

# 汞对固定化斜生栅藻净化污水及其生理特征的影响\*

严国安 李益健 张忠新\*\* 胡玉波\*\* 王志坚\*\*

(武汉大学环境科学系, 武汉 430072)

**【摘要】** 研究了在不同 Hg 浓度条件下, 固定化斜生栅藻对污水中氨氮、正磷酸盐和 Hg 的净化效率及其生理特征变化。结果表明, 固定藻的净化效率和对 Hg 毒性的抗性明显高于悬浮藻。0.2mg·L<sup>-1</sup>Hg 对固定藻的净化效率无影响, 并对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的吸收有刺激促进作用, 而悬浮藻的开始下降; 从 0.8—1.4mg·L<sup>-1</sup>, 随着 Hg 浓度的增加, 固定藻对氨氮和正磷酸盐的净化效率逐渐下降, 而悬浮藻的则急剧下降; 固定藻对汞的去除随汞浓度的增加而增加。同时, 固定藻的生长 OD 值、叶绿素含量、光合强度和过氧化物酶活性亦随汞浓度的增加而逐渐下降。

**关键词** 汞 净化污水 固定化斜生栅藻 生理特征

**Effect of mercury on sewage purification of immobilized *Scenedesmus obliquus* and its physiological characteristics.** Yan Guoan, Li Yijian, Zhang Zhongxin, Hu Yubo and Wang Zhijian (Wuhan University, Wuhan 430072). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 1995, 6(3): 323—328.

The NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P and Hg<sup>2+</sup> purification efficiency of immobilized *Scenedesmus obliquus* and its physiological characteristics are studied under different mercury concentrations. The results show that the purification efficiency of immobilized algae and their resistance to Hg toxicity are much higher than those of suspended ones. Under the concentration of 0.2mg·L<sup>-1</sup> Hg<sup>2+</sup>, there is no effect on purification efficiency of immobilized algae, but that of suspended one becomes decreasing. From 0.8 to 1.4mg·L<sup>-1</sup> Hg<sup>2+</sup>, the NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P purification efficiency of immobilized algae is decreased with increasing Hg concentration, and that of suspended one is decreased sharply. The removal rate of Hg<sup>2+</sup> by immobilized algae is increased with increasing Hg<sup>2+</sup> concentration, but their OD value for growth, chlorophyll a content, photosynthetic intensity and peroxidase activity are decreased.

**Key words** Mercury, Sewage purification, Immobilized *Scenedesmus obliquus*, Physiological characteristics.

## 1 引言

近十几年来, 固定化细胞污水处理新技术成为各国学者研究的热点, 其中固定化藻类细胞对污水的净化, 国外学者作过一些有益的尝试<sup>[6,10,12]</sup>。藻类固定化后对藻类生理代谢影响和利用固定化藻类进行毒性试验的研究也有报导<sup>[4,5,7,8]</sup>。本研究旨在

在人工配制的含不同浓度 Hg 的污水中, 固定化斜生栅藻对 N、P 和 Hg 的净化效率, 并与其生理特征的变化结合起来, 力图初步揭示其净化机理, 为深入研究和应用提供科学依据。

\* 国家自然科学基金资助项目。

\*\* 张忠新、胡玉波、王志坚为该校 88 级学生。  
1993 年 6 月 3 日收到, 1994 年 4 月 22 日改回。

2 材料与方法

斜生栅藻(*Scenedesums obliquus*)由中国科学院水生生物研究所淡水藻种库提供. 固定化所用载体为褐藻酸钠(分析纯). 人工配制污水的配方如下:  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.8g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.2g,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.2g,  $\text{KNO}_3$  0.1g,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.1g,  $\text{FeCl}_3$  痕量, 水 3000ml. 再根据实验要求加入适量的  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ , 配制成为含 0、0.2、0.8、1.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度的污水.

固定化方法是将藻种离心浓缩后, 弃去上清液, 再与 4% 的褐藻酸钠混合均匀, 用滴管吸取滴在 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  预冷的  $\text{CaCl}_2$  溶液中即成褐藻酸钙凝胶藻珠, 静置 2h 后取出, 用生理盐水及培养液洗涤. 制成的藻珠直径约为 4mm, 每个藻珠中含藻细胞约  $10^6$  个. 对固定化栅藻生理特征进行测定时, 需先进行脱固定. 脱固定化方法是将藻珠放入三角瓶中, 加入适量的 1.5% 柠檬酸钠, 摇动直至藻珠完全溶解<sup>[4,10]</sup>.

表 1 不同 Hg 浓度下斜生栅藻对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的净化( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 1  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  purification efficiency of suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus* at different concentrations of mercury

时 间 Time (d)	固定藻 Immobilized algae				悬浮藻 Suspended algae			
	0	0.2	0.8	1.4	0	0.2	0.8	1.4
0	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8
1	23.8	23.0	24.8	25.6	30.1	30.6	31.5	32.3
2	18.2	17.6	19.0	20.6	24.6	28.8	30.4	31.9
3	14.6	12.9	15.2	16.3	19.6	25.9	27.9	28.4
5	7.0	7.6	8.0	9.4	18.9	20.9	26.0	28.6
去除率(%) Removal rate	78.7	76.8	75.6	71.3	43.0	36.3	20.7	12.8

表 2 不同 Hg 浓度下斜生栅藻对  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 2  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  purification efficiency of suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus* at different concentrations of mercury

时 间 Time (d)	固定藻 Immobilized algae				悬浮藻 Suspended algae			
	0	0.2	0.8	1.4	0	0.2	0.8	1.4
0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
1	7.2	7.8	8.1	8.9	9.3	9.8	10.4	10.9
2	3.5	3.5	4.2	5.0	5.8	6.1	8.8	11.0
3	2.3	1.5	2.5	3.1	3.6	4.0	7.2	10.5
5	1.9	1.2	2.0	2.6	3.0	3.1	6.0	8.0
去除率(%) Removal rate	82.7	89.1	81.8	76.4	72.7	71.8	45.5	27.3

将藻种接入 knop 液体培养基中培养 10 天后, 均分为 2 份, 1 份进行包埋固定, 1 份保持悬浮状态. 固定后的藻珠再均分为 4 小份, 分别放入含有 0、0.2、0.8、1.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Hg 浓度污水的 4 个锥形瓶内. 将悬浮藻也分为 4 小份, 分别倒入另 4 个装有相同 Hg 浓度梯度污水的锥形瓶内. 每瓶盛有污水 400ml. 然后将锥形瓶置于光照培养箱中, 温度控制在  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , 光照由 12W 日光灯提供, 光强 2400Lx. 每隔 2—4h 轻轻摇动 1 次. 每天定时测定污水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和  $\text{Hg}^{2+}$  浓度及藻类的生长、叶绿素 a 含量、光合作用强度和过氧化物酶活性.  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的测定采用纳氏比色法,  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  采用钼-锑-抗分光光度法,  $\text{Hg}^{2+}$  采用双硫脲法<sup>[1]</sup>. 藻类的生长以藻类在 660nm 波长下的光密度(OD 值)表示, 用碘量法测定污水中溶解氧, 根据溶解氧的变化来计算光合强度, 用分光光度法测定叶绿素 a 含量和过氧化物酶活性<sup>[2]</sup>.

3 结果与讨论

3.1 Hg 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  净化效率影响

由表 1、2 可知,固定化斜生栅藻对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化效率明显高于悬浮藻。 $\text{Hg}^{2+}$  对两种状态的斜生栅藻表现出不同程度的影响。当  $\text{Hg}^{2+}$  浓度为  $0.2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,固定化斜生栅藻对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化效率与无  $\text{Hg}$  污水中的净化效率基本相同,对  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的去除率较高。悬浮态斜生栅藻对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除较无  $\text{Hg}^{2+}$  污水中的稍低一些,对  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的去除与无  $\text{Hg}^{2+}$  污水中的去除基本相同,说明  $0.2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{Hg}^{2+}$  对固定化斜生栅藻的净化效率无影响,并对其吸收  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  有一定的刺激促进作用,而对悬浮态斜生栅藻有一定的影响。

当  $\text{Hg}^{2+}$  浓度为  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,固定化斜生栅藻的净化效率无明显变化,而悬浮态的净化效率大大下降,说明  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{Hg}$  对悬浮态斜生栅藻产生强烈的抑制作用。当  $\text{Hg}^{2+}$  浓度为  $1.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,固定化斜生栅藻开始受影响,其净化效率出现下降,而悬浮态的净化效率却急剧下降。

由此可见,斜生栅藻的固定化不仅极

大地提高了对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化效率,而且由于载体凝胶保护藻细胞免受  $\text{Hg}^{2+}$  毒性的伤害<sup>[7]</sup>,也提高了对  $\text{Hg}^{2+}$  的毒性抗性,使固定化斜生栅藻在  $1.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Hg}^{2+}$  浓度下仍具较高的净化效率,表现为轻微的抑制影响,但悬浮态斜生栅藻在  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Hg}^{2+}$  浓度下净化效率已大大下降,表现为严重伤害。因此,固定化斜生栅藻对净化处理含较高浓度毒物的污水具有更高的应用价值和更广阔的应用前景。

### 3.2 斜生栅藻对 $\text{Hg}^{2+}$ 的净化效率

固定化斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率明显高于悬浮藻。污水中所含  $\text{Hg}^{2+}$  的浓度大小对于两种状态的斜生栅藻的去除率有一定影响(表 3)。

随着污水中  $\text{Hg}^{2+}$  浓度负荷增加,固定化斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除有所增加,由于  $1.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Hg}^{2+}$  对固定藻产生影响,尽管  $\text{Hg}^{2+}$  负荷较高,其去除率与  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时相同;而悬浮态斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除逐渐下降,因为  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Hg}^{2+}$  已对其产生严重伤害。许多学者对藻类细胞去除重金

表 3 不同  $\text{Hg}^{2+}$  浓度下斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除 ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 3 Removal of mercury from sewage by suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus* at different concentrations of mercury

时 间 Time (d)	固定藻 Immobilized algae			悬浮藻 Suspended algae		
	200	800	1400	0	800	1400
1	46.0	155.0	210.1	148.0	201.0	316.0
2	14.2	56.0	93.0	61.0	161.0	364.0
3	6.1	33.1	46.6	47.7	148.3	350.8
5	7.1	18.0	30.8	34.7	154.7	340.2
去除率(%)	96.5	97.8	97.8	82.6	80.7	75.7
Removal(rate)						

属的动力学研究表明<sup>[3,9,11]</sup>,藻类细胞对重金属的去除过程分为 2 个阶段,第 1 阶段为被动的物理吸附和细胞表面的离子交换,时间短而速度快;第 2 阶段为重金属通过细胞膜向细胞内主动转运富集,速度较慢。从表 3 可知,固定化斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除效率主要集中在开始的 1-2 天,说

明固定化斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除过程与悬浮藻是一致的,主要依赖藻细胞的被动吸附。即使是死亡的细胞对重金属也具有很强的吸附作用<sup>[9]</sup>,虽然  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上浓度的  $\text{Hg}^{2+}$  对悬浮藻产生严重伤害,悬浮藻仍表现为较高的去除率。

固定化斜生栅藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率较

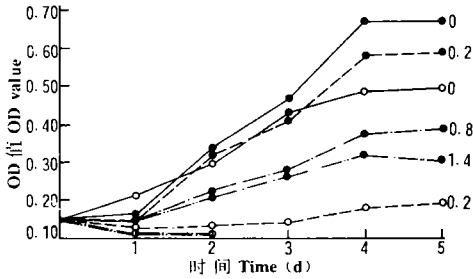


图1 斜生栅藻在不同 Hg 浓度污水中的生长曲线  
Fig. 1 Growth curves of suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus* at different mercury concentrations.  
— 固定藻 Immobilized algae, ---- 悬浮藻 Suspended algae. (下同).

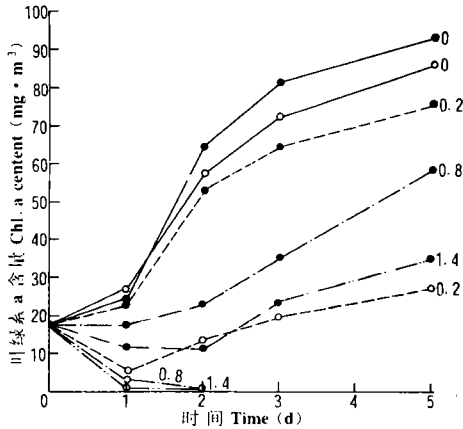


图2 不同 Hg 浓度对斜生栅藻叶绿素 a 含量的影响  
Fig. 2 Effect of different mercury concentrations on chl. a content of suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus*.

悬浮藻高的主要原因,除了由于固定化对斜生栅藻产生物理和生理的影响,促进藻细胞对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除外,载体本身也有吸附作用. Wilkinson 等<sup>[12]</sup>利用褐藻酸钙凝胶固定普通小球藻去除  $\text{Hg}^{2+}$  的研究表明,总的去除效率中藻细胞的吸收占 70%,藻细胞代谢活动引起  $\text{Hg}^{2+}$  的挥发约占 20% (最高可达 40%),载体凝胶的吸附约占 10%. 就本实验结果看,如果扣除载体吸附 10%,固定藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率比悬浮藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率,在 0.2、0.8 和 1.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Hg}^{2+}$  浓度下要分别高 4.25、7.32 和 12.32%. 由此可见,  $\text{Hg}^{2+}$  浓度越高的污

水,固定化斜生栅藻的净化效果愈是明显.

### 3.3 $\text{Hg}^{2+}$ 对斜生栅藻生长、叶绿素 a 含量、光合强度和过氧化物酶活性的影响

从图 1—4 可知,在净化实验的第 1 天,无  $\text{Hg}^{2+}$  污水中,固定化斜生栅藻的生长 OD 值、叶绿素 a 含量、光合强度和过氧化物酶活性略低于悬浮藻,这是由于固定的初期,藻细胞微环境的改变对其有一“伤害期”或适应期<sup>[4]</sup>. 适应期之后,除过氧化物酶活性外固定藻的其它特征均高于悬浮藻. 而在  $\text{Hg}^{2+}$  浓度为 0.2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上污

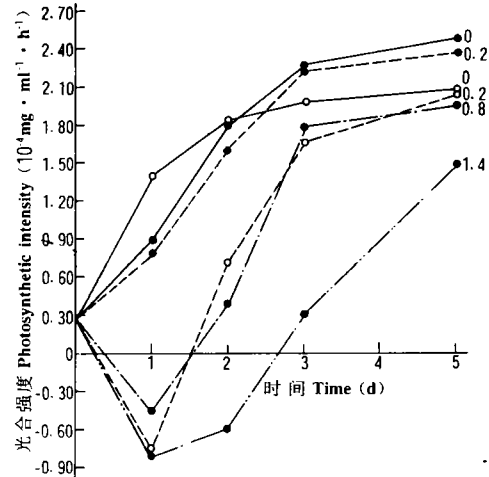


图3 不同 Hg 浓度对斜生栅藻光合强度的影响  
Fig. 3 Effect of different mercury concentrations on photosynthetic intensity of suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus*.

水中,固定藻虽有适应期,但其生长 OD 值、叶绿素 a 含量、光合强度和过氧化物酶活性始终高于悬浮藻,并随着  $\text{Hg}^{2+}$  浓度增大,相差越大,说明 0.2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Hg}^{2+}$  已开始对悬浮藻产生抑制和伤害,并随  $\text{Hg}^{2+}$  浓度增大伤害愈趋严重,乃至死亡.

从计算藻细胞生长的数目来看,固定化藻类的生长速度低于悬浮藻细胞<sup>[4]</sup>. 固定化藻类叶绿素 a 含量高于悬浮藻细胞可能是由于自我遮暗和在固定化状态下入射光的减少而促使光合色素的合成<sup>[4,7]</sup>. 因此,图 1 所示固定化斜生栅藻的 OD 值较

悬浮藻高并不表示其生长速度快,但可间接表明其综合生理活性高于悬浮藻(图2

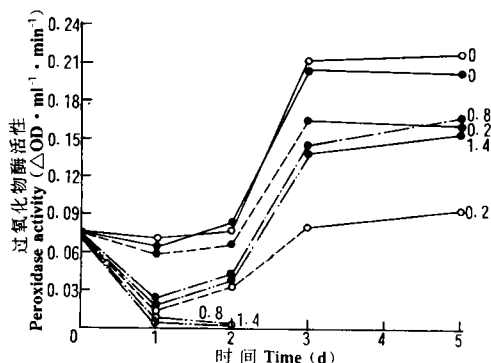


图4 不同Hg浓度对斜生栅藻过氧化物酶活性的影响  
Fig. 4 Effect of different mercury concentrations on peroxidase activity of suspended and immobilized *Scenedesmus obliquus*.

—4)。随着污水中  $\text{Hg}^{2+}$  浓度的增加(0— $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),固定藻和悬浮藻的叶绿素 a 含量、光合强度和过氧化物酶活性也随之降低,在 0.8 和  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下,悬浮态斜生栅藻在净化作用的第 2 天,其中叶绿素 a 已分解,光合作用停止,过氧化物酶失活,说明 0.8 和  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度对悬浮藻的严重伤害致死作用,但固定化斜生栅藻仍保持一定的生理活性。Bailliez 等<sup>[4]</sup>曾证明固定化能增加藻细胞蛋白质-叶绿素复合物的稳定性。

从两种状态的斜生栅藻的生理活性随时间的变化来看,在净化实验静态停留的第 1 天,0.8 和  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下固定藻及  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下的悬浮藻的叶绿素 a 含量和光合强度均较起始时的低,以后随时间逐渐增加。而在 0 和  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下的固定藻和无  $\text{Hg}^{2+}$  条件下的悬浮藻的叶绿素 a 含量和光合强度从开始就随时间而增加。净化作用的第 5 天,  $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下固定藻的光合强度略低于无  $\text{Hg}^{2+}$  条件下的悬浮藻,  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下固定藻的光合强度低于无  $\text{Hg}^{2+}$  和  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下的悬浮

藻。由此可以认为,  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  对固定化斜生栅藻已产生抑制作用,其抑制强度高于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  对悬浮态斜生栅藻的抑制强度,同时,  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  对固定化斜生栅藻可能也产生轻微的影响,这一结果与固定藻对含不同  $\text{Hg}^{2+}$  浓度污水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化效率是一致的。但不能解释 0.8 和  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  条件下固定藻的净化效率均高于无  $\text{Hg}^{2+}$  条件下的悬浮藻,可能与固定化所用载体有关,一方面是载体本身对 N 和 P 的吸附,另一方面是载体可促进 N、P 的运输,加速藻细胞的吸收去除。这一点有待深入研究。

## 4 结 论

4.1 固定化斜生栅藻对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和  $\text{Hg}^{2+}$  的净化效率明显高于悬浮态斜生栅藻。污水中  $\text{Hg}^{2+}$  对其净化效率也有明显影响。 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度的  $\text{Hg}^{2+}$  对固定藻  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化效率无影响,而悬浮藻的开始下降;从 0.8— $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,随着  $\text{Hg}^{2+}$  浓度的增加,固定藻对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的净化效率逐渐下降,而悬浮藻的则急剧下降。从 0.2— $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,随着  $\text{Hg}^{2+}$  浓度负荷增加,固定藻对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除也增加,而悬浮藻却随之下降。固定藻对 Hg 的去除规律与悬浮藻的一致,去除效果主要集中在净化作用开始时的 1—2 天,其去除的机理主要靠被动吸附来完成,即使 0.8 和  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  浓度下,悬浮藻伤害致死,但仍具较高的  $\text{Hg}^{2+}$  去除效率。

4.2 随着  $\text{Hg}^{2+}$  浓度的增加,固定化斜生栅藻的生长 OD、叶绿素 a 含量、光合强度和过氧化物酶活性逐渐下降,而悬浮藻下降幅度更大。 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  对悬浮藻的生理产生抑制,但对固定藻无影响;0.8 和  $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Hg}^{2+}$  对悬浮藻严重伤害致死,

而  $0.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{Hg}^{2+}$  仅对固定藻有轻微抑制,  $1.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{Hg}^{2+}$  对固定藻的抑制程度较  $0.2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{Hg}^{2+}$  对悬浮藻的抑制要强。不同浓度的  $\text{Hg}^{2+}$  对固定藻净化效率的影响与对固定藻光合强度的影响是一致的。

#### 参考文献

- 1 国家环境保护局. 1989. 水和废水监测分析方法(第3版). 中国环境科学出版社, 北京.
- 2 章骏德. 1986. 植物生理实验法. 江西人民出版社, 南昌.
- 3 韩宏英. 1984. 汞在腐殖酸影响下对浮游植物的毒性及其富集的研究. 环境科学学报, 4(4): 342—348.
- 4 Bailliez, C., Largeau, C., Berkaloff, C., et al. 1986. Immobilization of *Botryococcus braunii* in alginate, influence on chlorophyll content, photosynthetic activity and degeneration during batch culture. *Appl. Microbiol. Biotech.*, 23: 361—366.
- 5 Bozeman, J. 1989. Toxicity testing using immobilized algae. *Aquatic Toxicology*, 14: 345—352.
- 6 Chevalier, P., de la Noüe. 1985. Wastewater nutrient removal with microalgae immobilized in carrageenan. *Enzyme Microbiol. Tech.*, 7: 621—624.
- 7 Dainty, A. L., Goulding, K. H., Robinson, P. K., et al. 1986. Stability of alginate-immobilized algal cells. *Biotech. and Bioengr.*, 28: 210—216.
- 8 Jeanfils, J., Collard, E. 1986. Photoproduction of ammonia by immobilized heterocystic cyanobacteria; effect of nitrate and anaerobiosis. *Biotech. Letters*, 8: 265—270.
- 9 Khummongkol, D. 1982. Accumulation of heavy metals in unicellular algae. *Biotech. and Bioengr.*, 24: 2643—2660.
- 10 Robinson, P. K., Reeve, J. O., Goulding, K. H. 1989. Phosphorus uptake kinetics of immobilized *Chlorella* in batch and continuous-flow culture. *Enzyme Micro. Tech.*, 11(9): 590—596.
- 11 Tam, N. F. Y. 1990. The comparison of growth and nutrient removal efficiency of *Chlorella pyrenoidosa* in settled and activated sewages. *Environ. Poll.*, 65: 93—108.
- 12 Wilkinson, S. C., Goulding, K. H., Robinson, P. K., et al. 1989. Mercury accumulation and volatilization in immobilized algal cell system. *Biotech. Letters*, 11(12): 861—864.

## 欢迎订阅《应用生态学报》1995 年增刊

为缓解本刊稿件积压现象, 缩短出版周期, 加速科技信息的传播, 经有关部门批准, 《应用生态学报》于 1995 年 3 月出版增刊 1 期。该增刊发表应用生态学方面的研究报告 30 多篇, 内容涉及森林生态学、植物生态学、农业生态学、草地牧业生态学、渔业生态学、自然资源生态学、景观生态学、城市生态学、污染生态学、生态工程等分支学科。160 页, 约 25 万字, 定价 10 元(含邮资, 出报报销)。

另外, 为便于读者查阅有关应用生态学方面的文献, 本刊特汇编《应用生态学报(1—5 卷)论文索引》单行本, 包括作者索引和学科分类索引, 共收录本刊 1990—1994 年发表的论文 356 篇。40 页, 约 6.4 万字。1995 年 2 月出版。收取工本费 3 元。

欲订购者请直接将款邮至辽宁省沈阳市文化路 72 号 中国科学院沈阳应用生态研究所《应用生态学报》编辑部, 邮编: 110015。