

离散规划在沱江水质规划中的应用

施 为 光

(四川省环境保护研究所)

车 宇 珊

(北京师范大学环境科学研究所)

传统水质规划中,采用污水处理厂的費用函数作目标函数,用线性规划等方法进行最优化运算^[1-2]。但限于我国目前的经济和技术条件,大多数是在污染源控制上采用一些单项治理技术措施来减少排污量,进行水污染控制。这些治理措施的污染物削减率与費用之间并没有连续的函数关系,只能是一种离散的对对应关系,即一般的映射,而没有解析表达式。这样不可能用传统的优化方法进行最优化运算。在沱江水质规划中,我们用文献[3]中提出的离散规划方法进行了水污染防治的优化决策运算,取得了较好的效果。

一、河流污染控制的离散规划模型

设一条河流有 n 个污染源参加规划,它们的排污量(作为变量)记作 $Q_j (j=1, 2, \dots, n)$ 。对某一固定的污染源 j 可有一系列的治理技术措施来削减它的排污量。设与这些措施对应的排污量分别为 $Q_j^{(0)}, Q_j^{(1)}, Q_j^{(2)}, \dots, Q_j^{(l_j)}$, 其中 $Q_j^{(0)} = 0$, $Q_j^{(l_j)}$ 为无治理措施时的排污量。投资变量以 P_j 表示 ($j=1, 2, \dots, n$)。污染源 j 的治理措施 k_j 对应的投资取值为 $P_j^{(k_j)}$, ($k_j = 0, 1, 2, \dots, l_j$), 其中 $P_j^{(l_j)} = 0$ 。

河流污染控制的离散规划模型为:

$$\min P = \sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n F_j(Q_j) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \leq C_i^* \quad (2)$$

$$C_i^* > 0; i = 1, 2, \dots, m。$$

其中 F_j 为文献[3]中所述的排污量与投资的

反序满单映射。(2)式左端为河流某控制断面 i 的污染物浓度表达式, C_i^* 为水中污染物浓度约束值。 m 为河流中控制断面总数。

容易证明,由目前常用的水质模型出发而得出的某一控制断面浓度与排污量分布(即 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$)都是呈线性关系的。文献[4]也采取了这种观点。例如,常用的河流 BOD 模型为:

$$L = L_0 e^{-K \frac{x}{u}} = \frac{M}{86.4 Q} e^{-K \frac{x}{u}}$$

其中 L 为某断面 BOD 的浓度 (mg/l), M 为污染源排污量 (kg/d), Q 为河水流量 (m^3/s), K 为衰减系数 (1/d), x 为断面与污染源的距离 (km), u 为河水平均流速 (km/d)。系数 $\frac{1}{86.4 Q} e^{-K \frac{x}{u}} = a$ 称为源强系数,它仅与河流的地理位置、水文条件、水化学特征、水生态系统等因素有关,与污染物排放量无关。在研究河流确定后上述因素即已确定,故 a 为常数。由此可知,

$$f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = \sum_{j=1}^n a_{ij} Q_j$$

这样,河流的离散规划模型为:

$$\min P = \sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n F_j(Q_j) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n a_{ij} Q_j \leq C_i^* \quad (4)$$

利用文献[3]提出的离散规划的直接解法对(3)、(4)式求解,便可得到全江污染控制的最优解。但河流污染源具有对下游一维递次影

响的特点,利用这一特点对河流从上游至下游分段优化,并用控制断面的约束值作协调变量参与下一段的优化运算,分段采用离散规划的直接解法,通过调整协调变量的取值,求出全江段水污染控制的总体优化结果。为此,需将约束方程(4)表为分段形式。

将河流断面及源号从上游至下游依次排列,设 i 断面的浓度为:

$$C_i = \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} Q_j \quad (5)$$

由于源 j 只对下游断面有影响,故(5)式中

$$a_{ij} = 0, \text{ 当 } j > n_i; n_m = n_0$$

其中 n_i 为断面 i 上游的源头总数,于是(5)式实为:

$$C_i = \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} Q_j = \sum_{j=1}^{n_{i-1}} a_{ij} Q_j + \sum_{j=n_{i-1}+1}^{n_i} a_{ij} Q_j \quad (6)$$

(6) 式右端第一项为 $i-1$ 断面上游源对 i 断面浓度的贡献,第二项为 $i-1$ 断面到 i 断面之间的源对 i 断面的浓度贡献。而第一项实际上可看成是 $i-1$ 断面的浓度对 i 断面的浓度贡献。则有,

$$C_i = d_{i-1,i} C_{i-1} + \sum_{j=n_{i-1}+1}^{n_i} a_{ij} Q_j \quad (7)$$

其中影响系数 $d_{i-1,i}$ 可直接由水质模型求出。(7)式便是分段优化时采用的约束形式,于是分段优化模型为:

$$\min P = \sum_{j=n_{i-1}+1}^{n_i} P_j = \sum_{j=n_{i-1}+1}^{n_i} F_j(Q_j) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } C_i = d_{i-1,i} C_{i-1} + \sum_{j=n_{i-1}+1}^{n_i} a_{ij} Q_j \leq C_i^* \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; n_0 = 0.$$

对于每一个固定的断面 i , (8)、(9)式是只有一个约束条件的简单离散规划问题,利用文献[3]中的直接解法可以迅速求出分段最

优解。(9)式中 C_{i-1} 为 $i-1$ 段优化结果中的计算浓度,在 i 段优化过程中,它是由约束值 C_{i-1}^* 所决定的常数。

为了求得全江段的总体优化结果,以约束值 C_i^* 作协调变量,即取 $C_i^* = C_{i1}^*, C_{i2}^*, \dots, C_{in_i}^*$, 分别进行分段递次优化。由于规划模型(8)、(9)式简单,求解极快,故对于不同的约束组合仍可迅速得到最优解。比较这些不同意义下的最优解的目标值可获得全江段总体优化的最优解(至少是一个比较现实的准最优解)。

二、沱江离散规划模型

经研究沱江干流沿岸最主要的污染问题是 BOD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 它们主要影响水中的溶解氧浓度。因此沱江优化运算中选取反映水质状况的综合性指标溶解氧(DO)作为控制断面的水质指标。同时把 BOD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 换算成 UOD 以便统一表示污染强度,这样便把污染源排污量与河流控制断面的 DO 联系起来。 Q_j 便是污染源 j 的 UOD 排放量。

为了计算的方便用治理措施的 UOD 削减 η_j 代替排污量 Q_j 。即

$$\eta_j = g(Q_j) = 1 - \frac{Q_j}{Q_j^{(j)}} \quad (10)$$

其中 $Q_j^{(j)}$ 为源 j 的现状(或预计)排污量,即不采取措施的排污量。于是沱江水质规划的数字表达式为:

$$\min P = \sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n G_j(\eta_j) \quad (11)$$

$$\text{s.t. } b_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \eta_j \geq b_i^* \quad (12)$$

其中 η_j 为源 j 治理措施的削减率,有 $0 \leq \eta_j \leq 1$; $\eta_j^{(0)} = 1$; $\eta_j^{(j)} = 0$; $j = 1, 2, \dots, n_0$ 。 b_i 为 i 断面 DO 的计算浓度, b_i^* 为其 DO 的约束值。 A_{ij} 为源 j 对断面 i 的影响系数,它是由沱江水质模型推导约束方程时将

$Q_i = Q_i^0(1 - \eta_i)$ 代入水质模型(DO 模型)推导而得出的常数。

$G_i(\eta_i) = F_i[Q_i^0(1 - \eta_i)] = P_i$
 G_i 为集合 $\{\eta_i^{(0)}, \eta_i^{(1)}, \dots, \eta_i^{(l-1)}\}$ 与集合 $\{P_i^{(0)}, P_i^{(1)}, \dots, P_i^{(l-1)}\}$ 之间的保序满单映射。其中 $P_i^{(l-1)} = G_i[\eta_i^{(l-1)}] = 0$ 而当 $k_{j1} < k_{j2}$ 时,

$$\eta_i^{(k_{j1})} > \eta_i^{(k_{j2})}$$

相对应地

$$P_i^{(k_{j1})} > P_i^{(k_{j2})} \quad j = 1, 2, \dots, n_0$$

相应的沱江分段优化模型为:

$$\min P = \sum_{i=n_{l-1}+1}^{n_l} P_i = \sum_{i=n_{l-1}+1}^{n_l} G_i(\eta_i) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } b_i &= d_{i-1,n} b_{i-1} + \sum_{j=n_{l-1}+1}^{n_l} A_{ij}(\eta_j) \\ &\geq b_i^* \end{aligned} \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad n_0 = 0.$$

(14) 式中 b_{i-1} 为 $i-1$ 段优化结果中的计算浓度, 在 i 段优化过程中它是由约束值 b_{i-1}^* 所决定的常数。为简便计算, 分段式的规划变量通用 η_j 表示, 则沱江分段优化模型为:

$$\min P = \sum_{i=n_{l-1}+1}^{n_l} P_i = \sum_{i=n_{l-1}+1}^{n_l} G_i(\eta_i) \quad (15)$$

$$\text{s.t. } b_i = \sum_{j=1}^{n_{l-1}} A_{ij} \eta_j^* + \sum_{j=n_{l-1}+1}^{n_l} A_{ij} \eta_j \geq b_i^* \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad n_0 = 0.$$

其中 η_j^* 为上段优化的结果。

经过技术经济可行性分析, 可供离散规划求解使用的措施削减率可列为一个削减率表, 简称 H 表; 相对应的费用也可以列为一个费用表, 简称 P 表。采用文献[3]提出的离散规划的直接解法, 利用 $H-P$ 表可对 (15)、(16) 式求解, 求出沱江全江总体优化的最优结果。

三、沱江的应用实例

选取干流江段 17 个排放源共 21 个工厂作为需要控制的污染源。1984 年其排污量占沱江干流排放 BOD₅ 的 97.3%, NH₃-N 的 94.5%。控制住这 17 个排放源就能控制住沱江干流水中的溶解氧。对 17 个排放源

表 1 沱江离散规划 H 表 (单位: %)

编 号	排放源名称	治 理 措 施 编 号								
		一	二	三	四	五	六	七	八	九
1	简阳酒厂	99.0	89.4	89.1	88.5	24.8	0.0			
2	简阳糖厂	100	83.7	52.4	52.2	31.3	0.0			
3	简阳纸厂	98.3	83.4	80.0	30.0	5.0	0.0			
4	简阳氮肥厂	100	96.5	76.6	72.0	60.0	0.0			
5	红塔氮肥厂	96.6	93.3	73.2	72.1	68.7	0.0			
6	资阳酒厂	78.5	68.8	68.1	19.6	0.0				
7	乐至氮肥厂	97.7	74.7	73.7	71.6	70.3	0.0			
8	资阳糖厂	100	79.5	58.1	39.9	35.9	13.1	10.0	0.0	
9	球溪糖厂	100	78.2	77.2	42.0	37.8	10.7	0.0		
10	顺河酒厂	100	89.2	88.2	25.0	0.0				
11	资中酒厂	71.7	68.5	64.5	63.8	17.9	0.0			
12	银山糖厂	99.9	98.8	80.3	79.5	74.6	51.2	48.1	25.0	0.0
13	内江氮肥厂	100	76.5	75.5	72.0	0.0				
14	内江制药厂	82.1	81.4	56.9	22.8	0.0				
15	高桥纸厂	65.7	34.3	3.9	0.0					
16	内江糖厂	100	85.9	75.2	67.6	60.3	59.6	17.2	0.0	
17	茂市糖厂	100	84.0	59.8	40.3	38.2	20.7	0.0		

* 银山糖厂生产糖、纸、酒三种产品。

1984 年排污量的治理措施和费用进行筛选和排列, 得出具有保序满单映射关系的削减率表(表 1)和治理费用表(表 2)。治理措施表从略, 仅以 12 号排放源的 $H-P$ 表(表 3)为例。

沱江水质规划选取简阳、资阳、资中、内江四大中心城镇上侧某点作为水源保护江段的控制断面, 龙门镇作为出境水控制断面。其水质目标分别记为 b_0^* 、 b_1^* 、 b_2^* 、 b_3^* 、 b_4^* 。控

制断面及污染源分布如图 1 所示。

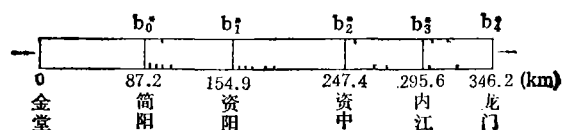


图 1 沱江离散规划控制断面及污染源示意图

图中下线中的点从左至右分别代表 1、3、4、5、6、7、8、9、10、12、14、17 号污染源点, 上线分别代表 2、11、15、16 号污染源点。

表 2 沱江离散规划 P 表 (单位: 万元)

编 号	排放源名称	治 理 措 施 编 号								
		一	二	三	四	五	六	七	八	九
1	简阳酒厂	183.0	50.0	40.0	25.0	6.0	0.0			
2	简阳糖厂	952.0	660.0	200.0	62.7	30.0	0.0			
3	简阳纸厂	500.0	400.0	150.0	50.0	30.0	0.0			
4	简阳氮肥厂	200.0	52.0	29.2	4.2	3.9	0.0			
5	红塔氮肥厂	200.0	52.0	32.2	29.2	4.2	0.0			
6	资阳酒厂	190.0	50.0	30.0	8.0	0.0				
7	乐至氮肥厂	377.0	64.3	58.3	54.2	8.3	0.0			
8	资阳糖厂	862.0	330.0	200.0	50.0	38.0	14.0	0.0		
9	球溪糖厂	1410.0	280.0	80.0	50.0	30.0	8.0	0.0		
10	顺河酒厂	138.0	40.0	25.0	6.0	0.0				
11	资中酒厂	183.0	55.0	40.0	25.0	6.0	0.0			
12	银山糖厂	1202.0	1098.0	708.0	665.7	613.0	63.0	25.7	25.0	0.0
13	内江氮肥厂	191.0	32.2	29.2	4.2	0.0				
14	内江制药厂	128.0	60.0	50.0	16.0	0.0				
15	高桥纸厂	234.0	200.0	30.0	0.0					
16	内江糖厂	1700.0	850.0	780.0	116.7	86.7	30.0	14.0	0.0	
17	茂市糖厂	838.0	250.0	180.0	60.0	55.0	30.0	0.0		

表 3 1984 年源 12 的 $H-P$ 表

措施编号	排放源单位	治 理 措 施	H_{12} (%)	P_{12} (万元)	Q_{12} UOD (kg/d)
一	银山糖厂*	银山糖厂、金紫酒厂两厂搬迁	99.9	1202	30
二	金紫酒厂	银山糖厂搬迁, 金紫酒厂废醪废气处理	98.8	1098	275
三		银糖制纸碱回收, 制酒废醪废气处理	80.3	708	4584
四		银糖制纸碱回收, 金酒废醪作饲料等	79.5	667	4784
五		银糖制纸碱回收, 两厂废醪废气处理	74.6	662	5622
六		银糖、金紫酒厂制酒废醪废气处理	51.2	63	11355
七		银糖制酒废醪燃烧提钾	48.1	26	12092
八		银糖, 金酒两厂共建一个一级处理厂	25.0	25	17460
九		两厂均不处理	0	0	23280

* 银山糖厂生产糖、纸、酒三种产品

b_0^* 只受初始断面排污量的影响,不参加
优化运算。实际上只有 $b_1^*, b_2^*, b_3^*, b_4^*$ 四个
断面的约束值参加优化运算。

总目标 $\min P = \sum_{i=1}^{17} P_i$

约束方程从略。

四、结 论

分段目标 $\min P(i) = \sum_{j=n_{i-1}+1}^{n_i} P_j$

计算中,通过选取不同协调变量,分别进

表 4 沱江离散规划最优解统计表

优 化 方 案 号	控制断面 DO 约束值 (mg/l)				上游 NH ₃ -N 削减 50% 控制断面 DO 的计算值及费用				
	资 阳	资 中	内 江	龙 门	资 阳	资 中	内 江	龙 门	投资(万元)
1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.0	4.6	4.3	189.32
2	4.0	4.5	4.5	4.0	4.1	4.5	4.7	4.3	261.32
3	4.0	4.5	5.0	4.0	4.0	4.5	5.3	4.5	286.32
4	4.0	4.5	6.0	4.0	4.1	4.5	6.1	4.2	261.18
5	4.4	5.0	5.0	4.0	4.4	5.0	5.4	4.6	536.02
6	4.4	5.0	6.0	4.0	4.4	5.0	6.2	4.3	510.88
7	4.5	4.5	4.5	4.0	4.8	4.7	4.7	4.3	1253.32
8	4.5	5.0	5.0	4.0	4.8	4.7	5.3	4.6	1278.32
9	4.5	5.0	5.0	4.0	4.8	5.1	5.4	4.6	1333.32
10	4.5	5.0	5.5	4.0	4.6	5.0	5.9	4.1	1324.43
11	5.0	5.0	5.0	4.0	4.9	5.0	5.4	4.6	1816.32
12	5.0	5.0	6.0	4.0	5.2	5.2	6.2	4.3	1283.18
13	5.0	5.5	5.5	4.0	5.2	5.6	5.6	4.6	1575.32
14	5.5	5.5	5.5	4.0	5.4*	5.5	5.5	4.6	1883.32
15	6.0	6.0	6.0	4.0	5.4*	6.1	6.2	4.2	3034.70

* 为断面以上污染源全部削减达到的最大值

表 5 沱江水污染控制的最优方案

排放口号	所含工厂名称	治 理 措 施	H_j (%)	P_j (万元)	$Q_j(UOD)$ (kg/d)
1	简阳酒厂	制酒废醪厌氧处理	88.5	25.0	367.5
2	简阳糖厂	制酒废醪浓缩燃烧回收热能与钾灰	52.2	62.7	3370.5
3	简阳纸厂	中段废水与县城其它废水共建一个二级处理	80.8	150.0	1006.5
6	资阳酒厂	制酒废醪厌氧处理	68.1	30.0	696.0
7	乐至氮肥厂 资阳氮肥厂	乐至氮肥厂、资阳氮肥厂实行氨水平衡,两厂采用 PLA 装置回收氨气	73.7	58.3	2696.3
8	资阳糖厂	制酒废醪浓缩燃烧回收热能与钾灰	39.9	50.0	6036.0
9	球溪糖厂	制酒废醪厌氧处理,造纸黑液“亚氨黑液浓缩”	77.2	80.0	3517.5
10	顺河酒厂	制酒废醪厌氧处理	88.2	25.0	232.5
12	银山糖厂 金紫酒厂	银糖制酒废醪浓缩燃烧回收热能与钾灰、金紫酒厂不治 理	48.1	25.7	12091.5
13	内江氮肥厂	实行氨水平衡	72.0	4.2	1832.6
其 他		含上游青白江区 NH ₃ -N 削减 50% 糖厂滤泥干排等费用		677.0	
合 计				1187.9 万元	

行分段递次优化,可以得到一系列不同水质目标的优化方案(表 4)。比较这些不同意义下的最优解的目标值,可以看出表 6 中的方案 6 是总体优化的最优解。全江治理投资为 1187.9 万元(表 5)。此方案实施后全江段都将达到三级地面水标准以上。此方案比全江污染源一刀切实施达标排放,浓度控制的治

理方案少投资 9200 万元。

参 考 文 献

- [1] 傅国伟,程声通,中国环境科学,(5),37(1981)。
- [2] 朱仲平,环境科学,2(3),56(1981)。
- [3] 车宇翊等,环境科学学报,2(2),102(1982)。
- [4] L. G. Rich 著,侯然杰等译,环境系统工程,3—6 页,水利出版社,1981 年。

居 住 与 环 境

——居住生态初探

姜 象 鲤

(北京师范大学环科所)

居住生态是专门研究城市居民与其居住环境关系的,它是城市生态的组成部分,因为居住是城市四大功能(居住、工作、康乐和交通)的最重要部分。

1976 年联合国在温哥华召开了《人类居住生态会议》,1980 年又在马尼拉召开以“人类城市面临的挑战和前景”为主题的学术讨论会。10 年来,居住生态的研究已引起国内外环境科学和建筑科学工作者的重视。为城市居民创建一个安全、卫生、方便、舒适和优美的住宅和住宅区是城市建设和环境建设的主要任务之一^[1]。

住宅问题是当代世界重大社会问题之一,解决“房荒”、改善和提高居住环境质量,是世界各国政府面临的最艰巨的任务。为此,联合国宣布 1987 年为《国际住房年》,以后每年 10 月第 1 周的星期一为《世界住房日》,以唤起各国政府和人民群众的重视。

一、居 住 标 准

在探讨住宅和居住区生态时,我们认为,首要问题是确定居住标准,即每人平均居住

面积。如果斗室容身,居住环境再好,也会感到索然无味。在探讨和解决居住生态问题时,还要坚持“先内,后外”的原则,即先解决住宅生态问题,保证每个家庭及其成员的基本居住生活获得满足,再解决居住区生态问题,保证每个居民享有家园气息的、生态健全的、有利生产、方便生活的居住环境。

目前,国际上通用的居住标准分为三级:每人一个床位是最低标准,每户一套住宅是合理标准,每人一个房间乃是舒适标准。居住标准应该和经济社会发展水平保持一致。到本世纪末,我国城镇居民的居住标准和国民经济社会发展战略目标一样,也是“小康水平”:基本实现每户一套住宅,有较齐全的设备,能满足各类家庭“住得下,分得开”的要求和各方面生活需要,人均居住面积达到 8m²。

住宅的生态指标除居住面积外,还包括居室容积、净高和进深。居住容积要求每人占有 20—25m³,使室内 CO₂ 浓度不超过最高容许浓度。居室净高在于保证居室有必要的容积,保证室内空气新鲜,通风和采光条件良好,一般居室净高应不低于 2.6—2.7m。居