

## 人工载体理化性状对附着生物水质修复能力的影响\*

陈丹<sup>1,2</sup>, 高光<sup>1\*\*</sup>, 汤祥明<sup>1</sup>, 晁建颖<sup>3</sup>, 戴江玉<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

**摘要:** 附着生物初级生产力、叶绿素 a 含量和碱性磷酸酶活性能够指示其对水质的净化能力。本实验选择了 5 种具有不同表面结构和理化特性的人工载体(载玻片、PVC 片、软性载体、组合载体和立体载体), 野外原位测定了不同人工载体上附着生物的初级生产力、叶绿素 a 含量及碱性磷酸酶活性。结果表明: 人工载体的理化性状是影响其上附着生物群落稳定、生产力、叶绿素 a 含量和碱性磷酸酶活性的重要因素。在野外原位条件下, 附着生物通常在 8~10 d 就可以达到最大附着量, 此时, 其初级生产力、叶绿素 a 含量和代谢活性等均处于最佳状态。在所选择的 5 种人工载体中, 立体载体和软性载体上附着生物的初级生产力、叶绿素 a 含量及碱性磷酸酶活性均显著高于其他 3 种载体, 其中立体载体上附着生物净初级生产力最高可达 164.21 mgO<sub>2</sub>/(g·h), 且与软性载体相比, 立体载体价格相对经济, 因此立体载体是一种比较理想的用于水质修复的人工载体。

**关键词:** 人工载体; 理化性状; 附着生物; 初级生产力; 叶绿素 a; 碱性磷酸酶活性

## Influence of the physicochemical characteristic of artificial substrates on water purifying capability of periphyton

CHEN Dan<sup>1,2</sup>, GAO Guang<sup>1</sup>, TANG Xiangming<sup>1</sup>, CHAO Jianying<sup>3</sup> & DAI Jiangyu<sup>1,2</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection of China, Nanjing 210042, P. R. China*)

**Abstract:** Primary production, chlorophyll-a and alkaline phosphatase activity of periphyton can indicate its water purifying capacity. Five artificial substrates with different surface configurations and physicochemical characteristics were selected during this experiment. They were glass slide, PVC film, soft substrate, combined substrate and elastic substrate. The primary production, chlorophyll-a and alkaline phosphatase activity of periphyton attached on these five different substrates were investigated *in situ*. The results showed that physicochemical characteristics of artificial substrates were proved to be the key factors affecting the stability of periphyton community, primary production, chlorophyll-a and alkaline phosphatase activity. Generally during *in situ* attachment process, the maximum mass of periphyton appeared on the 8th to 10th day while periphyton primary production, chlorophyll-a and metabolic activity were also showed the highest. Primary production, chlorophyll-a and alkaline phosphatase activity of the periphyton attached on elastic and soft substrates were significantly higher than those on other three substrates. The net primary production of the periphyton attached on the elastic substrate was 164.21 mgO<sub>2</sub>/(g·h), the highest of those on the five artificial substrates. Compared with the soft substrate, the elastic substrate was more economic and better optimal artificial substrate for water quality restoration.

**Keywords:** Artificial substrate; physicochemical characteristic; periphyton; primary production; chlorophyll-a; alkaline phosphatase activity

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07101-010)和江苏省自然科学基金项目(BK2011878)联合资助。2012-03-30 收稿; 2012-07-24 收修改稿。陈丹, 女, 1988 年生, 硕士研究生; E-mail: chendan881022@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: guanggao@niglas.ac.cn.

附着生物源于英文“epiphyte”,是指水生生态系统中附着于各种载体表面上由细菌、藻类和微型动物等所构成的集合体<sup>[1]</sup>,它们是水生生态系统中具有独特功能的组成部分,在湖泊、河流、水库等天然水体的物质循环和初级生产过程中起着重要的作用<sup>[2-3]</sup>. 相比水体中的浮游生物,载体表面的附着生物种群密度高,生物代谢活性强,且其生产力与周围水体的营养程度密切相关,往往在富营养化程度高的水体中附着生物初级生产力相应也高<sup>[2]</sup>. 因此,早在 1980s,国内外一些学者就开始利用水体中的附着生物来监测评价河流水质的污染状况<sup>[4-5]</sup>,一些地方也尝试利用附着藻类来处理受污染的水体<sup>[6]</sup>. 研究表明,作为衡量初级生产者生长和生物量的重要指标,附着生物初级生产力和叶绿素 a 含量也可以有效反映附着生物对水质的净化能力. 此外,附着藻类等对水体中的磷具有较好的去除作用<sup>[7-8]</sup>,而能够反映附着生物对磷需求的碱性磷酸酶活性也常被作为一种指示附着生物除磷能力的指标<sup>[9-10]</sup>.

水生生态系统中存在很多天然的附着载体,如石头、木材、植物等,这些天然载体虽然也能附着大量生物<sup>[11]</sup>,对受污染水体起到一定的净化作用,但天然载体往往形状不规则,表面积难以计算,不利于科学管理及定量分析<sup>[12-13]</sup>;人工载体是一种人工合成的、易于生物附着及定量分析的复合材料<sup>[14]</sup>. 在水生生态系统中,附着在人工载体上的附着生物由于富含细菌、藻类、原生生物等,具有极高的代谢活性,可以有效地分解、转化水体中的有机物质,并可通过定期将载体移出水体清洗等方式,使其中所附着的大量氮磷营养物质被带出水体,从而使得水体得以净化. 目前,人工载体在污水处理工艺中应用广泛,效果显著<sup>[15-17]</sup>.

不同类型的人工载体,其表面上附着生物的生物量、生产力等均存在差异<sup>[18-19]</sup>,为了探讨载体的表面结构和理化性状对附着生物的影响,本文通过在野外原位条件下比较 5 种不同理化性状的人工载体上附着生物初级生产力、叶绿素 a 含量和碱性磷酸酶活性的差异,以期筛选出适用于野外条件的理想人工载体,为富营养湖泊的治理提供新的思路和技术指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

依据人工载体的理化性状和表面结构,选择 5 种人工载体,包括载玻片(BP)、PVC 片(PVC)、软性载体(RX)、组合载体(ZH)和立体载体(LT)进行野外原位实验. 所选择的人工载体经酸处理、清洗、晾干、称重、测量面积后,分别悬挂于自制的附着生物采样装置上,于 2008 年 9 月 23 日—10 月 6 日放入位于太湖梅梁湾的太湖湖泊生态系统研究站(简称 TLLER,位于 31°42'N,120°21'E)栈桥下的水体中(水面下约 50 cm 处). 每隔 1 d,将所放入的人工载体从水体中取出,每种载体随机采集 3 段样品作为平行样. 在实验室中按国际上通用的处理程序,用软毛刷将不同载体材料上的附着生物洗脱下来,连同冲洗液一并收集,并用预先灭过菌的去离子水定容至 50 ml 或 100 ml. 所有样品均放入冰箱保存,并在 24 h 内进行各种参数的测定. 每次采样时,用有机玻璃采水器同步采集悬挂载体附近的水样,设置 3 个平行,进行实验区域背景水质参数分析.

### 1.2 实验载体的理化特征

选择的 5 种人工载体表面理化参数见表 1. 其中,载玻片表面光滑,结构简单,目前国际上的相关研究中常将其作为对照载体<sup>[20-21]</sup>;PVC 片是一种表面光滑、结构简单的聚氯乙烯材料,同载玻片一样,比表面积均较小<sup>[22]</sup>;软性载体具有抗拉力均匀不偏向、纤维丝易在水中横向展开、不易断等优点,比表面积最高(990.0 m<sup>2</sup>/kg);组合载体是由纤维束、塑料片、套管与中心绳组成,通常将塑料圆片压扣成双圈大塑料环,将涤纶丝压在环的环圈上,使涤纶丝均匀分布,内圈是雪花状塑料枝条,比表面积其次(555.6 m<sup>2</sup>/kg),空隙可变不堵塞,易生膜、挂膜,对受污水体中污染物浓度的适用性较好;立体载体筛选了聚烯烃类和聚酰胺中的几种防腐、耐温、耐老化的优质品种,混合以亲水、吸附、抗热氧等助剂,采用特殊的拉丝、丝条制毛工艺,将丝条穿插固着在防腐、高强度的中心绳上,在水体中能立体全方位均匀舒展满布,使气、水、生物膜得到充分混渗接触交换,生物膜不仅能均匀地附着在每根丝条上,保持良好的活性和空隙可变性,而且能在附着过程中获得愈来愈大的比表面积,进行良好的新陈代谢<sup>[23]</sup>.

表 1 5 种人工载体的理化性质参数  
Tab. 1 Physicochemical characteristics of the five artificial substrates

载体参数	载玻片	PVC 片	软性载体	组合载体	立体载体
载体材质	玻璃	聚氯乙烯 PVC 材料	合成纤维	合成纤维	聚烯烃类(聚酰胺)
重量比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)	0.4	0.2	990.0	555.6	105.6
表面性质	光滑	光滑	粗糙边缘多散丝	粗糙边缘多毛	粗糙辐射状分布密集

1.3 样品的分析

样品中总氮(TN)、总磷(TP)分别采用碱性过硫酸钾高温消解后紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定;溶解性总氮(TDN)、溶解性总磷(TDP)采用经 Whatman GF/F 膜过滤后的水样加碱性过硫酸钾高温消解,其余步骤同 TN、TP 的测定<sup>[24]</sup>;叶绿素 a 浓度用 90% 热乙醇提取后分光光度法进行测定<sup>[24-25]</sup>;用已经 105℃ 烘干并称重(W<sub>1</sub>)的 Whatman GF/F 滤膜抽滤水样;抽滤后,滤膜恒温 105℃ 烘 4 h,冷却平衡后称重(W<sub>2</sub>),继而放入马弗炉 550℃ 灼烧 5 h,冷却平衡后称重(W<sub>3</sub>). W<sub>2</sub> - W<sub>1</sub> 为悬浮物(SS)重,W<sub>2</sub> - W<sub>3</sub> 即为颗粒有机物(POM)重<sup>[26]</sup>;以对硝基苯磷酸二钠(p-NPP, Sigma 公司)为反应底物. 本实验选择以下反应条件: pH = 8.4(用 Tris 缓冲溶液调节)、温度 30℃、反应物体积为 5 ml、反应时间 6 h、波长 410 nm,岛津 UV-2401 分光光度计测定附着生物碱性磷酸酶活性(APA)<sup>[27-28]</sup>;附着生物初级生产力的测定:采用黑白瓶法,瓶中装满用 32 μm 筛绢过滤后充分曝气的湖水,每瓶加入 5 ml 附着生物备用液,加盖后放在光照培养箱中培养 24 h,用碘量法测定溶解氧的含量,每个样品重复测定 3 次<sup>[24]</sup>.

1.4 实验数据的处理

本实验中数据的统计分析采用 SPSS 统计软件包(SPSS 公司,版本 16.0)进行,不同人工载体附着物理化性质的均值比较采用 One-Way ANOVA. 数据图采用 SigmaPlot 10.0 软件绘制.

2 结果与分析

表 2 实验期间背景水体理化特性

Tab. 2 Physicochemical parameters of the surrounding water during the experiment

参数	均值 ± 标准差
SS/(mg/L)	61.40 ± 31.30
POM/(mg/L)	11.90 ± 4.30
TN/(mg/L)	1.80 ± 0.38
TP/(mg/L)	0.15 ± 0.03
Chl. a/(μg/L)	18.80 ± 7.90
TDN/(mg/L)	1.18 ± 0.21
TDP/(mg/L)	0.06 ± 0.01

2.1 实验区域水体的理化特征

实验期间,实验区域湖水中氮、磷营养盐形态、含量,叶绿素 a 含量及其它理化因子均出现一定程度的波动(表 2). 水体中营养盐形态、含量及其它理化性状的这种变化特征,除受到天气、风浪、湖流等各种动力因素及外源输入的影响外,还与梅梁湾水域中的藻类水华有着密切的关系.

2.2 不同人工载体上附着生物初级生产力的比较

整个附着过程中 5 种载体初级生产力总体变化趋势相似. 除软性载体上附着生物初级生产力在实验第 8 d 达到峰值外,其余均在实验第 10 d 达到峰值,随后便开始逐渐下降(图 1). 立

体载体上附着生物的净初级生产力和毛初级生产力最高值分别为 133.7 ± 30.5 mgO<sub>2</sub>/(g · h) 和 198.5 ± 29.4 mgO<sub>2</sub>/(g · h),与其他 4 种载体之间存在着极显著差异(P < 0.01,图 2). 软性载体上附着生物的初级生产力次之,而其他 3 种载体上附着生物的净初级生产力差异不显著(P > 0.05),玻片和 PVC 片上附着生物的净初级生产力最低,尤其是比表面积最低的 PVC 片,附着生物的净初级生产力均值仅为 0.064 mgO<sub>2</sub>/(g · h),仅占立体载体的 0.05%. 总体而言,附着生物的初级生产力呈现出立体载体 > 软性载体 > 组合载体 > 载玻片 > PVC 片的趋势(图 2A).

2.3 不同人工载体上附着生物叶绿素 a 含量的比较

实验结果表明,不同载体上附着生物的叶绿素 a 含量差异显著,但其变化趋势也十分类似(图 3). 其与初级生产力一样,附着生物叶绿素 a 的含量通常在 10 d 左右就可以达到稳定的固着状态. 当载体附着达到高峰时,其上叶绿素 a 含量呈现出立体载体 > 软性载体 > 组合载体 > 载玻片 > PVC 片的趋势(图 2B). 其中

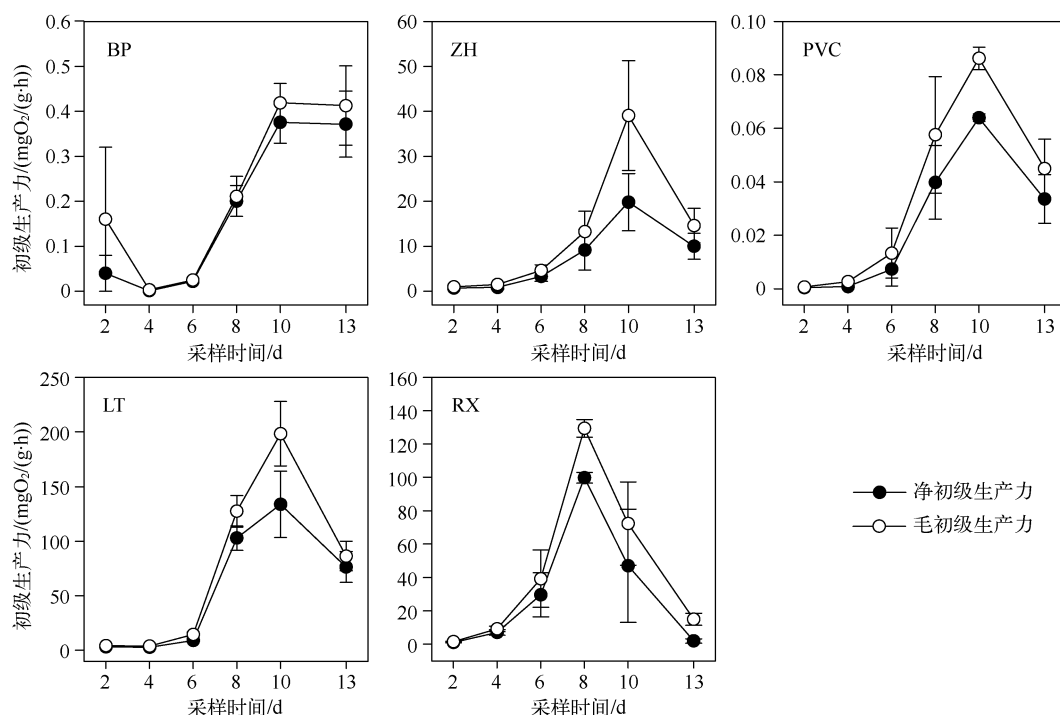


图1 不同人工载体上附着生物初级生产力随时间的变化

Fig. 1 Temporal variations in primary production of the periphyton attached on different artificial substrates

比表面积较大的立体、软性载体上附着生物叶绿素 a 含量远较其它几种表面比较光滑的载体高, 立体和软性载体上叶绿素 a 含量之间无显著性差异. 立体载体上附着生物叶绿素 a 的含量最高达到 664.15 mg/g, 分别是载玻片和 PVC 片上叶绿素 a 含量的 38 倍和 75 倍. 此外, 第 10 d 时载体上附着生物叶绿素 a 含量远高于背景湖水的叶绿素 a 含量(表 2, 图 3).

## 2.4 不同人工载体上附着生物碱性磷酸酶活性的比较

载玻片上附着生物碱性磷酸酶活性在 10 d 后仍继续增强, 但其他 4 种人工载体上附着生物的碱性磷酸酶活性在第 10 d 达到峰值, 随后逐渐减弱(图 4). 经过 8~10 d 附着生物达到峰值时, 在表面比较光滑的载玻片和 PVC 片上, 不仅附着生物的初级生产力、叶绿素 a 含量最低, 同样其碱性磷酸酶活性也最低(图 2C). 而软性载体和立体载体上附着生物具有着更高的碱性磷酸酶活性, 尤其是软性载体, 虽然其上附着生物的净初级生产力、毛初级生产力分别仅占立体载体的 74.6%、65.2%, 叶绿素 a 含量仅占 79%, 但其碱性磷酸酶活性达到了 76.15 mmol/(g·min), 显著高于其他 4 种人工载体.

## 3 讨论

### 3.1 载体理化性状对附着生物初级生产力和叶绿素 a 含量的影响

初级生产力是表征初级生产者进行光合和呼吸作用能力的指标, 是初级生产者代谢活性的体现. 附着生物中的初级生产者主要是附着藻类(如硅藻、绿藻等). 附着生物的叶绿素 a 含量也可以用来表征附着藻类的生物量<sup>[29]</sup>. 附着藻类可以通过吸收、吸附、络合及沉淀等作用, 有效去除富营养化水体中的氮磷营养盐<sup>[30-32]</sup>. 因此, 附着生物的初级生产力与叶绿素 a 含量可以作为指示附着藻类代谢活性和生物量的重要指标, 同时也能直接反映人工载体对水体的净化能力.

有研究指出, 不同类型人工载体附着生物的生物量、群落组成及代谢能力等均存在着很大的差异<sup>[21]</sup>. 本实验的结果也表明, 具有不同理化性状的人工载体上附着生物群落稳定时的初级生产力和叶绿素 a 含量都存在着显著差异. 相关性分析的结果表明(表 3), 载体的重量比表面积参数可能是一种影响附着生物初级生

产力、叶绿素 a 含量和代谢活性的重要因素. 具有较大重量比表面积和复杂形状的载体上附着生物的生产力和叶绿素 a 含量显著高于拥有较小比表面积和平整外形的载体 ( $P < 0.05$ ) (图 2), 这一方面可能是因为外形平整的载玻片和 PVC 片表面比较光滑, 附着生物很难大量牢固附着其表面继续生长; 另一方面, 较高的重量比表面积往往为附着生物的附着生长提供了充足的附着空间.

### 3.2 载体理化性状对附着生物碱性磷酸酶活性的影响

碱性磷酸酶作为一种诱导酶, 在湖泊营养盐循环过程中具有重要作用. 当水体中正磷酸盐含量较低不足以维持藻类生长时, 藻类、细菌等受到诱导, 会产生大量碱性磷酸酶释放到水体中, 且活性也相应显著增加<sup>[33]</sup>. 作为指示微生物“磷饥饿”状态的重要指标<sup>[34]</sup>, 附着生物的碱性磷酸酶活性既能反映附着生物对活性磷的需求, 也能够有效地表征附着生物磷代谢活性的高低. 人工载体上附着生物碱性磷酸酶活性越强, 说明附着生物膜系统所处的“磷饥饿”程度越深, 对水体活性磷的潜在需求也越大, 从而也能间接地体现出对富营养化水体吸收利用的能力越强. 本实验结果表明, 不同理化性状的人工载体附着生物碱性磷酸酶活性之间存在显著的差异 ( $P < 0.05$ ). 人工载体附着生物碱性磷酸酶活性与重量比表面积参数呈显著正相关, 具有较大重量比表面积和复杂形状载体上附着生物的碱性磷酸酶活性显著高于比表面积较小、表面平滑的载体 (表 3). 事实上, 载体上的碱性磷酸酶活性不仅来自于附着藻类等自养生物, 附着于载体上的细菌、真菌等异养微生物往往也会产生大量的碱性磷酸酶<sup>[35-37]</sup>, 这或许是实验中立体载体上附着生物的叶绿素 a 含量和碱性磷酸酶活性不一致的原因 (图 2).

除比表面积外, 载体的其它理化性状也会对附着生物的生产力和代谢活性产生影响. Tuchman 等<sup>[38]</sup>研究指出, 载体表面结构形状和材料类型对附着生物群落的数量和结构组成有着一定的影响, 不同载体表面结构、不同材料类型, 其上附着生物的生物量、生产力等都不相同. 本实验中, 虽然立体载体的比表面积 ( $105.6 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) 较小, 但其上附着生物在群落稳定时的初级生产力和叶绿素 a 含量却是最高的 (图 2). 由于立体载体是采用特殊的拉丝、丝条制毛工艺, 将丝条穿插附着在防腐、高强度的中心绳上, 使丝条呈立体均匀排列辐射状态, 制成了悬挂式立体填料的单体, 载体在有效区域内能立体全方位均匀舒展, 使空气、水、附着物得到充分混渗接触交换, 这也使得附着生物在每根丝条上均能保持良好的活性和空隙可变性, 进行良好的新陈代谢过程. 立体载体的这种特殊的表面结构形状很好地解释了其上附着生物初级生产力、叶绿

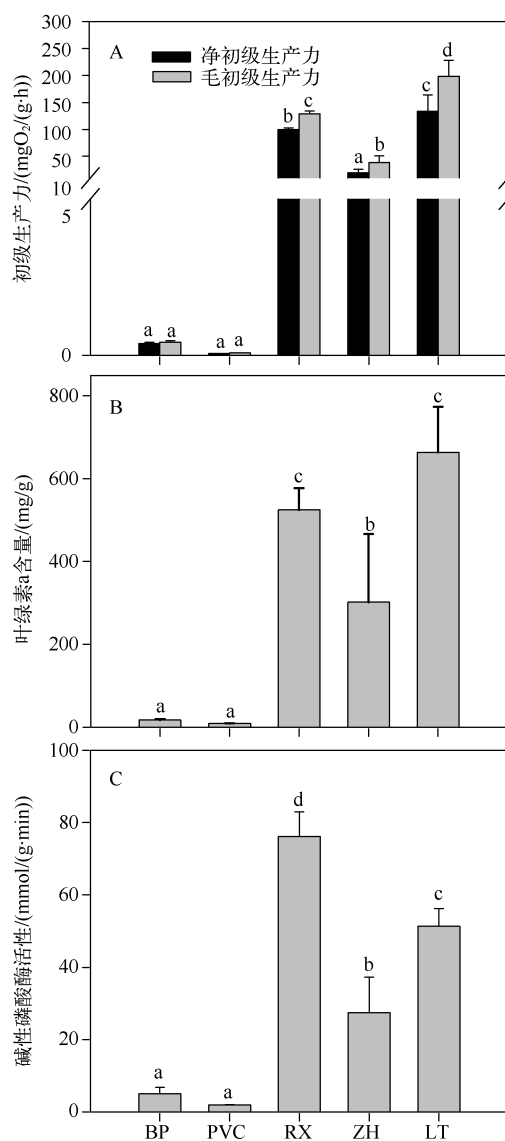


图 2 不同人工载体上附着生物初级生产力 (A)、叶绿素 a 含量 (B) 及碱性磷酸酶活性 (C) 的差异 (相同的字母标注代表没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ))

Fig. 2 Differences in primary production (A), content of chlorophyll-a (B) and alkaline phosphatase activity (C) of the periphyton attached on different artificial substrates (Bars with the same letter are not significantly different ( $P > 0.05$ ))

素 a 含量均高于其他几种载体的现象. 而其它的载体, 如软性载体, 采用纺搓的纤维绳, 串连压有纤维丝均匀分布的塑料圆片, 组成一定长度的单元纤维束, 虽然具有最大的比表面积( $990.0\text{ m}^2/\text{kg}$ ), 但表面结构的形状使得其投入水中后容易粘连成团, 影响附着生物在其表面上的附着效率.

表 3 附着物群落稳定时载体比表面积参数与初级生产力、叶绿素 a 含量、碱性磷酸酶活性的相关性分析  
Tab. 3 Correlation of the specific surface area and primary production, Chl. a and alkaline phosphatase activity when the periphyton community on the substrates are stable

	重量比表面积	净初级生产力	毛初级生产力	叶绿素 a 含量
净初级生产力	0.70			
毛初级生产力	0.70	1.00 **		
叶绿素 a 含量	0.70	1.00 **	1.00 **	
碱性磷酸酶活性	0.90 *	0.90 *	0.90 *	0.90 *

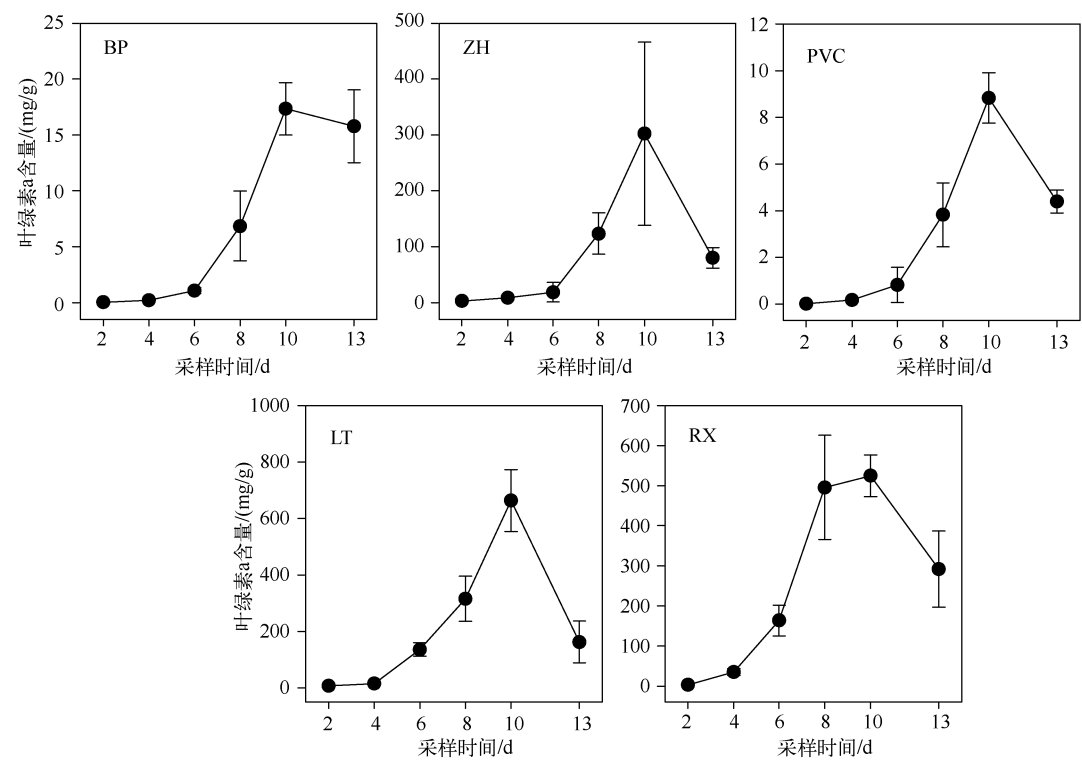


图 3 不同人工载体上附着生物叶绿素 a 含量随时间的变化

Fig. 3 Temporal variations in content of chlorophyll-a of the periphyton attached on different artificial substrates

此外, 在选择净化水质的人工载体时, 除需要考虑载体的重量比表面积、表面结构形状和材质外, 还需要考虑经济成本、材料的易获取性等因素. 在本实验所选择的几种人工载体中, 立体载体是一种比较理想的人工载体, 可以应用于受污染湖泊水质净化的实践中.

4 结论

1) 在天然水体中, 随着载体材料放入湖水中时间的增加, 附着在不同载体上的附着生物的生物量及初级生产力也逐渐增加. 附着生物通常在 8 ~ 10 d 就可以达到最大附着量, 此时其初级生产力、代谢活性等均处于最佳状态.

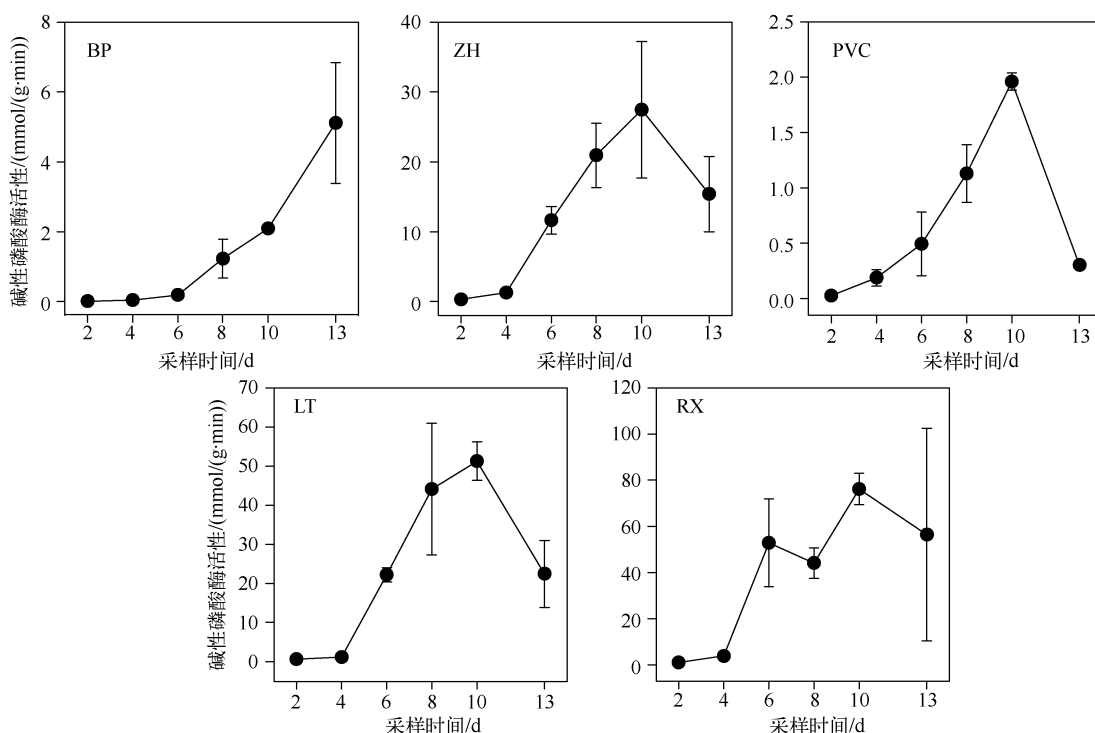


图4 不同人工载体上附着生物碱性磷酸酶活性随时间的变化

Fig. 4 Temporal variations in alkaline phosphatase activity of the periphyton attached on different artificial substrates

2) 载体的理化性状对附着生物有重要影响. 具有相对较大重量比表面积的立体载体、软性载体上, 附着生物的生物量、初级生产力、代谢活性等均远高于其他载体. 加之立体载体价格更加经济, 容易获取, 因而它是一种比较理想、可以大规模实际应用的人工载体.

致谢: 本实验在野外采样及分析过程中得到中国科学院太湖湖泊生态系统研究站的大力协助与支持, 特此致谢.

## 5 参考文献

- [1] Wetzel RG. Opening remarks. In: Wetzel RG ed. *Periphyton of freshwater ecosystems*. The Hague; Dr W. Junk Publishers, 1983; 3-4.
- [2] 秦伯强. 附着生物在浅水富营养化湖泊藻-草型生态系统转化过程中的作用. *中国科学: C 辑*, 2006, **36**(3): 283-288.
- [3] 宋玉芝. 附着生物对太湖沉水植物影响的初步研究. *应用生态学报*, 2007, **18**(4): 928-932.
- [4] 梁 霞, 李小平, 史雅娟. 周丛藻类水质处理系统中氮、磷污染物去除效果研究. *环境科学学报*, 2008, **2**(4): 695-704.
- [5] Irfanullah HM. Factors influencing the return of submerged plants to a clear-water, shallow temperate lake. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(3): 177-191.
- [6] 顾泳洁, 王秀芝, 廖祖荷. 利用着生生物群落动态变化监测水质的研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2005, **4**: 87-94.
- [7] Adey W, Luekett C, Jensen K. Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. *Restoration Ecology*, 1993, **1**: 29-39.
- [8] Jöbgen A, Palm A, Melkonian M. Phosphorus removal from eutrophic lakes using periphyton on submerged artificial substrata. *Hydrobiologia*, 2004, **528**(1): 123-142.
- [9] Burkholder JAM, Wetzel RG. Epiphytic alkaline phosphatase on natural and artificial plants in an oligotrophic lake; re-e-

- valuation of the role of macrophytes as a phosphorus source for epiphytes. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(3): 736-747.
- [10] Bothwell ML. Phosphorus limitation of lotic periphyton growth rates: an intersite comparison using continuous-flow troughs (Thompson River system, British Columbia). *Limnology and Oceanography*, 1985, **30**(3): 527-542.
- [11] Tuchman M, Blinn DW. Comparison of attached algal communities on natural and artificial substrata along a thermal gradient. *British Phycological Journal*, 1979, **14**(3): 243-254.
- [12] Cattaneo A, Amireault MC. How artificial are artificial substrata for periphyton? *Journal of North American Benthological Society*, 1992, **11**: 244-256.
- [13] Lamberti GA, Resh VH. Comparability of introduced tiles and natural substrates for sampling lotic bacteria, algae and macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 1985, **15**: 21-30.
- [14] Kralj K, Plenković-Moraj A, Gligora M *et al.* Structure of periphytic community on artificial substrata: influence of depth, slide orientation and colonization time in karstic Lake Visovačko, Croatia. *Hydrobiologia*, 2006, **560**(1): 249-258.
- [15] Winfield Fairchild G, Lowe RL. Artificial substrates which release nutrients: effects on periphyton and invertebrate succession. *Hydrobiologia*, 1984, **114**(1): 29-37.
- [16] 纪荣平, 吕锡武, 李先宁. 人工介质对富营养化水体中氮磷营养物质去除特性研究. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 39-45.
- [17] 宋玉芝, 秦伯强, 高 光. 附着生物对富营养化水体氮磷的去除效果. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(2): 180-185.
- [18] Liboriussen L, Jeppesen E. Structure, biomass, production and depth distribution of periphyton on artificial substratum in shallow lakes with contrasting nutrient concentrations. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(1): 95-109.
- [19] Shevchenko T. Distribution of periphyton algae of the dnier reservoirs depending on the type of Substratum. *Hydrobiological Journal*, 2011, **47**(3): 3-13.
- [20] Witt V, Wild C, Uthicke S. Effect of substrate type on bacterial community composition in biofilms from the Great Barrier Reef. *FEMS Microbiology Letters*, 2011, **323**: 188-195.
- [21] Barbiero RP. A multi-lake comparison of epilithic diatom communities on natural and artificial substrates. *Hydrobiologia*, 2000, **438**(1): 157-170.
- [22] Danilov RA, Ekelund N. Comparison of usefulness of three types of artificial substrata (glass, wood and plastic) when studying settlement patterns of periphyton in lakes of different trophic status. *Journal of Microbiological Methods*, 2001, **45**(3): 167-170.
- [23] 刘景明, 刘 慧, 乔淑媛等. 废水处理有机填料的合成材料现状和展望. 环境科学与技术, 2010, **33**(6E): 321-326.
- [24] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [25] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 185-188.
- [26] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 266-271.
- [27] 周易勇, 李建秋. 东湖间隙水自由碱性磷酸酶活性的季节性与组成的非均一性. 水生生物学报, 2003, **27**(1): 100-102.
- [28] 高 光, 秦伯强. 太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 245-251.
- [29] Liboriussen L, Jeppesen E. Periphyton biomass, potential production and respiration in a shallow lake during winter and spring. *Hydrobiologia*, 2009, **632**(1): 201-210.
- [30] 陈重军, 韩志英, 朱荫湄等. 周丛藻类及其在水质净化中的应用. 应用生态学报, 2009, **20**(11): 2820-2826.
- [31] Adey W, Luckett C, Jensen K. Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. *Restoration Ecology*, 1993, **1**(1): 29-39.
- [32] Dodds WK. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems. *Journal of Phycology*, 2003, **39**(5): 840-849.
- [33] Wynne D, Kaplan B, Berman T. Phosphatase activities in lake Kinneret phytoplankton. In: Chróst RJ ed. Microbial enzymes in aquatic environments. New York: Springer-Verlag, 1991: 220-226.
- [34] Berman T. Alkaline phosphatases and phosphorus availability in Lake Kinneret. *Limnology and Oceanography*, 1970, **15**: 663-674.
- [35] Stewart AJ, Robert G, Wetzel WK. Influence of dissolved humic materials on carbon assimilation and alkaline phosphatase activity in natural algal-bacterial assemblages. *Freshwater Biology*, 1982, **12**(4): 369-380.
- [36] Bae KS, Barton LL. Alkaline phosphatase and other hydrolyases produced by *Cenococcum graniforme*, an ectomycorrhizal fungus. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, **55**(10): 2511-2516.
- [37] Letelier M, Repetto Y, Aldunate Y *et al.* Acid and alkaline phosphatase activity in *Trypanosoma cruzi* epimastigotes. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 1985, **81**(1): 47-51.
- [38] Tuchman ML, Stevenson RJ. Comparison of clay tile, sterilized rock, and natural substrate diatom communities in a small stream in southeastern Michigan, USA. *Hydrobiologia*, 1980, **75**(1): 73-79.