

土施超富集植物秸秆对镉污染条件下葡萄生长及镉含量的影响

李欣欣¹, 钟莉莎¹, 马倩倩², 张 潇³, 林立金⁴, 廖明安^{1*}

(1. 四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130; 2. 达州市农业科学研究所, 四川 达州 635000; 3. 邛崃市农业农村局, 四川 成都 611530; 4. 四川农业大学果蔬研究所, 四川 成都 611130)

摘 要: 通过盆栽试验, 研究了在镉污染条件下, 土施3种镉超富集植物(龙葵、野苘蒿、三叶鬼针草)秸秆对葡萄生长及镉含量的影响。结果表明: 幼苗试验中, 土施龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄幼苗生物量、光合作用强度、抗氧化酶活性和代谢物质含量均增加, 且葡萄幼苗地上部分镉含量减少, 较未施用分别减少了37.63%、18.31%和22.25%。结果树试验中, 土施龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄果实镉含量均减少且提高了果实品质, 其中果实镉含量较未施用分别减少了22.11%、14.07%和19.25%。因此, 土施龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆能促进葡萄的生长和降低其镉含量, 有利于镉污染果园中葡萄的正常生长及安全生产, 其中土施龙葵秸秆效果最佳。

关键词: 超富集植物秸秆; 野苘蒿; 三叶鬼针草; 龙葵; 葡萄

镉是土壤重金属污染中面积最广的重金属元素之一^[1]。据调查显示, 耕地中重金属污染点位以镉超标最为显著^[2], 中国已有11个省、25个地区的农田遭受镉污染, 受镉污染的农田面积达到28万hm², 每年生产镉含量超标农产品1.46×10⁹kg^[3]。镉也是土壤重金属污染中危害最大的重金属元素之一^[1], 因其生物毒性强、迁移性大和不被生物体降解, 容易通过食物链在人体和动植物体内富集, 对动植物及人体的健康产生毒害作用^[4-5]。

葡萄具有较高的营养价值和医疗保健功能, 是重要的果品之一, 其栽培面积和产量一直位于世界水果生产前列^[6]。随着葡萄产业的发展, 农药和肥料等使用不当以及环境污染等^[7]致使中国各地区的葡萄园土壤受到不同程度的镉污染, 如长沙、株洲地区、天津市西青区等地区的葡萄园^[8-9]。且葡萄的多年生特性使其地上部分累积镉的可能性增加, 从而对葡萄正常生长和果品安全造成影响。因此, 为确保果品绿色生产和安全食用, 土壤镉污染治理和修复显得尤为重要。

目前, 重金属植物修复技术相较于传统的物

理、化学和工程措施具有经济、高效、环保和适用范围广等优点, 已成为修复土壤重金属污染的一项重要技术^[10]。但由于超富集植物生物量低、生长缓慢、地域性较强和修复时间较长等缺陷因素, 使得植物修复技术难以大范围推广应用^[11]。为克服植物修复技术存在的缺陷, 可采取一些农艺措施来提高其修复效率^[12]。在农业生产上, 秸秆还田是利用秸秆的一种重要且有效的方式, 不仅具有良好的土壤、生物和农田效应, 还能提高作物产量和品质^[13-14], 且有研究表明秸秆对植物吸收重金属也有一定影响^[15]。如在镉胁迫下, 覆盖镉超富集植物牛膝菊秸秆使树番茄、大五星和川早枇杷地上部分镉含量均增加^[16-17], 但施用镉耐性植物车前秸秆、镉富集植物小飞蓬秸秆和镉超富集植物少花龙葵秸秆使树番茄地上部分镉含量均减少^[17-19]。因此, 选用适宜的秸秆施入土壤能减少植物对镉的吸收。经前期混种试验表明, 龙葵(*Solanum nigrum*)^[20]、野苘蒿(*Crassocephalum crepidioides*)^[21]和三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)^[22]这3种生长周期短、生物量大、分布广和对镉富集能力强的镉超富集植物^[23-24]能显著降低植物镉含量^[25-26]。但混种材料前期生长速度快于作物, 会争夺作物养分、光照等资源, 后期作物长大荫蔽混种材料使混种效果弱化^[27]。而相关研究表明, 混种和施用混种试验材料秸秆会对植物重金属吸收产生相同或不同影响^[17, 28]。因

收稿日期: 2019-08-14; 录用日期: 2019-09-16

基金项目: 四川科技厅项目(2020YFH0144)。

作者简介: 李欣欣(1994-), 女, 四川雅安人, 硕士生, 主要从事果树生理生态及栽培研究。E-mail: 347319112@qq.com。

通讯作者: 廖明安, E-mail: lman@sicau.edu.cn。

此, 本试验选用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草地上部分秸秆作为试验材料, 施入镉污染土壤中种植葡萄, 研究其对葡萄生长及镉含量的影响, 以期筛选出能降低葡萄镉含量的植物秸秆, 为葡萄果园镉污染防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 植物材料

于2018年3月在四川农业大学成都校区周围农田(未被重金属污染区)采集供试超富集植物龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草地上部分, 然后分别用去离子水洗净后, 于110℃杀青15 min, 80℃烘干至衡重, 分别剪成小于1 cm的小段密封袋, 装袋保存备用。

供试葡萄品种为‘巨峰’, 供试葡萄幼苗于2018年5月购置于四川省成都市龙泉驿区苗木基地, 供试葡萄结果为两年生苗木。

1.1.2 试验土壤及重金属

供试土壤取自四川农业大学成都校区周围农田, 为紫色土, 基本理化性质如下: 土壤pH值为7.09, 全氮含量为1.50 g/kg, 全磷含量为0.76 g/kg, 全钾含量为18.02 g/kg, 碱解氮含量为94.82 mg/kg, 有效磷含量为6.30 mg/kg, 速效钾含量为149.59 mg/kg, 全镉含量为0.02 mg/kg, 土壤背景有效镉含量未检出^[26]。土壤理化性质及重金属含量均参照鲍士旦^[29]的方法测定。

供试重金属为镉, 以分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 形式按设计浓度加入供试土壤(根据每盆土的重量及设计浓度, 按镉占 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 相对分子质量的比重, 精确计算加入 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 的量, 以保证土壤镉浓度准确)。

1.2 试验设计

盆栽试验于2018年4~11月在四川农业大学成都校区五教进行。2018年4月, 将土壤风干、压碎过5 mm筛后分别称取3.0和6.0 kg土分别装入15 cm×18 cm和30 cm×35 cm(高×直径)规格塑料盆内, 再加入分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 使其镉浓度达到5 mg/kg, 保持淹水状态, 自然放置平衡4周。2018年5月将处理好的龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草地上部分秸秆分别与镉污染土壤混匀, 每千克土施2 g秸秆, 浇水保持湿润, 平衡2周; 挑选生长基本一致且无病虫害的当年扦插巨

峰葡萄幼苗(新梢长约15 cm)定植至15 cm×18 cm(高×直径)盆中, 两年生结果树定植至30 cm×35 cm(高×直径)盆中, 幼苗每盆种植3株, 结果树每盆种植1株, 每个处理重复3次。本试验共有4个处理: 未施秸秆(CK)、施龙葵秸秆、施野苘蒿秸秆和施三叶鬼针草秸秆。葡萄的管理按照标准的盆栽管理方式进行, 各盆(盆间距约15 cm)随机摆放并不定期随机调换位置, 保证盆土的含水量约为田间持水量的80%, 同时注意防治杂草和病虫害。

1.3 测试项目与方法

60 d后, 选取每株葡萄幼苗植株顶部约2 cm长的幼嫩叶片进行处理, 测定抗氧化酶(SOD、POD和CAT)活性和可溶性蛋白含量^[30]。选取从上往下的第3或第4片功能叶, 测定叶绿素含量^[30]。选取葡萄幼苗从上往下的第2片完全展开叶测定光合参数。之后收获整株葡萄幼苗, 并收集盆栽土各部位不含根系和杂质的土壤。葡萄幼苗根系、茎秆和叶片分别用自来水洗净, 再用去离子水冲洗3次后, 于110℃杀青15 min, 80℃烘干至衡重, 称重, 粉碎, 过0.149 mm筛后分别称取相应重量干物质用于可溶性糖含量^[30]及镉含量的测定^[29]。将收集的土壤铺开放置, 阴干过1 mm×1 mm筛后测定土壤pH值^[29]及土壤5种形态镉含量^[31]。

8月中旬, 待葡萄完全成熟, 选取每果穗上、中、下各部位3个果粒测定果实可溶性糖含量^[30]、可滴定酸含量^[32]、Vc含量^[32]及可溶性固形物。将葡萄果实用自来水洗净, 再用去离子水冲洗3次后, 于110℃杀青15 min, 80℃烘干至衡重, 粉碎, 过0.149 mm筛后称取相应重量干物质用于镉含量的测定^[29]。

1.4 数据处理

采用Excel 2010进行数据记录与整理, 采用SPSS 20.0系统进行Duncan差异显著性分析。转运系数=植物地上部分镉含量/根系镉含量^[33]。

2 结果与分析

2.1 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗生物量的影响

由表1可知, 与未施用相比, 施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄幼苗叶片生物量增加, 较未施用分别增加了38.66%、8.19%和20.28%。施用3种秸秆后葡萄幼苗根系、茎秆及地上部分较未施用无显著性差异, 但未施用秸秆葡萄幼苗根

系、茎秆及地上部分生物量均为最低。施用3种秸秆后葡萄幼苗的根冠比大小顺序为：施用三叶鬼

针草秸秆 > 施用龙葵秸秆 = 未施用 > 施用野苘蒿秸秆。

表1 土施超富集植物秸秆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
未施用	4.63 ± 0.76a	3.05 ± 0.45a	10.01 ± 1.17b	13.06 ± 1.62a	0.35
龙葵	6.26 ± 0.38a	4.08 ± 1.11a	13.88 ± 1.33a	17.96 ± 2.43a	0.35
野苘蒿	4.78 ± 0.81a	3.39 ± 0.53a	10.83 ± 0.78ab	14.22 ± 0.26a	0.34
三叶鬼针草	5.62 ± 0.67a	3.62 ± 0.46a	12.04 ± 1.49ab	15.66 ± 1.95a	0.36

注：不同小写字母表示不同处理在5%显著水平上差异显著，下同。

2.2 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗光合色素含量的影响

由表2可知，施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄幼苗叶绿素a含量、类胡萝卜素含量及叶绿素总量较未施用均增加，但叶绿素b含量与未施用无显著性差异。施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针

草秸秆后葡萄幼苗叶绿素a含量较未施用分别增加了9.42%、1.61%和7.31%，叶绿素总量较未施用分别增加了7.93%、0.95%和5.69%。就葡萄幼苗叶绿素a/b值而言，施用3种秸秆后葡萄幼苗叶绿素a/b值均高于未施用。

表2 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗光合色素含量的影响

处理	叶绿素a含量 (mg/g)	叶绿素b含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)	叶绿素总量 (mg/g)	叶绿素a/b
未施用	0.807 ± 0.011b	0.348 ± 0.009a	0.139 ± 0.003b	1.160 ± 0.002c	2.32
龙葵	0.883 ± 0.022a	0.369 ± 0.015a	0.160 ± 0.004a	1.252 ± 0.037a	2.39
野苘蒿	0.820 ± 0.014ab	0.351 ± 0.038a	0.144 ± 0.007b	1.171 ± 0.025bc	2.34
三叶鬼针草	0.866 ± 0.038ab	0.360 ± 0.015a	0.145 ± 0.005b	1.226 ± 0.023ab	2.41

2.3 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗叶片光合参数的影响

由表3可知，施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后，除葡萄幼苗叶片蒸腾速率和胞间CO₂浓度与未施用无显著性差异，净光合速率、叶温下蒸气

压亏缺值和气孔导度均显著高于未施用，净光合速率较未施用分别升高了41.30%、5.43%和9.94%，叶温下蒸气压亏缺值较未施用分别升高了62.15%、29.05%和39.11%，气孔导度较未施用分别升高了115.69%、70.59%和113.73%。

表3 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗叶片光合参数的影响

处理	蒸腾速率 [H ₂ O mmol/(m ² ·s)]	净光合速率 [CO ₂ μmol/(m ² ·s)]	胞间CO ₂ 浓度 (CO ₂ μmol/mol)	气孔导度 [H ₂ O mol/(m ² ·s)]	叶温下蒸气压亏缺值 (kPa)
未施用	0.0018 ± 0.0005a	6.44 ± 0.40b	295.1 ± 5.5a	0.153 ± 0.023b	0.716 ± 0.065c
龙葵	0.0027 ± 0.0008a	9.10 ± 0.83a	329.3 ± 8.5a	0.330 ± 0.034a	1.161 ± 0.034a
野苘蒿	0.0024 ± 0.0006a	6.79 ± 0.93b	299.9 ± 11.9a	0.261 ± 0.037a	0.924 ± 0.083b
三叶鬼针草	0.0027 ± 0.0004a	7.08 ± 0.71ab	304.6 ± 24.1a	0.327 ± 0.037a	0.996 ± 0.086ab

2.4 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗抗氧化酶活性及物质代谢的影响

由表4可知，施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针

草秸秆后葡萄幼苗POD活性较未施用显著升高，SOD和CAT活性与未施用无显著性差异。施用3种秸秆后葡萄幼苗POD活性较未施用分别升高了

53.59%、17.29% 和 31.39%。与未施用相比, 施用 3 种秸秆后葡萄幼苗可溶性糖含量和可溶性蛋白含量均增加, 其中可溶性糖含量较未施用分别

增加了 74.95%、37.87% 和 55.70%, 可溶性蛋白含量较未施用分别增加了 58.62%、17.60% 和 30.10%。

表 4 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗抗氧化酶活性及物质代谢的影响

处理	SOD 活性 (U/g)	POD 活性 [U/(g·min)]	CAT 活性 [mg/(g·min)]	可溶性糖含量 (mg/g)	可溶性蛋白含量 (mg/g)
未施用	116.0 ± 13.8a	10.99 ± 1.68b	1.346 ± 0.247a	41.67 ± 0.75b	8.24 ± 0.97b
龙葵	155.7 ± 12.4a	16.88 ± 1.46a	1.734 ± 0.115a	72.90 ± 0.94a	13.07 ± 0.79a
野苘蒿	124.4 ± 15.8a	12.89 ± 1.49ab	1.469 ± 0.013a	57.45 ± 0.64ab	9.69 ± 1.20b
三叶鬼针草	140.6 ± 15.8a	14.44 ± 1.80ab	1.536 ± 0.032a	64.88 ± 0.71a	10.72 ± 1.38ab

2.5 土施超富集植物秸秆对土壤 pH 值和土壤 5 种形态镉含量的影响

由表 5 可知, 与未施用相比, 施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后土壤残渣态镉含量增加, 较未施用分别增加了 81.64%、26.56% 和 69.18%, 而土壤铁锰氧化物结合态和有机结合态镉含量与未施用无显著性差异。施用龙葵和三叶鬼针草秸

秆后离子交换态镉较未施用分别减少了 26.93% 和 15.13%, 施用野苘蒿秸秆与未施用无显著性差异。施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后碳酸盐结合态镉较未施用分别减少了 20.02%、3.46% 和 16.07%。就土壤 pH 值, 其大小排序为: 施用龙葵秸秆 > 施用三叶鬼针草秸秆 > 施用野苘蒿秸秆 > 未施用。

表 5 土施超富集植物秸秆对土壤 pH 值和土壤 5 种形态镉含量的影响

处理	土壤 pH 值	离子交换态 (mg/kg)	碳酸盐结合态 (mg/kg)	铁锰氧化物结合态 (mg/kg)	有机结合态 (mg/kg)	残渣态 (mg/kg)
未施用	7.95 ± 0.35a	1.745 ± 0.099a	0.809 ± 0.014a	0.663 ± 0.028a	1.208 ± 0.031a	0.305 ± 0.018c
龙葵	8.35 ± 0.07a	1.275 ± 0.091b	0.647 ± 0.058c	0.579 ± 0.031a	1.122 ± 0.134a	0.554 ± 0.012a
野苘蒿	8.20 ± 0.14a	1.548 ± 0.107a	0.781 ± 0.031ab	0.646 ± 0.036a	1.174 ± 0.025a	0.386 ± 0.084bc
三叶鬼针草	8.25 ± 0.07a	1.481 ± 0.095ab	0.679 ± 0.047bc	0.628 ± 0.028a	1.103 ± 0.188a	0.516 ± 0.073ab

2.6 土施超富集植物秸秆对葡萄幼苗镉含量的影响

由表 6 可知, 与未施用相比, 施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄幼苗根系和茎秆镉含量均减少, 其大小排序为: 未施用 > 施用野苘蒿秸秆 > 施用三叶鬼针草秸秆 > 施用龙葵秸秆。施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄幼苗根系镉含

量较未施用分别减少了 29.85%、7.80% 和 20.12%, 茎秆镉含量较未施用分别减少了 32.71%、7.39% 和 18.87%。而施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄幼苗叶片及地上部分与未施用无显著性差异。施用 3 种秸秆后葡萄幼苗的转运系数大小顺序为: 未施用 > 施用三叶鬼针草秸秆 > 施用龙葵秸秆 = 施用野苘蒿秸秆。

表 6 土施超富集植物秸秆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
未施用	30.62 ± 1.10a	1.611 ± 0.108a	1.296 ± 0.278a	1.371 ± 0.186a	0.045
龙葵	21.48 ± 2.77c	1.084 ± 0.134b	0.793 ± 0.145a	0.855 ± 0.091a	0.040
野苘蒿	28.17 ± 1.08ab	1.492 ± 0.133a	0.999 ± 0.288a	1.120 ± 0.231a	0.040
三叶鬼针草	24.46 ± 1.36bc	1.307 ± 0.176ab	0.994 ± 0.278a	1.066 ± 0.254a	0.044

2.7 土施超富集植物秸秆对葡萄果实镉含量及品质的影响

由表 7 可知, 与未施用相比, 施用龙葵、野茼蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄果实镉含量均减少, 和施用秸秆后幼苗镉含量均减少表现一致, 分别减少了 22.11%、14.07% 和 19.25%。施用龙葵、野

茼蒿和三叶鬼针草秸秆后葡萄果实品质提高, 果实可溶性糖含量分别比未施用增加了 45.03%、10.00% 和 28.34%, 果实可溶性固形物比未施用增加了 12.25%、4.72% 和 9.80%。而施用 3 种秸秆后可滴定酸和 Vc 含量与未施用均无显著性差异。

表 7 土施超富集植物秸秆对葡萄果实镉含量及品质的影响

处理	镉含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	可溶性糖含量 (mg/g)	可滴定酸含量 (mg/g)	Vc 含量 ($\text{mg}/100\text{g}$)	可溶性固形物 (%)
未施用	19.90 \pm 1.38a	57.10 \pm 0.64c	5.48 \pm 0.08a	6.01 \pm 0.92a	16.33 \pm 0.55b
龙葵	15.50 \pm 1.12b	82.81 \pm 0.63a	4.24 \pm 0.04a	7.67 \pm 1.23a	18.33 \pm 0.21a
野茼蒿	17.10 \pm 1.57ab	62.81 \pm 0.51bc	4.98 \pm 0.09a	6.68 \pm 1.06a	17.70 \pm 0.66a
三叶鬼针草	16.97 \pm 1.39ab	73.28 \pm 0.53ab	4.67 \pm 0.06a	7.04 \pm 0.98a	17.93 \pm 0.35a

3 讨论

土施秸秆后, 秸秆自身的各种矿质元素和有机物等通过腐解进入土壤, 有效地改善土壤结构、理化性质和养分水平, 进而促进植物干物质的形成^[14]。研究表明, 镉胁迫下施用不同秸秆后释放的养分和分泌的化感物质等会对植物的生长产生促进、抑制或无显著变化 3 种影响, 如施用超富集植物少花龙葵和万寿菊秸秆增加了树番茄的生物量, 施用牛膝菊秸秆则降低, 而施用三叶鬼针草秸秆则对其无显著影响^[17]。本试验中, 在镉胁迫下土施龙葵、野茼蒿和三叶鬼针草秸秆后较未施用葡萄幼苗生物量均不同程度的增加, 和前人研究相似^[34-35], 说明在镉胁迫下施用 3 种秸秆后释放出的养分等物质对葡萄幼苗生长的促进作用强于镉对其的毒害作用。可能是因为土施超富集植物秸秆腐解产生的物质作用改变了镉胁迫下植物体内的生理代谢, 使其生长情况发生了变化。

当植物受到重金属胁迫时, 叶绿体结构和功能均受到破坏, 叶绿素含量降低, 光合作用强度降低; 植物体内抗氧化酶系统功能产生紊乱, 使植物不能有效清除活性氧自由基, 对质膜产生毒害作用, 影响植物的代谢功能^[36-37]。研究表明, 秸秆覆盖镉污染土壤会对植物的光合特性、抗氧化酶活性和代谢物质含量产生促进或抑制作用, 如在镉污染土壤表面覆盖通泉草秸秆分泌的化感物质增加了牛膝菊的叶绿素含量, 提高了其光合能力和抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)的活性, 降低了牛膝菊可溶性糖含量, 但覆盖扬

子毛茛秸秆和邻近风轮菜秸秆后却相反^[38-39]。本试验中, 在镉胁迫下土施龙葵、野茼蒿和三叶鬼针草秸秆后较未施用葡萄幼苗光合色素含量, 光合能力, 抗氧化酶活性和代谢物质含量均不同程度的增加, 与生物量变化表现一致。这说明在镉胁迫下, 土施龙葵、野茼蒿和三叶鬼针草秸秆缓解了镉胁迫下对葡萄幼苗的毒害, 增强葡萄幼苗的光合作用和对镉胁迫的抗性, 这可能与镉胁迫下施用超富集植物秸秆后对葡萄幼苗镉吸收含量多少的影响存在差异有关。

秸秆施入土壤腐解时释放的腐殖质、有机酸等可以改变土壤酸碱度和氧化还原电位等, 从而影响根际土壤中重金属的存在形式及生物可利用性^[15, 40]。研究表明, 秸秆还田分解时有机酸阴离子脱碳作用和氨化作用加强会提高土壤 pH 值^[15, 41], 且土壤 pH 值高于 6 时, 土壤镉生物有效性表现为随 pH 值升高而降低^[42]。本试验中, 镉胁迫下土施龙葵、野茼蒿和三叶鬼针草秸秆后土壤 pH 值均增加, 且施 3 种秸秆后土壤镉生物有效性随 pH 值上升而降低, 和前人研究相似^[18-19]。在土壤重金属污染下, 植物对重金属吸收效应的研究主要在根际土壤环境中。植物对镉的吸收量与所受镉胁迫程度与土壤镉的存在形式及生物可利用性直接相关^[19]。研究表明, 施用秸秆等有机物能原位钝化土壤中重金属镉, 增加对土壤重金属镉的吸附, 降低重金属镉的有效性^[43]。本试验表明, 土施龙葵、野茼蒿和三叶鬼针草秸秆的葡萄幼苗根系、茎秆、叶片镉含量均低于未施用, 与土壤镉的生物有效性大小变化一致, 同时也符合重金属在植物中的

分配规律,由高到低顺序为:根系>茎秆>叶片。随着生长,葡萄根系吸收的镉会转运到地上部分进入果实中,研究表明,当镉进入果实后,果实品质下降,且随镉含量越高而果实品质越低^[44]。本试验中,土施龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆的葡萄果实镉含量均低于未施用且葡萄果实品质较未施用提高,其中施用野苘蒿秸秆的品质最佳,和葡萄果实中镉含量大小表现一致。因此,土施龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草3种秸秆均能促进葡萄生长及降低镉含量,其中土壤施用龙葵秸秆效果最佳。

4 结论

幼苗试验中,土壤施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆增加了葡萄幼苗生物量、光合作用强度、抗氧化酶活性和代谢物质含量,且减少了葡萄幼苗镉含量以及降低了土壤镉的生物有效性。结果树试验中,土壤施用龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草秸秆减少了葡萄果实镉含量以及提高了果实品质。因此,土壤龙葵、野苘蒿和三叶鬼针草3种秸秆均能够促进葡萄的生长和降低其镉含量,有利于镉污染果园中葡萄幼苗的正常生长及安全生产,其中土壤施用龙葵秸秆效果最佳,其次是三叶鬼针草秸秆。

参考文献:

- [1] 陈志良,莫大伦,仇荣亮.镉污染对生物有机体的危害及防治对策[J].环境保护科学,2001,27(4):37-39.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014,36(5):1689-1692.
- [3] 王公卿.重金属镉对小麦的影响[J].河南农业,2017,(4):22.
- [4] Babich H, Stotzy G. Effects of cadmium on the biota: influence of environmental factors [J]. Advances in Applied Microbiology, 1978, 23 (23): 55-117.
- [5] Julin B, Wolk A, Thomas L D, et al. Exposure to cadmium from food and risk of cardiovascular disease in men: a population-based prospective cohort study [J]. European Journal of Epidemiology, 2013, 28 (10): 837-840.
- [6] 刘涛,马龙,堵年生.葡萄的生物学作用研究进展[J].自然杂志,2002,24(2):81-87.
- [7] Peryea F J. Heavy metal contamination in deciduous tree fruit orchards: implications for mineral nutrition management [J]. Acta Horticulturae, 2001, 564: 31-39.
- [8] 杨玉,尹春峰,汤佳乐,等.长沙和株洲地区葡萄园土壤重金属含量分析及污染评价[J].湖南农业科学,2017,(8):41-44.
- [9] 苏亚勋,王素君,赵立伟,等.天津市郊区果园土壤重金属污染状况调查试验研究[J].天津农业科学,2016,22(6):20-22.
- [10] 王松良,郑金贵.土壤重金属污染的植物修复与金属超富集植物及其遗传工程研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):190-194.
- [11] 刘周莉,何兴元,陈玮.忍冬——一种新发现的镉超富集植物[J].生态环境学报,2013,(4):666-670.
- [12] 冯子龙,卢信,张娜,等.农艺强化措施用于植物修复重金属污染土壤的研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(2):14-20.
- [13] Zhu H H, Wu J S, Huang D Y, et al. Improving fertility and productivity of a highly-weathered upland soil in subtropical China by incorporating rice straw [J]. Plant and Soil, 2010, 331 (1-2): 427-437.
- [14] 郭海斌,张军刚,王文文,等.秸秆还田对农田土壤理化性质、生物性状和作物生长的影响[J].农业科技通讯,2017,(10):174-176.
- [15] 贾乐,朱俊艳,苏德纯.秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(10):1992-1998.
- [16] Lin L J, Liao M A, Lv X L, et al. Addition of straw from hyperaccumulator plants to cadmium-contaminated soil increases cadmium uptake by loquat seedlings [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (5): 217.
- [17] Lin L J, Chen F B, Wang J, et al. Effects of living hyperaccumulator plants and their straws on the growth and cadmium accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 155: 109-116.
- [18] 何静,林立金,石军,等.土壤覆盖耐性植物秸秆对树番茄幼苗生长及镉积累的影响[J].土壤通报,2016,47(5):1259-1264.
- [19] He J, Lin L J, Ma Q Q, et al. Effects of mulching accumulator straw on growth and cadmium accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings [J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2016, 36 (2): 366-371.
- [20] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5): 1103-1110.
- [21] Masahide Y, Satoshi Y, Koji I. Cadmium accumulation in *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore (Compositae) in heavy-metal polluted soils and Cd-added conditions in hydroponic and pot cultures [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2008, 54 (5): 738-743.
- [22] Sun Y B, Zhou Q X, Lin W, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 161 (2-3): 808-814.
- [23] 魏树和,杨传杰,周启星.三叶鬼针草等7种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征[J].环境科学,2008,29

- (10): 2912–2918.
- [24] 魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征 [J]. 环境科学, 2005, 26 (3): 167–171.
- [25] Lin L J, Liao M A, Mei L, et al. Two ecotypes of hyperaccumulators and accumulators affect cadmium accumulation in cherry seedlings by intercropping [J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2014, 33 (4): 1251–1257.
- [26] 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.
- [27] Brooker R W. Plant–plant interactions and environmental change [J]. New Phytologist, 2006, 171 (2): 271–284.
- [28] Huang K W, Lin L J, Chen F B, et al. Effects of live Myriophyllum aquaticum and its straw on cadmium accumulation in Nasturtium officinale [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 24 (28): 22503–22509.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] 熊庆娥. 植物生理学实验教程 [M]. 四川: 四川科学技术出版社, 2003.
- [31] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51 (7): 844–850.
- [32] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [33] 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.
- [34] 胡容平, 石军, 黄廷友, 等. 土施超富集植物秸秆对芥菜生长及镉积累的影响 [J]. 水土保持通报, 2015, 35 (5): 217–221.
- [35] 王进, 陈发波, 林立金, 等. 施用富集植物秸秆对水田芥生长及镉积累的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2018, 36 (1): 60–66.
- [36] 文晓慧. 重金属胁迫对植物的毒害作用 [J]. 农业灾害研究, 2012, 2 (Z2): 20–21.
- [37] 郭燕梅, 王昌全, 李冰. 重金属镉对植物的毒害研究进展 [J]. 陕西农业科学, 2008, 54 (3): 122–125.
- [38] Lin L J, Liao M A, Ren Y J, et al. Effects of mulching tolerant plant straw on soil surface on growth and cadmium accumulation of *Galinsoga parviflora* [J]. PLoS One, 2014, 9 (12): e114957.
- [39] 石军, 黄廷友, 林立金, 等. 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊光合生理的影响 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (11): 269–271.
- [40] Xu J M, Tang C, Chen Z L. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38 (4): 709–719.
- [41] Yan F, Hütsch B W, Schubert S. Soil–pH dynamics after incorporation of fresh and oven–dried plant shoot materials of faba bean and wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 169 (4): 506–508.
- [42] 尚爱安, 党志. 土壤中重金属的生物有效性研究进展 [J]. 土壤, 2000, 32 (6): 294–300.
- [43] Alvarenga P, Gonçalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics [J]. Chemosphere, 2009, 74 (10): 1292–1300.
- [44] 李小红, 陶建敏, 陈剑东, 等. 镉胁迫对不同砧穗组合葡萄植株镉吸收规律和果实品质的影响 [J]. 生态环境学报, 2010, 19 (5): 1082–1086.

Effects of soil application of hyperaccumulator plant straw on grape growth and cadmium content under cadmium stress

LI Xin-xin¹, ZHONG Li-sha¹, MA Qian-qian², ZHANG Xiao³, LIN Li-jin⁴, LIAO Ming-an^{1*} (1. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130; 2. Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou Sichuan 635000; 3. Qionglai Agricultural and Rural Bureau, Chengdu Sichuan 611530; 4. Institute of Pomology and Olericulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of soil application of cadmium-hyperaccumulator plant straw (*Solanum nigrum*, *Crassocephalum crepidioides*, *Bidens pilosa*) on grape growth and cadmium content under cadmium stress. The results showed that the biomass, photosynthesis intensity, antioxidant enzyme activity and metabolite content in grape seedlings increased after applying *S. nigrum*, *C. crepidioides* and *B. pilosa* straw, while the cadmium content in shoots of grape seedlings decreased by 37.63%, 18.31% and 22.25%, respectively, compared with that without application. The tree experiment showed that the cadmium content in grape fruits decreased and the quality of grape fruits improved after applying *S. nigrum*, *C. crepidioides* and *B. pilosa* straw. The cadmium content in grape fruits decreased by 22.11%, 14.07% and 19.25%, respectively, compared with that without application. Therefore, soil application of *S. nigrum*, *C. crepidioides* and *B. pilosa* straw can promote the growth of grapes and reduce their cadmium content, which is conducive to the normal growth and safe production of grapes in cadmium-contaminated orchards, and among them, applying *S. nigrum* straw had the best effect.

Key words: hyperaccumulator plant straw; *Solanum nigrum*; *Crassocephalum crepidioides*; *Bidens pilosa*; grape