

相互嫁接对两种生态型牛膝菊后代生长及镉积累的影响

黄科文¹, 姚欢², 马倩倩³, 吴彩芳⁴, 廖明安¹, 林立金^{4*}

(1. 四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130; 2. 四川大学生命科学学院, 四川 成都 610064; 3. 达州市农业科学研究所, 四川 达州 635000; 4. 四川农业大学果蔬研究所, 四川 成都 611130)

摘要:为研究砧穗互作对超富集植物嫁接后代重金属积累的影响, 通过盆栽试验, 研究了相互嫁接对2种生态型(矿山生态型和农田生态型)牛膝菊后代在镉胁迫下生长及镉积累的影响。结果表明, 与未嫁接相比, 相互嫁接的牛膝菊后代生物量、光合色素含量及可溶性蛋白含量的差异不显著或略有降低。矿山生态型的砧木及接穗后代抗氧化酶活性显著提高, 而农田生态型的砧木及接穗后代抗氧化酶活性的变化不显著或略有降低。与农田生态型未嫁接相比, 农田生态型的砧木及接穗后代的植株镉含量均显著降低, 其中地上部分镉含量分别降低了5.96%和9.23%; 与矿山生态型未嫁接相比, 矿山生态型砧木后代植株的镉含量显著降低, 但其接穗后代的植株镉含量显著升高。因此, 砧穗互作能够影响牛膝菊嫁接后代的镉积累, 且不同生态型相互嫁接能在一定程度上降低或提高牛膝菊后代的镉含量。

关键词: 嫁接后代; 牛膝菊; 镉; 生态型

随着现代工农业的快速发展, 我国土壤受到重金属污染的情况越来越严重, 中国已有19.4%耕地土壤被污染, 按照 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 耕地计算, 污染面积约达 $0.23 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[1], 其中, 镉被认为是土壤重金属污染中最主要的元素^[2]。目前, 对于重金属污染土壤的修复, 采用最多的是植物修复技术。植物修复技术是指通过特殊的超富集植物对重金属的提取, 清除土壤中的重金属, 从而达到修复土壤的目的, 是一项对环境友好且具有广阔应用前景的技术, 但已知的超富集植物大多个体矮小、生物量低、生长缓慢, 修复效率受到很大影响^[3-4]。适当的农艺措施可以提高修复植物的生物量, 提高植物对重金属的吸收、转运能力, 进而来提高植物的修复效率, 促进该技术的推广应用^[4-7]。

嫁接是一种改良超富集植物的新方法, 有学者研究发现嫁接能够提高超富集植物后代的生物量与镉含量, 即嫁接能够提高超富集植物的镉修复能力, 并且由嫁接引起的表观遗传变异(镉修复能力)能够比较稳定地在植物后代中传递^[8-9]。在理

论上, 嫁接是一种无性繁殖技术, 嫁接的后代不会发生性状的改变, 但有学者认为, 嫁接后的植物会诱导其自身调控以应对不利环境, 从而产生变异^[10], 进而提高植物对胁迫环境的抗性^[11]。这种在不利环境中所产生的变异, 如嫁接可以导致一定频率的DNA甲基化模式的发生, 可使基因表达发生改变并传递给后代^[12]。嫁接使来自不同植株的砧木与接穗连接在一起, 并进一步形成一个完整植株^[13], 嫁接植株的生长发育和生理生化特性受到了砧木、接穗互作的复杂影响^[14-15]。有研究表明, 嫁接导致一定频率的DNA甲基化模式的变化在接穗发生的变化更为剧烈^[16], 嫁接黄瓜对Cd的吸收依赖于砧木基因型^[17], 因此, 不同的砧木、接穗互作产生的影响不同, 对嫁接后代的生长及镉积累影响也不同^[18]。

本试验以镉超富集植物牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)作为研究对象, 将生长发育和生理生化特性上存在差异的2种生态型(矿山和农田)的牛膝菊^[19]进行相互嫁接, 研究砧穗互作对牛膝菊嫁接后代镉积累的影响, 以为植物修复技术的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

四川农业大学雅安校区农场(30°23'N, 103°

收稿日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-28

基金项目: 四川省教育厅项目(17ZB0342)。

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: hkewen@foxmail.com。

通讯作者: 林立金, E-mail: llj800924@qq.com。

48' E) 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℃, 多年平均降水量为 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^[20]。唐家铅锌矿区 (29° 24' E, 102° 38' E) 位于四川省雅安市汉源县唐家乡, 平均海拔 890 m。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 17.9℃, 多年平均降水量为 741.8 mm, 多年平均日照 1 475.8 h, 多年平均蒸发量为 1 248.2 mm^[20]。

1.2 材料准备

牛膝菊种子于 2015 年 9 月分别采自四川省雅安市汉源县唐家山铅锌矿区 (矿山生态型) 和四川农业大学雅安校区农场农田 (农田生态型)。2015 年 10 月, 将上述牛膝菊种子分别播种育苗, 待株高约 6 cm (处于快速生长阶段) 时进行嫁接处理。(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嫁接 (矿山砧木 / 农田接穗): 将一株株高 6 cm 的矿山生态型牛膝菊剪断, 留 3 对真叶作为砧木, 接穗为另一株株高为 6 cm 的农田生态型牛膝菊的上部苗 (留 1 对真叶) 进行嫁接, 分别收集砧木和接穗的种子。(4) 农田生态型作为砧木嫁接 (农田砧木 / 矿山接穗): 将一株株高 6 cm 的农田生态型牛膝菊剪断, 留 3 对真叶作为砧木, 接穗为另一株株高 6 cm 的矿山生态型牛膝菊的上部苗 (留 1 对真叶) 进行嫁接, 分别收集砧木和接穗的种子。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分牢牢地贴在一起。嫁接后根据土壤水分实际情况不定期浇水, 保持土壤田间持水量为 80%, 用地膜覆盖保湿, 并用遮阳网遮光降温。10 d 后逐步移除地膜和遮阳网炼苗, 并取下绑缚的塑料薄膜。待牛膝菊果实成熟后, 分别收集未嫁接、正反嫁接处理的砧木及接穗的后代种子保存, 分别记为: 矿山不嫁接 (矿山)、农田不嫁接 (农田)、矿山砧木 (矿砧)、农田砧木 (农砧)、矿山接穗 (矿穗)、农田接穗 (农穗)。

试验土壤为砂壤土, 取自成都市温江区农田, 其基本理化特性为: pH 值 7.09, 全氮 1.50 g · kg⁻¹, 全磷 0.76 g · kg⁻¹, 全钾 18.02 g · kg⁻¹, 全镉 1.96 mg · kg⁻¹,

碱解氮 94.82 mg · kg⁻¹, 有效磷 6.30 mg · kg⁻¹, 速效钾 149.59 mg · kg⁻¹, 其中供试土壤背景有效镉含量未检出。

1.3 试验设计

试验于 2015 年 3 ~ 6 月在四川农业大学成都校区进行。2015 年 3 月, 将土风干、压碎、过 6.72 mm 筛后, 称取 2.5 kg 装于 21 cm × 20 cm (高 × 直径) 的塑料盆内, 分别加入 50 mg · kg⁻¹ 的镉, 镉的加入形式为分析纯的 CdCl₂ · 2.5H₂O, 使其与土壤充分混匀, 保持土壤田间持水量的 80%, 自然放置平衡 4 周, 不定期翻土混合, 使土壤充分混合均匀。2015 年 4 月, 将收集的嫁接后代种子放于种子发芽箱中进行发芽育苗, 培育基质为无污染试验土壤与营养土以 2 : 1 混合而成, 育苗箱内温度为 25℃, 湿度为 80%, 光照为 4 000 Lux。待幼苗高约 3 cm, 2 片真叶展开时移栽于装有含镉土壤盆中, 每盆种植 4 株。试验处理分别为: 矿山、农田、矿砧、农砧、矿穗、农穗, 每个处理重复 3 次。在整个生长过程中不定期的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。

1.4 测定项目与方法

待牛膝菊处于盛花期时 (2015 年 6 月), 测定牛膝菊叶片光合色素 (叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素) 含量、可溶性蛋白和超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性^[21]。之后, 整株收获, 并采集土壤备用。用自来水将牛膝菊植株上的泥土洗净, 再用去离子水反复冲洗, 于 105℃ 下杀青 15 min, 70℃ 烘至恒重。分别测定植株根系、茎秆、叶片的生物量及镉含量。称取 0.500 g 植物样品, 加入硝酸 - 高氯酸 (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 (Thermo Scientific, USA) 测定镉含量。土壤样品风干后, 过 1 mm 筛, 采用 pH 计测定土壤 pH 值 (土水比为 1 : 2.5), 土壤有效态镉含量用 0.005 mol · L⁻¹ DTPA-TEA 浸提 (土液比 1 : 2.5)^[22], 用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪测定。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 及 SPSS 17.0 进行数据统计与分析。根冠比 = 根系干重 / 地上部干重^[22], 地上部分富集系数 (BCF) = 地上部分镉含量 / 土壤镉含量^[23], 转运系数 (TF) = 地上部分镉含量 / 根系镉含量^[23]。

2 结果与分析

2.1 嫁接对牛膝菊后代生物量的影响

在镉胁迫条件下, 农穗根系生物量较农田提高了 26.67% ($P<0.05$), 矿砧较矿山降低了 18.18% ($P<0.05$, 表 1)。就地上部分生物量而言, 农穗及农砧地上部生物量较农田无显著变化; 矿穗和

矿砧较矿山分别显著降低 ($P<0.05$) 了 12.64% 和 18.39%。对于整株生物量而言, 除矿砧较矿山显著降低了 17.59% ($P<0.05$) 外, 其余处理整株生物量均无显著变化。牛膝菊根冠比由大到小顺序为: 农穗 > 农砧 > 农田, 矿穗 > 矿砧 > 矿山。

表 1 嫁接对牛膝菊后代生物量的影响

处理	根系生物量 (g · 株 ⁻¹)	地上部分生物量 (g · 株 ⁻¹)	整株生物量 (g · 株 ⁻¹)	根冠比
农田	0.15 ± 0.008c	0.76 ± 0.05b	0.91 ± 0.06b	0.20
农穗	0.19 ± 0.010b	0.68 ± 0.03b	0.87 ± 0.04b	0.28
农砧	0.17 ± 0.011bc	0.77 ± 0.05b	0.94 ± 0.06b	0.22
矿山	0.22 ± 0.005a	0.87 ± 0.04a	1.08 ± 0.05a	0.25
矿穗	0.22 ± 0.008a	0.76 ± 0.04b	0.96 ± 0.05ab	0.29
矿砧	0.18 ± 0.009b	0.71 ± 0.02b	0.89 ± 0.03b	0.26

注: 数据为平均值 ± 标准差, 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

2.2 嫁接对牛膝菊后代光合色素含量的影响

由表 2 可以看出, 在镉胁迫条件下, 农穗的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量及叶绿素总量较农田显著降低 ($P<0.05$), 分别降低了 17.14%、10.34% 和 17.75%, 而农砧较农田无明显变化。矿穗、矿

砧的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量及叶绿素总量较矿山均显著降低。牛膝菊嫁接后代的类胡萝卜素含量均有显著下降, 农穗、矿砧、矿穗、农砧分别较各自对照降低了 21.90% ($P<0.05$)、26.92% ($P<0.05$)、16.40% ($P<0.05$) 和 28.72% ($P<0.05$)。

表 2 嫁接对牛膝菊后代光合色素含量的影响

处理	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素总量	类胡萝卜素
农田	1.40 ± 0.04b	0.29 ± 0.008b	1.69 ± 0.05b	4.84 ± 0.12a
农穗	1.16 ± 0.02c	0.23 ± 0.008c	1.39 ± 0.03c	3.78 ± 0.16b
农砧	1.32 ± 0.03b	0.27 ± 0.013b	1.59 ± 0.04b	3.45 ± 0.20b
矿山	1.59 ± 0.10a	0.33 ± 0.023a	1.92 ± 0.12a	4.94 ± 0.46a
矿穗	1.44 ± 0.05b	0.29 ± 0.006b	1.73 ± 0.06b	4.13 ± 0.08b
矿砧	1.34 ± 0.07b	0.27 ± 0.009b	1.61 ± 0.08b	3.61 ± 0.39b

2.3 嫁接对牛膝菊后代可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性的影响

嫁接改变了在镉胁迫条件下牛膝菊后代可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性 (表 3)。农穗的可溶性蛋白质含量显著低于农田, 其余处理较各自对照无显著变化。就 SOD 活性而言, 农砧显著降低了 2.69% ($P<0.05$), 矿穗显著升高了 17.85% ($P<0.05$), 矿砧显著升高了 13.99% ($P<0.05$)。但

农穗、矿砧、农砧和矿穗的 POD 活性均较各自对照显著升高, 分别升高了 36.30% ($P<0.05$)、64.47% ($P<0.05$)、9.99% ($P<0.05$) 和 7.53% ($P<0.05$)。从 CAT 活性来看, 矿砧显著降低了 12.73% ($P<0.05$), 矿穗显著升高了 352.73% ($P<0.05$), 农穗及农砧较农田无明显变化。因此嫁接可以提高牛膝菊后代的抗氧化酶活性, 以此来提高对镉的抗性。

表 3 嫁接对牛膝菊后代蛋白质含量及抗氧化酶活性的影响

处理	可溶性蛋白质含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	SOD 活性 ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	POD 活性 ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	CAT 活性 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)
农田	3.44 ± 0.66a	410.07 ± 4.27c	1 333.33 ± 56.29e	1.01 ± 0.07bc
农穗	2.08 ± 0.23cd	404.28 ± 1.03cd	1 817.31 ± 13.60b	0.93 ± 0.07c
农砧	2.90 ± 0.01ab	399.03 ± 0.92d	1 465.52 ± 24.38cd	0.92 ± 0.06c
矿山	2.10 ± 0.02bcd	378.02 ± 2.16e	1 390.24 ± 34.49de	1.10 ± 0.03b
矿穗	1.75 ± 0.11d	445.50 ± 5.30a	1 494.95 ± 42.86c	4.98 ± 0.01a
矿砧	2.88 ± 0.32abc	430.89 ± 1.05b	2 258.71 ± 56.29a	0.96 ± 0.06c

2.4 嫁接对牛膝菊后代镉含量的影响

在镉胁迫条件下,牛膝菊嫁接后代根系镉含量的大小顺序为:矿穗>矿山>农田>农穗>矿砧>农砧(表4)。农穗及农砧根系镉含量较农田显著降低,分别降低了1.89% ($P<0.05$)和13.88% ($P<0.05$);矿砧根系镉含量较矿山降低了26.13% ($P<0.05$),但矿穗较矿山显著升高了15.15% ($P<0.05$)。从地上部分镉含量来看,农穗及农砧较农田显著降低,分别降低了5.96% ($P<0.05$)和9.23% ($P<0.05$),矿砧较矿山无明显变化,但矿

穗较矿山显著升高了9.81% ($P<0.05$)。整株镉含量的大小顺序与根系镉含量变化一致,农穗、农砧及矿砧整株镉含量分别较各自对照降低了4.79% ($P<0.05$)、10.05% ($P<0.05$)和7.96% ($P<0.05$),矿穗整株镉含量较矿山升高了10.87% ($P<0.05$)。牛膝菊嫁接后代地上部分富集系数大小顺序为:农田>农穗>农砧,矿穗>矿砧>矿山;转运系数由大到小为:农砧>农田>农穗,矿砧>矿山>矿穗,说明嫁接提高了矿穗、矿砧对镉的富集能力,促进了农砧、矿砧镉从根系向地上部分的转运。

表 4 嫁接对牛膝菊后代镉含量的影响

处理	根系镉含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	地上部分镉含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	整株镉含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	地上部分 富集系数	转运 系数
农田	64.57 ± 0.32c	61.22 ± 0.28a	61.79 ± 0.29c	1.22	0.95
农穗	63.35 ± 0.23d	57.57 ± 0.39b	58.83 ± 0.34d	1.15	0.91
农砧	55.61 ± 0.03f	55.57 ± 0.29c	55.58 ± 0.33f	1.11	1.00
矿山	83.15 ± 0.20b	56.68 ± 0.21bc	62.95 ± 0.39b	1.13	0.70
矿穗	95.75 ± 0.31a	62.24 ± 0.96a	69.79 ± 0.91a	1.24	0.65
矿砧	61.42 ± 0.29e	57.88 ± 0.30b	57.94 ± 0.13e	1.16	0.92

2.5 牛膝菊嫁接后代对土壤有效镉含量及土壤 pH 的影响

种植牛膝菊嫁接后代的土壤中,矿穗的土壤 pH 值较矿山显著升高,其余处理均无显著变化(表5)。牛膝菊嫁接后代除了农砧外,其余嫁接后代均显著降低了土壤有效态镉含量(表5)。农穗的土壤有效态镉含量最低,矿山的土壤有效态镉含量最高,农穗、矿穗及矿砧均较各自对照显著降低,分别降低了5.16% ($P<0.05$)、3.94% ($P<0.05$)和6.75% ($P<0.05$)。

表 5 牛膝菊嫁接后代对土壤有效镉含量及土壤 pH 值的影响

处理	pH 值	有效态镉含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
农田	7.48 ± 0.13a	5.23 ± 0.037b
农穗	7.43 ± 0.09a	4.96 ± 0.011d
农砧	7.59 ± 0.06a	5.19 ± 0.006b
矿山	6.96 ± 0.04b	5.33 ± 0.008a
矿穗	7.49 ± 0.07a	5.12 ± 0.010c
矿砧	6.79 ± 0.12b	4.97 ± 0.008d

3 讨论与结论

嫁接过程中,不同的砧木、接穗互作产生的影响不同,对植株的生长影响也不同^[18]。从试验结果来看,在镉胁迫条件下,与未嫁接相比,以农田型为砧木、矿山型为接穗的嫁接处理,其后代农砧、矿穗根系及整株生物量差异不显著;以矿山型为砧木、农田型为接穗的嫁接处理,其后代农穗根系生物量显著提高,整株生物量差异不显著,但矿砧根系及整株生物量显著降低。就光合色素而言,牛膝菊嫁接后代光合色素含量的差异不显著或略有降低。表明,不同生态型牛膝菊的相互嫁接对于后代的生长影响不同,这主要是由于不同生态环境的差异,不同生态型植物在形态和生理上也存在差异^[19]。这种生态型间的差异在牛膝菊嫁接后代的生长表现为:农田型砧木对于嫁接后代的生长影响高于矿山型砧木。

在胁迫环境条件下,植物体内产生大量的超氧阴离子会被抗氧化酶清除,清除效率与抗氧化酶活性有关,嫁接可以提高植物的抗氧化酶活性^[24]并通过被改变的DNA模式传递给后代^[25]。在本试验中,除了农穗的可溶性蛋白含量较对照显著降低,其余嫁接后代则变化不明显;与未嫁接相比,POD活性均显著提高,矿穗CAT活性显著升高,矿穗、矿砧SOD活性均显著升高;农穗、农砧CAT活性差异不显著,但农穗($P>0.05$)、农砧($P<0.05$)SOD活性降低。表明,嫁接对牛膝菊后代的可溶性蛋白含量的影响总体上不明显,但对牛膝菊后代抗氧化酶的影响存在差异,嫁接在总体上提高了牛膝菊后代抗氧化酶活性,提高了对镉的耐性,尤其是对矿山型牛膝菊嫁接后代(矿穗、矿砧),可能是因为矿山生态型的牛膝菊对镉胁迫的耐性大于农田生态型^[19]。

植物对重金属的吸收主要集中在根际环境中,根系分泌物在重金属污染的土壤中可以改变重金属的化学行为与生态行为,从而改变重金属的有效性和对植物的毒性^[26-27]。植物根系分泌物的主要成分为低分子量有机酸,总量高于普通植物的低分子量有机酸,降低了超富集植物根际周围土壤pH值,与土壤中的镉形成复合物,增加了土壤镉的有效性,促进了超富集植物对镉的吸收^[27-28]。从试验结果来看,与未嫁接相比,矿穗根系及整株镉含量显著提高,其余嫁接后代镉含量均显著降低;除了矿穗土壤pH值显著提高,其余嫁接后代在土壤pH值上变化并不显著;嫁接处理降低了土壤有效态镉含量。

表明,嫁接促进了矿穗对镉的吸收,且富集能力高于其他嫁接后代(矿穗地上富集系数最大),使其根系及整株镉含量显著提高;嫁接提高了矿穗对镉的富集能力的同时也显著提高了土壤pH值,进而降低了土壤有效态镉含量,降低了普通植物可吸收的镉的来源,有利于土壤重金属镉污染的修复。

综上所述,在重金属镉污染下,砧穗互作能够影响牛膝菊嫁接后代的镉积累,且不同生态型相互嫁接能在一定程度上降低或提高牛膝菊后代的镉含量。与未嫁接的农田矿山相比,牛膝菊嫁接后代矿穗的根系及整株生物量、可溶性蛋白差异不显著,抗氧化酶活性、植株的镉含量、土壤pH值均显著提高,土壤有效态镉含量显著下降。嫁接使得牛膝菊发生了可遗传变异^[19],嫁接显著地提高了牛膝菊后代矿穗对镉的耐性,提高了对镉的富集能力,且促进对镉吸收的同时提高了土壤pH值,进而降低了土壤有效态镉含量,降低了普通植物可吸收的镉的来源。因此,相互嫁接是一种改良超富集植物的新方法,适当的嫁接处理可提高植物的修复效率,有利于土壤重金属镉污染的修复,在本试验中,2种生态型(矿山生态型和农田生态型)牛膝菊相互嫁接,以农田型为砧木、矿山型为接穗的嫁接后代——矿穗对重金属镉污染的修复效果好。

参考文献:

- [1] 杨启良,武振中,陈金陵,等.植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J].生态环境学报,2015,24(6):1075-1084.
- [2] 杨扬,王晓燕,王江,等.物种多样性对植物生长与土壤镉污染修复的影响[J].环境科学学报,2016,36(6):2103-2113.
- [3] 王卫华,雷龙海,杨启良,等.重金属污染土壤植物修复研究进展[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2015,(2):114-122.
- [4] 郑黎明,袁静.重金属污染土壤植物修复技术及其强化措施[J].环境科技,2017,30(1):75-78.
- [5] 汤福义,林立金,廖进秋,等.土施富集植物秸秆对牛膝菊生长及镉积累的影响[J].华北农学报,2015,30(4):213-218.
- [6] 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.
- [7] Lin L J, Yang D Y, Wang X, et al. Effects of grafting on the cadmium accumulation characteristics of the potential Cd-hyperaccumulator *Solanum photeinocarum* [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(2): 1-11.
- [8] 林立金.混种少花龙葵嫁接后代对枇杷镉积累的影响[D].

- 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [9] 林立金, 罗丽, 张潇, 等. 油菜砧木对芥菜嫁接后代镉积累的影响 [J]. 华北农学报, 2015, 30 (1): 207-212.
- [10] Liu Y S, Wang Q L, Li B Y. New insights into plant graft hybridization [J]. *Heredity*, 2010, 104 (1): 1-2.
- [11] 张自坤, 刘世琦, 刘素慧, 等. 嫁接对铜胁迫下黄瓜幼苗根系多胺代谢的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21 (8): 2051-2056.
- [12] 王燕, 谢辉, 陈利萍. 植物嫁接诱导的遗传变异机理的研究进展 [J]. 遗传, 2011, 33 (6): 585-590.
- [13] 陈贵林, 卮兰春. 蔬菜嫁接栽培实用技术 [M]. 北京: 金盾出版社, 2004.
- [14] 王志伟, 李涵, 孙波, 等. 不同砧木嫁接对西瓜果实 Cd 含量和品质的影响 [J]. 长江蔬菜, 2018, (2): 66-70.
- [15] Cookson S J, Clemente Moreno M J, Hevin C, et al. Heterografting with nonself rootstocks induces genes involved in stress responses at the graft interface when compared with autografted controls [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65 (9): 2473-2481.
- [16] 吴蕊. 嫁接引起茄科植物可遗传的 DNA 甲基化模式变异及其可能机制的研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
- [17] Savvas D, Ntatsi G, Barouchas P. Impact of grafting and rootstock genotype on cation uptake by cucumber (*Cucumis sativus* L.) exposed to Cd or Ni stress [J]. *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, 2013, 149: 86-96.
- [18] 王占锋, 黄科文, 练华山, 等. 凤仙花嫁接后代的镉积累特性 [J]. 北方园艺, 2018, (7): 66-71.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 熊庆娥. 植物生理学实验教程 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 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.
- [24] He Y, Zhu Z, Yang J, et al. Grafting increases the salt tolerance of tomato by improvement of photosynthesis and enhancement of antioxidant enzymes activity [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66 (2): 270-278.
- [25] 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): 1-11.
- [26] 杨仁斌, 曾清如, 周细红. 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.
- [27] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究 [J]. 植物生态学报, 2005, 29 (3): 497-504.
- [28] 包姣, 韦惠琴, 赵秀兰. 低分子量有机酸强化烟草修复镉污染土壤的适用性研究 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (2): 265-270.

Effects of mutual grafting on growth and cadmium accumulation of two ecotypes of *Galinsoga parviflora* post generations

HUANG Ke-wen¹, YAO Huan², MA Qian-qian³, WU Cai-fang⁴, LIAO Ming-an¹, LIN Li-jin^{4*} (1. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130; 2. College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064; 3. Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou Sichuan 635000; 4. Institute of Pomology and Olericulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130)

Abstract: To study the effects of interaction of rootstock and scion on heavy metal accumulation of post-grafting generations of hyperaccumulator, the mining ecotype and farmland ecotype of *Galinsoga parviflora* were mutual grafted with each other, and planted in cadmium contaminated soil by the pot experiment to study the effects of mutual grafting on growth and cadmium accumulation of two ecotypes of *G. parviflora* post generations. Compared with the ungrafted treatment, the biomass, photosynthetic content and the content of soluble protein content of post-grafting generation of *G. parviflora* were not significantly or slightly decreased. The antioxidant enzymes activities in mining ecotype of post-grafting generation of *G. parviflora* significantly increased, and the changes of antioxidant enzymes activities in farmland ecotype of post-grafting generation of *G. parviflora* were not significantly or slightly decreased. Compared with the ungrafted farmland ecotype, the cadmium contents in post-grafting generation of farmland ecotype of rootstock and scion were significantly decreased, and the cadmium contents in shoots of them decreased by 5.96% and 9.23%, respectively. Compared with the ungrafted mining ecotype, the cadmium content in post-grafting generation of mining ecotype of rootstock was significantly decreased, but the cadmium content in post-grafting generation of mining ecotype of scion was significantly increased. Therefore, the interaction of rootstock and scion could affect the cadmium accumulation of in post-grafting generation of *G. parviflora*, and the mutual grafting of different ecotypes could decrease or improve the cadmium content in *G. parviflora* post generation.

Key words: post-grafting generation; *Galinsoga parviflora*; cadmium; ecotype