

# 好氧颗粒污泥处理高浓度有机废水的研究进展

白静<sup>1,2</sup>, 王现丽<sup>2</sup>, 李智<sup>2</sup>, 吴俊峰<sup>2</sup>, 刘祖文<sup>1</sup>, 宣鑫鹏<sup>1</sup>, 龙焙<sup>1</sup>,  
毛艳丽<sup>2</sup>, 康海彦<sup>2</sup>, 刘彪<sup>2</sup>, 朱新锋<sup>2</sup>, 郭一飞<sup>2</sup>

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 河南城建学院 河南省水体污染防治与修复重点实验室, 河南 平顶山 467036)

**摘要:** 好氧颗粒污泥(AGS)基于生物相丰富、污泥代谢活性高、耐冲击负荷、沉降性能好、运行成本较低等优势在高浓度有机废水处理中得到广泛应用。简述了高浓度有机废水对AGS结构形态、理化性质及代谢活性的不同影响,总结了近年来AGS技术对高浓度有机废水(食品工业废水、垃圾渗滤液、制药废水、焦化废水、印染废水、高盐废水)的处理效能、影响因素及稳定性的研究进展,并在此基础上分析了AGS技术处理高浓度有机废水的可行性及发展前景。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 高浓度有机废水; 处理效能; 稳定性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)08-0038-06

## Research Progress on Aerobic Granular Sludge for Treatment of High Concentration Organic Wastewater

BAI Jing<sup>1,2</sup>, WANG Xian-li<sup>2</sup>, LI Zhi<sup>2</sup>, WU Jun-feng<sup>2</sup>, LIU Zu-wen<sup>1</sup>, XUAN Xin-peng<sup>1</sup>,  
LONG Bei<sup>1</sup>, MAO Yan-li<sup>2</sup>, KANG Hai-yan<sup>2</sup>, LIU Biao<sup>2</sup>, ZHU Xin-feng<sup>2</sup>, GUO Yi-fei<sup>2</sup>

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Henan Key Laboratory of Water Pollution Control and Rehabilitation, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

**Abstract:** Aerobic granular sludge (AGS) is widely used in the biological treatment of high concentration organic wastewater due to its advantages of rich biological phases, high activity of sludge metabolism, shock resistance, good settling performance and low operation cost. This paper reviewed the effects of high concentration organic wastewater on the structure, physicochemical properties and metabolism of AGS. With the AGS technology, the efficiency, influence factors and the stability were summarized for the treatment of high concentration organic wastewater, such as food industrial wastewater, landfill leachate, pharmaceutical wastewater, coking wastewater, dyeing wastewater and high-salt wastewater. The feasibility and prospect of AGS technology in treating high concentration organic wastewater was analyzed.

**Key words:** AGS; high concentration organic wastewater; treatment efficiency; stability

高浓度有机废水是食品、制药、印染纺织等行业排出的COD浓度在2 000 mg/L以上的废水,多含

芳香族、杂环化合物、硫化物、氮化物等毒性有机物。其常规处理方法包括物化处理法及生物处理法,生物处理作为一种可持续发展的工艺广泛应用于污(废)水处理领域,从生物处理角度出发的好氧颗粒污泥(AGS)技术克服了生物处理中传统活性污泥法易产生大量剩余污泥、容积负荷较低、对冲击负荷敏感等弊端,表现出对高浓度有机废水中碳氮高效去除的同时具有一定的抗冲击能力及自我恢复能力<sup>[1]</sup>,对高浓度有机废水具有处理能力大、低耗、经济、管理方便等优势。

## 1 AGS在高有机负荷条件下的代谢机制

AGS是在特定环境下污泥自凝聚与固定化的一种形式,基于内部微生物交织形成紧实而规则的结构,使沉降性能优于普通活性污泥,有效提高反应器内污泥浓度,保证生物相丰富,增强对高浓度有机废水的处理能力。AGS对高浓度有机废水的处理过程主要包括吸附及生物降解。吸附作用以物理吸附为主,以生物吸附、化学吸附为辅,AGS的单位吸附量、吸附效率与浓度呈正相关,关梦龙等<sup>[1]</sup>通过修正ASM3模型建立了可描述AGS代谢数学模型,发现高有机负荷(OLR)下,处于优势地位的异养微生物,利用外源有机物同时进行储存及生长,并在底物富足阶段能够促进AGS的储存速率优化生长途径,减弱高浓度底物对代谢活动抑制的同时快速降解底物,以抵制在高OLR下AGS颗粒性质的恶化。AGS代谢机制是一个复杂的过程,包括底物的扩散、氧的传质、微生物间的竞争与生长及微生物产物等各方面。微生物增长动力学方程中微生物增长与基质利用的关系表明,AGS最大基质比降解速度是絮状污泥的1.8倍,Long等<sup>[2]</sup>研究表明OLR由4.8 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)增至18 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d),MLSS从5 g/L上升到20 g/L左右,证实了高OLR条件下逐渐增加的外源有机物在转化为生物体完成代谢作用后,通过剩余污泥的处理得到去除。

## 2 高OLR条件对AGS的影响

### 2.1 高OLR条件对好氧污泥颗粒化的影响

OLR在一定程度上影响了污泥颗粒化进程中AGS的微生物积累及其生长情况和沉降性能。由于低OLR条件下,无法形成污泥颗粒化所需的理想推流环境,且微生物在低营养环境下生长缓慢,故而形成颗粒时间较长并易造成颗粒穿孔。Ni等<sup>[3]</sup>研究表明,在低负荷城市污水(COD<200 mg/L)条件

下,经300 d才能完全培养出AGS,而在COD为450 mg/L条件下,36 d内AGS就可以基本形成。王芳等<sup>[4]</sup>研究发现在14.12 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)下形成的AGS相较于1.58 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)下形成的颗粒更为密实、含水率更低、沉降性更好,并且对COD、氨氮和磷的去除效率更高。AGS可以在高OLR[2.5~15 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)]条件下完成颗粒化,一方面,微生物比增殖速率逐渐增加<sup>[5]</sup>,促进颗粒化进程并形成以丝状菌为骨架,由杆菌及球菌组成密实的稳定结构,增大了AGS抵抗外界冲击的机械强度;另一方面,比耗氧速率(SOUR)及扩散系数随颗粒粒径增大而增加,改善了传质阻力及分层现象,提高了反硝化阶段对氮的去除效能,但当OLR增加到一定程度时,由于氮磷缺失造成颗粒稳定性下降,同时颗粒表面形成由丝状菌过度增长产生的絮状松散层<sup>[6]</sup>,加之颗粒粒径过大使底物传质受到影响,造成颗粒内核分解,影响AGS的稳定性。

### 2.2 高OLR条件对AGS稳定性的影响

AGS的稳定性可定义为颗粒抵抗水流及机械剪切力的能力。超声波测定结果表明,AGS内部强度在停止COD供给时急剧减弱,并且在随后的COD再供应阶段不被恢复<sup>[7]</sup>。对于OLR的界定,AGS所能承受的最大有机负荷达22.4 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d),可以抵抗2.5~15 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)的负荷扰动。Long等<sup>[2]</sup>研究表明,AGS在OLR逐渐增加至18 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)时出现裂解,OLR过高对脲酶、转化酶、超氧化物歧化酶及多酚氧化酶活性产生影响<sup>[8]</sup>,进而导致AGS稳定性下降。程晓霞等<sup>[8]</sup>研究表明,AGS在OLR为3和9 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)时解体程度较OLR为6 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)时高,从而衍生出高负荷缺氧学说及低负荷学说,OLR过高且曝气量不足的情况下,丝状菌大量生长繁殖从而使其三维结构强度降低;OLR过低的情况下,丝状菌形成丝状体伸出颗粒表面以吸收低浓度营养物,造成颗粒解体。粒数衡算方程表明,颗粒解体速率与颗粒粒径成正比,高OLR下颗粒粒径由于微生物快速增长而变大,致使OLR下颗粒解体速率增加。

AGS可通过提高曝气量来满足其形成与结构维持稳定的水力剪切要求,以提高对OLR的承受能力。Chen等<sup>[9]</sup>研究表明当水力剪切力为3.2 cm/s时,AGS可以承受的OLR为6~15 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d);当水力剪切力降低至2.4 cm/s时,AGS在OLR>9

kgCOD/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )下出现裂解。通过延长 SBR 系统饥饿时间使颗粒核心微生物倾向于产生更多的储存产物以维持代谢活性,实现提升处理过程中 AGS 粒状结构的完整及稳定性<sup>[10]</sup>。通过控制运行操作(循序渐进控制废水进水比例、曝气速率)及颗粒本身的稳固(富集缓慢生长微生物、强化颗粒核心)强化 AGS 的稳定性,以保证系统的相对平稳运转。

### 3 AGS 对高浓度有机废水的处理

#### 3.1 食品工业废水处理

食品工业废水含有大量易生化的蛋白质、有机酸、碳水化合物等耗氧性有机物,BOD<sub>5</sub>、COD 浓度是普通城市污水的 10~100 倍,农副食品加工业废水 COD 为 8 000~30 000 mg/L,蜜饯及卤菜加工废水 COD 高达 85 000 mg/L。王震等<sup>[11]</sup>研究表明以味精废水为进水,经过 60 d 培养 AGS,当 COD、氨氮的容积负荷分别为 2.4、0.24 kg/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )时,对氨氮、总氮、COD 的处理效能可分别稳定维持在 99% 及 85%、90%。于鲁冀等<sup>[12]</sup>研究表明,以味精废水厌氧池中解体的厌氧颗粒污泥形成 AGS 核心,AGS 表面及内部存在明显空隙,颗粒表面以球菌和短杆菌为优势菌群,中间层以长杆菌为主,颗粒内部结构致密,附着少量球菌,高 OLR 环境下 AGS 出现较为明显的变化(结构更致密、形态更规则),但颗粒在 111 d 运行期内未出现解体并保持处理效果稳定。近年来食品工业废水的处理逐渐偏向于对其无害化与资源化利用,联合厌氧、好氧颗粒污泥处理工艺,以微生物利用废水中的糖类、含氮物质等发酵产出甲烷、热量、多不饱和脂肪酸和生物柴油实现对食品工业废水的资源化利用,是食品工业废水处理的未来发展方向。

#### 3.2 垃圾渗滤液处理

垃圾渗滤液成分复杂,COD、BOD<sub>5</sub> 浓度可分别达到 90 000、45 000 mg/L,氨氮浓度至封场时可达 10 000 mg/L 以上。魏燕杰等<sup>[13]</sup>研究表明,在垃圾渗滤液含盐量 < 10 000 mg/L 时,AGS 的沉降性能、污泥活性及对污染物的去除效能基本不受影响,当含盐量  $\geq 10 000$  mg/L 并出现较大幅度波动时,也可在短期内迅速恢复。在高氨氮环境下,AGS 内硝化菌活性增强,在强化对氨氧化菌(AOB)富集的同时,高游离氨浓度抑制了亚硝酸氧化细菌(NO<sub>2</sub>-B)的活性<sup>[14]</sup>,促进同时硝化反硝化、短程反硝化并利于同步脱氮除磷的发生,对处理垃圾渗滤液具有一定

的优势。Morling<sup>[14]</sup>通过 SBR 培养 AGS 用于处理垃圾渗滤液,对 COD 及总氮的去除率分别为 85%、90%~95%。于小因<sup>[15]</sup>以乙酸钠、丙酸钠为碳源经 28 d 快速培养出形态均一、粒径为 3~5 mm、金黄色的 AGS,发现进水 COD 浓度越高,AGS 可耐受的氨氮浓度越高,因此提高 COD 浓度不仅能降低硝酸盐的累积,利于反硝化作用的进行,还能促进破碎的颗粒得到恢复,增强 AGS 的耐受力。研究中发现,在增加厌氧阶段、延长水力停留时间、提高曝气量、高 C/N 比率的环境下,AGS 能更好地适应垃圾渗滤液中的高氨氮环境并得到更好的处理效果。基于垃圾渗滤液的高氨氮含量,培养好氧硝化颗粒污泥,促进形成短程硝化反硝化,提高脱氮效能的同时强化其在处理系统中的稳定性,从处理效能及运行成本上具有可靠的优势,但好氧硝化颗粒污泥需要较长的时间进行培养,需要大量的研究数据及中试来完善和优化处理工艺。

#### 3.3 制药废水处理

制药废水的 COD 为 3 000~4 000 mg/L,其生物处理的难点在于无法回避具有抑菌作用的抗生素或生化抑制物对微生物生长产生的抑制作用,抑制类物质在一定程度上影响了 AGS 的结构及形态,通过这种抑制作用完成对 AGS 微生物菌种的淘汰与筛选,使耐受菌种在 AGS 中占主导地位。刘风华等<sup>[16]</sup>研究表明,利用 ABR 处理黄连素废水培养驯化 80 d 后形成灰色 AGS,其沉降速率是普通 AGS 的 11~15 倍,通过生物吸附及生物氧化的协同作用对黄连素及 COD 的去除率达到 92.24% 及 90.97%~95.79%。王君<sup>[17]</sup>通过添加头孢氨苄培养出的 AGS 粒径较小、密度较大、沉降速率较快、颗粒完整性高,但微生物种群多样性及数量不及普通 AGS,其中优势菌种 *Proteobacteria* 能够抵抗头孢氨苄的杀伤作用,且利用头孢氨苄作为能量补充使其去除率稳定在 89%~97%。环境因子和优势功能菌的竞争构成了 AGS 在制药废水水质条件下的微生物群落,在颗粒内部构成中强化了其在制药废水中的稳定性,这种方式可针对特定药物废水处理,达到相同排放标准的同时减小投资及消耗,满足技术及经济要求。

#### 3.4 焦化废水处理

焦化废水含有苯酚类、多环芳烃及杂环化合物等毒性物质,COD 为 5 000~8 000 mg/L,氨氮为 2 000~3 000 mg/L,目前主要采取活性污泥法与混



凝沉淀法联用处理方式。焦化废水中大量存在的酚和硫氰化物具有良好的好氧生物降解性<sup>[18]</sup>,吡咯、呋喃、萘也可通过微生物缓慢降解。刘国洋等<sup>[19]</sup>发现,投加苯酚可使 AGS 表面被丝状微生物缠绕并均匀镶嵌在 EPS 中,使 AGS 表面更加光滑,结构更为紧凑,在进水苯酚含量为 3 000 mg/L 时,对苯酚、COD 及氨氮的去除率分别达到 98.33%、97.27% 及 57.58%。AGS 在一定酚类含量的毒性抑制环境下,会刺激颗粒分泌出更多的 EPS 促进微生物细胞凝聚,强化颗粒稳定性的同时抵抗毒性的干扰<sup>[19]</sup>。Tay 等<sup>[20]</sup>研究表明,EPS 形成的鞘结构是 AGS 抵抗毒性干扰的关键。曹雯雯等<sup>[21]</sup>研究表明,加入 AGS 的一体式膜生物反应器在提高除污效率的同时减弱了膜污染,对焦化废水的降解具有一定的优势。针对焦化废水中含有的不易生化物质,需要增加预处理措施(沉淀法、萃取法、高级氧化法等)以削减其含量,保证系统的稳定运行,或通过生物强化技术,投加高效降解微生物培养针对性难降解有机物(联苯类、吡啶类)的功能菌 AGS,增强对难降解物质的去除效果,提高对废水的处理范围及能力。

### 3.5 印染废水处理

纺织印染废水不仅水质复杂、有机物含量高且多含芳香环及苯环结构并携带有色基团。van der Zee 等<sup>[22]</sup>研究表明 AGS 中偶氮染料还原菌可以在 SBR 的厌氧阶段还原偶氮染料中的偶氮键,使染料去除率达到 90% 以上,并在后续好氧阶段将产物芳香胺矿化实现对偶氮染料的有效降解。偶氮染料还原菌优选生存于 AGS 颗粒中心,受冲击波动影响小,在一定程度上提高了 AGS 长期运行的稳定性。此外,AGS 作为高生物相及耐高负荷性能的活性生物吸附材料,有效克服了常用生物吸附剂(细菌、真菌、藻类、豆壳类等)存在的固液分离及再生困难等问题。马登月<sup>[23]</sup>采用递加亚甲基蓝、刚果红染料的方式,培养出颗粒内层以杆状菌为主,中、外层以真菌和丝状菌紧密连接形成骨干的亚甲基蓝 AGS,以及结构紧密、外观光滑、边界清晰的刚果红 AGS,两种 AGS 的最大吸附容量分别达到 256.61、175.44 mg/gSS。影响 AGS 吸附效果的主要因素为 pH 值,在 pH 值为 1~2、6、12 时对橘黄、酸性红 B、孔雀绿、结晶紫的平衡吸附量达到最大,分别为 142.86、90.36、52.63、232.56 mg/g, pH 值对吸附效率的影响表现在 AGS 表面吸附位点、染料间离子静电引

力、颗粒与染料间的分子间力。AGS 对染料的吸附量与染料初始浓度成正比,依据这一特性,AGS 作为一种具有成本效益且环境友好的生物吸附剂可广泛应用于染料废水的处理。

### 3.6 高盐度废水处理

高盐度废水主要来自海水利用排出的高盐废水、医药产业废水、石油开采废水等,含有大量盐分。AGS 由于传质限制能够改善高盐环境下微生物细胞失活或质壁分离的现象,并且在高盐环境下 AGS 中的嗜盐菌具有一定的耐盐性<sup>[24]</sup>,使 AGS 能够较大程度地抵抗高盐环境的冲击。高盐环境能够改变丝状菌发散生长模式为密实生长,形成结构更加紧实、沉降性能更好的小粒径颗粒。此外,在高盐环境形成的浮力作用下能够优选出结构密实、沉降性能优良的 AGS,克服传统活性污泥中普遍存在的污泥量少、系统不稳定的弊端,在处理高盐废水时具有一定优势。但汪善全等<sup>[25]</sup>利用序批式摇床反应器培养 AGS 在高盐度水 NaCl 为 10 g/L 时对 TOC 的去除率为 97.6%,在 35 g/L 时下降到 70%。Campo 等<sup>[26]</sup>研究表明,当 OLR 为 1.6 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d),盐度由 0.30 gNaCl/L 增加到 38 gNaCl/L 时,硝化率从 58% 减少至 15% 随后又增加到 25%。这是由于对硝化细菌的抑制作用及氨氧化菌逐渐适应高盐的环境产生对亚硝酸盐的积累,增加的盐含量改变了 EPS 结构和组成成分,颗粒污泥蛋白质含量的减少使其疏水性降低<sup>[27]</sup>,稳定性受到影响。需要控制盐度水平使硝化作用的不利影响最小化<sup>[28]</sup>以维持颗粒的基本稳定。以中等嗜盐菌为主的耐盐 AGS<sup>[24]</sup>,可耐受 9% 的盐浓度。Corsino 等<sup>[29]</sup>研究表明 AGS 可以在盐度 <50 gNaCl/L 的条件下维持基本稳定。

## 4 结语

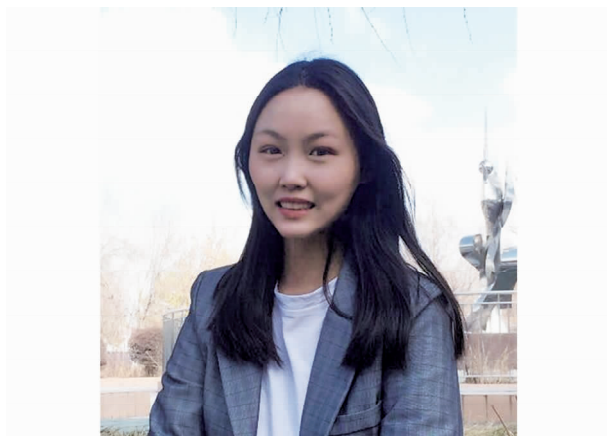
AGS 作为一种极具发展前景的生物处理技术,在实验室规模内对高浓度有机废水的处理效能、影响因素及稳定性研究等方面取得了大量的积极成果,证明 AGS 技术对治理高浓度有机废水具有良好的应用前景。但对其实现工程化应用仍需不断探索及论证,在此基础上提出以下建议:①以不同实际高浓度有机废水类型为研究对象进行中试研究,探究 AGS 对实际高浓度有机废水的普遍适用性并建立经济性评价,以推动实际应用,为将来工程化具体应用奠定基础。②针对不同类型高浓度有机废水的不同水质特点,通过联用工艺形成系统的处理方式,以

实现对高浓度有机废水的彻底降解。③针对难降解类废水采用生物强化技术,利用其培养驯化耐受机制的 AGS 对特殊水质进行定向处理,有效提高处理范围及效能。

#### 参考文献:

- [1] 关梦龙,黄钧,毕京芳,等. 好氧颗粒污泥代谢高浓度有机废水的数学模拟[J]. 应用与环境生物学报, 2014,20(6):1063-1069.
- Guan Menglong, Huang Jun, Bi Jingfang, *et al.* Mathematical simulation of aerobic granular sludge metabolizing high-concentration organic wastewater[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2014,20(6):1063-1069 (in Chinese).
- [2] Long B, Yang C, Pu W. Tolerance to organic loading rate by aerobic granular sludge in a cyclic aerobic granular reactor[J]. Bioresour Technol, 2015,182:314-322.
- [3] Ni B J, Xie W M, Liu S G. Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. Water Res, 2009,43(3):751-761.
- [4] 王芳,杨凤林,张兴文,等. 不同有机负荷下好氧颗粒污泥的特性[J]. 中国给水排水, 2004,20(11):46-48.
- Wang Fang, Yang Fenglin, Zhang Xingwen, *et al.* Characteristics of aerobic granular sludge at various organic loading [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(11):46-48 (in Chinese).
- [5] 刘芳芳,詹技灵,李欣,等. 不同进水浓度下好氧颗粒污泥的培养及其除污性能[J]. 中国给水排水, 2015, 31(3):5-8.
- Liu Fangfang, Zhan Jiling, Li Xin, *et al.* Cultivation and pollutant removal performance of aerobic granular sludge at different influent concentrations[J]. China Water & Wastewater, 2015,31(3):5-8 (in Chinese).
- [6] 董苗苗,陈垚,蒋彬,等. 有机负荷及 DO 对高盐好氧颗粒污泥稳定性的影响[J]. 水处理技术, 2015,41(6):67-70.
- Dong Miaomiao, Chen Yao, Jiang Bin, *et al.* Effects of organic load and DO on the stability of high-salt aerobic granular sludge [J]. Technology of Water Treatment, 2015,41(6):67-70 (in Chinese).
- [7] Wan C L, Shen Y G, Chen S, *et al.* Microstructural strength deterioration of aerobic granule sludge under organic loading swap[J]. Bioresour Technol, 2016,211: 671-676.
- [8] 程晓霞. SBAR 中好氧颗粒污泥运行稳定性影响因素的研究[D]. 哈尔滨:黑龙江科技大学, 2012.
- Cheng Xiaoxia. Research on Affecting Factors of Stability Operation of Aerobic Granular Sludge in SBAR [D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2012 (in Chinese).
- [9] Chen Y, Jiang W J, Liang D T, *et al.* Aerobic granulation under the combined hydraulic and loading selection pressures [J]. Bioresour Technol, 2008, 99 (16): 7444-7449.
- [10] Corsino S F, di Biase A, Devlin T R, *et al.* Effect of extended famine conditions on aerobic granular sludge stability in the treatment of brewery wastewater [J]. Bioresour Technol, 2016,226:150-157.
- [11] 王震,何青,赵晴,等. 好氧颗粒污泥技术用于味精废水处理的研究[J]. 中国给水排水, 2012,28(5):11-14.
- Wang Zhen, He Qing, Zhao Qing, *et al.* Application of aerobic granular sludge to monosodium glutamate wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2012,28(5):1-4 (in Chinese).
- [12] 于鲁冀,何青,王震. 好氧颗粒污泥的培养及处理味精废水[J]. 环境工程学报, 2012,6(6):1929-1935.
- Yu Luji, He Qing, Wang Zhen. Cultivation of aerobic granule sludge and its application in treatment of monosodium glutamate wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012,6(6):1929-1935 (in Chinese).
- [13] 魏燕杰,季民,秦菲菲,等. 颗粒污泥与絮状污泥处理垃圾渗滤液的耐盐性能比较[J]. 环境工程学报, 2010,4(10):2249-2253.
- Wei Yanjie, Ji Min, Qin Feifei, *et al.* Comparison of salt-resistance performances of aerobic granules and flocculent sludge treating landfill leachate [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4 (10): 2249-2253 (in Chinese).
- [14] Morling S. Nitrogen removal and heavy metals in leachate treatment using SBR technology[J]. J Hazard Mater, 2010,174(1/3):679-686.
- [15] 于小囡. 好氧颗粒污泥处理高氨氮废水及机理研究[D]. 上海:复旦大学, 2013.
- Yu Xiaonan. Study on the Treatment of High Ammonia Nitrogen Wastewater and Mechanism by Aerobic Granular Sludge [D]. Shanghai: Fudan University, 2013 (in Chinese).

- [16] 刘风华,曾萍,宋永会,等. ABR-好氧颗粒污泥处理黄连素废水的启动研究[J]. 环境工程学报,2011,5(9):1937-1942.  
Liu Fenghua, Zeng Ping, Song Yonghui, *et al.* Start-up performance of hybrid ABR-aerobic granulation reactor for berberine wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(9): 1937-1942 (in Chinese).
- [17] 王君. 好氧颗粒污泥降解头孢类抗生素研究[D]. 济南:山东大学, 2015.  
Wang Jun. Study on the Degradation of Cephalosporin by Aerobic Granular Sludge [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015 (in Chinese).
- [18] 张涛,韦朝海,任源,等. 焦化废水前置好氧流化床处理的必要性解析[J]. 化工进展,2017,36(8):3108-3115.  
Zhang Tao, Wei Chaohai, Ren Yuan, *et al.* Necessity analysis for employing preposition aerobic fluidized bed to treat coking wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(8): 3108-3115 (in Chinese).
- [19] 刘国洋,赵白航,李军,等. 好氧颗粒污泥降解苯酚[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3645-3650.  
Liu Guoyang, Zhao Baihang, Li Jun, *et al.* Phenol degradation by aerobic granular sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3645-3650 (in Chinese).
- [20] Tay S T, Moy B Y, Maszenan A M, *et al.* Comparing activated sludge and aerobic granules as microbial inocula for phenol biodegradation [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2005, 67(5): 708-713.
- [21] 曹雯雯,宋志伟,郑健. 好氧颗粒污泥膜生物反应器处理焦化废水[J]. 黑龙江科技大学学报,2012,22(1):23-27.  
Cao Wenwen, Song Zhiwei, Zheng Jian. Coking wastewater treatment using aerobic granular sludge membrane bioreactor [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2012, 22(1): 23-27 (in Chinese).
- [22] van der Zee F, Villaverde S. Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes—A short review of bioreactor studies [J]. Water Res, 2005, 39(8): 1425-1440.
- [23] 马登月. 好氧颗粒污泥对两种典型染料处理作用的机制研究[D]. 济南:山东大学,2014.  
Ma Dengyue. Studies on the Treatment Mechanism of Two Typical Dyes by Aerobic Granular Sludge [D]. Jinan: Shandong University, 2014 (in Chinese).
- [24] Ou D, Li H, Li W, *et al.* Salt-tolerance aerobic granular sludge: Formation and microbial community characteristics [J]. Bioresour Technol, 2018, 249: 132-138.
- [25] 汪善全,原媛,孔云华,等. 好氧颗粒污泥处理高含盐废水研究[J]. 环境科学,2008,29(1): 145-151.  
Wang Shanquan, Yuan Yuan, Kong Yunhua, *et al.* Experimental investigation of high saline wastewater treatment using aerobic granules [J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 145-151 (in Chinese).
- [26] Campo R, Corsino S F, Torregrossa M, *et al.* The role of extracellular polymeric substances on aerobic granulation with stepwise increase of salinity [J]. Sep Purif Technol, 2018, 195: 12-20.
- [27] Corsino S F, Capodici M, Morici C, *et al.* Simultaneous nitrification-denitrification for the treatment of high-strength nitrogen in hypersaline wastewater by aerobic granular sludge [J]. Water Res, 2016, 88: 329-336.
- [28] Wang Z W, van Loosdrecht M C M, Saikaly P E. Gradual adaptation to salt and dissolved oxygen: Strategies to minimize adverse effect of salinity on aerobic granular sludge [J]. Water Res, 2017, 124: 702-712.
- [29] Corsino S F, Capodici M, Torregrossa M, *et al.* Physical properties and extracellular polymeric substances pattern of aerobic granular sludge treating hypersaline wastewater [J]. Bioresour Technol, 2017, 229: 152-159.



作者简介:白静(1994-),女,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为高效废水生物处理技术。

E-mail: 1542473902@qq.com

收稿日期:2019-07-10