

凤眼莲净化城市污水厂二级出水中的氮和磷

刘冠南 冯生华 张大群

(天津市市政工程勘测设计院)

摘要 本文系实验室小试及模拟河道中试情况,利用凤眼莲净化二级出水氮、磷,水力停留时间3~5日,TN、TP去除率分别可达40%和68%以上。凤眼莲净化TN负荷是密度及温度的函数。通过试验确定了凤眼莲在二级出水的Logistic增长计算参数 r 、 k 。

一、前言

水资源的短缺在我国北方地区已成为障碍工、农业生产以及人民生活的突出问题之一。合理开发,回用污水资源对许多城市来说已是一项极有意义的工作。利用处理后的污水补充和回用城市公共用水等低质用水,是解决目前城市用水紧张的有效途径之一。利用高等水生植物凤眼莲对河道放流的城市二级处理出水进行补充净化,使水质在放流中稳定和提高是保证回用水质的必要和有效措施。目前国内、外在这方面的研究甚少。本研究旨在经小试、中试考察和探讨凤眼莲对二级出水氮、磷的净化负荷及能力,并提出有关参数。

利用凤眼莲净化污水,主要通过植物体对氮、磷等营养物的摄取,使浸没于水下的须根及根系微生物对氮、磷等物质进行吸附、分解和吸收。其次,与凤眼莲共生生物的分解、吸收,加以污染物的沉淀及底泥中微生物的吸附、分解和吸收等共同达到净化

目的。故本文所论及的凤眼莲对氮、磷的净化,实际上是一个以凤眼莲为主的复合净化系统的综合净化。

二、试验方法及条件

(一)小试

小试在室外自然条件下进行,运行分别采用静态和直接推流动态方式。供试水样取自天津市纪庄子污水处理厂二沉池出水。试验测定进、出水TN($\text{TKN} + \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N}$)、TP及凤眼莲增长量。静、动态小试装置及流程如图1、图2所示。



图1 静态小试装置示意图

小试条件:

多情况下应用,得到检验、校正和改进。同时,为能在更严格的统计理论上进行分析,还可把较完整的水位系列与不完整的流量系列作为一个由两个随机过程组成的系统进行统一模拟。至于多支流流量分配关系问题,除了还应做更多实测工作外,还可以从邻近水位、降雨、干流流量等多因素进行多元统计关联分析,深入探究。这些都是值

得进一步研究的问题。

参考文献

- [1]Brendeck, C.M.etc., Water Resources, 115(5), 686~696(1989)。
- [2]Godfrey A. Walters, Hydraulic Engineering, 115(8), 1157~1161(1989)。
- [3]董雅文等,环境科学,4, 75~82(1986)。
- [4]清华大学应用数学系,概率论与数理统计,吉林教育出版社,长春, 172~191(1987)。

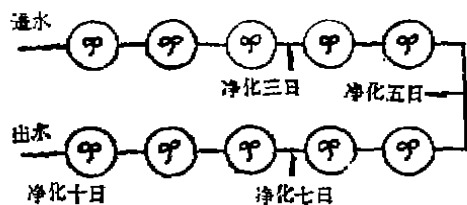


图2 动态小试装置示意图

试验水量—10L/个(缸)

动态试验流量—10L/d

凤眼莲初始量—0.25kg(鲜重)/个
(缸)

停留时间—3, 5, 7, 10(d)

试验历时—静态: 7月6日至17日

动态: 8月7日至17日

(二) 中试

中试在天津市纪庄子污水处理厂“城市污水资源化实验基地”模拟河道中进行。供水引自纪庄子污水处理厂二沉池出水。试验采用直接推流方式连续运行。试验中分别测定进、出水TN、TP, 并通过样方试验对凤眼莲增长进行定量研究。中试装置如图3所示。

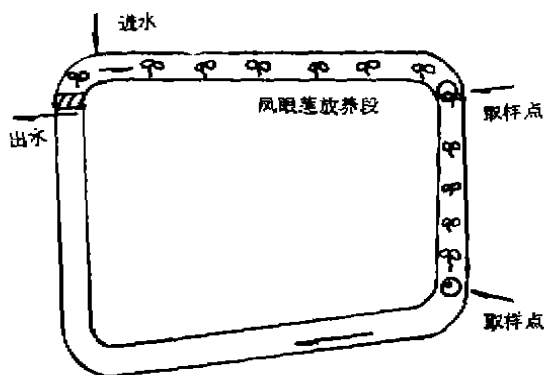


图3 中试装置示意图

中试条件:

凤眼莲放养段长: 191m

凤眼莲放养面积: 621m²

凤眼莲放养段容量: 350m³

河道有效水深: 0.85m

试验水量: 70~140m³/d

凤眼莲净化停留时间: 2.5~5d

试验历时: 7月~11月

凤眼莲密度: 4.74~18.1kg/m²(水面)

8.34~31.8kg/k³(污水)

样方试验: 1×1m²

三、试验结果及讨论

(一) 凤眼莲净化二级出水氮、磷负荷及能力

表1、表2为静、动态小试结果。表3为中试结果。

1. 凤眼莲净化TN负荷及能力

对表1中t与M和t与f_N的相关分析表明, 在凤眼莲净化TN过程中, 其体积密度和净化TN负荷分别与停留时间的对数成近似线性相关。回归结果得到:

$$\ln t = 0.0928 \cdot M + (-1.524) \quad (1)$$

$$\ln t = -9.624 f_N + 2.473 \quad (2)$$

合并(1)、(2)式即得到:

$$f_N = 0.415 - 0.00964M \quad (3)$$

温度的改变直接影响凤眼莲的增长和对营养物的吸收。为此需对(3)式在不同月份里因凤眼莲增长速率改变而引起的净化负荷变化进行修正。表4给出了根据不同月份凤眼莲增长率分析确定的修正系数值L。

将修正系数L代入(3)式后得到:

$$f_N = L \cdot (0.415 - 0.00964M) \quad (5)$$

(5)式考虑了凤眼莲体积密度和温度对实际净化TN负荷的影响而建立的经验式。它表明当进水TN浓度、流量、水力停留时间确定后, 凤眼莲净化负荷是体积密度的函数, 并随季节的变化而改变。

应用(5)式对中试凤眼莲净化TN实测负荷进行验算, 计算结果较实测偏差在-18.9~9.8%之间, 见表3。

试验结果表明, 凤眼莲无论在静态还是动态运行中对TN均有很高的去除率。凤眼莲密度、净化时间、季节的变化对净化TN都有较明显的影响。为此我们将各影响因素整理得到,

$$C_{N出} = C_{N进} - M \cdot t \cdot l \cdot (0.415 - 0.00964M) \quad (6)$$

表1 凤眼莲净化二级出水氮、磷静态小试结果

净化停留时间 t (d)	0	3	5	7	10
凤眼莲重量 (kg)	0.250	0.298	0.342	0.345	0.422
凤眼莲体积密度 M (kg/m ³)	25.0	29.8	34.2	34.5	42.2
TN浓度 (mg/L)	145.96	1.76	1.25	3.74	1.71
TN去除率 (%)	—	88.2	91.6	75.0	88.6
TN去除量 (g)	—	0.132	0.137	0.112	0.132
TN凤眼莲负荷 f_N (g/kg·d)	—	0.148	0.080	0.046	0.031
TP浓度 (mg/L)	0.949	0.388	0.082	0.075	0.055
TP去除率 (%)	—	59.1	91.4	92.1	94.2
TP去除量 (g)	—	0.00561	0.00867	0.00874	0.00894
TP凤眼莲负荷 f_P (g/kg·d)	—	0.00628	0.00507	0.00362	0.00212

表2 凤眼莲净化二级出水氮磷动态小试结果

净化停留时间 t (d)	0	3	5	7	10
凤眼莲重量 (kg)	0.250 ~ 1.0	0.938	1.638	2.695	4.625
凤眼莲体积密度 M (kg/m ³)	25.0	31.3	32.8	38.5	46.2
TN浓度 (mg/L)	11.99	2.12	2.06	0.39	1.71
TN去除率 (%)	—	82.3	82.8	91.7	85.7
TN去除量 (g)	—	0.256	0.496	0.770	1.028
TN凤眼莲负荷 f_N (g/kg·d)	—	0.105	0.061	0.041	0.022
TP浓度 (mg/L)	2.36	0.114	0.078	0.068	0.052
TP去除率 (%)	—	95.1	96.6	97.1	97.8
TP去除量 (g)	—	0.0674	0.114	0.160	0.231
TP凤眼莲负荷 f_P (g/kg·d)	—	0.0240	0.0139	0.0084	0.00499

式中 $C_{N出}$ —出水TN浓度 (mg/L)

$C_{N进}$ —进水TN浓度 (mg/L)

M —凤眼莲体积密度 (kg/m³)

t —净化停留时间 (d)

L —月份修正系数

通过(6)式可对凤眼莲在不同进水浓度、体积密度、净化时间及月份里的净化后出水TN浓度进行估算,从而得到对TN的净化能力。同时也可根据处理要求对净化工艺条件进行选取和确定。

2. 凤眼莲净化TP负荷及能力

由于凤眼莲系统去除TP与净化TN过程有着较大的区别,除凤眼莲吸收一部分TP外,物理或化学沉淀过程均对TP产生去除作用。因此凤眼莲密度、水力条件、停留时间、磷的存在形式及水质等因素都会对净化TP负荷产生较大影响。虽经各影响因素修正验算,仍不能确定净化负荷与密度及各影响因素之间的定量关系。这里仅就试验结果及各相关变量之间的试验规律提出净化TP负荷选取表。试验凤眼莲平均体积密度15.0 ~

表3 凤眼莲净化二级出水氨磷中试结果

试验历时	7.17~23	8.11~17	8.1~31	9.1~27	10.5~12	10.19~11.4
净化停留时间(d)	2.5	3	5	5	5	2.5
凤眼莲总量(kg)	5291	4648.5	8523	9056	5771.5	5771.5
凤眼莲体积密度(kg/m ³)	15	23	25	26	17	16
TN进水浓度 (mg/L)	20.70	28.28	30.60	27.71	25.46	24.60
TN出水浓度 (mg/L)	10.83	15.45	14.49	15.57	14.56	20.88
TN去除率 (%)	47.7	45.4	52.6	43.8	42.8	15.1
TN总去除量 (g)	82908	5465.6	34958.7	22944.6	5341.0	8332.8
TN实测负荷 (g/kg·d)	0.261	0.196	0.132	0.0938	0.132	0.0902
月份修正系数 ¹	0.950	0.822	0.822	0.626	0.498	0.365
(5)式计算负荷(g/kg·d)	0.257	0.159	0.143	0.130	0.125	0.0952
(5)式计算实测偏差 (%)	-1.5	-18.9	8.3	9.8	-5.3	5.5
TP进水浓度 (mg/L)	0.53	1.26	1.51	2.19	1.71	2.10
TP出水浓度 (mg/L)	0.12	0.22	0.48	0.37	0.53	1.22
TP去除率 (%)	77.4	82.5	68.2	33.1	69.0	41.9
TP总去除量 (g)	344.4	436.8	2235.1	3439.8	578.2	1971.2
TP实测负荷 (g/kg·d)	0.0108	0.0157	0.00846	0.0141	0.0143	0.0213

表4 净化TN负荷5~10月修正系数

月份	7月			8月			9.1~10	9.11~20	9.21~30	10.1~10	10.11~20	10.21~31
	1~10	11~20	21~31	1~10	11~20	21~31	6.21~30	6.11~20	9.1~10	5.21~31	5.11~20	5.1~10
修正系数 L	0.890	1.018	0.950	0.880	0.822	0.750	0.690	0.626	0.560	0.498	0.430	0.365

表5 凤眼莲净化TP负荷选取表 (净化五日)

密度 (kg/m ³)		进 水 TP (mg/L)			
		<1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5
负荷范围 (g/kg·d)	<10	0.008~0.013	0.010~0.015	0.013~0.018	0.0155~0.020
	10~20	0.005~0.010	0.008~0.013	0.010~0.015	0.013~0.018
	20~30	0.003~0.008	0.005~0.010	0.008~0.013	0.010~0.015

4.62kg/m³, 进水TP浓度0.53~2.36mg/L, 实测净化TP负荷0.00212~0.0240g/kg·d。

并且随停留时间延长,密度增大负荷降低,进水浓度增高净化负荷升高。见表5。当净化时间适当缩短或延长时,表中取值乘以修正值。修正值=5/停留时间(d)。

凤眼莲净化TP能力可由下式进行估算。

$$C_{p出} = C_{p进} - M \cdot t \cdot f_p \quad (7)$$

式中 $C_{p出}$ —出水TP浓度

$C_{p进}$ —进水TP浓度

M —凤眼莲体积密度

t —净化停留时间

f_p —净化TP负荷

(二) 凤眼莲增长率测定及生长量计算

1. Logistic方程

密度是生物种群数量特性之一。这里对凤眼莲的生物量以面积密度(kg/m^2)表示,并对其在净化二级出水过程中的变化进行研究。Logistic方程是描述种群数量变化的常用模式。

$$\frac{dw}{dt} = rw \left(-\frac{k-w}{k} \right)$$

式中:

$\frac{dw}{dt}$: 种群瞬时增长速率

k : 环境容纳量

r : 内禀增长率

w : 种群数量

由Logistic方程可见, $W \rightarrow 0$ 时,

$$\frac{k-w}{k} \rightarrow 1, \text{此时 } \frac{dw}{dt} \text{ 接近指数值; 而当 } w$$

$$\text{由 } 0 \rightarrow k \text{ 时, } \frac{k-w}{k} \text{ 则由 } 1 \rightarrow 0, \frac{dw}{dt} \rightarrow 0.$$

这一方程表示种群增长速率等于种群可能有的最大增长率乘以最大增长的现实程度。它说明了种群密度与增长率之间存在着

反馈机制,这是一种明显的密度制约作用。

2. k 、 r 、 W_t 计算及样方试验

对Logistic方程积分后整理得到

$$k = \frac{W_{t1} \cdot W_{t2} \cdot W_{02} + W_{t1} \cdot W_{01} \cdot W_{02}}{W_{02} \cdot W_{t1} - W_{t2} \cdot W_{01}} - \frac{W_{t1} \cdot W_{02} \cdot W_{01} - W_{t2} \cdot W_{01} \cdot W_{02}}{W_{02} \cdot W_{t1} - W_{t2} \cdot W_{01}} \quad (8)$$

$$r = \frac{1}{t} \ln \frac{W_t (k - w_0)}{W_0 (k - w_t)} \quad (9)$$

$$W_t = \frac{k}{1 + e^{\ln \left(\frac{k}{W_0} - 1 \right) - rt}} \quad (10)$$

其中 W_{01} 、 W_{02} : 两个不同样方试验凤眼莲初始密度(kg/m^2)

w_{t1} 、 w_{t2} : 两个不同样方试验凤眼莲终止密度(kg/m^2)

r : 内禀增长率

t : 起、止所用的时间

W_0 : 起始生物量

W_t : 终止生物量

样方试验在中试河道中部设置 $1 \times 1m^2$ 固定样方框架八个,每两个为平均组,共四组。每次试验分别放入重量不同的四组生长良好的凤眼莲,经一定时间生产后再分别测定重量。并将各组数据平均值代入(8)、(9)式计算,所得结果列于表6。考虑气温的变化对凤眼莲增长的影响,推荐5~10月计算凤眼莲生物量参数 k 、 r 值列于表7。

将推荐 k 、 r 值代入(10)式,对中试凤眼莲生物量进行计算并与试验实测生物量进

表6 样方试验数据及 k、r 结果

日期	7.1~7.28				8.16~8.29				8.16~9.29				10.11~10.25			
t(d)	13				13				13				14			
样方	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
Wo	3.06	5.50	7.14	11.31	3.47	5.10	7.34	10.20	3.06	5.10	7.14	10.20	3.36	5.20	7.14	
Wt	8.77	12.44	14.70	19.98	7.95	9.49	13.26	15.30	5.10	8.36	11.01	12.85	4.80	8.98	8.57	11.33
k	$K_{1-2}, K_{1-3}, K_{1-4}, K_{2-3}, K_{2-4}, K_{3-4}$				$K_{1-2}, K_{1-3}, K_{1-4}, K_{2-3}, K_{2-4}, K_{3-4}$				$K_{1-2}, K_{1-3}, K_{1-4}, K_{2-3}, K_{2-4}, K_{3-4}$				$K_{1-2}, K_{1-3}, K_{1-4}, K_{2-3}, K_{2-4}, K_{3-4}$			
	20.10	19.81	27.80	19.50	31.66	42.19	15.88	22.10	19.52	30.58	20.43	18.17	—	11.88	12.54	8.41
																11.57
$\bar{k}$	26.84				21.11				22.15				11.43			
r	0.182	0.093	0.086	0.107	0.086	0.080	0.089	0.077	0.048	0.054	0.056	0.037	0.04	—	0.042	—
$\bar{r}$	0.097				0.083				0.049				0.041			

注: Wo、Wt均为鲜重kg/m²。K₁₋₂、K₁₋₃、K₁₋₄、K₂₋₃、K₂₋₄、K₃₋₄等表示两个不同样方号

行偏差分析,见表8。结果表明,计算对实测最大正偏差为2.40%。在下雨可能导致实测值偏高的情况下,最大负偏差为-15.2%,两者有很好的一致性。这一结果也表明凤眼莲在净化二级出水过程中的增长符合 Logistic 方程。

表7 5~10月份凤眼莲生物量计算参数k、r

参数	7月	8月	9月和6月	10月和1月
k	26.84	21.11	22.15	11.43
r	0.097	0.083	0.049	0.041

表8 凤眼莲净化二级出水中试实测密度与(10)式计算结果

日期	7.15—7.28		7.28—8.7		8.9—8.25		8.30—9.20	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
t	13		10		16		21	
W ₀	4.74	4.74	12.30	12.30	9.05	9.05	12.27	12.27
k	—	26.84	—	26.84	—	21.11	—	22.15
r	—	0.097	—	0.097	—	0.083	—	0.044
W _t	12.30	11.56	18.10	18.53	18.40	15.60	16.90	17.20
偏差%	-6.0		2.4		-15.2		1.78	

(三) 讨论

1.本文中凤眼莲净化TN负荷系指凤眼莲净化二级出水过程中实际去除的TN负荷率。(5)式确定了在试验条件下M与f_N的经验函数关系。由于试验条件所限,(5)式的适用范围也相应受到限制。从(5)式可见其M的取值范围为 $\leq 43\text{kg/m}^3$,但当M=0时,显然与实际不符。一般情况,凤眼莲密度 $M > 10\text{kg/m}^3$ 时,方可构成一定的净化能力,并且对一般河道和水质等条件, $M > 43\text{kg/m}^3$ 时,凤眼莲增长会明显受到抑制而

使其净化能力降至较低的水平。因此在实际应用中M一般选择在 $10 \sim 35\text{kg/m}^3$ 之间。净化负荷月份修正系数受气温、水温、光照及水质等因素影响。故当上述条件与本试验条件相差较大时,应对修正系数进行实地测定。另外当水深超过1m时,也可能对(5)式计算结果产生较大偏差。

凤眼莲净化TP负荷选取表中未对月份改变提出修正。原因在于试验结果的TP去除量并未随月份改变呈现规律性变化。由于TP的净化过程较为复杂,仅能对其净化负荷和效果进行粗略的估算。笔者认为对凤眼莲净化二级出水TP,在净化时间3~7天时,采用表5数据,经(7)式计算可基本满足设计及运行的需要。

2.由表1、2小试及表3中试结果可见,同期小试净化TN、TP去除率明显高于中试。我们分析,造成这一结果的主要原因是凤眼莲密度的改变。试验中作为限制凤眼莲增长的面积密度两者相差不大,这意味着两者的生长受限情况相近。而作为衡量单位污水所拥有凤眼莲量的体积密度却有着较大差异。体积密度的改变决定了凤眼莲净化氮、磷总量的变化,它是影响净化能力的重要因素,因此必须对体积密度进行控制,使凤眼莲在净化氮、磷的同时又可合理的生长速率。换言之,在利用凤眼莲净化氮、磷中,体积密度应作为重要的工艺参数。

四、结论

1.利用河道放养凤眼莲净化二级出水中的氮、磷,7~8月净化三天,9~10月净化五天。当进水TN $20.70 \sim 30.90\text{mg/L}$ 时,出水为 $10.83 \sim 15.57\text{mg/L}$,去除率为42.8%~52.6%。当进水TP $0.53 \sim 2.19\text{mg/L}$ 时,出水为 $0.12 \sim 0.53\text{mg/L}$,去除率为67.2%~83.1%。

2.水力停留时间一定时,凤眼莲净化二

级出水中TN能力是体积密度及温度的函数。在天津地区可用下列经验式表示,

$$\Delta C_N = t \cdot M \cdot l \cdot (0.415 - 0.00964M)$$

3. 凤眼莲在二级出水中的增长符合 Logistic 增长规律。经试验确定 k 、 r 值后可由下式进行生物量估算。

$$\text{即 } W_t = \frac{k}{1 + e^{\ln(\frac{k}{w_0} - 1) - rt}}$$

4. 凤眼莲在天津地区的净化期为 6~10 月, 在此期间利用凤眼莲经河道净化二级出水, 可使水质进一步提高, 防止藻类的增

殖, 可为城市公共用水等低质用水提供回用水源。

* 本研究在朱肇源总工程师指导下进行, 赵谦昌、朱 芮、张永豪、李振强等同志参加试验工作。

参 考 文 献

- (1) 齐恩山, 环境保护科学, 3, 63~66 (1983)。
- (2) 戴树桂等, 环境化学 5 (3), 6~17 (1986)。
- (3) Weber, A. Scott, Water Pollut. Control Fed., 57(4), 631~323 (1985)。
- (4) Araujo, M., Water Sci. Technol., 19, 11~17 (1987)。

* 简 讯 *

△美国国家航空和宇宙航行管理局 (NASA) 组织的国际研究组 1990 年初在挪威进行的观测研究指出, 北极上空同温层的化学成分已经受到极大的干扰, 但是还不能说臭氧的损失已达到了极严重的程度, 只能说, 在同温层中, 光化学作用的确在逐步增强对臭氧层的破坏。

据 P. A. medien 教授的估算, 在 20~25 km 的空间层, 臭氧的数量大约减少了 23%。据此认为, 同温层中的臭氧约平均下降了 10%。

此外在两极上空同温层研究的国际联合行动中, 法国、美国、日本和德国的研究人员也深入观测了直接导致臭氧层破坏的化学原因、物理原因和气象因素。借助于高空探测气球的测试, 在 1990 年初, 也取得一批数据资料; 从这些资料可以看出, 在导致同温层内臭氧破坏过程中, 氯氟碳化物 (CFC), 氯在极低的温度起着互相“勾结”的作用。取得的数据第一次证实, 北极地区巨大而寒冷的旋风也在臭氧层的破坏过程中起有重大作用, 也是南极上空形成臭氧洞的原因之一。

△德国已决定在 1993 年以前提供 2 亿马克作为臭氧层的研究经费以资助下述项目:

1. 购买一架装备有多种观测仪器的飞机, 以用于北极上空臭氧层研究分析;

2. 完成与欧共体协作开展的臭氧层的研究任务;

3. 研制并发射一颗专用卫星, 以作臭氧层的研究。

△最近, 荷兰公布了一项国内防治污染计划, 该计划提出在 2010 年时, 至少要将全国的污染减少 70%。由政府制定的这个计划将使环境治理的预算从 1990 年到 1994 年时大约要增加 50 亿英镑, 比目前的环境预算经费约高一倍。此项防治污染计划的主要内容有:

1. 从现在起到 1994 年, 首先应将形成酸雨的污染物排放量减少 90%;

2. 建造家畜粪便处理场, 以消灭动物性污染;

3. 从现在起到 1994 年时, 至少将化学污染减少 70%;

4. 鼓励各种再循环利用的首创精神;

5. 无污染汽车的研制, 即研究用天然气或电能作为城市公共交通工具的运行动力, 同时大力发展和使用装有排气催化处理装置的汽车。

(李耶波)