

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.004

青岛市李村河黑臭水体整治措施、成效及难点分析

张明辉^{1,2}, 王琳¹, 黄绪达³

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 青岛市公用事业工程建设管理中心, 山东 青岛 266100)

摘要: 近年来,青岛市作为我国经济快速发展的沿海城市典型代表,一直致力于黑臭水体治理,然而 2017 年全市仍有 25.0% 的河流为劣 V 类水质,部分水体黑臭现象严重。以青岛市李村河治理为例,通过分析水环境现状,阐述了水体黑臭的主要原因,并根据已采取的治理措施评估了整治成效。同时对整治过程中的重点和难点问题进行了分析,以期为北方沿海城市黑臭水体治理提供借鉴和参考。

关键词: 李村河; 黑臭水体; 整治措施; 整治效果

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0023-09

Analysis on the Remediation Measures, Effects and Difficulties of the Black-odor Water in Licun River of Qingdao

ZHANG Ming-hui^{1,2}, WANG Lin¹, HUANG Xu-da³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Lab of Marine Environment and Ecology <Ministry of Education>, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Public Utilities Engineering Construction Management Center, Qingdao 266100, China)

Abstract: As a typical representative of coastal cities, Qingdao has developed rapidly in recent years. Qingdao has been committed to control the black-odor water. However, 25.0% of the river's water quality in the city was still inferior standard V, and the phenomenon of black-odor in some rivers was very serious in 2017. This article takes Licun River in Qingdao as an example. The current situation of the water environment was analyzed, and the main causes of the black-odor water were explored. At the same time, based on the measures taken, the effectiveness of remediation was evaluated. We analyzed the main difficulties that occurred during the remediation process, and this work may provide a reference for the treatment of the black-odor water in northern coastal cities.

Key words: Licun River; the black-odor water; remediation measures; remediation effect

青岛市河流水系受地形、地貌及地质构造影响, 水文动态随季节变化起伏较大,为季风区雨源型,时

有季节性断流^[1],随着城市化进程的加快,城市规模持续扩大,城市基础设施建设相对滞后,导致多数河流污染严重,部分水体出现黑臭现象^[2]。这不仅限制了城市的发展,也严重影响居民生活。青岛市通过启动综合整治系列工程,实现了黑臭水体全部摘帽。以青岛市李村河流域黑臭水体治理为研究对象,从原因分析、整治措施、重点难点等方面进行讨论,总结整治成效,为其他黑臭河道治理提供经验借鉴。

1 李村河流域黑臭水体的分布及原因分析

李村河流域由李村河、张村河、大村河、水清沟河等10条主要支流组成,是青岛市区最大的河流系统,水系总长约50 km,其中干流长度约17 km,流域汇水面积为137 km²,跨越李沧区、崂山区和市北区,作为主要的泄洪通道,担负有防洪排涝、景观环境的重要职能^[3]。随着经济的快速发展,大量生活污水和工业废水直排入河。2016年以来入海口断面水质长期超标,其中氨氮月均值最高超标达6.9倍,依据年均值评价,该断面2016年、2017年均属劣V类水体。在住房和城乡建设部、生态环境部2016年2月公布的全国城市黑臭水体清单中,李村河流域存在三条,分别是李村河中游(青银高速-君峰路)轻度黑臭(3 km)、水清沟河(开封路-唐河路)轻度黑臭(0.85 km)、李村河下游(四流中路)上游500 m-四流中路)轻度黑臭(0.5 km)。随着经济的快速发展,大量生活污水和工业废水直排入河。2016年以来入海口断面水质长期超标,其中氨氮月均值最高超标达6.9倍,依据年均值评价,该断面2016年、2017年均属劣V类水体。在住房和城乡建设部、生态环境部2016年2月公布的全国城市黑臭水体清单中,李村河流域存在三条,分别是李村河中游(青银高速-君峰路)轻度黑臭(3 km)、水清沟河(开封路-唐河路)轻度黑臭(0.85 km)、李村河下游(四流中路)上游500 m-四流中路)轻度黑臭(0.5 km)。



图1 李村河流域黑臭水体分布

Fig. 1 Distribution of the black-odor water in the Licun River basin

李村河作为青岛市区最大的水系,其黑臭原因具有一定的典型性和代表性,具体如下:

① 陆岸排污超标、收集能力不足。城市化进程加快,城乡结合部等区域市政基础设施建设尚未配套,该区域人口密集,沿河多违建,污水无法纳管而直排河道,水量难控制,水质严重超标;老工业区

转型升级缓慢,工业废水处理成本高、达标难,处理水超标排放;污水产量激增,污水处理厂容纳量有限,产消矛盾日益显现。

② 雨污管道不完善、雨季消纳能力不足。由于排水系统不完善、建筑设计标准的变更、维管不到位以及违法乱接等原因,导致雨污混接、雨季管网输送能力不足,引起污水冒溢和污水处理厂进水浓度过低等问题;泵站无截流设施、管道老化等问题,在防汛排空时加剧水质恶化。

③ 水动力不足、淤积严重。水文动态随季节变化起伏大,水资源补给不充分,季节性断流显著;底泥淤积,内源污染物释放,加之污染水体的进入,溶解氧浓度降低^[4],水质进一步恶化。

④ 河道自然生态破坏,自我恢复能力差。由于历史政策、技术原因,部分河段河底硬化,对河道自然生态造成较为严重的破坏,现状生态恢复困难,难以短时间恢复河道自净能力^[5]。

2 李村河黑臭水体整治

李村河整治最早始于20世纪90年代,主要针对行洪安全和景观进行治理,自2015年“水十条”颁布后,开始侧重对黑臭水体的治理。2017年前,河道的治理形式主要为分段治理,即行政区域治理,效果难维持,偶有反复情况,水质不稳定。自2018年始,设置专门部门进行全流域统筹治理。

2.1 分段整治时期

2.1.1 “水十条”颁布前分段整治措施

具体整治区域如图2所示,整治范围主要针对李村河、张村河两条主河道,所采取措施见表1。

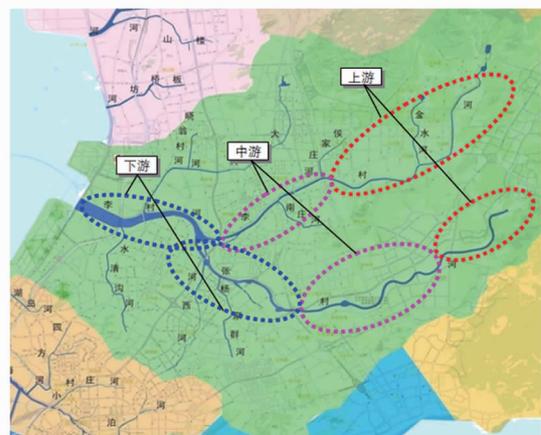


图2 李村河、张村河分段治理区域

Fig. 2 Treatment area of different locations of Licun River and Zhangcun River

表 1 “水十条”颁布前分段治理措施

Tab.1 Subsection control measures before the promulgation of Water Pollution Control Action Plan

项 目	李村河	张村河	主要支流
河道整治	上游 (青银高速-毕家水库)2009年、2010年综合整治,在满足行洪的基础上打造景观河道	(峪乔水库-枯桃村)未进行系统整治,仅九水东路两侧河道砌筑护岸约1.5 km	河西河蚌埠路上游1.7 km覆盖为暗渠,2009年综合整治长沙路至张村河段2 km河道(护岸砌筑、拦蓄水、道路、截污、桥梁、景观等);杨家群河2008年综合整治黑龙江路下游960 m河道(护岸砌筑、拦蓄水、道路、截污、桥梁、景观等),黑龙江路上游940 m河道进行了简单的防洪砌筑
	中游 (重庆路-青银高速)20世纪90年代清淤、河底铺砌、砌筑护岸等工程	(枯桃村-海尔路桥)2002年综合整治(防洪工程、截污工程、道路工程、桥梁工程、绿化工程等),2014年清淤、护岸	
	下游 (入海口-重庆路)2006年进行胜利桥至重庆路段清淤、左侧护岸砌筑工程	(海尔路桥-李村河)2002年—2003年进行综合整治(防洪工程、截污工程、道路工程、绿化美化工程等),该河段基本能满足50年一遇防洪标准,但桥墩众多、局部淤积,部分河段存在防洪隐患,2006年建设雨水渠约5.6 km	
污水厂建设	李村河污水厂建设:1998年一期设计规模 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;2008年二期设计规模 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;2010年出水提标一级A升级改造;2015年三期设计规模 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,至此处理规模达 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$		

2.1.2 “水十条”颁布后分段整治措施

河道综合整治范围:李村河下游君峰路至入海口段,长5.6 km;张村河下游海尔路大桥接线工程

口段,长5.6 km;张村河下游海尔路大桥接线工程

起始端至李村河段,长4.8 km。采取的措施见表2。

表 2 “水十条”颁布后分段治理措施

Tab.2 Subsection control measures after the promulgation of Water Pollution Control Action Plan

项 目	措施	李村河	张村河
防洪工程	满足行洪的前提下,筑坝蓄水,形成连续、宽窄变化的不同水面形式(大水面、湿地、跌水等)的水景空间;修复或改造硬质河岸	新建景观刚性坝4道、橡胶坝2道、跌水挡墙3道,以进行低水位蓄水;入海口-挡潮闸段清淤 $14.4 \times 10^4 \text{ m}^3$;采用多自然型生态护岸	结合跌水设计,新建刚性坝9道、橡胶坝1道、跌水挡墙3道;采用多自然型生态护岸
挡潮闸工程	挡潮闸蓄水,增加河道蓄水量,提高水资源的利用率,回水至胜利桥下游橡胶坝作为景观和生态用水	采用液压直立式平板钢闸门,蓄水水位标高1.8 m,回水长度1 720 m	无
水质保障工程	流域截污、临时截污、控制面源污染,建设雨水渠、雨水调蓄池,补水	改造污水干管220 m,临时截污6处,安装暗渠口防倒灌拍门2处,建设雨水调蓄池1座、雨水管道1 350 m、拦蓄冲洗系统2道、再生水管线6 600 m	改造污水干管520 m,临时截污19处,安装暗渠口防倒灌拍门11处,建设雨水管道240 m、拦蓄冲洗系统2道、再生水管线4 940 m

经长期、间断性分段整治,河道景观和行洪安全取得阶段性成果,但仍无法保证水质稳定达标。在住房和城乡建设部、生态环境部2016年2月公布的黑臭水体清单中,李村河流域仍有三段河道为黑臭水体。

2.2 全流域整治

为了彻底消除黑臭问题,实现整治目标,在总结历史治理经验的基础上,政府转变思路,设置专门部门,以流域为整体对建成区的河道进行了全面系统的排查,追本溯源,全面开展河道流域整治工程,整治后河道水质和生态环境得到了较大改善,黑臭现象消除。

2.2.1 治理路线

根据河道水质情况、水利工程现状和现有污染源分析结果,编制“一河一策”整治方案,通过截污

纳管、污水处理厂提标扩容改造、雨污分流改造、混接错接改造、河道疏浚和生态修复^[6]等措施,开展黑臭水体整治,以期最终达到“流畅、水清、岸绿、景美、宜居”的效果。黑臭水体治理路线见图3。

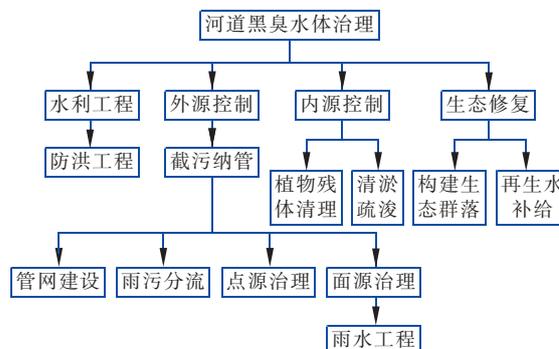


图 3 黑臭水体整治路线

Fig.3 Treatment route of the black-odor water

2.2.2 已实施的整治措施

总结出“两提、两清、两补、两分、两体系”十大整治内容,即污水处理能力和出水水质提升,河道淤泥及点源清理,生态补水和绿化补植,城中村和支流暗渠雨污分流,建立管理体系和智能化水质监测体系。从根本上削减入河污染物总量,从技术上提升出水标准,从工程上促进生态恢复,从制度上强化长效保持。具体措施如下:

① 提升污水处理能力和出水水质

完成张村河水质净化厂(设计规模 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、出水水质达地表V类水标准)、世园会净化水厂[设计规模 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、再生水水质达到《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)、《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)标准]配套泵站及管网建设,形成李村河流域污水处理设施布局上下联动的治污模式,改善张村河、李村河流域水环境质量。推进李村河污水厂四期扩建及提标改造: $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的一级A尾水提标至地表IV类水,扩建 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,项目建成后可以有效提高李村河流域污水处理能力。目前,李村河流域设有3座污水处理设施,分级布置于李村河流域上、中、下游。

② 清理河道淤泥、清除点源排污

对李村河、张村河主河道及支流、暗渠进行清淤和沿线垃圾清理,清理垃圾淤泥超过 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$,大大降低了内源污染。其中:市北区段,黑龙江南路—胜利桥段累计清淤 $3.1 \times 10^4 \text{ m}^3$;李沧区段,李村河下游胜利桥至挡潮闸段、中水段、青银路至京口路暗渠段、曲哥庄段累计清淤 $21 \times 10^4 \text{ m}^3$,大村河金水路以北、暗河(渠)、中游累计清淤 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$;崂山区段,李村河胜利桥以西、张村河黑龙江路—海尔路东、董家下庄漫水桥段、牟家社区、沙子口街道、北宅街道累计清淤 $39.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

强化点源排查,对流域沿线排水口进行全面排查,对有污水汇入和临时截污措施的,进行彻底整治,接入市政管网,保证无污水排入河道。市北区段点源主要集中在水清沟河支流,德安路暗渠附近整治190多处污水源;李沧区段整治李村河、大村河污染点源61处,取消临时截污26处,截污晓翁村河暗渠排水口72处,敷设污水管道1330m并接入沿线污水管网;崂山区段整治张村河污染点源61处,取消临时截污39处,清理、取缔、关停整改106家“散

乱污”企业,确保清水入河、污水纳管。

③ 城中村及支流暗渠雨污分流

加强沿岸村庄雨污分流改造,完善区域排水管网,根据现状将污水接入市政管网或建设调蓄池和分散式污水处理模块,对污水进行有效调蓄处理,彻底解决雨污混流问题。市北区段对13个社区进行改造,对于现状条件难整改社区,建立蓄水池收集城中村污水,再利用水泵将污水抽入污水管道,雨水从边沟自然流入李村河;李沧区段改造4个社区,铺设管道7045m;崂山区段改造23个社区,累计铺设雨污水主管288.83km,建成9处污水处理模块,砌筑污水检查井1743座,化粪池改造1932座。

核算流域管网规模,对存在问题及容量不足的排水管网进行改造。修复河道检查井,排查和疏通维护流域内两岸主干管,保障管线正常运行。翻建重淤堵管道300m,管段清淤拿砂 124 m^3 。加强李村河下游调蓄池泵站及“河中渠”运行管理,截流“河中渠”污水接入口14处,强化与李村河污水厂运行联动,错峰将初期雨水和旱流污水打入污水处理厂,消除“河中渠”旱季排污。

④ 河道生态修复和生态补水

加快河道生态修复、增植补绿,建设潜流湿地,种植水生植物,恢复河道自净功能^[7]。市北区段水生植物累计种植水生鸢尾 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、千屈菜 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、黄菖蒲 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,回填种植土 $5.95 \times 10^4 \text{ m}^2$,种植紫荆130棵、石楠180棵,胜利桥—木栈道之间建成两处浮岛(水生鸢尾 382 m^2 、千屈菜 435 m^2);李沧区段李村河胜利桥西种植菖蒲 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、黑麦草 $9 \times 10^4 \text{ m}^2$,子沟南侧种植芦苇 6000 m^2 ,同时结合海绵改造,对大村河沿岸进行海绵绿化改造,设置绿化带植草沟1500m、雨水花园20余处,绿地改造总面积达 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^2$;崂山区段张村河黑龙江路至海尔路东500m段,种植菖蒲、红蓼、水葱、灯芯草、美人蕉、狼尾草、粉黛乱子草、水生鸢尾^[8]等水生植物约 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$,黑龙江路至海尔路东200m段,绿化景观工程栽植乔木670株、灌木2050株、地被1100 m^2 、草坪8600 m^2 。

推进生态补水工程建设。铺设补水调蓄管道9.3km,建设舞阳路补水点($5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、三角地补水点($15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)进行补水。实施李村河污水厂排水口改造,建设配套再生水管道及泵站,将李村河污水处理厂尾水由现状向胶州湾排放改为向胜利

桥以上河段补水,世园会净化水厂的再生水补给,也在一定程度上强化了李村河上游补水能力。

⑤ 建立管理责任体系和智能化水质监测体系
建立李村河流域管理责任体系和李村河流域河道管理养护(含保洁)考核制度,对李村河流域李村河、张村河、水清沟河等长约70 km的10余条河道以社区为单元进行分段,落实责任主体,网格化、精细化管理,共设置94位河段长,负责河段日常巡查、问题处置及宣传引导等工作,合理设置巡河员、保洁员,实行分段包干,在河道沿岸规定位置设置标识牌,列明责任人和联系方式。建立排水许可联审机制、污水点源调查协调调度机制和流域内涉水工业企业清单,定期开展违法排污执法行动(每月不少于2次)。

推动智能化水质监测体系建设^[9],在河道分界点、支流入河口、主要排水口等位置设置水质监测点,筹建水质自动监测站。在水质监测方面,布设河道补水监测点8处、河道断面水质监测点9处及视频监控设施9套;在水量监测方面,布设在线雨量计2台、固定流量计35台和移动式流量计15台。

3 李村河黑臭水体治理成效

整治工程完成后,在连续三个月的跟踪监测中,各指标月均值除张村河海尔路桥10月总磷略微超过地表水V类标准外,其余指标浓度均远低于地表水V类指标限值,部分河段已达IV类水标准,水体整体质量显著提高,流域治理初见成效。

取样点沿流域自上游至下游监测结果如表3所示。

表3 取样监测结果

Tab.3 Water quality test results

mg · L⁻¹

项 目		张村河海尔路桥	张村河黑龙江路桥	张村河阎家山桥	李村河重庆路桥 (断流,到君峰路桥取样)	张村河胜利桥
10月	COD	16.00	16.80	19.80	29.80	25.00
	氨氮	0.55	0.28	0.64	1.00	0.43
	TP	0.44	0.22	0.21	0.29	0.16
	DO	8.50	7.70	8.50	9.20	8.13
11月	COD	13.00	13.30	15.00	18.80	17.80
	氨氮	1.23	0.24	0.34	0.38	0.33
	TP	0.16	0.10	0.11	0.12	0.14
	DO	8.40	9.90	10.30	10.10	9.30
12月	COD	16.00	17.00	20.00	22.00	22.00
	氨氮	0.40	0.54	1.27	1.03	1.50
	TP	0.16	0.16	0.24	0.19	0.19
	DO	7.10	7.60	8.10	8.50	8.70

4 北方黑臭水体整治难点分析

北方黑臭水体主要整治难点为自然水量不足和管网冒溢问题,自然水量不足导致污染物堆积、河道断流、生态不稳定,管网冒溢既影响污水厂的处理能力,又加剧水体黑臭程度。

4.1 管网冒溢问题分析

4.1.1 污水冒溢基本情况

李村河流域内比较典型的污水冒溢点主要有2处,分别为水清沟河河口接入南岸主干管处及大村河河口接入北侧主干管处。

① 水清沟河冒溢点

水清沟河冒溢点位于水清沟河(流域汇水范围317 hm²)入李村河河口处,污水通过水清沟河河道内现状DN800管道检查井冒溢。

② 大村河冒溢点

大村河冒溢点位于大村河(流域汇水范围1390 hm²)暗河出口处,污水从暗河截流口冒出,并溢流至河道内,或者从北岸截污主干管溢流口冒溢至河道内。

从冒溢点的观测情况看,污水冒溢量存在明显的规律,在不降雨期间,夏、秋季的冒溢量大于冬、春两季,冒溢时间集中在用水高峰期,张村河水水质净化厂投产运行后,冒溢量减少;在降雨期间,全天均出现冒溢现象,且在降雨停止后,冒溢还会持续2~3 d。

4.1.2 冒溢原因分析

① 流域污水量预测与管网设计能力分析

根据《青岛市排水专业规划(修编)》(2016—

2020年)中李村河流域污水量预测值,预测水清沟河流域内2020年污水量约 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,2030年污水量约 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,李村河南岸现状污水量约 $10.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,近期污水量为 $8.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远期污水量为 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (不含张村河上游南岸污水量);预测大村河流域内2020年污水量约 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,2030年污水量约 $3.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,李村河北岸现状污水量约 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,近期污水量为 $18.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远期污水量为 $22.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

水清沟河截污主干管管径为DN800,按照坡度为0.1%计算,最大过流能力约 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远大于预测污水量。李村河南岸下游主干管管径DN1500,坡度0.11%,过流能力 $18.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,满足南岸预测污水量,下游污水管道过流能力满足污水排放需求。大村河下游截污主干管管径为DN1000,按照坡度0.15%计算,最大过流能力约 $7.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远大于预测污水量。李村河北岸下游截污主干管管径为DN2000,按照坡度0.11%计算,最大过流能力约 $39.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远大于北岸预测污水量。

综上,水清沟河、大村河本段及下游李村河南、北岸污水主干管管道设计能力充足,不是管道冒溢的原因。

② 污水处理厂运行数据分析

搜集李村河污水处理厂2016年2月1日—2018年2月28日两年的污水处理量数据,发现污水处理厂进水量从2016年2月—2017年8月持续增加,峰值进水量约达 $33 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水量超过处理规模,而后进水量逐渐减少,并稳定在 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右。

李村河污水处理厂长期处于高负荷运行状态,为限制进水量,污水处理厂进水井在用水高峰期高水位运行,造成管网水位高。根据李村河污水处理厂进水井运行数据,高峰期水位标高为2.3~2.7m(黄海高程),而水清沟河河口检查井井顶最低标高为2.55m(黄海高程),低于污水处理厂进水井水位,致使李村河南北岸截污主干管高水位运行,导致水清沟河等截污管道内的污水无法进入主干管,并使截污主干管内污水倒流进入水清沟河截污管道,在低点处溢流进入李村河,造成河道污染。

③ “净水”入管网情况分析

根据污水厂进水量数据分析,发现雨季进水量

猛增,说明污水管道中有大量雨水进入。对李村河流域内自上游至下游各个断面取样检测COD,结果如表4所示。

表4 李村河流域内干管各断面COD浓度

Tab.4 COD concentration in each section of the main pipe in the Licun River basin $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

区位	测量点	COD
沿河管道	牟家社区段张村河北岸截污干管	188
	北龙口社区段张村河北岸截污干管	121
泵站	唐河路泵站	757
	郑州路泵站	766
污水处理厂	李村河污水处理厂进水井	663

根据表4数据,唐河路泵站和郑州路泵站内污水COD较接近,约760mg/L,代表了李村河流域生活污水COD,相比之下,上游沿河污水管内COD平均值约150mg/L,比上述两个泵站降低了约80%,说明此部分生活污水被稀释了约5倍。末端污水处理厂进水COD为663mg/L,该值与泵站浓度相比略低,但值得注意的是,污水处理厂进水中混入了部分垃圾渗滤液,一般垃圾渗滤液的COD为2000~62000mg/L,由于缺少混入量及浓度等资料,无法得知加入渗滤液前的具体浓度,但可以预测进水中COD含量肯定更低。

上述分析说明,现状污水管网中混入了大量雨水、河水或地下水等,这些“净水”进入污水管道,增大管道运行负荷,超出污水厂处理能力时引发污水管道冒溢,说明雨污混流是造成水清沟河、大村河冒溢的最主要原因。

此外,李村河流域范围较大,管网长度较长,水系较多,许多污水主干管沿河道(护岸、河底)布置,宜发生破损。且李村河流域排水系统内无化粪池,污水固体含量较高,管道上游坡度大,下游坡度小,受末端水位顶托影响,管道流速降低,易发生淤积缩小管道断面,降低管道排水能力。经现场巡检李村河两岸截污主干管道,发现检查井内水位较高,甚至全部淹没管道顶部,管道内污水呈现压力流,井内可见明显的浮渣等固体废弃物,检查井底部存在淤积情况。因此,主干管网缺乏养护管理也是导致管道冒溢的原因之一。

4.1.3 解决方案

彻底实施雨污分流改造是解决污水冒溢问题的关键。

① 取消临时截污措施

前期,为尽快实现河道截污目标,同时受诸多因素影响,李村河流域相当一部分污染源采取临时截污措施整治。目前来看,临时截污措施虽达到了短期截污效果,但时常发生破损、堵塞、冒溢等问题,同时还会造成大量截流雨水及清水进入管网、厂站,导致管网水位过高、厂站处理负荷增大等问题。近年来,随着河道综合整治及区域开发建设,李村河主干流及支流排水系统得到极大完善,原有临时截污措施的弊端逐渐显现。所以通过源头治理,实现雨污分流,取消临时截污措施势在必行。

② 实施雨污分流改造

李村河流域排水系统为雨污分流制,应按照《青岛市排水专业规划》等要求,加快建设李村河流域污水管道系统,彻底实现雨污分流;加强点源治理,杜绝非法排污;对不符合要求的历史遗留问题,进行彻底解决。

③ 实行厂网联动

优化污水处理厂运行参数,在排水高峰期提高污水处理厂的进水能力,在污水处理厂内进行削峰调配,减轻对上游管道的顶托作用。

④ 加大管网养护管理力度

修建养护通道,加大李村河流域内管网养护力度,特别是李村河中下游主干管道的养护管理工作,定期进行疏通养护,确保管道排水顺畅。

4.2 自然水量不足分析

4.2.1 水源分析

常用的河道生态补水水源有雨水径流、上游来水、水库蓄水、区域调水、自来水、再生水等。由于李村河为季节性河道,上游缺少稳定、足量的径流,没有大型水库,因此无法依靠上游来水和水库蓄水对河道进行生态补水^[10]。雨水径流补水仅在雨季有可行性,但需要解决雨水收集、调蓄、水质净化等一系列问题,目前还没有形成发展规模,补水成本高。青岛市水资源并不充裕,依靠区域调水和采用自来水进行补水更不现实。而污水再生水方面,李村河流域现有李村河污水厂($25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、世园会再生水净化厂($0.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、张村河水质净化厂($4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),综合当前实际考虑,污水再生水水量稳定可靠,经进一步净化处理后可作为河道生态补水的水源。由于污水处理厂的当前布设和水体黑臭现状,因此主要考虑下游附近补水。

4.2.2 河道内生态需水量计算

① 国内外河道内生态需水量的主要计算方法

目前,计算河道内生态需水量的方法众多,由于不同河道所处区域、自身特点千差万别,还未形成相应的规范或标准。国内外河道内生态需水量计算主要分为水文学方法、水力学方法、栖息地法及综合法,具体见表5。

表5 国内外河道内生态需水量计算方法

Tab.5 Calculation methods of ecological water demand in rivers at home and abroad

计算方法	原理	优缺点
水文学方法	根据流量的历史资料而非现场测量数据来推导河流流量推荐值,以确定保护河流流量权所需的最小流量标准,有 Tennant 法、7Q10 法和 Texas 法	计算简单,容易操作,对数据的要求不高,但河流实际情况过于简化,未直接考虑生物参数及其相互影响,同时受气候、人为污染等因素影响,不能完全反映生态需水实际情况,适用于优先度不高的河段,或粗略检验其他方法
水力学方法	根据河道水力参数(如宽度、深度、流速和湿周等)确定所需流量,水力参数可实测获得,也可采用曼宁公式计算获得,有湿周法和 R2 - CROSS 法等	只需简单的现场测量,不需详细的物种、生境关系数据,数据易得,但体现不出季节变化因素,能为其他方法提供水力学依据,可与其他方法结合使用
栖息地法	需研究水文系列的特定水力条件及相关鱼类栖息地参数,如 IFIM 法	将生物资料与河流流量相结合,更有说服力。但分析重点是目标物种而非整个河流生态系统,因此输出结果也非整个河流管理计划所要求的流量推荐值。生物信息较难定量化,使用受限
综合法	集中于流量变化对河流生态与环境的影响分析,需长年观测,不同流量的界定非常关键,整个过程需水生生态学家和水利工程师等多学科团体的参与,如 BBM 法	较复杂,使用较困难

② 李村河河道内生态需水量的计算

基于李村河现状,非汛期几近干涸、径流量极少的特点,参照类似工程经验,选择 R2 - CROSS 法计算河道内生态需水量,并适当考虑生物栖息等因素。

R2 - CROSS 法认为河流流量的主要生态功能是维持河流栖息地。采用河流宽度、水深、流速及湿周等指标来评估河流栖息地的保护水平,从而确定河流目标流量。R2 - CROSS 法以曼宁公式为基础,

根据一个河流断面的实测资料确定相关参数,并将其代表整条河流。相关概念及参数的选取如下:

a. 生态流速(使河道内生态系统保持其基本功能的水流流速)。根据目前国内关于流速与水华现象的关系研究成果,河道水流流速宜大于 0.2 m/s ,以有效防止水体富营养化;为利于河内鱼类等水生生物栖息,需要水体保持一定流速,一般可控制在 0.3 m/s ;根据相关工程类比,北京温榆河(河道水力坡度 $0.000\ 187$)最小生态流量下的生态流速约 0.15 m/s ,海河流域最小生态流量下的生态流速在 $0.24\sim 0.34\text{ m/s}$ 。因此,综合上述因素,李村河下游河道纵坡 0.1% 左右,最小生态流量下的生态流速可按照 0.2 m/s 控制。

b. 生态水深(使河道生态系统保持其基本生态功能的最低水深)。李村河下游现状河内小河槽深度为 $0.5\sim 1\text{ m}$,为满足水体内水生动、植物的生长活动需求,生态水深可取 0.3 m 。

c. 河道蒸发、下渗。李村河流域内最大月平均日蒸发量为 5.6 mm/d ,河底渗透系数为 0.003 m/d 。经计算,李村河下游蒸发、下渗量最大约 $5\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 。

非汛期条件下,李村河下游小河槽宽度平均约 30 m ,按照底坡 0.1% 、糙率 0.04 ,采用曼宁公式(均匀流)进行计算,结果表明,河道流量在 $3\text{ m}^3/\text{s}$ ($26\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)时,可基本满足河道生态补水各参数需求。

4.2.3 解决方案

① 再生水补给

基于流域内污水厂布局及污水处理基本情况,河道上游世园会再生水净化厂、张村河水水质净化厂,考虑沿程蒸发下渗 $0.25\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,则汇入下游 $4.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。加上本次李村河污水厂向上游补水总规模为 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,目前基本能够满足生态需水要求。

根据李村河污水处理厂改造提标及四期扩建工程情况,生态补水与四期工程结合相对较为合适,但考虑李村河总体水环境治理的紧迫性,提早实现了向河道内补水。后期,随着生态补水规划与措施的完善,应对补水点进行进一步合理优化。

② 加快海绵城市建设

采用渗、滞、蓄、净、用、排等措施,充分利用降雨资源,构建以李村河为骨架的生态水网体系,建设海

绵系统,开发河流海绵节点。将海绵工程、城区规划和河流治理有机结合,维持区域自然生态本底,构建生态网络,整合水域空间,利用低影响开发技术措施,加强对雨水径流的净化、消纳,减少地表径流,补充河道流量。

5 结语

通过长期的系列综合整治,李村河水体已消除黑臭,取得阶段性整治成果。与此同时青岛市建成区内的黑臭水体在综合整治中已实现全部消除,水环境质量得到极大改善。通过对管网冒溢和自然水量不足等重点难点问题分析,可为当前阶段的黑臭水体整治提供借鉴。

参考文献:

- [1] 杨惠敬. 青岛市城区防洪治涝关键问题及其对策研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
YANG Huijing. Key Issue and Countermeasure Study on Flood Prevention and Waterlogging Harnessing in Urban Area of Qingdao [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [2] 孙义峰. 李村河流域水污染原因及变化趋势分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
SUN Yifeng. The Water Pollution Causes and Trend Analysis of Licun River Basin [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese).
- [3] 肖晓梅,王列. 城市河道景观地域性设计研究——以青岛市李村河上游改造为例[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版),2016,18(4):481-486.
XIAO Xiaomei, WANG Lie. On the urban river landscape design in a regional perspective—taking the upper reaches of the Licun River situated in Qingdao City for example [J]. Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition), 2016, 18(4): 481-486 (in Chinese).
- [4] 徐祖信,张辰,李怀正. 我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]. 给水排水,2018,44(10):1-5,39.
XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Classification and systematic treatment of black odor problem in urban rivers in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 1-5, 39 (in Chinese).
- [5] 沙昊雷,章黎笋,陈金媛. 常州市白荡浜黑臭水体生态治理与景观修复[J]. 中国给水排水,2012,28(14):74-78.
SHA Haolei, ZHANG Lisun, CHEN Jinyuan. Ecological

- treatment and landscape restoration of malodorous water in Changzhou Baidangbang [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(14): 74 - 78 (in Chinese).
- [6] 郝永刚. 北方季节性河渠黑臭水体治理探析[J]. *山西建筑*, 2019, 45(10): 167 - 168.
HAO Yonggang. Inquiry on black and odorous water body treatment of seasonal channels in the north of China [J]. *Shanxi Architecture*, 2019, 45(10): 167 - 168 (in Chinese).
- [7] 靳俊伟, 毕生兰, 蔡岚, 等. 重庆市新华水库流域黑臭水体综合整治[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(2): 107 - 111.
JIN Junwei, BI Shenglan, CAI Lan, *et al.* Case study on the comprehensive treatment of cross-regional black and odorous water in Chongqing Xinhua Reservoir basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(2): 107 - 111 (in Chinese).
- [8] 路金霞, 柏杨巍, 傲德姆, 等. 上海市黑臭水体整治思路、措施及典型案例[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(3): 541 - 549.
LU Jinxia, BAI Yangwei, AO Demu, *et al.* Analysis of regulation thoughts, measures and typical case for the black-stinking water body in Shanghai City, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(3): 541 - 549 (in Chinese).
- [9] 谢飞, 吴俊锋. 城市黑臭河流成因及治理技术研究[J]. *污染防治技术*, 2016, 29(1): 1 - 3, 15.
XIE Fei, WU Junfeng. Causes of malodorous black rivers in cities and the study on treatment technologies [J]. *Pollution Control Technology*, 2016, 29(1): 1 - 3, 15 (in Chinese).
- [10] 徐玉良, 张剑刚, 蔡聪, 等. 昆山市凌家浜黑臭水体生物治理与生态修复[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(12): 76 - 81.
XU Yuliang, ZHANG Jiangan, CAI Cong, *et al.* Biological treatment and ecological restoration of malodorous water in Kunshan Lingjiabang [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(12): 76 - 81 (in Chinese).

作者简介:张明辉(1991 -),女,河北唐山人,博士研究生,主要从事水资源利用与水污染控制方面的研究。

E-mail:shalimarzhang@foxmail.com

收稿日期:2019 - 09 - 19

修回日期:2019 - 11 - 04

(编辑:丁彩娟)

(上接第22页)

- in Windhoek: a critical review of the design philosophy of new Goreangab drinking water reclamation plant [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2013, 13(2): 214 - 226.
- [25] STEINLE-DARLING E. Total water solutions—the many faces of DPR in Texas [J]. *Journal American Water Works Association*, 2015, 107(3): 16 - 20.
- [26] ROCCARO P. Treatment processes for municipal wastewater reclamation: the challenges of emerging contaminants and direct potable reuse [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 2: 46 - 54.
- [27] STEINLE-DARLING E, SUTHERLAND J, SALVESON A. Sampled direct potable reuse water shows promising results [J]. *Opflow*, 2016, 42(2): 20 - 22.
- [28] World Health Organization. Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-water [M]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [29] HERMAN J G, SCRUGGS C E, THOMSON B M. The costs of direct and indirect potable water reuse in a medium-sized arid inland community [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, 19: 239 - 247.

作者简介:陈梓豪(1996 -),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生在读,主要研究方向为再生水安全利用理论与技术研究、城市节水理论与技术。

E-mail:15600608226@163.com

收稿日期:2020 - 12 - 13

修回日期:2020 - 12 - 23

(编辑:丁彩娟)