

十堰市掇河流域综合治理及工程实践

陈萍^{1*}, 徐欢欢¹, 陈小刚¹, 赵振业^{1,2}

¹深圳市源清环境技术服务有限公司, 广东 深圳

²深港产学研基地, 广东 深圳

收稿日期: 2023年5月1日; 录用日期: 2023年5月31日; 发布日期: 2023年6月9日

摘要

十堰市是南水北调中线工程的核心水源区。掇河作为十堰市五河之一, 其水环境质量的好坏, 对调水水质安全有着重要影响。在综合治理前, 掇河水质长期处于劣V类。掇河流域综合治理措施包括人工快渗(Constructed Rapid Infiltration, CRI)工艺、人工湿地技术、河道生态修复技术等。综合治理工程实施后, 自2012年以来连续三年的水质监测结果表明, 重点污染指标化学需氧量、氨氮、总磷等下降明显, 河流水质明显改善, 总体上达到阶段水质治理目标。掇河流域综合治理成效显著, 可为其它地区流域治理提供参考和借鉴。

关键词

掇河流域, 水质, 综合治理, 人工快渗, 生态修复

Watershed Management and Engineering Practice of Jiang River Basin in Shiyan, Hubei Province

Ping Chen^{1*}, Huanhuan Xu¹, Xiaogang Chen¹, Zhenye Zhao^{1,2}

¹Shenzhen Yuanqing Environmental Technology Service Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²PKU-HKUST Shenzhen-Hongkong Institution, Shenzhen Guangdong

Received: May 1st, 2023; accepted: May 31st, 2023; published: Jun. 9th, 2023

Abstract

Jiang River plays a vital role in the Central Route of South-to-North Water Diversion Project be-

*通讯作者。

cause of its ecological environment and location advantage. Its river water has been classified as worse than Grade V according to Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002) in China before the integrated watershed management project, which was regarded unsuitable for any use. Integrated management techniques include the constructed rapid infiltration (CRI) system, constructed wetland, and river ecological restoration techniques. After the implementation of the project, the key water quality parameters (COD, NH₃-N, and TP) of the Danjiangkou Reservoir inflow have significantly decreased for three consecutive years since 2012, and overall achieved the phased goals. The integrated watershed management and engineering practice of Jiang River Basin has accomplished a remarkable achievement, which will provide experience and demonstration for similar watersheds in other regions.

Keywords

Jiang River Basin, Water Quality, Integrated Watershed Management, Constructed Rapid Infiltration System, Ecological Restoration

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水质安全是保障南水北调中线工程发挥供水效益的前提,作为南水北调核心水源区——十堰市五河(分别为神定河、泗河、颍河、剑河、官山河)之一,颍河的生态基础和水环境质量显得尤为重要。颍河发源于张家湾区的花果街道,在黄龙镇东湾村附近汇入堵河,随堵河注入丹江口水库,为汉江右岸的二级支流。颍河总长 50.2 km,大小支流 22 条,年径流量 9700 万 m³;颍河流域面积 326 km²,涉及 34 个行政村,总人口 15 万人。近年来,颍河水质污染严重,常年为劣 V 类,呈“重度污染”状态[1] [2] [3]。为确保“到 2014 年南水北调中线工程通水前,颍河水质实现不黑不臭;到 2015 年,水体 COD、氨氮力争达到 IV 类;到 2020 年,水质稳定达到 III 类”的治理目标,我方在颍河流域首次提出“综合规划、重点突出、减存控增、标本兼治”的总体原则和“前端截污治本、末端治污达标”的总体思路,制定治理方案并实施了一系列综合治理工程措施,对改善流域水生态环境质量,保障南水北调中线工程水质安全,确保“一泓清水永续北上”具有十分重要的意义。

目前,常用的水污染治理技术包括物理法(如底泥疏浚、人工增氧等)、化学法(如化学除藻、絮凝沉淀等)和生物-生态法(如植物净化、生物膜等)等。其中,一些低成本技术如人工快渗系统(Constructed Rapid Infiltration, CRI) [4],人工湿地[5]和生态修复技术[6]等在单一的水污染治理项目(如城镇污水处理、尾水提标等)中取得了良好效果。但流域污染治理是一项复杂的系统工程,采用单一技术的治理效果并不乐观,且容易出现系统性不强、排水设施与城市建设未能有效衔接等问题[7]。目前在十堰市颍河流域缺乏相应的流域综合治理研究报告,本研究依托丹江口库区江河湖泊生态环境保护专项资金,将人工快渗、人工湿地和生态修复等治理技术进行系统集成,并应用于颍河流域综合治理工程,取得良好的治理成效,以期为全国各流域水生态环境保护和综合治理提供参考。

2. 流域污染成因分析

根据 2005~2012 年历年监测数据显示,颍河入堵河口断面水质除 2009 年为 V 类外,其他各年度均

劣于国家地表水 V 类标准, 主要污染指标为 COD、氨氮和总磷等, 其污染分担率分别为 21.1%、15.3%、42.8% 和 20.8% [1] [8]。颍河流域的水污染主要来自生活源, 约占污染总量的 62.0%, 工业源次之, 占 36.7%, 农村源仅占 1.3%。

颍河流域水体污染原因主要有以下几个方面: ① 管网不完善, 污水收集处理率低。截至 2012 年, 仅干流建设了污水收集管网, 所有支流内废水均未接管直排入河, 且污水管网以混流制为主。城市生活污水收集率仅为 60.0%, 污水管网内清污分流率为 38.8%, 混流率 61.2%, 严重影响污水处理厂处理效率; ② 污水处理设施标准低, 尾水污染贡献量大。由于颍河河道的基流较小(1~3 m³/s), 西部污水处理厂尾水量占入河废水量的 86%, 对下游水体 COD 和氨氮污染的贡献达 50%、55%; ③ 农村基础设施落后, 面源污染严重。流域内未做农村连片综合整治的农村, 环保基础设施建设严重滞后, 厕所多为旱厕, 畜禽养殖规模小环境差, 且存在生活废水直接排放、垃圾随意堆放等问题, 容易污染地下水, 造成面源污染; ④ 河道内源污染严重, 生态失衡。河道污水管网截流系统不健全, 以及城市大规模建设致使天然河道生态系统被破坏。枯水期河道常流量较小, 有毒有害物质容易积累在河床底泥中, 成为二次污染源, 对下游水质造成很大影响。

3. 流域治理工程实践

3.1. 排污口整治工程

整治针对颍河流域大西沟、鲍花沟、财神沟、阳家沟、柏林沟、张家沟、方山沟以及颍河干流等 8 条人口比较密集, 污染较严重, 流量较大的支沟, 各支沟沿岸排污口污水均未接管网直接排放入支沟内, 经支沟汇入干流, 污染颍河水质。纳入本次排污口清污分流的支沟有 8 条共 98 个排污口。

排污口整治遵循以下原则: ① 入河排污口附近没有市政污水管网时, 在排放口设化粪池、隔油池处理等小型污水处理设施, 处理后排入河道; ② 入河排污口附近有市政污水管网时, 收集污水进入现污水管道; ③ 入河排污口为雨污合流小河道时, 通过设截流井或沿小河道敷设污水管道收集污水; ④ 入河排污口为雨污合流管时, 通过设截流井收集污水; ⑤ 入河排污口为污水管时, 通过整合排污管接入城市污水管网。

3.2. 污水管网建设工程

2014 年, 结合入河排污口整治, 沿支沟铺设截污干管, 收集入河排污口污水。2015 年, 为解决部分近年发展的居民小区未覆盖污水干管网, 生活污水直排入河问题, 在颍河流域新建主干管网。具体建设信息见表 1。

Table 1. Information of sewage pipe network construction project

表 1. 主干污水管网建设工程信息

建设年份	建设里程 (km)	总收集水量 (t/a)	增加污水收集量 (t/a)	COD 削减量 (t/a)	氨氮削减 量(t/a)
2014 年	95.3	26670	4060	384	34.1
2015 年	36.7	27150	480	58	7.1

2014 年建设截污干管 95.3 km, 检查井 2383 个。工程实施后, 可多收集生活污水约 4060 t/a, 总收水量约 26,670 t/a, 污水收集率提高到 93%, 混流率从 61.18% 降到 23.62%。结合管理措施, 可间接削减 COD 384 t/a, 氨氮 34.1 t/a。2015 年新建主干管网 36.7 km。工程实施后, 可多收集生活污水约 480 t/a, 总收水量约 27,150 t/a, 污水收集率提高到 97%, 混流率从 23.62% 降到 20.21%。结合管理措施, 可间接

削减 COD 58 t/a, 氨氮 7.1 t/a。为提高污水收集率和分流率, 在建设截污干管和污水收集干管的同时, 同步配套建设 200 km 支管网。

3.3. 污水处理设施建设工程

3.3.1. 西部污水处理厂深度处理工程

丹江口库区加坝蓄水后, 西部污水处理厂排水口距入库断面不足 2 km, 河流缺乏足够的水质自净空间, 需对其尾水进行深度处理。该项目位于黄龙镇斤坪村三里沟, 采用“高密度澄清池 + 人工快渗”工艺, 处理能力为 4 万 t/d, 经深度处理后出水水质可达到地表水 V 类标准。对污水处理厂的达标尾水, 可利用河滩地、坑塘、洼地布置人工湿地进行深度处理[9], 该工程与黄龙生态湿地相连, 尾水经湿地净化后可达地表水 III 类标准。工程实施后, 可增加削减 COD 365 t/a, 氨氮 109.5 t/a。

3.3.2. 西部垃圾处理场渗滤液处理升级改造工程

根据国家垃圾处理场渗滤液污染物最新排放标准要求, 对西部垃圾处理场渗滤液处理工程进行提标升级改造, 处理规模由 100 t/d 扩至 150 t/d, 出水执行国家《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB16889—2008) 表 3 标准。工程直接新增削减 COD 30 t/a, 氨氮 8 t/a。

3.4. 河道综合整治工程

颍河流域主要开展了 5 个河道综合整治工程, 分别是颍河花果段生态治理工程、颍河黄龙段生态治理工程、颍河西城开发区草店示范段治理工程、西沟河环境综合整治工程和黄龙人工湿地生态修复工程。由于颍河流域河道水质较差, 生态环境较为脆弱, 在河道综合整治时采用了运用生态修复手段对河道进行生态修复性重建的总体构思, 使得河道两侧能同时满足行洪排涝、生态修复和活动游憩休闲功能。黄龙人工湿地生态修复工程是颍河流域河道综合整治工程的典型案例, 该工程结合了河道治理技术及人工湿地技术, 在颍河入库前 7 km 河道内实施包括污泥清除、基底改造、调蓄浅坝、跌水复氧、生态护岸、植物恢复等措施在内的河道内源污染治理及生态修复工程, 打造兼具水质净化、生态修复和环保科普功能为一体的生态湿地。

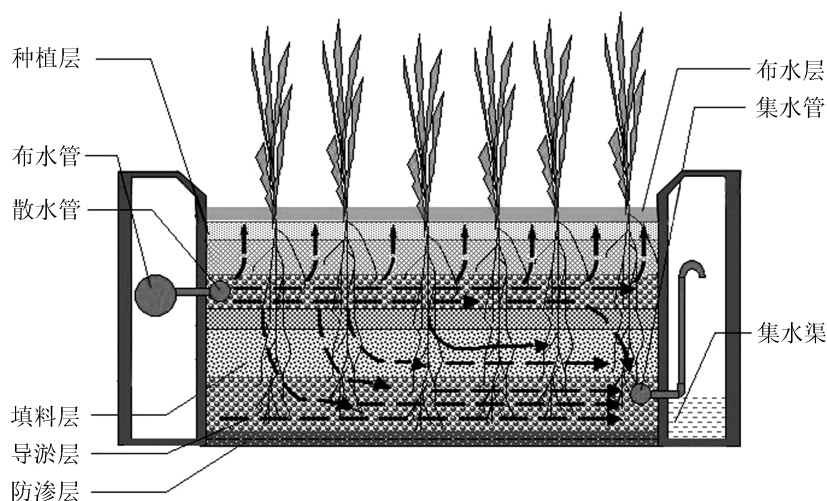
该湿地结合了高效复合型潜流人工湿地系统与表流人工湿地系统, 可日处理西部污水处理厂尾水 8000 t, 新增 COD、NH₃-N 年削减量分别为 116.8 t/a、20.44 t/a, 使出水达到地表水 III 类标准。湿地污染处理效果见表 2。

Table 2. Tail water treatment performance of Huanglong ecological wetland

表 2. 黄龙生态湿地污染处理效果

项目	CODCr	BOD5	NH ₃ -N	TP
西部污水厂尾水(mg/L)	10.9~19.3	2.2~4.0	0.25~1.2	0.14~0.25
生态湿地处理区去除率	10%	10%	20%	20%
工艺出水(mg/L)	9.8~17.3	2~3.6	0.2~0.96	0.11~0.2
《地表水环境质量标准》 (GB3838-2002) III 类标准 (mg/L)	≤20	≤4	≤1.0	≤0.2

潜流人工湿地工程总占地为 2 hm²。每个湿地单元占地面积 600 m², 长宽比为 30 m:20 m。湿地由防渗膜、填料层、湿地植物、集配水系统及导膜管构成。湿地剖面结构见图 1。



复合流人工湿地剖面示意图

Figure 1. The cross-section of integrated vertical flow constructed wetland

图 1. 复合流人工湿地剖面图

潜流湿地种植驯化后的具有吸污纳污能力的芦苇、茭白、香蒲作为潜流人工湿地植物，种植密度 $16 \text{ 株}/\text{m}^2$ ，株距 250 mm 。冬季收割后，覆盖在潜流湿地表面，第二年春天运走，用作造纸材料。冬季运行时，潜流湿地低水位运行，湿地表层将收割后的植物覆盖地表，起到保温作用。黄龙人工生态湿地后段天然湿地特征明显，采用表流人工湿地系统。潜流湿地处理后的尾水通过重力流进入表流人工湿地。表流人工湿地总面积约 1 hm^2 ，该段天然湿地特征明显，充分利用了现有的地形和地貌特征，不同水深区域种植适宜的水生植物，形成生态景观。表流与潜流结合处设置生态护岸，斜坡种植植被，使湿地与城市环境结合。该工程通过“集中预处理(西部污水处理厂) + 湿地”相结合的处理思路，可以更好地结合景观设计与周边的景观环境和谐的生态环境系统，符合周边土地利用以居住和旅游为主的功能定位，突出生态、环保、休憩理念，实现环保与旅游业发展相结合；同时，湿地具有科普教育、休闲娱乐等功能，可也为市民提供一个体验湿地美景的休憩场所，从而为改生态修复工程增添了突出的社会环境效益。

3.5. 农村分散面源污染治理工程

2014~2015 年，对颍河流域内 34 个行政村(社区)全部实施农村面源污染治理，内容包括污水收集处理、垃圾收集转运及种植业、养殖业的面源污染治理等，减少农村面源污染排放。工程所在地地处丘陵地区，地形复杂，人口居住分散，污水的集中收集困难。因此，工程区内不适宜采用占地面积大的处理工艺，选用污水处理工艺应适合单户家庭或联户的生活污水处理；同时考虑到农村地区经济水平不高，因此应选择运行成本低，维护简单，占地少，技术较成熟的基建。根据工艺的分析比较以及当地实际情况，根据面源污染的排放特点和处理要求，本着推荐工艺基建投资省、运行费用低、维护要求低等原则，一般处理量在 15 户以内采用人工湿地，庭院式污水处理系统[10] [11]；16~180 户之间的采用一体化人工快渗装置[12]、AOBR 工艺[13]；180 户以上采用土建人工快渗工艺，当地紧张时采用 AOBR 工艺。

4. 流域治理与修复技术应用

4.1. 人工快渗工艺

人工快渗系统主要由预处理单元、人工快渗系统及后处理单元构成，通常采用淹水和落干相交替的

工作方式,利用土壤含水层对污水进行综合处理,通过截留、吸附和生物降解的协同作用使污染物得以去除[14]。Wang 等人[15]使用 CRI 处理高速公路收费站收集的废水,发现 COD、悬浮固体、氨氮和总磷的平均去除率在 90%~92%,相较普通 A/O 处理技术,CRI 耗能更少,成本更低,在农村地区管理也更为方便。Kang 等[16]对工艺进行改造后(如添加海绵铁)发现可以促进磷的吸附。高密度澄清池是混合凝聚、加速絮凝、沉淀分离 3 个功能的集成[17]。作为人工快渗池预处理单元,该池主要除去水中的颗粒物,减少人工快渗系统入水的污染物浓度,防止人工快渗系统发生堵塞[18]。

4.2. 人工湿地系统

黄龙生态湿地由复合型潜流湿地和表流型人工湿地组成。在潜流人工湿地中,垂直潜流湿地有很强的硝化能力,而水平潜流湿地有很强的反硝化能力,因此复合型潜流湿地成为较为热门的选择[19][20]。复合潜流人工湿地的水体流态既有水平流也有竖向流。同时也可选用不同植物多级串联使用,采用复合垂直流人工湿地处理城镇居民生活污水的研究表明,其对 COD、BOD₅、氨氮、总磷、总悬浮固体、细菌总数和浊度的去除率均高达 80%以上[21]。表流型人工湿地的水面位于湿地填料层以上,水流呈推流式前进,植被密度一般占水面面积的 50%以上[22],其投资少,运行费用低,维护简单。在颍河流域综合治理工程中,黄龙表流生态湿地由生态滞留塘和水质稳定塘并联或串联组成。生态滞留塘水深 0.3~0.8 m,依靠塘内形成的一定容积,提高污水在塘内的水力停留时间,通过在不同的水深配置不同的植物,实现对污水中悬浮物的大部分去除、部分有机污染物、氨氮和总磷的削减。塘内种植香蒲、芦苇等挺水植物,不同植物分片进行种植,通过优化植物组合,去除河水中部分污染物。水质稳定塘水深 0.5~1.5 m,该区域生态多样性较为丰富,利用种植水生植物调整表流人工湿地的形状,使水面感官上自然弯曲,对湿地景观进行充分考虑。塘内以净化能力较强、地下根茎发达、地上枝叶生物量大的湿地植物为主,由沉水植物、挺水植物、浮水植物等共同组成的生态稳定区。植物类型包括芦苇、香蒲、茭白、荷花、睡莲、莲藕等。

4.3. 河道生态修复技术

在颍河流域河道综合整治工程中用到的主要生态修复技术包括河岸生态缓冲带、生态护岸、生态跌水堰、生态疏浚、植物修复等。

河岸生态缓冲带是介于河道和河岸之间的生态过渡带,具有明显的边缘效应,河岸生态缓冲带尽可能采用多孔渗水路面,植物种植采用本土树种,建立乔、灌、草层级结构,功能完善的河道天然植被带,发挥其生态功能[23]。

生态护岸是指恢复后的自然河岸或具有自然河岸可渗透性的人工护岸,可以充分保证河岸与河流水体之间的水分交换和调节功能,同时具有一定的抗洪强度[24]。它能有效的减少雨水对泥土护岸的冲刷,减少泥土岸堤向水体释放氮磷营养盐,削减面源污染。在一定范围内,流量越大,植物保护堤坝免受冲刷的效果越明显[23]。同时相对于混凝土堤岸,生态护岸不仅增强水体动植物交流,还能增加微生物附着载体的表面积,同时为鱼类提供栖息地[24]。护岸材料尽可能使用木桩、竹笼、卵石等天然材料[25],这些材料具有抗侵蚀性、抗冲击性,又具有渗透性。

生态疏浚是工程、环境、生态相结合的修复技术。河道底泥生态疏浚技术工艺的核心技术包括:疏挖深度设计、沉积物疏挖形式、空间定位技术、满足生态恢复需求的施工方式设计、余水处理和疏挖底泥的处置等[26]。在生态疏浚后,可以根据河道自然条件,在河道上设置鹅卵石跌水坝,形成 2 级跌水,使河道水在自然流动过程中处于富氧状态,加速河道微生物对污染物的自然降解速率。

砾石生态河床是根据河道断面地形特点,在局部顺直、稳定、坡降介于 0.5%~4%的河道断面上安放

砾石或砾石群,修复河道结构的复杂度和水力条件的多样性,从而增加平滩河道的栖息地多样性[27]。根据侯俊等[28]的研究,砂砾石生态河床河段对污染物质的截留效果明显好于自然河床河段的,对氨氮和总磷的截留率可分别达到 37% 和 25%,并且该河床中的水生动植物在敏感物种数、分类单元数和生物数量密度等方面均优于自然河床。

河床水生植物修复是在泥质基础上种植水生植物,通过水生植物的恢复带动河道生态系统的恢复。最终使河流进入良性的生态循环。在颍河治理工程中,选取了适当河段,恢复河床泥质基础并铺设生态性能良好的基土和卵石,同时,在河道较宽、水深较浅区段种植挺水及沉水植物。一般挺水植物适宜水深范围为 0~40 cm;浮叶植物适宜水深范围为 20~100 cm;漂浮植物通常对水深没有上限要求;沉水植物适宜水深范围为 30~200 cm [29]。

5. 流域治理效果分析

5.1. 水质变化效果分析

根据十堰市环境监测水质监测数据,与 2012 年相比,东湾桥断面水质从劣 V 类提升到 IV 类水质,水质提升效果明显,COD、氨氮和总磷浓度分别从 2012 年的 37.4 mg/L、5.81 mg/L 和 0.49 mg/L (2012 年均值),削减到 2016 年的 17.5 mg/L、0.51 mg/L、0.20 mg/L (2016 年前三季度均值),从 2016 年的污染物均值来看,颍河水质已达到地表水 III 类水质标准水质改善成效显著,达到阶段治理目标。

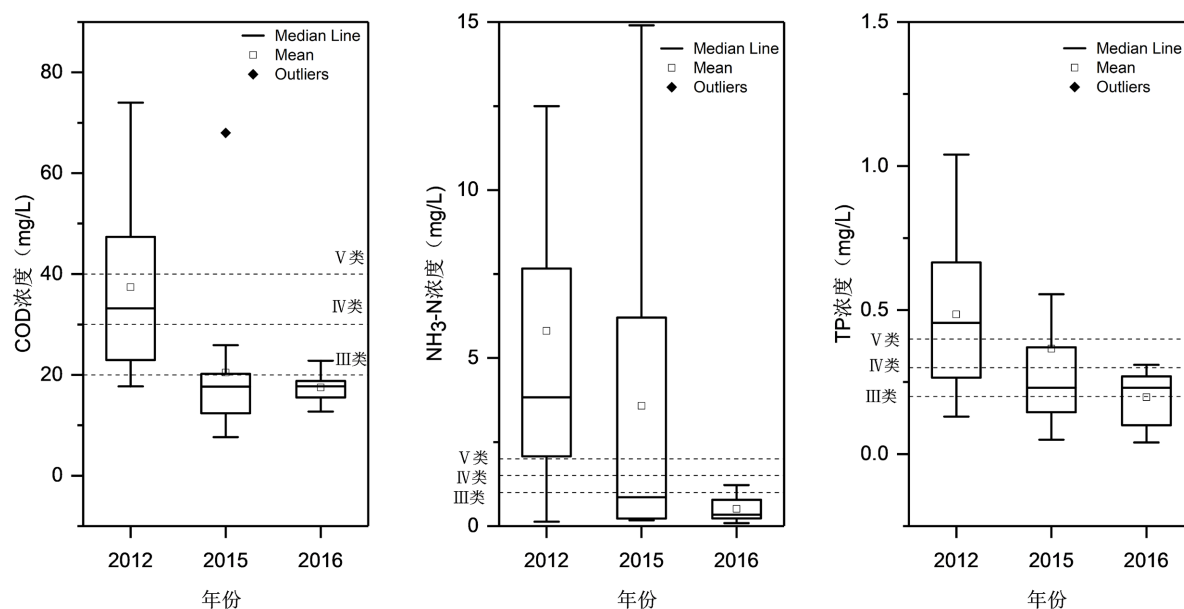


Figure 2. Comparison of COD, NH₃-N, and TP in Jiang River Basin in 2012, 2015 and 2016

图 2. 颍河流域 2012 年 2015 年与 2016 年 COD、氨氮和总磷浓度比较

从图 2 可看出各污染物的浓度均值逐年下降,在 2015 年时,COD 的均值已经接近地表水 III 类水的水平,2016 年时 COD 的均值已达到地表水 III 类水水平;相较 2012 年与 2015 年,2016 年前三季度颍河氨氮浓度已大幅度下降,氨氮均值能达到地表水 III 类水质标准,总磷浓度在部分月份能达到地表水 III 类水质标准。可见,颍河流域污染治理成效显著,但是总磷的削减仍需加强。同时,相较 2012 年与 2015 年的箱线图,2016 年箱线图的箱子的长度较小,说明在综合治理后颍河流域各指标污染物浓度波动较小,水质较为稳定。

5.2. 污染物削减效果分析

本项目实施并正常运行后, COD 实际削减量(760.73 t)远超过“十二五”目标削减量(290 t), 氨氮实际削减量(162.16 t)接近目标削减量(176 t)。总体来看, 颍河河口断面 COD 和氨氮浓度在 2016 年前三季度指标稳定在Ⅳ类标准, 其他指标未稳定达到Ⅳ类标准, 基本达到阶段治理目标。

6. 结论

颍河流域的综合治理及工程实践表明, 排污管网的建设对于污水的收集处理十分重要, 若雨污不分、清污不分将极大地降低污水厂的处理效率。在河道综合整治中, 应综合考虑行洪排涝、生态修复和活动游憩休闲功能, 合理配置工艺组合, 使治理工程达到较好的环境效益与社会效益。

基金项目

国家“十二五”重大科技专项海河项目子课题(2015ZX07203-007-005-02)。

参考文献

- [1] 王建虹. 颍河流域水质评价及保护对策[J]. 南阳师范高等专科学校学报, 2016, 36(6): 15-20.
- [2] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 丹江口水库水体氮的时空分布及入库通量[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 995-1005.
- [3] 蒲前超, 柳七一, 周延龙, 等. 丹江口库区水资源保护管理的思考[J]. 人民长江, 2016, 47(16): 10-13.
- [4] 张博, 雷志斌. 人工快渗工艺处理小城镇生活污水——以重庆大足县某镇为例[J]. 河南科学, 2012, 30(10): 1521-1524.
- [5] 张长宽, 倪其军, 杨栋, 等. 低温条件下高效复合人工湿地对尾水的净化效应[J]. 环境工程学报, 2017, (04): 2034-2040.
- [6] 邓卫东. 流域水环境综合治理技术路线浅析[J]. 城市道桥与防洪, 2016(12): 168-169, 173.
- [7] 尹炜, 辛小康, 梁建奎, 等. 基于主成分分析的丹江口水库支流水质评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 34-38.
- [8] 牛贺道. 城市河道治理关键技术问题探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2015(S01): 52-54.
- [9] 周双, 葛大兵, 黄静虹, 等. 岳阳县公田镇生活污水处理技术探讨[J]. 湖南农业科学, 2013(9): 116-120.
- [10] 刘珂. “四池净化系统”湿地基质的筛选及其污水净化效能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [11] 林明, 李建, 骆灵喜, 等. 人工快渗一体化设备在农村污水处理中的应用[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 44-47, 72.
- [12] 崔维. AOB 污水处理技术在农村生活污水处理中的应用研究[C]//农村生活污水及畜禽养殖业水污染防治技术高级研修班论文集. 北京: 北京绿色家园环境保护工程技术研究所, 2013: 150-155.
- [13] 刘家宝, 杨小毛, 王波, 等. 改进型人工快渗系统处理污染河水中试[J]. 中国给水排水, 2006, 22(13): 14-17.
- [14] Wang, D.B., Zhang, Z.Y., Li, X.M., et al. (2010) A Full-Scale Treatment of Freeway Toll-Gate Domestic Sewage Using Ecology Filter Integrated Constructed Rapid Infiltration. *Ecological Engineering*, **36**, 827-831. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.005>
- [15] Kang, A., Wang, L.X. and Zhang, B. (2015) Research on the Removal of Total Nitrogen and Total Phosphorus by Improved Constructed Rapid Infiltration System. 2nd International Conference on Green Materials and Environmental, Engineering, Phuket, 20-21 December 2015, 70-73. <https://doi.org/10.2991/gmee-15.2015.20>
- [16] 蒋富海, 安鹏. 高密度澄清池——滤布滤池在污水深度处理中的应用及控制[J]. 给水排水, 2017(4): 24-28.
- [17] 杨小毛, 赖梅东, 梅立永, 等. 人工快渗技术在我国农村地区水污染治理中的应用研究[J]. 环境工程, 2012(S2): 91-96.
- [18] Tunçsiper, B. (2009) Nitrogen Removal in a Combined Vertical and Horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetland System. *Desalination*, **247**, 466-475. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.03.003>
- [19] Platzer, C. (1999) Design Recommendations for Subsurface Flow Constructed Wetlands for Nitrification and Denitrification. *Water Science and Technology*, **40**, 257-263. <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0170>
- [20] Vymazal, J. (2010) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, **2**, 530-549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

- [21] 乐茂华, 刘军, 胡和平. 深圳市河道生态修复理念及其治理技术[J]. 中国农村水利水电, 2010(2): 25-28.
- [22] 田硕. 城市河道护岸规划设计中的生态模式[J]. 中国水利, 2006(20): 13-16.
- [23] 李婷婷, 黄津辉, 侯思琰, 等. 植物生态护岸技术的效果分析——以漳河下游陈村险工为例[J]. 南水北调与水利科技, 2013(3): 31-34, 56.
- [24] 初良, 刘丽丽, 赵丽, 等. 多种河流修复技术中试工程应用研究[J]. 环境工程, 2015(S1): 298-301.
- [25] 何衢, 陈德春, 魏文白. 生态护坡及其在城市河道整治中的应用[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 56-58.
- [26] 曹承进, 陈振楼, 王军, 等. 城市黑臭河道底泥生态疏浚技术进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(1): 32-42.
- [27] 孙飞云, 林鲁生, 董紫君, 等. 龙岗河干流综合治理工程生态修复设计与应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(8): 103-106.
- [28] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 卵砾石生态河床对河流水质净化和生态修复的效果[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6): 46-49.
- [29] 管永, 冯智, 张聪, 等. 水生植物在河道生态修复工程中应用研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(5): 149-151.