

城市污水厂污泥中重金属去除及其土地利用的研究现状

郑少杰¹, 边德军^{1,2}, 聂泽兵^{2,3}, 李清哲¹, 王帆¹, 艾胜书¹

- (1. 长春工程学院吉林省城市污水处理重点实验室, 吉林 长春 130012;
2. 东北师范大学吉林省城市污水处理与水质保障科技创新中心, 吉林 长春 130117;
3. 东北师范大学环境学院, 吉林 长春 130117)

摘要: 污泥中富含磷、氮和钾等农作物需要的营养物质, 但碍于污泥中残留的重金属离子而难以使用。文章介绍了污泥中重金属的存在形式及作用机理, 综述了几种能有效去除重金属的方法(吸附法、淋滤法和化学法), 分析了各种方法的优缺点、影响因素、处理效果、适用范围及处理后土地利用的现状, 以期处理后的污泥能够作为农用地, 减轻剩余污泥二次污染危害, 提高剩余污泥利用率, 降低经济投入, 变废为宝。

关键词: 污水厂污泥; 重金属去除; 土地利用; 复合污染物; 重金属形态

中图分类号: X705

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.01.009

Research Status of Heavy Metal Removal and Land Use for Municipal Sewage Sludge

ZHENG Shaojie¹, BIAN Dejun^{1,2}, NIE Zebing^{2,3}, LI Qingzhe¹, WANG Fan¹, AI Shengshu¹

- (1. Changchun Institute of Technology, Jilin Provincial Key Laboratory of Municipal Wastewater Treatment Changchun 130012, China; 2. Northeast Normal University, Science and Technology Innovation Center for Municipal Wastewater Treatment and Water Quality Protection Changchun 130117, China; 3. School of Environment, Northeast Normal University Changchun 130117, China)

Abstract: The sludge is rich in phosphorus, nitrogen, potassium and other nutrients needed by crops. However, it is difficult to use directly because of the residual heavy metal ions in the sludge. In this paper, the existing forms and the interaction mechanism of heavy metals in the sludge were introduced. Several effective methods for removing heavy metals (adsorption, leaching and chemical methods) were summarized. The advantages and disadvantages, the influencing factors, the treatment effects, the application scope and the current situation of the land use after treatment were analyzed. This paper aims to provide a reference of the agricultural land use in order to reduce the secondary pollution hazard, improve the utilization rate of the surplus sludge, decrease the economic investment and change the waste to the wealth.

Keywords: Municipal Sludge; Heavy Metal Removal; Land Use; Compound Pollutants; Heavy Metal Speciation

CLC number: X705

随着时代的发展和人民生活水平的不断提高, 日益加剧的生态环境污染问题成为了目前制约我国农业可持续发展的重要因素, 如何实现城市污水厂污泥中的重金属减量化、无害化和资源化已成为环境科学领域的重点和难点。截至 2017 年, 我国生活废水年产量约 590 亿 t, 剩余污泥产量达到了 908.07 万 t, 而工业污水的污泥产量亦达到了 2950

万 t。活性污泥作为污水处理的副产物, 目前的方法以填埋与焚烧为主, 随着物质的化学循环过程, 填埋会产生渗滤液污染地下水, 而焚烧处理费用较高, 且会产生含 N、S 和重金属等有毒气体, 造成严重的二次污染^[1-2]。另外, 活性污泥中蕴含大量的有机质、N、P、K 及微量元素, 能够有效提升土地肥力, 对农作物的生长具有积极作用。若是能够

收稿日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878067); 吉林省科技发展计划项目(20180201020SF, 20200201005JC)

作者简介: 郑少杰(1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 城市污水处理。E-mail: 904068608@qq.com

通信作者: 边德军(1967-), 男, 博士、教授。研究方向: 城市污水处理。E-mail: ccgxybiandj@163.com

引用格式: 郑少杰, 边德军, 聂泽兵, 等. 城市污水厂污泥中重金属去除及其土地利用的研究现状[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 58-63.

将污泥中重金属的含量降至农用标准范围内^[3],将提供一种处理剩余污泥的新思路,具有极大的发展潜力和实践价值。

污泥中的重金属作为制约污泥农用的关键因子受到了国内外学者的广泛关注,重金属去除技术主要分为:化学法、吸附法和淋滤法。化学法在处理电镀废水方面具有良好的效果^[4],但会导致污泥中营养物质流失^[5];吸附法具有高效、便捷和经济等特点,但在耐热性、稳定性及选择性上存在一些问题。另外,工业废水存在复合有机污染物可能,会干扰吸附剂对金属离子的吸收^[6];淋滤技术能有效去除污泥中的重金属,在消灭病原菌以及控制污泥恶臭等方面也具有良好的效果。此外,淋滤法对污泥脱水性也具有积极作用^[7-9],拥有广泛的应用前景,但该方法滞留时间较长,易产生大量高浓度重金属淋出液。

现阶段,污泥中重金属去除方法的应用还处于初级阶段,对重金属的去除只限于单一污染物,对复杂的复合污染物处理效果不佳。在当前形势下,传统单一的处理方法难以对重金属进行有效、绿色和经济地处理。因此,不同方法的联用及新工艺的深入发展将成为未来研究的方向。本文综述了剩余污泥中的重金属形态,以此为基础探讨了重金属离子相互作用的机理及去除的难易程度,总结了几种能够有效去除重金属离子且具有发展潜力的方法,并对其未来的研究方向以及重点难点进行展望。

1 污泥中重金属存在形式及其作用机理

1.1 重金属的存在形式

污泥中重金属的存在形态在很大程度上决定了其浸出性、迁移性、毒性和生物有效性,污泥中重金属形态的分类方式主要有 TESSIER 法^[10]和 BCR 法^[11]。前者将污泥重金属分为碳酸盐结合态、有机态、铁锰氧化态、硫化物及可交换的离子形态等几类,后者将其分为弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态。文献^[12]研究发现,污泥中重金属的存在形态是决定其去除率的重要因素,其中以可交换态、铁锰氧化态和碳酸盐结合态稳定性较差,如 Zn、Cu、Cd 和 Ni 等易被植物所吸收利用;而有机态和残渣态较为稳定,如 Cr、Pb 和 As 等不易溶出到环境中。豆艳霞等^[13]采用不同基质的氧化硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌淋滤剩余污泥,研

究结果表明,其对 4 种重金属浸出率的大小次序为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb}$ 。因此重金属的浸出率与其存在形态有关,故如何处理不同形态的重金属是未来需要克服的难点。

1.2 有机污染物与重金属之间的相互作用

随着工农业的不断发展,剩余污泥中重金属的成分愈发复杂,金属离子与有机污染物可通过多种方式反应,形成复合污染,为重金属的去除增加了难度^[14]。汪振文等^[15]归纳总结了复合污染物的形成,将其分为竞争作用、协同作用和强络合作用。竞争作用指的是在去除复合污染物时,由于污染物各组分之间存在竞争吸附点位,导致吸附剂难以对各组分污染物进行有效的去除;协同作用是指在一定条件下存在某种污染物对其他污染物的去除有积极作用;络合作用是指污水中的游离金属离子和有机污染物结合形成不同构及稳定的络合物。GOU et al^[16]使用扩展 X 射线吸收精细结构 (EXAFS) 光谱研究了 Li 和 Co 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的竞争吸附,研究发现,在 pH 为 6 时 Li 对 Co 有抑制作用,在 pH 为 7.5 时两者没有形成竞争关系,在处理复合污染物时 pH 应该作为一项重要的参数进行控制。黄翔峰等^[17]研究发现官能团组成与数量、金属离子的电负性和环境的 pH 是影响有机污染物与金属离子络合的主要因素,有机物的性质在很大程度上受富电子官能团的影响,富电子官能团数量决定了其络合能力的强度。WANG et al^[18]通过对三价铁离子与二甲氨基的研究,发现官能团的电子传递能力和空间位阻能够影响络合物的稳定性。BRILLANLT et al^[19]选择了 5 种金属离子,测定其表观络合常数由大到小为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$,与其络合能力基本一致,表明金属离子的吸电子能力也是影响络合作用的重要因素之一。

2 剩余污泥中重金属去除方法

2.1 吸附法

城市污水厂污泥源于污水厂中的二沉池,活性污泥在处理污水的过程中通过沉淀吸附的方式吸收了 70% ~ 90% 的重金属,所以在来源上降低污水中重金属的含量也是 1 种有效的去除方式。

吸附法是指利用具有多孔结构的固体材料将污水中的重金属离子吸附于表面从而达到固液分离的效果。相比于其他的处理方法,吸附法具有很

高的灵活性,其可以根据处理水质的不同调整吸附剂的种类。传统的吸附剂如活性炭,其能够有效的去除色度、臭味还可以去除废水中大多数有机污染物、无机污染物及一些重金属离子,被作为“万能吸附剂”而广泛的运用在废水处理中。宋小伟^[20]在探究活性炭对 Cd、Mn 离子的吸附中发现影响活性炭吸附的因素有很多,如温度、pH 和重金属浓度,吸附效率与温度呈正相关,与重金属的初始浓度呈负相关,pH 为中性时吸附效率达到最高值。活性炭在处理大多数污染物时都有良好的效果,但随着工业废水愈发复杂化,大量的有机污染物与重金属离子发生螯合作用,导致活性炭等传统吸附剂不再拥有良好的吸附率。

针对上述情况汪振文等^[15]整理归纳了 2 种具有代表性新型的吸附剂:改性天然复合吸附材料和磁性复合吸附材料。在处理复合污染物时,传统吸附剂如氧化石墨烯、介孔碳和壳聚糖等由于表面的官能团单一而导致重金属离子发生竞争吸附,降低了吸附效率^[21],而改性天然复合吸附材料通过引进多种官能团的方式来提高吸附性能;磁性复合吸附材料在外部磁场的作用下能够迅速的从水中分离开来,增加了吸附剂的使用次数,达到了降低成本的作用。LIU et al^[22]运用溶剂热法使用尿素作为改性剂,使用软模版制造了具有三维多孔中空结构的磁性微球 NiFe_2O_4 (MS- NiFe_2O_4),能对共存金属离子(Cu、Cd、Cr 和 Zn)以及环丙沙星、恩诺沙星和诺氟沙星等共存污染物进行快速有效的去除。

近年来,生物吸附法由于具有原料丰富、成本低廉、可再生回收和吸附容量大等优点,逐渐成为处理重金属的研究热点之一。所谓生物吸附是指利用生物中存在的特殊配体,通过静电吸附、表面络合、离子交换以及氧化还原等一系列反应来达到去除重金属离子目的的工艺。朱亦珩^[23]以污水厂中筛选出的菌株 Z-2 作为研究对象,通过丁二酮肟分光光度法测定重金属离子,研究发现菌株 Z-2 在 pH 为 6、温度为 30~40℃ 时,对 Li 去除率能达到 30.67%。铂族金属作为当今世界不可或缺的重要金属,被广泛应用于纳米材料、工业及环保催化剂、药物及一些特种功能材料等方面,但在世界上已探明的总量仅 7~8 万 t,故铂族金属的二次利用与回收一直是科研人员研究的重点。谭玲等^[24]探究发现大肠杆菌对 Pt 的吸附率达到 97.68%,且对

Pd^{2+} 、 Pt^{4+} 、 Ag^+ 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ni^{2+} 等也有良好的吸收效果。相较于传统金属矿产资源,回收资源具有品质较好、组分简单和品种单一等特点,这些特性使得铂族金属等稀缺金属能够在较短时限内回收利用,对环境影响小,经济收益好。

2.2 淋滤法

生物淋滤法因具有经济性、效率高、绿色及工程应用强等优点受到了国内外学者的普遍关注。生物淋滤是指特定微生物(嗜酸性硫杆菌)或其代谢产物通过氧化还原、络合、吸附和溶解等一系列反应将重金属溶出的一种工艺。微生物淋滤法对大部分的重金属都有良好的去除效果,其中 Mn、Cu、Zn 和 Cd 的去除率达 90% 以上^[25]。GAN et al^[26]采用分批法和异养微生物接种系统,通过分离的耐酸微生物红酵母和黑曲霉对金属进行淋滤,Mn、Cu、Zn 和 Cd 的浸出率分别达到 94%、90.9%、94.74% 和 84.2%。另外,生物淋滤法的影响因素较多:(1)重金属存在的形态决定了其被淋滤出的难度,稳定态存在的金属难以被淋滤出来,而非稳定态的则更容易去除;(2)基质的投加量与种类决定了菌种的生命活动和优势菌种的地位;(3)接种量可以缩短培养周期,接种量过低容易导致所需菌种无法成为优势菌种,在 5%~10% 的区间内去除率逐渐升高,而后趋于平稳;(4)温度及 pH 也会对不同菌种造成一定程度的影响。此外,污泥经过生物淋滤,脱水性能将得到极大的改善。马冬冬等^[27]以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 作为底物进行生物沥浸预处理时,发现在底物浓度为 6 g/L、沥浸 5 d 时污泥的脱水性能达到最高值,此时污泥比阻(SRF 值)为 $0.52 \times 1013 \text{ m/kg}$,Zn、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Cr 的去除率分别为 80.36%、76.89%、80.93%、86.04%、58.37% 和 58.52%。

污泥厌氧酸化淋滤是近年来发展的一种新型淋滤技术,相较于微生物淋滤法,其无需添加药剂和前处理,具备良好的发展潜力。李光宇等^[28]研究发现剩余活性污泥中的重金属离子经过厌氧消化后,其中的可交换态及其他不稳定形态会有一部分转化为较为稳定的硫化态。另外,在厌氧酸化产氢的过程中,大分子有机酸会水解为小分子的非脂肪酸及小分子脂肪酸,导致反应器内的 pH 降低,使一些金属盐的溶解度增大^[29]。此外,小分子脂肪酸通过与金属离子的络合反应也能够使溶解度增大,以

此增加污泥中重金属的浸出率。MEULEPAS et al^[30]研究发现影响厌氧淋滤的因素有很多: 剩余活性污泥含量过高会使生物降解受到多方面因素的影响而降低效率, 导致固态有机颗粒物(POMs)的含量过高, 影响重金属离子的去除; 初始 pH 通过对产酸菌活性的控制影响厌氧淋滤的效果, 值得注意的是较低的 pH 值虽然可以使更多的金属盐溶出, 但也会抑制产酸菌的生长。另外, 调节 pH 可用于甲烷的产出, 增加经济效益, 所以适宜的 pH 值是影响厌氧酸化淋滤效果的重要参数。

2.3 化学法

化学法主要分为电化学法和化学试剂法, 前者利用电极使重金属离子通过电迁移、自由扩散、电泳、电解及电渗析等反应转移至阴极从而将其去除, 后者利用化学试剂通过螯合、浸出和固化等方式去除重金属离子。其中, 电化学法具有处理效率高、可浓缩回收重金属且不需要化学试剂的优点, 但污泥中重金属向液相转化的时间较长并且需持续通电, 因此费用较高。此外, 该方法也会改变污泥的理化性质而使其肥力下降, 难以达到农用污泥的标准^[31]。徐颖等^[32]采用浸提剂(L-天冬氨酸、氨三乙酸、DL-苹果酸和丙二酸)探究其对处理后污泥肥力的影响, 研究发现经过化学浸提过后的污泥流失了一部分的营养物质但仍能满足土地的需要。其中浸提剂以 L-天冬氨酸的效果最优, TP 和 TN 的流失分别为 56.4% 和 33.3%。污泥与土壤各 50% 混合使用, 对植物的生长不造成负面影响。洪亚军等^[33]通过添加化学预处理的方式研究柠檬酸(CA)和谷氨酸 N,N-二乙酸(GLDA)在对重金属的去除效率, 研究结果表明化学预处理能够加强人工湿地对重金属的去除; 其中以 GLDA 效果最优, 相较于对照组湿地植物生物增加了 172.89%, 表明化学预处理可以有效地去除重金属离子, 且不会对植物的生长造成负面影响。

电动修复法作为多种学科综合而成的技术^[34], 能在短时间内的处理多种金属离子, 且不会对环境造成负担。其对不同形态的重金属去除效果不一, 对碳酸盐结合态和残渣态去除效果明显, 而金属可交换态以及铁锰氧化物态的去除效果则不太理想。裴冬冬等^[35]利用 CA 为络合剂, 大量的 Zn 由可还原态转化为酸可提取态, 而 Cu 则以残渣态和可氧化态为主, 两者去除率都有明显的提高, 在

0.10 ~ 0.20 mol/L 为最佳投放区间。经过柠檬酸预处理后, 电动修复法为未来回收 Zn 和 Cu 等重金属元素提供一种新思路。此外, CA 还可以与 GLDA 或是皂角苷联用^[36-37], 将呈分散絮状结构的污泥变为明显的团结结构和片状结构, 污泥形态的转变证明了 CA、GLDA 及皂角苷能够促进污泥中重金属的释放, 改善污泥的脱水性, 提高了剩余污泥利用率。

3 各去除方法的适用范围

经过对各重金属去除方法的介绍, 综合各方法的优劣及影响因素, 总结其适用范围如下。

1) 吸附法具有灵活性, 可根据水质的不同选择吸附剂, 但对复合污染物的去除效果欠佳, 在面对重金属含量高的污水时只能作为辅助手段, 可与其他方法联用, 以预处理的方式降低污水中重金属含量。

2) 微生物淋滤法通常以硫粉为能源基质培养驯化嗜酸性硫杆菌来去除污泥中的重金属, 所以在面对以硫化物为主的重金属时去除效果最佳, 对于其他形式的重金属也有良好的处理效果, 应用范围较广。

3) 化学法处理效率较高, 其中化学试剂法对稳定态的金属也能有效去除, 但成本较高且存在二次污染的风险, 故适用于处理重金属浓度较高的污泥和回收稀有金属。

4 污泥土地利用现状

我国在 2008 ~ 2017 年间共计发表 51 篇关于污泥土地利用相关的文件^[38], 目前, 我国土地利用有以下几方面应用^[39-40]: (1) 园林绿化。将污泥用作森林土壤, 极大地改善了土地肥力, 利用一些植物转移污泥中的重金属及有机污染物, 有效避开对人类的威胁; (2) 土地改良。污泥中的微生物可以促进土地熟化, 快速恢复植被, 将污泥投入盐碱地或沙化地, 增加土地肥力且能有效避免水土流失等问题; (3) 污泥建筑材料利用。在日本等发达国家已有将污泥变为水泥的技术并且广泛运用, 此外, 污泥在制砖、制轻质骨料等方面也有应用; (4) 污泥农用。污泥中蕴含多种促进农作物生长的营养物质, 可通过堆肥或制成污泥复合肥的方式消除臭味、固化和钝化重金属、降解多数毒性有机物, 其

效果更佳。王新等^[41]利用污水厂污泥作为堆肥土地,探究其长期使用对树木及土壤环境的影响,研究表明经过 6 个月的生长,实验组与对照组相比,树高、地径均有显著的提高。此外,处理量为 60 mg/kg 时土壤中 Cd 含量与对照组相比提高了 74.41%,而 Pb、Cu 和 Zn 含量变化甚微。

污泥中重金属的去除及稳定化是制约污泥土地利用的主要原因,但去除方法(淋滤法、化学试剂法和电动修复法等)大多还处于实验室阶段,针对处理后污泥农用的研究也处于初级阶段。目前,利用酸作为浸提剂将污泥处理后农用的研究占主流地位^[42-43],处理后重金属含量均能达到《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质:CJ/T 309—2009》标准^[44]。其余方法对污泥农用方面的研究较少,但在应用前景上都极具潜力,相信在未来的研究应用中能有出色的效果。此外,在未来要想实现污泥的资源化利用,还需要建立完整的法律制度、严格的检查标准及精确的使用方法用以指导污泥的土地利用进程。

5 展望

近年来剩余污泥的产量逐年增加,按照以往填埋或焚烧的方式进行处理会加大经济的投入,并且对填埋地造成严重的环境污染。相比之下,采用“三化”的方式处理无疑更具有发展前景。当前对重金属处理方法的研究大多还处于实验室阶段,在未来的研究中,吸附法可以改良磁性复合吸附材料,通过增加官能团或培养适合的菌株的方式加强吸附能力;而生物淋滤法可以把重心放在产酸菌的驯化上,培养抗冲击能力强的菌种,防止因 pH 或其他因素变化而导致溶解度发生改变,另外对淋滤程度浸出度、微生物的培养时间也是重点研究方向;化学法则应该在降低成本及防止二次污染方面深入研究,在考虑经济条件的基础上,利用电动修复法加强稀缺金属的回收。此外,重金属形态作为制约各方法处理效率的主要影响因子也应当深入研究。

污泥中的重金属主要来自于污水,建议根据每个地方的工厂、企业情况,将工业废水和生活污水区分,对工业废水进行预处理降低重金属含量后再进行混合处理,减少资源的浪费。建立健全的监察制度,严格遵守《中华人民共和国土壤污染防治法》,对剩余污泥中金属含量进行严格的检测,符合

标准才可作为农用地使用。

参考文献

- [1] MAXIMILIAN H, ANTJE W, BRIGITTE H. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 895–919.
- [2] DOMINGUZE M, ALEGRE J, MADEJON P, et al. River banks and channels as hotspots of soil pollution after large-scale remediation of a river basin[J]. *Geoderma*, 2016, 261: 133–140.
- [3] DELPHINE L, MARILVNE S, MAGALI C, et al. Impact of sludge stabilization processes and sludge origin (urban or hospital) on the mobility of pharmaceutical compounds following sludge landspreading in laboratory soil-column experiments.[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(21): 17135–17150.
- [4] 王文琪. 化学法处理电镀废水的研究进展[J]. *电镀与环保*, 2017, 37(2): 1–4.
- [5] 赵庆良,涂剑成,杨倩倩. 微波辅助化学试剂浸提城市污水处理厂污泥中重金属[J]. *中国建设信息(水工业市场)*, 2010(07): 15–18.
- [6] 郭成,高翔鹏,李明阳,等. 海藻酸钠基吸附材料去除水中重金属离子的研究进展[J/OL]. *过程工程学报*: 1–15. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.4541.tq.20200420.1452.006.html>.
- [7] ZENG X, TWARDOWSKA I, WEI S, et al. Removal of trace metals and improvement of dredged sediment dewaterability by bioleaching combined with Fenton-like reaction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 288(15): 51–59.
- [8] 李浩,杨期勇,熊兵. 生物淋滤技术在去除污泥中重金属的应用进展[C]//中国环境科学学会. 第六届重金属污染防治及风险评价研讨会暨重金属污染防治专业委员会 2016 年学术年会论文集. 厦门, 2016: 169–176.
- [9] 康得军,匡帅,唐虹,等. 微生物淋滤技术在去除城市污泥重金属中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2016, 47(3): 11–15.
- [10] TESSIER A, CAMPBELL P, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844–851.
- [11] 王亚平,黄毅,王苏明,等. 土壤和沉积物中元素的化学形态及其顺序提取法[J]. *地质通报*, 2005(8): 728–734.
- [12] 代双艳. 微生物淋滤电子废物拆解地土壤中重金属的研究[D]. 上海第二工业大学, 2019.
- [13] 豆艳霞,王怡,陈斌,等. 疏杆菌淋滤对剩余污泥中重金属及养分的影响[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(21): 27–31.
- [14] 关小红,谢嫔. 环境中金属离子与有机污染物复合污染研究进展[J]. *土木与环境工程学报*, 2019, 41(1): 120–128.
- [15] 汪振文,王会才,杨继斌,等. 吸附法去除水中重金属复合污染物的研究状况[J]. *稀有金属*, 2020, 44(1): 87–99.
- [16] GOU W, JI J, LI W. An EXAFS investigation of the mechanism of competitive sorption between Co(II) and Ni(II) at γ -alumina/solution interface[J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(3):

- 462–464.
- [17] 黄翔峰, 熊永娇, 彭开铭, 等. 金属离子络合对抗生素去除特性的影响研究进展[J]. *环境化学*, 2016, 35(1): 133–140.
- [18] WANG H, YAO H, SUN P, et al. Oxidation of tetracycline antibiotics induced by Fe(III) ions without light irradiation[J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 1255–1261.
- [19] BRILLAULT J, TEWES F, COUET W, et al. In vitro biopharmaceutical evaluation of ciprofloxacin/metal cation complexes for pulmonary administration[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2017, 97: 92–98.
- [20] 宋小伟. 活性炭对重金属离子镉锰的吸附研究[J]. *广东化工*, 2018, 45(16): 76–77.
- [21] WEN J Z, LIU Y, LI J H, et al. Simultaneous Enrichment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Cu(2+) in Water Using Tetraazacalix[2]arene[2]triazine as a Solid-Phase Extraction Selector[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(31): 6233–6239.
- [22] LIU X, LIU M, ZHANG L. Co-adsorption and sequential adsorption of the co-existence four heavy metal ions and three fluoroquinolones on the functionalized ferromagnetic 3D NiFe_2O_4 porous hollow microsphere[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 511: 135–144.
- [23] 朱亦珺. 生物吸附法处理污泥中重金属镍[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(7): 104–108.
- [24] 谭玲, 谭志斌, 何佳, 等. 生物吸附法回收溶液中铂族金属的研究进展[J]. *贵金属*, 2017, 38(S1): 163–168.
- [25] GAN M, JIE S G, LI M M, et al. Bioleaching of multiple metals from contaminated sediment by moderate thermophiles[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 97(1-2): 47–55.
- [26] GAN M, SONG Z B, ZHU J Y, et al. Efficient bioleaching of heavy metals from contaminated sediment in batch method coupled with the assistance of heterotrophic microorganisms[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 457.
- [27] 马冬冬, 王晟亦, 王敦球. 生物沥浸预处理改善污泥脱水性能和去除重金属研究[J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(4): 67–73.
- [28] 李光宇, 王少坡, 邱春生, 等. 淋滤技术去除剩余污泥重金属研究进展[J]. *环境工程*, 2017, 35(2): 133–137+167.
- [29] HUISMAN J, SCHOUTEN G, SCHULTZ C. Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry[J]. *Hydrometallurgy*, 2006, 83(1-4): 106–133.
- [30] MEULEPAS R, GONZALEZ-GIL, TESHAGER F, et al. Anaerobic bioleaching of metals from waste activated sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 60–67.
- [31] 解道雷, 孔慈明, 徐龙乾, 等. 城市污泥中重金属存在形态、去除及稳定化研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(1): 330–342.
- [32] 张颖, 陈玉, 路景玲, 等. 化学法浸提污泥土地利用的适用性[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(2): 302–308.
- [33] 洪亚军, 徐祖信, 冯承莲, 等. 化学预处理-人工湿地联合处理污泥中重金属[J]. *环境工程*, 2019, 37(11): 45–51.
- [34] 张艳杰, 鲁顺保, 彭桂群. 阴极 pH 控制对电动去除电镀污泥重金属的影响[J]. *环境化学*, 2013, 32(3): 492–497.
- [35] 裴冬冬, 鲁聪立, 杨韦玲, 等. 柠檬酸强化电动去除和回收污泥中的重金属[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3789–3796.
- [36] 徐大勇, 洪亚军, 唐海, 等. 柠檬酸和谷氨酸 N, N-二乙酸优化处理污泥重金属[J]. *化工学报*, 2017, 68(6): 2535–2545.
- [37] 叶涛, 黄丽, 张克强, 等. 皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4850–4859.
- [38] 黄岚, 封莉, 杜子文, 等. 我国城市污泥土地利用瓶颈问题分析与对策研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(20): 31–36.
- [39] 武建芳. 城市污泥综合利用现状分析[J]. *科学技术创新*, 2017(21): 125–126.
- [40] 苟剑锋, 李国梁, 曾正中, 等. 城镇污泥土地利用与环境影响分析与对策研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4): 564–570.
- [41] 王新, 周启星. 污泥堆肥土地利用对树木生长和土壤环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005(1): 174–177.
- [42] 李印霞, 刘碧波, 曹志林, 等. 酸去除剩余活性污泥重金属效果及农用安全性[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(1): 271–276.
- [43] 寇莹莹, 赵倩, 王雪娆, 等. 谷氨酸与柠檬酸复合去除污泥中重金属及处理后污泥农用可行性分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 185–189.
- [44] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂污泥处置农用泥质: CJ/T 309-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.