

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.018

黄科文, 林立金, 石军, 等. 混种牛膝菊嫁接后代对生菜镉积累的影响. 土壤, 2020, 52(1): 127–133

混种牛膝菊嫁接后代对生菜镉积累的影响^①

黄科文¹, 林立金², 石军³, 马倩倩⁴, 李克强¹, 廖明安^{1*}

(1 四川农业大学园艺学院, 成都 611130; 2 四川农业大学果蔬研究所, 成都 611130; 3 绵阳市农业科学研究院, 四川绵阳 621023; 4 达州市农业科学研究院, 四川达州 635000)

摘要: 采用盆栽试验, 将两种生态型(农田和矿山)镉超富集植物牛膝菊进行正反嫁接: 以矿山生态型牛膝菊为砧木(后代为矿砧)、农田生态型牛膝菊为接穗(后代为农砧)进行嫁接和以农田生态型牛膝菊为砧木(后代为农砧)、矿山生态型牛膝菊为接穗(后代为矿砧)进行嫁接, 研究了混种两种生态型牛膝菊正反嫁接实生后代(农田、矿山、农砧、矿砧、农穗、矿穗)对生菜镉(Cd)积累的影响。结果表明: 与生菜单种处理相比, 只有混种农穗及矿穗处理不同程度提高了生菜根系及地上部分的生物量(其中, 混种矿穗处理的生菜地上部分生物量最大, 较生菜单种处理提高了 10.98%), 其他混种处理均抑制了生菜的生长。另外, 混种农穗及矿穗处理显著提高了生菜叶片过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)活性, 但对其超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响不大。混种牛膝菊嫁接后代显著降低了生菜地上部分的 Cd 含量, 且与矿穗混种处理的 Cd 含量最低, 较生菜单种处理降低了 29.18%。因此, 生菜与矿穗混种, 既能有效降低生菜可食用部位(地上部分)的 Cd 含量, 还能促进其生长。

关键词: 牛膝菊; 嫁接后代; 生菜; 混种; 镉

中图分类号: X53; S636.2 **文献标志码:** A

Effect of Intercropping with Grafting Offspring of *Galinsoga parviflora* on Cadmium Accumulation of Lettuce

HUANG Kewen¹, LIN Lijin², SHI Jun³, MA Qianqian⁴, LI Keqiang¹, LIAO Mingan^{1*}

(1 College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Institute of Pomology and Olericulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3 Mianyang Academy of Agricultural Sciences, Mianyang, Sichuan 621023, China; 4 Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou, Sichuan 635000, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of intercropping with positive and negative grafting offspring of two ecotypes (farmland and mining) of cadmium (Cd) hyperaccumulator plants *Galinsoga parviflora* on Cd accumulation of lettuce. The positive grafting: the rootstock was mining ecotype of *G. parviflora* (grafting offspring was defined as mining-rootstock) and the scion was farmland ecotype of *G. parviflora* (grafting offspring was defined as farmland-scion); the negative grafting: the rootstock was farmland ecotype of *G. parviflora* (grafting offspring was defined as farmland-rootstock) and the scion was mining ecotype of *G. parviflora* (grafting offspring was defined as mining-scion). The results showed that compared with the monoculture of lettuce, only farmland-scion and mining-scion increased the root and shoot biomasses of lettuce (intercropping with mining-scion had the maximum of shoot biomass, increased by 10.98% compared with the monoculture), but the other treatments inhibited the growth of lettuce. In addition, intercropping with farmland-scion and mining-scion also significantly improved POD and CAT activities but had no obvious effects on SOD activity of lettuce. Compared to the monoculture of lettuce, intercropping with grafting offspring of *G. parviflora* significantly reduced Cd contents in shoots of lettuce, and intercropping with mining-scion had the minimum content, reduced by 29.18% compared with the monoculture. Therefore, intercropping with mining-scion not only effectively reduced Cd contents in the edible parts (shoots) of lettuce, but also promoted the growth of lettuce.

Key words: *Galinsoga parviflora*; Grafting offspring; Lettuce; Intercropping; Cadmium

①基金项目: 四川省教育厅项目(17ZB0342)资助。

* 通讯作者(lman@sicau.edu.cn)

作者简介: 黄科文(1992—), 男, 四川双流人, 博士研究生, 主要从事果树生理生态研究。E-mail: 263733029@qq.com

随着城市污染、矿区开采,工业“三废”的排放加剧,城郊菜区土壤重金属污染日益严重^[1]。镉(Cd)是毒性最强的重金属之一,易在土壤中长期积累,造成蔬菜品质下降,并通过食物链危害人体健康^[2]。不同类型的蔬菜对土壤重金属的积累存在较大差异,重金属在蔬菜中的含量由高到低依次为叶菜类、根茎类、瓜果类^[3]。近年来,叶菜类蔬菜因其在生产过程中相较于其他类型蔬菜拥有更高的重金属积累量,引起了人们广泛的关注^[4-5]。植物修复技术是利用重金属超富集植物吸收、转移土壤重金属的一种绿色、安全的修复措施^[6]。将重金属超富集植物与普通植物混种,实现修复重金属污染土壤的同时进行农业生产是植物修复技术的重要研究方向^[7-8]。研究表明,Cd超富集植物续断菊与经济作物(玉米、蚕豆)混种,可在降低经济作物Cd含量的同时有效促进续断菊对土壤Cd的积累^[9-10]。相较于蔬菜单种,混种重金属超富集植物鸡眼草可显著降低番茄、白菜、卷心菜可食用部位的Cd含量,但提高了油冬菜及花椰菜对土壤铅(Pb)、钡(Ba)的积累^[11]。超富集植物东南景天与大豆、玉米混种均显著提高了东南景天地上部分的Pb、Zn(锌)含量,与黑麦草混种却抑制了东南景天对Pb、Zn的积累;相较于作物单种,混种东南景天可显著抑制黑麦草及玉米对Cd、Zn的吸收,但显著促进了玉米对Pb的积累^[12]。这些研究表明不同混种模式对植物重金属含量的影响存在较大差异。因此,筛选合适的重金属超富集植物-普通植物混种模式来降低经济作物的重金属含量具有重要意义。

生菜(*Lactuca sativa*)是叶用莴苣的俗称,为菊科莴苣属一年生或二年生草本植物,富含多种维生素以及钙、铁、磷盐,具有较高的食用价值^[13]。有研究发现,生菜在生长过程中会吸收并积累土壤中的Cd,对人体健康存在一定危害^[14]。牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)为菊科牛膝菊属一年生草本植物,是一种生长迅速、广泛分布的Cd超富集植物,且在不同生态环境条件下,不同生态型的牛膝菊对土壤Cd的积累能力存在较大差异^[15-16]。梁欢^[17]以不同密度的牛膝菊与生菜混种,发现混种低密度牛膝菊可有效降低生菜可食用部位的Cd含量。前期的初步研究发现,两种生态型(农田和矿山)牛膝菊正反嫁接实生后代的Cd积累特性存在明显差异,这可能与嫁接导致的DNA甲基化模式改变遗传给后代有关^[18]。鉴于此,本试验分别将这两种生态型的牛膝菊正反嫁接实生后代与生菜混种,研究了混种牛膝菊嫁接后代对生菜Cd积累的影响,以期筛选出可以显著降低生菜Cd

含量且能使生菜稳产或高产的牛膝菊嫁接后代植株,为Cd污染地区的蔬菜栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

2015年9月,分别在四川农业大学雅安校区农场农田(30°23' N, 103°48' E, 农田生态型)和四川省雅安市汉源县唐家山铅锌矿区(29°24' N, 102°38' N, 矿山生态型)采集成熟的牛膝菊种子保存。

四川农业大学雅安校区农场位于四川省雅安市雨城区,平均海拔620 m,属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温16.2 °C,多年平均降雨量为1 743.3 mm,多年平均日照1 035 h,多年平均蒸发量为1 011.2 mm^[19]。农田土壤(非污染土壤)为紫色土,其基本理化性质为:pH 6.94,有机质43.64 g/kg,全氮3.63 g/kg,全磷0.38 g/kg,全钾17.54 mg/kg,碱解氮195.00 mg/kg,有效磷6.25 mg/kg,速效钾191.13 mg/kg,有效态Cd 0.022 mg/kg^[19]。

唐家山铅锌矿区位于四川省雅安市汉源县唐家乡,平均海拔890 m,现保有铅锌矿储量为 1.5×10^6 t,年采矿 10^5 t,零星堆积约60多万m³废矿渣。矿区地处北温带与季风带之间的山地亚热带气候区,具有典型的干热河谷气候特点,多年平均气温为17.9 °C,年均降雨量为741.8 mm,年均日照为1 475.8 h,年均蒸发量为1 248.2 mm^[19]。矿区土壤(镉污染土壤)为黄棕壤,其基本理化性质为:pH 8.17,有机质26.56 g/kg,全氮1.16 g/kg,全磷1.93 g/kg,全钾0.59 g/kg,碱解氮13.14 mg/kg,有效磷0.26 mg/kg,速效钾7.98 mg/kg,有效态Cd 16.78 mg/kg^[19]。

生菜品种为意大利散叶生菜(全年抗热耐抽薹),购自保丰种子商行。

供试土壤为潮土,取自成都市温江区农田,土壤基本理化性质参照鲍士旦^[20]方法测定:pH 7.35,有机质41.38 g/kg,全氮3.05 g/kg,全磷0.31 g/kg,全钾15.22 g/kg,碱解氮165.30 mg/kg,有效磷5.87 mg/kg,速效钾187.03 mg/kg,未检测出Cd。

1.2 嫁接

2015年10月,将采集的两种生态型牛膝菊种子置于温度25 °C,光照4 000 lx,空气湿度80%条件下育苗。待幼苗高约3 cm、2片真叶展开时,移栽于无Cd污染盆中。当牛膝菊苗高约10 cm时,对两种生态型牛膝菊进行正反嫁接。

嫁接处理方式如下:

1) 矿山生态型不嫁接处理(矿山): 直接将矿山生

态型牛膝菊幼苗移栽种植，收集种子保存。

2) 农田生态型不嫁接处理(农田)：直接将农田生态型牛膝菊幼苗移栽种植，收集种子保存。

3) 矿山生态型作为砧木(后代为矿砧)与农田生态型作为接穗(后代为农穗)进行嫁接：将矿山生态型和农田生态型牛膝菊幼苗分别从离地约 6 cm 处剪断，矿山生态型牛膝菊下部苗(6 cm)作为砧木，农田生态型牛膝菊的上部苗(4 cm)作为接穗进行嫁接，保留砧木叶片及幼芽。

4) 农田生态型作为砧木(后代为农砧)与矿山生态型作为接穗(后代为矿穗)进行嫁接：将矿山生态型和农田生态型牛膝菊幼苗分别从离地约 6 cm 处剪断，农田生态型牛膝菊下部苗(6 cm)作为砧木，矿山生态型牛膝菊的上部苗(4 cm)作为接穗进行嫁接，保留砧木叶片及幼芽。

嫁接方法为劈接法，用宽约 1 cm、长 20 cm 的塑料带进行绑缚，使砧木与接穗的结合部位紧密地贴在一起。嫁接后浇水并保持土壤田间持水量为 80%，用地膜覆盖保湿，并用遮阳网遮阴。10 d 后逐步移除地膜和遮阳网，并取下绑缚的塑料带。嫁接成活后，所有植株均种植在无重金属污染的土壤中，根据土壤水分实际情况不定期浇水确保土壤水分保持在田间持水量的 80% 左右。待牛膝菊成熟后，分别收集未嫁接以及正反嫁接处理的砧木及接穗的后代种子保存。

1.3 试验方法

2016 年 2 月参照梁欢^[17]的试验设计，将土壤风干、压碎，称取 2.5 kg 装于 21 cm × 20 cm(高×直径)的塑料盆内，加入分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ，使其 Cd 含量为 10 mg/kg，并与土壤充分混匀，保持土壤田间持水量的 80%，自然放置平衡 4 周，不定期翻土，使土壤充分混合均匀。

2016 年 3 月，将牛膝菊嫁接后代种子和生菜种子分别在 20 °C 下，置于装有营养土的培养皿中催芽。当有 80% 的种子发芽后移植于穴盘中，在温度 25 °C，光照强度 4 000 lx，空气湿度 80% 的条件下育苗。2016 年 4 月，待牛膝菊幼苗高约 3 cm、2 片真叶展开时，移栽至准备好的含 Cd 土壤中与长势一致的生菜幼苗混种：生菜混种农田生态型牛膝菊(生菜混农田)、生菜混种矿山生态型牛膝菊(生菜混矿山)、生菜混种农田生态型牛膝菊砧木后代(生菜混农砧)、生菜混种矿山生态型牛膝菊砧木后代(生菜混矿砧)、生菜混种农田生态型牛膝菊接穗后代(生菜混农穗)、生菜混种矿山生态型牛膝菊接穗后代(生菜混矿穗)以及生菜单种，每个处理种植 4 盆。混种处理

每盆种植 3 株生菜和 1 株牛膝菊，单种处理每盆种植 4 株生菜。整个生长过程中不定期交换盆与盆的位置以减弱边际效应的影响，并及时去除杂草，防治病虫害。

2016 年 6 月，种植 2 个月后，选取生菜幼嫩叶片，测定其抗氧化酶活性：超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定^[21]，过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[21]，过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法测定^[21]。之后整株收获，用自来水洗净，再用去离子水反复冲洗，于 105 °C 下杀青 15 min 后，在 70 °C 下烘至恒重。称重，粉碎，过 100 目筛后，分别称取生菜根系及地上部分样品 0.500 g，并加入硝酸-高氯酸(体积比为 4 : 1)放置 12 h。待溶液消化至透明后，过滤，定容至 50 ml，用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪测定(Thermo Scientific, USA)样品 Cd 含量^[20]。牛膝菊整株收获后，分成根系和地上部分分别进行清洗、烘干和 Cd 含量的测定，其处理过程和测定方法与生菜相同，同时计算牛膝菊的 Cd 积累量，即 Cd 含量 × 生物量^[22]。

收集土壤，风干，过 1 mm 筛后，称取 10 g 土样置于 25 ml 烧杯中，加入 0.01 mol/L CaCl_2 10 ml 混匀，静置 30 min 后，用校正过的 PHS-25 型 pH 值测试仪测定悬液 pH^[20]。土壤有效 Cd 含量用 0.005 mol/L DTPA-TEA 浸提(土液比为 1 : 2.5)^[20]，用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪测定^[20]。

1.4 数据处理

数据采用 DPS 进行方差分析(Duncan 新复极差法进行多重比较)。

2 结果与分析

2.1 混种牛膝菊嫁接后代对生菜生物量的影响

由表 1 可知，在 Cd 胁迫条件下与牛膝菊嫁接后代混种后，生菜各部位的生物量均受到不同程度的影响。与生菜单种处理相比，只有混种农穗处理显著提高了生菜根系的生物量，且较单种处理提高了 8.21%($P < 0.05$)，除混种矿穗处理外，其他混种处理均显著降低了生菜根系的生物量。生菜地上部分与整株生物量的大小顺序均为：生菜混矿穗 > 生菜混农穗 > 生菜单种 > 生菜混矿砧 > 生菜混农田 > 生菜混矿山 > 生菜混农砧。与生菜单种处理相比，混种矿穗处理显著提高了生菜地上部分的生物量，且较单种处理提高了 10.98%($P < 0.05$)。除混种农穗、矿砧处理对生菜地上部分的生物量无显著影响外，其他处理均显著降低了生菜地上部分的生物量。对生菜的整株生物量，只有

混种矿穗处理显著提高了生菜的整株生物量,且较单种处理提高了 10.12%($P<0.05$)。另外,生菜混农砧以

及生菜混农穗处理的根冠比较单种有所提高,其余混种处理均降低了生菜根冠比。

表 1 混种牛膝菊嫁接后代对生菜生物量的影响(以干物质质量计)

Table 1 Effects of intercropping with grafting offspring of *G. parviflora* on biomass of lettuce

处理	根系(g/株)	地上部分(g/株)	整株(g/株)	根冠比
生菜单种	1.011 ± 0.012 b	7.252 ± 0.352 b	8.262 ± 0.363 bc	0.139
生菜混农田	0.722 ± 0.022 c	6.233 ± 0.321 cd	6.941 ± 0.343 de	0.116
生菜混矿山	0.623 ± 0.034 d	6.104 ± 0.141 d	6.723 ± 0.173 e	0.102
生菜混农砧	0.643 ± 0.052 d	4.205 ± 0.073 e	4.734 ± 0.193 f	0.152
生菜混矿砧	0.612 ± 0.013 d	6.986 ± 0.041 bc	7.585 ± 0.034 cd	0.087
生菜混农穗	1.094 ± 0.012 a	7.737 ± 0.323 ab	8.827 ± 0.313 ab	0.141
生菜混矿穗	1.052 ± 0.023 b	8.048 ± 0.621 a	9.098 ± 0.643 a	0.131

注:表中数据为平均值 ± 标准差;同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 混种牛膝菊嫁接后代对生菜抗氧化酶活性的影响

由表 2 可知,在 Cd 胁迫下,相较于生菜单种处理,混种农田处理显著提高了生菜叶片的 SOD 活性,且较单种处理提高了 16.39%($P<0.05$);混种农砧处理显著降低了生菜叶片的 SOD 活性,且较单种处理降低了 44.45%($P<0.05$),其余混种处理对其 SOD 活性影响不大。对生菜叶片的 POD 活性,混种农穗及矿穗处理显著提高了生菜叶片的 POD 活性,且较单种

处理分别提高了 10.80%、10.19%($P<0.05$);混种农砧处理显著降低了生菜叶片的 POD 活性,且较单种处理降低了 37.38%($P<0.05$),其余混种处理对其 POD 活性影响不大。对生菜叶片的 CAT 活性,混种处理显著提高了生菜叶片的 CAT 活性,其大小顺序为:生菜混农砧>生菜混矿穗>生菜混矿砧>生菜混农穗>生菜混农田>生菜混矿山>生菜单种,分别较生菜单种处理提高了 67.50%、39.65%、23.60%、18.26%、9.97% 和 2.55%($P<0.05$)。

表 2 混种牛膝菊嫁接后代对生菜抗氧化酶活性的影响(以鲜物质质量计, U/g)

Table 2 Effects of intercropping with grafting offspring of *G. parviflora* on antioxidant enzyme activities of lettuce

处理	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性
生菜单种	158.471 ± 0.353 bc	508.532 ± 4.833 bc	8.222 ± 0.153 f
生菜混农田	184.442 ± 5.042 a	516.993 ± 0.303 bc	9.042 ± 0.032 d
生菜混矿山	166.383 ± 3.634 b	548.784 ± 1.353 ab	8.432 ± 0.053 e
生菜混农砧	88.024 ± 4.203 d	318.422 ± 0.172 d	13.772 ± 0.192 a
生菜混矿砧	150.093 ± 1.341 bc	504.204 ± 0.043 c	10.162 ± 0.113 c
生菜混农穗	140.684 ± 0.757 c	563.432 ± 1.662 a	9.723 ± 0.202 c
生菜混矿穗	165.993 ± 4.932 b	560.344 ± 4.384 a	11.482 ± 0.063 b

2.3 混种牛膝菊嫁接后代对生菜镉含量的影响

由表 3 可知,在 Cd 胁迫条件下,相较于生菜单种处理,混种农砧、农穗处理显著提高了生菜根系的 Cd 含量,分别较单种处理提高了 12.84%、15.19%($P<0.05$);混种矿山、矿砧及矿穗处理显著降低了生菜根系的 Cd 含量,分别较单种处理降低了 22.15%、19.80%、14.28%($P<0.05$)。对生菜地上部分的 Cd 含量,混种处理显著降低了生菜的地上部分 Cd 含量,其大小顺序为:生菜单种>生菜混农砧>生菜混农穗>生菜混农田>生菜混矿山>生菜混矿砧>生菜混矿穗,分别较生菜单种处理降低了 10.92%、12.43%、

16.63%、18.68%、20.14%、29.18%($P<0.05$)。生菜整株的 Cd 含量大小顺序与其地上部分的 Cd 含量相同,其中混种矿穗处理使生菜整株 Cd 含量最低,较生菜单种处理降低了 26.85%($P<0.05$)。说明与牛膝菊嫁接后代混种可以有效降低生菜的 Cd 含量。

2.4 牛膝菊嫁接后代的镉积累量

由表 4 可知,在 Cd 胁迫条件下,混种对不同牛膝菊嫁接后代生物量及 Cd 含量的影响存在差异。对牛膝菊嫁接后代的根系生物量,矿穗混生菜处理的根系生物量最大,且显著高于矿山混生菜、矿砧混生菜及农穗混生菜处理($P<0.05$)。对牛膝菊嫁接后代的地

表 3 混种牛膝菊嫁接后代对生菜 Cd 含量的影响(以干物质计, mg/kg)
Table 3 Effects of intercropping with grafting offspring of *G. parviflora* on Cd contents in lettuce

处理	根系	地上部分	整株
生菜单种	3.061 ± 0.042 b	3.362 ± 0.031 a	3.315 ± 0.445 a
生菜混农田	2.932 ± 0.051 b	2.803 ± 0.141 bc	2.822 ± 0.175 abc
生菜混矿山	2.383 ± 0.063 e	2.734 ± 0.052 cd	2.705 ± 0.198 abc
生菜混农砷	3.454 ± 0.046 a	2.995 ± 0.022 b	3.052 ± 0.088 ab
生菜混矿砷	2.455 ± 0.045 d	2.685 ± 0.026 d	2.665 ± 0.320 bc
生菜混农穗	3.526 ± 0.018 a	2.944 ± 0.106 bc	3.012 ± 0.058 abc
生菜混矿穗	2.624 ± 0.016 c	2.381 ± 0.208 e	2.425 ± 0.256 c

表 4 牛膝菊嫁接后代的 Cd 积累量
Table 4 Cd accumulation in grafting offspring of *G. parviflora*

处理	生物量(g/株)		Cd 含量(mg/kg)		Cd 积累量(μg/株)	
	根系	地上部分	根系	地上部分	根系	地上部分
农田混生菜	0.251 ± 0.022 ab	1.282 ± 0.024 c	34.934 ± 0.055 e	56.837 ± 0.059 bc	8.768 ± 0.097 f	72.865 ± 0.127 d
矿山混生菜	0.202 ± 0.012 bc	1.383 ± 0.051 b	63.443 ± 0.047 b	56.455 ± 0.130 c	12.815 ± 0.135 c	78.077 ± 0.034 c
农砷混生菜	0.242 ± 0.014 ab	1.164 ± 0.027 d	58.695 ± 0.143 c	57.333 ± 0.243 b	14.204 ± 0.020 b	66.736 ± 0.125 e
矿砷混生菜	0.212 ± 0.013 bc	0.965 ± 0.053 e	50.043 ± 0.042 d	60.837 ± 0.246 a	10.609 ± 0.143 e	58.708 ± 0.185 f
农穗混生菜	0.192 ± 0.011 c	1.486 ± 0.071 a	64.463 ± 0.033 a	54.458 ± 0.061 d	12.377 ± 0.174 d	80.925 ± 0.106 b
矿穗混生菜	0.271 ± 0.011 a	1.496 ± 0.051 a	58.665 ± 0.115 c	60.638 ± 0.240 a	15.898 ± 0.176 a	90.714 ± 0.065 a

上部分生物量,其大小顺序为:矿穗混生菜>农穗混生菜>矿山混生菜>农田混生菜>农砷混生菜>矿砷混生菜,其中农穗混生菜及矿穗混生菜处理的地上部分生物量显著高于其他处理($P<0.05$)。对牛膝菊嫁接后代的根系 Cd 含量,其大小顺序为:农穗混生菜>矿山混生菜>农砷混生菜>矿穗混生菜>矿砷混生菜>农田混生菜,其中农穗混生菜处理的根系 Cd 含量最大且显著高于其他混种处理($P<0.05$)。对牛膝菊嫁接后代的地上部分 Cd 含量,矿砷混生菜及矿穗混生菜处理的地上部分 Cd 含量显著高于其他处理,农穗混生菜处理的地上部分 Cd 含量最低。对牛膝菊嫁接后代的根系 Cd 积累量,其大小顺序为:矿穗混生菜>农砷混生菜>矿山混生菜>农穗混生菜>矿砷混生菜>农田混生菜,其中矿穗混生菜处理的根系 Cd 积累量最大,相较于农田混

生菜处理高出了 81.32%($P<0.05$)。对牛膝菊嫁接后代的地上部分 Cd 积累量,矿穗混生菜处理的根系 Cd 积累量达到 90.714 μg/株,分别较农田混生菜、矿山混生菜、农砷混生菜、矿砷混生菜及农穗混生菜处理 Cd 显著高出了 24.50%、16.19%、35.93%、54.52%、12.10%($P<0.05$)。

2.5 混种对土壤 pH 及土壤有效态镉含量的影响

由图 1 可知,在 Cd 污染条件下,相较于生菜单种处理,混种处理显著降低了土壤 pH($P<0.05$),各处理的土壤 pH 的大小顺序为:生菜单种>生菜混种农田>生菜混种农穗>生菜混种矿山>生菜混种矿穗>生菜混种农砷>生菜混种矿砷。与生菜单种相比,生菜混种矿山、矿砷、农穗及矿穗处理均显著提高了土壤中有效态 Cd 含量($P<0.05$),而其他混种处理则对其影响不大。

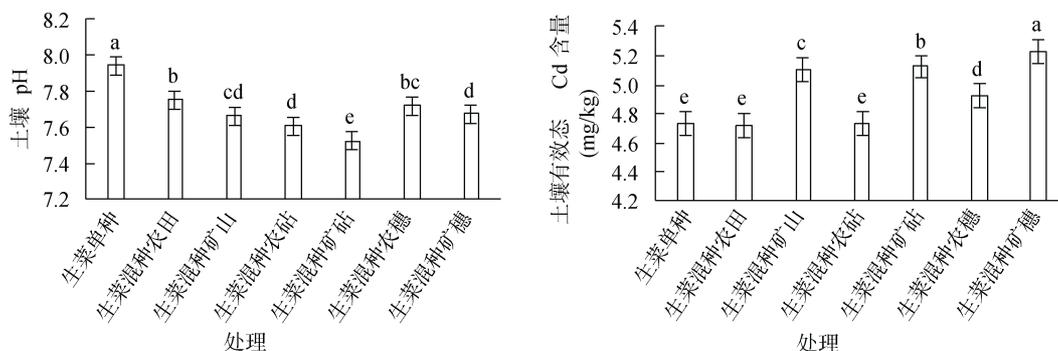


图 1 混种对土壤 pH 和有效 Cd 含量的影响
Fig. 1 Effects of intercropping on soil pH and available cadmium content

3 讨论

间(混)种是指在相同土地上,同时种植两种或两种以上生育期相近或相同植物的种植方式,可以实现植物对光能、热能、养分、水分、土地等资源集约化的利用,达到提高作物产量,改善籽实品质的目的^[23-24]。吴娜等^[25]研究发现,与马铃薯单作相比,马铃薯-燕麦混种模式有效增加了马铃薯单株块茎重以及单株商品薯重,显著提高了马铃薯产量。冯晓敏等^[26]研究发现,豆科-燕麦混种模式明显优于单作,且大豆与燕麦混种对大豆、燕麦的生长均有促进作用。正常情况下,植物体内的活性氧与抗氧化系统之间存在动态平衡,但在 Cd 胁迫下,活性氧大量积累会直接导致细胞膜的损伤和破坏^[27-28]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)以及过氧化氢酶(CAT)是植物为避免活性氧的损害而形成的内源保护系统,通过这 3 种酶的协同作用,可以及时清除植物体内的活性氧,避免活性氧大量累积对植物造成损害^[29-30]。本研究发现,除混种农穗及矿穗处理不同程度提高了生菜各部位的生物量外,其他处理均抑制了生菜的生长。另外,生菜混种农穗、生菜混种矿穗处理使牛膝菊嫁接后代的地上部分生物量均显著高于其他处理。同时,相较于生菜单种处理,混种农穗及矿穗处理均显著提高了生菜叶片的 POD 以及 CAT 活性。这说明生菜-农穗及生菜-矿穗这两种混种模式具有一定的间作优势,通过相互作用促进了生菜的生长。

混种模式下,植物间的相互作用增强,通过种间的竞争、促进作用以及“根际对话”可以改变植物根际的理化性质,进而影响植物对土壤重金属的积累能力^[31-32]。杨远祥等^[33]在镉复合污染条件下将白三叶与香根草以不同比例混种,发现合适的混种比例可以显著提高两种植物对土壤重金属的积累量。秦欢等^[8]研究发现,大叶井口边草与玉米混种,有效促进了大叶井口边草根系及地上部分对砷的吸收,并显著降低了玉米茎中砷的含量。本试验发现,混种牛膝菊嫁接后代可以显著降低生菜可食用部分(地上部分)的 Cd 含量,与前人的研究结果相似^[34]。混种不同处理的牛膝菊嫁接后代对生菜 Cd 含量的影响存在差异,这可能与不同混种处理对土壤理化性质的影响存在差异有关。土壤 pH 是影响土壤重金属离子吸附、解吸,改变其迁移及有效态的重要因子^[35-36]。本研究发现,生菜混种牛膝菊嫁接后代显著降低了土壤 pH,其中只有生菜混种矿山、矿砧、农穗及矿穗处理显著提高了土壤中有效态 Cd 的含量,而其他处理对其影响不大,说明土壤的有效态 Cd 含量是土壤 pH 和其他因

子共同决定的,可能还与土壤酶、土壤微生物以及土壤水分等因子相关^[37-39]。在不同混种模式中,生菜-矿穗混种模式显著抑制了生菜对土壤 Cd 的吸收,使其地上部分及整株 Cd 含量达到最低。同时,在生菜-矿穗的混种模式下,牛膝菊嫁接后代根系及地上部分的 Cd 积累量最高且显著高于其他混种模式。这可能是因为在混种模式下,生菜与矿穗间的“根际对话”最为频繁,促进了根系分泌物的释放,钝化了土壤 Cd 的活性,从而抑制了生菜对土壤 Cd 的积累^[40]。另外,嫁接可能导致一定频率的 DNA 甲基化模式的改变,且接穗发生的变化更为剧烈^[18]。相较于农田生态型牛膝菊,矿山生态型牛膝菊对土壤中的 Cd 具有更强的富集能力,将其嫁接到农田生态型牛膝菊上,可能增强了接穗对 Cd 的耐性并将这种性状遗传到了后代(矿穗)。让矿穗在生菜-矿穗混种模式下,对土壤 Cd 的吸收竞争中占据优势,从而在提高矿穗 Cd 含量的同时降低了生菜的 Cd 含量,但混种降低生菜 Cd 含量的机制还需进一步研究。

4 结论

与生菜单种处理相比,混种矿穗处理在提高生菜地上部分生物量的同时有效降低了其可食用部位的 Cd 含量,对生菜具有安全、增产的双重效果。另外,相较于其他混种处理,生菜-矿穗的混种模式有效促进了牛膝菊嫁接后代的生长以及对土壤中 Cd 的吸收,使牛膝菊嫁接后代各部分的 Cd 积累量达到最大,为实现降低生菜 Cd 含量的同时有效修复 Cd 污染土壤提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 陈涛,施加春,刘杏梅,等. 杭州市城乡结合带蔬菜地土壤铅铜含量的时空变异研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 608-615.
- [2] 胡文友,黄标,马宏卫,等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1045-1055.
- [3] 魏为兴. 福州市主要蔬菜基地土壤重金属的影响评价[J]. 福建地质, 2007(2): 100-107.
- [4] 秦丽娟,张伯尧,王万雄. 兰州市叶菜类蔬菜中重金属含量及健康风险分析[J]. 甘肃科学学报, 2013, 25(2): 35-39.
- [5] 刘瑞伟,皇传华,刘海军,等. 有机肥料对土壤重金属净化及叶菜生长的影响[J]. 农业与技术, 2004, 24(6): 80-82.
- [6] 杜博涛,李华翔,苏绘梦,等. 土壤重金属污染的植物修复技术综述[J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3(2): 32-37.

- [7] 谭建波, 陈兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd、Pb 分配特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 700–707.
- [8] 秦欢, 何忠俊, 熊俊芬, 等. 间作对不同品种玉米和大叶井口边草吸收积累重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1281–1288.
- [9] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 471–477.
- [10] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 53–60.
- [11] 杨晖, 梁巧玲, 赵鹏, 等. 7 种蔬菜型作物重金属积累效应及间作鸡眼草对其重金属吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 209–214.
- [12] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9): 985–990.
- [13] 中国植物志编委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [14] Mehmood F, Rashid A, Mahmood T, et al. Effect of DTPA on Cd solubility in soil—Accumulation and subsequent toxicity to lettuce[J]. Chemosphere, 2013, 90(6): 1805–1810.
- [15] 金倩. 镉超富集植物牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)的抗氧化酶活性变化与光合特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2014.
- [16] 曹玉桃, 彭晓辉, 雷青, 等. 两种生态型富集植物及超富集植物的镉积累特性差异研究[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(11): 61–65.
- [17] 梁欢. 牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)种植密度对其富集特性及生菜(*Lactuca sativa*)安全生产的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.
- [18] Wu R, Wang X R, Lin Y, et al. Inter-species grafting caused extensive and heritable alterations of DNA methylation in *Solanaceae* plants[J]. Plos One, 2013, 8(4): e61995.
- [19] 林立金, 廖明安, 梅洛银, 等. 不同生态型小飞蓬对镉胁迫砧木樱桃植株磷钾吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1565–1568.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] Rastmanesh F, Moore F, Keshavarzi B. Speciation and phytoavailability of heavy metals in contaminated soils in Sarcheshmeh Area, Kerman Province, Iran[J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2010, 85: 515–519.
- [23] 龚振平, 马春梅. 耕作学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [24] 胡飞龙, 高倩圆, 焦加国, 等. 不同间作模式下木薯花生光合效率比较[J]. 土壤, 2012, 44(2): 332–337.
- [25] 吴娜, 刘晓侠, 刘吉利, 等. 马铃薯/燕麦间作对马铃薯光合特性与产量的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 65–72.
- [26] 冯晓敏, 杨永, 任长忠, 等. 豆科-燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1426–1434.
- [27] Bidar G, Garçon G, Pruvot C, et al. Behavior of *Trifolium repens* and *Lolium perenne* growing in a heavy metal contaminated field: Plant metal concentration and phytotoxicity[J]. Environmental Pollution, 2007, 147(3): 546–553.
- [28] 罗立新, 孙铁珩, 靳月华. 镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 495–499.
- [29] Khatun S, Ali M B, Hahn E J, et al. Copper toxicity in *Withania somnifera*: Growth and antioxidant enzymes responses of in vitro grown plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64: 279–285.
- [30] Shah K, Kumar R G, Verma S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. Plant Science, 2001, 161(6): 1135–1144.
- [31] 林立金, 罗丽, 杨代宇, 等. 混种富集植物对牛膝菊镉积累的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 319–324.
- [32] 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.
- [33] 杨远祥, 朱雪梅, 邵继荣, 等. 不同混种比例对白三叶和香根草锌镉富集的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 266–269, 275.
- [34] 林立金. 混种少花龙葵嫁接后代对枇杷镉积累的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.
- [35] Hellweg S, Fischer U, Hofstetter T B, et al. Site-dependent fate assessment in LCA: Transport of heavy metals in soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(4): 341–361.
- [36] Li Y T, Becquer T, Dai J, et al. Ion activity and distribution of heavy metals in acid mine drainage polluted subtropical soils[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(4): 1249–1257.
- [37] 郭华, 陈俊任, 钟斌, 等. 毛竹根际与非根际土壤重金属、理化性质及酶活性特征[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6149–6156.
- [38] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 丛枝菌根真菌对玉米和续断菊间作镉吸收和累积的影响[J]. 土壤, 2017, 49(1): 111–117.
- [39] 姚胜勋, 张超兰, 杨惟薇, 等. 水分与磷肥对土壤重金属有效态的影响研究[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2194–2198.
- [40] 杨仁斌, 曾清如, 周细红, 等. 植物根系分泌物对铅锌尾矿污染土壤中重金属的活化效应[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 152–155.