

人工生态系统净化水质模型研究

逢勇 濮培民* 魏阳春** 胡维平

(河海大学 南京 210024)

摘要 建立了自来水厂取水口附近的人工生态系统水质模型,研究在水面面积、水生植物放养密度、取水量等改变条件下,取水口处水质的变化特征。这一模型可应用于确定人工生态系统水面面积,水生植物放养密度等值,以达到满足自来水厂取水口处水质的要求,对模型参数适当确定后,可应用于其它水域。

关键词: 人工生态系统,小水体,水质数学模型,净化水质

THE WATER QUALITY MODEL OF AN ARTIFICIAL PURIFICATION ECOSYSTEM NEAR A WATER PLANT

Pang Yong Pu Peimin Wei Yangchun Hu Weiping

(Hehai University, Nanjing, 210024, China)

Abstract The water quality model in an artificial ecosystem near the water intake region of a water plant was developed and the character of water quality variation with surfacer area, macrophyte density and water intake rate of the system were studied. The results indicate that the model can be used for determinig the area and macrophyte density etc. in the artificial ecosystem, in order to meet the desired water quality of the water intaking region.

Key words: artificial ecosystem, macrophyte, purification, water quality model.

目前,水质恶化已影响到我国许多城镇饮用水质量。为此,已有人提出了建立人工生态系统^[1],旨在改善局部水体水质,达到提供良好水质的目的。本文是在欧共体资助下,于1994年7月在无锡市的中桥地区建立了实验基地,对人工生态系统净化水质的机理、实用技术等进行了较深入的研究,现报道该实验研究的部分结果。

1 工程设计与实验方法

1.1 工程设计

人工生态系统是以试验工程为基础,以水生生物为主体,应用物种间共生关系和充分利用水体空间生态位与营养生态位的原则,建立高效的人工模拟生态系统,以降解水体中的污染负荷,改善系统内水质,提供高质量饮用水源。

人工生态系统主要包括两部分:系统小环境的软隔离带,控制系统内、外的物质和能量交换;系统内水生生物生存环境及配置的辅助措施,提高物质能量的利用率和系统的生态效率。

* 现在中国科学院南京地理与湖泊研究所工作。 ** 现在空军气象学院工作。

收稿日期:1996-09-24,修改稿收到日期:1997-03-29。

人工生态系统的软隔离带布设在无锡中桥老水厂主取水管道东侧,实验区面积为 $55 \times 40 \text{ m}^2$,在这一范围内,用不透水材料将水域隔成5m宽40m长的水渠围格10条,西侧无围格的 $5 \times 40 \text{ m}^2$ 水域上布设40只 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 的浮架(见图1)。

工程南端为透水膜,营养物质可以与水分一道进出系统。围隔内每条水渠种植不同种类的水生生物,北端设水泵抽围渠内的水,使南端进入围渠的水,经水生生物净化后输出系统外。西侧的方形浮架,用于拦养高等水生植物,并研究植物在实验区的生长特点。

1.2 实验方法

1.2.1 从1994年8月17日开始,在围隔的不同围渠内放养水生生物,主要种植凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、水薹(*Ipomoea aquatica*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等。实验时,模拟水厂取水进行动态实验,每条围渠北端用功率为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 的水泵抽水,日抽水10h。从8月30日到10月11日共采样5次,常规监测项目有透明度、pH值、总磷、总氮、氨氮、高锰酸盐指数和叶绿素7个项目,同时分析硝酸盐、亚硝酸盐及磷酸盐,以作比较。每条围渠滞水期约3d。

1.2.2 从1994年8月11日开始,在工程软隔离带西侧的漂浮架内,分别以4~5种不同密度种植几种植物,包括漂浮植物、浮叶植物及沉水植物,由于植物的适应性差别,生长季节局限和管理上的原因,取得系统资料的只有喜旱莲子草、凤眼莲和水薹。种植时对每种植物称重,之后每隔1至2个星期称重1次。表1为3种不同植物不同时期的生物量。

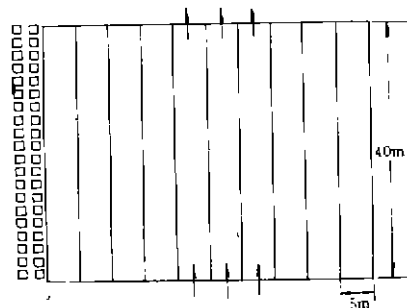


图1 实验工程图

Fig. 1 The figure of the experiment engineering

表1 3种水生植物不同阶段初始放养密度 f_0 及生长密度 f (kg/m^2)

Table 1 The primary density of the cultured(f_0)and the growth density(f) in some aquatic plants in different stages

水生植物 Aquatic Plant	时间(月.日) Time	第1组 1st group		第2组 2nd group		第3组 3rd group		第4组 4th group		第5组 5th group	
		初始 密度①	生长 密度②	初始 密度	生长 密度	初始 密度	生长 密度	初始 密度	生长 密度	初始 密度	生长 密度
喜旱莲子草	8.12~8.19	2.0	4.6	3.0	7.0	4.0	7.5	5.0	9.5	8.0	12.5
<i>Alternanthera philoxeroides</i>	8.19~8.30	4.6	5.2	7.0	8.8	7.5	10.4	9.5	12.8	12.5	14.6
凤眼莲	8.12~8.19	2.5	8.5	5.0	11.1	10.0	17.3	15.0	20.8	10.0	17.8
<i>Eichhornia crassipes</i>	8.19~8.30	8.5	16.4	11.1	20.6	17.3	23.6	20.8	25.6	8.8	13.6
水薹	8.19~8.30	2.0	2.8	1.7	2.6	2.0	2.4	1.5	4.4	2.5	5.2
<i>Ipomoea aquatica</i>	9.13~10.13	5.0	10.5	5.5	9.0	3.0	4.5	4.0	7.5	8.5	10.5

①Primary density, ②Growth density.

2 实验结果

2.1 模型参数确定

2.1.1 Logistic 模型参数确定 Logistic 模型为:

$$\frac{df}{dt} = r_m f (1 - f/k) \quad (1)$$

式中: f 为单位水面上植物的重量(g/m^2); r_m 为水生植物的内禀增长率; k 为植物生长至最大时的密度(g/m^2); t 为生长时间(d)。当 $f=k$ 时, $\frac{df}{dt}=0$,植物的生长与死亡处于平衡。 r_m 、 k 通常与植物种类、光照、水温、水质等环境因素有关,若在一定时间内,环境条件基本不变(或取其平均状态) r_m 、 k 是与植物密度无关的常数。取初始 $t=t_0$ 时的放养密度为 f_0 时,(1)式的解为:

$$f = \frac{KAf_0}{K + Af_0 - f_0} \quad (2)$$

$$A = \exp(rm \cdot t) \quad \tau = t - t_0$$

若在同一水域同一时段内有 N 组不同的初始放养密度的植物生长资料,则可按最小二乘法原理,求取最小拟合误差时的 r_m, k 值^[2],即需使

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[f_i - \frac{KAf_0}{k + Af_0 - f_0} \right]^2 \text{ 达最小值, } r_m, k \text{ 需满足统计方程 } \frac{\partial^2 \sigma}{\partial k^2} = 0, \frac{\partial^2 \sigma}{\partial A^2} = 0. \text{ 由此可得:}$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{f_i f_0 (f_0 - k)^2}{[k + (A - 1)f_0]^3}}{\sum_{i=1}^N \frac{f_0^2 (f_i - k)(f_0 - k)}{[k + (A - 1)f_0]^3}} \quad (3)$$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(A - 1)f_0^2 f_i}{[k + (A - 1)f_0]^3}}{\sum_{i=1}^N \frac{(Af_0^2 - f_0^2 f_i)}{[k + (A - 1)f_0]^3}} \quad (4)$$

可用迭代法求解(3)、(4)式的联立解,利用表1中的数据,计算出几种水生植物不同阶段的 Logistic 参数见表2。

表2 几种水生植物不同阶段的 Logistic 参数

Table 2 The Logistic parameters in some aquatic plants in different stages

水生植物 Aquatic plant	时间(月.日) Date	天数(d) Days	内禀增长率 Specific growth rate $r_m(1/d)$	环境容纳量 The capacity $k(kg/m^2)$	最适生长密度 Maximum growth density $f(kg/m^2)$	最大持续产量 Maximum growth rate $h(kg/m^2/d)$
喜旱莲子草 <i>Alternanthera</i>	8.12~8.19	7	0.149	17.86	8.93	0.665
<i>philoxeroides</i>	8.19~8.30	11	0.048	18.44	9.22	0.221
凤眼莲	8.12~8.19	7	0.151	27.42	13.71	1.035
<i>Eichhornia crassipes</i>	8.19~8.30	11	0.096	27.43	13.71	0.658
水 薹	8.19~8.30	11	0.088	27.12	13.56	0.597
<i>Ipomoea aquatic</i>	9.13~10.13	30	0.029	25.20	12.60	0.183

2.2.1 一维水质模型参数的确定 一维水质模型为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - u \frac{\partial c}{\partial x} - S^* \quad (5)$$

其中, S^* 为植物对营养物质的降解项, $S^* = \frac{1}{1000} \frac{RB}{Qt} f$; R 为水生植物对营养物质浓度降解率($mg/kg \cdot h$); Q 为流量(m^3/h); t 为时间(h); Qt 为待处理的水体积(m^3); B 为水生植物分布总面积(m^2); f 为水生植物生长密度(kg/m^2), f 的具体计算见(2)式。

在(5)式中,存在4个待定参数,它们分别为浓度扩散系数 D 、水生植物内禀增长率 r_m 、植物生长至最大时的密度 k 以及水生生物对营养物质的降解率 R ,参考前人报道^[3]取 D 为 $5.56 \times 10^{-4} m^2/s$,计算中发现, D 不是一个很灵敏参数; r_m, k 取本文前述计算值。

1994年9月23~26日,对实验水道连续以每小时 $12 m^3$ 的速率抽水,在23日和26日晨进行了采样,得到了 TN 、 TP 和 NH_4^+-N 的输入输出浓度,观测结果见表3。 本文对这次实验进行了模拟计算,计算时 U 取为常数 $U = \frac{Q}{M}$, M 为水道截面积,计算格距为 $4m$,时间步长为 $2h$,共积分 $72h$,调整 R 得计算结果见表3。从表3可见,计算结果与实测结果基本一致,率定的 R 值见表4,表4中的数据 and 原有的实测值^[4]基本吻合。

表3 模型计算输出浓度与实测输出浓度(72h,mg/L)

Table 3 The output concentration of the computed and observed

	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>			凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>			水葫芦 <i>Ipomoea aquatic</i>		
	C_0	输出浓度 Output concentration		C_0	输出浓度 Output concentration		C_0	输出浓度 Output concentration	
		$C_{\text{计}}$ Computed	$C_{\text{测}}$ Observed		$C_{\text{计}}$ Computed	$C_{\text{测}}$ Observed		$C_{\text{计}}$ Computed	$C_{\text{测}}$ Observed
TN	4.718	4.453	4.277	5.160	4.739	4.532	5.200	4.985	4.689
TP	0.193	0.153	0.138	0.131	0.091	0.072	0.186	0.165	0.097
NH_4^+-N	3.18	3.099	2.90	3.21	3.068	2.82	3.490	3.424	3.21

表4 水生植物对营养负荷的降解率(mg/kg·h)

Table 4 The absorb coefficient of the quatic plants

	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	水葫芦 <i>Ipomoea aquatic</i>
TP	0.1108	0.0735	0.0981
TN	0.7346	0.7800	0.9996
NH_4^+-N	0.2244	0.2631	0.3056

2.2 人工生态系统水质模型的应用研究

自来水厂取水口附近一般为开阔水域。故取极坐标下的水质方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left(\frac{D}{r} - u \right) \frac{\partial c}{\partial r} + D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} - \frac{1}{1000} \frac{RA}{Qt} \cdot f \quad (6)$$

r 为极坐标中的半径。改变人工生态系统的水面面积、水生植物的初始生长密度、流量,代入公式(6)分别进行计算。

(1) 改变水面半径 r 初始边界浓度见表3,分别取半径为250m、500m、1000m,计算结果见表5。因 TP 降解过快,故在计算 TP 时,取半径为250m、500m、620m。由表5可见:增大半径,即增大人工生态系统规模时,水生生物能更多地吸收降解营养负荷,提高系统效率。

表5 不同水面面积水质浓度计算结果

Table 5 The water quality concentration in different water open area

距离(m) Distance	TN			TP			NH_4^+-N		
	喜旱莲子草 ^①	凤眼莲 ^②	水葫芦 ^③	喜旱莲子草	凤眼莲	水葫芦	喜旱莲子草	凤眼莲	水葫芦
250	4.566	4.919	5.077	0.179	0.117	0.178	3.134	3.130	3.453
500	3.919	3.890	4.552	0.116	0.055	0.145	2.936	2.782	3.292
1000	2.323	1.353	3.256	—	—	—	2.449	1.926	2.896
620	—	—	—	0.105	0.043	0.139	—	—	—

① *Alternanthera philoxeroides*, ② *Eichhornia crassipes*, ③ *Ipomoea aquatic*

(2) 改变初始生长密度 f_0 初始边界浓度见表3, f_0 的取值见表1, 分别取初始生长密度为 $2f_0$ 、 f_0 、 $\frac{1}{2}f_0$ 进行计算, 得计算结果见表6。由表6可见, 随着初始放养密度的增加, 营养物质会更多地被吸收降解。

(3) 改变流量 Q 初始边界浓度及 f_0 的取值见表3和表1, Q 为 $12\text{m}^3/\text{h}$ 。分别取流量为 $2Q$ 、 Q 、 $\frac{1}{2}Q$ 进行计算, 得计算结果见表7。因 TP 降解较快, 计算 TP 时的流量取 $2Q$ 、 Q 和 $\frac{3}{4}Q$, 由表7可见: 减小流量, 即增大水的滞留期时, 营养物质会被更多地吸收掉。

表6 不同初始生长密度时水质浓度计算结果

Table 6 The water quality concentration in different primary growth density

	TN			TP			NH ₄ ⁺ -N		
	喜旱莲子草 ^①	凤眼莲 ^②	水 菰 ^③	喜旱莲子草	凤眼莲	水 菰	喜旱莲子草	凤眼莲	水 菰
$2f_0$	3.128	2.636	3.904	0.069	0.008	0.120	2.694	2.359	3.094
f_0	3.919	3.890	4.552	0.116	0.055	0.145	2.936	2.782	3.292
$\frac{1}{2}f_0$	4.318	4.525	4.876	0.155	0.093	0.166	3.058	2.996	3.391

① *Alternanthera philoxeroides*, ② *Eichhornia crassipes*, ③ *Ipomoea aquatic*

表7 不同流量时水质浓度计算结果

Table 7 The water quality concentration in different water flow

	TN			TP			NH ₄ ⁺ -N		
	喜旱莲子草 ^①	凤眼莲 ^②	水 菰 ^③	喜旱莲子草	凤眼莲	水 菰	喜旱莲子草	凤眼莲	水 菰
$2Q$	4.418	4.684	4.957	0.148	0.086	0.162	3.089	3.049	3.416
Q	3.919	3.890	4.552	0.116	0.055	0.145	2.936	2.782	3.292
$\frac{3}{4}Q$	—	—	—	0.073	0.011	0.122	—	—	—
$\frac{1}{2}Q$	3.521	3.256	4.228	—	—	—	2.814	2.568	3.193

① *Alternanthera philoxeroides*, ② *Eichhornia crassipes*, ③ *Ipomoea aquatic*

由以上计算可以看出:增大人工生态系统的水面面积和水生植物的初始放养密度均可使营养负荷降解得更快,但增大水面面积,会影响船舶通行等,使有限的水域空间变得更为紧张,故不可能任意增大;水生植物的初始放养密度也不可能任意增大,因植物生长需要有一定的空间;流量 Q 取决于水厂用水量,是一个与人工生态系统设计值无关的量。故在设计人工生态系统时,主要是根据要求的水质,通过改变水生植物的放养面积,放养密度等来满足要求。

3 结论

人工生态系统改善水质是一项具有广阔前景的研究工作。本文建立的极坐标水质模型能较好地模拟自来水厂取水口附近在取水时的水流状况,模型中辅以 Logistic 方程与水生物营养负荷降解规律,可较准确地模拟人工生态系统改善水质的功能。从模型上看,营养负荷衰减是由系统内各种水生生物对营养物质的吸收降解产生,模型可用于预测在一定的水质输入输出条件下人工生态系统的建设规模,以及在给定人工生态系统规模的条件下,计算出可供应水质水量的能力,另外该模型还可为人工生态系统的进一步完善提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 濮培民等.改善太湖马山水厂水源区水质的物理-生态工程实验研究.湖泊科学,1993,(2),171~180
- 2 窦洪身等.太湖开阔水域凤眼莲的放养实验.植物资源与环境,1995,4(1),54~60
- 3 Jrgensen S E 著.陆健健等译.生态模型法原理.上海,上海翻译出版公司,1988.216~231
- 4 戴全裕等.太湖入湖河道污染物控制生态工程模拟研究.应用生态学报,1995,6(2),201~205