DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.02.08

基于水质目标管理的涑水河水环境容量研究

刘璐瑶，冯民权
（西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地，陕西 西安 710048）

摘　要：应用水质目标管理技术方法，研究涑水河水环境容量计算及分配，污染负荷削减等关键技术，实现涑水河污染物减排。建立涑水河水动力水质模型，结合实际监测资料，进行模型率定和验证，并对涑水河在95%、75%、50%保证率下，各断面COD、NH_3—N水环境容量的研究。COD水环境容量在95%、75%、50%频率年分别为：-6802.037、-5891.560、-5203.764 t/a；NH_3—N水环境容量在95%、75%、50%频率年分别为：-3328.943、-2070.057、-1821.376 t/a。需要对其进行污染物削减，确定涑水河污染物的削减量，COD在特枯年、枯水年和平水年削减量分别2103.75、1926.58、1702.33 t/a；NH_3—N削减量分别是927.07、605.31、546.29 t/a。将水质目标管理技术运用在涑水河水环境容量研究中，为流域环境水质改善提供技术支撑。

关键词：水质目标管理；水环境容量；水动力水质模型；削减量
中图分类号：X26；X143　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2018)02-0045-05

Study on the environmental capacity of Sushui River water quality based on target management

LIU Luyao, FENG Minquan
(*State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: By applying water quality target management method this paper studied the water environmental capacity calculation and distribution of Sushui river, the key technologies of reducing pollution load, so as to reduce the emission of Sushui River pollutants. We established a hydrodynamic water quality model of Sushui River, combining with actual monitoring data, the model calibration and verification was conducted, and the environmental capacity of COD and NH_3—N in the section of the water at 95%, 75% and 50% guarantee rate was investigated. The water environmental capacity of COD in the frequency year of 95%、75%、50% were -6802.037 t/a, -5891.560 t/a, -5203.764 t/a, respectively. NH_3—N water environmental capacity in the frequency year of 95%, 75%, 50% were -3328.943 t/a, -2070.057 t/a, -1821.376 t/a respectively. It is necessary to reduce the pollutants and determine the reduction of Sushui River pollutants, the reduction of COD in extremely dry year, dry year and normal flow were 2103.75 t/a, 1926.58 t/a and 1702.33 t/a respectively, and the ammonia reduction were 927.07 t/a, 605.31 t/a, 546.29 t/a. The water quality target management technology can be used in the study of water environmental capacity of Sushui River, which can provide technical support for water quality improvement.

Key words: water quality target management; water environmental capacity; hydrodynamic water quality model; reduction

1　研究背景

河流水质目标管理是在原有总量控制技术体系上发展而来的[1]，20世纪70年代以来，欧美等许多发达国家针对本国水污染状况相继开展了水质管理技术的研究，如美国TMDL计划等。Lebo等[2]则对这一治理方案的实施效果进行了评估，总结了影响水质波动的主要因素。Lee等[3]以韩国洛东江为对象，

收稿日期：2017-09-21；　**修回日期**：2017-12-01
基金项目：国家自然科学基金项目(51679191)；运城市水资办科技计划基金项目(2016-10)；陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS102)
作者简介：刘璐瑶(1991-)，女，陕西渭南人，硕士研究生，主要研究方向为水环境模拟与污染控制。
通讯作者：冯民权(1964-)，男，山西永济人，教授，博士，博士生导师，主要从事水环境模拟与污染控制研究。

系统分析了韩国河流 TMDL 计划中水质目标的确定方法,为流域管理提供参考。欧美国家的研究一般用最大日容许纳污量、容许排污水平和同化容量等定义。Koutseris [4]分析并计算了希腊某海滨的水环境容量;Borges 等[5]研究了某流域上 5 个水库在不同环境因子影响下的关系,并分析计算了水环境容量。Cho 等[6]采用线性规划法对河流污染物的污染负荷进行了分配;Kerachian 等[7]研究利用遗传算法对季节性河流污染物的污染负荷进行分配。

我国比美国等发达国家晚几年也开始了水环境污染总量控制研究,在以水质目标管理为导向的河流治理模式方面,我国学者展开了积极的探索和尝试。孟伟等[8]提出了我国水环境质量目标管理技术的研究方向和发展趋势。雷坤等[9]提出了控制单元水质目标管理技术方法,阐述了控制单元划分、水质目标核定、控制单元水环境问题诊断的基本流程和方法。我国对水环境容量的研究开始于 20 世纪 90 年代,水环境容量的研究及其应用方面得到较快发展。金海生等[10]以断面平均的一维动态水质模型为基础,建立了计算潮汐河流一维动态水环境容量的数学模型。周孝德等[11]提出了一维稳态条件下水环境容量计算的 3 种方法,分别为段尾控制、段首控制以及功能区末端控制方法。韩龙喜等[12]在对中小型河段污染源进行概化的基础上提出纳污能力的计算方法及计算公式,为水资源保护与规划提供了一种简捷有效的方法。

目前,简单的总量控制不能确定水环境污染问题,严重限制了我国水环境管理的进一步发展,因此,水质改善需应用水质目标管理技术。涞水河属于干旱和半干旱地区,近年来,由于上游水量减少以及周围工业企业和城市污水的排放,造成了严重的污染,改善涞水河水质迫在眉睫。本研究应用水质目标管理技术方法建立水动力水质模型,研究计算涞水河各河段在不同水期的水环境容量,并进行污染物削减,为污染物超标排放的河段的削减量计算提供一种新思路。

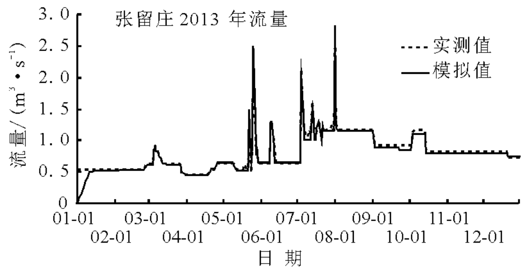

图 1 2013 年水动力模型参数率定

2 水动力水质模型

2.1 控制方程

因为涞水河流量较小,河流深度较浅,垂向断面浓度基本无变化,因此只考虑水流方向浓度变化的一维模型,对于一维均匀流水动力控制方程组:

连续方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{1}{B}\frac{\partial Q}{\partial x}=\frac{q}{B} \tag{1}$$

能量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+gA\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\alpha Q^2}{A}\right)+\frac{gQ|Q|}{c^2AR}=0 \tag{2}$$

水质模型基本方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}=E\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-kC \tag{3}$$

式中:z 为断面水位,m;Q 为流量,m^3/s;A 为河道过水面积,m^2;g 为重力加速度,m/s^2;B 为水面宽度,m;q 为旁侧入流流量,m^3/s;R 为水力半径,m;c 为谢才系数,$m^{1/2}/s$;x 为位置坐标,m;t 为时间,s;C 为污染物浓度,mg/L;E 为纵向分散系数,m^2/s;k 为污染物综合衰减系数,d^{-1}。

2.2 参数率定与模型验证

采用张留庄 2013、2014 年流量数据进行模型参数率定和验证,本研究通过模型试算,取河床糙率 $n=0.03$,结果如图 1、2。

本次计算预测水质指标为氨氮、COD。采用张留庄 2013、2014 年水质数据进行率定与验证,如图 3、4,考虑到降解系数与水流速度、温度、水深等因素相关,设置降解系数值:COD 为 $0.144\sim0.240\,d^{-1}$。

3 水环境容量计算与污染物削减

3.1 理论与方法

采用动态水环境容量计算方法,针对不同季节的流量特征来计算水环境容量。按照不同功能区采用段首控制法和段末控制法[13-14],高功能区段采用段首控制法,低功能区段采用段末控制法。

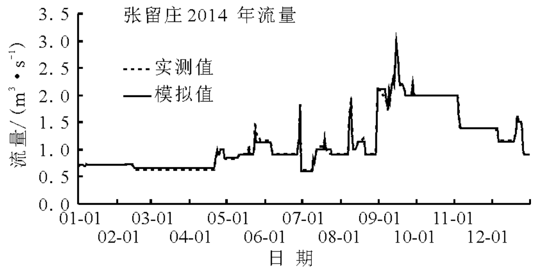

图 2 2014 年水动力模型验证

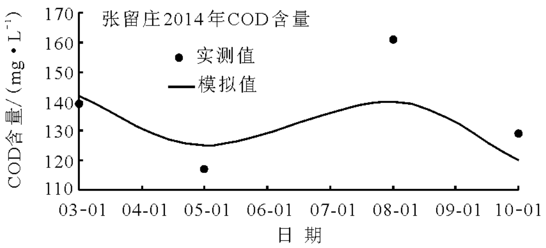

图 3　2014 年水质模型参数率定

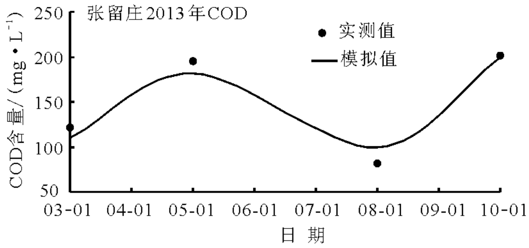

图 4　2013 年水质模型验证

3.1.1　污染物入河量计算　利用公式(4)计算出河流污染物通量值：

$$W = \sum (C \cdot Q) \tag{4}$$

式中：W 为水污染控制断面污染物通量，t/a；C 为河道水污染控制断面水质浓度，mg/L；Q 为河道水污染控制断面的水量，m^3/s。

3.1.2　段首控制法　段首控制法计算式为[15]：

$$E = 0.0864\{Q_0(C_s - C_0) + \sum_{i=1}^{n} C_s[Q_i(1 - \exp(-\frac{KL_i}{86400u_i}))] + q_i\} \tag{5}$$

式中：E 为功能区段的水环境容量，t/d；Q_0 为来水流量，m^3/s；C_s 为功能区段水质标准，mg/L；C_0 为来水污染物浓度，mg/L；Q_i 为混合后干流流量，m^3/s；L_i 为第 i 河段长度，m；u_i 为第 i 河段设计平均流速，m/s；q_i 为第 i 河段的排污量，m^3/s。

3.1.3　段末控制法　段末控制法计算式为[15]：

$$E = 0.0864\{Q_0(C_s - C_0) + \sum_{i=0}^{n-1} C_s[Q_{i+1} \cdot (\exp(-\frac{KL_i}{86400u_i}) - 1)] + q_{i+1}\} \tag{6}$$

式中：Q_{i+1} 为第 $i+1$ 个断面前的干流流量，m^3/s；q_{i+1} 为第 $i+1$ 个断面处的排污流量，m^3/s。

3.1.4　削减量计算

$$\Delta W = W - P \tag{7}$$

式中：ΔW 为剩余环境容量，t/a；P 为污染物入河量，t/a；W 为水环境容量，t/a。ΔW 为负值时，绝对值即为削减量。

3.1.5　削减量分配　对水功能区 3、5、6、7 排污口进行等比例分配法。分配公式如下：

$$P_i = \frac{m_{io}}{\sum m_{io}} \tag{8}$$

式中：P_i 为污染源 i 分得的权重；m_{io} 为控制区域内 i 的现状排放总量，t/a。

3.2　计算条件的确定

3.2.1　研究区域的基本概况　以涑水河为例，涑水河是运城市境内最长的一条河流，发源于运城市绛县陈村峪，全长 196.6 km，是一条集给水、排水、灌溉、养殖、防洪等于一体的多功能河流。流经绛县、闻喜、夏县、盐湖、临猗、永济 6 个县(市、区)，属黄河一级支流，在永济市上源头村附近注入黄河。涑水河流域共有 106 个乡镇，1796 个行政村，230.1 万人，耕地 33.27×10^4 hm^2，是运城市人口最为密集、生产力布局最为集中的区域，也是经济最为活跃的区域[15-16]。

3.2.2　控制单元划分　依据《山西省水环境功能划分》中水体功能划分确定各监测断面执行标准，以地方政府考核断面责任目标、水功能区划目标、“十三五”规划目标要求为水质目标进行水环境容量计算，如表 1 及图 5。

表 1　涑水河功能区划分及水质目标

功能区段编号	水功能区名称	控制单元	控制单元起点—终点	长度/km	功能区水质目标
1	绛县、闻喜农业用水区	控 1	河源—横水铁路桥	42.5	Ⅲ类
2	绛县、闻喜排污控制区	控 2	横水铁路桥—南宋村	15.0	Ⅳ类
3	闻喜过渡区	控 3	南宋村—上马水库	45.5	Ⅴ类
4	上马水库农业用水区	控 4	上马水库—临猗景滑	30.0	Ⅳ类
5	临猗排污控制区	控 5	临猗景滑—临猗庙上	15.0	Ⅴ类
6	临猗过渡区	控 6	临猗庙上—永济郭家庄	20.0	Ⅳ类
7	伍姓湖农业渔业用水区	控 7	永济郭家庄—永济西冯	14.2	Ⅳ区
8	永济排污控制区	控 8	永济西冯—张华	6.1	Ⅴ类
9	永济缓冲区	控 9	张华—张留庄	7.7	Ⅴ类

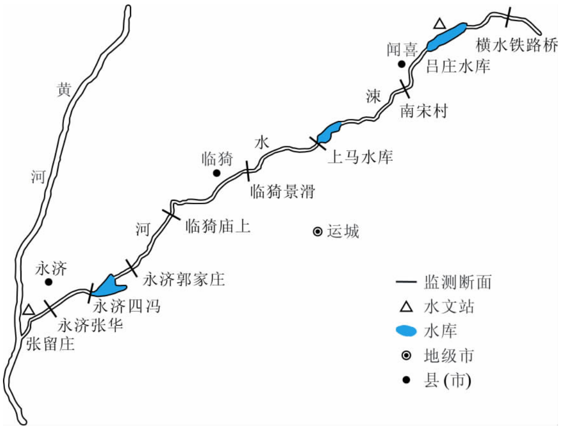

图 5 涑水河功能区段划分

3.3 结果与讨论

3.3.1 水环境容量计算结果 对氨氮、COD 进行计算时，当功能区水质目标为Ⅲ类时，采用段首控制法计算；水质目标为Ⅴ、劣Ⅴ类时，采用段末控制法计算。计算结果见表 2。

从水环境容量计算结果可得，COD 在 95%、75%、50% 频率年分别为：-6802.037、-5891.560、-5203.764 t/a；NH_3—N 在 95%、75%、50% 频率年分别为：-3328.943、-2070.057、-1821.376 t/a。

3.3.2 入河污染物计算结果 入河污染物计算结果见表 3。

表 2 涑水河各功能区不同频率年的 COD、NH_3—N 水环境容量 t/a

功能区编号	保证率 95% 特枯年		保证率 75% 枯水年		保证率 50% 平水年	
	COD	NH_3—N	COD	NH_3—N	COD	NH_3—N
1	72.240	6.093	79.788	6.557	85.239	8.963
2	-86.996	-41.235	-74.633	-37.547	-72.596	-31.366
3	-1111.330	-139.869	-1088.043	-100.361	-964.068	-92.679
4	-527.397	-208.693	-272.002	-123.446	-225.138	-107.803
5	-949.362	-796.272	-911.446	-517.671	-887.403	-463.498
6	-1702.748	-861.508	-1525.584	-539.745	-1301.330	-480.729
7	-1181.477	-427.200	-904.997	-258.949	-812.343	-226.234
8	-725.154	-535.120	-666.888	-322.252	-597.414	-280.261
9	-589.813	-325.139	-527.755	-176.643	-428.711	-147.769
总计	-6802.037	-3328.943	-5891.560	-2070.057	-5203.764	-1821.376

3.3.3 污染物削减结果 根据计算可以得出 COD、NH_3—N 在个频率年的排污削减量，如图 6、7。

从图 6、7 得出污染物目标削减成果，涑水河中下游污染严重，其中污染严重的功能区分别是：闻喜过渡区、临猗排污控制区、临猗过渡区和伍姓湖农业渔业用水区，在这几个功能区中污染最严重的是临猗过渡区，COD 在特枯年、枯水年和平水年削减量分别为 2103.75、1926.58、1702.33 t/a；NH_3—N 削减量分别为 927.07、605.31、546.29 t/a。

3.3.4 削减量分配 对水功能区 3、5、6、7 排污口进行等比例分配，排污口对 COD 的削减分配如图 8、9。

从图 8、9 中可以看出，导致水功能区 3、5、6、7 污染最严重的是临猗工业园区排污口和临猗化晋公司排污口，其次是临猗城市排污口。

由此可见，本文通过利用水量和水质指标进行模拟，针对频率年特征计算水环境容量。利用模型对涑水河水环境容量进行研究，实现涑水河对 COD、NH_3—N 等污染物的削减，从而使涑水河水质得到改善。但在计算过程中没有完全考虑动态水环境容量的确定，影响了流域水环境容量的计算精度。

表 3 涑水河各功能区 COD、NH_3—N 的入河污染量 t/a

功能区编号	COD	NH_3—N
1	163	36.29
2	200	54.18
3	235	36.33
4	256	19.90
5	312	32.61
6	401	65.56
7	236	46.87
8	165	57.03
9	123	33.00

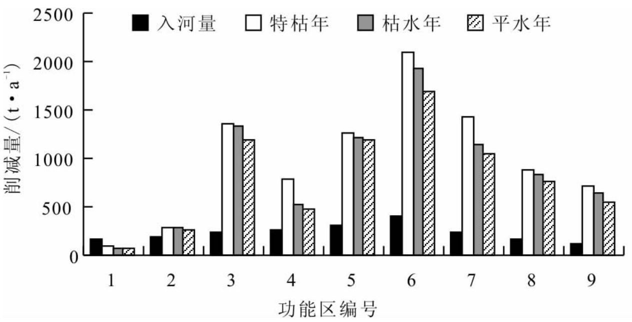

图 6　COD 在各频率年的排污削减量

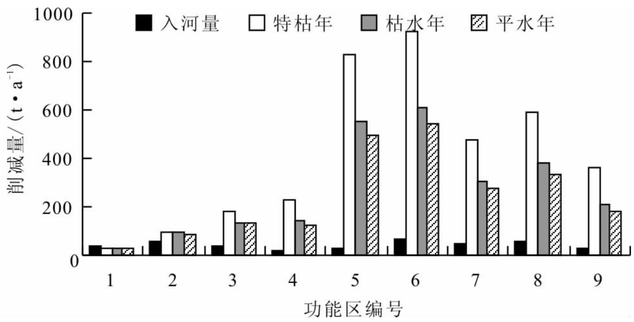

图 7　NH_3—N 在各频率年的排污削减量

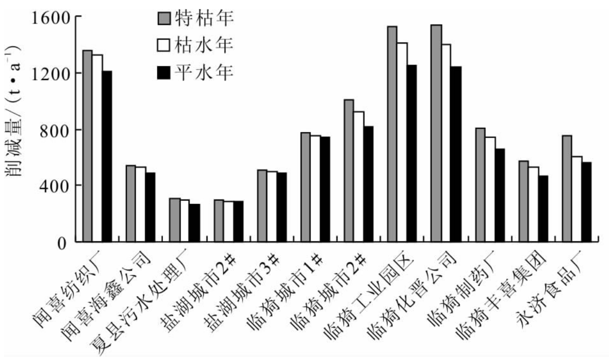

图 8　不同排污口对 COD 的削减分配

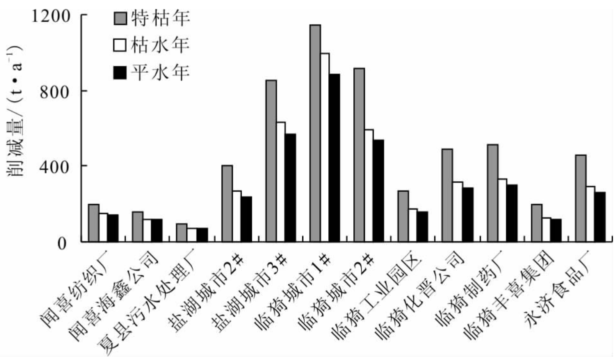

图 9　不同排污口对 NH_3—N 的削减分配

4　结　论

(1)通过段首控制法和段末控制法相结合的方法计算涑水河的水环境容量，结果表明，绛县、闻喜农业用水区的 COD 、NH_3—N 环境容量为正，其余功能区的 COD 、NH_3—N 环境容量均为负值。

(2)通过计算可以得出，涑水河中下游污染严重，其中污染严重的功能区分别是：闻喜过渡区、临猗排污控制区、临猗过渡区和伍姓湖农业渔业用水区，在这几个功能区中污染最严重的是临猗过渡区，COD 在特枯年、枯水年和平水年削减量分别为 2103.75、1926.58、1702.33 t/a；NH_3—N 削减量分别为 927.07、605.31、546.29 t/a。

(3)通过对涑水河水环境容量和削减量的计算，防止水体进一步恶化，为涑水河水环境治理和改善等提供了技术支持。

参考文献：

[1] 孟 伟，张 楠，张 远，等. 流域水质目标管理技术研究(I) – 控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究，2007，20(4)：1 – 8

[2] LEBO M E，PAERL H W，PEIERLS B L. Evaluation of progress in achieving TMDL mandated nitrogen reductions in the Neuse River Basin，North Carolina[J]. Environmental Management，2012，49(1)：253 – 266.

[3] LEE A，CHO S，PARK M J，et al. Determination of standard targetwater quality in the Nakdong River basin for the total maximumdaily load management system in Korea[J]. Ksce Journal of CivilEngineering，2013，17(2)：309 – 319.

[4] KOUTSERIS E. The carrying capacity for touristic development and the environmental capacity about the sustainability：Research in certain coasts of magnesia，Greece [J]. Mathematics and Computers in Science and Engineering，2009，7：58 – 63.

[5] BORGES E C L，MOZETO A A，NEVES E F A，et al. Study of complexation capacity and its relationship with some environmental variables in five reservoirs of the Tiete river system [J]. Química Nova，2007，30 (7)：1505 – 1511.

[6] CHO J H，AHN K H，CHUNG W J，et al. Waste load allocation for water quality management of a heavily polluted river using linear programming[J]. Water Science & Technology，2003，48(10)：185 – 190.

[7] KERACHIAN R，KARAMOUZ M. Waste-load allocation model for seasonal river water quality management：Application of sequential dynamic genetic algorithms[J]. Scientia Iranica，2005，12(2)：117 – 130.

[8] 孟 伟，张 远，张 楠，等. 流域水生态功能分区与质量目标管理技术研究的若干问题[J]. 环境科学学报，2011，31(7)：1345 – 1351.

(下转第 55 页)

水面的超渗产流部分,如何考虑强降水时超渗产流的部分仍是新安江模型未来发展的重要方向。

参考文献:

[1] 芮孝芳, 凌 哲, 刘宁宁,等. 新安江模型的起源及对其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4):1 -5.
[2] KHAN M H. Xinanjiang Model on Bird Creek catchment in USA. [J]. Pakistan Journal of Agricultural Research, 1993, 14(4):373 -382.
[3] ZHU Dehua, PENG Dingzhi. Notice of RetractionComparison of the hydrological models in the Upper Medway Catchment, UK[C]// Sixth International Conference on Natural Computation. IEEE, 2010:3874 -3877.
[4] 刘玉龙, 阮本清, 张春玲,等. 从生态补偿到流域生态共建共享——兼以新安江流域为例的机制探讨[J]. 中国水利, 2006(10):4 -8.
[5] HAPUARACHCHI H A P, LI Zhijia, WANG Shouhui. Application of SCE -UA method for calibrating the Xinanjiang watershed model[J]. 湖泊科学(英文版), 2001, 13(4):304 -314.
[6] 刘金涛, 宋慧卿, 张行南,等. 新安江模型理论研究的进展与探讨[J]. 水文, 2014, 34(1):1 -6.
[7] 张 波, 马得莲, 包为民,等. 新安江模型在富水水库流域洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4):49 -51 +21.
[8] 胡宇丰, 安 波, 陆玉忠,等. 新安江模型在嫩江流域洪水预报中应用[J]. 东北水利水电, 2011, 29(8):41 -45 +72.
[9] 肖兴涛, 张鹏远, 张淑霞. 新安江模型在汤旺河流域洪水预报中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2012,40(1):41 -43.
[10] 张漫莉. 改进的 HBV 模型与新安江模型在武江流域洪水预报中的应用比较[J]. 人民珠江, 2014, 35(1):34 -37.
[11] 周广刚, 温立成, 侯国柱. 三水源新安江模型在洒河流域的适用性研究[J]. 水利水电工程设计, 1999(3):45 -47.
[12] 朱求安, 张万昌. 新安江模型在汉江江口流域的应用及适应性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3):19 -23.
[13] 唐俊龙, 郝振纯. 新安江模型在浙江白水坑水库的适用性研究[J]. 水电能源科学, 2017,35(3):20 -23.
[14] 徐 莎, 杨小柳. GR3 模型和新安江模型在我国的对比研究[J]. 水文, 2015, 35(1):7 -13.
[15] 谷桂华. 玉溪市暴雨洪水特性分析[C]// 中国水利学会 2003 学术年会,深圳:2003.
[16] 孙惠玲, 李天艳, 周晓娟,等. 近 54 年来玉溪市气候变化特征分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2016, 36(5):67 -73.
[17] 张利茹, 管仪庆, 叶 彬,等. 新安江模型参数敏感性分析的实证研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5):16 -17 +30.
[18] 舒 畅, 刘苏峡, 莫兴国,等. 新安江模型参数的不确定性分析[J]. 地理研究, 2008, 27(2):343 -352.
[19] 杨自坤, 孔 燕. 新安江三水源模型在横江洪水预报中的应用[J]. 水资源研究, 2010,31(1):36 -38.

(上接第 49 页)

[9] 雷 坤,孟 伟,乔 飞,等. 控制单元水质目标管理技术及应用案例研究[J]. 中国工程科学,2013,15(3):62 -69.
[10] 金海生,郑英铭. 潮汐河流一维动态水环境容量计算模型[J]. 水利学报,1992(9):15 -22.
[11] 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.
[12] 韩龙喜,朱党生,蒋莉华. 中小型河道纳污能力计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(1):35 -38.
[13] 慕金波,甄文栋,王忠训,等. 山东省河流环境容量及最大允许排污量研究[J]. 山东大学学报(工学版),2008,38(5):77 -81 +93.
[14] 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.
[15] 李 飞. 浅议涑水河流域水环境污染状况及治理对策[J]. 资源节约与环保,2013(2):68 -70.
[16] 胡国华,赵沛伦,王任翔. 黄河孟津 -花园口河段水环境容量研究[J]. 水资源保护,2002,18(1):26 -28 +68 -69.
[17] 张利民,刘 洋,孙卫红,等. 太湖流域漕桥河小流域水环境容量估算及污染物削减分配[J]. 湖泊科学,2009,21(4):502 -508.
[18] DENG Xiangzheng, ZHAO Yonghong, WU Feng, et al. Analysis of the tradeoff between economic growth and the reduction of nitrogen and phosphorus emissions in the Poyang Lake Watershed, China[J]. Ecological Modeling, 2011,222(8):330 -336.