

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020070501

周俊杰, 孙硕, 赵远, 等. 混合改良剂对镉污染土壤川芎镉积累及生长的影响[J]. 环境化学, 2021, 40(11): 3608-3616.

ZHOU Junjie, SUN Shuo, ZHAO Yuan, et al. Effects of mixed amendments on the cadmium accumulation and growth of *Ligusticum chuanxiong* hort in cadmium-contaminated soil[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (11): 3608-3616.

混合改良剂对镉污染土壤川芎镉积累及生长的影响*

周俊杰¹ 孙硕¹ 赵远^{1**} 吉海² 肖娴¹ 赵文娟³
赵利华² 吉昕华² 孙旭³

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州, 213164; 2. 新疆光合元生物科技有限公司, 昌吉, 831100;
3. 小豆中药科技有限公司, 成都, 610031)

摘要 为解决川芎中镉含量超标而引起的中药安全问题, 以四川省川芎主产地的土壤为研究对象, 分别研究了施加不同剂量的混合改良剂 I (轻质碳酸钙、石灰石、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒) 的 3 种浓度 525 kg·hm⁻² (O1)、1575 kg·hm⁻² (O2)、5250 kg·hm⁻² (O3) 和改良剂 II (重质碳酸钙、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒) 的 3 种浓度 612 kg·hm⁻² (T1)、918 kg·hm⁻² (T2)、1224 kg·hm⁻² (T3) 对川芎根部镉 (Cd)、土壤有效态镉以及川芎生物量的影响. 结果表明, 不同浓度下两种混合改良剂的施用均减少了川芎根部对镉的富集, 这可能是由于两种混合改良剂的添加增加了土壤 pH, 减少了镉在土壤-川芎中的迁移, 其中 T1 和 T3 处理降幅最大, 对比空白处理分别降低了 56.13% 和 55.67%; 通过施加不同浓度混合改良剂, 能够提升川芎生物量, 增加效果最好的是 T1、T3 处理, 对比空白处理增加了 53.50% 和 52.72%, 这可能是由于混合改良剂的添加增加了土壤的氮、磷等含量和脲酶活性, 改善了土壤养分状况. 从川芎根部镉含量减少效果、川芎生物量增加量和混合改良剂施加量的经济角度来看, 混合改良剂 II 的 612 kg·hm⁻² 处理效果最好.

关键词 混合改良剂, 川芎, 有效态镉, 生物量.

Effects of mixed amendments on the cadmium accumulation and growth of *Ligusticum chuanxiong* hort in cadmium-contaminated soil

ZHOU Junjie¹ SUN Shuo¹ ZHAO Yuan^{1**} JI Hai² XIAO Xian¹ ZHAO Wenjuan³
ZHAO Lihua² JI Xinhua² SUN Xu³

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou, 213164, China; 2. Xinjiang Guangheyuan Biotechnology Co.Ltd, Changji, 831100, China; 3. Grow Chinese Medicine Technology, Chengdu, 610031, China)

Abstract To solve the safety problem caused by excessive cadmium (Cd) in *Ligusticum chuanxiong* hort, soils of the main producing area of *Ligusticum chuanxiong* hort in Sichuan province were used for the field experiments. We aimed to investigate the effects of soil amendments on plant growth and Cd accumulation by *Ligusticum chuanxiong* hort, as well as the available Cd in

2020年7月5日收稿(Received: July 5, 2020).

* 常州市武进区科技支撑计划 (WS201907), 工信部工业转型升级 (中国制造 2025) (0714-EMTC-02-000195) 和江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX20_2603) 资助.

Supported by Changzhou Wujin District Science and Technology Support Plan (WS201907), Industrial Transformation and Upgrading of the Ministry of Industry and Information Technology (Made in China 2025)(0714-EMTC-02-000195) and Jiangsu Graduate Scientific Research Innovation Program (KYCX20_2603).

** 通讯联系人 **Corresponding author**, E-mail: zhaoyuan@cczu.edu.cn; 2393281086@qq.com

soils. The soil mixed amendment I was composed of precipitated calcium carbonate, limestone, calcium bentonite, nano potassium dihydrogen phosphate, biochar, sodium silicate, and attapulgite, which was applied in the field at the concentration of 525 kg·hm⁻² (O1), 1575 kg·hm⁻² (O2), and 5250 kg·hm⁻² (O3), respectively. The mixed amendment II was composed of heavy calcium carbonate, calcium bentonite, nano potassium dihydrogen phosphate, biochar, sodium silicate, and attapulgite, and was applied at the concentration of 612 kg·hm⁻² (T1), 918 kg·hm⁻² (T2), 1224 kg·hm⁻² (T3), respectively. The results showed that Cd accumulation in the roots of *Ligusticum chuanxiong hort* was reduced by both the two amendments, which might attributed to the increasing soil pH and then reducing Cd migration to the plant. The treatments of T1 and T3 greatly decreased the accumulation of Cd in plants by 56.13% and 55.67%, respectively, compared to the control group. The biomass of *Ligusticum chuanxiong hort* was significantly improved with the application of mixed amendments. The treatments of T1 and T3 were most effective in enhancing the biomass, which increased 53.50% and 52.72% of the biomass compared to the control group. This might due to the increase in urease activity, soil nitrogen, and phosphorus with the application of mixed amendments. In general, the economically optimal amendment rates was 612 kg·hm⁻² according to the present study.

Keywords Mixed amendments, *Ligusticum chuanxiong hort*, available cadmium, biomass.

川芎是一种常见的中药材,属于四川传统的出口药材,对治疗风湿痹痛、抗凝血及抗血小板聚集、神经保护具有良好效果。现如今由于金属的大量开采和冶炼,土壤重金属污染问题愈发严重,许多研究表明川芎是典型的镉富集植物^[1-2],川芎中镉含量超标已经引起了安全性和出口问题^[3]。因此,如何有效的、低成本的降低川芎中的镉含量已经成为一个亟需解决的问题。

目前,在治理土壤重金属的技术中,通过向土壤添加混合改良剂的方法可以有效降低土壤有效态重金属活性,减少植物对重金属的富集并改善土壤养分状况^[4],从而增加植物生物量,以达到治理和修复的目的^[5-6]。

混合改良剂具有修复效果明显,经济成本低,不会造成二次污染的优点,现被我国广泛用于解决重金属在土壤-植物中的迁移累积问题^[7-8]。根据研究,施加生物炭、沸石粉、膨润土的混合改良剂处理的玉米土壤与对照组相比,显著降低了有效态镉含量,并且提升了玉米产量^[9];生石灰、鸡粪、硫酸硅组合处理的水稻土壤和对照组相比,降低了 5.21%—20.56% 有效态 Cd 含量,提升了 20.59%—62.14% 水稻产量^[10]。施加生石灰可增加土壤 pH 值,降低川芎镉含量^[11];施加 KH₂PO₄-NaOH 缓冲液,降低了川芎土壤有效态镉含量^[12]。目前关于单一改良剂修复川芎重金属污染土壤研究日益增多,但目前关于混合改良剂治理川芎镉污染及其生长的研究仍鲜有报道。

本研究基于川芎田间试验,考察不同混合改良剂的施用对川芎中镉污染土壤重金属有效性、川芎药用部位的镉含量、川芎生物量和土壤养分的影响,并探索其相关性,以为川芎镉污染土壤修复、川芎药用安全性和川芎的科学种植提供科学依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 供试土壤

试验材料为四川省成都市彭州区川芎种植基地人工栽种川芎 *Ligusticum chuanxiong hort*。田间试验位于四川省成都市某川芎种植基地(31°5'35"N、104°0'34"E),基本理化性质如表 1 所示。试验小区面积为 46.62 m²。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Chemical Properties of the soil tested

项目 Item	pH	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	孔隙度/% Porosity	总Cd/(g·kg ⁻¹) Total Calcium
含量	5.63	28.93	0.67	1.22	43.91	1.52

1.2 试验设计

试验共设两种混合改良剂,分别为改良剂 I:轻质碳酸钙、石灰石、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒;改良剂 II:重质碳酸钙、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒. 试验共设 7 种处理,混合改良剂浓度由预实验土壤中最低有效态 Cd 含量筛选而得,分别为不施加混合改良剂(CK),混合改良剂 I 低浓度($525 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(O1),混合改良剂 I 中浓度($1575 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(O2),混合改良剂 I 高浓度($5250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(O3),混合改良剂 II 低浓度($612 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(T1),混合改良剂 II 中浓度($918 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(T2),混合改良剂 II 高浓度($1224 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(T3). 每种处理 3 个重复,共 21 个区域,每个区域随机排列,采用泥梗并用塑料膜分隔,每个区域 2.22 m^2 ($2.22 \text{ m}\times 1 \text{ m}$). 两种混合改良剂各组分质量均按 1:1 混合均匀,于种植川芎前 7 d 均匀施入 0—20 cm 土壤中,并对其耕耙. 川芎种植时间为 2018 年 9 月上旬,于 2019 年 5 月中下旬收获. 所有处理川芎栽培方式相同,种植后每 20 d 追 1 次肥,共追 3 次肥,每亩施肥量为有机粪肥 1.2 t,春季再追肥 1 次,施肥量同前.

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

于川芎收获期,利用五点取样法,采集完整的植物样品以及 100 g 浅层土样(0—20 cm). 在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度条件下将川芎植株样品杀青 30 min^[13], $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干,去除砂砾等异物,切片,粉碎,过 0.5 mm 筛,密封保存待测. 土壤样品风干磨碎过 0.5 mm 筛,密封保存待测.

1.3.2 分析方法

川芎样品:在川芎杀青烘干后测定生物量(干重),根茎部位 Cd 参照《药典》方法,将川芎样品风干,去除砂砾等异物,过 100 目尼龙筛,制成药材粉末,取供试样品 1 g,置于烧杯中,加入硝酸-高氯酸(4:1)混合溶液 10 mL 混匀,瓶口加盖,浸泡过夜. 次日置于加热板上消解,保持微沸,待消解液呈无色透明或略微黄色,冷却后转入 10 mL 量瓶,用 2% 硝酸溶液洗涤容器,定容,摇匀,后用火焰原子吸收光谱仪(德国耶拿分析仪器股份公司, novAA300/FL)测定镉的含量.

土壤样品:土壤中有有效态 Cd 测定采用 Tessier 提取法进行测定,后用火焰原子吸收光谱仪测定 Cd 含量. 土壤 pH 值采用 pH 计(pHs-3C, 上海精科)测定(水土比 2.5:1);土壤有机质采用重铬酸钾法测定;土壤孔隙度根据土壤容重(环刀法)和比重(比重瓶法)计算得到;速效磷含量的测定采用钼锑抗比色法;碱解氮含量的测定采用碱解扩散法;硝态氮含量的测定采用紫外可见分光光度法;铵态氮含量采用靛酚蓝比色法. 土壤磷酸酶测定采用磷酸苯二钠比色法;脲酶活性测定采用苯酚-次氯酸钠比色法^[14].

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 和 SPSS22.0 进行统计分析,利用 Origin 9.1 作图,每种处理设 3 个重复,分析结果采用 3 个重复的实验平均值 \pm 标准误差,采用 Duncan 分析法检验处理间差异的显著性.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 混合改良剂对土壤理化性质的影响

施加混合改良剂可以减少土壤有效态 Cd 含量和川芎的吸收量^[15-16],在一定范围内,土壤 pH 值越小,土壤重金属生物有效性越大^[17-18]. pH 是一种重要的理化性质,对土壤溶解-沉淀、吸附-解吸反应起到重要影响^[19]. 如表 2 所示,施加混合改良剂后,各处理的土壤 pH 均显著提升($P < 0.05$). 由轻质碳酸钙、石灰石、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠和凹凸棒组配而成的混合改良剂 I 处理下的土壤为弱酸性(施加量分别为 O1: $525 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、O2: $1575 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、O3: $5250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),与对照组相比, pH 提高了 0.32—0.59 个单位. 混合改良剂 II 由重质碳酸钙、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒组配而成(施加量分别为 T1: $612 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、T2: $918 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、T3: $1224 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), pH 提升了 0.38—0.8 个单位,这可能是由于本研究中混合改良剂 I 的石灰石与生物炭等的组合与混合改良剂 II 中凹凸棒与生物炭等的组合含有大量的碱性成分^[20],与土壤充分混匀后提升了土壤 pH,并且混合改良剂中的生物炭可以增加土壤中的盐基离子(钾、钠等),通过吸持反应后,土壤可交换的 H^+ 和 Al^{3+} 减少,从而增加土壤 pH 值^[21].

表 2 混合改良剂对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of mixed amendments on soil physical and chemical properties

处理 Treatment	pH	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	硝态氮/(g·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen	速效磷/(g·kg ⁻¹) Available phosphorus	孔隙度/% Porosity
CK	5.83±0.25 c	31.87±2.82 d	17.00±0.86 a	21.42±1.15 f	44.10±0.94 c
O1	6.17±0.23 bc	35.47±2.39 c	21.76±0.88 bc	34.34±0.95 e	46.47±0.76 abc
O2	6.15±0.23 bc	36.39±2.06 bc	21.84±2.34 bc	36.68±0.98 c	47.17±0.51 abc
O3	6.42±0.35 ab	37.22±2.46 abc	20.54±0.31 bc	38.24±0.74 c	47.40±0.49 bc
T1	6.61±0.09 a	39.45±1.20 ab	29.57±10.14 a	42.83±0.62 a	48.13±0.69 a
T2	6.21±0.18 abc	36.43±1.07 bc	24.49±1.44 abc	36.52±0.26 d	44.26±0.53 d
T3	6.63±0.06 a	40.25±0.73 a	25.59±1.70 ab	41.01±0.52 b	47.89±0.71 ab

不同小写字母表示同列各处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。

Lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

施加混合改良剂可以显著提高土壤的有机质含量($P < 0.05$)。其中, T3 与 T1 处理提高土壤有机质效果最明显($P < 0.05$), 分别提升了 26.29% 和 23.78%, O1、O2、O3 处理下土壤有机质含量增加了 11.30%—16.79%, 但改良剂施加量的提升对有机质含量的影响无显著差异。混合改良剂 I 不同浓度处理能提升 20.82%—28.47% 土壤硝态氮含量, 但是该 3 种处理差异不显著($P > 0.05$)。总体而言, 混合改良剂 II 对土壤硝态氮的提升效果优于混合改良剂 I。混合改良剂的添加可以提升土壤速效磷的含量, T1 处理提升了 99.95%, 效果最明显, 较 CK 处理差异显著($P < 0.05$)。混合改良剂 I 和混合改良剂 II 的施加使土壤有机质、速效磷等养分的含量提升, 土壤本身离子交换反应加快, 提高了土壤对重金属离子的吸附和交换能力, 减少了土壤有效态 Cd 含量, 降低了重金属生物有效性^[22], 减少川芎对 Cd 的吸收。

施加了混合改良剂后, 所有处理均提高了土壤孔隙度, 增加量最多的为 T1 和 T3 处理, 分别提升了 9.15% 和 8.59%, 这是由于混合改良剂中生物炭具有良好的吸附能力, 并且其本身的多孔结构能够增加土壤的孔隙结构, 起到改善土壤结构的作用^[23]。

2.2 混合改良剂对土壤有效态镉含量的影响

由图 1 可知, 施加不同浓度的混合改良剂后, 土壤有效态 Cd 含量得到显著降低, 不同处理组间差异显著($P < 0.05$)。不同混合改良剂不同浓度处理对土壤有效态 Cd 影响不同, 对比 CK 处理, 土壤有效态 Cd 含量降幅为 9.64%—51.79%, 处理效果最好的是 T1 和 T3, 分别为降低了 51.79% 和 50.77%, 说明混合改良剂的施加均能不同程度减少土壤有效态 Cd 的含量。

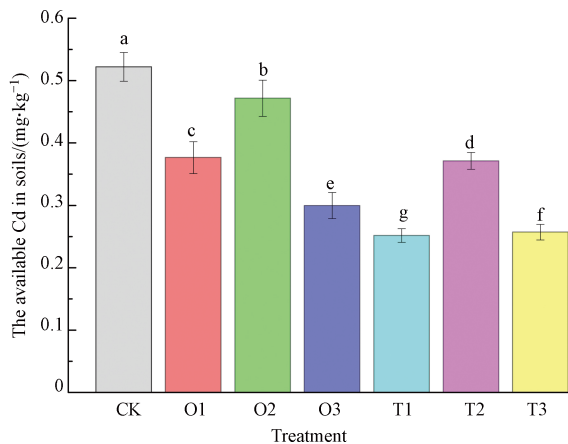


图 1 混合改良剂对土壤有效态 Cd 含量影响

Fig.1 Influence of mixed amendments on soil available Cd content

这是由于施加了混合改良剂后, 土壤 pH 得到提升, 土壤表面胶体中负电荷量因此增加, Cd²⁺的电性吸附效果也因此提升^[23], 两种混合改良剂中的钙基膨润土和生物炭的性质较为接近, 能够有效滞留土壤中的镉离子^[9], 土壤中正负电荷结合, 形成了羟基化合物, 以提供给重金属离子更多吸附位点, 从而降低土壤重金属生物有效性^[24], 同时, 混合改良剂中的凹凸棒的添加可能改变了土壤性状, 例如

pH、阳离子交换量等,促进了离子的络合反应,使土壤中有有效态 Cd 转变为其它形态 Cd^[25].

2.3 混合改良剂对土壤酶活性的影响

由表 3 可知,所有处理均提升了土壤脲酶的活性,随着混合改良剂 I 浓度的增加,土壤脲酶活性呈现先提升再降低的趋势,说明 O2 处理的土壤最有益于土壤脲酶活性. T1 和 T2 处理土壤脲酶活性无显著差异($P > 0.05$), T3 处理土壤脲酶活性在所有处理中提升最大,上升了 55.4%. 混合改良剂的添加可以增加土壤磷酸酶的活性,增幅最大的是 O1,土壤磷酸酶活性提升了 52.6%,随着混合改良剂 I 处理的浓度的提升,土壤磷酸酶活性呈下降趋势, T1、T2、T3 处理的土壤与对照组 CK 相比,差异显著($P < 0.05$). 说明混合改良剂的添加可以增加脲酶和磷酸酶的含量,这有利于土壤微生物的生长,促进土壤有机质、氮、磷等养分含量的分解矿化,提高土壤肥力^[26].

表 3 混合改良剂对土壤酶活性的影响($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 3 Effects of mixed amendments on soil enzyme activity

处理 Treatment	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase
CK	0.10±0.09 ab	170.89±2.19 d
O1	0.14±0.06 d	260.89±8.68 a
O2	0.15±0.07 c	219.68±8.05 b
O3	0.12±0.02 bc	181.15±7.65 d
T1	0.14±0.01 ab	201.64±10.98 c
T2	0.14±0.05 ab	215.82±2.48 b
T3	0.16±0.01 a	20.21±6.50 bc

2.4 混合改良剂对川芎 Cd 的累积和对生物量的影响

施加混合改良剂能有效降低收获期川芎根部 Cd 含量(图 2). 添加不同浓度的混合改良剂均能显著降低川芎根部对 Cd 的吸收. 除 T1 和 T3 处理之外,不同处理差异显著($P < 0.05$),降低幅度在 41.51%—56.13%,这说明两种混合改良剂不同浓度的添加均能有效降低川芎根部对 Cd 的吸收,其中处理效果最好的是 T1、T3,降低幅度分别达到了 56.13%、55.67%. 随着混合改良剂 I 浓度的提升,川芎根部 Cd 含量呈逐渐减少趋势,说明随着混合改良剂 I 施加量的增加能够更好的减少川芎对镉的富集;随着混合改良剂 II 施用量的增加,川芎根部 Cd 含量呈现先提升再降低的趋势,这与土壤有效态 Cd 趋势一致,这主要是由于混合改良剂的施加提升了土壤 pH(表 2),减少了土壤有效态 Cd 的含量(图 1),因此川芎对 Cd 的吸收效果受到抑制,混合改良剂中的轻质碳酸钙和重质碳酸钙都含有 Ca^{2+} 离子,它能够调控川芎植株体内的阴阳离子, Ca^{2+} 离子与 Cd^{2+} 离子竞争,阻止 Cd^{2+} 离子从土壤向川芎迁移转运,减少了川芎对 Cd^{2+} 的吸收^[27].

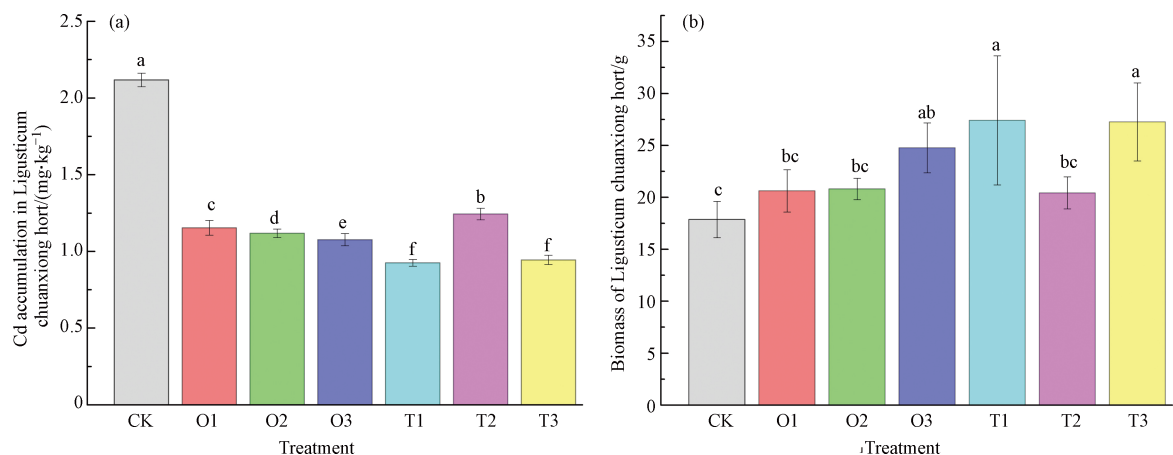


图 2 混合改良剂对川芎根部 Cd 含量(a)和川芎生物量(b)的影响

Fig.2 Effects of mixed amendments on Cd content (a) and biomass (b) of Ligusticum chuanxiong hort

混合改良剂的添加显著增加了川芎的生物量(图 2). 与对照 CK 相比, O1、O2、T2 处理的川芎生

物量差异不显著($P > 0.05$), O3、T1、T3 处理的川芎生物量增加趋势显著($P < 0.05$), 增加效果最好的是 T1、T3 处理, 增幅分别为 53.50% 和 52.72%, 但该两种处理无显著差异($P > 0.05$), 随着混合改良剂 I 浓度的提升, 川芎生物量呈增长的趋势, 这与川芎根部 Cd 含量趋势正好相反, 这说明川芎根部 Cd 的减少对其生长有利, 随着混合改良剂 I 浓度的提升, O2 处理的川芎根部 Cd 和生物量均低于 O1 处理, 但土壤有效态 Cd 含量却高于 O1 处理, 这可能是由于 O2 处理的土壤孔隙度高于 O1 处理(表 2), 提供了更优质的土壤结构以供川芎中更好的吸收养分对抗土壤中的有效态 Cd, 因此更利于川芎的生长和减少川芎根部对 Cd 的富集. 川芎生物量的提高可能是由于混合改良剂的添加使得土壤 pH 增加, 土壤有效态 Cd 的活跃程度因此减少, 降低了对川芎生长的胁迫, 并且对土壤理化性质和酶活性起到良好的改善作用, 增加了土壤的养分, 为川芎的生长提供了更好的土壤环境^[28], 磷酸二氢钾、生物炭等的添加使得土壤中 C、N、P 等营养元素含量提升^[29], 提供了充足的养分, 促进了川芎的吸收, 混合改良剂中硅酸钠的添加也对作物的生物量有着良好的影响作用^[30], 并且混合改良剂也有效的起到了去除重金属离子的作用, 减少了 Cd 对川芎的胁迫作用.

结合土壤有效态 Cd、川芎 Cd 和生物量来看, 混合改良剂 II 整体效果优于混合改良剂 I, 这可能是由于混合改良剂 II 中的重质碳酸钙的粉体分散性较高, 土壤 Ca^{2+} 、 K^{+} 等阳离子间的作用更加明显^[31], 从而起到更好的去除重金属离子的作用, 这还可能是由于虽然改良剂 I 施加的石灰石能显著降低重金属生物有效性^[32], 但是和轻质碳酸钙的组配施用反而略微影响了土壤胶体与颗粒引起的结合, 减少了团聚体的形成^[33], 因此孔隙度增加量略低于混合改良剂 II(表 2), 由此引起的混合改良剂 I 的总体土壤肥力和土壤质量略逊色于混合改良剂 II, 从而影响了 Cd 的迁移效果和川芎生物量.

2.5 川芎生物量和根部 Cd 与土壤指标之间的相关性分析

不同混合改良剂的添加均会改变川芎镉含量、土壤有效态镉含量、土壤理化性质和酶活性. 通过 IBM SPSS Statistics 22.0 进行对川芎生物量和土壤指标之间的相关性分析(表 4).

表 4 川芎生物量和根部 Cd 与土壤指标之间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of rhizoma chuanxiong biomass, root Cd and soil index

		有效态 Cd Available Cadmium	pH	有机质 Organic matter	硝态氮 Nitrate nitrogen	速效磷 Available phosphorus	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	孔隙度 Porosity
生物量	R	-0.748**	0.650**	0.612**	0.383	0.666**	0.492*	-0.037	0.406
	P	0.000	0.001	0.003	0.087	0.001	0.023	0.874	0.068
川芎Cd	R	0.787**	-0.719**	-0.731**	-0.552**	-0.964**	-0.767**	-0.446*	-0.675**
	P	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.043	0.001

R 值表示 Pearson 相关系数, P 值表示显著性; * 在 $P < 0.05$ 水平显著, ** 在 $P < 0.01$ 水平显著.

The R value represents the Pearson correlation coefficient, The P value represents significance; * means it's significant correlation at 0.05 level; ** means it's significant correlation at 0.01 level.

由表 4 可以看出, 川芎生物量分别与土壤有效态 Cd 含量、土壤 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$)和正相关关系($P < 0.01$), 这与提高土壤 pH 会降低有效态 Cd 含量, 并增加植物生物量的结果相一致^[33], 土壤有机质也与川芎生物量有极显著相关性($P < 0.01$), 这与在一定范围内, 土壤中有机质含量与肥力水平呈正相关关系并可使植株生物量增加结果一致^[34]. 川芎生物量与速效磷和脲酶有显著相关性关系($P < 0.05$), 川芎生物量与土壤硝态氮呈较弱正相关, 和土壤磷酸酶呈负相关关系. 这表明了种植川芎土壤中有有效态 Cd 含量较高时, 川芎植株会受到 Cd 的毒害, 土壤养分含量减少, 影响其生长发育, 因此可以通过在降低川芎土壤有效态 Cd 的方法提升川芎生物量和品质^[35].

川芎 Cd 和土壤有效态 Cd、土壤 pH, 呈极显著正相关和负相关关系($P < 0.01$), 这说明土壤 pH 的提高降低了土壤中有有效态 Cd 对川芎根部的迁移效果, 这与前人研究结果一致^[36], 川芎根部 Cd 与土壤孔隙度呈极显著负相关关系($P < 0.01$), 这可能是由于混合改良剂中生物炭丰富的孔隙结构对土壤理化性状有良好的改善作用, 能够有效减少土壤有效态镉含量, 从而减少作物中 Cd 的富集^[37].

3 结论(Conclusion)

(1)两种混合改良剂及其不同浓度施加水平均能在不同程度上提高土壤 pH 值($P < 0.05$),减少土壤有效态 Cd 含量,降低土壤重金属生物有效性,从而减少了川芎用药部位(根部)的 Cd 含量.混合改良剂 I(轻质碳酸钙、石灰石、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒)和混合改良剂 II(重质碳酸钙、钙基膨润土、纳米磷酸二氢钾、生物炭、硅酸钠、凹凸棒)的 3 种浓度对土壤有效态 Cd 的降幅分别达 9.64%—42.59% 和 28.86%—51.79%,混合改良剂 I 的 3 种浓度中,5250 kg·hm⁻² 处理有着最好的处理效果,混合改良剂 II 中 612 kg·hm⁻² 和 1224 kg·hm⁻² 对比空白处理分别降低了 51.79% 和 50.77%,但是所有处理均仍未达到川芎镉含量国家标准(0.3 mg·kg⁻¹).

(2)混合改良剂的添加可以有效提升川芎的生物量,这与改良剂的添加后,土壤有效态 Cd 的减少,有机质等理化性质和脲酶等酶活性的提高均有不同程度的相关性,从川芎生物量来看,混合改良剂 II 的 612 kg·hm⁻² 和 1224 kg·hm⁻² 浓度施配效果最好,并从川芎根部镉含量减少效果和经济方面考虑,混合改良剂 II 中 612 kg·hm⁻² 浓度处理效果最好.

参考文献 (References)

- [1] 宁梓君,李彬,何春杨,等.川芎生长阶段中对镉的富集阶段的初探 [J].时珍国医国药,2015,26(9):2240-2242.
NING Z J, LI B, HE C Y, et al. Preliminary investigation on the stage of cadmium-concentrated in growth cycle of Ligusticum chuanxiong hort [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2015, 26(9): 2240-2242(in Chinese).
- [2] 任敏,李敏,刘德军,等.川芎重金属镉吸收累积规律的初步研究 [J].中国药理学杂志,2016,20(51):1735-1738.
REN M, LI M, LIU D J, et al. Preliminary research on cadmium absorption and accumulation in Ligusticum wallichii [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2016, 20(51): 1735-1738(in Chinese).
- [3] 宁梓君.改良栽培方式对川芎镉吸附能力和镉富集阶段影响的研究[D].成都:成都中医药大学,2015.
NING Z J. Effect of improved cultivation on cadmium adsorption capacity and cadmium enrichment stage of Ligusticum chuanxiong hort[D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2015(in Chinese).
- [4] 张迪,吴晓霞,丁爱芳,等.生物炭和熟石灰对土壤镉铅生物有效性和微生物活性的影响 [J].环境化学,2019,38(11):2534-2626.
ZHANG D, WU X X, DING A F, et al. Effects of hydrated lime and biochar on the bioavailability of Cd and Pb and microbial activity in a contaminated soil [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2534-2626(in Chinese).
- [5] 黎大荣,吴丽香,宁晓君,等.不同钝化剂对土壤有效态铅和镉含量的影响 [J].环境保护科学,2013,39(3):46-49.
LI D R, WU L X, NING X J, et al. Effects of different passivating agents on contents of available lead and cadmium in soil [J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(3): 46-49(in Chinese).
- [6] 高瑞丽,唐茂,付庆灵,等.生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 [J].环境科学,2017,38(1):361-367.
GAO R L, TANG M, FU Q L, et al. Fractions transformation of heavy metals in compound contaminated soil treated with biochar, montmorillonite and mixed addition [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 361-367(in Chinese).
- [7] 胡红青,黄益宗,黄巧云,等.农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展 [J].植物营养与肥料学报,2017(6):1676-1685.
HU H Q, HUANG Y Z, HUANG Q Y, et al. Research progress of heavy metals chemical immobilization in farm land [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017(6): 1676-1685(in Chinese).
- [8] 王美娥,彭驰,陈卫平.水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 [J].环境科学,2015,36(11):351-358.
WANG M E, PENG C, CHEN W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of Cd in rice grains [J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 351-358(in Chinese).
- [9] 杜彩艳,王攀磊,杜建磊,等.生物炭、沸石与膨润土混施对玉米生长和吸收Cd、Pb、Zn的影响研究 [J].生态环境学报,2019,28(1):194-202.
DU C Y, WANG P L, DU J L, et al. Influence of fixed addition of biochar, zeolite and bentonite on growth and Cd, Pb, Zn uptake by maize [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(1): 194-202(in Chinese).
- [10] 韦小了,牟力,付天岭,等.不同钝化剂组合对水稻各部位吸收积累Cd及产量的影响 [J].土壤学报,2019,56(4):883-894.
WEI X L, MOU L, FU T L, et al. Effects of passivator on Cd absorption and accumulation and yield of rice as affected by its combination [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 883-894(in Chinese).
- [11] 宁梓君,李彬,李青苗,等.改良酸性土壤对土壤活性态镉及川芎镉含量影响的研究 [J].中草药,2014,37(11):1925-1928.
NING Z J, LI B, LI Q M, et al. Effects of acidic Soil improvement on active-state Cd content in soil and Cd content in Ligusticum

- chuanxiong [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2014, 37(11): 1925-1928(in Chinese).
- [12] 何春杨, 李彬, 李青苗, 等. 一种新型土壤改良剂对川芎镉污染土壤的修复效果 [J]. *时珍国医国药*, 2015, 26(12): 3002-3004.
HE C Y, LI B, LI Q M, et al. Effects of a new soil amendment on the remediation of Cd contaminated soil of *Ligusticum chuanxiong* hort [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2015, 26(12): 3002-3004(in Chinese).
- [13] 刘亚华, 徐文芬, 高杰, 等. 栽培川续断药材质量的综合考察 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 14(38): 170-172.
LIU Y H, XU W F, GAO J, et al. Comprehensive qualitative investigation on the cultivated *dipsacu asperides* materials [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 14(38): 170-172(in Chinese).
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. *Soil agrochemical analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2020(in Chinese).
- [15] 徐琴, 李彬, 李青苗, 等. 川芎镉含量与栽培土壤pH及活性态Cd含量关系初探 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(3): 116-118.
XU Q, LI B, LI Q M, et al. Preliminary investigation on the relationship between the Cd content in *Ligusticum chuanxiong* hort. and the pH value and activestate Cd content in cultivated soil [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(3): 116-118(in Chinese).
- [16] 宋正国, 唐世荣, 丁永祯, 等. 田间条件下不同钝化材料对玉米吸收镉的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2152-2159.
SONG Z G, TANG S R, DING Y Z, et al. Effects of different amendments on cadmium uptake by maize under field conditions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2152-2159(in Chinese).
- [17] 蔡梅. 混合改良剂对土壤Cd污染的钝化修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
CAI M. Study on passivation remediation of soil Cd pollution by mixed amendments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019(in Chinese).
- [18] 胡文. 土壤—植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
HU W. Study on bioavailability of heavy metals in soil-plant system and its influencing factors[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008(in Chinese).
- [19] 杜彩艳, 王攀磊, 杜建磊, 等. 生物炭、沸石与膨润土混施对玉米生长和吸收Cd、Pb、Zn的影响研究 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 190-198.
DU C Y, WANG P L, DU J L, et al. Influence of fixed addition of biochar, zeolite and bentonite on growth and Cd, Pb, Zn uptake by maize [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, 28(1): 190-198(in Chinese).
- [20] 韩玉琦. 凹凸棒石复合材料的制备及其吸附性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
HAN Y Q. Preparation and adsorption properties of attapulgite composites were studied[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2010(in Chinese).
- [21] 杨惟薇, 张超兰, 曹美珠, 等. 4种生物炭对镉污染潮土钝化修复效果研究 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 239-243.
YANG W W, ZHANG C L, CAO M Z, et al. Immobilization and remediation of cadmium contaminated soil with four kinds of biochars [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 239-243(in Chinese).
- [22] 刘艳, 王聪颖, 史志明, 等. 老化生物炭对小白菜积累重金属的影响 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(3): 58-64.
LIU Y, WANG C Y, SHI Z M, et al. Effect of aged biochar on the accumulation of heavy metals in pakchoi [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2019, 39(3): 58-64(in Chinese).
- [23] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1842-1849.
YAN J P, DING X D, CUI L, et al. Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1842-1849(in Chinese).
- [24] 王英杰, 邹佳玲, 杨文毅, 等. 组配改良剂对稻田系统Pb、Cd和As生物有效性的协同调控 [J]. *环境科学*, 2016, 37(10): 4004-4010.
WANG Y J, ZOU J L, YANG W T, et al. Synergetic control of bioavailability of Pb, Cd and As in the rice paddy system by combined amendments [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 4004-4010(in Chinese).
- [25] 任静华, 廖启林, 范健, 等. 凹凸棒粘土对镉污染农田的原位钝化修复效果研究 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(12): 2161-2168.
REN J H, LIAO Q L, FAN J, et al. Effect of in-situ stabilizing remediation of Cd-polluted soil by attapulgite [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, 26(12): 2161-2168(in Chinese).
- [26] 侯建伟, 陈芬, 余高谭, 等. 生态有机型土壤改良剂对油菜生育期土壤酶活性的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(1): 32-33.
HOU J W, CHEN F, YU G T, et al. Effects of ecological soil improvers on soil enzyme activity during rapeseed growth period [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(1): 32-33(in Chinese).
- [27] MING G X, PING L, ZHENG G S, et al. Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S1): 328-333.
- [28] 肖丹丹. 腐植酸对铅镉污染土壤中重金属形态及油菜抗氧化酶活性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.

- XIAO D D. Effects of humic acid on the morphology of heavy metals in lead-cadmium contaminated soil and antioxidant enzyme activity of rapeseed[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017(in Chinese).
- [29] 王国兵, 郭娇娇, 曹国华, 等. 不同施肥模式对杨树人工林土壤微生物生物量C、N、P的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 9-13.
- WANG G B, GUO J J, CAO G H, et al. Effects of different fertilization regimes on soil microbial biomass C, N, P under poplar plantation. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2016, 40(5): 9-13(in Chinese).
- [30] 王丙烁, 黄益宗, 李娟, 等. 镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 746-755.
- WANG B S, HUANG Y Z, LI J. Effects of different amendments on seed germination and cadmium uptake and accumulation in rice seedlings under cadmium stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 746-755(in Chinese).
- [31] 张德, 杨海涛, 沈上越. 轻质碳酸钙与重质碳酸钙比较[J]. 非金属矿, 2001, 24(增刊): 27-28.
- ZHANG D, YANG H T, SHEN S Y. Comparison of light calcium carbonate with heavy calcium carbonate[J]. *Non-Metallic Mines*, 2001, 24(special issue): 27-28(in Chinese).
- [32] 朱维, 刘丽, 吴燕明, 等. 组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4277-4282.
- ZHU W, LIU L, WU Y M, et al. In-situ study on effects of combined amendment on translocation control of Pb and Cd in soil-Vegetable system [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4277-4282(in Chinese).
- [33] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究 [J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-543.
- DU C Y, ZU Y Q, LI Y. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4): 539-543(in Chinese).
- [34] 刘美菊, 李江舟, 计思贵, 等. 生物炭对山坡地烟叶产量和氮肥利用效率的影响效果评价 [J]. 作物杂志, 2020, 1(1): 89-97.
- LIU M J, LI J Z, JI G S, et al. Evaluation of effect of biochar on tobacco yield and nitrogen use efficiency in mountain slope areas [J]. *Crops*, 2020, 1(1): 89-97(in Chinese).
- [35] 张德林, 张思获, 杨海燕, 等. 基于土壤Cd污染对川芎产量和品质的影响研究 [J]. 中药材, 2019, 42(6): 1228-1230.
- ZHANG D L, ZHANG S H, YANG H Y, et al. Based on the effect of soil Cd pollution on the yield and quality of *Ligusticum chuanxiong* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2019, 42(6): 1228-1230(in Chinese).
- [36] 杨江, 李彬, 李青苗, 等. 川芎镉含量与栽培土壤pH及镉活性态含量的相关研究 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(7): 142-147.
- YANG J, LI B, LI Q M, et al. The study of correlation between the pH value of cultivated soil, the active-state content in cultivated soft and the content in *Rhizoma chuanxiong* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(7): 142-147(in Chinese).
- [37] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭添加对重金属污染稻田土壤理化性状及微生物量的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 279-290.
- GUO B L, CHEN X M, JING F, et al. Effects of biochar addition on physicochemical properties and microbial biomass of the red paddy soil polluted by heavy metals [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 279-290(in Chinese).