

基于云模型的水利现代化评价方法与应用

黄显峰,刘展志,方国华

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:从防洪除涝减灾、水资源保障、水环境与河湖生态保护、农村水利保障、供排水工程、水管理服务以及水利发展保障 7 个方面建立了水利现代化水平评价指标体系,共 27 项指标,确定了各项指标的评价等级与标准,构建云模型对江苏省新沂市水利现代化水平进行了评价。结果表明,新沂市水利现代化水平在 2015 年现状的评价值分别为 85.53(云模型)和 84.56(集对分析),均处于基本现代化阶段,与实际情况相符;而 2020 年评价值为 93.71(云模型)和 91.38(集对分析),预测能达到全面现代化,与“十三五”规划目标相符,验证了云模型评价方法的有效性和适用性。

关键词:水利现代化;指标体系;云模型;集对分析;新沂市

中图分类号:TV211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)06-0054-08

Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model//HUANG Xianfeng, LIU Zhanzhi, FANG Guohua (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Water conservancy modernization(WCM) forms an important part of the national modernization. To make the evaluation of WCM be more scientific and reasonable, an evaluation index system consisting of seven sub systems and twenty seven indices is established, including flood control and waterlogged reduction, water resources guarantee, water environment and ecological protection, rural water project guarantee, urban drainage and supply, water management service and water conservancy development guarantee. A cloud model(CM), which has both fuzziness and randomness is used for the evaluation. The CM determines the comprehensive evaluation index weight by using backward and forward cloud generator, and calculates the rank by condition cloudgenerator. The paper uses set pair analysis as a comparative analysis(SPA). A case study is put forward with XinyiCity of Jiangsu province. The results show that, the evaluation values are 85.53(CM) and 84.56(SPA)in 2015 and the level of WCM in Xinyi City is basic modernization, consistent with the actual situation. In 2020, the evaluation values are 93.71(CM) and 91.38(SPA), both can achieve the level of comprehensive modernization, consistent with the 13th Five-Year Plan. The effectiveness and applicability of the CM is verified.

Key words: water conservancy modernization; evaluation index system; cloud model; set pair analysis; Xinyi City

21 世纪初,水利部成立了中国水利现代化进程研究小组,对我国水利现代化意义和内涵进行探讨,建立了相应的评价指标体系。水利现代化建设是现代经济社会发展不可或缺的基础性支撑,更是改善生态环境不可替代的保障系统,具有鲜明的公益、基础和战略性质^[1]。水利现代化进程同时也是我国经济社会实现现代化发展的重要组成部分,根据国内外水利发展阶段,水利现代化将是水利发展的必经之路。目前国内有一些学者对水利现代化提出了自己的分析见解。喻君杰等^[2]提出了江苏省水利现代化的目标内涵,同时构建了 6 大体系共 22 项指标系数的江苏水利现代化指标体系;严玲^[3]对苏南水利现代化和指标体系进行了研究,并以此开发了水利现代化软件;张颖等^[4]结合苏北实际情况进行

了水利现代化指标体系的重新赋权研究。目前针对指标体系评价常用方法有多指标综合评判、层次分析法、模糊综合评价、TOPSIS 等^[5]。这些方法中有的计算复杂、主观性强,有的定性成分过多、权重较难确定。云模型是一种新的评价方法,该方法兼具模糊性和随机性,比较客观精确,能够较好实现定性定量之间的转化。胡尊芳等^[6]利用云模型分析了东平湖枯水期地下水水质评价;张金鑫等^[7]采用云模型对流域内人水和谐关系进行分析;乔丹颖等^[8]采用云模型来评价中运河的安全性。然而目前还没有学者采用云模型进行水利现代化评价,本文在前人研究基础上,参照徐州市水利水务现代化评价指标体系,以江苏省新沂市为实例对云模型应用于水利现代化评价进行了探讨。

1 水利现代化内涵

水利现代化是指由传统水利向现代化水利以及可持续水利的转变,以达到强化水利保障体系的能力,推进人与自然和谐相处并保持生态文明发展进步的目的。水利现代化建设是一项涉及不同领域、层次、阶段的系统工程,水利现代化的最终目的是为了实 现水资源的循环可持续利用,人水和谐,促进经济社会不断发展进步。根据我国的内涵要求并结合各地区规划与实际^[2, 9],可以概括水利现代化的内涵要求为:以经济社会可持续发展以及人与自 然和谐相处为原则,以先进科学的治水理念为指导思想,并基于经济社会发展进步的要求,通过现代化装备技术和管理手段,高效全面地改造传统水利,并建立起保障经济社会安全与可持续发展的防洪减灾系统、水资源优化配置与有效供给系统、水环境保护系统和水利发展服务系统;最终实现人水协调、优化配置、防洪减灾、山清水秀、供水保证、科学管理、高效运行、法制健全的目标,不断提高社会的安全、富裕与舒适水平,不断促进社会经济的全面、协调与可持续发展。

2 水利现代化评价指标体系

2.1 评价指标体系

目前传统水利仍然是通过水利工程的建造来满

足人类各种需求,使人类社会经济不断发展进步,而现代水利往往是通过加强水资源的优化配置,来达到水资源的循环高效利用,促进社会进步^[10]。水利现代化评价指标体系以及评价方法均是水利现代化的核心问题,评价体系中应包括定性、定量和综合评价三部分^[11]。遵循国家水利发展方针,把水利现代化目标任务作为基础,同时结合地区自然环境条件、水利各项现状以及社会经济支撑能力,水利现代化的总体要求和目标可大致概括为:防洪减灾安全可靠、河湖生态优美健康、灌排标准全面提升、管理体系健全高效、水资源配置优化合理、调度运行科学有序。

水利现代化评价各指标的选取需遵循简明、科学、实用的原则,同时要借鉴国内外经验和教训,既要定性定量相结合,也要系统性和操作性兼具,还要注意可比性和代表性。本文以水利部及江苏省关于水利现代化建设的总体要求以及各地区县域水利现代化要求与目标为依据,参照引用徐州市水利水务现代化评价指标体系^[12],选取了包括防洪除涝减灾、水资源保障、水环境与河湖生态保护、农村水利保障、供排水工程、水管理服务和水利发展保障体系 7 个方面的 27 项指标(表 1)。其特点是,在江苏水利现代化评价指标体系^[13]的基础上增加了供排水工程子体系,包括城市供水水质综合合格率、区域供水覆盖率、城市雨水排水达标率、城市污水集中处理

表 1 水利现代化评价指标体系

体系	指标	指标含义
防洪除涝减灾体系 B_1	流域防洪达标率 C_1	防洪堤防中达标长度的比例
	区域防洪除涝达标率 C_2	堤防达标长度的比例和地区保护区面积与整体保护区面积比例
	城市防洪除涝达标率 C_3	城区防洪达标率和城区除涝保护区面积占整体保护区面积比例
水资源保障体系 B_2	供水保证率 C_4	供水量在长期供水均能充分满足的年数的概率
	万元 GDP 用水量 C_5	年用水总量与年 GDP 比值
	万元工业增加值用水量 C_6	年工业用水总量与年工业增加值比值
	城市污水处理回用率 C_7	城市污水处理总量与城市总排放污水比值
水环境与河湖生态保护体系 B_3	水功能区水质达标率 C_8	水功能区水质达标数与水功能区总量的比值
	集中式饮用水源地水质达标率 C_9	集中式饮用水源地水质达标数占集中式饮用水源地总数的比例
	水域面积率 C_{10}	水域面积占地区总国土面积的比值
	水土流失治理率 C_{11}	水土流失区经过治理已达标面积占总水土流失面积的比例
农村水利保障体系 B_4	旱涝保收田面积率 C_{12}	达到除涝、灌溉等旱涝要求的农田面积与总耕地面积的比值
	灌溉水利用系数 C_{13}	可被农作物吸收的有效水数量与灌溉系统总水量比值
	农村河道有效治理率 C_{14}	农村河道经疏浚引排后达到治理要求的河道长度与河道总长度的比值
城市供排水工程体系 B_5	城市供水水质综合合格率 C_{15}	城市各项指标达标的供水水量与总供水量的比值
	区域供水覆盖率 C_{16}	区域供水达到的面积与整个区域面积的比值
	城市雨水排水达标率 C_{17}	城市雨水达标排放与总排放雨水的比值
	城市污水集中处理达标率 C_{18}	城镇污水处理厂污水处理量占总生活污水量的比值
水管理服务体系 B_6	水资源管理达标率 C_{19}	反映水资源管理现代化水平
	骨干河湖管理达标率 C_{20}	反映骨干河道、湖泊、水库的管理状况
	水利工程设施完好率 C_{21}	分为骨干工程完好率以及农水工程完好率
	防汛防旱管理与应急能力 C_{22}	反映防汛防旱综合管理能力
	基层管理服务水平 C_{23}	反映基层水利管理队伍的服务水平和能力
水利发展保障体系 B_7	重要水管理事项有效实施率 C_{24}	反映水利法规健全程度、行政能力、管理水平
	水利投入政策到位率 C_{25}	反映各项水利投入政策执行情况
	人才结构达标率 C_{26}	反映水利人才队伍建设情况
	水利科技信息化水平 C_{27}	反映水利科技创新能力和信息技术应用水平

达标率 4 项指标及城市污水处理回用率指标。

2.2 评价等级与标准

考虑经济社会发展与全面小康社会的建设相适应,将水利现代化水平分为 4 个等级 ($N=4$):起步期、初等现代化、基本现代化和全面现代化,最终评价等级也使用这 4 个等级,并确定各评价指标不同等级的标准值。水利现代化指标体系评价等级与标准见表 2。

3 水利现代化指标体系云模型 (CM) 评价

3.1 云模型原理

云模型是一种兼具模糊性和随机性的定性与定量转换模型,通过具有一定随机性的样本点的值分析计算样本的关联性、模糊性以及随机性^[14-15],由 3 个特征值(期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e)通过云发生器来实现样本定性和定量之间的转换。云模型不仅可以分析求解指标权重,也可以计算指标等级^[5,16]。

期望 E_x :与统计学中样本的期望概念相同,是所有云滴的平均值,也是最具样本特色的值;熵 E_n :由样本本身随机性、模糊性定义,是样本的不确定性度量,也反映云滴之间的离散和模糊程度;超熵 H_e :由熵随机性、模糊性定义,故可以称为熵的熵,反映熵的不确定性度量。

云模型中的云发生器一般包括正向、逆向和条件云发生器 3 种:①正向云发生器 (FCG) 即通过云的数字特征 E_x 、 E_n 、 H_e 来产生定量云滴 x_i 与隶属度 μ_i 的过程,是由定性概念向定量指标的变化,如图 1 所示。②逆向云发生器 (BCG) 则是将一定数量的精确数值 x_i 转化为其定性概念 E_x 、 E_n 、 H_e ,并根据 3 个数值特征做分析计算,是由定量数值向定性概

念的转换,如图 2 所示。③条件云发生器由 X 云发生器与 Y 云发生器构成,他们均属于特殊的正向云发生器,即已知 E_x 、 E_n 、 H_e ,同时已知特定条件 X 或者 Y 来产生隶属度。通常由 X 与 Y 云发生器共同生成一个单条件单规则发生器,如图 3 所示。其中,本文通过结合逆向与正向云发生器来计算体系权重,并用 X 条件云发生器来计算各个指标的等级隶属度。

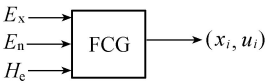


图 1 正向云发生器

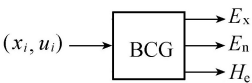


图 2 逆向云发生器

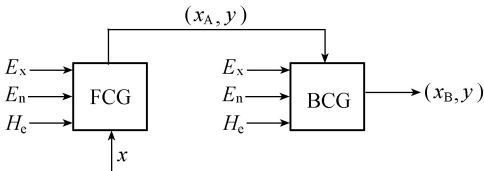


图 3 单条件单规则云发生器

3.2 云模型确定指标权重

本文在计算权重时先用逆向云发生器求得 3 个特征值,再用正向云发生器补充云滴获得权重,具体计算步骤如下^[17]:

步骤 1:收集一定数量专家各自的初始权重评价。

步骤 2:通过逆向云发生器求解 E_x 、 E_n 、 H_e ;根据样本值 x_i 和样本数 n 求 E_x 与样本方差 s^2 :

表 2 水利现代化评价等级与标准

评价等级	B ₁			B ₂			B ₃			B ₄				
	C ₁ /%	C ₂ /%	C ₃ /%	C ₄ /%	C ₅ /m ³	C ₆ /m ³	C ₇ /%	C ₈ /%	C ₉ /%	C ₁₀ /%	C ₁₁ /%	C ₁₂ /%	C ₁₃ /%	C ₁₄ /%
全面现代化	[90,100]	[90,100]	[90,100]	[90,100]	[0,90]	[0,20]	[50,100]	[80,100]	[90,100]	≥9	[80,100]	[80,100]	[65,100]	[85,100]
基本现代化	[80,90]	[80,90]	[80,90]	[80,90]	[90,110]	[20,22]	[40,50]	[70,80]	[80,90]	[8,9]	[70,80]	[70,80]	[55,65]	[75,85]
初等现代化	[70,80]	[70,80]	[70,80]	[70,80]	[110,120]	[22,24]	[30,40]	[60,70]	[70,80]	[7,8]	[60,70]	[60,70]	[45,55]	[65,75]
起步期	[0,70]	[0,70]	[0,70]	[0,70]	≥120	≥24	[0,30]	[0,60]	[0,70]	[0,7]	[0,60]	[0,60]	[0,45]	[0,65]
评价等级	B ₅				B ₆				B ₇					
	C ₁₅ /%	C ₁₆ /%	C ₁₇ /%	C ₁₈ /%	C ₁₉ /%	C ₂₀ /%	C ₂₁ /%	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄ /%	C ₂₅ /%	C ₂₆ /%	C ₂₇	
全面现代化	[90,100]	[90,100]	[80,100]	[80,100]	[90,100]	[90,100]	[85,100]	[90,100]	[80,100]	[90,100]	[90,100]	[80,100]	[80,100]	
基本现代化	[80,90]	[80,90]	[70,80]	[70,80]	[80,90]	[80,90]	[75,85]	[80,90]	[70,80]	[80,90]	[80,90]	[70,80]	[70,80]	
初等现代化	[70,80]	[70,80]	[60,70]	[60,70]	[70,80]	[70,80]	[65,75]	[70,80]	[60,70]	[70,80]	[70,80]	[60,70]	[60,70]	
起步期	[0,70]	[0,70]	[0,60]	[0,60]	[0,70]	[0,70]	[0,65]	[0,70]	[0,60]	[0,70]	[0,70]	[0,60]	[0,60]	

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2 \quad (2)$$

根据样本均值求熵 E_n :

$$E_n = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x|^2 \quad (3)$$

根据样本方差和熵求超熵 H_e :

$$H_e = \sqrt{s^2 - E_n^2} \quad (4)$$

步骤3:根据所求的 E_x 、 E_n 、 H_e ,用正向云发生器补充云滴,并根据最大隶属度原则^[8]求得权重,假设重复生成的云滴数为1000,计算正态随机数 E'_n 、正态随机数 E'_x 、度 μ_i :

$$E'_n = \text{randn}(1)H_e + E_n \quad (5)$$

$$E'_x = \text{randn}(1)E'_n + E_x \quad (6)$$

$$\mu_i = \exp\left[\frac{-(E'_x - E_x)^2}{2E_n'^2}\right] \quad (7)$$

式中 $\text{randn}(1)$ 为随机数。重复1000次,得到1000个云滴 (E'_x, μ_i) ,再求均值即可得到各个指标的权重,最后进行归一化处理。

3.3 云模型计算指标等级

确定评价目标指标值 X 与评价指标等级标准 S 后,通过 X 条件云发生器来计算各指标评价等级。

首先计算3个特征值并根据正反向指标求解各个指标在各等级下的隶属度^[18,19]

$$\begin{cases} E_{x_{ij}} = \frac{S_{ij,\max} + S_{ij,\min}}{2} \\ E_{n_{ij}} = \frac{S_{ij,\max} - S_{ij,\min}}{6} \\ H_e = C \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_{ij,\max}, S_{ij,\min}$ 分别为第 i 个指标在第 j 个等级中的上下限; $E_{x_{ij}}, E_{n_{ij}}$ 分别为第 i 项指标在 j 评价等级中的期望和熵。这里 $H_e = 0.005$,取云滴数 $m = 1000$ 。

然后求正态随机数 $E'_{n_{ij}}$:

$$E'_{n_{ij}} = \text{randn}(1)H_e + E_{n_{ij}} \quad (9)$$

指标归一化处理时,正向指标采用式(10)~(12),反向指标采用式(13)~(15)计算:

$$\mu_{ij}(x) = \exp\left[\frac{-(x_i - E_{x_{ij}})^2}{2E_{n_{ij}}'^2}\right] \quad (j=1,2,\dots,N; E_{x_{iN}} \leq x_i \leq E_{x_{i1}}) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & (j=1, x_i > E_{x_{i1}}) \\ \mu_{ij}(x) = 0 & (j=2,3,\dots,N; x_i > E_{x_{i1}}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & (j=N, x_i < E_{x_{i1}}) \\ \mu_{ij}(x) = 0 & (j=1,2,\dots,N-1; x_i < E_{x_{iN}}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{ij}(x) = \exp\left[\frac{-(x_i - E_{x_{ij}})^2}{2E_{n_{ij}}'^2}\right] \quad (j=1,2,\dots,N; E_{x_{i1}} \leq x_i \leq E_{x_{iN}}) \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & (j=1, x_i < E_{x_{i1}}) \\ \mu_{ij}(x) = 0 & (j=2,3,\dots,N, x_i < E_{x_{i1}}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \mu_{ij}(x) = 1 & (j=N, x_i > E_{x_{iN}}) \\ \mu_{ij}(x) = 0 & (j=1,2,\dots,N-1, x_i > E_{x_{iN}}) \end{cases} \quad (15)$$

对每个样本重复1000次求出最后的确定度:

$$\mu_{ij}(x) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \mu_{ijk} \quad (16)$$

求出一个样本对应的4个等级指标后进行归一化处理:

$$\mu_{ij}^*(x) = \frac{\mu_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^4 \mu_{ij}(x)} \quad (17)$$

通过级别特征值的方法进行评价等级评判^[20],将最终评价等级以百分制形式表示:

$$h_i = \sum_{j=1}^4 \mu_{ij}^*(x) k \quad (18)$$

式中 k 为各等级特征值。

整体评价等级评判:

$$h = \sum_{i=1}^7 h_i \mu_i \quad (19)$$

式中 μ_i 为 i 体系的权重。

3.4 云模型评价流程

云模型具体应用实现过程如图4所示。

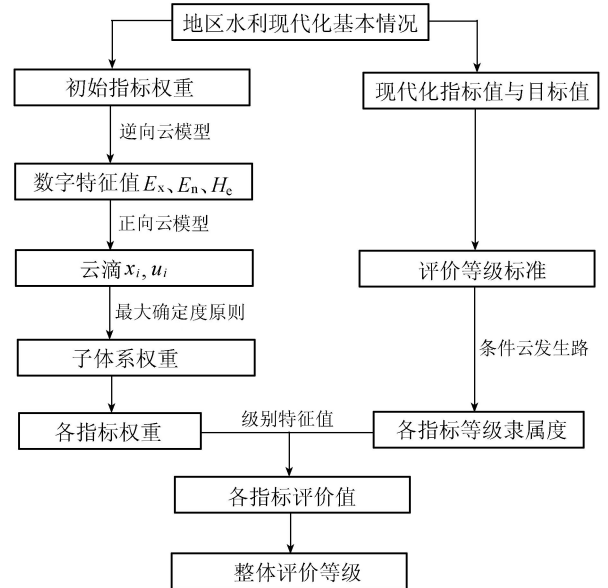


图4 云模型评价流程

4 实例研究

4.1 江苏省新沂市水利现代化基本情况

水利现代化是经济社会现代化不可或缺的一

环,是各领域现代化的基础与保障,制约影响整体现代化进程。新沂市位于江苏省北部边缘,是徐州市的一个县级市,总面积1 616 km²。新沂市主要水系是“四河一湖”,即中运河、沂河、沭河、新沂河和骆马湖,水资源总量丰富,达18.9 亿 m³,地表水资源主来源于沂河、沭河、骆马湖和高塘、阿湖两座中型水库。多年来,新沂市先后兴建了大量的水利工程,形成了多级控制的工程体系,开挖、疏浚了16 条河道;兴建堤防总长度673 km;修筑了30 座中小型水库,水库总库容达到10 344 万 m³;建设泵站264 座,水闸191 座,灌区8 个,基本形成了水利现代化体系,为促进新沂市经济社会发展和改善民生提供了重要的基础保障。

4.2 云模型指标权重计算

首先收集10 位专家对于各指标权重的意见,构建判断矩阵,并把通过层次分析法计算出的专家评价权重作为初始权重(表3),然后再通过云模型的逆向、正向云发生器模拟1 000 位专家的评价权重,通过求均值确定各指标的最终权重。

表3 层次分析法确定各系统初始权重					
体系	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5
B ₁	0.1800	0.1761	0.1822	0.1786	0.1821
B ₂	0.1600	0.1598	0.1604	0.1612	0.1612
B ₃	0.1400	0.1377	0.1374	0.1388	0.1385
B ₄	0.1200	0.1203	0.1193	0.1208	0.1200
B ₅	0.1200	0.1232	0.1242	0.1197	0.1196
B ₆	0.1600	0.1636	0.1566	0.1632	0.1585
B ₇	0.1200	0.1193	0.1199	0.1177	0.1199
体系	专家6	专家7	专家8	专家9	专家10
B ₁	0.1799	0.1778	0.1816	0.1821	0.1806
B ₂	0.1614	0.1604	0.1598	0.1586	0.1606
B ₃	0.1393	0.1454	0.1390	0.1405	0.1387
B ₄	0.1200	0.1199	0.1220	0.1213	0.1216
B ₅	0.1196	0.1195	0.1186	0.1156	0.1179
B ₆	0.1583	0.1566	0.1580	0.1610	0.1602
B ₇	0.1215	0.1205	0.1210	0.1209	0.1204

各指标体系权重的云模型图像如图5~11 所示。

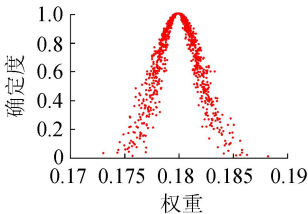


图5 防洪除涝减灾体系指标权重

由图5~11 可以看出,各指标体系的模拟权重呈正态分布,通过求均值来求出对应的权重分别为0.1801、0.1603、0.1395、0.1205、0.1198、0.1596、0.1202。重复以上步骤,可计算出各子体系中各指标的权重,结果见表4。

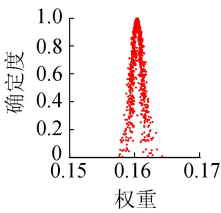


图6 水资源保障体系指标权重

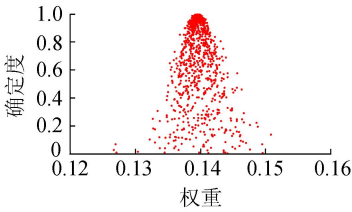


图7 水环境与河湖生态保护体系指标权重

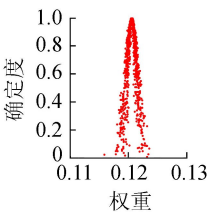


图8 农村水利保障体系指标权重

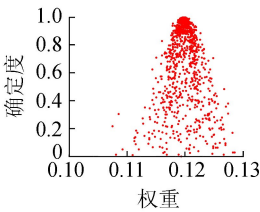


图9 城市供排水工程体系指标权重

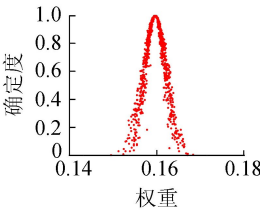


图10 水管理服务体系指标权重

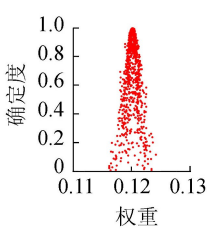


图11 水利发展保障体系指标权重

由表4 可以看出,不同指标权重差距较大,流域防洪达标率占比最大,达到0.0699;供水保证率次之,为0.0599;其余大部分指标权重介于0.02~0.06 之间;水域面积率与水利科技信息化水平的比重最低,均为0.0196。

表 4 云模型确定的指标权重

指标体系	E_x	E_n	H_e	在子体系 中的权重 μ	整体 权重 μ^*	指标体系	E_x	E_n	H_e	在子体系 中的权重 μ	整体 权重 μ^*
B_1	0.1801	0.0020	0.0004	0.1801	0.1801	B_5	0.1198	0.0020	0.0014	0.1198	0.1198
C_1	0.3883	0.0029	0.0006	0.3883	0.0699	C_{15}	0.2516	0.0110	0.0025	0.2516	0.0301
C_2	0.3057	0.0059	0.0007	0.3057	0.0551	C_{16}	0.2490	0.0104	0.0008	0.2490	0.0298
C_3	0.3060	0.0067	0.0026	0.3060	0.0551	C_{17}	0.2500	0.0064	0.0020	0.2500	0.0300
B_2	0.1603	0.0008	0.0003	0.1603	0.1603	C_{18}	0.2494	0.0054	0.0039	0.2494	0.0299
C_4	0.3739	0.0078	0.0040	0.3739	0.0599	B_6	0.1596	0.0025	0.0004	0.1596	0.1596
C_5	0.3126	0.0078	0.0048	0.3126	0.0502	C_{19}	0.1855	0.0036	0.0014	0.1854	0.0296
C_6	0.1897	0.0038	0.0011	0.1897	0.0304	C_{20}	0.1884	0.0069	0.0026	0.1884	0.0302
C_7	0.1238	0.0029	0.0009	0.1238	0.0198	C_{21}	0.2481	0.0062	0.0018	0.2481	0.0396
B_3	0.1395	0.0018	0.0013	0.1395	0.1395	C_{22}	0.2527	0.0056	0.0025	0.2527	0.0403
C_8	0.4257	0.0033	0.0012	0.4258	0.0594	C_{23}	0.1254	0.0028	0.0014	0.1254	0.0200
C_9	0.2156	0.0092	0.0046	0.2156	0.0301	B_7	0.1201	0.0009	0.0005	0.1201	0.1202
C_{10}	0.1404	0.0074	0.0030	0.1404	0.0196	C_{24}	0.2493	0.0168	0.0116	0.2494	0.0299
C_{11}	0.2182	0.0147	0.0050	0.2182	0.0304	C_{25}	0.4217	0.0191	0.0130	0.4217	0.0507
B_4	0.1205	0.0009	0.0003	0.1205	0.1205	C_{26}	0.1656	0.0036	0.0017	0.1656	0.0199
C_{12}	0.4070	0.0245	0.0016	0.4070	0.0490	C_{27}	0.1633	0.0063	0.0023	0.1633	0.0196
C_{13}	0.2520	0.0170	0.0113	0.2520	0.0304						
C_{14}	0.3410	0.0123	0.0039	0.3410	0.0411						

4.3 云模型评价等级计算

根据新沂市水利现代化指标现状值与未来值,通过条件云发生器,可以计算各指标的等级隶属度,然后通过级别特征值法可以求出各体系的评价值与整体评价等级,具体计算结果见表 5 和表 6。

分析结果显示 2015 年水利现代化评价中水资源保障体系的评价等级较差,只有 73.16,其余大部分体系评分均介于 80~90 之间,而农村水利保障体系评分最高达到 90.19,通过云模型最终计算得到的 2015 年整体评分为 85.53,属于基本现代化,与

表 5 云模型确定的 2015 年及 2020 年指标等级

体系	指标	2015 现状 指标/%	2020 目标 指标/%	2015 年指标等级隶属度				2020 年指标等级隶属度			
				全面现代化	基本现代化	初等现代化	起步期	全面现代化	基本现代化	初等现代化	起步期
B_1	C_1	97.0	100.0	1	0	0	0	1	0	0	0
	C_2	75.0	85.0	0	0	0.9972	0.0028	0	1	0	0
	C_3	75.0	85.0	0	0	0.9972	0.0028	0	1	0	0
B_2	C_4	85.0	90.0	0	0.9998	0	0.0002	0.4990	0.5010	0	0
	C_5	150.0	100.0	0	0	0	1	0.0012	0.9988	0	0
	C_6	24.0	20.0	0.0066	0	0.5007	0.4927	0.4976	0.5024	0	0
	C_7	15.0	25.0	0	0	0	1	0	0	0	1
B_3	C_8	70.0	80.0	0	0.4930	0.4921	0.0149	0.4998	0.5002	0	0
	C_9	100.0	100.0	1	0	0	0	1	0	0	0
	C_{10}	8.7	8.7	0.0211	0.9789	0	0	0.0210	0.9790	0	0
	C_{11}	70.0	80.0	0	0.4928	0.4923	0.0149	0.4999	0.5001	0	0
B_4	C_{12}	72.0	77.0	0	0.9925	0.0070	0.0005	0.0011	0.9989	0	0
	C_{13}	0.58	0.6	0.0003	0.9997	0	0	0.0006	0.9994	0	0
	C_{14}	80.0	80.0	0	0.9999	0	0.0001	1	0	0	0
B_5	C_{15}	98.0	98.0	1	0	0	0	1	0	0	0
	C_{16}	85.0	95.0	0	1	0	0	1	0	0	0
	C_{17}	65.0	75.0	0	0	0.9978	0.0022	0	1	0	0
	C_{18}	60.0	75.0	0	0	0.5	0.5	0	1	0	0
B_6	C_{19}	85.0	90.0	0	1	0	0	0.4995	0.5005	0	0
	C_{20}	85.0	95.0	0	1	0	0	1	0	0	0
	C_{21}	75.6	83.0	0	0.8872	0.1023	0.0105	0.0037	0.9963	0	0
	C_{22}	80.0	88.0	0	0.4872	0.487	0.0258	0.0007	0.9993	0	0
	C_{23}	70.0	80.0	0	0.4926	0.4926	0.0148	0.4997	0.5003	0	0
B_7	C_{24}	85.0	90.0	0	1	0	0	0.4992	0.5008	0	0
	C_{25}	85.0	95.0	0	1	0	0	1	0	0	0
	C_{26}	70.0	80.0	0	0.4928	0.4923	0.0149	0.5000	0.5000	0	0
	C_{27}	70.0	80.0	0	0.4926	0.4925	0.0149	0.5001	0.4999	0	0

新沂市现状相符,需要进一步加强水利现代化建设。而 2020 等级除水资源保障体系评分等级较差为 89.08 外,其余体系均达到全面现代化,整体等评分为 93.71,属于全面现代化,与新沂市水利发展“十三五”规划目标一致。

4.4 评价结果分析

为了进一步验证云模型的准确性,本文另外采用集对分析法^[21]进行评价,并将两种方法的评价结果进行对比分析。由集对分析得出评价等级结果见表 7。

由表 7 可得根据集对分析计算求得的新沂市现状值整体为 84.56,属于基本现代化,2020 年未来值整体为 91.38,属于全面现代化,与云模型计算的结果一致。

根据最终现代化等级对比分析云模型与集对分析的优缺点:云模型除了具有模糊性以外同时还具有一定的随机性,文中求出的现代化评价等级两者的差距不大,云模型在计算过程中模拟的数据较多,更加精确可靠,同时正态分布是极其重要的概率分布,正态云模型的适用性和确定度较好。而在计算各个指标的隶属度过程中,由于集对分析在计算过程中通常通过 $v_k = (1+u_k)/2$ 来求解隶属度,其最高隶属度只能到 0.5,不能十分精确地反映指标等级,而云模型可以更准确地反映该指标在某个等级中,而且云模型可以更好地处理边界等级隶属度问题。但是云模型在计算指标等级中,若某指标值处于中间等级时,在边界等级评价的计算中可能会出现较小的误差。

云模型计算求得的新沂市 2015 年水利现代化评价值为 85.53,由集对分析计算求得的是 84.56,两者差别较小,均属于基本现代化阶段,且进一步向全面现代化发展。由各指标的等级隶属度可以看出,流域防洪达标率、集中式饮用水源地水质达标率、城市供水水质综合合格率均达到全面现代化的标准,其余部分指标也已经达到基本现代化阶段。但仍有多项指标现代化程度较低,相关部门应加强城市排水设施的建设,加快工业化工厂的转型,提高水资源利用率,同时也要注意污水处理与水利管理

方面的加强,引进更多专业型人才并加强现代化建设。通过各方面的共同努力,尽快实现水利的全面现代化,争取达到 2020 年的期望值。根据集对分析计算的新沂市 2020 年预测水利现代化评价值为 91.38,云模型计算的新沂市 2020 年预测水利现代化评价值为 93.71,均已实现全面现代化。

综上,本文现状评价结果与新沂市水利现代化现状相适应,2020 年的评价结果与新沂市水利现代化规划和水利发展“十三五”规划目标一致,评价结果具有合理性,验证了本文水利现代化云模型评价方法的有效性和适用性。

5 结 语

水利现代化建设是一项涉及不同领域、阶段、层次的系统工程,其目标是实现水资源的可持续利用,人与自然的和谐共处,以及经济社会的可持续发展。云模型是一种新的评价方法,该方法兼具模糊性和随机性,比较客观精确,能够较好实现定性定量之间的转化。目前结合云模型对水利现代化评价的研究尚未见报道。本文以新沂市为计算实例,通过云模型计算了各指标的权重和评价等级,并用集对分析进行对比,验证了云模型评价结果的合理性。云模型既可以用来计算权重,也可以计算等级隶属度,适用性较广,在评价体系中有一定的应用意义。

当然,云模型在计算过程中,由于建模的不准确可能会导致超熵的计算出现问题,而在指标等级计算过程中,若某指标实际从属于某中间等级,那么在计算其边界等级隶属度时可能会出现较小的误差,需要对云模型做进一步优化研究。

参考文献:

[1] 中国水利现代化研究课题组. 中国水利现代化的内涵及其评价指标体系[J]. 中国水利, 2004 (4): 31-34. (Chinese Water Conservancy Modernization Research Group. The connotation of Chinese water conservancy modernization and its evaluation index system[J]. China Water Resources, 2004 (4): 31-34. (in Chinese))
[2] 喻君杰, 欧建锋. 江苏水利现代化目标内涵及指标体系研究[J]. 水利发展研究, 2013 (3): 15-18. (YU Junjie,

表 6 2015 年与 2020 年现代化云模型评价等级

目标年	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	综合评价值	评价等级
2015 年	87.73	73.16	88.73	90.19	85.02	87.58	88.22	85.53	基本现代化
2020 年	93.88	89.08	95.40	93.41	95.01	93.45	97.09	93.71	全面现代化

表 7 集对分析的现状值与未来值的现代化等级

目标年	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	综合评价值	评价等级
2015	85.34	72.04	89.22	88.28	83.98	87.03	88.35	84.56	基本现代化
2020	86.24	84.42	95.66	92.86	93.76	94.32	95.69	91.38	全面现代化

- OU Jianfeng. The connotation of Jiangsu water conservancy modernization and its index system research[J]. Water Resources Development Research, 2013 (3): 15-18. (in Chinese))
- [3] 严玲. 苏南县域水利现代化指标体系及评价方法研究[D]. 扬州:扬州大学, 2013.
- [4] 张颖, 俞双恩, 陆梦恬. 苏北水利现代化评价指标体系赋权研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 171-176. (ZHANG Ying, YU Shuangen, LU Mengtian. Study of index weight of evaluation index system for water conservancy modernization in northern Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(2): 171-176. (in Chinese))
- [5] AL-BARQAWI H, ZAYED T, et al. Infrastructure management: integrated AHP/ANN model to evaluate municipal water mains' performance[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2008, 14(4): 305-318.
- [6] 胡尊芳, 孙建峰, 宋印胜, 等. 基于云模型的东平湖枯水期地下水水质评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 74-78. (HU Zunfang, SUN Jianfeng, SONG Yinsheng, et al. Evaluation of groundwater quality of Dongping Lake in dry season based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 74-78. (in Chinese))
- [7] 张金鑫, 唐德善, 丁亿凡, 等. 基于云模型的流域人水和谐评价方法[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 155-158. (ZHANG Jinxing, TANG Deshan, DING Yifan, et al. Evaluation of river basin water harmonious based on cloud model[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 155-158. (in Chinese))
- [8] 乔丹颖, 刘凌, 闫峰. 基于云模型的中运河水安全评价[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 26-29. (QIAO Danying, LIU Ling, YAN Feng. Assessment on water security of Zhong Canal based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 26-29. (in Chinese))
- [9] 江苏省水利厅. 江苏省水利现代规划[R]. 南京:江苏省水利厅, 2010.
- [10] 杨增文, 郑金刚, 杨婷, 等. 关于水利现代化的探讨[J]. 水利发展研究, 2011(5): 44-47. (YANG Zengwen, ZHENG Jingang, YANG Ting, et al. Discussion about water conservancy modernization[J]. Water Resources Development Research, 2011(5): 44-47. (in Chinese))
- [11] 任苹, 李楠. 评价方法研究进展[J]. 沈阳大学学报, 2005, 17(6): 65-68. (REN Ping, LI Nan. Research progress of evaluation method[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2005, 17(6): 65-68. (in Chinese))
- [12] 方国华, 程顺发, 黄显峰, 等. 基于熵值法的徐州市水利水务现代化评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 34-38. (FANG Guohua, CHENG Shunfa, HUANG Xianfeng, et al. Research on evaluation of Water conservancy modernization and affairs based on entropy method in Xuzhou[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(6): 34-38. (in Chinese))
- [13] 欧建锋, 程吉林. 江苏水利现代化评价指标体系研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 12-15. (OU Jianfeng, CHENG Jilin. Study on evaluation index system of modernization of water resources in Jiangsu[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 12-15. (in Chinese))
- [14] 耿芳, 董增川, 徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 131-135. (GENG Fang, DONG Zengchuan, XU Wei. River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 131-135. (in Chinese))
- [15] 李德毅, 刘常昱, 杜鹂, 等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594. (LI Deyi, LIU Changyu, DU Yi, et al. Artificial Intelligence with uncertainty[J]. Journal of Software, 2004, 15(11): 1583-1594. (in Chinese))
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. The universality of the normal cloud model theory[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34. (in Chinese))
- [17] 张明媛, 高盼, 袁永博. 云模型理论在区域旱涝评价中的应用[J]. 模糊系统与数学, 2016, 30(1): 174-181. (ZHANG Mingyuan, GAO Pan, YUAN Yongbo. Application of cloud model theory in the evaluation of regional drought and flood[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 30(1): 174-181. (in Chinese))
- [18] 丁昊, 王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 251-257. (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model[J]. Journal of Environmental Science, 2013, 33(1): 251-257. (in Chinese))
- [19] GALLAGHER F W, BEASLEY W H. Evaluation of a one-dimensional cloud model for yellow and green thunderstorms[J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 505-510.
- [20] 李敏, 陈守煜. 径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(4): 576-579. (LI Min, CHEN Shouyu. Long-term runoff forecast level features value through fuzzy reasoning method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(4): 576-579. (in Chinese))
- [21] 李文君, 邱林, 陈晓楠, 等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan, et al. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set[J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2011, 42(7): 775-782. (in Chinese))

(收稿日期:2017-02-18 编辑:郑孝宇)