

# 基于多模型的渭河陕西段纳污能力研究

张海欧<sup>1</sup>, 闵涛<sup>1</sup>, 罗军刚<sup>1</sup>, 闫莉<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 黄河水资源保护科学研究所, 河南 郑州 450004)

**摘要:** 为了避免模型选择不当导致过分夸大或缩小水体纳污能力,进而造成不利于水资源保护的局。本文基于一维稳态条件下的水质模型,推求水域纳污能力的3种模型,即段首控制模型、标准模型和欧盟模型。以渭河干流陕西段水功能区为例,计算不同功能区在不同设计水文条件下COD和氨氮的纳污能力,并对不同模型计算结果进行分析,提出采用纳污能力最大值和最小值区间作为计算结果。结果表明:此种方法更可靠,能更好的为决策者服务。

**关键词:** COD; 氨氮; 纳污能力; 多模型; 渭河

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0089-05

## Research on the water environmental capacity of Weihe River in Shaanxi based on multi-model

ZHANG Haiou<sup>1</sup>, MIN Tao<sup>1</sup>, LUO Jungang<sup>1</sup>, YAN Li<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** In order to avoid improper selection of model to be exaggerated or reduced water environmental carrying capacity, and consequently to be unfavourable to the situation of water resources protection, this paper is based on water quality model of one - dimensional steady - state conditions to deduce the three models of the water environmental capacity that is the first section control method, the standard model and the European Union model. Taking Weihe river main stream of water function in shaanxi section for example, Calculating the COD and ammonia nitrogen water environmental capacity of the different functional areas in different designs hydrological conditions, And the different model calculation results were analyzed, Maximum and minimum range of the carrying capacity are proposed as the result. The results show that this method is more reliable, and better service for decision makers.

**Key words:** COD; ammonia nitrogen; water environment capacity; multi - model; Weihe River

## 0 引言

水域纳污能力是指在设计水文条件下,某种污染物在满足水功能区水质目标情况下能容纳的该种污染物的最大数量<sup>[1]</sup>。其大小随规划设计目标的变化而变化,反映特定水体水质保护目标与污染物排放量之间的动态输入响应关系<sup>[2]</sup>。水域纳污能力计算方法是水域纳污能力研究的一个重要组成部分,其适当与否直接影响计算结果的准确性。欧美国家一般采用随机理论和系统优化相结合方法进行研究。Ecker<sup>[3]</sup>将流量等参数作为确定性变量处理进行水域纳污能力的研究;Li等<sup>[4]</sup>在考虑了河流横

向混合不均匀性基础上,用优化模型确定各排污口在给定水质标准下允许排放量;Donald和Edward<sup>[5]</sup>用一阶不确定性分析方法,将水质随机变量转化为等价确定性变量,通过水质优化模型计算纳污能力。我国自20世纪70年代后期引入水域纳污能力概念,对于水域纳污能力计算方法的研究,我国最初的几种计算模式都是从定义出发的,理论上存在不足。之后的研究,大多以水质模型为基础,建立水域纳污能力计算模式。纳污能力计算模型的选择,应当充分考虑水体的自然特性、污染特性和保护目标,避免模型选择不当导致过分夸大或缩小水体纳污能力,进而造成不利于水资源保护的局。本文以渭河干

收稿日期:2012-08-27; 修回日期:2012-09-07

基金项目:公益性行业科研专项(201001011); 中国博士后科学基金(20110490170); 国家自然科学基金(51109175)

作者简介:张海欧(1985-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为水环境模拟。

流陕西段为例,根据水功能区和水质管理目标,采用多模型计算水体纳污能力,通过对计算结果的对比分析,提出决策空间概念,为决策者服务。

# 1 水域纳污能力计算

## 1.1 纳污能力计算方法

纳污能力计算采用水质模型方法,利用实测资料进行模型率定和推求相关系数,使模型推得的结果具有足够精度。渭河干流陕西段均为平原性河道,河道较宽较浅,水流顺直,流速小,污染物在较短的时间内就可在断面内均匀混合,污染物主要沿河纵向迁移变化,横向变化不大,因此采用一维水质模型推求各功能区水域纳污能力计算模型。本研究采用3种模型:第一种是标准模型,第二种是段首控制模型,第三种是欧盟模型对不同设计水文条件下的纳污能力进行估算。

(1) 标准模型。根据 SL348-2006《水域纳污能力计算规程》<sup>[1]</sup>,将计算河段内的多个排污口概化为一个集中的排污口,概化排污口位于河段中点处,相当于一个集中点源,该集中点源的实际自净长度为河段长的一半 ( $x = L/2$ )。因此,概化后的排污口入流断面污染物浓度按(1)计算为:

$$C_{x=L} = C_0 \exp(-KL/u) + \frac{m}{Q} \exp(-KL/u) \quad (1)$$

式中:  $C_{x=L}$  为水功能区下断面污染物浓度,mg/L;  $C_0$  为初始断面的污染物浓度,mg/L;  $x$  为沿河段的纵向距离,m;  $u$  为设计流量下河道断面的平均流速,m/s;  $K$  为污染物综合衰减系数,1/s;  $m$  为污染物入河速率,g/s。

其相应的水域纳污能力按式(2)计算:

$$W = (C_s - C_{x-L})(Q + Q_p) \quad (2)$$

式中:  $Q_p$  为废污水排放流量, $m^3/s$ ;  $Q$  为初始断面的入流流量, $m^3/s$ 。

(2) 段首控制模型。段首控制<sup>[6-8]</sup>中的“段”是指沿河任何两个排污口断面之间的河段,而段首则是指各段的上游第一个排污口断面。段首控制法进行水环境容量计算,即根据某一功能区内各段的划分情况(图1),控制上游断面(也即段首)的水质,使其达到功能区段的要求。因有机物的降解,故在该段内的水质达到或高于功能区段的控制指标。段首严格控制功能区段的水质不超标。

在功能区的段首,由于来水的 COD 浓度与功能区段水质标准存在差别,因此为来水提供了稀释容量:

$$W_0 = Q_0(C_s - C_0) \quad (3)$$

式中:  $W_0$  为功能区段段首的稀释容量,t/d;  $C_s$  为功能区段水质标准,mg/L;  $Q_0$  为来水流量, $m^3/s$ ;  $C_0$  为来水的 COD 浓度,mg/L。

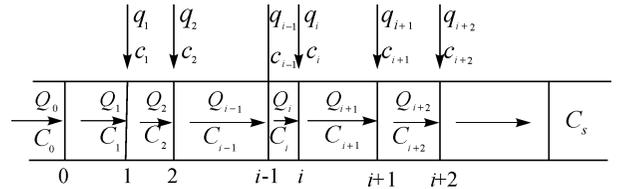


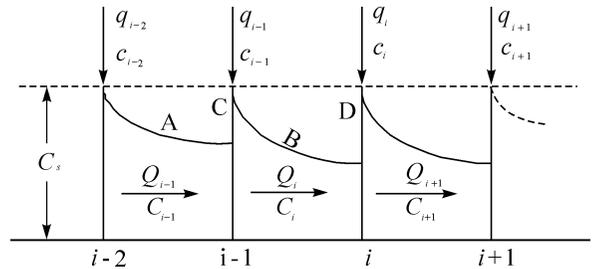
图1 功能区段内各小段的划分

功能区段内任意一段的容量计算(图2)。由于控制各段段首为水质标准,那么经过一段降解(如图2中A、B所示)后,到达段末时的降解量即为该断面处的环境容量(如图2中C、D所示)。

第  $i$  个断面处的纳污能力为:

$$W_i = (Q_i + q_i)C_s - Q_i C_f(x_i - x_{i-1}) \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个断面处的纳污能力,t/d;  $q_i$  为第  $i$  个断面处的排污流量, $m^3/s$ ;  $Q_i$  为混合后干流流量; 其余各符号意义同上。



A: 第  $i-1$  段浓度衰减曲线; B: 第  $i$  段浓度衰减曲线; C: 第  $i-1$  断面纳污能力; D: 第  $i$  断面的纳污能力

图2 段首控制纳污能力计算示意图

则功能区段内所具有的总纳污能力为:

$$W = W_0 + \sum_{i=1}^n W_i \quad (5)$$

根据一维稳态水质模型并且将式(3)、(4)代入式(5)简化得:

$$W = Q_0(C_s - C_0) + \sum_{i=1}^n C_s \left[ Q_i \left( 1 - \exp \frac{K_1 x_i - K_1 x_{i-1}}{u} \right) + q_i \right] \quad (6)$$

(3) 欧盟模型。欧盟模型实际就是控制断面达标算法的一维稳态水质模型,即是为保证下游控制断面水质达标,上游各污染源的最大允许排污量,但是要事先明确每个排污口的位置(或排污口概化位置)。图3为欧盟模型示意图。图中,  $C_0$  和  $Q_0$  分别为河道上游来水污染物浓度和流量,  $C_p$  和  $Q_p$  分别为污水的污染物浓度和排放量,  $C'$  为混合后的污染

物浓度,  $C$  为距排污口的距离为  $x$  的下游断面污染物浓度。则

$$C = C' \exp\left(-\frac{Kx}{u}\right) \quad (7)$$

$$C' = \frac{C_0 \exp\left(-\frac{K(L-x)}{u}\right) Q_0 + C_p Q_p}{Q_0 + Q_p} \quad (8)$$

式中:  $L$  为河道上下游断面长度,  $K$  为水质降解系数,  $u$  为流速。当只有一个排污口或者排污口概化为图 3 所示的情况,且  $C = C_s$  时,纳污能力  $W = C_p Q_p$ , 即:

$$W = (Q_0 + Q_p) C_s \exp\left(\frac{Kx}{u}\right) - C_0 Q_0 \exp\left(-\frac{K(L-x)}{u}\right) \quad (9)$$

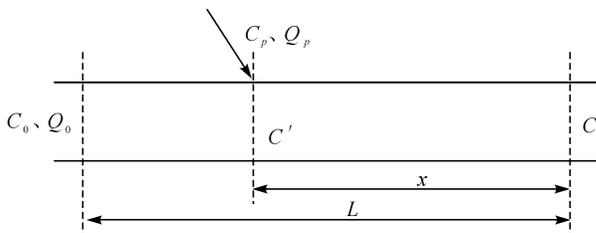


图 3 欧盟模型示意图

## 1.2 参数的确定

1.2.1 设计流量和流速确定 设计流量是影响水体纳污能力的主要因素,根据《全国水资源保护规划技术大纲》的要求,一般江河功能区采用 90% 保证率最枯月平均流量或最近 10 年最枯月平均流量作为设计流量。从全国各省市及流域机构近几年开展水域纳污能力情况来看,上述设计水文条件偏严格,造成水域纳污能力较小,以此为基础进行污染物总量控制,对社会经济的发展将形成明显的制约影响<sup>[9]</sup>。因此,结合渭河实际,本次水域纳污能力核定采用的设计水文条件增加 75% 和 50% 保证率最枯月平均流量(表 1)。再利用各水文站实测流量、流速资料,建立流量-流速关系曲线,分析计算渭河干流水文站最枯月 90%、75%、50% 保证率下设计流量对应的流速。

表 1 渭河陕西段各水文站设计流量  $\text{km}^2, \text{m}^3/\text{s}$

水文站	集水面积	90% 最枯	75% 最枯	50% 最枯
		月流量	月流量	月流量
林家村	30661	8.19	12.37	17.14
魏家堡	37006	5.23	6.12	10.30
咸阳	46827	9.60	13.78	22.70
临潼	97299	20.15	27.05	38.70
华县	106498	12.89	19.35	30.60

1.2.2 水功能区水质目标浓度值的确定 水功能

区水质目标是纳污能力计算的基本依据,其取值的大小直接影响纳污能力的大小。从渭河干流陕西段水功能区划分表中可以得到各个功能区的水质。由于各功能区水质控制目标是以水质类别表达的,而某一确定水质类别的浓度指标是一个范围,因此,在确定  $C_s$  值时,应考虑各功能区的实际情况。在相邻两功能区之间,如果上一功能区现状水质较好,纳污能力有富余,而下一功能区需要较多的纳污能力时,可将上一功能区的  $C_s$  值定为规定水质类别的下限浓度限值,以降低下一功能区的  $C_0$  值,从而为下一功能区留出较多的纳污能力,如果该功能区本身需要较多的纳污能力时,可将其  $C_0$  值定为规定的水质类别的上限浓度值。

1.2.3 初始断面污染物浓度值的确定 初始断面污染物浓度值  $C_0$  根据上游计算河段的水功能区水质目标浓度值  $C_s$  和本功能区水质目标浓度值  $C_s$  中的小者确定。

1.2.4 降解系  $K$  的确定 污染物降解系数反映了污染物在水体中降解的快慢程度,是纳污能力计算中一个关键参数,能否准确确定参数直接影响到纳污能力计算结果。本文采用 2000-2008 年渭河各监测断面的水质、水文资料,运用一维稳态模型公式反算污染物降解系数,根据已知上下两个监测断面污染物浓度实测值,率定出降解系数。

考虑到实验测定条件与实际水环境的差异,根据渭河的实际情况对降解系数进行如下修正<sup>[10]</sup>:

$$K = \exp[\ln\theta \cdot (T - 20)] \cdot K_s \quad (10)$$

式中:  $K$  为河流的实际降解系数,  $1/\text{d}$ ;  $T$  为河流实际温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta$  为温度修正系数 1.07;  $K_s$  为在  $20^\circ\text{C}$  室内模拟实验所测降解系数,  $1/\text{d}$ 。

经修正后,渭河干流陕西段 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$  的降解系数分别为  $0.278816 \text{ d}^{-1}$ ,  $0.160719 \text{ d}^{-1}$ 。

## 2 渭河干流陕西段纳污能力计算与分析

### 2.1 地表水现状

渭河是黄河最大的一级支流,发源于甘肃省渭源县,流经宁夏、甘肃,于宝鸡市风阁岭进入陕西,横穿关中平原至潼关注入黄河。全河长 818 km,流域面积 13.5 万  $\text{km}^2$ 。陕西境内河长 502.2 km,流域面积 6.71 万  $\text{km}^2$ ,约占总流域面积的一半。其中,关中约 5 万  $\text{km}^2$ 。

近年来,随着关中地区经济社会的快速发展,渭河沿岸的工业废水和生活污水逐年增多。通过不断

加大治理力度,大多数排污单位建设了污染治理设施,工业污染得到了有效控制,但仍有部分企业不能稳定达标排放。加之工业废水的达标排放标准(工业达标排放标准 COD 为 100 ~ 450 mg/L)远远高于地表水标准(COD 高于 40 mg/L 即为劣 V 类)。所以,即使工业废水全部处理达标排放,对自然河道而言,仍是污染物浓度很高的废水。根据陕西省水文局黄河流域入河排污口的普查登记报告,渭河干流共有 69 个直接排污口,废污水入河量 5.55 亿 m<sup>3</sup>,占渭河流域废污水入河量的 77.0%,化学需氧量入河量 13.75 万 t,占流域入河量的 77.4%;氨氮入河量 1.10 万 t/a,占流域入河量的 85.5%。说明排入渭河流域废污水量中 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度相对偏高,渭河主要污染指标为 COD、NH<sub>3</sub>-N 等。

渭河流域的水污染主要来源于工业废水和城镇生活污水,而生态水的严重缺乏使污染得不到有效降解。枯水期内,渭河水几乎全是工业废水和生活污水,渭河已成“关中下水道”。自 1990 年后,渭河干流的 13 个监测断面除林家村外,其余断面的水质综合类别都在 V 类以上,大部分水质类别为超 V 类。

### 2.2 水功能区段的划分

国家和陕西省人民政府对渭河流域陕西段进行了水功能区划分。参考陕西省环保局水环境功能区划,即《渭河干流(陕西段)地面水功能区划方案表》(DB61-224-1996),执行的地面水环境质量标准为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),可得到渭河陕西段水功能区段的划分及水质目标要求,如表 2 所示。

表 2 渭河干流陕西段水功能区段划分及水质目标 km

编号	水域范围	功能区名称	河段长度	水质目标
1	颜家河-林家村	宝鸡市农业用水区	43.9	Ⅲ
2	林家村-卧龙寺	宝鸡市景观用水区	20	Ⅲ
3	卧龙寺-虢镇	宝鸡市排污控制区	12	Ⅳ
4	虢镇-蔡家坡	宝鸡市过渡区	22	Ⅳ
5	蔡家坡-汤峪入渭口	宝眉工业、农业用水区	44	Ⅲ
6	汤峪入渭口-漆水河口	杨凌农业、景观用水区	16	Ⅲ
7	漆水河口-咸阳公路桥	咸阳工业用水区	63	Ⅳ
8	咸阳公路桥-铁路桥	咸阳市景观用水	3.8	Ⅳ
9	铁路桥-泮河入口	咸阳排污控制区	5.4	Ⅳ
10	泮河入口-210 国道桥	咸阳西安过渡区	19	Ⅳ
11	210 国道桥-零河入口	临潼农业用水区	56.4	Ⅳ
12	零河入口-王家城子	渭南农业用水区	96.8	Ⅳ
13	王家城子-入黄口	华阴入黄缓冲区	29.7	Ⅳ

### 2.3 纳污能力计算结果

根据渭河干流陕西段地表水各功能区的划分与水质目标值,并结合 2008 陕西省水文水资源勘测局

提供的黄河流域入河排污口排污资料,分别采用标准模型、段首控制模型、欧盟模型计算得到同一河段在不同设计水文条件下 COD 和氨氮的纳污能力结果。

表 3 标准模型不同保证率下的纳污能力 t/a

功能区段	90% 保证率		75% 保证率		50% 保证率	
	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 纳污能力	氨氮纳污能力
	1	523.6	30.9	654.3	32.3	803.6
2	662.8	21.3	722.8	23.0	798.2	25.4
3	2980.7	144.5	3416.5	165.6	4236.6	204.8
4	1476.9	41.5	1552.7	44.0	1867.7	51.1
5	2261.3	64.1	2468.7	70.2	3056.1	84.0
6	1030.7	42.7	1214.3	46.6	1450.1	53.2
7	12277.5	464.5	13887.8	532.2	17090.9	662.0
8	511.2	14.1	559.5	15.4	669.5	18.6
9	838.0	27.3	884.7	28.6	970.9	31.1
10	6275.7	344.8	7302.5	372.6	9274.1	427.5
11	5457.7	153.3	7825.0	217.8	11254.4	313.7
12	7761.4	212.6	15371.6	421.7	25288.1	696.6
13	3667.1	102.5	8474.5	236.9	15332.9	428.8
合计	45724.6	1664.1	64335.0	2206.9	92093.3	3033.6

表 4 段首控制模型不同保证率下的纳污能力 t/a

功能区段	90% 保证率		75% 保证率		50% 保证率	
	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 纳污能力	氨氮纳污能力
	1	459.6	29.4	578.3	31.0	697.6
2	591.8	18.1	648.3	19.8	724.6	22.3
3	2939.0	134.7	3385.2	155.5	4225.3	194.1
4	1335.4	40.8	1417.0	43.3	1711.3	50.3
5	1875.4	63.3	2069.8	69.7	2568.1	83.5
6	981.8	29.2	1153.1	33.3	1378.9	40.0
7	11423.9	450.7	13071.6	516.3	16262.0	642.9
8	503.3	14.0	551.3	15.3	660.1	18.5
9	823.9	23.1	871.1	24.4	957.8	27.0
10	6056.0	173.1	7047.6	201.5	8935.8	257.7
11	4251.1	151.7	6259.8	213.6	9245.1	302.4
12	5025.6	181.6	10070.9	347.6	17334.6	578.7
13	3209.2	97.9	7498.3	224.0	13774.0	406.6
合计	39475.8	1407.6	54622.2	1895.3	78475.3	2659.3

### 2.4 结果分析

从表 3、4、5 渭河干流陕西段不同保证率下各功能区纳污能力计算结果可以得知:

(1) 相同点:采用三种模型计算出的纳污能力, COD 和氨氮都随着 90%、75%、50% 设计流量的增大纳污能力随之增大,这是由于在排污量相同的条件下,枯水期的河段流量比丰水、平水两期小,而在一定条件下(污染物质浓度不超过一定值),纳污能

力和设计流量成正比,因此,枯水期的纳污能力小。

表5 欧盟模型不同保证率下的纳污能力  $1/a$

功能区段	90% 保证率		75% 保证率		50% 保证率	
	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 纳污能力	氨氮纳污能力
1	643.6	39.5	727.4	40.7	887.2	45.2
2	836.2	23.7	899.8	25.6	973.0	28.0
3	3422.8	145.7	1285.1	166.9	4720.8	206.3
4	1682.5	45.5	1750.7	47.9	2087.7	55.2
5	2882.2	77.8	3099.9	84.4	3792.3	99.9
6	1388.4	44.8	1585.0	49.0	1831.4	55.9
7	16282.9	528.7	12191.6	600.3	21943.7	740.9
8	519.3	14.2	567.9	15.6	679.0	18.8
9	989.4	27.8	1035.5	29.1	1121.1	31.7
10	12036.1	357.4	13098.3	386.2	15156.6	443.9
11	7695.7	196.7	10468.4	269.1	14385.5	372.4
12	12477.0	286.8	23951.9	550.0	37377.2	876.2
13	4279.3	113.3	9666.6	256.6	17156.8	458.2
合计	65135.3	1902.0	80328.3	2521.2	122112.3	3432.7

(2) 不同点:在同一区段,采用欧盟模型计算出的纳污能力最大,标准模型次之,段首控制模型计算出的纳污能力最小。这是由于欧盟模型保证下游控制断面水质达标,上游各污染源的最大允许排污量。标准模型是以概化后的排污口入流断面作为基准断面,但按排污总量控制理论,本水功能区入河排污削减量应考虑排污口入流断面处的成果,在计算水功能区削减量时,还要反算至排污口断面。段首控制模型控制上游断面的水质,因有机物的降解,故在该区段内水质达到或高于功能区段的控制指标。

(3) 本文同时采用3种模型进行计算,建议对于高功能区采用段首控制模型,低功能区段采用3种模型计算结果的区间作为水功能区纳污能力,这个区间同时成为决策者的决策空间,对于有经验的决策人员,可从决策空间取值作为最终的纳污能力,而不只是追求纳污能力值的大小。

### 3 结 语

渭河是黄河重要的一级支流,水质优劣对黄河

下游用水起着重要制约作用。2009年我国提出以水资源配置、节约和保护为重点,“明确水功能区限制纳污红线,严格控制入河排污总量”是三条“红线”之一。因此,本文以渭河为例,分别采用标准模型、段首控制模型、欧盟模型计算,得到不同设计水文条件下COD和氨氮的水域纳污能力,提出对于高功能区采用段首控制模型,低功能区段采用3种模型计算结果的区间作为水功能区纳污能力。与同类研究方法相比,本研究不是单纯的利用纳污能力的最大值或最小值,而是提出根据功能区不同特性采用不同的纳污能力计算模型,利用两者区间值作为纳污能力计算结果,为决策者留有决策空间。因此,本研究方法更合理,更可靠。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 水域纳污能力计算规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 訾香梅. 陕西渭河流域水功能区水域纳污能力分析[J]. 水利水电快报,2008,29(10):28-30.
- [3] Ecker J G. A geometric programming model for optimal allocation of stream dissolved oxygen [J]. Management Science,1975,21(6):658-668.
- [4] Li S Y, Morioka T. Optimal allocation of waste loads in a river with probabilistic tributary flow under transverse mixing [J]. Water Environment Research,1999,71(2):156-162.
- [5] Donald H B, Edward A M. Optimization modeling of water quality in an uncertain environment [J]. Water Resource Research,1985,21(7):934-940.
- [6] 周洋,周孝德,冯民权. 渭河陕西段水环境容量研究[J]. 西安理工大学学报,2011,27(1):7-11.
- [7] 陈艳霞,高建勇,刘俊民,等. 渭河关中段水环境容量计算研究[J]. 人民黄河,2008,30(9):46-49.
- [8] 周孝德,郭瑾珑,程文,等. 水环境容量计算方法研究[J]. 西安理工大学学报,1999,15(3):1-6.
- [9] 劳国民. 流域水功能区划及水环境容量研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [10] 逢勇,陆桂华. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2010.