

基于组合赋权-云模型的珠江三角洲 水资源可持续性动态评价

禹熙¹, 李晓英¹, 吴少霖²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

摘要: 为综合评价区域水资源可持续性状况, 构建基于水资源-社会经济-生态环境复合系统的区域水资源可持续性评价体系, 采用投影寻踪模型和云模型合理确定各指标的综合权重, 引入正态云模型确定指标隶属度, 建立基于组合赋权-云模型的区域水资源可持续性评价模型对珠江三角洲9座城市的水资源可持续性状况进行动态评价。结果表明: 2007-2020年珠江三角洲城市群水资源可持续性状况整体呈上升趋势, 到2020年已处于较好水平; 区域内部水资源可持续状况呈现东部城市优于西部城市、南部近海岸城市优于远海岸城市的空间分布格局; 各子系统之间可持续性等级不和谐, 生态环境子系统发展水平较好, 水资源子系统、社会经济子系统是造成珠江三角洲城市群水资源可持续性状况存在空间差异的主要因素。

关键词: 水资源可持续性; 投影寻踪模型; 正态云模型; 动态评价; 珠江三角洲

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0075-09

Dynamic evaluation of water resources sustainability in the Pearl River Delta based on the combined weight-cloud model

YU Xi¹, LI Xiaoying¹, WU Shaolin²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. CCCC Shanghai Navigation Bureau Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the regional water resources sustainability, a regional water resources sustainability evaluation system was constructed based on the composite system of water resources, social economy and ecological environment. The projection pursuit model and cloud model were used to reasonably assign the comprehensive weight of each index, and the normal cloud model was adopted to determine the index membership degree. Then, a regional water resources sustainability evaluation model based on the combined weight and cloud model was established to evaluate the status of water resources sustainability of nine cities in the Pearl River Delta. The results show that the water resources sustainability of the Pearl River Delta Urban Agglomeration showed an overall upward trend from 2007 to 2020, which has reached a preferable level by 2020. The spatial pattern of water resources sustainability in the region shows that the eastern cities are better than the western cities and the southern coastal cities are better than the far coastal cities. The levels of sustainability among the subsystems are not consistent, the ecological environment subsystem is at a good development level, whereas the water resources subsystem and social economy subsystem are the main factors causing the spatial difference of water resources sustainability in the Pearl River Delta Urban Agglomeration.

Key words: sustainability of water resources; projection pursuit model; normal cloud model; dynamic evaluation; the Pearl River Delta

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-11-04

基金项目: 湖南省重大水利科技项目(XSKJ2021000-04); 国家重点研发计划项目(2018YFC0407902)

作者简介: 禹熙(1998-), 男, 云南保山人, 硕士研究生, 研究方向为水资源系统规划。

通讯作者: 李晓英(1978-), 女, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水资源规划与利用。

1 研究背景

珠江三角洲(珠三角)是我国参与经济全球化的主体区域,也是“一带一路”建设的重要支撑,珠三角的水资源是粤港澳大湾区的重要基础性资源,对其发展建设有着举足轻重的作用。珠三角地区水资源总量较为丰富,但时空分布不均,其经济和人口重心在东部,而水资源重心在西部,在经济高速发展的形势下,珠三角地区面临着严峻的水资源问题。水资源是否具有可持续性决定珠三角社会、经济、环境发展的重要因素,为了使水资源可持续利用与经济社会发展规模相协调,分析研究与科学评价珠三角区域水资源面临的问题,对保障珠三角城市供水安全、促进珠三角高质量发展、粤港澳大湾区快速建设具有重要意义。

目前,水资源可持续性的研究大致分为水资源承载力评价^[1-2]、水安全评价^[3-4]、脆弱性分析^[5-6]、数量测算^[7-8]、水资源-经济-生态耦合协调分析^[9-10]以及多种方法集成的可持续利用综合评价^[11-13],其具体内容可归结为研究方法的应用创新、评价指标体系的构建方法和研究对象的评价等。从评价方法来看,主要分为数理统计方法(如TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)法^[1]、AHP(analytic hierarchy process)法^[14]、熵权法^[15]、主成分分析法^[16]等)、人工智能评价方法(如神经网络^[17]、随机森林算法^[18]等)、数量测算法(如能值理论^[7]和水足迹^[8]等)以及综合评价方法(如模糊综合评价法^[11]、组合赋权法^[19]等),在众多评价方法中,基于组合赋权的模糊综合评价法应用最多。在指标体系的构建方法上,主要分为根据研究需要和数据的可获得性直接建立以及基于PSR(pressure-state-reponse)模型^[5,19]、基于DPSIR(driving forces-pressure-state-impact-response)模型^[1]、基于Bossel指标体系^[20]、基于系统动力学模型等^[21]建立,基于模型框架能更准确、全面地定位子指标。从研究对象的评价视角来看,主要分为评价不同区域之间水资源可持续利用水平的差异^[10]、针对特定的研究对象在时间序列上评价水资源可持续发展水平^[19]、静态评价某一地区的水资源可持续性水平^[22]等,空间状态差异的评价可反映出区位特征和资源优势,时间序列的评价可反映出经济社会变化、生态环境、水资源保护政策对于水资源可持续性的影响。

综上所述,在已有研究文献中,绝大多数侧重于

水资源可持续性与否的评价,较少关注指标的差异性。在时间序列上,大多以某一代表年份或时间跨度相对较短的多年平均值为研究尺度;在空间分布格局上,以静态研究较多,动态研究较少,且较少考虑到水资源可持续性是一个动态、模糊且不确定的过程。鉴于此,本文以珠江三角洲为研究区,从水资源、社会经济、生态环境3个系统中选取13项评价指标,基于DPSIR模型框架构建指标体系,建立基于组合赋权-云模型的区域水资源可持续状态动态评价模型,对珠江三角洲水资源可持续利用问题进行动态研究,以期对珠三角地区做好水资源配置工程、实现水资源可持续利用以及高质量发展提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

珠江三角洲位于广东省中南部,包括西江、北江、东江和三角洲诸河4大水系,河网区面积为9750 km²,河网密度为0.8 km/km²,主要河道有100多条。研究区年平均降雨量为1600~2300 mm,水资源总量为3.8×10⁸ km³,包括广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门等9个城市,土地面积为5.5×10⁴ km²,2021年末常住人口为6500×10⁴,是国内经济增长最快的地区之一,珠江三角洲概况见图1。近年来,珠三角的许多城市都发生了水量、水质性缺水等水资源系统问题,对珠三角水资源可持续性利用状态进行研究,有助于为区域水资源可持续发展战略决策提供科学合理的理论依据。

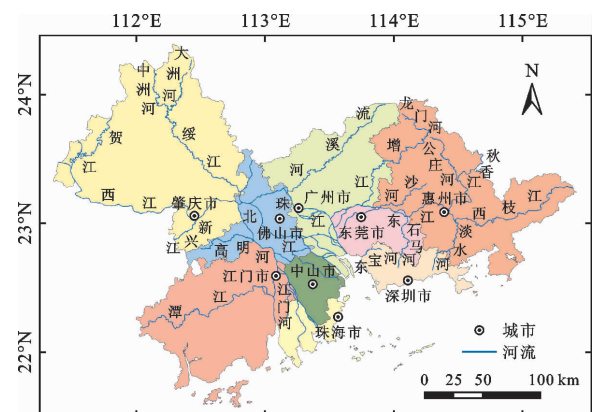


图1 研究区珠江三角洲概况图

2.2 数据来源

本文基础数据主要来源于2008-2021年《广东省统计年鉴》^[23]和2007-2020年《广东省水资源公报》^[24]以及各城市统计年鉴、水资源公报、社会发展

统计公报和环境质量状况公报。

2.3 研究方法

2.3.1 投影寻踪模型 在投影寻踪模型中,各评价指标对水资源可持续性的影响程度可由最佳投影方向各分量的大小来反映,两者呈正相关关系,因此采用投影寻踪模型来确定各评价指标的客观权重^[25]。

(1) 评价指标集归一化处理。将各评价指标值 x_{ij}^* 作归一化处理,以消除各指标量纲差异及统一各指标变化范围。

$$\text{正向指标: } X_{ij} = \frac{x_{ij}^* - x_{j \min}^*}{x_{j \max}^* - x_{j \min}^*} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X_{ij} = \frac{x_{j \max}^* - x_{ij}^*}{x_{j \max}^* - x_{j \min}^*} \quad (2)$$

式中: $x_{j \max}^*$ 、 $x_{j \min}^*$ 分别为第 j 个评价指标的最大值和最小值。

(2) 投影指标函数构造。将 p 维数据 $\{x_{ij}^*, j = 1, 2, \dots, p\}$ 综合成以 $a = (a(1), a(2), \dots, a(j), \dots, a(p))$ 为投影方向的一维投影值 z_i 。

$$z_i = \sum_{j=1}^p a_j X_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

(3) 投影指标函数优化。确定最佳投影方向即求解投影指标函数的最大化问题。

$$\max Q(a) = S_z D_z \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a_j^2 = 1 \quad (5)$$

式中: S_z 为投影值 z_i 的标准差; D_z 为投影值 z_i 的局部密度。

上述目标函数采用基于实数编码的加速遗传算法^[26] (real coding based accelerating genetic algorithm, RAGA) 进行优化,具体参数设置如下:种群规模为 400;变异方向所需要的随机数为 10;交叉概率 $P_c = 0.8$;变异概率 $P_m = 0.2$;加速次数 $C_i = 7$ 。

2.3.2 云模型 云模型主要由云数字特征和云发生器组成^[27]。云数字特征包括期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 。云发生器由正向云发生器、逆向云发生器和条件云发生器组成。

(1) 逆向云发生器表达式

$$Ex = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^*}{n} \quad (6)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^* - Ex)^2}{n - 1} \quad (7)$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sum_{i=1}^n |x_i^* - Ex|}{n} \quad (8)$$

$$He = \sqrt{S^2 - En^2} \quad (9)$$

式中: x_i^* 为样本值; n 为样本数; S^2 为样本方差。

(2) 正向云发生器表达式

① 正态随机数 En' :

$$En' = \text{rand } n(1) \cdot He + En \quad (10)$$

② 正态随机数 Ex'

$$Ex' = \text{rand } n(1) \cdot En' + Ex \quad (11)$$

③ 隶属度 μ

$$\mu = \exp \frac{-(Ex' - Ex)^2}{2En'^2} \quad (12)$$

2.3.3 基于组合赋权-云模型的水资源可持续性评价步骤

(1) 基于组合赋权确定各指标权重。为减少指标权重对评价结果的影响,采用线性加权平均法将客观权重 w_1 和主观权重 w_2 相结合得到组合权重 w 。本文采用投影寻踪模型确定客观权重 w_1 ,将最佳投影方向各分量的大小归一化即为各指标客观权重;采用云模型确定主观权重 w_2 ,收集若干专家各自的初始权重评价,通过逆向云发生器求解每个指标的云数字特征,再通过正向云发生器生成更多云滴,最大隶属度对应的 Ex'_i 即为第 i 项指标的主观权重,最后进行归一化处理。

(2) 云评价状态集数字特征确定。将评价等级分为 m 个等级,利用公式(13)~(15)计算评价云的数字特征,边界参数用半正态云描述。

$$Ex_i = \begin{cases} \lambda_i^{\min} & (i = 1) \\ \frac{\lambda_i^{\min} + \lambda_i^{\max}}{2} & (1 < i < m) \\ \lambda_i^{\max} & (i = m) \end{cases} \quad (13)$$

$$En_i = \frac{\lambda_i^{\max} - \lambda_i^{\min}}{2.355} \quad (14)$$

$$He = 0.1En \quad (15)$$

式中: λ_i^{\max} 、 λ_i^{\min} 分别为每个区间的上、下限值,超熵 He 可根据经验取值。

(3) 隶属度矩阵计算。

① 按正态分布特征(En , He) 生成正态随机数 En' ;

② 采用钟型隶属函数计算各指标的隶属度,计算公式为:

$$\mu = \exp \frac{-(x^* - Ex)^2}{2En'^2} \quad (16)$$

为提高评价结果的可靠性,可运行 N 次云发生器,得到平均隶属度 $\bar{\mu}$ 。

(4) 利用权重集合 W 与隶属度矩阵 U 进行模糊转换得到综合隶属度矩阵 Z ,即可根据最大隶属度

原则判断评价对象的可持续性等级。

3 评价指标体系构建

参考已有的评价指标体系^[14,19,28],在专家咨询、文献查阅、词频分析等基础上,从水资源、社会经济、生态环境3方面出发,基于DPSIR模型框架构建珠江三角洲水资源可持续性动态评价指标体系,如表1所示。

参考阮君等^[19]、刘莉等^[29]、张志君等^[30]、冯欣等^[31]对水资源的可持续性研究并根据《水资源评价导则》(SL/T 238—1999)和水利部印发的《全国水

资源承载能力监测预警技术大纲(修订稿)^[32],结合珠三角城市群的水资源及经济发展现状与全国平均水平,将珠三角水资源可持续性状况分为5个等级:Ⅰ级(非常差)、Ⅱ级(差)、Ⅲ级(一般)、Ⅳ级(好)、Ⅴ级(非常好),确定各指标的上下限后,进行均分得到各等级评价标准。

根据评级标准以及公式(13)~(15),确定评价标准云的数字特征,结果见表2。以年均降水量、万元GDP用水量、人均GDP、森林覆盖率为例,评价标准云图如图2所示。

表1 珠江三角洲水资源可持续性动态评价指标体系

| 准则层 | 指标层 | 计算方法 | 指标涵义 | 类型 |
|--------------------------|---|----------------------------|--------------------|----|
| 水资源 子系统 B_1 | X_{11} 年均降水量 ¹ /mm | 统计数据 | 水资源的降水来源状况 | 正 |
| | X_{12} 产水模数 ¹ /($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$) | 水资源总量/国土面积 | 区域内水资源丰富程度 | 正 |
| | X_{13} 人均水资源量 ¹ /m ³ | 水资源总量/人口数量 | 水资源人均状况 | 正 |
| | X_{14} 万元GDP用水量 ² /m ³ | 用水消耗量/地区生产总值 | 用水的经济效益和压力 | 负 |
| | X_{15} 万元工业增加值用水量 ² /m ³ | 用水消耗量/工业增加值 | 工业用水的效益和压力 | 负 |
| | X_{16} 人均综合用水量 ² /m ³ | 总用水量/常住人口数量 | 居民用水需求和节水意识 | 负 |
| 社会 经济 子系统 B_2 | X_{21} 人均GDP ³ /10 ⁴ 元 | 地区生产总值/常住人口数量 | 经济发展状况对水资源可持续性的驱动 | 正 |
| | X_{22} 人口密度 ³ /(人·km ⁻²) | 常住人口数量/国土面积 | 人口聚集程度对水资源可持续性的驱动 | 负 |
| | X_{23} 城镇化率 ³ /% | 城镇人口数量/常住人口数量 | 区域发展对水资源可持续性的驱动 | 正 |
| 生态 环境 子系统 B_3 | X_{31} 生态环境用水率 ⁴ /% | 生态环境用水量/总用水量 | 人工修复生态环境的水量投入 | 正 |
| | X_{32} 污水排放密度 ² /(10 ⁴ t·km ⁻²) | 污水排放量/国土面积 | 人类生活、工业生产对水资源质量的压力 | 负 |
| | X_{33} 森林覆盖率 ⁴ /% | 森林面积/国土面积 | 采取生态建设改善水环境 | 正 |
| | X_{34} 饮用水水质达标率 ⁵ /% | 饮用水水源地水质达标个数/ 总饮用水水源地个数 | 对水资源质量安全的影 | 正 |

注:(1)各指标上标1~5表示不同的指标属性,依次为状态指标、压力指标、驱动力指标、响应指标、影响指标;(2)类型为“正”即越大越优型指标,类型为“负”即越小越优型指标。

表2 珠江三角洲水资源可持续性评价标准云数字特征

| 评价指标 | 不同评价等级 E_x | | | | | En | He |
|----------|--------------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| | Ⅰ级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅳ级 | Ⅴ级 | | |
| X_{11} | 1730.74 | 1805.79 | 1955.89 | 2105.99 | 2181.04 | 63.74 | 5.00 |
| X_{12} | 87.05 | 96.16 | 114.37 | 132.59 | 141.69 | 7.73 | 0.50 |
| X_{13} | 199.60 | 784.14 | 1953.23 | 3122.31 | 3706.85 | 496.42 | 40.00 |
| X_{14} | 155.38 | 131.91 | 84.95 | 38.00 | 14.52 | 19.94 | 2.00 |
| X_{15} | 67.85 | 58.17 | 38.80 | 19.44 | 9.75 | 8.23 | 0.50 |
| X_{16} | 639.00 | 561.87 | 407.60 | 253.33 | 176.19 | 65.51 | 5.00 |
| X_{21} | 3.58 | 5.03 | 7.93 | 10.83 | 12.28 | 1.23 | 0.10 |
| X_{22} | 6352.43 | 5338.16 | 3309.60 | 1281.05 | 266.77 | 861.38 | 80.00 |
| X_{23} | 44.05 | 53.33 | 71.90 | 90.46 | 99.74 | 7.88 | 0.50 |
| X_{31} | 0.28 | 0.99 | 2.40 | 3.82 | 4.52 | 0.60 | 0.05 |
| X_{32} | 67.99 | 57.10 | 35.30 | 13.50 | 2.60 | 9.25 | 1.00 |
| X_{33} | 20.20 | 26.99 | 40.56 | 54.13 | 60.92 | 5.76 | 0.50 |
| X_{34} | 95.70 | 96.42 | 97.85 | 99.29 | 100.00 | 0.61 | 0.05 |

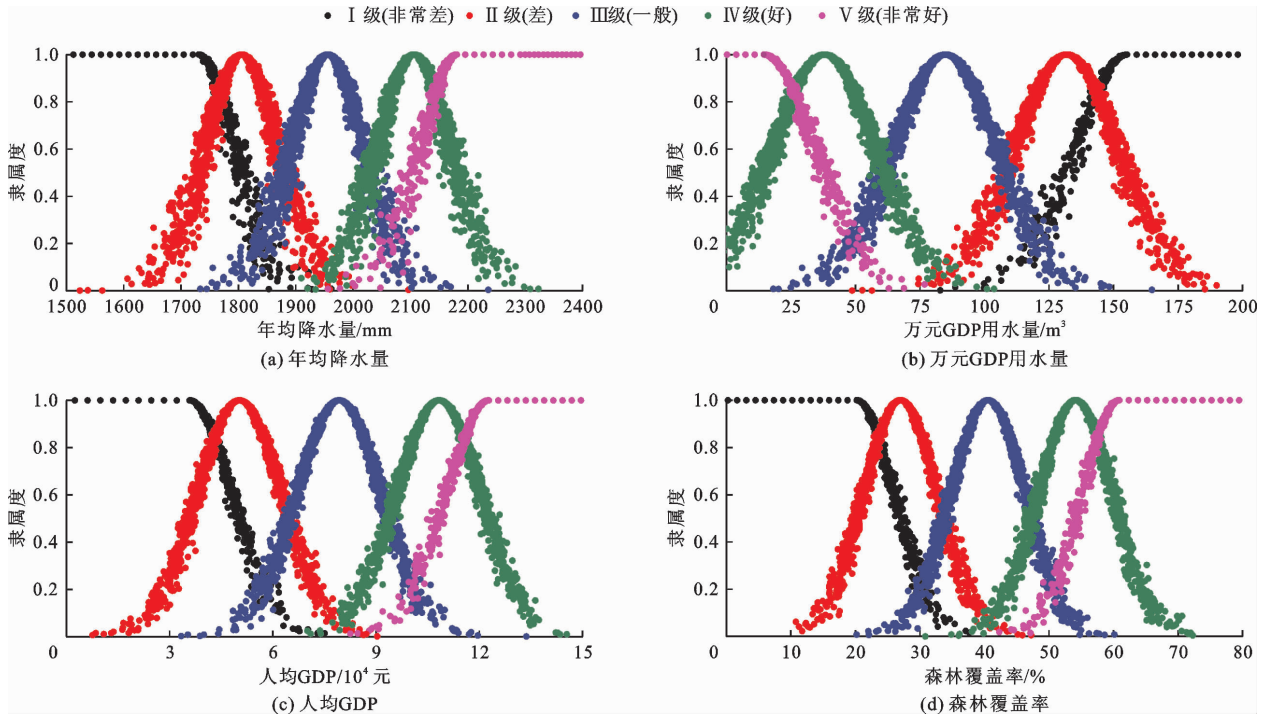


图 2 珠江三角洲水资源可持续性部分指标评价标准云

4 结果与分析

4.1 各指标权重的确定

通过投影寻踪模型确定各指标最佳投影方向, $a = (0.3246, 0.3522, 0.0818, 0.3298, 0.3499, 0.3263, 0.3717, 0.0882, 0.3508, 0.1742,$

$0.1053, 0.1372, 0.2168)$, 其大小反映了各指标在影响珠三角水资源可持续性上所占比重, 归一化处理即为各指标的客观权重 w_1 ; 采用云模型确定各评价指标的主观权重 w_2 , 权重占比结果如图 3 所示。在主、客观权重的基础上进行线性加权平均得到组合权重 w , 具体结果见表 3。

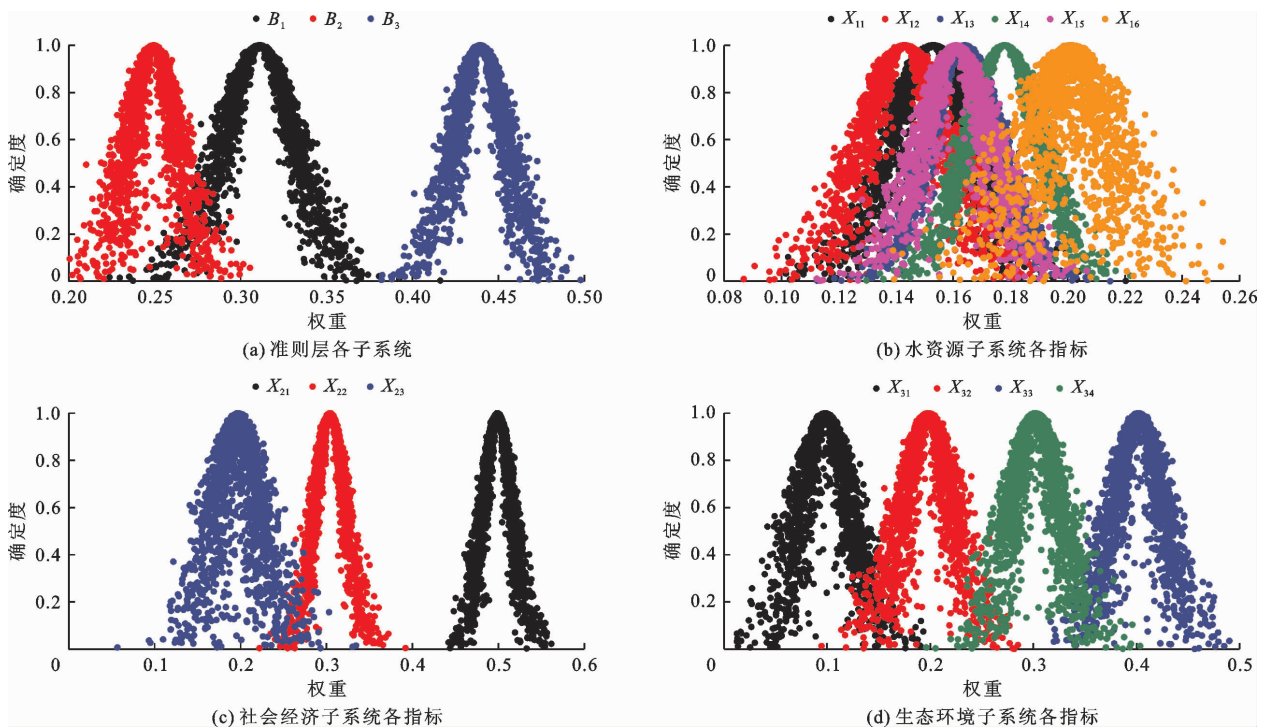


图 3 评价指标体系准则层及目标层各指标权重示意图

表3 珠江三角洲水资源可持续性各评价指标权重

| 权重 | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} | X_{15} | X_{16} | X_{21} | X_{22} | X_{23} | X_{31} | X_{32} | X_{33} | X_{34} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| w_1 | 0.101 | 0.110 | 0.025 | 0.103 | 0.109 | 0.102 | 0.116 | 0.027 | 0.109 | 0.054 | 0.033 | 0.043 | 0.068 |
| w_2 | 0.048 | 0.044 | 0.051 | 0.055 | 0.050 | 0.063 | 0.125 | 0.075 | 0.049 | 0.043 | 0.087 | 0.177 | 0.133 |
| w | 0.074 | 0.077 | 0.038 | 0.079 | 0.080 | 0.083 | 0.120 | 0.051 | 0.079 | 0.048 | 0.060 | 0.110 | 0.101 |

4.2 正态云模型计算结果

利用珠三角9个城市2007-2020年相关数据,基于MATLAB软件运行正向云发生器1000次,计算各指标对应的5个等级隶属度,根据表3的指标权重,模糊转换隶属度矩阵,并按照最大隶属度原则确定珠三角水资源可持续性状况综合评价等级,评

价结果如表4所示。

4.3 结果分析

4.3.1 水资源可持续性空间分布年际变化分析
选取2007、2011、2015和2020年绘制各城市水资源可持续性状态,可直观显示出珠三角水资源可持续性状态的空间分布及时间变化,如图4所示。

表4 2007-2020年珠江三角洲各城市水资源可持续性综合评价结果

| 城市 | 2007年 | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2012年 | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 广州 | I | III | I | III | III | III | IV | IV | IV | V | IV | IV | V | V |
| 深圳 | IV | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| 珠海 | IV | IV | IV | IV | IV | IV | IV | IV | IV | V | IV | V | V | V |
| 佛山 | I | III | I | IV | IV | IV | IV | IV | IV | IV | IV | IV | V | IV |
| 惠州 | I | I | I | II | V | II | V | III | III | V | V | III | V | V |
| 东莞 | I | II | II | III | IV | II | III | IV | IV | IV | IV | III | IV | V |
| 中山 | I | I | I | II | I | III | II | I | I | V | IV | IV | IV | IV |
| 江门 | I | I | I | I | I | V | V | II | III | V | IV | V | V | III |
| 肇庆 | I | I | I | I | I | V | V | V | V | V | V | V | V | V |

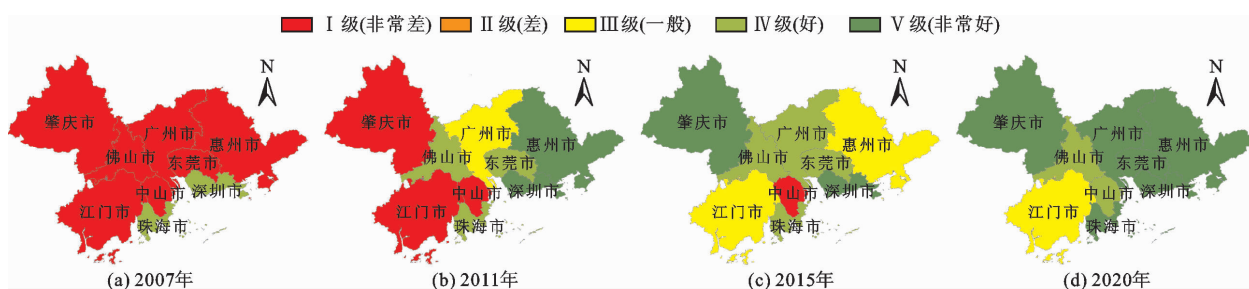


图4 2007、2011、2015和2020年珠江三角洲水资源可持续性状态空间分布

由表4和图4可知,2007-2020年珠三角水资源可持续状况整体呈上升趋势,实现了从较低水平到较高水平的转变。但东部城市明显优于西部城市,近海岸城市高于远海岸城市,呈现显著差异的空间分布格局。在珠三角的9座城市中,除江门市外的8座城市的水资源可持续性在2020年均已达到IV级“好”状态及以上,其中广州市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、肇庆市的水资源评价等级进步明显,由2007年的I级较差状态转变至IV级“好”状态及以上。

从研究区发展现状来看,2007-2020年珠三角9市水资源可持续性整体呈上升趋势主要得益于工业用水效益、居民节水意识、社会经济的提高以及生态环境的保护,9市的人均用水量、万元工业增加值用水量、万元GDP用水量等均呈递减趋势,森林覆盖率、人均GDP、城镇化率等均呈上升趋势。2007-2020年深圳市、珠海市水资源可持续性长期保持在IV级“好”状态以上,人均用水量、万元工业增加值用水量、万元GDP用水量在9市中均较小,且人均GDP均位于前列。在其余城市中,2020年江门市水资源可持

续性等级最低,处于Ⅲ级“一般”状态,但相比 2007 年的Ⅰ级“非常差”状态已得到提升,该城市水资源可持续状况的改善,得益于其单位耗水量逐年减少、具有丰富的水资源量、较小的人口密度以及较低的污水排放密度。由图 4 可以看出,2007-2020 年惠州市水资源可持续性状态波动较大,是由于 2012-2018 年该区域年均降雨量骤减、而城镇化率急剧上升导致水资源的污染和消耗加重,期间该市可持续性状态有所下降。此外,珠三角东部城市经济社会发展相对于西部

城市较快,传统工业改进后对水资源的需求量占比大幅度减小,远远小于西部城市的单位耗水量,因此东部城市水资源可持续状况整体高于西部城市。珠三角南部近海岸地区经济发展水平较高,人均 GDP 均位居珠三角 9 市前列,其水资源可持续性在珠三角处于较高水平。

4.3.2 水资源可持续性各子系统评价 2007、2011、2015 和 2020 年珠江三角洲水资源可持续性各子系统状态等级的评价结果见图 5。

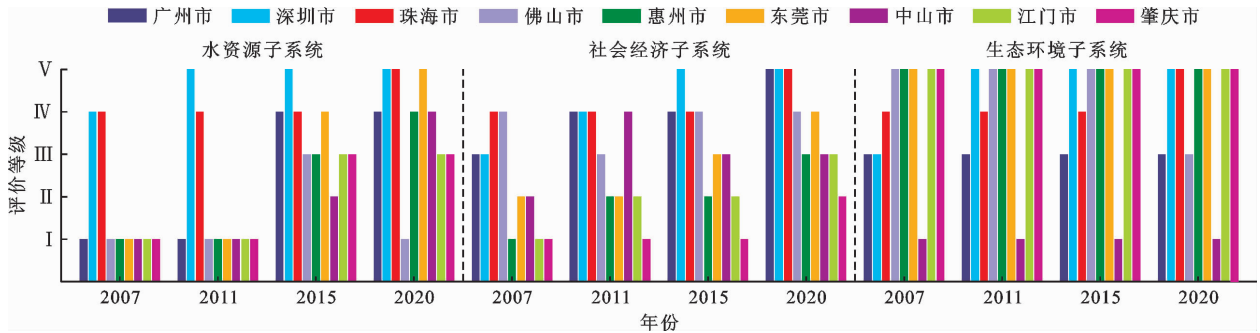


图 5 2007-2020 年珠江三角洲水资源可持续性各子系统状态等级评价结果

由图 5 可知,2007-2020 年珠三角城市群各子系统状态整体呈上升趋势。除深圳市外,其余 8 座城市水资源可持续性各分项子系统与综合评价结果存在明显不和谐情况。以广州市为例,2020 年广州市水资源可持续性状态等级为 V 级,但水资源子系统评价等级为Ⅳ级,社会经济子系统评价等级为 V 级,生态环境子系统评价等级为Ⅲ级,主要原因是区域森林覆盖率、生态环境用水率、污水排放密度均处于Ⅲ级“一般”水平及以下。由图 5 还可以看出,2007-2020 年珠三角社会经济子系统与生态环境子系统两级分化严重。珠三角西部中山市、江门市、肇庆市的社会经济子系统基本处于“一般”水平及以下,相对于东部城市,综合状态也处于较低水平,从原始数据中能够看出珠三角西部的经济发展较缓慢,人均 GDP、人口密度、城镇化率水平较低;珠三角南部近海岸地区深圳市、珠海市、惠州市、江门市的生态环境子系统处于 V 级“非常好”水平,这些城市的自然环境优越,天然水资源较为丰富,生态环境保持较好。2007-2020 年珠三角水资源子系统状态提升显著,其中广州市、深圳市、珠海市、惠州市、东莞市、中山市的水资源子系统在 2020 年已达到Ⅳ级“好”水平及以上,主要得益于这些城市采取的优化工业用水结构、严格实行最严格水资源管理制度、减少污水排放密度、提升居民节水意识等众多措施,然而佛山市、江门市、肇庆市的水资源子系统仍处于

Ⅲ级水平及以下,具有较大的提升空间,在未来需要加大治理力度,进一步优化产业结构、改善污水处理技术与手段、促进城市间经济协同发展、尽可能缩小城市间的人均 GDP 差距,同时,加强人口密度、污水排放密度、水质达标率等重要指标的检测,及时做出相应调整。

5 讨论

广东省于 2011 年印发了《最严格水资源管理制度实施方案》,重点推进水资源开发利用控制、用水效率控制、水功能区限制纳污三条红线,旨在严格控制用水总量及河流排污总量。从可持续性综合评价结果(表 4)可以看出,珠三角地区水资源可持续发展状况总体上得到明显改善,但区域内部差异显著,与刘莉等^[29]、徐志青等^[33]对珠三角地区水资源可持续性研究的结果一致,产生这种差异性的主要因素包括区位特征、资源优势以及产业结构。珠三角降水时空分布不均,近海岸地区水资源较为丰富,东部工业结构优于西部,其工业生产耗水量较西部少。针对水资源分布不均、开发利用不平衡问题,珠江三角洲于 2017 年开展水资源配置工程,建成后将对保障城市供水和经济社会发展具有重要意义。

珠三角各城市水资源子系统等级与综合等级均存在差别,与范嘉炜等^[34]的研究结果一致,导致水资源子系统等级与综合等级不吻合的主要因素是万

元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、人均综合用水量等指标。鉴于水资源可持续性在研究期内有降有升、空间差异较大以及各子系统不协调,珠三角地区需进一步因地制宜地施行最严格水资源管理制度,对于水资源生态赤字严重区域,严格限制高耗水型工业和农业的粗放型用水模式,加快节水技术推广,鼓励应用海水、再生水等非常规水源,全力推进重点河流整治。

由于缺少严格的指标分级标准,本文对珠三角地区的指标分级主要基于珠三角地区 2007 - 2020 年各指标数据的平均值,其水资源可持续状况评价结果仅适用于珠三角地区,后续研究可补充基于全国标准的指标分级,使评价结果与国内其他地区具有可比性。

6 结 论

(1) 依据水资源 - 社会经济 - 生态环境复合系统构建基于组合赋权 - 云模型的区域水资源可持续性动态评价模型,对珠江三角洲水资源可持续性发展状况进行综合评价。结果表明,2007 - 2020 年珠江三角洲 9 座城市水资源可持续性整体呈上升趋势,且处于较好水平。

(2) 珠江三角洲区域水资源可持续性水平呈现东部及南部近海岸城市向中、西部递减的空间分布格局。其评价结果贴近研究区域实际情况,表明本研究采用的模型合理可行,可适用于其他区域水资源可持续性评价。

(3) 水资源可持续性动态评价体系各子系统评价等级与综合评价等级存在明显的不和谐情况,生态环境子系统发展水平较高,而水资源子系统和社会经济子系统是造成珠江三角洲城市群水资源可持续性状况存在空间差异的主要因素。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 田培,王瑾钰,花威,等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1871 - 1884.
- [3] 郑炜. 基于三角模型的城市水资源安全动态评价——以广州市为例[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):68 - 73 + 80.
- [4] 唐莲,刘子西,齐娅荣. 宁夏水资源安全综合评价[J]. 安全与环境学报,2019,19(5):1810 - 1816.
- [5] 杨大方,周旭,张继,等. 贵州省水资源脆弱性时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):70 - 79.
- [6] 钟姗姗,王化龙. 流域水资源可持续脆弱性回顾评价及敏感度分析[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(1):43 - 50.
- [7] 王慧亮,申言霞,李卓成,等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护,2020,36(6):12 - 17.
- [8] 商庆凯,阴柯欣,米文宝. 基于水足迹理论的青海省水资源利用评价[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(5):70 - 77.
- [9] 高志远,程柳,张小红. 黄河流域经济发展 - 生态环境 - 水资源耦合协调水平评价[J]. 统计与决策,2022,38(9):123 - 127.
- [10] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等. 河南省黄河流域水资源 - 经济 - 生态系统耦合协调评价及预测[J]. 湖泊科学,2022,34(3):919 - 934.
- [11] ZHANG Ning, WANG Zichen, ZHANG Lan, et al. Assessment of water resources carrying risk and the coping behaviors of the government and the public[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14): 7693.
- [12] REN Li, GAO Jiachen, SONG Shuping, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Guiyang City[J]. Water, 2021, 13(16): 2155.
- [13] 李腾,李博,屈伟,等. 基于 SE - DEA - IAHP 方法的贵州省岩溶地区水资源可持续利用效率评价[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):101 - 107.
- [14] 李林汉,田卫民,岳一飞. 基于层次分析法的京津冀地区水资源承载力评价[J]. 科学技术与工程,2018,18(24):139 - 148.
- [15] 刘红雨,刘友存,孟丽红,等. 熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展[J]. 冰川冻土,2022,44(1):299 - 306.
- [16] 肖杰,郑国璋,郭鹏军,等. 基于主成分分析的关中 - 天水经济区水资源承载力评价[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(7):159 - 167.
- [17] LIU Liying. Assessment of water resource security in karst area of Guizhou Province, China[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 7641.
- [18] 闫佰忠,孙剑,安娜. 基于随机森林模型的地下水水质评价方法[J]. 水电能源科学,2019,37(11):66 - 69.
- [19] 阮君,何刚,王莹莹,等. 基于理想点 - 正态云模型的区域水资源可持续性动态评价[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(3):99 - 105 + 117.
- [20] 凌新颖,马金珠,于海超,等. 基于 Bossel 指标体系对敦煌盆地水资源可持续利用评价[J]. 节水灌溉,2018(10):42 - 46.
- [21] FAN Mengtian, XU Jianhua, CHEN Yaning, et al. How to sustainably use water resources—A case study for decision support on the water utilization of Xinjiang, China

- [J]. Water, 2020, 12(12): 3564.
- [22] 李俊晓,李朝奎,罗淑华,等. 基于 AHP-模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 210-214+286.
- [23] 广东省统计局,国家统计局广东调查总队. 2008-2021 年广东省统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008-2021.
- [24] 广东省水利厅. 2007-2020 年广东省水资源公报[R]. 广州:广东省水利厅, 2007-2020.
- [25] 郭倩,汪嘉杨,张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 484-493.
- [26] 苏屹,于跃奇. 基于加速遗传算法投影寻踪模型的企业可持续发展能力评价研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(5): 130-139.
- [27] 李晓英,江崇秀,张琛. 基于云模型的城市资源水价研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 215-221.
- [28] 王壬,陈莹,陈兴伟. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1441-1452.
- [29] 刘莉,汪丽娜. 基于熵权-正态云模型的水资源可持续性评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(1): 77-84.
- [30] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价——以石河子垦区为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 847-856.
- [31] 冯欣,姜文来,刘洋,等. 水资源价值模糊数学模型研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1834-1848.
- [32] 中华人民共和国水利部办公厅. 全国水资源承载能力监测预警技术大纲(修订稿)[S]. 水利部水利水电规划设计总院, 2016.
- [33] 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.
- [34] 范嘉炜,黄锦林,袁明道,等. 基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 100-105.

(上接第 74 页)

- [18] 陈守煜,胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271+277.
- [19] 孟丽红,叶志平,董书庆,等. 可变模糊集理论在江西省水资源承载力评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(10): 8-16.
- [20] 沈威,鲁丰先,秦耀辰,等. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [21] 张乐勤,方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 24-29.
- [22] 王保乾,杨晖,竺运. 长江经济带水资源承载力综合评价研究[J]. 资源与产业, 2020, 22(1): 1-11.
- [23] 阳斌成,张家其,罗伟聪,等. 基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009-2018 年水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 357-364.
- [24] 赵勇宏. 铜川市水资源保护利用分析及对策研究[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(2): 66-69.
- [25] 唐继张,夏伟,周维博,等. 基于关键绩效指标的西安市水循环健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 39-45+60.
- [26] 刘珍,文彦君,韩梅,等. 人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 82-86.
- [27] 冯湘华,宋孝玉,晁智龙. 淳化县水资源承载力预测评价[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 447-453.
- [28] 布瑶. 基于模糊综合评价和主成分分析的水资源承载力评价研究[D]. 西安:西安科技大学, 2019.
- [29] 田培,王瑾钰,花威,等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1871-1884.