

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.05.006

# 3种天然材料改造直立式护岸对河道水质净化能力的影响

吴凤环, 潘伟斌, 王照宜

(华南理工大学环境与能源学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 在具有直立式护岸的人工模拟河道中, 把蚝壳、竹片和椰壳纤维垫3种天然材料分别直接覆盖在护岸表面, 以研究其对提高河道自净能力的影响。结果表明: 试验启动21 d后, 3种材料覆盖后河道COD去除率分别达到93%, 74%, 94%, 高于对照组的60%;  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率均达到95%, 高于对照组的59%;  $\text{NO}_3\text{-N}$  质量浓度在3种材料护岸和对照护岸分别升高至5.9 mg/L, 5.0 mg/L, 5.8 mg/L和3.9 mg/L, 而TP去除率分别达到71%, 37%, 78%, 对照组为64%, 3种材料对提高河道水质净化能力均有明显效果。竹片表面附着的微生物磷脂含量和脱氢酶活性最大, 分别为12 nmol/cm和45.0  $\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ , 分别是蚝壳的3.4和1.6倍, 是椰壳纤维垫的4.8和4.5倍, 3种天然材料均能为微生物附着生长和繁殖提供空间, 促进河道中污染物的降解。

**关键词:** 直立式混凝土护岸; 蚝壳; 竹片; 椰壳纤维垫; 河道自净能力; 人工模拟河道; 水质净化试验  
**中图分类号:** X171.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2014)05-0032-06

## Influences of three natural materials on self-purification capacity of rivers with vertical revetments

WU Fenghuan, PAN Weibin, WANG Zhaoyi

(College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to study the influences of three natural materials (oyster shells, bamboo pieces, and coir mats) on improvement of the self-purification capacity of rivers with vertical revetments, these natural materials were used to cover the surface of the vertical revetment in an artificial river. The results show that, after the experiments lasted for 21 days, the removal rates of COD with the three kinds of revetments reached 93%, 74%, and 94%, respectively, higher than the level of 60% in the control river. The removal rates of  $\text{NH}_3\text{-N}$  with the three kinds of revetments all reached 95%, higher than the level of 59% in the control river. The concentrations of  $\text{NO}_3\text{-N}$  with the three kinds of revetments increased to 5.9 mg/L, 5.0 mg/L, and 5.8 mg/L, respectively, while that in the control river increased to 3.9 mg/L. The removal rates of TP with the three kinds of revetments reached 71%, 37%, and 78%, respectively, while that in the control river reached 64%. The three kinds of revetments played a significant role in improving the self-purification capacity of the river. The lipid phosphorus content and dehydrogenase activity (DHA) of the microbial film on the surface of bamboo pieces were 12 nmol/cm and 45.0  $\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$ , respectively, 3.4 and 1.6 times higher than those of oyster shells, and 4.8 and 4.5 times higher than those of coir mats, respectively. These three natural materials can provide a habitat for microbial growth and reproduction, and can promote the degradation of pollutants in rivers.

**Key words:** vertical concrete revetment; oyster shells; bamboo pieces; coir; river self-purification; artificial river; water purification experiment

随着城市化的发展,很多河流被渠化,用混凝土衬砌将渠道封闭后,河中生物、微生物由于失去了赖以生存的环境而难以存活,河流原有的生态系统遭到破坏,水体自净能力降低<sup>[1-2]</sup>,因此,以最小的工程

以生存的环境而难以存活,河流原有的生态系统遭到破坏,水体自净能力降低<sup>[1-2]</sup>,因此,以最小的工程

作者简介:吴凤环(1988—),女,硕士研究生,研究方向为生态工程与环境修复。E-mail:wufenghuan3721@163.com

通信作者:潘伟斌,副教授。E-mail:ppwbpan@scut.edu.cn

代价对现有的渠化护岸进行生态改造、恢复河流自净能力具有重要现实意义。针对直立式混凝土护岸,考虑到既不大规模改造其护岸结构,又不显著减少河道过水断面,在硬质护岸基础上进行生态修复是当前的研究重点<sup>[3]</sup>。在目前已有的护岸改造新技术中,比较适合应用在直立式护岸的技术有:铁丝网与碎石复合种植基<sup>[4]</sup>、仿木桩护岸<sup>[5]</sup>、石笼护岸、山石护岸、土壤固化剂等。笔者建立人工模拟河道,在河道直立护岸上覆盖天然材料,通过分析蚝壳、竹片和椰壳纤维垫3种天然材料对护岸净化水质的效果及对材料附着微生物的影响,为选择合适的材料对直立式混凝土护岸进行生态改造,提高河道自净能力提供理论依据和实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

在护岸覆盖悬挂的材料是水质净化的关键,需在不影响河流原有使用功能的基础上实现水质净化。生态护岸材料需要符合以下要求:不影响河流泄洪、排涝功能,属于自然生态材料,具有生物亲和性,表面粗糙,比表面积大。因此,选择蚝壳、竹片和椰壳纤维垫等3种天然材料为生态护岸的实验材料。

蚝壳的物理构造为角质层、棱柱层、珍珠层组成,蚝壳表面主要是叶片结构,含大量互相连通的2~10 μm微孔,具有较强的吸附能力,已经作为一种吸附剂被用作染料废水及生活污水的处理<sup>[6]</sup>。从海鲜市场收集废弃蚝壳,用水将蚝壳表面泥沙和附着物洗净,用铁丝把粗糙面向外的蚝壳固定在护岸边壁。

我国竹类资源丰富。竹子因其成本低,可再生,环境污染低,可自行降解,已经成为水处理材料的研究热点。竹子材质天然,具有良好的生物亲和性<sup>[7]</sup>,是一种具有应用潜力的材料,目前以竹纤维为原料制备成的新型竹纤维生物膜载体对水处理的效果比较稳定<sup>[8]</sup>。从市场购买竹子,截成0.2 m长的竹筒,从中部剖开成两半,洗净后使竹片凸面向外垂直固定在护岸边壁。

椰壳纤维是椰子果实的副产品,可通过机械加工处理得到。椰壳纤维具有粗细适中、长度范围合理、重量轻、强度高、弹性好、透水性强等特点,容易形成密集而大小合理的网孔结构,动植物在网孔中生长,网孔能创造一个透气、保水、调温的环境,可以为其生长提供良好的条件,纤维含水性好,5年之内不腐烂,适合用于湖泊、河流和水渠护岸。把椰壳纤维垫裁剪成宽0.2 m的条状直接敷盖在河道的直立边壁,用夹子固定。

将3种天然材料(20 cm×10 cm)分别置于1000 mL清水中浸泡5 d,考察材料对有机物、NH<sub>3</sub>-N和TP的溶出特性。蚝壳、竹片和椰壳纤维垫溶出COD的质量浓度分别是14 mg/L,27 mg/L,41 mg/L,溶出NH<sub>3</sub>-N的质量浓度分别是0.8 mg/L,0.8 mg/L,2.5 mg/L,溶出TP的质量浓度分别是0.09 mg/L,0.8 mg/L,0.8 mg/L。可以看出,用清水浸泡3种材料后均会溶出天然有机物质和氮磷营养盐。

### 1.2 河道模拟装置

试验所使用的河道模拟装置依据国内外对河工模型制作经验设计,并进行了验证试验。由验证试验结果分析可知,本系统中的河工模型能够较好地模拟原型河道,有一定的实用性,具体设计和验证过程见文献<sup>[9]</sup>。该装置根据城市河道直立式混凝土护岸的构筑形态、河流流量、流速,采用相似原理设计成U形河道模型,模拟河道采用不锈钢板制成,垂直边壁与河床的粗糙系数较小,符合实际河道特征。河道长6.08 m,宽0.45 m,高0.20 m,有效水深0.09 m,弯道半径0.375 m,有效容积0.22 m<sup>3</sup>,两直段的端部分别为进水口和出水口,进水口设置布水板,均匀布水,采用溢流堰出水。河道模拟装置见图1。

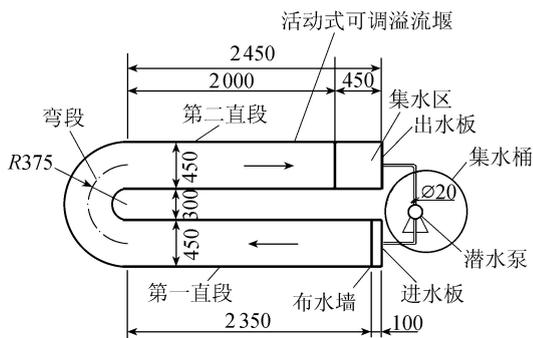


图1 河道模拟装置平面图(单位:mm)

### 1.3 试验方法和原水水质

取珠江广州市番禺区新造河段的河水作为试验用水,在模拟河道中循环流动,共进行3个周期(每个周期7~10 d)的实验,1个周期结束后更换河水。采用自然挂膜,第1周期为材料的挂膜启动阶段,第2、3周期为模拟河道运行阶段。采用4个相同的模拟装置,其中1个不放置材料作为空白对照组,其他3个分别放入蚝壳、竹片和椰壳纤维垫,作为护岸边壁材料的试验组。进水流量为1000 L/h,流速为0.7 cm/s,原水水质范围: $\rho(\text{COD})$ 为16.26~21.26 mg/L, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为4.10~7.01 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 为0.18~0.45 mg/L,pH值为7.26~7.40,水温为19~22℃。

### 1.4 分析项目及方法

选取的水质检测指标主要有COD、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP,生物指标主要有生物量和脱氢酶活性。水质指

标测定 COD 采用重铬酸法,  $\text{NH}_3\text{-N}$  采用纳氏试剂光度法,  $\text{NO}_3\text{-N}$  采用紫外分光光度法, TP 采用钼锑抗分光光度法; 取出河道材料, 用无菌刷把其表面附着的生物膜刮下制成附着微生物样品<sup>[10]</sup>, 采用磷脂法<sup>[11]</sup>和三苯基四氮唑氯化物比色法<sup>[12]</sup>分别测定生物量、脱氢酶活性。采用 SPSS 11.0 软件, 使用单因素方差分析对数据进行显著性分析 ( $P < 0.05$  差异显著), 采用 Origin 8.0 软件和 Excel 软件进行绘图及图件制作。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质净化效果

#### 2.1.1 有机物的去除效果

3 种护岸材料对有机污染物的去除情况见图 2。由图 2 可见, 随着试验时间的延长, 护岸对有机物的净化效果更加明显, 第 3 周期运行 6 d 后, 蚝壳、竹片和椰壳纤维垫护岸对水体 COD 的去除率分别由第 2 周期第 7 天的 72%, 36%, 79% 提高至 93%, 74%, 94%; 而相同条件下对照组在两个时期去除率分别是 57% 和 60%。其中蚝壳和椰壳纤维垫护岸的净化效果较好, 显著高于对照 ( $p < 0.05$ ), 可能是由于蚝壳和椰壳纤维表面粗糙, 对有机污染物有较大的拦截、吸附和过滤作用。微生物生长与繁殖所需要的碳源与能源由有机物供给, 因此会消耗水中有机物<sup>[13]</sup>, 第 2 周期试验运行的第 2 天, 竹片自身溶出的天然有机物大于微生物降解或吸附去除的有机物, COD 去除率先下降后上升, 可以看出竹片覆盖的护岸对水体有机物有净化效果。虽然椰壳纤维垫

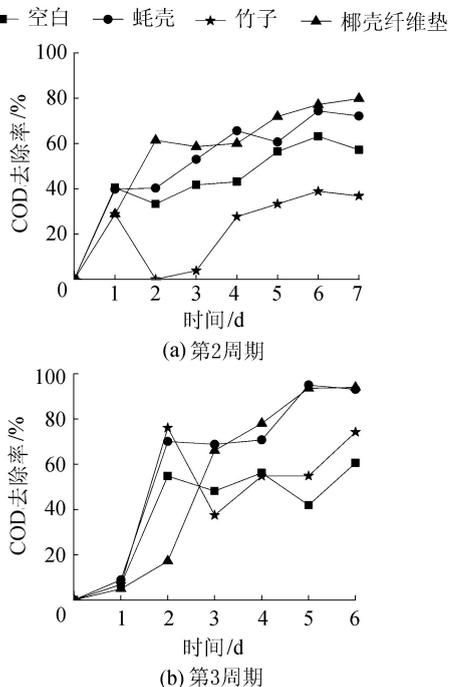


图 2 不同周期不同护岸材料对 COD 的去除率

有机物的溶出量也很高, 其吸附能力却较强, 因此对 COD 的去除率较高。

#### 2.1.2 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果

3 种护岸材料对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的净化效果如图 3。由图 3 可见, 试验初期,  $\text{NH}_3\text{-N}$  均有明显的下降, 这与  $\text{NH}_3\text{-N}$  的挥发特性有关<sup>[14]</sup>, 3 种材料与对照组去除率差别不大, 随着运行时间的延长, 覆盖材料的护岸优势开始体现, 因为生物膜逐渐形成, 除了材料的物理化学吸附, 材料表面微生物的硝化和反硝化作用逐渐增强<sup>[15]</sup>,  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率也逐渐增高, 第 2 周期 5 d 后蚝壳、竹片、椰壳纤维垫试验组  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率分别达到 84%, 90%, 81%, 高于对照组的 74%。第 3 周期第 6 天 3 种材料护岸对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率均接近 95%, 而对照组只有 59%, 显著性分析结果显示, 覆盖材料的护岸在第 3 周期前 5 d 对  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率显著高于对照 ( $p < 0.05$ )。整体上 3 种材料护岸对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除效果由高到低依次是竹片、蚝壳和纤维垫。

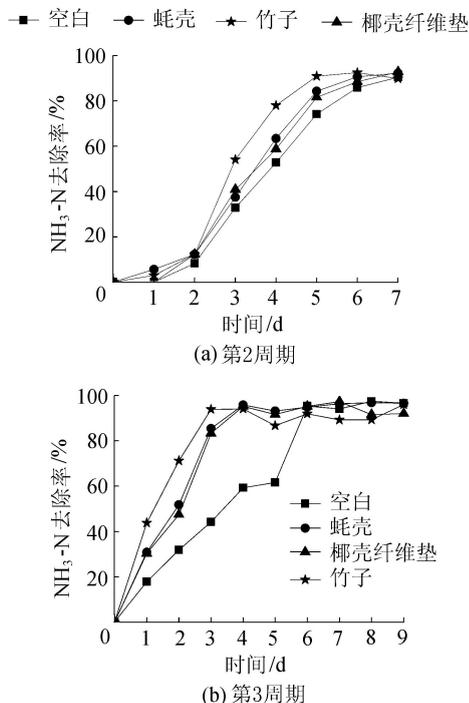


图 3 不同周期不同护岸材料对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率

水中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度下降时,  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度在升高。由图 4 可见, 试验第 3 周期, 对照组  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度上升得最慢, 可能因为材料表面形成的生物膜微生物硝化作用比较强, 在有氧条件下,  $\text{NH}_3\text{-N}$  在硝酸菌的作用下被进一步氧化成  $\text{NO}_3\text{-N}$ <sup>[16]</sup>, 在第 4 天蚝壳、竹片和椰壳纤维垫护岸的水体中  $\text{NO}_3\text{-N}$  质量浓度由原水的 2.8 mg/L 分别提高至 5.9 mg/L, 5.0 mg/L 和 5.8 mg/L, 对照组为 3.9 mg/L。3 种材料护岸的河水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度均先快速升高, 4 d 后在蚝壳与

椰壳纤维垫护岸平缓地下降,5 d后在竹片护岸快速下降,试验结束时蚝壳、竹片、椰壳纤维垫和对照组  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的质量浓度分别是 5.9 mg/L, 2.3 mg/L, 5.7 mg/L 和 5.8 mg/L。一些研究发现,微环境的存在是硝化和反硝化同时发生的主要原因,在一定厚度的生物膜上,因为氧无法渗透,生物膜内部形成厌氧环境,因此随着时间的延长,材料上的生物膜内部形成厌氧环境发生反硝化作用<sup>[17]</sup>,使蚝壳、椰壳纤维垫和竹片河道的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度逐渐降低。可能由于竹片附着生物膜厚度较大,膜内反硝化作用较强,对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的去除效果最好。

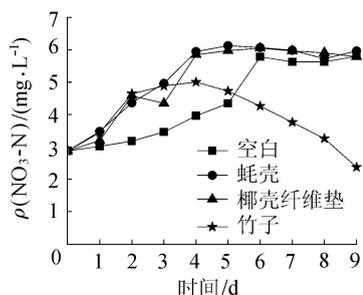


图4 第3周期不同护岸材料对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的净化效果

### 2.1.3 对 TP 的去除效果

3种材料护岸对 TP 的去除效果如图5所示。第2和第3周期实验前4天,蚝壳、竹片和椰壳纤维垫护岸对 TP 的去除率分别达到 68%, 15%, 80% 和 71%, 37%, 78%, 相同条件下对照组为 61% 和 64%, 分析结果显示对照组对 TP 的去除率与竹片、椰壳纤维护岸有显著差异 ( $p < 0.05$ ), 与蚝壳护岸差异不明显 ( $p > 0.05$ ), 可以看出, 椰壳纤维垫的净化

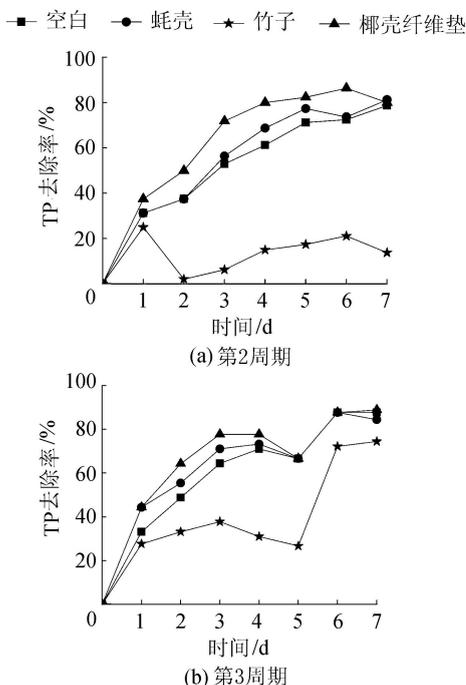


图5 不同周期不同护岸材料对 TP 的净化效果

效果最好。一些研究<sup>[18]</sup>发现 TP 的去除主要依靠材料对吸附在悬浮颗粒的磷进行拦截,使其沉入水底,加上试验水体流动较慢,在一定程度上也减少了沉入水底的磷的释放。随着装置运行时间的延长,对照组中 TP 去除效率逐渐增高,主要是由于河流泥沙沉淀作用,降低了水中 TP 浓度。竹片护岸在试验 2~3 d 后,水中 TP 的浓度开始升高,随后微生物生长和代谢消耗水中溶解性磷,当消耗的磷浓度大于竹片溶出磷物质时,TP 的浓度逐渐降低,说明竹片护岸对于水质也有净化作用。

## 2.2 3种材料附着生物量和生物活性比较

### 2.2.1 附着生物量

附着生物量是描述材料上附着微生物特性的重要参数。3种材料上附着生物量的变化情况见图6。由图6可见,竹片的附着微生物磷脂含量最大,与蚝壳和椰壳纤维垫有显著差异 ( $p < 0.05$ ), 达到 12 nmol/cm, 试验前期竹片上附着生物量增长较明显,到第9天突然下降,可能是由于中途换水,导致生物膜脱落。蚝壳和椰壳纤维垫上附着的生物量低于竹片,仅为 3.5 nmol/cm 和 2.5 nmol/cm, 而且变化趋于平缓。3种材料均为可生物降解的天然材料,为微生物的生长和繁殖创造了有利的条件,以材料为载体,通过护岸材料的物理吸附过滤作用<sup>[19-21]</sup>,聚集较高的生物量进行有机物降解、氨化和硝化等生化作用,达到提高水体自净能力的目的<sup>[14]</sup>。

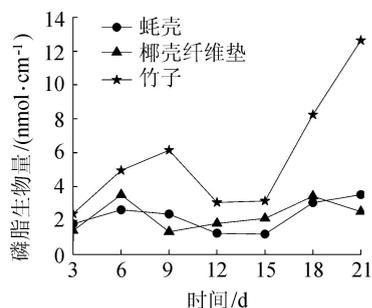


图6 附着生物量变化情况

### 2.2.2 附着微生物活性

生物处理的净化作用效果主要决定于生物量与生物活性<sup>[22]</sup>,生物量只能反映微生物量的多寡,不能反映其活性,本研究选择脱氢酶活性<sup>[23]</sup>作为反映微生物活性指标。3种材料的附着微生物脱氢酶活性见图7。竹片上附着的微生物活性最大,与其生物量相对应,其次是蚝壳,两者在第9天呈现快速增长趋势,15 d后分别达到 45.0  $\mu\text{g}/(\text{mL} \cdot \text{h})$  和 28.6  $\mu\text{g}/(\text{mL} \cdot \text{h})$ 。椰壳纤维垫上的附着微生物活性一直处于缓慢上升状态,到第9天基本不发生变化,稳定为 10.0  $\mu\text{g}/(\text{mL} \cdot \text{h})$ 。竹片含有较高的附着微生物量和活性,有利于水中的  $\text{NH}_3 \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的去

除<sup>[24]</sup>,但是蚝壳和椰壳纤维垫对水中 COD 和 TP 的去除效果却比竹片好,一方面可能与材料表面特性有关,前两者通过吸附作用去除污染物的作用较强;另一方面在水体修复中,N、P 是限制微生物活性的重要因素,适当增加污染环境微生物所需要的成分,可促使土著微生物迅速增长<sup>[25]</sup>,由于在试验周期内竹片本身释放出营养物质在供微生物生长同时,也增加了水中有机物和营养物的浓度。一些研究<sup>[26]</sup>还表明某些生物膜结构不同会导致微生物活性不同,本研究中竹片表面附着的微生物活性高,这可能与材料的结构和性质对某些活性较高的微生物具有较强的亲和性有关<sup>[27]</sup>,具体原因需进一步研究探讨。

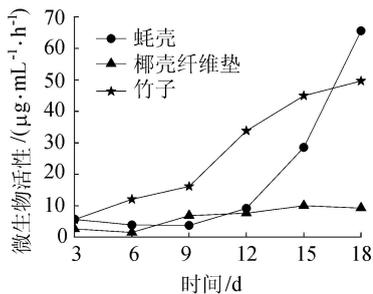


图7 附着微生物脱氢酶活性

### 3 结论

a. 采用蚝壳、竹片和椰壳纤维垫 3 种天然材料作护岸对提高水质自净能力均有一定效果。第 3 个周期运行 6 d 后,3 种材料覆盖的护岸对 COD 的去除率分别是 93% ,74% ,94% ,高于对照组的 60% ;第 3 周期运行 5 d 后,3 种材料 NH<sub>3</sub>-N 的去除率均接近 95% ,高于对照组的 59% ;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的质量浓度在第 3 周期第 4 天分别上升为 5.9 mg/L,5.0 mg/L 和 5.8 mg/L,对照组为 3.9 mg/L,试验结束时分别又达到 5.9 mg/L,2.3 mg/L 和 5.7 mg/L,对照组为 5.8 mg/L;TP 在模拟装置运行的第 3 周期 4 d 后的去除率分别达到 71% ,37% ,78% ,对照组为 64% 。

b. 3 种材料表面附着的微生物磷脂含量和活性存在差异,竹片上附着微生物磷脂含量最大,最高达到 12 nmol/cm,蚝壳和椰壳纤维垫上附着的生物量显著低于竹片,为 3.5 nmol/cm 和 2.5 nmol/cm。竹片上附着的微生物脱氢酶活性最大,其次是蚝壳,第 3 周期 15 d 时分别达到 45.0 μg/(mL·h) 和 28.6 μg/(mL·h),而椰壳纤维垫附着的生物活性稳定为 10.0 μg/(mL·h),3 种天然材料均能为微生物附着生长和繁殖提供空间,促进污染物的降解,相对于蚝壳和椰壳纤维垫,竹片更易于富集微生物。

### 参考文献:

[ 1 ] 李新芝,王小德.论城市河道中直立式护岸改造模式

[J].水利规划与设计,2009(6):61-63. (LI Xinzhi, WANG Xiaode. Discuss on the transformation mode of the vertical revetment in the urban river[J]. Water Resources Planning and Design,2009(6):61-63. (in Chinese))

[ 2 ] 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,LYU Xiwu,WU Yifeng. Removal of nitrogen in simulated rivers embanked by ecological concrete [J]. Environmental Science, 2008, 29 (8): 2172-2176. (in Chinese))

[ 3 ] 谢三桃,朱青.城市河流硬质护岸生态修复研究进展[J].环境科学与技术,2009,32(5):83-87. (XIE Santao,ZHU Qing. Review on ecological restoration on flinty riparian by urban rivers[J]. Environmental Science & Technology, 2009,32(5):83-87. (in Chinese))

[ 4 ] 范红社.城市河道整治中生态型护坡结构探讨[J].山西水利,2005(4):50-51. (FAN Hongshe. Bio-technical research of slope protection structure for urban river improvement[J]. Shanxi Water Resources,2005(4):50-51. (in Chinese))

[ 5 ] 王绍斌,林晨.从凉水河干流综合整治工程看城市河道的生态设计[J].北京水利,2005(1):14-16. (WANG Shaobin,LIN Chen. Analysis the eco-design of urban river based on the rehabilitation project of Liangshuihe main river[J]. Beijing Water Resources,2005(1):14-16. (in Chinese))

[ 6 ] 李林锋,吴小凤.天然牡蛎壳对磷吸附特性试验研究[J].三峡环境与生态,2011,33(6):1-8. (LI Linfeng, WU Xiaofeng. Experiment of phosphate adsorption characteristic by natural oyster shells [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges,2011,33(6):1-8. (in Chinese))

[ 7 ] 陈亚男.几种填料生物膜特性与挂膜参数优化研究[D].杭州:浙江大学,2012.

[ 8 ] 褚淑祯,肖继波,张立钦,等.一种新型竹纤维生物膜载体的制备与性能[J].林业科学,2012,48(7):128-133. (CHU Shuyi,XIAO Jibo,ZHANG Liqin,et al. Preparation and characteristics of a novel bamboo fibre biofilm carrier [J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,48(7):128-133. (in Chinese))

[ 9 ] 赵素.河岸河床材料对水体自净能力的影响[D].广州:华南理工大学,2011.

[ 10 ] 于鑫,李旭东,杨俊仕.微污染原水生物预处理工艺中生物膜的形态和活性[J].城市环境与城市生态,2003,16(1):37-39. (YU Xin,LI Xudong,YANG Junshi,et al. Biofilm morphology and activity in biopretreatment for polluted raw water [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003,16(1):37-39. (in Chinese))

[ 11 ] 于鑫,张晓健,王占生.饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定[J].给水排水,2002,28(5):1-5. (YU Xin, ZHANG Xiaojian, WANG Zhansheng. Determination by

- the way of biomass lipoteichoic in the biological treatment of drinking water [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2002, 28(5):1-5. (in Chinese))
- [12] 朱南文, 闵航, 陈美慈, 等. TTC-脱氢酶测定方法的探讨 [J]. *中国沼气*, 1996, 14(2):3-5. (ZHU Nanwen, MIN Hang, CHEN Meici, et al. Discussion on the determination of the TTC-dehydrogenase [J]. *China Biogas*, 1996, 14(2):3-5. (in Chinese))
- [13] 徐德福, 李映雪, 郑建伟, 等. 基质对人工湿地污水蒸发量及净化能力的影响 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(6):927-932. (XU Defu, LI Yingxue, ZHENG Jianwei, et al. Effect of substrates on evaporation and purification of wastewater in constructed wetland [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(6):927-932. (in Chinese))
- [14] 姚理为, 余辉, 田学达, 等. 碳素纤维对富营养化水体的水质改善与对藻类群落结构的影响 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(8):890-896. (YAO Liwei, YU Hui, TIAN Xueda, et al. Impacts of carbon fiber on eutrophic water quality improvement and its algal community structure [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(8):890-896. (in Chinese))
- [15] 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):107-116. (WU Yifeng, LYU Xiwu, SHI Jing. Source water quality improvement under special riverine ecosystem with ecological embankments [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(6):107-116. (in Chinese))
- [16] 纪荣平, 吕锡武, 李先宁, 等. 三种人工介质对太湖水质的改善效果 [J]. *中国给水排水*, 2005, 21(6):4-7. (JI Rongping, LYU Xiwu, LI Xianning, et al. Effect of three kinds of artificial media on the improvement of Taihu Lake water quality [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(6):4-7. (in Chinese))
- [17] PASTORELLI G, ANDREOTTOLA G, CANZIANI R. et al. Pilotplant experiments with moving-bed biofilm reactors [J]. *Water Science Technology*, 1996, 36(1):27-30.
- [18] 田伟君, 郝芳华, 翟金波. 弹性填料净化受污染入湖河流的现场试验研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29(5):1308-1312. (TIAN Weijun, HAO Fanghua, ZHAI Jinbo. Elasticity plastic filller for purification of polluted streams in situ entering lake [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5):1308-1312. (in Chinese))
- [19] WU Yaoguo, HUI Lin, WANG Hui. Effectiveness of riverbank filtration for removal of nitrogen from heavily polluted rivers: a case study of Kuihe River, Xuzhou, Jiangsu, China [J]. *Environmental Geology*, 2007, 52:19-25.
- [20] GRUNHEIDA S, AMY G, JEKEL M. Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge [J]. *Water Research*, 2005, 39(14):3219-3228.
- [21] DASH R R, BHANU PRAKASH E V P, KUMAR P, et al. River bank filtration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bacteria [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(4):973-983.
- [22] 袁杰. 透水混凝土生态膜生物相及其净水机理研究 [D]. 广州:暨南大学, 2006.
- [23] 赵庆良, 刘淑彦, 王琨. 复合式生物膜反应器中生物膜量、厚度及活性 [J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(6):39-43. (ZHAO Qingliang, LIU Shuyan, WANG Kun. Biomass, thickness and activity of biofilm in hybrid biofilm reactors [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, 32(6):39-43. (in Chinese))
- [24] 周海红, 王建龙. 利用可生物降解聚合物同时作为反硝化微生物的碳源和附着载体研究 [J]. *中国生物工程杂志*, 2006, 26(2):95-98. (ZHOU Haihong, WANG Jianlong. Study on using biodegradable polymers both as carbon source and carrier adhesion of denitrifying microbial [J]. *China Biotechnology*, 2006, 26(2):95-98. (in Chinese))
- [25] 张美兰. 有机污染河道生物膜原位处理技术研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [26] 向红, 刘武平, 李璇. 生物滤池中生物量与生物活性分析及其净水效果 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(3):48-51. (XIANG Hong, LIU Wuping, LI Xuan, et al. Analysis of biological filter biomass and biological activity and its purification effect [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(3):48-51. (in Chinese))
- [27] 林桔, 潘伟斌, 曹英姿, 等. 格宾护岸填料类型对河道自净能力的影响 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(5):1565-1569. (LIN Ju, PAN Weibin, CAO Yingzi, et al. Effect of different substrates on river self-purification in Gebin revetment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(5):1565-1569. (in Chinese))

(收稿日期:2014-04-21 编辑:徐娟)

