

doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2011.01.029

岸坡特定生态系统对河渠微型生物群落的影响

吴义锋 吕锡武

(东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘要: 采用多孔混凝土为河渠生态护岸载体,联合绿色植物、微生物构建河渠岸坡特定生态系统,以岸坡硬质护砌的河渠为实验对照,研究该系统对河渠中微型生物群落的胁迫效应. 经过15 d的PFU微型生物采集,具有岸坡特定生态系统的实验渠中检出微型生物60种,自养型微生物占46.7%,而对照渠中检出微型生物68种,异养型微生物占55.9%;实验渠中微型生物群集速率为0.95,5 d时生物多样性指数达到峰值2.43,实现物种平衡的时间为2.42 d;空白渠中微型生物群集速率为0.54,达到物种平衡的时间为4.19 d,群集过程中物种多样性指数小于实验渠. 结果表明,岸坡的护砌方式对河渠微型生物群落的结构和功能均产生生态影响,岸坡特定生态系统能强化水生生态系统的自我调节能力,在有效改善水质的同时,修复和完善水生生态系统.

关键词: 多孔混凝土; 岸坡特定生态系统; 微型生物群落; 水质

中图分类号: X5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2011)01-0150-05

Ecological effects of special riverine ecosystem on microbial community construction

Wu Yifeng Lü Xiwu

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An experimental model was made to study the influence of a special riverine ecosystem on microbial community construction using ecological embankments consisted of porous concrete, microorganism and hydrophytes. The microbial community in test channel was monitored by PFU methods and compared with those in the same size channel with hard embankments. The results show that after 15 d cluster course of PFU (polyurethane foam unit), 60 kinds of microorganism are detected in experimental channel, and the ratio of vegetal flagellate reaches 46.7%. On the contrary, 68 kinds of microorganisms are detected in control channel, only 36.8% for vegetal flagellate, 55.9% for heterotrophic microorganisms. The embankment status of riverine zones have a significant influence on the ecosystem, the cluster rate of microorganism in experimental channel is 0.95, and the biodiversity indexes of the community reach a peak of 2.43 in 5 d. The cluster rate in control channel is only 0.54, and the biodiversity indexes of the community are very low, and it takes 4.19 d to reach a species balance, while it is only 2.42 d for experimental channel. The special riverine ecosystem is effective to enhance the self-adjusting capacity of whole aquatic ecosystem and improve the water quality as well.

Key words: porous concrete; special riverine ecosystem; microbial community; water quality

河渠中微型生物种群包括细菌、藻类、原生动物以及微型后生动物,它们在生态系统中占据着各

收稿日期: 2010-06-17. 作者简介: 吴义锋(1975—)男,博士;吕锡武(联系人)男,博士,教授,博士生导师,xiwulu@seu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009027)、国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2009ZX07101-009)、浙江省水利厅科技资助项目(RB0914).

引文格式: 吴义锋,吕锡武. 岸坡特定生态系统对河渠微型生物群落的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(1): 0150-154. [doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2011.01.029]

自的生态位,彼此间发生着复杂的联系和相互作用,从而构成了稳定的微型生物群落,并对外界环境胁迫产生快速而有效的响应^[1]. 河渠岸坡是绿色植物生长和微生物富集、繁衍的生境载体,是水生生态系统的重要组成部分,其护砌方式必然对水生生物群落的结构和功能产生影响. 长期以来,河渠岸坡普遍采用硬化护砌方式切断了水域和陆域间的物质、能量和信息交流,绿色植物和微生物失去了生存空间,生物多样性降低,生态系统瓦解破碎^[2-3]. 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,通常选用合适的植物种类改造介质,或利用物理化学方法直接改良或改变介质,使之变得更适合植物生长^[4-5]. 多孔混凝土具有类似土壤透水性、透气性和足够的力学强度,以其为载体构建河渠生态岸坡,可有效改善水质^[6-7],并为绿色植物和微生物提供生息繁衍的空间,提高物种多样性、修复和完善河渠的生态系统^[8].

本文以多孔混凝土为河渠岸坡生态护砌载体,联合绿色植物、微生物构建河渠岸坡特定生态系统. 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,用于模拟研究该系统对河渠微型生物群落的生态效应,有助于阐明河渠生态岸坡的水质净化及生态修复机制.

1 实验材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

在上海市黄浦江原水厂构建河渠特定岸坡生态系统实验模型,开挖 2 条相同的环形实验河渠,环形设计模拟天然河渠自然弯曲和水流多样性. 河渠外侧岸周长 54.7 m,内侧岸周长 29.5 m. 断面为梯形,底宽 1 m,上宽 4 m,岸坡坡度为 1:1.5,设计水深 0.8 m,渠内安装水流推进器,以模拟河水流动. 实验模型见图 1 和图 2. 模型中 1 条河渠为实验渠,采用多孔混凝土进行护砌,并联合绿色植物、微生物构建河渠岸坡特定生态系统,另外 1 条为传统混凝土护砌的硬化实验对比渠,即空白渠.

河渠岸坡特定生态系统构建方法:岸坡由水质净化效果较好的多孔混凝土预制球^[6-7]铺装护砌,球直径 250 mm,内部预留 x, y 方向的通孔,球成型后用经防锈处理的 $\phi 18$ mm 钢筋串接固定,并充当生态护砌面的配筋,球体之间自然形成了边长约 100 mm 的方孔,见图 3. 护砌面空隙率约 47%. 预制球铺装后,就近挖取地表 20 cm 的土壤填充护砌

面的空隙,以诱导植物生根发芽. 选种须根系植物类型为主,并根据景观需要,沿坡面从下往上依次种植苦草 (*Vallisneria natans*)、香蒲 (*Typha orientalis*)、

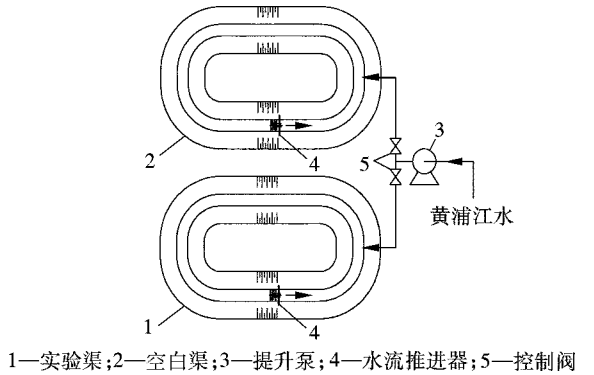


图 1 实验模型平面图

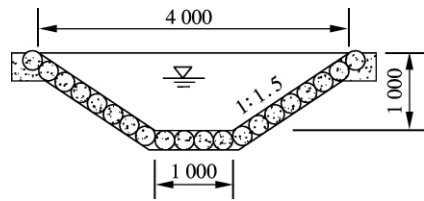


图 2 实验河渠断面图(单位: mm)

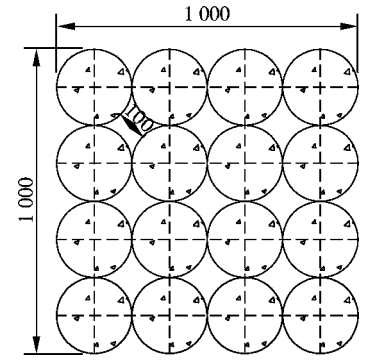


图 3 多孔混凝土预制球及组合(单位: mm)

美人蕉 (*Canna indica*)、狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、黑麦草 (*Lolium perenne*) 等植物带结构依次为沉水植物、挺水植物、草本植被,河渠坡面上实现了水生生态向陆生生态的自然过渡. 岸坡特定生态系统经过近 2 年的自然培养后,生态坡面上部的挺水植物、草本植被的覆盖率接近 100%,预制球间隙中发现了河蟹、蟾蜍等动物,而坡面下部的沉水植物则受黄浦江原水浊度较高的影响而生长缓慢.

1.2 微型生物群落测定方法

抽取黄浦江原水同时向 2 条河渠进水,当渠中水位均达到 0.8 m 时,停止进水,启动水流推进器,水在渠中循环流动. 河渠微型生物群落监测采用 PFU 法^[9-10],将 32 号聚氨酯泡沫塑料切割为 50 mm × 65 mm × 75 mm 的矩形块(即 PFU),使用前用自来水冲洗,蒸馏水浸泡 24 h,用细线悬挂并

固定于渠中,悬挂位置距水面不小于 0.3 m,距渠底不小于 0.2 m,当停留时间分别为 1,3,5,7,11,15 d 时采样 PFU,每次随机取出 2 块,作平行观察.采用活体镜检对微生物进行观察与鉴定分类,鉴定到种. PFU 法可获取微生物群落的结构参数有:微生物种类数和 Magalae 多样性指数. 功能参数有:达到平衡时的种类数 S_{eq} 、群集速率常数 G 和达到 90% S_{eq} 所需的时间 $T_{90\%}$.

1) 多样性指数计算^[9]. 把烧杯中含有 PFU 挤出液的水样摇匀,用吸管吸取水样于 0.1 mL 计数框内,全片活体计数,生物多样性指数采用 Maglaef 公式进行计算:

$$D = (S - 1) \ln N \tag{1}$$

式中 S 为所属种类数目; N 为观察到的个体总数.

2) 微生物群落功能参数计算. PFU 微生物群集过程符合生态学 MacArthur-Wilson 岛屿区域地理平衡模型^[9],根据微生物测定数据来反推群集过程的功能参数 (S_{eq} , G , $T_{90\%}$),计算公式为

$$S_t = S_{eq} (1 - e^{-Gt}) \tag{2}$$

式中 S_t 为群集时间 t 时的微生物种群数; t 为群集时间.

1.3 水质分析方法

水质分析与微生物群落监测同步进行,水质指标包括浊度和 COD_{Mn} , TP , NH_4^+-N , DO , NO_3^--N , NO_2^--N , TN 等,采用国家标准方法^[11]进行测定. 黄浦江作为饮用水源,即以 II 类地表水质标准 (GB 3838—2002) 为控制标准,计算河渠水质化学综合污染指数 P_b . $P_b \leq 1$ 表明监测水质符合或基本符合 II 类地表水质; $P_b > 1$ 表明水质劣于 II 类地表水质,数值越大,水质污染越严重. 计算公式为^[9]

$$P_i = \frac{C_d}{C_0} \tag{3}$$

$$P_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{4}$$

式中 P_i 为 II 类地表水为标准的单项化学污染指数; C_d 为污染物实测浓度; C_0 为 II 类地表水质标准的浓度上限; n 为控制项目数.

2 结果与分析

2.1 水质改善效果

基于实验模型的水质改善效果,研究微生物群落的结构与功能对水质差异的指示原理. 实验渠和空白渠水质化学污染综合指数的变化过程见图 4. 本实验中,黄浦江原水的化学综合污染指数为 3.22, TN , TP 质量浓度分别为 5.12, 0.17 mg/L,表

现为重度污染和富营养化趋势. 具有岸坡特定生态系统的实验渠中水质综合污染指数持续降低,停留时间 3 d 时污染指数即小于 1,水质达到地表 II 类水质. 硬质岸坡的空白渠中水质综合污染指数在停留时间 15 d 时为 1.03,仍表现为轻度污染. 河渠岸坡特定生态系统依靠绿色植物、微生物以及随之发生的物化作用有效改善了水体水质^[6,12-13],而空白渠中缺乏植物生长和微生物富集的载体,仅依靠渠中水体自身的物化反应,水质改善效果较差.

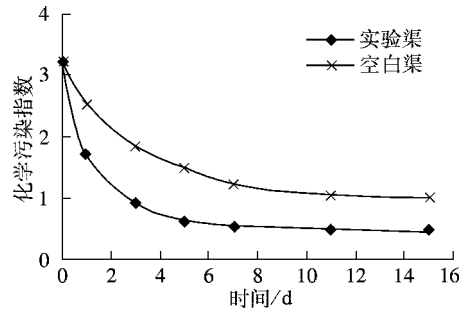


图 4 水质化学综合污染指数变化

2.2 微生物群落种群结构特征

通过 15 d 的 PFU 微生物群落监测,具有岸坡特定生态系统的实验渠、硬质护岸的空白渠中共采集 97 种微生物,其中植物性鞭毛虫 40 种,占物种总数的 39.2%. 实验渠采集 60 种微生物,空白渠采集 68 种,微生物种群结构见表 1.

表 1 微生物群落种类数

微生物种群	实验渠		空白渠	
	物种数	百分比/%	物种数	百分比/%
植物性鞭毛虫	28	46.7	25	36.8
动物性鞭毛虫	6	10.0	5	7.4
肉足虫纲	11	18.3	8	11.8
纤毛虫纲	9	15.0	16	23.5
轮虫	4	6.7	10	14.6
枝角类、桡足类及 其他	2	3.3	4	5.9
合计	60	100	68	100

PFU 群集的微生物种群按营养构成可分为 6 个功能类群,即生产者(光合作用者)、食菌(碎屑)者、食藻者、腐养者、食肉者和无选择的杂食者,它们在水生生态系统中构成稳定的食物链网,在特定的环境中保持相对平衡状态,同时对外界环境胁迫因子能产生快速而有效的生物学响应,即当外部环境发生变化时,水生生物的群落结构和功能参数将会发生显著变化. 实验渠中植物性鞭毛虫检出 28 种,占物种总数的 46.7%,纤毛虫纲、轮虫以及枝角、桡足类等微生物检出共 15 种,占总数的 25%,表明岸坡特定生态系统在有效改善水质的同

时,使得水中微型生物群落结构趋于稳定. 空白渠中植物性微型生物检出 25 种,占总数的 36.8%,而异养型微型生物检出 38 种,比例高达 55.9%,物种间存在较强的竞争势. 由于捕食关系,植物性鞭毛虫的比例较低,微型生物群落结构不稳定. 水体为异养型时,表现为浊度高,水中 COD_{Mn} , TN , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等污染物去除效果不明显. PFU 群集的微型生物种群在干净的水体中生产者、食菌者比例高,表明水体中自养型微生物在生物群落中的重要地位. 随着水体中有机污染物浓度的提高,群集的微型生物种类减少,异养型的原生动物比例增加. 该结论与文献 [14] 提出的微型生物群落结构对水质差异指示原理基本一致.

2.3 微型生物群落群集过程分析

根据 PFU 在停留时间分别为 1, 3, 5, 7, 11, 15 d 采集的微型生物种群数的变化过程,得到 PFU 微型生物群落的群集曲线,如图 5 所示. 从群集曲线的变化特征来看,PFU 群集的微型生物种群数 S_t 随停留时间 t 的增加表现为先升高后下降. 实验渠在停留时间为 1, 3 d 时微型生物种群数分别为 17 种和 24 种,生物多样性指数明显高于空白渠,表明岸坡特定生态系统能显著提高微型生物的群集速率. 当停留时间大于 5 d 时,实验渠中检出的微型生物种群数减少,主要因为实验渠中污染物去除速率快,水体透明度高,丝藻属等优势种迅速生长,而且 PFU 相继群集了轮虫及桡足类、枝角类等微型后生动物,因捕食关系致使微型生物种群数减少. 空白渠中 PFU 群集的微型生物种群数在停留时间为 7 d 才达到最大值,此后 PFU 陆续群集了轮虫类、枝角类、桡足类等微型后生动物,群集微型生物的种群数也逐步降低.

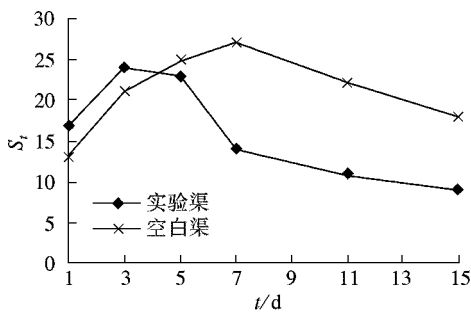


图 5 PFU 内微型生物种群数随时间变化

根据 MacArthur-Wilson 岛屿区域地理平衡模型^[9],采用最小二乘法反演计算 PFU 微型生物群落的群集过程的功能参数(见表 2). 实验渠中微型生物群落的平衡物种数与空白渠差别较小,分别为

27.56 和 27.22,然而实验渠中 PFU 的群集速率常数为 0.95,可在较短的时间内实现微型生物群落的物种平衡,达到 90% 平衡物种数的时间 $T_{90\%}$ 为 2.42 d,且水质改善效果显著,说明基于多孔混凝土的河渠岸坡特定生态系统强化了水生生态系统的自我调节能力,能迅速恢复和完善河渠生态系统. 空白渠中微型生物群集速率常数仅为 0.54,达到 90% 平衡种数的时间为 4.19 d,表现为种群结构不稳定,水体表现为异养型.

表 2 PFU 微型生物群集参数

监测点	S_{eq}	G	$T_{90\%} / \text{d}$
实验渠	27.56	0.95	2.42
空白渠	27.22	0.54	4.19

2.4 PFU 微型生物多样性分析

微型生物群落是由多种微型生物种群构成的,不是随机、脆弱的种类组合,而是能随环境条件变化按照自身规律发展的群落组合,正是由于微型生物群落的相对稳定性特征,因而能够用其结构和功能参数来评价河渠的生态系统. 一般来说,在环境胁迫条件下水生生物群落的多样性和种类数均呈减少的趋势. 实验渠、空白渠中微型生物群落的物种多样性指数见表 3. 实验渠在停留时间为 1~5 d 时生物多样性指数较大,3 d 时达到峰值 2.50,此后由于微生物种群数下降,水质透明度升高,生物量降低,多样性指数呈现下降趋势,并最终再次达到新的平衡状态. 物种多样性指数反映了河渠岸坡生态特性对微型生物群集过程的影响以及外部环境的胁迫效应,实验渠微型群落物种多样性指数可在较短的时间内达到峰值,岸坡特定生态系统有助于促进水生生态系统的建立和完善. 空白渠在停留时间为 1~5 d 内微型生物多样性指数均小于实验渠,5 d 后 PFU 群集了肉足虫纲、纤毛虫纲、轮虫等异养型微型生物,使得物种多样性指数高于实验渠. 对于封闭的水体来说,生物多样性指数并不能单独判定水生生态系统的稳定性,应结合微型生物的种群构成来综合判断生态系统的存在状态.

表 3 微生物群落多样性指数

t/d	实验渠	空白渠
1	1.84	1.29
3	2.50	2.07
5	2.43	2.46
7	1.44	2.69
11	1.13	2.24
15	0.97	1.92

3 结论

1) 应用 PFU 法测定具有岸坡特定生态系统

的实验渠和岸坡硬化的空白渠的微型生物群落,实验渠中水质改善效果显著,15 d 内检出微生物 60 种,植物性鞭毛虫比例为 46.7%,生物链结构趋于稳定;而空白渠水质改善效果不明显,15 d 内检出微生物 68 种,异养型微生物比例为 55.9%,生态系统易因生物种群结构不稳定而较为脆弱。

2) 实验渠、空白渠中微型生物群落速率常数分别为 0.95 和 0.54,实验渠中微型生物群落可在较短的时间内达到物种平衡,群集过程中生物多样性指数明显高于空白渠,达到微型生物种群平衡的时间为 2.42 d,而空白渠则为 4.19 d。

3) 空白渠中停留时间大于 5 d 时 PFU 群集了肉足虫纲、纤毛虫纲、轮虫以及桡足、枝角类等微型后生动物,生物多样性指数高于实验渠。对于封闭的水体来说,生物多样性指数并不能单独判定生态系统的稳定性,应与微型生物的种群构成、水质状况等因素相结合来综合评价河渠的生态系统。

参考文献 (References)

- [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(2): 208–217.
- [2] Jansson B, Backx 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(2): 218–222.
- [3] McKone P D. Streams and their riparian corridors—functions and values [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2000, 16(3): 28–29.
- [4] Jungwirth M, Muha S R, Schmutz S. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes [J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 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 Mingxi, Chen Fanqing, Liu Defu. Application of landscape ecology in construction of natural river level [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 98–102. (in Chinese)
- [6] 吴义锋, 吕锡武, 史静. 特定岸坡生态系统改善水源地水质实验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 107–111.
Wu Yifeng, Lü Xiwu, Shi Jing. Source water quality improvement under special riverine ecosystem using ecological embankments [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2009, 31(6): 107–111. (in Chinese)
- [7] 陈杨辉, 吕锡武, 吴义锋. 生态护砌模拟河道对氮系污染物的去除特性[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2172–2176.
Chen Yanghui, Lü Xiwu, Wu Yifeng. Removal of nitrogen in simulated rivers embanked by ecological concrete [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 2172–2176. (in Chinese)
- [8] 吴义锋, 吕锡武, 仲兆平, 等. 河渠特定生态岸坡基质酶活性及细菌种群的动态特征[J]. 化工学报, 2009, 60(11): 2897–2902.
Wu Yifeng, Lü Xiwu, Zhong Zhaoping, et al. Dynamic characteristics of substrate enzyme activities and bacteria species groups in special riverine ecosystem [J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(11): 2897–2902. (in Chinese)
- [9] 沈韞芬, 冯伟松, 顾曼云, 等. 河流的污染监测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 13–18.
- [10] 陈建, 沈韞芬. PFU 微型生物群落水质鉴别及群落参数变化模式的研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 156–161.
Chen Jian, Shen Yunfen. Discrimination of water quality based on PFU microbial communities and changing pattern of microbial parameters [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(2): 156–161. (in Chinese)
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 200–284.
- [12] 魏清伟, 胡勇有, 郑丙辉, 等. 护砌方式对模拟城市河道水质净化及稳定化的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 858–864.
Guo Qingwei, Hu Yongyou, Zheng Binghui, et al. Effects of simulated urban river embankments on water purification and stabilization [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(5): 858–864. (in Chinese)
- [13] 贾永志, 吕锡武, 吴义锋. 生态混凝土护砌模拟改善水源地水质[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 844–848.
Jia Yongzhi, Lü Xiwu, Wu Yifeng. Purification of source water quality in simulated rivers embanked by ecological concrete [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2009, 39(4): 844–848. (in Chinese)
- [14] 冯伟松, 沈韞芬. PFU 微型生物群落检测中异养型指数的应用研究及其分型分析[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 678–683.
Feng Weisong, Shen Yunfen. The fractal analysis and application studies of heterotrophic index in PFU methods [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4): 678–683. (in Chinese)