

设计制作了电渗析器本体;本文还承上海原子核所许志立同志指导。一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 北京市北郊木材厂等  
环境保护 2 11—13 (1976)

- [2] 上海电机厂 电解法处理含铬废水  
上海人民出版社 1974 年 11 月  
[3] 上海长征电镀厂  
五金科技 1 21—23 (1978)  
[4] A. C. Шубин, В. М. Ткач, В. М. Новаковский  
Ж. Вхо им Д. И. Менделеева Том 7, № 1.  
113—114 (1962).

## 河流水质模式参数估计的研究

叶常明 谢永明 杜秀英 马瑞霞

(中国科学院环境化学研究所)

## 摘 要

本文综述了河流水质数学模式参数估计的几种不同方法。结合我们对广西桂林地区漓江水质数学模式的研究,对用不同方法所计算的参数值加以比较,分析影响参数计算值的各种不同因素,计算了漓江上三个河段的自净系数。最后将所确定的各个参数值代入氧平衡数学模式,计算溶解氧的浓度,并将计算值与实测值进行比较,发现两者之间具有相当好的一致性。

## 前 言

参数估计是水质模式研究的重要组成部分。估计参数的正确与否,直接影响模式的可靠性。到目前为止,已有不少作者对水质模式中的参数估计方法进行了大量的研究工作。脱氧系数  $K_1$  的估计方法既可从实验室测定数据单独求得,亦可用野外测量数据同其它参数一道来计算。关于实验室测定数据估计  $K_1$  的方法有: Reed 和 Theriault (1927) 的最小二乘法, Thomas (1937) 的斜率法, Rhame (1949) 的两点法以及 Thomas (1950) 的图解法。河流的实际参数值与实验室测定的参数值是有差别的,河流的实际脱氧速度往往比实验室测定所计算的脱氧速度 ( $K_1$  值) 要大得多。

复氧系数  $K_2$  的确定方法主要分为四个方面: 经验公式; 激荡平衡技术; 溶解氧模式

以及 Tsivoglou (1965) 所提出的示踪剂技术。其中经验公式及溶解氧模式应用得比较普遍。目前人们广泛应用于计算  $K_2$  的经验数学表达式为:

$$K_2 = c \frac{U^m}{H^n} \quad (1)$$

其中  $c, m, n$  是常数,  $U$  是水流速度,  $H$  是水流平均深度。  $K_2$  是在 20℃ 时的复氧系数。由于  $K_2$  与水温有相当密切的关系, 因此在温度  $T$  时的  $K_2(T)$  计算公式应为:

$$K_2(T) = K_2(20^\circ\text{C})\theta^{(T-20)} \quad (2)$$

$\theta$  是温度系数,  $T$  是水温。

Churchill (1962) 等人认为  $K_2$  与存在的 DO 绝对量无关, 而与所测定的 DO 的亏缺及两点测定的流到时间有关。

本文所用野外测量数据是同桂林地区环境监测站和桂林市环境监测站一道测定的, 在此表示谢意。

本文得到申葆诚先生和金士博博士的指导。

O'Connor 和 Dobbins (1956) 则认为, 在各向异性的河流中,  $K_2$  与分子扩散、河床的粗糙度及水流平均深度有关。在各向同性的河流中则与其水流速度及水流平均深度有关。

Nemerow (1974) 用 Streeter-Phelps 公式分析溶解氧的下垂曲线求  $K_1$  或  $K_2$ 。他建议在氧亏不大于饱和亏缺的 25% 时, 计算

$K_2$  值可用 Churchill 公式、O'Connor's 公式或 Isaacs 公式。在氧浓度较低时, 必须用 Streeter-Phelps 修正公式, 这是因为, 特别缺氧可使复氧作用大大加强。

我们选择了几种较合理的方法, 对广西桂林地区漓江进行了初步研究, 并选了三条河段做水团追踪实验, 实验结果列于表 1。

表 1 水团追踪试验结果

| 编号 | 时间 (天) | 距离 (公里) | 水温 (°C) | 溶解氧<br>(毫克/升) | BOD (毫克/升) |      | 氨氮<br>(毫克/升) |
|----|--------|---------|---------|---------------|------------|------|--------------|
|    |        |         |         |               | 五天         | 十天   |              |
| 1* | 0.00   | 0.00    | 12.3    | 8.40          | 2.55       | 3.24 | 0.03         |
|    | 0.034  | 2.47    | 12.4    | 8.22          |            |      |              |
|    | 0.085  | 6.11    | 12.2    | 8.18          |            |      |              |
|    | 0.133  | 9.63    | 11.8    | 9.19          |            |      |              |
|    | 0.187  | 13.48   | 11.1    | 9.94          |            |      |              |
|    | 0.194  | 14.00   | 11.0    | 10.27         |            |      |              |
| 2* | 0.00   | 0.00    | 9.8     | 9.38          | 1.34       | 2.42 | 0.05         |
|    | 0.06   | 3.46    | 10.5    | 9.42          |            |      |              |
|    | 0.119  | 6.89    | 10.3    | 9.92          |            |      |              |
|    | 0.161  | 9.29    | 10.4    | 10.28         |            |      |              |
|    | 0.188  | 10.80   | 10.4    | 10.63         |            |      |              |
|    | 0.218  | 12.58   | 10.3    | 11.03         |            |      |              |
| 3* | 0.00   | 0.00    | 12.4    | 9.13          | 1.28       | 1.78 | 0.12         |
|    | 0.018  | 0.84    | 13.4    | 9.03          |            |      |              |
|    | 0.045  | 2.14    | 14.4    | 8.85          |            |      |              |
|    | 0.068  | 3.24    | 13.7    | 9.29          |            |      |              |
|    | 0.081  | 3.90    | 13.9    | 9.35          |            |      |              |
|    | 0.165  | 7.94    | 14.2    | 9.55          |            |      |              |

## 实 验 结 果

### 1. 用经验公式估算 $K_2$

根据 (1) 式, 我们用最小二乘方原理求出常数  $c$ 、 $m$ 、 $u$ , 然后根据各段的水文数据计算  $K_2$ 。计算公式变为:

$$K_2 = 0.1467 \times 1.024^{(7-20)} \times U^{-0.01649} \times H^{-0.8241} \quad (3)$$

对于 1\*、2\*、3\* 段求得的  $K_2$  值分别为 0.258、0.246、0.251。

2. 根据 Streeter-Phelps 公式分析溶解氧下垂曲线, 从而求得脱氧速率常数  $K_1$ 。

氧亏数的增加与脱氧作用和复氧作用的两项代数和成正比:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L - K_2 D_c \quad (4)$$

这里  $D$  是时间  $t$  时的氧亏 (毫克/升),  $D_c$  是溶解氧下垂曲线的最大氧亏 (即临界氧亏, 毫克/升),  $L$  是最大氧亏时的 BOD 浓度 (毫克/升)。在临界点上氧亏的变化即

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L - K_2 D_c = 0 \quad (5)$$

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} L_c \times 10^{-K_1 t_c} \quad (6)$$

表 2 Streeter-Phelps-牛顿法计算  $K_1$ 

| 编号 | $t_c$ (天) | $D_c$ (毫克/升) | $K_2$ (天 $^{-1}$ ) | $L_a$ (毫克/升) | $\lg \frac{D_c K_2}{L_a}$ | $K_1$ (天 $^{-1}$ ) |
|----|-----------|--------------|--------------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| 1* | 0.05542   | 2.18         | 0.0258             | 2.55         | -1.0188                   | 0.223              |
| 2* | 0         | 1.60         | 0.246              | 1.34         | -0.8936                   | 0.295              |
| 3* | 0.1042    | 0.98         | 0.251              | 1.28         | -1.0786                   | 0.196              |

两边取对数得:

$$\lg D_c = \lg K_1 + \lg \frac{L_a}{K_2} - K_1 t_c \quad (7)$$

上式中  $L_a$  是时间  $t$  为零时的 BOD 浓度,  $t_c$  是最大氧亏时的时间. 利用图解法求得  $D_c$ , 用牛顿法可以从  $D_c$  来计算  $K_1$ . 从计算结果发现, 当  $t_c > 0$  时, 计算结果比较理想; 当  $t_c \leq 0$  时, 计算结果不理想.

3. 根据河流溶解氧平衡模式, 我们可以得到:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} - K_1 L - K_N L_N + K_2 (c_s - c) \quad (8)$$

忽略弥散项, 上式变成:

$$\frac{dc}{dt} = -K_1 L - K_N L_N + K_2 \times (c_s - c) \quad (9)$$

该方程的解为:

$$c = \left( c_0 - \frac{K_1 L_0}{K_1 - K_2} - \frac{K_N L_{N_0}}{K_N - K_2} - c_s \right) e^{-K_2 t} + \frac{K_1 L_0}{K_1 - K_2} e^{-K_1 t} + \frac{K_N L_{N_0}}{K_N - K_2} e^{-K_N t} + c_s \quad (10)$$

式中  $c$  是时间  $t$  时溶解氧浓度;  $c_0$  是当时间等于零时的溶解氧;  $L_0$  和  $L_{N_0}$  分别是 BOD 和氨氮的浓度;  $c_s$  是溶解氧饱和浓度.

根据最小二乘法, 我们得到:

$$J(K_1, K_2, K_N) = \sum (c - c_i)^2 = \text{最小} \quad (11)$$

式中  $c_i$  是任何时间各点所测量的溶解氧浓度. 将水团追踪的各点溶解氧浓度  $c_i$  代入

方程 (11) 进行计算, 直到  $J(K_1, K_2, K_N)$  最小为止, 从而求得  $K_1, K_2, K_N$ . 从计算结果可以看出, 三段所求得的  $K_1$  值均在 0.10 和 0.13 之间;  $K_2$  值在 0.30 和 0.52 之间;  $K_N$  值在 0.095 和 0.101 之间. 这样的计算结果是可行的.

4. Kolvo 和 Phillips (以下简称 Kolvo 法) 提出只从不同四点的溶解氧浓度来求  $K_1$  和  $s$ , 用其它经验公式来求  $K_2$ , 基本程序是从 BOD 变化速度和溶解氧变化速度两个方程开始:

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{K_1}{U} L, L(x_0) = L_0 \quad (12)$$

$$\frac{dc}{dx} = -\frac{K_1}{U} L + \frac{K_2}{U} (c_s - c) + \frac{s}{U} \quad c(x_0) = c_0 \quad (13)$$

式中  $L$  是在时间  $t$  时 BOD 的浓度;  $c$  是时间  $t$  时的溶解氧浓度;  $U$  是水流速度;  $x$  是距离;  $s$  是其它的氧来源和除去源. 这里  $s = P - R$  是水生物的生产力同呼吸速度之差. Kolvo 和 Phillips 经过一系列假设及数学推导, 导出两个联立方程:

$$\gamma(k+2) = \phi_{11} \gamma(k+1) + s_i \quad (14)$$

$$\gamma(k+3) = \phi_{11} \gamma(k+2) + s_i \quad (15)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

定义  $\gamma(k+1) \triangleq [\phi_{22} y(k) - y(k+1)]$ , 可以类似地求出  $\gamma(k+2), \gamma(k+3)$ . 因为  $y(k), y(k+1), y(k+2)$  和  $\phi_{22} = e^{-K_2 x/U}$  都是已知的, 所以当  $k=0$  时, 求得:

$$\phi_{11} = \frac{\phi_{22}[y(2) - y(1)] - y(3) + y(2)}{\phi_{22}[y(1) - y(0)] - y(2) + y(1)} \quad (16)$$

式中  $y_{(0)}$ 、 $y_{(1)}$ 、 $y_{(2)}$ 、 $y_{(3)}$  分别代表在  $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  点的溶解氧浓度。将 (16) 式代入 (14) 或 (15), 可以求得  $s_i$ :

$$s_i = \phi_{22}y_{(1)} - y_{(2)} - \phi_{11}[\phi_{22}y_{(0)} - y_{(1)}] \quad (17)$$

并以 Kolvo 和 Phillips 的假设及推导出下列关系式:

$$s = \frac{s_i}{b_2} (\phi_{11} - 1) = (P - R) + K_2 c_i \quad (18)$$

$$b_2 = \frac{1}{K_2} (1 - e^{-K_2 x/U}) \quad (19)$$

$$\phi_{11} = e^{-K_2 x/U} \quad (20)$$

式中  $x = x_{i+1} - x_i$ , 假定  $x$  等于常数, 每个  $x$  间隔距离的溶解氧用图 1、图 2、图 3 求出。根据方程 16—20, 可以求出  $K_1$ 、 $s$ 。

从计算结果发现, 第三段的  $K_1$  大于其它两段的  $K_1$ , 这时的  $K_1$  比  $K_2$  大,  $P - R$  为 0.172 是合理的。

#### 5. Rhame 的两点法求 $K_1$

$$K_1 = \frac{1}{T - t} \ln \frac{x}{z - x} \quad (21)$$

式中  $x$  是时间  $t$  时所测定的 BOD 浓度;  $z$  是时间  $T$  时所测定的 BOD 浓度;  $T = 2t$ 。从而求得三段的  $K_1$  (见表 3)。

结果表明, Rhame 法计算  $K_1$ , 完全依赖于所测定的 BOD 值, 而其出现的现象与 Kolvo 法的计算结果相反, 第二段的  $K_1$  比其

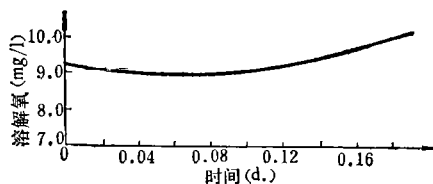


图 1 1# 河段溶解氧曲线

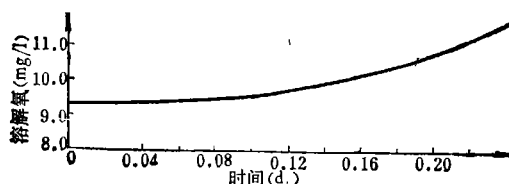


图 2 2# 河段溶解氧曲线

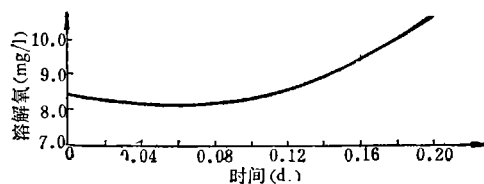


图 3 3# 河段溶解氧曲线

它两段的  $K_1$  小。这个原因可以归结到  $P - R$  的结果。

为了比较起见, 我们将几种不同方法求得的参数值列于表 4。

为了更进一步证明各种不同方法所求参数的可靠性, 我们利用野外测定数据进行验

表 3 Rhame 法计算  $K_1$

| 编 号 | $t$ (天) | $x$ (毫克/升) | $T$ (天) | $z$ (毫克/升) | $K_1$ (天 <sup>-1</sup> ) |
|-----|---------|------------|---------|------------|--------------------------|
| 1#  | 5       | 2.55       | 10      | 3.24       | 0.261                    |
| 2#  | 5       | 1.34       | 10      | 2.42       | 0.042                    |
| 3#  | 5       | 1.28       | 10      | 1.78       | 0.188                    |

表 4 各种方法求得参数值比较

| 编号 | 最速下降法                    |                          |                          | Kolvo 法                  |         | 牛顿法<br>$K_1$ (天 <sup>-1</sup> ) | 经验公式<br>$K_2$ (天 <sup>-1</sup> ) | Rhame 法<br>$K_1$ (天 <sup>-1</sup> ) |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|    | $K_1$ (天 <sup>-1</sup> ) | $K_2$ (天 <sup>-1</sup> ) | $K_N$ (天 <sup>-1</sup> ) | $K_1$ (天 <sup>-1</sup> ) | $P - R$ |                                 |                                  |                                     |
| 1# | 0.129                    | 0.368                    | 0.099                    | 0.116                    | -0.606  | 0.223                           | 0.258                            | 0.261                               |
| 2# | 0.110                    | 0.511                    | 0.095                    | 0.361                    | 0.172   | 0.295                           | 0.246                            | 0.042                               |
| 3# | 0.108                    | 0.302                    | 0.101                    | 0.106                    | 0.086   | 0.196                           | 0.251                            | 0.188                               |

证。用方程(10)来验证最速下降法所求得的参数值。用(22)式来验证用 Kolvo 法求得的参数值。

$$c = \left( c_0 - \frac{K_1 L_0}{K_1 - K_2} - c_s + \frac{P - R}{K_2} \right) e^{-K_2 t} + \frac{K_1 L_0}{K_1 - K_2} e^{-K_1 t} + \frac{P - R}{K_2} + c_s \quad (22)$$

用各种不同方法计算的参数代入不同的模式所计算的溶解氧浓度和该号实测数据一起列于表 5。在验证过程中,牛顿法和 Kolvo 法及 Rhame 法验证公式中  $K_2$  值是用经验公式求得的。

从表 5 可以发现,用前三种方法求得的参数值进行验证时,结果与测量值基本一致,符合程度亦很好。而用 Kolvo 法求得的参数进行验证时,DO 的计算值与测量值相差较

表 5 用不同方法求得的参数计算 DO 值与 DO 实测值的比较

| 编 号 | 测量值<br>(毫克/升) | $c_{计}^{(最)}$<br>(毫克/升) | $c_{计}^{(中)}$<br>(毫克/升) | $c_{计}^{(R)}$<br>(毫克/升) | $c_{计}^{(Kolvo)}$<br>(毫克/升) |
|-----|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 2*  | 9.52          | 9.54                    | 9.43                    | 9.55                    | 10.68                       |
|     | 8.10          | 8.42                    | 8.17                    | 8.32                    | 9.49                        |
|     | 6.60          | 7.04                    | 6.97                    | 7.02                    | 8.33                        |
|     | 8.40          | 8.65                    | 8.42                    | 8.53                    | 9.74                        |
|     | 6.00          | 6.29                    | 6.22                    | 6.25                    | 7.59                        |
|     | 8.00          | 8.37                    | 8.13                    | 8.29                    | 9.43                        |
|     | 6.20          | 6.53                    | 6.41                    | 6.47                    | 7.76                        |
|     | 8.40          | 9.06                    | 8.98                    | 9.03                    | 10.34                       |
|     | 6.00          | 6.64                    | 6.56                    | 6.63                    | 7.91                        |
| 3*  | 8.00          | 8.28                    | 8.17                    | 8.18                    | 8.89                        |
|     | 5.40          | 6.62                    | 6.58                    | 6.60                    | 7.28                        |
|     | 8.70          | 8.56                    | 8.46                    | 8.40                    | 9.18                        |
|     | 5.60          | 6.07                    | 6.05                    | 6.05                    | 6.74                        |
|     | 5.90          | 6.28                    | 6.24                    | 6.24                    | 6.92                        |
|     | 8.10          | 8.45                    | 8.40                    | 8.41                    | 9.10                        |
|     | 5.90          | 6.05                    | 6.01                    | 6.01                    | 6.70                        |
|     |               |                         |                         |                         |                             |

大。这是由于 Kolvo 法中一系列处理过程所致。该方法对于有机污染负荷较严重的河流比较适合,对污染不太严重的河流还存在一定的问题,有待研究。在运用牛顿法求参数时,在 DO、BOD 的测定,  $K_2$  的计算中,任何一项所具有的误差都会影响  $K_1$  值的计算结果。如果能够用一个精确的数学表达式来计算  $K_2$ ,而且测定的 DO、BOD 浓度十分可靠时,使用牛顿法比使用最速下降法要简便得多。

前三种方法计算的溶解氧浓度与测量值相比较,其相对误差在 10% 以下,而其中一点的误差在 20%。在条件许可的情况下,用

最速下降法比较理想。在粗略地估计参数值时,  $K_2$  可以用经验公式计算,  $K_1$  可以用 Streeter-phelps-牛顿法,或者用 Rhame 的两点法来确定。

## 结 束 语

河流水质模式中的参数估计,必须结合河流本身的实际情况加以研究。虽然目前有估计参数的各种方法,但都有其一定的局限性,它们都是在特定的河流条件下适用的。我们对参数的初步研究认为:(1)利用水团追踪结果,借助计算机,用最速下降法来估计参数是可行的。但是寻找一组合适的初始

值,以避开局部最低值在手续上比较麻烦。(2) Streeter-phelps 修正公式求得的  $K_1$  值取决于  $K_2$  计算公式的符合程度、DO 和 BOD 测量的准确。(3) 在计算复氧系数时,主要取决于流速、水深等水文参数,同时还取决于河流污染的类型和程度。就是说,河流的参数值随河流物理、化学、生化等作用的不同而不同。(4) 从我们的研究结果看出,对于同一河流的不同河段,其模式参数值亦不完全相同,但只要其变化幅度不大,我们可以取其平均值,近似地作为整个河流的参数值。

## 参 考 文 献

- [1] Kolvo, A. J. and Phillips, G. R., *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 2, p. 478—486, (1972).  
 [2] Nemerow, N. L., *Scientific Stream Pollution Analysis*, McGraw-Hill, New-York, 1974.

- [3] Owens, M. Knowlos, G. and Clark, A., The Prediction of the Distribution of Dissolved Oxygen in River, Proc. 4th Int. Conf. Wat. Pollut. Res, p. 125—137. 139—147, 1969.  
 [4] Churchill, M. A. *ASCE. J.*, 88(SA4), 1—4, (1962).  
 [5] Streeter, H. W. and Phelps, E. B., A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River, U. S. Public Health Service, Public Health Bulletin, No. 146, 1925.  
 [6] Theriault, E. J. I. USPHS. Public Health Bulletin p. 173, 1927.  
 [7] Thomas, H. A. Jr., *Sewage Works Journal*, 9, 224(1937).  
 [8] Rhame, G. A., *Water and Sewage Works*, 96, 317(1949).  
 [9] Thomas, H. A. Jr., Moore, E. V., Snow, W. B., *Sewage and Industrial Water*, 22, 1343. (1950).  
 [10] Tsivoglou, E. G., O'Connell, R. L., Watter, C. M., Goelsil, P. J., and Logsdon, G. S., *Water Poll. Control Fed. J.*, 37, 1343—1362, (1965).

# 沈阳地区气象场结构与大气污染\*

刘 万 军    赵 国 珍

(辽宁省气象科学研究所)

## 摘 要

本文初步分析了由于热岛存在而引起的城市温度场、风场及湿度场的变异,并结合  $\text{SO}_2$  浓度连续监测资料分析了影响沈阳大气污染的气象条件。

## 一、引 言

城市复合体引起的大气边界层结构的变异,尤其是温度场结构的变异,直接关系到大气污染物的散布。从污染源排放的污染物对大气的污染程度取决于大气的输送、扩散、干湿沉降等自净过程。在局地污染方面主要取决于大气的输送扩散能力。决定大气输送过程的因素是平均风场。热岛环流使气流向城市中心辐合,不利于污染物输送出城市。决

定大气扩散能力的主要因子是湍流。大气的温度层结是决定湍流发展的因子之一。

城市热岛存在引起了水平温度场、风场及湿度场的变异,使流经城市的大气层结发生了改变。本文初步分析了城市气象场结构,并结合沈阳市污染物测定讨论了其与气象场结构的关系。

\* 大气所张锡福同志对本文初稿进行了审查和指导,在此表示感谢。