

## 水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用\*

胡绵好<sup>1,2</sup>, 袁菊红<sup>1</sup>, 杨肖娥<sup>2\*\*</sup>

(1: 江西财经大学资源与环境管理学院, 南昌 330032)

(2: 浙江大学环境与资源学院, 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310029)

**摘要:** 通过采用水生蔬菜水芹和豆瓣菜作为生态浮床栽培材料, 对其净化富营养化水体的效果及其处理后的品质等方面进行研究. 结果表明, 水生蔬菜不仅能在富营养化水体中正常生长, 还对富营养化水体有较强净化能力, 且净化能力随着处理时间的延长而提高. 处理 20d, 水芹对富营养化水体中的 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD<sub>Mn</sub>、Chl. a 的去除率分别达到 76.86%、69.39%、90.45%、95.03% 和 89.81%; 豆瓣菜对富营养化水体中的 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、COD<sub>Mn</sub>、Chl. a 的去除率分别达到 78.27%、67.95%、89.98%、95.38% 和 91.28%. 水芹和豆瓣菜不仅能显著改善富营养化水体的水质, 且没有产生硝酸盐及重金属富集, 符合食用标准; 还能产生一定的经济效益.

**关键词:** 水芹; 豆瓣菜; 富营养化; 净化; 资源化利用

## Eutrophication purification and resource utilization by aquatic vegetables

HU Mianhao<sup>1,2</sup>, YUAN Juhong<sup>1</sup> & YANG Xiaoe<sup>2</sup>

(1: *College of Resource & Environment Management, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330032, P. R. China*)

(2: *MOE Key Laboratory, Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, P. R. China*)

**Abstract:** Using water dropwort and watercress as the planting stuff on ecological floating beds, the purification effectiveness of eutrophic water and their characteristics were investigated. The results showed that aquatic vegetable not only could grow well in eutrophic water bodies, but also was able to purify the eutrophic water bodies effectively, and the purification ability increased with treatment time. The removal rate of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, COD<sub>Mn</sub>, and Chl. a reached 76.86%, 69.39%, 90.45%, 95.03%, and 89.81% by water dropwort for 20d treatment, respectively. In addition, the removal rate of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, COD<sub>Mn</sub>, and Chl. a reached 78.27%, 67.95%, 89.98%, 95.38% and 91.28% by watercress for 20d treatment, respectively. It was proved that water dropwort and watercress had a significant effect on improving the quality of the eutrophic water, without producing nutrition enrichment of nitrate and heavy metals in plants, so water dropwort and watercress were edible according to food standard, and could produce certain economic benefits.

**Keywords:** *Oenanthe javanica* D. C.; *Nasturtium officinale* R. Br.; eutrophic waterbodies; purification; resource utilization

随着工农业生产的发展以及人民生活水平的提高, 由于大量使用化肥及排放各类污水, 已造成许多湖泊、河流等水体中氮磷等营养盐日益增加, 自养性生物(浮游藻类)生长旺盛, 最终致使水域环境恶化, 富营养化水域增多, 富营养化程度提高. 美国的 2084 个湖泊、河流中由于氮磷营养盐浓度超标而不能达标的水体占 61%<sup>[1]</sup>, 我国富营养化和超富营养化湖泊亦已达湖泊总量的 66% 和 22%<sup>[2]</sup>. 水体富营养化现象是世界水污染治理的难题, 已成为全球最重要的环境问题之一. 水生植物在其生长过程中需要吸收大量的氮、磷等营养元素, 收获水生植物可将其吸收的营养物质随之带走, 从而使水体中的氮、磷等营养盐含量降低, 减轻水体富营养化程度<sup>[3]</sup>. 近年来, 利用水生植物富集氮、磷等营养盐是治理、调节和抑制湖泊富营养化的有

\* 教育部科技研究重点项目(200705824)和浙江省科技局重点项目(2006C13059)联合资助. 2009-05-31 收稿; 2009-08-17 收修改稿. 胡绵好, 男, 1976 年生, 博士, 讲师; E-mail: silence988@gmail.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: xyang581@yahoo.com.cn.

效途径. 大量的研究表明<sup>[4-7]</sup>, 水生植物对水体中的氮磷等营养盐具有明显的去除效果, 可用于控制湖泊、水库等水体的富营养化. 但是, 这些研究仅停留在水生植物的净化效果层面上, 而对水生植物在净化过程中, 植物收获后的后续资源化处理及其经济效益等方面的研究却报道较少, 尤其是在水生蔬菜对受污染水体的处理方面. 基于此, 本研究从水生蔬菜净化受污染水体出发, 进一步对其品质 and 经济效益等方面展开了研究, 以期对污染水体的生态修复及处理后生物的资源化利用提供科学的理论依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 系统的设计、试验用水及植物的预培养

生态浮床技术系统(Ecological Floating Beds Technology System, EFBTs)用长宽高分别为 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m 的塑料容器(图 1). 不同植物种植于盛有 75L 富营养化水的浮床系统中. 用于试验的污水取自无工业排放的浙江大学华家池, 污水经过测定, TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、COD<sub>Mn</sub>、Chl. a 浓度分别为 5.238 ± 0.190mg/L、0.049 ± 0.013mg/L、3.552 ± 0.050mg/L、38.126 ± 0.007mg/L、0.062 ± 0.005mg/L(平均值(n = 3) ± 标准误差), 说明该水体属于富营养化水体. 试验开始前, 试验用水先在系统中静置平衡 1d.

水芹(*Oenanthe javanica* D. C.)和豆瓣菜(*Nasturtium officinale* R. Br.)两种水生植物用作试验材料. 先用去离子水将它们洗干净, 再放到玻璃温室在自然光照下培养, 培养的温度为 22 - 28℃(白天)和 15 - 18℃(晚上). 培养三周后, 即当豆瓣菜苗长到 5cm, 水芹苗长到 16cm 时, 开始进行试验.

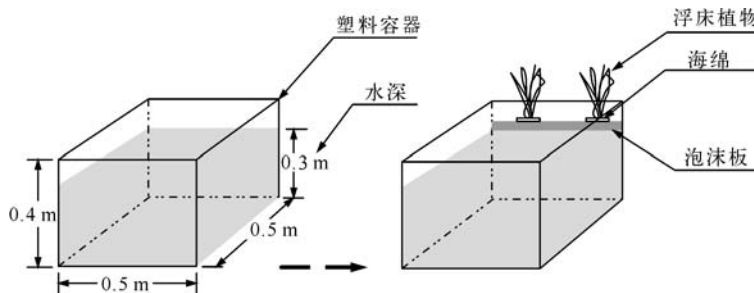


图 1 生态浮床植物技术系统示意图

Fig. 1 Design of ecological floating-beds plant technology system

### 1.2 静态试验

试验于 2007 年 4 月 23 日在浙江大学华家池校区进行. 称取预培养好的各植物 20 ± 2g, 放在 16 孔(φ32)的 PVC 泡沫板上(株行距为 0.15m × 0.15m), 再分别放于盛 75L 富营养化水(Eutrophic Water, EW)和盛 75L Hoagland-Arnon 完全营养液(Hoagland-Arnon Completed Solution, HACS)的生态浮床技术系统, 最后转移到玻璃温室中开始试验. 每个处理重复三次. 试验期间的平均光照度为 6000lx(120μE/(m<sup>2</sup>·s)), 光/暗周期为 12h/12h, 温度控制在 18 - 22℃. 试验期间每隔 4d 采集水样一次, 采样时间为上午的 9:00 点. 试验开始和结束采集植物样, 用于植物品质及其体内氮、磷含量和重金属的分析.

### 1.3 测定项目及其方法

水质测定项目有 TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、Chl. a、COD<sub>Mn</sub>等, 具体分析方法均按国家标准方法<sup>[8]</sup>. 为了使试验水中的净化效果与自然状态更符合, 因此, 本试验不添加水量, 而是通过称水重来换算所测定指标的总量, 由此计算去除率. 这样就克服了添加水对植物吸收营养的影响. 参照葛滢等<sup>[9]</sup>的方法计算去除率, 即:

$$\text{去除率}(\%) = (C_0V_0 - C_iV_i) / (C_0V_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中, C<sub>0</sub>为初始时的浓度, V<sub>0</sub>为初始时的体积, C<sub>i</sub>为第 i 天的浓度, V<sub>i</sub>为第 i 天的体积.

试验开始和试验结束后, 收集植物样品, 用超纯水洗净, 用吸水纸吸干后放到信封中, 最后放到恒温箱中在 75℃烘干至恒重. 磨碎后, 称取一定量的干样用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮制备成溶液, 用于植物叶片中 N、P 浓度测定, N、P 浓度分别采用奈氏比色法和钒钼黄比色法测定<sup>[10]</sup>. 植物体内氮磷的净积累量(PA)的计算公式为:

$$PA = PC \times PB \quad (2)$$

式中,  $PC$  为植物的氮磷浓度 ( $\text{mg/g(DW)}$ ),  $PB$  为植物生物量 ( $\text{g/m}^2(\text{DW})$ ).

植物叶片的可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法<sup>[11]</sup>, 可溶性蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[11]</sup>; 硝酸盐含量的测定采用酚二磺酸比色法<sup>[12]</sup>; 维生素 C 含量采用紫外分光光度计测定<sup>[13]</sup>; 重金属含量采用 ICP-MS 测定<sup>[14]</sup>.

#### 1.4 数据统计及分析

所有数据均用三次重复的平均值, 利用 SPSS 12.0 和 Sigmpilot 9.0 等软件对分析结果进行处理.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水生蔬菜对富营养化水体的净化能力

静态试验结果表明, 水芹和豆瓣菜对富营养化水体均有较强净化能力, 且其净化能力随着处理时间的延长而提高(表1). 试验后期, 水芹和豆瓣菜对富营养化水体中 TP、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、Chl. a 的去除率均达 89% 以上, 对 TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 的去除率也达 67% 以上. 黄田等的研究结果也表明, 在低温条件下, 水芹不仅能有效去除水体中的 N、P、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , 并对藻类也有很强的抑制作用<sup>[15]</sup>. 这可能是由于水生植物在浮床培养的过程中, 有助于硝化菌和反硝化菌的生长, 而硝化和反硝化作用是对氮的主要去除机制, 并且在其生长过程中会直接吸收磷酸盐, 因此水体中磷酸盐的去除效果也较明显. 试验后期水芹对富营养化水体中  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除能力较豆瓣菜要强(表1). 这一方面可能由于试验前期豆瓣菜的新根系较水芹多, 提供微生物生长的面积较大, 因此前期吸收  $\text{NH}_4^+$ -N 的能力较水芹要强, 但在试验后期水芹的新根系较豆瓣菜多, 提供微生物生长的表面积增大, 且其生物量也较高的缘故, 因此试验后期其去除能力增强; 另一方面可能是由于水芹对铵态氮的吸收能力较豆瓣菜强的缘故, 胡绵好等的研究结果也表明, 水芹对低浓度的铵态氮和硝态氮的吸收能力较豆瓣菜强<sup>[16]</sup>. 试验还发现, 用于净化富营养化水体的水芹和豆瓣菜在试验后期其新叶有点变白, 且成浅黄颜色, 这可能由于富营养化水体中某些元素的缺乏所致. 然而, 有关富营养化水体种植水生蔬菜缺乏氮、磷之外的营养元素的问题还有待进一步研究.

表1 水芹和豆瓣菜对富营养化水体的净化效果

Tab. 1 The purifying effect of eutrophic water by water dropwort and watercress

项目	水芹不同取样时间下的去除率(%)					豆瓣菜不同取样时间下的去除率(%)				
	4d	8d	12d	16d	20d	4d	8d	12d	16d	20d
TN	28.0	44.8	54.2	61.0	76.9	33.3	47.7	52.4	62.3	78.3
TP	36.7	59.6	83.9	90.1	90.5	30.5	61.2	79.7	87.8	90.0
$\text{NH}_4^+$ -N	31.0	42.7	52.2	58.4	69.4	31.4	46.4	50.6	60.0	68.0
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	70.0	74.3	81.1	92.9	95.0	44.5	62.1	81.6	88.9	95.4
Chl. a	44.0	68.1	83.8	88.3	89.8	59.1	77.3	85.7	88.9	91.3

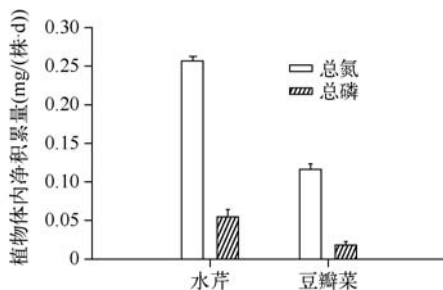


图2 富营养化水体处理中水生蔬菜体内氮磷的积累量

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus accumulation of aquatic vegetables during eutrophic water treatments

### 2.2 水生蔬菜体内氮磷的积累量

植物体内的氮磷浓度能够反映出该种植物对氮磷的吸收能力. 富营养化水体处理中水芹茎叶部分 TN 和 TP 的净积累量分别为 0.2566 和 0.0548  $\text{mg}/(\text{株}\cdot\text{d})$ , 豆瓣菜茎叶部分 TN 和 TP 的净积累量分别为 0.1162 和 0.0181  $\text{mg}/(\text{株}\cdot\text{d})$ (图2). 这一结果与本人在前期对黑麦草的研究结果相一致(待发表). 试验还表明, 水生蔬菜体内的氮磷积累量分别与生物量和氮磷浓度显示了显著的线性关系(数据没有给出), 因而可以直接通过生物量来评价它们对氮、磷的去除作用. 蒋跃平等在轻度富营养化水体人工湿地处理系统中植物的特性研究中也得出同样的结果<sup>[17]</sup>.

### 2.3 富营养化水体中水生蔬菜品质及作为食品或饲料的安全性分析

富营养化水体处理中,水生蔬菜叶片内可溶性蛋白和可溶性糖含量与营养液中培养的水生蔬菜无显著差异,但硝酸盐含量存在极显著差异(表2);水芹对富营养化水体处理中,其体内维生素C含量明显小于营养液培养,但豆瓣菜处理的富营养化水体中,其体内维生素C含量与营养液培养的无明显差异.这可能受富营养化水体中氮磷的浓度、其它植物元素的含量较低及植物种类等因素造成的.王强等的研究也表明,小青菜体内维生素C和硝酸盐含量随着氮量的提高而提高<sup>[18]</sup>.水生蔬菜对富营养化水体中的重金属有一定的吸收作用,但吸收量很小,这可能主要是由于受试水体中重金属含量不高造成的,因为从理论上,吸附量的大小应与富营养化水体中重金属含量有关(表3).在本研究的试验环境下,水生蔬菜均完全符合WHO & FAO允许食用标准,是安全的(表3).

表2 富营养化水体处理中水生蔬菜的品质特性

Tab.2 Quality characteristic of aquatic vegetable during eutrophic water treatments

指标	水芹		豆瓣菜	
	EW	HACS	EW	HACS
维生素C(mg/100g(FW))	34.38 ± 2.42	65.63 ± 4.11 *	56.25 ± 6.84	50.00 ± 8.53
可溶性蛋白质(mg/g)	2.61 ± 0.08	2.50 ± 0.03	2.67 ± 0.00	2.65 ± 0.01
可溶性糖(mmol/g)	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.08 ± 0.00
硝态氮(μg/g(FW))	185.55 ± 17.24	299.45 ± 7.54 **	163.26 ± 6.19	268.59 ± 21.55 **

\*, \*\* 分别表示在0.05,0.01水平的显著差异.

表3 富营养化水体处理中水生蔬菜体内重金属含量

Tab.3 Nitrate and heavy metal contents in aquatic vegetable during eutrophic water treatments

蔬菜	测定项目(mg/kg)			
	Cd	Cu	Pb	Zn
水芹	0.027 ± 0.001	1.569 ± 0.0341	0.361 ± 0.003	4.209 ± 0.113
豆瓣菜	0.018 ± 0.003	1.661 ± 0.021	0.242 ± 0.005	3.573 ± 0.156
WHO & FAO 允许食用标准	0.03	4.0	0.5	6.0

### 2.4 富营养化水体中水生蔬菜的经济效益分析

水芹和豆瓣菜在处理富营养化水体时均能迅速生长,在富营养化水体中水芹每20-30d收割一次,豆瓣菜每15-20d收割一次.据估算富营养化水体中水芹(茎叶可食用部分)的亩产量为2500kg,若以市售最低价3.00元/kg计,则每亩水面的经济效益为7500元,扣除载体和劳动力成本,获利近4200元左右.据估算富营养化水体中豆瓣菜(茎叶可食用部分)的亩产量为750kg,若以市售最低价3.50元/kg计,则每亩水面的经济效益为2625元,扣除载体和劳动力成本,获利近2100元左右.

对无工业污染的富营养化水体中水芹和豆瓣菜中重金属的分析表明,其含量均达到WHO & FAO允许食用标准.据对我国84个代表性湖泊富营养化状况评价结果表明:全年有44个湖泊呈富营养状态,占评价湖泊总数的52.4%;40个湖泊为中营养,占总数的47.6%.如果能采用如水芹、豆瓣菜等经济作物来净化水质,就可以变废为宝.该项研究成果,适用于无严重重金属污染废水(如饮用废水、啤酒废水或其它食品废水如屠宰、淀粉加工、制糖、味精、水产及肉类加工等废水)的处理利用.

## 3 结论

本研究在人工生态浮床技术系统中,利用水生蔬菜水芹和豆瓣菜来处理富营养化水体,其不仅能在富营养化水体中正常生长,还能有效地去除水体中的氮、磷等营养物质,且是人们食用的特色绿叶蔬菜;它们不仅可以用于水面种植以修复无重金属或特殊有机物污染水体生态环境,而且还可以作为特色绿色蔬菜在市场销售,其经济效益相当可观,能产生一定的经济价值,因此可以大面积应用,具有良好的应用前景.

从环境的角度来看,富营养化是由于水体中氮、磷等营养元素过度富集而导致的水生生态系统初级生产力增高的异常现象;但从资源的角度来看,水体营养是一种不可多得的农业资源.我国湖泊众多,富营养化问题普遍而严重,也可以说水体营养资源丰富,如何有效利用这些资源进行农业生产,缓解耕地紧张的矛盾,又有效地治理富营养化水体,既是我们面临的挑战,也是我们面临的机遇.人工生态浮床栽培农作物的水上农业资源化治理富营养化水体模式应该是一种很好的选择.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Smith RA, Schwartz GE, Alexander RB. Regional interpretation of water quality monitoring data. *Water Resource Research*, 1997, **33**(12):2781-2798.
- [ 2 ] 唐静杰,周青. 湖泊富营养化的生态修复研究进展. *生态环境*, 2008, (2):79-82.
- [ 3 ] 吴振斌,邱东茹,贺锋等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响. *应用生态学报*, 2003, **14**(8):1352-1353.
- [ 4 ] 刘春常,安树青,夏汉平等. 几种植物在生长过程中对人工湿地污水处理效果的影响. *生态环境*, 2007, **16**(3):860-865.
- [ 5 ] Hu MH, Ao YS, Yang XE *et al.* Treating eutrophic water for nutrient reduction using an aquatic macrophyte (*Ipomoea aquatica* Forsskal) in a deep flow technique system. *Agr Wat Manage*, 2008, **95**(5):607-615.
- [ 6 ] 方云英,杨肖娥,常会庆等. 利用水生植物原位修复污染水体. *应用生态学报*, 2008, **19**(2):407-412.
- [ 7 ] 陈秋夏,郑坚,金川等. 水生植物对 N、P 的富集作用研究. *江西农业大学学报*, 2008, **30**(3):437-442.
- [ 8 ] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002:104-280.
- [ 9 ] 葛滢,王晓月,常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究. *环境科学学报*, 1999, **19**(6):690-692.
- [ 10 ] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社, 2000:265-270.
- [ 11 ] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [ 12 ] 黄建国,袁玲. 重庆市蔬菜硝酸盐、亚硝酸盐含量及其与环境的关系. *生态学报*, 1996, **16**(4):383-388.
- [ 13 ] 安华明,陈力耕,樊卫国等. 刺梨果实中维生素 C 积累与相关酶活性的关系. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, **31**(4):431-436.
- [ 14 ] 黄亮,李伟,吴莹等. 长江中游若干湖泊中水生植物体内重金属分布. *环境科学研究*, 2002, **15**(6):1-4.
- [ 15 ] 黄田,周振兴,张劲等. 富营养化水体的水芹菜浮床栽培试验. *污染防治技术*, 2007, **20**(3):17-19.
- [ 16 ] 胡绵好,奥岩松,杨肖娥. 富营养化水体中水生经济植物氮代谢酶特性与不同形态氮去除的关系. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(4):1489-1494.
- [ 17 ] 蒋跃平,葛滢,岳春雷等. 轻度富营养化水人工湿地处理系统中植物的特性. *浙江大学学报(理学版)*, 2005, **32**(3):309-313,319.
- [ 18 ] 王强,姜丽娜,符建等. 氮素形态、用量及施用时期对小青菜产量和硝酸盐含量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, **14**(1):126-131.