

基于投影寻踪法的城市节水型社会建设评价

杨幸福¹, 黄显峰²

(1. 南京市高淳区水务局, 江苏 南京 211300; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为综合评价城市节水型社会的建设状况, 从综合用水和节水、工业、农业、生活、水生态与环境、节水管理 6 个方面建立了评价指标体系, 采用基于实码加速遗传算法的投影寻踪评价模型, 并将层次分析法的计算结果作为参照, 以南京市高淳区为实例进行评价。计算得出高淳区 2012 年初步建成节水型社会, 2017 年将基本建成节水型社会, 与实际情况及规划预期相符。

关键词: 节水型社会; 投影寻踪法; 指标体系; 层次分析法; 综合评价

中图分类号: TV213.9

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 01-0034-07

Evaluation of water - saving society based on Projection Pursuit Method

Yang Xingfu¹, Huang Xianfeng²

(1. Gaochun Water-affair Authority, Nanjing 211300, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu)

Abstract: For evaluating the construction of city water-saving society comprehensively, index system is established from the 5 aspects of comprehensive water use and water saving, industry, agriculture, life, water ecology and water environment, water management evaluation. The projection pursuit evaluation model based on real coded accelerating genetic algorithm (RAGA) is used to evaluate the construction of city water-saving society in Gaochun District of Nanjing. The results show that Gaochun District initially built a water-saving society in 2012, and would basically build water-saving society in 2017, which is consistent with the reality and plan.

Key words: water-saving society; Projection Pursuit Method; index system; analytic hierarchy process; comprehensive evaluation

水是人类生存和发展不可替代的资源, 是经济社会发展的重要物质基础, 也是生态环境的控制性因素。随着经济发展和社会进步, 人们对水资源数量和质量的要求也越来越高, 但自然界可供利用的水资源是有限的, 经济社会对水的需求与供给的矛盾日趋突出。我国是世界上水资源严重短缺的国家之一, 人均占有量不到世界平均水平的 30%, 水资源危机已成为严重制约我国社会经济发展的瓶颈^[1]。在过去, 传统水资源规划长期

忽视节水的重要性, 只注重运用工程手段增加水资源供给, 往往造成社会总体资源的巨大浪费。而高效节水能通过减少取水量、用水量 and 水的浪费来提高水的使用效率, 是一种更具有可持续发展潜力的水资源保障措施, 也是解决我国水资源问题的一项战略性任务。节水的内涵并不是固定不变的, 处在不断扩展和完善中, 很多学者都对此做了深入的研究, 总结起来, 节水是指采取现实可行的综合措施, 挖掘区域水资源的潜力, 提高用水

收稿日期: 2016-10-17

作者简介: 杨幸福 (1969-), 男, 工程师, 主要从事水资源管理和保护工作。

效率,从而实现水资源的合理利用,具体体现在提高用水效率、减少排污量、协调生态环境几个方面^[2]。

2000年,《中共中央关于制定国民经济和社会发展的第十个五年计划的建议》第一次明确提出建立节水型社会,标志节水型社会建设的开端。2002年3月,全国第一个节水型社会试点—甘肃省张掖市的建立,标志着我国节水型社会建设工作正式开展,此后又在大连、石家庄、徐州等地开展节水型社会建设试点。经过多年的努力,我国的节水型社会建设已经取得了明显的成效。节水型社会评价作为节水潜力评价的进一步发展,有利于科学、准确地把握区域节水型社会建设水平及发展趋势,有助于决策部门制定合理的节水型社会发展规划,具有重要的现实意义^[3]。节水型社会评价是一个多指标评价问题,常用方法有物元分析法^[4]、主成分分析法^[5]、层次分析法^[6]、TOPSIS法^[7]、突变评价法^[8]等。

本文基于节水型社会建设的内涵和目标,构建相应的评价指标体系,运用投影寻踪法,以南京市高淳区为实例进行研究,评价其节水现状,检验相关节水规划编制的合理性,并为如何提高节水水平提供合适的建议。

1 节水型社会建设评价指标体系

1.1 评价指标体系的设计原则

评价节水型社会建设情况必须要有一套明确的指标体系,该指标体系的构建是评价节水型社会建设水平的核心部分,关系到最终评价结果的准确性和可靠度。节水型社会的建设关系到社会生活、经济发展、生态环境的诸多方面,渗透在社会的各个基本要素中,因此设计用来评价节水型社会的指标体系是一项兼具综合性、复杂性、广泛性的系统工程,须遵循以下基本原则。

系统性原则:要从系统的角度出发,所选指标应兼顾长远与当前、局部与整体,要能够综合反映影响节水型社会建设的各个子系统的相互关系。

层次性原则:由于评价对象是一个复杂的大系统,设计指标宜分层考虑,从目标层到准则层再到指标层,不同层级的指标不能并列,不同类型的指标不能合并。可以把它分解为若干亚系统,亚系统又可分解为若干子系统。

独立性原则:所选指标均应反映某个侧面情况,指标之间尽量不关联,不交叉,不冲突。

定性与定量相结合的原则:由于节水型社会建设牵涉面广,并不是所有指标都能够量化,特别是某些描述制度建设水平的指标只可定性描述。

区域性原则:鉴于各个地区的经济水平、地理条件、人文环境不尽一致,甚至差别很大,各地区宜结合自身实际情况,根据需要适当增加或缩减某些指标。

可操作性原则:所涉及指标内容应简单明了,易于收集和分析,通常以人均、合格率、增长率等表示。

1.2 评价指标体系构建

本文在已有研究的基础上,参照国家水利部发布的《节水型社会建设评价指标体系》,遵循上述各项原则,从综合用水和节水、工业、农业、生活、水生态与环境、节水管理6个方面进行分析,共选取16个具体指标,构建节水型社会建设评价指标体系。具体指标见表1。

2 节水型社会建设阶段评价

节水型社会建设阶段评价,就是根据一系列指标值,通过某种数学方法或模型,对一个地区节水建设所处阶段或变化趋势进行综合评价。由于实际操作中采用的指标往往是多维、非线性的,传统数据分析方法易受到过于数字化的限制,而投影寻踪法在处理和这种,尤其是非正态总体分布高维数据方面则有较好的表现。因此,本研究采用基于RAGA的投影寻踪法,对节水型社会的建设效果进行评价。

2.1 投影寻踪法的基本思想

投影寻踪法(Project Pursuit, PP)的基本思想是以某种组合将高维数据投影到低维(1~3维)子空间上,对于投影到的构形,采用投影指标函数来衡量投影暴露某种结构的可能性大小,寻找出使投影指标函数达到最优(即能反映高维数据结构或特征)的投影值,从而实现在低维空间上对高维数据结构的分析^[9-10]。

2.2 投影寻踪法的计算步骤

投影寻踪法的计算过程分为原始数据归一化处理、构造投影指标函数、优化指标函数和阶段评价几部分^[11]。其中,通过优化投影指标函数来寻求能最大程度暴露数据特征的投影方向是其核

表 1 节水型社会建设评价指标体系

目标层 (A)	准则层 (B)	指标层 (C)	计算方法
节水型社会建设效果	综合用水和节水 B1	人均综合用水量 C1	地区总用水量 / 人口总数
		万元 GDP 用水量 C2	地区用水总量 / GDP
		城市再生水回用率 C3	污水处理后回用的水量 / 污水处理后总水量 $\times 100\%$
	工业用水和节水 B2	万元工业增加值用水量 C4	当年该地区工业用水总量 / 当年工业增加值
		工业用水重复利用率 C5	工业重复利用水量 / 工业总用水量 $\times 100\%$
	农业用水和节水 B3	农田灌溉水利用系数 C6	灌溉农作物实际需要的水量 / 灌溉水量
		节水灌溉工程面积率 C7	投入使用的节水灌溉工程面积 / 有效灌溉面积 $\times 100\%$
	生活用水与节水 B4	城市供水管网漏损率 C8	供水过程中损失的水量 / 城镇总供水量 $\times 100\%$
		节水器具普及率 (含公共生活用水) C9	第三产业和居民生活用水使用节水器具数 / 总用水器具 $\times 100\%$
	水生态与环境 B5	水功能区水质达标率 C10	水功能区达标水面面积 / 划定水功能区水面总面积 $\times 100\%$
		集中式饮用水源地水质达标率 C11	集中式饮用水源地达标水面面积 / 划定水功能区水面总面积 $\times 100\%$
		水域面积率 C12	水域面积 / 研究区域总面积 $\times 100\%$
		城镇污水集中处理率 C13	城镇污水集中处理总量 / 污水总排放量 $\times 100\%$
	节水管理 B6	计划用水率 C14	计划内实际取水量 / 总取水量 $\times 100\%$
		用水定额达标率 C15	定性分析
		管理制度执行率 C16	定性分析

心内容。

(1) 样本评价指标集的归一化处理

设评价指标的数目为 m , 样本的个数为 n , 由于各指标的单位不尽一致, 为统一其变化范围都在 $0 \sim 1$ 之间, 可采用式 (1) 和式 (2) 进行归一化处理。

对于效益型指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^* - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

对于成本型指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}^*}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

式中:

x_{ij} —第 i 个样本第 j 个指标值归一化处理后的值;

x_{ij}^* —第 i 个样本的第 j 个指标原始值;

$x_{j\max}$ 和 $x_{j\min}$ —第 j 个指标的最大值和最小值。

(2) 构造投影指标函数

投影寻踪法把 m 维数据综合成以 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 为投影方向的一维投影值 Z_i , 从而完成

高维数据向低维数据的转化, 即:

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

综合投影指标时, 投影值 Z_i 的散布特征宜局部尽可能密集, 投影点团整体上尽可能散开。因此, 投影指标函数可以表达为:

$$Q(\mathbf{a}) = S_z D_z \quad (4)$$

式中:

S_z —投影值 Z_i 的标准差;

D_z —投影值 Z_i 的局部密度。

即:

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - E_z)^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (6)$$

式中:

E_z —投影值序列的平均值;

R —局部密度的窗口半径, 取值范围为

$$r_{\max} + \frac{m}{2} \leq R \leq 2m;$$

r_{\max} —样本之间距离的最大值, 在一般应用

中,一般取为投影样本方差的10%;

r_{ij} —样本之间的距离, $r_{ij} = |z_i - z_j|$;

$u(t)$ —单位阶跃函数,当 $t \geq 0$ 时, $u(t) = 1$; 当 $t < 0$ 时, $u(t) = 0$ 。

(3) 优化指标函数

对于同一个样本集, $Q(a)$ 只与投影方向 a 有关。因此,可以通过求解 $Q(a)$ 的最大值来估计最佳投影方向,即

$$\begin{aligned} \max Q(a) &= S_z D_z \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

对于这样一个较复杂的非线性有约束优化问题,本文用 RAGA 求解。RAGA 是一种改进的遗传算法,采用实数编码,先初始化父代群体,并行进行选择、交叉、变异操作,再用第一次、第二次演化迭代所产生的优秀个体所对应的变量变化区间作为变量新的初始变化区间,重复前面的过程,如此加速循环直到最优个体的目标函数值小于某一设定值或算法运行达到预定加速次数,并把当前群体中最佳个体或优秀个体的平均值指定为 RAGA 的结果^[12]。

求得了投影方向,再根据权重的概念,可以把投影向量各分量按式(8)转化为对应指标的权重。

$$W = (a^2(1), a^2(2), a^2(3), \dots, a^2(m)) \quad (8)$$

(4) 阶段评价

通过比较评价对象与各个阶段的投影值大小,确定所属等级或阶段。

3 实例研究

高淳区位于南京市最南端,北临溧水,东界溧阳,南部和西部与安徽郎溪、宣州、当涂三县(市)接壤,下辖淳溪街道、古柏街道、砖墙镇、阳江镇、漆桥镇、固城镇、东坝镇和桤溪镇2个街道6个镇及1个省级经济技术开发区,总面积801.8 km²,其中水域面积235.3 km²,占总面积的29.35%,2015年末全区总人口43万人,地区生产总值530亿元。高淳区被誉为南京市后花园,素有“日出斗金、日落斗银”的江南鱼米之乡的美誉,是国际慢城联盟中国总部所在地。

高淳区降水时空分布不均、本地水资源相对匮乏,特别是东部丘陵山区,本地水资源量在一

般干旱年和特殊干旱年均难以满足需水要求,在考虑采用开源、节流、保护水质、再生水回用等措施后,特殊干旱年份仍存在一定程度的缺水现象。高淳区工程型和水质型缺水在一定程度上制约了经济社会的可持续发展,迫切需要研究和解决水资源短缺的问题。因此,高淳区开展以节水减污为核心的节水型社会建设,对提高用水效率,减少废污水排放,建设水生态文明,促进水资源可持续利用,保障经济社会的持续、协调发展,具有重要意义。2012年,高淳区节水型城市创建通过省级验收,成为江苏省第一家县级节水型城市,城市节水工作再跃新台阶。近年来高淳区为加强节约用水工作的管理,改变以往重建轻管的现象,先后制定了一系列涉水管理制度办法和规划,成立了节约用水办公室,狠抓节水专项管理,积极推进节水先进技术,大力开展节水宣传教育,节水工作取得了初步的成效,2014年成功创建了江苏省节水型社会示范区。然而由于高淳区节水型社会建设起步较晚,仍存在诸多问题:本地水资源量相对不足,东西部水资源分配差异巨大;水利工程调蓄能力不足导致供水保障水平不高;农民大水漫灌习惯未彻底改变,部分工业企业用水水平较低,用水重复利用率不高;节水载体建设大面积推进困难;节水治污的激励、补偿政策不够完善,审批复杂,难以落实;主要河湖水质污染仍较严重,水系连通性较差,水体存在富营养化趋势。以南京市高淳区2012年(现状年)和2017年(目标年)的节水型社会建设情况为研究对象,应用投影寻踪模型对其进行评价。

3.1 节水型社会建设阶段划分

目前对节水型社会建设阶段划分还没有统一的标准,本文立足国内外社会经济水平,并结合高淳区的区位条件和节水现状,确定起步、发展、初步建成、基本建成、完全建成5个阶段^[13-14],不同阶段各项指标的划分标准见表2。

3.2 综合阶段评价模型的应用

3.2.1 评价过程

按照前述的步骤,用 Matlab 编写投影寻踪计算程序,其中 C1, C2, C4, C8 属于成本型指标,其他均为效益型指标。在 RAGA 优化过程中,确定初始种群规模为400,加速次数为20,变异概率为0.8,交叉概率为0.8。运行此程序,得到最佳投影向量 $a^* = (0.2546, 0.2736, 0.2338, 0.2630, 0.2334, 0.2561, 0.2460, 0.2378, 0.2582, 0.2475, 0.2457, 0.2243, 0.2552, 0.2446, 0.2615, 0.2599)$,

表 2 高淳区各年目标值及评价指标阶段划分

评价指标	2012 年	2017 年	不同阶段划分				
			I 起步	II 发展	III 初步建成	IV 基本建成	V 完全建成
C1 (m ³ /人)	759	753	>800	600 ~ 800	400 ~ 600	160 ~ 400	<160
C2 (m ³ /万元)	85.4	75	>500	300 ~ 500	120 ~ 300	50 ~ 120	<50
C3 (%)	12	30	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	>40
C4 (m ³ /万元)	18	13	>60	40 ~ 60	20 ~ 40	10 ~ 20	<10
C5 (%)	70	80	<30	30 ~ 50	50 ~ 70	70 ~ 90	>90
C6 (—)	0.62	0.65	<0.55	0.55 ~ 0.65	0.65 ~ 0.7	0.7 ~ 0.75	>0.75
C7 (%)	71.8	78	<20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	>80
C8 (%)	13.5	12	>25	20 ~ 25	12 ~ 20	8 ~ 12	<8
C9 (%)	92	96	<80	80 ~ 85	85 ~ 90	90 ~ 95	>95
C10 (%)	75	82	<60	60 ~ 75	75 ~ 80	80 ~ 90	>90
C11 (%)	100	100	<80	80 ~ 90	90 ~ 93	93 ~ 96	>96
C12 (%)	29.4	29.4	<5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 25	>25
C13 (%)	85	90	<60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	>90
C14 (%)	85	95	<80	80 ~ 85	85 ~ 90	90 ~ 95	>95
C15 (%)	75	85	<40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 90	>90
C16 (%)	80	88	<40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 90	>90

I、II、III、IV、V级对应的投影值分别为 0、1.9165、2.7228、3.3762、3.9489，高淳区 2012 基准年投影值为 3.0499，2017 目标年投影值为 3.3762。表明高淳区节水型社会建设在 2012 年处于初步建成阶

段，2017 年即达到基本建成阶段，符合实际情况。

3.2.2 评价成果分析

根据评价结果，如果按照《南京市高淳区节

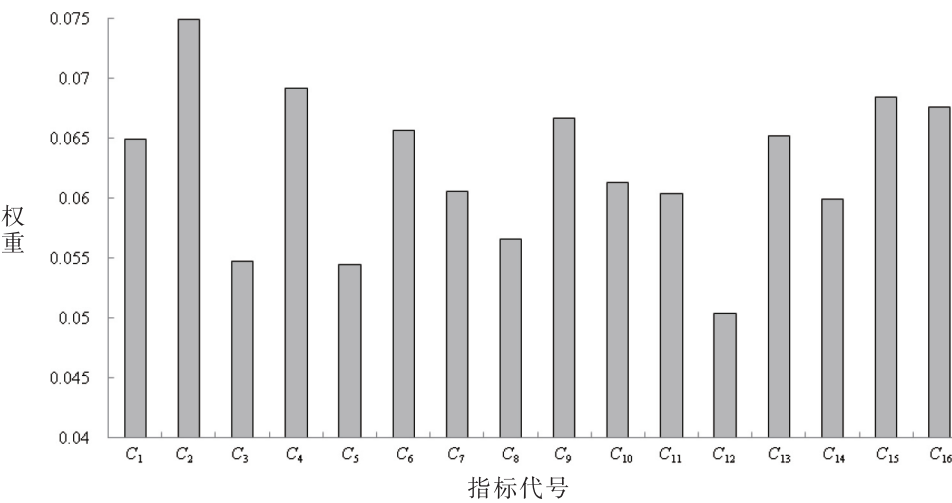


图 1 各项指标在综合评价中所占权重的柱状图

另外，最佳投影方向各分量的大小实质上反映了各参评指标对节水型社会建设阶段的贡献度，由式 (8) 可以求得各个指标对应的权重 $W=(0.0648, 0.0749, 0.0547, 0.0692, 0.0545, 0.0656,$

水型社会建设规划》的要求和部署，高淳区的节水型社会建设将从 2012 年的初步建成阶段提升到 2017 年的基本建成阶段，总体上是进步的，而且整体跨度不是很大，这也证明节水规划是合理的。从各指标所占的权重看，万元 GDP 用水量对

评价结果影响最大, 表明在节水型社会建设中, 要抛弃传统“唯 GDP 之上”的观念, 在发展经济的同时注重提高用水效率, 优化用水结构, 鼓励发展低耗水高产出产业。万元工业增加值用水量对评价结果的影响其次, 高淳区位于长江三角洲地区, 工业比较发达, 因此在节水型社会建设中需特别注意控制工业用水量, 改善三产用水比例。用水定额达标率和管理制度执行率对评价结果影响也较大, 这就要求在实际工作中不仅要强化制度建设, 更要加大政策的执行力度, 加强监督与管理, 使节水理念真正深入人心。

3.2.3 与层次分析法对照分析

为进一步验证本文所提评价模型的可靠性, 再用层次分析法(AHP)的评价结果作对比分析^[15]。AHP 是一种普遍适用的多目标、多层次决策及综合评价法, 具有实用性、系统性和简洁性等优点^[16], 计算步骤包括构造判断矩阵^[17]、确定指标权重、一致性检验、求子指标的权重, 此处不再赘述。最后将各指标的标准化值和权重代入式(9)算出待评价样本的综合得分, 比较综合得分和各阶段的分数范围, 从而完成评价。本次研究将节水型社会建设划分为 5 个阶段, 分别是起步阶段

(0 ~ 60 分)、发展阶段(61 ~ 70 分)、初步建成(71 ~ 80 分)、基本建成(81 ~ 90 分)、完全建成(91 ~ 100 分)。计算结果见表 3。

$$Q = \sum_{i=1}^m w_i q_i$$

(9)

式中:

- Q —待评价样本的综合得分;
- w_i —由层次分析法确定的第*i*个指标的权重;
- q_i —第*i*个指标的规范化值。

通过比较, 确定高淳区节水型社会建设在 2012 年处于初步建成阶段, 2017 年即达到基本建成阶段, 与本文所提模型得到的结论和实际情况相符, 从而表明用该模型来评价节水型社会建设是可靠的。

4 结语

从节水型社会建设的内涵和目标出发, 对综合用水和节水、工业、农业、生活、水生态与环境、节水管理 6 个方面进行分析, 共选取 16 个具体指标构建节水型社会建设评价指标体系, 立足国内外的经济社会发展水平和国家对节水型社会建设的总体部署, 把节水型社会分成 5 个阶段, 并制定对

表 3 层次分析法评价节水型社会建设的计算结果

目标层(A)	准则层(B)		指标层(C)		最终权重	2012 年		2017 年	
	指标	权重	指标	权重		规范化值	分项得分	规范化值	分项得分
节水型社会 建设效果	B1	0.326	C1	0.200	0.065	30	2.0	35	2.3
			C2	0.400	0.130	84.9	11.0	86.4	11.2
			C3	0.400	0.130	62	8.1	75	9.8
	B2	0.109	C4	0.750	0.082	82	6.7	85	7.0
			C5	0.250	0.027	80	2.2	85	2.3
	B3	0.065	C6	0.750	0.049	67	3.3	70	3.4
			C7	0.250	0.016	85.9	1.4	89	1.4
	B4	0.065	C8	0.750	0.049	78	3.8	80	3.9
			C9	0.250	0.016	84	1.3	92	1.5
			C10	0.351	0.038	70	2.7	82	3.1
	B5	0.109	C11	0.161	0.018	100	1.8	100	1.8
			C12	0.351	0.038	92	3.5	92	3.5
			C13	0.137	0.015	85	1.3	90	1.4
	B6	0.326	C14	0.2	0.065	70	4.6	90	5.9
			C15	0.2	0.065	77.5	5.0	85	5.5
			C16	0.6	0.196	80	15.7	88	17.2
总和		1.0		6.0	1.0	1228.3	74.3	1324.4	81.2

应的评价标准。

采用投影寻踪模型评价节水型社会建设所处阶段,该方法理论基础扎实,结果客观、通用性强。通过把计算得到的最佳投影方向转化为各个指标的权重,反映了各单项指标对整体状态的影响程度,对于规划的制定和决策有一定的参考价值和指导意义。评价结果与层次分析法所得结论和实际情况相符,验证了该模型是可行的,可以推广应用于其他节水型社会的评价。

我国幅员辽阔,南北、东西差异很大,而节水型社会建设的牵涉面又很广,因此在构建评价指标体系的时候,必须根据地区实际情况以及资料收集状态,从中选择适合本地区的指标,也可增补其他对该区域节水效果影响较大的指标,力求全面、客观。另外,投影寻踪评价模型的本质是将多维数据转化为一个综合指标来进行判断,操作过程中难免会有部分数据信息丢失,后续研究可进一步考虑调整密度窗宽^[18]等把这种影响降到最低;鉴于该方法的客观性,虽然所得各指标权重的相对大小大体与层次分析法接近,但在局部有些偏差,因此也可根据决策者的偏好和专家论证结果,将之与其他主观方法,如层次分析法、Delphi法结合,提出更具实际意义的耦合模型。

参考文献:

- [1] 陈静. 水质型缺水地区节水型社会评价体系与激励机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [2] 陈莹, 赵勇, 刘昌明. 节水型社会的内涵及评价指标体系研究初探[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 125-129.
- [3] 王巧霞, 袁鹏, 谢勇. 集对分析在节水型社会建设评价中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 134-137.
- [4] 赵世雯, 唐德善. 上海市节水型社会建设效果评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 173-176.
- [5] 车娅丽, 徐慧, 龚李莉, 等. 基于PSR模型和主成分分析法的节水型社会建设评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 124-127.
- [6] 王曦, 张永丽, 陈康. 基于AHP的节水型社会建设评价[J]. 人民黄河, 2012, 34(6): 80-82.
- [7] 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞. 基于TOPSIS法的广东省节水型社会建设评价[J]. 人民珠江, 2014, 35(3): 1-3.
- [8] 李绍飞, 唐宗, 王仰仁, 等. 突变评价法的改进及其在节水型社会评价中的应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 48-55.
- [9] 于国荣, 叶辉, 夏自强, 等. 投影寻踪分类模型的改进及在水质评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(6): 24-29.
- [10] 巩奕成, 张永祥, 丁飞, 等. 地下水水质评价的FA优化灰色关联投影寻踪模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 512-521.
- [11] 方国华, 黄显峰. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011, 162-168.
- [12] 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.
- [13] 陈莹, 刘昌明, 赵勇. 节水及节水型社会的分析和对比评价研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 82-87.
- [14] 黄乾, 张保祥, 黄继文, 等. 基于熵权的模糊物元模型在节水型社会评价中的应用[J]. 水利学报, 2007(S1).
- [15] 颜志衡, 袁鹏, 黄艳, 等. 节水型社会模糊层次评价模型研究[J]. 水电能源科学, 2010(4): 35-39.
- [16] 杨玮, 陈军飞, 王慧敏, 等. 江苏省节水型社会建设评价研究[J]. 水利经济, 2008, 26(1): 5-8.
- [17] GB/T28284-2012, 节水型社会评价指标体系和评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [18] 裴巍, 付强, 刘东, 等. 基于改进投影寻踪模型黑龙江省土地资源生态安全评价[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(7): 92-100.

(责任编辑: 华智睿)