

张惠. 城镇污水处理行业低碳技术研究现状与发展趋势分析[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 1-9.

ZHANG H. Analysis on research status and development trend of low-carbon treatment and disposal technologies for urban sewage and sludge [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 1-9.

城镇污水处理行业低碳技术研究现状与发展趋势分析

张 惠*

(上海市排水管理事务中心, 上海 200001)

摘 要 在全球气候变化的大背景下,我国在 2020 年提出了“双碳”目标,推进经济社会发展全面绿色转型。城镇污水污泥处理处置由于其具备污染物削减功能和高能耗特点,碳排放量可观,成为减污降碳的重点实施行业。研究基于污水污泥处理处置过程中碳排放特征,从过程和管理优化、技术和工艺升级、能源和资源回收三方面,总结了具有研究实践基础和推广应用前景的污水污泥处理处置低碳技术,系统分析了各技术的减碳关键点和碳减排效果,最终凝练提出了未来城镇污水污泥处理处置行业节能、低耗、低碳、循环的发展趋势,为我国污水污泥处理处置行业践行绿色循环理念,实现“碳中和”愿景,促进可持续发展提供方向。

关键词 污水污泥 处理处置 碳排放 低碳 节能降耗

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)07-0001-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.001

Analysis on Research Status and Development Trend of Low-Carbon Treatment and Disposal Technologies for Urban Sewage and Sludge

ZHANG Hui*

(Shanghai Municipal Drainage Management Affairs Center, Shanghai 200001, China)

Abstract Under the background of global climate change, China's "double carbon" goal in 2020 is promoted comprehensive green transformation of economic and social development. The treatment and disposal of urban sewage and sludge has become a key to pollution and carbon reduction as its pollutant reduction function and high energy consumption. Based on carbon emission characteristics during the treatment and disposal of sewage and sludge, this research summarizes low-carbon technologies with certain research basis and application prospects including process and management optimization, technology and process upgrading, and energy and resource recovery. Then the future development trend of energy saving, low consumption, low carbon and circulation is put forward. In summary, this research can provide direction to the treatment and disposal of sewage and sludge in the implementation of green recycling concept, achievement of "carbon neutrality" vision, and promotion of sustainable development in China.

Keywords sewage sludge treatment and disposal carbon emission low carbon energy conservation and consumption reduction



张惠,上海市排水管理事务中心,高级工程师。主要研究方向为水污染防治、水环境综合治理、防汛排水安全、污水输送、污水处理及排水管理等。多次获得企业管理现代化创新奖,期间主持完成的重大城市排水泵站更新改造项目逾百个,为切实提高城市排水能力和运行管理水平等助力。

[收稿日期] 2024-01-04

[基金项目] 上海市科技计划项目(21DZ1202600)

[通信作者] 张惠(1977—),女,博士,高级工程师,研究方向为市政排水、环境工程, E-mail: zichunhui@163.com。

污水处理行业关系公共卫生和生态安全,是我国水生态环境质量改善、人居环境品质提升的重要一环。同时,污水处理行业属于能耗大户,占全社会碳排放总量的1%~2%^[1],碳排放量可观。据测算,到2030年,我国污水处理行业碳排放量将达3.65亿 tCO₂eq,占全国碳排放量比例也将升至2.95%^[2]。在全球气候变化的大背景下,污水处理行业碳减排已成为各国共识,多个国家已发布相关“碳中和”计划。丹麦作为低碳转型的典型国家,于2012年发布了 *Copenhagen 2025 Climate Plan*,详细规划了哥本哈根的减排方向、目标和路径,其中市政领域是四大减排领域之一。我国为实现2030年“碳达峰”、2060年“碳中和”的目标,在各领域发布了一系列政策文件,其中生态环境部等部委2022年在联合发布的《减污降碳协同增效实施方案》^[3]中对污水污泥节能降耗和资源化利用提出了详细要求:推进污水处理厂节能降耗,优化工艺流程,提高处理效率;鼓励污水处理厂采用高效水力输送、混合搅拌和鼓风曝气装置等高效低能耗设备;推广污水处理厂污泥沼气热电联产及水源热泵等热能利用技术;提高污泥处置和综合利用水平;在污水处理厂推广建设太阳能发电设施。在此背景下,我国城镇污水污泥处理处置已开启低碳转型之路。

目前关于污水处理行业碳排放构成与核算已有较多研究。城镇污水处理过程中碳排放环节主要包括:污水生化处理等过程产生的CO₂、CH₄和N₂O等气体造成直接碳排放;污水厂各单元的能源、电力和药剂消耗造成间接碳排放。蒋富海等^[4]总结了污水处理厂碳排放核算方式如式(1)。

$$W = (W_1 + W_2) + (W_3 + W_4) \quad (1)$$

其中:W——年实际碳排放总量,tCO₂/a;

W_1 ——去除TN产N₂O的年碳排放量,tCO₂/a;

W_2 ——去除COD_{Cr}产CH₄的年碳排放量,tCO₂/a;

W_3 ——年电耗的碳排放量,tCO₂/a;

W_4 ——年药耗的碳排放量,tCO₂/a。

张海亚等^[5]研究发现,污水处理厂间接碳排放占总排放量比例过半,为53%~74%;MBR工艺碳排放量较高,AAO工艺碳排放量较低。污泥处理处置过程碳排放同样由温室气体逸散造成的直接碳排

放和能耗药耗造成的间接碳排放组成,其碳排放量与工艺相关。相比来说,污泥厌氧消化碳排放量较低,干化焚烧和好氧发酵碳排放量较高。本研究从污水处理行业工艺特点和碳排放特征出发,梳理城镇污水污泥减碳技术的要点、优势和减排效果等,并分析应用前景和发展趋势,为污水处理行业实现减污降碳协同增效提供理论基础。

1 过程优化、精细管理

污水处理过程中,污水提升系统、曝气系统、污泥脱水系统是主要耗能单元,其中污水提升系统电耗占全厂电耗的10%~20%,曝气系统占50%~70%^[6]。药耗主要包括外加碳源、除磷剂、消毒剂、污泥脱水药剂等。根据测算^[4],当单位水量电耗发生 $\pm 0.05 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 变化时,年碳排放量相应 $\pm 945 \text{ tCO}_2/\text{a}$;药耗每发生 $\pm 10\%$ 时,年碳排放量相应 $\pm 318 \text{ tCO}_2/\text{a}$ 。可以针对能耗和药耗潜在提升点采取相应减碳技术。此外,由于我国普遍存在管网系统不健全的问题,在污水收集过程中也有减碳空间。

1.1 管网建设和改造:系统治理、提质增效

管网是我国城市水系统治理的关键所在和薄弱环节,管网的破损、混接、淤积等往往导致污水集中收集率低、合流制溢流污染严重、污水厂进水浓度不升反降等现象,不利于污水处理行业的减污降碳。因此,应重视厂网系统化治理、管网建管运维,从而提高污水厂污水收集率和进水有机物浓度,减少外部碳源带来的化学药剂消耗,也可解决污泥厌氧消化和热电联产过程中因碳源不足影响沼气产生量和发电量的问题^[7]。

1.2 污水提升和输送:合理布局、优化设计

在污水提升和输送过程中,设计应充分考虑地形和自然坡度,合理进行高程布置、减少水泵扬程,避免跌水过大、多次提升。污水厂内管道应布置紧凑,尽量采用直线连接,减少弯管和连接管长度。选择合适出水方式,如二沉池前选择淹没出流方式、二沉池选择堰口出水方式,可减小水泵扬程^[8]。可采用变频调速、流量调节等措施,使提升泵处于高水位时启动运行,减少启停频率。卢伟等^[9]对某污水厂开展运行优化,通过改造提升泵叶轮使其实际提升流量、扬程均处于高效区,提升泵运行效率可由58%提高至65%以上。

1.3 污水搅拌与曝气:提高能效、智能控制

在污水进行生化处理过程中,搅拌和曝气环节

是节能降耗的重要潜力点,曝气规模、曝气工艺、曝气管布置方式、设备选择等都将影响曝气系统能效。

合理确定曝气规模是曝气系统节能降耗的基础。目前,污水厂曝气工艺优化正由常规人工调控和自控向精准化、智能化控制转变,精确控制含氧量有利于系统稳定运行、降低能耗。现阶段精确曝气控制技术主要包括生物模型和硬件集成两类^[10],其中生物模型技术通过在生化池中安装各种传感器和设备以监测水温、氧含量、微生物含量等指标,建立生化池污泥模型并预测空气需求量,从而实时调整鼓风机输出风量;硬件集成技术简化了生物模型参数,仅对曝气系统末端氧含量进行精确控制,对传感器和设备要求较高。卢敬斌^[11]基于某污水厂进水浓度远低于设计浓度而产生的过度曝气现象,提出在线监测溶解氧,并根据曝气池溶解氧浓度和进水 COD_{Cr} 浓度分段调控风机运行的调整策略,可提高污泥活性、降低系统能耗。余云龙等^[12]通过对某污水厂进行前馈补偿——多参数串级控制精确曝气改造,使单位水量电耗降低约 14%,出水日均 BOD_5 浓度下降约 16%,出水日均氨氮浓度下降约 52%。

鼓风机的选型和运行能效对污水处理全流程节能降耗十分重要。研究^[13]发现,空气悬浮和磁悬浮等高效风机可提高机械效率,节约曝气能耗可达 35%。在国外,德国 Grüneck 污水处理厂经过更换高效风机、优化风机性能后,污水处理厂能源自给率提升了 8%^[14]。在国内,某污水厂将原罗茨风机改造为空气悬浮离心鼓风机,可降低电耗约 22%,年节约电费约 100 万元^[15];湖州某污水厂将原多级离心风机改造为磁悬浮离心式鼓风机,风量提高 17%,节能 23.7%,年节省近 66 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[16]。此外,采用平板曝气器、带状膜曝气器、双叶轮搅拌设备等可将生化池能耗降低约 10%^[17]。

1.4 污水处理与加药:精准投加、按需调控

药剂种类和数量不仅影响污水和污泥处理效果,还关系到降本增效。长期以来,加药过程一般为人工调节、基础自动化控制,依赖于运行人员对进出水水质的经验判断,误差较大。随着污水处理行业向精细化运行发展,科学加药、智能加药技术研发和应用将越来越多。

在污水处理环节,普遍存在为实现出水总氮达标而过量加药的情况,导致碳排放量间接提高^[18]。对于加药过程的优化控制可提高出水水质、节约药

剂和人工成本。目前对于智能加药控制系统的研究主要分为两类:一类是应用无模型自适应控制技术对加药系统进行自动投药设计;一类是将模糊控制、神经网络控制等智能控制应用到自动加药系统^[19]。黄俊熙等^[20]采用基于模糊技术与常规 PID 控制算法结合的复合控制器和前馈的智能控制策略,在广州市某污水厂设计了除磷智能加药控制系统,可节约除磷剂量 40%~50%。吴宇行等^[21]提出以加药泵运行频率精确计算理论模型为核心的模型预测控制算法,在青岛市某污水厂建立了碳源智能投加控制系统,吨水药耗约降低 21%,月均节省药剂费达 4.72 万元。北京排水集团实施精准加药控制后,药剂投配率可降低 30%~50%。临沂青龙河净水厂通过采用智能加药系统,实现每吨水碳源投加量降低 13%,除磷剂投加量降低 27%^[7]。九峰镇污水厂基于当地进水总磷浓度不高的情况重新评估除磷剂投加量,每天可以节约除磷剂约 17.6 kg^[11]。

1.5 污泥减量与储存:高效减量、优化储存

污水厂污泥减量是后续储存、运输和处理处置的前提,减量化程度和效果关系到后续环节实施难度,影响经济性和碳排放。

污泥源头减量是通过各种手段使活性污泥中的微生物充分进行内源呼吸,将污水中有机物较彻底地氧化分解,达到降低活性污泥产率、减少剩余污泥量的目的,从而降低后续处理处置成本和碳排放水平。常见污泥源头减量技术包括隐性生长技术、解偶联技术、生物捕食技术等。

隐性生长技术通过物理、化学或生物作用破坏微生物细胞壁结构,加速细胞裂解速率,使细胞内蛋白质等高分子难降解物质分解为小分子易降解物质并被其他微生物再利用^[22]。生物溶胞技术可采用延长曝气、延长污泥龄、投加酶制剂等手段促使细胞自溶。物理溶胞技术主要包括加热、机械破碎、超声等,其中超声波技术研究较多,在浙江某污水处理厂已有示范应用,可实现污泥减量 28.2%^[23]。化学溶胞技术常见试剂有柠檬酸、高铁酸钾、氯气、亚硝酸盐、臭氧等。其中臭氧氧化技术研究较多,是利用臭氧在水中产生自由基而具备的强氧化性,分散污泥絮体、溶解微生物细胞,并将部分污泥直接氧化成 CO_2 和 H_2O 等无机物;同时部分污泥破胞、有机物溶出,将其回流进入生化池提供碳源,可实现资源回收、污泥减量。研究^[24]表明,污泥经臭氧处理后可

减量 70%。

解偶联技术可通过投加解偶联剂或改进活性污泥系统实现。解偶联剂(如 2,4-二硝基苯酚、四氯水杨酸苯胺等)能够破坏污泥微生物呼吸链与氧化磷酸化的偶联,影响细胞内三磷酸腺苷(ATP)合成,从而减少污泥产生^[25]。研究^[26]已发现 10 余种代谢解偶联剂,可降低污泥产量 21%~87%,但大多具有毒性、难降解,将残留在出水和剩余污泥中。改进活性污泥系统一般采用好氧-沉淀-厌氧(OSA)工艺,在污泥回流过程中加入厌氧池,使好氧微生物在好氧段产生的 ATP 在厌氧段被消耗,导致细胞合成速率降低。

生物捕食技术即延长污水处理系统中的食物链或强化食物链中高级营养级(如原生、后生动物)的捕食作用,实现污泥减量化。蚯蚓生物滤池利用该原理,在传统生物反应系统中引入蚯蚓等营养级别较高的物种,蚯蚓以污水中悬浮物和污泥为食料,污泥减量率可达 40%^[27]。

不同污水厂内剩余污泥脱水目标不同,需合理评估脱水必要性与脱水程度。此外应合理布置污泥输送及储存系统,尽量做好衔接,缩短在厂区储存或堆放时间。九峰镇污水厂污泥产量较少,综合评估实际情况后设置污泥收集池进行暂时储存,每隔 15~20 d 采用大型罐车运至污泥深度脱水处理中心一次性脱水至含水率 60%^[11]。苏志升等^[28]对南宁某污水厂污泥脱水、输送及储存系统进行设计优化,保障污泥减量效果,有效防止二次污染。

在污泥脱水环节,应基于减量目标选择高效的脱水设备、确定适宜的药剂种类和投加比例,有助于污泥减量化,间接降低后续处理成本和难度。胡洁^[29]对污泥离心脱水系统进行优化控制,确定了最优药剂种类、药耗、离心机转速等参数,全年可节约聚丙烯酰胺(PAM)药剂成本约 25 万元,离心脱水电耗成本约 4 万元。

2 技术开发、工艺升级

近年来,大量研究聚焦于各种低碳、高效、集约的新型污水污泥处理处置技术开发,其中污水处理低碳新技术包括好氧颗粒污泥、厌氧氨氧化、短程硝化反硝化等,污泥处理处置低碳新技术包括污泥热解炭化技术、污泥热解气化技术等。

2.1 好氧颗粒污泥技术

好氧颗粒污泥是活性污泥微生物在好氧条件下

形成的结构紧凑、形状规则的生物聚集体,分层结构营造了外部好氧区域和内部厌氧区域,因此好氧和厌氧微生物可同步去除氮磷^[30]。该技术微生物富集量是传统活性污泥法的 2~3 倍,占地节省 20%以上,能耗可减少 30%~50%,无需额外药耗^[7];但造粒速度慢、稳定性差。

工艺类型上,目前序批式反应器培养好氧颗粒污泥已可以进行工程应用,而连续流反应器培养好氧颗粒污泥仍在技术研发和改进阶段。世界范围内,荷兰 Garmerwolde 污水处理厂采用好氧颗粒污泥装置处理部分进水,新建系统比原有工艺节能约 51%^[31]。在国内,北京排水集团建设的吴家村再生水厂好氧颗粒污泥工艺提升工程于 2022 年投入运行,是目前国内规模最大的好氧颗粒污泥应用工程,可增加处理水量 20%以上,节约电耗 15%以上,节约药耗 50%以上。

2.2 厌氧氨氧化技术

厌氧氨氧化是在厌氧条件下,厌氧氨氧化菌利用 CO_2 、 HCO_3^- 等无机碳,以 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 为电子受体与供体,摩尔比为 1:1.32 反应生成 N_2 的过程。与传统污水处理工艺相比,该技术无需外加碳源,可节约药剂 90%;污泥产量低,可减少 80%剩余污泥量;可节约投资和运行成本 20%,节省能耗 30%,全过程碳排放可降低 50%。厌氧氨氧化技术目前主要应用于污水处理厂污泥消化液处理,如北京市目前建有世界上最大规模的污泥消化液厌氧氨氧化脱氮工程,年碳减排量约 1.05 万 $\text{t}^{[7]}$ 。

2.3 短程硝化反硝化技术

短程硝化反硝化技术缩短了传统生物脱氮反应路径,控制硝化作用在 NO_2^- 生成阶段后直接进行反硝化,可节约耗氧量 25%,节省碳源 40%,节约占地,减少污泥产量^[32]。该技术对菌种要求较高,在反应体系中需形成氨氧化菌对亚硝酸盐氧化菌的竞争优势,且对氧环境要求较高、受温度影响较大。

短程硝化反硝化技术适用于低 C/N、高氨氮废水,在城镇污水处理中应用不多。然而,短程硝化或短程反硝化与厌氧氨氧化耦合技术在城镇污水处理厂减污降碳中具有应用前景。在短程硝化与厌氧氨氧化耦合技术中,短程硝化产生的 NH_4^+ -N 被直接自养生成 N_2 ,大大降低 NO 和 N_2O 等温室气体排放量^[33]。在短程反硝化与厌氧氨氧化耦合技术中,将

传统反硝化控制到以 NO_2^- 为最终产物,可节约 43% 的耗氧量和 77% 的耗碳量^[34]。

2.4 污泥热解炭化技术

2008 年以后,中国逐步开展了污泥炭化的技术研究和工程应用。污泥热解炭化是在无氧或缺氧条件下进行热解处理,以获得含碳固体产物为主要目标产物的污泥稳定化过程。有机物在炭化过程发生分解,产物包括由低分子有机物、水蒸气等组成的热解气、焦油以及由固定碳和无机物为主的固体炭化物。生物炭具有改良土壤性质、促进土壤团聚体的形成、调控土壤微生物生态、减少温室气体效应等作用。此外,它还可可在建材、燃料、吸附材料等方面多元利用。该技术属于新工艺,目前国内已有应用,如无为市污水处理厂污泥处理处置项目、即墨污泥热解炭化处理项目等。

污泥热解炭化技术减量化程度可达 85% 以上。与污泥焚烧相比,污泥热解炭化在投资、能耗、碳排放、二次污染风险、产物资源利用上等都有显著优势^[35],其减排贡献主要来自于非 CO_2 温室气体 (N_2O) 的大幅减少和热解炭化物后续土地利用固碳两个方面。在污泥热值相似且焚烧规模远大于热解炭化规模的情况下,热解炭化相对于焚烧的全生命周期碳减排比例约为 63.5%。

2.5 污泥热解气化技术

污泥热解气化技术在中国处于起步阶段。污泥热解气化是在微正压、无氧或缺氧条件下通过加热使污泥中有机物充分分解,转化为热解气、热解油、残炭等产物的过程。可燃气经净化后可用于发电或补充干化系统热能,固态渣体可用于建材原料和土地改良等领域。

污泥热解气化技术可彻底杀灭病原微生物,气化设施高效、集约,占地面积较小,可充分回收污泥中能源,与焚烧相比具有烟气量少、污染物浓度少的清洁化特征。目前该技术在西咸新区沣西新城污泥处理项目中已有应用,其污泥处理规模可达 600 t/d,年碳减排量可达 44 万 t。

3 能源优用、资源回收

污水中可提取的化学能为 $1.5 \sim 1.9 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,是污水处理所需能耗的近 5 倍,能源利用和资源回收潜力可观^[36]。理论上,污水处理厂可实现能量自给甚至向外输出,有望从耗能大户转为能源供给方。

3.1 污水热能回收利用

污水余热中蕴含的热能约为化学能的 4 倍^[17],占城市废热排放总量的 15%~40%^[37],回收价值较高。生活污水温度波动小,夏天温度低于环境温度,冬天温度高于环境温度;污水源热泵技术利用这一特点,实现夏天制冷、冬天制热,如满足厂内能源需求仍有富余还可扩大输出范围。但污水余热属于低品位热源,有效输送半径仅为 3~5 km,适合就近利用^[37]。2009 年投运的芬兰图尔库市 Kakolanmäki 污水处理厂通过建造污水热泵站,可满足该市 14% 供暖需求和 100% 制冷需求,每年减少 8 万 t 碳排放^[7]。2020 年,河北省清河县碧蓝污水处理厂采用污水源热泵技术回收出水余热后供给邻近的怡海花园小区,供热面积达 21 万 m^2 ^[38]。

3.2 清洁能源开发利用

污水处理厂占地面积较大,沉淀池、曝气池、滤池等构筑物上方空间有条件安装太阳能发电设施,实施光伏发电可自给自用、节约能耗,符合循环经济理念和绿色低碳要求。20 世纪 70 年代以来,太阳能光伏发电技术开始受到关注,1997 年美国开始实施“百万太阳能屋顶计划”,而德国则在 1990 年—1999 年间实施了“千屋顶计划”。我国政策上鼓励污水处理厂推广建设太阳能发电设施,目前已有较多工程实践。芜湖市朱家桥污水处理厂采用“自发自用,余电上网”的运营模式,每年贡献绿色用电超 2 000 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,减排 CO_2 约 1.6 万 t,减排 SO_2 约 165.5 t,减排 NO_x 约 142.2 t,减排烟尘约 69 t^[39]。北京排水集团在 3 座再生水厂实施分布式光伏发电项目,年均发电量为 2 400 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, CO_2 减排约 1.45 万 t^[7]。合肥王小郢污水处理厂是安徽首家建成投产的光伏项目,每年可提供绿色清洁电能 1 200 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,减排 CO_2 约 1.2 万 t,减少粉尘 3 264 t^[40]。

3.3 污泥生物质回收利用

污泥中含有丰富有机质,通过厌氧消化可回收生物质能、产生沼气,沼气热电联产可实现热、电两种能源回收。污泥热电联产可减少污水处理厂总碳排放量约 40%。德国 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂应用热电联产,并利用太阳能、风能等清洁能源,实现厂区热能电能自给,并产生剩余热能供给周围港口^[41]。我国青岛海泊河污水处理厂的沼气热电联产系统于 2016 年稳定运行,沼气发电量占污水

厂年耗电量的 25%~30%, 年净利润达 200 余万元^[41]。在污水 COD_{Cr} 浓度偏低、污泥产量和有机质含量偏低的情况下, 污泥单独厌氧消化难以实现能量自给, 因此常添加其他高有机质废弃物协同处理。如美国 Sheboygan 污水处理厂将高有机质餐厨垃圾与污泥协同厌氧消化并进行热电联产, 在 2013 年其产热量与耗热量比值达 0.85~0.90, 产电量与耗电量比值达 0.9~1.15, 基本接近“能源零消耗”目标^[42]。

3.4 污泥焚烧热能回收利用

污泥焚烧产生的烟气进行热能回收的方式分为一次利用和二次利用。一次利用指回收的热量用于焚烧以减少辅助热源或燃料消耗, 如用于预热燃烧空气或污泥脱水/干化; 二次利用指回收的热量用于发电、加热外部介质等^[43]。干化焚烧工程主要热损失及节能减排措施有: 排烟热损失——改造省煤器进一步回收余热; 烟气洗涤热损失——改造烟气再热器或预热一次风; 干化载气洗涤热损失——余热回收再利用; 散热损失——改进系统保温性^[44]。常州市武进区污泥处置工程可实现自持焚烧, 焚烧产生热量可向干化过程自给, 无需外加热源^[45]。河北省辛集市污泥干化焚烧项目无需辅助燃料, 除设备驱动耗能外无其他能耗, 每年还可发电 8 640 万 kW·h, 每年减少 CO₂ 排放超过 7.5 万 t^[46]。

3.5 磷回收

磷是重要的战略资源, 是组成生命体的必要元素之一, 因此, 从污水和污泥中回收磷具有十分重要的意义。污水处理厂利用鸟粪石实现磷回收可抵消约 13 000 tCO₂eq, 降低 7%~18% 温室气体排放量^[5]。磷回收技术主要分为 5 类^[47]: 源头分离回收、出水沉淀回收、污泥消化液或污泥脱水上清液中沉淀回收、生活污水及消化污泥沉淀回收、污泥焚烧灰分回收, 其中后 3 类应用较多。磷回收多数通过投加化学药剂沉淀实现, 产物主要有鸟粪石(磷酸铵镁)、磷酸钙、磷酸镁等。

国际上, 加拿大 Ostara 公司研发的 WASSTRIP 和 Pearl 技术通过活性污泥厌氧释磷、添加镁盐等方式实现磷沉淀、生产鸟粪石化肥, 全球范围内进行推广应用, 如美国芝加哥 Stickney 污水处理厂拥有全球最大的鸟粪石回收装置, 年产量达 9 000 t。日本 Metawater 集团在岐阜和鸟取两座污泥厂应用污泥焚烧灰分磷回收技术, 磷肥年产量分别达 300 t 和

150 t, 经济收益良好^[48]。

3.6 氮回收

对于高浓度氨氮废水, 目前已有两种较成熟的方法进行氮回收: 吹脱法, 即通过升高液体温度或 pH 提高氨离解率, 再通过载气将 NH₃ 与液体分离后用于氮肥生产; 化学沉淀法, 即在特定反应器中投加含金属离子的化学药剂, 使 NH₄⁺ 形成金属盐化合物并在污水中以结晶形式沉淀析出。对于低浓度氨氮污水, 目前研究热点技术包括折点氯化法、电化学氧化法、电容去离子技术、离子交换技术等^[49]。

4 发展趋势

城镇污水污泥处理属于耗能密集型行业, 在双碳背景下, 打造节能、低耗、低碳、循环的新型污水污泥处理工程是大势所趋。在减污降碳协同增效的政策导向下, 城镇污水污泥处理行业将呈现如下发展趋势。

(1) 绿色、低碳、循环发展的配套政策和标准体系将更加健全。目前我国城镇污水污泥处理行业正处于低碳发展转型过渡期, 亟需在统一碳排放核算方法的基础上开展多维度评估标准和评价指标, 建立低碳发展标准体系。根据污水污泥处理企业的减碳贡献、能源转化效果制定低碳转型激励机制和价格机制, 促进污水污泥处理工程进行工艺改造和技术升级。

(2) 污水污泥处理处置的运营管理将趋向精细化、智能化。我国城镇污水处理厂正由规模增长向质量增效转变, 系统性和整体性不断增强。污水污泥处理工程的精细化管理和智能化运维将大大提升污水和污泥效率, 对于问题可进行有效诊断、及时反馈、精确调控, 助力污水处理行业可持续发展。

(3) 能源资源回收利用和碳平衡碳中和理念将更加深入。污水中尚有巨大能源潜力未充分发掘, 其中有机碳源高效捕获、氮磷高效分离回收、能量高效开发等技术是低碳转型道路上的研究应用热点。目前我国面向未来的污水处理概念厂建设工作刚刚起步, 仍需在实践推广中突破和发展, 真正实现出水可持续、能源零消耗、物质可循环及环境友好。

参考文献

- [1] 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, 43(3): 1-3.

- WANG H C. Carbon emission reduction path and potential of urban sewage treatment industry in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(3): 1-3.
- [2] 陆家缘. 中国污水处理行业碳足迹与减排潜力分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- LU J Y. Carbon footprint and reduction potential of Chinese wastewater treatment sector [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [3] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国工业和信息化部, 等. 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. (2022-06-13) [2024-01-04]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, et al. Notice on Issuing the *Implementation Plan for Reducing Pollution and Reducing Carbon Synergy* [EB/OL]. (2022-06-13) [2024-01-04]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.
- [4] 蒋富海, 王琴, 张显忠, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算及减碳案例分析[J]. *给水排水*, 2023, 49(2): 42-49.
- JIANG F H, WANG Q, ZHANG X Z, et al. Carbon emission accounting and carbon reduction case analysis in urban sewage plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(2): 42-49.
- [5] 张海亚, 李思琦, 黎明月, 等. 城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2053-2062.
- ZHANG H Y, LI S Q, LI M Y, et al. Carbon emission analysis of municipal wastewater treatment plants and discussion on synergistic path of pollution and carbon reduction [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2053-2062.
- [6] 杨博, 杨长军. 城市污水处理厂的节能降耗[J]. *华北水利水电学院学报*, 2011, 32(4): 148-151.
- YANG B, YANG C J. Energy saving and consumption reduction in municipal sewage treatment plants [J]. *North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2011, 32(4): 148-151.
- [7] 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.
- CHANG J W, JING Y Y, GENG Y, et al. Promote the low-carbon transformation of municipal sewage treatment industry and facilitate the realization of emission peak and carbon neutrality [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2021(6): 9-17.
- [8] 宋涛, 兰玲, 贺亚. 城市污水处理厂能耗分析及节能措施研究[J]. *节能与环保*, 2023(3): 90-92.
- SONG T, LAN L, HE Y. Energy consumption analysis and energy-saving measures of urban sewage treatment plant [J]. *Energy Saving and Environmental Protection*, 2023(3): 90-92.
- [9] 卢伟, 朱曜曜, 魏彬, 等. 华中地区某污水处理厂低碳运行措施及效果[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(9): 2813-2819.
- LU W, ZHU Y Y, WEI B, et al. Low-carbon operation measures and analysis of the effects in a sewage treatment plant in Central China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(9): 2813-2819.
- [10] 高新磊, 邱颀, 黄睿, 等. 精准曝气技术在污水处理中的研究进展[J]. *资源节约与环保*, 2022(10): 93-96.
- GAO X L, QIU J, HUANG R, et al. Research progress of precision aeration technology in wastewater treatment [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2022(10): 93-96.
- [11] 卢敬斌. 污水厂运行节能降耗措施[J]. *节能与环保*, 2021(4): 37-38.
- LU J B. Measures for energy saving and consumption reduction in sewage plant operation [J]. *Energy Saving and Environmental Protection*, 2021(4): 37-38.
- [12] 余云龙, 史彦伟, 姜秀光, 等. 南方某污水处理厂精确曝气技术示范及评估分析[J]. *给水排水*, 2017, 53(2): 41-44.
- YU Y L, SHI Y W, JIANG X G, et al. Demonstration and evaluation of precise aeration technology in a sewage treatment plant in southern China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(2): 41-44.
- [13] BELL K Y, ABEL S. Optimization of WWTP aeration process upgrades for energy efficiency [J]. *Water Practice and Technology*, 2011, 6(2): wpt2011024. DOI: 10.2166/wpt.2011.024.
- [14] THOMPSON M, DAHAB M F, WILLIAMS R E, et al. Improving energy efficiency of small water-resource recovery facilities: Opportunities and barriers [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(7). DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001723.
- [15] 谢荣焕, 梁文逵, 刘爱辉, 等. 空气悬浮风机在污水厂节能降耗中的应用[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(15): 108-110.
- XIE R H, LIANG W K, LIU A H, et al. Application of turbo blower to energy saving and consumption reducing in WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(15): 108-110.
- [16] 吴绪军. 磁悬浮离心式鼓风机在污水厂节能降耗中的应用[J]. *环境与发展*, 2015, 27(2): 82-84.
- WU X J. Application of high-speed blower saving energy in wastewater treatment plant [J]. *Environment and Development*, 2015, 27(2): 82-84.
- [17] 宋新新, 林甲, 刘杰, 等. 面向未来污水处理技术应用研究

- 现状及工程实践[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 39-53.
- SONG X X, LIN J, LIU J, et al. The current situation and engineering practice of sewage treatment technology facing the future [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1): 39-53.
- [18] 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.
- HAO X D, ZHANG Y N, LI J, et al. Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 1-8.
- [19] 廖雪平. 污水处理厂加药优化控制系统的设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- LIAO X P. Research and design of dosing control systems for wastewater treatment plant [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [20] 黄俊熙, 岑玉铭, 关宇霆, 等. 污水处理过程中除磷加药智能控制系统及应用研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 104-107.
- HUANG J X, CEN Y M, GUAN Y T, et al. Application of intelligent control system for chemical phosphorus removal in wastewater treatment process [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 104-107.
- [21] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 212-218.
- WU Y X, WANG X D, CHEN N, et al. Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6): 212-218.
- [22] 李攀荣. 污泥源头减量技术研究现状[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(9): 24-28.
- LI P R. Research status of sludge source reduction technology [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2023, 43(9): 24-28.
- [23] 朱广峰, 谢雯, 决洋洋, 等. 超声波污泥减量技术在污水处理中应用效果研究[J]. 声学及电子工程, 2020(1): 5-7.
- ZHU G F, XIE W, JUE Y Y, et al. Study on the application effect of ultrasonic sludge reduction technology in sewage treatment [J]. *Acoustic and Electronic Engineering*, 2020(1): 5-7.
- [24] 汤玉强, 李清伟, 王健, 等. 污泥源头减量化技术研究进展[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2018, 28(6): 51-54.
- TANG Y Q, LI Q W, WANG J, et al. Research progress on sludge source reduction technology [J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2018, 28(6): 51-54.
- [25] 李业云, 张婷, 景凌云. 剩余污泥源头减量化技术研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(11): 2708-2713.
- LI Y Y, ZHANG T, JING L Y. Study progress on source reduction technology of residual sludge [J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(11): 2708-2713.
- [26] DETCHANAMURTHY S, GOSTOMSKI P A. Metabolic uncouplers in environmental research: A critical review [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2012, 28(4/5/6). DOI: 10.1515/revce-2012-0004.
- [27] 吴敏, 娄山杰, 杨健, 等. 蚯蚓生物滤池的污泥减量化效果及其影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(4): 514-518.
- WU M, LOU S J, YANG J, et al. Sludge reduction effect of earthworm biofilter and its influencing factors [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2008(4): 514-518.
- [28] 苏志升, 林培真, 罗建标, 等. 污泥脱水、输送及储存系统的设计探讨与总结[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 76-81.
- SU Z S, LIN P Z, LUO J B, et al. Discussion and summary on the design of sludge dewatering, pumping and storage system [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(4): 76-81.
- [29] 胡洁. 某污水处理厂外碳源投加系统和污泥离心脱水系统的优化控制[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- HU J. Optimized control of carbon source supplemental and the sludge centrifugal dewatering system in a wastewater treatment plant [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [30] 杨敬畏, 程树辉, 罗丁, 等. 好氧颗粒污泥技术污染物去除策略应用进展[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 249-255.
- YANG J W, CHENG S H, LUO D, et al. Application progress of pollutant removal strategy of aerobic granular sludge technology [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(1): 249-255.
- [31] PRONK M, KREUK M K, BRUIN B, et al. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. *Water Research*, 2015, 84: 207-217. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.011.
- [32] XIAO J, TANG J H. Nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 908: 175-178. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.908.175.
- [33] 陈重军, 王建芳, 张海芹, 等. 厌氧氨氧化污水处理工艺及其实际应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 521-527.
- CHEN Z J, WANG J F, ZHANG H Q, et al. Research progress in Anammox wastewater treatment system and its actual application [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2014, 23(3): 521-527.
- [34] 田海成, 杨红红, 焦文海, 等. 城镇污水处理厂碳中和路径及难点分析[J]. 市政技术, 2022, 40(12): 154-159.
- TIAN H C, YANG H H, JIAO W H, et al. Analysis of the path and difficulties of carbon neutralization in WWTP [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2022, 40(12): 154-159.
- [35] 吴云生, 汪国梁, 银正一, 等. 市政污泥热解炭化工程应用

- 及运行分析[J]. 给水排水, 2022, 48(6): 43-48.
- WU Y S, WANG G L, YIN Z Y, et al. Application and operation analysis of sewage sludge pyrolysis carbonation project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (6): 43-48.
- [36] 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.
- LIU Z X. Carbon capture and carbon redirection; New way to optimize the energy self-sufficient of wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 43-52.
- [37] 郝晓地, 叶嘉洲, 李季, 等. 污水热能利用现状与潜在用途[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 15-22.
- HAO X D, YE J Z, LI J, et al. Status and potential applications of thermal energy from wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 15-22.
- [38] 黄雄虎, 顾敦罡, 陆嘉麒, 等. 污水源热泵技术在城市污水热能回收中的应用现状与研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(3): 922-928.
- HUANG X H, GU D G, LU J Q, et al. Application and research progress of wastewater source heat pumps in municipal wastewater heat recovery [J]. Application of Chemical Industry, 2023, 52 (3): 922-928.
- [39] 吕利平, 李航, 李伟, 等. 碳中和在污水处理厂的实践途径与应用进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(11): 1-6.
- LÜ L P, LI H, LI W, et al. Practice approach and application progress of carbon neutrality in wastewater treatment plant [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(11): 1-6.
- [40] 央广网. 全国最大污水厂光伏发电项目在肥井网发电[EB/OL]. (2018-08-22) [2024-01-04]. https://www.cnr.cn/ah/news/20180822/t20180822_524339133.shtml.
- CNR News. China's largest sewage plant photovoltaic power generation project in fertilizer grid connected power generation [EB/OL]. (2018-08-22) [2024-01-04]. https://www.cnr.cn/ah/news/20180822/t20180822_524339133.shtml.
- [41] 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.
- WU A H, YANG T T, LÜ M. Study on biogas cogeneration system in Qingdao Haibohe sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(1): 123-127.
- [42] 郝晓地, 魏静, 曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例——Sheboygan 污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 1-6.
- HAO X D, WEI J, CAO Y L. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 1-6.
- [43] 张辰, 段妮娜, 张莹, 等. 污水处理厂污泥独立焚烧工艺路线及适用性解析[J]. 给水排水, 2021, 57(1): 41-48.
- ZHANG C, DUAN N N, ZHANG Y, et al. Analysis and comparison of the technical routes of sewage sludge mono-incineration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57 (1): 41-48.
- [44] 曹晓哲, 林莉峰, 胡维杰. 碳中和背景下污泥干化焚烧工程的热平衡和节能降耗研究[J]. 给水排水, 2022, 48(7): 51-56.
- CAO X Z, LIN L F, HU W J. Study on energy saving and consumption reduction of sludge drying incineration project under the background of carbon neutralization [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(7): 51-56.
- [45] 杨汉文, 王建国, 李冲, 等. 市政污泥干化与自持焚烧技术应用工程案例[C]. 南京: 2020 中国环境科学学会科学技术年会, 2020.
- YANG H W, WANG J G, LI C, et al. Case study of municipal sludge drying and self-sustaining incineration technology application project [C]. Nanjing: 2020 Annual Meeting of Science and Technology of Chinese Society of Environmental Sciences, 2020.
- [46] 杨玲. 碳中和背景下污泥干化技术应用研究——以辛集市污泥干化独立焚烧发电项目为例[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(6): 80-82.
- YANG L. Study on the application of sludge drying technology under the background of carbon neutralization-Taking the independent incineration power generation project of sludge drying in Xinji City as an example [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41 (6): 80-82.
- [47] 柴春燕, 冯玉杰. 污水能源资源回收利用全球工程应用进展[J]. 中国给水排水, 2016, 32(24): 14-19.
- CHAI C Y, FENG Y J. Progress on global engineering applications of energy and resources recovery and reclamation from wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (24): 14-19.
- [48] 郝晓地, 申展, 李季, 等. 国际上主要污水磷回收技术的应用进展及与之相关的政策措施[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3507-3516.
- HAO X D, SHEN Z, LI J, et al. Global applied cases and technical summary of phosphate recovery from wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(11): 3507-3516.
- [49] 王凯军, 何文妍, 房阔. 典型离子交换水处理技术在低浓度氨氮回收中的应用分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2285-2301.
- WANG K J, HE W Y, FANG K. Application analysis of typical ion exchange water treatment technology in low concentration ammonia nitrogen recovery [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2285-2301.