

刚毛藻在半咸水中对汞的累积*

高玉荣

(中国科学院动物研究所, 北京, 100080)

提要 于1982年以刚毛藻为材料测定了其在汉沽污水库中对汞的累积量, 现场测定和室内试验结果表明: (1) 刚毛藻 (*Cladophora*) 对汞毒性的耐受力较强, 在1.0mg/L以下汞培养液中经48h生长正常; (2) 在汞浓度分别为0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0mg/L半咸水培养液中, 经48h刚毛藻汞含量由0.021mg/kg分别上升到60.0, 128.0, 240.0, 325.0, 420.0mg/kg, 其累积量随水环境中汞浓度的增加而增加; (3) 浓缩系数最高为 8×10^3 ; (4) 死藻积累汞的趋势与活藻近似, 惟程度差些; (5) 10g刚毛藻经48h使5L 0.2—5.0mg/L汞培养液平均去除率达72.3%; (6) 刚毛藻在半咸水中去汞能力略高于在淡水中。

刚毛藻 (*Cladophora*) 属丝状绿藻类, 适应能力强, 广泛分布于淡、咸水中, 汉沽污水库(除进水口外)一年四季均有生长, 尤其夏、秋季在库中部生长十分茂盛。

汉沽污水库总水面约2970000m², 平均水深约1.5m, 每天接纳含盐、含汞等化工废水约1.5万t, 是一个天然生物稳定塘。调查资料表明, 该库具有一定净化能力, 对汞的去除率达90%以上^[8], 大部分汞沉积于进水口附近的底泥中, 鱼体和刚毛藻也累积了大量的汞^[4,6]。本文着重研究刚毛藻在半咸水中对汞的累积规律, 进一步探讨生物对含汞、盐化工废水的净化机理, 为可能采取的对策提供依据。

一、材料与方 法

1. 现场测定

于1982年丰水期(6月)和枯水期(9月)在污水库进水口至出水口设七个站位(图1), 测定库水和刚毛藻的汞含量。

2. 室内试验

实验用藻采自污水库旁无汞污染的水沟中, 清水反复冲洗, 在室内于“水生18号”培养液^[9]中培养一周后待用。

试验设6个组, 在6个直径为32cm的搪瓷盆中, 分别加入预先配制好的浓度为0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0mg/L的氯化汞培养液5L, 再各加入NaCl, 使各组培养液氯化物浓度达2500mg/L, 近似污水库的半咸水条件。另设空白对照组。与此同时, 另配两组汞浓度为0.5和1.0mg/L的淡水培养液, 于上述各组中分别加入10g鲜藻。再配0.2和2.0mg/L两组汞培养液, 各加入煮沸10min的死藻10g。

* 此文为“六·五攻关”项目“天津市水资源合理利用与水污染综合防治研究”的子课题的部分内容。文稿经黄玉璠先生审阅, 谨致谢忱。

收稿日期: 1989年3月22日。

试验在自然光照条件下进行,水温在 16°C, pH 值为 7.8, 试验历时 48h。重复三批。每批试验分别在 0, 4, 8, 24, 48h 取试验藻和培养液测定汞含量。藻丝测定前用滤纸吸去表面水分。汞测定用硝酸-硫酸-五氧化二砷法消化,以 590 型测汞仪测定^[3]。

二、结果与讨论

1. 汉沽污水库刚毛藻对汞的累积能力

于 1982 年 6 月和 9 月分别测定了污水库 7—1 号站库水及刚毛藻的汞含量,计算了浓缩系数,见表 1, 图 2。

在 6 月,污水可以从进水口经库中心流至出水口,流程短,净化效果较差^[8],水中汞含量较高,变化在 0.00710—0.00017mg/L 之间。刚毛藻汞含量平均为 1.162mg/kg,最高达 2.650mg/kg;刚毛藻对水中汞的浓缩系数变化在 373—1496 之间。

在 9 月,污水的大部分沿东边的沟流至出水口,流程长,净化效果较好^[8],库中汞含量较低,但刚毛藻对汞的累积量却相当高,平均为 3.17mg/kg,最高达 7.12mg/kg,浓缩系

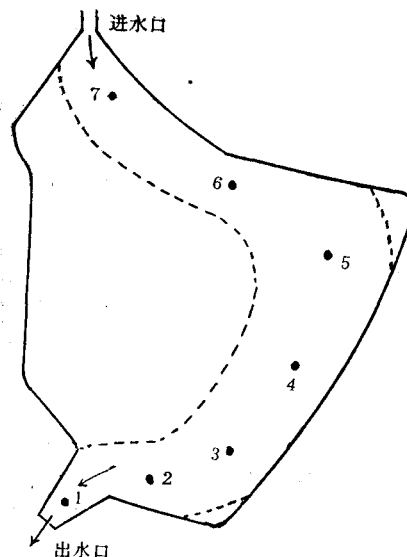


图 1 汉沽污水库取样站位

Fig. 1 Sampling stations in Hangu Sewage Lagoon

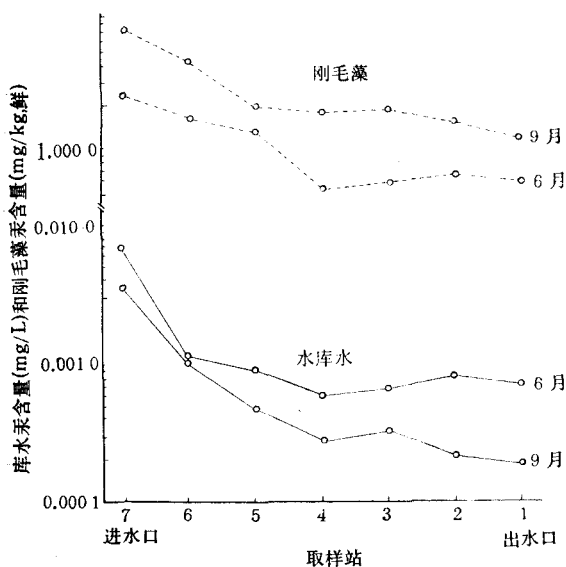


图 2 汉沽污水库中不同取样站水和刚毛藻的汞含量
Fig. 2 Mercury contents in water and *Cladophora* at different sampling sites in Hangu Sewage Lagoon in June and Sep., 1982

数变化在 1924—7904 之间,比丰水期约高一个数量级。这表明,刚毛藻对汞的累积随生长时间的延长而上升。

在不同站位的刚毛藻和库水汞含量变化的曲线表明,刚毛藻对汞的累积量随水环境中汞含量的上升而上升,这与文献[9],[10]报道结果相一致。浓缩系数变化则相反,随水环境中汞的浓度的增加而降低,在海藻对汞的累积试验中也有类似情况^[1],这是由于高浓度汞对藻细胞膜造成损伤以至藻死亡,致使浓缩系数降低。

刚毛藻累积汞的能力较强,在污水库中最高累积量达 7.12mg/kg,浓缩系数最高达 8×10^3 ,高于蓟运河浮游植物对汞的浓缩系数 (6×10^2)^[7],与海洋硅藻对汞的浓缩系数 (10^3) 属于同一数量级^[7]。污水库中虽有丰富

表 1 汉沽污水库中刚毛藻对汞的浓缩系数

Tab. 1 The concentration factors of mercury in *Cladophora* in Hangu Sewage Lagoon

| 日期 | 进水口 | | | | | | 出水口 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | |
| 6 月 | 373 | 1 496 | 1 478 | 847 | 816 | 780 | 867 |
| 9 月 | 1 924 | 4 076 | 4 375 | 6 344 | 5 939 | 7 904 | 6 578 |

的浮游生物和微生物,但生物量最大的是刚毛藻,尤其在秋季的5—1五个站几乎长满水库中下层,最高生物量可达 $1800\text{g}/\text{m}^2$,污水流经刚毛藻高密度的生长区,变得清澈见底,此时水质分析结果也表明净化效果极佳^[8],并且刚毛藻放出大量氧气于水中,为好氧细菌的分解活动提供充足能源。因此,可以认为,刚毛藻在污水库中对汞的累积和转移起着重要作用。

2. 刚毛藻对汞的累积和去除试验

(1) 刚毛藻对汞的累积 在不同汞浓度组,刚毛藻生长状况不同:在 $1.0\text{mg}/\text{L}$ 以下汞浓度组,48h后藻丝仍保持原来的绿色;在 2.0 和 $5.0\text{mg}/\text{L}$ 汞浓度组,24h后,少量藻丝出现黄绿色,48h后多数藻丝呈黄绿色,约 $1/3$ 的藻丝变得枯黄;在 $10.0\text{mg}/\text{L}$ 汞浓度组,试验开始2h全部藻丝变得枯黄,中毒死亡。

从图3刚毛藻在0,4,8,24,48h的汞含量变化看出,不论培养液中汞的起始浓度如何,藻丝对汞的累积在最初8h均最快,与文献[13]报道类似,尤其在最初4h,近乎直线上升,由原来 $0.021\text{mg}/\text{kg}$ 上升了几万倍,最高含量达 $316.0\text{mg}/\text{kg}$;8h后,各浓度组汞含量上升均缓慢,尤其在24—48h这段时间内上升极慢。在 $0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ 五个浓度组

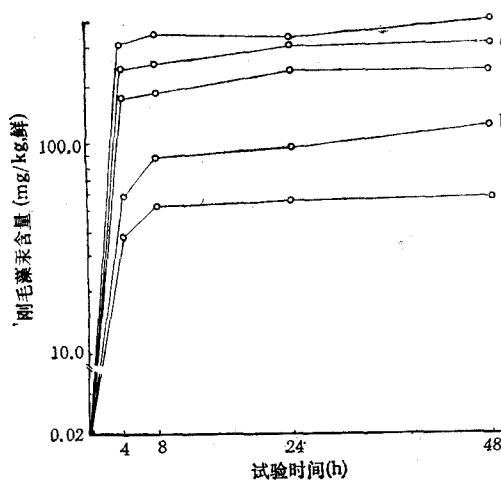


图 3 不同汞浓度培养液中刚毛藻的汞含量
Fig. 3 Mercury contents accumulated by *Cladophora* in different mercury culture solutions
a. $0.2\text{mg}/\text{L}$ 组; b. $0.5\text{mg}/\text{L}$ 组; c. $1.0\text{mg}/\text{L}$ 组; d. $2.0\text{mg}/\text{L}$ 组; e. $5.0\text{mg}/\text{L}$ 组。图 4 同。

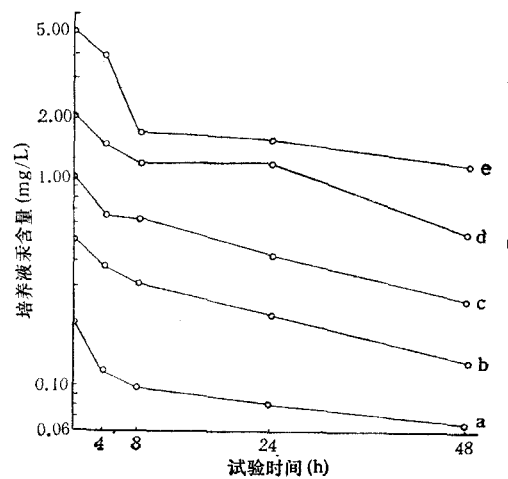


图 4 不同汞浓度培养液 48h 汞含量的变化与刚毛藻累积汞的关系
Fig. 4 Relationship between mercury contents in different mercury culture solutions and mercury contents accumulated by *Cladophora* in 48h

经 48h 藻丝汞含量分别达 60.0, 128.0, 240.0, 325.0, 420.0mg/kg, 最高上升 2 万倍; 其浓缩系数分别为 300, 256, 240, 162, 84。可以看出, 刚毛藻在半咸水中能迅速有效地累积汞, 在试验浓度范围内, 其积累量随培养液中汞浓度的增加而增加; 浓缩系数则随培养液中汞浓度的增加而降低: 这与污水库现场测定结果一致。

(2) 刚毛藻的除汞作用 从图 4 看出, 各浓度组培养液中汞含量的变化曲线与藻丝累积曲线相对应, 前 8h 下降快, 其中前 4h 最快, 其去除量约占总去除量的 1/3 以上; 8h 以后下降缓慢, 24—48h 下降极慢。

从表 2 五个浓度组汞的去除情况看出, 汞的去除量随培养液汞浓度的增加而增加, 还随试验时间的延长而增加, 经 48h 基本平衡, 五个浓度组汞的去除率在 67.0—76.8% 之间, 平均为 72.3%。汞的去除率受培养液汞浓度高低影响不太明显, 只是在试验时间内, 随试验时间的延长去除率不断上升。

表 2 不同汞浓度培养液中刚毛藻在不同时间内对汞的去除量 (mg/L) 和去除率 (%)

Tab. 2 The removed amounts (mg/L) and rates (%) of mercury of *Cladophora* in different mercury culture solutions for different times

| 试验组 (mg/L) | 4h | | 8h | | 24h | | 48h | |
|---------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | 去除量 | 去除率 | 去除量 | 去除率 | 去除量 | 去除率 | 去除量 | 去除率 |
| 0.2 | 0.088 | 43.7 | 0.106 | 53.0 | 0.120 | 60.0 | 0.134 | 67.0 |
| 0.5 | 0.120 | 24.0 | 0.180 | 36.0 | 0.280 | 56.0 | 0.362 | 72.4 |
| 1.0 | 0.345 | 34.5 | 0.370 | 37.0 | 0.592 | 59.2 | 0.732 | 73.2 |
| 2.0 | 0.533 | 26.7 | 0.840 | 42.0 | 0.825 | 41.0 | 1.444 | 72.2 |
| 5.0 | 1.160 | 23.2 | 3.400 | 68.0 | 3.500 | 70.0 | 3.840 | 76.6 |

经 48h 试验后, 藻丝汞含量与培养液中汞残留量之和远远小于汞的加入量, 这说明汞的去除中“丢失”是不可忽视的因素。从表 3 五个浓度组汞的“丢失”量看出, 随培养液中汞浓度的增加, “丢失”量也增加, 容器壁吸附是“丢失”的一项重要因素。Fujita 试验表明, 容器壁吸附作用在试验开始 10h 达到平衡^[33], 而我们的试验整个过程均有“丢失”。用 Ben-Bassat 的观点来解释我们的试验现象较为合理, 他认为, 由于藻类的生物学作用, 使汞变为易挥发的和渗透性不强的形态, 或变为与细胞亲和力较差的形态, 脱离了该系统^[11]。

表 3 经 48h 后 5L 汞培养液中汞的“丢失”量

Tab. 3 The “lose” amount of mercury in 5L mercury solution after 48h

| 浓度组 (mg/L) | 0.2 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 5.0 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| “丢失”量 (mg/L) | 0.068 | 0.530 | 1.262 | 3.970 | 15.000 |

3. 刚毛藻在半咸水和淡水中对汞的累积能力比较

测定不加 NaCl 的 0.5 和 1.0mg/L 两个浓度组藻丝及其培养液在 0, 4, 8, 24, 48h 的汞含量, 结果表明, 淡水中刚毛藻对汞的累积能力也较好, 经 48h 其汞含量分别达 128.0mg/kg 和 228.0mg/kg, 汞的去除率分别为 72.4% 和 59.5%。与半咸水相对应的浓度组比较, 规律基本一致(图 5), 只是在半咸水中去汞和积累汞的能力略高些, 经 48h, 在半咸水中的藻丝比同浓度淡水中的分别多累积 20.0mg/kg 和 12.0mg/kg, 分别多去除 59.0mg/L 和 133.0mg/L。试验中, 影响汞累积的温度、pH 等因素相同, 氯化物的存在使

汞的毒性降低^[14],有助于汞的累积与去除。

4. 死藻与活藻对汞的累积能力比较

从测定 0.2mg/L 和 2.0mg/L 两浓度组死藻及其培养液的汞含量结果看出,死藻同样有累积汞的能力,经 48h,两浓度组藻丝汞含量分别达 52.6mg/kg 和 296.0mg/kg,去除率分别为 58.1% 和 54.7%,同淡水硅藻对汞、衣藻和裸腹蚤(均为死体)对六六六的累积结果一致^[2,12,13]。由于汞具有较高的脂溶性并与蛋白质的硫氢基亲和力强,导致了死体的累积。但与相对应浓度的活藻比较(图 5),经 48h 后,死藻比活藻分别少累积 7.4mg/kg 和 29.0mg/kg,分别少去除 0.017mg/L 和 0.350mg/L,但其规律基本一致,死藻累积能力略低于活藻,但相差不太悬殊,这表明刚毛藻对汞的被动吸附大于主动吸收。Ben-Bassat 用 ²⁰³Hg 试验发现只有 2—2.5% 的汞出现在细胞内^[14],由此看出藻类对汞的累积作用,表面吸附是主要的。

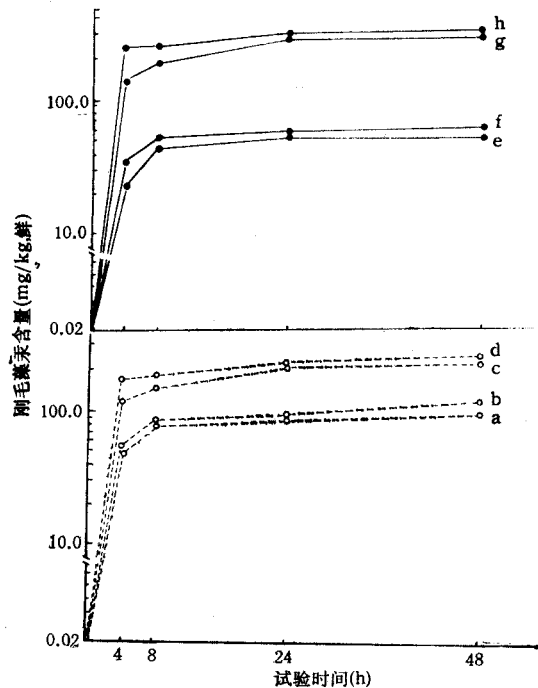


图 5 刚毛藻在不同汞浓度的半咸水、淡水中,以及死藻、活藻在不同汞浓度的培养液中的汞含量比较

Fig. 5 Comparison of mercury contents accumulated by *Cladophora* in brackish waste water and freshwater of different mercury concentrations, and dead and living algae in different mercury culture solutions
a, c 分别为汞浓度为 0.5mg/L 和 1.0mg/L 淡水组; b, d 分别为汞浓度为 0.5mg/L 和 1.0mg/L 半咸水组; e, g 分别为汞浓度为 0.2mg/L 和 2.0mg/L 死藻组; f, h 分别为汞浓度为 0.2mg/L 和 2.0mg/L 活藻组。

三、小 结

刚毛藻对汞累积的现场测定和室内试验结果如下:

刚毛藻对汞耐受力强,在 1.0mg/L 以下汞培养液中,经 48h,生长正常;2.0mg/L 以上汞培养液中,经 48h,藻丝出现中毒症状。

刚毛藻在半咸水中对汞累积能力较强,在污水库自然条件下,最高累积量达 7.12mg/kg,浓缩系数最高为 8×10^3 ;室内试验条件下,在 0.2,0.5,1.0,2.0,5.0mg/L 汞培养液中,经 48h,汞累积量分别达 60.0,128.0,240.0,325.0,420.0mg/kg,最高上升 20 000 倍,浓缩系数最高为 3×10^2 ;在忍受限度内,随水环境汞浓度的增加,累积量增加,浓缩系数降低。

刚毛藻去汞能力较强,在半咸水中,10g 鲜藻经 48h 能使 5L 0.2—5.0mg/L 培养液中汞平均去除 72.3%,汞的去除量随培养液中汞浓度的增加而增加。在半咸水中去除汞的能力略高于淡水中。

死藻也有累积和去除汞的能力,其规律与活藻近似,累积量略低于活藻,表明藻类对汞的累积作用被动吸附大于主动吸收。

参 考 文 献

- [1] 肖余生,1984。不同浓度的汞对三角褐指藻的生长及累积、排除 ^{203}Hg 的影响。海洋科学 2: 25—27。
- [2] 张甬元、谭谕云、孙美娟、张进军,1980。氧化塘净化有机氯农药废水机理的研究。环境科学 2: 8—14。
- [3] 环境污染分析方法编辑组,1980。环境污染分析方法。科学出版社,105—113 页。
- [4] 赵忠宪、滕德兴、仪垂贵,1986。汉沽污水库养鱼试验研究。生态学报 6(2): 171—177。
- [5] 修瑞琴、高世荣、李连元,1982。海洋生物对甲基汞的富集作用的研究。环境科学 3(5): 36—38。
- [6] 高玉荣,1983。利用丝状绿藻监测汉沽污水库汞的净化能力的研究。环境科学丛刊 4(10): 23—26。
- [7] 黄玉瑶、赵忠宪、仪垂贵,1984。汞、DDT、六六六在蓟运河河口生态系统中的迁移、累积与循环。环境科学学报 4(1): 57—64。
- [8] 黄玉瑶、滕德兴、高玉荣等,1984。汉沽污水库自净能力的初步研究。全国水生态及环境微生物学术会议论文集。科学出版社,72—93 页。
- [9] 湖北水生生物研究所藻类应用组,1976。利用丝状绿藻处理含汞污水的试验。水生生物学集刊 6(1): 67—73。
- [10] Anil, K. De, 1985. Studies of toxic effects of Hg on *Pistia stratiotes*. *Water, Air and Soil Pollut.* 24(4): 351—360.
- [11] Ben-Bassat, D., Gedalia Shelef, Nachman Gruner, et al., 1972. Growth of *Chlamydomonas* in a medium containing mercury. *Nature* 240(3): 43—44.
- [12] Canton, I. H., G. I. Van Esch, P. A. Greve and A. B. A. M. Van Hellemond, 1977. Accumulation and elimination of $\alpha\text{-HCH}$ by the marine algae *Chlamydomonas* and *Dunaliella*. *Water Research* 11(1): 111—115.
- [13] Fujita M, and Kenichiro Hashizume, 1975. Status of uptake of mercury by the fresh water diatom, *Synedra ulna*. *Water Research* 9(10): 889—894.
- [14] Hannan, P. J. and C. Patouillet, 1979. Analgal toxicity test and evaluation of adsorption effect. *J. Water Pollution Control Federation* 51(4): 834—840.

ACCUMULATION OF MERCURY BY *CLADOPHORA* SP. IN BRACKISH WASTE WATER

Gao Yurong

(Institute of Zoology, Academia Sinica, Beijing, 100080)

ABSTRACT

The silklike green algae *Cladophora* sp., a dominant species in Hangu Sewage Lagoon, is able in our experiment to accumulate and remove mercury from brackish waste water, and can still grow well even under 1.0 mg/L of mercury in water. But poisoning symptom appears when the concentrations are higher than 2.0 mg/L for 48 h.

The mercury can be quickly accumulated by *Cladophora* sp. from the brackish waste water when fresh algae are exposed to concentrations of 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mg/L of mercury. After 48 h exposure, the contents of mercury in algae are increased from initiated 0.021 mg/kg to final 60.0, 128.0, 240.0, 325.0 and 420.0 mg/kg, respectively. The biological accumulation factor of mercury in *Cladophora* sp. is 8×10^8 in brackish waste water.

The average removal rate of mercury from culture solution by *Cladophora* sp. is 72.3% under experimental condition, however the removal of mercury is increased with the increase of culture solution.

The ability of accumulation and removal of mercury by *Cladophora* sp. in brackish water is higher than solution.

The dead algae have also ability to remove mercury from brackish waste water, even though it is little lower than that of living one. This result indicates that the mercury accumulation in *Cladophora* sp. is mainly through adsorption.