

# 凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 I. 动态模拟试验\*

吴振斌 丘昌强 夏宜璋 王德铭

(中国科学院水生生物研究所,武汉)

## 提 要

两级串联凤眼莲塘净化燕山石化废水动态模拟试验表明:在温暖季节,凤眼莲塘对该废水有很强的净化能力,其净化效率明显高于普通氧化塘。总停留时间为8天的两级串联的凤眼莲塘可使出水达到规定要求。塘I 塘II 的去除率常数分别为0.376和0.151,表面净化率分别为9.51和2.38 gCOD/m<sup>2</sup>d,凤眼莲(湿重)增长量分别为226和210 g/m<sup>2</sup>d。当日平均气温在10—24°C的范围内,COD去除率(R)在日平均气温(T)的影响下以对数函数下降 R=87.70 lnT-200.15。根据试验,提出了动态凤眼莲塘净化燕山石化废水的定量计算方法和有关参数。

关键词 凤眼莲,净化,石化废水

凤眼莲(*Eichhornia crassipes* Solms.)等高等水生植物在适宜条件下生长极为迅速,对水中的氮、磷等营养物质<sup>[4]</sup>,生化需氧量(BOD)、总悬浮固体(TSS)<sup>[5,10]</sup>、重金属<sup>[7]</sup>、酚类等有机物质<sup>[6]</sup>以及某些除草剂、杀虫剂等有毒污染物<sup>[11]</sup>,都有程度不同的净化作用。已有报道用凤眼莲进行净化工业废水的试验<sup>[3,10]</sup>,但是关于处理石油化工废水的研究尚未见详细报道。

北京燕山石油化工公司每天排出石化废水14,160—49,580 m<sup>3</sup><sup>①</sup>,致使直接受纳其废水的牛口峪水库水层缺氧,散发恶臭,鱼虾绝迹;水库出水中酚、油等污染物含量时有超标,污染附近农田。中国科学院水生生物研究所于1982年10月开始进行人工强化的天然生物净化系统处理该公司二级出水的可行性的研究。我们在氧化塘、氧化沟动态模拟试验的同时,进行了凤眼莲塘的动态模拟试验,以了解凤眼莲对燕山石化废水的净化效率、所能承受的污染负荷、有效发挥净化效率所需的停留时间、塘面积和串联级数等。在此基础上对高等水生植物净化塘处理燕山石化废水的可行性作出估价,为人工强化的天然生物净化系统方案的论证和工程设计提供必要的科学依据和参数。

根据整个科研项目所规定的边界条件,生物氧化塘系统的进水标准为工业排放标准,

\* 在实验过程中,本所燕山攻关组的同志提供了多方面的帮助;北京燕山石化公司研究院和牛口峪水库管理所提供的实验设施并分析部分数据;谨此致谢。

① 中国科学院水生生物研究所,北京燕山石油化学公司,1984。利用天然生物净化系统处理燕山石化公司污水二级处理系统出水的可行性研究(中国科学院科研成果鉴定会议资料)。

1986年2月3日收到。

出水要求达到暂定的北京市二类水水质标准(以下简称出水标准)<sup>1)</sup>。

## 实验设置和过程

凤眼莲塘分为二级,由两个塑料池 ( $2.0 \times 10 \times 0.5 \text{ m}^3$ ) 串联而成(图 1)。

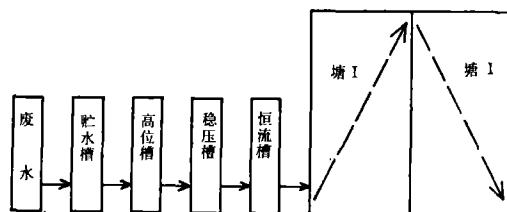


图 1 水草塘水流路线示意图(图右边的“塘 I”应为“塘 II”)

Fig. 1 Wastewater flowing route of the water hyacinth ponds

试验于 1983 年 4 月 27 日起进水运转,塘 I、塘 II 的起始 COD 浓度为  $138 \text{ mg/l}$ , 分别放入凤眼莲 5220g (塘 I) 和 5205g (塘 II)。试验依污水停留时间不同分三个阶段进行(表 1)。10 月 21 日以后保留塘 I 继续观察温度下降对凤眼莲生长和净化效率的影响。

表 1 动态模拟试验各阶段的条件

Tab. 1 Conditions of the three experimental stages

| 试验阶段<br>Experimental stages | 试验日期(天数)<br>Experimentation dates<br>(days) | 每塘停留时间(天)<br>Detention time of each pond<br>(days) | 污水流量(毫升/分)<br>Volume of flow<br>(ml/min.) |
|-----------------------------|---|--|---|
| 1                           | 27/4—7/6 (41)                               | 18   | 38  |
| 2                           | 8/6—30/6 (22)                               | 7  | 100                                       |
| 3                           | 1/7—21/10 (112)                             | 4  | 175                                       |

模型设在玻璃温室内,整个试验运转期间室温在  $13\text{--}38^\circ\text{C}$  之间,平均为  $27^\circ\text{C}$  左右,模型上方有两支 40 瓦日光灯和一支 500 瓦碘钨灯作为低温阴雨时的辅助光源。

试验过程中,每天监测进水 COD,上、下午测定进水、塘 I 及塘 II 出水的溶解氧。试验开始后第 2、5 天起,每星期 2、5 取水样作全分析,包括进水,塘 I 及塘 II 出水的 COD、 $\text{BOD}_5$ 、氨氮、酚、油、芳烃和硫等。此外,每天早、中、晚定时观察记录光强、气温、水温及相对湿度等,进水流量保持恒定。水草秤重(湿重)每星期进行一次,秤重时适当取出一部分植株,使池内凤眼莲保持相对稳定的种群密度。每 7 天进行一次细菌计数。

## 试 验 结 果

从感观上看,进水一般呈黄褐色,有时黑褐色,比较混浊。经凤眼莲处理以后的出

1) 同上页注 1)。

水则清澈洁净,透明度明显提高。

### 1. COD、BOD<sub>5</sub> 的去除效果

进水、塘 I 及塘 II 出水的 COD、BOD<sub>5</sub> 测定数据分三个阶段平均(表 2)。第一阶段进水 COD 平均值为 214.94 mg/l, 每塘停留时间为 18 天, 塘 I 和塘 II 出水的 COD 分别降到 57.21 和 22.33 mg/l, 去除率分别为 73.38 和 89.61%。当进水 COD 平均为 125.62 mg/l, 每塘停留时间为 4 天时, 塘 I、塘 II 出水 COD 分别为 50.16 和 31.28 mg/l, 去除率分别为 60.07 和 75.10%。第二阶段进水 COD 较低, 出水 COD 也较低。

表 2 不同停留时间下的 COD、BOD<sub>5</sub> 及其去除率

Tab. 2 Removal efficiencies of COD and BOD<sub>5</sub>, under different detention times

| 项 目<br>Items     | 每塘停留时间<br>(天)<br>Detention time<br>in each pond<br>(days) | 进 水<br>Influent                 | 塘 I 出水<br>Effluent of pond I    |                                    | 塘 II 出水<br>Effluent of pond II  |                                    |
|------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
|                  |   | 浓 度<br>Concentrations<br>(mg/l) | 浓 度<br>Concentrations<br>(mg/l) | 去除率<br>Removal<br>efficiencies (%) | 浓 度<br>Concentrations<br>(mg/l) | 去除率<br>Removal<br>efficiencies (%) |
| COD              | 18  | 214.94                          | 57.21                           | 73.38                              | 22.33                           | 89.61                              |
|                  | 7   | 72.49                           | 33.27                           | 54.10                              | 27.72                           | 61.76                              |
|                  | 4   | 125.62                          | 50.16                           | 60.07                              | 31.28                           | 75.10                              |
| BOD <sub>5</sub> | 18  | 39.69                           | 7.52                            | 94.62                              | 1.74                            | 98.75                              |
|                  | 7   | 30.62                           | 3.03                            | 90.91                              | 2.77                            | 90.95                              |
|                  | 4   | 54.04                           | 7.31                            | 86.47                              | 4.08                            | 92.45                              |

BOD<sub>5</sub> 的去除效果更为明显, 三个阶段进水 BOD<sub>5</sub> 平均值依次为 39.69、30.62 和 54.04 mg/l, 塘 I 出水平均值分别在 8 mg/l 以下, 塘 II 出水平均值均在 5 mg/l 以下。

第三阶段试验运转时间最长, 污水停留时间最短, 将其分为 8 个阶程, 每阶程 14 天, 各污染指标分阶程平均, 单独列出讨论。

在试验第三阶段, 塘 I 出水 COD 有 5 个阶程在 60 mg/l 以下。但有的阶程超过 80 mg/l; 塘 II 出水 COD 均在出水标准以下。第三阶段大部分时间进水 BOD<sub>5</sub> 较高, 有时甚至高达 150 mg/l, 但塘 I 和塘 II 出水 BOD<sub>5</sub> 均在 20 mg/l 以下, 全部达到出水标准。特别是塘 II 出水, BOD<sub>5</sub> 经常低于 4 mg/l (图 2)。

### 2. 其他污染物质的净化效果

经过凤眼莲塘的净化之后, 废水中的氨氮、酚、芳烃、油、硫等污染物含量均有较大幅度的下降。塘 II 的去除率一般比塘 I 更进一步提高。除塘 I 出水酚含量超出水质标准以外, 三阶段塘 I 和塘 II 出水中其他污染物含量平均值均达到出水标准(表 3)。

第三阶段各污染物含量的变化, 除塘 I 少数阶程出水中的酚、油和硫含量略超出出水标准外, 其余阶程的塘 I 出水和全部塘 II 出水均符合规定要求(图 3—5)。

### 3. pH、电导率、溶解氧变化

试验过程中进水 pH 测定值变化很大, 最低为 4.2, 最高达 9.5, 经常在 7.5—9.0 的范

表 3 不同停留时间下的氨氮、酚、芳烃、油、硫含量及去除率

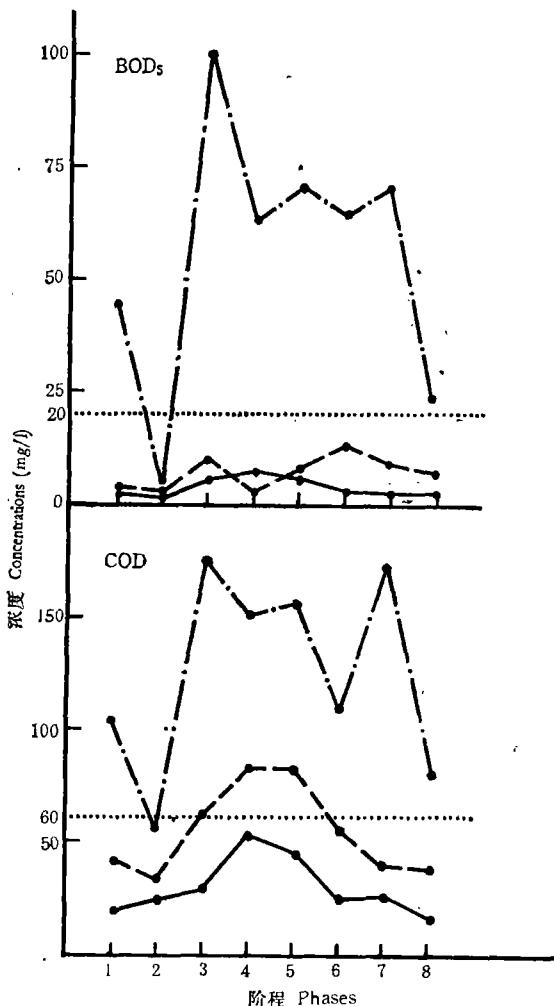
Tab. 3 Concentrations and removal efficiencies of NH<sub>3</sub>-nitrogen, phenol, aromatic hydrocarbon, oil and sulfide under different detention times

| 项 目<br>Items                     | 每塘停留时间<br>(天)<br>Detention times<br>of each pond<br>(days) | 进 水<br>Influent                 | 塘 I 出水<br>Effluent of pond I    |   | 塘 II 出水<br>Effluent of pond II  |   |
|----------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|---|
|                                  |  | 浓 度<br>Concentrations<br>(mg/l) | 浓 度<br>Concentrations<br>(mg/l) | 去 除 率<br>Removal<br>efficiencies<br>(%) | 浓 度<br>Concentrations<br>(mg/l) | 去 除 率<br>Removal<br>efficiencies<br>(%) |
| 氨 氮<br>NH <sub>3</sub> -nitrogen | 18   | 4.48                            | 0.64                            | 85.71                                   | 0.18                            | 95.98                                   |
|                                  | 7  | 16.10                           | 10.89                           | 32.36                                   | 4.55                            | 71.74                                   |
|                                  | 4  | 16.37                           | 6.33                            | 61.33                                   | 3.27                            | 80.02                                   |
| 酚<br>Phenol                      | 18   | 3.99                            | 0.24                            | 94.00                                   | 0.013                           | 99.67                                   |
|                                  | 7  | 0.35                            | 0.05                            | 85.84                                   | 0.025                           | 92.92                                   |
|                                  | 4  | 1.59                            | 0.32                            | 79.70                                   | 0.019                           | 98.80                                   |
| 芳 烃<br>Aromatic hydrocarbon      | 18   | 0.74                            | 0                               | 100                                     | 0                               | 100                                     |
|                                  | 7  | 1.00                            | 0                               | 100                                     | 0                               | 100                                     |
|                                  | 4  | 1.05                            | 0.41                            | 60.95                                   | 0.29                            | 72.38                                   |
| 油<br>Oil                         | 18   | 5.59                            | 1.88                            | 66.37                                   | 0.84                            | 84.91                                   |
|                                  | 7  | 18.08                           | 0.24                            | 98.67                                   | 0                               | 100                                     |
|                                  | 4  | 6.33                            | 1.45                            | 77.07                                   | 0.58                            | 55.45                                   |
| 硫<br>Sulfide                     | 18   | 0.026                           | 0.012                           | 53.85                                   | 0.0026                          | 90.90                                   |
|                                  | 7  | 0.020                           | 0.010                           | 50.00                                   | 0                               | 100                                     |
|                                  | 4  | 0.022                           | 0.0056                          | 74.55                                   | 0.0098                          | 55.45                                   |

表 4 进水、塘 I 及塘 II 出水的 pH、电导率、溶解氧

Tab. 4 Data of pH, conductivity and dissolved oxygen of the influent and the effluents of pond I and pond II

| 项 目<br>Items   | 每塘停留时间(天)<br>Detention times in<br>each pond (days) | 进 水<br>Influent | 塘 I 出水<br>Effluent of pond I | 塘 II 出水<br>Effluent of pond II |
|--|---|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
|  |   | Influent        | Effluent of pond I           | Effluent of pond II            |
| pH   | 18  | 7.36            | 7.04                         | 7.00                           |
|  | 7   | 7.41            | 7.00                         | 7.00                           |
|  | 4   | 7.84            | 7.44                         | 7.30                           |
| 电 导 率<br>Conductivity<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 18  | 835             | 805                          | 865                            |
|  | 7   | 717             | 765                          | 761                            |
|  | 4   | 1121            | 1083                         | 1091                           |
| 溶 解 氧<br>Dissolved oxygen<br>(mg/l)                  | 18  | 0.31            | 1.69                         | 2.86                           |
|  | 7   | 0.94            | 3.01                         | 4.08                           |
|  | 4   | 1.50            | 2.40                         | 3.35                           |

图 2 每塘停留 4 天各阶段的 COD、BOD<sub>5</sub>Fig. 2 Mean COD and mean BOD<sub>5</sub> under 4-day detention time

-----出水标准 Effluent standards  
 ——进水 Influent  
 ——塘 I 出水 Effluent of pond I  
 ——塘 II 出水 Effluent of pond II

围内波动。虽然出水的 pH 在一定的程度上受到进水的影响，但相对比较稳定，变化幅度较小，接近中性(表 4)。第三阶段两塘出水的 pH 一般在规定的 pH 6.0—8.5 的范围以内(图 6)。废水经过水草塘以后，其电导率没有太大的变化，并且基本上是随着进水而变动(表 4、图 6)。废水的溶解氧含量很低，凤眼莲塘的溶解氧也比较低，但进水、塘 I 及塘 II 出水的溶解氧含量依次稍有增加(表 4)。

#### 4. 细菌数量变动

试验过程中进水的细菌数量变化很大，但大多数时间里进水、塘 I 及塘 II 出水的细

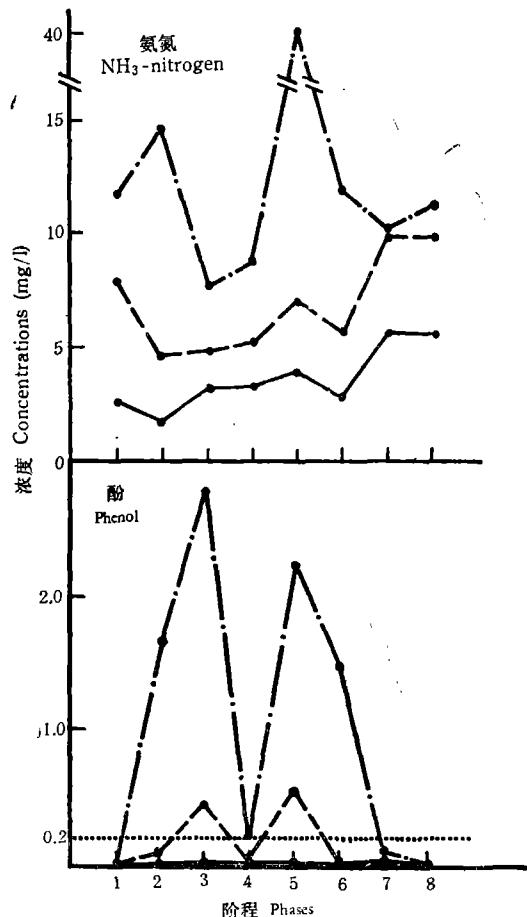


图 3 每塘停留 4 天各阶段的氨氮和酚、含量变化(图例同图 2)

Fig. 3 Mean contents of NH<sub>3</sub>-nitrogen and phenol under 4-day detention time

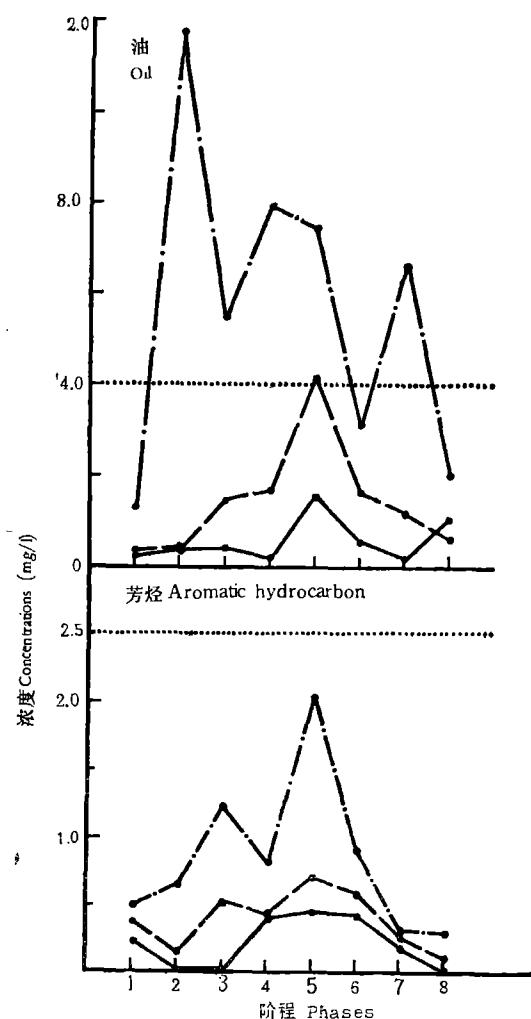


图 4 每塘停留 4 天各阶程的油和芳烃含量  
(图例同图 2)

Fig. 4 Mean contents of oil and aromatic hydrocarbon under 4-day detention time

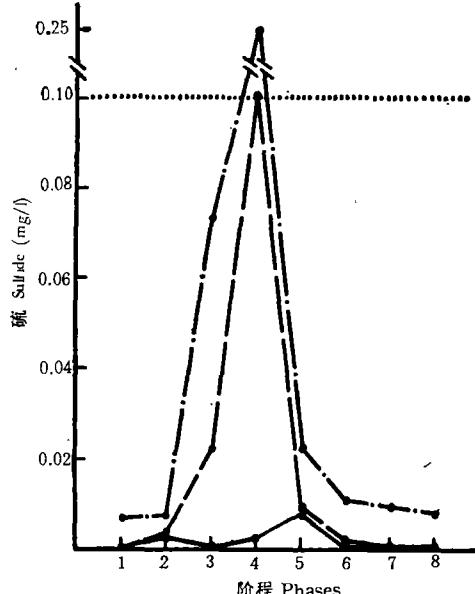


图 5 每塘停留 4 天各阶程的硫含量  
(图例同图 2)

Fig. 5 Mean contents of sulfide under 4-day detention time

菌总数逐级减少(表 5)。随着污染物浓度的逐步降低，以这些污染物为基质的细菌数量也依次减少。

表 5 进水、塘 I 及塘 II 出水的细菌数 ( $10^3/ml$ )  
Tab. 5 Densities of bacteria of the influent and effluents( $10^3/ml$ )

| 每塘停留时间 (天)<br>Detention times in each pond<br>(days) | 进 水<br>Influent | 塘 I 出水<br>Effluent of pond I | 塘 II 出水<br>Effluent of pond II |
|--|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| 18   | 2120            | 100                          | 53                             |
| 7  | 6547            | 237                          | 5                              |
| 4  | 1007            | 110                          | 26                             |

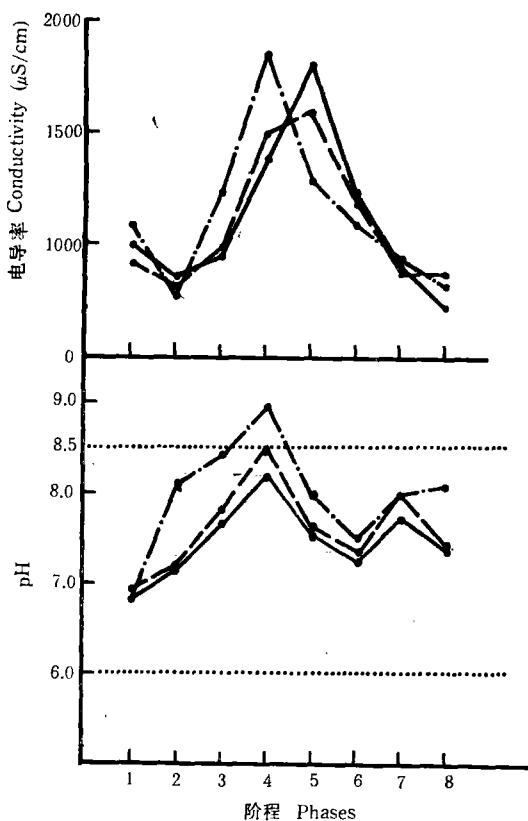


图 6 每塘停留 4 天各阶程的 pH 和电导率 (图例同图 2)  
Fig. 6 Mean pH and conductivity under 4-day detention time

## 讨 论

### 1. 凤眼莲塘对石化废水的净化能力

从上述各项试验结果可以看到, 凤眼莲对燕山石化废水有很强的净化能力。废水经凤眼莲塘的净化之后, 各项污染组分含量均明显降低。在半年多的动态运转试验期间, 虽然进水的各项污染组分含量经常超出规定的进水标准, 大多数时间里的塘 I 出水和全部塘 II 出水都符合规定要求。

试验全过程中进水的  $BOD_5/COD$  比率较高, 平均为 0.54, 说明废水中可生化降解性有机物质占较大比重。塘 I 和塘 II 出水的  $BOD_5/COD$  比率分别为 0.13 和 0.10, 比值比较低; 进水、塘 I 及塘 II 出水的 COD 与  $BOD_5$  之间分别呈较显著的线性相关(图 7)。从图 5 可以看出, 回归线的斜率塘 II>塘 I>进水, 表明废水中存在着一定量的不可生化降解的物质, 经过塘 I 和塘 II 的净化之后, 废水中可生化降解性物质依次递减。

引用氧化塘计算去除率常数 (K) 的公式

$$K = \frac{R}{100 - R} \cdot \frac{1}{D} \quad (1)$$

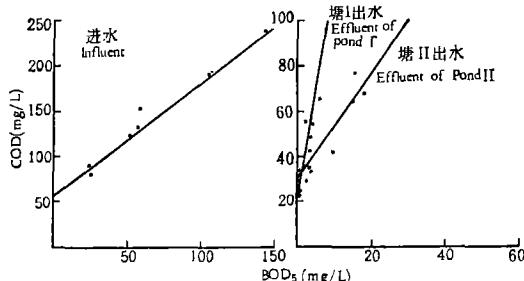
图 7 进水、塘 I 及塘 II 出水 COD 与 BOD<sub>5</sub> 之间的相关性

Fig. 7 Correlation between COD and BOD<sub>5</sub>, of the influent and the effluents of pond I and pond II

$$\text{COD} = 1.17\text{BOD}_5 + 56.87 \quad r = 0.92 \quad p < 0.01$$

$$\text{COD}_I = 2.32\text{BOD}_5 + 29.29 \quad r = 0.87 \quad p < 0.05$$

$$\text{COD}_{II} = 3.54\text{BOD}_5 + 20.30 \quad r = 0.77 \quad p < 0.05$$

式中 R 为去除率 (%), D 为停留时间 (d)。根据表 1 和表 2 的数据, 计算可得两凤眼莲塘各阶段的去除率常数(表 6)。与同步试验的氧化塘(沟)模型相比, 凤眼莲塘的 K 值较高。本试验第一阶段的进水流量和每塘停留时间与藻菌氧化塘(沟)相同(三组模型的进水来源和一、二级塘的面积、水深均相同), 但凤眼莲塘的去除率明显高于藻菌氧化塘(沟)。在二、三阶段, 凤眼莲塘的进水流量分别是藻菌氧化塘(沟)的 2.6 和 4.6 倍, 但大部分时间里出水中各污染组分含量仍然较低。并且因为藻类生长被抑制等原因, 凤眼莲塘出水 pH 低于藻菌氧化塘(沟)而接近中性, 且底部沉积物也较少。凤眼莲塘在处理废水方面有其明显的优点, 应该充分加以利用。发挥凤眼莲等高等水生植物的净化功能, 是人工强化天然生物净化系统净化能力的一个重要措施。

表 6 动态试验中的 K 值与 Ps

Tab. 6 The removal constants (K) and surface purification rates (Ps) in dynamic tests

| 每塘停留时间 (天)<br>Detention times of<br>each pond (days) | K (日 <sup>-1</sup> ) (d <sup>-1</sup> ) |                 | Ps (g/m <sup>2</sup> d) |                 |
|--|---|-----------------|-------------------------|-----------------|
|  | 塘 I<br>Pond I                           | 塘 II<br>Pond II | 塘 I<br>Pond I           | 塘 II<br>Pond II |
| 18   | 0.153                                   | 0.087           | 4.32                    | 0.95            |
| 7  | 0.168                                   | 0.028           | 2.83                    | 0.40            |
| 4  | 0.376                                   | 0.151           | 9.51                    | 2.38            |

## 2. 表面净化率的计算

为了给人工强化的天然生物净化系统方案的论证和工程设计提供参数, 有必要将凤眼莲塘对燕山石化废水的净化能力定量化。目前国内外已有一些关于凤眼莲净化氮、磷等污染物的计算公式<sup>[4,8]</sup>。但是这些公式大多以凤眼莲的产量和凤眼莲体内某污染物含量为基础进行计算。虽然这类计算也能在一定的程度上反映水质净化效果, 能计算某些元素如重金属等被凤眼莲吸收净化的量, 但在许多情况下, 凤眼莲生物量中所含某污染物的量与水体净化的量是不同的, 因此这类计算法难免与水质净化效果有差异。区尹正

等采用废水起止浓度和水量等参数计算静态净化塘的表面负荷<sup>[2]</sup>，但是不能计算动态净化效果。根据科研项目的要求与工程设计的需要以及研究的结果，我们提出下述公式来计算凤眼莲塘的表面净化率（Ps）。

$$Ps = \frac{F \cdot C_i - (F - E) \cdot C_e}{S \cdot 1000} \quad (2)$$

式中，Ps 为表面净化率( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )，F 为进水流量 ( $1/\text{d}$ )，C<sub>i</sub> 和 C<sub>e</sub> 分别为进水和出水中某污染组分含量 ( $\text{mg}/\text{l}$ )，E 为蒸发蒸腾量 ( $1/\text{d}$ )，S 为凤眼莲养植面积 ( $\text{M}^2$ )。根据净化系统的模拟试验结果及水库水质的多年监测结果，当出水的 COD 指标达到规定要求时，其它水质控制指标均已达到要求，因此，表面净化率的计算以 COD 作为主要污染组分含量指标。根据表 1 和表 2 的数据，蒸发蒸腾量略去不计，计算得到三阶段各凤眼莲塘的表面净化率(表 6)。Ps 值可用于塘面积的计算和衡量净化能力的参数。

### 3. 停留时间

比较不同停留时间三阶段试验结果可以看出，一般地说，停留时间较长，污染物的去除效果更好，并对稳定 pH 在中性有一定作用，但净化的速率会随停留时间延长而相应降低。例如一级塘在理论停留时间为 18 天时每天去除 BOD<sub>5</sub> 1.8 克，然而当停留时间为 4 天时，每天可去除 BOD<sub>5</sub> 11.8 克。比较第一、三阶段的 K 和 Ps 值，无论塘 I 还是塘 II 都是第三阶段高于第一阶段(表 6)。从静态净化试验得知，凤眼莲净化废水的速率随着时间在不断地变化。凤眼莲塘中的 COD 基本上是呈指数函数  $COD = A \cdot e^{-B \cdot D}$  下降，其净化速率开始很快，后来逐渐减慢，到 COD/BOD<sub>5</sub> 比率出现峰值以后，净化效率就非常缓慢<sup>[1]</sup>。因此任意地延长停留时间是不可取的。本动态模拟试验三阶段的总停留时间分别是 36、14、8 天，系统出水的各项污染指标都达到规定要求。因此，在正常的进水条件下，8 天的停留时间就足够了。

### 4. 串联级数

从理论上的反应速率来看，在总面积相同，多级串联塘比单个大塘效果好，即总面积相同，单个氧化塘面积小，串联的级数愈多，其处理效果也愈接近理想状态<sup>[3]</sup>。由于串联型各级净化塘中理化条件、污染物含量有一定的差异，因此各级将出现适应不同环境条件的生物相。在凤眼莲塘，主要是不同的微生物相及凤眼莲对不同水质环境适应性的改变。例如进水、塘 I 和塘 II 的细菌数量有一定差异，凤眼莲根系的形态和吸附的颗粒物质(其中有多量微小生物)亦有较大区别，整个串联系统更耐超负荷排放的冲击。由于每一级中生物相的不同，可能形成的中间产物也不相同，在前一级中未完全分解的产物，可能作为下一级微生物的基质，因此串联系统在处理成份复杂的废水时有可能得到较好的效果。另外，采用多级串联系统有利于增进废水的混合程度，有利于稳定凤眼莲种群并易于收捞水草。从水质净化效果来看，塘 II 出水优于塘 I，并且能将水质稳定在规定的范围内。然而，一个与停留时间和污染物下降速率变化的阶段性相联系的问题是，增加串联级数会使

1) 吴振斌等，1985。凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 II、静态净化试验(待发表)。

后部串联塘的净化速率降低,例如塘 II 的 K 和 Ps 值均低于塘 I。因此在实际应用时应综合考虑。

### 5. 凤眼莲生长情况和生长量

在整个试验过程中,凤眼莲能在废水中比较旺盛地生长和繁殖,植株量和生长量不断增加(表 7)。

表 7 塘 I、塘 II 凤眼莲每日湿重增量及增长百分率

Tab. 7 Biomass increase and growth rates of the water hyacinths in two ponds

| 每塘停留时间(天)<br>Detention times of<br>each pond (days) | 湿重增量<br>Biomass increase ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ) |                 | 日增长百分率<br>Daily growth rates (%) |                 |
|---|---|-----------------|----------------------------------|-----------------|
|   | 塘 I<br>Pond I   | 塘 II<br>Pond II | 塘 I<br>Pond I                    | 塘 II<br>Pond II |
| 18  | 217   | 128             | 3.5                              | 2.0             |
| 7   | 249   | 89              | 3.6                              | 1.5             |
| 4   | 226   | 210             | 4.4                              | 4.0             |

试验过程中也发现,有时候凤眼莲的生长稍差,比较明显的有三次,应该引起注意。在第一阶段的最后一、二个星期,凤眼莲生长逐渐减慢。这主要因为第一阶段污水停留时间过长,水中的营养物质不能满足凤眼莲生长的需要,此时的水质分析数据表明,BOD、氨氮和磷的含量都处于很低的水平。当增大进水流量以后,凤眼莲生长量迅即上升。从这方面来看,过长的停留时间也不利于凤眼莲的生长和净化潜力的充分利用。

在第三阶段第四阶程,凤眼莲生长量处于低水平,这主要因为水质差(事故排水)引起的。把图 8 与第三阶段各污染指标变化图对比可以看到,第四阶程的电导率、pH 和 BOD、酚、硫含量等明显偏高。由石化废水对凤眼莲的毒性试验研究得知,试验条件下的有机负荷、酚不足以对凤眼莲生长造成明显抑制;然而第四阶程较高的 pH 和盐分可对凤眼莲生长产生抑制影响,并且当此毒性很高的废水经一定时间的停留混合以后,其毒性会明显降低<sup>1)</sup>。因此在凤眼莲塘之前,宜有缓冲留存废水的构筑物。

在试验的后期,气温日渐下降,凤眼莲生长也逐渐减慢。

上述分析表明,试验过程中,凤眼莲生长有时受到抑制,生长量比正常状态下有所减少,在此基础上可估算全年的生物量。如果全年生长期为 6 个月,湿重增量取第三阶段塘 I、塘 II 的平均值  $218 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ,则每年每亩可收获凤眼莲(湿重)  $26,173 \text{ kg}$ 。种植凤眼莲 100 亩,则每年可收获凤眼莲(湿重)

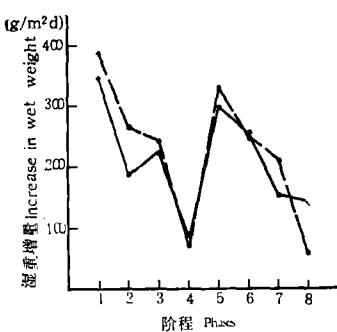


图 8 每塘停留 4 天时凤眼莲湿重增量

Fig. 8 Increased in wet weight of water hyacinths in 4-day detention time

— 塘 I Pond I —— 塘 II Pond II

1) 有机负荷、酚、pH、盐分对凤眼莲生长的影响(手稿)。

2,617 吨,折干重 131 吨(按干物率 5%)。依照 Wolverton 提供的数据,每公斤干重产沼气 374 升<sup>[10]</sup>,则 100 亩凤眼莲可产沼气 48,994 m<sup>3</sup>。发酵后的基质仍是优良的肥料。此外尚有许多用途,如在处理废水的同时,适时收捞凤眼莲并加以有效利用,就能化害为利。凤眼莲还可美化环境,在污水资源化、形成良性的生态循环方面发挥其重要作用。

## 6. 气温对净化效率的影响

凤眼莲的生长及其净化效率在很大的程度上要受到气候条件尤其是温度的影响。水库进水的月平均温度最低也在 20℃ 以上。动态试验期间大多数时间水温在 20~30℃ 之间,属于凤眼莲的适宜生长温度范围,但气温有较大幅度的变化,在 13~38℃ 之间。观测结果表明,试验条件下的较高温度对凤眼莲生长和净化效率没有明显的抑制影响。当日平均气温在 24℃ 以上时,凤眼莲生长特别旺盛,因气温变化造成净化效率的差异不明显。为了简化计算,对日平均气温 24℃ 以上的情况不予讨论。而当日平均气温在 24℃ 以下时,气温的下降对净化效率的影响越来越显著。对 9 月 24 日—12 月 2 日共 10 个星期的日平均气温 ( $T$ ) 和塘 I 的平均去除率 ( $R$ ) 进行回归分析,得如下回归关系式:

$$R = 87.70 \cdot \ln T - 200.15 \quad (r = 0.94, P < 0.01) \quad (3)$$

[式中  $10 \leq T \leq 24(\text{℃})$ ]。经计算,当  $T = 20(\text{℃})$ ,  $R = 62.85\%$ , 实验中 20℃ 时去除率为 63.18%, 当日平均气温下降到 10℃ 左右时, 进出水的污染物含量几乎没有改变, 去除率接近于零, 经式(3)计算,  $T = 10(\text{℃})$ ,  $R$  只有 1.78(%), 与实际情况基本相符。

## 7. 凤眼莲塘面积的计算

表 7 的数据,基本上是在比较温暖的气候条件下求得。在温暖季节,可直接作为净化效率的参数进行计算。如果考虑气温对净化效率的影响,实际应用表面净化效率数据时,应乘以温度系数  $K_t$ ,

$$K_t = \begin{cases} \frac{87.70 \ln T - 200.15}{78.56} & (24 \geq T \geq 10\text{℃}) \\ 1 & (38 > T > 24\text{℃}) \end{cases} \quad (4)$$

当日平均气温在 10—24℃ 时,  $K_t$  取某一平均气温时的去除率与 24℃ 时的去除率之比。

求出了表面净化率 ( $P_s$ ), 就可以根据既定的污水流量 ( $F$ ), 进水浓度 ( $C_i$ ) 和出水浓度 ( $C_e$ ) 等, 计算水草塘的建塘面积, 用公式

$$S = \frac{F \cdot (C_i - C_e)}{K_t \cdot P_s \cdot 1000} \quad (5)$$

举例: 如果进水流量为 35,000 吨/天, 进水 COD 为 130 mg/l, 出水要达到 60 mg/l,  $P_s$  取第三阶段塘 I 和塘 II 的平均值 5.94 (g/m<sup>2</sup>·d), 当气温在 24℃ 以上时,  $K_t = 1$ , 计算得  $S = 618$  (亩); 当气温在 20℃ 时,  $K_t = 0.80$ ,  $S = 773$  (亩)。

另外, 上述的有关公式和有关参数是在特定的试验条件下得到的, 具体应用时还要考虑水深等因素。

## 参 考 文 献

- [1] 丁树荣, 1984。高产水生维管束植物在城镇污水资源化中的作用及其发展前景。中国环境科学, 4(2): 10—15。
- [2] 区尹正, 汤曙明, 陈英旭, 王宇人, 1983。对几种水生植物净化污水的初步研究。环境污染防治, (3): 8—12。
- [3] 张甬元, 庄德辉, 孙美娟, 谭渝云, 张全正, 李建秋, 1982。有机磷农药生产废水氧化塘处理的静态和动态模拟试验。水生生物学集刊, 7(4): 489—498。
- [4] Cornwell, D. A., J. Zoltek, Jr., C. D. Patrinely, 1977. Nutrient removal by water hyacinths. *J. WPCF*, 49: 57—65.
- [5] Dinges, R., 1978. Upgrading stabilization pond effluent by water hyacinth culture. *J. WPCF*, 50: 833—845.
- [6] Gupta, G. C., 1980. Use of water hyacinth in wastewater treatment (a brief literature review). *J. Environm. Health*, 43(2): 80—82.
- [7] Muramoto, S. and Y. Oki, 1983. Removal of some heavy metals from polluted water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bull. Environm. Contam. Toxicol.* 30: 170—177.
- [8] Peterson, S. A., W. L. Smith and K. W. Malueg, 1974. Full-scale harvest of aquatic plants: Nutrient removal from a eutrophic lake. *J. WPCF*, 46(4): 697—707.
- [9] Reed, S. C., R. K. Bastian and W. J. Jewell, 1981. Engineers assess aquaculture systems for wastewater treatment. *Civil Engineering-ASCE*, July: 64—67.
- [10] Wolverton, B. C. and R. C. McDonald, 1979. The water hyacinth: From prolific pest to potential provider. *Ambio*, 8(1): 2—9.
- [11] —————, 1979, Upgrading facultative wastewater lagoons with vascular aquatic plants. *J. WPCF*, 51(2): 305—313.

## STUDIES ON THE PURIFICATION OF THE YAN SHAN PETRACHEMICAL WASTEWATER BY MEANS OF WATER HYACINTH I. DYNAMIC SIMULATION TEST

Wu Zhenbin, Qiu Changqiang, Xia Yicheng and Wang Deming

*(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan)*

### Abstract

Simulation test of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for the purification of petroleum wastewater was conducted in two connected ponds. Results showed that in the warm months, the hyacinth ponds had strong ability for purifying the wastewater, and resulted in a much greater purification efficiency than traditional oxidation ponds. This purifying system with total detention time of 8 days could treat the wastewater to meet the water quality standards. The COD removal constants (K) of pond I and pond II were 0.376 and 0.151, the surface purification rates (Ps) were 9.51 and 2.38 gCOD/m<sup>2</sup>d, and the increases of biomass (wet weight) of water hyacinths were 226 and 210 g/m<sup>2</sup>d, respectively. The COD removal rate (R) decreased as the daily mean air temperature (T) decreased according to the formula: R = 87.701 nT - 200.15 (10—24°C). Based on the experimental results, the calculation methods and parameters of the water hyacinth pond purifying system for the treatment of the Yan-Shan petrochemical wastewater are expounded.

**Key words** Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), purification, petrochemical wastewater.