

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.019

厂村融合型小流域污染控制关键技术及工程示范

仲 冉¹, 葛秋易², 杨 凤¹, 丁克强¹

(1. 南京工程学院 环境工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 结合武进港流域厂村融合型污染特征和成因,以东洋岸河小流域为治理对象,通过源解析划分污染控制单元,确定污染负荷空间分布规律,开展以分散式污水截流与尾水处理技术、农田面源污染控制技术、滨岸植被缓冲带、底泥生态清淤和智慧管理及监控等关键技术的开发和工程应用。该技术体系在东洋岸河流域治理中取得了显著的环境和社会效益,河道水质、生态环境、居民幸福感得到明显提升,为太湖流域厂村融合型小流域污染治理,建设城镇幸福河湖提供关键技术和示范。

关键词: 厂村融合; 小流域; 污染治理; 关键技术; 工程示范

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0104-05

Key Technologies and Project Demonstration of Industrial and Agricultural Integrating Pollution Control in a Small Watershed

ZHONG Ran¹, GE Qiu-yi², YANG Feng¹, DING Ke-qiang¹

(1. School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the characteristics and causes of the industrial and agricultural integrating pollution in Wujingang watershed, the Dongyang'an River watershed was taken as the object, and the pollution control units are divided to determine the spatial distribution of pollution loads by source analysis. The key technologies such as decentralized sewage interception, tail water treatment technology, farmland non-point source pollution control technology, coastal vegetation buffer zone, ecological sediment dredging and smart management and monitoring have been carried out. This technical system has achieved significant environmental and social benefits in the control of Dongyang'an River watershed. The river water quality, the ecological environment, and the resident's happiness have been significantly improved. It can provide key technologies and demonstrations for the pollution control of small watersheds which integrate industrial and agricultural pollution in the Taihu Lake watershed to realize better rivers and lakes.

Key words: industrial and agricultural integrating; small watershed; pollution control; key technology; project demonstration

基金项目: 南京工程学院校级科研基金项目(QKJ201906)

通信作者: 丁克强 E-mail: dingkq@njit.edu.cn

随着农村经济的多元化发展,许多村镇以农业为基础,同时进行一定规模的工业生产,致使太湖武进港流域内出现大量工业厂区与农村住宅混杂的现象,逐渐形成厂村融合型的区域污染特征^[1-3]。

现选取常州武进港典型厂村融合区——洛阳镇东洋岸河小流域作为治理对象,针对流域内工业企业分散、农村生活污水直排以及农业生产活动复杂等污染情况,通过采取截污控源、河道整治、疏浚清淤、生态修复以及景观设计等一系列关键技术集成和工程措施,把控外源输入,削减内源增量,提高河网自我修复能力,形成针对厂村融合型小流域污染控制的关键技术和工程示范,为太湖流域广大厂村融合区小流域污染治理提供经验和指导。

1 研究背景

1.1 区域概况

东洋岸河属于武进港下游的一级支浜,发源于礼嘉镇建东村,流经洛阳镇友谊村、圻庄村,最终由洛阳村汇入武进港。流域内常住人口 6 101 人,主导产业为五金家电制造、塑料制品和特色林果产业。干流全长约 3.1 km,大小支流共 7 条,流域面积约 12 km²,平均水深为 1.5 m。

1.2 流域污染现状

1.2.1 自然生态现状

每年进入 4 月下旬,东洋岸河流域主流及各支浜水面漂浮少量蓝藻和浮萍,不时散发出一定的腥臭味,部分支浜水动力条件较差,水面被沿岸抛撒的

垃圾、秸秆和植物残枝大面积覆盖,逐渐成为主要的纳污场所^[4-5]。

1.2.2 农业生产现状

东洋岸河流域内以水蜜桃、葡萄、苗木、蔬菜、草莓和西瓜等大棚作物为主。截至 2017 年,洛阳镇共有耕地约 1 533 hm²,其中东洋岸河流域耕作面积约 176.6 hm²,旱地、果园、稻田、苗圃、菜地分别为 47.3、38.6、47.9、26.8、16.0 hm²。

1.2.3 工业企业现状

根据统计资料,东洋岸河流域共有各类加工企业 115 家,主要集中在机械制造、电子制造、电镀、包装、食品加工、纺织印染等行业,小型加工企业在生产环节排水、排气的过程中易对周边土壤造成放射性污染,例如重金属(Pb、Cd、Se)、PAHs(BaP、NaP)。

1.3 污染负荷计算

1.3.1 水质监测指标

东洋岸河自西向东经东洋岸闸流入武进港,选取东洋岸闸作为衡量东洋岸河流域平均水质的特征点位,现状水质检测结果表明:BOD₅ 为 4.74 mg/L, COD 为 28 mg/L, TP 为 0.285 mg/L, NH₃-N 为 2.53 mg/L, DO 为 2.07 mg/L。

1.3.2 底泥理化性质

截至 2018 年底,镇区内东洋岸河主干、支浜及附近坑塘多已完成清淤,河道清淤总长约 5 241 m,总清淤方量约 112 427 m³。本次对未清淤河段的底泥进行了检测,结果见表 1。

表 1 东洋岸河流域底泥理化指标和释放速率

Tab.1 Physical and chemical indexes and release rate of sediments in Dongyang'an River

取样位置	NH ₃ -N		TN		TP	
	底泥含量/ (mg·kg ⁻¹)	释放速率/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	底泥含量/ (mg·kg ⁻¹)	释放速率/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	底泥含量/ (mg·kg ⁻¹)	释放速率/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)
刘家头浜	174	2.3	253	2.4	1 390	0.4
木桥头浜	43	3.4	237	3.5	705	0.35
杜元湾	128	2.8	437	2.75	1 140	0.4

1.3.3 污染控制单元划分

将流域划分为 100 个控制单元,流域的东北部污染物负荷总量为 120 ~ 230 t/a,由于 5 条支浜紧邻洛阳镇中心,沿线多为学校、工厂和交通干线,面源和点源污染排放量较高。其次在流域南部的圻庄站浜负荷总量达到 65 ~ 72 t/a,因为圻庄村附近多为分散性农户和小型加工厂,造成农业面源污染占比较高,流域其余支浜的污染负荷为 5 ~ 15 t/a。

1.3.4 污染总量分析

① 农村生活污水

东洋岸河流域内友谊、洛阳、圻庄和瞿家 4 个主要行政村参照太湖地区农村生活污染排污系数,采用排污系数法对流域内生活污染负荷进行核算:

$$Q_i = P \cdot a_i \cdot h \quad (1)$$

式中: Q_i 为研究区农村生活 i 污染物的年排放量,即污染负荷, t/a; P 为评估范围内乡镇人口数

量,人; a_i 为*i*污染物的排污系数, $\text{kg}/(\text{a} \cdot \text{人})$; h 为流失率,%。

② 农业面源

东洋岸河流域用地类型中除行政区外,农业用地超过 60%,灌溉及降雨径流易携带土壤中大量氮、磷有机物入河,形成农业面源污染。农田 COD 排污系数为 $150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 $30 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, TN 为 $300 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, TP 为 $30 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,污染物入河系数取 10%^[6-7]。

③ 底泥内源

结合东洋岸河流域的清淤历史,对部分未清淤的干流河支浜底泥进行取样检测分析,结果表明, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN 和 TP 含量平均值分别为 128、1 078 和 309 mg/kg ,最终内源污染负荷总量见表 2。

表 2 东洋岸河流域内源污染负荷

Tab. 2 Endogenous pollution load in Dongyang'an River watershed

污染因子	TP	TN	$\text{NH}_3 - \text{N}$
底泥释放量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.288	2.805	2.742
污染负荷/ $(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	0.036	0.356	0.348

农村生活污水和农业面源污染是构成东洋岸河流域污染的主要来源,其中农村生活污水对 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 的贡献最高,分别为 64.01%、75.71% 和 51.79%。农业面源污染对 TP 的贡献率最高,达到 69.51%,COD 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的贡献率均低于 25%,以上数据表明流域内村镇聚集性人口日常生活污水排放未经规范化收集处理,造成大量污水汇入河道。加之农业生产活动施用的氮肥、磷肥渗入周边水体,提高了水中氮、磷浓度,形成藻类疯长和富营养化现象。相比之下,由于水产、畜禽养殖业经严格整治管控,大小支浜已相继完成清淤疏浚,后两类污染整体贡献占比较少。底泥中的 COD 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的占比分别为 8.64%、3.62%,表明虽经清淤仍存在短期内污染物淤积释放的现象^[8]。

2 工程示范

2.1 分散式污水处理设施

分散式污水处理主要针对无法截污纳管的零散偏远农户村镇,污水经设施统一处理后达标排放。采用新型气升环流 MBR 工艺(见图 1),污水经粗格栅拦截过滤较大的悬浮颗粒后,进入调节池对水质、水量的负荷进行调控,经细格栅进一步过滤分筛,保证后续 MBR 处理装置正常运行。该系统设计处理

能力为 $30 \text{ m}^3/\text{d}$,设计出水水质执行一级 A 标准。

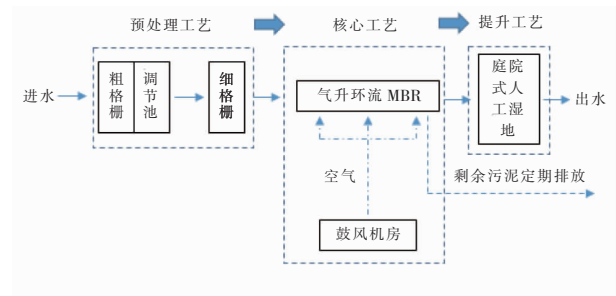


图 1 分散式污水处理系统工艺流程

Fig. 1 Flow chart of decentralized sewage treatment system

2.2 农田面源污染控制工程

① 生态拦截沟渠

渠体为 C30 预制混凝土 U 型槽,按照 2 m/节成品加工,槽体上口宽 60 cm,下口宽 43.2 cm,底部圆弧半径 22 cm,槽壁厚度为 6 cm,U 型槽座铺设 10 cm 砂石垫层,槽间勾缝采用 1:2 水泥砂浆,两侧渠顶各设置一道石笼过滤带,宽 12 cm,厚 50 mm,表面铺设鹅卵石,缝隙植草,用于过滤汇入水体。拦截滤坝间隔 50 m,坝顶距渠顶 20 cm,坝体由碎石、炉渣拌和胶结固定,渠底铺设 20 cm 素土垫层,透水坝迎水侧和背水侧坡比分别为 1:1、1:0.5,坝面内嵌 $\varnothing 100 \text{ mm}$ PVC 种植槽植草。

② 生物滞留池

生物滞留池组成部分包括进水系统、过滤层、过渡层、排水层、排水系统以及植被等。进水系统接收分散式污水处理设施和生态沟渠的出水。池体表层植被选择常绿鸢尾、千屈菜等挺水植物,栽种密度 16~25 株/ m^2 ,表层两侧坡脚处铺设 50~100 mm 卵石消能和粗过滤,下一级过滤层厚 50 cm,选用复合微生物菌剂包埋填料。中间过渡层厚 20 cm,采用 10~30 mm 砂砾石填充,防止过滤层细小颗粒进入穿孔排水管。底部排水层厚 10 cm,内设 PVC 穿孔集水管, $\varnothing 30 \sim 60 \text{ mm}$,管身开孔孔径 10 mm,开孔间隔 200 mm,各层之间铺设无纺土工布分隔反滤,净化的尾水最终排放至周边自然水体。

③ 小型庭院式组合湿地

采用厌氧塘+兼性塘+多级表面流湿地的小型庭院式组合型人工湿地工艺流程。

厌氧塘尺寸为 $15 \text{ m} \times 18 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,占地面积约 270 m^2 ,两侧坡比 1:1.5,进水口采用 $\varnothing 300 \text{ mm}$ PE 管,管顶高程低于地面 0.2~0.3 m,布水采用上进下出形式,出水口采用 $\varnothing 300 \text{ mm}$ PVC 管,置于塘底,

接至第二级兼性塘。

兼性塘尺寸 30 m × 10 m × 2 m, 占地面积约 300 m², 东西向和南北向坡比分别为 1 : 1.5、1 : 2, 进水口接厌氧塘出水, 管道埋深 0.2 ~ 0.3 m, 布水采用下进上出形式, 同时设置 Ø100 mm 排气管, 兼性塘两侧边坡栽种千屈菜、美人蕉等挺水植物, 栽种密度 10 ~ 12 株/m², 出水口接原 Ø400 mm 管涵进入第三级表面流湿地。

表面流人工湿地为梯形, 上宽 8 m, 下宽 16 m, 长 33 m, 占地约 396 m², 共分为 5 级, 其中 1 ~ 5 级设计深度分别为 0.5、0.8、1.0、1.2 和 1.5 m, 床体深度不足处采用土方回填压实。湿地设计水力坡度为 0.5%。每级床体间设置跌水坝 1 座, 坝体采用级配碎石垒筑而成, 迎水面和背水面坡比均为 1 : 0.5, 坝底铺设 100 mm 厚砂石垫层, 浇筑 150 mm 厚 C25 混凝土底板, 坝顶铺设 100 mm 厚鹅卵石, 表面嵌入 60 mm 厚汀步石, 每块间距 300 mm, 缝隙可植草。表面流人工湿地进水管为原 Ø400 mm 水泥管, 出水采用自然溢流方式, 最终汇入右侧东洋岸河支流。湿地两侧岸坡边坡坡比为 1 : 2, 栽种千屈菜、梭鱼草等挺水植物, 栽种密度 10 ~ 12 株/m², 塘面栽种睡莲、荷花等浮水植物, 栽种密度 1 ~ 2 头/m²。

2.3 生态护坡缓冲带

坡顶近路侧设置生态缓冲带, 深 0.5 ~ 0.8 m, 控制坡比 1 : (1.5 ~ 2), 坡面采用草皮护坡, 春夏季铺撒狗牙根, 秋冬季铺撒黑麦草, 坡脚为自嵌式植草砖结构, 外侧低于常水位 0.8 ~ 1 m 处设置挺水植物栽种平台, 品种以梭鱼草、美人蕉为主, 平台外侧设置密排松木桩固脚, 松木桩小头直径 150 mm, 长 6 m, 入土深度 > 4 m, 表面涂抹沥青防腐, 松木桩外侧低于常水位 1 ~ 1.5 m 处栽种沉水植物, 品种以狐尾藻、矮型苦草为主。

2.4 生态清淤疏浚工程

本次生态清淤疏浚工程平均清淤深度 1 ~ 1.2 m, 两侧清淤坡比为 1 : (1 ~ 1.5), 工艺为水力冲挖和小型挖泥船干湿结合法, 清出的淤泥经脱水干化后控制含水率为 70%。

2.5 流域智慧监测与管理系统

基于物联网技术, 构建东洋岸河流域水质实时在线监测及治理工程设备运行实时监控体系 (见图 2), 实现污染物源头、工程措施、水处理过程和水体质量实时信息的互联反馈, 关键节点水质监控频次

达小时级。

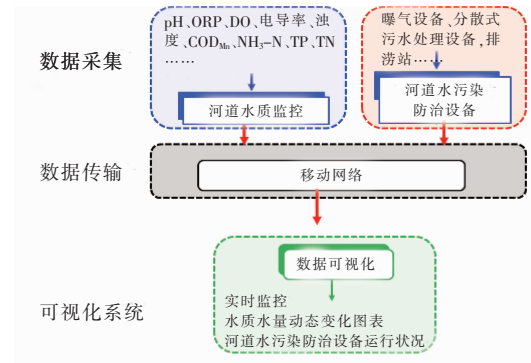


图 2 东洋岸河流域实时监控体系

Fig. 2 Real-time monitoring system for Dongyang'an River watershed

3 综合效益评估

该工程于 2019 年 8 月完工, 3 个月 after 对初始东洋岸断面水质进行取样考核, 结果显示流域水质明显提升。流域污染物削减量如表 3 所示。

表 3 流域污染物削减量估算

Tab. 3 Statistics of watershed pollutant reduction

关键技术 及工程	污染物削减量估算		
	COD	NH ₃ -N	TP
分散式污水截流与 尾水处理技术	1.8	0.25	0.47
农田面源污染控制技术	3.801	1.743	2.469
滨岸植被缓冲带	0.58	0.69	
底泥生态疏浚	6.85	0.35	0.36
合计	13.031	3.033	3.299

注: 工程实施前 COD、NH₃-N、TP 分别为 28、2.53、0.285 mg/L; 工程实施后相应指标分别为 21、1.46、0.22 mg/L。

本工程实施后, 能够改善流域范围内村镇自然生态环境, 使其成为居民休闲娱乐的理想场所。

本工程在现有流域水污染防治工程运行维护直接经济成本 (0.09 元/m³) 的基础上降低 15% ~ 20% (见表 4)。

表 4 工程经济效益费用分析

Tab. 4 Project economic benefit cost analysis

项目	子工程 1	子工程 2	备注
投资/万元	总投资: 352.53 建筑工程: 283.68	总投资: 508.94 建筑工程: 292.84	建筑工程、机电设备安装、临时工程费用
运行管理/ (万元 · a ⁻¹)	运维费用: 9.72	电费及运维 费用: 14.58	植被收割补种、 电气设备检修 维护

4 结论

厂村融合型小流域污染治理不同于普通河道整治,需结合区域污染特点,因地制宜地选择经济高效的措施。工程后期运行结果表明,各类关键技术集成运用对治理片区具有较好的效果,具有占地面积小、工艺简单高效、低成本易维护、自然和谐容错率高的优势,不仅提升了流域整体水质指标,同时改善了村镇人居环境和居民幸福感,适宜在苏南农村典型污染片区推广应用。

参考文献:

- [1] 陈亚军,何席伟,周嘉伟,等.太湖流域典型厂村融合区复合面源污染特征分析——以礼嘉镇、洛阳镇、雪堰镇为例[J].环境监控与预警,2019,11(2):1-9.
CHEN Yajun, HE Xiwei, ZHOU Jiawei, *et al.* Characteristics analysis of composite non-point source pollution in typical industrial-agricultural-integrating area in Taihu Lake basin—a case study of Lijia Town, Luoyang Town and Xueyan Town[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(2): 1-9 (in Chinese).
- [2] 康若熙,谢文理,赵文星,等.从水质变化趋势看常州市武南区域重点河流治理成效[J].中国环境科学,2019,39(10):4186-4193.
KANG Ruoxi, XIE Wenli, ZHAO Wenxing, *et al.* Spatio-temporal trends in water quality and the effectiveness of water treatment projects for Wunan District, Changzhou[J]. China Environmental Science, 2019, 39(10): 4186-4193 (in Chinese).
- [3] 蒋少杰,张宇,施昕澜.武进港2013—2018年总磷污染时空特征研究[J].资源节约与环保,2019(8):101-102.
JIANG Shaojie, ZHANG Yu, SHI Xinlan. Research on spatial and temporal characteristic of total phosphorus pollution in Wujingang River during 2013-2018[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2019(8):101-102 (in Chinese).
- [4] 胡开明,逢勇,谢飞,等.直湖港、武进港关闸对太湖竺山湖水环境影响[J].湖泊科学,2010,22(6):923-929.
HU Kaiming, PANG Yong, XIE Fei, *et al.* Effects of Zhihugang and Wujingang closing sluices on water environment of Lake Zhushan, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 923-929 (in Chinese).
- [5] 苏玉,文航,王东伟,等.太湖武进港区域浮游植物群落特征及其主要水质污染影响因子分析[J].环境科学,2011,32(7):1945-1951.
SU Yu, WEN Hang, WANG Dongwei, *et al.* Analysis on the key water quality factors to phytoplankton community in Wujingang region of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1945-1951 (in Chinese).
- [6] 於梦秋,蔡颖,刘华,等.太湖流域入湖河流土地利用类型对水质的影响——以乌溪港、武进港为例[J].农业环境科学学报,2014,33(5):1024-1032.
YU Mengqiu, CAI Ying, LIU Hua, *et al.* Impact of land use on water quality along inflow rivers in Taihu basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5): 1024-1032 (in Chinese).
- [7] 江苏省环境科学研究院.太湖流域主要入湖河流水环境综合整治规划编制技术规范[R].南京:江苏省环境科学研究院,2008.
Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science. Technical Specifications for the Preparation of Comprehensive Water Environment Improvement Planning for the Main Rivers in the Taihu Basin[R]. Nanjing: Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, 2008 (in Chinese).
- [8] 桂峰,于革,王柳柱.太湖流域上游外源氮、磷入湖通量模拟初步研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(9):1265-1274.
GUI Feng, YU Ge, WANG Liuzhu. Numerical simulation of exogenous source nutrients (nitrogen and phosphorus) loading from upstream watershed into the Taihu Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(9): 1265-1274 (in Chinese).

作者简介:仲冉(1992-),女,山东枣庄人,硕士,助教,研究方向为环境化学。

E-mail:805806410@qq.com

收稿日期:2020-08-28

修回日期:2020-09-25

(编辑:衣春敏)