

人工湿地去除非点源重金属污染物的研究进展

于召洋

青岛多得利节能科技有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2023年12月3日; 录用日期: 2024年1月3日; 发布日期: 2024年1月11日

摘要

近年来, 非点源(NPS)污染已成为发达国家和发展中国家面临的全球性重大问题。由于各种人为活动产生的非点源污染, 导致有机化合物(如药物化合物和农药)和无机养分(如Cu、Pb、Zn等重金属)过量排入到地表水和土壤中, 从而改变水质和土壤环境, 影响土壤和水生生态系统, 破坏食物链和生态链网。因此有效减少非点源污染物负荷的方法或处理工艺越来越受到重视。采用模拟自然且环境友好的人工湿地(CWs)对非点源(NPS)污染进行生态修复近年来已在许多国家引起重视。但关于处理不同来源的非点源污染, 特别是重金属污染的资料仍然没有得到充分的总结, 所以本文重点介绍了人工湿地技术去除非点源重金属污染的最新进展, 重点概述和回顾了非点源污染中重金属污染来源、迁移、转化及其生态毒理学效应。结果表明, 人工湿地中的植物能通过各种可能的机制去除重金属污染物, 其他因素(如微生物、基质)也起到了协同的作用。

关键词

非点源污染, 农业径流, 人工湿地, 重金属, 初期雨水

A Review on Constructed Wetlands-Based Removal of Heavy Metal Contaminants Derived from Non-Point Source Pollution

Zhaoyang Yu

Qingdao Duodeli Energy Saving Technology Co. Ltd., Qingdao Shandong

Received: Dec. 3rd, 2023; accepted: Jan. 3rd, 2024; published: Jan. 11th, 2024

Abstract

Recently, non-point source pollution has become a major global problem faced by developed and

developing countries. Due to non-point source pollution caused by various human activities, organic compounds (such as pharmaceutical compounds and pesticides) and inorganic nutrients (such as Cu, Pb, Zn and other heavy metals) are discharged into surface water and soil in excess, which is changing water quality and soil environment. The continuous discharge of non-point source pollutants has a major impact on soil and aquatic ecosystems, making against the food chain and ecological chain network on the earth. Therefore, more and more attention has been paid to the methods or treatment processes to effectively reduce the load of pollutants. In recent years, the use of constructed wetlands (CWS) for ecological restoration has attracted considerable attention in many countries, because most of them simulate natural and environment-friendly processes. Although it has a sufficient record of success in dealing with point source pollutants, the information on dealing with non-point source pollution from different sources has not been fully summarized. Therefore, this paper focuses on the sources, migration, transformation and ecotoxicological effects of heavy metals in non-point source pollution. It involves the importance of plants existing in constructed wetlands to help remove heavy metal pollutants through various possible mechanisms. The results indicate that plants in artificial wetlands can remove heavy metal pollutants through various possible mechanisms, and other factors (such as microorganisms and substrate) also play a synergistic role.

Keywords

Non-Point Source Pollution, Agricultural Runoff, Constructed Wetlands, Decentralized Systems, Initial Rain

Copyright © 2024 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

缺水是当今一个全球性风险。主要原因是人口增长、农业扩张、经济发展和气候变化。事实上，现有的自然淡水资源似乎不足以满足日益增长的需求，水需求和水供应之间日益失衡[1]。此外，受到非点源污染的废水未经处理会危害不同的生态系统。为了应对这一问题，人们开始寻找能够有效处理废水并提高其水质的方法。传统的废水处理技术已不能满足人们日益增长的要求，于是人们开始寻找以自然为基础的方法来处理这些废水。人工湿地就是其中之一。在经过长时间的废水处理之后，人们发现废水可以被视为一种替代资源。这一发现使得人们对废水处理技术的研究产生了兴趣。随后，人们开始寻找能够使用自然方法来处理废水并提高其水质的方法。这样做的目的是为了满足不同日益增长的水资源需求和防止水质进一步恶化[2]。

为了应对这一风险，人工湿地利用自然过程和工程生态系统来实现环境、社会和经济目标。人工湿地可以通过微生物、土壤和水生植物协同作用产生不同自然过程来处理废水，减少对自然资源的需求并改善水资源利用情况。人工湿地具有成本低、易于建造、易于运行、易于维修的优势；其主要优势是去除效率高、截留营养物质、生产能量生物质且具有很强的审美价值[3]，出水可用于灌溉、园艺、冲厕、地下水补充和其他公共和工业用途。人工湿地可以用来处理和去除重金属，但这种应用领域目前仍然很大程度上未开发。要想成功地将人工湿地用于重金属的处理，就需要完全掌握去除效率、机理、设计的作用、环境因素的影响和毒性风险等方面的知识。因此，在未来的研究结果中，需要对这些问题进行更多的审视。

淡水资源是人类和世界上生物的重要组成部分。然而，由于人类的过度消费，农业和城市对水资源

的需求日益增加,这给世界自然环境带来了巨大的压力[4][5]。饲料添加剂、采矿业乱采乱伐以及农药的滥用导致了雨水、溢流雨污水以及农田沥水中有害物质的增加,进而造成水体的污染。工业区大气沉降和地面污染也是导致水环境中有害物质增加的原因之一。目前,全球各地正面临着严重的水资源危机,人们必须尽快采取行动来保障水资源安全。人工湿地虽然能够有效去除微污染物,但是并不总能达到《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB T 18921-2019)和《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)的要求。为了克服与废水处理和回用相关的问题,并获得高质量的出水,建议将人工湿地与其他技术相结合[6]。例如,可以通过在人工湿地中添加适当的吸附过滤材料、铁碳微电解材料或磁絮凝材料来实现净化效果。污水处理是个大问题,尤其是在农村和工矿地区。人们需要能够支持若干人获得适当且公平的卫生设施,同时支持污水的安全回收和再利用。这是联合国可持续发展目标 6 清洁饮水和健康设施,具体目标 3 改善水质和 4 提高用水效率所鼓励的。

人工湿地去除非点源重金属的研究可以帮助解决这个问题。重点研究国内非点源污水处理系统,包括混合配置和其他技术进一步深入研究人工湿地削减 NPS 重金属能力,促进农村卫生与城市工矿区径流的净化,从而有助于实现可持续发展。

2. 非点源重金属污染来源

2.1. 文章数据来源

人工湿地在 NPS 污染处理中的应用已成为世界各国研究的热点。为此,在中国知网平台共发现 94 篇同行评审文章,在 Science Direct 平台共发现 48 篇(共 142 篇),调查年限为 2008~2022。首先,57 篇论文因重复或获取全文受限而被排除。其次,在充分阅读论文后,排除了 52 篇不符合所制定重金属标准的文章。最后,共考虑了 33 个同行评议的研究。并分析了涵盖 19 个国家 33 篇文章,其中 64% 的文章考虑的主题是与农村非点源污染(养殖废水、农田沥水、农村径流等)相关,而矿区(来自非矿山排水)和路面径流(来工业区或道路)分别占 30% 和 6%。混合人工湿地或与其他系统结合的人工湿地占总人工湿地的 65%,单级人工湿地占 35%。大多数是试点研究(51%),但全面研究(31%)和实验室研究(18%)也有很好的代表性。从每项研究中获得人工湿地处非点源中重金属污染的相关信息。

2.2. 城市非点源污染

人工湿地也用于处理下水道溢流、初期雨水、道路冲洗水等非点源污染处理,如对北京道路扬尘重金属污染进行分析,发现 Cd、Cu 和 Pb 污染最为严重,Cd 更是高达北京背景值的 8 倍[7][8]。最重要的是,以土壤重金属中超标最为严重的 Cd 为例,Cd 在通过食物和空气等介质进入人体后,在人体中极易累积的同时还有较长的潜伏性。云南省纵向岭谷区高速公路建设造成了土壤和植物中的重金属积累,而且这种积累在农田系统中表现的最为明显[9]。采用最新的技术进行统计分析发现在德国使用 RSFs 的目标是减少地表水污染,以达到欧洲水质标准要求的良好水体质量,从而不确定严格的出水水质标准,主要旨在去除 TSS、COD 和氨,而 TN 的去除没有明确的目标,系统也没有进行反硝化优化。法国的方法有很大不同,因为 CSO-CWs 的出水水质标准是集中式污水处理厂的出水水质标准(COD 125 mg/L, BOD 25 mg/L, TSS 35 mg/L) [10]。比较为满足不同水质目标而设计的 CSO-CWs 可能会得出误导的结论。因此希望未来的研究能够使用 EMC 和质量平衡方法来评估处理性能,而不是简单地基于浓度。

2.3. 农村非点源污染

因为饲料行业普遍存在向饲料中添加重金属元素的现象,如为了增强猪的健康与生长速度,饲料中需添加充足的 Cu 和 Zn [11],As 可以抑制病原微生物、促进生长、改善禽畜外观及畜产品颜色[12]。但

是饲料中重金属会通过不同代谢途径排出体外，进而污染环境。因此，随着点源污染被逐步控制，禽畜粪便有机肥的施用将会是导致农业重金属积累的主要原因。如珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物以 Ni、Pb、Cr 为主的重金属污染问题突出，而湿地土壤污染则以 Cd 为主[13]。哈尼梯田湿地[14]处于轻微的重金属生态危害状态，产生生态危害的主要重金属是 Cd、Cu、Cr 等等。综上，我国禽畜粪便重金属排放量与农田容纳能力已经失衡，而我国禽畜粪便重金属排放依旧会保持一个较快的增长趋势，因此对禽畜养殖废水和农田沥水的重金属污染去除，防止污水灌溉迫在眉睫。

2.4. 矿区非点源污染

上世纪八十年代中期以来，采矿业发展迅猛，长期乱采乱挖及露天开采，导致原始植被破坏，矿区原有的生态系统结构改变为草本零星、灌木和次生乔木群落[15]，在降雨过程中，被严重侵蚀的矿区土壤中的废石、尾砂、营养盐等污染物随地表径流进入受纳水体，在水中大量含重金属废石、尾砂不断析出重金属，导致地表水和地下水污染。

2.5. 重金属的来源及其迁移转化路径

重金属污染来源可分为点源污染和非点源污染。点源污染是一种已知的、可识别的来源，如制药业、医院废水、污水处理厂等等。目前国内点源污染管控日趋规范和严格，点源污染对环境的污染占比正在逐渐减小。另一方面，由于非点源污染[16] [17]来自广阔的地理尺度，因此难以追踪其确切位置并开展治理，对环境的污染占比正在逐渐扩大，尤其是其中重金属、POPs、微塑料等微污染物的影响往往被人忽视[18] [19]。本文解释了非点源重金属的来源及其迁移转化路径，如图 1 所示。非点源污染规模最大、危害程度最严重的是水土流失，数以亿吨计的泥沙和营养物质随地表径流直接进入水体[20] [21] [22]，但是这一过程中大量重金属污染物也随之一同进入水体，尤其是矿区和城市工业区初期雨水重金属含量尤为突出[23] [24]。在乡村大量的非点源污染随处可见，集约化养殖、零散畜牧、农药化肥滥用、污水灌溉等农业活动进一步加剧了重金属在各生物链中迁移、转化和富集，导致某些物种畸变，甚至破坏遗传基因的稳定性和遗传性[25] [26] [27]。综上，土壤、地表水和地下水是受点源污染和非点源污染影响的三个重要自然环境区域，重金属的潜在性危害严重，且往往被人忽视。

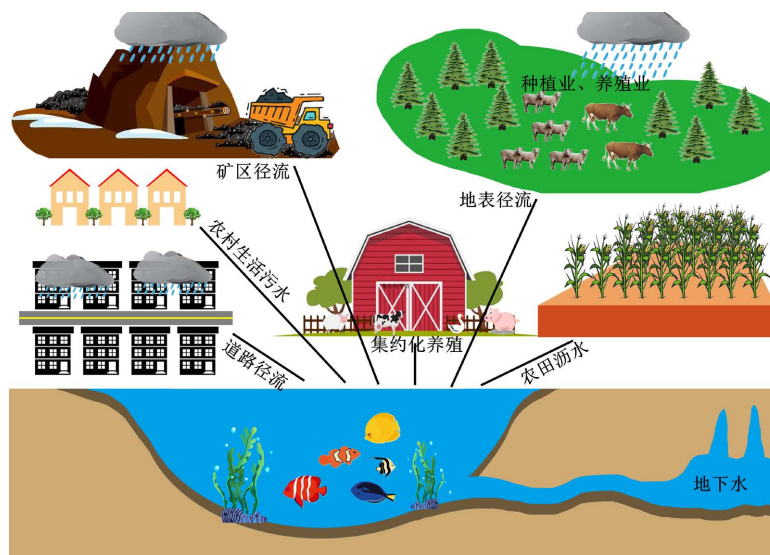


Figure 1. Various sources that are non-point source pollutants of heavy metal enter aquatic ecosystem
图 1. 非点源重金属污染物进入水生生态系统的各种可能来源

3. 人工湿地去除重金属机理

3.1. 基质与土壤的作用

基质作为支撑人工湿地的重要组成部分。基质除了支持植物和微生物种群生长外，还通过吸附、离子交换、沉淀作用与重金属接触。污染物在基质表面的吸附主要涉及范德瓦尔斯力、疏水分配、离子、静电交换和表面络合。非点源重金属污染废水经过人工湿地基质层，随着悬浮物一起被截留、过滤、沉积在基质中。但这种转移过程处于动态平衡，导致表层基质成为重金属汇集区，同时也成为潜在污染源。

在人工湿地中广泛用于去除重金属的最常见的载体基质是火山石、方解石、蛭石、硅藻土、沸石、石灰石、粉煤灰、活性炭和炉渣。这些吸附剂对不同重金属的使用和去除效率的总结见表 1。确认一种合适的吸附剂所需的主要特性基于以下参数(i) 较低的无机物浓度，(ii) 易于活化，(iii) 储存期间不易解吸，以及(iv) 低成本和可用性。成本因素是吸附剂商业化的关键因素之一。例如，活性炭，虽然是最古老、但相当昂贵、热再生技术成本较高，难以进行更大规模的实际应用。因此选取廉价事宜的基质对人工湿地来说尤为重要，成本价格为目前市场基础报价，不同的载体基质对不同重金属去除效果差异很大，因此设计湿地时应尽可能根据原水特征污染物选取适宜的载体基质。

土壤是人工湿地中另一种重要的组成成分，也有少数研究表明其对重金属去除的影响[28]。① 化学沉淀；② 腐殖酸或富里酸与重金属离子螯合或结合；③ 腐殖质会与重金属发生离子交换；④ 土壤胶体会吸附污染物。当然吸附在腐殖质和土壤胶体上的重金属本身不会发生降解，但会随着时间和沉积环境的改变而转化。此外，土壤中某些菌类的分泌物也会导致重金属的沉淀。

综上，基质与重金属的吸附作用是其最主要去除方式，虽然重金属很少与基质反应形成化学沉淀，但往往会络合转化成低毒状态。

Table 1. The removal efficiency of different heavy metals on common constructed wetland adsorbents

表 1. 常见人工湿地吸附剂对不同重金属的去除效率

湿地类型	成本(元/t)	特征污染物	去除率	主要去除机理
钢渣	1500	Cu、Cd、Pb、Zn	90%	离子交换[21]
方解石	410	Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As	88~100%	碳酸盐沉淀[22]
蛭石	900	Mn ²⁺ 、Zn ²⁺ 、Cu ²⁺ 、Pb ²⁺	57~69%	离子交换、表面静电和表面络合吸附[23]
硅藻土	2500	Ba、Cd、Pb、Mn、Ni、Zn	50~99%	离子交换[24]
沸石	260	Cd、Zn、Cr、Cu、Pb	26~96%	吸附[25]
石灰石	3000	Zn、Cu、Pb、Cd、Mn	64~99%	碳酸盐沉淀[26]
活性炭	6000	Cd、Zn、Cr、Cu、Pb	52~100%	碳酸盐沉淀、吸附[25]
炉渣	160	Cu、Zn、Cd、Pb	40~100%	离子交换[27]

3.2. 植物微生物协同作用

植物是人工湿地的重要组成部分，植物过滤、植物钝化、植物提取和植物挥发是人工湿地的实现重金属的去除的重要机制[29]。在水处理过程中，植物对水体中不同重金属元素的吸附、迁移、富集起着至关重要的作用[30] [31]。对于重金属等无机污染物的吸收，植物不仅通过扩散过程来吸收、迁移和富集[32]，还存在许多与重金属在多种生物体中的转运有关的转运蛋白，如：重金属(CPx 型) ATP 酶、天然抗性相关巨噬细胞蛋白、ATP 结合框转运蛋白和阳离子扩散促进剂[33] [34]。另一方面，植物根系表面会吸附水体中的重金属，其表面分泌物和腐殖质会与重金属相结合，形成多种重金属沉淀或螯合物，从而

将重金属转化为低毒状态,降低迁移转化能力[35];此外硒和汞等挥发性重金属也可以通过植物挥发到空气中,见图2。因为重金属一旦进入植物组织,可能会参与各种代谢过程(植物挥发、迁移、富集),代谢过程一般涉及亲本化合物的酶促生物转化、代谢物与大分子偶联、偶联产物整合到液泡和植物细胞壁等一系列生化反应[36]。所以投加人工合成螯合剂,可以促进植物吸收和迁移重金属[37]。例如天然螯合剂柠檬酸能显著增加植物对 Cd、Pb 的富集和迁移能力,促进它们在植物组织中的螯合和液泡隔离以及减轻胁迫诱导的氧化损。可生物降解的人工螯合剂渐渐发展起来,如谷氨酸 N, N-二乙酸能提高东南景天对土壤 Zn 和 Cd 的提取效率[38]。除了这些发现外,硅(Si)作为土壤中第二丰富的元素,不仅可以刺激植物生长,还可以缓解各种包括重金属胁迫在内的非生物和生物胁迫[39]。减少生长培养基中的活性重金属离子、减少重金属向枝条的转运、刺激酶促和非酶促抗氧化剂、螯合、分隔、金属转运基因表达的调节以及植物的结构变化[40]。除了研究植物在人工湿地中的作用外,植物微生物在人工湿地生物降解中的关系仍然是一个未探索的领域[41]。因此,我们需要做更多的尝试来了解有助于去除重金属的植物与细菌之间的相互作用[42]。例如,根际细菌(PGPR)具有调节各种金属转运蛋白、耐受性和金属螯合剂基因,能通过分泌螯合剂、酸化和氧化还原变化产生促进植物生长的物质促进植物生长[43]。此外,某些细菌释放地蛋白质能使可溶性重金属离子沉淀,且在厌氧条件下,硫酸盐还原菌将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} 而与重金属反应,形成溶解度相对较低的金属硫化物沉淀[44]。即湿地沉积物中重金属含量随深度的增加而降低,主要沉积在表层有机物和沉积物中。因为异化硫酸盐还原法在沉积物的缺氧层中产生硫化物,与大部分 Cu、Pb 和 Zn 等重金属迅速结合。因此随着时间的推移,在人工湿地系统中积累的高有机负荷足以缓解进水中的金属[45]。所以植物各个部位对重金属的富集系数通常按根尖 > 根茎 > 叶 > 茎顺序依次递减。但是叶片比根系的吸收重金属实际效果更好,因此向植物叶面喷施叶面肥如吲哚乙酸(IBA)、吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA)等植物激素[46],能强化植物提取重金属能力。

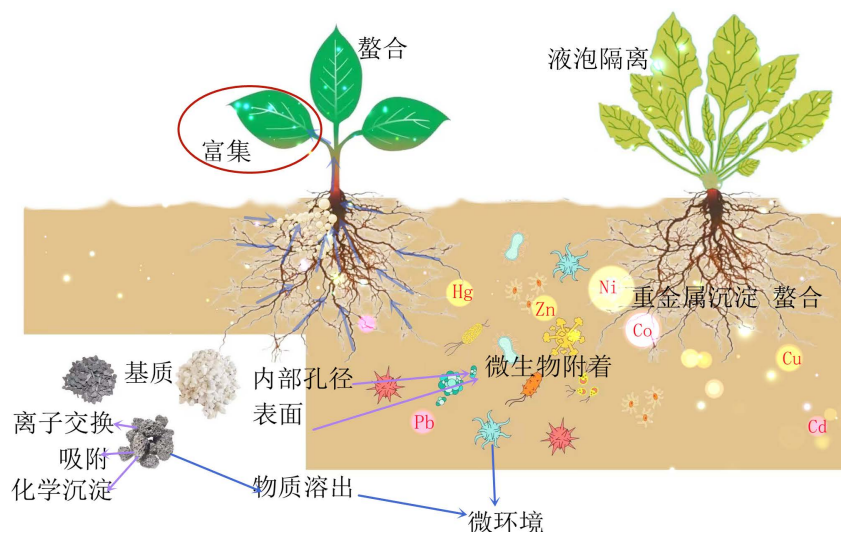


Figure 2. The migration, transformation and accumulation of heavy metals in plants
图 2. 重金属在植物体内的迁移、转化及积累

4. 结论

在土壤和水资源中重金属存在着多种形态,如离子态重金属、络合态重金属和螯合态重金属等等。非点源重金属污染物,具有隐蔽性、生物毒性显著、不可逆性和长期性。为了保护整个生态系统免受这些污染物的影响,利用人工湿地去除水体中的重金属最近受到了极大的关注。上述研究概述了人工湿地

植物修复去除多种重金属及其化合物的潜力, 包括重金属对人工湿地的毒性、人工湿地中重金属的去除效率。然而, 人工湿地高保留率和沉积物处理等问题似乎是一个令人担忧的因素, 使非点源污染控制变得困难。目前有意义的研究仅在中观尺度或微观层面进行。与此同时, 必须对农民、产业工人、家庭住户等各种生活、工作人员进行意识教育和控制方法教育, 以期在不久的将来, 持续降低非点源污染风险。此外, 还必须在以下特点上投入大量精力来筛选生长速度快、植物生物量高、适应和生长在寒冷和温带环境的能力强, 以及在高污染水平下易于生长的植物种类。

参考文献

- [1] Barbagallo, S., Cirelli, G.L., Consoli, S., *et al.* (2012) Analysis of Treated Wastewater Reuse Potential for Irrigation in Sicily. *Water Science and Technology*, **65**, 2024-2033. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.102>
- [2] Sharma, R., Vymazal, J. and Malaviya, P. (2021) Application of Floating Treatment Wetlands for Stormwater Runoff: A Critical Review of the Recent Developments with Emphasis on Heavy Metals and Nutrient Removal. *Science of the Total Environment*, **777**, Article ID: 146044. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146044>
- [3] Ventura, D., Ferrante, M., Copat, C., *et al.* (2021) Metal Removal Processes in a Pilot Hybrid Constructed Wetland for the Treatment of Semi-Synthetic Stormwater. *Science of the Total Environment*, **754**, Article ID: 142221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142221>
- [4] Oyuela Leguizamo, M.A., Sarmiento, M.C.G., *et al.* (2017) Native Herbaceous Plant Species with Potential Use in Phytoremediation of Heavy Metals, Spotlight on Wetlands—A Review. *Chemosphere*, **168**, 1230-1247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.075>
- [5] Knox, A.S., Paller, M.H., Seaman, J.C., *et al.* (2021) Removal, Distribution and Retention of Metals in a Constructed Wetland over 20 Years. *Science of the Total Environment*, **796**, Article ID: 149062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149062>
- [6] Zhang, Y., Li, Y., Wang, J., *et al.* (2021) Interactions of Chlorpyrifos Degradation and Cd Removal in Iron-Carbon-Based Constructed Wetlands for Treating Synthetic Farmland Wastewater. *Journal of Environmental Management*, **299**, Article ID: 113559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113559>
- [7] Walaszek, M., Bois, P., Laurent, J., *et al.* (2018) Urban Stormwater Treatment by a Constructed Wetland: Seasonality Impacts on Hydraulic Efficiency, Physico-Chemical Behavior and Heavy Metal Occurrence. *Science of the Total Environment*, **637-638**, 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.325>
- [8] 戴保琳. 利用农作物秸秆强化人工湿地对降雨径流中氮及重金属去除的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [9] 赵慧, 崔保山, 白军红, 等. 纵向岭谷区高速公路对沿线土壤-植物系统的影响[J]. 科学通报, 2007, 52(A2): 176-184.
- [10] Rizzo, A., Tondera, K., *et al.* (2020) Constructed Wetlands for Combined Sewer Overflow Treatment: A State-of-the-Art Review. *Science of the Total Environment*, **727**, Article ID: 138618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138618>
- [11] 王怀中. 饲料和猪粪中重金属含量特征及堆肥耐铅镉菌株的筛选鉴定[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东农业大学, 2019.
- [12] 周德刚, 丁美方. 饲料安全风险因素分析及应对措施[J]. 饲料研究, 2008(11): 74-77.
- [13] 付红波. 珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物重金属污染特征与评价[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2009.
- [14] 任华丽, 崔保山, 白军红, 等. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1625-1634.
- [15] 唐述虞. 铁矿酸性排水的人工湿地处理[J]. 环境工程, 1996, 14(4): 3-7.
- [16] 苏丹. 湖泊湿地沉积物重金属时空变异特征与来源判别研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2012.
- [17] Walaszek, M., Bois, P., Laurent, J., *et al.* (2018) Micropollutants Removal and Storage Efficiencies in Urban Stormwater Constructed Wetland. *Science of the Total Environment*, **645**, 854-864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.156>
- [18] Nsenga, K.M., Zhu, B., Moore, M.T., *et al.* (2021) Can Vegetated Drainage Ditches Be Effective in a Similar Way as Constructed Wetlands? Heavy Metal and Nutrient Standing Stock by Ditch Plant Species. *Ecological Engineering*, **166**, Article ID: 106234. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106234>

- [19] 孙保金, 庄起帆, 罗小进, 等. 苏州海绵城市试点区湿地沉积物中重金属的分布特征——以苏州工业园区为例[J]. 天津科技, 2020, 47(3): 62-68.
- [20] Shi, W., Li, T., Feng, Y., *et al.* (2022) Source Apportionment and Risk Assessment for Available Occurrence Forms of Heavy Metals in Dongdahe Wetland Sediments, Southwest of China. *Science of the Total Environment*, **815**, Article ID: 152837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152837>
- [21] 张浩, 于先坤, 徐修平, 等. 基于 XRD 与 SEM 研究风淬渣微粉用于重金属污染土壤的修复机理[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 278.
- [22] 王茂林, 吴世军, 杨永强, 等. 微生物诱导碳酸盐沉淀及其在固定重金属领域的应用进展[J]. 环境科学研究, 2018, 31(2): 206-214.
- [23] 夏银, 刘月迎, 王丽娟, 等. 蛭石对水中重金属离子的吸附性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(5): 1357-1363.
- [24] Elsayed, E.E. (2018) Natural Diatomite as an Effective Adsorbent for Heavy Metals in Water and Wastewater Treatment (a Batch Study). *Water Science*, **32**, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.02.001>
- [25] 王瑞刚. 人工湿地中强化吸附型填料筛选及其去污性能比较研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [26] Nguyen, T.T., Huang, H., Nguyen, T.A.H., *et al.* (2022) Recycling Clamshell as Substrate in Lab-Scale Constructed Wetlands for Heavy Metal Removal from Simulated Acid Mine Drainage. *Process Safety and Environmental Protection*, **165**, 950-958. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.026>
- [27] Yinxiu L, Hui Z, Gary B, *et al.* (2019) Preliminary Study on the Dynamics of Heavy Metals in Saline Wastewater Treated in Constructed Wetland Mesocosms or Microcosms Filled with Porous Slag. *Environmental Science and Pollution Research International*, **26**, 33804-33815. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2486-0>
- [28] 高素霞. 人工湿地基质配置对含 Pb 和 Cd 废水的处理效果研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [29] Rai, P.K. (2019) Heavy Metals/Metalloids Remediation from Wastewater Using Free Floating Macrophytes of a Natural Wetland. *Environmental Technology & Innovation*, **15**, Article ID: 100393. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100393>
- [30] He, W., Xu, F.-L., Zhang, Y., *et al.* (2014) Chapter 7. Modeling the Purification Effects of the Constructed Sphagnum Wetland on Phosphorus and Heavy Metals in Dajiuhe Wetland Reserve, China. In: Rgensen, S.E., Chang, N.-B. and Xu, F.-L., Eds., *Developments in Environmental Modelling*, Elsevier, Amsterdam, 185-207. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63249-4.00008-7>
- [31] Nabuyanda, M.M., Kelderman, P., Van Bruggen, J., *et al.* (2022) Distribution of the Heavy Metals Co, Cu, and Pb in Sediments and Typha spp. and *Phragmites mauritianus* in Three Zambian Wetlands. *Journal of Environmental Management*, **304**, Article ID: 114133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114133>
- [32] Bhat, S.A., Bashir, O., Ul Haq, S.A., *et al.* (2022) Phytoremediation of Heavy Metals in Soil and Water: An Eco-Friendly, Sustainable and Multidisciplinary Approach. *Chemosphere*, **2022**, Article ID: 134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- [33] Sharma, P., Pandey, A.K., Udayan, A., *et al.* (2021) Role of Microbial Community and Metal-Binding Proteins in Phytoremediation of Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Bioresour Technol*, **326**, Article ID: 124750. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124750>
- [34] Ullah, I., Mateen, A., Ahmad, M.A., *et al.* (2022) Heavy Metal ATPase Genes (HMAs) Expression Induced by Endophytic Bacteria, “AI001, and AI002” Mediate Cadmium Translocation and Phytoremediation. *Environmental Pollution*, **293**, Article ID: 118508. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118508>
- [35] Gavrilescu, M. (2022) Enhancing Phytoremediation of Soils Polluted with Heavy Metals. *Current Opinion in Biotechnology*, **74**, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.10.024>
- [36] Rai, P.K. (2021) Heavy Metals and Arsenic Phytoremediation Potential of Invasive Alien Wetland Plants *Phragmites karka* and *Arundo donax*: Water-Energy-Food (W-E-F) Nexus Linked Sustainability Implications. *Bioresour Technol Reports*, **15**, Article ID: 100741. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100741>
- [37] Williams, L.E., Pittman, J.K. and Hall, J.L. (2000) Emerging Mechanisms for Heavy Metal Transport in Plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)—Biomembranes*, **1465**, 104-126. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(00\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(00)00133-4)
- [38] 卢陈彬, 刘祖文, 张军, 等. 化学诱导剂强化植物提取修复重金属污染土壤研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(7): 1531-1535.
- [39] Wu, J.-W., Shi, Y., Zhu, Y.-X., *et al.* (2013) Mechanisms of Enhanced Heavy Metal Tolerance in Plants by Silicon: A Review. *Pedosphere*, **23**, 815-825. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60073-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60073-9)
- [40] Guittonny-Philippe, A., Masotti, V., *et al.* (2014) Constructed Wetlands to Reduce Metal Pollution from Industrial Catchments in Aquatic Mediterranean Ecosystems: A Review to Overcome Obstacles and Suggest Potential Solutions.

-
- Environment International*, **64**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.016>
- [41] Yu, G., Wang, G., Li, J., *et al.* (2020) Enhanced Cd²⁺ and Zn²⁺ Removal from Heavy Metal Wastewater in Constructed Wetlands with Resistant Microorganisms. *Bioresource Technology*, **316**, Article ID: 123898. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123898>
- [42] Kurniawan, S.B., Ramli, N.N., Said, N.S.M., *et al.* (2022) Practical Limitations of Bioaugmentation in Treating Heavy Metal Contaminated Soil and Role of Plant Growth Promoting Bacteria in Phytoremediation as a Promising Alternative Approach. *Heliyon*, **8**, e08995. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08995>
- [43] Manoj, S.R., Karthik, C., Kadirvelu, K., *et al.* (2020) Understanding the Molecular Mechanisms for the Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals through Plant Growth Promoting Rhizobacteria: A Review. *Journal of Environmental Management*, **254**, Article ID: 109779. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109779>
- [44] Sharma, P. (2021) Efficiency of Bacteria and Bacterial Assisted Phytoremediation of Heavy Metals: An Update. *Bioresource Technology*, **328**, Article ID: 124835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124835>
- [45] Singh, B.S.M., Singh, D. and Dhal, N.K. (2022) Enhanced Phytoremediation Strategy for Sustainable Management of Heavy Metals and Radionuclides. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, **5**, Article ID: 100176. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100176>
- [46] Mathur, P., Tripathi, D.K., Baluška, F., *et al.* (2022) Auxin-Mediated Molecular Mechanisms of Heavy Metal and Metalloid Stress Regulation in Plants. *Environmental and Experimental Botany*, **196**, Article ID: 104796. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104796>