

基于熵权法的城市水资源脆弱性研究

——以广东省为例

职璐爽¹, 薛惠锋^{1,2}

(1. 西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

摘要: [目的] 研究城市水资源的脆弱性, 客观反映水资源的可持续发展能力, 为建设可持续发展城市提供参考。[方法] 本文把广东省 21 个行政市及佛山市顺德区水资源列为实证对象, 从自然因素、人为因素、承载力因素 3 个角度建立评价指标体系; 在熵权法计算影响权重的基础上利用线性加权求和法构建水资源脆弱性评价模型。[结果] 广东省水资源脆弱性总体呈现较脆弱, 深圳市水资源脆弱性呈现不脆弱, 在 22 个研究对象中水资源脆弱性表现最稳定。[结论] 根据广东省水资源脆弱性评价结果结合智慧城市中可持续发展的目标可知, 由于产业结构、水资源利用效率较低等问题导致广东省水资源脆弱性较高, 可以通过产业结构改革, 建设智慧水务和利用科技水平提高水资源利用效率等方法来降低水资源脆弱性。

关键词: 水资源; 脆弱性; 熵权法; 广东省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0322-08

中图分类号: TV213

文献参数: 职璐爽, 薛惠锋. 基于熵权法的城市水资源脆弱性研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 322-329. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.051. Zhi Lushuang, Xue Huifeng. A study on vulnerability of urban water resource based on entropy weight method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 322-329.

A Study on Vulnerability of Urban Water Resource Based on Entropy Weight Method —A Case Study of Guangdong Province

ZHI Lushuang¹, XUE Huifeng^{1,2}

(1. Economics and Management College, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. China Academy of Space System Science and Engineering, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] To research the vulnerability of urban water resources, and reveal the ability of the sustainable development of urban water resources in order to provide reference for building sustainable cities. [Methods] This article listed the water resources of 21 administrative cities of Guangdong Province and Shunde District of Foshan City as empirical subjects. The evaluation index system was established from three perspectives including natural, human and bearing capacity factors. Based on the entropy weight method, the water resources vulnerability assessment model was constructed using the linear weighted summation method. [Results] Water resources in Guangdong Province were relatively vulnerable, and the water resources in Shenzhen City were not vulnerable. Among 22 research subjects, water resource vulnerability of Shenzhen City was most stable. [Conclusion] According to the results of water resources vulnerability assessment in Guangdong Province, and sustainable development of smart city, water resources vulnerability in Guangdong Province was high. The utilization of water resource can be improved through the reform of industrial structure, the construction of smart water affairs and the utilization of science and technology.

Keywords: urban water resources; vulnerability; entropy weight; Guangdong Province

进入 21 世纪以来, 社会经济快速发展, 水资源的消耗量也在大幅度的增加, 人类生活、农业、工业耗水量都在增加, 水资源成了影响人类社会健康可持续发

展的重要因素。水资源的重要性使得研究水资源科学的用取、水资源可持续发展显得尤为重要, 在这种背景下对水资源的脆弱性进行研究显得尤为重要^[1]。

生物赖以生存的基础就是水资源,人类可持续发展的重要因素也是水资源。水资源承载力反映水资源支撑社会经济能力,水资源的脆弱性指标体系中涉及到了表现水资源承载力的指标,说明水资源的脆弱性可以反映水资源的可持续发展能力。相比水资源承载力而言,水资源的脆弱性可以反映出水资源的供需、生态环境、气候变化等对水资源自身的影响程度。经济社会发展、环境变化、地理位置的不同、水资源本身的短缺等造成水资源脆弱性较高,减少水资源脆弱性能够帮助区域正确管理水资源,有针对地加强水资源的利用效率。现在国内大城市将转型成智慧城市作为城市发展的目标,智慧城市的愿景就是经济可持续,生态可持续,社会可持续。智慧城市最真实的本意就是可持续发展的城市。区域水资源脆弱性的定量评价可以协助区域社会经济可持续协调发展,提高用水效率,缓解水资源对社会经济发展造成的压力,平衡生态环境与社会的快速发展,从水资源脆弱性角度指出水资源现存的问题,这对于区域内发展经济、社会稳定有重要的作用。

研究评价水资源脆弱性的文章可以根据研究地区、评价方法、指标体系等角度将文章分类。研究地区划分:有的学者研究地区有河流域^[2-6],有的学者研究省市行政地区的脆弱性^[7-9],有的学者是根据地理研究水资源脆弱性的^[10-13];评价水资源脆弱性方法:函数法、GIS技术^[14],线性加权求和法^[2],模糊集对法^[15]、模糊综合评价法^[16]等;根据研究指标体系的不同划分:人类活动影响^[17]、气候变化影响^[18-19]等。

总结前人在水资源脆弱性方面的研究,考虑水资源本身的特性(不确定性、循环性与可再生性、稀缺性、分布不均匀性、利害双重性等)与气候变化、人类活动的影响,本文拟对水资源的脆弱性作以下说明与阐述:

(1) 水资源的脆弱性属于水资源整个系统的自身携带的性质、是一个内在性质,这个属性是否存在与外界的变化没有关系。

(2) 水资源的脆弱性是随着外界干扰的改变,随之产生改变的。这里的外界干扰主要指人类系统、自然系统等的干扰或影响,人类系统的变化间接或直接改变自然系统,自然系统的变化会影响水资源系统内部稳定性,整个水资源系统内在的情况(下渗能力、地下水量、蒸发能力等)会发生改变;人类活动,譬如工业用水、农业灌溉、植被的破坏等等,会直接影响水资源整个系统的初始状态,同时,人类生产、生活、社会等活动排放的二氧化碳的逐步增加影响了生态系统中的气候变化,气候变化再作用于水资源系统上,使得水资源系统受到干扰。

(3) 现在主要研究的方向是:水资源脆弱性在遭到破坏或者受到干扰后状态如何,在经历一段时间后,特定地理位置的水资源脆弱性如何改变,以及如何根据水资源系统的脆弱性情况相应做出水资源系统的适应性管理。

(4) 水资源脆弱性的本质包含水资源自身对外界变化的自身反映与适应性,所以说水资源的脆弱性是一个可变动的相对数值,是一个随时都会改变的数值,经过人类做出一系列的积极地适应性行为,可以降低水资源的脆弱性的程度,减小水资源脆弱性对人类社会发展的干扰。

本文拟在前人研究的基础上,从以下几个方面做重点的分析。第一,本文在指标选取,评价体系的构建方面,以易得到性与可操作性为主要原则,使得评价模型更容易理解与推广;第二,广东省在全国属于降水量较多的省份,但广东省的人均水资源量却远低于全国人均的水平,本文拟对广东省水资源脆弱性评价后,根据结果分析出广东省水资源可能存在的问题;第三,将行政区域与流域结合起来分析,对行政区域的水资源脆弱性评价后,又按照水系划分进行分析,力求使得本文结果可信度更高。

1 基于熵权法的脆弱性评价模型

1.1 评价体系的建立

正确选取水资源脆弱性评价的指标体系对水资源脆弱性评价的准确性有重要影响,本文明确提出评价水资源脆弱性的首要任务是选取充分反映水资源信息的指标体系。水资源脆弱性分析中的指标体系选取因人而异,不同研究人员选择不同的评价指标体系,现有研究的水资源脆弱性评价指标体系有很大差异。现有的指标体系主要包括自然、人为、驱动力、危险性、敏感性、压力性等。

现有的对水资源脆弱性研究中,对水资源脆弱性评价体系构建设没有明确的标准,选取的评价体系主要依据:首要考虑影响水资源脆弱性的影响因素,选择主导水资源脆弱性的因素;其次,考虑数据获取的难易程度和评价结果的可比性^[20]。

根据水资源脆弱性的成因来看,影响水资源脆弱性的因素主要有 3 个(如表 1 所示)。①自然脆弱性,主要是非人为的、属于水资源内部系统的自然因素,可以维持水资源系统使得水资源系统从水量、水质等方面满足人类活动的要求,这是水资源脆弱性的静态表现。表现为降水量、水质、土壤信息等。②人为脆弱性,主要指人为行动活动改变水资源系统的结构,使得水资源系统表现出脆弱,这是水资源脆弱性的动

态表现;表现为引水、蓄水、水利工程、人类的退耕还林等提高水资源利用效率。③承载力脆弱性,主要指水资源系统对外部的压力,包括人类活动和各种负荷,在水资源系统上的水质、水量等方面显示出的敏感性;表现为人口规模、区域经济、农业和工业方面过度污染等^[20]。

表 1 水资源脆弱性评价体系

目标层	指标层	影响因素	趋向
水资源脆弱性	自然脆弱性	降水量(X_2)	正向
		地下水资源量(X_1)	正向
	人为脆弱性	水资源的开发程度(X_2)	反向
		供水模数(X_4)	反向
		地下水的供水率(X_5)	反向
	承载力脆弱性	地级市人均水资源(X_6)	正向
		地级市人均 GDP(X_7)	反向
		地级市人均综合用水量(X_8)	反向
		地级市农业灌溉亩均用水(X_9)	反向

影响因素根据对水资源的作用,分为正向影响和负向影响,正向因素对水资源的脆弱性有降低的作用,正向因素值越大,水资源脆弱性越低;反向因素对水资源的脆弱性有升高的作用,负向因素值越大,水资源脆弱性越高。

结合数据的可获得性,具体影响因素:①自然脆弱性。地表水资源量(X_1),河流、湖泊等地表水体的逐年更新的动态水量,即当地天然河川径流量。该数值越大,表明水资源脆弱性越小,地表水资源量对水资源脆弱性是正向影响。降水量(X_2),可以体现自然因素对水资源造成影响的程度,该数值越大,表明自然对水资源脆弱性的影响程度越小,因此平均降水量是正向影响。②人为脆弱性。水资源的开发程度(X_3),可以体现人类社会对水资源造成的影响程度,开发程度是总供水量(10^8 m^3)和水资源总量(10^8 m^3)的比值。表明水资源开发程度的数值越大对水资源脆弱性的影响程度越大,因此水资源的开发程度是反向影响。供水模数(X_4),总供水量(10^8 m^3)与土地面积(km^2)的比值,供水模数越大表明人类社会对水资源的影响程度越大,因此供水模数是反向影响。地下水的供水率(X_5),地下水的供水量(10^8 m^3)与总的供水量(10^8 m^3)的比值,该数值越大表明了人类开发地下水的程度越大,对水资源脆弱性的影响越大,因此地下水供水率是反向影响的。③承载力脆弱性。地级市人均水资源(X_6),各地级市水资源总量与各地级市人口总数的比值,该数值越大明该地级市水资源越丰富,因此地级市人均用水量是正向影响。地级市人均 GDP(X_7),该数值越大说明该地级市的经济

水平越高,越高的经济水平对水的需求程度越高,因此地级市人均 GDP 是反向影响。地级市人均综合用水量(X_8),各地级市用水与各地级市人口总数的比值,地级市人均用水量的数值越大表明该地对水的需求量越高,因此地级市人均用水量是反向影响。地级市农业灌溉亩均用水量(X_9),农田实际灌溉用水量与土地面积的比值,该指标是反向影响的,该指标越大,对水资源的脆弱性影响越大。

其中, X_1, X_2, X_6 是正向影响因素,正向影响因素越大对水资源的脆弱性影响越小; $X_3, X_4, X_5, X_7, X_8, X_9$ 是反向影响因素,反向影响因素越大对水资源的脆弱性影响越大。

2.2 评价模型

权重系数确定的方法有很多种,主要分为主观赋权法和客观赋权法,主观赋权法是根据研究者的主观认知来判断影响因素的权重大小,例如层次分析法等;客观赋权法是根据原始的数据信息利用统计学地方法科学地分配影响因素的权重,例如变异系数法、主成分分析法、熵权法等。客观赋权法会受到主观因素导致权重分配不稳定,会有差异;客观赋权法规避了主观赋权法的缺点,能够使得权重不受个人偏好,权重分配更加稳定^[21]。

本文选择客观赋权法——熵权法。熵权法可以用于任何需要确定权重的过程,也可以结合一些方法共同使用。熵权法就是利用每一个指标的不同,使用信息熵可以得到每一个指标的熵权值,然后利用熵权值修正每一个指标,这样就可以计算出每一个指标的权重,且权重值较为客观。熵权法与主观赋权法相比较而言,熵权法具有很高的客观性,并且可以合理的解释最后的结果。熵权法与其他的客观赋权法相比较而言,熵权法没有复杂的线性关系式,较为简单,适用范围更为宽。

熵权法的步骤:

(1) 将每一个评价指标标准化,以便做数据对比。

正向影响的指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (1)$$

负向影响的指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{i\max} - x_{ij}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (2)$$

式中: r_{ij} ——评价指标中的第 i 个评价对象对第 j 个评价指标的数值; x_{ij} ——在标准化前的第 i 个评价对象对于第 j 个评价指标的数值; $x_{i\max}$ ——第 j 个评价价值中的最大数值; $x_{i\min}$ ——第 j 个评价价值中的最小数值。

(2) 决策矩阵。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

其中,有 m 个评价对象, n 个评价指标。

(3) 第 i 个评价指标熵的值。

$$H_i = \frac{-1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m, f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$ 当 $f_{ij} = 0$ 时,则 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

(4) 第 j 个评价指标的计算。

$$W_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (5)$$

(5) 水资源脆弱性 WVI 利用加权线性法求得。

$$WVI = RW_j = \sum_{j=1}^m X_{ij} W_j \quad (6)$$

3 实证分析

3.1 广东省水资源情况

广东省水资源丰富,2015 年全省水资源总量是 $1.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$,省内降水量较多,2015 年全省地下水量是 $2.41 \times 10^{10} \text{ m}^3$,平原地下水资源总量是 $4.59 \times 10^9 \text{ m}^3$,同时省内有东江、西江、北江、珠江三角洲等河流,37 座大型水库和 300 多中型水库。广东省人均水资源量比全国人均水资源量低。广东省水资源分布不均匀,夏季秋季水资源充足,容易出现洪涝等自然灾害,春季和冬季水资源又不充足,容易出现干旱缺水情况。随着广东省社会经济的发展,省内的诸多河流在中下游有污染情况,省内沿海地区以及低丘陵地区的蓄水能力较差,使得广东省自身水资源情况在外界情况发生变化时,反映出广东省水资源情况无法满足日后广东省的社会经济发展。

3.2 广东省水资源脆弱性评价体系建立。

本文参考大量文献^[4,9,14],并结合《广东省水资源公报》上的数据信息,考虑到主导性和数据获取性,评价体系的目标层为广东省水资源脆弱性,将自然脆弱性、人为脆弱性、承载力脆弱性定为本文的评价体系,力求准确客观地评价出广东省水资源脆弱性。选取

广东省 21 个地级市和佛山顺德区(21 个地级市中佛山不包括顺德区,将佛山顺德区单独分开)作为研究对象,参考《广东省水资源公报》上的数据,考虑上述选取指标体系的原则,根据水资源脆弱性的影响程度,选择 9 个指标:地下水水资源量(10^8 m^3)、降水量(10^8 m^3)、水资源开发程度(%)、供水模数($10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)、地下水的供水率(%)、地级市人均水资源(m^3)、地级市人均 GDP(万元)、地级市人均综合用水量(m^3)、地级市农业灌溉单位平均用水量(m^3)。广东省水资源脆弱性评价指标体系构建如图 1 所示。

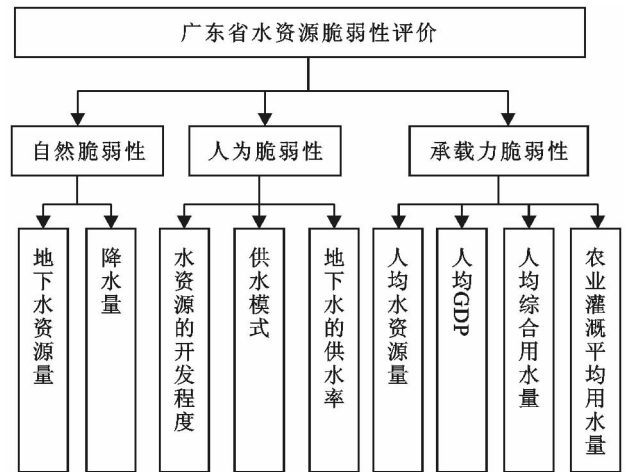


图 1 广东省水资源脆弱性评价指标体系构建

3.3 数据来源及样本数据标准化

根据《广东省水资源公报》(2011—2015 年)获取指标数据。正向影响因素用(1)式标准化,反向影响因素(2)式标准化,标准化数据后得到标准化矩阵 R (2015):

$$R = \begin{pmatrix} 0.2919 & 0.3149 & \dots & 0.3326 \\ 0.0419 & 0.0371 & \dots & 0.6054 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.1848 & 0.2256 & \dots & 0.1935 \end{pmatrix}$$

3.4 计算熵权权重

将标准化矩阵 R 带入(3),(4),(5)式,计算 22 个对象的 9 个影响因素的权重(表 2)。

表 2 广东省水资源脆弱性各评价指标权重

年份	地表水资源量	平均降水量	水资源开发程度	供水模数	地下水源供水率	人均水资源量	人均 GDP	人均用水量	农田灌溉平均用水量
2011	0.0611	0.1699	0.0693	0.0686	0.1699	0.0675	0.1699	0.1699	0.0540
2012	0.0689	0.1912	0.0807	0.0744	0.1912	0.0756	0.1912	0.0685	0.0609
2013	0.0697	0.1943	0.0768	0.0761	0.1943	0.0746	0.1943	0.0606	0.0593
2014	0.0682	0.1935	0.0779	0.0772	0.1935	0.0760	0.1935	0.0602	0.0600
2015	0.0679	0.1928	0.0782	0.0733	0.1928	0.0781	0.1928	0.0629	0.0613

3.5 计算水资源脆弱性 WVI

将计算的各个年份的权重 W 以及对应年份标准化矩阵 R 带入到式(6)中,利用线性加权求和法得到脆弱值(表 3)。

表 3 2011—2015 年广东省水资源脆弱性评价值 WVI

区域	WVI 值				
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
广州市	0.397 1	0.393 3	0.388 3	0.416 3	0.407 8
深圳市	0.424 5	0.356 7	0.368 5	0.353 9	0.330 6
珠海市	0.512 9	0.476 0	0.488 8	0.473 9	0.464 4
汕头市	0.570 7	0.528 4	0.552 8	0.545 8	0.542 2
佛山市	0.371 4	0.405 3	0.405 8	0.403 8	0.412 3
顺德区	0.332 9	0.318 2	0.303 3	0.304 6	0.310 4
韶关市	0.716 6	0.821 7	0.767 3	0.754 4	0.769 4
河源市	0.693 6	0.743 8	0.809 0	0.767 9	0.751 1
梅州市	0.679 6	0.702 3	0.755 8	0.715 3	0.703 5
惠州市	0.628 5	0.640 9	0.663 1	0.659 4	0.637 5
汕尾市	0.634 0	0.630 3	0.656 5	0.649 5	0.617 9
东莞市	0.544 0	0.516 2	0.515 1	0.511 5	0.508 5
中山市	0.377 4	0.394 9	0.380 8	0.375 0	0.385 5
江门市	0.570 0	0.655 3	0.662 5	0.629 4	0.640 8
阳江市	0.619 5	0.668 2	0.669 8	0.618 5	0.600 9
湛江市	0.543 8	0.510 6	0.510 8	0.492 8	0.468 3
茂名市	0.638 8	0.668 5	0.669 6	0.630 5	0.621 3
肇庆市	0.696 4	0.751 1	0.761 5	0.763 0	0.733 8
清远市	0.744 2	0.851 3	0.871 5	0.871 9	0.840 0
潮州市	0.606 6	0.582 7	0.594 9	0.579 2	0.633 5
揭阳市	0.641 1	0.603 8	0.618 6	0.599 7	0.584 6
云浮市	0.523 0	0.608 1	0.619 2	0.604 8	0.581 7

3.6 水资源脆弱性等级选取

目前评价水资源脆弱性没有统一的标准,本文参照文献等评价标准^[15,22],主要根据专家经验以及水域的具体数值从而划分水资源脆弱性等级阈值。根据广东省水资源的实际情况,考虑到水资源脆弱性评价的可推广性,将评价指标的最大值和最小值确定下来,然后确定每个指标的极差值,将极差值分为 5 段,选出 4 个等分点,即为水资源脆弱性划分点(表 4)。

表 4 广东省水资源脆弱性等级

脆弱度区间	等级
$0 \leq WVI < 0.40$	不脆弱
$0.40 \leq WVI < 0.55$	轻度脆弱
$0.55 \leq WVI < 0.63$	中度脆弱
$0.63 \leq WVI < 0.69$	比较脆弱
$0.69 \leq WVI < 0.9$	极度脆弱

4 结果与分析

4.1 广东省水资源脆弱性结果分析

4.1.1 广东省水资源脆弱性整体趋势 根据表 1—3 可知,2011—2015 年,广东省水资源脆弱性保持稳定,没有明显的水资源脆弱性较高或较低的年份。在 22 个研究对象中,韶关市、河源市、肇庆市与清远市水资源脆弱性呈现较严重的状态,且这 4 个城市的水资源脆弱性并没有降低的趋势。梅州市、惠州市、汕尾市、江门市、阳江市、揭阳市、潮州市与云浮市水资源脆弱性呈现较脆弱性,汕头市、东莞市、湛江市水资源脆弱性呈现中度脆弱,水资源脆弱性保持较好的地区有广州市、顺德区、深圳市、佛山市、中山市。5 a 内水资源脆弱性变化较大的区域有河源市、梅州市、江门市、清远市与云浮市。

从 2011—2015 年,影响广东省水资源脆弱性的因素来看,平均降水量、地下水源供水率与人均 GDP 是 3 个主要的影响因素。平均降水量与地表水水量,可以代表研究对象在研究时间内的丰枯状况,平均降水量的影响程度表明了研究对象在研究时间内降水量越大,水资源脆弱性越小,降水量越小,水资源脆弱性越严重;其次地下水源供水率在水资源的脆弱性影响因素中所占比例较高,地下水源供水率是反向指标,反向指标越大对水资源脆弱性影响越不好,地下水源供水率越大表明水资源的脆弱性情况越糟糕,说明今后在水资源管理工作中应加强地下水源供水情况的管理,减少地下水源供水,降低地下水源供水率;人均 GDP 反映了社会经济状况,经济状况越好,水资源脆弱性情况越差。

4.1.2 广东省省级市水资源脆弱性分析 2011—2015 年,广州市水资源的脆弱性呈现上升的趋势,属于轻度脆弱;深圳市水资源脆弱性保持较好,属于不脆弱。深圳市位于广东省东南部珠江口的东岸,每年的降水量较多但是降水空间分布不同,东部地区降水多,中部和西部逐渐减少。据相关资料显示,深圳市在近 5 a 水资源脆弱性保持良好有以下几点因素:首先,用水结构有了适当的调整。2011—2015 年深圳市用水发生变化如下:2010—2011 年,深圳市的全市用水量逐步上升。随着深圳市逐步落实最严格水资源管理制度、同时伴随产业结构的不断优化升级,全市各行业用水效率有了明显的提升,2011—2013 年,深圳市的总用水量呈现减少趋势,但在 2013—2015 年,城市公共用水量和生态环境用水量出现增加趋势,2011—2015 年,深圳市逐年提高城市公共用水,降低工业用水量。其次,高质量的污水处理能力,有

效的雨水与海水利用。2011—2015 年,深圳市的地下水源供水率较低,深圳市主要依靠地表水供水,同时污水处理回用、雨水利用和海水利用也占供水量一部分。深圳市人均用水量保持稳定,人均用水量、人均居民生活用水量、人均综合生活用水量在 5 a 内平稳。第三,最主要的原因是深圳市产业结构优化,由于产业结构优化,使得用水效率有了大幅度提升,2011—2015 年深圳市水资源的农业用水指标、工业用水指标和第三产业用水指标均有下降趋势,2015 年城市工业用水已经由原来的第二大用水行业下降为第三大用水行业。

查阅相关资料,从 2011—2015 年,广州市全市用水总量表现出逐步下降的趋势,从各用水行业来看,农业用水、工业用水均有所减少,但是生活用水和城镇公共用水表现出上升趋势。2011—2015 年,农田灌溉单位面积用水量在 2011 年达到最低值,随后便上升,在 2012 年上升到 5 a 内最高值,并在 2012 年以后呈现缓慢下降的趋势;人均综合用水量近 5 a 均有下降趋势。2011 年开始广州市开始实行最严格水资源管理制度,在农业工业上进行产业转移升级,在市民意识上加强节水型社会建设政策的宣传指引,逐步转移或关闭高耗水、重污染企业,广州市从 2011—2015 年经历了 5 a 时间,用水情况已经达到省级考核要求。广州市产业结构与其他发展城市相差较大,因此造成了广州市用水结构的变化,广州市内经济相对发达地区的一般工业用水和居民生活用水比重较高,农业用水较低。

4.1.3 广东省 4 大水系城市水资源脆弱性分析 根据对广东省的 21 个地级市水资源脆弱性的分析结果,结合广东省 4 大水系格局划分,得到 2011—2015 年广东省 4 大水系脆弱性对比结果(图 2)。

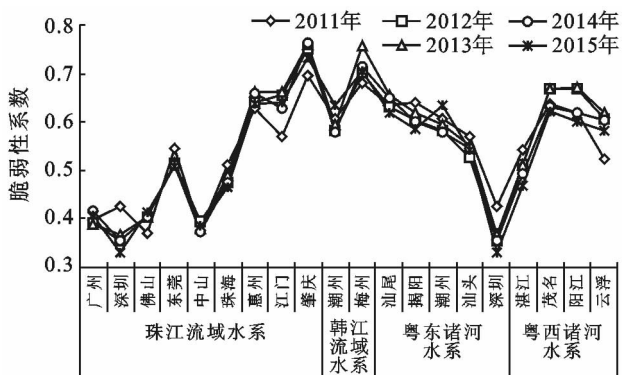


图 2 2011—2015 年广东省 4 大水系城市水资源脆弱性对比

从图 2 可以看出,韩江流域水系城市水资源的脆弱性是广东省 4 大水系脆弱性最严重,其次是粤西诸

河水系和粤东诸河水系,4 大水系中水资源脆弱性保持较好的是珠江流域水系。珠江流域水系主要包括北江、西江和东江,珠江流域水系的雨量充沛,尤其是水系中的河流径流量充沛,这是珠江流域水系脆弱性较低的主要原因。韩江流域水系主要包括韩江,韩江流域水系是 4 大水系中的集雨面积较小的水系,降雨量也较少,比起其他 3 大水系,韩江流域水系的水资源量不是很多,这是韩江流域水系水资源脆弱性偏高的原因,同时,韩江的万元工业增加值用水量(含火电与不含火电)是其他水系中最高的,万元 GDP 用水量也偏高,说明韩江流域水系的水资源利用率不高,也是导致韩江流域水系水资源脆弱性偏高的原因之一。

4.2 现阶段水资源存在的问题

(1) 水资源利用效率较低,全省人均用水量低。广东省 2010 年后总用水量有所下降,其中生活用水明显增加,而农业用水则总体呈现略微减少的态势,工业用水量也有所下降。2015 年广东省耗水总量 $1.68 \times 10^{10} \text{ m}^3$,各分类耗水率:农业 50.8%,居民生活 31.1%,城镇公共 34.4%,生态环境 47.3%,工业 16.6%。2015 年,除粤东河外,其余河流水资源量均较上年增加,用水总量较上年略微上升,全省水资源开发利用率低。据 2015 年水资源统计信息,全省水资源的开发利用率为 23.4%,根据多年平均水资源统计信息,广东省全省水资源利用率仅为 24.7%。同时,广东省各地级市的经济状况以及地理位置决定了每个地级市的水资源情况相差较大,经济能力较好的地区深圳、东莞等地区,水资源情况较好,而韶关等地水资源脆弱性高。

(2) 存在污染情况,水质问题严重。2015 年广东省废水污水的排放总量达到了 $1.20 \times 10^{10} \text{ t}$,其中有 76% 的废水污水排入了河流中,即 $9.14 \times 10^9 \text{ t}$,在进入河流的 $9.14 \times 10^9 \text{ t}$ 的废水污水中,有 54.7% 主要流入到了珠江三角洲。废水污水流入河流量前几位的城市是广州、深圳、东莞和佛山市,这 4 个城市的废水污水入河流的量超过了 $5.00 \times 10^8 \text{ t}$ 。2015 年广东省的 190 个国家级重要水功能区中,达标率仅为 40.5%,从对流域分区水质达标评价结果中来看,东江流域的水质达标率较高,粤西诸河的水质达标率较低;从对功能区水质评价结果来看,农业用水的水质达标率较低,渔业用水和缓冲区用水的水质达标率较高。广东省的污水治理不严格,生活污水的处理率较低等问题之前也被媒体披露出来,污染和水质情况的严重性关系到国民的生产、生活、健康等各个方面,应给予充分的重视。在 2015 年韩国世界水资源论坛中提出了一份“水安全和可持续增长”的重要报告,表明

了智慧城市的构建过程中要合理解决水安全的问题,并且在社会经济生态持续发展过程中要确保降低水资源带来的风险。

(3) 水资源管理矛盾突出,供需问题亟待解决。广东省的水资源丰富,但由于空间和时间的的原因,导致广东省水资源的分配不均匀,差异很大。珠江三角洲等经济发达地区用水量激增,但是蓄水能力不足。粤北山区蓄水能力较强,但是蓄水量较低,水资源不能充分利用,而东江流域和雷州半岛资源性缺水严重;西江水量丰富但是利用率较低。水资源管理问题也是现在智慧城市构建中需要解决的问题,智慧城市中拟用信息技术来实现智慧管理水资源,时刻监控水资源的消耗和分配,有效提高水资源在城市可持续发展中的利用率^[2]。

4.3 降低广东省水资源脆弱性的适应性对策

降低水资源脆弱性的适应性对策,就是综合水资源的使用、利用效率、水文循环、人类的社会发展等因素,合理地规划水资源的使用,提高水资源的可持续发展能力,降低水资源稀缺性与分布不均匀性带给人类的影响程度^[23]。针对以上对广东省水资源脆弱性显示出的水资源问题,提出以下几点适应性对策,以便更为有效的改善广东省水资源脆弱性状况:

4.3.1 产业结构改革 产业结构改革目的在于对用水结构与 GDP 做出调整,使得得到最大 GDP 的同时,使用尽可能的水资源,可以大幅度地提高水资源的利用效率。张书莲^[24]在对 2011 年到 2014 年广东省水资源利用效率的研究中发现,广东省水资源的利用效率与广东省各地区的产业结构关系密切。2014 年广州市和深圳市的 GDP 相差较小,但 2014 年广州市的总用水量比深圳市的用水总量明显超过很多,过量高达三倍多。通过比较两个省级市的产业结构来看,广州市的第一产业用水量也比深圳市的高出很多,广东省应根据各个地区的各产业经济发展与水资源量的关系,适当地做出调整和转变,首先,降低第一产业和第二产业中的高耗水行业,例如汽车制造、燃料加工行业等^[25];其次可以转向现代化服务行业,利用“互联网+”的趋势,降低城市经济发展过度依赖某项产业的程度;也可以转向发展科技制造、教育科技等领域。

4.3.2 建设智慧水务系统 建设智慧水务系统,旨在合理、快捷的对水资源进行综合管理。智慧水务就是将互联网、大数据、智能系统等高科技的计算机技术结合,深度挖掘水资源信息,以智能化的方式管理水资源在人类社会中的使用、存储、开发、利用以及排放等等各个环节,对相关异常情况有效的管理与控

制。构建智慧水务系统,包括以下各大板块:用户层主要有多元化的用水主体以及政府管理和监督部门;应用平台包括水质监测、供需水管理、便捷化收费、洪涝干旱监控、数据采集系统等等;平台支撑包括账户管理、数据收集与分析、缴费系统、异常值反馈等等;数据层包括:基础数据采集、数据作图、异常数据收集、业务数据收集等等;感知与传输层包括:供需水的监控、水质监测、排污水监测、企业及各类组织的供水监测等等;基础平台包括信息管理平台、数据处理平台、资源共享平台等。

智慧水务的建设对于广东省政府监管部门来说,可以起到高屋建瓴的作用,对广东省水资源的管理既高效又快捷,改善整个城市水资源的运作情况;对于企业及各类组织来说,建设智慧水务系统是一个互联网大数据行业的机会,可以促进相关信息技术、网络技术等企业的发展,节约制造业、工业等企业经济成本;对于公民来说,智慧水务高效地处理生活用水的各类问题,可以及时查看水资源的各类信息。智慧水务的建设,提高了水资源管理水平,对水质污染等情况也能实时监控。

4.3.3 依靠科技技术水平,提高水资源的利用率 依靠科技技术水平,是综合管理水资源脆弱性的手段之一。广东省的降水量大,尤其是 1、7 和 8 月。集中降水量强度较大,有利于收集降水,广东省应该加大雨水利用的力度,加强雨水的使用,发挥科技技术能力,充分利用广东省的多降水特点,充分收集降水。

依靠科技水平提高,提高污水处理能力。2015 年广东省废水全部来源为工业废水和生活污水,其中工业废水占污水总量的 47.8%,生活污水占 52.2%。废水排放会造成土地污染、河流水质降低、生态环境破坏,因此加强污水排放控制管理,提高污水处理,加强再生水利用,对于改善生态环境,提高水资源利用率以及促进经济发展都有重要的现实意义。在利用技术提高污水处理的同时也要考虑所在环境,充分考虑地理、经济、气候等条件,利用污水处理系统和技术提高污水处理能力。

依靠科技技术,增加水质达标率。2015 年,广东省共有 420 个水功能区监测点,检测结果显示达标 172 个,达标率为 41%,主要超标量是氨氮、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、溶解氧和总磷等。广东省应该加强水质保护,使用实用的去污方法,降低二次水资源污染,保障水资源的有效可利用量。

5 结论

水资源脆弱性是评价水资源情况的重要指标,与

水资源的可持续发展密切相关。利用熵权法,客观地将指标体系进行赋权,从自然脆弱性、人为脆弱性、承载力脆弱性3个方面较为全面并且不繁杂地计算水资源脆弱性量化结果,同时结合研究地区的水资源地实际情况,可以分析出研究地的水资源问题所在,为降低水资源脆弱性,及时科学合理的管理水资源提供一定依据,并根据广东省水资源可能存在的问题提出相关的建议。本文的不足在于研究时间过短,后期在研究水资源脆弱性、水资源与社会经济可持续发展的情况中,要紧紧结合智慧城市的构建,加入信息技术等手段,更加准确和客观的分析出水资源脆弱性的情况。

[参 考 文 献]

- [1] 于翠松. 环境脆弱性研究进展综述[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 23-27.
- [2] 翁建武, 夏军, 陈俊旭. 黄河上游水资源脆弱性评价研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 15-20.
- [3] 张明月, 彭定志, 钱鞠. 疏勒河流域昌马灌区水资源脆弱性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 104-106, 128.
- [4] 王明泉, 张济世, 程中山. 黑河流域水资源脆弱性评价及可持续发展研究[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(2): 114-116.
- [5] 崔循臻, 贾生海. 石羊河流域水资源脆弱性评价[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(24): 10098-10100.
- [6] 宁理科, 刘海隆, 包安明. 塔里木河流域水资源系统脆弱性定量评价研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 266-270.
- [7] 邹君, 杨玉蓉, 毛德华, 等. 湖南省农业生态水资源库脆弱性评价[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 196-203.
- [8] 朱怡娟, 黄建武, 揭毅. 武汉城市圈水资源脆弱性评价[J]. 水资源保护, 2015, 32(2): 59-64, 94.
- [9] 范弢, 庄立会. 丽江城市水资源评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 65-69.
- [10] 邹君, 杨玉蓉, 田亚平, 等. 南方丘陵区农业水资源脆弱性概念与评价[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 302-310.
- [11] 张颖, 翟瑞昌, 王晨晨. 水库型水源地系统脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 5-9.
- [12] 彭稳, 裴建国. 岩溶含水层脆弱性评价方法探讨[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 9-15.
- [13] 唐剑锋, 周正, 胡圣. 丹江口水源地水资源脆弱性评价[J]. 人民长江, 2014, 45(18): 5-9, 59.
- [14] 邹君, 郑文武, 杨玉蓉. 基于GIS/RS的南方丘陵区农村水资源系统脆弱性评价: 以衡阳盆地为例[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 1010-1017.
- [15] 马冬梅, 陈大春. 基于熵权法的模糊集对分析模型在乌鲁木齐市水资源脆弱性评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 36-40.
- [16] 白庆芹, 汪妮, 解建仓, 等. 基于模糊综合评价法的城市河流脆弱性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 33(1): 244-247, 256.
- [17] 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.
- [18] 邓慧平, 赵明华. 气候变化对莱州湾地区水资源脆弱性的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 9-15.
- [19] 夏军, 雒新萍, 曹建廷, 等. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 8-14.
- [20] 邹君, 杨玉蓉, 谢小立. 地表水资源脆弱性: 概念、内涵及定量评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 132-135, 145.
- [21] 申锦标, 吕跃进. 一种基于向量贴近度的组合赋权方法[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(2): 75-77, 89.
- [22] 刘倩倩, 陈岩. 基于熵权法的流域水资源脆弱性评价: 以淮河流域为例[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 10-17.
- [23] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286.
- [24] 张书莲. 水资源利用效率与产业结构调整: 以广东省为例[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(2): 230-234.
- [25] 梁圆, 千怀遂, 李明霞, 等. 广州市供水总量与经济增长及城市化之间的关系探讨[J]. 水电能源科学, 2014, 32(1): 145-148.