

不同钝化剂对镉污染土壤栽培的川麦冬生长及生理特性的影响

蒋攀^{1,2}, 刘雷¹, 黄怡¹, 李辉¹, 王金玲¹, 张旭³, 杜艳玲¹, 陈红梦¹, 邓贤会¹, 杜世章^{1*}

1. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000

2. 绵阳中科成污水净化有限公司, 四川 绵阳 621600

3. 遂宁卓同国际学校, 四川 遂宁 629000

摘要: 目的 综合评价不同钝化材料对镉(Cd)污染土壤栽培的涪城麦冬生长以及 Cd 吸收累积的影响。方法 以一年生川麦冬为供试材料, 采用土壤盆栽实验方法研究了汉白玉(Ar)、秸秆生物炭(Br)、粉煤灰(Fh)、菌渣(Me)、硅藻土(Dm) 5 种不同钝化材料对川麦冬生长、生理生化指标以及 Cd 吸收累积的影响。结果 2 种不同 Cd 污染程度土壤, 不同钝化材料处理下均能显著提高麦冬生物量, 以及麦冬叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白量; 其中 Ar 和 Me 处理提升幅度最大。麦冬抗氧化酶系统活性均显著降低, 丙二醛(MDA)含量无显著变化。不同钝化材料处理均极显著提高麦冬地下部黄酮含量, 其中 Ar 和 Fh 处理提升幅度最大。2 种 Cd 污染浓度土壤, 不同钝化材料处理均能降低麦冬各部重金属 Cd 含量; 麦冬地上和地下部分 Cd 含量较对照均极显著降低; Ar、Br 和 Fh 处理效果更佳。结论 综合对比施加不同钝化材料处理, 从提升麦冬生物量方面, Me 处理效果更佳, 略优于 Ar、Br。从降低麦冬 Cd 吸收积累以及提升麦冬有效成分黄酮的作用方面, Ar 和 Fh 效果更佳。

关键词: 土壤; 钝化修复; Cd 污染; 川麦冬; 综合评价

中图分类号: R286 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2020)24-6354-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2020.24.026

Effects of different passivators on growth and physiological characteristics of *Ophiopogon japonicus* in cadmium-contaminated soil

JIANG Pan^{1,2}, LIU Lei¹, HUANG Yi¹, LI Hui¹, WANG Jin-ling¹, ZHANG Xu³, DU Yan-ling¹, CHEN Hong-meng¹, DENG Xian-hui¹, DU Shi-zhang¹

1. Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China

2. Mianyang Zhongkecheng Wastewater Purification Co., Ltd, Mianyang 621600, China

3. Suining Zhuotong International School, Suining 629000, China

Abstract: **Objective** To comprehensively evaluate the different passivation materials on growth and cadmium uptake and accumulation of *Ophiopogon japonicus* cultivated in cadmium contaminated soil of. **Methods** Using one-year-old *O. japonicus* as experimental material, the effects of five different passivation materials (white marble Ar, straw biochar Br, fly ash Fh, bacterial residue Me, diatomite Dm) on the growth, physiological and biochemical indexes and cadmium absorption and accumulation of *O. japonicus* were studied by soil pot experiment. **Results** The biomass, chlorophyll, soluble sugar and soluble protein of *O. japonicus* could be significantly increased in soils contaminated with two kinds of Cd under different passivation materials. Among them, Ar and Me were the most improved. In addition, the activities of antioxidant enzyme system of *O. japonicus* were significantly decreased, and the content of MDA had no noteworthy change. Different passivation materials remarkably increased the content of flavonoids in the underground part of *O. japonicus*, among which Ar and Fh treatments increased the most. The contents of heavy metal Cd in all parts of *O. japonicus* were decreased by different passivation materials, and the contents of Cd in aboveground and underground parts of *O. japonicus* were significantly lower than those of the control, and the effects of Ar, Br and Fh treatments were better than those of the control. **Conclusion** Studies have shown that by combining and comparing treatments of different

收稿日期: 2020-06-01

基金项目: 四川省科技厅项目(2018JY0329); 绵阳师范学院研究生创新实践基金(CX201912); 四川省大学生创新创业实践项目(201910639030)

作者简介: 蒋攀(1995—), 男, 四川绵阳人, 硕士, 主要从事生态环境监测与治理研究。Tel: 15508167880 E-mail: 2945323566@qq.com

*通信作者 杜世章(1965—), 男, 四川乐山人, 博士, 教授, 主要从事生态学研究。Tel: 13628080619 E-mail: 2667047352@qq.com

passivating materials, in terms of the biomass of *O. japonicus* treated with Me, the biomass improvement effect of Me was better than that of Ar and Br. Aiming at the effect of reducing Cd absorption and accumulation of *O. japonicus* and improving the effective component flavone of *O. japonicus*, it can be concluded that Ar and Fh have better effects in treating Cd polluted soil and improving the quality of *O. japonicus*.

Key words: soil; passivation remediation; cadmium pollution; *Ophiopogon japonicus* (L.f) Ker-Gawl; comprehensive evaluation

四川素有“中医之乡，中药之库”之美誉。据资料统计，全川中药资源有 5 000 余种，约占全中国中药品种的 75%；其中著名道地药材和主产药材 30 余种，四川省绵阳市三台县的涪城麦冬就在其列。麦冬 *Ophiopogon japonicas* (L. f) Ker-Gawl 含有丰富的化学成分如多糖、黄酮、高异黄酮、氨基酸、挥发油等。其属于百合科沿阶草属，最初记载于《神农本草经》，又名麦门冬、书带草、沿阶草等^[1]，为多年生常绿草本植物，被《中国药典》收录记载^[2]。“涪城麦冬千金宝，本草遗珠万国珍”。麦冬自古以来作为一味常用的中药，以其独特药用功效被广泛应用于中医临床和保健。据三台县农业农村局提供的最新资料统计，截至 2019 年，涪城麦冬种植面积近 4 000 km²，种植区域涵盖 50 余个村，每年总产量约为 1.5 万 t，占全国麦冬产量的 70%，年产值近 30 亿元。随着人们对于中药材重金属问题的逐渐重视，麦冬重金属污染已经成为麦冬产业发展的一大难题和阻碍。

前期调查发现，三台县涪城麦冬产区土壤重金属镉（Cd）污染涉及面积大、区域广、程度不一，集中综合治理可行性不高。如今大部分土壤修复方法成本高、技术性强且大面积推广困难，而原位钝化修复因其自身优势被广泛应用于各类型的重金属 Cd 污染土壤的工程技术领域^[3]。此外，现阶段国内外使用的大部分原位钝化材料都是一些废弃物再利用，也符合现行环保要求。郭继斌^[4]通过人工模

拟重金属复合污染土壤，研究证明粉煤灰能有效降低土壤重金属，进而避免对植物生长产生不良影响。土壤 Cd 生物有效性受钝化材料添加类型和含量的不同，其受到的影响也肯定不同。徐万强等^[5]通过实验研究发现，鸡粪+磷矿粉和活性炭+磷矿粉处理效果均有差异。因此开展不同钝化剂对 Cd 污染土壤栽培川麦冬生长以及 Cd 吸收累积的影响，可以为涪城麦冬安全种植提供科学依据。

本研究针对三台县涪城麦冬种植区土壤 Cd 污染和麦冬 Cd 富集问题，从川中丘陵地区现状考虑和种植户的实际情况，选择了 5 个对环境友好、取材方便且符合 Cd 钝化原理的钝化材料。通过盆栽试验，对 5 种材料的钝化效果进行综合评价，以期能够为麦冬种植区 Cd 污染土壤的修复治理和麦冬品质的提升提供技术支持和理论依据。

1 材料和仪器

1.1 材料

供试土壤取自绵阳市三台县涪城麦冬种植区永明镇某农田 0~20 cm 的农田土壤，分别为低浓度 Cd 污染土壤和高浓度 Cd 污染土壤，其基本性质见表 1。供试钝化材料为秸秆生物炭（农业废弃物）、粉煤灰（工业废弃物）、汉白玉（碱性物质）、硅藻土（黏土矿物）和菌渣（有机物料），不同钝化材料基本性质见表 2。供试肥料 CH₄N₂O（质量分数 99%）、Ca(H₂PO₄)₂·H₂O（质量分数 85%）和 KCl

表 1 土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil

污染程度	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	总氮/(mg·kg ⁻¹)	总磷/(mg·kg ⁻¹)	总钾/(mg·kg ⁻¹)	全 Cd/(mg·kg ⁻¹)	有效态 Cd/(mg·kg ⁻¹)
低浓度	5.94	19.9	12.6	23.2	10.4	14.8	1.19	0.389
高浓度	5.61	19.2	12.1	21.7	9.8	15.1	2.07	0.693

表 2 钝化材料基本性质

Table 2 Basic properties of tested material

材料	取样地	pH	C/%	N/%	P/%	K/%	Cd/(mg·kg ⁻¹)	粒径/mm
汉白玉 (Ar)	四川雅安	8.54	—	—	—	—	0.07	0.15
秸秆生物炭 (Br)	四川绵阳	9.20	52.18	0.87	0.24	2.41	0.28	0.15
粉煤灰 (Fh)	四川成都	10.86	—	—	—	—	0.17	0.15
菌渣 (Me)	四川绵阳	7.34	36.59	1.49	1.02	0.94	0.31	2.00
硅藻土 (Dm)	四川米易	6.62	—	—	—	—	0.18	0.15

(质量分数 99.8%), 均购自上海麦克林生化科技有限公司。供试种苗均采摘自三台县争胜乡木鱼村某农田上长势一致、水肥管理安全一致的上季老苗, 经绵阳师范学院罗明华教授鉴定为百合科沿阶草属直立性麦冬 *Ophiopogon japonicus* (Linn. f.) Ker-Gawl.

1.2 仪器

3300 AAS 火焰原子吸收光谱仪 (Thermo Scientific™), DHG-9023A 电热恒温鼓风干燥箱 (苏州江东有限公司), UV-1800 紫外可见分光光度计 (日本岛津公司), 高速冷冻离心机 (奥斯特罗德热电实验), HH-M8 恒温水浴锅 (金坛春兰有限公司)。

2 方法

2.1 盆栽试验设计

土培盆栽试验采用种植区原土壤, 筛除土壤中杂质后风干, 称取 2.5 kg 风干土至于培养盆 (24 cm×22 cm, 3 L) 中, 拌入适量百菌清杀菌, 充分混匀, 放置平衡 7 d。将秸秆生物炭 (Br)、粉煤灰 (Fh)、汉白玉 (Ar)、硅藻土 (Dm) 和菌渣 (Me) 研细过百目筛, 均按照土壤干质量的 5% 添加, 充分混匀, 以不添加任何钝化材料为对照 (CK), 2 种 Cd 污染程度种植区土壤共计 12 个处理, 每处理设置 5 次重复, 随机排列。然后, 按照 $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 0.551 g/kg、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.496 g/kg 和 KCl 0.180 g/kg 加入底肥。每盆扦插 3 颗分蘖麦冬繁殖, 控制苗间距 10 cm。培养过程中不定期浇水, 土壤含水量保持在田间持水量的 80% 左右。培养期间于 7、9、11 月追肥 3 次, 日常田间照料除草。

2.2 样品采集与制备

麦冬生长周期较长, 于次年麦冬成熟期 (培养时长 300~320 d), 进行收获并同步采集土壤样品 (全盆混合采样)。收获的麦冬样品, 经自来水洗净、去离子水润洗后再用吸水纸擦干水分, 称取植物地上部分样品鲜质量, 留存后期指标测定需要的样品量, 余下样品在 105 °C 杀青 30 min, 在 70 °C 下烘干至恒定质量, 称量、粉碎待测; 麦冬地下部分样品在 70 °C 下烘干至恒定质量, 称量、粉碎待测。

2.3 测定项目及方法

麦冬样品成熟期采收后, 先用自来水洗净, 再用去离子水润洗完全, 于 70 °C 烘干至恒定质量, 而后将麦冬地下部分和地上部分分别粉碎研细, 采用火焰原子吸收分光光度法测定其各部重金属 Cd 含量^[6]。叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、丙二醛 (MDA) 和黄酮的测定采用苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒, 方法详见其说明书。

2.4 数据处理

数据经过 Office 2019 处理后, 使用 DPS9.01 软件进行统计分析, 多重比较采用最小显著差异法 (LSD), 图表设计制作采用 Excel 2019、GraphPad Prism 5 和 Origin2018。

3 结果与分析

3.1 不同钝化材料对麦冬生物学性状的影响

麦冬的生长情况可以直接反映钝化材料的钝化效果, 从表 3 分析可知, 与对照相比, 2 种不同浓度 Cd 污染的土壤经 5 种不同钝化材料处理后, 麦

表 3 钝化材料对不同 Cd 污染含量的土壤麦冬生物量的影响

Table 3 Effects of passivation materials on biomass of *O. japonicus* in soils with different Cd contamination contents

土壤类型	处理	株高/cm	根长/cm	地上部分干质量/g	地下部分干质量/g
低浓度 Cd 污染土壤	Ck ₁	29.22±1.18b	15.91±1.20b	15.39±1.00c	31.63±1.30b
	Ar ₁	31.23±1.04ab	18.34±1.21a	19.96±1.87ab	37.09±1.00a
	Br ₁	30.73±2.39ab	18.88±1.81a	19.14±1.02b	38.68±1.33a
	Fh ₁	31.57±1.01ab	18.40±0.74a	19.50±2.40ab	37.88±2.31a
	Me ₁	31.93±1.00a	19.62±1.32a	22.14±1.97a	39.59±0.53a
	Dm ₁	30.25±0.96ab	17.91±0.01ab	17.25±1.20bc	33.24±1.76b
高浓度 Cd 污染土壤	Ck ₂	28.14±2.66b	15.72±1.74b	14.41±2.65c	27.53±1.18b
	Ar ₂	30.54±2.03ab	17.32±2.11ab	19.33±1.87ab	38.05±1.19a
	Br ₂	30.24±1.02ab	17.72±1.80ab	18.78±0.80ab	35.05±3.05a
	Fh ₂	31.85±3.65ab	17.12±1.12ab	19.09±2.05ab	35.70±3.25a
	Me ₂	32.22±2.80a	19.22±2.22a	21.10±1.00a	36.59±3.06a
	Dm ₂	30.35±1.81ab	18.12±0.99ab	17.54±2.30bc	29.91±1.00b

表中同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P<0.01$), 下同

Different lowercase letters in the same column of the table indicate significant difference between treatments at 0.05 level, different capital letters indicate significant difference between treatments at 0.01 level, same as below

冬的地上部分和地下部分的生物量均有不同程度地增加。表明, Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 处理均能促进不同浓度 Cd 污染土壤上涪城麦冬的生长。通过隶属度函数法综合分析, 从不同钝化材料来看, 在相同施加量下, Me 处理的麦冬生物量明显高于其余钝化材料。

叶绿素量的高低会影响植物的产量, Cd 污染会影响植物的光合作用, 尤其影响叶绿素的合成与降解。经 Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后, 2 种 Cd 污染土壤中的麦冬叶绿素总含量均极显著高于对照 ($P<0.01$), 分别较对照提高 14.96%~34.69%和 14.63%~35.60%。

低浓度 Cd 污染土壤上, 经 5 种钝化材料处理后, 麦冬叶绿素 a 质量分数显著高于对照 ($P<0.05$), 分别增加 42.11%、33.89%、41.00%、51.17%、23.08%。经 Ar、Br、Me 和 Fh 处理后的麦冬叶绿素 b 质量分数与对照相比差异显著 ($P<0.05$), 分别增加 26.33%、16.98%、17.70%、28.83%、5.82%。

高浓度 Cd 污染土壤上, 经 5 种钝化材料处理后, 麦冬叶绿素 a 量显著高于对照 ($P<0.05$), 分别增加 48.68%、45.38%、40.01%、51.86%和 23.12%。经 Ar、Br 和 Me 处理后的麦冬叶绿素 b 含量与对照相比差异显著 ($P<0.05$), 分别增加 18.39%、15.34%、10.88%、18.85%、5.89%, 见表 4。

表 4 钝化材料对不同 Cd 污染程度的土壤上麦冬叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of passivation materials on chlorophyll content of *O. japonicus* in soils contaminated with different Cd levels

土壤类型	处理	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素总量/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/叶绿素 b
低浓度 Cd 污染土壤	Ck ₁	1.20±0.14d	1.07±0.07c	2.27±0.14e	1.13±0.13b
	Ar ₁	1.71±0.10ab	1.35±0.10a	3.05±0.10b	1.27±0.02ab
	Br ₁	1.61±0.15bc	1.25±0.04ab	2.85±0.03c	1.29±0.12ab
	Fh ₁	1.69±0.02ab	1.25±0.04ab	2.95±0.08bc	1.35±0.05a
	Me ₁	1.81±0.10a	1.37±0.10a	3.19±0.05a	1.33±0.11a
	Dm ₁	1.48±0.12c	1.13±0.10bc	2.61±0.02d	1.31±0.12a
高浓度 Cd 污染土壤	Ck ₂	1.04±0.03c	1.01±0.01b	2.05±0.04d	1.03±0.03b
	Ar ₂	1.54±0.04a	1.19±0.10a	2.74±0.04a	1.30±0.15a
	Br ₂	1.51±0.03a	1.16±0.01a	2.67±0.04ab	1.30±0.02a
	Fh ₂	1.45±0.10a	1.12±0.10ab	2.57±0.10b	1.30±0.06a
	Me ₂	1.58±0.10a	1.20±0.10a	2.77±0.10a	1.32±0.11a
	Dm ₂	1.28±0.04b	1.07±0.01ab	2.35±0.05c	1.20±0.03a

3.2 不同钝化材料对麦冬抗氧化酶活性的影响

在 Cd 胁迫下, 植物为避免这些活性氧种类对植物的伤害, 其会动用其细胞内抗氧化酶(如 SOD、POD 和 CAT)系统清除活性氧。

由表 5 分析知, 低浓度 Cd 污染土壤上, 不同钝化材料处理后麦冬地下部分 SOD 活性为 413.33~552.84 U/g, 各处理均较对照达到极显著差异 ($P<0.01$)。不同钝化材料处理后麦冬地下部分 POD 活性为 3 680.00~4 523.33 U/g, 除 Fh 和 Dm 处理只能较对照达到显著差异外, 其余 3 个处理均较对照达到极显著差异水平 ($P<0.01$)。而不同钝化材料处理后的麦冬地下部分 CAT 活性为 5 348.85~7 737.72 nmol/(min·mL), 除 Dm 处理只能较对照达到显著差异外, 其余 4 个处理均较对照达到极显著差异水平 ($P<0.01$)。高浓度 Cd 污染土壤上, 不同钝化材料处理后麦冬地下部分 SOD 活性为 451.40~577.96 U/g, 各处理均极显著低于对

照 ($P<0.01$)。不同钝化材料处理后麦冬地下部分 POD 活性为 3 386.67~4 170.00 U/g, 各处理均极显著低于对照 ($P<0.01$)。不同钝化材料处理后麦冬地下部分 CAT 活性为 6 126.61~8 259.92 nmol/(min·mL), 各处理均极显著低于对照 ($P<0.01$)。

通过隶属度函数法分析(表 6), 低浓度 Cd 污染土壤上, Ar 处理效果最优, Me 和 Br 处理效果其次, 且优于其他材料; 高浓度 Cd 污染土壤上, Me 处理效果最优, Ar 和 Br 处理效果其次, 且优于其他材料。

在 Cd 等重金属逆境胁迫下, 植物细胞的膜酯过氧化作用增加, 其产物 MDA 含量增加, 细胞质膜的透性增加。由表 5 可知, 与对照相比, 经 5 种钝化材料处理后, 2 种 Cd 污染土壤的麦冬地上部分 MDA 含量为 78.85~91.25 nmol/g 和 78.56~91.42 nmol/g, 均有不同程度地降低, 分别较对照降低了 10.31%~22.40%和 4.75%~18.15%。

表 5 钝化材料对不同 Cd 污染土壤上麦冬抗氧化酶活性的影响

Table 5 Effects of passivation materials on antioxidant enzyme activity of *O. japonicus*

土壤类型	处理	SOD/(U·g ⁻¹)	POD/(U·g ⁻¹)	CAT/(nmol·min ⁻¹ ·mL ⁻¹)	MDA/(nmol·g ⁻¹)
低浓度 Cd 污染土壤	Ck ₁	552.84±11.56aA	4 523.33±165.63aA	7 737.72±114.99aA	101.74±11.26aA
	Ar ₁	430.85±13.58deCD	3 910.00±221.13bcdB	5 348.85±218.59dC	79.46± 8.81bB
	Br ₁	452.61±31.80cdCD	3 706.67±140.48cdB	5 970.98±193.79cC	79.81± 9.91bB
	Fh ₁	464.45±26.01cBC	4 070.00±125.30bAB	5 848.80±138.12cC	91.25± 6.69abAB
	Me ₁	413.33±11.53eD	3 680.00±262.30dB	6 715.36±436.48bB	88.49± 8.24abAB
	Dm ₁	502.35±12.34bB	4 030.00± 98.49bcAB	7 171.07±298.97bAB	78.95± 5.27bB
高浓度 Cd 污染土壤	Ck ₂	577.96± 9.78aA	4 170.00± 90.00aA	8 259.92±207.98aA	95.98± 4.11aA
	Ar ₂	464.01±14.14deC	3 696.67±132.04bB	6 193.32±300.00cC	78.56± 5.09cB
	Br ₂	486.53±18.61cdBC	3 540.00±220.00bcB	6 126.61±688.89cC	87.12± 5.86abcAB
	Fh ₂	514.94±11.70bcB	3 750.00±195.19bB	6 504.27±305.48cBC	87.55± 5.21abcAB
	Me ₂	451.40±21.08eC	3 386.67±122.20cB	6 793.24±176.38bcBC	91.42± 7.50abAB
	Dm ₂	527.85±12.83bB	3 713.33±280.95bB	7 504.39±742.30bAB	83.68± 4.87bcAB

表 6 抗氧化酶系统活性隶属函数分析

Table 6 Analysis of membership function of activity of antioxidant enzyme system

土壤类型	处理	μ 值			平均值
		SOD	POD	CAT	
低浓度 Cd 污染土壤	Ck ₁	1.000	1.000	1.000	1.000
	Ar ₁	0.126	0.273	0.000	0.133
	Br ₁	0.282	0.032	0.260	0.191
	Fh ₁	0.366	0.462	0.209	0.346
	Me ₁	0.000	0.000	0.572	0.191
	Dm ₁	0.638	0.415	0.763	0.605
高浓度 Cd 污染土壤	Ck ₂	1.000	1.000	1.000	1.000
	Ar ₂	0.100	0.396	0.031	0.176
	Br ₂	0.278	0.196	0.000	0.158
	Fh ₂	0.502	0.464	0.177	0.381
	Me ₂	0.000	0.000	0.312	0.104
	Dm ₂	0.604	0.417	0.646	0.556

3.3 不同钝化材料对麦冬渗透调节物质的影响

为应对这种重金属胁迫,植物细胞会积累大量的小分子物质如可溶性糖、可溶性蛋白等来降低细胞的水势,减少失水来维持植物细胞的正常生理活动。

如图 1 所示,在不同钝化材料处理下,与对照相比,麦冬可溶性蛋白均显著增高 ($P<0.01$),分

别较对照提高 20.94%~66.95%和 21.67%~63.33%。

如图 2 所示,从可溶性糖来说,与对照相比,经 Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后,麦冬可溶性糖均极显著高于空白对照 ($P<0.01$),分别较对照提高 12.75%~39.94%和 16.07%~46.58%。

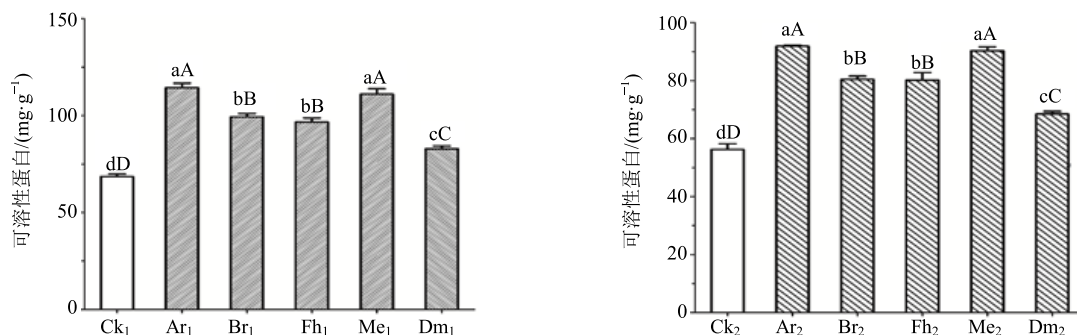


图 1 不同钝化材料对麦冬可溶性蛋白的影响

Fig. 1 Effects of different passivation materials on soluble proteinose of *ophiopogon japonicus*

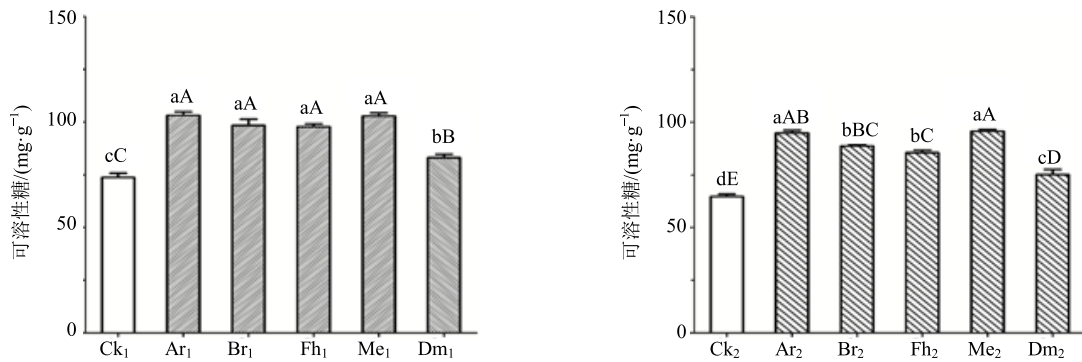


图 2 不同钝化材料对麦冬可溶性糖的影响

Fig. 2 Effects of different passivation materials on soluble sugar of *O. japonicus*

3.4 不同钝化材料对麦冬黄酮含量的影响

从图 3 分析可知, 与对照相比, 经 5 种钝化材料处理后, 麦冬地下部分黄酮含量均极显著高于对照 ($P<0.01$), 分别较对照提高 31.44%~64.20%和 32.94%~59.50%。从低浓度 Cd 污染土壤分析来看, 经 Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后, 麦冬地下部黄酮含量均极显著高于对照

($P<0.01$), 分别高出 62.57%、53.13%、64.20%、31.44%、36.54%。Me、Dm 处理后麦冬地下部分黄酮含量极显著低于 Ar、Br 和 Fh ($P<0.01$)。从高浓度 Cd 污染土壤分析来看, 经 Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后, 麦冬地下部黄酮含量均极显著高于对照 ($P<0.01$), 分别高出 59.50%、46.95%、53.83%、32.94%、39.02%。

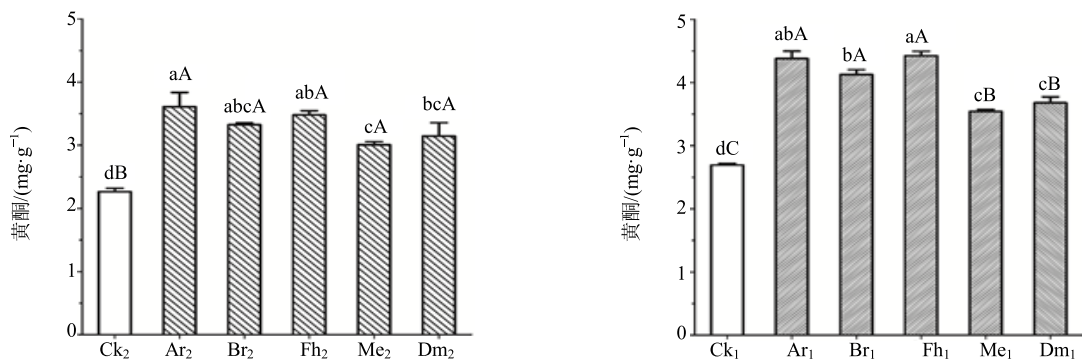


图 3 不同钝化材料对麦冬黄酮含量的影响

Fig. 3 Effects of different passivation materials on flavonoids content of *O. japonicus*

3.5 不同钝化材料对麦冬各部位 Cd 吸收的影响

就麦冬地上部分 Cd 含量而言, 从表 7 分析可知, 与对照相比, 经 Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后, 麦冬地上部分 Cd 累积量在 0.19~0.34 mg/kg 和 0.31~0.66 mg/kg, 均极显著低于对照 ($P<0.01$), 分别较对照降低 28.44%~58.72%和 14.06%~59.03%; 不同材料处理的麦冬地下部分 Cd 累积量在 0.20~0.46 mg/kg 和 0.25~0.63 mg/kg, 均极显著低于对照 ($P<0.01$), 分别较对照降低 16.43%~63.42%和 14.54%~65.99%。

从低浓度 Cd 污染土壤分析来看, 经 Ar、Br、Fh、

Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后, 麦冬地上部 Cd 含量较对照分别降低了 58.72%、49.36%、42.20%、37.23%、28.44%; 麦冬地下部分 Cd 含量较对照分别降低了 63.42%、57.58%、54.21%、32.43%、16.43%; 整体表现为 Ar>Br>Fh>Me>Dm。

从高浓度 Cd 污染土壤分析来看, 经 Ar、Br、Fh、Me 和 Dm 5 种钝化材料处理后, 麦冬地上部分 Cd 含量均极显著低于对照 ($P<0.01$), 分别降低了 59.03%、50.22%、43.40%、21.48%、14.06%; 高浓度 Cd 污染土壤经 5 种钝化材料处理后, 麦冬地下部分 Cd 含量均极显著低于对照 ($P<0.01$), 分

表 7 钝化材料对不同镉污染土壤上麦冬 Cd 含量

Table 7 Cd content capacity of crops in different cadmium-contaminated soils

土壤类型	处理	地上部分 Cd 质量分数/(mg·kg ⁻¹)	地下部分 Cd 质量分数/(mg·kg ⁻¹)
低浓度 Cd 污染土壤	Ck ₁	0.47±0.03aA	0.55±0.03aA
	Ar ₁	0.19±0.02dC	0.20±0.02eE
	Br ₁	0.24±0.03cdBC	0.24±0.03dDE
	Fh ₁	0.27±0.05bcBC	0.25±0.03dD
	Me ₁	0.30±0.06bcB	0.37±0.03cC
	Dm ₁	0.34±0.03bB	0.46±0.04bB
高浓度 Cd 污染土壤	Ck ₂	0.77±0.07aA	0.74±0.03aA
	Ar ₂	0.31±0.03fD	0.25±0.04eE
	Br ₂	0.38±0.04eCD	0.30±0.04dDE
	Fh ₂	0.43±0.03dC	0.32±0.03dD
	Me ₂	0.60±0.07cB	0.53±0.02cC
	Dm ₂	0.66±0.03bB	0.63±0.02bB

别降低了 65.99%、59.98%、57.00%、27.91% 和 14.54%；整体表现为 Ar>Br>Fh>Me>Dm。

4 讨论

4.1 不同钝化材料对麦冬的生长发育的影响

Nash 等^[7]研究发现，在重金属胁迫下，植物器官组织细胞中的线粒体、细胞核、细胞膜及多核糖体等细胞器最先显现受毒害症状。叶绿体是植物进行光合作用的场所。其功能的完整性直接关系到 CO₂ 的固定和植物生长、发育^[8]。

叶绿素是植物进行机体正常代谢活动和光合作用的重要保障，含量的多少直接决定着光合作用的强弱及有机物合成的速率。有研究表明，Cd 会导致植物生长受到抑制，当 Cd 含量超过一定浓度后，植物根系对土壤中养分和水分的吸收受到明显抑制，直接破坏叶绿素的生成，进而影响到植物的生长。在化学性质上，重金属 Cd 与 Zn 接近，在植物体内会取代 Zn，进而导致 Zn 的缺失，从而对植物生长产生抑制作用，影响植物生理生化活动，破坏细胞内的酶结构^[9]。Cd 在土壤-植物系统中的迁移首先影响植物的生理生化指标，进而影响作物产量及品质^[10]。

本实验中，麦冬生物量均较对照有所提高。分析其原因可能是由于各处理极显著地增加了麦冬叶绿素含量，尤其是对叶绿素 b 含量的提升，更加促进了麦冬对弱光环境的利用，促进了麦冬的生长和生物量积累，与路国华等^[11]关于高羊茅的生理生态研究结果基本一致。曹晨亮等^[12]也通过实验发现，轻度 Cd 污染土壤上烟草的产量在赤泥、油菜秸秆和玉米秸秆处理下均可显著提高。此外，Me、Br 本身含有一些氮、磷、钾等营养元素，添加到土壤中也可能会促进麦冬的生长。

本研究结果发现，添加钝化材料后麦冬可溶性

糖、可溶性蛋白含量增加（图 1、2），这一结果与闫晶^[13]关于烟草的研究结果基本一致。2 种 Cd 污染程度土壤上，Ar、Br、Me、Dm 和 Fh 处理下麦冬抗氧化酶系统活性的变化趋势基本一致，均较对照有一定程度的下降，与孙天国等^[14]、陈天等^[15]关于作物抗氧化酶系统活性的研究结果基本一致。究其原因可能是因为重金属 Cd 对麦冬的毒害作用在施加钝化材料后得到缓解^[16]。

在 Cd 胁迫下，不同 Cd 污染程度土壤上作物生长发育受到抑制，且土壤 Cd 浓度越高抑制作用越强^[17]。在不同钝化材料处理下，2 种 Cd 污染浓度土壤上麦冬的株高、最大叶长、根长、根冠比和有效产量均有不同程度的变化，能够在一定程度上减轻重金属 Cd 对麦冬的抑制作用，促进麦冬的生长发育。Karer 等^[18]通过研究发现，向重金属污染土壤中施加秸秆生物炭，黑麦草生长得到有效促进，从而降低重金属含量。王琪等通过田间定位试验发现，有机肥和生物炭可显著提高重金属污染农田土壤的土壤肥力，从而促进植物的生物量积累和修复效果的提高^[19]。因此，钝化材料可以通过降低土壤 Cd 有效性，抑制麦冬对 Cd 的吸收富集，从而减轻 Cd 对麦冬光合能力的毒害作用，进而促进麦冬的生长。

4.2 不同钝化材料对麦冬各部位 Cd 累积的影响

麦冬主要以块根入药，其地下部分块根质量为经济产量指标，是评价麦冬资源优劣的重要因素。本研究中，不同钝化材料处理下，2 种 Cd 污染土壤上麦冬各部 Cd 含量均较对照有极显著下降（表 7），这可能是由于钝化材料处理下，2 种土壤中的重金属 Cd 活性得到显著抑制，从而降低了麦冬对 Cd 的富集能力，减轻 Cd 的毒害作用并以此提高麦冬生物产量，进而增加种植区农户直接经济收益。

2 种土壤上，各钝化材料对麦冬 Cd 和黄酮的影

响趋势基本一致, Ar 和 Br 处理提升幅度最大, 略高于 Fh 处理, 与李荭荭等^[20]对水稻研究结果基本一致。通过对矿区周边 Cu 污染土壤研究发现, 施用生物炭显著提高土壤 pH 值和显著降低土壤 Cu 的有效性, 5%生物炭施加使分蘖期和成熟期土壤 CaCl_2 提取的有效态 Cu 含量分别降低了 73.78%~78.96% 和 87.61%~96.97%, 促进了稳定性较强的可氧化态 Cu 比例的增加^[20]。代允超等^[21]研究改良剂对小白菜 Cd 含量的影响表明, 在北方重金属 Cd 污染土壤上, 因其有机质含量相对较低, 有机物料降低作物 Cd 吸收的效果强于石灰; 在酸性和中性 Cd 污染土壤上, 石灰的降低效果好于有机物料。王艳红等^[22]通过生物炭类材料对生菜 Cd 吸收的影响研究发现, 高用量的稻壳基秸秆生物炭抑制生菜 Cd 吸收的效果更显著。

由此可见, 钝化材料可以通过抑制麦冬对 Cd 的吸收富集, 从而减轻 Cd 对其的毒害作用, 进而提升产区土壤上麦冬的品质。钝化修复的后效作用因土壤理化性质和钝化材料种类不同而有差异, 明确钝化材料种类及其适宜使用范围可为其在钝化修复技术中的应用提供参考。

5 结论

2 种不同 Cd 污染程度土壤, 不同钝化材料处理下均能提高麦冬生物量; 麦冬叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白量均显著高于空白对照组; 其中 Ar 和 Me 处理提升幅度最大。麦冬抗氧化酶系统活性均显著降低, MDA 含量无显著变化。不同钝化材料处理均极显著提高了麦冬地下部分黄酮含量; 其中 Ar 和 Fh 处理提升幅度最大, 优于其他钝化材料。

2 种不同 Cd 污染浓度土壤, 不同钝化材料处理均能降低麦冬各部重金属 Cd 含量; 通过方差分析和 LSD 多重比较发现, 麦冬地上部和地下部 Cd 含量较对照均极显著降低; 从降低幅度来看, Ar、Br 和 Fh 处理下麦冬地上部分和地下部分重金属 Cd 含量均极显著低于 Me 和 Dm, 处理效果更佳。

综合对比施加不同钝化材料处理, 从麦冬生物量而言, Me 处理对于麦冬的生物量提升效果更佳, 略优于 Ar、Br。针对降低麦冬 Cd 吸收积累以及提升麦冬有效成分黄酮的作用可以得出, Ar 和 Fh 治理麦冬产区 Cd 污染土壤以及麦冬品质提升效果更佳。

参考文献

- [1] 吴 普. 神农本草经 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1982.
- [2] 中国药典 [S]. 一部. 2020.
- [3] 黄 标. 环保新材料 LDHs 在重金属污染土壤修复方

- 面的应用 [A] // 中国土壤学会土壤环境专业委员会第二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会摘要集 [C]. 北京: 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2018.
- [4] 郭继斌. 粉煤灰钝化土壤重金属 Cd、Pb 效果及其机理研究 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2016.
- [5] 徐万强, 孙世友, 侯利敏, 等. 有机无机钝化剂及组合对重金属污染土壤上小白菜吸收 Pb 和 Cd 的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 290-295.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [7] Nash W W, Poor B W, Jenkins K D. The uptake and subcellular distribution of lead in developing sea urchin embryos [J]. *Comp Biochem Physiol C Comp Pharmacol*, 1981, 69(2): 205-211.
- [8] Brain G S, Martin S W. Ultrastructure and the Biology of plant cells [M]. New York: Edward Arnold, 1975.
- [9] 李仕友, 熊 凡, 欧阳成炜, 等. 万年青在镉胁迫下的富集特征和生理生化机制 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2432-2437.
- [10] 赵慧博, 李丽丽, 梁塔娜, 等. 重金属铜、镉胁迫下植物响应的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47(21): 14-16.
- [11] 路国华, 赵树兰, 多立安. 纳米铁联合氧化石墨烯对垃圾堆肥基质高羊茅生理生态的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2398-2404.
- [12] 曹晨亮, 王 卫, 马义兵, 等. 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 [J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 628-636.
- [13] 闫 晶. 钝化剂对烟草吸收镉及生长发育的影响 [D]. 延吉: 延边大学, 2017.
- [14] 孙天国, 孙玉斌. 外源亚精胺对镉胁迫下玉米幼苗抗氧化酶系统的影响 [J]. 种子, 2019, 38(9): 77-80.
- [15] 陈 天, 刘云根, 王 妍, 等. 外源磷对砷胁迫下挺水植物抗氧化酶系统的影响 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1040-1046.
- [16] 徐勤松, 施国新, 顾龚平, 等. 不同浓度 Hg^{2+} 对睡莲的毒害影响研究 [J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 784-789.
- [17] 侯晓杰, 梁魁景. 不同浓度镉胁迫对豇豆种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 现代园艺, 2019(17): 22-23.
- [18] Karer J, Wawra A, Zehetner F, et al. Effects of biochars and compost mixtures and inorganic additives on immobilisation of heavy metals in contaminated soils [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2015, 226(10): 342.
- [19] 王 琪, 张永波, 贾亚敏, 等. 有机肥和生物炭对重金属污染农田土壤肥力的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(1): 263-267.
- [20] 李荭荭, 赵明柳, 董海霞, 等. 生物炭对铜污染土壤的修复及水稻 Cu 累积的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1210-1217.
- [21] 代允超, 吕家珑, 刁 展, 等. 改良剂对不同性质镉污染土壤中有价镉和小白菜镉吸收的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 80-86.
- [22] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 稻壳基生物炭对生菜 Cd 吸收及土壤养分的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 207-214.