

人工湿地治理东北地区典型农村面源污染工程设计

葛秋易^{1,2}, 梁冬梅³, 肖尊东³, 宋雷蕾², 赵士文¹, 吴月龙¹

(1. 南京水利科学研究院 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 吉林省环境科学研究院, 吉林 长春 130012; 3. 吉林省环境保护厅, 吉林 长春 130033)

摘要: 吉林省公主岭市南山村、猴石村面源污染治理工程采用“表面流湿地+深度处理塘+潜流湿地”多级复合型人工湿地工艺, 辅以生态底质-生态护坡-仿拟根系水岸消解-生态岛等河岸带及水力优化技术, 对污染水体、受损河道进行改善修复。实际运行结果表明, 湿地出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准, 即使在冬季对污染物的有效去除率也维持在20%以上。本工程对东北地区农村面源污染治理技术选择具有良好的借鉴作用。

关键词: 人工湿地; 东北地区; 农村面源污染

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)24-0061-05

Design of Constructed Wetland for Treatment of Typical Rural Non-point Source Pollution in Northeast China

GE Qiu-yi^{1,2}, LIANG Dong-mei³, XIAO Zun-dong³, SONG Lei-lei², ZHAO Shi-wen¹,
WU Yue-long¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing R & D Tech Group Co. Ltd., Nanjing 210019, China;
2. Jilin Province Academy of Environmental Sciences, Changchun 130012, China; 3. Environmental Protection Department of Jilin Province, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to remediate polluted water bodies and damaged river courses, the multi-stage composite artificial wetland with “surface flow wetland + deep treatment pond + subsurface flow wetland”, which was supplemented with ecological substrate - ecological slope protection - imitation root waterfront digestion - eco-island and many riparian zone and water conservancy optimization technology, was applied in the non-point source pollution project of Nanshan and Houshi Village in Gongzhuling City, Jilin Province. The actual operation results showed that the quality of the constructed wetland effluent could meet the first class A level in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). The effective removal efficiency of pollutants in winter also maintained over 20%. The project has good reference value for application of rural non-point source pollution control technology in the northeast region.

Key words: constructed wetland; northeast region; rural non-point source pollution

1 工程概况

吉林省公主岭市二十家子镇旅游度假区西北部的南山村、猴石村,年平均气温为 5.6℃,年平均降雨量为 590.8 mm,雨季为 7、8 月份,夏季降雨量占全年的 70%。冬季长达 5 个月,最低温度低至 -30℃。两个村镇常住人口为 3 500 人,日常生活污水排放量约 120 L/(户·d),农业生产废水包括农田尾水、畜禽养殖废水,农田尾水集中在每年的 6 月—10 月农耕收割时期,污水经村口西边管道排入东辽河支流南汇入二龙湖水库。

面源污染治理工程选址南山村村口断桥墩处,利用天然地形优势,建造多级降解型人工湿地与景观生态结合的水体净化工程(见图 1)。工艺流程见图 2。人工湿地占地面积约 9 464.34 m²,设计水量为 400 m³/d,水力停留时间为 3 d,依据《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010),控制进水污染物浓度(见表 1),设计去除率>20%,根据《吉林省地表水功能区》(DB 22/388—2004)水功能区划,出水水质需达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准。

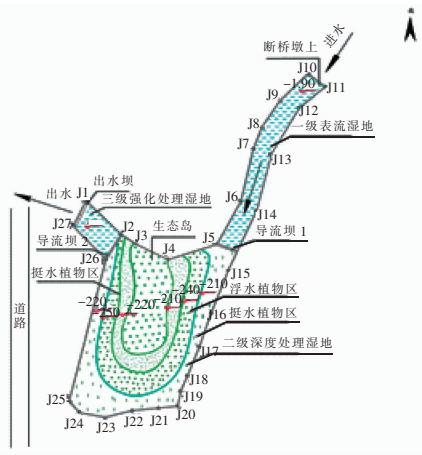


图 1 工程各单元设计分布
Fig. 1 Design distribution of engineering units

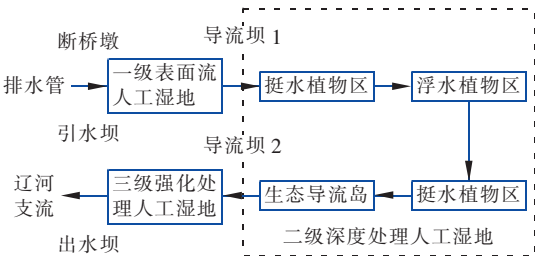


图 2 工艺流程
Fig. 2 Process flow chart

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项 目	mg · L ⁻¹				
	COD	NH ₃ - N	TP	TN	BOD ₅
进水	125	10	1	15	10
出水	60	8	1	20	20

2 关键技术

① 多级串联湿地:构建河道水系内的串联湿地系统,形成以表面流为主的多层级链状结构,依托生态型护岸,选择芦苇和香蒲等土著物种,建造集拦污除污、护林、观赏为一体的综合性生态治理工程。

② 仿拟根系水岸削减技术:河道仿拟根系水岸削减技术及多级人工湿地技术都是基于生态底质的集成技术。该技术整体防护性能高,造价低,生态效果显著,尤其适用于小型乡村河流、农村排水沟渠、湖泊水岸的防护。

③ 生态植被护坡技术:与护坡技术联合使用对污水体具有一定的净化功能,植被深根具有锚固作用,浅根加筋,降低坡体孔隙水压力,截留降雨,削弱溅蚀,有效防止水土流失。

④ 生态礁石技术:生态礁石以生态混凝土为材料制成,布置在河道或沟渠后可减缓水流速度,增加水力停留时间,抬高水位。减缓水流速度后有利于河道或沟渠内植物根系的发育,同时其自身的多孔结构,可为水生动物、两栖类动物提供栖息场所。

⑤ 复氧型水力措施优化:优化河道的水工结构,强化自然增氧过程与措施,优化河道水力工程条件,增强水体的自净降解能力。

3 工程设计^[1~4]

工程主要设计单元技术指标如表 2 所示。

表 2 各设计单元技术指标

Tab. 2 Design indicators for each unit

构筑物	规格或尺寸	控制水深/m
引水坝	2.5 m × 5.0 m × 3.0 m	1.5
1 号导流坝	17.5 m × 4.0 m × 2.5 m	1.9
一级表面流人工湿地	1 619.96 m ²	0.3 ~ 0.5
二级挺水植物区	2 870.61 m ²	0.5 ~ 1.0
二级浮水植物区	1 752.83 m ²	1.0 ~ 1.5
二级挺水植物区	1 236.81 m ²	0.5 ~ 1.0
生态导流岛	1 500.21 m ²	2.2
2 号导流坝	17.5 m × 4.0 m × 2.5 m	2.1
三级潜流式人工湿地	483.92 m ²	0.3 ~ 0.5
出水坝	4.0 m × 5.0 m × 2.5 m	1.9

实地考察后结合吉林省农村非点源污染特征,采用复合式人工湿地技术为工艺核心,污水以平稳流速经湿地内部流过,水中污染物通过植物、微生物和土壤基质的联合作用得到净化,并减轻下游接纳水体的污染负荷。考虑到夏天雨季洪水位要求,当最高水位高于设计水位时,开挖泄洪渠道,河道护岸的平面形状保证其限制在规划图纸红线范围内,尽量采用自然地势,减少挖填等破坏土壤结构,以徐缓曲折形状为主,自然生动。渠道护坡、生态导流岛、引水坝、拦截坝等边坡级别为4级,对周边环境危害程度较轻。

① 引水坝、导流坝、跌水坝、出水坝

以河岸外围尺寸、河道实际宽度为准,共设置1座引水坝、2座导流坝、2座跌水坝、1座出水坝,坝均由毛石灌浆砌筑,毛石采用MU30、M5.0水泥砂浆砌筑,长度为40 m,宽度为8 m,高度为5 m,导流坝1水深为1.9 m,导流坝2水深为2.1 m,引水坝水深为1.5 m,出水坝水深为1.9 m,砌筑验收符合《建筑地基基础工程施工质量验收规范》。

② 生态礁石

生态礁石由大中型鹅卵石与人工砌石混合组成,要求材质坚硬,表面光滑圆润,无风化剥落层或裂纹,密度 $\geq 25 \text{ kN/m}^3$,抗压强度 $\geq 60 \text{ MPa}$,鹅卵石选择两种规格(15~20、50~60 cm)。人工砌石长度 $> 30 \text{ cm}$,最小边厚度 $> 20 \text{ cm}$ 。规格小于要求的石块,可以用于塞缝,但用量不得超过该处砌体质量的10%。

③ 护脚石笼

石笼网由具备耐腐蚀、高强度、延展性的低碳外涂树脂膜钢丝编织,要求线径 $\geq 3.2 \text{ mm}$,双线胶合部分长度 $\geq 50 \text{ mm}$,绑扎料($\varnothing 2.5 \text{ mm}$),抗拉强度 $\geq 380 \text{ MPa}$ 。石笼网眼尺寸为 $1 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,且连接锚固可靠,各层之间用绑线锚固,确保装料后满足渠水冲击,用于填充的小块石粒径应大于网眼,强度指标满足设计要求。

④ 土工膜

HDPE防渗土工膜要求两布一膜,厚度为 $0.25 \sim 0.35 \text{ mm}$,质量 $\geq 300 \text{ g/m}^2$ 。主要铺设位置在进水口底层、护坡表面及底部、人工湿地底层处。铺设时要求沿轴线方向,进水口处铺设在管道下方防渗,护坡位置由先下游后上游,使膜的幅宽与渠轴线平行,坡肩自上而下至坡脚全覆盖,断头风雨坡面横

向接缝相互错开1 m以上。整个过程采用编织袋状装土覆压,卷起部分用钢管固定,防止复合土工膜滑移。

⑤ 生态护坡河岸

湿地生态护坡由拦截坝、石笼、植被构成(见图3)。河道宽度为10 m,护坡总长为17.5 m,两岸布设,现场取土,基层采用素土夯实生态石笼护脚,护坡土质选择粘土或粉质粘土,分层夯实,每层夯实厚度为300 mm,夯实密度 $> 95\%$,高差不足部分填方夯实。河道开槽后应对坡基进行处理,清除不合格土体(弹簧土、中空土、松土)、施工杂物,坑、槽、沟按实际深度填筑,填筑高度 $> 5 \text{ m}$,如触及地下水源,设置开挖排水导流沟渠。拦截坝由迎水坡面、坡顶、背水坡面构成,坡长分别为5、5和7.5 m,坡度为1:1.5,护坡表面铺设草坪,栽种黑麦草、地毯草。迎水坡面底部安置2块石笼护脚,规格为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,水深为3 m,石笼下铺设土工膜。仿拟河岸采用木桩来支撑水岸的稳定,木桩间布置高强度土工格栅,木桩总高为2.0 m,地面以上高为0.8 m,河底以下部分深为1.2 m,格栅后填充石块,厚度为0.3 m。木桩布置间距为1 m,每隔6 m设置加强桩1个,设置加强筋若干道。

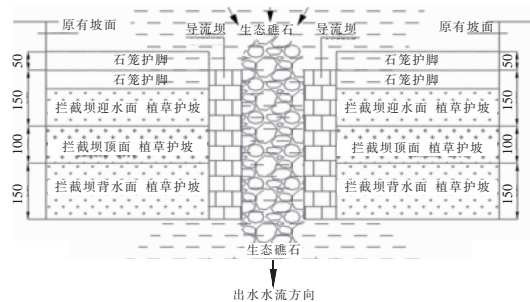


图3 生态护坡平面

Fig. 3 Ecological slope protection plane

⑥ 生态导流岛

导流岛位于二级深度处理塘中部,均为素土夯实的土质圆形人工岛,面积为 1500.21 m^2 ,高度为8 m,岛上种植松树、细叶小檗、刺柏等乔灌木,边缘种植垂柳,表面栽植草坪,当地园林部门负责后期浇灌养护。

⑦ 多级人工湿地

人工湿地采用三级复合型结构,一级表面流人工湿地位于断桥墩南侧,污水经管道排出后由引水坝引入湿地,一级湿地面积为 1619.96 m^2 ,水面控

制标高为1.9 m,种植水位为0.3~0.5 m,植物栽种芦苇、香蒲等土著物种。湿地地表常年积水,水深为15~30 cm,汛期达50~60 cm,土壤为腐殖质沼泽土,群落植物种类少,分草本层和灌木层,灌木层以蒿柳灌丛为主。草本层按高度分为两层,第一层高度为1.7~2.5 m,以芦苇为优势种,高度为1.8~2.3 m,香蒲为次优势种,高度为1.7~2.5 m。第二层的高度为0.3~1.0 m,以柳叶鬼针草为优势种,其他植物多为两栖蓼、萍蓬草等浮水伴生植物,底层填土为满足渗透系数 $\leq 10^{-8}$ m/s厚度的黏土。

表面流出水经1号导流坝引入二级深度处理塘,二级塘总面积为5 860.25 m²,分为三部分,植物按品种分片种植,污水汇入塘口后呈“U”型折流通过,这样不仅能控制水体流速,延长水力停留时间,更增加植物填料与污水接触反应时间,提高去除效率。先通过最外层挺水植物区,该区域面积为2 870.61 m²,水面控制标高为2.1 m,种植水位为0.5~1.0 m,种植密度为9株/m²,栽种芦苇、香蒲。内部的浮水植物区面积为1 752.83 m²,水面控制标高为2.4 m,种植水位为1.0~1.5 m,种植荷花、睡

莲、两栖蓼,夏季盛放的荷花、睡莲具有良好的园林观赏价值。最里层挺水植物区面积为1 236.81 m²,水面控制标高为2.1 m,种植水位为0.5~1.0 m,植物以黄菖蒲、芦苇为主,种植密度为6株/m²。

水流经生态导流岛改变方向,由2号导流坝引入三级强化处理区,强化处理区类型为潜流式人工湿地,总面积为483.92 m²,水面控制标高为2.2 m,控制水深为0.3~0.5 m。河道内部借助生态礁石壅高水位,实现侧向进水,在湿地内设置多道隔水的土工膜,实现水流在湿地内的折返,延长水力停留时间。垂直方向自下而上铺设粒径为20~35、50~60 mm,厚度为80 cm的碎石填料,填料表面分为反滤层及壤土层,壤土层移植栽种蒿柳40株,株高为0.8~1.0 m,胸径为3 cm,岸边伴以芦苇、香蒲实现多层处理,整个潜流式人工湿地四周及地面采用防渗层隔离,避免对岸后土体造成二次污染。

4 运行效果

工程于2016年7月建成,同年10月交付验收,整个人工湿地系统植物长势良好,内部水体流动稳定,2017年5月—2018年2月进、出水水质见表3。

表3 水质监测结果

Tab.3 Water quality monitoring results

项 目	夏秋季(5月—10月)			冬季(11月—2月)		
	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
COD	20.67	17.42	15.04	16.18	12.60	22.13
NH ₃ -N	6.97	3.60	48.35	6.56	4.40	32.47
TN	13.92	7.50	46.12	11.88	9.20	22.56
TP	0.35	0.13	62.86	0.30	0.24	20.00
BOD ₅	9.00	5.21	42.22	6.80	5.03	26.47

可见,人工湿地出水水质均达到了一级A标准,运行效果优良,达到工程设计要求。工程实景照片见图4。



图4 工程效果实景

Fig.4 Engineering real scene

进入10月下旬,东北地区迎来寒冷漫长的冬季,伴随着植物枯萎、水面结冰,内部微生物的活性也下降,针对冬季去除效率降低的问题,工程施工设计时在进出水处管道口包裹了泡沫保温层;施工时增加了清淤深度,保证冰封期水体在冰层以下的流动空间;秋季定期收割芦苇、香蒲秸秆并覆盖在河道两岸用于湿地床体保温。冬季监测结果表明,虽然对各类污染物的去除率较夏秋季有明显的下降,但是仍能维持在20%~35%,保证了冬季正常运行。

项目建成投入运行后,村庄周边区域生态环境趋向和谐优美,生物多样性得到有效恢复,水体生态平衡持续稳定,村民农牧业生产良性循环,同时下游旅游区水库水质达到国家水体标准,园林绿化符合

城市景观设计质量要求。

5 结论及建议

① 本工程是吉林省农村环境整治整镇(乡)推进项目,在治理农村非点源污染的基础上,同时改善区域水环境质量。综合了东北地区农村典型非点源污染的分散性高、隐蔽性强等特点,选择低成本、易建设、覆盖面广的人工湿地技术,利用废弃桥墩地势,建造多级(表面流+潜流式)组合型湿地,结合关键技术,发挥植物-填料的纳污除垢优势,强化湿地处理效率。

② 工程建造过程中几乎不铺设任何配水管、排水管,完全使用无动力处理技术,利用天然地形高差、生态礁石减缓河道内水体流速,有利于河道或沟渠内植物根系的发育,自身的多孔结构可为水生两栖类动物提供栖息场所。各级单元之间设置导流坝,二级塘内建造导流岛改变水流方向,跌水坝用于复氧,延长滞留时间,使污染物在湿地床体内部充分反应。

③ 冬季是东北地区人工湿地工程运行的短板,有条件的可以在施工阶段投入耐低温菌剂,选栽芦苇、千屈菜、石龙芮等耐寒越冬植物,将生物措施与工艺优化结合,有效提高冬季人工湿地的处理效率。

参考文献:

- [1] 刘国,何春光,王元彪,等. 人工湿地处理污水技术及其在吉林省西部应用的可行性研究[J]. 地球科学进展,2004,19(S1):206-210.
Liu Guo, He Chunguang, Wang Yuanbiao, *et al.* Review on wastewater treatment with constructed wetland and its possible application in western Jilin Province[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(S1):206-210 (in Chinese).
- [2] 熊元武,王中玉,何晨凤,等. 城郭河曹庄煤矿塌陷坑

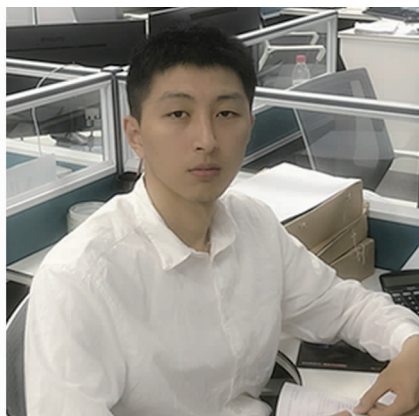
人工湿地工程设计[J]. 中国给水排水,2016,32(8):63-67.

Xiong Yuanwu, Wang Zhongyu, He Chenfeng, *et al.* Design of constructed wetland in Caozhuang coal mining collapse pit at Chengguo River[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(8):63-67 (in Chinese).

- [3] 黄伯平,李晓慧. 南京市江心洲农村污水分散处理技术及应用[J]. 中国给水排水,2017,33(6):102-105.
Huang Boping, Li Xiaohui. Decentralized rural domestic wastewater treatment technology in Jiangxinzhou of Nanjing City[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6):102-105 (in Chinese).

- [4] 胡凯泉,曾东,许振成,等. 潼湖地区水环境原位生态修复示范工程的运行效果[J]. 中国给水排水,2015,31(23):15-19.

Hu Kaiquan, Zeng Dong, Xu Zhencheng, *et al.* Operation effect of in-situ ecological restoration demonstration project in Tonghu Area[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23):15-19 (in Chinese).



作者简介:葛秋易(1993-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为水污染防治技术。

E-mail: ddlyt9372@163.com

收稿日期:2018-06-25

实施国家节水行动,建设节水型社会