

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19216

## 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗生长及镉积累的影响

黄艳<sup>1</sup>, 黄科文<sup>2</sup>, 廖明安<sup>2</sup>, 林立金<sup>1</sup>, 王进<sup>1</sup>, 吕秀兰<sup>1\*</sup>

(1. 四川农业大学果蔬研究所, 四川 成都 611130; 2. 四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130)

**摘要:** 采用盆栽试验, 以凤仙花未嫁接、同株嫁接、异株同苗嫁接、异株异苗嫁接后代与葡萄幼苗混种, 研究在镉胁迫下混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗生长及镉积累的影响。结果表明, 与葡萄幼苗单种相比, 混种凤仙花嫁接后代提高了葡萄幼苗的生物量、光合色素含量、抗氧化酶活性、可溶性蛋白及可溶性糖含量, 并显著降低了葡萄幼苗根系及地上部分的镉含量; 混种凤仙花嫁接后代显著增加了土壤 pH 值并降低土壤的有效态镉含量。其中, 混种异株异苗株凤仙花嫁接后代促进葡萄幼苗生长和降低土壤镉积累的效果最好。与葡萄单种相比, 混种异株异苗株凤仙花嫁接后代葡萄幼苗根系和地上部分的生物量分别增加了 47.25% 和 23.16%; 葡萄幼苗根系及地上部分的镉含量显著低于葡萄单种和其它嫁接处理; 土壤的有效态镉含量较葡萄单种降低了 10.02%。本研究中葡萄幼苗混种的凤仙花嫁接后代均可应用于葡萄园镉污染土壤的修复, 且最佳材料是凤仙花异株异苗嫁接后代。

**关键词:** 混种; 凤仙花嫁接后代; 葡萄幼苗; 镉

近年来, 重金属污染土壤的问题对环境产生的威胁越来越大, 其污染面积和程度呈上升趋势, 给我国农业生产安全和人民健康带来了严重的风险和危害<sup>[1]</sup>。镉是我国农田土壤污染较为严重且普遍的主要重金属元素, 因其不能在生物体内降解而成为一种极具毒性的重金属元素<sup>[2]</sup>。葡萄是世界上重要的栽培果树之一, 也是最古老、最早栽培的果树之一, 其果实营养丰富, 味道鲜美, 深受人们喜爱。土壤中镉含量过多将会影响葡萄的生长, 已有研究表明, 我国部分地区葡萄园土壤中的镉含量已超过绿色食品产地土壤环境质量标准或镉污染已达到轻度污染等级, 对葡萄果品安全造成严重危害<sup>[3-5]</sup>。因此, 研究葡萄园土壤的镉污染修复, 保证葡萄果品安全、绿色和可持续生产十分重要。在农业生产上, 间作套种或混作可通过根系和地上结构的互利互补促进作物对养分、水、光等资源的利用, 使产量增加<sup>[6]</sup>。前人研究表明<sup>[7-8]</sup>, 白三叶混种德国

鸢尾能够用于铅污染土壤的修复, 白车轴草混种紫花地丁能较好修复镉污染。在土壤镉污染条件下, 鬼针草属植物与葡萄幼苗混种可降低葡萄幼苗的镉含量<sup>[9]</sup>。

嫁接繁殖是广泛应用于生产上的果树、蔬菜等经济作物的繁育方法。有研究表明, 嫁接导致的生物胁迫可以通过诱导植物的生理变异来提高植物的抗性<sup>[10]</sup>, 嫁接还可以引起植物 DNA 甲基化, 并将这种变异遗传给后代<sup>[11]</sup>。自根苗嫁接可促进硫华菊及凤仙花后代的生长<sup>[12]</sup>。在镉污染条件下, 嫁接可以提高少花龙葵和芥菜后代的生物量<sup>[13-14]</sup>, 提高镉超富集植物少花龙葵地上部镉积累量和镉富集植物芥菜后代植株的镉积累量<sup>[15]</sup>, 说明嫁接可以提高镉超富集或镉富集植物后代的重金属积累能力。凤仙花是一种镉富集型花卉植物, 对镉污染土壤的修复能力较弱<sup>[16]</sup>。研究表明, 采用自根苗嫁接能够促进镉污染条件下凤仙花后代的生长, 提高其对镉的吸收与积累, 从而提高了其对镉污染土壤的修复能力<sup>[17]</sup>。因凤仙花嫁接后代对镉的吸收有明显的促进作用, 因此, 本研究通过将凤仙花进行未嫁接、同株嫁接、异株同苗嫁接、异株异苗嫁接处理, 用不同处理的凤仙花嫁接后代与葡萄幼苗进行混种, 旨在探究凤仙花嫁接后代与葡萄混种对葡萄幼苗生长和镉积累的影响, 以期筛选出能显著降低葡萄幼苗镉含量的凤仙花嫁接后代, 为葡萄园镉污染修复提供参考。

收稿日期: 2019-05-20; 录用日期: 2019-06-07

基金项目: 四川省科技厅应用基础项目(2018JY0374); 四川省重点研发项目(2018NZ0147); 四川省科技基础条件平台项目(2019JDPT0009); 国家现代农业产业技术体系四川创新团队专项。

作者简介: 黄艳(1994-), 女, 四川资中人, 博士研究生, 主要从事果树生理生态及栽培研究。E-mail: 275477909@qq.com。

通讯作者: 吕秀兰, E-mail: xllvjj@163.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与土壤

供试凤仙花种子采自四川农业大学成都校区(东经 103° 50', 北纬 30° 42') 周围农田; 供试葡萄为‘夏黑’的扦插苗, 来自四川农业大学崇州基地。供试土壤取自四川农业大学成都校区周边农田, 其基本理化特性为: pH 值 7.06, 全氮 1.48 g/kg, 全磷 0.78 g/kg, 全钾 17.82 g/kg, 碱解氮 94.65 mg/kg, 有效磷 6.28 mg/kg, 速效钾 149.52 mg/kg, 其中供试土壤背景有效镉含量未检出。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 凤仙花嫁接处理

2017 年 4 月将取自同一株凤仙花的种子进行播种和育苗, 待植株长到一定高度时进行嫁接处理<sup>[17]</sup>。嫁接处理方式如下: 1) 不嫁接处理(CK)。凤仙花幼苗移栽种植, 收集种子保存。2) 同株嫁接(SG)。选用一株约 10 cm 高的凤仙花, 以苗上部(约 4 cm)作接穗, 苗下部茎段(约 6 cm)作砧木进行嫁接, 并保留砧木叶片。3) 异株同苗嫁接(UG)。选用 2 株株高约 10 cm 的凤仙花, 将一株取苗上部(约 4 cm)作接穗, 另一株苗下部茎段(约 6 cm)作砧木进行嫁接, 并保留砧木叶片。4) 异株异苗嫁接(DG)。选用 2 株株高分别约 5 和 10 cm 的凤仙花, 将株高 10 cm 的凤仙花下部茎段(约 6 cm)作砧木, 株高 5 cm 的凤仙花取上部苗(约 4 cm)作接穗进行嫁接。

均采用劈接法嫁接。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, 并种植在营养土中。嫁接成活后, 将凤仙花全部移植到无重金属污染的湿润土壤中。待凤仙花开花时, 采用硫酸纸袋进行套袋隔离。种子成熟后, 分别收集种子保存待用。

#### 1.2.2 试验设计

2018 年 2 月, 将风干后的供试土壤过 5 mm 筛, 用 15 cm × 18 cm (直径 × 高) 塑料盆每盆装入 3.0 kg, 以 CdCl<sub>2</sub> · 2.5H<sub>2</sub>O 分析纯形式加入重金属镉并混匀, 使土壤镉浓度为 5 mg/kg。保持土壤湿润, 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, 保证土壤充分混合均匀。2018 年 4 月, 将不同嫁接处理的凤仙花后代种子进行分别育苗。2018 年 5 月挑选生长基本一致的‘夏黑’葡萄当年扦插幼苗(新梢长约 10 cm)及凤

仙花嫁接后代(2 对真叶展开)栽入塑料盆中, 葡萄单种每盆 3 株, 葡萄与凤仙花嫁接后代混种为每盆葡萄 2 株, 凤仙花嫁接后代 2 株, 每个处理重复 3 次。盆与盆之间的距离为 15 cm, 完全随机摆放。保证其在自然状况下生长, 根据盆中土壤缺水情况, 不定期浇水(水中未检出镉), 使土壤保持湿润。为防止污染物淋溶渗漏损失, 在盆下放置塑料托盘并将渗漏液倒回盆中。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。

### 1.3 项目测定

2018 年 6 月, 采集葡萄幼苗其从上往下的第 3 或第 4 片功能叶, 测定叶片的光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)含量及抗氧化酶(SOD、CAT)活性。光合色素含量采用紫外分光光度法进行测定<sup>[18]</sup>, SOD 活性采用氮蓝四唑法进行测定<sup>[18]</sup>, CAT 活性采用高锰酸钾滴定法进行测定<sup>[18]</sup>。之后将葡萄和凤仙花嫁接后代整株收获, 土壤分开存放。将葡萄植株分成根、茎、叶 3 部分, 将凤仙花嫁接后代植株分为根系和地上部两部分, 分别用自来水洗净, 再用去离子水冲洗 3 次后, 于 110 °C 杀青 15 min, 80 °C 烘干至恒重, 称重, 然后粉碎, 过 0.149 mm 筛, 植物样品由硝酸和高氯酸(体积比为 4:1)消化后用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪(Thermo Scientific, USA)测定镉含量<sup>[19]</sup>。土壤自然风干后过 1 mm 筛, 土壤 pH 值采用土水比 1:2.5 进行测定。土壤有效态镉含量由 DTPA-TEA 提取并 ICP-MS 分析测定<sup>[20]</sup>。转运系数 = 地上部镉含量 / 根系镉含量<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 统计软件对试验数据进行分析, 采用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 分析差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗生物量的影响

由表 1 可知, 混种异株异苗株凤仙花嫁接后代与混种凤仙花未嫁接后代和葡萄单种相比, 均显著提高了葡萄幼苗根系和地上部分的生物量。葡萄幼苗根系的生物量按照由大到小的顺序排列依次为单种 < 混种凤仙花同株嫁接后代 < 混种凤仙花异株同苗株嫁接后代 < 混种凤仙花未嫁接后代 < 混种凤仙花同株嫁接后代 < 混种凤仙花异株异苗株嫁接后

代。葡萄幼苗地上部分的生物量按照由大到小的顺序排列依次为混种凤仙花未嫁接后代 < 单种 < 混种凤仙花同株嫁接后代 < 混种凤仙花异株同苗株嫁接后代 < 混种凤仙花异株异苗株嫁接后代。与葡萄

单种相比, 混种异株异苗株凤仙花嫁接后代葡萄幼苗根系和地上部分的生物量分别增加了 47.25% 和 23.16%。另外, 混种凤仙花异株异苗株嫁接后代葡萄幼苗的根冠比也最高。

表 1 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗生物量的影响

处理	根系 (g/株)	茎秆 (g/株)	叶片 (g/株)	地上部分 (g/株)	根冠比
葡萄单种 (GS)	1.44 ± 0.61c	2.17 ± 0.19b	4.73 ± 0.30b	6.90 ± 0.23b	0.209
葡萄 (混种凤仙花 CK)	1.65 ± 0.50b	2.14 ± 0.14b	3.75 ± 0.75c	5.89 ± 0.45c	0.280
葡萄 (混种凤仙花 SG)	1.48 ± 0.40c	2.76 ± 0.30a	4.51 ± 0.50b	7.27 ± 0.42a	0.204
葡萄 (混种凤仙花 UG)	1.60 ± 0.30b	2.72 ± 0.20a	5.16 ± 0.20a	7.88 ± 0.20a	0.203
葡萄 (混种凤仙花 DG)	2.73 ± 0.70a	2.66 ± 0.22a	6.32 ± 0.32a	8.98 ± 0.27a	0.304

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

## 2.2 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗光合色素的影响

由表 2 可知, 在镉胁迫条件下, 混种凤仙花嫁接后代与葡萄单种相比, 不同程度地增加了葡萄幼苗的光合色素。混种凤仙花异株异苗株嫁接后代的葡萄幼苗叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量均显著高于葡萄单种。与凤仙花嫁接后代混种的葡萄幼苗叶片叶绿素总量由大到小的顺序排列依次为单种 < 混种凤仙花未嫁接后代 < 混种凤

仙花异株同苗株嫁接后代 < 混种凤仙花同株嫁接后代 < 混种凤仙花异株异苗株嫁接后代; 类胡萝卜素含量由大到小的顺序排列依次为单种 < 混种凤仙花未嫁接后代 < 混种凤仙花同株嫁接后代 < 混种凤仙花异株同苗株嫁接后代 < 混种凤仙花异株异苗株嫁接后代。混种异株异苗株凤仙花嫁接后代葡萄幼苗的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量与葡萄单种相比分别增加了 20.48%、26.68% 和 14.12%。

表 2 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗光合色素的影响 (mg/g)

处理	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素总量	类胡萝卜素
葡萄单种 (GS)	0.889 ± 0.009c	0.305 ± 0.003c	1.194 ± 0.008d	0.219 ± 0.006b
葡萄 (混种凤仙花 CK)	0.937 ± 0.012c	0.356 ± 0.002bc	1.293 ± 0.039cd	0.220 ± 0.012b
葡萄 (混种凤仙花 SG)	1.053 ± 0.002b	0.375 ± 0.002ab	1.428 ± 0.004ab	0.249 ± 0.002ab
葡萄 (混种凤仙花 UG)	1.048 ± 0.003b	0.347 ± 0.027bc	1.395 ± 0.003bc	0.250 ± 0.004ab
葡萄 (混种凤仙花 DG)	1.118 ± 0.027a	0.416 ± 0.008a	1.533 ± 0.036a	0.255 ± 0.002a

## 2.3 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗抗氧化酶活性、可溶性糖和可溶性蛋白的影响

在土壤镉胁迫条件下, 混种凤仙花嫁接后代可显著提高葡萄幼苗抗氧化酶 (SOD、CAT) 活性。由表 3 可知, 混种凤仙花嫁接后代葡萄幼苗的 SOD 和 CAT 活性均显著高于葡萄单种。葡萄幼苗的 SOD 和 CAT 活性表现为单种 < 混种凤仙花未嫁接后代 < 混种凤仙花同株嫁接后代 < 混种凤仙花异株同苗株嫁接后代 < 混种凤仙花异株异苗株嫁接后代。葡萄幼苗的 SOD 活性较葡萄单种分别提高了

11.31%、17.51%、28.15% 和 32.35%; CAT 活性较葡萄单种分别提高了 10.05%、25.98%、26.85% 和 38.16%。

混种凤仙花嫁接后代葡萄幼苗可溶性糖含量与葡萄单种相比均显著增加, 其中混种凤仙花异株异苗株嫁接后代葡萄幼苗的可溶性糖含量最高, 较葡萄单种增加了 44.14%。混种凤仙花同株嫁接后代和混种凤仙花异株异苗株嫁接后代葡萄幼苗可溶性蛋白含量与葡萄单种相比均显著增加, 较葡萄单种分别增加了 29.90% 和 31.48%。

表 3 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗抗氧化酶活性、可溶性糖和可溶性蛋白的影响

处理	超氧化物歧化酶活性 (U/g)	过氧化氢酶活性 (U/g)	可溶性蛋白含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (mg/g)
葡萄单种 (GS)	175.05 ± 4.77e	1.88 ± 0.04d	6.656 ± 0.029c	0.062 ± 0.005d
葡萄 (混种凤仙花 CK)	197.38 ± 1.26d	2.09 ± 0.02c	8.124 ± 0.202b	0.083 ± 0.004b
葡萄 (混种凤仙花 SG)	212.22 ± 2.19c	2.54 ± 0.02b	9.495 ± 0.130a	0.070 ± 0.002c
葡萄 (混种凤仙花 UG)	243.64 ± 0.96b	2.57 ± 0.02b	6.676 ± 0.142c	0.072 ± 0.003c
葡萄 (混种凤仙花 DG)	258.76 ± 0.86a	3.04 ± 0.02a	9.715 ± 0.043a	0.111 ± 0.006a

2.4 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗镉含量的影响

由表 4 可知, 与凤仙花嫁接后代混种的葡萄幼苗根系和地上部分的镉含量均显著低于葡萄单种。葡萄幼苗的根系和地上部分的镉含量均表现为单种 > 混种凤仙花未嫁接后代 > 混种凤仙花同株嫁接后代 > 混种凤仙花异株同苗株嫁接后代 > 混种凤仙花异株异苗株嫁接后代。按镉含量由高到低, 混

种凤仙花嫁接后代葡萄幼苗根系的镉含量与葡萄单种相比分别降低了 15.18%、17.13%、56.67% 和 83.53%。混种凤仙花异株异苗株嫁接后代的葡萄幼苗地上部分的镉含量最低。就转运系数而言, 混种凤仙花嫁接后代均降低了葡萄幼苗的转运系数, 其中混种凤仙花异株异苗株嫁接后代葡萄幼苗的转运系数最低。

表 4 混种凤仙花嫁接后代对葡萄幼苗镉含量的影响

处理	根系 (mg/kg)	茎秆 (mg/kg)	叶片 (mg/kg)	地上部分 (mg/kg)	转运系数
葡萄单种 (GS)	40.89 ± 9.46a	0.466 ± 0.012a	0.413 ± 0.006a	0.443 ± 0.010a	0.011
葡萄 (混种凤仙花 CK)	35.50 ± 5.35b	0.472 ± 0.003a	0.400 ± 0.012a	0.363 ± 0.002b	0.010
葡萄 (混种凤仙花 SG)	34.79 ± 8.42b	0.423 ± 0.013b	0.399 ± 0.002a	0.325 ± 0.001b	0.009
葡萄 (混种凤仙花 UG)	26.10 ± 4.69c	0.356 ± 0.002c	0.341 ± 0.003b	0.272 ± 0.003b	0.010
葡萄 (混种凤仙花 DG)	22.28 ± 3.78c	0.111 ± 0.003c	0.037 ± 0.015b	0.071 ± 0.014c	0.003

2.5 与葡萄混种的凤仙花嫁接后代生物量及镉积累

由表 5 可知, 在土壤镉胁迫条件下, 混种葡萄幼苗会不同程度地影响凤仙花嫁接后代的生物量、镉含量和镉积累量。与葡萄混种的凤仙花嫁接后代根系和地上部分的生物量均显著大于未嫁接后代, 同株嫁接后代和异株同苗株嫁接后代根系和地

上部分的镉含量显著低于未嫁接后代。就镉积累量而言, 与葡萄混种的凤仙花嫁接后代根系和地上部分的镉积累量均显著大于未嫁接后代, 其中异株异苗株嫁接后代根系和地上部分的镉积累量达到最大值, 分别为 30.31 和 171.10 μg, 较未嫁接后代分别增加 46.45% 和 44.06%。

表 5 与葡萄混种的凤仙花嫁接后代生物量及镉积累

处理	生物量		镉含量		镉积累量	
	根 (g/株)	地上部分 (g/株)	根 (mg/kg)	地上部分 (mg/kg)	根 (μg/株)	地上部分 (μg/株)
葡萄 (混种凤仙花 CK)	1.24 ± 0.14c	7.53 ± 0.40c	13.05 ± 0.20a	12.71 ± 1.53a	16.23 ± 1.74c	95.71 ± 2.76c
葡萄 (混种凤仙花 SG)	1.71 ± 0.02b	11.60 ± 0.40b	12.75 ± 0.24b	11.70 ± 1.26b	21.80 ± 1.18b	135.70 ± 5.62b
葡萄 (混种凤仙花 UG)	2.08 ± 0.10a	12.80 ± 0.21b	11.35 ± 0.15c	10.87 ± 0.59c	23.06 ± 1.64b	139.15 ± 3.25b
葡萄 (混种凤仙花 DG)	2.27 ± 0.10a	14.08 ± 0.40a	13.36 ± 0.06a	12.15 ± 0.48ab	30.31 ± 2.14a	171.10 ± 1.35a

2.6 混种后土壤 pH 值及有效态镉含量

由图 1 可知, 在镉胁迫条件下, 葡萄幼苗混种凤仙花嫁接后代土壤中的 pH 值较葡萄单种显著增

加, 具体表现为单种 < 未嫁接后代 < 同株嫁接后代 < 异株同苗株嫁接后代 < 异株异苗株嫁接后代。由图 2 可知, 葡萄幼苗混种凤仙花嫁接后代土壤中的

有效态镉含量较葡萄单种显著降低, 具体表现为单种 > 未嫁接后代 > 同株嫁接后代 > 异株同苗株嫁接后代 > 异株异苗株嫁接后代。

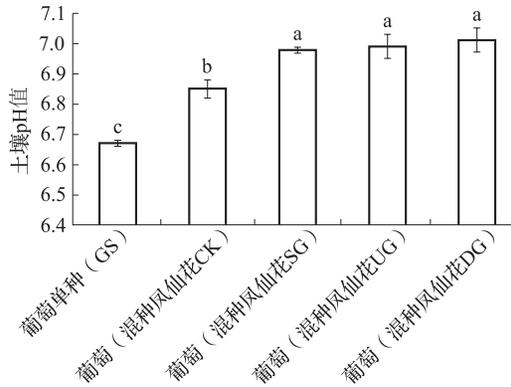


图1 混种对土壤 pH 值的影响

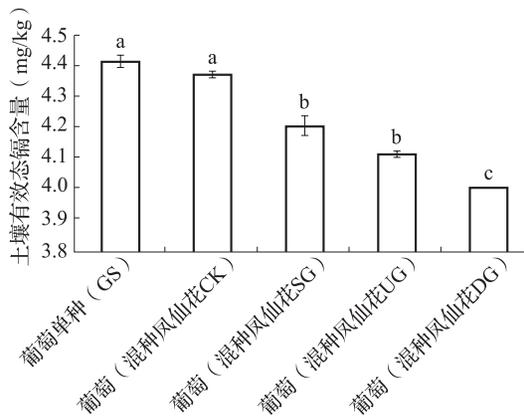


图2 混种对土壤有效态镉含量的影响

### 3 讨论

植物间混种可通过根际对话影响植物的生长, 在重金属污染条件下, 植物分泌的低分子量有机酸通过形成可溶性络合物而增加重金属元素在根际土壤的移动性<sup>[22]</sup>。另外根系分泌物可改变重金属的生物有效性和毒性, 并在植物吸收重金属的过程中发挥重要作用<sup>[23]</sup>。混种还可以通过增强植物与植物、植物与环境间的相互作用来提高植物对外界胁迫的抗逆性, 从而提高农产品的品质与产量<sup>[24-25]</sup>。孙国超等<sup>[26]</sup>研究发现树番茄幼苗混种繁缕可有效降低镉污染土壤上树番茄幼苗的镉积累, 同时达到修复镉污染土壤的效果。练华山等<sup>[27]</sup>研究表明混种牛膝菊嫁接后代能够促进树番茄幼苗的生长, 并降低树番茄的镉含量。本研究结果与上述结果相似, 研究发现凤仙花嫁接后代和葡萄幼苗混种能够

提高葡萄幼苗生物量, 显著降低葡萄幼苗根及地上部分的镉含量。

光合作用是植物最重要的生理反应之一, 其光合色素含量水平高低直接反映了光合能力的强弱。本研究结果发现在土壤镉胁迫条件下, 混种凤仙花嫁接后代与葡萄单种相比, 不同程度地增加了葡萄幼苗的光合色素。混种凤仙花异株异苗株嫁接后代的葡萄幼苗叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量均显著高于葡萄单种, 这和人研究结果一致<sup>[28]</sup>。

Michael 等<sup>[29]</sup>认为植物细胞中可溶性蛋白可与重金属离子结合形成金属结合蛋白, 从而降低植物细胞中游离态重金属离子的含量, 以减轻重金属离子对植物细胞的伤害; 糖是参与调节渗透胁迫的小分子物质, 在植物对重金属的适应性调节中, 是增加渗透性溶质的重要组成部分。韩淑梅等<sup>[30]</sup>研究表明在土壤镉胁迫条件下, 植物通过一系列生理生化反应形成了一定耐性机制, 通过增加脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白为镉耐性相关蛋白的合成提供物质基础, 增强了植物耐受重金属的能力。植物还可通过提高体内抗氧化酶的活性, 及时清除过量的活性氧自由基, 减缓镉胁迫的毒害作用<sup>[31]</sup>。本试验研究表明, 葡萄幼苗混种凤仙花嫁接后代提高了抗氧化酶活性、可溶性蛋白及可溶性糖含量, 这与前人的研究结果一致<sup>[9]</sup>。

研究表明, 重金属胁迫会促进植物根系分泌物的释放, 可通过改变根际 pH 值等理化性质间接地影响重金属在土壤中的有效性<sup>[32]</sup>, 土壤 pH 值是决定重金属形态及分布的直接因素<sup>[33]</sup>。本试验研究发现凤仙花嫁接后代和葡萄幼苗混种显著增加了土壤 pH 值, 并降低了土壤的有效态镉含量。这可能是凤仙花嫁接后代和葡萄幼苗混种产生了根际对话, 改变了根际土壤环境, 提高了土壤养分有效性, 从而促进了凤仙花嫁接后代对重金属镉的吸收。

### 4 结论

在镉胁迫条件下, 葡萄幼苗混种凤仙花嫁接后代可提高葡萄幼苗生物量、光合色素含量、抗氧化酶活性、可溶性蛋白及可溶性糖含量, 并显著降低葡萄幼苗根及地上部分的镉含量, 增加土壤 pH 值, 降低土壤的有效态镉含量。其中, 葡萄幼苗与凤仙花异株异苗株嫁接后代混种效果最佳, 使葡萄幼苗

的生物量及凤仙花嫁接后代的镉积累量均达到最大值,且葡萄幼苗地上部分的镉含量显著低于其他处理。因此,本研究的凤仙花嫁接后代均可应用于葡萄园镉污染土壤的修复,且最佳材料是凤仙花异株异苗株嫁接后代。

参考文献:

[1] 张望舒,蔡冲,周瑛华,等. 镉胁迫对不同品种葡萄叶片生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, (1): 171-173.

[2] Nouri M, Haddioui A. Human and animal health risk assessment of metal contamination in soil and plants from Ait Ammar abandoned iron mine, Morocco[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188 (6): 1-12.

[3] 刘子龙,鲁建江,张广军. 石河子葡萄主产区土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 西北林学院学报, 2010, 25 (4): 14-18.

[4] 苏亚勋,王素君,赵立伟,等. 天津市郊区果园土壤重金属镉污染状况调查试验研究[J]. 天津农业科学, 2016, 22 (6): 20-22, 27.

[5] 汤民,张进忠,张丹,等. 果园土壤重金属污染调查与评价—以重庆市金果园为例[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (14): 244-249.

[6] 董艳,董坤. 间套混种控病增产机制研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43 (1): 236-242.

[7] 朱红霞,贾艳蕾,景华宇,等. 混种3种观赏植物对白三叶铅积累的影响[J]. 水土保持学报, 2018, (1): 291-296.

[8] 朱红霞. 混种雏菊和紫花地丁对白车轴草镉积累的影响[J]. 安徽农学通报, 2018, (22): 127-134.

[9] 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, (4): 481-487.

[10] 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.

[11] Wu R, Wang X, 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.

[12] 王占锋,黄科文,练华山,等. 嫁接对硫华菊及凤仙花后代生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (11): 112-115.

[13] 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.

[14] Wang J, Lin L, Liu L, et al. Interspecies rootstocks affect cadmium accumulation in postgrafting generation plants of potential cadmium-hyperaccumulator *Solanum photeinocarpum* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, 35 (11): 2845-2850.

[15] Lin L, Yang D, Wang X, et al. Effects of grafting on the cadmium accumulation characteristics of the potential Cd-hyper accumulator *Solanum photeinocarpum* [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188 (2): 82.

[16] 陈杰. 几种积累镉花卉筛选及其修复污染土壤潜力研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 380-383.

[20] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51 (7): 844-851.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 刘一鸣,杨智仙,董艳. 对羟基苯甲酸胁迫下间作对蚕豆枯萎病发生和根系抗氧化酶活性的影响[J]. 核农学报, 2017, (5): 987-995.

[25] 张绪成,王红丽,于显枫,等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (3): 468-481.

[26] 孙国超,李红艳,廖明安,等. 混种石竹科富集植物对树番茄幼苗镉积累的影响[J]. 湖南农业科学, 2019, (2): 13-17.

[27] 练华山,廖明安,林立金. 混种牛膝菊嫁接后代对树番茄幼苗镉积累的影响[J]. 北方园艺, 2019, (7): 94-101.

[28] 汤福义,林立金,杨代宇,等. 少花龙葵种间嫁接后代对小白菜生长及镉积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47 (1): 207-212.

[29] Michael B, Eileen B, Carl A. Partial characterization of a cadmium-binding protein from the roots of cadmium-treated tomato [J]. Plant Physiology, 1980, 66 (3): 38-41.

[30] 韩淑梅,简丽,董旋,等. 不同浓度及不同时间镉胁迫对超富集植物孔雀草渗透调节物质的影响[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36 (3): 44-48.

[31] Arasimowicz J M, Floryszak W J, Deckert J, et al. Nitric oxide implication in cadmium-induced programmed cell death in roots and signaling response of yellow lupine plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 58: 124-134.

[32] 常学秀,段昌群,王焕校. 根分泌作用与植物对金属毒害的抗性[J]. 应用生态学报, 2000, 11 (2): 315-320.

- [ 33 ] Ardestani M M, Van Gestel C A M. Using a toxicokinetics approach to explain the effect of soil pH on cadmium bioavailability to *Folsomia candida* [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 180: 122–130.

**Effects of intercropping with post-grafting generation of *Impatiens balsamina* on growth and cadmium accumulation of grape seedlings**

HUANG Yan<sup>1</sup>, HUANG Ke-wen<sup>2</sup>, LIAO Ming-an<sup>2</sup>, LIN Li-jin<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, LV Xiu-lan<sup>1\*</sup> (1. Institute of Fruits and Vegetables, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130; 2. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130)

**Abstract:** Pot experiment was carried out to intercropping grape seedlings with *Impatiens balsamina* which non-grafted, self-rooted grafting by the same plant seedling, self-rooted grafting by two uniform plant seedlings, and self-rooted grafting by two different development stages of plant seedlings. The effects of intercropping with post-grafting generation of *Impatiens balsamina* on the growth and cadmium accumulation of grape seedlings under cadmium stress were studied. The results showed that intercropping with post-grafting generation of *Impatiens balsamina* increased the biomass, photosynthetic pigment content, antioxidant enzyme activity, soluble protein and soluble sugar content of grape seedlings compared with single grape seedlings, while significantly decreased the cadmium content in root and above ground part of grape seedlings. The intercropping significantly increased soil pH value and decreased the content of available cadmium in soil. Among them, the self-rooted grafting by two different development stages of plant seedlings had the best effect on promoting the growth of grape seedlings and reducing the accumulation of cadmium in soil. Compared with single grape seedlings, the biomass of root and above ground part of grape seedlings were increased by 47.25% and 23.16%, respectively. The content of cadmium in root and above ground part of grape seedlings was significantly lower than those of single grape and other grafting treatments, and the content of available cadmium in soil was 10.02% lower than that of single grape. The intercropping grape seedlings with post-grafting generation of *Impatiens balsamina* in this experiment can be applied to the remediation of cadmium contaminated soil in vineyards, and the best material is the self-rooted grafting by two different development stages of plant seedlings.

**Key words:** intercropping; post-grafting generation of *Impatiens balsamina*; grape seedlings; cadmium