

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.001

基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型

金菊良^{1,2}, 刘东平^{1,2}, 周戎星^{1,2}, 张礼兵^{1,2}, 崔毅^{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:针对基于专家判断的层次分析法(AHP)等主观定权方法存在一定的主观随意性,会导致区域水资源承载力评价结果具有不确定性的问题,提出采用投影寻踪(PP)方法优化 AHP 确定的指标权重,再结合减法集对势理论,构建了基于 PP-AHP 方法定权的水资源承载力评价模型,并以安徽省水资源承载力评价为例加以验证。结果表明:该模型能够进一步优化 AHP 法确定的指标权重,挖掘 AHP 法定权结果的不确定性信息,更好地将 AHP 法主观定权与 PP 法客观定权的优点相结合,所得权重更接近最优解,降低了指标权重不确定性带来的评价结果不合理的风险,评价结果更为稳健,验证了模型的有效性和合理性。

关键词:水资源承载力评价;投影寻踪;层次分析法;权重优化;减法集对势;安徽省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0001-06

Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization // JIN Juliang^{1,2}, LIU Dongping^{1,2}, ZHOU Rongxing^{1,2}, ZHANG Libing^{1,2}, CUI Yi^{1,2}, WU Chengguo^{1,2} (1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental System Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem that the subjective weighting methods such as analytic hierarchy process (AHP) based on expert judgment have certain subjective randomness which will lead to the uncertainty of the evaluation results of regional water resources carrying capacity, projection pursuit (PP) method was adopted to optimize the index weight determined by AHP and the evaluation model of water resources carrying capacity based on PP-AHP was established combined with subtractive set pair potential. The evaluation of water resources carrying capacity of Anhui Province was taken as an example for verification. The results show that this model can further optimize the index weight determined by AHP method and excavate the uncertainty information of the weight results by AHP method, which can better combine the advantages of AHP weight and PP objective weight and the weight obtained is closer to the optimal solution. This model can reduce the risk of unreasonable evaluation results caused by the uncertainty of index weight and the result is more robust, which verifies the validity and rationality of this model.

Key words: evaluation of water resources carrying capacity; projection pursuit; analytic hierarchy process; weight optimization; subtraction set pair potential; Anhui Province

水资源承载力作为衡量水资源可持续发展的重要指标,日益受到更多学者和相关管理部门的重视。有效合理地评价区域水资源承载力可为水资源承载调控、促进区域经济健康发展、保证社会稳定和维持生态环境健康提供参考依据,还可为水资源可持续开发利用提供理论支撑。水资源承载力的概念提出于 20 世纪 80 年代末,随后众多学者对其进行了大

量研究^[1-2],并提出了相应评价方法。作为水资源承载力评价模型构建过程中的重要一环,合理确定权重十分重要,关系着评价结果的可靠性。目前,常用的定权方法或是通过单一方法确定权重,或是没有考虑评价指标间的相互作用^[3],均存在或多或少的的问题。如:主成分分析法^[4]需对原始变量做降维处理,有时主成分的含义较为模糊,导致其分级标准

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407206);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,硕士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: zhourx11@163.com

难以划分;专家打分法是专家直接依据相关经验给出权重,存在一定的主观随意性;层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、模糊综合评价法在解决多目标、多层次及多准则等决策问题上存在优势,但人为干扰使得评价结果往往主观性较强,在一定程度上存在不确定性^[5];基于特征向量的最优综合评价方法是较为客观的评价方法,但受模型本身限制,在处理类似水资源承载力评价等具有高维度、非线性和非正态特性的评价问题时适应能力低,往往不易取得较为准确的评价结果^[5];投影寻踪(projection pursuit, PP)方法不仅能在一定程度上解决数据的高维及非线性问题,还能充分挖掘数据本身的特征^[6],但有时会出现确定的客观权重与主观认知明显不一致的情况。

集对分析概念由我国学者赵克勤^[7]于1989年提出,其基本思想是针对要研究的问题构建具有一定联系的由两个集合构成的集对,对集对中两集合间的关系特征进行同一、差异、对立三方面的系统分析;然后用联系数对这些关系特征进行定量表达,并可根据集对的联系数进一步计算出相应指标的减法集对势(subtraction set pair potential, SSPP)。减法集对势可克服除法集对势存在的不稳定现象,同时也符合集对势函数表达所研究集对当前确定性状态和未来发展趋势的特性,为集对势应用于多属性动态决策问题提供了理论依据^[8],且减法集对势较为客观,计算简便,能够对所研究问题进行定量表达,适用于区域水资源承载力评价问题^[9-10]。

为此,本文结合AHP法确定的权重(以下简称“AHP权重”),采用PP法进一步挖掘数据本身特征、优化AHP权重,并在此基础上结合减法集对势理论,构建基于PP-AHP方法定权的水资源承载力评价模型(以下简称“本文模型”),并以安徽省水资源承载力评价为例对模型的有效性进行验证。

1 模型构建

本文模型构建包括以下6个步骤:

步骤1 构建评价指标体系,确定相应评价标

准。目前,针对水资源承载力评价这一问题,尚无统一的评价指标体系^[11]。根据前人建立评价指标体系的经验,基于科学性、整体性、区域性和可操作性^[12]等指标体系构建标准,从水资源承载力3大子系统^[13]中选出15个指标^[14-16](这15个指标已在多种水资源承载力评价模型中使用,符合相应区域水资源承载力评价要求)构建本文水资源承载力评价指标体系(图1),并参照文献^[16]中的方法构建评价等级标准,详见表1。



图1 水资源承载力评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system for water resources carrying capacity

步骤2 构造评价标准等级样本值。为确定各指标的权重,在表1各指标的3个标准等级区间中各线性内插9个评价标准等级样本值,加上表1给出的2个临界值,得到标准样本 $\{x_{ij} | i=1,2,\dots,m+2; j=1,2,\dots,n\}$ (其中 m 为插值个数, n 为评价指标个数)及其对应的水资源承载力经验等级 $\{y_i | i=1,2,\dots,m+2\}$ 。

步骤3 标准样本值无量纲化。为消除量纲影响,对标准样本中的正向指标(指标数值随承载力等级增大而增大)和负向指标(指标数值随承载力等级增大而减小)分别采用式(1)和式(2)进行无量

表1 评价指标分级标准

Table 1 Evaluation index grading standard

评价等级	x_1/m^3	$x_2/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$x_3/(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	$x_4/\%$	x_5/L	x_6/m^3	x_7/m^3	$x_8/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$
1	≥ 1670	≥ 80	≥ 450	≥ 40	≤ 70	≤ 100	≤ 50	≤ 200
2	$[1000, 1670)$	$[50, 80)$	$[350, 450)$	$[25, 40)$	$(70, 180]$	$(100, 400]$	$(50, 200]$	$(200, 500]$
3	< 1000	< 50	< 350	< 25	> 180	> 400	> 200	> 500
评价等级	$x_9/\%$	$x_{10}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$x_{11}/\%$	$x_{12}/\text{元}$	$x_{13}/\%$	$x_{14}/\%$	$x_{15}/\%$	
1	≤ 50	≤ 16.75	≤ 40	≥ 24840	≥ 90	≥ 95	≥ 5	
2	$(50, 80]$	$(16.75, 26.80]$	$(40, 70]$	$[6624, 24840)$	$[70, 90)$	$[70, 95)$	$[1, 5)$	
3	> 80	> 26.80	> 70	< 6624	< 70	< 70	< 1	

纲化处理:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (1)$$

$$x_{ij}^* = -\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为标准样本值; x_{ij}^* 为无量纲化后的标准样本值; S_j 为指标 j 对应的标准样本的标准差; $\bar{x}_j$ 为指标 j 对应的标准样本的均值。

步骤4 指标权重的优化。设由上述步骤产生的标准样本的承载力经验等级及指标数值分别为 $\{y_i | i = 1, 2, \dots, m+2\}$ 和 $\{x_{ij}^* | i = 1, 2, \dots, m+2; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。依据表1, 将最低经验等级设为1、最高经验等级设为3, 承载水平越差则经验等级越高。PP法就是将多维数据 $\{x_{ij}^*\}$ 以向量 $\mathbf{a}$ 的方向为投影方向进行投影, 从而得到一维投影值 z_i [6]:

$$z_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij}^* \quad (3)$$

式中 a_j 为向量 $\mathbf{a}$ 的第 j 个分量。

在进行综合投影时为挖掘承载力评价指标与评价等级之间的相关性信息, 希望投影值 z_i 与经验等级 y_i 相关系数的绝对值 $|R|$ 尽可能大, 因而投影指标函数 [17] 可构造为

$$\max Q(\mathbf{a}) = |R| \quad (4)$$

为挖掘 AHP 法权重的不确定性信息, 本文进一步用 PP 法优化 AHP 权重。为了简便、不失一般性, 根据文献 [14, 16] 中 AHP 权重结果, 将本文所要求解的权重限定在合理的经验值范围内, 再根据投影方向与权重的关系确定投影方向的变化范围, 最后结合 PP 法进行优化, 进而确定权重。基于本文权重求解的需求, 式 (4) 所示投影指标函数的约束条件可设为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \\ 0.259 \leq a_1, a_2, a_3 \leq 0.447 \\ 0.118 \leq a_4 \leq 0.259 \\ 0.141 \leq a_5, a_{14} \leq 0.259 \\ 0.224 \leq a_6, a_8, a_{10} \leq 0.316 \\ 0.173 \leq a_7, a_{11} \leq 0.283 \\ 0.2 \leq a_9 \leq 0.3 \\ 0.158 \leq a_{12} \leq 0.283 \\ 0.122 \leq a_{13} \leq 0.259 \\ 0.1 \leq a_{15} \leq 0.259 \end{cases} \quad (5)$$

用加速遗传算法 [18] 求解由式 (4) 和式 (5) 组成的优化问题, 可得最优化投影方向 (向量 $\mathbf{a}$ 的方向), 根据 $\mathbf{a}$ 可得 a_j , 取指标 j 的权重 $w_j = a_j^2$ 。

步骤5 指标值联系数的确定。根据文献 [18] 中的式 (12) ~ (16) 求得各评价指标值 x'_{ij} (样本原始数值) 隶属于模糊集 k ($k = 1, 2, 3$) 的相对隶属度 v_{ijk} , 再将 v_{ijk} 代入式 (6) 可得样本 i 的评价指标值联系数 [19]。

$$u_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij1} + I \sum_{j=1}^n w_j v_{ij2} + J \sum_{j=1}^n w_j v_{ij3} \quad (6)$$

式中: u_i 为样本 i 的评价指标值联系数; $\sum_{j=1}^n w_j v_{ij1}$ 、 $\sum_{j=1}^n w_j v_{ij2}$ 、 $\sum_{j=1}^n w_j v_{ij3}$ 分别为相应三元联系数的同一度、差异度和对立度联系项 [19]; I 、 J 分别为差异度系数和对立度系数。

步骤6 减法集对势的计算。结合步骤4、5, 计算出样本 i 的减法集对势值 S_{fi} :

$$S_{fi} = \left(\sum_{j=1}^n w_j v_{ij1} - \sum_{j=1}^n w_j v_{ij3} \right) \left(1 + \sum_{j=1}^n w_j v_{ij2} \right) \quad (7)$$

据此可判断样本所处的承载力等级。参照“均分原则” [7], S_{fi} 可划分为如下5个势级 [14, 19]: $-1.0 \leq S_{fi} < -0.6$ 为反势, $-0.6 \leq S_{fi} < -0.2$ 为偏反势, $-0.2 \leq S_{fi} \leq 0.2$ 为均势, $0.2 < S_{fi} \leq 0.6$ 为偏同势, $0.6 < S_{fi} \leq 1.0$ 为同势。

2 实例验证

安徽省位于长江、淮河中下游, 与鲁豫鄂赣浙苏6省交界, 地跨两带, 北部属于温带季风气候, 南部属于亚热带季风气候。由于全省常年受季风影响, 导致全年降水量在时间和空间上分布较为不均 [20], 时间上主要表现为春夏季降水量明显多于秋冬季; 区域上则为皖南地区降水量和水资源占有量明显高于皖北及皖中地区。全省水资源开发程度较高, 但存在人均占有量不足等问题, 整体水资源承载情况不容乐观。

2.1 计算结果

为验证本文模型的适用性和可靠性, 依据建模6个步骤和图1中的评价指标及表1的等级标准对安徽省2005—2015年水资源承载力进行评价。表2为2007年、2010年和2013年各指标值联系数。将表2中各指标值联系数及步骤4求得的权重代入式 (6) 和式 (7), 可得各年份指标值的联系数及相应减法集对势值 S_{fi} , 同时参照文献 [16], 结合表1等级标准划分依据, 等级阈值记为 s_1 、 s_2 , 将其对应的减法集对势值设为新的评价标准中的1.5级和2.5级, 建立减法集对势和等级值的对应关系函数, 将2005—2015年的减法集对势值代入可得2005—2015年的评价等级值, 由此可得各年份最终评价等级如表3所示。

表 2 部分年份评价指标值联系数

Table 2 Connection number of index values of some years

评价指标	指标值联系数		
	2007 年	2010 年	2013 年
x_1	0.1228 + 0.5000I + 0.3772J	0.4315 + 0.5000I + 0.0685J	0 + 0.4936I + 0.5064J
x_2	0.0180 + 0.5000I + 0.4820J	0.2888 + 0.5000I + 0.2112J	0 + 0.4565I + 0.5435J
x_3	0 + 0.4983I + 0.5017J	0.3922 + 0.5000I + 0.1078J	0.3861 + 0.5000I + 0.1139J
x_4	0.0353 + 0.5000I + 0.4647J	0.0843 + 0.5000I + 0.4157J	0.0843 + 0.5000I + 0.4157J
x_5	0.4040 + 0.5000I + 0.0960J	0.3290 + 0.5000I + 0.1710J	0.3182 + 0.5000I + 0.1818J
x_6	0.1568 + 0.5000I + 0.3432J	0.2692 + 0.5000I + 0.2308J	0.4075 + 0.5000I + 0.0925J
x_7	0 + 0.4709I + 0.5291J	0.1123 + 0.5000I + 0.3877J	0.2993 + 0.5000I + 0.2007J
x_8	0.0350 + 0.5000I + 0.4650J	0.0167 + 0.5000I + 0.4833J	0.0067 + 0.5000I + 0.4933J
x_9	0.5637 + 0.4363I + 0J	0.5365 + 0.4635I + 0J	0.5109 + 0.4891I + 0J
x_{10}	0.4254 + 0.5000I + 0.1243J	0.2828 + 0.5000I + 0.362J	0.3722 + 0.5000I + 0.2130J
x_{11}	0.5512 + 0.4488I + 0J	0.5622 + 0.4378I + 0J	0.3242 + 0.5000I + 0.1758J
x_{12}	0.0931 + 0.5000I + 0.4069J	0.2324 + 0.5000I + 0.2676J	0.2920 + 0.5000I + 0.2080J
x_{13}	0 + 0.4542I + 0.5458J	0 + 0.4892I + 0.5108J	0.0480 + 0.5000I + 0.4520J
x_{14}	0 + 0.4578I + 0.5422J	0.1700 + 0.5000I + 0.3300J	0.0100 + 0.5000I + 0.4900J
x_{15}	0 + 0.4083I + 0.5917J	0 + 0.4413I + 0.5587J	0.0463 + 0.5000I + 0.4537J

表 3 安徽省水资源承载力评价结果

Table 3 Evaluation results of water resources carrying capacity of Anhui Province

年份	联系数	减法集对势	态势分析	评价等级
2005 年	0.1702 + 0.4770I + 0.3526J	-0.269	偏反势	2.18
2006 年	0.1520 + 0.4701I + 0.3778J	-0.332	偏反势	2.22
2007 年	0.1830 + 0.4843I + 0.3327J	-0.222	偏反势	2.15
2008 年	0.1880 + 0.4926I + 0.3193J	-0.196	均 势	2.13
2009 年	0.2106 + 0.4944I + 0.2949J	-0.126	均 势	2.08
2010 年	0.3010 + 0.4913I + 0.2076J	0.139	均 势	1.91
2011 年	0.2008 + 0.4924I + 0.3067J	-0.158	均 势	2.11
2012 年	0.2197 + 0.4984I + 0.2818J	-0.093	均 势	2.06
2013 年	0.2041 + 0.4928I + 0.3030J	-0.148	均 势	2.10
2014 年	0.2659 + 0.4971I + 0.2369J	0.044	均 势	1.97
2015 年	0.3220 + 0.4956I + 0.1823J	0.209	偏同势	1.86

2.2 结果分析

2.2.1 权重对比分析

为了进一步对 PP-AHP 方法求得的权重(以下简称“PP-AHP 权重”)与基于专家打分的 AHP 权重^[11,13]进行对比分析,将两种方法得出的权重结果列于表 4。由表 4 及相关计算结果可知:①AHP 权重由于受人为主观判断的不确定性影响,部分指标如 x_1 和 x_2 , x_6 、 x_8 和 x_{10} 等的权重存在完全相同的状况,说明 AHP 权重在反映多目标、多层次、多准则实际系统的复杂情形时相对比较粗糙,而 PP-AHP 方法可对指标权重进一步优化、细化;②PP-AHP 权重是在基于专家经验的 AHP 权重基础上,利用 PP 法进一步优化而得,这一权重求解方法将 AHP 专家经验定权与 PP 法客观定权紧密结合,既保留了贴近实际情况的优点,又避免了人为过度干预的缺点;③根据 PP-AHP 权重结果,对研究区水资源承载力影响最大的 5 个指标依次为 x_1 、 x_2 、 x_8 、 x_9 和 x_3 ,支撑力子系统对应的权重为 0.3574,压力子系统对应的

权重为 0.4247,调控力子系统对应的权重为 0.2178,由此可见,压力子系统在安徽省 2005—2015 年水资源承载力评价中占比最大,故压力子系统是对安徽省水资源承载力影响最大的子系统;④根据相关权重计算结果可得,PP-AHP 权重对应的目标函数值为 0.944,AHP 权重对应的目标函数值为 0.941。由于相关系数越大权重越优,故 PP-AHP 权重较 AHP 权重更接近最优解,表明了本文模型定权的合理性和有效性。

表 4 两种方法得到的权重结果对比

Table 4 Comparison of weight results obtained by two methods

评价指标	AHP 权重	PP-AHP 权重	评价指标	AHP 权重	PP-AHP 权重
x_1	0.1332	0.1382	x_9	0.0632	0.0818
x_2	0.1332	0.1241	x_{10}	0.0792	0.0803
x_3	0.1056	0.0805	x_{11}	0.0582	0.0744
x_4	0.0280	0.0146	x_{12}	0.0484	0.0358
x_5	0.0396	0.0603	x_{13}	0.0288	0.0373
x_6	0.0792	0.0720	x_{14}	0.0454	0.0601
x_7	0.0596	0.0455	x_{15}	0.0192	0.0102
x_8	0.0792	0.0848			

2.2.2 评价等级分析

为进一步对本文模型进行验证,选用文献[14,16]中联系熵方法和平均联系数模型的评价结果与本文模型计算结果进行对比,3种评价方法评价结果见图2。

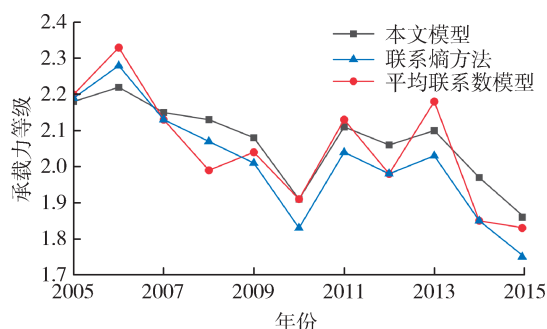


图2 3种评价方法评价结果比较

Fig.2 Comparison of evaluation results by three evaluation methods

a. 总体上,3种方法得到的评价结果虽在部分年份有一定程度的波动(主要是由不同评价方法下某些评价指标的权重差异所致),但总体均是呈转好趋势,整体趋势的变化间接说明了本文模型的评价结果与联系熵方法、平均联系数模型相一致。其中,本文模型与联系熵方法反映的水资源承载力等级变化趋势是一致的,而联系熵方法评价等级普遍略低于本文模型,说明联系熵方法反映的结果较为乐观,而本文模型对水资源承载力的评价更为谨慎。3种方法水资源承载力评价等级相近,但本文模型与平均联系数模型在2008—2009年等级趋势判断上相反,由于安徽省2008—2009年水资源承载力的各项评价指标较为稳定,不会导致这种差异产生,应该是年际降水量增加所致,说明平均联系数模型容易受外界因素干扰,不如本文模型的评价结果稳定。

b. 安徽省在2005—2007年水资源承载力相对较差,3种方法评价结果均表明2006年安徽省水资源承载状况最差,2015年最好。水资源承载力的变化情况和安徽省的年均降水量及国家相关政策密切相关。2005—2010年安徽省年降水量总体呈现上升趋势,水资源承载力等级也逐年降低。2006年后,随着国家加大水资源保护力度、推行节水政策,安徽省水资源承载力大大增强。2011—2013年随着我国经济的高速发展,相应的传统工业和基建规模加大,且降水量略有降低,水资源承载力出现了小幅波动,但并未恶化。2014年和2015年降水量大幅增长,安徽省水资源承载力继续逐步提高,于2015年达到最佳状态。总体上看,安徽省水资源承载力呈现出波动向好的发展趋势,这也与我国对环

境及水资源重视程度加大的国情相符。

c. 在与其他模型一致的基础上,本文模型的评价结果波动情况较联系熵方法和平均联系数模型更加平稳,也更符合在相关部门的治理下水资源承载力呈现稳中向好发展的实际情况,表明本文模型在水资源承载力评价中,抗干扰能力更强,不易出现异常的波动和变化。

3 结 语

本文提出了PP-AHP方法求解各评价指标的权重,再将其与减法集对势理论结合,据此构建了基于PP-AHP方法定权的水资源承载力评价模型。与传统的PP法相比,PP-AHP方法求得的权重不仅可以有效避免客观定权与主观认知不符的情况,还可以降低主观定权方法的随意性,较好地综合了专家的主观判断结果与数据本身的特点,能够为相关问题的进一步分析与评价提供可靠的数据,为权重的确定提供了一种新的思路。模型在安徽省水资源承载力评价中的应用结果也进一步验证了PP-AHP方法的准确合理性。本文模型不仅可用于区域水资源承载力评价问题,其在水资源空间均衡、黄河流域生态保护和高质量发展等评价问题中也具有应用前景。

参考文献:

- [1] 王晗,余文学,贾亦真. 郑州市水资源承载力综合评价[J]. 水利经济,2018,36(6):57-61. (WANG Han, YU Wenxue, JIA Yizhen. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Zhengzhou City[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6): 57-61. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 李宛谕,黄显峰,金国裕,等. 基于ANP-PP-SPA的区域洪灾风险评价模型研究[J]. 水利经济,2020,38(4): 45-50. (LI Wanyu, HUANG Xianfeng, JIN Guoyu, et al. Assessment model for regional flood risks based on ANP-PP-SPA[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4): 45-50. (in Chinese))
- [4] 肖迎迎,宋孝玉,张建龙. 基于主成分分析的榆林市水资源承载力评价[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4): 218-223. (XIAO Yingying, SONG Xiaoyu, ZHANG Jianlong. Assessment of water resources carrying capacity in Yulin based on principal component analysis[J].

- Agricultural Research in the Arid Area,2012,30(4):218-223. (in Chinese))
- [5] 黄勇辉,朱金福. 基于加速遗传算法的投影寻踪聚类评价模型研究与应用[J]. 系统工程,2009,27(11):107-110. (HUANG Yonghui,ZHU Jinfu. Study and application of PPC model based on RAGA in the clustering evaluation [J]. Systems Engineering, 2009, 27(11): 107-110. (in Chinese))
- [6] 李祚泳. 投影寻踪技术及其应用进展[J]. 自然杂志, 1997,20(4):224-227. (LI Zuoyong. Projection pursuit technology(PPT) and its progress of application [J]. Chinese Journal of Nature, 1997, 20(4): 224-227. (in Chinese))
- [7] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科技出版社,2000.
- [8] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 金菊良,陈鹏飞,张浩宇,等. 五元减法集对势及其在水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 30-35. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, ZHANG Haoyu, et al. Five-variable subtraction set pair potential and its application in trend analysis of water resource carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2020, 41(2): 30-35. (in Chinese))
- [11] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))
- [12] LIU Hongbo, LIU Yunfeng, LI Lingjun. Study of an evaluation method for water resources carrying capacity based on the projection pursuit technique [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2017, 17(5): 1306-1315.
- [13] 唱彤,酆建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 44-51. (CHANG Tong, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 44-51. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 李辉. 基于联系数的区域水资源承载力诊断评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- [16] 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))
- [17] 金菊良,魏一鸣,丁晶. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 431-434. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Projection pursuit model for comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Environmental Sciences, 2001, 21(4): 431-434. (in Chinese))
- [18] 金菊良,杨晓华,丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(4): 20-24. (JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(4): 20-24. (in Chinese))
- [19] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [20] 金菊良,酆建强,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))

(收稿日期:2020-12-15 编辑:熊水斌)