

厦门筓筓湖水体污染各治理方案的优化分析*

黄 国 和

(厦门市环境保护科学研究所)

在对区域性水污染控制系统进行研究的过程中,常遇到这样的问题,即在治理措施上存在许多纷杂各异、甚至相互对立的方案设想,难以定论,从而妨碍最后的行政决策。对此,人们一直试图找到一种能综合反映整个复杂的社会系统、为方案抉择提供有效科学依据的数学方法。

本文以厦门筓筓湖水体污染各治理方案的优化分析为例,讨论一种用于多方案寻优决策的量化的系统最优规划理论。通过优化模型的建立和大量数据的调查运算,得出相应结果,从而用于指导方案的最后决策。

一、厦门筓筓湖概况

筓筓湖位于厦门本岛正西部、老市区北端、筓筓新市区中心(图 1)。该湖汇水面积 58.04 km^2 , 年径流量 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为厦门本岛主要地表水体。

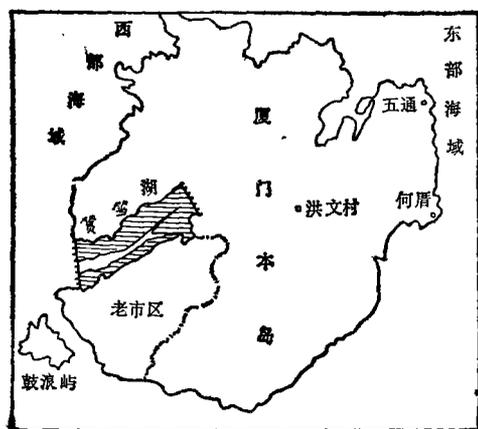


图 1 厦门筓筓湖位置示意图

目前,筓筓湖接纳厦门市大部分工业废水和生活污水,排污入口 21 处,平均流量达 $2.179 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。这一负荷已大大超过该湖的环境容量,以致造成水体黑臭、水生生物濒于绝迹,并导致周围环境质量的恶化。筓筓湖的这一环境状况,严重妨碍了厦门经济特区的开发和建设,同时也给周围近 5 万居民的生活和健康带来极大危害。所以,如何有效地治理筓筓湖,已成为各有关部门密切关注的问题之一。目前在具体治理方案上,主要有三方面较成熟的意见:(1)厦门大学的西排方案(污水截流向西部海域排放);(2)国家海洋局第三研究所的东排方案(通过引污渠向东部海域排放);(3)同济大学的生物治理方案(采用曝气生物塘实现 2 级或 3 级处理)。图 2 是三个方案设想下各子方案的分布状况及其关系示意图。共有 64 条路径,其中容量型方案 60 条(包括东排的 48 条和西排的 12 条),治理型(生物治理)方案 4 条。

二、寻优问题的数学描述

寻优模型的应用是建立在下述数字矩阵为已知的前提之下的:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1,64} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2,64} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3,64} \end{bmatrix}$$

其中, $A_i = (a_{i1} a_{i2} \cdots a_{i,64})$, $i = 1, 2, 3$; a_{ij} 为路径 W_j 的投资差额, a_{2j} 为环境效益, a_{3j} 为

* 本文承蒙关伯仁、林大任、王华东先生和车宇翔同志的指教和帮助,谨在此深表谢意!

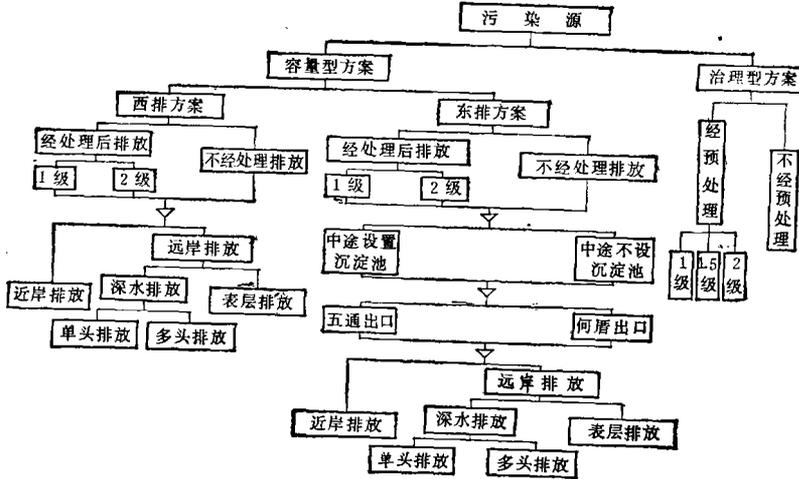


图2 厦门筭筭湖水体污染各可能的治理途径

净时耗, $j = 1, 2, \dots, 64$.

为统一比较各因子间相互关系, 以便于模式运算, 对 A 中各元素作标化处理, 得:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1,64} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2,64} \\ b_{31} & b_{32} & \dots & b_{3,64} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^0 \\ A_2^0 \\ A_3^0 \end{bmatrix}$$

其中, $B_i = (b_{i1} b_{i2} \dots b_{i,64})$; $A_i^0 = A_i / |A_i|$. 显然, b_{ij} 是路径 W_j 所对应的投资差额 (a_{ij})、环境效益 (a_{2j}) 和净时耗 (a_{3j}) 的无量纲相对值.

本模型的第一个目标 (S_1) 是使决策方案能最有效地改善环境质量. 若表为 S_1 取极大, 那么, 对于路径 W_j , 该目标与其净投资比例和环境效益 (b_{2j}) 呈正相关, 与投资差额 (b_{1j}) 呈负相关. 于是:

$$S_1 = \sum_{j=1}^{64} S_{1j} = \sum_{j=1}^{64} \frac{b_{2j} x_j}{b_{1j}} = \max$$

其中, S_{1j} 为 W_j 的目标分量; x_j 为 W_j 的净投资比例系数.

本模型的第二个目标 (S_2) 是使决策方案能尽快取得成效. 若表为 S_2 取极小, 那么, 对于路径 W_j , 该目标与其投资差额 (b_{1j}) 及时耗指数 $P(P=b_{3j}^m)$ 呈正相关, 与净投资比例 (x_j) 呈负相关. 此外, 各路径 P 值的离差也

与 S_2 成正比, 同样宜取极小. 于是:

$$S_2 = \sum_{j=1}^{64} S_{2j} = \sum_{j=1}^{64} \left[\frac{b_{3j}^m b_{1j}}{x_j} + \left(\frac{b_{3j}^m}{x_j} - \frac{1}{64} \sum_{k=1}^{64} \frac{b_{3k}^m}{x_k} \right)^2 \right] = \min$$

其中, S_{2j} 为 W_j 的目标分量; m 为时间调控指数 ($m < -1$). m 的存在主要由于各目标分量时间关系并非线性, 目标 S_2 不仅是达到总时耗之极小, 还包括使各时耗分量均不超出某一给定上限(即年限).

于是, 方案寻优便以取得最大 S_1 和最小 S_2 为目标. 由此得优化模型:

$$\begin{aligned} \max \quad S_1 &= \sum_{j=1}^{64} \frac{b_{2j} x_j}{b_{1j}} \\ \min \quad S_2 &= \sum_{j=1}^{64} \left[\frac{b_{3j}^m b_{1j}}{x_j} + \left(\frac{b_{3j}^m}{x_j} - \frac{1}{64} \sum_{k=1}^{64} \frac{b_{3k}^m}{x_k} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

满足: $B_i X \leq Q_0 (i = 1, 2, 3)$

$$b_{1j} x_j \geq R_{j0}$$

$$x_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, 64)$$

其中, X 为比例向量, $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{64})$; $Q_0 = Q / |A_1|$, Q 为总投资限; $R_{j0} = R_j / |A_1|$, R_j 为实现路径 W_j 的最低允许投资

限。

这是一个多目标非线性规划问题。采用递阶模型和最小-最大模型相互校准,处理多目标问题,然后用拉格朗日乘子法上机运算求得最后结果。

三、数据的收集和处理

A 中各元素(a_{ij})的赋值,主要通过大量数据的调查、衡算和统计分析而实现。表1给出决定 a_{ij} 值的各相关因子。由该表,我们有:

$$a_{1j} = \sum_{k=1}^9 d_k - \sum_{k=10}^{14} d_k$$

$$a_{2j} = \sum_{k=1}^4 e_k - \sum_{k=5}^8 e_k$$

$$a_{3j} = \sum_{k=1}^6 t_k$$

可见, a_{ij} 值的确定与许多因子有关。投资差额(a_{1j})方面,一般设计部门多从工程投资上考虑,但事实上还存在赔偿与回收问题。污水用于农灌,农业产量增加,可回收部分资金;但随之而来的农副产品质量下降与地下水污染等问题,则反过来导致资金的赔偿损失。故 a_{1j} 是综合这三方面收支的净核算结果。

环境效益(a_{2j})方面,各单位在其方案设计中均作了系统的规划研究。总的说来,最终都是使该湖成为游览区水体。但事实上还存在负效益问题,且不同方案间差别很大,故 a_{2j} 是各方面分效益总的统计核算结果的综合表述。

以 a_{11} 、 a_{21} 和 a_{31} 的实际查算为例,结果见表2。表3是各 a_{ij} 值标准化处理后得出的 B 中各元素(b_{ij})数值。表4是各路径设计的最低允许投资限(R_{j0})。

表 1 决定 a_{ij} 值的各相关因子

a_{ij}	投 资 差 额	环 境 效 益	净 时 耗		
相 关 因 子	工 程 投 资	正 效 益	t_1 : 可行性研究; t_2 : 评价决策; t_3 : 询价、招标、 谈判和签约; t_4 : 工程设计(包 括具体选点和确 定路线); t_5 : 施工; t_6 : 试运转。		
	d_1 : 各级处理厂投建及运转费用; d_2 : 管道工程费用; d_3 : 沉淀处理池投建及运转费用; d_4 : 曝气生物塘投建及运转费用; d_5 : 技术引进和咨询等方面费用。			e_1 : 因治理污染使湖水水质得到 改善; e_2 : 因治理污染使湖附近地区地 下水水质得到改善; e_3 : 因污水截流使底泥污染减轻; e_4 : 因治理污染使湖区大气质量 得到改善。	
	赔 偿 费 用			d_6 : 征地占地费用(包括因占用农地、民房、林地而赔偿的损失); d_7 : 使海域受污染而造成的损失(包括旅游业、渔业和滩涂养殖、种植业的损失); d_8 : 因渠道污水渗透污染土壤,使农副产品质量下降造成的损失; d_9 : 因渠道污水下渗污染地下水,而代之以自来水供饮用所增加的投资。	e_5 : 因渠流引污使途经地区水体、 土壤和大气受到污染; e_6 : 因沉淀处理池的运转而对周 围各环境要素产生影响; e_7 : 因曝气生物塘运转处理而污 染大气; e_8 : 因污水外排而使海域水质、底 质和大气受到污染。
	回 收 资 金			d_{10} : 因污水用于农灌,使农业产量增加; d_{11} : 因污染得到控制,使湖两岸各行业得以上马而带来的间接效益; d_{12} : 因污染得到控制,使湖两岸各设施的利用率增高而带来的间接效益; d_{13} : 因污染得到控制,使湖两岸居民健康状况得到改善而带来的间接效益; d_{14} : 因处理废水,使淡水资源得到回用而带来的效益。	负 效 益

表 2 路径 W_1 各参量的实际查算结果

投资差额(百万)	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	a_{11}	A_1	b_{11}	
	10.00	0.60	0	0	0.22	0.65	3.50				
	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	11.22	224.4	0.050	
	0.15	0	0	1.50	0.40	2.00	0				
环境效益指数	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	a_{21}	A_2	b_{21}
	6.20	0.20	0.85	3.00	0.20	0	0	2.80			
净时耗(百天)	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6		a_{31}	A_3	b_{31}	
	0.30	0.40	0.20	0.60	4.00	0.45	5.95				132.2

表 3 B 中各元素数值的求算结果

W_j	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}	W_{16}
B_1	0.050	0.090	0.108	0.076	0.060	0.114	0.130	0.084	0.042	0.079	0.100	0.069	0.103	0.144	0.166	0.127
B_2	0.076	0.105	0.132	0.093	0.083	0.109	0.140	0.099	0.051	0.094	0.113	0.063	0.093	0.137	0.163	0.118
B_3	0.045	0.061	0.066	0.054	0.037	0.053	0.055	0.049	0.017	0.031	0.042	0.025	0.121	0.138	0.143	0.129
W_j	W_{17}	W_{18}	W_{19}	W_{20}	W_{21}	W_{22}	W_{23}	W_{24}	W_{25}	W_{26}	W_{27}	W_{28}	W_{29}	W_{30}	W_{31}	W_{32}
B_1	0.099	0.140	0.160	0.123	0.096	0.139	0.162	0.125	0.092	0.134	0.158	0.117	0.112	0.153	0.173	0.135
B_2	0.099	0.146	0.172	0.126	0.087	0.129	0.152	0.110	0.094	0.134	0.157	0.117	0.112	0.151	0.181	0.137
B_3	0.123	0.136	0.148	0.131	0.127	0.144	0.144	0.137	0.130	0.143	0.150	0.137	0.131	0.147	0.152	0.144
W_j	W_{33}	W_{34}	W_{35}	W_{36}	W_{37}	W_{38}	W_{39}	W_{40}	W_{41}	W_{42}	W_{43}	W_{44}	W_{45}	W_{46}	W_{47}	W_{48}
B_1	0.108	0.148	0.168	0.132	0.106	0.146	0.168	0.129	0.100	0.142	0.166	0.129	0.094	0.136	0.157	0.119
B_2	0.124	0.168	0.189	0.146	0.105	0.148	0.171	0.132	0.115	0.152	0.177	0.139	0.086	0.113	0.138	0.099
B_3	0.132	0.149	0.157	0.149	0.134	0.152	0.159	0.146	0.137	0.153	0.163	0.144	0.104	0.122	0.124	0.110
W_j	W_{49}	W_{50}	W_{51}	W_{52}	W_{53}	W_{54}	W_{55}	W_{56}	W_{57}	W_{58}	W_{59}	W_{60}	W_{61}	W_{62}	W_{63}	W_{64}
B_1	0.091	0.131	0.153	0.115	0.088	0.129	0.150	0.113	0.084	0.126	0.147	0.109	0.130	0.135	0.138	0.121
B_2	0.091	0.123	0.144	0.103	0.079	0.112	0.132	0.091	0.087	0.113	0.142	0.096	0.111	0.132	0.147	0.090
B_3	0.104	0.124	0.129	0.112	0.111	0.122	0.126	0.120	0.108	0.104	0.129	0.120	0.168	0.163	0.180	0.150

表 4 各路径设计的最低允许投资限

W_j	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}	W_{16}
R_{j0}	0.016	0.032	0.037	0.028	0.021	0.042	0.047	0.033	0.015	0.022	0.035	0.023	0.022	0.032	0.034	0.042
W_j	W_{17}	W_{18}	W_{19}	W_{20}	W_{21}	W_{22}	W_{23}	W_{24}	W_{25}	W_{26}	W_{27}	W_{28}	W_{29}	W_{30}	W_{31}	W_{32}
R_{j0}	0.022	0.038	0.035	0.028	0.013	0.030	0.035	0.037	0.018	0.020	0.032	0.042	0.039	0.041	0.038	0.029

续表 4

W_j	W_{33}	W_{34}	W_{35}	W_{36}	W_{37}	W_{38}	W_{39}	W_{40}	W_{41}	W_{42}	W_{43}	W_{44}	W_{45}	W_{46}	W_{47}	W_{48}
R_{j0}	0.026	0.040	0.038	0.028	0.025	0.042	0.040	0.032	0.019	0.037	0.036	0.030	0.028	0.035	0.036	0.030
W_j	W_{49}	W_{50}	W_{51}	W_{52}	W_{53}	W_{54}	W_{55}	W_{56}	W_{57}	W_{58}	W_{59}	W_{60}	W_{61}	W_{62}	W_{63}	W_{64}
R_{0j}	0.027	0.037	0.046	0.031	0.019	0.030	0.035	0.032	0.027	0.031	0.033	0.028	0.035	0.043	0.049	0.033

四、结果和讨论

不同 Q 值和 m 值下的交叉调控运算结果 X 分布变化规律见图 3、图 4。作为调控因子, m 值的差异反映了各有关方面对时间效益的不同要求和重视程度。将一系列给定 m 值输入计算机, 进行大量假设检验运算, 便可

得出各给定前提所相应的 m 值。

作为最优解的 X , 其各分量间显然具最佳组合关系。由此, 我们结合厦门市整个社会决策系统各部分(包括政界、经济界、工业界和公众界等)的目标, 便可确定不同投资总额下, 相应于各给定前提的最优决策方案。

表 5 是各决策方案的具体描述。总的说

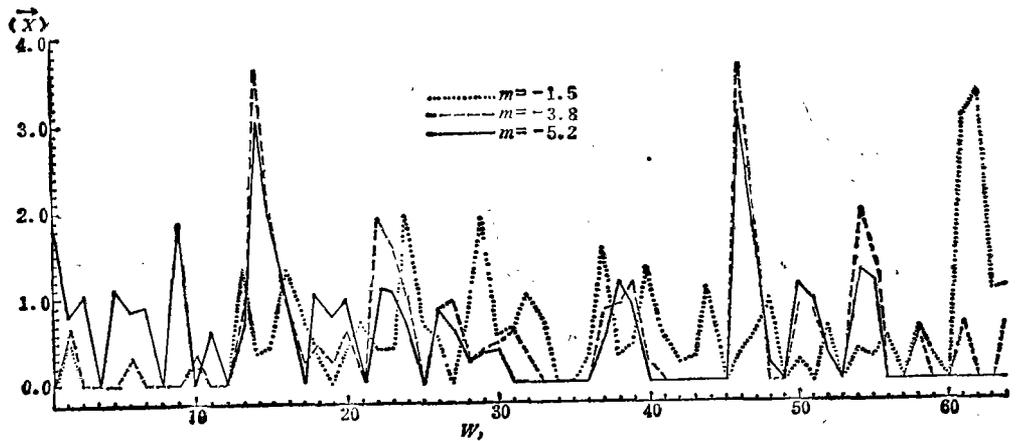


图 3 总投资为 2.8 亿时不同 m 值调控下的 X 分布变化规律

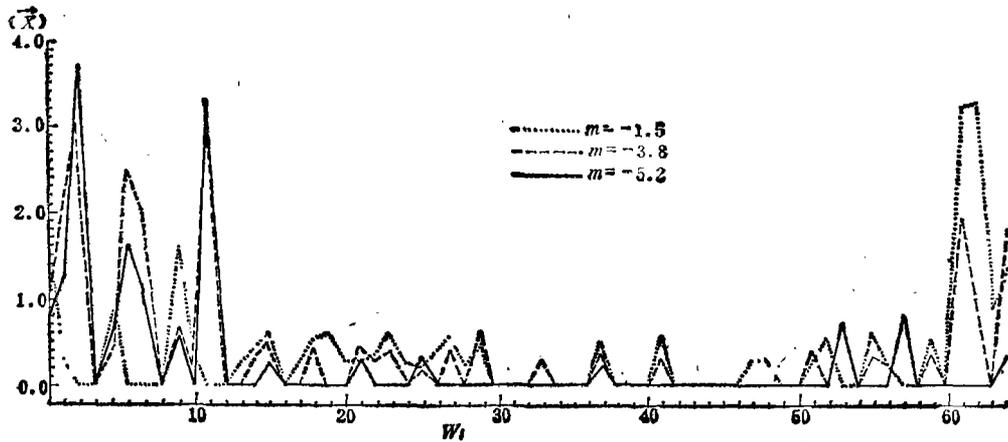


图 4 总投资为 1.6 亿时不同 m 值调控下的 X 分布变化规律

表 5 各供选的最优决策方案

Q(亿)	m	给定目标	优化结果	方 案 描 述
2.8	-1.5	允许较长的时间容许限; 但应具有较高的整体环境效益.	W_{62} 和 W_{61} 最优; W_{24} 和 W_{29} 辅之.	决策方案: 经 1.5 或 1 级预处理后的曝气生物塘方法. 辅助方案: ①东排系列中经 1 级处理后五通出口的远岸表层排放; 或 ② 东排系列中经 2 级处理后五通出口的近岸排放, 并在中途的洪文村附近设置沉淀处理池.
1.6			W_{62} 和 W_{61} 最优; W_1 和 W_9 辅之.	决策方案: 经 1.5 或 1 级预处理后的曝气生物塘方法. 辅助方案: 西排系列中不处理或经 1 级预处理后的近岸排放.
2.8	-3.8	协调时间和环境两方面的效益.	W_{14} 和 W_{46} 最优.	决策方案: 东排系列中不处理或经 1 级处理后五通出口的远岸深水单头排放, 并在中途的洪文村附近设置沉淀处理池.
1.6			W_3 和 W_{11} 最优; W_{61} 和 W_{64} 辅之.	决策方案: 西排系列中不处理或经 1 级处理后的远岸深水多头排放. 辅助方案: 不处理或经 1 级预处理后的曝气生物塘方法.
2.8	-5.2	整体环境效益可在今后逐步协调完善; 但目前应具有高的动态效益, 即迅速取得成效.	W_{46} 和 W_{14} 最优; W_9 和 W_1 辅之.	决策方案: 东排系列中不处理或经 1 级处理后五通出口的远岸深水单头排放, 并在中途的洪文村附近设置沉淀处理池. 辅助方案: 西排系列中不处理或经 1 级处理后的近岸排放.
1.6			W_3 和 W_{11} 最优.	决策方案: 西排系列中不处理或经 1 级处理后的远岸深水多头排放.

来,当允许较长时间容许限时,宜取经 1.5 或 1 级预处理后的曝气生物塘法为决策方案; 当时间效益要求较高、投资额也较高(2.8 亿)时,宜采纳东排方案系列中不处理或经 1 级处理后五通出口的远岸深水单头排放方案,并在洪文村附近设置沉淀处理池; 而当时间效益要求高,投资额却较低(1.6 亿)时,则宜采纳西排系列中不处理或经 1 级处理后的远岸深水多头排放方案.

五、结 语

本文以数学规划理论为基础,尝试探讨一种用于对一系列污染治理方案设想进行量化寻优分析的系统的研究方法. 这种方法通过对大量基础数据的调查分析,综合了整个复杂的社会系统中各相关因子带来的影响,

并用定量的形式予以表达,从而在决策上具很高的实用价值. 把这种方法应用于厦门筼筮湖的污染治理研究课题,结果表明,该方法是合理的、可行的. 将优化理论应用于指导方案决策,无疑将使我们得到更高的环境效益和更好的经济效果.

参 考 文 献

[1] Fukushima, M. et al., *Europ. J. Oper. Res.*, 11, 338(1982).
 [2] Freeman, A. M., *Air and Water Pollution Control*, pp. 5—208, John Wiley and Sons, New York, 1982.
 [3] Simpson, J. R., *Asian Environ.*, 1, 24(1983).
 [4] McLaughlin D., *Modelling, Identification and Control in Environmental Systems*, pp. 105—151, North-Holand, 1978.
 [5] Weisman, G. D., *Environ. Behav.*, 15, 381 (1983).

(上接第60页)

参 考 文 献

[1] WPCF, *Wastewater Plant Design, Manual of*

Practice, P299, Washington, 1977.

[2] 洞沢勇,用水と廃水,21(8),13(1979).
 [3] 同济大学编,排水工程(上册),148,上海科学技术出版社,1977.