

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.21.015

厌氧消化产甲烷量关键参数修正及碳排放计算

唐 婧, 杨佳豪, 李威潭, 孟子棋, 林治宏
(沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 根据北方地区某处理量为 $40\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的市政污水处理厂实际运行数据,对Sotemann污泥厌氧消化稳态模型污泥中的不可生物降解COD组分($f_{\text{PS},\text{up}}$)进行实测修正,获得修正的 $f_{\text{PS},\text{up}}=0.42$,将其应用于污泥厌氧消化稳态模型进而预测污水厂污泥厌氧消化工艺的甲烷产量。在浓缩池出泥量为 $1\,240\text{ m}^3/\text{d}$ 的条件下,甲烷产量可达 $14\,248\text{ m}^3/\text{d}$ 。采用情景分析法对沼气发电和沼气锅炉两种利用情景进行对比,有余热回收的沼气发电系统碳补偿量为 $73\,929\text{ kg/d}$ (以 CO_2 计),比沼气锅炉增加73%。

关键词: 厌氧消化模型; 参数修正; 甲烷预测产量; 沼气发电; 沼气锅炉

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0095-07

Correction of Key Parameters for Methane Production and Calculation of Carbon Emission in Anaerobic Digestion

TANG Jing, YANG Jia-hao, LI Wei-tan, MENG Zi-qi, LIN Zhi-hong
(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Utilizing the operational data from a municipal wastewater treatment plant in northern China, with a capacity of $40\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, the non-biodegradable COD component ($f_{\text{PS},\text{up}}$) in the sludge was measured and corrected based on Sotemann sludge anaerobic digestion steady-state model, resulting in a revised value of 0.42. This methodology was subsequently applied to the sludge anaerobic digestion steady-state model to predict methane production during the anaerobic digestion process in the wastewater treatment plant. When the treatment capacity of the thickening tank reached $1\,240\text{ m}^3/\text{d}$, the methane production could attain $14\,248\text{ m}^3/\text{d}$. A scenario analysis was conducted to evaluate two utilization options: biogas power generation and biogas boiler systems. The carbon offset of the biogas power generation system with waste heat recovery was calculated at $73\,929\text{ kg/d}$ (calculated in terms of CO_2), which represented a 73% increase compared to that of the biogas boiler.

Key words: anaerobic digestion model; parameter correction; predicted methane production; biogas power generation; biogas boiler

为实现“3060”碳达峰、碳中和的战略目标,我国在致力于水污染控制与治理的同时,积极寻求高效

低碳的污水处理厂碳中和运行模式。污水处理厂的剩余污泥中含有微生物、难降解污染物和大量有机

基金项目: 辽宁省教育厅重点攻关项目(LJKZZ20220081)

通信作者: 唐婧 E-mail: fairy_ben@163.com

物,需要对其进行妥善处理,否则会对环境造成严重危害。近年来,厌氧消化(AD)因其经济、高效、可持续的优势成为了实现污泥资源化的主流技术^[1]。其中沼气是厌氧污泥消化的必然产物,它能够在燃烧过程中同时产生电能和热能,因此被认为是一种潜力巨大的清洁能源。厌氧消化产生的沼气已经成为评估污水处理厂潜在能力的重要部分。

为了更深入地了解和优化厌氧消化过程,厌氧消化数学模型的概念在20世纪70年代被首次提出^[2]。2002年,IWA(国际水协)发布了厌氧消化模型1号(ADM1)。ADM1涵盖了多个生化反应步骤,包括底物的降解、产气、产酸、产碱等过程。到2006年,基于C、H、O和N守恒的Sotemann模型是包括了化学、生物和物理过程的双相污泥稳态厌氧消化的完整模型,通过进水的有机组分即可确定厌氧消化产物的浓度^[3],Sotemann模型需要输入进水颗粒COD浓度、不可生物降解COD浓度、厌氧消化生物量常数等6个参数,以确定剩余污泥厌氧消化的甲烷产量^[4]。而在ADM1中,输入底物通常需要28个变量来描述,相比之下,Sotemann模型更为简易。

Am等人^[5]通过ADM1和Sotemann厌氧消化稳态模型对初沉池污泥+剩余污泥、初沉池污泥+二沉池污泥和初沉池污泥等厌氧消化过程进行模拟分析,并预测了出水COD、pH和产气量等,与ADM1的预测值相比,对于不同的污泥类型,Sotemann模型都取得了较好的预测结果,适用范围更广。当实际产气量为90~244 L/d时,ADM1预测的产气量在163~316 L/d之间,而Sotemann模型预测的产气量在121~235 L/d之间,Sotemann模型在预测甲烷产量方面与实测值更为接近。

笔者以北方某污水处理厂为研究对象,引入了Sotemann厌氧消化模型中的关键参数——污泥中不可生物降解COD组分($f_{PS'up}$)的测定方法和预测甲烷产量的计算流程,对相关沼气利用情况进行碳补偿计算及分析。研究成果不仅在理论层面上拓展了对污泥厌氧消化过程的理解,也为污水处理厂产甲烷量预测提供了更准确的方法,并可为日后污水处理厂的升级改造和节能减排提供可行方案。

1 材料与方法

1.1 污泥来源及性质

污泥样品取自抚顺市某市政污水处理厂的浓

缩池。污泥密度为1.02 g/cm³,pH为6.5,含水率为97%,污泥沉降比(SV)为97.2%,混合液悬浮固体(MLSS)浓度为12.13 g/L,毛细吸水时间(CST)为46.2 s,污泥比阻(SRF)为11.31×10¹² m/kg。

1.2 $f_{PS'up}$ 的测定

污泥不可生物降解组分 $f_{PS'up}$ 的测定步骤如图1所示。泥水分离:将污水处理厂取回的泥水混合物充分搅拌均匀后,取出一定体积的混合液A,然后进行离心(10 min、3 000 r/min),将上层污水倒出,然后将分离得到的污泥记为污泥A。洗泥:将蒸馏水倒入盛有污泥A的容器中,并对其进行充分搅拌,之后在相同的条件下进行离心,取上清液后,再次加入蒸馏水,重复3次。 S_{up} 的测定:清洗过的污泥A经超声破碎处理后,将破碎的污泥移至烧杯中,并对其进行离心。接下来,使用孔径为0.45 μm的水系针式过滤器进行过滤,以测定破碎污泥的初始COD浓度 S_u ;随后进行连续曝气,并定时测定污泥的COD;当去除率趋于稳定时,表明可生物降解组分已经耗尽,此时容器内的COD即为 S_{up} 。污泥中不可生物降解COD组分的值 $f_{PS'up} = S_{up}/S_u$ 。

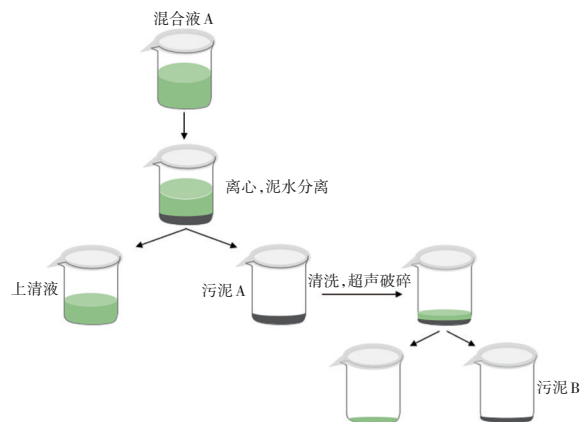


图1 $f_{PS'up}$ 的测定步骤

Fig.1 Procedures of testing $f_{PS'up}$

2 Sotemann模型及参数修正值的应用

2.1 Sotemann模型产甲烷量预测关键参数

Sotemann模型常被用于研究污泥的厌氧消化(AD)过程。区别于复杂动态模拟的AD模型,Sotemann稳态模型是基于气、液两相混合弱酸碱化学、物理和生物的动力学过程,仅需进行简单的直接计算:①基于COD质量平衡的动力学部分,用于计算可生物降解COD浓度、剩余可生物降解COD浓度、厌氧消化生物量和甲烷产量;②化学计量部分,

用于根据C、H、O和N的质量平衡以及可生物降解COD浓度等计算厌氧消化生物量、甲烷产量、溶解CO₂、气态CO₂和产生的铵盐(NH₄⁺)；③无机碳的弱酸/碱化学部分,基于CO₂分压和碳酸盐碱度计算反应器pH。

Sotemann 稳态模型将AD过程的速率与系统设计和操作参数关联起来,可以估算系统性能(如COD或VSS去除)的保留时间、反应器体积、气体产量和组成等。此外,该模型还可用于探究系统性能对设计和操作参数的敏感性,提供对模型模拟结果的交叉验证,并估算污水处理厂下游(或上游)单元操作中的产物浓度。

为了便于计算,Sotemann模型将COD分为4类(见图2),并定义污泥中不可生物降解COD组分的值为 $f_{PS'up}$,采用式(1)进行计算。

$$f_{PS'up} = f_{S'upSet} + \frac{1}{f_{psr}} (f_{S'upRaw} - f_{S'upSet}) \quad (1)$$

式中: $f_{S'upSet}$ 为沉淀出水中不溶性不可生物降解COD组分; $f_{S'upRaw}$ 为原水中不溶性不可生物降解COD组分; f_{psr} 为初沉池中去除的COD组分。

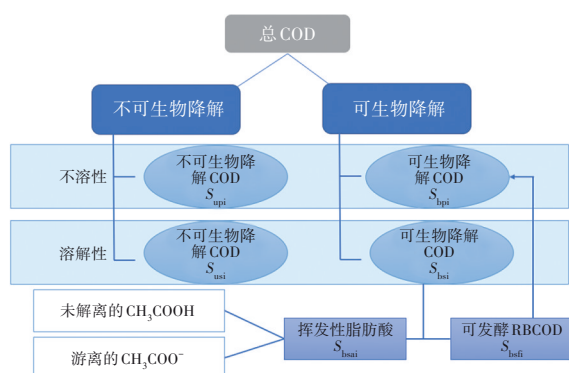


图2 Sotemann 稳态模型中污泥 COD 组分

Fig.2 COD fractions in Sotemann anaerobic digestion steady-state model

Sotemann模型根据南非典型市政污水的数据得出 $f_{PS'up}$ 值为0.36。不可生物降解组分影响着厌氧消化过程中挥发性固体(VS)的去除和沼气的产生^[6]。图3显示了原水中不可生物降解组分 f_{up} 分别为0.1和0.45时不同COD组分的质量占比。可以看出,随着 f_{up} 的增加,污泥浓缩池和消化池中可生物降解COD组分减少,即厌氧消化池的VS去除率和沼气产量均会下降。

因此,在污泥处理工艺单元中,不可生物降解

组分会直接影响厌氧消化池的产气潜力预测,这对模型结果的准确性至关重要。在使用Sotemann模型时,采用 $f_{PS'up}$ 参数缺省值不一定适合我国污水处理厂,当获得目标污水厂的 $f_{PS'up}$ 实测值时,才能更加准确地估算厌氧消化的产甲烷量,并评估沼气的

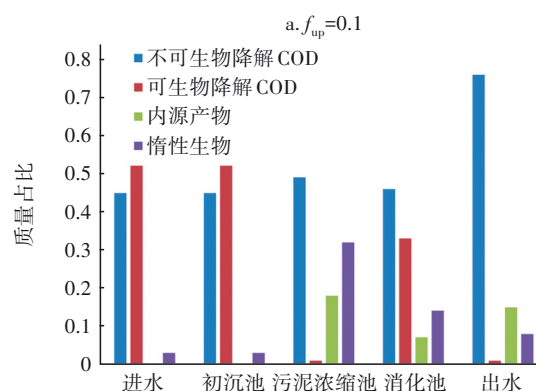
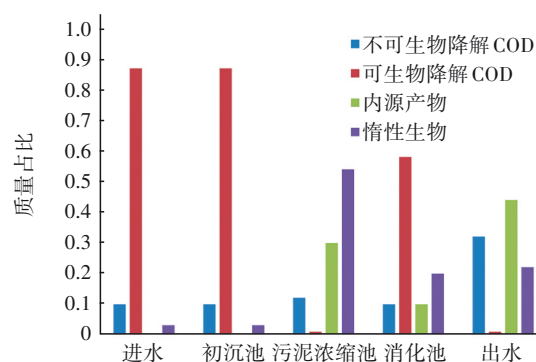


图3 不同 f_{up} 下不同处理单元中COD组分占比

Fig.3 Proportion of COD components in different treatment units under different f_{up} conditions

2.2 参数修正

在进行污泥COD测定之前,需要选择合适的污泥预处理方法^[7]。预处理方法按性质可分为化学性、物理性和生物性等^[8]。超声波预处理是一种省时、简单、成本低且环保的污泥物理预处理方法,而且还可以扩大降解聚合物的反应边界^[9]。因此,在进行COD组分测定时,首先需要利用超声波对污泥进行破碎。

污泥中不可生物降解COD可按式(2)计算^[10]。

$$S_{upi} = S_{ti} - S_{bi} - S_{usi} \quad (2)$$

式中: S_{upi} 为不可生物降解COD浓度; S_{ti} 为进水颗粒性污泥COD浓度; S_{bi} 为可生物降解COD浓度; S_{usi} 为溶解性不可生物降解COD浓度。

通过对破碎后的污泥进行连续曝气,可以有效去除污泥中的可生物降解COD(S_{bi}),而溶解性不可生物降解COD(S_{usi})通常处于很低的浓度,以至于其可以忽略不计。因此在Sotemann模型中,只需考虑污泥中不可溶的不可生物降解部分。首先通过计算进水颗粒性污泥COD(S_{ti})与可生物降解COD(S_{bi})的差值,可以得到污泥中不可生物降解COD(S_{upi}),然后通过计算 S_{upi} 和 S_{ti} 之间的比值得到污泥中不可生物降解COD组分 $f_{PS'up}$,即:

$$f_{PS'up} = (S_{ti} - S_{bi})/S_{ti} \quad (3)$$

挥发性脂肪酸浓度(S_{bsai})采用化学滴定法测定。将污泥离心上清液移至蒸馏烧瓶中,并加入适量蒸馏水和玻璃珠,随后注入15%的硫酸。使用橡胶塞严密封闭瓶口,并连接好玻璃导管。将导管一端连接烧瓶口,另一端连接冷凝管。将冷凝管下面的导管放入装有蒸馏水的锥形瓶中,蒸馏加热后使其冷却。蒸馏结束后,将锥形瓶取下并添加酚酞指示剂。随后,以0.10 mol/L的NaOH溶液进行滴定,直到淡粉色不再消失为止,记录NaOH用量并计算挥发性脂肪酸的含量(以乙酸量计)。

对处理后的浓缩池污泥进行多次检测和分析,其中 S_{ti} 、 S_{upi} 和 S_{bsai} 分别为13 132、5 537和1 290 mg/L。COD去除率变化曲线如图4所示。可知,在进行30 h的连续曝气处理后,污泥COD去除率趋于稳定。破碎污泥COD去除率达到57.83%,即其不可生物降解组分 $f_{PS'up}$ 为0.42,与Sotemann模型采用的0.36存在较大差异。

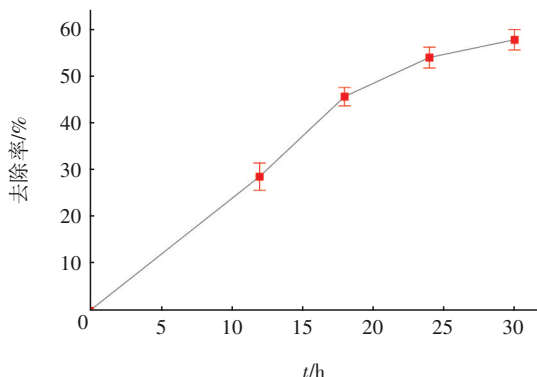


图4 COD去除率变化曲线

Fig.4 Curve of COD removal rate

2.3 厌氧消化池产甲烷量的预测

确定了污泥中不可生物降解COD组分后,利用Sotemann厌氧消化模型计算污水厂厌氧消化单元

的物料平衡并预测其甲烷产量,同时还可以评估污水厂的能源利用情况。进行厌氧消化池物料平衡计算所需的参数包括:厌氧消化池进水颗粒性污泥COD(S_{ti} , g/L),其为实测值;厌氧消化池进水颗粒性污泥中挥发性脂肪酸浓度(S_{bsai} , g/L),其为实测值,假设 S_{bsai} 只包含乙酸且均可转化为甲烷;污泥中不可生物降解COD组分($f_{PS'up}$),其为实测值,保留两位小数即0.42;进水可水解COD浓度(S_{bpi} , g/L);不可生物降解COD浓度(S_{upi} , g/L);剩余可生物降解COD浓度(S_{bpr} , g/L);去除的可生物降解COD浓度(S_{bpr} , g/L);产酸生物质浓度(Z_{AD} , g/L);出水不可生物降解COD浓度(S_{up} , g/L);出水总COD浓度(S_{te} , g/L)。

计算所需的相关公式如下:

$$S_{bpi} = (1 - f_{PS'up}) \times S_{ti} - S_{bsai} \quad (4)$$

$$S_{upi} = f_{PS'up} \times S_{ti} \quad (5)$$

$$S_{bp} = \frac{S_{bpi}}{\left\{ 1 + K_h R \frac{[1 + b_{AD} R(1 - Y_{AD})]}{(1 + b_{AD} R)} \right\}} \quad (6)$$

$$S_{bpr} = S_{bpi} - S_{bp} \quad (7)$$

$$Z_{AD} = \frac{Y_{AD}(S_{bpi} - S_{bp})}{[1 + b_{AD} R(1 - Y_{AD})]} \quad (8)$$

$$S_{up} = S_{upi} \quad (9)$$

$$S_{te} = S_{up} + S_{bp} + Z_{AD} \quad (10)$$

式中: K_h 为水解常数,取0.515; R 为水力停留时间,取30 d; b_{AD} 为产酸生物质内源呼吸速率,取0.041 d⁻¹; Y_{AD} 为产酸系数,即生物质与水解有机物的比值,取0.113。

K_h 取自Sotemann模型通过污泥厌氧消化数据集确定的不同保留时间下水解速率的平均值, b_{AD} 、 Y_{AD} 取自厌氧消化的产酸生物量常数的缺省值^[11]。

根据厌氧消化单元的物料守恒关系(见图5),可得出甲烷的产量为:

$$S_{ti} = Z_{AD} + S_{up} + S_{bp} + S_m \quad (11)$$

$$S_m = S_{ti} - S_{te} \quad (12)$$

式中: S_m 为产甲烷浓度。



图5 污泥厌氧消化池物料平衡

Fig.5 Mass balance in sludge anaerobic digester

还需要考虑挥发性脂肪酸 S_{bsai} 产生的甲烷,因此甲烷的总产量为:

$$S_{\text{总}} = S_{\text{m}} + S_{\text{bsai}} \tag{13}$$

将 2.2 节中所测数据代入,以计算厌氧消化池污泥产甲烷量,且标准状态下 1 m³ 甲烷的质量为 0.712 kg,可得 $S_{\text{总}}=11.49 \text{ kg/m}^3$ 。以该污水厂浓缩池为例,其出泥量为 1 240 m³/d,由此可以求出污水厂每天的甲烷产量为 11.49×1 240≈14 248 m³/d。

当 $f_{\text{PS,up}}$ 采用 Sotemann 模型中的 0.36 时,同理计算可得 $S_{\text{总}}=8.87 \text{ kg/m}^3$,则污水厂每天的甲烷产量为 15 450 m³/d。可见, $f_{\text{PS,up}}$ 修正之后,每天甲烷产量约减少 1 202 m³,每年约减少 438 730 m³,折合成碳排放量为 8 746 t,即每年在甲烷碳排放核算上会减少约 8 746 t 的碳排放量。因此建议对我国污水处理厂的 $f_{\text{PS,up}}$ 值进行实测修正,这样不仅可以提高模型的适用性,而且确保了预测厌氧消化产气量的准确性,得到的结果也更符合实际情况,为污水处理厂低碳高效和可持续性发展提供更可靠的科学评估方法。

2.4 沼气的回收利用及其碳补偿量

沼气被视为许多应用的优良燃料,且也可作为生产化学品的原料,沼气的相关利用途径见图 6。

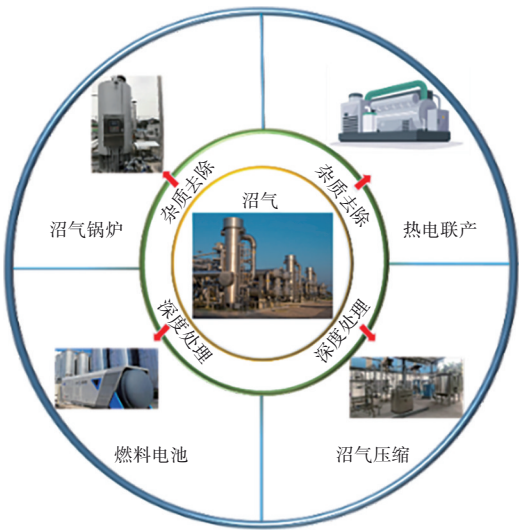


图 6 沼气利用及升级改造

Fig.6 Biogas utilization and upgrading

表 1 列举了典型污水处理厂污泥衍生沼气利用情况。

表 1 典型污水处理厂污泥衍生沼气利用情况

Tab.1 Utilization of sludge-derived biogas in typical sewage treatment plants

污水处理厂	处理量 ^[12] (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	沼气利用情况 ^[12]	碳补偿量(以 CO ₂ 计)/(t·a ⁻¹)
德国格雷沃斯米伦污水处理厂	1.514	年产电 1.7×10 ⁶ kW·h	1 318
瑞典博登污水处理厂	3.785	年产热 1.26×10 ¹⁰ kJ	1 173
美国希博伊根地区污水处理厂	4.164	年产电 6×10 ⁶ kW·h, 年产热 2.11×10 ¹⁰ kJ	6 616
美国格洛弗斯维尔-约翰斯敦联合污水处理厂	4.164	年产电 6.6×10 ⁶ kW·h, 年产热 3.24×10 ¹⁰ kJ	8 134
美国格雷沙姆污水处理厂	4.921	年产电 5×10 ⁶ kW·h, 年产热 3.85×10 ¹⁰ kJ	7 463

沼气发电通常能够满足污水厂的电力需求,甚至能产生额外电力供应至电网,有余热回收的沼气发电系统还能够产生热能,实现热电联产。与此不同,沼气锅炉则更适用于热能的直接生产^{〔13〕},其产生的热能可用于污泥反应器的加热,同时也可以冬季用于水域泥区的加热以及满足周边地区的供暖需求。

故采用情景分析法来探讨沼气利用的两种不同情景^{〔14〕},即设置沼气发电情景和沼气供热情景。这两种情景代表了可持续能源利用的两种主要途径,具有广泛的应用前景和环境效益。通过比较这两种情景,可以得出最佳的沼气利用方案,相关技术路线如图 7 所示。

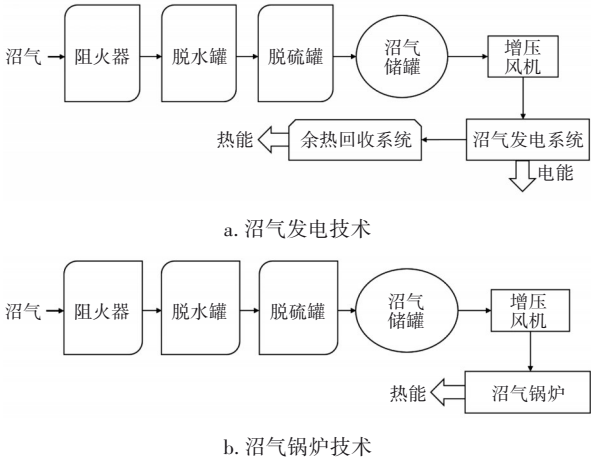


图 7 沼气利用技术路线

Fig.7 Technical roadmap for biogas utilization

2.4.1 沼气发电情景

沼气燃烧产生的热能转化为电能的效率通常在30%~43%之间^[15],取36.5%;有余热回收的发电系统综合能源利用率通常在60%~80%之间,取70%;在101.325 kPa、273.15 K条件下,甲烷的热值取其平均值即37 850 kJ/m³。当不考虑余热回收时,沼气发电产生的电能可以用式(14)计算。

$$W_1 = V_1 \times 65\% \times \eta_1 \times 37\,850 \times 2.78 \times 10^{-4} \quad (14)$$

式中: W_1 为沼气发电产生的电能,kW·h; V_1 为输入沼气发电机的沼气体积,m³; η_1 为发电系统效率,取36.5%。

当有余热回收时,沼气发电额外产生的热能可用式(15)计算。

$$W_2 = V_1 \times 65\% \times \eta_2 \times 37\,850 \quad (15)$$

式中: W_2 为热电联产获得的热量,kJ; η_2 为热电联产的热效率,取33.5%。

通过沼气发电产生的碳补偿量为:

$$\text{CO}_2 = W_1 (\text{或 } W_2) \times \text{EF}_{\text{电}} (\text{或 } \text{EF}_{\text{煤}}) \quad (16)$$

式中: $\text{EF}_{\text{电}}$ 为电能的碳排放系数(以CO₂计),选取东北区域电网排放因子,取值为1.082 6 kg/(kW·h); $\text{EF}_{\text{煤}}$ 为煤燃烧的碳排放系数(以CO₂计),其取值为93.11 kg/10⁶ kJ。

2.4.2 沼气锅炉供热情景

沼气锅炉通过燃烧沼气产生热能,其能量利用率在80%~90%之间^[16-17],取中间值85%,通过沼气锅炉产生的热量按式(17)计算。

$$W_3 = V_2 \times 65\% \times 85\% \times 37\,850 \quad (17)$$

式中: W_3 为沼气锅炉产生的热量,kJ; V_2 为进入沼气锅炉的沼气体积,m³。

通过沼气锅炉产生的碳补偿量见式(18)。

$$\text{CO}_2 = W_3 \times \text{EF}_{\text{煤}} \quad (18)$$

2.4.3 减排情景潜力分析

经计算,沼气锅炉产生碳补偿量为42 644 kg/d,无余热回收和有余热回收的沼气发电产生碳补偿量分别为57 076和73 929 kg/d,比沼气锅炉分别增加约34%和73%的碳补偿量。根据2.3节预测得到的甲烷产量对两种情景进行经济分析,当使用带有余热回收系统的沼气发电设备时,其处理规模约为600 m³/h,预计项目投资约为1 680万元,全年综合成本(包括折旧、运营、资金成本等)约为428万元,

当地工业购电价为0.72元/(kW·h),计算全年收入约为1 736万元,全年项目毛利润约为1 308万元,项目资产回收期约为1.28年。当使用沼气锅炉设备时,预计项目投资费约为428万元,全年综合成本约为96万元,当地天然气价格为2.88元/m³,全年收入约为891万元,全年项目毛利润约为795万元,项目资产回收期约为0.54年。综上所述,沼气锅炉具有较低的投资成本和更短的回收期,而沼气发电则年利润更高且能获得更大的碳补偿量。

3 结论

① 通过分析Sotemann污泥厌氧消化稳态模型,确定甲烷产量预测的关键参数,即污泥中不可生物降解COD组分($f_{\text{PS},\text{up}}$),根据北方典型污水厂的数据,对参数进行修正得到 $f_{\text{PS},\text{up}}$ 为0.42;基于修正后的参数,通过污泥厌氧消化物料衡算预测获得甲烷产量为14 248 m³/d,对比了修正值与原模型的缺省值在碳排放核算上的差异,修正值每年在甲烷碳排放核算上会减少约8 746 t的碳排放量。

② 提出沼气利用相关路径和典型污水处理厂污泥衍生沼气利用情况,构建沼气发电和沼气供热利用情景并制定相关技术路线,计算不同情景下的碳补偿量,从碳补偿和经济性方面进一步评估了沼气发电和沼气锅炉两种能量回收利用方式。

③ 甲烷排放对全球气候变化有重大影响,通过对厌氧消化产甲烷量关键参数的修正,不仅提高了对产甲烷量预测的准确性,而且有助于未来制定相应政策和措施,更快实现污水处理行业的“碳中和”与污水厂的可持续发展。

参考文献:

- [1] 安迪. 基于ADM1模型的厌氧发酵产气动力学研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
AN Di. Research on Kinetics of Anaerobic Fermentation Biogas Production Based on ADM1 Model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021 (in Chinese).
- [2] 郝晓地, 金铭, 曹达啟. 厌氧消化数学模拟技术发展历程与应用现状[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10): 1-10.
HAO Xiaodi, JIN Ming, CAO Daqi. Developing progress and applied situation of modeling techniques for anaerobic digestion[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 1-10 (in Chinese).

- [3] KUNATSA T, XIA X H. A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126311.
- [4] SOLON K, VOLCKE E I P, SPERANDIO M, *et al.* Resource recovery and wastewater treatment modelling [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, 5(4): 631–642.
- [5] AM A, ALI A. Comparison between the steady state anaerobic digestion model and ADM1 for anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2014, 4 (2) : 520–524.
- [6] DAIRI A, CHENG T Y, HARROU F, *et al.* Deep learning approach for sustainable WWTP operation: a case study on data-driven influent conditions monitoring [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101670.
- [7] PAPIRIO S. Coupling acid pretreatment and dosing of Ni and Se enhances the biomethane potential of hazelnut skin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121407.
- [8] HASHEMI S S, KARIMI K, MIRMOHAMADSADEGHI S. Hydrothermal pretreatment of safflower straw to enhance biogas production [J]. *Energy*, 2019, 172: 545–554.
- [9] JOSHI P D, PARKER W. Effect of pretreatment using ultrasound and hydrogen peroxide on digestion of waste activated sludge in an anaerobic membrane bioreactor [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2015, 34(6): 1724–1730.
- [10] FLORES-ALSINA X, RAMIN E, IKUMI D, *et al.* Assessment of sludge management strategies in wastewater treatment systems using a plant-wide approach [J]. *Water Research*, 2021, 190: 116714.
- [11] RAFATI M, PAZOUKI M, GHADAMIAN H, *et al.* Determine the most effective process control parameters on activated sludge based on particle swarm optimisation algorithm (case study: south wastewater treatment plant of Tehran) [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, 102(19): 7595–7616.
- [12] SHEN Y W, LINVILLE J L, URGUN-DEMIRTAS M, *et al.* An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 346–362.
- [13] KAPOOR R, GHOSH P, TYAGI B, *et al.* Advances in biogas valorization and utilization systems: a comprehensive review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 123052.
- [14] ALI S M H, LENZEN M, SACK F, *et al.* Electricity generation and demand flexibility in wastewater treatment plants: benefits for 100% renewable electricity grids [J]. *Applied Energy*, 2020, 268: 114960.
- [15] 杜强强, 米智晨, 靳坤, 等. 污泥热水解-厌氧消化沼气的利用系统设计方案探讨 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(18): 51–55.
- DU Qiangqiang, MI Zhichen, JIN Shen, *et al.* Discussion on the design of thermal hydrolysis-anaerobic digestion biogas utilization system for sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(18): 51–55 (in Chinese).
- [16] KIM D, KIM K T, PARK Y K. A comparative study on the reduction effect in greenhouse gas emissions between the combined heat and power plant and boiler [J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 5144.
- [17] GONG H J, CHEN Z Z, YU H Q, *et al.* Methane recovery in a combined amine absorption and gas steam boiler as a self-provided system for biogas upgrading [J]. *Energy*, 2018, 157: 744–751.

作者简介:唐婧(1980–),女,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,主要研究方向为水污染控制理论与技术。

E-mail: fairy_ben@163.com

收稿日期: 2023-09-28

修回日期: 2023-12-06

(编辑:任莹莹)