

施用腐殖酸对丹参生长及土壤理化性质的影响

李悦¹, 李佳丽¹, 胡艺馨¹, 王思涵¹, 米雪², 赵永平¹, 王哲¹

(1. 商洛学院生物医药与食品工程学院, 陕西 商洛 726000;

2. 西北大学生命科学学院, 陕西 西安 710069)

摘要: 通过探究腐殖酸对丹参生长及土壤理化性质的最佳施用量, 为丹参的生态种植提供理论依据。以不施用腐殖酸为对照, 设置了4个腐殖酸浓度(稀释50、100、200、400倍), 通过盆栽实验系统分析了不同处理下丹参生长指标、养分吸收和根际土壤理化指标的变化。结果表明, 与对照不施用腐殖酸相比, 腐殖酸稀释200倍处理的丹参地上、地下生物量较高, 分别提高了48.43%和43.02%; 丹参根际土壤的蔗糖酶、淀粉酶和纤维素酶活性较高, 分别提高了244.78%、13.58%、408.55%; 丹参根际土壤过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性最高, 分别提高了44.37%和51.90%。腐殖酸稀释400倍处理丹参根际土壤脲酶活性最高, 提高了547.32%。腐殖酸稀释200倍、400倍处理组根际土壤有机碳含量分别提高了364.98%、166.16%, 硝态氮含量分别提高了57.61%、65.43%; 铵态氮含量分别提高了89.13%、57.58%; 根际土壤的全磷分别降低了14.62%、25.24%, 速效磷含量分别降低了19.91%、15.20%。综上所述, 200倍腐殖酸稀释液可通过“碳输入-酶激活-养分转化”级联效应促进丹参的生长和养分吸收, 表现出最佳效果, 实现了土壤肥力提升和植物养分高效利用协同增效, 具有重要的实践指导价值。

关键词: 腐殖酸; 丹参; 养分吸收; 土壤酶活性

中图分类号: S567.5; S15

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)08-0756-06

[doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2025.08.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-2172.2025.08.012)

Effects of Humic Acid on the Growth of *Salvia miltiorrhiza* and Soil Enzyme Activity

LI Yue¹, LI Jiali¹, HU Yiixn¹, WANG Sihan¹, MI Xue², ZHAO Yongping¹, WANG Zhe¹

(1. The college of Biology Pharmacy and Food Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi 726000, China;

2. The College of Life Science, Northwest University, Xi'an Shaanxi 710069, China)

Abstract: To investigate the optimal application rate of humic acid (HA) on the growth of *Salvia miltiorrhiza* (*S. miltiorrhiza*), this study established 4 HA concentrations (diluted at 50-, 100-, 200-, and 400-fold ratios), with a control group without HA application. Through a pot experiment, systematic analyses were conducted on the growth parameters, nutrient uptake efficiency, and variations in physicochemical properties of the rhizosphere soil across different treatments. Results showed that the 200-diluted treatment significantly increased the above-ground and below-ground biomass of *S. miltiorrhiza* by 48.43% and 43.02%, respectively, compared to the control. This treatment also significantly enhanced the activities of sucrase, amylase, and cellulase in the rhizosphere soil by 244.78%, 13.58%, and 408.55%, respectively. Furthermore, it resulted in the highest activities of catalase and acid phosphatase in the rhizosphere soil, which increased by 44.37% and 51.90%, respectively. The 400-diluted treatment showed the highest urease activity in the rhizosphere soil, increasing it by 547.32% compared to the control. Treatments with humic acid diluted 200-fold and 400-fold significantly increased the soil organic carbon content by 364.98% and 166.16%; nitrate nitrogen (NO_3^- -N) content increased by 57.61% and 65.43%; ammonium nitrogen (NH_4^+ -N) content also increased by 89.13% and 57.58%, respectively, compared to the control. However, these treatments decreased total phosphorus content by 14.62% and 25.24%, respectively, and available phosphorus content by 19.91% and 15.20%, respectively. In conclusion, the 200-fold HA dilution solution demonstrated the optimal effect. It promotes the growth and nutrient uptake of *S. miltiorrhiza* through the cascade effects of 'carbon input-enzyme activation-nutrient transformation'. This approach achieves synergistic improvement in both soil fertility enhancement and efficient plant nutrient utilization, offering significant practical guidance.

Key words: Humic acid; *Salvia miltiorrhiza*; Nutrient uptake; Soil enzyme activity

收稿日期: 2025-04-21; 修订日期: 2025-07-26

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0357); 陕西省技术创新引导专项(2023QYPY2-01)。

作者简介: 李悦(2004—), 女, 陕西商洛人, 本科在读, 研究方向为药用植物栽培。Email: 2625443161@qq.com。

通信作者: 王哲(1987—), 男, 陕西富平人, 讲师, 博士, 主要从事土壤养分循环与植物营养研究。Email: wangzhe4048@163.com。

丹参(*Salvia miltiorrhiza*)为唇形科多年生草本植物,其干燥根及根茎具有良好的药用价值,被广泛用于各种疾病的治疗。目前丹参市场需求量持续增长,但野生资源日趋枯竭,且地道药材适宜栽培区域有限,导致产区普遍存在重茬连作现象^[1]。研究表明,丹参连作障碍效应显著,连续种植第4年丹参枯苗率可高达62%,严重制约药材产量和品质^[2]。长期连续种植可导致土壤全氮、全磷、有机质含量下降,土壤酸化增强,同时微生物群落结构和功能发生紊乱,尿酶、蔗糖酶、过氧化氢酶等与土壤养分代谢相关的酶活性降低^[3-4]。这种土壤环境的退化会阻碍丹参根系对养分的吸收利用,引发植株营养失调和生理代谢障碍,进而降低其抗病能力。此外,长期连续种植会抑制土壤碳循环过程,降低土壤呼吸速率,最终对丹参生长发育和根部有效成分积累产生负面影响^[5]。因此,采取有效措施改善根际土壤环境以促进丹参的生长发育,对于保障中药材生产的可持续发展具有重要的意义。

腐殖酸(Humic acids, HA)是动植物残体经过微生物分解、转化以及一系列地球化学过程累积起来的一类天然大分子有机化合物。腐殖酸作为一种重要的植物生物刺激剂,可以调节植物体内代谢活动,提高养分利用效率,使药材增产提量^[6]。施用水溶性腐殖酸可以促进潞党参、川芎、黄芪等药材株高、株幅,并促进块茎和贮藏根的生长^[7-9]。除此之外,腐殖酸可以改善土壤微生物多样性、钝化有害酶活性,增强药材对逆境的抵抗力^[10]。近年来,腐殖酸类肥料在药用植物种植中应用广泛,主要集中在对药材种子萌发、生长发育、逆境调控和产量的影响,在调控中药材养分吸收、土壤环境质量方面的研究较少。本试验利用腐殖酸作为核心添加物,研究施用腐殖酸肥料对丹参养分吸收、根际土壤理化性质及土壤酶活性的影响,以期腐殖酸肥料在丹参种植上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤含有机质 6.04 g/kg、全氮 0.53 g/kg、全磷 0.79 g/kg、速效磷 12.73 mg/kg, pH 8.3。供试腐殖酸肥料由陕西科技大学腐殖酸生态工程中心提供,游离腐殖酸含量 ≥ 30 g/L,液体剂型。供试

丹参为移栽长势一致的一年生丹参种根。

1.2 试验设计

于2024年4—10月在商洛学院校园内进行盆栽实验,设置4个腐殖酸施用水平,处理1(T1),供试腐殖酸肥稀释50倍;处理2(T2),供试腐殖酸肥稀释100倍;处理3(T3),供试腐殖酸肥稀释200倍;处理4(T4),供试腐殖酸肥稀释400倍;以不施用腐殖酸肥料为对照处理(CK)。丹参幼苗移栽前,准确称量复合肥(N-P₂O₅-K₂O为15-15-15)1.5 g/盆做基肥,与供试土壤混匀,选择直径为22 cm、高30 cm的塑料花盆,每盆装土4.5 kg。试验开始前,每个塑料盆移栽长势一致的一年生丹参种根5根,待出苗后留3株壮苗,每处理重复4次。出苗30 d后,采用灌根的方式按试验设计每盆浇灌500 mL腐殖酸溶液,对照处理用等体积的蒸馏水代替,丹参生长期所有处理采用相同的管理方式。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 生物量和养分含量 试验结束后取出丹参整体植株,去除根系周围土块后轻轻抖动收集根际土,装入自封袋,一部分风干后用于基础理化性质测定,另一部分于-20℃保存,用于硝态氮、铵态氮和酶活性的测定。土壤样品收集结束后,将茎叶和根分开取样,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重,统计地上(茎、叶)和地下(根)生物量。采用凯氏定氮法测定植物全氮含量^[11],钼锑抗比色法测定磷含量^[11];丹参植株氮、磷吸收量为氮、磷含量乘以相应的生物量。

1.3.2 土壤理化性质 采用重铬酸钾法测定土壤有机碳(SOC),采用凯氏定氮法测定土壤全氮(TN),采用钼锑抗比色法测定全磷(TP)和速效磷(AP)。采用紫外分光光度法测定硝态氮(NO₃⁻-N),采用靛酚蓝比色法测定铵态氮(NH₄⁺-N)^[11]。

1.3.3 土壤酶活性 土壤酶活性包括参与碳(C)循环的淀粉酶、蔗糖酶和纤维素酶;参与氮(N)循环的脲酶和过氧化氢酶^[12];参与磷(P)循环的酸性磷酸酶和碱性磷酸酶^[13]。采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定淀粉酶、蔗糖酶和纤维素酶活性^[12];采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性^[14],采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性^[14],采用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶和碱性磷酸

酶活性^[15]。

1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2021 整理丹参生物量、土壤理化性质和酶活性等数据,采用单因素方差分析(ANOVA)进行差异性分析,并用 Origin 2020 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 腐殖酸对丹参生长和养分吸收的影响

施用腐殖酸提高了丹参地上生物量、丹参氮素和磷素的吸收,T2、T3、T4处理均显著提高了丹参地下生物量、丹参氮素和磷素的吸收(图1)。与CK

相比,T2、T3、T4处理丹参地上生物量分别提高了45.65%、48.43%、43.84%($P<0.05$),地下生物量分别提高了15.48%、43.02%、52.59%;丹参地上部分吸氮量分别提高了45.65%、48.43%、43.84%($P<0.05$);T3、T4处理丹参地下部分吸氮量分别提高了43.02%、52.59%($P<0.05$),地上部分吸磷量分别提高了65.80%、58.35%($P<0.05$),地下部分吸磷量分别提高了68.59%、91.05%($P<0.05$)。

2.2 腐殖酸对丹参根际土壤理化性质的影响

从图2可以看出,施用腐殖酸显著提高了丹参根际土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -

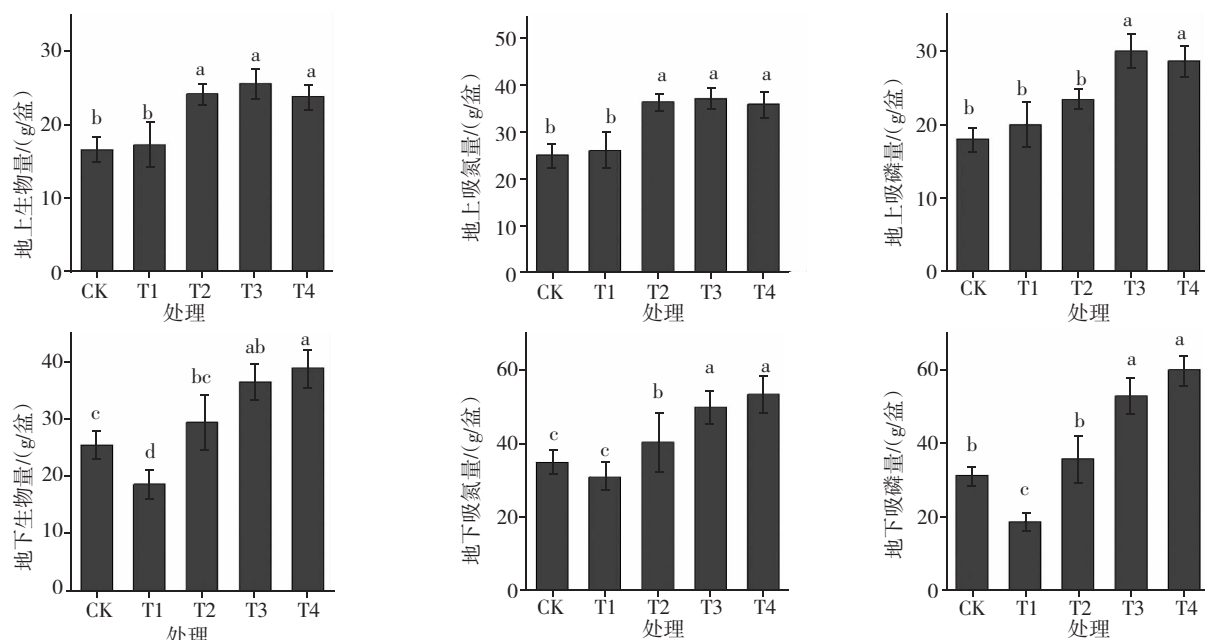


图1 施用腐殖酸对丹参生物量和养分吸收的影响

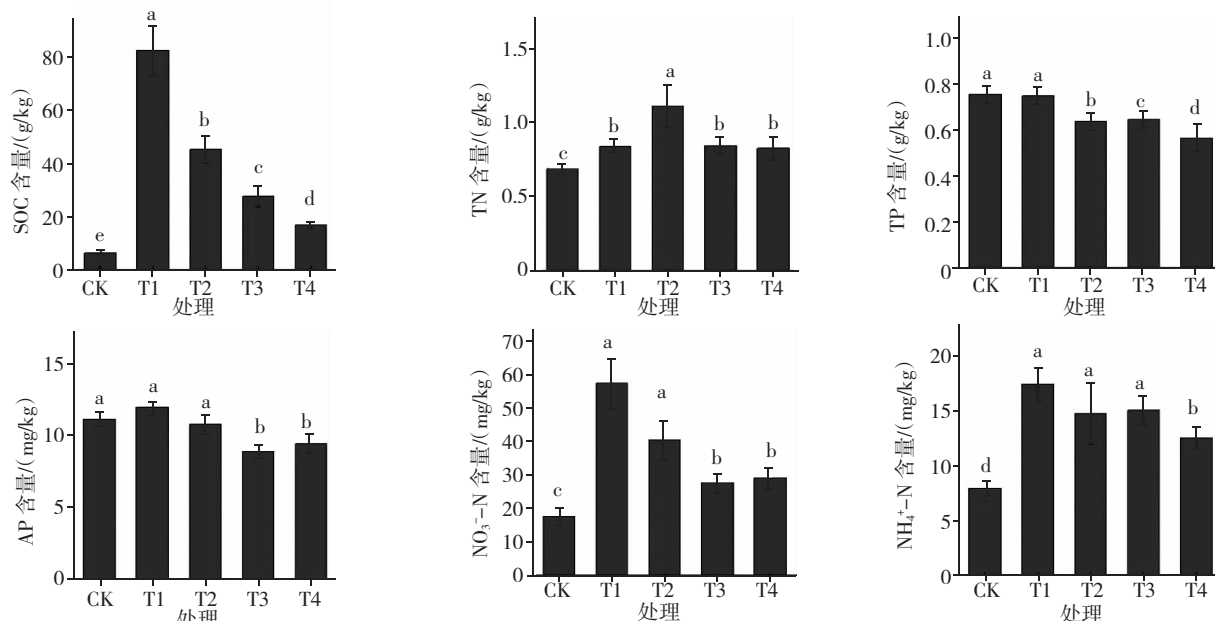


图2 施用腐殖酸对丹参根际土壤活性物质的影响

N)和铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量,降低了丹参根际土壤的全磷(TP)含量。与CK相比,T2、T3、T4处理丹参根际土壤SOC含量分别提高了614.24%、364.98%、166.16%($P<0.05$),土壤TN含量分别提高了61.45%、22.63%、20.01%($P<0.05$),土壤TP含量分别降低了15.56%、14.62%、25.24%($P<0.05$),土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别提高了130.83%、57.61%、65.43%($P<0.05$),根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别提高了85.40%、89.13%、57.58%($P<0.05$);T3、T4处理丹参根际土壤AP含量分别降低了19.91%、15.20%($P<0.05$)。

2.3 施用腐殖酸对丹参根际土壤养分循环相关酶活性的影响

施用腐殖酸提高了土壤蔗糖酶和纤维素酶的

活性(图3)。与CK相比,T2、T3、T4处理丹参根际土壤蔗糖酶活性分别提高了205.46%、244.78%和179.21%($P<0.05$);T1、T3、T4处理丹参根际土壤淀粉酶活性分别提高了12.62%、13.58%、53.15%($P<0.05$);纤维素酶活性分别提高了232.99%、408.55%、354.09%($P<0.05$)。

施用一定量腐殖酸显著提高了土壤脲酶的活性(图4)。与CK相比,T2、T3、T4处理丹参根际土壤脲酶活性分别提高了188.77%、271.32%、547.32%($P<0.05$);T3、T4处理组丹参根际土壤过氧化氢酶活性分别提高44.37%、26.65%($P<0.05$)。

腐殖酸施用可以改变丹参根际土壤磷酸酶活性(图5)。与CK相比,T3处理土壤碱性磷酸酶活

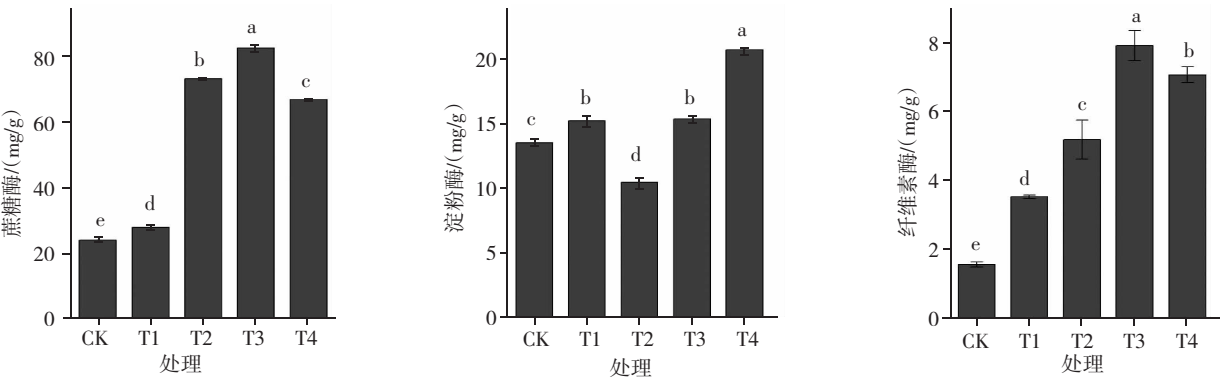


图3 施用腐殖酸对丹参根际土壤碳循环酶活性的影响

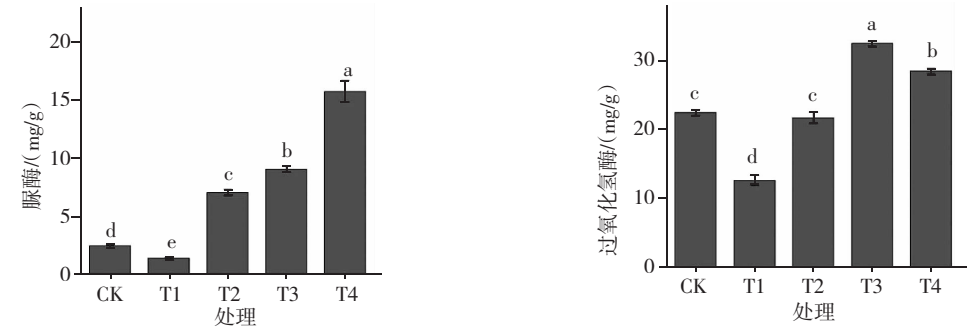


图4 施用腐殖酸对丹参根际土壤氮循环酶活性的影响

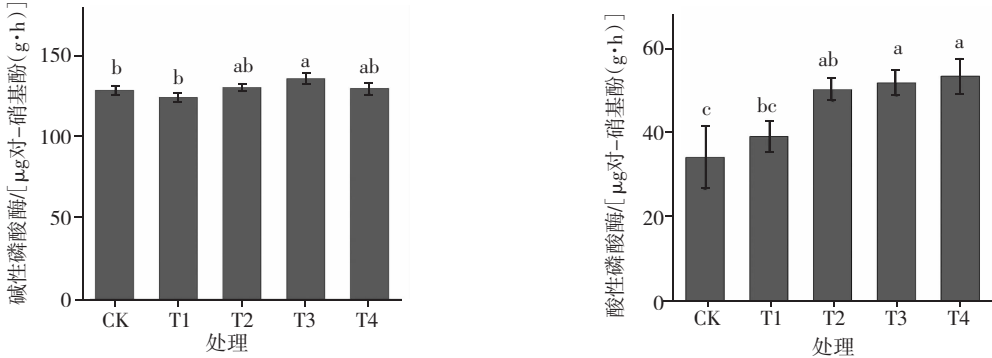


图5 施用腐殖酸对丹参根际土壤磷酸酶活性的影响

性显著提高了 5.62% ($P < 0.05$); T2、T3、T4 处理下土壤酸性磷酸酶含量分别提高了 47.26%、51.90%、56.73% ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

连续种植会造成土壤养分失衡与微生物活性降低,已被证实是药用植物生长的主要限制因子^[16]。本研究表明,除腐殖酸 50 倍稀释处理外,其他腐殖酸处理均显著提高了丹参地上和地下部分的生物量。这一促生效应与其多途径改善土壤环境有关。腐殖酸通过向土壤中输入外源碳刺激微生物活动,加速有机氮的矿化进程,从而增加土壤中氮的储存和利用。本研究表明,腐殖酸显著提高了丹参根际土壤的无机氮 (NO_3^- -N、 NH_4^+ -N) 的含量,增加可利用氮素的来源,从而提高丹参对氮素的吸收。腐殖酸作为生物刺激剂在改善植物生长发育方面发挥积极作用^[17-18]。研究表明,腐殖酸能激活植物体内硝酸还原酶、谷氨酸脱氢酶和谷氨酸酰胺合成酶等参与无机氮还原和同化的主要酶的活性,同时调节植物体内蔗糖代谢和光合作用,从而影响植物的生长^[19-20]。除此之外,腐殖酸中含有的羧酸、羰基和酚羟基等官能团,具有较强的离子交换和吸附能力,可以减少土壤对磷的固定,从而提高磷素有效性^[21]。本研究结果显示,腐殖酸显著降低了根际土壤全磷和速效磷的含量,这与腐殖酸提高土壤磷素有效性,促进丹参对磷素吸收有关。

土壤酶活性可直观反映土壤养分转化效率。本研究结果显示,腐殖酸显著提高了丹参根际土壤部分养分循环相关的酶活性。土壤蔗糖酶、淀粉酶和纤维素酶共同参与土壤碳循环,通过水解不同碳水化合土壤有机质矿化^[22]。研究表明,蔗糖酶、淀粉酶和纤维素酶与土壤氮素含量呈现良好的正相关关系^[23]。本研究结果显示腐殖酸显著提高土壤氮素含量,可能是由于土壤碳代谢酶活性提高,加速了土壤中碳水化合物的水解,为微生物提供更多的能量和碳源。微生物利用这些碳源进行代谢活动,刺激参与氮素转化过程,促进有机氮转化为无机氮 (NO_3^- -N、 NH_4^+ -N)。脲酶是直接催化尿素水解为铵态氮 (NH_4^+ -N) 的关键酶,其活性高低直接代表氮素代谢能力的强弱,且脲酶活性与土壤有机质和全氮含量呈正相关关系^[24]。

过氧化氢酶主要催化过氧化氢分解,保护微生物免受氧化损伤,从而间接维持土壤微生物群落的活性。因此,腐殖酸可以通过改善脲酶和过氧化氢酶活性,进一步促进土壤代谢过程,提高土壤中氮素的有效性,增加植物对氮素养分的吸收,促进丹参生物量。酸性磷酸酶和碱性磷酸酶通过分解有机磷参与土壤磷循环。腐殖酸通过直接刺激微生物活动,改善理化性质,显著提高酸性磷酸酶活性和碱性磷酸酶活性,从而提高土壤有效磷的供应能力,增加丹参对磷素的吸收,促进丹参的生长^[25]。

本研究从丹参养分吸收,土壤理化性质和酶活性等角度,系统阐明不同浓度腐殖酸对丹参生长的调控作用,并在 200 倍稀释处理下表现出最佳效果。与不施腐殖酸对照相比,腐殖酸 200 倍稀释处理下,丹参地上部分和地下生物量分别提高了 48.43%、43.02%;丹参根际土壤的蔗糖酶、淀粉酶和纤维素酶活性较高,分别提高了 244.78%、13.58%、408.55%;丹参根际土壤过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性最高,分别提高了 44.37%、51.90%;腐殖酸稀释 400 倍处理丹参根际土壤脲酶活性最高,提高了 547.32%。通过协同激活蔗糖酶、纤维素酶、脲酶和过氧化氢酶等关键酶活性,有效促进有机质和氮素的矿化过程,致使腐殖酸稀释 200 倍、400 倍处理根际土壤有机碳含量较不施腐殖酸对照相比分别提高了 364.98%、166.16%,硝态氮含量分别提高了 57.61%、65.43%;铵态氮含量分别提高了 89.13%、57.58%;提高了丹参根际土壤磷酸酶的活性,促进丹参对磷素的吸收,从而降低根际土壤全磷和速效磷的含量,其中全磷分别降低了 14.62%、25.24%,速效磷含量分别降低了 19.91%、15.20%。综上所述,200 倍腐殖酸稀释液可通过“碳输入-酶激活-养分转化”级联效应促进丹参的生长和养分吸收,表现出最佳效果,实现土壤肥力提升和植物养分高效利用协同增效。本研究为丹参高效栽培提供理论依据和技术支持,实现了土壤肥力提升和植物养分高效利用协同增效,具有重要的实践指导价值。

参考文献:

- [1] 王悦,杨贝贝,王浩,等.不同种植模式下丹参根际土壤微生物群落结构变化[J].生态学报,2019,

- 39(13): 4832–4843.
- [2] LIU H, NIU M, ZHU S, et al. Effect study of continuous monoculture on the quality of *Salvia miltiorrhiza* bge roots [J]. BioMed Research International. 2020(1): 4284385.
- [3] 苏 浩, 张锐澎, 吴思炫, 等. 连作障碍产生机理及防控现状[J]. 土壤, 2024, 56(2): 242–254.
- [4] 鞠吉东, 付心雨, 焦焕然, 等. 根际分泌物介导土壤微生物协同致害连作药用植物的分析与探讨[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(20): 92–99.
- [5] 崔 宁, 陈为序, 李 琦, 等. 基于土壤碳循环的丹参连作障碍机制研究[J]. 中国现代中药, 2021, 23(9): 1595–1600.
- [6] 张 茜, 马 苹, 张 婷, 等. 简述腐植酸类肥料在 35 种药材种植上的应用研究[J]. 腐植酸, 2025(1): 11–15; 44.
- [7] 程泽京, 张慧仙, 黄高鉴, 等. 腐殖酸型营养及对潞党参产量与品质的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(7): 771–776.
- [8] 喻 文, 余星语, 张德林, 等. 叶面喷施黄腐酸对川穹生长和品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(19): 128–132.
- [9] 郭 岩, 盛晋华, 张雄杰, 等. 腐殖酸水溶肥对蒙古黄芪根系生长及产量质量的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(3): 85–90.
- [10] 张 鹏, 俄胜哲, 袁金华, 等. 腐殖酸肥料研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(25): 102–108.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 曾 婷, 侯 萌, 王 耀, 等. 不同土地利用类型对土壤纤维素酶活性及肥力因子的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(1): 193–200.
- [13] 杨文娜, 余 烁, 罗东海, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 540–549.
- [14] 李鸿雁, 马佳丽, 张 芮, 等. 生物炭对水分胁迫下玉米产量和土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(5): 117–129.
- [15] 黎颖惠, 邢肖毅, 仇 旭, 等. 磷肥用量对红壤区稻田土壤磷酸酶活性及解磷菌分布的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(2): 111–117.
- [16] 孔亚丽, 秦 华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 331–347.
- [17] ELMONGY M S, ZHOU H, CAO Y, et al. The effect of humic acid on endogenous hormone levels and antioxidant enzyme activity during in vitro rooting of evergreen azalea[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 227: 234–243.
- [18] ZANIN L, TOMASI N, CESCO S, et al. Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 675.
- [19] VACCARO S, ERTANI A, NEBBIOSO A, et al. Humic substances stimulate maize nitrogen assimilation and amino acid metabolism at physiological molecular level[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2015, 2(1): 1–12.
- [20] 谷端银, 王秀峰, 高俊杰, 等. 纯化腐植酸对氮胁迫下黄瓜幼苗生长和氮代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2575–2582.
- [21] XU J, MOHAMED E, LI Q, et al. Effect of humic acid addition on buffering capacity and nutrient storage capacity of soilless substrates[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 644229.
- [22] 李建成, 伍维模, 赵长巍, 等. 氮肥减量配施壳聚寡糖对棉花根系生长和根际土壤酶活性的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(8): 752–758.
- [23] 范艳菊, 倪明月, 李振星, 等. 棉花秸秆还田配施秸秆腐熟剂及尿素对土壤微生物和土壤酶活性的影响[J]. 中国棉花, 2025, 52(1): 24–28.
- [24] 黄治宏, 赵浩宾, 王龙飞, 等. 生物炭对土壤酶活性、生态功能研究进展及作用机制分析[J]. 中国土壤与肥料, 2025(1): 250–259.
- [25] SUN Q, LIU J, HUO L C, et al. Humic acids derived from Leonardite to improve enzymatic activities and bioavailability of nutrients in a calcareous soil[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(3): 200–205.