

连续曝气 SBR 快速培养 AGS 及反应器流态的 CFD 解析

肖飞^{1,2}, 王维红^{1*}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要: 配制模拟番茄酱废水, 在高径比为 10 的 SBR 反应器中, 考察连续曝气条件下好氧颗粒污泥 (AGS) 的除污性能和微生物特性的变化。建立流体动力学模型, 模拟反应器中气-液-污泥三相流的流态, 以了解其对污泥颗粒化的影响机理。结果表明: 污泥完全颗粒化后, 对番茄酱废水中 COD、NH₃-N 和 PO₄³⁻-P 的去除率分别为 94.37%、93.55% 和 90.92%; 绿弯菌门 (Chloroflexi)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和厚壁菌门 (Firmicutes) 丰度显著提高, 假丝酵母菌 (*Candidatus saccharibacteria*) 为除磷功能微生物; 反应器内的流态结构呈环流和旋涡流, 水力剪切力的大小与颗粒粒径呈正相关, 颗粒形态与流态分布有关。

关键词: 好氧颗粒污泥; 流体动力学; 除污性能; 连续曝气; 微生物特性

中图分类号: X703

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2022)06-0064-05

Rapid Cultivation of AGS by Continuous Aeration SBR and CFD Analysis of Reactor Flow Pattern

XIAO Fei^{1,2}, WANG Wei-hong^{1*}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University,

Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. College of Water Resources and Architectural

Engineering, Tarim University, Aral, Xinjiang 843300, China)

Abstract: Simulated tomato paste wastewater was prepared in a SBR reactor with a height to diameter ratio of 10, the decontamination performance and the change of microbial characteristics of aerobic granular sludge (AGS) were investigated under continuous aeration condition. A fluid dynamics model was established to simulate the three-phase flow pattern of gas-liquid-sludge in the reactor to understand the influence mechanism on sludge granulation. The results showed that the removal rates of COD, NH₃-N and PO₄³⁻-P in tomato paste wastewater were 94.37%, 93.55% and 90.92%, respectively after the sludge was completely granulated. The abundance of Chloroflexi, Bacteroidetes and Firmicutes increased significantly. *Candida saccharibacteria* was phosphorus removal microorganism. The flow pattern structure in the reactor was circulatory and vortex. Hydraulic shear force was positively related to particle size, and particle shape was related to flow pattern distribution.

Key words: Aerobic granular sludge; Fluid dynamics; Decontamination performance; Continuous aeration; Microbial characteristics

好氧颗粒污泥 (Aerobic granular sludge, AGS) 大多培养于高径比 ($R_{H/D}$) > 5 的圆柱形鼓泡反应器中, 较高的 $R_{H/D}$ 提供了充足的水力剪切力, 增加污泥之间的碰撞频率, 为 AGS 颗粒化提供有利条件^[1-3]。然而, 在 AGS 颗粒化过程中, 水力剪切力

收稿日期: 2021-09-15; 修订日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51968071)

作者简介: 肖飞 (1993-), 男, 四川绵阳人, 硕士, 研究方向为污水处理。

* 通信作者: 王维红 E-mail: 2209319288@qq.com

速率、液相流态变化和污泥特性是制约 AGS 快速颗粒化的主要瓶颈,目前仍缺乏研究和分析。

近年来,全球发表的与流体动力学模型(CFD)相关的研究成果日益增多,其多数被应用于纺织、机械和船舶仿真^[4-6],而关于 AGS 方面的研究鲜有报道。有研究表明^[7-9],AGS 颗粒化过程与气-液两相流速、曝气头的孔径和表观气速有关,也与反应器塔高、直径及液面高度有一定的关联。液面高度和反应器直径是影响两相流状态的主要因素,反应器塔高和曝气头的尺寸主要影响气含率的变化。基于此,今在 $R_{H/D}$ 为 10 的 SBR 中培养 AGS,考察连续曝气条件下 AGS 颗粒化过程中污泥粒径、除污性能和微生物特性的变化。建立流体动力学模型,分析反应器内液相流态变化和剪切速率对 AGS 的影响,以期为 AGS 的优化培养提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 实验仪器和材料

接种污泥取自城市污水处理厂曝气池,含水率为 90%,污泥颜色为黄褐色。实验装置设计基于 SBR 原理,反应器为圆柱形有机玻璃(内径 8 cm,高 80 cm),有效工作体积约 4 L,容积交换率为 48%。采用微孔式曝气,维持曝气流量 5 L/min ~ 6 L/min,上升气流流速保持在 1.66 cm/s ~ 1.99 cm/s 之间。采用时间控制器(PLC)自动控制运行周期,包括进水(10 min)、曝气(198 min 增至 223 min)、沉降(30 min 缩短至 5 min)、出水(2 min),共 240 min。环境温度保持在 20 °C ~ 25 °C。实验用水和化学试剂用量均参考冯殿宝^[10]的研究。进水 COD 质量浓度采用递加的方式,从初始质量浓度 400 mg/L 逐步提高到 1 400 mg/L。

1.2 分析项目与方法

水质指标 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、MLSS、MLVSS 及 SVI 的测定均采用标准方法^[11],其他分析项目的方法和仪器参考文献[10]。

2 结果与讨论

2.1 连续曝气 SBR 的好氧同步脱氮除碳及除磷性能分析

在反应器启动初期,控制进水 COD 值为 400 mg/L,出水 COD 值不稳定,最大值为

127.01 mg/L。随后,培养时间每间隔 20 d,进水 COD 值增加 400 mg/L,相应的 COD 平均去除率由启动初期的 79.40% 提升至 94.37% (60 d)。而 60 d 后,进水 COD 值增加到 1 400 mg/L,COD 平均去除率为 95.19%,反应器的脱碳性能并未得到强化。分析原因有:当 AGS 成熟后,部分污泥颗粒面临老化,其理化性能有所降低,与进水 COD 负荷不相匹配,影响了 COD 的去除。另外,在大约 62 d 时,由于短时断电,微生物进行厌氧呼吸,导致污泥沉降性能变差,反应器内的污泥排放量过多,优势菌流失。

在颗粒初生阶段, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 去除率分别为 42.54%、76.78% 和 48.32%,反应器对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 TN 的去除效率偏低,这可能是由于初生颗粒粒径较小,聚磷菌和反硝化菌数量少,脱氮除磷能力有限。在颗粒转变阶段,虽然 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的平均去除率分别提高到 90.92% 和 93.55%,反应器内充足的碳源及高 DO 环境促进了聚磷菌的富集,加快了 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除,但 TN 去除率较前期增幅不大,反硝化性能略差。在成熟阶段, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率保持在 98% 左右,说明成熟期的 AGS 强化了不同类型的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 积聚生物体进行生物除磷;TN 去除率明显提高,平均去除率高达 72.19%,反应器内淡黄色颗粒较絮状污泥占比大,有利于 TN 去除,该阶段的反应器具有良好的脱氮除磷性能。结合 FISH 探针技术,发现硝化菌、反硝化菌主要分布在颗粒内部 297 μm 和 800 μm 左右,加之 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的转化量与颗粒粒径、数量呈正相关,粒径越小,数量越多,转化量越大。此外,还发现 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的质量浓度处于伴随状态,呈现出“低→低”,表明吸磷和硝化过程同时进行,且 AGS 能够有效地降解 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 。

2.2 连续曝气 SBR 中 AGS 的颗粒结构特征分析

SBR 启动初期,接种污泥结构疏松,呈黄褐色,且反应器内 DO 保持在 5 mg/L ~ 6 mg/L 之间,为完全好氧环境。SBR 运行至第 15 天,反应器内出现肉眼可见的细小微粒子,直径大约为 150 μm ~ 200 μm ,平均粒径为 165 μm ,微粒子四周较扁平且出现颗粒化;在 40 d 左右,通过体式显微镜可观察到细小微粒子逐渐转化成淡黄色粒状颗粒,颗粒沟壑明显且结构致密,直径范围为 495 μm ~ 510 μm ;60 d 后,淡黄色颗粒直径增加到 1.2 mm,直径范围为 510 μm ~ 1 200 μm 的颗粒占

57.4%, 平均粒径为 815 μm , 颗粒轮廓更加清晰, 表面光滑, 且达到成熟阶段。成熟颗粒形态多以椭圆为主, 偶有稻壳状及似扁平状的颗粒存在, 颗粒表面凹凸不平, 布满空隙。另外, 少数颗粒表面出现空洞现象, 此现象可能与内部细菌的凋亡有关。在高倍数成像下, 颗粒表面主要附着球菌和杆菌, 伴随少量丝状菌。同时, 其周围存在大量指示性后生微生物(钟虫)等^[12-13], 出现这一现象的原因是 AGS 培养的基质为人工番茄酱废水。

2.3 连续曝气 SBR 中微生物多样性分析

采用高通量测序技术, 分别对接种污泥 (Z_{1-0})、两相污泥 (Z_{2-40}) 和成熟 AGS (Z_{3-60}) 的微生物多样性及优势菌群进行表征。在 Z_{1-0} 、 Z_{2-40} 和 Z_{3-60} 中分别测得 OUT 数量为 3 418 个、2 957 个和 2 382 个, 覆盖指数均超过 98.42%, 涵盖样品中大多数生物讯息。Shannon 指数、Simpson 指数和 Ace 指数、Chao 指数分别用来衡量群落多样性和物种丰富度。Shannon 指数值 Z_{1-0} 最大, Z_{3-60} 最小; Simpson 指数值 Z_{3-60} 最大, Z_{1-0} 最小, 说明 AGS 在形成过程中可能受到环境、基质作用, 导致某些功能菌的选择性竞争, 致使成熟 AGS 群落较絮体污泥时期分布紊乱, 同时也降低了 AGS 内部微生物的多样性。随着 AGS 的形成, Ace 指数值和 Chao 指数值均呈下降趋势, 这与 Shannon 指数值变化趋势一致, 可能与高 DO 环境对微生物的选择有关。

Z_{1-0} 和 Z_{3-60} 中的优势菌门分别为变形菌门 (Proteobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和绿弯菌门 (Chloroflexi)。在颗粒形成初期, Chloroflexi 的相对丰度持续增加, 未出现在 Z_{1-0} 中, 在 Z_{2-40} 中占比为 5.14%, 而在 Z_{3-60} 中占比 7.58%。随着成熟颗粒粒径的增大, Chloroflexi 在 Z_{3-60} 后期消失, 说明其仅存在于粒径较小的 AGS 中。Firmicutes 是次优势菌门, 丰度随着 COD 梯度进水而呈上升趋势, 具有抵抗高有机负荷 (OLR) 的能力。在污泥接种期间, *Candidatus Accumulibacteria* 所占比例 (0.03%) 低于后期 (2.19%), 并且反应器中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 降解效率显著提高, 说明其丰度的增加有利于 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除。相比 Z_{1-0} , 草芽包杆菌 (*Bacillus subtilis*) (5.34%)、蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) (4.21%)、红环菌 (*Rhodocyclus*) (5.53%) 和黄杆菌 (*Flavobacterium*) (9.77%) 更有利于在番茄酱废

水基质和高 DO 环境生长。

2.4 曝气圆柱形反应器内气-液-污泥三相流模拟

2.4.1 表观气速对三孔曝气反应器速度场的影响

在 $R_{H/D}$ 为 10, 表观气速分别为 1.99 cm/s 和 1.66 cm/s 条件下, 气相流速随反应器轴向高度的增加呈下降趋势, 气相速度趋势线的增幅为 $v_{1.99} > v_{1.66}$, 增幅的大小受到影响, 导致反应器内流态出现变化。当入口气流速度分别为 9 cm/s 和 6 cm/s 时, 采用 FLUENT 15.0 软件得到气相-液相速度矢量关系。结果显示, 反应器内部气体呈升流式流动上升, 沿壁两侧存在多个涡旋, 涡流局部按环流发展, 并且反应器内的气泡更倾向于聚集在反应器中心, 而靠近侧壁的气泡则会因涡流存在而破裂。入口气流流速越大, 接近曝气头的液相速度也越大, 液相波动明显。产生这一现象的原因是入口气流速度较大, 表观气速增加, 环流增加了反应器内气泡并聚和破裂; 其次, 该现象还与气含率分布的均匀性有关, 气含率随反应器高度的增加而增加, 随入口气流速度的增加而减小。表明反应器内气泡沿轴向运动, 不断有气泡破裂, 同时也伴随着大量气泡新生, 符合上述结论。当采用相同材质的曝气头时, 表观气速为 1.99 cm/s, 反应器中新生的气泡直径较小, 液相与污泥颗粒流体之间存在显著差异。

2.4.2 液相-污泥颗粒相对速度分布

对于三相流而言, 随着污泥颗粒的增长, 液相流速与污泥颗粒之间的相对速度随之增加。当表观气速为 1.66 cm/s, 平均颗粒粒径为 0.165 mm 时, 液相流速与污泥颗粒的相对速度较小, 而反应器侧壁的相对速度比中心处偏大, 最大相对速度 u 为 0.15, 位于 Z/H (反应器中垂直坐标 Z 与液面高度 H 的比值) 为 0.52 处。另外, 随着培养时间的增加, 污泥颗粒粒径增大至 0.51 mm, 此时液相与污泥颗粒之间的相对速度大小发生改变, 这可能与反应器内环流有关。结合矢量关系可知, 该时期反应器中不同位置的环流形成的涡旋强度具有差异性, 中心处较大, 边缘处逐渐减弱, 且最大相对速度 u 为 0.5, 位于 Z/H 为 0.6 处, 是颗粒粒径 0.165 mm 的 3.33 倍。最后, 大约 60 d 左右, 污泥颗粒粒径维持在 1.2 mm, 最大相对速度 u 为 2.6, 位于 Z/H 为 0.4 处, 是初生颗粒的 17.4 倍。液相-颗粒污泥之间的相对速度大小与颗粒表面受迫力有关。同理, 当表观气速为 1.99 cm/s 时, 初生

颗粒和液相之间的最大相对速度 u 为 0.78, 位于 Z/H 为 0.2 处, 是表观风速 1.66 cm/s 的 5.2 倍, 而在相同粒度下, 当颗粒粒径较小时, 颗粒与液相之间的相对速度变化不大; 颗粒粒径为 0.51 mm, 最大相对速度 u 为 3.5, 位于 Z/H 为 0.4 处, 与表观风速 1.66 cm/s 相比, 液相与颗粒之间的相对速度增加, 使反应器内水力剪切力增大, 环流流动结构变长, 颗粒污泥与水流摩擦作用变强, 促进颗粒污泥表面变得光滑并形成球形结构, 这与 2.2 中颗粒结构特征的结果类似; 颗粒粒径 >1 mm, 最大相对速度 u 为 6.0, 位于 Z/H 为 0.9 处, 同时反应器内的涡流主要靠近中心轴线, 相对速度大小随轴向位置的延伸而增大, 而相对速度的变化趋势与反应器内部流态的分布呈现不断改变, 这也是造成颗粒形态多样性的原因(扁平状)。由此可见, 颗粒表面受到的作用力大小与反应器内流态的分布及相对速度大小都有关。

2.5 好氧颗粒污泥颗粒化过程中平均水力剪切力的变化

由分析可知, 水力剪切速率与颗粒粒径之间呈幂函数关系。AGS 培养初期, 颗粒粒径增加较快, 而水力剪切速率增加缓慢, 这是由于污泥受到水力剪切力的作用, 促进了微生物分泌更多的胞外聚合物(EPS), 大量的疏水性微生物也富集在颗粒表面。在 40 d 后, 颗粒污泥基本颗粒化, 颗粒粒径和水力剪切速率均显著增加, 而颗粒污泥全部转化为 AGS 阶段, 两者的增加趋势逐渐减弱, 并保持在相对稳定的状态。然而, 当颗粒粒径增加至某一限值时, 颗粒不再受涡流产生的剪切作用, 加之颗粒污泥内部的氧传质减小, 颗粒发生解体现象, 解体后颗粒将形成新的 AGS 内核, 这也是颗粒粒径分布范围较广及大小不同的原因。

2.6 进水 COD 不同质量浓度对反应器内流态的影响

2.6.1 速度矢量分布

为研究进水 COD 不同质量浓度对反应器内流态的影响, 设定表观风速 1.99 cm/s 为研究条件。当进水 COD 质量浓度为 400 mg/L 时, 反应器内的流态以环流和尺度较小的旋涡流为主, 尺度较大的环流沿反应器轴向按顺时针方向运动, 而较小的旋涡流集中在反应器轴心处。再者, 反应器 $R_{H/D}$ 为 10, 环流的运动轨迹较长, 为污泥的初生长提供了有利条件。当进水 COD 质量浓度为 800 mg/L 时,

反应器内的流态发生较大的转变, 流态从小旋涡流变为尺度较大的旋涡流且占据了环流的地位, 成为优势流态, 分布在反应器的侧壁, 流体按逆时针方向逐个交替朝上移动, 速度矢量随空间连续变化。当进水 COD 质量浓度为 1 200 mg/L 时, 反应器内流态呈现出大小不一的旋涡, 分布较密集, 减小了环流的流动通道, 增加了旋涡间的接触, 旋涡的剪切作用有利于颗粒之间的碰撞, 这对形成大颗粒污泥具有较强的促进作用。不同进水 COD 浓度条件下, 速度矢量分布存在差异, 主要表现在旋涡流的分布位置。

实验采用的培养基质为番茄酱废水, 当进水 COD 质量浓度高于 800 mg/L 后, 反应器内形成可见的颗粒污泥, 说明随着 OLR 增加, 反应器内水力剪切力逐渐下降, 颗粒污泥逐渐向着粒径增大的方向演化。而反应器内形成的颗粒污泥大小不均匀, 与旋涡流的分布及表观风速的大小有关。在反应器中心形成的旋涡流的大小明显高于其他部分, 污泥受到的水力剪切力最强, 颗粒粒径越大。

2.6.2 气泡分布及双颗粒沉降涡量现象

当表观风速为 1.99 cm/s 时, 反应器内气泡的分布呈现先疏后密的趋势, 初生期气泡的数量相对较少。在新形成的气泡稳定后, 气泡随着上升气流向反应器中心移动, 中央部位的气泡数量相对增加, 使气泡并聚发生在中心上方, 偏离了反应器中心, 此阶段气泡的数量达到峰值。这可能与表观风速、培养基质类型和 $R_{H/D}$ 有关。反应器内表观风速越大, 上升气流流速越大, 气泡移动距离越远。流体黏度与基质类型存在差异, 番茄酱为非牛顿流体, 必须施加一定的力才能运动。随着表观风速的增大, 流体黏度随剪切速率的增大而减小, 由于番茄酱的实际用量占耗水量的比例较小, 流体的黏度无显著改变。反应器 $R_{H/D}$ 为 10, 高度相对较高, 气泡并聚时间相应延长, 导致气泡的数量峰值出现偏差。上述结论也证实了 2.4.1 中所述结果, 颗粒污泥在反应器中部受到的水力摩擦较大。此后, 由于气泡之间频繁的破碎和并聚, 以致液相的局部运动发生紊乱, 加剧了流体的紊动^[14]。综上所述, 与基质类型比, 表观风速对反应器内流态的影响更大。当表观风速较大时, 反应器内液相发生变化, 由初始的竖向运动变为横向旋转, 横向作用力的参与有助于 AGS 的快速形成。这是由于在颗粒形成初期, 颗粒粒径较小, 反应器内旋涡流尺度优于颗粒

粒径,小颗粒被旋涡夹带随其一起移动,颗粒之间的碰撞次数较少,颗粒粒径的增加相对缓慢;随后,颗粒污泥粒径逐渐增大,大于旋涡的尺度,在此过程中的颗粒污泥将受到旋涡的剪切作用。当颗粒污泥受到剪切作用时,颗粒之间互相靠近,前者运动的颗粒的尾部将形成尾涡并产生低压区域,后者运动的颗粒进入前者产生的低压区域时,后者受到的流体阻力减小,运动速度增加,两者发生碰撞,同时还会发生横向运动并翻转分离,直至颗粒粒径与旋涡的剪切作用达到动态平衡为止。

3 结语

采用连续曝气 SBR 反应器,以模拟番茄酱废水为基质,污泥第 40 天完全颗粒化,平均粒径为 0.51 mm,形成的颗粒污泥对 COD、NH₃-N、TN 和 PO₄³⁻-P 去除率分别为 94.37%、93.55%、72.19% 和 90.92%。AGS 的快速培养与连续曝气提供的水力剪切力有关,颗粒污泥的菌落类型不仅与培养基质有关,还可能与连续曝气提供的高 DO 环境中的某些微生物存在紧密联系。

[参考文献]

- [1] LIU J, LI J, WANG X, et al. Rapid aerobic granulation in an SBR treating piggery wastewater by seeding sludge from a municipal WWTP[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 51(1): 332-341.

(上接第 55 页)

(3)无论是采用标准物质还是实际样品对样品进行稀释,样品的均匀性均能满足分析要求,所得结果的精密度较高。

[参考文献]

- [1] 吴俭,邓一荣,林龙勇,等.广州市建设用地土壤污染风险管控和修复现状、问题与对策[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(3):1-4.
- [2] 郑梦蕾,丁世伟,李子杰,等.耕地质量监测与评价研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(3):9-14.
- [3] 邓述培,范鹏飞,唐玉霜,等. X 射线荧光光谱(XRF)法测定土壤污染样品中 9 种重金属元素[J]. *中国无机分析化学*, 2019, 9(4):12-15.
- [4] 朱美洁. 波长射散 X 荧光法测定土壤中的重金属元素[J]. *福建分析测试*, 2018, 27(1):50-54.
- [5] 彭梦微,黄彦明,李业燕. 波长色散型 X 射线荧光光谱法测定固体废物中的重金属含量[J]. *环境与发展*, 2020, 32

- [2] 周赞成. 曝气强度和反应器高径比对好氧颗粒污泥稳定性影响研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019.
- [3] ZHOU JH, ZHOU C Y, HAO C Y, et al. Determining the effects of aeration intensity and reactor height to diameter (H/D) ratio on granule stability based on bubble behavior analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 26(1):784-796.
- [4] 王晓维,汪虎明,高杰,等. 基于 CFD 技术纺织空调送风口结构的优化设计[J]. *流体机械*, 2020, 48(8):65-70.
- [5] 曹占龙,曾振宇,何理,等. 基于 CFD 的汽车水泵性能优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2020(8):228-231.
- [6] 吴灿. 基于 CFD 的船舶废气脱硫系统优化研究[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(16):199-201.
- [7] 唐开亮. 鼓泡塔反应器内气液流动与传质过程的 CFD 模拟研究[D]. 北京:北京化工大学,2020.
- [8] 范文雯,袁林江. 气泡直径对气-液-污泥流态及污泥颗粒化的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9):3859-3870.
- [9] 冉绍辉. 好氧颗粒污泥反应器气液两相流场特性研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [10] 冯殿宝. 处理番茄酱加工废水的好氧颗粒污泥快速培养及特性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2018.
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
- [12] 王燕杉,王维红,董星辽,等. SBR 反应器处理番茄酱生产废水的污泥颗粒化过程[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(1):25-30.
- [13] 潘江,肖芃颖,姚源,等. 连续曝气 SBR 快速培养 AGS 及同步脱氮除磷特性分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(3):60-63.
- [14] 范文雯. 好氧活性污泥圆柱形反应器流态的 CFD 解析及污泥颗粒化的模型预测[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.

(6):30.

- [6] 刘玉纯,林庆文,马玲. X 射线荧光光谱技术在地质分析中的应用及发展动态[J]. *化学分析计量*, 2019, 28(4):125-131.
- [7] 李艳. 应用 X 射线荧光光谱法测定铁矿石中常量元素[J]. *天津冶金*, 2013(6):64-66.
- [8] 刘玉纯,林庆文,马玲,等. 粉末压片制样-X 射线荧光光谱法分析地球化学调查样品测量条件的优化[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(6):671-677.
- [9] 陈春霏,洪欣,王晓飞,等. X 射线荧光光谱法测定土壤和沉积物中的锰[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(5):777-784.
- [10] 梁祖顺,李小莉,刘峰,等. 粉末压片-X 射线荧光光谱法测定含铈多金属矿样中铈[J]. *冶金分析*, 2014, 34(10):65-69.
- [11] 王子杰,王干珍,汤行,等. 粉末压片-X 射线荧光光谱法测定铈矿石中铈及主量组分[J]. *冶金分析*, 2018, 38(8):21-25.
- [12] 环境保护部. 土壤和沉积物 无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法:HJ 780—2015[S]. 北京:中国环境科学出版社,2015.