

新型生物栅填料用量及对景观水体藻类的去除效果

苏雅玲¹, 肖羽堂^{1, 2*}, 高立杰²

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071

摘要: 针对天津市经济技术开发区景观河道水量大, 氮磷质量浓度高的特点采用生物栅填料去除藻类。通过实验室小试和室外中试, 对于生物栅填料实际应用的填料服务水体体积、曝气影响、负荷影响和 HRT 的影响进行考察。试验结果表明, 生物栅填料应用于富营养化除藻时, 生物栅填料的使用量越大越好, 但是较大的使用量代表较高的处理成本, 综合考虑处理成本和效果, 由实验得最佳服务水体的用量为 $12 \text{ cm} \cdot \text{L}^{-1}$; 曝气对于生物栅填料去除藻类的功能并没有影响; 在不同的负荷条件下, 生物栅填料都可以有效地去除藻类, 并且高负荷条件下生物栅填料具有较高的藻类去除速率, 在实验条件下, 4 d 后各个负荷条件下的藻类达到一致; 生物栅填料上的浮游动物种类比较单一, 只有沟渠猛水蚤 (*Canthocamptus staphylinus* Jurine); 生物栅填料对于出水水质也有一定的影响, 它可以有效地去除水中有机物, 氮磷和悬浮物质。

关键词: 生物栅填料; 景观水体; 除藻

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0458-08

水景设置可以提高环境质量, 增强居住的舒适感; 利于净化空气, 增加居住环境的湿度, 减少扬尘, 改善区内小气候; 同时可以为人们营造回归自然的气氛, 带来精神上的享受。随着世界城市化水平和工业化程度的提高, 水资源短缺和水污染加剧日益严重, 将清洁水资源用于景观水体是不可行的, 因此将城市污水经深度处理后, 补给人工景观水体已经成为解决城市缺水、提高水资源有效利用率、增加水景设施的一条重要途径。就再生水回用的景观水体而言, 水质要严格考虑再生水存在的污染物、病原菌以及藻类对水体美学价值和人体健康的潜在危害^[1]。其中, 富营养化是再生水发挥娱乐性、观赏性人工水体功能最大的障碍。除藻可使水体的透明度增加, 恢复景观水体的景观功能; 帮助景观水体由浊水稳态向着清水稳态转化^[2], 从而增强水体自净功能, 恢复景观水体的生态功能。

目前, 景观水体除藻的方法主要包括物理法、化学法和生物法。物理法通过吸附过滤、机械等方法去除, 方法复杂, 耗费人力物力。化学法主要通过化学药剂杀灭活体藻细胞, 该法操作简单, 除藻快, 但会不可避免地造成环境污染和生态破坏, 且有致癌作用。生物法通过水体中一些微生物对藻类及其副产品的生物降解起着重要作用。现已发现多种粘细菌、蓝噬菌体和真菌能裂解藻类营养细胞或破裂细胞的某一特定结构。而在生物法基础上发展起来的生物栅是一种人工绳状填料, 它是以硬质的纤维丝为骨架, 再用丝状纤维作为骨架中空部位的填充物, 正是通过丝状纤维缠绕出的细小空隙来保

护附着其上的浮游动物免于滤食性鱼类的摄食, 又提供了较高的比表面积, 从而使浮游动物和微生物在填料上以较高的密度生存, 当含藻水体流经填料区时, 将其以较高的速率牧食。这样通过人工措施增加了单位水体中微生物和浮游动物的数量, 使其在保证的水力停留时间范围内有效地降低水体藻类的含量, 从而也就增加了水体的自净能力。

本研究针对天津市经济技术开发区景观河道的富营养化问题, 为除藻寻找有效经济的解决途径。天津市经济技术开发区景观河道的氮磷本底值较高 (分别在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上), 这是引起藻类在河道内大面积高密度滋生的主要原因。本课题分别通过实验室小试和室外中试, 对于生物栅填料实际应用的填料服务水体体积、曝气影响、负荷影响和 HRT 的影响进行考察, 从而为生物栅填料在实际除藻过程中提供准确的应用和设计参数。

1 生物栅填料除藻试验设计

1.1 实验室小试

(1) 生物栅填料的最佳添加量: 于 10 L 的鱼缸中添加 10 L 现场采来的含藻景观河道水样, 在实验室条件下稳定 3 d 用于除藻实验; 分别在 5 个盛有 10 L 含藻水中添加不同长度 (0 cm、40 cm、80 cm、120 cm 和 160 cm) 已启动好的生物栅填料, 在不同时间下 (每天 1 次) 测定各个处理中的藻密度和叶绿素 a (Cla) 的含量。

(2) 曝气对于生物栅填料除藻的影响: 确定好最佳用量后, 在鱼缸中分别曝气, 以观察曝气对于生物栅除藻的影响。本试验的设置: 曝气方式为昼

基金项目: 中国科学院创新工程科研项目资助 (07SL011008)

作者简介: 苏雅玲 (1980 年生), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为水处理技术。E-mail: ylsu@niglas.ac.cn

收稿日期: 2008-11-05

夜连续曝气，以 A 表示，设置两个水平：340 mL·min⁻¹ 和 680 mL·min⁻¹，分别以 A1 和 A2 表示；加生物栅最佳用量以 B 表示，实验设计见表 1。在不同时间下（每天 1 次）测定各个处理中的藻密度和叶绿素 a（Cla）的含量。

表 1 曝气对于除藻影响的实验设计
Table 1 Experimental design of the effect of aeration on the algae removal

	处理					
	对照	A1	A2	B	B+A1	B+A2
曝气量/(ml·min ⁻¹)	0	340	680	0	340	680
生物栅量/(cm·L ⁻¹)	0	0	0	B	B	B

（3）藻类负荷对于生物栅除藻的影响：将原河水经 0.45 μm 滤膜过滤作为稀释用液，分别向 10 L 鱼缸中添加 1 L、4 L、7 L 和 10 L 的含藻河水，不足 10 L 的处理用已制备好的稀释用液补满，制得 10%、40%、70%和 100%负荷的河水样，以实验（1）中所确定的最佳生物栅填料用量处理。在不同时间下（每天 1 次）测定各个处理中的藻密度和叶绿素 a（Cla）的含量。

实验室小试所用河水水质： $\rho(\text{TN})=13.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\rho(\text{TP})=0.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\rho(\text{NO}_3^{-}\text{-N})=10.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\rho(\text{NH}_4^{+}\text{-N})=0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\rho(\text{可溶性磷})=0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})=11.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，总矿化度 5 569 mg·L⁻¹。河水藻类的分类计数见表 2。

表 2 进水藻类及其百分比
Table 2 The algae variety and percentage in the influent

藻种类	数目百分比/%
细小平列藻	39.629
最小胶球藻	18.265
水花鱼腥藻	16.438
池沼隐棒藻	10.731
线形棒膜藻	4.120
华美平列藻	2.740
池生黄球藻	2.511
膨胀胶球藻	2.283
针状蓝纤维藻	1.370
双生平板藻	1.370
浮游念珠藻	0.685
新月蹄形藻	0.228

1.2 室外中试

室外中试于天津经济技术开发区再生水景观河道边所建的水泥池中进行，布置如图 1 所示。中试系统由一个进水池和两个试验池（一个处理和一个对照）组成，试验池的尺寸为 6 m×1.5 m×1 m，河水经提升泵进入进水池，在重力作用下通过进水管向量试验池中进水，其进水流量由球阀控制。由出水管的位置来控制水位，实验过程中有效水深为

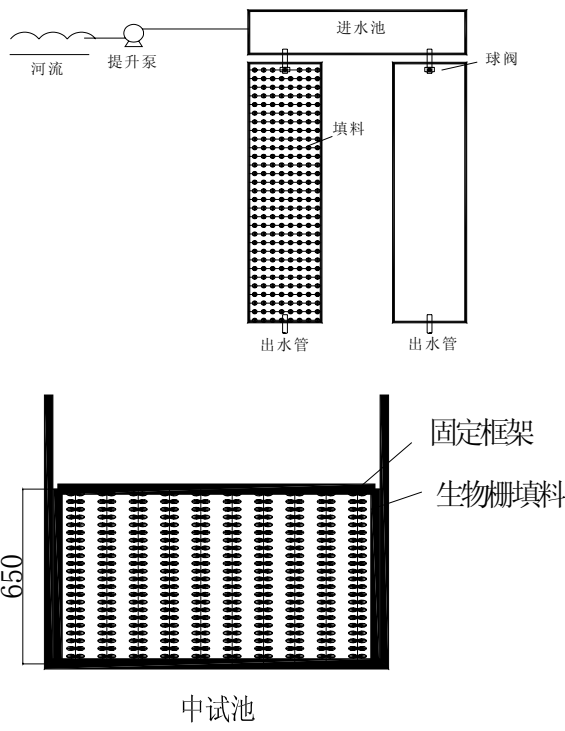


图 1 中试流程图及生物栅的布置
Fig. 1 Schematic diagram of pilot trial and disposal of bio-grid

0.65 m。填料在试验池中排布方式为垂直排布，并将其上下端固定，平均布满池子。分别设置不同的水力停留时间（HRT=1 d, 3 d, 6 d），观察生物栅在不同水力学条件下的除藻特征。

1.3 生物栅填料的启动

将高密度含藻河水通过提升泵注入到空水池中，再将已有的生物栅填料置于水池中，让河水中浮游动物自由地附着到填料中。每隔 3 d 给水池中换一次水，并同时观察浮游动物在生物栅的生长情况，由于浮游动物的个体较大并且肉眼可见，因此在捞出生物栅条放于地面时有大量的浮游动物从中爬出，即认为是启动工作已经成功。

1.4 采样及测定方法

（1）生物栅填料除藻采样：实验室小试每天 10:00 采样，分别测定藻密度和 Cla 的含量；中试分别在不同的水力停留时间下于两试验池的出水端分别于水面下 10 cm 和 50 cm 处采水样制得混合水样测定藻密度和 Cla 的含量。

（2）水样的藻计数和 Cla 的测定方法：叶绿素 a 的测定：藻属于低等植物，具有叶绿素，可以进行光合作用。因此，叶绿素 a 含量的多少可以代表藻类初级生产力的情况，进而测得藻类的生物量。叶绿素 a 的含量按如下公式计算：

叶绿素 a(mg·m⁻²)= { [11.64(D663-D750)-2.16(D645-D750)+0.1(D630-D750)]·V1 } /Vδ

其中, V: 水样体积 (L); D: 吸光度; V1: 定容体积 (mL); δ : 比色皿厚度 (cm)。

藻数目的测定: $\text{细胞数} \cdot \text{mL}^{-1} = \text{平均每下格细胞数} \times 4000 \times 30 / 1000$

其它项目均按照标准方法测定^[3]。

2 结果与讨论

2.1 生物栅填料最佳添加用量

生物栅作为填料添加到富营养化水体中去除藻类, 其最佳用量是一个重要的参数。不同生物栅长度下藻密度和 Cla 质量浓度的变化见图 2。由图 2 可以看出: 相比于对照, 加入生物栅后藻密度和 Cla 质量浓度都有所降低, 证明了生物栅对于富营养化景观水体除藻的有效性; 随着生物栅填料添加长度的增加, 藻类和 Cla 质量浓度的去除量也越来越大, 水体的透明度越来越高; 藻密度和 Cla 质量浓度随着停留时间的增大而变得越来越小, 当生物栅添加量为 $12 \text{ cm} \cdot \text{L}^{-1}$, 停留时间为 6 d 时, 藻密度和 Cla 的去除率分别为 96.38% 和 86.80%, 当生物栅添加量为 $16 \text{ cm} \cdot \text{L}^{-1}$, 停留时间为 6 d 时藻密度和 Cla 的去除率分别为 98.98% 和 88.25%; 藻密度的变化符合指数变化规律, 当生物栅长度为 120 cm 时 $y = 715.41e^{-0.5449x}$ ($r^2 = 0.984$); 当生物栅长度为 160 cm 时 $y = 910.6e^{-0.7531x}$ ($r^2 = 0.996$), Cla 质量浓度的变化也有相同的趋势, 但并不像藻密度变化得那么明显, 这主要是由于浮游动物对于藻种类的牧食也具有选择性差异^[4], 随着牧食的进行使得水体中藻类种群组成发生了变化, 但并没有造成不易被牧食的藻类重新造成水华的现象。

从上述实验结果可以看出: 如果想要应用生物栅填料除藻达到一个令人满意的效果就必须有足够的填料量。在浮游动物的数量成为绝对优势时才会大量地牧食藻类, 在较短时间内起到较好的除藻

效果; 藻类受到来自于浮游动物牧食压力会产生响应, 变化种群, 使牧食变得困难; 藻类也可以通过产生毒素来影响浮游动物的生长和种群组成^[5], 这些原因都使得较小添加量难以达到理想的除藻效果。因此, 对于除藻而言, 生物栅填料的添加量越大越好, 但添加量越大就意味着成本越高。从经济和去除效果两方面考虑, 在实验的 10 L 含藻水中 120 cm 的生物栅填料的加入量, 即 $12 \text{ cm} \cdot \text{L}^{-1}$ 在 6 d 的水力停留时间条件下, 藻密度和 Cla 的去除率分别为 96.38% 和 86.80%, 可认为是合理的添加量。

2.2 曝气对于生物栅除藻的影响

曝气对于藻和浮游动物系统有着多方面的影响: 藻在白天产生溶解氧 (DO) 使水体中溶解氧水平趋于饱和, 而夜里的呼吸作用却使水体中溶解氧水平很低, 严重抑制了浮游动物的活性, 因此通过曝气可以为浮游动物的生存提供充足的溶解氧; 曝气能够改变水体中 O_2 和 CO_2 的含量组成, 影响到水体的 pH 和氧化还原状况; 曝气也对水体进行扰动, 从而改变了 O_2 的传递和扩散^[6]; 通过 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化来影响藻类生长^[7]。

图 3 表示在不同曝气条件下, 生物栅填料对于藻密度和 Cla 质量浓度的去除的影响。从图中可以看出: 相比于对照, 曝气和加入生物栅的处理都可以明显地降低富营养化景观水体中藻密度和 Cla 的质量浓度; 对于单独曝气, 第 4 天之前, 藻类的生长并未受到抑制, 而且还有增加的趋势, 但第 4 天以后, 藻密度和 Cla 质量浓度骤然下降, 这与刘春光等的结果相同^[7], 主要是由于藻类的夜间过度的呼吸作用使藻类减少, 曝气量的大小并没有对藻密度和 Cla 质量浓度的变化产生影响; 加入生物栅填料的处理都可以明显地降低藻密度和 Cla 质量浓度, 并且曝气与否, 曝气量的大小对于生物栅除藻

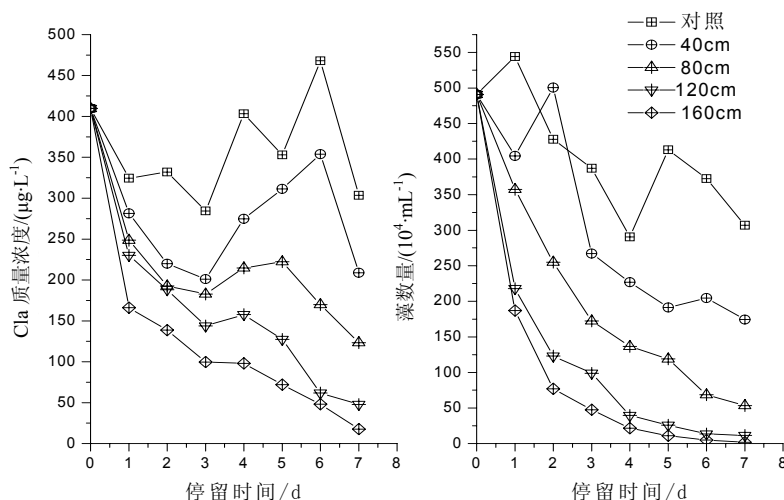


图 2 不同长度生物栅加入量条件下藻数目和 Cla 的变化

Fig. 2 Algae density and Cla concentration under different bio-grid length and usage number

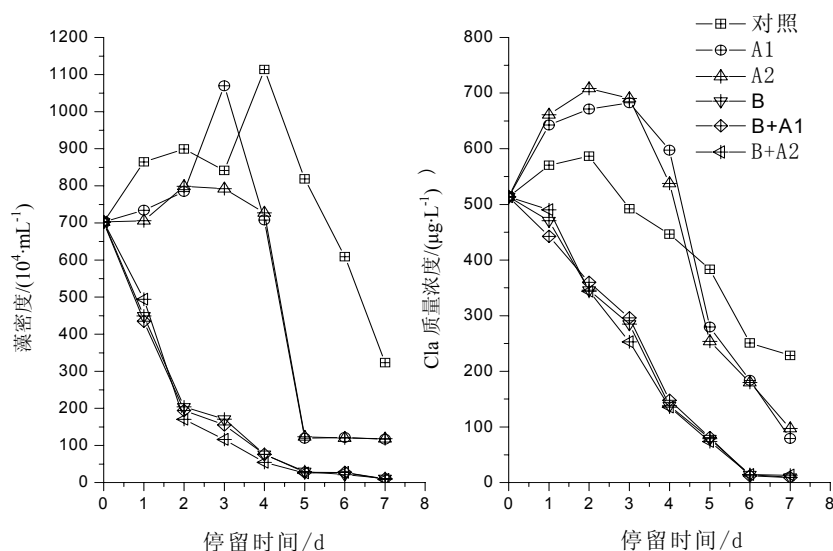


图3 不同曝气条件下生物栅处理藻密度和 Cla 质量浓度的变化

Fig. 3 Algae density and Cla concentration under different aeration conditions

没有影响；加入生物栅的处理比单纯曝气的除藻的效果要好。因此，曝气对于生物栅除藻并没有影响，这主要是由于生物栅上附着的大量浮游动物可以有效地控制周围环境中藻类的数量，从而保证了夜里溶解氧的含量。由此可以看出，生物栅在应用时对于环境的适应性较强，不需要额外的曝气或其它的辅助设备的帮助就可以起到很好的去除藻类的作用。

2.3 藻类负荷对于生物栅除藻的影响

图4为在不同的4种负荷（100%、70%、40%和10%）下，生物栅的去除效果。从图中可以看出，生物栅的加入使得4种负荷条件下的含藻河水的藻密度和 Cla 质量浓度都明显地降低；在4种负荷条件下，开始的牧食速率都比较大，随时间增长而降低；随着负荷的增加，其牧食速率越大；藻密度和

Cla 质量浓度在第4天趋于一致。这主要是由于生物栅中的浮游动物数量较大，对藻类的牧食量也较大，密度较高的藻液是浮游动物对于藻类的牧食比较容易，所以较高负荷具有较高的牧食速率。随着时间的行进，藻液的藻密度变小，使牧食变得困难，牧食速率随着时间而减小。由此可见，生物栅填料适用的负荷范围比较广泛，并且都可以起到有效去除藻类的作用，只是要达到一定效果，对于高负荷的藻类进水需要较长的时间。

2.4 生物栅除藻的动力学研究

2.4.1 不同生物栅长度与藻密度和 Cla 去除率的关系

图5为水力停留时间7 d条件下，不同长度生物栅填料对于藻密度和 Cla 质量浓度的平均去除率。从图中可以看出：在生物栅填料的加入量为0~100 cm时，浮游动物的数量未达到绝对优势，此

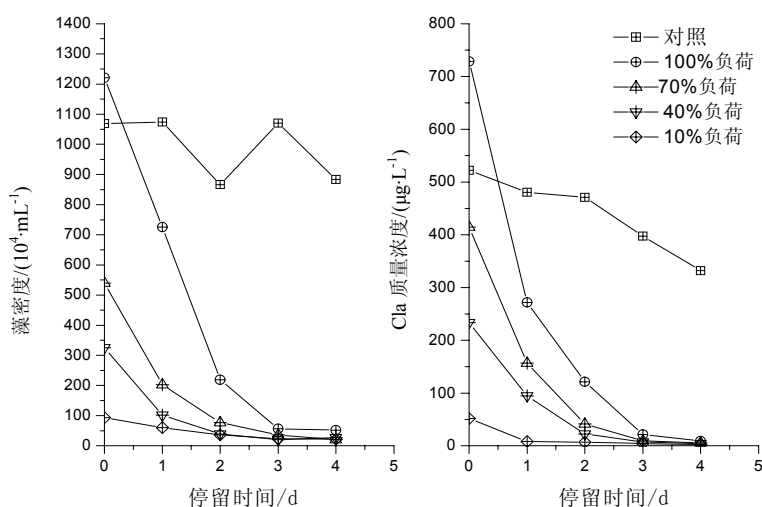


图4 不同负荷条件下生物栅处理藻密度和 Cla 质量浓度的变化

Fig. 4 Algae density and Cla concentration under different algae load

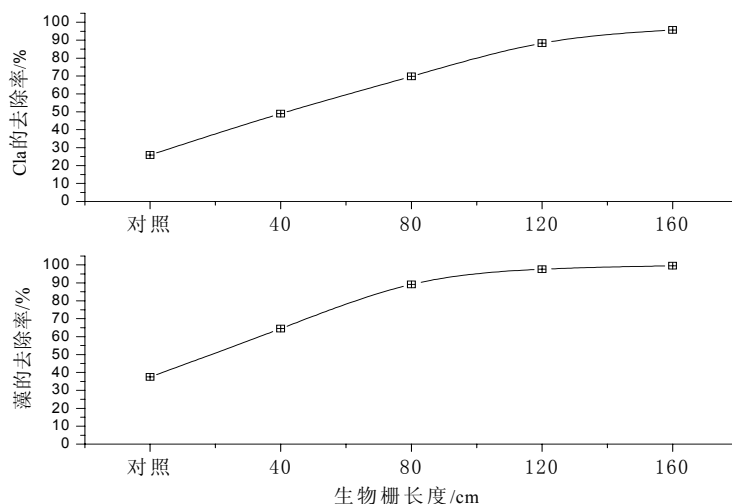


图5 不同长度生物栅条件下的藻密度和 Cla 质量浓度去除率 (7 d)

Fig. 5 Removal of algae density and Cla concentration under different bio-grid length

时藻密度和 Cla 的平均去除率随着生物栅加入长度 (浮游动物的生物量) 的增加而呈线性增长; 当生物栅填料的添加量为 100~160 cm 时, 藻密度和 Cla 的平均去除率随生物栅填加量的增加而增加的趋势明显变缓, 慢慢地接近于 100%。由此可以看出, 在生物栅实际应用过程中, 一味地增加生物栅的用量不仅使景观水体的处理成本增加, 而且还会使生物栅整体的处理效率降低。

2.4.2 不同负荷条件下藻密度和 Cla 的去除速率

从图 6 中可以看出, 随着负荷的增加, 藻密度和 Cla 的去除速率都有增大的趋势, 并且负荷越大, 去除速率增加的就越多。藻密度和 Cla 质量浓度去除速率随藻类负荷的变化趋势符合二项式规律: 藻密度的去除为 $y = 0.0002x^2 - 0.0026x + 0.1966$ ($R^2 = 0.9859$), Cla 的去除为 $y = 8E-05x^2 + 0.0069x +$

0.0402 ($R^2 = 0.9965$)。由此可知, 生物栅填料更适用于藻密度较大的富营养化景观水体, 因为这样有更大的去除速率。

2.5 生物栅填料上生物相的观察

通过对启动成功的生物栅填料上的浮游动物进行调查, 结果显示生物栅填料上浮游动物种类为单一种, 只有沟渠异足猛水蚤 (*Canthocamptus staphylinus* (Jurine)), 属于桡足类。其在生物栅填料上的生存密度为: 33.1 只每厘米生物栅填料。

由于水样中的盐度较高 ($5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右), 因此造成了在生物栅填料上的浮游动物的种类只有一种; 在生物栅填料的运行期间, 生物栅填料上的浮游动物由于有充足的食物来源, 又没有来自于滤食性鱼类的捕食压力, 因此在生物栅填料上沟渠异足猛水蚤的数量较大。

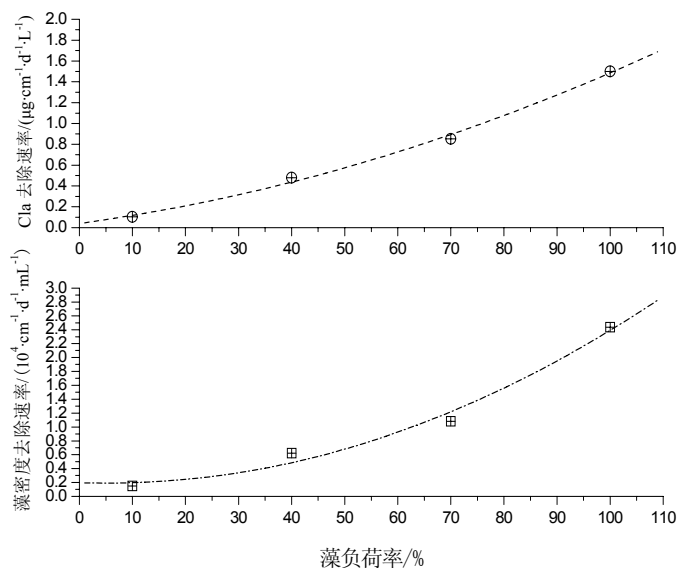


图6 不同藻类负荷条件下藻密度和 Cla 质量浓度去除速率的变化

Fig. 6 Removal rate of algae density and Cla concentration under different algae load

2.6 HRT 对于生物栅除藻的影响

由于以上实验都是在实验室内进行的静态模拟试验, 水体体积较小且为静止水体, 但通常实际的景观水体体积较大, 并且有一定的流速, 这就使得实验室的模拟试验与真实的情况差别较大, 因此要证明生物栅填料在实际应用过程中的有效性就必须进行室外中试, 同时也确定在实际应用时的水力学参数。

室外中试按照前文介绍的布置情况进行, 生物栅填料的投加量按照前面实验中所确定最佳服务水体体积 $12 \text{ cm} \cdot \text{L}^{-1}$ 进行。实验结果见图 7。从结果中可以看出: 进水的藻密度和 Cla 质量浓度比较恒定, 分别在 $300 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 而对照的藻密度和 Cla 质量浓度却大于进水, 分别在 $400 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 因此在此试验条件下有利于藻类的生长。当水力停留时间为 1 d 时, 投加生物栅填料的处理池就减少了进水中的藻生物量, 但处理的藻密度和 Cla 质量浓度与进水相差不多, 这主要是由于连续进水系统中藻类会随着进水源不断地被输入到池中。从图 7 中所添加的拟合曲线可以看出, 在连续进水的条件下, 藻密度和 Cla 质量浓度随着 HRT 的增加而不断减少, 在 $\text{HRT}=6 \text{ d}$ 时, 藻密度和 Cla 质量浓度分别为 $13 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $9.51 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率分别为 96.79% 和 98.25% (相对于物栅对照)。因此, 在生填料的实际应用过程中, 实际水体的水力学参数是十分重要的, 必须保证水体与生物栅有足够的接触时间才能保证除藻的效果。

2.7 生物栅填料的投加对于出水水质的影响

因为生物栅是一种绳状填料, 在生物栅填料启

动成功后, 在生物栅上除了附着有大量的浮游动物外, 还富集了大量的微生物并形成了生物膜, 因此投加了生物栅填料的处理系统还可以近似地看成是生物膜法水处理系统。生物栅填料上附着的生物膜可以通过吸附、附着、机械截流和捕食水体中的藻类, 水体中的污染物也可以在微生物的作用下得以去除; 生物栅填料上附着的浮游动物会将水体中的营养物质和有机物通过去除藻类的形式去除掉。通过对于中试系统在不同水力停留时间 ($\text{HRT}=1 \text{ d}, 3 \text{ d}, 6 \text{ d}$) 条件下, 分别测定进水、对照和出水的 SS, COD_{Mn} , 总磷和总氮。试验结果见图 8。

从图 8 中可以看出生物栅的加入可以明显改善出水的水质。对于 COD_{Mn} : 进水的 COD_{Mn} 随着进水水质的改变而改变, 但是进水的 COD_{Mn} 值一直都保持在 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; 对照池的出水的 COD_{Mn} 值在相同的水力停留时间下有明显的提高, 都保持在 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 证明了在现场中试的条件下是利于藻类生长的; 加入生物栅的处理池的 COD_{Mn} 值在 1 d 的水力停留时间时与进水大小相似, 但是随着水力停留时间的增加, COD_{Mn} 值大大地降低, 当 $\text{HRT}=6 \text{ d}$ 时, COD_{Mn} 的去除率为 63.26% (相对于对照)。主要原因为水中 COD_{Mn} 主要包括无机还原物质、水中的有机物和藻生物体, 现场中试条件下有利于藻类生长, 藻类白天进行光合作用合成自身物质, 使水体中藻类数目增加 (有机物质增加), 因此空白中 COD_{Mn} 值明显地增加了, 而对于加入生物栅填料的处理池, 生物栅上的微生物可以降解水中的有机物和藻类, 浮游生物又可以将藻类作为食物牧食掉, 因此 COD_{Mn} 值随着生物栅的加入而减少, 随着水力停留时间的增长处理的效果就变得

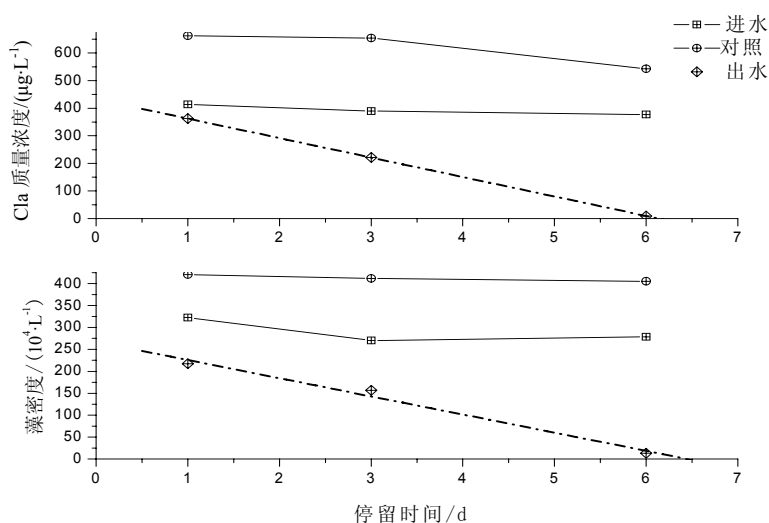


图 7 中试不同条件下 HRT 藻密度和 Cla 质量浓度的变化

Fig. 7 Algae density and Cla concentration under different HRT in pilot trial

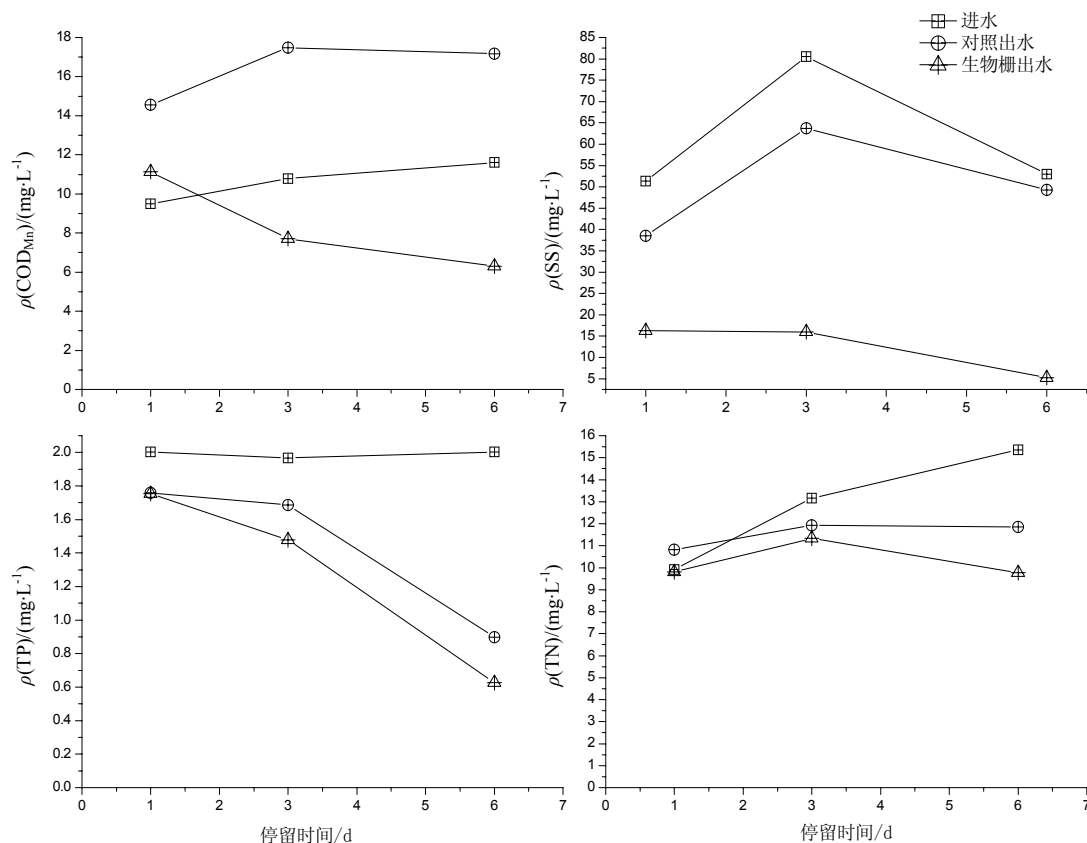


图 8 生物栅对于出水水质的影响

Fig. 8 Effect of bio-grid on the effluent quality

越好。

对于 SS: 进水中的 SS 的变化较大, 在 3 d 水力停留时间时达到最大; 对照池出水中的 SS 与进水中的 SS 的变化具有相同的趋势, 但对照中的 SS 总是要小于进水, 主要是因为两种作用: 1) 藻类的增殖使得水中不可滤过固体量增加, 使 SS 增加; 2) 水池可以被看作是平流沉淀池, 一些颗粒较大, 密度较高的颗粒就随着水流沉到水池的底部而被去除。两种作用以第 2 种作用为主, 因此 SS 有所降低; 加入生物栅的处理池可以明显地降低水体中的 SS, 即使是在 1 d 的条件下 SS 也有大幅度降低 (相对于对照)。由此可见, 生物栅填料的加入可以很好地去除 SS。除了沉淀作用外, 生物栅上丰富的微生物对水中有机物和无机物的吸附和絮凝作用 (在生物栅上可以明显看到大块的絮体)、对藻类的去除作用以及浮游动物对藻类的牧食作用使藻类生物量减少; 随着 HRT 的增加, 水体中的 SS 也越来越小, 当 HRT=6 d 时, 生物栅对于 SS 的去除率可达 89.33%, 水体透明度大大地增加。

对于营养盐: 通过图 8 中 TP 和 TN 的变化中可以看出, 进水中 TP 的质量浓度变化不大, 保持在 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右; 对照池中的 TP 要明显地低于进水, 这是因为一部分磷随着水中悬浮物质沉到池

底, 另一部分被水泥池壁所吸附。当 HRT=1 d 时, 对照池与生物栅处理池相差很小, 但是随着水力停留时间的增加, 两者的差距也逐渐增加, 这主要是因为池中包含在藻细胞内生物态磷随着藻的去除而被去除。TN 与 TP 的变化有着相似的趋势, 不同之处在于水泥池壁主要吸附 NH_4^+-N , 对 NO_3^--N 的吸附并不明显, 除了以藻细胞的形式除氮, 还有微生物的作用。当 HRT=6 d 时, 生物栅填料对于 TP 和 TN 的去除率分别为 30.11% 和 17.61%。

3 结论

针对天津经济技术开发区景观河道而言, 由实验得最佳服务水体的用量为 $12 \text{ cm}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 HRT=6 d 时, 藻密度和 Cla 的去除率分别为 96.38% 和 86.80%, 水体的透明度大大增加, 且未发现难处理藻类重新发生水华的现象。曝气对于生物栅填料去除藻类的功能并没有影响, 生物栅不需要额外的曝气或其它的辅助设备的帮助就可以起到很好去除藻类的作用。在不同的负荷条件下, 生物栅填料多可以有效地去除藻类, 并且高负荷条件下生物栅填料具有较高的藻类去除速率。相同的水力停留时间条件下, 藻类去除率和 Cla 去除率随着生物栅用量的增加而增加。在不同负荷条件下, 藻类和 Cla 质量浓度的去除速率呈二项式变化规律。因此, 生物

栅填料更适合应用于藻密度较高的富营养化水体。生物栅填料不仅可以有效地去除藻类，还有去除水中的污染物，保持水质，防止水华再次爆发的功能。在实际的连续流大水体中应用生物栅填料时，水体的 HRT 非常重要，只有保持适当的水体与生物栅填料的接触面积和时间才可能达到较好的藻类去除效果。建议生物栅在实际应用中布置在流速较小的流段中，保证充分的接触时间。

参考文献：

- [1] 李春丽, 周律. 再生水回用于景观水体的水质控制系统研究[J]. 现代城市研究, 2005, (4): 32-35.
LI Chunli, ZHOU Lu. The systematic studies on water quality control of regenerated wastewater for reuse in the landscape water-bodies[J]. Modern Urban Research, 2005, (4): 32-35.
- [2] 年跃刚, 宋英伟, 李英杰, 等. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J]. 环境科学研究, 2006, 19 (1): 67-70.
NIAN Yuegang, SONG Yingwei, LI Yingjie, et al. Regime shift theory and ecological restoration discussion in eutrophic shallow lakes[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(1): 67-70.
- [3] 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, 2002.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Water and Wastewater Monitoring and Analyzing Methods (IV) [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Publishing Company, 2002.
- [4] GONZÁLEZ ERNESTO J. Nutrient enrichment and zooplankton effects on the phytoplankton community in microcosms from El Andino reservoir (Venezuela)[J]. Hydrobiologia, 2000, 434: 81-96.
- [5] 陈艳, 王金秋, 王阳, 等. 微囊藻毒素对褶皱臂尾轮虫的毒性效应和种群增长影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(3): 198-201.
CHEN Yan, WANG Jinqu, WANG Yang, et al. Toxicity and population growth effects of microcystin on the rotifer *Brachionus plicatilis*[J]. China Environmental Science, 2002, 22(3): 198-201.
- [6] 孙从军, 张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. 环境保护, 2001, 4: 12-20.
SUN Congjun, ZHANG Mingxu. Application of aeration technique in river pollution control[J]. Environmental Protection, 2001, 4: 12-20.
- [7] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 不同氮源和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 101-104.
LIU Chunguang, JIN Xiangcan, SUN Ling, et al. Effects of nitrogen source and aeration mode on algae growth in freshwater[J]. Environmental Science, 2006, 27(1): 101-104.

Algae removal in the landscape waters using novel bio-grid method

Su Yaling¹, Xiao Yutang^{1, 2}, Gao Lijie²

1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Nanjing 210008, P R China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract: Aiming at the large water quantity and high nutrient and phosphor concentration in Tianjin Economy and Development Area landscape waters, bio-grid was used to remove algae. We presented field and laboratory data for the investigation of the influence factors, including water volume using bio-grid, aeration, algae loading and usage number. The results indicated that the larger usage number of bio-grid had the better effect on the algae removal. Considering the cost and effect, 12 cm·L⁻¹ was determined as the optimum usage number. Aeration had no obvious effect on algae removal. Bio-grid could effectively remove algae under the different algae loading. Moreover, it had a greater removal velocity under the bigger algae loading. Algae number reached the close value after 4 days under the different loading. There was only one kind of zooplankton on bio-grid, *Canthocamptus staphylinus* (Jurine). In addition, Bio-grid also had an effect on the influent quality because it could remove organic matter, nutrition and SS form water.

Key words: Bio-grid; Landscape water; Algae removal