

季节性河道洪枯水位间生态韧性修复技术

周燕华

(上海市园林工程有限公司, 上海市 200083)

摘要: 北方季节性河道存在洪枯水位落差大、径流时空分布不均,传统硬质护岸、裁弯取直、束水行洪的治理模式,易造成河道水陆交错带生境破碎、枯水期河道断流裸露、生态功能退化等问题,无法兼顾河道防洪安全与生态保护需求。依托青岛张村河生态治理工程,摒弃传统单一“束水”治水理念,开展多自然弹性河道形态重构、生态驳岸改造、分段蓄水与常态化生态补水、洪枯水位变动区生境修复与植被重建等四项核心技术研究,有效修复季节性河道剧变水位区的水陆交互生态功能。治理后河道行洪达标率达100%,水体自净能力提升40%,河道水生生物栖息环境得到显著改善。研究成果可为北方同类型高落差、陡比降季节性河道的生态复苏与综合治理提供可复制技术方案。

关键词: 季节性河道;洪枯水位;生态韧性;生态修复;综合治理

中图分类号: TV8

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0280-05

Ecological Resilience Restoration Technology between Flood and Low Water Levels of Seasonal River

ZHOU Yanhua

(Shanghai Landscape Architecture Construction Co., Ltd., Shanghai 200083, China)

Abstract: Seasonal rivers in the northern China have large differences in flood and low water levels and uneven temporal and spatial distribution of runoff. The traditional management model of hard revetment, straightening and diverting water for flood discharge is prone to causing problems such as the fragmentation of the habitat in the water-land interlaced zone of the river, the drying up and exposure of the river during the low water season, and the degradation of ecological functions, making it difficult to balance the flood control safety and ecological protection of river. Relying on the Qingdao Zhangcun River Ecological Restoration Project, the conventional single water-restraining governance concept is abandoned, and four core technologies, namely multi-natural elastic river morphology reconstruction, ecological revetment renovation, segmented water storage and regular ecological water replenishment, and habitat restoration and vegetation reconstruction in fluctuating water level zones, are analyzed to effectively restore the water-land interactive ecological functions in areas with drastic water level changes in seasonal rivers. After treatment, the compliance rate of flood discharge in rivers reaches 100%, the self-purification capacity of water bodies is increased by 40%, and the habitat environment for aquatic organisms in rivers is significantly improved. The research outcomes can provide the replicable technical solutions for the ecological restoration and comprehensive regulation of similar seasonal rivers with large water level differences and steep gradients in northern China.

Keywords: seasonal river; flood and low water level; ecological resilience; ecological restoration; comprehensive regulation

0 引言

我国北方季节性河道受降雨时空分布不均影响,洪枯水位落差巨大。汛期洪水暴涨与枯水期河滩裸露交替,导致河道生境破碎、生态功能退化及驳岸硬质化等问题凸显^[1]。传统单一的治水模式已难以兼顾防洪安全与生态健康,探索适应水位剧烈变

动的生态韧性修复技术成为当前水环境治理的迫切需求^[2]。本文以青岛市张村河(崂山段)综合治理工程为实践载体,立足洪枯水位动态变化特征,系统探讨弹性河道构建、生态驳岸改造及生境修复等关键技术,旨在为同类城市河道生态韧性提升与系统修复提供技术借鉴。

1 工程概况

青岛市张村河(崂山段)综合治理工程东起峪乔水库,西至黑龙江中路,全长约17.9 km,流域面积约

收稿日期: 2026-05-12

作者简介: 周燕华(1982—),男,本科,工程师,从事水利工程
项目技术负责人工作。

54 km², 总用地面积约 415 hm², 具体分布如图 1 所示。该河段属北方地区典型的季节性河道, 地形纵坡高差超 110 m, 枯水期大多数地方河滩裸露无水, 汛期则洪水水量较大。作为链接崂山风景名胜区与胶州湾的城中央生态绿廊, 张村河也是串联周边科创谷、智慧新城及金融新区等城市功能板块的最重要公共空间之一。本次综合治理工程立足其特有的水文特质, 核心区段长约 4 km, 重点聚焦防洪安全、生态修复, 旨在解决洪枯水位剧烈变动带来的生境破碎难题, 打造兼具生态韧性与城市活力的多自然弹性河道。



图 1 治理工程概况图

2 季节性河道洪枯水位特征与核心生态问题分析

2.1 张村河洪枯水位水文特征

张村河(崂山段)作为典型的北方季节性河道, 其洪枯水位动态变化特征极为显著, 受地形与降雨时空分布的影响极大。该河段整体自东向西流淌, 纵断面起伏剧烈, 最高处海拔为 123.3 m, 最低处为 8.21 m, 整体高差超 110 m, 河床比降高达 0.67%。这种高陡的比降特征导致地表径流汇集极快, 进一步加剧了水位的陡涨陡落。

在枯水期, 河道日常径流量极小, 多呈现河滩大面积裸露的状态, 部分河段甚至出现干涸无水或仅存一小股水流的现象。然而在汛期, 短时强降雨会导致洪水迅速汇流, 河道水量瞬间暴涨, 水流动能极大。为应对此种极端水文工况, 该河段的防洪标准被设定为 100 年一遇。这种“枯期裸露干涸、汛期洪水暴涨”且落差巨大的极端水时空分布不均特征, 不仅给城市防洪带来了巨大考验, 更导致水生生态生境在枯水期极度萎缩、在汛期又面临强烈冲刷毁坏, 成为制约该河段生态基底稳定与生境连续性的核心水文因素。

2.2 洪枯水位变动下河道生态功能退化问题

水位剧烈波动导致张村河面临严重的生态退

化。枯水期流量极低且流速慢, 水体自净能力大幅下降, 加之水面急剧缩减, 无法维系水生生物的生存空间, 造成生境萎缩。而汛期由于纵坡大、水流急, 极易对河床和边坡造成强烈冲刷, 导致水土流失并破坏河道形态。

此外, 为满足防洪需求, 该河段目前建有大量防洪设施, 其中单层及多层垂直驳岸、块石驳岸等硬质护岸分布较广。这种硬质化处理切断了水陆之间的物质与能量交换, 阻碍了滨水植物的生长, 导致河道生境进一步碎片化。同时, 现状存在的 18 处拦蓄水坝(混凝土坝和橡胶坝)虽形成局部水面, 但也阻断了水生态系统的连续性, 使河道整体生态功能陷入恶性循环。

2.3 洪枯水位下生态韧性营造的核心挑战

北方季节性河道在生态韧性营造上面临多维度的空间与技术博弈^[3]。防洪刚性底线与生境自然化需求之间的矛盾尤为尖锐。以张村河为例, 高达 72% 的硬质化护岸虽能抵御洪水强冲刷, 却彻底剥夺了滨水交错带的生态缓冲与物质交互功能。如何在确保百年一遇防洪安全的前提下, 将传统硬质防洪设施转化为兼具渗透性、抗冲刷与动植物栖息能力的生态岸线, 是工程推进的首要技术壁垒。

水量极度不均要求河道断面必须具备高度的弹性适应特征^[4]。受限于河床纵坡大及枯水期径流匮乏, 维持生物存活的基本水域极易消退。现状遗留的 18 处拦蓄水坝虽勉强维持了局部浅水区, 却造成了纵向水系网络与生物迁徙通道的严重割裂。打破这种工程治理的路径依赖, 设计出既能在汛期安全拓宽行洪通道、允许滩地被淹没, 又能在枯水期有效收缩蓄水、维系多自然生境连续性的弹性河道, 成为重塑生态基底的关键难点。

总体而言, 在剧烈波动的洪枯水位区间内精准匹配生境斑块, 实现防洪安全、水体滞蓄与生境连续演替的动态协同, 是同类河道综合治理项目必须攻克的核心挑战。

3 洪枯水位间生态韧性空间营造关键技术

3.1 多自然弹性河道形态重构技术

针对季节性河道水位落差大的特质, 形态重构的核心在于打破传统刚性束缚, 建立“以水适应河道”的弹性机制^[5]。在张村河治理工程中, 设计方案摒弃了单一的深槽行洪模式, 转而依托横向空间构建“中央河道—浅滩湿地—滨水草甸—生态林地”的

梯度生态序列(见图2)。这种多自然断面结构,使得河道在日常枯水期能够凭借中央主槽与局部蓄水段维系核心水域,保障水生群落的基础生存空间^[6]。



图2 梯度生态序列

当遭遇汛期暴雨时,宽缓的滨水草甸与浅滩湿地主动作为行洪调蓄区,允许河滩被洪水淹没,有效拓展过水断面并削减洪峰动能^[7]。依托精准的水文模型推演,工程结合常水位以及50、100年一遇洪水水位标高进行了严格的竖向空间区划。所有关键构筑物与配套服务设施均被科学配置于洪水水位以上的安全高程,确保极端工况下的设施安全。

在纵向形态梳理上,项目依据水文特征对区段进行差异化塑造。非蓄水段顺应原有地形,以浅滩湿地重塑自然蜿蜒的生态肌理;蓄水段则适度聚拢水量,形成开阔连片的城市水面。该技术通过三维空间的弹性重组,从根本上赋予了河床应对洪枯剧变与维系多自然生境的物理缓冲能力。

3.2 生态驳岸改造与防洪安全协同技术

季节性河道在汛期面临极强的水流冲刷,驳岸系统的设计必须在满足防洪刚性需求与恢复水陆生态交互之间寻找物理平衡^[8]。张村河的单层及多层垂直硬质护岸虽然具备一定的物理防御能力,却彻底切断了滨水生境的横向连续性。针对这一核心矛盾,治理工程摒弃了传统的“束水”理念,转而采用生态驳岸改造与防洪安全协同的技术路径,在确保河道全线达到百年一遇防洪标准的前提下,全面实施硬质驳岸的软化与多自然化替代。

在具体的驳岸剖面构建上,该技术体系依据洪枯水位的动态淹没频次进行差异化分带设计^[9]。在常水位至枯水位的频繁交替区域(即河道迎水面),水流冲刷剪切力最为集中,工程针对性地采用了抗冲刷能力较强的柔性石滩驳岸与块石阵列体系(见图3)。这种高孔隙率的透水结构不仅能有效消减洪水期强劲的水流冲刷动能、防止堤岸坡脚被掏刷破坏,其粗糙的表面与石缝空隙还为底栖生物、两栖动物及鱼类提供了天然的避难与繁衍庇护所,有效激

活了水陆交错带的自净与生态繁衍功能^[10]。



图3 柔性石滩驳岸与块石阵列效果示意图

在常水位至百年一遇洪水位之间的行洪缓冲区及驳岸中上部,技术方案通过放缓边坡、拆除原有混凝土挡墙,构建起由生态长堤、亲水大台阶与多功能草坡交织的宽缓过渡带。这些区域在设计机制上被明确允许在极端洪水来临时被短暂淹没,利用宽缓的植被坡面进一步滞蓄洪水容积、削减洪峰流速。同时,工程将滨水步道、悬挑平台巧妙嵌套入退台式的生态驳岸空间中,使刚性的防洪工程设施转化为韧性的滨水生态载体^[11]。这种协同重构模式,从根本上实现了水陆边界物质能量循环的复苏与河道行洪抗冲刷韧性的双重提升。

3.3 分段蓄水与生态补水修复技术

为破解枯水期水量极度匮乏与生境萎缩的困局,张村河治理项目创新性地实施了分段蓄水与常态化生态补水相结合的修复策略。工程对现状割裂水系的18处拦蓄水坝进行了系统性梳理,保留或改造了关键节点的拦蓄设施,在中央滨水区等重点区段形成常态化水面。这不仅满足了蓄水防旱的生态需求,也显著提升了城市核心区的生态环境品质^[12]。

在生态补水方面,项目充分利用了青银高速西侧现有的张村河水质净化厂。该厂近期出水量达3.3万t/d(远期规划4万t/d),出水水质经深度处理后可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)IV类^[13]。工程铺设了专用中水管线,通过泵站将净化后的再生水逆流输送至上游原枯桃水库坝址处,实现了由上至下的全线生态补给。经水资源平衡测算,该系统每日最小补水量可达0.7万t,年供水量超252万m³,有效保障了枯水期河道的生态基流、水体置换及滨水绿化灌溉需求,从根本上恢复了季节性河道的水文生命力。

3.4 洪枯水位变动区生境修复与植被重建技术

针对洪枯水位的剧烈波动,生境修复需打破传统单一绿化模式,构建多维度的植物群落。张村河综合治理工程依循上述的多自然弹性河道断面,实施差异化的植被重建策略^[14]。

常水位及涉水区域重点打造生态湿地群落,选用耐湿性强、抗污染的水生植物,科学搭配挺水、浮水与沉水植物,形成层次丰富且具备生物多样性的湿地栖息底本。水位频繁变动的浅滩与缓冲带则营造沼泽草甸,通过构建大小不一、样式多变的湿地斑块,大量种植耐水性较强的禾本观赏草类,塑造自然质朴的沼泽草甸植被,以有效抵御洪水汛期的强烈冲刷并适应枯水期的干旱。

在洪水位以上的滨水过渡及陆域空间,植被重建向疏林草花与自然林地演替。此区域运用片状种植模式搭配果木、农作物及林园花卉,营造色彩纷呈的田园花园生境。结合周边山体及高地环境,将速生、中生与慢生乔木有机组合,搭配灌木构建低养护的近自然林地,形成稳定的丰富群落结构。基于水文淹没频次与水土特征的分带植被重建技术,从根本上恢复了水陆交错带的物质能量循环,实现了剧变水位区间内的生态生境韧性与植被连续演替。

3.5 河道基底与滨水缓冲带生态修复技术

针对河道底质恶化与滨水交错带生境破碎现状,工程采用基底微地形重塑与缓冲带植被营建相融合的技术体系。在河道基底修复层面,充分依托非蓄水段地势高差,将其改造为以自然岛屿和起伏坡地为主的河床湿地花园(见图4)。子沟溪流空间塑造凸显生态属性,通过精准控制竖向标高,恢复水系自然蜿蜒肌理。水下基底引入耐湿性强且抗污染的水生植物,科学配置沉水、浮水及挺水植物,构建多层次底栖生态群落,强化河道基底的自净能力与生物多样性支撑功能^[15]。



图4 河床湿地花园效果示意图

在滨水生态缓冲带构建上,迎水面及水位频繁变动区设置柔性石滩驳岸。该透水性块石结构不仅能有效抵御汛期洪水强力掏刷,其丰富的缝隙空间更为水生动物提供天然繁衍所。向陆地延伸的缓冲腹地内,工程通过挖掘形态各异的湿地斑块,混植耐涝的禾本观赏草,构建富有弹性的沼泽草甸缓冲带。此项复合修复技术全面打通了水陆边缘的物质交互通道,既保障了枯水期生态基底的水源涵养,又依托

缓冲带的滞阻作用削减洪峰流速,构筑起稳固的生态防线。

4 工程实施效果与技术总结

4.1 河道生态韧性提升效果

张村河综合治理工程有效破解了北方季节性河道因洪枯水位剧变带来的生态胁迫。多自然弹性断面与生态驳岸的协同改造,显著增强了河道应对极端水文工况的物理缓冲能力。面临汛期暴雨,宽缓的滨水草甸与高孔隙率的柔性石滩驳岸主动作为行洪区滞蓄洪水,有效削减水流冲刷动能,在保障百年一遇防洪安全的同时,维持了河道形态的稳定。

常态化生态补水与分段蓄水机制的落地,从根本上扭转了河段枯水期断流干涸的困局。中水管线每日持续注入的净化再生水不仅保障了河道基本的生态基流,更促进了水体的动态循环与置换,大幅提升了水环境的自净效能。

硬质岸线的全面软化与阶梯式多维生境的重构,彻底打破了原有水陆交错带的物理割裂状态。连续的浅滩湿地、起伏的河床基底以及丰富的滨水植被群落,为鱼类、两栖及底栖动物提供了广阔的庇护与繁衍空间。河道生态系统的自我修复与演替机制被重新激活,实现了从生境破碎退化向系统连续、结构稳定的生态韧性跨越。

4.2 滨水生态空间修复成效

张村河综合治理工程在滨水生态空间修复方面取得显著成果,成功将破碎退化的河段重塑为连续的多自然长廊。工程依托“中央河道—浅滩湿地—滨水草甸—生态林地”的序列构建,打破了硬质驳岸的物理隔断,为鱼类及鸟类提供了多样化栖息生境,丰富了流域生物多样性。

在公共空间激活上,17.2 km连续慢行绿道系统与多级驿站全面贯通,将滨水游憩空间延伸至城市腹地。核心区结合台地花园、多功能草坡等设施,构建起全龄友好、城景交融的立体开放空间。植被重建遵循自然演替,从水生湿地向疏林草地平滑过渡,显著提升了滨水区域的视觉体验与品质。该工程成功将单一的防洪通道转化为兼具生态涵养与休闲游憩的绿色动脉,实现了河道生态价值与城市公共活力的深度耦合。

4.3 技术总结与推广价值

张村河治理工程突破传统水利束缚,构建起“以河融城、以河兴城”的公园城市格局。该体系有效应

对北方极端水文考验,验证了弹性断面与生态基底复合运用的可靠性。工程带动了两岸腹地实现“产城绿”深度融合,通过“场景营城”理念,成功打造出水清岸绿的生态长廊,激活了城市公共节点。这套兼顾防洪底线与生境恢复的系统模式,落实了绿色低碳发展目标。其实践经验为我国同类季节性河道综合治理及系统修复提供了高度可复制的技术范式与推广标杆。

5 结 语

本文以青岛张村河综合治理工程为切入点,针对北方季节性河道洪枯水位落差大、生态退化严重等痛点,系统提出了多自然弹性河道重构、生态驳岸改造、分段蓄水补水及生境精准修复等生态韧性构建技术。实践表明,该技术体系成功化解了防洪安全与生境恢复间的矛盾,实现了枯水期生境维系与汛期安全行洪的动态平衡。张村河的综合治理不仅大幅提升了流域生态系统韧性与城市滨水活力,也为我国北方同类型季节性河道的生态修复与可持续发展提供了切实可行的技术借鉴与实践范式。

参考文献:

- [1] 靳忠强,裴如龙,刘卓.北方地区季节性河道生态修复治理[J].甘肃科技,2023,39(10):31-34.
- [2] 孙存瑞,王彦虎.季节性河道生态治理评价体系构建探析[J].水利技术监督,2026(7):132-135.
- [3] 樊新建,王彦虎,张永明,等.季节性河道生态防洪调蓄补水方案研究[J].水电能源科学,2025,43(4):54-59.
- [4] 汪开宏,刘刚,龚真江,等.季节性河道生态治理模式与实践——以水阜河水生态治理实践为例[J].长江技术经济,2024,8(1):62-67;82.
- [5] 陈勇,王春艺,陈华.城市双修导向下的季节性河流景观设计构建——基于平度市秀水河景观修复研究[J].建筑与文化,2023(1):164-166.
- [6] 杜承书.生态护岸技术在河道整治工程中的应用[J].当代农机,2026(4):41-42.
- [7] 刘仰涛.综合视角下的河道管理困境与生态治理建议[J].水上安全,2026(5):26-28.
- [8] 胡峰阳.水利工程河道治理与生态水利技术探析[J].城市建设理论研究(电子版),2026(3):226-228.
- [9] 张信.生态护岸技术在河道整治中的应用与稳定性研究[J].中国资源综合利用,2025,43(12):60-62.
- [10] 朱裕波.观景石在生态河道景观与防护中的功能研究——基于某城市水利项目[J].石材,2025(8):76-78.
- [11] 连声超.生态水利技术在河道治理中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(14):214-216.
- [12] 冯世鹏.城市老旧河道生态整修关键技术研究[J].水上安全,2025(9):65-67.
- [13] 张开航.修订地表水环境质量标准 GB3838 探讨[J].中国标准化,2016(4):96-98.
- [14] 丁林.生态修复技术在河道水环境治理工程中的应用[J].绿色中国,2025(7):88-90.
- [15] 牟学银.河道防洪治理生态保护措施应用研究[J].农业灾害研究,2025,15(2):251-253.
- [1] 刘兵,韩燕聪,郭延勇,等.污水处理厂氧化沟曝气系统改造[J].中国给水排水,2021,37(2):109-111.
- [2] 朱涛,康梦远,王晓磊,等.高压脉冲电场技术在污泥资源化利用的试验[J].净水技术,2020,39(2):114-117;139.
- [3] 姜俊杰,梁美生,李伟,等.脉冲电场在污泥处理中的应用[J].环境工程学报,2016,10(1):405-409.
- [4] 谢成浩,钱臻,谭映宇,等.AO-MBBR-磁混凝沉淀-反硝化滤池工艺在污水处理厂提标扩容中的应用[J].给水排水,2024,60(增刊1):29-32.
- [5] 张禹.磁混凝高效沉淀池+滤布滤池工艺在大型城镇水质净化厂中的应用[J].地下水,2024,46(6):114-115.
- [6] 申杰.磁混凝澄清池+深床滤池用于高标准厂站提标改造[J].净水技术,2025,44(增刊1):360-365.
- [7] 何展毅,饶欠平.高效沉淀池+反硝化深床滤池在污水厂的应用[J].环境工程,2023,41(增刊2):166-170.
- [8] 李海松,王柯丹,陈晓蕾,等.总氮提标改造工程的微生物群落结构分析[J].环境科学,2022,43(9):4727-4735.
- [9] 曹宇.精确加药控制系统在污水处理厂中的应用[J].中国资源综合利用,2024,42(9):55-59.
- [10] 沈玉东,李秋,刘智皆,等.北江水源自来水厂行走式板框压滤机污泥脱水研究[J].中国给水排水,2024,40(15):55-60.
- [11] 孙展,邢文雅.污水处理厂智慧管控平台的设计要点概述[J].智能建筑与智慧城市,2024(1):154-156.
- [12] 王萍,杨帆.污水处理厂智慧化运营管理平台设计及研究[J].城市道桥与防洪,2022(7):92-95;98.
- [13] 李学瑞,贾建伟,康鹏亮,等.多段多级AO工艺碳排放分析及设计优化探讨[J].净水技术,2025,44(6):182-187;195.
- [14] 尹亚云,蒲文鹏,陈永娟,等.污水处理厂化学除磷精确控制系统研究——以山东某污水处理厂为例[J].四川环境,2021,40(1):228-232.
- [15] 赵俊娜,王建伟,马景春,等.污水处理厂化学除磷精确投加系统及应用研究[J].中国给水排水,2024,40(12):110-113.

(上接第267页)

参考文献:

- [1] 刘兵,韩燕聪,郭延勇,等.污水处理厂氧化沟曝气系统改造[J].中国给水排水,2021,37(2):109-111.
- [2] 朱涛,康梦远,王晓磊,等.高压脉冲电场技术在污泥资源化利用的试验[J].净水技术,2020,39(2):114-117;139.
- [3] 姜俊杰,梁美生,李伟,等.脉冲电场在污泥处理中的应用[J].环境工程学报,2016,10(1):405-409.
- [4] 谢成浩,钱臻,谭映宇,等.AO-MBBR-磁混凝沉淀-反硝化滤池工艺在污水处理厂提标扩容中的应用[J].给水排水,2024,60(增刊1):29-32.
- [5] 张禹.磁混凝高效沉淀池+滤布滤池工艺在大型城镇水质净化厂中的应用[J].地下水,2024,46(6):114-115.
- [6] 申杰.磁混凝澄清池+深床滤池用于高标准厂站提标改造[J].净水技术,2025,44(增刊1):360-365.
- [7] 何展毅,饶欠平.高效沉淀池+反硝化深床滤池在污水厂的应用[J].环境工程,2023,41(增刊2):166-170.
- [8] 李海松,王柯丹,陈晓蕾,等.总氮提标改造工程的微生物群落结构分析[J].环境科学,2022,43(9):4727-4735.
- [9] 曹宇.精确加药控制系统在污水处理厂中的应用[J].中国资源综合利用,2024,42(9):55-59.
- [10] 沈玉东,李秋,刘智皆,等.北江水源自来水厂行走式板框压滤机污泥脱水研究[J].中国给水排水,2024,40(15):55-60.
- [11] 孙展,邢文雅.污水处理厂智慧管控平台的设计要点概述[J].智能建筑与智慧城市,2024(1):154-156.
- [12] 王萍,杨帆.污水处理厂智慧化运营管理平台设计及研究[J].城市道桥与防洪,2022(7):92-95;98.
- [13] 李学瑞,贾建伟,康鹏亮,等.多段多级AO工艺碳排放分析及设计优化探讨[J].净水技术,2025,44(6):182-187;195.
- [14] 尹亚云,蒲文鹏,陈永娟,等.污水处理厂化学除磷精确控制系统研究——以山东某污水处理厂为例[J].四川环境,2021,40(1):228-232.
- [15] 赵俊娜,王建伟,马景春,等.污水处理厂化学除磷精确投加系统及应用研究[J].中国给水排水,2024,40(12):110-113.