需氨基酸指数(EAAI)从0.72提升至0.85,并使其赖氨酸和异亮氨酸含量提升25%~30%[13]。

氮(N)素是大田作物栽培必需的矿质元素,作为蛋白质和氨基酸的重要组成成分参与植物代谢过程[14]。适量施用N肥可为植株提供充足N源以刺激氨基酸与蛋白质的正向积累[15],还可通过调控疏水氨基酸合成,改善植株蛋白质结构特性,提高必需氨基酸占总氨基酸的比例[16]。研究发现施N后夏花生荚果内的各氨基酸含量得到不同程度提升,与不施N比较,施N后其籽粒总氨基酸含量2年的平均增幅达到10.08%[17]。施N在增加燕麦籽粒N含量的同时也提升其必需氨基酸浓度,以及谷氨酸、天冬氨酸等非必需氨基酸含量[18],对燕麦补施N肥后,N素用量的增加同样会促成燕麦籽粒中谷氨酸、苏氨酸、缬氨酸、精氨酸等上调[19]。

硒(Se)肥的施用能提升谷物籽粒Se含量[20],缓解因Se摄入不足而导致的微量营养素缺乏症(MNDs)[21]。叶面施Se和Se拌种均可增加大豆籽粒总氨基酸量[22],灌施富Se沼液生产出的小麦面粉与施用复合肥相比,其氨基酸总量与评分分别提升26.2%和20.6%[23]。合理施Se可显著提

升裸燕麦籽粒蛋白质含量,增加总氨基酸及必需氨基酸的积累,并促进非必需氨基酸(如谷氨酸、脯氨酸)的生物合成[24],增加不同燕麦品种籽粒总氨基酸、必需氨基酸、苯丙氨酸及赖氨酸含量[9]。

Se肥与高浓度N肥的配合施用能促进水稻籽粒中碳水化合物、Se和蛋白质含量的显著提升[25],叶面Se肥配施尿素与单施尿素相比,小麦的贮藏蛋白组分含量也明显增加[26],说明Se+N肥联合施用也对蛋白质有较好促进作用,但Se+N肥的联合施用对燕麦及其它谷物氨基酸的影响鲜见报道。为探究Se+N互作是否能优化燕麦籽粒氨基酸组成与影响不同灌浆阶段燕麦籽粒氨基酸的含量,以及燕麦籽粒氨基酸含量对Se+N互作效应响应的年际变化,本研究以山西晋北育成品种'晋燕19'为材料,以不施肥为对照,探讨单施N肥、单施Se肥及Se+N互作下燕麦籽粒氨基酸含量的差异,旨在明确Se+N互作对燕麦籽粒蛋白质品质与氨基酸组成含量的作用,为生产足Se、高蛋白和优质氨基酸的燕麦提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概述

于2022年和2023年的5-10月,即燕麦生育期,在山西省大同市左云县管家堡乡张果窑村(40°8′33″ N,112°44′22″ E)开展田间试验。试验区位于塞北高原,平均海拔超过1200 m,为典型温带半干旱大陆性季风气候区,年均气温6.1 ℃、日照时数2 763.8 h、降水量399.0 mm、无霜期125 d[27]。试验区土壤为淡栗褐土,播前0~20 cm土壤理化性质见表1,试验期间降水与温度见图1。

表1 燕麦播前0~20 cm土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of 0~20 cm soil before oat sowing

年份 Year	pH	有机质/(g/kg) TOM	全氮/(g/kg) Total N	速效氮/(mg/kg) NH_4OAc-N	速效磷/(mg/kg) NH_4OAc-P	速效钾/(mg/kg) NH_4OAc-K	总硒/(μg/kg) Total Se
2022	8.04	8.27	0.54	36.40	7.46	81.08	74.89
2023	8.17	12.90	0.64	43.68	6.58	105.37	86.34

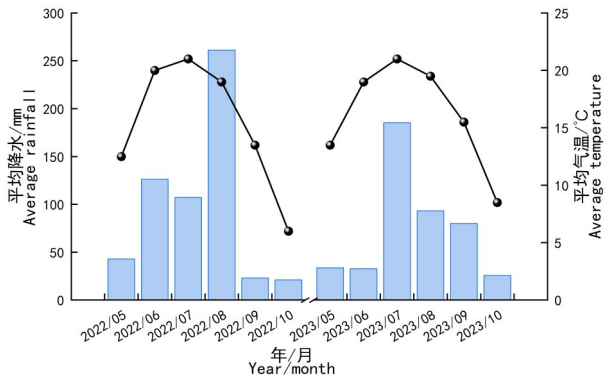


图1 试验期平均降雨量和平均气温

Fig.1 Average rainfall and temperature during the testing period

1.2 试验材料

参试燕麦品种为'晋燕19',由山西省农业科学院高寒区作物研究所提供。该品种抗倒抗病、耐旱耐瘠、适应性好,生育期100 d,株高110 cm,侧散穗型,适宜旱平地栽培。

供试肥料:氮肥为尿素(N占46.7%);硒肥为分析纯Na_2SeO_3;磷肥为过磷酸钙(P_2O_5占16%);钾肥为硫酸钾(K_2O占52%)。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计。设播前单施氮肥(N:240 kg/hm²)、单施硒肥(Se:150 g/hm²)、硒氮肥配施(Se:150 g/hm²+N:240 kg/hm²)和对照CK(不施Se与N肥)共4个处理(Se肥和N肥施用量参考前期梯度试验[28],该施用量下'晋燕19'地上部植株Se、N积累与产量表现最佳),每个处理4次重复,共16个试验小区,小区面积30 m²(6 m×5 m),各处理间设1 m宽隔离区。基施N肥和Se肥,基施120 kg/hm²过磷酸钙和60 kg/hm²硫酸钾。播量为120 kg/hm²,条播,播深3~4 cm,行距25 cm,其它田间管理遵循当地常规措施,人工拔除杂草。花后42 d获取燕麦成熟期籽粒样品,分别于2022年8月15日-9月19日和2023年7月29日-9月3日收集燕麦籽粒。收获后的籽粒样品常温保存备用,集中送至上海安谱实验科技股份有限公司进行氨基酸检测。

1.4 籽粒蛋白质和氨基酸含量测定

采用H_2SO_4-H_2O_2靛酚蓝比色法测定籽粒含N

量[29],根据含N量计算籽粒总蛋白质含量(含N量×5.83)。参考do Nascimento[30]和Lu[31]的方法,使用高效液相色谱仪(1260型,Agilent,美国)测定16种水解氨基酸含量(色氨酸除外)。氨基酸标准品购于上海安谱实验科技股份有限公司。色谱条件为色谱柱:C18 SHISEIDO(4.6 mm×250 mm×5 μm),进样量10 mL,柱温40 ℃,波长254 nm;流动相A:0.1 mol/L无水乙酸钠:乙腈=97:3(体积比),混匀后调pH至6.5(31.815 g乙酸钠+3880 mL水+120 mL乙腈);流动相B:乙腈:水=80:20;流动相梯度见表2。称取0.6 g样品于50 mL水解管,加入20 mL 1:1配置的HCl溶液,放入电热鼓风干燥箱,110 ℃水解22~24 h。取出冷却后,转移至25 mL比色管中定容。准确称取100 μL样品溶液于15 mL离心管中,放入真空干燥箱,60 ℃干燥2 h(将溶剂全部烘干),离心管中充N_2,准确加入50 μL衍生试剂(乙醇:异硫氰酸苯酯:水:三乙胺=7:1:1:1),现用现配,配制时充N_2,常温下衍生30 min,加入流动相A定容到0.5 mL,混匀,过0.45 μm有机膜,上机测定。

表2　流动相梯度

Table 2　Mobile phase gradient

时间/min Time	流速/(mL/min) Flow rates	流动相A/% Mobile phase	流动相B/% Mobile phase
0.0	1.0	100	0
14.0	1.0	85	15
29.0	1.0	66	34
30.0	1.0	0	100
37.0	1.0	0	100
38.0	1.0	100	0
45.0	1.0	100	0

1.5　统计分析

1.5.1　氨基酸与氨基酸相关指数计算公式

水解氨基酸含量计算公式如下:

$$W=\frac{(C-C_0)\times V\times N}{m} \tag{1}$$

式中,W为样品中氨基酸含量(mg/kg);C为样品测定液中氨基酸的浓度(mg/L);C_0为空白对照中目标物的浓度(mg/L);V为定容体积(mL);N为稀释倍数;m为样品质量(g)。

氨基酸营养评价指标必需氨基酸指数(EAAI)、氨基酸指数(RAA)、氨基酸比值系数(RC)、氨基酸比值系数分(SRC)计算公式如下[32]:

$$EAAI=\sqrt[n]{\frac{Leu^a}{Leu^b}\times\frac{Val^a}{Val^b}\times\ldots\times\frac{Lys^a}{Lys^b}\times\frac{His^a}{His^b}} \tag{2}$$

式中,Leu^a、Val^a、…、His^a为样品必需氨基酸含量;Leu^b、Val^b、…、His^b为标准模式中必需氨基酸含量;n为EAA(必需氨基酸)个数(本研究中n=7)。

$$RAA=\frac{\text{必需氨基酸含量}}{\text{标准模式(FAO/WHO)中对应的氨基酸含量}} \tag{3}$$

标准模式值采用FAO和WHO推荐的符合人体需要的8种必需氨基酸模式值[13]。

$$RC(mg/g)=\frac{\text{某必需氨基酸RAA}}{\text{各种氨基酸RAA平均值}} \tag{4}$$

$$SRC=(100-CV)\times 100 \tag{5}$$

式中,CV为被测样品中RC值标准差除以平均值。

1.5.2　数据分析与绘图

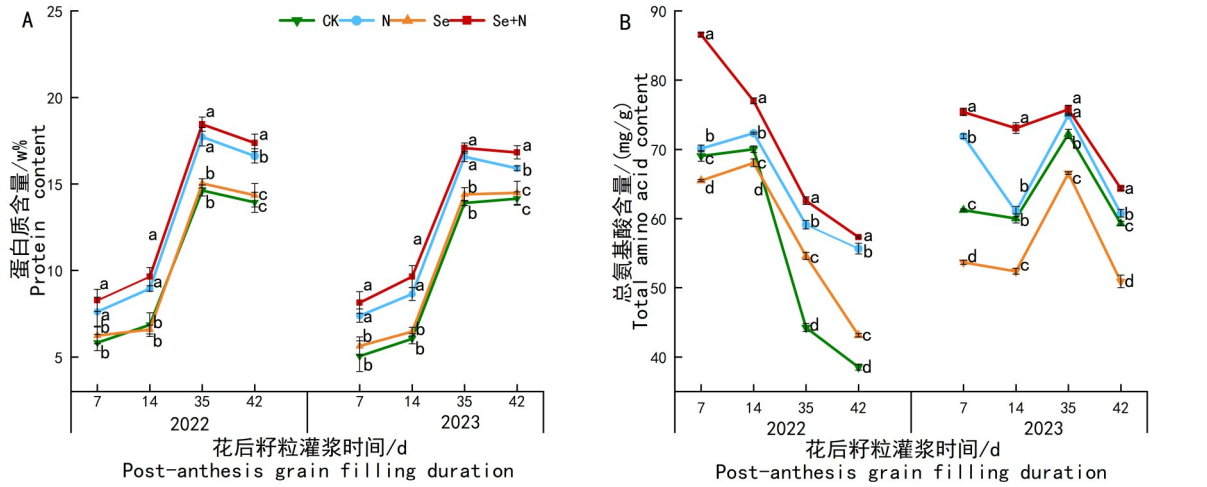
用Excel 2019软件整理数据,用SPSS 27软件进行方差分析,用最小显著性差异法(LSD)分析差异显著性,用Origin 2024软件绘图。

2　结果与分析

2.1　燕麦籽粒蛋白质、总氨基酸及8种代表性氨基酸的积累动态

燕麦籽粒蛋白质积累动态见图2A,随灌浆阶段推进,种植第1、2年的燕麦籽粒蛋白质含量均在花后7~14 d缓慢增长,在花后14~35 d快速增长,在花后35 d达到峰值,最终在花后35~42 d缓慢降低,呈先升高后降低的变化趋势,积累动态近似“S”型。

燕麦籽粒氨基酸含量的积累动态(图2B)与蛋白质含量积累动态不同,且2年间存在差异。种植第1年籽粒总氨基酸含量随灌浆阶段发展呈与蛋白质积累相反的倒“S”型,而第2年燕麦籽粒总氨基酸含量在灌浆至成熟期呈“降-升-降”的变化趋势。与CK相比,施N与Se+N互作在花后各阶段均有效提升了籽粒的蛋白质与总氨基酸积累,其



CK:对照处理(不施N肥与Se肥);N:单施N肥;Se:单施Se肥;Se+N:施Se肥+施N肥;图3~图5、表3、表4同。小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$)

CK: Control treatment (no Se or N application); N: N fertilizer only; Se: Se fertilizer only; Se+N: Se+N fertilizer application; The same as Fig. 3 to Fig. 5, Table 3, and Table 4. Lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among treatments within the same period

图2 不同施肥处理下花后燕麦籽粒蛋白质与总氨基酸积累动态

Fig.2 Dynamics of protein and total amino acid accumulation in oat grain in different fertilization treatments after flowering

中Se+N互作对蛋白质与总氨基酸积累提升更大,而施Se无显著提升。

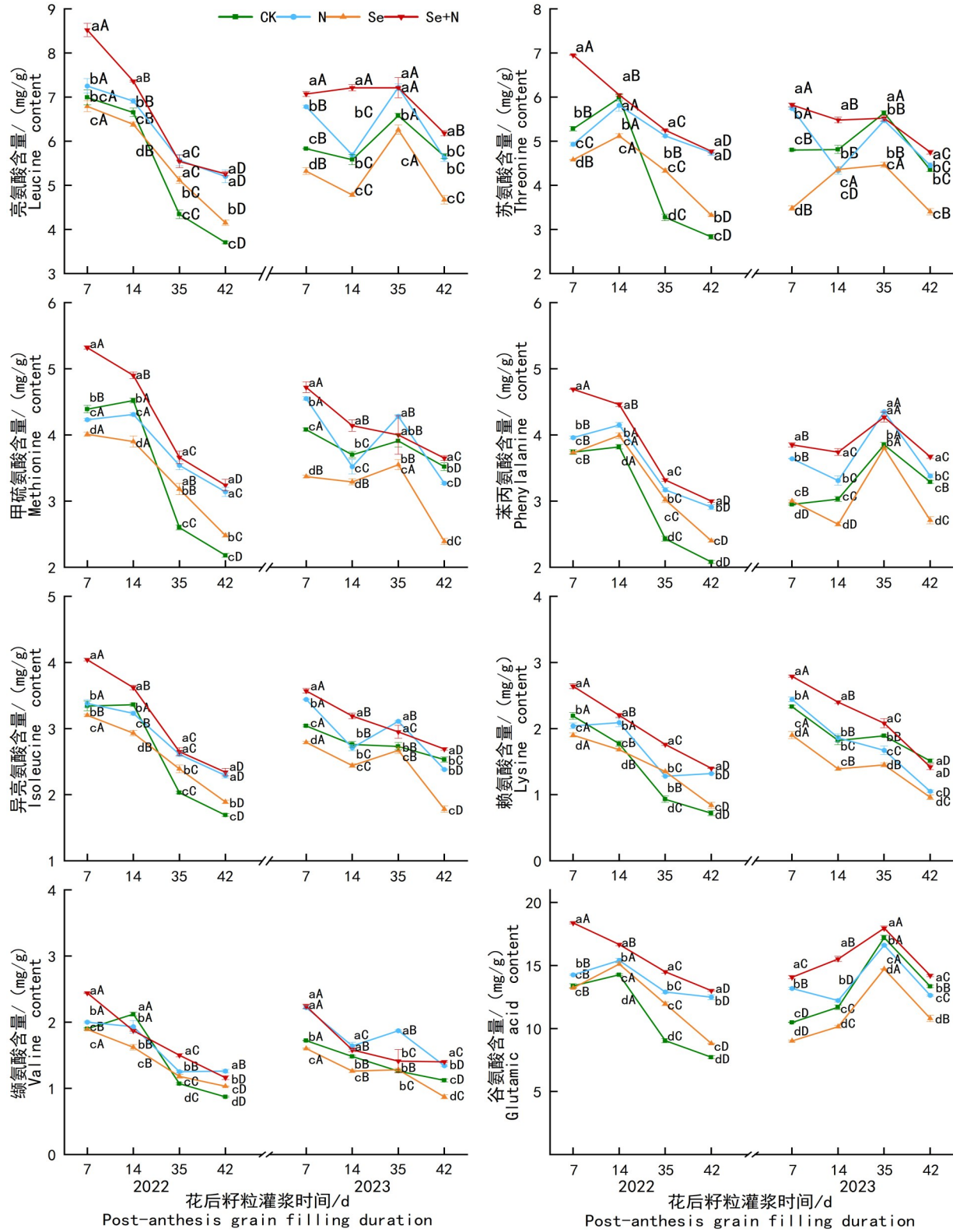
为进一步探究花后籽粒不同氨基酸类型的积累动态,选择7种人体必需氨基酸和非必需氨基酸中含量最高的谷氨酸进行比较(图3)。结果表明,燕麦籽粒中各必需氨基酸与谷氨酸的积累动态整体与总氨基酸积累趋势(图2B)类似,种植第1年8种氨基酸含量在花后14~42 d快速下降,种植第2年8种氨基酸含量随生育期推进下降速率较慢,花后35 d起各氨基酸积累量有短暂提升趋势(赖氨酸除外)。与CK相比,施N后籽粒8种氨基酸含量仅在第1年的灌浆阶段有一定程度的提升,而在第2年花后42 d甚至呈下降趋势;施Se在第1年表现为籽粒8种氨基酸含量在灌浆末期提升明显,而在第2年不同氨基酸在灌浆阶段的积累量显著降低;只有Se+N互作对连续2年籽粒中的8种氨基酸含量(苏氨酸、赖氨酸与缬氨酸的部分时期除外)积累都有显著提升($P<0.05$)。

2.2 燕麦成熟期籽粒蛋白质、总氨基酸含量与各氨基酸含量

由图4A可见,连续2年的试验中,燕麦籽粒蛋白质与氨基酸含量均在不同处理间差异显著。对比CK,施N与Se+N互作后燕麦成熟期籽粒蛋白质含量显著提升($P<0.05$)。施N处理下籽粒蛋白质含量提升12.4%~19.2%,Se+N处理下蛋白质含量提升18.9%~24.7%,施Se处理下蛋白质含量与CK差异不显著。

由图4B可见,对比CK,施N与Se+N互作在2年中均显著促进燕麦籽粒总氨基酸含量的提高($P<0.05$),施N处理下籽粒总氨基酸含量提升2.5%~44.5%,Se+N处理下总氨基酸含量提升8.5%~48.9%;施Se在第1年提升总氨基酸含量12.0%,而在第2年总氨基酸含量下降14.1%。总必需氨基酸含量对不同施肥处理的响应具有年际差异,与CK相比,仅Se+N互作下籽粒总必需氨基酸含量连续2年都有显著提升($P<0.05$),增幅为8.1%~50.5%。施N表现为第1年总必需氨基酸含量提升48.3%,第2年降低2.2%;施Se表现为第1年总必需氨基酸含量提升14.5%,第2年降低23.6%。总的来说,燕麦成熟期籽粒蛋白质、总氨基酸和总必需氨基酸含量均为Se+N互作后提升最高,其次是施N处理。

进一步测定燕麦籽粒中16种氨基酸含量发现(图5),对比CK,除施N后的组氨酸外,施N或Se+N互作下籽粒中7种必需氨基酸和8种非必需氨基酸2年平均含量均显著提升($P<0.05$),其中Se+N互作较施N对籽粒各氨基酸提升幅度更大。与施N相比,Se+N互作下亮氨酸、苏氨酸、



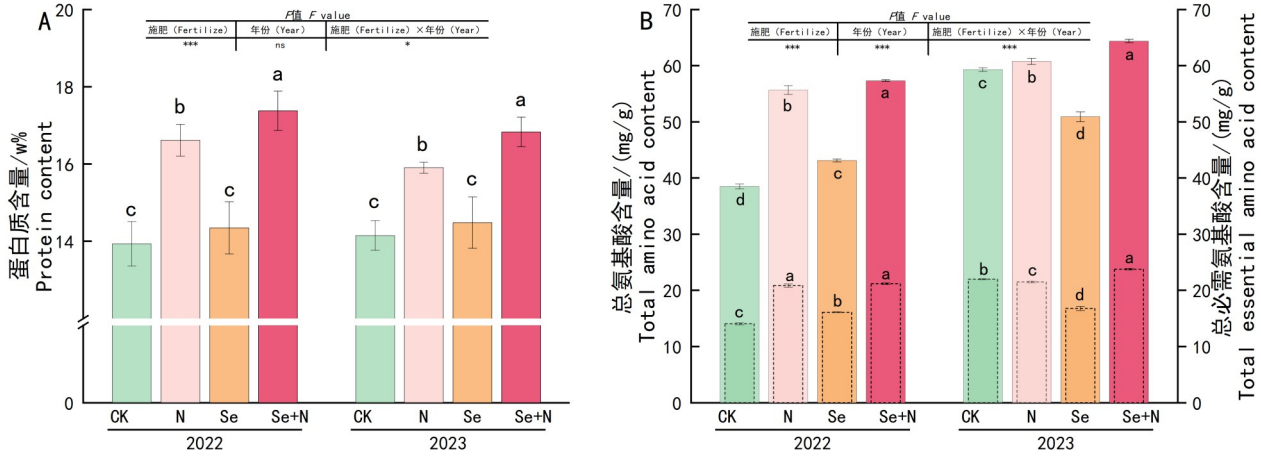
除谷氨酸外,其余7种氨基酸皆为必需氨基酸。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著,不同大写字母表示同一处理不同时期间差异显著($P<0.05$)

Except for glutamic acid, all the others are essential amino acids. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same time point, while different uppercase letters indicate significant differences across time points for the same treatment ($P<0.05$)

图3　不同施肥处理下燕麦籽粒花后8种代表性氨基酸积累动态

Fig.3　Dynamics of post-flowering accumulation of various amino acids in oat grain under different fertilization methods

甲硫氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、赖氨酸、谷氨酸、天冬氨酸、组氨酸、甘氨酸、精氨酸2年平均含量分别显著提升5.7%、3.6%、7.5%、5.9%、7.6%、18.9%、8.4%、2.9%、22.5%、7.4%、7.3%($P<0.05$)。而施Se后籽粒中氨基酸含量较对照降低或差异不显著(酪氨酸、胱氨酸除外),可能主要是第2年施Se后籽粒各氨基酸积累大幅度减少造成的。在各必需氨基酸中,亮氨酸含量最高,其次是苏氨酸和甲硫氨酸含量。与CK相比,Se+N互作后亮氨酸2年平均含量提升22.3%,苏氨酸2年平均含量提升32.6%,甲硫氨酸2年平均含量提升21.0%。更重要的是,从籽粒中的限制性氨基酸来看,与CK相比,Se+N互作下异亮氨酸、赖氨酸与缬氨酸2年平均含量分别提升19.1%、26.5%和28.5%。在各非必需氨基酸中,谷氨酸含量最高,与CK相比,Se+N互作下其含量提升29.2%,且占比达总氨基酸含量20%以上。



不同小写字母代表不同施肥处理间的显著差异($P<0.05$),n=3。表格中为施肥、年份、施肥与年份间交互作用的方差分析,*,**,***和ns分别表示$P<0.05$,$P<0.01$,$P<0.001$和$P>0.05$。实线柱形代表总氨基酸含量,短划线柱形代表总必需氨基酸含量

Different lowercase letters denote significant differences among fertilization treatments ($P<0.05$), n=3. The table shows the analysis of variance (ANOVA) for fertilizer, year, and their interaction effect. *, **, *** and ns indicated $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ and $P>0.05$. The borderless bars represent the total amino acid content, while the hatched bars represent the total essential amino acid content

图4 成熟期燕麦籽粒蛋白质,总氨基酸和总必需氨基酸含量

Fig.4 The protein content, total amino acids, and total essential amino acids in mature oat grains

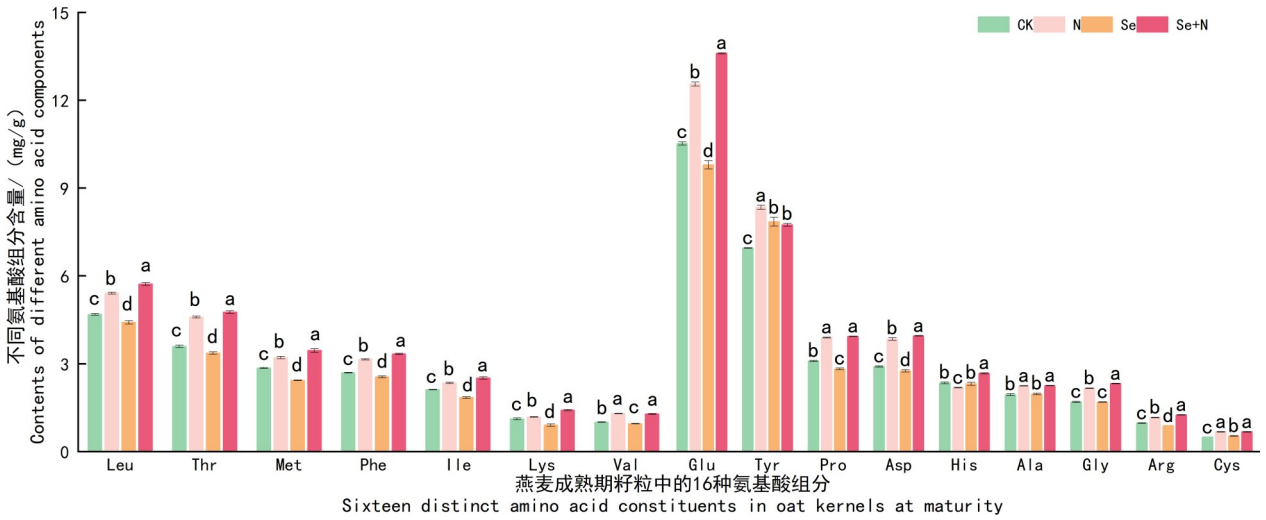
2.3 不同处理下燕麦成熟期籽粒理想蛋白模型与营养评价

2.3.1 燕麦籽粒理想蛋白模型

将燕麦成熟期籽粒中各必需氨基酸与FAO/WHO氨基酸模式值及理想蛋白质标准进行对比分析,结果如表3所示,燕麦籽粒中RAA值与FAO/WHO氨基酸要求值相差较大。相比不施肥处理下的燕麦籽粒RAA值,第1年籽粒各氨基酸RAA值在3种施肥处理后均显著提升($P<0.05$),而第2年燕麦籽粒大多数氨基酸(赖氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸组合除外)RAA值仅在Se+N互作后仍显著提升($P<0.05$)。而从理想蛋白质标准值看,该燕麦籽粒的氨基酸比例与理想蛋白质标准接近。与不施肥处理相比,第1年3种施肥处理均显著提升燕麦籽粒的E/T值和E/N值($P<0.05$),而第2年燕麦籽粒的E/T值和E/N值在单施Se、N后显著下降($P<0.05$)。

2.3.2 燕麦籽粒氨基酸营养评价

将燕麦籽粒氨基酸在不同处理下的结果进行比较发现(表4),种植第1年,施N显著提高赖氨酸、甲硫氨酸+胱氨酸组合、苏氨酸、缬氨酸的RC值、SRC值和EAAI值,Se+N互作显著提高亮氨酸、赖氨酸,甲硫氨酸与胱氨酸组合、苏氨酸的RC值、SRC值和EAAI值,施Se仅对缬氨酸的RC值、SRC值和EAAI值有显著提升效果。种植第2年的结果显示,施N显著提高苯丙氨酸+酪氨酸、缬氨酸的RC值,SRC值显著下降,EAAI值无明显变化;施Se显著提高第2年苯丙氨酸+酪氨酸组合的RC值,而SRC值和EAAI值显著下降;Se+N互作显著提高第2年苯丙氨酸与酪氨酸、缬氨酸



必需氨基酸:Leu—亮氨酸,Thr—苏氨酸,Met—甲硫氨酸,Phe—苯丙氨酸,Ile—异亮氨酸,Lys—赖氨酸,Val—缬氨酸。非必需氨基酸:Glu—谷氨酸,Tyr—酪氨酸,Pro—脯氨酸,Asp—天冬氨酸,His—组氨酸,Ala—丙氨酸,Gly—甘氨酸,Arg—精氨酸,Cys—胱氨酸。小写字母表示同种氨基酸在不同处理下的显著差异($P<0.05$)

Essential amino acids: Leu—Leucine, Thr—Threonine, Met—Methionine, Phe—Phenylalanine, Iso—Isoleucine, Lys—Lysine, Val—Valine. Non—essential amino acids: Glu—Glutamate, Tyr—Tyrosine, Pro—Proline, Asp—Aspartic acid, His—Histidine, Ala—Alanine, Gly—Glycine, Arg—Arginine, Cys—Cystine. Lowercase letters on the columns indicated significant differences among the different treatments under the same amino acid ($P<0.05$)

图5　不同施肥处理下2年燕麦成熟期籽粒的不同氨基酸组分平均含量

Fig.5　Mean contents of different amino acid fractions in oat grains at maturity under different fertilization treatments across two years

的RC值,SRC值显著下降,但幅度不大,EAAI值显著提升($P<0.05$)。同时从RC值来看,'晋燕19'籽粒的第1、2、3限制性氨基酸分别为赖氨酸,缬氨酸与异亮氨酸。综合来看,Se+N互作对燕麦籽粒的营养价值强化效果更加稳定。

3　讨论

3.1　硒氮互作提升燕麦籽粒不同灌浆阶段蛋白质、总氨基酸及各氨基酸的积累量

研究表明,小麦器官内的游离氨基酸含量与籽粒的蛋白质含量呈显著正相关关系[33],籽粒及营养器官中游离氨基酸的充足供应,是蛋白质生物合成必要的前体物质基础。本研究中,随灌浆阶段推进,种植第1、2年燕麦籽粒蛋白质含量均呈先升高后降低趋势(图3),与籽粒氨基酸含量的积累动态相似,反映了燕麦籽粒内氨基酸向蛋白质转化的动态过程。

燕麦籽粒不同灌浆阶段的蛋白质在Se+N互作下最高,其次是单施N肥;籽粒不同灌浆阶段的总氨基酸积累在不同施肥处理下同样以Se+N互作最高,施N次之,施Se在种植第1年对籽粒氨基酸含量的积累提升具有一定作用,但在第2年籽粒的氨基酸积累呈现显著降低的趋势。这可能是由于籽粒进入灌浆阶段之前的降水过多(2023年7月降水量达185.38 mm)改变土壤氧化还原状态从而降低了Se的生物有效性。Zhou等[34]发现相较于适度干旱的土壤,淹水处理后的土壤中Se^{4+}急剧减少,转化成了生物有效性更低的Se形态或不溶性Se,说明灌浆前过量的降水可能使土壤中的Se转化成了生物有效性更低的形态或不溶性Se,从而间接影响了籽粒氨基酸的合成。

种植第1年和第2年的燕麦籽粒氨基酸积累动态存在明显年际差异,除去基因型与提取方法造成的区别外,这种年际差异还可能与pH值、土壤水肥、气温等多种环境因素的影响有关[4,35-36]。有研究表明,同等施N条件下,灌溉水分更多的成熟期植株N素积累量高于干旱条件下的植株,肥料利用效率也更高[37-38]。2022年8月降雨量达到261.33 mm,但2023年8月降雨量为93.91 mm,即种植第1年燕麦扬花与灌浆时期降水更多,可能一定程度上提高了土壤内肥料尤其是N肥的积累量和利用效率,使第1年燕麦籽粒总氨基酸含量在花后14 d前保持在更高的水平。但过多的降雨也有可能造成作物减产降质,燕麦生长后期的灌水过

表3 参照FAO/WHO氨基酸模型与理想蛋白质标准比较不同施肥处理下燕麦籽粒各必需氨基酸含量

Table 3 The essential amino acid contents compared against the FAO/WHO amino acid pattern and ideal protein standard in oat grains under different fertilization treatments

时期 Time	处理 Treatments	氨基酸类型 Amino acid type							理想蛋白质标准 Ideal protein standard	
		Ile	Leu	Lys	Met+Cys	Phe+Tyr	Thr	Val	E/T	E/N
FAO/WHO标准模式值 FAO/WHO standard model value		4.00	7.00	5.50	3.50	6.00	4.00	5.00	40.00	60.00
2022	CK	0.42c	0.53c	0.13d	0.74c	1.38d	0.71c	0.17d	36.51c	57.50c
	N	0.57a	0.74a	0.24b	1.07a	1.59b	1.18a	0.25a	37.48a	59.95a
	Se	0.47b	0.59b	0.15c	0.84b	1.49c	0.83b	0.21c	37.35a	59.61a
	Se+N	0.58a	0.75a	0.25a	1.09a	1.64a	1.19a	0.23b	36.93b	58.55b
2023	CK	0.63b	0.81b	0.27a	1.17b	1.83d	1.09b	0.22c	37.07a	58.90a
	N	0.60c	0.80b	0.19c	1.14c	2.24a	1.11b	0.27b	35.38b	54.74b
	Se	0.45d	0.67c	0.17d	0.85d	1.98c	0.85c	0.17d	32.97c	49.18c
	Se+N	0.67a	0.88a	0.26b	1.26a	2.06b	1.19a	0.28a	36.92a	58.52a

注:表中原始数据见附表1。表格中不同数值为相应处理下燕麦籽粒各氨基酸的氨基酸指数得分(RAA)。Ile:异亮氨酸,Leu:亮氨酸,Lys:赖氨酸,Met+Cys:甲硫氨酸+胱氨酸组合,Phe+Tyr:苯丙氨酸+酪氨酸组合,Thr:苏氨酸,Val:缬氨酸;表4同。E/T表示总必需氨基酸含量/总氨基酸含量;E/N表示总必需氨基酸含量/总非必需氨基酸含量。同列不同小写字母表示同一种氨基酸在不同施肥处理下具有显著差异($P<0.05$)。

Note: The original data in the table can be found in Supplementary Table 1. The different values in the table represented the amino acid index scores (RAA) of each amino acid in oat grains under the respective treatments. Ile: Isoleucine, Leu: Leucine, Lys: Lysine, Met + Cys: Methionine + Cysteine, Phe + Tyr : Phenylalanine + Tyrosine , Thr: Threonine, Val: Valine; The same as Table 4 . E/T represented the ratio of total essential amino acids to total amino acids, while E/N denoted the ratio of total essential amino acids to total non-essential amino acids. Different lowercase letters within the same column indicated significant differences of the same amino acid content under different fertilization treatments at $P<0.05$ level.

表4 不同施肥处理中燕麦成熟期籽粒必需氨基酸的RC、SRC和EAAI值

Table 4 RC, SRC, and EAAI values of essential amino acids in oat grains at maturity under different fertilization treatments

时期 Time	处理 Treatments	RC							SRC	EAAI
		Ile	Leu	Lys	Met+Cys	Phe+Tyr	Thr	Val		
2022	CK	0.73a	0.91a	0.22b	1.26b	2.38a	1.21c	0.30b	32.39c	0.45c
	N	0.71a	0.92a	0.30a	1.33a	1.96c	1.47a	0.31a	42.54a	0.65a
	Se	0.72a	0.90a	0.23b	1.29b	2.27b	1.26b	0.32a	35.60b	0.51b
	Se+N	0.71a	0.92a	0.31a	1.33a	1.99c	1.46a	0.28c	41.65a	0.66a
2023	CK	0.73a	0.94a	0.32a	1.36a	2.12d	1.26a	0.26b	39.63a	0.68b
	N	0.66c	0.88c	0.21d	1.26b	2.47b	1.22b	0.30a	28.99c	0.68b
	Se	0.61dD	0.91b	0.24c	1.15c	2.70a	1.16c	0.24c	22.09d	0.53c
	Se+N	0.71b	0.94a	0.27b	1.34a	2.18c	1.26a	0.30a	38.06b	0.75a

注:表中原始数据见附表2。RC为氨基酸比值系数、SRC为氨基酸比值系数分、EAAI为必需氨基酸指数。同列不同小写字母表示同一种氨基酸在不同施肥处理下具有显著差异($P<0.05$)。

Note: The original data in the table can be found in Supplementary Table 2. RC is ratio coefficient, SRC is score of RC, EAAI is essential amino acid index. Different lowercase letters within the same column indicated significant differences of the same amino acid under different fertilization treatments at $P<0.05$ level.

量会降低水分的利用效率,不利于植株的干物质积累[39]。2022年9月降雨量骤降为23.1 mm,2023年9月降雨量为80.1 mm且与当年8月差距较小,种植第1年籽粒总氨基酸含量在花后14~35 d下降幅度更大,除灌浆末期部分干物质向碳水化合物与蛋白质等的合成途径转移外[40],另一个可能

就是因降水过多而导致籽粒干物质的稀释最终造成籽粒氨基酸含量降低,故而第1年成熟期籽粒的总氨基酸含量低于第2年。郑志松团队便发现灌水过多会导致冬小麦籽粒非必需氨基酸大幅下降[41],在水稻中也发现,灌浆期土壤水分的胁迫使得'籼稻汕优63'稻米的赖氨酸合成受阻最终导致赖氨酸含量显著降低[42]。因此,2年的降水量不同可能是导致燕麦籽粒氨基酸含量与积累动态具有年际差异的主要原因。

3.2　硒氮互作促进燕麦成熟期籽粒氨基酸与蛋白质含量提升

蛋白质是作物籽粒的重要成分之一,其含量的高低影响着谷物籽粒的营养价值与口感[43]。植物吸收N素同化为氨基酸后进一步合成蛋白质,氨基酸还是N素同化物的主要运输和存在方式[44],因此籽粒氨基酸的良好积累对蛋白质形成相当关键。许多研究表明,施N与施Se对作物氨基酸积累和蛋白质含量提升都具有正向作用。N素对粳稻灌浆期后籽粒与叶片中的游离氨基酸和蛋白质氨基酸具有显著正效益[35],施N可有效提升糙米和精米的蛋白质含量[45]。施Se通过增强谷子籽粒中苏氨酸、丙氨酸和天冬氨酸合成酶的活性,进而提高这些氨基酸及总氨基酸的水平[46],施150 g/hm^{2}的Se能使旱地玉米籽粒蛋白质含量提高7.34%[47]。本团队前期研究也发现,土施与叶施Se肥均有利于燕麦籽粒中赖氨酸、亮氨酸、谷氨酸和总氨基酸含量的提高[27]。而在本研究中,与CK相比,施N对成熟期燕麦籽粒氨基酸与蛋白质含量增加具有正效益,籽粒蛋白质含量提升12.4%~19.2%,总氨基酸含量2.5%~44.5%。施Se则使燕麦籽粒蛋白质含量提升2.4%~3.0%,种植第2年籽粒总氨基酸含量提升12.0%。

籽粒氨基酸为蛋白质的合成提供N素同化物的支持,3种施肥处理中,施N或施Se对籽粒蛋白质具有一定促进效果,但Se+N互作下籽粒总氨基酸、总必需氨基酸的含量最高,分别较对照提升8.5%~48.9%、8.1%~50.5%。而且,Se+N互作使成熟期燕麦籽粒蛋白质含量提升18.9%~24.7%,并且不同年份间差异较小,这说明Se+N联合施用对籽粒蛋白质与氨基酸含量的提升效果更好。Zhao等[48]研究Se+N互作在茶叶生长中的作用后发现,Se+N互作对茶叶成熟叶片的氨基酸含量提升效果强于单施。Se+N互作对籽粒氨基酸含量的优化作用,一方面体现在N肥的施用为植株生长提供充足N素,促进了植株对其它矿物质的吸收,还提升叶面积指数,促进了灌浆时期籽粒"源"的扩展[49],为植株吸收更多养分提供充足的动力库容。同时,N素通过调控硫同化途径关键酶活性,间接增强Se的吸收转运,如,水稻在施N后,其根中硫酸盐转运蛋白OsSULTR1.2表达量显著上调,而该蛋白对Se盐具有交叉亲和力,能够促进Se的跨膜吸收,从而间接促进根系Se吸收效率提升[25]。另一方面,Se肥的施用对N代谢中某些环节起正向作用,如促进植株的光合作用从而提升籽粒氨基酸的积累和品质提升。有研究表明,在N肥定量前提下,适量施Se能促进荞麦的净光合速率和光合指标的提升[50],是谷物品质提高的重要生理基础。同时Se也能通过上调硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶等N代谢关键酶的活性提高N素利用效率[51],一项关于花生的研究也表明施Se通过显著提升硝酸还原酶等N同化关键酶活性,从而促进N代谢,使土壤及水培花生的氨基酸增加[52]。Se还可以通过调节谷胱甘肽(GSH)代谢,增强谷氨酸等N同化中间产物的周转速率,进而减少N损失[53]。本文中Se+N互作对'晋燕19'燕麦籽粒氨基酸和蛋白质具有更好的改善效果可能正是Se与N素间的这种协同效果导致的。

燕麦籽粒中不同类型氨基酸含量的变化表明,Se+N互作对籽粒中人体必需氨基酸含量提升效果明显,与CK比较,除异亮氨酸外(19.1%),其余6种必需氨基酸含量均提升20%以上,其中苏氨酸含量提升幅度达32.6%,提升效果优于单施Se、N处理,可认为Se+N互作是一种能够有效提升燕麦籽粒必需氨基酸含量的农艺措施。籽粒各必需氨基酸中,亮氨酸含量最高,其在参与机体的多种器官组织的代谢、葡萄糖吸收、维持激素的正常分泌及肌肉蛋白的合成与免疫调节方面发挥作用,是一种重要的营养信号分子[54],来自谷物籽粒中丰富的亮氨酸可以维持人体有关代谢环节的正常运转。含量排在第2、3位的分别是苏氨酸与甲硫氨酸(蛋氨酸),二者对动物的免疫调节、蛋白质合成及细胞增殖生长与有关细胞分裂的化合物合成有重要作用[55-56]。燕麦籽粒的非必需氨基酸

组分中,谷氨酸含量最高且占总氨基酸含量的20%以上,因为谷氨酸作为核心氨基供体,为植物体内多种氨基酸的合成提供必需的氨基基团[57],常作为其它氨基酸合成的底物存在。谷氨酸有提高免疫细胞强度、兴奋神经元以强化记忆和学习过程、参与细胞骨架的构建与功能运行的功能[32],谷氨酸含量较高的蛋白质有助于提升肝脏糖原储备,优化骨骼肌的蛋白平衡[43]。与CK对比,Se+N互作同样表现出对谷氨酸含量显著的提升效果(29.2%),有研究显示更高的谷氨酸含量还有利于提高谷物的食味性[8],这意味着Se+N互作可能还对燕麦籽粒的食用口感具有改善效果。

3.3 硒氮互作优化燕麦籽粒氨基酸与蛋白质营养价值

燕麦籽粒必需氨基酸的比例与组成对燕麦籽粒蛋白质的品质有重要影响[32],籽粒内各氨基酸含量与比例的不同使处理间籽粒蛋白质三级结构的稳定性和凝胶特性具有差异,还会通过影响蛋白质二级结构的含量对蛋白质品质有所影响[3,16]。'晋燕19'属于晋北区常规燕麦品种,籽粒各必需氨基酸RAA值表现远低于其它高蛋白燕麦品种如'白燕2号'[9],且RAA值相比FAO/WHO氨基酸模型推荐值很低。但适当施肥的农艺措施能改善该品种籽粒氨基酸质量,尤其是Se+N互作后籽粒必需氨基酸RAA值整体提升效果较好,同时Se+N互作下E/T值和E/N值更接近理想蛋白质模式值,并与其它燕麦品种籽粒氨基酸研究中的E/T值35.08~38.37接近[58]。Se+N互作第1年的E/T值表现低于单施Se、N肥,是由于Se+N互作在提升燕麦籽粒必需氨基酸含量的同时也促进了非必需氨基酸含量的增长。根据氨基酸平衡理论,蛋白质的RC值越接近1、SRC值越接近100,说明其氨基酸组成合理且营养价值更高;EAAI值是样品所有必需氨基酸与标准蛋白质中总必需氨基酸的比值,越接近理想值1说明样品蛋白的氨基酸组成越均衡。结果表明,对比单施Se、N肥,Se+N互作对籽粒中RC和SRC值的整体提升效果最佳,与CK相比,Se+N互作下籽粒EAAI值2022年由0.45提升为0.66,2023年由0.68提升为0.75,更接近理想值1,优于单施Se、N效果。这些结果说明施加Se:150 g/hm^2+N:240 kg/hm^{2}的肥料,对燕麦籽粒氨基酸组分平衡与营养价值同样具有协同促进效应。

本研究发现,Se+N互作通过提升燕麦籽粒内限制性氨基酸的含量,从而提高了籽粒氨基酸的营养价值评分。在多种不同基因型燕麦籽粒氨基酸的测定中发现,赖氨酸、苏氨酸与蛋氨酸是大部分燕麦品种的第1、2、3限制性氨基酸[9-10,59-60],而本试验中燕麦籽粒第2、3限制性氨基酸为缬氨酸、异亮氨酸,这一差异可能是燕麦基因型的不同造成的。从本研究的结果看,赖氨酸是'晋燕19'中第1限制性氨基酸,这与众多关于谷物限制性氨基酸的研究结果一致,且受施肥方式的调控赖氨酸含量有所增加。赖氨酸在促进婴幼儿生长发育、保护神经系统损伤,增强机体免疫功能和抵抗力等方面发挥重要作用,作为骨胶原蛋白合成的必需因子还有助于预防骨质疏松[61],饮食中赖氨酸的缺乏则会导致人类、牲畜的营养不良,影响其背最长肌、股二头肌与肝脏的脂质代谢[62],而赖氨酸生物强化后的谷物有助于提升小鼠的生长性能与赖氨酸利用率[63]。Se+N互作后赖氨酸2年的平均含量提升了26.5%,这说明该处理能显著提升燕麦植物蛋白的营养价值。对水稻的研究中发现,N的供应会诱导氨基酸转运蛋白(如OsAAP15)的过表达,优先将谷氨酸和天冬氨酸从穗茎等转运至籽粒,提高必需氨基酸库容[64],并为必需氨基酸的合成提供基础,而Se的存在能通过激活植株的抗氧化系统、增强植物抗逆性、提升N利用效率等来提升必需氨基酸水平[65]。或许正是Se、N间的这种"协同"作用共同促进植株生长,进而激活氨基酸合成代谢过程中天冬氨酸家族合成与代谢途径的关键酶(天冬氨酸激酶、二氢毗考琳酸合酶等)活性,最终促进了燕麦籽粒内赖氨酸、苏氨酸、蛋氨酸和异亮氨酸的生物合成[8],提升了燕麦籽粒限制性氨基酸的水平。

4 结论

Se+N(150 g/hm^2+240 kg/hm^2)互作是一种可有效提升'晋燕19'燕麦籽粒氨基酸组分含量的施肥措施,Se+N互作下2年籽粒蛋白质含量平均提升21.8%,总氨基酸含量平均提升28.7%,对比单施Se、N肥,对籽粒蛋白质与氨基酸含量优化效果更强,同时促进了燕麦籽粒氨基酸营养价值的提升,并且提升了籽粒中的限制性氨基酸如赖氨

酸、缬氨酸等的含量,有望为生产更高品质的燕麦提供借鉴与参考,通过在其它燕麦品种甚至不同作物及不同类型土壤上进行进一步的验证,有望提供一种提升谷物氨基酸含量的新农艺策略。

附加材料:附表1(不同处理下燕麦籽粒的必需氨基酸含量原始数据与参照FAO/WHO标准模式值和理想蛋白质标准的计算值)、附表2(不同处理中燕麦成熟期籽粒必需氨基酸RC、SRC和EAAI值的差异分析)见中国知网增强出版内容。

参 考 文 献

[1]张靓,梁小玉,胡远彬,等.燕麦抗倒伏性研究进展[J].麦类作物学报,2024,44(1):74-81.
Zhang J,Liang X Y,Hu Y B,et al.Research progress on lodging resistance in oat[J].Journal of Triticeae Crops,2024,44(1):74-81.

[2]Ryan D,Kendall M,Robards K. Bioactivity of oats as it relates to cardiovascular disease[J]. Nutrition Research Reviews,2007,20(2):147-162.

[3]梁珍珍.基于氯化胆碱/二元醇的低共熔溶剂制备、理化性质及提取燕麦蛋白研究[D].西安:陕西科技大学,2022.
Liang Z Z. Fabrication, physicochemical properties of deep eutectic solvents and extraction of oat protein based on deep entetic solvents of choline chloride and dihydric alcohol[D].Xi'an:Shanxi University of Science and Technology,2022.

[4]岳健雄.脱脂预处理及低共熔溶剂体系组成对燕麦蛋白结构功能和理化性质的影响[D].西安:陕西科技大学,2021.
Yue J X. The influence of defatting pretreatment and different deep eutetic solvents on the structure, functionality and physicochemical properties of oat protein[D]. Xi'an; Shaanxi University of Science & Technology,2021.

[5]Buraczewska L, Schulz E, Schröder H. Ileal digestibility of amino acids in pigs fed barleys differing in protein content[J]. Archiv für Tierernaehrung,1987,37(10):861-867.

[6]Calvez J, Azzout-Marniche D, Tomé D. Protein quality, nutrition and health[J].Frontiers in Nutrition,2024,11:1406618.

[7]Zhou X X,Wang Y B,Pan Y J,et al. Differences in amino acids composition and coupling patterns between mesophilic and thermophilic proteins[J]. Amino Acids,2008,34(1):25-33.

[8]杨建昌,李超卿,江贻. 稻米氨基酸含量和组分及其调控[J].作物学报,2022,48(5):1037-1050.
Yang J C,Li C Q,Jiang Y.Contents and compositions of amino acids in rice grains and their regulation: a review[J]. Acta Agronomica Sinica,2022,48(5):1037-1050.

[9]张丽娜,杨文平,苏苗,等. 叶面施硒对燕麦籽粒营养品质的影响[J]. 作物杂志,2025(2):196-206.
Zhang L N,Yang W P,Su M,et al. Effect of foliar application of selenium on nutritional quality of oat grain[J]. Crops,2025(2):196-206.

[10]叶元土.以可消化蛋白质为基础的水产低蛋白质饲料发展方向与技术分析[J].饲料工业,2024,45(16):1-8.
Ye Y T. Development of low protein aquatic feed based on digestible protein[J]. Feed Industry,2024,45(16):1-8.

[11]朱志强,张巧娥,陶然,等.限制性氨基酸在奶牛生产中的应用研究进展[J].饲料研究,2023,46(9):139-142.
Zhu Z Q, Zhang Q E, Tao R, et al. Research progress on application of limiting amino acids in dairy cattle production[J]. Feed Research,2023,46(9):139-142.

[12]Lin Z A,Chang X H,Wang D M,et al. Long-term fertilization effects on processing quality of wheat grain in the North China Plain[J]. Field Crops Research,2015,174:55-60.

[13]González J A,Yousif S K M,Erazzu L E,et al. Effects of goat manure fertilization on grain nutritional value in two contrasting quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties cultivated at high altitudes[J]. Agronomy,2023,13(3):918.

[14]Liu S R,Cui S,Ying F Y,et al. 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.

[15]Liu J X,Zhang J W,Zhu G R,et al. Effects of water deficit and high N fertilization on wheat storage protein synthesis, gluten secondary structure, and breadmaking quality[J]. The Crop Journal,2022,10(1):216-223.

[16]Wan C X,Yu S P,Dang P F,et al. Nitrogen regulates the synthesis of hydrophobic amino acids to improve protein structural and gel properties in common buckwheat[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2023,253:126871.

[17]杨启睿,李岚涛,张潇,等.施氮对夏花生产量、品质及光温生理特性的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(4):627-639.
Yang Q R,Li L T,Zhang X,et al.Effect of nitrogen application on yield, quality and light temperature physiological characteristics of summer peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(4):627-639.

[18]Eppendorfer W H. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on amino acid composition and on relationships between nitrogen and amino acids in wheat and oat grain[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,1978,29(12):995-1001.

[19]Allwood J W,Martinez-Martin P,Xu Y,et al. Assessing the impact of nitrogen supplementation in oats across multiple growth locations and years with targeted phenotyping and high-resolution metabolite profiling approaches[J]. Food Chemistry,2021,355:129585.

[20]铁梅,韩杰,李宝瑞,等. 土壤施硒对燕麦硒含量及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2015,20(5):74-80.
Tie M,Han J,Li B R,et al. Effects of selenium fertilization on the selenium content, yield and quality of oat[J]. Journal of China Agricultural University,2015,20(5):74-80.

[21]Gashu D, Nalivata P C, Amede T, et al. The nutritional quality of cereals varies geospatially in Ethiopia and Malawi[J]. Nature,2021,594(7861):71-76.

[22]张久明,匡恩俊,宿庆瑞,等.外源施硒对土壤酶活性、大豆籽粒硒及氨基酸含量的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2022,19(5):106-113.
Zhang J M,Kuang E J,Su Q R,et al.Effects of exogenous

selenium application on soil enzyme activities, selenium and amino acid content of soybean seeds[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition),2022,19(5):106-113.

[23]刘明洋.喷施和灌施富硒沼液肥对小麦产量品质及硒强化效果的影响[D].武汉:华中农业大学,2023.
Liu M Y. Effect of spray and irrigation application of selenium-rich biogas slurry fertilizer on yield quality and selenium fortification effect of wheat [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023.

[24]李明,介晓磊,李建平,等.硒肥对莜麦常规养分和氨基酸变化规律的影响[J].草地学报,2012,20(6):1086-1092.
Li M, Jie X L, Li J P, et al. Effects of basal Se fertilizers on nutrition value and amino acid contents of naked oats[J]. Acta Agrestia Sinica,2012,20(6):1086-1092.

[25]Teixeira L S, Pimenta T M, Brito F A L, et al. Selenium uptake and grain nutritional quality are affected by nitrogen fertilization in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Cell Reports, 2021,40(5):871-880.

[26]Ismail M S, Nawaz F, Shehzad M A. Contributions of nitrogen metabolic enzymes in storage protein assimilation and mineral accumulation regulated by nitrogen and selenium in *Triticum aestivum* L[J].Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 221: 109597.

[27]Li J H, Yang W P, Guo A N, et al. Combined foliar and soil selenium fertilizer increased the grain yield, quality, total Se, and organic Se content in naked oats[J]. Journal of Cereal Science,2021,100:103265.

[28]张之玄,李军辉,张丽娜,等.硒氮配施对燕麦植株硒氮积累及根际土壤微生物群落与代谢物的影响[J].应用与环境生物学报,2023,29(5):1241-1252.
Zhang Z X, Li J H, Zhang L N, et al. Effects of combined application of selenium and nitrogen fertilizers on selenium and nitrogen accumulation in oat plants, rhizospheric soil microbial community, and metabolites[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2023,29(5):1241-1252.

[29]Hawkesford M J. Genetic variation in traits for nitrogen use efficiency in wheat[J]. Journal of Experimental Botany,2017, 68(10):2627-2632.

[30]do Nascimento T M T, Mansano C F M, Peres H, et al. Determination of the optimum dietary essential amino acid profile for growing phase of Nile Tilapia by deletion method [J]. Aquaculture,2020,523:735204.

[31]Lu P Y, Wang J, Wu S G, et al. Standardized ileal digestible amino acid and metabolizable energy content of wheat from different origins and the effect of exogenous xylanase on their determination in broilers[J]. Poultry Science, 2020, 99(2): 992-1000.

[32]卢冉,王炳智,田英姿. 不同品种杏仁氨基酸组成分析及综合评价[J]. 食品科学,2021,42(24):229-235.
Lu R, Wang B Z, Tian Y Z. Analysis and comprehensive evaluation of amino acid compositions of apricot seed kernels from different cultivars[J]. Food Science, 2021, 42(24): 229-235

[33]王月福,于振文,李尚霞,等.土壤肥力对小麦开花后各器官游离氨基酸和籽粒蛋白质含量变化的影响[J].麦类作物学报,2003,23(1):41-43.
Wang Y F, Yu Z W, Li S X, et al. Effect of soil fertility on change of free amino acid content and protein content in different organs[J]. Acta Tritical Crops,2003,23(1):41-43.

[34]Zhou X B, Li Y Y, Lai F. Effects of different water management on absorption and accumulation of selenium in rice [J]. Saudi Journal of Biological Sciences,2018,25(6):1178-1182.

[35]Zhao Y L, Xi M, Zhang X C, et al. Nitrogen effect on amino acid composition in leaf and grain of Japonica rice during grain filling stage[J]. Journal of Cereal Science,2015,64:29-33.

[36]孙强,郭永霞. 基于氨基酸含量的玉米品种品质综合评价[J]. 食品与机械,2022,38(3):38-43,50.
Sun Q, Guo Y X. Quality comprehensive assessment of different maize varieties based on aminoaicds content[J]. Food & Machinery,2022,38(3):38-43,50.

[37]Reis H P G, de Queiroz Barcelos J P, Junior E F, et al. Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality[J]. Journal of Cereal Science,2018,79:508-515.

[38]杨满红,刘锁云,李立军,等.水肥耦合对燕麦光合特性和产量的影响[J].华北农学报,2011,26(6):158-163.
Yang M H, Liu S Y, Li L J, et al. Influence of photosynthetic characteristics and yield in oats on coupling of fertilizer and irrigation [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(6): 158-163.

[39]刘锁云,陈磊庆,胡廷会,等. 水氮处理对燕麦功能叶衰老及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2012,32(4):706-710.
Liu S Y, Chen L Q, Hu T H, et al. Effects of water and nitrogen on senescence related physiological indexes of functional leaves and yield of oat[J]. Journal of Triticeae Crops,2012,32(4):706-710.

[40]蒋纪芸,张林生. 冬小麦籽粒氨基酸的形成规律及其调控研究[J]. 西北农业大学学报,1994,22(4):1-6.
Jiang J Y, Zhang L S. The formation law and control study of amino acids in grains of winter wheat [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 1994, 22(4):1-6.

[41]郑志松,王晨阳,牛俊义,等.水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(4):788-793.
Zheng Z S, Wang C Y, Niu J Y, et al. Effects of irrigation and fertilization coupling on protein and amino acids contents in grains of winter wheat[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011,19(4):788-793.

[42]蔡一霞,王维,朱庆森.水分胁迫对水稻籽粒蛋白质积累及营养品质的影响[J].植物生态学报,2007,31(3):536-543.
Cai Y X, Wang W, Zhu Q S.Effects of water stress on nutrient quality and accumulation of protein in rice grains[J]. Journal of Plant Ecology,2007,31(3):536-543.

[43]王洪露.不同氮肥水平对糜子籽粒蛋白质及淀粉调控效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
Wang H L. Study on the effects of different nitrogen fertilizer levels on the regulation of protein and starch in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) [D]. Yangling: Northwest A&F

University,2023.

[44]王月福,于振文,李尚霞,等.不同施肥水平对不同品种小麦籽粒蛋白质和地上器官游离氨基酸含量的影响[J].西北植物学报,2003,23(3):417-421.
Wang Y F, Yu Z W, Li S X, et al. The effects of different fertilization level on grain protein and free amino acid content of organs above ground of different wheat variety [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica,2003,23(3):417-421.

[45]Ning H F, Qiao J F, Liu Z H, et al. Distribution of proteins and amino acids in milled and brown rice as affected by nitrogen fertilization and genotype[J]. Journal of Cereal Science,2010,52(1):90-95.

[46]Liang K H, Liang S, Zhu H. Comparative proteomics analysis of the effect of selenium treatment on the quality of foxtail millet [J]. LWT,2020,131:109691.

[47]Wang L, Gao F, Zhang L G, et al. Effects of basal selenium fertilizer application on agronomic traits, yield, quality, and Se content of dryland maize [J]. Plants, 2022, 11(22): 3099.

[48]Zhao S X, Bai Y L, Jin Z, et al. Effects of the combined application of nitrogen and selenium on tea quality and the expression of genes involved in nitrogen uptake and utilization in tea cultivar 'Chuancha No. 2'[J]. Agronomy, 2023, 13(12):2997.

[49]王秀英.不同水氮条件对燕麦氮素吸收转运和积累的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2014,39(11):101-107.
Wang X Y. On effect of different water and nitrogen condition on nitrogen absorption, translocation and accumulation of oat [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition),2014,39(11):101-107.

[50]蔡天革,范宪荣,邵冉冉,等.氮硒配施对荞麦光合特性、产量和硒质量分数的影响[J].沈阳大学学报(自然科学版),2020,32(6):456-463.
Cai T G, Fan X R, Shao R R, et al. Effects of combined application of nitrogen and selenium on photosynthesis, yield and kernel selenium content of buckwheat [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science),2020,32(6):456-463.

[51]Rios J J, Blasco B, Rosales M A, et al. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2010,90(11):1914-1919.

[52]Cunha M L O, de Oliveira L C A, Silva V M, et al. Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry,2022,190:231-239.

[53]White P J. Selenium metabolism in plants[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects,2018,1862(11):2333-2342.

[54]Rehman S U, Ali R, Zhang H, et al. Research progress in the role and mechanism of Leucine in regulating animal growth and development[J]. Frontiers in Physiology,2023,14:1252089.

[55]王洪荣,季昀.氨基酸的生物活性及其营养调控功能的研究进展[J].动物营养学报,2013,25(3):447-457.
Wang H R, Ji Y. Advanced research in biological activities and functions of nutritional regulation of amino acids [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2013,25(3):447-457.

[56]王冉,周岩民. 动物蛋氨酸营养研究进展[J]. 粮食与饲料工业,1999(4):27-30.
Wang R, Zhou Y M. Research advance of methonine nutrition for animals[J]. Cereal & Feed Industry,1999(4):27-30.

[57]任红玉,白露,李昊阳,等.稀土对UV-B胁迫下大豆蛋白质含量和氨基酸组成的影响及营养评价[J].东北农业大学学报,2018,49(3):30-41.
Ren H Y, Bai L, Li H Y, et al. Effect of spraying rare earth on protein content and amino acid composition of soybean and nutritional evaluation under Ultraviolet-B Radiation [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(3): 30-41.

[58]王婧,李小平,刘柳,等. 燕麦等五种谷物的氨基酸含量综合评价[J]. 麦类作物学报,2019,39(4):438-445.
Wang J, Li X P, Liu L, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of amino acids of oat and other four crops[J]. Journal of Triticeae Crops,2019,39(4):438-445.

[59]卢士军,李泰,孙君茂,等. 香菇、杏鲍菇和金针菇的氨基酸组成与蛋白质含量评价[J]. 中国食用菌,2022,41(1):45-51.
Lu S J, Li T, Sun J M, et al. Amino acid composition and protein evaluation of *Lentinula edodes*, *Pleurotus eryngii* and *Flammulina velutipes*[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(1):45-51.

[60]徐向英,王岸娜,林伟静,等. 不同燕麦品种的蛋白质营养品质评价[J]. 麦类作物学报,2012,32(2):356-360.
Xu X Y, Wang A N, Lin W J, et al. Evaluation of the protein nutrition quality of oats from different regions[J]. Journal of Triticeae Crops,2012,32(2):356-360.

[61]Wu Z J, Chen T P, Sun W J, et al. Optimizing *Escherichia coli* strains and fermentation processes for enhanced L-lysine production: a review[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1485624.

[62]Kong F L, Bi Y L, Wang B, et al. Integrating RNA-sequencing and untargeted LC-MS metabolomics to evaluate the effect of lysine deficiency on hepatic functions in Holstein calves[J]. Amino Acids,2020,52(5):781-792.

[63]Yang Q Q, Zhao D S, Zhang C Q, et al. Lysine biofortification of crops to promote sustained human health in the 21st century [J]. Journal of Experimental Botany, 2022, 73(5): 1258-1267.

[64]Yang X Y, Yang G, Wei X L, et al. OsAAP15, an amino acid transporter in response to nitrogen concentration, mediates panicle branching and grain yield in rice[J]. Plant Science, 2023,330:111640.

[65]Ulhassan Z, Gill R A, Huang H F, et al. Selenium mitigates the chromium toxicity in *Brassicca napus* L. by ameliorating nutrients uptake, amino acids metabolism and antioxidant defense system[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2019,145:142-152.

(编辑:郭玥微)