



外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制

周武先, 刘翠君, 段媛媛, 张美德, 艾伦强, 魏海英, 张雅娟

引用本文:

周武先, 刘翠君, 段媛媛, 等. 外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 618–625.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0382>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用

周武先, 张美德, 王华, 段媛媛, 艾伦强, 黄东海, 罗孝荣, 张宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 457–465 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0228>

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>

硒对油菜根际土壤微生物的影响

程勤, 胡承孝, 明佳佳, 蔡苗苗, 刘康, 汤艳妮, 赵小虎

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 104–110 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0061>

基施富硒有机肥料对玉米和土壤硒含量的影响

李圣男, 岳士忠, 李花粉, 乔玉辉

农业资源与环境学报. 2015(6): 571–576 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0140>

叶面喷施不同形态硒对草莓吸收和转运硒的影响

王晓芳, 罗章, 万亚男, 王琪, 孙宏杰, 郭岩彬, 李花粉

农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 334–339 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0023>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周武先, 刘翠君, 段媛媛, 等. 外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 618–625.

ZHOU Wu-xian, LIU Cui-jun, DUAN Yuan-yuan, et al. Roles and underlying mechanisms of foliar selenium application in regulating growth of *Codonopsis tangshen*[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 618–625.



开放科学 OSID

外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制

周武先¹, 刘翠君^{1*}, 段媛媛¹, 张美德¹, 艾伦强¹, 魏海英², 张雅娟^{3*}

(1. 湖北省农业科学院中药材研究所, 湖北 恩施 445000; 2. 恩施土家族苗族自治州中心医院, 湖北 恩施 445000; 3. 恩施土家族苗族自治州农业农村局, 湖北 恩施 445000)

摘要:为探索外源喷施硒肥对川党参生长和营养品质的影响及其可能作用机制, 采用大田试验, 设置 0、25、50、100、200 g·hm⁻² 和 400 g·hm⁻² 硒肥(以硒元素计)六个处理, 观察不同硒肥处理下川党参根茎形态、产量、品质、硒形态和部分根际土壤养分的变化。结果表明, 在一定浓度范围内, 施用外源硒可增加川党参茎粗、产量、多糖和炔苣含量, 其中 200 g·hm⁻² 硒肥处理效果最佳, 与对照处理相比差异显著。川党参中的硒主要以有机硒形态存在, 有机硒占比超过 70%, 且有机硒比例随着喷施浓度的升高呈现先增大后减小的变化趋势, 并在硒肥喷施 200 g·hm⁻² 时达到最大, 为 83.6%。外源喷施 25~400 g·hm⁻² 硒肥对川党参生长总体表现为促进作用, 但促进效果随着喷施硒肥浓度的增加呈先增强后减弱的趋势。不同硒肥处理下川党参根际土壤养分存在差异, 其中 100 g·hm⁻² 和 200 g·hm⁻² 硒肥处理显著增加了川党参根际土壤碱解氮和速效钾含量。相关性分析和冗余分析表明, 改变根际土壤养分含量可能是外源硒影响川党参生长的重要因素之一。综上表明, 川党参是硒生物强化的良好材料, 在川党参蕾期和花期喷施适量硒肥可提高其产量及多糖、炔苣和硒含量, 从而达到生产富硒川党参和提产增质的目的, 且以喷施 100~200 g·hm⁻² 硒肥效果最佳。

关键词: 硒; 微量元素; 川党参; 喷施; 多糖; 炔苣; 硒形态; 根际土壤养分

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)04-0618-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0382

Roles and underlying mechanisms of foliar selenium application in regulating growth of *Codonopsis tangshen*

ZHOU Wu-xian¹, LIU Cui-jun^{1*}, DUAN Yuan-yuan¹, ZHANG Mei-de¹, AI Lun-qiang¹, WEI Hai-ying², ZHANG Ya-juan^{3*}

(1. Institute of Chinese Herbal Medicines, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Enshi 445000, China; 2. Central Hospital of Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Enshi 445000, China; 3. Agriculture and Rural Bureau of Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Enshi 445000, China)

Abstract: To explore the effects of foliar selenium (Se) application on the growth and nutritional quality of *Codonopsis tangshen* and elucidate the mechanisms underlying plant response to supplementation with selenium, a field experiment with six treatments (0, 25, 50, 100, 200 and 400 g·hm⁻² Se in sodium selenite) was conducted to determine the effects of different Se treatments on root morphology, yield, quality, Se speciation and partial rhizospheric soil nutrients of *C. tangshen*. Compared with the control, application of appropriate foliar Se increased root diameter, crop yield, and polysaccharide and lobetyolin content of *C. tangshen*. Differences between Se treatments and control were statistically significant at the concentration of 200 g·hm⁻² Se. Selenium in *C. tangshen* mainly existed in the form of organic Se (>70% of total Se), and the proportion of organic Se initially increased and then decreased with increasing foliar Se. The maximum value of organic Se was 83.6% when the foliar Se level was 200 g·hm⁻². The Se treatments promoted the growth of *C. tangshen*.

收稿日期: 2020-07-22 录用日期: 2020-08-25

作者简介: 周武先(1991—), 男, 江西抚州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事药用植物生理生态研究。E-mail: zhou_wx222@163.com

*通信作者: 刘翠君 E-mail: 704040135@qq.com; 张雅娟 E-mail: 544462784@qq.com

基金项目: 湖北省农业科学院青年科学基金项目(2019NKYJJ13); 湖北省技术创新专项(民族专项)(2019AKB092)

Project supported: Youth Science Foundation Project of Hubei Academy of Agricultural Sciences(2019NKYJJ13); Science and Technology Plan of Hubei Province(2019AKB092)

under Se level of $25\sim 400\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$; however, the promotion effects firstly increased and then decreased with the increasing foliar Se level. Significant differences of rhizospheric soil nutrients among different Se treatments were observed: The $100\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ Se treatments significantly increased the rhizospheric soil alkali-hydrolyzed nitrogen and available potassium content of *C. tangshen*, compared with the control. Pearson analysis and redundancy analysis showed that the change of nutrient content in rhizosphere soil might be an important factor affecting the growth of *C. tangshen*. In conclusion, *C. tangshen* was a good candidate for Se supplementation and spraying $100\sim 200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ Se in the bud and flowering stage could increase the yield, polysaccharide, lobetyolin and Se content of *C. tangshen*, thereby promoting the development of Se-enriched *C. tangshen* products.

Keywords: selenium; microelement; *Codonopsis tangshen*; spray application; polysaccharide; lobetyolin; selenium speciation; rhizospheric soil nutrient

硒(Selenium, Se)是人体必需的微量营养元素,日常摄入适量的硒对维持身体健康具有重要作用,缺硒容易引发心脑血管疾病、克山病以及大骨节病等^[1]。大量的科学研究表明,外源施用适量的硒肥有利于促进作物生长,增强植物的抗逆境胁迫能力^[2-4],提高作物的产量和品质^[5-6]。通过硒生物强化获得富硒植物资源是生产富硒农产品的安全有效途径,因此研究外源硒对植物生长发育的影响及适宜的施硒方式对推进我国硒产业健康发展具有重要意义^[7]。

川党参(*Codonopsis tangshen* Oliv.)为桔梗科多年生藤本植物,其干燥根是党参药材的主要来源之一,具有生津养血、补中益气 and 降血压等功效。2018年1月,国家卫生健康委员会食品司将党参列入既是食品又是中药材物质目录,意味着党参不再仅以药品和保健品的形式存在,未来也将更多以食品形式出现,这将有利于党参的综合开发和利用,能够激发和带动党参产业发展。目前关于植物硒生物强化的研究报道较多, Li等^[8]的研究表明,通过外源喷施硒肥可显著增加蓝莓浆果中的硒含量,达到生产富硒蓝莓食品的目的。Wang等^[9]的研究表明,在含硒营养液中水培龙须菜可以增强其抗氧化能力,生产富硒龙须菜。Zhu等^[10]的研究表明外源喷施硒肥可改善番茄的营养品质,生产富硒番茄。

目前关于党参硒方面的研究主要集中在硒化党参多糖的药理作用^[11-12],且试验材料多为党参(*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.),川党参的硒生物强化研究仍未见报道。党参作为药食同源药材,具有广阔的市场消费前景,生产富硒党参可以进一步提高其经济价值,因此开展川党参硒生物强化研究具有重要意义。本研究通过对川党参喷施不同浓度硒肥,探索外源硒对川党参产量、品质、硒形态及其部分根际土壤养分的影响,分析川党参生理生态变化与根际土壤养分变化的潜在关系,试图从土壤的角度揭示外源硒

对川党参生长的影响及其可能作用机制,并对其作用效果进行综合评价,为川党参富硒栽培提供理论依据和技术支撑,推动富硒川党参产业健康发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为1年生党参幼苗,购自湖北省恩施市板桥镇新田村农户,经湖北省农业科学院中药材研究所鉴定为川党参(*Codonopsis tangshen* Oliv.)。亚硒酸钠(Na_2SeO_3)作为硒源,购自成都艾科达化学试剂有限公司。

1.2 试验地概况

试验地点设置在恩施市板桥镇新田村湖北省农业科学院中药材研究所党参规范化栽培示范基地($30^\circ 32' 15''\text{ N}$, $109^\circ 12' 44''\text{ E}$,海拔1 735 m),属于亚热带季风气候区,年平均气温 10.8°C ,年平均降雨量1 100 mm,无霜期200 d左右。试验地土壤为泥质页岩发育的黄棕壤,耕层土壤容重为 $1.15\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pH为4.52, 硒含量 $0.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有机质 $29.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $130.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $28.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $188.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验设计

试验共设置6个硒肥处理,分别为喷施0(CK)、25、50、100、200、400 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥(以硒元素计),硒肥为亚硒酸钠水溶液。由于党参叶片表面有短绒毛和蜡质,容易造成硒肥溶液淋失,因此加入0.1%吐温80作为表面活性剂。每个处理三个重复(小区),每个小区 5 m^2 ,各硒肥处理每平方米分别喷施12.5、25、50、100、200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硒肥溶液200 mL,对照处理喷施等体积的清水。2017年11月将试验地进行翻耕,施入 $3\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥(pH=7.80, 有机质 $\geq 45\%$, $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}\geq 5\%$)和 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}\geq 45\%$)作为基肥,翻耕均匀,肥料施用一周后,将健康

且大小一致的一年生川党参幼苗进行移栽,保持种植密度一致,种植行株距为25 cm×10 cm,田间管理统一参照当地农户习惯模式进行。川党参于蕾期(2018年6月)和花期(2018年7月)分别喷施一次不同浓度的硒肥。2018年9月采用钉耙现场测产采收(避免伤及根茎),使用抖根法收集川党参的根际土壤,阴干后用于检测土壤理化性质。党参根茎带回实验室清洗干净后测定其形态特征,50 ℃烘干后测定其总硒、无机硒、炔苷和多糖含量。

1.4 检测项目及方法

川党参根长采用直尺进行测量;茎粗使用游标卡尺(MNT-150)测定。每个小区按五点取样法随机取20株川党参,采用3 kg级乐祺电子秤(LQ-C30002)称质量,然后计算出每个小区的单株鲜质量。各处理小区的川党参全部挖出,使用30 kg级金旺电子秤(HY-809)称质量测产。川党参总硒含量参照《食品安全国家标准 食品中硒的测定》(GB 5009.93—2017)进行检测;无机硒含量参照《湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》(DBS 42/002—2014)进行检测。川党参有机硒含量=总硒含量-无机硒含量。参照胡佳栋等^[13]的方法测定川党参多糖和炔苷含量。蒽酮-浓硫酸法测定川党参总糖含量;3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定还原糖含量。多糖质量浓度=总糖质量浓度-还原糖质量浓度。采用高效液相色谱法测定党参炔苷,色谱条件:Agilent C18色谱柱(4.6 mm×150 mm, 5 μm);流动相水:乙腈=75:25;流速1 mL·min⁻¹;柱温为室温(25 ℃);检测波长为267 nm;进样量20 μL。

川党参根际土壤养分检测指标包括有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,参考鲍士旦^[14]的《土壤农化分析》进行测定。有机质含量采用重铬酸钾氧化还原滴定外加热法测定;碱解氮含量采用NaOH碱解扩散

法测定;速效磷含量采用0.03 mol·L⁻¹ NH₄F和0.025 mol·L⁻¹ HCl浸提-钼蓝比色法测定;速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定。

参照周武先等^[15]的方法计算川党参对外源硒处理的生理生长响应指数(Physiology and growth response index, PGRI)以及不同硒处理对川党参生理生长影响的综合效应(Comprehensive effect, CE)。即:

$$PGRI = \begin{cases} 1 - C/T & (T \geq C) \\ T/C - 1 & (T < C) \end{cases} \quad (1)$$

式中:C为对照值;T为处理值。PGRI>0,表示对某一生理生长指标具有促进作用;PGRI=0,表示没有影响;PGRI<0,表示具有抑制作用,绝对值的大小表示作用强度。

$$CE = (PGRI_1 + PGRI_2 + PGRI_3 + \dots + PGRI_n) / n \quad (2)$$

式中:CE使用对应处理下川党参生理生长等正向指标的PGRI算术平均值表示。CE>0表示具有促进作用,值越大表明促进作用越强;CE=0表示没有影响(相对);CE<0表示具有抑制作用,绝对值越大表明抑制作用越强。n表示生理生长指标的个数。

1.5 数据处理

采用Excel 2007、SPSS 20.0软件对数据进行统计分析和单因素方差分析(One-way ANOVA),采用新复极差法(Duncan)进行多重比较(α=0.05)。利用Pearson法对川党参生理生长性状及其根际土壤理化性质进行相关性分析。采用Canoco 5.0软件对川党参生理生长性状的影响因子进行RDA排序。采用Origin 8.5作图,图表中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同硒处理对川党参根茎形态和产量的影响

从表1可以看出,不同硒处理对川党参的根长无显著影响。相比于CK, 100 g·hm⁻²和200 g·hm⁻²的硒

表1 不同硒肥处理对川党参根茎形态和产量的影响

Table 1 Effects of different Se treatments on root length, root diameter, fresh weight and yield of *C. tangshen*

硒处理 Se treatment/(g·hm ⁻²)	根长 Root length/cm	茎粗 Root diameter/cm	单株鲜质量 Fresh weight per plant/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
0	31.79±1.72a	1.13±0.01b	21.17±1.53b	4 793.3±208.2b
25	32.70±3.19a	1.10±0.08b	21.27±1.11b	4 760.0±105.8b
50	31.94±2.32a	1.24±0.11ab	22.61±3.59ab	4 946.7±220.3ab
100	33.46±1.27a	1.27±0.09a	23.31±2.70ab	5 126.7±201.3ab
200	32.47±2.38a	1.28±0.09a	24.48±0.70a	5 260.0±298.7a
400	30.65±3.16a	1.12±0.02b	21.35±0.80b	4 840.0±197.0b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level.

肥处理可显著增加川党参茎粗,增幅分别为12.4%和13.6%。200 g·hm⁻²的硒肥处理显著增加了川党参的单株鲜质量和产量,增幅分别为15.6%和9.7%。由此可见,喷施200 g·hm⁻²的硒肥处理可显著促进川党参的生长。

2.2 不同硒处理对川党参品质的影响

由图1可知,与CK相比,25、50、100 g·hm⁻²和200 g·hm⁻²硒肥处理均显著增加川党参的多糖含量,分别增加了2.9、2.2、3.5和3.6个百分点。100、200 g·hm⁻²和400 g·hm⁻²硒肥处理显著增加了川党参的炔萜含量,增幅分别为27.1%、37.6%和36.5%。综上所述,100 g·hm⁻²和200 g·hm⁻²硒肥处理对川党参多糖和炔萜合成均有促进作用,是提升川党参品质的适宜施硒量。

2.3 不同硒处理对川党参硒形态的影响

如图2所示,随着外源喷施硒肥浓度的增加,川党参的无机硒、有机硒和总硒含量显著增加,且川党参的无机硒、有机硒和总硒含量与外源喷施硒肥的浓度存在显著的线性关系($P<0.001$)。使用 y 表示川党参硒含量, x 表示外源喷施硒肥的浓度。川党参无机硒含量与外源喷施硒肥浓度的函数关系为 $y=0.004\ 2x+0.019\ 1$ ($r=0.979\ 1$, $P<0.001$);川党参有机硒含量与外源喷施硒肥浓度的函数关系为 $y=0.017\ 2x+0.088$ ($r=0.981\ 9$, $P<0.001$);川党参总硒含量与外源喷施硒肥浓度的函数关系为 $y=0.021\ 4x+0.107$ ($r=0.983\ 3$, $P<0.001$)。外源喷施25 g·hm⁻²硒肥时,川党参总硒含量最低,为0.174 mg·kg⁻¹;外源喷施400 g·hm⁻²硒肥时,川党参总硒含量最高,为0.947 mg·kg⁻¹。喷施50~200 g·hm⁻²硒肥处理时,川党参总硒含量为0.28~0.53

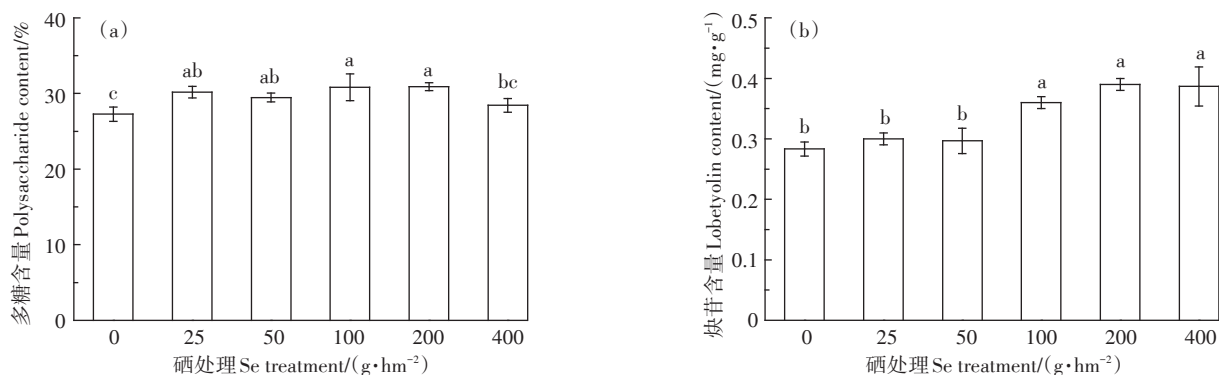
mg·kg⁻¹,有机硒占总硒的比例为80.1%~83.6%,均达到《湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》(DBS 42/002—2014)富硒农产品的标准。从图2还可以看出,随着外源喷施硒肥浓度的增加,川党参有机硒占比逐渐增大,在喷施硒肥为200 g·hm⁻²时达到最高,为83.6%,随后有机硒占比开始下降。所有硒处理的川党参有机硒比例均显著高于CK处理。综上所述,外源喷施硒肥的浓度不仅对川党参硒含量具有决定性作用,同时对川党参硒形态也会产生影响。

2.4 不同硒处理对川党参部分根际土壤养分的影响

如图3所示,不同外源硒处理对川党参根际土壤有机质和速效磷含量无显著影响。外源喷施100、200 g·hm⁻²硒肥可显著增加川党参根际土壤碱解氮和速效钾含量,增幅分别为10.1%、13.3%和9.6%、17.4%。由此可知,外源喷施硒肥不仅影响川党参的生理生长,而且对其根际土壤养分含量也有影响。

2.5 不同硒处理对川党参产量和品质影响的综合效应

产量和品质是决定中药材经济价值的主要因素,因此本研究选取产量、多糖和炔萜(三者权重相同)作为评价外源硒对川党参生长作用效果的考核指标。从表2可以看出,川党参对不同硒处理的生理生长响应指数不同,不同硒处理对川党参产量、多糖和炔萜影响的综合效应也存在差异。外源喷施25~400 g·hm⁻²硒肥对川党参生长的影响总体表现为促进作用,但随着喷施硒浓度的提高,促进效果先增强后减弱,其中200 g·hm⁻²硒肥处理对川党参生长的促进效果最强,CE达到0.48。说明喷施适量硒肥对川党参生长具有较好的促进效果,过量喷施硒肥会导致促进效果减弱。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same below

图1 不同硒肥处理对川党参多糖和炔萜含量的影响

Figure 1 Effects of different Se treatments on polysaccharide and lobetyolin content of *C. tangshen*

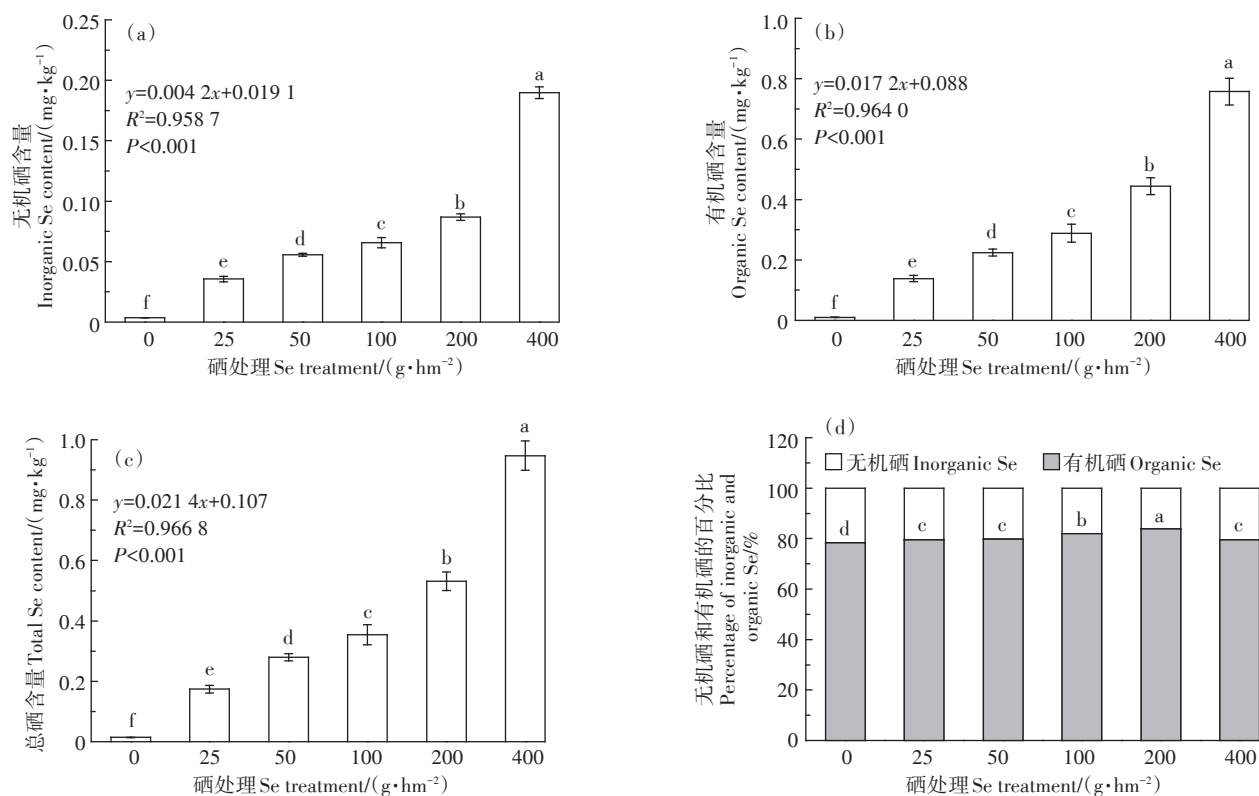


图2 不同硒处理对川党参硒形态的影响

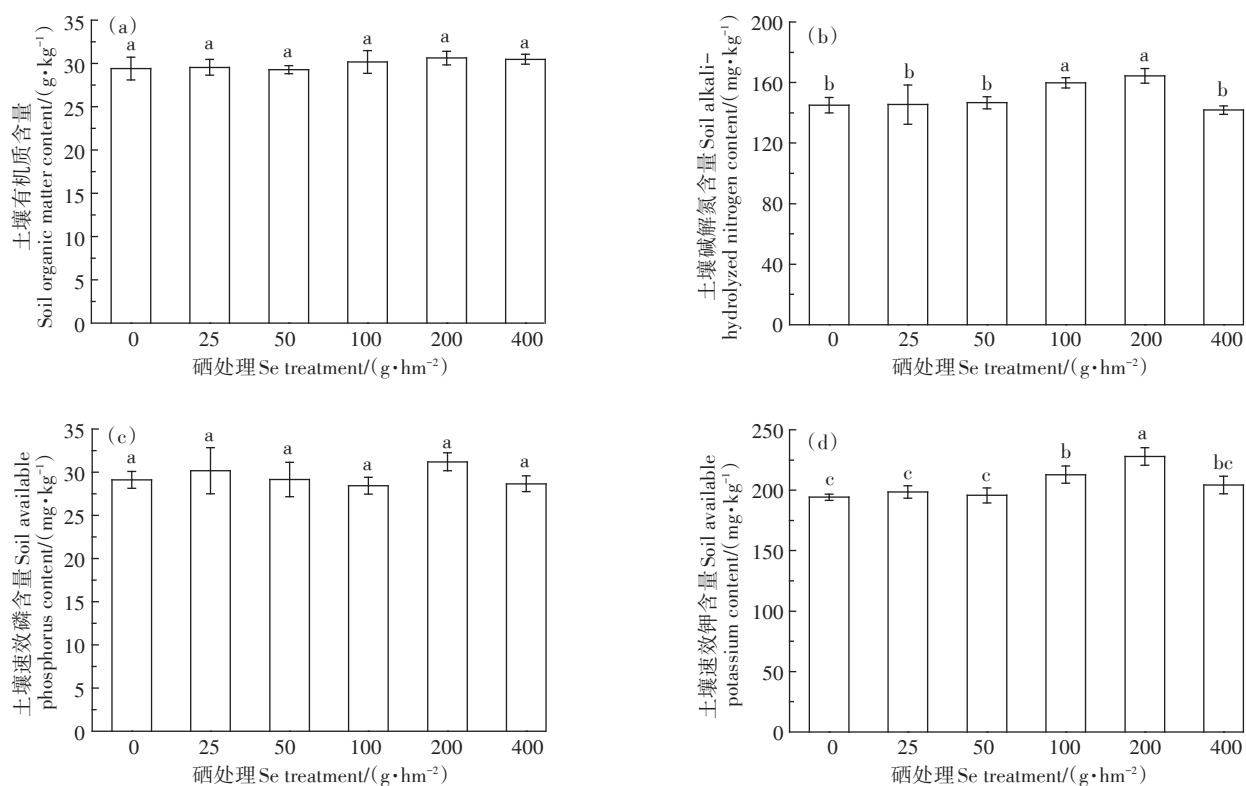
 Figure 2 Effects of different Se treatments on selenium speciation of *C. tangshen*


图3 不同硒处理对川党参部分根际土壤养分的影响

 Figure 3 Effects of different Se treatments on partial rhizospheric soil nutrients of *C. tangshen*

表2 不同硒处理对川党参产量和多糖、炔苷含量的综合效应
Table 2 The comprehensive effects of different Se treatments on the yield, polysaccharide and lobetyolin content of *C. tangshen*

硒处理 Se treatment/ (g·hm ⁻²)	生理生长响应指数 PGRI			综合效应 CE
	产量 Yield	多糖 Polysaccharide	炔苷 Lobetyolin	
25	-0.007	0.096	0.056	0.145
50	0.031	0.075	0.045	0.151
100	0.065	0.115	0.213	0.393
200	0.089	0.118	0.274	0.480
400	0.010	0.041	0.267	0.318

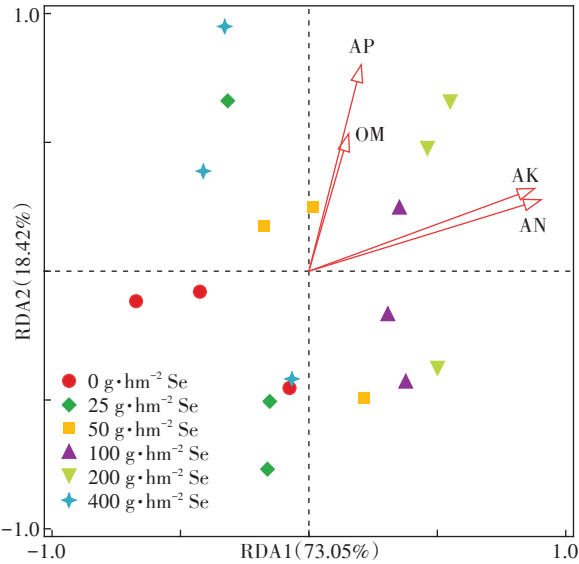
2.6 川党参生理生长性状和根际土壤养分的相关性和冗余分析

从表3可知,川党参单株鲜质量、产量与根际土壤碱解氮和速效钾含量呈显著正相关。川党参无机硒和有机硒含量与总硒含量呈极显著正相关。川党参多糖与根际土壤碱解氮和速效钾含量呈显著正相关。川党参炔苷含量与总硒含量及根际土壤速效钾含量呈极显著正相关。由此可知,川党参的生理生长性状与根际土壤养分存在密切联系。

川党参的生理生长性状与部分根际土壤养分的RDA分析见图4,第1排序轴解释了变量的73.05%,第2排序轴解释了变量的18.42%,前两个排序轴解释了变量的90%以上,说明前两个主成分可以充分反映各项因子的变异程度。土壤养分因子按照变量贡献率从大到小依次表现为碱解氮(61.5%, $P=0.002$)>速效钾(59.2%, $P=0.002$)>速效磷(17.0%, $P=0.258$)>有机质(8.7%, $P=0.660$),这表明根际土壤碱解氮和速效钾含量是影响川党参生理生长性状的主要土壤养分因子。

3 讨论

硒是一种天然的微量元素,对于植物的生长发育



OM:有机质;AN:碱解氮;AP:速效磷;AK:速效钾
OM: Organic matter; AN: Alkali-hydrolyzed nitrogen;
AP: Available phosphorus; AK: Available potassium

图4 川党参生理生长性状和部分根际土壤养分的冗余分析
Figure 4 The redundancy analysis of physiological and morphological traits and partial rhizospheric soil nutrients of *C. tangshen*

一般表现为双重作用,具有低浓度促进、高浓度抑制的作用效果^[6]。本研究结果表明,喷施200 g·hm⁻²的外源硒肥可显著促进川党参生长,增加其产量;当喷施400 g·hm⁻²硒肥时,这种促进效果会大大减弱。这与Hawrylak-Nowak等^[17]研究的硒对黄瓜生长影响和Zhu等^[5]研究的硒对轮叶党参生长影响的结果类似。大量的研究表明,外源喷施硒肥可有效改善作物品质。Zhu等^[10]的研究表明,在番茄花期叶面喷施1 mg·L⁻¹硒酸钠溶液(以Se元素计,1 mg·株⁻¹)可提高番茄可溶性糖、氨基酸和维生素C等营养成分含量。Zhu等^[6]通过对葡萄叶面喷施氨基酸螯合硒肥(Cu+Fe+Mn+Zn+B≥100 g·L⁻¹,有机硒≥60 g·L⁻¹,在幼果期和果

表3 川党参生理生长性状与总硒和根际土壤养分的相关性分析(r)

Table 3 Pearson correlation coefficients between physiological and morphological traits, total selenium and rhizospheric soil nutrients of *C. tangshen*(r)

养分 Nutrients	根长 Root length	茎粗 Root diameter	单株鲜质量 Fresh weight per plant	产量 Yield	总硒含量 Total selenium	无机硒 Inorganic selenium	有机硒 Organic selenium	多糖 Polysaccharide	炔苷 Lobetyolin
总硒含量 Total selenium	-0.211	0.077	0.138	0.142	1.000	0.992**	0.998**	0.076	0.813**
有机质 Organic matter	-0.198	0.038	0.090	0.169	0.433	0.400	0.439	0.224	0.455
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen	0.174	0.362	0.708**	0.652**	0.009	-0.084	0.031	0.506*	0.408
速效磷 Available phosphorus	-0.338	-0.066	0.365	0.194	-0.060	-0.115	-0.046	0.144	0.062
速效钾 Available potassium	0.170	0.428	0.635**	0.535*	0.392	0.292	0.415	0.558*	0.708**

注: *代表在0.05水平显著相关, **代表在0.01水平显著相关。
Note: *represent significant correlation at the level of 0.05, ** represent significant correlation at the level of 0.01.

实膨大期共喷施三次,每次间隔10~15 d)500倍液,发现外源硒肥提高了葡萄可溶性糖、可溶性蛋白和维生素C等营养成分含量,降低了葡萄有机酸含量。王清华等^[18]发现在冬枣果实膨大期喷施 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚硒酸钠溶液(以Se元素计, $27\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$),可显著提升冬枣可溶性糖、维生素C和总黄酮等营养成分含量。本研究结果显示,在川党参蕾期和花期叶面喷施 $100\sim 200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 外源硒肥可显著提高川党参多糖和炔苷含量,说明叶面喷施适量硒肥可有效改善川党参品质。

有研究表明,通过外源喷施硒肥可以提升谷类作物的硒含量。例如,Deng等^[19]对水稻喷施 $75\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥,使稻米硒含量达到 $0.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Galinha等^[20]对小麦喷施 $100\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥,使小麦硒含量达到 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Wang等^[21]对玉米喷施 $200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥,使玉米硒含量达到 $1.6\sim 1.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相比于其他研究,本研究设置的硒肥浓度虽然较高,但即使在川党参两个生育时期分别喷施一次 $25\sim 400\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥,川党参的硒含量也仅为 $0.17\sim 0.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相比于谷类作物,川党参的硒富集能力较弱,这可能是由于川党参叶片有短绒毛和蜡质,容易造成硒肥溶液流失且不易被川党参吸收,也可能与不同种类的植物硒富集特性存在差异有关。以往的研究表明,相比于无机硒,有机硒对人体来说相对更加安全,且生物可利用性更高^[22]。有机硒在谷类作物中占总硒的比例较大,一般高达80%^[19,23],而有关中药材有机硒比例报道较少。本研究结果表明,川党参中的硒主要以有机硒形态存在(有机硒>70%),且有机化程度与喷施的外源硒浓度密切相关,当 $\text{Se}\leq 200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着喷施硒肥浓度的提高,川党参有机硒比例逐渐上升;当 $\text{Se}=400\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,川党参有机硒比例下降,这与王清华等^[24]研究的喷施不同浓度硒肥对沾化冬枣硒形态影响的结果类似,可能是由于川党参中的无机硒含量快速增加导致其转化为有机硒的能力不足。

植物和土壤是陆地生态系统的重要组成部分,两者相辅相成、相互影响。根际土壤是指受植物根系活动及其分泌物影响,在物理、化学和生物学性质上不同于其他土体的微域土区^[25]。存在于植物根际能够促进植物生长的细菌被定义为植物根际促生菌^[26]。部分植物根际促生菌具有固氮和活化矿质营养元素的功能^[27]。外界环境变化可能会影响作物的生理代谢过程,致使植物根系分泌物成分发生改变,同时影响植物根际促生菌活性,进而引起一系列生物化学变化。根际土壤养分作为植物养分吸收的直接来源,其

养分含量的变化直接影响作物的生理代谢过程,进而影响作物生长^[28]。本研究结果表明,对川党参喷施 $100\sim 200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥可显著提高其根际土壤碱解氮和速效钾含量,这与周武先等^[29]前期发现叶面喷施适量硒肥可提高白术根际土壤速效钾含量的研究结果存在类似之处,可能是由于外源喷施硒肥引起川党参根系分泌物发生变化,刺激了根际土壤中具有固氮和解钾功能的植物根际促生菌的生长,从而增加了根际土壤中碱解氮和速效钾含量,但其具体原因还有待进一步研究。相关性分析结果表明,川党参产量和多糖含量与根际土壤碱解氮和速效钾含量呈显著正相关,炔苷含量与速效钾含量呈极显著正相关。RDA分析也表明,碱解氮和速效钾含量是影响川党参生理生长的主要环境因子,这表明提高根际土壤碱解氮和速效钾含量可能是外源喷施硒肥提升川党参品质的重要原因之一。在实际生产过程中,外源喷施适量硒肥可作为生产富硒川党参及提高川党参产量、品质的有效途径。

4 结论

(1)在川党参蕾期和花期喷施适量硒肥可提高其产量及多糖、炔苷含量,且以喷施 $100\sim 200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥效果最佳。

(2)川党参中的硒主要以有机硒形态存在(有机硒>70%),且有机硒占比随着外源硒肥浓度的升高呈现先增大后减少的变化趋势。

(3)川党参作为药食同源药材,是一种良好的硒生物强化候选材料,外源喷施 $50\sim 200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硒肥时,川党参总硒含量可达到富硒农产品标准,有机硒占比为80.1%~83.6%。

参考文献:

- [1] Fairweather-Tait S J, Bao Y P, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2011, 14 (7):1337-1383.
- [2] Zahedi S M, Abdelrahman M, Hosseini M S, et al. Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253:246-258.
- [3] Hussein H-A A, Darwesh O M, Mekki B B. Environmentally friendly nano-selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019, 18:101080.
- [4] Yin H Q, Qi Z Y, Li M Q, et al. Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L.[J]. *Ecotoxicol-*

- ogy and Environmental Safety, 2019, 169:911-917.
- [5] Zhu L X, Wang P, Zhang W J, et al. Effects of selenium application on nutrient uptake and nutritional quality of *Codonopsis lanceolata*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225:574-580.
 - [6] Zhu S M, Liang Y L, Gao D K, et al. Spraying foliar selenium fertilizer on quality of table grape(*Vitis vinifera* L.) from different source varieties [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 218:87-94.
 - [7] Mohtashami R, Dehnavi M, Balouchi H, et al. Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232:106046.
 - [8] Li M F, Zhao Z Q, Zhou J J, et al. Effects of a foliar spray of selenite or selenate at different growth stages on selenium distribution and quality of blueberries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(12):4700-4706.
 - [9] Wang Q, Zuo Y, Chen T F, et al. Effects of selenium on antioxidant enzymes and photosynthesis in the edible seaweed *Gracilaria lemaneiformis*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31(2):1303-1310.
 - [10] Zhu Z, Zhang Y B, Liu J, et al. Exploring the effects of selenium treatment on the nutritional quality of tomato fruit[J]. *Food Chemistry*, 2018, 252:9-15.
 - [11] Qin T, Ren Z, Liu X P, et al. Study of the selenizing *Codonopsis pilosula* polysaccharides protects RAW264.7 cells from hydrogen peroxide-induced injury[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 125:534-543.
 - [12] Gao Z Z, Zhang C, Jing L R, et al. The structural characterization and immune modulation activities comparison of *Codonopsis pilosula* polysaccharide(CPPS) and selenizing CPPS(sCPPS) on mouse *in vitro* and *vivo*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 160:814-822.
 - [13] 胡佳栋, 毛歌, 张志伟, 等. 不同施肥处理对党参产量和次生代谢物含量的影响研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(15):2946-2953. HU Jia-dong, MAO Ge, ZHANG Zhi-wei, et al. Effect of different fertilization treatments on yield and secondary metabolites of *Codonopsis pilosula*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2017, 42(15):2946-2953.
 - [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3th Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
 - [15] 周武先, 何银生, 朱盈徽, 等. 生石灰和钙镁磷肥对酸化川党参土壤的改良效果[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9):3224-3232. ZHOU Wu-xian, HE Yin-sheng, ZHU Ying-hui, et al. Improvement effects of quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer on acidified soil cultivating *Codonopsis tangshen*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9):3224-3232.
 - [16] 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.
 - [17] Hawrylak-Nowak B, Matraszek R, Pogorzelec M. The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(2):41.
 - [18] 王清华, 井大炜, 杜振宇, 等. 不同时期叶面喷硒对冬枣含硒量与品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2):226-232. WANG Qing-hua, JING Da-wei, DU Zhen-yu, et al. Effects of foliar selenium spray at different growing stages on selenium content and quality of winter jujube fruit[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2):226-232.
 - [19] Deng X F, Liu K Z, Li M F, et al. Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211:165-171.
 - [20] Galinha C, Sánchez-Martínez M, Pacheco A M G, et al. Characterization of selenium-enriched wheat by agronomic biofortification[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(7):4236-4245.
 - [21] Wang J W, Wang Z H, Mao H, et al. Increasing Se concentration in maize grain with soil- or foliar-applied selenite on the Loess Plateau in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150:83-90.
 - [22] Longchamp M, Castrec-Rouelle M, Biron P, et al. Variations in the accumulation, localization and rate of metabolism of selenium in mature *Zea mays* plants supplied with selenite or selenate[J]. *Food Chemistry*, 2015, 182:128-135.
 - [23] Eiche E, Bardelli F, Nothstein A K, et al. Selenium distribution and speciation in plant parts of wheat(*Triticum aestivum*) and Indian mustard(*Brassica juncea*) from a seleniferous area of Punjab, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505:952-961.
 - [24] 王清华, 井大炜, 杜振宇, 等. 叶面喷硒对沾化冬枣富硒及品质的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(2):23-28. WANG Qing-hua, JING Da-wei, DU Zhen-yu, et al. Effects of foliar selenium spray on selenium content and fruit quality of Zhanhua Jujube(*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)[J]. *Nonwood Forest Research*, 2019, 37(2):23-28.
 - [25] Schade J D, Hobbie S E. Spatial and temporal variation in islands of fertility in the Sonoran Desert[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(3):541-553.
 - [26] Kloepper J W, Ryu C M, Zhang S. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp.[J]. *Phytopathology*, 2004, 94(11):1259-1266.
 - [27] Kim B K, Chung J H, Kim S Y, et al. Genome sequence of the leaf-colonizing bacterium *Bacillus* sp. strain 5B6, isolated from a cherry tree[J]. *Journal of Bacteriology*, 2012, 194(14):3758-3759.
 - [28] Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97:40-49.
 - [29] 周武先, 张美德, 王华, 等. 有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3):457-465. ZHOU Wu-xian, ZHANG Mei-de, WANG Hua, et al. Benefits of partially substituting mineral fertilizers with organic manure combined with foliar selenium on the growth of *Atractylodes macrocephala* Koizd. [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3):457-465.