



混凝强化型好氧颗粒污泥对 Ni^{2+} 吸附性能及机理研究

李江琴¹, 杨志颖¹, 胡超², 欧阳二明¹

(1. 南昌大学资源与环境学院, 江西南昌 330031;

2. 广东职业技术学院轻工与材料学院, 广东佛山 528041)

[摘要] 为强化好氧颗粒污泥(AGS)对重金属 Ni^{2+} 的吸附效能, 利用聚合氯化铝(PAC)和天然混凝剂(SNC)的特性培养形成混凝强化型AGS, 并探究AGS对 Ni^{2+} 的吸附性能及机理。结果表明: PAC型和SNC型AGS对 Ni^{2+} 均具有良好的吸附性能且存在特异性, Ni^{2+} 质量浓度为0~25 mg/L时, PAC型AGS吸附效能较优; Ni^{2+} 质量浓度为100~150 mg/L时, SNC型AGS吸附性能较优。模型拟合结果表明: 混凝强化型AGS对 Ni^{2+} 的吸附以物理-化学吸附为主, 对于吸附量及吸附速率, SNC型AGS均大于PAC型AGS。傅里叶红外变换光谱(FT-IR)结果表明, 吸附过程中混凝强化型AGS存在大量羟基、羧基和氨基等基团与 Ni^{2+} 吸附结合, 实现了 Ni^{2+} 的有效去除; 同时, SNC能强化AGS中的官能团, 提高吸附性能。

[关键词] 好氧颗粒污泥; 混凝剂; Ni^{2+} ; 生物吸附

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0089-06

Study on the performance and mechanism of Ni^{2+} adsorption by coagulation-enhanced aerobic granular sludge

LI Jiangqin¹, YANG Zhiying¹, HU Chao², OUYANG Erming¹

(1. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Light Industry and Material, Guangdong Polytechnic, Foshan 528041, China)

Abstract: To strengthen the adsorption efficiency of heavy metal Ni^{2+} by aerobic granulated sludge (AGS), AGS was developed to explore the adsorption performance and mechanism of AGS to Ni^{2+} with the characteristics of poly aluminum chloride (PAC) and starch-based natural coagulant (SNC). The results showed that PAC and SNC-type AGS had good adsorption performance and specificity for Ni^{2+} . PAC-type AGS had better adsorption efficiency when the concentration of Ni^{2+} was 0~25 mg/L. The adsorption capacity of SNC-type AGS was better at 100~150 mg/L. The model fitting results showed that the coagulation-enhanced type AGS mainly had physical-chemical adsorption on Ni^{2+} , and the adsorption capacity and rate of SNC-type AGS were higher than PAC-type. FT-IR results showed that during the adsorption process, a large number of hydroxyl, carboxyl and amino groups were adsorbed and combined with Ni^{2+} in coagulation-enhanced AGS, achieving effective Ni^{2+} removal. Meanwhile, SNC could strengthen the functional groups in AGS and improve the adsorption performance.

Key words: aerobic granular sludge; coagulant; Ni^{2+} ; biosorption

镍具有强度高、延展性好、化学稳定性佳且耐酸碱等优点, 常被应用于汽车制造、航天和电子元件等工业领域^[1]。由于镍离子具有生物难降解性, 存在生态环境富集的风险^[2-3]。同时其还具有致敏性, 其化合物具有致癌性^[4], 属于第一类污染物。因此, 工业生产中的含镍废水需要严格处理。

好氧颗粒污泥(Aerobic granulated sludge, AGS)具有良好的污染物去除和耐负荷冲击等能力^[5], 并且其比表面积大、孔隙率高, 具有优秀的吸附性能^[6]。Li WANG等^[7]利用AGS吸附废水中的 Sr^{2+} ; 李姝等^[8]利用钙化AGS吸附废水中的 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 。因此, 使用AGS吸附重金属是可行的处理工艺, 并

且能达到以废治废的目的,具有良好的发展前景。

然而,AGS因成形所耗时间较长限制了其工业化应用^[9]。有相关研究^[10-11]着力于强化AGS的快速形成,其中采用聚合氯化铝(Poly aluminum Chloride, PAC)促进颗粒污泥形成的方法相对便捷且效果较好^[12]。梁梓轩等^[13]研究发现不同混凝剂强化后的AGS表面具有特异性结构。杨志颖等^[14]研究发现天然混凝剂(Starch-based natural coagulant, SNC)促进AGS成形效果显著,且SNC具有多官能团性的特点^[15],有望强化AGS对 Ni^{2+} 的吸附性能。因此,本研究以PAC和SNC强化的AGS为吸附剂,探究吸附剂投加量、 Ni^{2+} 初始质量浓度、pH和时间等因素对吸附效果的影响,确定吸附的最优条件;并运用吸附等温线模型、吸附动力学模型和FT-IR解释其吸附机理,为其实际应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 AGS的培养

AGS接种自南昌市某污水处理厂的回流污泥,使用序批式活性污泥反应装置(SBR)S1、S2,以人工模拟废水为底物,S1和S2分别投加SNC和PAC进行混凝强化。SBR材质为有机玻璃,工作容积为3 L,高径比(H/D)约为4.5;SBR运行周期由定时器控制,依次为进水5 min、曝气330 min、沉降3 min、出水17 min、闲置5 min。SBR的气体流量由玻璃转子流量计调节至8 L/min(表观风速为1.88 cm/s)。模拟人工废水具体成分:葡萄糖 291.66 mg/L,乙酸钠 291.66 mg/L,氯化铵 125 mg/L,磷酸二氢钾 21.83 mg/L,氯化钙 33.33 mg/L,硫酸镁 33.33 mg/L,硫酸铁 2.08 mg/L,pH用碳酸氢钠调节至7.0~8.0。通过70 d的驯化培养后,AGS平均粒径为0.88 mm,混合液悬浮固体质量浓度(MLSS)为3.0 g/L,污泥体积指数(SVI)为40 mL/g,COD和氨氮去除率均在97%以上,表观形貌见图1。

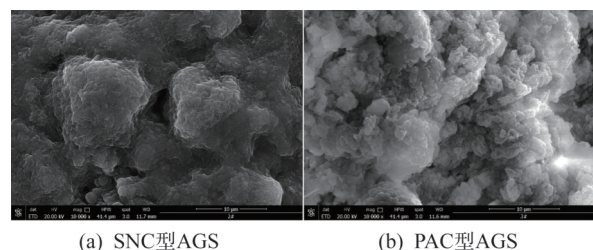


图1 混凝强化型AGS的SEM

Fig. 1 SEM of aerobic granular sludge

由图1可知,SNC型和PAC型AGS表观形貌存在显著差异。SNC型AGS形貌呈现山峦状,表面存在明显的孔洞,这些孔洞有利于基质和氧气的运输并且有助于内部微生物的代谢产物排出;而PAC型AGS形貌呈现花椰菜状,具有少许孔洞。

1.2 吸附实验

用去离子水清洗AGS表面3次,除去可溶性离子与杂质,并置于水浴恒温振荡器(SHZ-B型,金坛仪都)上,在室温(25℃)下以300 r/min振荡进行静态吸附 Ni^{2+} 实验。探究 Ni^{2+} 初始离子质量浓度、AGS投加量、pH、反应时间对吸附性能的影响,确定最佳吸附条件,并对数据进行Langmuir方程、Freundlich方程和Temkin方程回归性拟合^[16]。使用最佳条件进行吸附动力学实验,运用准一级动力学^[17]、准二级动力学方程^[18]和颗粒内扩散方程进行回归性分析,阐述吸附机理。

1.3 分析方法

使用pH计(PHS-25型,上海雷磁)测定溶液pH;采用称量灼烧法测定AGS的MLSS;采用激光粒度仪(MS3000型,英国马尔文)进行粒径分析;采用FTIR(FT-IR,美国赛默飞世尔)分析AGS吸附前后的官能团结构;采用Zeta电位仪(ZetaPlus,美国布鲁克海文)测定AGS表面Zeta电位。

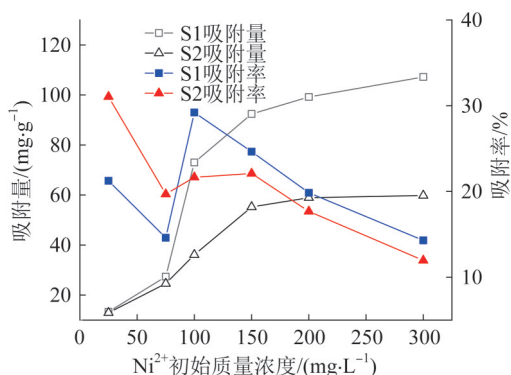
Ni^{2+} 质量浓度的测定:吸附后吸取溶液上清液,经0.45 μm 微孔滤膜过滤,使用丁二酮法^[19]测定。

2 结果与讨论

2.1 Ni^{2+} 初始质量浓度对AGS吸附性能的影响

在pH=7,吸附时间为5 h,AGS投加量为0.4~0.6 g/L,振荡速度为200 r/min的条件下考察不同 Ni^{2+} 初始质量浓度对AGS吸附性能的影响,结果见图2。

由图2可知,当 Ni^{2+} 初始质量浓度升高时,AGS对 Ni^{2+} 的吸附量同步增大,在0~150 mg/L时增速较快,在150~300 mg/L时增速趋于平缓,当 Ni^{2+} 的初始质量浓度为300 mg/L时,S1和S2中AGS的吸附量达到最大,分别为107.2 mg/g和59.8 mg/g。然而,AGS对 Ni^{2+} 的吸附率在0~100 mg/L时先下降再上升,在100~200 mg/L时下降趋势显著。AGS吸附位点相对有限,当 Ni^{2+} 的初始浓度较低时,先与AGS表面吸附位点结合,而PAC型AGS表面较粗糙,能有效提高 Ni^{2+} 与AGS表面的吸附位点结合。当表面吸附位点出现饱和,吸附率开始下滑。随 Ni^{2+} 的初始浓度继

图2 Ni^{2+} 初始质量浓度对AGS吸附性能的影响Fig. 2 Effect of initial concentration of Ni^{2+} on the adsorption performance of AGS

续提高,浓度梯度驱动力将产生, Ni^{2+} 开始渗入AGS内部,并与AGS内部吸附位点结合,此时吸附率将提高。当内部吸附位点趋于饱和时,AGS对 Ni^{2+} 的吸附率随浓度的升高显著降低。而SNC型AGS内部基团相对丰富,能有效促进 Ni^{2+} 与AGS内部吸附位点的结合。在处理实际含镍废水中,为实现 Ni^{2+} 的有效去除, Ni^{2+} 初始质量浓度最优应在0~25 mg/L的低质量浓度范围和75~150 mg/L的中质量浓度范围内。

2.2 AGS投加量对AGS吸附性能的影响

在pH=7, Ni^{2+} 初始质量浓度为100 mg/L,吸附时间为5 h,振荡速度为200 r/min的条件下,考察不同AGS投加量对AGS吸附性能的影响,结果见图3。

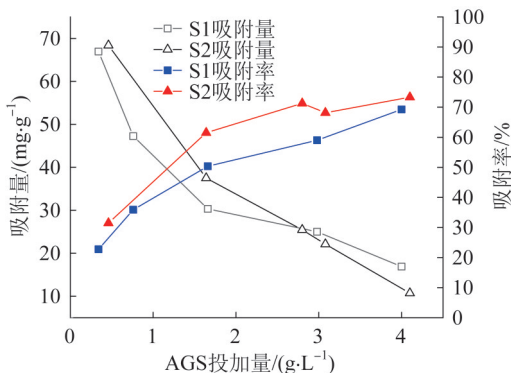


图3 AGS投加量对AGS吸附性能的影响

Fig. 3 Effect of AGS dosage on AGS adsorption performance

由图3可知,AGS对 Ni^{2+} 的吸附量随AGS投加量的增加而减少,试验现象与Zhengtao SHEN等^[20]研究的结果一致。S2中AGS投加量为0.46~2.80 g/L时,吸附率随AGS投加量的增加而升高;AGS投加量为2.80~4.10 g/L时,吸附率变化不明显。因为AGS投加量较低时,AGS单位质量上可分配的 Ni^{2+} 数量较多,能产生足够

的强驱动力。当AGS投加量升高时,强驱动力减弱,将引起吸附位点的数目减少、离子交换减少,导致单位吸附率降低。同时,吸附剂的浓度过高时,其外围将会产生掩蔽作用,抑制吸附位点的结合^[21]。S1中的AGS投加量为4.0 g/L时,吸附率与S2中的AGS投加量为3.08 g/L时接近。当投加质量相近时,S1和S2中AGS对 Ni^{2+} 的吸附率相似。因此,在处理实际含镍废水中,为实现 Ni^{2+} 的高效去除, Ni^{2+} 初始质量浓度与AGS投加量最佳的比值约为1:40。

2.3 pH对AGS吸附性能的影响

在 Ni^{2+} 初始质量浓度为100 mg/L,AGS投加量为4.0 g/L,吸附时间为5 h,振荡速度为200 r/min的条件下,考察pH对AGS吸附性能的影响,结果见图4。

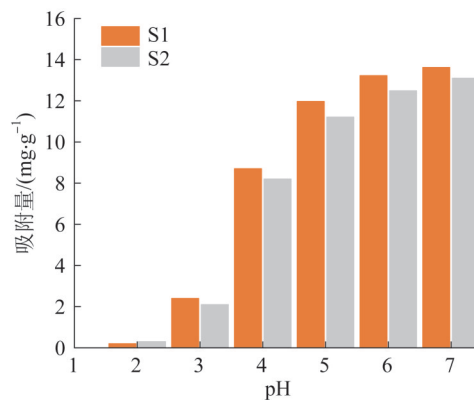


图4 pH对AGS吸附性能的影响

Fig. 4 Effect of pH on AGS adsorption performance

由图4可知,当pH=2.0时,S1和S2中的颗粒污泥对 Ni^{2+} 的吸附量分别仅有0.2、0.3 mg/g,因为AGS表面Zeta电位在pH=2.0时显正电性^[6,22],不利于与 Ni^{2+} 相互结合;当pH=3.0,AGS对 Ni^{2+} 的吸附量仍较低,此时水中存在大量的 H^+ ,将与 Ni^{2+} 竞争吸附位点;当pH继续提高后,AGS中官能团将逐渐失去氢键^[6],致使其表面呈负电,电中和作用使吸附量迅速增加。当pH为6.0时,吸附量趋于平稳;当pH为7.0时,AGS对 Ni^{2+} 的吸附量达到最大分别为14.10、13.30 mg/g。同时,在酸性条件下(pH为1.0~7.0),镍在溶液中仍主要以 Ni^{2+} 的形态存在^[23]。因此判断AGS吸附 Ni^{2+} 的最佳pH为7.0。

2.4 反应时间对AGS吸附性能的影响

在pH=7, Ni^{2+} 质量浓度为100 mg/L,吸附时间为5 h,振荡速度为200 r/min,S1和S2中AGS投加量分别为4.2 g/L和4.4 g/L的条件下,考察不同反应时间对AGS吸附性能的影响,结果见图5。

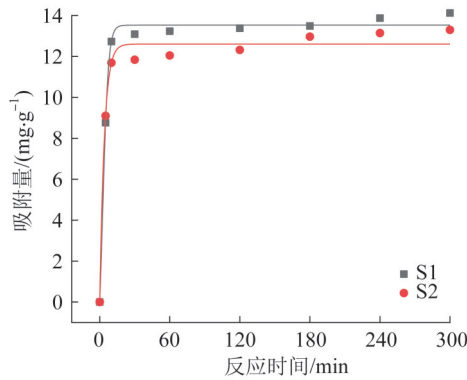


图5 反应时间对AGS吸附性能的影响

Fig. 5 Effect of reaction time on AGS adsorption performance

由图5可知,在0~10 min时,AGS对Ni²⁺吸附量骤升;在10~30 min时,AGS对Ni²⁺吸附速度降低;30 min后,AGS对Ni²⁺的吸附基本达到平衡,这与王琳等^[24]的实验现象相似。

表1 准一级动力学、准二级动力学和颗粒内扩散模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters of quasi-primary kinetics, quasi-secondary kinetics and intraparticle diffusion models

名称	准一级动力学			准二级动力学			颗粒内扩散		
	$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	K_1/min^{-1}	R^2	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$K_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	R^2	$K/(mg \cdot g^{-1} \cdot min^{-0.5})$	$I/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
S1	3.35	0.026	0.530 5	14.04	0.026	0.999 4	0.510	7.03	0.509 2
S2	3.96	0.032	0.809 7	13.30	0.022	0.999 2	0.478	6.70	0.493 5

2.4.2 吸附等温线

在温度为25℃,Ni²⁺的初始质量浓度为0~300 mg/L的条件下,进行等温吸附实验,并运用Langmuir方程、Freundlich方程和Temkin方程进行回归性分析,参数见表2。

表2 吸附等温线模型参数

Table 2 Fitting parameters of adsorption isotherm model

名称	Langmuir方程			Freundlich方程			Temkin方程		
	K_L	q_m	R^2	K_F	$1/n$	R^2	K_T	f	R^2
S1	0.002	370.37	0.396 5	1.038	0.883	0.924 5	48.565	0.048	0.912 8
S2	0.005	103.09	0.854 2	1.474	0.682	0.944 8	21.604	0.062	0.908 9

由表2可知,Freundlich模型和Temkin模型的 R^2 均达到0.9以上,即Freundlich模型和Temkin模型均适宜描述AGS对Ni²⁺的吸附行为,说明混凝强化型AGS对Ni²⁺的吸附行为主要以多层吸附和静电化学吸附为主^[25-26]。其中Freundlich模型的吸附指数 $1/n$ 分别为0.883、0.682(小于2),说明混凝强化后AGS表面存在多层吸附位点,AGS对Ni²⁺的吸附过程中可能是氨基、羟基、羧基等起到了关键性作用^[27]。

2.4 吸附机理探究

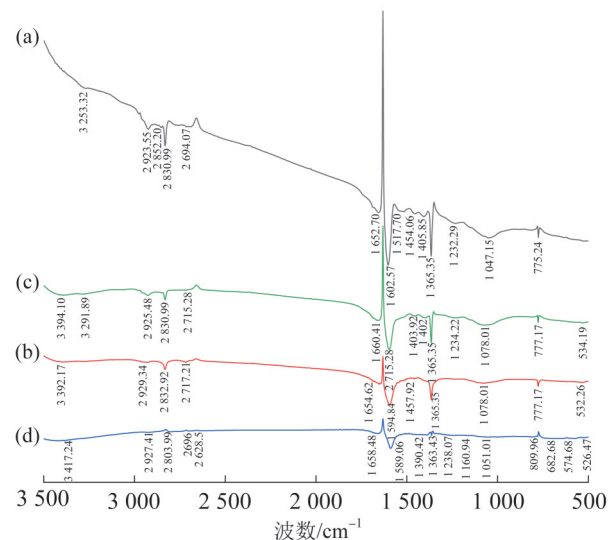
2.4.1 吸附动力学分析

为探讨SNC型和PAC型AGS对Ni²⁺的吸附机理,运用准一级动力学、准二级动力学和颗粒内扩散模型进行回归性分析,拟合参数见表1。

由表1可知,准二级动力学的 R^2 分别为0.999 2、0.999 4,而准一级吸附动力学的 R^2 分别为0.530 5、0.809 7。对于S1和S2中AGS对Ni²⁺的吸附过程,准二级吸附动力学模型比准一级吸附动力学模型拟合度更好,说明AGS对Ni²⁺的吸附主要为化学吸附。从平衡吸附量和初始吸附速率看,S1和S2的AGS平衡吸附量分别为14.02、13.30 mg/g,吸附速率常数分别为0.026、0.022 g/(mg·min),SNC型AGS吸附性能稍优于PAC型,这可能归因于SNC具有多官能团性^[15],能强化AGS官能团强度,促使AGS内部形成更多的吸附位点,促进颗粒内扩散作用,从而提高吸附效能。

2.4.3 FT-IR分析

混凝强化AGS吸附Ni²⁺前后的FT-IR图谱见图6。



(a) SNC型AGS吸附Ni²⁺前;(b) SNC型AGS吸附Ni²⁺后;

(c) PAC型AGS吸附Ni²⁺前;(d) PAC型AGS吸附Ni²⁺后。

图6 混凝强化AGS吸附Ni²⁺前后的FT-IR图谱

Fig. 6 FT-IR profiles of coagulation-enhanced granular sludge before and after Ni²⁺ adsorption

由图6可知,对于SNC型AGS,活性基团的特征峰在吸附Ni²⁺前后发生了明显迁移或消失。图6中3 253 cm⁻¹处的O—H伸缩振动峰和N—H伸缩振动峰移至3 392.17 cm⁻¹;2 839.29 cm⁻¹和2 923.55 cm⁻¹处的O—H伸缩吸收峰发生明显位移和强度变弱,表明O—H在AGS吸附Ni²⁺的过程中起作用^[28]。1 652 cm⁻¹处的C=O伸缩振动峰和C=C伸缩振动峰移至1 654 cm⁻¹;1 602 cm⁻¹处的C=C骨架振动峰和N—H弯曲振动峰移至1 594 cm⁻¹,并且峰形变钝变宽,这可能与AGS中的羧基官能团、烯烃C=C和N—H共同和Ni²⁺结合有关^[29]。1 454.06 cm⁻¹、1 405.85 cm⁻¹和1 365.35 cm⁻¹处的C—H变形振动峰消失或变弱,1 232 cm⁻¹处的C—O伸缩振动峰消失,1 047 cm⁻¹处的C—O伸缩振动峰变弱移至1 078 cm⁻¹。775 cm⁻¹处的芳香杂环特征峰移至777.17 cm⁻¹,推测AGS中的芳香杂环阳离子- π 对Ni²⁺有吸附作用^[30-31]。综上可得,SNC型AGS内存在对Ni²⁺起吸附作用的基团,如羧基、羟基、氨基和芳香杂环等。对于PAC混凝强化的颗粒污泥,以上官能团也在吸附前后出现了位移或强度变弱等现象。因此混凝强化型AGS均具有丰富的基团,有利于对Ni的吸附,并且SNC明显强化了AGS的活性基团,对提高AGS的吸附性能是有利的。

3 结论

(1)pH对混凝强化型AGS的Ni²⁺吸附性能影响显著。在pH为1.0~7.0时,吸附量随溶液pH的提高而增加,最佳pH=7.0。

(2)因混凝剂自身特性的影响,PAC型AGS表面结构较粗糙,而SNC内部基团强度较大。PAC和SNC均能有效提高AGS对Ni²⁺的吸附效果,但它们对Ni²⁺的吸附效能存在差异。Ni²⁺质量浓度为0~25 mg/L时,PAC型AGS的吸附性能较优;Ni²⁺质量浓度为100~150 mg/L时,SNC型AGS的吸附效能较优。

(3)Freundlich模型能较好地描述PAC和SNC型AGS的吸附行为,吸附动力学过程符合准二级动力学模型,说明PAC和SNC型AGS对Ni²⁺的吸附均为物理-化学吸附。

(4)吸附过程中,SNC和PAC型AGS均存在大量与Ni²⁺吸附结合的活性基团,如羟基、羧基和氨基等。

参考文献

- [1] MOSCATELLO N J, PFEIFER B A. Yersiniabactin metal binding characterization and removal of nickel from industrial wastewater[J]. *Biotechnology Progress*, 2017, 33(6): 1548-1554.
- [2] 聂发辉,刘荣荣,张慧敏,等.工业废水中镍的去除与回收技术及相关研究进展[J]. *水处理技术*, 2015, 41(11): 7-15.
NIE Fahui, LIU Rongrong, ZHANG Huimin, et al. Research advances of nickel removal and recycling from industrial wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(11): 7-15.
- [3] 林伟雄,顾海奇,武纯,等.响应面法优化化学沉淀整合生物絮凝处理含镍废水[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 493-500.
LIN Weixiong, GU Haiqi, WU Chun, et al. Optimization of Ni(II) wastewater treatment by the combination of chemical precipitation and bio-flocculation using response surface methodology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(2): 493-500.
- [4] 刚葆琪,庄志雄.我国镍毒理学研究进展[J]. *卫生毒理学杂志*, 2000, 14(3): 129-135.
GANG Baoqi, ZHUANG Zhixiong. Research progress of nickel toxicology in China [J]. *Journal of Health Toxicology*, 2000, 14(3): 129-135.
- [5] CAI Fangrui, LEI Lirong, LI Youming, et al. A review of aerobic granular sludge (AGS) treating recalcitrant wastewater: Refractory organics removal mechanism, application and prospect [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 782: 146852.
- [6] 刘名,唐朝春,衷诚,等.干硝化好氧颗粒污泥对Pb²⁺的吸附特性与机理[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(12): 1923-1930.
LIU Ming, TANG Chaochun, ZHONG Cheng, et al. Dried biomass from nitrified aerobic granular sludge for Pb²⁺ adsorption: Behaviors and mechanisms [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(12): 1923-1930.
- [7] WANG Li, WAN Chunli, LEE D J, et al. Adsorption-desorption of strontium from waters using aerobic granules [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, 44(3): 454-457.
- [8] 李姝,胡学伟,NGUYEN D T,等.钙化好氧颗粒污泥对Pb²⁺、Cu²⁺、Cd²⁺的吸附[J]. *环境化学*, 2013, 32(10): 1917-1923.
LI Shu, HU Xuewei, NGUYEN D T, et al. Adsorption of Pb²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺ by calcified aerobic granular sludge [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(10): 1917-1923.
- [9] SHENG Guoping, LI Anjie, LI Xiaoyan, et al. Effects of seed sludge properties and selective biomass discharge on aerobic sludge granulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 160(1): 108-114.
- [10] DE SOUSA ROLLEMBERG S L, MENDES BARROS A R, MILEN FIRMINO P I, et al. Aerobic granular sludge: Cultivation parameters and removal mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 678-688.
- [11] 王磊,湛含辉,王晴晴,等.好氧颗粒污泥快速培养影响参数及方法研究进展[J]. *环境工程*, 2020, 38(5): 1-7.
WANG Lei, ZHAN Hanhui, WANG Qingqing, et al. Research progress of influence parameters and methods for rapidly cultivat-

- ing aerobic granular sludge[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(5): 1-7.
- [12] LIU Zhe, LIU Yongjun, KUSCHK P, et al. Poly aluminum chloride (PAC) enhanced formation of aerobic granules: Coupling process between physicochemical-biochemical effects[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 1127-1135.
- [13] 梁梓轩, 涂倩倩, 苏晓轩, 等. 不同强化类型的好氧颗粒污泥结构特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(6): 167-173. LIANG Zixuan, TU Qianqian, SU Xiaoxuan, et al. Structural characteristics of different enhanced aerobic granules[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6): 167-173.
- [14] 杨志颖, 李江琴, 欧阳二明, 等. 天然混凝剂强化好氧颗粒污泥成形研究[J]. *应用化工*, 2022, 51(7): 1979-1984. YANG Zhiying, LI Jiangqin, OUYANG Erming, et al. Study of natural coagulant-enhanced aerobic granular sludge formation[J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(7): 1979-1984.
- [15] MOHD ASHARUDDIN S, OTHMAN N, ALTOWAYTI W A H, et al. Recent advancement in starch modification and its application as water treatment agent[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101637.
- [16] GULNAZ O, SAYGIDEGER S, KUSVURAN E. Study of Cu(II) biosorption by dried activated sludge: Effect of physico-chemical environment and kinetics study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 120(1/2/3): 193-200.
- [17] BOPARAI H K, JOSEPH M, O' CARROLL D M. Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 458-465.
- [18] VIMONSES V, LEI Shaomin, JIN Bo, et al. Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 148(2/3): 354-364.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 375-377. State Environmental Protection Administration. *Monitoring and analysis methods of water and wastewater* [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 375-377.
- [20] SHEN Zhengtao, ZHANG Yunhui, MCMILLAN O, et al. Characteristics and mechanisms of nickel adsorption on biochars produced from wheat straw pellets and rice husk[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(14): 12809-12819.
- [21] VILAR V J P, BOTELHO C M S, BOAVENTURA R A R. Equilibrium and kinetic modelling of Cd(II) biosorption by algae gelidium and agar extraction algal waste[J]. *Water Research*, 2006, 40(2): 291-302.
- [22] XU Hui, LIU Yu, TAY J H. Effect of pH on nickel biosorption by aerobic granular sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(3): 359-363.
- [23] 蒋韵秋. 改性花生壳炭对电镀废水中镍离子[Ni(II)]的吸附研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018. JIANG Yunqiu. Study on adsorption of Ni(II) from electroplating wastewater by modified peanut shell biochar [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [24] 王琳, 李煜. 酸度对好氧颗粒污泥生物吸附含铅废水影响的研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(7): 1160-1164. WANG Lin, LI Yu. Effect of acidity on biosorption of Pb²⁺ wastewater by aerobic granular sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7): 1160-1164.
- [25] 杨国靖. PFOA在好氧颗粒污泥系统中的行为机制及其影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018. YANG Guojing. The behavior mechanism and influence study of perfluorooctanoic acid in aerobic granular sludge system [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [26] COVELO E F, VEGA F A, ANDRADE M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1/2): 308-315.
- [27] SARİ A, TUZEN M. Kinetic and equilibrium studies of biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution by macrofungus (*Amanita rubescens*) biomass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1004-1011.
- [28] LIAN Fei, XING Baoshan, ZHU Lingyan. Comparative study on composition, structure, and adsorption behavior of activated carbons derived from different synthetic waste polymers[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 360(2): 725-730.
- [29] 邹局春, 郑志锋, 凌敏, 等. 核桃壳纤维素降解的 FTIR 特征[J]. *林业科学*, 2008, 44(3): 129-134. ZOU Juchun, ZHENG Zhifeng, LING Min, et al. Degradation of cellulose of walnut shell based on FTIR characteristics[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 129-134.
- [30] YAKOUT S M. Monitoring the changes of chemical properties of rice straw-derived biochars modified by different oxidizing agents and their adsorptive performance for organics[J]. *Bioremediation Journal*, 2015, 19(2): 171-182.
- [31] AN Qiang, JIANG Yunqiu, NAN Hongyan, et al. Unraveling sorption of nickel from aqueous solution by KMnO₄ and KOH-modified peanut shell biochar: Implicit mechanism [J]. *Chemosphere*, 2019, 214: 846-854.
-
- [作者简介] 李江琴(2001—), 硕士研究生. E-mail: 1246279500@qq.com. 通讯作者: 欧阳二明, 博士, 副教授. E-mail: youmer@ncu.edu.cn.
- [收稿日期] 2022-11-11(修改稿)