

# 浮萍净化氮磷污水生长条件研究

沈根祥<sup>1,2</sup>, 胡 宏<sup>1</sup>, 沈东升<sup>1</sup>, 朱荫湄<sup>1</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘 要:** 对分布在长江三角洲地区的 5 个浮萍品种, 通过不同环境温度下氮磷模拟污水化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)三因素三水平正交试验, 分别确定了 5 个浮萍品种在氮磷污水中的最佳生长条件, 从而为进一步筛选长江三角洲地区高效净化氮磷污水的浮萍优化品种及其氮磷污水净化技术革新提供了基础。

**关键词:** 浮萍; 氮磷污水; 生长条件; 正交试验; 污水处理

中图分类号: X506

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0284-04

## 0 引 言

当前, 在沿海经济发达地区, 由集约化畜禽养殖场和农村城镇居民生活产生的氮磷有机污水, 对水体环境的污染危害十分严重。在部分地区, 来自畜禽养殖和农村生活的氮磷污水, 对水体环境的污染负荷甚至远超过当地工业企业的污染负荷总和, 成为农村生态环境中最主要和最严重的污染源<sup>[1,2]</sup>。

由于受农村经济和技术管理水平的限制, 畜禽养殖和农村生活的氮磷污水净化难以采用工业污水的净化方法, 需要一种投资省、运行费用低、操作管理简便、适合农村特点、容易推广的就地净化技术。利用水生植物净化氮磷污水, 是一种最为经济有效和容易推广的处理技术, 一直受世界各国的高度重视。但长期的实践证明, 利用大型水生植物(水花生、水葫芦、水浮莲等)净化氮磷污水, 虽然净化效果良好, 但由于植物体形状体积大, 不易回收, 且多纤维营养价值低等原因, 难以真正做到资源化回收利用, 因而存在二次污染问题<sup>[3]</sup>。

与大型水生植物相比, 小型水生植物浮萍不仅具有吸收氮磷能力强, 生长速度快的特点, 而且还有如下优点: 1) 体积小, 容易收获; 2) 营养价值高, 低纤维、高蛋白, 叶黄酸和赖氨酸含量丰富, 可替代玉米大豆作为高蛋白畜禽、水产等动物饲料(干物质蛋白质含量高达 30% 以上); 3) 重金属富集低, 安全性好<sup>[4]</sup>。因此, 利用浮萍不仅可对污水中的氮磷等有机污染物进行深度吸收净化, 出水达到地面水排放标准要求, 而且还可将氮磷等有机污染物转化为易收获、优质、安全的高蛋白动物饲料资源, 从而真正达到高效、经济、利于生态和资源化的目标<sup>[5]</sup>。尤其在目前全球高蛋白动物饲料资源普遍紧缺的情况下, 该项技术引起了美国、荷兰、德国等欧美发达国家广泛的关注, 并在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初, 掀起了研究和应用浮萍净化氮磷污水及其资源化利用的热潮, 美国国家环保局也因此将它推荐为深度净化

氮磷污水及其资源化利用的最佳革新技术<sup>[6-9]</sup>。

我国浮萍品种资源较为丰富, 广布南北各省。但对浮萍的研究, 过去仅局限在如下两个方面: 1) 浮萍营养价值及其饲喂畜禽、水产的效果; 2) 浮萍的药用成分及其药用效果<sup>[10]</sup>。而在利用浮萍净化氮磷污水及其资源化利用的研究上, 国内至今尚未有专门的研究报道。

本文针对上述现状, 以广泛分布在长江三角洲地区的 5 个浮萍品种为研究对象, 通过不同环境温度下氮磷模拟污水化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)三因素三水平正交试验, 确定 5 个浮萍品种在氮磷污水中的最佳生长条件, 从而为进一步开展利用浮萍净化氮磷污水及其资源化利用的研究与应用工作提供必要的基础依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试验品种

根据浙江、江苏和上海的《植物志》浮萍科中提及的浮萍品种, 从上海和杭州市郊区野外采集了代表长江三角洲地区的青萍(*Lemna minor*)、稀脉浮萍(*Lemna perpusilla*)、紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)、少根紫萍(*Spirodela oligorrhiza*)和芜萍(*Wolffia arrhiza*) 5 种浮萍品种, 并用稀释的厌氧猪场污水(COD<sub>Cr</sub> 480 0 mg/L、总凯氏氮 TKN 67.0 mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 50.0 mg/L、TP 27.5 mg/L 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 12.2 mg/L), 在温室条件下进行放大培养两周后使用。

### 1.2 试验用污水

按 COD (400, 800, 1500 mg/L)、TN (80, 120, 200 mg/L) 和 TP (20, 50, 80 mg/L) 三因素三水平正交试验要求, 用蔗糖、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 和 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 3H<sub>2</sub>O 人工配制 9 组模拟氮磷污水, 其组合如表 1 所示。根据畜禽养殖污水组成及植物营养需要, 在各组模拟污水中添加的其他大量和微量元素含量成分分配比如表 2 所示。试验用模拟污水的 pH 值为 6.5 左右。

### 1.3 试验方法

选用外径 7.0 cm 和高 10.0 cm 的不透光塑料饮料杯为试验容器, 在杯中分别装入 200 mL 上述 9 组正交

收稿日期: 2003-07-11 修订日期: 2003-11-04

作者简介: 沈根祥, 副研究员, 在职博士生, 美国农业工程学会会员, 上海市钦州路 508 号 上海市环境科学研究院, 200233。Email: shen\_gx@sina.com

试验用模拟氮磷污水。对已放大培养的 5 种浮萍品种, 挑选健康的生物植株, 经自来水漂洗去除污垢和杂质后, 按 50% 左右表面覆盖率投放到试验容器(各浮萍品种鲜重投放量青萍、稀脉浮萍和少根紫萍均为 0.50 g、芜萍 0.60 g、紫萍 1.00 g)。各浮萍品种每组处理水平设三个重复, 并按光照度 3000 lx (每日光照 16 h), 温度分别为 15、25 和 35, 将上述五种浮萍品种进行试验培养两周, 并以各浮萍品种试验前后的鲜重生物量为测定指标。试验期间, 每天对试验杯中蒸发掉的水分用蒸馏水补充。

表 1 正交试验用污水营养成分组合

因 素	组 号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
COD	1 (400)	1	1	2 (800)	2	2	3 (1500)	3	3
TN	1 (80)	2 (120)	3 (200)	1	2	3	1	2	3
TP	1 (20)	2 (50)	3 (80)	2	3	1	3	1	2

注: 括号内为相应营养成分的浓度, 单位为 mg/L。

表 2 正交试验用污水常量和微量元素成分组合

Table 2 Other nutrients of wastewater in orthogonal test groups						mg/L
成分	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> EDTA · 2H <sub>2</sub> O	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O
浓度	529	522	407	52.5	39.2	13.5
成分	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	MnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	NaMoO <sub>4</sub>	
浓度	4.7	3.9	2.7	0.10	0.04	

1.4 测定方法

浮萍鲜重测定方法采用国外相关研究所用的方法<sup>[6]</sup>, 即用滤水网斗将需测定的浮萍从漂洗的水中捞起, 滤去自由水(无水滴出现), 将待测浮萍平铺放置在吸水的卫生纸垫上, 吸水 5 min 后, 用精度为 0.01 g 的电子天平进行测定。

2 结果与分析

2.1 不同环境温度下正交试验培养浮萍生长结果

表 3 为不同环境温度下 5 个浮萍品种 COD、TN 和 TP 三因素三水平正交试验培养 2 周后, 单位鲜重生物量增减结果。表中数据为各浮萍品种在各组处理水平下的重复试验结果 ( $P > 0.4$ ) 平均值。

2.2 各类浮萍正交试验结果直观分析

1) 不同环境温度下影响各类浮萍生长的营养因素主次顺序

表 3 不同环境温度下 5 种浮萍品种正交试验培养生长结果

Table 3 Orthogonal test culture results of five species of duckweed at different ambient temperatures										鲜质量 g/g
品种及温度		试验组号								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
芜萍	15	- 0.98	- 0.98	- 0.98	- 0.47	- 0.88	- 0.98	- 0.66	- 0.84	- 1.00
	25	0.16	0.02	- 0.25	0.07	- 0.15	- 0.77	0.17	0.23	- 0.58
	35	0.18	0.03	- 0.57	- 0.32	- 0.87	- 1.00	- 0.47	- 1.00	- 1.00
稀脉浮萍	15	2.50	1.90	1.34	4.78	2.58	3.94	4.44	6.07	5.26
	25	2.02	1.54	1.46	2.76	1.88	1.72	3.04	3.50	2.80
	35	2.44	1.28	- 0.46	2.28	0.60	- 0.88	- 0.24	1.84	- 0.44
紫萍	15	0.65	0.45	0.23	0.53	0.35	0.28	- 0.87	1.00	1.28
	25	1.26	1.39	1.40	1.56	2.04	1.98	2.36	1.93	2.23
	35	0.80	0.62	0.00	1.04	0.88	2.28	1.36	2.20	1.02
青萍	15	0.38	- 1.00	- 1.00	0.02	- 0.90	- 1.00	- 0.08	0.08	- 1.00
	25	1.60	1.12	- 0.52	3.17	0.50	0.78	1.00	2.12	- 1.00
	35	4.65	- 0.73	- 0.85	4.33	- 0.78	- 1.00	3.85	4.78	- 1.00
少根紫萍	15	0.38	0.10	0.16	0.44	0.24	0.86	0.10	0.54	0.66
	25	0.98	0.92	1.48	2.64	2.04	0.94	3.40	3.48	2.68
	35	0.24	- 0.14	- 1.00	0.20	- 0.32	- 0.84	- 0.80	0.50	0.20

注: 鲜质量 g/g 表示单位浮萍生物量在污水中生长一段时间后的增量, 其中分母代表初始浮萍的生物量(或投入量), 分子代表浮萍生长后的产量(如条件不合适, 浮萍死亡, 分子为负值), 下同。

经对表 1 和表 3 进行正交试验结果直观分析<sup>[11]</sup>,按照各类浮萍品种在不同环境温度下 COD、TN 和 TP 三因素三水平正交试验培养生长结果级差计算值,得到 5 个浮萍品种在 15、25 和 35 环境温度下,影响生长量的 COD、TN 和 TP 营养因素主次顺序为表 4 所示。

表 4 不同环境温度下影响 5 个浮萍品种生长的  
营养因素主次顺序

Table 3 Order of nutrients affecting on grow th of five species of duckweed at different ambient temperatures

温度	品 种				
	茭萍	稀脉浮萍	紫萍	青萍	少根紫萍
15	N>C>P	C>P>N	P>N>C	N>P>C	P>C>N
25	N>C>P	C>P>N	C>P>N	N>P>C	C>N>P
35	C>N>P	P>N>C	P>C>N	N>P>C	P>N>C

注:表中C代表COD,N代表TN,P代表TP。

由表 4 可见,同一环境温度下,影响 5 个浮萍品种生长的营养因素主次顺序总体上各不相同;而对同一浮萍品种,在不同环境温度下,除青萍呈现相同的营养因素主次顺序,其余品种均有变化。从中说明,在利用浮萍净化氮磷有机污水时,为了保证浮萍良好生长和污染物净化效果,必须针对不同氮磷有机污水营养配比和环境温度的变化,选择合适的浮萍品种。

2) 不同环境温度下各类浮萍最佳生长营养组合

由表 1 和表 3 进行正交试验结果直观分析,得到不同环境温度下 5 个浮萍品种最佳生长 COD、TN 和 TP 营养组合(图 1~ 3)。从中可知,少根紫萍在 15~ 35 范围内最佳生长营养条件为,COD、TN 和 TP 均保持在 2 水平以上的浓度强度,表明具有十分良好的耐污能力;紫萍除 35 高温时 TP 需保持在 1 水平的浓度强度,其

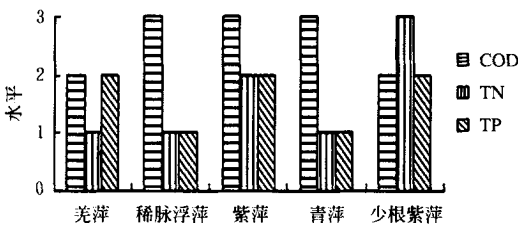


图 1 5 个浮萍品种 15 时最佳生长营养组合  
Fig 1 Relationship of optimum growth of five species of duckweed and combination of nutrients in wastewater at 15

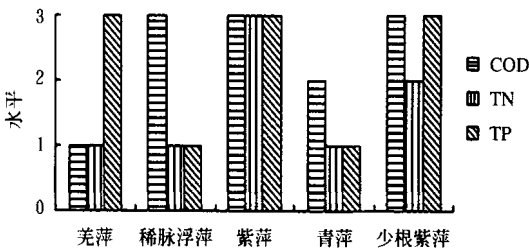


图 2 5 个浮萍品种 25 时最佳生长营养组合  
Fig 2 Relationship of optimum growth of five species of duckweed and combination of nutrients in wastewater at 25

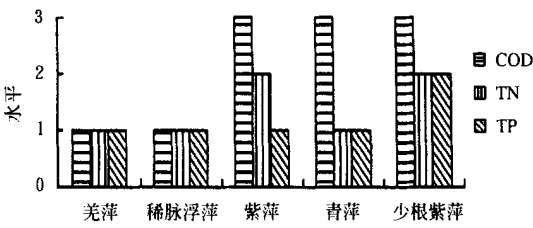


图 3 5 个浮萍品种 35 时最佳生长营养组合  
Fig 3 Relationship of optimum growth of five species of duckweed and combination of nutrients in wastewater at 35

余在 15~ 35 范围内也都保持在 2 水平以上的浓度强度,尤其在 25 时,COD、TN 和 TP 均保持在 3 水平的浓度强度,因此也具有良好的耐污能力。相对而言,其它浮萍品种在各环境温度下,最佳生长营养因素条件总体上保持在较低水平,表明对氮磷有机污水的耐污能力比较低。

3) 不同环境温度下各类浮萍最佳营养组合生长理论产量

表 5 为对表 1 和表 3 进行直观分析后,计算获得的不同环境温度条件下 5 种浮萍品种最佳营养组合生长理论产量。由表 5 可见,随环境温度的变化,各类浮萍最佳营养组合生长理论产量也呈现不同的变化趋势。在 15~ 35 范围内,茭萍、紫萍和青萍的最佳营养组合生长理论产量随环境温度的升高而递增,表明这三种浮萍品种为喜热品种,并有可能耐热能力也较强;少根紫萍在 25 条件下达到最佳理论产量高峰,表明该浮萍品种为喜温热浮萍品种;而稀脉浮萍则随环境温度的升高而下降,表明为喜低温浮萍品种,并有可能耐寒能力也比较强。单从各类浮萍生物产量最高值来看,虽然稀脉浮萍和青萍对氮磷有机污水的耐污能力不高,但在 15 和 35 时分别达到了各类浮萍品种的最高生长产量;而耐污能力相对最强的少根紫萍在 25 时达到了各类浮萍品种的最高生长产量。

表 5 不同环境温度下 5 个浮萍品种最佳生长理论产量

Table 5 Theoretical production of five species of duckweed under optimum growth condition at different ambient temperatures 鲜质量 g/g

温度	品 种				
/	茭萍	稀脉浮萍	紫萍	青萍	少根紫萍
15	0.34	6.14	1.10	0.59	0.89
25	0.27	3.53	2.39	2.96	3.71
35	0.37	2.64	2.50	6.68	0.50

3 结论与展望

经对长江三角洲地区广泛分布的 5 种浮萍品种不同环境温度下 COD、TN 和 TP 三因素三水平正交试验及其结果直观分析表明,影响浮萍生长的 COD、TN 和 TP 营养因素主次顺序因品种和环境温度变化而变化,并在不同的环境温度条件下,各浮萍品种具有不同最佳生长营养组合,其中少根紫萍和紫萍对氮磷有机污水具有良好的耐污能力。此外,研究结果表明,在 15~ 35 范围内,茭萍、紫萍和青萍 3 种品种为喜热浮萍品种,少

根紫萍为喜温热浮萍品种, 而稀脉浮萍为喜低温浮萍品种。

本研究结果对进一步开展利用浮萍净化氮磷有机污水的研究与应用提供了良好的基础参考依据。尤其是在本研究结果基础上, 通过对各类浮萍品种净化氮磷有机污水的效果、植物体蛋白质含量及其产量和冬季耐寒能力的比较试验, 可筛选确定适合长江三角洲地区气候特点的高效净化氮磷有机污水的浮萍优化品种, 从而为解决长江三角洲地区乃至我国其他气候类似地区畜禽养殖和农村生活产生的氮磷有机污水污染环境问题的, 寻找一条适合农村和农业特点的高效、低耗、易操作和能资源化回收利用的生态途径。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张大弟, 沈根祥, 张晓红, 等. 上海市郊非点源污染综合调查评价[J]. 上海农业学报, 1997, 13(1): 31~ 35
- [2] 黄沈发, 陈长虹, 贺 军, 等. 黄浦江上游汇水区畜禽业污染及其防治对策[J]. 上海环境科学, 1994, 13(5): 4~ 8
- [3] Tripathi B D, Brahma D, Tripathi, Jaya Srivastave, et al Nitrogen and phosphorus removal-capacity of four chosen aquatic macrophytes in tropical freshwater ponds [J]. Environmental Conservation, 1991, 18 (2): 143~ 147.
- [4] Gideon O ron. Duckweed culture for wastewater renova-

tion and biomass production[J]. Agricultural Water Management, 1994, 26: 27~ 40

- [5] M bagwu I G, A deniji H A. The nutritional content of duckweed (*L en na puntata*) in the Kainji Lake area, Nigeria[J]. Aquatic Botany, 1988, 29: 357~ 366
- [6] Bergmann B A, Cheng J, Classen J, et al In vitro selection of duckweed geographical isolates for nutrient recovery from swine lagoon effluent[J]. Bioresource Technology, 2000, 73(1): 13~ 20
- [7] Cheng J, Bergmann B A, Classen J, et al Nutrient recovery from swine lagoon water by *Spirodela punctata* [J]. Bioresource Technology, 2002, 81(1): 81~ 85
- [8] Caicedo J R, Van der Steen N. P, Arce O, et al Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) [J]. Water Research, 2000, 34(15): 3829~ 3835
- [9] A laerts G J, Rahman M ahbusbar M D, Keldeman P, et al Performance analysis of a full-scale duckweed covered sewage lagoon [J]. Water Research, 1996, 30(4): 843~ 845
- [10] 印万芬. 我国主要浮萍科植物的综合开发利用[J]. 资源节约和综合利用, 1998, 2: 46~ 48
- [11] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1992, 427~ 464

## Growing conditions of five species of duckweed for nutrient-rich wastewater treatment

Shen Genxiang<sup>1,2</sup>, Hu Hong<sup>1</sup>, Shen Dongsheng<sup>1</sup>, Zhu Yimei<sup>1</sup>

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;

2 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** With orthogonal tests of three levels of Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) in artificial nutrient-rich wastewater at different ambient temperatures, the optimum growth conditions of five species of duckweed collected from the Yangtze River Delta were studied. The results could be applied to superior duckweed species selection, with which nutrient-rich wastewater treatment could be renovated in the Yangtze River Delta.

**Key words:** duckweed; nutrient-rich wastewater; growing conditions; orthogonal test; wastewater treatment