

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.04.020

城市污水分散处理用于河道生态补水研究与实践

周家中¹, 徐金龙², 于林静¹, 吴迪¹, 薛磊³

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司 青岛市绿色低碳生物膜与水环境恢复重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 青岛西海岸新区城市管理局, 山东 青岛 266427; 3. 青岛思普润智能系统有限责任公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 为缓解污水集中处理与生态补水的矛盾问题,青岛西海岸新区采用了“原位处理、就地回用”的分散型污水处理补水模式。通过新建7座分散型污水处理设施,实现了污水就地处理、就近回用、生态补水。7座分散型污水处理设施总处理规模为 $4.55\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,实际运行效果显示,各污水处理设施出水水质优于地表准Ⅳ类水标准,有效解决了城市内河径流不足以及“集中处理,远程调水”模式占地大、投资高等问题,实现了污水资源化,达到了水资源循环利用的目的。分散型污水处理设施采用地理式建设形式,有效避免了对周边环境的不利影响。通过增加智慧水务管理系统,实现了分散型污水处理设施智慧运管和智能控制,提高了管理效率。采用“原位处理、就地回用”的污水处理理念,既解决了污水增量问题,实现了区域污水的灵活处置,又恢复了河道水体生态质量,获得了良好的环境效益、社会效益和经济效益。

关键词: 分散处理; 集中处理; 黑臭水体; 资源化; 生态补水; 流域治理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)04-0117-06

Research and Practice of Decentralized Urban Sewage Treatment for Ecological River Supplement

ZHOU Jia-zhong¹, XU Jin-long², YU Lin-jing¹, WU Di¹, XUE Lei³

(1. Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 2. Qingdao West Coast New Area Urban Administration, Qingdao 266427, China; 3. Qingdao SPRING Intelligent System Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: In order to alleviate the contradiction between centralized sewage treatment and ecological water supplement, a decentralized sewage treatment mode for water supplement of “in-situ treatment and on-site reuse” is adopted in Qingdao west coast new area. Through the construction of 7 decentralized sewage treatment facilities with total treatment capacity of $4.55\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, sewage treatment, reuse and ecological water supplement have been realized. The actual operation results show that the effluent quality of each sewage treatment facilities are superior to level quasi-Ⅳ criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). It effectively solves the problems of insufficient urban inland river runoff, large land occupation and high investment of “centralized treatment and remote water transfer” mode, so as to realize water quality and resource recycling. The decentralized sewage

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项; 青岛市科技惠民示范引导专项(22-3-7-CSPZ-10-nsh)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

treatment facilities are built underground, effectively avoiding the adverse impact on the surrounding areas. Through the addition of intelligent water management system, the intelligent management and control of decentralized sewage treatment facilities are realized, and the management efficiency is improved. The sewage treatment mode of “in-situ treatment and on-site reuse” not only solves the problem of sewage increment, realizes the flexible disposal of regional sewage, but also recovers the ecological quality of river water bodies, thus obtaining good environmental, social and economic benefits.

Key words: decentralized treatment; centralized treatment; black-odorous water; recycling; ecological water supplement; watershed management

西海岸新区位于青岛市西部、胶州湾西岸,是第9个国家级新区,2021年该新区GDP达到4 368.5亿元,位列19个国家级新区第3位。在新区经济快速发展的同时,也面临较大的城市内河综合治理以及排水系统新/改/扩建带来的双重压力。一方面是城市内河径流量季节性变化显著,旱季河道严重缺水甚至面临断流;另一方面是污水排放量持续增加,现有污水处理设施面临改/扩建问题,同时中水回用率需进一步提高。从城市水健康循环角度将上述两个问题统筹考虑,市政污水经处理后达到再生水利用标准,用于河道生态补水,是缓解城市内河径流不足,实现内河综合治理、污水资源化利用的有效途径。进一步地,正确处理好中水供需位置关系,实现流域内污水处理设施空间合理布置,方能起到事半功倍的效果。

青岛西海岸新区采用新建分散型污水处理设施的方式,通过污水“原位处理、就地回用”实现城市污水综合治理以及资源化,可为城市缓解污水增量、构建水循环、实现污水资源化以及恢复内河生态提供参考和借鉴。

1 新区排水与河道现状

根据西海岸新区建设规划,目前新区排水系统共设有9个污水处理分区,见表1。共设9座污水处理厂,累计处理能力为 $46.82 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。新区共有大小河流47条,其中流域面积 50 km^2 以上的骨干河道15条。区内河流均为季风区雨源型河流,河道径流量的季节变化较为明显,雨季流量激增,枯季流量骤减甚至干枯断流。同时,由于部分区域雨污合流和工业化进程的加快,导致城市废(污)水直接排入河道,地表水质波动较大、存在季节性恶化的现象。因此,需合理统筹水处理、水生态、水环境和水景观,因地制宜、科学布局建设污水处理设施、有序推

进城镇污水资源化,形成“污水处理→河道生态补水”的水资源循环路径。

表1 新区污水分区情况

Tab.1 Details of sewage zoning in the new area

$10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

污水处理分区	集中式污水处理厂	处理能力
龙泉河	龙泉河污水处理厂	2
镰湾河	镰湾河水质净化厂	8
泥布湾	泥布湾污水处理厂	12
灵山卫	灵山卫污水处理厂	3
中科成	中科成污水处理厂	15
金河	豆金河污水处理厂	1
海王	海王污水处理厂	3
古镇口	董家口港区污水处理厂	1.5
董家口及董家口港区	董家口污水处理厂	1.32

2 综合治理工艺路线

2.1 模式比选

目前,我国市政污水多采用集中处理的方式。通过城市排水管网、中间泵站将污水统一收集统一处理,这种模式便于污水处理设施的管理和控制。但是集中式污水处理厂往往需要建设与之匹配的污水收集系统,包括管网和中间提升泵站,而长距离管网建设也间接衍生出了黑臭水体等问题,管网治理补短板也成为各地区治理黑臭水体的重要措施^[1-2];在生态补水方面,建于河道中上游的污水处理厂高标准出水可以就近补给河道,如青岛的张村河水质净化厂,补水后断面水质由地表劣V类提升至V类,效益显著^[3]。而对于离河道较远或位于城市水系末端的污水处理厂,若要实现污水处理厂尾水用于河道生态补水的目标,则需通过新建中水泵房和中水管网多次输送才能将污水处理厂高标准出水泵回至河道上游实现河道补水,即“集中处理,远程调水”的补水模式(以下简称“远调补水”模

式)。这种方式进一步增加了建设投资和运行费用,严重限制了污水处理厂尾水回用。与之相对的,就是“原位处理、就地回用”的分散型污水处理补水模式(以下简称“原位补水”模式),即通过污水干管截污,在河道中上游新建分散型污水处理设施,独立运行,出水可就近补给河道。若采用该模式,费用方面:不仅可以节约大量管网建设资金,而且可以避免输送中水而产生的费用;建设方面:可以根据城市发展需要分批次逐步实施,体量小,一次性投资较低,建设方式灵活、建设周期短;效果方面:既可以根据污水收集实现源头分离,也可以根据资源化需求,实现精准处理。然而,分散型污水处理设施的缺点是管理难,同时新建需要征地,所以对工艺要求较高。

2.2 工艺比选

“原位补水”模式所选工艺应具备占地集约、高效稳定、控制简便的优势。

① 占地集约。分散型污水处理设施大多分布于管网连接处、居民区,所以往往没有大面积的土地可用于污水处理设施的新建。同时,分散型污水处理设施应根据需求而建,在土地利用上选择性空间较小。因此所选工艺应具备集约的特征,即能够根据提供的有限土地采用地上或地下的形式灵活布置污水处理设施。

② 高效稳定。采用分散型污水处理设施的目标是污水资源化。因此,实现优于一级 A 的高标准排放是基本要求。目前各地都在推行地表准Ⅳ类标准,而部分敏感区域已经开始实施准Ⅲ类要求,因此,所选工艺应在集约的基础上具备高效的特征,在有限的土地内获得高品质出水的同时,具备较强的抗冲击性能,实现出水稳定达标。

③ 控制简便。由于分散型污水处理实施往往体量较小,难以设置全方位的专业人员进行运营维护,所以一方面要求工艺运行控制简便,无需频繁操作;另一方面要求工艺装备保障率高,减少设备更换。通过较少的运行维护可获得污水处理设施的长期稳定运行。

目前 MBR、BAF、泥膜复合 MBBR、纯膜 MBBR 工艺等都具备集约的优势,四种工艺对比如表 2 所示。MBR 的本质是活性污泥法,通过增加过滤膜实现微生物截留,提高生化系统污泥浓度并省去深度处理工艺,节地效果显著,但运行过程中存在由于

膜污染而需要定期更换、能耗高、投资和运行费用高的问题;BAF 工艺属于固定床生物膜工艺,由于其自带过滤功能,所以流程短、出水水质好,但是滤料需要定期反冲洗,设备多,管理复杂^[4]。泥膜复合 MBBR 已在新区大型污水处理厂获得成功应用,实现了原池扩容 20% 的目标,运行效果稳定^[5]。纯膜 MBBR 节地效果较泥膜复合 MBBR 更优,在工程效果上,其占地优势可与 MBR 媲美,同时纯膜 MBBR 属于连续流生物膜法,无需反冲洗,运行更加简便^[6-9]。综合考虑,MBBR 是分散型污水处理设施理想的工艺形式。

表 2 集约型工艺对比

Tab.2 Comparison of intensive treatment processes

项目	MBR	BAF	泥膜复合 MBBR	纯膜 MBBR
工艺原理	活性污泥法	生物膜法	活性污泥法	生物膜法
占地	低	较低	较低	低
运行稳定性	较高, SS 无忧	较高,需要反冲洗	较高,固液分离工艺长	较高
运行管理	复杂	复杂	简单	简单
投资	较高	较高	一般	一般
运行成本	高	较高	一般	一般

3 项目实施

2018 年,由于泥布湾分区排污量增加,泥布湾污水处理厂需扩容 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与此同时新区岔河需进行生态补水。在“泥布湾污水处理厂扩容-岔河生态补水”综合治理工程中首次采用“原位补水”的建设模式^[4]。表 3 对比了采用“远调补水”和“原位补水”两种模式的投资与建设情况。

表 3 “远调补水”和“原位补水”投资费用比较

Tab.3 Comparison of investment costs between “remote water supply” and “in-situ water supply”

补水模式	远调补水	原位补水
管网	改建 2 km 污水管网,新增 8.8 km 中水管网,扩建泵站,投资 7 480 万元	/
污水处理厂扩建	$10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理厂,扩建 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原池扩容+新建模式,出水执行地表水准Ⅳ类标准,投资 10 710 万元	$10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理厂扩建 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原池扩容,出水执行一级 A 标准,投资 6 000 万元
分散污水处理设施	/	新建规模 $6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,利用废弃泵站,投资 8 400 万元
总投资/万元	18 190	14 400

如采用“远调补水”模式,首先需新建污水管网,然后泥布湾污水处理厂通过扩容+新建的方式新增 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的处理能力,出水达到地表水Ⅳ类标准,最后新建中水管网和泵站,将高标准出水泵送至岔河上游。如采用“原位补水”模式,首先可充分利用原钱塘江废弃泵站,将其改为钱塘江中水站,处理规模为 $6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,无需新征用地,出水执行地表水Ⅳ类排放标准,就近排放岔河;其次,泥布湾污水处理厂只需扩容 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,无需新建污水管网和中水管网以及扩建征地,出水只需满足一级A排放标准。采用“原位补水”模式投资可降低3 700万元,经济效益突出。

“十三五”时期,根据新区各污水分区的排水现状以及河道生态治理需求,经环评批复,共建设了包括钱塘江中水站在内的7座分散型污水处理设施,分布如图1所示。7座污水处理设施均设置于河道中上游,分别处理来自居民区、工业园区、学校等区域的污水,处理达标后排入景观娱乐用水功能区,实现河道生态补水。

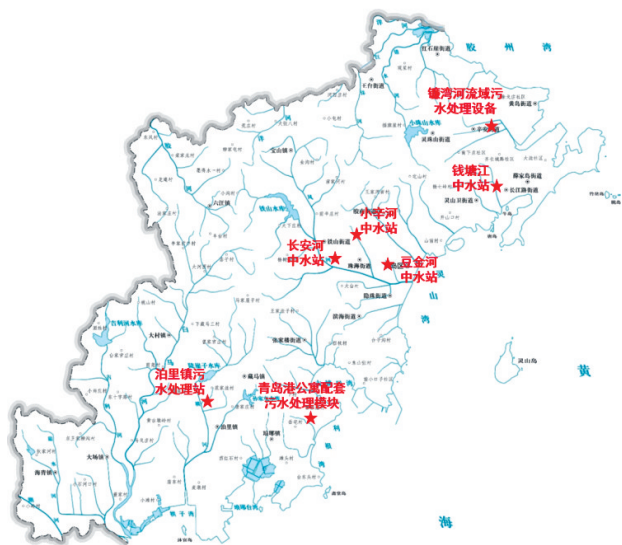


图1 分散型污水处理设施分布

Fig.1 Distribution of decentralized sewage treatment facilities

7座污水处理设施的建设情况如表4和图2所示。项目最大规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最小为 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,总处理规模为 $4.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。采用地埋式建设,不占用有效土地,降低了对周边环境的影响;处理规模小、工艺高效集约的双重因素降低了项目总占地面积。从表4可以看出,除泊里镇污水处理站和镰湾

河流域污水处理设备外,其余项目总占地均低于 $3\,000 \text{ m}^2$,不及一个标准足球场面积的1/2。

表4 新区分散型污水处理设施建设情况

Tab.4 Details of decentralized sewage treatment facilities

项目名称	所属分区	建设时间	处理水量/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	受纳水体	项目总占地/ m^2
钱塘江中水站	泥布湾	2018年	0.60	岔河	2 462
豆金河中水站	金河	2018年	0.30	豆金河	1 160
小辛河中水站	海王	2019年	0.15	小辛河	900
青岛港公寓配套污水处理模块	古镇口	2019年	0.10	周家河	700
泊里镇污水处理站	董家口及董家口港区	2020年	1.00	横河	6 300
长安河中水站	中科成	2020年	0.40	长安河	2 162
镰湾河流域污水处理设备	镰湾河	2020年	2.00	辛安前河	4 300



a. 豆金河中水站



b. 小辛河中水站



c. 长安河中水站



d. 钱塘江中水站

图2 新区分散型污水处理设施建设情况

Fig.2 Construction of decentralized sewage treatment facilities

4 运行效果与效益分析

项目建成后开始调试运行,经过排污许可批复,达标出水直排河道进行生态补水。各分散型污水处理设施实际运行效果如表5所示。从表5可以看出,各项目出水水质均优于地表水Ⅳ类水标准。稳定的高标准水质,为改善河道水环境提供了稳定的水源,达到了水资源循环利用的目的。为便于场站管理,增加了智慧水务管理系统。通过搭建统一综合控制平台,实现了“排水设施一张图、排水检测一张网”,多厂站用同一班组运维;通过集中管控和

数据共享,全局把控所有项目的生产运行状态,大幅减少人员数量和维护成本,实现了设备全生命周期管理;通过部署智能控制加药和曝气系统,实现了电、药的按需供给,节约了 20% 以上的运行费用,既保障了出水水质的稳定性,又实现了节能降耗。项目实施后,新区河道的补水量达到 $4.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过分散型污水处理设施,以“控源截污、活水造流”的理念,为河道提供了稳定的补给水源,恢复了河道景观,改善了河道水质。根据青岛市水质监测结果,西海岸新区海域 26 个国省控监测点位水质全部达标,8 个点位实现水质跃升。以钱塘江路污水泵站处理模块出水排入的岔河为例,断面 COD 和氨氮分别由 55、5.37 mg/L 降至 23.12、0.85 mg/L,实现了质的改善。同时,河道断流的天数降低为“0”,有效解决了新区河道季节性干涸的问题,保障了河道生态流量。此外,分散型污水处理设施采用地理形式,未占用有效土地,顶部实施绿化,打造成景观公园,实现了与周边环境相融合。

表 5 分散型污水处理设施运行效果

Tab.5 Operation effect of decentralized sewage treatment facilities

项目	mg·L ⁻¹					
	出水 氨氮	出水 TN	出水 BOD ₅	出水 COD	出水 TP	出水 SS
钱塘江中水站	0.46	12.10	4.00	21.00	0.26	5.70
豆金河中水站	0.35	11.39	4.21	27.16	0.16	6.10
小辛河中水站	0.42	12.01	4.67	25.34	0.13	4.98
青岛港公寓配套 污水处理模块	0.38	12.42	4.01	26.79	0.24	5.16
长安河中水站	0.21	10.12	3.75	10.30	0.07	4.90
镰湾河流域污水 处理设备	0.45	10.67	4.10	22.67	0.08	5.10

采用分散型污水处理设施,取得了显著的社会效益:①充分利用了分散、低效土地,有效避免了大宗土地的占用,为新区的发展节约了土地资源,推动有效用地用于商业、人居改善;②采用地埋式建设方式,节约了宝贵的地面土地资源,既完善了城市公共服务功能,提升了城市生态品质,又实现了土地垂直空间综合利用,还地于民;③厂区地面覆绿,实现了城市空间复合利用,使得污水处理设施“邻避”转变为“邻利”,减少了对周边土地价值的负面影响。

与“远调补水”模式相比,“原位补水”模式:①

无需新建与更换污水管网;②无需新建中水补水管网;③无需泵送中水而产生运行费用;④污水处理设施分散建设,在资金筹集上也更加灵活;⑤智慧水务管理系统的搭建进一步降低了运行和管理费用。

5 结论与展望

“十三五”期间,青岛西海岸新区采用“原位处理、就地回用”的城市污水综合治理理念,通过在内河中上游新建 7 座分散型污水处理设施,实现了污水的就地处理、就近回用、生态补水,既解决了城市污水增量问题,又恢复了河道水体生态质量,达到了水资源循环利用的目的,获得了良好的环境效益、社会效益和经济效益。西海岸新区属于资源型缺水,本地水资源总量不足,时空分布不均。根据《青岛西海岸新区水资源综合利用“十四五”规划》,预测 2025 年,全区总需水量为 $27\,583 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中工业需水量、生态需水量两项达到 $9\,332 \times 10^4 \text{ m}^3$,占比 33.8%,所以应有序推动提高污水的资源化利用率。分散型污水处理设施灵活性强、占地少、投资低、易于管理,是市政污水资源化较好的实施方式。在城市污水综合治理过程中,需统筹“空间均衡布置、流域系统治理”的方针,因地制宜建设分散型污水处理设施,根据具体需求实现污水资源化,以达到流域综合治理的目标。

参考文献:

[1] 肖朝红,周丹,马洪涛,等. 基于污水系统提质增效的老旧城区黑臭水体整治[J]. 中国给水排水,2021,37(10):23-27.
XIAO Chaohong, ZHOU Dan, MA Hongtao, et al. Treatment of black and odorous water body in old urban areas based on the improvement of the quality and efficiency of the sewage system [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 23-27 (in Chinese).
[2] 徐祖信,徐晋,金伟,等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. 给水排水,2019,45(3):1-5,77.
XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, et al. Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(3): 1-5, 77 (in Chinese).
[3] 牟润芝,荆玉姝,毛凤好. 青岛张村河黑臭水体治理案例与启示[J]. 给水排水,2021,47(S2):229-232.
MU Runzhi, JING Yushu, MAO Fengyu. Case study

- and enlightenment of black and odorous water treatment in Qingdao Zhangcun River [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(S2): 229-232 (in Chinese).
- [4] 刘彦华,周家中,吴迪,等. 城市污水再生利用的原位处理与集中处理分析与实践[J]. *给水排水*, 2021, 47(2): 67-70, 75.
- LIU Yanhua, ZHOU Jiazhong, WU Di, *et al.* Comparison between in-situ treatment and centralized treatment of wastewater reclamation and application [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(2): 67-70, 75 (in Chinese).
- [5] 郝晓地,陈峤,李季,等. MBR工艺全球应用现状及趋势分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(20): 7-12.
- HAO Xiaodi, CHEN Qiao, LI Ji, *et al.* Status and trend of MBR process application in the world [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(20): 7-12 (in Chinese).
- [6] 刘妍,余军,杨忠启,等. 微污染水处理厂纯膜MBBR工艺改造工程设计[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(6): 107-112.
- LIU Yan, YU Jun, YANG Zhongqi, *et al.* Design of pure MBBR process retrofitting project for a micro-polluted water treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 107-112 (in Chinese).
- [7] 路晖,辛涛,吴迪,等. MBBR工艺在污水处理厂提量增效中的应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 100-105.
- LU Hui, XIN Tao, WU Di, *et al.* Application of MBBR in increasing capacity and improving efficiency of a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 100-105 (in Chinese).
- [8] 周家中,吴迪,郑临奥. 纯膜MBBR工艺在国内外的工程应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 37-47.
- ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 37-47 (in Chinese).
- [9] 彭明,周家中,韩文杰,等. 基于纯膜MBBR的BioFIMag®工艺用于新建污水处理厂[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 71-75.
- PENG Ming, ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, *et al.* Application of BioFIMag® process based on pure MBBR in new wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 71-75 (in Chinese).

作者简介:周家中(1990-),男,河北张家口人,硕士,正高级工程师,主要从事污水处理强化脱氮除磷技术研究工作。

E-mail:zhoujiazhong@qdspr.com

收稿日期:2022-12-11

修回日期:2023-02-03

(编辑:衣春敏)

贯彻执行《中华人民共和国水法》