

# The Harm of Soil Heavy Metal Pollution in Yunnan Province and Its Prevention and Control Measures

Minhui Yue<sup>1,2,3</sup>, Peng Wang<sup>1,2,3</sup>, Minghui Yu<sup>1,2,3</sup>, Xianghui Meng<sup>1,2,3</sup>, Changqun Duan<sup>1,2,3</sup>, Ying Pan<sup>1,2,3</sup>, Huilin Huang<sup>1,2,3</sup>, Chang'e Liu<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Ecology and Environmental Sciences & Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>International Cooperative Center of Plateau Lake Ecological Restoration, Kunming Yunnan

<sup>3</sup>Watershed Management of Yunnan, Kunming Yunnan

Email: \*change@ynu.edu.cn

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2019; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Heavy metal pollution is one of the most serious pollution problems in China, especially in Yunnan province. The research progress of heavy metals on plants, soil animals, soil microorganisms, soil material circulation and farmland ecosystems was reviewed. The status quo, causes, hazards, mechanism of action and farmland ecological control measures of heavy metal pollution in Yunnan were summarized. In the local realities, scientific and reasonable effective measures for the prevention and control of heavy metal pollution in Yunnan province are proposed from the aspects of source control, local planting and scientific restoration.

## Keywords

Heavy Metal Pollution, Soil Physicochemical Properties, Material Circulation, Farmland Ecosystem

# 云南地区土壤重金属污染危害及其防治措施建议

岳敏慧<sup>1,2,3</sup>, 王朋<sup>1,2,3</sup>, 禹明慧<sup>1,2,3</sup>, 孟祥怀<sup>1,2,3</sup>, 段昌群<sup>1,2,3</sup>, 潘瑛<sup>1,2,3</sup>, 黄惠琳<sup>1,2,3</sup>, 刘嫦娥<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>云南大学生态学与环境学院暨云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省高原湖泊生态修复及流域管理国际联合研究中心, 云南 昆明

<sup>3</sup>云南生态文明建设智库, 云南 昆明

\*通讯作者。

文章引用: 岳敏慧, 王朋, 禹明慧, 孟祥怀, 段昌群, 潘瑛, 黄惠琳, 刘嫦娥. 云南地区土壤重金属污染危害及其防治措施建议[J]. 农业科学, 2019, 9(4): 278-289. DOI: 10.12677/hjas.2019.94043

Email: [change@ynu.edu.cn](mailto:change@ynu.edu.cn)

收稿日期: 2019年4月9日; 录用日期: 2019年4月21日; 发布日期: 2019年4月28日

## 摘要

重金属污染是我国所面临的最严重的污染问题之一, 云南省重金属污染状况尤为严峻。综述了国内外重金属对植物、土壤动物、土壤微生物、土壤物质循环以及农田生态系统等方面的研究进展, 重点阐述云南地区重金属污染的现状、原因、危害、作用机理和农田生态防治措施, 并结合地方实际, 从源头控制、因地制宜、科学修复三方面提出云南省重金属污染防治的科学合理的有效措施。

## 关键词

重金属污染, 土壤理化性质, 物质循环, 农田生态系统

Copyright © 2019 by author(s) 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

土壤是地球生态系统重要的组成部分, 土壤生化物质含量影响着地表生物的生长, 尤其是各种化学物质含量的超标不但影响植物正常生长, 而且通过食物链等途径进入人体和动物体, 在其体内不断富集, 影响机体健康。重金属具有隐蔽性、潜伏性、不可逆性、累积性、后果严重性[1]和难以治理性[2]的特点, 进入人体后能使蛋白质丧失作用, 导致各种酶失去活性, 且在人体脏器中富集, 对人体造成急性、亚急性、慢性中毒等, 如二十世纪日本的“痛痛病”、广西三合村 Cd 污染和湖南鹤山村的 As 污染产生“癌症村”等现象给人类带来了灾难性的伤害。自二十世纪中叶开始至今, 随着工农业的飞速发展及城市化进程深入等加剧了土壤中重金属的累积, 造成土壤重金属污染, 且污染面积逐年扩大。根据 2014 年全国土壤污染状况调查公报显示, 我国耕地环境污染严重质量堪忧, 其中镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍 8 种无机污染物点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%。据农业部进行的调查, 我国每年因重金属污染减产的粮食 1000 多万 t, 被重金属污染的粮食每年达到 1200 万 t, 合计损失至少 200 亿元[3]。通过 Kriging 插值得出, 土壤中 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd 在云南农田出现高值区, 其中云南省土壤中 Pb 和 Zn 的富集最高, 是超出背景值最高的省份[4], 可能是由于农业活动过程中导致大量重金属进入农田土壤, 加上云南省是我国重要的重金属矿区, Pb 和 Zn 背景值含量较高。

目前, 国内外在土壤重金属方面已经做了大量研究, 针对土壤重金属污染状况分析与风险评价、对生物生长发育[5]及群落结构的影响[6] [7]、迁移转化[8]、累积特征[9]、空间分布[4]以及重金属土壤修复[10] [11] [12]等方面开展研究。云南省土壤重金属研究中, 多数选取某些典型区域, 选取样点采集土壤和植被样本通过化学分析等确定重金属含量、污染现状及其相关分析[13]与风险评价[14] [15] [16] [17], 但对云南省农田土壤中重金属来源、土壤-植物-动物-微生物系统的污染危害及综合防治等缺乏综合的报道。因此, 本文系统梳理关于云南省土壤重金属污染来源、现状分析、污染危害(对土壤理化性质、物质循环、土壤生物及生态系统)及防治的研究, 归纳云南省农田土壤重金属污染来源及危害, 提供具有针

对性的科学有效的治理对策。

## 2. 云南省重金属污染概况

云南地质构造复杂, 金属矿藏丰富, 土壤母质重金属背景值含量高, 因此矿区农产品(粮食作物、蔬菜作物、经济作物)、部分地区药材、优势产业(茶叶、烟草业、食用菌)等重金属含量存在超标情况。

### 2.1. 云南省重金属污染物来源

土壤重金属污染来源包括自然来源与人为来源两方面, 其中主要是人为来源, 包括矿业开采、污水灌溉与施肥、动物粪便和生物固体应用、大气沉降等。

**矿业开采。**云南省地处我国西南边陲, 土壤中矿产资源丰富, 素有“有色金属王国”之称。锌、锡、铜、铅、铝、磷、锰、锆、铟、银、铂族元素矿产储量位居全国前列, 有色金属矿产资源丰富、开发利用程度高, 现有尾矿库 921 座, 遍及全省 16 个州市[18]。矿业发展促进了云南经济的增长, 但由于管理制度尚未完善, 缺乏防渗设施, 未处理的废水进行农业灌溉和外排以及矿渣、废气的排放是导致云南省土壤重金属污染的最主要因素[19]。红河州金属矿场分布密集, 主要包括以铁矿、铅锌矿、铜矿、钛矿和锡矿。金属的冶炼和提取对周围流域均会产生严重污染, 红河流域部分流域铅、砷的含量超标; 澜沧江部分区域铅和汞含量超标; 珠江流域砷的含量超标; 长江流域部分区域铅、镉接近标准值, 且水质呈现恶化趋势[20]。个旧市锡储量占全球储量的 16.7%, 开采过程伴生矿砷未被正确处理从而污染土壤, 大量农田出现砷超标现象[21], 除此之外部分地区 Zn、Pb、Cu 以及 Cd 的含量超过国家土壤环境质量二级标准[22]。云南会泽铅锌储量丰富, 通过研究发现冶炼厂周围土壤中金属元素 Pb、Zn、Cd 平均含量是土壤背景值 30.26、31.78 和 34.96 倍, 污染等级分别达到了强度、轻度和极度。Cu、Mn、Ni 和 As 的平均含量均超过《国家土壤环境质量标准》二级标准值, 且 Pb、Cd 对儿童均具有显著的健康风险[23]。

**污水灌溉与施肥、动物粪便和生物固体应用。**云南省是农业大省, 种植业结构复杂、种植作物种类较多, 包括农作物、水果类、中药材、花卉及大量食用菌。为增高产量、提升经济效益, 大量不合理落后的施肥和灌溉方式导致农业产业结构紊乱、肥料利用率降低并对土壤环境造成恶劣的影响[24]。例如许多农药中含有 Cu、Zn、Hg 等成分, 长期使用农药和杀虫剂, 就会导致土壤重金属含量超标。其次在施肥中, 我国许多化肥都含有一定量的重金属元素, 例如蔬菜种植中所用的磷肥, 里面含有大量的 Pb、Cd 等重金属。动物粪便是农作物重要肥料之一, 未经处理直接施于农田中, 适宜温度下经发酵后产生的氨、硫化氢、甲硫醚、二甲胺等有害气体[25]; 动物粪便的堆积过程中, 铜、锌、有机砷等重金属元素被土壤吸收, 通过循环系统在自然界内流转, 最终影响动物体和人体健康, 产生严重的生态问题[26]。农业灌溉水均为富含 Cu、Zn、Pb、Cd 等重金属元素的生活污水和工业废水, 使大量重金属元素在土壤中富集。

**大气沉降。**通过自然因素(如成土母质、火山爆发等)和人为因素(工业、交通、发电、农田、生活废气排放、火灾等[27])导致大气浮尘蓄积大量重金属元素如 Cr、Cu、Fe、Mn、Zn、Ni、Pb 等[28], 在空间上, 重金属的浓度在不同功能区总体呈现工业区 > 交通干道区 > 居民区 > 郊区[29]。大气中的重金属元素以离子或化合态存在于大气颗粒物中, 经过降雨、降雪等沉降方式沉积在土壤中[30], 引起土壤重金属污染。

### 2.2. 云南省土壤重金属污染现状

云南省矿产资源丰富, 由于其不合理的开发和落后的处理技术, 将大量含有重金属的废气、废渣、废水排入土壤中, 导致目前土壤重金属污染相当严峻。云南省土壤重金属污染面积大、种类多、副作用明显, 是重金属污染最突出的地方之一。

根据研究表明, Zn 在云南省富集最为严重, 是背景值的 1.55 倍[4]。云南中甸县部分地区土壤中 As、Cr、Cu、Pb、Zn 平均含量远高于云南背景值, 且变异系数大, 不同程度影响人类活动[14]。玉溪大河河道底泥中 As、Hg、Cu、Pb、Cr、Cd 和 Zn 含量平均值分别为 75.2、1.528、84.4、107.1、65.6、9.00、7.38  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均明显高于相应的背景值。在过去二百年, 云南省错恰湖中 Cr、Ni、Fe、Ti、Mn、Co、As 和 Cd 元素含量随时间推移整体呈上升趋势[31]。全省矿业污染排放量占全省工业污染排放量的一半, 土壤重金属受到广泛关注[32]。

### 3. 云南地区土壤重金属污染的危害

素有“有色金属王国”之称的云南有色金属遍及全身 16 个州市, 伴随矿产资源开发, 对当地的生态破坏和环境污染的问题随之而来, 尤其是对土壤结构、物质循环、植物根系、土壤动物与微生物、土壤生态系统的影响较为明显。

#### 3.1. 重金属污染对土壤理化性质的影响

##### 3.1.1. 重金属污染对土壤结构的影响

研究表明, 重金属元素在土壤中富集会对土壤结构造成巨大影响; 反之, 土壤结构和有效成分的改变同样会对土壤吸附和降解重金属的能力产生影响[33] [34]。因此, 重金属污染与土壤结构是一个作用与反作用的动态循环过程。土壤内部平衡结构被打破、容重增加、增加团聚体含量[33], 导致土壤板结、孔隙度降低, 大量灌溉水直接汇入地下水无法保湿, 土壤含水量和通透性均降低。重金属元素影响土壤酸碱平衡, 若其以阳离子形态存在如  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Sn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 等, 与土壤中的阴离子络合形成沉淀物或盐; 以阴离子形态存在如  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 等, 与土壤中的阳离子络合形成盐。导致土壤酸碱度发生改变、强烈而快速的反应, 打破了土壤内部的物质平衡, 使土壤所需的营养元素如 C、N、P、K、Fe、Cu 等无法进入土壤, 参与物质循环, 导致有机质减少、土壤贫瘠; 重金属元素影响土壤氧化还原电位。土壤土壤氧化还原电位取决于土壤中氧化态、还原态物质相对的浓度, 重金属离子与土壤中其他离子络合生产盐, 则氧化态、还原态物质均会减少, 即: 土壤的氧化还原电位减小。

综上所述, 重金属污染导致引起土壤质地和结构恶化, 而土壤的有机质含量、pH、质地、含水量等均影响重金属的吸附和降解, 则导致更多重金属元素在土壤中富集, 最终更大程度上对土壤造成危害。

##### 3.1.2. 重金属污染对物质转化的影响

土壤物质循环指土壤中的物质在生物和非生物之间反复交换和运转的过程, 是一种生物地球化学循环, 主要包括无机物质的有机质化和有机物质的无机质化。土壤物质循环对土壤的结构组成、营养成分均有显著的影响[33] [34], 最主要的是 C 循环、N 循环、P 循环。土壤受重金属污染后, 质地、透气性、孔隙度、pH 等均会发生变化, 进一步对物质循环产生不利影响, 从而物质循环会加重对土壤环境的恶化。因此, 土壤-重金属-物质循环是一个正反馈系统。

###### 1) 重金属污染对 C 循环的影响

碳是地球上最为重要的生命元素, 土壤 C 循环指有机质进入土壤, 并在土壤微生物(部分动物)的参与下分解和转化形成的碳循环过程[6]。因此, 土壤既是碳源, 也是碳汇。土壤中的 C 循环不仅影响土壤质量、陆地生态系统的生产力, 甚至影响整个地球系统的能量平衡和气候变化[35]。研究表明土壤的温度、含水量、质地、透气性、pH、土壤中的动物、微生物及相关植物显著影响土壤 C 循环。重金属污染会抑制种子萌发、降低植物生理活性, 使  $\text{CO}_2$  的固定减少; 重金属在一些低等土壤动物的体内富集, 会对其产生毒害作用使生理功能丧失甚至死亡, 土壤中低等动物通过呼吸作用产生的  $\text{CO}_2$  的含量减少。当 As、

Pb、Cu 和 Zn 的浓度范围分别在 8~22,992 mg·L<sup>-1</sup>、31~1845 mg·L<sup>-1</sup>、27~162 mg·L<sup>-1</sup>、81~4218 mg·L<sup>-1</sup> 时，碳矿化与重金属浓度呈极显著负相关[36]。微生物在碳循环中不仅能参与 CO<sub>2</sub> 的固定，也参与了 CO<sub>2</sub> 的再生，在整个循环过程发挥不可替代的作用[37]，但微生物具有高度敏感性，重金属可导致其数量、种类减少、群落结构发生改变。重金属对微生物的不利影响导致土壤中碳的同化、异化、矿化等循环过程的平衡破坏。如土壤中 CH<sub>4</sub> 的产生与厌氧条件、碳源、产 CH<sub>4</sub> 菌的数量相关，重金属污染使土壤通气性减弱导致氧气含量增多，土壤板结含水量降低，重金属对产 CH<sub>4</sub> 菌的毒害导致 CH<sub>4</sub> 菌的数量减少，这一系列因素最终会引起有机质向 CH<sub>4</sub> 转化的效率降低，碳循环受阻。除此之外，Ellen [38] 等研究发现，土壤呼吸作用和砷含量呈显著负相关，砷可抑制土壤呼吸，土壤中砷含量为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 时，土壤呼吸作用下降一半。

### 2) 重金属污染对 N 循环的影响

氮是农业生产中最重要的养分限制因子，是植物生长必须的营养元素，在土壤中以无机态氮和有机态氮存在。大气圈是植物的氮库，豆科作物的根瘤菌、非豆科植物的共生根瘤菌、土壤微生物可固定大气中的 N<sub>2</sub> 进入土壤，大气放电将 N<sub>2</sub> 氧化或人工固氮生产 NH<sub>3</sub>，均是土壤氮素的来源；进入土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 被微生物转化、高等植物固定、矿物固定成有机氮；土壤中原有的或进入土壤中有机氮被微生物分解转化为氨，这一过程就是土壤的 N 循环。土壤中氮的矿化、硝化、反硝化以及固定与土壤的温度、pH、含水量、通透性(O<sub>2</sub> 含量)、微生物以及有机碳紧密相关。重金属污染使土壤中可供微生物利用的有机碳化合物减少导致微生物的死亡，其毒害同样会使微生物的数量和群落发生变化。但是在 N 循环中微生物起推动作用[39]，如固氮过程中的根瘤菌、硝化作用中亚硝化细菌将 NH<sub>3</sub> 氧化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、反硝化作用中的反硝化细菌，因此重金属污染会影响土壤氮的矿化、硝化、反硝化作用以及固氮等多个化学过程[40]。Hassen [41] 等在研究中发现，氮的矿化作用与重金属的浓度呈负相关，土壤中 Zn、Cu、Cd 的累积，抑制土壤中氮的矿化作用。重金属含量超过 400 mg/kg 时，所有的重金属都会抑制氮的转化，且抑制顺序为：Cd > Cu > Zn > Pb，氮的转化被抑制后有机氮不能被分解，则植物生长所需的 N 元素供应不足，植物无法正常生长发育；受重金属影响氮的同化和重组作用要优于氮的矿化和氧化作用。土壤中有机态氮增多、无机氮缺乏或大量 N 以硝酸盐形式在土壤中富集，不仅会污染土壤和水体环境，而且不利植物生长，造成氮损失[42]。

### 3) 重金属污染对 P 循环的影响

磷素是作物必须的影响元素之一，自然土壤中的磷素取决于母质类型、风化程度和淋失状况，而农田土壤中的磷与有机质和施磷肥也相关。P 仅来源于地壳或人工施肥。在土壤中迁移包括一系列复杂的化学和生物化学反应，包括无机磷的生物固定、有机磷的矿化和难溶性磷的释放[43]。磷循环是典型沉积型循环，岩石、土壤风化释放出的磷素、施入农田的磷肥、土壤中凋落物通过还原者分解为可溶性磷酸盐，被植物吸收。植物体中 80% 的磷储存于籽粒中，会被移出农田生态系统[44]。红壤含有很高的 Fe<sup>3+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>，重金属污染后土壤酸性增强或减弱(偏碱)，磷在酸性条件下与 Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup> 常合成不溶态的 Fe(Al)-P 化合物；磷在碱性条件下与 Ca<sup>2+</sup> 常合成溶解性很小的 Ca-P 化合物，不能被植物吸收，以致农田土壤磷循环不完全、磷的有效性降低，造成土壤磷素的亏损[45]。王明娣[46] 等通过培养试验研究发现，在 Cd 浓度为 30 mg·kg<sup>-1</sup>，随着土壤磷含量的增加土壤对 Cd 的吸附量提高；邢维芹[10] 等研究发现，磷含量较低的土壤中，施用水溶性磷肥可降低土壤中 Pb 有效性。因此，磷可增加土壤对重金属的吸附能力，降低重金属的有效性[47]。土壤重金属污染破坏了土壤的 P 循环平衡，使土壤中磷素减少，植物生长营养不良；也导致了土壤对重金属的吸附减弱，重金属有效性增强，对土壤生物毒性作用增强并进一步破坏土壤中的物质循环。

### 3.2. 重金属污染对土壤生物的影响

土壤重金属污染是由于人类活动引起动态变化过程,随污染源的输入和植物吸收、流水等作用输出的变化而变化[38],对植物(农作物)、动物(人体)、微生物均会产生不良影响。

#### 3.2.1. 土壤重金属污染对植物(农作物的危害

植物(农作物)是重金属污染的直接受害者[39]。土壤和灌溉水源中的重金属通过质外体通道或共质体通道进入植物体,对植物生理、植物生化以及植物品质均会产生危害[9]。云南部分地区存在重金属污染隐患,粮食作物、蔬菜、经济作物、野生菌、中药材、茶叶等存在一定的重金属安全风险。云南水稻产量占全省粮食产量的25.0%左右,90%的人口以其为主食,但在红河州、个旧市、蒙自市和开远市大米产区砷污染超标[17]。胡斌等[48]对玉米、小麦、水稻、蚕豆籽粒中重金属元素含量进行测定发现蚕豆中Cu、Zn、Pb、Cd的含量超标。肖青青[16]等对云南个旧市某地区蔬菜调查表明,Pb含量超标率达80%,除花椰菜、甘蓝、萝卜中Pb含量未超过食品安全限量标准外,其余蔬菜均超标,且薄荷的Pb含量最高[13]。李江燕[15]通过对个旧市15种蔬菜中Pb、Zn、Cu、Cd含量进行测定,发现分别是食品安全限值的12.10、3.55、2.27、16.16倍。其中芋、菠菜、香菜、绿笋对重金属吸附能力较强,菠菜中Cd超标最严重、茼蒿中Pb超标最严重、绿笋中Zn超标情况最严重。茶叶是云南省具有代表性的产物之一,研究者对普洱市茶叶进行测定,发现随着环境中重金属污染加剧、外源性的施肥和大气沉降中引入的重金属及稀土元素,使茶叶中重金属、稀土等元素含量逐年增加,严重影响茶叶质量安全[49]。张玉洁等[50]的研究发现云南保山食用菌重金属Cd含量严重超标,部分样品中Pb、As含量超标;玉溪市和红河州等地的12个山药样品中重金属含量进行测定,其中有7个样品Pb含量超出限量标准2.44倍[51]。大量金属元素富集于植物根系中使细胞达饱和状态,不能正常吸收机体所需要营养元素。而导致体内缺乏所需的营养元素和营养物质,使其生理过程混乱、植物体的激素水平、植物酶系统、叶绿素合成及核酸代谢水平发生改变[52]。如Cu元素缺少,CO<sub>2</sub>同化和ATP合成速率降低导致植物生长缓慢、Mn元素不足会降低光合作用速率[53];重金属会抑制营养物质的分解延迟或阻止种子萌发、影响植株正常生长。如Cd元素会引起植物萎黄病,抑制损伤植物根尖,最终导致植物死亡[54],降低ATP酶活性[55];Pb元素抑制种子萌发[56],抑制幼苗初期生长[57],延缓根茎延长和展叶[58];植物体无法代谢或没有完全代谢的重金属不断在植物体富集,使作物及粮食品质降低,导致作物减产造成严重的经济下降,并且影响食用人体的健康。

#### 3.2.2. 对土壤动物的影响

动物和人体是土壤重金属最终受害者,也是最严重的受害者。影响途径包括直接和间接两种,直接途径是重金属通过动物和人体的皮肤、呼吸道、消化道等进入有机体内。重金属浮沉于空气中,人体和动物通过呼吸进入口腔和鼻腔,通过呼吸道到达肺,如Hg单质和化合物均是剧毒物质,在动物肺中吸收率为50%~100%、人体吸收率高达75%~85%,达到一定浓度造成对脑组织的损伤肝炎或血尿等[59];工业活动中产生的硫化镍或氧化镍等物质,不溶于水,排放到大气中呈颗粒状,吸入体内易患鼻腔癌及肺癌[60];农药喷洒、开采矿物质等均会导致重金属直接与皮肤接触,以扩散的方式表皮角质层进入真皮,渗入肌肉组织中,在有机体中富集,造成病变;直接接触含有镉粉尘的空气,镉在肝和肾内大量积累,造成呕吐、胸闷、咳嗽、肺功能异常等[61]。此外,重金属也通过食物链的间接途径传递[62],动物和人体食用被重金属污染的植物、农作物通过食物链使重金属在体内不断富集。引起广泛关注的“铅中毒”、“骨痛病”、“水俣病”等均由重金属的食物链传递造成。民以食为天,作物籽粒是人类消费量最大的[63],也是人类终生都在消费的食物[64],比如“镉大米”、“毒小麦”的影响范围很广;重金属还富集

在蔬菜和水果中，动物和人类食用，轻则引起组织和器官的病变、物质循环和新陈代谢紊乱，重则引起生命危险、机体癌变。

### 3.2.3. 土壤重金属污染对微生物的危害

土壤微生物是生活在土壤中的细菌、真菌、放线菌、藻类等微小生物的总和，在土壤中种类繁多、分布极广、数量大、繁殖迅速、个体小易变异[65]。土壤微生物是在土壤氧化、硝化、固氮、硫化、有机质的分解和养分转化发挥至关重要的作用[66]。可快速感知土壤环境变化，具有高度敏感性，因此被作为检测土壤质量和土壤重金属污染的生物指标[67]。较低浓度的重金属含量可能会刺激微生物酶活性，对生物代谢查收影响[68]，而高浓度的则表现为抑制作用[69]。Patel 等[11]研究发现，当重金属的浓度达到标准限定的土壤重金属环境容量的 2~3 倍，就会对微生物产生抑制作用，如当土壤中 Cu 和 Zn 浓度分别达到标准值的 2.5 倍时，会使微生物生物量下降 40%。重金属离子可以改变土壤生态系统，进而改变微生物生长环境，抑制微生物的代谢，使蛋白质变性，抑制细胞分裂或使细胞膜破裂，破坏细胞功能，导致微生物死亡、数量减少、群落结构发生变化[11]。

### 3.3. 重金属污染对生态系统功能的影响

土壤 - 蚯蚓 - 作物农田生态系统是指土壤中的生物和非生物通过能量转换和物质循环等相互作用构成的整体[70]。土壤 - 蚯蚓 - 作物农田生态系统是陆地生态的亚系统，其结构组成比较复杂，包括生产者农作物和微生物、消费者土壤动物、分解者微生物和土壤低等动物。农田生态系统是一个开放的生态系统，不仅受气候、地质、土壤、植物等自然因素的等影响，而且人类活动的干预和控制如灌溉、施肥、耕作对其生态功能有显著影响[71]。污水灌溉、化肥农药使用、大气沉降、岩石风化均会导致土壤产生重金属污染，而这种污染对土壤 - 蚯蚓 - 作物农田生态系统的破坏具有毁灭性。

蚯蚓在土壤中分布广泛，对环境的适应能力较强(极性环境如高温、强酸、强碱等除外)[72]，农田生态系统的工程师[73]。蚯蚓通过挖掘、运动可改变土壤的孔隙度，增大透气性和含水量，使土壤疏松，改善其物理结构；通过取食和排泄可促进有机物分解和土壤养分循环(C、N、P 循环)。这些均有利于促进植物生长以及微生物和其他土壤动物的活动。但蚯蚓对环境因子的变化敏感，农田土壤受重金属污染，使土壤的理化性质发生变化，对蚯蚓的生理生化以及生命活动均产生明显的不利影响。重金属污染导致蚯蚓体内自由基的含量显著提高，过多的氧自由基造成 DNA 片段损伤、染色体畸变，最终引起生物遗传物质的突变，干扰或抑制相关蛋白的合成，使生殖能力下降、子代变异数增加[74]。土壤酸碱度的改变后重金属在体内富集，使蚯蚓产生皮肤发红、流出黄色脓液、环带肿大、身体断裂、生殖溃烂等不同的急性毒性[75]；重金属浓度超过其生理耐受极限将导致蚯蚓个体死亡。重金属对蚯蚓身体、数量、种群的影响，间接导致蚯蚓挖掘、觅食、运动等能力减弱，对土壤改造能力降低。以蚯蚓为例的土壤小节肢动物在农田生态系统中，对能量转化及有机物质降解等发挥重要作用，直接影响着农田土壤健康[76]。重金属的毒害作用，使土壤动物的数量特别是优势类群的数量呈明显减少趋势[77]。据研究，Cu 污染程度的增加，导致土壤动物的种类数和个体密度急剧减少[78]；也有研究表明 Pb、As 和 Cd 污染均明显降低小节肢类土壤动物的数量[79]。重金属对农业生态系统的污染使消费者和分解者数量种类减少，土壤中有机体、动植物残体和生产者固定的能量大量积累，使生态系统的能量转化和物质循环速率降低。重金属对农作物和土壤微生物的毒害作用也较为显著，农作物作为生产者受重金属干扰后通过光合作用固定 CO<sub>2</sub> 的能力降低，导致生态系统初级生产力降低，整个生态系统能量转用处于低水平。土壤 - 蚯蚓 - 作物农田生态系统受重金属污染后物质循环和能量转化降低的同时，生态系统的平衡被破坏，对环境变化的抵抗能力下降，稳定性降低。

## 4. 结合云南省地方实际, 提出农田生态系统的重金属污染防治措施

云南省是一个农业大省, 农业的发展与云南经济发展息息相关。土壤的重金属污染不仅降低经济收入, 同时对人类健康产生极大的威胁。因此, 重金属污染的防治迫在眉睫, 必须从源头控制、因地种植、科学修复三个方面深入考虑, 全面治理。

### 4.1. 源头控制

云南省农田管理和农业耕种模式极为落后, 因此产生大量的污染。源头控制必须从施肥措施和灌溉方式两方面实施。

**施肥措施。**为增加作物产量, 化肥和农药的使用是较为有效的途径之一。选用国家允许的优质农药和化肥—高效、低毒、低重金属含量和低残留[80]。严格按照施用要求, 对施用时间、次数、数量进行规范化控制, 确保农药安全使用, 使效果达到最佳; 科学的施用有机肥, 对有机肥进行堆肥处理, 高温杀死有害微生物, 施于农田, 增产减污; 推广施用绿肥, 连年翻压绿肥可疏松土壤, 增强土壤团聚结构的稳定性, 使土壤环境更宜于土壤动物和微生物生活, 土壤动物和微生物的数量、种类增多, 提高土壤中脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性[81]; 农田中施用石灰石等土壤调理剂, 云南以红壤为主, 偏酸性, 含有大量的  $Al^{3+}$  和  $Fe^{3+}$ , 重金属污染后酸性增强, 不利于许多生物生长发育。施用石灰石, 石灰石是强碱弱酸盐, 呈碱性, 可以降低土壤酸度, 有效缓解 Al 和其他重金属毒害, 补充 Ca、Mg 营养元素, 改善土壤结构, 提高土壤的生物活性和养分循环能力, 提高作物产量和品质[82]。

**灌溉方式。**云南省大多农田、大棚等采用传统“大肥、大水”串灌、漫灌模式, 且使用的灌溉水为工业污水、城镇生活污水、养殖污水, 导致污染物在土壤中大量积累。采用地下水、处理达标水, 改装先进的灌溉设备如滴灌、喷灌, 节水且切断污染物流入农田。

### 4.2. 因地种植

对云南省各地区土壤的重金属污染状况根据《土壤环境监测技术规范》进行检测和统计, 把不同程度的重金属污染的土壤进行区域划分。根据不同重金属在不同植物体富集程度的差异和不同重金属在同一植物体不同部位富集的差异对重金属污染土壤因地制宜, 筛选出受其迫害最小的作物种植。对重金属污染严重的土壤, 禁止农作物的种植, 种植超量积累植物。如小腊叶片对 Pb 和 Cr 的富集能力极强[7]、蜈蚣草可富集大量 Sn [12]等, 植物富集减少土壤中重金属的含量, 并对植物冶金, 可实现重金属的回收利用。对重金属污染较为严重的土壤, 种植经济作物和能源作物, 避免重金属通过食物对人体健康造成危害, 且增加经济收入, 如种植棉花、空麻等能源作物和观赏性花卉。或者选择对土壤重金属吸附能力弱的作物进行种植, 如 Cd 污染严重地区, 选择种植低 Cd 积累作物如油菜、花生和甘蔗等。轻度污染地区, 根据重金属的污染类型, 筛选最佳的种植作物, 尽量避免重金属在食用部位的积累。如 Cd 在小白菜中是根 > 地上部分、Cr 在作物中是根 > 茎叶 > 籽粒、Pb 水稻中在根部集中 90%~98%。同时, 采取相应措施, 使重金属在作物中的富集降至最低。如淹水处理可降低稻米 Cd 含量, 与常规水分处理相比, 淹水条件下稻米 Cd 含量下降 3.6%~26.3% [5]。对于健康土壤, 科学施肥、合理规划, 高效种植食用作物如小麦、水稻、蔬菜等。

### 4.3. 科学修复

重金属对土壤污染面积大、周期长, 对土壤的修复应该科学、有效, 严禁带入新的污染源进入土壤。因此, 对重金属严重超标土壤采用客土或翻土降低土壤中的重金属浓度, 修复模式以生物修复和生态修复为主。生物修复法利用动物、植物和微生物来吸收分解重金属, 从而慢慢降低在土壤中的含量。种植



超累积植物,使重金属从土壤中迁移;土壤动物(如蛆类、蚯蚓等)、土壤微生物吸收、降解和转移重金属,减少土壤中的重金属含量。生态修复是通过科学手段,减少重金属在土壤的含量,降低对生物的危害,增加农田生态系统的抵抗力和稳定性。加土壤改良剂,降低重金属元素在土壤中的活性和生物有效性,从而阻断重金属元素在生物链系统的传递和危害[83];土壤中加入生物炭,其具较大表面积和表面官能团等可固定重金属,减小重金属在生物体的富集、改良土壤性质、提高土壤肥力。有的土壤含有易挥发的Hg、As等重金属物质,经高温处理后,使其变为气态挥发,降低土壤当中有害重金属物质的比重。

## 5. 总结与展望

云南省矿产资源丰富,但矿产资源的开发利用较为落后,导致重金属元素的浪费和在土壤中的积累;以农业为主,大量的不合理地施用化肥、农药,传统的污水灌溉模式;工业和生活废气、污水及废渣未处理排放等因素导致云南省土壤重金属状况极其严峻。土壤重金属污染对植物、土壤动物、微生物、土壤物质循环和生态系统产生严重危害,而重金属沿食物链传递,最终富集于人类,引起人体健康危机。因此,对重金属的研究应以治理为主,采用生物措施和生态措施,解决土壤环境问题,使土壤恢复健康状态,还生物一片净土。

## 基金项目

本文由国家自然科学基金项目(31660169)、云南省科技计划重点研发项目(2018BC001)、云南大学服务云南行动计划项目(2016MS18),云南大学大学生创新创业训练计划项目(201810673118)资助。

## 参考文献

- [1] 王焕校. 污染生态学[M]. 武汉: 高等教育出版社, 2001.
- [2] 李梦红. 农田土壤重金属污染状况与评价[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [3] 高翔云, 汤志云, 李建和, 等. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. 江苏环境科技, 2006, 19(2): 52-55.
- [4] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 江洪. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.
- [5] 李小丽. 乐安河洪泛区重金属在水稻作物中分布特征及评价[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌工程学院, 2017.
- [6] Markowicz, A., Plaza, G. and Piotrowskaseget, Z. (2016) Activity and Functional Diversity of Microbial Communities in Long-Term Hydrocarbon and Heavy Metal Contaminated Soils. *Archives of Environmental Protection*, **42**, 3-11. <https://doi.org/10.1515/aep-2016-0041>
- [7] 胡星明, 袁新松, 王丽平, 华攀玉, 张天澍. 磷肥和稻草对土壤重金属形态、微生物活性和植物有效性的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(1): 77-82.
- [8] 刘白林. 甘肃白银东大沟流域农田土壤重金属污染现状及其在土壤-作物-人体系统中的迁移转化规律[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [9] Wu, Q., Leung, J.Y.S., Geng, X., Chen, S., Huang, X., Li, H., Huang, Z., Zhu, L., Chen, J. and Lu, Y. (2015) Heavy Metal Contamination of Soil and Water in the Vicinity of an Abandoned e-Waste Recycling Site: Implications for Dissemination of Heavy Metals. *Science of the Total Environment*, **506-507**, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
- [10] 邢维芹, 苏崇, 李立平, 张建, 熊慧玲. 氯对磷酸盐稳定土壤铅的影响研究[J]. 土壤通报, 2018(4): 980-984.
- [11] Patel, K., Sharma, R., Dahariya, N., et al. (2016) Black Carbon and Heavy Metal Contamination of Soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, **25**, 2. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61062>
- [12] 沈锋. 典型铅锌冶炼区农田土壤重金属污染及植物化学联合修复研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [13] 陶亮, 张乃明. 云南部分地区农产品重金属污染现状与分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20): 83-89.
- [14] 李春华. 云南中甸县雪鸡坪矿区土壤重金属污染评价[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.

- [15] 李江燕, 杨永珠, 李志林, 陈金梦, 江映翔. 云南个旧大屯镇蔬菜重金属污染现状及健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2): 91-96.
- [16] 肖青青, 王宏镔, 赵宾, 等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 271-281.
- [17] 严红梅, 杜丽娟, 和丽忠, 魏茂琼, 尹本林, 樊建麟, 汪禄祥. 云南省不同产地大米重金属砷污染风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 3654-3660.
- [18] 郜雅静, 李建华, 靳东升, 等. 重金属污染土壤的微生物修复技术探讨[J]. 山西农业科学, 2018, 46(1): 150-154.
- [19] 周乐福. 云南土壤分布的特点及地带性规律[J]. 山地研究, 1983(4): 31-38.
- [20] 毕婷婷, 钱琪所. 云南省重金属污染源控制途径与对策[J]. 南方农机, 2015, 46(8): 61-62.
- [21] Miao, R.Q., Yan, Y.F., Bai, Y., *et al.* (2015) Assessment of Heavy Metal Contamination of Soil in Kunming. *Advanced Materials Research*, **1092-1093**, 774-779. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1092-1093.774>
- [22] Bei, W., Yang, Y.U., Dongmei, L.U., *et al.* (2016) Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Urban River in Yuxi, Yunnan. *Chinese Journal of Ecology*, **35**, 463-469.
- [23] 杨牧青, 康宏宇, 刘源, 林健, 康日峰, 张乃明. 云南会泽某铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征与评价[J]. 山东农业科学, 2017, 49(04): 72-77.
- [24] 王金林, 武广云, 刘友林, 宗晓波, 闻禄, 彭发元, 田永. 云南省化肥施用现状及减量增效的途径研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(03): 26-36.
- [25] 丁秀琴, 应淑兰. 畜禽养殖场环境污染现状和治理技术[J]. 农民致富之友, 2019(5): 54.
- [26] 任永富. 养殖场环境污染问题与治理措施初探[J]. 当代畜牧, 2018(18): 47-48. <https://doi.org/10.1007/s15027-018-1316-0>
- [27] 高秀丽. 重金属污染及污染秸秆施用对土壤质量影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
- [28] Nagajyoti, P., Lee, K. and Sreekanth, T. (2010) Heavy Metals Occurrence and Toxicity for Plants: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **8**, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- [29] 李泽渊, 鲁广秋, 王淑凡, 张殿叶, 鞠正雄, 尹永伟. 我国大气可吸入颗粒物中重金属污染特征研究进展[J]. 当代化工研究, 2018(6): 127-128.
- [30] 刘润梅, 范茂攀, 付云章, 等. 云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 753-760.
- [31] 柴铁凡, 张灿, 孔令阳, 赵成. 云南错恰湖两百年来气候环境变化与重金属污染[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1732-1744. <https://doi.org/10.1007/s40278-018-55486-7>
- [32] Yang, Q., *et al.* (2018) A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Industrial and Agricultural Regions in China: Pollution and Risk Assessment. *Science of the Total Environment*, **642**, 690-700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068>
- [33] 毛雪飞, 吴羽晨, 张家洋. 重金属污染对土壤微生物及土壤酶活性影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 7-12.
- [34] 陈穗玲, 李锦文, 邓红梅. 福建沿海地区农田土壤理化性质与重金属含量的关系[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(13): 3025-3029.
- [35] 程淑兰, 方华军, 徐梦, 耿静, 何舜, 于光夏, 曹子铖. 氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J]. 生态学报, 2018(23): 1-10.
- [36] Usman, A.R., Almaroai, Y.A., Ahmad, M., *et al.* (2013) Toxicity of Synthetic Chelators and Metal Availability in Poultry Manure Amended Cd Pb and As Contaminated Agricultural Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **262**, 1022-1030. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.032>
- [37] 王淑芳, 胡连生, 纪有海, 等. 重金属污染黑土中固氮菌及反硝化菌作用强度的测定[J]. 应用生态学报 1991(2): 174-179.
- [38] Cheng, X., Danek, T., Drozdova, J., *et al.* (2018) Soil Heavy Metal Pollution and Risk Assessment Associated with the Zn-Pb Mining Region in Yunnan, Southwest China. *Environmental Monitoring & Assessment*, **190**, 194. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6574-x>
- [39] Xu, J.M., Tang, C. and Chen, Z.L. (2006) Chemical Composition Controls Residue Decomposition in Soils Differing in Initial pH. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**, 544-552. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.006>
- [40] 刘沙沙, 付建平, 蔡信德, 周建民, 党志, 朱润良. 重金属污染对土壤微生物生态特征的影响研究进展[J]. 生态

环境学报, 2018, 27(6): 1173-1178.

- [41] Hassen, A., Jedidi, N., Cherf, M., *et al.* (1998) Mineralization of Nitrogen in a Clayey Loamy Soil Amended with Organic Wastes Enriched with Zn, Cu and Cd. *Bioresource Technology*, **64**, 39-45. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00153-3)
- [42] 黎静, 孙志高, 孙万龙, 田莉萍, 陈冰冰. 黄河尾间河段和河口区沉积物中重金属污染及潜在生态毒性风险评价[J]. 湿地科学, 2018, 16(03): 407-416.
- [43] 王秀芝. 浅论农田物质循环与养分平衡的关系[J]. 安徽农学通报, 2008(19): 169.
- [44] 于姣姣, 殷丹阳, 李莹, 周垂帆. 生物炭对土壤磷素循环影响机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 17-21.
- [45] 宋阳, 于晓菲, 邹元春, 王国平, 张琳琳. 冻融作用对土壤碳、氮、磷循环的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(2): 78-90.
- [46] 王明娣, 刘芳, 刘世亮, 等. 不同磷含量和秸秆添加量对褐土镉吸附解吸的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 803-808.
- [47] 刘世亮, 陈娇君, 王明娣, 刘芳, 等. 磷含量和秸秆添加量对褐土锌吸附—解吸的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 369-373.
- [48] 胡斌, 段昌群, 刘醒华. 云南寻定几种农作物籽粒中重金属的比较研究[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(6): 45-47. <https://doi.org/10.1023/A:1022886428482>
- [49] 瞿燕, 高原, 杨婉秋. 云南省普洱茶茶叶中重金属及稀土总量分析[J]. 昆明学院学报, 2015, 37(6): 34-38.
- [50] 普秋榕, 王红漫. 云南省出口食用菌产业发展研究——以食品安全监管为视角[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(16): 4193-4199.
- [51] 张国云, 郭晋, 周新惟, 毕生斌. 云南省某金矿下游稻田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(11): 174-178.
- [52] 张海燕. 大蒜重金属抗性基因的克隆及其功能分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [53] Burton, N.C. and Guilarte, T.R. (2009) Manganese Neurotoxicity: Lessons Learned from Longitudinal Studies in Nonhuman Primates. *Environmental Health Perspectives*, **117**, 325-332. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800035>
- [54] Facchinelli, A., Sacchi, E. and Mallen, L. (2001) Multivariate Statistical and GIS-Based Approach to Identify Heavy Metal Sources in Soils. *Environmental Pollution*, **14**, 313-324. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00243-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00243-8)
- [55] Huang, Y., Deng, M., Wu, S., *et al.* (2018) A Modified Receptor Model for Source Apportionment of Heavy Metal Pollution in Soil. *Journal of Hazardous Materials*, S0304389418303455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.006>
- [56] 周东美, 王玉军, 仓龙, 郝秀珍, 陈怀满. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(10): 1-8.
- [57] Yan, F., Schubert, S. and Mengel, K. (1996) Soil pH Changes during Legume Growth and Application of Plant Material. *Biology and Fertility of Soils*, **23**, 236-242. <https://doi.org/10.1007/s003740050166>
- [58] Marschner, B. and Noble, A.D. (2000) Chemical and Biological Processes Leading to the Neutralization of Acidity in Soil Incubated with Litter Materials. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**, 805-813. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00209-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00209-6)
- [59] 曹鑫. 湖南省耕地重金属污染治理研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [60] 刘晓庚, 张巧嘉, 袁建, 等. 谷物中重金属离子迁移及其污染消控研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2016, 38(5): 7-12.
- [61] 胡文. 土壤-植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [62] Naseri, M., Vazirzadeh, A., Kazemi, R. and Zaheri, F. (2015) Concentration of Some Heavy Metals in Rice Types Available in Shiraz Market and Human Health Risk Assessment. *Food Chemistry*, **175**, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.109>
- [63] Caussy, D., Gochfeld, M., Gurzau, E., Neagu, C. and Ruedel, H. (2003) Lessons from Case Studies of Metals: Investigating Exposure, Bioavailability, and Risk. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **56**, 45-51. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00049-6)
- [64] Nadal, M., Schuhmacher, M. and Domingo, J. (2004) Metal Pollution N of Soils and Vegetation in an Area with Petrochemical Industry. *Science of the Total Environment*, **321**, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.08.029>

- [65] 常学秀, 张韩波, 袁嘉丽. 环境污染微生物学[M]. 武汉: 高等教育出版社, 2006.
- [66] 侯志研, 杜桂娟, 孙占祥, 等. 玉米秸秆还田培肥效果的研究[J]. 杂粮物, 2004, 24(3): 166-167.
- [67] 陈静, 刘荣辉, 陈岩贲, 王炜, 温勇, 刘晓文, 周洪波. 重金属污染对土壤微生物生态的影响[J]. 生命科学, 2018, 30(06): 667-672.
- [68] 李金辉, 吴汉福, 翁贵英, 陈定梅, 王绪英, 赵由才. 贵州六盘水城市污泥中重金属的形态特征及其农用生态风险评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 304-308.
- [69] Yang, G., Pei, Z. and Liang, M. (2010) Assessment of Effects of Heavy Metals Combined Pollution on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure: Modified Ecological Dose-Response Mode Land PCRRAPD. *Environmental Earth Sciences*, **60**, 603-612. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0200-8>
- [70] 陈云峰, 唐政, 李慧. 基于土壤食物网的生态系统复杂性-稳定性关系研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2173-2186.
- [71] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 1-9.
- [72] 龚鹏博, 李健雄, 郭明昉, 等. 蚯蚓生态毒理试验现状与发展趋势[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1297-1302.
- [73] 曹佳, 王冲, 皇彦, 等. 蚯蚓对土壤微生物及生物肥力的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1579-1586.
- [74] 乔玉辉, 曹志平, 王宝清, 等. 不同培肥措施对低肥力土壤生态系统蚯蚓种群数量的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 700-705.
- [75] 李勛之. 城市土壤重金属与环草隆复合污染对蚯蚓的生态效应研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [76] 张秀, 尚艺婕, 王海波, 史静. 重金属污染条件下生物质炭对土壤微生物群落结构及多样性影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(25): 147-152.
- [77] 黄红英, 刘静华, 王福刚, 李栋. 重金属污染土壤不同修复处理后的土壤动物群落结构特征[J]. 中国农学通报, 2017, 33(21): 108-113.
- [78] 任若凡, 赵腾飞, 王晴晴, 马友华, 张云华. 重金属污染对土壤动物群落结构的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(10): 90-94.
- [79] 李孝刚, 丁昌峰, 王兴祥. 重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6198-6204.
- [80] 庄海峰. 落叶松和水曲柳人工林土壤动物群落生态以及施氮肥的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [81] 杨珂. 重庆山地园艺生态系统氮、磷循环及景观生态流分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [82] 汤海涛, 李卫东, 孙玉桃, 等. 不同叶面肥对轻度重金属污染稻田水稻重金属积累调控效果研究[J]. 湖南农业科学, 2013(1): 40-44.
- [83] 潘胜强, 王铎, 吴山, 杨国义. 土壤理化性质对重金属污染土壤改良的影响分析[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 600-603, 633.

### 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: 2164-5507, 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: [hjas@hanspub.org](mailto:hjas@hanspub.org)