果 树 学 报 2026,43(8):2072-2084
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250546

土施外源硒对瑞雪苹果不同器官硒分配及吸收转运的影响

高艺闻,张惠钫,胡秋硕,葛润雪,李思晗,张雪梅*

(河北农业大学林学院,河北保定 071000)

摘 要:【目的】比较硒处理对苹果器官全硒、有机硒、无机硒含量的影响,探究硒吸收转运规律,为生产富硒苹果提供理论基础。**【方法】**以瑞雪苹果为试材,于果实膨大期土施富硒(Se)和非富硒有机肥(CK),测定果实、叶片等器官的全硒、有机硒和无机硒含量及相关指标。**【结果】**外源硒施用后瑞雪苹果器官的全硒含量从高到低依次为地下须根>砧木地下茎段>主干>侧枝>叶片>果实,有机硒含量为地下须根>砧木地下茎段>主干>侧枝>叶片>果实,均从地下须根到果实(即植株从下到上)逐渐减少;各器官无机硒含量表现为叶片>地下须根>侧枝>主干>砧木地下茎段>果实。CK处理下地下须根的全硒、有机硒、无机硒含量均最高,全硒含量从高到低依次为地下须根>侧枝>主干>砧木地下茎段>叶片>果实;有机硒含量为地下须根>主干>侧枝>果实>叶片>砧木地下茎段;无机硒含量为地下须根>砧木地下茎段>侧枝>叶片>主干>果实。除砧木地下茎段外,硒处理显著提高了瑞雪苹果其他器官全硒、有机硒、无机硒含量及有机硒百分含量;硒处理下全硒累积量、富集系数、分配率、转运系数均以地下须根较高,分别达到19.31 μg、236.44%、35.99%、236.46%,CK的全硒累积量、富集系数、转运系数均以地下须根较高,分别达到6.78 μg、172.75%、172.74%;外源硒处理显著提高了土壤的全硒和有效硒含量。**【结论】**在树体吸收转运硒的过程中,地下须根占据重要地位,是树体通过土壤吸收转运硒的第一个通道,决定了硒运送到地上部的效率。与施非富硒有机肥相比,富硒处理提高了树体不同器官的硒含量,其中果实硒含量(*w*,后同)为60.67 μg·kg^{-1},达到富硒苹果标准(30 μg·kg^{-1})。因此,可以通过施用外源硒的方式生产富硒苹果,为合理使用硒肥生产富硒苹果提供理论依据,满足人体对硒的营养需求。

关键词:苹果;硒;吸收;转运

中图分类号:S661.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2072-13

Effects of exogenous selenium application on selenium distribution, absorption-translocation in different organs of Ruixue apple

Gao Yiwen, Zhang Huifang, Hu Qiushuo, Ge Runxue, Li Sihan, Zhang Xuemei*

(College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract:【Objective】The study aimed to explore the absorption and translocation patterns of exogenous selenium in different organs of apple trees. After applying selenium-enriched organic fertilizer and an equal amount of non-selenium-enriched organic fertilizer to Ruixue apple trees, we measured the total selenium, organic selenium, and inorganic selenium contents in various organs of the apple trees in order to provide a theoretical basis for the scientific production of selenium-enriched apples.【Methods】Taking Ruixue apple trees (with T337 as the rootstock) as experimental materials, a controlled pot experiment was conducted. During the fruit enlargement period, apply 0.05 kg per plant of selenium-enriched organic fertilizer evenly in the ring-shaped groove. An equal amount of non-selenium-enriched organic fertilizer was used as the control (CK). At the fruit maturity stage, the whole fruits, leaves, later-

收稿日期:2025-10-20 **接受日期:**2026-01-07

基金项目:河北省自然科学基金项目(编号:C2023204128)

作者简介:高艺闻,女,在读硕士研究生,主要从事经济林研究。E-mail:gaoyiwen2023@126.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:zhangxuemei888@163.com

al branches, main trunk, underground stem segments of the rootstock, and underground fibrous roots of the trees were collected *via* destructive sampling. Each organ was excised, brought back to the laboratory, rinsed with deionized water, dried in an oven at 105 ℃ for 30 minutes, and then baked at 80 ℃ for 8 hours. After that, the dry mass of each organ was weighed using a balance. Each organ was crushed using a grinder and sealed in a bag for the determination of total selenium and inorganic selenium content using fluorescence spectrophotometry. After the soil samples were naturally air- dried, they were crushed using a grinder, passed through a 100-mesh sieve, and then placed in sealed bags for the determination of total selenium and available selenium content by fluorescence spectrophotometry. By comparing indicators such as total selenium, organic selenium, and inorganic selenium content in various organs, the absorption, translocation, and distribution patterns of exogenous selenium in different tree organs were determined.【Results】After the application of exogenous selenium, the total selenium and organic selenium contents in all organs of Ruixue apples gradually decreased from the underground fibrous roots to the fruits (i.e., from the bottom to the top of the plant). Specifically, the order of total selenium content from high to low was: underground fibrous roots ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ main trunk ＞ lateral branches ＞ leaves ＞ fruits. The order of organic selenium content from high to low followed the same pattern: underground fibrous roots ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ main trunk ＞ lateral branches ＞ leaves ＞ fruits. By contrast, the order of inorganic selenium content from highest to lowest was: leaves ＞ underground fibrous roots ＞ lateral branches ＞ main trunk ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ fruits. The percentage of organic selenium in each organ reached over 60%. The total selenium accumulation, ranked from highest to lowest, was as follows: main trunk ＞ underground fibrous roots ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ fruits ＞ leaves ＞ lateral branches. Sorted by enrichment coefficient from largest to smallest, the order was as follows: underground fibrous roots ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ main trunk ＞ lateral branches ＞ leaves ＞ fruits. Sorted by distribution rate from largest to smallest, the order was as follows: main trunk ＞ underground fibrous roots＞the underground stem segment of the rootstock ＞ fruits ＞leaves＞lateral branches. The transport coefficients sorted from largest to smallest were as follows: $TF_{\text{Soil-Underground fibrous roots}}$ ＞ $TF_{\text{Main trunk-Lateral branches}}$ ＞ $TF_{\text{Lateral branches-Leaves}}$ ＞ $TF_{\text{Underground fibrous roots-Main trunk}}$ ＞ $TF_{\text{Leaves-Fruits}}$ ＞ $TF_{\text{Underground fibrous roots-The underground stem segment of the rootstock}}$. Among all organs of Ruixue apples in the CK treatment, total selenium content was the highest in underground fibrous roots. The total selenium content from high to low was as follows: Underground fibrous roots ＞ lateral branches ＞ main trunk ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ leaves ＞ fruits, and the organic selenium content, from highest to lowest, was as follows: underground fibrous roots ＞ main trunk ＞ lateral branches ＞ fruits ＞ leaves ＞ the underground stem segment of the rootstock. The inorganic selenium content, ranked from highest to lowest, was as follows: underground fibrous roots ＞ the underground stem segments of the rootstock ＞ lateral branches ＞ leaves ＞ main trunk ＞ fruits. The percentage of organic selenium in each organ was significantly lower than that of CK. The total selenium accumulation, ranked from highest to lowest, was as follows: underground fibrous roots ＞ main trunk ＞ fruits ＞ leaves ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ lateral branches. The enrichment coefficients, sorted from largest to smallest, were as follows: underground fibrous roots ＞ lateral branches ＞ main trunk ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ leaves ＞ fruits, and the distribution rate from largest to smallest was as follows: underground fibrous roots ＞ fruits ＞ leaves ＞ the underground stem segment of the rootstock ＞ lateral branches. The transport coefficients sorted from largest to smallest were as follows: $TF_{\text{Soil-Underground fibrous roots}}$ ＞ $TF_{\text{The underground stem segment of the rootstock-Main trunk}}$ ＞

$TF_{Main\ trunk-Lateral\ branches} > TF_{Leaves-Fruits} > TF_{Lateral\ branches-Leaves} > TF_{Underground\ fibrous\ roots-The\ underground\ stem\ segment\ of\ the\ rootstock}$. Except that the inorganic selenium content in the underground stem segment of the rootstock under exogenous selenium treatment was lower than that of CK, exogenous selenium treatment significantly increased the total selenium content, organic selenium content, inorganic selenium content, and the percentage of organic selenium in each organ of Ruixue apples compared with CK. Under selenium treatments, total selenium accumulation, enrichment coefficient, distribution rate and translocation coefficient were all higher in fibrous roots, reaching 19.31 μg, 236.44%, 35.99% and 236.46%, respectively for the CK group, fibrous roots also exhibited the highest total selenium accumulation, enrichment coefficient, and translocation coefficient, which were 6.78 μg, 172.75%, and 172.74%, respectively. Exogenous selenium application significantly increased both total soil selenium content and available soil selenium content.【Conclusion】Compared with the application of selenium-organic fertilizer, exogenous selenium application increased the selenium content in different organs of the tree. The selenium content in fruits reached 60.67 $\mu g \cdot kg^{-1}$, meeting the standard for selenium-enriched apples (30 $\mu g \cdot kg^{-1}$). Therefore, selenium-enriched apples could be produced by properly applying exogenous selenium.

Key words: Apple; Selenium; Absorption; Translocation

硒(Se)是人体不能合成的必需微量元素之一[1-2],必须依赖植物吸收并转化成有效态硒才能被人体吸收利用[3]。硒具有保护心血管[4]、抗氧化[5]、保护视觉器官[6]、促进生长[7]、提高免疫力[8]等多种生理功能,对人类健康具有重要的作用。人体中的硒主要来源于食物,植物硒含量维持在较安全范围内,80%以有机硒形式存在。人体吸收有机硒(硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸等)的效率显著高于无机硒(硒酸盐、亚硒酸盐等)[9]。植物源硒有效保证了人体对硒摄取的安全性[10]。目前,富硒产品包括苹果[11-12]、樱桃[13]、葡萄[14]、猕猴桃[15]、桃[16]等,研究方向多集中于通过施加外源硒提高果实硒含量、改善果实品质等方面,而关于硒吸收转运机制的研究较少。

苹果(*Malus domestica* Borkh.)是蔷薇科(Rosasceae)苹果属(*Malus*)植物,为多年生落叶乔木[17]。作为世界四大水果之一,苹果在世界上广泛种植,其肉质清脆、多汁,味道酸甜可口,还含有多酚、三萜类化合物、果胶、多种维生素以及人体必需的微量元素,具有抗氧化、抗衰老、抗癌、抗辐射、防龋齿、防心血管疾病等多种功效[18]。近些年来,苹果对硒吸收转运的研究主要集中在提高果实硒含量和品质方面,关于不同器官的硒吸收转运规律研究较少。因此,本研究通过盆栽控制试验,分析土施富硒有机肥对苹果器官硒分配的影响,明确苹果对硒吸收、转运、积累和分布的变化规律,为合理使用硒肥生产富硒苹果提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

2024年3—10月在河北农业大学苗圃开展试验,土壤为壤砂土,全氮含量(*w*,下同)0.97 $g \cdot kg^{-1}$,有效磷含量92.08 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾含量128.40 $mg \cdot kg^{-1}$,有机质含量21.60 $g \cdot kg^{-1}$,全硒含量0.170 $mg \cdot kg^{-1}$,有效硒含量0.038 $mg \cdot kg^{-1}$,pH值为7.67。

1.2 试验材料

以3年生瑞雪苹果(砧木为T337)为试材,嫁接苗栽植于黑色控根器中(控根器上口直径50 cm,高60 cm),盆中土壤高40 cm(土壤质量30 kg),树势中等,结果正常,常规田间管理。

供试富硒有机肥购自苏州硒谷科技有限公司,执行标准NY 525—2021[鲁农肥(2021)准字8734号],硒含量1000 $mg \cdot kg^{-1}$。供试非富硒有机肥购自邢台绿桐农业科技有限公司,符合农业行业标准NY 525—2021有机肥料,硒含量0.001 $mg \cdot kg^{-1}$[19](表1)。

1.3 试验设计

2024年7月上旬(果实膨大期)施用富硒和非富硒有机肥,每株用量为0.05 kg。单株小区,3次重复,共6株树。在距盆栽苹果主干10 cm处开环状沟,宽度和深度均为5~10 cm,将有机肥均匀撒施在环沟内,然后将土回填;其他管理措施相同。

1.4 样品的采集与预处理

于果实成熟期,对单株果实、叶片、侧枝、主干、

表1　供试肥料基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of the test fertilizers

肥料类型 Fertilizer type	w（氮） N content/%	w（磷） P content/%	w（钾） K content/%	w（有机质） Soil organic matter content/%	pH
富硒有机肥 Selenium-enriched organic fertilizer	2.23±0.06	1.21±0.02	1.70±0.03	39.35±0.06	7.19±0.10
非富硒有机肥 Non-selenium-enriched organic fertilizer	2.15±0.04	1.12±0.02	1.72±0.02	39.24±0.05	7.22±0.08

砧木地下茎段（地下须根直接着生于矮化自根砧苗木的地下茎段上）、地下须根取样，称取质量后立即带回实验室。样品经去离子水冲洗，吸干水分，于烘箱内105 ℃杀青30 min，80 ℃烘干8 h至恒质量，最后用万分之一天平称取干质量（DW）。使用粉碎机将样品粉碎后置于密封袋中保存待测。将控根器中的土壤混匀取样，平铺于纸上，自然风干后使用粉碎机粉碎，过100目筛后置于密封袋中保存待测。

1.5　分析方法

1.5.1　器官硒含量　（1）全硒含量：根据GB 5009.93—2017 食品安全国家标准-食品中硒的测定[20]，采用荧光分光光度法测定果实、叶片、枝条、根系的全硒含量。

样品预处理：准确称取2 g（精确至0.001 g）果实、叶片、侧枝、主干、砧木地下茎段、地下须根置于消煮管中，加入10 mL硝酸-高氯酸混合酸（9∶1），盖上漏斗冷消化过夜。次日于消煮炉上加热，并及时补加硝酸。当溶液变为清亮无色并伴有白烟产生时，继续加热至剩余体积约2 mL，切不可蒸干；冷却后加入5 mL盐酸溶液（6 mol·L^{-1}），继续加热至溶液变为清亮无色并伴有白烟产生，再继续加热至剩余体积约2 mL，冷却备用。

硒标准系列溶液：准确吸取硒标准使用液（50.0 μg·L^{-1}）0、0.20、1.00、2.00和4.00 mL，对应硒质量分别为0、0.010、0.050、0.100及0.200 μg。

将消化后的试样溶液以及硒标准系列溶液加入盐酸溶液（1∶9）至5 mL后，加入20 mL EDTA混合液，用氨水溶液（1∶1）及盐酸溶液调节pH=1.5~2.0（溶液呈淡红橙色）。以下步骤在暗室操作：加入2，3-二氨基萘试剂（1 g·L^{-1}）3 mL，混匀后置于沸水浴中加热5 min，取出冷却；加入环己烷3 mL，振摇4 min，将全部溶液移入分液漏斗，待分层后弃去水层，将环己烷层由分液漏斗上口倾入带盖试管中，勿使环己烷中混入水滴，待测。

样品测定：将荧光分光光度计调至激发光波长376 nm、发射光波长520 nm。将硒标准系列溶液按质量由低到高的顺序分别上机测定4，5-苯并苎硒脑的荧光强度。以质量为横坐标，荧光强度为纵坐标，制作标准曲线。再将试样溶液上机，根据标准曲线测定样品硒质量，根据公式计算全硒含量。

全硒含量/（μg·kg^{-1}）=硒质量/样品质量。（1）

（2）无机硒含量：准确称取试样粉末1.0000 g，加入0.1 mol·L^{-1}盐酸溶液20 mL，混匀静置8~12 h，置于70 ℃恒温水浴振荡器中，以160 r·min^{-1}振荡2 h。提取完毕，冷却至室温后，以1000 r·min^{-1}离心15 min，取上清液。将收集的上清液转移至分液漏斗中，加入5 mL环己烷进行萃取。收集水相于离心管中，在70 ℃水浴上蒸发至5~10 mL作为试样待测[21]。样品硒含量按照国家标准GB 5009.93—2017，RF-6000荧光分光光度计测定[20]。

（3）有机硒含量：有机硒含量/（μg·kg^{-1}）=全硒含量−无机硒含量；（2）

有机硒百分含量/%=有机硒含量/全硒含量×100。（3）

1.5.2　全硒累积量、富集系数、分配率和转运系数　全硒累积量/μg=全硒含量×生物量（以干质量DW计）；（4）

富集系数/%=器官的全硒含量/土壤的全硒含量×100；（5）

分配率/%=器官的全硒累积量/整个植株的全硒累积量×100。（6）

苹果中硒从器官A转运到器官B的转运系数（TF_{A-B}）：

TF_{A-B}/%=器官B中的全硒含量/器官A中的全硒含量×100[22]。（7）

1.5.3　土壤全硒和有效硒含量　根据NY/T 1104—2006 中华人民共和国农业行业标准 土壤中全硒的测定-荧光法[23]测定土壤全硒含量。

根据NY/T 3420—2019 中华人民共和国农业行业标准 土壤有效硒的测定-氢化物发生原子荧光光

谱法[24]测定土壤有效硒含量。

1.5.4 土壤及供试肥料理化性质 土壤理化性质分别采用凯氏定氮法、碳酸氢钠浸提法、NH_4OAc浸提火焰光度法、重铬酸钾容量法和pH计测定土壤的全氮含量、速效钾含量、有效磷含量、有机质含量和pH值。

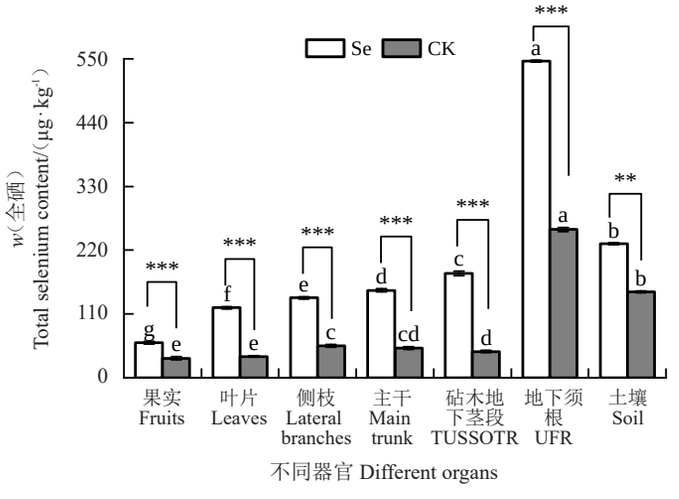
供试肥料理化性质分别采用荧光法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法、NaOH熔融火焰光度法、重铬酸钾容量法和pH计测定供试肥料的硒含量、氮含量、磷含量、钾含量、有机质含量和pH值[25]。

1.5.5 数据处理 使用Excel 2019软件对数据进行整理，使用IBM SPSS 27软件进行独立样本T检验以及单因素ANOVA检验（沃勒-邓肯多重比较法）进行差异显著性分析，显著性水平设置在$P<0.05$；使用Origin 2024软件绘图。

2 结果与分析

2.1 外源硒对瑞雪苹果树体不同器官全硒含量的影响

由图1可知，外源硒处理极显著提高了成熟期植株各器官的全硒含量。外源硒处理下果实、叶片、侧枝、主干、砧木地下茎段、地下须根、土壤全硒含量间均存在显著差异。除土壤的全硒含量（w，后同）较地下须根低315.17 μg·kg^{-1}外，其他器官的全硒含量呈现地下须根＞砧木地下茎段＞主干＞侧枝＞叶片＞果实的递减趋势，与硒在树体不同器官的转运路径一致。CK处理下果实和叶片、侧枝和主干、主干和砧木地下茎段间的全硒含量无显著差异；地下须根、土壤和其他器官的全硒含量差异显著，其中地下须根全硒含量（255.67 μg·kg^{-1}）最



TUSSOTR表示砧木地下茎段；UFR表示地下须根。不同小写字母表示同一处理不同器官间差异显著（$P<0.05$）；*表示在$P<0.05$水平上同一器官不同处理间差异显著；**表示在$P<0.01$水平上同一器官不同处理间差异极显著；***表示在$P<0.001$水平上同一器官不同处理间差异极显著。下同。

TUSSOTR represents the underground stem segment of the rootstock; UFR represents the underground fibrous roots. Different small letters indicate significant differences among different organs of the same treatment ($P<0.05$); * indicates significant differences among different treatments of the same organ at $P<0.05$; ** indicates highly significant differences among different treatments of the same organ at $P<0.01$; *** indicates extremely significant differences among different treatments of the same organ at $P<0.001$. The same below.

图1 外源硒对不同器官全硒含量的影响

Fig. 1 Effects of exogenous selenium on total selenium content in different organs

高，土壤（148.00 μg·kg^{-1}）次之；全硒含量排序为地下须根＞侧枝＞主干＞砧木地下茎段＞叶片＞果实。无论是外源硒处理还是CK，地下须根全硒含量均最高，表明其是硒吸收和积累的重要器官。

2.2 外源硒对瑞雪苹果不同器官有机硒和无机硒含量的影响

由图2可知，外源硒处理极显著提高了各器官的有机硒含量。外源硒处理下果实、叶片、侧枝、主干、砧木地下茎段、地下须根有机硒含量均存在显著差异；且各器官有机硒含量的分布规律与全硒含量一致。CK处理下果实、侧枝、主干有机硒含量无显著差异；叶片和砧木地下茎段有机硒含量无显著差异；地下须根有机硒含量最高，为224.33 μg·kg^{-1}，与其他器官存在显著差异，各器官有机硒含量排序为

地下须根＞主干＞侧枝＞果实＞叶片＞砧木地下茎段。

由图3可知，除砧木地下茎段外，外源硒处理极显著提高了其他器官的无机硒含量。硒处理下侧枝和主干间无机硒含量无显著差异，其他器官无机硒含量差异显著。其中，叶片的无机硒含量最高，为45.89 μg·kg^{-1}；果实无机硒含量最低，为7.00 μg·kg^{-1}；砧木地下茎段和地下须根无机硒含量中等，分别为16.00和39.33 μg·kg^{-1}；各器官无机硒含量排序为叶片＞地下须根＞侧枝＞主干＞砧木地下茎段＞果实。CK处理下叶片和侧枝无机硒含量无显著差异，其他器官无机硒含量差异显著。其中，地下须根无机硒含量最高，为31.33 μg·kg^{-1}；果实无机硒含量最低，为3.33 μg·kg^{-1}；主干和砧木地下茎段无机硒含量中等，分别为14.33和27.67 μg·kg^{-1}；各器官无机硒含量排序为地下须根＞砧木地下茎段＞侧枝＞叶片＞主干＞果实。在苹果生长过程中，部分无机硒会转化为有机硒，其含量提高利于有机硒合成，进而提高全硒含量。

2.3　外源硒对瑞雪苹果不同器官有机硒百分含量的影响

由表2可知，外源硒处理下，除果实外其他器官的有机硒百分含量均显著高于CK。外源硒处理下瑞雪苹果不同器官果实、叶片、侧枝、主干、砧木

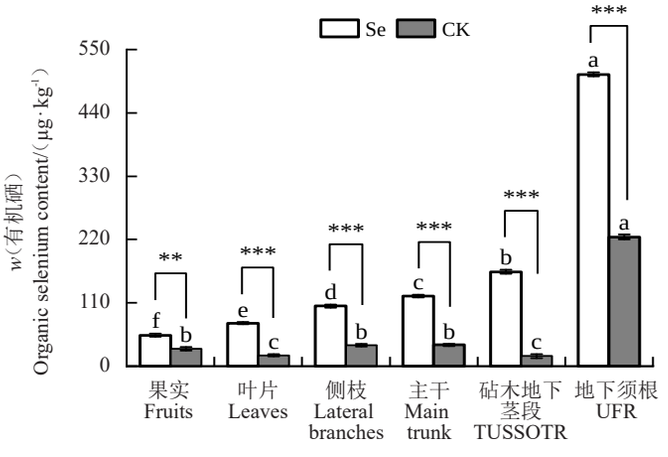


图2　外源硒对不同器官有机硒含量的影响

Fig. 2　Effects of exogenous selenium on organic selenium content in different organs

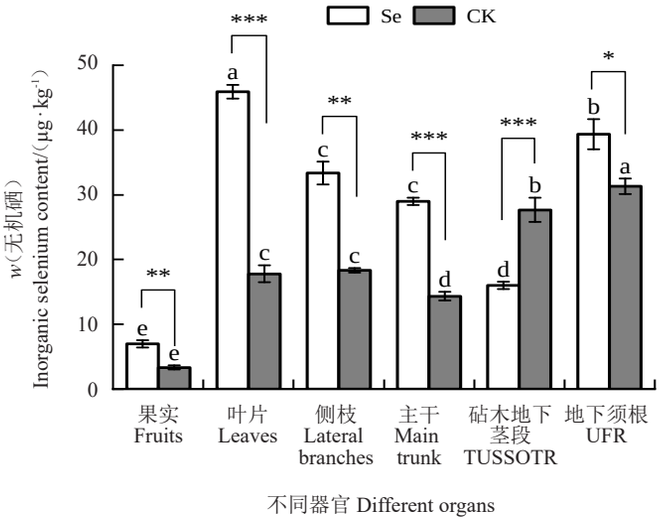


图3　外源硒对不同器官无机硒含量的影响

Fig. 3　Effects of exogenous selenium on inorganic selenium content in different organs

地下茎段、地下须根有机硒百分含量均高于60%；CK下瑞雪苹果有机硒百分含量除砧木地下茎段（38.22%）外，其他器官均高于50%。有机硒为人体易吸收利用且有益的硒源，硒在植株中主要以有机态硒形式存在。施硒肥能显著提高有机硒含量，表明土壤施硒肥是提高植物有机硒含量的合理、健康途径。

2.4 外源硒对瑞雪苹果不同器官全硒累积量、富集系数、分配率和转运系数的影响

由表3可知，外源硒处理下全硒累积量为主干＞地下须根＞砧木地下茎段＞果实＞叶片＞侧枝，CK全硒累积量为地下须根＞主干＞果实＞叶片＞砧木地下茎段＞侧枝。外源硒处理主干和地下须根的全硒累积量最高，分别为20.81和19.31 μg，二者无显

表2 外源硒对不同器官全硒、有机硒、无机硒含量和有机硒百分含量的影响

Table 2 Effects of exogenous selenium on the total selenium, organic selenium, inorganic selenium contents and the percentage of organic selenium in different organs

器官 Organs	处理 Treatments	*w*（全硒）Total selenium content/（μg·kg^{-1}）	*w*（有机硒）Organic selenium content/（μg·kg^{-1}）	*w*（无机硒）Inorganic selenium content/（μg·kg^{-1}）	有机硒百分含量 Percentage content of organic selenium/%
果实 Fruits	Se	60.67±2.33 f*	53.67±2.73 f*	7.00±0.58 e*	88.39±1.23 b
	CK	33.67±1.20 d	30.33±1.45 b	3.33±0.33 e	90.03±1.28 a
叶片 Leaves	Se	120.67±1.88 e*	74.77±2.02 e*	45.89±1.07 a*	61.95±0.98 e
	CK	36.67±1.09 d	18.86±1.88 c	17.80±1.32 c	51.31±4.05 c
侧枝 Lateral branches	Se	137.83±1.92 d*	104.50±2.75 d*	33.33±1.76 c*	75.80±1.38 d*
	CK	55.17±1.48 b	36.83±1.74 b	18.33±0.33 c	66.70±1.40 b
主干 Main trunk	Se	150.67±2.68 c*	121.67±2.13 c*	29.00±0.58 c*	80.75±0.10 c*
	CK	51.33±1.96 b	37.00±1.32 b	14.33±0.67 d	72.09±0.35 b
砧木地下茎段 The underground stem segment of the rootstock	Se	179.83±3.93 b*	163.83±3.53 b*	16.00±0.58 d	91.10±0.22 a*
	CK	45.17±1.92 c	17.50±3.62 c	27.67±1.86 b*	38.22±6.47 d
地下须根 Underground fibrous roots	Se	546.17±1.42 a*	506.83±3.37 a*	39.33±2.33 b*	92.80±0.44 a*
	CK	255.67±3.38 a	224.33±4.41 a	31.33±1.20 a	87.73±0.61 a

注：不同小写字母表示同一处理不同器官间差异显著（$P<0.05$）；*表示在 $P<0.05$ 水平上同一器官不同处理间差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant differences among different organs of the same treatment ($P<0.05$); * indicates significant differences among different treatments of the same organ at $P<0.05$. The same below.

表3 外源硒对不同器官全硒累积量、富集系数和分配率的影响

Table 3 Effects of exogenous selenium on the total selenium accumulation, enrichment coefficient and distribution rate in different organs

器官 Organs	处理 Treatments	生物量 Biomass/g	全硒累积量 Total selenium accumulation/μg	全硒富集系数 Total selenium enrichment coefficient/%	全硒分配率 Total selenium distribution rate/%
果实 Fruits	Se	63.80±2.16 b	3.87±0.21 bc*	26.26±1.01 f	7.22±0.38 bc
	CK	61.94±0.89 b	2.09±0.09 c	22.75±0.81 d	11.97±0.51 c*
叶片 Leaves	Se	24.44±1.79 d	2.96±0.26 bc*	52.24±0.81 e*	5.51±0.49 bc
	CK	34.97±1.62 c	1.28±0.04 d	24.78±0.74 d	7.35±0.37 d*
侧枝 Lateral branches	Se	14.59±4.30 e	2.02±0.62 c	59.67±0.83 d*	3.77±1.15 c
	CK	9.40±0.35 e	0.52±0.01 e	37.27±1.00 b	2.97±0.05 f
主干 Main trunk	Se	138.00±4.10 a	20.81±0.98 a*	65.22±1.16 c*	38.80±1.83 a
	CK	110.33±2.95 a	5.66±0.24 b	34.68±1.33 b	32.47±1.37b
砧木地下茎段 The underground stem segment of the rootstock	Se	25.87±2.92 d	4.67±0.63 b*	77.85±1.70 b*	8.71±1.17 b
	CK	24.41±1.87 d	1.10±0.07 d	30.52±1.30 c	6.30±0.37 e
地下须根 Underground fibrous roots	Se	35.34±2.44 c	19.31±1.38 a*	236.44±0.62 a*	35.99±2.58 a
	CK	26.51±2.04 d	6.78±0.55 a	172.75±2.29 a	38.94±3.37 a

著差异。全硒累积量为各器官干质量和全硒含量的乘积，主干全硒累积量高是因为其干质量大，地下须根全硒累积量高则因为其全硒含量高。CK处理下主干和地下须根的全硒累积量最高，分别为5.66和6.78 μg；表明地下须根大量吸收土壤中的硒并固定，向树体地上部供应，主干则积累大量硒并向枝条和果实输送。

不同器官富集系数越大，从土壤中富集硒的能力越强。外源硒处理富集系数为地下须根＞砧木地下茎段＞主干＞侧枝＞叶片＞果实，CK富集系数为地下须根＞侧枝＞主干＞砧木地下茎段＞叶片＞果实。外源硒处理各器官全硒富集系数差异显著，地下须根全硒富集系数最高，为236.44%，表明从土壤中吸收的硒主要富集于地下须根，供应树体生长发育。外源硒处理与CK相比，除果实外，其他各器官均呈显著差异，表明果实从土壤中富集的硒含量与其他器官相比较少。

外源硒处理全硒分配率为主干＞地下须根＞砧木地下茎段＞果实＞叶片＞侧枝，CK分配率为地下须根＞果实＞叶片＞砧木地下茎段＞侧枝。外源硒处理主干和地下须根全硒分配率最高，分别为38.80%和35.99%，二者无显著差异；受生物量和全硒累积量的影响，主干全硒分配率略高于地下须根。CK地下须根的全硒分配率最高，为38.94%。以上结果表明整个树体中，硒主要分配在主干和地下须根中。

由表4可知，外源硒处理下全硒转运系数为$TF_{土壤\text{-}地下须根}$＞$TF_{主干\text{-}侧枝}$＞$TF_{侧枝\text{-}叶片}$＞$TF_{砧木地下茎段\text{-}主干}$＞$TF_{叶片\text{-}果实}$＞$TF_{地下须根\text{-}砧木地下茎段}$，CK转运系数为$TF_{土壤\text{-}地下须根}$＞$TF_{砧木地下茎段\text{-}主干}$＞$TF_{主干\text{-}侧枝}$＞$TF_{叶片\text{-}果实}$＞$TF_{侧枝\text{-}叶片}$＞$TF_{地下须根\text{-}砧木地下茎段}$。外源硒处理和CK均以地下须根全硒转运系数$TF_{土壤\text{-}地下须根}$较高，分别为236.46%、172.74%；且地下须根全硒转运系数$TF_{土壤\text{-}地下须根}$均显著高于其他器官，表明外源硒处理能显著提高土壤向根系转运硒的能力，提高树木整体硒含量。

表4　外源硒对不同器官全硒转运系数的影响

Table 4　Effects of exogenous selenium on the total selenium transport coefficient of different organs

器官 Organs	处理 Treatments	全硒转运系数 Total selenium transport coefficient/%
$TF_{叶片\text{-}果实}$	Se	50.26±1.53 d
$TF_{Leaves\text{-}Fruits}$	CK	91.95±3.87 c*
$TF_{侧枝\text{-}叶片}$	Se	87.60±2.31 bc*
$TF_{Lateral\ branches\text{-}Leaves}$	CK	66.55±2.60 d
$TF_{主干\text{-}侧枝}$	Se	91.50±0.77 b
$TF_{Main\ trunk\text{-}Lateral\ branches}$	CK	107.60±2.24 b*
$TF_{砧木地下茎段\text{-}主干}$	Se	83.83±1.74 c
$TF_{The\ underground\ stem\ segment\ of\ the\ rootstock\text{-}Main\ trunk}$	CK	114.40±9.00 b*
$TF_{地下须根\text{-}砧木地下茎段}$	Se	32.92±0.64 e*
$TF_{Underground\ fibrous\ roots\text{-}The\ underground\ stem\ segment\ of\ the\ rootstock}$	CK	17.65±0.53 e
$TF_{土壤\text{-}地下须根}$	Se	236.46±1.98 a*
$TF_{Soil\text{-}Underground\ fibrous\ roots}$	CK	172.74±0.88 a

2.5　外源硒对瑞雪苹果土壤全硒和有效硒含量的影响

土壤有效硒含量是决定农产品中硒含量高低的关键性因素。由图4可知，外源硒处理后，土壤全硒和有效硒含量差异极显著，分别为231.00和56.14 μg·kg^{-1}，CK土壤全硒和有效硒含量差异极显著，分别为148.00和36.80 μg·kg^{-1}。外源硒处理显著提高了土壤全硒和有效硒含量，外源硒处理土壤全硒含量极显著高于CK，差值为83.00 μg·kg^{-1}，外源硒处理土壤有效硒含量极显著高于CK，差值为19.34 μg·kg^{-1}。以上结果表明，在植物吸收的情况下，外源硒处理依然能提高土壤全硒及有效硒含量，可以更有效地为植物生长提供硒元素。非富硒土壤及时补充外源硒是持续获得富硒产品的有效方式。

3　讨　论

植株对硒的吸收存在一定规律。在相同硒浓度下，红富士苹果树体各器官硒含量的高低顺序依次

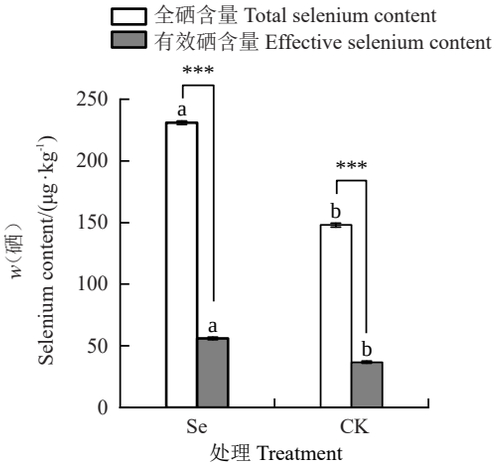


图 4 外源硒对土壤全硒和有效硒含量的影响

Fig.4 Effects of exogenous selenium on the total selenium and available selenium contents in the soil

为叶＞枝＞果＞根，地上部分占比较大[26]，在茶树硒富集的研究中也发现了同样的结论[27]。土施外源硒条件下，葡萄植株体内硒含量分布为叶＞根＞新梢＞果实＞主蔓，且各器官的含硒量与土壤施硒量呈显著正相关[28]。陈玉真等[29]发现大部分硒元素被茶树根系固定，转运到新叶的硒含量较少，地下须根的硒富集系数显著高于其他器官，总体表现出从根部-茎-叶片自下而上依次递减的规律。

磷硒配施处理下油茶苗各器官硒含量表现为根部＞茎部＞叶部[30]，中国中等富硒地区食用植物及周围土壤的硒含量调查也得到根部富集较多的规律[31]。本研究发现，外源硒处理瑞雪各器官全硒含量呈现从地下须根到果实逐渐减少的趋势，即地下须根＞砧木地下茎段＞主干＞侧枝＞叶片＞果实，与陈玉真等的研究结果一致。在作物生长方面，硒主要积累在可食用部位。适宜的磷硒配施可提高冬小麦产量，促进硒向籽粒的转运，增加籽粒硒累积量和有机硒含量[32]。本试验硒处理显著提高了苹果果实全硒累积量和有机硒含量，与冬小麦试验结论一致。磷缺乏和铁添加处理导致水稻幼苗产生根铁斑块，该斑块对硒具有强烈吸附作用，减少了根部硒向新芽的运输[33]。叶片硒对谷壳硒基本无影响，两者均对糙米硒存在显著正效应[34]。喷施纳米硒肥时，大部分硒积累在谷壳和米糠中，而喷施有机硒和亚硒酸钠则显著提高籽粒或精米的硒含量[35]。在薯类作物中，根、茎、叶均存在一定的硒吸收能力[36-37]。由于该种作物可食用部位位于地下，所以硒会随着作物的生长发育由地上部分向地下部分转移，改变硒在作物不同器官的分配与积累，从而导致植株生长发育期和块茎收获期各部分器官之间硒含量明显不同[38-39]。

食物来源的硒分为有机硒和无机硒两种，有机硒具有毒性低、生物活性高、吸收效果好等诸多优点[40-41]，而无机硒毒性较大，被人畜摄入后易在体内积累而引起中毒[42-43]。在本研究中，外源硒处理显著提高了各器官有机硒含量和富集系数。李玉梅等[44]研究发现，有机硒可以提升作物对硒的富集能力，在满足作物生长的营养需求之外，提高可食用部分硒含量。在水培试验中，小麦和油菜对有机硒的吸收效率比无机硒高20~100倍，且施加硒代蛋氨酸的植物体内硒浓度最高，推测有机硒较容易被植物吸收并转移到地上部[9]。本试验结果表明，瑞雪苹果各器官的有机硒含量占比均高于60%，符合富硒苹果生产的要求。

不论是外源硒处理还是CK，果实无机硒含量均最低，在其他器官中被截留，原因如下：(1)叶片硒代谢酶丰富、活性高，可高效将无机硒转化为有机硒并优先运输至果实，但仍残留部分无机硒，而果实代谢活性弱，接收的多为转运的有机硒，因此无机硒含量更低[45]；(2)叶片为光合主器官，直接承接硒等矿物质并完成初步积累转化，无机硒含量偏高；果实以繁殖为核心，侧重积累有机营养，无机硒积累需求低、含量更低[46-47]。

富集系数表示植株从土壤中富集硒的能力，通常富集系数大于1时表示植株从土壤中吸收该元素的效率高[30]。外源硒处理与CK各器官中地下须根富集系数大于1，且外源硒处理与CK呈显著差异，表明地下须根从土壤中吸收硒的效率高于其他器官，外源硒处理显著提高了地下须根从土壤中富集硒的能力。由于大部分硒元素被地下须根富集，其他器官富集能力较弱，导致其他器官富集系数均小于1，该结果与天然硒在茶树中的结论一致[29]。分配率表示各器官在整个植株中的硒含量累积比例情况，分配率越高，全硒累积量越高，是间接表达硒累积量高低的一项指标。但由于树体主干生物量的影响，导致地下须根的全硒累积量仅次于主干，因此分配率也随之受影响，地下须根的高全硒累积量保障了地下部对地上部硒的供应。

转运系数表示硒元素从一个器官转运到另一个器官的能力。外源硒处理地下须根的转运系数

$TF_{土壤\text{-}地下须根}$值大于1，表明地下须根对硒的吸收能力强；外源硒处理$TF_{土壤\text{-}地下须根}$显著高于CK，表明外源硒处理显著提高了地下须根吸收土壤中硒的能力。外源硒处理与CK相比，转运系数$TF_{果实\text{-}叶片}$无显著差异，表明外源硒肥在叶片向果实转运硒的过程中无显著作用，与苏宁等[48]的研究结果一致。

农产品中硒主要来源于土壤，且能被植物吸收的有效态硒含量偏低。因此，提高当地土壤硒的有效性是使农产品富硒的关键。本试验经过一个生长季后，仍比未种植植物的本底土壤全硒和有效硒含量高，表明外源硒在土壤中留存，果实膨大期土施硒肥达到了提高土壤全硒和有效硒含量的目的。土壤硒多以有机结合态、矿物晶格态等难溶形态存在，常规检测难以计入且可随环境活化；多年生苹果根系分泌有机酸、酶类等物质，能降低根际pH值、溶解难溶硒，将潜在硒转化为可吸收的无机硒。因此，苹果植株硒累积总量超过土壤表层全硒与有效硒的年度差值[49-50]。

作为多年生经济林果树，苹果果实及各器官生长易受树龄、肥料元素含量、土壤理化性质、栽培技术等多种因子调控。由于本试验仅完成了3年生瑞雪苹果为期1年的肥效研究，且存在重复次数较少等不足情况，试验结果的普适性有限。未来应进一步开展多品种、多树龄、多环境的施肥试验，以期为苹果树科学施肥和富硒苹果生产的方案制定提供更全面的参考依据。

4　结　论

外源硒处理显著提高了瑞雪苹果果实成熟期各器官的全硒、有机硒含量。外源硒处理各器官间均存在显著差异，全硒、有机硒含量表现一致，呈现从地下须根到果实逐渐减少的趋势，CK各器官中以地下须根的全硒、有机硒含量最高；除砧木地下茎段外，硒处理显著提高了果实成熟期各器官的无机硒含量，硒处理叶片的无机硒含量最高，CK各器官中以地下须根的无机硒含量最高；除硒处理地下须根的全硒累积量和分配率略低于主干外，其他器官全硒富集系数和转运系数均表现为地下须根最高，CK各器官全硒累积量、富集系数、分配率和转运系数均表现为地下须根最高。地下须根是植株吸收和固定土壤中硒的主要器官，对植株各器官硒含量的高低发挥至关重要的作用。外源硒能显著提高瑞雪苹果各器官硒含量，达到生产富硒苹果的标准。通过土壤施硒肥来提高植物中的硒含量是一条合理、健康的途径。

参考文献 References：

[1] 王磊，杜菲，孙卉，张春义 . 人体硒代谢与硒营养研究进展[J]. 生物技术进展，2015，5(4)：285-290.
Wang Lei，Du Fei，Sun Hui，Zhang Chunyi. Progress on selenium metabolism and nutrition in human[J]. Current Biotechnology，2015，5(4)：285-290.

[2] 王文霞，谢安琦，夏清，智慧，杜杰 . 不同施硒方式对胡麻生理特性、产量和品质的影响[J]. 河南农业科学，2025，54(11)：40-49.
Wang Wenxia，Xie Anqi，Xia Qing，Zhi Hui，Du Jie. Effects of different selenium application methods on physiological characteristics，yield and quality of flax[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2025，54(11)：40-49.

[3] 汤超华，赵青余，张凯，李爽，秦玉昌，张军民 . 富硒农产品研究开发助力我国营养型农业发展[J]. 中国农业科学，2019，52(18)：3122-3133.
Tang Chaohua，Zhao Qingyu，Zhang Kai，Li Shuang，Qin Yuchang，Zhang Junmin. Promoting the development of nutritionally-guided agriculture in research and development of selenium-enriched agri-products in China[J]. Scientia Agricultura Sinica，2019，52(18)：3122-3133.

[4] Handy D E，Joseph J，Loscalzo J. Selenium，a micronutrient that modulates cardiovascular health via redox enzymology[J]. Nutrients，2021，13(9)：3238.

[5] 张心壮，刘雨蒙，高星，王晓阳，尹艺旋，芒来 . 亚硒酸钠和硒代蛋氨酸对马骨骼肌卫星细胞氧化损伤的缓解作用及线粒体功能的影响[J]. 中国畜牧兽医，2025，52(10)：4603-4613.
Zhang Xinzhuang，Liu Yumeng，Gao Xing，Wang Xiaoyang，Yin Yixuan，Mang Lai. Effects of sodium selenite and selenomethionine on the mitigation of oxidative damage and mitochondrial function in equine skeletal muscle satellite cells[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine，2025，52(10)：4603-4613.

[6] 王春苗，冉瑞金 . 硒及硒蛋白在眼部疾病的生物学功能研究进展[J]. 国际眼科杂志，2021，21(4)：660-663.
Wang Chunmiao，Ran Ruijin. Research advance of biological functions of selenium and selenoprotein in ocular diseases[J]. International Eye Science，2021，21(4)：660-663.

[7] 匡一迪，唐纯，张庆林，杨红，周洁，齐传东，郭凤领，朱进，吴金平 . 有机硒与纳米硒对生姜生长、品质及硒含量的影响[J]. 中国瓜菜，2025，38(11)：167-172.
Kuang Yidi，Tang Chun，Zhang Qinglin，Yang Hong，Zhou Jie，Qi Chuandong，Guo Fengling，Zhu Jin，Wu Jinping. Effects of exogenous organic selenium and nano-selenium on growth，quality，and Se content in ginger[J]. China Cucurbits and Vegetables，2025，38(11)：167-172.

[8] Xia X J，Zhang X L，Liu M C，Duan M Y，Zhang S S，Wei X B，Liu X Y. Toward improved human health：Efficacy of dietary selenium on immunity at the cellular level[J]. Food & Function，2021，12(3)：976-989.

[9] Kikkert J，Berkelaar E. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology，2013，65(3)：458-465.

[10] 金小琬，朱茜，黄进，杜丽峨，王丽，陈稷 . 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 Xiaowan，Zhu Xi，Huang Jin，Du Li’e，Wang Li，CHEN Ji. Effects of selenium on chloroplast and photosynthesis[J]. Molecular Plant Breeding，2019，17(1)：288-294.

[11] 刘丽，王张民，牛慈琼，袁林喜，刘娟桃，刘志奎，李全 . 土壤施富硒有机肥对‘嘎拉’苹果果实硒含量和品质的影响[J]. 中国果树，2020(1)：27-30.
Liu Li，Wang Zhangmin，Niu Ciqiong，Yuan Linxi，Liu Juantao，Liu Zhikui，Li Quan. Effects of soil applied selenium on selenium content and quality of ‘Gala’ apple fruits[J]. China Fruits，2020(1)：27-30.

[12] 玉柳，荆澳航，韩艳英，刘爽，王秀，仝令臣，黄文强，叶彦辉 . 叶面喷施硒、锌、钙肥对林芝地区响富苹果光合特性与果实品质的调控效应[J]. 果树学报，2026，43(1)：26-38.
Zhou Yuliu，Jing Aohang，Han Yanying，Liu Shuang，Wang Xiu，Tong Lingchen，Huang Wenqiang，Ye Yanhui. Effects of foliar fertilizer on photosynthetic characteristics and fruit quality of Xiangfu in Linzhi，Xizang[J]. Journal of Fruit Science，2026，43(1)：26-38.

[13] 戚霄晨，简在海，张琦，宋尚伟 . 叶面喷施硒对甜樱桃硒和重金属含量及果实品质的影响[J]. 果树学报，2019，36(6)：748-754.
Qi Xiaochen，Jian Zaihai，Zhang Qi，Song Shangwei. Effects of foliar application of selenium on selenium and heavy metal contents and fruit quality in sweet cherry[J]. Journal of Fruit Science，2019，36(6)：748-754.

[14] 王梅，牛小沛，马朝喜，张月玲，李铭，刘星明 . 外源硒对“夏黑”葡萄果实硒含量与品质的影响[J]. 北方园艺，2025(4)：68-75.
Wang Mei，Niu Xiaopei，Ma Chaoxi，Zhang Yueling，Li Ming，Liu Xingming. Effects of exogenous selenium on selenium content and quality of ‘Summer Black’ grapes[J]. Northern Horticulture，2025(4)：68-75.

[15] 龚弘娟，蒋桥生，叶开玉，李洁维，莫权辉，刘平平，王发明，齐贝贝 . 硒营养素对红阳猕猴桃果实硒含量及果实品质的影响[J]. 中国南方果树，2025，54(4)：141-145.
Gong Hongjuan，Jiang Qiaosheng，Ye Kaiyu，Li Jiewei，Mo Quanhui，Liu Pingping，Wang Faming，Qi Beibei. Effects of selenium nutrient on fruit selenium content and quality of Hongyang kiwifruit[J]. South China Fruits，2025，54(4)：141-145.

[16] 杨兴旺，王志强，段晨磊，王莹莹，薛桂红，庞灵枝，时梦，冀晓昊，张德燕，王孝娣，王海波 . 两种叶面肥对金黄金桃果实品质和挥发性风味物质的影响[J]. 果树学报，2025，42(5)：993-1002.
Yang Xingwang，Wang Zhiqiang，Duan Chenlei，Wang Yingying，Xue Guihong，Pang Lingzhi，Shi Meng，Ji Xiaohao，Zhang Deyan，Wang Xiaodi，Wang Haibo. Effects of two foliar fertilizers on fruit quality and volatile flavor compounds in Jinhuangjin peach[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(5)：993-1002.

[17] 李威，王子俊，孙昊宸，王世尧，陈豆豆，熊瑶，李慧，王忆，韩振海 . 基于多组学的苹果性状解析与分子育种研究进展[J]. 中国农业大学学报，2025，30(10)：121-134.
Li Wei，Wang Zijun，Sun Haochen，Wang Shiyao，Chen Doudou，Xiong Yao，Li Hui，Wang Yi，Han Zhenhai. Advances in multi-omics-based elucidation of traits and molecular breeding in apple[J]. Journal of China Agricultural University，2025，30(10)：121-134.

[18] 中国苹果产业协会，国家苹果产业技术体系 . 2022 年苹果产业发展概况（一）[J]. 中国果菜，2024，44(3)：1-9.
China Apple Industry Association，National Apple Industry Technology System. Overview of apple industry development in 2022 (1)[J]. China Fruit & Vegetable，2024，44(3)：1-9.

[19] 丁新宇，李士魁，刘志鑫，贾鹏，陈利英，齐国辉 . 不同施硒水平对核桃坚果品质及抗氧化影响[J]. 林业科学研究，2026，39(2)：80-92.
Ding Xinyu，Li Shikui，Liu Zhixin，Jia Peng，Chen Liying，Qi Guohui. Effect of soil application of selenium-enriched organic fertilizer on quality and antioxidant of walnut nuts[J]. Forest Research，2026，39(2)：80-92.

[20] GB 5009.93—2017 食品安全国家标准-食品中硒的测定[S].
GB 5009.93—2017 National Food Safety Standard - Determination of Selenium in Food[S].

[21] 孙文丹，孟强，王景超，于燕萍，田静，于军，商姗姗，张娟 . 原子荧光光谱法测定粮谷中的有机硒和无机硒[J]. 肥料与健康，2021，48(6)：69-73.
Sun Wendan，Meng Qiang，Wang Jingchao，Yu Yanping，Tian Jing，Yu Jun，Shang Shanshan，Zhang Juan. Determination of organic selenium and inorganic selenium in cereal by atomic fluorescence spectrometry[J]. Fertilizer & Health，2021，48(6)：69-73.

[22] 唐鑫，王玉荣，周志高，丁昌峰，王兴祥 . 花生生育期镉吸收及迁移转运特征[J]. 中国油料作物学报，2025，47(1)：150-159.
Tang Xin，Wang Yurong，Zhou Zhigao，Ding Changfeng，Wang Xingxiang. Dynamics of cadmium absorption and translocation patterns during whole growth period of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2025，47(1)：150-159.

[23] NY/T 1104—2006 中华人民共和国农业行业标准 土壤中全硒的测定-荧光法[S].
NY/T 1104—2006 Agricultural industry standard of the people's republic of China-determination of total selenium in soil-fluorometric method[S].

[24] NY/T 3420—2019 中华人民共和国农业行业标准 土壤有效硒

的测定-氢化物发生原子荧光光谱法[S].
NY/T 3420—2019 Agricultural industry standard of the people's republic of China-determination of available selenium in soil-hydride generation atomic fluorescence spectrometry[S].

[25] 鲍士旦 . 土壤农化分析[M]. 3 版 . 北京：中国农业出版社，2000：39-271.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000：39-271.

[26] 宁婵娟，丁宁，吴国良，冀爱青，刘晓华，杨燕君 . 喷硒时期与浓度对红富士苹果果实品质及各部位全硒和有机态硒含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(5)：1109-1117.
Ning Chanjuan，Ding Ning，Wu Guoliang，Ji Aiqing，Liu Xiaohua，Yang Yanjun. Effects of different selenium spraying scheme on the fruit quality，total selenium and organic selenium contents in ‘Red Fuji’ apple trees[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2013，19(5)：1109-1117.

[27] 李泽轩，冯亮，李开元，唐晓玲，樊爽，付盈盈，梁霞 . 硒元素在茶园土壤和茶树内的富集规律[J]. 安全与环境工程，2023，30(6)：217-223.
Li Zexuan，Feng Liang，Li Kaiyuan，Tang Xiaoling，Fan Shuang，Fu Yingying，Liang Xia. Enrichment patterns of selenium in tea plantation soils and tea plants[J]. Safety and Environmental Engineering，2023，30(6)：217-223.

[28] 邓小芳，刘新伟，叶志娟，吕臣浩，张海清，黄立强，赵竹青 . 不同时期喷施不同硒源对葡萄硒吸收分配的影响[J]. 中国南方果树，2018，47(5)：82-86.
Deng Xiaofang，Liu Xinwei，Ye Zhijuan，Lü Chenhao，Zhang Haiqing，Huang Liqiang，Zhao Zhuqing. Effects of foliar application of selenium from different sources on the absorption and distribution of selenium in grape at different stages[J]. South China Fruits，2018，47(5)：82-86.

[29] 陈玉真，单睿阳，王峰，陈常颂，尤志明，马丽婷，臧春荣，余文权 . 天然硒在茶园土壤-茶树-茶汤中吸收转运特征[J]. 茶叶学报，2019，60(3)：106-113.
Chen Yuzhen，Shan Ruiyang，Wang Feng，Chen Changsong，You Zhiming，Ma Liting，Zang Chunrong，Yu Wenquan. Selenium absorption and transportation in plantation soil，tea leaves and brewed tea[J]. Acta Tea Sinica，2019，60(3)：106-113.

[30] 赵雪妍，唐昱，陈卓灵，张学玲 . 基于磷硒配施的油茶苗富硒能力与土壤硒形态的相关性分析[J]. 中南林业科技大学学报，2025，45(7)：46-55.
Zhao Xueyan，Tang Yu，Chen Zhuoling，Zhang Xueling. Study on the correlation between selenium enrichment ability of *Camellia oleifera* seedlings and soil selenium forms based on phosphorus selenium combination application[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2025，45(7)：46-55.

[31] Li X C，Luo Y，Zeng C S，Zhong Q L，Xiao Z Y，Mao X，Cao F L. Selenium accumulation in plant foods and selenium intake of residents in a moderately selenium-enriched area of Mingyueshan，Yichun，China[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2023，116：105089.

[32] 胡彩霞，刘红恩，李畅，秦世玉，赵玉焕，张玉鹏，刘亥扬，许嘉阳，赵鹏，聂兆君，王秋红 . 磷硒配施对冬小麦硒吸收、转运及籽粒有机硒的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文)，2023，25(11)：182-191.
Hu Caixia，Liu Hongen，Li Chang，Qin Shiyu，Zhao Yuhuan，Zhang Yupeng，Liu Haiyang，Xu Jiayang，Zhao Peng，Nie Zhaojun，Wang Qiuhong. Effect of phosphorus and selenium combined application on selenium uptake，translocation and organic selenium in grain of winter wheat[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2023，25(11)：182-191.

[33] Li Y Y，Yu S H，Zhou X B. Effects of phosphorus on absorption and transport of selenium in rice seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research，2019，26(14)：13755-13761.

[34] 周成 . 施肥对地质高背景区土壤-水稻系统镉硒迁移与积累的影响[D]. 杭州：浙江大学，2024.
Zhou Cheng. Effects of fertilizer application on cadmium and selenium transport and accumulation in soil-rice system with high geological background levels[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2024.

[35] 凌沥，翟辉，张云舒，邵华伟，唐光木，葛春辉，徐万里，杨建军 . 外源硒对水稻硒吸收和转运的影响[J]. 新疆农业科学，2025，62(1)：103-109.
Ling Li，Zhai Hui，Zhang Yunshu，Shao Huawei，Tang Guangmu，Ge Chunhui，Xu Wanli，Yang Jianjun. Effects of exogenous selenium on its uptake and translocation in rice[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2025，62(1)：103-109.

[36] Zhang H Q，Zhao Z Q，Zhang X，Zhang W，Huang L Q，Zhang Z Z，Yuan L X，Liu X W. Effects of foliar application of selenate and selenite at different growth stages on selenium accumulation and speciation in potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Food Chemistry，2019，286：550-556.

[37] Aly R A M，Abdel-Halim K Y. Effect of bio-fertilizer and foliar spray of selenium of growth，yield and quality of potato plants[J]. Academic Journal of Life Sciences，2020，6(1)：1-7.

[38] 李慧峰，黄咏梅，李彦青，滑金锋，廖金秀，陈天渊 . 2 种薯肉色甘薯对亚硒酸盐的吸收累积特性[J]. 西南农业学报，2021，34(3)：566-574.
Li Huifeng，Huang Yongmei，Li Yanqing，Hua Jinfeng，Liao Jinxiu，Chen Tianyuan. Absorption and accumulation of selenium in two kinds of tuber flesh color sweetpotato varieties[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2021，34(3)：566-574.

[39] Nasser V G，Visôtto L E，De Aquino L Â，Novais R F，Gomes M H F，Soares F S C，De Carvalho H W P. Efficiency of application of selenium in biofortification of potato tubers (*Solanum tuberosum*)[J]. Potato Research，2023，66(3)：683-700.

[40] 司振兴，梁郅哲，钱建财，许自成，李俊领，张豫丹，张莉，贾玮 . 植物对硒的吸收、转运及代谢机制研究进展[J]. 作物杂志，2023(2)：1-9.

Si Zhenxing，Liang Zhizhe，Qian Jiancai，Xu Zicheng，Li Junling，Zhang Yudan，Zhang Li，Jia Wei. Research progress on absorption，transportation and metabolism mechanism of selenium in plants[J]. Crops，2023(2)：1-9.

[41] Hadrup N，Ravn-haren G. Toxicity of repeated oral intake of organic selenium，inorganic selenium，and selenium nanoparticles：A review[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology，2023，79：127235.

[42] Zhang K，Zhao Q Y，Zhan T F，Han Y S，Tang C H，Zhang J M. Effect of different selenium sources on growth performance，tissue selenium content，meat quality，and selenoprotein gene expression in finishing pigs[J]. Biological Trace Element Research，2020，196(2)：463-471.

[43] Chen Z N，Lu Y Q，Dun X L，Wang X F，Wang H Z. Research progress of selenium-enriched foods[J]. Nutrients，2023，15(19)：4189.

[44] 李玉梅，王根林，李艳，刘峥宇，孙雷，魏丹 . 水稻对有机态硒的吸收与积累[J]. 中国农学通报，2017，33(10)：7-11.
Li Yumei，Wang Genlin，Li Yan，Liu Zhengyu，Sun Lei，Wei Dan. Organic selenium absorption and accumulation of rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2017，33(10)：7-11.

[45] Wang X，Hussain B，Xin X P，Zou T，Huang X W，Cheng L P，Wu Z W，Yang Y，Li Y Y，He Z L，Lian J P，White J C，Yang X E. Fate and physiological effects of foliar selenium nanoparticles in wheat[J]. ACS Nano，2025，19(23)：21792-21806.

[46] 张丹，陈璐，毛积鹏，朱昱坤，王小玲，高柱 . 园艺作物硒生物强化效应及其富硒产品研究进展[J]. 江西科学，2025，43(5)：884-890.
Zhang Dan，Chen Lu，Mao Jipeng，Zhu Yukun，Wang Xiaoling，Gao Zhu. Research progress on selenium biofortification and its effects in horticultural crops[J]. Jiangxi Science，2025，43(5)：884-890.

[47] 唐鹏兴，闫加力，赵敏，涂书新 . 离体梨树叶对不同形态硒的吸收及抗氧化反应[J]. 中国农学通报，2025，41(10)：72-80.
Tang Pengxing，Yan Jiali，Zhao Min，Tu Shuxin. Study of absorption and antioxidant response in excised pear tree leaves to different forms of selenium[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2025，41(10)：72-80.

[48] 苏宁，谢惠春，蒋礼玲，乔枫，郑万财，李娟，王蓉，耿贵工 . 光碳核肥对土壤养分及青稞硒吸收转运的影响[J]. 山西农业科学，2025，53(4)：64-72.
Su Ning，Xie Huichun，Jiang Liling，Qiao Feng，Zheng Wancai，Li Juan，Wang Rong，Geng Guigong. Effects of photocarbon core fertilizer on soil nutrients and selenium absorption and transport of highland barley[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences，2025，53(4)：64-72.

[49] 李圣会，蒋代华，余丰源，张宇 . 土壤耐硒菌株筛选及其硒活化能力评价研究[J]. 土壤通报，2022，53(3)：558-566.
LI Shenghui，JIANG Daihua，YU Fengyuan，ZHANG Yu. Screening of selenium-resistant strains in soil and evaluation of selenium activation ability[J]. Chinese Journal of Soil Science，2022，53(3)：558-566.

[50] Lei Z，Wang H X，Zhang H，Liu W J，He Z Y，Wang Z，Zhang H，Wang Y，Tang Y N，Hu C X，Zhao X H. *Sultr1;2*-mediated recruitment of selenium-oxidizing bacteria promotes plant selenium uptake[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2025，73(22)：13313-13326.