

叶面喷施纳米铁对连作当归土壤养分、酶活性及产量和品质的影响

彭 桐^{1,2}, 唐湛文^{1,2}, 杨 涛^{1,2*}, 王引权^{2,3}, 沙 洁¹, 姚阳阳², 孟令煜²

(1. 甘肃省科学院 生物研究所, 甘肃省微生物资源开发利用重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃中医药大学 药学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 西北中藏药协同创新中心, 甘肃省中药质量与标准研究重点实验室培育基地, 甘肃 兰州 730000)

【摘要】目的 为解决在当归生产中滥用化肥和连作障碍等问题, 研究纳米铁对当归土壤养分含量、酶活性以及当归产量和药效成分的影响, 为其在当归种植中的合理应用提供依据。**方法** 测定了当归根际土壤相关酶活性, 根际土壤和根中养分含量, 当归不定根数、芦头直径、芦头长、主根长和单株鲜重, 药效成分含量。**结果** 纳米铁在不同时期显著提高了当归根际土壤 FDA 水解酶、土壤脲酶、土壤蔗糖酶、土壤碱性蛋白酶活性, 降低了土壤碱性磷酸酶活性。纳米铁处理土壤过氧化氢酶活性, 在膨大生长末期(S2)明显升高, 土壤 β -葡萄糖苷酶活性在膨大生长旺盛期(S1)显著升高。纳米铁显著提高了不同时期土壤速效钾、铵态氮、硝态氮、全铁和根中蛋白、蔗糖、铵态氮和硝态氮含量, 并显著增加了当归不定根数、芦头直径、芦头长、主根长、平均单株鲜重和药材中阿魏酸、阿魏酸松柏脂、洋川芎内酯 A 和 Z-藁本内酯的含量。**结论** 纳米铁通过调节土壤酶活性, 促进根际土壤碳氮循环, 改善土壤养分供应能力, 提高当归土壤和根中养分含量, 促进当归药材产量、品质的提升。

【关键词】 当归; 纳米 Fe; 土壤酶活; 碳氮循环; 养分; 品质

DOI 标识: doi:10.3969/j.issn.1008-0805.2024.10.22

【中图分类号】S567.9 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1008-0805(2024)10-2432-07

当归药材为伞形科植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 的干燥根, 药用历史悠久, 主产于甘肃岷县等地, 常用于治疗血虚萎黄, 月经不调, 虚寒腹痛, 跌扑损伤, 肠燥便秘等症^[1,2]。甘肃为当归的主产区, 栽培面积及年产量均占全国总量的 90% 以上^[3]。近年来, 随着现代中医药的快速发展, 当归的应用领域不断扩展, 其需求量逐年增加。由于适宜栽培区域有限, 加之经济利益的驱使, 导致当归大面积连作种植, 为追求产量农民滥用化肥的问题也日渐突出^[4,5]。连作和滥用化肥造成了土壤理化性质改变, 微生物种群结构失衡, 土壤致病菌增多和有益菌减少, 同时土壤酶活性降低, 土壤养分失衡、肥力变差, 当归病害率增加。土壤环境变化会影响当归次生代谢产物积累, 影响药材品质及用药安全性^[6-8]。

纳米颗粒(nanoparticles, NPs)是指在三维空间中至少有一个维度的尺寸介于 1~100 nm 之间的颗粒物, 具有独特的表面效应、小尺寸效应、量子效应和宏观量子隧穿效应^[9]。由于 NPs 的特殊结构, 近年来,

NPs 作为一种新型纳米农业产品在提高作物产量、提升作物品质和降低病虫害等方面已经显现出巨大潜力, 生产的纳米肥料、纳米农药、纳米农业传感器等应用也越来越广泛^[10,11]。与传统肥料相比, 纳米肥料能在减少农化产品投入 20%~30% 的基础上, 增效 20%~30%^[12]。周一敏研究发现, 叶面喷施纳米 MnO_2 可以有效降低水稻 Cd 含量, 提高叶片光合作用效果, 缓解水稻的 Cd 胁迫^[13]; 纳米 ZnO 可显著增加绿豆根系土壤磷酸酶、植酸酶的活性, 并促进绿豆对于磷素的吸收^[14]。研究表明, NPs 能够被植物吸收并且在植物体中传递, 甚至在细胞质基质和细胞器中均有发现, 但吸收、转运及传递的过程机理尚不明晰^[15-17]。目前被用于植物领域的纳米铁材料以氧化态铁和零价铁为主, 其中纳米 Fe 、 $\alpha-Fe_2O_3$ 、 $\gamma-Fe_2O_3$ 、 Fe_3O_4 为常见的纳米铁材料^[18]。Yan 等^[19]研究发现, 向土壤中释放 Fe_3O_4 -NP 可以增加植株叶绿素、糖、蛋白质和营养元素含量以及降低丙二醛含量, 从而提高玉米的抗氧化能力, 促进玉米的生长。胡子逸^[18]对花生及柑橘幼苗

收稿日期: 2023-12-09; 修订日期: 2024-07-01

基金项目: 甘肃省知识运用项目(22ZSC0037); 甘肃省科学院重点研发项目(2023ZDYF-01); 西北中藏药协同创新中心基金项目(Xbzzy-2022-01)

作者简介: 彭 桐(1995-), 女(汉族), 河北石家庄人, 甘肃中医药大学在读博士研究生, 主要从事中药资源评价、保护与可持续研究工作。

*通讯作者简介: 杨 涛(1983-), 男(汉族), 甘肃兰州人, 甘肃省科学院研究员, 硕士学位, 主要从事中药材致生态及生物技术研究工作。

叶面喷施纳米铁肥进行了系统的研究,结果显示,花生叶面喷施纳米铁肥对老叶和新叶的铁强化程度分别为 350% 和 115%,能够降低叶片中 MDA 含量,增强 CAT 活性,改善花生植株的抗氧化能力;柑橘幼苗叶面喷施纳米铁肥可降低叶片的蒸腾速率,提高植物叶片的水分利用率,同时对植物的叶片和茎的铁强化程度分别为 85% 和 93%,强化效果显著。孟令煜等^[20]的研究结果表明,对当归叶面喷施 90 $\mu\text{mol/L}$ 纳米铁后,显著提高了当归叶片内源茉莉酸、细胞分裂素水平,水杨酸、生长素、脱落酸含量显著低于对照。此外,纳米 Fe_3O_4 能显著增加土壤酶活性,并对高浓度铅污染土壤中铅具有良好的固定效果^[21]。 Fe_3O_4 -NPs 和 Fe_2O_3 -NPs 能够增加土壤中转氨酶和脲酶的数量,促进土壤中碳、氮的循环^[22]。本研究通过对连作当归叶面喷施纳米铁处理后,探寻当归根际土壤酶活、矿质养分吸收利用等变化情况,结合对产量和品质的影响,为矿质元素纳米肥料的研究开发和合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省天祝中药材生态种植示范基地,选取连作 3 年当归的地块为试验地,试验地面积 360 m^2 (36 m $\times$ 10 m),土壤类型为栗钙土,供试土壤含速效钾 6.65 mg/kg,速效磷 15.99 g/kg,碱解氮 35.05 $\mu\text{g/g}$,有机质 2.9%,pH 值为 7.85。

1.2 试验材料概况

供试植株由岷县中药材生产技术指导站提供的 1 年生当归苗,品种为岷归 1 号。经甘肃中医药大学药学院王引权教授鉴定为伞形科植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 的幼苗。

纳米铁为单质铁,由甘肃省科学院纳米研究室馈赠。外观呈黑色粉末状,平均粒径为 53.56 nm 密度为 7.8 g/cm^3 ,比表面积为 14.36 m^2/g ,纯度 > 99.5%。从扫描电镜 (SEM) 的分析结果看,供试纳米铁的球形度和分散性均良好,尺寸均匀 (图 1)。

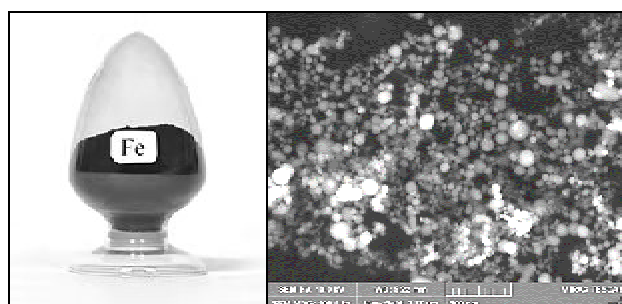


图 1 供试纳米铁粉末外观及扫描电镜图

紫外可见分光光度计 (北京普析通用仪器有限责

任公司);土壤硝态氮、铵态氮、速效钾、速效磷、过氧化氢酶、FDA 水解酶、脲酶、蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶、碱性蛋白酶和植物蔗糖、可溶性蛋白试剂盒 (北京索莱宝科技有限公司)。阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、Z-藁本内酯、阿魏酸松柏酯对照品 (上海源叶生物技术有限公司),批号分别为 B20007、B21463、B21462、B20492、B20009,质量分数 $\geq 98.0\%$ 。

1.3 试验设计

1.3.1 喷施试验处理

试验采用单因素设计,设 CK (无菌水) 和纳米铁处理,各处理重复 3 次,各处理面积为 60 m^2 ,共 360 m^2 ,四周用铁丝网围栏。2020 年 7 月起,每 3 周叶面喷施 90 $\mu\text{mol/L}$ 纳米铁 1 次 (参考姜虹^[23]所建立的浓度),以喷施等量无菌水 (0 mol/L) 为对照,喷施量均为 13 L/60 m^2 ,共喷施 4 次。

1.3.2 当归根围土壤采集

分别于膨大生长旺盛期 S1 时期 (2020 年 8 月 25 日,第 3 次施用后 1 天) 和膨大生长末期 S2 时期 (2020 年 10 月 6 日,第 4 次施用后 22 天) 随机采挖当归,每小区采挖 10 株,将根系外围土轻轻抖掉,用毛刷收集附在根系表面的土壤,并筛去土壤中混有的残根,自然风干后,无菌封口袋密封保存于 4 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 当归根采集处理

将上述采挖的当归根收获洗净,截成长度为 1 cm 的小段,混合均匀,鲜样测定养分指标,阴干后测定药效成分指标。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤、根中养分含量测定

当归不同时期土壤养分测定根际土壤硝态氮、土壤铵态氮、土壤速效钾和碱性土壤速效磷的含量,当归不同时期 (S1 和 S2) 根中养分测定植物蔗糖、植物可溶性蛋白、植物铵态氮和植物硝态氮的含量,以上指标均以试剂盒所述方法测定,每个样品重复 3 次,计算平均值。

1.4.2 土壤酶活性测定

当归不同时期土壤酶活性测定根际土壤过氧化氢酶 (S-CAT)、土壤 FDA 水解酶 (S-FDA)、土壤脲酶 (S-UE)、土壤蔗糖酶 (S-SC)、土壤 β -葡萄糖苷酶 (S- β -GC)、土壤碱性磷酸酶 (S-AKP/ALP) 和土壤碱性蛋白酶 (S-ALPT) 的含量,以上指标均以试剂盒所述方法测定,每个样品重复 3 次,计算平均值。

1.4.3 当归产量指标测定

对每小区采挖的 10 株当归,分别测定芦头直径、芦头长、主根长、单株鲜重和不定根数,取平均值。

1.4.4 当归药效成分测定

采用高效液相色谱法 (HPLC) 对采收期 (S2) 当归

根中阿魏酸、洋川芎内酯 I、阿魏酸松柏酯、洋川芎内酯 A、Z-藁本内酯含量^[24] 5 种药效成分进行测定。重复 3 次,取平均值。

1.5 数据处理

采用 Excel 对原始数据进行整理,通过 SPSS 软件对数据进行方差分析、相关性分析,使用 Graphpad Prism 8、Origin 9 软件进行整理作图。

2 结果

2.1 纳米铁处理对当归根际土壤养分的影响

不同时期纳米铁对当归根际土壤养分的影响见表 1。与 S1 期相比,S2 期土壤速效钾含量显著升高。S1

到 S2 期,土壤速效磷、铵态氮、硝态氮含量呈下降趋势,其中 CK 土壤硝态氮含量下降值未达到显著水平,纳米 Fe 处理下土壤全铁含量显著升高,S2 较 S1 期提高了 16.12%。较 CK,经纳米铁处理后,两个时期的土壤速效钾、铵态氮、硝态氮和全铁含量均有显著提高,土壤速效磷含量无显著差异。S1 和 S2 期,纳米铁处理下土壤速效钾含量较 CK 分别提高了 33.28% 和 18.25%,土壤铵态氮含量分别增加 38.37% 和 18.11%,土壤硝态氮含量分别增加 21.85% 和 14.91%,土壤全铁含量分别增加了 9.09% 和 39.35%。

表 1 不同时期纳米铁对当归根际土壤养分的影响($\bar{x} \pm s$)

时期	处理	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$	铵态氮/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	硝态氮/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全铁/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
S1	纳米铁	8.17 ± 0.94^c	16.97 ± 0.07^a	23.15 ± 0.19^a	11.88 ± 0.83^a	278.03 ± 5.83^b
	CK	6.13 ± 0.61^d	16.89 ± 0.12^a	16.73 ± 0.30^b	9.75 ± 1.01^{bc}	254.86 ± 4.82^c
S2	纳米铁	13.28 ± 0.94^a	16.39 ± 0.09^b	13.89 ± 0.41^c	10.33 ± 0.21^b	322.84 ± 6.95^a
	CK	11.23 ± 0.35^b	16.22 ± 0.12^b	11.76 ± 0.77^d	8.99 ± 0.06^c	231.68 ± 9.36^d

不同小写字母分别表示相应指标有显著性差异($P < 0.05$); $n = 3$

2.2 纳米铁处理对当归根际土壤酶活性的影响

不同时期纳米铁对当归根际土壤酶活性的影响见表 2。从 S1 到 S2 时期,CK 和纳米铁处理下当归土壤 S-FDA、S-UE、S-SC、S- β -GC、S-ALPT 活性均显著降低,S-AKP/ALP 活性显著升高。纳米铁较 CK 在不同时期均显著提高了 S-FDA、S-UE、S-SC、S-

ALPT 活性,降低了 S-AKP/ALP 活性。纳米铁处理的 S-CAT 活性在 S1 期较 CK 显著下降,在 S2 期又明显升高,而随着时间的延长,纳米铁对 S- β -GC 的作用效果有所减弱,与 CK 相比,S- β -GC 活性在 S1 期显著升高,在 S2 期无显著差异。

表 2 不同时期纳米铁对当归根际土壤酶活性的影响($\bar{x} \pm s$)

时期	处理	S-CAT	S-FDA	S-UE	S-SC	S- β -GC	S-ALPT	S-AKP/ALP
S1	纳米铁	10.46 ± 0.12^c	2688.37 ± 56.39^a	203.66 ± 6.54^a	34.91 ± 0.52^a	17.91 ± 0.65^a	0.16 ± 0.01^a	13485.71 ± 56.69^f
	CK	11.64 ± 0.24^b	2130.23 ± 62.92^b	177.95 ± 9.13^b	30.32 ± 0.32^a	14.79 ± 0.20^b	0.11 ± 0.01^b	13726.19 ± 114.81^c
S2	纳米铁	12.63 ± 0.05^a	1863.52 ± 78.60^c	168.17 ± 2.50^b	32.08 ± 0.40^b	12.30 ± 0.14^c	0.10 ± 0.01^b	14776.47 ± 147.53^c
	CK	11.42 ± 0.12^b	1421.17 ± 58.77^c	137.86 ± 2.95^c	29.38 ± 0.43^d	11.79 ± 0.14^c	0.07 ± 0.01^c	15140.54 ± 79.66^a

不同小写字母分别表示相应指标有显著性差异($P < 0.05$); $n = 3$

2.3 纳米铁处理对当归根产量的影响

纳米铁对当归根系生长具有一定的促进作用,见表 3。经纳米铁处理后,当归不定根数、芦头直径、芦头

长、主根长和平均单株鲜重均显著提高,较 CK 分别显著增加 17.47%、11.98%、11.9%、5.48%、15.71%,促进了当归产量的增加。

表 3 纳米铁对当归根相关指标及产量的影响($\bar{x} \pm s$)

处理	不定根个数	芦头直径/mm	芦头长/mm	主根长/mm	平均单株鲜重/g
纳米铁	15.80 ± 1.14^a	28.69 ± 0.89^a	47.42 ± 1.45^a	247.88 ± 3.46^a	94.92 ± 3.01^a
CK	13.45 ± 0.21^b	25.62 ± 0.68^b	42.37 ± 6.63^b	235.00 ± 4.09^b	82.03 ± 7.42^b

不同小写字母分别表示相应指标有显著性差异($P < 0.05$); $n = 10$

2.4 纳米铁处理对当归根中养分的影响

不同时期当归根中养分含量见表 4。从 S1 到 S2 期,当归根中蛋白、蔗糖、铵态氮含量均显著降低,CK 根中硝态氮显著下降,而纳米铁处理下根中硝态氮含量维持在相同水平。纳米铁促进了当归根系对土壤养分的吸收,较 CK 显著提高了不同时期根中蛋白、蔗糖、

铵态氮和硝态氮含量,在 S1 时期分别提高了 13.70%、19.85%、18.91%、24.40%,在 S2 时期分别提高了 6.39%、19.90%、17.57%、46.93%。

2.5 纳米铁处理对当归药用成分的影响

当归品质成分混合对照品、供试品 HPLC 见图 2,当归药效成分含量见表 5。较 CK,纳米铁处理显著提高了

阿魏酸、阿魏酸松柏酯、洋川芎内酯 A、Z-藁本内酯含量,分别增加 35.57%、22.12%、27.08%、30.74%。

2.6 主成分分析

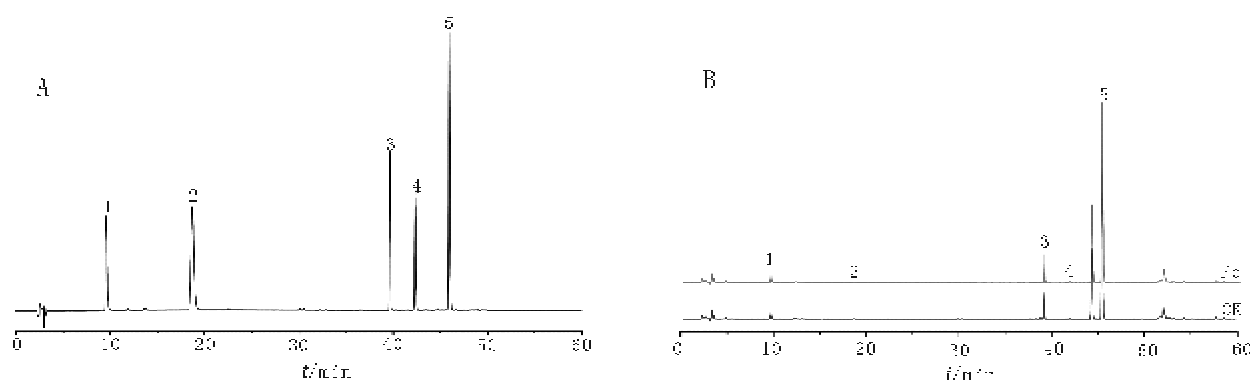
不同时期当归土壤酶活、养分和根中养分相关指标进行主成分分析(PCA)见图 3。PC1 的载荷为 71.7%,PC2 的载荷为 19.8%。S-CAT、土壤全铁、土壤速效钾、根中硝态氮对 PC2 的贡献较大,S-SC、S-UE、S-ALPT、S-FDA、S-β-GC、土壤硝态氮、土壤铵态氮、根中蔗糖、根中蛋白与 PC1 的贡献较大。S1

期纳米铁处理样品聚集分布在 PC1 轴正方向,S2 期 CK 样品分布在 PC1 轴负方向,S1 期 CK 样品分布在 PC2 轴负方向,S2 期纳米铁处理样品分布在 PC2 轴正方向,不同时期纳米铁处理与 CK 区域分布明显。说明不同时期纳米铁处理和对照在当归土壤酶活、养分和根中养分方面存在显著差异。纳米铁在 S1 期主要提高了当归土壤中 S-UE、S-ALPT、S-FDA 活性,在 S2 期主要提高了当归土壤中全铁、速效钾含量和 S-CAT 活性。

表 4 不同时期纳米铁对当归根中养分的影响($\bar{x} \pm s$)

时期	处理	根中蛋白/ $\mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$	根中蔗糖/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	根中铵态氮/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	根中硝态氮/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
S1	纳米铁	1244.43 ± 10.03^a	53.15 ± 0.83^a	2080.86 ± 37.09^a	258.71 ± 2.75^a
	CK	1094.47 ± 5.95^b	44.34 ± 1.10^b	1750.00 ± 25.93^b	207.96 ± 4.17^b
S2	纳米铁	1125.91 ± 10.14^b	46.39 ± 0.97^b	1941.35 ± 27.30^b	261.40 ± 3.34^a
	CK	1058.28 ± 12.45^d	38.69 ± 0.50^d	1651.24 ± 26.27^d	177.91 ± 7.88^c

不同小写字母分别表示相应指标有显著性差异($P < 0.05$); $n = 3$



1. 阿魏酸;2. 洋川芎内酯 I;3. 阿魏酸松柏;4. 洋川芎内酯 A;5. Z-藁本内酯

图 2 当归混合标准品(A)和样品(B)的 HPLC 图

表 5 纳米铁对当归药效成分的影响

处理	阿魏酸	洋川芎内酯 I	阿魏酸松柏酯	洋川芎内酯 A	Z-藁本内酯
纳米铁	0.625 ± 0.033^a	0.017 ± 0.000^a	1.772 ± 0.129^a	0.122 ± 0.001^a	16.746 ± 0.120^a
CK	0.461 ± 0.039^b	0.019 ± 0.001^b	1.451 ± 0.100^b	0.096 ± 0.001^b	12.809 ± 0.022^b

不同小写字母分别表示相应指标有显著性差异($P < 0.05$); $n = 3$

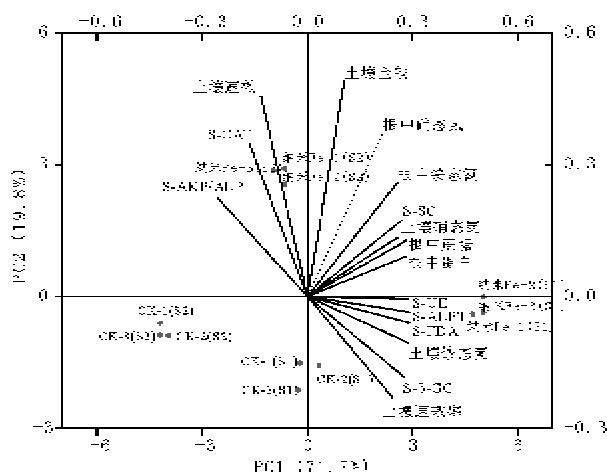


图 3 当归不同时期土壤酶活 PCA 分析

3 讨论

3.1 纳米铁对提高当归产量及品质具有促进作用

铁是植物生长发育过程中的必须营养元素,参与光合作用、呼吸作用、氧化还原反应等重要生理过程。纳米 Fe 作为新型功能材料用于农资投入品,其促生增产效果早已在玉米、小麦、花生等常见农作物上得到验证^[25,26]。何跳娥的研究表明^[27],Cu、Fe 纳米颗粒对植物致病真菌三线镰刀菌具有优异的抑菌抗菌性能,而 Fe 纳米颗粒对有益菌枯草芽孢杆菌不敏感,更适合于农业生产。对番茄和辣椒的大田试验中显示,番茄植株发病率、植株病死率较对照均低于 3.6%~6.4%之间,且苗期进行铁纳米微肥叶面喷施较对照增幅可达

14.97%, 座果期进行叶面喷施较对照增产 7.61%; 辣椒种植中使用铁纳米微肥防治病虫害可减少 1/3 农药使用量, 且增产幅度在 8% ~ 15% 之间。在药用植物方面, 纳米 Fe 的提质增产效果也非常明显。赵疆^[28]对华重楼幼苗叶面喷施 90 $\mu\text{mol/L}$ 纳米铁, 显著提高了华重楼的生物量, 降低了 MDA 和过氧化氢胁迫, 提高抗氧化酶活性, 较对照内源茉莉酸、赤霉素、细胞分裂素含量显著升高, 水杨酸、脱落酸、生长素含量显著降低。杨涛^[29]以三年生和四年生甘肃贝母实生苗为研究对象, 叶面喷施纳米铁后可提高栽培甘肃贝母抗逆性和产量。植物对叶面养分的利用是通过叶片吸附, 穿透物理屏障(角质层、水孔和气孔)到达叶质外体, 被叶细胞隔室(叶绿体、线粒体、液泡)吸收, 最后转运到植物的其他部位来实现的^[30]。较传统叶面肥和农药来说, 喷施的大部分液体都因雨水冲刷或沉降作用落在了地面上, 只有少量保持在叶面之上, 对土壤环境和水环境污染造成潜在风险。而纳米肥因其颗粒小能够更快的被植物吸收, 且具有巨大的比表面积, 为纳米颗粒和植物接触提供了更多的机会, 植物蜡质层中的脂质能够将纳米颗粒吸附在表面, 延长了在叶面的停留时间, 待纳米颗粒穿过角质层后, 再扩散到叶组织中^[31], 植物对纳米颗粒高效的利用增加了肥效。本研究中, 对当归叶面喷施纳米 Fe 后, 显著提高了根中养分含量, 积累了更多的生物量, 进而促进了产量的增加, 且采收期的各药用成分提高了 22% ~ 35%, 说明叶面喷施纳米 Fe 对当归生长起到了促进作用。

3.2 纳米铁对消减当归土壤连作障碍具有正面效应

根际是受到根系分泌物影响的那部分区域, 通常不超过根系周围 2 mm。植物根际土壤微生态环境的动态变化影响植物生长发育, 土壤基本理化性状、土壤微生物环境和土壤酶活性等指标都影响土壤微生态环境的动态变化, 进而影响植物的生长发育^[32]。反过来, 植物的生长状态影响着根系分泌物的产生, 根系分泌物可以为根际微生物提供营养, 根系分泌物中的糖、氨基酸、有机酸、脂肪酸和次生代谢产物是植物和微生物交流的主要物质; 部分物质具有吸引微生物由根圈向根际转移的功能, 改变了根际微生物群落组成, 并促进有益微生物在根际定殖或富集, 抑制了致病菌的生长^[33]。根际微生物群落结构的改变将会影响根际土壤养分的变化, 不同的根际促生菌能产生各种胞外聚合物、铁载体、有机酸等物质, 能增加土壤通透性、改善土壤结构并提供营养元素, 从而促进植物的生长和提高营养元素的利用效率^[34]。因此, 植物、根际土壤、根际土壤微生物是一个动态平衡, 相互影响的系统。王丹等^[35]对成药期党参进行纳米铁喷施处理, 结果显示经纳米铁叶面喷施后, 改变了土壤酶活性与某类微生物和根际土养分的相关关系, 而且与其他微生物的数

量转变和养分的积累、转化利用存在一定的协同效应。徐宁等^[36]研究了硅叶面肥对小麦-玉米种植体系根际土壤微生态的影响, 结果表明, 喷施硅叶面肥提高了小麦和玉米根际土壤 EC 值; 改变了土壤 pH 值, 并且提高了根际土壤脲酶、转化酶、磷酸酶和多酚氧化酶的活性。

土壤酶是土壤生态系统的重要活性物质, 土壤酶活性能够在一定程度上反映土壤微生物的代谢速率和土壤养分转化的动态进程。研究表明, 土壤酶活性与养分密切相关, 土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶等活性与土壤有机质、氮、磷等养分的吸收转化及逆境胁迫效应间存在显著的相关性^[37]。本研究显示, 较 CK, 经纳米 Fe 处理, 两个时期的土壤速效钾、铵态氮、硝态氮和全铁含量均有显著提高。Fe 是植物体内多种酶的重要组分, 在核酸的新陈代谢发挥着重要作用, 并且土壤有效铁的含量与全铁含量呈直线正相关^[38], 纳米 Fe 增加了土壤中有效铁的含量进而促进了植株各种酶的合成。土壤过氧化氢酶是土壤中一种重要的氧化还原酶, 通过分解土壤中因生物呼吸作用而产生的过氧化氢, 进而降低其对土壤和植株的毒害^[39]。在纳米 Fe 处理作用后期使 S-CAT 活性显著升高, 纳米 Fe 的长效作用能够有效清除活性氧对土壤和当归根系的影响。土壤 FDA 水解酶活性能够有效的反映土壤微生物情况^[40], 本研究中纳米 Fe 较 CK 显著增强了不同时期当归根际 S-FDA 的活性, 表明纳米 Fe 在一定程度上提高了根际土壤微生物的生物量和生物活性。土壤有机磷的转化和生物有效性受土壤磷酸酶活性影响^[41]。本研究中纳米 Fe 对土壤有效磷含量虽没有显著影响, 但与对照相比仍显著降低了 S-AKP/ALP 活性, 表明纳米 Fe 对当归根际土壤磷代谢具有一定的抑制作用。

土壤蛋白酶和脲酶直接参与氮素的转化, 常用来反映土壤氮素的供应能力, S-UE 具有很高的专一性, 能够催化尿素水解为氨和 CO_2 , 而 S-ALPT 能将各类蛋白质和肽类化合物分解为氨基酸, 供植物直接吸收利用^[42,43]。铁参与多种蛋白酶的组成, 能促进氮元素进行代谢, 在硝态氮还原成铵态氮的过程中起着重要的作用^[43]。纳米 Fe 显著增强了不同时期当归根际 S-UE、S-ALPT 活性以及土壤铵态氮和硝态氮含量, 提高了根际土壤氮循环速率和氮素供应水平。纳米 Fe 促进了当归根系对土壤氮素的吸收, 并且由于 S1 期对 S-UE 和 S-ALPT 活性的显著提升, 根中硝态氮含量在当归生长后期(S2 期)仍保持了较高水平, 根中蛋白含量与对照相比也显著增加。土壤蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性可用来表征土壤碳循环速度, S- β -GC 是纤维素降解过程中的限速酶, S-SC 与土壤有机质代谢密切相关, 二者在土壤碳循环中发挥重要作用^[44]。纳

米 Fe 显著提升了当归根际不同时期 S-SC、S-β-GC 活性,根中蔗糖含量得到明显增加。

本研究首次将纳米 Fe 应用于当归种植,与对照相比,当归叶面喷施纳米 Fe 后,根际土壤的酶活性显著变化,驱动了根际养分循环,从而使根际土壤环境变得更有利于当归的生长,在一定程度上消减了连作障碍对当归种植的影响。

结合当归产量数据分析,纳米 Fe 通过提高根际土壤的酶活性,促进根际土壤碳氮循环,改善土壤养分供应能力,从而使当归根系从根际土壤获取了更多养分,主根长、平均单株鲜重等产量指标明显增高。此外,纳米 Fe 处理显著增加了当归指标性药效成分阿魏酸、阿魏酸松柏酯、洋川芎内酯 A、Z-藁本内酯的含量。研究表明,纳米 Fe 在促进当归产量提高的同时,保证了当归品质的稳定,可用于消减当归连作障碍,为当归生态种植和提质增产提供技术支撑,在当归生态种植中具有良好的应用前景,为土壤可持续利用奠定基础条件。今后应更多的关注纳米材料和植物的联合效应,通过组学技术进一步了解更深层的作用机理和性能趋势,对植物和纳米材料的相互作用进行系统地评估,使其能够更好地用于纳米农业化。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典,一部[S]. 北京:中国医药科技出版社, 2020.
- [2] 王康宇, 陈雪慧, 刘小康, 等. 当归道地产区及历代炮制方法考证[J]. 吉林中医药, 2021, 41(10):1371.
- [3] 赵汤景, 陈四保, 高光耀, 等. 道地与非道地当归栽培土壤的理化性质[J]. 中国中药杂志, 2022, 27(1):19.
- [4] 张新慧. 当归连作障碍机制及其生物修复措施研究[D]. 甘肃农业大学硕士学位论文, 2009.
- [5] 袁洪超, 郭凤霞, 陈垣, 等. 高寒区轮作模式对当归土壤特性及药材产量的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(10):183.
- [6] 郭兰萍, 康传志, 周涛, 等. 中药生态农业最新进展及展望[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(8):1851.
- [7] 胡双, 孙文静, 高林怡, 等. 药用植物连作障碍研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(16):38.
- [8] 吕海龙, 师桂英, 贾喜霞, 等. 硅肥及油菜素内酯对茄子连作障碍的缓解作用及土壤生物化学效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3):105.
- [9] Lu L, Huang M, Huang YX, et al. Mn_2O_3 nanozymes boost endogenous antioxidant metabolites in cucumber (*Cucumis sativus*) plant and enhance resistance to salinity stress[J]. Environ Sci, 2020, 7(6):1692.
- [10] 刘晓飞, 刘晶, 王传洗, 等. 硒纳米颗粒对两种叶菜作物肥料效应的田间试验研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(12):2785.
- [11] Wang CX, Yang HY, Chen FR, et al. Nitrogen-doped carbon dots increased light conversion and electron supply to improve the corn photosystem and yield[J]. Environ Sci Technol, 2021, 55(18):12317.
- [12] Kab M, Kookana R S, Gogos A, et al. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues[J]. Nat Nanotechnol, 2018, 13(8):677.
- [13] 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 等. 叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻营养集成的影响机制[J]. 环境科学, 2021, 42(2):932.
- [14] Ramesh R, Chandra T J, Pratim B. Enhancing the Mobilization of Native Phosphorus in the Mung Bean Rhizosphere Using ZnO Nanoparticles Synthesized by Soil Fungi[J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(16):3111.
- [15] Andersen C P, King G, Plocher M, et al. Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles[J]. Environ Toxicol Chem, 2016, 35(9):2223.
- [16] Avellan A, Schwab F, Masian A, et al. Nanoparticle uptake in plants: Gold nanomaterial localized in roots of *Arabidopsis thaliana* by X-ray computed nanotomography and hyperspectral imaging[J]. Environ Sci Technol, 2017, 51(15):8682.
- [17] 杨金康, 赵鹏, 陈福庆, 等. 纳米颗粒与植物相互作用的研究热点和演变趋势分析——基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的知识图谱方法[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(1):460.
- [18] 胡子远. 叶面喷施纳米铁肥对花生和甜糯幼苗生长和铁营养的影响[D]. 西南大学硕士学位论文, 2022.
- [19] Yan L, Li P Y, Zhao X P, et al. Physiological and metabolic responses of maize (*Zea mays*) plants to Fe_3O_4 nanoparticles[J]. Sci Total Environ, 2020, 718:137400.
- [20] 孟令媛, 杨涛, 王引权, 等. 叶面喷施纳米铁对当归生理生化特性及药材产量、品质的影响[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(10):2497.
- [21] Peng D H, Wu B, Tan H, et al. Effect of multiple iron-based nanoparticles on availability of lead and iron, and micro-ecology in lead contaminated soil[J]. Chemosphere, 2019, 228:44.
- [22] Elhambakbeh A, Ghannatlan A, Keshavarz P. Glutamine functionalized iron oxide nanoparticles for high-performance carbon dioxide absorption[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2021, 94:104081.
- [23] 姜虹. 纳米水铁矿合成及生物纳米复合叶面肥的应用[D]. 南京农业大学硕士学位论文, 2018.
- [24] 杨燕, 于春强, 郭子娟, 等. 基于 HPLC 指纹图谱及多指标成分定量分析的不同产地当归质量特征研究[J]. 中草药, 2021, 52(15):4666.
- [25] Naseer M, Zhu Y, Li F M, et al. Nano-enabled improvements of growth and colonization rate in wheat inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Environ Pollut, 2022, 295:118724.
- [26] Yang Y M, Naseer M, Zhu Y, et al. Dual effects of nZVI on maize growth and water use are positively mediated by arbuscular mycorrhizal fungi via rhizosphere interactions[J]. Environ Pollut, 2022, 308:119661.
- [27] 何凯娥. Cu、Fe 纳米颗粒与农业上两种常见真菌和细菌的耦合作用研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2023.
- [28] 赵疆, 汤涛, 魏亚琴, 等. 纳米铁和赤霉素对华重楼兰长的影响[J]. 中药药, 2021, 44(6):1308.
- [29] 杨涛, 赵疆, 闫明勋, 等. 纳米铁和褪黑素对驯化栽培条件下甘肃贝母产量和品质的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(7):144.
- [30] Malhotra H, Pandey R, Sharma S, et al. Foliar fertilization: possible routes of iron transport from leaf surface to cell organelles[J]. Arch Agronomy Soil Sci, 2020, 66(3):279.
- [31] Schreck E, Foucault Y, Sarret G, et al. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead[J]. Sci Total Environ, 2012, 427.
- [32] 徐宁, 张方圆, 王霞, 等. 不同蔬菜轮作对设施连作黄瓜根际土

- 壤微生态的影响[J]. 北方园艺, 2017, 46(1):48.
- [33] 杨智仙, 汤利, 郑毅, 等. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3):10.
- [34] Prasad R, Kumar M, Varma A. Role of PGPR in soil fertility and plant health[J]. Plant Growth, 2015:247.
- [35] 王丹, 赵毅, 宋婕, 等. 两种芽孢杆菌配施纳米铁对成药期党参根际土壤养分及微生物类群的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(5):1261.
- [36] 徐宁, 张方园, 曹娜, 等. 硅叶面肥对小麦-玉米种植体系根际土壤微生态的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(2):363.
- [37] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4):406.
- [38] 韩松良, 赵兰坡. 土壤中铁元素的研究及提高植物对铁元素吸收方法[J]. 中国农业信息, 2014, 26(1):99.
- [39] 王慧, 李鑫, 陈梦妮. 水氮配合对不同耐旱性红小豆根际土壤酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(11):1812.
- [40] 史冬燕, 彭恒辰, 孙迅. 牡丹连作下不同种植模式对土壤微生物活性的影响[J]. 菏泽学院学报, 2018, 40(5):82.
- [41] 裴志强, 卢树昌, 王茜, 等. 不同种植密度的夏季填沟作沟对设施土壤酶素形态及其迁移性的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2):126.
- [42] 周礼恺. 土壤的酶活性[J]. 土壤学进展, 1980, 8(4):9.
- [43] 蔡红, 沈仁芳. 改良茼蒿三色法测定土壤蛋白酶活性的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2):306.
- [44] 陈伟, 杨洋, 崔亚菲, 等. 低氮对苦苣苗期土壤碳转化酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4):132.

Effects of Leaf Spraying Nano - Fe on Soil Nutrients, Enzyme Activities, Yield and Quality of Continuous Growing *Angelica sinensis*

PENG Tong^{1,2}, TANG Zhan-wen^{1,2}, YANG Tao^{1,2*}, WANG Yin-quan^{2,3}, SHA Jie¹, YAO Yang-yang², MENG Ling-yu²

(1. Institute of Biology, Gansu Academy of Sciences, Gansu Key Laboratory of Microbial Resources Development and Utilization Laboratory, Lanzhou 730000, China; 2. College of Pharmacy, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China; 3. Northwest Chinese and Tibetan Medicine Collaborative Innovation Center, Cultivation Base of Gansu Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Quality and Standards, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Objective To solve the problems of abuse of chemical fertilizers and continuous cropping obstacles in *Angelica sinensis* production, the effects of nano - Fe on soil nutrient content, enzyme activity, yield and pharmacodynamic composition of *Angelica sinensis* were studied, so as to provide a basis for its rational application in *Angelica sinensis* cultivation. **Methods** The activities of related enzymes in *A. sinensis* rhizosphere soil, soil and root nutrient content, the number of adventitious roots, rhizosphere diameter, rhizosphere length, main root length and fresh weight per plant, and the content of pharmacodynamic components were determined. **Results** Nano - Fe significantly increased the activities of FDA hydrolase, soil urease, soil sucrase and soil alkaline protease in *A. sinensis* rhizosphere soil at different stages, and decreased the activity of soil alkaline phosphatase. The activity of soil catalase was significantly increased in the late stage of enlargement and growth (S2), and the activity of soil β - glucosidase was significantly increased in the vigorous growth stage (S1). Nano - Fe significantly increased the contents of soil available potassium, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total iron and protein, sucrose, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in different stages, and significantly increased the number of adventitious roots, rhizosphere diameter, rhizosphere length, main root length, average fresh weight per plant and the contents of ferulic acid, coniferous ferulic acid, asiaticoside A and Z - swertia lactone in *Angelica sinensis*. **Conclusion** Nano - Fe can promote the rhizosphere soil carbon and nitrogen cycling by regulating soil enzyme activity, improve soil nutrient supply capacity, increase nutrient content in soil and root of *A. sinensis*, and promote the yield and quality of *A. sinensis*.

Key words: *Angelica sinensis*; Nano - Fe; soil enzyme activity; Carbon and nitrogen cycle; Nutrient; quality

(责任编辑:张秀兰)