

文章编号 :1009-038X(2002)05-0506-05

凤眼莲根系生态系统在含银废水净化中的功能

郭耀基, 张一波

(江南大学 生物工程学院, 江苏 无锡 214036)

摘 要:通过采用凤眼莲净化含银废水,定性定量分析了其根系生态系统的组成,证实凤眼莲水下根系上栖息着大量藻类、细菌、微型动物,它们协同作用,致使废水中的含银物质、悬浮物、营养盐和有机物发生不同形式的迁移和转化,证明了“有机质—细菌—微型动物”食物链在根系的形成及其含银物质的富集,是凤眼莲根系生态系统对污染水体综合净化和资源化的基础。

关键词:凤眼莲;根系生态系统;结构;功能

中图分类号:X 17;X 703

文献标识码:A

The Research of the Function of *Eichhornia crassipes* Root Ecosystem in the Treatment of Silver-Containing Wastewater

GUO Yao-ji, ZHANG Yi-bo

(School of Biotechnology, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

Abstract: By using *Eichhornia crassipes* to treat silver-containing wastewater, we quantitatively and qualitatively analysed the components of its ecosystem, verified that the cooperation of a large number of algae, germ and minianimals, which were resting on the root, led to the different-form migrations and concertions of silver-containing materials, suspended matter, nutrition salt and organic compounds in the wastewater. It was proved that the formation of the “organic matter-bacterium-animalcule” food chain in root system and the gathering of silver-containing materials were the basis of the synthetical purification and materialization of the *Eichhornia crassipes* root ecosystem.

Key words: *Eichhornia crassipes*; root ecosystem; structure; function

凤眼莲对污染水体的净化作用已有大量报道^[1-3],特别是对重金属的净化更是研究的重点之一^[4-5],但对含银等稀贵金属废水的净化资源化研究,以及对凤眼莲根系生态系统方面的研究,却少有报道。虽有根系亚生态系统^[6]或周丛生物(an-fwuchs 或 periphyton)^[7]的提法,但净化机制的专门研究也不多见。

作者在“凤眼莲等水生植物对含银废水的净化

与银回收研究”课题成果^[8,9]的基础上,进一步对凤眼莲根系生态系统的基本组成、功能及综合净化机制进行了深入剖析。

1 材料与方法

1.1 试验水质

电影胶片厂排水(经二级处理),Ag 37~2 286

收稿日期 2002-02-05; 修订日期 2002-07-18.

基金项目 国家自然科学基金项目[编号:486002]资助课题.

作者简介 郭耀基(1946-),男,江苏无锡人,工学学士,副教授.

$\mu\text{g}/\text{kg}$, COD_{Cr} 41 ~ 372 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 0.10 ~ 3.77 mg/L .

1.2 生物试验材料

凤眼莲自培,株高(水上部分)大于 30 cm,主根 13 ~ 29 cm. 投放量 鲜重占总水体质量的 2% 左右.

1.3 试验装置

分 3 个阶段进行. 静态试验 : D 30 cm, h 30 cm 的玻璃缸. 动态模拟试验 45 m $\times$ 0.36 m $\times$ 0.44 m 水泥沟. 生产性试验 99.6 m $\times$ 4.52 m $\times$ 0.32 m 氧化渠,底泥厚 0.6 ~ 0.8 m.

1.4 试验条件

自然光照,气温 5 ~ 31 $^{\circ}\text{C}$,水温 5 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$,培养 24 ~ 96 h.

1.5 植株表面杀菌(无菌对照)

根部用自来水清洗,沥干,在质量分数 70% 的酒精溶液中漂洗 5 s,清水漂洗 5 次,杀菌率 99.9%,且不伤植株组织^[10].

1.6 测定方法

藻类、微型动物 :目镜计数网视野比例计数 ;细菌总数 稀释平板培养法 ; COD :重铬酸钾法 ;氨氮 :纳氏试剂比色法 ;银 :TMK-SLS 光度法^[11] 和催化动力比色法^[12].

2 结果与讨论

2.1 凤眼莲根系生态系统

凤眼莲茎、叶光合作用,吸收空气中的 CO_2 ,根须吸收水中 N, P 等营养盐. 正常情况下凤眼莲鲜重达 10 kg/m^2 ,根重占总重的 48.5%. 根系上栖息着藻类、微生物和微型动物(见表 1). 这些生物及其代谢产物、被吸附的悬浮颗粒,与根际水体形成以凤眼莲根须为网络骨干的生态系统.

表 1 凤眼莲根系生物组成

Tab.1 Components of <i>Eichhornia crassipes</i> root ecosystem			
项 目	属种	数量/(个/kg)	生物量/(g/kg)
藻类	32	$2.41 \times 10^8 \sim 3.50 \times 10^8$	0.677 ~ 1.182
微生物	—	$3 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11}$	—
微型动物	22	1.79×10^7	4.6

注 氧化渠凤眼莲.

根系生物群落与根际环境组成的生态系统,其生物个体和空间都很微小,因而有学者称之为“亚生态系统”或“微生态系统”. 作者认为称“根系生态系统”较确切. 生态系统是多层次的,难以以“亚”、“次”、“微”分类. 凤眼莲根系生态系统有特定的结构和功能,是自然界的基本单元.

2.2 凤眼莲根系主体的功能

2.2.1 吸附悬浮颗粒 根须的比表面积极大,对水体中悬浮物具有吸附、截留作用,并使浊度降低(见表 2),24 h 内浊度的下降率比静置对照样高 40% 多. 根系对悬浮物的日均吸附量达 11.27 ~ 13.46 mg/kg ,其中有机质质量分数为 57% ~ 65%. 有机物被根系微生物分解,代谢产物无机盐再由根须吸收.

表 2 凤眼莲根系对悬浮物的吸附性能

Tab.2 Adsorption function of root systems to suspended matter

时间/ h	浊 度		底 部 沉 降 物 质 量		浓 度/(mg/L)	
	根 系 吸 附		静 置 沉 降		根 系 吸 附	静 止 沉 降
	浊 度	下 降 率/%	浊 度	下 降 率/%		
0	27	—	27	—	—	—
24	12	55.56	23	14.81	4.50	5.00
48	4.2	84.44	9.5	64.81	5.82	9.69
72	3.0	88.89	8.5	68.52	—	—
96	3.0	88.89	6.2	77.04	4.93	11.60
120	3.0	88.89	5.7	78.89	8.37	15.20

注 静态试验.

2.2.2 吸收氮、磷营养盐 氮、磷既是凤眼莲的营养元素,又是水质净化的对象. 从表 3 可见,缺氮或磷都影响凤眼莲的生产量,且缺磷影响更大. 凤眼莲干重含氮约 2.64%,含磷约 0.43% (均为质量分数). 按鲜重实测平均净生长量 0.5 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,干湿系数以 5% 计,则 666.7 m^2 水面年输出氮 79.2 kg,磷 12.9 kg.

表 3 营养盐对凤眼莲生长量的影响

Tab.3 Influence of nutrition salts on the growing of *Eichhornia crassipes*

质量浓度/(mg/L)		完全样		缺磷		缺氮	
TN	TP	W_0/g	W_t/g	W_0/g	W_t/g	W_0/g	W_t/g
0.25	0.25	250	348	250	262	250	267
0.50	0.40	250	373	250	289	250	310
1.0	0.60	250	498	250	289	250	333
2.0	0.80	250	547	250	338	250	311

注 静态试验,培养时间 10 d ; W_0 、 W_t 分别为培养前后植株重.

从表 4 可见,水体营养盐质量浓度高,凤眼莲生长快,根系却不发达 ;而营养盐质量浓度低时生长缓慢,根系发达. 说明凤眼莲对氮、磷的吸收主要靠根须.

2.2.3 吸附、吸收含银物质

银等重金属在凤眼莲净化中的迁移、转化较复

杂,这与它们的存在状态有关. 水体中银有悬浮态银(卤化银、 Ag_2S 、带银生物体等)、离子态银和络合态银($[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)]^{3-}$). 测定表明,其中悬浮态银占

96%,它们易被根系吸附、絮凝,但其净化率明显小于 Ag^+ 和 $[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)]^{3-}$ (见图 1).

表 4 不同营养条件下凤眼莲的生长状况
Tab.4 Growth of *Eichhornia crassipes* under different conditions of nutrition

试样点	$\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度/ (mg/L)	$\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度/ (mg/L)	$\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度/ (mg/L)	TP 质量浓度/ (mg/L)	全 株		根	
					平均长度/ cm	平均称重/ g	平均长度/ cm	平均称重/ g
调节池	1.440	0.034	0.054	0.147	46.6	190.3	19.0	89
实验塘	0.192	0.000	0.050	0.031	42.9	208.3	28.7	139.8

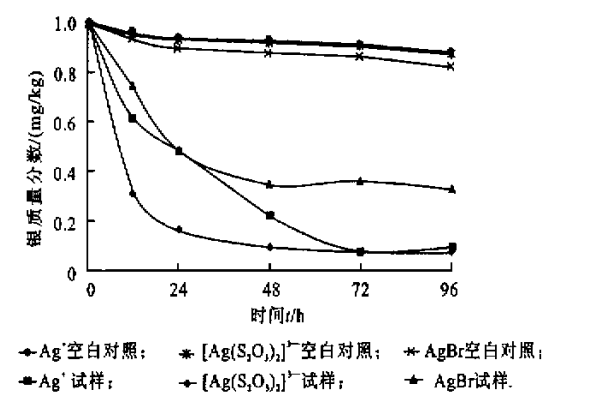


图 1 凤眼莲对不同形态银的净化效果
Fig.1 *Eichhornia crassipes* 's purification effect on silver of different forms

溶解态银易于转化为颗粒态银而沉降,也可被凤眼莲根须吸收,并输送到叶柄、叶片. 表 5 列出了凤眼莲各部位对银的富集,可证实其生态系统对银的吸收和输送. 银在根、柄、叶片中可富集至千、万倍.

表 5 凤眼莲对痕量银的富集
Tab.5 Agglutination of trace silver by *Eichhornia crassipes*

试验阶段	植株部位	废水中银 质量分数/ ($\mu\text{g/kg}$)	银的富集情况			
			占干重 比例/ (mg/kg)	富集 倍数	占灰分 比例/%	富集 倍数
动态 试验	根部	72.5	1884.5	25993	0.635	87586
	叶柄	37~108	147.7	2037	0.105	14482
	叶片		114.5	1579	0.058	8000
生产性 试验	根部		549.5	68688	0.185	231250
	叶柄	8.0	32.9	4113	0.023	28750
	叶片		12.2	1525	0.006	7500

注 动态试验.

银的净化与有机物被微生物分解和营养盐被植物吸收不同,银在基质与水体间存在吸附—解吸、富集—释放的双向过程. 根系对银吸附到一定

程度,有释放的趋势,水体中银质量分数可能回升. 从图 1 可以看出,48~72 h 后各种形态的银都有回升现象. 故应掌握净化时间,及时打捞植株.

2.3 藻类的作用

凤眼莲根系藻类有 32 属,比邻近水体(有 65 属)少. 色球藻、席藻、束丝藻、异极藻等 7 种为优势种,眉藻等 8 种为水体中所无. 异极藻密集而整齐地固着在凤眼莲根须上,数量之多,实属少见. 受凤眼莲植株空隙有限光照和水中银毒害的限制,形成了其特定的群落.

藻类也吸收利用水中的营养盐,具有辅助净化作用;更重要的是通过光合作用放出氧气. 在玻璃缸静态试验中观察到根系藻类,特别是丝状藻的放氧——小气泡,而非根须放氧. 这提高了水体的复氧能力,有利于根系微生物、微型动物的生长(见表 6).

表 6 凤眼莲根系藻类的复氧效果
Tab.6 Oxygen-regaining effect of alage in *Eichhornia crassipes* root system

项 目	废水调节池		氧化渠	
	有凤眼莲	无凤眼莲	有凤眼莲	无凤眼莲
$\text{DO}/(\text{mg/L})$	0.50	0.08	2.90	0.80

2.4 微生物的作用

凤眼莲根系细菌总数 $3 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11}$ 个/kg,比表层水体高 1 000 倍. 种类上也有差异,多为革兰氏阴性菌,假单孢细菌占优势. 凤眼莲植株经杀菌处理后,根系细菌总数 5×10^8 个/kg,约为原株的千分之一,与试液中相当. 从表 7 可见,两种基质上微生物数量的差异对 COD_{Cr} 的去除率有明显影响,而对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、银的净化几乎无影响. 根系微生物数量的差异只是 24 h 内比较明显,杀菌凤眼莲根系微生物在试液中能迅速恢复繁殖,原株根系微生物则因试液中银的毒害,数量有所减少. 24 h 后两种基质上的微生物量趋于接近,杀菌株为 6.36×10^9 个/

kg,原株为 1.60×10^{10} 个/kg. 48 h 后则都稳定在 2.0×10^9 个/kg.

61.5%,包括水体中溶解性有机物,均易被微生物降解,COD 得以降低.

根系吸附的悬浮颗粒有机质质量分数平均为

表 7 微生物的净化作用
Tab.7 Purification effect of microbe

基质	COD				NH ₃ -N 质量浓度/(mg/L)				Ag 质量分数/(μg/kg)			
	C _o	C _t	$\overline{C_t}$	R/%	C _o	C _t	$\overline{C_t}$	R/%	C _o	C _t	$\overline{C_t}$	R/%
杀菌 凤眼莲		59.58								55		
	109.5	33.52	49.65	54.7	1.05	0.11	0.11	89.5	257	45	44.0	82.9
		55.86								32		
原株 凤眼莲		23.84				0.09				32		
	109.5	28.64	24.11	78.0	1.05		0.096	90.9	257		39.5	84.6
		19.84				6				47		

注 静态试验,t 96 h.

微生物对凤眼莲具有保护作用,能减轻毒物的危害(见表 8). 杀菌凤眼莲对银毒害的承受能力较差,质量分数 $318 \mu\text{g/kg}$ 的银使其光合作用受损,叶片叶绿素质量分数下降 34% 无银条件下 2 种植株叶绿素质量分数则相差无几.

表 8 银对凤眼莲叶片叶绿素的影响
Tab. 8 Influence of silver on *Eichhornia crassipes* chlorophyll

试样		叶绿素 a 质量分数/ (mg/g)	叶绿素 b 质量分数/ (mg/g)	叶绿素 c 质量分数/ (mg/g)
杀菌 凤眼莲	无银	0.978	0.820	0.719
	有银	0.649	0.500	0.490
原株 凤眼莲	无银	0.837	0.724	0.620
	有银	0.827	0.694	0.581

注 $318 \mu\text{g/kg}$ 银质量分数下培养 96 h.

2.5 微型动物的作用

原生动物、微型后生动物,统称“微型动物”. 调查情况见表 9.

表 9 微型动物的调查情况
Tab.9 Investigation of minianinals

项目	属种	个体数/(个/m ²)	生物量/(g/m ²)
根系	22	1.79×10^8	46.366
凤眼莲 下水柱	11	1.035×10^8	19.875
无凤眼莲 下水柱	7	1.57×10^8	9.771

凤眼莲根系集中了较多的微型动物,优势种为旋轮虫、狭甲轮虫、多核草履虫. 根系吸附的有机物、微生物为微型动物提供了食料,藻类的光合作

用又为其供氧,造成良好的生存环境. 它们吞食有机颗粒和微生物,使水质得到澄清. 轮虫属较高等的微型动物,对低溶解氧和毒物敏感. 它在根系出现优势,表明“有机质—微生物—原生动物—微型后生动物”食物链的完整性,指示出凤眼莲根系生态系统的正常运转. 凤眼莲下水柱中也有龟纹轮虫等优势种,则说明水质属寡污带. 无凤眼莲的对照水柱中轮虫较少.

3 结 论

试验在不同阶段和不同季节进行,凤眼莲都显示了良好的水质净化功能. 如生产性试验中,当废水平均含量:银质量分数 $124.3 \mu\text{g/kg}$,CODcr 质量浓度 73.8 mg/L , NH₃-N 质量浓度 2.39 mg/L 废水停留 49 h,平均去除率分别为:银 98.6%,CODcr 54.4%,NH₃-N 41.6%. 银在凤眼莲各部位都能富集,以根部的银含量最高,富集倍数干重约 6.9 万倍、灰分约 23 万倍,从中炼得了白银. 展示出生态资源化工的经济效益.

维管束植物凤眼莲水下根须既吸收水中营养盐供自身代谢,又作为天然基质吸附水中悬浮物,并栖息着大量藻类、细菌、微型动物,形成相互依存、协同作用的根系生态系统. 悬浮物在迁移过程中吸附、携带水体中有机、无机杂质,并被凤眼莲根系截留,其中有机质被微生物降解,产生无机盐类,与水体中的氮、磷营养盐一起被水生植物吸收. 微型动物吞食微生物和有机颗粒,形成完整的食物链.

研究证实了凤眼莲对不同形态银的吸附、吸

收、富集和释放 ;发现了以藻类为主的放氧现象和微生物对银的解毒功能 揭示出微型动物在根系生态系统中处于消费者地位. 在此综合作用下,污染物被分解或富集,随着凤眼莲的人工收获,根系上

富集的有机质、重金属、各种生物体一起被移出水体,达到水质净化和进一步资源化的目的.

致谢 中国科学院南京地理与湖泊研究所戴全裕、陈源高,无锡阿尔梅感光公司张珩、皮宇等参加了研究,特此致谢.

参考文献：

[1] 吴振斌. 高等水生植物净化水质方面的研究概况 [J]. 淡水生物学科技情报, 1983, (5) 5 – 8.

[2] 谢心义. 凤眼莲净化污水试验研究 [J]. 环境科学, 1984, 5(3) 15 – 18.

[3] 张雁秋. 凤眼莲的容量对净化利用的影响 [J]. 农村生态环境, 1989, (1) 40 – 43.

[4] 戴树桂. 凤眼莲对污水中重金属的净化 [J]. 环境科学, 1987, 6(2) 43 – 46.

[5] 戴全裕. 凤眼莲对重金属的吸收与喂鱼后二次富集状况的初步研究 [J]. 水产学报, 1988, 12(2) 135 – 144.

[6] Curdg C R. The floccu lation of suspeded matter by paramecium [J]. Caudatum Jgem Microbid, 1963, 33 357 – 363.

[7] 沈韞芬. 周从生物与微型动物 [J]. 淡水生物学科技情报, 1982, (2) 1 – 2.

[8] 戴全裕, 郭耀基. 凤眼莲对含银废水的净化研究——动态模拟试验 [J]. 环境科学学报, 1990, 10(3) 362 – 370.

[9] 戴全裕, 郭耀基. 凤眼莲等水生植物对含银废水的净化与银回收研究 [J]. 科学通报, 1991, 36(21) 1657 – 1660.

[10] 郭耀基. 凤眼莲根系微生物在含银废水净化中的作用 [J]. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 1991, (8) 79 – 89.

[11] 戴全裕. TMK-SLS 光度法测定含银废水、水生植物及底泥中的微量银 [J]. 环境监测管理与技术, 1989, 1(2) 40 – 44.

[12] 戴全裕. 催化动力比色法测定水中痕量银及其在水生植物净化含银废水中的应用 [J]. 环境污染与防治, 1990, 12(1) 45 – 46.

(责任编辑 秦和平)

(上接第 505 页)

[3] BURKITT D P, TROWELL H C. Refined Carbohydrate Foods and Disease [M]. London :Academic Press, 1975.

[4] Royal College of Physicians. Medical Aspects of Dietary Fibre[M]. London :Pitmans Medical, 1980.

[5] BINGHAM S, WILLIAMS D R R, COLE T J, *et al* . Dietary fibre and regional large bowel cancer mortality in Britain [J]. **Br J Cancer**, 1979, 40 :456 – 463.

[6] ENGLYST H N, BINGHAM S A, WIGGINS H S, *et al* . Non-starch polysaccharide consumption in flour Scandinavian populations[J]. **Nutr Cancer**, 1982, 4 :50 – 60.

[7] CUMMINGS J H, SOUTHGATE D A T, BRANCH W, *et al* . Colonic response to dietary fibre from carrot, cabbage, apple, bran, and guar gum[J]. **Lancet**, 1978, 1 :5 – 7.

[8] CANDLISH-JK, GOURLEY-L, LEE-HP. Dietary fibre and starch in some southeast asian food [J]. **Asean Food Journal**, 1987, 3 (2) :81 – 83.

[9] MULLIN WJ, PEACOCK S, LOEWEN DC, *et al* . Macronutrients content of Yellow Glacier lily and balsamroot :root vegetables used by indigenous peoples of northwestern North America[J]. **Food Research International**, 1997, 30 (10) :769 – 775.

[10] TAKEDA C, TAKEDA Y, HIZUKURI S. Physicochemical properties of lily starch[J]. **Cereal Chemistry**, 1983, 60 :313 – 316.

[11] HANS N ENGLYST, MICHAEL E QUIGLEY, GEOFFREY J HUDSON. Determination of dietary fibre as NSP with GLC, HPLC or spectrophotometric measurement of constituent sugars[J]. **Analyst**, 1994, (119) :1497 – 1509.

[12] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J, *et al* . Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. **Anal Chem**, 1956, 28 :350 – 356.

[13] BRANDRUP J, IMMERGUT E H. The Polymer Handbook[M]. New York :Wiley-Interscience, 1966.

[14] BACON J S, BERKELEY R C W, GGOODAY G W, *et al* . Microbial Polysaccharides and Polysaccharides[M]. London :Academic Press, 1979. 269.

[15] HANS N ENGLYST, JOHN H CUMMINGS. Simplified method for the measurement of total NSP by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol acetates[J]. **Analyst**, 1984, 109(7) :937 – 942.

(责任编辑 李春丽)