

基于盲数理论的涑水河水环境容量研究

苟婷, 冯民权, 李丹

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 根据涑水河的水文、水质资料,运用盲数理论计算涑水河的COD和氨氮的水环境容量及削减量,并将计算结果与一维稳态河流环境容量模型的计算结果作比较。由于河流水文、水质具有动态特性,所以运用不确定性信息的处理方法,把涑水河分成9段,对水质、水文参数进行盲数化,利用盲信息下的河流环境容量的计算模型,计算该河流主要污染物的水环境容量及削减量。计算结果表明:涑水河COD、氨氮的水环境容量分别为: -40207 kg/d和 -11675 kg/d。计算结果均为负值,说明它们均已超标,需要对其进行削减,削减量分别为17556 kg/d和9715 kg/d。用盲数理论研究河流的水环境容量,其计算结果具有较高可信度,与确定性计算方法相比更有优势。

关键词: 水环境容量; 削减量; 盲数理论; 涑水河

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0077-06

Study on water environment capacity of Sushui river based on blind number theory

GOU Ting, FENG Minquan, LI Dan

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the water quality, hydrological data of Sushui river, the paper used the blind number theory to calculate water environmental capacity and reduction of COD, $\text{NH}_3\text{—N}$, and compared it with the results of one-dimensional steady water environmental capacity. Because of the dynamic characteristics of the river hydrology and water quality, the paper divided the Sushui river into 9 sections by using uncertain information processing method, and made the water quality and hydrological parameters into blind number. It used the calculation model of water environmental capacity under blind information to calculate the water environmental capacity and reduction of major pollutants in the river. The result indicated that the water environmental capacities of COD, $\text{NH}_3\text{—N}$ of the river are -40207 kg/d and -11675 kg/d respectively. The results are both negative indicate that they need to be reduced, the amount of reduction are 17556 kg/d and 9715 kg/d. The result which is gotten by applying blind number theory to study the water environmental capacity is more credible and has more advantages than that by deterministic calculation method.

Key words: water environmental capacity; reduction of COD, $\text{NH}_3\text{—N}$; blind number theory; Sushui river

1 研究背景

目前,对于河流水环境容量的研究,大多数计算方法是:先设定河段的目标水质和一定保证率下的最枯月流量,再利用一维或二维的确定性模型计算某种污染物的环境容量^[1]。这种计算方式的计算结果仅是与设定条件相对应的水环境容量。对于短

时间内参数变化不大的河段,这种确定性模型的计算结果是可以保证实际需要的,而对于流态复杂、不确定性因素较多的河段,水环境容量的不确定性则非常显著^[2]。作为一个开放的水环境系统,河流的流量、流速、污染物浓度、衰减系数等参量在一定程度上都存在着不确定性,即模糊性、随机性、灰性和未确知性^[3]。不确定性模型多以确定性模型为基

收稿日期:2015-04-13; 修回日期:2015-05-20

基金项目:山西省水利厅科研基金项目(2014-01-06)

作者简介:苟婷(1991-),女,新疆伊宁人,硕士研究生,主要从事水源保护与微污染控制研究。

通讯作者:冯民权(1964-),男,山西永济人,博士,教授,博士生导师,主要从事水环境模拟与污染控制研究。

础,同时考虑影响水质变化过程的不确定性,如水质参数的不确定性,河流径流量、水体温度具有明显的年内或年际不确定性变化,将水环境系统的这种不确定性,通过改变模型参数或输入条件的方式,即令河流的纳污条件恒定。

由于上述因子的微变化而影响了降解速率和不确定性输移速率,致使在下游断面得到的浓度变化过程是波动的,这反映出了水质系统的不确定性因素的作用^[4]。不确定性数学法是近年来发展起来的计算水环境容量的最新方法,其优点在于可以更加充分地考虑水环境系统中各类参数的不确定性,计算相对简便,对少资料情况适应期较强^[5]。

针对水环境系统具有的不确定性,许多专家学者运用未确知数学中的有关随机数学理论^[6]、蒙特卡罗模拟^[7]、盲数理论^[8-9]等方法进行了水环境容量不确定性计算和分析^[1]。运用未确知数学计算不确定信息下河流纳污能力,理论上是可行的,计算结果可信度高^[10]。

近年来,由于人们超量超标排放污水,导致涑水河的污染日益严重,目前尚无针对涑水河运用盲数理论计算其水环境容量的研究,因此本文尝试对涑水河建立基于盲数理论的水环境容量模型,从而计算该河流水环境容量的各种可能值及其可信度,并计算出污染物削减量,可为水环境保护提供丰富、有用的纳污能力信息。

2 研究区概况

涑水河(东经 111°17′~111°43′,北纬 34°44′~

35°32′)为黄河一级支流,位于山西省西南部的运城盆地,发源于运城市绛县陈村峪,入伍姓湖后于弘道园村附近注入黄河,该河全长 196 km,流域面积 5 548km²。涑水河是运城市境内最长的河流,是一条集给水、排水、灌溉、养殖、防洪等功能于一体的河流。据 2000 年统计,年排入涑水河的工业废水和生活污水量达 5 506 万 t,河水色黑、味臭,感官极差,污染十分严重,多年来一直属于重度污染型河流。该河流主要污染物有溶氧量、COD、氨氮、总氮、氟化物、硫化物等,污染物严重超标致使该河流水体功能完全丧失。张留庄断面全年监测各污染指标值均超过环境 V 类标准。为保护涑水河水资源,遏制和改善涑水河水污染状况,必须对涑水河水资源开展研究。

3 盲信息下涑水河水环境容量的计算

3.1 涑水河计算河段的划分

涑水河主要污染物是 COD 和氨氮(NH₃—N),由于沿河排污严重超标,目前水质属于劣 V 类水。本研究采用 1980—2008 年的水文资料,计算涑水河的 COD 和氨氮的水环境容量。该河流主要污染物来自于山西省沿涑水河两岸工业企业及城镇废污水排放的污水。

根据涑水河的水文特点,结合污染物的排放类型、水域功能分区、污染源调查结果等因素,本文将涑水河划分为 9 个计算单元(见图 1)进行水环境容量计算(见表 1),控制断面的选择主要依据现有的监测断面分布。

表 1 涑水河水功能区一览表

范围长度/km		水质代表断面	长度 / km	水质现状	水质目标	目标值/(mg·L ⁻¹)	
开始断面	终止断面					COD	氨氮
源头	横水铁路桥	冷口	42.5	Ⅲ类	Ⅲ类	20	1.0
横水铁路桥	南宋	吕庄水库	15.0	V类	Ⅳ类	30	1.5
南宋	上马水库	水头	45.5	劣V类	V类	40	2.0
上马水库	景滑	景滑	30.0	劣V类	Ⅳ类	30	1.5
景滑	庙上	庙上	15.0	劣V类	V类	40	2.0
庙上	郭家庄	郭家庄	20.0	劣V类	Ⅳ类	30	1.5
郭家庄	四冯	四冯	14.2	劣V类	Ⅳ类	30	1.5
四冯	张华	张华	6.1	劣V类	V类	40	2.0
张华	入黄口	蒲州	7.7	劣V类	V类	40	2.0

3.2 盲信息下水环境容量计算模型

根据河流的实际情况,本研究采用稳态条件下

完全混合模型的水环境容量计算公式,计算涑水河水环境容量。研究河段的稀释容量与自净容量,通

过这2部分容量反映河段的实际水体环境容量。

$W = Q(C_S - C_0) + K \cdot C_S \cdot Q \cdot x/u$ (1)

式中: W 为水环境容量, kg/d; Q 为河段控制断面的污染带内平均过水量, m^3/s ; C_S 为河流水质目标质量浓度, mg/L; C_0 为上游来水背景质量浓度, mg/L; K 为污染物降解系数, $1/s$; x 为控制河段长度, m; u 为河流流速, m/s。

$A = 86.4Q(C_S - C_0)$ (2)

$B = 86.4K \cdot Q \cdot C_S \cdot x/u$ (3)

则: $W = A + B$ (4)

该公式反映的是在某一给定情况下的水环境容量, 由于河流的不稳定性、河流流量、流速的变化, 该公式不能如实的反映水体的纳污能力。考虑系统的模糊性, 随机性, 将河水流量 Q 、污染物浓度 C_0 、和流速 u 构造为盲数形式:

$Q = \{[Q_1, Q_n], f(Q)\},$

$u = \{[u_1, u_n], f(u)\},$ (5)

$C_0 = \{[C_{01}, C_{0n}], f(C_0)\}$

将各参数代入式(1), 可以得到盲信息条件下河流水环境容量的计算模型:

$W = \{C_S - ([C_{01}, C_{0n}], f(C_0))\} \cdot$

$\{[Q_1, Q_n], f(Q)\} + K \cdot C_S \cdot \{[Q_1, Q_n],$

$f(Q)\} \cdot x / \{[u_1, u_n], f(u)\}$ (6)

本研究中污染物的降解系数的确定采用分析借用法, 参考山西汾河的污染物综合降解系数, 分别取 $K_{COD} = 4.05 \times 10^{-6}/s$, $K_{NH_3-N} = 3.47 \times 10^{-6}/s$ (这里假定 K_{COD} 、 K_{NH_3-N} 为一个定值)。

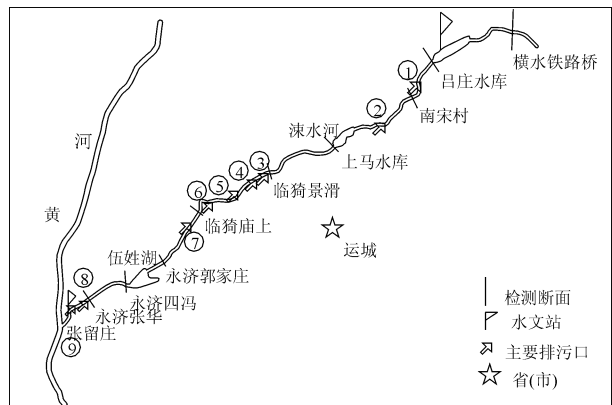


图1 涑水河概化图

3.3 参数的盲信息形式

对涑水河 1980 - 2008 共 29 年的流量、流速以及水质统计资料进行分析, 将各参量分别按数值大小进行排列, 根据数据分布情况划分别划分为 3 个

区间, 以区间数据出现的频率作为其相应的可信度, 则可得到各段的流量 Q (m^3/s)、流速 u (m/s)、背景浓度 C_0 (mg/L) 的盲数参量。

对于源头 - 衡水铁路桥计算单元:

$\varphi(Q) = \begin{cases} 0.86 & Q = (0.09, 0.70) \\ 0.03 & Q = (0.70, 1.20) \\ 0.10 & Q = (1.20, 2.96) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$\varphi(u) = \begin{cases} 0.69 & u = (0.09, 0.50) \\ 0.21 & u = (0.50, 1.00) \\ 0.10 & u = (1.0, 3.08) \\ 0 & 0 \end{cases}$

$\varphi(C_0)_{COD} = \begin{cases} 0.34 & C_0 = (4.2, 6.9) \\ 0.50 & C_0 = (6.8, 8.7) \\ 0.16 & C_0 = (8.7, 9.8) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$\varphi(C_0)_{NH_3-N} = \begin{cases} 0.3 & C_0 = (0.1, 0.3) \\ 0.6 & C_0 = (0.3, 0.5) \\ 0.1 & C_0 = (0.5, 0.7) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

为了简化计算, 对区间型灰数取“心”可得:

$\varphi(Q) = \begin{cases} 0.86 & Q = (0.35, 0.35) \\ 0.03 & Q = (0.95, 0.95) \\ 0.10 & Q = (2.08, 2.08) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$\varphi(u) = \begin{cases} 0.69 & u = (0.30, 0.30) \\ 0.21 & u = (0.75, 0.75) \\ 0.10 & u = (2.04, 2.04) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$\varphi(C_0)_{COD} = \begin{cases} 0.34 & C_0 = (5.55, 5.55) \\ 0.50 & C_0 = (7.8, 7.8) \\ 0.16 & C_0 = (9.25, 9.25) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

$\varphi(C_0)_{NH_3-N} = \begin{cases} 0.3 & C_0 = (0.2, 0.2) \\ 0.6 & C_0 = (0.4, 0.4) \\ 0.1 & C_0 = (0.6, 0.6) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

3.4 盲参数的运算

根据公式(2)、(3), 及盲数的运算法则^[14], 可以计算出 A_{COD} , B_{COD} 的可能值及与其相应的可信度, 如表 2。

表 2 A_{COD} 的可能值及其相应的可信度

A 的可能值及其相应的可信度		
可能值区间	区间中值	可信度
(1938.47,782.10)	1360.286	0.034
(1607.21,674.64)	1140.925	0.054
(1386.37,513.44)	949.908	0.021
(943.29,529.70)	736.500	0.056
(782.10,456.92)	619.510	0.093
(674.64,347.74)	511.190	0.037
(638.87,220.71)	429.792	0.210
(529.70,190.38)	360.042	0.350
(456.918,144.389)	300.905	0.140
else		0

表 3 B_{COD} 的可能值及其相应的可信度

B 的可能值及其相应的可信度		
可能值区间	区间中值	可信度
(2.07,0.50)	1.287	0.053
(1.04,0.29)	0.662	0.037
(0.59,0.14)	0.366	0.020
(1.01,0.34)	0.674	0.089
(0.50,0.20)	0.350	0.061
(0.29,0.09)	0.191	0.034
(0.68,0.14)	0.412	0.336
(0.34,0.08)	0.211	0.231
(0.19,0.04)	0.117	0.126
else		0

表 4 $A_{\text{COD}}, B_{\text{COD}}$ 的可能值带边和矩阵

$A_{\text{COD}}, B_{\text{COD}}$ 可能值带边和矩阵									
1360.29	1361.58	1360.95	1360.66	1360.96	1360.64	1360.48	1360.70	1360.50	1360.41
1140.92	1142.21	1141.58	1141.29	1141.59	1141.27	1141.11	1141.33	1141.13	1141.04
949.91	951.20	950.57	950.28	950.58	950.26	950.10	950.32	950.13	950.04
736.50	737.79	737.16	736.87	737.17	736.85	736.69	736.91	736.71	736.62
619.51	620.80	620.17	619.88	620.17	619.86	619.70	619.92	619.72	619.63
511.19	512.48	511.85	511.56	511.86	511.54	511.38	511.60	511.40	511.31
429.79	431.08	430.45	430.16	430.46	430.14	429.98	430.20	430.00	429.91
360.03	361.33	360.70	360.41	360.71	360.39	360.23	360.45	360.25	360.16
300.91	302.20	301.57	301.28	301.58	301.26	301.10	301.32	301.12	301.03
+	1.29	0.66	0.37	0.67	0.35	0.19	0.41	0.21	0.13

注：“+”表示两边数据进行求和运算。

表 5 $A_{\text{COD}}, B_{\text{COD}}$ 的可信度带边积矩阵

$A_{\text{COD}}, B_{\text{COD}}$ 可信度带边积矩阵									
0.034	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.010	0.009	0.004
0.056	0.004	0.003	0.002	0.005	0.003	0.003	0.020	0.012	0.008
0.023	0.073	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.006	0.006	0.003
0.056	0.004	0.001	0.002	0.003	0.005	0.002	0.018	0.014	0.007
0.093	0.005	0.133	0.002	0.008	0.006	0.003	0.031	0.021	0.012
0.037	0.087	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001	0.014	0.009	0.004
0.210	0.012	0.008	0.005	0.019	0.014	0.005	0.071	0.048	0.027
0.350	0.018	0.014	0.008	0.032	0.021	0.011	0.119	0.081	0.046
0.140	0.007	0.006	0.003	0.014	0.007	0.004	0.048	0.032	0.018
*	0.050	0.041	0.020	0.090	0.060	0.030	0.340	0.230	0.130

注：“*”表示两边数据进行求和运算。

表 4 中的 81 个元素，即为该河段水环境容量的各种可能值，将这些计算值，按由小到大的顺序进行排列。由于可能值和矩阵中的元素与可信度积矩阵中的元素是一一对应的，所以表 5 中可信度积矩阵中的元素即为与表 4 水环境容量各种可能取值相对应的可信度。

3.5 计算水环境容量平均值

根据盲数均值的计算公式，得到该河段水环境容量均值为：

$E(W_{\text{COD}}) = E(A + B) = 690.3 \text{ kg/d}$ (7)

与之相对应的总可信度为： $\alpha = 1$ 。

氨氮计算结果：氨氮的水环境容量为：26.5 kg/d。

4 盲数理论水环境容量计算结果及其分析

4.1 涑水河各功能区段水环境容量

上述计算出涑水河河源－衡水铁路桥段的 COD、氨氮环境容量,其它几个计算单元的水环境容量结果如表 6 所示。由表 6 中数据可以看出,除了

绛县闻喜农业用水区还存有 COD 690 kg/d、氨氮 26 kg/d 闻喜过渡区还存有 COD 659 kg/d 的环境容量,其余功能区环境容量均为负值;涑水河中段,由上马水库－永济四冯污染严重,污染物严重超标,农业用水污染占主导地位;盲数理论计算涑水河 COD、氨氮的水环境容量计算结果分别为－16207 和－9675 kg/d。

表 6 涑水河各功能区水环境容量计算结果

功能区名称	范围		水环境容量(kg/d)	
	开始	终止	COD	氨氮
涑水河绛县闻喜农业用水区	源头	横水铁路桥	690	26
涑水河绛县闻喜排污控制区	横水铁路桥	南宋	－69	－472
涑水河闻喜过渡区	南宋	上马水库	659	－555
涑水河上马水库农业用水区	上马水库	景滑	－3684	－2695
涑水河临猗排污控制区	景滑	庙上	－1896	－650
涑水河临猗过渡区	庙上	郭家庄	－4398	－2376
涑水河伍姓湖农业渔业用水区	郭家庄	四冯	－3305	－1599
涑水河永济排污控制区	四冯	张华	－1896	－426
涑水河永济缓冲区	张华	入黄口	－2308	－928
小计			－16207	－9675

4.2 污染物的削减

根据现状污染物入河量,计算污染物削减量见表 7。按照削减量的计算原则,削减量的计算公式如下:

$$X = \begin{cases} P - W & P > W \\ 0 & P < W \\ |W| & W < 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} W > 0 \\ W > 0 \\ W < 0 \end{matrix} \quad (8)$$

式中: X 为污染物削减量,kg/d; P 为污染物入河量,kg/d; W 为环境容量,kg/d。

表 7 涑水河污染物削减量计算表

功能区段编号	现状污染物入河量		盲数理论水环境		污染物削减量	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
区段 1	0	40	690	26	0	14
区段 2	737	79	－69	－472	69	472
区段 3	234	25	659	－555	0	555
区段 4	2339	251	－3684	－2695	3684	2695
区段 5	935	100	－1896	－650	1896	650
区段 6	748	80	－4398	－2376	4398	2376
区段 7	1076	115	－3305	－1599	3305	1599
区段 8	1146	123	－1896	－426	1896	426
区段 9	732	79	－2308	－928	2308	928
小计	7947	892	－16207	－9675	17556	9715

4.3 与其他计算方法的比较

基于盲数理论得出的涑水河水环境容量是负值,为了验证此方法用于计算、分析水环境容量的

合理性,将用盲数理论计算和一维稳态计算模型计算的涑水河水环境容量作比较,比较结果见图 2,其中 COD1,氨氮 1 为盲数理论计算结果,COD2,氨氮 2 为一维稳态计算模型计算结果。

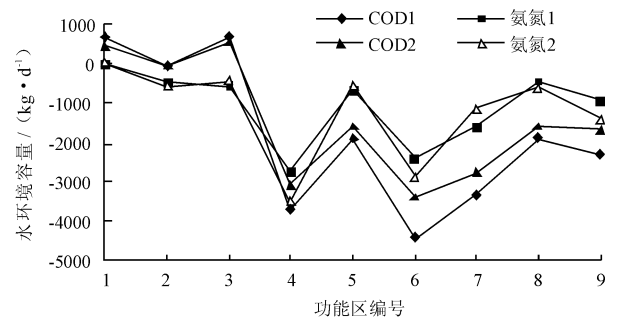


图 2 盲数理论计算结果和一维稳态计算模型计算结果比较

由图 2 可知,采用盲数理论和确定性模型计算出的水环境容量基本相同。大部分功能区段水环境容量均为负值,说明涑水河有机污染物严重超标,水质恶化严重。由于用确定性方法计算水环境容量时,是假设整个设计期间内各设计参量维持不变;而用不确定性方法时是根据河流水文、水质和水力条件的实际变化计算该段的污染物削减量,较常规的确定性方法更为科学、合理。

5 结 语

(1)从以上计算结果可以看出涑水河 COD、氨氮的水环境容量分别为 -16207 kg/d 和 -9675 kg/d ,均为负值,这说明该河流的有机物污染严重,水体已基本丧失了使用功能。从 9 个计算单元来看,只有涑水河绛县闻喜农业用水区、涑水河闻喜过渡区有 COD 环境容量,涑水河绛县闻喜农业用水区有一些氨氮环境容量,其余控制单元实际排放量均大于环境容量。

(2)大多数控制单元的水环境容量均为负值,因此需要削减,整条涑水河削减量分别为 COD 17556 kg/d 、氨氮 9715 kg/d 。用盲数理论计算值与一维稳态计算模型计算值基本相同,证明用盲数理论计算河流水环境容量是可行的。考虑河流的水文、水质等因素的不确定性,用盲数来表达水文、水质的不确定性信息,与确定性计算方法相比,该方法更为科学、合理。

(3)从水环境系统具有多种不确定性共存的角度考虑,运用盲信息下河流水环境容量的计算模型,根据所建模型不仅可以得到河流水环境容量的各种可能取值区间,还可以得到与各区间相对应的可信度值,这是常规的确定性模型难以实现的。

参考文献:

- [1] 陈 龙,曾维华,何孟常,等. 基于三角模糊数理论的河流水环境容量计算[J]. 人民黄河,2014,36(2):55-57.
- [2] 王 涛. 区域水环境容量测算方法及总量控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [3] 李如忠,范传勇. 基于盲数理论的河流水环境容量计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(10):233-235.
- [4] 谢洪章. 基于盲数理论的感潮河段水环境容量计算方法[D]. 福州:福建师范大学,2007.
- [5] 张海亮. 不确定性分析方法在城市湖泊水污染控制中的应用研究[D]. 吉林:吉林大学,2005.

- [6] 王有乐,周智芳,王立京,等. 黄河兰州段水环境风险容量研究[J]. 环境科学与技术,2006,29(6):72-73+100.
- [7] 严齐斌. 河流水质参数估计的蒙特卡罗方法[J]. 水利水电技术,2006,37(10):14-16.
- [8] 王忠燕,孙世群,王 辉. 基于盲数理论的南淝河水环境容量核算研究[J]. 环境科学与管理,2008,33(1):33-37.
- [9] 尹念辅,李铁松,左云霞,等. 基于盲数理论的四川省西充河水环境容量研究[J]. 水土保持通报,2012,32(1):233-237.
- [10] 王卫平. 九龙江流域水环境容量变化模拟及污染物总量控制措施研究[D]. 厦门:厦门大学,2007.
- [11] Dong Fei, Liu Xiaobo, Peng Wenqi, et al. Calculation methods of water environmental capacity of surface waters: Review and prospect[J]. Advances in Water Science. 2014,25(3):451-463.
- [12] 罗 彬. 锦江流域水环境容量估算与总量分配研究[D]. 南昌:南昌大学,2011.
- [13] 陈丁江,吕 军,金树权,等. 河流水环境容量的估算和分配研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):123-127.
- [14] 林风兰. 基于盲数理论的河流水环境容量的分析及应用研究[D]. 南京:东南大学,2009.
- [15] 闫欣荣,史忠科. 盲信息下渭河水环境容量及消减量研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(5):684-689.
- [16] Li Ruzhong, Hong Tianqiu. Application of blind number theory in calculating water environmental carrying capacity of lakes[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2005,36(7):765-771.
- [17] Chen Qiuwen, Wang Qibin Wang, Li Zhijie, et al. Uncertainty analyses on the calculation of water environmental capacity by an innovative holistic method and its application to the Dongjiang River[J]. Journal of Environmental Sciences,2014,26(9):1783-1790.
- [18] 王 涛,张 萌,张 柱,等. 基于控制单元的水环境容量核算研究——以锦江流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(3):283-287.