

# 赣江流域水资源供需平衡模拟研究

殷彪彪, 刘丽娜, 刘卫林, 万珊珊, 周展雄

(江西水利电力大学 水资源调配与高效利用江西省重点实验室, 南昌 330099)

**摘要:** [目的] 评估赣江流域在不同发展路径下的水资源供需变化趋势, 为优化水资源配置与制定管理策略提供依据。[方法] 基于赣江流域现状水资源供需条件, 构建系统动力学(SD)水资源供需平衡模型, 并设计现状延续情景(S<sub>1</sub>)、经济社会高增长情景(S<sub>2</sub>)、节水优化情景(S<sub>3</sub>)和协调发展情景(S<sub>4</sub>)共4种发展路径, 对赣江流域2023—2035年水资源供需演变进行模拟分析。[结果] (1) 4种情景下年均总需水量分别为136.91亿m<sup>3</sup>, 140.62亿m<sup>3</sup>, 105.23亿m<sup>3</sup>, 126.01亿m<sup>3</sup>。需水结构方面, 情景S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>均表现为工业占比上升、农业占比下降, 生活与生态占比基本保持稳定, 情景S<sub>4</sub>则为工、农业占比下降, 生活占比上升, 生态环境基本稳定; (2) 4种情景年均供需缺口依次为15.74亿m<sup>3</sup>, 19.41亿m<sup>3</sup>, -15.92亿m<sup>3</sup>, 1.50亿m<sup>3</sup>, 年均供需平衡指数(RWRI)分别为1.13, 1.16, 0.87, 1.04, 情景S<sub>2</sub>有较大供需缺口风险; (3) 情景S<sub>4</sub>既能保障社会稳定增长, 又能有效缓解水资源供给压力, 是未来赣江流域水资源规划与管理的优选方案。[结论] 不同发展路径对供需矛盾影响显著, 节水措施和协调发展策略能有效缓解水资源紧张。协调发展模式是实现赣江流域经济稳定与资源可持续利用的关键选择。

**关键词:** 供需平衡; 系统动力学; 情景分析; 赣江流域

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0186-10

## Simulation study on water resources supply-demand balance in Ganjiang River Basin

Yin Biaobiao, Liu Lina, Liu Weilin, Wan Shanshan, Zhou Zhanxiong

(Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources Allocation and Efficient Utilization, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to evaluate the trends of water resources supply and demand in the Ganjiang River Basin under different development pathways, thereby providing a basis for optimizing water resources allocation and formulating management strategies. [Methods] Based on the current water resources supply and demand conditions in the Ganjiang River Basin, a system dynamics (SD) water resources supply-demand balance model was constructed. Four development pathways were designed: current situation continuation scenario (S<sub>1</sub>), high economic and social growth scenario (S<sub>2</sub>), water-saving optimization scenario (S<sub>3</sub>), and coordinated development scenario (S<sub>4</sub>). Simulations of water resources supply and demand evolution in the Ganjiang River Basin from 2023 to 2035 were conducted. [Results] (1) The average annual total water demands under the four scenarios were 13.691 billion m<sup>3</sup>, 14.062 billion m<sup>3</sup>, 10.523 billion m<sup>3</sup>, and 12.601 billion m<sup>3</sup>, respectively. In terms of the water demand structure, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, and S<sub>3</sub> showed an increase in the industrial proportion and a decrease in the agricultural proportion, while the proportions for domestic and ecological needs remained basically stable. The S<sub>3</sub> scenario exhibited a decrease in both industrial and agricultural proportions, an

收稿日期: 2025-07-25

修回日期: 2025-08-10

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(52069015); 江西省高层次人才领军人才培养工程(2023)项目

第一作者: 殷彪彪(1999—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 2648630413@qq.com

通信作者: 刘卫林(1978—), 男, 江西新余人, 教授, 博士, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: weilin\_liu@juwp.edu.cn

<https://stbcej.publish.founderss.cn>

increase in the domestic proportion, and basic stability in the ecological water demand. (2) The average annual supply-demand gaps under the four scenarios were 1.574 billion  $\text{m}^3$ , 1.941 billion  $\text{m}^3$ , -1.592 billion  $\text{m}^3$ , and 0.150 billion  $\text{m}^3$ , respectively, with average annual supply-demand balance index (RWRI) of 1.13, 1.16, 0.87, and 1.04.  $S_2$  had a large risk of supply-demand gaps. (3)  $S_4$  could ensure stable social growth while effectively alleviating water supply pressures, making it the preferred option for future water resources planning and management in the Ganjiang River Basin. [Conclusion] Development pathways significantly affect water supply-demand conflicts, while water-saving measures and coordinated development strategies can effectively alleviate water resources shortages. The coordinated development mode is a key option for achieving stable economic growth and sustainable resource utilization in the Ganjiang River Basin.

**Keywords:** supply-demand balance; system dynamics; scenario analysis; Ganjiang River Basin

水资源作为支撑区域经济社会发展的基础性自然资源与战略性经济资源,长期以来在保障粮食安全、能源开发、生态保护与城乡发展等方面发挥着关键作用<sup>[1-2]</sup>。随着全球气候变化加剧和城镇化进程的快速推进,人口增长和社会发展进一步驱动水资源需求持续增长,致使水资源供需矛盾日益凸显<sup>[3]</sup>。因此,如何科学规划与优化配置水资源,对于破解供需瓶颈、支撑区域可持续发展具有重要战略意义<sup>[4]</sup>。而科学合理预测区域水资源供需平衡态势是制定科学决策的重要基础和依据<sup>[5]</sup>,当前主要的研究方法有时间序列法<sup>[6]</sup>、定额法<sup>[7]</sup>、多元线性回归法<sup>[8]</sup>、WEAP模型法<sup>[9]</sup>、TOPSIS法<sup>[10]</sup>和系统动力学法等<sup>[11]</sup>。影响水资源供需平衡的因素诸多,通常涉及产业规模调整、农业灌溉面积、人口规模、城镇化进程以及相关政策等多个方面,常规的预测方法难以系统解析上述因素间的非线性反馈机制、时滞效应与动态累积效应,无法捕获水资源供需之间系统行为。相较而言,系统动力学法既能考虑经济发展和水资源之间的复杂反馈关系,又能完整反映系统中各因素动态过程<sup>[12-13]</sup>,已被广泛用于流域水资源承载力评估<sup>[14]</sup>、节水政策模拟<sup>[15]</sup>与风险预警<sup>[16]</sup>,是模拟区域水资源供需状况的有效方法。

赣江流域是鄱阳湖流域乃至长江中下游地区的重要子流域之一<sup>[17]</sup>,其水资源的合理利用和可持续管理对区域经济社会发展和水安全保障具有重要意义。当前关于赣江流域内水资源供需关系的研究多以行政区划为分析单元进行分析,缺乏基于整个流域视角的系统性供需平衡分析。为此,本文采用系统动力学方法(System Dynamics, SD),构建赣江流域水资源供需预测模型,对不同情景下的水资源供需平衡进行模拟仿真,进而探索符合赣江流域发展的最优路径,为赣江流域水资源管理与可持续利用提供决策参考。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 研究区概况

赣江流域位于长江中下游南岸,呈南北走向贯穿江西全境,经鄱阳湖与长江连通。流域地貌以山地丘陵与低丘岗地为主,平原及水域覆盖面积不足4%,气候类型为亚热带季风气候,多年平均气温为17.2~19.3℃,多年平均降水量为1400~1800mm。流域水系发育良好,长度超30km的干支流超百条,水资源总量较为丰富。2022年末赣江流域水资源总量为689.42亿 $\text{m}^3$ ,占江西省水资源量的44.3%。流域总面积约83500 $\text{km}^2$ ,约占江西省国土面积的50.03%,涵盖赣州、吉安、抚州、宜春、南昌、新余和萍乡等7个地级市在内的44个县(市、区),是江西省人口最为密集的区域之一<sup>[18]</sup>。流域内以农业为主要产业,广泛种植水稻、油菜和柑橘等作物,工业基础较好,已形成电子信息、有色金属、装备制造、食品加工等为主导的产业体系。

### 1.2 数据来源

本研究用到的数据可分为社会经济数据、农业数据、水资源数据和污水回用数据,具体如表1所示。

### 1.3 研究方法

1.3.1 系统动力学法 系统动力学(System Dynamics, SD)是一种用于理解复杂系统行为的建模方法和工具,通过构建动态模型来模拟系统随时间变化的行为,帮助决策者理解系统的结构、行为以及不同组成部分之间的相互作用<sup>[21]</sup>。针对赣江流域用水系统的非线性关系,系统动力学在处理具有多变量、多回路、非线性和高阶系统的数据时具有独特的优势<sup>[22]</sup>,能更好地解析用水结构的动态演化过程。本研究使用Vensim-PLE仿真平台建立用水系统动力学模型,以确立社会经济发展、用水需求、水资源供给之间的关系。建模过程如下:

表 1 数据来源  
Table 1 Data sources

类型	具体指标	年限	来源
社会经济数据	人口		
	城镇化率		
	工业增加值		
	绿化面积		《江西省统计年鉴》 <sup>[19]</sup> 及赣江流域各地级市统计年鉴
	道路面积		
农业数据	灌溉面积		
	牲畜数量	2007—2022	
水资源数据	地表水源供水量		
	地下水源供水量		《江西省水资源公报》 <sup>[20]</sup>
	其他水源供水量		
	工业用水回用率		
污水回用数据	生活污水收集率		《江西省统计年鉴》 <sup>[19]</sup> 及赣江流域各地级市统计年鉴
	污水处理率		
	污水排放系数(生活和工业)	2021	《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》

(1) 模型边界设定。以赣江流域江西境内的行政区为空间边界,涉及南昌市、吉安市、赣州市、宜春市、萍乡市、新余市和抚州市 7 个地级市。以 2007—2035 年为模拟的时间边界,选取 2007 年为基准年,时间步长为 1 a。其中,2007—2022 年为历史拟合年份,2023—

2035 年为仿真模拟年份。

(2) 模型变量及主要方程。本研究构建的赣江流域水资源供需平衡系统动力学模型共包括 76 个变量,其中变量参数 58 个,状态变量 9 个,速率变量 9 个。模型的主要方程详见表 2。

表 2 模型主要方程  
Table 2 Main equations of model

子系统	变量名称	方程	单位
社会经济子系统	总人口	=INTEG(人口增长量,总人口现值)	万人
	城镇人口	=总人口×城镇化率	万人
	有效灌溉面积	=INTEG(有效灌溉面积变化值,有效灌溉面积现值)	10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>
	大牲畜数量	=INTEG(大牲畜增长量,大牲畜现值)	头
	工业增加值	=INTEG(工业增加值增长量,工业增加值现值)	亿元
用水需求子系统	生活用水量	=居民生活用水量+城镇公共用水量	亿 m <sup>3</sup>
	农业用水量	=林渔用水量+畜牧用水量+农田灌溉用水量	亿 m <sup>3</sup>
	生态环境用水量	=城市绿化浇洒需水量+道路清扫需水量	亿 m <sup>3</sup>
	工业需水量	=万元增加值需水量×工业增加值	亿 m <sup>3</sup>
	需水总量	=农业需水量+生活用水量+生态环境需水量+工业用水量	亿 m <sup>3</sup>
水资源供给子系统	再生水供水量	=再生水利用率×污水处理量	亿 m <sup>3</sup>
	供水总量	=地表水供水量+地下水供水量+再生水供水量+其他水源供水量	亿 m <sup>3</sup>
水资源供需子系统	供需缺口	=需水总量-供水总量	亿 m <sup>3</sup>
	供需平衡指数	=供水量/需水量	无量纲

(3) 模型子系统划分及系统动力学流程图绘制。充分考虑赣江流域生活、工业、农业用水需求和水资源供给,将系统划分为社会经济子系统、用水需求子系统、水资源供给子系统和水资源供需子系统。其中,社会经济子系统提供用水需求外部驱动,用水需求子系统聚合农业、工业、生活、生态等所有用水需求,水资源供给子系统描述水资源的获取与供水能力,水资源供需子系统综合分析供需关系。根据各

因素之间相互影响及其作用,绘制赣江流域水资源供需分析流图(见图 1)。

(4) 模型率定和验证。为提高模型的模拟精度与预测能力,按照 7:3 的比例,划分 2007—2017 年为率定期,用于调整参数,使模拟结果尽可能贴近历史数据;2018—2022 年为验证期,用于检验模型拟合效果与趋势再现能力。模型参数分为初始值、常数值和表函数等 3 类,其中初始值(总人口、有效灌溉面积等)直接来源

于统计年鉴、政府公报等文件;常数值(工业废水排放系数、生活污水排放系数等)依据相关计算手册确定;表函

数(地表水供水量、城市道路增长率等)通过历史数据,采用趋势外推、ARIMA 模型<sup>[23]</sup>、复利法等方法得到。

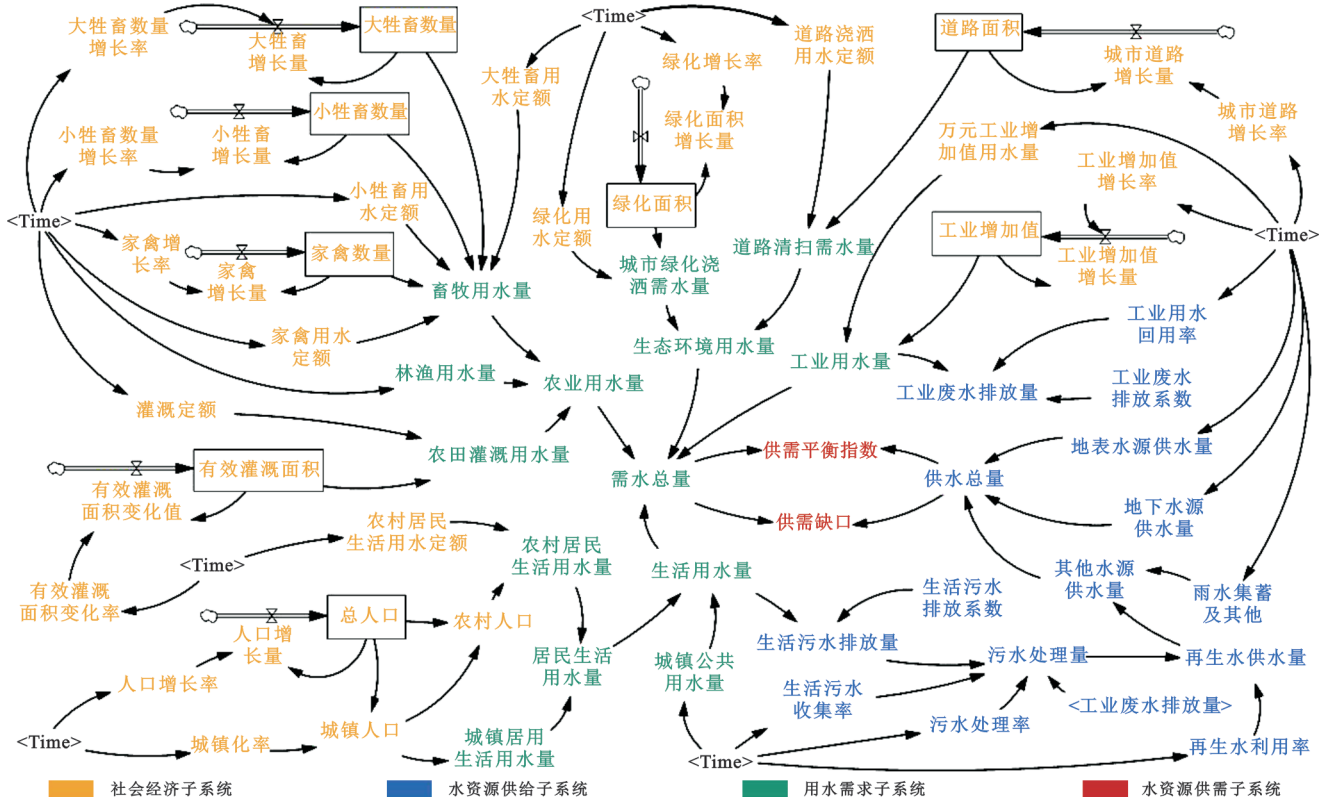


图 1 赣江流域水资源供需分析系统流程图

Fig. 1 System flow diagram of water supply and demand analysis for Ganjiang River Basin

为评估模型的拟合精度与预测性能,本文采用相对误差(Relative Error, RE)对模型模拟结果与历史数据进行验证<sup>[24]</sup>。公式如下:

$$RE = (x_i - y_i) / y_i \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为*i*年模型模拟值; $y_i$ 为*i*年实测值。

选取生活需水量、农业需水量、工业需水量和需水总量等关键变量进行误差分析,当模型模拟结果与实测数据的相对误差控制在±10%以内,则认为模型具备较好的拟合精度与可信度,适用于后续的未来情景模拟分析<sup>[25-26]</sup>。经过参数优化后,如表 3 所示,选取的 4 个关键变量模型模拟值在率定期内的误差绝对值均低于 8%,而验证期误差绝对值均低于 6%,满足精度要求,可进一步开展未来情景模拟。

1.3.2 情景设置 为评估赣江流域水资源供需关系在不同发展路径下的动态演变,本文在梳理历史时期国民经济与社会发展特征的基础上,结合相关规划,充分考虑未来影响水资源可持续利用的关键因素,并参考相关文献设置<sup>[27-29]</sup>,构建了 4 种发展情景,包括基准情景( $S_1$ )、经济社会高增长情景( $S_2$ )、节水优化情景( $S_3$ )和协调发展情景( $S_4$ ),以模拟不同发展路径下的用水演变趋势及水资源供需状况。

(1) 现状延续情景( $S_1$ ):以 2007—2022 年实测数据为基础,按照《江西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》及《江西省“十四五”节水型社会建设规划》要求,2020—2025 年江西省城镇化率年均增长 1.1%,万元工业增加值用水量年均下降 4.3%,城镇居民用水定额年均下降 1%。其他用水定额依据《生活及服务业用水定额第 2 部分:服务业、居民生活和建筑业》设置,同时假设未来无重大水资源管理政策出台,社会经济发展、用水习惯等因素延续历史发展趋势。

(2) 经济社会高增长情景( $S_2$ ):在  $S_1$  延续的基础上,以经济快速发展为主要导向,设定城镇化进程显著加快并带动人口集聚,同时提升工业发展水平,其中工业产业增加值增长率为 4%,人口增长率、城镇化率分别每五年提高 1.25%、10%。

(3) 节水优化情景( $S_3$ ):在  $S_1$  延续的基础上,强化节水约束,社会经济发展适度放缓,万元工业产业增加值年增长率为 1.8%,城镇化率每五年累计提升 4%,万元工业产业增加值用水量每五年下降 30%,其他定额每五年累计降低 10%,非常规水资源利用水平显著提升,生活污水收集率及再生水利用率累计每五年分别提升 6% 和 8%。

表 3 模型模拟效果  
Table 3 Model simulation performance

年份	总人口/万人			农业需水量/亿 m <sup>3</sup>			工业需水量/亿 m <sup>3</sup>			需水总量/亿 m <sup>3</sup>		
	模拟值	实测值	RE/%	模拟值	实测值	RE/%	模拟值	实测值	RE/%	模拟值	实测值	RE/%
2007	2085.56	2084.56	0.05	66.81	70.72	-5.53	25.07	25.69	-2.41	105.15	101.03	4.08
2008	2090.24	2099.69	-0.45	68.54	70.32	-2.54	25.68	25.90	-0.85	104.98	103.25	1.68
2009	2094.93	2114.98	-0.95	76.67	81.68	-6.13	26.21	25.96	0.96	117.69	112.28	4.82
2010	2099.64	2129.34	-1.39	63.46	68.85	-7.83	26.65	26.75	-0.37	106.07	100.16	5.90
2011	2104.35	2134.92	-1.43	71.82	77.39	-7.19	27.01	26.30	2.70	114.36	108.54	5.36
2012	2109.08	2135.66	-1.24	64.16	69.57	-7.77	27.29	26.03	4.84	106.67	100.88	5.74
2013	2113.81	2135.70	-1.02	75.74	75.94	-0.27	27.48	27.61	-0.47	114.77	114.49	0.25
2014	2118.56	2137.68	-0.89	73.25	74.09	-1.13	27.59	27.99	-1.43	113.44	112.52	0.82
2015	2123.31	2139.98	-0.78	66.12	65.80	0.48	27.62	27.81	-0.68	105.17	105.51	-0.33
2016	2128.08	2145.28	-0.80	66.92	65.82	1.68	27.56	27.53	0.11	105.11	106.17	-1.00
2017	2132.86	2152.84	-0.93	69.16	69.07	0.13	27.42	27.58	-0.58	108.61	108.76	-0.14
2018	2137.65	2153.80	-0.75	71.93	69.52	3.47	27.19	27.01	0.67	108.49	110.00	-1.37
2019	2142.44	2154.97	-0.58	73.90	70.13	5.38	26.88	27.69	-2.93	109.88	112.60	-2.41
2020	2147.25	2156.36	-0.42	74.08	70.85	4.56	26.49	26.84	-1.30	110.05	112.51	-2.18
2021	2152.07	2155.66	-0.17	76.08	73.73	3.19	26.02	27.27	-4.58	112.66	116.07	-2.94
2022	2156.91	2160.71	-0.18	89.87	85.92	4.60	25.45	23.65	7.61	120.93	126.44	-4.36

(4) 协调发展情景(S<sub>4</sub>):在 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub> 基础上, 融合“绿色发展”“高质量增长”理念, 协同推进“多源水利用”和“生态优先”策略, 设定万元工业产业增加值年增长率为 3%, 万元工业产业增加值用水

量每五年下降 25%, 其他用水定额每五年累计降低 6%, 城镇化率、污水收集率及再生水利用率分别每五年累计提升 6%, 5% 和 5%。具体参数设定见表 4。

表 4 各情景方案参数  
Table 4 Parameters for each scenario setup

情景方案	年份	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	情景方案	年份	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
总人口 增长率/%	2025	2.25	3	2.25	2.25	农田灌溉定额/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	2025	1.08	1.08	0.96	1.03
	2030	2.25	4	2.25	2.25		2030	1.08	1.08	0.81	0.96
	2035	2.25	5.25	2.25	2.25		2035	1.08	1.08	0.66	0.89
城镇 化率/%	2025	65.4	66	64	65.5	家禽用水定额/ [L/(只·日)]	2025	1.25	1.25	1.18	1.2
	2030	69.8	76	66	71.5		2030	1.25	1.25	1.09	1.1
	2035	75	86	70	77.5		2035	1.25	1.25	0.98	1
工业产业增加 值增长率/%	2025	2	4	1.8	3	小牲畜用水定额/ [L/(只·日)]	2025	20	20	18.8	19.1
	2030	2	4	1.8	3		2030	20	20	17.4	17.9
	2035	2	4	1.8	3		2035	20	20	15.7	16.5
万元工业增加 值用水量/ (m <sup>3</sup> /万元)	2025	47.1	47.1	42	45	大牲畜用水定额/ [L/(只·日)]	2025	70	70	65.9	66.7
	2030	47.1	47.1	29.4	33.8		2030	70	70	60.8	62.5
	2035	47.1	47.1	20.6	25.3		2035	70	70	54.9	57.7
城镇居民生活 用水定额/ [L/(人·d)]	2025	135.8	135.8	131.8	133.4	生活污水 收集率/%	2025	52	52	53	53
	2030	135.8	135.8	121.5	125.1		2030	57	57	59	58
	2035	135.8	135.8	109.9	115.4		2035	60	60	65	63
农村居民生活 用水定额/ [L/(人·d)]	2025	94	94	88.5	89.6	再生水 利用率/%	2025	20	20	20	22
	2030	94	94	81.6	84		2030	25	25	28	27
	2035	94	94	73.8	77.5		2035	28	28	36	32

1.3.3 供需平衡指数 引入文献<sup>[7]</sup>的供需平衡指数(RWRI)评价方法,如表5所示,定性对水资源供需状况评价。

$$RWRI=WD/WS \quad (2)$$

表5 水资源供需平衡分类评价标准

Table 5 Classification criteria for water resources supply-demand balance evaluation

类型	水资源盈余			水资源平衡			水资源短缺		
	高度盈余	中度盈余	轻度盈余	平衡有余	供需平衡	临界短缺	轻度短缺	高度短缺	极度短缺
RWRI	(0,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,0.9]	(0.9,1.0]	1	(1.0,1.2]	(1.2,1.4]	(1.4,2.1]	(2.1,∞)

## 2 结果与分析

### 2.1 需水变化分析

基于4种情景设定,本文系统模拟赣江流域2023—2035年水资源供需的动态演变过程,重点分析生活、工业、农业以及总需水等不同用水类型的变化趋势结构演变特征。

2.1.1 需水量变化趋势 (1)生活需水量(图2A):4种情景的生活需水量呈现“两升两降”的变化趋势。其中,经济社会高增长情景( $S_2$ )变化最为显著,2023年的11.74亿 $m^3$ 增长至2035年的13.62亿 $m^3$ ,增幅约16%,主要受到区域经济快速发展引发的人口规模扩大和城镇化进程加速的共同驱动;现状延续情景( $S_1$ )增长相对平稳,由11.72亿 $m^3$ 增至12.97亿 $m^3$ ,增幅约11%;而节水优化情景( $S_3$ )与协调发展情景( $S_4$ )需水量呈现下降趋势,分别由11.59亿 $m^3$ 降至10.87亿 $m^3$ ,11.65亿 $m^3$ 降至11.54亿 $m^3$ ,下降幅度分别为6%和1%,表明节水与协调发展政策和人们节水意识提高有效抑制了生活用水需求的快速增长。

(2)工业需水量(图2B):4种情景下工业需水量均出现先小幅上升(2023—2025年),差距不大,主要源于初期技术改造及产能调整降低了单位产值耗水强度,随后随产业扩张速度和节水力度的不同快速分化(2026—2035)。其中经济社会高增长情景( $S_2$ )总体增长最快,由2023年的25.49亿 $m^3$ 增至2035年的42.44亿 $m^3$ ,增幅约67%,主要为该情境下工业增值增长最快;现状延续情景( $S_1$ )维持中等增速,2035年达到34.27亿 $m^3$ ,较2023年增长约34%;协调发展情景( $S_4$ )兼顾经济增长与资源节约,2035年增长至31.20亿 $m^3$ ,较2023年增长约24%;相反,节水优化情景( $S_3$ )总体呈现下降趋势,2035年达到14.66亿 $m^3$ ,较2023年下降约6%,表明高效用水技术推广和产业结构优化对工业用水增长形成了显著抑制。

(3)农业需水量(图2C):与生活需水相似,农业需水在4种情景下亦呈现“两升两降”的分化趋势。

式中:RWRI为供需平衡指数,WD为区域水资源需水量,WS为区域水资源供水量。

根据表5所示的评价标准,依据RWRI值所处区间,将当年的水资源供需状况划分为不同类型。

其中现状延续情景( $S_1$ )与经济高速发展情景( $S_2$ )增长一致且需水量持续上升,从90.38亿 $m^3$ 增长至96.72亿 $m^3$ ,增幅约7%,主要是灌溉面积扩张和畜牧规模扩大,且缺乏强力节水手段所致;相反,节水优化情景( $S_3$ )和协调发展情景( $S_4$ )呈下降趋势, $S_3$ 借助高效灌溉与压减牲畜用水等措施将农业用水从86.94亿 $m^3$ 压缩至59.55亿 $m^3$ ,降幅约为32%; $S_4$ 在兼顾生态和粮食安全的前提下,农业用水由88.96亿 $m^3$ 降至79.70亿 $m^3$ ,降幅约10%。

(4)总需水量(图2D):4种情景下总用水量呈现不同的变化趋势。其中,现状延续情景( $S_1$ )和经济高速发展情景( $S_2$ )呈现增长趋势,情景 $S_1$ ,情景 $S_2$ 分别由128.31亿 $m^3$ 升至144.76亿 $m^3$ (年均136.91亿 $m^3$ ),128.32亿 $m^3$ 升至153.57亿 $m^3$ (年均140.62亿 $m^3$ ),增幅分别约为13%和20%,生活与工业需水的快速增长是两情景下总需水量上升的主要驱动因素;节水优化情景( $S_3$ )和协调发展情景( $S_4$ )呈现下降趋势,情景 $S_3$ 有123.76亿 $m^3$ 快速下降至85.88亿 $m^3$ (年均105.23亿 $m^3$ ),降幅约为31%,农业大幅节水与工业用水增速受控共同促成了总需水量变化的主要原因;相较于情景 $S_3$ ,情景 $S_4$ 增长较为平缓,仅由126.41亿 $m^3$ 升至123.23亿 $m^3$ (年均126.01亿 $m^3$ ),降幅为3%,表明在适度经济增长与节水并举条件下,可有效控制需水总量。

2.1.2 需水结构变化分析 图3展现了2023—2035年4种情景下赣江流域生活、工业与农业需水在总需水量中占比结构演变趋势。现状延续情景( $S_1$ )、经济高速发展情景( $S_2$ )和协调发展情景( $S_4$ )中均呈现工业占比上升、农业占比回落、生活和生态环境占比基本稳定的特征,其中,缺乏额外节水驱动的情景 $S_1$ 中,农业需水比重由70%跌至67%,工业需水比重从20%稳步抬升至24%;工业扩张效应最强的情景 $S_2$ ,工业需水占比由20%大幅攀升至28%,农业占比由70%跌至63%;情景 $S_4$ 借助高效灌溉、产业升级等手段,工业需水占比由20%升至25%,农业需水占比70%降至65%,用水结构趋向均衡。相较之下,节水

优化情景(S<sub>3</sub>)通过强节水措施,将工业需水占比由 20% 压至 17%,农业占比由 70% 减少至 69%,同时

生活需水比例则由 9% 上升至 13%,生态环境用水占比保持基本稳定。

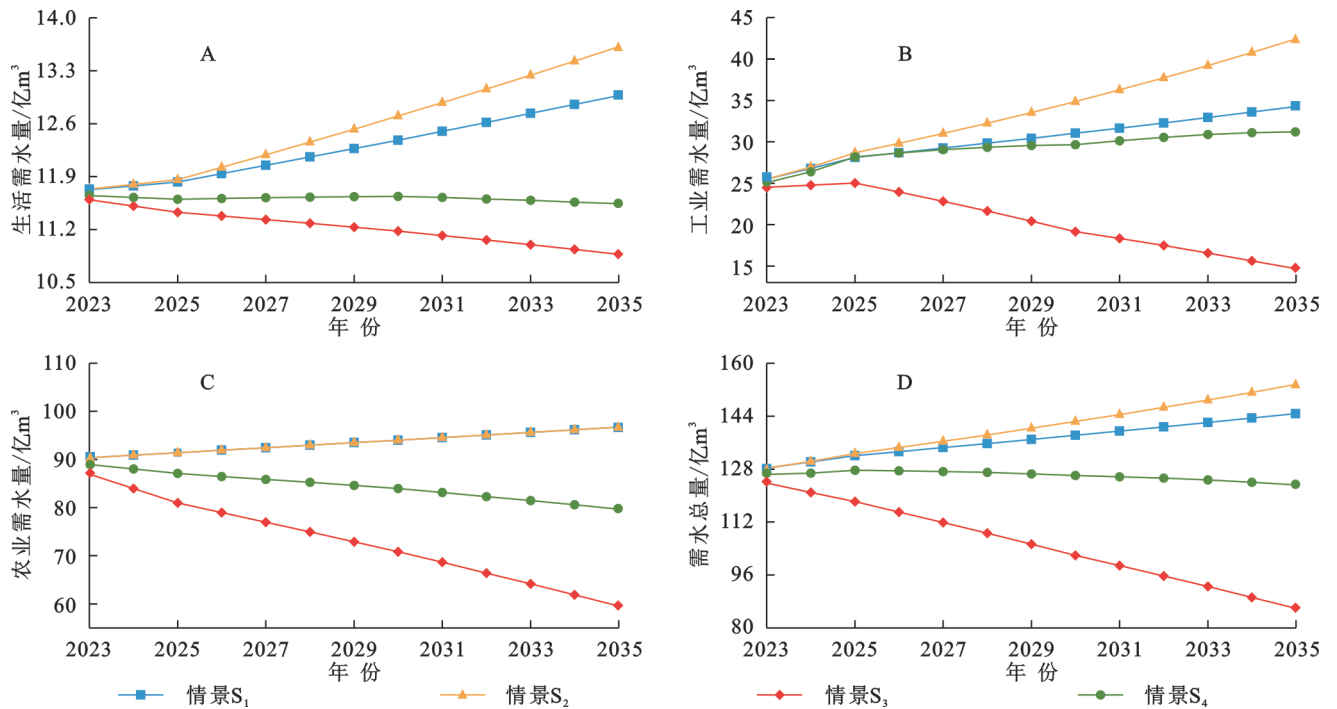


图 2 各情景需水量变化

Fig. 2 Variations in water demand under different scenarios

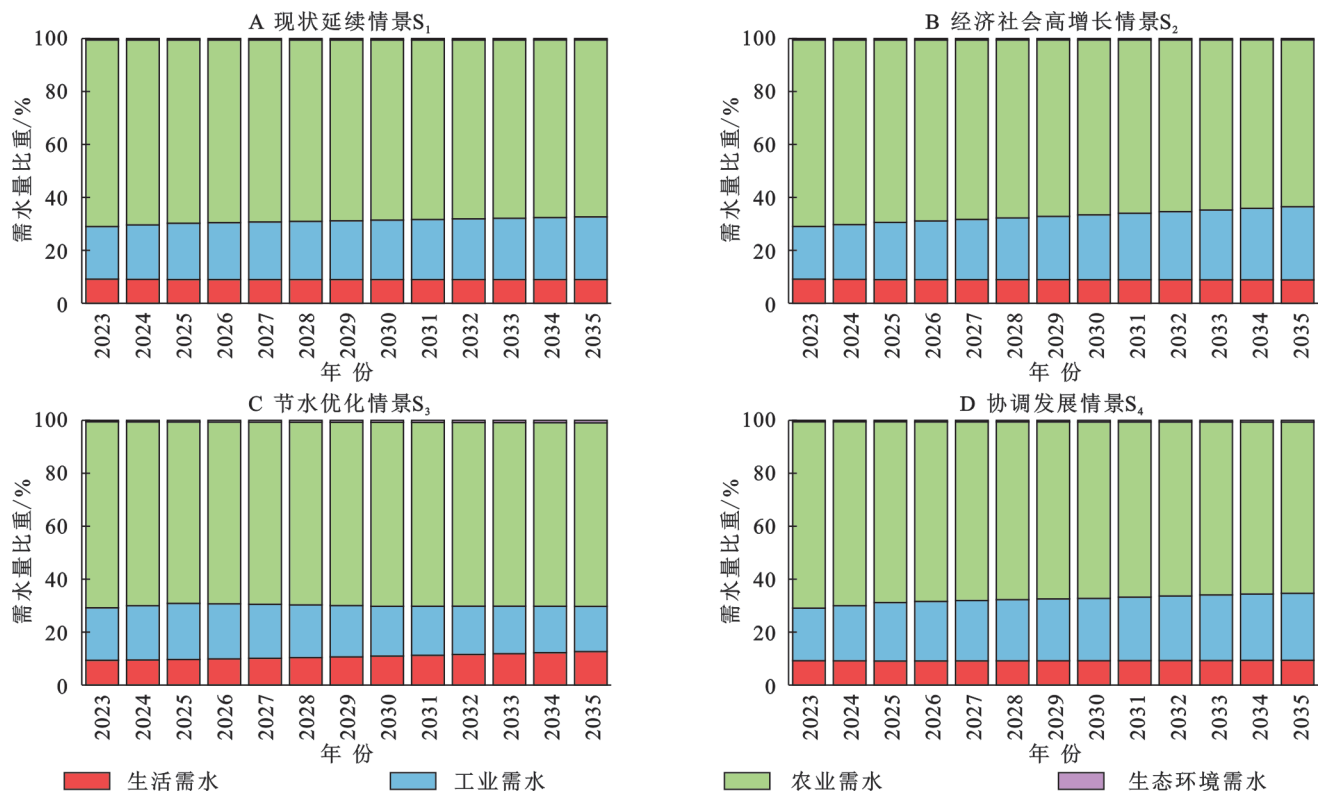


图 3 各情景需水量占比变化

Fig. 3 Variations in proportion of water demand under different scenarios

## 2.2 水资源供需平衡分析

如图 4 所示,模拟期内 4 种情景年缺水量的变化趋势。其中,现状延续情景(S<sub>1</sub>)呈现出先下降

后持续抬升,增长趋势逐渐放缓,从 2023 年 7.66 亿 m<sup>3</sup> 至 2035 年 23.11 亿 m<sup>3</sup>(年均 15.74 亿 m<sup>3</sup>),增长了近 3 倍;经济高速发展情景(S<sub>2</sub>)供需缺口加速扩大至

2035年31.79亿 $m^3$ (年均19.41亿 $m^3$ ),增长量是 $S_1$ 的1.56倍,表现出高强度工业化和城镇化加大了水资源供需不平衡;相比之下,协调发展情景( $S_4$ )曲线变化最为平缓,从2023年5.74亿 $m^3$ 至2035年2.39亿 $m^3$ (年均1.50亿 $m^3$ ),下降了0.26倍左右,是适度经济增长和节水力度共同作用的良性体现;最为显著的是节水优化情景( $S_3$ ),供需缺口持续下降,缺口于2024年后转负并在2035年盈余35.80亿 $m^3$ (年均-15.92亿 $m^3$ ),累计削减了38.92亿 $m^3$ ,是强节水力度的体现。

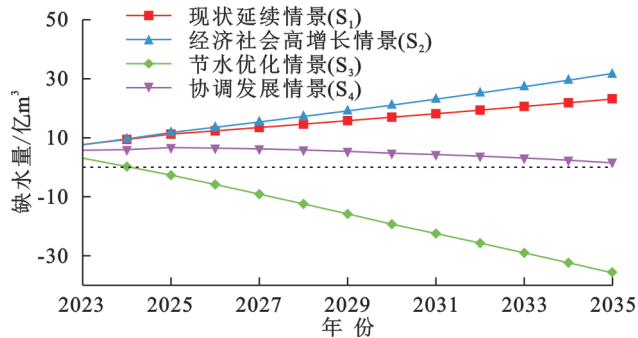


图4 各情景缺水变化  
Fig. 4 Variations in water shortage under different scenarios

为进一步探讨4种情景下水资源供需状况,计算模拟期水资源供需平衡指数,结果如图5所示。总体来看,4种情景呈现“二升二降”的分化格局:现状延续情景( $S_1$ )、经济高速发展情景( $S_2$ )的RWRI值总体上均保持上涨,协调发展情景( $S_4$ )、节水优化情景( $S_3$ )逐步下沉,且模拟期4种情景RWRI值均在1.4(轻度短缺范围)以下。经济高速发展情景( $S_2$ )抬升最为迅猛,2035年RWRI值为1.26(年均1.16),缺水风险越过水资源平衡范围到达轻度短缺范围;现状延续情景( $S_1$ )以较缓坡度上扬,模拟末期逼近临界短缺上边界,RWRI值为1.19左右(年均1.13),表明若维持现有节水水平,缺水压力仍将逐年积累,存在一定的缺水风险;协调发展情景( $S_4$ )曲线总体平稳下降,RWRI值由1.05降至1.01(年均1.04),临近平衡有余区域,表明适度增长与节水并举可将缺口控制在可调度范围;节水优化情景( $S_3$ )RWRI值持续下滑,由2024年进入平衡有余区域,2028年进入轻度盈余区域,2032年跌破0.8进入中度盈余区域,2035年跌至0.71(年均0.87),成为4个情景中唯一落入“中度盈余”区的情景,缺水风险极小,但经济增长较慢。由此看来,未来赣江流域在维持一定经济的生长的同时,需强化节水措施,严控缺水风险。

### 2.3 情景结果比较

在未来发展过程中,若赣江流域按照经济高速发展情景( $S_2$ )路径推进,高耗水产业与人口集聚将使流

域迅速逼近轻度短缺,需要“开源节流”,提前布局非常规水源并实施限水策略;从现状延续情景( $S_1$ )可以看出即便不追求高速增长,若缺乏新增节水措施,同样难以摆脱水资源临界短缺;节水优化情景( $S_3$ )提供了风险最低的参考路径,以节水为主导,提高节水水平的同时抑制工业增速,并大力开发非常规水源,最大限度缓解流域水资源紧张。协调发展情景( $S_4$ )在保障合理经济增长速率与民生用水需求的同时,综合考虑经济发展、污水处理技术、人民对生活水平的需要等多方面因素,以适当的速度保证未来经济发展,又能缓解水资源利用压力,符合可持续发展内涵。

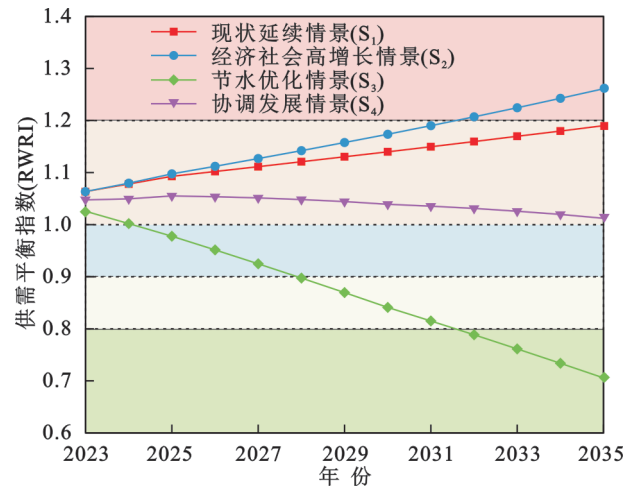


图5 各情景供需平衡指数变化  
Fig. 5 Variations in supply-demand balance index under different scenarios

综上所述,赣江流域未来水资源系统面临较大不确定性,特别是在经济高速发展情景下存在明显的供需矛盾。而协调发展策略在保证合理的经济增长的同时,可显著缓解缺水压力,提升系统韧性与适应能力,可作为流域水资源管理与政策制定中优先考虑。

## 3 结论

以赣江流域为例,构建了基于SD的赣江流域水资源供需平衡仿真模型,并设定4种情景,对2023—2035年不同发展路径下的赣江流域用水演变趋势及水资源供需状况进行模拟分析,主要得出以下结论:

(1) 模拟期内,4种情景下总需水呈现不同的变化趋势。其中,情景 $S_1$ 、 $S_2$ 呈上升趋势,情景 $S_3$ 、 $S_4$ 呈下降趋势。情景 $S_2$ 上涨最快,情景 $S_1$ 次之,情景 $S_3$ 下降最快,情景 $S_4$ 下降较为缓慢,年均总需水量分别为140.62亿 $m^3$ ,136.91亿 $m^3$ ,105.23亿 $m^3$ ,126.01亿 $m^3$ 。就需水结构而言,情景 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_4$ 均表现为工业需水占比上涨,同时农业需水占比下降,生活需水和生态需水占比基本稳定;而情景 $S_3$ 表现为工业和农业需水占比下降,生活需水占比提高,生态环境需水占比基本稳

定,表明在维持适度经济增长的同时强化节水措施,不仅能有效控制需水总量增长,还能优化用水结构。

(2) 模拟期内,4种情景年均供需缺口依次为19.41亿 $m^3$ (情景 $S_2$ )>15.74亿 $m^3$ (情景 $S_1$ )>1.50亿 $m^3$ (情景 $S_4$ )>-15.92亿 $m^3$ (情景 $S_3$ ),对应年均RWRI值分别为1.16,1.13,1.04,0.87,4种情景均处于临界短缺评价区间内及以下,但分化趋势明显:情景 $S_2$ 已超过临界短进入轻度缺范围,情景 $S_1$ ,情景 $S_4$ 均在临界短缺和平衡有余范围内,情景 $S_3$ 在由临界短缺进入中度盈余区域。若不加强节水和非常规水利用,赣江流域缺水风险将在高增长情景下显著加剧。

(3) 情景 $S_4$ 兼顾经济发展与节水目标,既保持适度增长,又将缺水量控制在可调度区间,明显缓解水资源压力,是最值得采纳的方案。未来应完善流域统筹规划,推广高效节水技术,提升污水处理及其他非常规水利用水平,以实现赣江流域水资源的可持续利用。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈浮,朱新华.全球气候变化语境下水安全的维度与治理[J/OL].河海大学学报:哲学社会科学版,2024:1-11.(2024-11-27). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HHZX20241126002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
Chen F, Zhu X H. Dimensions and governance of water safety in the context of global climate change [J/OL]. Journal of Hohai University : Philosophy and Social Sciences, 2024: 1-11. (2024-11-27). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HHZX20241126002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [2] Mishra B K, Kumar P, Saraswat C, et al. Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions[J]. Water, 2021,13(4):490.
- [3] Liu X P, Hu Z W, Wang Y C, et al. Spatial scale effects on the response strength of water resources supply-demand balance to driving factors[J]. Ecological Indicators, 2025,173:113431.
- [4] 谭安琪,穆振宇,艾学山,等.考虑破坏程度的流域水资源优化配置模型及应用[J].武汉大学学报:工学版,2024,57(11):1531-1538.  
Tan A Q, Mu Z Y, Ai X S, et al. Optimal allocation model of water resources in watershed considering damage degree and its application[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024,57(11):1531-1538.
- [5] 聂鸿玉,刘凯鑫,胡宝华,等.基于SD模型的新疆水资源供需预测及平衡方案研究[J].节水灌溉,2025(8):15-21.  
Nie H Y, Liu K X, Hu B H, et al. Research on supply and demand prediction and balance plan of water resources in Xinjiang based on SD model [J]. Water Saving Irrigation, 2025(8):15-21.
- [6] Zhai Y Z, Wang J S, Teng Y G, et al. Water demand forecasting of Beijing using the Time Series Forecasting Method [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5):919-932.
- [7] 赵维岭,纪义虎,左其亭,等.区域水资源供需平衡指数分析方法:以引沁灌区为例[J].灌溉排水学报,2023,42(3):128-135.  
Zhao W L, Ji Y H, Zuo Q T, et al. Variation in balance between water supply and water demand in Yinqin irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3):128-135.
- [8] 王旻,尹少华,卢丽帆.缺水型城市水资源供需匹配的模拟和预测:以甘肃省兰州市为例[J].经济地理,2020,40(2):89-96.  
Wang M, Yin S H, Lu L F. Simulation and prediction of water supply and demand matching in water-deficient cities: A case study of Lanzhou City of Gansu Province [J]. Economic Geography, 2020,40(2):89-96.
- [9] 任文颖,黄斯妍,杨柳,等.基于WEAP模型的河北省水资源供需分析[J].人民黄河,2023,45(S1):30-31.  
Ren W Y, Huang S Y, Yang L, et al. Water resources supply and demand balance in Hebei Province based on WEAP model [J]. Yellow River, 2023,45(S1):30-31.
- [10] 阿哈提·克力木,曾俊杰,刘德地.干旱区水资源供需平衡分析方法研究:以新疆哈密市伊州区为例[J].中国农村水利水电,2023(6):21-26,35.  
Ahati·Kelimu, Zeng Y J, Liu D D. An analysis of the balance between water demand and supply in arid areas: a case study of the Yizhou district of Hami City of Xinjiang uygur automons region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6):21-26,35.
- [11] 王健泉,秦欢欢,黄丽想,等.基于系统动力学的河北省水资源供需平衡预测[J].人民珠江,2024,45(8):92-103.  
Wang J Q, Qin H H, Huang L X, et al. Supply-demand balance prediction of water resources in Hebei Province based on system dynamics [J]. Pearl River, 2024,45(8):92-103.
- [12] 陈颖杰,金保明,金君良,等.变化环境下考虑物理机制的SD需水预测研究[J].水利水运工程学报,2021(3):84-95.  
Chen Y J, Jin B M, Jin J L, et al. System dynamics model-based water demand prediction under changing environment with consideration of physical mechanism [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3):84-95.
- [13] 张诗倩,刘昕瑀,杨晓,等.基于系统动力学的江西省需水量预测[J].宁夏大学学报:自然科学版,2021,42(3):334-339,345.  
Zhang S Q, Liu X Y, Yang X, et al. Water demand prediction of Jiangxi Province based on system dynamics [J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2021,42(3):334-339,345.

- [14] 邵雪杰,胡剑,常超然.基于系统动力学模型的宁波市水资源承载力评价[J].浙江水利科技,2025,53(3):37-44,56.  
Shao X J, Hu J, Chang C R. Evaluation of water resources carrying capacity in Ningbo City based on a system dynamics model [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2025,53(3):37-44,56.
- [15] 徐凯,岳耀先,雷波,等.基于系统动力学模型的干旱区农业节水潜力计算[J].灌溉排水学报,2025,44(1):104-112.  
Xu K, Yue Y X, Lei B, et al. Calculating agricultural water-saving potential in arid areas using system dynamic model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025,44(1):104-112.
- [16] Guo H, Sun D, Wu L, et al. Early Warning and Prediction of Water Resources Carrying Capacity in Shule River Based on System Dynamics Model, Northwest China [J]. Northwest China.
- [17] 王真,姜三元,张奇,等.赣江流域水文情势时空差异性及其变化分析[J].人民长江,2024,55(3):105-116.  
Wang Z, Jiang S Y, Zhang Q, et al. Investigation on spatial and temporal variabilities and changes of hydrological regimes in Ganjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2024,55(3):105-116.
- [18] 徐冰石.1989-2018年赣江流域NDVI变化及驱动因素分析[D].南昌:江西农业大学,2022.  
Xu B S. NDVI change and its driving factors in Ganjiang River Basin from 1989 to 2018 [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022.
- [19] 江西省统计局.江西省统计年鉴,2007—2022年[EB/OL]. <https://tjj.jiangxi.gov.cn/jxstjj/col/col38595.html>.  
Jiangxi Provincial Bureau of Statistics. Jiangxi Statistical Yearbook, 2007-2022 [EB/OL]. <https://tjj.jiangxi.gov.cn/jxstjj/col/col38595.html>.
- [20] 江西省水利厅.江西省水资源公报:2007—2022年[EB/OL]. [https://slt.jiangxi.gov.cn/jxssl/jbgb/pc/content/content\\_1867327471686443008.html](https://slt.jiangxi.gov.cn/jxssl/jbgb/pc/content/content_1867327471686443008.html).  
Jiangxi Provincial Department of Water Resources. Jiangxi Water Resources Bulletin: 2007-2022 [EB/OL]. [https://slt.jiangxi.gov.cn/jxssl/jbgb/pc/content/content\\_1867327471686443008.html](https://slt.jiangxi.gov.cn/jxssl/jbgb/pc/content/content_1867327471686443008.html).
- [21] Rahmani M, Jahromi S H M, Darvishi H H. SD-DSS model of sustainable groundwater resources management using the water-food-energy security Nexus in Alborz Province [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2023,14(1):101812.
- [22] Li G H, Chen X, You X Y. System dynamics prediction and development path optimization of regional carbon emissions: a case study of Tianjin [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023,184:113579.
- [23] 张书宝.基于ARIMA时序模型的灌区供需水量预测研究[J].江淮水利科技,2024(4):28-33.  
Zhang S B. Research on water supply and demand forecasting in irrigation areas based on the ARIMA time series mode [J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2024(4):28-33.
- [24] Jose V R R. Percentage and relative error measures in forecast evaluation [J]. Operations Research, 2016, 65(1):200-211.
- [25] 武佳维,李金燕,马占存.基于系统动力学模型的清水河流域水资源承载力研究[J].长江科学院院报,2025,42(4):71-79,86.  
Wu J W, Li J Y, Ma Z C. Water resources carrying capacity of Qingshui River Basin based on system dynamics modeling [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025,42(4):71-79,86.
- [26] 王奕淇,李国平,延步青.基于SD与AHP模型的流域水资源承载力仿真研究[J].系统工程,2022,40(3):24-32.  
Wang Y Q, Li G P, Yan B Q. Simulation research on carrying capacity of basin water resources based on SD and AHP model [J]. Systems Engineering, 2022, 40(3):24-32.
- [27] 王霄君,杨欢,李桢萍,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.  
Wang X J, Yang H, Li Z P, et al. Sustainable development of water resources carrying capacity based on system dynamics: A case study of Ganzhou City [J]. Pearl River, 2022,43(4):9-16,62.
- [28] 肖洁,温天福,蔡付林,等.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[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):62-71,80.  
Xiao J, Wen T F, Cai F L, et al. System dynamics simulation analysis of water resources carrying capacity in Xinyu City under the rigid constraint of water resources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(5):62-71,80.
- [29] 秦欢欢,黄碧贤,吴昊,等.基于SD模型和情景分析法的华北平原需水量预测[J].节水灌溉,2022(2):59-65.  
Qin H H, Huang B X, Wu H, et al. Water demand prediction in North China Plain based on SD model and scenario analysis method [J]. Water Saving Irrigation, 2022(2):59-65.