

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.06.13

# 基于系统动力学的珠澳地区取用水系统水资源承载力

李文雅<sup>1,2</sup>, 赵玲玲<sup>2</sup>, 翁学先<sup>3</sup>, 柳玉梅<sup>4</sup>, 宋小燕<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 广东省科学院 广州地理研究所 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070; 3. 江西省玉山县水利局, 江西 上饶 334700; 4. 苏州科技大学 地理科学与测绘工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 珠澳地区经济社会快速发展导致水资源问题日益突出。综合考虑珠澳地区经济社会发展和水资源开发保护, 基于系统动力学理论设置现状趋势发展、经济优先发展、环境优先发展及综合发展4个情景方案, 分析4个情景下珠澳地区“水-社会-生态”复杂水系统水资源承载力状况, 并预测2020-2030年综合水资源承载力发展趋势。结果表明: 预测期内各情景下的水资源承载力均呈上升趋势, 而综合发展情景下至2030年用水总量低于广东省最严格水资源管理制度中所要求的 $6.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 整体优于其他情景; 珠海市对澳门供水约占供水总量的15%, 经济发展及人口增长会导致澳门用水出现供需缺口, 综合发展情景可以缓解珠海市的供水压力; 对各发展情景下用水效率分析发现, 降低工业用水有利于环境保护, 但会阻碍经济发展, 提高工业用水效率并实施节水措施可实现环境保护与经济发展的双赢。珠海市与澳门取用水具有联动调控特点, 水资源面临较大承载压力, 采取适宜措施有利于提高珠澳地区水资源承载力。

**关键词:** 水资源承载力; 系统动力学; 取用水系统; 珠澳地区

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0103-08

## Water resources carrying capacity of Zhuhai – Macao water intake system based on system dynamics

LI Wenya<sup>1,2</sup>, ZHAO Lingling<sup>2</sup>, WENG Xuexian<sup>3</sup>, LIU Yumei<sup>4</sup>, SONG Xiaoyan<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Guangdong Provincial Public Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 3. Yushan County Water Resources Bureau, Shangrao 334700, China; 4. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** With the rapid development of social economy in Zhuhai and Macao, the problem of water resources has become increasingly prominent. For the comprehensive development of Zhuhai – Macao region and the protection of water resources, the water resources carrying capacity of water – society – ecology complex system is analyzed under four scenarios based on system dynamics, namely, status quo, priority of economic development, priority of environmental protection and integrated development, and then the developing trend of comprehensive water resources carrying capacity of 2020 – 2030 is estimated under these scenarios. The results showed that the water resources carrying capacity of all scenarios in the forecast period shows an increasing trend, and the total water consumption in the integrated development scenario is lower than  $684 \times 10^6 \text{ m}^3$  required by the strictest water resources management system in Guangdong Province, which is better than other scenarios overall. Zhuhai's water supply to Macao is about 15% of the total water supply, economic development and population growth will lead to a gap in water supply and demand in Macao, and integrated development scenario can relieve the pressure on Zhuhai's water supply. Analysis of the water use efficiency of each development model reveals that reducing industrial water use is beneficial to environmental protection, but will

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-07-08

基金项目: 粤港澳大湾区陆地生态安全与绿色可持续发展研究项目(2020GDASYL-20200301003); 粤港澳大湾区城市群生态系统观测研究(2020GDASYL-20200401001); 粤港澳大湾区人地关系机制以及环境适应能力提升策略研究项目(2020GDASYL-20200102002)

作者简介: 李文雅(1997-), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 宋小燕(1983-), 女, 山西介休人, 博士, 副教授, 研究方向为水文循环。

hinder economic development, whereas improving industrial water use efficiency and implementing water conservation measures can achieve a win-win situation for both environmental protection and economic development. The water intake of Zhuhai and Macao are interconnected, so the local water resources are under great pressure. Therefore, appropriate measures should be taken to improve the carrying capacity of water resources in this region.

**Key words:** water resources carrying capacity; system dynamics; water intake system; Zhuhai – Macao region

## 1 研究背景

水资源承载力作为区域水资源承载状态的评判标准,对实现经济社会发展与环境保护协同作用具有重要意义。但目前不合理的取用水导致水量减少、水质恶化等问题层出不穷,水资源承载能力面临巨大压力。因此,亟需一种水资源综合评价方法分析水资源系统中的突出问题并预测未来水资源发展趋势<sup>[1-3]</sup>,从而针对不同区域的水资源承载状况提出有效管理措施,以促进水资源的合理利用及有序开发。

系统动力学作为一种仿真模拟方法,适用于非线性、高阶次、多变量的复杂系统,能够较好地对水资源系统做出长期的、动态的分析与研究,近年来在水资源承载力研究领域得到了广泛应用<sup>[4-6]</sup>。基于系统动力学的水资源系统模型可以对不同地区水资源承载力的历史、现状与未来趋势进行定量评估与预测,设置多种情景方案并结合层次分析法和熵权法等方法确定指标权重,评价不同方案下的水资源承载力并选出适用于不同地区的最佳方案<sup>[7-8]</sup>,从而提出具有针对性的措施以提高水资源承载力。例如新疆维吾尔自治区典型干旱区塔里木河流域以灌溉农业为主,提高该地区水资源承载力的有效办法为推行农业节水技术<sup>[9]</sup>;北京市湿地水资源承载力的主要影响因素为水污染及水体富营养化等,提高其水资源承载力的有效管理措施为调整产业结构、改善污染控制及增加再生水利用量<sup>[10]</sup>;珠三角地区水资源空间分布不均衡,加之咸潮上溯等自然因素影响,该地区水质及水量承载力均面临巨大挑战,因此加强珠三角地区水资源联动调控、节水优先与污染控制并行是提高该地区水资源承载力的有效措施<sup>[11]</sup>。通过系统动力学方法能够有效解决水资源管理中的动态复杂问题,通过对水资源和经济社会及人口的一体化分析,设置多种情景方案并对比不同方案下的水资源承载力,可以为管理者提供决策依据和具有针对性的调控策略<sup>[12]</sup>。

珠海市和澳门特别行政区作为珠三角和粤港澳大湾区的重要组成部分,对促进区域经济与环境协

调发展十分重要<sup>[13-15]</sup>。珠海市过境水资源量丰富,供水来源主要为地表水,供水手段主要为提水、引水和蓄水。澳门城市人口密集,水资源条件匮乏,人口与水资源空间分布高度不均;目前珠海市和澳门共用一个供水系统即珠澳供水系统,由于澳门土地资源有限,且境内没有河流,自1924年以来大部分供水来源地为珠海市<sup>[16-18]</sup>。经济发展和人口的增长使珠澳地区用水总量呈逐年上升趋势,废污水排放总量也不断增大,加之咸潮上溯的影响,导致澳门在珠海市的取水量逐年增加,使该地区供需水矛盾日益突出<sup>[19-20]</sup>,亟需对该地区水资源承载力及未来的取用水系统发展趋势进行预测。本文基于系统动力学理论构建珠澳地区供用水系统承载力现状,并预测未来趋势,以期对珠澳地区水资源优化配置提供决策依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区域概况

珠海市和澳门特别行政区位于珠江三角洲前缘,南部与广阔的南海相邻。2019年末珠澳地区常驻人口共 $270.33 \times 10^4$ (其中珠海市 $202.37 \times 10^4$ ,澳门 $67.96 \times 10^4$ ),珠海市人均GDP为 $16.98 \times 10^4$ 元,位列广东省第2(2019年)。珠海市雨量充沛,多年平均降水量为2037 mm,多年平均气温为22.5℃,该地区属于典型的亚热带海洋性气候。市内河流众多,过境水量丰富,主要河道包括磨刀门水道、鸡啼门水道和虎跳门水道。澳门特别行政区境内共有4座储水设施,总储水量为 $515 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。珠海市主要供水来源为地表水,近年来珠海市及其对澳门的供用水量呈增长趋势。珠澳地区用水结构中的生活用水及生产用水比重较大,具有一定节水空间。由于澳门地区土地资源有限,自20世纪以来,其供水主要来自珠海市。2010-2019年澳门供水量及珠海市用水量变化趋势见图1。

### 2.2 数据来源

本研究使用的原始数据主要来源于2010-2019年《珠海市水资源公报》、珠海市统计局官网(<http://tjj.zhuhai.gov.cn/>)、珠海市自然资源局官

网(<http://zrzyj.zhuhai.gov.cn/>)、《广东省水资源公报》《珠海市城市规划技术标准与准则》;经济社会层面数据主要来源于《珠海市统计年鉴》、澳门统计暨普查局官网(<https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/>)。水资源数据包括水资源总量、地表水资源总量、地下水资源总量、生活用水、生产用水、生态用水、废水排放量及污水处理率等;经济社会数据包括人口、GDP、工业增加值、农业增加值等。

### 2.3 研究方法

2.3.1 系统动力学方法 系统动力学是研究复杂问题的有效方法,被应用于工业、农业、能源和军事等众多领域,其主要作用可归纳为预测、管理、优化与控制<sup>[4]</sup>。珠澳地区水资源系统结构复杂,水资源

配置存在优化空间。采用 Vensim 软件对珠澳地区水资源承载力建立系统动力学仿真模型<sup>[21]</sup>。Vensim 软件中包括状态变量(L)、速率变量(R)、辅助变量(A)、常量(C)及外生变量(E)。珠澳地区水资源系统动力学模型建立过程中的主要辅助变量及其计算方法列于表 1。

对珠澳地区取用水系统进行仿真模拟,绘制 SD (systems dynamics)模型流程图并确定模型参数,如图 2 所示。模型中状态变量包括人口总量、工业增加值、水资源总量及澳门人口,反映了系统中部分参数数值的累积过程;对应速率变量包括人口增长率、工业增加值增长率、水资源增长率及澳门人口增长率,根据统计数据输入。

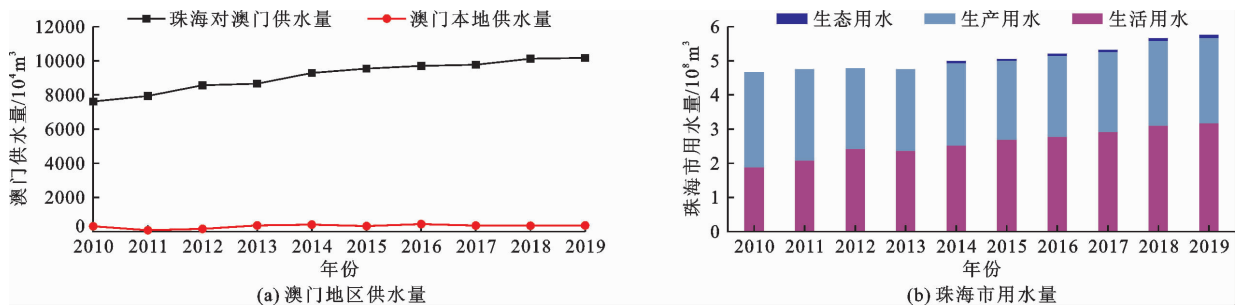


图 1 2010 - 2019 年澳门供水量及珠海市用水量变化趋势

表 1 系统动力学仿真模型主要辅助变量及其计算方法

| 变量       | 计算方法                                |
|----------|-------------------------------------|
| 用水总量     | 农业用水量 + 工业用水量 + 生态用水量 + 生活用水总量      |
| 居民生活用水量  | 人口总量 × 人均居民生活用水量                    |
| 农业增加值    | 农业用水量 / 万元农业增加值用水量                  |
| 工业增加值用水量 | 工业增加值 × 万元工业增加值用水量                  |
| 生活污水排放量  | 生活污水排放系数 × 生活用水总量                   |
| 工业污水排放量  | 工业污水排放系数 × 工业用水总量                   |
| 供水总量     | 再生水利用量 + 地下水供水量 + 地表水供水量 - 内地对澳门供水量 |
| 再生水利用量   | (工业污水排放量 + 生活污水排放量) × 再生水利用率        |
| 地下水供水量   | 地下水开发利用程度 × 地下水资源量                  |
| 地表水供水量   | 地表水开发利用程度 × 地表水资源量                  |
| 供需缺口     | 用水总量 - 供水总量                         |
| 澳门用水总量   | 内地对澳门供水量 + 澳门本地供水量                  |

2.3.2 层次分析法 层次分析法是将复杂的系统分解为多个目标和层次,进而确定层次单排序(权重)和总排序的系统方法<sup>[22-23]</sup>,该方法能够综合确定 SD 模型中各参数的权重,评估珠澳地区水资源承载力。层次结构中最高层为珠澳地区水资源承载力(G),中间层为经济社会子系统(B<sub>1</sub>)、水污染子系统(B<sub>2</sub>)、水资源子系统(B<sub>3</sub>),最低层为子系统中部分参数和变量。将子系统与评价指标分别两两比

较,确定判断矩阵并进行一致性检验,一致性检验较好则可以对珠澳地区水资源承载力指标进行评价。

$$CI = \lambda - \frac{n}{n - 1} \quad (1)$$

式中:CI 为一致性评价指标;λ 为判断矩阵最大特征根;n 为判断矩阵阶数(参数数量)。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中:CR为检验系数;随机一致性指标RI见表2。当CR < 0.1时认为一致性较好。

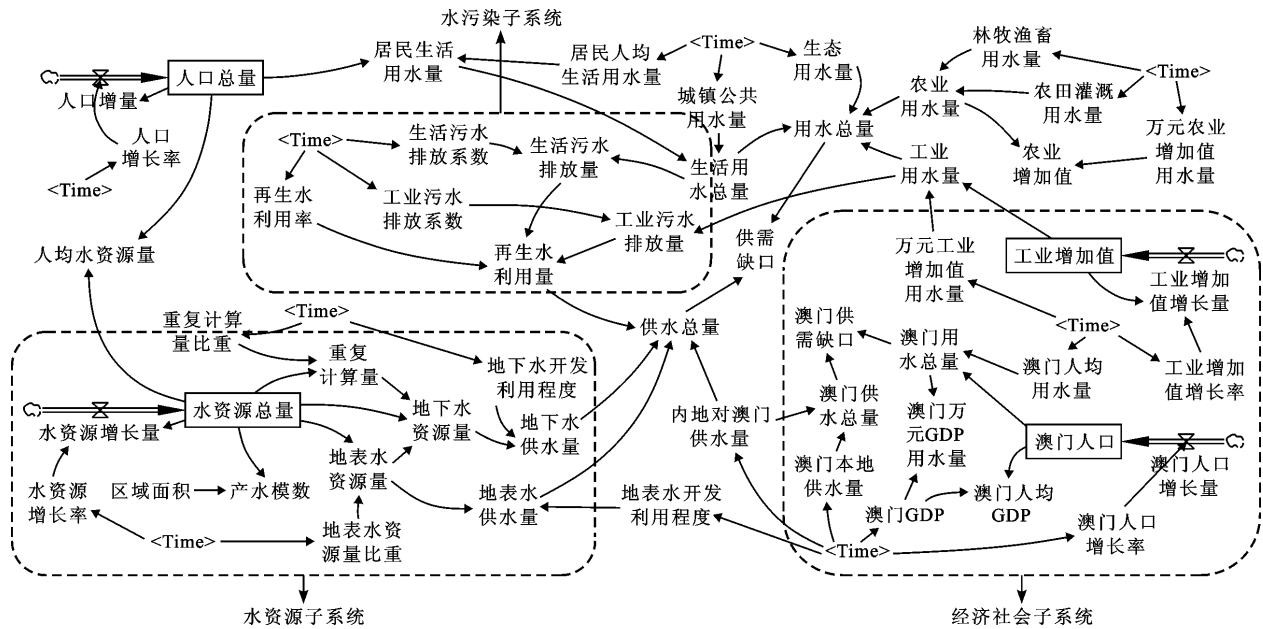


图2 珠澳地区水资源承载力系统SD模型流程图

表2 随机一致性指标RI值

|      |   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 矩阵阶数 | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| RI   | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

2.3.3 水资源承载力计算方法 对指标数据进行标准化处理后加权汇总,得到每个方案下的综合水资源承载力,计算公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^n U_i S_i \quad (3)$$

式中:R为综合水资源承载力;U<sub>i</sub>为第i个指标的权重;S<sub>i</sub>为第i个指标标准化后的值。

2.3.4 模型检验方法

(1) 为保证建立的珠澳地区水资源承载力的系统动力学模型的准确性,采用2010-2019年人口总量、工业增加值、用水总量和工业污水排放量等具有代表性的变量作为检验对象,对其真实值和拟合值的相对误差进行分析。相对误差计算方法<sup>[24]</sup>如公式(4)所示:

$$E = \frac{S - H}{H} \times 100\% \quad (4)$$

式中:E为相对误差;S为模型模拟值;H为历史真实值。

(2) 灵敏度分析用来研究参数变化对变量的影响,从而确定参数对系统行为的影响程度,并根据灵敏度检验结果调整参数,设置不同情景模式。灵敏度检验公式<sup>[25]</sup>如下:

$$S_i = \left| \frac{\Delta Y / Y_t}{\Delta X / X_t} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中:S<sub>i</sub>为参数对变量的灵敏度;ΔY为变量Y在t时刻的增长值;Y<sub>t</sub>为变量Y在t时刻的值;ΔX为参数X在t时刻的增长值;X<sub>t</sub>为参数X在t时刻的值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型检验结果

3.1.1 一致性检验结果 模型一致性检验结果见表3。由表3可知,各层次指标的CI及CR值均小于0.1,说明矩阵满足一致性检验,可以用于确定各指标的权重。

表3 模型一致性检验结果

| 层次                    | 一致性指标CI | 检验系数CR  |
|-----------------------|---------|---------|
| 水资源承载力G               | 0.01460 | 0.02520 |
| 社会经济子系统B <sub>1</sub> | 0.00003 | 0.00005 |
| 水污染子系统B <sub>2</sub>  | 0.02680 | 0.04600 |
| 水资源子系统B <sub>3</sub>  | 0.03200 | 0.05600 |

3.1.2 历史检验结果 表4为2010-2019年珠澳地区水资源承载力系统代表性指标模拟误差分析结

果。表 4 中分析结果表明,所选验证变量的真实值与模拟值的相对误差均在  $\pm 15\%$  以内,大部分在  $\pm 5\%$  之内,说明模型的准确性较好,模拟结果与实际情况误差较小,可以用于未来年份的预测。

表 4 2010 - 2019 年珠澳地区水资源承载力系统  
代表性指标模拟误差分析结果

| 年份   | 人口总量     |          |        | 工业增加值      |            |        | 用水总量           |                |        | 工业污水排放量    |            |        |
|------|----------|----------|--------|------------|------------|--------|----------------|----------------|--------|------------|------------|--------|
|      | $H/10^4$ | $S/10^4$ | $E/\%$ | $H/10^8$ 元 | $S/10^8$ 元 | $E/\%$ | $H/10^4$ $m^3$ | $S/10^4$ $m^3$ | $E/\%$ | $H/10^4$ t | $S/10^4$ t | $E/\%$ |
| 2010 | 156.2    | 156.2    | 0      | 619.39     | 619.39     | 0      | 46816          | 46815          | -0.002 | 6125       | 6125       | 0      |
| 2011 | 156.8    | 158.2    | 0.90   | 714.29     | 688.89     | -3.56  | 47531          | 47055          | -1.00  | 4886       | 4712       | -3.56  |
| 2012 | 158.3    | 158.8    | 0.32   | 720.26     | 794.43     | 10.30  | 47813          | 49289          | 3.09   | 5524       | 6094       | 10.31  |
| 2013 | 159.0    | 160.3    | 0.79   | 775.57     | 801.07     | 3.29   | 47575          | 48144          | 1.20   | 5538       | 5719       | 3.28   |
| 2014 | 161.4    | 161.1    | -0.22  | 843.18     | 862.59     | 2.30   | 49804          | 50102          | 0.60   | 4936       | 5050       | 2.31   |
| 2015 | 163.4    | 163.5    | 0.05   | 894.07     | 937.79     | 4.89   | 50464          | 51182          | 1.42   | 5934       | 6226       | 4.92   |
| 2016 | 167.5    | 165.5    | -1.21  | 995.50     | 994.39     | -0.11  | 51979          | 51429          | -1.06  | 4379       | 4374       | -0.12  |
| 2017 | 176.5    | 169.7    | -3.89  | 1133.2     | 1107.2     | -2.30  | 53194          | 52238          | -1.80  | 4382       | 4281       | -2.30  |
| 2018 | 189.1    | 178.8    | -5.45  | 1258.0     | 1260.4     | 0.19   | 56598          | 55699          | -1.60  | 4297       | 4306       | 0.21   |
| 2019 | 202.4    | 191.5    | -5.35  | 1312.4     | 1399.2     | 6.61   | 57611          | 57726          | 0.20   | 4127       | 4402       | 6.66   |

3.1.3 灵敏度检验结果 表 5 为珠澳地区水资源承载力系统模型参数对变量的灵敏度分析结果。表 4 中的检验结果表明,不同参数对不同变量的灵敏度存在差异,其中居民人均生活用水量对用水总量影响较大(为方案设置时的参数调整提供依据),但各参数对变量的灵敏度平均值整体在 10% 以内,说明模型对大多数参数的变化不敏感,系统结构相对稳定,能够用于实际系统的模拟。

3.2 指标选取及方案设置

依照科学性、整体性和可行性原则构建珠澳地区水资源承载力评价指标体系,尽可能完整地反映出珠澳地区取用水系统的特点<sup>[26]</sup>。珠澳地区过境水量丰富,人口密度大,但人均用水量较低,且随着经济的高速发展,水环境问题日益突出,水资源承载

能力面临巨大压力。考虑以上因素,指标的选取应综合体现经济发展、取用水状况及水环境对珠澳地区水资源承载力的影响,并同时兼顾数据的可用性,最终建立了由 9 个评价指标组成的珠澳地区水资源评价指标体系,如表 6 所示。

利用系统动力学方法对珠澳地区取用水系统进行仿真模拟,根据广东省最严格水资源管理制度调整模型参数:2020 年农田灌溉水有效利用系数为 0.515,至 2030 年万元工业增加值用水量小于 12  $m^3$ ,用水总量小于  $6.84 \times 10^8 m^3$ 。设置 4 个发展情景方案,即现状趋势发展、经济优先发展、环境优先发展以及综合发展,对比计算 4 个方案下的综合水资源承载力以选出最优方案<sup>[27]</sup>。各情景的方案设置见表 7。

表 5 珠澳地区水资源承载力系统模型参数对变量的灵敏度分析结果

| 变量    | 人口<br>变化率 | 生活污水<br>排放系数 | 再生水<br>利用率 | 居民人均<br>生活用水量 | 澳门人口<br>增长率 |
|-------|-----------|--------------|------------|---------------|-------------|
| 人口总量  | 6.0821    | 0            | 0          | 0             | 0           |
| 供水总量  | 0         | 6.9106       | 8.7726     | 2.8412        | 0           |
| 工业增加值 | 0         | 0            | 0          | 0             | 0           |
| 澳门人口  | 0         | 0            | 0          | 0             | 11.2129     |
| 用水总量  | 1.7316    | 0            | 0          | 27.9977       | 0           |
| 水资源总量 | 0         | 0            | 0          | 0             | 0           |
| 平均灵敏度 | 1.3023    | 1.1518       | 1.4621     | 5.1398        | 1.8688      |

表6 珠澳地区水资源承载力评价指标体系

| 指标              | 计算方法                          | 属性 | 指标权重   |
|-----------------|-------------------------------|----|--------|
| 产水模数 $C_1$      | 水资源总量 / 区域面积                  | 正向 | 0.4213 |
| 地表水开发利用程度 $C_2$ | 地表供水量 / 地表水资源量                | 负向 | 0.1811 |
| 用水总量 $C_3$      | 生活用水量 + 工业用水量 + 农业用水量 + 生态用水量 | 负向 | 0.0467 |
| 工业增加值 $C_4$     | INTEG 工业增加值增长量                | 正向 | 0.0620 |
| 人口密度 $C_5$      | 人口总量 / 区域面积                   | 负向 | 0.1860 |
| 澳门人均 GDP $C_6$  | 澳门 GDP / 澳门人口                 | 正向 | 0.0310 |
| 再生水利用率 $C_7$    | 统计数据                          | 正向 | 0.0463 |
| 生活污水排放系数 $C_8$  | 生活污水排放量 / 生活用水总量              | 负向 | 0.0194 |
| 生态用水量 $C_9$     | 统计数据                          | 正向 | 0.0061 |

表7 4个发展情景及其方案设置

| 序号 | 情景     | 方案设置  |
|----|--------|---|
| 1  | 现状趋势发展 | 根据地区发展现状,各参数按照相关规划正常发展,不采取任何措施  |
| 2  | 经济优先发展 | 工业增加值增长率提高5%,澳门GDP增加10%,澳门人均用水量增加5 m <sup>3</sup> ,内地对澳门供水量增加1 000 m <sup>3</sup>   |
| 3  | 环境优先发展 | 再生水利用率提高10%,污水排放系数(生活和工业)降低10%,地表水开发利用程度降低5%,珠海市和澳门人均用水量减少5 m <sup>3</sup> ,内地对澳门供水量减少1 000 m <sup>3</sup> ,生态用水量增加100 m <sup>3</sup> ,工业用水量降低5%  |
| 4  | 综合发展   | 地表水开发利用程度降低5%,澳门GDP增加10%,人口增长率降低5‰,澳门人口增长率降低3‰,居民人均生活用水量降低为170 L/d,城镇公共用水量降低10%,通过提高农田灌溉技术使农田灌溉用水量降低15%,万元工业增加值用水量降低0.5 m <sup>3</sup> ,澳门人均用水量减少8 m <sup>3</sup> ,澳门本地供水量增加200 m <sup>3</sup> ,内地对澳门供水量增加10% |

### 3.3 各情景方案的模拟结果与分析

图3为不同方案下2010-2030年珠澳地区水资源主要指标变化趋势模拟结果;图4为不同方案下预测期2020-2030年珠澳地区水资源承载力发展趋势。

对图3、4中各方案的模拟结果综合分析如下:

方案1:现状趋势发展方案,不采取任何措施。图3(a)~3(c)显示,至2030年珠澳地区用水总量将超过 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,远远高于广东省最严格水资源管理制度的 $6.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 要求;工业用水量达到 $1.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占用水总量的19.84%;再生水利用量达到 $1.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占用水总量的20.60%。图4显示该方案下综合水资源承载力呈增长趋势,但仍然低于其他3个方案。

方案2:经济优先发展方案,不考虑环境及节水等问题。在此方案下至2030年珠澳地区工业增加值为 $3.593 \times 10^8$ 元,较2010年的 $619 \times 10^8$ 元工业增加值年均增长率为24%,此方案在一定程度上能

够促进经济发展。然而珠海市以工业为主,工业用水在用水结构中占有较大比例,而澳门供水主要来源于珠海市,在此方案下澳门用水总量显著高于其他方案,2029年澳门供需缺口开始出现负值,表明澳门用水出现供不应求的状况(图3(c)、3(e)、3(f))。在此方案下珠海市和澳门的用水总量急剧增加,珠海市供水系统将承受巨大压力。图3(b)、3(d)显示,至2030年珠澳地区用水总量接近 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,且预测期2020-2030年工业污水排放量增长率在4个方案中为最高,这表明经济的发展会导致用水需求和污水排放的增加,地区经济发展的同时必然伴随着环境问题,因此需统筹考虑制定综合发展方案。

方案3:环境优先发展方案。图3(a)、3(b)、3(d)显示,在此方案下用水总量和工业污水排放量均低于方案2,再生水利用量显著大于其他3个方案。珠澳地区用水结构中生活用水和城镇公共用水所占比重最大,因此降低人均用水量可以有效减少

生活污水的排放量,同时响应国家生态文明建设要求,减少工业用水量并增加生态用水量以支持生态环境保护。此方案下珠澳地区环境将得到极大程度的改善,但经济发展会相对受到制约。图4显示该方案至2030年综合水资源承载力约为0.52,整体优于方案1、2。

方案4:综合发展方案,统筹考虑经济社会发展和环境保护。图3(b)~3(d)、3(f)显示,在此方案下预测期内的用水总量、工业用水量和工业污水排放量均为最低,澳门供需缺口均为正值,未出现供不

应求状况。珠澳地区供水总量中居民生活用水、城镇公共用水及工业用水所占比例较大,通过一系列节约用水措施可以有效降低生活污水排放,从而对环境保护产生积极影响,减少工业用水量同样有利于环境保护,但是会对经济发展产生一定阻碍。因此需通过提高生产技术来降低万元工业增加值的用水量,同时提高农田灌溉用水率,以达到经济与环境目标协调发展的目的。图4显示,综合发展方案至2030年水资源承载力达到0.58,为4个方案中的最优方案。

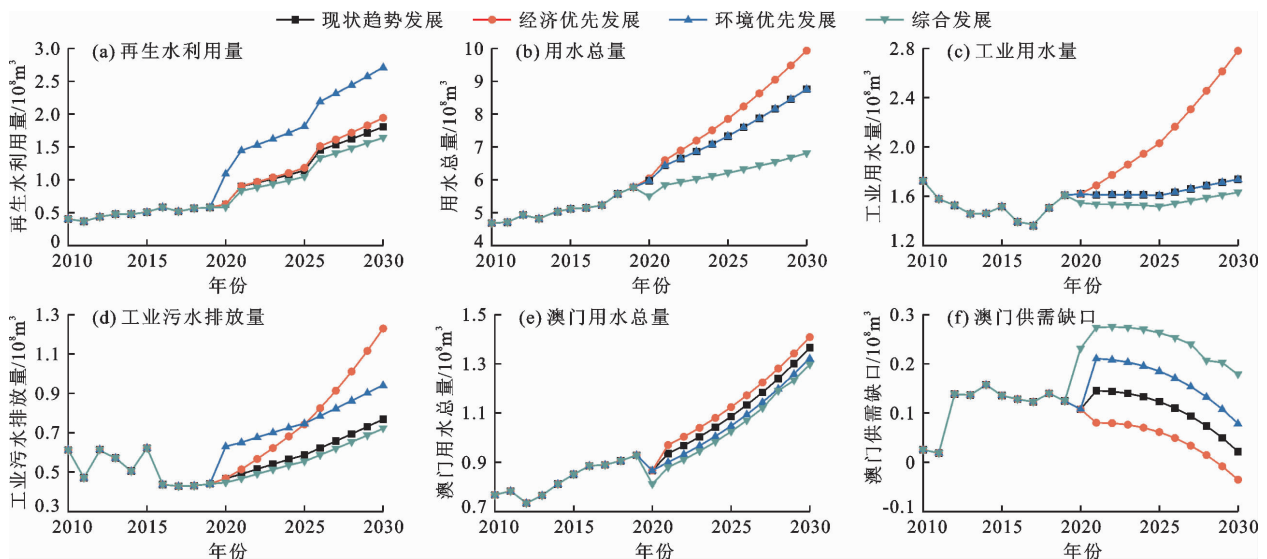


图3 不同方案下2010-2030年珠澳地区水资源主要指标变化趋势

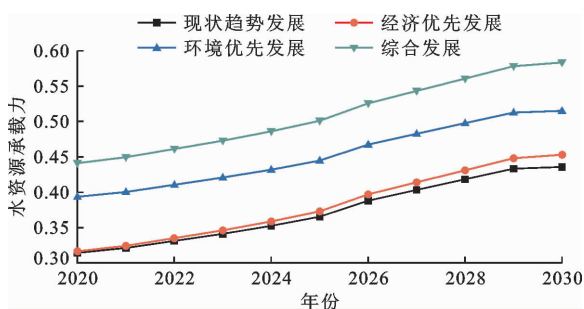


图4 不同方案下预测期2020-2030年珠澳地区水资源承载力发展趋势

根据4个方案下的模拟结果,以2020年为调整起点,4个方案均可以实现水资源承载力的提升。2020年以后4个方案下澳门供需缺口均呈下降趋势,其中3个方案出现了供水量小于用水量的情况,分析其原因可能为澳门人口数量逐年增长过快,尽管加大了内地对澳门供水量和澳门本地供水量,仍然无法达到人口与水资源承载力的均衡发展,水量问题将成为珠澳地区经济发展的重要影响因素。此外,快速的经济增长导致水资源成本增加及环境恶

化,提高工业及农业生产技术是协调经济与环境发展的重要途径。

## 4 讨论

以珠海市和澳门特别行政区区域为空间边界、2010-2030年为时间边界对珠澳地区取用水系统进行模拟预测,结果表明,快速的经济发展和人口增长会导致珠澳地区用水总量逐年增加并伴随着环境恶化,不加干预的情况下珠澳地区水资源将面临巨大承载压力,这与已有学者的研究结果一致<sup>[11]</sup>。与其他城市水资源承载力研究不同的是,珠澳地区作为一个整体的取用水系统,具有联动调控的特点。澳门地区水资源匮乏且人口密集,黄锋华等<sup>[14]</sup>的研究表明,粤港澳大湾区的城市中澳门水资源负载指数最高,属于开发利用程度很高、开发潜力很小的地区,对珠海市供水依赖程度较高。本文中珠海市对澳门的供水量约占供水总量的15%,珠海市肩负自身与澳门的经济发展,水资源承载压力较大,未来水

量将成为珠海市水资源承载状况的主要影响因素。研究表明<sup>[20,22]</sup>,从生产及生活用水角度提高水资源承载力的有效措施包括提高工业用水效率、农田灌溉用水效率、再生水利用率以及构建节水型社会等,应针对区域水资源特点采取适宜措施,本研究中珠海市用水结构比重较大的为生活用水和工业用水,因此缓解珠澳地区供水压力的有效措施为提高工业生产技术和实施节约用水措施。

本文仅讨论了珠澳地区水资源承载力的发展趋势及提高水资源承载力的非工程措施,要实现珠海市和澳门取用水的联动配置,还需要结合水库调水、管道输水和水厂供水等工程措施在珠澳地区取用水系统中发挥的作用,通过工程措施和非工程措施共同保障珠澳地区供水安全,提高珠澳地区水资源承载能力。

## 5 结 论

本文通过系统动力学方法对2020-2030年珠澳地区取用水系统进行仿真模拟,得到4个发展情景方案的模拟结果,利用层次分析法确定指标权重并计算对比不同方案下珠澳地区的水资源承载力发展趋势,主要得到如下结论:

(1)4个方案下的综合水资源承载力在预测期内均呈上升趋势,其中现状趋势发展方案下的水资源承载力最低,在其基础上通过调整参数、设置不同情景可以整体有效地提高珠澳地区的综合水资源承载力。综合发展方案为最优方案,至2030年用水总量为 $6.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,低于广东省最严格水资源管理制度中所要求的 $6.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2)珠海市和澳门特别行政区为统一的联动供水系统,澳门主要供水来源为珠海市,珠海市对澳门的供水量约占供水总量的15%。快速的人口增长和经济发展会导致澳门用水增长较快,在预测期末会出现供不应求的状况,而综合发展方案可以实现珠澳地区供水稳定向好的趋势发展,有效缓解珠海市的供水压力。

(3)珠澳地区用水结构中所占比重较大的为生活用水和工业用水,用水量呈逐年增加趋势,减少工业用水会制约区域的经济发展,通过提高工业用水效率、农田灌溉用水效率、再生水利用率以及实施节约用水措施,可以实现珠澳地区经济发展与环境保护的双赢。

综上,系统动力学方法可以对不同情景下珠澳地区取用水进行仿真模拟,在权衡经济发展和环境

保护的基础上提供有效调控措施,能够全面地反映出珠澳地区供水、用水特点,可在水资源优化配置和调控管理领域发挥积极作用。

## 参考文献:

- [1] 孙为民. 中国水资源状况与安全分析[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(6): 94-96.
- [2] 李云, 张紫瑶, 周维博. 西安市2010-2018年水生态承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 65-70.
- [3] 石晓昕, 袁重乐, 钱会, 等. 基于DPSIR-TOPSIS模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 92-99.
- [4] 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.
- [5] 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, 19(6): 921-928.
- [6] 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 基于系统动力学的闭环反馈水资源优化配置研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 209-216.
- [7] 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.
- [8] YANG Zhaoyang, SONG Jinxi, CHENG Dandong, 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.
- [9] 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.
- [10] WANG Changhai, HOU Yilei, XUE Yongji. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: Analysis of policy optimization for urban wetland water resources management[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1180-1191.
- [11] 林钟华, 刘丙军, 伍颖婷, 等. 变化环境下珠三角城市群水资源脆弱性评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(6): 8-16.
- [12] 曾文炉, 荆杨洋. 城市水资源循环利用的多情景系统模拟分析[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 83-89.
- [13] 徐志青, 刘雪瑜, 肖书虎, 等. 珠江三角洲地区水环境承载力评价及障碍因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 44-52.
- [14] 黄锋华, 黄本胜, 洪昌红, 等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 65-71.
- [15] 黄汉文. 珠三角一体化背景下的珠海市经济发展战略[J]. 经济研究导刊, 2017(14): 66-67.

(下转第119页)



- M: A new model for daily water consumption prediction based on the autoregressive integrated moving average model and the Markov chain error correction[J]. *Water*, 2020, 12(3): 760.
- [18] WANG Zhaocai, WU Xian, WANG Huifang, et al. Prediction and analysis of domestic water consumption based on optimized grey and Markov model[J]. *Water Supply*, 2021, 21(7): 3887–3899.
- [19] YUAN Yanbin, ZHAO Hao, YUAN Xiaohui, et al. Application of fractional order-based grey power model in water consumption prediction[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019(8): 266.
- [20] YUAN Yanbin, LI Qian, YUAN Xiaohui, et al. A SAFSA-and metabolism-based nonlinear grey bernoulli model for annual water consumption prediction[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020, 44: 755–765.
- [21] 陈嘉彤,温立书,谭雅心. 基于灰色预测和Elman神经网络的全国用水量预测[J]. *江西科学*, 2018, 36(6): 961–967.
- [22] LIU Xingpo, ZHANG Yiqing, ZHANG Qichen. Comparison of EEMD – ARMA, EEMD – BP and EEMD – SVM algorithms for predicting the hourly urban water consumption[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2022, 24(3): 535–558.
- [23] 白鹏,龙秋波. 3种用水总量预测方法在京津冀地区的适用性比较[J]. *水资源保护*, 2017, 37(2): 102–107.
- [24] 杨建强,王启优,孙栋元,等. 基于不同模型的用水总量预测研究[J]. *水利规划与设计*, 2021(8): 29–34.
- [25] FARAH E, ABDALLAH A, SHAHROUR I. Prediction of water consumption using Artificial Neural Networks modeling (ANN)[C]// MATEC Web of Conferences, 2019.
- [26] VELASCO L C P, GRANADOS A R B, ORTEGA J M A, et al. Performance analysis of artificial neural networks training algorithms and transfer functions for medium-term water consumption forecasting[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, 9(4): 109–116.
- [27] GHARABAGHI S, STAHL E, BONAKDARI H. Integrated nonlinear daily water demand forecast model (case study: City of Guelph, Canada)[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124182.
- [28] ANTUNES A, ANDRADE – CAMPOS A, SARDINHA – LOURENCO A, et al. Short-term water demand forecasting using machine learning techniques [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2018, 20(6): 1343–1366.
- [29] 王文圣,金菊良,丁晶. 随机水文学(第3版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
- [30] MENG Xiangmei, WU Lifeng. Prediction of per capita water consumption for 31 regions in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 29253–29264.
- [31] MENG Xiangmei, TU Leping, YAN Chen, et al. Forecast of annual water consumption in 31 regions of China considering GDP and population[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 27: 713–736.
- [32] 杨舒媛,王军,魏保义,等. 城市需水预测方法综述及应用调研[J]. *北京规划建设*, 2016(4): 66–68.

(上接第110页)

- [16] 赵玲玲,夏军,杨芳,等. 粤港澳大湾区水生态修复及展望[J]. *生态学*, 2021, 41(12): 5054–5065.
- [17] 胡培,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区发展背景下珠海市水资源保障战略研究[J]. *广东水利水电*, 2020(7): 1–5+37.
- [18] 于洋,卢然超,李迎霞. 澳门水资源现状与展望[J]. *给水排水*, 2014, 50(2): 30–33.
- [19] 申子通,贺新春,郑久瑜. 珠澳供水安全现状及对策建议[J]. *广东水利水电*, 2015(11): 31–33.
- [20] 李骏飞,杨磊三,孟凡松. 粤港澳大湾区面临的水问题探析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 10–14.
- [21] 王涛,李治军,姚蓉,等. 基于模糊层次分析法安庆市水资源承载力的评价[J]. *陕西水利*, 2021(8): 25–28+31.
- [22] 刘熙娟,于德珠,刘云. 基于AHP的阿拉尔市水资源系统评价研究[J]. *地下水*, 2021, 43(4): 185–188+245.
- [23] 何光洪,梁燕,邓炎倩,等. 基于层次分析法的泾阳南塬黄土滑坡影响因素综合研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(2): 66–70+148.
- [24] 林龙圳,李达,林震. 基于熵权 – TOPSIS模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 54(4): 640–648.
- [25] 薛冰,宋新山,严登华. 基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(6): 43–47.
- [26] 王翠,杨广,何新林,等. 基于系统动力学的水资源承载力研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(9): 212–215+220.
- [27] 左其亭,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.