

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220066

## 醋渣生物炭对土壤铬修复及苋菜萌发的影响

赵国忠<sup>1,2</sup>, 王新宇<sup>1</sup>, 姚云平<sup>1,2</sup>, 周新运<sup>1,2</sup>, 张琦<sup>2</sup>, 丁凯丽<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457;  
2. 天津天丰泽田生物科技有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 为了缓解重金属铬(Cr)给农田和作物带来的负面影响,将2%醋渣生物炭、2%市售土壤调理剂、基肥(由硫酸钾、磷酸二氢铵和尿素构成,施用量分别为0.05%、0.08%和0.08%)、2%醋渣生物炭+基肥施用于Cr污染的土壤中,对比各处理组对土壤修复及苋菜萌发的作用。结果表明:与对照组(5.12%)相比,醋渣生物炭可降低土壤弱酸可提取态Cr的相对含量(4.19%),但其他处理组会不同程度提升土壤中弱酸可提取态Cr的含量,土壤中弱酸可提取态Cr含量与pH( $r=0.74$ )、脲酶活性( $r=0.81$ )呈正相关,与过氧化氢酶活性呈负相关( $r=-0.55$ )。醋渣生物炭可减轻弱酸可提取态Cr对苋菜幼苗的胁迫作用,使苋菜幼苗长势最佳(其干质量是对照组的3.5倍),作用效果优于市售土壤调理剂。该结果为耕地重金属钝化和作物生长研究提供了技术支持。

**关键词:** 醋渣生物炭; 铬污染; 苋菜; 酶活性; 相关性分析

中图分类号: S156.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2023)01-0041-07

## Effects of Vinegar Residue Biochar on Chromium Contaminated Soil Remediation and Amaranth Germination

ZHAO Guozhong<sup>1,2</sup>, WANG Xinyu<sup>1</sup>, YAO Yunping<sup>1,2</sup>, ZHOU Xinyun<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Qi<sup>2</sup>, DING Kaili<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety,  
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;  
2. Tianjin Tianfeng Zetian Biological Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** To alleviate the negative impact of chromium (Cr) on farmland and crops, 2% modified vinegar residue biochar, 2% commercial modifier, base fertilizer (It is composed of potassium sulfate, ammonium dihydrogen phosphate and urea, with application rates of 0.05%, 0.08% and 0.08% respectively.) and 2% vinegar residue biochar + base fertilizer (the same as above) were applied to Cr contaminated soil, and the effects of each treatment group on soil remediation and amaranth germination were compared. The results showed that compared with the control group (5.12%), vinegar residue biochar could reduce the relative content of weak acid extractable Cr in the soil (4.19%), but other treatment groups could increase the content of weak acid extractable Cr. Moreover, the content of weak acid extractable Cr was positively correlated with soil pH ( $r=0.74$ ), significantly positively correlated with urease activity ( $r=0.81$ ), and negatively correlated with catalase activity ( $r=-0.55$ ). The results of amaranth germination experiment showed that vinegar residue biochar could reduce the stress of weak acid extractable Cr on seedlings and lead to the best amaranth, which was better than commercial modifier, and its dry weight was 3.5 times than that of the control group. The results provide technical support for the study of heavy metal passivation and crop growth in cultivated land.

**Key words:** vinegar residue biochar; chromium pollution; amaranth; enzyme activity; correlation analysis

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-06-02

基金项目: 天津市科技计划项目(20YDTPJC01360, 21YDTPJC00590); 天津市“项目+团队”重点培养专项(XC202057)

作者简介: 赵国忠(1983—), 男, 山西人, 教授; 通信作者: 丁凯丽, 硕士研究生, 948842698@qq.com

重金属污染是导致农田点位超标的重要因素,其可通过土壤被农作物蓄积并进入食物链,使食品安全产生重大隐患<sup>[1-3]</sup>。铬(Cr)是一种重要的工业原料,被广泛应用于冶金、电镀、纺织印染等行业。但是,Cr是一种公认的有毒重金属,被国际癌症研究机构列为I类致癌物<sup>[4]</sup>,常通过工业废水排放进入地下水和土壤<sup>[5]</sup>。耕地中的Cr过量会阻碍作物的萌发,破坏根细胞,诱导叶绿体超微结构改变,降低作物品质<sup>[6-7]</sup>。

目前,Cr污染土壤的修复方法主要包括物理修复法、化学修复法、生物修复法等<sup>[8-9]</sup>。物理修复法如客土法、换土法。客土法见效快、效果好,适用于污染物含量不高、取土方便的地区。换土法切实有效,适用于土层深厚且污染较轻的土壤,同时要增加施肥量,以弥补由于深耕导致的耕层养分的减少。化学修复法如淋洗法、稳定化法。淋洗法的技术工艺较为复杂,工期长且施工成本较高。稳定化法可以改变土壤中重金属的理化性质,降低重金属的生物利用度,但并没有改变土壤中重金属的实际总量。生物修复法如植物修复法、微生物修复法。植物修复法通过不同种类的植物对土壤污染区域的污染物进行固定、降解来修复重金属污染的土壤,但多数超富集植物生长缓慢、富集量小。微生物修复法的成本低、效率高,不破坏植物生长的土壤环境,不产生二次污染,但存在菌种接种培育较困难、周期较长、菌种对生存环境要求高的问题。

由工农业废弃物经缺氧炭化形成多孔、高比表面积、富含官能团的生物炭,能够通过孔填充、官能团络合、静电引力及共沉淀等作用固定污染物,降低土壤中重金属的有效态含量,从而减轻重金属对植株的毒害作用<sup>[10]</sup>。在以往的研究报道中,生物炭在土壤Cr的钝化修复中展现出较大的潜力。通过盐酸酸洗和零价铁负载,改性柳枝生物炭能够提供有效的质子促进Cr(VI)还原为Cr(III),从而降低铬的生物毒性<sup>[11]</sup>。通过污泥与棉秆共热形成的生物炭能够促进土壤中的Cr由弱酸可提取态、可还原态向可氧化态、残渣态转化,并降低了Cr的浸出毒性<sup>[12]</sup>。负载羧甲基纤维素-稳定化纳米FeS复合体的生物炭可以促进交换态和碳酸盐结合态的Cr转化为铁-锰氧化物结合态、有机物结合态、残渣态的Cr,从而降低Cr(VI)的毒性<sup>[13]</sup>。另外,生物炭中含有丰富的有机碳物质和无机矿物质组分,能够有效改善土壤的理化指标,提高作物品质<sup>[14]</sup>。但是,由于生物炭自身的吸附固定效应,生物炭在施用初期可能会导致土壤的肥力

下降,对植株生长具有一定的负面效应,随着时间的推移这种负面效应会逐渐消退,与其他肥料共施可消除这种负面影响<sup>[15]</sup>。

醋渣是食醋酿造过程中的副产物,其产量每年可达300万吨<sup>[16]</sup>。醋渣具有酸性高、含水量大、有机质丰富等特点,将其直接填埋或丢弃会给环境形成负担,且会造成资源浪费<sup>[17]</sup>。经研究<sup>[18]</sup>发现,将改性醋渣经高温碳化后可有效吸附水溶液中的重金属Cr,吸附量高达236.81 mg/g。然而,有关醋渣生物炭及醋渣生物炭联合其他肥料共施对Cr污染土壤的修复效果尚不清楚。

本研究将醋渣生物炭、市售土壤调理剂、基肥、醋渣生物炭+基肥施入Cr污染土壤,对比修复效果并观察在不同修复条件下苋菜的萌发和幼苗的生长情况,为醋渣的再利用和Cr污染耕地的修复提供理论基础和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

醋渣,山西双园醋业有限公司;苋菜种子为花红苋菜种子,北京绿金蓝种苗有限责任公司。尿素、磷酸二氢铵、硫酸钾和市售土壤调理剂,由天津天丰泽田生物科技有限公司提供。实验试剂 $K_2Cr_2O_7$ 、NaOH、 $H_2SO_4$ 、 $ZnCl_2$ 等均为分析纯试剂。

实验用土取自天津市滨海新区某菜地(39°4'44"N, 117°41'43"E)的表层(0~20 cm)土壤。实验土壤采回实验室后立即风干并过筛(孔径为2 mm),该土壤中的Cr含量为61.77 mg/kg, pH为7.85,阳离子交换量为85.7 mmol/kg,有效钾含量为133.5 mg/kg,有效磷含量为81.02 mg/kg,有效氮含量为79.18 mg/kg。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 醋渣生物炭的制备

将风干的食醋渣、 $ZnCl_2$ 和去离子水以1:1:10(g:g:mL)混合均匀后静置12 h,在60℃烘箱中烘干至质量恒定(前后2 h质量差不超过0.1 g),随后粉碎并过80目筛。将上述粉末置于马弗炉中以10℃/min升至700℃,保持2 h,冷却至室温后将所得半成品与去离子水按1:10混合并浸泡24 h,再清洗3次以去除杂质。将清洗后的醋渣生物炭在60℃条件下烘干至质量恒定,置于干燥器中保存,供后续实验使用。供试醋渣生物炭的pH为5.52,含碳量为

70.34%,比表面积为 940 m<sup>2</sup>/g.

### 1.2.2 实验设计

为了制备被 Cr 污染的土壤,向每千克实验土中添加 100 mg Cr(以 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 形式加入),混匀后添加去离子水使其达到 70% 田间持水率,每 3 d 搅拌 1 次实验用土并补足水分. 30 d 后,将上述土壤均分为 5 组,第 1 组不处理作为空白对照组(Control 组),其余 4 组分别为 VB 组、CM 组、BF 组、VB-BF 组. VB 组加入土壤干质量 2% 的醋渣生物炭,CM 组加入土壤干质量 2% 的市售土壤调理剂,BF 组加入基肥,VB-BF 组加入土壤干质量 2% 的醋渣生物炭和基肥. 其中,基肥由硫酸钾、磷酸二氢铵和尿素构成,土壤中的施用量分别为 0.05%、0.08% 和 0.08%. 7 d 后,向玻璃培养皿中添加 50 g 土壤和 100 粒苋菜种子,放入 28 °C 培养箱中培养 7 d,结束后观察各组苋菜的萌发情况并测定各项指标.

### 1.2.3 指标测定

采用火焰原子吸收分光光度法测定总 Cr 含量<sup>[19]</sup>. 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量<sup>[20]</sup>. 采用乙酸铵萃取法测定有效钾含量<sup>[21]</sup>. 采用碱解扩散法测定有效氮含量<sup>[22]</sup>. 采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性,过氧化氢酶活性以 20 min 后 1 g 土壤消耗 0.1 mol/L KMnO<sub>4</sub> 溶液的体积(mL)表示<sup>[23]</sup>. 采用靛酚蓝比色法测定脲酶活性,脲酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sub>3</sub>-N 的质量(mg)表示<sup>[23]</sup>. 采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性,蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的质量(mg)表示<sup>[23]</sup>. 土壤的 pH 按照 NY/T 1121.2—2006《土壤检

测 第 2 部分:土壤 pH 的测定》中的方法测定. 土壤的形态 Cr 采用欧共体标准司(European Community Bureau of Reference, BCR)提出的分步提取法测定.

苋菜幼苗干质量的测定:将各组苋菜幼苗从培养皿中取出,并用蒸馏水清洗去除附着在根系的土壤,随后置于 105 °C 烘箱中干燥 8 h,待冷却至室温后记录各组幼苗的干质量.

### 1.3 数据分析

所有实验均设 3 次重复. 采用 Microsoft Excel 2016 进行基础数据处理,SPSS 17.0 进行数据的显著性分析,不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ). 采用 Origin 2020 进行皮尔逊相关性分析并绘图,当相关系数( $r$ )大于 0.8 时,表明指标间具有强相关性;当  $r$  值介于 0.5~0.8 时,表明指标间具有相关性;当  $r$  值小于 0.5 时,表明指标间不具有相关性.

## 2 结果与分析

### 2.1 醋渣生物炭对土壤理化性质的影响

添加醋渣生物炭和市售土壤调理剂能显著( $P < 0.05$ )降低土壤的 pH,VB 组的效果最明显(表 1). 这种效应可能与醋渣生物炭自身偏酸性有关,而醋渣生物炭与基肥联合使用时 pH 下降程度被削弱. 另外,醋渣生物炭对土壤酸碱度具有一定缓冲能力,能够提高酸性土壤的 pH,而一定程度上可以降低碱性土壤的 pH. 本实验使用的土壤为弱碱性,pH 下降能够减轻碱性对作物带来的不利影响<sup>[24-25]</sup>.

表 1 不同调理剂对土壤理化性质的影响

Tab. 1 Effects of different treatment agents on physicochemical properties of soil

组别	pH	有效氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	总有机碳/%
Control	7.79 ± 0.06 <sup>a</sup>	80.90 ± 2.86 <sup>c</sup>	75.33 ± 1.02 <sup>c</sup>	223.69 ± 5.87 <sup>d</sup>	5.10 ± 0.09 <sup>d</sup>
VB	7.30 ± 0.04 <sup>c</sup>	82.79 ± 2.34 <sup>c</sup>	73.34 ± 0.94 <sup>c</sup>	281.05 ± 3.84 <sup>c</sup>	8.18 ± 0.09 <sup>b</sup>
CM	7.62 ± 0.03 <sup>b</sup>	123.38 ± 3.24 <sup>b</sup>	73.07 ± 1.31 <sup>c</sup>	279.88 ± 4.26 <sup>c</sup>	5.63 ± 0.09 <sup>c</sup>
BF	7.83 ± 0.07 <sup>a</sup>	123.27 ± 2.98 <sup>b</sup>	94.71 ± 2.08 <sup>b</sup>	554.59 ± 4.37 <sup>b</sup>	5.29 ± 0.10 <sup>d</sup>
VB-BF	7.65 ± 0.04 <sup>b</sup>	205.72 ± 2.45 <sup>a</sup>	130.54 ± 0.45 <sup>a</sup>	706.47 ± 7.75 <sup>a</sup>	9.70 ± 0.13 <sup>a</sup>

VB 组土壤的有效氮和有效磷与 Control 组无显著差异( $P > 0.05$ ),但有效钾含量有显著差异. CM 组的有效磷与 Control 组无显著差异( $P > 0.05$ ),而有效氮和有效钾含量分别是 Control 组的 1.53 倍和 1.25 倍. BF 组的有效氮、有效磷和有效钾含量均有较大幅度的提升,分别是 Control 组的 1.52 倍、1.26 倍和 2.48 倍,这是因为基肥中含有丰富的氮、磷、钾. 当同时施用醋渣生物炭和基肥时,土壤的有效氮、有效磷

和有效钾含量进一步提升,分别为对照组的 2.54 倍、1.73 倍和 3.16 倍,是 BF 组的 1.67 倍、1.38 倍和 1.27 倍. 这表明施用醋渣生物炭有助于肥料中有效氮、有效磷、有效钾的全面释放,提高肥料利用率.

与 Control 组相比,不同调理剂均能提高土壤总有机碳的含量. CM 组和 BF 组的提升幅度相对较小,为 Control 组的 1.10 倍和 1.04 倍. VB 组总有机碳含量是 Control 组的 1.6 倍,这与醋渣生物炭自身

的碳含量高有关<sup>[14]</sup>. VB-BF 组总有机碳含量进一步提升,是 Control 组的 1.90 倍、VB 组的 1.19 倍、BF 组的 1.83 倍,表明醋渣生物炭与基肥共施对土壤总有机碳含量的提升具有协同效果,这种协调效果可能得益于生物炭能够减少甲烷等温室气体的排放<sup>[26]</sup>. 另外,有效钾含量的进一步升高能够抑制产甲烷菌并刺激甲烷营养细菌的生长,从而减少甲烷排放<sup>[27]</sup>,将碳源更大程度地保留在土壤中.

## 2.2 醋渣生物炭对土壤酶活性的影响

土壤酶活性是影响土壤养分循环和污染物生物有效性的重要指标<sup>[28]</sup>. 如图 1 所示,与 Control 组相比,BF 组过氧化氢酶活性显著下降( $P < 0.05$ );而 VB 组、CM 组和 VB-BF 组过氧化氢酶活性均显著升高( $P < 0.05$ ),以 VB 组最高,是 Control 组的 1.22 倍. 过氧化氢酶活性与离子价态和重金属解毒有关,表明添加基肥或许不利于土壤中 Cr 的固定.

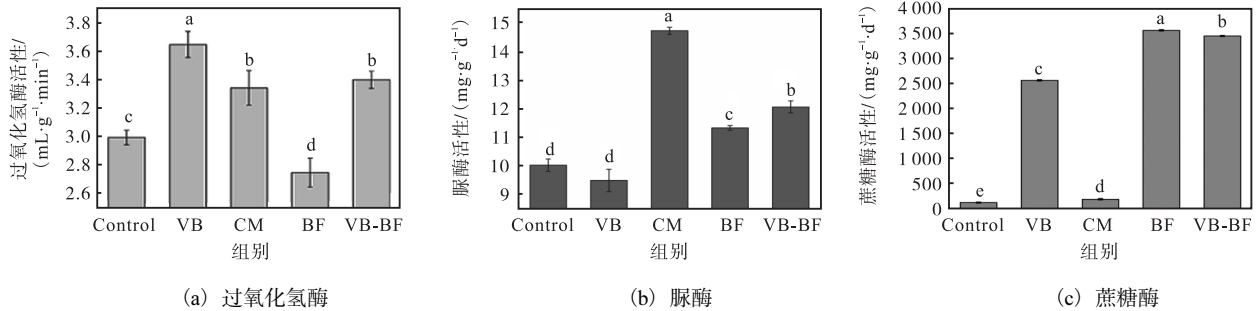


图 1 不同调理剂对土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different treatment agents on soil enzyme activity

VB 组脲酶活性略低于 Control 组,CM 组、BF 组、VB-BF 组脲酶活性均高于 Control 组. 醋渣生物炭与基肥共施(VB-BF 组)对脲酶活性的提升具有协同作用,脲酶参与土壤中营养物质的转化,能够催化尿素水解为  $\text{NH}_4^+$ ,从而为植物提供必需养分<sup>[29]</sup>. 虽然 CM 组的脲酶活性最高,但其土壤中有效氮含量并不是最高的,可能原因是该土壤调理剂自身可提供的氮源有限. 尽管 BF 组的脲酶活性低于 CM 组,但其自身能够提供大量氮源(尿素),因此其有效氮含量与 CM 组相近,VB-BF 组脲酶活性的进一步升高与其有效氮含量协同增加的结果一致.

所有处理组的蔗糖酶活性均高于 Control 组,但 CM 组的提升效果不明显,VB 组、BF 组、VB-BF 组的蔗糖酶活性分别是 Control 组的 20.55 倍、28.57 倍和 27.66 倍. 蔗糖酶能够催化蔗糖水解为葡萄糖和果糖,促进土壤碳循环,是用于表征土壤生物化学活性的重要指标<sup>[30]</sup>.

## 2.3 醋渣生物炭对土壤 Cr 形态的影响

土壤中的 Cr 通过 BCR 分步提取法被分为弱酸可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态. 通常,弱酸可提取态的金属离子非常活泼,很容易被生物利用,随着提取强度增加,可还原态和可氧化态的生物可利用性越来越低,而残渣态则不能被利用<sup>[31]</sup>. 当 Cr 的含量为 100 mg/kg 时,不同调理剂对土壤 Cr 形态的影响如图 2 所示.

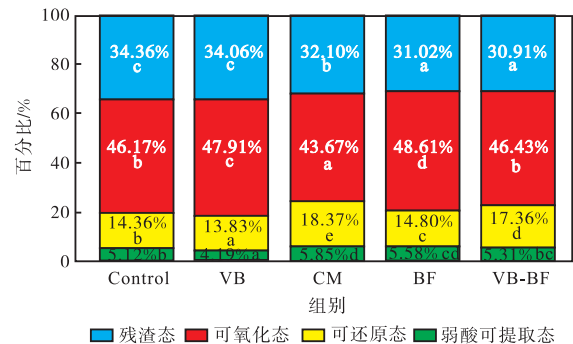


图 2 不同调理剂对土壤 Cr 形态的影响

Fig. 2 Effects of different treatment agents on chromium fraction in soil

添加醋渣生物炭能够降低弱酸可提取态 Cr 的含量,增加可氧化态 Cr 的含量,表明醋渣生物炭能够在一定程度上钝化土壤中的 Cr,提升土壤安全性. 与 Control 组相比,CM 组的弱酸可提取态 Cr 和可还原态 Cr 的比例有所升高,而可氧化态 Cr 和残渣态 Cr 比例下降,表明这种土壤调理剂会激活 Cr,增加土壤的安全隐患. 添加基肥会增加弱酸可提取态 Cr、可还原态 Cr 和可氧化态 Cr 的比例,降低残渣态 Cr 的比例,表明施加基础氮磷钾肥会增加被污染土壤的 Cr 危害.

当醋渣生物炭与基肥共施时,弱酸可提取态 Cr 的比例与 Control 组的相近,而可还原态 Cr 的比例升高,残渣态 Cr 的比例下降,表明醋渣生物炭在一



一定程度上可以缓解施肥带来的重金属激活效应。

## 2.4 Cr形态与土壤理化指标和酶活性间的相关性

土壤各项指标间的相关性分析如图3所示。

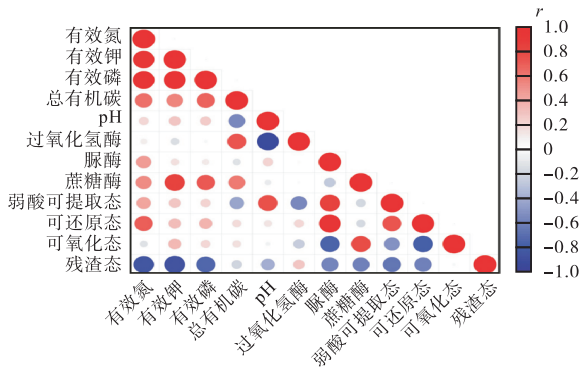


图3 土壤各项指标间的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis among various soil indexes

Cr的弱酸可提取态与过氧化氢酶的酶活性呈负相关( $r = -0.55$ ),与pH呈正相关( $r = 0.74$ )。这表明较高酶活性的过氧化氢酶有助于钝化土壤中的重金属,降低弱酸可提取态Cr的含量,与上述基肥会增加污染土壤的Cr危害的结论相一致。有研究<sup>[32]</sup>表明,在 $pH > 5.5$ 的土壤中,pH的升高会促使三价铬被氧化为六价铬,从而增加铬的生物可利用度。另外,土壤pH与过氧化氢酶的酶活性呈强负相关( $r = -0.91$ ),意味着土壤的pH与过氧化氢酶的酶活性间

有很强的关联性,影响其中之一可以直接和间接改变弱酸可提取态Cr的含量。弱酸可提取态Cr与脲酶的酶活性呈强正相关( $r = 0.81$ ),这解释了CM组中与弱酸可提取态Cr呈负相关的过氧化氢酶的酶活性高于Control组但弱酸可提取态含量却依旧高于Control组的原因。

可还原态Cr与有效氮间呈正相关( $r = 0.67$ ),与脲酶间具有强正相关性( $r = 0.94$ )。可氧化态Cr与脲酶之间呈负相关( $r = -0.76$ ),而与蔗糖酶之间呈正相关( $r = 0.75$ ),表明可氧化态Cr的存在会抑制脲酶的酶活性<sup>[33]</sup>。残渣态Cr与蔗糖酶、脲酶之间呈负相关,与有效氮和有效钾之间具有强负相关性。脲酶的酶活性与有效氮之间具有正相关性( $r = 0.46$ ),蔗糖酶的酶活性与有效钾之间具有强正相关性( $r = 0.81$ )。土壤脲酶和蔗糖酶是与土壤的C、N循环有关的酶系<sup>[34]</sup>,这两种酶与土壤中Cr的形态密切相关,尤其是高活性脲酶与相对不稳定的弱酸可提取态Cr和可还原态Cr间呈正相关,而与相对不稳定的可氧化态Cr和残渣态Cr之间呈负相关。造成这种关联性的原因可能是脲酶在激活土壤氮元素可利用性的同时也会提高Cr的生物可利用性。

## 2.5 醋渣生物炭对苋菜萌发的影响

在不同调理剂处理的土壤中播种苋菜,在第7天用摄像机拍摄各组的萌发情况(图4),并记录发芽率。

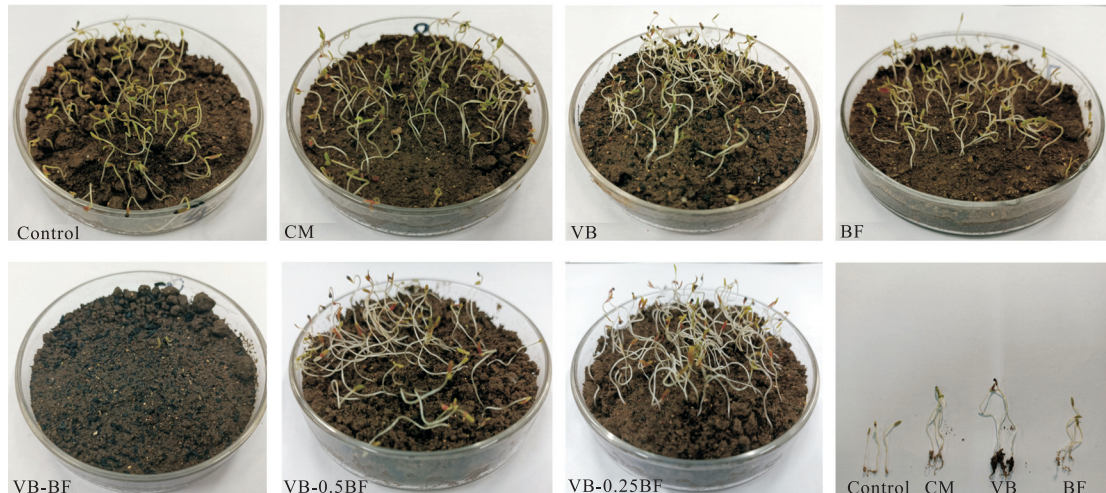


图4 不同调理剂处理土壤的苋菜发芽情况对比

Fig. 4 Comparison of amaranth germination in soil under different treatments

由图4可以看出:在第7天时,除VB-BF组外,其余4组的发芽率未见明显差异,为88%~92%。而VB-BF组发芽率仅有2%。这可能是由于醋渣生物炭与基肥共施致使肥效大大提升,但过高的肥效会抑制苋菜的萌发,毕竟种子在萌发阶段对环境中的 $NH_4^+$

浓度非常敏感<sup>[35]</sup>。为了验证上述猜想,调整醋渣生物炭与基肥共施时基肥的用量为VB-BF组的50%和25%,命名为VB-0.5BF组和VB-0.25BF组,并在相同条件下重复苋菜的播种过程。苋菜发芽率与VB-BF配比的量效关系如图5所示。降低基肥施用量后

VB-0.5BF 组的发芽率约为 68%，VB-0.25BF 组的发芽率约为 85%，这验证了过高的肥效确实不利于苋菜发芽，但关于基肥与醋渣生物炭共施时的最优配比还需要进一步探索。

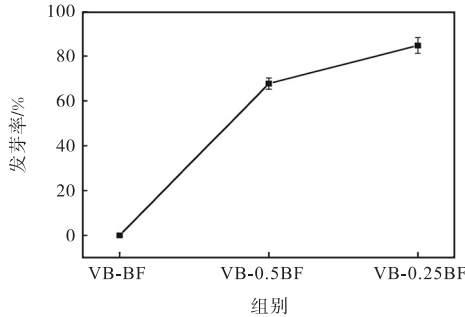


图5 苋菜发芽率与 VB-BF 配比的量效关系

Fig. 5 Dose effect relationship between amaranth germination rate and VB-BF ratio

为了对比发芽率相近的 Control 组、VB 组、CM 组和 BF 组的苋菜幼苗的长势情况，每组随机拔出 3 株苋菜幼苗进行比较(图 4)。VB 组、CM 组和 BF 组幼苗的长势均优于 Control 组，且 VB 组苋菜幼苗的长势最佳，根系能够很好地固定和保留培养基中的土壤，有利于根系更好地汲取土壤中的养分，促进生长。其次是 CM 组，其苋菜幼苗高度略低于 VB 组，根系能够黏附少量的土壤，而 BF 组与 Control 组苋菜幼苗高度明显低于其他两组，其根系几乎没有土壤附着。比较各组苋菜幼苗的干质量(表 2)，VB 组的苋菜幼苗干质量是 Control 组的 3.5 倍，其结果与上述的观察结果一致。这表明在被 Cr 污染的土壤中施用单一的醋渣生物炭能够有效促进苋菜幼苗的萌发生长，其效果优于市售的土壤调理剂。

表 2 苋菜幼苗的干质量

Tab. 2 Dry weight of amaranth seedlings

组别	干质量/g
Control	0.048 0 ± 0.004 5 <sup>d</sup>
CM	0.108 3 ± 0.004 4 <sup>b</sup>
VB	0.168 3 ± 0.006 6 <sup>a</sup>
BF	0.059 6 ± 0.005 0 <sup>c</sup>

### 2.6 苋菜幼苗干质量与土壤指标的相关性分析

土壤是苋菜幼苗萌发和生长的环境介质，为了探究苋菜幼苗长势与土壤各个指标的相关性，将 Control 组、VB 组、CM 组和 BF 组幼苗干质量与土壤各项指标进行相关性分析(表 3)。由表 3 可知：苋菜幼苗的干质量与土壤总有机碳( $r = 0.94$ )、pH( $r = -0.98$ )和过氧化氢酶活性( $r = 0.93$ )间有着非常强的相关性，与弱酸可提取态 Cr( $r = -0.63$ )和有效磷( $r =$

$-0.51$ )呈负相关。这些指标中，过氧化氢酶、pH 和弱酸可提取态 Cr 之间相互关联(图 3)。这表明通过调整 pH 和过氧化氢酶含量来解毒，从而降低弱酸可提取态 Cr 对苋菜幼苗的毒性胁迫，能够有效促进幼苗的生长。土壤有机碳占土壤有机质的 60% ~ 80%，能够改善土壤微生物的群落结构，是土壤中养分转变的关键，也是评价土壤肥力的重要指标<sup>[36-37]</sup>。因此，醋渣生物炭对苋菜幼苗的生长促进作用可归因于减轻能被植物利用的弱酸可提取态 Cr 的胁迫作用和提升土壤总有机质含量，从而改善土壤肥力。

表 3 苋菜幼苗干质量与土壤各指标的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between dry weight of amaranth seedlings and various soil indicators

指标	$r$	指标	$r$
有效氮	-0.22	脲酶	-0.07
有效钾	-0.30	蔗糖酶	0.18
有效磷	-0.51	弱酸可提取态 Cr	-0.63
总有机碳	0.94	可还原态 Cr	0.01
pH	-0.98	可氧化态 Cr	0
过氧化氢酶	0.93	残渣态 Cr	0.28

### 3 结论

(1) 弱酸可提取态 Cr 在土壤中的迁移性和生物有效性较强，对土壤和植物的危害高于其他形态 Cr。施加醋渣生物炭能够显著提升过氧化氢酶活性并缓解土壤碱度，促进 Cr 的钝化解毒，降低弱酸可提取态 Cr 含量，进而降低 Cr 对苋菜的胁迫效应。

(2) 醋渣生物炭是富含碳元素的多孔材料，将其施加到土壤中会显著提升土壤的总有机碳含量。有机碳含量的升高会促进碳循环，改善微生物活力和泌酶能力，提高蔗糖酶和过氧化氢酶活性。过氧化氢酶活性的升高会促进土壤中 Cr 的钝化，而蔗糖酶活性的升高能进一步驱动碳循环，并改善土壤的养分转化。因此，VB 组的苋菜幼苗长势最佳，其干质量是 Control 组的 3.5 倍。

(3) 醋渣生物炭能够增加施用基肥后土壤有效氮、有效磷、有效钾的含量，但过高的肥效不利于苋菜种子的萌发。当醋渣生物炭与基肥共施时，减少基肥的用量至 VB-BF 组的 25%，苋菜的发芽率可达 85%。醋渣生物炭与基肥共施能够在满足作物对肥效需求的基础上，减少肥料施用量，具有经济效益。因此，关于醋渣生物炭与基肥复配的最佳比例是后续的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 代允超,吕亚敏,吕家珑. 土壤性质对小白菜吸收铬(Cr)的影响及预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 244-250.
- [2] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2022-03-17]. <http://www.gov.cn/footer/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>.
- [3] 闫翠侠,贾宏涛,孙涛,等. 鸡粪生物炭表征及其对水和土壤镉铅的修复效果[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 225-233.
- [4] SHARMA A, KAPOOR D, WANG J F, et al. Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: an overview[J]. Plants, 2020, 9(1): 100.
- [5] LIU L H, LIU X, WANG D Q, et al. Removal and reduction of Cr(VI) in simulated wastewater using magnetic biochar prepared by co-pyrolysis of nano-zero-valent iron and sewage sludge[J]. Journal of cleaner production, 2020, 257: 120562.
- [6] 柳玲. 设施菜地重金属含量变化及芹菜对 Cr<sup>6+</sup>的吸收与累积规律[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2010.
- [7] GUO X F, JI Q, RIZWAN M, et al. Effects of biochar and foliar application of selenium on the uptake and sub-cellular distribution of chromium in *Ipomoea aquatica* in chromium-polluted soils[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2020, 206: 111184.
- [8] 何雨江,陈德文,张成,等. 土壤重金属铬污染修复技术的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(3): 126-132.
- [9] 张英婷,李紫龙,蒋妮娜,等. 重金属污染土壤修复技术及其研究进展[J]. 能源与环境, 2021(5): 78-79.
- [10] 王欣,尹带霞,张凤,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248-257.
- [11] 孟繁健,朱宇恩,李华,等. 改性生物炭负载 nZVI 对土壤 Cr(VI)的修复差异研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4715-4723.
- [12] 王志朴,热则耶,张大旺,等. 污泥基生物炭用于土壤中 Cr 的钝化及作用机制分析[J]. 环境工程, 2021, 39(5): 178-183.
- [13] LYU H, ZHAO H, TANG J, et al. Immobilization of hexavalent chromium in contaminated soils using biochar supported nanoscale iron sulfide composite[J]. Chemosphere, 2018, 194: 360-369.
- [14] KAMALI M, SWEYGERS N, AL-SALEM S, et al. Biochar for soil applications-sustainability aspects, challenges and future prospects[J]. Chemical engineering journal, 2022, 428: 131189.
- [15] SCHMIDT H P, KAMMANN C, NIGGLI C, et al. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2014, 191: 117-123.
- [16] WEN H L, WACHEMO A C, ZHANG L, et al. A novel strategy for efficient anaerobic co-digestion based on the pretreatment of corn stover with fresh vinegar residue[J]. Bioresource technology, 2019, 288: 121412.
- [17] LI Y X, PEI G P, QIAO X L, et al. Remediation of cadmium contaminated water and soil using vinegar residue biochar[J]. Environmental science and pollution research international, 2018, 25(16): 15754-15764.
- [18] DING K L, ZHOU X Y, HADIATULLAH H, et al. Removal performance and mechanisms of toxic hexavalent chromium[Cr(VI)] with ZnCl<sub>2</sub> enhanced acidic vinegar residue biochar[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 420: 126551.
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 土壤和沉积物 铜、锌、铅、镉、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法: HJ 491—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [20] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第7部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [21] 汤佳仪. 生物炭和堆肥对重金属污染土壤的金属有效性、理化性质和酶活性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [22] 莎娜,张三粉,骆洪,等. 两种土壤碱解氮测定方法的比较[J]. 内蒙古农业科技, 2014(6): 25-26.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [24] BRTNICKY M, DATTA R, HOLATKO J, et al. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment[J]. Science of the total environment, 2021, 796: 148756.
- [25] ZHANG X, QU J, LI H, et al. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region[J]. Geoderma, 2020, 363: 114170.
- [26] BI Y C, CAI S Y, WANG Y, et al. Assessing the viability

- wave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips[J]. LWT, 2016, 70: 271–279.
- [12] 刘勇,徐娜,陈骏飞,等. 不同干燥方法对三七药材外观性状与内在结构及其品质的影响[J]. 中草药, 2019, 50(23): 5714–5723.
- [13] XU H L, ZHAO Y, WU X Y, et al. Quick assessment of the potato chip crispness using the mechanical-acoustic measurement method[J]. International journal of food engineering, 2020, 16(12): 20200135-1–20200135-8.
- [14] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J]. LWT, 2018, 96: 612–619.
- [15] LAMMERSKITTEN A, WIKTOR A, MYKHAILYK V, et al. Pulsed electric field pre-treatment improves microstructure and crunchiness of freeze-dried plant materials: case of strawberry[J]. LWT, 2020, 134: 110266.
- [16] 刘春菊,王海鸥,牛丽影,等. 蔗糖调控对气流膨化黄桃片微观结构及品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 113–120.
- [17] 殷玲,常诗洁,赵立艳,等. 低温油炸与冷冻干燥生产草菇脆片的特性[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 192–199.

责任编辑:周建军

(上接第47页)

- of soil successive straw biochar amendment based on a five-year column trial with six different soils: views from crop production, carbon sequestration and net ecosystem economic benefits[J]. Journal of environmental management, 2019, 245: 173–186.
- [27] BABU Y J, NAYAK D R, ADHYA T K. Potassium application reduces methane emission from a flooded field planted to rice[J]. Biology and fertility of soils, 2005, 42(6): 532–541.
- [28] YANG R, WANG J H, ZHU L S, et al. Effects of interaction between enrofloxacin and copper on soil enzyme activity and evaluation of comprehensive toxicity[J]. Chemosphere, 2021, 268: 129208.
- [29] VILAR R P, IKUMA K. Adsorption of urease as part of a complex protein mixture onto soil and its implications for enzymatic activity[J]. Biochemical engineering journal, 2021, 171: 108026.
- [30] LI D Q, LAI C H, LI Y T, et al. Biochar improves Cd-contaminated soil and lowers Cd accumulation in Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) [J]. Soil and tillage research, 2021, 213: 105085.
- [31] MUNIR M A M, YOUSAF B, ALI M U, et al. In situ synthesis of micro-plastics embedded sewage-sludge copolymerized biochar: implications for the remediation of Cr and Pb availability and enzymatic activities from the contaminated soil[J]. Journal of cleaner production, 2021, 302: 127005.
- [32] REIJONEN I, HARTIKAINEN H. Oxidation mechanisms and chemical bioavailability of chromium in agricultural soil-pH as the master variable[J]. Applied geochemistry, 2016, 74: 84–93.
- [33] SAMBORSKA A, STEPNIIEWSKA Z, STEPNIIEWSKI W. Influence of different oxidation states of chromium (VI, III) on soil urease activity[J]. Geoderma, 2004, 122: 317–322.
- [34] ZHANG X P, GAI X, ZHONG Z K, et al. Understanding variations in soil properties and microbial communities in bamboo plantation soils along a chromium pollution gradient[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2021, 222: 112507.
- [35] PAN W L, MADSEN I J, BOLTON R P, et al. Ammonia/ammonium toxicity root symptoms induced by inorganic and organic fertilizers and placement[J]. Agronomy journal, 2016, 108(6): 2485–2492.
- [36] 杨旭,刘海林,黄艳艳,等. 有机无机复混肥施用量对热带水稻土微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 619–629.
- [37] 黄连喜,魏岚,李衍亮,等. 花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 101–107.

责任编辑:郎婧