

微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用研究进展

寇志安, 张婉霞, 张梓坤, 王馨芳, 刘璐, 田永强

兰州交通大学生物与制药工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年4月1日; 录用日期: 2023年5月1日; 发布日期: 2023年5月8日

摘要

重金属对土壤的理化性质、土壤生态特性和微生物群落结构产生明显的不良影响, 也严重影响了土壤生态环境和功能的稳定, 同时, 重金属离子随着食物链流动进入人体, 极大地危害了人体健康, 因此探究修复重金属污染土壤的技术显得尤为重要。本文简介了土壤重金属污染现状、污染的原因以及土壤重金属的特点及其危害, 重点介绍了微生物修复土壤重金属的技术及其修复机理。旨在解决土壤重金属污染的问题, 为土壤重金属污染治理寻求更经济、高效的方法。

关键词

微生物技术, 重金属污染, 修复

Application of Microbial Technology in Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil

Zhi'an Kou, Wanxia Zhang, Zikun Zhang, Xinfang Wang, Lu Liu, Yongqiang Tian

School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 1st, 2023; accepted: May 1st, 2023; published: May 8th, 2023

Abstract

Heavy metals have obvious adverse effects on soil physical and chemical properties, soil ecological characteristics and microbial community structure, and also seriously affect the stability of soil ecological environment and function. At the same time, heavy metal ions flow into the human body

文章引用: 寇志安, 张婉霞, 张梓坤, 王馨芳, 刘璐, 田永强. 微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用研究进展[J]. 世界生态学, 2023, 12(2): 138-145. DOI: 10.12677/ije.2023.122016

along with the food chain, which greatly endangers human health. Therefore, it is particularly important to explore the remediation technology of heavy metal contaminated soil. In this paper, the current situation of heavy metal pollution in soil, the causes of pollution, the characteristics and hazards of heavy metals in soil were briefly introduced, and the technology and mechanism of microbial remediation of heavy metals in soil were emphatically introduced. The purpose is to solve the problem of soil heavy metal pollution, and to seek more economic and efficient methods for soil heavy metal pollution control.

Keywords

Microbial Technology, Heavy Metal Pollution, Remediation

Copyright © 2023 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

随着工业化进程的不断加快,土壤污染问题不容乐观。尤其是重金属造成的土壤污染问题。根据 2014 年环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》中的数据显示,目前中国土壤重金属污染现象尤为严重,其中受到汞污染和镉污染最为严重,除此之外,土壤受到污染的总点位的整体超标率高达 17.3%。其中,铅、砷、硒、铬、铜等重金属对土壤的污染也是相当严重的。整个中国的耕地面积大概有 1.3 万公顷受到了镉污染,3.2 万公顷的耕地受到汞污染。由此可见,对重金属污染土壤进行控制以及减轻其对环境的污染是非常必要的一项工作。

2. 土壤重金属污染现状

重金属污染[1]是指由密度在 5 以上的金属或其化合物造成的环境污染,而土壤重金属污染指的是土壤中的各种重金属元素超标,超过土壤能够承受的极限值,重金属超标对于土壤的自身循环能力有很大影响。据估算,全世界每年排放到环境中的镉(Cd)约 1.0×10^6 t,汞(Hg)约 1500 t,铅(Pb)约 5×10^6 t,铜(Cu)约 3.4×10^6 t,镍(Ni)约 1.0×10^6 t,土壤重金属[2]污染已是世界各国共同面临的主要环境问题之一。在欧洲,有数百万公顷土壤受到重金属污染,日本受 Cd、Cu、As 等重金属污染的土壤面积达到 7.3×10^4 hm^2 。生态环境部全国土壤污染状况调查显示,我国耕地土壤[3] [4] [5]污染点位超标率达 19.4%,主要污染物为重金属,其中镉污染点位超标率达到 7.0%,其次分别为镍、砷、铜、汞、铅、铬等;而生态环境部对 30 万 hm^2 保护区土壤监测结果显示,土壤中重金属超标率达到 12.1%;我国多数城市近郊农田都受到不同程度重金属污染。中国台湾地区按照 4 km \times 4 km 网格法对全台湾 116 万 hm^2 农用地土壤[6]污染监测的结果显示,近 10.24% 点位的农用地土壤污染物超标,主要污染物为重金属 Cd、Pb。值得注意的是,随着工业化进程的不断加快,重金属污染土壤的问题也日益突出。基于此,本文综述了土壤重金属污染的危害以及修复措施,着重介绍了微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用。

2.1. 土壤重金属污染原因

土壤重金属污染的原因[7]是多方面的,总的来讲,可以分为人为原因导致的污染和自然原因所引起的土壤重金属污染。影响土壤中重金属元素含量变化的主要因素有两个。第一,由于自然环境[8]的影响,成土母质在风化过程中会自然积累一些重金属元素,在风和水的的作用下,经过物理变化和化学变化,土

壤中的重金属元素含量会发生改变。第二，人类活动[9]导致土壤中的重金属含量逐渐增加，尤其是随着工业发展速度逐渐加快，其对土壤带来的危害越来越严重。例如，化学工业制造、金属矿山开采、日常生活废水排放以及农业生产中的农药和化肥的不规范使用等，导致土壤的重金属含量逐渐增加。

2.2. 土壤重金属污染特点

隐蔽性：土壤污染与其他环境污染不同，具有一定的隐蔽性[10] [11]，而大气污染、水污染等都十分明显，一旦出现污染会立即表现出来。土壤污染的呈现速度缓慢，凭肉眼很难观察到土壤污染的情况以及程度，人们必须通过实验室检测才能知晓土壤污染情况。

不可逆性：在土壤污染中最主要的就是重金属污染，重金属对土壤的污染是一个不可逆[12]的过程，受到污染的土壤需要花费很长时间才能将重金属元素消解。

长期性：在土壤被重金属元素污染的过程中，这些污染元素一般都呈现垂直递减分布，很难从根本上进行治理。随着时间的推移，土壤的重金属污染深度[13]会逐渐加深，影响更加恶劣。

难治理性：与大气污染和水污染相比，土壤污染的治理难度[14]更大。通常，人们需要通过物理手段、化学手段和生物手段的综合治理才能达到比较好的治理效果。

2.3. 土壤重金属污染危害

2.3.1. 对植物的危害

土壤中的重金属会对植物[15]产生一定的毒害作用，引起株高、主根长度、叶面积等一系列生理特征的改变。主要是因为吸收到植物体内的重金属能诱导其体内产生某些对酶和代谢具有毒害作用和不利影响的物质，如 H_2O_2 、 C_2H_2 等类物质。重金属的胁迫[16]有时会引起大量营养的缺乏和酶有效性的降低，较高浓度的重金属含量有抑制植物体对 Ca 、 Mg 等矿物质元素的吸收和转运的能力。经过 Cd 处理的小麦幼苗[17]叶和根的生长明显受到抑制，其茎和叶中富集的 Cd 量增加， Fe 、 Mg 、 Ca 和 K 等营养元素的含量下降。

2.3.2. 对土壤动物的危害

各种重金属元素在土壤中的富集，对土壤动物的生存繁衍带来了严重威胁。土壤重金属含量对蚯蚓[18]、线虫等无脊椎动物数目、丰富度、生物数量和群体构成等有直接影响。经研究[19]发现沙质平原土壤蚯蚓数量明显高于受重金属污染的疏浚底泥土壤的蚯蚓数。

2.3.3. 对土壤酶的危害

土壤酶[20]是一种生物催化剂，是反映土壤肥力的一个敏感性生物指标，更能直接反映土壤生物化学过程的强度和方向。由于土壤酶活性易受土壤物理性质、化学性质和生物活性的影响，环境污染对土壤酶活性影响较大，可在一定程度上灵敏地反映出土壤的环境状况。

2.3.4. 对人体健康的危害

土壤尤其是表层土壤中的重金属极易进入人体，直接对人体健康[21]造成威胁，当人体摄入或吸入过量的 Cd [22]，会引起身体各器官一系列的病变，可引发以骨矿密度降低和骨折发生几率增加为特征的骨效应。 Pb [23]能导致包括人类在内的各种生物的生殖功能下降、机体免疫力降低，当人体内血铅质量比达到 $600 \mu\text{g/g}$ ~ $800 \mu\text{g/g}$ 时会表现为头晕、头疼、记忆力减退和腹疼等一系列症状。长期食用含 Cr [24]的食物，人体会出现不同程度的皮肤和呼吸道系统病变，并且出现溃疡和炎症。长期吸入 Ni [25]可以引起鼻癌、肺癌，并且可以引起接触性皮炎、肺炎等病症。当金属 Hg [26]进入人体后，可与体内酶或蛋白质中许多带负电的基团如巯基等结合，使能量生成、蛋白质和核酸合成受到影响，从而影响细胞正常的功

能和生长。研究得出, 癌的产生和发展与土壤环境中 Sn [27]元素质量分数有关, 居住在 Sn 元素质量分数高的地区的人群癌症死亡率较高。可见, 土壤重金属污染对人体产生极大的危害。

3. 土壤重金属污染治理措施

目前对于土壤重金属污染的修复技术主要有物理修复、化学修复以及微生物修复。目前, 主要的土壤重金属污染修复技术有物理修复、化学修复和生物修复。其中物理修复[28]的方法有客土工程、电修复法、电热修复、热处理法和土壤淋洗法; 化学修复[29] [30]的方法有土壤稳定化法、光催化降解法和改良法; 微生物修复[31]的方法有植物修复、动物修复和微生物修复。对比传统的物理、化学修复技术, 运用生物修复技术[32]对重金属污染的土壤进行修复, 生成的产物不会破坏植物的生长环境, 同时生物修复技术还具有成本低、效率高、不会产生二次污染、操作简单和适用范围广等特点。而对比微生物修复技术和动植物修复技术, 微生物具有个体微小、比表面积大、繁殖快、代谢能力强、种类多、分布广、适应性强、容易培养等特点。因此近年来微生物修复技术成为了研究热点。

3.1. 微生物修复技术

微生物修复技术是利用微生物代谢功能对土壤中的重金属污染物进行生物吸附和富集、氧化还原和溶解沉淀, 从而固定重金属离子, 或将有毒重金属离子转化为无毒或低毒价态。微生物修复技术中应用的微生物包括两大类: 土著微生物和外源微生物。利用土著微生物进行污染修复时, 主要依靠改善外界环境条件(如添加营养元素、改变环境介质理化性质等)来刺激土著微生物, 从而达到修复效果。另一种则是利用外源微生物进行污染修复, 则是通过接种外源具有强降解性能的微生物达到修复重金属污染的效果。细菌、真菌、藻类和植物等具有修复重金属污染的能力, 对重金属污染的耐性不同, 一般认为, 放线菌 < 细菌 < 真菌[33]。其中细菌和真菌的修复能力较强。利用微生物修复技术可以使重金属污染场地恢复到未污染前的状态且不会对环境产生有害影响。下面对具有重金属污染修复能力的微生物进行了概述。

3.1.1. 真菌

丛枝菌根真菌[34]是一类广泛分布于土壤生态系统中的有益微生物, 能与 90%以上的陆生高等植物形成共生体。研究发现[35], AM 真菌能够增强宿主植物对土壤中重金属胁迫的耐受性。其真菌细胞壁组分如几丁质等对重金属的钝化固定, 真菌体内有机酸根离子或无机酸根离子与重金属形成沉淀等作用可使土壤中的重金属固化, 移动性减弱, 从而有效降低重金属对宿主植物的毒害性。此外, 研究还发现了许多真菌可以吸附土壤中的重金属离子, 如丛菌根真菌、黑曲霉、类酵母、木霉属、出芽短梗霉、球囊霉、腐木真菌、树脂枝孢霉与青霉属等。相信随着研究的深入以及相关技术的发展, 将会有更多的具有修复重金属污染能力的潜在真菌被发现, 并且应用到重金属污染土壤的工作中来。

3.1.2. 细菌

目前, 研究较多的耐重金属污染细菌[36]主要有链霉菌、芽孢杆菌、球菌等。余雪梅[37]等人在实验过程中发现一种对重金属镉具有较高耐受性的菌株, 经鉴定为一株高耐镉芽孢杆菌 PFYN01, 该菌株可作为重金属 Cd^{2+} 的微生物吸附剂, 它具有繁殖速度快、处理时间短、成本低、绿色环保等优点, 通过实验发现菌株在 pH 值为 5~7 之间, 装液量为 90 mL, 最适温度为 30℃达到生长最佳; 在 50 mg/L Cd^{2+} 液体培养基中生长状况良好, Cd^{2+} 浓度在液体培养基中超过 100 mg/L 时菌株生长逐渐受到一定程度抑制; 但在固体培养基中 Cd^{2+} 浓度高达 3900 mg/L 时依然能够生长, 表示菌株对 Cd^{2+} 有很强的耐受性, 对其它重金属耐受性为: $Cd > V > Zn > Pb > Cu$, 多种重金属耐受性实验推测该菌株对重金属污染修复有很大的应用潜力。其他相关研究也发现了多种细菌具有重金属污染修复能力。

3.1.3. 藻类

陶海平等人[38]利用活性藻类(蛋白核小球藻、细长聚球藻、铜绿微囊藻、水华鱼腥藻和斜生栅藻)吸附重金属为主体,研究发现5种藻类对 Cr^{6+} 的耐受性强弱顺序为:铜绿微囊藻 > 水华鱼腥藻 > 细长聚球藻 > 斜生栅藻 > 蛋白核小球藻。水华鱼腥藻在锌离子浓度为 10.0mg/L 时锌离子去除率 R 达到最大值 59.20%;斜生栅藻在铜离子浓度为 3.0 mg/L 时铜离子去除率 R 达到最大值 62.50%;水华鱼腥藻在铬离子浓度为 1.0 mg/L 时铬离子去除率 R 为最大值 32.87%。蛋白核小球藻对 Cu^{2+} 有一定的吸附作用,吸附速度较快。且吸附的初期是简单的一级反应, Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cr(VI) 重金属离子浓度随时间的变化规律是不相同的。5种藻类在不同的 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cr(VI) 等重金属质量浓度中,其吸附效率规律也不尽相同。5种藻类对 Zn^{2+} 的去除率 R 随 Zn^{2+} 质量浓度的变化规律有类似之处,即随着 Zn^{2+} 质量浓度的增加,5种藻类的 Zn^{2+} 去除率 R 先下降然后上升最后又下降;其他相关研究[39] [40]也证实了藻类对金属离子具有修复重金属污染能力。

3.2. 微生物修复机理

微生物修复[41]重金属污染土壤大多都是通过生物转化作用、生物吸附与富集作用、生物溶解与矿化作用等方式来将重金属离子降解或进行固定结合,从而降低重金属离子在土壤中的浓度,以达到修复的目的。

3.2.1. 生物转化作用

生物转化是指[42]微生物通过生物氧化还原、甲基化或去甲基化等与重金属反应改变重金属价态或生成金属化合物,从而降低重金属毒性的过程。在重金属离子的生物修复过程中,微生物主要通过建立完善的生物系统,以主动转运方式通过原核或真核生物的生物膜进入菌体,将金属离子还原成更稳定的价态,且易通过酶促反应(直接还原)或非酶促反应(间接还原)形成不稳定的中间价态。

3.2.2. 生物吸附

生物吸附(表面络合、离子交换、静电吸附、氧化还原、微沉积等):例如,微生物自身的生长代谢可对重金属形态和价态进行转化,从而使其变成不易挥发或不易恢复的低毒形式以及微生物细胞及其分泌物的吸附和作用,以降低重金属的流动性和有效性。生物吸附是微生物与金属之间发生的一种快速、可逆的过程。重金属离子的生物吸附过程[43] [44]分为2个阶段:第一阶段微生物表面吸附重金属离子,即重金属离子与微生物表面官能团发生螯合和络合等反应,不消耗能量。第二阶段微生物主动吸附,包括在微生物表面的传送以及在微生物内部的累积,消耗能量。重金属离子生物吸附的机制有阴离子生物吸附、生物吸附与还原相结合、阳离子与阴离子生物吸附、阴离子生物吸附与还原4种模式。值得注意的是,不论微生物的细胞是死细胞还是活细胞,都可以完成生物吸附。因此,生物吸附被认为是一种经济高效的方法。

3.2.3. 生物矿化

生物矿化[45]是指由生物体通过生物大分子的调控生成无机矿物的过程。与一般矿化最大不同在于有生物大分子生物体代谢、细胞、有机基质的参与。是生物形成矿物的作用,是生物在特定的部位,在一定的物理化学条件下,在生物有机物质的控制或影响下,将溶液中的离子转变为固相矿物的作用。碳酸盐矿化菌和磷酸盐矿化菌是生物矿化作用研究中最常见的两类菌。磷酸盐矿化菌磷[46]首先通过分泌磷酸酶或植酸酶释放出化合物中的磷酸根,同时通过代谢活动产生一些小分子有机物,当遇到重金属离子时,菌体细胞有序吸附这些重金属离子,菌体细胞-重金属复合物再和磷酸根离子结合,在小分子有机物的调控下以菌体细胞为晶核不断生长,从而形成晶体结构的矿物,这样,微生物就完成了对重金属离子

的矿化作用。有毒金属可通过生物吸附积聚在微生物细胞表面,这可能导致生物矿物质成核并随后沉淀。一些金属可以通过主动转运或扩散穿过细胞膜而在细胞内积累,并定位在液泡或其他细胞器室内,和/或被硫化物,金属结合蛋白/肽和其他大分子隔离。有毒金属也会对真菌[47]的繁殖和活性产生重大影响。尽管许多金属物种具有潜在的毒性,但许多真菌仍会在受污染的条件下蓬勃发展,尽管物种组成可能会发生变化。所涉及的主要生存机制可以解释为由各种耐受性和抗性机制导致的有毒金属迁移率的变化。真菌具有影响金属毒性和迁移率的许多机制或特性,包括金属结合蛋白的产生,有机和无机沉淀,主动转运和细胞内分解,而细胞壁和相关色素以及复合物的形成可能与配位有关氧给体原子和质子释放的金属离子的变化。金属固定化似乎与生物修复方法特别相关,真菌能够介导金属以不溶性草酸盐,氧化物,碳酸盐和磷酸盐的形式沉淀。例如,从有机或无机磷酸盐水解中释放磷酸盐被证明是一种有效的金属固定[48]方法,包括 Zn, Pb, La 和 U, 沉淀在菌丝表面及其周围。真菌与金属及含金属矿物(Ca、Cd、Co、Cu、Mg、Mn、Sr、Zn、Ni、Pb)相互作用产生多种金属草酸细胞外蛋白质,氨基酸和多糖在有毒金属固定中也起着重要作用。细胞外镍的沉淀与细胞外蛋白质的去除有关,并且已经证明细胞外蛋白质[49]可以作为矿物质形成的模板,影响所得生物矿物质的大小。

4. 影响微生物生物修复效率的因素

微生物修复重金属污染的土壤是一个复杂的过程。影响其修复效率的因素是多方面的,大致可分为内因和外因。内因包括微生物自身代谢物和酶的影响,外因包括土壤特性、PH、温度等主要影响因素。因内因机理且尚不清楚,故该部分重点讨论土壤特性、PH、温度对微生物修复重金属污染土壤的影响。

4.1. 土壤特性

土壤的特性[50]是影响微生物降解重金属离子的重要因素,主要通过增加或减少重金属离子在土壤中的溶解度。有研究表明,在以矿物为主的土壤中,0.01 mg L⁻¹Cd²⁺能够抑制三氯苯胺(TCA)的脱氯,而在有机为主的土壤中是0.2 mg L⁻¹Cd²⁺必需的,不难看出,土壤特性影响着金属离子的溶解能力。这与有机材料的金属结合能力有关。粘土矿物,例如蒙脱石,具有高阳离子交换能力(CEC),可以有效降低金属的生物利用度和毒性。

4.2. PH 值

pH [51]是有毒金属的生物转化的另一个关键因素。PH 从两方面来影响重金属离子的降解,一方面 pH 值的变化会改变真菌,细菌,群落结构和酶活性。另一方面通过 PH 值的改变影响金属形态,在不同的 PH 范围内,金属离子以不同的结合态形式存在。

4.3. 温度

温度可以通过影响污染物的化学性质和微生物的生物多样性来影响重金属污染土壤的生物修复。在较高的温度下,有毒金属离子的溶解度增加,从而改善了它们的生物利用度,尽管这样的高温[52]也会影响微生物群落的结构和活性。与 20℃和 40℃的影响相比,发现 30℃是球孢白僵菌去除金属离子的最佳温度,这是由于增加了生物量产生并提供了更多的金属结合位点。

5. 结语

在重金属污染土壤微生物修复技术中,微生物分布广、数量大、种类多、繁殖较快、代谢能力强且不会对土壤造成二次污染,因此微生物在土壤修复过程中占有越来越重要的地位。随着微生物研究的不断深入,我们相信将会发现更多具有重金属污染修复能力的微生物。但值得注意的是,如何筛选分离土

壤中的土著微生物仍是一个难题, 但我们有理由相信, 随着生物技术的不断发展, 这些问题也终将得到解决。届时, 微生物修复技术将进一步向绿色环保、快速高效的方向发展, 朝着多项修复技术综合运用发展, 土壤重金属污染问题也将得到有效治理。

参考文献

- [1] 黄琼, 王丽君. 土壤中重金属污染现状与防治研究[J]. 资源节约与环保, 2020(11): 97-98.
- [2] 邵啸. 浅析土壤重金属污染的现状以及治理[J]. 资源节约与环保, 2020(10): 105-106.
- [3] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 83-92.
- [4] 侯林洋, 陈应华. 试析耕地土壤重金属污染特征[J]. 农业与技术, 2020, 40(13): 37-38.
- [5] 董玉梅, 李燕. 浅析土壤重金属污染与防治修复[J]. 农业与技术, 2020, 40(23): 125-127.
- [6] 于洋, 刘文清, 许人骥, 张霖琳, 孙聪, 魏复盛. 典型地区农用地污染调查及风险管控标准探讨[J]. 中国环境监测, 2019, 35(3): 1-7.
- [7] 周怡, 胡文友, 黄标, 纪荣平, 刘本乐, 刘鹏, 王信凯. 我国高速公路周边土壤重金属污染现状及研究进展[J]. 中国环境监测, 2020, 36(5): 112-120.
- [8] 靳建超, 任鑫, 马先慧, 王庚, 周鑫, 吉新磊. 土壤重金属污染现状及修复治理对策[J]. 环境与发展, 2020, 32(7): 62-63.
- [9] 杨嘉欣. 耕地重金属污染现状及其人为污染源分析[J]. 绿色环保建材, 2020(8): 58-59.
- [10] 兰敏. 土壤中重金属污染的产生及特点[J]. 世界有色金属, 2018(14): 260+262.
- [11] 杨丽霞, 王聪. 土壤重金属污染特点及治理策略分析[J]. 科技与创新, 2015(24): 115-116.
- [12] 张健. 土壤重金属的污染特点及治理策略研究[J]. 科学家, 2017, 5(12): 14+32.
- [13] 周雯婧, 贺惠. 我国农田土壤重金属污染来源及特点[J]. 科教文汇(下旬刊), 2013(4): 102-103.
- [14] 王建军. 浅议土壤污染的类型及特点[J]. 科学大众(科学教育), 2014(9): 173.
- [15] 薛鲁燕, 张海峰, 蔡葵, 赵爱鸿, 赵征宇, 孙永红, 王文娇. 论农田土壤重金属污染的危害及修复技术[J]. 农业与技术, 2020, 40(13): 41-42.
- [16] 段成娇. 重金属胁迫下土壤酶活性空间分布特征的原位研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [17] 夏晔. 重金属镉、铜、铅对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京农学院, 2018.
- [18] 孟祥怀. 镉污染下蚯蚓行为和微生物群落结构对杨树凋落物分解的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [19] 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.
- [20] 周会程, 周恒, 肖海龙, 马源, 李林芝, 张德罡, 陈建纲. 三江源区不同退化梯度高寒草原土壤重金属含量及其与养分和酶活性的变化特征[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 784-792.
- [21] 杨雅茹, 钟瑶, 李帅东, 邓梦玲, 杨希妍, 杨雅茂, 姚怡萍. 水产品中重金属对人体的危害研究进展[J]. 农业技术与装备, 2020(10): 55-56.
- [22] 蔡峥, 齐越, 杨红, 张铁林, 凌娜. 土壤重金属镉污染现状、危害及治理措施[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7): 2286-2294.
- [23] 王国强, 腾波, 戴伟, 陈小岳, 王珮. 常州市农田土壤重金属污染及其潜在生态风险[J]. 环境与健康杂志, 2019, 36(7): 615-617.
- [24] 王成霞. 食品中重金属对人体的危害及预防策略[J]. 食品界, 2019(2): 70.
- [25] 曹翠萍, 王雪莉. 重金属镍对人体健康的危害及预防[J]. 中国现代药物应用, 2013, 7(9): 78-79.
- [26] 李橙, 赵阳, 马雄飞. 重金属汞污染的危害及其治理研究[J]. 绿色科技, 2015(10): 255-258.
- [27] 曾昭华, 曾雪萍. 癌症与土壤环境中 Sn 元素的关系[J]. 土壤与环境, 1999(4): 241-244.
- [28] 李淋萍, 吕忠祥. 重金属污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. 化工管理, 2020(29): 76-77.

- [29] 杨国栋, 张梦竹, 冯涛, 李明, 张惠灵, 邓雅茜, 闫晶. 土壤重金属污染修复技术研究现状及展望[J]. 现代化工, 2020, 40(12): 50-54+58.
- [30] 伍新花. 关于土壤污染修复的深入研究[J]. 环境与发展, 2020, 32(11): 40-41.
- [31] 夏明, 万何平, 曹新华, 孙齐英, 周世力. 利用微生物技术修复污染土壤的方法[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 13-15+19.
- [32] 邓琴. 土壤重金属污染微生物修复技术探讨[J]. 西部皮革, 2019, 41(9): 117.
- [33] Hiroki, M. (2012) Effects of Heavy Metal Contamination on Soil Microbial Population. *Soil Science and Plant Nutrition*, **38**, 141-147. <https://doi.org/10.1080/00380768.1992.10416961>
- [34] 李信茹, 米屹东, 魏源, 周民. 丛枝菌根真菌-植物共生体系在重金属污染土壤修复上的研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(5): 14-18.
- [35] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 李媛媛, 孙莉, 金樑. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3898-3906.
- [36] 吴楠楠, 张珂, 孙晨曦, 顾晓燕, 宋磊, 王新. 微生物技术在土壤修复中的应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(13): 5-9.
- [37] 余雪梅. 耐镉芽孢杆菌对 Cd²⁺的吸附特性及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [38] 陶梅平. 活性藻类吸附重金属的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [39] 刘学虎, 张清, 马伟. 非活性藻类吸附重金属的研究[J]. 山东化工, 2002(3): 15-17.
- [40] Ubando, A.T., Africa, A.D.M., Maniquiz-Redillas, M.C., *et al.* (2021) Microalgal Biosorption of Heavy Metals: A Comprehensive Bibliometric Review. *Journal of Hazardous Materials*, **402**, Article ID: 123431. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123431>
- [41] 张敏, 范春, 赵苒. 微生物修复环境铬污染机制的研究进展[J]. 吉林大学学报(医学版), 2020, 46(6): 1338-1344.
- [42] 庄旭超. 微生物在重金属污染土壤修复中的作用分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(6): 70+72.
- [43] 张若诗, 田永强. 铬污染场地生物吸附修复技术研究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(11): 187-195.
- [44] 黄浩杰. 三种微生物菌种对镉的吸附作用及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20200725.1645.012.html>, 2020-12-28.
- [45] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 彭新华, 陈正, 孙国新. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1107-1116.
- [46] 车驰. 磷酸盐矿化菌的分离鉴定及对 Cu 的吸附和矿化作用[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- [47] 袁浩, 卢梦涵, 刘宏伟, 刘菊梅, 包苏日古嘎, 何倩, 李海波, 曹伟伟, 赵吉, 包智华. 矿区复合污染土壤真菌多样性及其对稀土-重金属离子的吸附特征[J]. 微生物学报, 2019, 59(12): 2334+2345+2335-2344.
- [48] 黄惠, 孙璐, 蒋继宏, 张梅华, 姚一夫. 真菌 LP-20 对金属矿土壤镉锌的固定化作用研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(12): 36-39+51.
- [49] 苏春彦. 自然水体生物膜胞外多糖和胞外蛋白吸附铅和镉的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [50] 丁恒. 土壤石油污染微生物修复技术及影响因素的研究进展[C]//2007 年安徽节能减排博士科技论坛论文集. 2007: 501-506.
- [51] 吴娟娟, 徐恒, Nasir Ali, 苑泉, 黄博, 于彩虹, 王凯军. 基于 pH 值调控的厌氧酸化产物分布及微生物群落特征研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(1): 3-7.
- [52] Zhou, S., Song, Z.Z., Sun, Z.L., Shi, X.D. and Zhang, Z. (2021) The Effects of Undulating Seasonal Temperature on the Performance and Microbial Community Characteristics of Simultaneous Anammox and Denitrification (SAD) Process. *Bioresource Technology*, **321**, Article ID: 124493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124493>