

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.007

城镇污水厂典型重金属去除研究进展

李鹏程¹, 刘成², 武海霞¹, 金俊丞¹

(1. 南京工业大学 城市建设学院, 江苏 南京 211816; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 重金属污染成为日益严重的环境污染问题,也是影响污水资源化利用的关键因素,城镇污水处理厂污染物排放标准严格限制了重金属的最高允许排放浓度。对城镇污水厂处理污水中的重金属和微生物吸附去除重金属等相关研究进行整理,阐述了城镇污水中的重金属浓度和特性、重金属离子在污水处理厂的迁移转化、不同处理工艺对典型重金属的去除效能以及影响因素和典型去除机理,并对未来污水厂去除重金属研究进行了展望。

关键词: 污水处理厂; 重金属去除; 迁移转化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0040-07

Research Progress on Removal of Typical Heavy Metals in Urban Sewage Treatment Plants

LI Peng-cheng¹, LIU Cheng², WU Hai-xia¹, JIN Jun-cheng¹

(1. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Heavy metal pollution has become an increasingly serious environmental pollution problem, and it is also a key factor affecting the utilization of sewage resources. The pollutant discharge standards of urban sewage treatment plants strictly limit the maximum allowable discharge concentration of heavy metals. The related researches on heavy metals in urban sewage and their removal by microbial adsorption are reviewed. The concentration and characteristics of heavy metals in urban sewage, the migration and transformation of heavy metal ions in sewage treatment plants, the influence of different treatment processes on the removal efficiency of typical heavy metal, the influencing factors of heavy metals in treatment processes and the typical removal mechanism were reviewed. Finally, the future research on the heavy metal removal in sewage treatment plants is prospected.

Key words: sewage treatment plant; heavy metals removal; migration transformation

重金属具有长期性、积累性、不可逆性和显著的生物毒性等特点,难以被生物降解,而且会通过食物链的生物放大作用在人体内富集。微量的重金属物质对人体有一定益处,但当其浓度达到一定数值后会威胁人体健康。城镇污水中的重金属主

要来自于工矿企业的生产废水、居民生活污水、自然雨雪形成的径流等。随着我国经济的快速发展和城市化进程的加快,淡水资源日趋紧张,污水资源化利用成为热点,而水中的重金属种类及含量是关键影响因素。

通信作者: 刘成 E-mail: 107489860@qq.com; 武海霞 E-mail: vividhaixia@163.com

1 城镇污水中重金属的含量及特征

城镇污水中重金属的种类和浓度易受当地的生活条件、习惯、法规要求等因素影响^[1]。相关调研结果表明,城镇居民生活污水与商业污水中重金属的浓度水平相似,而新、旧住宅和管道铜、镉含量的差异使不同区域污水中的铜镉浓度变化较大,牙科诊所产生的含汞废水也会导致汞含量增高,在使用镀锌管道的区域其城镇污水中Zn浓度较高;电镀行业、采矿冶炼、皮革加工和油漆颜料制造等工业生产废水中铬、铜、铅、锌等重金属的含量远高于生活污水,城镇污水来源中生活污水和工业废水所占比例不同以及不同行业排放的废水使重金属浓度和种类存在较显著差别。随着更严格的废水排放法规的推出,城镇污水中重金属含量也呈逐渐减少的趋势。除此之外,干旱期之后降雨形成的径流中重金属含量显著提高,汇入排水管网导致城镇污水中重金属浓度升高^[2-3]。Yu等^[4]调研了两座污水厂的进水特性,主要接收住宅区和工业区的污水厂,其旱季进水重金属浓度高于雨季,这是因为旱季水量少,导致重金属浓度较高;另一座污水厂接收生活污水、畜牧污水、农田污水,雨季重金属浓度高于旱季,推测农田和畜牧区的径流可能也是重金属的重要来源。

城镇污水中的重金属有溶解态和颗粒态两种,受污水的来源、硬度、酸碱度和氧化还原电位等影响。Sylwan等^[5]调研了原水中溶解性重金属浓度与总重金属浓度的关系,其中铜、铬、镍、铅、镉、锌、汞的溶解性部分分别占总重金属浓度的8%~39%、21%~59%、33%~78%、17%~30%、36%~86%、12%~66%和8%~85%。重金属以表面键合的有机配体、不溶性物质有机配体和可溶性有机配体三类出现,溶解性的重金属会与天然或人工合成的螯合剂发生反应。el Samrani等^[6]研究了城镇污水中重金属的不同矿物形式,发现与硫化物颗粒相关的重金属含量丰富,而且金属还以氢氧化物、碳酸盐、磷酸盐和硫酸盐的形式存在,并与污泥相结合。

2 不同处理工艺对重金属的去除效能

目前,应用广泛的生物处理工艺包括传统活性污泥法、SBR、CASS、A/O、氧化沟等。最初的污水处理系统主要用于去除COD、氨氮、总磷等物质,研究发现,在去除有机物的同时,对重金属也具有一定

的去除效果。重金属在污水中分为颗粒态和溶解态两种,颗粒态重金属吸附在固体颗粒上,通过沉淀去除,溶解态重金属通过生物处理单元的同化吸收、吸附和截留作用去除,不同的污水处理工艺和处理单元对重金属的去除效果也存在差异。

传统活性污泥工艺对城镇污水中大部分典型重金属具有较好的去除效果,重金属去除效率与其进水浓度成正比,通常进水Zn和Cu浓度高于Cd、Cr等重金属,其去除效果也好于其他重金属,而Cd、Pb浓度分别为0.02、0.05 mg/L时则处理效果不显著。在各处理单元中,初次沉淀在很大程度上影响了Zn、Pb和Cr的分布,而生物处理过程和二次沉淀对Cu、Cd和Ni的分布影响最大,初沉池能去除大部分Zn、Pb,对Zn的去除率在55%以上,曝气池和二沉池对Cd、Hg和Cu的平均去除率为36%~38%,进水中溶解态重金属比例从初沉池进水到曝气池呈升高趋势,可能是颗粒态重金属通过沉淀去除所致。在初沉池污泥中Zn含量最高,Cd含量最低,而Cu、Mn经活性污泥吸附去除并富集在二沉池污泥中。氧化沟工艺依靠活性污泥良好的絮凝和沉淀能力以及吸附能力去除重金属,对Pb、Cd、Cr的去除率可达到90%以上,对Mn、Ni的去除效果却低于40%,基本上不具备对砷的去除能力。其中沉砂池对Zn仅具有24.3%的去除率,对其他重金属则无明显去除效果,其原因可能是曝气后水力停留时间较短致。生物池对Cr、Cd、As、Zn、Cu的去除率分别达到95.8%、93.2%、99.5%、71.7%和80.2%,二沉池进水中重金属浓度变化不明显^[7]。另一项研究发现,沉砂池对Cr、Cu、Hg的去除有较高的贡献率,分别占总去除率的40.3%、52.4%、49.2%,特别是二沉池对Zn的去除贡献率达到77%,但对其他种类重金属的去除效果较差^[8]。两项关于氧化沟工艺去除效果存在的差异可能是进厂污水中颗粒态重金属含量不同所致。对AAO工艺污水厂水样检测表明,污水在通过初沉池和二沉池时,重金属含量明显降低,生物处理单元对重金属的去除效果较差。由此可知,该工艺中发挥主要作用的是沉淀池的物理吸附沉淀作用,生物池只能去除少量重金属物质^[9]。CASS工艺对Hg、Ni的去除效果好,去除率分别达到49%和59.46%,其中曝气池对两种重金属的去除贡献率分别为58.2%、57.75%,但对Cu不具有去除效果,细格栅对重金属也具有去除效果,对Hg的去除

率达到68.92%。A/O工艺中初沉池、生物池和二沉池对Cd、Pb、Cu均具有较好的去除效果,但对Hg无去除效果。值得注意的是,消毒池进、出水中重金属含量发生了变化,表明消毒池也具备一定的重金属去除效能^[10]。氧化沟工艺对重金属的去除效果高于CASS、AAO和SBR,对Zn、Pb、Cr都具有较高的去除率^[11]。

城镇污水中重金属以颗粒态和溶解态形式存在,在污水处理系统中,重金属存在形态受污水硬度、酸碱度、氧化还原电位以及微生物作用等的影响会发生转换。细格栅的拦截和初沉池的物理吸附沉淀作用,可去除大部分颗粒态重金属,生物处理单元中微生物的吸附同化作用能够去除污水中的溶解态重金属,并在二沉池中沉降。污水中的重金属会向污泥中转移,并随着污泥排出而得到最终去除。进厂污水中颗粒态重金属占比较高,经过初沉池后溶解态所占比例提高^[8],在生物池中微生物会将部分溶解态重金属转换成颗粒态,但是二沉池存在颗粒态重金属转变为溶解态的现象,从而导致溶解态比例提高^[7]。李晓晨^[12]研究发现,经过初沉池处理后,Fe的溶解性物质含量提高,经过生物处理单元后Cr、Ni、Pb等溶解性物质浓度增加,表明污水处理过程会对重金属形态产生影响。污水中重金属会随着处理过程向污泥中转移,但也存在解析现象,导致液相中重金属含量略有提升^[13]。

3 污水处理工艺去除重金属的影响因素

3.1 重金属含量和形态

城镇污水通过排水管网收集进入污水厂进行处理,来源不同致使污水中的重金属含量和形态存在差异,对污水处理系统重金属去除效能产生影响。与生活污水相比,工业废水中的重金属浓度更高、种类更多,区域间的差别也会导致污水中重金属含量和种类存在差异。不同种类的重金属在污水处理系统中具有不同的去除效果,如氧化沟工艺不适合处理含Mn污水、A/O工艺不具备去除Hg的能力、CASS工艺难以去除Cu等。有研究表明,污水厂对重金属的去除率随其浓度增加而增大,重金属浓度超过微生物耐受阈值时,将抑制生物处理单元中的微生物生长,影响去除效果。进水中颗粒态重金属占总重金属的比例在一定范围内波动,颗粒态重金属占比较高时,细格栅、沉砂池和二沉池有比

较明显的去除重金属的能力,溶解态重金属含量较高时,生物池微生物吸附同化对重金属去除的贡献较大^[7],但是溶解态重金属易随出水流出,影响污水的资源化利用。

3.2 季节变化

降雨量、居民污水排放量、工业废水排放量随着季节的变化,会影响进入污水处理厂的污水量和污水中重金属的浓度,在污水处理过程中,温度的变化会影响沉淀池对重金属的沉淀效果,污泥对重金属的吸附效果也会受到影响。吴海云等^[14]研究发现,活性污泥对重金属的吸附去除率随着温度的升高而增加。Maurya等^[15]研究表明,冬季污水处理系统去除重金属的效率低于夏季,而降雨时污水中的重金属浓度会增加,夏季进厂污水重金属浓度高于冬季,所以夏季出水重金属浓度略高于冬季。污泥中典型重金属浓度季节变化明显,夏季时As、Pb、Ni、Cd在污泥中的浓度明显高于冬季^[16]。Lin等^[17]研究表明,冬季结冰期污水厂对重金属的去除效率较低,出水Zn、Cr、Ni、Pb浓度变化较大,认为可能是冬季低温抑制了微生物的活性所致。夏季污水处理系统对典型重金属的去除率高于冬季,但是由于夏季城镇污水中重金属含量高于冬季,导致夏季出水中重金属浓度也高于冬季。

3.3 pH

pH的变化对污水中重金属的吸附去除存在显著影响,不仅影响污泥中微生物的生长,还会改变污水中重金属离子的化学性质和存在形式^[18]。低pH时,微生物表面吸附官能团(氨基、羧基)出现质子化现象,影响吸附去除效果^[19]。pH的提高减弱了质子化效应,生物表面带负电荷的官能团增加,额外的吸附位点促进了重金属的吸附去除^[20],当pH接近中性或呈弱碱性时,重金属离子形成氢氧化物微沉淀,阻碍吸附剂对重金属离子的吸附。Govarthanan等^[21]评估了类芽孢杆菌对Cu、Pb、Zn、As的去除效果,发现在pH为7时,去除效率最高,溶液处于微酸状态时, H^+ 、 H_3O^+ 会降低细胞壁表面的负电荷强度,与重金属离子竞争吸附位点,降低其去除效果。

进厂污水中重金属的形态和含量会影响重金属的去除,浓度较低或者较高时都不利于去除,颗粒态物质易在初沉池和二沉池中去除,溶解态物则主要在生物池去除。重金属主要通过沉淀池沉淀和生物处理单元的吸附作用去除,冬季温度较低,

沉淀池的沉淀去除率和生物处理单元的去除率均低于夏季,因此对重金属的去除效果低于夏季。污水pH变化幅度较大时也会对重金属的去除产生影响,污水处于中性或者弱酸性时,重金属吸附去除效果最佳。

4 污水厂中典型重金属的去除途径和机理

污水厂一级处理和二级生物处理对重金属均有去除效果。一级处理通过简单的吸附和沉淀作用去除颗粒态重金属,因此重金属的去除效果与污水中的悬浮物浓度成正比。一级处理对重金属的吸附/解吸以及进水中重金属的形态或分配决定了其去除效果,微生物吸附、胞内蓄积等作用为二级生物处理单元去除溶解态重金属的主要途径^[22]。污水中重金属去除机理如图1所示。

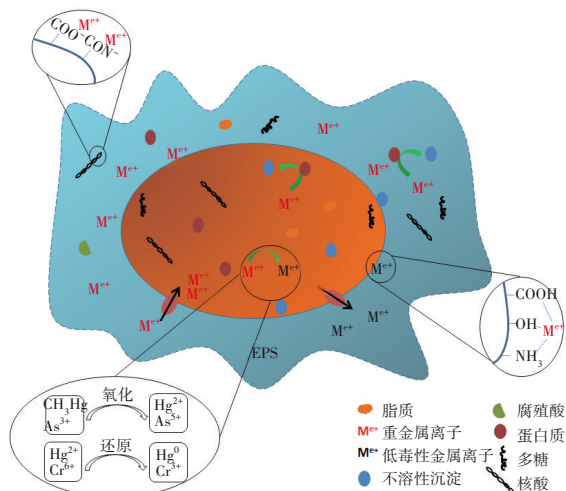


图1 典型重金属去除机理

Fig.1 Typical heavy metal removal mechanism

4.1 胞外聚合物吸附

活性污泥中的微生物会分泌出黏性胞外聚合物(EPS),由蛋白质、多糖、脂类、核酸、腐殖酸等物质组成,是活性污泥有机物的主要成分。EPS富含带负电荷的官能团,能吸收水中的重金属离子,对Cu、Pb、Ni具有很高的吸附容量,特别是对Cu的吸附量可达320 mg/g,是微生物抵御外界环境变化的保护层^[23]。通过量化分析发现,重金属离子能与EPS上的蛋白质发生络合反应生成不溶性沉淀而被去除,也可与EPS上结合的阳离子进行离子交换以及形成表面沉淀去除。康得军等^[24]通过FTIR、TEM、XRD分析了胞外聚合物对Cu、Pb的吸附机理,认为对于Pb在胞外聚合物上的吸附,参与的官

能团主要是一COOH、—OH、磷酸基团等;而Cu²⁺的吸附过程还有一NH₂、多聚糖、亚甲基等其他官能团的参与,而且pH对不同重金属离子的吸附存在一定影响。Biswas等^[25]提取了地衣芽孢杆菌的EPS,发现其C、O化合物的负电荷官能团和蛋白质基团通过静电作用能够与重金属离子结合,在pH为11时,吸附活性最高,对Cu离子的去除率达到94.8%。Nouha等^[26]通过提取梭状芽孢杆菌产生的EPS,发现一级处理对镍的去除率达到了80%。在多种重金属离子共存体系中,存在重金属离子相互竞争结合位点的情况,在分别加入Na⁺、Ca²⁺、Fe³⁺时,Na⁺对重金属的吸附几乎无影响,Ca²⁺对重金属吸附的影响远低于Fe³⁺,三价阳离子对吸附位点的竞争显著影响重金属离子的生物吸附。EPS对重金属的吸收易受到环境条件的影响,重金属离子浓度较高时会阻碍其与EPS上活性位点的结合,为了有效去除活性污泥中的重金属,需要将重金属离子浓度控制在较低水平,在低浓度下Cd比Zn更容易被EPS吸收;重金属离子与EPS之间的双电层随着离子强度的增加而增加,影响重金属与EPS的结合,而且离子强度的增加会导致渗透压失衡,影响微生物活性,降低微生物对重金属的吸附能力;重金属与EPS的结合反应由反应焓变驱动,所以较高的温度有利于EPS吸收重金属^[27]。

4.2 微生物表面吸附

细胞壁也富含能够吸附重金属的活性基团,如氨基、羰基、羧基、羟基等,与EPS吸附重金属离子的机理相似,但微生物细胞壁中的生化组分是控制其对重金属吸附能力的重要控制因子,不同种类微生物的细胞壁组成不同,其对不同重金属的吸附能力也不同^[28]。盐单细胞BVR1吸附电子工业废水中的Cd离子时,主要吸附基团是—OH、—NH₂、COO—,对Cd²⁺的最大吸附容量可达12.03 mg/g^[29]。Ren等^[30]分离出的芽孢杆菌PZ-1能够作为吸附剂去除水中的Pb,细胞壁上的羟基、羰基和羧基与Pb形成配合物和螯合物,细胞分泌的铁载体对吸附Pb也有积极作用。在乳酸菌ZY-6细胞壁中发现由于镉吸附后以颗粒形式沉积的金属络合物聚集体形成的结晶,细胞壁对Cd²⁺的吸附量占总量的27.45%,主要由—OH、—NH₂、COO—等官能团负责吸附,而且在加入Pb²⁺、Mg²⁺、Zn²⁺等阳离子后,出现吸附位点竞争现象,Cd²⁺的吸附量显著减少^[31]。重金属离子能

够与微生物细胞表面的 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 等阳离子交换,结合到细胞表面,交换下来的阳离子进入溶液中,因此在微生物吸附重金属之后,溶液中 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 等阳离子的浓度会增加^[32]。

4.3 微生物胞内吸收

微生物胞内吸收重金属与细胞代谢直接相关,吸附在细胞表面的重金属会通过细胞膜的主动运输转运进入细胞,重金属离子在微生物胞内积累的机理主要包括两种:一是微生物细胞利用吸收的重金属离子来合成其生命活动必需的物质,如钴、铜等离子是各种生物酶的组成成分,参与细胞的代谢活动。二是对于非必需的重金属离子,微生物能够通过自身的一系列生化反应降低重金属离子毒性,保护自身不受伤害。微生物能够改变重金属离子价态,降低重金属离子的毒害作用;在抗汞菌中,有机汞裂解酶将甲基汞转化为毒性较低的 Hg^{2+} 。微生物可将毒性较高的 Cr^{6+} 还原为毒性较低的 Cr^{3+} 。细菌微球菌属和不动杆菌属可将有毒的 As^{3+} 氧化为可溶性较低且无害的 As^{5+} ,以降低其对细胞的毒性^[33]。另一方面,微生物胞内的重金属可以和蛋白质、硫化物、聚磷酸盐等结合形成不溶性沉淀,在胞内积累。Imron等^[22]研究发现,在铜绿假单胞菌FZ-2中, Hg^{2+} 能够与氯离子发生络合反应,降低 Hg^{2+} 的毒性。蓝藻利用细胞中的聚磷酸盐和Cd、Pb等形成沉积物,聚球藻能分泌金属硫蛋白结合Cd和Zn,并降低其对细胞的毒性,但当胞内重金属浓度过高时,微生物会通过细胞膜的外排系统将重金属离子排出体外,调节胞内重金属离子浓度^[33]。

5 现有研究存在的问题及后续发展趋势

目前关于污水厂重金属的研究主要局限在对出水中重金属浓度的检测,关于污泥与重金属的作用机理、浓度变化等,以及对城镇污水中重金属去除的研究较少,而在干旱缺水地区,污水资源化利用成为一种趋势,需要从以下几个方面做进一步研究:

① 增加污水厂重金属去除效能影响因素的研究,探究污泥中微生物群落结构对重金属去除效能的影响,以及污水的酸碱度、水中有机物对重金属的影响,根据影响因素改进污水处理系统,提高重金属去除效率。

② 探明不同处理工艺对不同重金属的去除

效能存在差异的原因,不同地区城镇污水中重金属含量和种类不同,根据当地污水重金属特点选择合适的处理工艺,以有效降低污水中的重金属含量。

③ 重金属在污水处理系统中存在形态的转化规律和去除机理尚未明确,如二沉池中重金属由颗粒态转化为溶解态,导致出水中重金属含量提高的原因,以及活性污泥对不同重金属去除效能的差异等。增加这方面的研究,可以明确重金属的去除规律,对降低污水厂出水中重金属浓度有积极作用。

④ 污水处理系统进水重金属浓度会影响其重金属去除效能,对于重金属浓度较高的进厂污水,强化一级处理过程中重金属的去除能力,降低生物处理出水和污泥中的重金属浓度,推动污水的资源化利用。

6 结论

重金属是城镇污水中常见的污染物,其在污水中的含量和形态受到多种因素的影响。在污水厂处理过程中,重金属存在形态上的转变,颗粒态重金属主要靠沉淀去除,溶解态重金属则主要通过生物作用去除,不同污水处理厂处理工艺对重金属的去除效果不同,氧化沟工艺对重金属的去除效能好于其他处理工艺,冬季和夏季温度会影响生物池微生物的生长进而影响重金属的去除效能,但夏季污水中重金属含量较高,故出水重金属含量也高于冬季。沉砂池、沉淀池的颗粒吸附沉淀作用和微生物吸附同化作用在重金属去除过程中发挥了主要作用,污水呈中性或者弱酸性时,微生物对重金属的吸附去除效果最佳。研究重金属在污水厂的去除效能、迁移转化规律和去除机理对出厂污水的回用有重要意义。

参考文献:

- [1] JARMILA D, HELENA R, KONSTANTIN R, *et al.* Heavy metals in domestic wastewater with respect to urban population in Ostrava, Czech Republic[J]. *Water and Environment Journal*, 2019, 33(1): 77-85.
- [2] VAREDA J P, VALENTE A J M, DURÃES L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 101-118.

- [3] PENG D, ZHANG L R, MA Y T, *et al.* Occurrence and fate of heavy metals in municipal wastewater in Heilongjiang Province, China: a monthly reconnaissance from 2015 to 2017[J]. *Water*, 2020, 12(3): 728.
- [4] YU B M, KIM M L, KA L C, *et al.* Ecological risks of heavy metals/metalloid discharged from two sewage treatment works to Mai Po Ramsar site, South China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(7): 466.
- [5] SYLWAN I, THORIN E. Removal of heavy metals during primary treatment of municipal wastewater and possibilities of enhanced removal: a review[J]. *Water*, 2021, 13(8): 1121.
- [6] EL SAMRANI A G, LARTIGES B S, GHANBAJA J, *et al.* Trace element carriers in combined sewer during dry and wet weather: an electron microscope investigation [J]. *Water Research*, 2004, 38(8): 2063–2076.
- [7] 李龙宇, 毛宇翔, 李永. 重金属在氧化沟式污水处理工艺中的迁移转化[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4): 217–223.
LI Longyu, MAO Yuxiang, LI Yong. Migration and transformation of heavy metal pollutants in the sewage-oxidation treating tunnel [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(4): 217–223(in Chinese).
- [8] 罗丽, 康得军, 王晓昌. 城市污水处理中典型重金属离子去除与迁移规律研究[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(1): 52–55.
LUO Li, KANG Dejun, WANG Xiaochang. Investigation of typical heavy metals in domestic sewage treating process and their removing and migrating properties [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(1): 52–55 (in Chinese).
- [9] 王凯凯, 庞国瑞, 何世鼎, 等. 不同水质特征污水厂处理过程中的重金属归趋特性[J]. *净水技术*, 2019, 38(1): 68–73.
WANG Kaikai, PANG Guorui, HE Shiding, *et al.* Fate feature of heavy metals in treatment processes of WWTPs with different influent water quality [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(1): 68–73 (in Chinese).
- [10] 陈丽茹, 范功端, 康得军. 两种典型污水处理工艺中痕量重金属迁移规律研究[J]. *市政技术*, 2016, 34(1): 104–108.
CHEN Liru, FAN Gongduan, KANG Dejun. Investigation of the migration law of trace heavy metal in two typical sewage treatment processes [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2016, 34(1): 104–108 (in Chinese).
- [11] YANG J, GAO D, CHEN T, *et al.* Comparison of heavy metal removal efficiencies in four activated sludge processes [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(10): 3788–3794.
- [12] 李晓晨. 城市污水处理过程中重金属形态分布及潜在迁移性研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
LI Xiaochen. Study on Speciation Distribution and Potential Mobility of Heavy Metals in Urban Sewage Treatment [D]. Nanjing: Hohai University, 2006 (in Chinese).
- [13] 路光超. 浅析重金属在氧化沟式污水处理工艺中的迁移转化[J]. *资源节约与环保*, 2015(3): 91.
LU Guangchao. Analysis on migration and transformation of heavy metals in oxidation ditch sewage treatment process [J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2015(3): 91(in Chinese).
- [14] 吴海云, 胡玥, 谢正威. SBR活性污泥吸附水中重金属离子的研究 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(5): 71–74.
WU Haiyun, HU Yue, XIE Zhengwei. Study on adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by SBR activated sludge [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(5): 71–74(in Chinese).
- [15] MAURYA C, SRIVASTAVA J N. Current seasonal variations in physicochemical and heavy metals parameters of sewage treatment plant effluent and suitability for irrigation [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2019, 11(7): 852–865(in Chinese).
- [16] 张智春. 太原市某污水处理厂各工段重金属含量分析[J]. *环境保护科学*, 2011, 37(2): 26–28, 94.
ZHANG Zhichun. Analysis on heavy metal content in each processing section of a sewage treatment plant in Taiyuan [J]. *Environmental Protection Science*, 2011, 37(2): 26–28, 94(in Chinese).
- [17] LIN Y Z, CAO C H, YIN J, *et al.* Investigation of heavy metal pollutants in a sewage treatment plant of Changchun in frozen period [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 343/344: 1265–1268.
- [18] GHOSH A, DASTIDAR M G, SREEKRISHNAN T R. Recent advances in bioremediation of heavy metals and metal complex dyes: review[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, 142(9): 965.
- [19] DEMEY H, VINCENT T, GUIBAL E. A novel algal-

- based sorbent for heavy metal removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 332: 582–595.
- [20] LI W, CHEN Y, WANG T. Cadmium biosorption by lactic acid bacteria *Weissella viridescens* ZY-6 [J]. Food Control, 2021, 123: 107747.
- [21] GOVARTHANAN M, MYTHILI R, SELVANKUMAR T, *et al.* Bioremediation of heavy metals using an endophytic bacterium *Paenibacillus* sp. RM isolated from the roots of *Tridax procumbens* [J]. 3 Biotech, 2016, 6(2): 242.
- [22] IMRON M F, KURNIAWAN S B, ABDULLAH S R S. Resistance of bacteria isolated from leachate to heavy metals and the removal of Hg by *Pseudomonas aeruginosa* strain FZ-2 at different salinity levels in a batch biosorption system [J]. Sustainable Environment Research, 2021, 31(1): 14.
- [23] 刘磊, 宋成文. 微生物吸附重金属离子机理研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(5): 15–17.
LIU Lei, SONG Chengwen. Research advance in the mechanism of microbial absorption of heavy metal ions [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(5): 15–17 (in Chinese).
- [24] 康得军, 谢丹瑜, 匡帅, 等. 活性污泥胞外聚合物对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附机理 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 28–33.
KANG Dejun, XIE Danyu, KUANG Shuai, *et al.* Adsorption mechanism of extracellular polymeric substances in activated sludge on Pb^{2+} and Cu^{2+} [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 28–33 (in Chinese).
- [25] BISWAS J K, BANERJEE A, SARKAR B, *et al.* Exploration of an extracellular polymeric substance from earthworm gut bacterium (*Bacillus licheniformis*) for bioflocculation and heavy metal removal potential [J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 349.
- [26] NOUHA K, KUMAR R S, TYAGI R D. Heavy metals removal from wastewater using extracellular polymeric substances produced by *Cloacibacterium normanense* in wastewater sludge supplemented with crude glycerol and study of extracellular polymeric substances extraction by different methods [J]. Bioresource Technology, 2016, 212: 120–129.
- [27] YAN P, XIA J, CHEN Y, *et al.* Thermodynamics of binding interactions between extracellular polymeric substances and heavy metals by isothermal titration microcalorimetry [J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 354–363.
- [28] 江娜, 宁增平, 郭圆, 等. 环境 pH 对微生物生物膜吸附重金属的影响研究进展 [J]. 地球与环境, 2021, 49(2): 216–226.
JIANG Na, NING Zengping, GUO Yuan, *et al.* Research progress of the effect of pH on the adsorption of heavy metals by microbial biofilms [J]. Earth and Environment, 2021, 49(2): 216–226 (in Chinese).
- [29] MANASI, RAJESH V, KUMAR A S K, *et al.* Biosorption of cadmium using a novel bacterium isolated from an electronic industry effluent [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 235: 176–185.
- [30] REN G, JIN Y, ZHANG C, *et al.* Characteristics of *Bacillus* sp. PZ-1 and its biosorption to $Pb(II)$ [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 117: 141–148.
- [31] LI W, CHEN Y, WANG T. Cadmium biosorption by lactic acid bacteria *Weissella viridescens* ZY-6 [J]. Food Control, 2021, 123: 107747.
- [32] 支田田, 程丽华, 徐新华, 等. 藻类去除水体中重金属的机理及应用 [J]. 化学进展, 2011, 23(8): 1782–1794.
ZHI Tiantian, CHENG Lihua, XU Xinhua, *et al.* Advances on heavy metals removal from aqueous solution by algae [J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(8): 1782–1794 (in Chinese).
- [33] YIN K, WANG Q, LÜ M, *et al.* Microorganism remediation strategies towards heavy metals [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 360: 1553–1563.

作者简介: 李鹏程 (1998–), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为污水深度处理。

E-mail: 1719293728@qq.com

收稿日期: 2021-08-24

修回日期: 2022-08-31

(编辑: 丁彩娟)