

广州市石井河受污染水体修复中试研究*

李 青¹, 孙夏平¹, 陈晓宏¹, 刘 军², 于海霞¹, 陶 贞¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 广州市恒兆环境生物工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘 要: 选择广州市石井河上游白海面河涌, 在非雨季进行污染河流生态系统修复中试试验。结果表明: 封闭环境下曝气增氧技术对 TP、NH₃-N 的去除率平均分别为 34.7% 和 28.8%; 复合修复技术对 TP、NH₃-N 的平均去除率分别为 48.1% 和 51.9%。在原木以平均流量 0.015 m³/s 注入条件下, 曝气增氧技术对 TP、NH₃-N 的平均去除率分别只有 19.6% 和 29.7%; 生态滤床对 TP、NH₃-N 的平均去除率分别为 25% 和 44.99%; 复合修复技术对 TP、NH₃-N 的平均去除率分别为 46% 和 52.41%。复合修复技术使河水透明度最深达到 46 cm。对城市受污染河流的治理, 宜采取复合修复技术; 岸基生态滤床植物多样性可以有效去除污染物。

关键词: 河流生态系统修复; 生态滤床; 复合修复技术; 石井河; 广州市

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 02-0131-05

河流生态系统是连接陆地生态系统和海洋生态系统的纽带。但是人类文明导致的河流生态系统退化已成为全球性的生态环境问题。河流生态系统恢复引起了各国政府和学术界的关注^[1-4]。自 20 世纪 60 年代以来, 国内外纷纷开始修复受污染的河流生态系统^[5-6]。修复河流生态系统常用的 3 种技术方法中, 生物-生态方法因其处理效果好、所需的生物组分多为土著微生物和植物、不易出现二次污染^[5-15]且可以美化环境等, 成为当前河流生态系统修复研究的热点。如河道曝气技术可以加速水体复氧过程, 提高水体中好氧微生物的活力, 促进河流生态系统的恢复^[5,8]; 底泥生物氧化技术可以减小河道内源污染物对水质的影响^[9-10], 河道浅水处种植水生植物可以去除河水中的营养物质^[11-12], 减轻河流的非点源污染^[6,14]。为了探索珠江三角洲地区近似污水径流河道生态系统的修复技术, 选择广州市石井河上游白海面涌, 在非雨季采用河道曝气增氧、底泥生物氧化、岸基生态滤床等技术进行河涌水体生态系统修复的中试试验, 旨在通过中试试验了解在封闭和半封闭条件下河涌水中的 NH₃-N、TP、透明度等指标的变化, 为受污染河流的水质净化和生态修复提供技术基础。

1 研究区概况

石井河流域地处广州市白云区, 属亚热带季

风气候, 多年平均降雨量为 1 620 mm, 其中雨季(4-9月)降水量占 85% 左右, 10 月至翌年 3 月为旱季, 降雨量很少。石井河干流全长 21.72 km, 流域面积为 89.67 km²。流域上游为丘陵区, 下游为平原区, 河床纵比降变化于 0.182% ~ 0.014 2% 之间。石井河自蚬坑河口以下属于感潮河道。汛期既受来自上游的洪水影响, 又受珠江洪水的顶托, 同时受珠江的潮汐作用。洪潮混杂, 水流流态复杂。白海面河涌位于石井河上游, 属于季节性河道。根据 Global water FP 201 流速探测仪现场实测流速值计算, 洪水期间流量超过 2.21 m³/s, 无雨水时河涌流量仅有 0.07 m³/s。白海面涌水源补给为自然降水和上游排放的养殖废水。

20 世纪 80 年代以前石井河主要功能是排涝、排洪、灌溉与航运, 不存在水质问题。80 年代以后, 随着城市规模的不断扩大和居民的增多, 排入石井河的污水量日益增多, 致使石井河上游枯水季节平均污水流量与径流量之比为 7:3^[16]。石井河已经演变成为一条排污河流, 白海面河涌试验河段上游水质为 V 类水标准 (GB3838-2002), 除 pH 值以外, COD 含量 150 mg/L, 超标 2.75 倍; NH₃-N 含量 13.70 mg/L, 超标 5.85 倍; TP 含量 4.93 mg/L, 超标 11.33 倍; DO 含量 0.7 mg/L, 仅为标准的 35%。水体呈现黑臭状态。白海面涌水生态系统受损主要是以溶解氧贫缺为特征的有机污染物

* 收稿日期: 2007-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50579078), 广东省自然科学基金资助项目 (06300102、04009805)

作者简介: 李青 (1979 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 陶贞; E-mail: taozhen@mail.sysu.edu.cn

所致。

2 试验设计及测定方法

2.1 试验方案设计

中试河段选取石井河白海面涌 200 m 长的河段, 平均水深 1.6 ~ 2 m。试验河段上游和下游均为两岸对称且平直河道。用塑料泥袋子筑成三道拦河坝, 将中试河段分为上游强氧化河段和下游复合修复河段两部分, 并且与其上、下游分开。强氧化河段布设水车式增氧机 (增氧机型号为 YC-2. 2-6, 2.2 kW, 清水充氧量 3.80 kg/h) 8 台和 1 个回流设备; 复合修复河段河道中间放置 1 台叶轮式增氧机 (增氧机型号为 YL-3, 3.0 kW, 清水充氧量 4.50 kg/h), 河道两岸布设生态滤床, 生态滤床中间布设有集水管道 (图 1 和图 2)。

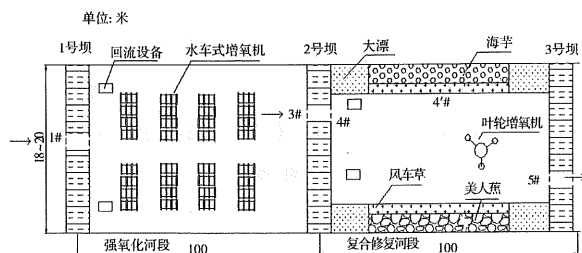


图 1 中试场地平面图

Fig. 1 Plan of pilot-scale system

注: 图中箭头指示水流方向。1-5#为采样点, 其中, 1#是原水样; 3#是强氧化河段出口处水样; 4#代表复合修复河段入口处水样; 4'#是生态滤床中间水; 5#是复合修复河段出口处水样。数值单位为 m)。

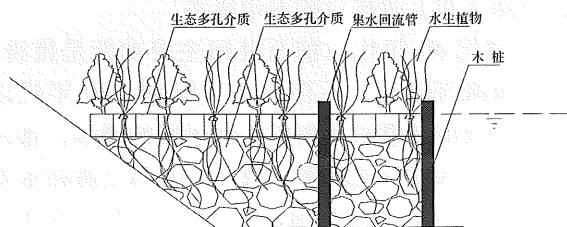


图 2 岸基生态滤床结构图

Fig. 2 Sketch of the riparian ecotypic filter bed structure

在自然河流的近河岸浅水处一般都生长有水生植物, 它们对稳定河岸结构, 提供生物栖息地, 维持河流生态系统的完整性起着重要作用。同时河岸水生植物带可以去除河水中的营养物质, 可以改善河水水质, 提高河流的自净能力^[11,15]。

根据白海面涌水污染特征, 中试河段岸基生态滤床植物选用根系发达, 生存能力强, 根系能够着生微生物, 能够吸收水体中 N、P 等营养盐的植

物。如风车草 (*Cyperus alternifolius*)、海芋 (*Alocasia Rhizome*)、美人蕉 (*Canna*)、大漂 (*Pistia stratiote Linn*) 等。而且, 漂浮植物大漂的根系对水体中大颗粒物具有较好的截留作用, 可以去除水体中的悬浮物, 改善水体透明度。同时, 大漂的叶及其根系可为水体中的原生动物、后生动物提供优异的栖息环境, 这些原生动物、后生动物则以多孔介质上的细菌等微生物为食, 可以控制多孔介质上微生物过度繁殖而导致岸基生态滤床的阻塞, 延长岸基生态滤床的使用寿命。中试河段岸基生态滤床所选植物的生态习性见表 1。

表 1 岸基生态滤床植物特征

Tab. 1 Characteristics of plants in riparian ecotypic filter bed

植物种类	生态特征
莎草科	多年生挺水草本植物; 普遍栽培。亦可生于沼泽地或长期积水处, 具有很强的吸收污染物能力, 对污水中的 TN、TP、COD、BOD 有较好的净化效果。在华南地区全年保持生长。
风车草	天南星科, 多年生挺水草本植物; 分布于长江以南海拔 1700 m 以下的热带和亚热带地区。根系发达, 可有效吸收氮、磷等物质。
海芋	天南星科, 多年生挺水草本植物, 普遍栽培, 适宜观赏, 又能有效去除氮、磷等物质。
美人蕉	天南星科, 多年生漂浮型水生草本植物; 广布热带、亚热带地区。性喜高温高湿, 不耐寒, 具须状根, 无直立茎, 叶片倒卵状楔形, 两面均有短绒毛。多生于河流, 湖泊, 池塘, 水渠等水质肥沃的静水或缓流的水面中。根系发达, 在其根部吸附有大量的微生物和浮游生物, 增加生物的多样性, 与微生物协同净化污水作用明显; 可作为园林水景水面观赏植物。
大漂	

岸基生态滤床分别布设在复合修复河段两岸边。生态滤床长 80 m, 宽为 0.75 m。采用广州市恒兆环境生物工程有限公司研制的专利材料——粘土多孔介质 (对水体中的 N、P 有吸附作用), 分别在多孔介质中间的植物定植孔中种植风车草、美人蕉和海芋等挺水植物。于 2006 年 8 月 21 日开始种植, 植物种植时, 美人蕉和海芋株高均为 0.6 ~ 1 m, 风车草为 0.5 ~ 0.8 m。植物种植的行距和列距都是 25 cm, 8 月 29 日植物定植完毕。

试验时首先对河涌底泥进行氧化预处理。将土著微生物培养液 (细菌含量 1×10^6 个/mL) 450

L、生物促生液 (Bio-energizer, 7 mg/L) 42 L 和生物解毒剂 (Mlcatrol, 1.5 mg/L) 9 L 混合均匀, 然后均匀泼洒于试验河段, 以促进河涌底泥氧化。单位面积河床的喷药量为 0.15 L/m^2 , 此过程连续进行 4 d。然后运行河道曝气增氧机和回流系统 (复合修复河段岸基生态滤床中间布设有集水管道, 集水管道与水泵相连, 在水泵的作用下, 将岸基生态滤床的含有大量微生物的出水回流到上游强氧化河段和复合修复河段上游, 并与河水混合, 使得微生物能够充分降解水中的污染物)。在试验期间中试河道内的水位基本保持不变。试验分 3 种方案:

方案 1: 封闭试验。将 3 个坝的过水口都封闭起来, 运行强氧化河段的 6 台增氧机, 同时启动下游复合修复河段的回流设备并运行叶轮式增氧机, 连续运行 6 d, 每天运行 8~10 h。增氧机组的增氧模式为间歇性增氧。

方案 2: 半封闭试验一。将 3 个坝的过水口部分开启, 平均流量为 $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$, 运行强氧化河段 7 台增氧机, 同时启动该河段的回流设备, 并运行复合修复河段的叶轮式增氧机, 连续运行 14 d, 每天运行 8~10 h。

方案 3: 半封闭试验二。将 3 个坝的过水口部分开启, 平均流量为 $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$, 运行强氧化河段 7 台增氧机, 同时启动该河段的回流设备并运行复合修复河段的叶轮式增氧机, 连续运行 6 d, 每天运行 8~10 h。

2.2 采样点的选择及采样方法

采样点位置如图 1 所示。方案 1 的采样点为 1#、3#、4#、5#, 方案 2 和 3 采样点为 1#、3#、4' #、5#。用 500 mL 取样瓶直接取样, 并于当天测定各项指标。

2.3 分析方法

$\text{NH}_3\text{-N}$ (氨氮) 分析采用纳氏试剂分光光度法; TP (总磷) 分析采用钼锑抗分光光度法; 透明度采用自制塞氏盘于每天上午 10:00 现场测定。试验于 2006 年 10 月 23~28 日、12 月 24~29 日连续观测和 11 月 2~17 日非连续观测 3 个阶段进行。

3 结果与讨论

3.1 TP 浓度的变化

图 3 是试验河段 TP 浓度的变化。方案 1 曝气增氧技术对 TP 的去除率平均为 34.7%, 运行 4 d 后, 对 TP 的去除率增至 42%; 试验河段复合修复技术 (河道曝气增氧、底泥生物氧化、岸基生态滤床等) 对 TP 的平均去除率为 48.1%, 运行 4 d

后, 对 TP 的去除率增至 56.3~59.2%。在原木以平均流量为 $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ 注入条件下 (方案 2), 在运行的第 1、2 天, 曝气增氧技术对 TP 的去除率分别为 20.4% 和 18.8%, 随着原木注入, 曝气增氧技术对 TP 的去除率逐渐降低; 同样地, 随着原木注入, 运行 2 d 后, 生态滤床和复合修复技术对 TP 的去除率亦分别由 34.2% 和 53.6% 逐渐降低。方案 2 试验期间曝气增氧技术对 TP 的平均去除率为 19.6%, 生态滤床和复合修复技术对 TP 的平均去除率分别为 25% 和 46%。在原木以平均流量为 $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ 注入条件下 (方案 3), 无论是采用单一的曝气增氧技术还是复合修复技术, 对 TP 的去除效果均不明显。由于 12 月 27 日凌晨有鱼塘水自强氧化河段旁侧排入试验河段, 导致 27 日试验河段的 TP 浓度高于原木的相应值。

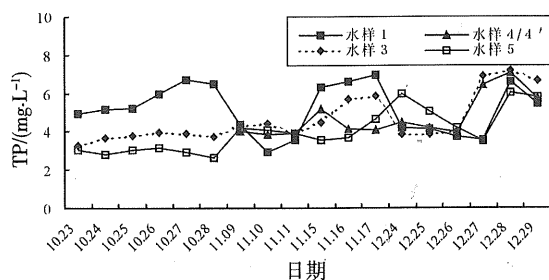


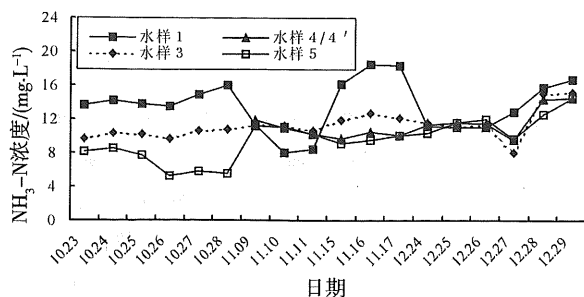
图 3 试验河段 TP 的变化

Fig. 3 Variation of TP in the pilot-scale reach

10 月 23~28 日为方案 1 运行结果; 11 月 9~17 日为方案 2 运行结果; 12 月 24~29 日为方案 3 运行结果。

3.2 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果

试验期间, 试验河段水体的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量低于原木的相应值 (图 4)。方案 1 曝气增氧技术对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率为 28.8%, 运行 4 d 后, 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率增至 30.8%; 复合修复技术对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率为 51.9%, 运行 4 d 后, 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率增至 62.9%。在原木以平均流量为 $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ 注入条件下 (方案 2), 曝气增氧技术对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率为 29.7% 左右; 生态滤床对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率为 44.99%; 复合修复技术对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率为 52.41%。但是随着原木注入, 运行 2 天后, 生态滤床和复合修复技术对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别由 51.6% 和 60.8% 逐渐降低。在原木以平均流量为 $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ 注入条件下 (方案 3), 无论是采用单一的曝气技术还是复合修复技术, 试验河涌水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量的减少甚微。

图4 试验河段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化Fig. 4 Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ in the pilot-scale reach

10月23-28日为方案1运行结果;11月9-17日为方案2运行结果;12月24-29日为方案3运行结果

3.3 透明度的变化

中试期间试验河段河水的透明度(12月27-29日因修路导致泥土进入试验区除外)均高于原水的相应值(平均为17 cm)。其中曝气技术使河水透明度加深至26.1 cm,复合修复技术使河水透明度加深至31 cm,最深达到46 cm(图5)。

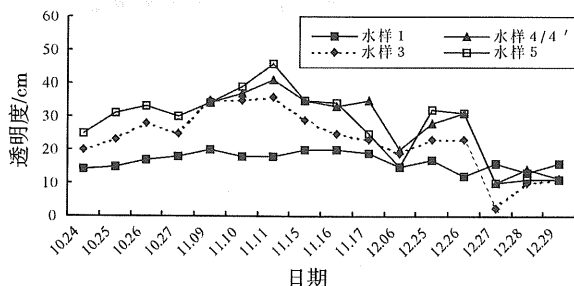


图5 透明度变化

Fig. 5 Change of the diaphaneity in the pilot-scale reach

比较上述试验结果,可以得出:①试验河段采用的修复污染水体技术系统在封闭环境下去污效果较好;②不同修复技术修复受污染河水的效果存在差异,生态滤床、复合修复技术对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率均大于曝气增氧技术,其中复合修复技术对去除受损河水中污染物的效果最显著;③无论哪种试验情况下试验河道采用的修复污水技术系统都要运行一定时间后去污效果才明显;④随着原水流量增大,该修复污水技术系统对试验河段受污染水体的修复能力显著降低。其修复效果下降的机制是由于内源污染随着底泥氧化预处理时间逐步复原,还是受限于该修复污水技术系统的处理能力有待进一步探讨。

4 结论

对白海面涌受污染河水进行修复中试试验,根

据修复技术条件将修复试验河段分为强氧化河段和复合修复河段。通过试验得出如下结论:

(1) 封闭环境下曝气增氧技术对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率平均分别为34.7%和28.8%;复合修复技术对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别为48.1%和51.9%;在原水以平均流量为 $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ 注入条件下,曝气增氧技术对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别只有19.6%和29.7%;生态滤床对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别为25%和44.99%;复合修复技术对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别为46%和52.41%。生态滤床、复合修复技术对TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率均大于曝气增氧技术,其中复合修复技术对修复受损的河流生态系统效果最显著。随着原水注入流量的增加,本试验修复技术系统对TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除能力逐渐降低,其去污效果的下降机制是由于内源污染随着底泥氧化预处理时间逐步复原,还是受限于该修复污水技术系统的处理能力有待进一步探讨。

(2) 复合修复技术使河水透明度最深达到46 cm。

(3) 污染河流修复技术系统的运行时间对污水处理效果影响明显。随着系统的运行时间延长,污染物的移除率逐渐增大。

参考文献:

- [1] KOEBEL JR J W, JONES B L, ARRINGTON D A. Restoration of the Kissimmee River, Florida; water quality impacts from canal backfilling [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, 57: 85-107.
- [2] HOLMES N T H. The river restoration project and its demonstration sites [C]// De WAAL L C, eds. Rehabilitation of Rivers: Principles and Implementation. Chichester: John Wiley, 1998:133-148.
- [3] HENRY C P, AMOROS C, ROSET N. Restoration ecology of riverine wetlands: a 5 year post-operation survey on the Rhône River, France [J]. Ecological Engineering, 2002, 18: 543-554.
- [4] ORMEROD S J. Restoration in applied ecology: editor's introduction [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40: 44-50.
- [5] 孙从军, 张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. 环境保护, 2001(4): 12-14.
SUN Cong-jun, ZHANG Ming-xu. Application of aeration technique in river pollution control [J]. Environmental Conservancy, 2001, (4): 12-14.
- [6] 董哲仁, 刘倩, 曾向辉. 受污染水体的生物-生态修复技术[J]. 水利水电技术, 2002, 33(2): 1-4.
DONG Zhe-ren, LIU Qian, ZENG Xiang-hui. Biological and ecological rehabilitation technology on polluted water

- [J]. Water Conservancy and Water Electricity Technology, 2002, 33(2): 1-4.
- [7] 汪松年. 上海水生生态修复实例调查[J]. 水利规划与设计, 2005(2): 26-30.
WANG Song-nian. Survey of water ecological restoration in Shanghai[J]. Water Resources Planning and Design, 2005(2): 26-30.
- [8] 李开明, 刘军, 刘斌, 等. 黑臭河道生物修复中3种不同增氧方式比较研究[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 816-821.
LI Kai-ming, LIU Jun, LIU Bin, et al. Investigation on three aerator equipments in the bioremediation of black-odor river[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(6): 816-821.
- [9] 冯奇秀, 谢骏, 刘军. 底泥生物氧化与城市黑臭河涌治理[J]. 水利渔业, 2003, 23(6): 42-44.
FENG Qi-xiu, XIE Jun, LIU Jun. Bio-oxydation of Ground-sludge and Restoration of the black-odor river in the city[J]. Water Conservancy and fisheries, 2003, 23(6): 42-44.
- [10] 李开明, 刘军, 江栋, 等. 古廖涌黑臭水体生物修复及维护试验[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(6): 742-746.
LI Kai-ming, LIU Jun, JIANG Dong, et al. Bioremediation and Management of the Guliao River[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2005, 11(6): 742-746.
- [11] 王超, 王沛芳, 唐劲松, 等. 河道沿岸芦苇带对氨氮的削减特性研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 311-317.
WANG Chao, WANG Pei-fang, TANG Jing-song, et al. Ammonia sorption and retention characters in the riparian reed zone[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 311-317.
- [12] 张军, 周琪, 何蓉. 表面流人工湿地中氮、磷的去除机理[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 98-101.
ZHANG Jun, ZHOU Qi, HE Rong. Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free-water surface constructed wetland[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 98-101.
- [13] PINNEY M L, WESTERHOFF P K, BAKER L. Transformations in dissolved organic carbon through constructed wetlands[J]. Water Research, 2000, 34(6): 1897-1911.
- [14] SCHULZ R, PEALL S K C. Effectiveness of a constructed wetland for retention of non-point source pesticide pollution in the Lourens River catchment, South Africa[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35: 422-426.
- [15] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 493-497.
LI Rui-hua, Guan Yun-tao, HE Miao, et al. Pilot-scale study on Riparian Phragmites communis, Zizania latifolia and Typha angustifolia L. Zones Treating Polluted River Water[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 493-497.
- [16] 李青. 浅谈城市河汉整治中的水环境问题[J]. 中国农村水利水电, 2002(7): 39-40.
LI Qing. Addressing the Water Environment problem during river restoration in the city[J]. Chinese Country Water Conservancy and Water Electricity, 2002(7): 39-40.

Pilot-Scale Study on Restoring Polluted River Water in the Shijing River, Guangzhou City

LI Qing¹, SUN Xia-ping¹, CHEN Xiao-hong¹, LIU Jun², YU Hai-xia¹, TAO Zhen¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangzhou Hengzhao Environmental Biological Engineering Co Ltd, Guangzhou 510300, China)

Abstract: A pilot-scale test of restoring polluted-water was conducted during non-rainy season in the Baihaimian canal at the upper reach of the Shijing River, Guangzhou city. The results show that the removal rates of TP and NH₃-N are 34.7% and 28.8% with mobile oxygenation, and are 48.1% and 51.9% with multi-restoring technology during obturated test, respectively. Under the circumstances of average runoff as high as 0.015m³/s, the removal rates of TP and NH₃-N are merely 19.6% and 29.7% with Mobile oxygenation, and 25% and 44.99% with ecotypic filter bed, and 46% and 52.41% with multi-restoring technology, respectively. The diaphaneity of the river water is maximum to 46 cm in depth with multi-restoring technology. Multi-restoring technology should be adopted in treating polluted rivers.

Key words: river ecosystem restoration, ecotypic filter bed, multi-restoring technology, Shijing River