

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.003

污水处理厂灰绿协同策略研究与实践

方 圆, 刘晓钰

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司 北京第三分公司, 北京 100080)

摘 要: 基于灰色基础设施与绿色基础设施的相关概念,以及对单一基础设施问题和挑战的认识,总结了灰绿协同的概念与高效韧性、复合利用和绿色低碳3个方面的内涵。以横琴粤澳深度合作区水质净化厂为案例,探讨了污水处理厂灰绿协同的3条策略,即:效益最大化的土地立体复合利用;叠加生态工法提质增效;注重工艺创新实现资源能源充分循环,通过碳减排和固碳打造“零碳”园区。最后,结合未来发展趋势,提出跨学科的多维灰绿共生的协同技术,以及数字化整合和优化展望,以期扎实推进生态市政灰绿协同建设提供相应的建议。

关键词: 市政基础设施; 绿色基础设施; 灰绿协同; 污水净化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0019-06

Research and Practice on the Grey-Green Synergistic Strategy of Sewage Treatment Plants

FANG Yuan, LIU Xiao-yu

(Beijing Third Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Based on the relevant concepts of gray infrastructure and green infrastructure, as well as the understanding of the challenges and issues related to single infrastructure systems, this paper summarizes the concept of grey-green synergy and its implications in three aspects: efficient resilience, composite utilization, and green and low-carbon. On this basis, based on the practical case of sewage purification plant in the Hengqin Guangdong-Macao in-deep cooperation zone, three strategies for the grey-green synergy of sewage treatment plants were explored: maximizing the benefits of land three-dimensional composite utilization; overlaying ecological engineering methods to enhance sewage purification efficiency; emphasizing process innovation to achieve full resource and energy circulation, and creating a zero-carbon park through carbon emission reduction and carbon sequestration. Finally, the paper proposes interdisciplinary collaborative technologies for multi-dimensional grey-green symbiosis and discusses the future potential of digital integration and optimization, offering recommendations for advancing the construction of ecological municipal grey-green synergy.

Key words: municipal infrastructure; green infrastructure; grey-green synergy; sewage purification

基金项目: 2023年度中国建设科技集团科技创新基金资助青年基金项目(Z2023Q20); 2023年度中国市政华北院自立课题(2023-60-BJ3)

近些年,随着对城市生态价值认识的加深,绿色基础设施的概念也得到广泛接受,认为其作为自然生命的支持系统,是实现城市可持续发展的重要保障。可以说,灰色基础设施和绿色基础设施在城市中共同发挥着物质供给、安全保障、生态保护、环境提升等功能,因此两者的协同发展被广泛认为是城市可持续发展的关键。尽管灰绿协同目前在雨洪管理领域已经有了一定研究和实践^[1-3],但其概念与内涵尚未明确。污水处理厂作为重要的传统灰色基础设施,具有资源能耗高的特点,与绿色基础设施相结合具有必要性和重要意义^[4],但目前该领域的探索还相对不足。总结了灰绿协同的概念与内涵,以期为后续细化的协同技术体系提供理论支撑和现实依据。此外,基于实践案例探讨了污水处理厂的灰绿协同策略,可为扎实推进生态市政建设提供参考。

1 灰色、绿色基础设施的相关概念与不足

关于灰色基础设施,国际上通常将其定义为传统工程规划中的城市支持系统,如道路、机场、桥梁、市政下水管网等,以及确保工业化经济正常运行所必需的公共设施构成的网络。在国内话语体系下,灰色基础设施等同于以人工设施为主的传统市政工程基础设施,高效、稳定和安全是其追求的主要目标。但是,现实中过度强调灰色基础设施功效,往往会导致资源浪费、环境破坏及成本高昂,因此灰色基础设施“机械式”的做法忽视了其应具有生态、社会、文化功能。同时,灰色基础设施的“刚性”特征,也使得其在面对极端情况时变得极为脆弱,难以适应与恢复。

在此背景下,绿色基础设施应运而生。结合国内土地划分方法,绿色基础设施主要包含6类系统,即城市绿地系统、自然水系统、森林生态系统、草原生态系统、湿地生态系统、农田生态系统。同时,它有别于“绿色市政”的概念,后者更强调市政工程设计建设与建设过程的“绿色化”,以安全、高效、生态、低碳、智慧为核心目标,要求尽量降低对周边自然环境和社会环境的影响。相比之下,绿色基础设施通过自然生态过程为人们和城市提供普惠型生态系统服务功能,包括净化水质、改善空气和土壤质量、增强生物多样性、增加娱乐空间、减缓和适应气候变化等,具有功能复合性和韧性。由于自然条

件的制约,绿色基础设施存在转化效率较低、稳定性较弱、承载力有限等局限。

2 灰绿协同的概念与内涵

2.1 灰绿协同概念

正是普遍认识到单一基础设施的问题和挑战,为发挥灰色与绿色基础设施各自的优势,学界普遍开展了灰绿协同的跨学科研究。综合相关研究方向和热点,可以发现其共同点均为探讨城市基础设施领域中人工系统与自然系统的有机协调,以实现城市生态、经济、社会效益的统一。因此,灰绿基础设施协同以协同理论为基础,通过多要素的跨尺度和多层次连接,将自然途径与人工措施相结合,建立生态过程与基础设施之间“双赢”和“共存”的相互关系。其目标是最大限度地发挥城市自然资本和技术手段的综合效益,将城市湿地、绿地、农林用地、生态廊道等自然和半自然的蓝绿空间,及相关的生态技术手段和工程设施,与城市防洪系统、给排水系统、道路交通系统以及其他系统的工程构筑物和设备紧密结合,减轻城市灾害、提高城市韧性和生态可持续性。

2.2 灰绿协同内涵

以生态城市为理论基础,灰绿协同的内涵主要体现在以下3个方面:

① 高效韧性。灰绿协同强调灰色与绿色基础设施在功能属性、空间组织、运作过程方面的复合,叠加灰色基础设施的功能效应与绿色基础设施的生态效应,实现节约资源与能耗基础上的整体功能增强与效益增加。两者相互支撑、互为补充,在应对极端自然与人为灾害时维护城市安全,并体现耐受、适应和快速恢复的韧性特征。

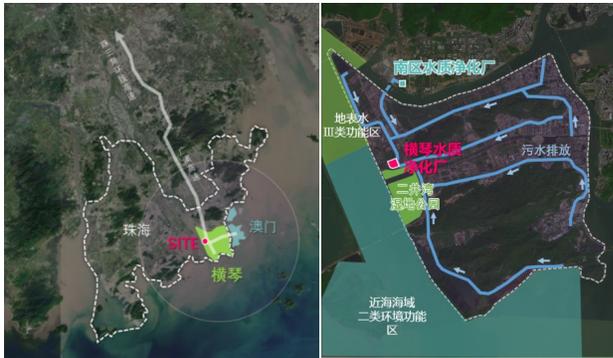
② 复合利用。灰绿协同强调灰色与绿色基础设施既能提供传统的市政基础服务,又能体现维护生态环境健康安全功能,同时展示更多元的文化价值、美学价值、休闲价值,并积极借助数字化赋能,提供更高品质的城市服务。

③ 绿色低碳。灰绿协同强调灰色与绿色基础设施在规划、设计、建造、施工、运维的全生命周期内运用绿色低碳的技术方法,深入贯彻落实“碳达峰、碳中和”战略部署,通过节能、降碳、减污、扩绿实现可持续发展并最大化发挥灰绿协同的生态价值。

3 横琴粤澳深度合作区污水厂灰绿协同策略

3.1 项目概况与背景

珠海横琴新区自2009年成立以来,经过十多年的高速发展,已成为珠海市经济发展的重要引擎。目前,横琴新区污水主要调往南区水质净化厂进行处理。然而,伴随横琴新区的开发建设,污水产量逐年大幅增加,原处理规模仅为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的南区水质净化厂已满负荷运行,无法满足处理需求,而且横琴污水跨磨刀门水道长距离调往南区水质净化厂存在安全运行风险。因此,亟须启动横琴水质净化厂的建设,以满足未来城市开发建设中的污水处理和水环境质量提升需求。基于此,横琴水质净化厂未来将承担全岛污水净化任务,规划污水处理规模为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。横琴水质净化厂与南区水质净化厂的空间关系见图1。



a. 横琴水质净化厂区位 b. 与南区水质净化厂的空间关系

图1 横琴水质净化厂区位及其与南区水质净化厂的空间关系

Fig.1 Location of Hengqin sewage purification plant and its spatial relationship with Nanqu sewage purification plant

值得注意的是,场地南部的二井湾国家湿地公园是横琴新区最大的自然生态湿地,栖息于此的国家二级保护动物欧亚水獭是健康河流生态系统的指示物种,对水质清洁有极高要求。为了给欧亚水獭及其他生物保留一个完整且健康的湿地生态系统,水质净化厂兼具对该湿地进行生态补水的任务,因此对出水水质的要求也有了更高的标准。

3.2 设计目标

埋地式污水处理厂将所有或主要处理设施置于地下箱体内部而地上空间用作城市公园绿地、停车场等公共用地的建设方式,虽然节约土地资源,但兼容功能有限,活力不足,并未达到经济、生态双重

效益最大化。污水处理行业的碳排放量占全社会总碳排放量的2%~5%,地下污水厂的碳排问题更为突出。同时污水处理作为能耗密集型行业,在全球气候变化的大背景下,欧美等发达国家已将实现“碳中和”作为污水处理行业的重要发展方向。欧盟、英国和加拿大提出2050年污水处理厂实现“碳中和”运行,美国提出2030年污水处理厂实现“碳中和”运行,新加坡则提出在21世纪末达到从“棕色水厂”到“绿色水厂”的发展目标。随着国家对减污降碳协同增效要求的逐渐提高,绿色低碳将成为污水处理行业未来重要的发展方向。

《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确要求在大湾区推进生态文明建设,创新绿色低碳发展模式。以此为契机,该项目开创了以“灰绿协同”为核心特色的污水处理厂“横琴模式”,旨在打造横琴新区的生态资源中心和面向国际的大湾区创新绿色展厅。

3.3 设计策略

结合灰绿协同的概念与内涵,项目设计策略主要包括3个部分:①效益最大化的土地立体复合利用;②叠加生态工法的提质增效;③注重工艺创新实现“零碳”园区。

3.3.1 效益最大化的土地立体复合利用

项目规划用地 16 hm^2 ,规划远期处理规模为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,地下污水处理设施建筑总占地面积约 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$,双层加盖,保证足够的设备起吊及检修空间和必要的消防设施、消防通道,共壁建设各类管道的布置与走位,同步协调参观、检修、运输通道的设置。为确保安全韧性和良好的地面环境,地下设施的设计与建设妥善解决了3个常见的运维问题:

① 削减噪声与振动。选用噪声低、振动小的设备,采用隔声、消声、吸声、隔振降噪综合控制直接噪声源。污水泵设备或设于封闭池或建筑内,经水体、墙壁隔音衰减传播音量,采取降噪措施加设隔音罩。设备与管道采用柔性连接方式,防止振动造成危害。负一层检修层池体封闭加盖,并采用局部设置吸声体或对壁面进行声学处理的措施消除混响。

② 除臭。通过源头减量措施,减少处理单元水界面与外界的接触以降低湿度及臭气产生,粗格栅、细格栅、污泥处理设备进行加罩处理,曝气沉砂池、生物池加设盖板。负一层单体设有混凝土顶盖、钢盖板,均为全封闭式池体。过程中采用“全流

程除臭+离子送新风(预处理、污泥处理)+生物除臭+土壤除臭”多级串联方式,箱体内设置完整的通风除臭系统并采用置换通风方式,在一定程度上兼顾节能和室内空气质量保证。在末端,结合地面景观通过土壤滤池无组织或高空排放塔,最终三重除臭方式强强联合确保臭气零排放。

③ 安全韧性。为保障珠海地区台风天气时水质净化厂的正常运行,箱体内设置排涝泵池及调蓄池,设置备用发电机,双电源供电。

在此基础上,地上部分以“港澳新能源建筑科技产业园”为主题,充分发挥横琴毗邻港澳的区位优势,打造内地与港澳经贸合作枢纽。首期规划建设包含生产研发、总部办公、市政管养和“零碳”技术展示等,总面积为 70 000 m²的港澳新能源建筑科技产业园(见图 2)能够带动产业发展,实现生态、经济效益最大化。同时,建筑中的 5 000 m²“零碳”展馆、临路一侧总面积约为 2.5 hm²的城市活力区和地上地下共计 160 个社会停车位对公众开放,消除传统灰色基础设施的“邻避”效应,为周边办公人群与居民提供包含运动康体、儿童娱乐、交流休憩等多种类型的活动场地(见图 3)。



图 2 港澳新能源建筑科技产业园

Fig.2 Schematic diagram of Hong Kong and Macao new energy building technology industrial park



图 3 城市活力区内的体育运动场地

Fig.3 Sports venues in vibrant urban areas

3.3.2 叠加生态工法的提质增效

根据《珠海市污水系统专项规划(2020—2035)》,各水质净化厂出水水质指标需全面执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准及广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)的较严值,并提出结合横琴“生态岛”“粤澳深度合作区”等发展定位,建议横琴水质净化厂出水水质按照地表水Ⅳ类标准进行设计(见表 1),污水处理选用改良型 AAO 生物池+二沉池工艺。

表 1 横琴水质净化厂设计出水水质

Tab.1 Design effluent quality of Hengqin sewage purification plant

主要污染物	珠海市常规环保要求(一级 A+广东地标)	地表水Ⅳ类标准	设计出水	标准提升比例/%
pH	6~9	6~9	6~9	
COD	≤40 mg/L	≤30 mg/L	≤30 mg/L	25
BOD ₅	≤10 mg/L	≤6 mg/L	≤6 mg/L	40
SS	≤10 mg/L		≤10 mg/L	0
TN	≤15 mg/L	≤1.5 mg/L(湖、库,以 N 计)	≤12 mg/L	20
氨氮	≤5 mg/L	≤1.5 mg/L	≤1.5 mg/L	70
TP	≤0.5 mg/L	≤0.3 mg/L	≤0.3 mg/L	40

针对横琴新区淡水资源缺乏和出水水质亟待提升的问题,充分利用灰色与绿色基础设施在功能属性、空间组织、运作过程方面的复合,构建多级复合流人工湿地修复技术体系,叠加功能效应与生态效应,在节约资源与能耗基础上实现整体功能增强与效益增加(见图 4)。



图 4 与生态工法和景观设计相结合的水净化过程

Fig.4 Water purification process combined with ecological engineering and landscape design

该体系设计处理水量为 7 500 m³/d,采用复合流人工湿地、人工湿地管网曝气、喷泉曝气等新型装置。其中,潜流湿地总面积约为 18 000 m²,呈 5 层梯级式。该湿地可充分利用不同屋顶面的高差形成

跌水,增强曝气充氧效果(见图5),并通过本土水生植物来辅助水的过滤和清洁,营造出与横琴岛其他公园截然不同的自然乡野景观。表流湿地位于场地建筑南侧,总面积约为 11 500 m²,水深 0.5~2.5 m。喷泉曝气设在湿地的进水和出水区域,池底和护岸采用生态方法,利用沿岸植物和水生植物配置技术,强化水体自净能力。亲水开放空间设有固定的水上无动力设施,可在玩乐的同时为水注入氧气,帮助完成水的清洁,从而成为水处理系统中的积极一环。水质净化厂尾水最终通过排水口和管网溢流排入场地南侧的二井湾国家湿地公园,实现生态补水,其余则作为景观娱乐用水和地块内用水回用,也可根据澳门用水需求为澳门企业供水。



图5 由湿地植物构成的绿色屋面

Fig.5 Schematic diagram of green roof composed of wetland plants

该体系出水 COD、TN、TP 浓度均可达到地表水 IV 类标准,稳定运行阶段相应去除率可分别达到 70%~80%、80%~90% 和 70%~80%。按处理水量 7 500 m³/d 计算,每年净化水量 270×10⁴ m³, COD、TN、TP 削减量分别为 297.75、36.08、2.31 t/a,处理成本为 0.05~0.08 元/m³。此外,该体系在满足污水净化要求的同时,还可实现场地雨水“零外排”,并将附近市政排洪渠的雨水接入人工湿地,实现周边雨水的自然积存和自然下渗,减轻了城区雨季防洪排涝的压力。

3.3.3 注重工艺创新,打造“零碳”园区

在规划、设计、建造、施工、运维的全生命周期内系统性融入碳中和理念,综合利用多种措施打造“零碳”园区。基于绿色低碳理念的设计实践主要体现在两方面,即“减排”和“固碳”。在“减排”方面,主要从地下污水处理工艺、设备和系统管理措施的改进和地面建筑的绿色技术应用两方面入手;

在“固碳”方面,主要措施包括生态固碳、人工固碳和碳的资源化利用,主要依靠地上空间实现,也是将污水处理设施置于地下后形成的优势之一。

污水处理选用的改良型 AAO 生物池+二沉池工艺具有脱氮效率高、能耗及药耗低的特点,减碳措施主要从降能耗和减药耗两方面入手,具体措施包括:①采用加介质高效沉淀池,大幅降低药剂投加量;②采用以紫外线消毒为主、次氯酸钠消毒为辅的消毒方式,在保证工程应用的成熟性、安全性、可靠性的同时大幅减小能耗;③污泥处理区采用沼气发电技术,减少能耗;④采用污水源热泵空调系统,降低热耗。同时采用精确曝气、智能加药、智能配电、智能照明、智慧水务等系统,降低电耗和药耗。地上空间的减碳措施主要体现在建筑设计中应用的光伏建筑一体化技术,将光伏板与建筑同时设计、施工和安装,打造与建筑完美集成的光伏发电系统。项目中建设了 12 000 m² 的光伏屋顶,平均每年发电 2 400 000 kW·h,可减少二氧化碳排放 2 400 t,等同植树 7 200 棵,满足约 1 200 个居民年用电需求。

该项目一方面利用屋顶和地面的湿地和林草进行生态固碳,预计实现生态固碳量约 900 t/a,固碳总价值约 12.5 万元/a^[5-7]。另一方面采用国际先进的人工固碳技术,整体建筑物东侧迎风面设置碳捕捉设备,结合场地东侧碳收集设备集装箱,形成一套碳捕集装置(见图6),对空气中的碳进行捕捉并回收利用,以减少场地内及周边工业园区空气中的排碳量;捕捉到的二氧化碳代替石油作化工原料,用于制备甲醇等产品。



图6 碳捕捉设备墙与碳捕捉设备集装箱

Fig.6 Schematic diagram of carbon capture equipment wall and carbon capture equipment container

除了“减排”和“固碳”外,项目规划建立集监测监管、应急预警、运营维护、分析研判、决策支持为

一体的全方位、一站式数字化环境管控综合服务体系,旨在园区内部基本实现资源和能源的充分循环利用,构建生态的能源、资源工厂。

4 展望

结合未来发展趋势,灰绿协同的策略研究应注重以下两方面的发展:

① 从协同技术看,应从单一专业领域的灰绿结合发展为跨学科的多维灰绿共生,这就需要摒弃当前各领域孤立研究的模式,打通专业壁垒,实现整合布局;

② 灰绿协同将迎来数字化整合和优化的浪潮,充分发挥人工智能在基础设施的调查、监测、反馈、联动、决策、评估方面的能力,形成灰绿协同的城市数字化模型,引导相关策略制定更加精准和智能。

参考文献:

- [1] 李江云,李瑶,胡子欣. 灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):49-55,80.
LI Jianguyun, LI Yao, HU Zixin. Multi-objective optimization modeling and application of grey-green coupled stormwater system [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):49-55, 80 (in Chinese).
- [2] 杨青娟,朱钢. 雨水管网和城市绿地的协同优化设计研究[J]. 中国给水排水,2014,30(7):94-98.
YANG Qingjuan, ZHU Gang. Collaborative optimization design of urban green space and stormwater system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(7): 94-98 (in Chinese).
- [3] 杨帆,陶蕴哲. 雨洪管理与城市绿地系统协同的规划模式与优化策略研究[J]. 中外建筑,2020(1):87-90.
YANG Fan, TAO Yunzhe. Research on collaborative planning of urban green space system from the

perspective of rainwater management [J]. Chinese & Overseas Architecture, 2020(1):87-90 (in Chinese).

- [4] 刘玉琰,邓彬. 深圳市布吉污水处理厂建设过程综述[J]. 城市道桥与防洪,2014(7):257-259,20.
LIU Yuying, DENG Bin. Summarization on construction process of Shenzhen Buji wastewater treatment plant [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(7): 257-259, 20 (in Chinese).
- [5] 杨成江,池也,徐蕾. 大石头亚光湖湿地生态系统固碳价值研究[J]. 广东化工,2022, 49(6): 141-143.
YANG Chengjiang, CHI Ye, XU Lei. Carbon sequestration value of Dashitou Yaguang Lake wetland ecosystem [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(6): 141-143 (in Chinese).
- [6] 武文婷,夏国元,包志毅. 杭州市城市绿地固碳释氧价值量评估[J]. 中国园林,2016,32(3):117-121.
WU Wenting, XIA Guoyuan, BAO Zhiyi. The assessment of the carbon fixation and oxygen release value of the urban green space in Hangzhou [J]. Chinese Landscape Architecture, 2016, 32(3): 117-121 (in Chinese).
- [7] 庞丙亮,崔丽娟,马牧源,等. 扎龙湿地生态系统固碳服务价值评价[J]. 生态学杂志,2014,33(8):2078-2083.
PANG Bingliang, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al. Carbon sequestration service valuation of Zhalong wetland ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8):2078-2083 (in Chinese).

作者简介:方圆(1988-),女,浙江金华人,硕士,高级工程师,主要研究方向为蓝绿空间规划与设计、生态市政理论与实践。

E-mail:fangyuan_tr3@163.com

收稿日期:2023-10-07

修回日期:2023-12-26

(编辑:丁彩娟)