

石化废水中酚对凤眼莲生长的影响

吴振斌 夏宜琤 丘昌强 王德铭

(中国科学院水生生物研究所, 武汉)

提 要

半动态酚毒性模拟试验表明: 酚浓度高于 600mg/l, 凤眼莲几天内中毒死亡; 酚浓度 350mg/l 以上亦造成不可恢复的损伤; 酚浓度 40mg/l 以上, 凤眼莲生长受到不同程度的抑制。同时叶绿素含量及 a/b 比率, 光合作用速率及生长率等亦随酚浓度增高而降低。较强光照增加了酚的毒性影响。酚浓度 25mg/l 以下对凤眼莲无明显抑制影响。10mg/l 以下浓度的酚还可以促进凤眼莲的生长。酚使凤眼莲无性繁殖能力下降但可促进其提早开花。

关键词 酚, 凤眼莲

酚是多种工业废水中常见的一种污染物。国内外已有利用凤眼莲(*Eichhornia crassipes* Solm.) 净化酚的报道, 其净化能力得到了比较一致的肯定^[1,4,6-10]。在有些试验中也出现了凤眼莲受酚毒害的问题^[1]。关于酚对凤眼莲生长影响的研究相对较少。本研究旨在探求燕山石化废水中主要污染物之一的酚对凤眼莲生长的影响, 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参考^[4]。并就酚对凤眼莲营养生长, 繁殖及恢复生长的影响进行初步的探讨。

材 料 和 方 法

第一批试验用搪瓷桶 26 只, 各盛燕山石化废水 40 升(主要污染组分含量见表 1)。加入酚溶液使成 0—800mg/l 共 13 种浓度梯度试验液。各加入少许等量营养液, 放入凤眼莲 5 株 (350±5 克)。试验期间、隔天换 1 次试验液。定期测量根的长度, 叶绿素含量(丙酮提取法^[2]), 湿重等。设自来水平行试验组。试验进行 12 天, 重复 1 次。

表 1 试验废水各主要污染组分含量

Tab. 1 Main pollutant contents in the experimental wastewater

酚 Phenol (mg/l)	芳烃 Aromatic hydrocar- bon (mg/l)	油 Oil (mg/l)	硫 Sulfide (mg/l)	氨氮 Ammoni- nitrogen (mg/l)	COD _{Cr} (mg/l)	电导率 Conduc- tivity (20°C) (μ S/cm)	pH
0.0252	0.59	1.84	0.010	15.05	80.81	830	7.1

第二批试验设 0—150mg/l 共 11 个浓度组, 时间 25 天, 其余与第一批试验相同。

此外, 测定了不同酚浓度下离体叶片的光合作用速率 (氧电极法^[5])。测定时取未经酚污染水体中生长正常的凤眼莲叶片 0.15 克, 剪碎后放入一定酚浓度的碳酸氢钠缓冲液中。1 组直接测定, 另 2 组分别经遮光和光照 (7000lx) 3 小时和 10 小时处理后测定。反应温度 25±0.5℃, 光强 50 000lx。没重复。

结 果

1. 酚对叶的伤害

高浓度的酚对叶的伤害是严重的。在正常的日照条件下, 试验开始 2 小时后, 800 和 600mg/l 浓度组凤眼莲叶片即出现脱水斑块, 以后逐渐扩大。几天以后, 200mg/l 以上浓度组的凤眼莲逐渐出现不同程度的受害症状。自外轮叶片的顶端或外缘开始, 逐渐出现点状或与叶脉走向相同的弧形斑块, 然后向叶片基部甚至叶柄表面延伸。斑块自外层老叶向内层幼叶发展。酚处理浓度愈高, 受害症状愈严重。例如, 试验开始后第七天, 800 和 600mg/l 浓度组凤眼莲叶全部枯死, 400mg/l 浓度组叶片上有大片褐色斑块, 300mg/l 浓度组少数老叶上有点状斑块, 150mg/l 以下浓度组未见明显的症状。

除了高浓度组凤眼莲叶片受害症状在短时间内立即出现以外, 大多数浓度组在试验开始后几天至十几天逐渐出现受害症状。例如, 400, 350, 300, 250, 200mg/l 浓度组凤眼莲出现类似症状分别在 4, 6, 7, 9, 11 天。

2. 酚对根的损伤

试验开始几小时以后, 高浓度组凤眼莲根尖部分细胞开始解体, 一天或数天以后, 自 90—800mg/l 浓度组根的颜色逐渐加深, 由白色或淡蓝色变成灰色、褐黑色。部分须根融

表 2 凤眼莲在含酚废水中生长 12 天后根长变化

Tab.2 Growth of root of hyacinths on phenol-polluted wastewater for 12 days

酚浓度 Phenol conc. (mg/l)	0	25	55	90	120	150	200	250	300	350	400	r
根长增加量 Increment of root length (cm)	3.34	3.35	3.26	3.10	2.61	2.03	*1.49	0.87	-1.14	-2.21	-3.04	-0.97 p<0.01
增长 率 Increase rate (%)	37.11	36.48	35.54	34.43	28.89	23.19	16.45	10.03	-15.65	-24.43	-33.49	-0.96 p<0.01

化、断裂。新根很少或没有新根长出。各浓度组凤眼莲根的平均增长长度随酚浓度的增高而减少 (表 2)。

3. 酚对生长率和叶绿素的影响

随着酚处理浓度的增高, 凤眼莲叶片叶绿素含量一般有所减少, 仅少数低浓度处理组

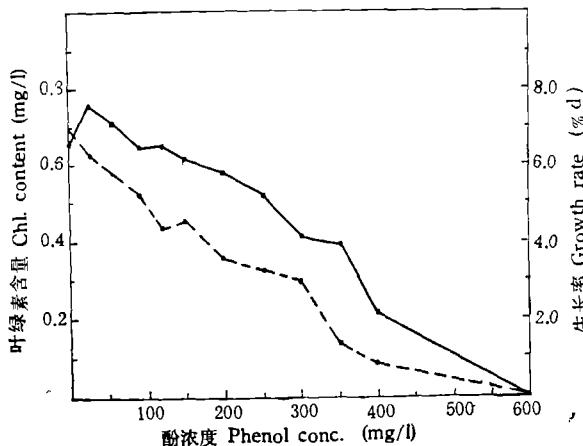


图 1 废水中酚对凤眼莲生长率和叶绿素含量的影响 (12 天)

——叶绿素 ——生长率

Fig. 1 Effects of phenol on the growth rate and chl. content of hyacinths, 12-days exposure
 —— Chl. content --- Growth rate

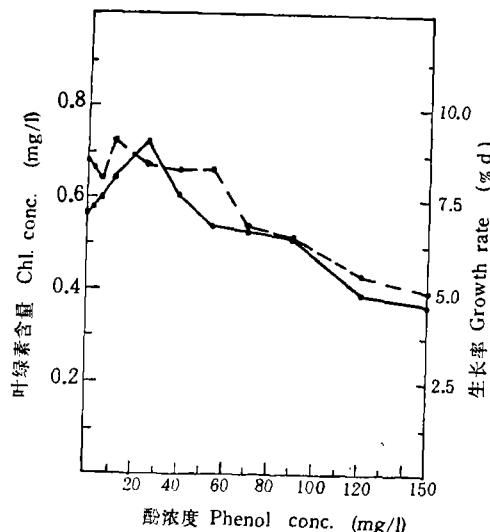


图 2 废水中酚对凤眼莲生长率和叶绿素含量的影响 (25 天)

——叶绿素 ——生长率

Fig. 2 Effects of phenol on the growth rate and chl. content of hyacinths, 25-days exposure
 —— Chl. content --- Growth rate

例外(图 1、2)。

酚还使叶绿素 a/b 比率发生改变。随着酚处理浓度的增高, 叶绿素 a/b 比率逐渐下降。这在较长时间的试验中表现得尤为明显(表 3)。当酚浓度在 40mg/l 以下时, 叶绿素 a/b 比率变化不大, 55mg/l 以上各浓度组凤眼莲叶绿素 a/b 比值明显下降。

高浓度的酚使凤眼莲生长受到明显的抑制(图 1, 2)。在第一批试验中, 凤眼莲生长

表 3 在含酚废水水中生长 25 天后凤眼莲叶绿素 a/b 的变化

Tab. 3 Variation of chl. a/b in the hyacinths growing on phenol-polluted wastewater for 25 days

酚浓度 Phenol conc. (mg/l)	0	1	5	10	25	40	55	70	90	120	150	r
叶绿素 a/b Chl. a/b	0.678	0.871	0.690	0.726	0.776	0.670	0.369	0.413	0.361	0.094	0.143	-0.93 p<0.01
变化率 Change rate(%)		28.5	1.8	7.1	14.5	-1.2	-45.6	-39.1	-46.8	-86.1	-78.9	-0.94 p<0.01

率与酚处理浓度呈极为显著的线性负相关。

4. 酚对叶片光合作用速率的影响

高浓度的酚对凤眼莲叶片的光合作用有明显的抑制作用。在直接测定组, 当酚浓度在 400mg/l 以上时, 光合作用速率逐渐下降; 经 3 小时处理以后, 抑制影响更为明显。在遮光处理组, 600 和 800mg/l 浓度组光合作用速率分别下降了 58.9 和 67.1%。在光照处理组, 200, 400, 600 和 800mg/l 浓度组光合作用速率分别下降了 24.1, 55.2, 72.4, 100%。可见, 在光照条件下, 酚对光合作用的影响更加显著; 经 10 小时处理以后, 400mg/l 以上浓度组叶片完全丧失了光合作用活性 (表 4)。

表 4 酚对凤眼莲叶片光合作用速率 ($\mu\text{MO}_2/\text{g}\cdot\text{min}$) 的影响Tab. 4 Influence of phenol on the photosynthesis speed ($\mu\text{MO}_2/\text{g}\cdot\text{min}$) of the hyacinth leaves

处理时间(小时) Duration of treatment (hours)	处理方法 Treatment methods	酚浓度 Concentration of phenol (mg/l)									
		0	1	10	50	100	200	400	600	800	r
0		0.84	0.80	0.81	0.82	0.80	0.82	0.75	0.65	0.57	0.95 p<0.01
3	暗 Dark	0.73	0.75	0.77	0.75	0.73	0.74	0.69	0.30	0.24	0.93
	光照 Light	0.58	0.59	0.61	0.58	0.56	0.44	0.26	0.16	0	0.99 p<0.01
10	暗 Dark	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92 p<0.01
	光照 Light	0.27	0.37	0.29	0.28	0.29	0.17	0	0	0	

5. 酚对无性繁殖和开花的影响

当酚浓度在 70mg/l 以下时, 凤眼莲新增加的叶和植株数量差别不大。酚浓度 90mg/l 以上时, 叶和植株增加数量逐渐减少 (表 5)。

试验中还观察到, 各浓度组凤眼莲依酚浓度 150—0mg/l 的次序, 逐日开出花朵 (表 6)。

表 5 凤眼莲在含酚废水中生长 25 天后植株和叶增长倍数

Tab. 5 Increase in multiples of plants and leaves of the hyacinths growing on phenol-polluted wastewater for 25 days

酚浓度 Phenol conc. (mg/l)	0	1	5	10	25	40	55	70	90	120	150	r
植株(倍) Plants (times)	2.5	2.5	2.6	2.4	2.5	2.3	2.3	2.2	1.9	1.6	1.4	-0.97 p<0.01
叶(倍) Leaves (times)	2.4	2.5	2.7	2.6	2.5	2.1	2.2	2.0	1.7	1.5	1.3	-0.97 p<0.01

表 6 不同酚浓度下凤眼莲开花初始天数

Tab. 6 Duration for first blooming of the hyacinths growing on wastewater with different phenol conc.

酚浓度 Phenol conc. (mg/l)	0	1	5	10	25	40	55	70	90	120	150
初始开花天数 Duration for first blooming (days)	22	21	20	20	19	18	18	17	16	15	14

6. 凤眼莲对酚的耐受性及恢复生长能力

当第一批试验进行12天以后, 将配制的含酚废水倒掉, 换上补加适量营养液的原排放废水(浓度见表1), 继续进行恢复生长试验。10天以后, 350mg/l以上浓度组凤眼莲死亡或接近死亡, 不能恢复生长; 350mg/l及以下浓度组凤眼莲逐渐恢复生长。叶色由黄转绿, 叶绿素含量增加, 植株逐渐增大并进行无性繁殖, 生长逐渐趋于正常。

讨 论

1. 高浓度是酚抑制凤眼莲生长的主要因素

在本试验条件下, 除了少数低浓度组外, 随着酚浓度的升高, 凤眼莲受抑制程度加剧。600mg/l以上浓度的酚使凤眼莲几天之内中毒死亡, 酚浓度350mg/l亦造成不可恢复的损伤, 酚浓度40mg/l以上使凤眼莲生长受到不同程度的抑制, 25mg/l以下抑制影响较小。

从多年的水质资料来看, 燕山公司二级出水中酚含量一般在10mg/l以下, 超过25mg/l的很少。由此可见, 在一般情况下, 该废水中的酚对凤眼莲生长不会造成严重不利影响。室内培养和室外放养试验表明, 试验用废水(表1)对凤眼莲生长无明显抑制作用, 与用自来水代替废水进行的平行试验结果相似。各浓度组凤眼莲生长及受害情况与相应各废水试验组差别不显著, 说明废水中污染组分没有明显增加酚对凤眼莲的毒性影响。

凤眼莲对燕山石化废水有很强的净化能力^[4,8]。凤眼莲体内的酶系统可催化酚的降解和代谢过程^[10]。因此,在一定的条件下,酚甚至可作为一种营养物质被凤眼莲利用。从试验结果可以看出,有时低浓度组凤眼莲的叶绿素含量,光合作用速率、生长率等甚至超过对照组(图 1, 2; 表 4)。可见,一定浓度下的酚对凤眼莲生长还有一定的促进作用。

2. 接触时间对凤眼莲受害程度有重要影响

植株与含酚废水接触时间亦是影响凤眼莲受酚毒害程度的一个重要因素。由试验结果可知,除少数低浓度组以外,在同样的酚浓度下,随着试验时间的延长,凤眼莲受害症状逐渐加重。试验 12 天时叶绿素 a/b 比值虽然随着酚浓度的升高有下降的趋势,但尚未达到显著的相关水平(未列入),然而试验 25 天的叶绿素 a/b 比值随酚浓度升高而明显降低,两者呈极为显著的负相关(表 3)。酚对叶片光合作用的影响随处理时间延长而明显加剧(表 4)。有报道说,当酚浓度在 200—250mg/l 以下时,凤眼莲生长没有任何影响,相反对酚有最大吸收^[11]。我们在试验中观察到,几天之内 200 和 250mg/l 浓度组凤眼莲未产生肉眼可见的伤害症状,但根、叶细胞已部分受到损害。时间延长、根的长度、叶绿素含量及 a/b 比率、生长量等均降低,症状也逐渐出现。说明 200 和 250mg/l 的酚已对凤眼莲生长有抑制作用。由此看来,凤眼莲与含酚废水接触时间也是酚对凤眼莲毒性效应的一个不可忽视的因素。

在本半动态试验条件下,由于凤眼莲对酚的净化作用和酚自身的挥发降解等过程使每次更换试验液之后酚浓度逐渐下降,凤眼莲所承受的实际上是断续的高浓度的冲击负荷、标志各浓度组的酚浓度值实际上是该浓度组的最高值。本试验结果难免与酚浓度恒定不变(实际上难以办到)条件下的情况有出入,但是较之一次性冲击的静态试验更能反映酚对凤眼莲的实际影响。酚浓度随时间延长而不断变化,凤眼莲受酚毒害程度受到酚浓度和接触时间的综合影响。

3. 强光能增强酚对凤眼莲的危害程度

关于光照强度对凤眼莲净化酚速率的影响已有一些报道^[6,8]。但关于光强对酚对凤眼莲毒性的影响尚未见有报道。为比较不同日照条件下凤眼莲受害症状,曾于第一批试验开始(上午 8 时、晴)当日下午 6 时另设 0、200、400、600 和 800mg/l 5 个浓度组迟 10 个小时开始试验。当天晚上未出现明显的可见症状。第二天阴天,仍未见明显可见症状。至第三天早晨 8 点左右(晴)、酚浓度 800 和 600mg/l 浓度组凤眼莲迅速出现叶斑块等前述的可见症状。这说明酚对凤眼莲的毒性影响在较强的光照条件下能更快地发挥作用。有研究指出,光照强度对凤眼莲降解酚速率的影响不显著,光照在凤眼莲净化酚的过程中不是必需的,即使在黑暗条件下叶组织仍有降酚作用^[6]。然而在强烈光照下,光合作用,蒸腾作用及根的吸收作用均加强^[3]。大量的酚被输送到叶组织。因此,在强烈光照下,酚向叶输导占优势,在弱光或黑暗条件下,酚的降解占优势。叶组织中酚的积累与降解的不平衡使酚积累量不同,由此产生不同的毒性效应。另一方面,酚对凤眼莲的毒性与光照强度直接相关。因为在同样的酚浓度下,光照处理比遮光处理叶片的光合作用速率下降得多(表 4)。在不同的光照强度下,酚对凤眼莲的毒性也有所不同。此外,本试验中高浓度组

凤眼莲在较长时间内未出现可见症状与前面讨论的试验液酚浓度下降也有一定关系。

4. 酚对凤眼莲的危害程度与其在植物体内的转移和积累相关

高浓度的酚存在于植物细胞的内环境和外环境可使蛋白质变性^[3]。细胞结构蛋白遭受破坏,酶的生物活性降低以致丧失,细胞的功能结构受到损害。酚对凤眼莲的影响是多方面的。在一定浓度酚的胁迫下,凤眼莲叶、根器官分别受到不同程度的损伤,根的长度、叶绿素含量及 a/b 比率、光合作用速率、生长率、无性繁殖率以及开花时间等均受到不同程度的影响。严重者可导致全株死亡。

在叶片出现可见症状之前,显微观察可见叶表皮细胞气孔关闭,叶绿细胞由鲜绿色变成桔黄色、细胞周围间有不规则黑色质团,部分细胞解体。根部在出现肉眼可见症状之前亦可见部分根尖细胞解体。由此看来,叶、根细胞受损先于外部症状出现。不仅如此,凤眼莲受酚毒害的可见症状在不同的酚浓度下的一定时期内分别从不同的部位表现出来。当酚浓度较高时,很短时间内叶的受害症状即非常明显地表现出来;当酚浓度较低时,根部在几天以后一般都会逐渐出现症状。叶的可见症状一般出现较晚,甚至一直未见明显的症状。这一方面由于酚较活跃,流动性大、由根部吸收后能迅速地向上转移到叶,酚在叶片中的含量远高于根部^[7]。凤眼莲叶片经 400, 600, 800mg/l 酚处理数小时后,光合作用速率即大幅度降低以致完全丧失光合作用活性(表 4)。可见短时间内叶的主要功能结构已遭严重破坏。然而在一定的酚浓度下,虽然酚被输送到叶,但由于凤眼莲对酚的降解作用^[6-8],即使酚对叶细胞有一定的损伤,但不足以使细胞组织迅速解体。这样使受害症状推迟以致不出现。根直接接触酚溶液,酚长时间的毒害导致须根融化、断裂(表 2)。在一定酚浓度下,随着时间的延续,叶绿素含量减少(图 1, 2),尤其是叶绿素 a 减少得更多(表 3)。叶绿素正常的比例改变。这使光合作用速率降低、光合产物减少,不能满足生长的需要。由此还可间接地影响到组织中物质代谢的平衡。这种间接的影响在根部尤为明显,因为叶器官光合作用合成物质数量不足,将只有更少的份额被输送到根部,从而导致根生长受抑制以致结构受损。

5. 酚能促进凤眼莲提早开花

由于凤眼莲无性繁殖即以腋芽发育形成新植株,在很大程度上是以营养生长为基础的,因此必然受到酚的影响。酚使凤眼莲营养生长受影响,由此影响到新器官的发育和形态建成。酚对凤眼莲无性繁殖的影响与对营养生长影响的趋势基本上是一致的(表 5)。

关于植物成花生理,虽然假说众多,但无一定论。有的研究者指出生长素、赤霉素及三碘苯甲酸等物质可能与植物开花有关^[3,9]。关于酚类物质对植物开花的影响迄今未见报道。在本试验条件下,酚处理浓度愈高、凤眼莲开花愈早(表 6)。说明酚对凤眼莲开花有促进作用。由前面的讨论可知,凤眼莲开花提早时间与生长及无性繁殖受抑制程度基本上是一致的。在生物界,环境条件适宜时行无性繁殖,条件不利时营有性繁殖的发育生理现象普遍存在,凤眼莲也显示此一现象,并且在不同浓度酚的胁迫下表现得比较典型。关于酚以何种途径诱导凤眼莲提早开花,有待研究揭示。

参 考 文 献

- [1] 孙连芳, 1982。利用水生植物监测和净化鞍钢污水的研究。环境科学丛刊, 3(2): 10—12。
- [2] 华东师大生物系, 1980。植物生理学实验指导。86—90。高等教育出版社。
- [3] 杨学荣, 1981。植物生理学。290—306。高等教育出版社。
- [4] 吴振斌、丘昌强、夏宜铮、王德铭, 1987。凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 I. 动态模拟试验。水生生物学报, 11(2): 139—150。
- [5] 薛应龙, 1985。植物生理学实验手册。100—104。上海科学技术出版社。
- [6] 谭常、王崇效、邵根福、董建国、余叔文, 1986。凤眼莲净化含酚污水的研究 II. 组织, 细胞和匀浆水平的试验。环境科学学报, 6(2): 216—224。
- [7] 吴玉树、鲍奕佳, 1984。酚、氯在凤眼莲—水体系统中的迁移、积累及净化。植物生态学与地植物学丛刊, 8(4): 336—345。
- [8] 刘厚田, 1984。凤眼莲对污水中酚的净化能力的研究。水土保持通讯, (2): 34—36。
- [9] Leopold, A.C., 1975. Plant Growth and Development, Second Edition. 1—56. McGraw-Hill。
- [10] Wolverton, B. C., McKown, M. M., 1976. Hyacinths for removal of phenol from polluted waters. *Aquatic Botany*, (2): 192—201。

EFFECTS OF THE PHENOL IN PETROCHEMICAL WASTEWATER ON THE GROWTH OF WATER HYACINTH

Wu Zhenbin, Xia Yicheng, Qiu Changqiang and Wang Deming

(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan)

Abstract

Semi-dynamic phenol toxicologic simulation test has been conducted. Results showed that when phenol concentration (cp) in water was above 600 mg/l, the hyacinths died in a few days; when cp was higher than 40 mg/l, the growth of hyacinths slowed down to various extents, with leaves and roots partially or totally damaged, and the chlorophyll content, chl. a/b ratio, photosynthesis speed and growth rate all decreased successively as cp was rising. Intense sun-light aggravated the toxic effect of phenol on the plant. Phenol with concentrations lower than 25 mg/l had little inhibitory effect on the hyacinths and, with cp lower than 10 mg/l, it could actually promote the growth of the plant. It was found that phenol at lower concentration could inhibit asexual reproduction but could promote earlier blooming of the hyacinths.

Key words Phenol, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)