

水资源刚性约束下新余市水资源承载力系统动力学仿真分析

肖洁^{1,2}, 温天福^{1,3,4}, 蔡付林², 刘鑫^{1,3,4}

(1. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210024; 3. 水利部鄱阳湖水资源水生态环境研究中心, 江西 南昌 330029; 4. 江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 江西 南昌 330029)

摘要: 加强水资源刚性约束可有效提升区域水资源对社会经济的支撑能力。以新余市为例, 充分考虑工业产业特色, 建立面向水资源刚性约束要求的系统动力学仿真模型, 预测 2020-2035 年现状延续型、经济发展型、资源节约型和刚性约束型 4 种方案下当地水资源承载力变化。结果表明: 在落实水资源刚性约束制度下, 刚性约束型方案更注重工业用水的高效利用, 尤其是钢铁、光伏等高污染、高耗水等工业。该方案下 2035 年水资源供需比 β_{2035} 为 1.03, COD 污染比 α_{2035}^1 和氨氮污染比 α_{2035}^2 均大于 1, 可承载总人口数为 130.2×10^4 , 可承载 GDP 规模为 $5\,578.6 \times 10^8$ 元。本文运用系统动力学模型, 同时考虑用水效率高效利用和社会经济合理发展的刚性约束型方案, 可获得区域水资源供需平衡并达到较大的承载能力, 以为新余市有效落实水资源刚性约束制度提供技术支撑。

关键词: 水资源承载力; 系统动力学; 水资源刚性约束; 仿真分析; 新余市

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0062-10

System dynamics simulation analysis of water resources carrying capacity in Xinyu City under the rigid constraint of water resources

XIAO Jie^{1,2}, WEN Tianfu^{1,3,4}, CAI Fulin², LIU Xin^{1,3,4}

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Research Center for Water Resources and Ecological Environment of Poyang Lake, Ministry of Water Resources, Nanchang 330029, China; 4. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Nanchang 330029, China)

Abstract: Strengthening the rigid constraint of water resources can effectively improve the performance of water resources in the regional socio-economic development. Taking Xinyu City as an example, a system dynamics simulation model for the rigid constraint requirements of water resources is established considering local industrial characteristics, then it is used to predict the changing process of local water resources carrying capacity from 2020 to 2035 under four schemes (i. e. the current situation, the economic development, the resource conservation, the rigid constraint). The results show that, under the scheme of rigid constraint of water resources, the efficient water utilization of industries are emphasized, especially industries with high water pollution and consumption such as steel and photovoltaic, and the supply - demand ratio of water resources will be 1.03 in 2035, while the pollution ratio of both COD and ammonia nitrogen will be greater than 1. By 2035, the carrying capacity of total population and GDP in Xinyu City can reach 1.302×10^6 and 557.86×10^9 yuan, respectively. In this paper, with the help of the system dynamics model, the rigid constraint scheme which considers the water efficiency and socio-economic development can realize the balance between regional water supply and demand with maximized carrying capacity of water resources. This study aims to provide an effective support for the implementation of the

收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169001); 江西省水利科技项目(201821ZDKT07)

作者简介: 肖洁(1997-), 女, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

通讯作者: 温天福(1981-), 男, 江西吉安人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面研究。

rigid constraint of water resources in Xinyu City.

Key words: water resources carrying capacity; system dynamics; rigid constraint of water resources; simulation analysis; Xinyu City

1 研究背景

水资源作为社会经济发展过程中的刚性约束性指标,可有效引导区域发展规模、产业结构的优化调整,使得当地经济社会与水资源相适应^[1]。江西省提出“十四五”期间以水资源刚性约束为引领,全面提升水资源利用效率,促进全省经济社会高质量发展^[2]。新余市作为江西省境内工业发展程度较高的城市,目前人口增长和经济发展较快,用水需求增长较多,同时存在着污染物排放量即将超载、季节性供水不足、用水效率不高等问题^[3]。以新余市为例,分析水资源刚性约束下的社会经济发展方式,可进一步对比不同发展方式下水资源可承载当地社会经济能力的变化。

水资源承载力是在一定的社会经济发展水平下区域水资源支撑社会经济发展的最大规模^[4]。而系统动力学方法可全面刻画社会经济复杂的系统行为和关系,实现对水资源承载状况的定量和定性的仿真模拟^[5],常用于分析区域水资源承载力^[6]。国外学者在建立系统动力学模型方面做了大量研究,Chhipi - Shrestha 等^[7]利用系统动力学的方法,建立了城市水系统的水-能-碳(water-energy-carbon, WEC)综合关联模型,使得区域实现较好的水资源规划和管理。Furrer 等^[8]主要考虑气候变化和极端天气等影响因素对系统动力学模型模拟结果进行了分析,得出决策者需重视这种快速变化的现象造成的破坏。Huang 等^[9]对台北市某农场建立了农业水资源承载力模型,对气候变化如何影响种物的收成进行了研究。1989年国内学者阮本清等^[10]首次在建立的社会经济-水资源系统动力学模型中得到了其可支撑的社会经济规模和人口载量。杨子江等^[11]综合考虑污水再生利用、外地供水的影响因素建立了系统动力学模型,得出协调发展方案可实现昆明市水资源的供需平衡。刘夏等^[12]重点考虑农业节水与产业转型等因素建立了水资源承载力模型,指出发展农业节水设施建设规模和灌溉技术等措施。陈文婷等^[13]构建了包括17个细化工业类型在内的水资源承载力模型,得出发展高新产业和服务业,并抑制高耗水、重污染的产业发展规模可使社会经济、环境协调发展。

目前水资源承载力的研究主要集中在北方及西北地区,指标选取综合考虑非常规水源利用、城镇化

率、建筑业、旅游业等兼顾区域特性^[14-16],内容侧重于水资源可利用量和水资源承载力评价^[17-20],结合水资源刚性约束制度且充分考虑当地社会经济发展特点的相关研究较少。本文根据新余市社会经济发展的特点,以区域可供水量、行业用水效率、入河湖污水排放量3个方面量化为最大的刚性约束要求,构建水资源刚性约束下的系统动力学仿真模型,设置并模拟现状延续型、经济发展型、资源节约型和刚性约束型4种方案下2020-2035年新余市水资源承载力的变化,分析现状水资源利用和管理中存在的问题,可为新余市水资源刚性约束制度的落实提供科学参考,对于新余市社会经济的高质量发展具有重要的现实意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

新余市是位于江西省中部偏西的新兴工业城市,是长江中游城市群的重要成员,市域总面积为3 178 km²。2019年新余市总人口为119.34 × 10⁴,城镇化率为70.08%,全市人均GDP为81 642元,位列江西省第2。新余市的经济主要以工业为主,新余市在“十四五”规划以及2021年的工作报告中,推进钢铁产业和锂电产业为优先发展的两大经济产业,同时加强光伏产业和麻纺布产业以及其他两大产业的结构升级。

新余市属于亚热带湿润性气候,四季分明,气候温和。全年平均气温为17.7℃,年平均降雨量为1 583.1 mm,多年平均地表水资源量为29.24 × 10⁸ m³。人均水资源量为2 200 m³,为全省人均值的60%左右。袁河是流经新余市的主要河流,为赣江一级支流,横贯东西,全市境内河段长度为116.9 km。新余市水系图见图1。

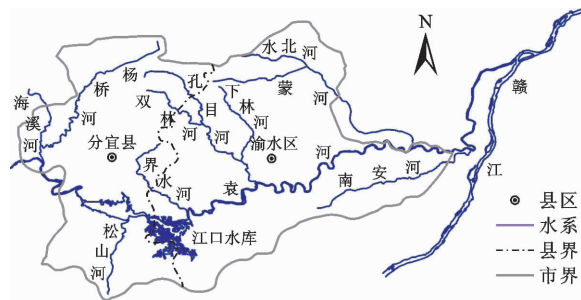


图1 新余市水系图

2.2 数据来源

社会经济数据来源于《新余统计年鉴(2015-2019年)》《新余市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》。水资源统计数据来源于《新余市水资源公报(2015-2019年)》《新余市“十三五”节能减排综合方案》(余府发[2017]19号)、《江西省“十四五”节水型社会建设规划》(江西省水利厅,2021年)、《新余市水资源管理“三条红线”控制指标(2020年、2030年)》。用水定额数据来源于《江西省工业企业主要产品用水定额》(DB36/T 420—2019)、《江西省生活用水定额》(DB36/T 419—2017)。环保数据来源于《全国第二次污染源普查生活源产排污系数手册 2020》《江西省地表水功能区纳污能力核定和分阶段限制排污总量控制意见》(江西省水利厅,2014年)。

2.3 研究范围与分析时段

本文研究范围为新余市,涉及渝水区和分宜县,模拟时间为2015-2035年,其中2015-2019年为模型率定期,2020-2035年为模拟预测期,模拟时间步长为1 a。

2.4 系统流程图绘制

从水资源供给侧和需求侧出发,充分考虑新余市生活、工业、农业取排水特点,将系统的层次关系划分为社会子系统、经济子系统、水资源子系统、水环境子系统4个子系统,子系统内部以及子系统之间通过数学方程建立层次或者因果关系,描述水资源系统与社会经济系统的互馈耦合关系^[21]。新余市水资源承载力系统动力学仿真模型运用 Vensim PLE 软件来实现,如图2所示。

(1)社会子系统:表现为人口组成和人口规模,由总人口、城镇人口、农村人口、城镇化率等4个主要变量表征。

(2)经济子系统:表现为产业结构和经济规模,2018年钢铁、锂电、光伏、麻纺四大产业增加值大约占新余市规模工业70%的比重,经济子系统由新余市GDP、第一产业增加值、工业增加值、第三产业增加值、钢铁产业增加值、锂电产业增加值、光伏产业增加值、麻纺产业增加值等8个主要变量表征。

(3)水资源子系统:表现为社会经济水资源供需情况,由供水总量、需水总量、居民生活用水量、农业用水量、工业用水量等5个主要变量表征。

(4)水环境子系统:表现为社会经济污染物排放量情况,由居民生活、工业和畜牧业所产生的COD排放量和氨氮排放量等2个主要变量表征。

2.5 模型主要变量和方程

系统动力学模型主要是根据水平变量、速率变量、表函数以及常量变量组成,模型主要涉及70个方程,11个状态变量、速率变量以及15个表函数。主要状态变量为总人口、播种面积、钢铁产量、锂盐产量、多晶硅产量、苧麻布产量、其他规模以上工业增加值、规模以下工业增加值、第三产业产值增加值、建筑业增加值、林牧渔业增加值等11个,其他为辅助变量。模型的主要状态变量初始值见表1,主要方程见表2。

表1 模型主要状态变量初始值

状态变量	初始值
总人口/ 10^4	119.34
播种面积/ 10^4 hm^2	85.50
钢铁产量/ 10^4 t	949.66
多晶硅产量/ 10^4 t	0.96
锂盐产量/ 10^4 t	11.50
苧麻布产量/ 10^8 m	4.56
其他规模以上工业增加值/ 10^8 元	227.30
规模以下工业增加值/ 10^8 元	193.70
第三产业产值增加值/ 10^8 元	514.63
建筑业增加值/ 10^8 元	85.50
林牧渔业增加值/ 10^8 元	32.96

2.6 模型有效性检验

2.6.1 模型检验方法 模型检验方法是将模型的仿真模拟结果与历史数据进行比较,如果模拟结果与实际数据的误差小于10%,则表明模型与实际系统的拟合效果比较理想,即可认为构建的模型和设置的参数可行^[21]。当模型误差不符合要求时,则需要分析误差来源,修正模型中变量的设置,从而使得模型模拟结果接近实际情况。相对误差 δ 计算公式如下:

$$\delta = \frac{x' - x}{x'} \times 100\% \quad (1)$$

式中: x' 为指标模拟值; x 为指标实际值。

2.6.2 模型检验结果 选取总人口数量、工业增加值、生产总值(GDP)、生活需水量、工业用水量、农业用水量6个代表性指标,将这些指标2015-2019年的预测模拟结果与历史数据进行对比(如表3所示),结果中的6个代表性指标预测值和实际值的相对误差均小于10%,其中总人口数量的预测结果最好,最大相对误差未超过1%;工业增加值预测的误差稍大,但也控制在10%以内;其余指标的误差均在5%以内。说明该模型能够反映实际情况,可以满足仿真模拟预测要求。

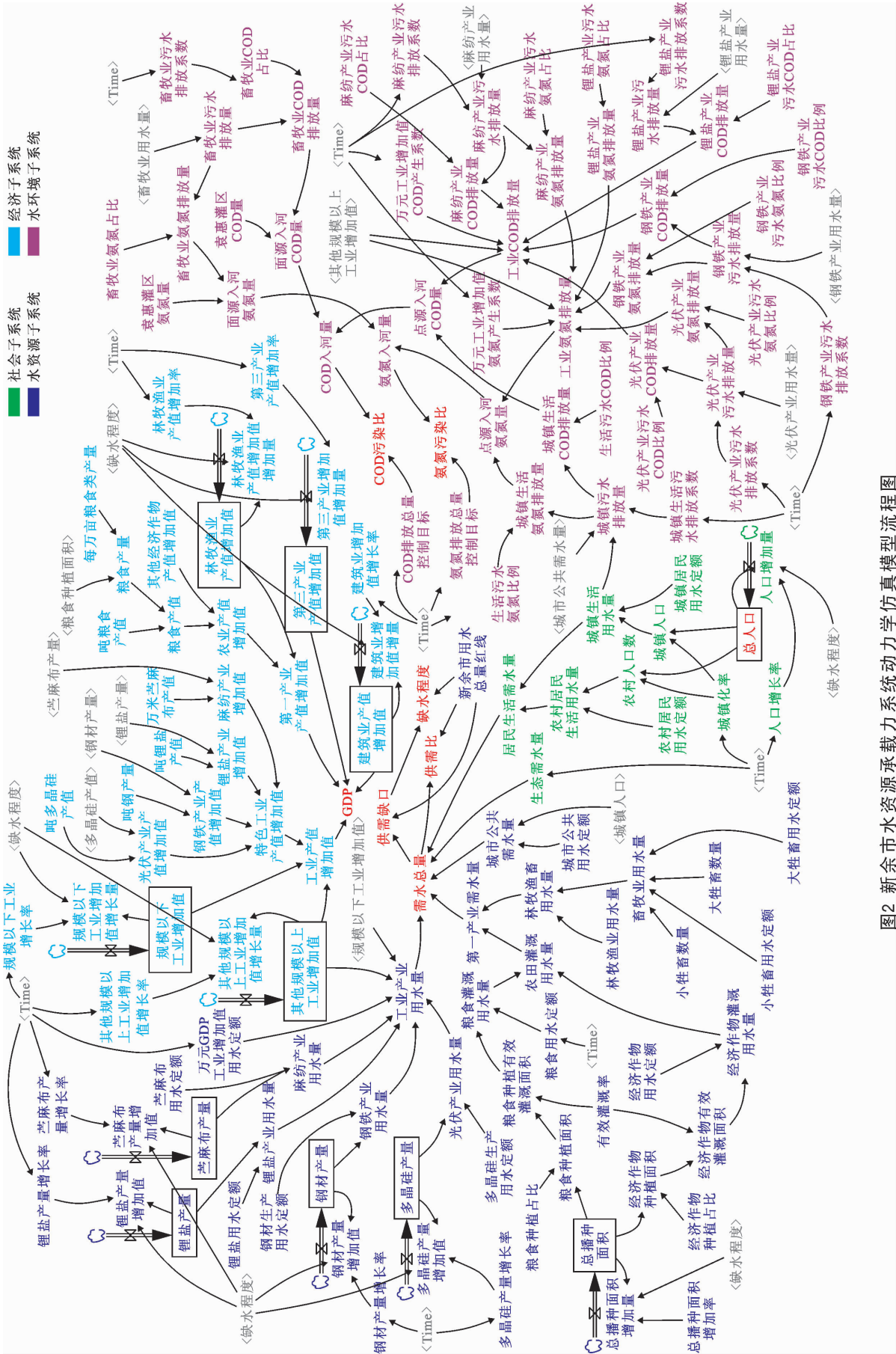


图2 新余市水资源承载力系统动力学仿真模型流程图

表2 系统动力学模型主要方程

变量	类型	方程
总人口/ 10^4	L	人口增长率 \times 上一年总人口数
居民生活需水量/ 10^8 m^3	A	城镇人口 \times 城镇居民用水定额+农村人口 \times 农村居民用水定额
工业需水量/ 10^8 m^3	A	钢铁产业用水量+(其他规模以上工业增加值+规模以下工业增加值) \times 万元GDP工业增加值用水定额/ $10\ 000$ +光伏产业用水量+锂盐产业用水量+麻纺产业用水量
需水总量/ 10^8 m^3	A	居民生活需水量+工业产业用水量+第一产业需水量+城市公共需水量+生态需水量
工业增加值/ 10^8 m^3	A	规模以下工业增加值+其他规模以上工业增加值+特色工业产值增加值
GDP/ 10^8 元	A	第一产业产值增加值+工业产值增加值+第三产业产值增加值+建筑业产值增加值
缺水程度	A	(新余市用水总量红线-需水总量)/新余市用水总量红线
水资源供需比	A	新余市用水总量红线/需水总量
COD污染比	A	COD纳污能力/COD排放量
氨氮污染比	A	氨氮纳污能力/氨氮排放量

注:L类型为状态变量,A类型为辅助变量。

表3 2015-2019年预测模拟结果与历史数据对比

代表性指标		2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
总人口数量/ 10^4	模拟值	116.67	117.37	118.07	118.78	119.38
	实际值	116.67	117.37	118.07	118.67	119.34
	误差/%	0	0	0	0.10	0.03
工业增加值/ 10^8 元	模拟值	460.13	483.82	514.15	580.43	653.12
	实际值	460.13	500.16	543.68	589.34	637.08
	误差/%	0	-3.38	-5.74	-1.54	2.46
GDP/ 10^8 元	模拟值	946.80	1015.24	1088.66	1200.54	1323.00
	实际值	946.80	1028.22	1115.62	1208.22	1300.05
	误差/%	0	-1.28	-2.48	-0.64	1.74
生活需水量/ 10^8 m^3	模拟值	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63
	实际值	0.61	0.63	0.64	0.64	0.64
	误差/%	1.37	-1.06	-1.50	-0.89	-0.36
工业用水量/ 10^8 m^3	模拟值	3.11	2.80	3.08	2.82	3.23
	实际值	3.30	3.05	3.05	2.96	3.11
	误差/%	-5.86	-8.62	1.01	-4.86	3.99
农业用水量/ 10^8 m^3	模拟值	3.47	3.59	3.95	3.97	3.98
	实际值	3.22	3.53	3.71	3.87	4.00
	误差/%	7.42	1.72	6.31	2.54	-0.45

借助 Vensim PLE 软件的“模型检验”和“单位检验”功能,对构建的新余市系统动力学仿真模型进行验证,结果表明模型系统边界、因果关系、结构流图、方程式及量纲均通过检验。

3 新余市水资源承载力规模结果对比

为了更直观地反映新余市水资源承载力的状

况,本文采用污染比 $\alpha_i^{k[22]}$ 和水资源供需比 $\beta_i^{[23]}$ 进行表征,公式如下:

$$\alpha_i^k = \frac{W_{E_i}^k}{W_{P_i}^k} \quad (t = 2020, 2021, \dots, 2035, k = 1, 2) \quad (2)$$

$$\beta_i = \frac{W_{S_i}}{W_{D_i}} \quad (t = 2020, 2021, \dots, 2035) \quad (3)$$

式中: α_i^k 为 t 年第 k 种水环境容量与污染物排放量

的比值,若 $k = 1$, 污染物为 COD, 若 $k = 2$, 污染物为氨氮; $W_{E_t}^k, W_{P_t}^k$ 为 t 年第 k 种污染物的水环境容量和污染排放量。 β_t 为 t 年可供水总量与需水总量的比值; W_{S_t}, W_{D_t} 为 t 年的“三条红线”可供水总量和需水总量。

当 $\alpha_t^k \geq 1$ 时, 则说明水环境容量大于污染物排放量, 符合水功能区限制纳污要求; 当 $\alpha_t^k < 1$ 时, 则说明水环境容量小于污染物排放量, 容易导致水环境恶化。发展潜力随 α 值的增大而逐渐增大。当 $\beta_t \geq 1$ 时, 则说明“三条红线”的可供水总量能够满足新余市社会经济的发展; 当 $\beta_t < 1$ 时, 则说明可供水总量不能满足新余市社会经济发展。发展潜力随 β_t 值的增大而逐渐增大。

3.1 发展方案设定

通过参考文献[23]中预测模型的设定, 结合新余市水资源利用现状以及社会经济发展情况, 设定现状延续型、经济发展型、资源节约型、刚性约束型 4 种方案(方案 I ~ IV)。社会子系统、经济子系统、水资源子系统和环境子系统的决策变量输入参数值见表 4 ~ 7。

表 4 社会子系统决策变量调整方案

决策变量	方案	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
人口增长率 /‰	I	5.6	5.6	5.6	5.6
	II	5.6	5.6	5.6	5.6
	III	5.6	5.6	5.6	5.6
	IV	5.6	5.5	5.4	5.3
城镇化率/%	I	70.0	73.5	77.0	81.0
	II	70.0	74.0	85.0	89.0
	III	70.0	73.5	77.0	81.0
	IV	70.0	71.0	72.0	73.0

注: 方案 I ~ IV 依次为现状延续型、经济发展型、资源节约型、刚性约束型(下同)。

3.1.1 现状延续型 假设 2020 - 2035 年新余市发展依然维持现状, 各主要变量参数参考 2019 年参数值, 以此动态模拟预测新余市 2020 - 2035 年的水资源承载力。

3.1.2 经济发展型 在现状延续型的基础上, 以经济发展为主要发展目标, 将产业间增长调整为中高速发展。根据《2020 年新余市政府工作报告》《新余市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》, 经济发展必须满足其他规模以上工业增加值增长率 $\geq 8.5\%$ 及第三产业增加值 $\geq 8.5\%$, 参数见表 5。

表 5 经济子系统决策变量调整方案

决策变量	方案	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
其它规模以上 工业增长率/%	I	8.5	8.5	9.0	10.0
	II	8.5	9.0	10.0	11.0
	III	8.5	8.5	9.0	10.0
	IV	8.5	9.0	9.0	10.0
规模以下工 业增长率/%	I	8.1	8.5	8.5	8.5
	II	8.1	8.5	9.0	10.0
	III	8.1	8.5	8.5	8.5
	IV	8.1	8.5	9.0	10.0
第三产业 增长率/%	I	8.4	8.6	8.8	9.1
	II	8.4	9.0	9.5	10.0
	III	8.4	8.6	8.8	9.1
	IV	8.4	9.0	9.5	10.0

3.1.3 资源节约型 在现状延续型的基础上, 适当减缓经济发展速度, 提升水资源利用效率并降低生活、工业、畜牧业等污水排放量, 达到加大节流以及生态环境保护的目的。在落实国家水资源刚性约束政策下, 江西省制定了《江西省“十四五”节水型社会建设规划》, 规划中提出居民用水定额、城镇公共用水定额、粮食灌溉用水定额以及其他经济作物灌溉用水定额到 2025 年要达到比 2020 年减少 10% 的目标以加大水资源用水的节约能力。万元工业增加值用水量在 2020 - 2025 年中, 每 5 年下降幅度为 33%, 参数见表 6。同时 2025 和 2030 年分别降低城镇工业、畜牧业污水排放系数的 30% 和 20%, 参数见表 7。钢材用水定额、锂盐用水定额、多晶硅用水定额分别降低至 2.2、12、60 m^3/t , 苧麻布用水定额降低至 41 $m^3/10^4 m$ 。

3.1.4 刚性约束型 通过对以上 3 种方案优缺点的分析, 刚性约束型是从生活、工业、农业等方面, 充分考虑在刚性约束下水资源用水效率的高效利用和新余市经济社会发展、新余市“十四五”规划中刚性约束要求下设计的方案。在现状延续型基础上提出每年人口增长率降低 0.2‰, 城镇化水平每年增速降低 0.2%。居民用水定额、粮食灌溉用水定额、万元工业增加值用水定额以及城市居民、工业、畜牧业的污水排放系数与资源节约型中的参数保持一致。其它规模以上工业增长率, 2025 - 2030 年增长率保持在 9%, 规模以下工业增长率、第三产业增长率与经济发展型中的参数保持一致。

表6 水资源子系统决策变量调整方案

决策变量	方案	2020年	2025年	2030年	2035年
城镇居民生活 用水定额/ (L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	I	167	167	167	167
	II	167	167	167	167
	III	148	148	148	148
	IV	148	148	148	148
农村居民生活 用水定额/ (L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	I	98	98	98	98
	II	98	98	98	98
	III	88	88	88	88
	IV	88	88	88	88
粮食灌溉 用水定额/ (m ³ ·hm ⁻²)	I	520	520	520	520
	II	520	520	520	520
	III	465	465	465	465
	IV	465	465	465	465
城镇公共 用水定额/ (L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	I	79	79	79	79
	II	79	79	79	79
	III	70	70	70	70
	IV	70	70	70	70
万元工业 增加值 用水量/m ³	I	64	51	41	33
	II	64	51	41	33
	III	64	43	29	19
	IV	64	43	29	19

3.2 各方案结果分析

根据4种方案,运用构建的系统动力学仿真模型模拟新余市2020-2035年水资源承载力,选取了新余市2020-2035年的社会经济需水量、污染物排放量、污染比和水资源供需比、社会经济规模等4类指标反映其变化过程。

3.2.1 社会经济需水量 主要选取需水总量、居民生活需水量、工业需水量、农业需水量4个指标表征社会经济需水量,预测结果如图3所示。由图3(a)可见,各方案需水总量的变化趋势为经济发展型>现状延续型>刚性约束型>资源节约型。到2035年现状延续型、经济发展型方案的需水总量均超过其用水总量控制红线;相比前2种方案,资源节约型和刚性约束型方案2020-2035年均未超过其用水总量控制红线,可实现新余市社会经济可持续发展。图3(b)显示在4种方案下居民生活用水量逐年增加,人口持续增长使得降低居民用水定额的节水措施效果并不显著。图3(c)表明,至2035年现状延续型、经济发展型方案的工业需水量分别达到

6.21×10^8 、 7.35×10^8 m³。而在通过减少万元工业增加值用水量和主要工业产业用水定额后,资源节约型和刚性约束型方案的工业需水量约为 3.08×10^8 m³,相比现状延续型减少了50.4%,节水效果较为显著;从图3(d)可看出,在4种方案中,与前2种方案相比,提高农业用水效率的资源节约型和刚性约束型方案的第一产业需水量到2035年仅减少 0.41×10^8 m³,节水效果不显著。

表7 水环境子系统决策变量调整方案

决策变量	方案	2020年	2025年	2030年	2035年
生活污水 排放系数	I	0.87	0.78	0.700	0.700
	II	0.87	0.78	0.700	0.700
	III	0.87	0.61	0.488	0.488
	IV	0.87	0.61	0.488	0.488
麻纺产业污 水排放系数	I	0.56	0.500	0.450	0.450
	II	0.56	0.500	0.450	0.450
	III	0.56	0.390	0.310	0.310
	IV	0.56	0.390	0.310	0.310
工业污水排 放系数	I	0.73	0.657	0.590	0.590
	II	0.73	0.657	0.590	0.590
	III	0.73	0.510	0.410	0.410
	IV	0.73	0.510	0.410	0.410
钢铁产业污 水排放系数	I	0.30	0.270	0.243	0.243
	II	0.30	0.270	0.243	0.243
	III	0.30	0.210	0.170	0.170
	IV	0.30	0.210	0.170	0.170
光伏产业污 水排放系数	I	0.80	0.72	0.648	0.648
	II	0.80	0.72	0.648	0.648
	III	0.80	0.56	0.448	0.448
	IV	0.80	0.56	0.448	0.448
畜牧业污 水排放系数	I	0.60	0.54	0.486	0.486
	II	0.60	0.54	0.486	0.486
	III	0.60	0.42	0.336	0.336
	IV	0.60	0.42	0.336	0.336

3.2.2 污染排放量 主要选取COD、氨氮污染物排放量来表征污染物排放量,预测结果如图4所示。由图4(a)、4(b)可以看出,采取污染治理措施最少的现状延续型和经济发展型方案污染物排放量逐年上升,到2022年COD污染物排放量为18 500 t,氨氮污染物排放量为2 380 t,均超过河流的污染物纳污能力。而采取资源节约型和刚性约束型方案强化

污染治理措施,则 2025、2030 和 2035 年 COD 污染物排放量相较于 2020 年分别减少了 19%、25% 和 17%,氨氮污染物排放量相应分别减少了 17%、19% 和 0。资源节约型和刚性约束型方案通过控制居民、工业、农业的排污系数可以有效地控制新余市社会经济 COD 和氨氮污染物的排放量,实现规划中污染物排放量不超过其允许排放量的目标,保障新余市河流水质达标率为 98% 以上。

3.2.3 污染比和水资源供需比 以 COD 污染比 α_i^1 、氨氮污染比 α_i^2 及水资源供需比 β_i 作为水资源承载力指标,其预测结果如图 5 所示。图 5(a)、5(b)表明,现状延续型方案到 2035 年的 α_{2035}^1 和 α_{2035}^2 分别下降至 0.92 和 0.59,新余市水环境系统将面临严峻的挑战。资源节约型和刚性约束型方案的 COD 污染比在 2035 年达到 1.30,基本达到了平衡。但这两种方案在 2035 年的氨氮污染比为 1.02。由此看出污染物排放量的问题尤其是氨氮的排放是新余市水环境系统面临的主要问题之一。由图 5(c)可知,新余市现状延续型方案到 2035 年水资源供需比 β_{2035} 降低至 0.71,经济发展型方案降低至 0.64,供需矛盾较为严重。而资源节约型和刚性约束型方案水资源供需比 β_{2035} 均为 1.03,刚性约束型方案水资源供需比的下降幅度相比资源节约型方案较为平缓。由此看出提升居民、农业灌溉以及工业用水效率,可以有效提高水资源供需比,实现区域水资源用水效率高效利用。

3.2.4 社会经济规模 主要采用总人口数量、城镇人口数量、GDP、工业增加值 4 个指标反映社会经济规模^[24],其预测结果如图 6 所示。

结合图 5(c)和图 6 可知,现状延续型和经济发展型方案的水资源供需比 β_i 分别在 2022、2020 年达到 1,此时水资源最大可承载总人口数量分别为 121.36×10^4 、 120.01×10^4 ,城镇化率分别为 71.79%、70.73%,相应的水资源最大可承载 GDP 分别为 1562.59×10^8 、 1397.30×10^8 元,其中工业增加值分别为 736.10×10^8 、 686.16×10^8 元。资源节约型和刚性约束型方案在 2020-2035 年均将实现水资源供需平衡,且满足环境目标。刚性约束型方案在通过提升经济发展速率、以节水指标为刚性约束条件、减缓城镇化进程和减少人口自然增长率方面实现水资源供需平衡,且保持污染物排污量不超过区域水环境容量。至 2035 年,资源节约型和刚性约束型方案下的新余市总人口数量分别为 130.49×10^4 、 130.22×10^4 人,城镇化率分别为 81%、73%。可承载 GDP 分别为 5408.38×10^8 、 5578.60×10^8 元,其中工业增加值分别为 3102.69×10^8 、 3159.64×10^8 元。由图 6 总体来看,2020-2035 年 4 种方案下新余市总人口数量差别不大;经济发展型方案加快了城镇化进程,使该方案城镇人口数量高于其他 3 种方案;4 种方案 GDP、工业增加值的大小排序为经济发展型 > 刚性约束型 > 现状延续型 > 资源节约型。

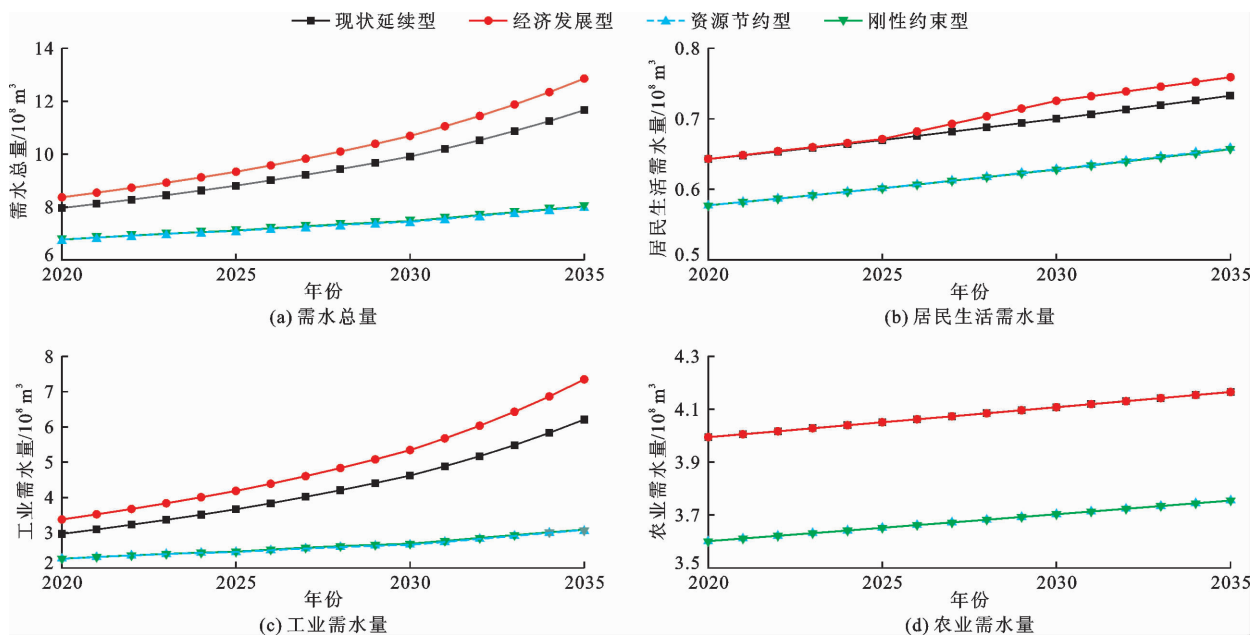


图 3 各方案 2020-2035 年新余市社会经济需水量预测结果

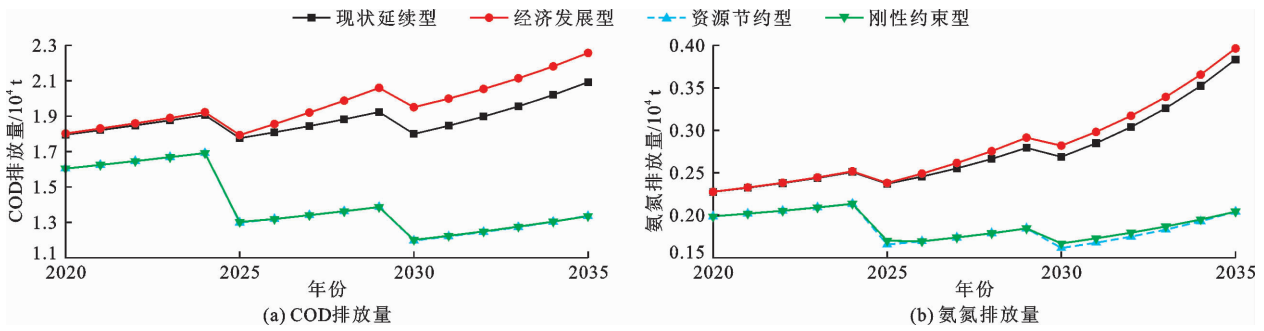


图4 各方案2020-2035年新余市污染排放量预测结果

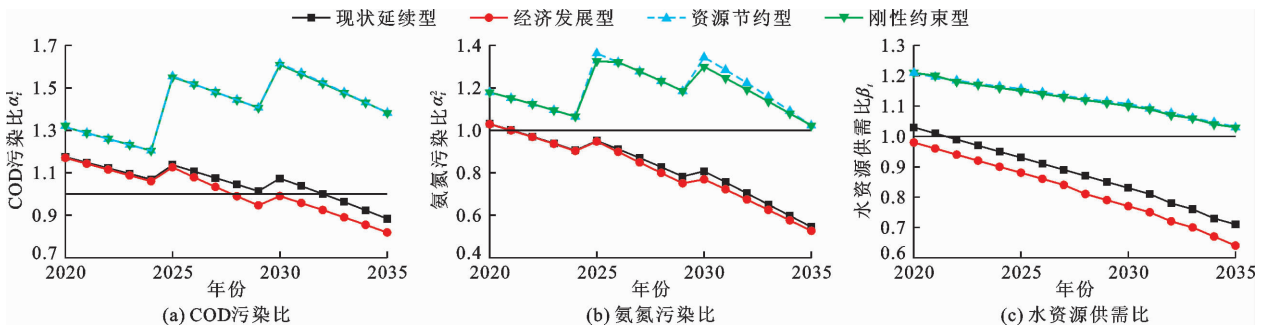


图5 各方案2020-2035年新余市水资源承载力指标预测结果

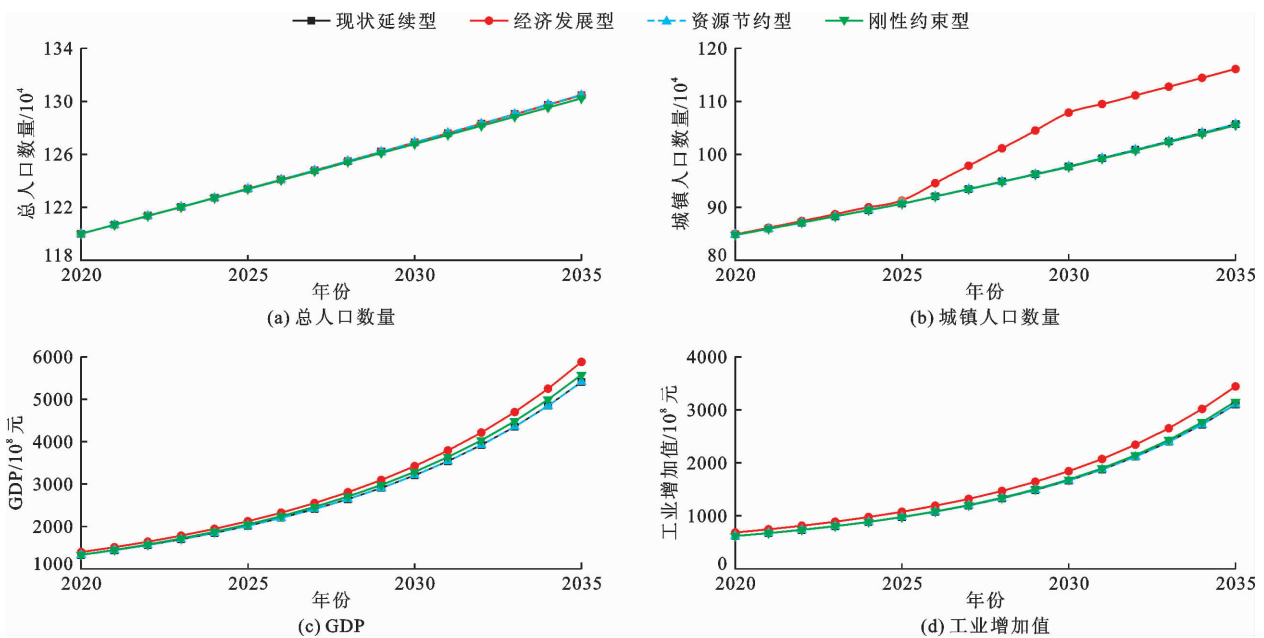


图6 2020-2035年社会经济规模变化

4 讨论

在水资源承载力模型构建中,目前指标选取研究已在传统的社会经济-水资源-水环境系统基础上更多综合考虑兼顾区域特性的影响因素,如海绵城市中非常规水利用、工业强市中工业发展、旅游强市中旅游业发展等。王宵君等^[25]以赣州市为例,将水资源承载力系统细分为社会经济、水资源和水环境3个

子系统,得出考虑社会经济发展和环境保护等多因素的综合协调型,可实现较好的可持续发展模式。新余市与赣州市的水资源利用效率差异不大^[26],本文综合考虑新余市的四大产业的区域特色,建立了新余市水资源承载力系统动力学模型,提出更能反映新余市特色工业特点的水资源利用效率。

新余市“十四五”发展规划强调规模以上工业增加值速率保持在7%以上,同时城镇化率达到

71%,城镇居民用水定额降低至145 L,农村用水定额取100 L。危文广等^[27]基于理想点法对江西省水资源承载力进行了现状评价,得到新余市2011-2015年的水资源承载力均值为0.606,需要提高工业用水重复率和污水处理能力,同时提倡节约用水以缓解水资源需求压力。在落实水资源刚性约束制度的要求下,以提升新余市水资源承载力为目标,本文建议新余市2020-2035年应重点提升锂盐、麻纺布等重点工业产品的用水效率,同时钢铁、光伏等高耗水、高污染产业的污水排放系数每5年应合理降低调整20%~35%,以满足水环境条件的要求。此外,2025-2035年居民用水定额力争降低10%~15%,以支撑新余市节水型社会创建的要求。

本次研究构建的系统动力学模型未考虑非常规水源利用、特色种植业、外来供水等因素的影响,水资源可承载规模与实际情况还有一定的提升空间,可进一步以非常规水源利用为重点,完善水资源管理与利用制度,大力推动行业用水方式和效率的转变,为新余市合理规划人口、城市和产业发展提供有力支撑。

5 结论

(1)水资源刚性约束对区域水资源承载力分析提出了更高的要求,通过社会、经济、水资源和水环境4个子系统构建的系统动力学模型流程图,能全面反映新余市社会经济、特色工业产业特点和资源环境之间的互馈耦合关系,构建的模型模拟结果与实际情况的误差小于10%,可用于分析评价水资源支撑当地社会经济的能力。

(2)针对现状延续型、经济发展型、资源节约型和刚性约束型4种方案,现状延续型或经济发展型方案不利于新余市社会经济可持续发展,资源节约型方案可缓解以上两种方案的不足,刚性约束型方案综合考虑了用水效率高效利用和社会经济合理发展,可承载总人口为 130.22×10^4 ,可承载GDP规模为 $5\,578.60 \times 10^8$ 元,是新余市未来一段时间的优先发展方式。

参考文献:

[1] 刘同凯,贾明敏,马平召. 强化刚性约束下的黄河水资源节约集约利用与管理研究[J]. 人民黄河,2021,43(8):70-73+121.
[2] 罗小云. 江西推进节水优先的实践与思考[J]. 中国水利,2021(3):9-12.

[3] 马学明. 新余市水资源供需分析与对策[J]. 中国水运(下半月),2017,17(11):179-180.
[4] 新疆水资源软科学课题组. 新疆水资源及其承载能力和开发战略对策[J]. 水利水电技术,1989(6):2-9.
[5] WANG Ge, XIAO Changlai, QI Zhiwei, et al. Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 122: 107232.
[6] 朱洁,王烜,李春晖,等. 系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):32-39.
[7] CHHIPI - SHRESTHA G, HEWAGE K, SADIQ R. Water - energy - carbon nexus modeling for urban water systems: System dynamics approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(6): 04017016.
[8] FURRER M, MOSTOFI H, SPINLER S. A study on the impact of extreme weather events on the ceramic manufacturing in Egypt [J]. Resources, Environment and Sustainability, 2022, 7: 100049.
[9] HUANG A, CHANG F J. Prospects for rooftop farming system dynamics: An action to stimulate water - energy - food nexus synergies toward green cities of tomorrow [J]. Sustainability, 2021, 13(16): 9042.
[10] 阮本清,李清杰. 柳园口引黄灌区水资源的优化调配 [J]. 人民黄河,1989(4):37-41.
[11] 杨子江,韩伟超,杨恩秀. 昆明市水资源承载力系统动力学模拟[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(3):594-602.
[12] 刘夏,张曼,徐建华,等. 基于系统动力学模型的塔里木河流域水资源承载力研究[J]. 干旱区地理,2021,44(5):1407-1416.
[13] 陈文婷,郑明霞,夏青,等. 基于产业细化和多要素约束的白洋淀流域水环境承载力系统动力学模拟与调控 [J]. 长江流域资源与环境,2022,31(2):345-357.
[14] 吴卫宾,韩锦辉,杨天通,等. 基于SD双要素模型的长春市水资源人口承载力动态模拟[J]. 郑州大学学报(理学版),2017,49(4):126-131.
[15] 张姗姗,张落成,董雅文,等. 基于水环境承载力评价的产业选择——以扬州市北部沿湖地区为例[J]. 生态学报,2017,37(17):5853-5860.
[16] 张静,唐莲,刘子西,等. 污水再生回用对银川市水资源承载力的影响[J]. 安全与环境学报,2020,20(2):756-762.
[17] 王飞,张爱国,陈国鹰,等. 基于DPSIRM模型的河北省水资源承载力评价[J]. 水电能源科学,2021,39(7):57-60+116. (下转第80页)

- [24] 孙思瑞, 谢平, 陈柯兵, 等. 三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1819 - 1826.
- [25] 黄群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 424 - 428.
- [26] 李景保, 张照庆, 欧朝敏, 等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1251 - 1260.
- [27] 徐长江, 徐高洪, 戴明龙, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖区水文情势变化研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 6 - 12.
- [28] 王鸿翔, 查胡飞, 李越, 等. 三峡水库蓄水后洞庭湖水文情势变化研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 31 - 33 + 48.
- [29] 周蕾, 李景保, 汤祥明, 等. 近60 a来洞庭湖水位演变特征及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 660 - 671.
- [30] 肖潇, 毛北平, 吴时强. 近100年来长江与洞庭湖汇流河段水文特征演变[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 266 - 276.
- [31] 胡光伟, 毛德华, 李正最, 等. 荆江三口60a来入湖水沙变化规律及其驱动力分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 129 - 142.
- [32] 刘登峰, 雷江群, 黄强, 等. 具有近百年观测数据的径流演变特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 24 - 28.
- [33] 张跃华, 徐刚, 张忠训, 等. 嘉陵江年径流量时间序列趋势分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2011, 28(5): 33 - 36.
- [34] 姚治君, 管彦平, 高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 599 - 606.
- [35] 周永强, 李景保, 张运林, 等. 三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 409 - 421.

(上接第71页)

- [18] 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.
- [19] 宗鑫. 基于SD模型的甘肃省水资源承载力及结构性需水预测[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 83 - 90 + 98.
- [20] 杨光明, 时岩钧, 杨航, 等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估——以重庆市为例[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 6 - 13 + 51.
- [21] 高亚, 章恒全. 基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 103 - 109.
- [22] 杨海燕, 孙晓博, 周广宇, 等. 基于系统动力学模型的泰安市水资源与水环境系统模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 348 - 355.
- [23] 贾建辉, 龙晓君. 水资源承载力预测模型研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 21 - 27.
- [24] 李玲, 潘雪倩, 夏威夷, 等. 基于SD模型的重庆市水资源承载力模拟分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 128 - 133.
- [25] 王宵君, 杨欢, 李楨萍, 等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展研究——以赣州市为例[J]. 人民珠江, 2022, 43(4): 9 - 16 + 62.
- [26] 吴向东, 许新发, 成静清, 等. 江西省水资源利用效率时空演变及其影响因素[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 92 - 98 + 121.
- [27] 危文广, 黎良辉, 赖敬飞, 等. 基于理想点法的江西省水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 25 - 30.