

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.015

中山市水资源系统动态模拟与敏感性分析

关雪桦¹, 陈志和¹, 叶智恒²

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要:为满足区域水资源可持续开发与高效利用条件下中山市未来的社会经济发展需求,构建了系统动力学模型,模拟中山市经济社会、水资源供需及水环境的变化趋势,采用了熵权 TOPSIS 模型进行参数敏感性分析,综合评价不同参数变化对 2030 年和 2040 年水质、水量以及经济社会的影响。结果表明:常规发展模式下,中山市水资源供需矛盾逐渐凸显,水环境恶化愈发严重;控制用水量的方案对促进区域可持续发展的作用较为明显,且万元工业(不含火电)增加值用水量的减少产生效果最为显著;不同参数调整方案对水资源系统近期及远期的影响不尽相同,为使水资源管理政策更加适合长远的发展,应重视远期作用明显的参数调整方案。

关键词:水资源管理;系统动力学;TOPSIS 模型;动态模拟;敏感性分析;中山市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0103-09

Dynamic simulation and sensitivity analysis of water resources system in Zhongshan City // GUAN Xuehua¹, CHEN Zhihe¹, YE Zhiheng² (1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To meet social and economic development needs of Zhongshan City in the future under conditions of sustainable development and efficient utilization of regional water resources, a system dynamics model was established to simulate the changing trends of economic society, water resources supply and demand, and water environment in Zhongshan City. The entropy weight TOPSIS model was used to analyze the sensitivity of parameters, and comprehensively evaluate the effects of different parameter changes on the water quality, water quantity, and economic society in 2030 and 2040. The results show that under the conventional development mode, the contradiction between supply and demand of water resources in Zhongshan City becomes increasingly prominent, and the deterioration of water environment becomes more serious. Controlling the amount of water consumption has more obvious effect on promoting the regional sustainable development, and the reduction of water consumption of industrial (without including thermal power) added value per ten thousand Yuan has the most significant effect. Different parameter adjustment schemes have different short-term and long-term effects on the water resources system. To make water resources management policies more suitable for long-term development, more attention should be paid to parameter adjustment schemes with obvious long-term effects.

Key words: water resources management; system dynamics; TOPSIS model; dynamic simulation; sensitivity analysis; Zhongshan City

水是维持区域社会经济可持续发展的重要资源,亦是区域自然生态系统良性循环的控制性要素^[1]。随着人口的增长与经济的发展,水资源短缺、水环境恶化的问题愈发突出^[2-3],严重制约着区域经济社会发展。如何实现水资源的开发利用与经济社会的协调发展已成为研究热点^[4]。目前,已有学者从不同角度开展了水资源开发利用与经济社会

发展耦合研究,为制定区域发展战略与实施规划提供了科学依据。李敏等^[5]模拟分析了云南省水价、水利技术等条件的变化对经济社会的影响,指出缓解水资源供需矛盾的方法;卢超等^[6]探究了水资源承载力约束下小城镇经济变化的趋势,提出构建节水型社会的建议;Kotir 等^[7]建立了系统动力学(system dynamics, SD)模型以探索水资源与农业生

项目基金:国家自然科学基金(51879291)

作者简介:关雪桦(1996—),女,硕士研究生,主要从事水资源管理政策优化研究。E-mail: guanxh3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:陈志和(1976—),男,教授,博士,主要从事区域水安全和环境泥沙研究。E-mail: chzhihe@mail.sysu.edu.cn

产之间的相互作用;焦士兴等^[8]分析了河南省各城市城镇化与水资源系统的协调发展状况,为提高城市发展质量提供了新思路。然而,传统的研究多为评估特定情景下区域水资源系统的变化趋势,但由于情景的设计往往基于经验估计,且特定情景存在可操作性不强的问题^[9],导致了水资源管理方案的实施效果不佳。对水资源系统进行敏感性分析以识别关键参数是制定有效管理政策的重要步骤,对实现协调可持续发展具有现实指导意义^[10]。

本文运用SD理论,综合经济社会、水质、水量等要素构建SD模型,以中山市为例,模拟快速发展背景下水资源系统的变化趋势,并在此基础上采用熵权TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 模型对水资源系统进行敏感性分析,寻找对水质、水量以及经济社会综合影响最深的参数,以期为区域水资源管理者决策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

中山市位于广东省中南部,处于粤港澳大湾区的中心地带,全境位于东经113°09′~113°46′、北纬22°11′~22°47′,总面积为1 800.14 km²。2000年以来,中山市形成了有较强竞争力的产业链和产业群,经济社会持续快速发展。2018年,中山市地区生产总值为3 632.7亿元,同比增长5.9%;常住人口331万人,同比增长0.962%;城镇化率为88.35%。

中山市属亚热带季风气候,雨量充沛,水资源丰富,多年平均降水量为1 710.3 mm,平均水资源总量17.38亿m³(不含过境水),多年平均入境水与过境水资源量分别为2 662.94亿m³和2 678.92亿m³。中山市现供水能力为168 619万m³/a,但其水资源主要依赖上游过境水量,且市内蓄水工程少,调蓄能力不强,应对污染事故等突发事件和水质性缺水状况的能力受到限制。在水质方面,根据2018年水质监测成果,中山市主要大江大河水质较好,但城市内河石岐河水质不达标(劣V类),主要是溶解氧、氨氮超标;长江水库为Ⅲ类水质,超标项目为总氮。

1.2 数据来源

本研究使用的人口、GDP、三产比例等社会经济数据来源于2005—2018年《中山市统计年鉴》;用水量、需水量、用水定额等数据则来源于2005—2018年《中山市水资源公报》;GDP、人口预期增长率、产业比例目标以及城镇化率目标根据国民经济规划、城市总体规划综合确定;中山市2020年和2030年GDP预期增长率分别为7.7%和5.0%,第

一、二、三产业比例目标分别为1.6:46.1:52.3和1.2:43.8:55.0,人口预期增长率均为1.0%,城镇化率目标分别为89.13%和91.0%。

2 研究方法

2.1 中山市水资源SD模型

SD模型设定模拟时间为2005—2040年,其中2005—2018年作为模型验证,基准年为2005年,时间间隔为1a。

2.1.1 因果关系图建立

在建模过程中,根据对系统的分析结果,确定系统内部主要变量之间的反馈关系^[11],见图1。其中,蓝线代表同向影响,如农业需水量的增加将导致需水总量的增加;红线代表反向影响,如污染物入河量的增加将导致水环境容量余量减少。

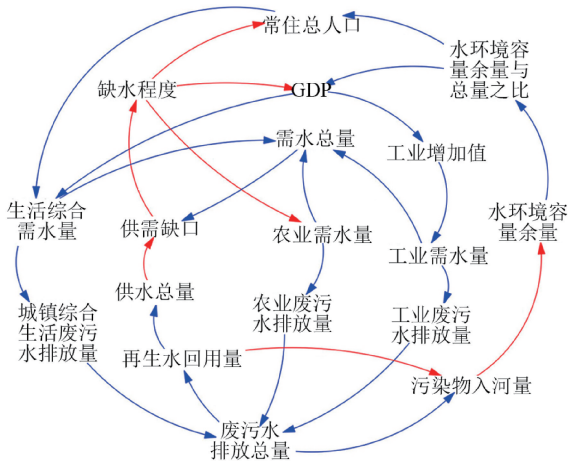


图1 主要变量的反馈关系

Fig. 1 Feedback relationship between major variables

2.1.2 模型结构划分及系统流图

结合收集到的相关信息以及中山市的实际情况,将中山市水资源系统划分为6个子系统。6个子系统彼此相对独立,但是在整个大系统中密不可分。运用SD专用建模软件Vensim-DSS构建了中山市水资源SD模型,其系统流图如图2所示。图2中状态变量是随时间变化的积累量;速率变量是表示累积效应变化快慢的变量;影子变量是绘图时调用的模型中另一子系统已定义的变量;〈Time〉为时间变量,用于确定变量与时间的表函数;其他辅助变量是系统中的信息量。

a. 农业需水子系统。农业需水包括农田灌溉需水、林果地灌溉需水、鱼塘补水和牲畜需水。本文根据历史数据分析农田灌溉用水毛定额、林果地灌溉用水毛定额、鱼塘补水毛定额和牲畜用水毛定额,结合全市农田有效灌溉面积、林果灌溉地面积、鱼塘补水面积、牲畜头数等,采用用水定额法计算求

<.....> 影子变量 [.....] 状态变量 [--->] 速率变量

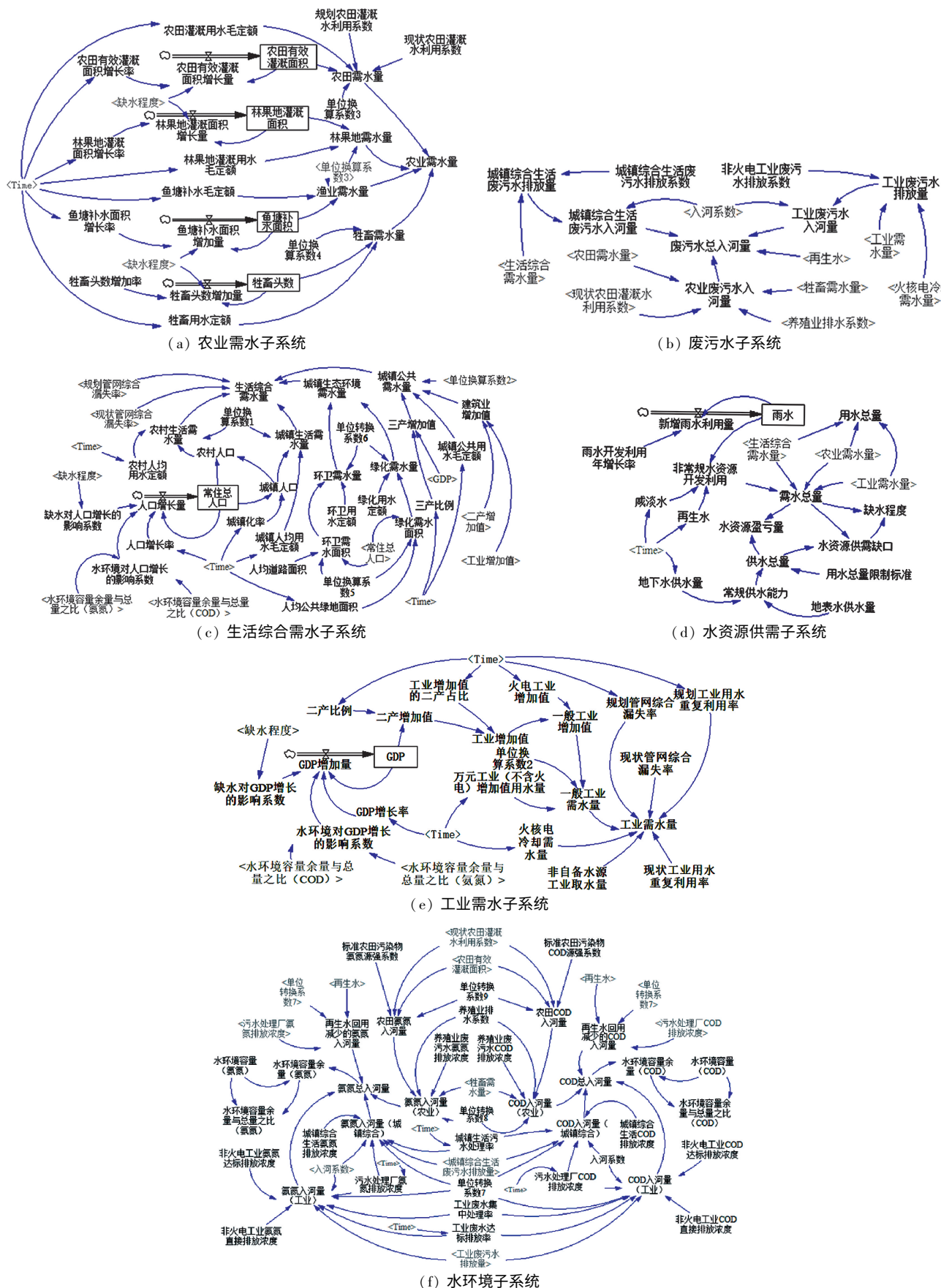


图2 SD模型系统流图

Fig.2 System flow diagram of SD model

得农业需水量。

b. 废污水子系统。中山市的废污水主要来源于城镇综合生活废污水、工业废污水和农业废污水。

c. 生活综合需水子系统。生活综合需水量包括城镇生活需水量、农村生活需水量、城镇公共需水量和城镇生态环境需水量。前两者主要采用人均日用水定额方法求得,城镇公共需水量和城镇生态环境需水量则分别采用万元产业增加值用水定额法、面积定额法计算求得。

d. 水资源供需子系统。中山市供水主要来源于地表水和地下水,同时利用雨水、咸淡水和再生水以供给非生活综合需水的其他方面需水。

e. 工业需水子系统。工业需水量包括一般工业需水量和火核电冷却需水量。其中火核电冷却需水量通过表函数形式表示;一般工业需水量则采用用水定额法计算;根据历史数据分析中山市万元工业(不含火电)增加值用水量的变化趋势,结合一般工业增加值的计算,得到一般工业需水量。

f. 水环境子系统。考虑指标的代表性与可得性,本文研究的污染物为氨氮和化学需氧量(COD)。城镇综合生活和工业产生的污染物入河量根据城镇综合生活和工业废污水的排放量,结合处理率、达标率、处理前后的排放浓度等指标求得;对农田污染物采用源强系数计算方法,对牲畜养殖业通过排水系数、排放浓度等指标计算其入河污染物。

模型涉及的主要方程如下:

a. 供水总量为

$$S_T = \begin{cases} L_S & L_S < C_S \\ C_S & L_S \geq C_S \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_T 为供水总量, m^3 ; L_S 为用水总量限制标准, m^3 ; C_S 常规供水能力, m^3 。

b. 一般工业需水量为

$$D_{GI} = D_{AI}A_I \quad (2)$$

式中: D_{GI} 为一般工业需水量, m^3 ; D_{AI} 为万元工业(不含火电)增加值用水量, m^3 /万元; A_I 为一般工业增加值,万元。

c. 工业需水量为

$$D_I = D_{GI}(1 - R_{PR} + R_{CR}) - D_{IN}(R_C - R_P) + D_{TP} \quad (3)$$

式中: D_I 为工业需水量, m^3 ; R_{PR} 为规划工业用水重复利用率,%; R_{CR} 为现状工业用水重复利用率,%; D_{IN} 为非自备水源工业取水量, m^3 ; R_C 为现状管网综合漏失率,%; R_P 为规划管网综合漏失率,%; D_{TP} 为火核电冷却需水量, m^3 。

d. 农业需水量为

$$D_A = D_C + D_W + D_F + D_L \quad (4)$$

式中: D_A 为农业需水量, m^3 ; D_C 为农田需水量, m^3 ; D_W 为林果地需水量, m^3 ; D_F 为渔业需水量, m^3 ; D_L 为牲畜需水量, m^3 。

e. 生活综合需水量为

$$D_D = D_{AD} + (D_{UD} + D_{UP})(1 - R_C + R_P) + D_{UE} \quad (5)$$

式中: D_D 为生活综合需水量, m^3 ; D_{AD} 为农村生活需水量, m^3 ; D_{UD} 为城镇生活需水量, m^3 ; D_{UP} 为城镇公共需水量, m^3 ; D_{UE} 为城镇生态环境需水量, m^3 。

f. 需水总量为

$$D_T = D_A + D_I + D_D - D_R \quad (6)$$

式中: D_T 为需水总量, m^3 ; D_R 为非常规水资源开发利用量, m^3 。

g. 氨氮总入河量为

$$W_{TNH_3-N} = W_{ANH_3-N} + W_{UNH_3-N} + W_{INH_3-N} - W_{RNH_3-N} \quad (7)$$

式中: W_{TNH_3-N} 为氨氮总入河量,t; W_{ANH_3-N} 为农业产生的氨氮入河量,t; W_{UNH_3-N} 为城镇生活产生的氨氮入河量,t; W_{INH_3-N} 为工业产生的氨氮入河量,t; W_{RNH_3-N} 为再生水回用减少的氨氮入河量,t。

h. COD总入河量为

$$W_{TCOD} = W_{ACOD} + W_{UCOD} + W_{ICOD} - W_{RCOD} \quad (8)$$

式中: W_{TCOD} 为COD总入河量,t; W_{ACOD} 为农业产生的COD入河量,t; W_{UCOD} 为城镇生活产生的COD入河量,t; W_{ICOD} 为工业产生的COD入河量,t; W_{RCOD} 为再生水回用减少的COD入河量,t。

2.1.3 模型参数的取值

模型2018年主要参数取值为:咸淡水再生水利用量、火核电冷却需水量分别为24 112万 m^3 和6 800万 m^3 ,万元工业(不含火电)增加值用水量、城镇公共用水定额分别为19 m^3 /万元和8.46 m^3 /万元,城镇生活污水处理率、规划管网综合漏失率、规划工业用水重复利用率分别为85%、12.18%和26.39%,农村人均用水定额、城镇人均用水定额分别为136L/d和165L/d,污水处理厂COD排放质量浓度、氨氮排放质量浓度分别为60mg/L和8mg/L,牲畜用水定额为11.26L/(d·头),环卫用水定额为2.1L/($m^2 \cdot d$),农田灌溉用水毛定额、林果地灌溉用水毛定额、鱼塘补水毛定额分别为10 680.00 m^3 /hm 2 、4 222.95 m^3 /hm 2 和9 726.60 m^3 /hm 2 。

2.1.4 模型验证

为了验证模型的运行结果是否符合实际情况,对模型进行历史性检验。对比分析中山市2005—2018年模型模拟结果与实际数据(表1)可知:在所

表 1 2005—2018 年部分参数模拟值及实际值

Table 1 Simulated and actual values of some parameters from 2005 to 2018

年份	GDP			总人口			工业增加值		
	模拟值/亿元	实际值/亿元	相对误差/%	模拟值/万人	实际值/万人	相对误差/%	模拟值/亿元	实际值/亿元	相对误差/%
2005	885.72	885.72	0.00	243.46	243.46	0.00	510.87	510.86	0.00
2009	1562.45	1567.50	0.30	295.50	296.53	0.35	857.35	860.06	0.31
2013	2622.45	2651.93	1.11	315.83	317.39	0.49	1392.03	1407.79	1.12
2018	3609.87	3632.70	0.63	329.28	331.00	0.52	1683.5	1780.23	5.43

年份	农业需水量			一般工业需水量			生活综合需水量		
	模拟值/亿 m ³	实际值/亿 m ³	相对误差/%	模拟值/亿 m ³	实际值/亿 m ³	相对误差/%	模拟值/亿 m ³	实际值/亿 m ³	相对误差/%
2005	4.93	4.93	0.00	4.95	5.05	2.05	2.58	2.70	4.60
2009	6.80	6.81	0.11	5.99	6.37	6.04	2.16	2.63	17.70
2013	6.87	6.87	0.01	6.33	6.41	1.27	2.76	2.81	1.91
2018	4.29	4.38	2.05	3.09	3.25	4.92	3.463	3.53	1.90

选取的变量中,生活综合需水量模拟值的相对误差较大,但超过 10% 的年份较少,其他变量模拟值的相对误差都在 10% 以下,大部分在 5% 以内。总的来说,模型的模拟结果有效地反映了实际情况,具有较高的可信度。

2.2 熵权 TOPSIS 评价模型的构建

2.2.1 指标体系的选取

保护资源与环境是可持续发展的前提,为促进水资源开发利用与经济社会的协调发展,本文选取了水资源供需比、COD 水环境承载系数、氨氮水环境承载系数和 GDP 作为评价指标。其中,水资源供需比为实际可用水量与经济社会发展需水量的比值,实际可用水量根据最严格水资源管理制度中用水总量限制标准确定;COD 和氨氮水环境承载系数分别为 COD 和氨氮水环境容量与污染物入河量的比值。该指标评价体系遵循了系统性原则,表征了资源利用目标、环境目标以及经济目标 3 个层面^[12-13],具有一定的代表性。

2.2.2 评价方法

TOPSIS 法是根据评价对象与理想方案的接近程度进行排序的评价方法,具有计算过程灵活方便、评价结果合理等优点^[14-15],而熵权法是根据指标原始数据确定权重的一种客观赋值方法,将其与 TOPSIS 法结合,可克服 TOPSIS 进行评价具有主观性这一缺点^[16-17],能够客观评价不同方案对中山市水资源系统的影响。

熵权法的主要计算步骤为:

步骤 1 假定有 m 个评价对象,每个评价对象有 n 个评价指标,利用评价对象的不同评价指标的实测值构造判断矩阵。

步骤 2 将实测值构成的判断矩阵进行归一化处理,正向和负向指标归一化公式分别为

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$b_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

式中: x_{ij} 为评价对象 i 的评价指标 j 的实测值; $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为评价指标 j 对应的不同评价对象的最满意与最不满意的值。

步骤 3 计算各评价指标的熵值:

$$H_j = - \frac{\sum_{i=1}^m (f_{ij} \ln f_{ij})}{\ln m} \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad f_{ij} = \frac{(1 + b_{ij})}{\sum_{i=1}^m (1 + b_{ij})} \quad (12)$$

式中 H_j 为评价指标 j 的熵值。

步骤 4 计算各评价指标的权重:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (13)$$

式中 w_j 为评价指标 j 的权重。

TOPSIS 模型综合评价法的主要计算步骤为:

步骤 1 数据同趋势化与无量纲化。通过反比将负向指标数据正向化,将正向化处理后的数据按下式进行无量纲化处理,即得到无量纲决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$:

$$z_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m v_{ij}^2}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中 v_{ij} 为正向化后评价对象 i 的评价指标 j 的值。

步骤 2 确定指标 j 的最优解 z_j^+ 和最劣解 z_j^- :

$$z_j^+ = \max(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}) \quad (15)$$

$$z_j^- = \min(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}) \quad (16)$$

步骤3 确定评价对象与最优解及最劣解间的加权欧式距离 D_i^+ 和 D_i^- :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j(z_{ij} - z_j^+)]^2} \quad (17)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j(z_{ij} - z_j^-)]^2} \quad (18)$$

步骤4 确定接近度 C_i :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (19)$$

C_i 值越接近于1 说明该对象与最佳方案越靠近,即对象相对最优,最终按各对象接近度大小进行排序。

3 结果与分析

3.1 常规发展模式模拟

常规发展模式,即假定中山市维持现状供用水水平、节水强度和污水治理力度等,经济社会指标按照现行的城市总体布局和发展规划确定,不采取任何水资源管理措施的发展模式。在 Vensim-DSS 中运行所建立的中山市水资源 SD 模型,模拟常规发展模式下中山市 2019—2040 年的水资源供需、经济社会以及水环境状况的变化趋势,结果如图 3 所示。

在常规发展模式下,中山市未来的 GDP 将持续增长,2020 年、2030 年和 2040 年 GDP 分别为 4093.43 亿元、7 631.64 亿元和 12 237.70 亿元;2020—2030 年、2030—2040 年 GDP 年均增长率分别为 6.43%、4.84%,发展速度逐步放缓。中山市的需水总量持续增加,到 2034 年需水总量将达到 14.93 亿 m^3 ,届时将超过中山市供水总量,缺水量为 0.42 亿 m^3 ;到 2040 年,缺水量将达到 4.02 亿 m^3 ,水资源供需比仅为 0.78。中山市的水环境承载系数将持续下降,2035 年,中山市将出现 COD 水环境容量不足现象,COD 水环境承载系数为 0.98,至 2040 年,COD 水环境承载系数将下降至 0.80;氨氮污染则更为严重,2020 年氨氮入河量为 3 869 t,已超过

中山市氨氮水环境容量 315 t,且随着时间的推移,污染愈发严重,2030 年和 2040 年氨氮水环境承载系数仅为 0.57 和 0.38。

3.2 敏感性分析

在常规发展模式下,中山市的水资源问题愈发突出,将影响中山市的可持续发展,亟须制定水资源管理方案。为寻找对水资源系统影响显著的参数,为水资源管理提供方向,本文设计不同方案对水资源系统进行敏感性分析。

3.2.1 方案设计及模拟结果分析

根据最严格水资源管理制度设立的目标及不同学者对华南河网地区水资源问题的研究^[18],本文初步设计了 12 个方案进行参数敏感性分析。方案设计的基本思路为:在常规发展模式的基础上,每个参数 2030 年的具体数值向有利于水资源系统发展的方向改变 10%,且每次只变动 1 个参数。所选方案涵盖了水量调整与水质管控两个方面,且参数变化范围不大,具有一定的代表性与可行性。运行所建立的 SD 模型,得到不同方案下目标变量的变动情况。方案的具体设计及模拟结果如表 2 所示。

在缓解水资源供需矛盾方面,方案 8 取得最优效果,2030 年和 2040 年水资源供需比较常规发展模式分别提高 4.9% 和 5.5%。在促进 GDP 增长方面,方案 4 为最优方案,2030 年和 2040 年 GDP 分别达到 7 639.34 亿元和 12 275.1 亿元,较常规发展模式分别增加 7.7 亿元和 37.4 亿元。在改善水质方面,方案 4 能同时提高了 COD 与氨氮水环境承载系数,是最有利于改善水环境质量的方案;而方案 2 和方案 3 仅能提高 COD 和氨氮水环境承载系数中的一个指标,不能系统地改善水环境质量。

3.2.2 熵权法 TOPSIS 模型综合评价结果分析

由以上分析可知,同一方案能对其中个别指标产生明显作用而对另外指标影响较小。为衡量不同参数变化对整个水资源系统的影响,本文运用熵权 TOPSIS 模型进行综合评价并排序,从而得出优选方案。

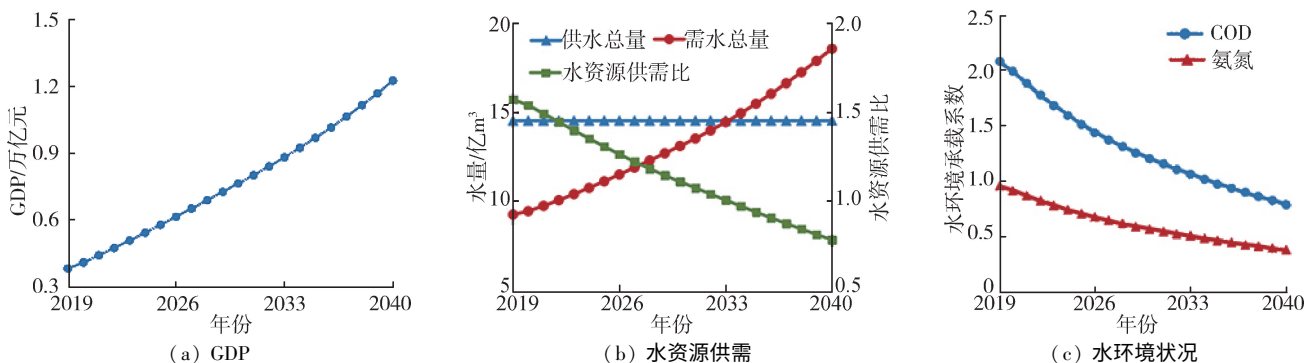


图3 中山市 2019—2040 年 GDP、水资源供需以及水环境状况的变化趋势

Fig.3 Trends of water resources supply and demand, GDP, and water environment from 2019 to 2040 in Zhongshan City

表2 方案设计及目标变量模拟结果

Table 2 Scheme design and simulation results of target variables

方案	参数变化	水资源 供需比		GDP/亿元		COD 水环境 承载系数		氨氮水环境 承载系数	
		2030 年	2040 年	2030 年	2040 年	2030 年	2040 年	2030 年	2040 年
1	咸淡水再生水利用量提高 10%	1.129	0.793	7631.64	12240.0	1.209	0.795	0.572	0.385
2	污水处理厂 COD 排放浓度减少 10%	1.108	0.783	7631.88	12238.9	1.271	0.836	0.572	0.385
3	污水处理厂氨氮排放浓度减少 10%	1.108	0.782	7635.92	12258.7	1.208	0.794	0.599	0.402
4	城镇生活污水处理率提高 10%	1.108	0.781	7639.34	12275.1	1.307	0.853	0.619	0.414
5	农业用水定额减少 10%	1.135	0.794	7631.65	12240.3	1.209	0.795	0.572	0.385
6	规划管网综合漏失率减少 10%	1.117	0.788	7632.58	12243.1	1.218	0.801	0.578	0.388
7	规划工业用水重复利用率提高 10%	1.122	0.794	7632.68	12245.2	1.226	0.807	0.579	0.389
8	万元工业(不含火电)增加值用水量减少 10%	1.164	0.826	7635.80	12267.3	1.282	0.846	0.598	0.403
9	火核电冷却需水量减少 10%	1.135	0.796	7631.64	12240.6	1.209	0.795	0.572	0.385
10	农村人均用水定额减少 10%	1.131	0.794	7632.06	12241.3	1.210	0.796	0.573	0.385
11	城镇公共用水定额减少 10%	1.161	0.818	7634.89	12261.8	1.242	0.817	0.593	0.399
12	城镇人均用水定额减少 10%	1.147	0.802	7633.96	12251.6	1.228	0.804	0.584	0.390

根据中山市 2005—2018 年历史数据,利用熵权法对所选指标赋权。赋权结果为:水资源供需比、COD 水环境承载系数、氨氮水环境承载系数、GDP 的权重分别为 0.338、0.239、0.227、0.196。在所构建的指标体系中,水资源供需比所占权重最大,水环境承载系数次之,而经济社会所占权重最少,赋权结果与珠江三角洲其他城市水资源承载力计算中指标赋权的结果相近^[19-20],是合理且可靠的。

利用熵权 TOPSIS 模型对方案进行综合评价。分别计算 2030 年和 2040 年各方案与最优解的接近度,根据接近度进行排序,如表 3 所示。

表3 方案综合评价结果

Table 3 Comprehensive evaluation results of different schemes

方案	2030 年		2040 年	
	接近度	排序	接近度	排序
1	0.168	11	0.146	11
2	0.339	5	0.345	4
3	0.288	6	0.281	6
4	0.645	2	0.590	2
5	0.209	7	0.155	10
6	0.124	12	0.125	12
7	0.188	9	0.224	7
8	0.704	1	0.788	1
9	0.208	8	0.177	8
10	0.181	10	0.156	9
11	0.519	3	0.559	3
12	0.362	4	0.292	5

根据 2030 年综合评价结果,方案 8 对中山市水资源系统的综合影响最大,为所有方案中的最优方案。方案 8 能有效促进工业节水,在减少需水量的同时减少相应的污染物排放量,延缓水环境恶化;而水资源供需矛盾减缓、水环境的改善又将作用于经济社会系统,促使 GDP 增速提高。方案 8 对 4 个指

标的改善均发挥明显作用,故对整个水资源系统产生显著影响,适用于调整中山市水资源管理政策。方案 4 能减少入河污染物的排放,有效改善水环境质量且促进 GDP 的增长,但该参数的调节对水量影响甚少,故对综合指标的影响低于方案 8。方案 11 与方案 12 调整了城镇用水量,在减少用水量的同时也减少了污染物的排放,GDP 增长速度也有所提高。从上述分析可以看出,控制用水量更容易促使系统达到全面平衡的状态,但控制不同部门的用水也会得到不同的效果,如方案 5 对系统的综合影响劣于方案 8 和方案 11。

对比 2030 年和 2040 年的排序结果,12 个调整方案对近、远期的影响程度有一定的区别。如方案 5 在 2030 年和 2040 年排名分别为第 7 和第 10,表明减少农业用水定额对水资源系统近期影响较大,但随着时间的推移,其影响将会有所降低;方案 7 的效果则相反,表明工业用水重复利用率的提高对近期的影响较小,但随着时间推移,其影响会更加显著。2030 年和 2040 年排在前 50% 的方案大体相同,但为了使水资源管理政策更加适合长远的发展,需重视远期作用更加明显的参数调整方案,如工业用水重复利用率的提高。水资源的管理不仅应着眼于当下,更应放眼未来,从而促使城市可持续发展。

4 结 论

a. 常规发展模式下,中山市水资源供需矛盾逐渐凸显,水环境恶化愈发严重。

b. 万元工业(不含火电)增加值用水量的减少对水资源系统的影响最大,相应的方案适用于调整中山市水资源管理政策。

c. 控制用水量更容易促使水资源系统达到全

面平衡的状态,有助于实现经济社会的可持续发展。

d. 不同方案对近期及远期的影响不尽相同,为了使水资源管理政策更适合长远的发展,决策者应重视远期作用更为明显的参数调整方案。

参考文献:

- [1] 刘寒青,刘静,赵建世,等. 基于水资源系统可持续性的南水北调进京规模分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):99-105. (LIU Hanqing, LIU Jing, ZHAO Jianshi, et al. Analysis of water transfer scale of South-to-North Water Diversion Project based on sustainability of water resources system[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):99-105. (in Chinese))
- [2] 唱彤,酆建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护, 2020, 36(1):44-51. (CHANG Tong, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):44-51. (in Chinese))
- [3] YANG Z, SONG J, CHENG D, et al. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi'an City, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230:221-233.
- [4] MA Hailiang, SHI Chenling, CHOU Nanting. China's water utilization efficiency: an analysis with environmental considerations[J]. Sustainability, 2016, 8(6):516.
- [5] 李敏,刘春学,李春雪,等. 云南省水资源政策效应模拟及预测研究[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(1):133-138. (LI Min, LIU Chunxue, LI Chunxue, et al. Simulation and prediction of water resources policy effect in Yunnan Province[J]. Areal Research and Development, 2020, 39(1):133-138. (in Chinese))
- [6] 卢超,王蕾娜,张东山,等. 水资源承载力约束下小城镇经济发展的系统动力学仿真[J]. 资源科学, 2011, 33(8):1498-1504. (LU Chao, WANG Leina, ZHANG Dongshan, et al. System dynamics simulation of small towns' economy under the constraints of water resources' carrying capacity[J]. Resources Sciences, 2011, 33(8):1498-1504. (in Chinese))
- [7] KOTIR J H, SMITH C, BROWN G, et al. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573:444-457.
- [8] 焦士兴,王安周,李青云,等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):21-26. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, LI Qingyun, et al. Study on coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Henan Province[J]. Water Resources

Protection, 2020, 36(2):21-26. (in Chinese)).

- [9] 张礼兵,胡亚南,金菊良,等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1):242-254. (ZHANG Libing, HU Yanan, JIN Juliang, et al. Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu Basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(1):242-254. (in Chinese))
- [10] 宋晓猛,孔凡哲,占车生,等. 基于统计理论方法的水文模型参数敏感性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5):642-649. (SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe, ZHAN Chesheng, et al. Sensitivity analysis of hydrological model parameters using a statistical theory approach [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5):642-649. (in Chinese))
- [11] 位帅,陈志和,梁剑喜,等. 基于 SD 模型的中山市水资源系统特征及其演变规律分析[J]. 资源科学, 2014, 36(6):1158-1167. (WEI Shuai, CHEN Zhihe, LIANG Jianxi, et al. Analysis of water resource system characteristics and variation law for Zhongshan City based on system dynamics[J]. Resources Science, 2014, 36(6):1158-1167. (in Chinese))
- [12] 张玲玲,沈家耀,王伟荣. “三条红线”约束下区域水资源复合系统仿真与模拟研究:以菏泽市为例[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(6):30-37. (ZHANG Lingling, SHEN Jiayao, WANG Weirong, et al. Study on simulation of regional water resources compositesystem under the “Three Red Lines” constraints: a case study of Heze City [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2016, 37(6):30-37. (in Chinese))
- [13] 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 Chuanyou, YIN Tong, et al. Evaluating the water ecological carrying capacity of Chengdu City with SD model [J]. South-to-North Transfers and Water Sciences and Technology, 2017, 15(4):101-110. (in Chinese))
- [14] 左其享,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binnin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):1-7. (in Chinese))
- [15] 孙涵,聂飞飞,胡雪原. 基于熵权 TOPSIS 法的中国区域能源安全评价及差异分析[J]. 资源科学, 2018, 40(3):477-485. (SUN Han, NIE Feifei, HU Xueyuan. Evaluation and difference analysis of regional energy security in China based on entropy-weight TOPSIS

- modeling[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 477-485. (in Chinese))
- [16] 杜娟娟. 基于不同赋权方法的模糊综合水质评价研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(12): 69-73. (DU Juanjuan. Research of fuzzy comprehensive water quality assessment model based on different methods[J]. Yellow River, 2015, 37(12): 69-73. (in Chinese))
- [17] 傅聪颖, 赖昭豪, 郭熙. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价及障碍因素诊断[J]. 生态经济, 2020, 36(1): 198-204. (FU Congying, LAI Zhaohao, GUO Xi. Evaluation of regional resource and environment carrying capacity based on the entropy-weight TOPSIS model and the obstacle factors diagnosis[J]. Ecological Economy, 2020, 36(1): 198-204. (in Chinese))
- [18] LI Tianhong, YANG Songnan, TAN Mingxin. Simulation and optimization of water supply and demand balance in Shenzhen: a system dynamics approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 882-893.
- [19] 张斌. 基于 SD 模型的深圳市水资源承载力研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(12): 89-93. (ZHANG Bin. SD model based study on water resources carrying capacity of Shenzhen[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(12): 89-93. (in Chinese))
- [20] 范嘉炜, 黄锦林, 袁明道, 等. 灰色关联-熵模型在珠三角水资源承载力评估中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 35-39. (FAN Jiawei, HUANG Jinlin, YUAN Mingdao, et al. The application of grey correlation-entropy model in water resources carrying capacity evaluation to Pearl River Delta[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(7): 35-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-01-08 编辑: 施业)

(上接第 40 页)

- Flood forecasting of small watershed in mountainous area based on hydrological-hydrodynamic coupling model[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(5): 28-35. (in Chinese))
- [26] HUBBARD M E J J O C P. Multidimensional slope limiters for MUSCL-Type finite volume schemes on unstructured grids[J]. Journal of Computational Physics, 2012, 155(1): 54-74.
- [27] LAI T, YI T H, LI H N, et al. An explicit fourth-order Runge-Kutta method for dynamic force identification[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2017, 17(10): 1750120.
- [28] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling Software, 2015, 66(C): 131-152.
- [29] SIVAKUMAR P, HYAMS D G, TAYLOR L K, et al. A primitive-variable Riemann method for solution of the shallow water equations with wetting and drying[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(19): 7452-7472.
- [30] HOU J, LIANG Q, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains[J]. Computers & Fluids, 2013, 82(17): 132-147.
- [31] 侯精明, 李桂伊, 李国栋, 等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2): 96-107. (in Chinese))
- [32] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese))
- [33] GEURTS P, ERNST D, WEHENKEL L. Extremely randomized trees[J]. Machine Learning, 2006, 63(1): 3-42.
- [34] JOHN V, ZHENG L, GUO C, et al. Real-time lane estimation using deep features and extra trees regression[C]//Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology. Cham: Springer, 2015.
- [35] YU Z, LUO Y, DENG X, et al. Satellite-based estimates of daily NO₂ exposure in China using hybrid random forest and spatiotemporal kriging model[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(7): 4180.
- [36] KELLER J M, GRAY M R, GIVENS J A. A fuzzy K-nearest neighbor algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1985, 15(4): 12-20.
- [37] HU X, SHI L, LIN L, et al. Improving surface roughness lengths estimation using machine learning algorithms[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287: 107956. (收稿日期: 2020-12-15 编辑: 王芳)