

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.004

## 污泥外部调理强化好氧颗粒污泥(AGS)培养研究进展

刘俊<sup>1</sup>, 李松波<sup>2</sup>, 姜月梅<sup>1</sup>, 陆佳莹<sup>1</sup>, 梅晓曦<sup>1</sup>, 刘文如<sup>3</sup>,  
何秋来<sup>4</sup>, 邢保山<sup>5,6</sup>, 刘喆<sup>5,6</sup>, 李军<sup>7</sup>

(1. 嘉兴职业技术学院 现代农业学院, 浙江 嘉兴 314036; 2. 嘉兴职业技术学院 城市建设学院, 浙江 嘉兴 314036; 3. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 4. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 5. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 6. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 7. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 好氧颗粒污泥(AGS)因具有良好的沉降性能、耐冲击负荷等优异特性而备受关注,但较长的培养周期极大地限制了其大规模应用。简述了AGS的特性、影响因素等基本知识,明确了快速颗粒化的内涵,同时总结了现有实现好氧污泥快速颗粒化的策略并进行归类,分析了污泥内部调理和外部调理特点,重点论述了污泥外部调理加速污泥颗粒化过程。污泥内部调理策略存在污泥随机聚集-瓦解的缺陷,导致AGS启动周期较长;污泥外部调理策略可实现絮状污泥“定向、快速聚集”的目标,返投污泥聚集体可减少启动阶段污泥随机聚集-瓦解发生的频次,从而加速好氧污泥颗粒化进程。未来,可借助大数据和人工智能的优势改善污泥外部调理强化好氧污泥颗粒化在实际工程中的应用。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 污泥外部调理; 快速颗粒化; 随机聚集-瓦解

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0023-08

## Research Process of Enhancing Aerobic Granulation by Sludge External Conditioning

LIU Jun<sup>1</sup>, LI Songbo<sup>2</sup>, JIANG Yuemei<sup>1</sup>, LU Jiaying<sup>1</sup>, MEI Xiaoxi<sup>1</sup>, LIU Wenru<sup>3</sup>,  
HE Qiulai<sup>4</sup>, XING Baoshan<sup>5,6</sup>, LIU Zhe<sup>5,6</sup>, LI Jun<sup>7</sup>

(1. School of Modern Agriculture, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314036, China; 2. School of Urban Construction, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314036, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 4. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 5. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 6. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 7. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**基金项目:** 西北水资源与环境生态教育部重点实验室开放基金项目(2022SZY05); 浙江省大学生创新训练计划项目(S202512874021); 嘉兴市公益研究计划项目(2025CGZ078)

**Abstract:** Aerobic granular sludge (AGS) technology has been extensively studied due to its advantages of excellent stability and high organic tolerance. However, its long start-up period remains a major challenge. This paper reviews the characteristics of AGS, examines factors affecting its formation, and defines rapid granulation. We also summarize strategies for the rapid cultivation of AGS and classify them systematically, with a focus on analyzing internal and external conditioning strategies. In particular, we emphasize the role of external conditioning methods in accelerating granulation. While the internal conditioning strategy often leads to random sludge aggregation-collapse, resulting in a prolonged start-up, the external conditioning approach can promote directional and rapid aggregation of flocculent sludge. Moreover, returning sludge aggregates to the bioreactor can reduce the frequency of random aggregation-collapse events, thereby accelerating aerobic granulation. In the future, the practical application of rapid granulation is expected to be further enhanced through the integration of big data and artificial intelligence.

**Keywords:** aerobic granular sludge; sludge external conditioning; rapid granulation; random aggregation-collapse

好氧颗粒污泥(AGS)是活性污泥在好氧条件下通过微生物的自凝聚作用而形成的结构紧凑、外形规则的生物聚集体,经过多年研究,许多学者在污泥粒径( $d$ )、污泥体积指数(SVI)及压缩沉淀性三方面达成共识:① 90%以上AGS的 $d \geq 0.2 \text{ mm}$ ;② 无压缩沉淀性,即 $\text{SVI}_{30}/\text{SVI}_5 \geq 90\%$ 。与普通活性污泥(AS)相比,AGS具有良好的沉降性能、密实的结构、较高的生物量等优点<sup>[1-2]</sup>,其较长的污泥停留时间有助于世代周期较长的细菌生长(如硝化菌、反硝化菌和聚磷菌),从而强化有机物的去除效能<sup>[3]</sup>。AGS的产生最早源于连续流反应器,因其运行条件苛刻,颗粒化难以实现,故未受到广泛关注。序批式反应器(SBR)为AGS的形成创造了有利条件,如缩短沉淀时间、提高有机负荷、形成基质丰富-匮乏机制等,大幅提高了AGS培养的效率,从此有关AGS的培养和稳定运行、形成机理及有机物去除和相关数学模型在以SBR为代表的柱状反应器中得到了广泛研究<sup>[4-5]</sup>。

目前,有关AGS的研究经历了大量的小试、部分中试和少量的工程化应用三个阶段,在小试规模的SBR中,以醋酸钠或葡萄糖为主要碳源,通过模拟城市污(废)水培养稳定的AGS需几周至一个月的时间,中试及实际工程中采用实际污水培养AGS时则需几个月甚至一年的时间。这是因为人工配制污水组分比较单一,而实际污水中营养成分比较复杂,对微生物的结构组成会产生重要影响,进而

延缓好氧污泥颗粒化的进程,最终延长启动时间。AGS较长的培养周期限制了其大规模的应用,因此如何实现好氧污泥快速颗粒化值得深入思考与研究。

## 1 AGS共识

### 1.1 颗粒污泥特征

与普通AS相比,AGS作为新型污水生物处理技术,在结构形态、菌群分布及胞外聚合物(EPS)等理化指标方面具有显著的差异。AGS形态以接近球形或椭球形为主且轮廓清晰、结构致密,这种3D结构使得污泥具有菌群丰富、抗冲击负荷能力强、沉降性能好、易于泥水分离等优异特性。在理化特性方面,除污泥含水率和密度外,AGS的MLSS、 $\text{SVI}_{30}$ 、平均粒径、沉降性能以及比耗氧速率(SOUR)都优于传统AS<sup>[6-7]</sup>。此外,AGS中EPS含量远高于AS<sup>[8]</sup>,这对颗粒的形成和污泥的稳定性具有积极作用。然而,有关AGS中EPS成分比例及其不同成分在颗粒化过程中的作用结论并不统一,这可能与有机质、污泥特性和微生物群落结构等因素有关<sup>[8]</sup>。

### 1.2 影响因素

影响AGS形成的因素较多,主要包括有机负荷(OLR)、选择压、水力剪切力、金属离子等<sup>[6,9]</sup>。研究表明,在OLR为 $2.5 \sim 41.0 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 范围内均可成功培养AGS,且提高OLR有助于AGS的快速形成,但OLR不能高于 $41.0 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。在SBR中沉淀 $2 \sim 30 \text{ min}$ 均可形成AGS,缩短沉淀时间有

利于AGS的快速形成。在SBR系统中,表面气速(SGV)在1.2~2.0 cm/s范围内有助于AGS形成,但也有研究在SGV为0.44 cm/s条件下实现了AGS快速培养且可大幅节省能耗<sup>[10]</sup>。较大的剪切力能够迫使微生物分泌更多的EPS、提高细胞疏水性,从而提高颗粒污泥的稳定性。投加适量的金属离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ )有助于加速AGS的形成和稳定运行<sup>[11]</sup>。过量的金属离子对微生物具有毒害作用,沉积在AGS中会增加灰分含量并降低生物活性,不利于有机物的去除。在柱状反应器内流体呈环状周期运动形式,颗粒具有最小表面自由能,对AGS的培养和稳定具有积极作用<sup>[12]</sup>。接种厌氧颗粒污泥(AnGS)和成熟的AGS也可加速好氧污泥颗粒化进程,由于颗粒污泥培养本身较为困难,将其作为接种污泥在大规模实践中不易实现,因此有关采用颗粒污泥作为接种污泥培养AGS的研究工作较少报道。此外,pH和温度对AGS的形成也有不同的作用。

连续流反应器属于完全混合式,流体运动则呈现随机性,颗粒处于不断自由碰撞中,对AGS的形成和稳定具有消极作用。通过调整进水流动方向、增加旋流器及调控水力停留时间(HRT)等方式控制连续流反应器的选择压,有利于促进反应器中轻、重污泥的分离,强化AGS的形成。目前,有关AGS的小试、中试和工程应用大部分研究仍然集中于SBR上。鉴于此,综合考虑优化运行参数、赋能AGS培养和稳定运行过程、推动其工程化效益势在必行。

### 1.3 形成过程

AGS的形成过程较复杂,形成机制尚未达成统一共识<sup>[9]</sup>。目前,AGS形成机制主要有4类假说,即,晶核假说、丝状菌假说、EPS假说及自凝聚假说<sup>[1]</sup>。这些假说虽然是在一定试验研究基础上提出的理论模型,但不能很好地解释AGS形成机制,通常认为AGS的形成过程需经历以下4个步骤:

① 在水力剪切力、扩散作用力和重力等物理作用下,细胞与固体颗粒间的距离缩短并形成生物聚集体萌芽;

② 在物理、生物作用下,提高细菌和固体颗粒的有效碰撞频次,维持连接的稳定性,强化吸附和凝聚效果;

③ EPS的产生、微生物群落的构建及外界环

境诱发效应等进一步加速聚集体的形成并逐渐稳定成熟;

④ 在水力剪切力的作用下聚集体最终形成AGS<sup>[13]</sup>。

## 2 好氧污泥快速颗粒化策略

迄今,有关好氧污泥快速颗粒化的内涵并未明确。基于前人研究成果,笔者认为快速颗粒化是指在同等条件下采取有效措施强化好氧污泥颗粒化进程,大幅缩短颗粒化时间的过程。国内外有关加速AGS形成的策略,主要集中在污泥内部调理和外部调理两方面,前者主要通过调控选择压、投/增加诱导核、接种特殊工程菌种等方式实现AGS的快速形成<sup>[14]</sup>;后者则富集出水污泥中与EPS分泌和有机物降解有关的优势菌群,如变形菌、拟杆菌和浮霉菌等,在外部调理过程中实现EPS快速分泌、加速污泥聚集体的形成,然后返投至生物反应器,为AGS的快速形成提供有利条件<sup>[15]</sup>。

### 2.1 污泥内部调理加速AGS形成

#### ① 调控选择压

缩短沉淀时间、提高进水负荷、延长饥饿时间、提高水流剪切力等策略均能加速好氧污泥颗粒化进程<sup>[16]</sup>。在极限选择压下24 h可实现好氧污泥颗粒化,但颗粒污泥在反应器中只能稳定运行12 d左右<sup>[17]</sup>。

#### ② 外加诱导核

在低基质浓度(COD为200 mg/L)条件下投加3 g/L的粉末活性炭作为诱导核可加速颗粒污泥的形成并使其长期稳定<sup>[18]</sup>,但所形成的生物聚集体能否归类为颗粒污泥尚存在疑问。在启动阶段,向反应器投加污泥微粉不仅能抑制外伸型丝状菌的过度生长,还可以加速AGS的形成<sup>[19-20]</sup>。在反应器中接种的厌氧颗粒污泥、成熟颗粒污泥、破碎颗粒污泥均能被水力剪切力打碎成小颗粒,为AGS形成的启动阶段提供充足的诱导核,从而加速好氧污泥颗粒化。然而,颗粒污泥本身难以培养,此法并不适合大规模应用。

#### ③ 接种特殊工程菌种

通过接种纯培养具有较强自凝聚能力的菌种可大幅缩短颗粒化进程,但所培养的颗粒污泥 $\text{SVI}_{30}$ 通常维持在70 mL/g且不密实<sup>[21]</sup>。由于使用工程菌存在安全性风险且菌种培养成本较高,因此后续研

究较少。

#### ④ 提高污水中的金属离子浓度

投加金属离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ ),通过电中和、吸附架桥的作用可大幅加快污泥颗粒化进程<sup>[11,22]</sup>。连续且过量投加金属离子易造成其在AGS内部沉积<sup>[23]</sup>,使颗粒污泥中灰分含量增加50%~84%,降低污泥的生物活性,从而抑制有机物的降解<sup>[24]</sup>。减少金属离子的投加量可降低AGS中的灰分含量,但会延缓污泥颗粒化进程<sup>[23,25]</sup>。

综上,不同的污泥内部调理措施均能强化污泥聚集,实现AGS快速培养的目标,但这些策略各有利弊(见图1)。在AGS启动阶段,污泥随机聚集-瓦解的机制决定了细胞之间的接触和聚集体的形成,固、液、气三相的存在提高了污泥随机聚集-瓦解发生的频次,延缓了污泥颗粒化进程。如果在AGS启动阶段减少这种机制发生的频次,将有助于加速好氧污泥颗粒化。

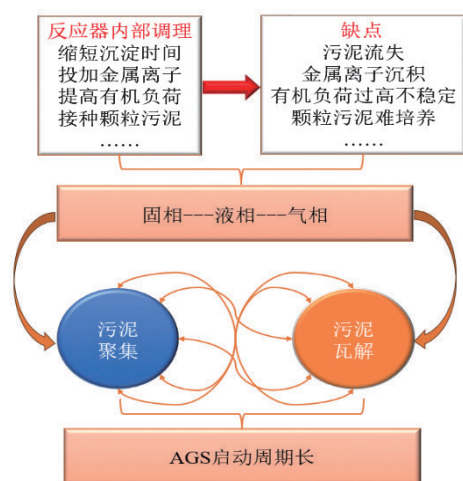


图1 反应器内部调理加速AGS形成示意

Fig.1 Schematic diagram of accelerating AGS formation by internal conditioning process

## 2.2 污泥外部调理加速AGS形成

Liu等<sup>[26]</sup>发现来自实际工程SBR中的颗粒污泥和絮状污泥均存在变形菌、拟杆菌和浮霉菌等优势菌群,且这些优势菌群与EPS分泌和有机污染物(C、N、P)的降解密切相关。在SBR中缩短沉淀时间必然导致启动阶段大量的絮状污泥被排出反应器,造成出水SS过高以及功能菌的流失。如何实现优势菌种富集、加速EPS分泌、强化絮状污泥聚集,对AGS快速形成至关重要。

#### ① 出水污泥经外部调理后返投SBR

剩余污泥经过浓缩、化学药剂调理、机械脱水等过程处理后其性状将由絮状变成结构紧凑的“泥饼”,在这个过程中微生物会释放大量的EPS<sup>[27]</sup>,而EPS是AGS形成的重要条件之一。基于此,有研究者提出将SBR出水污泥(絮状污泥)经外部调理后再返投至反应器,以强化好氧污泥颗粒化的构想<sup>[28]</sup>。该构想模型<sup>[28]</sup>如图2所示。

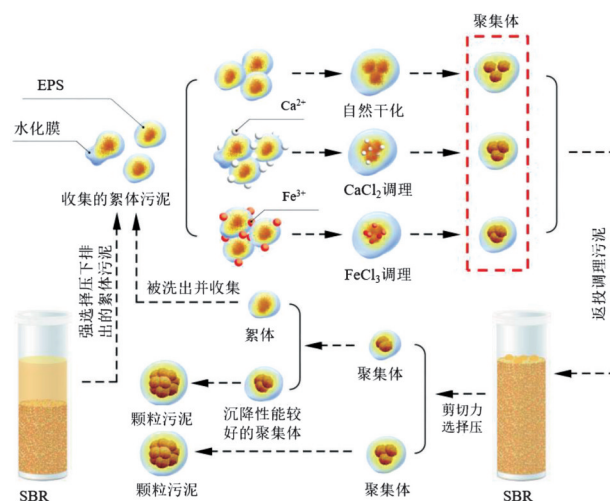


图2 出水污泥经外部调理后再返投至SBR加速AGS形成模型示意

Fig.2 Schematic diagram of accelerating AGS formation by effluent sludge external conditioning and feeding back into SBR

2020年—2022年,Liu等<sup>[28]</sup>采用自然干化、投加 $\text{CaCl}_2$ 及 $\text{FeCl}_3$ 对SBR出水污泥进行调理,在24~72 h内均实现了絮状污泥的快速聚集,尽管调理所形成的污泥聚集体在SOUR和含水率方面存在较小差异,但其在外观轮廓、EPS和停留效能方面却有显著差异。投加等量的 $\text{FeCl}_3$ 调理24 h后所形成污泥聚集体的EPS和污泥停留效能分别为360.5 mg/gVSS、0.71,明显高于投加等量的 $\text{CaCl}_2$ 调理和自然干化。该研究将调理形成的污泥聚集体等量 $[(1.75 \pm 0.05) \text{ g/L}]$ 分别返投至相应处理系统中,发现系统中均形成了AGS且都能稳定运行。相对于常规培养方法(逐渐缩短沉淀时间),该策略使污泥颗粒化时间缩短14~24 d,污泥颗粒化速度均得到加快,反应器中MLSS、 $\text{SVI}_{30}$ 、 $\text{SVI}_{30}/\text{SVI}_5$ 和平均粒径分别维持在3.7~6.0 g/L、45~47 mL/g、0.9~1.0、1.2~3.5 mm<sup>[10,28]</sup>。该小试研究结果还显示,MLVSS/MLSS比值基本维持在0.82~0.85,表明短期投加的 $\text{Ca}^{2+}$ 、

$\text{Fe}^{3+}$  金属离子未在污泥聚集体中沉积,也未增加 AGS 灰分含量,更没有降低微生物的活性和有机物的去除效果。

早期研究者采用人工配制污水在小试 SBR 中连续且过量投加金属离子,导致 AGS 中灰分含量增加 50%~84%<sup>[13-23]</sup>,大幅降低了生物活性,从而影响有机物的去除效能,而污泥外部调理则可以避免上述缺陷。Liu 等<sup>[28]</sup>的研究还表明,经过外部调理的污泥返投至反应器后,在水力剪切力的作用下将分解为粒径不等的污泥聚集体和絮状污泥,粒径较大的聚集体作为微生物的载体,可强化好氧污泥颗粒化;粒径较小的聚集体充当晶核的角色,可加速微生物聚集、强化颗粒化进程;絮状污泥伴随出水排出反应器,再次进入污泥外部调理和返投过程,直至实现颗粒化。由此可见,该策略既有助于出水污泥中关键功能菌的富集,促使关键菌群分泌 EPS,加速污泥聚集体形成,聚集体的返投为 AGS 的快速形成提供了“晶核”和“载体”,可大幅缩短污泥颗粒化时间。

## ② 出水污泥外部调理后返投连续流反应器

由于连续流反应器中 AGS 培养条件较为严苛,且颗粒失活、解体等现象时有发生,因此相关科学研究和工程实践报道较少,早期的研究主要集中在调控选择压、水力剪切力及优化反应器构造等来实现轻重污泥的分选。Kent 等<sup>[29]</sup>认为优化连续流反应器颗粒沉降速度、完善基质丰富-匮乏比例可实现 AGS 培养。然而,大多数连续流反应器中基质丰富-匮乏条件不如 SBR,而且比例难以调控,出水污泥经外部调理后返投至反应器可加速 AGS 的形成,这一策略在连续流反应器中是否可行,值得深入研究。

Xu 等<sup>[30]</sup>以生活污水作为营养源,尝试将  $\text{CaCl}_2$  调理后的污泥返投来加速 AGS 形成,研究结果表明,在第 18 天时双区沉淀一体式氧化沟出现外形规则的 AGS,其平均粒径为 0.37 mm、 $\text{SVI}_5$  为 56.6 mL/g、沉速为 37.8 m/h,连续运行 51 d 后,MLSS 和  $\text{SVI}_5$  分别稳定在 3 500 mg/L 和 40.0 mL/g 左右。在整个试验过程中,污泥生物活性得到大幅度提升,EPS 浓度显著增加,关键微生物如变形菌和拟杆菌属等得以富集,这对好氧污泥颗粒化和污染物的去除具有显著的积极作用。该方法既有效减少了污泥的排放量,又实现了 AGS 的快速形成,其加速 AGS 形成模

型<sup>[30]</sup>如图 3 所示。

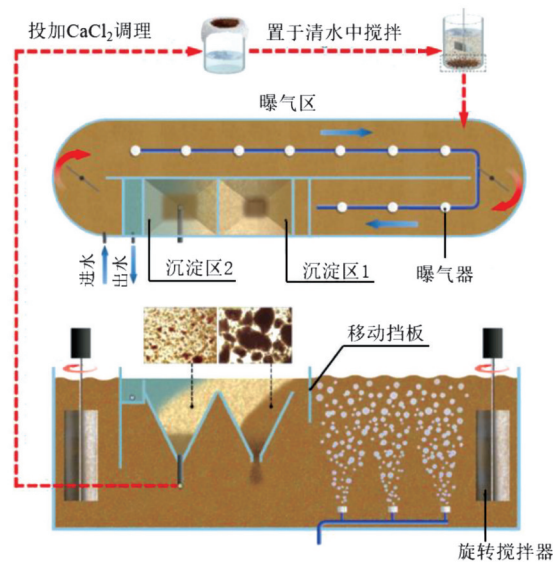


图3 双区沉淀一体式氧化沟出水污泥经  $\text{CaCl}_2$  调理后返投反应器加速 AGS 形成模型

Fig.3 Accelerating AGS formation in an integrated oxidation ditch with a two-zone sedimentation tank by effluent sludge conditioning of adding  $\text{CaCl}_2$  and feeding back to reactor

实际污水处理厂在 AGS 启动阶段需要大量的接种污泥,其中脱水污泥是最便捷、易获得的接种污泥。在 SBR 中接种脱水污泥可实现 AGS 的快速培养,然而在连续流反应器却并不容易实现。有研究<sup>[31]</sup>在双区沉淀池连续流反应器中持续加入脱水污泥,以低浓度生活污水( $\text{COD} < 200 \text{ mg/L}$ )为处理对象,在第 25 天成功培养出轮廓清晰、形态规则的 AGS,其平均粒径为 0.42 mm、 $\text{SVI}_5$  为 37.7 mL/g、沉速为 35.2 m/h。经过 45 d 的稳定运行,反应器内 MLSS 和  $\text{SVI}_5$  分别稳定在 4 200~4 600 mg/L 和 25.8~31.3 mL/g。该研究成功的关键在于该连续流反应器独特的双区沉淀构造设计和持续投加脱水污泥充当“诱导核”。然而,该模式对污水中的氮磷去除效果并不理想。为了提高连续流反应器在 AGS 培养过程中的脱氮除磷能力,相关学者<sup>[32]</sup>采用海绵填料耦合双区沉淀池的策略在同类型反应器中开展相关研究。结果表明,缺氧区与好氧区分别在第 30 天和第 43 天实现好氧污泥颗粒化,运行至 90 d 时,两区的 MLSS 分别达到 5 848、4 812 mg/L,  $\text{SVI}_5$  分别为 31.2、35.8 mL/g,平均粒径分别为 0.33、0.36 mm。在污泥颗粒化进程中,TN 去除率为  $(60.1 \pm 4.6)\%$ ,TP 去除率从 26.9% 增至 77.5%,反应器脱

氮除磷能力的提升可归功于 A/O 的运行方式和 AGS 形成。

综上所述,在连续流反应器中单独依靠污泥外部调理再返投策略难以实现 AGS 的快速培养,还需要对现有连续流反应器进行改进(如增设两个沉淀功能区、投加海绵填料等),为 AGS 的快速稳定形成和有机物的去除提供适宜的条件。这一论断与 Xu 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致,说明基于现有连续流反应器进行局部改造来实现 AGS 快速培养面临重大挑战。因此,未来设计 AGS 连续流反应器时需要整体考虑,在启动阶段提高污泥的定向、快速聚集,以及轻重污泥的分选效能是缩短 AGS 培养周期的关键所在。

### 3 污泥外部调理强化 AGS 形成应用前景

在实际工程中脱水污泥作为接种污泥在活性污泥工艺得以广泛应用,但并未实现 AGS 快速培养。究其原因,主要在于大多数工程采用连续流工艺,并不具备 AGS 大规模形成的适宜条件;一次性投加污泥聚集体并不能实现污泥快速颗粒化的目的。即使二沉池污泥有回流,但回流污泥并未得到外部调理,而且普通回流泵(离心泵)会破坏污泥聚集体。

研究发现,AGS 的理化特性( $SVI_{30}$ 、平均粒径、沉速)、污泥颗粒轮廓外形与成熟 AGS 具有较强的线性关系<sup>[34]</sup>,因此,提出运用大数据技术建立 AGS 形成及成熟评判“专家”系统。当生化反应器中污泥特性偏离 AGS 特性时,启动污泥外部调理程序,将出水污泥输送至污泥外部调理车间,然后将调理形成的聚集体通过返投系统输送至生物反应器,耦合 AGS 图像识别和特性技术(大数据)以及专家系统,实现污泥外部调理及不定期返投机制的智能启停,强化好氧污泥颗粒化,直至 AGS 形成及稳定运行,反之亦然。该机制的关键在于“专家”系统中 AGS 图像形貌和关键特性数据要充足(如外形规则、轮廓明晰、合适的  $SVI_{30}$ 、粒径  $>0.2\text{ mm}$  等)。此外,返投设备不能破坏污泥聚集体,同时还需兼顾有机物去除效能。对于连续流反应器,还需优化水力条件,提高系统的选择压,增设轻重污泥快速分离设备(如旋流器)。

出水污泥经外部调理后再返投反应器以加速 AGS 形成的模型如图 4 所示,其应用构想模型如图 5

所示。

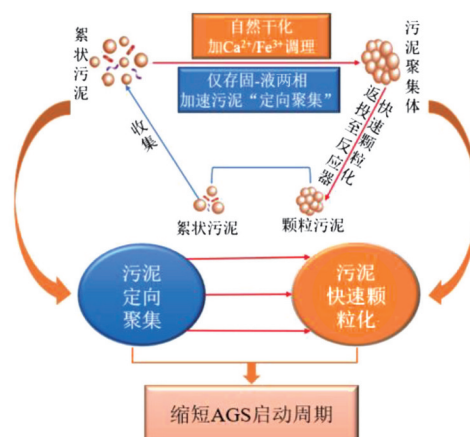


图 4 出水污泥外部调理返投至反应器加速 AGS 形成模型

Fig.4 Model of accelerating AGS formation by effluent sludge external conditioning and feeding back into reactor

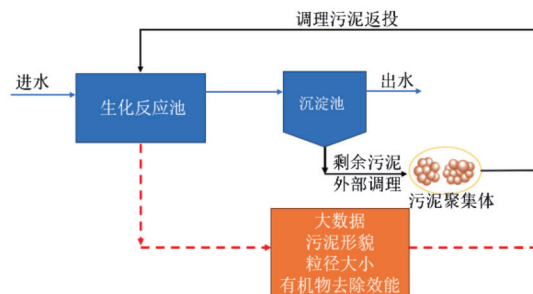


图 5 出水污泥外部调理返投至反应器加速 AGS 形成的应用构想模型

Fig.5 A conceptual application model for accelerating AGS formation by effluent sludge external conditioning and feeding back into reactor

## 4 结论

AGS 快速形成是限制 AGS 大规模应用的重要挑战之一。传统的加速好氧污泥颗粒化的策略主要集中在污泥内部调理(提高选择压、投加金属离子等),由于反应器内部存在固、液、气三相增加了微生物聚集的难度,提高了污泥随机聚集-瓦解发生的频次,从而延缓了污泥颗粒化进程。出水污泥经外部调理后再返投至 SBR 的策略实现了絮状污泥定向、快速聚集,减少了污泥随机聚集-瓦解的频次,大量的聚集体持续返投至反应器为 AGS 的快速形成提供了有利条件,实现了关键功能菌的富集和再利用。在连续流反应器中,该策略还需优化水力条件、提高选择压、强化轻重污泥分离。污泥外部调理还需在污泥定向、快速聚集上提供科学理论依据,耦合大数据、人工智能等手段可助力 AGS 工程

应用制定更精准的决策。

#### 参考文献:

- [1] NANCHARAI Y V, REDDY G K K. Aerobic granular sludge technology: mechanisms of granulation and biotechnological applications [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247:1128–1143.
- [2] SARMA S J, TAY J H. Aerobic granulation for future wastewater treatment technology: challenges ahead [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, 4(1):9–15.
- [3] XIA J T, YE L, REN H Q, et al. Microbial community structure and function in aerobic granular sludge [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2018, 102:3967–3979.
- [4] WINKLER M K H, MEUNIER C, HENRIET O, et al. An integrative review of granular sludge for the biological removal of nutrients and recalcitrant organic matter from wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 336:489–502.
- [5] ZAGHLOUL M S, ACHARI G. A review of mechanistic and data-driven models of aerobic granular sludge [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3):107500.
- [6] DE SOUSA ROLLEMBERG S L, BARROS A R M, FIRMINO P I M, et al. Aerobic granular sludge: cultivation parameters and removal mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270:678–688.
- [7] WAN C L, FU L Y, LI Z W, et al. Formation, application, and storage-reactivation of aerobic granular sludge: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323:116302.
- [8] YU H Q. Molecular insights into extracellular polymeric substances in activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(13):7742–7750.
- [9] LIU S L, ZHOU M, DAIGGER G T, et al. Granule formation mechanism, key influencing factors, and resource recycling in aerobic granular sludge (AGS) wastewater treatment: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338:117771.
- [10] LIU J, LI J, XU D, et al. Improving aerobic sludge granulation in sequential batch reactor by natural drying: effluent sludge recovery and feeding back into reactor [J]. *Chemosphere*, 2020, 242:125159.
- [11] HAO W, LI Y C, LV J P, et al. The biological effect of metal ions on the granulation of aerobic granular activated sludge [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 44:252–259.
- [12] JI Y T, LIU J Y, WANG C, et al. Stability improvement of aerobic granular sludge (AGS) based on Gibbs free energy change ( $\Delta G$ ) of sludge–water interface [J]. *Water Research*, 2023, 240:120059.
- [13] LIN H H, MA R, HU Y P, et al. Reviewing bottlenecks in aerobic granular sludge technology: slow granulation and low granular stability [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263(Part B):114638.
- [14] HAN X S, JIN Y, YU J G. Rapid formation of aerobic granular sludge by bioaugmentation technology: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 437(Part 1):134971.
- [15] LIU J, LI J, PICHÉ-CHOQUETTE S. The combination of external conditioning and  $\text{Ca}^{2+}$  addition prior to the reintroduction of effluent sludge into SBR sharply accelerates the formation of aerobic granules [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 36:101269.
- [16] WANG J Y, ZHAO B, AN Q, et al. The acceleration of aerobic sludge granulation by alternating organic loading rate: performance and mechanism [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347:119047.
- [17] LIU Y Q, TAY J H. Fast formation of aerobic granules by combining strong hydraulic selection pressure with overstressed organic loading rate [J]. *Water Research*, 2016, 80:256–266.
- [18] LI A J, LI X Y, YU H Q. Granular activated carbon for aerobic sludge granulation in a bioreactor with a low-strength wastewater influent [J]. *Separation & Purification Technology*, 2011, 80(2):276–283.
- [19] LI J, LIU J, WANG D J, et al. Accelerating aerobic sludge granulation by adding dry sewage sludge micropowder in sequencing batch reactors [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2015, 12(8):10056–10065.
- [20] LIU J, LI J, XIE K, et al. Role of adding dried sludge micropowder in aerobic granular sludge reactor with extended filamentous bacteria [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, 5:51–58.
- [21] IVANOV V, WANG X H, TAY S T L, et al. Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 70:374–381.

- [22] LIU Z, LIU Y J, 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.
- [23] WAN C L, LEE D J, YANG X, et al. Calcium precipitate induce aerobic granulation[J]. Bioresource Technology, 2015, 176:32-37.
- [24] REN T T, LIU L, SHENG G P, et al. Calcium spatial distribution in aerobic granules and its effect on structure, strength and bioactivity[J]. Water Research, 2008, 42(13):3343-3352.
- [25] SAJJAD M, KIM K S. Studies on the interactions of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  with EPS and their role in determining the physicochemical characteristics of granular sludge in SBR system [J]. Process Biochemistry, 2015, 50(6): 966-972.
- [26] LIU J, LI J, TAO Y Q, et al. Analysis of bacterial, fungal and archaeal populations from a municipal wastewater treatment plant developing an innovative aerobic granular sludge process [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2017, 33(1):14.
- [27] WU B R, DAI X H, CHAI X L. Critical review on dewatering of sewage sludge: influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge re-utilizations[J]. Water Research, 2020, 180:115912.
- [28] LIU J, YIN S C, XU D, et al. Fast granulation by combining external sludge conditioning with  $\text{FeCl}_3$  addition and reintroducing into an SBR [J]. Polymers, 2022, 14(17):3688.
- [29] KENT T R, BOTT C B, WANG Z W. State of the art of aerobic granulation in continuous flow bioreactors [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(4):1139-1166.
- [30] XU D, LI J, LIU J, et al. Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers [J]. Water Research, 2020, 175: 115704.
- [31] XU D, LIU J, MA T, et al. Rapid granulation of aerobic sludge in a continuous-flow reactor with a two-zone sedimentation tank by the addition of dewatered sludge[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 41:101941.
- [32] XU D, LIU J, MA T, et al. Coupling of sponge fillers and two-zone clarifiers for granular sludge in an integrated oxidation ditch[J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 26:102264.
- [33] XU D, LI J, LIU J, et al. Advances in continuous flow aerobic granular sludge: a review [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 163:27-35.
- [34] LEAL C, VAL DEL RIO A D, MESQUITA D P, et al. Sludge volume index and suspended solids estimation of mature aerobic granular sludge by quantitative image analysis and chemometric tools [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 234:116049.
- 
- 作者简介:刘俊(1986— ),男,河南信阳人,工学博士,副教授,从事污水生物处理及资源化研究工作。
- E-mail:liuj521282@sina.com
- 收稿日期:2024-01-02
- 修回日期:2024-01-15

(编辑:丁彩娟)

精打细算用好水资源,从严从细管好水资源