

城市污染河流水质原位综合净化技术

王淑梅¹, 王宝贞^{2,3}, 金文标², 曹向东³, 薄涛²

(1. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361012; 2 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳 518055; 3 深圳市水污染防治指挥部, 深圳 518055)

摘要: 针对我国城市河流水质污染普遍严重, 河道截污不彻底的现状, 开发了污染水体就地综合净化方法, 利用水闸形成一定深度的水体, 在其中安装曝气机、生物膜并投加特效菌种。为了考查其处理效果, 在福田河进行了现场试验, 试验段长 420 m, 河底宽 7 ~ 15 m, 平均水深 1.85 m, 总容积为 8 500 m³。试验运行 3 个月, 进水平均 COD_{Cr}, BOD₅, NH₄⁺-N, TN, TP 及 SS 分别为 88.4 mg/L, 62.0 mg/L, 6.4 mg/L, 8.2 mg/L, 0.8 mg/L 和 17.0 mg/L, 出水分别为 28.9 mg/L, 7.6 mg/L, 4.2 mg/L, 5.9 mg/L, 0.4 mg/L 和 10.0 mg/L, COD_{Cr}, BOD₅, NH₄⁺-N, TN, TP 及 SS 的去除率分别为 67.4%, 87.7%, 34.3%, 30.3%, 53.3% 和 39.7%, 河道中溶解氧及透明度分别由原水的 0.9 mg/L 和 12.5 cm 提高至 7.6 mg/L 和 137.5 cm。

关键词: 城市污染河流; 原位综合净化技术; 生物膜; 曝气机; 特效菌剂

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** (K) 08088 (原 1002-1264) (2008) 04-0001-04

In-Situ Remediation Technology for Polluted Water in Urban River

WANG Shu-mei¹, WANG Bao-zhen^{2,3}, JIN Wen-biao², CAO Xiang-dong³, BO Tao²

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Science, Xiamen 361003, China;

2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

3. Water Pollution Control Headquarter, Shenzhen Municipal Government, Shenzhen 518036, China)

Abstract: A new integrated technology for in-situ remediation of polluted streams was developed for serious polluted urban rivers with uncompleted interception, which included the construction of sluices to form water bodies with desirable depth, package of bio-film carriers, installation of aerators, and addition of special bacterial strains to the water bodies. To evaluate its efficiency, a field experiment was conducted in Futian Stream. The experimental section was 420 m long, 7 ~ 15 m wide, and 1.85 m deep on average with a volume of 8500 m³. During three-month operation COD_{Cr}, BOD₅, NH₄⁺-N, TN, TP and SS concentrations in the down stream were reduced to 28.9 mg/L, 7.6 mg/L, 4.2 mg/L, 5.9 mg/L, 0.4 mg/L, and 10.0 mg/L, respectively, as their corresponding concentrations in the upstream were 88.4 mg/L, 62.0 mg/L, 6.4 mg/L, 8.2 mg/L, 0.8 mg/L, and 17.0 mg/L. The remediation technology achieved a removal efficiency of 67.4% for COD_{Cr}, 87.7% for BOD₅, 34.3% for NH₄⁺-N, 30.3% for TN, 53.3% for TP, and 39.7% for SS, respectively. Dissolved oxygen (DO) and transparency were also improved from 0.9 to 7.6 mg/L and from 12.5 to 137.5 cm respectively.

Key words: polluted urban river; in-situ remediation technology; bio-film; aerator; special bacterial strain

随着水污染问题的日益突出, 修复污染水体, 改善生态环境已成为当前的热点问题。针对河流水质进行综合治理与改善是河流水生生态系统修复与重建的基础。河流的直接净化技术即直接在河床里或其附近采取一些净化措施, 就地治理污染, 能够大幅度压缩开支, 适合于城市中流量较小且污染严重的河流。河流直接净化技术包括在河道中安装曝气机^[1], 采用生物膜技术^[2], 以及投加特效菌种等^[3], 但针对污染严重的城市河流, 水质恶化乃至黑臭、水生态严重退化甚至破坏, 单一的净化技术很难在短期内使其水质得到明显改善^[4]。

本文针对我国城市河流水质污染普遍严重, 河道截污不彻底的现状, 并结合我国河流大多被衬砌、水深浅、河道顺直、水量小、流速慢的特点以及经济基础还比较薄弱的现实情况, 开发了污染河流水质原位综合净化方法, 并在福田河进行了现场试验研究, 考查了其处理污染河水的效果, 对污染物的去除机理进行了初步分析。

1 试验材料与方法

1.1 污染河道原位综合净化技术

污染河流水质原位综合净化方法的思路是利

用河道水闸形成一定深度的水体,根据水质的污染程度,在水体内布设填料及曝气机,辅以特效菌剂,

形成强化生物处理区,对河水进行综合处理(图 1)。

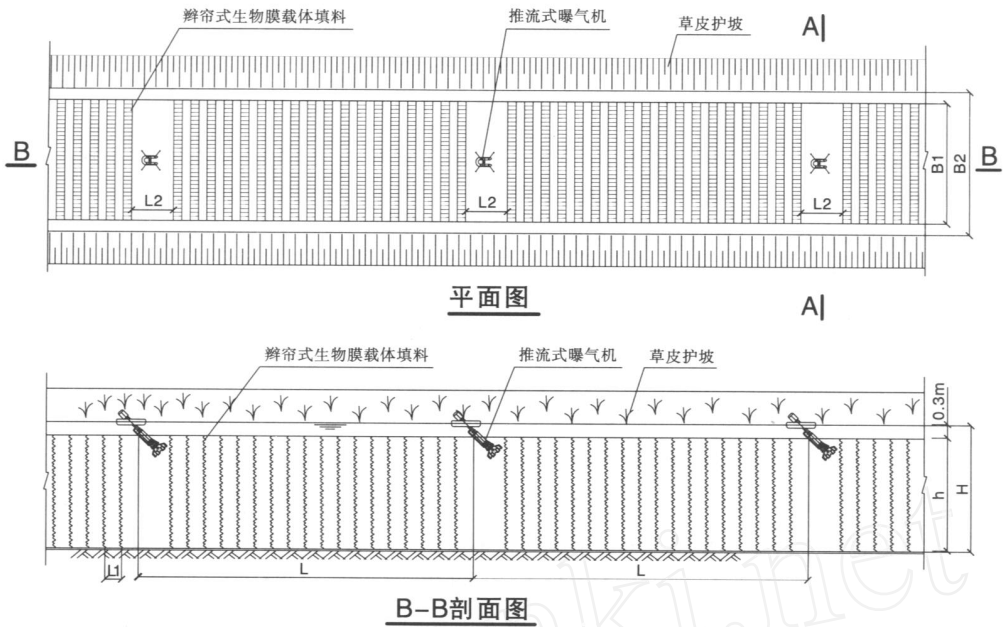


图 1 污染水体原位综合净化方法示意图

投加特效菌种^[3],利用投加的微生物唤醒或激活水体中原本存在但被抑制的微生物,促使其迅速繁殖,进而钳制有害微生物的生长,以消除水域中有机污染及氮、磷污染物。

安装机械曝气机,可以加速水体复氧过程,恢复水体中好氧微生物的活力,保证投加的菌种及土著菌种在适宜的条件下增长繁殖,从而改善河流的水质状况^[1,4]。推流式曝气机与环流立式曝气机的联合使用,在一定的区间形成循环流动,不仅有利于减少短流和提高缓冲能力,而且有利于氧的传递和改善污泥的厌氧状态,有效地治理河流的黑臭现象^[5]。同时水闸的设置也可以保证投加的特效菌种不会被流动的河水迅速冲走而能够在原地增长繁殖并发挥生物净化作用。

试验采用的辫帘式编织填料固定安装于河底,该填料具有较大的比表面积,可附着大量微生物,在非降雨期能垂直地悬浮于河流中,为微生物提供附着表面并在运行过程中形成生物膜,达到净化污染河水的目的。在雨季河道行洪时,填料将被洪流压伏在河床上而不影响行洪。

1.2 福田河现场试验

1)现场试验在福田河中心公园段进行,此河段水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TN 、 TP 、 COD_{Cr} 、 BOD_5 等均超标,污染严重,水体溶解氧和透明度较低,水质黑臭,并伴有淤泥沉淀,影响河道景观。试验期间河道水质属于地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 中的劣 V 类,试验段进水水质与低浓度城市污水相近 (见表 1)。

表 1 试验段进水水质

指标	COD_{Cr} (mg/L)	BOD_5 (mg/L)	TN (mg/L)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	透明度 (cm)
范围	65~133	40~78	7.4~18.3	5.5~11.1	0.6~1.8	15~60	0.15~1.17	10~15
均值	88.4	62.0	8.2	6.4	0.75	26.6	0.91	12.5
V类水质标准 ^[7]	40	10	-	2	0.4	-	2	-

- 2)旱季河水流量为 $(1 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。
- 3)试验河段长 420 m,宽 7 m (底面) ~ 15 m (水面),水深 1.4 m (上游) ~ 2.3 m (下游),平均水深 = 1.85 m,有效容积 = 8 500 m^3 。
- 4)填料安装间距 2.5 m,填料填充率 0.9 %。
- 5)曝气机安装间距: 70~80 m,安装曝气机 5 台

- (功率: 5.5 kW,清水充氧量: 10.5 kg/h,服务面积: 50 m^2)。
- 6)启动期间投菌比例: 5/10000,菌液浓度: 10^{10} cfu/mL,连续投菌时间: 7 d。试验中所投菌种为功能菌,包括硝化菌、反硝化菌等原来河道中本身存在的菌种,经筛选后人工强化,再投加到水体,不含致病菌。

7)正常运行时的水力停留时间 $HRT = 20h$,降雨时水力停留时间 $HRT = 2 \sim 5 h$ 。

1.3 分析方法

主要测试项目 COD_{Cr} , $NH_4^+ - N$, TN , TP , SS 及 DO 均采用标准分析方法^[8]。试验段内微生物分布特性采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳技术,水体透明度测定采用塞氏盘法。

2 结果与讨论

2.1 试验段水质改善效果

福田河现场试验运行 3 个月,经历了旱季和雨季。试验结果显示,在正常情况下,试验段对污染物有明显的去除效果,而且河水透明度及溶解氧浓

度在处理段下游明显升高。虽然 $NH_4^+ - N$ 和 TN 由于进水浓度偏低,去除效果不明显,但与进水相比,出水也有明显的降低,系统对 TP 也表现出很好的处理效果(图 2)。进水平均 COD_{Cr} , BOD_5 , $NH_4^+ - N$, TN , TP 及 SS 分别为 88.4 mg/L , 62.0 mg/L , 6.4 mg/L , 8.2 mg/L , 0.75 mg/L 和 17.0 mg/L 时,出水分别为 28.9 mg/L , 7.6 mg/L , 4.2 mg/L , 5.9 mg/L , 0.35 mg/L 和 10.0 mg/L ,其对应的去除率分别为 67.4% , 87.7% , 34.3% , 30.3% , 53.3% 和 39.7% ,河道中溶解氧及透明度分别由原水的 0.9 mg/L 和 12.5 cm 提高至 7.6 mg/L 和 137.5 cm 。下游水质除氨氮和总氮外均达到了地表水环境质量标准中 V 类环境水质标准要求^[7]。

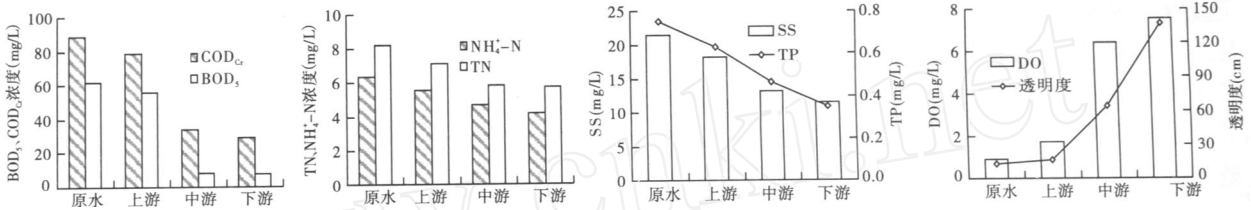


图 2 正常运行期间福田河试验段的水质变化

试验运行期间经历了 3 次大雨,在雨季河水流量为旱季的 5~10 倍,但试验系统可以在雨后的 24 h 内恢复正常。暴雨期间上游 COD , SS , TN 及 TP 浓度分别 63.4 , 86.5 , 8.9 及 0.74 mg/L 时,经过处理段后水质分别下降为 57.4 , 43.5 , 6.9 和 0.6 mg/L , COD , SS , TN 及 TP 的去除率分别为 10.0% , 49.7% , 22.3% 及 13.5% ,与正常运行期间的治理效果相比明显下降,主要原因是暴雨期间水量增加,使试验段在严重超负荷下运行。因此在实际设计中应适当考虑暴雨期间河流水质保障措施及暴雨过后水质的快速恢复措施。

2.2 试验段微生物分析

河道污染就地净化技术就是培养、驯化细菌等微生物,满足其生长要求,促使其大量生长繁殖,依靠它们在快速成长和繁殖中大量消耗食物的过程来达到净化污染河水的目的。由于福田河污染严重,旱季时完全成为了排污河,河水中污染物含量较高。河道中供生物膜的营养较充足,试验期间生物膜生长饱满,附着微生物丰富。试验期间分别取福田河试验段上游,中游及下游的表层(上部)、中层(中部)、底层(底部)填料,进行了多样性分析,结果显示福田河试验段上游微生物多样性相对中下游较少,而下游的微生物多样性略高于中游;同时,中层微生物多样性均高于表层(见表 2)。

表 2 试验段生物膜微生物多样性变化(种)			
取样位置	上层	中层	底层
上游	18	26	29
中游	31	33	30
下游	35	40	42

表 2 的结果说明,上游水体中优势物种比较单一,此时的水体尚未形成一个稳定的生态构架,处于生物群落的开敞或先锋群落阶段;中游是一个过渡段,有一定的优势物种,但其他物种也同时具有很强的竞争,处于生物群落形成的郁闭未稳定阶段。微生物分布情况说明福田河治理段内从前到后微生物逐渐适应并繁殖,最终物种通过竞争平衡,进入协调进化的较稳定的群落阶段,实现稳定去除污染物。

2.3 污染物去除机理分析

2.3.1 有机物的去除机理分析

由图 2 可见,试验段上游段对有机物的去除率很低,且主要以 COD_{Cr} 的形式被去除,说明此段有机物的去除主要是通过填料对悬浮固体及泥沙的物理截留作用实现的。中游段对有机物去除发挥了主要作用, COD_{Cr} 和 BOD_5 去除率分别达到 57% 和 86% ,其末端 COD_{Cr} 和 BOD_5 浓度分别降低至 34.1 mg/L 和 7.6 mg/L 。中下游生物膜上微生物多样性明显提高,说明此阶段有机物的去除主要是通过微生物的降解作用实现的,且下游段有机物浓度变化

不大,已稳定维持在一个很低的水平。

2.3.2 氮的去除机理分析

河流中的氮主要是以有机氮和氨氮的形式存在,其中有机氮在异养菌的作用下转化为氨氮,因此本文以氨氮作为河流中氮去除效果的主要考查对象。

试验期间进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度在 $5 \sim 11 \text{ mg/L}$ 之间,远高于劣 V 类水质,而氨氮的去除率在 $25\% \sim 60\%$ 之间。由于试验期间试验河段溶解氧比较充足,所以河流中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要是发生硝化反应,转化为硝态的氮。由于生物膜的存在,在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化过程中存在两种可能,一种是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 发生完全硝化反应后又发生了缺氧反硝化反应,最后转化为 N_2 ;另一种是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 发生短程厌氧反应,直接转化为 N_2 。试验期间, TN 在溶解氧含量较低的上游和中游段有很好的去处效果,而在溶解氧浓度较高的下游几乎没有去除,说明在溶解氧浓度较低的上游和中游,生物膜内能够形成好氧-缺氧-厌氧的递进环境,为硝化反硝化、短程硝化反硝化及同时硝化反硝化等过程提供了可能。

2.3.3 总磷的去除效果与机理分析

河流中的磷主要是来自生活污水和农业的面源污染,通过地表径流进入河流,进入河流后的磷主要吸附在悬浮颗粒的表面,在河流流动过程中一部分通过沉降作用沉入河底,一部分被河流生态系统内的生物利用,合成自身细胞。因此,河流本身对磷有一定的自净能力,而在河流中布设填料及强化曝气供氧会增强这种能力^[2]。

根据生物除磷机理可知,采用生物膜法进行生物除磷必须满足以下 4 个条件: 1) 使生物膜交替处于厌氧和好氧状态,使聚磷菌增殖并成为优势菌属; 2) 供给必要的有机碳源; 3) 以脱落污泥的形式排出磷,因此要求聚磷菌为优势菌属的生物膜生长快,且在好氧状态下能够脱落,所以必须有足够的曝气强度和选择合适的生物膜载体; 4) 沉淀后的污泥应及时排出系统,避免被吸收的磷释放再次进入水体,造成二次污染。以上这些条件在天然河流中虽无法满足,但在福田河试验现场, 5 台曝气机分段布设,间距 $70 \sim 80 \text{ m}$,必然在试验段形成相对的好氧-缺氧-厌氧环境。福田河试验段污染比较严重, C/P 比大于 50,能够为除磷提供充足的碳源。同时,由于曝气机的搅拌作用,其周围的生物膜更新

周期缩短,脱落的生物膜随水流经过无曝气机河段,即可能经历好氧-厌氧环境变化,因此可以认为研究中 TP 浓度的降低部分是由微生物作用引起。同时,在试验中也发现 TP 的去除与悬浮物 (SS) 的去除存在一定的相似规律,这说明填料段对吸附在悬浮颗粒中的磷具有拦截作用,曝气机的布设使河道处于好氧状态,减少了磷释放,从而使试验段对 TP 保持了较高的去除率。

3 结论

污染河流水质原位综合净化方法现场试验表明,该技术能够改善污染相对严重的城市河流水质, COD_{Cr} , BOD_5 , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN, TP 和 SS 的去除率分别达到 67.4% , 87.7% , 34.3% , 30.3% , 53.3% 和 39.7% ,河道中溶解氧及透明度分别由原水的 0.9 mg/L 和 12.5 mm 提高至 7.6 mg/L 和 137.5 mm ,处理段下游水质恢复至接近地表水环境质量标准中的 V 类水体质量标准要求。

试验段河道中的微生物从前到后逐渐适应并繁殖,最终物种通过竞争平衡,维持一个较稳定的群落结构。

试验段对有机物、氮磷的去除主要是通过生物作用及生物膜的截留作用共同完成。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 田伟君,翟金波. 生物膜技术在污染河道治理中的应用 [J]. 环境保护, 2003, (8): 19-21.
- [3] 丁吉震. CBS 水体修复技术 [J]. 洁净煤技术, 2000, 6(4): 36-38.
- [4] 田伟君,王超,李勇,等. 城市污染水体强化净化技术研究进展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2004, 32(2): 136-139.
- [5] 刘延恺,陆苏. 河道曝气法—适合我国国情的环境污水处理工艺 [J]. 环境污染与防治, 1994, 16(1): 22-25.
- [6] William J M, Jean-claudel, Virginie B. Ecological Engineering Applied to River and Wetland Restoration [J]. Ecological Engineer, 2002, 18: 529-541.
- [7] 中国国家环保总局. 地表水环境质量标准 (GB3838-2002) [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [8] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》编委会编. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002: 200-285.

作者简介:王淑梅 (1968-),女,河北昌黎人,副研究员,博士,研究方向为河道污染治理、污水处理及资源化,已发表论文 10 余篇。