

# 菌粉、草木灰对 $\text{Cu}^{2+}$ 胁迫下牧草幼苗生长的影响

李文斌<sup>1,2</sup>, 邱润<sup>1</sup>, 朱浪<sup>1</sup>, 何海霞<sup>1</sup>, 谢佳<sup>1</sup>, 邓红艳<sup>1,2</sup>, 康乐<sup>1,2</sup>, 孟昭福<sup>3</sup>

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 四川 南充 637009; 2. 西华师范大学环境科学研究所, 四川 南充 637009; 3. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 咸阳 712100)

**摘要:** 采用盆栽实验探究菌粉和草木灰添加对  $\text{Cu}^{2+}$  胁迫土样上牧草幼苗发芽率、株高、地上部和根系生物量等特征的影响, 并分析各生长指标间的相关性。结果显示: 当  $\text{Cu}^{2+}$  超过 200 mg/L 时, 菌粉和草木灰的添加促进苏丹草的发芽而对黑麦草发芽影响不大, 两种牧草的幼苗株高均随生长时间的增加而增加, 增长速度整体表现为生长初期(前5天)大于后期(后5天)。菌粉添加不利于苏丹草和黑麦草的生物量的增加, 而菌粉+草木灰添加可促进两种牧草生物量的增加。两种牧草的各生理指标之间均保持中度以上正相关关系, 添加菌粉和草木灰有利于牧草幼苗在  $\text{Cu}^{2+}$  污染土样上生长。

**关键词:**  $\text{Cu}^{2+}$  污染; 牧草; 菌粉; 草木灰; 土壤修复

中图分类号: X53

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2019)05-0065-04

## Effects of Fungus Powder and Plant Ash on the Growth of Pasture Seedlings under $\text{Cu}^{2+}$ Stress

LI Wen-bin<sup>1,2</sup>, QIU Run<sup>1</sup>, ZHU Lang<sup>1</sup>, HE Hai-xia<sup>1</sup>, XIE Jia<sup>1</sup>,  
DENG Hong-yan<sup>1,2</sup>, KANG Le<sup>1,2</sup>, MENG Zhao-fu<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 2. Institute of Environmental Science, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Xianyang, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The effects of fungus powder and plant ash on the germination rate, plant height, above-ground and root biomass of pasture seedling under  $\text{Cu}^{2+}$  stress were studied by pot experiment, and the correlations between each growth index were analyzed. The results showed that when the concentration of  $\text{Cu}^{2+}$  exceeded 200 mg/L, fungus powder and plant ash had significant effects on the germination of Sudangrass, but little effect on Ryegrass. The plant height of Sudangrass and Ryegrass seedling was increased with the growth time, and the growth rate at the early growth stage (the previous 5 d) was greater than that at the late stage (the last 5 d). Fungus powder did not make the biomass of Sudangrass or Ryegrass increase, while Fungus powder plus plant ash did. The physiological indexes of the two pastures maintained a moderate or above positive correlation. The addition of fungus powder and plant ash in  $\text{Cu}^{2+}$  contaminated soil was beneficial to the growth of pasture seedlings.

**Key words:**  $\text{Cu}^{2+}$  pollution; Pasture; Fungus powder; Plant ash; Soil remediation

采矿、金属冶炼、电镀等行业的发展促使土壤重金属污染日益严重<sup>[1-4]</sup>。植物修复因其成本低廉、操作简单等优势引起众多学者的关注和应用<sup>[5-7]</sup>。Cu 既是重金属元素也是营养元素, 故  $\text{Cu}^{2+}$  污染修复已经成为研究热点<sup>[8-9]</sup>。牧草具有

收稿日期: 2018-08-03 修订日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271244); 四川省教育厅基金资助项目(18ZB0576); 四川省科技厅基金资助项目(2018JY0224)

作者简介: 李文斌(1985—), 男, 陕西渭南人, 讲师, 博士, 研究方向为土壤污染修复。

抗逆性强、生物量大、富集能力强、可多次刈割等特点<sup>[10-11]</sup>,作为污染修复植物具有天然优势。草木灰具有较大的比表面积和孔隙率,可以很好地吸附重金属<sup>[12]</sup>,同时还具有良好的肥效性及促进植物发芽的作用<sup>[13-14]</sup>。

植物修复生态性好,可幼苗在高浓度  $\text{Cu}^{2+}$  污染条件下存活率低,而微生物和材料修复不能将  $\text{Cu}^{2+}$  完全从土壤中去。微生物修复由于其环境影响小,修复费用低等特点在重金属污染土壤修复中也具有较好的应用效果<sup>[15-16]</sup>。若在植物修复土壤中添加少量微生物或吸附材料,可迅速降低土壤中游离的  $\text{Cu}^{2+}$  含量,极大地提高修复植物在幼苗期的成活率。今选用产量较大、价格低廉的啤酒酵母菌粉和草木灰作为微生物和吸附材料,分别以特定比例加到紫色土中,并种植苏丹草和黑麦草,分析其对牧草发芽率、株高、地上部和根系生物量等特征的影响,旨在为植物-材料联合修复重金属污染土壤研究提供参考依据。

## 1 材料与方

### 1.1 实验材料

供试牧草为苏丹草和黑麦草,牧草种子购于亚艺花卉淘宝店。挑选饱满、成熟度好的两类种子各180粒,先用自来水冲洗干净,然后用10 g/L的高锰酸钾溶液表面消毒15 min,再用去离子水冲洗3次,用滤纸吸干水分,备用。

供试土样为川东北典型紫色土,采自西华师范大学试验田。选取典型区域以S布点法采集耕层(0 cm ~ 25 cm)土样,将土样混合均匀、风干、磨碎、过100目(0.15 mm)筛,封存备用。样品基本理化性质经3次重复测定,pH值为8.08,TOC值为16.66 g/kg,CEC值为288.46 mmol/kg,Cu质量比为18.60 g/kg。

供试菌粉采用活性啤酒酵母菌粉,黄褐色粉末或颗粒状,每克含活性菌群 > 6 000 万个,水分低于10%,购于广州鹏翔农业有限公司;草木灰采用油菜秆自然焚烧形成的草木灰,粒径20  $\mu\text{m}$  ~ 60  $\mu\text{m}$ ,钾质量分数为15.33%;供试重金属污染物  $\text{Cu}^{2+}$  溶液用  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (分析纯),购于成都市科龙化工试剂厂。

### 1.2 实验设计

将0.5 g啤酒酵母菌粉和99.5 g紫色土混合形成  $\text{PS}_F$  (0.5%菌粉+99.5%紫色土)实验组。将

0.5 g啤酒酵母菌粉和3.5 g草木灰同时混入96 g紫色土中形成  $\text{PS}_{F/A}$  (0.5%菌粉+3.5%草木灰+96%紫色土)实验组,以紫色土(PS)作为对照组分别作为盆栽实验用土。

$\text{Cu}^{2+}$  污染设0 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、400 mg/L和600 mg/L 6个质量浓度梯度,分别进行苏丹草和黑麦草的室内盆栽实验。

实验于2018年7月10日开始,采用高9 cm,外直径7 cm,内直径6.5 cm的塑料花盆。分别将200 g混合土样装入6个实验盆中,依次加入不同质量浓度梯度的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液100 mL,待溶液渗透均匀后,在每盆土层表面下1 cm ~ 2 cm均匀种植5粒种子。每组重复3次实验,在牧草幼苗期内(发芽10 d)测定牧草发芽率、株高,收获后测牧草地上和地下部分生物量,于2018年7月20日结束。

### 1.3 数据处理

采用Spss 16.0统计分析软件进行实验数据统计,并做方差分析和回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌粉和草木灰对牧草发芽率和株高的影响

当PS中  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度高于100 mg/L时,两种牧草的发芽率均会受到抑制,且发芽率随  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度的增加而逐渐降低,当  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度为600 mg/L时,苏丹草和黑麦草的发芽率仅为40%和20%。 $\text{PS}_F$ 上  $\text{Cu}^{2+}$  处理质量浓度高于200 mg/L后两种牧草的发芽率都相比0 mg/L(CK)得到了提高,且苏丹草最高发芽率为100%,而黑麦草为70%。在  $\text{PS}_{F/A}$ 中,苏丹草和黑麦草的平均发芽率分别为93.3%和90%,且当  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度高于200 mg/L时,苏丹草的发芽率均为100%。由此可见,当  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度高于200 mg/L时,  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度增加抑制PS上牧草发芽,促进  $\text{PS}_F$ 上和  $\text{PS}_{F/A}$ 上苏丹草的发芽,而对  $\text{PS}_F$ 上和  $\text{PS}_{F/A}$ 上黑麦草的发芽影响不大。

各质量浓度  $\text{Cu}^{2+}$  处理条件下,PS、 $\text{PS}_F$ 和  $\text{PS}_{F/A}$ 上苏丹草和黑麦草的幼苗株高均随生长时间的增加而增高,增长速度整体表现为生长初期(前5天)大于后期(后5天)。苏丹草幼苗在PS和  $\text{PS}_F$ 上生长速率较为稳定,日均分别增长1.7 cm和1.0 cm,且  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理之间差异不大;而在  $\text{PS}_{F/A}$ 上株高在前8 d急剧增加,最高增长率为3.8 cm/d,保持600 mg/L时生长最佳、100 mg/L

时生长最差的趋势。黑麦草在 PS 和  $\text{PS}_F$  的作用下,前 8 天稳定增长,之后增长速度减慢,均表现为  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理 100 mg/L 时生长最佳。在  $\text{PS}_{F/A}$  的作用下,前 5 天生长较快,保持 600 mg/L 时生长最佳。

苏丹草和黑麦草幼苗分别在  $\text{PS}_{F/A}$  和 PS 上株高达到最大值 19.8 cm (600 mg/L) 和 19.2 cm (100 mg/L)。两种牧草在 PS 中  $\text{Cu}^{2+}$  处理为 100 mg/L 时,株高都达到最大值。苏丹草在  $\text{PS}_{F/A}$  上长势最好,PS 上株高略低于  $\text{PS}_{F/A}$ ,  $\text{PS}_F$  最差,株高仅有  $\text{PS}_{F/A}$  的 60%; 黑麦草在  $\text{PS}_{F/A}$  上且  $\text{Cu}^{2+}$  处理 200 mg/L 下株高达到最大值,为  $\text{PS}_F$  株高的 1.5 倍。

## 2.2 菌粉和草木灰对牧草生物量的影响

在 PS 土样上,苏丹草经 100 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理后,鲜重和干重达到最大值,分别为 1.4 g 和 0.3 g,黑麦草经 200 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理后鲜重和干重分别为 0 mg/L 时的 1.6 倍和 1.3 倍,两种牧草均在 600 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理时鲜重和干重最小。 $\text{PS}_F$  上两种牧草的长势均较差,相同  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理时地上部的鲜重和干重都显著低于 PS,而  $\text{PS}_{F/A}$  上的两种牧草地上部的鲜重和干重均大于 PS 和  $\text{PS}_F$  实验组,苏丹草在  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度 200 mg/L 时的鲜重和干重最大,是最小值(400 mg/L)的 1.7 倍和 1.8 倍,而黑麦草在 600 mg/L 时长势最好,是 CK 的 1.9 倍。 $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度低于 200 mg/L,除苏丹草在  $\text{PS}_F$  上以外,其他情况都会促进两种牧草地上部的生长,随着  $\text{Cu}^{2+}$  处理浓度的增加,牧草地上部分的生长受抑制增强。 $\text{PS}_F$  不利于牧草地上部分的生长,而  $\text{PS}_{F/A}$  促进了牧草地上部分的生长。

在 PS 实验组中, $\text{Cu}^{2+}$  处理质量浓度在 0 mg/L ~ 200 mg/L 范围内时,两种牧草根系的生长均得到了促进,且都在 100 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理时达到最大值,苏丹草根鲜重和干重分别为 0.3 g 和 0.1 g,黑麦草根鲜重和干重是 CK 的 1.5 和 1.3 倍。随着  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度的持续增加 (>200 mg/L),两种牧草根系生长均被抑制,600 mg/L 时根系生物量最低。在  $\text{PS}_F$  上 200 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  溶液处理时虽然根系质量达到最大,但显著低于 PS 和  $\text{PS}_{F/A}$ 。 $\text{PS}_F$  上苏丹草根鲜重和干重的最大值仅有  $\text{PS}_{F/A}$  的 52% 和 47%,两种牧草根系质量均高于 PS 和  $\text{PS}_{F/A}$ ,黑麦草在 600 mg/L 时根系质量最大。在 PS 上  $\text{Cu}^{2+}$  处理质量浓度低于 200 mg/L 时,苏丹草和黑麦草根系生长较好; $\text{PS}_F$  环境中,牧草根系的生长被抑

制,当  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度高于 200 mg/L 时,根系的质量会随着浓度的增高而减少; $\text{PS}_{F/A}$  增强了两种牧草对高浓度  $\text{Cu}^{2+}$  的适应能力,牧草根系均生长较佳。

## 2.3 牧草各生理指标之间的相关性分析

苏丹草和黑麦草各生理指标的相关分析表明,在  $\text{Cu}^{2+}$  胁迫条件下,不同土样上两种牧草生理指标之间均保持中度以上正相关关系。PS 上苏丹草和黑麦草地上干重与鲜重呈极显著相关,黑麦草根系鲜重与干重也达极显著相关。两种牧草株高与其余指标均呈显著相关。而在  $\text{PS}_F$  上,苏丹草地上部、根系鲜重与干重均达极显著相关,黑麦草地上部鲜重与干重也达极显著相关。苏丹草株高仅和地上鲜重呈显著相关,而黑麦草株高和根系干、鲜重均呈显著相关。 $\text{PS}_{F/A}$  中地上部、根系鲜重与干重对于苏丹草均达极显著相关,而对于黑麦草仅保持显著相关。苏丹草株高仅和鲜重呈显著相关,而黑麦草和除地上干重以外的指标均呈显著相关。

## 3 结语

低浓度  $\text{Cu}^{2+}$  有利于苏丹草和黑麦草种子的发芽,当  $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度 >200 mg/L 后,加入菌粉和草木灰,能够提高苏丹草和黑麦草的发芽率。苏丹草前期的增长速率明显大于黑麦草,在植物生长的后期,黑麦草的生长速度快于苏丹草。菌粉的加入虽然提高了发芽率,但不利于植物的株高的增加。菌粉添加不利于苏丹草和黑麦草地上部分和根系的生长,而菌粉和草木灰复合添加促进了牧草地上部分和根系的生长。菌粉和草木灰的同时添加增强了牧草在  $\text{Cu}^{2+}$  污染土样上适应能力,增强了修复植物对高浓度重金属污染的耐受力,一定程度上提高了植物修复效果。菌粉和草木灰廉价易得、生态性好,具有较好的应用价值,该研究也提供了材料 + 微生物 + 植物修复的探索方向,为实际污染土壤修复工作提供了理论参考。

### [参考文献]

- [1] 苏耀明,陈志良,雷国建,等. 多金属矿区土壤重金属垂向污染特征及风险评估[J]. 生态环境学报, 2016, 25 (1): 130 - 134.
- [2] 许大毛,张家泉,占长林,等. 有色金属冶炼厂周边地表水和农业土壤中重金属污染特征与评价[J]. 环境化学, 2016, 35 (11): 2305 - 2314.
- [3] 李培中,吕晓健,王海见,等. 某电镀厂六价铬污染土壤还原

- 稳定化试剂筛选与过程监测[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 368-373.
- [4] 李文斌, 李雅, 邓红艳, 等. 有机、重金属污染物同时吸附前沿态势的文献计量分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2177-2184.
- [5] SALAM M M, KAIPIAINEN E, MOHSIN M, et al. Effects of contaminated soil on the growth performance of young *Salix (Salix schwerinii* e. l. wolf) and the potential for phytoremediation of heavy metals[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 183(3): 467-477.
- [6] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, 171: 710-721.
- [7] 李亚娇, 温猛, 李家科, 等. 土壤污染修复技术研究进展[J]. 环境监测管理和技术, 2018, 30(5): 8-14.
- [8] 鱼小军, 张建文, 潘涛涛, 等. 铜、镉、铅对7种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(4): 793-803.
- [9] ZHOU T, LI L, ZHANG X, et al. Changes in organic carbon and nitrogen in soil with metal pollution by Cd, Cu, Pb and Zn: a meta-analysis[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(2): 237-246.
- [10] LI W B, HE H X, DENG H Y, et al. Physiological characteristics of two pastures on different copper polluted purple soils[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2018, 27(7): 4789-4796.
- [11] 谷超, 梁隆超, 陈卓. 4种牧草植物对红枫湖底泥中重金属污染的植物修复研究[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 148-151.
- [12] 刘发林. 草木灰对四种松属种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5673-5680.
- [13] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3996-4003.
- [14] 陈杰, 宋靖珂, 张晶, 等. 不同钝化剂对铜污染土壤原位钝化修复[J]. 土壤, 2016, 48(4): 742-747.
- [15] 陈杰, 张晶, 宋靖珂, 等. 草木灰对单一与复合污染土壤中铜、铅和铬的钝化[J]. 西南农业学报, 2016, 29(8): 1947-1951.
- [16] 李文斌, 邓红艳, 李雪连, 等. 菌粉、BS黏土复合活性硅酸钙  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附和阻滞效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 711-717.

(上接第56页)

征污染物主要集中在烯烃和苯系物, 筛选结果合理, 且能从不同角度反映各站点周边污染源特征。

#### [参考文献]

- [1] HUANG Z H, WANG Y, YU Q, et al. Source area identification with observation from limited monitor sites for air pollution episodes in industrial parks[J]. Atmospheric Environment, 2015, 122: 1-9.
- [2] MAO I F, CHEN M R, WANG L, et al. Method development for determining the malodor source and pollution in industrial park[J]. Science of the Total Environment, 2012, 437: 270-275.
- [3] SU Y C, CHEN S P, TONG Y H, et al. Assessment of regional influence from a petrochemical complex by modeling and fingerprint analysis of volatile organic compounds (VOCs)[J]. Atmospheric Environment, 2016, 141: 394-407.
- [4] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Community member assessment of environmental odors factsheet [EB/OL]. [2015-08-25]. <https://www.atsdr.cdc.gov/odors/index.html>.
- [5] NICOLAS J, CORS M, ROMAIN A C, et al. Identification of odour sources in an industrial park from resident diaries statistics[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(13): 1623-1631.
- [6] 陈冰怡, 王汉峥, 高松, 等. 上海市工业区大气污染预警监测信息平台研究与设计[J]. 环境监测管理和技术, 2017, 29(6): 5-8.
- [7] 崔虎雄. VOCs自动监测技术评价指标构建的研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(11): 156-159.
- [8] 董艳平, 喻义勇, 母应锋, 等. 基于GC-MS方法的焦化行业特征挥发性有机物分析[J]. 环境监测管理和技术, 2016, 28(3): 65-68.
- [9] 孟繁丽, 孙丹, 司饶迪, 等. 宿迁空气特征污染物主成分识别[C]//中国环境科学学会. 2014年中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 118-123.
- [10] 陈颖, 李丽娜, 杨常青, 等. 我国VOC类有毒空气污染物优先控制对策探讨[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3469-3475.
- [11] 张卿川, 陈家桂, 夏邦寿, 等. 工业有机废气排放物控制指标表征和监测方法——美德日优先控制的有害大气VOCs与限制指标[J]. 污染防治技术, 2015, 28(5): 46-52.
- [12] 叶代启, 郝吉明, 柴发合, 等. 工业区挥发性有机物的排放与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 169-177.
- [13] 上海市环境保护局. 《家具制造行业大气污染物排放标准》(征求意见稿)[EB/OL]. [2016-09-02]. <http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj/shhj2024/shhj2038/2016/09/93710.htm>.
- [14] 上海市环境保护局. 《表面涂装(汽车制造业)大气污染物排放标准》(征求意见稿)[EB/OL]. [2014-07-14]. <http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj/shhj2024/shhj2038/2014/07/87043.htm>.
- [15] 上海市环境保护局. 《印刷业大气污染物排放标准》(征求意见稿)[EB/OL]. [2014-09-30]. <http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj/shhj2024/shhj2038/2014/10/87708.htm>.
- [16] 上海市环境保护局. 《涂料、油墨及其类似产品制造工业大气污染物排放标准》(征求意见稿)[EB/OL]. [2014-09-15]. <http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj/shhj2024/shhj2038/2014/12/88377.htm>.
- [17] 高宗江, 高松, 崔虎雄, 等. 上海市某化工区夏季典型光化学过程VOCs特征及活性研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1251-1259.