



DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.06.007

述评与讨论

## 日本污水处理系统温室气体排放量计算及控制

贺凯<sup>1</sup>, 刘泽军<sup>1</sup>, 张钰旋<sup>1</sup>, 齐元峰<sup>2</sup>, 刘丙军<sup>1</sup>, 胡茂川<sup>1</sup>,  
林应超<sup>3</sup>, 刘博群<sup>4</sup>

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 3. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 4. 交通运输部天津水运工程科学研究所 水路交通环境保护技术实验室, 天津 300456)

**摘要:** 污水处理过程会产生大量以二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等为主的温室气体, 至2030年我国污水处理行业的温室气体排放量将达到全国温室气体排放量的2.95%, 因此污水处理系统的低碳化/零碳化运行对我国达成“碳达峰、碳中和”的战略目标具有重要意义。准确掌握和评估污水处理设施能耗和其温室气体排放行为, 是行之有效制定污水处理系统温室气体减排策略的坚实基础。为此, 以日本环境省发布的《污水处理系统全球变暖对策手册》为参考, 对污水处理厂各单元温室气体的产生来源和排放量计算方法及相应的减排措施进行了梳理和总结, 旨在为我国污水处理系统温室气体排放量核算和碳减排方面的研究及其应用提供参考。

**关键词:** 日本污水处理; 温室气体; 碳中和; 碳减排

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0032-07

## Greenhouse Gas Emission Calculation and Carbon Neutralization Measures in Japanese Wastewater Treatment System

HE Kai<sup>1</sup>, LIU Ze-jun<sup>1</sup>, ZHANG Yu-xuan<sup>1</sup>, QI Yuan-feng<sup>2</sup>, LIU Bing-jun<sup>1</sup>,  
HU Mao-chuan<sup>1</sup>, LIN Ying-chao<sup>3</sup>, LIU Bo-qun<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 4. Water Transportation Environmental Protection Technology Laboratory, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin 300456, China)

**Abstract:** A large number of greenhouse gases (GHG) are produced during wastewater treatment, mainly including CO<sub>2</sub>, methane, N<sub>2</sub>O, etc. By 2030, the GHG emissions from the wastewater treatment industry in China will reach 2.95% of the national greenhouse gas emissions. Achieving low-carbon or zero-carbon emission is of great significance to complete the carbon emission peak and carbon neutralization. In order to effectively reduce GHG emissions from wastewater treatment plants, it is

基金项目: 珠海市社会发展领域科技计划项目(2220004000355); 佛山市顺德区核心技术攻关重点项目(2230218004273); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023B1515040028)

通信作者: 林应超 E-mail: dei@nankai.edu.cn; 刘博群 E-mail: 13920853218@163.com

necessary to accurately evaluate the GHG emissions of each wastewater treatment facility. Referring to the *Handbook on Global Warming Countermeasures for Sewage Treatment Systems* issued by Ministry of the Environment of Japan, this paper introduced the sources of GHG, the emission calculation methods of GHG, and the emission reduction measures for each unit of wastewater treatment plants, which could provide suggestions for the calculation and emission reduction of GHG emissions from wastewater treatment plants in China.

**Key words:** Japanese wastewater treatment; greenhouse gas; carbon neutrality; carbon emissions reduction

为响应国家实现“碳达峰、碳中和”的绿色发展目标,国内各行业已推出相关的政策和规划。然而,面对工业化和城市化进程中温室气体排放量的增长,实现这一目标仍充满挑战。据估计,2030年我国污水处理行业的温室气体排放量将达到全国温室气体总排放量的2.95%<sup>[1-6]</sup>,存在巨大的碳减排空间。

从污水处理厂的全生命周期来看,温室气体的产生主要来自建设阶段、运行阶段和拆除阶段<sup>[7]</sup>,而运行阶段的排放量取决于污水处理厂所采用的工艺<sup>[8]</sup>。为有效减少污水处理过程中温室气体的排放量,需要准确掌握和评估污水处理设施的温室气体排放情况,方可制定行之有效的减排措施。然而,在污水处理过程温室气体排放量计算方面,还缺少各处理单元的碳足迹、影响因素、节能减排能力等详细参数,并且目前污水处理厂温室气体排放量的计算方式主要依据《省级温室气体清单编制指南》,排放系数沿用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《国家温室气体清单指南》。由于排放系数选择范围较大,故计算结果准确性有待提高<sup>[9-10]</sup>。受上述因素制约,我国在污水处理厂各处理单元温室气体排放量核算方面的研究需要进一步加强。

日本是关注全球气候变化并做出行动较早的国家之一,在应对温室气体排放方面具有相对成熟的方法。以日本环境省发布的《污水处理系统全球变暖对策手册》为基础,对污水处理厂各单元温室气体的来源和排放量计算方法及其减排措施进行梳理和总结,旨在为我国污水处理厂温室气体排放量的准确计算和减排研究及其应用提供一定的参考。

## 1 日本污水系统碳排放量的核算

污水处理厂运行过程中温室气体排放核算主要包括直接排放、间接排放以及污水处理过程中的温室气体核减等。在直接排放方面,日本现行碳排放量核算主要参考《污水处理系统全球变暖对策手册》,其中碳排放的核算方法主要采用排放系数法,该方法是IPCC提出的第一种碳排放估算方法。温室气体排放量计算公式如下:

$$E_{\text{ig}} = \sum E_{\text{ai}} = \sum (A_i \times \text{Ef}_i) \quad (1)$$

$$\text{TE} = \sum (E_{\text{vj}} \times \text{GW}_j) \quad (2)$$

式中: $E_{\text{ig}}$ 为温室气体排放量; $E_{\text{ai}}$ 为第*i*种类型活动的温室气体排放量; $A_i$ 为第*i*种类型的活动量; $\text{Ef}_i$ 为第*i*种活动对应的排放系数; $\text{TE}$ 为 $\text{CO}_2$ 总排放量; $t$ ; $E_{\text{vj}}$ 为第*j*种温室气体的排放量, $t$ ; $\text{GW}_j$ 为第*j*种温室气体的温室效应系数,时间周期为1年,甲烷温室效应系数为25,一氧化二氮为298。

### 1.1 污水处理设施运转过程中的直接排放量核算

产生甲烷和一氧化二氮的过程主要包括:污水处理过程<sup>[11-12]</sup>、污泥焚烧<sup>[13-15]</sup>和脱水污泥等的填埋或堆肥等。污水处理设施将进水中的有机物分解并转化为二氧化碳,根据社会碳中和的概念,有机物在形成过程中已经发生了固碳作用,因此该过程产生的二氧化碳不包含在温室气体排放量计算中。但是,甲烷、一氧化二氮需要根据活动分类进行计算。日本根据往年碳排放数据制定了相关核算模型与系数,污水处理过程中甲烷和一氧化二氮的排放量计算公式如下:

$$E_{\text{CH}_4} = \text{ST} \times \text{Ef}_{\text{CH}_4} \quad (3)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = \text{ST} \times \text{Ef}_{\text{N}_2\text{O}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{CH}_4}$ 为污水处理过程中甲烷排放量, $t/a$ ; $\text{ST}$ 为污水处理量, $\text{m}^3/a$ ; $\text{Ef}_{\text{CH}_4}$ 为污水处理过程中甲烷

排放系数,  $tCH_4/m^3$ ;  $E_{N_2O}$  为污水处理过程中一氧化二氮排放量,  $t/a$ ;  $E_{f_{N_2O}}$  为污水处理过程中一氧化二氮排放系数,  $tN_2O/m^3$ 。

污泥焚烧过程中的温室气体排放因污泥种类、燃烧条件等不同而具有较大的差异。在温室气体排放量计算规范中, 一氧化二氮的排放系数根据污泥的种类(投加絮凝剂的类型)、焚烧炉的形式和燃烧温度等不同而取不同值, 可以参照其排放系数, 也可以通过实测等确定该处理设施的排放系数。而甲烷由于燃烧条件的限制, 在实测中有少量被检出, 但其排放系数远小于一氧化二氮。污泥处理过

程中甲烷和一氧化二氮的排放量计算公式具体如下:

$$E_{1,CH_4} = Slu \times Ef_{1,CH_4} \quad (5)$$

$$E_{1,N_2O} = Slu \times Ef_{1,N_2O} \quad (6)$$

式中:  $E_{1,CH_4}$  为污泥处理过程中甲烷排放量,  $t/a$ ;  $Slu$  为污泥处理量,  $t/a$ ;  $E_{f_{1,CH_4}}$  为污泥处理过程中甲烷排放系数;  $tCH_4/t$ ,  $E_{1,N_2O}$  为污泥处理过程中一氧化二氮排放量,  $t/a$ ;  $E_{f_{1,N_2O}}$  为污泥处理过程中一氧化二氮排放系数,  $tN_2O/t$ 。

日本污水处理和污泥处理过程涉及的主要温室气体排放系数如表 1 所示。

表 1 污水处理和污泥处理产生的甲烷与一氧化二氮排放系数

Tab.1 Emission factors of  $CH_4$  and  $N_2O$  from sewage treatment and sludge treatment

分类	$CH_4$ 排放系数	$N_2O$ 排放系数	
污水处理	污水处理厂/( $t \cdot m^{-3}$ )	$8.80 \times 10^{-7}$	
	活性污泥法/( $t \cdot m^{-3}$ )	$1.42 \times 10^{-7}$	
	厌氧好氧活性污泥法(AO)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$2.92 \times 10^{-8}$	
	厌氧缺氧好氧法(A <sup>2</sup> O)和循环式硝化脱氮法/( $t \cdot m^{-3}$ )	$1.17 \times 10^{-8}$	
	循环式硝化脱氮膜分离活性污泥法/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.00 \times 10^{-10}$	
	粪便处理设施(厌氧消化处理)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.40 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{-9}$
	粪便处理设施(好氧消化处理)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.50 \times 10^{-6}$	$4.50 \times 10^{-9}$
	粪便处理设施(高负荷生物脱氮处理)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.00 \times 10^{-6}$	$2.90 \times 10^{-6}$
	粪便处理设施(生物脱氮处理)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.90 \times 10^{-6}$	$4.50 \times 10^{-9}$
	粪便处理设施(膜分离处理)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.50 \times 10^{-6}$	$2.40 \times 10^{-6}$
	粪便处理设施(其他处理)/( $t \cdot m^{-3}$ )	$5.50 \times 10^{-6}$	$4.50 \times 10^{-9}$
	净化槽(不含现有单独处理净化槽)/( $t \cdot a^{-1}$ )	$1.10 \times 10^{-3}$	$2.20 \times 10^{-5}$
	单独净化槽/( $t \cdot a^{-1}$ )	$2.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-5}$
	社区污水处理设施/( $t \cdot a^{-1}$ )	$2.00 \times 10^{-4}$	$3.90 \times 10^{-5}$
社区污水抽取过程/( $t \cdot a^{-1}$ )	$2.00 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-4}$	
污泥焚烧	高分子流化床(800 °C)/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)	$9.70 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-3}$
	高分子流化床(850 °C)/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)		$6.45 \times 10^{-4}$
	高分子多段炉/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)		$8.82 \times 10^{-4}$
	石灰系污泥/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)		$2.94 \times 10^{-4}$
	其他污泥/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)		$2.63 \times 10^{-4}$
	炭化固体燃料炉/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)		$3.12 \times 10^{-5}$
污泥填埋	厌氧/( $t \cdot t^{-1}$ 干泥)	$1.33 \times 10^{-1}$	
	好氧/( $t \cdot t^{-1}$ 干泥)	$6.67 \times 10^{-2}$	
	堆肥/( $t \cdot t^{-1}$ 湿泥)	$4.00 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-4}$

## 1.2 污水处理设施运转过程中的间接排放量核算

### 1.2.1 电力、燃料等消耗产生的温室气体排放量

污水处理过程中使用外部电力所产生的温室气体排放量主要通过发电厂发电时温室气体排放量进行核算。用电包括污水处理单元和泵站等所有设备以及行政大楼的用电等, 计算方法是基于 1

年内消耗的用电量乘以相应的排放系数。由于不同电力公司的排放系数不同, 因此耗电产生的温室气体排放量需依据电力公司的温室气体排放系数进行计算。各电力公司的温室气体排放系数具体取值参考日本环境省发布的《温室气体排放量算定报告公表制度》。使用外部电力的温室气体排放量

计算公式如下:

$$E_e = P \times Ef_{e,CO_2} \quad (7)$$

式中: $E_e$ 为外部电力温室气体排放量, $tCO_2/a$ ;  $P$ 为电使用量, $kW \cdot h/a$ ;  $Ef_{e,CO_2}$ 为用电碳排放系数, $tCO_2/(kW \cdot h)$ 。

能源消耗是指将重质原油等用于供热,将汽油等轻质原油用作汽车燃料,以及将重质原油等用作污水/污泥处理厂和泵站等发动机或者焚烧设施的辅助燃料等。根据 IPCC,使用生物质燃料所产生的二氧化碳不列入计算。计算方法是将每种燃料的使用量乘以二氧化碳的排放系数,其中污水设施运行过程中相关燃料消耗的温室气体排放系数参考《温室气体排放量算定报告公表制度》和《温室气体总排放量算定方法指导手册》;或者先利用碳的排放系数进行计算,然后换算为二氧化碳的排放量,计算公式如下:

$$E_f = F_e \times Ef_{f,CO_2} \times 44/12 \quad (8)$$

式中: $E_f$ 为燃料的温室气体排放量, $tCO_2/a$ ;  $F_e$ 为燃料使用量, $GJ/a$ ;  $Ef_{f,CO_2}$ 为燃料的碳排放系数, $tC/GJ$ ;  $44/12$ 为二氧化碳与碳的换算系数,即  $tCO_2/tC$ 。

日本环境省的统计结果显示,每消耗  $1 kW \cdot h$  的电网电力,其二氧化碳排放量达到  $0.55 kg$ ,每消耗  $1 MJ$  的柴油则释放  $0.0686 kg$  的二氧化碳,每消耗  $1 MJ$  的城市燃气将释放  $0.0499 kg$  的二氧化碳。

### 1.2.2 水耗和化学品消耗产生的温室气体排放量

自来水、工业用水和化学品的温室气体排放量因产品生产过程不同而有较大差异,计算公式如下:

$$E_{w,CO_2} = CW \times Ef_{w,CO_2} \quad (9)$$

$$E_{c,CO_2} = CM \times Ef_{c,CO_2} \quad (10)$$

式中: $E_{w,CO_2}$ 为污水处理过程中自来水、工业用水消耗而产生的二氧化碳排放量, $tCO_2/a$ ;  $CW$ 为污水处理过程中自来水、工业用水的消耗量, $m^3/a$ ;  $Ef_{w,CO_2}$ 为污水处理过程中使用自来水、工业用水的二氧化碳排放系数, $tCO_2/m^3$ ;  $E_{c,CO_2}$ 为污水处理过程中化学品消耗产生的二氧化碳排放量, $tCO_2/a$ ;  $CM$ 为污水处理过程中化学品的消耗量, $t/a$ ;  $Ef_{c,CO_2}$ 为使用化学品的二氧化碳排放系数, $tCO_2/t$ 。

与自来水、工业用水和化学品消耗有关的二氧化碳排放系数见表 2。

表 2 与自来水、工业用水和化学品消耗有关的二氧化碳的排放系数

Tab.2  $CO_2$  emission factors for the consumption of tap water, industrial water and chemicals

类型		排放系数(二氧化碳当量)
自来水/ $(tCO_2 \cdot m^{-3})$		0.002
工业用水/ $(tCO_2 \cdot m^{-3})$		0.000 11
化学 品	次氯酸钠/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.32
	液氯/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.9
	漂白粉(高级漂白粉)/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	3.5
	高分子絮凝剂(聚合物)/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	6.5
	表面活性剂/ $(tCO_2 \cdot 万日元^{-1})$	0.11
	氯化铁/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.32
	消石灰/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.45
	聚合氯化铝/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.41
	过氧化氢/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	3.9
	硫酸铝/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.36
	50% NaOH 溶液/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	1.2
	活性炭/ $(tCO_2 \cdot t^{-1})$	0.26

### 1.3 污水资源有效利用对温室气体的核减量计算

核减量计算主要通过统计有效利用污水资源(污水热能、污泥消化产生的沼气、污水再生以及污泥固体燃料)而减少的温室气体排放量。污水资源有效利用项目包括:清洁能源发电(利用沼气、太阳能、风力、水力等发电),提供固体燃料、沼气、再生水、焚烧产热以及污水热能等。例如,向其他能源系统提供沼气作为化石燃料的替代品时,可以考虑将供给外部的沼气产生热量相当于化石燃料的消耗量乘以排放系数后产生的温室气体量作为削减量进行计算;另外,再生水利用作为节约自来水资源的有效手段,可以替代自来水用作厕所用水,为估算减排效益,可以将该地区自来水的温室气体排放系数乘以再生水的使用量,从而计算出温室气体具体的减排量。

### 1.4 不同污水处理工艺温室气体估算公式

当估算工艺总体碳排放量时,根据指导手册中各地污水处理厂以往调研数据,按照污水处理厂各处理工艺的不同分类,对温室气体排放量和污水厂污水处理量进行多元回归分析,具体计算公式如表 3 所示。表 3 中使用每处理单位水量的温室气体排放量(产  $CO_2$  符号为  $E_a$ ,单位为  $tCO_2/10^3 m^3$ ;产  $N_2O$  和  $CH_4$  的总和符号为  $E_b$ ,单位为  $t-eqCO_2/10^3 m^3$ )的对数

作为因变量,并使用日平均处理水量(DT, m<sup>3</sup>/d)的对数、BOD<sub>5</sub>流入量(λ, mg/L)和BOD<sub>5</sub>流入比率(μ, 日平均处理水量/当前设施容量)作为自变量,进行多元回归分析。

表3 日本不同污水处理工艺温室气体排放估算公式

Tab.3 Greenhouse gas estimation formulas for different wastewater treatment processes in Japan

污水处理工艺	计算函数
分类1(活性污泥法)带污泥焚烧炉 <sup>*1</sup>	① $\lg E_a = -0.282 \times \lg(DT/1\ 000) + 0.846$ ; ② $E_b = 0.222 \times (DT/1\ 000)^{*3}$
分类2(活性污泥法)	① $\lg E_a = -0.208 \times \lg(DT/1\ 000) + 0.059 \times \lg \lambda - 0.368 \times \lg \mu + 0.092$ ; ② $E_b = 0.064\ 5 \times (DT/1\ 000)$
深度处理 <sup>*2</sup> 分类3 (A <sup>2</sup> O法)	① $\lg E_a = -0.293 \times \lg(DT/1\ 000) + 0.811$ ; ② $E_b = 0.025\ 5 \times (DT/1\ 000)$
分类4(氧化沟法)	① $\lg E_a = -0.234 \times \lg(DT/1\ 000) - 0.302 \times \lg \mu + 0.258$ ; ② $E_b = 0.064\ 5 \times (DT/1\ 000)$

注: <sup>\*1</sup>指设有污泥焚烧炉且采用活性污泥法的污水处理厂属于分类1,不包括深度处理设施。<sup>\*2</sup>指深度处理方法根据具体污水处理情况而不同,都假设为A<sup>2</sup>O方法。<sup>\*3</sup>指将单位处理水量产生的标准污泥量设定为0.082%。

## 2 日本某市温室气体排放削减政策

为了更好地指导温室气体排放量的核算,《日本污水厂碳排放指导手册》提供了日本某市碳减排的相关对策实施计划案例,其改进计划针对的活动类别如表4所示。

表4 日本某市执行计划针对的活动类别

Tab.4 Types of activities targeted by implementation plan in a city of Japan

目标活动	计划目标	实际执行情况
①与电力和燃料等能源消耗相关的温室气体排放	使用其他来源提供的电力	○ ○
	燃料燃烧、燃料使用	○ ○
	汽车运行:汽车燃料	○ ○
②与设施运营相关的加工过程导致的温室气体排放	污水处理	○ ○
	污泥焚烧	○ ○
	污泥垃圾填埋处理(私人处理)	○ -
堆肥(私人处理)	○ -	
③消耗自来水、工业用水和化学药品造成的温室气体排放	○	-
④通过有效利用污水资源减少的温室气体排放	○	-

注:“○”表示采取,“-”表示未采取。

该案例中污水处理全过程中温室气体排放数据基准年为2014年,目标年度为2020年;计划改进相关设施单位为下水道管网、雨水泵站、中继泵站、管理中心、污水处理中心、污泥处理中心及污泥填埋场等;对策推进计划针对的3种主要温室气体分别为二氧化碳、甲烷和一氧化二氮。

### 2.1 污水碳排放及减排目标

该市基准年(2014年)温室气体总排放量为5 382 tCO<sub>2</sub>,污水处理过程中各温室气体排放量结构占比分析见图1。

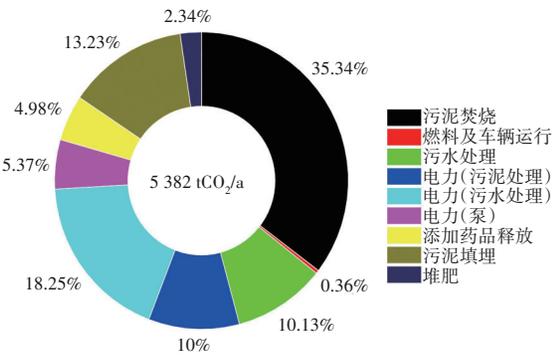


图1 日本某市基准年(2014)碳排放量结构(剔除有效利用部分)

Fig.1 Carbon emission structure of a city in Japan in 2014 (excluding the effective utilization part)

由图1可以看出,温室气体排放量最大的为污泥焚烧(占比为35%),其次为电力(占比为34%),再次为污泥填埋(占比为13%)及污水处理(占比为10%)。预计该市2020年在基准年的基础上可减少5%的碳排放总量,同时使用污泥燃料代替化石燃料,可减少1 400 tCO<sub>2</sub>/a的温室气体排放,即2020年某市产生温室气体控制在3 710 tCO<sub>2</sub>/a以内,同时确保每处理1 m<sup>3</sup>污水产生的温室气体减少10%,即将处理污水产生的温室气体从0.74 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>降至0.67 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。

### 2.2 温室气体减排措施

为实现既定年度的减排目标,案例中的日本某城市污水处理行业通过一系列综合对策大力推进温室气体减排,实现了目标年度的减排目标。改进措施包括提高污水处理效率、优化水处理流程、改良污泥处理方法、能源的再利用和设备节能等(见表5),各环节都紧密结合,以此降低整个行业的碳足迹。

表 5 目标年度之前的污水厂具体改进措施

Tab.5 Specific measures of Wastewater treatment plant before the target year

改进方法		具体措施
改进工序	改进操作方式	采取数控、设备功率控制方式
	选择节能泵	使用高效泵
		通过控制变压器降低功率损耗
降低电气设备的功率损耗	通过提高功率因数降低功率损耗	
水处理工艺	改进驱动方式	与污泥处理过程联动
	曝气设备采取节能措施	采用高能空气扩散器
	加强鼓风机运行控制	采用鼓风机数量控制/阀门开关控制/转速控制等方式
污泥处理工艺	加强运行管理	采用污泥界面恒定控制法改善污泥浓缩性能
	改进污泥沼气产生效率	加强污泥沼气产量提升的研究与实施
	使用节能脱水设备	
	取消脱水污泥填埋场	
能源回用	燃料转化	污泥作燃料
其他设备	照明/空调等节能措施	勤关灯,减少照明设备使用
	高效率运行车辆	
	使用新能源	推广太阳能发电等
		利用污水出流落差设计小水力发电

### 3 控制温室气体排放的措施

#### 3.1 选择可行有效的措施

① 完善减排体制并向职员宣传减排措施的重要性。

② 详细了解温室气体排放量及设备的配置和运行情况,理解各要素间的相互关系。

③ 收集整理相关文献和数据库信息。

④ 重新考虑设备的选择和使用方法,确保未来计划中的有序选择和使用,并持续跟踪实施效果,采用PDCA循环以持续改进;此外,针对污水和污泥处理,选择最佳的设备和工艺组合,集中处理脱水污泥,如采用厌氧消化、好氧堆肥和焚烧等方法。

⑤ 实施与地方公共事业团体相一致的措施,并与相关部门协调合作。

#### 3.2 选择有助于减少温室气体排放的设备

污水处理系统的管理者在选择设备时,应优先

考虑那些有助于控制温室气体排放的类型。推荐设备及组合参照《推进法》和《温室气体排放控制指南》。在选择设备时,需重点考虑以下三个方面:

① 考虑设施的使用寿命,选择适用于安装、重建或修理的技术和设施;

② 将不同处理工艺的小型污水厂整合成大规模的污水厂,以及优化流程,提高设备利用率;

③ 促进不同类型企业在特定区域内的合作,以提高能源利用率。

### 4 结语

参考日本污水处理厂的节能减排措施,我国在能源结构和利用方面可以采用太阳能、风能等新能源替代传统化石能源,并合理利用污水处理过程中产生的余热,以提升整个污水处理流程的能源效率。在工艺方面,采用新型或多工艺耦合替换传统工艺,优化工艺布局,将大幅降低碳排放。对于脱水污泥处理,鉴于其在碳减排和经济效益方面的优势,更需重视其转化为固体燃料和污泥焚烧发电的技术前景,并实行污泥集中处理。

通过在能源利用、处理工艺、污泥后处理等方面的改进,我国污水处理行业将为实现2030年的碳达峰目标及更远的2060年碳中和目标提供有力支持。

### 参考文献:

- [1] 郝晓地,方晓敏,李季,等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 11-16.  
HAO Xiaodi, FANG Xiaomin, LI Ji, et al. Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 11-16 (in Chinese).
- [2] 周兴,郑有飞,吴荣军,等. 2003—2009年中国污水处理部门温室气体排放研究[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 131-136.  
ZHOU Xing, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment in China during 2003-2009 [J]. Climate Change Research, 2012, 8(2): 131-136 (in Chinese).
- [3] SAHELY H R, MACLEAN H L, MONTEITH H D, et al. Comparison of on-site and upstream greenhouse gas emissions from Canadian municipal wastewater treatment facilities [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2006, 5(5): 405-415.

- [4] RAMIREZ-MELGAREJO M, GASSO-DOMINGO S, GUERCA P L. Evaluation of  $N_2O$  emissions in wastewater treatment systems: a comparative analysis of emission between case studies of developed and developing countries[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(2): 42.
- [5] XI J R, GONG H, ZHANG Y J, *et al.* The evaluation of GHG emissions from Shanghai municipal wastewater treatment plants based on IPCC and operational data integrated methods (ODIM) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 148967.
- [6] 陆家缘. 中国污水处理行业碳足迹与减排潜力分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.  
LU Jiayuan. Carbon Footprint and Reduction Potential of China's Wastewater Treatment Sector [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019(in Chinese).
- [7] 鲍志远. 典型城市污水处理工艺温室气体排放特征及减排策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.  
BAO Zhiyuan. Study on Characteristics and Mitigation Strategies of Greenhouse Gases Emissions from Typical Domestic Wastewater Treatment Processes [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019(in Chinese).
- [8] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(4): 118-124.  
CAI Bofeng, GAO Qingxian, LI Zhonghua, *et al.* Study on the methane emission factors of wastewater treatment plants in China [J]. *China's Population, Resources and Environment*, 2015, 25(4): 118-124(in Chinese).
- [9] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 65-74.  
ZHANG Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, *et al.* Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 65-74(in Chinese).
- [10] 石春力, 田永英, 黄海伟, 等. 我国城镇污水处理碳排放核算方法研究综述[J]. *建设科技*, 2021(11): 39-43.  
SHI Chunli, TIAN Yongying, HUANG Haiwei, *et al.* Summary of researches on accounting methods of carbon emissions from urban sewage treatment [J]. *Construction Science and Technology*, 2021 (11): 39-43 (in Chinese).
- [11] 尚会来, 彭永臻, 王淑莹, 等. 污水生物脱氮过程中  $N_2O$  的产生和减量化控制[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(16): 104-108.  
SHANG Huilai, PENG Yongzhen, WANG Shuying, *et al.* Production and reduction control of nitrous oxide during biological nitrogen removal from domestic wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24 (16): 104-108(in Chinese).
- [12] 胡振, 张建, 谢慧君, 等. 污水生物脱氮过程中  $N_2O$  的产生与控制研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(12): 95-100.  
HU Zhen, ZHANG Jian, XIE Huijun, *et al.* Review on production and control of  $N_2O$  during biological nitrogen removal from wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(12): 95-100(in Chinese).
- [13] URCIUOLO M, SOLIMENE R, CHIRONE R, *et al.* Fluidized bed combustion and fragmentation of wet sewage sludge [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 43: 97-104.
- [14] 谭涛. 污水污泥含氮模型化合物的构建及热解过程中氮转化途径研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
TAN Tao. Construction of Nitrogen Containing Model Compound of Sewage Sludge and Study on the Transformation Pathway of Nitrogen During Microwave Pyrolysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).
- [15] 张娜. 污泥热解过程中氮的迁移特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.  
ZHANG Na. Study on the Transformation Characteristics of Nitrogen during Pyrolysis of Sewage Sludge [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013(in Chinese).

**作者简介:** 贺凯(1986-), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要从事污水处理大数据、污染物特征识别及溯源等工作。

**E-mail:** hekai7@mail.sysu.edu.cn

**收稿日期:** 2021-10-29

**修回日期:** 2021-12-10

(编辑: 丁彩娟)