

Cd 污染土壤不同钝化处理对木麻黄幼苗生理响应研究

洪婷¹, 张晓勉², 吴才华³, 谢长明⁴, 岳春雷², 李贺鹏², 王珺², 黄旭波², 李俊⁵

(1. 台州市自然资源和规划局路桥分局, 浙江 台州 318050; 2. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023;
3. 台州市路桥区农业农村和水利局, 浙江 台州 318050; 4. 台州市路桥区农业信息化服务中心, 浙江 台州 318050;
5. 温岭市自然资源和规划局, 浙江 温岭 317500)

摘要:以木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 1 年生幼苗为实验对象, 采用重金属 Cd 污染土盆栽实验, 研究添加秸秆生物炭、泥炭、凹凸棒土 3 种钝化剂对木麻黄生长情况、膜质过氧化和渗透调节等的影响, 分析木麻黄对 Cd 胁迫的耐受机理。结果表明, 在中度以上 Cd ($2.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 胁迫条件下, 木麻黄依靠可溶性蛋白质和可溶性糖等渗透调节物质对膜质过氧化进行修复, 维持正常的生长状态, 5 个月时的高生长效率、地径生长效率分别达到种植初始值的 2.5 倍以上和 14 倍以上, 表现出对 Cd 胁迫较强的适应能力; 单独添加 5% 的秸秆生物炭、泥炭和凹凸棒土 3 种钝化剂可有效减轻 Cd 胁迫危害, 3 种钝化剂处理木麻黄幼苗叶片中 MDA 的含量分别为对照的 39.3%, 84.1% 和 94.3%; 通过多重比较和聚类分析认为单独添加 5% 的秸秆生物炭的综合钝化效果最好。木麻黄作为多功能树种, 在土壤重金属污染修复方面具有较大应用潜力。

关键词: 木麻黄; 重金属 Cd 污染; 钝化处理; 生理响应

中图分类号: S792.93; X53 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2020)05-0007-06

Physiological Response of *Casuarina equisetifolia* Seedlings to Cd Contaminated Soil after Passivating Treatment

HONG Ting¹, ZHANG Xiao-mian², WU Cai-hua³, XIE Chang-ming⁴, YUE Chun-lei², LI He-peng², WANG Jun², HUANG Xu-bo², LI Jun⁵

(1. Luqiao Branch of Taizhou Natural Resources and Planning Bureau of Zhejiang, Taizhou 318050, China; 2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 3. Taizhou Luqiao Agriculture and Water Conservancy Bureau of Zhejiang, Taizhou 318050, China; 4. Taizhou Luqiao Agricultural Information Center of Zhejiang, Taizhou 318050, China; 5. Wenling Natural Resources and Planning Bureau of Zhejiang, Wenling 317000, China)

Abstract: In June 2019, 1-year bare-root *Casuarina equisetifolia* container cutting seedlings were planted on pure Cd contaminated soil (CK), +5% of straw biochar, +5% of peat and +5% of attapulgite. 5 months after treatment, determinations were implemented on diameter and height growth, content of MDA, soluble sugar and soluble protein. The results showed that height and ground diameter growth reached more than 2.5 and 14 time of the initial value, showing strong adaptability to Cd stress. MDA content of seedlings on treated soil was 39.3%, 84.1% and 94.3% of that on the control. Multiple and cluster analysis demonstrated that adding 5% of straw biochar had the best passivation effect.

Key words: *Casuarina equisetifolia*; Cd stress; passivating treatment; physiological response

土壤中的重金属污染不仅会对生态环境造成危害, 也会影响植物对土壤养分的吸收, 威胁植物生长, 还会通过食物链危害人体健康^[1-2]。上世纪, 浙东沿海部分地区兴起的电子废物拆解回收产业带来了丰厚的利润, 但

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-07-27

基金项目: 浙江省重点研发项目(2018C03047); 台州市农业类一般项目(162hb02); 温岭市一般农业项目(2018C210022)

作者简介: 洪婷, 农艺师, 从事林业科技推广工作; E-mail:498652746@qq.com。通信作者: 张晓勉, 副研究员, 从事植物抗逆研究; E-mail:82236545@qq.com。

由于部分企业电子废物处理方式不合理,导致 Cd, Cu, Pb 等重金属进入环境,对人类的身体健康和自然环境造成严重危害^[3-6]。植物修复技术作为一种绿色环保的土壤重金属污染修复技术,是目前修复重金属污染土壤行之有效的办法。木本绿化植物具有生物量大、重金属耐性强、不进入食物链危害人类健康、兼具生态修复和景观美化功能等特点,在修复土壤重金属污染方面具有广阔的应用前景^[3-6]。以植物修复技术为核心,辅以化学、微生物及农业生态措施,形成联合修复体系,可明显提高植物修复重金属污染土壤的效率,成为当今植物修复土壤重金属污染的热点^[7-8]。

木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 具有耐干旱、抗风沙和耐盐碱的特性,自引进后一直是我国东南沿海地区重要的沿海绿化树种,在海岸带生态系统保护、恢复等方面发挥了巨大作用^[9]。目前,关于木麻黄耐重金属胁迫的研究已有部分报道^[6,9-11],但利用木麻黄作为绿化植物修复沿海因电子废物污染土壤的研究鲜有报道。本文以木麻黄作为修复主体,结合施用钝化剂,研究在 Cd 污染土壤条件下木麻黄幼苗的生长及生理响应,以期为木麻黄在浙东沿海电子废物污染土壤修复中的应用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

台州市路桥区(121°17'25"~121°40'10"E, 28°26'46"~28°38'32"N),位于温黄平原东南侧,背山面海,属亚热带季风气候,冬、夏盛行风向分别为西北风和东南风,光照适宜,年平均气温为 16.1℃,雨水充足,年降水量为 1 441.9 mm。路桥区峰江街道再生金属园曾是我国最大的电子废物拆解基地,于 20 世纪 70 年代建厂,2015 年前后关闭,存在将近 50 年的历史,园区总占地面积 107 hm²,包括园区周边小手工作坊,总占地面积达到 10 km²。由于粗放的拆解工艺和小作坊的手工操作,使得电子废物中 Cd, Cu, Pb, Zn 等重金属污染物及化学污染物得不到有效处理,拆解电子垃圾产生的残渣、污水经过污灌、渣堆等途径进入周围的农田和水域,造成严重污染^[6]。

1.2 材料及方法

污染土壤来源于台州市路桥区峰江街道西村实验地,距原峰江街道再生金属园 1 km。在实验地四角及中心位置各设置 8 m×8 m 的取土区,取土深度为 0~20 cm,2019 年 6 月取土,并对所取土壤进行混合、室温风干,去除肉眼可见的植物根、枯落物等,研磨,过 4 mm 筛,备用。供试土壤理化性质见表 1,其中, Cd 含量达到 2.52 mg·kg⁻¹,超过国家《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[12]农用地 Cd 污染风险筛选值(0.3 mg·kg⁻¹, pH<6.5) 8.39 倍,已达到中度以上污染水平^[6,13-15]。

表 1 供试土壤和钝化剂理化性质
Table 1 Physio-chemical properties of tested soil and pasivators

参数	全 Cd/(mg·kg ⁻¹)	全 P/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH	含盐量/(g·kg ⁻¹)
供试土壤	2.52	1.25	31.50	6.05	1.40
秸秆生物炭	0.06	1.43	89.73	7.93	0.22
泥炭	0.12	1.77	76.16	8.16	0.42
凹凸棒土	0.09	1.89	69.44	8.69	0.37

试验采用污染土盆栽室内控制试验,根据相关研究^[16-18]及预实验结果,共设计 4 种处理情况:纯污染土不添加任何钝化剂(CK)、污染土+秸秆生物炭(处理 A)、污染土+泥炭(处理 B)、污染土+凹凸棒土(处理 C)。污染土壤风干后按试验设计分别称量装入花盆中,每盆装入原状土 5 kg,并加入 3.0 mg·kg⁻¹挪威进口复合肥(N:P:K=15:15:15)作为底肥,混匀后,浇水,保持田间最大持水量的 50%。其中,CK 为纯污染土,处理 A、处理 B 和处理 C 每盆按土壤质量的 5%拌入相应的钝化剂,混匀,装盆^[19-21]。秸秆生物炭、泥炭、凹凸棒土由浙江省农业科学院提供,其理化性质见表 1,每种钝化剂处理土壤 10 盆,共计 40 盆,平衡两周后开展木麻黄种植试验。

供试木麻黄来源于临海市保障苗圃, 2019 年 6 月, 选用 1 年生、地径和高度基本一致的扦插容器苗, 去掉容器苗根部基质后定植到相应的土壤处理中, 每盆 1 株, 浇透水, 每个处理 10 株, 共计 40 株。定植后的木麻黄在大棚中进行培养, 每 2 d 浇 1 次水。定植 10 d 后, 每个处理随机取 5 株测定株高、地径, 作为生长效率比较的初始值。5 个月后每个处理随机取 5 株统计株高、地径并采集叶片进行 MDA (丙二醛)、可溶性糖、可溶性蛋白质等指标测定。

1.3 测定方法及数据处理

MDA 测定采用硫代巴比妥酸法^[22-23], 可溶性糖测定采用蒽酮法, 可溶性蛋白质测定采用考马斯亮蓝法^[24-26]。株高使用钢圈尺 (三圈牌 173 钢卷尺) 测定, 地径使用游标卡尺 (晶思达数显游标卡尺) 测定。

采用 Excel 软件对数据进行基本统计和分析作图。采用 SPSS17.0 进行方差分析、多重比较和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对木麻黄生长的影响

从图 1 和图 2 中可以看出, 添加不同钝化剂处理对木麻黄幼苗地径和高生长都具有一定的促进效果: 处理 A、处理 B 和处理 C 的苗高生长量分别为 CK 的 1.25 倍、1.02 倍和 1.26 倍, 地径生长量分别为 CK 的 1.47 倍、1.05 倍和 1.28 倍。从生长效率来分析, 种植 5 个月后 4 种钝化剂处理土壤条件下 (CK、处理 A、处理 B 和处理 C) 木麻黄苗高生长量分别是种植时初始值的 2.53 倍、3.11 倍、2.63 倍、3.18 倍, 地径生长量分别是种植时初始值的 14.01 倍、21.41 倍、14.67 倍、17.96 倍。综合生长情况可以看出, 处理 A 和处理 C 可以明显提高木麻黄幼苗的地径和高生长。

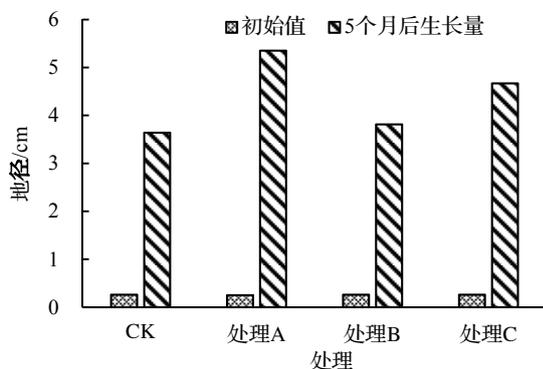


图 1 不同处理 5 个月后木麻黄地径生长量的比较
Figure 1 Comparison on ground diameter growth of seedlings treated 5 months later

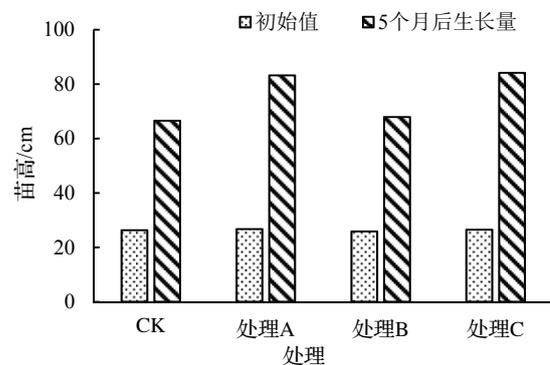


图 2 不同处理 5 个月后木麻黄高生长量的比较
Figure 2 Comparison on height growth of seedlings treated 5 months later

2.2 不同处理对木麻黄叶片 MDA 含量的影响

由图 3 可以看出, 与 CK 相比, 添加钝化剂的各处理木麻黄叶片的 MDA 含量较低, 分别为 CK 的 39.3%, 84.1%和 94.3%。说明添加秸秆生物炭、泥炭、凹凸棒土后木麻黄幼苗膜质过氧化反应较小, 膜系统受损程度较轻, 植物受到 Cd 胁迫伤害程度较小。不同处理木麻黄叶片的 MDA 含量排序为: CK > 处理 C > 处理 B > 处理 A, 其中, 处理 A 木麻黄叶片的 MDA 含量为 CK 的 39.3%, 为处理 B 的 46.8%, 为处理 C 的 41.7%, 说明添加秸秆生物炭比添加泥炭和凹凸棒土在缓解重金属污染、保障植物正常生长方面具有较好效果。

2.3 不同处理对木麻黄叶片可溶性蛋白质、可溶性糖含量的影响

从图 4 可以看出, 与 CK 相比, 处理 A、处理 B 和处理 C 木麻黄叶片的可溶性蛋白质含量较低, 分别为 CK 的 81.7%, 96.4%和 80.2%, 各处理可溶性蛋白质含量排序为: CK > 处理 B > 处理 A > 处理 C。处理 A、处理 B 和处理 C 木麻黄叶片的可溶性糖含量分别为 CK 的 82.2%, 80.0%和 92.6%, 各处理的可溶性糖含量排序为: CK

>处理 C>处理 A>处理 B。

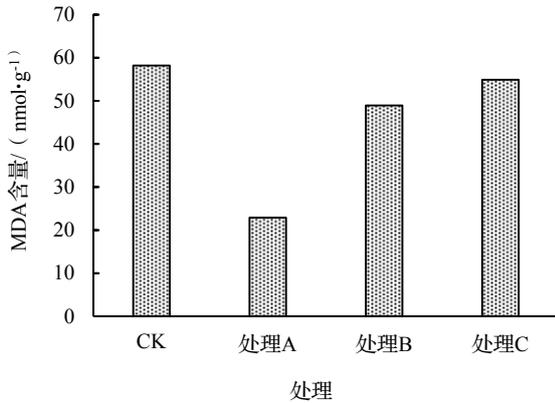


图3 不同处理木麻黄叶片的MDA含量

Figure 3 MDA content in seedlings with different treatments

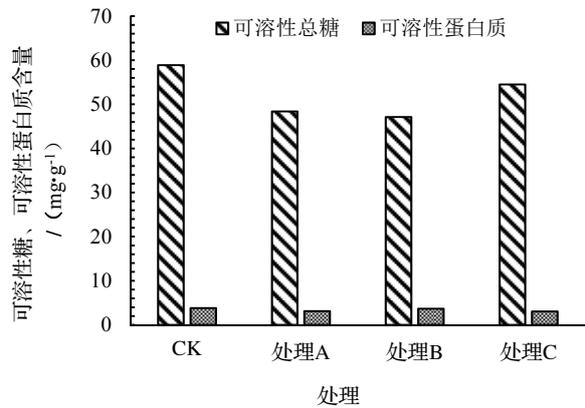


图4 不同处理木麻黄叶片的可溶性蛋白质、可溶性糖含量

Figure 4 Content of soluble protein and soluble sugar in seedlings with different treatments

2.4 不同钝化剂处理对木麻黄幼苗生长效果比较分析

为研究不同钝化剂处理在Cd胁迫条件下对木麻黄幼苗生长的促进效果,采用单因变量多因素方差分析进行多重比较,结果见表2。由表2表明,在4种处理土壤条件下,木麻黄幼苗的MDA含量、可溶性总糖含量、可溶性蛋白质含量、地径、苗高5个指标之间存在差异,其中,处理A的5个指标与CK间的差异均达到极显著水平($P<0.01$),并且其MDA含量与处理B、处理C之间的差异达到极显著水平($P<0.01$);处理B的MDA含量、可溶性总糖含量与CK之间差异达到极显著水平($P<0.01$);处理C的可溶性蛋白质含量、苗高与CK之间的差异达到极显著水平($P<0.01$)。

表2 不同钝化剂处理木麻黄相关指标多重比较
Table 2 Multiple comparison on different index of seedlings with different treatments

处理	MDA/(nmol·g ⁻¹)	可溶性总糖/(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白/(mg·g ⁻¹)	地径生长量/cm	苗高生长量/cm
CK	58.15±1.27aA	58.87±2.15aA	3.80±0.13aA	3.64±0.50bB	66.60±7.27bB
处理A	22.88±2.65cC	48.38±3.74bB	3.11±0.02bBC	5.35±0.79aA	83.23±1.19aA
处理B	48.90±4.54bB	47.10±5.14bB	3.66±0.54aAB	3.82±0.21bB	67.93±5.05bB
处理C	54.86±4.89aAB	54.49±3.28aAB	3.05±0.12bC	4.67±a0.29AB	84.18±4.78aA

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。

为了对不同钝化剂施用效果进行更直观的分析归类,以4种处理土壤条件下木麻黄幼苗的MDA含量、可溶性总糖含量、可溶性蛋白质含量、地径、苗高5个指标为自变量,运用SPSS软件对4种处理的综合效果进行聚类分析,聚类结果见图5。由图5可以看出,综合分析不同钝化剂处理条件下木麻黄的MDA含量、可溶性总糖含量、可溶性蛋白质含量、地径、苗高5个指标,总体认为分为3大类更为符合实际。其中,处理A为一类,总体效果最好;处理C为一类,总体效果较好;处理B和CK属于一类,总体效果一般。本研究采用的3种钝化剂综合效果排序为:秸秆生物炭>凹凸棒土>泥炭。

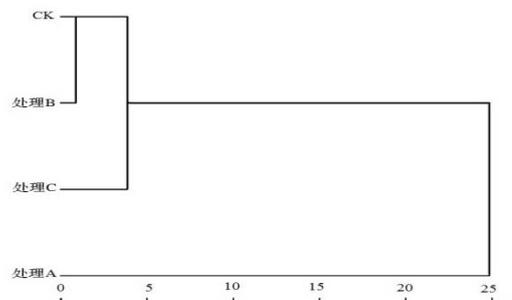


图5 不同钝化剂处理聚类图

Figure 5 Clustergram of different treatments

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究结果显示,在中度以上 Cd ($2.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染土壤条件下,木麻黄幼苗未出现中毒枯黄现象,地径和高生长没有受到抑制,整体维持正常的生长状态,表现出木麻黄对 Cd 污染较强的适应能力;在中度以上 Cd 污染土壤中,单独添加质量比 5% 的秸秆生物炭、凹凸棒土可以明显提高木麻黄幼苗的地径和高生长。

添加秸秆生物炭、泥炭和凹凸棒土可有效改善 Cd 污染土壤环境,降低木麻黄幼苗叶片的 MDA 含量,减轻木麻黄膜质过氧化程度,为木麻黄幼苗生长提供较好的生长环境,使木麻黄叶片中渗透调节物质的含量维持在较低水平。通过多重比较和聚类分析认为单独添加 5% 的秸秆生物炭综合效果最好。

3.2 讨论

3 种钝化剂处理条件下,木麻黄幼苗叶片的 MDA 含量、可溶性蛋白质和可溶性糖含量 3 个指标都较未添加钝化剂处理低,且在各处理下这 3 个指标含量排序规律大体一致,说明由于钝化剂对土壤中 Cd 的物理、化学等作用,为植物生长提供了相对较好的土壤环境,减轻了重金属对植物生长的毒性作用^[16,27-29],使木麻黄幼苗叶片膜系统受损程度较轻,可溶性蛋白质和可溶性糖等渗透调节物质未充分发挥作用;而未添加钝化剂的土壤处理中这 3 个指标均较高,这也从侧面反映出在未添加钝化剂的纯污染土壤环境下木麻黄自身的渗透调节功能发挥了作用,木麻黄通过提高可溶性蛋白质和可溶性糖的积累量来降低细胞所受伤害,维持细胞正常的生理代谢,这是木麻黄耐 Cd 毒害的一种解毒机制。

本研究主要通过对 Cd 污染土壤胁迫条件下木麻黄幼苗叶片 MDA、可溶性蛋白质、可溶性糖的分析来对木麻黄耐 Cd 胁迫机理进行初步研究,由于研究时间较短(不到一个水文年),木麻黄对 Cd 胁迫的解毒机制复杂,渗透调节物质含量、抗氧化酶活性等综合调节机制今后还需深入研究^[30-32]。秸秆生物炭、泥炭、凹凸棒土作为钝化剂对减轻 Cd 对木麻黄毒性效果明显,但效果各有优劣,复合配置多种钝化剂构成复配调理剂可以扬长避短实现多种钝化剂功能的相互补充。木麻黄作为浙江省沿海地区造林绿化的重要树种,在耐盐及耐寒等抗逆性研究方面已有部分突破,对木麻黄耐盐、耐寒及耐重金属等抗逆能力进行综合研究,将对木麻黄在浙江省沿海地区的广泛应用具有巨大作用。

参考文献:

- [1] 黑译文, 向慧, 章家恩, 等. 水合欢对重金属 Cd、Pb 的耐受性及吸收富集特性[J]. 生态毒理学报, 2019, 14 (3): 286-296.
- [2] 张佳. 农田土壤 Cd 污染与治理的研究现状[J]. 农业科技与装备, 2016 (6): 5-10.
- [3] 王可, 杨林, 陈思, 等. 木本植物修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 资源与环境科学, 2019 (14): 172-180.
- [4] 杨居荣, 黄翌. 植物对重金属的耐性机理[J]. 生态学杂志, 1994, 13 (6): 20-26.
- [5] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, 28 (9): 1900-1906.
- [6] 吴才华, 张晓勉, 谢长明, 等. 台州市路桥区 4 种绿化类型土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 浙江林业科技, 2019, 39 (5): 38-44.
- [7] 刘少文, 焦如珍, 董玉红, 等. 土壤重金属污染的生物修复研究进展[J]. 林业科学, 2017, 53 (5): 146-155.
- [8] 黄明煜, 章家恩, 全国明, 等. 土壤重金属的超富集植物研发利用现状及应用入侵植物修复的前景综述[J]. 生态科学, 2018, 37 (3): 194-203.
- [9] 李晓刚, 康希睿, 蔡泽宇, 等. 木麻黄对土壤重金属的生长响应及积累特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38 (7): 2094-2101.
- [10] 靳明华, 丁振华, 周海超, 等. 不同林龄木麻黄防护林对重金属的富集作用[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2016, 55 (5): 707-712.
- [11] 余云龙, 邹焯燊, 毕竟, 等. 3 代木麻黄林系统重金属的分布和迁移特征[J]. 广东农业科学, 2016 (6): 188-192.
- [12] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准: GB15618-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 1-3.
- [13] 孙华, 谢丽, 张金婷, 等. 基于改进内梅罗指数法的棕(褐)地周边土壤重金属污染评价[J]. 环境保护科学, 2018, 44 (2): 98-102.
- [14] 刘红, 贾英, 方明, 等. 台州市路桥农业土壤中重金属的污染分析[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2013, 36 (2): 294-300.
- [15] 张春丽, 袁新田. 宿州市土壤重金属含量分布及其潜在生态风险评价研究[J]. 石家庄学院学报, 2012, 14 (3): 9-15.
- [16] 金睿, 刘可星, 艾绍英, 等. 生物炭复配调理剂对镉污染土壤性状和小白菜镉吸收及其生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47 (9): 1480-1487.
- [17] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 石灰和泥炭配施对叶菜吸收 Cd 的阻控效应[J]. 农业环境科学学报, 32 (12): 2339-2344.

- [18] 唐雪东, 刘晓嘉, 窦森, 等. 3种果树幼苗对镉胁迫的响应[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 27-32.
- [19] 李伟亚, 刘希灵, 李志贤, 等. 生物炭对湘潭锰矿区土壤重金属的固化效应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1306-1312.
- [20] 王红, 夏雯, 卢平, 等. 生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3944-3952.
- [21] 潘丽萍, 张鹏, 方培结, 等. 不同改良剂对剑麻累积土壤重金属的影响杨惟薇[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4): 1632-1636.
- [22] 王佳星, 余国源, 谢瑛, 等. 土壤镉胁迫对紫金牛生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(5): 25-29.
- [23] 陈浩东, 贺云新, 郭利双, 等. 镉胁迫对3个棉花品种生理生化特征及农艺性状的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(1): 62-70.
- [24] 张阿芳, 张庆, 代惠萍, 等. 镉胁迫对银灰杨根和叶片渗透调节物质的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 83-87.
- [25] 徐艳, 师晨迪, 曹婷婷, 等. 生物炭对重金属污染土壤养分的影响及修复效果研究[J]. 农业科学, 2019, 9(6): 405-413.
- [26] 史雅甜, 简敏菲, 苗艳娇, 等. 土壤重金属镉、铅及其复合污染对羊蹄 (*Rumex japonicas* Hoult) 生长及其抗性生理指标的影响[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(3): 297-306.
- [27] 丁华毅. 生物炭的环境吸附行为及在土壤重金属镉污染治理中的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [28] 安梅, 董丽, 张磊, 等. 不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 892-898.
- [29] 廖启林, 刘聪, 朱伯万, 等. 凹凸棒石调控Cd污染土壤的作用及其效果[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1693-1704.
- [30] 高姪妮, 刘倩, 柳旭, 等. 柳枝稷对镉、铅及其交互污染的耐性与累积效应[J]. 家畜生态, 2019, 40(2): 56-64.
- [31] 许月明, 张晓勉, 高智慧, 等. 低温胁迫对近无柄雅榕叶片丙二醛和可溶性糖含量的影响[J]. 浙江林业科技, 2014, 34(4): 1-4.
- [32] 张晓勉, 王泳, 高智慧, 等. 盐胁迫对尖果沙枣和大果沙枣膜脂过氧化和渗透调节的影响[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(4): 1-5.