

基于灰色聚类集对分析法的水资源承载力评价模型

叶飞¹, 方国华¹, 金菊良²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 水资源承载力是评价区域水资源可持续利用的一项重要指标,为定量评价区域水资源承载力,建立了以水资源-社会-经济-生态环境系统为基础的多层次评价体系。考虑到传统集对分析(SPA)模型的不足,引入中心三角白化权函数构建灰色聚类集对分析模型,并利用博弈论确定指标权重。以安徽省为例验证了该评价模型的准确性和有效性,评价结果与实际情况基本一致,结果表明:2008-2013年安徽省水资源承载力评价等级为Ⅲ级,2014-2017年评价等级为Ⅱ级,水资源承载力得到了有效的改善。借助 ArcGIS 可视化功能实现安徽省 16 市的水资源承载力区域差异分析,安徽省水资源承载力南北差异较明显,南方水资源承载力较北方更优,这与水资源分布不均、社会发展模式不同和区域生态环境差异有关。为保障安徽省社会经济可持续发展,应结合区域自身发展特性以及生态环境现状,制定科学合理的水资源可持续利用方案。

关键词: 水资源承载力; 灰色聚类; 集对分析; 博弈论; 安徽省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)03-0030-07

Evaluation model of water resources carrying capacity based on grey cluster set pair analysis method

YE Fei¹, FANG Guohua¹, JIN Juliang²

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

2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Water resources carrying capacity is an important indicator for evaluating the sustainable use of regional water resources. To evaluate regional water resources carrying capacity quantitatively, a multi-level evaluation system was established based on water resources-society-economy-ecological environment system. Considering the shortcomings of the traditional set pair analysis (SPA) model, the grey cluster set pair analysis model was constructed by introducing the center triangle whitening weight function, and its index weights were determined by game theory. Anhui Province as an example was given to demonstrate the accuracy and effectiveness of the evaluation model and the evaluation results were basically in accord with the actual situation. The results showed that water resources carrying capacity in Anhui province in 2008-2013 was evaluated as Class III, and Class II in 2014-2017, which indicates that the water resources carrying capacity in this area had been improved effectively. Based on ArcGIS visualization function, the regional difference analysis of water resources carrying capacity of 16 cities in Anhui Province was demonstrated. It shows that the north-south difference in Anhui Province was obvious, and the south water resources carrying capacity was better than that of the north, which is related to the uneven distribution of water resources, different social development patterns and regional ecological environment differences. For the sustainable development of social economy in Anhui Province, a suitable and applicable scheme of sustainable utilization of water resources should be formulated based on the characteristics of the regional development and the current situation of its ecological environment.

收稿日期:2019-08-29; 修回日期:2019-11-08

作者简介:叶飞(1995-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事水资源规划及利用。

通讯作者:方国华(1964-),女,安徽定远人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源规划及利用、水利经济和工程管理研究。

Key words: carrying capacity of water resources; grey cluster; set pair analysis; game theory; Anhui Province

1 研究背景

水资源承载力指某一地区的水资源基于一定时代的技术背景下,以可持续发展为原则,根据社会经济发展水平,在生态系统良性发展的前提下,在合理配置水资源和有效利用水资源的同时,可以支撑的最大人口数量和社会经济发展规模。水资源承载力是评价水资源可持续利用的一项重要指标,是促进水资源可持续利用和社会经济可持续发展的重要支柱^[1-3]。随着我国社会经济的快速发展,水资源危机愈发严重,水量不足、水质不达标等问题更加突出。如何实现水资源的可持续利用是我国面临的重大问题之一。

区域水资源承载力研究必然要考虑其承载状况,而承载状况是一个模糊的概念,目前还没有统一的标准^[4]。目前,不同学者采用的研究方法有所不同,利用不同模型从不同角度分析评价某区域水资源承载力,已取得较多的研究成果。金菊良等^[5]基于集对分析和风险矩阵理论评价了淮北市水资源承载力;黄显峰等^[6]基于集对分析(SPA)和云模型理论评价了南京市浦口区水资源承载力;朱玲燕等^[7]基于灰色关联模型评价了衢州市水资源承载力。在已有较成熟的评价方法中,集对分析法用联系数将不确定因素转换成具体的数学问题,综合考虑了评价指标的优劣对水资源承载力的影响,能够较为全面地分析问题,但在传统 SPA 的使用过程中,因联系数分量计算过程较粗糙,易丢失部分信息,导致评价结果与实际偏差较明显。灰色聚类理论适应于“小样本”、“少信息”的不确定系统^[8],本文通过引

入改进灰色聚类理论,以不同灰色的聚类系数表示相应的联系数分量,充分利用已知信息客观反映水资源承载力系统本质;并利用博弈论确定评价指标权重。故本文以安徽省为研究区域,先利用灰色聚类评价法进行初步评价,进一步采用灰色聚类集对分析法进行更为全面科学的综合评价,并对比二者的分析结果。

2 水资源承载力评价体系的构建

由于水资源承载力与区域发展模式和水资源开发利用模式有关,其承载力受到自然条件和社会因素的制约,而水资源与社会-经济-生态环境系统是动态变化的^[9],所以水资源承载力也是处在不断变化之中。遵循评价体系的系统性、层次性、地区差异性和可操作性等原则,在对区域水资源系统、社会-经济-生态环境系统以及其他因素的综合分析的基础上,咨询专家以及借鉴其他学者的研究成果^[10-11],构建了多层次区域水资源承载力评价体系,如图 1 所示。参考水利部现行《建立全国水资源承载能力监测预警机制技术大纲》,对各项评价指标进行分级处理,确立各等级范围数值,选定 I 级、II 级、III 级、IV 级。指标分级标准值以相关文献^[12-14]研究成果为基础并咨询专家确定,结果如表 1 所示。表 1 中, I 级表示该区域水资源承载力好,开发潜力大; II 级表示该区域水资源承载力可以满足现有社会经济生态发展需求; III 级表示该区域水资源承载力已接近饱和状态,开发潜力一般,需采取工程措施满足需求; IV 级表示该区域水资源承载力已经制约了区域社会经济发展,开发潜力小。

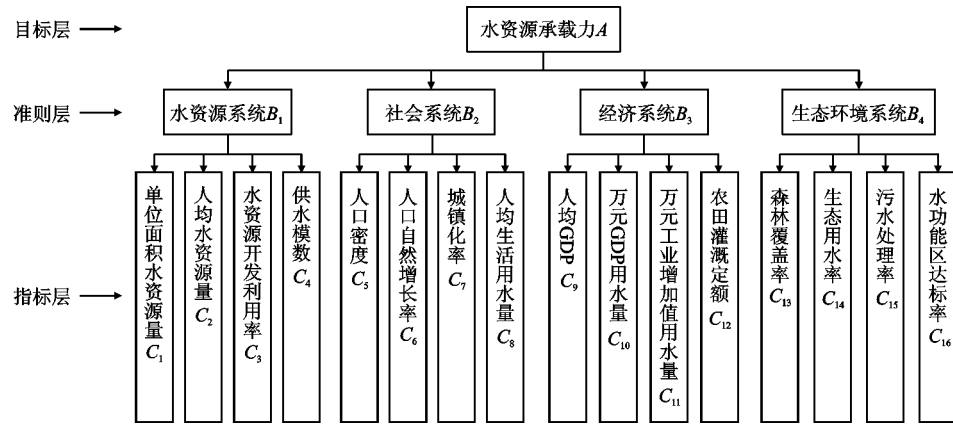


图 1 水资源承载力评价体系

3 灰色聚类集对分析评价模型

3.1 集对分析基本原理

集对分析法将研究对象分为具有特定关系的两个集合对,分别用 A 、 B 表示。 μ 为联系数, i 为差异度系数, $i \in (-1, 1)$; j 为对立度系数, 常取 -1 。 a 表示同一度, b 、 c 表示差异度, d 表示对立度, $a + b + c + d = 1$, a 、 b 、 c 、 $d \in [0, 1]$, 对于各评价指标联系数表达式为^[15]:

$$\mu_k = a + bi_1 + ci_2 + dj \quad (1)$$

式中: $i_1 = 0.33$; $i_2 = -0.33$; $j = -1$ 。

评判标准如下: 当 $\mu_k > 0.5$ 时, 样本在指标 k 上的评价等级为 I 级; 当 $0 < \mu_k \leq 0.5$ 时, 等级为 II 级; 当 $-0.5 < \mu_k \leq 0$ 时, 等级为 III 级; 当 $\mu_k \leq -0.5$ 时, 等级为 IV 级^[16]。根据各指标联系数 μ_k 和指标权重 ω_k , 利用公式(2) 计算样本总体联系数 μ 。

$$\mu = \sum_{k=1}^m \omega_k \mu_k \quad (2)$$

表1 水资源承载力各评价指标分级标准

评价指标	指标类型	I 级	II 级	III 级	IV 级
$C_1 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	≥ 80	80 ~ 60	60 ~ 50	< 50
C_2 / m^3	+	≥ 2000	2000 ~ 1500	1500 ~ 1000	< 1000
$C_3 / \%$	-	< 30	30 ~ 55	55 ~ 80	≥ 80
$C_4 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	-	< 10	10 ~ 25	25 ~ 60	≥ 60
$C_5 / (\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-	< 100	100 ~ 200	200 ~ 500	≥ 500
$C_6 / \%$	-	< 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.6	≥ 1.6
$C_7 / \%$	-	< 40	40 ~ 60	60 ~ 80	≥ 80
$C_8 / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	-	< 70	70 ~ 120	120 ~ 180	≥ 180
$C_9 / \text{元}$	+	≥ 24000	24000 ~ 15000	15000 ~ 7000	< 7000
C_{10} / m^3	-	< 100	100 ~ 200	200 ~ 400	≥ 400
C_{11} / m^3	-	< 50	50 ~ 100	100 ~ 200	≥ 200
$C_{12} / (\text{m}^3 \cdot \text{亩}^{-1})$	-	< 250	250 ~ 300	300 ~ 400	≥ 400
$C_{13} / \%$	+	≥ 40	40 ~ 30	30 ~ 25	< 25
$C_{14} / \%$	+	≥ 5	5 ~ 3	3 ~ 1	< 1
$C_{15} / \%$	+	≥ 90	90 ~ 60	60 ~ 40	< 40
$C_{16} / \%$	+	≥ 95	95 ~ 80	80 ~ 70	< 70

注: “+”表示正向指标; “-”表示负向指标。

3.2 灰色聚类集对分析评价模型

灰色聚类是指灰数的白化权函数将观测对象或指标分成若干个可定义类别的方法^[17]。考虑到传统 SPA 模型的不足, 本文引入中心三角白化权函数进行优化改进, 使用 I 级、II 级、III 级、IV 级 4 种灰类分级标准计算指标 k 的聚类系数 μ_{1k} 、 μ_{2k} 、 μ_{3k} 、 μ_{4k} 。根据 4 种不同灰类的情况, 用各评价指标相应的聚类系数代替指标联系数分量, 即:

$$a = \mu_{1k}, b = \mu_{2k}, c = \mu_{3k}, d = \mu_{4k} \quad (3)$$

设有 n 个评价样本, m 个评价指标, p 个不同的灰类, x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$) 是区域水资源承载力评价指标实际值。根据各指标的评价标准和实际值将各指标的取值范围划分为 $[s_0, s_1] \dots [s_k, s_{k+1}] \dots [s_p, s_{p+1}]$ (s_k 表示该级评价标准的临界值, $k = 1, 2,$

$\dots, p$; s_0, s_{p+1} 分别为指标两端评价标准的另一临界值)。令 $\lambda_k = (s_k + s_{k+1})/2$, 其中心三角白化权函数值为 1。不同灰类的聚类系数计算公式为:

$$\mu_k^1 = \begin{cases} 1 & (x_{ij} \in [\lambda_p, \infty]) \\ \frac{x_{ij} - \lambda_{p-1}}{\lambda_p - \lambda_{p-1}} & (x_{ij} \in [\lambda_{p-1}, \lambda_p]) \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_k^2 = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \lambda_{k-1}}{\lambda_k - \lambda_{k-1}} & (x_{ij} \in [\lambda_{k-1}, \lambda_k]) \\ \frac{\lambda_{k+1} - x_{ij}}{\lambda_{k+1} - \lambda_k} & (x_{ij} \in [\lambda_k, \lambda_{k+1}]) \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_k^3 = \begin{cases} 1 & (x_{ij} \in [0, \lambda_1]) \\ \frac{\lambda_2 - x_{ij}}{\lambda_2 - \lambda_1} & (x_{ij} \in [\lambda_1, \lambda_2]) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k = 2, 3, \dots, p-1$; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 分别为指标对于

1,2,⋯,s 类的隶属度为 1 的样本值,称作中心点。

通过引入中心三角白化权函数,使得联系数分量无需进行归一化处理,结果更合理,较好地体现了各个指标等级间的相互联系。

3.3 博弈论确定指标组合权重

为科学合理地计算出样本总体联系数 μ ,本文基于已有确定权重方法的成熟度,选取层次分析法^[18]和熵权法^[19]分别计算各指标主观权重和客观权重,最后根据博弈论确定各指标权重。博弈论主要是在不同方法确定的基本权重之间寻求一个最佳组合形态^[20],具体步骤如下:

设层次分析法和熵权法确定的权重集为 $\omega_k = (\omega_{k1}, \omega_{k2}, \cdots, \omega_{km}) (k = 1, 2)$, 则权重线性组合可按公式(7) 表示。

$$\omega = \sum_{k=1}^2 \beta_k \omega_k^T \tag{7}$$

式中: β_k 为权重系数, $\beta_k > 0$ 。

对权重系数 β_k 进行优化计算,使目标 ω 与各个 ω_k 的离差最小化,可据公式(8) 计算求解,其中 ω_g 为第 g 种方法得到的基本权重集。

$$\min \parallel \sum_{k=1}^2 (\beta_k \omega_k^T - \omega_g^T) \parallel_2 \tag{8}$$

根据矩阵微分性质,可将公式(8) 转换成公式(9) 求解最优权重系数。将解得的最优权重系数经归一化处理后代入公式(7) 即得评价指标组合权重。

$$\begin{cases} \beta_1 \omega_1 \omega_1^T + \beta_2 \omega_1 \omega_2^T = \omega_1 \omega_1^T \\ \beta_1 \omega_2 \omega_1^T + \beta_2 \omega_2 \omega_2^T = \omega_2 \omega_2^T \end{cases} \tag{9}$$

4 实例应用

安徽省位于东经 114°54′ ~ 119°37′、北纬 29°41′ ~ 34°38′之间,总面积 14. 01 × 10⁴ km²,下辖 16 个省辖市。2017 年末,全省 GDP 为 2 7518. 7 × 10⁸ 元,常住人口 6 254. 8 × 10⁴ 人,水资源总量为 784. 9 × 10⁸ m³,供水总量为 290. 3 × 10⁸ m³。根据《安徽省水资源公报》(2008 – 2017 年)、《安徽省统计年鉴》(2008 – 2017 年)等综合规划相关成果,整理得到 2008 – 2017 年安徽省 16 个水资源承载力评价指标值,如表 2 所示。

4.1 指标权重的计算

根据表 2 数据,按照博弈论确定组合权重,由公式(8)、(9)解得最优权重系数为 $\beta_1 = 0. 888, \beta_2 = 0. 112$, 由公式(7)得出各指标组合权重。具体结果如表 3 所示。

4.2 安徽省水资源承载力评价结果及分析

基于水资源承载力评价体系,由灰色聚类集对分析法评价安徽省 2008 – 2017 年水资源承载力等级,为了检验该方法的可靠性,根据灰色聚类最大隶属度判别准则,得到安徽省水资源承载力评价等级,计算结果如表 4 所示,各评价指标联系数分量占比见图 2。

表 2 2008 – 2017 年安徽省水资源承载力各评价指标值

指标	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
C_1	50. 13	52. 56	67. 33	43. 17	50. 26	41. 99	55. 81	65. 54	89. 27	56. 27
C_2	1139. 8	1195. 7	1578. 2	1008. 8	1172. 6	974. 54	1279. 78	1495. 31	2018. 3	1254. 88
C_3	0. 38	0. 40	0. 31	0. 48	0. 41	0. 50	0. 34	0. 31	0. 23	0. 36
C_4	19. 10	20. 96	20. 97	21. 12	20. 69	21. 22	19. 51	20. 70	20. 84	20. 81
C_5	439. 86	439. 57	427. 10	427. 89	429. 32	432. 33	436. 13	440. 51	444. 23	448. 46
C_6	6. 45	6. 47	6. 75	6. 32	6. 86	6. 82	6. 97	6. 98	7. 06	8. 17
C_7	40. 5	42. 1	43. 2	44. 8	46. 5	47. 86	49. 15	50. 5	51. 99	53. 49
C_8	96. 10	101. 21	107. 62	109. 53	109. 63	110. 00	110. 35	110. 94	110. 90	110. 55
C_9	14448. 15	16407. 66	20887. 8	25659. 31	28792. 32	32000. 89	34424. 61	35996. 61	39091. 81	43401. 36
C_{10}	288. 8	290. 3	238. 5	195	167. 6	155. 5	131	131. 2	120. 5	105. 5
C_{11}	244. 90	227. 60	166. 30	123. 10	120. 9	110. 20	97. 00	96. 80	94. 00	80. 10
C_{12}	349. 2	366. 1	358. 6	341. 5	315. 1	313. 9	259. 0	282. 4	284. 7	275. 3
C_{13}	26. 06	26. 06	27. 53	27. 53	27. 53	27. 53	28. 65	28. 65	28. 65	28. 65
C_{14}	0. 61	0. 66	0. 79	1. 34	1. 31	1. 37	1. 71	1. 70	1. 92	2. 13
C_{15}	73. 6	83. 2	88. 5	91. 1	94. 5	96. 2	96. 2	96. 7	97. 36	97. 3
C_{16}	72. 2	75. 4	64. 5	69. 3	68	66. 9	73. 6	78. 9	81. 1	82. 4

注:表中各评价指标值的单位参见表 1。

表3 安徽省水资源承载力各评价指标权重

评价指标	主观权重	客观权重	组合权重
C_1	0.131	0.057	0.123
C_2	0.131	0.059	0.123
C_3	0.022	0.052	0.025
C_4	0.066	0.074	0.067
C_5	0.038	0.059	0.040
C_6	0.063	0.037	0.060
C_7	0.063	0.062	0.062
C_8	0.088	0.083	0.087
C_9	0.139	0.062	0.131
C_{10}	0.058	0.071	0.059
C_{11}	0.034	0.060	0.037
C_{12}	0.020	0.071	0.025
C_{13}	0.012	0.074	0.019
C_{14}	0.023	0.069	0.028
C_{15}	0.040	0.045	0.040
C_{16}	0.075	0.066	0.074

由表4可知,安徽省水资源承载力由2008—2013年的Ⅲ级(2010年为Ⅱ级)上升至2014—2017年的Ⅱ级,水资源承载力得到了有效改善,以2017年为例,因

气候原因2017年降雨量较往年偏少,但控制联系数分量 a 、 b 总和占比依然大于 c 、 d 总和,说明近些年来安徽省采取的一系列水资源防控措施有效避免了气候问题带来的水资源承载能力不足的问题。由灰色聚类集对分析联系数评价的水资源承载力等级与灰色聚类最大隶属度判别的等级基本一致,其中2014、2017年根据灰色聚类集对分析联系数评价结果比最大隶属度更优,更符合安徽省实际情况,验证了灰色聚类集对分析法的可靠性与准确性。

从总体趋势看,安徽省水资源承载能力逐步提升的同时也在趋于稳定,近年一直保持为Ⅱ级,如表4和图2所示,表明水资源承载力可以满足现有社会经济生态发展需求。通过2008年到2017年的增长,安徽省水资源综合评价联系数 μ 值逐渐超过0.1接近0.2,表明安徽省水资源承载力总体得到了提高。代表Ⅰ级、Ⅱ级的联系数分量 a 、 b 占比呈现上升趋势,逐渐超过 c 、 d 的占比,这与这些年来的水资源合理开发、科学管理是分不开的,随着人们的重视与科学的开发,安徽省水资源承载力将会得到更好的改善,未来安徽省水资源承载力会得到进一步提升,生态环境也会得到进一步改善。

表4 2008—2017年安徽省水资源承载力评价结果

年份	a	b	c	d	最大隶属度等级	联系数 μ	水资源承载力等级
2008	0.045	0.286	0.547	0.122	Ⅲ	-0.163	Ⅲ
2009	0.058	0.292	0.553	0.097	Ⅲ	-0.125	Ⅲ
2010	0.077	0.512	0.324	0.087	Ⅱ	0.052	Ⅱ
2011	0.114	0.323	0.413	0.150	Ⅲ	-0.066	Ⅲ
2012	0.141	0.318	0.440	0.101	Ⅲ	0.000	Ⅲ
2013	0.163	0.304	0.365	0.168	Ⅲ	-0.025	Ⅲ
2014	0.193	0.317	0.438	0.052	Ⅲ	0.101	Ⅱ
2015	0.200	0.458	0.292	0.050	Ⅱ	0.204	Ⅱ
2016	0.291	0.474	0.188	0.047	Ⅱ	0.339	Ⅱ
2017	0.222	0.324	0.401	0.053	Ⅲ	0.144	Ⅱ

4.3 安徽省水资源承载力区域差异性分析

本文选取了2017年安徽省16个地级市的评价指标数据,基于灰色聚类集对分析评价模型判别各市水资源承载力以及各子系统评价等级。利用ArcGIS可视化功能绘制安徽省水资源承载力等级的空间分布图,能够直观地体现出安徽省水资源承载力的区域差异性,具体结果如表5和图3、4所示。

由表5和图3可看出,安徽省16个地市中,合肥市、淮南市、淮北市、阜阳市、蚌埠市和马鞍山市水

资源承载力等级为Ⅲ级,水资源承载力较差,池州市、宣城市和黄山市水资源承载力等级为Ⅰ级,水资源开发潜力大,其余地市均为Ⅱ级。整体看,安徽省南方水资源承载力较北方好,这与水资源分布不均、社会发展模式不同和区域生态环境差异有关。图4表明,安徽省水资源分布南北差异较大,其中合肥市、淮南市、淮北市、蚌埠市和马鞍山市水资源系统评价等级已经达到Ⅳ级,水资源系统具有很大压力,急需采取有效措施来满足现有社会发展的水资源需

求。安徽省各地市社会、经济系统发展趋势良好,整体较为均匀,按照现有政策和措施,可以保障区域水资源承载力的良性发展。从生态环境系统看,合肥市、淮南市和淮北市等级为Ⅲ级,生态环境脆弱,需采取有效截污控污措施保障地表水水质,同时恢复生态湿地和自然湖泊,采取退耕还林等保护措施提升区域生态环境承载能力。

表 5 2017 年安徽省各地市水资源承载力评价结果

城市	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	联系数 μ	水资源承载力等级
合肥市	0.267	0.127	0.272	0.334	-0.116	Ⅲ
淮北市	0.296	0.169	0.194	0.342	-0.054	Ⅲ
亳州市	0.213	0.415	0.085	0.286	0.035	Ⅱ
宿州市	0.250	0.309	0.144	0.297	0.008	Ⅱ
蚌埠市	0.229	0.278	0.234	0.260	-0.016	Ⅲ
阜阳市	0.119	0.438	0.195	0.248	-0.049	Ⅲ
淮南市	0.149	0.230	0.346	0.275	-0.165	Ⅲ
滁州市	0.208	0.358	0.248	0.185	0.059	Ⅱ
六安市	0.171	0.577	0.208	0.044	0.249	Ⅱ
马鞍山市	0.182	0.142	0.418	0.259	-0.168	Ⅲ
芜湖市	0.272	0.125	0.467	0.136	0.023	Ⅱ
宣城市	0.473	0.350	0.164	0.013	0.522	Ⅰ
铜陵市	0.256	0.197	0.463	0.083	0.085	Ⅱ
池州市	0.505	0.351	0.120	0.024	0.558	Ⅰ
安庆市	0.340	0.459	0.159	0.041	0.398	Ⅱ
黄山市	0.617	0.249	0.116	0.018	0.642	Ⅰ

从表 5 可知,亳州市、宿州市、滁州市和芜湖市虽然处于Ⅱ级,但联系数 μ 接近于Ⅲ级,考虑到未来社会的发展状况,现有水资源可能无法满足发展需求,应加强区域水资源管理,优化水资源配置,制定

合理的水资源利用方案,如种植耐旱作物,采取节水灌溉等措施保障区域社会经济的可持续发展。随着安徽省引江济淮大型水利输水工程的开展,将会有效改善安徽省中北部水资源不足的局面,有助于恢复安徽北部地下水水位,逐步提升安徽省地区水资源承载力,中国四大淡水湖之一的巢湖水质也将得到有效的改善。

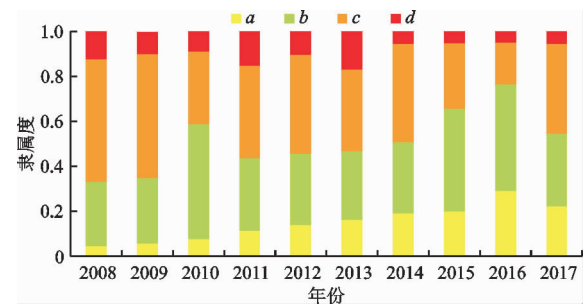


图 2 2008 - 2017 年安徽省水资源承载力评价指标联系系数分量占比

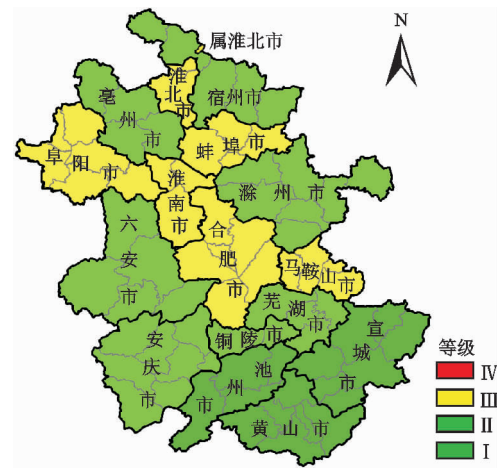


图 3 2017 年安徽省水资源承载力等级空间分布

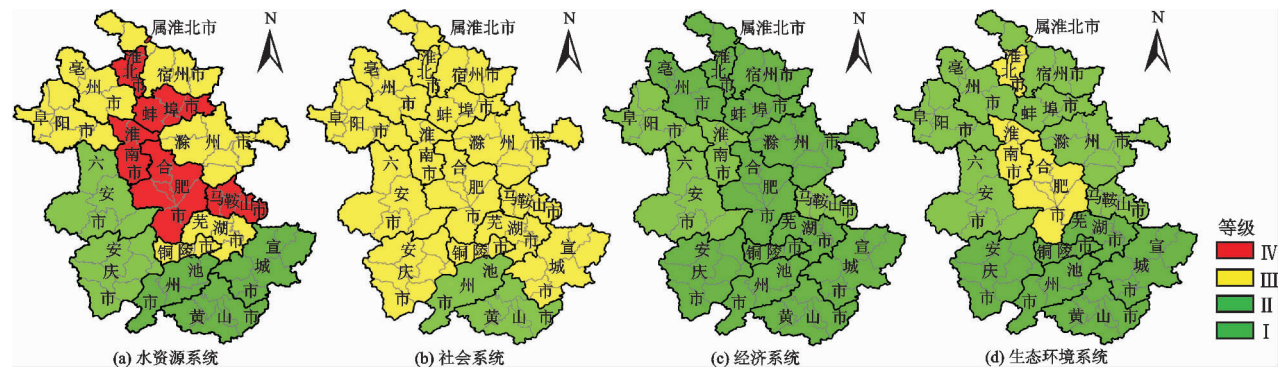


图 4 2017 年安徽省水资源承载力各子系统等级空间差异

5 结 论

通过对水资源承载力评价体系的建立、评价模

型的优化以及安徽省水资源承载力的评价分析,得出以下主要结论:

(1)在已有研究成果的基础上,本文从区域水

资源-经济-社会-生态环境系统自身特点出发,综合分析水资源承载力的内涵,确定了基于水资源、社会、经济和生态环境系统的 16 个评价指标,较为清晰地反映了社会经济发展对水资源和生态环境的压力状况。

(2) 基于灰色聚类适用于“小样本”、“少信息”的不确定系统,构建和优化灰色聚类 SPA 评价模型,并应用于安徽省水资源承载力评价中,结果表明灰色聚类 SPA 评价模型计算更为准确、快速,模型应用更为简便。

(3) 利用灰色聚类 SPA 模型对安徽省 2008-2017 年水资源承载力进行分析评价,结果表明:安徽省 2008-2013 水资源承载力评价等级基本为Ⅲ级,2014-2017 年评价等级为Ⅱ级,水资源承载力得到了明显的改善。以 2017 年为例,安徽省水资源承载力南北差异较明显,南方水资源承载力较北方更优,这与水资源分布不均、社会发展模式不同和区域生态环境差异有关。各地市应结合区域自身发展特性以及生态环境现状,制定合理有效的水资源可持续利用方案。

参考文献:

- [1] 苏敏杰,白栩嘉. 基于最大熵投影寻踪模型的云南省近 10a 水资源承载力评价[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 12-18.
- [2] DU Min, XU Zhenghe, PENG Limin, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity of Jining City[J]. Energy Procedia, 2011, 5(5): 1654-1659.
- [3] NGOM F D, TWEED S, BADER J C, et al. Rapid evolution of water resources in the Senegal delta[J]. Global and Change, 2016, 144: 34-47.
- [4] 方国华,郭天翔,黄显峰. 区域水资源承载能力模糊综合评价研究[J]. 海河水利, 2010(4): 1-4.
- [5] 金菊良,陈磊,陈梦璐,等. 基于集对分析和风险矩阵的水资源承载力评价方法[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 35-41.
- [6] 黄显峰,李宛谕,方国华,等. 基于 SPA 和云理论的水资源承载能力评价研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 9-15+63.
- [7] 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.
- [8] 李浩,杨侃,陈静,等. 灰色三角白化权集对分析模型在河流健康评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(8): 33-36.
- [9] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1399-1409.
- [10] 姜秋香,付强,王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 184-190.
- [11] 韩运红,唐德善,李典典,等. 模糊熵权综合评价模型在阜阳市水资源承载力综合评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5): 26-29.
- [12] 金菊良,董涛,郦建强,等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 31-39.
- [13] 袁鹰,甘泓,汪林,等. 基于不同承载水平的水资源承载能力计算[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 40-43.
- [14] 方国华,胡玉贵,徐瑶. 区域水资源承载能力多目标分析评价模型及应用[J]. 水资源保护, 2006, 22(6): 9-13.
- [15] 张文. 基于灰色关联分析与集对分析的区域水资源承载力评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2018.
- [16] 李浩,杨侃,陈静,等. 灰色三角白化权集对分析模型在河流健康评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(8): 33-36.
- [17] 李自明. 基于多层次灰色聚类模型的河流健康综合评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
- [18] 高玉杉,方国华,黄显峰,等. 基于模糊层次分析与可变模糊集的徐州市水资源管理现代化评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 155-158.
- [19] 舒持恺,杨侃. 基于组合赋权的湖泊健康评价物元分析模型[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 40-46.
- [20] 王念秦,张帅,刘鹏. 基于博弈论组合赋权法的泥石流灾害易发性评价云模型[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(2): 41-47.