

# 苕麻替代种植修复重金属污染耕地中根际土壤的调控技术研究进展

孙向平

中国农业科学院麻类研究所, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年7月3日; 录用日期: 2022年8月1日; 发布日期: 2022年8月9日

---

## 摘要

控制稻田土壤镉污染、减少土壤中镉向水稻体内的迁移一直以来是国内外学者研究的热点问题。由于根际微域环境中的镉可以直接被水稻根系吸收利用, 因此降低水稻根际镉活性是解决稻田镉污染物进入水稻体内的重要途径之一。苕麻因生物量大、修复成本低、具有经济效益等优势, 在重金属污染土壤治理方面具有很大的应用潜力。本文综述了苕麻替代种植修复重金属污染耕地中根际土壤的调控技术研究进展。

## 关键词

苕麻, 重金属, 污染, 根际

---

# Research Progress of Ramie Replacement Planting to Remediate Rhizosphere Soil in Heavy Metal Contaminated Farmland

Xiangping Sun

Bast Fiber Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha Hunan

Received: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Aug. 1<sup>st</sup>, 2022; published: Aug. 9<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

Controlling cadmium pollution in paddy soil and reducing the migration of cadmium from the soil to the rice body have always been hot issues studied by scholars at home and abroad. Because the cadmium in the rhizosphere microenvironment can be directly absorbed and utilized by the rice roots, reducing the activity of cadmium in the rhizosphere of rice is one of the important ways to

**solve the problem of cadmium pollutants entering the rice body. Ramie has great application potential in the treatment of heavy metal contaminated soil due to its advantages such as large biomass, low restoration cost, and economic benefits. This article reviews the research progress in the regulation and control technology of rhizosphere soil in cultivated land contaminated by heavy metals instead of planting ramie.**

## Keywords

Ramie, Heavy Metal, Pollution, Rhizosphere

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

污染土壤修复技术存在着工程措施造价高、费时费工，而且对土壤理化性质有破坏作用等缺陷。植物修复面临的最大问题是高重金属含量植物的处置困难，且修复效率较低；在农业生产实践中都面临不同程度的制约。农艺措施调控是指适时调整耕作管理制度，以及在污染土壤中种植不进入食物链的农作物等，从而改变土壤重金属的生物活性，降低其生物有效性，减少重金属从土壤向植物体内的转移，达到降低重金属环境危害的一系列技术手段。施肥作为重要的农艺措施对镉的生物有效性有显著的影响。施肥通过如下几种途径影响到植物对土壤中重金属的吸收：1) 促进植物生长；2) 影响土壤 pH (少数情况影响到 Eh)；3) 带入重金属离子，也提供能沉淀、络合重金属的基团；4) 带入竞争离子；5) 影响根系和地上部的代谢过程或重金属在体内的运转而间接影响重金属元素的吸收。苧麻又名中国草，为荨麻科苧麻属多年生草本宿根植物，是重要的经济作物[1]。我国苧麻种植面积和原料产量占世界的 95% 以上，在国际市场上占支配地位[2]。与现有超积累植物相比，苧麻一年种植，多年收获，并具有抗逆境能力强、生长迅速、繁殖能力强、根系庞大、生物产量高等优点，可弥补现有植物修复的缺点和不足，且苧麻的收获产物——苧麻纤维不进入食物链，对人畜安全，是较理想的土壤重金属污染植物修复资源。苧麻对重金属污染土壤具有相当的修复潜力，在自然条件下，使土壤镉浓度从 1.72 mg/kg 降低到 0.3 mg/kg 需要 39 年，但如能结合一些农艺措施，如施肥、外施有机酸促进苧麻对镉的吸收，苧麻的修复功能会大大增加[3]。有关苧麻抗重金属的耐性研究及苧麻在修复重金属污染土壤上的优势，揭雨成等曾作了详细、全面的综述。其研究认为，苧麻虽然从重金属的富集量上未能达到超积累植物的标准，但具有诸多的生理性状优势，可以弥补现有植物修复的缺点和不足，是一种较为理想的土壤重金属污染修复的植物资源。施肥在农业生产中具有突出作用，禽畜粪便类有机肥用于农业生产在我国具有悠久的历史，早在 3000 多年前的春秋时期，我国农民就开始使用禽畜粪便类有机肥[4]。但近代以来由于长期过量施用化肥，导致其利用率不断下降，土壤养分流失，已经引起了如土壤质量下降、土壤酸化、地下水硝酸盐超标、地表水富营养化、湖泊严重污染等一系列环境问题[5] [6]。

## 2. 国内外研究进展

重金属对农作物的毒害程度，首先取决于土壤中重金属的存在形态，其次才取决于该元素的数量。施肥作为重要的农艺措施对重金属的生物有效性有显著的影响。研究表明施用氮肥都促进植物对重金属的吸收，但其作用程度与肥料形态有密切的关系[7]。有机肥施入到土壤后改变重金属形态的途径主要有：

1) 有机肥中的腐殖质通过络合-螯合反应固定重金属,降低土壤溶液中重金属有效态的含量[8]; 2) 有机肥通过改善土壤的结构和理化性质,如 pH、Eh 等,从而改变土壤中重金属有效态的含量[9]。利用以猪粪、羊粪、鸡粪为原料的有机肥施用到镉污染土壤中降低了土壤可交换态镉与碳酸盐结合态镉含量,促进了土壤镉由可交换态和碳酸盐结合态向铁锰氧化物结合态、有机结合态和残留态的转化[10]。研究表明土壤中重金属的有效性和在农作物中的积累状况还受到有机肥用量和比例的影响[11]。

根际一般是指根—土界面不足 1 毫米到几毫米范围的微区土壤,是植物-土壤-微生物与其环境条件相互作用的场所,同时根际是养分、水分、有益或有害微生物、有机和无机污染物进入植物体的门户[12]。根际微域实验的方法主要有:大田采用剥离分离法,目前主要集中在多层根箱实验和盆栽实验,也有采用较先进的 X-射线电子探针和土柱培养切片法。大量研究表明影响稻田土壤根际镉赋存形态及生物有效性的主要因素有:

### 2.1. 根际 pH

根际活动能引起根际 pH 变化,其原因有:根系呼吸作用;根系分泌有机酸;根际微生物呼吸作用;植物根系吸收阴阳离子的不平衡。其中根系对阴阳离子吸收的不平衡是造成根际土壤 pH 变化的最主要因素[13]。pH 值的改变可引起土壤中重金属活性的变化。pH 值越高,重金属的溶解度越低,其活性就越低;研究表明,淹水能改变土壤 pH,淹水后土壤 pH 值向 7 靠拢[14]。根际 pH 值的变化会改变镉的溶解状况,当土壤 pH 值为 7.6 时,50 mg/kg 镉离子就会形成沉淀,此时 pH 值每升高一个单位,镉的浓度就下降 100 倍。土壤 pH 值为 4.5~7.2 时,介质中水溶性镉含量与 pH 值呈显著负相关。当 pH 值为 4 时,镉的溶出率为 50%,pH 值升至 7.5 时,就很难溶出了[15]。此外重金属胁迫条件下植物也可能形成根际 pH 屏障限制重金属离子进入原生质,如镉的胁迫可减轻根际酸化过程[16]。

### 2.2. 根际 Eh

根际 Eh 一般低于土体,镉在氧化条件下(Eh 值高)比在还原条件下(Eh 值低)更容易由无效态转化为水溶态和交换态[17]。由于根系和根际微生物呼吸耗氧,根系分泌物中含有还原性物质,因而早作下根际 Eh 一般低于土体 50~100 mV,水稻由于其特殊的根系泌氧过程,根际 Eh 总是高于根外,可使硫化铁发生氧化,同时也会使根际的一些其它硫化物如硫化镉、硫化汞等发生氧化而增加了重金属的移动性[18]。随着 Eh 值的增大,土壤中水溶性镉含量、水稻吸收镉的总量及地上部镉量随之增加。这可能是因为还原状况下,镉易与硫化物结合形成硫化镉沉淀[14]。土壤处于氧化状态时,水稻根表形成的铁氧化物胶膜也会吸附土壤中的镉,从而影响根系对镉的吸收。研究发现,水稻根表铁膜可以吸附土壤中的镉从而减少水稻对镉的吸收[19]。在生育后期处于淹水条件下的水稻含镉量较低,其原因可能是根际 Eh 下降,此时若排水烤田,根际 Eh 不下降,再加上根外土体镉 CdS 氧化, Cd<sup>2+</sup>活度增加,也就使镉有效性大大增加[14]。另一原因可能与微生物的固定也有关,细菌细胞壁和原生质膜的阴离子能结合溶液中的镉,在长期暴露下,镉固定后在好氧条件下又会释放回溶液,而在还原条件下不发生镉的迁移[14]。

### 2.3. 根际分泌物及微生物

研究发现,植物根部水溶性小分子分泌物与镉有较强的络合作用,这使镉在根际的移动更加容易向植物体迁移[17]。根际分泌物一方面通过改变根际环境的 pH 值和氧化还原电位从而改变土壤中重金属元素的形态和活性;另一方面通过与土壤重金属络合、螯合、沉淀及改变根际环境而影响土壤中重金属的有效性[14] [18]。根际微生物对镉的化学行为有很大影响。根际微生物可以改变土壤溶液的 pH 值而大大改变镉的吸附特征,微生物可产生 H<sub>2</sub>S 与镉形成硫化镉,细胞壁或黏液层可吸附或固定重金属,这些物理、生物和化学的过程可以改变镉的存在形态以及生物有效性[20] [21]。另一方面,微生物

通过分解有机质也可释放出固定的重金属。微生物做为根际微生态系统中的重要组成成分,其数量远远高于非根际土壤,约为非根际土壤的 10~100 倍[20]。很多微生物还可以通过氧化-还原作用、甲基化作用和脱羟作用等将重金属转化为无毒或低毒的化合物。有机肥相比较于化肥对根际土壤微生物数量的促进作用更加明显[22]。

## 2.4. 根际矿物质及其他

矿物质是土壤的主要成分,也是重金属吸附的重要载体,不同的矿物对重金属的吸附有着显著的差异。根际矿物丰度明显不同于非根际,特别是无定形矿物及膨胀性硅酸盐在根际土壤发生了显著变化[20]。从目前对土壤根际吸附重金属的行为研究来看,根际环境的矿物成分在重金属的可利用性中可能作用较大[20][22]。在土壤-植物这一生态系统中,有许多重金属元素与镉同时存在,研究表明镉-锌之间的相互作用表现为协同和拮抗两种形式[13]。

苧麻作为修复作物,其自身还包含了一定的生态效益和巨大的经济价值。苧麻依靠自身的特性,对重金属污染土壤进行修复,除此之外,其对水土保持、绿化环境、净化空气功不可没。纤维苧麻不进入食物链,可作为纺织、造纸、建筑材料等工业原料,且种植、管理成本相较于其他修复植物较低。重金属污染作为土壤污染中较为严重的类型变得日益严重,在重金属污染中,尤以镉污染最为严重[16]。根据全国土壤污染状况调查公报结果,我国土壤总的超标率为 16.1%,其中耕地土壤点位超标率最高为 19.4%。从污染分布情况看,南方土壤污染重于北方,8 种无机污染物中镉超标率最高为 7.0%。我国土壤环境质量标准是镉含量小于 0.3~0.5 mg/kg,稻米食品卫生标准是镉含量小于 0.2 mg/kg。以湖南省为例,湖南省既是我国双季稻生产大省,也是我国的有色金属生产之乡。近年来,根据湖南省农业环境监测和重金属污染专项调查表明,湖南省被污染的耕地面积已占全省总耕地面积的 23.70%,还有 25%左右的农田大气污染和 27%左右的农田灌溉水污染,主要污染物为镉、铅等重金属。稻田镉污染不仅影响水稻产量、品质及整个农田生态系统功能,并可通过食物链传递而危害人体健康,已成为影响我国水稻生产和提高稻米质量的主要限制因子之一[11]。

## 3. 结论

苧麻因生物量大、修复成本低、具有经济效益等优势,在重金属污染土壤治理方面具有很大的应用潜力。就如今的发展趋势来看,苧麻治理土壤重金属污染的各项研究仍然处于初步阶段。施用有机肥不仅可培肥地力,同时也有利于根系生长,根际效应与根的生长和代谢直接相关联。因此,有机肥的施用必然要改变作物的根际环境。

## 参考文献

- [1] 孙进昌,彭源德,皮珊. 麻类作物的用途及发展前景[J]. 农产品加工, 2010, 3(3): 66-68.
- [2] 朱光旭,黄道友,朱奇宏,等. 苧麻镉耐受性及其修复镉污染土壤潜力研究[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(6): 752-755.
- [3] 揭雨成,罗中钦,余玮. 苧麻抗重金属污染研究现状与应用前景[J]. 作物研究, 2009, 23(4): 283-286.
- [4] 黄鸿翔,李书田,李向林,姚杰,曹卫东,王敏,刘荣乐. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006(1): 3-8.
- [5] Tu, C., Zheng, C.R. and Chen, H.M. (2000) Effect of Applying Chemical Fertilizers on Forms of Lead and Cadmium in Red Soil. *Chemosphere*, **41**, 133-138. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00400-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00400-2)
- [6] Zhao, B.Z., Chen, J., Zhang, J.B., Xin, X.L. and Hao, X.Y. (2013) How Different Long-Term Fertilization Strategies Influence Crop Yield and Soil Properties in a Maize Field in the North China Plain. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **176**, 99-109. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200076>
- [7] Gray, C.W., Moot, D.J., McLaren, R.G. and Redcliffe, T. (2002) Effect of Nitrogen Fertiliser Applications on Cad-



- mium Concentrations in Durum Wheat (*Triticum turgidum*) Grain. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, **30**, 291-299. <https://doi.org/10.1080/01140671.2002.9514226>
- [8] Udom, B.E., Mbagwu, J.S.C., Adesodun, J.K. and Agbin, N.M. (2004) Distributions of Zinc, Copper, Cadmium and Lead in a Tropical Ultisol after Long-Term Disposal of Sewage Sludge. *Environment International*, **30**, 467-470. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.09.004>
- [9] Mclaughlin, M.J., Tiller, K.G., Naidu, R. and Stevens, D.P. (1996) Review: The Behaviour and Environmental Impact of Contaminants in Fertilizers. *Australian Journal of Soil Research*, **34**, 1-54. <https://doi.org/10.1071/SR9960001>
- [10] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 243-252.
- [11] Mckenzie, F.R., Jacobs, J.L. and Kearney, G. (2003) Long-Term Effects of Multiple Applications of Nitrogen Fertiliser on Grazed Dry Land Perennial Ryegrass/White Clover Dairy Pastures in South-West Victoria. 3. Botanical Composition, Nutritive Characteristics, Mineral Content, and Nutrient Selection. *Australian Journal of Agricultural Research*, **54**, 477-485.
- [12] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报, 1992, 29(3): 239-250.
- [13] 李花粉. 根际重金属污染[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(4): 54-59.
- [14] Sebastian, A. and Prasad, M. (2014) Cadmium Minimization in Rice: A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, **34**, 155-173. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0152-y>
- [15] 刘文菊, 张西科, 尹君, 刘玉双, 张福锁. 镉在水稻根际的生物有效性[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 184-187.
- [16] 耿维, 胡林, 崔建宇, 卜美东, 张蓓蓓. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 171-179.
- [17] Lin, Q., Zheng, C.R., Chen, H.M. and Chen, Y.X. (1998) Transformation of Cadmium Species in Rhizosphere. *Acta Pedologica Sinica*, **35**, 461-467.
- [18] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762.
- [19] 宋文恩, 陈世宝, 唐杰伟. 稻田生态系统中镉污染及环境风险管理[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 1669-1678.
- [20] 吴建, 耿胤, 周彦君, 等. 有机肥施肥机研究现状与发展思路[J]. 农业工程, 2022, 12(4): 19-22.
- [21] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复——重金属污染土壤整治有效途径[J]. 生态学报, 2001, 21(2): 326-331.
- [22] 林琦. 重金属污染土壤植物修复的根际机理[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [23] 孔文杰. 畜禽商品有机肥与化肥配施对土壤-萝卜系统重金属平衡影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 249-252.
- [24] 滕应, 黄昌勇. 重金属污染土壤的微生物生态效应及其修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2002, 11(1): 85-89.
- [25] 郝秀珍, 周东美. 畜禽粪中重金属环境行为研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(4): 509-513.
- [26] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 生态环境学报, 2002, 11(1): 79-84.
- [27] Liu, J., Cao, C., Wong, M., *et al.* (2010) Variations between Rice Cultivars in Iron and Manganese Plaque on Roots and the Relation with Plant Cadmium Uptake. *Journal of Environmental Sciences*, **22**, 1067-1072. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60218-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60218-7)
- [28] Cai, W.H., Hu, S.-G. and Xu, X.-M. (2015) Risk Assessment on Exposure of Lead and Cadmium of Rice in Guangdong Residents from 2012 to 2014. *Food & Machinery*, **31**, 47-50.
- [29] Wang, Q.Y., Zhang, J.B., Zhao, B.Z., Xin, X.L., Zhang, C.Z. and Zhang, H.L. (2014) The Influence of Long-Term Fertilization on Cadmium (Cd) Accumulation in Soil and Its Uptake by Crops. *Environmental Science and Pollution Research*, **21**, 10377-10385. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2939-z>
- [30] 罗安程, Subedi, T.B., 章永松, 林咸永, 柴容明. 有机肥对水稻根际土壤中微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 321-327.