

城市污水处理过程污泥膨胀识别与抑制综述

潘红光^{1,2†}, 张莹婷¹, 折洋洋¹, 杨勇¹

(1. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 污泥膨胀是活性污泥法污水处理过程中常见的一类异常工况, 且具有严重危害性, 研究污泥膨胀的识别和抑制方法对城市污水处理过程正常运行意义重大. 本文主要针对城市污水处理过程中污泥膨胀的识别和抑制方法进行综述. 首先, 文章概述了城市污水处理过程, 介绍了污泥膨胀的概念、主要特点、类型和成因; 其次, 概述了基于微生物生理特征、机理模型、图像识别和数据驱动的污泥膨胀识别方法, 分析其发展现状并指出优缺点; 然后, 概述了基于过程调控和机理特征的污泥膨胀抑制方法, 分析其发展现状并对比优缺点; 最后, 总结全文, 指出了城市污水处理过程污泥膨胀识别和抑制面临的主要问题, 并对其研究趋势进行了展望.

关键词: 污泥膨胀; 活性污泥法; 城市污水处理过程; 识别; 抑制

引用格式: 潘红光, 张莹婷, 折洋洋, 等. 城市污水处理过程污泥膨胀识别与抑制综述. 控制理论与应用, 2024, 41(5): 798 – 807

DOI: 10.7641/CTA.2023.20488

Review on identification and suppression of sludge bulking in municipal wastewater treatment process

PAN Hong-guang^{1,2†}, ZHANG Ying-ting¹, SHE Yang-yang¹, YANG Yong¹

(1. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China;
2. Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education, Chongqing 400065, China)

Abstract: Sludge bulking is a common abnormal process in activated sludge wastewater treatment and has serious harm. It is of great significance to study the identification and suppression methods of sludge bulking for the normal operation of municipal wastewater treatment. In this paper, the identification and suppression methods of sludge bulking in the process of municipal wastewater treatment are summarized. Firstly, the urban wastewater treatment process is summarized, and the concept, main characteristics, types and causes of sludge bulking are introduced. Secondly, the sludge bulking identification methods based on the microbial physiological characteristics, mechanism model, image recognition and data driven are summarized. The development status of sludge bulking identification methods are analyzed and their advantages and disadvantages are pointed out. Then, the sludge bulking suppression methods based on the process regulation and mechanism characteristics are summarized. The development status of sludge bulking suppression methods are analyzed and their advantages and disadvantages are compared. Finally, the full text is summarized, and the main problems in the identification and suppression of sludge bulking are pointed out and the research trend is prospected.

Key words: sludge bulking; activated sludge process; municipal wastewater treatment process (MWWTPs); identification; suppression

Citation: PAN Hongguang, ZHANG Yingting, SHE Yangyang, et al. Review on identification and suppression of sludge bulking in municipal wastewater treatment process. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(5): 798 – 807

收稿日期: 2022-06-03; 录用日期: 2023-05-11.

†通信作者. E-mail: hongguangpan@163.com; Tel.: +86 13892827321.

本文责任编辑: 阳春华.

国家自然科学基金项目(51905416, 51804249), 西安市科技计划项目(2022JH-RGZN-0041), 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-38), 能源化工过程智能制造教育部重点实验室开放课题项目(2020ACOCPO3), 陕西省科技厅自然科学研究计划项目(2021JQ-574), 陕西省教育厅科学研究计划项目(20JK0758)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51905416, 51804249), the Xi'an Science and Technology Program (2022JH-RGZN-0041), the Shaanxi Qin Chuang Yuan "Scientists + Engineers" Team Construction (2022KXJ-38), the Key Laboratory of Smart Manufacturing in Energy Chemical Process, Ministry of Education (2020ACOCPO3), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2021JQ-574) and the Scientific Research Plan Projects of Shaanxi Education Department (20JK0758).

1 引言

城市污水处理是处理水污染和淡水资源紧张问题的重要措施^[1]。英、美国等发达国家将城市污水处理作为重要战略举措^[2], 而许多发展中国家没有成熟的污水处理技术, 以印度为例, 虽然采取了一定措施处理^[3], 但仍有废水未经任何处理或只经过初级处理排入水中。我国政府在第14个五年规划中指出要加大城镇污水处理力度, 国家相关政策彰显了城市污水处理的重要地位。活性污泥法是一种敏感的生物处理方法, 国内外一半以上的城市污水处理过程均采用该方法处理污水^[4]。使用该方法处理污水时污泥膨胀发生率较高^[5], 据统计, 欧美发达国家50%以上的处理厂出现过不同程度的污泥膨胀, 在国内该比例约为90%。污泥膨胀发生率高、范围广, 且抑制难度大, 严重时, 甚至会导致整个处理系统崩溃, 影响出水水质^[6]。因此, 寻求有效方法进行污泥膨胀识别与抑制意义重大。

近年来, 为降低污泥膨胀的发生率, 国内外学者对污泥膨胀的识别和抑制方法进行了大量研究。一方面, 针对污泥膨胀识别问题, 基于微生物生理特性、机理模型、图像识别以及数据驱动等方法, 获得了众多学者的广泛关注^[7-8]; 另一方面, 学者们通过研究城市污水处理的机理特征和运行过程, 提出了一系列污泥膨胀的抑制方法^[9]。在识别和抑制方法不断地改进与创新中, 先进的技术如神经网络等引起了研究人员的广泛关注, 相关学者将这些先进的技术应用到城市污水处理过程污泥膨胀的识别和抑制中, 使其识别和抑制能力得到了一定程度的提高^[10-11]。

本文首先概述城市污水处理过程工艺, 污泥膨胀的概念、特点、分类和成因; 其次, 讨论4类常见的污泥膨胀识别方法, 并阐述其研究现状; 然后, 讨论两种常见的污泥膨胀抑制方法, 并阐述其研究现状; 最后, 进行总结, 指出城市污水处理污泥膨胀识别和抑制的主要问题, 并结合当前研究进行了展望。

2 城市污水处理过程污泥膨胀简介

2.1 城市污水处理工艺概述

城市污水处理过程通过不同物理与生化反应, 去除危害物成分净化水质^[12]。活性污泥法是广泛使用的一种处理方法, 其成分包括污泥中的微生物、微生物代谢物和有机物等。该方法利用微生物群落的新陈代谢来降解、吸收和氧化污染物质, 实现水质净化^[13]。

典型的活性污泥法污水处理流程如图1所示, 污水处理工艺一般分三级处理工艺: 一级处理用作预处理一般采用格栅过滤、曝气沉砂和重力沉降等方法, 沉降大块悬浮物, 中和pH值并筛除无机颗粒; 二级处理活性污泥法中两个厌氧区和3个好氧区的硝化和反硝化作用是生化反应的主体。二级处理可以极大的提高

有机污染物的处理效率; 三级处理进一步消除难降解有机物、重金属、可溶性无机物等, 主要方法有生物脱氮法、反渗透法和臭氧消毒法等。

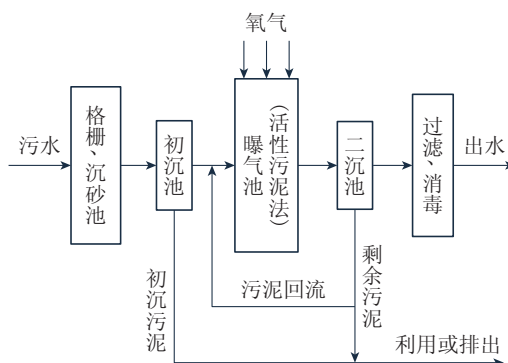


图1 典型活性污泥法污水处理工艺流程

Fig. 1 Typical activated sludge wastewater treatment process

2.2 污泥膨胀的概念与特点

污泥膨胀是一种活性污泥沉降速率缓慢、絮体压缩恶化的状态, 也是生化处理系统较为严重的异常现象之一。污泥膨胀发生时, 污泥结构极度松散不絮凝, 体积增大, 污泥沉降比 (settling velocity, SV) 值增大, 难于沉降分离, 从而影响出水水质, 严重时, 会造成系统工艺失效^[14]。一般来说, 各类活性污泥工艺都会发生污泥膨胀, 而且一旦发生难以控制, 通常需要很长时间来调整。

污泥膨胀现象的主要特点概括为以下4点:

- 1) 发生频率高, 影响范围广。国内外城市污水处理厂大多存在不同程度的污泥膨胀^[15];
- 2) 机理复杂。活性污泥中包含多种微生物, 涉及多种物理、化学反应过程;
- 3) 修复时间长。发生大概需要2-3天, 但是, 其修复期则是10-30天;
- 4) 危害严重。导致出水水质超标, 严重时, 使整个系统崩溃, 造成巨大的经济损失和社会不良影响。

2.3 污泥膨胀的分类与成因

活性污泥膨胀可分为由丝状菌过量增殖引起的丝状菌性污泥膨胀, 以及非丝状菌性污泥膨胀两种类型^[16]。经过调查发现, 在国内外污水处理厂中由丝状菌引起的污泥膨胀占有污泥膨胀事件数量的90%以上^[17]。丝状菌膨胀是活性污泥絮体中的丝状菌过度繁殖而导致的污泥膨胀; 非丝状菌膨胀是指菌胶团细菌本身生理活动异常, 粘性物质大量产生引发污泥膨胀, 非丝状菌膨胀发生时, 其处理废水的能力还较强, 危害相对较小。根据污泥膨胀的严重程度又可将污泥膨胀分为轻度膨胀、中度膨胀、重度膨胀等。

污水处理过程包含多种引发污泥膨胀的因素。污泥膨胀成因可简单概括为3个方面: 入水水质、污水处

理工艺, 以及环境因素. 为了识别和抑制污泥膨胀, 结合城市污水处理过程特点, 对污泥膨胀相关成因进行研究, 可从本质上将污泥膨胀分为低溶解氧浓度型污泥膨胀^[18]、缺乏营养型污泥膨胀^[19-20]、低污泥负荷型污泥膨胀^[21]、低温型污泥膨胀^[22-23]、pH不平衡型污泥膨胀^[24-25]、高硫化物浓度型污泥膨胀^[26]和高基质浓度型污泥膨胀^[27-28]等7种类型^[29].

3 污泥膨胀识别方法

在污水处理过程中, 准确识别污泥膨胀的发生是对污泥膨胀实施抑制的前提, 因此, 污泥膨胀的识别具有重要意义. 本节将污泥膨胀识别方法分为4类进行讨论, 分别是: 基于微生物生理特性的识别方法、基于机理模型的识别方法、基于图像的识别方法和数据驱动识别方法, 具体如图2所示.

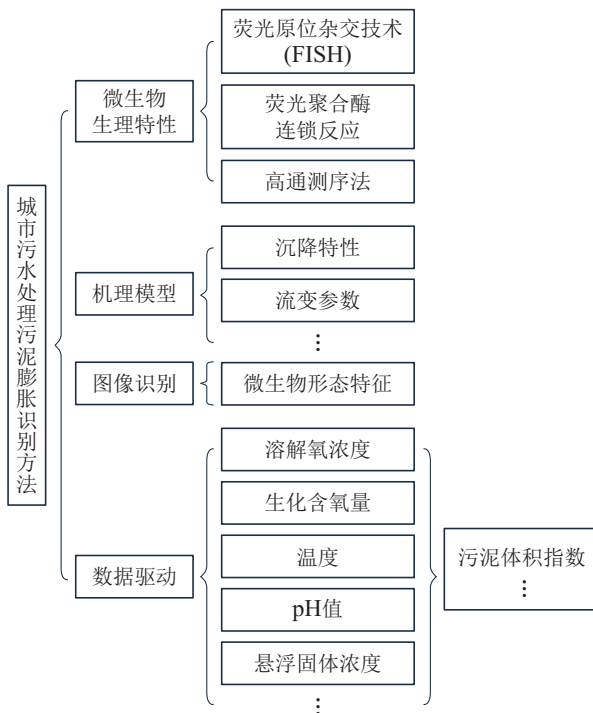


图2 城市污水处理污泥膨胀识别方法

Fig. 2 Identification method of sludge bulking in municipal wastewater treatment

3.1 基于微生物生理特性的识别方法

丝状菌大量繁殖是污泥膨胀的主要原因之一, 可采用基于微生物生理特性的方法识别污泥膨胀, 包括荧光原位杂交 (fluorescence in situ hybridization, FISH) 技术, 聚合酶链锁反应 (polymerase chain reaction, PCR) 法和高通量测序法等.

FISH技术是一种非放射性原位杂交方法, 可用于识别和鉴定微生物种群. 文献[30]针对微丝菌本身生理特性导致的探针渗透率低、FISH定量结果偏低等现象, 通过对杂交时间等进行了优化, 提高了定量结果的准确性. 荧光原位杂交技术能准确识别出微生物,

但该方法对操作者本身要求较高, 实验过程复杂, 时间长, 费用高, 因此, 适用范围较小. 聚合酶链锁反应法是一种生物体外复制DNA片段的技术, 可以通过定量分析复制DNA的占比, 实现对影响污泥膨胀的细菌识别. 文献[31]将TapMan探针应用于定量PCR技术, 实现了对影响污泥膨胀的赤霉菌的鉴定. PCR方法可以对污泥膨胀现象做出快速且准确的识别, 但该方法同样存在对操作者本身要求较高, 实验过程复杂等不足. 高通量测序法是一种测定生物的DNA序列的方法. 文献[32]利用高通测序法, 分析了污水处理厂58个月的活性污泥样本数据, 确定引起污泥膨胀的微生物种类及其影响程度. 高通测序法相比于FISH和PCR方法, 测量精度更高, 但其设备价格高、操作难度大, 无法实现实时地监测和识别.

综上所述, 基于微生物生理特性的方法能准确识别污泥膨胀, 为抑制污泥膨胀提供前提条件. 但几种方法均存在对操作者和设备本身的依赖程度高、操作复杂、费用昂贵, 且不具备在线识别能力等不足. 因此, 这类方法适用范围较小, 一般用于实验室研究.

3.2 基于机理模型的识别方法

污泥膨胀发生时, 活性污泥絮凝体结构松散, 沉降性能变差, 同时, 微生物群落的形态和结构也会发生变化. 因此, 可通过分析污泥膨胀的形成机理, 建立机理模型来预测和识别污泥膨胀.

国际水质协会设计了活性污泥模型, 该模型对活性污泥中微生物的生化反应及污泥的沉降过程都有良好的模拟效果, 为污泥膨胀的识别提供了重要的研究基础^[33]. 通过研究微生物菌类之间的生长及形成规律, 分析微生物菌种对污泥沉降性能的影响, 可以实现污泥膨胀识别. 文献[34]提出了一种描述活性污泥絮凝体形成的多尺度模型, 该模型定性的描述了其中微生物的形成过程, 能够实现对污泥膨胀的识别. 文献[35]提出了一种改进的方法, 来量化不同类型丝状菌对污泥膨胀沉降性能的影响. 文献[36]建立了累积Logit模型, 说明了污水处理厂水质参量对丝状菌生长的影响, 该模型可对优势丝状菌的丰度进行预测, 可用于识别污泥膨胀以及其相关的水质参量. 由于污泥膨胀的发生时, 丝状菌的生理特征如流变参数、粘度等会发生改变, 为了提高模型的可靠性, 文献[37]确定了活性污泥的沉降速度和流变模型参数, 并利用污泥膨胀和污泥良好的沉降条件获得平均参数, 对污泥膨胀的识别有重要作用.

综上所述, 基于机理模型的方法在特定条件下能够实现污泥膨胀的识别, 但其过度依赖于模型, 难以实现在线辨识. 同时, 该方法依赖有限的生物、化学反应过程, 无法完全替代复杂污水处理过程, 适用范

围较小,且准确性和有效性还有待提高。

3.3 基于图像信息的识别方法

基于图像信息的方法,通过提取微生物及微生物群落的形态特征,分析活性污泥形态与污泥膨胀参数的相关性,判断污泥膨胀是否发生,实现污泥膨胀识别。

文献[38]利用图像来分析微生物的形态特性,通过建立有源自回归模型(auto-regressive with extra inputs, ARX)模型来预测污泥体积指数的变化,以达到识别污泥膨胀目的。文献[39]提出了一种全自动图像分析系统,能够准确描述活性污泥中的微生物形态特征,并可以集成到传感器上,实现实时的污泥膨胀监测。文献[40]利用图像分析的方法,分析了活性污泥形态特征与污泥体积指数的相关性,找到了分形维数与污泥体积指数(sludge volume index, SVI)之间的关系,该方法对于污泥膨胀的识别和预测有重要意义。文献[41]提出了一种自动识别和检测丝状菌图像的算法,该算法对丝状菌有较高的识别率,可适用于对污泥膨胀的实时监控。文献[42]利用图像定量分析方法,采用偏最小二乘法从图像中提取了微生物特征与溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度、硝态氮和氨氮等水质参数的关系,实现了对这些水质参数的预测,对于污泥膨胀的识别提供了重要依据。

从以上研究来看,尽管图像分析方法在丝状菌和絮体的特征提取上取得一定效果,但种类繁多的丝状菌和形态各异的絮体增加了分析难度,同时,图像分析的参数通用性不强,泛化性较弱,难以推广。

3.4 基于数据驱动识别方法

污水处理过程中,污泥沉降比SV, SVI和污泥成层沉降速度(zone SV, ZSV)等可作为判别污泥膨胀是否发生,以及发生严重程度的指标。SVI值是判定污泥膨胀最直观的指标之一,大多数情况下,当SVI值大于150时,有可能发生污泥膨胀现象,SVI指数计算如下:

$$SVI = \frac{SV}{MLSS}, \quad (1)$$

其中:SV指1000 mL混合液静沉30 min后,沉淀污泥与混合液体积之比,单位为mL/L; SVI为污泥体积指数,单位为mL/g; MLSS (mixed liquor suspended solids)为污泥浓度,表示活性污泥中微生物含量,单位为g/L。

可通过污水处理过程中的水质参量(溶解氧浓度、生化需氧量、温度和pH等)与污泥沉降性能评价指标之间的关系,建立污泥膨胀预测模型,实现污泥膨胀的预测和识别。实际应用中相关硬件包括传感器(溶氧仪、硝态氮分析仪、电磁传感器、超声波传感器等)^[43]、执行器(水泵、曝气器等;数据采集系统:分布式控制

系统等)、控制器(可编程逻辑控制器等)。常见的建模方法主要有统计分析、神经网络等。

文献[44]利用大量数据分析和曲线拟合,得到了SVI与混合液悬浮固体浓度、温度的关系,实现了污泥膨胀的预测。文献[45]提出了一种多输出的高斯回归模型,能够实现对SVI的多步预测。该模型的输入为溶解氧浓度、生化需氧量和进水流量等水质参量,相比于一般的高斯回归模型性能更好,预测的准确度较高。文献[46]研究了5个污泥微观絮体结构指标与SVI之间的线性关系,利用偏最小二乘回归法实现了SVI的预测,能够较好的实现污泥膨胀的识别和预测。上述方法能够对污泥膨胀进行识别和简单分类,但泛化性不强。为了解决这一问题,智能方法如神经网络方法等,被应用于污泥膨胀的识别和预测中。

文献[47]建立了基于主成分回归和人工神经网络的数学模型,将污水处理过程中的温度、pH值、生物需氧量和化学需氧量等数据作为输入,实现了SVI的预测,并通过比较证明人工神经网络预测能力更好。文献[48]提出了一种具有浅层和深层结构的自联想神经网络,并利用自回归移动平均模型实现了对故障的长时间预测。文献[49]设计了一种自组织径向基函数神经网络方法预测SVI值的变化,该模型的结构可以动态改变,具有良好的泛化性。文献[8]提出了一种基于贝叶斯网络的数据知识驱动识别方法,能够以较高精度检测污泥膨胀的发生情况,并识别出引发污泥膨胀的根本变量。上述文献对比研究中,相较于统计学分析方法、神经网络等智能方法适应性更强,且预测准确度更高。

基于数据驱动的方法能够在线识别污泥膨胀,满足实际现场的识别需要。在目前研究对比中,神经网络等智能方法的识别和预测精度更高,适应性更强,具有很高的研究价值和良好的应用前景。

3.5 小结

城市污水处理过程污泥膨胀识别方法对比如表1所示,上述分析可知基于微生物生理特性和基于机理模型的方法,虽然能够准确识别污泥膨胀,但受限于材料和设备等条件。基于图像信息的识别方法在一定情况下能够识别污泥膨胀,但当待测污水中丝状菌种类繁多时识别效果较差。基于数据驱动的识别方法以回归统计学方法为主,但是对于不同的污水处理过程模型适应性较差,可能无法准确识别出污泥膨胀类型,基于神经网络等智能方法因其适应度高,且有着较好的识别效果,具有较大优势。

4 污泥膨胀抑制方法

污泥膨胀具有严重危害性,常见的污泥膨胀抑制方法主要分为两类:一类通过过程调控间接获得良好

的泥水分离效果;另一类直接利用添加剂和改变工艺环节等机理调控方法,调节丝状菌的生长环境和条件,改善活性污泥的沉降性能,如图3所示。

表1 城市污水处理过程污泥膨胀识别方法

Table 1 Identification method of sludge bulking in municipal wastewater treatment process

方法	参考文献	优缺点
微生物生理特征	文献[30-32]	优: 能够准确识别微生物 缺: 过程复杂费用高
机理模型	文献[34-37]	优: 特定条件下能够识别 缺: 无法完全替代真实过程
图像信息	文献[38-42]	优: 特征提取上有一定效果 缺: 泛化能力较弱
数据驱动	文献[8,44-49]	优: 实时识别和预测污泥膨胀 缺: 准确性还有待提高

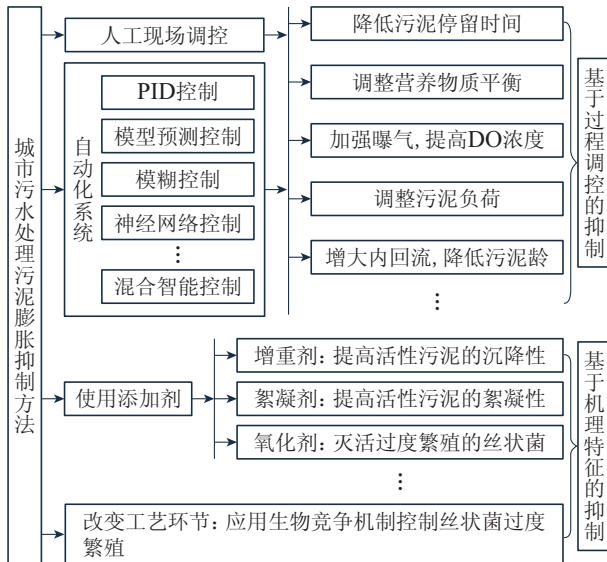


图3 城市污水处理污泥膨胀抑制方法

Fig. 3 Methods for suppressing sludge bulking in municipal wastewater treatment

4.1 基于过程调控的抑制

污泥膨胀的发生通常与溶解氧浓度、硝态氮浓度、水质等因素相关,通过对这些因素的调节和优化,能够有效减少污泥膨胀的发生.当污泥膨胀状态严重程度不高、处于微膨胀或具有发生膨胀风险时,采用调节工艺操作改变过程变量的方法相比添加剂法更为适宜.基于过程调控的抑制方法已成为当前污水处理厂控制污泥膨胀的常用方法,如表2所示。

研究发现,通过调整污泥停留时间、营养物质配比以及进水负荷等,能够起到抑制污泥膨胀的效果.根据这一发现,文献[50]通过调整污泥停留时间、微生物生长周期等方法,改善污泥状况来抑制污泥膨胀.文献[51]采用序批式活性污泥法(sequencing batch

reactor, SBR)工艺处理生活废水,通过采取提高进水负荷及静态进水等方式,提高主反应器内的污泥负荷使污泥膨胀得以控制及恢复.文献[52]分析了低DO条件下丝状菌和絮凝菌的竞争关系,得出保证较低DO和较高F(food)/M(microorganism)有利于抑制污泥膨胀的结论.文献[53]证明了调节DO浓度能够在抑制丝状菌繁殖的同时,促进菌胶团细菌生长实现调控污泥膨胀的本质目标,但这种方法见效慢且耗时长.以上方法均能够通过过程变量调控,实现污泥膨胀抑制,但对过程变量进行更为精确的调控还存在一定的挑战。

表2 基于过程调控的城市污水处理过程污泥膨胀抑制方法

Table 2 Suppression method of sludge bulking in MWWTPs based on process control

方法	参考文献	优缺点
现场调控	文献[50-53]	优: 调控变量实现抑制 缺: 无法精确调控等
控制器	文献[54-58]	优: 精确调控过程变量
混合	文献[59-60]	缺: 通用性较差等

为了使过程变量的调控更加精确,需要研究者针对不同的异常现象,设计有效的控制器对过程变量进行跟踪控制.文献[54]设计了一种基于遗传算法的鲁棒PID控制结构,该结构可使底物和DO浓度在干扰下均保持在限定范围内.相比传统的PID控制,遗传算法加入能够解决控制参数优化问题,但也可能产生静差、震荡等问题.文献[55]提出了一种模糊控制器,该模糊控制器通过对溶解氧、回流量和温度等变量进行控制,能够同时改善出水水质并降低运行成本.模糊控制适用于复杂的非线性控制,但自适应能力不足.文献[56]采用一种简单的动态矩阵控制算法控制过程中的氮,获得了较为满意的控制效果.模型预测控制可以有效处理多变量过程并处理约束,但在污水处理中建立适合控制需求的数学模型较为困难.近年来,基于神经网络的控制方法被越来越多的国内外污水处理专家所关注,取得了许多学术成果.文献[57]利用自组织模糊神经网络,实现了对溶解氧的控制,相比于PID和模型预测控制等方法,有更高的控制精度和适应能力.文献[58]构建了反向传播人工神经网络模型,实现了对DO浓度的控制以及对 N_2O 的预测.神经网络控制具有较强的自适应性和学习能力,但其存在不能较好利用已有的经验知识等不足.上述研究大多采用单控制器对过程变量进行控制,而每一种控制方法均有其优点和不足。

通过多种控制方法融合,实现混合智能控制,一方面弥补单一控制方法的弊端;另一方面能够较大发挥

每一种方法的优势. 文献[59]提出了一种综合控制框架, 有效集成数据模型、智能决策、动态优化与控制, 实现了污水处理全流程的抑制效果. 文献[60]提出了一种基于递归模糊神经网络的多变量控制方法, 通过递归模糊神经网络控制器自适应地获得对操作变量的控制精度, 实现对溶解氧和硝态氮浓度的控制. 从以上研究可见, 多种控制方法耦合能够实现不同方法的优势互补. 但这种混合控制的方法仍是对特定的过程变量进行调控, 较少考虑环境因素的影响, 在实际应用中仍存在通用性较差、评价困难等不足.

4.2 基于机理特征的抑制

研究者通过分析丝状菌的生物特征和生长时的生理变化, 判断污泥膨胀成因和程度, 并且通过外部加药、改变工艺环节等方式抑制污泥膨胀发生, 如表3所示.

表3 基于机理特征的城市污水处理过程污泥膨胀抑制方法

Table 3 Suppression methods of sludge bulking in MWWTPs based on mechanism characteristics

方法	参考文献	优缺点
添加剂	文献[61-64]	优: 成本低、作用快 缺: 药剂污染等
改变工艺环节	文献[16, 65-67]	优: 从根本上抑制 缺: 成本昂贵等

1) 基于添加剂的抑制.

添加剂法能够直接抑制丝状菌生长或降低其含量、促进活性污泥沉降. 投加增重剂以增加活性污泥的絮凝的比重, 可以快速改善污泥的沉降性. 文献[62]发现滑石粉能在短期内改善活性污泥沉降能力, 且滑石粉的存在并没有干扰污泥的生物活性, 但曝气池中的总悬浮固浓度增加. 投加增重剂对污泥的活性的影响相对较小, 但其实际的工厂环境下多次投加增重剂会使剩余污泥变多, 大大增加污泥量. 投加絮凝剂快速增加污泥沉降速率以防止污泥流失, 是应急性调控污泥膨胀的常用技术. 文献[63]发现改变生化反应池中淀粉和糖类的比值, 会对丝状菌的沉降性有巨大改善, 因而添加相应的助沉剂, 可达到抑制污泥膨胀的作用. 投加絮凝剂, 能够使絮凝产物与污泥絮体相结合形成更大的絮体, 改善沉降性能, 但存在成本昂贵、实际应用效果不理想等问题. 投加臭氧、氯、过氧化氢等氧化剂可以在非常短的时间达到抑制污泥膨胀的效果, 也可以对二级处理出水进行消毒. 文献[64]研究了臭氧对丝状菌的影响, 并得出在活性污泥中添加臭氧对污泥的沉降速度有重大影响的结论. 研究表明, 投加氧化剂能够快速抑制污泥膨胀, 但其不足之

处是会导致如硝化菌等生长缓慢的功能性细菌数量大范围减少, 从而导致出水水质恶化. 添加药剂的方法成本低, 作用时间快, 效果显著, 但药剂本身会增加再次污染的风险, 添加的量很难控制, 且停止加药剂后, 污泥膨胀会再次发生.

2) 改变工艺环节.

生物选择器抑制方法利用生态学原理, 首先, 需要培育一个适合菌胶团细菌发育和生长的环境条件, 然后, 选择性地增殖菌胶团细菌, 使丝状菌的大量繁殖变得困难, 从而, 抑制丝状菌的膨胀. 选择器可分为耗氧、缺氧和厌氧3种类型. 文献[16]通过实际水厂分析, 证明了厌氧选择器在污泥膨胀控制中可发挥一定作用. 文献[65]将厌氧和缺氧选择器置于生化反应池中, 通过限制丝状菌生长, 提高污泥沉降能力, 大大降低了污泥膨胀发生的概率. 这种方法是对污水处理过程的工艺进行改善, 从而, 抑制污泥膨胀. 生物选择器的理念广泛应用于城市污水处理工艺中, 如厌氧好氧工艺法(anaerobic oxic, A/O)、厌氧-缺氧-好氧生物脱氮除磷工艺(anaerobic-anoxic-oxic, A²/O)、SBR等. 文献[66]将倒置A²/O改为A/O工艺运行, 提高缺氧段负荷, 有利于抑制丝状菌生长. 文献[67]改变A/O工艺中的原有进水分配比策略和系统曝气量, 实现了污泥膨胀的抑制. 改变工艺环节的方法能够从根本上抑制丝状菌的膨胀, 但其成本较为昂贵, 且不同污水处理厂的需求不同, 需要改变的工艺环节也不同, 因此, 这种方法适应性不强.

4.3 小结

综上所述, 基于机理特征的抑制方法中, 施加外部干扰如添加剂, 能在保证污水处理过程正常运行的同时, 使污泥膨胀得以迅速控制, 但停止加药后污泥膨胀会重新产生; 改变工艺环节能够保持抑制效果长期有效, 然而, 会提高污水处理过程的成本. 相对于基于机理特征的抑制方法, 基于过程调控的抑制方法减少了二次污染和运行成本, 可以起到更长久地抑制效果. 然而, 基于过程调控的抑制方法存在见效慢、耗时长、通用性差和实践效果差等不足, 研究结果与实际应用要求仍有一定差距, 抑制效果还有待提高.

5 总结与展望

污泥膨胀现象是城市污水处理的一大顽症. 本文介绍了污泥膨胀的概念与特点, 分析了其分类与成因, 回顾并总结了识别和抑制方法的研究现状, 如图4所示. 尽管针对污泥膨胀识别和抑制方法的研究在理论和工程上均取得了一些成果, 但污水处理过程复杂, 需求多变, 且污泥膨胀的成因较多等因素, 制约了该技术的进一步发展. 结合城市污水处理过程污泥膨胀识别与抑制研究现状, 总结研究中面临的主要问题, 并结合当前研究趋势进行如下展望.

1) 部分污泥膨胀识别和抑制技术依赖于固定化模型设计, 如文献[34–37]所示. 然而, 城市污水处理水质成分多且过程复杂, 无论是通过数学模型建模, 还是数据驱动建模, 均无法完全代替实际的污水处理过程. 由于无法建立精确的城市污水处理模型, 识别和控制精度不高. 因此, 如何提高城市污水处理污泥膨胀识别与抑制的精度, 是行业目前面临的主要难题之一.

解决该问题的出路在于提高识别和抑制模型的自适应能力, 使固定化的模型根据水质成分和工况环境等变化不断调整自身参数, 从而, 保证识别和抑制方法的精度. 由于污水处理过程的生化反应机理复杂, 因此, 自组织模型结构配合调整优化算法是提高精度的关键^[49]. 然而, 自组织模型本身也有其局限性, 例如

当遇到复杂强烈环境变化时, 自组织模型的性能也会有一定程度的下降. 因此, 研究自组织模型与实际问题相结合, 提高模型的实用性也是解决识别和抑制精度问题重要研究方法. 此外, 根据不同情况下污泥膨胀的特性, 采用特定的识别和抑制方法也能提高精度.

2) 对于基于机理特征的识别与抑制方法, 如文献[34–37, 62–67]所示, 虽然这类方法识别精度高, 抑制效果显著, 但难以实现在线检测与调控. 对于基于数据驱动等智能识别方法和基于过程调控的抑制方法, 如文献[44–60]所示, 虽然这两类方法能够进行在线识别和抑制, 但受方法自身局限性影响也难以达到理想的实时性要求. 由于识别污泥膨胀是对其进行抑制的前提, 因此, 污泥膨胀抑制的实时性同时受到抑制方法和识别方法的制约.

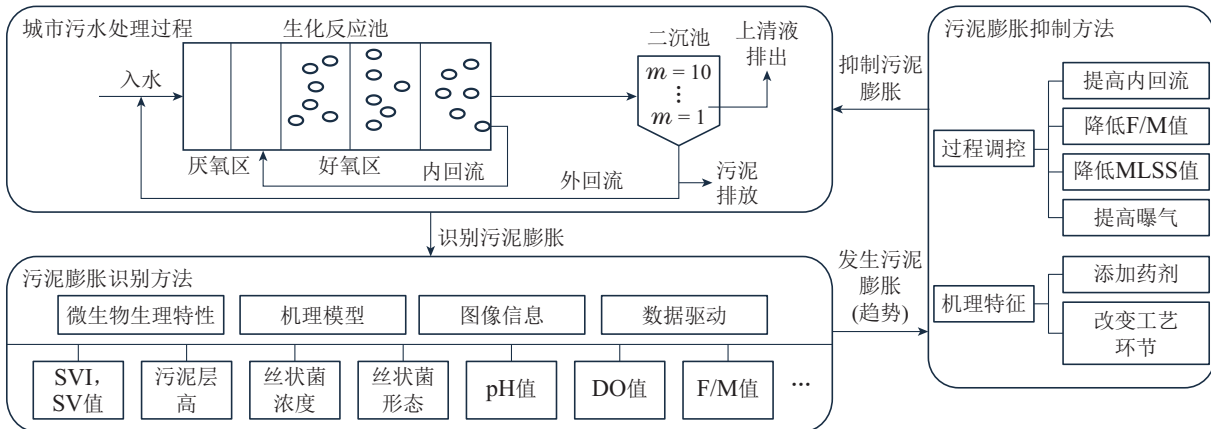


图4 城市污水处理过程污泥膨胀识别与抑制方法研究

Fig. 4 Study of identification and suppression of sludge bulking for municipal wastewater treatment process

解决该问题的出路在于优化识别与抑制方法. 一方面, 多种方法及多个指标相结合的方法对于识别和抑制快速性的提高效果明显. 研究耦合的方法^[61], 能够结合不同方法的优势, 起到快速, 且永久的污泥膨胀抑制效果. 污泥膨胀的成因往往并不能准确判定, 如文献[57–58]所示, 研究耦合技术避免“试错性”的工程应用, 是符合现实需求的研究趋势; 另一方面, 研究趋势表明智能运行优化控制方法将成为污泥膨胀抑制研究的主要方向, 可以建立针对污泥膨胀的预测控制系统, 通过对一些相关参量比如污泥龄等进行实时预测, 及时预测是否会出现污泥膨胀, 判断因何原因出现污泥膨胀, 并对影响污泥膨胀的相关水质变量进行优化控制, 达到及时预防污泥膨胀的目的. 这种方法能大大增强抑制污泥膨胀的实时性, 且具有预测功能的控制系统比常规的反馈控制系统对于解决污泥膨胀问题具有更有效的作用.

3) 过程指标完备性不足, 且污泥膨胀受外界环境因素的影响较大, 如文献[44–60]所示. 某一城市污水处理系统的污泥膨胀实际情况及其识别和抑制方法

可能无法复制到其他城市污水处理系统中. 因此, 在城市污水处理污泥膨胀的识别与抑制中设计并健全评价体系也是研究的难点.

解决该问题的主要方法是融入操作人员知识经验^[68–69], 建立专家数据库, 集合机理、数据和知识建模方法优势提高指标完备性, 构建污泥膨胀识别与抑制的评价体系. 操作人员的知识经验难以通过机理或数据形式表达, 如何提取相关知识经验并加以运用; 如何将机理、数据和知识经验相结合需要继续进行研究. 此外, 根据实际污泥膨胀特点对验证模型和评价体系进行修正也是重要的研究方向.

综上所述, 污泥膨胀的识别和抑制方法均朝着自动化和智能化的方向发展. 未来城市污水处理过程研究还将利用大数据、深度学习, 以及人工智能等先进技术, 建立包含数据采集、智能识别和自愈控制等功能完备的污泥膨胀识别与抑制系统. 除此之外, 在工程实践中, 需要结合知识经验进行更加深入的研究, 探讨因地制宜的污泥膨胀识别和抑制方法.

参考文献:

- [1] QU J H, WANG H C, WANG K J, et al. Municipal wastewater treatment in china: Development history and future perspectives. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 2 – 8.
- [2] DANIEL P, BATSTONE D J, TIM H, et al. Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Front Microbiol*, 2016, 7: 2106.
- [3] SINGH S K, KAPOOR V, SIRIYA K, et al. Performance evaluation of extended aeration-based sewage treatment plants at NCT of delhi. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2021, 23(5): 515 – 525.
- [4] KHANDAKAR M N, BIJOYEE S, KAMRUN N K, et al. A review on the methods of industrial waste water treatment. *Scientific Review*, 2021, 7(3): 20 – 31.
- [5] WANG J, LI Q, QI R, et al. Sludge bulking impact on relevant bacterial populations in a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Process Biochemistry*, 2014, 49(12): 2258 – 2265.
- [6] FAN N S, WANG R F, QI R, et al. Control strategy for filamentous sludge bulking bench-scale test and full-scale application. *Chemosphere*, 2018, 210: 709 – 716.
- [7] LIU Y Q, YUAN L L, HUANG S, et al. Integrated design of monitoring, analysis and maintenance for filamentous sludge bulking in wastewater treatment. *Measurement*, 2020, 155: 107548.
- [8] HAN H G, DONG L X, QIAO J F. Data-knowledge-driven diagnosis method for sludge bulking of wastewater treatment process. *Journal of Process Control*, 2021, 98: 106 – 115.
- [9] ZHANG H Y, ZHENG S K, ZHANG X Y, et al. Optimizing the inclined plate settler for a high-rate microaerobic activated sludge process for domestic wastewater treatment: A theoretical model and experimental validation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 154: 105060.
- [10] HAN H G, LIU Z, GE L M, et al. Prediction of sludge bulking using the knowledge-leverage-based fuzzy neural network. *Water Science & Technology*, 2018, 77(3): 617 – 627.
- [11] QIAO J F, HAN G T, HAN H G, et al. Wastewater treatment control method based on a rule adaptive recurrent fuzzy neural network. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2017, 10(2): 94 – 110.
- [12] EJRAEI A, AROON M, ZIARATI A. Wastewater treatment using a hybrid system combining adsorption, photocatalytic degradation and membrane filtration processes. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 28: 45 – 53.
- [13] SOBCHYZK M, PAJDAK-STÓŚ A, FIAKOWSKA E. Multivariate analysis of activated sludge community in full-scale wastewater treatment plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(3): 3579 – 3589.
- [14] DOSSANTOS L A, FERREIRA V, NETO M M, et al. Study of 16 portuguese activated sludge systems based on filamentous bacteria populations and their relationships with environmental parameters. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(12): 1 – 10.
- [15] WANG Z W. China's wastewater treatment goals. *Science*, 2012, 338(6107): 604.
- [16] HAO Ercheng, YUAN Xing, FU Wei. Research on reason for sludge bulking and its control strategy. *Environmental Engineering*, 2017, 35(7): 18 – 22.
(郝二成, 袁星, 阜巍. 污泥膨胀原因及控制措施研究. 环境工程, 2017, 35(7): 18 – 22.)
- [17] LEVÉN L, WIJNBLADH E, TUVESSON M, et al. Control of microthrix parvicella and sludge bulking by ozone in a full-scale WWTP. *Water Science & Technology*, 2016, 73(4): 866 – 872.
- [18] HENRIET O, MEUNIER C, HENRY P, et al. Filamentous bulking caused by thiothrix species is efficiently controlled in full-scale wastewater treatment plants by implementing a sludge densification strategy. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1 – 10.
- [19] PÉREZSANCHO M, VELA A I, WIKLUND T, et al. Differentiation of *Flavobacterium psychrophilum* from *Flavobacterium psychrophilum*-like species by MALDI-TOF mass spectrometry. *Research in Veterinary Science*, 2017, 115: 345 – 352.
- [20] CONVILLE P S, BROWNELLIOTT B A, SMITH T, et al. The complexities of nocardia taxonomy and identification. *Journal of Clinical Microbiology*, 2018, 56(1): e01419-17.
- [21] ZHOU Li, PENG Yongzhen, GAO Chundi, et al. Influence of sludge loak on filamentous sludge bulking in SBR process. *China Water & Wastewater*, 1999, 15(6): 11 – 13.
(周利, 彭永臻, 高春娣, 等. SBR工艺中污泥负荷对丝状菌污泥膨胀的影响. 中国给水排水, 1999, 15(6): 11 – 13.)
- [22] GAO Chundi, ZHANG Na, HAN Hui, et al. Microbial diversity of filamentous sludge bulking at low temperature. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3373 – 3383.
(高春娣, 张娜, 韩徽, 等. 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性. 环境科学, 2020, 41(7): 3373 – 3383.)
- [23] WANG Jie, PENG Yongzhen, YANG Xiong, et al. Effect of temperature on activated sludge settleability and microbial community structure. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 109 – 116.
(王杰, 彭永臻, 杨雄, 等. 温度对活性污泥沉降性能与微生物种群结构的影响. 中国环境科学, 2016, 36(1): 109 – 116.)
- [24] UNZ R F, WILLIAMS T M. The effect of controlled pH on the development of rosette-forming bacteria in axenic culture and bulking activated sludge. *Water Science & Technology*, 1988, 20(11/12): 249 – 255.
- [25] ZHANG Anlong, ZHANG Xue, WANG Sen, et al. Influence of low pH value on activated sludge bulking and treatment effect of paper-making wastewater. *Paper and Paper Making*, 2013, 32(10): 41 – 45.
(张安龙, 张雪, 王森, 等. 低pH值对活性污泥膨胀及废水处理效果的影响. 纸和造纸, 2013, 32(10): 41 – 45.)
- [26] GRAAFF D R, LOOSDRECHT M C, PRONK M. Stable granulation of seawater-adapted aerobic granular sludge with filamentous thiothrix bacteria. *Water Research*, 2020, 175: 115683.
- [27] SCRUGGS C E, RANDALL C W. Evaluation of filamentous microorganism growth factors in an industrial wastewater activated sludge system. *Water Science & Technology*, 1998, 37(4/5): 263 – 270.
- [28] STAINSBY F M, PHILP J C, DUNBAR S, et al. Microbial foaming and bulking in activated sludge plants. *Water Encyclopedia*, 2005, DOI:10.1002/047147844X.ww132.
- [29] WANG Shuo, LI Changbo, ZHAO Guozheng, et al. Advances in swelling biomes of activated sludge filamentous bacteria and their regulation. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, 27(6): 1 – 10.
(王硕, 李长波, 赵国峥, 等. 活性污泥丝状菌膨胀生物群落及调控研究进展. 应用与环境生物学报, 2021, 27(6): 1 – 10.)
- [30] WANG Runfang, ZHANG Hong, WANG Qin, et al. Optimization for microthrix parvicella quantitative processing of fluorescence in situ hybridization (FISH). *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2266 – 2270.
(王润芳, 张红, 王琴, 等. 微丝菌原位荧光杂交(FISH)定量过程的条件优化. 环境科学, 2016, 37(6): 2266 – 2270.)
- [31] VANYACKER L, DENIS C, ROELS J, et al. Development and evaluation of a taqman duplex real-time PCR quantification method for reliable enumeration of *candidatus* microthrix. *Journal of Microbiological Methods*, 2014, 97: 6 – 14.

- [32] JIANG X T, GUO F, ZHANG T. Population dynamics of bulking and foaming bacteria in a full-scale wastewater treatment plant over five years. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1 – 9.
- [33] HENZE M, GUJER W, MINO T, et al. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. *Water Intelligence Online*. London: IWA Publishing, 2000: 121.
- [34] OFIȚERU I D, BELLUCCI M, PICIOREANU C, et al. Multi-scale modelling of bioreactor-separator system for wastewater treatment with two-dimensional activated sludge floc dynamics. *Water Research*, 2014, 50(3): 382 – 395.
- [35] SALVADÓ H. Improvement of the intersection method for the quantification of filamentous organisms: Basis and practice for bulking and foaming bioindication purposes. *Water Science & Technology*, 2016, 74(6): 1274 – 1282.
- [36] DEEPNARAIN N, KUMARI S, RAMJITH J, et al. A logistic model for the remediation of filamentous bulking in a biological nutrient removal wastewater treatment plant. *Water Science & Technology*, 2015, 72(3): 391 – 405.
- [37] WÁGNER D S, RAMIN E, SZABO P, et al. Microthrix parvicella abundance associates with activated sludge settling velocity and rheology-quantifying and modelling filamentous bulking. *Water Research*, 2015, 78: 121 – 132.
- [38] SMETS I Y, BANADDA E N, DEURINCK J, et al. Dynamic modeling of filamentous bulking in lab-scale activated sludge processes. *Journal of Process Control*, 2006, 16(3): 313 – 319.
- [39] JENNÉ R, BANADDA E N, SMETS I, et al. Detection of filamentous bulking problems: Developing an image analysis system for sludge composition monitoring. *Microscopy and Microanalysis*, 2007, 13(1): 36 – 41.
- [40] ARELLI A, LUCCARINI L, MADONI P. Application of image analysis in activated sludge to evaluate correlations between settleability and features of flocs and filamentous species. *Water Science & Technology*, 2009, 59(10): 2029 – 2036.
- [41] DIAS P A, DUNKEL T, FAJADO D A, et al. Image processing for identification and quantification of filamentous bacteria in situ acquired images. *Biomedical Engineering Online*, 2016, 15(1): 1 – 19.
- [42] MESQUITA D P, AMARAL A L, FERREIRA E C. Estimation of effluent quality parameters from an activated sludge system using quantitative image analysis. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 285: 349 – 357.
- [43] SELISTEANU D, POPESCU I M, PETRE E, et al. Distributed control systems for a wastewater treatment plant: Architectures and advanced control solutions. *Wastewater and Water Quality*, 2018, 9: 153 – 181.
- [44] RÖSSLE W H, PRETORIUS W A. Batch and automated SVI measurements based on short-term temperature variations. *Water SA*, 2008, 34(2): 237 – 244.
- [45] LIU Y Q, GUO J H, WANG Q L, et al. Prediction of filamentous sludge bulking using a state-based gaussian processes regression model. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1 – 11.
- [46] HU Xiaobing, ZHANG Lin, WANG Kun, et al. Sludge volume index prediction of filamentous bulking sludge based on floc structure index. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 16 – 22.
(胡小兵, 张琳, 汪坤, 等. 基于絮体结构指标的丝状菌膨胀污泥SVI预测. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 16 – 22.)
- [47] LOU I, ZHAO Y. Sludge bulking prediction using principle component regression and artificial neural network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, DOI: 10.1155/2012/237693.
- [48] XIAO H J, HUANG D P, PAN Y P, et al. Fault diagnosis and prognosis of wastewater processes with incomplete data by the auto-associative neural networks and ARMA model. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2017, 161: 96 – 107.
- [49] HAN H G, LIU H X, LIU Z, et al. Fault detection of sludge bulking using a self-organizing type-2 fuzzy-neural-network. *Control Engineering Practice*, 2019, 90: 27 – 37.
- [50] ZHAO Xia, ZHAO Yangli, CHEN Zhonglin, et al. Control of filamentous sludge bulking in aerobic granular sludge SBR process. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(3): 15 – 19.
(赵霞, 赵阳丽, 陈忠林, 等. 好氧颗粒污泥发生丝状菌污泥膨胀的控制措施. *中国给水排水*, 2012, 28(3): 15 – 19.)
- [51] ZHOU Xiaohua, PAN Yang, CHEN Qianqian, et al. Dynamic changes of EPS of sludge bulking and recovery in sludge shifting SBR process. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10): 5643 – 5647.
(周晓华, 潘杨, 陈茜茜, 等. 污泥转移SBR工艺污泥膨胀及恢复过程中EPS的动态变化. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5643 – 5647.)
- [52] HAN W, PENG Z, LI T, et al. Control of sludge settleability based on organic load and ammonia nitrogen load under low dissolved oxygen. *Water Science & Technology*, 2018, 78(10): 2113 – 2118.
- [53] HONG Ying, YAO Junqin, MA Bin, et al. Filamentous sludge microbial community of a SBR reactor based on high-throughput sequencing. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3279 – 3285.
(洪颖, 姚俊芹, 马斌, 等. 基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析. *环境科学*, 2018, 39(7): 3279 – 3285.)
- [54] QIAO X, FEIL L, XU Y. Robust PID controller design using genetic algorithm for wastewater treatment process. *Proceedings of 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. Xi'an, China: IEEE, 2016: 1081 – 1086.
- [55] SANTÍN I, BARBU M, PEDRET C, et al. Fuzzy logic for plant-wide control of biological wastewater treatment process including greenhouse gas emissions. *ISA Transactions*, 2018, 77: 146 – 166.
- [56] MULAS M, TRONCI S, CORONA F, et al. Predictive control of an activated sludge process: An application to the viikinmaki wastewater treatment plant. *Journal of Process Control*, 2015, 35: 89 – 100.
- [57] ZHANG Wei, QIAO Junfei, LI Fanjun. Direct adaptive dynamic neural network control for dissolved oxygen concentration. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(1): 115 – 121.
(张伟, 乔俊飞, 李凡军. 溶解氧浓度的直接自适应动态神经网络控制方法. *控制理论与应用*, 2015, 32(1): 115 – 121.)
- [58] SUN S H, BAO Z Y, LI R Y, et al. Reduction and prediction of N₂O emission from an anoxic/oxic wastewater treatment plant upon do control and model simulation. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 800 – 809.
- [59] LI F, SU Z, WANG G M. An effective integrated control with intelligent optimization for wastewater treatment process. *Journal of Industrial Information Integration*, 2021, 24(1): 100237.
- [60] HAN Gaitang, QIAO Junfei, HAN Honggui. Wastewater treatment control method based on recurrent fuzzy neural network. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(9): 1152 – 1158
(韩改堂, 乔俊飞, 韩红桂. 基于自适应递归模糊神经网络的污水处理控制. *控制理论与应用*, 2016, 33(9): 1152 – 1158.)
- [61] SHEIK A G, TEJASWINI E, SEEPANA M M, et al. Design of feedback control strategies in a plant-wide wastewater treatment plant for simultaneous evaluation of economics, energy usage, and removal of nutrients. *Energies*, 2021, 14(19): 6386.
- [62] ROSSONI H A V, SILVA C M, SOUSA C A, et al. Use of talc for filamentous bulking control in effluent treatment plant of a recycled

- paper mill. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 2014, 5(1): 293 – 302.
- [63] VANDIERDONCK J, VANDEN BROECK R, VERVOORT E, et al. The effect of alternating influent carbon source composition on activated sludge bioflocculation. *Journal of Biotechnology*, 2013, 167(3): 225 – 234.
- [64] NILSSON F, DAVIDSSON Å, FALÅS P, et al. Impact of activated sludge ozonation on filamentous bacteria viability and possible added benefits. *Environmental Technology*, 2019, 40(20): 2601 – 2607.
- [65] PARKER D, APPLETON R, BRATBY J, et al. North american performance experience with anoxic and anaerobic selectors for activated sludge bulking control. *Water Science & Technology*, 2004, 50(7): 221 – 228.
- [66] BAI Xue, ZHANG Rongbing, GU Jian, et al. Cause analysis and control of sludge bulking in large-scale WWTP. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(23): 31 – 35.
(白雪, 张荣兵, 顾剑, 等. 大型污水处理厂污泥膨胀原因分析及其控制方法. *中国给水排水*, 2011, 27(23): 31 – 35.)
- [67] CHEN Haolin, PENG Yi, AN Dong, et al. Diagnosis and control of sludge bulking in step-feed multi-stage A/O process. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 92 – 98.
(陈浩林, 彭轶, 安东, 等. 分段进水多级A/O工艺污泥膨胀的诊断与调控. *中国给水排水*, 2021, 37(20): 92 – 98.)
- [68] ZHONG W M, LIU S M, WAN F, et al. Equipment selection knowledge base system for industrial styrene process. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, 26(8): 1707 – 1712.
- [69] ZHONG W M, LI C Y, PENG X, et al. A knowledge base system for operation optimization: Design and implementation practice for the polyethylene process. *Engineering*, 2019, 5(6): 1041 – 1048.

作者简介:

潘红光 博士, 副教授, 主要研究方向为模型预测控制、人工智能及其应用, E-mail: hongguangpan@163.com;

张莹婷 硕士研究生, 目前研究方向为工业过程的建模、控制和优化, E-mail: zhang_yingting@163.com;

折洋洋 硕士研究生, 目前研究方向为工业过程的建模、控制和优化, E-mail: she_yang_yang@163.com;

杨勇 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为人工智能及其应用, E-mail: yongy@xust.edu.cn.