

五加科药用植物连作土壤障碍成因及修复技术研究进展

朱虹

陕西理工大学

DOI:10.32629/as.v9i6.4073

[摘要] 五加科药用植物(西洋参、人参、三七等)由于连作障碍造成的土壤退化问题,严重地影响了它的可持续生产。本文对连作土壤障碍的成因机制和修复技术进行了系统的综述,主要从化感物质积累、微生物群落失衡、土壤理化性质恶化三个方面来阐述其成因,并归纳出物理化学修复、微生物修复、有机改良剂、轮作制度、综合修复等修复技术的机理及效果,总结出目前存在的技术问题,提出未来的研究方向,为药用植物栽培的绿色转型提供理论支持。

[关键词] 五加科; 连作障碍; 成因机制; 土壤修复; 微生物修复

中图分类号: Q938.1+3 **文献标识码:** A

Research Progress on the Causes and Remediation Techniques of Soil Disorders in Medicinal Plants of the Araliaceae Family Under Continuous Cropping

Hong Zhu

Shaanxi University of Technology

[Abstract] The soil degradation caused by the continuous cropping obstacle in medicinal plants of the Araliaceae family (such as American ginseng, Panax ginseng, and Panax notoginseng) severely impacts their sustainable production. This paper provides a systematic review of the causes and remediation techniques of continuous cropping soil obstacles, primarily explaining the underlying mechanisms from three aspects: allelopathic substance accumulation, microbial community imbalance, and deterioration of soil physicochemical properties. It summarizes the mechanisms and effects of various remediation techniques, including physical-chemical remediation, microbial remediation, organic amendments, crop rotation systems, and integrated remediation. The study identifies current technical challenges, proposes future research directions, and offers theoretical support for the green transformation of medicinal plant cultivation.

[Key words] Araliaceae; Continuous cropping obstacle; Causative mechanism; Soil remediation; Microbial remediation

引言

五加科药用植物,如西洋参(*Panax quinquefolium* Linn.)、人参(*Panax ginseng*)、三七(*Panax notoginseng*)等,因富含皂苷类活性成分,在医药和保健品领域应用广泛。但是其忌连作的特性造成栽培土壤出现地力衰退、病害加重等连作障碍现象,使植株生长受阻、产量和品质明显下降。如何解决土壤连作障碍、开发高效的修复技术,是实现五加科药用植物可持续生产的中心问题。

1 五加科药用植物连作障碍成因

连作障碍(Continuous Cropping Obstacle)是指在同一农业生态单元内,连续多年种植同一种或者同科植物,在标准化农艺管理措施下仍然出现的系统性农艺性状衰退综合征,典型表现为植株生物量下降30%~60%,药用活性成分损失20%~40%,土

传病害发生率>50%,产量减少40%~80%。这是植物、土壤、微生物之间相互作用失衡的外在反映,其产生的原因可以归纳为化感物质积累、微生物群落失衡和土壤理化劣变三个互相影响的互作机制^[1]。

1.1 化感物质积累

五加科药用植物在连作栽培体系中,根系会通过根际沉积作用不断地释放出化感活性次生代谢产物,主要有人参皂苷、三七皂苷、酚酸类(香草酸、阿魏酸)、特定氨基酸衍生物等,含量与连作年限呈显著正相关($r=0.78\sim0.92$, $p<0.01$)。当累积浓度大于 $200\mu\text{M}$ 的时候,一方面会干扰线粒体电子传递链(ETC),使ATP合成效率降低42%~65%,造成根系能量代谢紊乱,另一方面会引发活性氧(ROS)的爆发,导致膜脂过氧化(MDA含量上升1.8~3.2倍),进而引发细胞程序性死亡^[2]。

在土壤微生态层面,高浓度皂苷类物质(>300 mg/kg)可显著抑制氨氧化细菌(AOB)的amoA基因表达(下调56%~73%),阻碍硝化作用进程;同时选择性促进尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、腐皮镰孢菌(*Fusarium solani*)等土传病原菌孢子萌发率(提高2.1~4.7倍),并通过抑制拮抗菌株(如枯草芽孢杆菌*Bacillus subtilis*)的群体感应(QS)系统,破坏微生物种间拮抗平衡。化感物质不断累积会造成土壤氨基酸、糖类等根系分泌物组分比例失衡,给病原微生物的定向富集提供有利条件。化感胁迫和微生态失衡共同造成根系生物量减少38%~52%,皂苷类有效成分含量下降21%~34%,土传病害发生率高达67%~89%。

1.2 土壤微生物群落失衡

连作种植模式下,多种胁迫因子一起作用,导致土壤微生物群落结构和功能发生明显变化,根系不断分泌出的酚酸类、萜类等次生代谢产物不断积累,对固氮菌、解磷菌等功能性微生物有明显的抑制作用,连作造成的土壤pH值偏移、酶活性异常等理化性质的改变,也加重了微生物群落结构失衡。

微生态失调是微生物多样性指数明显降低(Shannon指数下降20%~35%),病原微生物丰度增加2~5倍,有益微生物如假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)的相对丰度减少40%~60%,造成土传病害频发、养分利用率下降、作物生长受抑^[3]。微生物群落结构失衡和土壤养分循环障碍互相影响,加快了连作土壤生态功能的整体退化,使土壤酶活性下降、碳氮循环受阻,从而加重了生态系统脆弱性。

1.3 土壤理化性质恶化

连续种植3到5个生长周期之后,根际土壤会出现系统性的理化劣变现象,pH值明显降低0.8~1.5个单位,阳离子交换量(CEC)减少18%~25%,腐殖质组分中胡敏酸/富里酸比值(HA/FA)减小0.3~0.6,有机质矿化受阻。养分失衡方面,速效氮、速效磷分别减少34%~52%、28%~45%,速效钾流失率达60%~75%;脲酶、酸性磷酸酶活性分别被抑制42%~58%、35%~49%,多酚氧化酶活性异常升高1.2~1.8倍,加快有机质无效分解。

酚酸类物质会与土壤胶体结合,导致胶体凝聚指数降低40%~60%,皂苷类物质会抑制土壤脲酶编码基因ureC的表达,造成氮素转化受阻,出现理化退化和化感毒害的正反馈。目前有针对性的修复措施有有机-无机复合改良剂(生物炭+腐殖酸)施用、功能微生物(丛枝菌根真菌AMF)定向调控等,可以提高土壤缓冲性(pH稳定度提高30%~45%)、养分库容^[4]。

2 连作土壤修复技术研究进展

2.1 物理与化学修复

马玉丹等研究了土壤蒸汽消毒和生石灰消毒对三七连作障碍的影响,发现两种方式都明显减少土壤中的真菌、细菌、放线菌数量,蒸汽机消毒的效果比生石灰消毒好。棉隆属于低毒农药熏蒸剂,王丽华等最先研究棉隆对西洋参、人参土传病害的防治效果,用棉隆处理土壤可以使锈根率由100%降到0~3.5%。李明华用棉隆熏蒸三七种植土壤,发现不同浓度的棉隆(35~45kg/666.7m²)都能明显减少致病镰刀菌属的丰度,增加有益菌的丰度,

以40kg/666.7m²效果最好,有利于三七的生长,提高皂苷含量,促进氮磷钾素的积累。高微微等用多菌灵、代森锰锌和氯化苦做无土栽培旧基质消毒试验,结果表明氯化苦和代森锰锌对提高西洋参出苗率、减少根病有明显促进作用,多菌灵效果差^[5]。

强还原土壤灭菌(RSD),就是在土壤中加入小麦、米糠等易分解的有机改良剂,灌水到饱和后覆盖薄膜保持2~4周,可以有效地杀灭90%以上的病原菌。战宇等研究结果表明,强还原土壤灭菌能明显改善人参连作土壤养分结构,提高土壤EC值、速效钾、水解氮含量,并且可以明显增加被孢霉属、毛壳菌属等有益菌的丰度,有望代替传统的化学熏蒸技术。闫宁等又对RSD+SF、RSD+F和SF+F这三种改良方法对人参连作土壤细菌群落和土壤酶活性的影响进行了比较,结果表明RSD相关处理组有益细菌属数量和土壤酶活性都比SF+F组高,说明强还原土壤灭菌效果比氯化苦熏蒸法好。

2.2 微生物修复

微生物修复就是从土壤中分离出高效拮抗菌株,制备成生防菌剂施用于连作土壤,从而降低病害的发生率,改善根际微生态环境。闫宁从人参根际土壤中筛选出8株对根腐病原菌、锈腐病原菌、黑斑病原菌有高效抑制作用的生防细菌,其中抑菌率最高的菌株为X-51,该菌株被鉴定为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)。将生防细菌复配成菌剂施入人参连作土壤中,可明显降低致病真菌的丰度,提高有益真菌的丰度,同时提高人参皂苷含量。李玥从三七根际土壤中分离出耐皂苷木霉菌(绿色木霉*Trichoderma viride*、渐绿木霉*T. viridescens*),对三七根腐病的主要病原菌都有较强的拮抗作用,对三七有良好的促生作用。刘博文在枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)和哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*)对多种三七病原菌拮抗效果的基础上,组成不同的菌剂组合测试对三七根腐病的防治效果,结果表明它不但可以提高三七籽条移栽六个月后的生存率、剪口重量和人参皂苷含量,还可以有效降低根腐病原菌属丰度,提高部分有益菌属丰度,从而改善根际土壤微生物群落结构,达到根腐病的综合防治^[6]。

2.3 有机改良剂应用

生物炭是农林废弃物在限氧条件下高温(250~700℃)热解得到的高芳香化固态物质,能有效地调节土壤pH、电导率,提高土壤养分含量,促进作物生长。牟苗用核桃壳、花生壳、玉米和烤烟秸秆为原料制备生物炭基质肥料,改善三七土壤理化性质,调节微生物群落,提高土壤酶活性,降低根腐病发病率,提高出苗率和存活率^[7]。杨莉等认为,在人参连作的土壤中施加生物炭可以提高土壤养分含量、重茬人参的生物量和总皂苷含量。王旭用橡胶木生物炭(RB)和负载铁离子改性生物炭(FeB)来研究其对三七酚酸类物质化感效应的消减作用,发现生物炭施加后化感抑制作用明显减弱,潜在病原菌相对丰度下降5.17%~21.15%,潜在有益菌群相对丰度上升0.02%~11.25%。王贞玉等研究了烟草秸秆制备的生物炭对三七连作土壤的影响,发现施

用烟杆炭后提高了土壤有机碳、硝态氮、铵态氮含量,增强了脲酶和蛋白酶活性,改变了微生物群落结构,增加了微生物量碳、微生物量氮,从而缓解连作障碍。生物炭经改良土壤理化性质、调节微生物群落、增强酶活性等途径,是解决五加科药用植物连作障碍的有效办法,具有资源循环利用和生态修复的双重功能。

2.4 轮作制度

轮作用周期性换种不同科属的作物来达到土壤养分平衡和病虫害控制的目的。已有研究用玉米、小麦等粮食作物轮作西洋参参后地。或者用五味子、细辛、薏苡等药用植物轮作,都可以有效地缓解连作障碍。以白藓、黄精、黄芩、细辛、桔梗等轮作人参参后土,可以提高土壤pH值到6~7之间,增加土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,提高蔗糖酶、纤维素酶、淀粉酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和脲酶等土壤酶活性。轮作以改善资源利用和生态平衡为手段,达到用地与养地相结合的目的,是提高作物产量、保证土壤健康的农业战略。

2.5 微生物-植物联合修复

丛枝菌根真菌(AMF)是一种普遍存在的生物共生体,它可以促进药用植物的生长发育、增强抗逆性、提高药效成分的含量。自2007年任嘉红首次发表AMF侵染三七的研究之后,相关研究就不断深入。曾燕等在大田条件下用丛枝菌根侵染三七,发现侵染强度与三七地下部生物量、皂苷含量、皂苷产量之间有显著的相关性,适度侵染时三七有最大的生物量和最高的皂苷含量。曹冠华等认为三七AMF定殖率和三七皂苷R1含量有显著正相关。冉志芳等对栽培西洋参根系AMF做了初步的调查,结果表明西洋参根系有明显的AMF菌丝、丛枝、泡囊等结构,三年生西洋参根系AMF侵染率和侵染强度达到最高点,并且AMF侵染率和侵染强度都和人参皂苷Rg1、Re、Rb1含量显著正相关($P<0.05$)。冉志芳等对山东栽培西洋参的AMF多样性做了初步研究,确定了主产区西洋参根系AMF群落多样性及优势种质资源,为研究西洋参药材品质形成环境打下了基础。

3 结论与展望

3.1 研究结论

以上修复技术都可以一定程度上修复五加科药用植物连作障碍,但是各有各的不足,棉隆、氯化苦等熏蒸剂存在环境风险,长期使用会造成耐药性,生防菌剂稳定性差,田间应用容易受到温湿度、pH等环境因素的影响,生物炭原料和热解工艺不同会导致效果波动,规模化生产成本高,轮作周期长,短期内会影响农户的收益。单一种类的修复技术很难达到连作障碍的系统性防治效果,需要研究多种技术相结合的综合修复方法^[8]。

3.2 未来研究方向与展望

未来连作土壤修复技术的发展要以生态友好性、精准性和可持续性为方向,主要研究如下几个方面。一是利用宏基因组学和代谢组学来筛选出广谱抑菌功能的微生物,开发出以环境响应为特征的智能控释菌剂系统,提高生防菌剂田间定植率及稳定性。二是功能化生物炭构建,通过负载纳米材料(Fe^{3+} 、 ZnO)或者生物活性分子的生物炭,特异性吸附和催化降解皂苷、酚酸类自毒物质,同时改善孔隙结构和表面官能团,提高病原菌的物理阻隔效果。三是多技术协同修复体系的创建,把强还原土壤灭菌、微生物菌剂和有机改良剂结合起来,形成“物理灭活、生物拮抗、养分调控”联用模式,达到病原菌抑制和土壤健康重建的目的。第四为智能决策支持系统开发,用物联网传感器对土壤理化参数和微生物群落进行监测,用机器学习算法预测连作障碍发生的风险,根据这些变化来调整修复方案,从而形成一个闭环的调节机制。

未来的研究还需要对根际微生物、病原菌和宿主作物之间的互作网络进行解析,阐明抗生素合成基因、化感物质降解酶基因等关键功能基因的作用机理,加强田间尺度的验证,评价不同的修复技术的环境风险及长期效果,促进技术由实验室走向规模化应用,创建起高效、低耗、环境友好的修复体系,给人参、三七、西洋参等五加科药用植物的可持续生产赋予科学支撑。

[参考文献]

- [1]于晓艳,张宇弛,方粟一,等.西洋参的化学成分和药理作用研究进展[J].中医药学报,2024,52(04):99-104.
- [2]高健,吕邵娃.人参化学成分及药理作用研究进展[J].中医药导报,2021,27(1):127.
- [3]郭玺,刘盼茹,唐乙朝,等.三七皂苷成分及临床药理作用研究进展[J].南京中医药大学学报,2024,40(09):985-992.
- [4]李耿,王华,董政起,等.中国人参产业发展现状及趋势分析[J].中国中药杂志,2024,49(17):4818-4828.
- [5]王梓,李勇,丁万隆.人参化感自毒作用与连作障碍机制研究进展[J].中国现代中药,2017,19(07):1040-1044.
- [6]王薛梅,计丕霞,芦梦,等.皂苷源土壤连作障碍的成因及生物炭修复缓解机制研究进展[J].环境污染与防治,2024,46(03):406-415.
- [7]李丽,蒋景龙.西洋参化感自毒作用与连作障碍研究进展[J].分子植物育种,2018,16(13):4436-4443.
- [8]黄小芳.人参根系分泌物及其自毒活性研究[D].北京:中国协和医科大学,2009.

作者简介:

朱虹(2000--),女,汉族,四川简阳人,硕士,研究方向:微生物学。