

农田排水河道的生态修复工程设计与实际效果

杨 非¹, 王建清², 张亚平¹, 张志勇³, 宋 伟³

(1. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省常州市武进区农业局, 江苏 常州 213169; 3. 江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘 要: 镇江市上社河为农田区域排水灌溉河道, 承担着容纳农田面源污染负荷的作用。为改善区域水环境质量, 通过截污围隔装置、组合型生态浮床、生态护坡及水生植物恢复等工程技术措施对该水体进行生态修复治理。结果表明, 经过6个月的稳定运行, 水体中的氮、磷等污染物得以有效去除, 水生态系统的结构和功能得到了恢复和提升。该工程设计可为农村面源污染水环境生态修复的相关应用提供参考。

关键词: 面源污染; 生态修复; 治理思路; 水生植物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)18-0095-05

Design and Effects of Ecological Restoration Project of a Farmland Drainage River

YANG Fei¹, WANG Jian-qing², ZHANG Ya-ping¹, ZHANG Zhi-yong³, SONG Wei³

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Ecological Department of the Agricultural Bureau of Wujin District, Changzhou 213169, China; 3. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Shangshe stream in Zhenjiang is a farmland drainage and irrigation river, which is responsible for agricultural non-point source pollution load. In order to improve the water environment, ecological restoration techniques, such as the sewage interception project, combined ecological floating bed technology, ecological slope and hydrophyte restoration, were taken to treat the water. After the operation of six months, nitrogen, phosphorus and other pollutants were removed effectively from the water, the structure and function of water ecosystem was recovered and promoted, which provides a good reference for the ecological restoration projects of water environment regarding rural non-point source pollution.

Key words: non-point source pollution; ecological restoration; solving thoughts; aquatic plant

农村面源污染是我国水环境污染控制的重点和难点之一^[1]。农村面源污染具有无序排放, 污染物

量大且浓度低的特征, 在源头减量、过程阻断以及循环利用的基础上, 应进一步采用水环境的生态修复

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX < 15 > 1004); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-005)

通信作者: 张亚平 E-mail: amflora@seu.edu.cn

技术,从根本上提高水体自净能力,提升水质,恢复水生态系统的结构和功能^[2]。农田汇水区重污染水体生态修复工程技术是治理农村面源污染不可或缺的最后一环。

针对城市河道生态修复的研究^[3]较多,而对农田集水区重污染河道方面的研究较少。苗伟波等^[4]提出采用多方位生态修复技术能够因地制宜地开展水环境修复工程,实现水生态良好循环和水资源可持续发展。上社河为农田区域排水灌溉河道,承担着容纳农田面源污染负荷的作用,现采用生态修复工程技术来改善区域水环境质量,以期为农村面源污染水环境生态修复的相关研究和工程实践提供參考。

1 工程概况

上社河位于镇江市京口区姚桥镇。河段上口宽约28.2 m,枯水期水面宽约18.0 m,河道坡度平均为1:3。夏季雨季为河道丰水期,水深平均为2.0~2.5 m,其余时间多为枯水期,水深平均为1.0~1.5 m,总长1 034 m。水流方向从北向南,流速缓慢,基本上无流动。水体中季节性存在以小杂鱼为主的水生动物,透明度在10 cm上下。生态修复区域河道主要污染物为氨氮、总氮、总磷和COD,属于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)劣V类

水。本工程污染源主要是农田灌溉排水和降雨径流排水携带的污染负荷通过排水斗沟等途径进入水体。2016年7月河道水质监测结果见表1。

表1 上社河水质监测结果

Tab. 1 Monitoring results of Shangshe stream water quality

mg · L⁻¹

项目	实测浓度	标准值(V类)	现状水质
COD	84.8	≤40	劣V类
TN	3.812	≤2.0	劣V类
TP	0.682	≤0.4	劣V类
NH ₄ ⁺ - N	2.179	≤2.0	劣V类

根据工程治理现状,在外源污染可控的基础上,治理后的主要水质指标需达到地表水V类标准,实现水体生态系统自我修复能力的提高和自我净化能力的强化,最终由损伤状态向健康稳定状态转化。

2 工程设计思路

在工程开展的初期,需要进行河道上、下游排污口排查工作,沿岸共有两条较大的排水斗沟(9-3和9-6)。依据各条河流的自身现状生态特点,量身定制生态修复方案,在保留现有河道物理尺寸的基础上,优化河段物理结构,强化水质净化功能,提升其生态水平。根据外源污染负荷情况,将上社河生态修复工程治理河段分为四个功能区(见表2)。

表2 上社河水体环境功能区

Tab. 2 Water environment function zoning of Shangshe stream

功能分区	工程措施	工程效果
前置净化区	截污围隔装置	污染物的强化削减,总长50 m;针对河流的上游,利用截污围隔装置以及浮床、微孔曝气系统对入河污染物进行第一道削减
生态修复功能提升区	生态混凝土护坡	岸线生态提升区,总长136 m;对河道岸线生态进行提升,以多孔混凝土为修复载体,联合水生、湿生草灌景观植物构建岸线生态
水质强化净化区	组合生态浮床	污染物强化削减区,总长388 m;水面区域设计4道总长为108 m的生态浮床。同时,设置太阳能曝气器将大量溶解氧带入底泥和水体,促进水生生态多样化
水质稳定生态保育区	构建沉水植物群落	生态水质稳定区,总长510 m;主要考虑水生植物(沉水植物)群落的构建和设计,种植、恢复沉水植被

3 工程措施

3.1 截污围隔装置的构建

河道西侧现有排水斗沟9-3和9-6,针对这两个主要的排污口,利用截污围隔装置快速且彻底地拦截排污口污水,在河岸带形成截污导流净化槽,槽内利用景观型复合型浮岛及底层微孔曝气系统,使污水在导流过程中得到原位净化,再导入下游的污水集中净化区,进行强化净化,消除污染物,从而实现河道主要治理段的完全截污和水质提升。

软围隔导流布采用HDPE膜,厚度为2.8 mm,共计400 m。在距排污口一侧岸线5 m处,每隔3 m设置DN40镀锌钢管,导流布固定于钢管之上。在导流布与岸线之间每隔2 m放置3 m×3 m的生态浮床,浮床上部种植水生植物,下面悬挂填料,同时在浮床下部布设微孔曝气管,通过纯氧曝气,形成模拟A/O工艺。

截污围隔装置以及生态护坡设计示意如图1所示。

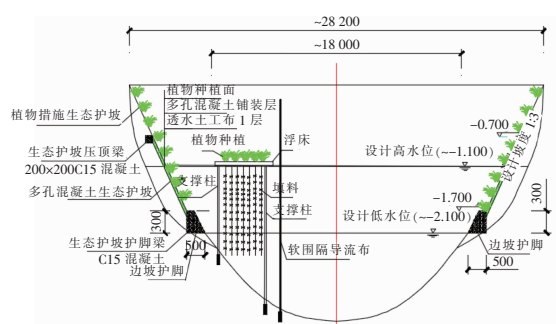


图 1 截污围隔装置及生态护坡

Fig. 1 Sewage interception and ecological slope

3.2 生态混凝土护坡

生态混凝土护坡既能够满足工程使用的要求,又能够改善坡岸的生境。多孔混凝土具有蜂窝状结构,有良好的透水性和透气性,植物能在其中生长,同时植物发达的根系能够对混凝土起到锚固和加筋作用^[5]。生态护坡在保障河流岸坡的安全与稳定的同时,又能为河流岸坡的生态修复提供有利条件,有助于去除氮、磷等污染物,从而起到保护水体生态环境的作用。采用预制构件式四球连体构建多孔混凝土护坡,可以根据需要设计不同的模具进行预制构件的制作,有利于生产的自动化和流水化,施工方便,成型后只需自然养护护坡上的植物。

生态护坡的绿化工程对护坡功能的发挥极为重要。以多孔混凝土为修复载体,坡度为 1:3,联合水生、湿生草灌景观植物构建岸线生态。护坡底部种植美人蕉、千屈菜和再力花,种植密度为 8~10 株/ m^2 ;护坡中部混合种植草本植物和灌木植物。草本植物为狗牙根和三叶草,种植密度为 3 g/ m^2 ;灌木植物为胡枝子、红叶石楠、小叶女贞,种植密度为 0.4 g/ m^2 ;护坡上部种植狗牙根和三叶草,种植密度为 3 g/ m^2 。护坡植物在种植后需要维护,及时拔草和浇水,确保植物成活率。

3.3 组合生态浮床技术

生态浮床以高分子材料为载体,人工在水面种植水生植物,通过植物的吸收、吸附、根系截留以及微生物的降解来净化水质,同时营造水上景观,易于安装维护、成本低^[6]。试验^[7]证明,组合生态浮床因水生植物的同化作用与悬挂填料上高密度富集的微生物分解作用相互协同,大大提高了浮床对氮、磷等的去除效果,同时也表明合理的生物配置能够促进浮床富营养化水体治理效能的提高。

采用组合生态浮岛技术,以水生植物单元和人

工介质填料(微生物)单元组合成生态浮床。浮床尺寸为 3 m×3 m×3 m,采用 PVC 框架,内部采用尼龙绳固定植物,下面悬挂填料。另外,在浮岛中心选种水生美人蕉、风车草、梭鱼草等挺水植物,栽植密度约 10 株/ m^2 ;浮岛周边选种空心菜、粉绿狐尾藻等,种植区域覆盖率不少于 90%。冬季(11 月中下旬)需进行植物换茬,保留多年生植物生长根系,浮岛表面全面换茬为水芹、黑麦草等冬季生长植物,保证浮床体系的整年净化能力。

3.4 水生植物群落的构建

河道两岸种养不同生活型挺水植物,通过合理空间配置,对农田排水和地表径流中污染物进行拦截阻断和强化净化。岸边滨水湿地的构建区间为设计低水位下 0.3 m 至设计高水位上 0.3 m 之间的岸线带,岸坡按 1:3 坡度整形,保留现有土质岸线状态,种植挺水植物,包括芦苇、美人蕉、茭草、千屈菜、香蒲等。

在河道末端恢复并种植沉水植被,选种景观效果佳、净化能力强、四季常绿的沉水植物群落,浅水区为刺苦草,相对深水区为红线草、小黄草、马来眼子菜等。李琳琳等^[8]得出沉水植物对河底环境适应性较强,脱氮除磷效果显著。生长状况良好的沉水植物对水体中的营养盐浓度有着明显的降低作用,会抑制“藻华”的暴发。

4 调试运行情况

4.1 运行结果分析

该工程设施于 2016 年 7 月陆续投运,经过几个月的稳定运行,在 2017 年 4 月—2017 年 10 月河道生态修复期间,对河道定点进行水质监测,取样时间为每月中旬上午 10:00—12:00 之间,现场测定理化指标,并于 24 h 内进行主要水质指标(COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的测定。根据工程设计思路,在每一功能区末端设置采样点,共 5 处。

① COD

治理前平均 COD 浓度为 84.8 mg/L;工程稳定运行期间,仅有 4#点在 7 月 COD 浓度达到 67 mg/L,可能与梅雨季节地表径流增多,农田排水携带的有机污染物负荷超过水质强化净化区生态浮床的处理能力有关;其余点位 COD 均 ≤ 40 mg/L,达到了地表水 V 类标准。有机物的去除主要与水生植物的吸收与吸附、微生物的降解有关。工程中 COD 的去除效果明显,4 月—7 月水生植物适应环境后,处于快

速生长期,从水中吸收了大量有机物,因此 COD 基本低于 30 mg/L;7 月 4#点位的 COD 超标,但在水质稳定生态保育区沉水植物群落的作用下,COD 值迅速降至 14 mg/L,这说明各功能分区之间能够有效联合,确保水质稳定。具体见图 2。

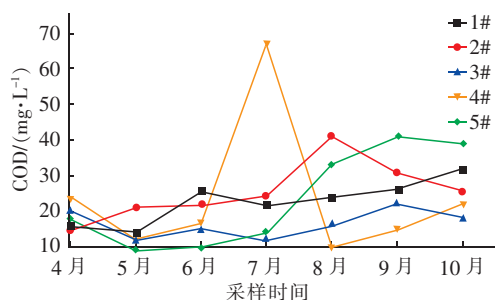


图2 水体 COD 随时间的变化

Fig.2 Change of COD from Apr. to Oct. 2017

② TP

治理前水中 TP 的平均含量为 0.682 mg/L。工程稳定运行期间,TP 含量明显下降,5 个点位在 7 月—10 月 TP 含量均 ≤ 0.4 mg/L,达到了地表水 V 类标准。磷的去除主要通过植物和微生物的吸收作用,以及吸附、络合及沉降作用。4 月—8 月大部分点位的 TP 达到 II ~ IV 类标准,主要与工程相关措施发挥良好作用有关,大量水生植物快速增长,庞大的根系给微生物提供了附着空间,同时减缓了水体流动,有效减少了水中总磷的含量;9 月和 10 月的 TP 含量较之前月份相对升高,这与进入秋季后植物生长相对缓慢有关。具体见图 3。

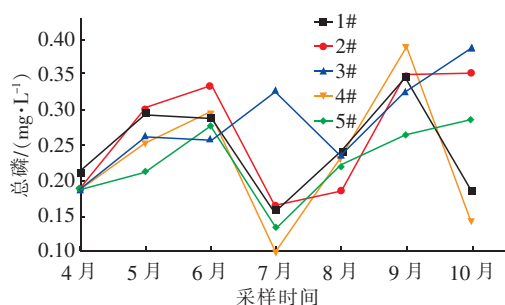


图3 水体总磷随时间的变化

Fig.3 Change of total phosphorus from Apr. to Oct. 2017

从河道 TP 的去除效果分析,河道中已经建立良好的水生动物、植物生态系统,河道水体自净能力得到恢复。

③ TN

治理前水体 TN 平均含量为 3.812 mg/L。工程稳定运行期间,除了 6 月和 7 月外,其他月份 5 个点

位的 TN 含量基本低于 2 mg/L,达到了地表水 V 类标准;9 月和 10 月河道水体平均 TN 含量达到了 IV 类水标准。6 月—7 月河道各点位 TN 值异常偏高是由于梅雨季节降雨量较多,大量污染负荷通过地表径流和排水斗沟进入水体,6 月 1#点位的 TN 含量为 11.433 mg/L,说明截污围隔装置未能快速降低污染负荷,2#点位 TN 降至 6.244 mg/L,5#点位降至 2.384 mg/L,经过整个工程措施的净化,TN 去除率为 79%,净化效果明显,保证了污染物的去除。具体见图 4。

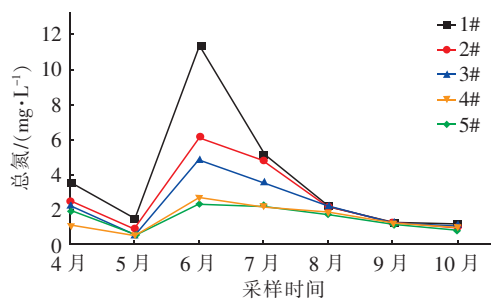


图4 水体总氮随时间的变化

Fig.4 Change of total nitrogen from Apr. to Oct. 2017

氮的去除主要通过植物的吸收以及微生物的硝化、反硝化作用;在工程运行期间,植物生长快速、水温适宜微生物的生存,因此系统对总氮的去除效果较好。

4.2 运行管理与综合效益

工程的运行和养护主要分为三个方面:一是水生植物的养护管理;二是生态浮床需要根据河道水位、周边情况进行维护管理;三是修复工程范围内的安全保卫管理。本工程维护相对简单,需特别注意冬季水生植物的更换,确保整年治理效果。

经过综合整治之后,河流末端水体中 COD、氮磷含量均达到地表水 V 类水的要求,水质得到有效的改善,水生植物具有较强的去除氮磷污染物的能力。岸边滨水湿地的构建使得河岸植被带宽度增加,这标志着初级生产者丰度以及景观舒适度的增加。沉水植物群落的构建不仅对降低水体中氮磷浓度有显著作用,而且能够降低水体的浊度及悬浮物的浓度,显著提高水体的透明度。

5 结论与建议

河道的生态修复工程是目前的研究热点。本工程所采用的多方位生态修复技术,既考虑了多种工程措施对水质的净化效果,又注重提高河流的生态

多样性及自净能力,同时滨水湿地和生态护坡的构建对岸边生境改善与自然恢复功能的提高有着显著的效果。以水生植物与微生物耦合技术为核心,辅以截污围隔拦截与生态护坡技术的水环境组合生态修复治理工程,可有效治理农田排水区河道的劣V类水体;而且对污染河道水体进行功能区的划分,在根据水体特征突出各功能区效果的同时,又能够全方位地利用各种技术组合,在面对大量污染物突然入河、天气骤变等突发事件时,不会同时遭受严重影响,保障水体水质。

上社河为人工调控的区域排水河道,其水质净化功能和生态水平的提升可有效削减农田面源污染负荷进入当地水网的总量,对于实现生态农业、改善区域水环境质量具有重要意义。通过生态修复工程技术手段,明显提升了上社河河道水质,为今后农田集水区重污染水体生态修复工程提供了良好的治理思路及参考的工程技术手段。

参考文献:

- [1] 杨林章,施卫明,薛利红,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.
Yang Linzhang, Shi Weiming, Xue Lihong, *et al.* Reduce - retain - reuse - restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 1-8 (in Chinese).
- [2] 刘福兴,宋祥甫,邹国燕,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——水环境生态修复技术[J]. 农业环境科学学报,2013,32(11):2105-2111.
Liu Fuxing, Song Xiangfu, Zou Guoyan, *et al.* Reduce - retain - reuse - restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: Eco-restoration technology[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2105-2111 (in Chinese).
- [3] 谷勇峰,李梅,陈淑芬,等. 城市河道生态修复技术研究进展[J]. 环境科学与管理,2013,38(4):25-29.
Gu Yongfeng, Li Mei, Chen Shufen, *et al.* Research progress on urban river ecological restoration technology[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(4): 25-29 (in Chinese).
- [4] 苗伟波,邹剑,刘国庆,等. 多方位生态修复技术在河道水环境治理工程中的应用[J]. 水电能源科学, 2016, (7): 167-170.
Miao Wei-bo, Zou Jian, Liu Guoqing, *et al.* Applications of multi-directional ecological restoration technique in river water environmental treatment projects[J]. Water Resources and Power, 2016, (7): 167-170 (in Chinese).
- [5] 郭英燕,李俊鹏,褚华强,等. 崇明岛河道治理中的生态护坡技术[J]. 生态学杂志,2012,31(2):501-506.
Guo Yingyan, Li Junpeng, Chu Huaqiang, *et al.* Ecological slope protection technique in managing Chongming Island river ways[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 501-506 (in Chinese).
- [6] 胥丁文,陈玲娜,马前. 生态浮床技术的应用及研究新进展[J]. 中国给水排水,2010,26(14):11-15.
Xu Dingwen, Chen Lingna, Ma Qian. Application and new research process of ecological floating bed technology[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(14): 11-15 (in Chinese).
- [7] 刘海洪,汪祥静,吴磊,等. 生物组合对浮床污染物净化效能的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版,2011,41(4):784-787.
Liu Haihong, Wang Xiangjing, Wu Lei, *et al.* Effect of biological combination on pollutants purification performance of floating bed[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(4): 784-787 (in Chinese).
- [8] 李琳琳,汤祥明,高光,等. 沉水植物生态修复对西湖细菌多样性及群落结构的影响[J]. 湖泊科学,2013,25(2):188-198.
Li Linlin, Tang Xiangming, Gao Guang, *et al.* Influence of submerged vegetation restoration on bacterial diversity and community composition in West Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(2): 188-198 (in Chinese).



作者简介:杨非(1994-),男,河南南阳人,硕士研究生,从事农业面源污染和水体生态修复治理等方面的科研工作。

E-mail: 1032260454@qq.com

收稿日期:2018-02-01