

水生高等植物对废水中银的净化 与富集特性研究*

戴全裕

(中国科学院南京地理与湖泊研究所)

戴文宁

(兰州大学化学系)

高翔 卢红

(南京师范大学生物系)

摘 要

本文研究了水生植物对废水中银的净化与富集特性,揭示了它们对银净化和富集的有关条件。研究表明:水生植物对废水中银(Ag^+)的净化与富集能力不同,其顺序为:沉水植物>漂浮和浮叶植物>挺水植物;根系发达的水生植物>根系不发达的水生植物。而它们对银的抗性能力则是:挺水植物>漂浮和浮叶植物>沉水植物。

在本实验条件下,水生植物植物72小时对银的净化率达64.5—100%,根部对银的富集量达260—7200ppm(DM)。水生植物风眼莲、水葫芦和水芹菜都是净化能力较强的植物种类。

关键词: 水生植物, 银, 净化与富集。

银在生产过程中流失量较大^[1]。这不仅是一个经济损失,而且还会造成严重的环境污染。利用水生植物净化处理有机废水的报道较多^[2-4],但是利用水生植物对含银废水的处理则研究很少。本文通过对20余种水生植物的研究,探讨了它们对低浓度含银废水的净化特性与对银的富集能力。并从中筛选出优良品种,为推广应用提供必要的科学依据。

一、材料与方 法

1. 实验容器 玻璃培养缸(直径30×高30cm);
2. 生物试验材料 选用20余种不同生活型(见表1)水生植物作试验材料。样品从野外带根采回后,在室内培养2天左右,然后取出用自来水细心将其杂物清洗干净(勿揉碎),再用去离子水洗至无 Cl^- 离子为止(淋洗水用 AgNO_3 检验);
3. 含银废水 用 AgNO_3 (A.R)和去离子水配制。废水与试验的水生植物重量(鲜重)比例为100:2(kg);
4. 净化率测定 根据水生植物的生活型分成若干试验组,在含银废水中投放一定量的水生植物后,在不同时间内分别进行水样测定,分析废水中银浓度的变化。同时设空白对照组(不放水生植物)并测定其气温、水温 和 pH 等。实验均在室内近窗的自然光下进行;
5. 富集样含银量的测定 均以实验72h后的水生植物作为测定样品;

* 国家自然科学基金资助项目。

本文于1988年7月26日收到。

表 1 不同生活型水生植物对废水中银的净化率(%)^{*}

Table 1 The purification rates of silver in wastewater by means of the different hydrophytes

生活型	水生植物名称	净 化 率 (%)					
		12 (h)	24 (h)	36 (h)	48 (h)	60 (h)	72 (h)
沉水植物	菹 草 <i>Potamogeton crispus</i>	88.0	91.0	91.0	91.0	98.0	97.0
	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	94.0	96.0	≈100	96.0	97.0	≈100
	狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	74.0	93.0	96.0	99.0	94.0	≈100
	平 均 值	85.3	93.3	95.6	95.3	95.6	99.0
浮叶植物	荇 菜 <i>Nymphoides peltata</i>	96.0	94.0	96.0	96.0	85.0	≈100
	菱 <i>Trapa natans</i>	75.0	87.0	91.0	91.0	85.0	≈100
	睡 莲 <i>Nymphaea rubra</i>	89.8	89.2	88.8	90.2	95.4	84.9
	平 均 值	86.9	90.1	91.9	92.4	88.5	94.9
飘浮植物	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	97.0	94.5	88.5	87.5	≈100	≈100
	细绿萍 <i>Azolla filiculoides</i>	46.6	70.0	70.0	72.5	63.5	64.5
	紫 萍 <i>Spirodela polyrhiza</i>	90.0	94.5	90.5	88.0	68.5	70.5
	小浮萍 <i>Lemna minnor</i>	84.0	66.0	80.0	92.0	89.0	94.0
	水 鳖 <i>Hydrocharis dubia</i>	69.0	79.0	84.0	79.0	86.0	86.0
	槐叶萍 <i>Salvinia natans</i>	88.0	95.0	87.0	86.0	96.0	93.0
	水 蕹菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	98.0	93.0	88.5	89.0	≈100	≈100
	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	55.0	68.0	83.0	70.5	70.5	69.0
	平 均 值	76.9	81.3	83.9	83.1	84.1	84.6
挺水植物	芦 苇 <i>Phragmites communis</i>	30.0	37.0	61.0	53.0	63.0	66.0
	菰 <i>Zizania latifolia</i>	49.0	64.0	80.0	77.0	87.0	90.0
	水 蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	76.0	79.5	88.0	86.0	70.5	≈100
	菖 蒲 <i>Acorus alumnus</i>	40.0	60.0	78.0	77.0	87.0	86.0
	水 稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	26.0	59.0	73.0	88.0	92.0	≈100
	水 稻 <i>Oryza sativa</i>	90.0	78.4	94.8	95.4	95.8	98.5
	慈 菇 <i>Sagittaria sagittifolia</i>	31.0	49.0	66.0	73.0	86.0	≈100
	平 均 值	48.9	61.0	77.2	78.4	83.0	80.0

试验银浓度2.0ppm; *试验气温为27.3±1.5℃, 水温为24.9±0.9℃, pH6.5—7.0.

6. 测定方法 含银废水样品采用 TMK-SLS 光度法^[5], 水生植物富集样的测定采用原子吸收法。标准银回收率均在90%以上。

二、结果与讨论

1. 水生植物对废水中银的净化

将不同生活型的水生植物放入含银 2.0ppm 的废水中培养, 测得水生植物在不同时间内的净化率(见表 1)。净化率大小依次为沉水植物>飘浮和浮叶植物>挺水植物, 根系发达的水生植物, 如凤眼莲对废水中银的净化率特别强, 经 60h 后, 其净化率达100%。水蕹菜经水培后根系也很发达, 60h 后, 净化率也达100%, 可与凤眼莲相比拟(根系状况图版 II)。而根系不发达的水生植物则对废水银的净化率较差, 如喜旱莲子草, 60h 后, 其净化率仅为

69.0%, 芦苇仅为66.0%。

选取凤眼莲、水蓼和喜旱莲子草等不同种类的水生植物于起始银浓度为 2.0ppm 溶液中培养, 以不放水生植物的同一银浓度试验缸为对照, 每隔 2.0h 测定一次水体中银浓度的变化值, 结果见图 1。

试验结果表明, 水生植物对废水中银的净化率, 在一定范围内与停留时间呈正相关。如凤眼莲放入废水中8h后, 水体中银浓度已由2.0ppm降至0.34ppm, 净化率为83.0%; 12h后, 水体中银浓度仅为 0.06ppm, 净化率已达97.0%。而对照组的含银量却降低得很少。同时还可看出, 净化并不是缓慢过程, 具有“快速”吸收的净化特性, 即开始吸收速度很快, 而后逐渐减慢, 最后失去净化作用。

因为水生植物的生长都要受到气温的影响。为了探索这一问题, 我们将喜温水生植物和耐寒水生植物在不同季节、不同气温下做了实验(见表2)。

试验在玻璃培养缸内进行, 条件仍按植物鲜重与含银废水重量之比为: 2:100。空白对照组, 废水银浓度为 2.0 ppm。结果表明: 喜温水生植物当气温低于20℃时, 其净化率仅达 60% 左右。而夏、秋季节(20—35℃)对银的净化率较高(见表1)。与凤眼莲对石油废水净化情况基本一致^[2]。但对耐寒水生植物来说, 情况不同, 如水芹菜和药芹等, 尽管气温在10℃左右, 其净化率仍达 90% 以上。

上述研究结果揭示, 水生植物的生长状况与净化率有关。在夏、秋季节, 许多喜温水生植物处于生长旺期, 吸收营养最多, 同时生物量也最大, 因而表现出较高的净化效率。然而到了深秋和冬季, 许多喜温水生植物已经处于衰老和死亡阶段, 新陈代谢作用显著减弱或停止, 自然会失去其净化效能。但是对于耐寒水生植物来说, 情况却相反, 冬季或春季节是其生长旺期, 需要吸收较多的营养物质, 因而表现出在寒冷季节对废水中污染物有较高的净化率(如水芹菜等)。因此, 我们认为可以充分利用这两项习性不同的水生植物对含银废水进行净化处理, 以解决冬季净化的问题。

2. 水生植物对银离子吸收后的释放现象

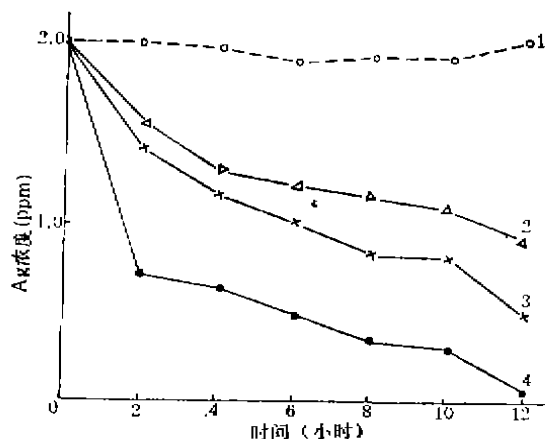


图 1 不同水生植物对废水中银的净化曲线

1. 对照 2. 喜旱莲子草 3. 水蓼 4. 凤眼莲

Fig.1 The purification curves of Silver In waste-water by means of the hydrophytes

表 2 喜温水生植物与耐寒水生植物对废水中银的净化率

Table 2 The purification rates of silver in waste-water by means of the hydrophytes of winter-resistance

水生植物名称	试验 气温 (℃)	试 验 银 浓 度 (ppm)	净 化 率 (%)		
			12 (h)	48 (h)	72 (h)
苦 草 <i>Vallisneria spiralis</i>	18—19	2.0	61.5	61.5	63.0
蔺 菜 <i>Brasenia schreberi</i>	18—19	2.0	60.5	61.0	64.5
伊 乐 藻 <i>Elodea nuttallii</i>	18—19	2.0	62.5	62.5	64.0
黑 藻 <i>Hydrilla verticillata</i>	18—19	2.0	60.5	61.0	60.5
水 芹 <i>Oenanthe javanica</i>	9—10	2.0	82.96	90.91	90.91
药 芹 <i>Apium graveolens</i>	9—10	2.0	76.15	89.21	81.78

由图2看出,水生植物对废水中银的吸收与净化,一般可分为三个阶段:第一是快速吸收与净化;第二是慢速吸收与净化;第三是释放作用。其中吸收与释放在实际作用过程中又是相对动态平衡。例如槐叶萍在6h内则表现出快速吸收与净化作用,其对水体中银的净化率达81.0%;在6—24h内则表现出对银的慢速吸收与净化作用,净化率由81.0%上升到95.0%;24h后,因植物体吸收了过多的银离子而受到银的毒害,出现中毒症状,脱根烂叶,开始下沉。这时被吸收的银离子逐渐向水体释放,致使水中银含量回升。由此可知,在利用水生植物净化水体时,一定要掌握重金属(银)对植物体的中毒剂量和适宜的净化时间,还需要对净化后的植物残体进行及时打捞,否则很容易造成水体的二次污染。

3. 水生植物对废水中银的富集

一般说来,水生植物对废水中银的富集

量根部最多,其次才是茎、叶和果实。就总体而言,其对银的富集能力是:沉水植物>飘浮和浮叶植物>挺水植物。这与水生植物对其它重金属元素(如Cu、Pb、Zn、Cd、Mo等)的富集规律相一致^[8-11](见表3)。虽然凤眼莲和水葫芦是飘浮植物,但是经专门培养后(控制营养盐),其根系相当发达,因而它们对银的净化和富集能力均超过其它水生植物。大多数水生植物的根部对废水中银的富集量都超过1000ppm(DM),均可达到目前我国贵稀金属冶炼厂对白银提炼和回收的实用标准(上海贵稀金属提炼厂白银废品回收品位标准是0.1%以上)。

由表4可以看出,凤眼莲在不同银浓度下的富集能力。试验条件:气温32.2—35℃,水温29.6—32.8, pH值6.5—7.0。将凤眼莲放在不同银浓度的试验玻璃缸中培养(含银废水15kg,凤眼莲鲜重0.3kg),曝露72h后,再取出测定其体内的含银量。

随着废水中银浓度的增加,凤眼莲体内的含银量则显著提高。当银浓度为8.0 ppm时,经72hr富集后,凤眼莲根部的含银量达7200ppm(DM)。水生植物在较高银浓度下有较高的富集量。但是当废水中离子态银(Ag^+)>1—2 ppm时,便对植物有明显的伤害作用。由此可知,水生植物对废水中银的净化及回收是有一定浓度范围的。

本项研究表明: 1. 水生植物对废水中银具有较强的净化能力和富集作用。一般规律是:沉水植物>飘浮和浮叶植物>挺水植物;而对银离子毒性的抗性能力则反之; 2. 喜温水生植物在气温20—35℃时,对废水中银有较好的净化和富集作用,而低于20℃时,其效果显著降低。但对于耐寒水生植物来说,尽管气温低于10℃,其净化率仍可达到90%以上。这说明,水生植物对废水中银的净化与其生长周期和新陈代谢有关; 3. 利用水生植物净化废水中银,必须注意植物残体的及时打捞,否则会造成水体的二次污染; 4. 据初步试验,水生植物在低浓度的含银废水中(2.0ppm左右),其根部对银的富集量大多数种类已达1000

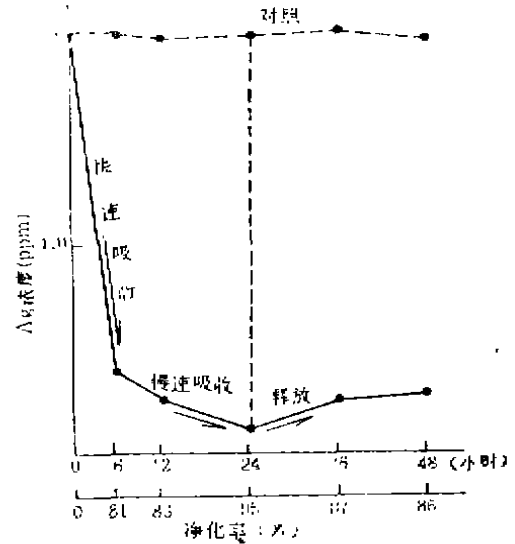


图2 槐叶萍对 Ag^+ 的吸收与释放

Fig.2 Absorption and releasing of *Salvinia natans* on Silver in waste-water

表 3 水生植物对废水中银的富集量(DM)

Table 3 The purification contents of silver in waste-water by means of hydrophytes(DM)

植物名称	分析部位	对 照 样 (ppm)	富 集 样 (ppm)	富 集 系 (F_x)	植物名称	分析部位	对 照 样 (ppm)	富 集 样 (ppm)	富集系数 (F_x)
菹 草	茎	1.81	358	178	喜旱莲子草	茎	1.28	48.3	23.5
	叶	2.73	846	421		叶	1.38	230	114
黑 藻	茎	8.23	968	479	紫 萍	全 株	10.8	1480	735
	叶	16.7	1490	737		全 株	0.78	933	466
狐尾藻	根	2.86	1089	543	芦 苇	根	0.88	3435	1717
	茎、叶	1.45	680	289		茎	0.38	47.2	23.4
苦 草	茎、叶	1.32	4832	2415		叶	0.38	2.86	1.26
荷 菜	根 部	10.8	2920	1455	藕	根	1.02	1471	735
	叶 柄	5.32	477	236		茎	0.62	52.3	25.8
	叶 片	2.74	860	120		叶	0.75	151	65
菱	水中根	2.87	2284	1141	菰 蒲	根	0.73	1070	535
	主 茎	1.84	258	128		叶	0.38	42.9	21.3
	叶 盘	1.19	470	234	早 苗 蓼	根	0.37	260	130
莼 菜	根	4.03	800	298		茎	0.95	52.4	25.7
	茎	1.45	250	124	水 蓼	叶	0.64	4.26	1.8
水 蕹菜	叶	1.45	700	349		根	22.8	2192	1085
	根	1.53	2670	1334	水 芹	茎	2.56	54.4	26.8
	茎	0.62	63.7	31.5		叶	3.01	200	98.5
水 鳖	叶	2.73	195	96	水 芹	根	10.74	1040	1028
	根	0.75	2059	1029		茎	5.58	50	44.4
	茎	1.94	1073	536		叶	12.55	259	248
水 鳖	叶	0.49	698	349					

试验条件同表 1 (试验银浓度 2.0ppm); $F_x = \frac{\text{富集量} - \text{对照量}}{\text{试验银浓度}}$

表 4 凤眼莲在不同银浓度下对银的富集量(DM)

Table 4 The purification contents of silver in different concentration by means of *Echhornia crassipes*(DM)

试验银浓度 (ppm)	测定部位	对 照 样 (ppm)	富 集 量 (ppm)	富集系数 (F_x)
1.0	根 部	27.4	1197	1170
	叶 柄	12.2	56.7	45
	叶 片	8.2	15.1	7.6
3.0	根 部	27.4	2570	847.5
	叶 柄	12.2	28.7	5.5
	叶 片	8.2	13.0	1.6
8.0	根 部	27.4	7200	896.6
	叶 柄	12.2	131	14.8
	叶 片	8.2	101	11.6

ppm(DM)以上, 凤眼莲在含银8.0ppm废水中, 最高富集量达7200ppm(DM)。这说明, 水生植物残体中的含银量已具备了提炼和回收价值。

参 考 文 献

- [1] 王恩伟, 1986, 摄影材料中银回收技术, 第1—201页, 四川科学技术出版社。
- [2] 吴振斌等, 1987, 凤眼莲净化燕山石油化工厂废水的研究(1.动态模拟试验), 水生生物学报 11(2):139—150。
- [3] 夏晓松等, 1987, 凤眼莲对染料色水脱色作用的初步研究, 环境科学学报 7(3):35—359。
- [4] 德永隆司, 1981, 关于利用水生植物防止水质污染的研究, 《用水と废水》 23(2):1—11。
- [5] 戴全裕, 1989, TMK-SLS光度法测定含银废水、水生植物及底泥中微量银, 环境监测管理技术 1(2):40—46。
- [6] 戴全裕, 1983, 水生高等植物对太湖重金属的监测及其评价, 环境科学学报 3(3):219—221。
- [7] 戴全裕, 1988, 凤眼莲对重金属的吸收与其喂食后二次富集状况的初步研究, 水产学报 12(2):135—144。
- [8] Woverton, B.C. et al, 1975, NASA, Tech. Memo., TM-X-72722.

STUDY OF THE PURIFICATION AND ACCUMULATION OF SILVER IN WASTE WATER BY AQUATIC PLANTS

Dai Quanyu

(Nanjing Institute of Geography and limnology, Academia Sinica)

Dai Wenning

(Department of Chemistry, Lanzhou University)

Lu Hong Gao Xiang

(Department of Biology, Nanjing Normal University)

The characteristics of purification and accumulation of silver in waste water by aquatic plants is dealt with in this paper, revealing the conditions where this process occurs. The results show that the different aquatic plant has different purification efficiency in the order: Submerged hydrophytes > Floating and Floating-leaved hydrophytes > Emergent hydrophytes, and the aquatic plants with developed root system > the aquatic plants with undeveloped root system, but their resistant ability to silver is, Emergent hydrophytes > Floating and Floating-leaved hydrophytes > Submerged hydrophytes.

The purification rates of silver in waste water by aquatic plants are 64.5—100% and the silver accumulated in aquatic plants was up to 260—7200 ppm in root, that is higher than in leaves and stems. Eichhornia crassipes, Ipomoea aquatica and Oenanthe javanica are proved to be better species to purify silver from waste water.

Key words: aquatic plants, silver, accumulation and purification.