

不同生态工程及其组合系统除藻效率的比较研究

吴振斌¹, 吴晓辉^{1,2}, 付贵萍¹, 成水平¹, 贺锋¹, 邓平^{1,2}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 比较了不同水力负荷条件下, 由水平流碎石床湿地、下行流湿地、上行流湿地、好氧塘和兼性塘等不同生态工程单元组合而成的 5 组 8 套小型处理系统对藻类的去除效率及其变化趋势, 并根据适宜水力负荷下各系统除藻效率的季节变化研究了各种组合形式对藻类的去除效果. 结果表明: 当水力负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 各处理单元对藻类生物量的去除效率均达到最高; 好氧塘+下行流湿地系统和水平流碎石床系统均表现出较强的抗水力冲击负荷能力; 各生态工程组合系统的除藻效率在夏季最高, 对藻类的去除率均超过 94%; 冬季最低, 藻类去除率变动范围为 34%~90%. 不同类型生态工程的组合方式决定了系统的除藻效率, 下行流-上行流湿地的组合对藻类去除效果优于其它组合, 季节变化对其运行效果影响不大; 水平流碎石床湿地系统对藻类去除效果略逊于其它组合且受季节影响较大.

关键词: 生态工程; 组合; 藻类; 去除效率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)02-0241-05

Comparison of Algal Removal Efficiencies in Different Ecological Treatment Systems and Their Combinations

WU Zhenbin¹, WU Xiaohui^{1,2}, FU Guiping¹, CHENG Shuiping¹, HE Feng¹, DENG Ping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The algal removal efficiencies and their trends of 8 experimental ecological treatment systems, which belonged to 5 groups, were studied under different hydraulic loading rates (HLR). The algal removal efficiencies were compared according to the seasonal changes under the optimum HLR. Gravel-bed horizontal-flow wetland, downflow wetland, upflow wetland, aerobic ponds or facultative ponds combined these systems. The results show that the best HLR is $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ in all the experimental systems. The systems including aerobic pond and downflow wetland show a stronger resistance to hydraulic shock loading, as well as horizontal-flow wetland. The algal removal rates of all the systems peaked to over 94% in summer and bottomed in winter that varied from 34% to 90%. It was the combined form that determined the removal efficiency of the ecological treatment systems. The combination system of downflow and upflow wetland present the highest capacity of algal removal efficiency and lower seasonal fluctuation, while the gravel-bed horizontal-flow wetland system present the lowest efficiency and higher seasonal fluctuation.

Key words: ecological treatment system; combination; algae; removal efficiencies

稳定塘、人工湿地等生态工程手段近年来被广泛研究应用于对湖泊或生活污水等的处理, 其在对 C、N、P、悬浮物等去除的同时, 对富营养水体中的藻类也有较大的去除作用. 与传统的混凝、直接过滤、沉淀、气浮、预氧化等物理化学除藻方法相比, 此类生态工程手段具有建造和运行费用低、能耗省、管理维护方便、二次污染小、抗冲击性能强等优点. 人工湿地和稳定塘相结合已被用于处理制浆造纸废水^[1]、生活污水等^[2~3], 然而人工湿地、稳定塘等生态工程对藻类去除效率的研究并不多见^[4~6], 2 种以上生态工程组合系统的除藻效率、运行负荷等方面的研究更少. 本研究以水平流碎石床、垂直流湿地及稳定塘等不同工艺组合的小试系统为研究对象, 通过对不同冲击负荷和不同季节下各处理系统除藻

效果的研究, 探讨了不同类型生态工程及其组合系统对藻类的去除效率及最佳运行参数.

1 材料与方法

1.1 不同生态工程组合小试系统的设计

受试系统为由水平流碎石床湿地、下行流湿地、上行流湿地、好氧塘和兼性塘 5 种处理单元组合而成的 5 组 8 套小试系统, 其中 1 号、2 号系统为水平流碎石床湿地与下行流-上行流湿地的对照组合, 3 号、4 号系统为下行流湿地与稳定塘的对照组合, 5

收稿日期: 2005-01-18; 修订日期: 2005-03-30

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(39925007); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102); 国家“十五”科技攻关项目(2002AA601021)

作者简介: 吴振斌(1957~), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境工程、恢复生态学等方面研究.

号 6 号为下行流湿地与水平流碎石床的对照组合, 7 号为下行-上行流湿地, 8 号为水平流碎石床湿地。

系统中水平流碎石床、下行流、上行流等湿地单元的水流方向以 1 号系统为例表示如图 1。

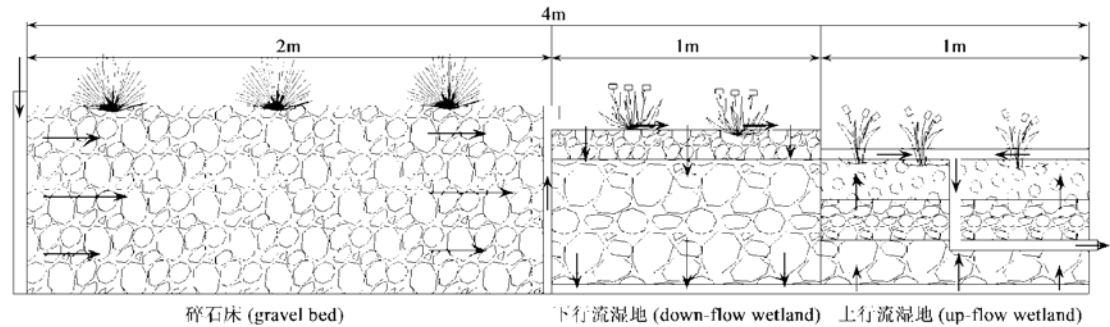


图 1 1 号小试系统剖面示意
Fig. 1 Section figure of small scale plot 1

5 种处理单元规格, 水平流碎石床湿地: 面积为 $2\text{m} \times 1\text{m}$, 填料厚度 70cm, 填料为砾石。下行流湿地: 面积为 $1\text{m} \times 1\text{m}$, 填料厚度 65cm, 填料为砾石和碎石, 2 层级配。上行流湿地: 面积为 $1\text{m} \times 1\text{m}$, 填料厚度 50cm, 填料为砾石、碎石和砂, 3 层级配。好氧塘: 面积为 $2\text{m} \times 1\text{m}$, 水深 0.4m。兼性塘: 面积为 $2\text{m} \times 1\text{m}$, 水深 1.0m。各组合系统的工艺流程见表 1。

表 1 不同生态工程及其组合系统工艺流程
Table 1 The treatment process of the small-scale ecological treatment systems

小试系统	工艺流程 ¹⁾
1	水平流碎石床湿地(美人蕉) → 下行流湿地(薹苳) → 上行流湿地(菖蒲)
2	下行流湿地(美人蕉) → 上行流湿地(菖蒲) → 水平流碎石床湿地(薹苳)
3	好氧塘 → 下行流湿地(美人蕉)
4	下行流湿地(美人蕉) → 兼性塘
5	水平流碎石床湿地(美人蕉) → 下行流湿地(菖蒲)
6	下行流湿地(菖蒲) → 水平流碎石床湿地(美人蕉)
7	下行流湿地(美人蕉) → 上行流湿地(菖蒲)
8	水平流碎石床湿地(美人蕉)

1) 括号内为湿地植物种类, 栽种密度为: 美人蕉(*Canna genaralis*) $10\text{株}/\text{m}^2 \sim 12\text{株}/\text{m}^2$; 薹苳(*Coix lacrymarjobi*) $4\text{株}/\text{m}^2 \sim 5\text{株}/\text{m}^2$; 菖蒲(*Acorus calamus*) $36\text{株}/\text{m}^2 \sim 40\text{株}/\text{m}^2$

1.2 各组合系统进水水质及运行状况

受试系统以武汉市东湖茶港排污口附近湖水为进水, 其水质指标平均值为: 电导率 $569\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 溶解氧 $4.01\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TSS $11.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD_{Cr} $59.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, BOD_5 $42.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP $0.313\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N $40.4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KN $8.58\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N $0.103\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 藻类数量 $12\,760\text{万个}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据国家地表水环境质量标准 GB3838-2002, 进水

为严重富营养化的劣 V 类水。

系统于 2001-03 建成投入运行, 同时定期监测分析进水和出水的水质指标(每月采样 3~ 4 次), 监测指标主要包括电导率、溶解氧、TSS、 COD_{Cr} 、 BOD_5 、TP、KN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 。电导率用 Cole Parmer 60648 型笔式电导仪测定, 其余指标按文献 [7] 进行。经过 1a 多的运行, 各处理系统发育基本成熟, 对进水的处理效果稳定。

1.3 不同水力负荷下各组合系统除藻效率的比较

2002-10-28~ 2002-12-28 期间, 对受试系统进行不同水力负荷的冲击测试, 水力负荷分别设定为 $0.6\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, $0.8\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $1.0\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。系统采用间歇式进水, 每天进水 8 次, 每次间隔约 3h。每一水力负荷运行 20d。在每一水力负荷运行的第 12d 采集水样(各采样 2 次), 检测进水和出水中的藻类浓度, 分析各系统的除藻效率。

1.4 不同季节适宜水力负荷下各组合系统除藻效率的比较

综合 TSS、 BOD_5 等指标的去除率, 选择出水水质较佳的水力负荷为各处理系统的适宜水力负荷。在适宜水力负荷下, 分别于 2003-01、2003-04、2003-07 和 2003-10 采集各组合系统的进出水水样(各月份采样 2 次), 根据进出水中藻类浓度变化分析不同季节各系统的除藻效率。

1.5 藻类的采集及检测方法

分别取 3L 进水水样和 3L 各组合系统的出水水样, 经 25 号浮游生物网过滤, 收集于样品瓶中, 鲁哥氏液固定。实验室内显微镜(Zeiss) 下观察、鉴定其种类。

分别取 1L 进水和 1L 各组合系统的出水水样,

鲁哥氏液固定. 实验室内沉淀 24h, 去除上清液, 浓缩至 30mL. 取 0. 1mL 浓缩样在 0. 1mL 计数框内, 显微镜下观察记数(40×16), 确定其种类和数量, 以细胞体积法推算藻类生物量^[8].

2 结果与讨论

2.1 不同水力负荷条件下各处理系统的除藻效率

不同水力负荷条件下各处理系统的进、出水藻类浓度如表 2 所示, 藻类测定不同于一般水化学指标, 其浓度表示有数量浓度和生物量浓度 2 种方法,

相同数量浓度的藻类因其种类个体差异而具有不同的生物量浓度, 反之亦然. 因此, 当监测进出水藻类浓度和藻类去除效率时, 必须选择适宜的指标以反映各系统的真实运行状况. 各系统的除藻效率如图 2、图 3 所示, 当以生物量为监测指标时, 水力负荷为 0. 8m³/(m²·d) 时各处理系统的除藻率均达到最高; 当以数量为监测指标时, 水力负荷为 0. 6m³/(m²·d) 时的除藻率最高; 当水力负荷增大到 1. 0m³/(m²·d) 时, 各处理系统的除藻效率均不理想.

同期测定的 TSS、N、P 等化学指标结果显示,

表 2 不同水力负荷下各组合处理系统进水和出水的藻类浓度¹⁾

Table 2 Algae concentrations of the inflow and outflow in the experimental systems by different HLR

系统	水力负荷 0. 6m ³ /(m ² ·d)		水力负荷 0. 8m ³ /(m ² ·d)		水力负荷 1. 0m ³ /(m ² ·d)	
	藻数量	藻生物量	藻数量	藻生物量	藻数量	藻生物量
	× 10 ⁵ /个·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	× 10 ⁵ /个·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	× 10 ⁵ /个·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹
1 号出水	277. 0 (39. 6)	0. 828(0. 12)	60. 5(6. 8)	0. 051(0. 01)	31. 2(2. 1)	0. 028(0. 01)
2 号出水	248. 4(43. 4)	0. 827(0. 06)	23. 9(6. 8)	0. 015(0. 01)	20. 5(5. 4)	0. 017(0. 01)
3 号出水	179. 1(19. 5)	0. 402(0. 09)	30. 2(5. 9)	0. 023(0)	12. 7(0. 1)	0. 009(0)
4 号出水	148. 8(15. 6)	0. 324(0. 02)	52. 5(3. 4)	0. 031(0. 02)	36. 5(5. 9)	0. 035(0. 01)
5 号出水	168. 8(19. 4)	0. 723(0. 14)	23. 9(3. 3)	0. 077(0. 01)	28. 7(2. 4)	0. 032(0. 02)
6 号出水	150. 4(6. 4)	0. 710 (0. 13)	35. 0 (3. 7)	0. 039(0. 01)	11. 1(2. 7)	0. 015(0)
7 号出水	191. 0 (19. 2)	0. 799(0. 08)	27. 1(2. 5)	0. 019(0. 02)	33. 4(3. 8)	0. 022(0. 01)
8 号出水	304. 9(10. 6)	0. 910 (0. 66)	44. 6(4. 1)	0. 099(0. 04)	23. 9(1. 1)	0. 027(0. 01)
进水	749. 8(54. 3)	1. 380 (0. 33)	89. 2(3. 7)	0. 150 (0. 03)	39. 8(3. 4)	0. 041(0. 01)

1) 括号内为标准差, 下同

当水力负荷为 0. 8m³/(m²·d) 时出水水质优于 0. 6m³/(m²·d)、1. 0m³/(m²·d) 时的出水, 因此在进行藻类监测时, 以生物量浓度为指标能更真实准确地反映水质状况. 与其它水处理工程相似, 生态工程对进水的处理能力不是无限的, 过高的水力负荷将影响出水水质; 与多数水处理工程不同的是, 过低的水力负荷也将影响生态工程的出水水质, 这是由生态工程的工作原理决定的, 不论是湿地系统还是稳定塘系统, 都需通过生物的作用吸收或分解进水中过剩的营养物质, 若进水的浓度过低, 不能满足生物生长需要, 生物将处于较低的新陈代谢水平和不良的生长状况, 从而降低系统的净化能力并最终影响系统出水水质.

从各处理系统的抗冲击能力来看, 3 号和 8 号在各水力负荷下运行较稳定, 对藻类的去除率变化不大, 具有一定的抗冲击能力. 水力负荷的变化对不同生物系统的冲击效应各不相同. 对组成单元不同的各组进行比较发现: 由 1 号和 2 号组成的第 1 组湿地组合系统, 在适宜水力负荷下的除藻效果都明显优于其它水力负荷, 说明湿地组合对水力负荷的变化较敏感, 适宜的水力负荷可大大提高湿地系统

的去除效率. 由 3 号和 4 号组成的第 2 组在较低水力负荷下的除藻效率均处于较高水平, 基本与第 1 组相同. 由 5 号和 6 号组成的第 3 组对藻类数量的去除优于对生物量的去除, 说明该组系统的优势在于对大型藻类的去除, 而对小型藻类的去除效果略差. 7 号下行-上行流湿地与第 1 组湿地组合系统一样表现出对适宜水力负荷的依赖性, 处于适宜水力负荷下的 7 号处理系统的除藻效率在 8 套系统中处于较高水平(与 2 号系统相同). 8 号水平流碎石床系统虽具有一定的抗冲击负荷的能力, 但其除藻效率较低, 基本为所有处理系统中的最低水平, 这可能因为水平流碎石床湿地填料粒径较大, 导致系统对藻类滤过作用的降低. 对组成单元相同而流程不同的 3 组对照组合进行组内比较发现: 同为稳定塘+下行流湿地的组合, 3 号系统中前置的稳定塘有良好的抗冲击负荷能力, 因负荷增高而增生的稳定塘中的藻类, 被紧随其后的下行流湿地去除; 而 4 号处理系统的稳定塘处于下行流湿地之后, 湿地未完全去除的小型藻类可能刺激了稳定塘中藻类的生长, 从而增加了出水的藻类浓度, 影响整套系统对藻类的去除效果. 同为碎石床水平流湿地+下行流湿地

的组合,下行流湿地置于水平流碎石床湿地前的 5 号系统,不仅除藻效率提高而且抗高冲击负荷能力增强.

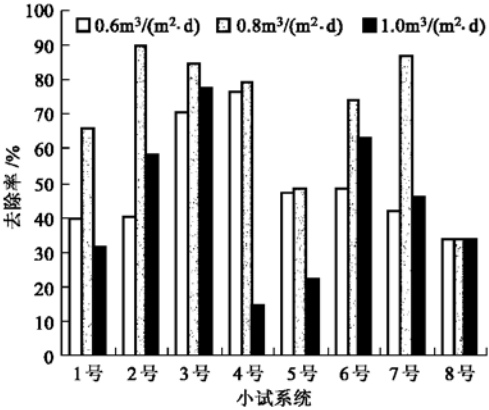


图 2 不同水力负荷下各系统对藻类生物量的去除率
Fig. 2 Removal rate of algae biomass by different HLR

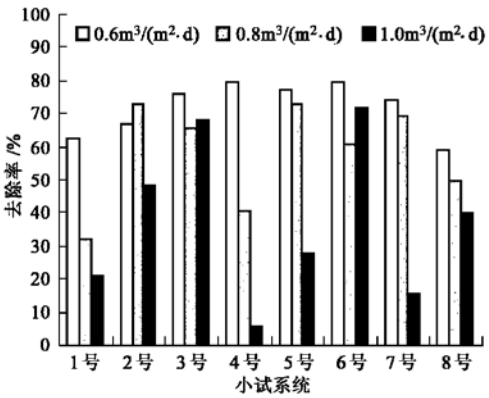


图 3 不同水力负荷下各系统对藻类数量的去除率
Fig. 3 Removal rate of algae number by different HLR

2.2 不同季节各组合系统的除藻效率比较

不论是湿地系统还是稳定塘系统,对各种污染物的去除效果均与系统内生物的生长状态密切相关,因此不同季节各生态工程系统对藻类的去除效果会有较大区别,受试系统冬季的运行状况是生态

和 8 号系统的除藻率则降至 50% 以下.春季和秋季的除藻效率也都较好,一般都在 80% 以上;春季的除藻效果优于秋季,这一现象可能是春、夏季湿地系统对磷的去除率高于秋季造成的^[9].冬季湿地处理系统的除藻作用可能源自 2 个方面:①填料的滤过作用;②湿地植物地下根系、基质微生物等的吸附降解作用^[10].

比较各组合系统除藻率的季节变动尤其是秋、冬季的下降趋势可以发现:水平流碎石床湿地系统前置的 1 号、5 号和 8 号系统除藻效率受季节影响较大,而同样的季节变化则对水平流碎石床湿地系统后置的 2 号和 6 号系统影响不大.全年运行稳定,受季节影响最小的为 2 号和 7 号系统.

表 3 各组合处理系统在不同季节对藻类的平均去除率/%

Table 3 Average algae removal rate of the treatment systems in different seasons/%

系统	春季	夏季	秋季	冬季	平均
1	98.54	99.94	87.46	66.00	87.99(15.68)
2	98.56	99.98	94.73	90.00	95.82(4.47)
3	72.99	99.66	85.17	84.67	85.62(10.92)
4	83.21	94.10	81.52	79.33	84.54(6.57)
5	97.81	98.74	76.38	48.67	80.40(23.54)
6	99.64	99.30	88.61	74.00	90.39(12.07)
7	90.88	99.11	89.14	87.33	91.62(5.20)
8	86.35	96.38	77.85	34.00	73.65(27.49)

在 8 套处理系统中,1 号、2 号、6 号和 7 号的除藻效率明显高于其它受试系统,这表明下行流湿地置于其它类型湿地之前的组合系统对藻类去除效果较好.进一步分析表明,2 号除藻效率最高,其次为 7 号,这 2 套系统的组合工艺分别为下行流-上行流-水平流碎石床湿地和下行流-上行流湿地,说明下行流-上行流湿地组合对藻类的去除效率高于其它组合形式,这一结论与该小试系统对 TSS、COD_{Cr}、BOD₅ 等指标的测定结论相同^[11].1 号系统的组合工艺中也含有下行流-上行流湿地,其除藻率的年平均值却明显低于 1 号、7 号系统,这是因为前置的水