

外源硒对核桃幼苗生长和生理指标的影响

顿春垚¹, 李双龙^{1,①}, 万松胜¹, 吴代坤¹, 李春霖¹, 鲁彦君²

(1. 恩施土家族苗族自治州林业科学研究院, 湖北 恩施 445000; 2. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用盆栽实验,以 0 mg·kg⁻¹ 硒酸钠为对照组,比较不同质量分数外源硒(5、10、15、20、25、30、35、40 和 45 mg·kg⁻¹ 硒酸钠)处理下核桃(*Juglans regia* Linn.)幼苗的生长和生理指标的差异,并对生长指标和生理指标间的相关性进行了分析。结果显示:与对照组相比,不同质量分数硒酸钠处理组核桃幼苗地径增长量总体显著升高,根尖数总体显著降低;苗高增长量、叶片数增长量、茎分枝数增长量、总叶面积、总根长、总根表面积、总根体积和根分叉数总体降低,但大部分处理组间无显著差异;茎鲜质量、茎干质量、根鲜质量和根干质量无显著变化。与对照组相比,10~20 以及 40 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组核桃幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性显著升高,5~15 以及 40 和 45 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的过氧化氢酶(CAT)活性显著升高,5、30 和 35 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的丙二醛(MDA)含量显著升高,15 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理的可溶性还原糖含量显著升高,10、20 和 45 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的可溶性蛋白质含量显著升高。相关性分析结果显示:核桃幼苗少数生长指标间的相关性达显著水平,其中,根分叉数与总根长、总根表面积、总根体积和根尖数呈极显著正相关,根鲜质量与总根长、总根表面积、总根体积、根尖数和根分叉数呈极显著正相关;生理指标间仅叶片超氧化物歧化酶活性与丙二醛含量呈显著负相关。综合研究结果显示:核桃幼苗生长和生理指标对不同质量分数外源硒的响应存在差异,外源硒对核桃幼苗地径有显著促进作用,对根尖数有显著抑制作用,对苗高增长量、叶片数增长量、茎分枝数增长量、总叶面积、总根长、总根表面积、总根体积和根分叉数有一定抑制作用,对茎和根质量无显著影响;适宜施用量的硒酸钠可显著提高幼苗叶片 SOD 和 CAT 活性以及可溶性还原糖和可溶性蛋白质含量。在开发富硒核桃产品时应根据实际需求施用硒肥。

关键词: 核桃; 硒酸钠; 生长指标; 生理指标; 相关性分析

中图分类号: Q945.78; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)03-0050-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.03.05

Effects of exogenous selenium on growth and physiological indexes of *Juglans regia* seedlings DUN Chunyao¹, LI Shuanglong^{1,①}, WAN Songsheng¹, WU Daikun¹, LI Chunlin¹, LU Yanjun² (1. Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture Academy of Forestry Sciences, Enshi 445000, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(3): 50-57

Abstract: Taking 0 mg·kg⁻¹ sodium selenate as the control group, the differences in growth and physiological indexes of *Juglans regia* Linn. seedlings treated with different mass fractions of exogenous selenium (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, and 45 mg·kg⁻¹ sodium selenate) were compared by using a pot experiment, and the correlations among growth indexes and physiological indexes were analyzed. The results show that compared with the control group, the ground diameter increment of *J. regia* seedlings in treatment groups of different mass fractions of sodium selenate significantly increase in general, while the number of root tip significantly decreases in general; the seedling height increment, leaf number increment, stem branching number increment, total leaf area, total root length, total root surface area, total root volume, and number of root bifurcation decrease in general, but there are no

收稿日期: 2023-08-18

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2023AFD082)

作者简介: 顿春垚(1991—),男,土家族,湖北巴东人,硕士,主要从事植物资源开发利用和经济林研究。

①通信作者 E-mail: lishl2007@163.com

引用格式: 顿春垚,李双龙,万松胜,等. 外源硒对核桃幼苗生长和生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(3): 50-57.

significant differences between most of the treatment groups; there are no significant variations in stem fresh mass, stem dry mass, root fresh mass, and root dry mass. Compared with the control group, the superoxide dismutase (SOD) activity in leaves of *J. regia* seedlings of 10–20 and 40 mg · kg⁻¹ sodium selenate treatment groups significantly increase, the catalase (CAT) activity of 5–15, 40, and 45 mg · kg⁻¹ sodium selenate treatment groups significantly increase, the malondialdehyde (MDA) content of 5, 30, and 35 mg · kg⁻¹ sodium selenate treatment groups significantly increase, the soluble reducing sugar content of 15 mg · kg⁻¹ sodium selenate treatment group significantly increases, and the soluble protein content of 10, 20, and 45 mg · kg⁻¹ sodium selenate treatment groups significantly increase. The correlation analysis result shows that there are significant correlations between a few growth indexes of *J. regia* seedlings, in which, the number of root bifurcation shows extremely significant positive correlations with total root length, total root surface area, total root volume, and number of root tip; the root fresh mass shows extremely significant positive correlations with total root length, total root surface area, total root volume, number of root tip, and number of root bifurcation; only SOD activity in leaves shows a significant negative correlation with MDA content between the physiological indexes. The comprehensive research result shows that there are differences in responses of growth and physiological indexes of *J. regia* seedlings to different mass fractions of exogenous selenium, and exogenous selenium has a significant promotion effect on ground diameter of *J. regia* seedlings, significant inhibitory effects on number of root tip, some inhibitory effects on seedling height increment, leaf number increment, stem branching number increment, total leaf area, total root length, total root surface area, total root volume, and number of root bifurcation, and no significant effect on stem and root masses of seedlings; suitable application amount of sodium selenate can significantly increase SOD and CAT activities in leaves of *J. regia* seedlings, as well as soluble reducing sugar and soluble protein contents. Selenium fertilizer should be applied according to actual needs when developing selenium-rich *J. regia* products.

Key words: *Juglans regia* Linn.; sodium selenate; growth index; physiological index; correlation analysis

硒是人体和植物必须的微量元素,不同地区土壤硒含量差别较大,无机硒被植物吸收进入体内后可与碳形成共价键,存在于各种有机硒化合物中,如硒代半胱氨酸、硒代甲硫氨酸和硒蛋白等^[1]。目前,通过人工增硒手段开发富硒食品成为了研究热点。核桃(*Juglans regia* Linn.)是世界上重要的坚果果树之一,分布较广^[2],其果实富含蛋白质,通过人工施加外源硒可提高核桃果仁硒含量^[3],有开发为富硒食品的可能性。

微量元素对植物抗逆性以及植物生长存在影响,部分微量元素可增强植物抗逆性,增加抗逆基因表达,对植物抗逆酶活性以及物质积累与生长有影响^[4-5]。近年来,关于硒在植物生长与抗逆生理中作用的研究逐渐增多。相关研究结果表明适量的硒有益于植物的生长发育以及对矿物质的吸收和利用^[6]。如在叶面和根施用质量浓度低于 10 mg · L⁻¹ 外源硒可使碎米荠(*Cardamine occulta* Hornem.)分枝数增加^[7];5 mg · m⁻²外源硒可增加白术(*Atractylodes macrocephala* Koidz.)的叶面积、比叶面积和产量^[8];质量浓度低于 0.5 mg · L⁻¹ 外源硒能促进花生

(*Arachis hypogaea* Linn.)幼苗生长,较对照组根系发达,侧根更多^[9];铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura et Migo)组培苗添加1 mg · L⁻¹外源硒后,其平均株高、叶片数、平均叶片长、生根数和平均根长均显著高于对照组^[10]。此外,也有研究发现一定浓度的外源硒会诱发植物的抗性反应^[11],提升植物抵御生物和非生物胁迫的能力^[6]。如 25 mg · kg⁻¹外源硒可显著提高水稻(*Oryza sativa* Linn.)的抗氧化能力,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性增加^[12];随着外源硒浓度的增加,烟草(*Nicotiana tabacum* Linn.)叶片中SOD活性呈升高的趋势,POD活性呈降低的趋势,CAT活性呈先升高后降低的趋势^[13]。自然界中的硒形态多样,植物对硒的吸收与运用主要来自土壤中+4价和+6价无机硒以及少量有机硒化合物^[14],作为+6价替代硒源,硒酸钠常被用作人工增硒种植的外源硒。现有报道中,苗高、地径、生物量和叶面积等指标是判断植物在外源硒作用下生长状况的常用指标;而SOD和CAT活性以及丙二醛(MDA)、多糖和蛋白质含量等指标则广泛用于判断植物在外源硒作用下的抗性生理变化。

目前,有关外源硒对核桃生长和抗逆性的研究尚不明确,不利于核桃的进一步开发、利用。本研究通过对核桃幼苗施加不同质量分数外源硒(硒酸钠),分析外源硒对核桃生长和生理指标的影响,以期初步确定外源硒的施用量,为开发富硒核桃产品提供基础理论支撑。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为核桃品种‘清香’(‘Qingxiang’)2年生嫁接苗,由湖北省东灵农业股份公司提供;硒酸钠为分析纯,购自西亚化学科技(山东)有限公司。实验地位于湖北省恩施土家族苗族自治州林业科学研究院实验大棚内(东经109.49°、北纬30.29°),该区域属亚热带气候区,雨热同期,实验培养温度为自然室温,实验期间最高气温为38.3℃,最低气温为11.4℃,平均气温为24.2℃。

1.2 方法

1.2.1 实验设计 实验时间为2022年3月27日至2022年10月21日。选取100株生长健壮,苗高、地径接近的核桃苗,栽植于盛有5 kg 蛭石与珍珠岩(体积比5:1)混合基质的培养盆(上口径29 cm、下口径22 cm、高26 cm)中,每盆1株,栽植后每盆立即浇2 L 纯水,其后每2周加1次Hogland营养液,培养4个半月后随机分为10组,编号为1~10,每组一次性根施不同质量分数硒酸钠溶液,施加后基质中硒酸钠质量分数分别为0、5、10、15、20、25、30、35、40和45 mg·kg⁻¹。同等条件连续管理70 d后测定数据。

1.2.2 生长指标测定 每组随机选取3株幼苗作为重复,实验处理前采用游标卡尺(精度0.02 mm)测量地径,采用直尺(精度1 mm)测量苗高,统计每株幼苗的叶片数和茎分枝数;处理70 d后再次测量植株的地径和苗高,统计叶片数和茎分枝数,并计算处理前后各指标的差值,即地径增长量、苗高增长量、叶片数增长量和茎分枝数增长量。结果以平均值计。

处理70 d后收取每株植株的根、茎和叶,采用方格网法^[15]测量总叶面积;使用winRHIZO根系分析软件(北京易科泰生态技术有限公司)测量直径小于或等于1.5 mm 新生根的总根长、总根表面积、总根体积、根尖数和根分叉数,分析根系生长情况;使用万分之一分析天平分别称量茎和根的鲜质量,将茎和根置

于110℃烘箱中烘干至恒质量,分别称量茎和根的干质量。结果以平均值计。

1.2.3 生理指标测定 每组另随机选取3株幼苗作为重复,分别在植株中部取较大的完整新鲜叶片0.1 g,加入的0.05 mol·L⁻¹磷酸缓冲液(pH 7.0)10 mL和少量石英砂,在冰浴条件下研磨成匀浆,在6 000 r·min⁻¹、4℃条件下离心20 min,上清液即为粗酶提取液。采用氮蓝四唑法^[16]测定超氧化物歧化酶活性,采用钼酸铵比色法^[17]测定过氧化氢酶活性,采用丙二醛(MDA)试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定丙二醛含量,采用蒽酮比色法^[18]测定可溶性还原糖含量,采用Lowry氏法^[19]测定可溶性蛋白质含量。

1.3 数据处理和分析

使用EXCEL 2007软件处理数据,使用IBM SPSS Statistics 22软件进行单因素方差分析和Pearson相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗生长的影响

2.1.1 对地上部分生长的影响 结果(表1)显示:随着硒酸钠质量分数的增加,核桃幼苗地径增长量总体呈升高的趋势,在35 mg·kg⁻¹时达到最大值(0.93 mm),除5 mg·kg⁻¹硒酸钠处理组外,其他处理组的地径增长量与对照(0 mg·kg⁻¹硒酸钠)组差异显著($P<0.05$)。随着硒酸钠质量分数的增加,苗高增长量和总叶面积总体呈降低的趋势,35和40 mg·kg⁻¹硒酸钠处理组的苗高增长量与对照组差异显著,不同质量分数硒酸钠处理组的总叶面积与对照组差异均不显著。随着硒酸钠质量分数的增加,叶片数增长量波动变化,5、15和40 mg·kg⁻¹硒酸钠处理组的叶片数增长量高于对照组,但差异不显著。随着硒酸钠质量分数的增加,茎分枝数增长量波动变化,不同质量分数硒酸钠处理组的茎分枝数增长量均低于对照组,但差异不显著。

总体上看,不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗地径有显著促进作用,对苗高增长量、叶片数增长量、茎分枝数增长量和总叶面积有一定抑制作用。

2.1.2 对茎和根质量的影响 结果(表1)显示:不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗茎鲜质量、茎干质量、根鲜质量、根干质量均无显著影响。其中,40 mg·kg⁻¹硒酸钠处理组的茎鲜质量高于对照组,20、30和40

表 1 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗地上部分生长以及茎和根质量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of different mass fractions of sodium selenate on above-ground part growth and stem and root masses of *Juglans regia* Linn. seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

硒酸钠质量分数/(mg·kg ⁻¹) Sodium selenate mass fraction	地径增长量/mm Ground diameter increment	苗高增长量/cm Seedling height increment	叶片数增长量 Leaf number increment	茎分枝数增长量 Stem branching number increment	总叶面积/cm ² Total leaf area	茎鲜质量/g Stem fresh mass	茎干质量/g Stem dry mass	根鲜质量/g Root fresh mass	根干质量/g Root dry mass
0(CK)	0.51±0.39b	2.29±0.80a	75.9±28.3abc	0.6±0.9a	1 284.49±368.93a	21.34±8.82a	8.20±2.81a	123.66±38.48a	61.29±19.11a
5	0.78±0.28b	1.19±0.45a	87.3±34.5a	0.2±1.3a	1 265.69±297.55a	13.75±7.15a	5.68±3.06a	137.01±37.39a	67.55±18.72a
10	0.83±0.23a	1.00±0.33ab	70.7±21.8abc	0.3±1.1a	1 146.40±369.77a	19.68±8.62a	8.09±3.44a	130.12±32.21a	59.74±14.66a
15	0.86±0.16a	0.94±0.20ab	78.1±39.9abc	0.5±1.7a	1 249.51±831.77a	19.78±10.96a	6.82±3.49a	116.27±35.39a	53.59±19.10a
20	0.81±0.20a	0.99±0.24ab	47.5±38.5c	-0.8±1.0a	1 213.31±672.86a	20.95±10.61a	9.02±4.81a	137.60±29.82a	68.91±13.63a
25	0.86±0.12a	0.94±0.26ab	40.1±19.3c	-0.7±0.8a	1 191.51±427.60a	17.32±6.76a	7.81±2.79a	112.02±35.71a	52.45±16.72a
30	0.89±0.17a	0.86±0.05ab	40.2±22.4c	-0.6±0.9a	1 077.65±528.15a	20.31±7.55a	8.69±3.31a	126.60±14.66a	66.14±6.47a
35	0.93±0.09a	0.80±0.18b	59.3±46.1abc	-0.6±1.2a	823.90±401.23a	18.10±8.73a	7.56±4.59a	109.43±23.44a	54.43±10.95a
40	0.91±0.12a	0.74±0.14b	81.6±20.2ab	0.4±1.7a	1 356.36±533.05a	26.26±10.58a	10.52±4.54a	126.38±25.82a	60.75±11.91a
45	0.84±0.18a	0.99±0.17ab	63.4±41.0abc	-0.1±1.3a	763.23±478.07a	14.59±8.47a	6.14±3.16a	104.96±24.12a	50.76±11.53a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences.

mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的茎干质量高于对照组, 5、10、20、30 和 40 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的根鲜质量高于对照组, 5、20 和 30 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的根干质量高于对照组。

2.1.3 对根系生长的影响 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗根系生长的影响见表 2。结果显示: 随着硒酸钠质量分数的增加, 核桃幼苗总根长、总根表面积、总根体积、根尖数和根分叉数波动变化, 但总体低于对照组, 其中, 10 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的总根长与对照组差异显著, 45 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的总根表面积与对照组差异显著, 不同质量分数硒酸钠处理组的总根体积与对照组差异均不显著, 除 25 和 30 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组外其他处理组的根尖数与对

照组差异显著, 10 和 45 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的根分叉数与对照组差异显著。

总体上看, 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗根尖数有显著抑制作用, 45 mg·kg⁻¹ 硒酸钠对总根长、总根表面积、总根体积和根分叉数有一定抑制作用。

2.2 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗生理指标的影响

不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗生理指标的影响见表 3。结果显示: 随着硒酸钠质量分数的增加, 核桃幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性以及丙二醛(MDA)、可溶性还原糖和可溶性蛋白质含量均波动变化。10、15、20 和 40 mg·kg⁻¹ 硒酸钠处理组的 SOD 活性显著高于对照

表 2 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗根系生长的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Effects of different mass fractions of sodium selenate on root growth of *Juglans regia* Linn. seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

硒酸钠质量分数/(mg·kg ⁻¹) Sodium selenate mass fraction	总根长/cm Total root length	总根表面积/cm ² Total root surface area	总根体积/cm ³ Total root volume	根尖数 Number of root tip	根分叉数 Number of root bifurcation
0(CK)	2 009.67±487.06a	1 273.73±411.58a	70.61±45.27a	5 541.3±654.1a	20 063.3±5 162.8a
5	1 418.91±479.07ab	1 166.68±376.07a	80.48±36.81a	3 340.9±1 018.1bc	16 500.8±6 670.4abc
10	1 073.46±299.06b	984.01±240.77ab	76.69±34.69a	2 536.6±645.2c	10 003.1±4 732.9c
15	1 482.03±674.01ab	1 100.90±480.34ab	69.84±34.50a	3 036.7±1 292.3bc	14 683.8±8 095.9abc
20	1 667.23±611.39ab	1 095.55±405.66ab	59.73±28.96a	3 754.0±1 348.7bc	16 023.8±7 762.4abc
25	2 031.95±512.86a	1 035.51±400.45ab	42.91±23.33a	4 803.0±1 000.5ab	21 362.7±6 037.9a
30	1 621.34±713.21ab	1 092.24±184.26ab	64.52±17.93a	3 956.2±1 274.4abc	18 881.4±5 771.1ab
35	1 405.34±577.10ab	957.09±363.75ab	57.27±36.01a	3 413.6±1 597.4bc	14 246.4±6 644.1abc
40	1 572.21±791.67ab	1 117.39±384.67ab	73.41±41.79a	3 578.8±1 502.8bc	16 014.8±9 169.5abc
45	1 107.20±567.57ab	719.54±173.57b	42.34±17.19a	2 413.0±1 213.5c	11 742.3±6 384.2bc

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences.

表3 不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗生理指标的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 3 Effects of different mass fractions of sodium selenate on physiological indexes of *Juglans regia* Linn. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

硒酸钠质量 分数/(mg · kg ⁻¹) Sodium selenate mass fraction	超氧化物歧化酶 活性/(U · g ⁻¹) Superoxide dismutase activity	过氧化氢酶 活性/(U · g ⁻¹) Catalase activity	丙二醛 含量/(nmol · mg ⁻¹) Malondialdehyde content	可溶性还原糖 含量/(mg · g ⁻¹) Soluble reducing sugar content	可溶性蛋白质 含量/(mg · g ⁻¹) Soluble protein content
0(CK)	171.74±2.34d	9.29±0.33d	2.97±0.27de	38.69±0.38b	14.58±1.07b
5	78.88±6.99i	18.58±2.67b	11.23±1.70a	29.05±0.33g	8.83±1.34c
10	193.17±4.20b	19.51±0.60b	1.96±0.08e	32.02±0.17f	20.63±0.75a
15	196.27±1.94b	12.62±0.37c	2.79±0.34de	42.12±0.32a	15.07±1.47b
20	222.67±0.93a	8.73±0.29de	2.68±0.19de	37.86±0.37c	20.73±1.91a
25	136.65±0.54f	7.51±0.48e	3.26±0.20de	38.69±0.36b	16.07±0.89b
30	144.10±0.54e	2.74±0.33f	4.90±0.66c	35.00±0.25de	8.93±1.49c
35	122.05±0.93g	9.63±0.43d	6.61±1.82b	39.28±0.54b	15.87±1.69b
40	177.33±1.94c	14.18±0.47c	4.29±0.56cd	35.26±0.36d	7.54±1.04c
45	109.94±3.36h	28.52±0.19a	2.00±0.41e	34.57±0.35e	23.80±5.19a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences.

(0 mg · kg⁻¹ 硒酸钠) 组, 其余处理组的 SOD 活性均显著低于对照组。5、10、15、40 和 45 mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的 CAT 活性显著高于对照组, 25 和 30 mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的 CAT 活性显著低于对照组。5、30 和 35 mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的 MDA 含量显著高于对照组。15 mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的可溶性还原糖含量显著高于对照组, 5、10、20、30、40 和 45 mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的可溶性还原糖含量显著低于对照组。10、20 和 45 mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的可溶性蛋白质含量显著高于对照组, 5、30 和 40

mg · kg⁻¹ 硒酸钠处理组的可溶性蛋白质含量显著低于对照组。

总体上看, 10、15 和 40 mg · kg⁻¹ 硒酸钠对核桃幼苗叶片 SOD 和 CAT 活性均有显著促进作用, 多数质量分数硒酸钠对叶片可溶性还原糖含量有显著抑制作用, 10、20 和 45 mg · kg⁻¹ 硒酸钠对叶片可溶性蛋白质含量有显著促进作用。

2.3 核桃幼苗生长和生理指标的相关性分析

硒酸钠处理下核桃幼苗生长指标间相关性分析结果(表4)显示: 核桃幼苗地径增长量与苗高增长量

表4 硒酸钠处理下核桃幼苗生长指标间的相关系数¹⁾Table 4 Correlation coefficient between on growth indexes of *Juglans regia* Linn. seedlings treated with sodium selenate¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient												
	GDI	SHI	LNI	SBNI	TRL	TRSA	TRV	NRT	NRB	TLA	SFM	SDM	RFM
SHI	-0.988 **												
LNI	-0.153	0.133											
SBNI	-0.321	0.333	0.902 **										
TRL	-0.418	0.443	-0.403	-0.248									
TRSA	-0.525	0.513	0.190	0.227	0.667 **								
TRV	-0.256	0.222	0.677 *	0.609	0.068	0.769 **							
NRT	-0.584	0.624	-0.368	-0.169	0.900 **	0.679 **	0.173						
NRB	-0.331	0.363	-0.415	-0.319	0.889 **	0.794 **	0.317 **	0.859 **					
TLA	0.180	-0.022	0.580 **	0.415 **	0.043	0.032	-0.016	0.053	0.011				
SFM	0.024	0.188	0.027	-0.075	0.141	0.174	0.074	0.167	0.136	0.002			
SDM	0.088	0.148	0.128	0.207	-0.063	0.001	0.001	0.029	-0.067	0.241 *	0.301 **		
RFM	0.193	-0.190	0.052	0.111	0.326 **	0.543 **	0.462 **	0.330 **	0.408 **	-0.004	0.199	-0.065	
RDM	0.082	-0.137	0.015	0.020	-0.062	-0.017	0.030	0.007	-0.079	0.274 **	0.035	0.159	0.123

¹⁾ GDI: 地径增长量 Ground diameter increment; SHI: 苗高增长量 Seedling height increment; LNI: 叶片数增长量 Leaf number increment; SBNI: 茎分枝数增长量 Stem branching number increment; TRL: 总根长 Total root length; TRSA: 总根表面积 Total root surface area; TRV: 总根体积 Total root volume; NRT: 根尖数 Number of root tip; NRB: 根分叉数 Number of root bifurcation; TLA: 总叶面积 Total leaf area; SFM: 茎鲜质量 Stem fresh mass; SDM: 茎干质量 Stem dry mass; RFM: 根鲜质量 Root fresh mass; RDM: 根干质量 Root dry mass. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

呈极显著($P<0.01$)负相关,相关系数为 -0.988 ;叶片数增长量与茎分枝数增长量和总叶面积呈极显著正相关,与总根体积呈显著($P<0.05$)正相关,相关系数分别为 0.902 、 0.580 和 0.677 ;茎分枝数增长量与总叶面积呈极显著正相关,相关系数为 0.415 ;总根长与总根表面积、根尖数、根分叉数和根鲜质量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.667 、 0.900 、 0.889 和 0.326 ;总根表面积与总根体积、根尖数、根分叉数和根鲜质量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.769 、 0.679 、 0.794 和 0.543 ;总根体积与根分叉数和根鲜质量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.317 和 0.462 ;根尖数与根分叉数和根鲜质量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.859 和 0.330 ;根分叉数与根鲜质量呈极显著正相关,相关系数为 0.408 ;总叶面积与茎干质量呈显著正相关,与根干质量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.241 和 0.274 ;茎鲜质量与茎干质量呈极显著正相关,相关系数为 0.301 。

硒酸钠处理下核桃幼苗生理指标间的相关性分析结果(表5)显示:核桃幼苗叶片超氧化物歧化酶活性与丙二醛含量呈显著负相关,相关系数为 -0.679 ,其余生理指标间的相关性均不显著。

表5 硒酸钠处理下核桃幼苗生理指标间的相关系数¹⁾
Table 5 Correlation coefficient between physiological indexes of *Juglans regia* Linn. seedlings treated with sodium selenate¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient			
	A _{SOD}	A _{CAT}	C _{MDA}	C _{SRS}
A _{CAT}	-0.300			
C _{MDA}	-0.679 *	-0.042		
C _{SRS}	0.455	-0.483	-0.481	
C _{SP}	0.236	0.435	-0.622	0.181

¹⁾ A_{SOD}: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; A_{CAT}: 过氧化氢酶活性 Catalase activity; C_{MDA}: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; C_{SRS}: 可溶性还原糖含量 Soluble reducing sugar content; C_{SP}: 可溶性蛋白质含量 Soluble protein content. *: $P<0.05$.

3 讨论和结论

相关研究结果显示:叶面喷施 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源硒可以促进生菜(*Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort.)株高的增长^[20]; $6.25\sim 25.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒可使魔芋(*Amorphophallus konjac* K. Koch)柄茎、叶幅及株高明增加^[21];低质量分数(小于或等于 $4.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)硒处理可显著提高烟草品种‘云烟87’(‘Yunyan

87’)各部位对矿质元素的吸收,从而促进植物生长,高质量分数(大于或等于 $11.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)硒处理则表现为抑制^[22]。说明不同植物生长对不同质量分数外源硒的响应表现各异。本研究中,核桃幼苗生长对不同质量分数外源硒的响应不同,如幼苗叶片数增长量和茎分枝数增长量均随着外源硒质量分数的增加波动变化, $20\sim 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒酸钠处理组的叶片数增长量明显低于对照($0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒酸钠)组,低于或高于该范围的硒酸钠处理组与对照组相比并未表现出明显差异。一般而言,植物茎的初生长会使植物形成新的叶原基和腋芽原基,二者分别决定了植物叶片数和分枝数^[23]⁵⁴⁻⁵⁸。本研究中, $20\sim 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒酸钠处理组的核桃幼苗的叶片数增长量和茎分枝数增长量明显低于对照组,说明该范围内的硒酸钠会抑制叶原基和腋芽原基的分化,进而影响叶片增加和茎分枝。

刘婷等^[7]采用叶面喷施和根部追施不同质量浓度外源硒的方式处理碎米荠,发现株高降低,根施 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源硒后株高降低了 22% 。植物苗高的增加源于茎的伸长生长,其高度由细胞数量和大小决定^[24]。本研究中,不同质量分数硒酸钠处理的核桃幼苗苗高增长量均明显低于对照组,说明外源硒进入核桃幼苗后抑制了植物茎的伸长生长。植物茎伸长生长的调控机制复杂,涉及许多基因家族和转录因子以及植物激素作用。例如:抑制苹果(*Malus pumila* Mill.)GA20ox2基因的表达会减少赤霉素(GA)的合成,导致植株出现矮化现象^[25];油菜素内酯(BR)和脱落酸(ABA)等通过影响次生细胞壁生长等调控植物茎伸长生长^[26-27];在拟南芥[*Arabidopsis thaliana* (Linn.) Heynh.]、竹类和水稻(*Oryza sativa* Linn.)等植物中,C3H14、CYP85A1和CYP94C2b等基因参与调控植物的茎伸长生长^[28-30]。植物茎增粗的主要原因是维管形成层进行平周分裂,向外产生次生韧皮部,向内产生次生木质部,使茎直径逐渐增加^[23]⁵⁸⁻⁶⁸、^[31]。本研究中,不同质量分数硒酸钠处理的核桃幼苗地径均明显增加,说明外源硒进入核桃植株后促进了维管形成层的平周分裂,茎增粗,这可能是相关基因诱导了形成层和木质部细胞分化^[32]。不同质量分数硒酸钠对核桃幼苗茎伸长生长和茎增粗相关基因表达的调控机制值得进一步研究。此外,不同质量分数硒酸钠处理的核桃幼苗茎的鲜质量和干质量变化不大,与对照组均无显著差异。一方面可能

是外源硒对茎增粗的促进量与对茎伸长生长的抑制量在生物量上发生了抵消;另一方面可能是由于实验时间较短,尚不足以使器官间的差异达到统计学水平,下一步可通过延长实验时间明确具体原因。

低质量分数(小于或等于 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 外源硒处理提高了烤烟叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(CAT)活性,能不同程度缓解烤烟受到的干旱胁迫^[33];随着硒肥施用量的增加,‘红香酥’梨(*Pyrus ‘Hongxiangsu’*)叶片 SOD 和 CAT 活性呈现先升高后降低的趋势^[34];紫色生菜添加外源硒后,叶片 SOD 和 CAT 活性均显著提高^[35]。本研究中,随着硒酸钠质量分数的增加,核桃幼苗叶片 SOD 和 CAT 活性均呈波动变化,其中,10~20 以及 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠对核桃幼苗叶片 SOD 活性有显著促进作用,5~15 以及 $40 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠对核桃幼苗叶片 CAT 活性有显著促进作用。说明一定施用量的外源硒可使植物酶活性提高,抗逆性增强。陈彪等^[33] 研究结果显示:低质量分数(小于或等于 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 外源硒处理降低了干旱胁迫下烤烟叶片丙二醛(MDA)含量,而高质量分数($12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 外源硒处理则提高了 MDA 的含量;张艳嫣等^[36] 发现, $0.05 \sim 0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源硒处理可以降低低温胁迫下铁皮石斛幼苗叶片 MDA 含量,但大于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源硒处理下的效果则相反。但本研究中的核桃幼苗叶片 MDA 含量并未简单呈现上述“低浓度抑制、高浓度促进”的现象。相关性分析结果显示:核桃幼苗叶片 SOD 活性与 MDA 含量呈显著负相关。 $5, 30$ 和 $35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠处理的核桃幼苗叶片 MDA 含量显著高于对照组,而 SOD 活性显著低于对照组。这可能是由于植物体内 SOD 活性降低会导致氧自由基与脂质结合量增加,从而形成大量的 MDA^[37]。以上结果表明:适宜施用量的外源硒能提高植物叶片 SOD 活性,同时降低 MDA 含量,超过一定施用量则会降低 SOD 活性,同时提高 MDA 含量,但不同植物种类适宜的施用量不同。此外,CAT 活性与 MDA 含量间未表现出显著相关性。推测核桃幼苗叶片 SOD 是清除氧自由基的主要酶,同时 H_2O_2 可能不是核桃幼苗叶片中主要的氧自由基,CAT 参与拮抗氧自由基与脂质反应较为有限。

相关研究结果显示:银杏(*Ginkgo biloba* Linn.) 叶面施硒后的叶片可溶性糖和可溶性蛋白质含量均显著增加^[38],低质量浓度亚硒酸盐(小于或等于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理可提高野葛[*Pueraria montana* var.

lobata (Ohwi) Maesen et S. M. Almeida] 幼苗叶片可溶性蛋白质含量^[39]。本研究中,仅 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠处理组的可溶性还原糖含量显著高于对照组,10、20 和 $45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠处理组的可溶性蛋白质含量显著高于对照组。表明一定施用量的外源硒可以提高植物体中可溶性还原糖和可溶性蛋白质含量。相关性分析结果显示:可溶性还原糖含量和可溶性蛋白质含量与 SOD 活性呈不显著正相关。外源硒处理是否通过增加 SOD 活性降低糖类与蛋白质的氧化量或硒元素直接作用于核桃幼苗内糖类和蛋白质的合成过程尚需进一步验证。

综上所述,核桃幼苗生长和生理指标对不同质量分数外源硒的响应存在差异。总体上看,外源硒对核桃幼苗地径有显著促进作用,对根尖数有显著抑制作用,对苗高增长量、叶片数增长量、茎分枝数增长量、总叶面积、总根长、总根表面积、总根体积和根分叉数有一定的抑制作用,对茎和根质量无显著影响; $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠可显著提高叶片 SOD 和 CAT 活性, $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠可显著提高叶片可溶性还原糖含量, $10, 20$ 和 $45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒酸钠可显著提高叶片可溶性蛋白质含量。但本实验开展时间较短,且仅在同一气候环境下进行,实验数据具有一定的局限性,未来可在不同环境条件下继续开展研究。

参考文献:

- [1] 陈永波,刘淑琴,刘瑶,等.富硒产品中硒的形态分析及化学评分模式的建立[J].生物资源,2021,43(1):79-85.
- [2] 马婷,宁德鲁.中国核桃产业国际竞争力分析[J].林业科技通讯,2021(1):3-7.
- [3] ZHANG S P, ZHENG H Y, ZHANG R, et al. Extraction optimization and antioxidant activity evaluation of Se-enriched walnut proteins[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16719.
- [4] 郭瑜瑞,王渭玲,杨祎辰,等.4种微量元素对蒙古黄芪幼苗形态建成及抗逆性的影响[J].西北农业学报,2014,23(6):172-179.
- [5] 李方文,周子军,刘晓莉,等.木芙蓉营养生长旺期主要矿质元素的吸收与分布特征[J].中国土壤与肥料,2021(1):256-261.
- [6] 李琳玲,张国际,郭杰,等.植物对硒的吸收和代谢研究进展及对富硒种植业发展的启示[J].湖北农业科学,2021,60(6):5-14.
- [7] 刘婷,候运和,郑甲成.外源硒对碎米荠农艺性状及硒含量的影响[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2018,36(4):365-369.
- [8] 黄思勇,周光龙,康振兴,等.外源硒对咸丰白木生长及其根际土壤理化性质的影响[J].中药材,2020,43(9):2085-2090.

- [9] 施和平, 张晓元, 许 晟. 水培条件下硒对花生幼苗生长和开花及抗氧化酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(12): 2489-2495.
- [10] 李 婷, 张尚文, 杨 彬, 等. 硒对铁皮石斛组培苗生长、SOD活性及多糖和叶绿素含量的影响[J]. 广西林业科学, 2022, 51(6): 798-802.
- [11] 姜 英, 曾昭海, 杨麒生, 等. 植物硒吸收转化机制及生理作用研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 4067-4076.
- [12] 卜少腾, 李衍亮, 李玉义, 等. 不同硒累积型水稻耐高硒毒害差异特征研究[J]. 核农学报, 2023, 37(8): 1681-1689.
- [13] 樊 俊. 硒在土壤-植物中的转化及烟株对硒的富集和抗性机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015: 71-73.
- [14] 周 菲, 彭 琴, 王 敏, 等. 土壤-植物体系中硒生物有效性评价研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(6): 461-472.
- [15] 江胜利, 金荷仙, 华晓莉, 等. 杭州常见绿化植物滞尘能力研究[J]. 林业科技开发, 2013, 27(5): 47-50.
- [16] 杨 明, 刘晓辉, 麦汉伦. 雪莲果 SOD 不同环境下活性研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2016, 34(2): 32-34.
- [17] 杨 节. 茶树中过氧化氢酶的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 21-22.
- [18] 张述伟, 宗营杰, 方春燕, 等. 萘酮比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 196-200.
- [19] 张 品, 余顺波, 朱文秀, 等. 紫苏饼粕分离蛋白中蛋白质含量测定方法比较[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 150-154.
- [20] 宋 波, 温佳乐, 陆佳怡, 等. 外源硒对沙质栽培生菜生长和品质的影响[J]. 现代园艺, 2021(4): 3-5.
- [21] 蔡阳光, 覃剑锋, 陈国爱, 等. 外源硒对岚皋花魔芋生长发育的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 35-42.
- [22] 韩 丹, 熊双莲, 许自成, 等. 硒对烤烟生长、化学指标及矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 2072-2079.
- [23] 马炜梁. 植物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [24] 皇甫欣雨, 李有梅, 谢兆森. 果树新梢节间生长规律及其调控机制[J]. 植物生理学报, 2024, 60(2): 284-294.
- [25] 魏灵珠, 程建徽, 李 琳, 等. 赤霉素生物合成与信号传递对植物株高的调控[J]. 生物工程学报, 2012, 28(2): 144-153.
- [26] MORI M, NOMURA T, OOKA H, et al. Isolation and characterization of a rice dwarf mutant with a defect in brassinosteroid biosynthesis [J]. Plant Physiology, 2002, 130: 1152-1161.
- [27] LIU C, YU H S, RAO X L, et al. Abscisic acid regulates secondary cell-wall formation and lignin deposition in *Arabidopsis thaliana* through phosphorylation of NST1 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(5): e2010911118.
- [28] CHAI G H, KONG Y Z, ZHU M, et al. *Arabidopsis* C3H14 and C3H15 have overlapping roles in the regulation of secondary wall thickening and anther development [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(9): 2595-2609.
- [29] 陈 炜, 赵建文, 张智俊, 等. 竹类植物中 *CYP85A1* 基因的克隆及表达分析[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 653-663.
- [30] KUROTANI K-I, HATTORI T, TAKEDA S. Overexpression of a CYP94 family gene *CYP94C2b* increases internode length and plant height in rice [J]. Plant Signaling Behavior, 2015, 10(7): e1046667.
- [31] SHI D, LEOVKA I, LÓPEZ-SALMERÓN V, et al. Bifacial cambium stem cells generate xylem and phloem during radial plant growth [J]. Development, 2019, 146: dev171355.
- [32] ZHU Y Y, SONG D L, XU P, et al. A *HD-ZIP III* gene, *PtrHB4*, is required for interfascicular cambium development in *Populus* [J]. Plant Biotechnology Journal, 2018, 16: 808-817.
- [33] 陈 彪, 李继伟, 王小东, 等. 外源硒对干旱胁迫下烤烟生长和生理特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2018, 54(1): 165-172.
- [34] 冯 涛, 周国华, 卢立波. 施硒肥对梨树生理、光合作用和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2020(11): 37-41.
- [35] 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.
- [36] 张艳嫣, 陈 丹, 谭艳玲, 等. 外源硒对低温胁迫下铁皮石斛幼苗的缓解效应及其抗氧化生理特征变化 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 747-754.
- [37] ZHUANG X Y, ZHAO B, LIU S, et al. Non-covalent interactions between superoxide dismutase and flavonoids studied by native mass spectrometry combined with molecular simulations [J]. Analytical Chemistry, 2016, 88(23): 11720-11726.
- [38] 余 洁. 外源亚硒酸钠影响银杏叶萜类合成的生理与分子机理[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 9-12.
- [39] 郭坤元, 何银生, 林先明, 等. 亚硒酸盐对野葛根幼苗形态及生理指标的影响 [J]. 中药材, 2020, 43(3): 532-535.

(责任编辑: 郭严冬)