

# 平原河网的水环境容量 —杭州运河水系初探

苏雨生

钱秉钧

(浙江省环境保护研究所)

(浙江省环境保护局)

## 摘 要

本文在河网水流数学模型和河道水体自净规律研究基础上,提出了河网水质模拟数学模型:  $RL = u \cdot \bar{W} + m$ ,  $RO = v \cdot \bar{W} + n$ ; 以及单位时间内河网最大允许排污量计算

数学模型: 目标函数  $\max \cdot W_T = \sum_{i=1}^n W_i$ ; 水质约束条件  $u \cdot \bar{W} + m \leq \overline{RL}$ ,  $v \cdot \bar{W} +$

$n \geq \overline{RO}$ . 计算时,可分别以BOD水质目标 ( $L^*$ )、DO水质目标 ( $O^*$ ) 为约束条件,也可同时以BOD和DO水质目标为约束条件. 本文以工业和人口集中、污染严重的杭州运河河网区为例,计算了两种水质目标下不同引水方案的最大允许排污量,揭示了数学模型在河网治理工程环境效益评价及方案优化等方面的应用.

河网的水环境容量是网区内各河道水体稀释自净能力的总和. 在平原河网内,河港相连,支叉众多,各河段的长短、宽窄不一,其水量的大小、流速的快慢、流向的变化等都互相制约,各不相同,因而各河段的稀释自净能力或污染物的允许排入率也不尽相同. 为此,必须研究不同水利和水文条件下河网内各河段的水量分配,研究污染物排入各河段后的衰减变化,并在此基础上建立起河网的水质模拟数学模型和河网最大允许排污量计算数学模型. 本文以运河(杭州段)水系为例,研究了平原河网水质模拟和最大允许排率(水环境容量)的计算方法.

### 1. 河网水质模拟数学模型

运河水体自净规律研究<sup>[1]</sup>表明,河流水质变化符合一维、稳态的Streeter-Phelps方程,即:

$$u \frac{dL}{dX} = -K_1 L \quad (1)$$

$$u \frac{dO}{dX} = -K_1 L + K_2 (O_s - O) \quad (2)$$

式中,  $L$ 、 $O$ ——水中某点处的BOD<sub>5</sub>和溶解氧DO浓度 (mg/l);

$K_1, K_2$ ——有机物降解速率常数和水体复氧速率常数 (1/d) ;

$u$ ——河段断面平均流速 (m/d) ;

$O_s$ ——水中饱和溶解氧浓度 (mg/l) .

上述方程的解析解为:

$$L = L_0 e^{-K_1 t} \quad (3)$$

$$O = O_0 e^{-K_1 t} - L_0 \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_2 t} - e^{-K_1 t}) + O_s (1 - e^{-K_2 t}) \quad (4)$$

式中,  $L_0, O_0$ ——起始断面的BOD<sub>5</sub>和DO浓度 (mg/l) ;

$t$ ——从起始断面到该点的流到时间 (d) ;

河网是由节点和河段组成, 计算节点可分为排污节点和下游水质控制节点.

根据方程 (3)、(4) 和水量平衡、物料 (BOD<sub>5</sub>, DO) 平衡原理, 对某一排污河段的上、下断面之间可以得到下列方程:

$$RQ_i = RQ_{i-1} + SQ_i + BQ_i \quad (5)$$

$$RQ_i \cdot RL_i = a_{i-1} \cdot RL_{i-1} + W_i + BQ_i \cdot BL_i \quad (6)$$

$$RQ_i \cdot RO_i = c_{i-1} \cdot RO_{i-1} - d_{i-1} \cdot RL_{i-1} + f_{i-1} \cdot SQ_i \cdot SO_i + BQ_i \cdot BO_i \quad (7)$$

式中,  $RQ_i, RL_i, RO_i$ ——第*i*节点处 (下断面) 的流量 (m<sup>3</sup>/s) ;

$RQ_{i-1}, RL_{i-1}, RO_{i-1}$ ——第*i-1*节点处 (上断面) 的流量 (m<sup>3</sup>/s) ;

$W_i$ ——第*i*节点处排放的污染物质 (g/s) ;

$SQ_i, SL_i, SO_i$ ——第*i*节点处所排放污水的流量 (m<sup>3</sup>/s) ;

$BQ_i, BL_i, BO_i$ ——在第*i*节点处入流河水的流量 (m<sup>3</sup>/s) ;

另外,  $W_i = SQ_i \cdot SL_i$

$$a_{i-1} = RQ_{i-1} e^{-K_1 t'_{i-1}}$$

$$c_{i-1} = RQ_{i-1} e^{-K_2 t'_{i-1}}$$

$$d_{i-1} = RQ_{i-1} \frac{K_1}{K_2 - K_1} (e^{-K_2 t'_{i-1}} - e^{-K_1 t'_{i-1}})$$

$$f_{i-1} = RQ_{i-1} \cdot O_s (1 - e^{-K_2 t'_{i-1}})$$

$t'_{i-1}$ ——从第*i-1*节点流到第*i*节点所需的时间.

对于若干支流会合的节点, 按具体情况 (汇流、分流及支流个数) 可以得到类似于方程 (5) 至 (7) 的流量平衡、BOD<sub>5</sub>平衡和DO平衡方程. 根据这些方程, 可以得到如下形式的矩阵方程:

$$\vec{RL} = u \cdot \vec{W} + \vec{m} \quad (8)$$

$$\vec{RO} = v \cdot \vec{W} + \vec{n} \quad (9)$$

式中,  $\vec{RL} = (RL_1, RL_2, \dots, RL_n)^T$ ,  $\vec{RO} = (RO_1, RO_2, \dots, RO_n)^T$ ,  $\vec{W} = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ , 分别为由各节点处的BOD<sub>5</sub>值、DO值和污染物排放量组成的*n*维列向量;

$\vec{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$ ,  $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_n)^T$ , 分别为由计算机条件决定的*n*维向量, 对于某一确定的计算条件, 它们是已知常量.

$$u = \begin{pmatrix} u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,n} \\ u_{2,1}, u_{2,2}, \dots, u_{2,n} \\ \dots \dots \dots \\ u_{n,1}, u_{n,2}, \dots, u_{n,n} \end{pmatrix}$$

为BOD<sub>5</sub>响应矩阵 ( $n \times n$ 维);

$$v = \begin{pmatrix} v_{1,1}, v_{1,2}, \dots, v_{1,n} \\ v_{2,1}, v_{2,2}, \dots, v_{2,n} \\ \dots \dots \dots \\ v_{n,1}, v_{n,2}, \dots, v_{n,n} \end{pmatrix}$$

为DO响应矩阵 ( $n \times n$ 维)。

矩阵方程 (8)、(9) 即为河网水质模拟数学模型的计算方程组。它们建立起了各污染源排放状况与河流水质变化状况之间的数学关系,其主要作用是,对不同的水文条件和不同的污染物排放量(不同的削减率),在计算机上进行河网水质状况的数学模拟。

## 2. 河网最大允许排污量计算数学模型

河网的总污染负荷就等于各污染源排放量的总和,在保证水质满足一定水质标准下,求污染物排放量为最大,这一问题可以归结为如下数学描述:

$$\max W_T = \sum_{i=1}^n W_i \quad (10)$$

$$\text{满足} \quad u\vec{W} + \vec{m} \leq \vec{RL}^0 \quad (11)$$

$$v\vec{W} + \vec{n} \geq \vec{RO}^0 \quad (12)$$

式中,  $\vec{W}_T$ ——污染物总排放量,  $\vec{RL}^0 = (RL_1^0, RL_2^0, \dots, RL_n^0)^T$ ,  $\vec{RO}^0 = (RO_1^0, RO_2^0, \dots, RO_n^0)^T$ , 分别为由各断面规定的BOD<sub>5</sub>和DO标准组成的 $n$ 维列向量。

方程 (10) 称为目标函数, 方程 (11)、(12) 称为水质约束条件。在水质约束条件下求解方程 (10), 即在保证河流水质不低于一定水质标准的条件下, 使这些污染物排放量的总和为最大。这一数学模型的主要作用是在一定的水文条件下, 求出使水质达到一定标准时河流的最大允许排污量, 以及污染负荷在各个河段的分配。

方程 (10) 为一线性方程, 矩阵方程 (11)、(12) 为两组线性方程组, 可以归结为最优化方法中的线性规划问题。本文将上述方程化为线性规划的标准形, 采用改进的单纯形法求解。计算程序可以分别以BOD<sub>5</sub>水质标准为约束条件 (方程11); 以DO水质标准为约束条件 (方程12), 或同时以BOD<sub>5</sub>和DO水质标准为约束条件 (方程11和12)。当DO水质约束为一多余约束时, 则同时以BOD<sub>5</sub>和DO水质标准为约束条件与仅以BOD<sub>5</sub>水质标准为约束条件所得计算结果完全相同。

## 3. 杭州市区运河的水环境容量

杭州运河水系是一个典型的平原河网 (如图1所示), 运河市区段及其东侧支流污染十分严重。根据运河水体自净规律研究结果, 模型参数为:  $K_1 = 0.22 \times 1.047^{(T-20)}$ ;  $K_2 = 0.20 \times 1.024^{(T-20)}$ 。计算时水温采用30°C。

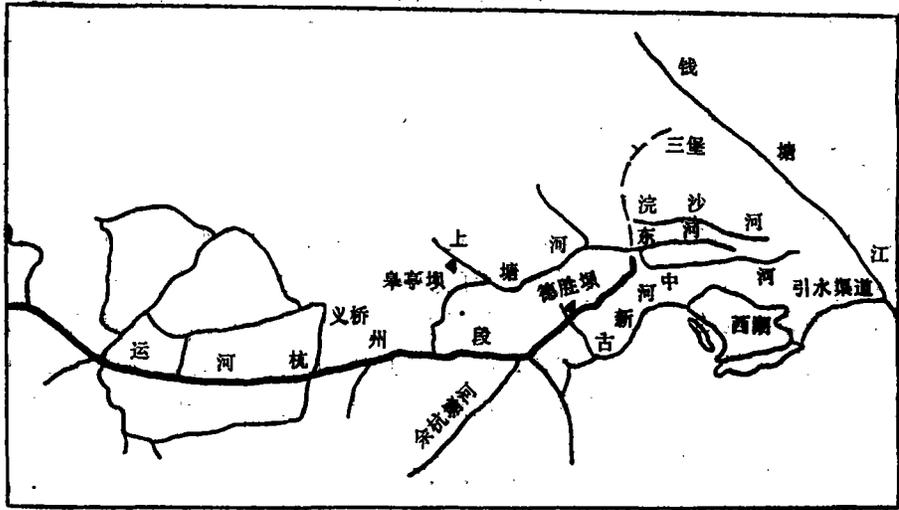


图 1 京杭运河杭州段及其相邻水系示意图

Fig. 1 The Grand Canal at Hangzhou and its joined water system

不同引水地点、不同引水流量时河网内各河段流量分配，根据运河河网水流计算数学模型计算值<sup>[2]</sup>；来水水质根据实测资料估定。

水质标准，即治理的水质目标：近期  $BOD_5 \leq 10\text{mg/l}$ ,  $DO \geq 1.0\text{mg/l}$ ；远期  $BOD_5 \leq 5\text{mg/l}$ ,  $DO \geq 4.0\text{mg/l}$ 。点的工业污染源，在调查值基础上加预测增长值；面的污染源，主要为城市生活污水，按预测量均匀排入。

计算结果见表 1。表中来水情况中，中东河、三堡船闸、西湖和三堡引水表示经由

表 1 市区运河地区最大允许排污量

Table 1 The maximum permissible discharge capacity in the Grand Canal at Hangzhou

	来水情况 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							最大允许排污量 ( $\text{kg BOD}_5/\text{d}$ )	
	中东河	三堡船闸	西湖	三堡引水	三堡翻水	德胜坝翻水	泉亭坝翻水	$BOD_5 \leq 10\text{mg/l}$	$BOD_5 \leq 5\text{mg/l}$
								$DO \geq 1.0\text{mg/l}$	$DO \geq 4.0\text{mg/l}$
1	2.0	0	0	0	0	0	0	2532.38	*
2	2.0	1.6	0	0	0	0	0	3074.49	*
3	2.0	1.6	3.47	0	0	0	0	5174.85	2474.48
4	2.0	1.6	0	10.0	0	0	0	8666.57	4238.46
5	2.0	1.6	3.47	10.0	0	0	0	10717.57	4474.47
6	2.0	0	0	0	10.0	0	0	7497.14	3181.01
7	2.0	0	3.47	0	10.0	0	0	7242.95	2876.66
8	2.0	0	0	0	0	10.0	0	8510.88	3602.75
9	2.0	1.6	3.47	0	0	10.0	0	7036.50	*
10	2.0	0	0	0	0	0	10.0	5222.78	*
11	2.0	1.6	3.47	0	0	0	10.0	4631.56	*
12	2.0	1.6	0	18.4	0	0	0	12858.75	5611.17
13	2.0	1.6	3.47	18.4	0	0	0	14272.51	5907.26

\*：无最优解，原因是若干断面的DO值达不到4.0mg/l。

这些河道引水入运河河网，三堡翻水、德胜坝翻水和皋亭坝翻水是指通过这些地方将河网水外翻，以便将北部太湖清洁水调入网区，既搞活了水体，又增加了清洁水的稀释比例。

由表1可见，不同来水计算网区内的最大允许排污量是不相同的，在同一来水情况而不同的水质目标，其最大的允许排污量也不相同。

#### 4. 小 结

(1) 一个水体的环境容量是自然环境赋予水体的一种属性，但同时又受社会环境所制约，例如，随着人们对水体质量要求的提高，水体的环境容量会“变”小。

(2) 平原河网的水环境容量一般是很小的，但可以通过水利工程等措施加以提高，这是河网水污染治理的重要途径。所建立的河网水质模型和最大允许排放量计算数学模型为各种工程措施环境效益的评价，特别是为各种措施的对比优化提供了有用手段。

#### 参 考 文 献

- [1] 钱菊芬等, 1985. 运河(杭州段)水体自净规律研究. 浙江省环保所资料
- [2] 陈增奇等, 1985. 运河(杭州段)河网水流数学模型及计算. 浙江省水电勘测设计院资料

1987年7月22日收到。

# WATER ENVIRONMENTAL CAPACITY FOR RIVER NETWORK IN THE PLAINS——A CASE STUDY OF THE GRAND CANAL AT HANGZHOU

*Su Yusheng*

(Zhejiang Environmental Protection Institute)

*Qian Bingjun*

(Zhejiang Provincial Bureau of Environmental Protection)

## ABSTRACT

On the basis of the study on flow mathematical model and self-purification of waterbody for river reticulation systems in a plain, this paper presents a mathematical model of water quality simulation;  $\overline{RL} = u \cdot \overline{W} + \overline{m}$  and  $\overline{RO} = v \cdot \overline{W} + \overline{n}$ , and mathematical model for calculating maximum allowable discharge of

a river network in a unit time; Aim function  $\max W_T = \sum_{i=1}^n \cdot W_i$ ; and the con-

straint conditions of water quality;  $u \cdot \overline{W} + \overline{m} \leq \overline{RL}^0$  and  $v \cdot \overline{W} + \overline{n} \geq \overline{RO}^0$ .

It is possible to calculate the function by taking either BOD<sub>5</sub> or DO of the water quality aim as the constraint condition separately, or both of them at the same time. By linearizing the above-mentioned function, resolving the linear function by improving method of a simple standard form and using the water quality modeling result as the rectification, we can, at the fixed water quality aim, obtain total allowable discharge amount or water environmental capacity in the river network. Taking the river network of the Grand Canal (Hangzhou section) as an example, the paper calculates maximum allowable discharge under different diversion plan of two kinds of water quality aims. Also the paper reveals the application of mathematical model for river network in the respects of environmental benefit assessment of controlling engineering, plan optimization and so forth.