

汉江中下游水污染控制规划模型研究

尧桂龙, 周孝德

(西安理工大学环境科学研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:针对汉江中下游经济发展和污染加剧的特点,为合理充分利用水环境容量,节约投资,建立了汉江中下游排污口最优化模型,并应用分段线性化及线性优化理论对该模型进行了求解分析;最后通过对规划年进行排污口最优化的实例验证了该模型的可靠性。

关键词:水污染控制;排污口;最优化模型;分段线性化;线性优化;汉江中下游

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)04-0018-02

汉江是长江中游最大的支流,汉江中下游地区是湖北省主要经济区域,工农业发达,人口密度大,沿江城镇多,对汉江干流水质要求较高.随着南水北调中线工程从丹江口水库引水以及沿线各城镇工业生产的发展,汉江中下游水质将日益恶化,对人民生活、工业生产势必造成严重影响.

为了控制汉江中下游水质污染,保护水域的使用功能,本文建立了汉江中下游排污口最优化模型.

1 模型的建立

排污口最优化处理是以每个小区的污水处理厂为基础,在水质约束下,求解各个污水处理厂的最佳处理效率.这一问题的基础是各个小区的污水处理厂的规模不变,通过调整各个处理厂的处理效率,使得整个区域(包括每个小区)的污水处理费用最低,同时要满足水体的水质要求^[1].

1.1 目标函数

污水处理厂的费用可以表示为污水流量 Q 与处理效率 η 的函数,而排污口最优化是为了寻求最佳的处理率,污水处理厂的费用主要为处理率的函数.基本规划模型的目标函数为

$$Z = \sum_{i=1}^n f_i(\eta_i) \quad (1)$$

其中: $f_i(\eta_i) = K_{1i} + K_{2i}\eta_i^{k_2}$

$$K_{1i} = k_1 Q_i^{k_1}, K_{2i} = k_3 Q_i^{k_3}$$

式中: Z 为污水处理厂投资费用,万元; k_2 为 $0 \sim 1$ 之间的系数; k_1, k_3, k_4 为大于零的系数; Q_i 为废水排放量, m^3/s . k_1, k_2, k_3, k_4 通过采用系列设计法,经曲线拟合而得.

1.2 约束条件方程

根据水流连续性原理和质量守恒原理有下述平衡方程:

$$\begin{cases} Q_{11} = Q_{10} \\ Q_{2i} = Q_{1i} - Q_{3i} + Q_i \\ Q_{1i} = Q_{2i-1} \\ C_{2i}Q_{2i} = C_{1i}(Q_{1i} - Q_{3i}) + W_i \\ C_{1i} = Q_{2i-1}\exp(-R_it_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{1i} 为排入 i 断面污染物浓度, mg/L ; Q_{1i} 为由上游流到 i 断面的河水流量, m^3/s ; Q_{2i} 为由 i 段面向下游流出的河水流量, m^3/s ; Q_{3i} 为在断面 i 处引走的流量, m^3/s ; C_{2i} 为由 i 段面向下游流出的污染物浓度, mg/L ; R_i 为 $i-1$ 断面到 i 断面间污染物的衰减系数, $1/d$; W_i 为经污水处理厂处理后排入河流中的污染物排放量, g/L ; t_i 为河水由 $i-1$ 断面流至 i 断面的流行时间, d , 可由 x_i/u_i 获得. 由该平衡方程最终递推可得到如下矩阵表达式:

$$C_2 = A^{-1}BW + A^{-1}g \quad (3)$$

W 与污染源排放量之间的关系为

$$W_i = (1 - \eta_i)S_i \quad (4)$$

式中: η_i 为污水处理厂的处理率; S_i 为污染源的排放量, g/s . 将式(4)代入式(3)可以得到关于 η 的函数:

$$C_2 = -U\eta + m \quad (5)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} b_1 S_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_1 b_1 S_1 & b_2 S_2 & 0 & \cdots & 0 \\ a_1 a_2 b_1 S_1 & a_2 b_2 S_2 & b_3 S_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 \cdots a_{n-1} b_1 S_1 & a_2 \cdots a_{n-1} b_2 S_2 & a_3 \cdots a_{n-1} b_3 S_3 & \cdots & b_n S_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i, \dots, \eta_n) \quad (7)$$

$$m = \begin{bmatrix} b_1 S_1 + a_0 C_{20} \\ a_1 b_1 S_1 + b_2 S_2 + a_1 a_0 C_{20} \\ a_1 a_2 b_1 S_1 + a_2 b_2 S_2 + b_3 S_3 + a_1 a_2 a_0 C_{20} \\ \vdots \\ a_1 \cdots a_{n-1} b_1 S_1 + \cdots + b_n S_n + a_1 \cdots a_{n-1} a_0 C_{20} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: C_{20} 为起始段水质浓度, mg/L;

$$a_{i-1} = \frac{Q_{1i} - Q_{3i}}{Q_{2i}} \exp(-R_i t_i) \quad (9)$$

$$b_i = \frac{1}{Q_{2i}} \quad (10)$$

约束条件是为了使其水质结果不超过水体功能要求, 故其最终约束条件为

$$-U\eta + m \leq C_i \quad (11)$$

式中: C_i 为污染物应达到的水质标准。

1.3 求解方法

由于目标函数为非线性函数, 故先将目标函数分段线性化。分段线性化方法如下:

对于非线性函数 η_i^k , 若在 $0 < \eta < 1$ 的区间里用 n 段线性函数近似原函数, 各段区间分别为 $(0, \eta_1)$, $(\eta_1, \eta_2), \dots, (\eta_{n-1}, \eta_n)$, 各区间线性函数斜率分别为 $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n$, 则 η_i^k 可近似表示为如下线性函数:

$$\eta_i^k = \sum_{j=1}^n a_j \eta_j$$

为使每条线段与该段区间内的原函数近似误差最小, 可规定一目标函数为: 要求线段与函数之间所夹面积最小。对于区间 (η_{i-1}, η_i) 内的任一点 η 处, 取 $d\eta$, 则该微小线段与原函数之间所夹面积 ds 可表达出来。为使 $ds \geq 0$, 取其平方构造新函数 dZ :

$$dZ = \left[\sum_{j=1}^{i-1} a_j (\eta_j - \eta_{j-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1}) - \eta_i^k \right]^2 d\eta$$

则目标函数为

$$\min Z = \int_{\eta_{i-1}}^{\eta_i} \left[\sum_{j=1}^{i-1} a_j (\eta_j - \eta_{j-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1}) - \eta_i^k \right]^2 d\eta$$

将积分项展开并积分, 并把不含 a_i 项的合并为 K , 则有:

$$Z = K + \left[\sum_{j=1}^{i-1} a_j (\eta_j - \eta_{j-1}) \right] a_i (\eta_i - \eta_{i-1})^2 + \frac{1}{3} a_i^2 (\eta_i - \eta_{i-1})^3 - \frac{2a_i}{k_4 + 2} (\eta_i^{k_4+2} - \eta_{i-1}^{k_4+2}) + \frac{2a_i}{k_4 + 1} \eta_{i-1} (\eta_i^{k_4+1} - \eta_{i-1}^{k_4+1})$$

令 $\frac{dZ}{da_i} = 0$, 即可解得:

$$a_i = \frac{\frac{2}{k_4 + 2} (\eta_i^{k_4+2} - \eta_{i-1}^{k_4+2}) + \frac{2\eta_{i-1}}{k_4 + 1} (\eta_i^{k_4+1} - \eta_{i-1}^{k_4+1})}{\frac{2}{3} (\eta_i - \eta_{i-1})^3} - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} a_j (\eta_j - \eta_{j-1})}{\frac{2}{3} (\eta_i - \eta_{i-1})} \quad (12)$$

按上述分段线性化方法将目标函数分段线性化后, 再采用对偶单纯行法求解整个优化模型^[2]。

2 计算实例

以南水北调中线工程近期调水后的汉江中下游水文条件确定设计流量, 对规划年 2010 年的汉江中下游排污口最优化计算为例来验证该模型。

2.1 模型参数确定

根据参考文献[3,4], 再综合考虑汉江流域的经济现状和物价上涨指数等因数从而确定 $k_1 = 1614.3$, $k_2 = 0.7878$, $k_3 = 5154$, $k_4 = 1.234$ 。

2.2 水文条件确定

根据南水北调规划报告, 对丹江口水库调水后的调节下泄流量, 考虑汉江中下游各城镇用水量及农业用水量, 采用 1956~1997 年水文系列进行长系列操作演算资料, 分别统计分析得到各代表站枯 30Q10(保证率为 90% 的连续 30 d 最小流量) 的设计流量, 各水文站的设计流量见表 1。

表 1 各水文站的设计流量 m^3/s

水文站	黄家港	襄樊	皇庄	沙洋	仙桃
设计流量	430	429	413	388	667

2.3 功能区划分

根据水环境保护功能区划分原则, 结合各城乡多年已对江段水域使用功能的要求, 汉江中下游各段 2010 年的功能为: 汉江中下游除武汉市江段以及老河口市、襄樊市城区部分江段的使用功能为集中式生活饮用水水源地二级保护区, 执行地表水环境质量Ⅲ类水标准外, 其余江段的最高使用功能为集中式生活饮用水源地一级保护区, 执行Ⅱ类水标准。

2.4 计算

首先将处理率 η 在区间 $(0, 1)$ 中划分为 $(0, 0.3)$, $(0.3, 0.6)$, $(0.6, 0.85)$, $(0.85, 1)$ 4 段, 从而可求得 $\alpha_1 = 0.702$, $\alpha_2 = 1.06$, $\alpha_3 = 1.63$, $\alpha_4 = 0.027$ 。

最后根据湖北省环境科学研究院对规划年 2010 年汉江中下游 37 个排污口预测的污染物排放量^①

①湖北省环境科学研究院等. 南水北调中线工程调水对汉江中下游环境影响研究(阶段报告), 2001.

表4 面板实测温度统计资料

面板编号	面板长度/m	浇筑日期	混凝土浇筑温度/℃	混凝土温度峰值/℃	峰值发生日期	峰值发生时间/d	面板中心温度高于表面温度 ΔT_1 /℃	面板表面温度高于气温值 ΔT_2 /℃	气温骤降混凝土面板表里温差 ΔT_3 /℃	气温骤降面板表面与气温差值 ΔT_4 /℃
9	101.7	1999-11-11	11.75	27.4	11-18	2.0	3~7	2~5	3.4~7.5	4~6
11	112.3	1999-11-16	25.25	38.1	11-23	1.5	2~6	2~6	4~7	2~6
13	123.0	1999-11-26	23.35	43.0	11-25	2.0	2~6	2~6	2~5	3~6
17	128.0	1999-11-20	17.0	28.7	12-19	1.5	2~6	1.5~5	5~10	5~15
25	142.6	2000-01-04	15.2	24.8	01-08	2.0	2~6	1.5~5		

3.2 混凝土坍落度及含气量

在混凝土浇筑仓面实测的坍落度为 3.2 cm 左右,最大 4.1 cm,最小 2.5 cm.含气量为 3.8%~4.1%.混凝土泌水和离析很小,粘聚性好.

3.3 面板温度

在 9 号、11 号、13 号、17 号、25 号 5 块面板中心和表面各布置了 2 支温度计,分别测量中心和表面温度变化.温度实测统计资料见表 4.

面板属薄板结构,水化热升温时间短,达到最高温度峰值的时间为 1.5~2.0 d,且很快下降,尔后随气温波动.

面板在降温过程中,其中心温度在大多数情况下高于面板表面温度.面板及时保温保湿非常重要.从表 4 可见,面板表面温度高于外界气温 2~6℃,特别在 1999 年 12 月 20~24 日气温骤降,从 11℃降到 -4℃时,面板表面温度高于外界气温 2~5℃.第 15 号面板于 1999 年 12 月 18 日浇筑,在混凝土降温

过程中,遇到气温骤降,采取措施后,面板表面温度始终高于外界气温 5~10℃,有效地避免了早期裂缝.

3.4 面板混凝土裂缝调查

先后于 1999 年 12 月 26 日、2000 年 1 月 13 日及 2 月 27 日、3 月 20 日、4 月 20 日、5 月 12 日,对面板不同龄期混凝土进行 6 次实地调查.调查结果表明,在面积为 9281 m² 的面板上,均未发现裂缝,说明西主坝面板混凝土具有较强的抗裂性能,施工防裂措施效果良好.

参考文献:

- [1] 司洪洋.混凝土面板堆石坝的监测性态[A].见:中国混凝土面板堆石坝十年学术研讨会论文集[C].北京:中国水力发电工程学会,1995.
- [2] 蒋国澄.混凝土面板坝工程[M].武汉:湖北科学技术出版社,1997.

(收稿日期:2003-03-18 编辑:傅伟群)

(上接第 19 页)进行排污口优化计算,可得目标费用函数 $Z = 40354.89$ 万元,各排污口处理率如表 2 所示.

表2 排污口优化计算结果

所属地区	排污口名称	处理率	入河排放量/(t·a ⁻¹)
北河	北河	0.30	352.8000
小清河	小清河	0.99	0
襄樊	3542,米公路,邵家巷	0.66	2326.9880
襄樊	闸口	0.60	5210.8000
襄樊	湖北制药厂	0.99	0
钟祥	蜜河	0.99	0
钟祥	磷肥厂	0.26	9611.3960
竹皮河	竹皮河	0.92	328.2214

除表 1 之外的其余各排污口均采用直排,处理率为 0.

2.5 结果分析

把计算结果代入水质模型中验证,结果如图 1 所示.从图中可以看出整条河流水质计算结果符合水体功能要求,故该优化结果是可靠的,该模型是可用的.

3 结论

应用排污口最优化理论建立汉江中下游水污染控制规划模型,同时结合分段线性化和线性规划理论求解该模型,该模型简单、实用,可应用于汉江中下游多



图1 COD质量浓度曲线分析

种水文水质,以及各种水体功能目标条件下的排污口优化计算.通过实例计算可以看出该模型计算结果可靠稳定,能为决策者提供一个可靠而经济的参考方案.

参考文献:

- [1] 韦鹤平.环境系统工程[M].北京:中国环境科学出版社,1995.
- [2] 刁在筠,郑汉鼎,刘家状,等.运筹学[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [3] 王富廉.工业废水和城市污水处理经济手册[M].北京:清华大学出版社,1992.
- [4] 曹瑞钰,顾国维.水环境治理工程费用优化模型[J].同济大学学报,1997,25(5):548~552.

(收稿日期:2002-08-31 编辑:熊水斌)