

# 基于排污口权重的一维河流水环境容量计算

阎 非 苏保林 贾海峰

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

**摘要** 综合考虑多个点源排污口、支流、取水口以及面源污染,建立了一维河流水环境容量综合模型,给出排污口权重的确定方法,并在此基础上提出了实用化的水环境容量计算方法和排污控制方案。其方法的正确性由恒权水环境容量计算得到了验证。基于排污口权重的水环境容量计算方法与传统的“试算法”相比,具有可操作性强的优点,且可为确定排污方案、河流综合管理提供新的思路。

**关键词** 一维河流;水环境容量;排污口权重;面源

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2006)02-0016-03

## Calculation of water environmental capacity for one-dimensional river based on weight of sewage outfall

YAN Fei, SU Bao-lin, JIA Hai-feng

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on point sources, such as sewage outfall, branches and water intakes and non-point sources, an integrated water environmental capacity model for one-dimensional river is established. Practical calculation method of water environmental capacity and pollution control projects are proposed based on weighting of sewage outfall. The method is validated in the calculation of the water environmental capacity with constant weight. Compared with the trial-error method, the method based on weight of sewage outfall is more operable and can provide a new idea for the establishment of pollution control project and comprehensive management of rivers.

**Key words** one-dimensional river; water environmental capacity; weight of sewage outfall; non-point source

在环境规划与管理中,环境容量是重要的理论和实际问题。水环境容量概念的提出已有多年,并且在环境规划和管理中得到了广泛的应用。然而,即使是对一维河流,环境容量的计算方法仍然不够成熟,许多研究或报告都以环境容量为依据,但是缺乏实用化的环境容量计算方法<sup>[1]</sup>。本文针对具有多个点源排污口和面源污染的一维河流,建立了一维河流水环境容量综合模型,给出各排污口的权重系数,并在此基础上提出了操作性强的水环境容量计算方法和排污控制方案。

### 1 基本概念和基本假设

环境容量的概念首先是由日本学者提出来的。

我国对环境容量的研究开始于 20 世纪 70 年代,研究者从不同角度提出和应用了水环境容量的概念。关于水环境容量较为认同的定义是:水体在规定的目标下允许容纳的污染物量<sup>[2]</sup>。然而该定义仍然较为抽象,不能直接应用于实际。

本文中研究的水环境容量定义为:给定水域范围和在水文条件下,在现状排污方式和水质目标的前提下,单位时间内该水域所能容纳的最大点源排污量。需要说明的是,本文研究的水环境容量并未包括面源排污量,这是因为面源污染的产生与控制比较复杂。综合考虑点源和面源污染的总量控制方案已经成为目前研究的热点问题,很多学者对此已有大量研究。而本文关注的是点源排污口对河流水环境容

量的影响,故面源污染并不作为本文的重点研究对象。本文中仅仅考虑点源的排放量及其总量控制,是对实际情况的一种合理简化。

在以上定义的基础上,本文研究一维河流在给定排污口位置以及上下游断面水质目标的情况下,所有排污口排污量之和的最大允许值。

基于以上定义,本文做如下假设:①各个排污口连续、均匀排污,即污水流量和污染物浓度不随时间变化,各支流的流量和污染物浓度也不随时间变化。②河流中污染物的输移降解作用均已达到稳定状态,河流中各处的污染物浓度不随时间变化。③仅关心污染物浓度的沿程变化,而不关心其在断面上的变化,这时可采用一维水质模型进行描述。

## 2 一维河流水环境容量综合模型

### 2.1 基本条件

如图1所示,假设一维河流在起始断面的流量和污染物浓度分别为 $Q_0$ 和 $C_0$ ,起止断面的河段长度为 $x_0$ ,流速和污染物综合降解系数在整个河段上保持不变,分别为 $u$ 和 $K$ 。下游断面为控制断面,流量为 $Q_s$ ,污染物浓度为 $C_s$ 。

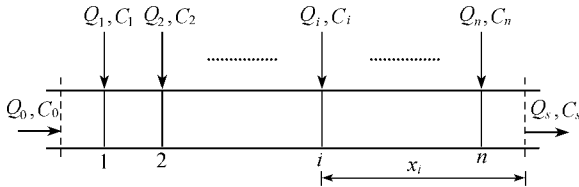


图1 一维河流模型概化示意图

**点源排放:**在这个河段上有 $n$ 个点源排污口,第 $i$ 个排污口的污水流量为 $Q_i$ ,污染物浓度为 $C_i$ ,距离河流下游断面的距离为 $x_i$ 。

**面源排放:**该河流区域内存在面源入河量,在一维情况下,面源入河量以线源的形式入河。假设线源强度为 $P$ ,整个河流的线源入河量为 $W_l = Px_0$ 。

**取水口:**在整个河段上有 $m$ 个取水口,第 $j$ 个取水口的取水量为 $q_j$ 。

**支流:**支流的性质同点源排污口,因此不单独列出,而统一算入点源排污口中。

### 2.2 一维河流水环境容量综合模型

一维河流中共有 $n$ 个排放口,第 $i$ 个排放口的污水流量为 $Q_i$ ,污染物浓度为 $C_i$ ,距离控制断面的距离为 $x_i$ ,则控制断面处的污染物浓度为

$$C_s = \sum_{i=0}^n Q_i C_i e^{-Kx_i/u} / Q_s \quad (1)$$

式(1)右边分子是 $n+1$ 项之和,分别代表河流起始断面污染物和这 $n$ 个排污口排放的污染物对控制断面浓度的贡献。

若令 $W_i = Q_i C_i$ , $W_s = Q_s C_s$ ,则式(1)可以变换为

$$\sum_{i=1}^n W_i e^{-Kx_i/u} = W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} \quad (2)$$

由以上分析可知,点源排放对控制断面的贡献满足线性叠加的原理,而面源可以看作由无限个点源组成,因此面源排放对控制断面的贡献也可以在式(2)的基础上修正得到,进而建立一维河流水环境容量综合模型。

整个河流上所有面源对控制断面的贡献为

$$\int_0^{x_0} (P dx) e^{-Kx/u} = \frac{W_l u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u})$$

于是在式(2)的基础上可以得到一维河流水环境容量综合模型

$$\sum_{i=1}^n W_i e^{-Kx_i/u} = \left[ W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_l u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right] \quad (3)$$

$W = \sum_{i=1}^n W_i$ 就是所有排污口的排放量总和,当

$C_s$ 是控制断面的水质标准浓度时, $W = \sum_{i=1}^n W_i$ 就是该河段的最大允许排放量,即水环境容量。在一般情况下,由式(3)可以得出多个水环境容量计算结果,并不能得到一个确定的值。

## 3 基于排污口权重的水环境容量计算

已有研究中,对于一维河流的水环境容量计算多使用“试算法”,即根据污染物降解规律 $C(x) = C_0 e^{-Kx/u}$ 沿程计算整个河段的污染物浓度变化规律,如果模拟结果超标,就要通过削减每一个排污口的排污量来反复试算,直到计算结果满足水质要求为止。这时各个排污口的排污量之和,即 $W = \sum_{i=1}^n W_i$ 就是此河段的一个水环境容量值。之后,分析各个排污口污染负荷削减的技术经济可行性,利用其他方法,从一组水环境容量结果中合理的水环境容量。这种方法的缺点是过程繁琐,可操作性较差。较为常见的污染负荷削减方法有等比例分配法<sup>[3]</sup>等。

在上文提出的排污口权重的基础上,本文提出新的水环境容量计算方法及相应的排污控制方案。

基于权重系数的水环境容量计算方法,分三步计算。

**a.**先计算出每个排污口的理论最大排污量,即假设整个河段只有这唯一一个排污口时的水环境容量。由式(3)可知,第 $i$ 个排污口的理论最大排污

量为

$$W'_i e^{Kx_i/u} = \left[ W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_l u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right] \quad (4)$$

由式(4)可知,理论最大排污量仅仅与排污口的位置有关,而与排污口的排污量没有关系。

b. 确定每个排污口的权重系数  $m_i$ 。根据排污口的位置及排污控制方案的排污量确定权重系数。

c. 计算该河段的水环境容量

$$W = \sum_{i=1}^n W'_i m_i$$

下面首先给出排污口权重的确定方法,并在此基础上讨论基于排污口权重的水环境容量计算方法。

### 3.1 排污口权重的确定

显而易见,排污口的排放量  $W_i$  越大,它对控制断面浓度的影响也越大,而排污口到下游控制断面的距离越长,由于降解作用排放量  $W_i$  对控制断面浓度的影响就越小。基于以上认识,定义第  $i$  个排污口的权重系数  $m_i$  为

$$m_i = \frac{W_i}{e^{Kx_i/u}} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{e^{Kx_i/u}}$$

这样,在整个河段都具有同样的流速  $u$  和污染物综合降解系数  $K$  的情况下,每个排污口的权重系数仅仅与它的排污量  $W_i$  和距离下游断面的距离  $x_i$  有关。排污量较大以及距离下游断面较近的排污口具有较大的权重系数,而且整个河段全部排污口的权重系数之和为 1。

### 3.2 恒权水环境容量

恒权水环境容量是指保持每个排污口权重系数不变而制定的不同的排污控制方案。如果某个方案下控制断面的污染物浓度恰好是水质标准,则在这种方案下的排污量之和就是此河段的恒权水环境容量。

每个排污口的权重系数  $m_i$  保持不变,则任意两个排污口排污量之比  $W_i/W_j$  也保持不变,所以保持权重不变的排污控制方案实际就是等比例分配法。

以下将用基于权重系数的计算方法和传统方法分别计算一维河流的水环境容量,以证明权重方法的科学性。

#### 3.2.1 基于权重系数计算水环境容量

由式(4)计算出只有第  $i$  个排污口时的第  $i$  个排污口的理论最大排污量。保持权重不变,第  $i$  个排污口的权重系数为

$$m_i = \frac{W_i}{e^{Kx_i/u}} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{e^{Kx_i/u}}$$

则恒权水环境容量可由下式计算:

$$\sum_{i=1}^n W'_i m_i = \left( \sum_{i=1}^n W_i \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{e^{Kx_i/u}} \right) \left[ W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_l u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right]$$

#### 3.2.2 传统方法计算水环境容量

由于各个排污口是等比例削减排污量,故可以假设

$$W_i = L_i A \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中,  $L_i$  是第  $i$  个排污口的基本排污量,在等比例削减时保持不变;  $A$  是比例系数,在等比例削减时变化,但是不同的排污口  $A$  值相同。

将式(5)代入式(3),可以求得

$$A = \left[ W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_l u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right] \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{e^{Kx_i/u}} \quad (6)$$

于是

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \left( \sum_{i=1}^n W_i \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{e^{Kx_i/u}} \right) \left[ W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_l u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right]$$

以上两种方法计算结果相同,证实了基于权重系数计算方法的正确性。

### 3.3 等权水环境容量

恒权水环境容量计算(基于等比例分配法的水环境容量计算)虽然得到了较广泛的应用,但也存在如下问题。以两个排污口为例,如果其中一个排污口的现状排污量已经远远超过了河流的水环境容量,而另一个排污口的现状排污量却远远小于水环境容量,等比例分配法的结果将导致第二个排污口的排污量进一步减小,这样的分配法显然对第二个排污口是不公平的。用基于权重系数的理论分析,排污量较大的排污口的权重系数较大,甚至接近 1,而排污量较小的排污口的权重系数较小。这样它们对控制断面污染物浓度的贡献也有很大区别。如果保持权重不变,将使第一个排污口对控制断面的浓度仍然保持较高的贡献率,所以等比例分配法在很多情况下是难以实现的。

基于排污口的权重系数,可以提出其他切实有效的排污控制方案并在此基础上计算水环境容量,等权水环境容量就是一例。

等权水环境容量指使新的排污控制方案下所有排污口的权重系数均相等,在这种情况下使控制断面浓度恰好是水质标准的排污量之和就是该河段的等权水环境容量。

(下转第 22 页)

表 5 1996 年宁夏部分地表水环境监测结果统计

采样点	$\rho(\text{DO})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{SS})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{总硬度})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{BOD}_5)$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{FN})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{Cr}^{+6})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TP})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{氟化物})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	大肠菌群/ ( $\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ )
第三排水沟	4.20	273.09	261.07	20.60	9.84	8.418	0.059	0.021	0	1.702	0
第五排水沟	5.15	429.00	256.15	19.64	9.33	0.710	0.012	0.015	0	0.700	0
吴忠清水沟	2.17	7008.83	295.20	1032.00	123.96	4.648	0.458	0.211	0	0	0
灵武入黄口	4.38	3753.11	274.03	184.50	50.53	2.168	0.065	0.047	0	0	0
I 类标准限值	$\geq 8$	$\leq 30$	$\leq 120$	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 0.4$	$\leq 0.001$	$\leq 0.01$	$\leq 0.02$	$\leq 0.6$	$\leq 0$

表 6 1996 年宁夏地表水水环境质量评价结果

采样点	黄河	清水河	茹河	四二干沟	银新干沟	第三排水沟	第五排水沟	吴忠清水沟	灵武入黄口
评价结果	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅲ类	V类	Ⅲ类

I 类水质标准限值。因此,最大最小贴近度、算术平均最小贴近度的评价结果是不符合实际的,应采取 Hamming 贴近度、Euclid 贴近度的评价结果。

综上所述,1996 年宁夏地表水水环境质量综合评价结果如表 6 所示。

### 3 结 语

根据地表水环境质量的模糊性特征,本文分析了模糊贴近度(本文采取 4 种模糊贴近度评价模型)用于区域水环境质量评价的基本步骤,并将其用于宁夏地表水环境质量的综合评价中,获得了较好的效果。基于模糊贴近度的区域水环境质量评价原理直观,计算方法简单、准确,评价结果精度较高,能较

完整地反映水环境质量污染程度,因此是一种实用而准确的评价方法。该模型不仅能对地表水环境质量进行评价,还可对地下水环境、大气环境、土壤环境进行评价,而且还可推广到其他领域的评价问题。

#### 参考文献:

- [1] 程西方,谭炳卿.水环境质量评价及存在问题浅析[C]//汪斌.水环境保护与管理文集.郑州:黄河水利出版社,2002:373-376.
- [2] 时光新,姜运轩,陈学山.基于变异系数的地下水环境质量评价模型及应用[J].地下水,2002(3):147-148.
- [3] 汪培庄.模糊集合论及其应用[M].上海:上海科技出版社,1983:57-59.

(收稿日期 2005-02-23 编辑:高渭文)

(上接第 18 页)

等权情况下,所有的排污口权重均相同,即

$$\frac{W_1}{e^{Kx_1/u}} = \frac{W_2}{e^{Kx_2/u}} = \dots = \frac{W_n}{e^{Kx_i/u}} \quad (7)$$

$$m_i = 1/n \quad (8)$$

则基于权重系数的水环境容量为

$$W = \sum_{i=1}^n W_i m_i = \left( \sum_{i=1}^n e^{Kx_i/u} / n \right) \left[ W_s - W_0 e^{-Kx_0/u} - \frac{W_0 u}{Kx_0} (1 - e^{-Kx_0/u}) \right]$$

等权情况下每个排污口对控制断面浓度的贡献率都相同,在此基础上的排污控制方案较为公平。

#### 3.4 其他排污控制方案及其水环境容量

在排污口权重的基础上,可以综合考虑社会经济自然等各方面的因素来确定排污口的权重,以便于河流综合管理。

例如,如果每个排污口对应一个企业,在排污量和位置因素的基础上还可以再考虑工业产值、工业万元产值排污量等其他因素,在分配容量时适当向工业产值大、工业万元产值排污量少的企业倾斜,提高此类企业的权重系数,使排污方案更加科学。

### 4 结 语

本文考虑多个点源排污口、支流、取水口以及面源污染,建立了一维河流水环境容量综合模型。为使水环境容量计算简便科学易行,文中提出了排污口权重系数的概念,并在此基础上给出了基于排污口权重的水环境容量计算方法和相应的排污控制方案。该方法的正确性由恒权水环境容量计算实例得到了验证。基于排污口权重的水环境容量计算方法不但克服了传统的“试算法”计算繁琐、操作性较差的缺点,还可以为排污方案确定、河流综合管理提供新的思路。

#### 参考文献:

- [1] 程声通.河流环境容量与允许排放量[J].水资源保护,2002(2):8-10.
- [2] 张永良,刘培哲.水环境容量综合手册[M].北京:清华大学出版社,1991:138-161.
- [3] 李如忠,钱家忠,汪家权.水污染物允许排放总量分配方法研究[J].水利学报,2002(5):112-115.

(收稿日期 2004-11-17 编辑:高渭文)