

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.011

# 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究

张 岳, 葛铜岗, 孙永利, 刘 静, 高晨晨, 张 维  
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘 要:** 我国不仅尚未独立开展城镇污水处理各子单元的温室气体清单研究,而且有关污水处理各个系统的温室气体估算数据研究也较少。结合“全国城镇污水处理信息管理系统”大数据平台,以城镇污水处理行业节能减排为目标导向,构建了污水处理系统全流程节能减排综合测算模型。通过模型测算了 3 个实例污水处理厂提标前后的碳排放变化情况并识别出主要控制环节,结果表明,适当提高污水排放标准,可有效降低污水处理厂各流程环节产生的碳排放量,但进一步提高出水标准将会使污水厂在能源、资源及温室气体排放等方面产生不利的影响。

**关键词:** 污水处理; 碳排放; 温室气体; 排放因子; 提标改造

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0065-10

## Research on Carbon Emission Model Based on the Whole Process of Urban Sewage Treatment

ZHANG Yue, GE Tong-gang, SUN Yong-li, LIU Jing, GAO Chen-chen, ZHANG Wei  
(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Not only has China not carried out independent research on greenhouse gas inventory of each sub-unit of urban sewage treatment, but there are also few studies on greenhouse gas estimation data of each sewage treatment system. Combined with the big data platform of “National Urban Sewage Treatment Information Management System” and guided by the goal of energy saving and emission reduction in urban sewage treatment industry, a comprehensive calculation model of energy saving and emission reduction in the whole process of sewage treatment was constructed. Variations in carbon emission of three sewage treatment plants before and after upgrading were calculated by the model and the critical controlling unit was identified. Appropriate raising sewage discharge standard could effectively reduce the carbon emission generated by each link of the sewage treatment plant, but further improvement of effluent standards would have an adverse effect on sewage treatment plants in terms of energy, resources and greenhouse gas emissions.

**Key words:** sewage treatment; carbon emission; greenhouse gas; emission factor; upgrading and reconstruction

目前污水处理厂碳排放核算方法主要采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指南提供的

方法,鉴于大部分国家缺乏基础数据,一般是通过国家人口数据、人均产污能力的粗略估计,指导各国国

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07323001)  
通信作者: 葛铜岗 E-mail: getonggang2004@163.com

家尺度上的碳排放核算,参数取值基本上是国外专家判断的推荐值,导致其在我国污水处理行业碳排放管理方面的适用性尚不完全确定<sup>[1-4]</sup>。同时,我国尚未独立开展城镇污水处理各子单元的温室气体清单研究,还没有污水处理各个系统的温室气体估算数据,有关城市尺度上污水处理处置过程温室气体排放研究较少<sup>[5-7]</sup>。其次,我国各地一味地提高污水处理排放标准的做法并不一定有利于碳减排和环境综合效益,甚至有可能产生负面作用<sup>[8-12]</sup>。因此建立以碳排放为基准的城镇污水处理系统全流程节能减排综合测算方法和模型,不仅有利于综合衡量污水处理产生的碳减排效益,而且有利于评价高标准排放对水环境之外产生的不利影响,并比较其对环境产生的碳排放值。

城镇污水处理处置系统是城市建设的重要环节,本研究结合“全国城镇污水处理信息管理系统”(以下简称“信息系统”)的大数据平台,以城镇污水处理行业节能减排为目标导向,基于“信息系统”运营项目填报数据格式,在 IPCC 指南方法框架下结合工艺过程化学计量学,初步构建包括污水处理、污泥处理处置、再生水利用环节在内的污水处理系统全流程节能减排综合测算方法,为后期提标项目决策和工程设计方案的环境影响分析提供参考。

## 1 测算方法构建

### 1.1 测算内容和范围

根据“信息系统”运营项目月报数据覆盖范围,将污水厂内所有环节纳入核算范围。考虑到污水厂向环境输出尾水及脱水污泥中仍含一定量 C、N 元素,在自然状态下仍可能排放温室气体,因此将尾水受纳及脱水污泥处置过程直接碳排放也纳入核算范围<sup>[13-16]</sup>。同时兼顾因污泥厌氧消化产沼回收能量及尾水水质提升、再生水利用带来的碳减排效应。

IPCC 指南认为,生物降解排放的  $\text{CO}_2$ ,其碳元素源于空气中的  $\text{CO}_2$ ,对空气碳平衡影响有限,未纳入国家碳排放总量的核算范围<sup>[17-20]</sup>。据此,主要考虑污水厂运行过程中直接向空气排放的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、外加碳源转化排放的  $\text{CO}_2$ (称“直接碳排放”)以及能消耗物耗生产的碳排放(称“间接碳排放”)。

城镇污水处理厂提标运行碳排放变化测算研究范围见图 1。由图 1 可知,在污水处理、污泥处理与处置、尾水排放及再生水利用各环节均有碳排放或碳减排发生。本研究基于目前普遍采用的主要工艺

单元碳排放分析,提出全流程节能减排综合测算方法。各个工艺单元碳排放情况见图 2。各工艺单元碳排放来源见表 1。

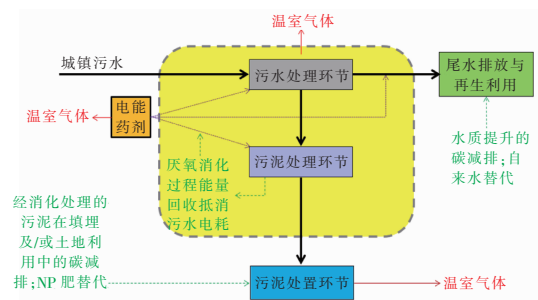


图1 城镇污水处理厂提标运行碳排放测算边界示意

Fig.1 Schematic diagram of carbon emission measurement boundary of urban sewage treatment plant

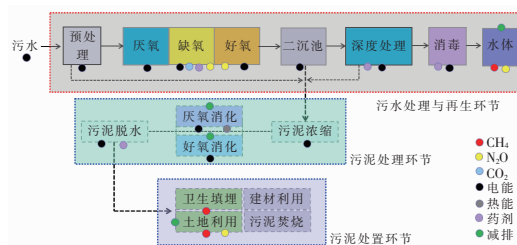


图2  $\text{A}^2/\text{O}$  污水厂运行碳排放源分析

Fig.2 Carbon emission source analysis of  $\text{A}^2/\text{O}$  sewage treatment plant operation

表1  $\text{A}^2/\text{O}$  污水厂各处理单元碳排放分析

Tab.1 Carbon emission analysis of each unit of sewage treatment plant with  $\text{A}^2/\text{O}$  process

流程环节	工艺单元	碳减排	间接碳排放		直接碳排放		
			电能生产	药剂生产	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$
污水处理与再生利用	预处理		√				
	厌氧		√				
	缺氧		√	√	√	√	√
	好氧		√				
	二沉池		√				
	深度处理		√	√			
	消毒		√				
污泥处理	环境用水	√	√				
	污泥浓缩		√	√			
	厌氧消化	√	√				
	好氧消化	√	√				
污泥处置	污泥脱水		√	√			
	卫生填埋				√		
	土地利用	√			√	√	
Σ		碳减排项	间接碳排放项		直接碳排放项		

## 1.2 测算公式基本形式分析

根据图2和表1,结合污水厂运行碳排放途径分析可知,污水厂运行阶段的净碳排放量( $W$ )是指直接碳排放( $E_{\text{直接}}$ )与间接碳减排量( $E_{\text{间接}}$ )的总和扣除碳减排( $J_{\text{减排}}$ )。

直接碳排放可根据实施途径分解成污水脱氮环节碳排放( $E_{\text{污水脱氮}}$ )、污泥卫生填埋碳排放( $E_{\text{卫生填埋}}$ )和污泥土地利用环节碳排放( $E_{\text{土地利用}}$ )。

间接碳排放( $E_{\text{间接}}$ )主要考虑污水处理厂耗电( $E_{\text{电能}}$ )和药剂使用( $E_{\text{药剂}}$ )间接导致的碳排放。

碳减排( $J_{\text{减排}}$ )可根据实施途径分解成水质提升碳减排( $J_{\text{水质提升}}$ )、污泥厌氧消化碳减排( $J_{\text{厌氧消化}}$ )、污泥好氧消化过程碳减排( $J_{\text{好氧消化}}$ )和污泥土地利用作为土壤肥料的碳减排( $J_{\text{土地利用}}$ )。

综上,污水厂运行碳排放测算公式基本形式可写成如下方程体系:

$$W = E - J_{\text{减排}} \quad (1)$$

$$E = E_{\text{直接}} + E_{\text{间接}} \quad (2)$$

$$E_{\text{直接}} = E_{\text{污水脱氮}} + E_{\text{卫生填埋}} + E_{\text{土地利用}} \quad (3)$$

$$E_{\text{间接}} = E_{\text{电能}} + E_{\text{药剂}} \quad (4)$$

$$J_{\text{减排}} = J_{\text{水质提升}} + J_{\text{厌氧消化}} + J_{\text{好氧消化}} + J_{\text{土地利用}} \quad (5)$$

## 2 测算公式推导

### 2.1 直接碳排放( $E_{\text{直接}}$ )测算过程

#### 2.1.1 污水脱氮环节碳排放( $E_{\text{污水脱氮}}$ )

污水脱氮过程存在两种碳排放途径,一是污水处理过程中释放的 $N_2O$ ( $E_{N_2O, \text{污水处理}}$ ),二是污水处理外加碳源被微生物利用转化为 $CO_2$ ( $E_{CO_2 \text{ 外碳源}}$ )。

##### ① $N_2O$ 类碳排放( $E_{N_2O, \text{污水处理}}$ )

$N_2O$ 可作为硝化过程的副产物也可作为反硝化过程的中间产物而释放,释放过程受工艺类型、碳氮比、DO浓度、监测方法等众多因素影响,尚未形成统一的计算方法。 $N_2O$ 释放量的估算通常采用经验转化率,其中IPCC指南推荐取值0.008~0.39 kg $N_2O$ /kgTN之间,同时有关文献结果表明<sup>[21]</sup>通过接种实际污水厂污泥,测得不同条件下 $N_2O$ 平均转化率为0.04 kg $N_2O$ /kgTN,因此取 $N_2O$ 转化率( $EF_{N_2O, \text{污水处理}}$ )为0.04 kg $N_2O$ /kgTN,从而计算污水处理过程 $N_2O$ 产生量( $M_{N_2O, \text{污水处理}}$ ),如下式所示:

$$M_{N_2O, \text{污水处理}} = Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}}) \times EF_{N_2O, \text{污水处理}} \times 10^{-2} = 4 \times 10^{-4} \times Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}}) \quad (6)$$

$N_2O$ 的全球增温潜势( $G_{N_2O}$ )为298 t $CO_2$ /t $N_2O$ ,故 $N_2O$ 类碳排放( $E_{N_2O, \text{污水处理}}$ )可写为:

$$E_{N_2O, \text{污水处理}} = G_{N_2O} \times M_{N_2O, \text{污水处理}} = 0.1192 \times Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}}) \quad (7)$$

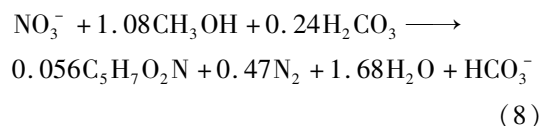
式中: $E_{N_2O, \text{污水处理}}$ 为污水处理环节 $N_2O$ 类碳排放量,t $CO_2$ /月; $M_{N_2O, \text{污水处理}}$ 为 $N_2O$ 产生量,t $N_2O$ /月; $TN_{\text{进水}}$ 、 $TN_{\text{出水}}$ 分别为进、出水TN浓度,mg/L; $Q$ 为处理水量, $10^4$  m<sup>3</sup>/月,可由“信息系统”直接查询。

##### ② $CO_2$ 类碳排放( $E_{CO_2 \text{ 外碳源}}$ )

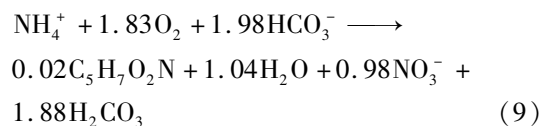
外加碳源作为电子供体在反硝化脱氮过程中被氧化为碱度( $HCO_3^-$ ),在硝化过程中又被转化为 $CO_2$ 。

硝化反硝化过程的化学计量方程式为:

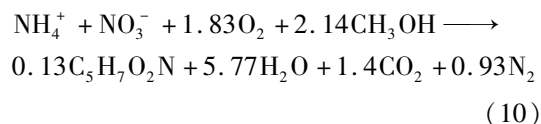
反硝化过程:



硝化过程:



硝化反硝化过程化学计量方程式合并为:



根据文献资料可知<sup>[22-23]</sup>,每消耗1 kg 甲醇产生0.9 kg  $CO_2$ ,同时结合甲醇氧当量(1.5 mg/mg)可知,脱氮过程中外加碳源(以氧当量计)的 $CO_2$ 理论转化率( $EF_{CO_2 \text{ 外碳源}}$ )为0.675 kg $CO_2$ /kgBOD 碳源。结合“信息系统”运营项目月报表登记的外加碳源信息, $CO_2$ 类碳排放量( $E_{CO_2 \text{ 外碳源}}$ )可按式计算:

$$E_{CO_2 \text{ 外碳源}} = M_{\text{碳源}} \times \eta_{\text{碳源}} \times BOD_{\text{碳源}} \times EF_{CO_2 \text{ 外碳源}} = 0.675 \times M_{\text{碳源}} \times \eta_{\text{碳源}} \quad (11)$$

式中: $E_{CO_2 \text{ 外碳源}}$ 为外加碳源转化的 $CO_2$ 排放量,t $CO_2$ /月; $M_{\text{碳源}}$ 为外加碳源投加量,t/月; $\eta_{\text{碳源}}$ 为外加碳源有效成分含量,%; $BOD_{\text{碳源}}$ 为外加碳源的氧当量。

$M_{\text{碳源}}$ 、 $\eta_{\text{碳源}}$ 由“信息系统”直接查询, $BOD_{\text{碳源}}$ 由“信息系统”查询碳源种类后,经理论计算获取。

#### 2.1.2 污泥卫生填埋碳排放( $E_{\text{卫生填埋}}$ )

污泥中的C、N元素在卫生填埋环节将产生

CH<sub>4</sub>,其处理处置过程会产生碳排放效应。针对污泥卫生填埋的碳排放估算,IPCC 指南提供了两种方法,分别为质量平衡法和一阶衰减法。一阶衰减法需要污泥填埋场 50 年以上监测数据,计算方法并不适用于我国,故采用质量平衡法。污泥卫生填埋 CH<sub>4</sub> 排放因子(EF<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub>)采用 IPCC 指南推荐公式:

$$EF_{CH_4,卫生填埋} = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 = 0.15 \text{ kgCH}_4/\text{kg} \quad (12)$$

式中:MCF 为甲烷产生量修正因子,根据我国实际污泥泥质,取 0.92;DOC 为污泥中可分解有机碳比例;DOC<sub>F</sub> 为可分解转为 CH<sub>4</sub> 的 DOC 比例;F 为 CH<sub>4</sub> 在填埋气体中的比例;16/12 为 CH<sub>4</sub> 和 C 分子质量比率。

DOC、DOC<sub>F</sub>、F 均取 IPCC 指南的推荐值,分别为 0.5 kgC<sub>DOC</sub>/kgVS(污泥中挥发性固体)、0.5 kgCH<sub>4</sub>-C/kgC<sub>DOC</sub>、0.5。

基于此,结合“信息系统”运营项目月报表中登记的污泥处置途径及处置量信息,污泥填埋 CH<sub>4</sub> 排放量(M<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub>)测算公式如下:

$$M_{CH_4,卫生填埋} = [\omega_{卫生填埋} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times EF_{CH_4,卫生填埋} - R_{CH_4,卫生填埋}] \times (1 - OX) = 0.14 \times \omega_{卫生填埋} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (13)$$

式中:M<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub> 为污泥卫生填埋环节 CH<sub>4</sub> 产生量,tCH<sub>4</sub>/月;ω<sub>卫生填埋</sub> 为污泥填埋率,%;Q<sub>w</sub> 为脱水污泥量,t/月;R<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub> 为污泥填埋场 CH<sub>4</sub> 回收量,取 0;OX 为污泥中碳的氧化因子;γ 为“信息系统”中填报的污泥含水率,%。

ω<sub>卫生填埋</sub> 可由“信息系统”查询的污泥卫生填埋量及污泥处置总量计算得到;R<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub> 取 0(一般不在污水厂统计);OX 采用 IPCC 指南推荐值,取 0.1。

污泥填埋 CH<sub>4</sub> 类碳排放量(E<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub>)测算公式如下:

$$E_{CH_4,卫生填埋} = G_{CH_4} \times M_{CH_4,卫生填埋} = 21 \times M_{CH_4,卫生填埋} = 2.94 \times \omega_{卫生填埋} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (14)$$

式中:E<sub>CH<sub>4</sub>,卫生填埋</sub> 为污泥填埋 CH<sub>4</sub> 类碳排放量,tCO<sub>2</sub>/月;G<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为 CH<sub>4</sub> 的全球增温潜势,取值 21 tCO<sub>2</sub>/tCH<sub>4</sub>。

### 2.1.3 污泥土地利用环节碳排放(E<sub>土地利用</sub>)

污泥土地利用环节 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量(M<sub>CH<sub>4</sub>,土地利用</sub>、M<sub>N<sub>2</sub>O,土地利用</sub>)采用排放系数法核算。据报道,土地利用 CH<sub>4</sub> 的排放因子(EF<sub>CH<sub>4</sub>,土地利用</sub>)取 0.003 kgCH<sub>4</sub>/kgVS, N<sub>2</sub>O 的排放因子(EF<sub>N<sub>2</sub>O-N,土地利用</sub>)取 0.011 kgN<sub>2</sub>O/kgVS,且污泥细胞质 N 含量(δ<sub>N</sub>)可取 0.12,结合“信息系统”运营项目月报表中登记的污泥处置途径及处置量信息,污泥土地利用(E<sub>土地利用</sub>)CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放量可写成下式:

$$M_{CH_4,土地利用} = \omega_{土地利用} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times EF_{CH_4,土地利用} = 3 \times 10^{-3} \times \omega_{土地利用} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (15)$$

$$M_{N_2O,土地利用} = \omega_{土地利用} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times \delta_N \times EF_{N_2O-N,土地利用} \times 44/28 = 1.2 \times 10^{-3} \times \omega_{土地利用} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (16)$$

式中:f 为污泥中有机组分比例。

根据文献<sup>[24-26]</sup>,厌氧消化 VS 去除率按 54.5%计,f 为 VS/TS(污泥中挥发性固体/总固体)比值,取 0.6。

污泥土地利用碳排放量(E<sub>土地利用</sub>)计算如下:

$$E_{土地利用} = G_{CH_4} \times M_{CH_4,土地利用} + G_{N_2O} \times M_{N_2O,土地利用} = 21 \times M_{CH_4,土地利用} + 298 \times M_{N_2O,土地利用} = 0.42 \times \omega_{土地利用} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (17)$$

式中:E<sub>土地利用</sub> 为污泥土地利用碳排放量,tCO<sub>2</sub>/月;M<sub>CH<sub>4</sub>,土地利用</sub> 为污泥土地利用 CH<sub>4</sub> 产量,tCH<sub>4</sub>/月;M<sub>N<sub>2</sub>O,土地利用</sub> 为污泥土地利用 N<sub>2</sub>O 产量,tN<sub>2</sub>O/月;ω<sub>土地利用</sub> 为污泥土地利用量,可由“信息系统”查询污泥土地利用量、污泥处置总量,经简单计算可得。

## 2.2 间接碳排放(E<sub>间接</sub>)测算过程

### 2.2.1 污水处理厂运行耗电碳排放(E<sub>电能</sub>)

污水厂运行所需耗能主要为电能,其中电能消耗主要用于污水和污泥的输送、混合、供氧、污泥脱水及特种物质(O<sub>3</sub>、ClO<sub>2</sub>)现场制备等设备运行。

国家发改委公布的《2016 年中国区域电网基准线排放因子(征求意见稿)》提供了华北、东北、华东、华中、西北、南方区域的电能生产碳排放因子,取其平均值 0.94 tCO<sub>2</sub>/(MW·h)作为电能生产碳排放因子(EF<sub>D</sub>),则电能生产碳排放(E<sub>电能</sub>)可按下式



计算:

$$E_{\text{电能}} = D \times EF_D \times 10^{-3} = 9.4 \times 10^{-4} \times D \quad (18)$$

式中:  $E_{\text{电能}}$  为电能生产间接碳排放量,  $\text{tCO}_2/\text{月}$ ;  $D$  为用电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{月}$ , 由“信息系统”直接查询。

## 2.2.2 污水处理厂药剂生产碳排放( $E_{\text{药剂生产}}$ )

污水厂运行所需药剂包括外加碳源、除磷药剂、污泥脱水药剂等。药剂生产过程中温室气体的排放因子可从相关文献获取<sup>[27-28]</sup>, 比如甲醇的碳排放因子( $EF_{\text{甲醇}}$ )可取  $1.54 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$  甲醇, 除磷药剂和脱水药剂的碳排放因子( $EF_{\text{混凝剂}}$ )均可取  $25 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$  混凝剂, 石灰的碳排放因子( $EF_{\text{石灰}}$ )可取  $1.74 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$  石灰等。结合“信息系统”外加碳源、除磷药剂、脱水药剂信息, 药剂生产的碳排放量( $E_{\text{药剂生产}}$ )可按下式计算:

$$E_{\text{药剂生产}} = M_{\text{碳源}} \times EF_{\text{碳源}} + M_{\text{除磷药剂}} \times EF_{\text{除磷药剂}} + M_{\text{脱水药剂}} \times EF_{\text{脱水药剂}} = 1.54 \times M_{\text{甲醇}} + 25 \times (M_{\text{除磷药剂}} + M_{\text{脱水药剂}}) \quad (19)$$

式中:  $E_{\text{药剂生产}}$  为药剂生产碳排放量,  $\text{tCO}_2/\text{t}$  药剂;  $M_{\text{碳源}}$ 、 $M_{\text{除磷药剂}}$ 、 $M_{\text{脱水药剂}}$  分别为各种药剂投加量,  $\text{t}/\text{月}$ , 由“信息系统”直接查询。

## 2.3 碳减排( $J_{\text{减排}}$ )测算过程

碳减排( $J_{\text{减排}}$ )可分解成  $J_{\text{水质提升}}$ 、 $J_{\text{厌氧消化}}$ 、 $J_{\text{好氧消化}}$  和  $J_{\text{土地利用}}$ 。

### 2.3.1 水质提升碳减排( $J_{\text{水质提升}}$ )

因水质提升带来水环境碳减排, 故污水处理厂对环境的影响总体是积极作用。受纳水体向大气中排放温室气体。假如向受纳水体直接排放污水, 向大气排放的温室气体量计为  $E_1$ ; 向受纳水体补入再生水, 向大气排放的温室气体量计为  $E_2$ ; 则由水质提升再生利用带来的碳减排  $J_{\text{水质提升}} = E_1 - E_2$ 。

根据 IPCC 指南, 地表水体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的排放因子( $EF_{\text{CH}_4, \text{地表水体}}$ 、 $EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{地表水体}}$ )是基于排入受纳水体的  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{TN}$  质量提出的, 分别取  $0.06 \text{ kgCH}_4/\text{kgBOD}_5$ 、 $0.008 \text{ kgN}_2\text{O}/\text{kgTN}$ 。每向受纳水体排入  $1 \text{ kg BOD}_5$  或  $1 \text{ kg TN}$ , 将向大气中排放  $0.06 \text{ kg CH}_4$ 、 $0.008 \text{ kg N}_2\text{O}$ 。水质提升所产生的碳减排公式如下:

$$J_{\text{水质提升}} = [Q \times (\text{BOD}_{5\text{进水}} - \text{BOD}_{5\text{出水}}) \times G_{\text{CH}_4} \times EF_{\text{CH}_4, \text{地表水体}} + Q \times (\text{TN}_{\text{进水}} - \text{TN}_{\text{出水}}) \times G_{\text{N}_2\text{O}} \times EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{地表水体}}] \times 10^{-2} \quad (20)$$

将公式简化如下:

$$J_{\text{水质提升}} = 0.0126 \times Q \times (\text{BOD}_{5\text{进水}} - \text{BOD}_{5\text{出水}}) +$$

$$0.0238 \times Q \times (\text{TN}_{\text{进水}} - \text{TN}_{\text{出水}}) \quad (21)$$

### 2.3.2 污泥消化碳减排( $J_{\text{厌氧消化}}$ 、 $J_{\text{好氧消化}}$ )

污泥消化碳减排, 是指污泥经厌氧消化或好氧消化处理后, 有机组分降低, 使其在卫生填埋或土地利用等处置环节向大气中排放  $\text{CH}_4$  量减少。因此, 该部分碳减排量的计算分两个阶段, 一是污泥有机组分的降低量( $\Delta\text{VS}$ )的计算, 根据污泥消化过程的化学计量学进行理论计算; 二是  $\Delta\text{VS}$  在污泥处置环节中能产生的  $\text{CH}_4$  量的计算。信息系统内的总耗电量数据中, 应已扣减该部分能量回收的发电量, 不能将能量回收的值计算在内, 否则重复。污泥厌氧消化过程见图 3, 污泥好氧消化过程见图 4。

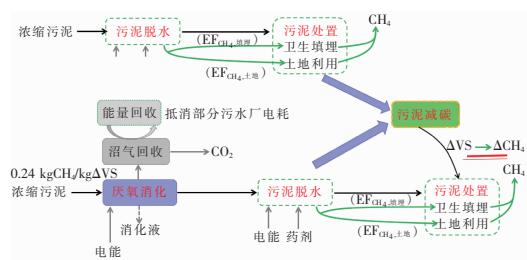


图 3 污泥厌氧消化过程

Fig. 3 Sludge anaerobic digestion process

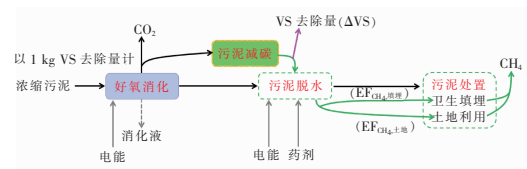
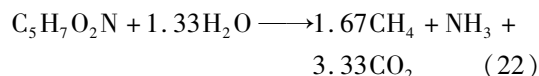


图 4 污泥好氧消化过程

Fig. 4 Sludge aerobic digestion process

#### ① 污泥厌氧消化碳减排( $J_{\text{厌氧消化}}$ )

污泥处理环节主要考虑污泥厌氧消化过程产生的  $\text{CH}_4$ , 之后被收集利用。厌氧消化实质是污泥细胞质的厌氧降解,  $\text{CH}_4$  产生量根据 Buswell - Mueller 通式推导的化学计量方程形式计算:



进而推导出污泥厌氧消化处理碳减排的计算公式:

$$\Delta\text{VS}_{\text{厌氧消化}} = Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times \beta_{\text{VS}} / (1 - \beta_{\text{VS}}) \quad (23)$$

$$J_{\text{厌氧消化}} = \varepsilon_{\text{厌氧消化}} \times G_{\text{CH}_4} \times (\varepsilon_{\text{填埋}} \times \Delta\text{VS}_{\text{厌氧消化}} \times EF_{\text{CH}_4, \text{填埋}} + \varepsilon_{\text{土地}} \times \Delta\text{VS}_{\text{厌氧消化}} \times$$

$$EF_{CH_4, \text{土地}}) \quad (24)$$

式中:  $J_{\text{厌氧消化}}$  为污泥厌氧消化过程的碳减排量,  $tCO_2/\text{月}$ ;  $\varepsilon_{\text{厌氧消化}}$ 、 $\varepsilon_{\text{填埋}}$ 、 $\varepsilon_{\text{土地}}$  均为污泥处理处置措施选择参数;  $f$  为污泥中有机组分比例;  $\Delta VS_{\text{厌氧消化}}$  为污泥厌氧消化过程中 VS 去除量,  $t/\text{月}$ ;  $\beta_{VS}$  为污泥厌氧消化过程中 VS 去除率。

根据 IPCC 指南的方法,  $EF_{CH_4, \text{填埋}}$  为  $0.15 \text{ kgCH}_4/\text{kg}$ ,  $EF_{CH_4, \text{土地}}$  为  $0.003 \text{ kgCH}_4/\text{kg}$ 。式(24)简化为:

$$J_{\text{厌氧消化}} = \varepsilon_{\text{厌氧消化}} \times (2.12 \times Q_{w, \text{填埋}} + 0.05 \times Q_{w, \text{土地利用}}) \times (1 - \gamma) \quad (25)$$

## ② 污泥好氧消化碳减排( $J_{\text{好氧消化}}$ )

同理可得到污泥好氧消化碳减排计算公式:

$$\Delta VS_{\text{好氧消化}} = Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times \alpha_{VS} / (1 - \alpha_{VS}) \quad (26)$$

$$J_{\text{好氧消化}} = \varepsilon_{\text{好氧消化}} \times G_{CH_4} \times (\varepsilon_{\text{填埋}} \times \Delta VS_{\text{好氧消化}} \times EF_{CH_4, \text{填埋}} + \varepsilon_{\text{土地}} \times \Delta VS_{\text{好氧}} \times EF_{CH_4, \text{土地}}) \quad (27)$$

式中:  $J_{\text{好氧消化}}$  为污泥好氧消化过程的碳减排量,  $tCO_2/\text{月}$ ;  $\varepsilon_{\text{好氧消化}}$  为污泥处理工艺选择参数,  $0/1$ ;  $\Delta VS_{\text{好氧消化}}$  为污泥好氧消化过程 VS 去除量,  $t/\text{月}$ ;  $\alpha_{VS}$  为污泥好氧消化过程 VS 去除率, 取 50%。

式(27)简化为:

$$J_{\text{好氧消化}} = \varepsilon_{\text{好氧消化}} \times (1.76 \times Q_{w, \text{填埋}} + 0.04 \times Q_{w, \text{土地利用}}) \times (1 - \gamma) \quad (28)$$

## 2.3.3 污泥作为土壤肥料的碳减排( $J_{\text{土地利用}}$ )

污泥 N、P 能被植物利用, 可替代硝酸铵、过磷酸钙等化肥原料。据估算, 污泥土地利用可增加 12% ~ 137% 的植物固碳量。化肥硝酸铵生产能耗 ( $EF_{\text{硝酸铵}}$ ) 为  $1 \text{ GJ/t}$  硝酸铵, 过磷酸钙生产能耗 ( $EF_{\text{过磷酸钙}}$ ) 为  $1.3 \text{ GJ/t}$  过磷酸钙。结合污泥细胞 N 含量 ( $\delta_N$ ) 为 0.12 (可被植物利用 61%), P 含量 ( $\delta_P$ ) 为 0.02 (可被植物利用 70%), 则污泥土地利用替代化肥的碳减排量:

$$J_{\text{土地利用}} = \omega_{\text{土地利用}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times EF_{\text{天然气}} \times (0.61 \times P_{\text{NH}_4\text{NO}_3} \times \delta_N \times EF_{\text{硝酸铵}} + 0.7 \times P_{\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2} \times \delta_P \times EF_{\text{过磷酸钙}}) \times 10^{-3} = 0.01 \times \omega_{\text{土地利用}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (29)$$

式中:  $J_{\text{土地利用}}$  为污泥土地利用替代化肥的碳减排量,  $tCO_2/\text{月}$ ;  $P_{\text{NH}_4\text{NO}_3}$  为  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  与 P 的分子质量比率, 取值 2.8;  $P_{\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2}$  为  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  与 P 的分

子质量比率, 取值 3.8;  $EF_{\text{天然气}}$  为天然气消耗的  $CO_2$  排放因子, 取值  $51\,600 \text{ kg/TJ}$ 。

## 2.4 各项基本计算方法

对上述各分项公式进行总结归纳, 公式中各项基本计算方法见表 2。

表 2 各分项计算方法

Tab. 2 Calculation method of each item

分项	计算公式
碳减排	$J_{\text{水质提升}} = 0.012 \times Q \times (BOD_{5\text{进水}} - BOD_{5\text{出水}}) + 0.023 \times Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}})$
	$J_{\text{厌氧消化}} = \varepsilon_{\text{厌氧消化}} \times (2.12 \times Q_{w, \text{填埋}} + 0.05 \times Q_{w, \text{土地利用}}) \times (1 - \gamma)$
	$J_{\text{好氧消化}} = \varepsilon_{\text{好氧消化}} \times (1.76 \times Q_{w, \text{填埋}} + 0.04 \times Q_{w, \text{土地利用}}) \times (1 - \gamma)$
	$J_{\text{土地利用}} = 0.01 \times Q_{w, \text{土地利用}} \times (1 - \gamma)$
间接碳排放	$E_{\text{电能}} = 9.4 \times 10^{-4} \times D$
	$E_{\text{药剂生产}} = 1.54 \times M_{\text{甲醇}} + 25 \times (M_{\text{除磷药剂}} + M_{\text{脱水药剂}})$
直接碳排放	$E_{CO_2\text{外碳源}} = 0.675 \times M_{\text{碳源}} \times \eta_{\text{碳源}}$
	$E_{N_2O, \text{污水处理}} = 0.119 \times Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}})$
	$E_{CH_4, \text{卫生填埋}} = 2.94 \times Q_{w, \text{填埋}} \times (1 - \gamma)$
	$E_{\text{土地利用}} = 0.42 \times Q_{w, \text{土地利用}} \times (1 - \gamma)$

## 3 污水处理厂提标运行碳排放变化分析

目前, 污水处理厂提标改造主要有两种途径: 一是生物段碳源和除磷药剂投加, 二是增加深度处理工艺。虽然污水厂出水水质逐步提高, 但投入的能耗物耗、设备工程、人工成本逐年增加, 进而导致碳排放量增加。以污泥增加、外加碳源、除磷药剂、电耗增加为核心的碳排放增量模型的建立, 可为环境容量稳定、排放标准制定以及政府决策提供参考。污水厂出水水质由一级 B 提高至一级 A 是污水处理厂提标改造趋势, 可重点计算已有的污水处理厂升级改造后, 不同提标改造分项部分碳排放增量贡献值, 以及贡献比例。通过三个案例计算可知, 污水厂提标改造过程中外加碳源和除磷药剂导致的碳排放增量所占比例达到 80% 以上。

### 3.1 案例污水厂选取依据

根据北京、天津、江苏污水厂基础信息表格中数据, 查找 2007 年—2019 年各月份污水厂出水 COD、BOD<sub>5</sub>、TN、TP, 并作图表。根据图表上变化趋势, 筛选出北京、天津和江苏典型污水厂进行碳排放增量计算。筛选的污水厂特征: 出水水质由二级提标至一级 A、二级提标至一级 B、一级 B 提标至一级 A, 之后对筛选出的污水厂进行碳排放增量计算。

3.2 案例分析

3.2.1 案例 1

北京大兴区黄村污水处理厂 2013 年 11 月提标后,出水水质标准由二级提高至一级 B,设计处理规模为由提标前  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  提升至  $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实际处理规模约为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;2016 年 1 月再次提标,出水水质由一级 B 提高至一级 A 标准。污泥无消化过程且经脱水全部填埋处置,污泥含水率  $\gamma$  为 79%。两次提标前后  $\text{BOD}_{5\text{进水}}$ 、 $\text{BOD}_{5\text{出水}}$ 、 $\text{TN}_{\text{进水}}$ 、 $\text{TN}_{\text{出水}}$  和污水处理系统吨水电耗  $K_e$  月均值见表 3,投加碳源为甲醇,除磷药剂为硫酸铝。

表 3 案例 1 两次提标前后运行指标月均值

Tab.3 Monthly average values of operation indices before and after twice upgrading of case 1

项 目	二级标准	一级 B 标准	一级 A 标准
$\text{BOD}_{5\text{进水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	196	230.0	254.54
$\text{BOD}_{5\text{出水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	12.8	3.3	3.43
$\text{TN}_{\text{进水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	64.11	57.64	61.43
$\text{TN}_{\text{出水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	22.19	19.07	7.48
$K_e/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	0.25	0.79	0.81
$C_{\text{甲醇}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	10.68	19.83
$C_{\text{混凝剂}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	19.33	26.41

将表 3 中的数据及参数代入碳排放模型公式,通过计算可得出北京大兴区黄村污水处理厂碳排放各分项增量,增量清单见表 4。由表 4 可知,该厂出水水质标准由二级提标至一级 B 后,吨水碳排放增量  $\Delta M_1 = -199.39 \text{ gCO}_2/\text{m}^3$ ,导致向外界环境中的碳排放量每天减少 19.94 t  $\text{CO}_2$ 。出水水质标准由一级 B 提标至一级 A 后,吨水碳排放增量  $\Delta M_2 = 145.33 \text{ gCO}_2/\text{m}^3$ ,则导致向外界环境中的碳排放量每天增加 14.53 t  $\text{CO}_2$ 。

表 4 案例 1 碳排放增量各分项清单

Tab.4 Each subentry inventory of carbon emission increment of case 1  $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$

项 目	二级标准	一级 B 标准后	一级 A 标准后
$J_{\text{水质提升}}$	-169.78	-406.78	-612.89
$J_{\text{厌氧消化}}$	-315.67	-666.89	-803.44
$J_{\text{好氧消化}}$	0	0	0
$J_{\text{土地利用}}$	-13.54	-28.78	-28.48
$E_{\text{电能}}$	889	1 084	1 450
$E_{\text{药剂生产}}$	1 548	1 790	1 894
$E_{\text{CO}_2\text{外碳源}}$	115.89	97.67	103.45
$E_{\text{CH}_4, \text{卫生填埋}}$	140.98	182.96	153.29
$E_{\text{土地利用}}$	152.45	95.76	137.34

3.2.2 案例 2

天津咸阳路污水处理厂于 2010 年 12 月提标后,出水水质标准由二级标准提高至一级 B,设计处理规模为  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实际处理规模约为  $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。污泥无消化过程且经脱水全部填埋处置,污泥含水率  $\gamma$  为 80%。提标前后  $\text{BOD}_{5\text{进水}}$ 、 $\text{BOD}_{5\text{出水}}$ 、 $\text{TN}_{\text{进水}}$ 、 $\text{TN}_{\text{出水}}$  和污水处理系统吨水电耗  $K_e$  月均值见表 5,投加碳源为甲醇,除磷药剂为聚合氯化铝。

表 5 案例 2 提标前后运行指标月均值

Tab.5 Monthly average values of operation indices before and after upgrading of case 2

项 目	二级标准	一级 B 标准后
$\text{BOD}_{5\text{进水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	162	177.15
$\text{BOD}_{5\text{出水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	14.76	7.41
$\text{TN}_{\text{进水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	53.97	55.99
$\text{TN}_{\text{出水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	39.15	17.69
$K_e/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	0.22	0.23
$C_{\text{甲醇}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	2.59
$C_{\text{混凝剂}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	0.77

通过计算可得出天津咸阳路污水处理厂碳排放各分项增量,增量清单见表 6。由表 6 可知,该厂出水水质标准由二级提标至一级 B 后,吨水碳排放增量  $\Delta M = -174.34 \text{ gCO}_2/\text{m}^3$ ,导致向外界环境中的碳排放量每天减少 61.02 t  $\text{CO}_2$ 。

表 6 案例 2 碳排放增量各分项清单

Tab.6 Each subentry inventory of carbon emission increment of case 2  $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$

项 目	二级标准	一级 B 标准后
$J_{\text{水质提升}}$	-123.67	-356.11
$J_{\text{厌氧消化}}$	-231.34	-486.79
$J_{\text{好氧消化}}$	0	0
$J_{\text{土地利用}}$	-23.88	-37.34
$E_{\text{电能}}$	693	807
$E_{\text{药剂生产}}$	890	1 124
$E_{\text{CO}_2\text{外碳源}}$	98.45	72.34
$E_{\text{CH}_4, \text{卫生填埋}}$	137.91	134.65
$E_{\text{土地利用}}$	103.66	112.04

3.2.3 案例 3

江苏省常州地区金坛市第一污水处理厂于 2009 年 9 月提标后,出水水质标准由一级 B 提高至一级 A,设计处理规模为  $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实际处理规模为  $2.85 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。污泥无消化过程且经脱水全部填埋处置,污泥含水率  $\gamma$  为 79.4%。提标前后  $\text{BOD}_{5\text{进水}}$ 、 $\text{BOD}_{5\text{出水}}$ 、 $\text{TN}_{\text{进水}}$ 、 $\text{TN}_{\text{出水}}$  和污水处理系统吨

水电耗  $K_e$  月均值见表7,投加碳源为甲醇,除磷药剂为聚合氯化铝。

表7 案例3 提标前后运行指标月均值

Tab.7 Monthly average values of operation indices before and after upgrading of case 3

项 目	一级 B 标准	一级 A 标准后
$BOD_{5\text{进水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	116.85	69.64
$BOD_{5\text{出水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	12.94	4.04
$TN_{\text{进水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	38.77	30.94
$TN_{\text{出水}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	15.76	10.67
$K_e/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	0.36	0.48
$C_{\text{甲醇}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	11.51
$C_{\text{混凝剂}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	55.23

通过计算可得出金坛市第一污水处理厂碳排放各分项增量,增量清单见表8。由表8可知,该厂出水水质标准由一级B提标至一级A后,吨水碳排放增量  $\Delta M = 22.35 \text{ gCO}_2/\text{m}^3$ ,导致向外界环境中的碳排放量每天增加  $0.64 \text{ t CO}_2$ 。

表8 案例3 碳排放增量各分项清单

Tab.8 Each subentry inventory of carbon emission increment of case 3  $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$

项 目	一级 B 标准	一级 A 标准后
$J_{\text{水质提升}}$	-240.19	-432.77
$J_{\text{厌氧消化}}$	-653.22	-769.22
$J_{\text{好氧消化}}$	0	0
$J_{\text{土地利用}}$	-37.9	-50.23
$E_{\text{电能}}$	790	903
$E_{\text{药剂生产}}$	1 094	1 275
$E_{\text{CO}_2\text{外碳源}}$	67.15	84.66
$E_{\text{CH}_4\text{,卫生填埋}}$	137.81	148.34
$E_{\text{土地利用}}$	66.95	88.17

## 4 结论

根据国际IPCC温室气体清单指南、“全国城镇污水处理信息管理系统”和我国温室气体清单研究成果,结合城镇污水处理厂系统特点,以污水处理系统产生的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、生物成因产生的  $\text{CO}_2$  和能源消耗产生的  $\text{CO}_2$  为研究对象,对  $\text{A}^2/\text{O}$  为代表的污水处理系统和污泥处理处置系统碳排放进行了核算和研究。系统建立了以碳排放为基准的城镇污水处理全流程节能减排综合测算方法,提出污水处理和污泥处理处置碳排放核算方法和模型,为后期提标项目决策和工程设计方案的环境影响分析提供参考。

结合数据平台中污水处理厂实例,对污水处理厂提标改造后碳排放增加情况进行了分析计算,结

果表明,适当提高污水处理厂出水水质标准将有利于碳减排。但一味地提高出水水质,不仅造成污水处理厂处理污水成本的提高,而且会导致污水处理厂碳排放增加。

## 参考文献:

- [1] FYTILI D, ZABANIOTOU A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008,12(1):116–140.
- [2] 郝晓地,刘然彬,胡沅胜. 污水处理厂“碳中和”评价方法创建与案例分析[J]. 中国给水排水,2014,30(2):1–7.  
HAO Xiaodi, LIU Ranbin, HU Yuansheng. Creation of evaluation method of “carbon neutral” for WWTPs and analysis of a practical case [J]. China Water & Wastewater, 2014,30(2):1–7 (in Chinese).
- [3] 张成. 重庆市城镇污水处理系统碳排放研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.  
ZHANG Cheng. Study on Carbon Emission of Urban Wastewater Treatment System in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011 (in Chinese).
- [4] 郭盛杰,黄海伟,董欣,等. 中国城镇污水处理行业温室气体排放核算及其时空特征分析[J]. 给水排水, 2019,45(4):56–62.  
GUO Shengjie, HUANG Haiwei, DONG Xin, et al. Calculation of greenhouse gas emissions of municipal wastewater treatment and its temporal and spatial trend in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4):56–62 (in Chinese).
- [5] 李欢,金宜英,李洋洋. 污水污泥处理的碳排放及其低碳化策略[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(2):117–121,131.  
LI Huan, JIN Yiyang, LI Yangyang. Carbon emission and low-carbon strategies of sewage sludge treatment [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2011,33(2):117–121,131 (in Chinese).
- [6] 常江,杨岸明,甘一萍,等. 城市污水处理厂能耗分析及节能途径[J]. 中国给水排水,2011,27(4):33–36.  
CHANG Jiang, YANG Anming, GAN Yiping, et al. Energy consumption analysis and energy saving solutions in WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(4):33–36 (in Chinese).
- [7] 郝晓地,王向阳,江瀚,等. 污水处理环境综合效益评价方法及案例应用[J]. 中国给水排水,2019,35(6):



- 6-15.  
HAO Xiaodi, WANG Xiangyang, JIANG Han, *et al.* Evaluation method of the environmental comprehensive benefit for wastewater treatment and a case study [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (6): 6-15 (in Chinese).
- [8] 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与定量识别[J]. 给水排水, 2008, 34(10): 42-45.  
YANG Lingbo, ZENG Siyu, JU Yuping, *et al.* Statistical analysis and quantitative recognition of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34 (10): 42-45 (in Chinese).
- [9] 宋宝木, 秦华鹏, 马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析: 以深圳某污水处理厂为例[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(10): 204-209.  
SONG Baomu, QIN Huapeng, MA Gongqiang. Analysis for dynamic changes of wastewater treatment plant carbon emissions in operation phase: with a wastewater treatment plant in Shenzhen as an example [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38 (10): 204-209 (in Chinese).
- [10] BAO Z Y, SUN S C, SUN D Z. Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 108: 108-114.
- [11] DELRE A, MØNSTER J, SCHEUTZ C. Greenhouse gas emission quantification from wastewater treatment plants, using a tracer gas dispersion method [J]. Science of the Total Environment, 2017, 605/606: 258-268.
- [12] 梁松. 基于 LCA 的城市污水处理厂环境影响负荷研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
LIANG Song. Research on the Environmental Impact Load of the Urban Wastewater Treatment Plant by the Method of Life Cycle Assessment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [13] 杨帆. 重庆市城市污水处理厂升级改造的环境影响评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
YANG Fan. Environmental Impact Assessment of Urban Sewage Treatment Plant Upgrade in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).
- [14] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.  
WANG Changbo, ZHANG Lixiao, PANG Mingyue. A review on hybrid life cycle assessment: development and application [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (7): 1232-1242 (in Chinese).
- [15] MASUDA S, SANO I, HOJO T, *et al.* The comparison of greenhouse gas emissions in sewage treatment plants with different treatment processes [J]. Chemosphere, 2018, 193(1): 581-590.
- [16] 刘文博. 不同城市污水处理工艺中非二氧化碳温室气体产生与释放[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
LIU Wenbo. Non-carbon Dioxide Greenhouse Gas Emission from Different Municipal Wastewater Treatment Process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese).
- [17] SHAHABADI M B, YERUSHALMI L, HAGHIGHAT F. Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants—model development and application [J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1085-1092.
- [18] 谢淘, 汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 473-477.  
XIE Tao, WANG Chengwen. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology Edition), 2012, 52(4): 473-477 (in Chinese).
- [19] 赵晨晨. 污水处理工艺生命周期环境影响分析与比较[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
ZHAO Chencheng. Analysis and Comparison on the Life Cycle Environmental Impacts of Wastewater Treatment Process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [20] ZENG R J, LEMAIRE R, YUAN Z, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 84(2): 170-178.
- [21] 李静, 刘华超, 王龙, 等. 污水系统温室气体排放研究[J]. 水科学与工程技术, 2013(2): 35-37.  
LI Jing, LIU Huachao, WANG Long, *et al.* Research about the greenhouse gas emission of the wastewater system [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2013(2): 35-37 (in Chinese).
- [22] 孟春江. 中国煤化工行业温室气体排放核算研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.  
MENG Chunjiang. Research of Greenhouse Gas Emission Calculation Inventory in Coal Chemical industry of China [D]. Beijing: Tsinghua University,

- 2014(in Chinese).
- [23] 刘霞. 煤制甲醇过程的低温余热利用与碳减排工艺研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- LIU Xia. The Study on Low Temperature Waste Heat Utilization and Carbon Reduction of Coal-based Methanol Process [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016(in Chinese).
- [24] 刘鸿霞,周小伟,何强. 浓缩消化一体化反应器对污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水,2014,30(7):27-30.
- LIU Hongxia, ZHOU Xiaowei, HE Qiang. Study on dewaterability of sludge thickening and digestion reactor [J]. China Water & Wastewater,2014,30(7):27-30 (in Chinese).
- [25] 徐荣险. 城市污水污泥高温好氧/中温厌氧两级消化研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- XU Rongxian. Research on Urban Sewage Sludge Treatment with Thermophilic Aerobic/Mesophilic Anaerobic Digestion [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2010(in Chinese).
- [26] 杨翠. 好氧消化过程及污泥减量途径的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
- YANG Cui. Research on Aerobic Digestion Process and the Sludge Reduction Pathway[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [27] ZENG S Y, CHEN X, DONG X, *et al.* Efficiency assessment of urban wastewater treatment plants in China: considering greenhouse gas emissions [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 120: 157-165.
- [28] 张成,易建婷,陈宏,等. 重庆市城镇生活污水处理碳排放核算[J]. 西南大学学报(自然科学版),2014,36(9):135-139.
- ZHANG Cheng, YI Jianting, CHEN Hong, *et al.* Estimation of carbon emission from urban wastewater treatment in Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, 36(9): 135-139(in Chinese).

作者简介:张岳(1987-),男,山东聊城人,博士,高工,从事市政与环境工程专业科研工作,主要研究方向为污水深度处理技术、可持续环境生物技术、水体生态治理技术。

E-mail:tjdxhjzy@tju.edu.cn

收稿日期:2019-11-22

修回日期:2019-12-21

(编辑:孔红春)

(上接第64页)

- Journal of Applied Sciences and Environmental Management,2010. DOI:10.4314/jasem.v11i2.55019.
- [31] JI J J, CHEN G, ZHAO J. Preparation and characterization of amino/thiol bifunctionalized magnetic nanoadsorbent and its application in rapid removal of Pb(II) from aqueous system[J]. Journal of Hazardous Materials,2019,368:255-263.
- [32] ZHANG X X,SUN C L,ZHANG L, *et al.* Adsorption studies of cadmium onto magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@FePO<sub>4</sub> and its preconcentration with detection by electrothermal atomic absorption spectrometry[J]. Talanta,2018,181:352-358.
- [33] GE F,LI M M,YE H, *et al.* Effective removal of heavy metal ions Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> from aqueous solution by polymer-modified magnetic nanoparticles [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 211/212: 366-372.
- [34] HUANG Y X, KELLER A A. EDTA functionalized magnetic nanoparticle sorbents for cadmium and lead contaminated water treatment [J]. Water Research, 2015,80:159-168.

作者简介:郭晓婧(1995-),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为农业资源与环境。

E-mail:gxj1130@126.com

收稿日期:2020-09-09

修回日期:2020-10-08

(编辑:任莹莹)