·综述·

文章编号：1001-5493(2024)02-0138-09 DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2024020138

农用地重金属污染现状及修复方法*

王冬芳[1,2], 李姜珊[1], 程若瑶[1], 许贺[1,2], 朱延平[1,2], 蔡冬清[1,2]**

([1]东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620；[2]上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘 要：土壤是农业生产的基础，随着社会的进步和经济的高速发展，越来越多的污染物排入土壤，其中重金属所占的比例逐渐增大，成为土壤治理的主要对象。农用地重金属污染不仅会导致作物产量降低，而且重金属会随着食物链在人体内积累，对人体产生极大的危害，因此重金属污染修复迫在眉睫。文章综述了农用地重金属污染现状、来源以及各种修复技术，分析了不同修复技术的优势及不足，为运用联合修复技术控制农用地重金属污染提供一定的借鉴与思路。

关键词：农用地，重金属，修复技术，污染现状

中图分类号：X5 **文献标志码：**A

农用地是直接或间接为农业生产所利用的土地，包括耕地、园地、林地、牧草地及其他农业用地[1]。随着我国社会经济的快速发展，土壤重金属污染日益严重，尤其是在农村地区[1]。近年来，由于矿产资源开发、金属加工和冶炼、化工生产、工厂排放和污水灌溉等人为活动的影响，农用地重金属污染问题日益突出[2]。土壤重金属主要包括铅 (Pb)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、镉 (Cd)等。当过量的重金属进入土壤时，土壤质量会由于土壤生产力的降低而下降[3-4]。此外，接触重金属可能对人类健康构成威胁。例如，无论是急性或是慢性砷 (As) 暴露都会导致心血管等系统的紊乱，最终可能导致癌症[5]。因此，农用地重金属污染修复技术的研究有利于改善土壤污染状况，保证农产品质量，保护人类和动物的健康。本文结合国内外文献，主要介绍我国农用地重金属污染现状、来源及其修复技术的研究进展，从而为我国农用地污染修复提供一定的借鉴与思路，有效促进我国社会经济的可持续发展。

1 农用地重金属污染现状

1.1 农用地土壤重金属含量总体状况

近年来，农用地土壤重金属污染受到广泛关注并被大量研究。Huang等[6]在对文献数据分析的基础上，研究了我国农业土壤中Cd、Cr、Hg、Pb、As、铜 (Cu)、锌 (Zn)、镍 (Ni) 等重金属的污染现状。结果表明，Cd、Hg含量高于背景值，其余6种元素在农田中无明显积累。如图1所示，与我国国家标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》 (GB 15618—2018) 中规定的农业土壤重金属污染风险管制值相比，Cd超标样品比例最高，其次是Hg、Pb和

* 收稿日期：2023-07-05
基金项目：广东重点研发计划项目 (基金号 2020B0202010005)；内蒙古自治区重点研发计划项目 (基金号 2021GG0300)；安徽省科技重大专项项目 (基金号 202203a06020001)；国家自然科学基金项目 (基金号 52000025)；山东重点研发计划项目 (基金号2022SFGC0302)；中央高校基本科研业务费专项资金项目 (基金号 22D111317、2232020D-22)；呼伦贝尔市“科技兴市”行动重点专项 (成果转化) 项目 (基金号2022HZZX008)；中科院STS项目 (基金号 KFJ-STS-QYZD-199).
作者简介：王冬芳 (1989—)，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为土壤重金属修复和固废资源化.
**通信作者：蔡冬清，E-mail：dqcai@dhu.edu.cn.
引用本文：王冬芳, 李姜珊, 程若瑶, 许贺, 朱延平, 蔡冬清. 农用地重金属污染现状及修复方法[J]. 离子交换与吸附, 2024, 40(2):138-146.
Citation: WANG Dong-fang, LI Jiang-shan, CHENG Ruo-yao, XU He, ZHU Yan-ping, CAO Dong-qing.The Situation and Remediation Methods of Heavy Metal Pollution in Agricultural Land [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2024, 40(2):138-146.

Zn，而Cr、Ni、Cu几乎没有超标。Ren等[7]采用地质累积指数、标准差椭圆法和主成分分析/绝对主成分分数 (Principal Component Analysis/Absolute Principal Component Scores，PCA/APCS) 模型，探究了中国农田土壤中As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg等重金属的总体污染现状。结果表明，与1990年我国土壤背景值相比，Cd、Hg含量显著增加，分别超过背景值140.2%和129.2%，成为中国最严重的重金属污染元素，这与Huang等得出的结果一致。

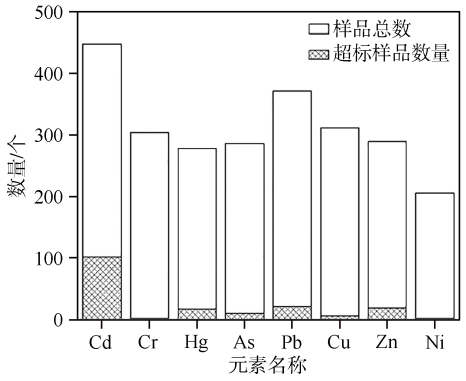


图1　中国农田重金属超标样品数量.

Figure 1　Diagram of quantity of heavy metal samples exceeding standard in China' farmland.

1.2　土壤重金属的空间分布

土壤重金属污染与人类活动密切相关。宋伟等[8]以《土壤环境质量标准》(GB 1518—1995) 的二级标准为评价标准，研究了我国138个典型区域农用地土壤重金属污染现状。结果表明，我国东、中、西部耕地的土壤重金属污染概率分别为11.3%、33.3%、17.2%，中部地区耕地土壤重金属污染概率最高，可能与中部地区的山西、湖南、河南等省份有大量的煤炭和金属矿场及其相关开采有关。此外，Shifaw[9]根据综合污染指数，研究发现南方经济发达、人口稠密，其土壤污染比北方和西部更为普遍，约有53.0%的省份属于中、重度污染级别。

2　农用地重金属污染来源

土壤重金属污染的来源非常广泛，包括农药和化肥的应用、机动车排放和燃煤有关的大气沉降、污水灌溉和采矿等。其中，农药和化肥的应用较为普遍，一些重金属浓度与农药和化肥的应用存在较强的线性关系[10]，更加值得关注。

2.1　化肥农药

农业生产离不开化肥农药，化肥农药由于含有大量重金属元素，成为农用地重金属污染重要来源。中国国家统计局网站数据显示，农用地中Cd浓度与施肥量显著相关[11]，其中氮肥、磷肥、钾肥和复合肥是引起土壤中Cd含量偏高的重要因素。农药和化肥的施用也是促进Cu在土壤中积累的重要途径。根据中国国家统计局收集的化肥和农药数据，农业土壤中的Cu浓度与大量的化肥和杀虫剂应用显著相关 ($p>0.5$)[12]。杀虫剂中的Cu主要以三氯酚铜、Cu-Zn混合物和$CuSO_4$等形式存在，长期施用会导致土壤中Cu的积累，进而导致植物黄化。此外，施用有机肥也会导致重金属的积累。Liu等[13]分析畜禽粪便有机肥对中国农田土壤重金属积累的影响。结果表明，猪粪中Zn、Cu、Cd、As的超标率均高于其他重金属。Matte等[14]的研究也表明，由于饲料中大部分的Cu会随着猪粪排出，有机肥 (如猪粪) 是土壤中Cu污染的来源之一。

2.2　污水灌溉

污水灌溉是农作物重金属污染的主要来源之一。未达到排放标准或未经处理的工业污水通过灌溉进入农田，而工业污水中含有大量的重金属等有毒物质，因此会导致农用地重金属超标[15]。相关资料表明[16]，中国污水灌溉面积占全国农田总面积的7.3%，这些污水灌溉区主要分布于水资源严重短缺的海、辽、黄、淮四大流域，并且面积还在不断增加。Hu等[17]认为，北京市和郑州市农田中重金属的来源主要是污水灌溉。Han等[18]得出结论，工业废水排放可能是我国珠江流域和黄河流域沉积物中Pb污染的主要人为来源之一。

2.3　大气沉降

大气颗粒物沉降是环境中重金属污染物的主要来源之一，威胁着食品安全和人类健康。人类生产活动过程中产生的气体，如工业生产过程中排放的大量SO_2，交通运输中汽车尾气排放的氮氧化物、碳氢化合物，以及燃料燃烧排放的CO、SO_2等都会导致有机污染物和重金属排放增加，从而造成酸雨。酸雨可以增强农用地土壤中重金属的活性，使得农用地污染加剧。Peng等[19]基于简单二元模型分析了我国东北地

区土壤和玉米中重金属的来源。结果表明，机动车排放和燃煤对大气粉尘中Pb的贡献率分别为78.1%和21.9%。因此，Pb在玉米植株中的积累可能主要来自与机动车排放相关的大气沉降。

2.4 采矿

采矿是土壤重金属污染的重要来源之一，采矿过程中会向土壤释放一定量的重金属，造成农田土壤的污染[20]。煤炭开采造成了10.0%以上的Cu和Cd污染，约7.0%的Pb和Zn污染，以及少量的As和Ni污染 (分别为1.0%和1.5%)。例如，Zhang等[21]总结了矿物提取对周围农田土壤重金属含量的影响。结果表明，矿区周边土壤中重金属含量显著高于背景值，主要是由于矿石和尾矿中重金属含量较高。

3 农用地重金属污染修复技术

当前，农用地重金属污染愈益严重，重金属污染修复技术得到充分关注。对农用地土壤的修复思路主要有去除和钝化2种。去除是利用各种技术将土壤中重金属和有机污染物从被污染的土壤中移除，适用于污染程度轻、深度较浅的土壤；而钝化是指采用各种技术将重金属固定在土壤中，从而防止被作物吸收，适用于污染程度较重、深度较深的土壤。

3.1 物理修复

3.1.1 换土法

换土法通过深耕将污染土壤置换至底层，采用清洁土壤覆盖污染土壤或将污染土壤置换为清洁土壤等方式修复土壤[22]，该方法主要适用于污染较严重且面积较小的土壤污染区。Douay等[23]对法国北部一个重金属污染菜地进行了换土修复，后续的蔬菜种植实验表明，换土使得萝卜叶片中的Cd、Pb含量分别从26.20、41.20 mg/kg (干重)降低到2.97、8.37 mg/kg (干重)。该方法虽效率高，但需要耗费较高的成本，容易造成二次污染，置换出来的污染土壤仍需进一步处理，具有一定的局限性。因此，目前的研究重点是开发综合修复技术。例如，Jiang等[24]使用生物炭和土壤替代相结合的方式修复矿区周围的土壤，将Pb含量从 (370±25) mg/kg降低到 (190±8) mg/kg，将As含量从 (75.5±4.6) mg/kg降低到 (38.0±1.2) mg/kg。

3.1.2 电动萃取法

电动萃取是通过电吸附去除污染土壤中的重金属。当向插入地面的电极施加低密度直流电时，污染土壤中的阳离子在既定电场的引力下迁移到阴极，而阴离子迁移到阳极，集中在极化电极上的金属污染物随后通过电镀、(共)沉淀、离子交换树脂络合去除[25]。该方法适用于小范围污染土壤的修复，具有修复时间短、经济高效的优点，但其受pH的影响较大，且容易导致土壤理化性质改变[26]。电动修复过程中容易发生聚焦效应，使迁移态离子生成沉淀，降低迁移速率，从而影响重金属的去除效率；同时单一电动技术修复土壤过程中放射性核素与重金属溶出较多，彻底提取出来还存在一定难度[27]。针对以上2个问题，研究者通过采用接近阳极技术、极性反转技术、添加离子交换膜及增强剂等改进技术避免聚焦效应；通过将电动技术与其他技术进行联合，如电动-渗透反应屏障技术，解决污染物去除不彻底的问题。例如，Zhao等[28]在低电压电动修复重金属Cd污染土壤的实验中采用极性交换技术。结果表明，总Cd和生物可利用Cd的平均去除率分别达到61.1%和77.0%。Li等利用废弃棉花合成了一种新型的β-CD/生物炭 (KCB) 可渗透反应墙。结果表明，KCB对Pb^{2+}和Cd^{2+}的去除率分别达到92.9%和86.2%。

3.1.3 热脱附法

热脱附是指通过加热使被污染的土壤稳定，通过控制系统的温度和材料的停留时间使重金属挥发，然后通过冷凝使这些重金属得到回收[29-30]。该方法对许多类型的污染物都有良好的处理效果[31]。此外，这种方法使用的设备具有强大的处理能力，效率高、技术成熟[32]。该方法工艺简单，适用于修复挥发性强的重金属污染，如Hg和As等，因此其应用范围比较有限[33-34]。据报道，当受Hg污染的土壤和采矿废物样品加热到400～500 ℃时，Hg的去除效果显著 (41.3%～87.0%)[35]。Zhao等[36]采用热脱附技术对贵州省某化工厂的Hg污染农田土壤进行了处理。结果表明，在工程规模试验中，经350 ℃处理30 min后，土壤中Hg含量从255.7 mg/kg降至80.6 mg/kg，降低了约70%。然而，过高的热脱附温度导致修复成本很高，同时造成土壤本身结构的破坏及营养成分的丢失。何依琳等[37]

采用在土壤中加入$FeCl_3$的方式来降低土壤修复的热解吸温度和缩短热解吸时间，结果表明，在$c(FeCl_3)/c(Hg)$为150、热脱附温度为450 ℃、热脱附时间为20 min条件下，Hg污染土壤热解吸修复的效果最佳，土壤中Hg的含量可降至1.5 mg/kg以下。

3.2 化学修复

3.2.1 钝化法

钝化法是将土壤改良剂加入受污染土壤中，使土壤中的重金属转化或固定为不活泼的状态，从而降低受污染土壤中重金属的流动性，实现土壤净化的方法。这些改良剂通过不同的机理，如沉淀、络合、氧化还原、吸附或离子交换等固定重金属，从而降低重金属在土壤中的迁移性和生物有效性[38]。钝化法具有成本低廉、效果显著、操作简单等优势，但是仍具有较大的局限性，如不能将重金属彻底去除，并且化学药剂的滥用会使得土壤的理化性质发生改变[39]。此外，该修复方法对重金属的钝化时效尚未被证实。

钝化剂可通过沉淀、络合、吸附和离子交换等方式将重金属从生物可利用性较大的形态向生物可利用性较小的形态转化，以降低重金属对植物和人体等生物受体的毒性，实现修复重金属污染土壤的目的[40]。生物炭是燃烧木材、家禽粪便和作物秸秆等有机材料产生的一种碳质产物[41]。作为一种土壤固化剂，生物炭可以修复污染场地以减少污染物对土壤的影响。生物炭是一种具有较大比表面积和高吸附能力的稳定化合物，其在土壤中的应用不需要进一步处理，且能增加土壤碳含量和提高土壤肥力[42]。生物炭在土壤中通过吸附或络合等机理结合重金属，从而最大限度地降低Cd的生物有效性[43]。Liu等[44]研究土壤中Cd含量对植物发芽势、株高和株重的影响，发现生物炭可降低土壤中的Cd含量，从而促进植物的生长，提高Cd污染土壤的微生物多样性。研究表明，堆肥也可以降低污染土壤中重金属的流动性和可交换性金属含量，可以作为重金属的有效改良剂[45]。Ferreyroa等[46]发现，施加10.0%的堆肥，不仅可以降低农业土壤中Pb的活性，还可以提高土壤的营养质量。海泡石是具有丰富的表面官能团的矿物，可显著钝化土壤中的重金属。Bashir等[47]通过盆栽实验，研究海泡石 (1.0%～5.0%) 对菠菜组织中Cd生物有效性的影响。结果表明，随着海泡石投加量的增加，土壤pH值由0.3增加到1.0。与对照相比，可溶性Cd含量降低42.8%，固定态Cd含量以5.0%的速率增加了35.8%。菠菜地上和根部对Cd的吸收量分别下降26.2%和30.6%，降幅为5.0%。余召辉等[48]采用自主研发的以氨基羧酸盐为主的有机复合药剂处理上海2座生活垃圾焚烧厂的飞灰。结果表明，该复合药剂对飞灰中Pb元素的稳定化效果最好，其易浸出态比例分别从29.6%、27.5%下降到3.1%、0.3%。

重金属的价态不同，其在土壤中的可迁移性和生物有效性也存在差异。利用具有氧化还原作用的钝化剂可以改变重金属的价态，进而降低重金属的生态毒性[49]。纳米零价铁去除Cr(VI)的机制主要是将Cr(VI)还原为毒性较小的Cr(III)，然后在纳米零价铁表面形成Cr(III)沉淀[50-52]。侯素珍等[53]以玉米秸秆生物炭为载体，制备氨基改性生物炭负载型纳米零价铁去除水中Cr(VI)。结果表明，反应5 min和60 min后，材料对Cr(VI)的去除率可分别达到87.1%和98.8%。王婉玉等[54]利用FeS纳米颗粒对Cd-Pb-Cr(VI)复合污染土壤进行修复。结果表明，当FeS与Cd-Pb-Cr(VI)的物质的量比为2∶1时，可将土壤中Cr(VI)含量降至5.4 mg/kg，达到标准。李佩珊等[55]采用还原剂多硫化钙与包封钝化剂水泥等联合修复Cr(VI)污染土壤，结果表明，还原剂与钝化剂均发挥作用，Cr(VI)、总Cr浸出质量浓度低于标准值，且Cr(VI)钝化率在95%以上。

3.2.2 化学淋洗法

土壤化学淋洗是用有机或无机试剂从土壤中提取污染物，并通过溶解、解吸和络合将其从固相释放到液相中的过程。该技术由于其快速、高效、方便的特点，已被应用于重金属污染地区的修复[56-58]。该技术工艺简单，能够去除土壤中的大多数重金属，但成本较高，并且易污染地表水和造成二次污染，因此不适用于大面积的土壤重金属修复[59]。采用化学淋洗法需要选取合适的淋洗剂，目前的淋洗剂有螯合剂、无机淋洗剂、复合淋洗剂和表面活性剂4种。无机淋洗剂是最早使用的淋洗剂，伴随着

相关技术的不断改进，已经逐渐被可以和大部分重金属螯合的人工螯合剂乙二胺四乙酸(Ethylene Diamine Tetraacetic Acid，EDTA)代替。Wang等[60]使用EDTA洗涤重金属污染土壤，发现EDTA淋洗处理对Pb、Cu有较好的洗脱效果，对Zn浸出浓度的削减率较高；当EDTA用量为2 g/L时，Zn的浸出浓度降低了70.4%。李婷等[61]以$FeCl_3$为淋洗剂修复Pb污染土壤，结果发现，当$FeCl_3$的淋洗浓度为10 mmol/L、液土比为10 mL/g、振荡淋洗120 min时，Pb的去除效果为85.5%，振荡1440 min时去除率可达到96.8%，土壤中的重金属Pb几乎被全部去除。

3.2.3 叶面喷施法

叶面喷雾剂在重金属污染的农业中同样很实用，与土壤改良剂相比，其环境风险更低[62]。Li等[63]利用田间小区试验研究硅(Si)元素施入方式对杂交稻籽粒产量和Cd吸收、转运及积累的影响。结果表明，叶面喷施Si主要是通过抑制Cd从茎秆向糙米的转运，降低糙米中Cd的积累，提高石灰性水稻土的产量。Lian等[64]发现，叶面喷洒TiO_2纳米颗粒在减少Cd积累和减轻Cd对玉米的植物毒性方面优于根系喷洒。此外，100 mg/L的TiO_2纳米颗粒能显著降低玉米地上部Cd含量(15.2%～17.8%)，并通过提高玉米超氧化物歧化酶和谷胱甘肽转移酶的活性，增强半乳糖代谢和柠檬酸循环代谢等降低Cd诱导的毒性。王惠君等[65]发现，喷施2～3次5 mmol/L苹果酸能使水稻各器官的Cd含量显著下降，Ca含量显著增加，其中稻米的Cd平均含量从0.26 mg/kg分别下降至0.14 mg/kg和0.09 mg/kg，降幅分别为46.2%和65.4%，Ca含量增加16.02%～26.60%。

3.3 生物修复

3.3.1 植物修复法

植物修复法是指利用超富集植物或自然生长的植物去除土壤中重金属污染的方法，可以细分为植物积累、植物稳定、植物降解、植物挥发等，其中植物稳定是最常用的方法。植物修复法主要利用植物对重金属的吸收、转化等减少土壤中有毒重金属的含量，从而改善土壤重金属污染状况。植物修复法被认为是一种高效、生态友好和经济的方法[66]，具有成本低、不改变土壤性质、不会造成二次污染的优势，其缺点则在于耗时长，植物的生长受土壤污染影响较大，因此推广价值较低。Cui等[67]研究金色狗尾草、巨菌草、东南景天和海州香薷对污染土壤中Cu和Cd的生物有效性及迁移率的影响。结果发现，与未处理土壤相比，4种植物与石灰石组合显著提高了土壤的pH值，其中巨菌草处理使Cu和Cd的含量分别降低52.1%和40.5%。虽然植物修复技术存在修复效率低的问题，但随着研究的深入，将得到更进一步的应用[68]。

3.3.2 微生物修复法

微生物修复法利用细菌、真菌等微生物的吸附沉淀、氧化还原、吸收转化等作用，降低土壤中重金属含量，从而净化土壤[69]。不同微生物修复重金属污染土壤的机理不同：有些微生物通过细胞壁的吸附作用，可大面积吸附金属阳离子；有些通过生物代谢产生生物酶，溶解吸收重金属。特殊微生物会将土壤中重金属氧化还原、吸收、固化，使土壤中重金属含量降低，改善土壤重金属污染状况[70]。与植物修复一样，微生物修复具有成本低、不改变土壤性质、无二次污染的优势，但该技术基于生物正常代谢活动，其修复效果受外界条件影响较大，需保持良好的生物生长环境。胡永娟[71]通过驯化、筛选和分离技术，获得2种对Cd具有较高抗性的菌株，分别为蜡状芽孢杆菌和米根霉。然后采用水培试验研究2种菌株对Cr(III)胁迫下小麦幼苗生长的影响，结果表明加入2种菌株悬液组的小麦生长情况优于对照组，Cr(III)对小麦的抑制作用得到缓解，并且小麦幼苗叶和根部Cr的积累量也明显低于未加菌株悬液组。Wang等[72]观察到羊肚菌菌丝体比土壤超积累植物修复土壤重金属污染更有效。当Pb量为800 mg/kg时，羊肚菌菌丝体可降低土壤Pb量34.8%，同时提高作物干生物量134.1%。

4 结论与展望

综上所述，农用地属于土地的关键构成部分，在农业及国民经济发展过程中发挥着至关重要的作用，农用地土壤重金属污染已成为一个亟待解决的全球性问题。为了改善农用地土壤和提高农产品质量，各种修复技术相继提出。本文综述了农用地重金属污染现状、来源，以及物理修复、化学修复和生物修复等修复技术，

分析了不同修复技术的优势及不足，为我国农用地污染修复提供一定的借鉴与思路。

然而单一的修复技术都具有一定的局限性，如在土壤置换中被替换的土壤需要堆放或处理，植物修复耗时长等。与物理和生物修复技术相比，化学修复具有快速修复和大规模应用的优势。同时化学修复可以进一步改进，如减少化学浸出的二次污染，以寻找更有效、更经济的氧化/还原化学材料。因此在实际修复中，应根据土壤的污染程度、面积、污染物的性质等特点，开发大规模应用联合修复技术，并从绿色、科学、可持续的角度出发，因地制宜地解决土壤重金属污染问题，提高土壤生态环境质量。此外，相关部门务必对农用地土壤污染保持高度重视，对农用地土壤污染进行科学防治与严格监管，改善土地污染情况，为农业经济发展提供可靠保障，有效促进我国社会经济可持续发展。

参考文献

1 汤超, 王潇. 农用地土壤污染治理与修复技术研究 [J]. 低碳世界, **2020**, 10(4): 15, 17.

2 Li F, Chen M, Shi Y, Tao M, Hu L. Research progress on remediation of contaminated soil in agricultural land in China [J]. *Modern Chemical Industry*, **2018**, 38(12): 4-9.

3 Ren S, Li E, Deng Q, He H, Li S. Analysis of the impact of rural households' behaviors on heavy metal pollution of arable soil: taking Lankao County as an example [J]. *Sustainability*, **2018**, 10(12):4368.

4 Zhao X, Yang Z, Yu T. Review on heavy metal pollution and remediation technology in the soil of mining areas [J]. *Geology of China*, **2023**, 50(1): 84-101.

5 Zhang E, Deng X, Zhou G. Research progress on biotreatment of arsenic pollution [J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, **2022**, 16(1): 1-14.

6 Huang Y, Wang L, Wang W, Li T, He Z, Yang X. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, **2019**, 651: 3034-3042.

7 Ren S, Song C, Ye S, Cheng C, Gao P. The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, **2022**, 806:150322.

8 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况 [J]. 水土保持研究, **2013**, 20(2): 293-298.

9 Shifaw E. Review of heavy metals pollution in China in agricultural and urban soils [J]. *Journal of Health & Pollution*, **2018**, 8(18): 180607.

10 Qin G W, Niu Z D, Yu J D, Li Z H, Ma J, Xiang P. Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology [J]. *Chemosphere*, **2021**, 267:129205.

11 Shi T, Zhang Y, Gong Y, Ma J, Wei H, Wu X, Zhao L, Hou H. Status of cadmium accumulation in agricultural soils across China (1975-2016): from temporal and spatial variations to risk assessment [J]. *Chemosphere*, **2019**, 230: 136-143.

12 Li X, Zhang J, Gong Y, Liu Q, Yang S, Ma J, Zhao L, Hou H. Status of copper accumulation in agricultural soils across China (1985-2016) [J]. *Chemosphere*, **2020**, 244:125516.

13 Liu W R, Zeng D, She L, Su W X, He D C, Wu G Y, Ma X R, Jiang S, Jiang C H, Ying G G. Comparisons of pollution characteristics, emission situations, and mass loads for heavy metals in the manures of different livestock and poultry in China [J]. *Science of the Total Environment*, **2020**, 734:139023.

14 Matte J J, Girard C L, Guay F. Intestinal fate of dietary zinc and copper: postprandial net fluxes of these trace elements in portal vein of pigs [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, **2017**, 44: 65-70.

15 杨伟. 农用地土壤重金属污染修复技术研究 [J]. 云南农业, **2021**(12): 52-54.

16 陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价 [J]. 环境科学, **2020**, 41(6): 2822-2833.

17 Hu Z, Li J, Wang H, Ye Z, Wang X, Li Y, Liu D, Song Z. Soil contamination with heavy metals and its impact on food security in China [J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **2019**, 7(5): 168-183.

18 Han L, Gao B, Hao H, Zhou H, Lu J, Sun K. Lead contamination in sediments in the past 20 years: a challenge for China [J]. *Science of the Total Environment*, **2018**, 640: 746-756.

19 Peng M, Zhao C D, Ma H H, Yang Z F, Yang K, Liu F, Li K, Yang Z, Tang S, Guo F, Liu X, Cheng H. Heavy

metal and Pb isotopic compositions of soil and maize from a major agricultural area in Northeast China: contamination assessment and source apportionment [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, **2020**, 208: 106403.

20 Zhang X, Zhong T, Liu L, Ouyang X. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China [J]. *Plos One*, **2015**, 10(8):e0135182.

21 Zhang Y, Hou D, O'connor D, Shen Z, Shi P, Ok Y S, Tsang D C W, Wen Y, Luo M. Lead contamination in Chinese surface soils: Source identification, spatial-temporal distribution and associated health risks [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **2019**, 49(15): 1386-1423.

22 王泓博, 苟文贤, 吴玉清, 李伟. 重金属污染土壤修复研究进展:原理与技术 [J]. 生态学杂志, **2021**, 40(8): 2277-2288.

23 Douay F, Roussel H, Pruvot C, Loriette A, Fourrier H. Assessment of a remediation technique using the replacement of contaminated soils in kitchen gardens nearby a former lead smelter in Northern France [J]. *Science of the Total Environment*, **2008**, 401(1/2/3): 29-38.

24 Jiang S, Duan L, Dai G, Shu Y. Immobilization of heavy metal(loid)s in acid paddy soil by soil replacement-biochar amendment technology under normal wet condition [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, **2021**, 28(48): 68886-68896.

25 Song P, Xu D, Yue J, Ma Y, Dong S, Feng J. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: a critical review [J]. *Science of the Total Environment*, **2022**, 838.

26 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.

27 张琪, 丁德馨, 胡南, 马建洪. 放射性核素及重金属污染土壤电动修复技术研究进展 [J]. 有色金属 (矿山部分), **2022**, 74(6): 1-9.

28 Zhao M, Ma D, Sun X, Wang Y, Wang Q. In situ removal of cadmium by short-distance migration under the action of a low-voltage electric field and granular activated carbon [J]. *Chemosphere*, **2022**, 287.

29 Ghobadi R, Altaee A, Zhou J L, Karbassiyazdi E, Ganbat N. Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive filter media [J]. *Science of the Total Environment*, **2021**, 794:148668.

30 O'brien P L. *Soil Function following Remediation Using ex Situ Thermal Desorption* [D]. Fargo: North Dakota State University, **2017**.

31 Zhao C, Dong Y, Feng Y, Li Y, Dong Y. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: a review [J]. *Chemosphere*, **2019**, 221: 841-855.

32 Shen Z, Chen Y, Li S, Gu Q, Guo L, Jiao W, Liu P, Ji L, Li J. Application of ex-situ thermal desorption technology and equipment in contaminated site remediation projects in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2019**, 13(9): 2060-2073.

33 叶萌. 土壤重金属污染修复及淋洗技术研究 [J]. 中国资源综合利用, **2021**, 39(5): 144-146.

34 Li J, Hashimoto Y, Riya S, Terada A, Hou H, Shibagaki Y, Hosomi M. Removal and immobilization of heavy metals in contaminated soils by chlorination and thermal treatment on an industrial-scale [J]. *Chemical Engineering Journal*, **2019**, 359: 385-392.

35 Navarro A, Canadas I, Martinez D, Rodriguez J, Mendoza J L. Application of solar thermal desorption to remediation of mercury-contaminated soils [J]. *Solar Energy*, **2009**, 83(8): 1405-1414.

36 Zhao T, Yu Z, Zhang J, Qu L, Li P. Low-thermal remediation of mercury-contaminated soil and cultivation of treated soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, **2018**, 25(24): 24135-24142.

37 何依琳, 张倩, 许端平, 马福俊, 李发生, 谷庆宝. $FeCl_3$强化汞污染土壤热解吸修复 [J]. 环境科学研究, **2014**, 27(9): 1074-1079.

38 Hamid Y, Tang L, Sohail M I, Cao X, Hussain B, Aziz M Z, Usman M, He Z L, Yang X. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain [J]. *Science of the Total Environment*, **2019**, 660: 80-96.

39 张思翰. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究 [J]. 冶金管理, **2020**(21): 133-134.

40 邹雪艳, 李小红, 赵彦保, 张治军. 化学钝化法修复重金属污染土壤研究进展 [J]. 化学研究, **2018**, 29(6): 560-569.

41 Yu J, Jiang C, Guan Q, Ning P, Gu J, Chen Q, Zhang J, Miao R. Enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution by supported ZnO nanoparticles on biochar derived from waste water hyacinth [J]. *Chemosphere*, **2018**, 195: 632-640.

42 Xu M, Gao P, Yang Z, Su L, Wu J, Yang G, Zhang X, Ma J, Peng H, Xiao Y. Biochar impacts on phosphorus cycling in rice ecosystem [J]. *Chemosphere*, **2019**, 225: 311-319.

43 宗大鹏, 田稳, 李韦钰, 张梦妍, 徐武美, 向萍. 农林废弃物生物炭钝化典型土壤重金属的机制研究进展 [J]. 生态毒理学报, **2023**, 18(1): 232-245.

44 Liu W, Li Y, Feng Y, Qiao J, Zhao H, Xie J, Fang Y, Shen S, Liang S. The effectiveness of nanobiochar for reducing phytotoxicity and improving soil remediation in cadmium-contaminated soil [J]. *Scientific Reports*, **2020**, 10(1):858.

45 Zhao T, Zhang K, Chen J, Shi X, Li X, Ma Y, Fang G, Xu S. Changes in heavy metal mobility and availability in contaminated wet-land soil remediated using lignin-based poly(acrylic acid) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, **2019**, 368: 459-467.

46 Ferreyroa G V, Vergara Cid C, Verdenelli R A, Dominchin M F, Meriles J M, Pignata M L, Rodriguez J H. Availability of lead in agricultural soils amended with compost of biosolid with wood shavings and yard trimmings [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, **2019**, 26(29): 30324-30332.

47 Bashir S, Ali U, Shaaban M, Gulshan A B, Iqbal J, Khan S, Husain A, Ahmed N, Mehmood S, Kamran M, Hu H. Role of sepiolite for cadmium (Cd) polluted soil restoration and spinach growth in wastewater irrigated agricultural soil [J]. *Journal of Environmental Management*, **2020**, 258:110020.

48 余召辉, 张瑞娜, 毕珠洁, 陈善平. 药剂稳定化法处理飞灰中重金属的研究 [J]. 环境卫生工程, **2016**, 24(1): 24-26.

49 邢金峰, 仓龙, 任静华. 重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展 [J]. 土壤, **2019**, 51(2): 224-234.

50 Sun Y, Zheng F, Wang W, Zhang S, Wang F. Remediation of Cr(VI)-contaminated soil by nano-zero-valent iron in combination with biochar or humic acid and the consequences for plant performance [J]. *Toxics*, **2020**, 8(2): 8020026.

51 Fan Z, Zhang Q, Gao B, Li M, Liu C, Qiu Y. Removal of hexavalent chromium by biochar supported nZVI composite: Batch and fixed-bed column evaluations, mechanisms, and secondary contamination prevention [J]. *Chemosphere*, **2019**, 217: 85-94.

52 Wang H, Zhong D J, Xu Y L, Chang H X, Shen H Y, Xu C Z, Mou J X, Zhong N B. Enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution by nano-zero-valent iron supported by KOH activated sludge-based biochar [J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, **2022**, 651: 129697.

53 侯素珍, 田浩然, 黄超, 王平, 曾峤婧, 彭惠琳, 刘素琳, 李安. 氨基改性生物炭负载纳米零价铁去除水中Cr(VI) [J]. 环境科学学报, **2020**, 40(11): 3931-3938.

54 王婉玉, 彭聃, 佘健, 刘元元, 瞿宏璟. FeS纳米颗粒修复镉铅铬污染土壤的试验研究 [J]. 环境科学与技术, **2021**, 44(9): 144-153.

55 李佩珊, 冯志刚, 黄冲, 刘威, 张兰英. Cr(VI)污染土壤的还原钝化修复研究 [J]. 南华大学学报(自然科学版), **2023**, 37(1): 16-23.

56 Ali I, Alharbi O M L, Alothman Z A, Badjah A Y, Alwarthan A, Basheer A A. Artificial neural network modelling of amido black dye sorption on iron composite nano material: kinetics and thermodynamics studies [J]. *Journal of Molecular Liquids*, **2018**, 250: 1-8.

57 Basheer A A. New generation nano-adsorbents for the removal of emerging contaminants in water [J]. *Journal of Molecular Liquids*, **2018**, 261: 583-593.

58 Al-Shaalan N H, Ali I, Alothman Z A, Al-Wahaibi L H, Alabdulmonem H. High performance removal and simulation studies of diuron pesticide in water on MWCNTs [J]. *Journal of Molecular Liquids*, **2019**, 289: 111039.

59 武越. 土壤重金属污染修复技术的研究进展 [J]. 化工管理, **2020**(31): 51-52.

60 Wang M, Wang C, Zhang J, Xiao Y, Wang S. Joint remediation of heavy metal contaminated soil by EDTA and nanohydroxyapatite [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2019**, 13(2): 396-405.

61 李婷, 蔡芫镔, 方圣琼, 肖月琦. $FeCl_3$淋洗修复重金属Pb污染土壤技术研究 [J]. 能源与环境, **2020**(4): 62-65.

62 Li X. Technical solutions for the safe utilization of heavy metal-contaminated farmland in China: a critical review

[J]. *Land Degradation & Development*, **2019**, 30(15): 1773-1784.
63 Li N, Feng A, Liu N, Jiang Z, Wei S. Silicon application improved the yield and nutritional quality while reduced cadmium concentration in rice [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, **2020**, 27(16): 20370-20379.
64 Lian J, Zhao L, Wu J, Xiong H, Bao Y, Zeb A, Tang J, Liu W. Foliar spray of TiO_2 nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Chemosphere*, **2020**, 239:124794.
65 王惠君, 薛卫杰, 张昕, 张长波, 黄永春, 任兴华, 刘仲齐. 叶面喷施苹果酸对水稻Cd积累特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, **2021**, 40(2): 269-278.
66 Muthusaravanan S, Sivarajasekar N, Vivek J S, Paramasivan T, Naushad M, Prakashmaran J, Gayathri V, Al-Duaij O K. Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements [J]. *Environmental Chemistry Letters*, **2018**, 16(4): 1339-1359.
67 Cui H, Li H, Zhang S, Yi Q, Zhou J, Fang G, Zhou J. Bioavailability and mobility of copper and cadmium in polluted soil after phytostabilization using different plants aided by limestone [J]. *Chemosphere*, **2020**, 242: 125252.
68 Shah V, Daverey A. Phytoremediation: a multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil [J]. *Environmental Technology & Innovation*, **2020**, 18: 100774.
69 Verma S, Kuila A. Bioremediation of heavy metals by microbial process [J]. *Environmental Technology & Innovation*, **2019**, 14: 100369.
70 丁禺乔, 柳晓光. 土壤重金属污染修复技术及展望 [J]. 资源节约与环保, **2021**(6): 77-78.
71 胡永娟. 抗铬菌株的筛选鉴定及其对麦田铬污染土壤修复效应研究 [D]. 新乡:河南师范大学, **2014**.
72 Wang Y, Tan R, Zhou L, Lian J, Wu X, He R, Yang F, He X, Zhu W. Heavy metal fixation of lead-contaminated soil using morchella mycelium [J]. *Environmental Pollution*, **2021**, 289:117829.

Review

The Situation and Remediation Methods of Heavy Metal Pollution in Agricultural Land

WANG Dong-fang[1,2], LI Jiang-shan[1], CHENG Ruo-yao[1], XU He[1,2], ZHU Yan-ping[1,2], CAI Dong-qing[1,2*]
([1]*College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China*;
[2]*Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China*)

Abstract Soil is the basis of agricultural production, but more and more pollutants are discharged into the soil with the rapid social progress and economic development. Among all pollutants, the proportion of heavy metal is gradually increasing to an predominant part in soil management. The heavy metals in soil could not only reduce crop yield, but also accumulate in human body along with the food chain, causing serious health problems. Therefore, the remediation of heavy metal pollution is of great necessity. In this work, the status and sources of heavy metal pollution, as well as various remediation technologies, were reviewed. Meanwhile, the advantages and disadvantages of different remediation technologies were analyzed, which provide references for application of combined remediation technologies to control heavy metal pollution in farmland soil.
Keywords Agricultural land, Heavy metals, Remediation technology, Pollution situation

* **Corresponding author:** CAI Dong-qing, E-mail: dqcai@dhu.edu.cn.