



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.017

马涵玉, 黄川友, 殷彤, 等. 系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 101-110. MA Hanyu, HUANG Chuan you, YIN Tong, et al. Evaluating the water ecological carrying capacity of Chengdu City with SD model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 101-110. (in Chinese)

系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用

马涵玉, 黄川友, 殷彤, 朱国宇

(四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 基于成都市水生态现状, 为提高其水生态承载力, 促进经济发展和提高人民生活水平, 运用系统动力学(SD)的方法, 建立了成都市水生态-经济-人口-水资源-水环境的耦合系统, 模拟了现状延续型、节约用水型、污染防治型和综合协调型四种情景模式。模拟结果显示: 在模拟年限内(2014年-2020年), 现状延续型和污染防治型未能有效降低水生态承载限制系数, 水生态问题将进一步加剧; 节约用水型和综合防治型都可以降低水生态承载限制系数, 但节约用水型不能显著减低该系数, 只有通过节约用水和污染防治相结合的综合防治型, 才可以更加有效的减低该系数, 该情景模式是提高水生态承载力的最佳模式; 到2020年, 该情景模式下成都市的水生态承载限制系数下降为0.297, 与2010年的相比, 下降了59.4%。研究结果可为成都市水生态保护提供技术依据。

关键词: SD模型; 水生态承载力; 决策变量; 情景模拟

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0101-10

Evaluating the water ecological carrying capacity of Chengdu City with SD model

MA Hanyu, HUANG Chuan you, YIN Tong, ZHU Guo yu

(College of Water Resources & Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to enhance the water ecological carrying capacity of Chengdu city whilst promoting the development of economy and improving the living standards of the people, System Dynamics (SD) method was applied to build a coupled system of water ecology-economy-population-water resources-water environment of the city based on the status quo of water ecology. Four scenario patterns including status continuing, water saving, pollution controlling, and integrated coordination were simulated by the SD model. Simulation results showed that: in the analog period (2014 to 2020), the status continuing and pollution controlling scenario patterns can not effectively reduce the limit coefficient of water ecological carrying capacity, resulting in further deterioration of water ecological problems. However, the water saving and integrated coordination scenario patterns can reduce the limit coefficient of water ecological carrying capacity. It should be noted that the water saving scenario pattern can not significantly reduce the coefficient. The integrated coordination pattern combining water saving and pollution controlling measures can reduce the coefficient more effectively. It is the best pattern to improve the water ecological carrying capacity. With the aforementioned recommended pattern, the limit coefficient of water ecological carrying capacity can be reduced to 0.297 for Chengdu City by 2020, down by 59.4% compared with that of 2010. The research results can provide technical basis for water ecological protection in Chengdu city.

Key words: SD model; water ecological carrying capacity; decision variable; scenario simulation

收稿日期: 2016-04-08 修回日期: 2016-07-07 网络出版时间:

网络出版地址:

作者简介: 马涵玉(1991-), 男(回族), 河南人, 主要从事水资源开发利用与保护方面研究。E-mail: 2539720514@qq.com.

通讯作者: 黄川友(1953-), 男, 四川人, 教授, 主要从事水资源开发利用与保护方面研究。E-mail: hcy2868@sohu.com

系统动力学最初是由美国麻省理工学院 Forrester 教授所创立, 20 世纪 70 年代末引入我国。经过 30 多年来的发展, 它几乎被应用于自然科学和人类社会的全部领域。当前, 系统动力学在可持续发展与生态系统变化的预测研究中应用相当广泛^[1], 它作为系统科学理论与计算机仿真紧密结合、研究系统反馈与行为的一门科学, 是系统科学与管理科学的一个重要分支^[2]。我国的水生态承载力研究主要是沿着水资源承载力 \rightarrow 水环境承载力 \rightarrow 水生态承载力 \rightarrow 生态承载力 \rightarrow 水生态承载力这两条主线逐步发展起来的^[3]。目前对水生态承载力定义的叙述, 不同的学者对此表述不一。李靖^[4]等将水生态承载力表述为在一定的历史阶段, 某一流域的水生态系统在满足自身健康发展的前提下, 在一定的环境背景下所能持续支持人类社会经济发展规模的阈值。彭文启^[5]给出了水生态承载力的广义定义: 流域水生态承载力指维持良好状态的流域水资源及水环境系统所能承受的一定水平的人口、最大数量和一定技术水平下的最大经济规模, 从水资源、水环境等水体理化特性及水生态特征等方面考虑了水生态承载力的定义。

成都市是我国西部地区重要的中心城市。随着城市化建设和经济的发展, 成都市对水资源的需求, 特别是工业水量的需求不断增加, 供需矛盾日益突出, 加之水资源利用率低, 回用率更低, 入河污染物排放过多, 城市区域水环境污染严重, 致使成都市在建设西部经济高地不断前进的道路上, 面临的水生态问题也越来越突出。针对以上问题, 许多学者用不同的理论与方法进行了分析与研究。薛小妮等^[6]以可承载人口数量作为指标, 利用多层次分析方法和纳污模型分别进行了成都市的水资源和水环境承载力预测分析, 但存在指标单一的问题。陈琳^[7]等运用 PSR 模型建立水安全评价指标体系, 采用层次分析法计算指标权重, 最后用水安全评价综合指数对成都市的水安全状况进行评价。欧阳铭^[8]等利用生态足迹理论计算了 2000 年-2009 年的水资源承载力, 并运用主成分分析法对影响承载力的因子进行了分析, 而未预测未来水资源承载力的发展变化。苏敏^[9]采用主成分分析法对主成分进行特征值和贡献率的计算, 得到了影响成都市水资源承载力的主成分因子, 而未对承载力进行量化研究。因此, 本文运用 Vensim 软件建立成都市水生态承载力 SD 模型来定性与定量地预测分析水生态承载力的变化情况, 旨在分析影响成都市水生态承载力的两个方面——水资源与水环境, 预测水生态承载力的变化

趋势, 为成都市节约用水和污染防治政策制定提供科学依据, 提高水生态承载力。

1 区域概况

成都市位于东经 $102^{\circ}54' - 104^{\circ}53'$, 北纬 $30^{\circ}05' - 31^{\circ}26'$, 地处四川省中部, 四川盆地西部, 属长江水系岷江及沱江流域。其东部为龙泉山低山丘陵区, 中部为成都平原, 西部为龙门山和邛崃山山区。全市东西最大横距 192 km, 南北最大纵距 166 km, 总面积为 $12\,121.3\text{ km}^2$ ^[10]。成都市属于亚热带季风气候区, 其气候特点为: 夏无酷暑, 冬无冰雪, 气候温和, 夏长冬短, 无霜期长, 秋雨和夜雨较多, 风速小, 湿度大, 云雾多。全市多年平均降水量为 900~1300 mm, 其雨量主要集中在 7 月-8 月, 约占全年降水量的一半, 年平均气温在 $15.2\text{ }^{\circ}\text{C} - 16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

成都市是我国西南部经济最为发达的城市之一, 2015 年年末全市常住人口 1 465.8 万人, 实现地区生产总值 10 801.2 亿元, 占全四川省生产总值的 35.9%^[11]。成都市水资源量较为丰富, 根据 2004 年-2013 年统计^[12], 年均水资源总量为 81.72 亿 m^3 ; 总用水量为 54.15 亿 m^3 , 水资源开发利用率高, 高达 66.3%, 多年来农业用水、工业用水、生活用水比例为 3:1:1, 农业用水占据了总用水量的 60%。在水环境方面, 多年来 COD、氨氮的排放量分别为 19.73 万 t、2.31 万 t, 水质污染情况严重^[13]; 城市水体富营养化指数为 59.85^[14], 为轻度富营养; 2015 年成都市重要江河湖泊水功能区水质达标率为 35%。这一系列亟待解决的问题, 促使我们必须加快实施最严格的水资源管理制度和推进成都市水生态文明建设, 以此为指导来改善成都市的水生态承载能力。

2 材料与方法

2.1 水生态承载力系统耦合关系分析

本文所研究的水生态承载力系统是人类活动影响下的系统, 它是由人类社会系统、经济系统、自然生态系统组成的耦合系统, 可以将其细分为 5 个子系统——人口子系统、经济子系统、水资源子系统、水环境子系统和水生态子系统。人口子系统以人口数量为特征, 经济子系统以 GDP 为主要指标, 水资源子系统发挥水量供给的作用, 水环境子系统具有自净纳污的重要功能, 水生态子系统是水资源子系统和水环境子系统两者的结合, 通过水量供给和自净纳污来发挥作用。各个子系统之间相互作用, 相

值用水量来进行需水量和排污量的预测。其中工业污水的排放主要分两部分: 未经处理直排的和经污水处理厂处理后排放的量, 两者都作为点源污染最终进入自然水体。

(4) 污水处理及回用模块。

污水处理及回用模块主要包括城镇居民生活污水模块和工业污水处理模块。污水处理厂的存在会大大降低污染物进入自然水体的风险, 且经处理的污水可以实现一定程度的重新利用, 增加水资源供给, 本模型也设置了污水回用量。

(5) 水资源模块。

水资源模块预测的总需水量主要包括农业需水量、工业需水量、居民生活需水量和生态需水量四部分。根据成都市的实际情况, 将农业需水量分为灌溉需水量和禽畜养殖需水量; 居民生活需水量分为城镇居民生活需水量和农村居民生活需水量。这样的分类便于数据统计也符合当地的实际情况, 具有可操作性。

(6) 水环境模块。

水环境模块中通过模型模拟成都市 COD 入河总量, 与计算得到的水功能区 COD 水环境容量做比, 分析水环境的纳污状况。其中城镇居民生活和工业排放的 COD 作为点源入河, 农村居民生活、农田径流和禽畜养殖排放的 COD 作为非点源入河。

(7) 水生态模块。

水生态模块通过构造水环境承载限制系数和水资源承载限制系数, 最后取两者的最大值来作为水生态承载限制系数。其中水环境承载限制系数由 COD 入河总量和 COD 水环境容量决定; 水资源承载限制系数由总需水量、水资源总量、水资源开发利用率及污水回用量决定。

3.2.2 模型主要变量参数及方程式

根据前人对水生态承载力的定义和两条研究主线, 本模型主要通过三个系数: 水环境承载限制系数、水资源承载限制系数和水生态承载限制系数来量化水环境、水资源和水生态的超载状态。其中, 水环境承载限制系数作为一个比值变量, 首先计算 COD 入河总量与 COD 水环境容量的差值, 然后用差值与 COD 水环境容量的比值来描述水环境的承载能力, 当其比值大于 0 时, 说明水环境已处于超载状态; 水资源承载限制系数也为比值变量, 首先计算总需水量与可供水量的差值, 然后用差值与可供水量的比值来描述水资源的承载能力, 当其值大于 0 时, 说明水资源已处于超载状态; 最后综合前两个系数的最大值, 得水生态承载限制系数来描述水生态承载力超载状态。承载限制系数的值越大, 其反映的水环境、水资源和水生态的超载状态越严重。主要变量参数及方程式见表 1。

表 1 成都市水生态承载力 SD 模型主要变量参数及方程式

Tab.1 The main variable parameters and equations in SD model of water ecological carrying capacity in Chengdu City

序号	名称	方程	结果说明
1	总需水量	工业需水量+ 农业需水量+ 居民生活需水量 + 生态需水量	生态需水指河道外生态需水, 不包括河道内生态需水。
2	可供水量	水资源总量× 水资源开发利用率+ 污水回用量	水资源开发利用率是指流域或区域用水量占水资源总量的比率, 体现的是水资源开发利用的程度。国际上公认的水资源开发利用率合理限度为 40%~ 50%, 超过了该限度, 就会出现水资源短缺和生态恶化等一系列问题 ^[28] 。本文以 40% 为限, 同时考虑污水回用来计算可供水量。
3	COD 入河总量	点源 COD 入河总量+ 非点源 COD 入河总量	
4	水环境承载限制系数	IF THEN ELSE (COD 入河总量 > COD 水环境容量, (COD 入河总量- COD 水环境容量) / COD 水环境容量, 0)	若 COD 入河总量 > COD 水环境容量, 水环境承载限制系数 = (COD 入河总量 - COD 水环境容量) / COD 水环境容量; 否则, 水环境承载限制系数 = 0
5	水资源承载限制系数	IF THEN ELSE (总需水量 > 可供水量, (总需水量 - 可供水量) / 可供水量, 0)	若总需水量 > 可供水量, 水资源承载限制系数 = (总需水量 - 可供水量) / 可供水量; 否则, 水资源承载限制系数 = 0
6	水生态承载限制系数	MAX(水环境承载限制系数, 水资源承载限制系数)	若水环境承载限制系数 ≥ 水资源承载限制系数, 水生态承载限制系数 = 水环境承载限制系数; 否则, 水生态承载限制系数 = 水资源承载限制系数。

3.3 系统流图的构建

通过分析各子系统之间的联系和系统中各因素

之间的反馈关系, 本文运用系统动力学专用建模软件 Vensim 建立了以成都市水生态承载力系统耦合

关系图(图 1)为基础的成都市水生态承载力 SD 模型。模型系统总流图见图 2。



图 2 成都市水生态承载力 SD 模型系统流图

Fig. 2 System flow chart of SD model of Chengdu water ecological carrying capacity

3.4 模型参数的选取

系统动力学模型的行为模式与结果主要取决于模型结构,即反馈模型的行为对参数的变化是不敏

感的,模型对参数的准确度满足模型要求即可^[29]。本文选取的主要参数变量的数值均取自“材料与方

表 2 成都市水生态承载力 SD 模型主要变量初始值

Tab. 2 Initial value of main variables in SD model of Chengdu water ecological carrying capacity

变量名称	初始值	变量名称	初始值
人口数量/万人	1 404.8	城镇居民生活 COD 人均产污系数/(g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	80
水稻种植面积/hm ²	214 160	农村居民生活 COD 人均产污系数/(g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	60
其他粮食作物种植面积/hm ²	233 810	生猪 COD 产污系数(g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)	50
油菜种植面积/hm ²	111 860	集约化养殖生猪 COD 产污系数(g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)	17.9
蔬菜种植面积/hm ²	166 370	农田单位面积 COD 排放量/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	150
水果种植面积/hm ²	104 400	污水处理率(%)	80
农作物有效灌溉面积/hm ²	320 300	工业用水重复利用率(%)	80
禽畜养殖总量(折合成猪)/万头	2 052.32	污水回用率(%)	0
工业 GDP 总量/亿元	2 062.82	灌溉水利用系数	0.47
城市化率(%)	65.51	城镇居民生活污水排放系数	0.9
城镇居民生活用水定额/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	340	工业污水排污系数	0.8
农村居民生活用水定额/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	150	城镇居民生活 COD 入河系数	1
生猪用水定额/(L·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)	30	工业 COD 入河系数	1
水稻单位面积用水定额/(m ³ ·hm ⁻²)	4 350	农村居民生活 COD 入河系数	0.15
其他粮食作物单位面积用水定额/(m ³ ·hm ⁻²)	675	禽畜养殖 COD 入河系数	0.23
油菜单位面积用水定额/(m ³ ·hm ⁻²)	900	农田径流 COD 入河系数	0.2
蔬菜单位面积用水定额/(m ³ ·hm ⁻²)	1 800	水资源总量/亿 m ³	81.72
水果单位面积用水定额/(m ³ ·hm ⁻²)	825	COD 水环境容量/t	118 178
工业万元 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	58	水资源开发利用率(%)	40
工业污水直排 COD 平均浓度/(mg·L ⁻¹)	150	污水处理厂 COD 平均出水浓度/(mg·L ⁻¹)	60

4 成都市水生态承载力的有效性检验

本文对成都市水生态承载力 SD 模型进行有效性检验采用的是历史性检验^[29],将 2010 年-2013 年的相关数据输入模型,将模拟的仿真结果与历史数据对比,验证其吻合度。

由于模型结构较为复杂,参数较多,本文仅对 2010 年-2013 年的人口数、总需水量、工业需水量、COD 入河总量的预测结果进行历史验证,结果见表 3。

表 3 成都市水生态承载力 SD 模型历史检验结果

Tab. 3 Historical inspection results in SD model of Chengdu water ecological carrying capacity

时间	总人口数			工业需水量		
	实际值 /万人	模拟值 /万人	误差 (%)	实际值 /万人	模拟值 /万人	误差 (%)
2010	1404.80	1404.80	0.000	11.96	11.96	0.000
2011	1407.80	1407.80	0.000	12.49	12.49	0.000
2012	1417.78	1417.79	-0.001	12.44	12.35	0.723
2013	1429.76	1429.77	-0.001	11.60	11.60	0.000

时间	总需水量			COD 入河总量		
	实际值 /万人	模拟值 /万人	误差 (%)	实际值 /万人	模拟值 /万人	误差 (%)
2010	52.42	55.36	-3.23	215815	204798	5.105
2011	49.35	54.99	-8.76	209616	203018	3.148
2012	52.41	53.77	-0.28	198379	189093	4.681
2013	52.91	52.61	2.79	189930	185430	2.369

由误差值分析可知,除 2011 年总需水量和 2010 年 COD 入河总量模拟值误差略大于 5%,其余模拟值误差都低于 5%,模拟结果与历史数据基本吻合,因此认为模型模拟结果与实际数据拟合较好,模型结构合理,可信度较高。

5 成都市水生态承载力模型情景设计与分析

情景分析法^[30-31]是一种以某种趋势和现象将一直持续为前提,通过定性和定量的分析,对事件可能出现的情况作出预测的方法。在研究成都市水生态承载力的过程中,运用情景分析法提出不同的情景方案,在不同的情景模式下,对水生态承载力进行预测分析,选择出最为有效缓解承载力的情景方案。

5.1 决策变量的选取

参考相关研究^[32-35],选取万元工业增加值用水量、工业用水重复利用率、污水处理率、污水回用率、灌溉水利用系数、禽畜集约化养殖比例、城镇居民

活用水量、农村居民生活用水量、工业污水直排 COD 平均浓度、污水处理厂 COD 平均出水浓度、城镇居民生活人均 COD 产污系数、农村居民生活人均 COD 产污系数、农田单位面积 COD 排放量作为决策变量。

为综合反映成都市水生态承载力状况,选取总需水量、COD 入河总量、水环境承载限制系数、水资源承载限制系数、水生态承载限制系数作为评价模型的主要指标。

5.2 情景设计

(1) 现状延续型。假定从 2013 年至 2020 年,工业用水重复利用率、污水处理率、污水回用率、禽畜集约化养殖比例、灌溉水利用系数、城市居民生活用水量定额和农村居民生活用水量定额按照现在的增长趋势线性增加,即每年分别增加 1%、0.5%、2%、2%、0.005、12 L/(人·d)、3 L/(人·d),则到 2020 年底,工业用水重复利用率达到 90%、污水处理率达到 85%、污水回用率达到 20%、禽畜集约化养殖比例达到 60%、灌溉水利用系数提高到 0.52、城市居民生活用水量定额提高至 450 L/(人·d)、农村居民生活用水量定额提高至 180 L/(人·d)。根据相关工作方案和最严水资源管理制度^[36-37],到 2020 年,工业用水方面逐渐降低万元工业增加值用水量降至 2013 年的 70%。

(2) 节约水量型。为保证水资源的可持续利用,大力推行节约用水、循环用水和污水回用。根据相关规划、工作方案及最严水资源管理制度^[36-39],到 2017 年,全市农业灌溉水有效利用系数达到 0.535;到 2020 年,农田灌溉水有效利用系数达到 0.56 以上的要求来制定节约用水方案。即从 2014 年开始到 2020 年底,居民生活用水量方面逐步消减至 2013 年的 80%,工业用水方面逐渐降低万元工业增加值用水量至 2013 年的 50%,工业用水重复利用率逐渐提高至 95%,灌溉水利用系数提高至 0.56,污水回用率逐步提高至 40%。

(3) 污染防治型。为保证水环境的可持续发展,提高水环境对外界干扰的抵抗力和水体的自净能力,通过降低产污系数和提高污水处理率来提高水环境质量。根据相关工作方案及国家标准^[21,36],2020 年底前,新建城镇污水处理设施执行一级 A 排放标准,中心城区、郊区(市)县城市、乡镇污水集中处理率分别达到 98%、88%、75% 以上,推进农业农村污染防治和控制农业面源污染的基础上制定详细的污染防治方案。即工业污水直排 COD 平均浓度从 2014 年起由 150 mg/L 降为 100 mg/L,污水

处理厂 COD 平均出水浓度由 60 mg/L 降为 50 mg/L。从 2014 年开始到 2020 年底,居民生活 COD 人均产污系数和农村居民 COD 人均产污系数逐年消减至基准年的 80%,农田单位面积 COD 排放量逐年消减至基准年的 70%,污水处理率逐年提高到 90%,禽畜集约化养殖比例逐年提高到 80%。

(4) 综合协调型。综合协调型即在同时考虑节约用水和污染防治的基础上进行情景模拟。具体方案为:工业污水直排 COD 平均浓度从 2014 年起由 150 mg/L 降为 100 mg/L,污水处理厂 COD 平均出水浓度由 60 mg/L 降为 50 mg/L。从 2014 年开始到 2020 年底,居民生活用水定额方面逐步消减至 2013 年的 80%,工业用水方面逐渐降低万元工业增加值用水量至 2013 年的 50%,工业用水重复利用率逐渐提高至 95%,灌溉水利用系数提高至 0.56,污水回用率逐步提高至 40%。居民生活 COD 人均产污系数和农村居民 COD 人均产污系数逐年消减至基准年的 80%,农田单位面积 COD 排放量逐年消减至基准年的 70%,污水处理率逐年提高到 90%,禽畜集约化养殖比例逐年提高到 80%。

5.3 结果分析与讨论

按照情景设计进行参数调整,运行成都市水生态承载力 SD 模型,模拟结果见图 3- 图 7。

(1) 总需水量模拟结果(图 3)中,现状延续型和污染防治型总需水量逐年上升,综合协调型和节约用水型总需水量逐年下降,且现状延续型与污染防治型上升速度一致,综合协调型与节约用水型下降速度一致。节约用水型的情景模拟,2020 年总需水量降低到 48.39 亿 m³,与 2013 年相比下降了 8%,说明本情景中对居民生活用水、工业用水重复率、污水回用率、灌溉水有效利用系数的调整对总需水量的影响较大。

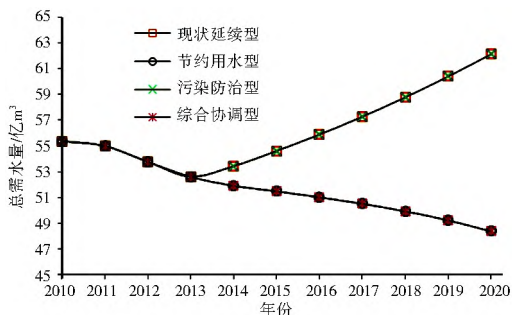


图 3 总需水量模拟结果

Fig. 3 Simulation results of total water demand

(2) COD 入河总量模拟结果(图 4)中,综合协调型 < 污染防治型 < 节约用水型 < 现状延续型,在情景模拟中,污染防治型 COD 入河总量与 2013 年

相比下降了 11.71%,节约用水型下降了 4.12%,而将两种情景综合协调后,COD 入河总量下降了 29.04%,远远大于两者的加和。以上三种情景说明,污染防治型比节约用水型对减少 COD 入河总量效果更好,但是,如果将两者综合,对减少 COD 的入河总量的控制将会达到最佳。

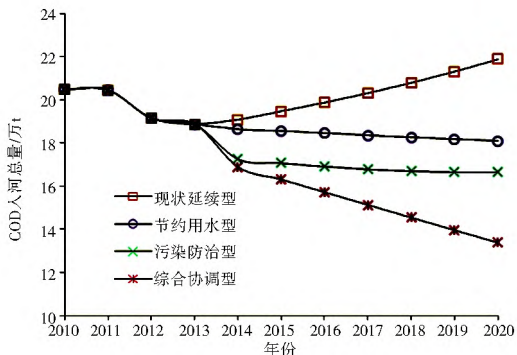


图 4 COD 入河总量模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the total amount of COD into the river

(3) 水资源承载限制系数模拟结果(图 5)中,综合协调型 < 节约用水型 < 污染防治型 < 现状延续型,且综合协调型和节约用水型的水资源承载限制系数自 2013 年以来逐年变小,说明在这两种情景下,水资源的超载状态逐渐好转;而污染防治型和现状延续型的水资源承载系数自 2013 年以来逐年变大,说明在这两种情景下,水资源的超载状态开始逐渐加剧。加剧原因主要在于居民总人口和工业 GDP 的快速增长,带来的总需水量的快速增长,缓解这种情景的最有效的方法就是控制居民生活用水定额和通过改进生产工艺来进一步减低万元工业增加值的用水量。

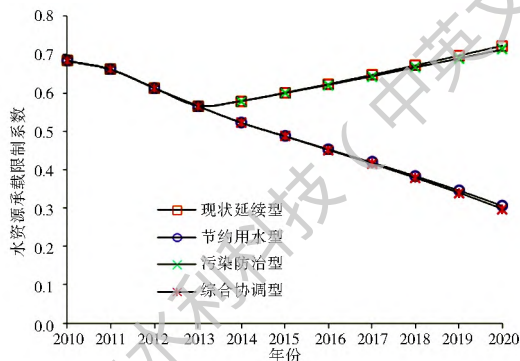


图 5 水资源承载限制系数模拟结果

Fig. 5 Simulation results of limit coefficient of water resources carrying capacity

(4) 水环境承载限制系数模拟结果(图 6)中,综合协调型 < 污染防治型 < 节约用水型 < 现状延续型,其中除了现状延续型,其他三种情景的水环境承载系数自 2013 年以来逐年变小,说明成都市的水环

境现状在这三种情境下会逐年变好。通过曲线可以看出,节约用水型情境下,曲线的下降速率最小;综合协调型情境下,曲线的下降速率最大;污染防治型情境下,曲线的下降速率居中。到2020年,节约用水型情境下的水环境承载限制系数为0.53,污染防治型情境下的水环境承载限制系数为0.41,综合协调型情境下的水环境承载限制系数为0.13,说明了只有通过节约用水和污染防治的综合协调,才能使水环境的质量得到更好的改善。

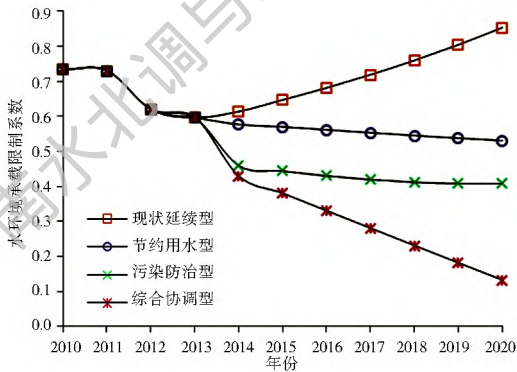


图6 水环境承载限制系数模拟结果

Fig. 6 Simulation results of limit coefficient of water environment carrying capacity

(5) 水生态承载限制系数模拟结果曲线(图7)是水资源承载限制系数和水环境承载限制系数综合后的一条曲线,该曲线反映出了水生态的两个方面水资源与水环境。在该曲线中,综合协调型<节约用水型<污染防治型<现状延续型,同时在污染防治型和现状延续型情景下,水生态承载限制系数逐年变大,说明节约用水才是影响水生态承载力的主要因素。比较节约用水型和综合协调型曲线的下降速率,发现节约用水型下降速率远远小于综合协调型,更进一步说明了 $1+1>2$ 这种现象在科研和生活中的普遍性,只有通过节约用水和污染防治的综合协调,才能使水生态的质量得到更快的改善,满足水生态可持续发展的目标。

由模拟结果可知,从2014年-2020年,成都市的水生态承载力在四种情景下由大到小的顺序为:综合协调型,节约用水型,污染防治型,现状延续型。若成都市按当前的现状发展,其水生态承载力将越来越弱,最终可能造成生态严重破坏和经济巨大损失;当单独考虑污染防治或者节约用水时,得到的水生态承载限制年变化曲线减小速率较慢;若同时考虑污染防治和节约用水,就可以得到减小速率较快的水生态承载限制系数年变化曲线,到2020年的水生态承载限制系数与节约用水型情景相比,将降至节约用水型的一半。因此,污染防治与节约用水相结合,是提高成都市水生态承载力的关键。

6 结论

根据系统动力学方法建立了成都市水生态承载力模型,以图形的形式直观的反映出4种不同情景下的总需水量、COD入河总量、水环境承载限制系数、水资源承载限制系数、水生态承载限制系数随时间的变化趋势。模拟结果可为成都市的社会经济和资源环境协调发展提供较为有价值的技术依据。

与前人在水生态承载力方面的研究相比,本文给出了影响水生态承载力主要因素的计算结果,同时提出的水生态承载系数可更加综合、精确地反映承载力的大小,使不同地区的水生态承载力具有了可比性,有利于模型的推广和使用。建议在以后的研究中考虑水环境容量的历年变化情况,以期获得更为准确、客观的成果。

参考文献(References):

- [1] 陈国卫, 金家善, 耿俊豹. 系统动力学应用研究综述[J]. 控制工程, 2012(6): 921-928. (CHEN Guo wei, JIN Jia shan, GENG Jun bao. Application research overview of system dynamics [J]. Control Engineering of China, 2012, (6): 921-928. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-7848.2012.06.001
- [2] 钟永光, 贾晓箐, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (ZHONG Yong guang, JIA Xiao qing, QIAN Ying, et al. System dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [3] 柴淼瑞. 基于SD模型的流域水生态承载力研究—以铁岭控制单元为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014. (CHAI Miao rui. Research of carrying capacity of water ecological based on the sd model: illustrated by the tieling control unit [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese))
- [4] 李靖, 周孝德. 叶尔羌河流域水生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 2009(3): 249-255. (LI Jing, ZHOU Xiao de. Research on water ecological carrying capacity of Yarkant river basin [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009

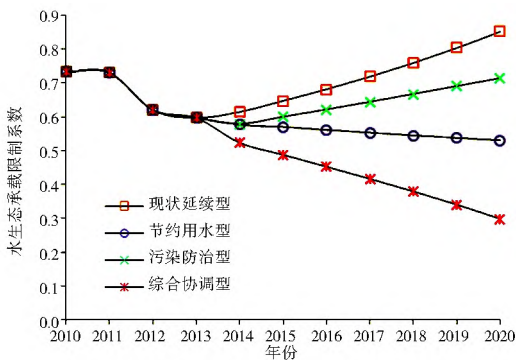


图7 水生态承载限制系数模拟结果

Fig. 7 Simulation results of limit coefficient of water ecological carrying capacity

- (3): 249-255. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.2009.03.001
- [5] 彭文启. 流域水生态承载力理论与优化调控模型方法[J]. 中国工程科学, 2013(3): 33-43. (PENG Wenqi. Watershed water ecological carrying capacity and optimizing regulation model [J]. Engineering Science in China, 2013(3): 33-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.03.007
- [6] 薛小妮, 甘泓, 游进军, 等. 成都市水资源及水环境承载力分析[J]. 水利水电技术, 2012(4): 14-18. (XUE Xiaoni, GAN Hong, YOU Jinjun, et al. Study on water resources and water environmental carrying capacities of Chengdu [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012(4): 14-18. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2012.04.004
- [7] 陈琳, 邹添丞, 石杰, 等. 基于层次分析法的成都市水安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 44-45. (CHEN Lin, ZOU Tiancheng, SHI Jie, et al. Water security assessment of Chengdu City based on analytic hierarchy process [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 44-45. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.04041
- [8] 欧洋铭, 白若男, 朱国宇. 成都市水资源承载力动态变化及成因[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 110-114. (OU Yangming, BAI Ruonan, ZHU Guoyu. Dynamic variation of water resources carrying capacity and its causes in Chengdu [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 110-114. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.06110
- [9] 苏敏. 基于主成分分析法的水资源承载力影响因素分析——以成都市为例[J]. 科技与生活, 2012(19): 218-219. (SU Min. Analysis of water resources carrying capacity based on principal component analysis of factors: a case study of Chengdu City [J]. Technology and Living, 2012(19): 218-219. (in Chinese))
- [10] 成都市地方志编纂委员会. 成都年鉴[Z]. 成都: 成都年鉴社, 2006-2013. (Chengdu Local Chronicles Compilation Committee. Chengdu yearbook [Z]. Chengdu: Chengdu Yearbook Press, 2006-2013. (in Chinese))
- [11] 成都市统计局, 国家统计局成都调查队. 2015年成都市国民经济和社会发展统计公报[Z]. 成都: 成都市统计局, 2016. (Statistics Bureau of Chengdu, NBS Survey Office in Chengdu. Statistical bulletin of the national economic and social development of Chengdu city in 2015 [Z]. Chengdu: Statistics Bureau of Chengdu, 2016. (in Chinese))
- [12] 成都市水务局. 成都市水资源公报[Z]. 成都: 成都市水务局, 2004-2013. (Chengdu Water Authority. Water resources bulletin of Chengdu [R]. Chengdu: Chengdu Water Authority, 2004-2013. (in Chinese))
- [13] 成都市环保局. 2015年成都市总量减排工作计划[Z]. 成都: 成都市环保局, 2015. (Environment Protection Bureau of Chengdu. Total emission reduction work plan of Chengdu City in 2015 [Z]. Chengdu: Environment Protection Bureau of Chengdu, 2015. (in Chinese))
- [14] 蒋伟, 柴夏, 颜飞. 成都地区水质调查与富营养化评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6): 370-372. (JIANG Wei, CHAI Xia, YAN Fei. Water quality surveys in Chengdu and eutrophication [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(6): 370-372. (in Chinese))
- [15] 崔宁, 梁冬梅, 苏伟. 水环境承载力量化方法述评[J]. 吉林水利, 2009(11): 45-47. (CUI Ning, LIANG Dongmei, SU Wei. Review on the methods of water environment carrying capacity [J]. Jilin Water Resources, 2009(11): 45-47. (in Chinese))
- [16] 赵元慧. 铁岭市水环境承载力研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012. (ZHAO Yuanhui. Research on water environment carrying capacity of Tieling [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012. (in Chinese))
- [17] 四川省统计局, 国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2014. (Statistics Bureau of Sichuan, NBS Survey Office in Sichuan. Sichuan statistical yearbook [Z]. Beijing: China Statistics Press, 2004-2014. (in Chinese))
- [18] 成都市统计局, 国家统计局成都调查队, 成都市统计学会. 成都统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2003-2013. (Statistics Bureau of Chengdu, NBS Survey Office in Chengdu, Statistical Society of Chengdu. Chengdu statistical yearbook [Z]. Beijing: China Statistics Press, 2003-2013. (in Chinese))
- [19] 四川省水利科学研究院. 四川省用水定额(修订稿)[Z]. 成都: 四川省水利厅, 2010. (Sichuan Academy of Water Conservancy. Water quota of Sichuan Province (revised draft) [Z]. Chengdu: Sichuan Provincial Water Resources Department, 2010. (in Chinese))
- [20] 环境保护部环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[Z]. 北京: 环境保护部环境规划院, 2003. (Chinese Academy for Environmental Planning. National water environmental capacity verification manual [Z]. Beijing: Chinese Academy for Environmental Planning, 2003. (in Chinese))
- [21] GB8978-1996, 污水综合排放标准[S]. (GB8978-1996, Integrated standard for waste water discharge [S]. (in Chinese))
- [22] 钱俊, 杨姗姗, 肖杰, 等. 四川省生活污水产污系数研究[J]. 四川环境, 2009(1): 27-32. (QIAN Jun, YANG Shanshan, XIAO Jie, et al. Study on pollutant rate in Sichuan Province [J]. Sichuan Environment, 2009(1): 27-32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3644.2009.01.009
- [23] 杨立梦, 付永胜, 高红涛. 四川省茫溪河流域非点源污染负荷研究[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2014(11): 57-63. (YANG Limeng, FU Yongsheng, GAO Hongtao. Study on non point source pollution of Mangxi River Basin in Sichuan Province [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2014(11): 57-63. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2014.11.012
- [24] 冯猛, 邱忠平, 白磊磊, 等. 四川省规模化畜禽养殖污染防治现状[J]. 畜牧与饲料科学, 2010(3): 107-108. (FENG Meng, QIU Zhongping, BAI Leilei, et al. Pollution prevention and control of large scale livestock and poultry production in current Sichuan Province [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2010(3): 107-108. (in Chinese)) DOI: 10.1672-5190.2010.03.047
- [25] 方国华, 于凤存, 曹永满. 中国水环境容量研究概述[J]. 安徽

- 农业科学, 2007(27): 860F-8602. (FA NG Guo hua, YU Feng cun, CAO Yong xiao. Review of water environment capacity in China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007(27): 860F-8602. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2007. 27. 090
- [26] 刘晓臣, 李小平, 陈小华, 等. SD模型在洱海流域营养物消减策略研究中的应用[J]. 湖泊科学, 2013(5): 655-664. (LIU Xiaochen, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua, et al. Reduction strategies for TN and TP based on system dynamics model (SD) in Lake Erhai [J]. Journal of Lake Sciences, 2013(5): 655-664. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2013. 0506
- [27] 郑富玲. 银川市再生水回用SD模型的构建[D]. 银川: 宁夏大学, 2015. (ZHENG Fuling. The construction of SD model for reclaimed water reuse in Yinchuan City [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015. (in Chinese))
- [28] 曾肇京, 石海峰. 中国水资源利用发展趋势合理性分析[J]. 中国水利, 2000(8): 45-48. (ZENG Zhaojing, SHI Haifeng. Rationality analysis of development and utilization trend of water resources in China [J]. China Water Resources, 2000(8): 45-48. (in Chinese))
- [29] 肖悦. 基于SD模型的区域水资源承载力研究—以黄石港工业园区为例[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012. (XIAO Yue. Regional water resources carrying capacity based on SD model of Huangshi Port Industrial Park [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology. (in Chinese))
- [30] 刘俏. 情景分析法在城市规划区域污染物排放总量中的预测研究—以安庆市为例[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. (LIU Qiao. Research on the prediction of the total discharge of pollutants of urban planning based on scenario analysis: the case study of Anqing City [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [31] 李玮, 秦大庸, 褚俊英, 等. 基于情景分析法的污染物排放趋势研究[J]. 水电能源科学, 2010(5): 36-39. (LI Wei, QIN Dayong, ZHU Junying, et al. Study on pollutant emission trend based on scenario analysis [J]. Water Resources and Power, 2010(5): 36-39. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2010. 05. 011
- [32] 罗宇, 姚帮松. 基于SD模型的长沙市水资源承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(1): 42-46. (LUO Yu, YAO Bangsong. The water resources carrying capacity based on SD model in Changsha [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(1): 42-46. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2015. 01. 012
- [33] 冯海燕, 张昕, 李光永, 等. 北京市水资源承载力系统动力学模拟[J]. 中国农业大学学报, 2006(6): 106-110. (FENG Haiyan, ZHANG Xin, LI Guangyong, et al. A system dynamic model and simulation for water resources carrying capacity in Beijing [J]. Journal of China Agricultural University, 2006(6): 106-110. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-4333. 2006. 06. 021
- [34] 陈雪. SD模型在阿什河流域水污染控制规划中的应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010. (CHEN Xue. The appliance of SD model in the pollution control planning of A shi River Basin [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010. (in Chinese))
- [35] 刘晓玉. 水生态承载力政策设计与政策效率的系统仿真—以赣江流域水生态承载力为例[D]. 南昌: 南昌大学, 2011. (LIU Xiaoyu. System simulation of the policy design and efficiency for the water ecology carrying capacity: taking the water ecology carrying capacity of Gan River Basin for example [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011. (in Chinese))
- [36] 成都市人民政府. 成都市水污染防治工作方案[Z]. 成都: 成都市人民政府, 2016. (People's Government of Chengdu. Scheme of water pollution prevention and control in Chengdu City [Z]. Chengdu: People's Government of Chengdu, 2016. (in Chinese))
- [37] 成都市人民政府. 成都市人民政府办公厅关于实行最严格水资源管理制度考核方法的通知[Z]. 成都: 成都市人民政府, 2014. (People's Government of Chengdu. Notice to implement the most stringent water management system assessment in Chengdu City [Z]. Chengdu: People's Government of Chengdu, 2014. (in Chinese))
- [38] 成都市人民政府. 成都市水务发展“十二五”规划[Z]. 成都: 成都市人民政府, 2012. (People's Government of Chengdu. The 12th five year plan of water development in Chengdu City [Z]. Chengdu: People's Government of Chengdu, 2012. (in Chinese))
- [39] 成都市人民政府. 成都市循环经济发展“十二五”规划[Z]. 成都: 成都市人民政府, 2012. (People's Government of Chengdu. The 12th five year plan of circular economy development in Chengdu City [Z]. Chengdu: People's Government of Chengdu, 2012. (in Chinese))