

# 甜高粱对镉污染农田的植物修复效果

龚平<sup>1,2</sup>, 王月玲<sup>3</sup>, 杜林峰<sup>3</sup>, 谢童<sup>1</sup>, 王敏艳<sup>1</sup>, 吴胜春<sup>1</sup>, 梁鹏<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>深圳市生态环境局龙岗管理局, 广东 深圳

<sup>3</sup>中节能铁汉生态环境有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2022年8月14日; 录用日期: 2022年9月13日; 发布日期: 2022年9月20日

## 摘要

本文旨在研究甜高粱对重金属胁迫的生理响应及其结合生物炭和菌根用于Cd污染农田土壤的修复效果。试验用土采自湖南长沙县北山镇的表层污染农田土壤, 以探明3个水平的生物炭添加量以及接种与不接种摩西球囊霉菌处理对甜高粱产量、含糖量和重金属含量的影响。结果表明, 接种菌根和添加生物炭均能够明显增加甜高粱的产量, 在生物炭添加量为1%并接种菌根的情况下效果最好, 增产幅度达到了50%; 接种菌根促进了甜高粱根系对土壤中有效态镉的吸收, 降低土壤中有效态镉的含量, 且其降低效果随着生物炭添加量的增加而增加, 添加生物炭和接种菌根能够提高甜高粱蔗糖含量, 对还原糖含量没有影响。结合甜高粱产量、含糖量以及土壤修复效果, 采用添加1%生物炭并接种菌根的处理效果最为理想。

## 关键词

菌根侵染率, 农田修复, 土壤, 摩西球囊霉菌

# Phytoremediation Effectiveness of Sweet Sorghum on Cadmium-Contaminated Farmland

Ping Gong<sup>1,2</sup>, Yueling Wang<sup>3</sup>, Linfeng Du<sup>3</sup>, Tong Xie<sup>1</sup>, Minyan Wang<sup>1</sup>, Shengchun Wu<sup>1</sup>, Peng Liang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental and Resource Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Longgang Administration Bureau of Shenzhen Ecological Environment Bureau, Shenzhen Guangdong

<sup>3</sup>CECEP Techand Ecological & Environment Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Aug. 14<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 13<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 20<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 龚平, 王月玲, 杜林峰, 谢童, 王敏艳, 吴胜春, 梁鹏. 甜高粱对镉污染农田的植物修复效果[J]. 农业科学, 2022, 12(9): 839-846. DOI: 10.12677/hjas.2022.129118

## Abstract

This paper was to investigate the physiological response of sweet sorghum to heavy metals stress and validate the effectiveness for phytoremediation of Cd-contaminated soils by this energy plant combined with biochar and mycorrhizae. The test soil was collected from Beishan Town, Changsha County, Hunan Province of China. The effects of three biochar additions and inoculation with *Glomus mosseae* on the yield, sugar content and heavy metal content of sweet sorghum were evaluated via a greenhouse study. The results showed that inoculation with mycorrhizal fungi and addition of biochar exerted a positive effect in terms of the yield, sugar content and heavy metal content of sweet sorghum. Both mycorrhizal and biochar additions significantly increased the yield of sweet sorghum, up to 50% increase rate, which was achieved in the treatment of 1% biochar addition associated with mycorrhizal inoculation. The addition of biochar and inoculation of mycorrhizae increased the sucrose content in the stem of sweet sorghum, but had no influence on the reducing sugar content. Taking into the yield, sugar content and soil remediation effect into account, the treatment of 1% biochar addition associated with mycorrhizal inoculation was recommended due to its ideal performance.

## Keywords

Mycorrhizal Infection Rate, Farmland Restoration, Soil, *Glomus mosseae*

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

镉(Cd)不是人体必需元素, 过度 Cd 的摄入可导致人体 Cd 中毒。国际癌症研究机构(IARC)将 Cd 归类为人类致癌物, 我国将 Cd 列为实施排放总量控制的重点监控指标之一。农田土壤 Cd 累积导致农产品产量和质量下降, 严重威胁着我国农业生产[1] [2]。《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国农田 Cd 点位超标率为 7%, 为农田无机污染物首位[3]。

湖南是我国最重要的水稻主产区, 而沿湘江流域农田重金属镉污染问题严重, 由于水稻极易吸收并累积土壤中的 Cd, 湖南稻米 Cd 超标率整体较高[4]。有效控制和治理土壤 Cd 污染已经成为我国迫切需要解决的问题。目前, 对 Cd 污染土壤最主要的修复技术有物理修复、化学修复、生物修复等[5] [6]。但物理修复和化学修复存在会破坏土壤结构和土壤生态的局限性, 植物修复存在周期长、经济效益低下的缺点, 使得其在中国这样一个人口大国难以得到有效的支持与推广。

以不进入食物链的能源作物取代重金属超富集植物来降低土壤重金属, 同时亦可产生可观的经济效益, 是重金属污染农田修复的新策略, 已经逐渐引起国内国际专家学者的广泛关注[7] [8] [9]。甜高粱具有庞大的根系, 对土壤中重金属有很强的吸收作用, 且不进入食物链, 因此被认为是土壤重金属修复最理想的植物之一[10]。研究表明甜高粱根系对土壤重金属有很强的吸收作用, 特别在镉污染土壤的治理与修复中优势明显[11]。但也有研究认为, 甜高粱吸收的镉主要积累在根部, 只有少量被转移到地上部分[12]。

本研究拟采用高生物量能源植物甜高粱来进行 Cd 污染土壤的植物修复, 同时探究添加生物质炭和菌

根对甜高粱生物量及重金属修复效果的影响,为切实有效地解决 Cd 土壤污染问题提供科学依据。

## 2. 试验材料与方法

### 2.1. 试验设计

试验用土采自湖南长沙县北山镇农田,取表层 0~20 cm,风干后过 2 mm 筛备用。土壤基本理化性质见表 1。参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),供试土壤 Cd 含量已经超过了风险管控值( $\text{pH} < 5.5$ , Cd 浓度  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),应当采取严格管控措施。

**Table 1.** Basic physical and chemical properties of tested soil

**表 1.** 供试土壤基本理化性质

土壤类型	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	全镉
		$(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$				$(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
酸性砂壤土	4.87	23.21	3.27	0.19	21.15	2.03

本实验共设置八个处理,每个处理设置 4 个重复,随机放置于温室大棚。每盆装 Cd 污染土壤 3 kg,播种甜高粱种子 4 颗,出苗后间苗至 2 株。每天浇蒸馏水,使得土壤含水量约为最大田间持水量的 60%。种植时间为 120 天。每盆中添加复合肥作为基肥,并根据甜高粱种植技术进行日常管理。试验处理见表 2。

**Table 2.** The treatment setup of this pot experiment

**表 2.** 盆栽试验处理设置

处理编号	菌根	生物质炭
CK	—	—
C1	—	+1%
C2	—	+2%
C3	—	+5%
C4	100 mL 砂基菌剂	—
C5	100 mL 砂基菌剂	+1%
C6	100 mL 砂基菌剂	+2%
C7	100 mL 砂基菌剂	+5%

注:接种的真菌为摩西球囊霉菌;添加的生物质炭为猪粪生物质炭;种植的作物为甜高粱。

### 2.2. 样品采集与测定

待甜高粱成熟时,沿土面剪取植株地上部分,洗出根系,并用去离子水将茎、叶和根洗净,先用自来水冲洗干净,后用去离子水冲洗 2~3 遍,用吸水纸吸干表面水。鲜样先在  $105^\circ\text{C}$  下杀青 30 min,后再  $70^\circ\text{C}$  烘干至恒重,分别测定地上部分和地下部分的干重、菌根侵染率、植物镉含量、植物还原糖含量和

植物蔗糖含量，同时采集土壤样品，及时冷冻干燥，研磨过筛，测定土壤有效态镉含量。

### 2.3. 数据统计与分析

使用 Excel 2013 对数据进行处理，用 SPSS 的 *t*-test 对均值进行差异显著性分析。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 植物根系菌根侵染率

表 3 为接种摩西球囊霉菌和添加生物炭对甜高粱根系菌根侵染率的影响，结果表明，接种摩西球囊霉菌对甜高粱根系有良好的侵染率，并达到显著效果( $p < 0.05$ )。在接种摩西球囊霉菌的处理组别中，随着生物炭添加量的增加，甜高粱根系菌根逐渐下降，以 5% 生物炭的侵染率最低。在未接种摩西球囊霉菌的处理组别中也有相似的试验结果。这表明，生物炭的添加会抑制摩西球囊霉菌对甜高粱根系的侵染，一方面可能是生物炭的添加改变了摩西球囊霉菌最适宜的生存环境，另一方面生物炭的添加可能导致了摩西球囊霉菌与其它微生物对氮的竞争。

**Table 3.** Mycorrhizal infection rate of sweet sorghum root under different treatments  
**表 3.** 不同处理下甜高粱根系菌根侵染率

处理	无菌根/%	有菌根/%
甜高粱	7.93 ± 1.39	47.7 ± 3.89
甜高粱 + 1% 生物炭	8.35 ± 2.48	47.2 ± 5.48
甜高粱 + 2% 生物炭	6.92 ± 1.56	35.8 ± 3.76
甜高粱 + 5% 生物炭	5.55 ± 0.68	28.9 ± 2.97

### 3.2. 生物炭和接种菌根对甜高粱生长的影响

由表 4 可知，在接种摩西球囊霉菌的条件下，四个不同处理的甜高粱地上部分(秸秆部分)的生物量明显增加，且显著高于未接种的对照组( $p < 0.05$ )，这与邹英宁和黄咏明等[13] [14]的研究结果相一致。植物生长势的好坏与菌根侵染率的高低密切相关，这是因为丛枝菌根真菌与宿主植物形成菌根共生体，从根部发散出数量庞大的真菌菌丝，扩大了有效吸收面积，能显著促进植物对磷素和水的吸收[13] [15] [16]。比较甜高粱地下部分干重可知，菌根的接种会造成甜高粱根系的干重略有下降，但对其生长并无显著影响。这可能是因为摩西球囊霉菌与甜高粱根系形成的互惠互利共生关系，菌根向宿主植物根系提供水及磷等必需物质的同时，也要从宿主植物根系获取碳水化合物，这可能是造成甜高粱根系生物量减少的原因[17]。

此外，值得注意的是适量添加生物炭也能促进甜高粱的生长，如适用量在 1% 或是 2% 之后，甜高粱的地上和地下部分的生物量都有所增加，但贡献度要远小于接种菌根的效应。这可能是由于生物炭的添加为甜高粱生长提供了部分营养，有一定的促进发育和增加产量效应，巴西亚马逊河地区的田间试验结果也证明了这一点[18]。但当生物炭添加量达到 5% 之后，无论是菌根组或是对照组，增产效果均逐渐降低，原因可能是生物炭的添加导致土壤 C/N 比增大，导致作物与微生物之间对养分的竞争性增强，从而使作物增产效果降低[19]。总的来说，在添加 1% 生物炭并同时接种菌根时，甜高粱产量最高为 384 g，增产幅度达到了 50%。

**Table 4.** The biomass of sweet sorghum under different treatments  
**表 4.** 不同处理的甜高粱生物量

处理	地上部分干重/g		地下部分干重/g	
	无菌根	有菌根	无菌根	有菌根
甜高粱	256 ± 18.7	342 ± 20.6	20.3 ± 2.27	18.2 ± 4.06
甜高粱 + 1%生物质炭	280 ± 16.4	384 ± 14.9	24.0 ± 4.84	22.2 ± 3.32
甜高粱 + 2%生物质炭	282 ± 6.26	370 ± 12.5	22.4 ± 3.52	20.5 ± 2.24
甜高粱 + 5%生物质炭	260 ± 14.2	336 ± 12.8	18.3 ± 2.28	18.2 ± 3.68

### 3.3. 甜高粱植株体内镉含量变化

土壤 Cd 的生物有效性和植物自身对 Cd 的吸收均能影响植物体内的 Cd 含量[20]。在甜高粱种植期间内, 不同处理间植株地上部分和地下部分的 Cd 含量如表 5 所示。结果表明, Cd 含量在甜高粱体内的分配基本遵循地下部分 > 地上部分的规律, 这与甜高粱对砷的吸收富集规律相似[21]。在同一添加量菌根和生物质炭的条件下, 甜高粱植株地下部分的 Cd 含量显著高于其地上部分( $p < 0.05$ )。对地上部分而言, 接种摩西球囊霉菌的处理甜高粱植株的 Cd 含量要低于未接种的处理组, 与地下部分的结果相反。一方面, 由于甜高粱并不属于重金属超累积植物, 其向上转移 Cd 的能力较弱; 另外, 由于菌根细胞壁对重金属 Cd 有强烈的固定作用[22], 所以导致菌根组的甜高粱根系中 Cd 含量要高于不接种对照组。而在同一菌根处理的条件下, 生物质炭的添加抑制了甜高粱对土壤有效态镉的吸收, 并且随着生物质炭添加量的增加, 其抑制效果越好, 但并未达到显著水平( $p > 0.05$ )。生物质炭的施用不仅能够降低 Cd 积累对甜高粱毒害的作用, 而且可以降低秸秆中 Cd 的积累, 主要与土壤 Cd 有效性降低有关。生物质炭能够促进 Cd 在甜高粱根系周围形成沉淀, 阻碍 Cd 在植物体内的迁移, 减轻对植物的生长的抑制作用[23]。虽然接种菌根和施用生物质炭降低了甜高粱地上部份茎秆中的 Cd 含量, 但其含量仍高于国家食品安全标准的阈值 (GB2762-2017, 最大限值  $Cd \leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 这说明用于牲畜鲜饲料仍存在一定的风险。

**Table 5.** Cadmium content in plants  
**表 5.** 植株体内镉的含量

处理	地上部分/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		地下部分/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	无菌根	有菌根	无菌根	有菌根
甜高粱	4.87 ± 0.590	3.58 ± 0.360	14.5 ± 1.43	15.6 ± 3.53
甜高粱 + 1%生物质炭	3.67 ± 0.360	2.89 ± 0.260	12.2 ± 1.93	16.9 ± 2.16
甜高粱 + 2%生物质炭	3.64 ± 0.650	2.86 ± 0.370	12.4 ± 2.56	14.9 ± 3.13
甜高粱 + 5%生物质炭	2.98 ± 0.320	2.62 ± 0.530	12.8 ± 2.23	13.6 ± 2.35

### 3.4. 土壤有效态镉含量变化

土壤中 Cd 的赋存形态多种多样, 并非所有的化学形态都能被植物所吸收的。土壤有效态镉含量, 即能被植物吸收利用的那部分 Cd, 能比土壤全镉含量更好地预测植物体内 Cd 的含量。很多研究表明, 土壤有效态镉含量与植物体内 Cd 含量具有很好的相关性, 能够较好地表征 Cd 的生物有效性[24]。添加不同含量生物质炭和接种菌根前后, 土壤中有效态镉含量变化见表 6。

**Table 6.** The concentration of available cadmium in soil  
**表 6.** 土壤中有效态镉的含量

处理	无菌根/mg·kg <sup>-1</sup>	有菌根/mg·kg <sup>-1</sup>
甜高粱	1.08 ± 0.015	1.07 ± 0.013
甜高粱 + 1%生物质炭	0.87 ± 0.026	0.89 ± 0.016
甜高粱 + 2%生物质炭	0.64 ± 0.065	0.76 ± 0.021
甜高粱 + 5%生物质炭	0.58 ± 0.032	0.62 ± 0.013

可知, 施加生物质炭能够降低土壤中有效态镉含量, 随着生物质炭的添加量的增加, 其降低效果越好, 在接种菌根和不接种菌根的情况下, 添加生物炭处理土壤有效态镉含量分别降低了 19.4%~46.3%和 16.8%~42.1%。作为常用的重金属污染土壤钝化剂, 生物炭能够有效促进土壤 pH 的升高, 一方面增加土壤胶体表面负电荷, 有利于 Cd 的氢氧化物沉淀和碳酸盐结合态形成; 另一方面, H<sup>+</sup>的减少减弱了土壤阳离子竞争吸附, 增强土壤胶体、铁锰氧化物对 Cd<sup>2+</sup>的吸附, 有效降低土壤 Cd 的积累[25]。也有研究表明, 生物质炭中的有机碳含量较高, 能与镉络合形成难溶的螯合物, 其重要组分羟基磷灰石能够与 Cd<sup>2+</sup>进行离子交换和共沉淀, 形成磷酸盐沉淀, 进一步降低 Cd<sup>2+</sup>迁移性和有效性[26]。但是接种菌根对土壤中有效态镉含量影响并无差异。这是因为菌根可以活化根际土壤中的磷酸根, 从而形成磷酸镉沉淀; 但在酸性土壤中效果不明显[27]。

### 3.5. 甜高粱地上部对镉的吸收

植物修复效果的好与坏, 可以根据地上部分生物量与其中 Cd 含量的乘积来进行判断[28]。表 7 给出了不同处理条件下, 盆栽土壤中甜高粱的 Cd 富集特性, 可以看出 8 个处理中甜高粱对 Cd 的修复效果均处于 700~1300 μg 范围内, 最大值为 1246 μg, 最小值为 775 μg, 均落在未接种菌根处理组。对比甜高粱在是否接种菌根的条件下对 Cd 的修复效果可知, 接种菌根对其修复效果无任何显著影响。然而从生物质炭添加量的角度来看, 生物质炭的施用并没有提高植物提取的修复效果, 反而对其有抑制效果; 与未添加生物质炭的对照组相比, 同未接种菌根添加下当生物质炭的添加量为 5%时, 其对甜高粱提取修复土壤 Cd 的抑制效果最为明显。一定量生物质炭的添加虽然促进甜高粱的生长, 增加了其生物量, 但是同时也降低了土壤和植株中有效态镉的含量, 相比之下, 后者效果大于前者效果, 因而抑制了甜高粱对 Cd 的吸收。当生物质炭的添加量为 5%时, 促进甜高粱生长的效果微弱, 而显著降低了其地上部分的 Cd 含量, 因此其抑制效果最大。

**Table 7.** Remediation effectiveness of sweet sorghum under different treatments (unit: μg/pot)  
**表 7.** 不同处理下甜高粱修复效果(单位: μg/盆)

处理	无菌根	有菌根
甜高粱	1246 ± 91.6	1224 ± 73.7
甜高粱 + 1%生物质炭	1028 ± 170	1110 ± 43.1
甜高粱 + 2%生物质炭	1026 ± 22.8	1058 ± 35.8
甜高粱 + 5%生物质炭	775 ± 42.3	880 ± 33.4

### 3.6. 不同处理对甜高粱含糖量的影响

利用甜高粱发酵榨汁来生产乙醇,其茎秆中所含的蔗糖和还原糖(果糖和葡萄糖)是最佳原料。如表8所示,接种菌根和添加生物炭均可以提高秸秆中的蔗糖含量,在同一生物炭添加量下,接种菌根效果更好,且在添加1%的生物炭时效果最好,达到了14.1%;对于还原糖含量,接种菌种和添加生物炭均没有明显的影响。土壤中 $\text{Cd}^{2+}$ 胁迫对甜高粱产糖量并无负面效果。其他学者也报道含Cd土壤并不会对甜高粱茎秆中的糖含量、发酵过程中的糖利用率和乙醇转化率产生不利影响[29]。

**Table 8.** Sucrose content and reducing sugar content in sweet sorghum under different treatments (unit: %)

**表 8.** 不同处理甜高粱秸秆中的蔗糖含量和还原糖含量(单位: %)

处理	蔗糖含量/%		还原糖含量/%	
	无菌根	有菌根	无菌根	有菌根
甜高粱	7.87 ± 1.35	8.58 ± 0.36	3.76 ± 0.83	3.58 ± 1.66
甜高粱 + 1%生物质炭	9.67 ± 1.56	10.2 ± 0.26	3.62 ± 1.12	3.69 ± 0.26
甜高粱 + 2%生物质炭	8.64 ± 1.26	9.86 ± 0.37	3.54 ± 0.76	3.76 ± 0.77
甜高粱 + 5%生物质炭	7.98 ± 0.32	8.62 ± 0.53	3.08 ± 0.85	3.62 ± 0.64

## 4. 结论

甜高粱不仅具有耐干旱、高生物量、高光合作用效率和低生产成本等优势,而且是用于生物能源乙醇的优良作物原料,同时甜高粱能吸收土壤中残留的重金属。相较于其它植物,甜高粱具有含糖量高、生长周期短、生物量大、抗逆性强、种植范围广等优势,因此可以弥补植物修复周期长这一缺点。另外,利用甜高粱修复镉污染土壤不进入食物链,兼顾了生态和经济效益。本研究主要结果如下:

1) 接种菌根能够明显增加甜高粱的产量(地上部分干重),且在生物质炭的加持下,增产效果更为明显。当生物质炭的添加量为1%并接种菌根的情况下,甜高粱的增产幅度达到了50%;而当添加量大于2%后,增产效果随着生物质炭添加量的增加而降低,甚至消失。

2) 接种菌根促进了甜高粱根系对土壤中有效态镉的吸收,降低土壤中有效态镉的含量,且抑制了其向上转运Cd的能力。

3) 生物质炭的施用能在抑制甜高粱根系对土壤中有效态镉的吸收的同时也降低土壤中有效态镉的含量,且其降低效果随着生物质炭添加量的增加而增加。

4) 结合甜高粱产量、含糖量以及土壤修复效果,采用添加1%生物质炭 + 菌根的处理效果最为理想。

## 参考文献

- [1] Huang, Y., Wang, L., Wang, W., et al. (2018) Current Status of Agricultural Soil Pollution by Heavy Metals in China: A Meta-Analysis. *Science of the Total Environment*, **651**, 3034-3042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.185>
- [2] Ma, C., Ci, K., Zhu, J., et al. (2020) Impacts of Exogenous Mineral Silicon on Cadmium Migration and Transformation in the Soil-Rice System and on Soil Health. *Science of the Total Environment*, **759**, Article ID: 143501. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143501>
- [3] 高鑫, 曾希柏, 陈清, 等. 利用富镉基质栽培快速比较不同叶菜镉累积能力的差异[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2740-2748.
- [4] 刘昭兵, 纪雄辉, 官迪, 等. 湖南两种母质发育土壤的稻米镉积累差异[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 191-196.
- [5] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022,

- 45(1): 49-56.
- [6] 丁禹乔, 柳晓光. 土壤重金属污染修复技术及展望[J]. 资源节约与环保, 2021(6): 77-78.
- [7] Dastyar, W., Raheem, A., He, J., *et al.* (2019) Biofuel Production Using Thermochemical Conversion of Heavy Metal-Contaminated Biomass (HMCB) Harvested from Phytoextraction Process. *Chemical Engineering Journal*, **358**, 759-785. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.111>
- [8] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 59-64.
- [9] 张杏锋, 吴萍, 冯健飞, 等. 超富集植物与能源植物间作对 Cd, Pb, Zn 累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1481-1491.
- [10] 祁剑英, 杜天庆, 薛建福, 等. 能源作物甜高粱和玉米对土壤重金属的富集比较[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 73-78.
- [11] 张英英, 施志国, 李彦荣, 等. 施用改良剂对重度镉胁迫下甜高粱重金属吸收和转运的调控效应[J]. 西南农业学报, 2021, 34(9): 1959-1968.
- [12] Jia, W., Lv, S., Feng, J., *et al.* (2016) Morphophysiological Characteristic Analysis Demonstrated the Potential of Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in the Phytoremediation of Cadmium Contaminated Soils. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 18823-18831. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7083-5>
- [13] 邹英宁, 吴强盛, 李艳, 等. 丛枝菌根真菌对枳根系形态和蔗糖、葡萄糖含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1125-1129.
- [14] 黄咏明, 吴黎明, 宋放, 等. 根系修剪和接种丛枝菌根真菌对枳实生苗根系形态的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(2): 5-10.
- [15] Wu, Q. S., He, X. H., Zou, Y. N., *et al.* (2012) Arbuscular Mycorrhizas Alter Root System Architecture of Citrus Tangerine through Regulating Metabolism of Endogenous Polyamines. *Plant Growth Regulation*, **68**, 27-35. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9690-6>
- [16] 韩冰, 郭世荣, 贺超兴, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜植株生长、果实产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 154-158.
- [17] 黄京华, 刘青, 李晓辉, 等. 丛枝菌根真菌诱导玉米根系形态变化及其机理[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 131-135, 139.
- [18] 李江鹏, 于阳雪, 孙璐. 生物炭对甜高粱形态特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(10): 53-54, 90.
- [19] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3634-3641.
- [20] 聂新星, 张自咏, 黄玉红, 等. 生物炭与氮肥配施对高粱生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2749-2756.
- [21] 再吐尼古丽·库尔班, 吐尔逊·吐尔洪, 阿扎提·阿布都古力, 等. 砷污染农田甜高粱对砷的累积特性[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3): 182-187.
- [22] 牟玉梅, 邢丹, 周鹏, 等. 接种丛枝菌根真菌对辣椒积累转运镉的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 172-179.
- [23] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同作物秸秆生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2364-2369.
- [24] 颜世红, 吴春发, 胡友彪, 等. 典型土壤中有效态镉  $\text{CaCl}_2$  提取条件优化研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 99-104.
- [25] 王玉婷, 王紫玥, 刘田田, 等. 钝化剂对镉污染土壤修复效果及青菜生理效应影响[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2395-2403.
- [26] 纪艺凝, 徐应明, 王农, 等. 鱼骨粉对土壤 Cd 污染钝化修复效应及其理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 312-319.
- [27] 郭雄飞. 生物炭、间作和菌根对重金属污染土壤特性及刨花润楠生长的影响[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [28] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L.)对镉污染农田的修复潜力[J]. 环境科学, 2019(5): 2453-2459.
- [29] 薛忠财, 李纪红, 李十中, 等. 能源作物甜高粱对镉污染农田的修复潜力研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1621-1627.