



DOI:10.14188/j.ajsh.20250704001

生态因子对三七生长特性和有效成分含量影响的研究进展

陈雨秋¹,徐哲丰²,尚晓玲^{1*}

(1. 长春中医药大学 基础医学院,吉林 长春 130117;

2. 长春中医药大学 吉林省人参科学研究院,吉林 长春 130117)

摘要: 多年生草本植物三七的根是一种著名的中药材,三七的生长环境在其质量形成的过程中起着决定性的作用。以光照、温度、海拔、土壤非生物因子(水分、酸碱度、根系分泌物、养分和重金属元素)和土壤生物因子(微生物群落的结构和多样性)为环境指标,以三七的主要生长特性(生物量、形态特征、抗病能力等)和有效成分含量(三七皂苷和人参皂苷)为质量评价指标,系统阐述了生态因子对药用植物三七质量形成的调控机制,为优化其生态栽培模式提供理论依据。气候因子中,光照、温度和海拔对三七有效成分含量和农艺性状均有显著影响;土壤非生物因子主要影响三七的化学成分含量,而生物因子主要影响三七的产量和抗病能力。通过系统性梳理国内外相关研究结果,基本明确了常见的生态因子在三七质量形成中的作用,但仍存在一些研究空白,后续可以将未明确单因素调控(土壤容重、盐度、质地等)和复合调控(气候因子-气候因子、气候因子-土壤因子、土壤因子-土壤因子)作为研究方向进行深入探究。

关键词: 三七;生态因子;病害;人参皂苷;三七皂苷

中图分类号: Q945

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2025)05-0431-11

Research advances in the influence of ecological factors on the growth characteristics and bioactive constituent content of *Panax notoginseng*

Chen Yuqiu¹, Xu Zhefeng², Shang Xiaoling^{1*}

(1. School of Basic Medical Sciences, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130117, Jilin, China;

2. Jilin Ginseng Academy, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130117, Jilin, China)

Abstract: The root of *Panax notoginseng*, a perennial herb, is a famous traditional Chinese medicine. The growth environment of *Panax notoginseng* plays a decisive role in its quality formation. In this paper, light, temperature, altitude, soil abiotic factors (water, pH, root exudates, nutrients, and heavy metal elements) and soil biological factors (microbial community structure and diversity) are used as environmental indicators, and the main growth characteristics (biomass, morphological characteristics, disease resistance, etc.) and the content of effective components (notoginsenosides and ginsenosides) of *Panax notoginseng* are used as quality evaluation indicators. The regulation mechanism of ecological factors on the quality of *Panax notoginseng* is systematically elaborated, which provides a theoretical basis for optimizing its ecological cultivation mode. Among the climatic factors, light, temperature, and altitude have significant effects on the content of effective components and agronomic traits of *Panax notoginseng*. Soil abiotic factors mainly affect the content of chemical components of *Panax notoginseng*, while biological factors mainly affect its yield and disease resistance. By systematically reviewing the relevant research results at home and abroad, the role of common ecological factors in the

收稿日期: 2025-07-04 修回日期: 2025-09-05 接受日期: 2025-10-03

作者简介: 陈雨秋(1998-),女,博士生,主要从事中医基础理论研究,E-mail:18332786929@163.com

* 通信作者: 尚晓玲(1975-),女,博士,教授,主要从事中医基础理论研究,E-mail:xiaolingshang@sina.com

基金项目: 第五批全国中医临床优秀人才研修项目

引用格式: 陈雨秋,徐哲丰,尚晓玲. 生态因子对三七生长特性和有效成分含量影响的研究进展[J]. 生物资源, 2025, 47(5): 431-441.

Chen Yuqiu, Xu Zhefeng, Shang Xiaoling. Research advances in the influence of ecological factors on the growth characteristics and bioactive constituent content of *Panax notoginseng* [J]. Biotic Resources, 2025, 47(5): 431-441.

formation of quality of *Panax notoginseng* has been basically clarified, but there are still some research gaps. In the future, the unclear single factor regulation (soil bulk density, salinity, texture, etc.) and compound regulation (climate factor-climate factor, climate factor-soil factor, soil factor-soil factor) can be further explored as the research direction.

Key words: *Panax notoginseng*; ecological factors; disease; ginsenoside; notoginsenoside

0 引言

初生代谢和次生代谢是植物维持自身生长和适应环境的两种代谢作用^[1],初生代谢产生生长发育必需的碳水化合物、核苷酸、蛋白质、氨基酸等化合物,次生代谢产生防御性化合物(如酚类、萜类等)以抵御病原微生物、食草动物及环境胁迫^[2-4]。近年来,药用植物次生代谢研究备受关注,其核心价值在于次生代谢产物的双重生物活性:一方面,这些化合物(如生物碱、萜类、酚酸)是植物应对环境胁迫的防御物质;另一方面,它们作为人类疾病治疗药物的主要来源之一,具有抗炎、抗肿瘤、神经保护等广泛药理活性。次生代谢产物的种类由遗传因素决定,而其累积量的高低则受环境因素调控^[5]。由于药用植物次生代谢产物积累的最适条件与其生长的最适环境存在差异^[6],通过明确代谢规律并优化栽培手段(如提升光能、水分、养分的利用效率),可促进药用植物中有效成分的积累,从而实现中药材的优质高产^[7]。

五加科(Araliaceae)人参属(*Panax* L.)植物三七[*Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen]的根是一种著名的中药材,是血塞通、云南白药、化瘀镇痛胶囊等中成药的重要原料^[8]。其主要的活性成分为达玛烷型三萜皂苷(包括三七皂苷R1、人参皂苷Rb1、Rd、Re、Rg1),是三七抗炎、镇痛、降血压、抗血栓等生物活性的物质基础^[9]。云南、广西、四川等地是三七的主要产区,其中云南省文山市是三七的道地产区,其独特的生态因子是保障三七高产优质的必要条件^[10]。

随着三七种植规模的进一步扩大和对高品质栽培三七的深入研究,有关生态因子在三七质量形成中的作用已经取得了阶段性的研究成果。生态因子主要分为气候因子和土壤因子两类,气候因子主要影响植物的地上部分,包括光照、海拔、温度、空气湿度和二氧化碳浓度等;土壤因子主要影响植物的地下部分,包括土壤的生物和非生物因素。本文拟从气候因子和土壤因子两个方向作为切入点,回顾近年来有关生态因子与栽培三七的产量和质量相关的研究工作,系统总结了不同的生态因子对三七不同品质指标的影响作用,对目前三七栽培相关领域的研究现状和空白进行了深入的分析 and 总结,对未来

的高品质栽培三七的研究提出了新方向,并为验证三七的“道地性”提供理论依据。

1 气候因子对三七生长和有效成分的影响

1.1 光照

1.1.1 光强

光照是植物光合作用和生产干物质的基础,三七属阴生植物,栽培三七时需要进行遮阴,避免强光直射。不同生长时期的三七对光照强度的需求存在显著差异,通常要求透光率不高于30%。在最大透光率的范围内,更高的光照强度有助于三七有效成分的积累。林下栽培的三七中,生长于阳坡的三七较阴坡的具有更高的生物量和总皂苷含量。与透光率>25%相比,在透光率为10%~25%的条件下生长的三七的生物量和总皂苷含量也显著增加^[11]。在高(30%)、中(15%)和低(5%)的透光率条件下,高和低透光率处理的三七须根具有更高的次生代谢特征,类黄酮类、萜类化合物、脂质和酚酸是最高比例的差异表达代谢物^[12]。适宜光照强度对三七农艺性状也有显著促进作用,在为期8个月的5组不同的透光率(1%、3%、8%、12%、22%)的实验中,随着透光率增大,须根长度、须根数量、块根直径、不同部位(根、须根、块根、茎和叶)的生物量逐渐增大,而叶面积逐渐降低;三七在较低透光率(1%、3%)的条件下叶面积、冠幅、叶质比和茎质比高于其他处理条件^[13]。

1.1.2 光质

植物的光合作用、形态建成、物质代谢和基因表达对不同颜色光照的响应不同。例如,在高等植物和藻类中,蛋白质类成分的同化主要响应蓝光,碳水化合物的同化主要响应红光^[14]。三七的生长特性和有效成分积累也受光质的影响,在相同的光强(50 μmol/m²/s)条件下,使用不同光质(红、橙、绿、蓝、白光)处理三七种苗,在60 d 试验期后,三七的根、茎、叶和全株鲜重在红光处理下最大;株高与株幅在白光处理下最大,其次是红光;根冠比在橙光处理下最大,其次是红光和蓝光;根据研究结果,在低光密度时,红光对三七生长的综合促进作用最大^[15]。另外,使用3种透光率(5.5%、10.0%、21.0%)用于蓝色和白色两种农膜中,栽培一年后,在白膜条件

下,10%透光率的三七具有更好的农艺性状(株高、茎粗、根粗、根数、生物量、根冠比和根重比),而在蓝膜条件下,21%透光率的三七具有更好的农艺性状,表明白膜适合搭配低透光率,蓝膜适合搭配高透光率^[16]。

1.2 温度

温度对药用植物的影响不仅在于其本身,温度还会引起环境因子的改变。例如,土壤水分、空气湿度、土壤温度等^[17]。不同温度对植物代谢产物的影响也有选择性。例如,高温有利于含氮物质(蛋白质、氨基酸、生物碱等)的合成,适中的温度通常有利于糖、淀粉等不含氮元素的物质的合成,低温则可以使高温条件下欧乌头(*Aconitum napellus*)含有的乌头碱转变为无毒物质^[17-18]。高温胁迫对三七的生长存在显著影响,研究表明,当温度高于24℃时不利于三七的生长,在24℃~34℃的温度下,随着温度升高,三七植株的死亡率、叶片相对电导率和枯黄率都显著提高,且对黑斑病病原菌细极链格孢菌(*Alternaria tenuis*)的抵抗能力显著降低^[19]。反之,适当的低温胁迫有助于三七有效成分的积累,在一项低温(10℃、15℃、20℃)处理二年和三年生三七的为期一个月的试验中,与常温处理的对照相比,低温处理提高了根、茎和叶的皂苷含量,以20℃处理的综合效果最佳^[20-21]。

1.3 海拔

高海拔的环境较低海拔有更低的空气温度、土壤温度和更高的土壤湿度^[11]。因此,海拔的差异通常作为复合的环境变量存在。不同海拔思茅松林下栽培的三七有不同的生长特性,与海拔1890m相比,栽培于1510m的三七具有更高的出苗率和总皂苷含量($P<0.01$)。对道地产区云南省6个地区(昆明、文山、红河、保山、曲靖和楚雄)的三七环境因子进行分析,相关性回归方程的结果表明,纬度和海拔是两年生和三年生三七总皂苷的积累负预测因子^[22]。

2 土壤因子对三七生长和有效成分的影响

土壤是药用植物的固着基质和生活的物质源泉,与药用植物的生长发育关系密切,土壤的质量决定了药用植物的质量^[23]。在田间和森林栽培的两年生三七的形态特征有明显差异:栽培于森林的三七形态特征(颜色、形状)更加美观,且根重大于栽培于田间的三七($P<0.05$)^[8]。土壤因子分为生物因子和非生物因子,大量学者对这两类土壤因子在三七生长的影响中开展了一系列研究,并取得了一些

进展。

2.1 土壤非生物因子

2.1.1 水分

三七对水分的要求十分严格,虽然它们喜欢生活在潮湿的环境中,但是湿度不能太大。道地产区云南文山雨季降雨频繁,导致根腐病频发,对三七的产量和质量造成了极大的负面影响^[24]。因此,对土壤水分的控制是非常有必要的。

适当的高水分胁迫有利于三七生物量积累,在70%的田间持水量配合施肥的条件下,三七具有最高的地上部分和地下部分的生物量、株高和茎粗,对光能的利用率也高于50%和90%田间持水量的处理组^[25]。而较低的水分处理有利于降低黑斑病、根腐病的发生率,配合高肥处理可以有效促进叶片生长和有效成分(三七皂苷R1和人参皂苷Rg1)的积累^[26]。与裸露相比,避雨处理使三七根层土壤温度、养分含量和酶活性显著提高,使土壤湿度和根腐病的发生率显著降低,此外还降低了土壤中酚酸(丁香酸、羟基苯甲酸、阿魏酸等)的含量^[24]。

2.1.2 酸碱度

土壤酸碱度(pH值)对直播三七的产量、存苗率和根腐病发生率均有显著影响^[27]。在不同比例的无机肥、有机肥和生物菌肥配施下,土壤pH值显著升高,进而提高了三七的株高和叶面积指数并降低了根腐病的发生率($P<0.05$)^[28]。使用生物炭处理栽培三七的土壤,土壤的酸性显著降低,同时三七的存活率有所提高,相关性分析表明,pH值的升高与三七存活率的提高显著正相关^[29]。

2.1.3 根系分泌物

三七在生长过程中会向土壤中分泌一些由无机离子(H^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等)和有机化合物(氨基酸、皂苷、有机酸、酚酸等)组成的化感物质,无机离子通常改变土壤pH值、电导率和氧化还原电位,而有机化合物通常影响微生物群落并导致连作障碍^[23,30]。与健康三七的根际土壤相比,患病三七的根际土壤具有更高含量的化感物质(环十五烷、十八烷酸甲酯、二十二烷酸乙酯等),这些化合物可能由三七感染后的病原微生物产生,也可能来自三七根系自身的分泌^[23]。根系分泌物的大量积累会导致叶片过氧化物酶和过氧化氢酶活性下降,使得三七光合能力降低,碳水化合物的合成减弱,整个植株的长势变弱,抗逆性降低^[31]。也有研究报道了连作三七的土壤提取物对三七的苗高、根长和鲜重表现出不同程度的抑制作用^[23]。

(1)皂苷类。皂苷类是导致三七患病的主要有

机化感物质,人参皂苷 Rh1、Rg1、Rb1 和三七皂苷 R1 是三七根腐病的致病因子,这些化学成分降低了三七根系的细胞活力,显著抑制了三七幼苗生长^[32-33]。有研究报道了与添加人参皂苷 Rb1 和三七皂苷 R1 相比,外源添加 5 mg/kg 和 30 mg/kg 的人参皂苷 Rg1 显著降低了三七幼苗的发芽率、发芽指数、苗高、茎粗、根长、地上部分和地下部分生物量,其中以 5 mg/kg 的影响更大;外源添加人参皂苷 Rb1 仅对茎粗有显著影响,外源添加三七皂苷 R1 仅显著降低了三七幼苗的发芽指数,表明了 Rg1 具有更强的化感自毒作用^[32]。

(2) 酚酸类。三七根系向土壤中分泌的酚酸类物质(香豆酸、香草酸、阿魏酸等)会影响其根长、苗高和发芽率^[34]。对羟基苯甲酸和邻苯二甲酸二异丁酯具有促进三七病原菌的生长从而导致三七染病的负面作用^[23]。此外,研究报道了三七根系分泌的酚酸类成分中,丁香酸、阿魏酸和对羟基苯甲酸是导致三七根腐病的主要成分^[24]。更重要的是,在盆栽三七的土壤中添加香草酸和对羟基苯甲酸,土壤的细菌多样性显著改变,病原真菌镰刀菌属(*Fusarium*)的丰度显著升高,增加了三七的患病率^[35]。

(3) 有机酸类。三七根系向土壤中分泌的长链有机酸会产生自毒作用并促进病原菌生长^[36]。有学者对其进行了验证,在施用三种外源有机酸(邻苯二甲酸、棕榈酸、邻苯二甲酸+棕榈酸混合)后显著影响了三七的生长,主要表现为鲜重显著降低;更严重的是,三七向土壤中分泌皂苷类物质(人参皂苷 Rh6、Rg5、Rf 等)的含量随着有机酸的添加而显著增加,加重了连作障碍^[37]。外源水杨酸的添加(1.0 mmol/L)显著提高了三七保护酶的活性和防御基因的表达,进而提高了三七的抗病能力^[38]。此外,苹果酸可以引起三七青枯病阻碍根系的正常生长^[39]。

2.1.4 土壤养分

土壤养分直接影响三七的产量和质量,氮、磷和钾是土壤养分的核心,其含量和有效性是土壤肥力的表征。此外,镁、钙、锌、硫等营养元素也是三七健康生长必不可少的因素^[40-41]。

(1) 氮。氮(N)是三七生长发育必需的元素,与叶绿素、核酸、蛋白质等物质的合成密切相关。氮缺乏导致三七植株矮小、叶片失绿变黄、根生物量减少、须根稀少、主根几乎不膨大^[42]。研究报道了三七通过根际土壤氮含量的高低来调整根系形态,使得根系形态更适应其对氮素的吸收进而提高生物量和促进皂苷积累,其中每公顷土壤施加 225 kg 尿素综

合效果最佳^[43],或是每公顷土壤施加 165~270 kg 氮肥^[44]。不同配比的氮磷钾肥耦合施用前期显著促进三七对硝态氮的吸收利用,进而提高了其人参皂苷 Re 的含量^[45]。氮素与人参皂苷 Rb1、Rd、Rg1、三七皂苷 R1 的合成显著相关^[42],氮素形态的不同配比也能改变三七的生长特性,在 5 组不同硝态氮与铵态氮的配比处理栽培三七土壤的试验中,不同的配比对三七的生长影响各有特点:混合施用效果高于单一施用,硝态氮:铵态氮为 3:1 时三七有着最高的皂苷含量、根生物量和产量^[46]。另外,在外源有机酸胁迫下,根际土壤的铵态氮、硝态氮、总氮与三七的鲜重显著相关^[37]。

(2) 磷。磷(P)是生物体内磷脂、核糖核蛋白、高能磷酸化合物、酶等物质的组成成分,磷有助于根系形态的形成和干物质的积累^[40-41]。磷素有助于三七形成密而多的须根,缺乏磷的三七在 6 月不良症状明显:叶色暗绿、出现白色斑点、叶片狭小、茎秆细;磷还与人参皂苷 Rb1、Rd 的积累有关^[42]。对一、二、三年生的三七施用不同浓度磷肥,在进行为期半年的试验后发现施加磷肥后三七的根、叶和全株的生物量显著升高,且与磷肥施加量正相关;但茎和叶的产量与磷肥施加量呈负相关($P < 0.05$)^[47]。此外,磷还能降低三七对重金属元素的吸收。在一项模拟砷污染(砷浓度 50 mg/L)的水培实验中,添加 100 mg/L 的外源磷显著降低了三七根、茎和叶中砷的含量(分别降低了 47%、80% 和 33%)^[48]。

(3) 钾。钾肥的施用显著提高了三七的叶长、叶宽、株高、茎粗和各部位的生物量^[49],Person 相关性分析表明土壤中的速效钾含量与三七的存苗率正相关^[27]。三七缺钾不仅导致其有效成分含量(人参皂苷 Rg1、Re、Rb1、Rd 和三七皂苷 R1)积累的降低($P < 0.01$),还导致了叶缘黄化焦枯、叶面积降低和生物量下降^[42]。

(4) 硫。硫元素在植物生长发育中的需要量仅次于氮磷钾,是第四大营养元素^[50]。硫与植物的抗逆性(耐旱、耐寒和倒伏等)有关,可提高植物对不良环境的抵抗力^[51]。缺硫对三七的前期症状影响不显著,但 7 月时叶片、叶脉和叶肉逐渐失绿变黄,开花量变少,抽蔓能力减弱,株高降低;须根减少且主根无明显膨大;人参皂苷 Re 和 Rb1 的积累减少^[42]。在砷污染土壤中施用不同浓度的硫酸盐(Na_2SO_4 , 浓度为 0、25、50 和 75 mg/kg),结果显示硫酸盐的施加导致三七根、茎和叶的生物量显著降低,降低的趋势与施加硫酸盐的浓度正相关;分析了三七皂苷 R1、人参皂苷 Rg1、Rb1 和总皂苷的含量后发现,施用

50 mg/kg 硫酸钠显著增加了总皂苷的含量,其他浓度对皂苷类成分的增加未能达到显著水平^[52]。

(5)钙。钙是植物细胞壁胞间层中果胶钙的组成成分,与植株的机械强度相关;Ca²⁺可以与植物体内过量的有机酸结合形成不溶性的钙盐,减少有机酸对植物的损害;Ca²⁺还是一些酶的活化剂^[53-54]。缺钙的三七叶片窄小皱缩,叶尖弯钩缘枯焦;根生物量降低且根部存在大面积腐烂;人参皂苷 Rb1、Rg1 和 Rd 的积累受钙缺乏影响显著^[42]。在镉污染土壤中,施加氯化钙(CaCl₂)和生石灰(CaO)显著降低了三七对镉的吸收,同时降低了三七根腐病的发生率^[55]。在土壤中使用不同浓度的生石灰(500、1 000、1 500、2 000 kg/hm²)后,与对照相比,施用 500~1 000 kg/hm² 的生石灰通过增加细菌群落的多样性和提高有益微生物的相对丰度,进而减少了三七根腐病发病率,提高了存苗率^[56]。

2.1.5 重金属元素

云南文山附近存在许多矿藏,由于 20 世纪 90 年代频繁的采矿活动,该产区土壤中普遍存在重金属污染^[57],而三七具有惊人的重金属元素耐受性^[58]。研究发现三七可以承受高达 500 mg/kg 浓度的砷,当土壤砷浓度达到 217 mg/kg 时,三七的根、茎和叶的生物量较对照有极大降低,分别降低了 51%、41% 和 40%,但仍然可以正常生长^[59]。三七也具有一定的镉耐受性,在土壤中施加浓度为 2 mg/kg 和 5 mg/kg 的 Cd(NO₃)₂·4H₂O 模拟镉胁迫,与对照相比,不同镉处理显著降低了三七的叶长、叶宽、叶绿素含量和地上部分鲜重;但是 2 mg/kg 处理下的三七株高、地下部分鲜重和根长显著升高^[60]。

2.2 土壤生物因子

微生物是影响三七质量的主要土壤生物因子,对三七幼苗栽培前的盆栽土壤进行高压灭菌处理(压力 0.12~0.13 MPa,温度设置 120 °C),栽培三七后连续观察 30 d,结果显示与未灭菌相比,灭菌处理后三七幼苗的苗高和茎粗明显降低^[32]。将栽培三七后的连作土壤在 70 °C 下蒸煮 15 min 后,土壤中的细菌只有一部分保留,而真菌完全被消灭,使用该蒸煮后的土壤栽培三七虽然可以使其出苗率和生物量有所提升($P < 0.05$),但是仍然不及未栽培三七的新林土^[61]。使用氯化苦熏蒸土壤,熏蒸后的土壤细菌、真菌和放线菌数量显著降低(分别降低了 50%、19%、38%),同时三七的根系形态得到了优化,二年生三七的株高、叶长、须根长、剪口长和宽、主根长和宽显著增加,主根的生物量极显著增加($P < 0.01$),这表明微生物的存在是三七品质形成必不可少的

因子^[62]。

2.2.1 微生物的多样性

微生物的多样性和丰富度与三七的健康程度显著相关,细菌多样性减少和真菌多样性增加导致三七根腐病发生率增加^[63]。在使用生物炭处理土壤后,根际土壤真菌的 α 多样性显著升高,并与三七的存活率显著正相关^[29]。细菌的多样性与根腐病的发生率显著负相关,在避雨处理的条件下,三七根际土壤有更高的细菌 α 多样性,冗余分析结果显示变形菌门、硝化螺旋菌门、芽单胞菌门等细菌门的成员具有防治根腐病的潜力^[24]。

2.2.2 微生物的结构

微生物的结构即微生物群落的组成,细菌、真菌、古菌、线虫、藻类是主要的土壤微生物,其组成和数量的变化往往可以反映土壤物质循环和能量代谢的旺盛水平^[10]。由于细菌和真菌在微生物群落结构中突出的生态位功能,因此大部分学者将研究重点放在对细菌和真菌的研究中。

(1)细菌群落。土壤中细菌群落数量巨大,种类繁多,占土壤微生物总量的 70%~90%,在保护植物抵御病原微生物的过程中起着不可忽视的作用^[64]。健康和患病的植物根际土壤细菌存在明显差异,前者以变形菌门为主,而后者以拟杆菌门和疣微菌门为主^[65]。此外,厚壁菌门(Firmicutes)和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)较高的相对丰度可降低三七根腐病的发生率^[66]。高产量的三年生三七中亚硝化单胞菌科(Nitrosomonadaceae)、分枝杆菌科(Mycobacterium)、黄单胞菌科(Xanthomonadaceae)和节杆菌科(Arthrobacter)是相对丰度较高的细菌科,相关性分析显示,它们与三七产量显著正相关^[64]。使用黑绿木霉菌(*Trichoderma atroviride*) 1126,哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*)和康氏木霉菌(*Trichoderma koningiopsis*) T5-1 作为益生菌处理一年生和两年生的三七,3 种木霉菌显著促进了三七地下部分的鲜重、干重和幼苗的成活率^[67]。此外,慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)和鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)的相对丰度与三七根腐病的发生率具有显著的相关性^[27]。

尽管细菌在三七质量的形成中起积极的作用,但也存在一些潜在的致病细菌。例如,较高丰度的黄色杆菌科(Xanthobacteraceae)、柄杆菌科(Caulobacteraceae)、草酸杆菌科(Oxalobacteraceae)和噬几丁质菌科(Chitinophagaceae)与三年生三七的产量显著负相关^[64]。据报道,假单胞菌属(*Pseudomonas*)的某些菌株是三七根腐病的病原菌之一^[68],芽胞杆

菌属(*Bacillus*)中的炭疽芽胞杆菌(*B. anthracis*)也是引起炭疽病的病原体^[69]。

(2)真菌群落。土壤微生物中真菌所占的比例很小(约占0.4%~3.61%),但真菌和类真菌是真核生物中多样化程度最高的群体之一,其组成、多样性和生态位功能会极大影响土壤生态系统的健康、稳定和可持续性^[70]。被孢霉属(*Mortierella*)的成员是潜在的生防菌,其相对丰度与三七的存苗率显著正相关^[29]。球毛壳菌(*Chaetomium globosum*)菌株YIM PH30719的施用显著降低了根腐病发生率,促进了三七的健康生长^[71]。特定的真菌还具有转化不同构型皂苷类成分的作用,烟曲霉菌(*Aspergillus fumigatus*)具有将三七总皂苷转化为稀有皂苷[20(R)-Rg3、20(S)-Rg3、Rk3、Rh4、20(R)-Rh1、20(S)-原人参三醇等]的能力^[10]。子囊菌门的成员黄篮状菌(*Talaromyces flavus*)具有转化三七中极性皂苷(R1、Rg1、Rb1、Re、Rd)为小极性皂苷(Rg2、Rg3、Rg5、Rh1、Rh2、Rk1)的作用,虽然这些小极性皂苷在三七中极少存在,但它们具有更强的生物活性^[72]。

与细菌相比,许多真菌都有潜在的致病菌,它们通过导致三七患病,进而降低其产量和质量。灰霉病、圆斑病、黑斑病、枯萎病和根腐病是三七常见的病害,镰刀菌属的成员如,尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)、腐皮镰刀菌(*F. solani*)、锐顶镰刀菌(*F. acuminatum*)等是三七根腐病的主要致病菌^[61];且镰刀菌属具有极强的环境适应性,其更高的丰度会抑制有益微生物,如芽胞杆菌属、芽单胞菌属(*Gemmatimonas*)、根微菌属(*Rhizomicrobium*)、罗丹杆菌属(*Rhodanobacter*)和青霉属(*Penicillium*)的生长^[73]。尽管土赤壳属(*Ilynoceptria*)的成员,如粗壮土赤壳(*I. robusta*)、杀参土赤壳(*I. mors-panacis*)、白籽土赤壳(*I. leucospermi*)主要引起人参属其他两种植物人参和西洋参锈腐病,但对三七根部也存在潜在的致病能力,目前研究证实了其主要原因是这3种人参属植物的根系产生的皂苷类分泌物是土赤壳属的营养来源^[74]。人参链格孢(*Alternaria panax*)、灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)和嗜果枝孢(*Mycocentrospora acerina*)分别是三七黑斑病、灰霉病、圆斑病的致病因子^[38]。这些致病菌不仅使三七外观形态发生了明显的变化,更重要的是导致其产量和质量严重下降。

3 讨论与展望

综上所述,生态因子(尤其是气候因子和土壤因子)的差异是三七生长和有效成分累积显著差异的主要原因,进而影响三七的药用价值。随着三七产

业的扩大和市场需求逐渐增加,三七的种植面积不断扩大,严重的连作障碍(导致根腐病、黑斑病、锈腐病等病害高发)正逐渐降低着三七的产量与质量^[24,63]。因此,深入研究药用植物次生代谢特性与生态因子的相关性,揭示生态因子在中药材质量形成中的作用,是中药材道地性形成研究、生态适应性研究、合理种植与综合开发利用研究的关键环节。区别于粮食作物,药用植物的种植研究必须在保障产量的同时,将有效成分的积累确立为核心目标^[43]。因此,需要从更多的方向去探究提高三七产量和质量的方法。

3.1 农业方法

由于三七具有人参属植物的共同特点,即存在严重的连作障碍,同一块土地上无法连续栽培三七。因此,在农业工作中可以进行轮作和间作的方式来缓解,选择合理的植物来和三七轮作/间作是未来的研究方向。目前,学者已经研究三七与药用植物(黄精、白及、天麻、重楼、百合、玉竹)、粮食作物(玉米、小麦)、经济作物(茴香、葱)的轮作,并取得许多积极的研究进展。在与人参轮作的研究中,紫穗槐、苜蓿、细辛、水稻和豆科植物都被报道具有积极的缓解连作障碍的作用^[75],作为同属植物,三七与人参存在许多相似性,与不同植物的轮作/间作可以作为未来的研究方向。

病原微生物在土壤微生态中的主导作用是三七连作障碍的原因之一,因此除去病原微生物是从生物层面上缓解连作障碍的直接方法。土壤日晒是一种简单低成本的灭菌方式,根据报道^[76],土壤日晒尽管不能完全消除致病微生物,但可以很大程度上降低由镰刀菌属、轮枝菌(*Verticillium*)、柱孢菌(*Cylindrocarpon*)和卵菌(*Oomycetes*)引起的疾病。目前尚未有连作土壤日晒对三七质量影响的报道,因此也可以作为未来的研究方向。

3.2 化学方法

目前已经确定了外源养分的添加可以促进三七生长,并增加活性成分的积累,但是对单一因素的研究尚存在不足。目前的研究主要着眼于大量元素(碳、氮、磷、钾)和中量元素(钙、镁、硫),微量元素和稀土元素对三七的生长的影响机制。叶面喷施肥料具有吸收快、减少与土壤中的离子拮抗和减少淋溶风险等诸多作用,目前叶面施肥的研究较少,有必要去加强此方面的研究。微量元素与大中量元素的结合施用可能具有全面的养分补充效果,三七一般种植三年后采收,在不同的生长阶段可能对养分的需求不完全相同,掌握三七生长的养分动态需求规律,

有助于满足各个生长阶段三七的养分需求,从而起到更好地促进生长的作用。

3.3 生物方法

连作障碍是人参属植物种植出现的普遍问题,其中病原微生物占据土壤生态主导位是连作障碍发生在生物层面上的主要原因。尽管化学农药和杀菌剂可以除去绝大部分的病原微生物,但是这给土壤带来了许多残留物,不利于可持续发展。目前研究已经确定了芽胞杆菌属、假单胞菌属、鞘氨醇单胞菌、肠杆菌属(*Enterobacter*)、伯克霍尔德菌(*Burkholderia*)等有益细菌属不仅具有拮抗病原微生物的作用,而且其在土壤中大量存在很少导致植物患病,且具有显著推动养分循环的作用。青霉菌属、木霉菌属、炭角菌属(*Xylaria*)等有益真菌属作为生物杀菌剂也已经在其他植物中被广泛报道。因此,有必要研究这些益生菌在三七连作障碍和可持续栽培中的具体作用,进而达到全方位掌握三七生物防治技术的目的。

非生物因素与生物因素的联合调控具有高于单一调控的显著作用,球毛壳菌菌株 YIM PH30719 和哈茨木霉菌具有潜在的生物防治潜力,生物炭具有保留土壤养分、增加微生物多样性和降低土传病原微生物丰度的作用,将生物炭分别和球毛壳菌菌株 YIM PH30719^[71]、哈茨木霉菌^[77]联合使用,效果显著高于单一施加,后续研究可以考虑将两种或多种具有改善土壤质量的外源添加剂结合使用。这些方向对实现三七高产优质栽培和产业可持续发展具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Walck J L, Cofer M S, Hidayati S N. Understanding the germination of bulbils from an ecological perspective: a case study on Chinese yam (*Dioscorea polystachya*) [J]. *Annals of Botany*, 2010, 106 (6) : 945-955.
- [2] Tomasi N, Weisskopf L, Renella G, et al. Flavonoids of white lupin roots participate in phosphorus mobilization from soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1971-1974.
- [3] Szakiel A, Pączkowski C, Henry M. Influence of environmental abiotic factors on the content of saponins in plants [J]. *Phytochemistry Reviews*, 2011, 10 (4) : 471-491.
- [4] Weston L A, Ryan P R, Watt M. Mechanisms for cellular transport and release of allelochemicals from plant roots into the rhizosphere [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(9): 3445-3454.
- [5] 王鑫,郭平毅,原向阳,等. 2,4-D 丁酯对罂粟(*Papaver somniferum* L.)保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1098-1103.
- Wang X, Guo P Y, Yuan X Y, et al. Effect of 2,4-D on the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in Opium Poppy (*Papaver somniferum* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1098-1103.
- [6] 郭兰萍,黄璐琦,阎洪,等. 基于地理信息系统的苍术道地药材气候生态特征研究[J]. *中国中药杂志*, 2005, 30(8): 565-569.
- Guo L P, Huang L Q, Yan H, et al. Habitat characteristics for the growth of *Atractylodes lancea* based on GIS [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2005, 30(8): 565-569.
- [7] 王升,蒋待泉,康传志,等. 药用植物次生代谢在中药材生态种植中的作用及利用[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(9): 2002-2008.
- Wang S, Jiang D Q, Kang C Z, et al. Core position of secondary metabolism of medicinal plants in ecological planting of Chinese materia medica and its utilization [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(9): 2002-2008.
- [8] Shi R, Gu H Y, He S, et al. Comparative metagenomic and metabolomic profiling of rhizospheres of *Panax notoginseng* grown under forest and field conditions [J]. *Agronomy*, 2021, 11(12): 2488.
- [9] Shang J H, Li Y X, Zhu H T, et al. Notoginsenosides, a new class of hexa-nortriterpenoids from biotransformation of *Panax notoginseng* saponins [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1252: 132096.
- [10] Yang L, Lin D M, Li F X, et al. Production of rare ginsenosides by biotransformation of *Panax notoginseng* saponins using *Aspergillus fumigatus* [J]. *Bioresources and Bioprocessing*, 2024, 11(1): 81.
- [11] 吴灿,叶辰,张俊星,等. 思茅松林下生境差异对三七生长和品质的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(4): 691-699.
- Wu C, Ye C, Zhang J X, et al. Effect of habitat differences under the forest of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* on the growth and quality of *Panax notoginseng* [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2021, 36(4): 691-699.
- [12] Fang H Y, Guo C W, Mei X Y, et al. Light stress elicits soilborne disease suppression mediated by root-secreted flavonoids in *Panax notoginseng* [J]. *Horticulture Research*, 2024, 11(10): e213.
- [13] 匡双便,徐祥增,杨生超,等. 不同光质和透光率对三七种苗生长的影响[J]. *南方农业学报*, 2014, 45 (11): 1935-1942.

- Kuang S B, Xu X Z, Yang S C, et al. Effects of different light qualities and transmittances on growth of *Panax notoginseng* seedlings [J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(11): 1935-1942.
- [14] 刘立侠,马英忠,唐树延. 光质与人参淀粉酶活性、总糖和淀粉含量的关系[J]. 生物物理学报, 1992, 8(4): 653-658.
- Liu L X, Ma Y Z, Tang S Y. Relations of light qualities with amylase activity, contents of carbohydrate and starch in *Panax ginseng* [J]. Acta Biophysica Sinica, 1992, 8(4): 653-658.
- [15] 殷小智,肖红,李冬雪,等. 不同LED光强、光质对三七种苗生长及光合特性的影响[J]. 照明工程学报, 2020, 31(4): 152-158.
- Yin X Z, Xiao H, Li D X, et al. Effects of different LED light intensity and light quality on growth and photosynthesis of *Panax notoginseng* [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(4): 152-158.
- [16] 匡双便,张广辉,陈中坚,等. 不同光照条件下三七幼苗形态及生长指标的变化[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(2): 54-59.
- Kuang S B, Zhang G H, Chen Z J, et al. Change in morphological and growth indexes of *Panax notoginseng* seedling under different light conditions [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2014, 23(2): 54-59.
- [17] Fahad S, Bajwa A A, Nazir U, et al. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1147.
- [18] Beheshti Rooy S S, Hosseini Salekdeh G, Ghabooli M, et al. Cold-induced physiological and biochemical responses of three grapevine cultivars differing in cold tolerance [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(12): 264.
- [19] 全怡吉,郭存武,张义杰,等. 不同温度处理对三七生理生化特性的影响及黑斑病敏感性测定[J]. 分子植物育种, 2018, 16(1): 262-267.
- Quan Y J, Guo C W, Zhang Y J, et al. Effects of different temperatures on physiological and biochemical characters of *Panax notoginseng* and sensitivity test to *Alternaria panax* [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(1): 262-267.
- [20] 周润泽,王翊豪,周玉厚,等. 不同温度对三年生三七各部位皂苷含量的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(12): 2802-2806.
- Zhou R Z, Wang Y H, Zhou Y H, et al. Effect of different temperature on saponin content in different parts of three-year-old *Panax notoginseng* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(12): 2802-2806.
- [21] 周润泽,王翊豪,马晓惠,等. 低温对不同年限三七中的皂苷含量及光合生理的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(34): 71-75.
- Zhou R Z, Wang Y H, Ma X H, et al. Effects of low temperature on saponin content and photosynthetic physiology of *Panax notoginseng* in different ages [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(34): 71-75.
- [22] 杨勇,梁文,赵亮庆,等. 不同产地三七总皂苷和土壤矿质元素、水质的相关性分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 1331-1339.
- Yang Y, Liang W, Zhao L Q, et al. The correlations analysis between total saponin and soil mineral elements, water factors of *Panax notoginseng* from different producing areas [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023, 45(6): 1331-1339.
- [23] Qiao Y J, Zhang J J, Shang J H, et al. GC-MS-based identification and statistical analysis of liposoluble components in the rhizosphere soils of *Panax notoginseng* [J]. RSC Advances, 2019, 9(36): 20557-20564.
- [24] Zhang Y, Liang J P, Tang Z Y, et al. Rain shelter cultivation reduces root rot incidence of *Panax notoginseng* by altering root exudates and bacterial communities under micro-irrigation and fertilization [J]. Agronomy, 2023, 13(5): 1257.
- [25] 刘艳伟,周潇,杨启良,等. 不同施肥和灌溉水平对三七生长特性和发病率的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(8): 1426-1435.
- Liu Y W, Zhou X, Yang Q L, et al. Effects of fertilization ratio and irrigation level on growth characteristics and incidence rate of *Panax notoginseng* [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(8): 1426-1435.
- [26] 唐建楷,韩焕豪,刘冰,等. 灌水频率和施肥量对三七有效成分积累与发病率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 55-63.
- Tang J K, Han H H, Liu B, et al. Effects of irrigation frequency and fertilization amount on active ingredient accumulation and morbidity of *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 55-63.
- [27] 吴洪钦,李云峥,杨敏,等. 直播模式下三七根际土壤微生物群落特征及其与病害发生的关系[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1-25. (2023-07-05). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=FZZW20230704005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.

- Wu H Q, Li Y Z, Yang M, et al. Characteristics of rhizosphere soil microbial community and its relationship with disease occurrence under direct-seeding mode of *Panax notoginseng* [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023: 1-25. (2023-07-05). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=FZZW20230704005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [28] 吴凤云,崔秀明,杨野,等. 不同施肥处理调节土壤pH值对三七发病率及其生长的影响[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(5): 908-914.
- Wu F Y, Cui X M, Yang Y, et al. Effects of soil pH values regulated by different fertilization on the disease incidence and growth of *Panax Notoginseng* [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 39(5): 908-914.
- [29] 赵林艳,徐武美,王豪吉,等. 施用生物炭对连作三七根际真菌群落与存活率的影响[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(7): 219-227.
- Zhao L Y, Xu W M, Wang H J, et al. Effects of applying biochar on the rhizosphere fungal community and survival rate of *Panax notoginseng* under continuous cropping [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(7): 219-227.
- [30] Bais H P, Weir T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57: 233-266.
- [31] 李浩成,左应梅,杨绍兵,等. 三七根系分泌物在连作障碍中的生态效应及缓解方法[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(8): 159-167.
- Li H C, Zuo Y M, Yang S B, et al. Ecological effect of root exudates of *Panax notoginseng* on continuous cropping obstacles and its alleviating methods [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(8): 159-167.
- [32] 拱健婷,程新宇,孙萌,等. 3种皂苷单体对三七种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2015, 37(6): 988-993.
- Gong J T, Cheng X Y, Sun M, et al. Effects of three kinds of saponins on seed germination and seedling growth of *Panax notoginseng* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, 37(6): 988-993.
- [33] 游佩进,张媛,王文全,等. 三七连作土壤对几种蔬菜种子及幼苗的化感作用[J]. *中国现代中药*, 2009, 11(5): 12-13, 20.
- You P J, Zhang Y, Wang W Q, et al. Allelopathic effects of continuous cropping soil of *Panax notoginseng* on seed and seedling of some vegetables [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2009, 11(5): 12-13, 20.
- [34] 吴立洁,刘杰,王文祎,等. 三七根际土壤中酚酸类物质的鉴定及含量测定[J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2014, 16(4): 825-829.
- Wu L J, Liu J, Wang W Y, et al. Identification and content determination of phenolic acids of rhizosphere soil of *Panax notoginseng* [J]. *Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology*, 2014, 16(4): 825-829.
- [35] Liu Y Y, Chen J M, Liu Z D, et al. Two phenolic acids altered the rhizosphere microbial community of *Panax notoginseng* and promoted potential pathogen growth [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2024, 129: 102213.
- [36] Yuan J, Zhao J, Wen T, et al. Root exudates drive the soil-borne legacy of aboveground pathogen infection [J]. *Microbiome*, 2018, 6(1): 156.
- [37] Hei J Y, Li Y, Wang Q, et al. Effects of exogenous organic acids on the soil metabolites and microbial communities of *Panax notoginseng* from the forest understory [J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 601.
- [38] Li J B, Bao Y L, Wang Z R, et al. Research progress in diseases of *Panax notoginseng* [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2022, 121: 101878.
- [39] 李振双,王倩,朱媛,等. 外源信号物质对檀香幼苗生长和光合特性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 271-278.
- Li Z S, Wang Q, Zhu Y, et al. Effects of exogenous signal substances on growth and photosynthetic characteristics of *Santalum album* seedlings [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(6): 271-278.
- [40] Pang J Y, Ryan M H, Lambers H, et al. Phosphorus acquisition and utilisation in crop legumes under global change [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2018, 45: 248-254.
- [41] Cong W F, Suriyagoda L D B, Lambers H. Tightening the phosphorus cycle through phosphorus-efficient crop genotypes [J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(10): 967-975.
- [42] 高丽芳,王艳林,龙月娟,等. 大量元素缺乏对三七生长、养分吸收利用及品质的影响[J]. *中药材*, 2024, 47(6): 1369-1376.
- Gao L F, Wang Y L, Long Y J, et al. Effects of macroelement deficiency on growth, nutrient absorption and utilization and quality of *Panax notoginseng* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2024, 47(6): 1369-1376.
- [43] Wei W, Ye C, Huang H C, et al. Appropriate nitrogen application enhances saponin synthesis and growth me-

- diated by optimizing root nutrient uptake ability [J]. Journal of Ginseng Research, 2020, 44(4): 627-636.
- [44] Ou X H, Yang Y, Guo L P, et al. Effect of organic-inorganic N sources on growth, NPK nutrients and secondary metabolites of *Panax notoginseng* (Burk.) f. h. Chen [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2017: 629.
- [45] 王昭仪, 脱云飞, 刘香凝, 等. 土壤养分和酶活性及三七产量、皂苷含量对水肥耦合的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(12): 2332-2344.
- Wang Z Y, Tuo Y F, Liu X N, et al. Response of soil nutrients, enzyme activities, yield and saponin content of *Panax notoginseng* to different water and fertilizer combinations [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(12): 2332-2344.
- [46] 霍跃文, 金航, 王馨, 等. 硝态氮与铵态氮不同比例配施对文山三七生长及药用成分的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2422-2428.
- Huo Y W, Jin H, Wang X, et al. Effects of different application ratios of ammonium and nitrate nitrogen on growth and medicinal components of *Panax notoginseng* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2422-2428.
- [47] 韦美丽, 陈中坚, 魏富刚, 等. 磷肥用量对三七生物量及养分分配影响研究[J]. 特产研究, 2020, 42(4): 28-36.
- Wei M L, Chen Z J, Wei F G, et al. Effects of phosphorus levels on biomass and nutrients distribution of *Panax notoginseng* [J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2020, 42(4): 28-36.
- [48] 陈璐, 米艳华, 万小铭, 等. 砷胁迫下磷对三七砷的微区及亚细胞组织分布特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 654-660.
- Chen L, Mi Y H, Wan X M, et al. Effects of phosphorus additions on micro- and sub-cellular distribution of As in *Panax notoginseng* under As stresses [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(4): 654-660.
- [49] 杜彩艳, 杜建磊, 包立, 等. 不同施钾水平对土壤速效钾含量和三七养分吸收及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 105-112.
- Du C Y, Du J L, Bao L, et al. Effects of potassium application on soil available K, yield and nutrient absorption of *Panax notoginseng* [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(6): 105-112.
- [50] 包荣军, 郑树生. 土壤硫肥力与作物硫营养研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(3): 37-40.
- Bao R J, Zheng S S. Progress on soil sulfur fertility and crop sulfur nutrition [J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2006, 18(3): 37-40.
- [51] 李玉颖. 硫在作物营养平衡中的作用[J]. 黑龙江农业科学, 1992(6): 37-39.
- Li Y Y. The role of sulfur in crop nutrition balance [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 1992(6): 37-39.
- [52] Zeng X C, Jiang Y X, Fan X T, et al. Effects of sulfate application on inhibiting accumulation and alleviating toxicity of arsenic in *Panax notoginseng* grown in arsenic-polluted soil [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2016, 227(5): 148.
- [53] 王银月, 于鸿雪, 李晓娜, 等. 中药材连作障碍研究进展[J]. 新农业, 2023(5): 27-28.
- Wang Y Y, Yu H X, Li X N, et al. Research progress on continuous cropping obstacle of Chinese medicinal materials [J]. Xin NongYe, 2023(5): 27-28.
- [54] You J F, Liu X, Zhang B, et al. Seasonal changes in soil acidity and related properties in ginseng artificial bed soils under a plastic shade [J]. Journal of Ginseng Research, 2015, 39(1): 81-88.
- [55] 李娜, 李涛, 梅馨月, 等. 2种外源钙对镉胁迫三七生理生化特性及其镉积累的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(7): 131-137.
- Li N, Li T, Mei X Y, et al. Effects of two exogenous calcium on physiological and biochemical characteristics and cadmium accumulation of *Panax notoginseng* of cadmium stress [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 131-137.
- [56] 张义杰, 徐杰, 陆仁窗, 等. 生石灰对林下酸化土壤的调控作用及三七生长的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 972-980.
- Zhang Y J, Xu J, Lu R C, et al. Modification of quicklime on acid soil under forest and their effect on the growth of *Panax notoginseng* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 972-980.
- [57] Yan X L, Lin L Y, Liao X Y, et al. Arsenic stabilization by zero-valent iron, bauxite residue, and zeolite at a contaminated site planting *Panax notoginseng* [J]. Chemosphere, 2013, 93(4): 661-667.
- [58] Ma J, Mi Y H, Li Q W, et al. Reduction, methylation, and translocation of arsenic in *Panax notoginseng* grown under field conditions in arsenic-contaminated soils [J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 893-899.
- [59] Yan X L, Lin L Y, Liao X Y, et al. Arsenic accumulation and resistance mechanism in *Panax notoginseng*, a traditional rare medicinal herb [J]. Chemosphere, 2012, 87(1): 31-36.
- [60] 李佳佳, 张乃明, 杨莉, 等. Cd胁迫危害三七生长的生理机制研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 177-182.

- Li J J, Zhang N M, Yang L, et al. Effects of cadmium stress on growth, physiology and biochemistry of *Panax notoginseng* [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 177-182.
- [61] Yang M, Yuan Y, Huang H C, et al. Steaming combined with biochar application eliminates negative plant-soil feedback for Sanqi cultivation [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189: 189-198.
- [62] 欧小宏,刘迪秋,王麟猛,等. 土壤熏蒸处理对连作三七生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国现代中药, 2018, 20(7): 842-849.
- Ou X H, Liu D Q, Wang L M, et al. Effects of soil fumigant chloropicrin on the growth development and soil physico-chemical properties of continuous cropping *Panax notoginseng* [J]. Modern Chinese Medicine, 2018, 20(7): 842-849.
- [63] Zhang Y J, Li T Y, Ye C, et al. Leaching alleviates phenol-mediated root rot in *Panax notoginseng* by modifying the soil microbiota [J]. Plant and Soil, 2021, 468 (1): 491-507.
- [64] Li M Z, Chen Z J, Qian J, et al. Composition and function of rhizosphere microbiome of *Panax notoginseng* with discrepant yields [J]. Chinese Medicine, 2020, 15: 85.
- [65] Gu Y A, Banerjee S, Dini-Andreote F, et al. Small changes in rhizosphere microbiome composition predict disease outcomes earlier than pathogen density variations [J]. The ISME Journal, 2022, 16(10): 2448-2456.
- [66] Han L J, Wang Z Y, Li N, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* B1408 suppresses *Fusarium* wilt in cucumber by regulating the rhizosphere microbial community [J]. Applied Soil Ecology, 2019, 136: 55-66.
- [67] Li Y B, Liu Y X, Zhang Z P, et al. Application of plant survival-promoting and pathogen-suppressing *Trichoderma* species for crop biofertilization and biocontrol of root rot in *Panax notoginseng* [J]. Journal of Plant Pathology, 2022, 104(4): 1361-1369.
- [68] Li J B, Li L L, Liu T T, et al. Profiling lipid changes in *Panax notoginseng* upon *Alternaria panax* infection [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2024, 133: 102351.
- [69] 白茹,袁青青,张晓乐,等. 健康与致病菌感染双峰骆驼肠道细菌和真菌群落的比较分析[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 36-43.
- Bai R, Yuan Q Q, Zhang X L, et al. Diversity analysis of intestinal bacterial and fungal communities between healthy and infected Bactrian camels [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2024, 43(4): 36-43.
- [70] Abu Hanif M, Guo Z M, Moniruzzaman M, et al. Plant taxonomic diversity better explains soil fungal and bacterial diversity than functional diversity in restored forest ecosystems [J]. Plants, 2019, 8(11): 479.
- [71] Zhao L Y, Lu Y L, Miao C P, et al. Mitigating root rot in *Panax notoginseng*: The synergistic effects of biochar and *Chaetomium globosum* YIM PH₃0719 [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119805.
- [72] 梁应忠. 黄篮状菌对三七主根及花中皂苷成分的转化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- Liang Y Z. Studies on transformation of saponins in main roots and flowers of *Panax notoginseng* by *xanthophylls* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [73] Fang W S, Liu X M, Song Z X, et al. Mechanism of the antifungal action of chloropicrin fumigation against *Panax notoginseng* root rot caused by *Fusarium solani* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2022, 121: 101859.
- [74] Bischoff Nunes I, Goodwin P H. Interaction of ginseng with *Ilyonectria* root rot pathogens [J]. Plants, 2022, 11(16): 2152.
- [75] 刘莹,孙文松,李玲,等. 人参连作障碍及防治措施研究进展[J]. 园艺与种苗, 2020, 40(7): 26-29.
- Liu Y, Sun W S, Li L, et al. Research progress on consecutive monoculture problems and control measures of *Panax ginseng* [J]. Horticulture & Seed, 2020, 40 (7): 26-29.
- [76] Westerveld S M, Riddle R N, Shi F. Efficacy of fumigants and biofumigants for the control of replant disease of American ginseng (*Panax quinquefolius*) [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2023, 45 (4): 405-419.
- [77] Ali A, Elrys A S, Liu L L, et al. Deciphering the synergies of reductive soil disinfestation combined with biochar and antagonistic microbial inoculation in cucumber *Fusarium* wilt suppression through rhizosphere microbiota structure [J]. Microbial Ecology, 2023, 85 (3): 980-997.