

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.005

基于联系数的水资源承载力状态评价模型

胡启玲^{1,2},董增川¹,杨雁飞³,李冰¹,张济韬¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092;
3. 长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430000)

摘要: 基于集对分析和三角模糊数理论,建立水资源承载力状态评价模型。通过理论分析、频率计算和数据统计,选取 14 个指标,划分为 5 个等级,建立水资源承载力评价指标体系;采用主客观赋权相结合的方式计算各指标组合权重,分析水资源承载力的主要影响因素及其原因。在联系数方法的基础上,用减法集对势分析各样本水资源承载力态势。对山东省 17 个地级市 2015 年各指标数据进行实例分析,结果表明:影响山东省各地级市水资源承载力状态的主要因素为单位面积灌溉水量、单位面积地下水资源量、单位面积废水排放量;山东省总体水资源承载力处于临界超载和轻微超载状态,在水资源禀赋条件稳定的情况下,提高水资源利用效率,改善水生态环境,能够有效提升水资源承载力水平。

关键词: 水资源承载力;集对分析;三角模糊数;评价模型;联系数;层次分析法;主成分分析法;山东省

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0425-08

State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number

HU Qiling^{1,2}, DONG Zengchuan¹, YANG Yanfei³, LI Bing¹, ZHANG Jitao¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;
3. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430000, China)

Abstract: Based on set-pair analysis theory and triangular fuzzy number theory, the state evaluation model of water resources carrying capacity was established. Through theoretical analysis, frequency calculation and data statistics, 14 indexes were selected, and each index was divided into five grades, to establish an evaluation index system of water resources carrying capacity. The weight of each index was calculated by means of combination of subjective and objective weights, and the main influencing factors and reasons of water resources carrying capacity were analyzed. Based on the connection number method, the situation of water resources carrying capacity of each sample was analyzed by set-pair subtractive situation. With the data of 17 cities in Shandong Province in 2015, the results were analyzed. The results show that: main factors that affect the water resources carrying capacity of all cities in Shandong are irrigation water per unit area, groundwater resources per unit area and wastewater discharge per unit area. From four characteristic layers, the weight of natural characteristics of water resources is the largest. The overall carrying capacity of water resources in Shandong is in the state of critical overloading and slight overloading. Under the condition of stable water resources, improving water resources utilization efficiency and improving water environment can effectively improve the carrying capacity of water resources. Through the analysis

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401306);江苏省典型地区水资源环境承载能力提升研究(2016003)

作者简介: 胡启玲(1993—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:huql@hhu.edu.cn

通信作者: 董增川,教授。E-mail:dongzengchuan@163.com

引用本文: 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432.

HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432.

of examples, the model is practical and effective, and has certain practical significance and value.

Key words: water resources carrying capacity; set-pair analysis; triangular fuzzy number; evaluation model; connection number; analytic hierarchy process; principal component analysis; Shandong Province

承载力一词源于物理学,后来被引入生态学中,表示一定时期内、特定地区、特定种群的最大种群数目^[1]。20世纪80年代联合国教科文组织正式提出“资源承载力”这一概念。1989年,新疆水资源软科学课题组将承载力和水资源结合,考虑水资源承载能力这一问题^[2]。随后,许多专家和学者都对水资源承载力进行研究,提出了多种不同的定义。在水资源承载力评价方面,常用的方法有主成分分析法^[3]、投影寻踪法^[4-5]、模糊综合评价法^[6]等。但是大部分都是确定性的研究,考虑不确定条件下的水资源承载力的研究较少。

赵克勤先生于1989年提出的集对分析理论^[7],是一种用于处理确定不确定系统问题的系统分析方法,是用联系数的结构式来定量表示集对中集合间的确定与不确定性关系。该系统分析方法被广泛用于基础学科、应用学科和新兴学科,在水资源方面的应用开始较晚,主要有:冯利华等^[8]运用集对分析进行水资源变化趋势预测研究,王栋等^[9]将集对分析和模糊集合论引入水环境评价中,石月珍等^[10]将集对分析运用到滨海地区区域协调发展评价中,贺瑞敏等^[11]基于集对分析理论进行了广义水环境承载能力评价,金菊良等^[12]用集对分析来研究流域水安全评价,冷辉等^[13]将集对分析理论用于湖泊形态健康评价,郑志宏等^[14]用熵值法改进集对分析并同于水质模糊评价。

综上,水资源承载力研究目前仍然存在着一些问题,比如概念内涵未明确,没有通用性强的评价指标体系,评价方法未充分考虑不确定条件。为此,本文以选择的评价指标体系、依据各项定量的等级评价指标判定五级超不超载程度、综合评价地区水资源承载力状态。方法上,以理论分析、频率计算和数据研究多种基础上建立水资源承载力及其状态评价指标体系。并运用集对分析理论,结合三角模糊数,建立联系数评价模型用于水资源承载力评价。同时运用减法集对势对水资源承载力进行诊断,与联系数模型进行对比研究,综合分析水资源承载力状态水平及主要影响因素。

1 评价指标体系构建

1.1 指标选取

水资源承载力受水资源禀赋条件、水生态环境、社会经济水平和科学技术水平等多方面因素的影响^[15]。综合评价指标需要体现出这些影响,同时要考虑指标的易获取性。通过对水资源承载力内涵理解和影响因素分析,选取了4个特性层,即水资源自然特性、水生态环境特性、社会经济特性和水资源利用特性。通过在知网上检索“水资源承载力评价”相关文献,记录各文献选取的指标,进行频率统计,从结果中选取了使用频率较高的指标作为参考指标。结合不同指标的特性,分析各指标的代表性和易获取性,选出14个指标作为评价指标,指标极性:指标为正向,即其值越大水资源承载力越大;指标为负向,即其值越大水资源承载力越小。指标体系见表1。

1.2 状态评价等级确定

根据指标的分级惯例,分为5个评价等级,分别为Ⅰ级(不超载)、Ⅱ级(临界超载)、Ⅲ级(轻微超载)、Ⅳ级(超载)和Ⅴ级(严重超载)。具体分级情况见表2,权重见表3。

1.3 指标权重确定

组合赋权法可以将主观赋权法和客观赋权法结合起来,可以规避两类赋权法的缺点^[16]。采用层次分析法和主成分分析法结合的组合赋权法计算各指标权重。

层次分析法通过专家打分得到比较判断矩阵,计算各指标权重值。层次分析法得到的权重记为 $w_{1i}(i=1,2,\cdots,n)$, n 为指标个数,对其进行一致性检验,得到一致性比率为0.07,小于0.1,一致性检验通过。

主成分分析法为根据样本原始数据,利用SPSS软件进行主成分分析,计算得到各指标权重,记为 $w_{2i}(i=1,2,\cdots,n)$ 。

表 1 水资源承载力状态综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of state of water resources carrying capacity

目标层	准则层	特性层	指标层	指标含义	指标极性
水资源承载力状态综合评价	水资源自然-生态能力	水资源自然特性	降水量(X_1)	地区面平均年降水量	正向
			产水模数(X_2)	单位面积的年水资源量	正向
			单位面积地表水资源量(X_3)	年地表水资源量与地区面积的比值	正向
			单位面积地下水资源量(X_4)	年地下水总补给量与地区面积的比值	正向
		生态环境特性	单位面积废水排放量(X_5)	年废水排放总量与地区面积的比值	负向
			湿地覆盖率(X_6)	湿地面积占总面积的比值	正向
			生态用水量(X_7)	包含绿地用水和环境卫生用水量	正向
	水资源经济-社会能力	社会经济特性	人均 GDP(X_8)	地区的国内生产总值与地区常住人口比值	正向
			人口密度(X_9)	单位面积土地上居住的人口数	负向
			城镇化率(X_{10})	城镇常住人口占该地区常住总人口的比例	负向
			居民消费水平绝对额(X_{11})	常住住户对货物和服务的全部最终消费支出	正向
		水资源利用特性	单位面积灌溉水量 X_{12}	单位耕地面积灌溉水量(含跨流域引水量)	负向
			万元工业增加值用水量 X_{13}	工业用水量与工业增加值的比值	负向
			万元 GDP 用水量 X_{14}	总用水量除以总 GDP 值	负向

表 2 水资源承载力状态评价指标分级标准

Table 2 Classification standard for evaluation index of state of water resources carrying capacity

评价等级	X_1/mm	$X_2/(10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2})$	$X_3/(10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2})$	$X_4/(10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2})$	$X_5/(10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2})$	$X_6/\%$	$X_7/10^4\text{ m}^3$
I 级	(800, +∞)	(25, +∞)	(20, +∞)	(7, +∞)	[0, 1.5]	(20, +∞)	(10, +∞)
II 级	(600, 800]	(20, 25]	(15, 20]	(6, 7]	(1.5, 2.0]	(15, 20]	(7, 10]
III 级	(500, 600]	(15, 20]	(10, 15]	(5, 6]	(2.0, 2.5]	(10~15]	(5, 7]
IV 级	(200, 500]	(10, 15]	(5, 10]	(4, 5]	(2.5, 3.0]	(5, 10]	(3, 5]
V 级	[0, 200]	[0, 10]	[0, 5]	[0, 4]	(3.0, +∞)	[0, 5]	[0, 3]
评价等级	$X_8/10^4\text{ 元}$	$X_9/(\text{人}\cdot\text{km}^{-2})$	$X_{10}/\%$	$X_{11}/10^4\text{ 元}$	$X_{12}/(10^3\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$	X_{13}/m^3	X_{14}/m^3
I 级	(6, +∞)	(0, 580]	(0, 40]	(2, +∞)	[0, 1.2]	[0, 8]	[0, 20]
II 级	(5, 6]	(580, 590]	(40, 44]	(1.5, 2]	(1.2, 1.8]	(8, 10]	(20, 30]
III 级	(4, 5]	(590, 600]	(44, 48]	(1, 1.5]	(1.8, 2.7]	(10, 15]	(30, 50]
IV 级	(3, 4]	(600, 610]	(48, 52]	(0.5, 1.0]	(2.7, 3.5]	(15, 20]	(50, 100]
V 级	(0, 3]	(610, +∞)	(52, +∞)	(0, 0.5]	(3.5, +∞)	(20, +∞)	(100, +∞)

组合赋权法将层次分析法和主成分分析法得到的权重按照一定的比例进行组合,本文采用加法合成法计算组合权重:

$$w_q = a_0w_{1q} + (1 - a_0)w_{2q}$$

(1)

式中: $w_q(q=1,2,\cdots,n)$ ——各指标综合权重; a_0 ——层次分析法所占比例,一般取 0.5。

各分析方法得到的指标权重见表 3。

表 3 水资源承载力状态评价指标权重

Table 3 Index weights of state of water resources carrying capacity

指标	权重			指标	权重		
	层次分析法	主成分分析法	组合赋权法		层次分析法	主成分分析法	组合赋权法
X_1	0.08408	0.06679	0.07544	X_8	0.02410	0.06962	0.04686
X_2	0.06435	0.09623	0.08029	X_9	0.03643	0.08216	0.05930
X_3	0.11426	0.04429	0.07928	X_{10}	0.02485	0.06304	0.04395
X_4	0.16558	0.11164	0.13861	X_{11}	0.01083	0.07838	0.04460
X_5	0.08581	0.09816	0.09198	X_{12}	0.27138	0.08191	0.17665
X_6	0.03139	0.05730	0.04435	X_{13}	0.01682	0.00541	0.01111
X_7	0.04677	0.07089	0.05883	X_{14}	0.02335	0.07418	0.04876

2 基于联系数的水资源承载力评价模型构建

2.1 联系数计算

根据集对分析理论^[17],建立水资源承载力等级评价样本值与评价标准各等级的集对 H 和 H 同异反关系结构,五元联系数表达式为

$$u_{ij} = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_3 + c j \tag{2}$$

式中: a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c ——同一度、偏同差异度、中差异度、偏反差异度和对立度; i_1 、 i_2 、 i_3 ——偏同差异度系数、中差异度系数和偏反差异度系数,取值在 $[-1,1]$,构造三角模糊数来表示其在取值范围内的连续性和不确定性; j ——对立度系数,一般直接取值-1^[18]。

根据上述分析,样本值 x_{in} ($i=1,2,\cdots,I$, I 为样本个数; $n=1,2,\cdots,N$, N 为指标个数) 与水资源承载力评价标准等级 k 间的联系数 u_{ink} 的表达式为

$$u_{ink} = \begin{cases} 1 + \frac{x_{in} - s_{0n}}{s_{1n} - s_{0n}} i_1 & x_{in} \in \text{I 级} \\ \frac{1}{2} \frac{s_{2n} - x_{in}}{s_{2n} - s_{1n}} + \frac{1}{2} i_1 + \frac{1}{2} i_2 & x_{in} \in \text{II 级} \\ 0 + \frac{1}{2} \frac{s_{3n} - x_{in}}{s_{3n} - s_{2n}} i_1 + \frac{1}{2} i_2 + \frac{\frac{1}{2} x_{in} - s_{1n}}{s_{2n} - s_{1n}} i_3 & x_{in} \in \text{III 级} \\ 0 + 0 i_1 + \frac{1}{2} \frac{s_{4n} - x_{in}}{s_{4n} - s_{3n}} i_2 + \frac{1}{2} i_3 + \frac{1}{2} \frac{x_{in} - s_{3n}}{s_{4n} - s_{3n}} j & x_{in} \in \text{IV 级} \\ 0 + 0 i_1 + 0 i_2 + \frac{1}{2} \frac{s_{5n} - x_{in}}{s_{5n} - s_{4n}} i_3 + j & x_{in} \in \text{V 级} \end{cases} \tag{3}$$

式中: s_{0n} ——各指标 I 级评价标准等级的另一端点值; s_{1n} ——I 级与 II 级评价标准等级之间的限值; s_{2n} ——II 级与 III 级评价标准等级之间的限值; s_{4n} ——各指标 III 级与 IV 级评价标准之间的限值; s_{5n} ——V 级评价标准等级的另一端点值。

2.2 评价等级计算

2.2.1 构造三角模糊数和联系数矩阵

采用分析取值法的特殊值法,确定偏同差异度系数、中差异度系数和偏反差异度系数的大致取值范围。然后根据此范围,确定 3 个差异度系数的三角模糊数: $\tilde{A}(i_1) = (0, 0.5, 1)$ 、 $\tilde{A}(i_2) = (-0.5, 0, 0.5)$ 、 $\tilde{A}(i_3) = (-1, -0.5, 0)$ 。

给定截集水平 α ,利用式(4)计算在给定截集水平 α 下的置信区间。

$$\tilde{A}_\alpha = [\tilde{A}_\alpha^L, \tilde{A}_\alpha^R] = [(l_2 - l_1)\alpha + l_1, -(l_3 - l_2)\alpha + l_3] \tag{4}$$

式中: $\tilde{A}_\alpha^L$ ——置信区间的下限值; $\tilde{A}_\alpha^R$ ——置信区间上限值; l_1 、 l_2 、 l_3 ——三角模糊数 $\tilde{A}$ 的差异度系数的特殊值。

按照实数区间数的运算法则,计算出评价指标的联系数值 u_{in} ,也是为置信区间数,组成联系数矩阵 $U = (u_{in})_{I \times N}$ 。

2.2.2 综合评价分析

采用加法加权综合法进行综合评价:

$$G = W \cdot U = [g_1, g_2, \cdots, g_J] \tag{5}$$

其中

$$g_j = [g_j^L, g_j^R] = \sum_{i=1}^n w_i [u_{ij}^L, u_{ij}^R]$$

根据公式(5)计算出来的综合评价结果按照期望-方差排序法进行排序分析。确定综合评价等级:利用评价指标的模拟值,画出联系数值 u_{ij} 与评价等级 k 之间的散点图,建立综合评价等级 y_k 与 g_j 的投影函数^[19]:

$$y_k = f(g_j) = -2 g_j + 3 \tag{6}$$

式中 $g_j \in [-1,1]$,根据式(6)计算各样本的综合评价等级,进行综合分析。

2.3 减法集对势分析

联系数的集对势函数 $S_f(u)$ 是联系数的伴随函数,其含义为联系数所表达的研究对象在当前宏观期望层次上所处的相对确定性状态和发展趋势。采用减法集对势进行态势分析,计算公式为

$$S_f(u) = (a - c)\left(1 + \frac{b_1 + b_2}{2}\right)$$

(7)

式中把不确定项的差异度 b_1 和 b_2 值按差异度系数的比率取值法进行分配。减法集对势函数 $S_f(u) \in [-1, 1]$ 。按均分原则将区间分为五个部分,分别为 $[-1, -0.6]$ 、 $(-0.6, -0.2]$ 、 $(-0.2, 0.2]$ 、 $(0.2, 0.6]$ 和 $(0.6, 1]$,对应态势为反势、偏反势、均势、偏同势和同势。根据减法集对势的计算结果,对样本的水资源承载力状态进行分析。

3 实例分析

选取山东省 17 个地级市 2015 年各项指标数值,采用上述联系数模型对山东省 2015 年水资源承载力状态进行分析和评价。

3.1 数据收集及指标联系数计算

通过查找《2015 山东省统计年鉴》《2015 山东省水资源公报》和政府网站信息,收集 2015 山东省 17 个地级市的 14 项指标数值,利用 SPSS 软件进行主成分分析,计算各指标权重。利用式(1),取 $\alpha_0 = 0.5$,与层次分析法所得权重结合计算得到组合权重,结果见表 3。利用式(3)计算各样本值与各指标的联系数表达式。以济南市为例,列出各指标联系数表达式,再根据联系数表达式判断评价标准等级,结果见表 4。

由表 3 可知,单位面积灌溉水量 X_{12} 所占权重最大,由于山东省是农业大省,2000—2016 年农业用水量占用水总量的平均比例为 72.8%。农业用水量一直是用水总量的主要组成部分,直接影响着用水总量的多少,因此对水资源承载力的影响较大。单位面积地下水资源量 X_4 占比第二,单位面积废水排放量 X_5 第三,由于山东省地表水污染情况较为严重,某些地区的地表水资源水质不能满足使用要求,2015 年有 6 个地级市的地下水供水量大于地表水,其他地级市地下供水量也占较大比例,因此地下水资源量和废水排放量对水资源承载力的影响也较为显著。万元工业增加值用水量 X_{13} 占比最小,权重仅为 0.011 1,这是因为山东省工业用水量占用水总量比值较小,多年平均(2000—2016 年)占比仅为 12.8%。

按照 4 个特性层来看,水资源自然特性权重为 0.373 6,生态环境特性权重为 0.195 2,社会经济特性权重为 0.194 7,水资源利用特性权重为 0.236 5。水资源禀赋条件和水资源利用效率对水资源承载力影响最大,生态环境特性和社会经济特性相对较小。

由表 4 可知,济南市 2015 年各项指标的评价等级主要为Ⅲ级和Ⅳ级,还有 3 个指标为Ⅰ级,综合可知,济南市 2015 年水资源承载力水平在Ⅲ级附近。

相较于济南这个大城市,其他山区或以农业为主的城市在水资源禀赋条件上有优有劣,在生态环境特性方面也有好有坏,社会经济发展程度相对较低,水资源利用效率较低。但是由于水资源自然特性和生态环境特性的权重相加达到 0.568 8,所以山区或以农业为主的城市水资源承载状态与济南市相比也各不一样。各城市的综合评价结果展示在后续分析中。

3.2 评价等级结果计算

利用 2.2 节中的公式和方法, α 取 0.75^[19],计算截集水平为 0.75 的 2015 年山东省 17 个地级市的水资源承载力综合评价等级。

表 4 济南市各指标联系数表达式及权重
Table 4 Expressions and weights of index connection numbers in Ji'nan city

指标	济南市联系数表达式	评价等级
X_1	$u_{11} = 0.003\ 5 + 0.333\ 3i_1 + 0.663\ 2i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅲ
X_2	$u_{21} = 0.209\ 4 + 0.333\ 3i_1 + 0.457\ 2i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅲ
X_3	$u_{31} = 0 + 0.009\ 4i_1 + 0.500\ 0i_2 + 0.490\ 6i_3 + 0j$	Ⅲ
X_4	$u_{41} = 0.500\ 0 + 0.500\ 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅰ
X_5	$u_{51} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.500\ 0i_3 + 0.500\ 0j$	Ⅳ
X_6	$u_{61} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.349\ 0i_3 + 0.651\ 0j$	Ⅴ
X_7	$u_{71} = 0.219\ 1 + 0.333\ 3i_1 + 0.447\ 6i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅲ
X_8	$u_{81} = 0.500\ 0 + 0.500\ 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅰ
X_9	$u_{91} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.500\ 0i_3 + 0.500\ 0j$	Ⅳ
X_{10}	$u_{101} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.500\ 0i_3 + 0.500\ 0j$	Ⅳ
X_{11}	$u_{111} = 0.500\ 0 + 0.500\ 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅰ
X_{12}	$u_{121} = 0 + 0i_1 + 0.015\ 8i_2 + 0.500\ 0i_3 + 0.484\ 2j$	Ⅳ
X_{13}	$u_{131} = 0.026\ 7 + 0.333\ 3i_1 + 0.639\ 9i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅳ
X_{14}	$u_{141} = 0.123\ 0 + 0.333\ 3i_1 + 0.543\ 7i_2 + 0i_3 + 0j$	Ⅳ

由减法集对势计算结果可知,2015 年山东省各地级市大部分水资源承载力都处于Ⅲ级,只有东营市、日照市和滨州市等级评价结果的区间数完全处于Ⅱ级,属于临界超载状态;青岛市、淄博市、枣庄市、潍坊市、莱芜市和聊城市等级评价结果区间数完全处于Ⅲ级,属于轻微超载状态;其他地级市评价结果区间数处于Ⅱ级和Ⅲ级之间,处于临界超载和轻微超载之间。总体而言,山东省水资源承载力状态不容乐观,没有不超载的城市,如果再不采取有效措施,很可能会进一步发展成超载状态,不利于水资源的可持续发展与利用。对比排序在前的滨州市、日照市和排序在后的聊城市、莱芜市,在水资源禀赋条件方面:前两者降水量比后两者平均高 10%,日照市的产水模数更是莱芜市的 4.1 倍,单位面积地表水资源量滨州市和日照市分别为 $16.93\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 和 $23.40\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$,而聊城市和莱芜市只有 $2.37\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 和 $3.78\text{ 万 m}^3/\text{km}^2$;生态环境特性方面:聊城市的单位废水排放量比聊城市少 40%,湿地覆盖率更是高达 18.65%,聊城市和莱芜市只有 1.76%、2.55%,生态用水量滨州市和日照市比聊城市和莱芜市平均多 55%;社会经济特性方面,滨州市和日照市除了城镇化率略微差于聊城市,其他指标均优于聊城市和莱芜市;水资源利用特性方面:日照市的单位面积灌溉水量为 $2497\text{ m}^3/\text{hm}^2$,聊城市和莱芜市分别为 $3100\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $2725\text{ m}^3/\text{hm}^2$,滨州市虽然略高于这 3 个城市,但是滨州市的万元工业增加值用水量只有 $8.52\text{ m}^3/\text{万元}$,远小于聊城市和莱芜市的 $13.97\text{ m}^3/\text{万元}$ 和 $34.00\text{ m}^3/\text{万元}$ 。综合 4 个方面,就能得知聊城市和莱芜市水资源承载力较低是多个指标综合作用的结果。

从图 1 中可以看出,山东省水资源承载力空间分布呈现北部城市水资源承载力评级较高,南部其次,中部最差的基本格局。沿海城市中除青岛和潍坊外,其他沿海城市水资源承载力较好。青岛、潍坊、淄博、莱芜 4 个连着的市水资源承载力较差,滨州和东营片区最好,德州、济南、泰安、济宁、菏泽、临沂、日照这一片区承载力居中,可以看出水资源承载力有区域性,这是因为水资源在空间上是相互连通的,不仅地表河道水系连通,地下水也息息相关,另外水文循环也有区域性。从这一点可知,水资源承载力的提升不仅要考虑当地情况,还需考虑周边地区的情况,需要多地一同协商共同努力,采取各项有力措施,提升水资源承载能力,实现水资源可持续开发利用。

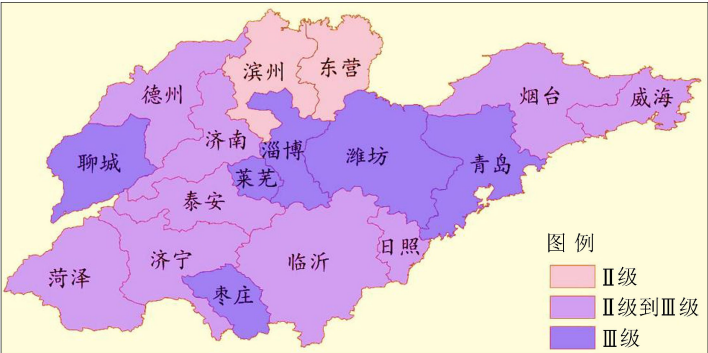


图 1 山东省水资源承载力空间分布

Fig. 1 Spatial distribution map of water resources carrying capacity in Shandong Province

3.3 减法集对势分析

根据求得的各地级市各指标的系数,计算各地级市的平均系数,再采用 2.3 节中的公式和方法,计算山东省 17 个地级市水资源承载力评价结果的减法集对势值和态势,结果见表 5。

表 5 各市平均联系数级减法集对势结果

Table 5 Result of set-pair subtractive situation of the average connection number of each city

城市名称	平均联系数	减法集对势	态势分析
济南市	$u_1=0.2045+0.3046i_1+0.1148i_2+0.1114i_3+0.2647j$	-0.0709	均势
青岛市	$u_2=0.3436+0i_1+0.1033i_2+0.1660i_3+0.3871j$	-0.0474	均势
淄博市	$u_3=0.1897+0.2391i_1+0.1431i_2+0.1324i_3+0.2958j$	-0.1243	均势
枣庄市	$u_4=0+0.3470i_1+0.2303i_2+0.1633i_3+0.2593j$	-0.3233	偏反势
东营市	$u_5=0.2323+0.2003i_1+0.2327i_2+0.2305i_3+0.1041j$	0.1565	均势
烟台市	$u_6=0.3518+0i_1+0.2579i_2+0.1259i_3+0.2644j$	0.0986	均势
潍坊市	$u_7=0.1255+0.2614i_1+0.1966i_2+0.1569i_3+0.2595j$	-0.1615	均势
济宁市	$u_8=0.1442+0.2229i_1+0.2177i_2+0.1672i_3+0.2480j$	-0.1248	均势
泰安市	$u_9=0.0693+0.2008i_1+0.3176i_2+0.3384i_3+0.0739j$	-0.0060	均势
威海市	$u_{10}=0.3141+0.1802i_1+0.1196i_2+0.1433i_3+0.2428j$	0.0818	均势
日照市	$u_{11}=0.1888+0.2978i_1+0.2620i_2+0.1971i_3+0.0543j$	0.1685	均势
莱芜市	$u_{12}=0.0693+0.1026i_1+0.2735i_2+0.2085i_3+0.3461j$	-0.3307	偏反势
临沂市	$u_{13}=0.2380+0.1316i_1+0.2223i_2+0.2143i_3+0.1938j$	0.0525	均势
德州市	$u_{14}=0.1944+0.1983i_1+0.2409i_2+0.2546i_3+0.1118j$	0.1017	均势
聊城市	$u_{15}=0.1259+0.1243i_1+0.3055i_2+0.1999i_3+0.2444j$	-0.1434	均势
滨州市	$u_{16}=0.3730+0.3032i_1+0i_2+0.2176i_3+0.1062j$	0.3132	偏同势
菏泽市	$u_{17}=0.1962+0.1755i_1+0.2023i_2+0.2041i_3+0.2218j$	-0.0306	均势

将减法集对势结果画在一张图上,结果见图 2。

从图 2 可知,各市减法集对势结果主要分布在 $[-0.2,0.2]$ 之间,处于均势状态,滨州市减法集对势计算结果为 0.3132,处于偏同势状态,即水资源承载状态良好,不超载。枣庄市和莱芜市减法集对势计算结果低于 -0.2 ,分别为 -0.3233 和 -0.3307 ,处于偏反势状态,即水资源承载状态较差,轻微超载。其他城市如潍坊市、淄博市、聊城市计算结果虽处于均势状态,但是数值上接近 -0.2 ,水资源承载力状态不理想,处于部分超载或者临界超载状态。减法集对势结果的空间分布形势与联系数评价结果期望值空间分布形势基本相同,这说明联系数等级评价和减法集对势方法对水资源承载力的评价可以相互对比印证。

4 结 语

通过理论分析、频率计算和数据统计,选取 2 个准则层、4 个特性层的 14 个指标来构建水资源承载力评价指标体系,不仅考虑了影响水资源承载力的多方面因素,还考虑了指标的使用频率和指标数据的易获取性。评价等级的确定是基于各指标分级的惯例和其他权威研究结果中采用的分级。采用主客观组合赋权法计算各指标权重,克服了主观赋权法和客观赋权法各自的缺点。基于集对分析理论,采用联系数来表示样本值与指标之间的确定与不确定关系,建立了基于联系数的水资源承载力状态评价模型。其中的具有不确定性的差异度系数通过三角模糊数来表示,利用区间数运算法则,计算得到各样本水资源承载力评价结果及评价等级区间数。引用减法集对势方法对各样本进行进一步的分析,得到各样本的减法集对势数值和态势,然后进行分析研究。

通过实例分析,可以验证所建的水资源承载力状态评价模型切实有效,具有一定的实用意义及价值,能够为科学合理配置水资源、实现水资源可持续利用和社会经济高效可持续发展做出相应的指导。与传统评价方法比较,该模型运用联系数来表示评价指标与样本值之间的关系,运用三角模糊数来表示差异度系数的不确定性和随机性,得到评价对象的水资源承载状态综合范围和等级,更好地体现了评价对象的水资源承载状态。

建立的基于联系数的水资源承载力状态模型对资料要求较高,理论上可用于各地区,但是由于并未在全国各地进行实例分析,实际应用情况不明,需要在以后的研究中进行更多的应用和探讨。

参考文献:

[1] 任冲锋. 不确定性条件下石羊河流域水资源承载力优化提升研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.

[2] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3): 1-6. (ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(3): 1-6. (in Chinese))

[3] 吴琼. 基于因子分析的青海省水资源承载力综合评价[J]. 水资源保护,2013,29(1): 22-26. (WU Qiong. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources of Qinghai Province based on factor analysi[J]. Water Resources Protection, 2013,29(1): 22-26. (in Chinese))

[4] 郦建强,陆桂华,杨晓华,等. 区域水资源承载能力综合评价的 GPPIM[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004,32(1): 1-4. (LI Jianqiang,LU Guihua,YANG Xiaohua,et al. DPPIM for comprehensive assessment of regional water resources bearing capacity[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2004,32(1): 1-4. (in Chinese))

[5] 李如意,束龙仓,鲁程鹏,等. 济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比[J]. 水资源保护,2018,34(6):65-70. (LI Ruyi,SHU Longcang,LU Chengpeng,et al. Application and comparison of water resources carrying capacity evaluation methods in Jining City[J]. Water Resources Protection,2018,34(6):65-70. (in Chinese))

[6] 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-

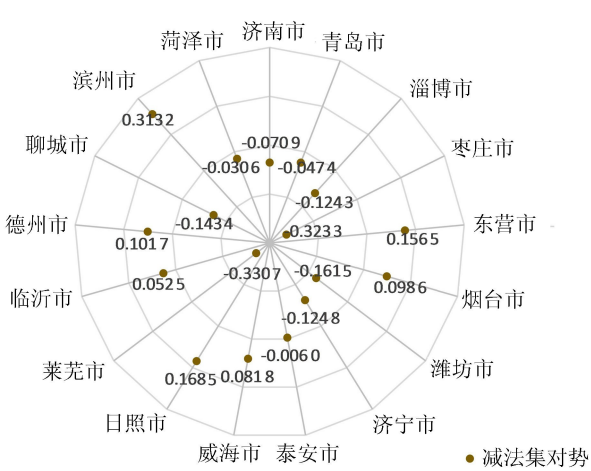


图 2 各市减法集对势结果分布
Fig. 2 Distribution map of results of set-pair subtractive situation for each city

56. (YUAN Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 52-56. (in Chinese))
- [7] 赵克勤. 集对分析中的不确定性理论及若干应用[J]. 有色冶金设计与研究, 1995, 16(3): 40-43. (ZHAO Keqin. Uncertainty theory and some applications in set pair analysis[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 1995, 16(3): 40-43. (in Chinese))
- [8] 冯利华, 张行才, 龚建林. 基于集对分析的水资源变化趋势的统计预测[J]. 水文, 2004, 24(2): 11-14. (FENG Lihua, ZHANG Xingcai, GONG Jianlin. Statistical forecast of change tendency of water resources based on the set pair analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(2): 11-14. (in Chinese))
- [9] 王栋, 朱元牲, 赵克勤. 基于集对分析和模糊集合论的水体营养化评价模型的应用研究[J]. 水文, 2004, 24(3): 9-13. (WANG Dong, ZHU Yuanshen, ZHAO Keqin. Research and application of model based on set pair analysis and fuzzy set theory for evaluation of water eutrophication[J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(3): 9-13. (in Chinese))
- [10] 石月珍, 严以新. 集对分析在盐城滨海湿地区域协调发展评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 322-326. (SHI Yuezheng, YAN Yixin. Application of set pair analysis to coordinated development evaluation of coastal wetland region in Yancheng City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2005, 33(3): 322-326. (in Chinese))
- [11] 贺瑞敏, 张建云, 王国庆, 等. 基于集对分析的广义水环境承载力评价[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 730-735. (HE Ruimin, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Evaluation on generalized water environment carrying capacity based on SPA[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 730-735. (in Chinese))
- [12] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [13] 冷辉, 张凤太, 王腊春, 等. 湖泊形态健康内涵及其集对分析评价: 以大纵湖为例[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 514-519. (LENG Hui, ZHANG Fengta, WANG Lachuan, et al. Implication of lake's healthy morphology and its assessment through set pair analysis: a case study of Dazong Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(5): 514-519. (in Chinese))
- [14] 郑志宏, 魏明华. 基于熵值法的改进集对分析水质模糊评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 136-139. (ZHENG Zhihong, WEI Minghua. Water quality fuzzy evaluation based on entropy method-improved set pair analysis[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(2): 136-139. (in Chinese))
- [15] 崔东文. 文山州近10年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 129-136. (CUI Dongwen. SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture in last ten years[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(2): 129-136. (in Chinese))
- [16] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 622-628. (SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(6): 622-628. (in Chinese))
- [17] 金菊良, 沈时兴, 潘争伟, 等. 水资源集对分析理论与应用研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 54-66. (JIN Juliang, SHEN Shixing, PAN Zhengwei, et al. Advances in theoretical and applied research on set pair analysis method for water resources system[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2017, 38(4): 54-66. (in Chinese))
- [18] 汪哲荪, 金菊良, 魏一鸣, 等. 三角模糊数随机模拟的防洪工程联系数风险评价模型[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1173-1178. (WANG Zhesun, JIN Juliang, WEI Yiming, et al. Connection number based risk evaluation method for watershed flood control engineering system using stochastic simulation and triangular fuzzy numbers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1173-1178. (in Chinese))
- [19] 吴开亚, 金菊良, 潘争伟. 基于三角模糊数截集的联系数模型在城市涝灾影响等级评价中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 711-719. (WU Kaiya, JIN Juliang, PAN Zhengwei. Set pair analysis model based on triangle fuzzy intervals and its application to impact rating evaluation of urban flood[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 711-719. (in Chinese))