

古励, 盛国荣, 潘伟亮, 等. 城市污水处理厂污泥特征分析及针对性减量方案[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 91-97.

GU L, SHENG G R, PAN W L, et al. Characteristics analysis of urban WWTPs sludge and targeted scheme for sludge reduction [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 91-97.

## 城市污水处理厂污泥特征分析及针对性减量方案

古 励<sup>1,\*</sup>, 盛国荣<sup>2</sup>, 潘伟亮<sup>3</sup>, 李金泽<sup>1</sup>, 刘少武<sup>4</sup>, 何 强<sup>1</sup>

(1. 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司, 重庆 400045; 3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400030; 4. 重庆水务集团股份有限公司, 重庆 400027)

**摘要** 在生态文明建设和“碳达峰”“碳中和”目标的背景下,本文聚焦于污泥低碳、绿色处理面临的挑战,提出了针对性的污泥减量方案。污泥是由有机物和无机物构成的复合体,但以往的污泥减质研究主要集中在降低有机物向生物细胞的转化率方面,并未对污泥特征进行深入分析。**【目的】** 本文的研究目的是通过细分污泥特征,从而更准确地反映污水处理厂的运行状态,为我国污泥减量的技术研究提供参考。**【方法】** 具体而言,本文以重庆市中心城区 14 座污水处理厂为对象,首次将污泥产生细分为 5 个可量化的部分:去除化学需氧量 (COD) 污泥产量、外碳源投加污泥产量、进水无机颗粒 (inorganic suspended solid, ISS) 污泥产量、除磷剂投加污泥产量以及内源呼吸消耗量,深入分析各部分对整体污泥产量的影响,并以此反馈污水厂的运行状态。并且我们在研究中首次提出了管网控砂、处理控药和加强内耗 3 条创新的减质路径,明确了干预内源呼吸消耗的关键因子,为污泥管理提供了新思路。**【结果】** 通过这些措施,污水处理厂可以有效降低污泥的产生,提高处理效率,进而减少环境负担。**【结论】** 最终,我们选择了 2 类典型的污水处理厂,制定了具有可操作性的污泥减量方案。本文能够为污泥减量技术研究奠定重要基础,也为我国污水处理行业提供理论支持和实践指导,推动生态文明建设的步伐,实现可持续发展目标。

**关键词** 污水处理厂 污泥 特征分析 污泥减量 内源呼吸

**中图分类号:** X703    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1009-0177(2025)11-0091-07

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.010

## Characteristics Analysis of Urban WWTPs Sludge and Targeted Scheme for Sludge Reduction

GU Li<sup>1,\*</sup>, SHEN Guorong<sup>2</sup>, PAN Weiliang<sup>3</sup>, LI Jinze<sup>1</sup>, LIU Shaowu<sup>4</sup>, HE Qiang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental and Ecological Sciences, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. General Research Institute of Architectural Planning & Design Co., Ltd., Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400030, China;

4. Chongqing Water Group Co., Ltd., Chongqing 400027, China)

**Abstract** Against the backdrop of ecological civilization construction and "carbon peak" and "carbon neutrality" goals, this paper focuses on the challenges faced by low-carbon and green sludge treatment, and proposes targeted sludge reduction plans. Sludge is a complex composed of organic and inorganic substances, but previous research on sludge degradation has mainly focused on reducing the conversion rate of organic matter to biological cells, without in-depth analysis of sludge characteristics. **[Objective]** This paper is to more accurately reflect the operating status of wastewater treatment plants by subdividing sludge characteristics, and provide reference for the technical research of sludge reduction in China. **[Methods]** Specifically, this paper focused on 14 wastewater treatment plants in the central urban area of Chongqing, and for the first time divided sludge production into five quantifiable parts: chemical oxygen demand (COD) removal sludge production, external carbon source added sludge production, influent inorganic suspended solids (ISS) sludge production, phosphorus removal agent added sludge production, and endogenous respiration consumption. The impact of each

[收稿日期] 2024-07-23

[基金项目] 重庆市建委科技计划项目;重庆水务集团创新项目

[通信作者] 古励(1982—),男,副教授,硕士生导师,主要从事污水、污泥处理处置研究等工作,E-mail:guli@cqu.edu.cn。

part on the overall sludge production was analyzed in depth, and the operating status of the wastewater treatment plant was fed back accordingly. [Results] And in this paper, we proposed for the first time three innovative quality reduction pathways: sand control in pipeline networks, drug control in treatment, and strengthening internal consumption, clarifying the key factors that intervene in endogenous respiration consumption and providing new ideas for sludge management. Through these measures, wastewater treatment plants could effectively reduce sludge production, improve treatment efficiency, and thereby reduce environmental burden. [Conclusion] In the end, we choose two typical types of wastewater treatment plants and develops feasible sludge reduction plans. This paper can lay an important foundation for the research of sludge reduction technology, and provide theoretical support and practical guidance for China's wastewater treatment industry, promoting the pace of ecological civilization construction and achieving sustainable development goals.

**Keywords** wastewater treatment plant (WWTP) sludge characteristics analysis sludge reduction endogenous respiration

随着城镇化水平的不断提高,我国城市污水处理厂的污水处理量逐年提升。剩余污泥是污水处理的主要副产物,其产量也随着污水处理量的增加而攀升<sup>[1]</sup>。近年来,国家对污泥问题的日益重视,制定了一系列标准、规范和政策,加大了科技投入<sup>[2]</sup>,逐渐形成“生物处理-土地利用”和“热化学处理-建材利用”两大类技术路径,并建设了一系列示范工程。虽然我国在污泥处理方面已取得了突破和发展,但不少地方仍存在污泥烧不起、产物无处可去的局面<sup>[1]</sup>。

污水处理厂的运行状态决定了污泥的产量。通过调控污水处理厂的运行,减少污水处理厂污泥的产生(污泥厂内减量),是压缩污泥处理端运行支出、减缓处理产物去向压力的重要手段。根据减量方式不同,污泥减量可分为减质与污泥减容两类<sup>[3]</sup>。污泥减质以降低污泥中固体物质的量为目标,而污泥减容则以强化脱水降低污泥含水率的方式缩减污泥的体积。相比污泥减容,污泥减质能有效削减污泥处理端终产物的产量,有力缓解处理产物的去向压力。而二者的有效结合,可实现污泥运输、处理过程的能耗和处理终产物产量的共同削减。

在污水生物处理过程中,水中有有机物的降解伴随着生物细胞的合成。因此,以往涉及污泥减质的研究主要集中在如何降低有机物向生物细胞的转化率方面<sup>[4-6]</sup>。事实上,污水处理厂污泥是多类物质的复合体,主要包括进水有机物转化形成的微生物细胞;进水中的无机组分;化学除磷剂添加所引入的金属水解产物;此外,污水处理厂外碳源的使用,也会形成外碳源输入转化形成的微生物细胞。因此,需要对污水处理厂进行深度分析,明确各厂的污泥产生特征,从而提出针对性的措施,实现精准减量。

基于此,本文以重庆市中心城区处理量大于 4

万  $m^3/d$  的 14 座城市污水处理厂为对象,收集其运行数据,梳理各厂的污泥产生特征,分析其减量路径;并选择典型污水处理厂,提出相应的污泥减量思路,以期为污水处理厂污泥减量工作提供参考。

## 1 对象污水处理厂基本情况

研究对象污水处理厂的基本信息如表 1 所示。以上污水处理厂平均处理水量为 76.78 万  $m^3/d$ ,每日产生含水率为 80% 的污泥 650 t(核算干固体为 132.9 t DS),核算得到上述污水厂的平均污泥产率为  $8.33 \times 10^{-4} t/m^3$ 。各污水厂的污泥产率差异明显,最高(CN 厂)可达到  $1.77 \times 10^{-3} t/m^3$ ,最低(XJH 厂)可至  $3.06 \times 10^{-4} t/m^3$ 。考虑到污泥产率与进水化学需氧量(COD)浓度存在一定的线性关系(图 1),引入 COD 消耗产泥率能从一定程度上反馈污水处理厂的运行状态。比如:去除单位质量的 COD 所产生的污泥量越高,表明厂内内源呼吸强度弱或有外源碳源引入。

## 2 污水处理厂污泥的产生特性分析

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)<sup>[7]</sup>,污水处理厂污泥的产生( $\Delta X$ )计算如式(1)。

$$\Delta X = YQ \times (S_0 - S_e) - K_d V_v + fQ \times (C_0 - C_e) \quad (1)$$

其中:  $Y$ —污泥产率系数,  $kg \text{ VSS}/(kg BOD_5)$ ;

$Q$ —进水水量,  $m^3/d$ ;

$S_0, S_e$ —进水、出水的 BOD 质量浓度,  $kg/m^3$ ;

$K_d$ —生物的内源呼吸系数,  $d^{-1}$ ;

$V_v$ —生化池中微生物的总量,  $kg$ ;

$f$ —进水中无机颗粒物在总进水悬浮

物(SS)中的占比,  $g \text{ MLSS}/(g \text{ SS})$ ;  
 $C_0, C_e$ ——进水、出水的 SS 质量浓度,  
 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

以上公式表明, 污泥中主要包含进水有机质向微生物细胞转化部分、微生物内源呼吸消耗部分、进水中的无机颗粒 (inorganic suspended solid, ISS) 3 类。事实上, 还应考虑污水处理厂外碳源投加所产

生的生物(有机)污泥量以及除磷剂投加所导致的无机污泥产量。

由此, 根据污水处理厂的运行数据, 可计算出对象污水处理厂的污泥产生特征。在此将 14 座污水处理厂的污泥产生特征进行了汇总, 如图 2 所示。由于公式中不涉及含水率, 此处对污泥产生特征分析采用干固体单位。

表 1 污水处理厂的基本运行情况  
Tab. 1 Basic Operation Situation of the WWTP

污水厂名称	设计水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	处理工艺	平均处理水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	平均产泥量/ ( $\text{t DS} \cdot \text{d}^{-1}$ )	产泥率/ ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	COD 消耗产泥率/ [ $\text{t} \cdot (\text{t COD})^{-1}$ ]	去向
LJT	12 万	CASS、AAO+MBR	9.96 万	79.0	$7.93 \times 10^{-4}$	4.41	外运处理处置
BNYD	8 万	AAO、MBR	6.37 万	56.1	$8.81 \times 10^{-4}$	4.72	
DJ	7 万	CASS	6.71 万	50.7	$7.56 \times 10^{-4}$	4.12	
SPBJK	4 万	氧化沟	3.39 万	29.3	$8.65 \times 10^{-4}$	4.11	
XY	6 万	氧化沟、AAO	5.80 万	46.8	$8.07 \times 10^{-4}$	5.47	
JQH	10 万	AAO	6.47 万	48.4	$7.48 \times 10^{-4}$	3.19	
CN	5 万	AAO	2.96 万	52.4	$1.77 \times 10^{-3}$	3.84	
ST	6 万	AAO	4.98 万	38.6	$7.75 \times 10^{-4}$	5.88	
TJQ	6 万	反硝化生物滤池	5.11 万	55.4	$1.085 \times 10^{-3}$	3.53	
XP	3 万	氧化沟	1.70 万	17.2	$1.014 \times 10^{-3}$	5.35	
XJH	8 万	AAO	6.53 万	20.0	$3.06 \times 10^{-4}$	—	
YL	5 万	AAO	5.36 万	43.3	$8.07 \times 10^{-4}$	4.96	
DDK	10 万	CASS	6.67 万	69.2	$1.037 \times 10^{-3}$	5.76	
BP	5 万	氧化沟	4.77 万	43.6	$9.13 \times 10^{-4}$	4.28	

注: 表中污泥量均按照 80% 含水率计; 有 2 种工艺的厂为一期和二期所用工艺不同; CASS 为循环式活性污泥; AAO 为厌氧-缺氧-好氧; MBR 为膜生物反应器。

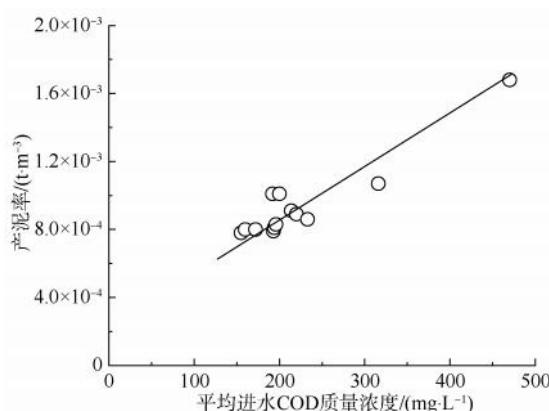


图 1 进水浓度与污泥产率之间的关系

Fig. 1 Relationship between Influent Concentration and Sludge Yield

由图 2 可知, 14 座污水处理厂每日因去除进水中 COD 产生有机污泥 71.7 t DS, 因外碳源投加产生有机污泥 29.7 t DS, 以上有机污泥合计为 101.4

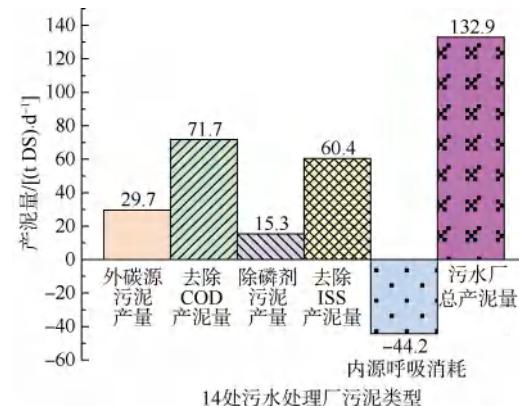


图 2 14 座对象污水处理厂的污泥产生特征汇总

Fig. 2 Summary of Sludge Generation Characteristics from 14 Selected WWTPs

t DS。因进水无机颗粒的去除产生无机污泥 60.4 t DS, 因污水厂运行过程中投加除磷剂产生无机污泥 15.3 t DS, 无机污泥合计为 75.7 t DS。所产生的

有机污泥中的 43.6% (44.2 t DS) 因内源呼吸被消耗, 最终产生污泥 132.9 t DS, 污泥的平均挥发性固体(VS)/总固体(TS) 为 43.1%。

污泥的产生特征有效地反馈了污水处理厂的运行状态。图 3 展示了所选取的 4 座典型污水处理厂的污泥产生特征。CN 厂进水 COD 高、进水 SS 高是导致高污泥产率的主要原因。ST 厂服务对象为工业园区, 进水浓度低, 外碳源投加量大, 使得外碳源导致的污泥量占比高; TJQ 厂采用了曝气生物滤池工艺, 进水絮凝沉淀后再进入滤池进行脱氮, 其外碳源、除磷剂投加量高导致了其较高的污泥产率; DDK 厂为循环式活性污泥 (cyclic activated sludge technology, CAST) 工艺, 序批式反应器的内源呼吸时间短, 污泥的内源呼吸率不足。

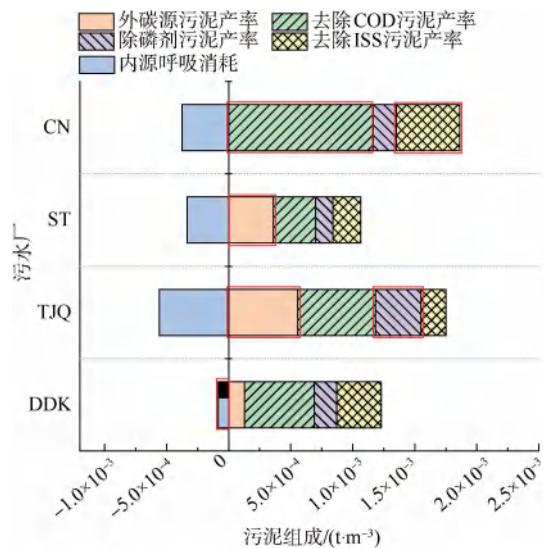


图 3 典型污水处理厂的污泥产生特征

Fig. 3 Characteristics of Sludge Generation in Typical WWTP

从以上解析可得出, 污水厂污泥减量应从管网控砂、处理控药(碳源/除磷剂)和加强内耗(内源呼吸)3 个方面出发。通过管网提质增效, 减少因管网输入厂内的 ISS 数量, 从源头上削减污泥产量。调研中发现, 对于外碳源投加而言, 污水处理厂普遍缺乏有效的降碳技术手段, 使得投加量高于实际脱氮的碳源需求量。而除磷剂投加超量是普遍现象, 水务公司内部对出水总磷(TP)浓度有更严格的要求, 各厂更会强化执行(要求出水 TP 质量浓度低于 0.2 mg/L), 而除磷剂价格相对便宜, 这使得各厂在生产中加大其用量, 部分厂的除磷剂实际投加量/需求量之间的比例甚至达到了 2.0 以上。

### 3 污水处理厂的内源呼吸特征与干预因素

内源呼吸是实现有机污泥削减的主要手段。由图 3 可知, 采用 AAO 工艺的 CN 厂和 ST 厂, 污泥内源呼吸分别实现了有机污泥 32.3% 和 47.8% 的消耗; 而采用了 CAST 工艺的 DDK 厂, 仅 12.2% 的有机污泥通过内源呼吸得到消耗。这表明污水处理厂的工艺选择和运行方式对内源呼吸的强度存在较大的影响。为了明确  $K_d$  在不同污水处理工艺及运行参数下的特征, 本研究尝试引入机器学习算法, 建立基于  $K_d$  的算法模型。

图 4 展示了 3 种典型处理工艺 AAO、氧化沟和序批式活性污泥法(SBR)(含以上工艺的衍生工艺)的  $K_d$  统计值。AAO 和氧化沟的  $K_d$  基本处于同一水平, 而 SBR 的  $K_d$  显著低于 AAO 和氧化沟工艺。由于回流的引入, AAO 和氧化沟工艺在流态和反应模式上相对接近, 二者在停留时间上的差异也因设计要求在缩小<sup>[7]</sup>, 这使得二者在  $K_d$  方面并未呈现显著性差异。而 SBR 序批运行, 水质达标即可停止曝气进入沉淀阶段, 这降低了运行能耗<sup>[8]</sup>, 也削减了微生物内源呼吸的强度, 导致其具有更低的  $K_d$ 。

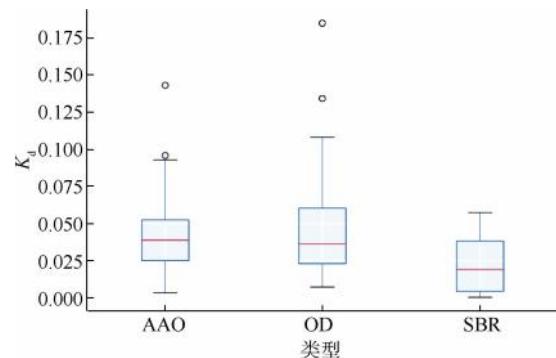


图 4 不同污水处理工艺的  $K_d$  值对比

Fig. 4 Comparison of  $K_d$  Values for Different Treatment Processes of WWTPs

图 5 为所构建机器学习模型的 SHAP 总结图。对  $K_d$  影响最大的为食微比(F/M)和固体停留时间(SRT)。图 6 展示了 F/M 和 SRT 对 SHAP 值( $K_d$ )的影响。随着 F/M 和 SRT 的增加,  $K_d$  逐渐增加, 表明污泥的内源呼吸强度增加。F/M 高时, 微生物底物充足, 生物活性高, 会分泌更多的胞外酶水解外界有机物, 水解酶的非选择性可能导致较高的内源呼吸水平; 当 F/M 低时, 微生物为了应对饥饿状态, 会

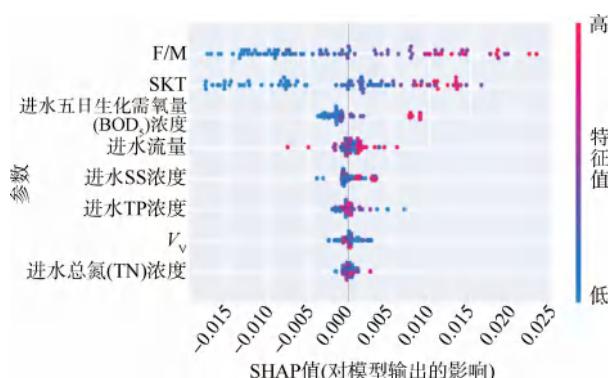


图 5 机器学习模型的 SHAP 总结图

Fig. 5 Summary Plot of SHAP Values for a Machine Learning Model

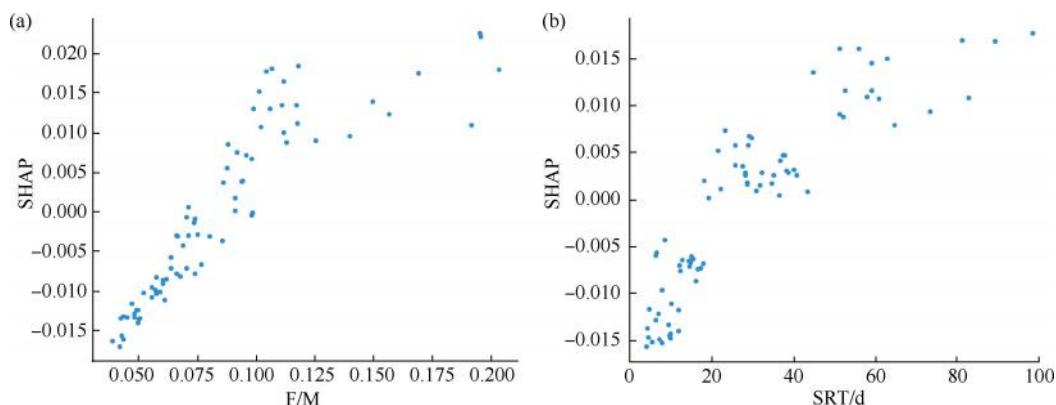


图 6 F/M 和 SRT 对 SHAP 值的影响

Fig. 6 Impact of F/M and SRT on SHAP Values

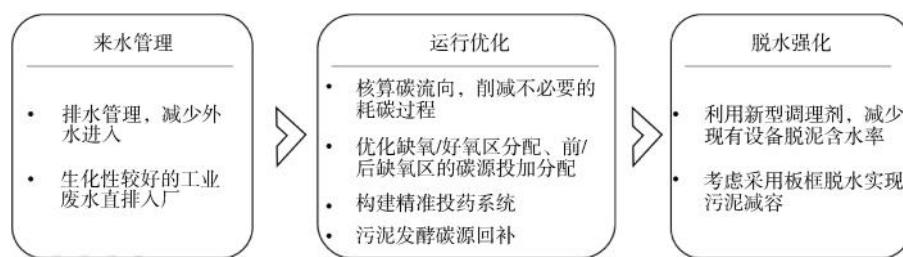


图 7 ST 污水厂的污泥减量思路

Fig. 7 Sludge Reduction Solutions for ST WWTP

户的调查,明确可直排进入污水处理厂的工业污水,并明确其风险。这可以减少外碳源的需求。运行优化包括①核算系统碳平衡,明确碳的流向,减少不必要的耗碳生物过程;②优化生化池结构,在好氧池末端引入低氧区和缺氧区,并通过主动分配前后碳源的投配比,减少碳源使用;③构建碳源精准投加系统,使碳源投加与进水特征匹配;④对污泥进行发酵处理,并回补发酵液,实现碳源节约。脱水强化主要着眼于降低污泥的含水率,减少污泥的容积。此处

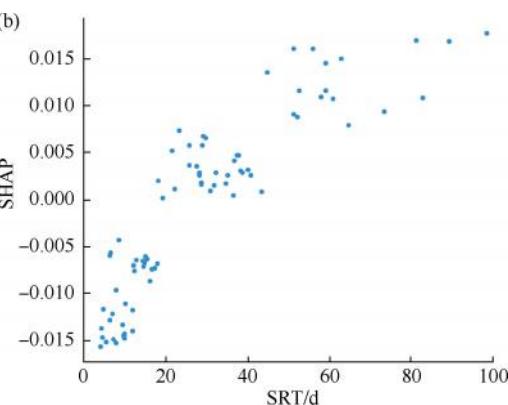
减弱自身的代谢水平以自我保护,对外界有机质的水解作用变低<sup>[9]</sup>。SRT 越长,微生物在系统内的存留时间延长,受外部胞外酶的水解时间延长,污泥的  $K_d$  由此增大。

## 4 典型污水处理厂的减量方案

### 4.1 ST 厂(碳源污泥过多型)

由图 7 可知,ST 厂因接纳工业园区低浓度的进水,外碳源投加量高,这使得外碳源投加导致的污泥占比高。因此,削减外碳源使用量对削减本厂污泥产量至关重要。

该污水厂的减量思路可分为来水管理、运行优化和脱水强化 3 个方面。来水管理主要通过对排水



仅对污水处理厂生化池过程优化进行简要介绍。

ST 污水处理厂采用了倒置 AAO 的处理工艺,碳源在缺氧池中投加。为了减少污水处理厂的碳源消耗,研究组将原有 AAO 中的 O 段调整为高氧区、低氧区和缺氧区(图 8)。并考虑将碳源在前缺氧区和末端缺氧区分配投加。研究通过小试获得各关键生化反应的反应参数,并引入 ASM1 模型模拟污水处理厂的工况调整后的出水情况。

由图 9(a)可知,将好氧池调整为高氧区、低氧

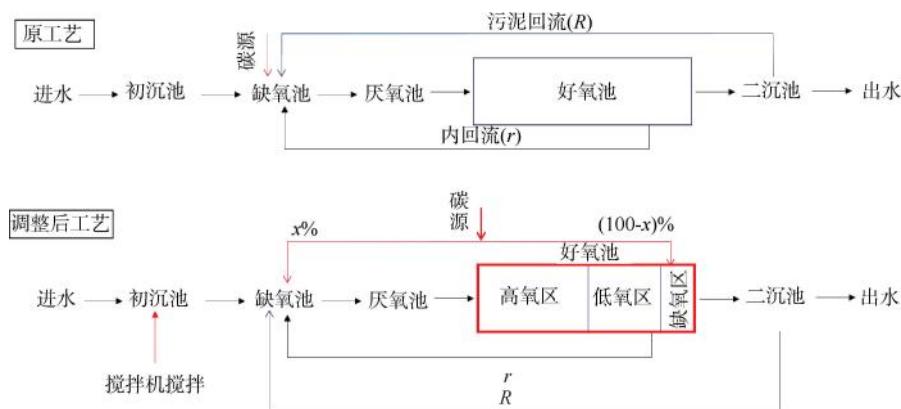


图 8 污水处理厂原工艺及调整工艺

Fig. 8 Original and Adjusted Processes in WWTP

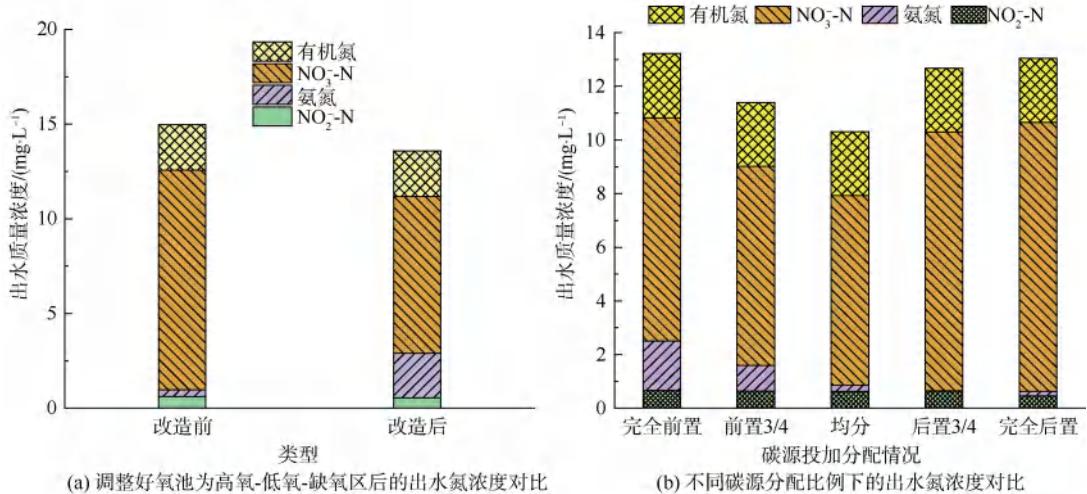


图 9 调整前后的出水氮浓度情况

Fig. 9 Comparison of Effluent Nitrogen Concentrations before and after Adjustments

区和缺氧区运行, 在等同的碳源输入情况下, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度得到显著降低, TN 浓度总体下降。氨氮浓度有所上升, 但仍在要求范围内。这可能是由于后缺氧区的引入, 使得微生物利用残余 BOD 进行后置反硝化。图 9(b)展示了碳源在前置、末端缺氧区分配投加时的出水情况。当碳源为前后均分投加时, 出水 TN 浓度降至最低。根据以上结果反算在同等出水 TN 浓度下, 碳源的需求量可削减 10%~15%, 由此削减了污泥产量。

#### 4.2 DDK 厂(内源呼吸不足型)

由图 3 可知, DDK 厂因采用了 CAST 工艺, 仅 12.2% 的有机污泥通过内源呼吸得到消耗。因此, 强化该厂的污泥内源呼吸是污泥减量的主要手段。由于无法通过改变既有生物处理单元提升内源呼吸, 可考虑额外增设污泥好氧消化池, 通过额外曝气

加强污泥的内源呼吸消耗, 减少污泥的产量。当然, 减量措施并非单一的, 也可与除磷剂投加控制、碳源投加控制以及强化脱水协同, 实现污泥的减质与减容。

#### 5 结论

(1) 通过技术手段, 将污泥分为去除 COD 污泥产量、碳源投加的污泥产量、进水 SS 污泥产量、除磷剂投加的污泥产量以及内源呼吸消耗量 5 个部分, 可有效反馈污水处理厂的运行状态, 为污泥的精准减量提供依据和方向。

(2) 污水处理厂中的污泥减量应从管网控砂、控药处理和内耗加强 3 个方面出发, 结合实际的污泥产生特征和厂内的改造条件构建针对性的措施与方案。

(3) SBR 及其衍生工艺的污泥内源呼吸强度低

于AAO、氧化沟及其衍生工艺;  $K_d$  对 F/M 和 SRT 敏感。

(4) 对于碳源污泥过多型污水处理厂, 可通过来水管理、运行调控和脱水强化实现污泥减质和减容, 运行过程的调控既削减碳源需求, 又减少了污泥产生; 对因受工艺本身限制导致内源呼吸不足的污水处理厂, 可额外设置处理单元强化污泥内源呼吸, 以此实现污泥的减质。

## 参考文献

- [ 1 ] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145-153.  
DAI X H, HOU L A, ZHANG L W, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153.
- [ 2 ] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1-5.  
DAI X H, ZHANG C, ZHANG L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5.
- [ 3 ] 李紫瑛, 潘淑一, 杨浩. 污泥源头化减量技术 [J]. 化学工程与装备, 2021(7): 267-269.  
LI Z Y, ZANG S Y, YANG H. Source reduction technology for sludge [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021 (7): 267-269.
- [ 4 ] FANG F, HU H L, QIN M M, et al. Effects of metabolic uncouplers on excess sludge reduction and microbial products of activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2015, 185: 1-6. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.02.054.
- [ 5 ] TIAN Y, ZHANG J, WU D, et al. Distribution variation of a metabolic uncoupler, 2,6-dichlorophenol (2,6-DCP) in long-term sludge culture and their effects on sludge reduction and biological inhibition [J]. Water Research, 2013, 47(1): 279-288.
- [ 6 ] ZHANG X Q, ZENG H Y, WANG Q, et al. Sludge predation by aquatic worms: Physicochemical characteristics of sewage sludge and implications for dewaterability [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120612. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120612.
- [ 7 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [ 8 ] LI J Z, DU Z X, LIU J Y, et al. Analysis of factors influencing the energy efficiency in Chinese wastewater treatment plants through machine learning and SHapley Additive exPlanations [J]. Science of the Total Environment, 2024, 920: 171033. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171033.
- [ 9 ] FRIEDRICH M, TAKÁCS I. A new interpretation of endogenous respiration profiles for the evaluation of the endogenous decay rate of heterotrophic biomass in activated sludge [J]. Water Research, 2013, 47(15): 5639-5646.

## (上接第 11 页)

- [37] 蒋春丰, 王慧. 城市污水特性分析及处理技术现状 [J]. 环境与发展, 2019, 31(3): 57-58.  
JIANG C F, WANG H. Current status of urban sewage analysis and treatment technology [J]. Environment and Development, 2019, 31(3): 57-58.
- [38] 杨磊. 城市污水处理厂提标改造工艺要点解析——以沧州市运东污水处理厂为例 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(1): 112-114.  
YANG L. Analysis on the key points of upgrading and renovation process of urban sewage treatment plants ——Taking Cangzhou Yundong sewage treatment plant as an example [J]. Intelligent Building & Smart City, 2023(1): 112-114.
- [39] 张媛媛, 司倩倩, 王述柏. 我国规模化养殖场污水处理现状 [J]. 山东畜牧兽医, 2015, 36(1): 61-65.  
ZHANG Y Y, SI Q Q, WANG S B. Sewage treatment status of large-scale aquaculture in China [J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2015, 36(1): 61-65.
- [40] AKIRA I. JK-BC system as a highly advanced wastewater treatment system-actual case of denitrification (wastewater from animal husbandry [J]. Japan Tappi Journal, 2004, 58 (4): 493-499.
- [41] 王洪才, 王庭鹏, 李强. 工业废水污染治理途径与技术发展需求 [J]. 中国高新科技, 2021(22): 139, 149.  
WANG H C, WANG T P, LI Q. Industrial wastewater pollution treatment ways and technical development needs [J]. China High and New Technology, 2021(22): 139, 149.
- [42] AKIRA I, TOORU S. JK-BC system as a highly advanced waste water treatment system-waste water treatment test with bacilli at paper mills [J]. Japan Tappi Journal, 2005, 59 (11): 1673-1679.
- [43] 武思瑾. BBR 工艺耦合 BIM 技术在污水厂改造工程中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2023(13): 190-196.  
WU S J. Application of BBR process coupled BIM technology in sewage plant renovation project [J]. Technology Innovation and Application, 2023(13): 190-196.