

中国城市污水处理的瓶颈、缘由及可能的解决方案

曹业始¹, 郑兴灿², 刘智晓³, M. C. M. Van Loosdrecht⁴, Glen Daigger⁵

(1. 中持新概念环境发展宜兴有限公司, 江苏 宜兴 214213; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381;
3. 北京首创股份有限公司, 北京 100028; 4. 代尔夫特理工大学生物技术系, 代尔夫特 2629 HZ, 荷兰;
5. 密歇根大学土木和环境工程系, 密歇根州 48109, 美国)

摘要: 自20世纪90年代以来, 中国在城市污水收集与处理方面取得了很大的进步。但是, 源自于独特污水水质特征, 中国城市污水处理效率的改善仍然面临瓶颈。该文着重比较了中国和其他国家的城市污水处理在能量回收、氮磷营养物去除和污泥产率方面的差异, 并在资料支撑的理论分析基础上, 揭示了因为下水道渗漏、化粪池设置等因素导致的中国城市污水独特的水质特征(高无机悬浮固体(inorganic suspended solids, ISS)质量浓度、低碳氧需求(COD)和低碳氮比)与城市污水处理厂较低的运营效率和性能之间的关系, 提出了中国需要制定适合自己独特污水水质特性的处理过程设计指南。鉴于下水道系统建设与修复耗时长久, 改善现有城市污水处理厂的效率和可持续性应该与下水道修复和制定设计指南同时推进, 提出了三点建议: 提高除砂效率、应用污泥发酵和厌氧消化、优化现有工艺并开发低碳源生物脱氮新工艺。

关键词: 城市污水处理; 污水水质特征; 能源回收; 营养物去除; 污泥产率; 可持续性

中图分类号: X 703

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2021)11-1292-11

doi: 10.11936/bjtxb2020040009

Bottlenecks and Causes, and Potential Solutions for Municipal Sewage Treatment in China

CAO Yesi¹, ZHENG Xingcan², LIU Zhixiao³, M. C. M. Van Loosdrecht⁴, Glen Daigger⁵

(1. CSD Concept Environmental Development Yixing Co., Ltd., Yixing 214213, Jiangsu, China;

2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300381, China;

3. Beijing Capital Group Co., Ltd., Beijing 10028, China;

4. Department of Biotechnology, Delft University of Technology, Delft 2629 HZ, Netherlands;

5. Department of Civil and Environ. Eng., University of Michigan, MI 48109, USA)

Abstract: Since about the 1990s China has achieved remarkable progress in urban sanitation. The country has built very extensive infrastructure for wastewater collection and treatment, with 94.5% coverage in urban areas and legally mandated nation-wide full nutrient removal implemented. However, municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in China are still confronted with several bottlenecks rooted in the unique sewage characteristics, which are caused by leakage of sewer systems. This study compared energy recovery, cost of nutrient removal and sludge production between Chinese municipal WWTPs and those in countries with longer wastewater treatment traditions, and, on the basis of theoretical analysis, highlighted the cause-effect relationships between Chinese sewage characteristics, including high inorganic suspended solids (ISS) loads, low COD, and low $\rho(C)/\rho(N)$ and municipal WWTP process performance in China. It proposes that China needs to develop guidelines for the design of urban

收稿日期: 2020-04-23

作者简介: 曹业始(1949—), 男, 博士, 主要从事污水处理方面的研究, E-mail: cao_yeshi1949@hotmail.com

wastewater treatment processes based on its own unique wastewater quality characteristics. In view of the time-consuming construction and rehabilitation of sewer systems, the improvement of the efficiency and sustainability of existing urban sewage treatment plants should be promoted simultaneously with sewer rehabilitation and design guidelines. To this end, cost-effective technical measures and solutions need to be selected and implemented. This paper proposed to strengthen work in three areas: improving the efficiency of grit removal, applying sludge fermentation and anaerobic digestion, and optimizing the existing and developing low-carbon biological nitrogen removal processes, and estimated the potential benefits of implementing these technical measures. The necessity of strengthening the application research of municipal sewage treatment oriented to the improvement of engineering applications was emphasized.

Key words: municipal wastewater treatment; sewage characteristics; energy recovery; nutrient removal; sludge production; sustainability

自 20 世纪 90 年代以来, 中国在城市排水与污水处理基础设施建设方面取得了显著进步. 截至 2019 年 12 月底, 城镇污水处理厂设计处理能力 2.107 亿 m^3/d , 年度处理水量 656.31 亿 m^3 ^[1], 覆盖 94.5% 以上的城市地区^[2]. 氮磷营养物去除已经在全国范围内依法实施. 然而, 与此同时许多城市污水处理厂面临很少能量回收、营养物去除成本昂贵和高污泥产量等瓶颈问题, 效率和可持续性仍有待提高^[3]. 下水道渗漏(地表入流与地下水入渗、化粪池设置等)导致的中国城市污水的独特水质特征, 是城市污水处理厂效率相对低下的根本原因^[4-6]. 最近, 中国三部委颁布了《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》^[7], 强调了下水道建设与修复在城市水环境治理与生态恢复中的关键作用, 标志着中国城市水环境治理的战略转折点. 考虑到下水道建设与修复所需的巨大投资和长周期, 现有城市污水处理厂的效率改善工作应该与下水道修复同时推进, 需选择具有良好成本效益的技术措施和解决方案并尽快加以实施. 本文将聚焦于: 1) 对比分析中国和其他具有更悠久污水处理传统的国家在城市污水处理厂能量回收、营养物去除和污泥产率等方面的差异; 2) 在足够资料支撑的理论分析基础上, 揭示中国独特的城市污水处理厂进水水质特征和较低运营效率之间的因果关系; 3) 建议可望在不太长的时间内改善中国城市污水处理厂

的效率和具有可持续性的技术措施与解决方案.

1 城市污水处理——有待改善的运营效率

1.1 低能量回收和高营养物去除费用

表 1 显示, 目前仅有不到 5% 的中国城市污水处理厂采用污泥厌氧消化系统^[8-11], 相对欧洲、美国和新加坡比例较低, 而污泥厌氧消化在有悠久污水处理历史的国家已经得到广泛应用^[12]. 在美国, 许多处理量比较大的污水处理厂很早就采用污泥厌氧消化和热电联产技术, 并获得经济收益, 最近几年数据显示, 处理量为 2 万~4 万 m^3/d 的污水厂使用污泥厌氧消化和热电联产技术, 仍然有利可图. 欧洲的经验是处理量约或超过 1 万 m^3/d (50 000 PE) 的污水厂, 使用污泥厌氧消化经济上仍是可行的^[12]. 国内在 20 世纪八九十年代建设的大型城市污水处理厂曾较多应用污泥厌氧消化, 但目前仅部分省会及一线城市建有大型污泥厌氧消化设施^[1], 且只有部分处于正常运行状态^[9]. 由此, 当前中国城市污水处理厂通过污泥厌氧消化和热电联产回收的能量非常有限. 这同时也导致污泥处置的稳定化和二次污染问题^[9-11, 13-14], 大大增加了所需处置的污泥量(由于缺乏污泥厌氧消化过程中的挥发性悬浮固体(VSS)降解, 以及板框脱水添加石灰调理药剂), 进而使得污泥处理处置和资源化利用的费用和难度增大^[11, 13-14].

为了达到严格的氮磷营养物排放标准(如中国

表 1 目前在中国和其他国家采用污泥厌氧消化的城市污水处理厂数量占比

Table 1 Proportions of municipal WWTPs with anaerobic sludge digestion in China and other countries %

中国	丹麦	法国	德国	荷兰	新加坡	瑞典	瑞士	英国	美国
<5 ^[9,11]	52 ^[14]	39 ^[15]	87 ^[14]	66 ^[14]	100 ^[16]	56 ^[14]	95 ^[14]	97 ^[14]	68 ^[14]

城市污水处理厂一级 A 标准 $\rho(\text{TN}) < 15 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) < 0.5 \text{ mg/L}$, 和在一些省份敏感地区实施的 $\rho(\text{TN}) < 10 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) < 0.3 \text{ mg/L}$, 不少中国污水处理厂舍弃初级污泥沉降^[1], 并采用了外加碳源方式来增强脱氮除磷效果^[17]. 以当前市场价格粗略估计, 一个 $10 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂(为达到总氮 10 mg/L 排放标准)购买相当于 20 mg/L 醋酸的碳源($\text{NO}_3\text{-N}$ 去除约 $4 \sim 5 \text{ mg/L}$), 每年需花费大约 300 万元人民币^[3]. 因而, 现今在一些污水处理厂中化学药品花费仅次于电力^[18]. 从根本上讲, 这主要是由于进水的低碳氮比造成的, 因为对于典型的生活污水, 常规的生物脱氮工艺可以在不添加或添加少量碳情况下实现出水 $\rho(\text{TN}) < 15 \text{ mg/L}$ ^[14]. 很明显, 实行更严格的营养物排放标准(例如 $\rho(\text{TN}) < 5 \text{ mg/L}$ 和 $\rho(\text{TP}) < 0.1 \text{ mg/L}$) 将给污水处理厂运营和地方管理机构带来进一步的经济负担及稳定达标压力. 此外, 考虑初级能源的使用和相应的温室气体排放, 过量化学物质添加对环境也是不

可持续的^[19].

1.2 高污泥产率

污水处理厂活性污泥池内混合液悬浮固体(mixed liquor suspended solid, MLSS)主要由活性微生物、微生物自身氧化的残留物、吸附在污泥上不能被生物降解的有机颗粒和无机盐悬浮固体(MLISS)组成, 其产生量和组成取决于污水的水质特性、处理工艺和场地环境. 表 2 列出了以中国城市污水处理在 2015 年、2016 年和 2017 年 COD 去除量和对应的年平均污泥产量(按干固体 DS 计)^[2, 20-21] 计算的污泥产率. 3 年平均值为 $0.69 \text{ kg 干污泥 (DS)/kg COD}$, 假设 $\text{COD}/5 \text{ d 生物需氧量 (BOD}_5) = 2$ ^[22], $0.69 \text{ kg DS/kg COD}$ 在报告值 $1.0 \sim 1.5 \text{ kg DS/kg BOD}_5$ ($0.5 \sim 0.75 \text{ kg DS/kg COD}$)^[22-23] 范围内. 鉴于只有不到 20% 的污水厂采用初级污泥沉降^[1] 和不到 5% 的污水厂采用污泥厌氧消化^[9, 11], 去除每 kg COD 产生的污泥量可以视为活性污泥过程定义的表现污泥产率(系数) Y_{OBS} ^[24].

表 2 2015 年、2016 年和 2017 年中国年度城市污水处理 COD 去除量和污泥产量以及污泥的表现污泥产率

Table 2 Chinese annual COD removal, sludge production and sludge observed yield coefficients for 2015, 2016 and 2017

项目	2015 年	2016 年	2017 年
去除 COD	0.25 kg/m^3 ^①	$13.00 \times 10^9 \text{ kg}^{\text{②}}$	$13.77 \times 10^9 \text{ kg}^{\text{③}}$
产生污泥(干重)	0.17 kg/m^3 ^④	$8.00 \times 10^9 \text{ kg}^{\text{⑤}}$	$10.53 \times 10^9 \text{ kg}^{\text{⑥}}$
表现污泥产率	0.69	0.62	0.77

①城市污水处理厂的平均值^[20]. ②所有城市污水处理厂总量^[21]. ③所有污水处理厂总量^[2]. ④城市污水处理厂的平均值^[20]. ⑤所有城市污水处理厂总量^[21]. ⑥所有城市污水处理厂总量^[21].

为探讨污水中无机盐悬浮粒子含量对观察污泥产率的影响, 根据中国 2017 年城市污水平均成分数据^[4], 包括污水易于生物降解 COD(RBCOD) 占比(RBCOD/总 COD)为 8%, $\text{BOD}_5/\rho(\text{TP})$ 为 18, 在中国现今盛行传统生物脱氮除磷工艺辅以化学除磷(铁和磷物质的量去除比率为 1.5, 去除 80% 的 TP), 其污泥停留时间(SRT)为 15 d, 但活性污泥混合液挥发性悬浮固体(mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS)与混合液悬浮固体(MLSS)典型比率为 80%, 根据 Paul 等^[25] 基于表现污泥产率和化学除磷计量关系, 并结合大量现场数据算得污泥产率为 0.48 kg/kg (以 COD 计, 下同). 该数值比常规营养活性污泥过程的污泥产率 0.37 kg/kg 多 30%^[25]. 原因是生物除磷形成的聚合磷酸盐和化学除磷添加金属药剂导致非挥发化学污泥的增加. 中国城市污水厂近 3 年平均污泥产率为 0.69 kg/kg (见表 2), 比在

活性污泥 MLVSS/MLSS 为 80% 条件下估算值 0.48 kg/kg 高出约 44%.

对中国江苏南部部分城市市区污水处理厂的调查表明, 当进水水质无机悬浮固体(ISS)/总悬浮固体(TSS)大致正常时($\geq 60\%$), 污水处理厂剩余污泥产率接近或稍高于 0.48 kg/kg , 而污水和污泥 VSS/TSS 低时, 污泥产率接近 0.69 kg/kg 或更高. 高的剩余污泥产率系数在很大程度上源自进水中高质量浓度 ISS^[3, 9, 22-23, 26] (见 2.1 节). 在法国苏伊士旗下 30 个大型污水处理厂中, 39% 的污水处理厂采用污泥厌氧消化(见表 1), 其平均污泥产率为 0.44 kg/kg ^[15]. 新加坡所有城市污水处理厂均采用污泥厌氧消化进行能量回收, 减少约 35% 的固体, 虽然仅在个别活性污泥过程实行生物除磷^[27], 其污泥产率仅 0.24 kg/kg ^[16]. 通过与法国、新加坡污水处理厂的污泥产率相比, 可以看出进

水中无机盐悬浮固体质量浓度以及厌氧污泥消化对污泥产率系数的影响, 也说明中国目前的城市污水厂污泥产率系数过高^[26]。

2 独特的污水水质特性和低运营效率的关系

污水水质特征对于活性污泥工艺和整个处理厂的设计至关重要^[3,28-30]。对中国(不包括港澳台)城市污水和城市下水道系统进行的若干研究结果显示, 地表入流和地下水入渗、化粪池设置和管道内部悬浮固体沉积等因素导致中国城市污水水质 3 个独特特征: 高 ISS 质量浓度、低 COD 和低碳氮比^[46]。这 3 个特征直接影响污水处理单元和整个过程的性能和效率, 是中国城市污水处理低效率运行的根本原因之一^[3,5-6,26]。

2.1 高 ISS 及其影响

文献报道的中国污水 ISS/TSS 数据非常有限。初步调查显示, 即便在施工质量及管理维护良好的下水道系统, 如苏南某些城市市区的污水处理厂的进水 VSS/TSS 为 50% ~ 65%, 低于 60% ~ 80% 的正常范围^[28-29]。然而, 常见报道进水低 COD/TSS (< 1) 和低 BOD₅/SS (0.3 ~ 0.5)^[11,17,22,31-32], 反映国内污水含高 ISS (砂质、粉土和黏土等), 国内污水厂进水固体“无机化”特性显著。如式(1)所示, 在假设所有 ISS 呈悬浮态、没有设置初沉、二沉池出水无 ISS 的条件下, 进水的 ISS/SS 直接影响到混合液非挥发性固体质量浓度 (MLISS)^[24]。

$$MLISS = ISS_{10} \times (\Theta_c / \tau) \quad (1)$$

式中: MLISS 为混合液 ISS; ISS₁₀ 为进水 ISS; Θ_c 为 SRT; τ 为水力停留时间 (HRT)。

对于未设置初沉池, 12 d SRT 和 0.5 d HRT 的活性污泥工艺, 进水 VSS 为 180 mg/L, ISS 为 79 mg/L (VSS/TSS 为 70% (180/(79 + 180))), 当进水 VSS/TSS 减少 10% (ISS 增加至 120 mg/L), 使用公式(1), 混合液 MLISS 增加大约 1 000 mg/L, 表明了进水 ISS 对混合液 MLVSS/MLSS 比值的敏感性。

根据文献和调查, 中国大多数污水处理厂活性污泥挥发性固体比值在 30% ~ 65%^[8-10, 33-37]。较低的 MLVSS/MLSS 通常来自进水高 ISS 浓度, 联结入流和入渗相对严重下水道系统的污水处理厂。较高 MLVSS/MLSS 通常来自联结维护管理较规范下水道系统或发生渗出性渗漏下水道系统的中国北方污水处理厂, 其进水 ISS 较低。如长江三角洲苏州市区

厂 MLVSS/MLSS 在 60% ~ 65%, 常州市区厂在 50% ~ 65%, 江苏省厂平均约 50%, 上海市区平均 50% ~ 60%^[32]。有赖于管理良好的下水道系统^[4], 北京市区厂 MLVSS/MLSS 在 60% ~ 70%。就整个中国来说, 活性污泥挥发性固体组分的平均值低于 50% (见表 3), 远低于正常范围 70% ~ 75%^[38], 即使与只用化学除磷条件下化学污泥及矿物的积累形成混合液固体挥发率 60%^[39] 相比。进水高质量浓度的 ISS 在活性污泥中的积累影响显著, 反映出中国当前广泛存在的城市污水含高质量浓度 ISS 和处理过程中除砂效率低下的问题^[3,22,26,33-34]。

低混合液 MLVSS/MLSS 比值对城市污水处理厂工艺性能和运行有多方面的不利影响^[3,6,26]。以活性污泥固体有机组分比值 (MLVSS/MLSS) 70% 作为比较基准, 为了在活性污泥池中维持相同数量的生物量、MLSS、SRT 和 HRT, 依据公式 $MLSS = (\Theta_c / \tau) \times Y_{OBS} \times (COD_{进水} - COD_{出水})$ ^[24], 在相同 $(COD_{进水} - COD_{出水})$ 下, 50% 的较低 MLVSS/MLSS 则意味着活性污泥池的有效容积需增加约 40%。而在有效容积增加较少或容积不变情况下, 则可能由于混合液中增加的无机盐颗粒挤占了原属微生物空间, 减少了单位体积微生物含量, 导致实际运行泥龄的减小, 从而影响到出水水质。太长水力停留时间活性污泥过程, 过高 MLSS 质量浓度和在长江下游地区的污水处理厂常看到低水温条件下由于硝化泥龄不足导致的出水氨氮质量浓度升高就是由于高 ISS 引起的例子。而初沉污泥和侧流污泥的低 MLVSS/MLSS 比值降低了污泥发酵单位污泥挥发性酸产量, 则是阻碍初沉和侧流污泥发酵 2 种工艺技术在中国成功应用的主要因素之一。

类似于活性污泥, 污泥厌氧消化池进料中的低挥发性固体比值, 降低了单位有效体积 (或每单位污泥) 的沼气产率。而为了达到预定的 VSS 削减率和产气率, 需要增加额外容积以维持泥龄。同时, 固体在污泥厌氧消化池沉积容易引起设备磨损和管道堵塞。污水中较高的 ISS 含量成为中国应用污泥厌氧消化及其正常稳定运行的主要技术障碍^[9-11,22,40]。此外, 高进水 ISS 也导致污泥干化和焚烧设备的严重磨损。

进水 ISS 在初沉和二沉污泥中的积累, 导致污泥量的增加^[24] (参阅第 1.2 节)。图 1 为模拟结果, 仿真软件为 GPS-X, version 6.02。未设置初沉池的 COD 去除和硝化活性污泥过程。进水成分: COD 为 429 mg/L, sCOD 为 107 mg/L, 可生物降解固体 COD

为 238 mg/L, ISS 随进水 VSS/TSS 变化. 其间为了保持完全硝化, SRT 维持在 8 ~ 9 d (HRT: 7 h, 20 °C), MLSS 从 2 700 mg/L 增加到 6 370 mg/L. 当进水 VSS/TSS 在 35% ~ 75% 时, VSS/TSS 每降低 10%, 污泥产量增加 20% ~ 30% [26]. 由高 ISS 导致污泥质量浓度明显增加, 需要额外的二沉池表面积、固体处理设施(脱水机和污泥泵等)容量和运行所需能量, 明显增加了城市污水处理厂处理污泥所需的投资. 本节内容说明了在设计中忽略进水高 ISS 将会带来的对工艺、设备和运行的一系列破坏性影响.

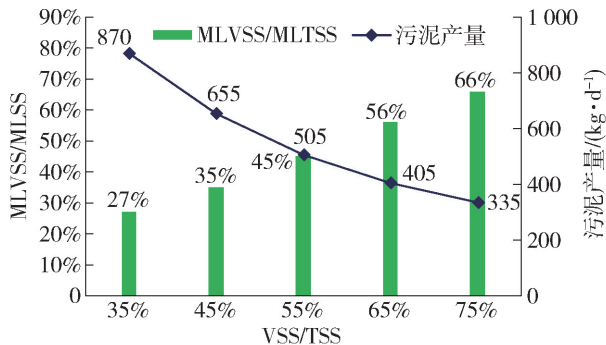


图1 进水 VSS/TSS 对污泥 MLVSS/MLSS 和污泥产量的影响

Fig. 1 Effect of influent VSS/TSS ratio on MLVSS/MLSS and sludge production

2.2 低 COD、低碳氮比及其影响

2016 年中国城市污水处理厂的进水 COD 平均值仅为 267 mg/L [20], 约为表 3 所列其他国家的污水厂进水 COD 的一半. 低 COD 归因于下水道中出现的 COD 在线生物降解和高渗漏比率 [4-6]. 许多污水处理厂进水悬浮固体 (SS) 质量浓度在 100 mg/L 上

下 [5], 比污水典型值低约 150 mg/L [38], 可能与多数城市仍然设置化粪池 [6] 和悬浮颗粒在下水道中的沉降和积累相关 [41].

进水低 COD 容易导致活性污泥池生物量低质量浓度. 相对于正常进水 COD, 低 COD 进水 ISS 越高 (高 ISS/COD), 混合液中的挥发性固体比值 (MLVSS/MLSS) 相应下降越多. 这使得高效除砂在处理 COD 较低进水时尤为重要. 需要注意的是, 较低的进水 COD 并不意味着必须放弃污泥厌氧消化 (参见下文), 尽管与较高进水 COD 相比, 回收的总能量可能会受到较大的影响. 中国城市污水处理厂的进水碳氮比在 5.4 ~ 10.9 [5,31,43], 北京、上海和广州污水处理厂的进水碳氮比介于 7.5 (广州) ~ 8.8 (北京), 平均 8.0 [5], 低于典型范围 8 ~ 12 [36]. 碳源短缺不利于达到严格的 TN 和 TP 排放要求.

在中国许多污水处理厂, 为提高生物脱氮 (反硝化) 效果, 省略了初沉池 [1]. 考虑初沉池去除 30% ~ 40% 进水 COD, 加上同时去除的无机悬浮固体, 一旦省略初沉池, 在相同的 MLSS、SRT 和 HRT 条件下, 生物池所需的池容将增加 30% ~ 40% [24], 同时二沉池表面积也须显著增加, 导致设施体积和水力停留时间增加, 加大了工程建设成本. 而由于引入了更多固体 COD, 可生物降解颗粒 COD 在固体中占比和可生物降解颗粒 COD 的水解速率成为提高反硝化效率的决定因素. 举例来说, 由于水解和温度的关系 [44], 夏季反硝化效率的提高是可能的, 但是冬季则未必. 所以, 省略初沉池的预期效果并不一定能够实现, 需要进行详细的试验来确定技术可行性 (参阅第 4.4 节).

表 3 中国城市污水处理厂和其他国家的进水 COD 比较

Table 3 Influent COD concentrations in Chinese municipal WWTPs and elsewhere

mg/L						
中国	法国	德国	荷兰	新加坡	瑞典	英国
267 [20]	592 [42]	548 [42]	470 [42]	565 [27]	477 [42]	612 [42]

3 潜在的解决方案

3.1 综合污水水质特征的城市污水处理厂设计和运行

由于中国独特的污水水质特征, 中国需要制定适合自己的城市污水处理厂设计指南, 或在现有的设计指南 (例如由德国水协会 (ATV) 等制定) 包括软件 (例如 Biowin、GPS-X 等) 进行必要的修改后再加以使用 [3,33-34]. 同时须将当地污水水质特征与

排放要求、处理量、能源、化学药品、污泥处置成本和地理位置等一并综合考虑.

鉴于下水道建设与修复耗时长久和当前广泛存在城市污水处理厂低效率运行的现状, 在整合各个方面因素制定污水处理厂设计与运行指南, 以提高污水处理厂运行绩效的同时, 需要找出具有良好成本效益的技术措施和解决方案并快速加以实施. 根据本文前面的陈述, 建议加强三方面工作: 除砂池改进、污泥发酵和现有流程优化以及开发低碳源脱氮

工艺过程.

3.2 提高除砂池效率

当前中国城市污水处理厂除砂低效率是由于:

1) 现有除砂装置的设计存在技术、设备配置及安装等方面的缺陷. 典型的情况为, 由于缺乏污水中 ISS 的数据而导致的低负荷设计. 运行过程中缺乏足够的维护, 甚至没有定期维护的计划进一步降低去除效率.

2) 当前使用常规除砂单元主要去除直径超过 200 μm 和密度大于 2.7 g/cm^3 的无机悬浮固体^[46]. 而中国的许多地方城市污水中的 ISS 不仅质量浓度高, 且相当部分属于直径远小于 200 μm 的微细无机固体^[11,33-34,47], 甚至部分污水的 ISS 平均直径在 50 ~ 60 μm . 常规除砂单元难以有效去除这部分微细无机固体, 去除率只有约 10%^[11,33,47-48].

可很快做的提高现有除砂装置的效率的措施包括: 1) 根据下水道的类型和地理区域等因素^[46], 对全国范围的城市污水的 ISS 质量浓度和质量负荷进行调查. 2) 研究现有各种类型除砂单元, 包括能够去除直径小于 200 μm 颗粒物的设备的性能 (如 ISS 质量负荷和去除效率), 加强维护和保养. 3) 改造现有的常规除砂设备. 一些例子表明, 一些常规的除砂装置经简单升级改造, 例如增加水力停留时间^[45]、调整循环除砂提升泵的位置^[22] 和除砂单元后续设置超高负荷初沉池 (速沉池)^[49] 等, 混合液挥发性固体比值可达约 60%^[22,26].

由于现有中国城市污水处理厂中常见的无机盐悬浮固体 (砂粒) 严重累积以及由此导致对工艺、设备和运行多方面的破坏作用, 改善被忽视的除砂单元效率成为提高当前中国城市污水处理效率的一个不可回避的技术措施. 考虑到提高去除砂粒效率带来多方面效益和有限资金投入, 污水处理厂应该对提高砂粒去除效率给予足够的重视并尽快采取行动. 通过提高除砂效率使混合液中的挥发性固体成分增加约 10%, 有望使小型污水处理厂的混合液中的挥发性固体成分达到 55% ~ 60%, 中大型污水处理厂 (≥ 5 万 m^3/d) 达到 60% ~ 65%.

3.3 污泥发酵和厌氧消化

利用污水中可生物降解的固体 COD 解决生物脱氮工艺中的碳源短缺是一个研究了很长时间并且还在继续的课题. 由于污水的低碳氮比, 这个课题与中国城市污水处理营养物质去除有着更密切的关系. 图 2 显示了中国江苏苏南某地一个日处理量 10 万 m^3 城市污水处理厂的长期运营初沉污泥发酵部

分数据, 挥发性脂肪酸 (VFA) 平均增加 40 mg/L ^[26] (进水挥发性脂肪酸 - 出水挥发性脂肪酸, 温度 16 ~ 18 $^{\circ}\text{C}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和磷的净释放量分别为 2 和 1 mg/L), 这部分 COD 可以减少出水 TN 6 ~ 8 mg/L . 在应用初沉污泥发酵同时, 利用侧流活性污泥 (和在线混合液) 发酵技术增加脱氮除磷效率已在欧洲和美国得到广泛应用^[50-51]. 中国已经有初沉污泥和侧流污泥发酵的工程应用^[52,17]. 可能由于项目前期准备和工程后期跟进工作不够充分 (参阅第 4.4 节), 长期成功运行的报告不多.

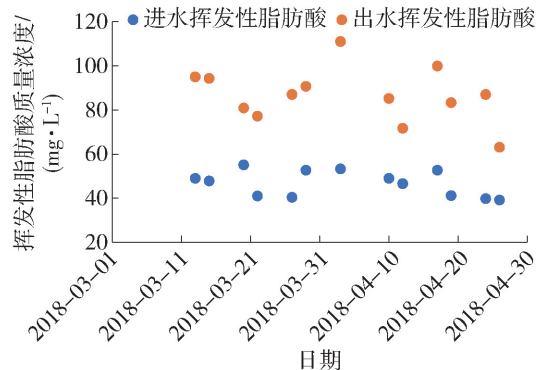


图 2 生产规模初级污泥发酵罐中的 VFA 进、出口质量浓度

Fig. 2 VFA in the influent and effluent of full-scale primary sludge fermentation tanks

鉴于污泥厌氧消化带来污泥稳定、卫生、能源回收、污泥量减少等作用, 污泥厌氧消化的应用应在城市污水处理增质提效的议程上得到足够的关注. 特别是随着进水 ISS 的减少和 COD 的提高^[26], 急需研究适合中国城市污水处理厂应用污泥厌氧消化的经济可行性和必要性, 包括能量回收与营养物质去除两者之间的平衡, 以及不同方案的成本-效益分析, 积极推动该技术在中国的应用.

3.4 优化现有工艺、应用和开发低碳源脱氮工艺

提高现有工艺和设备的效率是具有成本效益的增质提效措施. 面对进水低碳氮比和越来越严格的营养物质排放要求导致的碳源短缺, 首先应追求进水中碳源的有效使用. 减少不必要的好氧异养反应而导致的 COD 消耗, 包括通过降低进水跌落、削减高溶解氧回流液从好氧区循环到厌氧或缺氧区影响、在线控制减少过度曝气, 从而减少碳源投加量^[6,53-54]. 与此同时, 努力应用、开发低碳源脱氮生物工艺, 包括在中国南部近海地区尝试 SANI[®] (综合硫酸盐还原, 自养反硝化和硝化)^[55], 防止硝酸盐干扰磷酸盐释放和促进低碳反硝化除磷的营养物去

除 BCFS[®]工艺(生物化学除磷和脱氮)^[56],研究和开发 MABR(膜曝气生物反应器)短程脱氮的功能^[57]等.国内短程反硝化和厌氧氨氧化研究取得显著进展^[58-60],相应中试研究正在推进,以期尽早进入生产规模应用.最近报告的西安第四污水处理厂主流部分厌氧氨氧化去除氮^[61]令人鼓舞,值得进一步跟踪并深入研究.

4 前景:可能增加的效益

4.1 能量回收:节省 10%~15% 全国城市污水处理厂运行电能

随着除砂效率的提高,有望使混合液挥发性固体占比达到 60%~65%,为污泥厌氧消化带来 20% 的沼气产量增长^[22],显著减少金属材料磨损和管道堵塞.这些改进提供应用污泥厌氧消化的前提条件.中国大约一半的城市污水由 10 万 m³/d 以上规模的污水处理厂处理^[2].这些大型污水处理厂具备较高的进水 COD(>300 mg/L),在污泥混合液挥发性固体占比 60%~65% 的情况下,应用污泥厌氧消化和热电联产回收的电能,可节省运行污水处理厂 20%~30% 的电能^[12].相当于节省 10%~15% 中国所有城市污水处理厂运行电能(估算不包括处理量小于 10 万 m³/d 的污水厂的能量回收).上海白龙港污水处理厂(日处理量 200 万 m³/d,进水 COD 约 250 mg/L)^[21]和苏黎世污水处理厂(日处理量 50 万 m³/d,初沉出水 COD 约为 250 mg/L)^[54]都为污泥厌氧消化用于能量回收提供了工程案例支撑.

4.2 购碳支出:不加碳源出水总氮质量浓度降低 5 mg/L

通过工艺改进避免 COD 的浪费和污泥发酵产生 VFA,获得净 COD 约 30 mg/L,可使最终出水硝酸氮质量浓度降低约 5 mg/L,有助于实现在没有或添加少量碳源情况下实现出水总氮质量浓度显著降低.

4.3 污泥量:减少 25% 全国城市污泥产生量

通过提高进水砂粒去除率,增加混合液挥发性固体比值,明显地减少污泥量^[26],加上污泥厌氧消化转化 40%~50% 的 VSS 为沼气^[24],污泥量减少可达 50%.这意味着如果在约一半的城市污水处理厂实现进水 ISS 减少并采用污泥厌氧消化,则全国范围内城市污泥产生量可减少约 25%.此外,能量回收的增加和购买化学品成本的减少,落实 ISS 的减少并应用污泥厌氧消化将在很大程度上改善国内城市污水处理厂的可持续性.

4.4 加强以工程应用为导向的研究

强大的研发能力是去除城市污水处理瓶颈并实现前景目标的前提条件.项目前期可行性研究应充分考虑可能出现的问题和工业应用.以过程效率优化、控制等为目的的中试研究应在现场条件下进行,试验持续时间应根据试验任务需要而定.项目建成运行后的工程研究是过程研发不容忽视的阶段之一.考虑到中国污水 ISS 的特殊性,有必要开发新型的除砂技术,涉及污水中 ISS 特征化、除砂单元设计的两相流研究(污水和砂砾、砂粒和有机固体)、水力计算、中试(展示)规模的设计、运行和数据分析等等,需要多学科知识的融合应用和多样的技术能力.为评估设置初沉池技术可行性,需要测定机理性(基于数学模拟)的污水水质特征参数^[28,30],可生物降解的固体 COD 在不同温度下的缺氧和厌氧环境条件下降解速度^[62]和与此相关硝酸盐还原动力学等^[63].而为评估初级和活性污泥发酵的技术可行性,需测定污泥生化挥发物脂肪酸潜力(BVFAP)^[64].上述研发任务皆具挑战性,需要全身心的投入和高校、科研院所、设计单位和水务公司充分合作.

5 结语

中国在城市污水收集与处理的基础设施建设方面取得了显著进步,但城市污水处理仍然面临着较低效率的能量回收、昂贵的氮磷营养物去除成本和高污泥产率(量)等瓶颈问题.这些瓶颈问题主要源自于下水道渗漏导致的独特的污水水质特性:高 ISS、低 COD 和低碳氮比.本文在足够资料支撑的理论分析基础上,揭示了中国污水独特水质特性和城市污水处理厂较低运营效率之间的潜在关系.提出中国需要制定根据自己的独特水质特性的城市污水处理设计指南.鉴于下水道的建设与修复耗时长久,污水处理厂的可持续性改进应该与下水道的修复同时进行.出于成本效益的考虑,本文建议在 3 个方面加强工作:提高除砂效率、采用污泥发酵和厌氧消化及改善现有并开发低碳源生物脱氮工艺,同时估算了实际应用可能带来的收益.强调了加强以工程应用为导向的城市污水处理研究的必要性.

致谢 杨向平(中国城镇供水排水协会),张悦(中国土木工程学会水工业分会),甘一萍(中国城镇供水排水协会),王洪臣(中国人民大学),戴晓虎(同济大学),何强(重庆大学),吴军(扬州大学),白宇,王佳伟(北京排水集团),胡维杰(上海市政工程

设计研究总院(集团)有限公司),李金河(天津创业环保),侯小阁(中广核),丁永伟(苏州水务集团公司),李激、王燕(江南大学)和吕贞(常州市排水管理处)等提供了有用的信息和观点. 作者也感谢学报两位不知名的审稿人,尤其是第一位审稿人的专业和详细评论.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 全国城镇污水处理管理信息系统[Z/OL]. [2020-03-20]. <http://219.142.101.196/WSXM/2020>.
- [2] 中国给排水协会. 城镇排水统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国城镇供水与排水协会, 2018: 1-55.
- [3] 曹业始, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. 国内市政污水三大特征: 挑战和对策[C/OL] // 2019 年中国城市水环境与生态国际会议. [2020-03-20]. <https://www.chndaqi.com/show/1638.html>.
CAO Y S, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. Three characteristics of domestic municipal sewage: challenges and countermeasures[C/OL] // China Urban Water Environment and Ecology International Conference. [2020-03-20]. <https://www.chndaqi.com/show/1638.html>. (in Chinese)
- [4] 曹业始, 唐建国, HENZE M, 等. 国内下水道系统渗漏及其对污水处理厂设计、运行的影响[C/OL] // 第十三届中国城镇水务发展国际研讨会与新技术设备博览会. [2020-03-20]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20181203/945829.shtml>.
CAO Y S, TANG J G, HENZE M, et al. The leakage of sewer systems and the impact on the black and odorous water bodies and WWTPs in China[C/OL] // The 13th China Water Congress and Exhibition. [2020-03-20]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20181203/945829.shtml>. (in Chinese)
- [5] CAO Y, TANG J G, HENZE M, et al. The leakage of sewer systems and the impact on the 'black and odorous water bodies and WWTPs in China[J]. *Wat Sci Technol*, 2019, 79(2): 334-341.
- [6] 郑兴灿. 江苏省太湖地区城镇污水处理厂 DB32/1072 提标技术指引宣贯[C/OL] // 江苏省太湖地区城镇污水处理厂 DB32/1072 提标研讨会. [2020-03-20]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20190104/954203.shtml>.
ZHENG X C. The technical guidelines for the DB32/1072 upgrade of urban sewage treatment plants in the Taihu Lake district of Jiangsu province were announced and implemented[C/OL] // Workshop of the Technical Guidelines for the DB32/1072 Upgrade of Urban Sewage Treatment Plants in the Taihu Lake District. [2020-03-20]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20190104/954203.shtml>. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)[Z/OL]. [2020-03-20]. [Http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201905/t20190509_240490.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201905/t20190509_240490.html).
- [8] JIN L, ZHANG G, TIAN H. Current state of sewage treatment in China[J]. *Water Res*, 2014, 66: 85-98.
- [9] FENG L, LUO J Y, CHEN Y G. Dilemma of sewage sludge treatment and disposal in China[J]. *Environ Sci & Technol*, 2015, 49: 4781-4782.
- [10] YANG G, ZHANG G, WANG H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China[J]. *Water Res*, 2015, 78: 60-73.
- [11] 戴晓虎. 污泥处理处置的瓶颈与技术分析[C/OL] // 第八届全国市政污泥处理与处置高级研讨会. [2020-03-25]. <https://www.solidwaste.com.cn/column/1180.html>.
DAI X H. Bottleneck and technology analysis of sludge treatment and disposal[C/OL] // The 8th National Workshop of Municipal Sludge Treatment and Disposal. [2020-03-25]. <https://www.solidwaste.com.cn/column/1180.html>. (in Chinese)
- [12] KROISS H, CAO Y. Energy considerations[M] // WANNER J, JENKINS D. *Activated sludge-100 years and counting*. London: IWA Publishing, 2014: 221-244.
- [13] 胡杰杰. 中国污水污泥处理处置及在上海的实践探索[C/OL] // 第八届污泥处理与处置高级研讨会. [2020-03-25]. <http://www.cnww1985.com/news/show-658.aspx>.
HU W J. The sewage sludge treatment and disposal in China and practice exploration in Shanghai[C/OL] // The 8th Advanced Workshop of Technology & Application of Sludge Treatment and Disposal. [2020-03-25]. <http://www.cnww1985.com/news/show-658.aspx>. (in Chinese)
- [14] 王凯军. 城市污泥资源化的瓶颈与发展方向[C/OL] // 第八届高级污泥处理与处置技术与应用研讨会. [2020-03-25]. <http://www.cnww1985.com/news/show-658.aspx>.
WANG K J. Bottleneck and direction of resource reuse of municipal sludge[C/OL] // The 8th Advanced Workshop of Technology & Application of Sludge Treatment and Disposal. [2020-03-25]. <http://www.cnww1985.com/news/show-658.aspx>. (in Chinese)

- [15] YANG Y, DONNAZ S. Benchmarking the 30 largest WWTPs operated by Suez on the French market [C/OL] // IWA LWWTSP Specialist Group Conference. [2020-03-25]. https://www.nrr_lwwtp2017.com.
- [16] CAO Y S, LAU C L, LIN L, et al. Mass flow and energy efficiency in a large water reclamation plant in Singapore [J]. *Water Reuse and Desalination*, 2013, 3(4): 402-409.
- [17] 郑兴灿. 城镇污水处理厂一级A稳定达标技术城镇污水处理技术升级的挑战与机遇[J]. *给水排水*, 2015, 41(7): 1-7.
ZHENG X C. Challenges and opportunities for upgrading urban sewage treatment technology [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(7): 1-7. (in Chinese)
- [18] 钱静. 合肥污水处理厂升级改造的实践与经验 [C/OL] // 第二届全国污水处理厂升级改造研讨会. [2020-03-25]. <https://wemp.app/posts/65ac44ae-7578-4a8a-a6a4-6488e4091338>.
QIAN J. Practice and experiences of upgrading and reconstruction of Hefei wastewater treatment plants [C/OL] // The 2nd National Workshop on Upgrading to Meet New Discharge Standard of WWTPs. [2020-03-25]. <https://wemp.app/posts/65ac44ae-7578-4a8a-a6a4-6488e4091338>. (in Chinese)
- [19] VAN LOOSDRECHT M, SEAH H, WAH Y L, et al. The next 100 years [M] // WANNER J, JENKINS D. *Activated sludge-100 years and counting*. London: IWA Publishing, 2014: 407-424.
- [20] 中国给排水协会. 城镇排水统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国城镇供水与排水协会, 2016: 1-77.
- [21] 中国给排水协会. 城镇排水统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国城镇供水与排水协会, 2017: 1-73.
- [22] 吉芳英. 细砂对污泥资源回收的影响以及除砂技术 [C/OL] // 中国给水排水杂志年会. [2020-03-25]. https://www.sohu.com/a/194800716_698856.
JI F Y. The influences of fine sand to resource recovery of sludge and technology for sand removal [C/OL] // Annual Meeting of the Journal of China Water and Wastewater. [2020-03-25]. https://www.sohu.com/a/194800716_698856. (in Chinese)
- [23] 郑兴灿. 城镇污水处理厂污泥减容减量技术途径及影响因素分析 [C/OL] // 第八届全国城市污泥处理与处置研讨会. [2020-03-25]. <https://www.solidwaste.com.cn/column/1180.html>.
ZHENG X C. Analysis of technical methods and influencing factors of sludge volume reduction and reduction in urban sewage treatment plants [C/OL] // The 8th National Symposium on Urban Sludge Treatment and Disposal. [2020-03-25]. <https://www.solidwaste.com.cn/column/1180.html>. (in Chinese)
- [24] GRADY JRC P L, DAIGGER G T, LIM H C. *Biological wastewater treatment* [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999: 180-201.
- [25] PAUL E, LAVAL M L, SPERANDIO M. Excess sludge production and costs due to phosphorus removal [J]. *Environ Technol*, 2001, 22(11): 1363-1371.
- [26] 曹业始, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. 国内市政污水处理的瓶颈和解决方案 [C/OL] // 2019年第三届全国污水处理厂升级改造研讨会. [2020-03-25]. <https://wemp.app/posts/497e710d-bca0-4727-b645-178c49a70e25>.
CAO Y S, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. Bottlenecks and solutions for domestic municipal wastewater treatment [C/OL] // The 3rd National workshop on Sewage Treatment Plant Upgrade and Reform. [2020-03-25]. <https://wemp.app/posts/497e710d-bca0-4727-b645-178c49a70e25>. (in Chinese)
- [27] CAO Y, KWOK B H, NORAINI A Z, et al. The mainstream partial nitrification-anammox nitrogen removal in the largest activated sludge process and comparisons with other BNR activated sludge process in Singapore [C/OL] // IWA World Water Congress. [2020-03-25]. <https://www.iwa2014lisbon.org/>.
- [28] HENZE M, COMEAU Y. *Wastewater characteristics* [M] // HENZE M. *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design*. London: IWA Publishing, 2008: 35-52.
- [29] VAN HAANDEL A C, VAN DER LUBBE J G M. *Handbook of biological wastewater treatment, design and optimisation of activated sludge systems* [M]. London: IWA Publishing, 2012: 36-45.
- [30] 曹业始, DAIGGER G. 污水水质特性对污水处理厂设计和升级的关键影响: 从经验到机理 [C/OL] // 第二届全国污水处理厂升级改造研讨会. [2020-03-26]. <https://wemp.app/posts/65ac44ae-7578-4a8a-a6a4-6488e4091338>.
CAO Y S, DAIGGER G. Key influences of sewage characteristics to the design and upgrading of WWTPs: from empirical to mechanistic [C/OL] // The 2nd National Workshop on WWTPs Plant Upgrade and Reform. [2020-03-26]. <https://wemp.app/posts/65ac44ae-7578-4a8a-a6a4-6488e4091338>. (in Chinese)
- [31] 韦启信, 郑兴灿. 影响污水生物脱氮能力的关键水质参数及空间分布特征研究 [J]. *给水排水*, 2013, 39(9): 127-131.

- WEI Q X, ZHENG X C. Study on the key water quality parameters and spatial distribution characteristics that affect the biological nitrogen removal capacity of sewage [J]. *Water & Wastewater*, 2013, 39(9): 127-131. (in Chinese)
- [32] HE L, TAN T, GAO Z, et al. The shock effect of inorganic suspended solids in surface runoff on wastewater treatment plant performance[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16: 452-464.
- [33] 吉芳英, 来铭笙, 何莉, 等. 细微泥沙粒径对活性污泥产率的影响及其计算公式[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(4): 1627-1632.
- JI F Y, LAI M S, HE L, et al. Influence of fine sediment size on activated sludge yield and its calculation formula [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 1627-1632. (in Chinese)
- [34] 郑兴灿, 孙永利, 尚巍, 等. 城镇污水处理功能提升和技术设备发展的几点思考[J]. *给水排水*, 2011, 37(9): 1-5.
- ZHENG X C, SUN Y L, SHANG W, et al. Some considerations about the improvement of urban sewage treatment functions and the development of technical equipment[J]. *Water & Wastewater*, 2011, 37(9): 1-5. (in Chinese)
- [35] 李激. 高标准排放要求下市政废水生物除氮的挑战和解决方案[C/OL] // 市政污水未来脱氮技术研讨会. [2020-03-26]. [Https://www.jiei.cn](https://www.jiei.cn).
- LI J. Challenges and solutions for biological nitrogen removal from municipal wastewater under high standard discharge requirements[C/OL] // The Seminar on Future Sewage Nitrogen Removal Technology of Municipal Wastewater. [2020-03-26]. [Https://www.jiei.cn](https://www.jiei.cn). (in Chinese)
- [36] XU J, LI P, H CAO W, et al. Application status of co-processing municipal sewage sludge in cement kilns in China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(12): 3315-3321.
- [37] 王洪臣. 城镇污水处理厂运营困局怎么破? [J]. *给水排水*, 2019, 55(9): 1-3.
- WANG H C. How to solve the dilemma of urban sewage treatment plant operation? [J]. *Water & Wastewater*, 2019, 55(9): 1-3. (in Chinese)
- [38] HENZE M, HARREMOËS P, LA COUR JANSEN J, et al. *Wastewater treatment: biological and chemical processes* [M]. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 37-51.
- [39] USEPA. *Design manual phosphorus removal* [M]. Cincinnati: USEPA, Center for Environmental Research Information, 1987: 45-60.
- [40] 蒋玲燕. 废水处理厂污泥厌氧消化的优化设计和运行研究[J]. *给水排水*, 2014, 4(2): 32-35.
- JIANG L Y. Optimal design and operation of the sludge anaerobic digestion in wastewater treatment plants [J]. *Water & Wastewater*, 2014, 4(2): 32-35. (in Chinese)
- [41] 徐祖信, 徐晋, 金伟, 等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. *供水和排水*, 2019, 3: 1-5.
- XU Z X, XU J, JIN W, et al. Challenges and opportunities for the management of black skunk water bodies in China[J]. *Water and Wastewater*, 2019, 3: 1-5. (in Chinese)
- [42] PONS M N, SPANJERS H, BAETENS D, et al. *Wastewater characteristics in Europe—a survey* [EB/OL]. [2020-03-25]. http://www.ewa-online.eu/tlfiles/_media/content/documentspdf/Publications/E-Ater/documents/70_200404.pdf.
- [43] SUN Y, CHEN Z, WU G, et al. Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: implications for resources utilization and management[J]. *J Cleaner Prod*, 2016, 131: 1-9.
- [44] HENZE M, MLADENOVSKI C. Hydrolysis of particulate substrate by activated sludge under anaerobic, anoxic and aerobic conditions[J]. *Water Res*, 1991, 25: 61-64.
- [45] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省太湖地区城镇污水处理厂DB 32/1072 提标技术指引[M]. 南京: 江苏省住房和城乡建设厅, 2018.
- [46] TCHOBANOGLIOUS G, FRANKLIN L M, STENSEL H D. *Wastewater engineering treatment and reuse* [M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2003: 65-98.
- [47] 吉芳英, 周峰, 范剑平, 等. 降雨过程对污水处理厂无机颗粒物特性及活性污泥的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 4643-4648.
- JI F Y, ZHOU F, FAN J P, et al. Impact of rainfall process on the characteristics of inorganic particulate matter and activated sludge in sewage treatment plants [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 4643-4648. (in Chinese)
- [48] HE P J, LU F, ZHANG H, et al. Sewage sludge in China: challenges toward a sustainable future[J]. *Water Practice and Technology*, 2007, 2(4): 83-90.
- [49] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省太湖流域城镇污水处理厂提标建设技术导则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 35-50.
- [50] BARNARD J L, DUNLAP P, STEICHEN M. Rethinking the mechanisms of biological phosphorus removal [J]. *Water Environ Res*, 2017, 89(11): 2043-2054.
- [51] 刘智晓. 废水生物除磷理论与实践的新突破: 从主流EPBR到侧流EPBR[J]. *中国给水排水*, 2018, 34

- (24): 1-7.
- LIU Z X. A new breakthrough in the theory and practice of biological phosphorus removal from wastewater: from mainstream EPBR to side stream EPBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(24): 1-7. (in Chinese)
- [52] 刘智晓, PETERSON G, 张伟, 等. 低碳源条件下利用侧流活性污泥水解技术强化生物脱氮除磷[J]. *给水排水*, 2013, 39(1): 53-57.
- LIU Z X, PETERSON G, ZHANG W, et al. Enhancement of biological nitrogen and phosphorus removal using sidestream activated sludge hydrolysis under low carbon source conditions [J]. *Water & Wastewater*, 2013, 39(1): 53-57. (in Chinese)
- [53] DOMINGUEZ D, GUJER W. Evolution of a wastewater treatment plant challenges traditional design concepts[J]. *Water Res*, 2006, 40: 1389-1396.
- [54] 孙永利, 李鹏峰, 隋克俭, 等. 内回流混合液对缺氧池脱氮的影响及控制方法[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(21): 81-84.
- SUN Y L, LI P F, SUI K J, et al. The effect of internal reflux mixed liquid on denitrification in anoxic tank and control methods[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(21): 81-84. (in Chinese)
- [55] WU D, EKAMA G A, CHUI H K, et al. Large-scale demonstration of the sulfate reduction autotrophic denitrification nitrification integrated (SANI[®]) process in saline sewage treatment [J]. *Water Res*, 2016, 100: 496-507.
- [56] BARAT R, VAN LOOSDRECHT M C M. Potential phosphorus recovery in a WWTP with the BCFS process: interactions with the biological process [J]. *Water Res*, 2006, 40: 3507-3516.
- [57] HOUWELING D, DAIGGER G T. Intensification of the activated sludge process using media supported biofilms [M]. London: IWA Publishing, 2020.
- [58] DU R, PENG Y Z, CAO S B, et al. Advanced nitrogen removal from wastewater by combining anammox with partial denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 497-504.
- [59] DU R, PENG Y, JI J, et al. Partial denitrification providing nitrite: opportunities of extending application for anammox [J]. *Environment International*, 2019, 131: 105001.
- [60] MA B, XU X, WEI Y, et al. Recent advances in controlling denitrification for achieving denitrification/anammox in mainstream wastewater treatment plants [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299: 122697.
- [61] LI J, PENG Y, ZHANG L, et al. Quantify the contribution of anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomic analysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor [J]. *Wat Res*, 2019, 160: 178-187.
- [62] WU J, HE C. The effect of settlement on wastewater carbon source availability based on respirometric and granulometric analysis [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 189/190: 250-255.
- [63] KRISTENSEN G H, JORGENSEN P E, HENZE M. Characterization of functional microorganism groups and substrate in activated sludge and wastewater by AUR, NUR and OUR [J]. *Water Sci Technol*, 2012, 25(6): 43-57.
- [64] ZHOU M, YAN B, WONG J, et al. Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: a mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 248(Pt A): 68-78.

(责任编辑 张 蕾)