农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

外源硒肥对藜麦生物学指标及其生理特性的影响

马艳雨, 杨再磊, 冯耀祖, 韩润强, 马文静, 阿迪莱·库尔班, 贾宏涛

引用本文:
马艳雨, 杨再磊, 冯耀祖, 等. 外源硒肥对藜麦生物学指标及其生理特性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1668–1678.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0787

农业资源与环境学报 2025, 42(6): 1668-1678 Journal of Agricultural Resources and Environment

马艳雨, 杨再磊, 冯耀祖, 等. 外源硒肥对藜麦生物学指标及其生理特性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1668-1678.
MA Y Y, YANG Z L, FENG Y Z, et al. Effects of exogenous selenium fertilizer on biological indexes and physiological characteristics of quinoa[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(6): 1668-1678.

开放科学 OSID

外源硒肥对藜麦生物学指标及其生理特性的影响

马艳雨[1], 杨再磊[1,2], 冯耀祖[3], 韩润强[1], 马文静[1], 阿迪莱·库尔班[1], 贾宏涛[1,2*]

(1.新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 3.新疆农业科学院科技成果转化中心, 乌鲁木齐 830091)

摘 要:为探究叶面喷硒对藜麦生长指标、产量、籽粒硒含量和生理特性的影响,明确更适合藜麦生长的外源硒浓度,本研究以藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)为材料,利用亚硒酸钠进行叶面喷施,设置硒浓度水平为0(喷清水,CK)、5(Se1)、10(Se2)、20(Se3)、30 mg·L^{-1}(Se4)和40 mg·L^{-1}(Se5)共6个处理,对其生长指标、产量、籽粒硒含量及生理指标进行了分析。结果表明,施硒7 d后,藜麦的株高和茎粗在Se4处理下增幅最大;成熟期藜麦的总生物量在Se4处理下最大;Se4处理的藜麦籽粒产量比CK处理显著高32.26%;Se4、Se5处理的藜麦籽粒硒含量较CK处理显著增加了247.39%和268.55%。Spearman检验发现,藜麦谷胱甘肽过氧化酶与过氧化物酶呈极显著的正相关关系;Mantel检验表明,类胡萝卜素、过氧化物酶、脯氨酸、谷胱甘肽过氧化酶活性与硒添加水平之间存在显著的正相关关系。综合分析表明,硒对藜麦的生理机能至关重要,硒通过渗透调节和清除有害的氧自由基等方式,增强了藜麦在生长后期抗衰老的能力,促进籽粒灌浆;同时叶面施30 mg·L^{-1}亚硒酸钠,对于提高藜麦的产量和籽粒硒含量效果最好。

关键词:藜麦;叶面喷硒;生理特性;亚硒酸钠;产量

中图分类号:S519 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2025)06-1668-11 **doi**: 10.13254/j.jare.2024.0787

Effects of exogenous selenium fertilizer on biological indexes and physiological characteristics of quinoa

MA Yanyu[1], YANG Zailei[1,2], FENG Yaozu[3], HAN Runqiang[1], MA Wenjing[1], ADILAI Kurban[1], JIA Hongtao[1,2*]

(1. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China; 3. Transformation Center of Scientific and Technological Achievements, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of leaf-applied selenium on the growth, yield, grain selenium content, and physiological characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and to identify the optimal exogenous selenium concentration for enhancing quinoa growth. Sodium selenite was applied via foliar spraying, with treatments including control group without selenium (0 mg·L^{-1}, CK) and five varying levels of selenium application: 5 (Se1), 10 (Se2), 20 (Se3), 30 mg·L^{-1} (Se4), and 40 mg·L^{-1} (Se5). Growth indices, yield, grain selenium content, and physiological parameters were analyzed. Results indicated that after 7 days of Se application, plant height and stem diameter exhibited the greatest increase under Se4 treatment. At maturity, total biomass was highest in plants treated with Se4. The grain yield for quinoa subjected to Se4 was found to be 32.26% greater than that of CK without any selenium application. Additionally, the seed selenium content for treatments Se4 and Se5 was observed to be 247.39% and 268.55% higher than that of CK, respectively. Spearman correlation analysis revealed a significant positive relationship between glutathione peroxidase activity and peroxidase levels in quinoa samples. Mantel test results demonstrated that activities related to carotenoids, peroxidase enzymes, proline accumulation, and glutathione peroxidase were positively correlated with supplemental selenium levels. Comprehensive analysis

收稿日期:2024-10-09 **录用日期**:2024-12-23

作者简介:马艳雨(1999—),女,新疆焉耆人,硕士研究生,研究方向为土壤与植物营养。E-mail:mayanyu777@163.com

***通信作者**:贾宏涛 E-mail:jht@xjau.edu.cn

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02010)

Project supported: Xinjiang Uygur Autonomous Region Key Research and Development Project(2022B02010)

underscored the critical role of selenium in enhancing physiological functions within quinoa; it improved anti-aging capabilities while promoting grain filling through osmoregulation mechanisms and scavenging harmful reactive oxygen species. Furthermore, applying sodium selenite at a concentration of 30 mg·L^{-1} on leaf surfaces proved most effective for augmenting both yield and grain selenium content.

Keywords: quinoa; foliar spraying selenium; physiological characteristic; sodium selenite; yield

硒（Se）是谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）的重要成分，在保护细胞膜结构和减少氧化损伤方面起着至关重要的作用，是动植物生长发育过程中必不可少的关键物质[1]。我国是缺硒大国，缺硒可能引发大骨节病以及与氧化损伤相关的慢性疾病、癌症等[2]。然而，人体自身不能合成硒，植物是增加膳食中硒含量的主要硒源，食用富硒农产品是当下公认为最直接有效、最经济安全的人体补硒方法。因此，通过对农作物进行补硒，有望成为一种增加人畜每日硒摄入量的重要途径。

目前常利用叶面喷硒或土壤施硒肥来提高作物的硒含量，增加食物链中的硒，以满足人体和动物硒营养需求[3]。虽然硒并非植物生长必需的元素，但多数研究都表明硒能够调节植物的生长，抵挡自由基对植物体内的伤害，提高植物的抗氧化能力，有效清除植物体内活性氧自由基。活性氧的累积会诱导激活SOD、POD等酶促氧清理系统，从而降低氧自由基对植物的伤害，提高植株抗逆性[4]。前人研究发现，硒能调控作物的生长发育，激活抗氧化通路，从而提高作物产量与品质[5]。适量的硒可以提高水稻的抗氧化酶活力，提高水稻的生长发育；过量的硒会导致酶活力下降，代谢功能下降，从而影响水稻的生长发育[6]。藜麦（*Chenopodium quinoa* Willd.）原产于南美洲的安第斯山地区[7]，因其富含多种维生素、多酚、类黄酮类、皂苷、植物甾醇类等物质，具有调节免疫、增强机体功能、降低胆固醇等功效，被誉为“超级食物”[8]。我国于1987年在西藏引种藜麦试验成功[9]，2008年实现规模化种植。目前，我国藜麦种植广泛分布于20余个省（区），截至2020年，面积超过20 000 hm^2，种植面积和总产量已跃居世界第三[10]。随着藜麦种植面积的扩大，其在保障粮食安全和促进农业可持续发展方面的作用将更加凸显。此外，藜麦的高蛋白特性使其成为动物饲料的潜在替代品[11]，有助于减少对国外大豆和豆粕的依赖，从而增强国内粮食供应的自主性。随着国民膳食结构的改善、营养配比意识的提高，藜麦在日常饮食中逐渐被人们关注，对富硒藜麦的开发可以对富硒农产品进行补充。现有关于藜麦施肥的研究主要集中于氮磷钾肥，而藜麦硒强化研究尚处于起步阶段且有关硒强化对藜麦生长和生理代谢影响尚不清楚。从富硒藜麦开发的角度，本研究以伊藜早1号作为原材料，亚硒酸钠为硒源，在新疆乌鲁木齐设立盆栽试验，明确不同浓度水平亚硒酸钠对藜麦生长、生理代谢方面的影响，为新疆富硒藜麦产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究于2024年5月1日在新疆农业大学农科楼试验地（43°48′N，87°34′E）进行。供试土壤采自乌鲁木齐三坪农场，土壤质地为砂质黏壤土，土壤的基本理化见表1。

供试藜麦品种为伊藜早1号，由新疆农业科学院粮食研究所提供。供试硒肥为亚硒酸钠（Na_2SeO_3）（分析纯含量≥97%），由天津永晟精细化工有限公司提供。

1.2 试验设计

将供试土壤过5 mm筛装入直径28 cm、高30 cm的花盆，每个处理12次重复，共72盆。各盆均基施尿素450 kg·hm^{-2}（N 46%）、重过磷酸钙225 kg·hm^{-2}（P_2O_5 44%）、水溶性硫酸钾45 kg·hm^{-2}（K_2O 51%）；选取大小一致、籽粒饱满的藜麦种子，每盆播四穴，每穴3粒，覆土1 cm。播种后等量浇水，幼苗长到六叶时定苗。待盛花末期选取长势相近、无病害的藜麦挂牌标记，在藜麦灌浆期（2024年7月8日）进行叶面喷硒（选择长势一致的藜麦），设置：喷清水，亚硒酸钠浓度为0 mg·L^{-1}（CK）；喷5（Se1）、10（Se2）、20（Se3）、30

表1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	土壤质地 Soil texture/%			pH	有机质 SOM/(g·kg^{-1})	碱解氮 AN/(mg·kg^{-1})	速效磷 AP/(mg·kg^{-1})	速效钾 AK/(mg·kg^{-1})	总硒 Total selenium/(mg·kg^{-1})
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay						
灰漠土	48.97	18.67	32.36	8.12	10.45	18.74	5.08	199.39	0.02

mg·L^{-1}(Se4)和40 mg·L^{-1}(Se5)亚硒酸钠,共6个处理。

1.3 测定方法及项目

在藜麦的灌浆前(7月3日,T1)、喷硒后7 d(7月15日,T2)、喷硒后14 d(7月22日,T3),采集藜麦主茎倒三叶(健康)的叶片,用于光合色素的测定;随机选取5株长势一致的藜麦测定其株高、茎粗和叶片数,同时进行破坏性采样,带回实验室用自来水冲洗干净后再用去离子水冲洗一遍,将叶片、茎秆、根系和穗烘干,以计算各器官生物量(干质量)。

在喷硒后7 d(7月15日,T2)采集藜麦主茎倒三叶的叶片,每个处理重复6次,液氮速冻后存于-80 ℃冰箱备用,用于藜麦抗氧化酶活性和渗透调节物质的测定。

于成熟期(8月20日,T4)随机选取5株长势一致的藜麦测定其株高、茎粗、主穗长,单株有效穗数(因成熟期藜麦叶片黄化脱落,因此不统计藜麦叶片数),同时进行破坏性采样;在藜麦叶片80%枯黄并有部分开始脱落时进行实收测产,每个处理随机选取5株长势一致植株,测定其单株产量和千粒质量。

1.3.1 藜麦成熟期生长指标和产量的测定

株高:用钢卷尺测量自然株高;茎粗:用游标卡尺在藜麦主茎基部子叶部位测定;叶片数:藜麦主茎上去除子叶的叶片数;生物量:烘干至恒质量后,称量质量计算其生物量;主穗长:用钢卷尺测量主穗基部到顶部的长度;单株有效穗数:整株植物上含有3粒或更多饱满或欠饱满种子的穗数;单株产量:将穗部剪下放置干燥向阳处晾晒一周至穗质量恒定,揉搓去除籽粒颖壳后称量质量;千粒质量:在晒干(含水量不高于10%)净种子中,用四分法取样3份,数1 000粒,分别称量,取其平均值,即以平均值作为千粒质量。

1.3.2 藜麦籽粒硒含量的测定

将去除颖壳的藜麦籽粒置于60 ℃烘箱中烘干至恒质量,将烘干后的样品研磨成粉末,过0.15 mm筛,采用原子荧光光谱法(GB/T 5009.93—2017)[12]测定籽粒硒含量。

1.3.3 藜麦生理指标的测定

藜麦叶片叶绿素含量采用95%乙醇浸泡(黑暗条件下)测定。根据公式(1)~(3),分别计算出叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)的含量:

$$C_a=13.951A665-6.88A649 \quad (1)$$

$$C_b=24.96A649-7.32A665 \quad (2)$$

$$C_{ar}=(1\,000A470-2.05C_a-114.8C_b)/245 \quad (3)$$

式中:C_a、C_b和C_{ar}分别为叶绿素a、叶绿素b的含量及类胡萝卜素总含量,mg·L^{-1};再按下式求算植物组织中单位干质量各色素的含量,mg·g^{-1}:色素的含量=色素含量(mg·L^{-1})×提取液体积(L)×稀释倍数/样品干质量(g)。

超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑NBT光化还原法[13]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木龄法测定[14];过氧化氢酶(CAT)采用钼酸铵比色法[14]测定;谷胱甘肽过氧化酶(GSH-Px)采用南京奥青生物技术有限公司提供的试剂盒测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定[13];脯氨酸采用酸性茚三酮比色法[14]测定,可溶性蛋白采用考马斯亮蓝G-250比色法测定[14];可溶性糖采用蒽酮比色法[14]测定。

1.4 数据处理

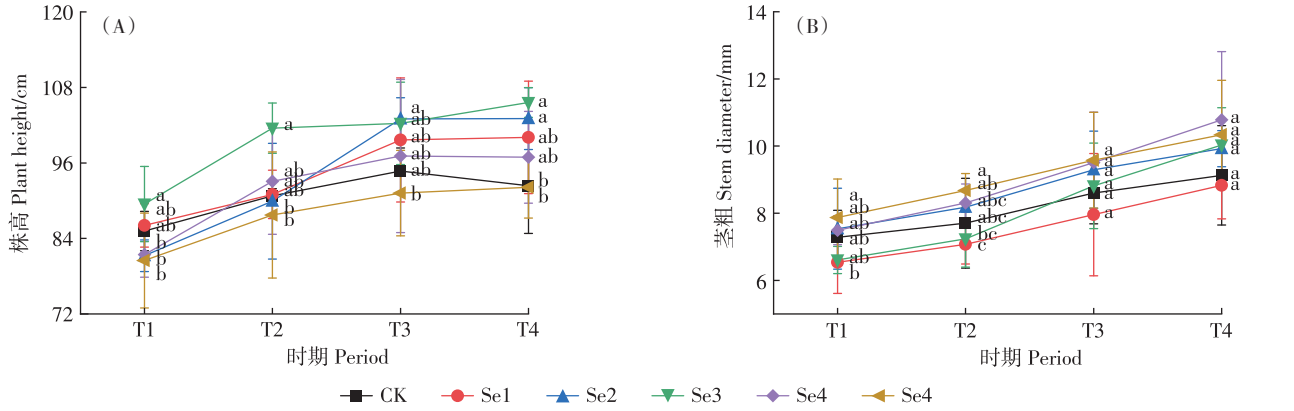
本研究中所有的数据分析均在R语言(v4.3.1)中完成,用“Easystats”包分析数据,使用“ggplot2”包制图,硒添加与藜麦生理特性的相关性分析(Spearman相关)在R中使用“linkET”包完成;主成分分析通过SPSS 25.0软件进行。

2 结果与分析

2.1 叶面喷硒对藜麦生长性状、籽粒硒含量和产量的影响

2.1.1 叶面喷硒对藜麦生长的影响

如图1所示,施硒对藜麦的株高和茎粗有不同程度的影响,T1时期藜麦的平均株高(图1A)在Se3处理达最大;T2时期藜麦株高在Se3处理达最大,各处理(CK、Se1、Se2、Se3、Se4和Se5)藜麦株高相较于T1时期分别增长了6.54%、5.74%、10.66%、13.48%、14.32%和8.97%,其中Se4处理的增幅最大;T3时期藜麦株高在Se2处理达最大,其显著高于Se5处理($P<0.05$);T4时期藜麦株高在Se3处理达最大,其显著高于CK处理($P<0.05$)。T1时期的藜麦茎粗(图1B)在Se5处理达最大值;T2时期在Se5处理达最大,各处理(CK、Se1、Se2、Se3、Se4和Se5)藜麦茎粗相较于T1时期分别增长了5.80%、8.17%、8.46%、9.50%、10.84%和10.24%,其中Se4处理的增幅最大;T3时期藜麦茎粗在Se5处理达最大,各处理之间差异不显著;T4时期藜麦茎粗在Se5处理达最大,各处理(CK、Se1、Se2、Se3、Se4和Se5)藜麦茎粗相较于T3时期分别增长了6.14%、10.98%、6.76%、13.82%、13.38%和



不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）；T1为藜麦灌浆前（7月3日）；T2为喷硒后7 d（7月15日）；T3为喷硒后14 d（7月22日）；T4为成熟期（8月20日）。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$); T1 represents prior to the application of quinoa grout (July 3); T2 represents the seventh day following selenium spraying (July 15); T3 represents fourteen days post-selenium spraying (July 22); and T4 represents the maturity period (August 20). The same below.

图1 叶面喷硒对藜麦株高和茎粗的影响

Figure 1 Effects of foliar spraying selenium on plant height and stem diameter of quinoa

7.91%，其中Se3处理的增幅最大。

由图2可知，T1时期藜麦叶片数在Se1处理下达最多；T2时期藜麦叶片数在Se4处理下达最多，各处理（CK、Se1、Se2、Se3、Se4和Se5）藜麦叶片数相较于T1时期分别增长了6.82%、9.40%、12.77%、16.79%、15.28%和9.72%，其中Se3处理的增幅最大；T3时期藜麦叶片数在Se4处理下达最大，各喷硒处理显著高于对照处理。

T2时期，各处理的藜麦根、叶、穗生物量（图3）差异不显著；藜麦的茎生物量在Se3处理下达最大。T3时期，各处理的藜麦根、叶、穗生物量差异不显著；藜麦的茎生物量在Se3处理下达最大值，其中Se3处理比CK处理显著高41.13%（$P<0.05$）。T4时期，各处理的藜麦根生物量差异不显著；叶生物量在Se3处理下达最大值，比CK显著高91.21%（$P<0.05$）；茎生物量

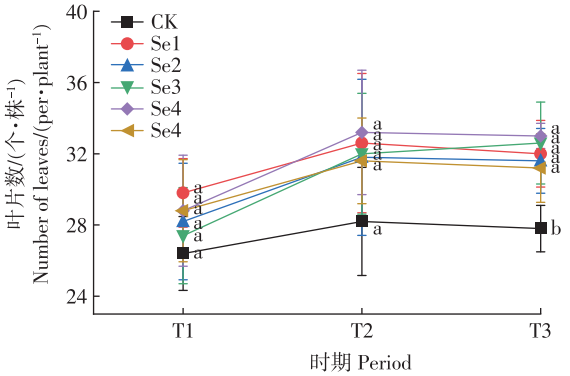


图2 叶面喷硒对藜麦叶片数的影响

Figure 2 Effects of foliar spraying selenium on the number of quinoa leaves

在Se4处理下达最大值，比CK处理显著高168.18%（$P<0.05$）；Se2、Se4处理的穗生物量分别比CK处理显

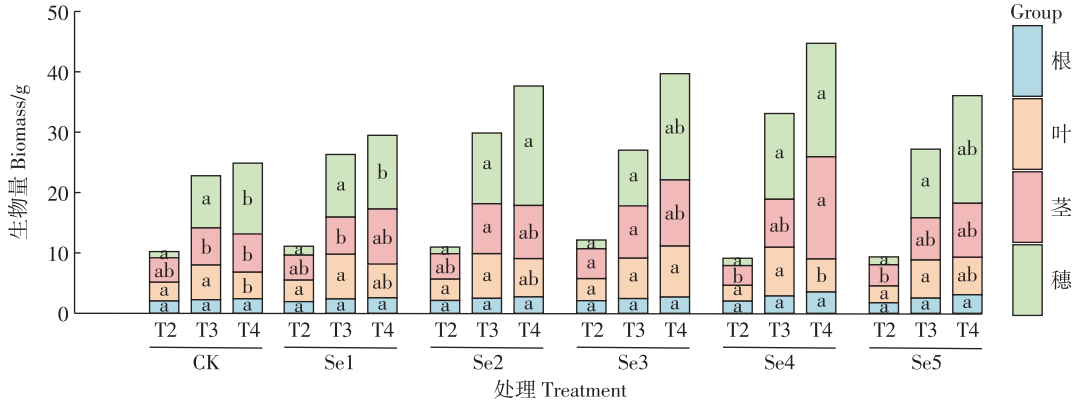


图3 叶面喷硒对藜麦生物量的影响

Figure 3 Effects of foliar spraying selenium on quinoa biomass

著高68.66%、60.33%（P<0.05）。T4时期藜麦总生物量平均水平表现为：Se4>Se3>Se2>Se5>Se1>CK。

2.1.2 叶面喷硒对藜麦籽粒硒含量的影响

叶面喷硒显著提高了成熟期藜麦籽粒硒含量（图4），且随硒肥浓度增加，提高的幅度越明显。Se2、Se3、Se4和Se5处理的籽粒硒含量显著高于CK处理，其中Se4、Se5处理分别比CK处理显著高247.39%和268.55%（P<0.05）。

2.1.3 叶面喷硒对藜麦产量构成的影响

由表2可知，藜麦有效穗数在Se3、Se4处理下达最大值，各处理之间无显著差异；主穗长在Se2处理下达最大值，平均长度为32.73 cm，比不喷硒CK处理显著高7.91%（P<0.05）；各处理的千粒质量平均水平表现为：Se4>Se3>Se5>Se2>Se1>CK，各处理之间无显著差异；藜麦单株籽粒产量在Se4处理下达最大值，比CK处理显著高32.26%（P<0.05）。

2.2 叶面喷硒对藜麦生理特性的影响

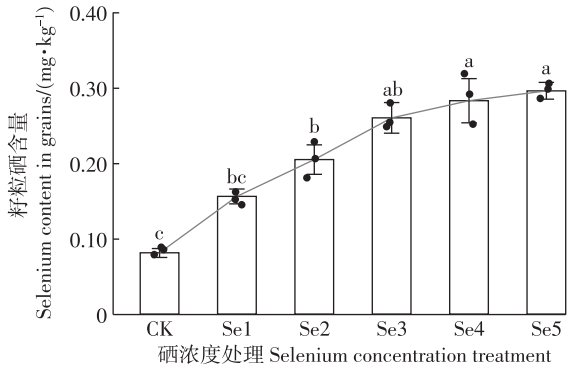


图4 叶面喷硒对藜麦籽粒硒含量的影响

Figure 4 Effects of foliar spraying selenium on quinoa grain selenium content

表2 叶面喷硒对藜麦产量构成的影响

Table 2 Effects of foliar spraying selenium on yield composition of quinoa

处理 Treatment	单株有效穗数 Effective panicle number per plant	主穗长 Main panicle length/cm	千粒质量 Thousand grain mass/g	籽粒产量/(g·株⁻¹) Grain yield/(g·plant⁻¹)
CK	7.66±0.33a	30.33±0.32b	2.70±0.03a	10.88±0.52c
Se1	7.67±0.33a	31.53±0.34ab	2.83±0.23a	11.37±0.3bc
Se2	8.33±0.33a	32.73±0.54a	2.83±0.14a	13.28±0.14ab
Se3	8.67±0.33a	31.97±0.44a	3.13±0.05a	14.12±1.35a
Se4	8.67±0.33a	32.53±0.52a	3.24±0.39a	14.39±0.28a
Se5	8.33±0.33a	30.47±0.34b	3.10±0.23a	11.35±0.48bc

注：不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments (P<0.05). The same below.

2.2.1 叶面喷硒对藜麦光合色素含量的影响

从表3可以看出，叶面喷硒对藜麦的光合色素含量有不同程度的影响。T2时期，藜麦的叶绿素a含量在Se4处理下达最大值，比CK处理显著高31.83%（P<0.05）；叶绿素b含量在Se2和Se4处理下达最大；各处理的类胡萝卜素含量无显著差异；总叶绿素含量在T2时期平均水平表现为：Se4>Se2>Se3>Se5>CK>Se1。

T3时期，藜麦的叶绿素a含量在Se2处理下达最大值，比CK处理高15.24%；叶绿素b含量在Se2处理下达最大，比CK处理高5.03%；类胡萝卜素含量、总叶绿素含量均在Se2处理下达最大值，各处理之间无显著差异。

T4时期，藜麦的叶绿素a含量在Se1处理下达最大值，比CK处理显著高40%（P<0.05）；叶绿素b含量在Se4处理下达最大，比CK处理显著高70.37%（P<0.05）；类胡萝卜素含量在Se1处理达最大，各处理之间无显著差异。总叶绿素含量在Se4处理下达最大，比CK处理显著高41.35%（P<0.05）。

2.2.2 叶面喷硒对藜麦抗氧化酶活性的影响

藜麦叶片POD活性随硒浓度的增加呈现先增后降的趋势（图5A），相比于CK处理，施硒处理的POD

表3 叶面喷硒对藜麦光合色素的影响（mg·g⁻¹）

Table 3 Effects of foliar spraying selenium on photosynthetic pigments of quinoa (mg·g⁻¹)

时期 Period	处理 Treatment	叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	总叶绿素 Total chlorophyll
T2	CK	1.02±0.01b	0.41±0.03a	0.14±0.01a	1.57±0.05a
	Se1	1.10±0.22ab	0.35±0.05a	0.12±0.04a	1.56±0.31a
	Se2	1.19±0.11ab	0.45±0.18a	0.09±0.01a	1.73±0.25a
	Se3	1.19±0.06ab	0.35±0.02a	0.15±0.01a	1.69±0.09a
	Se4	1.34±0.07a	0.45±0.08a	0.14±0.05a	1.93±0.01a
	Se5	1.13±0.08ab	0.31±0.04a	0.15±0.01a	1.59±0.11a
T3	CK	1.22±0.02a	0.43±0.02a	0.10±0.02a	1.74±0.01a
	Se1	1.18±0.10a	0.37±0.02a	0.11±0.01a	1.66±0.09a
	Se2	1.40±0.14a	0.45±0.10a	0.14±0.02a	2.00±0.22a
	Se3	1.34±0.21a	0.36±0.08a	0.12±0.02a	1.82±0.28a
	Se4	1.26±0.14a	0.38±0.03a	0.13±0.01a	1.76±0.17a
	Se5	1.03±0.14a	0.32±0.05a	0.12±0.02a	1.47±0.18a
T4	CK	0.60±0.02b	0.18±0.02bc	0.10±0.01a	0.89±0.04c
	Se1	0.84±0.09a	0.18±0.03c	0.15±0.03a	1.17±0.08ab
	Se2	0.68±0.06ab	0.19±0.03bc	0.13±0.03a	1.00±0.06bc
	Se3	0.70±0.05ab	0.26±0.04abc	0.12±0.02a	1.08±0.07abc
	Se4	0.82±0.07a	0.31±0.04a	0.13±0.01a	1.25±0.08a
	Se5	0.77±0.03ab	0.27±0.02ab	0.09±0.03a	1.14±0.06ab

活性提高了11.56%~103.75%，藜麦POD活性在Se4处理下达最大值，比CK处理显著高103.75%（P<0.05）。叶片SOD活性在Se3处理下达最大值（图5B），与CK处理存在显著差异（P<0.05）。藜麦叶片CAT活性（图5C）在Se2处理下达最大值，比CK处理高23.86%；藜麦叶片CAT活性在Se5处理下达最小值，比CK处理低3.70%。各施硒处理的GSH-Px活性（图5D）与CK处理相比，提高了6.55%~95.17%，其中，在Se4处理下GSH-Px活性达最大值，比CK处理显著提高95.17%（P<0.05）。各处理藜麦叶片MDA含量（图5E）平均水平表现为：CK>Se2>Se1>Se3>Se5>Se4，喷硒处理（Se1、Se2、Se3、Se4和Se5）的藜麦叶片MDA含量分别比CK处理显著低26.06%、21.82%、44.11%、62.95%和58.24%（P<0.05）。

2.2.3 叶面喷硒对藜麦渗透调节物质的影响

藜麦叶片可溶性蛋白质含量（图6A）在Se4处理达最大，比CK处理显著高246.95%（P<0.05）。藜麦叶片可溶性糖含量（图6B）在Se1处理下达最大值，比CK处理显著高49.90%（P<0.05）。叶片脯氨酸含量（图6C）在Se5处理下达最大值，显著高于其他处理（P<0.05）。相比于CK处理，硒肥处理的脯氨酸含量提高了23.72%~124.03%。

2.3 叶面喷硒与藜麦生理特性相关性分析

使用Spearman检验藜麦各生理特性之间的两两相关性（图7），结果表明，超氧化物歧化酶与过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化酶与过氧化物酶呈极显著正相

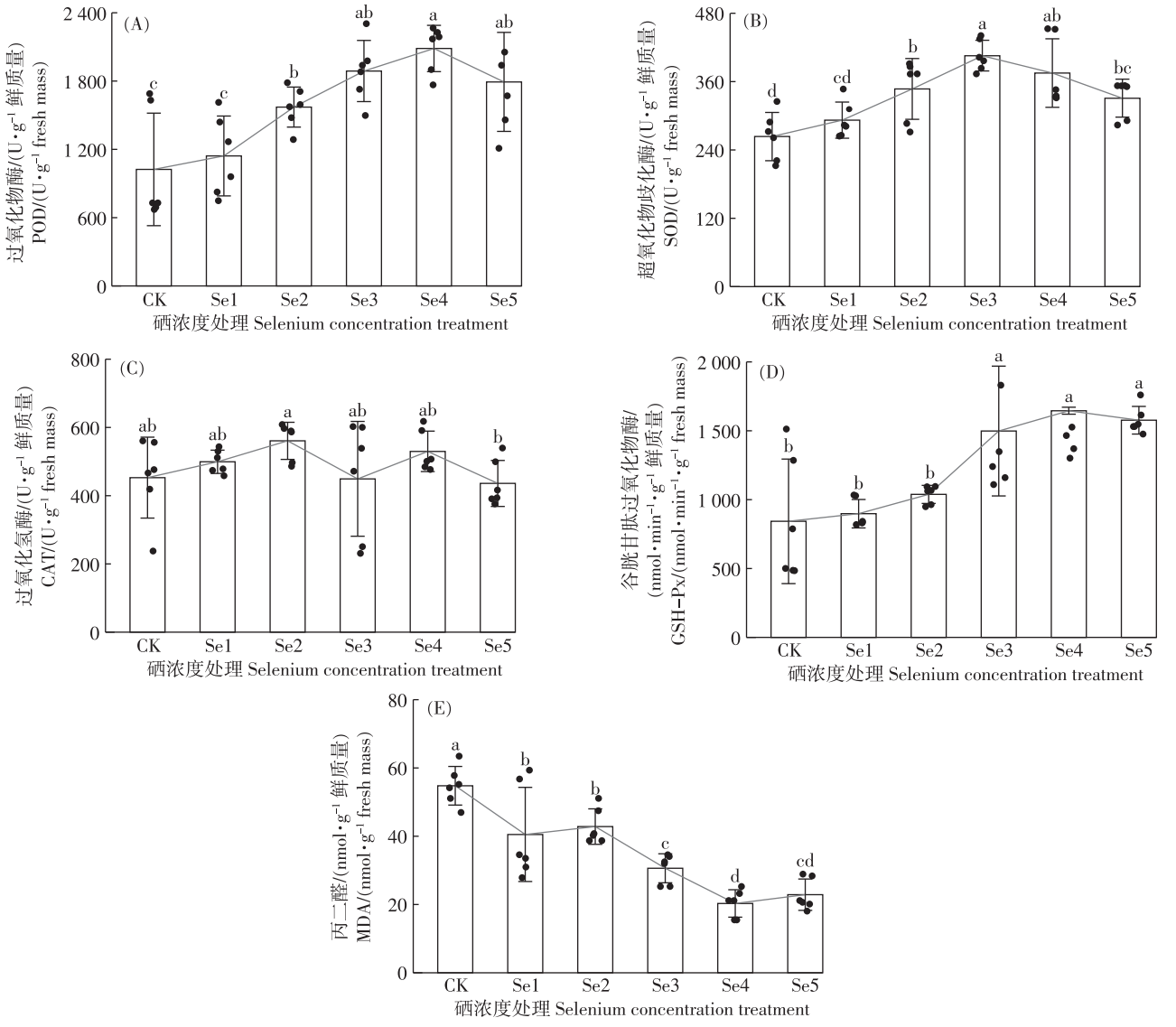


图5 叶面喷硒对藜麦抗氧化酶活性的影响

Figure 5 Effects of foliar spraying selenium on antioxidant oxidase activity of quinoa

关(P<0.001)；叶绿素a与过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化酶与可溶性蛋白、谷胱甘肽过氧化酶与脯氨酸、脯氨酸与类胡萝卜素、叶绿素a与可溶性蛋白均呈显著正相关(P<0.01)；可溶性蛋白与过氧化物酶、过氧化物酶与类胡萝卜素、超氧化物歧化酶与可溶性蛋白、超氧化物歧化酶与总叶绿素、叶绿素a与谷胱甘肽过氧化物酶、脯氨酸与可溶性蛋白、总叶绿素与类胡萝卜素之间呈显著正相关(P<0.05)。Mantel检验结果表明，除过氧化氢酶、丙二醛、可溶性糖和叶绿素b外，其余生理指标均与硒添加呈正相关。值得注意的是谷胱甘肽过氧化酶与硒添加存在极显著正相关的关系(Mantels′r=0.789，Mantels′P<0.001)；过氧化物酶、脯氨酸与硒添加存在极显著相关的关系(Mantels′r=0.664，Mantels′P<0.001、Mantels′r=0.684，Mantels′P<0.001)；类胡萝卜素与硒添加存在极显著正相关的关系(Mantels′r=0.555，Mantels′P<0.001)。

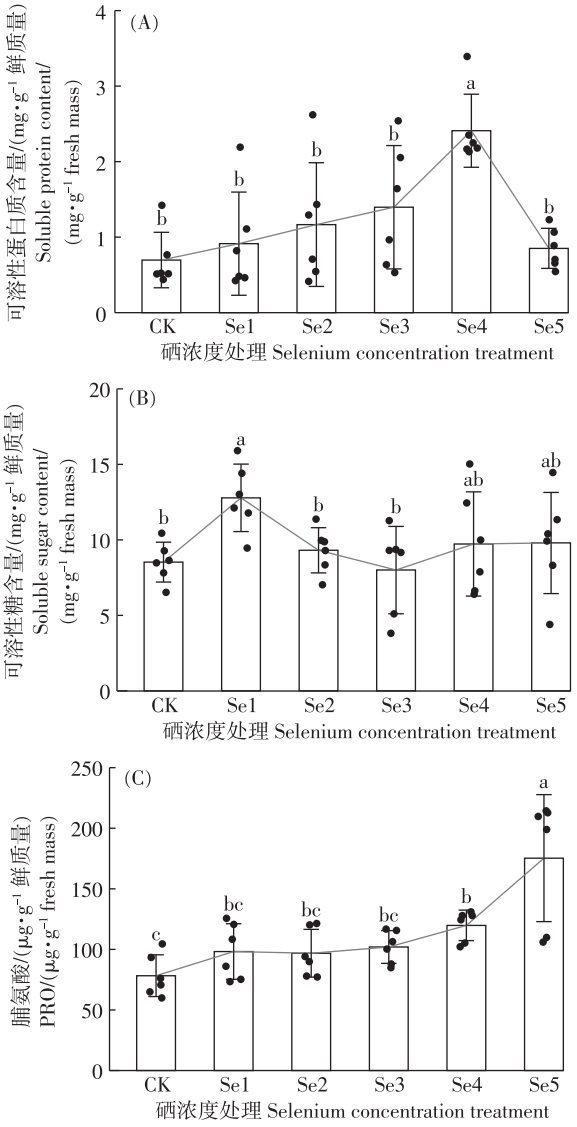


图6 叶面喷硒对藜麦渗透调节物质的影响

Figure 6 Effects of foliar spraying selenium on osmoregulatory substances of quinoa

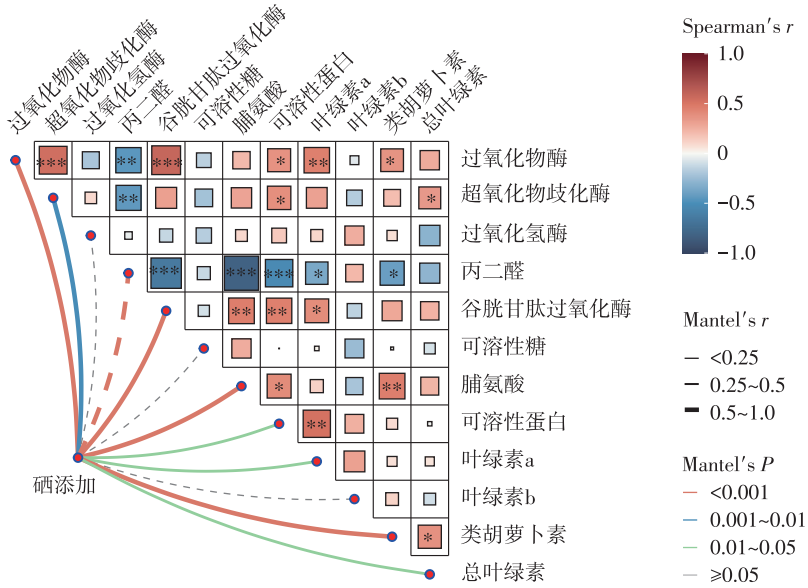
2.4 主成分分析

采用主成分降维的方法对喷硒处理后藜麦10项指标进行分析。将特征值≥1作为判别的条件，成功提取3项主成分因子，第一主成分(PC1)的特征值为3.503，贡献率为35.029%，第二主成分(PC2)的特征值为2.446，贡献率为24.460%，第三主成分(PC3)的特征值为1.177，贡献率为11.769%，3个主成分累计贡献率达71.257%，具有较好的代表性，可作为评价叶面硒对藜麦产量、籽粒硒含量等影响力的综合指标(表4)。第一主成分(PC1)综合了脯氨酸、可溶性糖、谷胱甘肽过氧化酶等，第二主成分(PC2)综合了单株籽粒产量、超氧化物歧化酶等指标的信息，第三主成分(PC3)综合了过氧化氢酶、可溶性蛋白、籽粒硒含量等指标的信息(表5)。得分(F)是每个主成分得分与对应贡献率乘积之和，即F=$F1$×35.029%/71.257%+$F2$×24.460%/71.257%+$F3$×11.769%/71.257%(表6)。由表7可知，藜麦在各处理下的综合得分排名为Se4>Se3>Se5>Se2>Se1>CK，由此可得，在试验所设处理中，Se4处理下藜麦富硒效果最佳。

3 讨论

3.1 叶面喷硒对藜麦生物学指标的影响

植物的生长状况，如株高、茎粗以及叶片数，是衡量植物生长状况和适应环境能力的重要指标，它们能够直接反映植物发育的好坏。作为微量元素，硒对植物生长的影响具有两面性：在低浓度时，它能够促进植物生长，浓度过高，反而会抑制植物的生长过程[15]。彭晓伟等[16]研究发现，随施硒量的增加，谷子的株高、茎粗均呈现增加的趋势，本研究观察到，在施硒7 d后(T1~T2阶段)，Se4处理的藜麦在株高和茎粗方面的增幅最大，较CK处理分别增加了7.78%和5.04%；施硒14 d后(T2~T3阶段)，Se3处理的藜麦在株高和茎粗增长上表现最佳；施硒21 d后(T3~T4阶段)，藜麦的株高变化呈现正负增长不一的情况，以Se3处理下的增幅最大，同时藜麦茎粗的最大增长率也出现在Se3处理组中，这一结果与Chen等[17]的研究有差异，这种差异可能是藜麦对硒的耐受性与其他作物存在不同，以及施硒的时期不同所导致的。叶面施硒可能促进植物生理机能，从而间接导致叶片数的增加，吴



使用Spearman检验藜麦喷硒后7 d(T2时期)各生理指标的两两相关性，方框的大小表示相关性的强弱关系(*表示P<0.05，**表示P<0.01，***表示P<0.001)；硒添加与生理指标的相关性分析使用Mantel检验(999次置换)。

Spearman's rank correlation coefficient is employed to assess the pairwise correlations of physiological indices measured seven days post-selenium application in quinoa(T2 period). The dimensions of the boxes represent the strength of these correlations(* indicates P<0.05, ** indicates P<0.01, *** indicates P<0.001). Additionally, the relationship between selenium supplementation and physiological indices is evaluated using a Mantel test with 999 permutations.

图7　硒添加与藜麦生理特性的相关性分析

Figure 7　Correlation analysis between selenium supplementation and physiological characteristics of quinoa

表4　方差贡献率载荷矩阵

Table 4　Variance contribution load matrix

指标 Index	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%
PC1	3.503	35.029	35.029
PC2	2.446	24.460	59.489
PC3	1.177	11.769	71.257

表5　主成分分析后的旋转载荷矩阵

Table 5　Rotational load matrix after principal component analysis

指标 Index	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
单株籽粒产量	−0.046	0.351	0.101
籽粒硒含量	0.234	0.035	0.019
过氧化物酶	0.069	0.201	−0.336
超氧化物歧化酶	0.014	0.292	0.056
过氧化氢酶	0.007	0.031	0.802
丙二醛	−0.274	0.046	−0.115
谷胱甘肽过氧化酶	0.209	−0.011	−0.135
可溶性糖	0.199	−0.351	0.081
脯氨酸	0.337	−0.305	−0.014
可溶性蛋白	0.088	0.140	0.207

焕焕等[18]的研究表明，硒的施用有助于叶片数的提高。本研究中，藜麦在T1~T2阶段和T2~T3阶段，Se3处理叶片数的增幅最大，T1~T2阶段的增长率较对照组(CK)提升了9.97%，这表明施硒有助于藜麦叶片的增多，但在灌浆中期(T2~T3阶段)，藜麦叶片的脱落现象开始增多，导致叶片数量的增长速率变为负值，这一现象与Ikram等[19]的研究发现大致相同，可能是藜麦开始衰老导致的。研究指出[20]，硒肥的施用对植物的生物量有积极作用，特别是在增加叶生物量方面。本研究发现，随着硒浓度的增加，藜麦的生物量先增加后减少。在T4时期，藜麦在Se4处理下的总生物量最大，比不喷硒CK处理高79.83%。这种增长可能与抗氧化系统中酶活性的提高[21]以及光合色素的增加有关[22]，进而促进了碳水化合物含量的增加。这表明，硒肥的合理施用可以促进藜麦的生长，提高其生物量。不过，硒的浓度需要严格控制，以避免高浓度硒对植物造成的潜在毒性影响。

采用农艺生物强化手段，施用含有无机硒、有机硒和纳米硒的叶面肥料能够提升稻米产量[23]。本研究发现施硒能够增加藜麦的产量，特别是Se4处理的藜麦产量显著高于CK处理。随着硒浓度的增加，藜麦的千粒质量和主穗长度呈现出上升趋势，但在Se5

表6 综合得分排名

Table 6 Ranking of comprehensive scores

处理 Treatment	*F1*	*F2*	*F3*	综合得分 Composite score	综合得分排名 Composite scores ranking
CK	−1.445	−0.595	−0.302	−0.963	6
Se1	−0.411	−0.953	0.336	−0.473	5
Se2	−0.447	0.391	0.622	0.017	4
Se3	0.180	1.062	−0.390	0.387	2
Se4	0.919	0.880	0.462	0.830	1
Se5	1.204	−0.784	−0.727	0.203	3

处理下却出现了显著下降。硒对产量的影响主要体现在两个方面：首先，硒通过影响藜麦的光合色素含量，间接促进了有机物的积累，从而有助于主穗的生长；其次，硒通过减少藜麦中瘪粒的形成，增加了成熟籽粒的数量，进而提高了千粒质量，这一发现与Luo等[24]在香米上的研究结果一致。叶面喷施硒肥对籽粒硒含量的促进作用呈极显著正相关，这与彭晓伟等[16]、朱磊等[5]的研究结果一致。

3.2 叶面喷硒对藜麦生理特性的影响

硒对植物生理-生化过程具有显著的促进作用，包括刺激光合色素的生物合成和增加光合同化物的积累[25]。黄思杰等[26]的研究表明，硒可以显著提高叶片中的光合色素含量。李亚敏等[27]研究也发现，适量的硒浓度能够促进光合色素的合成，而较高浓度的硒则会抑制该过程。在本研究中，与对照组相比，添加30 mg·L^{-1}的外源硒能显著提高藜麦叶片中光合色素的含量，尤其在喷硒后7 d（T2时期），叶绿素a对不同硒浓度的响应比叶绿素b更为显著。这表明外源硒可能通过提高藜麦的光合色素含量来促进其光合作用，很可能是因为硒影响了与叶绿素形成相关的卟啉的生物活性[25]。

抗氧化系统关键作用是中和植物体内的活性氧自由基，防止它们积累到有害水平。活性氧的积聚会触发超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）等抗氧化防御系统的活性，减少氧自由基对植物的损伤，增强植物的逆境耐受性。硒作为一种重要的微量矿物质，能够影响植物的生理过程，包括叶绿素含量和抗氧化系统，从而对植物生长产生积极影响[28]。硒是抗氧化酶谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）的活性中心，该酶能够促使过氧化物分解，降低过氧化物水平，因此硒在清除植物体内的过氧化物、预防过氧化和延缓衰老方面发挥着关键作用[29]。Stewart等[30]研究发现，SOD、GSH-Px等抗氧化酶在不同硒浓度下活性各异，说明硒可能根据其浓度的不同，对不同的酶活性产生刺激或抑制作用。本研究结果表明，叶面喷施可以激发藜麦叶片中SOD活性的变化，且在Se4处理下POD、GSH-Px活性与CK处理有显著差异，藜麦叶片中MDA活性随硒强化浓度的增加而下降，这与Cabral等[31]的研究结果一致。

植物细胞依靠渗透调节机制来适应环境的变动并增强对逆境的抵抗力。当作物遭遇环境胁迫时，它们通常会在体内积累可溶性蛋白质和糖类，这些物质对于调节细胞的渗透压至关重要。牛锐敏等[32]的研究表明，施硒能够提升植物品质，通过叶面施硒显著增加了植物体内可溶性蛋白、可溶性糖以及脯氨酸的含量。在本研究中，与对照组（CK）相比，Se4处理显著提高了藜麦中可溶性蛋白和脯氨酸的含量，这可能与叶面喷硒能够延缓叶绿素的降低、抑制丙二醛的增加有关，从而通过渗透调节和清除有害的氧自由基等方式，增强了藜麦在生长后期对抗衰老的能力。

3.3 叶面喷硒延缓藜麦衰老、提高籽粒产量与硒含量

硒在低浓度下可以促进植物生长，通过影响植物的生理过程来提高产量[19]。研究表明[33]，喷施30 g·hm^{-2}硒肥，使谷子叶片叶绿素含量提高，抗氧化酶（SOD、POD、CAT）活性增强，降低MDA含量，增强了叶片抗氧化性，延缓谷子衰老，从而显著提高了谷子的产量。边淑惠等[34]的研究表明，在亚硒酸钠处理下，CAT活性与蛋白质含量呈显著正相关关系。叶片的寿命与作物的生产能力之间存在正向关系[35]。在作物生长的灌浆阶段，它们将通过光合作用产生的淀粉、蛋白质以及累积的有机物，通过同化作用储存于种子中。研究发现，在水稻的生长过程中，至少有90%的有机物质是通过光合作用和二氧化碳同化作用来进行转运和积累的，因此，延缓叶片衰老和提升光合作用效率对于提高产量至关重要[36]。以往的研究指出，硒的补充可能会对作物的碳水化合物代谢和其他生理活动产生影响，进而改变作物的生物量、产量以及营养组成[37]。本研究发现，谷胱甘肽过氧化酶与过氧化物酶存在极显著的正相关。此外，通过Mantel检验的分析结果揭示了类胡萝卜素、过氧化物酶、脯氨酸、谷胱甘肽过氧化酶活性与硒添加之间具有显著的正相关性。通过主成分分析，将测定的10个单项指标转化为3个互为独立的综合指标，对各处理下藜麦产量、籽粒富硒效果进行鉴定与评价。根据综合评价可知，Se4处理即喷施30 mg·L^{-1}亚硒酸钠效果最优。总之，硒在藜麦的抗氧化防御体系中起着至

关重要的作用，喷施适量的硒能够延缓叶片衰老，这可能对藜麦的灌浆过程有积极影响，并有助于提高藜麦的产量。然而，对于硒如何精确调控藜麦的代谢途径以及其背后的作用机制，目前的研究尚未完全阐明。未来的研究需要更深入地探讨硒在藜麦代谢中的具体作用，以便更好地理解其对藜麦生理和产量的全面影响。

4　结论

（1）成熟期藜麦的生物量和产量在硒浓度为30 mg·L^{-1}时达最大值，其中产量相较于不喷硒处理高32.26%；籽粒硒含量在硒浓度为40 mg·L^{-1}时达最大值。

（2）硒添加与类胡萝卜素、过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化酶等生理指标显著正相关，这些生理因素与藜麦的光合作用、抗氧化能力以及籽粒灌浆密切相关。

（3）叶面喷硒能有效延缓藜麦衰老，促进籽粒灌浆，有助于提高藜麦的产量和籽粒硒含量，30 mg·L^{-1}的亚硒酸钠为最佳浓度。

参考文献：

[1] ROTRUCK J T, POPE A L, GANTHER H E, et al. Selenium: biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. *Science*, 1973, 179(4073): 588-590.

[2] DE LIMA L J H, ARAUJO A M, FERREIRA L A, et al. Agronomic biofortification of rice (*Oryza sativa* L.) with selenium and its effect on element distributions in biofortified grains[J]. *Plant and Soil*, 2019, 444(1): 331-342.

[3] 陈历程, 张勇. 微量元素硒的研究现状及其食品强化[J]. 食品科学, 2002, 23(10): 134-137. CHEN L C, ZHANG Y. Status of selenium research and selenium-fortified food[J]. *Food Science*, 2002, 23(10): 134-137.

[4] D'AMATO R, REGNI L, FALCINELLI B, et al. Current knowledge on selenium biofortification to improve the nutraceutical profile of food: a comprehensive review[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(14): 4075-4097.

[5] 朱磊, 胡婷, 刘德明, 等. 叶面喷施硒对萝卜硒吸收及抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 127-131. ZHU L, HU T, LIU D M, et al. Effects of foliar application of selenium on selenium absorption and antioxidant capacity of radish[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 127-131.

[6] DAI Z H, RIZWAN M, GAO F, et al. Nitric oxide alleviates selenium toxicity in rice by regulating antioxidation, selenium uptake, speciation and gene expression[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113540.

[7] WRIGHT K H, PIKE O A, FAIRBANKS D J, et al. Composition of *Atriplex hortensis*, sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(4): 1383-1385.

[8] ADEL H. Towards expanding quinoa cultivation in Egypt: the effect of compost and vermicompost on quinoa pests, natural enemies and yield under field conditions[J]. *Agricultural Sciences*, 2020, 11(2): 191-209.

[9] 贡布扎西, 旺姆, 张崇玺, 等. 南美藜在西藏的生物学特性研究[J]. 西北农业学报, 1994, 3(4): 81-86. GONGBU T, WANG M, ZHANG C X, et al. Study on biological characteristics of *Atriplex fruticosa* in Tibet[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1994, 3(4): 81-86.

[10] 霍建强. 青海省藜麦产业发展现状与思考[J]. 中国种业, 2024(8): 10-13. HUO J Q. Current status and reflections on the development of the quinoa industry in Qinghai Province[J]. *China Seed Industry*, 2024(8): 10-13.

[11] 王思宇, 左文博, 朱凯莉, 等. 71份藜麦品种资源的农艺性状及营养品质分析与评价[J]. 作物杂志, 2022(3): 63-72. WANG S Y, ZUO W B, ZHU K L, et al. Analysis and evaluation of agronomic characteristics and nutritional qualities of 71 quinoa accessions[J]. *Crops*, 2022(3): 63-72.

[12] 刘乔斐, 谢世学, 杜小平, 等. 叶面施硒浓度和喷施次数对春玉米产量和硒含量的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(9): 1336-1344. LIU Q F, XIE S X, DU X P, et al. Effects of selenium concentration and spraying frequency by foliar application on yield and selenium content of spring maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(9): 1336-1344.

[13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社, 2000. LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[14] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京：高等教育出版社, 2006. WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[15] SCHIAVON M, PILON-SMITS E A H. The fascinating facets of plant selenium accumulation - biochemistry, physiology, evolution and ecology[J]. *New Phytologist*, 2017, 213(4): 1582-1596.

[16] 彭晓伟, 蒋沛含, 张爱军, 等. 叶面喷施硒肥对谷子农艺性状及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 1-9. PENG X W, JIANG P H, ZHANG A J, et al. Effects of foliar application of selenium fertilizer on agronomic traits and grain quality of foxtail millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(1): 1-9.

[17] CHEN H Y, CHENG Q, CHEN Q L, et al. Effects of selenium on growth and selenium content distribution of virus-free sweet potato seedlings in water culture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 965649.

[18] 吴焕焕, 张虹, 任志红, 等. 叶面喷硒对茶树叶片光合特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(6): 64-68. WU H H, ZHANG H, REN Z H, et al. Effects of foliar application of nano-selenium on photosynthetic characteristics and yield of tea[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(6): 64-68.

[19] IKRAM S, YANG L, CHAI L, et al. Selenium in plants: a nexus of growth, antioxidants, and phytohormones[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2024, 296: 154237.

[20] 魏玮, 李平, 周志高, 等. 不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦硒累积的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1003-1011. WEI W, LI P, ZHOU Z G, et al. Availability changes in different exogenous selenium fertilizers in soil and their effects on selenium accumulation in wheat[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1003-1011.

[21] BOCCHINI M, D'AMATO R, CIANCALEONI S, et al. Soil selenium (Se) biofortification changes the physiological, biochemical and epigenetic responses to water stress in *Zea mays* L. by inducing a higher drought tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 389.

[22] ZHANG M, TANG S H, HUANG X, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 107: 39-45.

[23] LIDON F C, OLIVEIRA K, GALHANO C, et al. Selenium biofortification of rice through foliar application with selenite and selenate[J]. *Experimental Agriculture*, 2019, 55(4): 528-542.

[24] LUO H W, HE L X, DU B, et al. Biofortification with chelating selenium in fragrant rice: effects on photosynthetic rates, aroma, grain quality and yield formation[J]. *Field Crops Research*, 2020, 255: 107909.

[25] 金小琬, 朱茜, 黄进, 等. 硒对叶绿体及光合作用的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(1): 288-294. JIN X W, ZHU X, HUANG J, et al. Effects of selenium on chloroplast and photosynthesis[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(1): 288-294.

[26] 黄思杰, 刘丹丹, 杨育文, 等. 外源硒对紫色生菜生理指标及营养品质的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(18): 6126-6133. HUANG S J, LIU D D, YANG Y W, et al. Effect of exogenous selenium on physiological indicators and nutritional quality of purple lettuce[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(18): 6126-6133.

[27] 李亚敏, 刘建中, 张峰, 等. 硒对猕猴桃叶片光合生理和果实品质的影响[J]. 西部林业科学, 2012, 41(2): 38-42. LI Y M, LIU J Z, ZHANG F, et al. Effects of selenium on photosynthesis and fruit quality of *Actinidia chinensis*[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2012, 41(2): 38-42.

[28] 甘圳. 外施硒对苦荞生长发育、产量品质及转录调控表达的影响分析[D]. 成都: 成都大学, 2024. GAN Z. Analysis of the effects of external application of selenium on growthand development, yield and quality and transcriptional regulation expression of tartary buckwheat [D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.

[29] PADMAJA K, PRASAD D D K, PRASAD A R K. Biosynthesis in mung[J]. *Phytochemist*, 1989, 28(12): 3321-3324.

[30] STEWART M S, SPALLHOLZ J E, NELDNER K H, et al. Selenium compounds have disparate abilities to impose oxidative stress and induce apoptosis[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 26(1/2): 42-48.

[31] CABRAL G G C, GALINDO F S, DANTAS B L M G, et al. Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: characterization of symptoms and plant metabolic adjustment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110916.

[32] 牛锐敏, 王春良, 陈卫平. 施用硒肥对金矮生苹果品质和含硒量的影响[J]. 落叶果树, 2011, 43(2): 13-14. NIU R M, WANG C L, CHEN W P. Effects of selenium fertilizer application on quality and selenium content of golden dwarf apple[J]. *Deciduous Fruits*, 2011, 43(2): 13-14.

[33] 许佳昕. 叶面喷施硒肥对谷子生理特性、产量形成及元素吸收的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022. XU J X. Effect of foliar application of selenium fertilizer on physiological property, yield formation and element absorption in foxtail millet[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022.

[34] 边淑惠, 邢国芳, 梁昕, 等. 不同形态硒及用量对幼苗期谷子生长与生理的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 152-157. BIAN S H, XING G F, LIANG X, et al. Effects of different forms selenium and dosage on foxtail millet growth and physiology at seedling stage[J]. *Crops*, 2023(1): 152-157.

[35] JORDAN D R, HUNT C H, CRUICKSHANK A W, et al. The relationship between the stay-green trait and grain yield in elite *Sorghum* hybrids grown in a range of environments[J]. *Crop Science*, 2012, 52(3): 1153-1161.

[36] HUANG L C, DAI L P, WANG L, et al. Genetic dissection for chlorophyll content of the top three leaves during grain filling in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2015, 34(2): 381-391.

[37] KIELISZEK M, BŁAŻEJAK S, BZDUCHA-WRÓBEL A, et al. Effect of selenium on lipid and amino acid metabolism in yeast cells[J]. *Biological Trace Element Research*, 2019, 187(1): 316-327.