

# 关于水处理碳核算实例以及不同N<sub>2</sub>O排放因子应用研究

辛文<sup>1</sup>, 杨雪晶<sup>2</sup>, 王志远<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

<sup>2</sup>华东理工大学机械与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年4月8日; 录用日期: 2022年4月29日; 发布日期: 2022年5月7日

## 摘要

对污水处理中的温室气体产生机理进行研究。采用生态环境部推荐的方法, 对排放因子进行符合工程实际的调整, 以甲醇工业污水处理厂的温室气体排放为例, 探究不同N<sub>2</sub>O排放因子的影响, 以及结果差异性。结果表明: 污水中污染物去除与温室气体(GHG)有关联机制, COD的削减对应CH<sub>4</sub>, TN的削减会产生N<sub>2</sub>O; 排放因子对结果影响显著, 选择合适排放因子至关重要; 从温室气体排放总量上来看, 直接排放的总量最大, 其次是能耗产生的间接排放。

## 关键词

温室气体, 排放因子, 污水处理, 协同控制

# Example of Carbon Accounting for Water Treatment and Application Study of Different N<sub>2</sub>O Emission Factors

Wen Xin<sup>1</sup>, Xuejing Yang<sup>2</sup>, Zhiyuan Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>College of Mechanical and Power Engineering of East China University of Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 8<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 29<sup>th</sup>, 2022; published: May 7<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The mechanism of greenhouse gas generation in wastewater treatment was investigated. Using the method recommended by the Ministry of Ecology and Environment, the emission factors were

adjusted to meet the engineering reality, and the effect of different  $N_2O$  emission factors and the variability of the results were investigated with the example of GHG emission from A/O wastewater treatment. The results show that: there is a correlation mechanism between pollutant removal and GHG in wastewater, removal of COD corresponds to  $CH_4$ , and removal of TN generates  $N_2O$ ; emission factors have a significant impact on the results, and the selection of appropriate emission factors is crucial; in terms of total GHG emissions, direct emissions are the largest, followed by indirect emissions from energy consumption.

## Keywords

Greenhouse Gas, Emission Factors, Wastewater Treatment, Synergistic Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 污水处理中温室气体的排放机理

污水处理厂是去除废水中污染物的重要基础设施，但是污水处理厂也会产生大量的温室气体，这些气体是导致全球变暖的主要原因。据美国环保署估计[1] 1970~2015 年期间，废水处理和排放的非二氧化碳型温室气体排放量增加了一倍，占 2015 年全球非二氧化碳型温室气体排放量的 9.6%。且 2018 年[2] 仅中国的废弃物处理行业一项就占全球总温室气体排放量的 0.42%，达到了 197.6 Mt  $CO_2e$ ，是中国前十大温室气体排放行业，因此本文对污水处理中的温室气体产生机理进行研究，以 A/O 污水处理的温室气体排放为例，探究不同  $N_2O$  排放因子的影响。

### 1.1. $CH_4$ 的产生机理

废水中的有机物如果进行厌氧生物处理会产生大量的  $CH_4$ 。厌氧生物处理可通过由 Bryant 提出的三个阶段理论来说明，大致包括了三个阶段，① 水解和酸化，主要产物是脂肪酸、醇类；② 产氢产乙酸阶段，将有机酸分解为乙酸、氢和二氧化碳；③ 产甲烷阶段，产甲烷菌利用乙酸、氢和二氧化碳产生甲烷。这需要厌氧环境和高有机物浓度。从这个观点出发，则会认为好氧处理并不会生成温室气体，但实际的运行效果表明，即使是经过优化设计的曝气池也会有厌氧微环境，以至于产生  $CH_4$ 。而影响产甲烷菌的因素包括环境温度、pH、氧化还原电位、养分、有机负荷率、毒性物质等。山东大学的张建团队研究表明，最重要的因素是好氧过程中的溶解氧浓度，以及沉淀罐中的水温[3]。

### 1.2. $N_2O$ 的产生机理

$N_2O$  气体释放被认为与脱氮过程相关，即将污水中 TN 含量减少到排放指标。长期以来传统硝化和反硝化被认为是主要来源。在硝化过程中， $N_2O$  作为副产物存在[4]。首先， $NH_4^+$  在亚硝酸盐氧化菌(AOB)作用下被氧化成  $NO_2^-$ ，在硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)的作用下会接着氧化成  $NO_3^-$ ，在某些情况下(pH 过高，溶解氧过低等)，第一个中间产物羟胺( $NH_2OH$ )会累积，在羟胺氧化还原酶(HAO)的作用下，羟胺氧化生成  $N_2O$ 。若  $NO_2^-$  的进一步氧化受到限制，形成累积的同时对微生物产生毒性效应，生成异构亚硝酸盐还原酶(NiR)，其利用  $NO_2^-$  充当电子受体，最终生成  $N_2O$ 。

在反硝化过程中， $N_2O$  是必然的中间产物，如图 1 所示，进一步还原受阻时(一氧化二氮还原酶 Nos 失活不能进一步还原  $N_2O$  为  $N_2$ ，Nos 是一种可溶性蛋白质，其活性很容易受到其他不利的环境影响，例

如较高的溶解氧, 低 pH 值, 低碳氮比等都会导致酶活性降低或者丧失), 导致  $\text{N}_2\text{O}$  将取代  $\text{N}_2$  成为反硝化的最终产物。此外处理后的出水排放到水体后发生的硝化反硝化阶段也是如此。

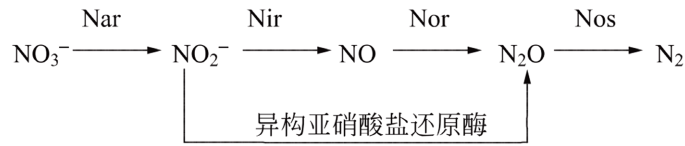


Figure 1.  $\text{N}_2\text{O}$  production pathway during denitrification [11]

图 1. 反硝化过程中  $\text{N}_2\text{O}$  产生路径[11]

## 2. 污水处理碳排放计算的排放因子

按照中华人民共和国生态环境部二零一八年四月印发的《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南》(试行)(以下简称指南), 将污染物类型包括甲烷、化学需氧量、总氮和污泥四类污染物。《中华人民共和国大气污染防治法》规定,  $\text{CH}_4$  是温室气体(GHG), 也属于环境污染防治物质, 需要列为污染物核算。GHG 种类包括  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  三种温室气体, 污染物去除量作为核算温室气体减排量的活动水平。污水处理系统碳排放可划分为直接碳排放和间接碳排放两部分。

直接碳排放包括  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  碳排放(在 IPCC 指南中, 由生物分解产生的二氧化碳被归于生物碳, 而沼气和污泥归为生物燃料或可再生能源, 因此都不包括进碳排放量清单)。间接碳排放包括能源性碳排放和物耗性碳排放, 其中能源性碳排放是指电力和能源消耗产生的碳排放; 物耗性碳排放与污水处理过程中消毒剂, 絮凝剂, 碳源等药物的消耗密切相关。

指南中详细描述了去除  $\text{COD}_{\text{cr}}$  产生的温室气体排放量以及去除 TN 产生的温室气体排放量的计算过程。然而现有的对中国污水处理厂温室气体排放的概算差异很大,  $\text{CH}_4$  从 20.5 到 1395.8 kt/yr,  $\text{N}_2\text{O}$  从 0.9 到 32.4 kt/yr [5] [6] [7]。活动数据多来自于官方数据或工厂运行数据, 通常比较可靠, 那么不确定性主要来源于排放系数。

### 2.1. $\text{CH}_4$ 排放因子

污水处理中  $\text{CH}_4$  排放是废弃物处理部门中非常重要的温室气体源, 也包含很大的减排潜力, 因此精准核算计量甲烷排放对水处理行业减排有重要意义。IPCC 指南中详述了有机物厌氧分解的排放系数, 这是基于专家团队的经验判断。蔡博峰[8]将好氧和厌氧类型这种技术层面的  $\text{CH}_4$  排放因子转化为省级和国家级的排放因子, 根据不同的精度要求, 为用户计算温室气体排放提供更多选择。表 1 中列出了蔡博峰的研究与 IPCC 指南中关于  $\text{CH}_4$  排放因子的对比。本研究中根据案例水质以及处理工艺, 选择排放因子为 0.004 kg  $\text{CH}_4$ /kg COD。

Table 1. Emission factors of  $\text{CH}_4$  studied by Cai Bofeng and comparison with IPCC [8]

表 1. 蔡博峰研究  $\text{CH}_4$  排放因子及与 IPCC 比较[8]

IPCC 分类	蔡博峰分类	排放因子(kg $\text{CH}_4$ /kg COD)		
		IPCC	蔡博峰	
			生活污水	工业污水
污泥厌氧消化池 + 回收 $\text{CH}_4$	厌氧工艺 + 回收 $\text{CH}_4$	/	0.003	0.0008
污泥厌氧沼气池 + 不回收 $\text{CH}_4$	厌氧工艺	0.2~0.25	0.044	0.14
厌氧反应装置				
管理完善的集中好氧工艺的处理厂	好氧为主	0~0.025	0.004	0.004

## 2.2. N<sub>2</sub>O 的排放因子

前人研究中[4] [9] [10], 因 N<sub>2</sub>O 释放情况所受影响因素较多, 并且没有非常确定的论断, 则没有进行核算 N<sub>2</sub>O 的排放情况。但是根据气候观察的数据, 2016 年全球在废弃物处理(包括废水处理)中排放的 N<sub>2</sub>O 对应的 CO<sub>2</sub> 当量约 139.81 Mt, 占总 N<sub>2</sub>O 排放的 4.7%, 而中国对应的数据为 29.66 Mt, 并且每年都在升高, 2018 年达到了 29.89 Mt, 这样的情况下, 污水处理中 N<sub>2</sub>O 的排放不能再忽视不理。

由于 N<sub>2</sub>O 的排放占比较高, 采用不同的排放因子以作比较。一种采用杨世琪的研究[11]按照不同的脱氮工艺进行区分。这类排放因子起源于 Foley [12]的 N<sub>2</sub>O 转化率的研究, 取平均值后[11]又进一步根据不同脱氮工艺反应式的理论转化率的加以区分得出传统硝化反硝化为 0.035 kg N<sub>2</sub>O-N/kg N, 短程硝化反硝化的排放因子为 0.049 kg N<sub>2</sub>O-N/kg N, 同步硝化反硝化工艺的排放因子取 0.023 kg N<sub>2</sub>O-N/kg N, 厌氧氨氧化 0.0026 kg N<sub>2</sub>O-N/kg N, 这也是指南中采用的排放因子[13]。但 Foley [12]同时指出, 仔细检查结果发现, 去除掉 4 组明显使得平均数向上偏移的数据, 其余 16 组结果的平均数为 0.013 ± 0.003 kg N<sub>2</sub>O-N/kg N, 这证明了 0.035 的平均值是由少数偏大数据导致, 同时说明来源于 Foley [12]转化率的指南中采用的排放因子也是偏大的; 另一种采用 IPCC [14]的推荐的默认值, 为 0.016 tN<sub>2</sub>O-N/tN, 大多数研究应用 IPCC 发布的排放因子来量化区域尺度或国家尺度的污水处理厂的温室气体排放[7] [15] [16] [17] [18]。

## 2.3. 其余排放因子

污水在污水处理厂处理过程中的能耗作为温室气体的间接排放, 是通过区域电网基准线排放因子和污水处理过程中消耗的电能来计算的。各区域电网的具体排放因子列于表 2。

**Table 2.** Recommended values of CO<sub>2</sub> emission factors for regional grid power<sup>①</sup>

**表 2.** 区域电网电力<sup>①</sup>的 CO<sub>2</sub> 排放因子推荐值

电网	省份	排放因子/(tCO <sub>2</sub> /MWh)
华北	北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古自治区 <sup>②</sup>	0.8843
东北	辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古自治区 <sup>③</sup>	0.7769
华东	江苏、浙江、安徽、福建	0.7035
华中	河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆	0.5257
西北	陕西、甘肃、青海、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	0.6671
南方	广东、广西自治区、云南、贵州、海南	0.5271

数据来源: ① 电力 CO<sub>2</sub> 排放因子来源于国家应对气候变化战略研究和国际合作中心编制的《2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》中 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子, 建议根据政府主管部门发布的最新数据填写, 另上海市生态环境局于 2022 年将电力排放因子的缺省值调整为 0.42 tCO<sub>2</sub>/MWh; ② 除赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟外的内蒙古地区采用“华北区域电网”排放因子; ③ 赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟采用“东北区域电网”排放因子。

为达到水质排放标准, 在处理过程中会投放消毒剂和絮凝剂, 这些物质在生产和运输中会造成碳排放等, 可用适当的碳排放因子进行衡量。药剂消耗相关的 CO<sub>2</sub> 排放因子列于表 3。

## 3. 案例分析

陕西省某甲醇废水处理厂[20]设计规模为 1300 m<sup>3</sup>/h, 无甲烷回收装置。甲醇废水属于高氨氮、碳氮比失调的废水, 需要外加上游废甲醇以做碳源, 保证 SBR 池运行。进水 COD<sub>Cr</sub> 平均浓度为 383.67 g/m<sup>3</sup>,

出水 COD<sub>Cr</sub> 平均含量为 34.8 g/m<sup>3</sup>。进水 TN 平均浓度为 211.5 g/m<sup>3</sup>，出水 TN 平均浓度为 10.37 g/m<sup>3</sup>。出水水质指标满足《黄河流域(陕西段)污水综合排放标准》。全年污水处理设施电耗 21,168.792 MWh。年污泥干物质质量为 19,224 t/a，DOC (可降解有机物)数值取 15.6% [21]，进行界外处理处置，则不算入污水厂温室气体排放。

**Table 3.** Recommended values of emission factors for different agents  
**表 3.** 不同药剂的排放因子推荐值

药剂名称	排放因子/(kgCO <sub>2</sub> /kg 药品)
碱度[4]	1.74
甲醇	1.54
PAM [4]	1.5
PAC [4]	0.0227
其他(盐酸、氯酸钠[19])	1.4

### 3.1. 核算的数据清单

根据核算方法，对核算数据及案例数据进行整理，如下表 4 所示。 $R_{\text{COD}}$  为污水处理厂 COD 的去除量， $R_{\text{TN}}$  为处理过程中 TN 的去除量。

**Table 4.** Pollutant removal data and material consumption information for wastewater treatment plants  
**表 4.** 污水处理厂污染物去除数据及材料消耗信息

核算内容		单位	数值
COD <sub>Cr</sub>	$Q$	m <sup>3</sup> /a	11,388,000
	COD <sub>in</sub>	g/m <sup>3</sup>	383.67
	COD <sub>e</sub>	g/m <sup>3</sup>	34.8
	$R_{\text{COD}}$	t/a	3972.93
TN	TN <sub>i</sub>	g/m <sup>3</sup>	211.5
	TN <sub>e</sub>	g/m <sup>3</sup>	10.37
	$R_{\text{TN}}$	t/a	2290.47
盐酸		t/a	264.6
PAM		t/a	34.8
PAC		t/a	360
甲醇		t/a	3721.176
电力消耗	EH	MWh/a	21,168.792

### 3.2. 核算中采用的不确定数据假设以及排放因子

本研究中根据案例水质以及处理工艺，选择甲烷排放因子为 0.004 kg CH<sub>4</sub>/kg COD。由于 N<sub>2</sub>O 的排放占比较高，采用两种不同的应用程度较广泛的排放因子以作比较。电力排放因子依据地理位置所用的电网排放因子，采用 0.6671 tCO<sub>2</sub>/MWh。研究中所采用的排放因子列于下表 5。

**Table 5.** Emission factors and assignment basis  
**表 5.** 排放因子及赋值依据

种类	名称	数值	单位	赋值依据
CH <sub>4</sub> 排放因子	$EF_{CH_4}$	0.004	tCH <sub>4</sub> /t COD	[8]
污水中单位质量的氮能够转化为氧化亚氮的氮量	1 $EF_{N_2O}^1$	0.035	tN <sub>2</sub> O-N/t N	指南中传统硝化反硝化建议数值
	2 $EF_{N_2O}^2$	0.016	tN <sub>2</sub> O-N/t N	参考《2019 修订 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》第五卷, 第六章 6.39
电力 CO <sub>2</sub> 排放因子	$EF_{CO_2}$	0.6671	tCO <sub>2</sub> /MWh	《2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》(陕西省)

#### 4. 结果与讨论

我们估计了污水处理厂因去除 COD<sub>Cr</sub> 和 TN 产生的温室气体, 将生化反应产生的温室气体排放和由电力消耗、化学品生产和运输产生的温室气体排放以二氧化碳当量的形式估算出来, 核算结果如下表 6 所示。其中氧化亚氮的排放因子因采用指南中推荐数值以及 IPCC 推荐值存在明显差异。

该污水处理厂对于 COD<sub>Cr</sub> 以及 TN 的去除量为 3972.93 t、2290.47 t, 因排放因子的选取不同, 产生的温室气体排放总量 59,417.45 t (38,217.52 t)。

**Table 6.** Comparison of greenhouse gas emission accounting results  
**表 6.** 温室气体排放量核算结果比较

	排放量	单位	比例
去除 COD <sub>Cr</sub> 产生的 CH <sub>4</sub>	81.81	tCO <sub>2</sub> eq/a	0.14%
去除 TN 产生的 N <sub>2</sub> O	39,052.51	tCO <sub>2</sub> eq/a	65.73%
1 电力排放	14,121.7	tCO <sub>2</sub> eq/a	23.77%
物耗排放	6161.42	tCO <sub>2</sub> eq/a	10.37%
共计	59,417.45	tCO <sub>2</sub> eq/a	100%
去除 COD <sub>Cr</sub> 产生的 CH <sub>4</sub>	81.81	tCO <sub>2</sub> eq/a	0.21%
去除 TN 产生的 N <sub>2</sub> O	17,852.58	tCO <sub>2</sub> eq/a	46.71%
2 电力排放	14,121.7	tCO <sub>2</sub> eq/a	36.95%
物耗排放	6161.42	tCO <sub>2</sub> eq/a	16.12%
共计	38,217.52	tCO <sub>2</sub> eq/a	100%

直接温室气体排放是在去除 COD 以及 TN 方面引起, COD 与 TN 的去除率分别为 90.93%和 95.10%。脱氮阶段是此研究中直接温室气体排放的主要来源, 不论采取哪个排放因子, 都占整体排放量的 50%左右。究其原因, 主要是与水质的关联度比较高, 进水 COD 约为 383 mg/L, 总氮高达 211.5 mg/L。这点结论同文献中[9] [22] [23]一致, 高有机负荷会增加温室气体排放, 含氮量高也会带来药耗和能耗的升高。并且采用指南中为传统硝化反硝化排放因子 0.035 tN<sub>2</sub>O-N/t N, 如果采用 IPCC 拟定的好氧处理工艺的 N<sub>2</sub>O 排放因子, 则脱氮带来的排放为 17,852.58 tCO<sub>2</sub>eq/a, 约是采用指南排放因子的 45.71%, 可以看出采用合适排放因子对于拟算碳排放结果有至关重要的影响。Foley [12]研究发现, 低 N<sub>2</sub>O 排放往往发生在设计之初就为了实现出水 TN 浓度低的污水处理厂, 而这类污水厂通常具有这样的特征, 如有高循环率, 较大



的生物反应器容积和污泥停留时间(SRT)较长。高循环率能大幅稀释硝化反硝化的中间产物浓度,包括亚硝酸盐以及一氧化氮;较大的生物反应器容积和长 SRT 的设计更有可能进行完全反硝化,更接近“理想”的良好混合水力条件,从而有相对较低的  $N_2O$  排放。从以往研究中[24] [25] [26],污水处理厂控制在最佳的溶解氧(DO)和亚硝酸盐浓度下运行,并在硝化和反硝化阶段保持适当的 COD/N 比例,可以大大缓解  $N_2O$  的排放。

污水处理厂运行过程消耗电能,其生产过程中产生温室气体。此外,污水污泥处理过程中使用不同化学药剂在生产运输中也会产生碳排放。在此处,能耗和物耗碳排放的贡献相对较小,两者的碳排放同样也受到处理水量、处理工艺和处理水质、进出水标准的影响。在实际生产生活中,物耗和能耗均存在“规模效应” [27],即污水处理量越大,单位电耗,单位物耗越小。

## 5. 结论

根据上述结果,表明在污水处理厂运行过程中,大量的温室气体是由生化反应产生的,其中  $N_2O$  的比重更大,而在以前的模型中,  $N_2O$  的排放通常被忽略[9] [27],然而,这种排放其实在污水处理厂运行过程中实际上是大量产生的。同时,采用国内认可度比较高的两种  $N_2O$  排放因子,得出的结果相差几倍之多。因此将技术层面的  $N_2O$  排放因子转换为区域尺度的  $N_2O$  排放因子的研究模式迫在眉睫,未来需要科研人员更详尽的研究,得到最符合工程实践的碳排放数据。以研究不同工艺配置和运行条件下的  $N_2O$  排放,使得可以根据研究目的选择合适的排放因子。

碳排放主要受废水处理水量和污染物浓度变化的影响。污水处理总量越大,与污水处理的生化反应相关的  $CH_4$  气体释放和  $N_2O$  气体释放就越高。因为水处理工艺和出水要求的差异, COD 和 TN 处理率会通过影响进出水的 COD 和 TN 的浓度差,从而引起碳排放量的变化。所以,节约用水,降低城市水源地的废水量,将减少污水处理设施的处理水量。同时,污水处理厂污染物去除并没有协同减排温室气体排放量。在双碳目标的约束下,污水处理厂应全面考虑排放源,在减污降碳协同治理上下功夫,建立协同治理的控制体系,向污水处理厂“碳中和”和“能量中和”进发。

## 参考文献

- [1] Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., *et al.* (2019) EDGAR v5.0 Greenhouse Gas Emissions. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset]. <http://data.europa.eu/89h/488dc3de-f072-4810-ab83-47185158ce2a>
- [2] Climate Watch (2021) GHG Emissions. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
- [3] Wang, J.H., Zhang, J., Xie, H.J., *et al.* (2011) Methane Emissions from a Full-Scale A/A/O Wastewater Treatment Plant. *Bioresour Technol*, **102**, 5479-5485. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.090>
- [4] 柴宏祥, 杨世琪, 何强, 等. 污水生物处理脱氮工艺的温室气体排放比较[J]. 给水排水, 2014, 40(7): 129-134.
- [5] 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1256-1263.
- [6] Yan, X., Qiu, D.Z., Zheng, S.K., *et al.* (2018) Spatial and Temporal Distribution of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment Plants in China From 2005 to 2014. *Earth's Future*, **7**, 340-350. <https://doi.org/10.1029/2018EF001058>
- [7] Zhao, X., Jin, X.K., Guo, W., *et al.* (2019) China's Urban Methane Emissions from Municipal Wastewater Treatment Plant. *Earth's Future*, **7**, 480-490. <https://doi.org/10.1029/2018EF001113>
- [8] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 吴静, 曹东, 刘兰翠. 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.
- [9] Shahabadi, M.B., Yerushalmi, L. and Haghghat, F. (2010) Estimation of Greenhouse Gas Generation in Wastewater Treatment Plants—Model Development and Application. *Chemosphere*, **78**, 1085-1092. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.044>

- [10] Shahabadi, M.B., Yerushalmi, L. and Haghghat, F. (2009) Impact of Process Design on Greenhouse Gas (GHG) Generation by Wastewater Treatment Plants. *Water Research*, **43**, 2679-2687. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.040>
- [11] 杨世琪. 城镇污水处理系统碳核算方法与模型研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [12] Foley, J., de Haas, D., Yuan, Z.G. and Lant, P. (2010) Nitrous Oxide Generation in Full-Scale Biological Nutrient Removal Wastewater Treatment Plants. *Water Research*, **44**, 831-844. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.10.033>
- [13] 生态环境部办公厅. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行) [EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/201804/t20180410\\_629682.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/201804/t20180410_629682.html), 2018-04-08.
- [14] IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [15] Du, M., Zhu, Q., Wang, X., et al. (2018) Estimates and Predictions of Methane Emissions from Wastewater in China from 2000 to 2020. *Earth's Future*, **6**, 252-263. <https://doi.org/10.1002/2017EF000673>
- [16] Liao, X.W., Tian, Y.J., Gan, Y.W. and Ji, J.P. (2020) Quantifying Urban Wastewater Treatment Sector's Greenhouse Gas Emissions Using a Hybrid Life Cycle Analysis Method—An Application on Shenzhen City in China. *Science of the Total Environment*, **745**, Article ID: 141176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141176>
- [17] Peng, S., Piao, S., Bousquet, P., et al. (2016) Inventory of Anthropogenic Methane Emissions in Mainland China from 1980 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 14545-14562. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14545-2016>
- [18] Yang, D., Xu, L., Gao, X., et al. (2018) Inventories and Reduction Scenarios of Urban Waste-Related Greenhouse Gas Emissions for Management Potential. *Science of the Total Environment*, **626**, 727-736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.110>
- [19] 余娇, 赵荣欣, 肖连刚, 等. 基于“水-能-碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1052-1062.
- [20] 张超. SBR 工艺处理煤化工废水的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [21] 郭恰. IPCC 污泥碳排放核算模型中 DOC 取值的不足与修正[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 49-53.
- [22] Yang, S.S., Yu, X.L., Ding, M.Q., He, L., Cao, G.L., Zhao, L., Tao, Y., Pang, J.W., Bai, S.W. and Ding, J. (2021) Simulating a Combined Lysis-Cryptic and Biological Nitrogen Removal System Treating Domestic Wastewater at Low C/N Ratios Using Artificial Neural Network. *Water Research*, **189**, Article ID: 116576. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116576>
- [23] Massoompour, A., Borghei, S. and Raie, M. (2020) Enhancement of Biological Nitrogen Removal Performance Using Novel Carriers Based on the Recycling of Waste Materials. *Water Research*, **170**, Article ID: 115340. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115340>
- [24] Tallec, G., Garnier, J. and Gousailles, M. (2006) Nitrogen Removal in a Wastewater Treatment Plant through Biofilters: Nitrous Oxide Emissions during Nitrification and Denitrification. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **29**, 323-333. <https://doi.org/10.1007/s00449-006-0081-0>
- [25] Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., et al. (2009) Nitrous Oxide Emission during Wastewater Treatment. *Water Research*, **43**, 4093-4103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.001>
- [26] Pijuan, M., Tora, J., Rodriguez-Caballero, A., et al. (2014) Effect of Process Parameters and Operational Mode on Nitrous Oxide Emissions from a Nitritation Reactor Treating Reject Wastewater. *Water Research*, **49**, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.009>
- [27] 杨凌波, 曾思育, 鞠宇平, 等. 我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析 with 定量识别[J]. 给水排水, 2008, 34(10): 42-45.