

# EGSB 能源回收污水预处理浓缩碳源水解液

王启镛<sup>1</sup>, 刘越<sup>1</sup>, 常风民<sup>1</sup>, 林甲<sup>2</sup>, 宋新新<sup>2</sup>, 王凯军<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 传统的污水处理需要消耗大量的能耗换取清洁水, 已是不可持续的处理方法。污水本身具有良好的资源化潜力, 客观上污水中蕴含着大量有机物, 转化为可利用资源。在双碳背景下, 从污水中提取能源已成当前污水处理行业的热点。采用厌氧膨胀颗粒污泥反应器处理污水预处理浓缩碳源水解液, 产生可利用的沼气。根据能源估算, 当前污水厂进水低 COD 情况下, 污水预浓缩碳源通过甲烷回收能量占污水处理能耗的 61.8%, 不能达到污水厂碳中和的目的; 污水预浓缩碳源与餐厨垃圾协同厌氧消化, 不仅能够实现污水厂碳中和, 还可以向厂外输出额外的能量。市政污水预处理碳源浓缩-碳源水解-EGSB 路线是完全可行的, 是实现污水处理碳中和的重要途径, 可为国家减污降碳协同增效贡献行业重要力量。

**关键词:** 污水预处理; 浓缩碳源; 水解; EGSB; 能源回收

**中图分类号:** S216.4; X703 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2023)03-0020-07

**DOI:** 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023030020

**Energy Recovery via EGSB Using Hydrolysate of Concentrated Carbon Source from Sewage Pretreatment / WANG Qibin<sup>1</sup>, LIU Yue<sup>1</sup>, CHANG Fengmin<sup>1</sup>, LIN Jia<sup>2</sup>, SONG Xinxin<sup>2</sup>, WANG Kaijun<sup>1\*</sup> / (1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co Ltd, Beijing 100044, China)**

**Abstract:** Traditional sewage treatment that needs to consume a lot of energy in exchange for clean water, has become an unsustainable treatment method. Sewage itself has a good resource potential. Objectively, sewage contains a lot of organic matter, which can be converted into available resources. Under the background of “3060” plan, extracting energy from sewage has become a hot topic in the current sewage treatment plant. The anaerobic expanded granular sludge reactor (EGSB) was used to treat the hydrolysate of carbon source from the wastewater pretreat and concentrate to produce usable biogas. According to the energy estimation, under the condition of low COD in the effluent, the energy recovery of pre-concentrated carbon source through methane accounted for 61.8% of the energy consumption of wastewater treatment cost, which could not achieve the goal of carbon neutrality in the wastewater plant. The collaborative anaerobic digestion of wastewater pre-concentrated carbon source and food waste can not only achieve carbon neutrality of wastewater plant, but also output additional energy to the society. The route of municipal sewage pretreatment of carbon source concentration, carbon source hydrolyzation and EGSB is completely feasible. It is an important way to achieve carbon neutrality in sewage treatment, and can contribute an important industry strength to the national synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction.

**Key words:** wastewater pretreatment; carbon source concentrate; hydrolysis; EGSB; energy recovery

在国家大力倡导生态文明建设背景下, 环保产业很难采用传统的模式继续发展, 必须有创新的发展理念和处理模式引领, 加大先进技术研究与应用, 扩大行业内涵和外延, 推动环保产业大发展和

技术大繁荣。其中, 市政污水处理只有通过处理方法和污泥处置模式发展, 逐渐从“以能耗换水质”转变为“能源资源回收利用”, 才能改变目前行业高能耗、高碳排放、低资源回收利用和环境不友好的落后

收稿日期: 2022-03-23

项目来源: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-003)

作者简介: 王启镛(1983-), 男, 博士, 主要研究方向为水污染控制理论与低碳技术研究, E-mail: wangqibin188@163.com

通信作者: 王凯军, E-mail: wkj@tsinghua.edu.cn

面貌<sup>[1]</sup>,这是由于污水处理厂是耗能大户,在美国,污水处理设施的电耗高达全国用电量的3%<sup>[2]</sup>。同时,污水中富含蛋白、脂质、多糖等有机物,通过物化/生化方式进行碳捕获,可获得富含有机物的浓缩产物,有效提升后续厌氧消化的能源回收效率<sup>[3]</sup>。从污水中提取能源已成当前污水处理行业的热点。

现有污水处理系统的优势与弊端值得反思和总结。结合可持续发展的要求<sup>[4]</sup>,污水处理系统未来的发展方向应从碳减排和资源利用的角度来设计思考<sup>[5]</sup>。传统的活性污泥法的剩余污泥含一定量的有机物,固然可以通过厌氧消化、热电联产等途径,作为污水处理运行能耗自给自足的重要来源,然而,大部分的有机物在好氧段被氧化分解,既“破坏”损失了进水中有机物,又增加了温室气体排放,因此,应尽可能的回收原水中的有机物。清华大学王凯军课题组近年来开展了一系列的污水预处理碳源浓缩研究<sup>[6-8]</sup>,围绕膜浓缩、磁分离技术进行了深入研究,浓缩碳源达 $9700 \text{ mgCOD} \cdot \text{L}^{-1}$ ,回收率达94%<sup>[9]</sup>,结果表明,对污水预浓缩回收碳源是可行的。吉林大学万立国采用膜孔径较小( $0.03 \mu\text{m}$ )的中空纤维超滤膜组件构建了圆柱体结构的高负荷生物絮凝膜反应器(HLB-MR),确定SRT为0.6 d是HLB-MR反应器较优的控制参数,在该条件下,胶体COD的絮凝效率高达90%,膜污染程度较轻;总

COD的回收率可高达80%以上<sup>[10]</sup>。这些研究成果为城市污水资源/能源化中关键的碳源分离单元提供一种可行的方法,对实现污水处理厂向能量平衡或“碳中和”运行方向的转变具有积极的推动作用。

本文围绕厌氧膨胀颗粒污泥反应器(EGSB)从污水预浓缩碳源水解液中回收能源,对浓缩碳源开展生化产甲烷潜力(Biochemical methane potential, BMP)实验,对污水预浓缩-碳源水解-EGSB工艺的能源回收估算并讨论了本技术工程意义,为下一步工程化应用提供技术支撑和运行指导。

## 1 材料与分析方法

### 1.1 技术路线及EGSB装置概况

北京某市政污水处理厂在预处理阶段设置碳磷高效浓缩设备,不溶解的有机物陆续经过水解、提取、厌氧产甲烷等工序,有机污染物转化为沼气进行统一收集再利用。EGSB反应器处理污水原水中碳源浓缩后热水解,水解滤液经水泵提升至厌氧罐,厌氧产生的沼气通过锅炉产热水对罐内循环水进行加热,促进厌氧消化效果。相较于传统工艺,EGSB对于高浓度有机物处理负荷和进水高SS的耐受能力有着显著的提高(主要工艺流程图详见图1)。EGSB反应器,包括厌氧主罐、循环系统、布水系统、出水系统、取样系统、沼气系统等。

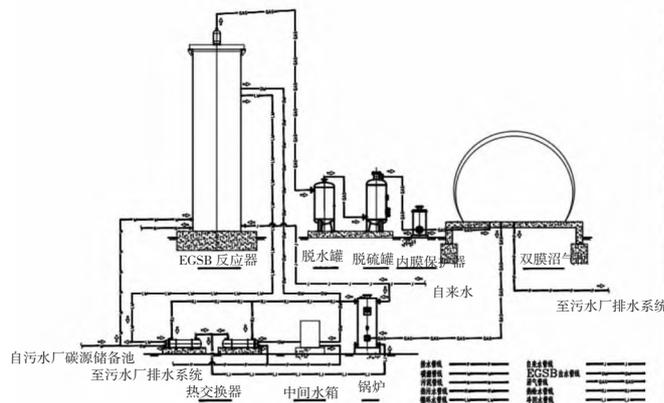


图1 主要工艺流程图及现场实景图

主要设备设施,详见表1。

### 1.2 水源与接种

本装置进水水源为污水厂预处理浓缩的碳源水解液。

EGSB反应器接种污泥为厌氧颗粒污泥,本项目的EGSB反应器的接种污泥量为 $26 \text{ m}^3$ 。接种污泥前EGSB反应器需要装满约 $1/3 \sim 2/3$ 的清水,然

后可以接种污泥。污泥接种步骤为:

- (1) 准备好小型气动隔膜泵,连接预留的污泥接种管口,连接压缩空气。
- (2) 气动隔膜泵前后端搭配好转换接头以及钢丝软管。
- (3) 开启气动隔膜泵开始抽泥至EGSB Plus反应器。

表1 主要设备参数

| 序号 | 名称      | 型号及参数   |
|----|---------|---|
| 1  | EGSB 主体 | Φ2.6X11 m   |
| 2  | 双膜沼气柜   | V = 50 m <sup>3</sup> , 运行压力 2 kPa  |
| 3  | 沼气脱水罐   | Φ0.6X1.65 m   |
| 4  | 沼气脱硫罐   | Φ0.6X1.85 m   |
| 5  | 沼气带压热水器 | 沼气处理量 14 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> , 沼气热量 20~25 MJ·h <sup>-1</sup> , 进气压力约 2 kPa。 |
| 6  | 热交换器    | —   |
| 7  | 中间水箱    | 1000 L  |

(4) 待污泥大部分卸完后, 加入清水, 将剩余残留污泥清理干净。

(5) 关闭压缩空气的阀门, 停止气动隔膜泵。

### 1.3 调试运行

调试运行期共有两个阶段, 详见表 2。阶段 I 主要常温下运行, 察看整套设备调试运行状态, 阶段 II, 投加外碳源, 考察整套设备的联动运行情况。

表2 调试期工况

| 阶段 | 时间 | 流量                                 | 进水 COD 负荷                                 | 水温 |
|----|----|------------------------------------|---|----|
|    | d  | (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | (kg COD·m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ) | ℃  |
| I  | 7  | 1.6                                | 0.41                                      | 23 |
| II | 17 | 1.6                                | 4.57                                      | 20 |

### 1.4 BMP 实验方法

按照产甲烷潜势标准方法进行实验设计, 选择水解碳源浓缩污泥作为实验基质, 分别设置 3 组不同的 SIR(物料 VS 与接种污泥 VS 比例, 即  $S/I = VS_{\text{substance}}/VS_{\text{inoculum}}$ , 以 VS 计, SIR 分别设置为 0.25、0.5、1) 进行实验, 每个实验条件均做 3 次平行样品。选用 500 mL 反应瓶, 向每个瓶中放入 150 mL 接种污泥, 按照相应 SIR 数值, 计算出所需加入的基质污泥体积, 接种污泥及基质污泥均加入反应瓶后均需用氮气吹洗 5 min 用以驱赶液体中的空气, 最后用带有搅拌桨的密封盖盖紧。使用 3 个 500 mL 反应瓶作为空白, 仅放入 150 mL 接种物, 不加入任何物料。将所有厌氧反应瓶置于 35℃ 恒温水浴锅。用电脑记录累积气体产生体积, 直到没有显著产生甲烷(每日甲烷产量小于累积甲烷产量的 1%) 停止实验。具体实验条件如表 3 所示。

BMP 分析采用甲烷潜力自动测试系统(Automatic Methane Potential Test System, AMPTS) (Bioprocess, 碧普公司, 瑞典)。如图 2 所示, 该系统由厌氧消化反应瓶、CO<sub>2</sub> 碱液吸收瓶、甲烷气体产量检测

表3 BMP 条件

| 条件        | 空白   | 水解碳源浓缩污泥 |      |      |
|-----------|------|----------|------|------|
| SIR       | 0    | 1/4      | 1/2  | 1    |
| 接种污泥 VS/g | 1.80 | 1.80     | 1.80 | 1.80 |
| 物料 VS/g   | 0    | 0.45     | 0.90 | 1.80 |

器以及电脑接收端四部分组成。在厌氧反应瓶中物料被厌氧微生物降解产生沼气, 后经过导管连接进入装有 NaOH 溶液的 CO<sub>2</sub> 吸收瓶, 从吸收瓶逸出的气体基本为甲烷, 甲烷进入气体体积检测器进行甲烷产量计量, 在电脑终端记录每个样品的实时产气量。

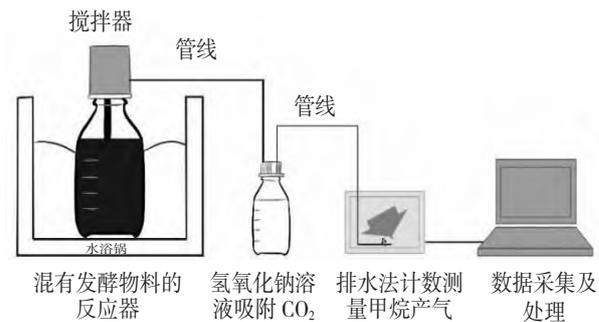


图2 BMP 反应器示意图

### 1.5 分析方法

COD、BOD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、pH 值、TSS、VSS、VAF、碱度、温度和流量等按照国标方法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水源及 BMP 分析

#### 2.1.1 EGSB 进水水源特性

污水本身具有良好的资源化潜力, 客观上污水中蕴含着大量有机物, 可转化为可利用资源, 如沼气。以资源化为首要目标的新型污水处理模式以碳源浓缩为手段, 从系统回收利用能量流/物质流的角度出发, 对污水中的有机物等组分进行分离, 浓缩液水解后, 提高浓缩液生化性, 进而通过厌氧反应器, 产生的沼气进行资源化利用。

浓缩的碳源利用是新工艺碳源管理实现资源化的重要环节, 浓缩碳源具有独特性质, 由于其在短泥龄、低溶解氧、短停留时间条件下实现分离, 因此碳源以本原有机物为主。何秋杭<sup>[11]</sup>等研究表明, 强化磁分离技术稳定地将碳源去除率提升至 75%, SCOD 去除率提升至 60% 以上, TP 去除率达 90%, 浓缩液 COD 超 20 g·L<sup>-1</sup>。刘越<sup>[12]</sup>等结果表明, 氢氧化钠预处理加速了超磁分离污泥的水解酸化, 提

高了可溶性物质的含量。溶解性 COD 达到  $8974.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 同时,挥发性脂肪酸的含量在第 6 天可以达到最高值,为  $3505.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其中,乙酸含量最高为  $2124.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占比 67.7%;表明,浓缩碳源经过水解后具有很高的 COD 值,并且多数为小分子乙酸,为下一步厌氧消化产沼气创造了良好的条件。

### 2.1.2 BMP 分析

不同 S/I 值的水解碳源浓缩污泥在 BMP 实验中甲烷产生速率如图 3 所示。随着 S/I 值的升高,甲烷产生速率表现为先升高后降低, S/I = 0.5 时甲烷产生速率最大。S/I 值分别为 0.25、0.5 和 1 时,强化磁分离污泥厌氧消化的最大甲烷产生速率分别为  $64.82 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}\text{VS}$ 、 $79.03 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}\text{VS}$ 、 $57.94 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{d}^{-1}\text{VS}$ 。S/I = 0.25 时,甲烷产生速率在 0 ~ 2 d 内以同一增长率快速升高,在  $t = 2 \text{ d}$  时达到速率最大值,2 d ~ 5 d 内甲烷产生速率快速降低,  $t = 5 \text{ d}$  时反应结束。在反应器的 S/I = 0.5 时,甲烷产生速率在 0 ~ 1 d 内快速升高,1 d ~ 2 d 时间段内甲烷产生速率继续升高,但增长幅度降低,在  $t = 2 \text{ d}$  时,甲烷产生速率达到最大值,其后甲烷产生速率降低,直至  $t = 17 \text{ d}$  甲烷产生速率降低为 0。在 S/I = 1 时,甲烷产生速率在 0 ~ 1 d 内快速升高,增长幅度与 S/I = 0.25 时的一致,1 d ~ 3 d 时间段内甲烷产生速率以低增长幅度升高,在  $t = 3 \text{ d}$  时甲烷产生速率达到最大值,第 13 天时反应器不再产生甲烷。

不同 S/I 值的水解碳源浓缩污泥在 BMP 实验中的累积甲烷产率如图 4。在 3 组不同 S/I 值的水解碳源浓缩污泥厌氧消化实验初期, S/I 值为 0.25 和 1 时的反应器累积甲烷产率近乎一致,而 S/I 值为 0.5 的反应器累积甲烷产率远远大于前两者。不同 S/I 值的反应体系达到“稳态”的时间长短不同,随着 S/I 值的增加,“稳态”时间先升高后降低, S/I 值分别为 0.25、0.5 和 1 时,厌氧反应持续时间分别为 6 d、17 d、5 d。3 组不同 S/I 值的水解碳源浓缩污泥厌氧消化反应的最终累积甲烷产率存在较大差异,随着 S/I 值的增加,最终累积甲烷产率先升高后降低,在 S/I 值分别为 0.25、0.5 和 1 时,反应的累积甲烷产率分别为  $185.42 \text{ mLCH}_4\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 、 $250.63 \text{ mLCH}_4\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 、 $213.18 \text{ mLCH}_4\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$ 。当 S/I 值从 0.5 提高至 1 后,反应器中的微生物受到抑制,从而导致甲烷产率降低。因此以水解碳源浓缩污泥为物料的厌氧消化反应最优 S/I 值为 0.5。

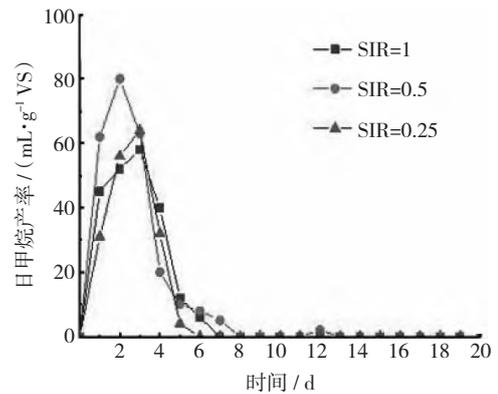


图3 水解碳源浓缩污泥日甲烷产率

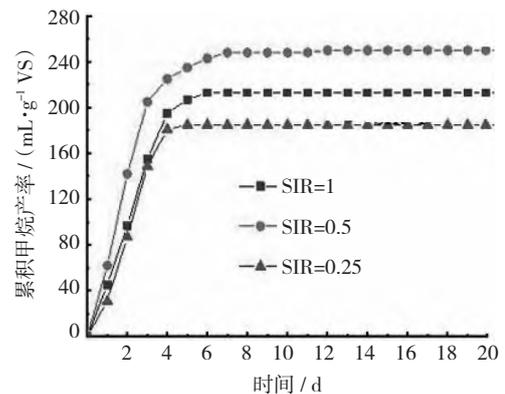


图4 水解碳源浓缩污泥累积产甲烷量

## 2.2 整套装置性能

### 2.2.1 COD 转化情况

EGSB 装置对 COD 去除转化情况,见图 5。在阶段 I,进水 COD 波动较大,在  $269 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  与  $770 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间变化,平均进水 COD 浓度为  $550 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,EGSB 反应器出水十分稳定,始终都在  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,COD 平均去除率为 68%。本阶段水解加热设备未到位,因此预浓缩碳源水解液 COD 浓度较低,为了验证整套工艺设备的性能可靠性和稳定性,从阶段 I 到阶段 II,进水投加外碳源,达到产能产气的目标。因投加外碳源,进水 COD 大幅增加,在  $5500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  与  $7000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间变化,平均进水 COD 浓度  $5957 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均出水 COD 浓度  $774 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,COD 去除率达 87%。整体上,EGSB 表现出良好的去除 COD 性能。也表明进水 COD 转化率较高,将有机物转化为甲烷。EGSB 克服了传统的反应器混合强度不够,容易出现短流等缺点,展现出良好的厌氧消化效果。该反应器主要是由进水系统、反应区、三相分离器和沉淀区等部分组成。富含有机物的污水从底部配水系统进入反应器,根据载体流态化原

理,很高的上升流速使废水与 EGSB 反应器中的颗粒污泥充分接触。当有机废水及其所产生的沼气自下而上地流过颗粒污泥床层时,污泥床层与液体间会出现相对运动,导致床层不同高度呈现出不同的工作状态;在反应器内的底物、各类中间产物以及各类微生物间的相互作用,通过一系列复杂的生物化学反应,形成一个复杂的微生物生态系统,有机物被降解,同时产生气体。在此条件下,一方面可保证进水基质与污泥颗粒的充分接触和混合,加速生化反应进程;另一方面有利于减轻或消除静态床中常见的底部有机物负荷过重的状况,从而增加了反应器对有机负荷的承受能力。

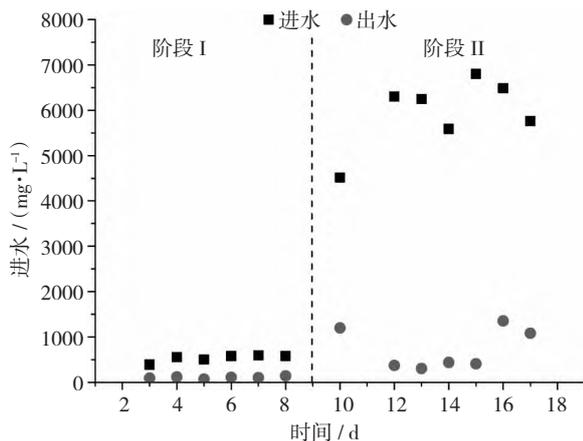


图5 EGSB 装置进出水 COD 变化情况

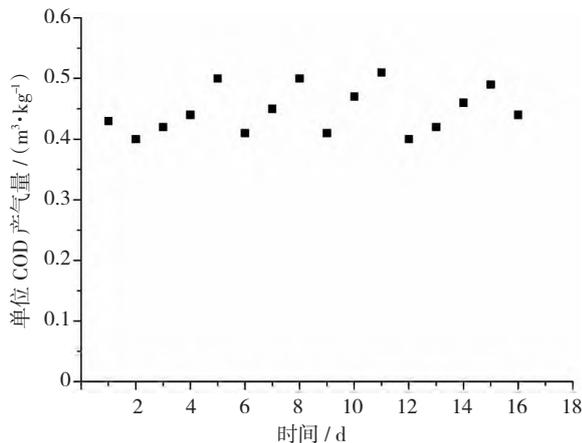


图6 阶段 II 单位 COD 产气量情况

### 2.2.2 单位 COD 产气量

单位 COD 产气量,即单位质量发酵原料的产气量。此指标用天天沼气产量除以进料量取得的。依照不同的情形可分为理论产气率和生产产气率。理论产气率可依照原料的化学成份来计算。生产产气率通常依照大量的实际情形来估量或实测。单位

COD 生产产气量情况,详见图 6。阶段 II,投加外碳源期间,单位 COD 生产产气量在  $0.4 \sim 0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  COD 之间,产气能力平均为  $0.44 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  COD,约  $0.22 \text{ kgCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$  COD,达预期目标,表明整套装置运行性能良好。

构建实施了一套 EGSB 能源回收污水预浓缩碳源水解液系统,设备完好,各模块均能正常工作,整套设备联动调试成功。经过提高进水 COD 浓度,沼气和流量能够供锅炉使用,提高罐内水温促进厌氧消化产甲烷。市政污水预处理碳源浓缩-碳源水解-EGSB 路线是完全可行的,后续进一步考察该装置运行的稳定性和可靠性,为未来污水处理厂碳中和提供了技术支撑和运行指导。

### 2.3 能源估算

根据住建部统计数据显示,2020 年我国城市污水处理量全年达 557 亿  $\text{m}^3$ ,处理率达 97.5%,按照平均污水处理电费  $0.317 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  计算,每年耗电量达 176.57 亿 kWh。根据研究成果<sup>[11]</sup>,并进行产能分析,通过甲烷回收能量占比 61.8%,不能达到污水厂碳中和的目的,这是由于我国城市污水厂的进水有机物浓度偏低,单靠这部分有机物转化为能源,难以满足全部运行能耗。而随着我国经济发展和人民生活消费水平的不断提高,我国餐厨垃圾产生体量且增长迅速,到 2026 年预计餐厨产生量将增至 1.8 亿  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。餐厨垃圾具有有机质含量高、油脂高等特点,厌氧消化技术以其产能高效的优势在国内已成为主流处理技术<sup>[14]</sup>。将餐厨垃圾与预浓缩碳源水解液共同厌氧消化,两者产生的能源之和达到污水处理能耗的 128.03%,不仅实现了污水厂碳中和,还具有对外输出能源的能力,见表 4。奥地利斯特拉斯( Strass) 污水处理厂以主流传统工艺( AB 法) 与侧流现代工艺( 厌氧氨氧化) 相结合处理方式,最大化回收进水中有机物。2002 年之前,厌氧消化产  $\text{CH}_4$  转化的电能最多只能满足该厂约 80% 的用电量。2005 年脱氮工艺改造( DEMON) 后, $\text{CH}_4$  发电量已超过耗电量( 108%)。该厂剩余污泥与厨余垃圾共消化使能源自给率高达 200%<sup>[15]</sup>,可以向厂外输出额外产生的能量,已成为名副其实的“能源工厂”。实际上,污泥与餐厨协同厌氧消化( AcoD) 能够补充微量元素、提高缓冲能力、获得适宜碳氮比、提升高值消化产物产量、改善营养元素均衡性和增强微生物协同效应能够更加稳定高效的实现废弃物减量化和资源化,显著提高厌氧消化效果<sup>[16-18]</sup>。

表 4 能源估算

| 项 目   |         | 单 位         | 数 值                                      | 备 注    |             |
|-------|---------|-------------|--|--------|-------------|
| 污水预浓缩 | 基本特性    | 全国水量        | 亿 m <sup>3</sup>                         | 557    | 住建部统计数据     |
|       |         | 进水 COD      | ( mg · L <sup>-1</sup> )                 | 281    | [19]        |
|       |         | 预浓缩碳源比例     | %  | 75     | [11]        |
|       |         | 浓缩 COD 量转化量 | ( mg · L <sup>-1</sup> )                 | 168.6  | 转化率按 80% 考虑 |
|       |         | 传统处理方式平均能耗  | ( kWh · m <sup>-3</sup> )                | 0.317  | [20]        |
|       | 产能分析    | 甲烷化学能       | kWh · kg <sup>-1</sup> CH <sub>4</sub>   | 13.9   | [2]         |
|       |         | 产甲烷系数       | kgCH <sub>4</sub> · kg <sup>-1</sup> COD | 0.22   | 本研究         |
|       |         | 甲烷产电效率      | %  | 38     | [6]         |
|       |         | 通过甲烷回收能量    | kWh · m <sup>-3</sup>                    | 0.1959 | —           |
|       |         | 回收能量占比      | %  | 61.8   | —           |
| 餐厨垃圾  | 有机固废产生量 | 全国回收量       | 亿 kWh                                    | 109.11 | —           |
|       |         | 亿 t         | 1.8                                      | [13]   |             |
|       |         | 产甲烷系数       | ( kg · t <sup>-1</sup> )                 | 12.3   | [21]        |
|       |         | 通过甲烷回收能量    | ( kWh · t <sup>-1</sup> )                | 64.97  | —           |
| 合计    | 能源回收总量  | 全国污水处理能耗    | 亿 kWh                                    | 226.06 | —           |
|       |         | 亿 kWh       | 176.57                                   | —      |             |
|       |         | 回收能量占比      | %  | 128.03 | —           |

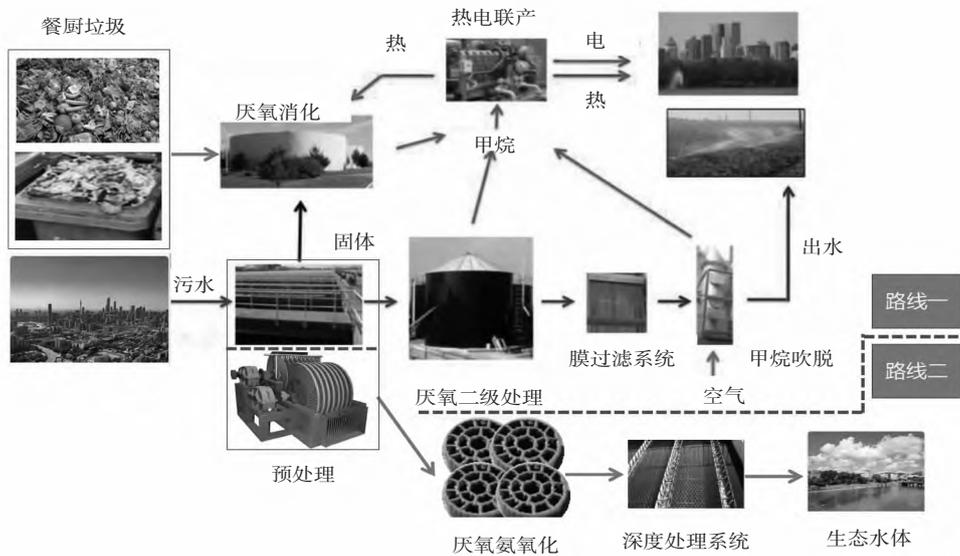


图 6 用于生活污水资源化处理的概念系统(部分内容来源参考文献 [2])

2.4 工程意义

污水中含有大量的有机物,传统的污水处理方法会使得大量的有机物转化为二氧化碳,增加了温室气体排放。从能源输入到能源输出的改变,就需要改变过去污水处理流程,创新污水处理模式,减少甚至取消好氧过程,提高能源回收效率。污水处理规模无论大小,都需要选择合适工艺,最大化回收能源和资源,在处理的同时实现资源化利用。图 6 提出一种假设的生活污水处理系统。包括预处理设施,初沉池或者物化分离碳源,截留的悬浮固体进入厌氧消化池,产生甲烷,出水的一个路线就是二级厌

氧膜生物反应器可以防止生物固体的流失,从而保持足够高的固相保留率。考虑到甲烷是一种强大的温室气体,其全球变暖潜力约为二氧化碳的 25 倍,不能让它逃到大气中,而是作为一种有用的生物燃料,应该被捕获并用作一种可再生能源。甲烷被吹脱后,出水作为灌溉用水使用<sup>[2]</sup>。另一路线是预处理后水碳氮比很低,为厌氧氨氧化脱氮提供了有利条件<sup>[22,23]</sup>。强化厌氧消化的技术作用,尽可能减少好氧处理过程,是可持续发展的趋势和必然要求。出水经过深度处理后,满足国家和地方排放标准,排入水体。这一假设污水处理系统,预处理时尽可能

回收能源,然后分质分类利用。优先将达标排放水转化为可利用的水资源,就近灌溉或者回补自然水体,将治污、产气、综合利用三者相结合,使废物资源化、环境效益与经济效益和社会效益相统一<sup>[24]</sup>,符合可持续发展的理念,对减少水污染、保障水生态安全、优化地区供水结构、增加水资源供给和缓解供需矛盾具有重要意义。

### 3 结论

(1) 市政污水预处理碳源浓缩-碳源水解-EGSB路线是完全可行的,未来污水处理强化厌氧消化的技术作用,尽可能减少好氧处理过程,是可持续发展的趋势和必然要求。

(2) 浓缩碳源经过水解后具有很高的COD值,并且多数为小分子乙酸,EGSB系统产甲烷能力较强,进水COD约 $6000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,产气能力平均为 $0.44\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{COD}$ 。

(3) 在当前污水厂进水低COD情况下,污水浓缩碳源通过甲烷回收能量占污水处理能耗的64.6%,不能达到污水厂碳中和的目的;污水浓缩碳源与餐厨垃圾协同厌氧消化,不仅能够实现污水厂碳中和,还可以向厂外输出额外的能量。

### 参考文献:

- [1] 王凯军,宫徽. 生态文明理念引领城市污水处理技术的创新发展[J]. 给水排水, 2016, 42(5): 1-3.
- [2] McCarty P L, Bae J, Kim J. Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer-Can This be Achieved? [J]. Environmental Science Technology, 2011, 45(17): 7100-7106.
- [3] 杨媛,邓伟航,胡以松,等. 城市污水能源回收方式研究进展: 碳捕获-厌氧消化耦合技术[J]. 环境工程, 2022.
- [4] 王凯军. 可持续发展的新型、高效城市污水处理技术探讨[J]. 给水排水, 2005, 31(2): 32-35.
- [5] 王凯军,宫徽,金正宇. 未来污水处理技术发展方向思考与探索[J]. 建设科技, 2013(2): 36-38.
- [6] 宫徽. 基于“碳源浓缩-氮源回收”的新型污水资源化工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [7] 金正宇. 强化膜混凝反应器(E-mCR)生活污水资源化处理工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [8] 何秋航. 强化磁分离污水碳源浓缩资源化技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [9] Zhengyu Jin, Fanlin Meng, Hui Gong, et al. Improved low-carbon-consuming fouling control in long-term membrane-based sewage pre-concentration: The role of enhanced coagulation process and air backflushing in sustainable sewage treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2017, (529): 252-262.
- [10] 万立国. 高负荷生物絮凝膜反应器(HLB-MR)捕集城市污水碳源的效能与机制[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [11] 何秋杭,金正宇,宫徽,等. 基于强化磁分离的市政污水碳源浓缩技术研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(10): 114-118.
- [12] 刘越,石川,马金元,等. 不同预处理对超磁分离污泥水解产酸效果的影响研究[J]. 中国沼气, 2022, 40(1): 3-10.
- [13] 张星星,焦彭博,杨汇莹,等. 剩余污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化研究进展[J]. 中国环境科学, 2022, 42(05): 2179-2194.
- [14] Wang Q, Li H, Feng K, et al. Oriented Fermentation of Food Waste towards High-Value Products: A Review [J]. Energies, 2020, 13(21): 5638.
- [15] 郝晓地,程慧芹,胡沅胜. 碳中和运行的国际先驱奥地利 Strass 污水厂案例剖析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(12): 1-5.
- [16] Azarmanesh R, Zonoozi M H, Ghiasinejad H. Characterization of food waste and sewage sludge mesophilic anaerobic co-digestion under different mixing ratios of primary sludge, secondary sludge and food waste [J]. Biomass and Bioenergy, 2020, 139: 105610.
- [17] Li Q, Li H, Wang G, et al. Effects of loading rate and temperature on anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high frequency feeding system, looking in particular at stability and efficiency [J]. Bioresource Technology, 2017, 237: 231-239.
- [18] Liang J, Luo L, Li D, et al. Promoting anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste with different types of conductive materials: Performance, stability, and underlying mechanism [J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125384.
- [19] 王启镛,龚春辰,魏彬,等. 季节性气候变化下污水处理厂性能及污泥特性分析[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 49-54.
- [20] 张羽就,席佳锐,陈玲,等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析[J]. 给水排水, 2021, 37(8): 8-17.
- [21] 石川,李坤,边潇,等. 餐厨垃圾厌氧处理“碳中和”综合效益评价[J]. 中国环境科学, 2022, 网络首发.
- [22] Tommaso Lotti, Robbert Kleerebezem, Charlotte van Erp Taalman Kip, et al. Anammox Growth on Pretreated Municipal Wastewater [J]. Environ Sci Technol, 2014, 48: 7874-7880.
- [23] 宋亚朋,宫徽,苑泉,等. 不同形态厌氧氨氧化菌处理磁分离出水脱氮性能及微生物群落结构变化分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(01): 70-82.
- [24] 王凯军,王晓惠,柯建明,等. 厌氧处理技术发展现状与未来发展领域[J]. 中国沼气, 1999, 17(04): 14-17.