

基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价

范嘉炜^{1,2,3}, 黄锦林^{1,2,3}, 袁明道^{1,2,3}, 张旭辉^{1,2,3}, 谭彩^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635; 3. 广东省粤港澳大湾区水安全保障工程技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要: 科学合理评价水资源承载力是促进区域可持续发展的有效途径。以珠江三角洲城市群为研究对象, 建立了基于水资源承载力子系统熵权的评价模型, 与灰色关联理论相结合, 对珠江三角洲区域水资源承载力子系统差异性进行分析。结果表明: 各地区间水资源承载力子系统等级与总等级均存在差别。除江门、惠州和肇庆外, 其余地区水资源开发利用程度已接近饱和; 深圳、佛山、珠海3市水资源供给对社会经济支持力较弱, 已不能满足经济发展需求; 江门和肇庆水资源承载力总等级虽然较高, 但工、农业及居民生活用水效率低下, 耗水率高, 水资源未得到充分利用; 东莞市在S4子系统的等级低于其他城市, 应予以重点关注。提出的基于子系统熵权的分配方式可改善目前仍以传统熵权分配为主的现状, 提供更加有针对性的评价结论。这对于合理分配在各个子系统的治理力度, 以保证区域未来可持续协调发展具有一定的参考价值。

关键词: 水资源承载力; 子系统; 熵权; 珠江三角洲

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0100-06

Water resources carrying capacity evaluation of Pearl River Delta based on entropy weight model of subsystem

FAN Jiawei^{1,2,3}, HUANG Jinlin^{1,2,3}, YUAN Mingdao^{1,2,3}, ZHANG Xuhui^{1,2,3}, TAN Cai^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuary Hydropower Technology, Guangzhou 510635, China;

3. Guangdong, Hongkong and Macau Water Safety Protection Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Reasonable evaluation of water resources carrying capacity is an effective way to promote regional sustainable development. This paper took the Pearl River Delta city cluster as the research object, established an evaluation model based on the entropy weight of the water resources carrying subsystem, and analyzed the difference of the water resources carrying subsystem in the Pearl River Delta by combining with the grey relational theory. The results showed that there are differences between the water resources carrying subsystem and the total grade in different regions. Except for Jiangmen, Huizhou and Zhaoqing cities, the development and utilization of water resources in other areas has reached saturation point. The supply of water resources in Shenzhen, Foshan and Zhuhai is insufficient to support social and economic development and cannot meet the needs of economic development. Although the total carrying capacity of water resources is high in Jiangmen and Zhaoqing, the water efficiency is low in industry, agriculture, and daily consumption. The high water consumption rate means that water resources are not fully utilized. The S4 subsystem in Dongguan is lower than other cities, and should be paid more attention to. The method based on subsystem entropy weight proposed in this paper can improve the current situation of traditional entropy weight distribution and provide targeted evaluation conclusions. It has important reference value for the rational allocation of governance measures of each subsystem to ensure the sustainable and coordinated development in the future.

收稿日期: 2018-09-02; 修回日期: 2018-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402605); 深圳市水务发展专项资金科技创新项目(20170103)

作者简介: 范嘉炜(1991-), 女, 山西太原人, 硕士, 研究方向为水文水资源等。

通讯作者: 黄锦林(1971-), 男, 江西赣州人, 博士, 教授级高工, 从事水利工程与防洪减灾研究工作。

Key words: water resources carrying capacity; subsystem; entropy weight; Pearl River Delta

1 研究背景

水资源承载力是影响地区可持续发展的重要因素,也是衡量社会经济发展受水资源制约的阈值。水资源承载力通常受到多种因素共同作用,因此,对其进行科学合理地评价逐渐成为水利界所研究的重点问题之一^[1-2]。

珠江三角洲位于珠江入海口,是粤港澳大湾区的重要组成部分,也是我国南方地区对外开放的门户,珠三角借助毗邻港澳的沿海的地理优势,逐渐成为亚太地区最具活力的经济区之一^[3-5]。

目前在水资源承载力的相关研究中,张杰等^[6]建立了基于熵权的模糊综合评价模型,对广西省水资源可持续利用提出了建议;梁彩霞^[7]以肇庆市为例,运用熵权法和因子分析法对区域水资源短缺风险进行了综合评价;孙月峰等^[8]采用基于熵权的模糊综合评价方法对影响城市水资源安全的因素进行了合理评价;贺欣悦等^[9]将熵权法和云理论相结合,对近中远期目标年的水资源承载力进行了预测评价。虽然评价方法各有优势,但仍以传统方法为主,且权重分配均基于承载系统整体,子系统对于承载力等级的影响分析不足,具有一定的局限性。本文将传统熵权理论扩展至水资源承载子系统评价,结合灰关联分析法,对珠三角区域水资源承载力空间差异性^[10]进行分析,可改善目前在珠三角水资源承载力研究中仍以传统熵权分配方法为主的现状,

提供科学合理的评价方法。

2 系统等级与标准化

2.1 系统等级

在基于传统熵权的水资源承载力评价中,通常将承载力分为 I ~ V 级,其中 I 级、III 级、V 级分别代表区域水资源承载力较高、一般和低下,II、IV 级为两个过渡等级,可通过采取具有针对性地管理措施或合理的开发利用方式向较优等级转变。

水资源承载系统由多个子系统共同组成,且各子系统的指标普遍具有不确定性、随机性等特点。为改善评价工作合理性,深入分析影响珠三角区域水资源承载力因素,提出改善承载力的针对性建议和措施。

本文通过建立珠三角水资源承载力评价体系,将基于子系统的熵权理论应用于承载力系统分析中。基于子系统的等级表述详见表 1,II、IV 级仍为过渡等级,在表 1 中略去。

2.2 数据标准化

为克服数据之间由于量纲、不同取值标准等造成的差异,首先需利用数据标准化对指标数据和实际统计数据进行统一。

本文根据各市水资源公报、统计年鉴^[11]等,结合水资源承载力指标数据标准化方法的研究成果^[12],得出各市水资源承载力 I ~ V 级的指标数据标准化结果,见表 2。

表 1 珠三角水资源承载力子系统等级划分

总等级	说明	子系统等级				
		水资源数量	社会经济	用水水平	水资源质量	生态环境
I	水资源承载力高 对于区域内人口-经济-环境-资源协调发展具有较强的承载能力	水资源开发利用程度低,水资源量丰富	水资源供给对社会经济支持力强,满足经济发展需求	水资源供给能很好满足工业、农业、生活等用水需求	污水处理与排放工作落实到位,水质情况优	绿化面积广,水资源供给能很好维持生态环境用水
III	水资源承载力一般 能够基本保证区域内人口-经济-环境-资源协调发展	水资源开发利用程度中等	基本能够满足经济发展需求。	基本满足工业、农业、生活等用水需求	排污工作基本到位,水质情况中等	水资源供给基本能够维持生态环境用水
V	水资源承载力低下 水资源问题会成为经济社会发展的一项阻碍因素	水资源开发利用程度接近饱和	已不能满足社会发展需求	已不能满足工业、农业、生活等用水需求	排污工作不达标,水质情况较差	水资源供给已不能维持生态环境用水

表2 珠三角水资源承载力评价指标数据标准化结果

子系统	指标序号	指标名称	指标类型	I级标准化	II级标准化	III级标准化	IV级标准化	V级标准化
S ₁ 水资源数量	I ₁	人均水资源量/m ³	+	1	0.825	0.492	0.167	0
	I ₂	水资源开发利用/%	-	1	0.9	0.6	0.2	0
	I ₃	单位面积水资源量/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	+	1	0.8	0.4	0.1	0
S ₂ 社会经济	I ₄	城镇化率/%	-	1	0.857	0.5	0.143	0
	I ₅	人口增长率/%	-	1	0.722	0.5	0.167	0
	I ₆	人口密度/(人·km ⁻²)	-	1	0.824	0.471	0.147	0
S ₃ 用水水平	I ₇	人均GDP/10 ⁴ 元	-	1	0.982	0.835	0.353	0
	I ₈	耗水率/%	-	1	0.875	0.625	0.25	0
	I ₉	万元工业增加值用水量/m ³	-	1	0.966	0.81	0.345	0
S ₄ 水资源质量	I ₁₀	农田灌溉亩均用水量/m ³	-	1	0.889	0.556	0.167	0
	I ₁₁	城镇居民人均日用水量/L	-	1	0.893	0.643	0.25	0
	I ₁₂	万元GDP用水量/m ³	-	1	0.9	0.6	0.2	0
S ₅ 生态环境	I ₁₃	单位面积污水排放量/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	-	1	0.846	0.538	0.192	0
	I ₁₄	污水处理率/%	+	1	0.889	0.556	0.167	0
	I ₁₅	水功能区水质达标率/%	+	1	0.875	0.5	0.125	0
	I ₁₆	森林覆盖率/%	+	1	0.875	0.5	0.125	0
	I ₁₇	生态环境用水占总用水/%	-	1	0.875	0.625	0.25	0

在对区域实际统计数据进行尺度统一时,可设 X_{ij} 为实际统计数据的矩阵,矩阵组成元素为 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, m$ 为指标数, n 为区域数)。经标准化后可得到由元素 x'_{ij} 组成的矩阵 X'_{ij} 。当 x'_{ij} 为正向指标类型时, x'_{ij} 由式(1)表示;当 x'_{ij} 为负向指标类型时,由式(2)表示。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

经公式(1)、(2)处理可以得到标准化后的各区域水资源承载力实际统计数据,由于篇幅所限,具体数据在此不作罗列。

3 系统承载力分析

水资源承载系统属于多指标共同作用的复杂体系,所求目标值无法通过单一的函数拟合得出,需借助关联性分析模型来进行系统承载力分析评价。

熵权理论^[6-9]可用来确定各个指标的重要程度,以减少在计算各个指标权重时产生的人为干扰。灰关联分析法^[13]可用来对比指标数据与统计数据的相关程度,客观反映各指标间隐含的灰色特性。

结合以上分析理论,本文提出了基于子系统的熵权分配方式,并与传统熵权的评价结果进行对比,利用灰关联分析法对区域水资源承载力进行深入分析,旨在为水资源承载力评价提供更加科学化、规范化的方式。

3.1 灰关联分析

灰关联分析法^[14-16]可在信息量不够全面的条件下完成对统计数据的评价分析,它通过确定指标数据曲线与统计数据曲线的相近程度来判定两者的相关性,从而省去了大量的数据统计工作。对于评价对象 j 而言,灰关联系数 ξ_{ij}^k 以公式(3)表示,其中分辨系数 ρ 取 0.5。 Δ_{ij}^k 的含义为:经过标准化后的统计数据与同样经标准化处理后的 I ~ V 级指标数据的绝对差^[17]。

$$\xi_{ij}^k = \frac{\min_i \min_k \Delta_{ij}^k + \rho \max_i \max_k \Delta_{ij}^k}{\Delta_{ij}^k + \rho \max_i \max_k \Delta_{ij}^k} \quad (3)$$

由此可得出各评价地市在不同指标下对应的关联系数,表3以深圳市为例列出不同等级下的2017年深圳市水资源承载力指标的 ξ_{ij}^k 。

3.2 熵权与关联度 e_j

3.2.1 传统熵权的 e_j 目前,在水资源承载力评价

中广泛应用的传统熵权评价模型^[9,18]可用公式(4)~(6)表示。其中 E_i 表示信息熵^[19], w_i 表示熵权, y_{ij} 表示指标比重。

表 3 2017 年深圳市水资源承载力指标的灰关联系数

分类	指标	等级				
		I	II	III	IV	V
S ₁ 水资源数量	I ₁	0.333	0.373	0.459	0.724	1.000
	I ₂	0.375	0.401	0.491	0.930	0.750
	I ₃	0.766	0.913	0.483	0.369	0.371
	I ₄	0.333	0.364	0.455	0.754	1.000
S ₂ 社会经济	I ₅	0.333	0.405	0.455	0.724	1.000
	I ₆	0.333	0.374	0.470	0.748	1.000
	I ₇	0.333	0.333	0.333	0.553	1.000
	I ₈	1.000	0.797	0.527	0.368	0.333
S ₃ 用水水平	I ₉	1.000	0.934	0.688	0.400	0.333
	I ₁₀	0.562	0.638	0.883	0.496	0.450
	I ₁₁	0.825	0.998	0.625	0.405	0.359
S ₄ 水资源质量	I ₁₂	1.000	0.831	0.511	0.354	0.333
	I ₁₃	0.333	0.367	0.437	0.695	1.000
	I ₁₄	1.000	0.815	0.484	0.344	0.333
	I ₁₅	1.000	0.797	0.455	0.333	0.333
S ₅ 生态环境系统	I ₁₆	0.450	0.503	0.792	0.623	0.562
	I ₁₇	0.333	0.359	0.401	0.636	1.000

关联度 e_j 可用公式(7)表示, e_j 表示评价对象 j 与等级 K 相近的程度, 两者越相近则 e_j 越大, 反之 e_j 值则越小。 e_j 可以克服由于 ξ_{ij}^k 较分散所导致在确定

评价对象 j 等级时不够直观的问题。

$$w_i = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{i=1}^m E_i} \quad (4)$$

$$E_i = -K \sum_{j=1}^n (y_{ij} \ln y_{ij}) \quad (5)$$

$$y_{ij} = x'_{ij} / \sum_{j=1}^n x'_{ij}, K = 1/\ln n, y_{ij} \ln y_{ij} = 0 (y_{ij} = 0) \quad (6)$$

$$e_j = \sum_{i=1}^m (w_i \xi_{ij}^k) \quad (7)$$

以深圳市为例, 深圳市在各等级下的 e_j 可应用表 4 以传统熵权加权求和得出。同理可得出其余城区基于传统熵权分配方式的关联度 e_j 成果, 与最大 e_j 值相应的等级即为总等级。表 4 为珠三角城市群基于传统熵权的 e_j 成果。

3.2.2 子系统熵权的 e_j 从上一节的分析结果可以看出, 基于传统熵权的关联度 e_j 虽然可以直观地反映出珠三角各地区在不同等级下的关联度成果, 但对于各个子系统下的承载力情况却无法得以体现, 例如, 根据表 4 的分析结果可知, 广州、佛山、中山、东莞、珠海 5 市的水资源承载等级均为 IV 级, 惠州、肇庆两市的水资源承载等级均为 I 级, 显然无法从此结果中得出同级别地区间承载力的相似或差异之处。

另外, 基于传统熵权的承载力等级是一个宏观层面的问题反映, 高等级地区是否在各个子系统都全面优于低等级地区同样不得而知。针对此, 本文对于珠三角地区间的水资源承载力特点和差异进行深入分析, 以期各地区水资源承载力评价提供更合理的方式。

表 4 珠三角地区城市群不同等级的 e_j 值与总等级

等级	广州	深圳	佛山	中山	东莞	珠海	惠州	江门	肇庆
最大 e_j 值	0.668	0.644	0.687	0.644	0.684	0.629	0.719	0.656	0.709
相应等级(总等级)	IV	V	IV	IV	IV	IV	I	II	I

本文通过分析传统熵权 w_i 后, 针对推求方法做出改进, 提出了考虑子系统熵权影响的水资源承载力评价方法: 分别计算每个子系统的熵权 w_i , 公式(4)中的 m 不再沿用传统定义的总指标数, 而是每个子系统下的指标数, 即 $m_{s1} = 3, m_{s2} = 4, m_{s3} = 5 \dots$, 每个子系统的熵权和均为 1。因此, 可得出基于此定义下的水资源子系统熵权计算结果, 具体权

重分配见表 5。

根据公式(7)的关联度的定义, 得出基于子系统熵权的珠三角地区各城市在 5 个承载力等级下的关联度 e_j , 在每个子系统下, 取 5 个承载力等级中 e_j 的最高值对应等级汇总于表 6, 由于 ArcGIS 能更直观地反映珠三角各市水资源承载力的空间分布情况, 因此将各区域空间分布图汇总于图 1。

表5 珠三角水资源承载子系统熵权权重

分类	指标	子系统熵权	Σ
S_1 水资源数量	I_1	0.424	1
	I_2	0.272	
	I_3	0.304	
	I_4	0.424	
S_2 社会经济	I_5	0.147	1
	I_6	0.167	
	I_7	0.262	
	I_8	0.200	
	I_9	0.194	
S_3 用水水平	I_{10}	0.197	1
	I_{11}	0.204	
	I_{12}	0.205	
	I_{13}	0.324	
S_4 水资源质量	I_{14}	0.340	1
	I_{15}	0.336	
	I_{16}	0.489	
S_5 生态环境系统	I_{17}	0.511	1

从表6和图1的结果中可以看出,各地区间水资源承载子系统等级与总等级均存在差别:深圳市由于受 S_1 、 S_2 、 S_5 子系统影响,总等级为V级,但通过基于子系统熵权的 e_j 分析后可发现,深圳市的 S_3 、 S_4 子系统均为I级,即处于用水水平高、水资源质量优的良好状态。这是基于传统熵权的分析所是无法反映的。

同理可得出, S_1 、 S_2 也是导致佛山、中山、广州、东莞、珠海水资源承载力低下的主要因素。另外,水质问题是目前社会热点之一,东莞市在 S_4 子系统(水资源质量)的等级较其他城市低(IV级),应予以重点关注,并采取相应的治理措施。江门、惠州和肇庆水资源承载等级较高,但 S_3 子系统的承载等级较低,分别为V级、IV级、V级,在今后的城市建设中需注意用水水平的提高。这种特点与深圳市恰是相反的。

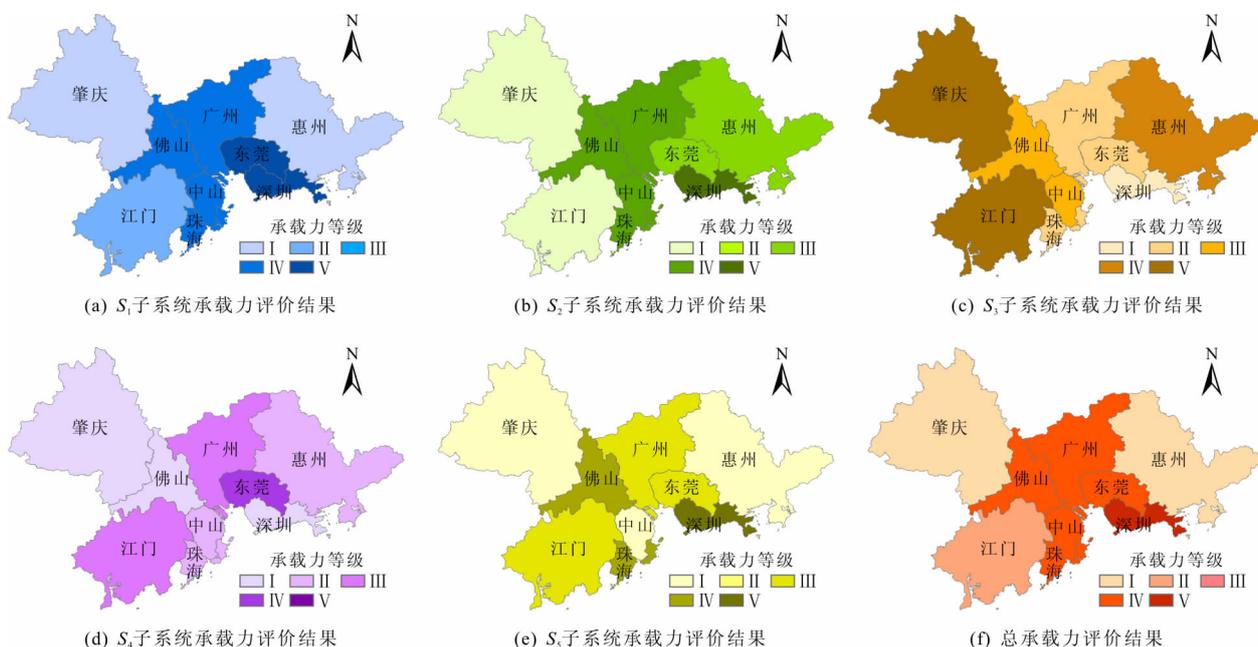


图1 珠三角各市水资源承载力评价结果

表6 珠三角地区各城市水资源子系统承载等级及相应 e_j

分类	广州	深圳	佛山	中山	东莞	珠海	惠州	江门	肇庆
S_1 等级	IV	V	IV	IV	V	IV	I	II	I
相应 e_j	0.782	0.741	0.804	0.775	0.686	0.744	1.000	0.954	0.732
S_2 等级	IV	V	IV	IV	III	IV	III	I	I
相应 e_j	0.683	1.000	0.749	0.662	0.705	0.717	0.785	0.805	0.975
S_3 等级	II	I	III	III	II	II	IV	V	V
相应 e_j	0.630	0.878	0.662	0.691	0.730	0.672	0.613	0.808	0.715

续表6

分类	广州	深圳	佛山	中山	东莞	珠海	惠州	江门	肇庆
S_4 等级	Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ
相应 e_j	0.781	0.784	0.644	0.756	0.852	0.726	0.766	0.614	0.662
S_5 等级	Ⅲ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅰ
相应 e_j	0.771	0.786	0.804	0.658	0.725	0.768	0.876	0.758	0.973
总等级	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ
相应 e_j	0.668	0.644	0.687	0.644	0.684	0.629	0.719	0.656	0.709

4 结 论

(1)为科学地对珠三角地区水资源承载力,促进水资源合理开发和利用,本文基于子系统的熵权分配方式对指标熵权进行了合理划分,与灰关联分析法相结合,改善了目前在珠三角水资源承载力研究中仍以传统熵权分配方法为主的现状,提供更加合理的评价方法。

(2)各地区间水资源承载子系统等级与总等级均存在差别,除江门、惠州和肇庆外,其余地区水资源量不足,水资源开发利用程度已接近饱和;深圳、佛山、珠海3市由于受社会人口、经济发展过快影响,水资源供给对社会经济支持力较弱,已不能满足经济发展需求;江门和肇庆水资源承载力总等级虽然较高,但工、农业及居民生活用水效率低下,耗水率高,导致水资源未得到充分利用,应对此采取相应的治理措施;对于水资源质量子系统,珠三角区域内除东莞市外,污水处理与排放工作均落实到位,水质情况优良, S_4 等级处于较理想的水平。

(3)为改善区域内水资源整体承载力,各区域应根据子系统现状等级,有针对性地采取相应措施,合理分配在提高用水水平、改善城区水质等方面的治理力度,以保证未来经济-环境-资源的可持续协调发展。

参考文献:

- [1] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90.
- [2] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(2):258-269.
- [3] 郭磊,黄本胜,邱静,等.基于趋势及回归分析的珠三角城市群需水预测[J].水利水电技术,2017,48(1):23-28.
- [4] 张日新,谷卓桐.粤港澳大湾区的来龙去脉与下一步[J].改革,2017(5):64-71.
- [5] 覃成林,刘丽玲,覃文昊.粤港澳大湾区城市群发展战略思考[J].区域经济评论,2017(5):113-118.

- [6] 张杰,邓晓军,翟禄新,等.基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J].水土保持研究,2018,25(5):385-389+396.
- [7] 梁彩霞.基于因子分析法和熵权法的肇庆市水资源短缺风险评价[J].广东水利水电,2018(10):1-4.
- [8] 孙月峰,张表志,闫雅飞,等.基于熵权的城市水资源安全模糊综合评价研究[J].安全与环境学报,2014,14(1):87-91.
- [9] 贺欣悦,刘国东,胡月,等.基于云理论的成都市水资源承载力评价[J].中国农村水利水电,2018(9):58-63.
- [10] 职璐爽.广东省水资源脆弱性评价[D].西安:西安理工大学,2018.
- [11] 广东省统计局,国家统计局广东调查总队.广东统计年鉴(2017)[M].北京:中国统计出版社,2017.
- [12] 康艳,宋松柏.水资源承载力综合评价的变权灰色关联模型[J].节水灌溉,2014(3):48-53.
- [13] SAHOO M M, PATRA K C, SWAIN J B, et al. Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2016,21(6):730-752.
- [14] 刘敏,聂振龙,王金哲,等.华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J].水土保持通报,2014,34(6):311-315.
- [15] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等.改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J].水资源保护,2017,33(1):52-56.
- [16] 朱玲燕,苏维词.基于熵权法及灰色关联模型的水资源承载力研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(5):233-236.
- [17] 侯珏,刘芳,陈征.基于熵权和灰色关联分析的航道绿色水平综合评价方法[J].大连海事大学学报,2016,42(3):56-61.
- [18] 成琨,付强,任永泰,等.基于熵权与云模型的黑龙江省水资源承载力评价[J].东北农业大学学报,2015,46(8):75-80.
- [19] PAKKAR M S. Multiple attribute grey relational analysis using DEA and AHP[J]. Complex & Intelligent Systems, 2016,2(4):243-250.