

述评与讨论

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 20. 001

# 精确曝气实现污水处理厂节能减排:计算方法与控制策略

施汉昌<sup>1,2</sup>, 汪秋婉<sup>2,3,4</sup>, 张明凯<sup>2</sup>, 柯细勇<sup>2</sup>

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 京津冀国家技术创新中心 环境与资源研究所, 北京 100094; 3. 北京大学 工学院, 北京 100871; 4. 北京百度网讯科技有限公司, 北京 100085)

**摘 要:** 介绍了精确曝气的技术原理及其在污水处理中的计算方法与控制策略。通过技术应用的节能降碳效果,指明精确曝气是污水处理厂实现节能减排的重要技术之一,其研究内容包括技术原理、计算方法和控制策略。采用模型软件对污水处理工艺进行模拟,确定不同条件下较优的运行条件,并根据优化的运行条件进行供气量和溶解氧浓度控制值的计算。在实际操作中,通过前馈加反馈的控制策略可实现精确曝气。前馈控制根据进水水质和水量计算出理论供氧量,以及参考鼓风机负载或调频等条件调节供气量。反馈控制则根据实际溶解氧浓度与设定值之间的偏差进行调整,使供气量满足实际需求并保持稳定。在实施控制时,采用溶解氧浓度和气体流量的串级控制方式,即根据溶解氧浓度来调节阀门的开度,同时根据气体流量计的流量趋势对风机进行预调节,以减小供气量的波动。研究表明,采用精确曝气技术,案例污水处理厂去除单位污染物(以 $\text{COD}+\text{NH}_3\text{-N}$ 计)的鼓风曝气平均电耗从 $0.418\ 7\ \text{kW}\cdot\text{h/kg}$ 降至 $0.384\ 1\ \text{kW}\cdot\text{h/kg}$ ,实现节能 $8.2\%$ ,相当于减碳 $431\ \text{kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。同时,内外回流液的溶解氧浓度从 $2.5\ \text{mg/L}$ 降至 $0.87\ \text{mg/L}$ ,缺氧区和厌氧区碳源(COD)消耗减少 $489\ \text{kg/d}$ 。以乙酸钠为例,平均减碳 $350\ \text{kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。综合考虑节能和降耗两方面,每年可实现减碳 $285.5\ \text{t}$ 。

**关键词:** 精确曝气; 污泥负荷; 溶解氧; 脱氮除磷; 污水处理厂; 碳减排

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)20-0001-06

## Precise Aeration for the Energy Conservation and Carbon Reduction of Wastewater Treatment Plant: Optimization Algorithm and Control Strategy

SHI Han-chang<sup>1,2</sup>, WANG Qiu-wan<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Ming-kai<sup>2</sup>, KE Xi-yong<sup>2</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Environment and Resources, China National Center for Technological Innovation of Beijing-Tianjin-Hebei Region, Beijing 100094, China; 3. School of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Beijing Baidu Netcom Science Technology Co. Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** This paper outlines the technical principles of precise aeration and its process optimization algorithm and the control strategy in wastewater treatment. Through its application to prove the effect of energy conservation and carbon reduction, it indicates that precise aeration is one of the important technologies for wastewater treatment plants to achieve energy conservation and carbon reduction. The research includes the principles of technology, calculation methods, and control strategies. Model software is used to simulate the process of wastewater treatment plants, to determine better operating conditions under different scenarios, and to calculate the air supply and dissolved oxygen

concentration based on the optimized operating conditions. In practice, the precise aeration is realized by the control strategy of feedforward and feedback. Feedforward control includes calculating the theoretical oxygen supply according to the flow and quality of influent and adjusting the air supply concerning conditions such as blower load or frequency regulation. The feedback control is adjusted according to the deviation between the actual dissolved oxygen concentration and the setting value, ensuring that the air supply meets the actual demand and remains stable. During the implementation of control, the cascade control of dissolved oxygen concentration and air flow is adopted. This involves adjusting the opening of the valve according to the dissolved oxygen concentration and pre-adjusting the blower according to the flow trend of the air flow meter. This cascade control can reduce the fluctuation of air supply. The results show that the average power consumption of blast aeration for the removal of unit pollutants in the wastewater treatment plant is reduced from  $0.418\ 7\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}(\text{COD}+\text{NH}_3\text{-N})$  to  $0.384\ 1\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}(\text{COD}+\text{NH}_3\text{-N})$  by applying precise aeration technology. This results in an 8.2% energy savings and a 431  $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$  carbon reduction. At the same time, the dissolved oxygen concentration of the internal and external return sludge was reduced from 2.5 mg/L to 0.87 mg/L, potentially reducing the consumption of 489 kg carbon source (COD) in anoxic and anaerobic areas every day. Taking sodium acetate as an example, the average carbon reduction is 350  $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{d}$ . Considering energy conservation and consumption reduction, 285.5 tons of carbon can be reduced every year with this technology.

**Key words:** precise aeration; sludge load; dissolved oxygen; nitrogen and phosphorus removal; wastewater treatment plant (WWTP); carbon reduction

随着我国“碳达峰、碳中和”温室气体减排战略的实施,城市污水厂的碳减排措施也提上了日程。污水厂的温室气体排放主要分为直接碳排放和间接碳排放,直接碳排放是指污水处理过程中排放的甲烷、氧化亚氮和燃煤及运输产生的二氧化碳<sup>[1]</sup>,间接碳排放是指污水处理过程中消耗的电能和化学药剂在其生产过程中形成的碳排放。一般城市污水厂是直接碳排放占总排放量的45.9%,间接碳排放占总排放量的53.8%,其他占0.3%。在污水厂的能源消耗中,鼓风曝气的能耗占全厂能耗的50%以上,是节能的重点环节。污水生物处理中的除碳和脱氮都是氧化还原反应,与系统的供氧条件密切相关。因此,实现供氧系统的精确控制对于污水厂的节能和碳减排至关重要。20世纪70年代末国际水协提倡在污水厂实施仪器化-控制-自动化(ICA)技术,其中的重要内容之一就是鼓风曝气的自动控制。欧美国家的技术人员经过多年研究提出了基于溶解氧(DO)浓度的曝气控制方法和基于呼吸速率(OUR)的曝气控制方法,其中基于DO控制曝气的方法逐步得到广泛应用。2000年以来,我国城市污水厂得到快速建设与发展,随着污水排放标准的

提高和节能降耗的需求,污水处理过程控制技术也逐步得到推广,特别是作为节能降耗的主要技术之一,精确曝气技术在一些污水厂得到了应用。

## 1 技术原理

污水生物处理是通过微生物的生化反应去除污水中的碳源有机物和氮磷等营养物质,达到保护水生态环境的目标。精确曝气就是按照微生物氧化有机物和氨氮的需求供氧,随着进水水质和水量的变化对供气量进行调整,保证出水水质达到排放标准的同时尽可能降低供气电耗。精确是一个相对的概念,实际精确曝气的供氧量是一个低于稳定供氧量(即常量曝气),又高于理论需氧量(理论计算)的值。从理论上讲,如果供给微生物的氧量刚好等于微生物降解有机物和氨氮需要的氧量,则水中的溶解氧应为零,即没有多余的溶解氧。但是氧进入微生物反应需要化学推动力(浓度差),如果浓度差非常小,反应就会进行得很慢。因此水中应保持一定的溶解氧浓度(宜为 $1.5\sim 2.0\ \text{mg}/\text{L}$ ),以保证污水处理所需的反应速度。为保证污水处理厂的运行安全,通常将溶解氧控制在 $1.5\sim 2.5\ \text{mg}/\text{L}$ ,若再提高溶解氧浓度则对提高反应速度的作用不大,而

且还会造成大量的空气从水中逸出,浪费供气,并增加能耗。由于进水水质和水量的变化,进水负荷较高时需加大供气量,进水负荷降低时需减小供气量,该供气模式比稳定气量供气方式节省气量,因此,精确曝气是切实可行且行之有效的技术。

## 2 控制策略

污水处理厂精确曝气控制时建议采用前馈加反馈的控制策略。前馈包括两方面:①给出一个计算的供气量作为供气控制的参考值,通过控制系统调节鼓风机的风量。②依据进水污泥负荷给出溶解氧控制的参考值,然后通过反馈控制来调节供气阀门,保证溶解氧浓度值尽量处于其控制目标值附近。在实施控制时,采用溶解氧浓度和气体流量串级控制方式,即,根据溶解氧浓度调节阀门的开度,同时根据气体流量计的流量趋势对风机进行预调节。该种串级控制模式可以减小供气量的波动,其原理见图1。采用前馈控制时应注意从进水监测的时刻到好氧池存在时间上的滞后,在调节参数(如溶解氧)时需考虑这个滞后时间。

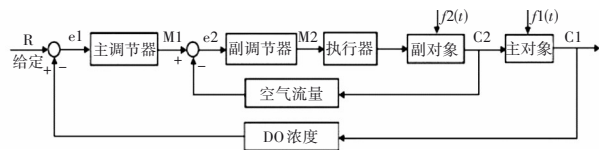


图1 曝气系统的串级控制原理

Fig.1 Cascade control principle for aeration system

## 3 供气量和溶解氧浓度控制值的计算

### 3.1 运行条件的模拟

由于污水处理厂的进水水质和水量不断变化,因此,在有条件的情况下采用污水处理工艺模拟软件(如GPS-X软件)进行模拟,以确定不同工况下较优的运行条件。结合优化的运行条件进行供气量和溶解氧浓度的计算效果会更好<sup>[2]</sup>。如果没有条件进行模拟计算,也可以直接根据工艺参数计算。

采用模型软件对污水处理厂的工艺进行模拟,首先应建立一个处理工艺的概化模型,并依据厌氧池、缺氧池和好氧池的容积和水力停留时间将其划分成多个连续搅拌池(CSTR)反应器的串联形式,对每个CSTR反应器设定物理模型参数和反应条件<sup>[3]</sup>。图2是某污水处理工艺的概化模型,厌氧池的停留时间较短,用一个CSTR反应器表达。缺氧池停留时间较长,用2个串联CSTR反应器表达。好氧池水力停留时间最长,用4个串联CSTR反应器表达。

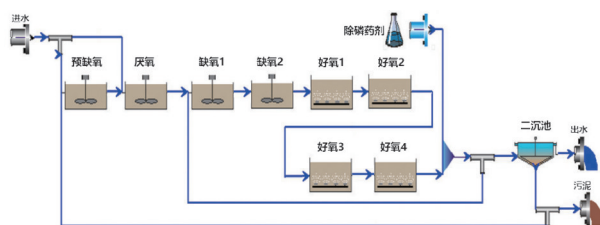


图2 污水处理工艺的概化模型

Fig.2 Generalized model of wastewater treatment process

在构建好概化模型后,利用污水处理厂的历史数据对模型进行校准,当模拟数据与历史数据基本吻合后,即可认为该模型达到了适用程度。然后输入进水水量和水质等数据进行模拟,通过变换多组运行条件并比较其模拟结果,可得出优化的运行条件。图3为模拟AAO工艺的缺氧段和好氧段比例调整对脱氮除磷出水水质的影响。

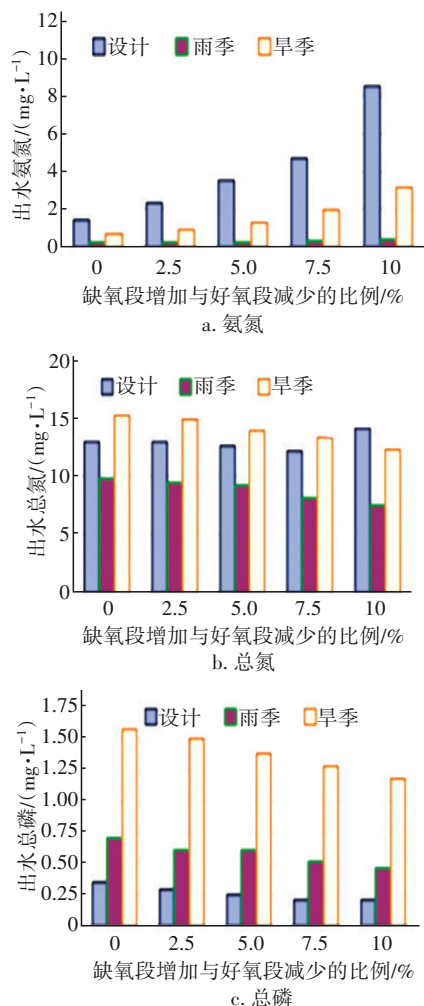


图3 缺氧段与好氧段容积变化对脱氮除磷效果的影响

Fig.3 Effect of the volume variation between anoxic and aerobic sections on the nitrogen and phosphorus removal



图3中缺氧段增加与好氧段减少的比例如为5%表示有5%的好氧段停止曝气转换成缺氧段(位置在好氧段的前部)。当在好氧段的10%范围内对曝气进行调整时,随着好氧区的减少,缺氧区增加,出水总氮和总磷浓度都呈下降趋势。减少曝气会使氨氮浓度升高,特别是在旱季升高比较明显,但可控制在不超过排放标准要求的浓度范围。由此可以确定通过控制供氧提高脱氮除磷效果的策略是可行的。

### 3.2 供气量的计算

污水处理厂的鼓风机曝气主要是为微生物的碳氧化和硝化过程提供氧气,因此与进水的流量和污染物浓度相关。

设某污水处理厂的设计处理能力为 $Q$ ,日进水量为 $Q_{li}$ ,计算好氧池的供气量。污水处理装置的进水COD为 $C_{liCOD}$ 、BOD<sub>5</sub>为 $C_{liBOD}$ 、SS为 $C_{liSS}$ 、氨氮为 $C_{liNH}$ 、总氮为 $C_{liTN}$ 、总磷浓度为 $C_{liTP}$ 。处理出水水质要求COD为 $C_{e4COD}$ 、BOD<sub>5</sub>为 $C_{e4BOD}$ 、氨氮为 $C_{e4NH}$ 、总氮为 $C_{e4TN}$ 。这里的出水指标值可以是控制目标值,不要求是实际出水浓度。平均需氧量(OU)计算公式如下:

$$OU = OU_{\text{碳}} + OU_{\text{氨氮}} = C_{\text{BOD当量}} \times Q' \times \Delta BOD / 1000 + C_{\text{NH}_3 - \text{N当量}} \times Q' \times \Delta \text{NH}_3 - \text{N} / 1000 = 1.2 \times Q_{li} \times (C_{liBOD} - C_{e4BOD}) / 1000 + 4.75 \times Q_{li} \times (C_{liNH} - C_{e4NH}) / 1000 \quad (1)$$

式中: $OU_{\text{碳}}$ 为碳氧化需氧量; $OU_{\text{氨氮}}$ 为氨氮硝化需氧量; $Q'$ 为污水日处理量; $C_{\text{BOD当量}}$ 为BOD氧化当量; $C_{\text{NH}_3 - \text{N当量}}$ 为 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 氧化当量; $\Delta BOD$ 为去除的BOD浓度; $\Delta \text{NH}_3 - \text{N}$ 为去除的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度。

鉴于BOD数据不能实时获得,可将式(1)中的BOD浓度换成COD浓度。对于生活污水,进水BOD/COD可取0.6,出水BOD/COD可取0.15。式(1)变为:

$$OU = 1.2 \times Q_{li} \times (0.6 \times C_{liCOD} - 0.15 \times C_{e4COD}) / 1000 + 4.75 \times Q_{li} \times (C_{liNH} - C_{e4NH}) / 1000 \quad (2)$$

由于每还原1 kg  $\text{NO}_3$ 需要2.86 kgBOD,因此利用污水中的碳源反硝化减少氧的消耗量( $OU_n$ )为:

$$OU_n = 2.86 \times Q_{li} \times (C_{liTN} - C_{e4TN}) / 1000 \quad (3)$$

实际需氧量( $OU_p$ )为:

$$OU_p = OU - OU_n \quad (4)$$

考虑曝气系统的氧利用率为20%,空气中氧含

量为21%,空气密度为1.29 g/L,实际供气量( $Q_{\text{气}}$ )为:

$$Q_{\text{气}} = k_1 \times OU_p / (0.21 \times 0.2 \times 1.29) \quad (5)$$

式中: $k_1$ 为曝气量调节系数,取值范围1.0~1.5,其中包含了不同污水处理厂曝气系统和鼓风机差异的影响和所取的安全系数,可依据实际情况确定。

上述实际供气量随水量和水质的变化而变化,是依据微生物承载污染物的负荷进行供氧。由于进水的参数获取时间早于污水流至反应区的时间,该供气量用作鼓风机气量调节参考时需要设置一个滞后时间( $T_{\text{滞}}$ )。由于有内外回流的影响,这个滞后时间小于从进水处到好氧池中部的水力停留时间。滞后时间可表达为:

$$T_{\text{滞}} = \text{HRT} / (1 + r + R) \quad (6)$$

式中:HRT为污水处理系统的水力停留时间,h; $r$ 为内回流比,%; $R$ 为外回流比,%。

### 3.3 溶解氧控制值

活性污泥好氧池的溶解氧浓度可作为鼓风机曝气的反馈控制值。由于每日不同时间的进水量和进水浓度的变化,微生物的需氧量不同。污水在处理系统中的停留时间也是变化的,例如在午后进水量的高峰期,污水在好氧池的反应时间可能是7 h,在凌晨进水量的低谷期,污水在好氧池的反应时间可能是12 h。因此,在进水量高峰期好氧池的溶解氧浓度控制值可以设得高一些,如2.0~2.5 mg/L,在进水量低谷期的溶解氧浓度控制值可以设得低一些,如1.0~1.5 mg/L。同样,当进水污染物浓度较高时,溶解氧浓度控制值需设得高一些,反之则设得低一些。综合考虑进水流量、进水污染物浓度和微生物的关系,可基于进水污泥负荷确定溶解氧浓度的控制值。例如,根据某污水处理厂的进水量、COD浓度和污泥浓度(MLSS)可计算得出进水污泥负荷为0.001~0.008 kgCOD/(kgMLSS·d)(见图4),将该范围分为4个区间,设定对应的溶解氧浓度控制值,具体见表1。

表1中的设定值只是提供一个参考,可以在控制室由运行负责人根据实际情况做出调整设定。

好氧池是处理工艺中污水停留时间最长的反应单元,如果设一个溶解氧监测点位,建议设在好氧池的中后部(约为好氧池长度的3/4处)。如果设

多个监测点可以设在好氧池的前端、中部和末端。一般前端需氧量大,溶解氧浓度会较低,中部的溶解氧浓度应较高(如 2.0 mg/L 以上),以加速氨氮的氧化,末端的溶解氧浓度应控制得较低(如 1.5 mg/L 以下),以避免内回流带到缺氧池的溶解氧消耗碳源。

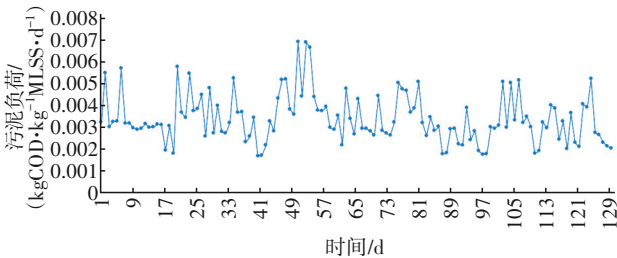


图 4 某污水处理厂的进水污泥负荷

Fig.4 Influent sludge load of a WWTP

表 1 某污水厂进水污泥负荷与溶解氧浓度控制值

Tab.1 Dissolved oxygen control values and influent sludge load of a WWTP

污泥负荷/(kgCOD·kg <sup>-1</sup> MLSS·d <sup>-1</sup> )	DO 浓度控制值/(mg·L <sup>-1</sup> )
0.006 ~ 0.008	2.5
0.003 ~ 0.005	2.0
0.001 5 ~ 0.002	1.5
0.001 ~ 0.001 4	1.0

反馈控制是控制阀门的开度,调整曝气量,保证好氧池的溶解氧浓度在控制值范围内。供气阀的调节可采用步进调节方法,根据气量将阀门的有效开度分成若干份,每次调节增加或减少一份,使溶解氧浓度逐步达到和保持在控制值。

对于不同的污水处理厂,可根据出水水质选择以 COD 污泥负荷或氨氮污泥负荷进行曝气控制。采用氨氮污泥负荷控制方式时,可参照上述方法。

#### 4 精确曝气的效果

对于污水厂的运行,精确曝气具有节能、降耗和碳减排三方面的效果。首先,通过精准的供气,在保证污水处理微生物需氧量的条件下,降低进水低负荷时段的过度供气,减少鼓风机的电耗,实现节能。其次,通过控制好氧池末端的溶解氧浓度,降低内回流和外回流带入缺氧池和厌氧池的溶解氧浓度,保证缺氧池和厌氧池处于良好的氧化还原状态,降低溶解氧消耗的碳源,节省反硝化碳源药剂的投加量。通过节电和降低药剂消耗可减少污水处理厂的间接碳排放量,保持缺氧池和厌氧池处

于良好的氧化还原状态可以减少污水厂的直接碳排放量(氧化亚氮和甲烷气体)。以某污水厂为例,探究其采用精确曝气后的节能减碳效果。

该案例污水厂处理能力为 10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,进、出水水质平均浓度与运行参数分别见表 2、3。

表 2 案例污水厂的进、出水水质平均浓度

Tab.2 Average concentration of influent and effluent indicators in the case WWTP mg·L<sup>-1</sup>

项目	COD	总氮	氨氮
进水	140.39	22.83	17.78
出水	12.06	6.15	0.13

注: 出水浓度为实施精确曝气后的浓度。

表 3 案例污水厂的运行参数

Tab.3 Operating parameters of the case WWTP mg·L<sup>-1</sup>

运行参数	污泥浓度	DO <sub>1</sub>	DO <sub>2</sub>	DO <sub>3</sub>
数值	4 226	1.08	1.59	0.87

注: DO<sub>1</sub>为好氧池中段的溶解氧浓度;DO<sub>2</sub>为好氧池后段的溶解氧浓度;DO<sub>3</sub>为好氧池末端的溶解氧浓度。

污水厂的首要目标是处理出水达标排放,在实施精确曝气前后处理出水的水质都能够达到排放标准。采用精确曝气后污水厂的出水水质优于一级 A 排放标准。图 5 提供了该污水厂运行时的计算风量、实际风量、控制溶解氧值和实测溶解氧值。

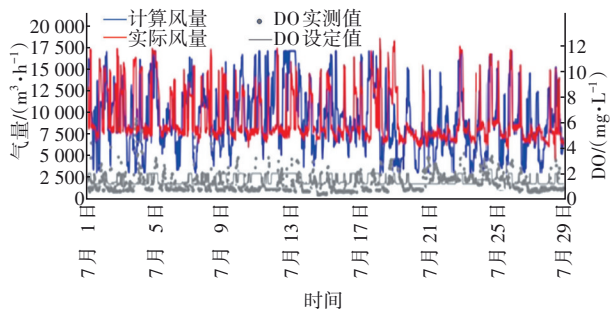


图 5 案例污水厂的供气量与 DO 控制情况

Fig.5 Air supply and DO control status of the case WWTP

图 5 表明,实际供气量与计算供气量基本吻合,实现了良好的前馈控制,好氧池的溶解氧浓度分布合理,末端实现了低氧状态,有效降低了内外回流带入缺氧池和厌氧池的溶解氧量。考虑到鼓风机的安全运行,为避免阀门前压力过高引起风机喘振,设置了最低安全风量。因此在有些时段虽然计算的供气量可以更低,但实际供气量按安全风量的限值运行。

在实施精确曝气控制前,该污水厂的运行采用人工远程控制,即由中控室的值班人员依据经验对曝气量进行调节控制,一般技术人员一天也就是做几次调整,所以不能及时根据进水水质的变化调整曝气量。该污水厂采用人工远程控制时去除单位污染物(以 $\text{COD}+\text{NH}_3\text{-N}$ 计,下同)的鼓风曝气平均电耗为 $0.4187\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$ ,实施精确曝气控制后去除单位污染物的鼓风曝气平均电耗为 $0.3841\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$ ,两者相比实现节能8.2%。参考《城镇污水处理厂运营质量评价标准》(CJJ/T 228—2014),与一般污水厂去除单位污染物的鼓风曝气平均电耗水平( $0.6\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$ )相比,可实现节能36%。内外回流液的溶解氧浓度按一般污水厂好氧池末端的 $2.5\text{ mg/L}$ 降到 $0.87\text{ mg/L}$ 计算,内回流比取200%,外回流比取100%,则缺氧区和厌氧区碳源(COD)消耗可减少 $489\text{ kg/d}$ 。

污水处理中碳排放因子参考生态环境部发布的《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》,以华中地区为例,电能的碳排放因子为 $0.8587\text{ kgCO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,则该污水厂去除单位污染物(以 $\text{COD}+\text{NH}_3\text{-N}$ 计)的平均电耗降低8.2%。折算成碳减排量为 $431\text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ ,相当于每年减碳 $157\text{ t}$ 。按一般污水厂的情况,节能36%折算成碳减排量为 $1892\text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ ,相当于每年减碳 $691\text{ t}$ 。污水处理中外加碳源葡萄糖、乙酸钠、乙酸、甲醇的化石源 $\text{CO}_2$ 当量的排放因子分别为 $0.98$ 、 $0.72$ 、 $0.98$ 、 $0.92\text{ kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 。以乙酸钠为例,每天平均减碳 $0.35\text{ t}$ ,相当于每年减碳 $128.5\text{ t}$ 。节能与降耗两方面相加每年可实现减碳 $285.5\text{ t}$ 。

## 5 结论

精确曝气是污水厂运行中实现节能减排的重要技术之一。通过对污水厂控制系统和曝气系统的技术改造,可使系统的供氧量尽量接近微生物氧化有机污染物和氨氮的需氧量,使污水厂在进水高负荷条件下保证处理出水达标排放,在进水低负荷条件下减少过度供气浪费的电能。同时对曝气量的控制有助于保证厌氧区和缺氧区良好的氧化还原状态,减少回流溶解氧对碳源的消耗。通过降低

运行的电耗和药耗,可以促进污水厂实现碳减排的目标。

## 参考文献:

- [1] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水, 2017, 43(3): 1-3, 73.  
WANG Hongchen. Carbon emission reduction path and potential of China's urban wastewater treatment industry [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(3): 1-3, 73 (in Chinese).
- [2] 李冰, 邱勇, 田宇心, 等. 面向污水处理厂提标改造的效能测试与模型模拟实践[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 93-98.  
LI Bing, QIU Yong, TIAN Yuxin, et al. Performance evaluation and scenario simulation for process retrofitting of wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 93-98 (in Chinese).
- [3] 施汉昌, 邱勇. 污水生物处理的数学模型与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 181-183.  
SHI Hanchang, QIU Yong. Modeling and Application for Biological Wastewater Treatment [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 181-183 (in Chinese).

**作者简介:**施汉昌(1950—),男,上海人,博士,教授,京津冀国家技术创新中心环境与资源研究所荣誉所长,2000年—2012年担任环境模拟与污染控制国家重点联合实验室主任,长期从事水污染控制的理论与技术研究,在污水生物处理高效反应器、大型城市污水处理厂的智能化运行与节能降耗、污水处理的过程模拟与控制技术和水环境监测生物传感器方面积累了大量的研究成果和经验。承担了国家重大专项、“863”计划、支撑计划和国家自然科学基金等多项重大科研课题。曾获多项省部级科技进步奖和技术发明奖,获中国环境科学学会环境科学优秀科技工作者和清华大学良师益友称号。

**E-mail:** hanchang@tsinghua.edu.cn

**收稿日期:** 2023-11-03

**修回日期:** 2024-03-08

(编辑: 丁彩娟)