



文章栏目：国家水体污染控制与治理科技重大专项特邀专稿

DOI 10.12030/j.cjee.202205038 中图分类号 X52 文献标识码 A

孙贻超, 邢妍, 孙静, 等. 国家水体污染控制与治理科技重大专项“天津滨海工业带废水污染控制与生态修复综合示范”项目的主要研究成果及其应用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(7): 2111-2121. [SUN Yichao, XING Yan, SUN Jing, et al. The main research achievements and application of the “Comprehensive Demonstration of Wastewater Pollution Control and Ecological Restoration in Tianjin Binhai Industrial Belt” Project in the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Program[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(7): 2111-2121.]

国家水体污染控制与治理科技重大专项“天津滨海工业带废水污染控制与生态修复综合示范”项目的主要研究成果及其应用

孙贻超^{1,✉}, 邢妍^{1,*}, 孙静¹, 刘东方², 郭兴芳³, 邹锋⁴, 刘红磊¹, 闫志明¹, 李磊¹

1. 天津市生态环境科学研究院, 天津 300191; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 4. 天津临港建设开发有限公司, 天津 300452

摘要 针对天津滨海工业带当前面临的有限的水环境容量、水生态承载力与密集的工业排放强度之间的矛盾, 部署了国家水体污染控制与治理科技重大专项项目“天津滨海工业带废水污染控制与生态修复综合示范”。依托该项目, 开展了天津滨海工业带生态环境精细化管理、“减排-扩容-保安全”模式下的工业园区高标准排放、突发水环境风险应急管控等研究工作, 集成构建了水资源、水环境、水生态、水安全统筹兼顾的天津滨海工业带“负荷零增长”水环境管理技术体系、滨海工业带工业园区高标准排放与生态修复技术体系和“查-控-处”一体化的水环境风险管控体系。依托该项目研发的技术体系在天津滨海工业带进行了示范与应用, 实现了滨海工业带水生态环境空间管控、水质目标精细化管理和基于差异化区域总量的排污许可管理等核心管理技术的有效衔接; 在国内首次系统解决了滨海工业带工业园区污水处理厂最严格的准 IV 类排放稳定达标问题, 首次提出了统筹初期雨水强化预处理的滨海工业带多功能人工湿地协同构建模式; 建成了国内首个大型环境应急装备物资库与风险管控平台, 形成了系统化应急技术与装备体系, 填补了天津滨海工业带环境风险管控的空白。

关键词 水污染控制; 水生态修复; 水环境风险管控; 技术体系; 水专项; 天津滨海工业带

天津市处于海河流域最下游。“九河下梢”, 是海河流域各河流入海的主要通道, 京津冀区域的永定河-潮白河-永定新河、北运河-南运河-海河、大清河-独流减河 3 条河流生态廊道全部经由天津入海。天津市是区域产业结构优化转型的重要阵地, 是落实京津冀协同发展战略的重要引擎^[1]。天津滨海工业带作为重要的经济发展区域, 在快速发展的同时, 也面临着“水少、质差、生态脆弱和风险源密集”的严峻水环境问题^[2]。具体表现为, 清洁水源相对不足, 生态需水严重短缺, 加上工业带企业废水排放量巨大, 且水体中难降解及有毒有害污染物含量高, 使得滨海工业带区域内的河流水质长期处于劣 V 类状态; 水少质差导致滨海工业带自然生态湿地萎缩, 天然水域面积急

收稿日期: 2022-05-09; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07107)

第一作者: 孙贻超 (1971—) 男, 硕士, 正高级工程师, sunyichao429@hotmail.com; ✉通信作者

共同第一作者 (执笔人): 邢妍 (1984—) 女, 硕士, 工程师, xingyan19861008@163.com

剧减少,最终导致滨海工业带生态环境恶化。除此之外,天津滨海工业带由于工业企业密集,环境风险源众多,潜在风险高,尤其是天津“8.12”生态环境事故更是暴露了水污染应急处置能力不足的问题。然而,解决上述问题仍然面临着系统化、科学化、精细化的水生态环境管理技术体系缺失,“减排-扩容-保安全”的工业园区高标准超净排放核心技术缺失,突发水环境风险应急管控体系缺失等问题。

要解决天津滨海工业带面临的“水少(水资源量少)、质差(水体污染重)、生态脆弱(生态承载力不断降低)和风险源密集”这一关键科学问题和难点,需从减少滨海工业带水污染物排放、提升生态修复及水环境安全水平这一实际需求目标出发,在管理目标方面为天津滨海工业聚集区水环境综合治理提供总体方案和建议,在技术目标方面开展“源头高风险废水趋零排放-集中污水高标准处理达标排放-末端尾水水质提升处理”技术体系和水环境风险管控技术体系研究,紧密围绕“水环境目标需求-减污与生态修复顶层设计-水污染控制-水生态修复(人工湿地及生境构建)-水环境风险应急防控”这一核心研究主线,通过有效减少水污染物排放、人工湿地构建及生境恢复、风险应急保障,以典型功能区为支点,实施滨海工业带水污染控制与生态修复,破解滨海工业带“水少、质差、生态脆弱和风险源密集”的困境,最终实现废水趋零排放、氮磷削减、入海水质保障、生态环境改善、风险防范及管理体制机制创新的目标。为此,本文系统阐述了国家水体污染控制与治理重大科技专项“十三五”“天津滨海工业带废水污染控制与生态修复综合示范”项目研究形成的水环境宏观管控技术、园区个性化管控技术、园区治理技术体系和水环境应急技术集成体系的构建,及其对滨海工业带乃至京津冀地区水污染防治的重要意义。

1 天津滨海工业带的主要水生态环境问题

工业带的内涵是指受工业集聚影响的区域。结合研究需要,本文中的“天津滨海工业带”界定为天津市全域。天津市是我国传统综合性工业基地,制造业是天津市产业的支柱。尽管近年来天津市大力发展第三产业,但以工业为主的第二产业增加值占GDP的比重仍较高,2018年仍达到37%,是4个直辖市中占比最高的城市,大大高于同期北京的14.7%、上海的26.6%以及重庆的29.5%,也高于同期全国的平均值(33.9%)。在京津冀协同发展过程中,天津的定位之一为“全国先进制造研发基地”,承担着承接北京非首都功能疏解的重要政治任务。但从目前发展来看,由于自身市场机制发育程度不高,很难依靠市场机制实现区域要素自由流动、资源充分共享和污染协同治理,区域内部尚未形成合理的分工,也未形成完整的区域产业链和区域生态环境治理体系,导致生态空间支离破碎、水环境污染加剧且空间差异不明显等问题。

天津市域作为海河流域绿色生态廊道的重要水生态环境节点,以3.5%的流域面积承接着京津全部、河北省大部的1.2亿人口、8万亿GDP产生的废水,约占海河流域下泄污水的70%,是流域水污染物入海前的最后屏障。然而,海河流域整体生态水量匮乏,多年来下泄天津市域河段的天然入境水量呈衰减趋势,导致天津市域水资源严重短缺,水环境质量持续改善压力大,水生态功能极其脆弱。现有水环境治理和管理技术已无法有效解决天津面临的“水少(水资源量少)、质差(水体污染重)、生态脆弱(生态承载力不断降低)和风险源密集的难点,水环境、水生态与水安全保障问题已经成为制约天津市可持续发展的瓶颈之一。

2 研究目标与内容

2.1 研究目标

本项目的总体目标是:在“十一五”和“十二五”阶段“控源减排”、“减负修复”的基础上,针对滨海工业带在京津冀地区的特殊地理区位,以及该区域工业密集、污染物排放量大且成分复杂、风险源密集的特征,紧密结合天津市水环境管理和污染治理科技需求,针对天津市水生态环境管理的关键节点实施精准治污,构建“减排-扩容-保安全”的工业园区高标准超净排放核心技术体系和

突发水环境风险应急管控体系，通过典型工程示范，实现废水趋零排放、氮磷削减、入海水质达标、水生态环境改善、生态环境风险得到有效防范以及管理机制与体制创新的目标。具体目标包括以下 3 个方面。

1) 建立天津滨海工业带“负荷零增长”水环境管理技术体系。构建基于“水生态环境功能区精细划分-水质目标科学核定-水环境承载力优化-排污许可分配及监管”为核心的滨海工业带“负荷零增长”水环境管理整装成套技术，形成以水生态环境功能分区、排污许可为核心的水生态环境全过程精细化管理体系，提出天津滨海工业带“水陆联动、海陆统筹”的水生态环境日常管理模式；构建基于源头污染系统防控与末端尾水深度净化的天津滨海工业带水污染控制与生态修复技术集成体系，形成滨海工业区“排污准入-企业及园区减排-污水处理厂提标-沿海人工湿地增容-环境风险应急防范”水污染防控示范模式，提出滨海工业带典型工业园区水生态环境全过程系统化解决方案；构建基于系统论视域下的水生态环境顶层设计方法学，形成基于水资源优化配置、水污染全过程控制、水生态修复、水环境风险防范“四水联动”的天津滨海工业带水环境与水生态顶层设计方案，提出面向“十四五”乃至中长期的水生态环境差异化提升对策及实施路径。

2) 建设滨海工业带工业园区高标准排放与生态修复技术集成与综合示范工程。在天津滨海典型区域建成水污染系统控制示范工程：重点研究高盐难降解废水趋零排放技术，研发高盐难降解废水中有机物与重金属预氧化及分离、杂盐 MVR 循环分离与资源化技术和设备，实现 99% 以上无机杂盐资源回收和冷凝水的全部回收利用及大型 MVR 成套装备的国产化和产业化；研究工业带污水处理厂天津地标高标准排放技术，形成以“碳源筹措-污水可生化性提升与碳品质改善-碳源高效利用与损耗精控-多模式超净深度处理”为核心技术路线库；构建集深度净化、景观构建与生境恢复三位一体的滨海工业带尾水人工湿地技术体系，形成集“初期雨水高效预处理-污水厂尾水有机污染物深度净化-人工湿地氮磷强化去除-人工湿地生境恢复”于一体的滨海工业带人工湿地污染物协同去除与生态恢复的综合模式。

3) 建立“查-控-处”一体化突发水环境风险应急体系。研发“天-地-水”一体化环境风险应急侦测系统，实现危险事故水域无人化自动采样和侦测及现场人员、监测设备、实验室、远端指挥中心的即时沟通；研发水环境风险实时监控与智能决策指挥系统，建立 4 000 m² 滨海工业带园区水环境风险应急监管平台，形成区域性“预警-应急-处置”联动响应长效机制；研发典型事故废水应急处置技术与装备快速组合集成系统，建立大型环境应急装备与物资库，实现体系化、模块化应急处置。

2.2 研究内容

基于上述研究目标，针对天津滨海工业带存在的水生态环境问题，本项目设置 1 个共性技术课题和 4 个工程技术研发与示范课题(见表 1)，从宏观管控着手提出硬性约束，到园区基于协商排

表 1 水专项“十三五”“天津滨海工业带废水污染控制与生态修复综合示范”项目课题设置

Table 1 The subjects setting in Tianjin Binhai Industrial Belt basin project during the 13th Five-year plan period

课题类型	课题名称
共性技术课题	天津滨海工业带水污染控制与生态修复顶层设计方案和路线图研究
工程技术研发与示范课题	滨海工业带高盐难降解废水趋零排放技术研究与示范应用
	工业带污水厂高标准超净排放技术研究与示范
	滨海工业带尾水人工湿地构建技术研究与示范
	水环境风险应急监管体系与应急设备研发与示范

放提出个性化管控策略与措施。针对工业园区水质特点,构建从源头的高盐废水趋零排放到园区污水厂的高标准排放,最后到湿地进一步深度净化的全流程防控,以期为天津市水污染防治工作提供技术支撑。

3 研究成果

经过3年多的科研攻关,提出了天津滨海工业带面向“十四五”的水生态环境提升系统化解决方案,构建形成了水资源、水环境、水生态、水安全统筹兼顾的天津滨海工业带“负荷零增长”水环境管理技术体系、滨海工业带工业园区高标准排放与生态修复技术体系和“查-控-处”一体化的水环境风险管控体系;集成创新形成了滨海工业带水环境负荷零增长和安全排放技术体系(图1)。项目建成了5项示范工程,突破关键技术15项,编制3项技术导则或方案,发表论文107篇^[3-12],出版专著9本^[13],软件著作权17项^[14],授权专利51项^[15-20](其中发明专利15项),全面完成了项目预期成果与考核指标。

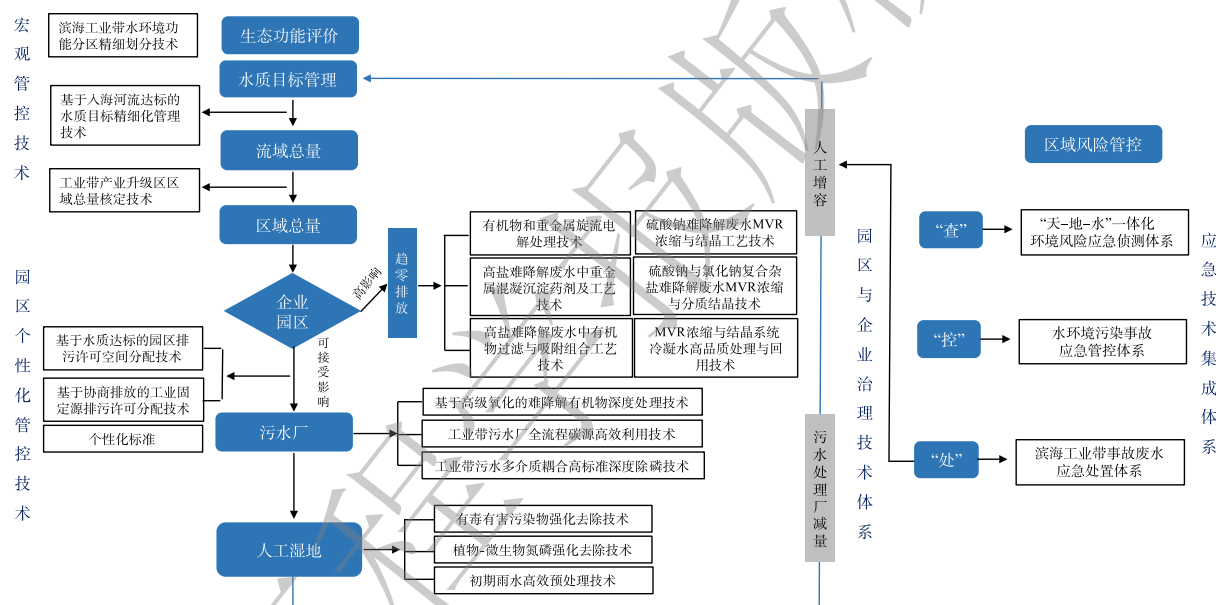


图1 滨海工业带水环境负荷零增长和安全排放技术体系框架

Fig. 1 The technical system framework of zero-increase of water environmental load and safe discharge in coastal industrial belt

1) 构建形成了水资源、水环境、水生态、水安全统筹兼顾的天津滨海工业带“负荷零增长”水环境管理技术体系,提出了天津滨海工业带面向“十四五”的水生态环境提升系统化解决方案。构建了基于水生态环境功能分区、排污许可为核心的管理制度体系。针对水资源、水环境、水生态统筹兼顾的精细化管理需求,提出了天津滨海工业带水生态环境功能分区管控单元精细划分技术,支撑水生态环境功能分区空间管理体系构建及管控目标设计。针对现行排污许可与水质达标不衔接的问题,提出了基于容量总量和水质达标、常规污染物与特征污染物兼顾的天津滨海工业带排污许可限值确定分配及长效监管技术,支撑差异化的水环境承载力优化方案制定。构建了基于“水生态环境功能区精细划分-水质目标科学核定-水环境承载力优化-排污许可分配及监管”为核心的滨海工业带“负荷零增长”水环境管理整装成套技术,形成了以水生态环境功能分区、排污许可为核心的水生态环境全过程精细化管理体系^[21-25],提出了天津滨海工业带“水陆联动、海陆统筹”的水生态环境日常管理模式。

形成了滨海工业区全过程精细化水污染防控示范模式。针对水环境承载力脆弱、水生态功能破碎的问题，提出了基于“源头高风险废水趋零排放、集中污水高标准处理达标排放、末端尾水水质提升处理”的滨海工业带水污染控制与生态修复技术集成体系，实现了水专项在天津市示范成果的科学评估、组合优化和系统集成，并由水专项“十三五”各示范工程开展技术验证，支撑流域区域减污增容工程技术方案的提出。针对沿河沿海工业园区布局敏感且排放集中问题，提出了基于“排污准入-企业及园区减排-污水处理厂提标-沿海人工湿地增容-环境风险应急防范”的滨海工业区全过程系统化的水污染防控示范模式^[26-30]，对低环境风险和高环境风险的工业园区污水，分别提出差异化的工业园区水污染控制管理方案，支撑工业园区绿色发展样板模式的构建。

提出了面向“十四五”的基于四水联动和分区施策的天津市水污染控制与生态修复顶层设计方案和路线图。针对“以水定陆”为特色的水质目标管理新导向并结合国家及地方环境管理要求，沿“系统分析-目标设计-路径设计-措施设计-制度设计”的链条，构建了基于系统论视域下的水生态环境顶层设计方法，形成了包含水资源优化配置、水污染全过程控制、水生态修复、水环境风险防范的“四水联动”多目标管理体系^[31-33]；以蓟运河、永定河/永定新河、海河、大清河/独流减河、南四河等天津滨海工业带五大水生态廊道为抓手，开展了分区施策水生态环境保护措施设计，提出了差异化的小流域解决方案；以水生态环境治理体系与治理能力现代化为核心，提出了行为主体、行为手段、行为依据相统一的天津市水生态环境保护制度体系建议，最终构建了以“水生态环境功能分区-全过程精细化目标管理-污染控制与生态修复技术集成-治理体系与治理能力提升”为核心的天津市水环境与水生态顶层设计方案和“十四五”水质改善行动路线图。

2) 构建形成了滨海工业带工业园区高标准排放与生态修复技术体系。在高盐难降解废水处理 and 资源回收利用方面，突破了工业难降解废水处理“难中难”的瓶颈。针对难以彻底控制入海持久性有机物、重金属等高风险污染物的问题，在国内首次提出了针对高盐有机废水的“化学催化氧化+电催化氧化+高盐吸附”协同难降解有机物和重金属的预处理技术和针对复合杂盐废水的“MVR 一体浓缩+浓缩液有机物去除+循环套用+冷冻分质结晶”回收技术^[34-42]。解决了蒸发废盐高能耗问题、蒸出盐危废化问题。建立了规模化的生产应用工程(滨海工业带高盐难降解废水趋零排放示范工程)，实现了 99% 以上杂盐资源化和全部冷凝水的回收利用，成功解决了园区污水处理“最后一公里”的难题，实现了真正意义上的高盐废水趋零排放，相关技术与产品推广到国内外。

在园区污水处理厂天津地标高标准排放方面，针对不同类型工业园区特点，以分解难度为导向，构建臭氧、臭氧催化氧化、芬顿高级氧化等难降解有机物深度处理分级优选技术方案，提出了“筹措-提质-增效”的碳源高效利用策略^[42-48]，实现了臭氧氧化、芬顿氧化高标准深度去除低浓度水平有机物(30~50 mg·L⁻¹)的工程化应用(天津滨海工业带污水处理厂 DB12/599-2015 稳定达标示范应用工程 2 座)，破解了强波动低碳氮比水质下总氮高标准稳定达标和碳源成本控制的两难困境，实现了工业带复杂水质条件下碳源利用效率提升 20%~30%，碳源投加成本降低 30% 以上，首次解决了工业园区污水复杂水质条件下准四类稳定达标问题。

在人工湿地污染物协同去除与控制方面，开发了特异性吸附净水基质，实现了滨海工业带污水厂尾水中残存全氟化合物等有毒有害污染物的高效去除；针对滨海工业带高污染负荷初期雨水，研发了“管网+河道”水量调蓄、“分散式+集中式”相结合的初期雨水预处理应用技术模式^[48-50]，在国内首次系统解决了工业园区初期雨水高效预处理难题；建立了以鸕鹚类水鸟保育为核心的滨海工业园区人工湿地生境构造方法^[51-57]。通过滨海工业带尾水人工湿地示范工程(天津临港经济区湿地二期工程)的构建，在滨海工业带污水厂类 IV 类出水基础上进一步提升了水质，并有效提升了区域生态服务功能。

3) 构建形成了“查-控-处”一体化的水环境风险管控体系。研发形成“天-地-水”一体化环境风险应急侦测系统。将无人化应急监测设备、事故现场移动水质实验室和信息化平台应用于突发环境应急监测体系中^[58-60]。其中,多功能现场两栖无人侦测船具有水陆两栖、自动避障、极端环境高通过性、污染底泥采样等功能,能够在陆地及滩涂泥泞环境下正常行驶,可实现危险事故水域自动采样和侦测;事故现场移动水质实验室集成了车载实验平台、数据采集及传输系统、便携应急监测仪器、车载大型仪器等功能模块,能够为现场应急检测与指挥提供野外实验及指挥场所,可满足水环境突发污染事故应急监测快速响应;信息化平台基于搭建的区域应急数据库对无人化应急监测设备与事故现场移动水质实验室数字化集成,能够实现现场人员、监测设备、实验室、远端指挥中心的及时沟通与联系,形成了完善的机动化、信息化的“天-地-水”一体化环境风险应急侦测系统,可提升应急响应能力和科学决策水平。

研发形成了水环境风险实时监控与智能决策指挥系统^[61-62]。建成了面积超4 000 m²以上的滨海工业带园区水环境风险应急监管平台,接入了103家各级企业和30座工业带地表水自动监测站,并实现业务化运行。该应急监管平台包含了突发水污染事故的预警方法体系和涵盖风险源基础信息数据库、应急装备库、专家库、应急预案、处置方法和案例库的数据库管理系统;集成了区域地表水自动监测系统、重点排污单位自动监控系统、环境综合应用支撑平台、环境监测预警数据中心、监测环境生态指数评价、环境监测预警GIS信息系统、监测预警应急管理系统、水污染应急处置系统等模块,形成了区域性“预警-应急-处置”联动响应长效机制,实现了水污染应急事故平台化管控。

研发形成了典型事故废水应急处置技术与装备快速组合集成系统。开发了风险水域多功能安全监测、滨海工业带典型事故废水应急处置关键技术及配套设备^[63-64],建成了全国第一个大型环境应急装备与物资库并开发了设备物资信息化管理系统,形成了区域性应急物资保障和应急处置系统。以环境应急设备物资库为载体,实现了体系化、模块化应急处置,为环境应急事故快速响应、应急物资库紧急调用、快速提出决策方案等工作提供了技术支撑。项目在国内首次将标准化、模块化理念融入水处理设备领域,自主研发设计组合式、模块化、撬装式水处理设备,各模块经不同组合可高效应对污染物复杂多变的治理工程,尤其适用于突发事件造成的水污染应急处理。其中各类应急装备可通过多种形式组合,形成了成本有效可控的重金属废水大于2 000 m³·d⁻¹、难降解有机物废水大于2 000 m³·d⁻¹、含油废水大于10 000 m³·d⁻¹的处理能力。

4) 集成创新形成了滨海工业带水环境负荷零增长和安全排放技术体系。基于环境质量改善,集成区域总量核定、工业园区与固定源排污空间分配形成了支撑工业园区污染排放递减的负荷零增长管理技术;针对滨海地区工业废水特点,集成形成了“高风险污染物源头控制-园区污水厂减量-人工湿地增容-系统风险防范”的全过程系统化治理技术,以高盐废水趋零排放及污水厂高标准排放技术确保园区企业排放与污水厂准IV类出水达标排放,构建了多功能人工湿地协同解决工业园区初期雨水污染控制与排海水质保障;建立了水环境风险管控体系,系统解决了滨海工业带突发水污染事故应急管控技术与装备缺失问题。

4 成果应用

4.1 对国家或地方流域规划、环境治理及应急处置的科技支撑

1) 助力打好渤海综合治理攻坚战。利用水生态环境功能分区精细划分、水质目标精细化管理方案设计等技术成果,建立了天津市主要河流高强度人工干预下的“污染源-水质”响应关系,精确核定了12条入海河流的汇水范围,实现了污染排放溯源及传输去向解析、在统筹考虑上下游、左右岸的基础上,以入海河流全面消除劣V类为硬约束,科学设定境内主要河流水质目标、达标时

限及污染减排目标，形成了覆盖全市域的精细化差异化水质目标管理体系。相关研究成果支撑形成了《天津市打好渤海综合治理攻坚战强化作战计划》《天津市入海河流污染治理“一河一策”工作方案》及天津市12条入海河流水污染防治攻坚战行动方案，由天津市污染防治攻坚战指挥部印发实施。

2) 支撑“十四五”重点流域规划编制。在水环境质量提升方面，研究制定了差异化精细化的分类分期水环境质量提升路径，重点支撑了天津市“十四五”主要河流水质改善目标设定工作；在水生态保护修复方面，研究构建了基于水生态环境功能分区精细划分的天津市水生态环境管理体系，提出了分级分类分区的水生态管控目标，为天津市水生态环境管控单元划定提供了空间化数据成果。项目建立的天津市水生态健康评估指标体系，为天津市“十四五”阶段水资源、水生态亲民指标的制定提供了数据和技术支持。上述成果已纳入到天津市重点流域“十四五”水污染防治规划要点，上报至海河流域北海海域生态环境监督管理局和生态环境部。

3) 有力支撑了国家重大生态环境突发事件的应急处置。本项目研发的水环境风险应急技术和设备，在近几年华北渗坑污染应急处置、白洋淀上游污染坑塘应急治理等工作中发挥了重要作用。在2019年8月生态环境部组织的京津冀水环境应急演练中，项目研发的两栖无人侦察车、水体采样无人机、移动分析实验室等进行了集中展示，受到生态环境部的好评，被认为这是未来环境应急技术的集中展示。依托天津滨海新区大型环境应急物资库，建立了常州沿江化工高浓水应急处置中心。特别是在2020年的新冠肺炎疫情应对中成效显著，本项目组编制的《新冠肺炎定点医院污水消毒处理操作规范》和《新冠肺炎定点医院医疗污水强化消毒推荐示例》2部技术指导文件，指导了疫情期间污水强化消毒应急体系建设和规范运行。开发了20余套医疗废水、医疗废物、方舱医院应急消毒等应急处理装置，用于天津市、湖北省武汉市和孝感市、海南省三亚市的肺炎疫情阻击战，相关工作得到生态环境部高度赞扬。

4.2 有关技术成果的推广应用

高盐难降解废水处理和资源回收利用技术在南港趋零排放示范工程进行了应用，处理高盐废水规模达 $2\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以上，每个月回收废水中的无机盐超过4 000 t，分离出的硫酸钠达到国家二级标准，并在国内外作为工业盐实现产品销售，大幅降低处理成本。同时，该技术还在南港工业区再生水处理工程中进行了推广，有效解决了污水处理厂出水无处可去的难题。

在MVR关键设备推广方面，蒸发结晶系统应用到苏里格气田深度处理工程，MVR型机械压缩设备及活性炭吸附与再生装置已在我国6个行业的15个工程项目上得到应用。

污水厂天津地标高标准排放技术分别在天津经济技术开发区西区和北塘污水处理厂提标改造工程进行了应用，出水水质稳定达到天津新地标A，主要污染物去除率均在90%以上，其中总氮在80%以上，新增成本均在1元以下。该技术还分别在天津中新生态城营城污水处理厂、天津大港港东新城污水处理厂、天津滨海新区南港轻纺园污水处理厂的提标改造中进行了推广应用。

人工湿地污染物协同去除与控制技术在临港人工湿地示范工程进行了示范应用，实现了出水 $\text{TN}\leq 1.98\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{TP}\leq 0.182\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，特征污染物去除率大于30%。生境恢复技术在临港示范工程的生境保育区进行了示范应用，应用后鸟类品种由2018年湿地建设前夕的13种恢复至2020年的77种。

5 建议

1) 建立基于水生态环境功能分区的水生态环境管理制度。“十三五”以来，天津市已初步形成以地表水国考断面、市控断面为基础的水质目标管理体系，并在水质改善的幅度上体现出了较好的成效。“十四五”阶段，在水环境质量提升的基础上，国家及流域层面又进一步提出了水生态管

理要求,重点在“有河有水、有鱼有草、人水和谐”上实现突破,对水生态环境管理政策工具提出了更高的要求。建议逐步推动水资源、水环境、水生态等要素耦合的水生态环境管理体系,以水生态环境功能分区替代现有水环境控制单元,以水资源、水环境质量、水生态目标替代单一水质目标,以强化水生态修复、提升水生态服务功能替代过度依赖控污减排的管理思路,构建基于水生态环境功能分区的分区、分级、分类、分期水生态环境管理制度。

2) 建立基于水质达标、区域总量的差异化排污许可管理制度。我国现阶段排污许可制度确定主要是依据企业行业排放标准、环评审批等要求,更多考虑了企业自身的行业属性和法定审批要求,是基于技术的排污许可限值,虽有利于排污许可管理迅速推广,但未能与水质目标直接挂钩。特别是考虑天津水资源严重匮乏、水环境质量改善需求较大的前提下,与水质目标脱钩的排污许可制度,不能完全发挥排污许可制度应有的作用。因此,作为海河流域主要的入海通道,建议在天津市逐步推动基于水质达标、区域总量的差异化排污许可制度,这对天津市乃至海河流域水环境质量改善具有重要的指标性作用。

3) 建立高盐难降解有机废水集中处理厂。针对目前化工制药等行业高盐废水水量小、种类多、水质复杂、达标困难,小规模企业单独建立高盐废水处理系统面临投资高、技术难度大、自己运行技术人员缺乏等难题,建议在化工与制药园区建立高盐废水集中处理厂,工业园区内企业可将高盐废水送到集中处理厂进行处理。高盐废水集中处理厂可以发挥资金、技术、专业人员的优势保证高盐废水处理效果和杂盐资源化,有利于与当地环保部门执法,有利于推动园区化工制药等产生高盐废水的企业健康发展。

4) 全面促进滨海新区污水处理提质增效,稳步持续改善新区水生态环境质量。滨海新区应进一步优化产业布局,强化源头管控,科学推进协商排放;加快推进污水管网排查,提升污水处理效能,加大再生水资源多目标综合利用,加大污泥处理处置力度,逐步推进“厂-网-河(湖)”一体化管理。建议全面促进污水处理提质增效,实现污水处理效能的整体和系统性提升,稳步持续改善新区水生态环境质量。

5) 加强滨海工业带地区多功能人工湿地构建,提升滨海工业带污染物协同净化与生态服务功能。虽然目前人工湿地已经在我国各地进行了推广应用,但由于缺乏雨水强化预处理、氮磷强化去除、有毒有害有机物强化去除、湿地生境构建等技术集成应用,往往仅具水质净化功能,且难以为区域及迁徙鸟类提供适宜生境。因此,针对当前滨海工业带土地开发利用强度高、有毒有害有机污染物残存、自然湿地退化严重等问题,应强化多功能人工湿地构建技术的推广应用,提升滨海工业带污染物协同净化与生态服务功能。

6) 进一步加强环境应急物资储备,加快推动全国环境应急智能网络平台建设。环境应急物资储备应做到“宁可备而不用,不可用而无备”。对不同突发环境污染事件,应进一步研究开发各类专用环境应急设备,强化应急物资储备,增强应急处理能力。建议集成全国各区域风险源基础信息数据库、风险源监控查询系统、应急装备库、专家库、处置方法和案例库、事故应急监控预警系统、管网可视化系统、污染扩散模拟系统等数据库和智能管理系统,建立全国性预警-应急-处置联动响应长效机制,实现全国联动、信息共享。

参 考 文 献

- [1] 卢卫. 京津冀协同发展视角下的天津城市定位研究[J]. 城市发展战
略, 2019(6): 37-46.
- [2] 天津市环境保护局. 2016年天津市环境状况公报[EB/OL]. [2017-05-
07]. http://sthj.tj.gov.cn/ZWXX808/TZGG6419/202010/t20201021_3972881.html
- [3] 史芳, 包景岭, 李燃. 基于STIRPAT模型的天津市水环境污染影响因

- 素分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(6): 64-67.
- [4] 徐香勤, 蔡文倩, 雷坤, 等. 天津市河流生态完整性评价[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2309-2317.
- [5] LI Z D, LIU D F, HUANG W L, et al. Biochar supported CuO composites used as an efficient peroxymonosulfate activator for highly saline organic wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137-164.
- [6] 王振东, 刘东方, 李文姣, 等. 金属氧化物/膨润土催化剂臭氧化处理高盐废水[J]. *水处理技术*, 2019, 45(1): 85-94.
- [7] XU D C, ZHAI S Y, CHENG H Y, et al. Wire-drawing process with graphite lubricant as an industrializable approach to prepare graphite coated stainless-steel anode for bioelectrochemical systems[J]. *Environmental Research*, 2020, 191: 93-110.
- [8] 李劭, 郭兴芳, 陶润先, 等. 工业集聚区集中污水处理厂难降解有机高标准深度处理研究[J]. *给水排水*, 2020, 48(10): 59-64.
- [9] CHEN Z, REN G B, MA X D, et al. Perfluoroalkyl substances in the Lingang hybrid constructed wetland Tianjin, China: occurrence, distribution characteristics, and ecological risks[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(31): 38580-38590.
- [10] 李宏瑞, 何旭, 刘涛, 等. 基于污水厂尾水的人工湿地系统中水体氮的水流方向分布特征及污染评价[J]. *环境工程学报*, 2019, 14(4): 1013-1020.
- [11] LI H Q, HOU R R, CHEN Y F, et al. Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using sulfonated peat[J]. *Water*, 2019, 11(10): 1-15.
- [12] 门娟. 滨海新区水环境污染事故应急处置平台建设初探[J]. *天津科技*, 2018, 45(1): 99-102.
- [13] 孙静, 温娟, 李燃. 滨海工业带水污染控制与生态修复设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [14] 中国环境科学研究院, 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京金水水利科技有限公司. 天津滨海工业带突发水环境事故预警级别判断系统V1.0: 2020SR0147049 [DB]. 北京, 2019.
- [15] 段云霞, 乔楠, 孙静, 等. 一种对河道/湖库水体修复的生态系统: CN212269599U[P]. 2021-01-01.
- [16] 王爱杰, 程浩毅, 彭永臻, 等. 污水水增效处理加速器件: CN107244733B[P]. 2020-03-24.
- [17] 俞其林, 王凯军, 裘华刚, 等. 一种颗粒活性炭吸附及再生集成处理方法: CN108178353B[P]. 2020-09-01.
- [18] 孙贻超, 丁晔, 回蕴珉, 等. 一种河道水体生态环境质量同步提升工艺设备: CN111777183B[P]. 2020-12-22.
- [19] 冯辉, 苏志龙, 丁晔, 等. 一种高效的臭氧催化氧化水处理系统及控制方法: CN110734124B[P]. 2020-04-03.
- [20] 申世峰, 李劭, 吴凡松, 等. 工业园区综合性废水中难降解有机物高标准深度处理系统: CN211255496U[P]. 2020-08-14.
- [21] ARTHINGTON A H, PUSEY B J. Flow restoration and protection in Australian rivers[J]. *Review Research and Applications*, 2003, 19(5-6): 377-395.
- [22] MARINA A, DEREK B, KRISTINA H, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 345-361.
- [23] 董伟, 蒋仲安, 苏德, 等. 长江上游水源涵养区界定及生态安全影响因素分析[J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(2): 139-144.
- [24] OSWALD M, ANDREW H, PETER C, et al. Directing urban development to the right places: Assessing the impact of urban development on water quality in an estuarine environment[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 62-77.
- [25] VEENA S, KAREN C S, RUTH E, et al. The impact of urbanization on water vulnerability: A coupled human-environment system approach for Chennai, India[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(1): 229-239.
- [26] 徐香勤, 蔡文倩, 雷坤, 等. 天津市河流生态完整性评价[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2309-2317.
- [27] 卢瑛莹, 楼乔奇, 刘柏辰. 基于“三线一单”的排污许可精细化管理设想[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(10): 1325-1328.
- [28] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1338-1344.
- [29] 秦剑. 水环境危机下北京市水资源供需平衡系统动力学仿真研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(3): 671-676.
- [30] 谭淑妃. 几种富营养化水体生态修复技术的比较[J]. *中国水运*, 2016, 16(7): 113-116.
- [31] 陈守煜, 王国利, 朱文彬, 等. 大连市水资源、环境与经济协调可持续发展研究[J]. *水科学进展*, 2001(4): 504-508.
- [32] 杜湘红. 水资源环境与社会经济系统耦合建模和仿真测度—基于洞庭湖流域的研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(8): 151-155.
- [33] 范文华, 王静, 扈仕娥, 等. 山东黄河水资源及水环境与沿黄经济发展关系[J]. *水资源与水工程学报*, 2004(4): 70-73.
- [34] 魏琳. 工业难降解有机污染物的电化学氧化处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [35] BRIDGEMAN J, JEFFERSON B, et al. Computational fluid dynamics modelling of flocculation in water treatment: A review[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2009, 3(2): 220-241.
- [36] 蒋文新. 强化活性炭吸附技术深度处理焦化废水的可行性研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(4): 265-270.
- [37] AI S, WANG B, LI X, et al. Comparison of mechanical vapor recompression technology for solution regeneration in heat-source tower heat pumps[J]. *Build Serv Eng Res Technol*, 2019, 40(3): 360-378.
- [38] YANG D, YIN Y, WANG Z, et al. Multi-effect evaporation coupled with MVR heat pump thermal integration distillation for separating salt containing methanol wastewater[J]. *Energy Power Engineering*, 2017, 9(12): 772-785.
- [39] GUR-REZNIK S, KATZ I, DOSORETZ CG, et al. Removal of dissolved organic matter by granular-activated carbon adsorption as a pretreatment to reverse osmosis of membrane bioreactor effluents[J].

- [Water Research](#), 2008, 42(6/7): 1595-1605.
- [40] 张小璇, 任源, 韦潮海, 等. 焦化废水生物处理尾水中残余有机污染物的活性炭吸附及其机理[J]. [环境科学学报](#), 2007, 27(7): 1113-1120.
- [41] 武超. MVR技术处理高盐废水应用进展[J]. [化学工程与装备](#), 2020, 277(2): 207-208.
- [42] 天津市环保局, 天津市市场和质量技术监督委员会. 天津市城镇污水处理厂污染物排放标准: DB 12/599-2015[S].
- [43] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. [给水排水](#), 2010, 36(11): 125-128.
- [44] 江苏省环境保护厅, 江苏省质量技术监督局. 太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值: DB 32/1072-2017[S].
- [45] 车承丹. 臭氧工艺在市政污水和工业废水深度处理中的研究与应用[J]. [净水技术](#), 2018, 37(4): 53-59.
- [46] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 内回流混合液溶解氧对工艺脱氮影响及其工程控制措施[J]. [给水排水](#), 2015, 51(9): 134-136.
- [47] 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(11): 81-84.
- [48] 冯钰润. 螺旋式旋流分离器结构设计及数值模拟研究[D]. 陕西: 西安石油大学, 2020.
- [49] L B. The application of focal species knowledge to landscape design in agricultural lands using the ecological neighbourhood as a template[J]. [Landscape and urban planning](#), 2002, 60: 185-210.
- [50] 左晓俊, 傅大放, 李贺, 等. 降雨特性对路面初期径流污染沉降去除的影响[J]. [中国环境科学](#), 2010, 30(1): 30-36.
- [51] 李坤, 徐军, 云干, 等. 复合耐盐微生物菌剂强化MBBR工艺处理高盐废水[J]. [环境工程学报](#), 2015, 9(6): 2829-2834.
- [52] 金云霄. 智能化控制SBBR处理城市污水脱氮除磷性能和微生物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [53] 胡望舒, 王思思, 李迪华, 等. 基于焦点物种的北京市生物保护安全格局规划[J]. [生态学报](#), 2010, 30(16): 4266-4276.
- [54] 张姚, 谢汉宾, 曾伟斌, 等. 崇明东滩人工湿地春季水鸟群落结构及其生境分析[J]. [动物学杂志](#), 2014, 49(4): 490-504.
- [55] GE Z. Seasonal change and habitat selection of shorebird community at the South Yangtze River Mouth and North Hangzhou Bay[J]. [Acta Ecologica Sinica](#), 2006, 26(1): 40-47.
- [56] Z H, V L, B E, et al. The keystone role of anostracans and copepods in European soda pans during the spring migration of waterbirds[J]. [Freshwater Biology](#), 2013, 58(2): 430-440.
- [57] 葛振鸣, 周晓, 施文斌, 等. 九段沙湿地鸻形目鸟类迁徙季节环境容量[J]. [生态学报](#), 2007, 27(1): 90-96.
- [58] 廖兵, 魏康霞. 基于5G、IoT、AI与天地一体化大数据的鄱阳湖生态环境监控预警体系及业务化运行技术框架研究[J]. [环境生态学](#), 2019, 1(7): 23-31.
- [59] 王旭, 王钊越, 潘艺蓉, 等. 人工智能在21世纪水与环境领域应用的问题及对策[J]. [中国科学院院刊](#), 2020, 35(9): 1163-1176.
- [60] 刘萍. 基于物联网的农村区域水环境智能监测及预测方法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [61] 宋凯. 面向环境保护的智慧物联网关及平台设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [62] 冯鹏程. 基于信息系统的军交运输保障决策理论与方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [63] 余亮华. 城市水源地污染应急处置技术筛选与评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [64] 聂长鑫. 地表水突发污染应急处置决策支持系统构建与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

(责任编辑: 金曙光)

The main research achievements and application of the “Comprehensive Demonstration of Wastewater Pollution Control and Ecological Restoration in Tianjin Binhai Industrial Belt” Project in the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Program

SUN Yichao^{1*}, XING Yan^{1*}, SUN Jing¹, LIU Dongfang², GUO Xingfang³, ZOU Feng⁴, LIU Honglei¹, YAN Zhiming¹, LI Lei¹

1. Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China; 4. Tianjin Lingang Construction and Development Co., Ltd, Tianjin 300452, China

*Corresponding author, E-mail: sunyichao429@hotmail.com

Abstract In view of the contradiction between the limited water environment capacity, water ecological carrying capacity and intensive industrial discharge intensity currently faced by Tianjin coastal industrial belt, the national major science and technology special project of water pollution control and treatment "Tianjin coastal industrial belt wastewater pollution control and ecological restoration comprehensive demonstration" was deployed. Based on the project, it has carried out research work in Tianjin coastal industrial belt, such as refined management of water ecological environment, high-standard discharge of industrial parks under the mode of emission reduction-water capacity expansion-water environment security and emergency management and control of sudden water environmental risks, etc. The "zero load growth" water environment management technology system, which integrated water resources, water environment, water ecology and water security, the high-standard discharge and ecological restoration technology system, and "integrated water environmental risk control system of "investigation-control-discipline", have been constructed. The technology system developed by this project has been applied in Tianjin coastal industrial belt, realizing the effective connection of core management technologies such as spatial control of water ecological environment, refined management of water quality objectives and sewage permit management based on differentiated regional total amount in coastal industrial belt. For the first time in China, it has systematically solved the strictest quasi class IV discharge standard of the wastewater treatment plant in the coastal industrial zone. The cooperative construction mode of multi-functional constructed wetland in coastal industrial zone was proposed for the first time. The first large environmental emergency equipment material warehouse, and risk management and control platform in China have been constructed, forming a systematic emergency technology and equipment system, filling the blank of environmental risk management and control in Tianjin Binhai Industrial Belt.

Keywords water pollution control; water ecological restoration; water environment risk management; technology system; major water program; Tianjin Binhai Industrial Belt