

# 水分管理对重金属污染土壤植物修复效果的影响研究综述

王亚丹<sup>1,2</sup>, 乔冬梅<sup>1\*</sup>, 陆红飞<sup>3\*</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453000; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;  
3. 江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212499)

**摘要:** 随着人们生活水平的提升、工业化进程和城市化的不断发展, 土壤重金属污染已成为当今社会发展面临的一个很严峻的环境问题, 因此加强土壤重金属污染的修复刻不容缓。近年来兴起的植物修复技术相比于其它修复技术有着良好的发展前景, 但植物修复效率一直是困扰该技术的难题。大量研究表明, 水分管理会引起土壤理化性质及重金属形态的改变, 同时改变植物体内重金属的含量和迁移。本文在前人的研究基础上, 综述了水分管理对土壤物理、化学、生物学性质以及植物本身的影响, 分析了不同水分条件下植物的修复效率, 提出了未来发展建议, 为保证我国粮食安全和农业绿色发展提供理论基础和实践依据。

**关键词:** 水分管理; 重金属污染; 植物修复; 富集植物

**中图分类号:** S156   **文献标识码:** A   **文章编号:** 0564-3945(2022)06-1499-07

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021120804

王亚丹, 乔冬梅, 陆红飞. 水分管理对重金属污染土壤植物修复效果的影响研究综述 [J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1499 – 1505  
WANG Ya-dan, QIAO Dong-mei, LU Hong-fei. Effects of Water Management on Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1499 – 1505

土壤滋养着万物生长, 与人们的饮食健康、居住环境有着密不可分的关系<sup>[1]</sup>。随着工业化进程的迅速发展, 当今社会面临着一个很严峻的环境问题——土壤重金属污染<sup>[2]</sup>。土壤中的重金属来源主要包括两大类: ① 自然因素, 例如: 矿物风化、水土流失、火山活动等; ② 人为因素, 例如: 污水灌溉、过量使用农药与化肥、城市生活垃圾、工业“三废”的排放、矿山的开采冶炼等<sup>[3]</sup>, 其中污水灌溉是造成农田土壤重金属污染的主要污染源<sup>[4]</sup>, 由于企业污水处理不当, 污染附近的灌溉水源, 污水中过量的重金属随着灌溉进入土壤, 会对土壤造成一系列的危害, 引起土壤质量下降<sup>[5]</sup>, 从而影响国家粮食安全和生态环境平衡。

目前土壤重金属污染已经成为了普遍的环境问题<sup>[6]</sup>, 据 2014 年全国土壤污染状况调查公报显示, 全国耕地土壤污染点位超标率高达 19.4%<sup>[7]</sup>, 主要为镉 (7.0%)、汞 (1.6%)、砷 (2.7%)、铜 (2.1%)、铅 (1.5%)、铬 (1.1%)、锌 (0.9%)、镍

(4.8%) 8 种无机污染物。重金属污染具有隐蔽性、不可逆性、长期性等特点, 很难彻底治理。土壤中的重金属首先会对植物本身产生危害且可通过食物链进入人体, 损害人类器官, 危害人体健康<sup>[8]</sup>。2009 年我国发生了著名的浏阳镉 (Cd) 超标事件, 超过 3000 名群众受害<sup>[9]</sup>; 2010 年共发生 14 起重金属污染事件; 2011 年仅 1~8 月就发生了 9 起血铅事件; 2013 年数万吨湖南镉大米流入广东事件; 2017 年河南镉麦事件等等。可见, 重金属污染已经是影响人民群众生命健康、威胁农产品安全的重要隐患。植物修复技术是目前国内外应用最为广泛的重金属污染土壤修复技术, 而水分是重金属元素由土壤进入植物体的重要载体, 因此, 本文分析总结了水分管理对重金属污染土壤植物修复效果的影响, 旨在为重金属污染土壤植物修复技术的新发展提供思路。

## 1 重金属污染土壤的植物修复技术

土壤重金属污染的修复方法主要包括物理、化

收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51879268)、河南省科技攻关项目 (212102110237; 212102110233) 和河南省自然科学基金项目 (212300410309) 资助

作者简介: 王亚丹 (1998-), 女, 河南新乡人, 主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: wangyadan1108@163.com

\*通讯作者: E-mail: qiaodongmei78@163.com; gofeigo@sina.com

学和生物修复 3 种。其中物理和化学方法存在一定的局限性<sup>[10]</sup>, 例如修复花费高、耗费大量的人力、物力和财力、破坏土壤的结构和性质, 还可能导致二次污染, 不能从根本上解决问题。生物修复技术主要包含动物修复技术、植物修复技术和微生物修复技术, 是目前推广利用最多的土壤重金属污染修复技术, 但其中动物和微生物修复的活性受温度的影响较大。相比之下, 近年来兴起的植物修复技术花费低、土壤结构不受影响, 相比于其他的方法, 不仅可以吸收土壤中的重金属, 还可以减少对环境的破坏, 同时又不会引起二次污染、应用范围广, 在重金属污染治理方面具有良好的发展前景<sup>[11]</sup>。

植物修复技术第一次是由美国科学家 Chaney<sup>[12]</sup> 在 1983 年提出的, 指通过植物富集重金属的方式降低土壤中的污染物, 甚至将土壤污染物移出的环境污染治理技术。植物修复是植物、土壤和根际微生物相互作用的综合效果, 涉及土壤化学、土壤微生物学、植物生理生态学和植物化学等多学科研究领域<sup>[13]</sup>。它依据修复过程和机理分为: 植物稳定、植物挥发和植物提取。植物稳定是植物通过根或其根系分泌物使得重金属生物有效性、可移动性降低的过程, 从而降低重金属对土壤环境和人体健康的影响。植物挥发是土壤中的可挥发性污染物被植物吸收后, 通过植物的蒸腾作用被转化成气态物质, 释放到大气中的过程。植物提取是指在重金属污染的土壤中种植具有特定功能的植物, 此种植物对污染土壤中某种污染物质有富集累积的能力, 通过植物收割后续处理将污染土壤中的污染物清除, 进而实现土壤污染治理与修复的方法<sup>[14]</sup>。

目前的植物修复技术, 基本都是依靠超富集植物实现。随着土壤污染情况的愈来愈严峻, 单纯地依靠植物本身已经满足不了当前土壤污染治理的需要, 植物修复效率一直是困扰该领域的难题。后来出现的联合修复技术的研究<sup>[15]</sup>, 主要有以下几种: ① 化学强化措施, 研究发现植物外源有机酸可以影响土壤中重金属的移动性和生物有效性, 对提高植物修复技术的效率有明显的作用<sup>[16-19]</sup>。② 农艺措施, 包括施肥、水分管理和栽培等, 例如对土壤进行合理施肥或灌溉, 可有利于植物的快速生长, 增强其对土壤中重金属的吸收。③ 微生物措施, 土壤中的部分细菌真菌可以活化土壤, 或直接作用于植物本身, 增加植物吸收的重金属量。美国学者 Lundberg

和德国学者 Bulgarelli 均聚焦于超积累植物拟南芥的根际微生物, 对根际菌群的定殖机制展开了深入的研究。④ 基因工程修复措施, 通过将耐性基因片段插入到植物体内, 获得具有耐重金属污染的转基因植物<sup>[10]</sup>。

## 2 水分管理对重金属污染土壤的影响

水分管理是指为了达到植物生物量最大化和节约水资源的目标, 根据不同植物不同生长阶段的需水规律, 有目的地科学调配田间水分的措施。

### 2.1 水分管理对土壤 pH、Eh 的影响

土壤水分管理可以调节根区土壤的氧化还原电位 (Eh) 和酸碱度 (pH), 对土壤中重金属的活性产生较大的影响, 进而影响镉、砷、铬等重金属在籽粒中的积累<sup>[20]</sup>。水分的多少与土壤氧化还原电位的高低有很大的关系。在重金属污染土壤中, 淹水条件下土壤的 Eh 较低, 约 200 ~ -400 mv, 而通气良好土壤则为 800 ~ 300 mv<sup>[21]</sup>。这主要是由于淹水后, 进入土壤的氧气大幅下降, 一些微生物如厌氧细菌等分解有机质产生大量的还原性物质, 导致土壤 Eh 下降<sup>[22]</sup>。淹水条件下还能够改变土壤的 pH 值, 使土壤最终都趋于中性, 在碱性土壤中, 淹水初期好氧微生物的呼吸作用会产生二氧化碳, 碳酸盐等物质的不断溶解也会产生二氧化碳, 因此土壤中的二氧化碳增多, 酸性增强, 土壤 pH 值就下降至中性; 而在酸性土壤中, 后期由于有机质分解产生的还原物质在土壤中发生还原反应, 消耗大量的质子, 导致土壤的 pH 值上升至中性<sup>[23]</sup>。而水分会通过影响土壤的 pH、Eh 等的改变, 间接对重金属的存在形态产生影响, 土壤水分的多少决定土壤的 Eh 高低, 进而使土壤的氧化还原性发生改变, 引起重金属更多的向有效态或无效态转化; 土壤水分会影响 pH, 进一步影响有机质、铁锰化合物等对重金属的吸收, 增强或降低土壤中重金属的生物有效性。

### 2.2 水分管理对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤中最活跃的成分, 土壤性质的变化离不开微生物的作用, 通过土壤中微生物的状态能够反映重金属在土壤中的活性。水分状况对土壤中微生物的结构和分布等具有重要影响<sup>[24]</sup>。土壤水分过多会使土壤中的团聚体破裂, 而微生物就会以团聚体释放出的有机碳源为呼吸底物, 提高自身的代谢能力, Tian 等<sup>[25]</sup> 通过观察青藏高原湿地干旱

年份和湿润年份的土壤发现,干旱会导致土壤古细菌群落数量减少;同时有研究发现<sup>[26]</sup>,相比于干湿交替处理,淹水条件下土壤中氧气含量急剧降低,大部分好氧细菌等微生物难以长时间生存,减少了水田中微生物的数量和多样性。王义详等<sup>[27]</sup>通过对圆叶决明进行水分胁迫发现,水分胁迫明显增加了土壤细菌、真菌和放线菌等的数量。土壤微生物群落的氧化还原反应能够显著影响土壤团聚体结构和土壤中营养物质和微生物的迁移,进而影响重金属在土壤中的存在形态<sup>[28]</sup>,研究表明在淹水条件下厌氧细菌(如硫酸盐还原菌、异化铁还原菌等)快速增加,这些厌氧细菌可以将土壤中的硫酸根离子和三价铁离子分别还原为硫离子和二价铁离子,进而与重金属形成沉淀,导致土壤中重金属的生物有效性降低<sup>[29]</sup>。

### 2.3 水管理对土壤重金属的影响

对土壤进行水管理会使土壤中重金属的含量、存在形态以及生物有效性发生改变,进而影响植物对重金属的吸收与积累。黄益宗等<sup>[30]</sup>通过在加 Cd 溶液的土壤上种植玉米,得到不同水分条件下土壤中镉含量变化趋势,在田间持水量(WHC)为 65% 时的土壤中镉的含量比 75% WHC 和 85% WHC 时大。但也有相反报道,许铎月<sup>[31]</sup>研究表明不同水分处理对土壤总镉含量无显著性影响。然而,土壤中重金属的总量并不能代表其在土壤中的赋存形态,迁移能力及其生物有效性。土壤水分通过对土壤的 pH、Eh、有机质含量等的改变,间接对重金属的存在形态产生影响,不同的灌溉方式将会导致土壤中重金属赋存形态及其有效性发生改变<sup>[32]</sup>。有研究表明<sup>[31,33]</sup>,相比于湿润处理,淹水处理有效减少了土壤中有效态镉含量,同时土壤在淹水条件下可交换态镉含量降低的更快,碳酸盐结合态表现为先增加后减少的状态。这是因为土壤水分会改变土壤的 Eh 和微生物活性,淹水条件会促进厌氧型微生物的生长,同时 Eh 下降,土壤的还原性增强,重金属更容易由有效态转化为无效态,土壤中的硫酸盐在还原条件下变成硫化物,导致土壤中的硫离子与重金属离子结合形成沉淀,降低土壤中重金属的生物有效性,因此随着淹水时间的增加土壤重金属更多的向无效态转化<sup>[31]</sup>。而重金属在土壤中的赋存形态决定着重金属的生物有效性,沈欣等<sup>[34]</sup>在种植水稻的土壤中研究发现,可以通过对水管理从而降低土壤中镉的生物有效性,可能是由于淹水后土壤 pH 值增大,有机质

和铁锰氧化物等对重金属的吸附能力增强,从而导致土壤中重金属的生物有效性和迁移性降低<sup>[33]</sup>。

## 3 水管理对重金属污染土壤中植物的影响

### 3.1 水管理对重金属污染土壤中植物根系及根系分泌物的影响

根际是各种物质进入植物体的重要通道,而植物的根系是阻碍重金属进入植物体的第一道屏障,根系是植物吸收养分的主要器官,适宜的水分会促进根系活力的提高。根系分泌的有机酸可以活化土壤中的镉、铅和铜等,它通过影响重金属元素在根系和土壤中的反应,改变土壤中重金属的存在形态等,进而加强植物吸收重金属的能力<sup>[35]</sup>。在逆境胁迫下,植物根系分泌的有机酸含量明显增加,这是因为植物体内的有机酸可以促进重金属从根系到地上部的转运。淹水条件下,水稻根系会分泌大量低分子量有机酸,有机酸进一步活化土壤中的重金属镉,使重金属镉的有效态含量增加<sup>[36]</sup>。同时其他元素如铁、锰、锌等也会被有机酸解吸,但这些元素会与重金属离子竞争进入植物体内,从而减少植物对镉的吸收<sup>[22]</sup>,因此淹水状态下还是会减少植物吸收重金属的含量。

### 3.2 水管理对重金属污染土壤中植物生物量的影响

植物的生物量是衡量其富集性能的重要指标,水管理可通过调控土壤中重金属的生物有效性,进而对植物的生长发育产生影响<sup>[27]</sup>。水分是影响植物生物量的重要因素,在植物生长过程中,根据其自身需求,有目的地进行水管理,有利于提高植物的产量。不同植物对土壤水分的敏感性不同。黄益宗<sup>[24]</sup>研究表明,水分变化对镉污染土壤生长的玉米地上部和地下部生物量影响较大,35% WHC ~ 85% WHC 处理对生物量影响显著。董馨岚等<sup>[37]</sup>通过室内盆栽、正交实验的方法,在重金属污染土壤上种植黑麦草得出,黑麦草在 90% WHC 时具有较高生物量。Angle 等<sup>[38]</sup>研究表明遏蓝菜等超富集植物随着土壤含水量增大,植物的生物量增大,植物重金属积累能力增强。吴晓月等<sup>[39]</sup>研究表明,土壤水分对甜高粱的生长存在显著影响( $P < 0.001$ ),在土壤含水量达到 90% WHC 时,甜高粱的地上部及根干重均达到最大值。这主要是由于在重金属和水分的双重

胁迫下,会降低植物的光合速率,影响光合物质生产能力<sup>[40]</sup>。相反,并不是土壤水分越多生物量就越高,研究发现相比于淹水处理,干湿交替处理更能显著提高水稻的生物量及产量,促进水稻的生长<sup>[41-42]</sup>。可能是相较于淹水条件,干湿交替或者干旱条件增加了土壤的通气性,增强根系活力,通过根系的生长从而促进了植物地上部的生物量<sup>[42]</sup>。崔立强等<sup>[43]</sup>研究表明,在重金属锌、镉的胁迫下,当处于 70% WHC 处理时伴矿景天生物量达到最大,大于 100% WHC 和淹水处理,同时对重金属吸收能力最强;Ye 等<sup>[44]</sup>发现在重金属铅、锌尾矿的土壤中,淹水条件下比干旱条件下的 *P. australis* (芦苇)生物量低。可见,针对不同的重金属污染土壤,不同的植物有其敏感的水分阈值,须进行系统研究。

### 3.3 水管理对植物吸收富集土壤中重金属的影响

土壤水分状况与植物富集重金属密切相关,不同的水管理模式对植物富集重金属效果不同。一方面水分可以直接影响植物的生长,从而影响植物对重金属的富集效果。另一方面,水分通过改变土壤的物理化学性质改变重金属在土壤中的赋存状态,进而影响植物对土壤中重金属的吸收。董馨岚等<sup>[37]</sup>通过在重金属污染土壤上设置了不同水分条件种植黑麦草,研究表明黑麦草在 90% WHC 下对重金属铜、铅富集量较高。Angle 等<sup>[38]</sup>利用遏蓝菜等超富集植物修复 Ni 污染土壤时发现,在土壤含水量为 30% WHC ~ 40% WHC 条件下,植物体内重金属浓度随着土壤含水量的增大而增加,同时明显提高了植物修复的效率。可见,土壤水分提高可迅速增加根对镉的吸收和积累,但不同的植物具有不同的最适水分含量。同样,对于作物来说,并不是土壤含水量越高,植物对重金属的累积效果越好。淹水条件下土壤重金属的有效性降低,因此植物对重金属的吸收也降低,这主要是由于水管理通过调控土壤的物理化学性质改变土壤中重金属的有效性,从而影响植物对重金属的吸收;同时淹水条件还通过改变水稻的根系形态、生理结构和与重金属吸收转运蛋白有关的基因等降低水稻对镉的吸收<sup>[22]</sup>。HU 等<sup>[45]</sup>研究了湿润灌溉、间歇性灌溉、常规灌溉、淹水灌溉 4 种不同灌溉方式对水稻吸收镉的影响,结果表明水稻在湿润灌溉时镉含量达到最大,其次是间歇灌溉与常规灌溉,淹水灌溉可使水稻中的镉含量最低。相反,有研究得出,与干湿交替灌溉相比,常规水

层灌溉条件下的作物籽粒中铬 (Cr)、镍 (Ni)、钴 (Co)、铅 (Pb)、砷 (As) 含量呈增加趋势<sup>[46-48]</sup>。这可能是由于水管理对不同重金属污染条件下植株富集重金属的量有差异性。

### 3.4 水管理对植物富集系数、转运系数的影响

水分通过改变植物的生长和土壤的理化性质,进而改变植物对重金属的富集、转运能力。同一植物对不同的重金属富集、转运系数也不同。董馨岚等<sup>[37]</sup>研究表明,黑麦草在铜、铅单一胁迫时,转运系数都随着土壤水分的增加先下降后上升,在铜胁迫下,90%WHC 处理最大;在铅胁迫下,80%WHC 时最大。而在铜胁迫下,黑麦草地上及地下部的铜富集系数均呈先升后降再升的趋势,且分别在 90%WHC 和 70%WHC 时达到最大值,不同的是在铅胁迫下,黑麦草地上部铅富集系数先升后降,在 80%WHC 时最大。杨小粉等<sup>[49]</sup>通过对比长期淹水灌溉、湿润灌溉和阶段性湿润灌溉下不同水稻品种糙米中镉含量发现,长期淹水灌溉处理水稻糙米镉富集系数最低。相反,方飞等<sup>[50]</sup>研究得出,干湿交替处理下不同水生植物对重金属的迁移系数都低于淹水处理,水分的不足会抑制重金属在体内的迁移,干湿交替处理不仅降低了植物的迁移系数也改变了重金属的富集能力。

## 4 结论及展望

植物修复技术因其绿色、经济可行等优点而得到研究者的青睐,但植物的修复效率一直是限制其发展的主要因素。近年来出现的联合技术为植物修复技术带来了新的发展机遇,其中水分是影响植物生长最关键的因素,同时也是控制土壤理化性质变化的重要因子,它可以影响土壤基础的物理、化学性质及微生物种类等。水分过多(淹水条件)会使 pH 值升高, Eh 下降,土壤的还原性增强,厌氧型微生物的生长增强,有机质和铁锰化合物等对土壤中的重金属吸附能力增强。除此之外,土壤中的硫酸根离子和三价铁离子等在还原条件下变成硫离子和二价铁离子,可与重金属离子结合形成沉淀,降低土壤中重金属的活性。

另外,土壤水分会影响植物的生长发育、生物量以及重金属在植株体不同部位的分配,进而影响重金属含量以及富集、迁移能力,起到调控重金属在植株体内部运移转化的作用。除了水稻和水生植

物以外,淹水条件一般都会对植物的生长产生负面影响,淹水条件下土壤中的氧气含量减少,导致植物根系等腐烂,影响植物的生长发育,使植物的生物量降低;相反水分不足会影响根活力,限制植物根系生长,土壤中的水分不能满足植物生长所需,进而降低植物的生物量,只有适宜的水分阈值,才可使植物的生物量达到最大,植物对重金属的富集和修复效果增强。因此,探索水管理对植物修复技术的影响机制十分重要。

本文对前人研究进行了归纳、总结,但还存在一些不足,有待进一步探索。①关于水分调控的研究大多数为稻米,且主要集中在我国南方水稻主产区,为了粮食安全采用植物稳定原理,但未来植物修复技术的发展趋于植物提取,所以应培育更多超富集植物,进行其他超富集植物的水管理研究,加强联合修复技术的研究与应用,拓展植物修复的研究领域十分重要。②以往的研究主要侧重水分对土壤理化性质以及植株富集效果、生物量等表现现象的影响,而对产生这些现象的内在物理、化学和生物学综合特性研究较少,未来对土壤生物、结构、生化过程的影响机制及与植物修复效率的关联也需要更多的研究,可进一步探索水管理对植物-根际-土壤环境的综合影响机制。③可通过构建物理模型、数值模型等模拟预测不同水管理下土壤的修复效果并进行评价,选择适宜的水管理模式,提升重金属污染土壤的植物修复效果。

#### 参考文献:

- [1] 王 恒,牛 双,叶红升,等.典型重金属污染土壤植物修复应用研究[J].科技创新导报,2019,16(29):109-110.
- [2] 魏忠平,朱永乐,赵楚昀,等.生物炭吸附重金属机理及其应用技术研究进展[J].土壤通报,2020,51(3):741-747.
- [3] 陈亚奎,葛登文,卢滇楠.镉污染土壤的植物修复技术[J].环境生态学,2020,2(9):92-98.
- [4] 李 鹏.水管理对不同积累特性水稻镉吸收转运的影响研究[D].南京农业大学,2011:12-14.
- [5] 赖书雅,董秋瑶,宋 超,杨振京.南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J].环境科学,2021,42(11):5500-5509.
- [6] 徐露露,马友华,马铁铮,等.钝化剂对土壤重金属污染修复研究进展[J].农业资源与环境学报,2013,30(6):25-29.
- [7] 中华人民共和国生态环境部,中华人民共和国国土资源部印发《2014中国环境状况公报》[EB/OL].(2015-05-29).
- [8] 郭碧林,陈效民,景 峰,等.施用生物有机肥对红壤水稻土中重金属及微生物量的影响[J].土壤通报,2019,50(4):952-957.
- [9] 李永华.“镉村”十年[J].中国经济周刊,2014,(35):68-73.
- [10] 杨国栋,张梦竹,冯 涛,等.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.
- [11] 肖鹏飞,吴德东.全球植物修复研究的文献计量学分析[J/OL].生态学报,2021(21):1-12.
- [12] CHANEY R L, MALIK M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279-284.
- [13] 韦朝阳,陈同斌.重金属污染植物修复技术的研究与应用现状[J].地球科学进展,2002,(6):833-839.
- [14] 樊 霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.
- [15] 程涵宇,栾慧君,刘汉湖.基于文献计量分析土壤重金属污染修复研究现状[J].环境保护与循环经济,2020,40(9):12-18.
- [16] QIAO D M, LU H F, ZHANG X X. Change in phytoextraction of Cd by rapeseed (*Brassica napus* L.) with application rate of organic acids and the impact of Cd migration from bulk soil to the rhizosphere[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115452-115452.
- [17] 陆红飞,乔冬梅,齐学斌,等.外源有机酸对土壤pH值、酶活性和Cd迁移转化的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(3):542-553.
- [18] 韩 洋,乔冬梅,齐学斌,等.草酸对镉污染土壤油葵生物量及土壤酶活性和镉形态的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(9):1964-1973.
- [19] LU H F, QIAO D M, HAN Y, et al. Low molecular weight organic acids increase Cd accumulation in Sunflowers through increasing Cd bioavailability and reducing Cd toxicity to plants[J]. *Minerals*, 2021, 11(3): 243-243.
- [20] WANG M, YANG Y, CHEN W. Manganese, Zinc, and pH affect cadmium accumulation in rice grain under field conditions in southern China[J]. *Journal of environmental quality*, 2018, 47(2): 306-311.
- [21] PONNAMPERUMA F N. The chemistry of submerged soils[J]. *Advances in Agronomy*, 1972, 24: 29-96.
- [22] 张 燕,江建锋,黄奇娜,等.水管理调控水稻镉污染的研究与应用进展[J].中国稻米,2021,27(3):10-16.
- [23] CHIMNER R A, COOPER D J. Influence of water table levels on CO<sub>2</sub> emissions in a colorado subalpine fen: an in situ microcosm study[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2003, 35(3): 345-351.
- [24] 黄 荣,徐应明,黄青青,等.不同水管理下施用尿素对土壤镉污染钝化修复效应及微生物结构与分布影响[J].环境化学,2018,37(3):523-533.
- [25] TIAN J Q, ZHU Y B, KANG X M, et al. Effects of drought on the archaeal community in soil of the Zoige wetlands of the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 52: 84-90.
- [26] SAWADA K, FUNAKAWA S, KOSAKI T. Effect of repeated drying rewetting cycles on microbial biomass carbon in soils with different climatic histories[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 120: 1-7.

- [ 27 ] 王义祥, 任丽花, 翁伯琦, 等. 土壤干旱胁迫对圆叶决明土壤微生物的生态效应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, (S1): 66 - 68.
- [ 28 ] Liang X L, Radosevich M, Löffler F, et al. Impact of microbial iron oxide reduction on the transport of diffusible tracers and non-diffusible nanoparticles in soils[J]. *Chemosphere*. 2019, 220: 391-402.
- [ 29 ] 范文宏, 姜 维, 王 宁. 硫酸盐还原菌修复污染土壤过程中镉的地球化学形态分布变化[J]. *环境科学学报*, 2008, (11): 2291 - 2298.
- [ 30 ] 黄益宗, 朱永官, 童依平, 等. 土壤水分变化对玉米苗期吸收积累镉的影响[J]. *生态学报*, 2004, (12): 2832 - 2836.
- [ 31 ] 许铎月. 土壤水分与pH对镉污染下黄瓜和小白菜镉积累及生长的影响[D]. 东北农业大学, 2020: 54-56.
- [ 32 ] 茆 智. 水稻节水灌溉及其对环境的影响[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(7): 8 - 16.
- [ 33 ] 王惠明, 林小兵, 黄欠如, 等. 不同灌溉模式对稻田土壤及糙米重金属积累的影响[J]. *生态科学*, 2019, 38(3): 152 - 158.
- [ 34 ] 沈 欣, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1449 - 1454.
- [ 35 ] 秦 丽. 间作系统中续断菊与作物Cd、Pb累积特征和根系分泌低分子有机酸机理[D]. 云南农业大学, 2017: 6-8.
- [ 36 ] 刘 源, 徐仁扣. 低分子量有机化合物对MnO<sub>2</sub>和土壤氧化锰的还原溶解作用[J]. *环境化学*, 2015, 34(6): 1037 - 1042.
- [ 37 ] 董馨岚, 白 哲, 李铭红, 等. 铜铅胁迫下水分、温度和施肥对黑麦草富集能力的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7721 - 7732.
- [ 38 ] Angle JS, Baker AJM, Whiting SN, et al. Soil moisture effects on uptake of metals by *Thlaspi*, *Alyssum* and *Berkheya*[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(2): 325 - 332.
- [ 39 ] 吴晓月, 季晓敏, 高丽敏, 等. 土壤水分及镉浓度对甜高粱生长及镉吸收和转运的影响[J]. *草学*, 2021, (3): 12 - 20 + 44.
- [ 40 ] 戴俊英, 沈秀瑛, 徐世昌, 等. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J]. *作物学报*, 1995, (3): 356 - 363.
- [ 41 ] 崔晓茨, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(11): 2177 - 2184.
- [ 42 ] 张艳超, 任艳芳, 林 肖, 等. 不同灌溉方式对镉污染下水稻生长和产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(2): 51 - 54.
- [ 43 ] 崔立强, 吴龙华, 李 娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 572 - 576.
- [ 44 ] Ye ZH, Wong MH, Baker AJM, et al. Comparison of biomass and metal uptake between two populations of phragmites australis grown in flooded and dry conditions[J]. *Annals of Botany*, 1998, 82: 83 - 87.
- [ 45 ] Hu P, Li Z, Yuan C, et al. Effect of water management on cadmium and arsenic accumulation by rice with different metal accumulation capacities[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(5): 916 - 924.
- [ 46 ] 王肖凤, 汪吴凯, 夏方招, 等. 水分管理对再生稻稻米品质的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(2): 103 - 111.
- [ 47 ] Wan Y, Huang Q Q, Camara A Y, et al. Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As, and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 228: 360 - 369.
- [ 48 ] Somenahally A C, Hollister E B, Yan W, et al. Water management impacts on arsenic speciation and iron-reducing bacteria in contrasting rice-rhizosphere compartments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 8328 - 35.
- [ 49 ] 杨小粉, 吴勇俊, 张玉盛, 等. 水分管理对水稻镉吸收的影响[J]. *中国稻米*, 2019, 25(4): 34 - 37.
- [ 50 ] 方 飞, 浦晨霞, 武 帅, 等. 水分调控下4种水生植物对重金属的吸附与富集作用[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(14): 78 - 81 + 160.

## Effects of Water Management on Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils

WANG Ya-dan<sup>1,2</sup>, QIAO Dong-mei<sup>1\*</sup>, LU Hong-fei<sup>3\*</sup>

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Jiangsu Vocational College Agriculture and Forestry, Jurong 212499, China)

**Abstract:** With the improvement of people's living standards, the continuous development of industrialization and urbanization, soil heavy metal pollution has become a very serious environmental problem. It is urgent to strengthen the remediation of soil heavy metal pollution. In recent years, phytoremediation techniques have a promising future compared with other remediation techniques, but the efficiency of phytoremediation was a difficult problem. A large number of studies have shown that water management can change the physical and chemical properties of soils and the form of heavy metals, and affect the content and migration of heavy metals in plants. Based on previous studies, this paper reviewed the effects of water management on soil's physical, chemical and biological properties, as well as plants themselves, analyzed the remediation efficiency of plants under different water conditions, and the suggestions for future development were put forward, which will provide a theoretical and practical basis for ensuring food security and green agricultural development in China.

**Key words:** Water management; Heavy metal pollution; Phytoremediation; Hyperaccumulator

[责任编辑:刘轶飞]