

凤眼莲在城市重污染河道修复中的应用

胡长伟^{1,3} 孙占东² 李建龙^{1*} 区裕雄²

(1. 南京大学生命科学学院, 南京 210093; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
3. 临沂师范学院生命科学学院, 临沂 276005)

摘要 外港河是秦淮河重要支流, 长期以来遭受严重污染。2006年4月份起对外港河进行了综合生态治理。在前期清淤和截污的基础上, 7月份开始引种凤眼莲。在上游排污口附近和外港河河口段分别设置的4个生态区以及河面上布设的水面载体内全面放养以凤眼莲为主的浮水植物。经过5个多月的初步治理, 外港河水体透明度从40 cm以下提高到120 cm左右, COD下降了70.4%, TSS、TN和NH₃-N分别下降了39.6%、49.7%和21.8%。结果证明, 凤眼莲在净化严重污染的河道方面起到了良好的效果, 引种凤眼莲治理城市重污染河道是切实可行的; 此外, 用PVC管设计制作的水面载体来放养浮水植物可以点缀水面环境, 美化城市河道景观。

关键词 凤眼莲 重污染河道 生态修复 水生植物

中图分类号 X5 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)12-0051-06

Application of water hyacinth in restoration of heavily polluted urban rivers

Hu Changwei^{1,3} Sun Zhandong² Li Jianlong¹ Qu Yuxiong²

(1. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093;
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;
3. School of Life Science, Linyi Normal College, Linyi 276005)

Abstract Waigang River is one of major anabranches of Qinhuai River and has suffered long-time heavily pollution. The ecological restoration was performed from April 2006. After cleaning sediments and intercepting effluent, water hyacinth was introduced to Waigang River. Water hyacinth grew freely in the surface artificial carriers and four ecological areas around upriver effluent outlets and estuary. After 5 months primary restoration, water transparency rose from 40 cm to about 120 cm, COD, TSS, TN and NH₃-N decreased by 70.4%, 39.6%, 49.7% and 21.8%, respectively. Our work showed that it is feasible and effective to restore heavily polluted urban river using water hyacinth introduced to the river. In addition, floating plants cultured in surface artificial carriers could make urban river landscape more beautiful.

Key words water hyacinth; heavily polluted rivers; ecological restoration; aquatic plants

随着社会经济的发展和城市化水平的提高, 城市河道水质遭受严重威胁, 许多河道甚至成了排污专道和污水的长期滞留地。据国家环保总局2000年发布的环境状况公报, 流经城市的河段普遍受到污染, 141个国控城市河段中, 36.2%的城市河段为Ⅰ至Ⅲ类水质, 63.8%的城市河段为Ⅳ至劣Ⅴ类水质^[1]。城市河道的生态容纳量小, 污染物来源广, 汛期水深流急, 水体缺少自净功能, 这些因素增加了治理的难度。

利用水生植物净化污水具有费用低、效果好、管理简便、可恢复生态环境以及可回收资源等许多优点, 适合应用于城市污水处理^[2]。

凤眼莲(*Eichhornia crassipes*), 俗称水葫芦, 属维

管束水生植物, 喜高温、多湿, 适宜生长在富营养化的水体。由于凤眼莲具有发达的根系和旺盛的生长繁殖能力以及超强的耐污能力, 所以在工业废水和生活污水的处理中得到广泛应用^[3-7]。

外港河是秦淮河的重要支流, 位于南京江宁城市中心地带, 由于长期以来缺乏系统整治, 外港河已经成为一条垃圾成堆、污染严重的污水沟。河道

收稿日期: 2007-04-03; 修订日期: 2007-06-20

作者简介: 胡长伟(1970~), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为水体净化与环境生态。E-mail: changwei.hu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jlli2008@nju.edu.cn

中的污染主要来自周围的生活污水和少量工业废水,河道严重淤积,普通淤积厚度达2 m左右,最深处达3 m。根据2006年4月我们测得的数据,其水体透明度仅为25 cm左右,COD达30 mg/L,TSS为55 mg/L,整个河道已经遭受严重污染。城市河道的面貌关系到整个城市的总体景观,所以对其进行整治,恢复其生态功能是十分必要的。

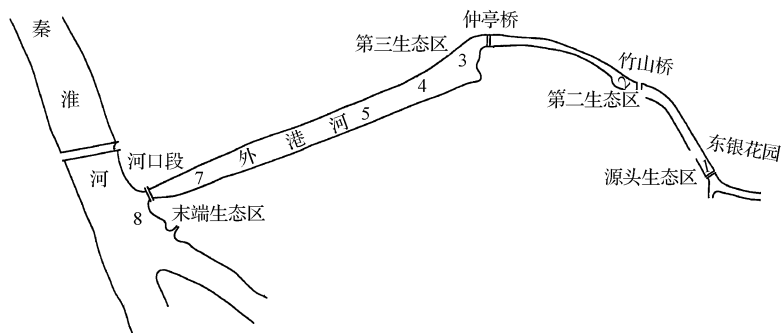
外港河的生态治理从2006年4月份开始,治理的河段(竹山桥——河口段)长约1.9 km,平均宽度60 m,水面积约114 000 m²。我们尝试用水面载体圈养以凤眼莲为主的水生植物,对外港河进行生态修复。用水生植物来净化河水是在清淤、截污和适时换水基础上实施的。工程治理可以在短期内大规模改造河道的外部形态,创造良好的水域环境,但它不能取代水体内部的演变规律。引种水生植物,可以提高河道的自净功能,增加生物多样性,恢复河道自身良好的生态系统。

1 材料与方法

1.1 生态区的设置

为了在污水入口对流入外港河的生活污水进行初步净化,集中设置3个围栏生态区,圈养凤眼莲。此外,在外港河河口段单独设置一个生态区,对进入秦淮河的水体进一步净化。各生态区在外港河的位置见图1。生态区通过钢架和滤布与外围水环境隔离,防止污水中的固体悬浮物排入河道,并通过以凤眼莲为主的水生植物对污水进行初步的净化。各生态区的总面积约29 580 m²。

各生态区围栏结构采用直径5 cm、长6 m的钢管为支架,顶部高程约8 m。沿支架内侧安装网、滤布各一层,形成滤墙。滤墙的基部用石拢锚定,上端帮扎紧。各钢管顶部用扁铁构筑图案并焊接成整体,再用水下脚桩拉紧,使生态区外围固定。各生态区的建设参数见表1。



(注:数字1~8为水样取样点位置)

图1 生态区位置示意图

Fig. 1 Diagram of ecological area locations

表1 生态区建设参数表

Table 1 Parameters of ecological areas

编号	型式	生态区长度 (m)	生态区平均 宽度(m)	围栏滤墙 长度(m)	生态区面 积(m ²)
源头生态区	回旋式拦河结构	340	39	89	13 200
第二生态区	弧形结构	98	21	140	2 056
第三生态区	弧形结构	100	25	150	2 495
末端生态区	拱形拦河结构	151	79	79	11 829

1.2 水面载体的建立

采用直径100 mm的定型PVC塑料空心管,通过45°、60°、90°和120°等弯头密封,制作成长方形、

三角形、梯形和菱形等各种形状的框架单元(表2)。利用这些框架单元,拼接多种型式的漂浮式水面载体结构,用来进行水生植物的放养。外港河整治期

间,在水面上共建成 10 个水面载体(表 3),累计面积达 5 000 m²。这些水面载体主要设置在源头生态区到末端生态区的水面上,集中放养凤眼莲,另混养少量水花生等水生植物。

表 2 框架单元形状、构造参数及成本
Table 2 Shapes, configuration parameters and cost of the frame cells

框架单元形状	结构参数 *	使用弯头数量(个)	成本(元)
长方形	4 m × 1 m	4	40
	8 m × 1 m	4	70
三角形	边长 2 m	3	26
梯形	(1 + 2) × 1.8 m	4	32
	(1 + 2) × 0.85 m	4	25
	(1 + 3) × 2.8 m	4	50
菱形	边长 1 m	44	22
	边长 2 m		34

* 长方形为长 × 宽;梯形为(上底 + 下底) × 高

表 3 水面载体形状、数量、构造参数及成本
Table 3 Shapes, numbers, configuration parameters and cost of the surface carriers

水面载体形状	数量	参数(m)	单计成本(元)
圆形	1	直径 50	1 200
菱形	3	边长 50	1 000
矩形	4	长 36; 宽 6	600
八角形	1	边长 6	1 200
八角形	1	边长 4	1 400

1.3 凤眼莲的引种

2006 年 7 月 6 日购进凤眼莲 4 000 kg,放养到 4 个生态区和各水面载体中,让其自由生长和繁殖。

1.4 凤眼莲生长参数的测定

试验于 2006 年 7 月 5 日~8 月 29 日在外港河中段岸边的水域进行,在长 2 m、宽 1 m 的浮框内投放凤眼莲苗 120 株,总计鲜重 2.5 kg。试验分 3 个平行,期间每隔 10 d 测植株数与总鲜重。

1.5 取样与水质指标的测定

在东银花园至河口段的水面上设立 8 个取样点(图 1),每月 2 号左右取水样测定水质理化指标。

高氯酸-硫酸消化凯氏定氮法测定 TN;苯酚-次氯酸盐法测定 NH₃-N;高氯酸硫酸溶钼锑抗比色法测定 TP;重铬酸钾法测定 COD;重量法测定 TSS。

1.6 凤眼莲放养的后期处理——二次污染的防治

南京地处亚热带地区,凤眼莲在冬季低温时会死亡,为防止凤眼莲残体对水体造成二次污染,在外港河河口段附近的岸边建设一座容积 50 m³ 的脉冲式生物发酵反应器^[8],对凤眼莲集中采收以后投入反应器发酵产气。反应器已于 2006 年 1 月份建成,发酵效率等方面的测试还在进行中。

2 结果与分析

2.1 外港河水质 7~12 月份的变化

2.1.1 TSS、TN、TP、NH₃-N 和 COD

7 月份引种凤眼莲以后,经历了 5 个月左右的生物净化,外港河水质发生了较为明显的变化(图 2)。其中 COD 变化最为显著,下降了 70.4%;TSS、TN 和 NH₃-N 分别下降了 39.6%、49.7% 和 21.8%;而 TP 略有下降,基本没有明显的变化趋势。

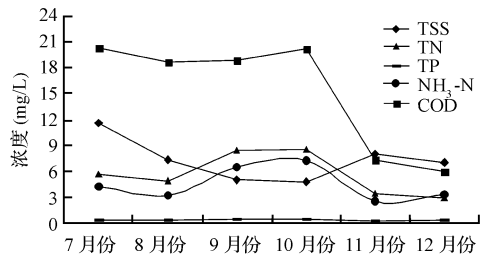


图 2 外港河 2006 年 7~12 月份各项理化指标变化曲线
(注:数值为 3~7 取样点的平均值)

Fig. 2 Variation of several chemical and physical parameters of Waigang River from Jul. to Dec. 2006

值得注意的是,各项指标在整个治理过程中并非一直表现出下降趋势,而是在某些阶段出现反复,呈现出暂时的上升(如 9 月份数值的变化)。

2.1.2 透明度

图 3 反映了透明度的变化情况,可以看出,透明度从 7 月份的 20~40 cm 提高到 12 月份的 120 cm 左右,水质有了明显的好转。外港河自复水以来,水中异味已除,水色清新,鱼类从秦淮河中回游,透明度在换水前介于 70~100 cm 之间;10 月中旬换水后,基本稳定在 100~120 cm 之间,达到了预期目标。2 号生态区在 12 月份由于无污水注入,凤眼莲生长多,透明度高达 160 cm,沿岸清澈见底。

2.2 上下游水质对比

11 月份上游河段水质指标(1~3 取样点平均

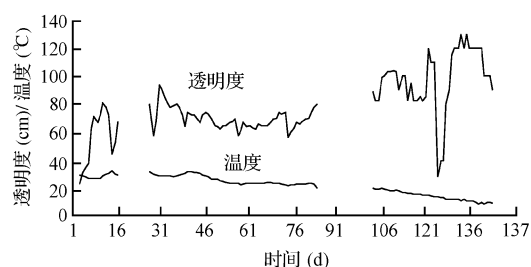


图3 2006年7月6日~12月14日外港河水体透明度、温度变化曲线

(数据测量于8月4日~8月14日因事故中断;
10月13日~11月1日因换水中断)

Fig. 3 Variation of water transparency and temperature of Waigang River from Jul. 6 to Dec. 12, 2006

值)和下游河段(4~7取样点平均值)比较(表4),各项指标均呈现显著降低,降低的幅度在29.4%~47.2%之间, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化最为明显。

表4 外港河11月份上游河段与下游河段水质指标对比(平均值与标准差)

Table 4 Comparison of upriver and downriver water parameters of Waigang River in Nov. 2006 (mean values $\pm$ SD)

项目	上游河段 (mg/L)	下游河段 (mg/L)	下降率 (%)
TSS	13.00 $\pm$ 0.40	8.63 $\pm$ 0.18	33.6
TN	6.27 $\pm$ 0.97	3.53 $\pm$ 0.39	43.7
TP	0.28 $\pm$ 0.032	0.19 $\pm$ 0.023	32.1
$\text{NH}_3\text{-N}$	5.04 $\pm$ 0.57	2.66 $\pm$ 0.30	47.2
COD	10.33 $\pm$ 1.87	7.29 $\pm$ 0.42	29.4

2.3 凤眼莲生长情况

表5 凤眼莲株数、重量与平均植株重统计

Table 5 Statistics of plant numbers, weights and average individual plant weights of water hyacinth

测定时间	植株数量(株)	重量(kg)	平均植株重(g)
7月5日	120	2.5	21
7月15日	340	6.6	22
7月28日	728	10.4	14.3
8月8日	2 952	24.0	8.1
8月19日	3 808	46.4	12.2
8月29日	5 346	83.6	15.6

从表5可以看出,凤眼莲在外港河中的生长、繁

殖速度较快,仅从试验期间的55 d中,植株从120株繁殖到5 346株,增植株43.5倍,重量从2.5 kg增长到83.6 kg,增重32.4倍,平均每天净增0.59倍。试验期间,当覆盖度达到100%的容纳量时,每平方米凤眼莲鲜重由10.45 kg增长到12 kg,平均11.35 kg。11月25日抽样测定,鲜重达20 kg/m²。据此对全年生产情况估算,每平方米累计凤眼莲总生物量可达180 kg。即在有效管理条件下,全年每亩水面积(666 m²)可产凤眼莲(鲜重)13 300 kg。

3 讨论

生物多样性在河道修复中具有重要作用^[9],引进水生生物物种,增加水环境的生物多样性,恢复河道原有的生态环境,是城市重污染河道修复的重要一步。凤眼莲在污染水体中快速生长能力以及富集污水中金属离子的能力而引起人们重视,它在对富营养化水体的修复中显示出良好的效果^[10]。南京市江宁区地处亚热带地区,适合凤眼莲的生长,所以我们在外港河生态治理的过程中引种凤眼莲,利用生态区和水面载体对其进行放养。由于凤眼莲在南京地区不能越冬,再加上生态区和水面载体的应用,其生长被限制在一定区域内,所以不会造成凤眼莲种群的暴发而对其失去控制。

3.1 凤眼莲在外港河生态治理中的作用

在外港河治理的初期,就尝试引种伊洛藻、轮叶黑藻、金鱼藻、家菱、野菱、水蓼和凤眼莲等水生植物,结果除了凤眼莲以外,其他植物成活率很低,大多汛期以后在河道中消失。

凤眼莲对氮、磷元素有很高的耐受性,万志刚等^[11]的试验显示水体中氮浓度达到1 514.26 mg/L时死亡;水体中磷浓度达到200.4 mg/L时死亡,说明凤眼莲具有超强的耐污能力。谢心义等^[6]用凤眼莲净化生活污水的试验得出,当污水中COD起始值为189.33~375.92 mg/L时,经过5~9 d去除率可达79.38%,氨氮起始值为10.1 mg/L时,经过4 d去除率为71.3%,同时可除去污水中臭味。

凤眼莲发达的根系、快速生长能力和超强的耐污能力使得它适合于用来对重污染河道进行生态治理。经过5个多月的生态治理,COD、TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等指标都显著降低,透明度从7月份的40 cm左右上升到120 cm左右,末端生态区附近甚至可以达到160 cm,达到了预期效果。

图2显示,几项理化指标并非稳定下降,而是在

中间出现回升,治理期间透明度的变化尤其复杂,这与当地复杂的气候变化和地理特征有关。外港河的水位受制于上游来水和下游秦淮河水位顶托的双向影响,汛期高水位时河床水深可达 6~7 m,水体运动复杂,导致了各项指标的波动,也增加了治理的难度。

孙文浩等^[7]曾应用凤眼莲生态治理上海市区一条富营养化河道,抑制藻类的生长,改善了水质。外港河属重度污染河道,生物多样性受到严重破坏。所以用凤眼莲来对河水中严重超标营养物质初步进行分解,然后逐步净化水质,修复河道自身的生态系统。单纯依靠凤眼莲一种植物很难取得理想的生态治理效果,应该在前期的基础上,增加水生生物的引种,提高河道水体的自净能力。2006 年 4 月份开始,就引种了一些水生植物,大多不久以后就死亡。7 月,在外港河放养环棱螺 8 500 kg,河蚌 1 500 kg,另加少量鱼苗。这些物种的成活率也很低,环棱螺的成活率约 40%,未发现成活的河蚌,这与水质条件的恶劣有关。随着治理工作的进行和水质的好转,应加大水生生物的引种。此外,我们还发现秦淮河中的鲤鱼、鲫鱼等鱼类开始回游到外港河中,这反映了外港河水质的好转。

3.2 净化有效面积的估算

经测定,凤眼莲(鲜重)的氮和磷含量,分别为 1.84 g/kg 和 0.26 g/kg。同期,外港河水体中的氮、磷含量分别为 6.42 mg/L 和 0.35 mg/L。取外港河凤眼莲年生物量为 120 kg/m² 计,其所含的氮、磷来自水体。假定这些水体中的 N、P 全被吸收。那么,每 1 m² 凤眼莲,按 N 的吸收量计,可净化水面(平均水深 3.5 m,下同)14.75 m²;按 P 的吸收量计,可净化水面 37.39 m²。反之,亦可计算外港河水体(总贮水量约 392 000 m³)所含 N、P 全被吸收所需的凤眼莲面积:按 N 的吸收量计,需凤眼莲 7 593 m²(折 11.38 亩);按 P 的吸收量计,仅需凤眼莲 2 971 m²(折 4.46 亩)。这里的估算只是假设。实际情况是,流入河道的 N、P 含量是动态变化的,凤眼莲对水中 N、P 含量的吸收率是有一定的限度,估算只反映凤眼莲净化功能的一个量的概念。

3.3 生态区效果

通过对 11 月份外港河下游和上游水质的比较可以看出,下游水质明显好转。排污口附近用围栏设置生态区,对流入河道的生活污水进行初步净化,然后通过滤布过滤,排入下游河道,减轻了污染压

力,有利于下一步的生态净化。

3.4 水面人工载体的作用

目前国内园林水面上的生物载体结构,大都是以木料、毛竹和泡沫板等为材料组成的框架^[2,12,13]。屠清瑛等^[14]研制了一种由空心浮筒和钢丝网等组成的具有多种功能的生物载体。这里用 PVC 管制作的框架结构,其特点是:浮力大(为木料的 4 倍),构件可定型组织,规模化应用。组合方式是柔性联结,力学性能好,结实耐用;结构简单,安装方便,可以组成多种形状的水面浮床。为有计划、有控制地放养凤眼莲等漂浮植物,发挥了重要作用。而且适用于大规模发展漂浮植物和无土栽培,整体美观,集生物修复和景观于一体。水面载体的应用方便了凤眼莲的收集:用船只将框架单元以及放养的水生植物拖至岸边,人工打捞收集。

此外,冬季降温以后,凤眼莲将不能继续存活,需要更换耐寒的冬季品种。捆扎以各种孔径的尼龙网以后,水面载体同样为水芹菜、黑麦草等植物的水面无土培养提供了适宜的载体条件。

3.5 二次污染的防治

凤眼莲被列为世界上繁殖最快的植物之一,其个体可以在 5 d 内增长一倍^[10]。在我们的测试中,凤眼莲也显示了快速生长的能力。但是,它死亡后的处理仍然是一个问题。凤眼莲根系吸附了大量的有机悬浮物,死亡后根系吸附的悬浮物会重新释放入水体,再加上其残体,会造成对水体的二次污染。生物发酵反应器的建立可以有效解决这一问题。凤眼莲在 12 月份采收,转移至反应器,混以少量动物粪便发酵产气。发酵混合物在反应器中可以以脉冲的方式循环,脉冲的频率根据需要来控制;反应器可以人工加温,自身也具有良好的保温效果。目前关于反应器对凤眼莲发酵效率的测试还在进行中。

生物发酵反应器的建立和应用,可以避免水生植物死亡后对水体的二次污染,而且对水生植物进行有效的利用,制得生物能源。

4 结 论

通过水面载体和生态区放养凤眼莲,外港河治理取得良好的生态效应。PVC 塑料管水面载体结构的设计和应用,为大规模和有计划的发展和控制在湖面放养及无土栽培开创了新途径。凤眼莲由于其耐污能力和在富营养化水体中旺盛的生长繁殖能力,在生活污水的处理中显示了巨大的潜力。

城市重污染河道的治理是一个长期的过程。外港河历经8个月的治理,水质仍较差,比如以N、P含量的单项指标衡量,水质仍属于劣五类,但从生态修复的发展看,前景应是乐观的。生态治理应注重增加水环境的生物多样性,建立起良好的生态系统,提高水体自净能力。

(致谢 本研究得到南京市江宁区政府和江宁区水利局的帮助和支持,在此表示衷心的感谢。)

参考文献

- [1] 国家环境保护总局. 1999年中国环境状况公报. 环境保护, **2000**, (7): 3~9
- [2] 韩潇源, 毕继胜, 宋志文. 水生植物在水污染控制中的应用与发展. 青岛理工大学学报, **2005**, 26(6): 88~91
- [3] 俞井初, 冯成武. 凤眼莲在污水处理中的应用. 油气田环境保护, **1995**, 5(4): 20~24
- [4] Sinha A. K., Sinha R. K. Sewage management by aquatic weeds (water hyacinth and duckweed): Economically viable and ecologically sustainable biomechanical technology. Environ. Educ. Inf., **2000**, 19: 215~226
- [5] Sajn Slak A., Bulc T. G., Vrhovsek D. Comparison of nutrient cycling in a surfaceflow constructed wetland and in a facultative pond treating secondary effluent. Water Sci. Technol., **2005**, 51: 291~298
- [6] 谢心义, 张艳茹, 郎业广, 等. 凤眼莲净化污水试验研究. 环境科学, **1984**, 5(3): 15~18
- [7] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理. 环境科学学报, **1989**, 9(2): 188~195
- [8] 区裕雄. 净化有机废水的渠槽式生物反应器. 专利号: ZL01108289.5, **2005**
- [9] De Wall L. C., Large A. R. G., Gippel C. J., Wade P. M. River and floodplain rehabilitation in Western Europe: Opportunities and constraints. Arch. Hydrobiol. Suppl., **1995**, 9: 679~693
- [10] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth. Environ. Int., **2007**, 33: 122~138
- [11] 万志刚, 顾福根, 孙丙耀, 等. 6种水生维管束植物对氮和磷的耐受性分析. 淡水渔业, **2006**, 36(4): 37~40
- [12] Li Zhi-zheng, Huang Guo-hong, Ni Jin-shan. Soilless culture of higher terrestrial plant s on Tai Lake. Acta Botanica Sinica, **1991**, 33(8): 614~620
- [13] 邴旭文, 陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质. 湛江海洋大学学报, **2001**, 21(3): 29~33
- [14] 屠清瑛, 章永泰, 杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程. 湖泊科学, **2004**, 16(1): 61~67