

编者按 为深入探讨污水处理行业的节能降耗减碳问题,《环境工程学报》编辑部特邀请清华大学环境学院王凯军教授、中国科学院生态环境研究中心魏源送研究员和清华大学环境学院王启镔高级工程师为专题学术编辑,组织“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”。该专题自 2023 年第 3 期开启报道,受到广泛关注。2023 年第 9 期报道本专题最后 8 篇稿件。希望通过本专题的出版,能够为污水处理行业落实减污降碳协同增效提供参考。



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.202303069 中图分类号 X703 文献标识码 A

王凯军, 魏源送, 王启镔. 推进污水处理厂减污降碳协同增效的措施和建议[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 2798-2802. [WANG Kaijun, WEI Yuansong, WANG Qibin. Measures and suggestions for promoting synergistic efficiency in reducing pollution and carbon emissions in wastewater treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 2798-2802.]

推进污水处理厂减污降碳协同增效的措施和建议

王凯军^{1,✉}, 魏源送², 王启镔¹

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. 中国科学院生态环境研究中心, 水污染控制实验室, 北京 100085

摘要 污水处理厂对保护环境、维护生态平衡、促进国民经济和城乡建设的发展、推进生态文明进步作出了巨大贡献。随着工业生产的发展以及水处理要求的变化, 污水处理工艺技术发生了深刻变革, 污水处理厂的运行管理目标已发生根本变化, 已从减少污染物转向水的再利用、资源回收和低碳运行管理。污水处理过程涉及处理工艺、设备选型、运行管理控制等多方面, 应多措并举协调推进污水厂高效稳定运行, 并将污水处理融入到现代城市水循环体系中, 释放以污水厂为核心的水系统新动能, 引领多层面、多领域开展减污降碳协同增效工作, 助力污水处理可持续发展。

关键词 污水处理厂; 减污降碳协同增效; 运行管理; 城市水循环体系; 生态文明

当前, 我国生态文明建设同时面临实现生态环境根本好转及碳达峰碳中和两大战略任务。生态环境要求的进一步强化使得协同推进减污降碳已成为我国经济社会发展全面绿色转型的必然选择, 生态环保产业也将迎来新的发展窗口期。污水处理行业碳排放量占全社会总排放量的 1%~2%^[1], 故污水处理系统低碳运行管理对遏制全球气候变化具有重要意义。2022 年, 我国城市污水处理量已经超过 $6.11 \times 10^{10} \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 处理率达 97% 以上^[2]。我国现行出水排放标准普遍提高, 特别在敏感水域地区, 排放标准要求接近地表水标准。为达到排放标准、保障高质量的出水水质, 不得不增加药品投入, 能耗量亦随之增大, 因此, 推进污水处理厂减污降碳协同增效的需求更加迫切。

1 污水处理厂运行管理目标变革历程

从 18 世纪 60 年代开始, 欧洲兴起了工业革命, 促进了城市化迅速发展, 导致大量污水无法得到有效处理。持续爆发的霍乱席卷了整个欧洲, 霍乱的传播与水污染直接相关。1914 年 4 月 3 日, 英国卫生工程师 ARDERN 和 LOCKETT 首次提出“活性污泥”的概念, 标志着活性污泥法正式诞生^[3]。至今, 污水处理技术经历了百余年发展进程(图 1)。起初, 活性污泥法的关注点为去除污水中有机物和致病微生物; 随着水体富营养化问题的凸显, 脱氮除磷成为污水处理的另一目标^[4]。随着对水处理过程的认识逐渐加深, 研究者在开发高效污水处理技术方面取得了新发展, 如好氧颗粒污泥^[5]、厌氧氨氧化^[6]等。曾经以污水为污染物的思路逐渐转变为将污水视为资源与能源的载体, 故水处理技术朝着“碳、氮、磷等物质循环和水资源循环”方

收稿日期: 2023-03-12; 录用日期: 2023-03-19

第一作者: 王凯军, 男, 教授, wkj@tsinghua.edu.cn; ✉通信作者

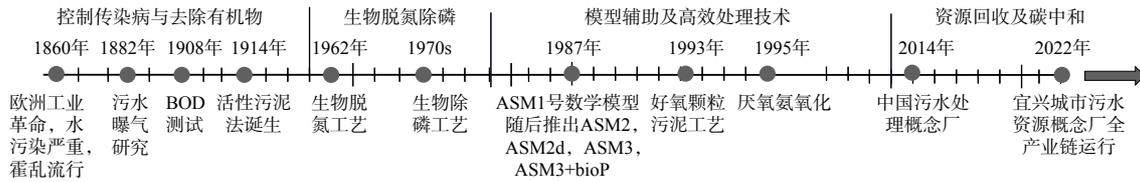


图 1 百余年污水处理技术发展进程

Fig. 1 The development process of wastewater treatment technology in more than 100 years

向发展。这就要求对于污水处理工艺的设计，除了考虑污水处理系统运行物质大循环，还应考虑资源要素的全收集和利用^[4]。这也为未来污水处理厂设计、运行管理指明了方向。结合可持续发展的要求^[7]，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^[8-9]。例如，膜浓缩、磁分离技术为有机物能源回收和磷回收提供了技术支持^[10-12]；离子交换技术从污水治理领域应用到污水中低浓度氨氮原位富集回收领域，日益成为污水全面资源化利用的重要技术^[13]。

随着污水处理技术发展及生态环境治理的要求，我国污水处理厂运行管理目标相应发生了变化，分为 4 个阶段：水污染控制阶段、厂内水气固环境要素控制阶段、降本增效阶段及低碳运行阶段 (图 2)。

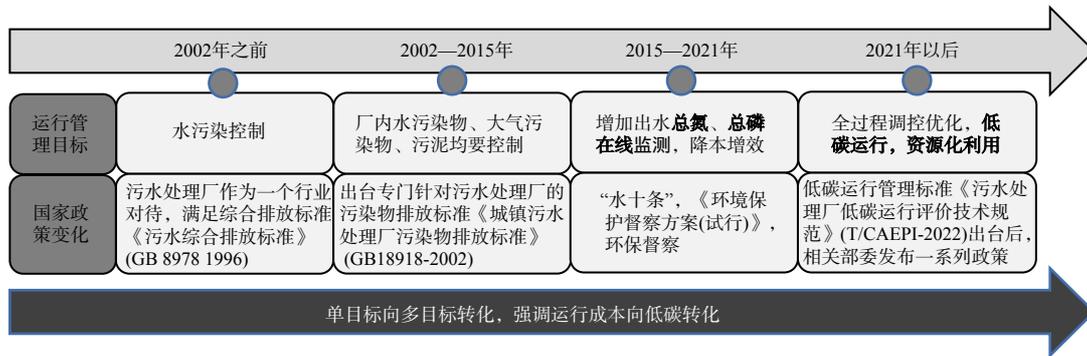


图 2 我国污水处理厂运行管理目标变化

Fig. 2 Changes in the operation and management objectives of wastewater treatment plants in China

1) 水污染控制阶段 (—2002 年)。2002 年之前，我国一直视污水处理厂为一家排污单位，主要依据《污水综合排放标准》(GB 8978-1988) 对水污染物进行控制，主要对出水悬浮物、COD、BOD₅ 等指标进行限制。1996 年，在原标准基础上增加部分行业水污染物排放标准中的特征污染物及其他有毒有害污染物的控制项目，COD、BOD₅ 等项目的最高允许排放浓度适当从严，亦对污水厂工作人员的运行和化验提出了更高的要求。

2) 厂内水气固环境要素控制阶段 (2002—2015 年)。自 2002 年以来，为促进城镇污水处理厂的建设和管理，加强城镇污水处理厂污染物的排放控制和污水资源化利用、保障人体健康、维护良好生态环境，制定了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)，涵盖水污染物排放标准、大气污染物排放标准、污泥控制标准，为污水处理厂设计、运行提供了依据。特别在运行阶段，需突出调控运行的能力，以确保进水水质不确定的情况下出水稳定达标。

3) 整厂降本增效阶段 (2015—2021 年)。2015 年，国务院发布《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)。同年发布《环境保护督察方案(试行)》，提出建立中央环保督察工作机制。2019 年 6 月印发实施《中央生态环境保护督察工作规定》，对污水处理厂运行达标管理更加严格。随着排放标准提高，污水处理厂的运行成本显著增加。水务公司在满足排放标准的前提下又要确保利润收益，污水厂运行管理遂进入降本增效阶段。

4) 污水资源化与低碳运行阶段 (2021 至今)。2021 年 1 月，国家发改委等十部门出台的《关于推进污水资源化利用的指导意见》提出：到 2025 年，全国污水收集效能显著提升，县城及城市污水处理能力应基本满足当地经济社会发展需要，水环境敏感地区污水处理基本实现提标升级；全国地级及以上缺水城市再生

水利用率达到 25% 以上, 京津冀地区达到 35% 以上; 工业用水重复利用、畜禽粪污和渔业养殖尾水资源化利用水平显著提升; 污水资源化利用政策体系和市场机制基本建立。2022 年, 为响应国家双碳战略, 污水处理厂运行应更加突出低碳化、资源化及强调控制温室气体排放, 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022) 出台。该规范为我国污水处理厂低碳运行评价提供了依据。

总体上, 污水处理厂运行管理目标从单一目标向多目标转变、从强调运行成本向低碳运行方向转变, 在满足出水水质、臭气排放、噪音控制等指标的前提下, 朝着碳中和目标迈进, 推进污水处理厂运行管理目标更迭, 助力国家双碳战略实施。因此, 废水管理的目标已从减少污染物转向水的再利用、资源回收和水生态恢复。这种目标的转变已反映在我国近期的政策中^[14]。

2 污水处理厂实现减污降碳协同增效的措施

提高传统工艺削减污染物的效率、改善水生态环境, 并合理控制日常运行所需能耗物耗, 是当前污水处理行业关注的焦点。虽然欧洲、美国等已开展了污水处理过程优化研究^[15-16], 但受水质特点、气候条件、工艺形式、自动化操作程度等因素的影响, 我国污水处理厂的运行管理还不能直接照搬应用国外的生产经验, 而应积极探索适合我国国情的污水处理过程控制方式方法和运行管理模式。如今, 污水处理厂稳定运行并出水达标是其首要任务, 而内外部因素会影响其稳定运行, 故应多措并举推进污水厂减污降碳协同增效。

1) 采取措施积极应对进水条件波动性。对进水水质水量进行科学分析, 可为污水处理厂运行调控和维护管理提供支撑。随着城镇化进程加速, 有些污水处理厂水量快速上升, 导致实际进水量高于设计能力, 造成超水量运行的压力。超水量运行对污水厂运行管理影响很大: 一方面, 对工艺调控、设备运行提出了更高的要求, 出水水质超标的风险提升; 另一方面, 水量的波动可能伴随水质变化, 因进水 C/N、C/P 较低导致需投加外碳源、除磷剂等化学药品, 又会导致运行成本升高。目前, 大多数城镇污水处理厂还需接纳服务范围内的工业废水。工业废水来源广泛、成份复杂、污染物浓度变化较大, 且往往含有对微生物有毒有害的物质, 会影响以生化工艺为主的城镇污水处理厂的处理能力、处理效率和处理稳定性。因此, 需要摸索污水处理厂逐月逐日的进水规律, 并结合污水厂工艺及配套设备情况, 从而制定运行调控及应急管理方案, 以保障污水处理厂稳定运行和达标排放。水温是影响微生物活性的重要因素。部分细菌的活性会因水温而受到抑制, 需进行相应工艺调整, 如改变污泥浓度、延长污泥龄、调整曝气量等, 从而补偿季节性温度变化带来的负面影响^[17]。另外, 对于特定的污水处理厂, 应研究季节性气候变化条件下进水条件的变化规律、活性污泥特性、污泥膨胀控制条件等内容, 以支撑其运行管理的稳定性和可控性。

2) 推广高效设备及强化设备运行维护管理。污水处理设备是污水处理厂正常运行的物质基础, 管理好设备能保障其稳定运行, 同时能降低处理成本、提升生产效益。随着污水处理和控制技术的发展, 污水处理厂的机械化程度和自动控制程度也不断提高, 使用的设备越来越多, 新设备也层出不穷。一个普通的污水厂的设备数量达几百台, 甚至上千台。主要设备仪表涵盖专用设备(如二沉池刮泥机)、通用设备(如水泵)、电气设备(如启动开关)、仪器仪表(如溶解氧仪)等 4 大类。一方面, 这些设备选型与调节容量对提高工艺运行稳定性十分重要; 另一方面, 这些设备的安装与调试是一项系统且复杂的工作, 只有妥善落实各环节工作, 高质量完成相应工作内容, 才能真正保障相关设备的可靠稳定运行。建议结合厂内设备情况, 制定主要设备维护保养方案, 并严格落实。

3) 加强智能化以助力运行管理。目前, 越来越多的污水处理厂在污水处理全流程中应用仪表、控制和自动化(instrumentation, control and automation, ICA)技术, 以构建水质信息实时感知和工艺运行参数动态自动调整体系, 从而达到改进操作水平、改善出水水质并提高操作效率的目标。针对污水处理过程的非线性、面临挑战的复杂性, 利用物联网、传感器、云计算、污水处理数学模型、大数据等技术对污水厂进行智慧化管理, 从而提高信息化水平, 实现管理协同、水资源利用高效、水务服务便捷的目标, 形成融合实时感知、动态模拟、在线诊断、自动预警、实时调度、智能处置、智慧控制的全方位污水厂运行管理系统, 进而促进污水厂开展减污降碳协同增效工作。

4) 全过程挖掘工艺潜力。污水处理厂设计与稳定运行关系密切, 且良好的运行管理对实际工况下发挥工艺潜力十分重要。以活性污泥法为核心的工艺及变型工艺应用范围广泛, 涉及预处理、厌氧、缺氧、好氧、泥水分离、回流、深度处理、消毒等多个处理过程。脱氮除磷包括硝化反硝化、吸磷释磷、化学除磷等多个生化/物化反应, 每个单元的生化/物化反应对基质类型/数量、环境条件、微生物优势菌属要求不同。污水厂

脱泥单元又涉及浓缩、加药、脱水等多个环节，剩余污泥的浓缩效果又与生化池的控制密不可分。因此，污水处理厂内各环节、各过程间相互联系并制约，需将其运行管理视为整体，统一协调控制整体工艺，充分发挥各工艺段的潜力、提高运行效率，并减少甲烷、氧化亚氮等温室气体排放，达到全过程减污降碳协同增效的目的。曝气过程是减污降碳协同增效的核心，与曝气能耗有关，又与生物脱氮除磷效果相关，故污水处理厂节能降耗关键在于优化控制和升级改造曝气系统。曝气过程又与碳源消耗相关，可采用间歇曝气、渐减曝气、好氧池末端设置消氧区、分段进水等措施^[18-20]开展工艺优化，以提高进水碳源利用率，从而促进高效生物脱氮除磷反应的发生^[21]。

5) 开发利用新能源新资源。以面向未来的污水处理概念厂需求为导向，突破并集成碳浓缩、磷分离、氮素转化、厌氧技术碳素能源转化、氮磷资源回收与利用、环境友好等关键技术，形成完整的污水处理新工艺技术路线和成套方案，从而推动水处理全流程降低能耗物耗及实现资源化。未来污水处理厂应配套建设有机固废厌氧消化中心、资源输出中心，以实现消除环境污染物与环境治理的和谐统一、能源良性循环和资源化运营。资源回收技术多种多样、各具优势，尚在技术上或经济上存在不足。未来还应探索相关创新科技和管理手段，并充分考虑技术适用性、实用性及经济性，从而促进先进技术的规模化应用，以更好地应对水环境保护、水资源可持续利用及经济效益等方面的挑战。污水处理厂将治污、产气、资源综合利用三者相结合，环境效益与经济效益和社会效益统一起来^[22]，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。国家鼓励污水处理企业综合利用场地空间，采用“自发自用、余量上网”模式建设光伏发电项目。污水处理厂具有空间庞大的天然优势，其主要处理单元，如初沉池、生化池、二沉池拥有较大的表面空间，厂区内的绿化地带和办公建筑屋顶也能安装光伏电池组件，在污水处理厂实施光伏发电系统具有基本硬件条件。污水处理厂+光伏模式能降低厂区用电成本，是污水厂增收降碳的重要措施。

3 建议

站在污水处理系统行业发展角度，应按“用户控制-源头分离-管网收集输送-净化处理-资源化利用”全流程进行系统性规划，需要政府相关部门、科研院所和水务公司共同努力。站在生态文明建设的高度，应扩展污水处理行业的发展维度，将污水处理与城乡规划、居民感受、污水/污泥资源化、能量自给、环境友好等更多目标有机结合，从顶层规划、系统设计和统筹安排出发，全面升级管理运营模式，将污水处理厂与其上下游设施串联考虑，引领污水处理行业高质量发展。因此，需构建现代城市水循环体系，坚持创新引领发展，开发培育新技术、新产业、新业态、新模式，从而促进以污水厂为核心的水系统减污降碳协同增效。

全方位加速释放现代城市水循环体系新动能，建议实施路线图和优先序原则。1) 第一优先序是利用现在厂站挖掘工艺潜力，采用污水处理厂工艺调控技术、基于复合絮凝剂原位扩容技术等提升污水处理厂降解污染物的效率^[23-24]。2) 第二优先序是基于厂站的扩能改造，如曝气沉淀一体化技术(好氧颗粒污泥技术等)、厌氧氨氧化技术、二沉池改扩建、更新曝气系统等。3) 第三优先序是整体规划城市管网系统，加强管网施工、监管及运维工作。建议修订城市污水处理厂排放标准，鼓励雨季超水力负荷处理，协同控制城市面源污染或雨水溢流污染，充分发挥已有污水处理设施的处理效能，加强其在减污降碳协同增效中的作用。4) 第四优先序是构建现代城市水循环体系，减污降碳工作融入到水务行业生产生活中。污水污泥能源资源提取、再生水利用与相关行业相衔接，逐步完善法律、法规、标准、政策体系，提升统计、监测、监管能力，深化管理制度、基础能力和市场机制，形成有效激励约束，有力支撑减污降碳目标任务。鼓励先行先试，激发一线积极性和创造力，创新管理方式，形成各具特色的典型做法和有效模式，加强推广应用，实现多层面、多领域减污降碳协同增效。

参考文献

- [1] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 57(3): 1-5.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. 2022. <https://www.mohurd.gov.cn/file/2022/20221012/5683cd2a-1b26-4cd7-854f-22d40ce98636.zip?n=2021%E5%B9%B4%E5%9F%8E%E4%B9%A1%E5%BB%BA%E8%AE%BE%E7%BB%9F%E8%AE%A1%E5%B9%B4%E9%89%B4>.
- [3] 王洪臣. 百年活性污泥法的革新方向[J]. 给水排水, 2014, 50(10): 1-3.

- [4] 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.
- [5] 王启铨, 苑泉, 宫徽, 等. SBR系统在低浓度污水条件下培养好氧颗粒污泥的特性及微生物分析[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(11): 3043-3052.
- [6] 薛意, 陈荣, 邢保山, 等. 厌氧氨氧化: 理论和工艺发展概述(代序言)[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(2): 375-380.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 魏源送, 常国梁, 吴敬东, 等. 基于“源-流-汇”的非常规水源补给河流水质改善与水生态修复专刊序言[J]. *环境科学学报*. 2021, 41(1): 1-6.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] QU J H, WANG H C, WANG K J, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 88.
- [15] LUDWIG T, KERN P, BONGARDS M, et al. Simulation and optimization of an experimental membrane wastewater treatment plant using computational intelligence methods[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(10): 2255-2260.
- [16] KIM D, BOWEN J D, OZELKAN E C. Optimization of wastewater treatment plant operation for greenhouse gas mitigation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 163: 39-48.
- [17] 王启铨, 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.
- [18] 孙永利, 李鹏峰, 隋克俭, 等. 内回流混合液DO对缺氧池脱氮的影响及控制方法[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(21): 81-84.
- [19] 吕利平, 李航, 张欣, 等. 多点进水对前置预缺氧A²O工艺脱氮除磷的影响[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(15): 8-13.
- [20] 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 等. 分段进水对改良A²O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1704-1712.
- [21] 王启铨, 李浩, 董旭, 等. 改良型A²O污水处理厂的工艺优化调控方案及其对同步脱氮除磷效率的提升[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(2): 659-665.
- [22] 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(4): 14-17.
- [23] HE W Y, WANG Q B, ZHUY, et al. Innovative technology of municipal wastewater treatment for rapid sludge sedimentation and enhancing pollutants removal with nano-material[J]. *Bioresource Technology*, 2020: 124675.
- [24] 王启铨, 何文妍, 宫徽, 等. 基于复合絮凝剂的SBR工艺中试研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(9): 91-95.

(责任编辑: 靳炜)

Measures and suggestions for promoting synergistic efficiency in reducing pollution and carbon emissions in wastewater treatment plants

WANG Kaijun^{1*}, WEI Yuansong², WANG Qibin¹

1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract Wastewater treatment plants (WWTPs) have made great contributions to protecting the water environment, maintaining ecological balance, promoting the development of the national economy and urban & rural construction, and promoting the progress of ecological civilization. With the development of industrial production and changes in water treatment requirements, profound changes have taken place in wastewater treatment process technology, as well as fundamental changes in the operation and management objectives of wastewater treatment plants, which has been shifted from reducing pollutants to water reuse, resource recovery and low-carbon operation management. The wastewater treatment process involves many aspects, such as treatment technology, equipment selection, operation management control, etc. Many measures should be taken to promote the efficient and stable operation of the WWTPs, and integrate the wastewater treatment into the modern urban water circulation system, to release new pathways from the water systems with WWTPs as the core, and to lead efforts to reduce pollution and carbon synchronously at the multi-levels and in various fields, and promote sustainable development of wastewater treatment.

Keywords wastewater treatment plants; synergistic efficiency of pollution and carbon reduction; operation management; urban water cycle system; ecological civilization