

文章栏目：面向减污降碳协同增效的污水处理系统运行管理研究与实践专题
DOI 10.12030/j.cjee.202301058 中图分类号 X703 文献标识码 A

孙猛, 杨佳林, 肖彭誉, 等. 城市污水低碳和资源化技术进展与新趋势[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1748-1760. [SUN Meng, YANG Jialin, XIAO Pengyu, et al. Progress and new trend of low carbon and resource recovery technologies for municipal wastewater treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1748-1760.]

城市污水低碳和资源化技术进展与新趋势

孙猛^{1,✉}, 杨佳林^{2,3}, 肖彭誉¹, 李金珊⁴, 王启镔⁵, 刘刚³, 霍明昕²

1. 清华大学环境学院, 清华大学水质与水生态研究中心, 北京 100084; 2. 东北师范大学环境学院, 长春 130117; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 福建工程学院, 福州 350118; 5. 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

摘要 城市污水处理行业作为耗能大户, 总碳排放量约占全社会碳排放量的 2%。高能耗、高碳排放的传统城市生活污水处理过程与低碳、可持续发展理念背道而驰。总结了城市污水处理厂的碳排放现状, 介绍了符合时代发展的城市污水处理新理念, 讨论了相关新技术在我国探索性应用的初步成效。重点关注用于城市污水厂减排和资源回收的前沿技术、创新范式和发展趋势, 结合实际应用案例阐明城市污水低碳处理和资源回收的可行性与前景。提出了我国城市污水厂在达成减污降碳目标下所需面临的两方面关键挑战, 并为污水处理厂的绿色低碳转型提出解决思路。

关键词 城市污水处理厂; 低碳技术; 能源再生; 资源回收; 碳排放; 碳中和

城市人口增加使得城市生活污水(后简称城市污水)排放量增加, 水质亦日趋复杂。为减少城市污水排放对水环境的不利影响, 诸多污水处理工艺被开发出来应用在城市污水处理系统中以保障排水水质。在 17 世纪之前, 城市污水处理仅以初级沉淀和消毒为主, 处理后的水主要用于农业灌溉。在工业革命爆发之后, 有机物和氮磷营养盐成为城市污水的主要污染物, 活性污泥法成为城市污水处理的核心技术。近年来, 生物接触氧化、膜生物反应器等污水处理技术不断发展并普及, 污水处理工艺流程由简变繁。然而, 相伴而来的是城市污水处理所需电能和药剂越来越多。在全球气候变化和能源紧缺的背景下, 单纯做“加法”的城市污水处理模式已不符合污水处理技术的革新与发展趋势。

在“双碳”背景下, 我国城市污水处理亟需向低碳化和高质化转型。为达成这一目标, 应充分考虑地区污水水质水量、受纳水环境容量及现有污水处理设施建设情况等影响因素, 并因地制宜地执行污水排放标准, 最大程度地减少污水处理能耗。截至 2019 年, 我国 77% 以上的城市污水处理厂执行《城市污水处理厂污染物排放标准》(GB18198—2002) 一级 A 排放标准。污水提标排放使我国水处理平均能耗由 $0.28 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{t}^{-1}$ 增至 $0.328 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{t}^{-1}$ ^[1]。这部分能耗将通过直接和间接方式转化为温室气体排入大气中, 造成了“以能消能, 污染转嫁”的问题^[2]。污水处理行业碳排放占全社会碳排放的 1%~2%^[3], 其中非二氧化碳排放约占全球非二氧化碳温室气体排放总量的 4.6%~5.2%^[4], 因此, 污水处理行业是实现“双碳”目标过程中不可忽视的重要领域。

本文基于“双碳”背景下, 城市污水处理的新理念革新, 总结城市污水处理厂的碳排放现状, 并讨论相关新技术在我国探索性应用的初步成效, 以梳理用于城市污水厂减排和资源回收的前沿

收稿日期: 2023-01-15; 录用日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52270043)

第一作者: 孙猛(1986—), 男, 博士, 副研究员, meng_sun@tsinghua.edu.cn; ✉通信作者

技术、创新范式和发展趋势，再结合实际应用案例阐明城市污水低碳处理和资源回收的可行性与前景，提出污水高质化处理中的障碍及应对思路，以期为污水处理行业的绿色低碳转型提供参考。

1 城市污水处理技术低碳发展的新理念及其实现思路

(1) 以污水处理概念厂为代表的新理念

将污染物削减作为传统城市污水处理的目标已不能顺应未来污水处理高质量发展的现实需求。以节能减排为核心的污水处理新理念强调，在保证高品质出水的前提下，通过技术创新实现能源自给、资源回收和节能固碳。在2014年初，中国工程院院士曲久辉等6位国内环境工程专家首次提出了建设面向未来的中国污水处理概念厂的愿景。专家指出：“污水中潜在的能量是处理它所需要能量的10倍，如果能将这些潜在能量加以利用，市场前景将十分巨大。转向新的理念，使物质能够资源化、能源能够自给，这是污水处理发展的必由之路。”概念厂的设计围绕“水质永续、资源回收、能源自给、环境友好”4个核心理念，运行面向4个目标：使出水水质满足水环境变化和水资源可持续循环利用的需要，实现可持续供水；从污水中提取并再利用氮磷等资源；原位利用污水处理过程中捕获的能量，实现污水厂运维中的能量自给；把污水厂对外界环境影响降至最低，解决传统污水处理厂异味重、污泥多等问题。2021年10月18日，全国首座具有领先示范效应的污水处理厂——宜兴城市污水资源概念厂正式建成投运，全面践行了我国城市污水处理行业绿色发展理念。宜兴污水概念厂突破了传统污水厂以高能耗换取水体净化的局限，将传统污水厂转变为水源、能源、资源工厂，实现了包括污水达标处理、水资源再生利用、能源自产自足、化肥等高值产品生产在内的多重功能。因此，符合未来低碳可持续发展方向的城市污水处理厂将朝着资源再生、能源自给、智能友好、和谐绿色的方向发展。

(2) 污水处理厂落实碳减排的具体思路

为更好地贯彻以上污水处理新理念，明晰污水处理厂现有处理工艺的高能耗短板，对实现污水处理低碳、可持续发展至关重要。常规的污水处理工艺流程为：首先采用固液分离方法处理进入城市污水处理厂的污水，利用格栅拦截、沉砂池沉淀等工艺将污水中的杂质和悬浮固体颗粒去除，再将污水提升输送至生化反应池，采用微生物处理方法去除污水中有机质、氮、磷等溶解性污染物，最后通过卫生填埋、焚烧等方法处理剩余污泥。城市污水处理厂的碳排放主要来自上述污水处理工艺方法、设备和构筑物运维中所产生的直接和间接碳排放(图1)。直接碳排放是在污水处理厂运行中的微生物代谢或污泥焚烧过程产生并直接进入大气的温室气体，如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)等。直接碳排放是城市污水处理厂碳排放的主要来源，约占其总碳排放量的70%^[5]。间接碳排放指污水厂格栅机、生化曝气池等工艺设备运行产生的电耗和药剂消耗所折算的碳排放^[6-7]。

图2为典型城市污水以微生物厌氧—缺氧—好氧曝气法(anaerobic-anoxic-oxic, A/A/O)为核心的处理工艺流程的碳足迹。在生化处理中，厌氧微生物发酵、污水有机物降解、脱氮除磷及污泥处置等过程都会向大气直接排放温室气体，造成直接碳排放。间接碳排放主要来自于机房、泵房等附属构筑物运行产生的电耗和热耗；剩余污泥、栅渣等固体废物储运中排放的温室气体；污水厂的基建能耗，根据进水水质调变的处理工艺用药消耗和生化处理(如好氧活性污泥法)运维等消耗^[8]；为确保寒冷地区污水生化处理脱氮除磷工艺效能，对水体进行保温处理的能耗等。因此，应针对产生直接和间接碳排放的传统污

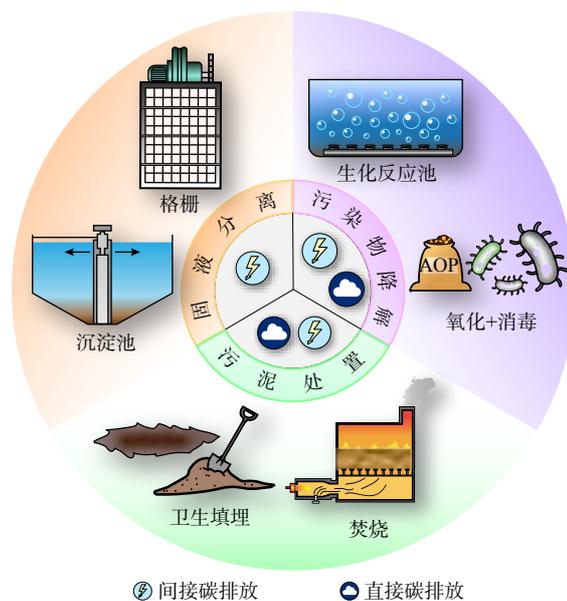


图1 城市污水处理主要工艺及其碳排放形式

Fig. 1 Typical municipal wastewater treatment processes and their carbon emission forms

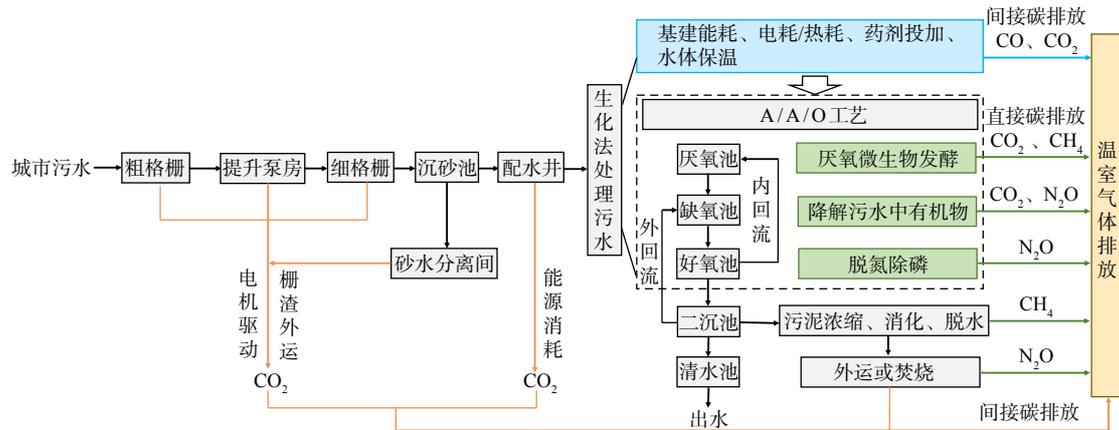


图 2 传统城市污水处理厂碳足迹 (以典型 A/A/O 工艺为例)

Fig. 2 Carbon footprint of conventional municipal wastewater treatment plants (with typical A/A/O process as an example)

水处理工艺, 在特定工艺环节上实施污水处理的节能减排措施, 以切实实现城市污水处理系统的碳减排目标。

城市污水中蕴藏着数量可观的资源和能量。通常认为, 污水中含有的有机物能量约为污水处理消耗能量的 9~10 倍, 回收 COD 为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 污水中的耗氧有机物最高可产生 $1.93 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ 的电能^[9]。现阶段污水厂配备的热电联产装置能将 10%~14% 有机物转化为运营所需电能, 在一定程度上减少消耗电能造成的碳排放^[10]。因此, 回收污水中资源和能量并就地用于污水厂运维, 可从根本上改变传统污水处理厂的能源供给模式。未来, 我国污水处理厂建立净零能耗的污水资源回收系统, 实现污水厂运维的能源自给与低碳减排, 可采取如下方式。1) 通过直接回收污水中高值资源实现能源再生, 以降低运营成本、实现节能减排, 如利用光伏发电或热电联产等方法。2) 通过污水处理技术创新的开源手段实现污水中能源利用或降耗, 如基质共消化、生物质焚烧、营养物质再利用、化学品的轻量投加等。

2 城市污水能源再生和低碳处理技术进展

污水处理技术的创新是从根本上改变污水处理厂运维理念, 实现污水处理节能降耗、资源再生的关键。本节将从化学能、生物质能、热能等能量蕴存形式及氮转化、磷回收等角度来梳理污水处理领域的高值资源回收和前沿的低碳处理技术, 并重点阐述相关技术如何在实现城市污水处理厂节能运行和资源回收中发挥关键作用。

2.1 化学能与生物质能再生技术

1) 污水有机物再生技术。将生化反应产生的污泥进行混合厌氧消化产甲烷, 是目前最成熟的污水中有机物的回收方法。生污泥经脱水浓缩 (干固体质量分数 4%~7% 为宜) 后进入消化池^[11], 经水解发酵、产氢产乙酸和产甲烷三阶段反应生成消化液和沼气。消化液中主要成分为氨氮及小分子酸, 沼气主要成分为 CH_4 和 CO_2 。消化后的污泥再经干化熟成, 理化性质满足《城镇污水处理厂污泥处置单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009) 对污泥单独焚烧利用要求, 即可与厌氧消化产生的沼气共同焚烧用于产热发电。这种通过厌氧消化生成沼气进行热电联产 (combined heat and power, CHP) 的污泥处理方式是一种化学能与生物质能同步再生模式, 已被欧盟地区的污水处理厂普遍采用。在理论上, 热电联产方式可将污水厂电耗、热耗等产生的碳排放占比由 70% 降至 20%。尽管沼气不完全燃烧产生的 N_2O 和 CH_4 会增加 10%~20% 的生物碳足迹, 但污泥热电联产处理仍可减少污水处理厂约 40% 的总碳排放量^[12]。

德国 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂利用剩余污泥厌氧消化产生的沼气和焚烧干化熟成污泥实现热电联产 (表 1)。此外, 该厂还通过有效利用太阳能、风能等清洁能源的方式, 补充了运维电能消耗, 进一步减少了 CO_2 排放。2018 年, 该厂的电能、热能自给率分别达到 107% 和 113%, 在实现能量中和目标的同时, 已将剩余热能供给周围港口^[13]。由此可见, 污水处理厂通过化学能

表1 污水处理低碳运行及能源回收技术与案例

Table 1 Introduction of low carbon wastewater treatment and energy recovery technologies and application cases

技术名称	应用案例	技术方法	技术效能	参考文献
污泥厌氧消化—热电联产 (AD-CHP)	德国Köhlbrandhöft/Dradenau污水处理厂	将初沉池与二沉池的剩余污泥进行浓缩, 添加增稠剂后在消化池中进行污泥厌氧消化, 消化过程中产生的沼气可转化为天然气对外输送	2018年该厂电能自给率达107%, 热能自给率达113%。已实现厂区热能电能自给	[13]
新型“A-B”工艺结合消化液侧流自养脱氮 (DEMON)	奥地利Strass污水处理厂	A段设置高负荷和较短的水力停留时间 (0.5 h)。通过生物絮凝、吸附作用充分浓缩并截留水中碳源。消化后污泥经机械脱水一分为二, 一部分用于焚烧热电联产, 另一部分经侧流自养脱氮 (DEMON) 回流至A段吸附池。投加制铝工业废弃物铝酸钠进行化学除磷。B段进行有机物去除并完成生物体内的同步反硝化作用。	2005年, Strass污水处理厂日耗电量为7 869 kW·h, 而CH ₄ 热电联产电量为8 490 kW·h, 超额8%完成了能源中和目标。产能/耗能比2.0, 污水处理厂成为能源供给厂。	[16]
污水源热泵系统	南昌市青山湖区污水源热泵系统	采用4台RSL1480W型污水源热泵机组, 每台机组配备一级污水泵、防阻机、二级污水泵及空调水循环泵等。工程上可采取直入式原生污水源热泵空调系统, 省去中间换热环节, 提高换热效率	污水源热泵系统在采暖期 (90 d) 比传统煤锅炉节约标煤1 238 t, 制冷期 (120 d) 比风冷冷水机组节电1 150 MWh, 相当于标煤404 t, 全年CO ₂ 减排量4 700 t。	[17]
鸟粪石流化床反应器	天津市某污泥处理厂	污泥上清液由流化床底部进入反应器, 与投加的氯化镁溶液充分混合, 调节pH使鸟粪石结晶沉淀	从PO ₄ ³⁻ -P质量浓度为50.54 mg·L ⁻¹ 的污泥上清液中回收磷。可形成粒径纳米级别的高纯度 (大于90%) 鸟粪石, 每吨污泥上清液回收量为0.48 kg, 磷回收率达95%	[18]
好氧颗粒污泥系统 (AGS)	荷兰Garmerwolde污水处理厂	建立基于AGS工艺的全尺寸装置, 与原有“A-B”反应池平行运行。新建AGS装置处理量为总进水的41%, 通过SHARON反应器处理工厂消化池和污泥浓缩器产生的侧流	荷兰其他污水处理厂处理市政污水达标所需平均能量约为 ¹⁾ 37.5 kWh·人 ⁻¹ (PE _{150, removed year})。相比之下, Garmerwolde污水处理厂能耗大幅下降至13.9 kWh·人 ⁻¹ (PE _{150, removed year}) ⁻¹ , 新建AGS系统相比原有“A-B”法处理废水耗能节约51%	[19]

注: ¹⁾这里的“人”指“人口当量” (population equivalents, PE), 此处为PE_{150, removed}, 即每日每人去除150 mg总需氧量 (TOD) 所消耗的能量。

与生物能再生可实现设备运行的能耗自给, 减少厂外能量供给和运维成本。热电联产技术可为市政公用范畴的污水厂收支平衡提供可行性方案, 该技术还可减轻因市政补贴造成的政府财政压力。我国部分水厂同样具备利用沼气进行热电联产的能力。青岛麦岛污水处理厂于2007年启动调试热电联产产能项目, 利用厂区内废热 (发电机尾气余热、沼气锅炉余热) 对污泥进行厌氧消化, 并利用产生的沼气进行发电。在两年调试后, 发电系统年均发电量稳定在 931.05×10^4 kW·h, 可保证供应全厂全年约60%的发电量^[14]。青岛海泊河污水处理厂日处理污泥约 $1\ 100$ m³, 平均日产气量达 10^4 m³。2016年, 该厂全年沼气发电效率平均可达30%, 沼气发电占整个污水处理厂年自用用电量的25%~30%^[15]。热电联产技术实现污水有机物再生已成为国内外众多污水处理厂采用的一种成熟、普遍的能源利用手段。

2) 提升甲烷产率的污泥预处理技术。污泥厌氧消化经过水解酸化、产氢产乙酸和产甲烷3个阶段。其中, 水解酸化阶段可将大分子有机物水解为便于厌氧微生物利用的小分子物质, 是消化反应的限速步骤并直接影响甲烷产率。然而, 活性污泥中存在的细菌和一些难降解的纤维素及腐

殖质阻碍了污泥中有机物的水解,造成厌氧消化回收的碳源低于进水 COD 总量的 20%。因此,有必要在污泥厌氧消化前进行预处理以释放出细胞内存在的有机物、糖类、蛋白质等,为后续微生物代谢提供条件。

污泥预处理技术通过物理方法或化学药剂破坏污泥结构和微生物细胞膜与细胞壁,将生物能以化学能的形式释放到消化液中,可有效提升活性污泥水解酸化程度和甲烷产率。ZOU 等^[20]研究了低温热结合碱预处理对污泥厌氧消化性能的影响,相比对照组,25 d 内低温热结合混碱预处理可使甲烷产量提升 171.7%。LI 等^[21]利用碱和超声预处理剩余污泥并进行 21 d 厌氧消化,消化后甲烷产量可达 752.6 cm³,比原污泥甲烷产量高出 1.4 倍。由此可见,通过物化预处理手段能有效解决水解酸化程度低的问题并提高甲烷产量。

污泥中有机质占比越高、无机杂质含量越低,越有利于有机质向甲烷转化。反之,低有机物质量浓度的污泥会抑制微生物活性并改变其代谢途径,致使甲烷产率降低^[22]。基于此,以改善污泥组成成分、提高厌氧消化甲烷产率为目标的污泥预处理方法得以发展。如将挑分后的厨余垃圾和剩余污泥进行混合可提升剩余污泥中有机质含量,二者共消化还会产生协同作用^[23]。这种与我国剩余污泥和固体废弃物处理处置的“减量化→稳定化→无害化→资源化”一般导则相反的“污泥增量”概念,已在欧美甚至一些周边亚洲国家兴起。“污泥增量”并不是增加剩余污泥数量,而是通过引入外来有机物提高污泥消化池的有机负荷率,实现了有机物回收“1+1>2”的效果^[24]。这种人为提高有机物浓度的污泥预处理方法,减少了耗氧有机物(以 COD 计)的无效直接氧化,可大幅提高产气率,为实现城市生活污水处理厂能源自给提供技术保障。尽管使用外加碳源可提升产气率及资源回收效率,但进行有机物回收的污水处理厂最多仅能实现“能源中和”,距离真正“碳中和”仍有差距,亟需开发污泥厌氧发酵能源回收新设备,以提高能量转化效率,从而实现能源自给和减碳目标。

3) 污水碳源截留技术。厌氧污泥消化过程仅能提取污水中 30%~35% 的能量,其余能量仍储存在污水中。因此,在消化反应前捕获污水中的碳源更具实际意义。上流式厌氧污泥床(up-flow anaerobic sludge bed/blanket, UASB)中污水自下而上流动,污泥在重力作用下聚集在反应器底部,形成以厌氧微生物为主的高浓度污泥区。该区域内厌氧微生物截留污水中 COD 并通过发酵作用转化为 CH₄ 和 CO₂。最终生成的气体通过反应器上部的三相分离器分离回收,污泥消化液从反应器澄清区排出进入深度处理环节。

我国城市污水中有机物浓度普遍偏低,污水的水质和水量显著影响了反应器污泥床的能量回收效率。因此,可对污水中有机物进行浓缩以获得较高的消化产气率。在二级生化处理前投加混凝剂的化学强化一级处理工艺(chemically enhanced primary treatment, CEPT),可捕获并富集初沉池中胶体有机物和颗粒态有机物。

新型的吸附-生物氧化(adsorption-biodegradation, A-B)工艺可有效截留污水中的碳源。首先,在 A 段营造高负荷、低水力停留时间条件,促进水中微生物富集并截留污水中溶解性有机物。A-B 工艺可与 CEPT 工艺结合提升 A 段的碳源捕获率,再将含有高浓度有机物的污泥厌氧消化。其次,可在低 F/M 比(Food/Microorganism, 单位重量的活性污泥在单位时间内所承受的有机物数量,用以反应污泥负荷)的 B 段实施好氧处理,降解水中剩余的低浓度有机物。值得注意的是, B 段有机碳源浓度过低会抑制污泥中反硝化菌的代谢过程。因此,脱氮效率低是限制 A-B 工艺实际应用的主要原因。近年来,随着自养脱氮技术的飞速发展,出现了将 A-B 工艺与自养脱氮技术联用的新型污水处理范式,实现了 A 段碳源回收最大化和 B 段低碳氮比污水的达标处理。如奥地利 Strass 污水处理厂采取新型 A-B 工艺和消化液侧流自养脱氮联合技术截留水中的碳源, A、B 两端截留的 COD 占进水总量的 74.3%。并结合污泥热电联产,超额(8%)完成了能源中和目标(表 1),实现了最大化的能源再利用。该组合工艺范式在污水碳源截留和有机物再生利用方面展示出其优势,从污水处理厂源头中实现了化学能回收。该厂通过改良工艺同时实现了污染物降解和能源回收 2 个目标,证明了污染物去除和污水厂节能降耗二者并不矛盾,为污水厂工艺的低碳化改进提供了参考实例。

4) 污泥厌氧消化产氢技术。氢被认为是一种代替化石能源的新型清洁能源。利用污泥厌氧发

醇产氢成为一种重要的能源回收技术。该技术通过抑制产甲烷菌并调节微生物生长环境建立产氢优势菌群，再通过严格控制氨氮、腐殖酸、污泥 pH、温度及盐类等物理条件可有效提高产氢效率并抑制产甲烷过程。除了调控厌氧发酵过程中的发酵条件外，还可将污泥与餐厨垃圾进行厌氧共消化以提升氢气产率，并通过调控污泥碳氮比、含水率、pH 等发酵条件以获得最佳产氢效率。桑静等^[25]在厌氧消化的污泥中加入 0.02% 氯仿作为产甲烷抑制剂，对比无氯仿的对照组污泥，经 120 h 发酵培养后污泥厌氧消化产氢量由 1.2 mL 上升至 15.7 mL，Miseq 测序结果表明，产氢菌种相对丰度增加了 10%~30%。通过营造适合产氢的污泥厌氧消化条件，培养的优势种群以实现有效产氢。

为避免乙酸积累对产氢菌造成的毒害作用，常利用萃取、精馏、吸附等手段对消化过程中的乙酸进行回收。经调控后气液分离的厌氧消化气态产物主要包括氢气和二氧化碳，渗透膜可对气态产物进行提纯，得到氢气。厌氧消化产氢技术将污泥中有机碳转变为清洁能源氢气和乙酸，实现能源回收和减碳目标^[26]。但就目前工程运营成本的考虑，污泥厌氧消化产氢技术在氢气回收和储存等方面还有较大的发展空间。

2.2 城市污水热能回收技术

城市污水常年恒定室温 (10~20 °C)，所含低品位热源不足以用于直接发电。但在厂区或周边 3~5 km 污水热能供给范围内，污水余热有潜力用于夏季制冷或冬季供热。相较于有机物回收利用，热能回收更容易实现。HAO 等^[10]估算发现，城市污水中能实际转化为热、电的化学能理论上仅占 10%~14%。而可回收的热能为化学能的 6~8 倍，具有极大回收价值。污水热能具有高转化率的特点，是污水处理厂从能源中和向碳中和发展的必要途径。

城市污水热能主要来源包括三方面：室内污水余热、生活污水下水管余热、城市生活污水处理厂构筑物中水体余热，这些污水余热可经换热器回收利用 (图 3)。荷兰阿姆斯特丹水务公司 Waternet 在入户下水管和冷水进水管间设计了一种简易换热器，将洗浴废水与入户冷水进行热量交换。该装置保证了洗浴用水温度并加热了洗浴混水中的冷水，在居住区大面积推广能有效降低碳排放。通过水源热泵提取城镇污水余热，可用于污泥保温或污水厂区供热 (制冷)，可大幅降低碳交易额。早在 20 世纪 70 年代，瑞士和瑞典便已建成 50 余个污水处理厂热能利用工程。我国已建成的污水源热泵系统的制冷及制热系数可达 3.5~4.5。如江西省南昌市青山湖区利用污水源热泵空调系统制冷供热 (表 1)，相比传统燃煤锅炉房及风冷冷水机组，污水源热泵系统全年节约标煤 1 642 t，CO₂ 减排可达 4 700 t。污水余热回收潜力巨大，我国虽在污水热能回收领域起步较晚，但目前已有利用污水源进行热能回收的工程项目。未来城市污水热能回收技术将成为我国污水处理行业实现“双碳”目标的重要一环。

2.3 磷资源回收与低碳脱氮技术

城市污水中总氮 (TN) 约为 50~60 mg·L⁻¹^[27]，总磷 (TP) 日均浓度约为 4~9 mg·L⁻¹^[28]，不当处理将造成受纳水体的富营养化。目前，城市污水处理厂主要采用 A/A/O 脱氮除磷工艺。但因城市污水存在水量不稳定、冬季低温、COD 偏低等问题，为保证污水脱氮除磷效果，需向污水中添加碳源。过量添加的碳源会导致生化法碳排放量增加。实施磷资源高效回收并施用低碳高效脱氮技术，成为解决此类问题的有效手段。

1) 磷资源回收技术。磷矿石的发现与开采使得磷资源从封闭的磷—食物循环转变为不可持续的线性路径。磷肥的生产和使用加速了磷资源的不可逆消耗，也造成了水体富营养化^[29]。鸟粪石 (Mg (NH₄) PO₄·6H₂O) 是一种溶解度低且磷含量高的磷酸盐矿物，常作为优良的缓释磷肥^[30]。鸟粪石结晶法又称作磷酸铵镁沉淀法，通过向含磷污水中加入氯化镁作为沉淀剂，促使水中溶解态的铵盐和磷酸盐与镁离子生成不溶性的鸟粪石，达到回收污水中磷资源的同时去除水中氨氮。鸟粪石回收法将污水资源流从分解代谢转变为合成代谢，可减少碳源投加量。天津某污泥处理厂利用鸟粪石结晶法回收污泥上清液中的磷，磷回收率达 95%，成本仅为 0.46 元·t⁻¹ (表 1)。因此，鸟粪石结晶法可节省污泥处理成本并产生环境效益。

污水处理后产生的污泥中磷回收潜力同样巨大^[31]，因重金属超标的问题，将污泥直接用于农业的处理方法受到限制，故常用湿化学法回收污泥中的磷资源。根据污泥中重金属种类，对焚烧

后的污泥灰分先进行酸化溶解,再将pH调至碱性去除污泥中重金属。然而,对于高硫含量的污泥废物,该方法需要先对污泥进行焚烧或预处理,以防止会产生大量硫化氢污染空气^[32]。

向曝气池内投加铁盐的生物铁除磷技术有助于实现较高的磷酸盐回收率。这一技术还具有强化混凝、增强微生物酶活性和铁元素强化还原硝态氮的附加功能^[33]。开普敦大学开发出一种将沉淀池污泥回流至缺氧池的改良A/A/O工艺,命名为UCT(University of Cape town)脱氮除磷工艺。UCT工艺有效避免了含硝态氮污泥回流对聚磷菌的影响。强化释磷作用的厌氧池上清液可直接用于鸟粪石结晶,从而提高磷回收率。鸟粪石结晶法回收的高纯度磷具有巨大经济价值,结合污水厂能源自给技术有望实现污水厂盈利。随着污水厂资源回收产业化发展,磷回收技术未来可能成为最具商业价值的污水资源化再生方法。

利用微藻培养将水中磷作为生物磷进行回收被认为是一种低成本、环境友好且有前途的磷回收方法。对于无法通过直接沉淀回收的低浓度含磷污水,在污水中进行微藻培养可以有效富集磷^[34]。但该方法在处理大水量污水上仍有局限性,未来可能以辅助手段对污水厂的二级出水中的氮、磷进行回收,再将收集的微藻处理后作为生物肥料使用。

2) 低能耗脱氮技术。短程脱氮技术可减少污水处理过程的碳源投加量和需氧量^[35]。例如,短程硝化反硝化(shortcut nitrification denitrification, SCND)技术可通过调控溶解氧、基质含量和pH等条件,将硝化反应停留在产亚硝酸盐阶段,再利用亚硝酸盐直接反硝化生成氮气。短程硝化和短程反硝化常与厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, anammox)耦合使用,衍生出了短程硝化—厌氧氨氧化(partial nitrification-anammox, PN/A)和短程反硝化—厌氧氨氧化(partial denitrification-anammox, PDN/A)技术^[36]。Anammox指在厌氧的条件下,厌氧氨氧化菌利用CO₂、碳酸氢盐(HCO₃⁻)等无机碳,以亚硝态氮和氨氮为电子受体与供体,摩尔比1:1.32反应生成氮气(N₂)的过程。Anammox无需外加碳源,碱度消耗量减少45%,污泥产量也远低于传统脱氮工艺,污泥处理成本显著降低。北京排水集团自主研发的系统性厌氧氨氧化技术在北京市内5个再生水厂的污泥处理中心得到应用,总计日处理量1.59×10⁴t,已节约能耗30%、节约药剂90%、减少碳排放1.05×10⁴t,为世界上最大规模的污泥消化液脱氮工程^[6]。

传统脱氮工艺分为硝化反应和亚硝化反应2个过程,如图4所示。硝化反应将氨氮经亚硝态氮氧化为硝态氮,两个过程分别消耗75%和25%氧气;反硝化反应将硝态氮经亚硝态氮还原为氮气,2个过程分别消耗60%和40%碳源。相比之下,PN/A技术通过控制反应条件,营造低浓度溶解氧和氨氮环境,抑制了亚硝酸盐氧化菌与anammox菌的协同竞争作用。PN/A技术仅需将一半左右的进水氨氮氧化为亚硝态氮,比传统硝化作用降低了60%的需氧量^[37],再以anammox的自养途径实现高效短循环脱氮。PN/A技术节省了曝气能耗且无需外加碳源,大大降低了脱氮反应碳排放量,有利于城市污水脱氮处理节能降耗。

Anammox技术在脱氮上的节能优势激发了研究者对自养脱氮技术的研究。哈尔滨工业大学王爱杰教授团队牵头研发了活性自持深度脱氮技术(简称SADeN®技术,或珊氮®技术)。珊氮是一种基于复合活性生物载体(Thiocref®)驱动的自养反硝化脱氮技术。反硝化过程依靠载体自身提供的电子,以无机碳作为碳源,将硝态氮直接还原为氮气,解决了反硝化过程对碳源的依赖问题。该技术在邢台市宁晋经济开发区污水处理厂完成了建设规模为4×10⁴t·d⁻¹的示范工程。珊氮®滤池运

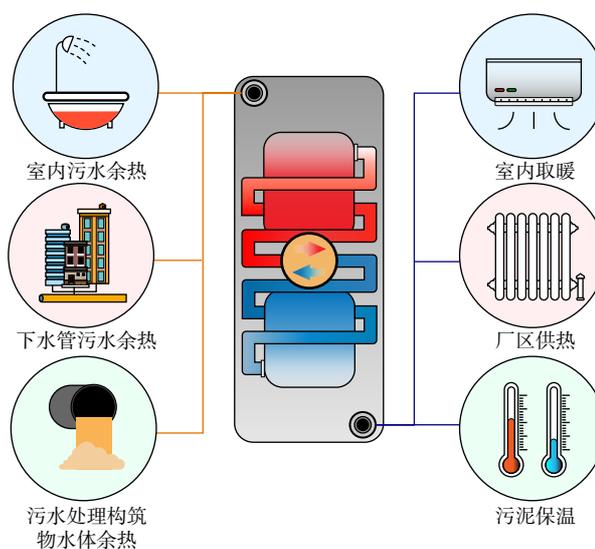


图3 污水热能提取及利用途径

Fig. 3 Wastewater heat extraction and utilization

行以来,出水TN低于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,运行成本较异养反硝化滤池降低40%以上。该示范工程是目前国际上已知规模最大的自养深度脱氮技术应用案例。

在传统脱氮除磷工艺中,反硝化菌与聚磷菌存在碳源竞争、泥龄差异大的问题,导致无法在脱氮的同时实现磷资源的高效去除及回收。反硝化聚磷菌可在无氧的条件下利用硝态氮和亚硝态氮作为末端电子受体,使反硝化和除磷过程同步进行,实现高效、低耗能的脱氮除磷^[38]。基于反硝化聚磷菌诞生的反硝化除磷技术(denitrifying P removal, DPR)使脱氮和除磷技术在时间和空间上达到统一,实现了“一碳两用”。相较于传统脱氮除磷工艺,DPR工艺的理论污泥产率、碳源消耗量和耗氧量分别降低了50%、50%和30%,此外,DPR工艺还可通过共享脱氮和除磷的反应设备缩短工艺流程^[39]。

在缺氧条件下,反硝化聚磷菌以水中硝酸盐作为电子受体,利用溶解氧和有机物完成释磷和吸磷过程,降低了水中碳氮比和溶解氧含量,为厌氧氨氧化菌代谢提供有利条件。此外,反硝化聚磷菌与厌氧氨氧化菌均可利用亚硝酸盐作为电子受体^[40],厌氧氨氧化与反硝化除磷耦合工艺还可防止亚硝酸盐积累过量导致脱氮除磷性能下降。

好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS)是一种微生物自凝聚形成的微生物集合体。颗粒污泥内外双层的形态特征使其从内层到外层含氧量逐渐升高,满足污水脱氮除磷所需的好氧和厌氧条件。因此,相较于传统活性污泥脱氮方法,AGS无需设置回流装置就可实现同步脱氮除磷,减少污泥回流所需能耗。好氧活性污泥颗粒可较好地保留人为接种的菌株,其致密的核结构对有毒物质具有较高耐受性,故可用于处理毒性高的污水^[41]。好氧颗粒污泥中微生物种类和数量远高于传统活性污泥,高浓度的微生物菌群更容易发生相互碰撞和接触。提高培养AGS连续流反应器的高径比(反应器高度与直径的比

例)可形成较强的水力剪切力,在一定程度上减少搅拌所需的能耗。好氧颗粒污泥具有优良的沉降性能,且在实际水处理中无需设置二沉池,可减少25%~75%的用地面积^[42]。AGS技术在实际污水处理中已有应用案例,荷兰Garmerwolde污水处理厂将新建AGS全尺寸装置与原有“A-B”反应池平行运行。对比运行后发现(表1),Garmerwolde污水处理厂能耗由 $37.5\text{ kWh}\cdot\text{人}^{-1}$ (这里的“人”指“人口当量”(population equivalents, PE),此处为 $\text{PE}_{150, \text{removed}}$,即每日每人去除150 mg总需氧量(TOD)所消耗的能量)大幅下降至 $13.9\text{ kWh}\cdot\text{人}^{-1}$ 。相比平行运行的传统“A-B”反应池,新建AGS系统可有效节约51%能耗。颗粒污泥具有抗冲击能力强、能有效保留目标微生物群体和避免污泥流失等优点,将anammox技术与AGS技术耦合的厌氧氨氧化颗粒污泥技术(anammox granular sludge, AnGS)可解决anammox菌繁殖速率低、倍增时间长等问题,拓展了anammox的应用范围。

2.4 膜法污水资源化技术

低压超滤和反渗透技术的联用使污水再生利用成为可能^[43]。国外已有将膜分离技术用于再生水饮用回用的案例^[44]。其中,最成功的案例当属新加坡的NEWater水厂。污水再生饮用的主要工艺被称为“完全高级处理”(full advanced treatment, FAT),即采用微滤/超滤—反渗透—高级氧化联合工艺,是再生水饮用回用的标准工艺^[45]。将深度处理后的再生水注入地表径流或地下含水层,经天然水体自净后重新进入给水系统。这种间接回用的再生水处理方法更易被接受,可有效解决城市人口密集带来的水资源短缺问题。

膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)将生化处理单元和膜分离单元直接耦合,突破了传统污水资源化技术的诸多壁垒。如膜分离过程能大幅提升固液分离效率^[46],出水悬浮物和浊度接近于零,解决了传统活性污泥法污泥沉降性能与污泥浓度之间的矛盾。膜分离过程还能大幅提升

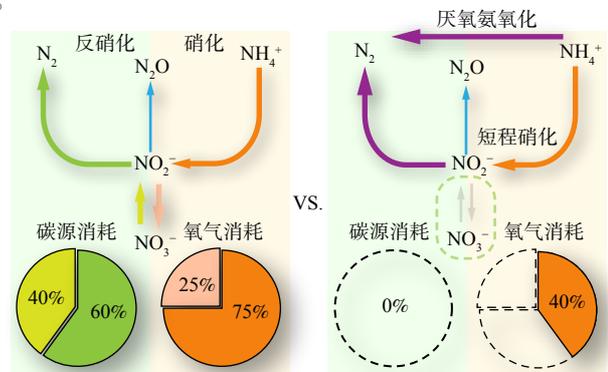


图4 传统脱氮和短程脱氮工艺及其碳源、氧气消耗
Fig. 4 Comparison of carbon and oxygen consumption between traditional denitrification and partial nitrification-anammox processes

出水水质,更易实现中水回用和水资源再生。WANG等^[47]设计了一种“厌氧MBR-反渗透-氯化”一体化工艺处理城市污水,出水可达到新加坡NEWater水厂的再生水出水标准。该工艺可有效减少生物法脱氮产生的 N_2O ,温室气体排放总量仅为目前城市污水回用系统的25.8%,减排及水资源回收效果显著。随着MBR技术的不断发展,同时实现节能降耗和水质提升的振动膜生物反应器(V-MBR)实现了更低能耗突破。V-MBR反应器以机械振动的膜清洗方式代替了鼓风曝气膜清洗方式,可降低约为MBR反应器20%能耗的综合运行能耗,并将出水TN控制在 5 mg L^{-1} 以下。V-MBR已在北京窦店再生水厂示范应用,运行效果良好,出水可作为当地高品质补充水源。

2.5 人工湿地技术

为满足未来更高的污水处理排放标准及再生水回用目的,污水二级出水需进一步去除残余有机物、氮磷营养盐及水中微量重金属。相比传统的离子交换法、膜分离法、催化氧化法等能源密集型技术,将二级出水引入人工湿地可在不影响自然环境的条件下实现低成本的污水深度处理。人工湿地污水处理技术因其低能耗、成本低、碳排放量小、无额外化学品的添加等优势成为传统污水深度净化工艺的替代技术。人工湿地生态化技术利用水生植物的生长特性,将空气中的氧气转移到水中,湿地基质环境中微生物的生长有利地促进了废水中有害物质的分解,不仅能消除污染物和病原微生物以实现水资源再生,还极大地降低了运营成本并减少碳足迹。在人工湿地技术的实际应用中,通常采取混合或多级系统以保证污水深度处理效率^[48]。VALERIE等^[49-50]已证实相较于传统活性污泥法,垂直流人工湿地与水平流人工湿地展现出更强的硝化和反硝化能力和更低的温室气体排放量。人工湿地对污染物的去除作用包括:沉淀、过滤、挥发、吸附、植物吸收和各种微生物代谢作用。全过程受湿地基质中温度、土壤类型、氧化还原条件等参数的直接或间接影响。因此,调控湿地场地实况,对运行处理参数进行调整,是提高其水处理运行效率的重要手段。

曝气可通过提高氧气转移速率调控人工湿地环境,以提高污水BOD、COD及氨氮的去除效率^[51]。英国彼得斯菲尔德的曝气式垂直流人工湿地日处理量高达 $1\ 250\text{ m}^3$,保证了当地两万余居民正常生活用水^[52]。潮汐流人工湿地通过交替充水及排水过程促进污染物与生物膜的相互作用起到对湿地内增氧的作用,在一定程度上可减少持续曝气的能耗。此外,采取明矾净水后产生的含铝固体废物作为人工湿地基质,可发挥高效的磷、农药、砷等重金属的吸附与固定功能,在固体废物资源化的基础上优化湿地基质。通过明矾污泥技术的应用,困扰爱尔兰农牧业养殖场的高浓度废水排放问题得到有效解决,全年月平均BOD、COD、氨氮、总磷处理效率分别在57%~84%、36%~84%、49%~93%、75%~94%和46%~83%波动^[53]。自2014年起,我国的明矾污泥设备已全面投产,正在建设部分以明矾污泥为基质的生态化人工湿地。以人工湿地为代表的生态化尾水处理技术,利用污水作为资源的绿色生态化水处理运行模式,或将成为污水处理行业未来发展的优选。

3 我国城市污水低碳处理的应对思路

上述部分技术已成熟应用于国外污水厂,但要实现在我国的应用尚需在系统性验证。一方面,我国污水资源化起步相对较晚,现有资源化技术体系还不完备,新技术的应用推广还应建立在长期稳定运行的效果之上。另一方面,针对面向未来污水处理高质量发展的新排放标准,选取符合我国城市污水特征的低碳与资源化技术,以提高污水处理的智能化、绿色化程度是我国城市污水处理实现“减污降碳协同增效”所面临的主要挑战。因此,通过技术革新解决上述挑战是城市污水处理实现绿色转型的必要条件。

1) 基于全生命周期方法解决“提标”、“减碳”相制衡问题。为满足“提标”,污水处理厂一般通过“做加法”的形式,通过增加生化处理和深度处理工艺等方式来达标。复杂的流程必然会导致污水处理设施的改造,更先进的工艺和更长的水力停留时间大大增加了投资、运营和处理过程的成本。通过技术革新和工艺调控精细化的污水处理改进技术也会在一定程度上增加资源的直接消耗,产生的废弃污泥和温室气体排放带来的间接影响还将在一定程度上加剧环境问题。因此,综合权衡“排放标准—运营成本—环境影响”之间的关系,使用生命周期评价量化水体污染物排放标准对环境的影响至关重要。张岳等^[48]初步建立了城市污水处理系统全流程节能减排综合测算模

型,并测算了地处北京、天津、江苏的污水处理厂实际碳排量。结果表明,将污水排放标准由二级标准提升至一级B可在一定程度上降低各流程环节的碳排量,但提升至一级A则会使污水厂在能源、资源、处理成本及温室气体排放等方面产生不利影响。SU等^[54]的研究中预测了将水污染物排放标准提高至特别排放限值时,到2030年将会使得电力消耗和运营成本相比于2015年增加86.59%和70.44%,电力消耗引起的温室气体排放量增加72.21%,约占城市生活污水总碳排放量的29.16%。此外,在“政策—经济—环境”相互制约的背景下,资源回收、高效低耗的污水处理组合工艺路径的选择至关重要。目前,污水处理工艺单元远远不能满足新工艺的投入应用,在充分利用污水厂原有设施的前提下,如何在不同标准、水质条件和现有工艺单元基础上,利用厌氧共消化技术、鸟粪石结晶技术进行工艺优化仍有待考量。而通过成本效益分析及生命周期评价来权衡各项污水处理厂的替代技术,以综合评价排放标准对污水处理厂工艺设计的影响,将有助于政府及企业在不同条件下做出最优选择^[55]。

2) 基于资源回收实现创收来保证水厂收支平衡。我国城市污水厂的运营大多数属于市政公用事业范畴,以最大化社会公共效益为目标,因此导致其在运行收益的回报低。高投资建设和高能耗运维成本严重影响了水处理企业在减排和资源回收技术和设备革新上的热情,从根本上限制了城市污水处理行业的低碳转型。因此,污水处理行业亟需由“耗能大户”转型为“物质工厂”来弥补高成本投入。尽管城市污水资源化带来的创收有望在未来实现水厂收支平衡,但目前仍有较多问题亟需解决。以再生水回用为例,一方面再生水的饮用健康风险问题对再生水水质提出更高的要求;另一方面,再生水、城市给水双管网输配系统会显著增加成本。当前,可大力发展再生水间接回用技术,稳步提升再生水回用的社会认同度,逐步有序提高再生水饮用安全保障。我国宜兴污水处理概念厂的再生水水质已达到直饮标准,其再生饮用水的商品化潜力已使污水厂实现可观收益成为可能。

此外,通过从污水中回收高价值资源可最大程度降低污水厂运维成本。除了上文中提及的化学能、生物质能、热能能源再生工艺技术与氮转化、磷回收技术外,更多新颖的生物材料,如挥发性脂肪酸(volatile fatty acid, VFA)、聚羟基烷酸酯(polyhydroxyalkanoates, PHA)和胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)也被视为有价值的化合物。其中,VFA具有较高的工业价值,可作为增塑剂、食品添加剂、染料、树脂和油漆等。PHA作为能量和碳储存材料,在生物工程、汽车工业和建筑材料中有较多应用。EPS可作为阻燃剂、涂层材料及土壤改良剂等。而通过常规处理工艺中进行额外特定的生化过程可促进上述物质的稳定、提取与回收,且越来越多的研究肯定了这三者在作为可持续替代品的循环经济价值。尽管其生产过程大多为小、中试规模、其应用及商业化尚无定论,但伴随着污水污泥中高附加值的价值化法规与准则的制定,越来越多的污水增值化产品将被社会再利用,昂贵的污水处理系统也会彻底转型为具有自我可持续发展的资(能)量源头。

3) 利用智能水务提高能源利用率。污水处理工艺系统的智慧化程度是降低污水处理碳排放和能耗的关键。因此,发展自动化、智能化、标准化污水处理运营控制技术至关重要。如在智能生化反应池中,通过水质指标的实时监控,可实现对药剂投加量的精确调控,从而避免生化反应池因过度加药带来次生风险。还可通过监测水中溶解氧、氨氮的变化,自动调整曝气阀门数量及风量,可实现污水处理厂生化处理单元的科学管理^[49]。高自动化、智能化的污泥堆肥设备可实时优化污泥堆肥条件,精准控制堆体耗氧量、温度和含水率,提高堆肥效率并降低运营成本。智能化污水处理系统还可在一定程度上提高污水处理工艺流程对污染物的去除效率。YUAN等^[50]指出,仪表、控制和自动化(instrumentation, control and automation, ICA)联用技术可将生化处理单元的污染物去除效率提高10%~30%。近期,生态环境部推出的《国家先进污染防治技术目录(水污染防治领域)》将智能化、标准化的水污染治理设施运维控制技术作为重点推荐领域,吸引了环保企业制定相关智能服务,以更好地助力污水处理及回用技术升级,为节能低耗的水厂设计提供新的思路。

4) 提倡绿色生态化发展模式以降低城市水处理碳足迹。绿色科学的污水分流化技术可在源头上解决部分城区管网设计不合理导致的污水处理厂“清水进,清水出”问题,降低污水处理能耗,提升能源和财政资金的利用效率。其中,重要的技术手段就是海绵城市的建设,通过在城市公

园、绿化等地带设置可吸水的海绵地块，将强暴雨消化在本地，一定限度内防止洪水灾害。汇集的雨水还可通过浇灌、清洁等手段进行二次利用，是一种绿色可持续的城市发展理念。海绵城市从人与自然生态系统的可持续关系发展出发，最大程度降低外界干预消耗的人力物力成本及电力、动力消耗所产生的碳排放，实现城市条件下的绿色水循环，体现了低碳城市发展理念在未来水处理技术应用中的关键作用。在自然灾害发生时，海绵城市建设还可在一定程度上解决内涝和干旱问题，减轻排水系统水处理压力，延长水处理设备使用寿命。海绵城市可在多领域、多角度实现排水处理减碳目标。绿色污水处理模式与生态化污水处理技术二者相辅相成，以人工湿地为代表的污水处理技术是海绵城市发展中的重要一环。该技术有效减少了大型排水设施的运维消耗能源导致的碳排放量增加，湿地深度处理后的二级出水满足了更高的水质要求。此外，人工湿地具有多重生态服务功能，通过水生植物代谢可以调节区域微气候、阻滞沙尘、降低噪声、增加绿化面积等功能，是改善河湖生态环境的一种重要措施。将上述生态化的处理技术与城市污水处理厂相结合，通过创造新的小型生态系统，有效提高了城市环境的绿色覆盖率，同时可以处理水资源管理与水资源循环，减轻城市的热岛效应、洪水发生的可能并改善水气介质的环境质量。可见，污水处理在绿色生态化的发展模式对环境产生的增益效果和减污降碳的贡献远远高于建设消耗的资源及人工成本，是满足未来城市污水处理出水高标准和减少污水厂碳足迹的重要措施。

绿色城市水处理设施可有效缓解自然灾害发生时，排水系统高负荷运转对设备带来的巨大损耗。生态化的水处理设施建设契合了可持续发展理念，低碳绿色的二级出水深度净化满足了更高的尾水处理要求，二者对污水低碳处理的意义不仅停留在降低了化石燃料的消耗，更多在于对城市生态系统的保护和优化。因部分硬质开发和灰色基础设施的局限，我国距离实现污水处理绿色生态化发展模式产业化还有较大距离，需要污水处理企业、水处理相关政策制定部门和环境生态领域学者共同努力。

4 结语

减少城市污水处理的温室气体排放和最大化再生利用污水中的资源是城市污水处理向高质化和低碳化转变面临的巨大挑战。合理规划并升级改造污水处理厂现有设施，积极使用上述前沿技术，将为水处理行业带来全新活力。然而，在双碳背景下，我国城市污水处理厂必将朝着生态化、智能化和可持续发展的方向不断前进。在未来，多学科交叉能辅助这一目标顺利实现，利用系统工程学的评估方法，在不同技术工艺组合的模拟情景下，结合实际情况对运营成本、电力减排等予以考察，以辅助减污降碳协同污水处理厂的更新建设，加速城市污水处理厂在“双碳”时代下的技术更替。

参考文献

- [1] 宋新新, 刘杰, 林甲, 等. 碳中和时代下我国能量自给型污水处理厂发展方向及工程实践[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 53-63.
- [2] 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算: 以芬兰Kakolanmäki污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2849-2857.
- [3] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水, 2017, 53(3): 1-3.
- [4] LU L, GUEST J S, PETERS C A, et al. Wastewater treatment for carbon capture and utilization[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(12): 750-758.
- [5] 余娇, 赵荣钦, 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.
- [6] 常纪文, 井媛媛, 耿瑜, 等. 推进市政污水处理行业低碳转型, 助力碳达峰、碳中和[J]. 中国环保产业, 2021(6): 9-17.
- [7] SABIA G, PETTA L, AVOLIO F, et al. Energy saving in wastewater treatment plants: A methodology based on common key performance indicators for the evaluation of plant energy performance, classification and benchmarking[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220: 113067.
- [8] 郝晓地, 李季, 张益宁, 等. 污水处理行业实现碳中和的路径及其适用条件分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 3857-3863.
- [9] HERNÁNDEZ-SANCHO F, MOLINOS-SENANTE M, SALA-GARRIDO R. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(14): 2693-2699.
- [10] HAO X, LI J, VAN LOOSDRECHT M C, et al. Energy recovery from wastewater: Heat over organics[J]. Water Research, 2019, 161: 74-77.
- [11] 彭汉威, 杨寅生, 姚刚. 德国城市污水处理厂污泥处理的能量回收利用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 111-115.

- [12] 蒋彬, 刘中亚, 陈磊, 等. 碳中和视角下污水处理现状与展望[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 51-58.
- [13] 郝晓地, 张益宁, 李季, 等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.
- [14] 范秀磊, 袁博, 李学强, 等. 青岛麦岛污水处理厂污泥消化及热电联产运行管理经验[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 22-25.
- [15] 吴艾欢, 杨婷婷, 吕谋. 青岛海泊河污水处理厂沼气热电联产系统研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(1): 123-127.
- [16] 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(22): 1-5.
- [17] 申传涛, 彭冬根, 胡松, 等. 南昌市污水源热泵系统工程实例与应用可行性分析[J]. 可再生能源, 2014, 32(10): 1510-1514.
- [18] 孟勇彪, 李志, 王林, 等. 中试鸟粪石流化床反应器回收污泥强化厌氧释磷上清液中的磷及产品分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1377-1385.
- [19] PRONK M, DE KREUK M, DE BRUIN B, et al. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment[J]. Water Research, 2015, 84: 207-217.
- [20] ZOU X, YANG R, ZHOU X, et al. Effects of mixed alkali-thermal pretreatment on anaerobic digestion performance of waste activated sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120940.
- [21] LI W, FANG A, LIU B, et al. Effect of different co-treatments of waste activated sludge on biogas production and shaping microbial community in subsequent anaerobic digestion[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 378: 122098.
- [22] ZHANG Y, LI H. Energy recovery from wastewater treatment plants through sludge anaerobic digestion: effect of low-organic-content sludge[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(30): 30544-30553.
- [23] LIU C, LI H, ZHANG Y, et al. Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste[J]. Bioresource Technology, 2016, 219: 252-260.
- [24] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径——碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 43-52.
- [25] 桑静, 班巧英, 李建政. 腐殖酸和产甲烷抑制剂对厌氧污泥发酵产气效能的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1458-1464.
- [26] 丁聪, 万思卓, 王茹, 等. “双碳”政策背景下厌氧消化产气产乙酸过程控制的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(10): 1392-1396.
- [27] 冯红利, 赵梦月, 丁舒喆. 城市污水厂A²O工艺生物脱氮过程优化控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 102-106.
- [28] 宗福哲, 李佟, 曹婧, 等. 典型城市污水处理厂进水污染物规律及运行策略[J]. 给水排水, 2022, 58(5): 31-37.
- [29] ASHLEY K, CORDELL D, MAVINIC D. A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse[J]. Chemosphere, 2011, 84(6): 737-746.
- [30] 余璐, 沈翔. 污水中磷回收技术的研究进展[J]. 净水技术, 2018, 37(S2): 48-51.
- [31] LAW K P, PAGILLA K R. Phosphorus recovery by methods beyond struvite precipitation[J]. Water Environment Research, 2018, 90(9): 840-850.
- [32] EGLE L, RECHBERGER H, ZESSNER M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 105: 325-346.
- [33] 陈仁杰, 荆肇乾, 谢禹, 等. 污水生物强化磷回收技术研究[J]. 应用化工, 2021, 50(05): 1377-1381.
- [34] YANG Y, SHI X, BALLENT W, et al. Biological phosphorus recovery: Review of current progress and future needs: Yang et al[J]. Water Environment Research, 2017, 89(12): 2122-2135.
- [35] 李航, 董立春, 吕利平. 强化脱氮工艺在污水处理中的研究与应用进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(08): 20-24.
- [36] LI J, PENG Y, ZHANG L, et al. Improving efficiency and stability of anammox through sequentially coupling nitrification and denitrification in a single-stage bioreactor[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(17): 10859-10867.
- [37] MA B, WANG S, CAO S, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances[J]. Bioresource technology, 2016, 200: 981-990.
- [38] 郑春霞, 王侧容, 张漫漫, 等. 反硝化聚磷菌及其脱氮除磷机理研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(3): 1009-1025.
- [39] KUBA T, VAN LOOSDRECHT M, HEIJNEN J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. Water Research, 1996, 30(7): 1702-1710.
- [40] 陈亚, 印雯, 吴鹏, 等. 厌氧氨氧化与反硝化除磷耦合机制[J]. 工业水处理, 2019, 39(2): 1-5.
- [41] DUQUE A F, BESSA V S, CARVALHO M F, et al. 2-Fluorophenol degradation by aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 2011, 45(20): 6745-6752.
- [42] 王明阳, 曹素兰, 王孙艳, 等. 好氧颗粒污泥的工程应用及其研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(11): 11-18.
- [43] QU J, WANG H, WANG K, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(6): 1-7.
- [44] 陈梓豪, 许萍. 国外再生水饮用回用的案例分析与启示[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 13-22.
- [45] GERRITY D, PECSON B, TRUSSELL R S, et al. Potable reuse treatment trains throughout the world[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 2013, 62(6): 321-338.
- [46] XIAO K, LIANG S, WANG X, et al. Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: a critical review[J]. Bioresource technology, 2019, 271: 473-481.
- [47] WANG S, LIU H, GU J, et al. Towards carbon neutrality and water sustainability: An integrated anaerobic fixed-film MBR-reverse osmosis-chlorination process for municipal wastewater reclamation[J]. Chemosphere, 2022, 287: 132060.
- [48] 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(09): 65-74.
- [49] 何元浦, 范海涛, 刘国华, 等. 污水生物处理过程中曝气控制策略的研究进展及趋势[J]. 环境工程, 2021, 39(06): 34-41.
- [50] YUAN Z, OLSSON G, CARDELL-OLIVER R, et al. Sweating the assets—the role of instrumentation, control and automation in urban

- water systems[J]. *Water Research*, 2019, 155: 381-402.
- [51] NIVALA J, MURPHY C, FREEMAN A. Recent advances in the application, design, and operations & maintenance of aerated treatment wetlands[J]. *Water*, 2020, 12(4): 1188.
- [52] STEFANAKIS A I. The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management[J]. *Sustainability*, 2019, 11(24): 6981.
- [53] ZHAO Y, BABATUNDE A, HU Y, et al. Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment[J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46(1): 278-283.
- [54] SU H, YI H, GU W, et al. Cost of raising discharge standards: a plant-by-plant assessment from wastewater sector in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: 114642.
- [55] 车悦驰, 颜蓓蓓, 王旭彤, 等. 污泥堆肥技术及工艺优化研究进展[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 164-173.
- (责任编辑: 靳炜)

Progress and new trend of low carbon and resource recovery technologies for municipal wastewater treatment plants

SUN Meng^{1,*}, YANG Jialin^{2,3}, XIAO Pengyu¹, LI Jinshan⁴, WANG Qibin⁵, LIU Gang³, HUO Mingxin²

1. Center for Water and Ecology, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130117, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 5. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*Corresponding author, E-mail: meng_sun@tsinghua.edu.cn

Abstract Municipal wastewater treatment plants (MWTPs) consume a large amount of energy, accounting for over 2% of the electrical energy consumption of municipal public utilities. The conventional municipal wastewater treatment processes with high carbon emissions run counter to the development of low-carbon, sustainable water treatment. This study summarized the current situation of carbon emission in MWTPs and introduced new paradigms of water treatment and resource recovery of MWTPs. The key role of innovative modes and state-of-the-art technologies in reducing carbon emissions and increasing energy recovery of MWTPs were discussed. This study clarified the feasibility and prospect of emission reduction and resource recovery of MWTPs by discussing the practical application cases. Two key challenges for Chinese MWTPs to meet the goal of pollution control and carbon reduction were suggested. Correspondingly, solutions for transforming conventional MWTPs into advanced versions with full potential for resource recovery were proposed.

Keywords municipal wastewater treatment plants; low-carbon technology; energy regeneration; resource recovery; carbon emission; carbon neutrality