

基于系统动力学模型的天津市水资源承载力模拟分析

陈文娟^{1,2}, 姚润钰^{1,2}, 石文豪^{1,2}, 李奇^{1,2}, 赵景窈³, 张永根^{1,2}

(1. 天津大学地球系统与科学学院 表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 2. 天津市环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072; 3. 河北省邢台市水务局, 河北 邢台 054000)

摘要: 为研究天津市水资源供需远景发展情况, 根据天津市水资源供需和发展现状, 结合系统动力学方法和层次分析法建立了天津市水资源可持续发展系统动力学模型。将2012—2019年的历史数据与系统动力学方法的模拟数据进行比较, 相对误差绝对值基本小于10%, 所构建的模型具有较高的可信度, 可用于预测天津市未来的水资源承载力发展情况。在此基础上, 通过设定现状延续型(S_1)、综合节水型(S_2)、开源治污型(S_3)和综合发展型(S_4) 4种不同情景, 利用所构建的系统动力学模型预测了2020—2035年水资源供需平衡情况。结果表明: 2035年现状延续型情景下天津市总需水量可达 $41.58 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2035年 $S_1 \sim S_4$ 情景的水资源承载系数分别为0.178 2、0.397 3、0.481 5和0.728 1, 分析得到2025年南水北调东线供水将大幅缓解天津市水资源超载现状; 在4种发展情景中, 综合发展型方案对缓解水资源供需不平衡的效果最优, 未来应遵循“节水优先, 保障供水”的原则, 综合实施节水、治污、开源等措施保障天津市水资源系统的可持续发展。

关键词: 水资源承载力; 系统动力学模型; 水资源承载系数; 天津市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0042-10

Simulation analysis of water resources carrying capacity of Tianjin based on system dynamics model

CHEN Wenjuan^{1,2}, YAO Runyang^{1,2}, SHI Wenhao^{1,2}, LI Qi^{1,2}, ZHAO Jingyao³, ZHANG Yonggen^{1,2}

(1. Institute of Surface - Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin 300072, China; 3. Xingtai Water Affairs Bureau, Xingtai 054000, China)

Abstract: To study the long-term development of water resources supply and demand in Tianjin City, based on the current situation, a system dynamics model for sustainable water resources development in Tianjin was established using system dynamics and hierarchical analysis method. Then the simulation results were compared with the historical data from 2012 to 2019, the results show that the absolute value of the relative error is less than 10%, so the proposed model is highly reliable, which can be used to predict the future development of water resources carrying capacity of Tianjin City. Four different scenarios, namely, status quo continuity (S_1), integrated water conservation (S_2), open-source and pollution control (S_3), and integrated development (S_4) were set in the system dynamics model to predict the situation of water supply and demand balance in the time frame of 2020 - 2035. The results show that the total water consumption in Tianjin can reach $4.158 \times 10^9 \text{ m}^3$ under scenario S_1 in 2035, and the water resources carrying coefficients for scenarios $S_1 \sim S_4$ in 2035 are predicted to be 0.178 2, 0.397 3, 0.481 5 and 0.728 1, respectively. The analysis shows that the water supply from the South - North Water Diversion Project East Line in 2025 will significantly alleviate the overload situation of water resources in Tianjin. Among the four development scenarios, scenario S_4 has the best performance on alleviating the imbalance between water resources supply and demand, so the government should follow the principle of “pri-

收稿日期: 2022-09-11; 修回日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077168); 天津市自然科学基金项目(20JCQNJC01660)

作者简介: 陈文娟(1999—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。

通讯作者: 张永根(1986—), 男, 山西阳泉人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为水文与水资源及土壤物理。

oritize water conservation and guarantee water supply”, and implement water conservation, pollution control, and open-source measures to ensure the sustainable development of water resources in Tianjin in the future.

Key words: water resources carrying capacity; system dynamics model; water resources carrying coefficient; Tianjin City

1 研究背景

随着区域经济社会的发展,人口、资源和环境的矛盾日益凸显。水资源作为人类社会发展中不可或缺的重要资源,对保障国家安全和地区经济发展至关重要,然而水资源供需矛盾日益突出,水资源短缺形势日益严峻,成为制约地区经济社会可持续发展的重要因素^[1]。

国家或区域的经济社会与生态环境的综合协调发展程度常用水资源承载力来表征,在以可持续发展为原则的前提下,水资源承载力是一个涉及资源、社会、经济和环境等多系统的综合概念^[2-3]。水资源承载力研究是可持续发展和水资源安全战略研究中的基础性课题,也是水资源科学研究的重点和热点^[4]。目前,水资源承载力的研究方法已经从静态、单一指标分析发展为动态、多目标综合分析,常用的方法有常规趋势法、指标体系法、投影寻踪法、系统动力学法^[5-10]等。由于水资源承载力系统是一个非线性、高阶次的复杂时变系统,常规趋势法未考虑水资源承载系统中各因素之间的关系,不能反映真实的区域水资源承载力情况;指标体系法是一种常用的水资源承载力量化评价方法,包括模糊综合评价法^[11-12]、主成分分析法^[13]、层次分析法^[14-15]等,虽然该方法在行业内被广泛应用,但存在模型中各指标选取及权重赋值受主观影响较大的弊端;投影寻踪法虽然可以实现水资源承载力的动态分析,但其缺点在于最优投影方向难以确定。而系统动力学方法具有分析速度快、构造简单、可运用非线性方程等优点,可以对影响水资源承载力的多因素耦合的复杂系统进行定量分析与模拟,能够较为准确地捕获水资源系统内部的宏观动态关系^[16]。近几十年来,系统动力学在水资源承载力和需水量预测的研究中得到了较为广泛的应用,在水资源分析、综合管理和规划方面有了长足的发展,推动了水资源系统的科学研究^[17]。例如,徐凯莉等^[18]采用系统动力学模型,模拟研究了周口市2018—2030年水资源承载力的发展趋势,并比较了不同情景下的变化趋势;高亚等^[19]运用系统动力学方法,构建了

江苏省水资源承载力动力学模型,模拟研究了江苏省2013—2020年的水资源承载力水平。

由于受气候变化和人类活动加剧的影响,海河流域的径流量显著减少^[20]。天津市是一个典型的资源缺水型城市,依据《2020年天津统计年鉴》,人均水资源占有量仅为95.92 m³,远远低于国际公认的500 m³“极度缺水标准”警戒线。张爱国等^[21]构建了基于驱动-压力-状态-响应-管理模型的天津市水资源承载力评价指标体系,结果表明2008—2017年天津市水资源承载力整体处于IV级(较弱)水平。因此,为探究2025年南水北调东线通水前后的天津市水资源供需平衡情况,利用系统动力学方法构建水-社会-经济-生态环境耦合系统,综合考虑各子系统内部中各影响因素之间以及不同子系统间各因素之间的相互作用,对未来4种不同情景下的水资源承载力进行预测分析,为天津市水资源合理配置、减缓供需矛盾提供科学依据和建议,有利于实现天津市水资源和经济社会的可持续发展。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

天津市是我国四大直辖市之一,总面积为11 919.7 km²,属于暖温带半湿润大陆性季风型气候,多年平均降水量在362.1~850.3 mm之间,受地形和海陆影响,雨量由北向南递减。此外,由于天津市的暖温带半湿润大陆性季风型气候,降水集中且不稳定性较为显著,年内降水时空分配不均,不利于水资源的开发、利用、管理和调控。图1为天津市2001—2020年水资源量的变化情况。

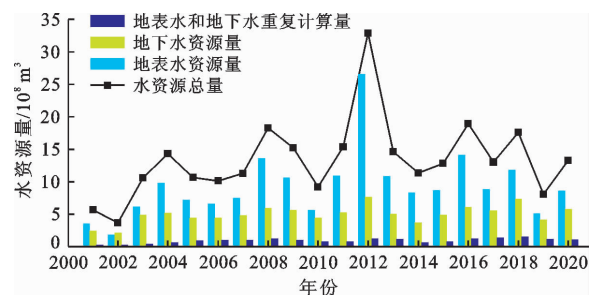


图1 2001—2020年天津市水资源量

由图1可知2001—2020年天津市水资源总量、地表水资源量和地下水资源量均呈现波动趋势,多年平均水资源总量为 $13.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,2002年水资源总量最小,为 $3.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,2012年水资源总量最大,达到 $32.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2 数据来源

本文采用天津市2012—2019年的人口、经济、水资源资料进行了模型的构建和有效性检验,所有资料来源于统计数据、规划数据及其计算结果。其中,人口数据和经济数据来源于《天津市统计年鉴》,水资源相关数据来源于《天津市水资源公报》,部分规划数据来源于《天津市供水规划(2020—2035年)》《天津新型城镇发展“十四五”规划》《“十四五”工业绿色发展规划》。

2.3 水资源利用系统动力学模型

系统动力学(system dynamics, SD)是由美国麻省理工学院的Forrester教授于1956年提出的一种仿真方法,是一门分析研究信息反馈系统、综合了自然科学与社会科学的交叉综合学科,目的在于从系统内部定量地识别和解决复杂的、多反馈回路的系统性问题^[22]。SD模型中各类变量的重要桥梁是状态方程,方程形式可表示如下:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = f(X_i, R_i, A_i, P_i) = \frac{X_i(t + \Delta t) - X_i(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $X_i(t)$ 为系统动力学模型中第*i*状态变量在*t*时刻的取值;*i*为状态变量序号;*f*为向量值函数; R_i 为速率变量,即为状态变量的变化速率; A_i 为辅助变量; P_i 为参数; Δt 为时间步长。

2.3.1 概念模型与系统流图 系统动力学通过系统内部变量之间的反馈来分析和解释问题,建立模型的首要任务是确定系统边界。本文将模型的系统边界定义为天津市行政区边界,模型的模拟时段为2012—2035年,步长为1 a,其中2012年为基准年,2012—2019年为历史检验时段,2020—2035年为预测时段。

供水、需水、经济发展、环境管理和生态平衡对水资源的承载力有着直接且显著的影响^[23],针对天津市供用水现状,分析影响需水量的因素及其相互关系,确定本模型包括人口、经济、水资源和生态4大子系统,选取农业耕地面积、渔业面积、第三产业增加值和工业GDP 4个状态变量,利用Vensim软件构建天津市水资源可持续发展模型,其模型系统流图见图2。

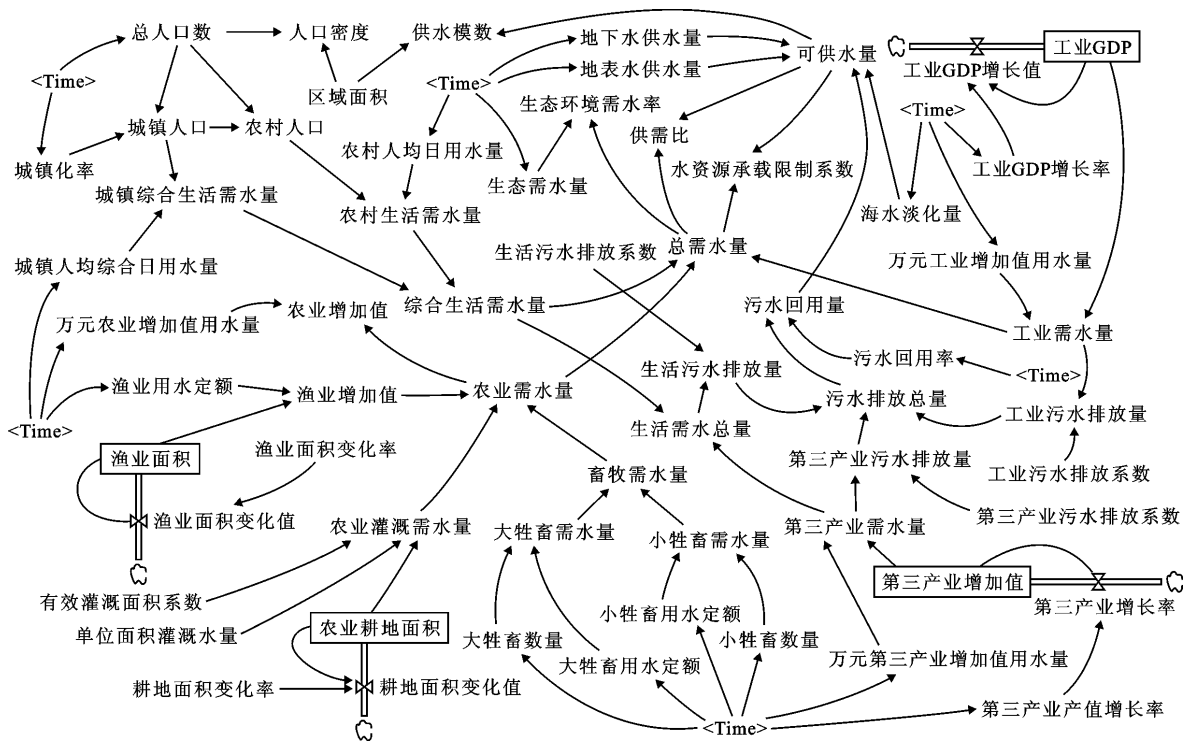


图2 天津市水资源承载力系统动力学模型系统流图

(1) 人口子系统。人口子系统主要研究自然变化和经济社会发展对人口数量变化的影响及其对生

活需水量的影响,进而研究水资源供需平衡情况。生活需水量为城镇和农村需水量之和,城镇需水量

受控于城镇人口和城镇人均用水量;农村居民需水量则由农村人口和农村人均日用水量决定。

(2) 经济子系统。经济子系统的需水量主要包括农业需水量和工业需水量,同时工业、农业的发展在很大程度上受到水资源的制约。工业需水量主要受工业 GDP 增速和万元工业增加值用水量影响。由于天津市林果灌溉需水相较于农业总需水量较小,故本文农业需水量仅考虑耕地灌溉需水量、渔业需水量和畜牧需水量,其各方面需水量均受各产业发展速度及用水量定额的影响。

(3) 水资源系统。水资源系统中天津市总需水量主要由农业需水量、工业需水量、生活需水量和第三产业需水量构成,由于数据的统计方式影响,本文第三产业及居民生活需水归为综合生活需水量。可供水量包括地表水、地下水、再生水、海水淡化和外调水资源(引滦入津、南水北调)。

(4) 生态子系统。生态环境子系统包括生态和污水两部分,生态环境补水只统计人为调配水量,不包括降水及径流自然满足的水量,主要包括绿化、清洁用水和对河湖沼泽等的补水;污水排放量主要包括生活污水和工业废水排放量。

2.3.2 模型变量与参数 天津市水资源系统 SD 模型共选择了 62 个参数和变量,参数类型有常数和状态变量初始取值以及表函数,分别见表 1、2,SD 模型的主要参数方程见表 3。

表 1 SD 模型主要常数及状态变量 2012 年初始取值

参数	取值
生活污水排放系数/%	54.19
第三产业污水排放系数/%	67.87
工业污水排放系数/%	59.46
单位面积灌溉水量/ $10^4(m^3 \cdot hm^{-2})$	0.30
有效灌溉面积系数/%	82.00
耕地面积变化率/%	-1.30
工业 GDP 初始值/ 10^8 元	6122.92
渔业面积初始值/ $10^4 hm^2$	4.13
第三产业增长值的初始值/ 10^8 元	6111.23
农业耕地面积初始值/ $10^4 hm^2$	44.33

本模型中共有 4 个状态变量(见公式(1)),即工业 GDP、农业耕地面积、渔业面积和第三产业增加值,其初始值均直接采用 2012 年的统计数据;其余随时间变化不明显的参数近似为常数,随时间变化明显且可描述变量之间非线性关系的为表函数。

本文所涉及的生活污水排放系数、第三产业污水排放系数、工业污水排放系数、单位面积灌溉水量、有效灌溉面积系数、耕地面积变化率等主要参数和城镇化率、污水回用率等主要表函数参数由实际观测和统计数据计算得到,其实际数据均来源于《天津市水资源公报》和《天津统计年鉴》。

表 2 主要表函数参数取值

表函数参数	2012 年 取值	2019 年 取值
总人口数/ 10^4 人	1413.15	1561.83
农村人均日用水量/ $(L \cdot 人^{-1} \cdot d^{-1})$	97.00	46.40
城镇人均综合日用水量/ $(L \cdot 人^{-1} \cdot d^{-1})$	96.44	148.48
城镇化率/%	81.55	83.48
污水回用率/%	21.70	61.71
海水淡化量/ $10^8 m^3$	0.2792	0.4653
地下水供水量/ $10^8 m^3$	5.49	3.91
地表水供水量/ $10^8 m^3$	15.99	19.16

2.4 层次分析法

2.4.1 水资源承载力评价指标 由于水资源承载力受到众多因素的影响,为保障合理地构建其评价指标体系,本文将水资源承载力作为目标层,共选取人口(B_1)、经济(B_2)、水资源(B_3)、生态(B_4)4 个准则层和 14 个水资源承载力评价指标构建水资源承载力评价指标体系,如表 4 所示,其中正向指标表示对水资源承载力具有积极的影响,负向指标表示对水资源承载力具有消极的影响。

参照文献[24]~[27]并结合天津市的水资源承载力特点,采用 1~9 标度对各指标的重要性进行两两比较,构建目标层与准则层、准则层与各指标的判断矩阵 D ,根据 $DW = \lambda_{\max} W$ 确定特征向量 W 和最大特征值 λ_{\max} 。为避免各评价指标之间的矛盾,根据公式(2)、(3)计算得到一致性指标 CI 和一致性比例 CR 进行一致性检验,当 $CR < 0.1$ 时,表示判断矩阵通过一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中: m 为评价指标数; RI 为随机一致性指标。

经计算得到的各层判断矩阵一致性比例均小于 0.1,故各判断矩阵具有较好的一致性,随机一致性指标 RI 值见表 5。

表3 SD模型主要参数方程

子系统	参数	方程
人口	城镇人口/ 10^4 人	城镇人口 = 总人口 × 城镇化率
	农村人口/ 10^4 人	农村人口 = 总人口 - 城镇人口
	城镇综合生活需水量/ 10^8 m^3	城镇综合生活需水量 = 城镇人均综合日用水量 × 城镇人口数 × $365/10^8$
	农村生活需水量/ 10^8 m^3	农村生活需水量 = 农村人均日用水量 × 农村人口数 × $365/10^8$
	综合生活需水量/ 10^8 m^3	综合生活需水量 = 城镇生活需水量 + 农村生活需水量
	工业GDP/ 10^8 元	工业GDP = INGET(工业GDP增长值, 工业GDP初始值)
	工业需水量/ 10^8 m^3	工业需水量 = 万元工业增加值用水量 × 工业GDP × 0.0001
经济	农业灌溉需水量/ 10^8 m^3	农业灌溉需水量 = 农业耕地面积 × 有效灌溉面积系数 × 单位面积灌溉水量
	渔业需水量/ 10^8 m^3	渔业需水量 = 渔业面积 × 渔业用水定额
	畜牧需水量/ 10^8 m^3	畜牧需水量 = 大牲畜需水量 + 小牲畜需水量
	第三产业增加值/ 10^8 元	第三产业增加值 = INGET(第三产业增长率, 第三产业增加值初始值)
	第三产业需水量/ 10^8 m^3	第三产业需水量 = 第三产业增加值 × 万元第三产业增加值用水量
	总需水量/ 10^8 m^3	总需水量 = 综合生活需水量 + 工业需水量 + 农业需水量 + 生态需水量
	可供水量/ 10^8 m^3	可供水量 = 地表水供水量 + 地下水供水量 + 污水回用量 + 海水淡化量
水资源	水资源承载限制系数 ^[16]	水资源承载限制系数 = (总需水量 - 可供水量) / 可供水量
	供需比	供需比 = 总供水量 / 总需水量
	污水回用量/ 10^8 m^3	污水回用量 = 污水排放总量 × 污水回用率

表4 天津市水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层	权重	指标层/单位	权重	指标性质
水资源 承载力	水资源 B_1	0.4108	地表水供水量/%	0.1005	正向
			供水模数*/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	0.0500	正向
			供需比	0.2603	正向
	人口 B_2	0.1103	人口密度/(人· hm^{-2})	0.0569	负向
			城镇化率/%	0.0116	负向
			农村人均日用水量/L	0.0209	负向
			城镇人均综合日用水量/L	0.0209	负向
	经济 B_3	0.2068	工业GDP/ 10^8 元	0.0337	正向
			第三产业增加值/ 10^8 元	0.1014	正向
			农业增加值/ 10^8 元	0.0239	正向
			万元工业增加值用水量/ m^3	0.0478	负向
			生态环境需水率**/%	0.0318	正向
	生态 B_4	0.2721	污水回用率/%	0.0544	正向
			污水排放总量/ 10^8 m^3	0.1859	负向

注：“*”供水模数为可供水量与区域面积之比；“**”生态环境需水率为生态需水量与总需水量之比。

表5 随机一致性指标RI值

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

2.4.2 评价指标标准化 为避免各评价指标之间量纲差异的影响,首先对原始正向和负向数据进行归一化处理,本文设天津市第*i*年第*j*项水资源承载力评价指标的值为 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$),归一化处理计算公式如下:

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (4)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (5)$$

式中: x'_{ij} 为第*i*年第*j*项水资源承载力评价指标的归一化值; x_{ij} 为第*i*年第*j*项水资源承载力评价指标的原始数据值; $\min x_{ij}$ 、 $\max x_{ij}$ 为第*i*年第*j*项评价指标的最小值和最大值。

2.4.3 水资源承载力量化 归一化处理后的水资源承载力评价指标数据加权求和,得到天津市水资源承载力为:

$$A_i = \sum_{j=1}^m w_j x'_{ij} \quad (6)$$

式中: A_i 为第*i*年水资源承载系数; w_j 为各指标权重。

2.5 模型验证

本文采用历史检验方法来验证模型的有效性。选取2012—2019年时间段进行模型的有效性检验,将模拟得到的结果与历史数据进行比较,采用模拟数据和历史数据的相对误差绝对值(absolute relative error, ARE)来验证拟合度的优劣。ARE计算公式为:

$$ARE = \left| \frac{\hat{Y} - Y}{Y} \right| \quad (7)$$

式中: \hat{Y} 为模拟数据; Y 为历史数据。对于水文过程数值模拟的检验结果来说,相对误差小于10%表示模型效果很好,介于10%~15%表示模型效果好,介于15%~25%表示模型效果较差^[28]。

本模型选取总需水量、工业需水量、农业灌溉需水量、综合生活需水量和污水回用量5个指标值用于历史检验,主要检验结果见图3。

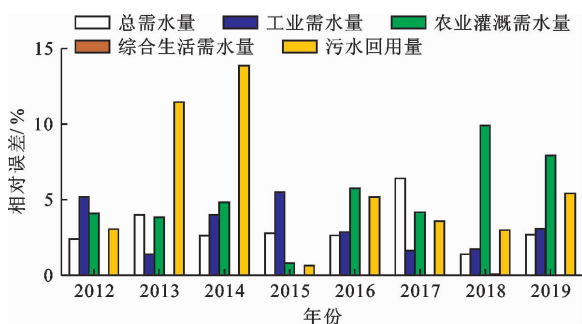


图3 所选指标模拟值与实际值的相对误差绝对值

由图3可知,此模型5个指标的模拟值与实际值之间的相对误差绝对值基本均小于10%,因此确定本研究中模型的拟合程度较好,所建立的系统动力学模型可用于预测天津市未来水资源承载力的发展情况。

2.6 发展情景设定

本研究设定了4种情景,通过模拟不同情景下2020—2035年的水资源供需情况,获得现有经济社会发展趋势下天津市水资源供需平衡的变化趋势。

(1) 现状延续型(S_1)。依据研究区现有发展速度和发展规划设定指标,相较于2012—2019年的数据,此情景涉及的各方面增长率以及各类用水定额均保持恒定不变或维持历史变化趋势,且地下水供水量、地表水供水量及海水淡化量保持不变。根据天津市中长期供水规划预测,2025和2035年天津市总人口分别为 1.850×10^4 和 2.100×10^4 ,城镇综合人均日用水量分别为175和185 L,农村人均日用水量分别为90和95 L,生态需水量分别为 8.53×10^8 和 $8.62 \times 10^8 \text{ m}^3$,其他需水量均保持现状不变。

(2) 节水型(S_2)。为了保证天津市水资源的可持续利用,大力推行节约用水和废水循环利用。该情景具体包括综合节水、农业灌溉节水、工业节水和生活节水4方面内容,因不同的节水措施共分为综合节水型、农业节水型、工业节水型和生活节水型4种方案,通过设定城镇和农村生活用水定额、灌溉用水定额、渔牧畜用水定额和万元工业用水量各减少20%的方案,探讨生活、工业、农业各方面节水措施对天津市水资源供需平衡的影响。

(3) 开源治污型(S_3)。开源即是增加天津市供水来源,增加引滦入津、南水北调工程的外调水量和提高海水淡化率及污水回用率。该情景基于现状延续型情景 S_1 设定不同的外调水量方案,根据《天津市供水规划(2020—2035年)》,同时在此基础上分别增加10%和20%,共设定4种不同开源治污方案,见表6。

(4) 综合发展型(S_4)。该情景以协调全面发展为目标,综合实施 S_2 和 S_3 的节水和开源治污措施,其相对应的节水、开源、治污等参数同节水型情景 S_2 及开源治污情景 S_3 的规划开源治污方案。

3 结果与分析

3.1 各情景不同方案水资源承载限制系数

3.1.1 现状延续型情景 在保证天津市经济社会发展的同时,若保持现有各方面的供水能力,SD模

型的模拟结果表明,总需水量呈不断增长的趋势,预计2025年天津市总需水量将会增加至 $35.20 \times 10^8 \text{ m}^3$,2035年天津市总需水量将会持续增加至 $41.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据现状延续型情景设定的各种指标,通过SD模型模拟得到2020—2035年天津市的总需水量及水资源承载限制系数,如图4所示。由图4可知,2025和2035年天津市水资源承载限制系数分别增长至0.177和0.236。在遵循现状趋势发展方案下,天津市对水资源的需求随着未来经济社会的发展不断增大,现有供水条件无法满足经济社会发展的需要。

表6 开源治污型情景方案设定

方案	年份	外调水量/ 10^8 m^3	海水淡化 量/ 10^8 m^3	污水回 用率/%
规划开源	2025	16.710	1.170	61.71
	2035	19.520	5.240	
规划开源治污	2025	16.710	1.170	62.10
	2035	19.520	5.240	
规划开源治污+10%	2025	18.381	1.287	68.31
	2035	21.472	5.764	
规划开源治污+20%	2025	20.052	1.404	74.52
	2035	23.424	6.288	

注:规划开源方案的污水回用率(61.71%)为现状数据;规划开源治污方案的污水回用率(62.10%)为规划数据。

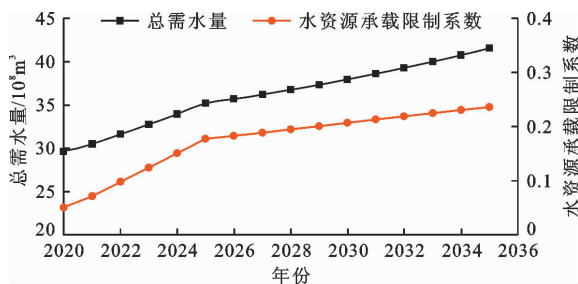


图4 2020—2035年天津市现状延续型情景模拟结果

3.1.2 节水型情景 在此节水情景下,天津市2025年综合节水型、工业节水型、农业节水型和生活节水型4种方案的总需水量分别为 29.05×10^8 、 33.10×10^8 、 32.27×10^8 和 $31.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,2035年相应4种方案的总需水量分别为 33.50×10^8 、 37.76×10^8 、 38.05×10^8 和 $37.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据各节水方案的设定,利用系统动力学模型模拟得到2020—2035年节水型情景下各节水方案的水资源承载限制系数及其与现状延续型的比较,如图5所示。由图5可知,2020—2035年各节水方案的水资

源承载限制系数均呈上升趋势,但均低于现状延续型,表明该情景下天津市水资源供需不平衡现状得到一定改善。相较于工业节水和生活节水方案,农业节水方案对总需水量降幅的贡献最大,从用水占比的角度分析其原因,农业需水量相较于工业需水量和生活需水量占比最大,其对相关因素变化的灵敏度也最大。此外,综合节水型方案的节水效果相对于其他3种节水方案的效果最优,其总需水量相较于现状延续型情景有明显的降幅,并且水资源承载系数也大幅减小,虽然在延续现状供水的条件下天津市水资源仍存在供需不平衡的情况,但节水措施的实施在一定程度上显著缓解了天津市水资源供不应求的现状。

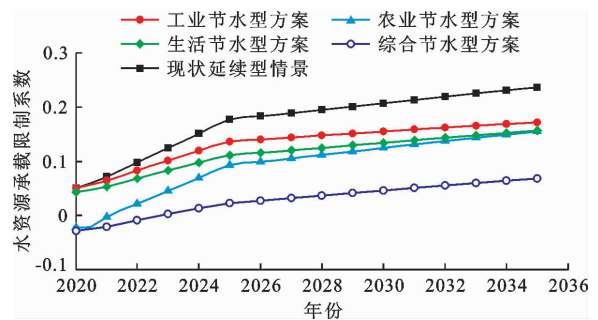


图5 2020—2035年天津市节水型情景各方案模拟结果

3.1.3 开源治污型情景 按照天津市引滦入津、南水北调工程的调水规划,天津市2025和2035年总供水量分别可达 33.71×10^8 、 $42.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ [29]。根据表6设定的开源治污情景的供水量和污水回用率,利用系统动力学模拟得到2020—2035年开源治污型情景下各方案的水资源承载限制系数,如图6所示。

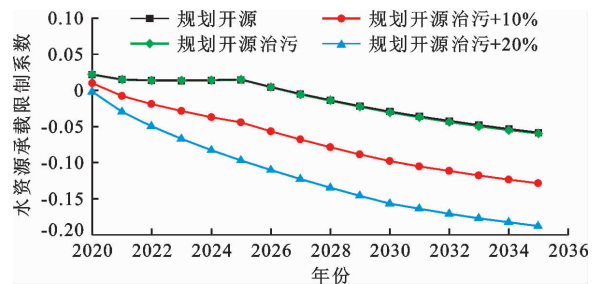


图6 2020—2035年天津市开源治污型情景各方案模拟结果

由图6可知,预测的2020—2035年规划开源、规划开源治污型、规划开源治污+10%和规划开源治污+20%4种方案的天津市水资源承载限制系数均不断减小,其中规划开源治污+20%方案的水资源承载限制系数减幅最大,其次为规划开源治污+10%方案,规划开源与规划开源治污两方案的结果

相差不大,2035年4种方案的水资源承载限制系数分别为-0.059、-0.060、-0.129和-0.188,表明天津市水资源供水可满足社会、经济、生态需求量。

3.1.4 综合发展型情景 2020—2035年综合发展型情景的水资源承载限制系数模拟结果与现状延续型、综合节水型、开源治污型(规划开源治污方案)的比较见图7。由图7可看出,2020—2035年现状延续型和综合节水型的水资源承载限制系数不断增大,开源治污型和综合发展型水资源承载限制系数不断减小,2035年天津市现状延续型、综合节水型、开源治污型和综合发展型的水资源承载限制系数分别为0.236、0.068、-0.060和-0.211。相较于现状延续型情景,综合节水措施的实施虽然在短时间内可以满足天津市的用水需求,但随着时间的推移,水资源与社会经济发展的矛盾日益凸显,水资源短缺的问题仍无法得到根本解决;开源治污型情景能在一定程度上改善水资源短缺的现状,因此从天津市水资源长期可持续发展角度考虑,虽然外调水工程建设及提高海水淡化措施需要投入大量资金,但该措施的实施有利于天津市水资源可持续发展。总体分析认为,综合发展型情景对缓解水资源供需不平衡的效果最优。

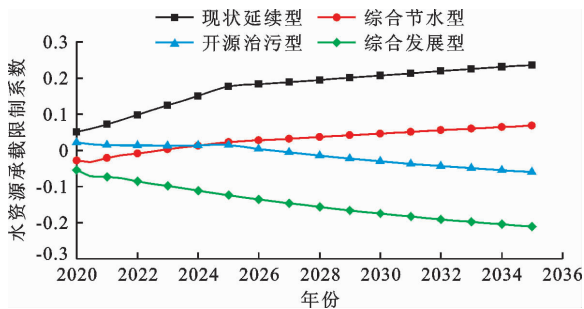


图7 2020—2035年天津市4种情景方案模拟结果比较

3.2 水资源承载系数

为了综合人口、水资源、社会经济和生态环境发展等各方面对天津市水资源承载力的影响,结合层次分析法和系统动力学模型进行模拟预测,2020—2035年现状延续型、综合节水型、开源治污型(规划开源治污方案)和综合发展型的水资源承载系数模拟结果如图8所示。由图8可知,现状延续型和综合节水型的水资源承载系数均呈减小趋势,现状延续型情景下天津市2035年水资源承载系数仅为0.1782,主要是由于现状延续型发展条件下人口和经济逐年增长,且外调水量恒定不变,导致区域水资源与人口、经济无法均衡发展,采用综合节水措施能

够使水资源承载系数增长至0.3973。开源治污方案可实现水资源承载力的提升,其水资源承载系数先缓慢减小后缓慢增大,分析其原因可能是2025年南水北调东线开通后,外调水量的增多补充了自然水资源供给缺口。综合发展型情景相较于其余3种情景方案的优势明显,其水资源承载系数一直处于增长的趋势,表明在此情景下,水资源、人口、经济社会和生态环境可实现可持续发展。

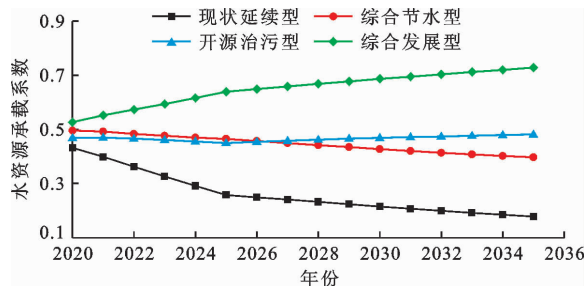


图8 2020—2035年天津市水资源承载系数模拟结果

4 讨论

以天津市行政区域为空间边界,对天津市水资源系统进行以2020—2035年为时间边界的模拟预测,结果表明,在没有其他因素干扰的情况下,人口、社会对水资源的需求不断增大,天津市现状水资源量无法承载相应人口、经济社会和生态环境的发展。韩雁等^[29]经研究得出,南水北调使得2015年天津市水资源承载力提高了5%,水资源短缺是京津冀地区水资源超载的主要原因。本文通过设定规划开源方案模拟天津市水资源承载系数,结果表明2025年南水北调东线开通之后,至2035年天津市水资源承载系数相比于现状延续型增长了0.3033,相较于实施节水、治污等措施而言,增加外调水量可实现水资源承载系数的大幅提升,对缓解天津市水资源短缺、改善水资源承载能力具有明显的效果,也从侧面反映出水资源短缺是天津市水资源承载力超载的主要因素。有研究表明,目前京津冀地区存在大型地下水降落漏斗群,地下水超采形势依然严峻^[30],为防止地下水水位持续下降同时保障天津市的供水能力,在天津市地下水利用率将逐年降低的条件下,南水北调东线工程和非常规水资源的合理利用是必不可缺的,根据本研究,2025年按照规划调水 $16.710 \times 10^8 \text{ m}^3$ 即可保障天津市水资源系统的可持续发展。

为了满足广大群众对水资源的需求,保障城市高质量发展的生产用水需水,保障重要河湖湿地水

生态环境用水需求,建议天津市遵循“节水优先,保障供水”的原则。在“节水优先”方面,天津市用水结构中占比较大的为农业用水,其次为工业用水和生活用水。对于工业节水方面,近些年来由于天津市大力促进工业重复用水技术的发展,目前天津市工业用水重复利用率已经处于较高水平,进一步提高工业节水技术从而达到工业节水的目的较为困难,因此建议加快优化天津市工业结构,降低传统耗水产业占比,提高战略性新兴产业增加值占比。此外,如通过减少天津市人均用水量来缓解天津市水资源供需不平衡现状,则难以保障天津市第三产业的发展,因此节水型发展方向应首先考虑优化配置农业用水、完善农业节水工程等农业节水措施,并与工业结构优化同步进行,其次考虑提高工业用水重复利用率、降低人均用水定额等措施。在“保障供水”方面,建议在天然水资源不足的情况下按照“以需定供”的原则,合理调配南水北调中线、东线水量和提高海水淡化率,统筹多个外调水源和非常规水源的利用。通过以上措施,实现天津市水资源合理开发、优化配置、高效利用和科学管理,为生活、生产、生态提供供水保障。

5 结论

本文选取了天津市水资源供需平衡的主要影响因素,利用系统动力学方法建立了天津市水资源可持续发展系统动力学模型,通过设定现状延续型、节水型、开源治污型和综合发展型4种不同的情景,讨论了2020—2035年天津市水资源承载力发展状况,主要结论如下:

(1)天津市存在水资源供需不平衡的现状,若保持现状发展,则2035年水资源承载系数将降低至0.178 2,水资源将出现严重的供需矛盾。

(2)在天津市经济社会发展现状的条件下,综合节水有利于缓解天津市水资源供需矛盾,建议加强推广农业节水灌溉技术,同时加快优化工业产业结构,进一步推进社会全面节水进程。

(3)现状供水条件无法满足天津市的水资源需求,水资源成为限制地区经济社会高水平可持续发展的主要因素。在规划开源型发展方案下,2035年天津市的水资源承载系数为0.481 5,相较于现状延续型提高了0.303 3,充分说明建设南水北调东线工程及提高海水淡化效率的必要性,因此未来仍需在保障引滦水量和南水北调水量的基础上加强建设外调水供水工程及设施。

(4)2035年天津市现状延续型、综合节水型、开源治污型和综合发展型4种情景方案的水资源承载系数分别为0.178 2、0.397 3、0.481 5和0.728 1。相较于现状延续型情景,综合发展型对缓解水资源供需不平衡的效果最优,未来应遵循“节水优先,保障供水”的原则,综合实施节水、治污、开源等措施保障天津市水资源系统的可持续发展。

参考文献:

- [1] 胡光伟,黄作维,许滢,等.洞庭湖生态经济区水资源与社会经济发展协同度评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):21-27+34.
- [2] 王建华,翟正丽,桑学锋,等.水资源承载力指标体系及评判准则研究[J].水利学报,2017,48(9):1023-1029.
- [3] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J].资源科学,2017,39(3):379-395.
- [4] 金菊良,陈鹏飞,陈梦璐,等.基于知识图谱的水资源承载力研究的文献计量分析[J].水资源保护,2019,35(6):14-24+57.
- [5] MASHALY A F, FERNALD A G. Identifying capabilities and potentials of system dynamics in hydrology and water resources as a promising modeling approach for water management[J]. Water, 2020, 12(5): 1432.
- [6] SUN Boyang, YANG Xiaohua. Simulation of water resources carrying capacity in Xiong'an New Area based on system dynamics model[J]. Water, 2019, 11(5): 1085.
- [7] 赵义平,于向前,刘伟,等.基于投影寻踪模型的镶黄旗水资源承载力评价及其在水源调配中的应用[J].水文,2018,38(6):72-76.
- [8] 金菊良,陈梦璐,郇建强,等.水资源承载力预警研究进展[J].水科学进展,2018,29(4):583-596.
- [9] 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.
- [10] 金菊良,刘东平,周戎星,等.基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J].水资源保护,2021,37(3):1-6.
- [11] 陈丽,周宏.基于模糊综合评价和主成分分析法的岩溶流域水资源承载力评价[J].安全与环境工程,2021,28(6):159-173.
- [12] XIN Shuai, LI Wanwan, JIN Hua, et al. Dynamic assessment of water resources carrying capacity in Heze using fuzzy sets methods[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
- [13] 王晶,薛联青,张洛晨,等.阿克苏地区水资源承载力变化及驱动力生态脆弱性分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):104-109+115.
- [14] 李文雅,赵玲玲,翁学先,等.基于系统动力学的珠澳地

- 区取水系统水资源承载力[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 103 - 110 + 119.
- [15] LU Yan, XU Hongwen, WANG Yuexiang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method; a case in Huai'an City[J]. Water Resources and Industry, 2017, 18: 71 - 77.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 徐凯莉, 吕海深, 朱永华. 水资源承载力系统动力学模拟及研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 67 - 72.
- [19] 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.
- [20] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303 - 310.
- [21] 张爱国, 李鑫, 张义明, 等. 城市水资源承载力评价指标体系构建——以天津市为例[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4): 1839 - 1848.
- [22] GHASEMI A, SAGHAFIAN B, GOLIAN S. System dynamics approach for simulating water resources of an urban water system with emphasis on sustainability of groundwater[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76: 637.
- [23] WANG Yuxi, WANG Yong, SU Xuelian, et al. Evaluation of the comprehensive carrying capacity of interprovincial water resources in China and the spatial effect[J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 794 - 809.
- [24] 黄婷婷, 陈春. 基于层次分析对安徽水资源承载力的评价[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2017, 33(8): 19 - 21.
- [25] 张成, 杨建康. 渭河流域陕西段水资源承载力分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 165 - 168.
- [26] 宋世强, 冯倩, 王萍根, 等. 基于系统动力学模型的江西省水资源承载力评价[J/OL]. 人民珠江(2023-02-02) [2023-02-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1037.TV.20230202.0949.010.html>.
- [27] 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.
- [28] 张诗情, 赖锋, 秦欢欢. 基于SD模型的山东省水资源供需平衡分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(2): 61 - 67.
- [29] 韩雁, 张士锋, 吕爱锋. 外调水对京津冀水资源承载力影响研究[J]. 资源科学, 2018, 40(11): 2236 - 2246.
- [30] 曹庆一, 陈卓, 梁季月, 等. 京津冀平原区地下潜水层降落漏斗现状分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(S2): 66 - 68.

(上接第41页)

- [30] 金菊良, 洪天求, 王文圣. 基于熵和FAHP的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22 - 28.
- [31] 范通达. 水资源承载力评价及其在安徽省的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [32] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载能力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 342 - 349.
- [33] 朱明雅, 冯利华, 肖凡, 等. 基于主成分分析的安徽省水资源承载力评价研究[J]. 科技通报, 2016, 32(9): 26 - 29 + 34.
- [34] 李辉, 金菊良, 童芳, 等. 基于联系数的安徽省水资源承载力评价及空间差异诊断分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 22 - 27.
- [35] 丁晶, 覃光华, 李红霞. 水资源设计承载力的探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 1 - 6.
- [36] 陈腊娇, 冯利华, 毛小军. 主成分分析法在水资源承载力影响因子评价中的应用[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(6): 362 - 364.
- [37] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [38] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401 - 409.
- [39] 潘争伟, 吴成国, 金菊良. 水资源系统评价与预测的集对分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [40] 金菊良, 吴开亚, 李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1257 - 1261 + 1266.
- [41] 金菊良, 刘丽, 汪明武, 等. 基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 143 - 147.
- [42] 吴开亚, 金菊良, 潘争伟. 基于三角模糊数截集的联系数模型在城市涝灾影响等级评价中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 711 - 719.