

论述与研究

重庆城镇污水处理厂生物脱氮优化调控措施

王逸飞¹, 吉芳英¹, 许晓毅¹, 邓泉明², 赵正刚²,
况力³, 杨肃博³

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆市渝西水务有限公司, 重庆 402160; 3. 重庆港力环保股份有限公司, 重庆 400010)

摘要: 重庆地区的污水中碳源浓度总体较低, 污水厂运行时普遍存在进水 C/N 值 < 5, 无法满足反硝化所需碳源导致出水 TN 不达标的问题, 而总氮的去除除了与碳源浓度有关外, 还受到溶解氧和回流比等运行参数的影响。因此, 在重庆市某污水厂进行了调节回流比和溶解氧及投加外碳源试验, 研究了通过改变污水厂运行管理方式来优化出水 TN 指标的效果。在内回流比由 180% 调整至 300%, 好氧段溶解氧由 2.5 mg/L 降至 1.5 mg/L 的条件下, 结合外碳源的投加, 可使出水 TN 稳定达到一级 A 标准, 且每去除 1 mg/L 的 TN, 需投加 10.65 mg/L 乙酸钠或 7.81 mg/L 葡萄糖, 即 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水需要投加 213 kg 乙酸钠或 156 kg 葡萄糖, 折合 COD 分别为 99 和 142 kg, 成本分别为 650 元和 550 元, 相差不大, 故选用乙酸钠更合适。试验证明, 在现有污水厂提标改造的过程中, 通过改变运行管理方式而避免工程化改造, 是一种可行的技术手段。

关键词: 城镇污水处理厂; 生物脱氮; 一级 A 标准; 内回流比; 溶解氧; 外碳源
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0001-06

Optimization and Control Measures for Biological Nitrogen Removal in Chongqing Urban Wastewater Treatment Plant

WANG Yi-fei¹, JI Fang-ying¹, XU Xiao-yi¹, DENG Quan-ming²,
ZHAO Zheng-gang², KUANG Li³, YANG Su-bo³

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Yuxi Water Co. Ltd., Chongqing 402160, China; 3. Chongqing Gangli Environmental Protection Co. Ltd., Chongqing 400010, China)

Abstract: The concentration of carbon source in wastewater in Chongqing is generally low, and the influent C/N ratio of urban wastewater treatment plants (WWTPs) is usually less than 5, which can not meet the requirements for denitrification, resulting in the effluent TN not meeting the standard. In addition to the carbon source concentration, the removal of the total nitrogen is also related to operation parameters such as dissolved oxygen and reflux ratio. Biological nitrogen removal was enhanced by changing the internal reflux ratio, dissolved oxygen and dosing external carbon source in a wastewater treatment plant. The results showed that when the internal reflux ratio was adjusted from 180% to 300%,

the dissolved oxygen in the aerobic phase was reduced from 2.5 mg/L to 1.5 mg/L, and the external carbon source was added to the anoxic zone, the TN concentration in the effluent could reach the first level A standard stably. To remove TN of 1 mg/L, 10.65 mg sodium acetate or 7.81 mg glucose per liter of wastewater was required. For the WWTP with a capacity of 20 000 m³/d, 213 kg of sodium acetate or 156 kg of glucose should be added, which approximately equaled 99 kg and 142 kg COD, respectively. The cost was 650 yuan and 550 yuan, respectively. After comprehensive consideration of TN removal and costs, it was better to use the sodium acetate as the external carbon source. The experiment proves that it is a feasible technical means to change the operation mode to reach the first level A standard for TN without the engineering reconstruction.

Key words: urban wastewater treatment plant (WWTP); biological nitrogen removal; first level A standard; internal reflux ratio; dissolved oxygen; external carbon source

随着工业化和城镇化的快速发展,水污染控制与水环境治理成为全球关注的重大问题,同时也是我国经济社会健康、快速、可持续发展的重要制约因素,受到了各级政府和公众的广泛重视。2007年5月太湖流域水污染事件爆发后,污水处理厂提标改造在全国范围内全面实施。提标改造的主要指标包括TN、TP和SS。其中,TP和SS可以通过投加除磷剂和混凝、过滤等物化方法进行深度去除^[1]。然而,截至目前还未发现能应用于水处理系统的化学或物化脱氮技术,因此如何提高生物脱氮效率就成为污水处理系统提标改造的关键。

根据生物脱氮原理可知,传统活性污泥法对TN的去除效果主要与内回流比、溶解氧以及外碳源的投加量等参数有关。当内回流比升高时,更多的硝态氮随回流进入缺氧区,提升了反硝化脱氮的效率。但这也引起好氧段溶解氧提升,导致COD的过度氧化,减少反硝化可以利用的内碳源,同时溶解氧也会随着回流进入缺氧段,难以保证反硝化菌的缺氧环境^[2]。当生化系统内溶解氧降低时,能够减少好氧段的无效氧化,使低碳源污水中的碳源可以充分被微生物所利用。但溶解氧过低会抑制好氧段的硝化作用,导致氨氮去除效果变差。故污水厂运行时将内回流比和溶解氧控制在较佳的范围对总氮的去除具有非常重要的意义^[3]。碳源是反硝化的限制因素^[4],故投加外碳源是提升低碳源污水脱氮效果最有效的方法^[5-8],但外碳源投加量必须严格核算,若投加过多则会增加污泥产量和成本,造成不必要的浪费;而投加不足则会使出水TN无法达标^[6]。为此,结合重庆市某污水处理厂的提标改造,探讨了内回流比、溶解氧以及投加外碳源对生物脱氮效果

的影响。

1 工程概况及存在问题

1.1 工程概况

试验基于重庆市某污水处理厂进行。该污水处理厂设计规模为 3×10^4 m³/d,实际运行水量为 $(2 \sim 2.4) \times 10^4$ m³/d,采用A²/O工艺。在前期现场调研期间,好氧段末端溶解氧约为2.0 mg/L,内回流比在160%~180%之间,且未投加外碳源。污水厂主要运行参数见表1。

表1 污水处理厂主要工艺参数

Tab. 1 Operation parameters of a wastewater treatment plant

项 目	厌氧池	缺氧池	好氧池
有效池容/m ³	1 849	1 816	7 546
HRT/h	1.8	2.5	11.5
SRT/d	6.4		
污泥浓度/(mg·L ⁻¹)	2 406~5 574		
DO/(mg·L ⁻¹)	0.3~0.4	0.2~0.3	2.0
MLVSS/MLSS	0.57		
内回流比/%	160~180		
外回流比/%	90~100		

前期调研时该污水处理厂1月—5月的水质数据如表2所示。出水水质基本能稳定地达到国家一级B标准,但由于进水中不定期有垃圾渗滤液进入,水质波动很大。在没有垃圾渗滤液进入时,进水TN浓度平均约为40 mg/L,出水值基本在一级A标准附近波动,进水COD较低,C/N值维持在5左右,不能满足TN达到一级A标准时反硝化对碳源的需求。而在有垃圾渗滤液进入时,进水TN平均浓度较高,能达到72 mg/L,出水TN超过一级B标准的风险高。根据对现有运行条件的分析,运行参数具有一定的优化空间。

表2 污水厂1月—5月主要水质指标

Tab.2 WWTP's main wastewater quality indicators from January to May $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD		$\text{NH}_4^+ - \text{N}$		TN	
	最大值	均值	最大值	均值	最大值	均值
进水	696	286.2	123.00	46.87	126.00	50.45
出水	46	25.9	3.05	0.59	24.52	16.56

1.2 存在的问题

污水厂运行过程中,反硝化效能的影响因素主要为温度、溶解氧和碳源。由于温度无法控制,故只能采取优化溶解氧和碳源的运行方式。根据该污水处理厂1月—5月进水水质的统计结果,出水TN浓度基本稳定达到一级B标准,进水COD/TN值在2.87~12.69之间,平均值为4.96,基本可以满足达到一级B标准的碳源要求,但无法满足稳定达到一级A标准的碳源需求。因此,碳源是制约TN达到一级A标准的关键因素。尽管通过优化运行对出水水质有进一步提升的空间,但是,若不进行外碳源投加或增加后续深度脱氮的工程措施,出水水质很难稳定达到一级A标准。

溶解氧也是影响污水厂脱氮效果的重要参数。试验之前好氧段溶解氧维持在2 mg/L左右,出水氨氮平均值为0.59 mg/L,远低于一级A标准,好氧段内可能存在COD的过度氧化,使反硝化菌可用碳源更为缺乏。同时还有部分溶解氧会随着内回流进入缺氧段,不利于反硝化反应的进行。

2 提标升级技术思路

根据对该污水处理厂的问题诊断分析,其提标升级可以通过改变现有运行参数和投加外碳源的方式进行。改变现有运行参数包括调整内回流比和溶解氧浓度。首先考虑优化运行参数,进行内回流比的调节试验。为了给缺氧段反硝化过程提供更多的反应底物,将混合液回流比(内回流比)调整至300%,使得更多硝态氮随内回流进入缺氧段。随后进行溶解氧的调控,将好氧段溶解氧浓度适当调低,减少碳源的过度氧化,在保证硝化反应完全的前提下充分发挥进水碳源的作用,为反硝化菌提供良好的反应条件。

根据内回流比和溶解氧浓度对出水效果的影响,考虑在改变内回流比和溶解氧浓度的基础上,通过投加外碳源来增强生物脱氮效果。由于反硝化反应在缺氧段进行,所以将外碳源投加在缺氧段,且相

对于投加至厌氧段,效率更高,碳源投加量更少,节约成本。

2.1 运行参数优化调控方式

首先探究内回流比的改变对出水TN的影响,在有垃圾渗滤液进入的条件下进行为期4 d的试验,其中第1天保持原回流比,按照原有参数运行,随后于当晚22时将内回流比调整至300%。期间分别采集沉砂池和二沉池出水作为进出水水样进行测试。

随后探究溶解氧对出水TN的影响,在有垃圾渗滤液进入的条件下进行试验,为期1周,其中前2 d保持原曝气量,随后于第2天22时开始将曝气量逐渐调低。期间分别采集沉砂池和二沉池出水作为进出水水样进行测试。

2.2 外碳源投加方式

根据内回流比和溶解氧调控试验的结果,后续进行外碳源投加试验,考虑通过改变内回流比和溶解氧结合投加外碳源的方式,降低出水的TN浓度。进行碳源投加试验时,首先测定投加碳源的当量,并根据测定的碳源当量及需要降低的TN指标,按照污水厂运行经验进行碳源投加量的核算。研究中外碳源选择乙酸钠与葡萄糖,根据药剂纯度与COD当量的测算,分别确定乙酸钠与葡萄糖的实际日投加量。通过3组平行试验,得到乙酸钠和葡萄糖的COD当量分别为0.464 gCOD/gNaAc和0.912 gCOD/g葡萄糖。

根据现状出水水质与一级A标准要求,并考虑到污水厂的进水水质波动,需削减的TN量约为7 mg/L。根据污水厂运行经验核算,以反硝化1 mg的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 要消耗5 mg BOD_5 计,则 BOD_5 投补量为35~50 mg/L,即COD投补量为45.5~65 mg/L,处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (单组)的COD日投补量为455~650 kg。则1 L污水需要投加的乙酸钠量为 $7 \times 6.5/0.464 = 98 \text{ mg}$,需要投加的葡萄糖量为 $7 \times 10.6/0.912 = 81 \text{ mg}$ 。为便于投加,取乙酸钠和葡萄糖总的投加量分别为1 950和1 650 kg,则1.3倍的投加量为2 550和2 100 kg。

在调整内回流比至300%、维持好氧段溶解氧在1.5 mg/L左右的条件下,分别采用乙酸钠和葡萄糖作为碳源,采用半连续投加方式(每晚22:00—次日10:00不间断均匀投加)投加至生化系统缺氧段,进行1.0倍和1.3倍投加量试验,背景值试验为期

3 d, 每种碳源和投加量试验均为 2 d, 采集沉砂池和二沉池出水作为进出水水样进行测试, 将得到的结果与背景值进行比较, 从而分析碳源投加效果。

2.3 分析项目及测定方法

MLVSS、MLSS 采用重量法测定; DO 采用 HACH 溶解氧仪在污水厂进行测定; COD、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在污水厂和学校实验室分别进行测试, 其中在污水厂均采用国标方法进行测定, 在实验室则分别采用 HACH COD 分析仪、碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法及纳氏试剂比色法进行测定, 取污水厂和实验室测试结果的平均值进行分析。

3 结果与讨论

3.1 内回流比对出水 TN 的影响

在提升了内回流比之后, 由于有机负荷的降低, 生化池好氧段溶解氧逐渐升高, 约为 2.5 mg/L。TN 去除率由调控前的 60.8% 提升至 66.3%, 出水 TN 浓度略微下降, 但仍在一级 B 标准附近波动 (见图 1), 分析原因可能是由于进水中的碳源浓度较低, 无法满足反硝化脱氮对碳源的需求。故后续试验考虑通过降低好氧段溶解氧与改变内回流比相结合, 使反硝化菌能够更高效地利用原水中的碳源。

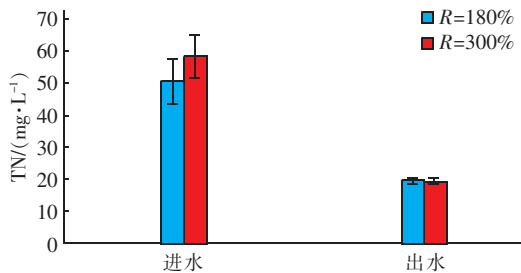


图1 试验期间进出水 TN 浓度与内回流比的关系

Fig. 1 Influence of internal reflux ratio on influent and effluent TN concentration

3.2 溶解氧浓度对出水 TN 的影响

由于增加内回流比会使系统溶解氧迅速升高, 需要降低溶解氧来避免好氧段产生无效氧化, 故结合内回流比的调节进行了溶解氧的调控试验: 将曝气量逐渐减小, 使好氧段溶解氧由最高的 2.5 mg/L 逐渐降低, 直到出水总氮出现较为明显的反弹。溶解氧的计量采用好氧段不同点位取多个值用差分法求加权平均的方法。结果见图 2。可知, 随着好氧段溶解氧由 2.5 mg/L 逐渐降低至 1.0 mg/L, 出水总氮先下降, 随后出现了小幅的反弹, 但基本能稳定在一级 B 标准限值以内。TN 去除率在溶解氧为

1.5 mg/L 时达到最高值, 随后又出现了小幅下降。分析原因可能是由于降低了溶解氧, 有机物在合适的溶解氧条件下被合理分配, 减少了碳源在好氧段被异养菌的氧化, 为反硝化提供了更多的电子供体, 从而提高了反硝化效果。但当溶解氧浓度过低时会导致硝化反应不完全, 氨氮无法完全氧化为硝态氮, 导致对氨氮和总氮的去除效果均受到影响。综上所述, 当好氧段溶解氧为 1.5 mg/L 时更有利于总氮的去除, 但出水值仍无法稳定达到一级 A 标准。

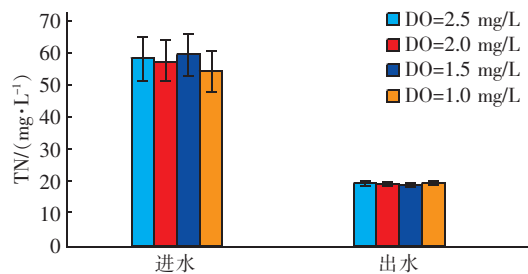


图2 进出水 TN 浓度与溶解氧的关系

Fig. 2 Influence of dissolved oxygen on influent and effluent TN concentration

3.3 碳源投加量及种类对出水 TN 的影响

在外碳源投加试验中, 比较了碳源投加量和碳源种类的影响。首先在内回流比为 300%、好氧段溶解氧为 1.5 mg/L 的条件下测定沉砂池和二沉池的出水水质并将其作为背景值, 为期 3 d; 随后于第 3 日晚 22 时开始投加碳源, 总共验证了 4 种不同投加量和碳源种类的组合, 为期共 8 d。试验期间, 不同条件下的出水 TN 和 COD 浓度如图 3 所示。可以看出, 在投加乙酸钠之后, 出水 TN 浓度并未出现明显的下降, 原因可能是整个系统具有一定的水力停留时间, 投加的碳源无法立即产生效果, 且在碳源投加初期, 碳源主要起到改善污泥活性的作用, 在此期间 SV_{30} 由接近 50% 下降至 30%, 沉降性能有了明显改善, 外加碳源并未对反硝化产生较大的影响, 故对出水 TN 浓度及其去除率未产生较为明显的优化。随后在第 5 天的晚上将乙酸钠的投加量由所需投加量增加至 1.3 倍的所需投加量, 结果出水 TN 出现明显下降, 最低可以达到 3.25 mg/L, TN 去除率已接近 90%, 证明了结合内回流比和溶解氧的调节进行乙酸钠的投加效果极佳。而在整个试验过程中, 出水 COD 并没有出现明显的升高, 表明缺氧段投加的外碳源能够被微生物充分利用, 故出水 COD 仍然能够保持在较低的水平。

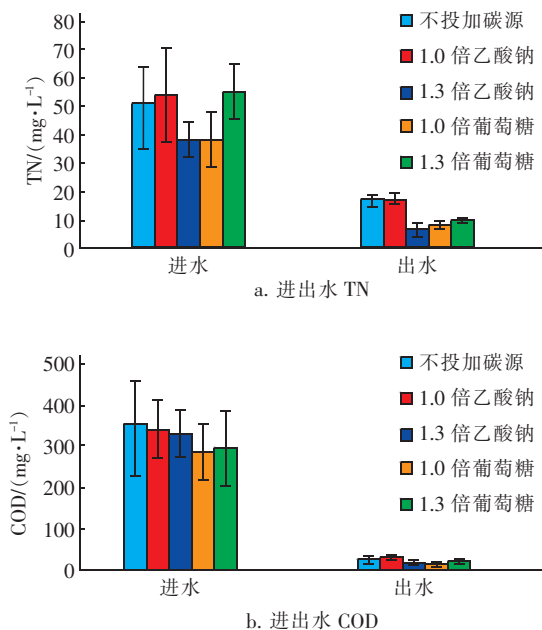


图3 进出水 TN 和 COD 浓度与投加外碳源的关系

Fig.3 Influence of dosing external carbon source on removal of TN and COD

为了验证微生物对不同种类碳源的利用效率,之后又进行了 1.0 倍和 1.3 倍葡萄糖投加量试验,出水 TN 有小幅的上升,维持在 9 mg/L 左右,仍然能够稳定达到一级 A 标准。与投加相同 COD 浓度的乙酸钠相比,出水 TN 有了明显的降低,其原因可能是由于在投加乙酸钠时,微生物处于适应期,投加的乙酸钠主要用于改善微生物的活性而没有完全被用于反硝化,而投加葡萄糖时,反硝化菌已经具有较高的活性,投加的葡萄糖可以被充分利用,所以按照正常核算投加量投加时,投加葡萄糖的出水水质要明显优于乙酸钠的。投加 2 d 后继续增加葡萄糖投加量至 1.3 倍投加量,发现出水 TN 并没有如投加乙酸钠时出现明显的下降,而是仍然稳定在 9~10 mg/L 之间,但由于进水水质波动,总氮去除率出现了较为明显的提升,且出水 COD 未出现明显升高。分析原因为,微生物对于葡萄糖的分解过程相比于乙酸钠更为复杂,故在选用葡萄糖作为外碳源时,其利用效率并没有乙酸钠高,但也能微生物提供充足的有机物,提升生物脱氮的效果。故可以初步得出结论:乙酸钠作为外加碳源时,反硝化菌对其利用效率更高,反硝化效果更佳。

根据碳源投加试验的结果,可初步计算出投加外碳源的运行费用。试验期间该批次乙酸钠的单价

为 3 050 元/t,葡萄糖的单价为 3 500 元/t。根据乙酸钠投加量为 2 550 kg/d 的试验结果进行分析,以背景出水为 17.17 mg/L 作基准,出水 TN 降至 6.76 mg/L,去除量提升了约 10.4 mg/L,则每去除 1 mg/L 的 TN,需投加 10.65 mg/L 乙酸钠,共需要投加 213 kg 乙酸钠,约为 650 元;根据葡萄糖投加量为 1 650 kg/d 的试验结果进行分析,以背景出水浓度为 17.17 mg/L 作基准,出水 TN 降至 7.98 mg/L,提升了 9.19 mg/L,则每去除 1 mg/L 的 TN,需投加 7.81 mg/L 葡萄糖,共需要投加 156 kg 葡萄糖,约为 550 元。由于两种碳源价格相差不大,但乙酸钠作为碳源的效果明显优于葡萄糖,故在运行时建议选用乙酸钠作为外加碳源。

4 结论

① 在内回流比为 300%、溶解氧为 1.5 mg/L 时,在生化池缺氧区适量投加外碳源,对污水中的 TN 具有明显的去除效果。

② 适当地调低溶解氧浓度,可以减少有机物的过度氧化,节省污水中碳源,给反硝化菌提供更多的有机物,一定程度上有利于提升反硝化效率。

③ 反硝化菌对乙酸钠的利用率高于葡萄糖,投加乙酸钠时 TN 去除效果更好。投加外碳源后,生化系统具有一定的响应期,往往需要一段时间后才能对水质指标产生明显的效果。外碳源的投加量需要根据不同污水厂的实际情况经试验后确定。

参考文献:

- [1] 郑兴灿. 城镇污水处理厂一级 A 稳定达标技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
Zheng Xingcan. The Technologies for Urban Wastewater Treatment Plants to Reach First Level A Standard Stably [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2015 (in Chinese).
- [2] 滕荣国,庄新民. 城市污水厂减少外碳源投加量的研究[J]. 中国给水排水,2013,29(21):65-68.
Teng Rongguo, Zhuang Xinmin. Studies on reducing the dosage of external carbon sources in urban wastewater treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21):65-68(in Chinese).
- [3] 吉芳英,金展,郭倩,等. 溶解氧对低碳源污水一体化处理工艺脱氮除磷的影响[J]. 给水排水,2014,40(5):129-133.
Ji Fangying, Jin Zhan, Guo Qian, et al. Influence of

- dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal in integration treatment process of low-carbon source sewage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40 (5): 129 - 133 (in Chinese).
- [4] 王伟,王淑莹,孙亚男,等. 分段进水 A/O 工艺外碳源投加控制策略的比较研究[J]. 环境科学, 2009, 30 (3): 792 - 797.
- Wang Wei, Wang Shuying, Sun Yanan, *et al.* External carbon addition control strategies of step-feed A/O process [J]. Environmental Science, 2009, 30 (3): 792 - 797 (in Chinese).
- [5] Yuan Z, Bogaert H, Vanrolleghem P, *et al.* Control of external carbon addition to predenitrifying systems [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123 (11): 1080 - 1086.
- [6] Olsson G, Nielsen M, Yuan Z, *et al.* Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems [M]. London: IWA Publishing, 2005.
- [7] 马勇,彭永臻,王淑莹. 前置反硝化工艺外碳源投加串级控制策略的研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24 (2): 214 - 218.
- Ma Yong, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Study on external carbon source addition cascade control strategy of pre-denitrification process [J]. China Environmental Science, 2004, 24 (2): 214 - 218 (in Chinese).
- [8] 马勇,彭永臻. 城市污水处理系统运行及过程控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- Ma Yong, Peng Yongzhen. Urban Wastewater Treatment System Operation and Process Control [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese).



作者简介:王逸飞(1993 -),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程。

E-mail: 645960036@qq.com

收稿日期: 2019 - 01 - 05

· 会讯 ·

“《中国给水排水》第三届污水处理厂提标改造高级研讨会”

定于8月27日—30日在宁波召开

在《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)以及住房和城乡建设部、生态环境部、发展改革委联合印发的《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019年—2021年)》等政策实施的大背景下,全国重点区域及重点流域均对污水处理提出了更高的要求,污水处理厂提标增效成为业内关注的热点。为此,《中国给水排水》杂志社有限公司联合青岛思普润水处理股份有限公司、赛莱默(中国)有限公司、麦斯特环境科技股份有限公司、北京沃尔德斯水务科技有限公司、中国市政工程华北设计研究总院有限公司、上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司等单位共同举办“第三届污水处理厂提标改造高级研讨会”,届时将邀请住房和城乡建设部、中国土木工程学会、中国城镇供水排水协会等有关单位领导,以及全国排水行业设计、科研、运营单位和建设单位的专家、学者、管理人员等,解读行业政策、分享污水处理厂提标改造典型案例、研讨未来技术发展方向,为污水处理新技术、新工艺、新设备搭建交流和展示的平台。本次会议以会场技术交流为主(60多个专家报告),以现场参观典型工程(宁波市城市排水有限公司新周污水处理厂等)为辅。会议日程安排可通过关注公众号“中国给水排水”(微信号:cnww1985)获取。

时 间: 2019年8月27日—30日(27日报到, 28日—29日会场交流, 30日参观)

地 点: 宁波泛太平洋大酒店(宁波市鄞州区民安东路99号)

负责人: 王领全, 13752275003/022-27835639, wanglingquan88@163.com

(本刊编辑部)