



农业资源与环境学报

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>

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

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

几种有机肥对紫色土Pb有效性和形态的调控效应

李顺奇, 刘洁, 陈杰, 王璐瑶, 柏宏成, 魏世强

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 79–88 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0032>

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>

叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响

谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 邢颖, 陈锦平, 刘永贤, 张超兰

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 981–987 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0629>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响

李顺江, 李鹏, 李新荣, 赵丽平, 马茂亭, 赵同科

农业资源与环境学报. 2015(3): 235–241 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0291>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

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*

(湖北省农业科学院中药材研究所, 湖北 恩施 445000)

摘要:为探讨有机肥替代部分化肥结合喷施外源硒对白术生长的影响及其可能作用机理,采用大田试验,设置喷施清水(CK)、有机肥替代部分化肥结合喷施清水(OM)、有机肥替代部分化肥结合喷施 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥(OM+5Se)、有机肥替代部分化肥结合喷施 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥(OM+10Se)和有机肥替代部分化肥结合喷施 $15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥(OM+15Se)五个处理,考察不同处理对白术叶功能性状、产量和土壤理化性质的影响。结果表明,OM、OM+5Se、OM+10Se和OM+15Se显著增加白术的叶面积,增幅分别为12.3%、25.3%、22.5%和10.4%。OM+5Se和OM+10Se处理显著增加白术叶干质量,增幅分别为10.7%和13.0%。OM+5Se处理显著增加白术叶片比叶面积,增幅为13.0%。OM+5Se和OM+10Se处理显著降低白术叶片长宽比,降幅分别为15.6%和18.4%。OM、OM+5Se、OM+10Se和OM+15Se显著增加白术产量,增幅分别达到37.3%、121.7%、91.7%和65.2%。在施用有机肥的基础上,外源喷施硒肥对白术生长整体表现为促进作用,但促生效果呈现低浓度上升、高浓度下降的趋势。相关性分析表明,通过测定白术的叶功能性状可初步了解白术的生长情况。与对照相比,其他四种处理显著增加白术根际土壤的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。综上所述,有机肥替代部分化肥或有机肥替代部分化肥结合喷施外源硒肥均能促进白术生理生长,提高白术产量,且以有机肥替代部分化肥结合喷施 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥对白术的促生效果最好。

关键词:白术;有机肥;外源硒;叶片;功能性状;土壤性质

中图分类号:S567.233

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)03-0457-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0228

Benefits of partially substituting mineral fertilizers with organic manure combined with foliar selenium on the growth of *Atractylodes macrocephala* Koizd.

ZHOU Wu-xian, ZHANG Mei-de*, WANG Hua, DUAN Yuan-yuan, AI Lun-qiang, HUANG Dong-hai, LUO Xiao-rong, ZHANG Yu*
(Institute of Chinese Herbal Medicines, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Enshi 445000, China)

Abstract: To explore the effects of applying organic manure combined with foliar Se on the growth of *Atractylodes macrocephala*, and the possible mechanism thereof, an experiment using five different treatments was conducted to determine the effects of the treatments on leaf growth (a functional characteristic of leaves), yield and rhizospheric soil properties. The five treatments were as follows: spraying with distilled water (CK); mineral fertilizers partially substituted with organic manure combined with spraying of distilled water (OM); mineral fertilizers partially substituted with organic manure combined with spraying $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ foliar Se (OM+5Se); mineral fertilizers partially substituted with organic manure combined with spraying $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ foliar Se (OM+10Se); and mineral fertilizers partially substituted with organic manure combined with spraying $15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ foliar Se (OM+15Se). The results showed that compared with the CK, the OM, OM+5Se, OM+10Se and OM+15Se treatments significantly increased the leaf area of *A. macrocephala* by 12.3%, 25.3%, 22.5%, and

收稿日期: 2020-05-01 录用日期: 2020-06-23

作者简介: 周武先(1991—),男,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: 张美德 E-mail: emailtoecho@163.com; 张宇 E-mail: 15496883@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); 湖北省中央引导地方科技发展专项(2018ZYD013)

Project supported: Youth Science Foundation Project of Hubei Academy of Agricultural Sciences (2019NKYJJ13); Science and Technology Plan of Hubei Province (2019AKB092); Technical Innovation Program of Hubei Province (2018ZYD013)

10.4%, respectively. The OM + 5Se and OM + 10Se treatments produced a marked increase in leaf dry weight, of 10.7% and 13.0%, respectively, while also decreasing the leaf length width ratio by 15.6% and 18.4%, respectively. The OM + 5Se treatment increased the specific leaf area significantly, by 13.0%. The OM, OM + 5Se, OM + 10Se and OM + 15Se treatments also increased the yield of *A. macrocephala* significantly, by 37.3%, 121.7%, 91.7%, and 65.2%, respectively. The promotion of the growth in *A. macrocephala* leaves by the application of foliar Se (based on the application of organic manure) showed an increasing trend when Se was applied at low levels but a decreasing trend when Se was at high levels. Correlation analysis showed that the growth of *A. macrocephala* could be understood preliminarily by measuring its leaf functional characteristics. The OM, OM + 5Se, OM + 10Se and OM + 15Se treatments significantly increased the content of organic matter, alkaline N, and available P and K in the rhizospheric soil of *A. macrocephala*, compared with the CK. Thus, the application of both mineral fertilizers only partially substituted with organic manure and that combined with foliar Se treatments all increased the growth and yield of *A. macrocephala*. The application of mineral fertilizers partially substituted with organic manure combined with $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ foliar Se was the optimal treatment.

Keywords: *Atractylodes macrocephala*; organic manure; exogenous selenium; leaf; functional characteristics; soil properties

硒(Selenium, Se)是人体必需的营养元素,对维持身体健康具有重要作用,日常摄入适量的硒可以抵御心脑血管疾病、克山病和关节炎等疾病,硒还具有抗衰老、增强机体免疫力以及预防癌症的功效^[1-2]。硒虽然没有被认定为植物必需的营养元素,但越来越多的研究表明,适量的硒有利于促进植物生长发育^[3-5],增强其抗氧化能力和缓解逆境胁迫^[6-7],并具有拮抗重金属的效果^[8-9]。因此,合理利用硒肥有利于植物生长和富硒农产品的开发^[10-11]。

有机肥具有较强阳离子代换能力,能显著提高养分利用率,加速土壤团聚体形成,改善土壤理化性质。土壤一般处于碳缺乏环境,有机肥含有大量的有机质,能矿化分解为碳和其他微生物生长所需的营养物质^[12],进而提高微生物多样性^[13]。有研究表明,施用有机肥或有机无机配施能显著提高作物产量和果实品质^[14-15]。目前为了追求作物高产,大量施用单一化肥,导致土壤酸化、水体污染和土壤微生态结构失衡等问题。前期研究表明,有机肥替代部分化肥是培肥土壤和减肥增效的主要途径之一^[16]。合理施用有机肥可有效提高作物产量,改善土壤生态环境^[13]。

白术(*Atractylodes macrocephala* Koidz.)是菊科苍术属植物,以根茎入药,为我国常用大宗中药材品种,已有2 000多年的种植历史,素有“十方九术”和“南术北参”之称,被誉为健脾补气第一要药^[17]。其主要药效成分白术内酯Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ具有抗氧化^[18]、去炎症^[19]、抗突变^[20]和抗肿瘤^[21]的作用。本研究小组发现,适量的外源硒肥对白术生长和抗氧化能力具有促进作用^[3],而目前有关有机肥结合施用外源硒肥对白术生长影响的研究鲜见报道。因此本研究通过设置有机肥替代部分化肥处理,并在此基础上外源喷施不同浓度的硒肥,探索有机肥替代部分化肥结合施用外源硒

肥对白术生长的影响,为白术绿色健康栽培和科学施肥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设置在湖北省农业科学院中药材研究所试验基地恩施州咸丰县小村乡李子溪村(108°54'51" E, 29°53'05" N, 海拔832 m)。具有北亚热带湿润性季风气候特征,年均降雨量为1 400~1 600 mm,年均温度12~14℃,无霜期225~260 d,年日照时数1 062 h。试验地为灰色沙壤土,耕层土壤总硒含量为0.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质34.87 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮68.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷52.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾145.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为4.65。

1.2 供试材料和试剂

供试白术为一年生“咸丰白术”根茎,购自李子溪村当地农户,经湖北省农业科学院中药材研究所鉴定为菊科苍术属草本植物白术(*Atractylodes macrocephala*)。硒源为亚硒酸钠(纯度98%),购自武汉中恩科技有限公司。有机肥为丰疆有机肥(原料为牛粪、菜饼和米糠等,有机质 $\geq 45\%$,N-P₂O₅-K₂O $\geq 5\%$),购自金正大国际利川团堡直销店。

1.3 试验设计

试验始于2017年12月,共设置5个处理,分别为喷施清水(CK)、有机肥替代部分化肥结合喷施清水(OM)、有机肥替代部分化肥结合喷施5 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥(OM+5Se)、有机肥替代部分化肥结合喷施10 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥(OM+10Se)和有机肥替代部分化肥结合喷施15 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥(OM+15Se)。有机肥施用量为4 500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;硒肥为亚硒酸钠水溶液,施用量均以硒元素(Se)含量计。根据白术的氮磷钾需肥规律^[22]和配方

施肥方法(专利号 ZL 201611056634.4)计算白术的施肥量,白术的施氮量为 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=1:0.56:0.5$,分别使用尿素、过磷酸钙和硫酸钾作为氮、磷、钾肥,所有处理通过调节基肥配比保持氮磷钾施用量一致,12月中旬一次性施入50%氮肥、100%磷肥和100%钾肥作为基肥,于白术苗期和抽薹期分别追施30%和20%氮肥。有机肥和基肥同时施入,肥料施用一周后,将健康且大小一致的一年生白术幼苗进行移栽,行株距为 $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。采用随机区组设计,每个处理3个重复(小区),每个小区 6 m^2 ,于2018年白术抽薹期(5月)、现蕾期(6月)和开花期(7月)分别喷施一次外源硒肥(CK和OM喷施清水),每小区硒肥喷施量为1 L。现蕾期每个小区随机挑选15株白术(选取茎梢往下的第三轮叶片,每株一枚)测定叶片形态特征、SPAD值以及株高。2018年10月现场进行测产(测定白术根茎生物量)采收,采用抖根法收集白术根际土壤,带回室内阴干,用于测定土壤养分含量。白术根茎洗净后切片,置于 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒质量,粉碎后用于总硒含量测定。

1.4 检测项目及方法

白术株高采用钢卷尺测定;新鲜叶片叶面积采用作物叶片形态测量仪(YMJ-C,浙江托普云农科技股份有限公司)测定;叶绿素相对含量(SPAD)采用叶绿素仪(TYS-A,浙江托普云农科技股份有限公司)测定;叶片干质量采用千分之一天平(Sartorius,BSA223S)称量;白术总硒含量使用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮法测定^[23]。

土壤养分测定指标包括有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量,参考鲍士旦^[24]的《土壤农化分析》方法进行。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;有效磷含量采用 $0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{F}-0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$

浸提-钼蓝比色法测定;速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰分光光度计法测定。

参照周武先等^[25]的方法计算白术对外源硒的生理生长响应指数(Physiology and growth response index, PGRI),即:

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

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

综合效应(Comprehensive effect, CE)使用 PGRI 的算术平均值表示,即:

$$\text{CE} = (\text{PGRI}_1 + \text{PGRI}_2 + \text{PGRI}_3 + \dots + \text{PGRI}_n) / n \quad (2)$$

式中: $\text{CE} > 0$ 表示具有促进作用,值越大表明促进作用越强; $\text{CE}=0$ 表示没有影响(相对); $\text{CE} < 0$ 表示具有抑制作用,绝对值越大表明抑制作用越强。

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),并用新复极差法(Duncan)进行多重比较($\alpha=0.05$)。使用 Pearson 法对白术生理生长性状及土壤理化性质间的相关性进行分析。采用主成分分析法对影响白术生理生长性状的土壤理化性质进行 PCA 排序。利用 Origin 8.5 和 Canoco 5.0 软件作图。图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同处理下白术叶片功能性状

从表1可以看出,与CK相比,OM、OM+5Se、OM+10Se和OM+15Se处理的叶面积显著增加,增幅分别为12.3%、25.3%、22.5%和10.4%;而对白术叶周长、

表1 不同处理对白术叶片功能性状的影响

Table 1 Effects of different treatments on characteristics of *A. macrocephala* leaf

处理 Treatment	叶面积 Leaf area/ mm^2	叶周长 Leaf perimeter/mm	叶长 Leaf length/mm	叶宽 Leaf width/mm	叶干质量 Leaf dry weight/g	比叶面积 Specific leaf area/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$)	叶长宽比 Leaf length width ratio
CK	1 672.72 $\pm$ 72.79d	230.30 $\pm$ 18.91a	94.52 $\pm$ 3.83a	29.13 $\pm$ 2.56a	0.169 $\pm$ 0.008b	9.89 $\pm$ 0.16b	3.32 $\pm$ 0.04a
OM	1 878.80 $\pm$ 99.11bc	232.36 $\pm$ 10.50a	94.82 $\pm$ 9.55a	30.18 $\pm$ 4.29a	0.177 $\pm$ 0.006b	10.62 $\pm$ 0.52ab	3.16 $\pm$ 0.17ab
OM+5Se	2 096.17 $\pm$ 47.55a	238.65 $\pm$ 16.80a	96.07 $\pm$ 3.48a	32.97 $\pm$ 1.68a	0.187 $\pm$ 0.004a	11.18 $\pm$ 0.11a	2.80 $\pm$ 0.09bc
OM+10Se	2 049.32 $\pm$ 146.62ab	237.23 $\pm$ 13.92a	93.10 $\pm$ 3.93a	34.38 $\pm$ 2.47a	0.191 $\pm$ 0.009a	10.74 $\pm$ 1.03ab	2.71 $\pm$ 0.06c
OM+15Se	1 847.50 $\pm$ 76.79c	233.90 $\pm$ 9.93a	93.81 $\pm$ 6.22a	30.32 $\pm$ 5.61a	0.174 $\pm$ 0.004b	10.65 $\pm$ 0.62ab	3.14 $\pm$ 0.44ab

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

叶长和叶宽无显著影响。OM+5Se 和 OM+10Se 处理显著增加白术叶片干质量,增幅分别为 10.7% 和 13.0%。OM+5Se 处理显著增加白术叶片比叶面积,增幅为 13.0%。OM+5Se 和 OM+10Se 处理显著降低白术叶片长宽比,降幅分别为 15.6% 和 18.4%。可见,有机肥替代部分化肥和有机肥替代部分化肥结合喷施硒肥均会显著改变白术的叶片功能性状。

2.2 不同处理下白术生理生长及硒含量

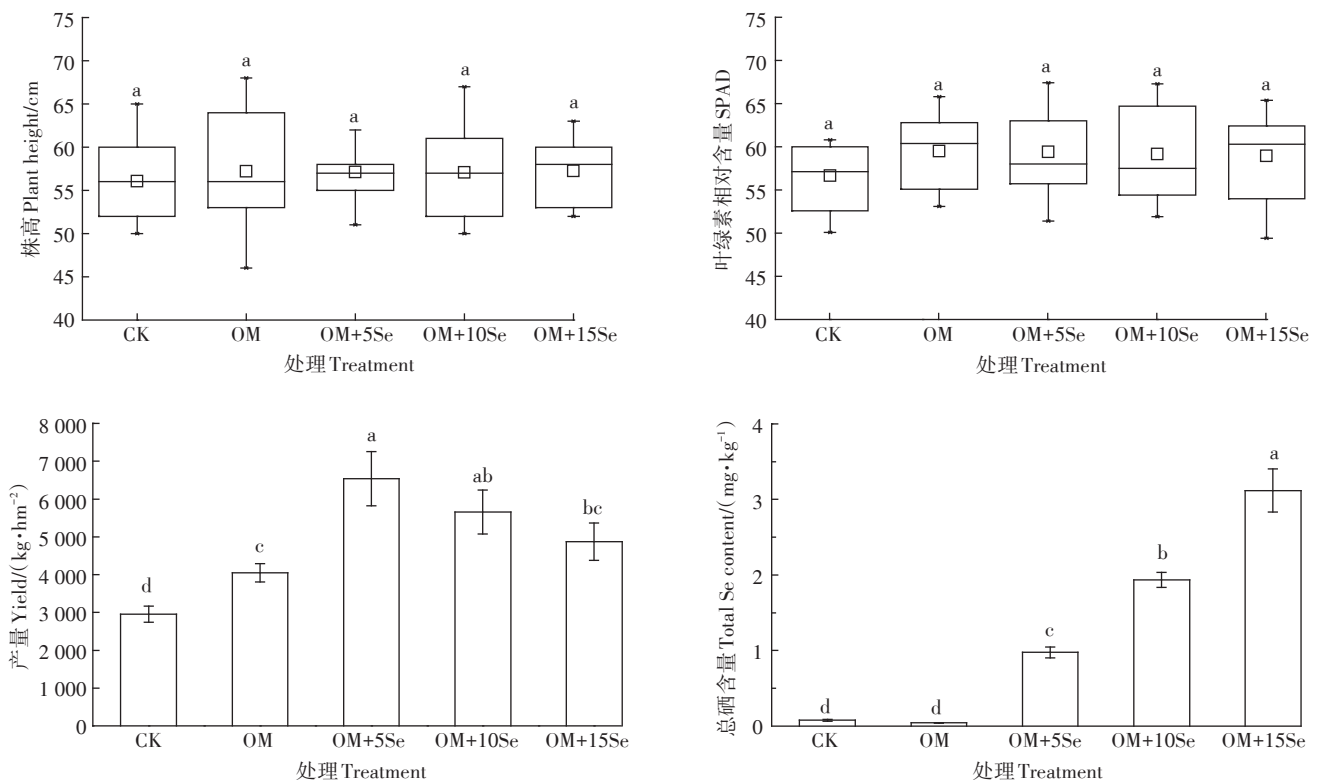
从图 1 可知,各处理对白术株高和叶绿素相对含量无显著影响。OM、OM+5Se、OM+10Se 和 OM+15Se 处理相较于 CK 分别增产 1 100、3 589、2 706 kg·hm⁻² 和 1 922 kg·hm⁻²,增幅分别达到 37.3%、121.7%、91.7% 和 65.2%。CK 和 OM 处理硒含量没有显著差异,外源喷施硒肥后,白术硒含量显著增加,且喷施硒浓度越高,白术硒含量越高。OM+5Se、OM+10Se 和 OM+15Se 处理白术硒含量分别为 0.98、1.94 mg·kg⁻¹ 和 3.12 mg·kg⁻¹,均达到富硒农产品的标准(Se≥0.2 mg·kg⁻¹, DBS 42002—2014 湖北省食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求)。

2.3 白术根茎生物量与叶功能性状的相关性

如图 2 所示,白术叶面积和叶干质量与根茎生物量呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数(r)分别为 0.742 9 和 0.726 6。比叶面积、叶宽和叶绿素相对含量与根茎生物量均呈显著正相关关系($P<0.05$), r 分别为 0.618 8、0.573 0 和 0.584 9。叶长宽比和根茎生物量呈显著负相关关系($P<0.05$), r 为 -0.625 1。由此可知,白术根茎生物量与叶功能性状存在密切联系,通过测定白术的叶功能性状可初步估测白术产量的大小。

2.4 不同处理下白术根际土壤养分

从图 3 可以看出,相比于 CK 处理,OM、OM+5Se、OM+10Se 和 OM+15Se 处理的土壤有机质含量显著增加,增幅分别为 20.4%、20.4%、21.6% 和 18.1%;碱解氮含量显著增加,增幅分别为 33.1%、35.2%、33.1% 和 26.3%;四个处理的土壤有机质和碱解氮含量相互之间差异不显著。OM、OM+5Se、OM+10Se 和 OM+15Se 处理的土壤有效磷含量显著高于 CK,增幅分别为 65.0%、30.5%、55.0% 和 39.7%,其中 OM 处理的有效磷含量最



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 difference among treatments($P<0.05$). The same below

图 1 不同处理对白术株高、SPAD、产量和总硒含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on plant height, leaf SPAD value, yield and total Se content of *A. macrocephala*

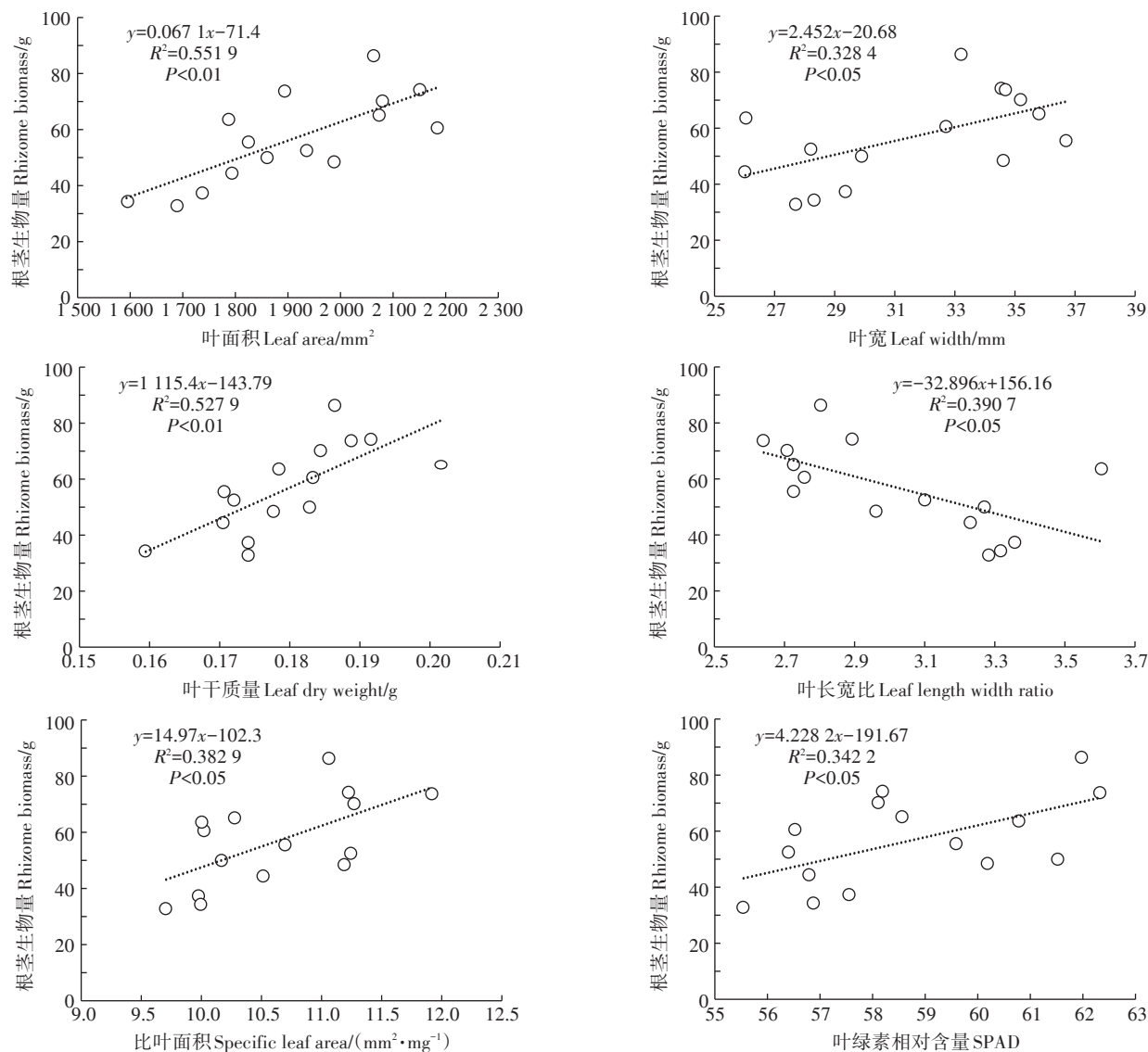


图2 白术根茎生物量与叶功能性状的相关性分析

Figure 2 Pearson correlations between rhizome biomass and leaf functional characteristics of *A. macrocephala*

高且显著高于其他处理。与CK相比,OM、OM+5Se、OM+10Se和OM+15Se处理的土壤速效钾含量显著增加,增幅分别为13.6%、22.2%、35.2%和33.0%。

2.5 不同处理下白术生理生长的响应指数和综合效应

表2显示,不同处理下白术的生理生长响应指数和综合效应存在差异,OM、OM+5Se、OM+10Se和OM+15Se处理对白术叶面积、叶干质量、比叶面积、叶绿素、株高和产量均具有促进作用,但促进作用强弱不同。从综合效应来看,OM+5Se处理对白术生长的促进作用最强,CE为0.171,其次为OM+10Se和OM+15Se,CE分别为0.153和0.108。随着喷施硒肥浓度的提升,外源硒肥对白术生长的促进作用呈现先上升后下降的趋势,说明喷施

适量的硒肥对白术生长具有促生作用,过量喷施硒肥后促进作用减弱。

2.6 白术生理生长性状与根际土壤养分的相关性

从表3可以看出,白术叶面积与根际土壤有机质、碱解氮和速效钾含量呈显著正相关关系。叶宽与土壤碱解氮含量呈显著正相关关系。叶干质量与土壤有机质、碱解氮和速效钾含量呈显著正相关关系。叶长宽比与土壤有机质、碱解氮和速效钾含量呈显著负相关关系。比叶面积与土壤有机质含量呈显著正相关关系。叶绿素相对含量与土壤碱解氮含量呈显著正相关关系。白术产量与土壤有机质、碱解氮和速效钾含量呈极显著正相关关系。根际土壤速效钾含量与白术总硒含量呈极显著正相关关系。由此可知,

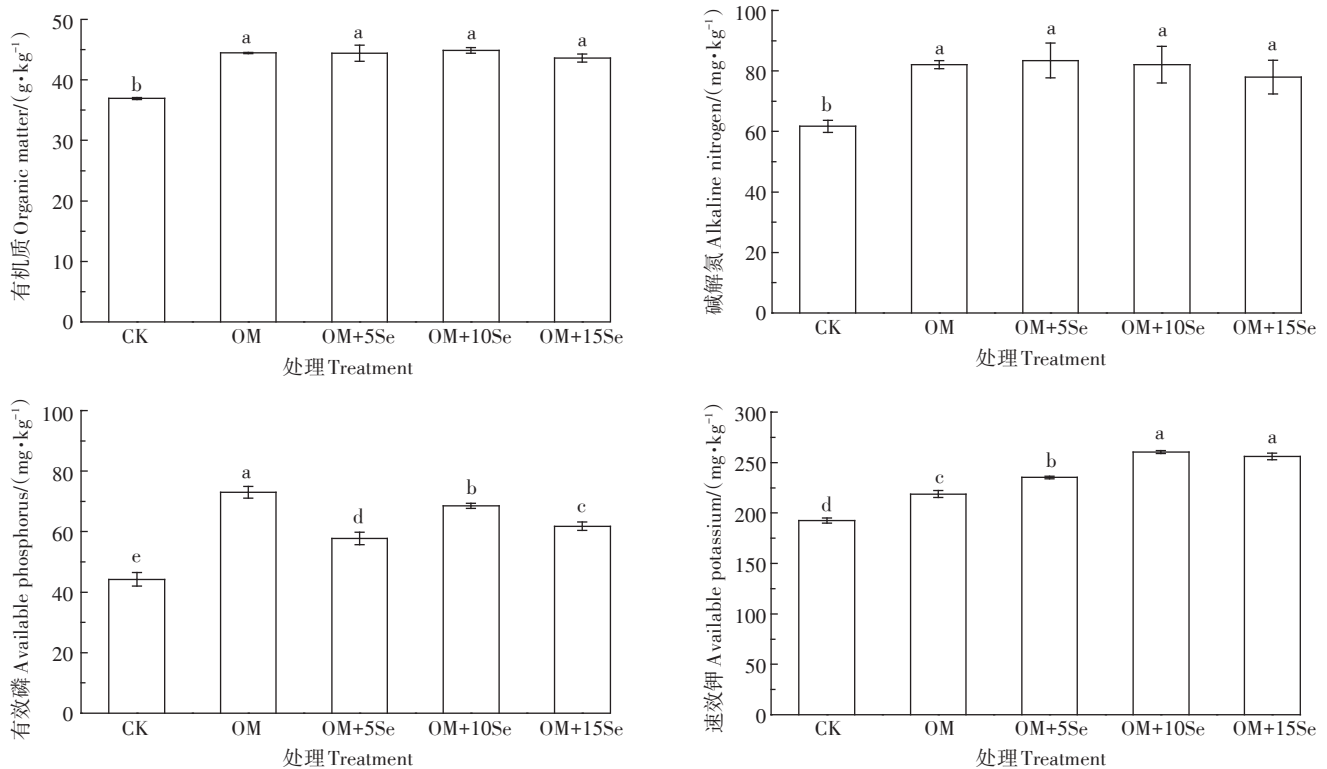


图3 不同处理对白术根际土壤养分含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on rhizospheric soil nutrients content of *A. macrocephala*

表2 不同处理对白术生理生长的综合效应

Table 2 The comprehensive effects of different treatments on the growth of *A. macrocephala*

处理 Treatment	生理生长响应指数 Physiology and growth response index (PGRI)							综合效应 Comprehensive effect (CE)
	叶面积 Leaf area	叶干质量 Leaf dry weight	比叶面积 Specific leaf area	叶绿素 SPAD	株高 Plant height	产量 Yield		
OM	0.110	0.044	0.069	0.048	0.020	0.272		0.094
OM+5Se	0.202	0.098	0.116	0.046	0.019	0.549		0.171
OM+10Se	0.184	0.115	0.079	0.042	0.018	0.478		0.153
OM+15Se	0.095	0.026	0.071	0.038	0.021	0.395		0.108

表3 白术生理生长性状与根际土壤养分的相关性分析

Table 3 Pearson correlation coefficients between physiological growing traits and rhizospheric soil nutrients of *A. macrocephala*

土壤养分 Soil nutrients	叶面积 LA	叶周长 LP	叶长 LL	叶宽 LW	叶干质量 LDW	叶长宽比 LLWR	比叶面积 SLA	株高 PH	叶绿素 SPAD	产量 Y	总硒 TSe
有机质 OM	0.739**	0.087	-0.031	0.436	0.586*	-0.528*	0.538*	0.167	0.438	0.696**	0.414
碱解氮 AN	0.791**	0.055	-0.033	0.517*	0.534*	-0.642**	0.438	0.139	0.582*	0.738**	0.299
有效磷 AP	0.440	0.013	-0.109	0.226	0.374	-0.329	0.357	0.151	0.400	0.338	0.219
速效钾 AK	0.591*	0.165	-0.107	0.449	0.522*	-0.567*	0.423	0.165	0.311	0.689**	0.852**

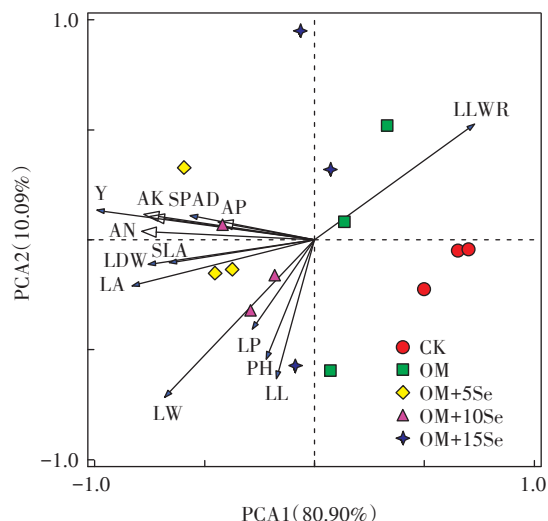
注: *代表在0.05水平差异显著, **代表在0.01水平差异显著。

Note: LA: leaf area; LP: leaf perimeter; LL: leaf length; LW: leaf width; LDW: leaf dry weight; LLWR: leaf length width ratio; SLA: specific leaf area; PH: plant height; SPAD: soil and plant analyzer development; Y: yield; TSe: total selenium; OM: organic matter; AN: alkaline nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium. *represent significant correlation at the level of 0.05 and ** at the level of 0.01, respectively.

白术的生理生长性状与根际土壤养分存在密切联系。

白术的生理生长性状与根际土壤养分的PCA分

析见图4,第1排序轴解释了变量的80.90%,第2排序轴解释了变量的10.09%。白术根际土壤有机质、碱



LA: leaf area; LP: leaf perimeter; LL: leaf length; LW: leaf width; LDW: leaf dry weight; LLWR: leaf length width ratio; SLA: specific leaf area; PH: plant height; SPAD: soil and plant analyzer development; Y: yield; TSe: total selenium; OM: organic matter; AN: alkaline nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium

图4 白术生理生长性状和根际土壤养分的PCA分析

Figure 4 The principal component analysis of physiological growing characteristics and rhizospheric soil nutrients of *A. macrocephala*

解氮、有效磷和速效钾按变量贡献率从大到小排序依次为碱解氮(69.2%, $P=0.002$)>有机质(67.3%, $P=0.002$)>速效钾(62.9%, $P=0.004$)>有效磷(11.3%, $P=0.118$)。这表明,根际土壤碱解氮、有机质和速效钾是影响白术生理生长性状的主要土壤养分因子。PCA分析还显示,CK处理在象限中的位置与其他处理距离较远,说明CK处理与其他处理的主成分得分相差较大,即CK处理白术的生理生长性状和根际土壤养分与其他处理相比差异明显。

3 讨论

研究表明,叶面积、叶干质量、比叶面积和叶长宽比等指标是植物重要的叶功能性状,能反映叶资源获取与叶生产成本的权衡关系^[26],与植物生长和光合代谢密切相关^[27]。叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,对植物光合作用强弱具有直接的指示作用^[25]。本研究中的相关性分析表明,白术根茎生物量与叶面积、叶干质量、比叶面积、叶宽和叶绿素相对含量呈显著正相关关系,与叶长宽比呈显著负相关关系,进一步验证了上述观点,说明测定白术的叶功能性状可对白术的生长状况进行初步的了解。本研究结果显示,有机肥替代部分化肥显著增加了白术叶片叶面积和

白术产量。有机肥替代部分化肥结合喷施适量硒肥($5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)能够显著促进($CE>0$)白术的生长,主要表现为白术叶面积、叶干质量和比叶面积等功能性状提升,产量显著提高。前期研究发现,外源施硒对白术幼苗生理生长的影响呈现低浓度促进、高浓度抑制的现象^[3]。本研究在有机肥替代部分化肥的基础上喷施外源硒肥,发现其作用效果与单施硒肥类似,并且能够强化有机肥对白术的促生效果。喷施 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥时,其对白术的促生效果最强,当喷施硒超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,其对白术生长的促进作用减弱,以喷施 $15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 硒肥的促生效果下降最为明显。说明喷施外源硒肥可以强化有机肥对白术的促生作用,但仍然表现出典型的剂量效应,这和外源硒对小麦^[28]、人参菜^[29]和轮叶党参^[10]等作物生长影响的研究结果类似,可能与喷施过量的硒肥致使白术抗氧化系统遭到破坏进而抑制白术的生长有关^[3]。本研究还发现,所有喷施外源硒肥的处理,白术硒含量均达到富硒农产品标准,说明喷施外源硒肥是生产富硒白术药材的有效途径。

土壤和植物是生态系统中的重要组成部分,两者相辅相成,互相影响。根际土壤是植物根系及其分泌物与土壤直接接触的区域,也是土壤微生物与植物相互作用的重要场所^[30]。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^[31]。相关性分析表明,白术产量与根际土壤有机质、碱解氮和速效钾含量均呈极显著正相关关系,说明白术的生长与土壤养分含量密切相关。本研究结果显示,有机肥替代部分化肥后白术根际土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量显著增加。有机质含量增加可能是由于有机肥中的大量有机质输入到土壤;而碱解氮、速效磷和速效钾含量提升可能是由于有机肥具有较强的离子代换能力,活化了土壤中的氮磷钾。相比于有机肥替代部分化肥处理,有机肥替代部分化肥结合喷施外源硒肥对白术根际土壤中的有机质和碱解氮含量没有显著影响,但显著降低了有效磷含量,其具体原因还有待进一步研究。有机肥替代部分化肥结合喷施外源硒肥显著增加了白术根际土壤的速效钾含量,相关性分析也表明白术硒含量与土壤速效钾含量极显著正相关,说明喷施适量外源硒肥可能诱导白术根际土壤中速效钾的进一步释放。由于土壤养分是影响植物功能性状及其生产力的主要因素之一^[32],因此推测活化土壤养分是有机肥和外源硒肥促进白术生长并

提高其产量的重要因素。主成分分析法是一种高效降维方法,可应用于植物生长性状对环境因子响应等研究^[33]。本研究对影响白术生理生长性状的根际土壤理化性质进行了贡献率排序,发现根际土壤有机质、碱解氮和速效钾是影响白术生长的主要土壤养分因子,而有机肥替代部分化肥或有机肥替代部分化肥结合喷施外源硒肥均能活化土壤养分,促进白术生理生长,且有机肥结合喷施外源硒肥效果更佳,这表明在白术种植过程中,使用有机肥替代部分化肥并结合喷施外源硒肥有利于提高白术产量。

4 结论

(1)有机肥替代部分化肥或有机肥替代部分化肥结合喷施适量外源硒肥均能促进白术生理生长,提高白术产量,并以施用有机肥结合喷施外源硒肥的效果更佳,且喷施的外源硒浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,对白术的促生效果最好。

(2)白术的根茎生物量与叶功能性状存在密切联系,通过测定白术的叶功能性状可初步了解白术的生长情况。

(3)有机肥替代部分化肥或有机肥替代部分化肥结合喷施适量外源硒肥均能显著提高白术根际土壤有机质、碱解氮和速效钾含量,而这三个土壤养分因子与白术产量显著正相关,说明活化土壤养分可能是有机肥和外源硒肥促进白术生长的重要原因。

参考文献:

- [1] Rayman M P. Selenoproteins and human health: Insights from epidemiological data[J]. *Biochimica et Biophysica Acta: General Subjects*, 2009, 1790(11):1533-1540.
- [2] Fairweather-Tait S J, Bao Y, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2011, 14(7):1337-1383.
- [3] 王华, 张雅娟, 周武先, 等. 外源硒对白术种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(22):7551-7558. WANG Hua, ZHANG Ya-juan, ZHOU Wu-xian, et al. The effects of exogenous selenium on seed germination and seedling physiological characteristics of *Atractylodes macrocephala*[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(22):7551-7558.
- [4] 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.
- [5] Yin H, Qi Z, Li M, et al. Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169:911-917.
- [6] 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. CHEN Biao, LI Ji-wei, WANG Xiao-dong, et al. Effects of exogenous selenium on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco under drought stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(1):165-172.
- [7] 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.
- [8] 张美德, 艾伦强, 何银生, 等. 硒对镉胁迫下白术抗氧化能力的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(7):1211-1214. ZHANG Mei-de, AI Lun-qiang, HE Yin-sheng, et al. Effects of selenium on antioxidant ability of *Atractylodes macrocephala* Koidz. under cadmium stress[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(7):1211-1214.
- [9] Hu Y, Norton G J, Duan G, et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. *Plant and Soil*, 2014, 384(1):131-140.
- [10] Zhu L, Wang P, Zhang W, et al. Effects of selenium application on nutrient uptake and nutritional quality of *Codonopsis lanceolata*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225:574-580.
- [11] Mohtashami R, Movahhedi D 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.
- [12] Demoling F, Figueroa D, Bååth E. Comparison of factors limiting bacterial growth in different soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(10):2485-2495.
- [13] Ding J, Jiang X, Ma M, et al. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 105:187-195.
- [14] Zhang M, Sun D, Niu Z, et al. Effects of combined organic/inorganic fertilizer application on growth, photosynthetic characteristics, yield and fruit quality of *Actinidia chinensis* cv 'Hongyang' [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22:e00997.
- [15] Moe K, Moh S M, Htwe A Z, et al. Effects of integrated organic and inorganic fertilizers on yield and growth parameters of rice varieties[J]. *Rice Science*, 2019, 26(5):309-318.
- [16] Manna M C, Swarup A, Wanjar R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2/3):264-280.
- [17] 国家药典委员会. 中国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2020. Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese pharmacopoeia: Part I [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.
- [18] Li X, Jian L, Han W, et al. Antioxidant ability and mechanism of rhizoma *Atractylodes macrocephala*[J]. *Molecules*, 2012, 17(17):13457-13472.
- [19] Li C Q, He L C, Dong H Y, et al. Screening for the anti-inflammatory activity of fractions and compounds from *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2007, 114(2):212-217.

- [20] Huang Q S, Li H Z, Zhang Y L, et al. The research on the effect of abstraction of *Atractylodes* on the ability of resisting mutation of human peripheral blood lymphocytes for Cr⁶⁺[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2006, 6:20021.
- [21] Wen Z, Liu B, Zheng Z, et al. Preparation of liposomes entrapping essential oil from *Atractylodes macrocephala* Koidz by modified RESS technique[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2010, 88(8):1102-1107.
- [22] 张美德, 吴德洲, 艾伦强, 等. 白术氮、磷、钾营养吸收分配规律研究[J]. *中药材*, 2016, 39(3):469-472. ZHANG Mei-de, WU De-zhou, AI Lun-qiang, et al. Absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in *Atractylodes macrocephala*[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2016, 39(3):469-472.
- [23] Deng X, Liu K, Li M, 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.
- [24] 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]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 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.
- [26] Poorter L, McDonald I, Alarcón A, et al. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species[J]. *New Phytologist*, 2010, 185(2):481-492.
- [27] 段媛媛, 宋丽娟, 牛素旗, 等. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1):28-36.
- DUAN Yuan-yuan, SONG Li-juan, NIU Su-qi, et al. Variation in leaf functional traits of different-aged *Robinia pseudoacacia* communities and relationships with soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1):28-36.
- [28] 董石峰, 孙敏, 赵剑敏, 等. 花期喷施亚硒酸钠对小麦生长特性及硒积累的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(6):13-18. DONG Shi-feng, SUN Min, ZHAO Jian-min, et al. Effects of sodium selenite application at anthesis stage on the growth characteristic and Se accumulation in wheat plants[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2019, 39(6):13-18.
- [29] 仰路希, 谢永东, 贺忠群. 施硒对人参菜生长及生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(9):1636-1641. YANG Lu-xi, XIE Yong-dong, HE Zhong-qun. Effect of selenium application on growth and physiological characteristics of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(9):1636-1641.
- [30] Shi S J, Nuccio E, Herman D J, et al. Successional trajectories of rhizosphere bacterial communities over consecutive seasons[J]. *mBio*, 2015, 6(4):500-503.
- [31] Zhang C, Liu G, 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.
- [32] 黄义林, 张中瑞, 丁晓纲, 等. 施肥对红锥幼苗叶功能性状的影响[J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(4):115-118. HUANG Yi-lin, ZHANG Zhong-rui, DING Xiao-gang, et al. Effects of fertilization on leaf functional traits of *Castanopsis hystrix* seedlings[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2018, 34(4):115-118.
- [33] Gong C, Bai J, Wang J, et al. Carbon storage patterns of *Caragana korshinskii* in areas of reduced environmental moisture on the Loess Plateau, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):28883.