

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.001

基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法

金菊良^{1,2}, 徐新光^{1,2}, 周戎星^{1,2}, 崔毅^{1,2}, 宁少尉^{1,2}, 周玉良^{1,2}, 吴成国^{1,2}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要:为定量分析评价水资源空间均衡状况和空间差异,采用联系数和耦合协调度相结合的方法对区域水资源空间均衡进行评价。综合考虑水资源-经济社会-生态环境的复合关系,构建了由水资源承载支撑力和承载压力 2 个系统、15 个评价指标组成的水资源空间均衡评价指标体系,并采用基于加速遗传算法的模糊层次分析法计算了评价指标权重,提出了基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法。以安徽省为实例进行了验证,结果表明:该评价方法应用于水资源空间均衡评价较为合理,能弥补传统耦合协调度无法体现不确定性问题的缺陷,准确反映系统间的协调作用和整体发展水平。

关键词:水资源空间均衡;联系数;耦合协调度;承载支撑力;承载压力;安徽省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0001-06

Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree

//JIN Juliang^{1,2}, XU Xinguang^{1,2}, ZHOU Rongxing^{1,2}, CUI Yi^{1,2}, NING Shaowei^{1,2}, ZHOU Yuliang^{1,2}, WU Chengguo^{1,2}
(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental System Engineering, College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze and evaluate the spatial balance and spatial difference of water resources, the combined method of connection number and coupling coordination degree was used to evaluate the spatial balance of regional water resources. Considering the composite relationship of water resources, economic society and ecological environment, an evaluation index system for spatial balance of water resources composed of two systems of water resources carrying capacity and bearing pressure and 15 evaluation indexes was established. The weight of evaluation index was calculated by fuzzy analytic hierarchy process based on accelerating genetic algorithm, and a spatial balance evaluation method of water resources based on connection number and coupling coordination degree was proposed. Taking Anhui Province as an example, the results show that the evaluation method is reasonable when applied to the evaluation of water resources spatial balance, which can make up for the defect that the traditional coupling coordination degree can not reflect the uncertainty problem, and accurately reflect the coordination between systems and the overall development level.

Key words: spatial balance of water resources; connection number; coupling coordination degree; carrying capacity; bearing pressure; Anhui Province

水资源是推动经济社会发展和维护生态环境必不可少的自然资源和战略资源^[1-2]。随着经济社会快速发展,区域发展失衡与空间开发无序问题日趋突出^[3-4],水资源与经济社会、生态环境之间供需矛盾加剧,引起水资源空间不均衡,会严重制约区域可持续发展。针对水资源问题,2014 年习近平总书记

提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的十六字水利工作方针^[5],水资源空间均衡是其核心内容之一。目前关于水资源空间均衡评价尚无统一的标准,郗建强等^[6]认为水资源空间均衡评价应从水的供需两侧入手,综合考虑产业结构、经济规模、水资源水环境承载能力,对节水水平、需水程度、水

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407206);国家自然科学基金(51709071,51779067);中央高校基本科研业务费专项(JZ2020HGQA0202)

作者简介:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: jinjl66@126.com

通信作者:周戎星(1990—),女,讲师,博士研究生,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: zhourx11@163.com

资源开发规模、供需平衡水平等进行评价;金菊良等^[7-8]认为水资源空间均衡评价应采用能够体现复杂系统的综合指标对水资源空间均衡进行分析,从水资源-经济社会-生态环境复合系统出发,评价水资源承载支撑力与承载压力空间分布方面的匹配性。水资源空间均衡评价的研究方法目前主要有基于洛伦兹曲线的基尼系数法^[9-10]、空间均衡系数法^[11-12]、耦合协调度方法^[13-14]等。其中,耦合协调度方法可度量系统及其要素的层次性和协调性,体现系统由无序向有序的发展趋势。孙爱军等^[15]通过计算城市经济与用水效率二者的耦合协调度,分析了空间和时间的动态差异变化,可为经济和用水效率的可持续发展提供依据;喻笑勇等^[16]建立了湖北省水资源与经济社会耦合协调发展度模型。

耦合协调度方法是目前水资源空间均衡评价研究常用的重要方法,其不足是在协调度计算中存在均匀化问题,很难有效处理水资源-经济社会-生态环境复合系统的不确定性,而集对分析中的联系数方法可定量刻画评价样本与评价标准间的确定与不确定性关系,对不确定性系统进行定量分析,在处理不确定性问题中有全面、精细、简便等独特优势^[1,17]。为此本文综合考虑水资源-经济社会-生态环境的复合关系,对协调度计算公式进行改进,并与联系数相结合,构建基于承载支撑力和承载压力的水资源空间均衡评价指标体系,提出基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法,并以安徽省为实例进行分析评价,以期水资源空间均衡评价提供新途径。

1 评价指标体系及等级标准

1.1 评价指标体系的建立及权重的计算

目前,水资源空间均衡评价尚无统一的标准,在已有水资源空间均衡评价概念的基础上^[7-9],本文认为水资源空间均衡就是区域水资源承载支撑力与承载压力在空间分布上的协调程度,遵循科学性、层次性、适用性及可操作性原则,考虑与水资源空间均衡相关的主要影响因素,构建了如图1所示的由水资

源承载支撑力和承载压力2个系统、15个指标组成的水资源空间均衡评价指标体系。可利用基于加速遗传算法的模糊层次分析法(AGA-FAHP)^[18]计算这2个系统各项指标的权重。

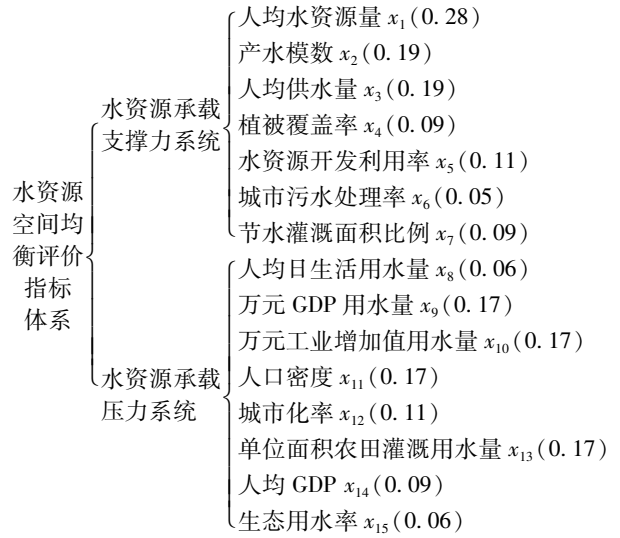


图1 水资源空间均衡评价指标体系及权重

Fig.1 Evaluation index system and weight of water resources spatial balance

1.2 确定评价指标等级标准

评价指标等级化是集对分析常用的指标分类方法,也是集对分析的基础性工作。参考文献[19-22]并借鉴相关专家的意见,将评价指标分为1级(可载,即指标承载支撑力较大或承载压力较小)、2级(临界,即指标承载支撑力和承载压力相当)、3级(超载,即指标承载支撑力较小或承载压力较大)3个等级,具体等级划分标准如表1所示。

2 评价方法

2.1 集对分析联系数方法

将不确定性系统中两个有特定关系的集合A和集合B构成集对H^[23],对集对H作同、异、反三方面关系分析,定量描述集对系统内的关系程度,综合处理不确定性问题,并用联系数表达^[23-26]:

$$u = a + bl + cJ \quad (1)$$

式中:u为联系数;a、b、c分别表示同一度、差异度和

表1 评价指标等级值

Table 1 Grade value of evaluation index

等级	x_1/m^3	$x_2/(万 m^3 \cdot km^{-2})$	$x_3/(m^3 \cdot a^{-1})$	$x_4/\%$	$x_5/\%$	$x_6/\%$	$x_7/\%$	x_8/L
1级	>1670	>80	>450	>40	<40	>95	>60	<70
2级	1000~1670	50~80	350~450	25~40	40~70	90~95	20~60	70~180
3级	<1000	<50	<350	<25	>70	<90	<20	>180
等级	x_9/m^3	x_{10}/m^3	$x_{11}/(人 \cdot km^{-2})$	$x_{12}/\%$	$x_{13}/(m^3 \cdot hm^{-2})$	$x_{14}/元$	$x_{15}/\%$	
1级	<100	<50	<200	<50	<3750	>24840	>5	
2级	100~400	50~200	200~500	50~80	3750~6000	6624~24840	1~5	
3级	>400	>200	>500	>80	>6000	<6624	<1	

对立度,且满足 $a + b + c = 1$; I 为差异度系数,参考 J 而定,对正负对立关系 I 一般在 $[-1, 1]$ 上取值; J 为对立度系数,对正负对立关系一般取 $J = -1$ 。

2.2 耦合协调度模型

复合系统的协调均衡发展可表征为各系统的相互协调作用使系统由无序走向有序,达到协同的过程^[27]。协调度反映各系统在发展演化过程中彼此和谐一致的程度,可用几何平均法将协调度函数^[28]表示为

$$C_i = \left(\prod_{j=1}^n v_{ij} \right)^{1/n} \quad (2)$$

式中: C_i 为样本 i 的协调度; v_{ij} 为样本 i 系统 j 归一化后的相对隶属度值, v_{ij} 在 $[0, 1]$ 上取值; n 为系统个数。以往的协调度计算一般采用公式 $C_i = \left(\prod_{j=1}^n v_{ij} \right)^{1/n} / \left(\sum_{j=1}^n v_{ij} / n \right)$, 但易产生协调度计算均匀化问题。协调度可衡量各系统的协调关系,尚不能反映整体的绝对发展水平,为此引入耦合协调度来评价复合系统的综合协调发展水平^[29]:

$$D_i = \sqrt{C_i T_i} \quad (3)$$

其中

$$T_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

式中: D_i 为样本 i 的耦合协调度,其含义为各系统交互耦合的协调程度,既可体现系统间的协调作用,又可反映复合系统的整体发展水平; T_i 为样本 i 的绝对效益,是表征各系统发展水平的综合评价指数; w_j 为系统 j 的权重。

2.3 评价步骤

本文将联系系数和耦合协调度方法结合用于水资源空间均衡评价,包括以下 5 个实现步骤。

步骤 1: 计算样本 i 系统 j ($j = 1, 2$, 分别代表水资源承载支撑力和承载压力 2 个系统) 指标 k ($k = 1, 2, \dots, m_j$, 其中 m_j 为系统 j 中指标个数, $m_1 = 7$, 即支撑力子系统有 7 个评价指标, $m_2 = 8$, 即压力子系统有 8 个评价指标) 的样本值 x_{ijk} 与评价等级 g ($g = 1, 2, 3$) 之间的三元联系系数^[23, 30]。对于样本值 x_{ijk} 随评价标准等级的增大而增大(减小)的正向(反向)指标,可通过文献[31]的公式计算得到样本值 x_{ijk} 与评价等级 g 之间的三元联系系数 u_{ijk} 。

步骤 2: 单指标联系系数 u_{ijk} 的计算。由文献[31-33]的计算方法可得样本值 x_{ijk} 隶属于模糊集评价等级 g 的相对隶属度,归一化处理得到评价指标样本值同、异、反联系系数分量 v_{ijk1} 、 v_{ijk2} 、 v_{ijk3} ($0 \leq v_{ijk} \leq 1$); 由样本值同、异、反 3 个联系系数分量 v_{ijk1} 、 v_{ijk2} 、 v_{ijk3} 可得单指标联系系数 u_{ijk} 。

步骤 3: 确定样本 i 系统 j 与评价等级 g 之间的

联系系数 u_{ij} 。根据单指标联系系数加权可得系统样本联系系数 v_{ijg}^* ; 经归一化可得系统同、异、反联系系数分量 v_{ijg} 进而得到样本 i 系统 j 与评价等级 g 之间的联系系数 u_{ij} , 具体公式见文献[31]。

步骤 4: 考虑到差异度的影响,采用比例取值法^[34]取差异度,即 $v_{ij2} I = v_{ij2} v_{ij1} - v_{ij2} v_{ij3}$, 对立度系数取 $J = -1$, 计算样本 i 系统 j 的联系数值 u_{ij} , 进而得到相对隶属度 v_{ij}^* ^[33]:

$$v_{ij}^* = 0.5 + 0.5 u_{ij} \quad (4)$$

步骤 5: 将样本 i 的水资源承载支撑力系统和承载压力系统的相对隶属度 v_{ij}^* 的归一化值 v_{i1} 、 v_{i2} 代入式(2)(3)得到样本 i 的耦合协调度 D_i :

$$D_i = \sqrt{C_i T_i} = \sqrt{\sqrt{v_{i1} v_{i2}} (w_1 v_{i1} + w_2 v_{i2})} \quad (5)$$

式中: w_1 、 w_2 分别为承载支撑力和承载压力 2 个系统的权重,从均衡的角度出发,这里取 $w_1 = w_2 = 0.5$ 。采用模糊隶属度分级标准^[35]确定耦合协调度的评价等级标准如下: $[0, 0.2)$ 为 5 级(严重不均衡), $[0.2, 0.4)$ 为 4 级(比较不均衡), $[0.4, 0.6]$ 为 3 级(临界均衡), $(0.6, 0.8]$ 为 2 级(比较均衡), $(0.8, 1]$ 为 1 级(均衡)。

3 实例验证

以安徽省 16 个地市为例,建立由水资源承载支撑力和承载压力 2 个系统、15 个指标组成的安徽省水资源空间均衡评价指标体系,采用基于加速遗传算法的模糊层次分析法^[18]计算得各指标的权重(图 1 括号中数据),通过步骤 1~5 得到这 2 个系统的联系系数和隶属度,再由式(5)得到耦合协调度,据此评价安徽省 2011—2016 年的水资源空间均衡程度,得到 2011—2016 年 16 个地市的水资源承载支撑力和承载压力的耦合协调度值及其评价等级,结果见表 2。

由表 2 可知,2011 年安徽省水资源空间均衡状况较差。皖北 6 市(淮北、宿州、蚌埠、阜阳、淮南、亳州)评价等级都为 4 级,其耦合协调度均低于 0.40; 皖中地区除安庆市为 3 级外,其余 3 市(合肥、六安、滁州)都为 4 级; 皖南地区黄山、池州、宣城 3 市耦合协调度介于 0.6~0.8 之间,为 2 级,而芜湖、马鞍山为 4 级,铜陵则为 3 级。通过上述分析可以看出,2011 年安徽省水资源空间均衡呈现出南强北弱的空间差异,且由南到北均衡性依次减弱。

2012 年安徽省水资源空间均衡状况依然较差,空间均衡程度与 2011 年基本相似。不同的是六安由 2011 年的 4 级变为 2012 年的 3 级,耦合协调度由 0.3887 变化为 0.4640; 铜陵由 2011 年的 3 级变

表2 安徽省水资源承载支撑力与承载压力的耦合协调度及评价等级

Table 2 Coupling coordination degree and evaluation grade of water resources carrying capacity and bearing pressure in Anhui Province

行政区	耦合协调度						评价等级					
	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
淮 北	0.3087	0.3205	0.3208	0.3300	0.3248	0.3611	4级	4级	4级	4级	4级	4级
毫 州	0.2872	0.3341	0.3113	0.3662	0.3429	0.3726	4级	4级	4级	4级	4级	4级
宿 州	0.3460	0.3498	0.3474	0.3673	0.3622	0.3936	4级	4级	4级	4级	4级	4级
蚌 埠	0.3595	0.3551	0.3559	0.3665	0.3818	0.4314	4级	4级	4级	4级	4级	3级
阜 阳	0.2183	0.2304	0.2280	0.3273	0.2943	0.3623	4级	4级	4级	4级	4级	4级
淮 南	0.2951	0.2858	0.3095	0.3288	0.3412	0.4099	4级	4级	4级	4级	4级	3级
滁 州	0.3845	0.3685	0.4012	0.5195	0.5718	0.6166	4级	4级	3级	3级	3级	2级
六 安	0.3887	0.4640	0.5063	0.6138	0.6213	0.7334	4级	3级	3级	2级	2级	2级
合 肥	0.3803	0.3867	0.3999	0.4024	0.4227	0.5567	4级	4级	4级	3级	3级	3级
马鞍山	0.2823	0.2877	0.2734	0.3550	0.3313	0.4699	4级	4级	4级	4级	4级	3级
芜 湖	0.3178	0.3472	0.3508	0.3862	0.4405	0.5913	4级	4级	4级	4级	3级	3级
铜 陵	0.4251	0.3872	0.3556	0.3675	0.5556	0.6067	3级	4级	4级	4级	3级	2级
安 庆	0.4591	0.5656	0.5757	0.6453	0.6321	0.6748	3级	3级	3级	2级	2级	2级
池 州	0.6083	0.6602	0.6230	0.7003	0.7000	0.7046	2级	2级	2级	2级	2级	2级
宣 城	0.6387	0.6729	0.6411	0.7498	0.7338	0.7529	2级	2级	2级	2级	2级	2级
黄 山	0.6708	0.6714	0.6921	0.7266	0.7052	0.7311	2级	2级	2级	2级	2级	2级

为2012年的4级,耦合协调度由0.4251变化为0.3872。通过分析评价指标发现六安人口密度(x_{11})从2011年的473.36人/km²减少到2012年的385.11人/km²,铜陵市由246.51人/km²增加到666.76人/km²,其余城市无明显变化,该指标变化较大成为影响两市水资源空间均衡状态变化的主要原因。

2013年与2012年相比皖北、皖南水资源空间均衡状态基本无变化。皖中滁州从4级变为3级,通过分析评价指标可发现2012年到2013年滁州植被覆盖率(x_4)由10.71%增加到15.01%,水资源承载支撑力增加,单位面积农田灌溉用水量(x_{13})从5510.71m³/hm²减少为3398.87m³/hm²,水资源承载压力减小,这是导致该市水资源空间均衡状态变化的主要原因。

从表2可以看出,安徽省2014—2016年水资源空间均衡状态与前3年相比有明显改善趋势。具体表现为:六安、安庆两市从2013年的3级转变为2014年的2级,合肥市从4级变为3级;芜湖、铜陵两市从2014年的4级转变为2015年的3级;到2016年铜陵市从3级变为2级,而均衡性较差的马鞍山、淮南、蚌埠也由4级转变为3级。通过对指标分析时发现2014—2016年水资源空间均衡状态变好的城市其人均水资源量(x_1)、产水模数(x_2)都有明显增加,且这两个指标权重分别为0.28和0.19,对水资源承载支撑力系统影响较大,水资源承载支撑力变强促使水资源空间均衡程度提高。

综上所述,从空间分布角度看,安徽省水资源空

间均衡程度在同一时间维度上由南到北有依次变差趋势。从动态变化角度看,2011—2016年皖北地区水资源空间均衡形势不容乐观,皖北6市基本处于4级;皖中、皖南的水资源空间均衡状态相对较好,滁州、六安从4级转变成2级、改善幅度最大,合肥从4级变为3级,安庆从3级变成2级;皖南地区的黄山、池州、宣城则一直处于2级,芜湖、马鞍山也从4级转变成3级。提高水资源空间均衡程度可从水资源调控、植树造林增加植被覆盖率、节约用水和提高水资源利用效率等方面入手。

4 结 论

a. 提出了综合考虑水资源-经济社会-生态环境复杂系统及其影响因素、由水资源承载支撑力和承载压力2个系统、15个指标组成的水资源空间均衡评价指标体系。

b. 鉴于传统耦合协调度模型在协调度计算过程中存在均匀化问题,难以处理水资源-经济社会-生态环境复合系统的不确定性,利用联系数方法可对不确定性系统进行刻画、将不确定问题量化的优势,提出了基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法,为水资源空间均衡评价提供了新途径。

c. 将基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法应用于安徽省进行实证分析,结果表明该方法可综合考虑复合系统的协调性、发展水平和不确定性,评价结果合理,与实际情况相符,方法简便有效,为水资源空间均衡评价研究提供了新

途径。

参考文献:

- [1] 李辉,金菊良,吴成国,等.基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):42-49. (LI Hui,JIN Juliang,WU Chengguo, et al. Dynamic evaluation and diagnostic analysis for water resources carrying capacity in Anhui Province based on connection number [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1):42-49. (in Chinese))
- [2] WANG Y Q, HUANG X R, GAO L Y, et al. Preliminary research on quantitative methods of water resources carrying capacity based on water resources balance sheet [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2018, 379:269-277.
- [3] DICKEN P. Geographers and “Globalization”: (yet) another missed boat? [J]. Transactions of the Institute of British Geographers, 2004, 29(1):5-26.
- [4] 周斌,桑学锋,秦天玲,等.我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J].水利水电科技进展,2019,39(3):6-10. (ZHOU Bin, SANG Xuefeng, QIN Tianling, et al. Regulation ideas and coping strategies of virtuous water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3):6-10. (in Chinese))
- [5] 吴强,高龙,李淼.空间均衡:必须树立人口经济与资源环境相均衡的原则[J].水利发展研究,2018,18(9):17-24. (WU Qiang, GAO Long, LI Miao. Spatial balance: the principle of balancing population economy with resources and environment must be established [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(9):17-24. (in Chinese))
- [6] 郦建强,王平,郭旭宁,等.水资源空间均衡要义及基本特征研究[J].水利规划与设计,2019,32(10):1-5. (LI Jianqiang, WANG Ping, GUO Xuning, et al. Research on the essentials of spatial equilibrium of water resources and its basic feature [J]. Water Resources Planning and Design, 2019, 32(10):1-5. (in Chinese))
- [7] 金菊良,郦建强,吴成国,等.水资源空间均衡研究进展[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(6):47-60. (JIN Juliang, LI Jianqiang, WU Chengguo, et al. Research progress on spatial equilibrium of water resources [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(6):47-60. (in Chinese))
- [8] 徐翔宇,郦建强,金菊良,等.基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J].水利水电科技进展,2020,40(1):1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):1-9. (in Chinese))
- [9] 范嘉伟,黄锦林,袁明道,等.广州市用水结构空间均衡差异性分析[J].水资源保护,2020,36(4):82-86. (FAN Jiawei, HUANG Jinlin, YUAN Mingdao, et al. Analysis of spatial equilibrium of water consumption structure in Guangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4):82-86. (in Chinese))
- [10] SHU H, XIONG P P. The Gini coefficient structure and its application for the evaluation of regional balance development in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199:668-686.
- [11] 左其亭,纪瑗芯,韩春辉,等.基于GIS分析的水资源分布空间均衡计算方法及应用[J].水电能源科学,2018,36(6):33-36. (ZUO Qiting, JI Yuanxin, HAN Chunhui, et al. Spatial equilibrium calculation method and application in regional water resources distribution based on GIS analysis [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6):33-36. (in Chinese))
- [12] 夏帆,陈莹,窦明,等.水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J].水资源保护,2020,36(1):52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):52-57. (in Chinese))
- [13] CUI D, CHEN X, XUE Y L, et al. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale: a case study of Kunming [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 234:189-199.
- [14] 耿芳,董增川,管西柯.基于耦合协调度模型的南京市用水效率与经济发展关系[J].水利经济,2017,35(1):21-25. (GENG Fang, DONG Zengchuan, GUAN Xike. Dynamic relationship between water use efficiency and economic development in Nanjing based on coupling coordination model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(1):21-25. (in Chinese))
- [15] 孙爱军,董增川,张小艳.中国城市经济与用水技术效率耦合协调度研究[J].资源科学,2008,30(3):446-453. (SUN Aijun, DONG Zengchuan, ZHANG Xiaoyan. Coupling degree between urban economy and technical efficiency of water use in China [J]. Resources Science, 2008, 30(3):446-453. (in Chinese))
- [16] 喻笑勇,张利平,陈心池,等.湖北省水资源与社会经济耦合协调发展分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):809-817. (YU Xiaoyong, ZHANG Liping, CHEN Xinchu, et al. Analysis of coupling and coordinated development between water resources and social economy in Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(4):809-817. (in Chinese))
- [17] 李辉,金菊良,童芳,等.基于联系数的安徽省水资源承载力评价及空间差异诊断分析[J].水电能源科学,

- 2018,36(7):22-27. (LI Hui, JIN Juliang, TONG Fang, et al. Evaluation and spatial differential diagnosis analysis of water resources carrying capacity in Anhui Province based on connection number [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2018, 36(7):22-27. (in Chinese))
- [18] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22-28. (JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 22-28. (in Chinese))
- [19] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 14-16. (MIN Qingwen, YU Wendong, ZHANG Jianxin. Fuzzy-based evaluation of water resources carrying capacity and its application [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 14-16. (in Chinese))
- [20] 王学全,卢琦,李保国. 应用模糊综合评判方法对青海省水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 152-157. (WANG Xuequan, LU Qi, LI Baoguo. Fuzzy comprehensive assessment for carrying capacity of water resources in Qinhai Province [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 152-157. (in Chinese))
- [21] 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, 8(3): 48-53. (KANG Yan, SONG Songbai. Variable-weight and grey correlation model for water resources carrying capacity comprehensive assessment [J]. Water Saving Irrigation, 2014, 8(3): 48-53. (in Chinese))
- [22] 景林艳. 区域水资源承载力的量化计算和综合评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.
- [23] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科技出版社, 2000.
- [24] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 3(24): 119-122. (DUAN Xinguang, LUAN Fangfang. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on fuzzy comprehensive model [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 3(24): 119-122. (in Chinese))
- [25] 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. (in Chinese))
- [26] 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. (JIN Juliang, CHEN Lei, CHEN Menglu, et al. Evaluation method of water resources carrying capacity based on set pair analysis and risk matrix [J]. Yangtze River, 2018, 49(7): 35-41. (in Chinese))
- [27] 李勇. 武汉市社会、经济、资源、环境协调发展的评价与预测建模研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- [28] 吴跃明,张子珩,郎东锋. 新型环境经济协调度预测模型及应用[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1996, 32(3): 466-473. (WU Yueming, ZHANG Zihang, LANG Dongfeng. The forecasting model of environment-economy coordinated degree and its application [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1996, 32(3): 466-473. (in Chinese))
- [29] HE Y Q, PAN X X, WANG Y, et al. Evaluation and analysis on coupling coordinated development of urban resource, environment and economy in Jiangxi Province in China [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2301: 2457-2463.
- [30] 汪明武,金菊良. 联系数理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [31] 金菊良,沈时兴,酆建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [32] 吴开亚,金菊良,魏一鸣,等. 基于指标体系的流域水安全诊断评价模型[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 105-113. (WU Kaiya, JIN Juliang, WEI Yiming, et al. Diagnosis assessment model of watershed water security based on index system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(4): 105-113. (in Chinese))
- [33] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [34] 金菊良,刘鑫,周戎星,等. 联系熵方法在水资源承载力评价中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 447-455. (JIN Juliang, LIU Xin, ZHOU Rongxing, et al. The application of link entropy method in water resources carrying capacity evaluation [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 447-455. (in Chinese))
- [35] 刘洪丽,吴军年,徐兴东. 基于集对分析的矿区生态承载力定量评价[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 568-573. (LIU Hongli, WU Junnian, XU Xingdong. Study on quantitative evaluation of ecological carrying capacity in mining areas based on set pair analysis [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 568-573. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-03 编辑:熊水斌)