

# Research Advances on Heavy Metal Zinc Pollution and Remediation of Soil in Guizhou

Fang Yang<sup>1</sup>, Jianjun Duan<sup>2\*</sup>, Xiaoli Wang<sup>1</sup>, Xixi Liu<sup>1</sup>, Meihong Luo<sup>2</sup>, Xianwei Zhou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>College of Tobacco Science, Guizhou University/Guizhou Key Laboratory for Tobacco Quality, Guiyang Guizhou

<sup>3</sup>Agricultural Service Center of Dahea Town, Sinan County, Tongren Guizhou

Email: \*djjwxl@126.com, 2511915303@qq.com

Received: Sep. 17<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 3<sup>rd</sup>, 2018; published: Oct. 10<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

Soil zinc contamination of heavy metals was a hot issue for the environment and soil scientists. In order to deepen the understanding of zinc contaminated and research progress in soil of Guizhou province, this paper reviews the research results on the content, pollution sources, nutrition and toxicity of Zinc. In this paper, harness approaches including engineering control, chemo remediation, bioremediation and agronomic repair were summarized. Finally, this summary highlights existing problems of Zinc Pollution and Remediation in Soil. On the basis of the following, three questions: 1) Zinc pollution in soils of Guizhou Province is more prominent in typical lead-zinc mining areas than in typical farmland soils; 2) There are many studies on total zinc content in soils of Guizhou Province, but there are few studies on zinc forms in soil; 3) There are many studies on soil zinc pollution in Guizhou Province, but there is not much research on zinc remediation in contaminated soil. These three problems were further discussed in order to promote the study of zinc contaminated soil remediation in Guizhou Province.

## Keywords

Soil, Heavy Metal, Zinc Nutrition and Toxic Effects, Zinc Pollution, Remediation Technology

# 贵州土壤重金属锌污染及修复研究进展

杨芳<sup>1</sup>, 段建军<sup>2\*</sup>, 王小利<sup>1</sup>, 刘茜茜<sup>1</sup>, 罗湄宏<sup>2</sup>, 周先伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>贵州大学农学院, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质重点实验室, 贵州 贵阳

<sup>3</sup>思南县大河坝镇农业服务中心, 贵州 铜仁

Email: \*djjwxl@126.com, 2511915303@qq.com

\*通讯作者。

收稿日期：2018年9月17日；录用日期：2018年10月3日；发布日期：2018年10月10日

## 摘要

土壤重金属锌污染问题是环境和土壤科学研究者关注的热点问题。为了深入了解贵州省土壤锌污染及修复研究进展，本文综述了贵州土壤重金属锌含量、锌污染来源、锌的营养作用及其毒害效应方面的研究进展。重点阐述了目前锌污染土壤修复改良所采取的各类措施，包括物理修复、化学修复、生物修复及农艺修复，并分析了几种修复技术的优缺点。在此基础上提出土壤锌污染及修复技术研究存在以下三点问题：1) 贵州省土壤锌污染比较突出的为典型铅锌矿区，而典型农田土壤锌污染现状研究较少见报；2) 对于贵州省土壤中总锌含量研究比较多，而土壤中锌的形态研究较少；3) 对于贵州省土壤锌污染现状研究较多，而污染土壤锌修复研究不多。并对这三个问题进行了进一步探讨，以推动贵州省锌污染土壤治理修复的研究。

## 关键词

土壤，重金属，锌营养及毒害效应，锌污染，修复技术

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

土壤是人类赖以生存的主要资源和自然生态系统的重要组成部分，更是农业生产的基础[1]。同时也是连接大气圈、水圈、生物圈以及岩石圈的纽带，是与人类生存密切相关的最重要的自然资源，是人类赖以生存和繁衍的基础，其作用具有不可替代性[2]。

贵州属亚热带湿润季风气候区，气候温暖湿润，年气温变化小，总体上属农业丰收型气候。贵州是中国的矿产资源大省之一，已发现的矿产有 110 种以上，其中 76 种程度不同地探明了储量。随着贵州省经济发展速度不断加快，矿业开采、工业“三废”、城市生活垃圾和污泥、农用化肥、农药带来的污染越来越严重，重金属 Zn 也随之进入土壤积累固定。由此带来了土壤重金属 Zn 污染，造成植物 Zn 毒害，从而引起农产品安全和经济作物品质等问题。因此寻找高效并对环境影响小的土壤 Zn 污染修复方法成为当务之急。

Zn 作为重金属元素之一，是动物、植物生长发育所必需的微量营养元素。但是，也是公认的有害重金属元素之一，土壤被 Zn 污染后，Zn 被植物吸收后会导致作物减产和品质下降，严重时造成绝收[3]。同时污染土壤中的 Zn 通过土壤—食物—人这条食物链中的积累、迁移和传递，最终会给人体健康带来严重的威胁[4]。因此，近些年来土壤 Zn 污染修复和治理措施一直是广大土壤科研工作者所关注的重点。本文在讨论了贵州省土壤重金属 Zn 污染来源，重金属 Zn 的检测技术，Zn 污染的危害的基础上，综述了土壤 Zn 污染修复技术的研究进展，以为土壤 Zn 污染治理提供科学依据。

## 2. 贵州土壤中的锌含量及污染现状

Zn 在自然界中分布较广，天然土壤中的 Zn 主要来源于母岩。中国土壤中的 Zn 含量在 3~709 mg·kg<sup>-1</sup> 之间，平均值为 100 mg·kg<sup>-1</sup>，比世界土壤的平均含 Zn 量高出 1 倍[5]，其中贵州省土壤重金属 Zn 背景值

为  $82.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  [6]。我国土壤中 Zn 含量有一定的地带性分布规律,分布趋势是由南向北和由东向西逐渐降低。随着贵州省经济发展速度不断加快,矿业开采、工业“三废”、城市生活垃圾和污泥、农用化肥、农药带来的污染越来越严重,土壤重金属锌污染状况也日益加剧。吴迪等[7]研究结果表明,随着耕种历史的延长,贵州 DX、DW Pb、Zn 矿区水稻土壤重金属 Zn 与标准比超标 31.42 倍,单因子污染指数大于 1,说明对土壤已造成严重污染。岳佳等[8]研究结果表明,黔西北地区土壤重金属 Zn 含量  $454.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高于贵州省土壤 Zn 背景值且与 Cd 含量之间成正相关。孟忠常等[9]研究结果表明,贵州典型 Pb、Zn 矿区 XQ、DA、SS、QS 周边土壤重金属污染 Zn 分别为  $1317.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $728.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $749.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $873.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,单因子污染指数和综合污染指数两个指标综合分析得出,矿区土壤重金属 Zn 污染处于重污染等级。牟力[10]等研究得出贵州省镇远县金堡乡爱河村谷地 21 个田块土壤 Zn 污染仅次于 Cd 污染,属于轻度污染。丁玉娟[11]等研究发现贵州威宁县草海生态区主要农业区耕地土壤 Cd、Cr、Hg、Pb、As、Zn 等重金属元素土壤污染综合评价范围在 1.79~2.71 之间,综合指数为 2.12,处于中度污染状态。城市化过程中也大了含有重金属元素的机动车废气、污水污泥、生活垃圾等污染等致使城市附近土壤 Zn 污染加重,土壤 Zn 也有小幅度增高。王济等[12]研究结果表明,贵阳市城区表层土壤重金属 Zn 含量最高达  $635.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。贵阳城区路侧土壤中 Zn 含量均值为  $162.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别为基线值和背景值的 3.5 和 2.2 倍。

### 3. 土壤锌对植物营养作用及毒害效应

Zn 是人体和动物所必需的生命元素之一,同时也是植物生长发育必需的营养元素。现有的研究表明,Zn 是参与合成和调节多种类型酶功能、结构或活性的必要元素[13];参与植物光合作用中  $\text{CO}_2$  的水合作用,与植物光合作用密切相关[14];还与蛋白质合成、成熟叶片矿质元素含量、膜的完整性、生殖器官的发育以及植物的抗逆性有关[15]。

Zn 是植物必需的微量营养元素,但过量将对植物产生毒害。对大多数植物而言,叶片生长所需要的锌含量为  $5\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,当植物体内锌含量达到  $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时可能会过量,而当锌含量达到  $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时则对大多数作物表现为毒害作用[16]。

土壤中过量的 Zn 会对植物产生毒害作用,主要表现在以下方面[17]:① 对植物根伸长的抑制[18][19];② 抑制植物根系对土壤营养元素的吸收;③ 引起植物超微结构的改变,包括影响细胞膜的通透性、植物光合作用、呼吸作用及植物的代谢物质,从而导致植物体内自由基的产生并引起脂膜的过氧化等方面[20]。

## 4. 土壤中锌的形态分布及影响因素

### 4.1. 土壤中锌的形态分布

重金属 Zn 而言,通过各种途径进入土壤中的 Zn,按其存在形态可分为有机态锌和无机形态 Zn,其中,无机态 Zn 又包括代换态、矿物结合态及土壤溶液中的自由 Zn 离子等。不同结合形态的 Zn 在不同土壤中含有很大差异,且不同形态的 Zn 之间可以相互转化[21]。

### 4.2. 影响土壤中锌形态分布的主要因素

外源可溶态 Zn 进入土壤后,迅速在溶液和固相中进行再分配,以自由离子态( $\text{Zn}^{2+}$ )、有机络(螯)合态、可溶性胶体吸附态及晶格固定等形态存在于不同土壤组分中。

#### 4.2.1. 土壤 pH 的影响

一般情况下,酸性土壤中 Zn 的有效性高,在中性和碱性土壤,Zn 可呈锌络离子,也可沉淀为氢氧

化物等, 溶解度降低, 有效性差。随着土壤 pH 的升高, Zn 在土壤固相上的吸附量和吸收能力增强, 从而降低 Zn 的活性[22]。进入土壤中的 Zn 主要以残留态为主, 很少量以可溶态存在于土壤溶液中, 后者数量虽少, 产生的生物毒害却很强[23]。

#### 4.2.2. 根际效应

在根际土壤中, 植物根系通过改变根际 pH 的改变和分泌有机酸可以促进根际土中硅酸盐、碳酸盐、硫化物、氧化物态锌的溶解, 由此可引起以不同形态存在的锌的释放, 并与各种根系有机分泌物发生络合或者螯合作用, 进而改变根际土中锌的存在形式[24]。

### 5. 贵州土壤重金属锌污染的主要来源

#### 5.1. 矿业开采“三废”排放带来的污染

作为西南资源大省, 贵州省矿产资源分布广泛, 矿种众多, 特别是汞矿储量、产量均居全国第一, 磷矿、铝土矿、锰矿、煤炭储量分别居全国第二、三、四、五位[7]。

由于矿产开采“三废”排放带来的污染随着经济社会的快速发展, 及对矿产资源的大量消耗和不合理科学开采利用, 既造成资源的浪费又污染土壤环境, 特别是矿区土壤污染问题日趋严重[25]。矿区土壤锌污染来源主要有以下 2 个方面: 一方面, 矿物开采和冶炼过程中含锌废渣和矿渣排放, 产生的含锌有害气体和粉尘随自然沉降和降雨进入土壤, 另外, 产生的矿山酸性废水进入水环境(如河流等)从而进入土壤, 造成污染; 另一方面, 矿业废弃物(尾矿砂、矿石等)在堆放或处理过程中重金属向周围土壤、水体扩散[26]。刘灵飞等[27]研究结果表明, 贵州省晴隆县大厂镇喀斯特山区废弃锑冶炼厂周围的农田土壤, 距离冶炼厂烟囱不同距离 12 个表层土壤样点和 5 个典型土壤剖面中表层土壤主要污染元素为 Sb、Zn、Pb、Hg、As 和 Cu, 分别是贵州省土壤背景值的 58.58、11.96、7.99、7.45、6.70 和 1.60 倍; 以贵州省土壤背景值计算, 采用内梅罗综合污染指数法对其进行评价得出, 研究区土壤达到中度污染水平。董亚辉等[28]研究结果表明, 贵州六盘水市某铅锌矿废弃地区重金属含量值从高到低依次为  $Pb > Zn > Cu > Cr > Cd$ , 平均含量分别达  $5088.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4956.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $403.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $65.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $38.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。渣区及尾矿区的 Pb、Zn、Cu 和 Cd 含量均超出土壤环境质量三级标准, 达到了限制植物生长的程度。湛天丽[29]等对贵州省铜仁市万山区高楼坪万山汞矿区约 5 公里远的一块面积约 100 亩的农田研究得出: 农田土壤 Hg、As、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 的平均含量分别为 4.29、117.6、0.43、59.06、48.99、43.77、29.13、 $18.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤重金属综合污染指数为 7.16, 表明该农田土壤重金属重度污染, 且元素具有一定的同源关系或复合污染现象。随着 Pb、Zn 矿的长期开采, 生产过程中矿渣、工业粉尘、废水、尾矿中的重金属 Zn 污染及环境问题已严重阻碍了农业的可持续发展并危害着土壤的健康。

#### 5.2. 农业生产带来的污染

近代农业生产过程中含有重金属的化肥、畜禽粪便、农药等的施用, 已经造成了土壤中重金属含量的升高。一般来说, 氮肥和钾肥中 Zn 含量很少, 混杂有 Zn 的主要是 P 肥、含 P 复合肥、含 Zn 复合肥以及以城市垃圾、污泥为原料的肥料等。张民等[30]研究结果表明, 随着耕种历史的延长, 表层土壤的 Zn 含量呈增加趋势, 并指出施用含 Zn 肥料和农药可能是导致土壤中 Zn 含量升高的重要原因之一。张树清等[31]统计了我国 7 个省、市、自治区的典型规模化养殖场畜禽粪便中 Zn 含量, 55 个猪、鸡粪中 Zn 含量变幅为  $71.3\sim 8710 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 猪粪中 Cu、Zn、Cr 和 As 含量明显高于鸡粪。

#### 5.3. 城市化进程带来的污染

随着城市化在贵州飞速发展, 以及城市人口的不断增长和城市人流量的加大, 人类活动的增加必

然导致大量的重金属锌被带入土壤中，造成土壤中重金属的积累，并通过大气、水体或食物链而直接或间接地威胁着人类的健康甚至生命。有研究表明，垃圾填埋层中锌含量约为  $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，生活垃圾渗滤液中的锌含量则高达  $1100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  [32]。

#### 5.4. 污水、污泥带来的污染

污水灌溉一般指使用经过一定处理的城市污水灌溉农田、森林和草地。由于城市工业化的迅速发展，大量的工业废水涌入河道，使城市污水中含有的许多重金属离子，随着污水灌溉而进入土壤[33] [34]。污泥中含有大量的有机质和 N、P、K 等营养元素，但同时污泥中也含有大量的重金属，随着大量的市政污泥进入农田，使农田中的重金属的含量在不断增高。污泥施肥可导致土壤中 Cd、Hg、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 含量的增加。

#### 5.5. 交通运输带来的污染

交通运输产生的重金属类污染物主要来源于汽车行驶中产生的汽车尾气、轮胎和机械部件磨损污染物、燃料油、润滑油的泄漏及机动车运载货物导致的扬尘，污染元素则主要为 Pb、Cu、Zn 等元素[35]。张春辉等[36]对贵阳市道路降尘研究结果表明，由于汽车轮胎的磨损及燃油燃烧等，造成 Cu、Pb、Zn 含量分别为  $60.37\sim 437.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $35.63\sim 313.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $282.64\sim 841.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cu、Pb 和 Zn 的平均含量均超过贵州土壤背景值，分别是背景值的 7.69、2.85 和 6.94 倍。武永锋等[37]研究结果表明，由于汽车轮胎硬度添加剂含 Zn 粉尘，贵阳不同功能区中交通区土壤中 Zn 含量均值为  $141.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，达到轻度污染。综上所述，交通运输对大气、土壤等环境要素已经造成了 Zn 污染，并通过人们的呼吸系统和食物链富集对人类的健康构成威胁。

### 6. 贵州土壤重金属锌污染修复改良技术

目前土壤重金属 Zn 污染土壤的治理途径主要体现在以下 3 个方面：① 降低土壤中 Zn 浓度；② 降低 Zn 在土壤中的迁移性；③ 清除土壤中 Zn [38]。Zn 污染土壤的修复措施很多，从原理上可以分为物理修复、化学修复、生物修复和农艺修复四大类。

#### 6.1. 物理修复

物理修复(经典和传统方法)包括客土、换土、翻土及去表土法，电化学法，淋洗法，热处理法[39] [40]。客土是在 Zn 污染土壤上，加入未污染的新土；换土是将 Zn 污染的土壤移去，换上未污染的新土；翻土是将 Zn 污染土壤翻至下层；去表土是将 Zn 污染的表土移去。深耕翻土常用于轻度污染的土壤，而客土和换土多用于重污染区。通过这些措施，可以降低土壤中 Zn 的含量，减少过量的 Zn 对土壤-植物系统产生毒害，从而使农产品达到食品卫生标准。物理工程措施治理效果最为显著、稳定，是一种治本措施，而且适应性广，但投资大，存在二次污染和肥力降低问题，适于小面积的重度污染土壤的治理。董亚辉等[28]研究发现，贵州六盘水市某 Pb、Zn 矿废弃地客土覆盖区，Zn 的含量明显降低，Zn 污染达二级标准。

#### 6.2. 化学修复

化学修复是通过土壤中的重金属 Zn 进行吸附、溶解、沉淀、氧化还原、络合螯合等来降低土壤中重金属 Zn 迁移性或生物有效性的方法。常用的重金属污染土壤化学修复技术主要包括固化法、稳定化法、淋洗法、改良法。

固化法是指通过向土壤中添加固化剂，在固化剂的作用下形成渗透性较低的固体混合物，将重金属

Zn 封存在固化物中, 从而降低重金属 Zn 元素在土壤中的迁移性。

稳定化法是指向土壤中投加稳定剂, 通过氧化还原等化学反应, 将重金属污染物转化为状态稳定、毒性小或不易溶解的化合物, 从而降低重金属元素的生物可利用性[38]。

淋洗法是指用清水淋洗液或含有一定配位体的化学助剂冲淋受重金属 Zn 污染的土壤, 改变其理化性质, 增加重金属的水溶性, 再将含有重金属的溶液抽提出来再处理。方一丰等[41]发现, 聚天冬氨酸(PASP)对 Cd、Zn 有较好的提取率, 均超过 50%。

改良法是向土壤中投加改良剂(石灰、沸石、碳酸钙、磷酸盐、硅酸盐等), 以增加土壤有机质、阳离子交换量和粘粒含量, 以及改变 pH、Eh 和电导率等理化性质, 使土壤中的 Zn 发生氧化、还原、沉淀、吸附、抑制和拮抗等作用, 以降低 Zn 的生物有效性。华珞等[42]研究发现, 不同的 Zn、Cd 含量的污染土壤上施加有机质, 能使玉米茎中的 Zn 和 Cd 含量明显降低, 生物量明显增加。纳明亮等[43]研究发现, 在添加不同的 Cu、Cd 外源含量的污染土壤上施加石灰, 能使土壤有效 Zn 降低了 64%, 在添加量 250 mg·kg<sup>-1</sup> 和 500 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 小白菜中 Zn 含量分别降低了 82.4%和 87.6%。

### 6.3. 生物修复

生物修复是利用生物技术治理污染土壤的一种新方法。利用生物削减、净化土壤中的重金属锌或降低重金属 Zn 毒性。通常用的生物措施为植物修复, 是一种利用自然生长或遗传培育植物修复重金属污染土壤的技术。重金属 Zn 污染土壤的植物修复技术常用为植物提取, 即利用重金属超积累植物从土壤中吸取金属污染物, 随后收割地上部并进行集中处理, 连续种植该植物, 达到降低或去除土壤重金属污染的目的。目前已发现有 400 多种超积累重金属植物, 积累 Zn 可达到 1%以上[44]。国外已发现的锌超积累植物已达 18 种[45] [46], 其中最典型的 Zn 超积累植物为天蓝遏蓝菜, 其地上部 Zn 含量达 51,600 mg·kg<sup>-1</sup> [47]。胡宇等[48]研究发现, 毕节 Pb、Zn 矿区优势植物中淡黄香青自然条件下地上部分对 Pb 和 Zn 的富集量分别达 1304.5 mg·kg<sup>-1</sup> 和 2468.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 对 Pb、Zn 的吸收能力较强, 在重金属 Pb、Zn 污染土壤修复方面具有潜在的应用价值。

生物措施的优点是实施较简便、投资较少和对环境扰动少, 缺点是治理效率低(如超积累植物通常都矮小、生物量低、生长缓慢且周期长), 不能治理重污染土壤(因高耐重金属植物不易寻找)和被植物摄取的重金属因大多集中在根部而易重返土壤等。

### 6.4. 农艺修复

目前专一通过农艺措施进行重金属锌修复的研究比较少, 通常采用的农艺修复措施有以下两种: ① 改变耕作制度, 对于某些中轻度污染土壤, 可通过改变水分, 调节 Eh 以减少污染的危害。② 选种抗污染农作物品种[49]。

用农艺措施来治理重金属锌污染土壤具有可与常规农事操作结合起来进行、费用较低、实施较方便等优点, 但存在有些方法周期长和效果慢等缺点。农艺措施适合于中、轻度污染土壤的治理。投资小, 无副作用。但治理效果较差, 周期长。

## 7. 结论

贵州土壤 Zn 的背景值为 82.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 部分矿区严重污染, 部分矿区轻度污染, 贵阳城区土壤 Zn 含量也略高于背景值, 土壤中过量的 Zn 会对植物产生毒害作用。

贵州土壤重金属 Zn 污染来源较广, 矿产开采“三废”是主要的污染源, 矿产区土壤 Zn 轻度或中度污染。农业生产、城市化进程、污水、污泥和交通运输等都不同程度的带来 Zn 污染。

贵州土壤重金属锌污染修复改良技术有物理修复、化学修复、生物修复和农艺修复四大类。各种修复措施都有优缺点，实际中需要根据具体的污染区土壤的理化性质选择相对应的修复技术，以期达到最好的修复效果。

## 8. 展望

锌是植物必需的微量元素，但由于自然或人类活动的影响，已经造成其在部分地区土壤中的过量积累，从而影响农产品的产量和质量，甚至通过食物链危害人畜健康。袁启凤等[50]研究发现，都柳江流域柑橘园生产的柑橘果实和叶片中铬、镍、铜、锌、铅含量与土壤中的铬、镍、铜、锌、铅含量呈正相关。因为土壤锌污染来源趋于多样化、综合性，土壤锌污染过程比较复杂及存在状态多样且变化方式比较多。目前贵州重金属锌污染和修复的研究虽较多，但仍存在如下一些问题：

① 贵州省重金属锌污染研究主要集中在典型矿区土壤等特定区域，而对于整个贵州省农田土壤区域尺度上污染研究较少。可能由于贵州锌污染主要来源于矿物开采，所以典型矿区土壤锌污染研究比较多。但是随着贵州经济发展和城市化进程的加快，非矿区典型农田土壤锌污染也必将成为广大科研工作者关注的对象。

② 土壤中重金属锌总量研究较多，但土壤重金属锌形态研究较少，特别是重金属锌与有机污染物结合态造成土壤的持久性污染少有见报。

③ 对于污染现状研究就多，而重金属锌污染修复的研究比较少，特别是两种或两种以上修复技术结合对重金属锌修复的研究比较少见报。而在实际中，通常是采用多种修复技术综合应用效果更佳；因为就单一技术来看，任何一种修复技术都有其局限性，难以达到预期效果，进而无法大力推广。

因此，贵州土壤重金属锌污染防治及修复是一项系统工程，不仅需要土壤学、植物生理学、遗传学、环境工程学、分子生物学等多个学科的努力，还需要多种修复技术的综合应用，即将物理措施、化学措施、生物措施、农艺措施科学地结合起来，取长补短，才能达到更好的效果。同时减少了农药、化肥、环境激素等污染物进入土壤环境，保护了农田生态环境，促进了良性生态循环，进而保障了人类健康，促进贵州农业的可持续发展。

## 基金项目

国家自然科学基金(编号：41361064)。

## 参考文献

- [1] 王之明, 江川, 黄文琥, 安宏锋, 等. 贵州省土壤环境质量监测存在问题及对策[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(4): 91-93.
- [2] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [3] 张莉, 周康, 等. 贵州省土壤重金属污染现状与对策[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(5): 114-115.
- [4] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 42-57.
- [5] 刘福来. 土壤-植物系统中锌的研究概况[J]. 土壤肥料, 1998(5): 10-14.
- [6] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 346-348, 378-380.
- [7] 吴迪, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 1992-1998.
- [8] 岳佳, 宁兵, 等. 黔西北铅锌矿区镉污染分布特征: 以赫章县为例[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(5): 210-213.
- [9] 孟忠常, 吴迪, 邓琴, 秦樊鑫, 李存雄, 罗充, 吴坤, 等. 贵州典型铅锌矿区土壤重金属污染特征与生态危害风险评价[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(8): 218-221.
- [10] 牟力, 张弛, 滕浪, 付天岭, 李相楹, 何腾兵. 山区谷地铅锌矿区稻田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 山地

农业生物学报, 2018, 37(2): 20-26.

- [11] 丁玉娟, 林昌虎, 何腾兵, 林绍霞, 张珍明. 贵州草海耕地土壤重金属污染特征及安全评价[J]. 贵州科学, 2013, 31(2): 47-51, 88.
- [12] 王济, 张浩, 曾希柏, 等. 贵阳市城区路侧土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 950-955.
- [13] 冯致, 郁继华, 领建明. 锌对青花菜幼苗生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(4): 471-474.
- [14] 汪洪, 金继运, 周卫. 不同水分状况下施锌对玉米水分代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 367-373.
- [15] Cho, U.H. and Park, J.O. (2000) Mercury-Induced Oxidative Stress in Tomato Seedlings. *Plant Science*, **156**, 1-9.
- [16] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [17] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] 徐明岗, 纳明亮, 张建新, 张文菊, 刘军领, 等. 红壤中 Cu、Zn、Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制效应[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 153-157.
- [19] 张建新, 纳明亮, 徐明岗, 等. 土壤 Cu、Zn、Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制及毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 945-949.
- [20] 汪洪, 金继运. 植物对锌吸收运输及积累的生理与分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 225-235.
- [21] 林蕾, 陈世宝, 等. 土壤中锌的形态转化、影响因素及有效性研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 221-229.
- [22] 谢正苗. 土壤中锌的化学平衡[J]. 环境科学进展, 1996, 4(5): 13-30.
- [23] Chadi, H.S. (2008) Speciation of Zinc in Contaminated Soils. *Environmental Pollution*, **155**, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.12.006>
- [24] 杨志敏. 锌污染对小麦萌发期生长和某些生理生化特性的影响[J]. 农业环境保护, 1994, 13(8): 121-123.
- [25] 张建江, 杨胜元, 王林, 等. 贵州土壤环境污染现状及其防治建议[J]. 贵州地质, 2008, 25(4): 292-296.
- [26] 李忠义, 张超兰, 邓超冰, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属有效态空间分布及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1772-1776.
- [27] 刘灵飞, 龙健, 万洪富, 等. 贵州喀斯特山区锑冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1036-1047.
- [28] 董亚辉, 戴全厚, 邓伊晗, 张会芹, 等. 不同类型铅锌矿废弃地重金属的分布特征及污染评价[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(5): 109-112.
- [29] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 何腾兵, 石维, 候长林, 骆永明, 赵其国. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 474-480.
- [30] 张民, 龚子同, 等. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 85-93.
- [31] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
- [32] 彭永臻, 张树军, 郑淑文, 等. 城市生活垃圾填埋场渗滤液生化处理过程中重金属离子问题[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 1-5.
- [33] 王贵玲, 蔺文静. 污水灌溉对土壤的污染及其整治[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 163-166.
- [34] Sato, T., Yamamoto, S., Qadir, M., Endo, T., Masunaga, T. and Ahmad, Z. (2014) Long-Term Effects of Wastewater Irrigation on Soil Heavy Metal Contamination in Peri-Urban Areas of Aleppo, Syria. *International Journal of Agriculture and Biology*, **16**, 1153-1158.
- [35] 战锡林, 马保民, 邓保军, 等. 济青高速两侧土壤重金属污染分布特征研究[J]. 三峡环境与生态, 2012(1): 23-26.
- [36] 张春辉, 吴永贵, 杨少博, 等. 贵阳市道路降尘中重金属污染特征及其健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(5): 432-435.
- [37] 武永锋, 刘丛强, 涂成龙, 等. 贵阳市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3): 254-257.
- [38] 赵述华, 陈志良, 张太平, 等. 重金属污染土壤的固化/稳定化处理技术研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1531-1536.
- [39] 郑小东, 荣湘民, 罗尊长, 等. 土壤重金属污染及修复方法研究进展[J]. 农学学报, 2011, 1(8): 37-43.



- [40] 李秀悌, 顾圣啸, 郑文杰, 等. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S2): 203-208.
- [41] 方一丰, 郑余阳, 唐娜, 等. 生物可降解络合剂聚天冬氨酸治理土壤重金属污染[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 237-240.
- [42] 华璐, 陈世宝, 白玲玉, 韦东普, 等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. 农业环境保护, 1998(2): 55-59.
- [43] 纳明亮, 张建新, 徐明岗, 张茜, 张文菊, 等. 石灰对土壤中 Cu、Zn 污染的钝化及对蔬菜安全性的影响[J]. 农业环境与发展, 2008, 25(2): 105-108.
- [44] 刘小梅, 吴启堂, 李秉滔, 等. 超富集植物治理重金属污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 636-640.
- [45] Singh, J., Hembram, P. and Basak, J. (2014) Potential of *Vigna unguiculata* as a Phytoremediation Plant in the Remediation of Zn from Contaminated Soil. *American Journal of Plant Sciences*, **5**, 1156-1162.  
<https://doi.org/10.4236/ajps.2014.59128>
- [46] Solhi, M., Shareatmadari, H. and Hajabbasi, M.A. (2005) Lead and Zinc Extraction Potential of Two Common Crop Plants, *Helianthus annuus* and *Brassica napus*. *Water, Air and Soil Pollution*, **167**, 59-71.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-005-8089-7>
- [47] Cunningham, S.D. and Ow, D.W. (1996) Promises and Prospects of Phytoremediation. *Plant Physiology*, **110**, 715-719.  
<https://doi.org/10.1104/pp.110.3.715>
- [48] 胡宇. 毕节铅锌矿区优势植物的铅超富集特性[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(3): 220-223.
- [49] 刘候俊, 韩晓日, 李军等. 再追踪: 重金属污染防治与管理——土壤重金属污染现状与修复[J]. 环境保护与循环经济, 2012(7): 4-8.
- [50] 袁启凤, 李文云, 张银, 陈守一, 黄静, 李金强, 等. 贵州都柳江流域柑橘园土壤、柑橘中重金属的分布特征[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 359-361.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [hjss@hanspub.org](mailto:hjss@hanspub.org)