

引用格式:

王茜, 鲍欣蕾, 邓群仙, 王羊, 李雷, 林立金. 混种少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗生长及镉含量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 429–436.

WANG X, BAO X L, DENG Q X, WANG Y, LI L, LIN L J. Effects of intercropping with post-grafting generation of two ecotypes of *Solanum photeinocarpum* on the growth and cadmium content of *Ziziphus acidojujuba*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(4): 429–436.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



混种少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗生长及镉含量的影响

王茜¹, 鲍欣蕾¹, 邓群仙^{1*}, 王羊¹, 李雷^{1,2}, 林立金³

(1.四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130; 2.达州市茶果技术推广站, 四川 达州 635000; 3.四川农业大学果蔬研究所, 四川 成都 611130)

摘要:在镉(5 mg/kg)污染条件下进行盆栽试验,研究混种农田生态型和矿山生态型少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗生长及镉含量的影响。结果表明:与单种酸枣幼苗相比,混种降低了酸枣幼苗的生物量、株高、可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性,其中混种少花龙葵农田本砧嫁接后代的酸枣幼苗生物量降幅最小,根系生物量降低了25.51%,其可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性降幅最大,可溶性蛋白含量降低了20.65%,SOD活性降低了20.59%,POD活性降低了35.91%,CAT活性降低了28.16%;混种还降低了酸枣幼苗镉含量、土壤有效态镉含量及土壤过氧化氢酶的活性,其中混种农田本砧的表现最佳,显著降低了酸枣幼苗根系镉含量和土壤有效态镉含量,分别降低了29.60%和16.25%;混种提高了土壤脲酶和蔗糖酶的活性。农田本砧与农田未嫁接相比,根系、地上部生物量分别提高了55.84%、49.23%,镉含量分别提高了31.68%、45.27%,镉积累量分别提高了69.77%、72.18%。农田本砧显著降低了酸枣幼苗根系镉含量、地上部镉含量和土壤有效态镉含量;嫁接提高了少花龙葵对镉的富集能力,少花龙葵本砧嫁接后代富镉能力更强。在镉污染条件下,少花龙葵嫁接后代与酸枣幼苗混种,对酸枣镉污染的修复有明显作用,其中混种农田生态型少花龙葵本砧嫁接后代的效果更好。

关键词:少花龙葵;酸枣;镉污染;混种;生物量

中图分类号: S665.104⁺.6

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)04-0429-08

Effects of intercropping with post-grafting generation of two ecotypes of *Solanum photeinocarpum* on the growth and cadmium content of *Ziziphus acidojujuba*

WANG Xi¹, BAO Xinlei¹, DENG Qunxian^{1*}, WANG Yang¹, LI Lei^{1,2}, LIN Lijin³

(1.College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2.Tea and Fruit Technology Extension Station of Dazhou, Dazhou, Sichuan 635000, China; 3.Institute of Pomology and Olericulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to study the effects of two ecotypes(farmland and mine) of *Solanum photeinocarpum* post-grafting generation on the growth and cadmium(Cd) content of *Ziziphus acidojujuba* seedlings under Cd contaminated condition(5 mg/kg). The results showed that compared to single cropping intercropping decreased the biomass, plant height, soluble protein content and antioxidant enzyme activity of *Z. acidojujuba* seedlings. Under intercropping with self-anvilgeneration of farmland ecotype *S. photeinocarpum*, the decrease of biomass of *Z.*

收稿日期: 2020-09-05

修回日期: 2021-03-09

基金项目: 四川省科学技术厅科技富民强县专项行动计划项目(2012—2014); 四川农业大学“双支计划”基金项目(03572783); 德阳市科技局重点科学技术研究项目(2018CKJ018)

作者简介: 王茜(1995—), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要从事果树栽培理论与技术研究, 1030706674@qq.com; *通信作者, 邓群仙, 博士, 教授, 主要从事果树栽培理论与技术研究, 1324856299@qq.com

acidojuba seedlings was the least and root biomass decreased by 25.51%; the decrease of soluble protein content and antioxidant enzyme activity of *Z. acidojuba* seedlings was the biggest: soluble protein content decreased by 20.65%, SOD activity decreased by 20.59%, POD activity decreased by 35.91% and CAT activity decreased by 28.16%. Intercropping also reduced the Cd contents in *Z. acidojuba* seedlings, reduced the available Cd content and the catalase activity in soil. Intercropping with farmland ecotype *S. photeinocarpum* self-anvilgeneration significantly reduced the Cd content in roots, shoots part in *Z. acidojuba* seedlings by 29.60%, and significantly reduced the available Cd content in soil by 16.25%. At the same time, intercropping increased the activity of soil urease and invertase activity. The self-anvilgeneration of farmland ecotype *S. photeinocarpum* significantly reduced the Cd content in roots, shoots part in *Z. acidojuba* seedlings and significantly reduced the available Cd content in soil. Grafting increased the Cd enrichment ability of *S. photeinocarpum*, and self-anvilgeneration of *S. photeinocarpum* showed the better enrichment effect. Compared to the un-grafting generation, biomass in root and above ground part of self-anvilgeneration of farmland ecotype *S. photeinocarpum* increased by 55.84% and 49.23%, respectively; while Cd content increased by 31.68% and 45.27%, respectively, and Cd accumulation content increased by 69.77% and 72.18%, respectively. Therefore, under the condition of Cd contamination, intercropping the post-grafting generation of two ecotypes of *S. photeinocarpum* with *Z. acidojuba* had a significant effect on remediation of cadmium, and the self-anvilgeneration of farmland ecotype *S. photeinocarpum* was the best.

Keywords: *Solanum photeinocarpum*; *Ziziphus acidojuba*; cadmium pollution; intercropping; biomass

由于化学肥料的大量使用、污水灌溉和大气沉积,导致农业土壤污染日趋严重。据报道,中国镉污染土地面积约为 1.3 万 hm^2 ^[1]。部分地区果园土壤受到镉污染,陕西渭北苹果园土壤镉含量达 0.055 mg/kg ^[2];湖南省猕猴桃果园土壤中的重度镉污染占比 10.52%^[3],果园土壤镉污染亟待修复。

混种是一种广泛使用的农作物种植方式,即在同一块土地上种植多种不同的农作物,以提高产量并抑制病虫害的发生。已有的研究表明,大豆和玉米混种,2种作物对营养元素的吸收得到增强^[4];苹果园内行间种草可提高果树叶片的光合效率、蒸腾效率和水分利用率^[5]。作物混种除了种间促进作用之外,可能表现出种间的抑制作用或种间作用互不影响。徐海强等^[6]将木薯与花生间作,在木薯块根形成期,木薯生物量降低;马迎杰等^[7]将小茴香、分蘖洋葱分别与甜瓜混种,对甜瓜单果重无明显影响。在重金属污染或胁迫条件下,超富集植物、富集植物与普通植物不同的混种组合的作用也有差异,如鬼针草混种蕹菜能够提高蕹菜的光合色素含量和生物量,并降低其 Cd 含量^[8];但 3 种鬼针草属 Cd 超富集植物与酸枣幼苗混种,却增加了酸枣幼苗的 Cd 含量^[9];矿景天混种苋菜后,对两者 Cd 积累无显著影响^[10]。这些研究表明,要提高土壤重金属污染修复效率,关键在于寻找合适的超富集植物以及筛选富集植物与普通植物的适宜搭配。少花龙葵(*Solanum photeinocarpum*)虽是农田杂草,但它是 Cd 的潜在超富集植物^[11],因而可在镉污染

土壤的修复中合理利用。矿山生态型少花龙葵,植株矮小,茎秆粗壮,但镉含量高,而农田生态型反之^[12]。HUANG 等^[13]将 2 种生态型少花龙葵进行嫁接,提高了其生物量、抗氧化酶活性及 Cd 含量。

酸枣(*Ziziphus acidojuba*)根系发达,抗寒、抗旱及抗贫瘠能力强,常作为栽培枣嫁接繁殖的主要砧木。酸枣受到 Cd^{2+} 毒害已有报道,因 Cd^{2+} 胁迫而出现严重出苗不齐、幼苗长势减弱、幼龄树死亡等情况^[1,14]。笔者将农田生态型和矿山生态型少花龙葵嫁接后代与酸枣幼苗混种,测定酸枣幼苗生理生化特性及 Cd 含量,以期筛选出降低酸枣 Cd 含量的少花龙葵嫁接后代,为果树安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

酸枣种子购买于河北省邢台市。于四川省汉源县唐家乡铅锌矿区和四川农业大学雅安校区农场农田,分别收集矿山生态型和农田生态型少花龙葵种子,采用不同砧木对少花龙葵进行嫁接,收集少花龙葵嫁接后代的第一代种子。

试验用土为沙壤土,取自四川农业大学成都校区周边(N30°42'、E103°51')无污染的农田。土壤基本理化性质:pH 6.29、Cd 全量 0.10 mg/kg 、有效态 Cd 含量 0.028 mg/kg 、有机质 21.16 g/kg 、碱解氮 68.12 mg/kg 、全氮 1.09 g/kg 、全磷 1.20 g/kg 、全钾 22.00 g/kg 、速效磷 16.22 mg/kg 、速效钾 156.20 mg/kg 。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

将供试土壤风干、压碎除杂后向其中加入 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液,充分混匀,使土壤 Cd 含量为 5 mg/kg(参照 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》设定),放置在通风避雨处平衡 1 个月后,再次混匀,装入高 230 mm、直径 210 mm 的花盆,每盆 2.5 kg。

选取大小均一、饱满的酸枣及少花龙葵嫁接后代种子,浸种、消毒后穴盘育苗,育苗期间保持基质相对湿度为河沙最大持水量的 50%~55%。待酸枣幼苗长出 8 片真叶后、少花龙葵幼苗有 2~3 片真叶展开时移栽至花盆中,进行混种试验。花盆置于透明遮雨棚内,不定期浇水,以确保土壤水分保持在田间持水量的 80%左右。

共设置 7 个处理:单种酸枣幼苗;酸枣幼苗混种未嫁接农田生态型少花龙葵;酸枣幼苗混种未嫁接矿山生态型少花龙葵;酸枣幼苗混种农田生态型少花龙葵本砧嫁接后代(混农田本砧);酸枣幼苗混种矿山生态型少花龙葵本砧嫁接后代(混矿山本砧);酸枣幼苗混种农田生态型少花龙葵作接穗、矿山型少花龙葵作砧木的嫁接后代(混矿砧农穗);酸枣幼苗混种矿山型少花龙葵作接穗、农田生态型少花龙葵做砧木的嫁接后代(混农砧矿穗)。单种酸枣幼苗每盆种植 4 株;混种每盆种植少花龙葵 1 株、酸枣幼苗 3 株,均匀随机混种。每个处理 2 盆,每个处理重复 3 次。

1.2.2 测定项目及方法

混种 2 个月后,取酸枣叶片,测定光合色素、可溶性蛋白含量及抗氧化酶(超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT))的活

性^[15]。酸枣幼苗和少花龙葵植株整株收获后,测量酸枣幼苗株高,随后剪下酸枣幼苗和少花龙葵植株的根、茎和叶片,于 110 °C 杀青 15 min,75 °C 烘干至恒重,称重,粉碎,过 0.15 mm 孔径筛。称取 1.000 g 植物样品,加入硝酸-高氯酸消化(体积比为 4:1)放置 12 h 后消化至溶液透明,过滤,定容至 50 mL,用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪测定 Cd 含量^[16]。

将盆栽试验的土壤自然风干并粉碎过 1.00 mm 孔径筛,用原子吸收法^[17]测定土壤有效态 Cd 的含量;按照文献[18],采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性;采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性;采用 KMnO_4 滴定法测定土壤过氧化氢酶活性。

1.3 数据处理

依据文献[19],计算酸枣幼苗根冠比;依据文献[20],计算镉的转运系数及镉积累量。采用 Excel 2010 进行数据处理;用 SPSS 进行统计分析,使用 Duncan 新复极差法比较处理的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 混种少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗生长性状的影响

由表 1 可以看出,Cd 污染下,混种显著降低了酸枣幼苗的各器官生物量及株高,提高了根冠比。与单种酸枣相比,混种后酸枣幼苗根系生物量依次降低了 26.65%、26.71%、25.51%、25.63%、30.48% 和 30.98%,地上部生物量分别降低了 33.30%、34.91%、26.87%、29.62%、36.66% 和 41.78%,其中农田本砧的降幅最小,农砧矿穗的降幅最大。混种后酸枣幼苗根冠比增高是由于地上部生物量的降幅大于根系的,农砧矿穗的根冠比最大为 2.63。说明混种处理酸枣幼苗的生长受到抑制。

表 1 混种少花龙葵嫁接后代的酸枣幼苗的生长性状

Table 1 Growth traits of *Z. acidojuba* seedlings under intercropping with *S. photeinocarpum*

混种方式	根系质量/mg	茎质量/mg	叶片质量/mg	株高/cm	根冠比
酸枣(单种)	(432.85±14.19)a	(98.25±3.49)a	(97.73±6.51)a	(13.10±0.17)a	2.21
酸枣+农田未嫁接	(317.50±32.23)b	(62.22±4.26)bc	(64.51±3.44)bc	(11.13±0.84)b	2.46
酸枣+矿山未嫁接	(317.24±15.60)b	(63.84±4.86)bc	(63.72±3.29)bc	(10.87±0.10)b	2.50
酸枣+农田本砧	(322.41±12.82)b	(71.26±0.34)b	(72.07±1.19)b	(11.57±0.50)b	2.25
酸枣+矿山本砧	(321.89±5.23)b	(70.03±1.89)bc	(67.91±0.89)bc	(11.41±0.80)b	2.33
酸枣+矿砧农穗	(300.91±7.19)b	(62.44±2.04)bc	(61.70±1.77)bc	(10.74±0.22)b	2.43
酸枣+农砧矿穗	(298.76±17.98)b	(60.03±1.30)c	(54.07±9.91)c	(9.58±0.35)c	2.63

不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 混种少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗叶片光合色素含量的影响

由表2可以看出,Cd污染下,与单种酸枣相比,除混种农田本砧、农砧矿穗降低了酸枣幼苗叶片叶绿素a含量外,其他混种方式均提高了酸枣的叶绿素a含量;所有混种方式都提高了酸枣的叶绿素b含量,其中混种矿山本砧的酸枣叶绿素b含量最高(0.65 mg/g);混种农砧矿穗的酸枣叶绿素总量低于单种酸枣的,其余处理均有所提高,其中混种矿山

本砧酸枣的叶绿素总量最高(2.78 mg/g)。混种降低了叶绿素a与叶绿素b比值和类胡萝卜素含量,其中混种农田本砧的酸枣叶绿素a/叶绿素b比值和类胡萝卜素含量最低,分别较单种酸枣的低37.04%和23.53%,叶绿素a与叶绿素b比值的降低表明叶绿素b的增幅大于叶绿素a的。总体来说,混种少花龙葵嫁接后代提高了酸枣幼苗叶片叶绿素含量,降低了类胡萝卜素含量。

表2 混种少花龙葵嫁接后代的酸枣幼苗的叶片光合色素含量

混种方式	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/叶绿素 b	类胡萝卜素/(mg·g ⁻¹)
酸枣(单种)	(1.88±0.00)b	(0.41±0.12)b	(4.59±1.05)a	(0.51±0.07)a
酸枣+农田未嫁接	(1.91±0.02)ab	(0.56±0.17)ab	(2.94±0.94)c	(0.45±0.04)bc
酸枣+矿山未嫁接	(2.02±0.19)ab	(0.46±0.08)ab	(4.39±1.17)ab	(0.44±0.02)bc
酸枣+农田本砧	(1.79±0.08)bc	(0.62±0.01)a	(2.89±0.78)c	(0.50±0.02)ab
酸枣+矿山本砧	(2.13±0.21)a	(0.65±0.06)a	(3.28±0.98)b	(0.49±0.01)ab
酸枣+矿砧农穗	(1.99±0.41)ab	(0.60±0.02)a	(3.32±1.03)b	(0.43±0.01)bc
酸枣+农砧矿穗	(1.59±0.17)c	(0.51±0.13)ab	(3.12±0.68)bc	(0.39±0.01)c

不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 混种少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗叶片可溶性蛋白含量和抗氧化酶活性的影响

由表3可知,Cd污染下,混种少花龙葵的酸枣幼苗叶片抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量均低于单种酸枣的。混种少花龙葵本砧嫁接后代的酸枣的

各项指标低于其他处理,其中混种农田本砧的最低,与单种酸枣相比,其可溶性蛋白含量降低了20.65%,SOD活性降低了20.59%,POD活性降低了35.91%,CAT活性降低了28.16%。

表3 混种少花龙葵嫁接后代的酸枣幼苗叶片可溶性蛋白含量和抗氧化酶活性

混种方式	可溶性蛋白含量/(mg·g ⁻¹)	SOD活性/(U·g ⁻¹)	POD活性/(U·g ⁻¹)	CAT活性/(mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹)
酸枣(单种)	(0.92 ± 0.01)a	(162.43 ± 0.81)a	(796.80 ± 17.36)a	(15.41 ± 0.18)a
酸枣+农田未嫁接	(0.76 ± 0.04)cd	(141.48 ± 2.68)d	(649.60 ± 18.20)b	(12.06 ± 0.70)c
酸枣+矿山未嫁接	(0.81 ± 0.04)bcd	(146.37 ± 0.31)c	(656.22 ± 8.99)b	(13.42 ± 0.38)b
酸枣+农田本砧	(0.73 ± 0.02)d	(128.98 ± 1.73)e	(510.63 ± 1.41)c	(11.07 ± 0.29)c
酸枣+矿山本砧	(0.75 ± 0.05)cd	(137.46 ± 0.66)d	(638.49 ± 100.11)b	(11.71 ± 0.59)c
酸枣+矿砧农穗	(0.83 ± 0.07)bc	(147.00 ± 5.86)c	(732.33 ± 23.26)ab	(13.55 ± 1.26)b
酸枣+农砧矿穗	(0.87 ± 0.03)ab	(156.22 ± 0.74)b	(757.22 ± 29.83)ab	(14.19 ± 0.58)b

不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 混种少花龙葵嫁接后代对酸枣幼苗Cd含量的影响

由表4可以看出,Cd污染下,混种少花龙葵的酸枣幼苗Cd含量均低于单种酸枣的。其中,混种少花龙葵本砧嫁接后代的酸枣幼苗对Cd的吸收最

少,混农田本砧处理的酸枣幼苗各器官的Cd含量最低,分别较单种酸枣的降低了29.60%、6.67%、20.54%、13.15%。混农田本砧的酸枣镉转运系数为0.85,为所有处理中最高,表明其地上部Cd含量降低幅度大于根系的。

表 4 混种少花龙葵嫁接后代的酸枣幼苗镉含量

混种方式	根系 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)	茎秆 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)	叶片 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)	镉转运系数
酸枣(单种)	(11.92 ± 0.05)a	8.77 ± 0.20	(7.63 ± 0.27)a	0.69
酸枣+农田未嫁接	(10.94 ± 0.48)b	8.30 ± 0.42	(6.69 ± 0.14)c	0.69
酸枣+矿山未嫁接	(11.57 ± 0.01)a	8.31 ± 0.11	(6.86 ± 0.31)ab	0.66
酸枣+农田本砧	(8.39 ± 0.24)c	8.19 ± 0.84	(6.07 ± 0.10)d	0.85
酸枣+矿山本砧	(10.54 ± 0.41)b	8.26 ± 0.48	(6.47 ± 0.30)cd	0.70
酸枣+矿砧农穗	(11.59 ± 0.06)a	8.46 ± 0.02	(7.24 ± 0.22)ab	0.68
酸枣+农砧矿穗	(11.61 ± 0.07)a	8.55 ± 0.06	(7.36 ± 0.39)a	0.69

不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.5 混种后少花龙葵嫁接后代的生物量及 Cd 含量

由表 5 可知,在 Cd 污染下,少花龙葵根系和地上部分的生物量、Cd 含量和 Cd 积累量从高到低的依次为农田本砧、矿山本砧、矿砧农穗、农砧矿穗、农田未嫁接、矿山未嫁接。与农田未嫁接相比,农田本砧嫁接后代的根系、地上部生物量分别提高了 55.84%、49.23%,根系、地上部 Cd 含量分别提

高了 31.68%、45.27%,根系、地上部 Cd 积累量分别提高了 69.77%、72.18%;与矿山未嫁接相比,矿山本砧根系、地上部生物量分别提高了 33.87%、44.47%,根系、地上部 Cd 含量分别提高了 36.72%、28.13%,根系、地上部 Cd 积累量分别提高了 58.08%、60.32%,农田本砧在所有嫁接后代中富 Cd 能力最强。

表 5 混种后少花龙葵嫁接后代的生物量及镉含量

龙葵种植方式	根系质量/g	地上部质量/g	根系 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)	地上部 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)	根系 Cd 积累量/ μg	地上部 Cd 积累量/ μg
农田未嫁接	(1.74 ± 0.32)b	(7.62 ± 0.06)c	(21.65 ± 0.37)d	(26.83 ± 0.38)de	(37.77 ± 4.13)cd	(204.46 ± 1.03)d
矿山未嫁接	(1.64 ± 0.22)b	(6.58 ± 1.08)c	(17.37 ± 0.50)e	(25.80 ± 0.98)e	(28.55 ± 2.61)d	(168.96 ± 12.40)d
农田本砧	(3.94 ± 0.85)a	(15.01 ± 2.37)a	(31.69 ± 0.24)a	(49.02 ± 0.68)a	(124.94 ± 15.33)a	(734.81 ± 61.21)a
矿山本砧	(2.48 ± 0.18)b	(11.85 ± 0.96)b	(27.45 ± 0.51)b	(35.90 ± 1.04)b	(68.10 ± 3.15)b	(425.81 ± 26.47)b
矿砧农穗	(2.04 ± 0.66)b	(14.25 ± 0.34)a	(27.11 ± 0.47)b	(28.52 ± 0.26)c	(55.19 ± 10.26)bc	(406.58 ± 7.64)b
农砧矿穗	(1.93 ± 0.21)b	(10.95 ± 0.29)b	(24.37 ± 0.55)c	(27.11 ± 0.35)d	(46.97 ± 3.34)bcd	(296.99 ± 5.65)c

不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.6 混种少花龙葵对土壤有效态 Cd 含量和酶活性的影响

由表 6 可以看出,混种后土壤有效态 Cd 含量降低,各混种方式较单种酸枣分别降低了 7.86%、7.31%、16.26%、7.86%、6.75%及 15.00%,其中混农田本砧降幅最大。土壤脲酶、蔗糖酶活性变化与

土壤有效态 Cd 含量相反。混种提高了它们的活性,与单种酸枣相比,混农田本砧使土壤脲酶活性提高了 43.75%,蔗糖酶活性提高了 59.50%。土壤过氧化氢酶活性与土壤有效态 Cd 变化一致,与单种酸枣相比,混农田本砧使土壤过氧化氢酶活性降低了 26.92%。

表 6 混种少花龙葵嫁接后代的土壤有效态镉含量和土壤酶活性

混种方式	脲酶活性/(U·g ⁻¹)	蔗糖酶活性/(U·g ⁻¹)	过氧化氢酶活性/(U·g ⁻¹)	有效态 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)
酸枣(单种)	(0.32 ± 0.01)c	(16.69 ± 0.50)f	(0.78 ± 0.04)a	(3.69 ± 0.28)a
酸枣+农田未嫁接	(0.39 ± 0.03)abc	(23.91 ± 1.19)bc	(0.63 ± 0.03)b	(3.40 ± 0.18)a
酸枣+矿山未嫁接	(0.36 ± 0.01)bc	(21.56 ± 0.88)de	(0.65 ± 0.01)b	(3.42 ± 0.04)a
酸枣+农田本砧	(0.46 ± 0.13)a	(26.62 ± 3.13)a	(0.57 ± 0.00)c	(3.09 ± 0.27)b
酸枣+矿山本砧	(0.45 ± 0.02)ab	(24.69 ± 0.29)ab	(0.59 ± 0.01)c	(3.40 ± 0.05)a
酸枣+矿砧农穗	(0.35 ± 0.03)bc	(19.53 ± 1.35)de	(0.65 ± 0.02)b	(3.44 ± 0.11)a
酸枣+农砧矿穗	(0.34 ± 0.02)c	(179.97 ± 0.12)ef	(0.66 ± 0.01)b	(3.54 ± 0.03)a

不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

本试验中,混种少花龙葵嫁接后代后的酸枣幼苗各器官的生物量和株高均较单种酸枣幼苗的降低,混种植物之间的竞争作用大于促进作用,表现出间作劣势,这与在樱桃^[21]、葡萄^[22]上的研究结果相似。出现间作劣势的原因,一方面可能因为混种时植物间的“他感作用”,根系分泌物会对周围植物的生长发育产生影响;另一方面,在重金属胁迫下,植物为了维持正常生理状态,可能产生了相互间对土壤养分的竞争,少花龙葵属于草本植物,其生长速度及生存竞争力均高于酸枣的。混种后酸枣幼苗叶片类胡萝卜素含量降低,是因为少花龙葵长势茂盛,对酸枣幼苗形成遮蔽,使酸枣幼苗处于弱光环境。有研究表明,在低温、弱光下,类胡萝卜素含量会降低^[23],这与任纬等^[24]将红蓼及千里光与水果玉米幼苗混种的研究结果一致。

本研究结果表明,混种后酸枣幼苗的根系、地上部和整株 Cd 含量均低于单种酸枣幼苗的,混种后酸枣幼苗对 Cd 的吸收减少,这与 TANG 等^[25]在茄子上的研究结果一致;然而当 2 种植物根系相互接近或接触时,植物产生的“根际对话”现象既能促进、也可能抑制植物生长。少花龙葵作为草本植物,对于生长空间、水分和养分的竞争力大于酸枣幼苗,因此,即使混种减少了 Cd 对酸枣幼苗的毒害作用,但酸枣幼苗的生长仍然受到抑制,因此其生物量降低。

正常情况下,SOD、POD 和 CAT 三者共同作用使细胞内的活性氧保持在较低水平,而在胁迫条件下,由于活性氧数量的增加,诱导 SOD 活性增强,启动抗氧化酶系统对胁迫造成的活性氧积累作出积极反应。从这一方面讲,SOD、POD 和 CAT 三者活性增加,既是一种保护机制,也表明了植物已受到胁迫^[26]。本试验中,混种的酸枣幼苗 Cd 含量低于单种酸枣幼苗,即受到的 Cd 毒害作用更小,所需抵抗 Cd 的毒害作用的抗性物质更少,因此,混种的酸枣幼苗叶片的可溶性蛋白含量、SOD、POD 和 CAT 活性均较低。胡容平等^[27]将茄子与龙葵混种后,其根系及地上部可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性降低;黄佳璟等^[22]将葡萄幼苗与金盏银盘混种,其 CAT 活性降低。农田本砷的酸枣幼苗 Cd 含量最低,受到的

Cd 毒害程度较低,其可溶性蛋白和抗氧化酶生成也更少。

王巧红等^[28]研究发现,土壤脲酶和蔗糖酶对 Cd 十分敏感,随着土壤 Cd 污染程度的增加,土壤脲酶和蔗糖酶活性都受到了不同程度的抑制。本试验中,混种后土壤脲酶和蔗糖酶活性都高于幼苗单种酸枣,土壤过氧化氢酶活性的变化则与脲酶、蔗糖酶相反,混种后土壤过氧化氢酶活性低于酸枣幼苗单种。土壤中的 Cd 含量与土壤过氧化氢酶活性呈负相关,当镉含量小于 10 mg/g 时表现为激活作用,当 Cd 含量达到 50 mg/g 时表现为抑制作用^[29]。本试验中土壤的有效态 Cd 含量都低于 10 mg/g,因此混种后土壤过氧化氢酶活性都显著低于酸枣幼苗单种。

从各处理吸附 Cd 的能力来看,混种未嫁接少花龙葵的酸枣幼苗 Cd 含量、土壤有效态 Cd 含量低于异砷嫁接后代,高于本砷嫁接后代;而少花龙葵的生物量和 Cd 含量表现为本砷嫁接后代最高,异砷嫁接后代次之,未嫁接的最低。表明酸枣幼苗混种 2 种生态型少花龙葵本砷嫁接后代的方式,能提高少花龙葵对 Cd 的吸附能力,并降低酸枣幼苗 Cd 吸收量,对于修复土壤 Cd 污染比异砷嫁接更有优势。

参考文献:

- [1] 茹淑华,苏德纯,王激清.土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理[J].中国生态农业学报,2006,14(4):29-33.
RU S H, SU D C, WANG J Q. Characteristics of Cd pollution in soil and the mechanisms of phytoremediation for soil contamination[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 29-33.
- [2] 梁俊,赵政阳,樊明涛.陕西渭北苹果园土壤中汞、镉污染与分布特征研究[J].农业工程学报,2008,24(3):209-213.
LIANG J, ZHAO Z Y, FAN M T. Spatial distribution and pollution of mercury and cadmium in Weibei apple orchard soils of Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 209-213.
- [3] 卜范文,汤佳乐,杨玉,等.湖南省猕猴桃果园土壤镉含量及镉吸收规律研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):468-475.
BU F W, TANG J L, YANG Y, et al. A study of soil cadmium content and its absorption law in kiwifruit orchards in Hunan Province[J]. Acta Agriculturae

- Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 468–475.
- [4] FU Z D, ZHOU L, CHEN P, et al. Effects of maize-soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2006–2018.
- [5] 邢荔. 苹果园林间种草对果树光合蒸腾效率及水分利用效率的影响[J]. 林业科技通讯, 2019(9): 74–75.
XING L. Effects of planting grass in apple orchard on photosynthetic transpiration and water use efficiency of fruit trees[J]. Forest Science and Technology, 2019(9): 74–75.
- [6] 徐海强, 黄洁, 魏云霞, 等. 木薯与花生间作对产量和养分的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(6): 575–579.
XU H Q, HUANG J, WEI Y X, et al. Effects of cassava/peanut intercropping on their yield and nutrient[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(6): 575–579.
- [7] 马迎杰, 邓海峰, 许传强. 3 种间作植物对薄皮甜瓜植株生长、营养吸收和果实品质的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1130–1138.
MA Y J, DENG H F, XU C Q. Effects of three intercropping species on growth, nutrition absorption and fruit quality of oriental melon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1130–1138.
- [8] TANG Y, LIAO J C, YU X N, et al. Effects of intercropping hyperaccumulators on growth and cadmium accumulation of water spinach(*Ipomoea aquatica* Forsk)[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2020, 100(5): 567–575.
- [9] DENG Q, DENG Q X, WANG Y, et al. Effects of intercropping with *Bidens* species plants on the growth and cadmium accumulation of *Ziziphus acidojujuba* seedlings[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(6): 1–8.
- [10] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 轮间作对伴矿景天和苋菜生物量及 Cd 含量的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 39(13): 35–37.
TANG M D, AI S Y, LI M J, et al. Effects of interplanting-rotation on growth and Cd concentration of *Sedum plumbizincicola* and *Amaranthus cruetus*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(13): 35–37.
- [11] ZHANG X F, XIA H P, LI Z A, et al. Identification of a new potential Cd-hyperaccumulator *Solanum photeinocarpum* by soil seed bank-metal concentration gradient method[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1): 414–419.
- [12] 黄科文, 廖明安, 林立金. 2 种生态型三叶鬼针草的不同株数混种比例对其镉累积的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 753–759.
HUANG K W, LIAO M A, LIN L J. Effects of interplantation ratio of two exotypes of *Bidens pilosa* on cadmium accumulation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(5): 753–759.
- [13] HUANG K W, YANG L, LIU Q, et al. Effects of reciprocal grafting on cadmium accumulation in post-grafting generations of two ecotypes of *Solanum photeinocarpum*[J/OL]. International Journal of Phytoremediation. [2020–06–11]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2020.1774738>.
- [14] 袁沛果, 龚玥琦, 李卜, 等. 镉胁迫对酸枣幼苗生长及生理特性的影响[J]. 北京农学院学报, 2010, 25(3): 14–17.
YUAN P G, GONG Y Q, LI B, et al. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Zizyhus spinosus* seedlings[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2010, 25(3): 14–17.
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
WANG X K. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [16] RASTMANESH F, MOORE F, KESHAVARZI B. Speciation and phytoavailability of heavy metals in contaminated soils in Sarcheshmeh area, Kerman Province, Iran[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 85(5): 515–519.
- [17] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有价态铅和镉的测定[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊 1): 300–302.
LIU M, LIU F Z, LIU B F. Determination of available lead and cadmium in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(S1): 300–302.
- [18] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. 土壤通报, 1980, 11(5): 37–38.
ZHOU L K, ZHANG Z M. Determination method of soil enzyme activity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1980, 11(5): 37–38.
- [19] SAINJU U M, ALLEN B L, LENSSEN A W, et al. Root biomass, root/shoot ratio, and soil water content under perennial grasses with different nitrogen rates[J]. Field Crops Research, 2017, 210: 183–191.
- [20] 向明文, 王丹, 姚天月, 等. 8 种植物对铀和镉的富集特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 594–601.
XIANG M W, WANG D, YAO T Y, et al. Enrichment characteristics of eight plants to uranium and cadmium[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 594–601.
- [21] LIN L J, LIAO M A, MEI L Y, et al. Two ecotypes of hyperaccumulators and accumulators affect cadmium accumulation in cherry seedlings by intercropping[J].

- Environmental Progress & Sustainable Energy, 2014, 33(4): 1251–1257.
- [22] 黄佳璟, 林立金, 陈发波, 等. 混种鬼针草属植物对葡萄幼苗生长及镉积累的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(4), 481–487.
- HUANG J J, LIN L J, CHEN F B, et al. Effects of intercropping *Bidens* on growth and cadmium accumulation of grape seedlings[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(4), 481–487.
- [23] 颀建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 弱光或低温弱光下辣椒叶片类胡萝卜素含量与品种耐性的关系[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 4036–4044.
- XIE J M, YU J H, HUANG G B, et al. Relationship between carotenoid content and low-light-tolerance or chilling-and low-light-tolerance of pepper varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 4036–4044.
- [24] 任纬, 石军, 严康, 等. 混种杂草对水果玉米幼苗生长及锌吸收的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(9): 21–25.
- REN W, SHI J, YAN K, et al. Effects of intercropping with weeds on growth and zinc uptake of fruit maize seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(9): 21–25.
- [25] TANG Y, HE J, YU X N, et al. Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from two ecoclimatic regions promotes growth and reduces cadmium uptake of eggplant seedlings[J]. Pedosphere, 2017, 27(3): 638–644.
- [26] 何冰, 叶海波, 杨肖娥. 铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 274–278.
- HE B, YE H B, YANG X E. Effects of Pb on chlorophyll contents and antioxidant enzyme activity in leaf for Pb-accumulating and Non-accumulating ecotypes of *Sedum Alfredii*(Hance)[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2003, 22(3): 274–278.
- [27] 胡容平, 李欣欣, 林立金, 等. 混种龙葵对番茄和茄子生理生化特性及镉含量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26): 57–63.
- HU R P, LI X X, LIN L J, et al. Effects of Intercropping with *Solanum nigrum* on physiological and biochemical characteristics and cadmium content of *Lycopersicon esculentum* and *Solanum melongena*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(26): 57–63.
- [28] 王巧红, 董金霞, 张君, 等. Cd污染对3种类型土壤酶活性及Cd形态分布的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(3): 339–344.
- WANG Q H, DONG J X, ZHANG J, et al. Effects of Cd pollution on soil enzyme activities and Cd forms in three soil types[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2017, 35(3): 339–344.
- [29] 杨志新, 冯圣东, 刘树庆. 镉、锌、铅单元素及其复合污染与土壤过氧化氢酶活性关系的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 138–141.
- YANG Z X, FENG S D, LIU S Q. Effect of single element and compound pollution of Cd, Zn, Pb on soil catalase activity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(4): 138–141.

责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 罗维