

陈艳平,王喜. 生物炭、AM真菌与氮对镉污染土壤番茄养分吸收、镉累积及土壤性质的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(21):182-189.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.21.023

生物炭、AM真菌与氮对镉污染土壤番茄养分吸收、镉累积及土壤性质的影响

陈艳平¹,王喜²

(1. 郑州黄河护理职业学院,河南郑州 450066; 2. 云南农业大学热带作物学院,云南普洱 665099)

摘要:采用盆栽试验,研究镉污染土壤中(3.06 mg/kg)空白对照(CK)、施用生物炭(BC)、AM真菌(AM)、氮(NN)及其复合(BC+NN、AM+NN、BC+AM、BC+AM+NN)处理对番茄养分吸收、土壤性质及Cd累积的影响,为番茄的安全生产提供理论依据。结果表明,施用生物炭可提高菌根侵染率,而添加氮肥略微抑制了菌根定殖,而接种AM真菌配施BC、氮肥对番茄地上部和根系生物量皆有积极影响。与单一处理或双组分处理相比,三组分复合处理(BC+AM+NN)具有最高的地上部生物量,而在根系生物量中以BC+AM处理最佳。与CK相比,AM、BC、NN单一或复合处理皆整体提高了番茄地上部与根系相关养分(N、P、K、Mg、Ca、Mn、Fe)的吸收量、改善部分土壤理化性质,整体以BC+AM+NN、BC+AM处理较佳。AM、BC处理皆降低了番茄地上部、根系及土壤Cd浓度,生物富集系数(BCF)较小,转移系数(TF)较大,生物炭配施AM真菌(BC+AM)处理效果最佳。在单一施氮下,番茄地上部、根系Cd含量升高,BCF较高,TF较低,而NN与BC或AM组合处理下,Cd相关指标得到改善。综上,在中低浓度Cd污染土壤中,BC、AM、NN单一或组合处理均可促进番茄生长及养分吸收、改善部分土壤理化性质,但单施氮促使Cd富集,因此氮肥不宜单独施用,需与AM真菌、生物炭配合施用。

关键词:生物炭;AM真菌;氮;养分吸收;镉累积;土壤养分

中图分类号:S641.206 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)21-0182-08

农业工业实践(如金属冶炼、矿产开采、污水污泥应用)和高地质背景会导致土壤重金属含量超标,目前土壤重金属含量超标已成为全球共同关注的环境安全问题^[1]。镉(Cd)是一种广泛存在的重金属物质,在农业土壤中尤为普遍。大量研究表明,Cd对植物具有较强的生理和基因毒性,可抑制植物的光合反应活性和养分吸收,影响植物根系生长,含量过高时可直接导致植物萎蔫死亡^[2]。Cd具有高移动性、高毒害性以及不可生物降解等特性,

这意味着Cd一旦进入生物体,会长期累积且无法排出体外,从而通过食物链途径威胁生物体健康^[3]。

生物炭(BC)是天然动植物残体与人类生活垃圾等生物质材料在限氧或无氧、中低温裂解得到的富碳产品^[4]。由于炭化后的BC具有丰富的活性官能团、较高的阳离子交换量、规则的多孔结构等特性,可有效吸附和固定重金属离子,目前已应用于修复土壤中的镍(Ni)、砷(As)以及铬(Cr)等重(类)污染^[5]。吴伟健等研究表明,在Cd污染的土壤中,BC可以降低土壤生物可利用Cd浓度、提高作物产量并降低植物对Cd累积^[6]。丛枝菌根(AM)真菌隶属于球囊菌亚门,广泛存在于土壤中,其可与陆地生态系统中超过80%以上的维管植物建立互惠共生关系。AM真菌可改善宿主的营养状

收稿日期:2023-10-26

基金项目:河南省教育厅科技发展研究项目(编号:Wjlx2020375)。

作者简介:陈艳平(1986—),女,河南郑州人,硕士,讲师,主要从事生物化学与分子生物学研究。E-mail:chenyanp1986@163.com。

通信作者:王喜,博士,副教授,主要从事园艺作物栽培研究。E-mail:wangx135@163.com。

遗传多样性及相关性分析[J]. 植物遗传资源学报,2012,13(1):11-15,21.

[17] Sayed M R I, Alshallah K S, Safhi F A, et al. Genetic diversity, analysis of some agro-morphological and quality traits and utilization of plant resources of alfalfa[J]. Genes, 2022, 13(9): 2-18.

[18] 王健胜,梁亚红,侯桂玲,等. 油菜育种亲本主要性状相关性及其主成分分析[J]. 中国农学通报,2015,31(27):147-152.

[19] 常琴,张明生,黄如意,等. 半夏种质遗传多样性鉴定与产量决定因素分析[J]. 北方园艺,2022(18):99-108.

[20] 蒋莹,常蕾,王安,等. 143份大麦种质资源主要农艺性状遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(14):94-98.

况、降低重金属胁迫并提高宿主抗逆性等^[7]。孙红等的研究表明,AM 真菌菌丝可分泌一种能络合重金属的螯合性多糖蛋白球囊霉素,从而降低其土壤重金属有效性,以及通过菌丝作用将重金属吸附并固定在菌丝胞间内^[8]。此外,AM 真菌是土壤中重要的功能性微生物,可对根际微域和微生物群落丰度产生积极影响,多方面影响植物的重金属吸收。

氮(N)是植物体中蛋白质、核酸等遗传物质和代谢化合物的重要组成部分。植物对 N 与 Cd 的吸收转运采用同一种方式,作物种类、氮形态、施用量及施用时间皆会影响植物对 N、Cd 的吸收^[9]。硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)是植物主要的氮素吸收类型,潘维等的研究表明,添加以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 形态为主的氮肥会产生 H^+ ,从而加速土壤酸化,酸性的土壤环境会增加 Cd 的生物利用度和溶解度^[10]。据报道,植物中的 N 和 Cd 含量呈正相关,但存在稀释效应,即植物生物量的增加可减少植物体的单位镉浓度^[11]。

有研究表明,BC 可提高 AM 真菌在植物根系的定殖能力,增强对土壤养分利用的有效性,且 AM 真菌和 BC 组合应用可以促进植物养分吸收、降低土壤 Cd 的有效性及限制根系 Cd 向上转运^[12]。此外,BC 和 N 的相互作用可以增强土壤中的氮残留、促进微生物增殖,从而延长养分供应周期、促进养分利用率和提高作物产量^[13],且 BC 的吸附作用可以有效降低氮肥发生硝化作用产生的损失,同时可以有效降低酸性土壤中 Cd 的有效浓度^[10]。然而,关于 AM 真菌、生物炭和氮施用对 Cd 污染土壤中植物生长发育及其 Cd 生物有效性的研究鲜有报道。番茄是全球广泛种植的大宗蔬菜之一,具有丰富的营养价值。然而,番茄种植大多为棚内长期单一种植,番茄用肥中含有一定的重金属物质,长期种植会造成土壤重金属污染^[2],大多数番茄品种对胁迫环境反应较为敏感,尤其是在早期生长阶段。目前,关于相关物理、生物及生物措施组合施用对重金属胁迫下番茄生长发育的研究鲜有涉及^[14]。基于此,本研究探索了 AM 真菌、生物炭和氮组合施用对番茄养分累积、Cd 吸收及相关土壤性质的影响,以期对番茄的安全生产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验于 2021 年 5—7 月在云南农业大学园艺试

验场地进行,供试番茄品种为中蔬 6 号,来自中蔬种业科技有限公司。AM 真菌接种物由摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)、幼套近明球囊霉(*Claroideoglossum etunicatum*)及明根孢囊霉(*Rhizophagus clarus*)按重量比 1:1:1 混合而成,接种物由孢子和培养土构成,3 株菌种均购自北京农林科学院植物营养与资源研究所。供试 N 为氯化铵(NH_4Cl),分析纯,购自国药集团化学试剂。生物炭购自辽宁省沈阳隆泰生物炭工程有限公司,由水稻秸秆和稻谷壳在无氧环境下经 450 °C 炭化制成,其基本性质为:pH 值 9.88,总碳含量 450.14 g/kg,总氮含量 8.14 g/kg,总磷含量 2.32 g/kg,总钾含量 37.43 g/kg,阳离子交换量 23.03 cmol/kg,比表面积 217.25 m²/g。

供试土壤取自云南省普洱市某电子拆卸厂附近废弃的原大棚土壤样品,土壤类型为棕壤,其理化性质如下:pH 值 6.39,有机质含量为 22.04 g/kg,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 57.44、22.93、107.51 mg/kg,土壤有效镉含量 3.06 mg/kg。根据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,土壤 pH 值为 5.5~6.5 的 Cd 风险值 ≤ 0.3 mg/kg,供试土壤 Cd 超标 10 倍,为中轻度 Cd 污染水平。

1.2 试验设计

试验采用 3 因素完全随机设计,3 因素分别为单施氮肥(NN)、单施生物炭(BC)、单接种丛枝菌根真菌(AM),相应的复合处理分别为 BC+NN、AM+NN、BC+AM、BC+AM+NN,以不施生物炭+不接种 AM 真菌+不施氮为对照(CK),试验共设置 8 个处理,每个处理 3 次重复。

盆栽所用底部直径为 20 cm、高度为 22 cm 的圆桶型器具,装土 5 kg/盆,其生物炭、AM 真菌处理及氮处理施用量分别为 50、50、2.5 g/盆,相应处理按上述施用量与土壤提前混合均匀。播撒种子 3 粒/盆,15 d 后间苗至 1 株,保持 60% 土壤持水量。其他管理措施同番茄作物培育方法,试验培育期 45 d。

1.3 样品采集及测定分析

1.3.1 番茄植株生物量及菌根侵染率的测定 培育 45 d 时将盆栽器具剖开,采用清水小心清洗已获得完整根系,将根切成 1 cm 长的小段,采用台盼蓝染色,光学显微镜下用网格交叉记数法^[15]计算菌根侵染率。将植株地上部、根系分离,然后置于烘

箱中 105 ℃、30 min 使酶失活,65 ℃ 烘干以获得生物量。

1.3.2 番茄植株养分含量及 Cd 含量的测定 将烘干的番茄地上部、根系样品加入 6 mL 体积比为 4 : 1 的 HNO₃: HClO₄ 混合液微波消解,之后采用电感耦合等离子体质谱法(ICP - OES)测定 P、K、Ca、Mg、Mn、Fe 含量,采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP - MS)测定植物提取物中 Cd 浓度。

1.3.3 土壤有效养分含量及植株 Cd 浓度的测定 采用 NH₄HCO₃ - 二乙烯三胺五乙酸(AB - DTPA)通用浸提法提取土壤 Cd、Mg、Mn、Fe 及 Cu 浓度,其余土壤指标的测定按照鲍士旦的方法^[16]进行,采用 pH 计进行土壤 pH 值测定($V_{水} : V_{土} = 5 : 1$),NO₃⁻ - N 和 NH₄⁺ - N 浓度分别通过盐酸 - 乙二胺四乙酸钠缓冲液、苯酚钠 - 乙二胺四乙酸钠提取,全自动连续流动分析仪(TRAAS - 2100,上海泽泉科技股份公司)进行测定;有效磷(AP)、速效钾(AK)含量分别采用钼蓝法、火焰光度法测定。

1.4 数据处理与统计分析

生物富集系数(BCF)及转移系数(TF)的计算按照以下公式进行^[17]:

BCF = 植株 Cd 浓度/土壤 Cd 浓度;

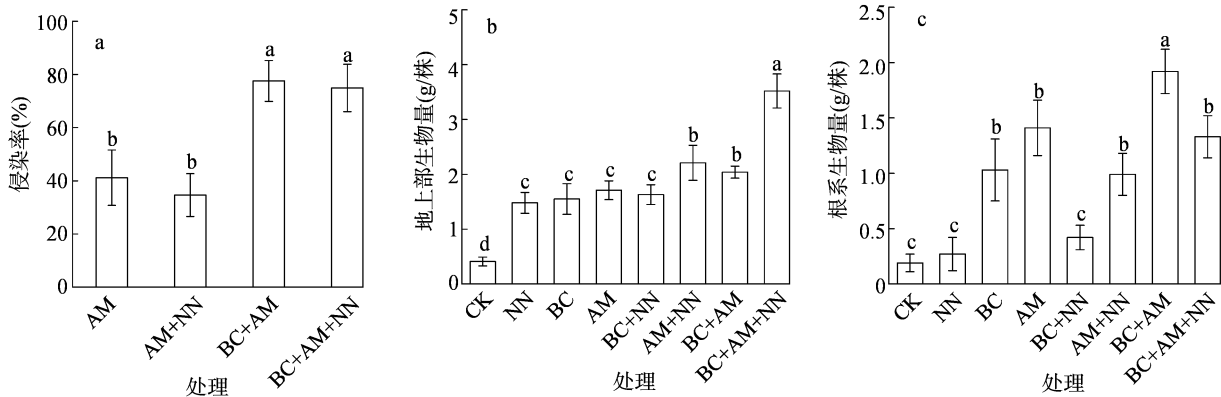
TF = 植株地上部 Cd 浓度/根系 Cd 浓度。

采用 SPSS 23.0 进行方差分析和多重比较($\alpha = 0.05$),所有图形皆采用 Origin 12 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 生物炭、AM 真菌及氮对番茄生物量累积及菌根侵染的影响

由图 1 - a 可知,在侵染率中,各 AM 真菌接种处理的侵染率为 34.63% ~ 77.56%,各处理侵染率从低到高表现为 AM + NN < AM < BC + AM + NN < BC + AM,其中以 BC + AM 处理侵染率最高,BC + AM + NN 处理其次,二者无显著差异,且二者皆显著大于 AM、AM + NN 处理($P < 0.05$)。由图 1 - b 可知,各处理地上部生物量从小到大表现为 CK < NN < BC < BC + NN < AM < BC + AM < AM + NN < BC + AM + NN,与 CK 相比,各处理显著提高 260.98% ~ 758.54%,且以 AM + NN、BC + AM、BC + AM + NN 处理显著高于余下处理。由图 1 - c 可知,BC + AM 处理的根系生物量最高,其他处理较其显著降低 26.56% ~ 91.10%。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同
图1 镉污染土壤中生物炭、AM 真菌及施氮对番茄生物量及菌根侵染的影响

2.2 生物炭、AM 真菌及氮对番茄地上部养分吸收量的影响

由表 1 可知,在番茄地上部的养分吸收量中,各处理的 N、P、K、Mg、Ca、Mn、Fe 吸收量皆以 CK 最低,以 BC + AM + NN 处理最大;与 CK 相比,生物炭、AM 真菌及施氮处理分别增加 281.27% ~ 810.44%、162.94% ~ 1120.31%、156.68% ~ 822.39%、216.00% ~ 1782.67%、225.04% ~ 883.07%、125.71% ~ 1217.14%、77.27% ~

877.27%。多因素方差分析表明,AM、BC、NN 处理对大量元素(N、P、K)、中量元素(Ca、Mg)的吸收具有一定的交互影响;双因素分析表明,AM × BC、BC × NN 对 N、P、K 具有显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)交互作用;3 因素分析表明,AM × BC × NN 在 N、P、K、Mg、Ca 中存在显著或极显著交互作用。

2.3 生物炭、AM 真菌及氮对番茄根系养分累积的影响

由表 2 可知,在番茄根系的养分吸收中,各处理

N、P、Mg、Ca、Mn、Fe 以 CK 最低,而 N、P、K、Fe 吸收量皆以 BC + AM 最高,Ca、Mn 吸收量以 AM + NN 处理最高,Mg 吸收量则以 AM 处理最高。总体而言,接种 AM 真菌明显增加了根系 N、P、K、Mg、Ca、Mn、Fe 吸收量,而 BC 处理明显增加了根系 N、K、Fe 吸收量,NN 处理则明显增加了 N、P、Fe 吸收量。在没有接种 AM 真菌条件下,与 NN 处理相比,BC + NN

处理显著提高了根系的 P、K、Mn 及 Fe 吸收量;特别地,在接种 AM 真菌条件下,与 BC + AM 处理相比,BC + AM + NN 处理皆降低了根系 N、P、K、Ca 及 Fe 的吸收量。双因素分析结果显示,AM × NN 对 N、K 吸收量分别存在显著、极显著交互作用;双因素及 3 因素分析结果显示,根系 N、P、K、Mg、Ca、Mn、Fe 吸收量皆无明显交互作用。

表 1 镉污染土壤中生物炭、AM 真菌及施氮对番茄地上部养分吸收的影响

处理	养分吸收量 (g/kg)						
	N	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe
CK	28.73 ± 9.66c	0.64 ± 0.27e	25.90 ± 7.75e	0.75 ± 0.09e	5.79 ± 0.84c	1.05 ± 0.19e	0.22 ± 0.09d
NN	112.23 ± 43.28b	1.67 ± 0.21d	89.55 ± 26.94cd	3.66 ± 0.23c	20.75 ± 5.21b	5.36 ± 0.61b	0.73 ± 0.11b
BC	118.52 ± 26.67b	2.14 ± 0.64cd	91.39 ± 19.13cd	2.37 ± 0.19d	18.82 ± 4.98b	2.37 ± 0.21d	0.39 ± 0.08cd
AM	109.54 ± 32.03b	4.75 ± 0.52b	80.87 ± 42.04cd	4.75 ± 0.64bc	33.31 ± 14.58ab	3.40 ± 0.48c	0.56 ± 0.12bc
BC + NN	120.01 ± 22.15b	3.36 ± 0.51c	140.72 ± 29.17b	5.02 ± 1.11b	23.55 ± 1.62b	6.72 ± 0.77b	0.90 ± 0.08b
AM + NN	158.66 ± 19.18b	1.68 ± 0.18d	66.48 ± 15.33d	4.75 ± 0.82bc	18.84 ± 6.18b	5.24 ± 1.18b	0.91 ± 0.13b
BC + AM	143.31 ± 8.64b	5.81 ± 0.69b	120.79 ± 12.65bc	6.34 ± 1.32b	35.48 ± 12.74ab	5.75 ± 0.81b	0.79 ± 0.07b
BC + AM + NN	261.57 ± 27.69a	7.81 ± 0.72a	238.90 ± 15.74a	14.12 ± 2.21a	56.92 ± 9.23a	13.83 ± 0.93a	2.15 ± 0.12a
AM	*	**	*	**	**	**	**
BC	*	*	**	**	**	**	**
NN	**	ns	**	**	ns	**	**
AM × BC	**	*	**	**	ns	ns	ns
AM × NN	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
BC × NN	*	*	**	*	ns	ns	ns
AM × BC × NN	**	*	**	**	*	ns	ns

注: *、** 分别表示因子对各养分含量在 0.05、0.01 水平存在显著、极显著影响作用,ns 表示无显著影响作用。表 2、表 3 同。

表 2 镉污染土壤中生物炭、AM 真菌及施氮对番茄根系养分吸收的影响

处理	养分吸收量 (g/kg)						
	N	P	K	Mg	Ca	Mn	Fe
CK	15.52 ± 3.15d	0.29 ± 0.10d	7.44 ± 1.13f	0.28 ± 0.16e	0.76 ± 0.22b	0.35 ± 0.15b	2.38 ± 0.28d
NN	22.86 ± 4.23cd	0.38 ± 0.09d	6.84 ± 0.56f	0.78 ± 0.08d	1.80 ± 1.13ab	0.64 ± 0.23b	2.69 ± 0.39d
BC	83.41 ± 9.02b	1.36 ± 0.28c	26.92 ± 5.05bc	1.15 ± 0.19c	2.18 ± 1.36a	2.80 ± 0.65a	12.99 ± 3.01b
AM	114.99 ± 20.51ab	3.34 ± 0.19a	31.56 ± 8.06b	4.46 ± 0.33a	5.77 ± 2.37a	3.17 ± 1.01a	19.78 ± 5.43b
BC + NN	35.54 ± 12.23c	0.78 ± 0.36c	11.80 ± 2.91e	0.88 ± 0.17cd	3.10 ± 1.53a	2.36 ± 0.89a	4.88 ± 0.62c
AM + NN	82.25 ± 7.09b	2.19 ± 0.23b	16.58 ± 3.85de	4.38 ± 0.24a	6.80 ± 3.88a	4.07 ± 0.86a	16.31 ± 2.47b
BC + AM	157.92 ± 36.11a	3.59 ± 0.44a	52.63 ± 3.41a	2.40 ± 0.18b	4.97 ± 1.03a	3.38 ± 0.35a	37.65 ± 5.52a
BC + AM + NN	108.12 ± 12.18ab	2.83 ± 0.35a	22.77 ± 4.92cd	2.95 ± 0.43b	4.54 ± 2.21a	3.80 ± 0.71a	18.10 ± 4.24b
AM	**	**	**	**	**	**	**
BC	*	ns	**	ns	ns	ns	*
NN	*	*	ns	ns	ns	ns	*
AM × BC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AM × NN	*	ns	**	ns	ns	ns	ns
BC × NN	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AM × BC × NN	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

2.4 生物炭、AM 真菌及氮对 Cd 浓度、生物富集及转运的影响

由图 2 可知,与未接种 AM 真菌的相关处理相比,接种 AM 真菌处理的地上部和根系中的 Cd 浓度皆有所降低。总体而言,与 CK 相比,AM、AM + NN、BC + AM、BC + AM + NN 处理的地上部和根系 Cd 浓度分别降低 28.90%、57.68%、51.89%、5.32% 和 52.61%、49.18%、88.31%、61.83%。在未接种 AM 真菌的情况下,无论是否施用生物炭,施氮均提高了地上部和根系的 Cd 浓度,与 NN、AM + NN 处理相比,BC 处理皆降低了番茄根系 Cd 浓度(图 2 -

b)。在土壤 Cd 浓度中,单一或组合施用生物炭、AM 真菌及施 N 皆显著降低了土壤 Cd 浓度,且 NN、BC、AM、BC + AM、AM + NN、BC + AM、BC + AM + NN 两两处理间均无显著差异,该 7 个处理较 CK 显著降低 11.11% ~ 21.51% (图 2 - c)。在生物富集系数 (BCF) 中,各处理呈 BC + AM < BC < AM + NN < AM < BC + AM + NN < CK < NN < BC + NN,以 BC + NN、NN 处理显著高于其他处理(图 2 - d)。在转移系数 (TF) 中,各处理表现为 AM + NN < CK < NN < AM < BC + NN < BC + AM + NN < BC < BC + AM(图 2 - e)。

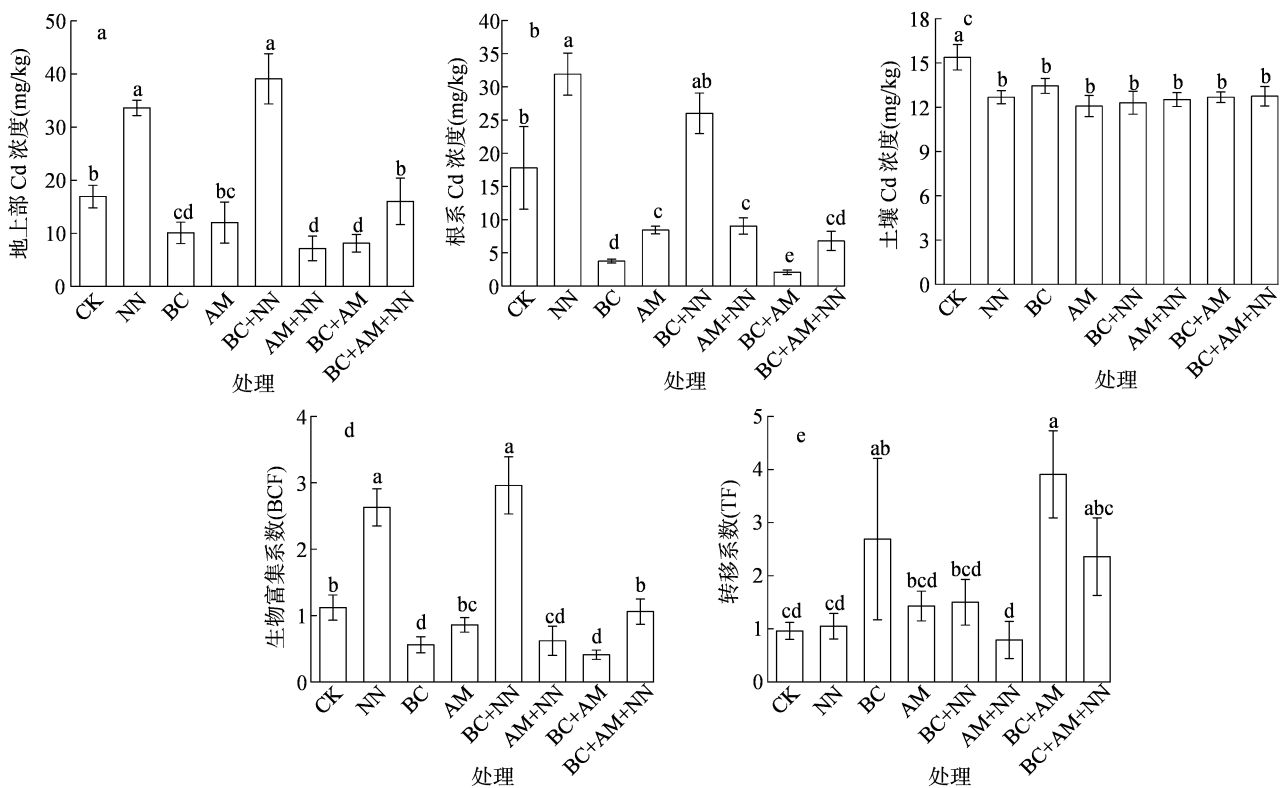


图2 镉污染土壤中生物炭、AM 真菌及施氮对番茄 Cd 累积、生物富集及转运的影响

2.5 生物炭、AM 真菌及氮对土壤性质的影响

由表 3 可知,就 pH 值而言,以 NN 处理值最低,为 6.11,与 CK 相比,其显著降低 9.48%;以 BC + AM 处理 pH 值最高,其他处理较 BC + AM 降低 1.74% ~ 11.58%,其中 BC + AM 处理除了与 BC 处理、CK 无明显差异外,皆显著高于其他处理。土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别以 NN、BC + NN 处理具有最高值,其他处理较其分别显著降低 57.69% ~ 93.65%、30.20% ~ 64.63%。在速效磷 (AP)、速效钾 (AK)、速效镁 (AMg) 及速效锰 (AMn) 含量中,皆

以 BC + N 处理存在最大值,其他处理较其分别降低 0.45% ~ 29.60%、1.76% ~ 89.99%、9.32% ~ 66.09% 及 21.74% ~ 89.45%。在速效铁 (AFe) 中,各处理呈 BC + NN < BC + AM + NN < NN < AM + NN < CK < BC < BC + AM < AM,其中 NN、BC + NN、AM + NN、BC + AM + NN 处理较 AM 处理分别显著降低 50.84%、58.43%、45.57%、54.82%。方差分析结果表明,AM × BC 在 AMn 含量、AM × NN 在 AMg 含量、BC × NN 在 AP 和 AMn 含量、AM × BC × NN 在 AK 和 AMn 含量中皆存在极显著交互作用。

表 3 生物炭、AM 真菌及施氮对番茄种植土壤性质的影响

处理	pH 值	NH ₄ ⁺ - N 含量 (mg/kg)	NO ₃ - N 含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	速效镁含量 (mg/kg)	速效锰含量 (mg/kg)	速效铁含量 (mg/kg)
CK	6.75 ± 0.07ab	43.26 ± 2.16b	13.12 ± 0.59c	23.55 ± 2.59ab	118.83 ± 10.19a	20.41 ± 0.94cd	18.27 ± 0.93d	118.21 ± 21.94abc
NN	6.11 ± 0.11d	113.01 ± 2.08a	22.93 ± 2.14b	26.24 ± 1.27a	46.51 ± 5.98b	21.57 ± 0.71c	49.86 ± 16.19c	82.35 ± 8.71d
BC	6.79 ± 0.13ab	12.55 ± 1.04d	12.21 ± 0.87cd	24.17 ± 0.97ab	140.27 ± 13.68a	31.25 ± 2.75ab	20.11 ± 4.68d	129.08 ± 14.75abc
AM	6.68 ± 0.10bc	9.06 ± 2.13de	12.47 ± 1.05cd	18.96 ± 3.02b	23.96 ± 8.31c	16.77 ± 4.32d	15.15 ± 2.10e	167.53 ± 20.32a
BC + NN	6.42 ± 0.17c	47.82 ± 4.21b	32.85 ± 2.29a	26.93 ± 1.75a	153.27 ± 28.48a	35.42 ± 5.12a	143.57 ± 6.22a	69.65 ± 7.12d
AM + NN	6.56 ± 0.07bc	26.91 ± 1.08c	11.73 ± 0.34d	26.81 ± 0.87a	15.34 ± 5.83c	12.01 ± 0.63e	66.82 ± 5.83c	91.18 ± 33.63cd
BC + AM	6.91 ± 0.09a	7.18 ± 0.55e	11.62 ± 0.58d	26.03 ± 1.11a	150.57 ± 22.42a	32.12 ± 2.42ab	20.59 ± 2.42d	140.06 ± 8.42ab
BC + AM + NN	6.73 ± 0.03b	27.04 ± 4.02c	18.02 ± 3.36b	24.89 ± 2.26a	42.16 ± 6.17b	27.99 ± 4.01b	112.36 ± 8.67b	75.69 ± 10.21d
AM	ns	**	*	ns	**	**	*	ns
BC	**	*	ns	ns	**	**	**	ns
NN	**	**	*	**	**	ns	**	**
AM × BC	**	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
AM × NN	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
BC × NN	ns	ns	ns	**	ns	ns	**	ns
AM × BC × NN	ns	ns	ns	ns	**	ns	**	ns

2.6 生物炭、AM 真菌及施氮下生长指标与土壤指标的相关性分析

由表 4 可知,土壤 pH 值与 TF, NH₄⁺ - N 含量与 BCF、地上部 Cd 浓度、根系 Cd 浓度, AMg 含量与地上部 K 含量、地上部 Mn 含量, AMn 含量与地上部 K 含量、地上部 Mn 含量、地上部 Fe 含量, AFe 含量与根系 K 含量、根系 Fe 含量皆呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系。土壤 pH 值与根系 Cd 浓度、NH₄⁺ - N 含量与番茄生理指标(根系生物量、地上部 P 含量、地上部 Ca 含量、根系 N 含量、根系 P 含量、根系 K 含量、根系 Mn 含量、根系 Fe 含量), AK 含量与根系 Mg 含量、根系 Ca 含量, AFe 含量与番茄生理指标(地上部 K 含量、地上部 Mn 含量、地上部 Cd 浓度、根系 Cd 浓度、BCF), 土壤 Cd 浓度与根系 N 含量、根系 Mg 含量皆呈显著或极显著负相关关系。

3 讨论与结论

人类行为及高地质背景导致的土壤 Cd 浓度超标已成为影响农业安全发展的制约因子,化学、物理及生物措施已被证明可有效降低土壤 Cd 浓度并减少植物 Cd 累积^[2,18]。在本研究中,AM 真菌(AM)、生物炭(BC)和氮肥(NN)单一或组合处理皆可提高番茄地上部和根系的生物量,这表明 AM 真菌、生物炭和氮肥均有利于番茄的生物量累积。在 BC、AM 和 NN 的多元组合处理中,BC + AM、

BC + NN、AM + NN 处理的地上部生物量皆大于单一处理和 CK(图 1 - b);而在根系生物量中,施氮处理皆较低,尤其是 BC + NN 处理(图 1 - c),这可能是生物炭可吸附多余氮素,减少氮损失,从而在番茄早期生长中导致根系生长减缓的缘故^[19]。此外,本研究结果表明,添加 BC 皆显著提高了 AM 真菌的定殖率(图 1 - a),这可能归因于 BC 具有较佳的孔隙结构和养分底物的有效性,可为 AM 真菌生长发育提供良好的环境^[20]。

在本研究中,与对照(CK)相比,AM、BC 和 NN 单一或组合处理皆整体提高了番茄地上部和根系的养分(N、P、K、Mg、Ca、Mn、Fe)吸收,且接种 AM 真菌条件下,地上部和根系中的 P 吸收量增加尤为明显。前人研究表明,AM 真菌是土壤中广泛存在的重要功能性微生物,AM 真菌侵染植物形成菌根共生结构后,可分泌胞外磷酸酶溶解难溶磷,从而改善宿主 P 营养^[21]。此外,接种 AM 真菌总体上提高了 N、K、Ca、Mg、Mn 和 Fe 吸收量,BC 亦提高了地上部和根系的 N、K 及 Fe 吸收量(表 1、表 2),这可能是 AM 真菌和 BC 均可促进养分矿化的结果^[22]。此外,BC 亦不同程度地改善了番茄的地上部 P、Ca、Mg 和 Mn 的积累,这些结果表明 BC 对番茄的养分吸收具有积极作用。

接种 AM 真菌显著降低了地上部和根系的 Cd 浓度(图 2 - a、图 2 - b)。前人研究表明,AM 真菌可通过介导植物 Cd 转运蛋白表达水平和土壤细菌

表 4 镉污染土壤中生物炭、AM 真菌及施氮下番茄生长指标与土壤指标的相关性分析

指标	相关系数								
	pH 值	NH ₄ ⁺ - N 含量	NO ₃ ⁻ - N 含量	AP 含量	AK 含量	AMg 含量	AMn 含量	AFe 含量	土壤 Cd 浓度
地上部生物量	-0.14	-0.33	-0.02	0.18	-0.38	0.13	0.48	-0.30	-0.60
根系生物量	0.38	-0.76*	-0.48	-0.23	-0.04	0.13	-0.24	0.52	-0.45
地上部 N 含量	-0.15	-0.44	0.02	0.25	-0.35	0.17	0.52	-0.38	-0.56
地上部 P 含量	0.39	-0.69*	0.07	-0.14	-0.08	0.37	0.27	0.06	-0.49
地上部 K 含量	0.14	-0.19	0.32	0.22	-0.04	0.90**	0.93**	-0.88**	-0.46
地上部 Mg 含量	0.04	-0.28	0.08	0.12	-0.30	0.22	0.53	-0.34	-0.45
地上部 Ca 含量	0.21	-0.69*	0.01	-0.09	-0.25	0.27	0.33	-0.07	-0.55
地上部 Mn 含量	-0.07	-0.07	0.28	0.32	-0.27	0.70*	0.70*	-0.68*	-0.45
地上部 Fe 含量	-0.12	-0.13	0.18	0.26	-0.35	0.17	0.91**	-0.53	-0.41
根系 N 含量	0.38	-0.75*	-0.48	-0.22	-0.04	0.13	-0.24	0.51	-0.76*
根系 P 含量	0.25	-0.68*	-0.45	-0.33	-0.24	-0.04	-0.19	0.49	-0.52
根系 K 含量	0.60	-0.72*	-0.44	-0.21	0.25	0.29	-0.37	0.65*	-0.32
根系 Mg 含量	-0.35	-0.53	-0.42	-0.34	-0.69*	-0.52	-0.09	0.31	-0.68*
根系 Ca 含量	-0.31	-0.53	-0.25	-0.09	-0.67*	-0.35	0.08	0.18	-0.38
根系 Mn 含量	-0.15	-0.73*	-0.22	0.01	-0.24	0.01	0.20	0.11	-0.61
根系 Fe 含量	0.45	-0.68*	-0.47	-0.09	0.06	0.14	-0.27	0.70*	-0.39
地上部 Cd 浓度	-0.15	0.75*	0.90**	0.34	0.17	0.34	0.59	-0.92**	-0.13
根系 Cd 浓度	-0.90**	0.92**	0.69*	0.30	-0.03	-0.02	0.37	-0.89**	0.04
BCF	-0.24	0.78*	0.89**	0.35	0.08	0.25	0.59	-0.88**	-0.18
TF	0.76*	-0.53	-0.21	0.08	0.54	0.68*	-0.15	0.32	-0.15

注：*、** 分别表示指标间在 0.05、0.01 水平存在显著、极显著相关性。

群落结构影响植物对 Cd 的吸收^[23]。在 Cd 污染土壤中,AM 真菌菌丝和菌丝分泌的球囊霉素蛋白皆可吸收或螯合土壤 Cd²⁺,以减少土壤游离的 Cd²⁺数量^[7,24]。接种 AM 真菌增加了地上部和根系的生物量,AM 真菌可能通过间接提高生物量从而稀释生物体的 Cd 浓度。在接种 AM 真菌前提下,BC 进一步降低了根系 Cd 浓度(图 2-b)。前人研究表明,BC 具有优良的阳离子交换性能和表面官能团,可以有效沉淀 Cd²⁺形成化合物^[25],这可能是根系 Cd 浓度降低的另一因素。此外,在污染土壤中 BC 可提高 pH 值,由此可降低土壤 Cd 的有效性。

生物富集系数(BCF)是评价植物富集重金属能力的重要指标,可以反映土壤-植物体系中重金属由土壤向植物体迁移的难易程度^[17,26]。与 CK 相比,施氮降低了土壤 Cd 浓度,增加了番茄地上部和根系的 Cd 浓度,且 BCF 具有较大值。前人研究表明,由于 NO₃⁻与 Cd²⁺共用转运蛋白,当土壤 N 含量较高时,可间接促进植物对 Cd 的吸收^[11];NN 处理下土壤 NO₃⁻-N 含量较高,且 NO₃⁻-N 含量与地上部 Cd 浓度、根系 Cd 浓度呈显著或极显著正相关关

系,这可能是 BCF 增加的原因之一。相比于 NN 处理,BC + NN 处理中 BCF 更高,而 BC + AM + NN 处理下 BCF 显著降低(图 2-d),表明 AM 真菌对 Cd 富集具有抑制作用。这与前人研究结论基本一致:AM 真菌可通过菌丝作用及分泌物作用降低土壤 Cd 浓度,从而抑制 Cd 进入宿主体内^[8,27]。

土壤 pH 值是影响土壤 Cd 溶解度及植物吸收 Cd 的重要因素,当土壤 pH 值较低时,土壤 Cd 有效态急剧增加,增加植物 Cd 吸收量^[28-29]。施氮降低了土壤 pH 值,且 pH 值与根系 Cd 浓度呈极显著负相关关系(表 4)。本研究施用氮肥为 NH₄Cl,由于 NH₄⁺可以水解释放 H⁺以降低土壤 pH 值^[30],且 NH₄⁺与 Cd²⁺竞争土壤吸附位点,从而双重增加土壤游离 Cd²⁺数量。本研究进一步表明,与 CK 相比,接种 AM 真菌配施生物炭(BC + AM)处理降低了地上部 Cd 浓度、根系 Cd 浓度,增加地上部生物量,因此 Cd 浓度降低可能是生物量增加所产生的稀释效应^[11,31-32]。综上,BC、AM 和 NN 单一或组合处理皆可提高番茄生长、养分吸收及部分土壤性质,但单一施氮可导致土壤酸化从而影响番茄积累更多

的Cd。因此,在中低浓度Cd污染土壤中,氮肥不宜单独施用,需与AM真菌、BC配合施用。

参考文献:

- [1] 孙斌,魏志敏,张力浩,等. 地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异[J]. 土壤学报,2021,58(5):1246-1255.
- [2] Zhou X G, Zhang X H, Ma C L, et al. Biochar amendment reduces cadmium uptake by stimulating cadmium-resistant PGPR in tomato rhizosphere[J]. Chemosphere,2022,307(Pt 4):136138.
- [3] 张星雨,叶志彪,张余洋. 植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展[J]. 植物生理学报,2021,57(7):1437-1450.
- [4] 李海珀,水清明,贾莉. 氮肥减量配施生物炭对玉米根系生理及氮素去向的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(21):102-109.
- [5] Liang M, Lu L, He H, et al. Applications of biochar and modified biochar in heavy metal contaminated soil: a descriptive review[J]. Sustainability,2021,13(24):14041.
- [6] 吴伟健,陈艺杰,李高洋,等. 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制[J]. 农业环境科学学报,2022,41(3):492-503.
- [7] 曹本福,姜海霞,陆引罡,等. 烟草与丛枝菌根真菌的共生效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2021(1):327-338.
- [8] 孙红,郑玉龙,林炎丽,等. 生物炭、磷及AMF对Cd胁迫下柳枝稷生长及土壤性质的影响[J]. 草业学报,2021,30(12):71-80.
- [9] 柴冠群,张秀锦,张容慧,等. 生物炭与不同形态氮肥配施对辣椒产量、品质及镉吸收的影响[J]. 园艺学报,2023,50(3):549-558.
- [10] 潘维,徐茜茹,卢琪,等. 不同氮形态对镉胁迫下小白菜生长及镉含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):973-982.
- [11] Yang Y J, Xiong J, Tao L X, et al. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review [J]. Science of the Total Environment, 2020, 708:135186.
- [12] 杨怡森,袁小会,廖国婷,等. 菌根共生条件下施加生物炭对玉米根系及生长的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):90-94.
- [13] Song D L, Chen L, Zhang S, et al. Combined biochar and nitrogen fertilizer change soil enzyme and microbial activities in a 2-year field trial[J]. European Journal of Soil Biology,2020,99:103212.
- [14] Liu X W, Wang X H, Xu T Y, et al. The combined application of γ -PGA-producing bacteria and biochar reduced the content of heavy metals and improved the quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(59):88938-88950.
- [15] 刘晓迪,冯曾威,朱红惠,等. 脱落酸对丛枝菌根真菌侵染和产孢的调控效应研究[J]. 微生物学报,2021,61(4):935-945.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 赖秋羽,魏树和,代惠萍,等. 番茄光合荧光特性及其镉吸收对土壤镉污染的响应[J]. 中国环境科学,2019,39(11):4737-4742.
- [18] 刘鸿雁,涂宇,顾小凤,等. 地球化学高背景农田土壤重金属镉的累积效应及环境影响[J]. 山地农业生物学报,2018,37(5):1-5.
- [19] 申书伟,张丹丹,王敏鸽,等. 木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响[J]. 环境科学,2022,43(5):2779-2787.
- [20] 普东伟,邱亮,周巧红,等. 生物炭与丛枝菌根真菌联用对镉固化效果研究[J]. 环境科学与技术,2023,46(1):56-64.
- [21] 侯殿明. 丛枝菌根真菌对盐渍土辣椒生长、生理代谢及土壤无机磷组分的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(15):101-107.
- [22] 邝曦芝,邓伟明,唐乐乐,等. 不同磷水平配施生物炭对土壤磷有效性和大豆磷吸收的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(7):1911-1918.
- [23] 刘琛,林义成,郭彬,等. 丛枝菌根真菌通过改变植物基因表达水平和微生物群落结构促进红叶石楠对镉的吸收[J]. 生物工程学报,2022,38(1):287-302.
- [24] 苏琳,曹力,张金秀,等. 丛枝菌根真菌对溶解态和胶体态Cd淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(8):1741-1747.
- [25] 罗盼军,马倩倩,武均,等. 生物炭与叶面硒肥联合施用对生菜吸收镉及土壤镉形态的影响[J]. 土壤通报,2022,53(4):956-964.
- [26] 俞明宏,王力明,刘继,等. 表油菜素内酯对镉胁迫下番茄幼苗生长及镉累积的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(3):151-156.
- [27] 王磊,吴子龙,张浩,等. 丛枝菌根真菌促进植物抗重金属镉的研究进展[J]. 北方园艺,2021(1):137-142.
- [28] 易蔓,韦慧琴,胡梦坤,等. 氮素形态对烟草根际镉的有效性及其吸收的影响[J]. 环境工程学报,2016,10(2):941-947.
- [29] 杨金康,杨秋云,朱利楠,等. 不同改良剂在石灰性潮土上对土壤-小麦体系镉的吸收转运的影响[J]. 中国水土保持科学,2021,19(4):96-102.
- [30] Cheng Y R, Wang C, Chai S Y, et al. Ammonium N influences the uptakes, translocations, subcellular distributions and chemical forms of Cd and Zn to mediate the Cd/Zn interactions in dwarf Polish wheat (*Triticum polonicum* L.) seedlings [J]. Chemosphere, 2018, 193:1164-1171.
- [31] Cheng Y R, Bao Y J, Chen X, et al. Different nitrogen forms differentially affect Cd uptake and accumulation in dwarf Polish wheat (*Triticum polonicum* L.) seedlings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400:123209.
- [32] 安婷婷,黄帝,王浩,等. 植物响应镉胁迫的生理生化机制研究进展[J]. 植物学报,2021,56(3):347-362.