

### 3 种人工载体净化富营养化水体能力的比较\*

吴睿<sup>1</sup>, 张晓松<sup>2</sup>, 戴江玉<sup>3</sup>, 高 光<sup>4</sup>, 汤祥明<sup>4</sup>, 陈 丹<sup>1\*\*</sup>

(1: 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

(2: 江苏省核与辐射安全监督管理局, 南京 210019)

(3: 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

(4: 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)

**摘 要:** 通过野外模拟实验, 对比 3 种不同理化性状人工载体(立体填料、生物绳和尼龙纱网)净化太湖梅梁湾富营养化水体的能力, 并探讨影响人工载体水质净化能力的生物与非生物因素。结果表明: (1) 所选择的 3 种人工载体均能显著降低水体的浊度, 其中尼龙纱网处理组中水体浊度下降了 94.2%, 其单位质量载体净化量最高(36.18 NTU/g); (2) 与对照组相比, 各人工载体处理组中, 水体中藻类的生长都受到极显著抑制; (3) 3 种人工载体对水体中 TN、TP 的去除效果差异极显著, 其对 TN 累积去除率分别为 25.55%、10.21%、51.54%, 对 TP 累积去除率分别为 38.93%、38.33%、62.98%; (4) 载体理化性状、附着藻类与细菌的生物量和活性、挂载量以及载体上溶解态营养盐的释放是影响人工载体水质净化能力的重要因素。综上, 尼龙纱网因具备单位质量附着生物的生物量与活性高、自身滞留溶解态营养盐少以及质量轻且价格经济等优势成为净化富营养化水体较为理想的人工载体。

**关键词:** 富营养化; 氮磷; 人工载体; 附着生物; 水质净化; 太湖; 梅梁湾

### Comparison of the abilities of three artificial substrates in purifying eutrophic waters

WU Rui<sup>1</sup>, ZHANG Xiaosong<sup>2</sup>, DAI Jiangyu<sup>3</sup>, GAO Guang<sup>4</sup>, TANG Xiangming<sup>4</sup> & CHEN Dan<sup>1</sup>

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

(2: *Jiangsu Regulatory Bureau of Nuclear and Radiation Safety, Nanjing 210019, P. R. China*)

(3: *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P. R. China*)

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

**Abstract:** The abilities of three artificial substrates (solid filler, bio-cord and nylon gauze) on purifying the eutrophic waters were compared in relation to the biotic and abiotic influencing factors based on a field microcosm experiment in Meiliang Bay of Lake Taihu. The results were as follows: (1) all of the three artificial substrates could significantly reduce the water turbidity. In comparison, water turbidity of the nylon gauze treatment group decreased by 94.2%, which was the highest decrease by per unit mass substrate (36.18 NTU/g); (2) comparing with the control group, the growth of algae in all three treatment groups were significantly inhibited; (3) the removal amounts of total nitrogen and phosphorus by the artificial substrates were significantly different among the three treatment groups respectively, with a 25.55%, 10.21%, 51.54% accumulative removal of total nitrogen, and a 38.93%, 38.33%, 62.98% accumulative removal of total phosphorus for the solid filler, bio-cord and nylon gauze, respectively; and (4) substrate physicochemical characteristic, biomass and activity of periphytic algae and bacteria, substrate quantity, and the releasing of dissolved nutrients attached on substrates are the key factors affecting the abilities of artificial substrates to purify eutrophic waters. In conclusion, nylon gauze has advantages over the other two substrates with high biomass and microbial activity by per unit mass periphyton, less dissolved nutrients attached on itself, lighter weight and cheaper price. Hence we suggest that nylon

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07101-010)和国家自然科学基金项目(51309156)联合资助。  
2013-09-29 收稿; 2013-12-25 收修改稿。吴睿(1982~), 男, 硕士; E-mail: wuzijie0329@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: chendan881022@126.com.

gauze is an ideal artificial substrate in purifying eutrophic waters.

**Keywords:** Eutrophication; nitrogen and phosphorus; artificial substrate; periphyton; water purification; Lake Taihu; Meiliang Bay

自1980s以来,伴随着经济的飞速发展,我国许多湖泊富营养化问题日趋严重,如何控制水体的富营养化已成为一个亟待解决的环境问题.天然水体中,在各种物体的表面常附着有大量由细菌、真菌、藻类和微型动物等生物所构成的附着生物群落,它们往往构成一个具有较大比表面积、多孔的生物膜,可有效吸收水体中溶解态营养盐<sup>[1]</sup>.因此,将人工载体引入天然水体中,利用人工载体上形成的附着生物吸收、转化和沉淀水体中的氮、磷营养盐,可为净化富营养化水体提供一种有效途径<sup>[2-4]</sup>.

目前,国外已有很多研究利用人工载体上的附着生物来净化天然水体,如海洋、海岸带、河流和湿地等<sup>[5-7]</sup>.对于我国富营养化浅水湖泊,有学者也尝试利用人工载体上的附着生物来去除水体中的氮、磷营养盐,以抑制藻类的生长<sup>[8-9]</sup>,证实了人工载体对富营养化水体具有较好的净化效果<sup>[10]</sup>.不同研究者选取的人工载体类型差异较大,所获得对水体中氮、磷等营养盐的去除效率也不尽相同<sup>[11-12]</sup>.然而,目前鲜有研究关注如何评价人工载体净化天然富营养化水体的能力及影响人工载体水质净化能力的因素,尤其是关于附着生物方面的因素.由于附着藻类和细菌是人工载体上附着生物的主要组成部分,研究其生物量与活性有助于认识影响人工载体水质净化能力的生物因素.针对上述问题,本研究选取了3种具有不同理化性状的人工载体——立体填料、生物绳和尼龙纱网,通过比较不同类型载体上附着生物对富营养化水体水质净化效果的差异,探讨影响载体上附着生物水质净化能力的生物及非生物因素,为我国大型富营养化湖泊生态修复实践中高效人工载体的筛选和应用提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

依据人工载体的理化性状和表面结构,筛选了3种不同比表面积、安全无毒、应用广泛的人工载体材料——立体填料、生物绳和尼龙纱网进行野外水质净化模拟实验<sup>[13]</sup>,3种人工载体理化性质参数详见表1.其中,立体填料是由聚烯烃类物质,混合以亲水、吸附、抗热氧等助剂,采用特殊拉丝、丝条制毛工艺,并将丝条穿插固定在耐腐、高强度的中心绳上制作而成(图1A).由于选材和工艺刚柔适度,使丝条呈立体均匀排列辐射状态,在水中能立体全方位均匀舒展,使气、水、附着生物得到充分混渗接触交换<sup>[14]</sup>.生物绳是一种新型接触氧化材料,它是由强亲水性的化学合成纤维(聚丙烯和维尼纶)材料构成,通过生物绳的内芯与外侧纤维构成结构紧密的环状纤维束,能够长期保持材料的物理化学性能,同时也可以保持相应的强度,材质的变化可调整其比表面积,使得其上固着的附着生物更加不易脱落(图1B).尼龙纱网是由聚乙烯材料构成,具有质量轻、不易变形、耐酸碱、抗腐蚀、易清洁、价廉等优点,表面呈网格状均匀分布,利于附着生物的固着生长(图1C).

### 1.2 实验设计

本实验在位于太湖梅梁湾附近中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(31°42'N, 120°21'E)的室外水质净化模拟实验池内进行.梅梁湾是太湖北部较大的湖湾,近十几年来,水质严重恶化,蓝藻水华连年发生<sup>[15]</sup>.

水质净化模拟实验池为水泥池,规格为长×宽×高=7.45 m×1.50 m×2.00 m,深度与太湖平均水深接近(图1).将梅梁湾湖区的湖水用水泵抽至水池中(水位约1.6 m),在池内固定悬挂16个100 L塑料桶(高63.5 cm,上口外直径50.5 cm,底部外直径40.0 cm),同时向桶内抽入70 L梅梁湾湖水,使桶内外水面持平,桶内水温与湖水温度保持一致.鉴于加入桶中的湖水颗粒物在实验过程中会自然沉降,易造成实验水体浊度以及营养盐浓度下降的假象,湖水加入桶中后先静置2 d,静置后测定其营养盐浓度.同时,为了更好地比较不同人工载体对富营养化水体的净化效果,参考目前太湖天然水体中氮、磷的实际浓度以及我国湖泊富营养化分级标准,分别向桶中添加适量的氮、磷营养盐,使得总氮(TN)和总磷(TP)浓度达到太湖蓝藻水华暴发时水体的营养盐浓度,TN浓度约为3.00 mg/L,TP浓度约为0.50 mg/L<sup>[16]</sup>,其中,添加营养盐时,氮源主要添加NH<sub>4</sub>Cl和KNO<sub>3</sub>(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N=1:1),磷源主要添加K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O<sup>[17-18]</sup>.

表 1 3 种人工载体的理化性质参数  
Tab. 1 Physicochemical characteristics of the three artificial substrates

参数	立体填料	生物绳	尼龙纱网
载体材质	聚烯烃类(聚酰胺)	聚丙烯、维尼纶	聚乙烯
直径/cm	15	4	20
尺寸/目	—	—	10
重量比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)	105.60	53.12	20.00
表面性质	表面粗糙 辐射丝状密集分布	表面粗糙 环状纤维束密集分布	表面平滑 网格状均匀分布
单价/(元/m)	1.2	4.4	6.0



图 1 水质净化实验模拟装置及人工载体图 (A: 立体填料; B: 生物绳; C: 尼龙纱网)  
Fig. 1 The pictures of the water purifying microcosm and artificial substrates

在前期的实验中发现:人工载体在野外自然水体中放置到第 10 d 时,其上附着生物的生产力和碱性磷酸酶活性等均会出现峰值<sup>[19]</sup>. 因此,本实验开始前,先将所选 3 种人工载体,经酸处理、清洗、晾干、称重后,分别悬挂于自制的载体固定装置上,置于梅梁湾湖水中进行原位挂膜,10 d 后,将附着后的载体从湖水中取出,放入塑料桶内开始水质净化实验. 塑料桶口盖上带有橡胶塞透气孔的透明有机玻璃盖,以减少桶中水分蒸发及降雨对实验体系的影响,桶口同时用铁丝固定、悬挂从湖中取出的人工载体,使其完全浸入桶内水体中(图 1). 实验开始于 2011 年 10 月 7 日,持续 18 d,18 d 后人工载体上的附着生物逐渐老化、脱落,易影响实验处理组中水体的水质,故实验结束于 2011 年 10 月 25 日.

实验共设置 4 个实验组(16 个桶),分别为对照组(不添加人工载体)、立体填料组、生物绳组和尼龙纱网组,其中每个实验组均设置 4 个平行且随机分布. 每个处理组中各悬挂 8 串相应的人工载体,每串载体规格长 20 cm(图 1). 每 3 d 采样 1 次,用有机玻璃采水器在每个桶中采集 500 ml 水样用于水体理化参数的分析,其中添加氮、磷营养盐后未放入人工载体前的水样作为初始水样,测定其本底营养盐. 同时在实验前、

中、后期分别从每个处理组中各采集1串人工载体,在实验室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100 ml,在24 h内进行各种参数的测定,用于附着生物样品的分析<sup>[20]</sup>。

### 1.3 水体理化及生物参数的测定

样品中TN、TP浓度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进行测定<sup>[21]</sup>;叶绿素a(Chl. a)浓度用90%热乙醇提取后分光光度法进行测定<sup>[22]</sup>;水温、浊度、溶解氧(DO)、pH等采用YSI多功能水质参数仪(YSI Incorporated, USA)现场测定。

附着生物碱性磷酸酶活性(APA)的测定:采用对硝基苯磷酸二钠(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分光光度计进行测定<sup>[23-24]</sup>。

附着细菌计数:用于人工载体上附着细菌计数的样品,经100倍稀释后,经无颗粒甲醛固定(终浓度2%)的水样用无菌超纯水进行5~10倍(视不同样品而定)稀释,取5 ml水样采用4,6-diamidino-2-phenylindole(DAPI, Sigma, USA)染色、表面荧光显微镜观察计数的方法对样品中的细菌进行计数<sup>[25]</sup>。水样超声波振荡10 min(30 W,每隔5 s超声5 s,变幅杆Φ6,南京先欧超声波细胞破碎仪XO-1000D),加入50 μl浓度为100 μg/ml的DAPI静置染色10 min,用手持式手动泵(MityVac, USA)以<10 mm Hg的真空压将染色后的样品过滤至黑背景聚碳酸酯膜上(孔径0.22 μm,直径25 mm, Poretics™, USA)上,滴1滴无荧光镜油,至Zeiss落射荧光显微镜(Axioskop 2 plus, Germany)下观察计数。每个样品至少观察20个视野。

### 1.4 数据处理

水体中相关指标的去除率计算公式为<sup>[26]</sup>:累积去除率=(起始浓度-取样时的浓度)/起始浓度×100%。

文中所用数据均为4个平行数据的平均值,以Excel进行误差分析,采用SPSS 16.0统计软件包对数据进行统计分析,数据差异显著性检验采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和重复性测量方差分析(Repeated Measures),数据图采用SigmaPlot 10.0(Systat Software Inc., USA)软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体的理化特征

对照组和3个不同处理组中的水温基本保持恒定,维持在17.7~20.9℃之间,平均水温为19.3℃(图2)。pH与DO浓度变化趋势相似,对照组中均呈先逐渐升高再下降的趋势,实验第12 d分别均达最高值(pH=9.55, DO=12.53 mg/L),而各处理组中pH、DO浓度实验前3 d均呈先下降随后逐渐升高的趋势,直至第15 d达最高值。统计

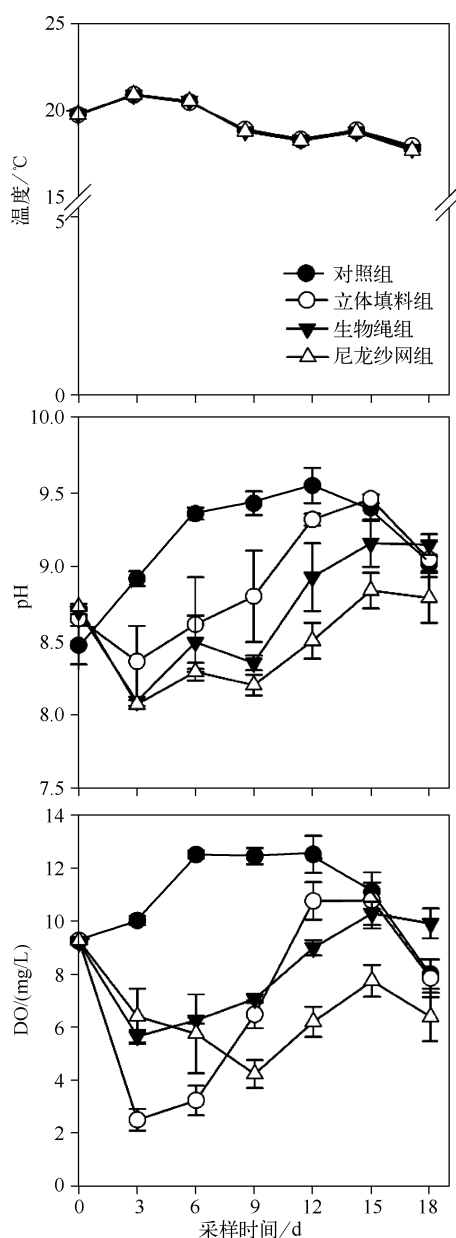


图2 不同处理组水体的基本水质指标

Fig. 2 Water parameters in different treatment groups

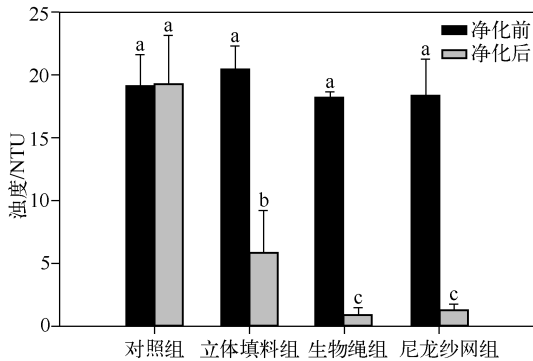


图3 不同处理组净化前后水体浊度的变化  
(相同的字母标注表示无显著性差异,  $P > 0.05$ )

Fig. 3 Initial and final water turbidity changes  
in different treatment groups

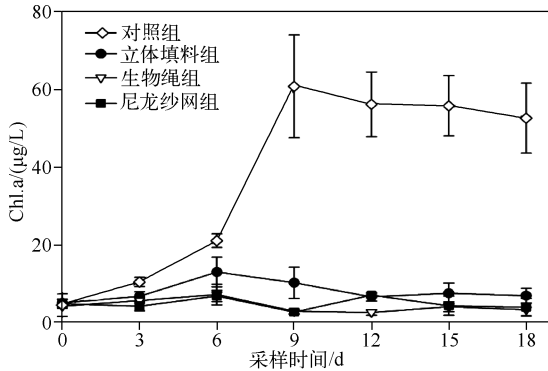


图4 不同处理组水体中 Chl. a 浓度的变化

Fig. 4 Variation of water chlorophyll-a concentration  
in different treatment groups

各载体处理组对水体中 TN 累积去除率(计算时扣除对照组相应的值,下同)差异极显著( $P < 0.01$ )。实验结束时,立体填料、生物绳和尼龙纱网处理组的最终 TN 累积去除率分别为:  $25.55\% \pm 7.36\%$ 、 $10.21\% \pm 8.13\%$ 、 $51.54\% \pm 3.00\%$  (图 5b)。

### 2.3 不同人工载体对富营养化水体中 TP 的去除

与对照组相比,载体处理组水体中的 TP 浓度呈极显著下降趋势( $P < 0.01$ , 图 6a)。立体填料、生物绳和尼龙纱网处理组水体中的 TP 浓度从起始时的  $0.50 \text{ mg/L}$ , 分别下降到  $0.25 \pm 0.05$ 、 $0.35 \pm 0.01$  和  $0.14 \pm 0.02 \text{ mg/L}$ 。

实验过程中,各载体处理组对水体中 TP 累积去除率的差异也极显著( $P < 0.01$ )。其中,尼龙纱网处理组的最终累积去除率达到  $62.98\% \pm 4.68\%$ , 显著高于立体填料 ( $38.93\% \pm 10.81\%$ ) 和生物绳 ( $38.33\% \pm 7.68\%$ ) 处理组 (图 6b)。从 TP 累积去除率看,所选的 3 种人工载体对富营养化水体中 TP 的去除效果优于 TN。

### 2.4 不同人工载体对富营养化水体净化能力的比较

方差分析结果表明:不同类型人工载体及其附着物对水体中氮、磷的净化能力差异显著(表 2)。其中,尼龙纱网处理组不论从累积去除率还是从单位载体的净化能力(总净化量/添加载体的质量)来看,都极显著

分析结果表明,对照组 pH、DO 浓度变化与 3 个处理组之间差异显著( $P < 0.05$ ),3 个处理组之间无显著差异( $P > 0.05$ )。

实验期间,装置内水体的浊度变化可以看出,对照组水体浊度变化不明显;而各处理组中水体浊度均显著降低( $P < 0.01$ ),立体填料、生物绳和尼龙纱网处理组分别下降了 71.4%、94.5% 和 94.2% (图 3)。将其浊度下降量换算到载体单位质量上,3 种载体单位载体净化量分别为:尼龙纱网处理组 ( $36.18 \text{ NTU/g}$ ) > 生物绳处理组 ( $21.22 \text{ NTU/g}$ ) > 立体填料处理组 ( $10.16 \text{ NTU/g}$ )。

实验期间水体中叶绿素 a 浓度变化显示:投放人工载体的处理组中,水体中叶绿素 a 浓度显著低于对照组( $P < 0.01$ ),但是不同人工载体处理组之间的差异并不显著( $P > 0.05$ ) (图 4)。

### 2.2 不同人工载体对富营养化水体中 TN 的去除

总体而言,与对照组相比,各处理组中的 TN 浓度均显著下降,而且不同载体处理组之间的差异极显著( $P < 0.01$ ) (图 5a)。实验起始时,3 种载体处理组中的 TN 浓度均略高于对照组,这可能是投放载体时,载体上的附着生物及所吸附的营养盐向水体中释放所致;实验后期,由于载体上附着生物所形成的生物膜部分开始老化、脱落,水体中 TN 浓度下降趋势变缓。实验结束时,立体填料、生物绳和尼龙纱网处理组水体中的 TN 浓度从起始时的  $3.00 \text{ mg/L}$  分别下降至  $1.86 \pm 0.38$ 、 $2.19 \pm 0.22$  和  $0.93 \pm 0.06 \text{ mg/L}$ 。

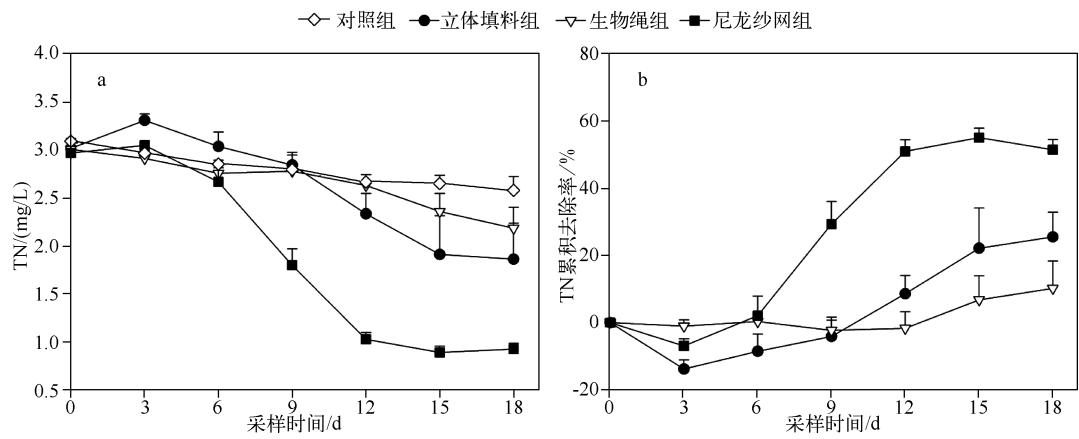


图 5 不同处理组内水体 TN 浓度的变化(a) 及 TN 累积去除率(b)

Fig. 5 Variation of water TN concentration(a) and cumulative removal ratio of TN(b) in different treatment groups

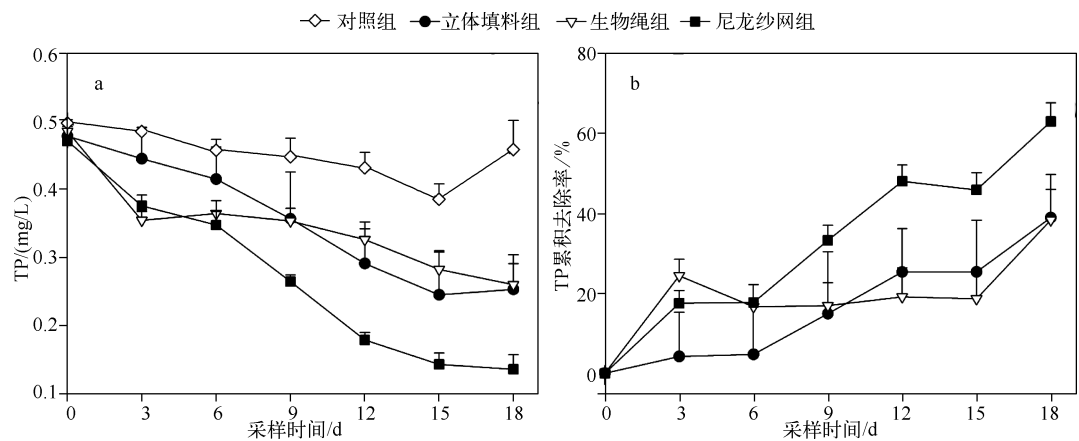


图 6 不同处理组内水体 TP 浓度的变化(a) 及 TP 累积去除率(b)

Fig. 6 Variation of water TP concentration(a) and cumulative removal ratio of TP(b) in different treatment groups

高于立体填料和生物绳处理组( $P < 0.01$ ). 尼龙纱网处理组对 TN 的净化能力约是立体填料和生物绳处理组的 7 倍,对 TP 的净化能力约是立体填料和生物绳处理组的 3~5 倍.

表 2 3 种人工载体对水体氮、磷净化能力的比较\*

Tab. 2 Comparison of the abilities to purify eutrophic waters among three artificial substrates

营养盐	人工载体	营养盐浓度/(mg/L)		累积去除率/%	单位载体净化能力/(mg/g)
		起始浓度	终止浓度		
TN	立体填料	3.020	1.864	$25.55 \pm 7.36^b$	$0.45 \pm 0.22^b$
	生物绳	3.008	2.187	$10.21 \pm 8.13^c$	$0.48 \pm 0.28^b$
	尼龙纱网	2.971	0.926	$51.54 \pm 3.00^a$	$3.19 \pm 0.26^a$
TP	立体填料	0.478	0.253	$38.93 \pm 10.81^b$	$0.13 \pm 0.04^c$
	生物绳	0.486	0.260	$38.33 \pm 7.68^b$	$0.23 \pm 0.05^b$
	尼龙纱网	0.471	0.135	$62.98 \pm 4.68^a$	$0.62 \pm 0.06^a$

\* 相同字母标注表示没有显著性差异( $P > 0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 人工载体对氮、磷营养盐的去除和对藻类生长的抑制

通过人工载体上附着生物去除富营养化天然水体中的氮、磷营养盐已经得到许多研究证实<sup>[8,27-29]</sup>,如宋玉芝等研究利用渔网围隔上的附着生物去除水体中的氮、磷营养盐<sup>[1]</sup>;吴永红等利用人工水草能明显抑制富营养化水体中藻类生长,降低 TN、TP 浓度<sup>[30]</sup>. 浊度是水质的综合要素,是评价水质的 1 项重要参数. 浊度越高,水体中悬浮颗粒物越多,水质越差<sup>[31]</sup>. 实验后期 3 种人工载体处理组水体浊度均有极显著降低(图 3),可见处理组中水体水质均有了明显改善,这可能是载体物理截留和附着生物表面微生物分泌物对水体悬浮物的粘附、沉淀作用所致<sup>[32]</sup>. 人工载体因具有较大比表面积,其上极易附着形成黏液状生物膜,膜上微生物通过硝化-反硝化以及附着藻类、细菌等微生物自身吸收、吸附作用能够有效吸收水体中的营养盐,使污染水体得到净化<sup>[33]</sup>. 本实验温度适宜,生物代谢较快,水体中 TN 和 TP 主要为溶解态,更易于被载体上的附着生物吸收利用,因此 3 种人工载体均能不同程度地去除水体中的 TN 和 TP,尤其是对 TP 的去除效果更好,这与陆红等<sup>[4]</sup>在静水条件下的实验结果一致. 其中尼龙纱网对 TN 和 TP 的累积去除率最高,分别高达 51.5% 和 63.0%,可能这与尼龙纱网独特的表面性状有关,尼龙纱网纤维较细,网孔较小,成膜过程中形成了三维结构,相对比表面积较大,为附着微生物提供了更多空间和更理想的生长环境<sup>[11]</sup>.

人工载体由于其特殊的表面理化性状,为藻类、细菌和其他生物的附着和生长提供了理想的附着环境<sup>[13]</sup>,载体上形成的附着生物,生物量大、代谢活性高,不仅能去除水体中的氮、磷营养盐,还能有效抑制水体中藻类的生长<sup>[34-35]</sup>. 纪荣平等认为,载体上的各种附着生物通过吸收周围水体中的氮、磷营养盐与水体中的藻类产生有效竞争;同时,载体上附着的大量假单胞菌属和芽孢杆菌属等溶藻菌,可以有效抑制水体中藻类的生长<sup>[27]</sup>. 人工载体处理组中的叶绿素 a 浓度在实验过程中均无显著升高,保持在 2.5 ~ 13.0  $\mu\text{g/L}$  之间,而对照组水体中,叶绿素 a 浓度极显著地高于人工载体处理组(图 4). 这是由于本实验用水取自太湖梅梁湾,虽然实验之前用浮游生物网滤除了大颗粒的藻类和其他杂质,但水体中仍有部分单细胞藻类存在. 因此,在添加了一定量的氮、磷营养盐之后,对照组水体中的藻类在 6 d 后大量生长,使得水体中叶绿素 a 浓度显著增加,其中 6 ~ 9 d 时藻类生长速率达 13.25  $\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,第 9 d 时叶绿素浓度出现最高值,为 60.8  $\mu\text{g/L}$ . 而在处理组中,虽然水体中的 N、P 营养盐浓度并不低于太湖藻类水华暴发的营养盐浓度,即 TN 浓度 2.5 ~ 3.5  $\text{mg/L}$ ,TP 浓度 0.1 ~ 0.8  $\text{mg/L}$ <sup>[16]</sup>,但投加了人工载体的 3 个处理组水体中叶绿素 a 浓度在 6 d 后并未显著增加. 随着人工载体投放时间增加,周围水体中的 DO 浓度与 pH 也开始逐渐回升,这说明附着藻类还可以通过自身光合作用,吸收周围水体中的  $\text{CO}_2$ ,并向周围水体输送氧气,维持其他水生生物的生长.

#### 3.2 不同类型人工载体水质净化能力的差异

不同理化性状人工载体的水质净化能力存在显著的差异. 本实验中,尼龙纱网对 TN 和 TP 的去除效果最优,单位质量载体对水体氮、磷的净化量最高(表 2). Burkholder 等指出,碱性磷酸酶活性和叶绿素 a 的比值(简称比叶绿素 a 酶活)可以作为衡量人工载体及其附着生物水质净化潜在能力的指示指标<sup>[36]</sup>. 实验中单位质量人工载体比叶绿素 a 酶活结果表明,尼龙纱网上附着生物的单位质量比叶绿素 a 酶活( $0.48 \pm 0.08 \text{ nmol}/(\text{h} \cdot \mu\text{g} \cdot \text{g})$ )均高于立体填料( $0.08 \pm 0.01 \text{ nmol}/(\text{h} \cdot \mu\text{g} \cdot \text{g})$ )和生物绳( $0.42 \pm 0.16 \text{ nmol}/(\text{h} \cdot \mu\text{g} \cdot \text{g})$ ). 此外,附着细菌代谢活性强,是附着生物的主体. 有研究表明,人工载体上附着细菌的生物量远高于周围水体<sup>[10]</sup>. 本实验结果也与之一致,即单位质量载体上附着细菌数量均值分别为: $5.56 \times 10^9 \text{ cells/g}$ (尼龙纱网)  $> 2.58 \times 10^9 \text{ cells/g}$ (生物绳)  $> 2.30 \times 10^9 \text{ cells/g}$ (立体填料),约为太湖水体中细菌数量的 1000 倍,这可能是尼龙纱网这种人工载体水质净化能力最强的原因之一.

影响这 3 种人工载体水质净化能力的因素主要有两个方面. 一方面,实验所用 3 种人工载体的理化性状(比表面积、表面结构、粗糙程度、化学组成等)差异较大,使得其上附着生物的数量和代谢活性有所差异,从而导致其对富营养化水体中氮、磷的去除能力不同(表 2). 已有研究证实,载体的表面结构和材料类型对附着藻类、附着细菌的数量和结构组成有一定程度的影响<sup>[2,13,37]</sup>. 附着藻类与附着细菌有着巨大的水质净化潜力,可以通过吸收、硝化-反硝化或沉淀等方式去除水体中的氮、磷营养盐<sup>[38]</sup>. 同时,附着生物代谢活性的差异也是影响其水质净化能力的重要因素. 纪荣平等研究认为,单位质量载体上附着生物的生物量和代谢活

性均较高的载体是改善富营养化水质的理想载体<sup>[12]</sup>。由于碱性磷酸酶活性能够反映附着生物对于磷营养盐的需求,也是附着生物除磷的很好的指示指标<sup>[36,39]</sup>。故本实验中采用单位质量载体的比叶绿素 a 碱性磷酸酶活性作为衡量附着生物代谢活性的指标。此外,不同种类附着微生物在营养盐吸收和循环过程中的功能可能有所差异。因此,不同载体上附着微生物群落结构和组成的差异也可能是影响载体水质净化能力的重要因素。

另一方面,人工载体不同的表面结构和挂载量会导致其营养盐释放程度和释放量的不同。立体填料具有最大的比表面积和辐射丝状分布的表面结构,这使得其上附着生物的附着过程更为容易,附着生物的数量也较高;但附着于这种丝状表面结构上的高密度的生物群落,相对容易脱落,且所携带的大量营养盐容易向周围水体中释放。生物绳上附着生物虽不易脱落,但环状纤维束结构使其极易富集大量的溶解态营养盐,投加载体过程中的外力作用也易使溶解态营养盐释放。而尼龙纱网因其网片状均匀分布的表面结构,附着生物较立体填料、生物绳密度均匀,不易脱落,网片状平面分布使得其可以与水体充分接触,单位质量上附着生物对溶解氧和营养盐的竞争要好于立体填料和生物绳,且网片状表面结构不会携带大量溶解态营养盐。

综上,影响人工载体水质净化能力的生物与非生物因素主要是载体的理化性状(包括比表面积、表面结构等),附着生物生物量、群落结构、代谢活性,载体投放量以及载体上溶解态营养盐的释放。所选的 3 种人工载体中,尼龙纱网对富营养化水体中氮、磷的净化效率显著高于立体填料和生物绳。如果能定期将这些纱网移出水体进行清洗,可以带走水体中大量的悬浮物质及氮、磷营养盐。由于尼龙纱网具有单位质量生物活性高、网片状均匀结构、附着生物能与水体接触充分、自身滞留溶解态营养盐少、质量轻等优势,同时从经济成本上考虑,净化等量营养盐其所需经济成本最低(表 3),因此尼龙纱网可作为净化富营养化水体较为理想的人工载体。

致谢:本研究室外实验得到了中国科学院太湖湖泊生态系统研究站的大力协助与支持,室外采样及实验样品分析工作得到了太湖站薛静琛工程师的指导与帮助,在此一并表示感谢。

表 3 3 种人工载体去除水体 TN、TP 含量经济成本的比较

人工载体	经济成本/(元/mg)	
	TN	TP
立体填料	0.042	0.146
生物绳	0.256	0.535
尼龙纱网	0.018	0.092

4 参考文献

[ 1 ] 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.

[ 2 ] MacDonald LA, Balasubramaniam AM, Hall RI *et al.* Developing biomonitoring protocols for shallow Arctic lakes using diatoms and artificial substrate samplers. *Hydrobiologia*, 2012, **683**(1): 231-248.

[ 3 ] Szlauer-Lukaszewska A. Succession of periphyton developing on artificial substrate immersed in polysaprobic wastewater reservoir. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, **16**(5): 753-762.

[ 4 ] 陆 红,晁建颖,张毅敏等. 人工介质富集附着生物对富营养化水体的净化作用. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(3):76-81.

[ 5 ] Albay M, Akcaalan R. Comparative study of periphyton colonisation on common reed (*Phragmites australis*) and artificial substrate in a shallow lake, Manyas, Turkey. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1): 531-540.

[ 6 ] Dodds WK. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems. *Journal of Phycology*, 2003, **39**(5): 840-849.

[ 7 ] Gaiser E, Scinto L,Richards JH *et al.* Phosphorus in periphyton mats provides the best metric for detecting low-level P enrichment in an oligotrophic wetland. *Water Research*, 2004, **38**(3): 507-516.

[ 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 ] Wolfe JE, Lind O. Phosphorus uptake and turnover by periphyton in the presence of suspended clays. *Limnology*, 2010,



- 11(1): 31-37.
- [10] 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.
- [11] 戴亚奇, 甄 彧, 吴 健. 渔网围栏介质对太湖梅梁湾富营养化水体的改善. 中国环境科学, 2006, 26(2): 176-179.
- [12] 纪荣平, 吕锡武, 李先宁等. 3 种人工介质对太湖水质的改善效果. 中国给水排水, 2005, 21(6): 4-7.
- [13] Barbiero RP. A multi-lake comparison of epilithic diatom communities on natural and artificial substrates. *Hydrobiologia*, 2000, 438(1): 157-170.
- [14] 唐传祥. 新型生物膜法废水处理中生物载体填料的研讨. 工业用水与废水, 1993, 3: 27-31.
- [15] 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.
- [16] Chen Y, Qin B, Teubner K *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages; *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(1): 445-453.
- [17] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(1): 420-432.
- [18] 郑焕春, 周 青. 微生物在富营养化水体生物修复中的作用. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 197-202.
- [19] 陈 丹, 高 光, 汤祥明等. 人工载体理化性状对附着生物水质修复能力的影响. 湖泊科学, 2013, 25(1): 39-46.
- [20] 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.
- [21] 金相灿, 屠清琰. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] 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.
- [23] 周易勇, 李建秋, 宋春雷等. 东湖间隙水自由碱性磷酸酶活性的季节性与其组成的非均一性. 水生生物学报, 2003, 27(1): 100-102.
- [24] 高 光, 秦伯强, 朱广伟等. 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.
- [25] Porter KG, Feig YS. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(5): 943-948.
- [26] 沈鑫绿, 沈新强, 邵 留等.  $Hg^{2+}$  胁迫下细叶蜈蚣草对水体总磷去除效果的研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 130-133.
- [27] 纪荣平, 李先宁, 吕锡武等. 人工介质富集微生物对藻类和藻毒素降解试验研究. 东南大学学报, 2005, 35(3): 442-445.
- [28] 李先宁, 纪荣平, 蒋 彬等. 利用人工介质改善太湖水源地水质的研究. 中国给水排水, 2007, 23(19): 19-22.
- [29] 纪荣平, 吕锡武, 李先宁等. 人工介质对水源水中藻类去除特性研究. 环境科学, 2007, 28(1): 75-79.
- [30] 吴永红, 方 涛, 丘昌强. 藻-菌生物膜法改善富营养化水体水质的效果. 环境科学, 2005, 26(1): 84-89.
- [31] 王福芳, 屈建航, 胡元森. 太湖水-沉积物界面磷、pH 及碱性磷酸酶的时空特征及相关性. 生态环境学报, 2012, 21(5): 907-912.
- [32] 周 勇. 生物填料在苏州重污染河道治理中的应用研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [33] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程(下). 北京: 高等教育出版社, 1999: 124-127.
- [34] 肖羽堂, 许建华. 生物接触氧化法净化微污染原水的机理研究. 中国给水排水, 1998, 14(2): 8-10.
- [35] 季 民, 吴昌敏, 贾霞珍等. 生物接触氧化法对引滦水中藻类的去除. 中国给水排水, 2003, 19(8): 56-58.
- [36] Burkholder JAM, Wetzel RG. Epiphytic alkaline phosphatase on natural and artificial plants in an oligotrophic lake; re-evaluation of the role of macrophytes as a phosphorus source for epiphytes. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(3): 736-747.
- [37] 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.
- [38] 陈重军, 韩志英, 朱荫渭等. 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.
- [39] 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.