

# 特定岸坡生态系统改善水源地水质实验研究

吴义锋, 吕锡武, 史 静

(东南大学 能源与环境学院, 南京 210096)

**摘要:**采用多孔混凝土为生态护岸载体,联合微生物、绿色植物等生态因子构建特定岸坡生态系统来研究水源地水质改善效果。实验结果表明,在停留时间(RT)为6 d时,系统对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{TN}$ 的平均去除率分别达到20.9%、13.4%、81.4%、96.8%和67.7%,相比硬质化岸坡的空白渠, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{TN}$ 的平均去除率仅为9.6%、5.0%、70.8%、42.4%和34.6%。通过该系统中多孔混凝土载体、水生植物和基质上富集的微生物等生态因子协同作用,使得有机物、氮类污染物去除效果明显。

**关键词:**多孔材料;特定岸坡生态系统;水质改善;水源地

中图分类号:X506 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)06-0107-05

## Source Water Quality Improvement under Special Riverine Ecosystem with Ecological Embankments

WU Yi-feng, LV Xi-wu, SHI Jing

(School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** An experimental model was made on the improvement of sources water quality through the construction of a special riverine ecosystem using ecological embankments, which consisted of porous concrete, microorganism and hydrophytes. It was found that, with six day as retention time (RT), the removal rates were 20.9% for  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , 13.4% for  $\text{UV}_{254}$ , 81.4% for  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 96.8% for  $\text{NO}_2 - \text{N}$  and 67.7% for  $\text{TN}$ . In contrast, in the control pool with hard embankment, the removal rates only reached 9.6% for  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , 5.0% for  $\text{UV}_{254}$ , 70.8% for  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 42.4% for  $\text{NO}_2 - \text{N}$  and 34.6% for  $\text{TN}$ . Through coordination of all constituent elements of special aquatic ecosystem such as porous concrete, hydrophytes and substrate micro-organisms, organic pollutants and nitrogen can be removed effectively.

**Key words:** porous materials; special riverine ecosystem; water quality improvement; water source

河湖地表水体岸坡通常为水土保持等功能需求而普遍采用的硬质化护砌,切断了生态系统中各要素间的物质、能量和信息交流,绿色植物及微生物失去生存栖息空间,生物多样性降低,生态系统瓦解破碎<sup>[1-2]</sup>。对于缺损的水生生态系统来说,生物种类及其生长介质的丧失或改变是影响生态恢复的主要障碍,在进行生态恢复时,通常选择合适的植物种类改造介质,使之变得更适合植物的生长,或是利用物理

化学的方法直接改良或改变介质<sup>[3-5]</sup>。因此,研发具有类似天然岸坡生态功能并具有一定力学强度的环保型材料对于河湖生态修复具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。多孔混凝土(Porous concrete),也称为生态混凝土(Ecological concrete)、环境友好型混凝土(Environment-friendly concrete),是采用特殊级配的集料和胶凝材料,使其力学性能满足工程使用要求的同时,形成蜂窝状的结构,内部具有连续贯通的

收稿日期:2009-06-12

基金项目:浙江省水利厅科技项目(RB0914)

作者简介:吴义锋(1975-),男,博士,主要从事水环境的生态修复及工程技术研究,(E-mail)shinfun@seu.edu.cn。

吕锡武(联系人),教授,博士生导师,xiwulu@seu.edu.cn。

孔隙,绿色植物能以此为基质茁壮生长,并能有效降低环境污染负荷<sup>[8-10]</sup>,其自研发以来即被视为河渠岸坡生态建设较为理想的生态替代材料之一,并逐步开展应用<sup>[11]</sup>。采用多孔混凝土为河湖的生态护岸载体,可为微生物的富集和繁衍提供基质条件,同时绿色植物也能在其中生长,进而营造生物多样性的生境,建立和修复水生生态系统。

目前,关于水源地水质改善和生态防护技术的研究报道较多<sup>[12-13]</sup>,但将生态型护岸基质、微生物、绿色植物的共同效应应用于微污染水源地原位性生态恢复或直接净化的研究较少。特定岸坡生态系统是通过改变和改良植物生长介质,将生态护岸基质、微生物、绿色植物等生态要素融为一体,并强化其协同作用去除水中有机污染物、氮磷等营养盐,能在水体和底质中的污染物直接净化或转化利用。笔者拟采用多孔混凝土为生态护岸载体,并构建特定岸坡生态系统平台,用于模拟研究该系统对水源地水质的改善效果。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

在上海市黄浦江原水厂内构建中试模型,人工开挖规格相同的 2 条环形实验河渠,河渠外侧岸周长 54.7 m,内侧岸周长 29.5 m,河渠断面为梯形,底宽 1 m,上宽 4 m,岸坡坡度 1:1.5,设计水深 0.8 m,渠内均安装潜水型水流推进器,以模拟河水流动,见图 1。模型中的一条河渠为实验渠,其岸坡采用多孔混凝土护砌,构建微生物、绿色植物等为生命主体的特定岸坡生态系统,以研究其对水源地水质改善效果,另一河渠为硬质化护砌的实验对比渠,即空白渠。

实验渠特定岸坡生态系统的构建方法为:岸坡采用多孔混凝土预制球铺装护砌,球直径为 250 mm,内部预留平面二维方向的通孔,球成型后用经防锈处理的  $\Phi 18$  钢筋进行串接固定,并充当生态护砌面的配筋作用,球体之间自然形成了边长约 100 mm 的方孔,护砌面空隙率约 47%,见图 2。预制球铺装后,就近挖取地表层 20 cm 的土壤填充护砌面的空隙,以诱导植物生根发芽。覆土后实验模型反复通水 30 d 左右,以充分稀释多孔混凝土的释

碱,然后进行坡面植被植生。坡面选种须根系的植物类型为主,并兼顾景观效应。沿坡面从下往上依次种植枯草、菖蒲、美人蕉、狗牙根、黑麦草等,植物带结构依次为沉水植物、挺水植物、草本植被,实现了坡面上水生生态向陆生生态的自然过渡。实验装置建设及坡面绿化建设于 2006 年 8 月完成。实验河渠经过 1 a 的运行后,坡面植被生长茂盛,多孔混凝土预制球的间隙中发现了河蟹、蟾蜍等动物,特定岸坡生态系统趋于完善。该系统主要通过生态坡面上的绿色植物来改善水质,并以多孔混凝土载体和坡面基质富集的微生物来进一步优化系统的稳定性,构建特定岸坡生态系统最终实现水源地水质改善和生态修复的目标。

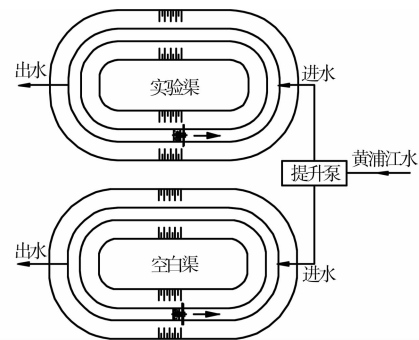


图 1 中试流程图

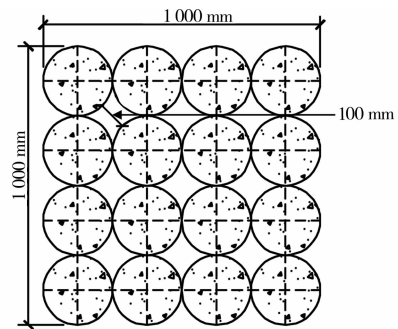


图 2 多孔混凝土预制球及其铺装

### 1.2 原水水质及项目分析方法

实验原水取自黄浦江,当实验河渠均达到设计水深 0.8 m 时,关闭进水泵,启动水流推进器,水在渠中循环流动,每个实验周期持续 7 d,实验出水通过提升泵排至黄浦江。实验期间黄浦江原水水质见表 1。

表 1 黄浦江原水水质

项目	COD <sub>Mn</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	DO/ (mg·L <sup>-1</sup> )	UV <sub>254</sub> /cm <sup>-1</sup>
范围	5.86~7.08	0.64~2.22	0.045~0.223	0.98~3.47	3.73~6.72	2.8~7.2	0.143~0.193
平均值	6.53	1.12	0.122	2.41	5.12	4.52	0.159

水质分析按照现行标准规定方法进行<sup>[14]</sup>,TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:α-萘胺分光光度法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂比色法;COD<sub>Mn</sub>:酸性高锰酸钾滴定法;UV<sub>254</sub>:紫外分光光度法;DO:碘量法。

## 2 结果与分析

实验在 2 个河渠中同时进行,经过 1 a 多生态系统的培养,实验渠构建了良好且稳定的特定岸坡生态系统。于 2008 年 1 月 17 日开始实验,共设 8 个实验周期,每周开始时,黄浦江原水被泵至实验模型中,当 2 河渠均达到 0.8 m 的水深时,同时启动水流推进器,水在河渠中循环流动。停留时间(RT)分别为 3 d 和 6 d 时,考察该系统随 RT 变化时污染物的去除效果。

### 2.1 系统对有机污染物的去除效果

该系统对有机物的去除效果见图 3、图 4。随着 RT 从 3 d 延长到 6 d,实验渠中 COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub> 的平均去除率分别从 14.8%、8.6% 提高至 20.9%、13.4%,对比空白渠,COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub> 的平均去除率仅

从 5.7%、3.1% 提高至 9.6%、5.0%,可见,以多孔混凝土为生态护岸载体,微生物、绿色植物为生命主体而构建的特定岸坡生态系统对水中有机物有较好的去除效果,从而可提高饮用水水质安全性。

特定岸坡生态系统对 COD<sub>Mn</sub> 的去除效果受气温影响显著,冬季时(1 月 17 日、2 月 21 日),RT=6 d 时 COD<sub>Mn</sub> 的平均去除率为 14.9%,3 月以后的 5 个实验周期中,RT=6 d 时的平均去除率达到 22.8%,最高时去除率达到 31.1%(此时黄浦江原水 COD<sub>Mn</sub> 为 6.08 mg/L)。UV<sub>254</sub> 是水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后在 254 nm 波长的紫外吸光度,可表征水中具有苯环和共轭双键结构有机物的相对含量,同时可作为饮用水消毒副产物前驱物的代用参数<sup>[15-16]</sup>。实验渠具有较为完善的特定岸坡生态系统,在多孔混凝土基质、微生物、绿色植物等生态因子的协同作用下,对 UV<sub>254</sub> 有较稳定的去除效果。空白渠中因缺乏微生物富集及绿色植物生长的基质,为一缺损的生态系统,同样的实验条件下,空白渠中 UV<sub>254</sub> 的去除率仅相当于实验渠的 1/3 左右。

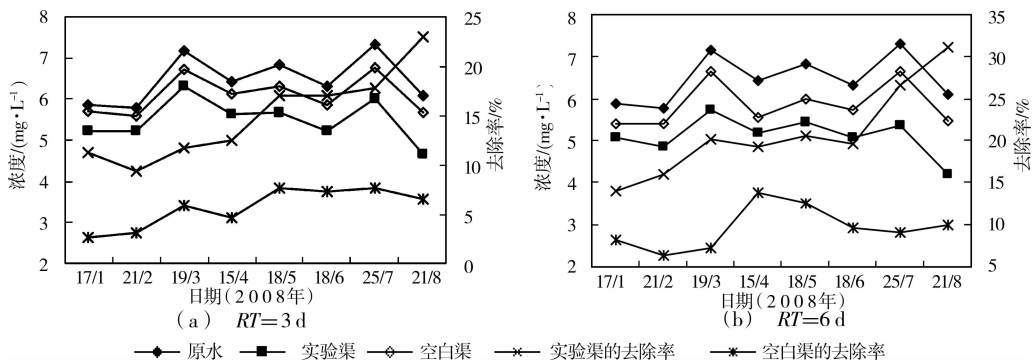


图 3 COD<sub>Mn</sub> 的去除效果

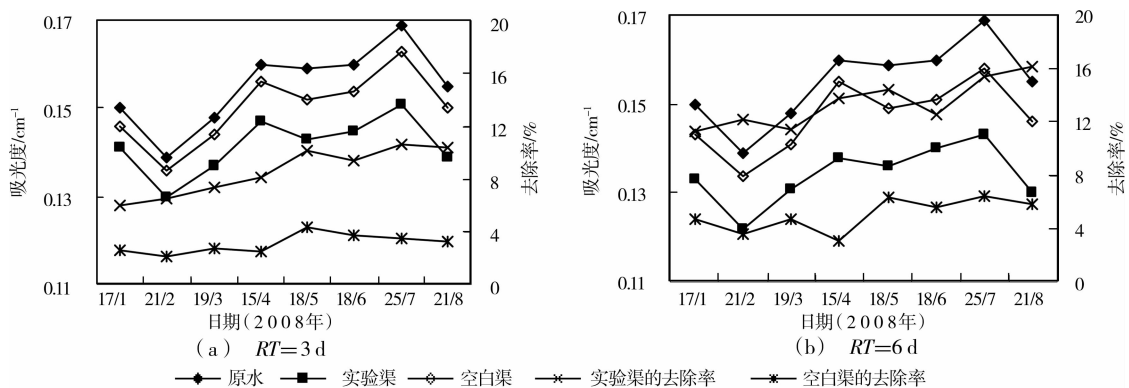


图 4 UV<sub>254</sub> 的去除效果

### 2.2 系统对氮类污染物的去除效果

该系统对氮类污染物的去除效果见图 5—图 7。当 RT=3 d 时,建立特定岸坡生态系统的实验渠中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、TN 的平均去除率分别为

55.0%、88.6% 和 51.2%,当 RT=6 d 时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、TN 的平均去除率分别提高至为 81.4%、96.8% 和 67.7%。相对于硬质化岸坡的空白渠,相同的实验条件下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{TN}$  的平均去除率分别由  $RT=3$  d 时的 21.9%、22.5%、12.8% 仅上升到  $RT=6$  d 时的 70.8%、42.4%、34.6%，可见，实验渠的特定岸坡生

态系统可提高氮类污染物的去除效果，并随  $RT$  的延长，系统对氮类污染物的去除效果越明显。

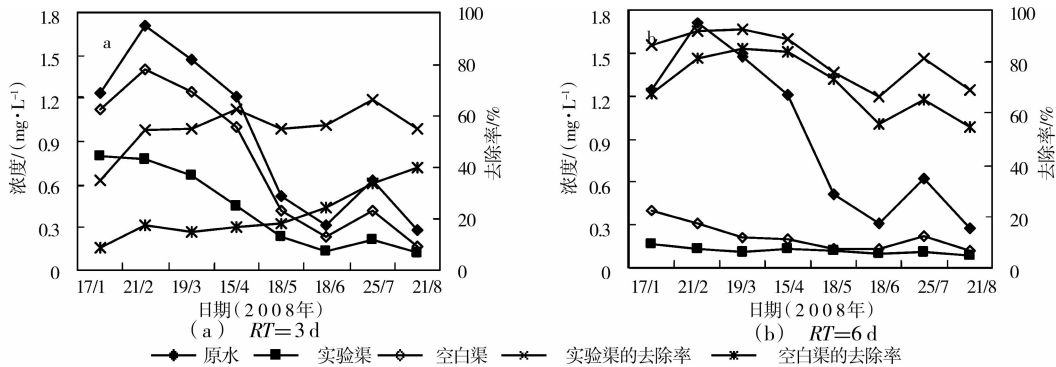


图 5  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

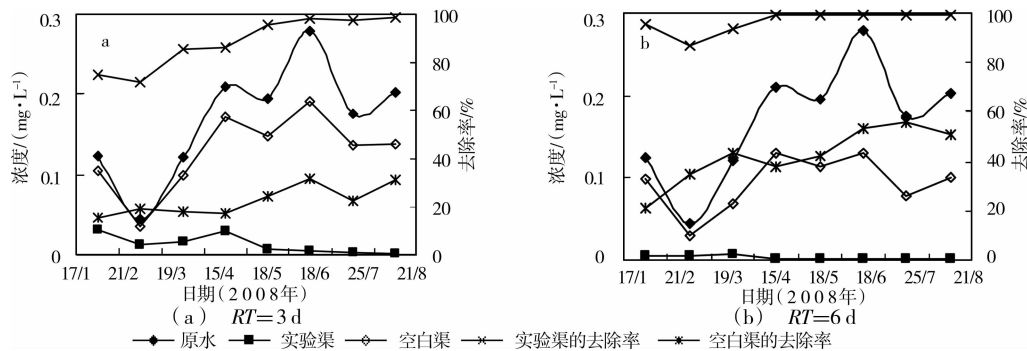


图 6  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除效果

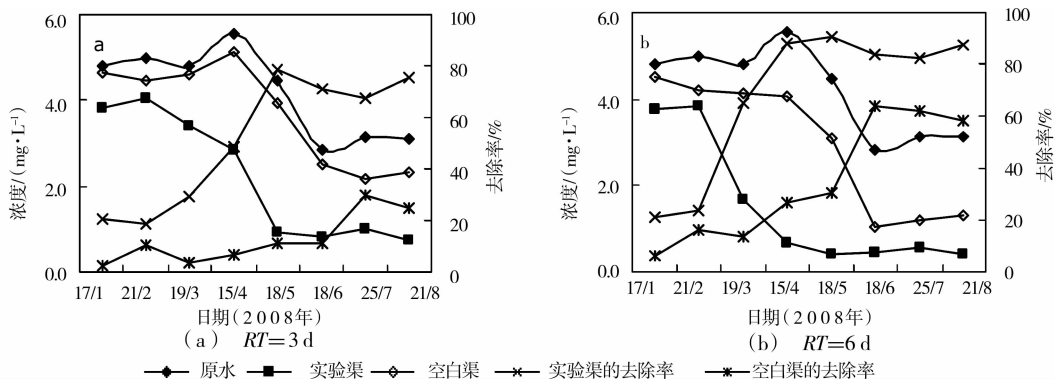


图 7  $\text{TN}$  的去除效果

特定岸坡生态系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除效果受气温变化的影响较小，主要因为实验河渠中  $\text{DO}$  浓度高 (5.0~9.0  $\text{mg/L}$ )，特定生态岸坡的基质中富集了大量的各类细菌种群，同时坡面基质的硝化潜力较高<sup>[17]</sup>，有机氮、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  在有氧条件下被氨化细菌、亚硝化细菌和硝化细菌等菌群逐步转化为硝酸盐氮，这一过程受外界天气变化的影响较小。而实验渠对  $\text{TN}$  的去除效果则受季节变化的影响较为显著，冬季 (1 月 17 日、2 月 21 日)  $RT=6$  d 时  $\text{TN}$  的平均去除率 22.5%，而 3 月以后的 5 个实验周期中， $RT=6$  d 时  $\text{TN}$  的平均去除

率上升为 82.8%，最高时达到 90.4% (此时黄浦江原水  $\text{TN}$  浓度为 4.466  $\text{mg/L}$ )，由此可见，特定岸坡生态系统的绿色植物对氮类污染物的去除发挥重要作用。空白渠对氮类污染物的去除效果较差，主要为空白渠中水生生态系统残缺破损，夏季时 (6 月~8 月)，因黄浦江原水呈现富营养化态势，每个周期的后阶段 ( $RT>3$  d)，水中滋生了刚毛藻等浮游生物，同时  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  因浮游生物的作用去除率得以提高， $RT=6$  d 时平均去除率也达到 70.8%，但仍低于相同实验条件下的实验渠的去除率，具备完整特定岸坡生态系统的实验渠中氮类污染物则在较短的

时间内( $RT \leq 3$  d)被去除。另外,夏季时空白渠对TN的去除率并未因气温升高而显著增加。

### 3 讨论

综上所述,以多孔混凝土预制球为生态护岸载体,生态坡面基质、微生物以及绿色植物等为生态系统关键因子而构建的特定岸坡生态系统对水源地水质具有明显的改善作用。实验渠中具备了弱碱性(pH值为7.5~8.5)、溶解氧适中(5.0~9.0 mg/L)等有利环境,在水质净化过程中,多孔混凝土载体、微生物、绿色植物等生态要素发挥了重要作用,特定岸坡生态系统强化了生态岸坡上绿色植物、微小动物以及微生物的新陈代谢过程及生态系统中生物链的链接强度,从而提高了水中污染物的去除效果。

多孔混凝土内部具有连续贯通的孔隙(孔隙率20%~25%),吸附和过滤性能好,具有透水(透水系数1.5~3.0 mm/s)透气性等特点,可作为植物生长基质的同时,对水源中的土著微生物能进行有效富集,在其表面和内部形成生物膜,生物膜中的微生物高度密集,包括硝化菌、甲烷菌、脱氮菌等好氧性和兼性细菌,形成有机物污染物—细菌—微小动物的食物链,以强化有机物的去除作用<sup>[18]</sup>。在水体与岸坡的交互过程中,通过微生物的降解、多孔混凝土载体的吸附以及绿色植物的吸收等协同作用去除污染物以改善水源水质。另外,多孔混凝土在制备过程中,通常掺加缓释性的添加剂,如含 $Mg^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 的掺和剂,在改善其力学性能的同时,掺和剂还可作为净水材料,从混凝土内部结构中释放至水体后即与颗粒态的磷发生沉积作用,而大大降低了水中的营养盐浓度。

另外,由于实验渠内水流推进器的搅拌和推动作用,水中DO浓度较高,水体中有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮在有氧条件下进行矿化、硝化反应,逐步转化为硝酸盐。在氮类污染物转化和去除过程中,一部分氮类污染物被绿色植物吸收利用,另一部分又被富集在生态坡面基质中的反硝化细菌通过还原作用完成脱氮,同时,生态坡面基质具有很强的硝化潜力和反硝化作用强度<sup>[17]</sup>,使得水中的氮类污染物浓度有很大程度的降低。

### 4 结论

1)特定岸坡生态系统的构建是基于大多数地表水体岸坡硬化护砌的现状,结合水源地水质安全性考虑而提出的一种新型的水源地生态防护及污染水体的原位性生态修复技术,实验结果显示,该系统能有效改善水源地水质;

2)当 $RT=3$  d时,特定岸坡生态系统的实验渠对 $COD_{Mn}$ 、 $UV_{254}$ 、 $NH_4^+-N$ 、 $NO_2^- - N$ 、TN的平均

去除率分别达到14.9%、8.6%、55.0%、88.6%和51.2%,当 $RT=6$  d时,该系统对 $COD_{Mn}$ 、 $UV_{254}$ 、 $NH_4^+-N$ 、 $NO_2^- - N$ 、TN的平均去除率分别增加至20.9%、13.4%、81.4%、96.8%和66.7%,随 $RT$ 的延长,系统的去除能力得以提高;相对于硬质化岸坡的空白渠, $RT=6$  d时, $COD_{Mn}$ 、 $UV_{254}$ 、 $NH_4^+-N$ 、 $NO_2^- - N$ 、TN的平均去除率仅为9.6%、5.0%、70.8%、42.4%和34.6%;

3)多孔混凝土为生态护岸载体构建的特定岸坡生态系统在保障河渠岸坡安全与稳定同时,既为绿色植物提供了适宜的生存环境,又为微生物富集提供了良好的载体,形成特定岸坡生态系统中的稳定生物链,有助于提高氮磷等营养盐的去除效果,改善河流生态环境,修复破损的生态系统。

### 参考文献:

- [1] PALMER M A, BEMHARDT E S, ALLAN J D, et al. Standards for the ecologically successful river restoration[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 208-217.
- [2] JANSSON B, BACHX H, BOULTON A, et al. Stating mechanisms and refining criteria for ecologically successful river restoration; a comment on Palmer et al [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 218-222.
- [3] PETER D M. Streams and their riparian corridors—functions and values [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2000, 16: 28-29.
- [4] JUNGWIRYTH M, MUHA S R, SCHMUTZ S. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47: 867-887.
- [5] 陈明曦,陈芳清,刘德富. 应用景观生态学原理构建城市河道生态护岸[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 98-102.  
CHEN MING-XI, CHEN FANG-QING, LIU DE-FU. Application of landscape ecology in construction of natural river level[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 98-102.
- [6] 董哲仁. 探索水利工程学[J]. *中国工程科学*, 2007, 9(1): 1-7.  
DONG ZHE-REN. Exploring eco-hydraulic engineering [J]. *Engineering Science*, 2007, 9(1): 1-7.
- [7] GILLILAN S, BOYD K, HOITSMA T, et al. Challenges in developing and implementing ecological standards for geomorphic river restoration projects: a practitioner's response to Palmer et al [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 223-227.
- [8] PARK S B, TIA M. An experimental on the water purification properties of porous concrete[J]. *Comment and Concrete Research*, 2004, 34: 177-184.

(下转第116页)