



基于熵权法-正态云模型的辽宁省 水生态承载力评价

贺磊

(葫芦岛市南票区农业发展服务中心 辽宁 葫芦岛 125027)

【摘要】 将正态云模型引入水生态承载力评价中能够科学衡量其随机性和模糊性特征,对辽宁省2025年、2008—2018年水生态承载力运用熵权法-正态云模型进行评价。从社会、经济、水环境和水资源子系统中选择19项指标,结合相关资料构建分级标准和指标体系,然后运用云模型正向发生器、熵权法计算分级评价指标的隶属度及其权重,其中水生态承载力分级确定度依据权重矩阵与隶属度矩阵计算。为进一步验证模型的可靠性,对比分析了投影寻踪法、模糊综合法和熵权法-正态云模型评价结果。研究表明:辽宁省2008—2011年、2012—2018年、2025年分别处于基本可承载、可承载和绝对可承载状态;投影寻踪法、模糊综合法和该评价结果保持较好的一致性;该模型具有随机性和模糊性,可为水生态承载力评价提供一种新的思路。

【关键词】 熵权法; 正态云模型; 水生态承载力; 辽宁省

中图分类号: X826

文献标志码: B

文章编号: 2096-0131(2020)07-016-07

Evaluation of water ecological carrying capacity in Liaoning Province based on entropy weight method-normal cloud model

HE Lei

(Huludao Nanpiao District Agricultural Development Service Center of, Huludao 125027, China)

Abstract: The introduction of normal cloud model into the evaluation of water ecological carrying capacity can scientifically measure its randomness and fuzziness, and the entropy weight method-normal cloud model is used to evaluate the water ecological carrying capacity of Liaoning Province in 2025 and from 2008 to 2018. Nineteen indexes are selected from social, economic, water environment and water resources subsystems, and classification standards and index systems are constructed based on relevant data. Then membership degree and weight of classification evaluation indexes are calculated using cloud model forward generator and entropy weight method, wherein the classification determination degree of water ecological carrying capacity is calculated based on weight matrix and membership degree matrix. In order to further verify the reliability of the model, the evaluation results of projection pursuit method, fuzzy synthesis method and entropy weight method-normal cloud model are compared and analyzed. The research shows that Liaoning Province is basically bearable,

收稿日期: 2019-10-30

作者简介: 贺磊(1980—),男,高级工程师,学士,主要从事水资源、水生态环境、水利工程、河道管理等工作。

bearable and absolutely bearable from 2008 to 2011 , from 2012 to 2018 and in 2025 respectively. The projection pursuit method , fuzzy synthesis method and the evaluation results keep good consistency. The model is stochastic and fuzzy , which can provide a new idea for the evaluation of water ecological carrying capacity.

Key words: entropy weight method; normal cloud model; water ecological carrying capacity; Liaoning Province

水生态承载力是指在满足水功能区水质、栖息地环境和生态需水目标的基础上,在一定的排、用、取水方式下特定时期及区域内,水环境和水资源量所能承载的最大人口数量、经济规模。近年来,我国经济社会的可持续发展在一定程度上受到水生态恶化、水污染加剧、水资源短缺等问题的严重制约,对水生态承载力评价方法及模型的研究对于推进水生态文明城市建设及社会经济发展具有重要的现实意义^[1]。

目前,生态足迹法^[2]、SD 模型法^[3]、投影寻踪法^[4]、模糊综合评价法^[5]和系统动力学法^[6]等为水生态承载力评价的常用方法。然而,水生态承载力是一个涉及社会、经济、水环境及水资源等系统的动态化多元复杂系统,承载力标准和影响因子存在随机性、模糊性特征,在解决此类问题时以上方法均存在一定的局限性。李德毅等^[7]提出的云模型能够实现定量与定性问题的转化处理,可有效解决自然系统中随机性与模糊性问题,在河流健康评价、水安全评判、水利现代化评价、膨胀土胀缩等级分类、水质及灾害风险分析等领域得到广泛的应用^[8-9]。云模型应用的关键是如何确定评价指标的权重,目前主要有主观、客观两种赋权方法。其中,主观法主要有 Delphi 法^[10]、层次分析法^[11]等;客观赋权法有投影寻踪法、熵权法^[12]等。人为主观意愿对主观法评价结果的影响较为显著,在实际应用中易出现偏离客观实际的情况。鉴于此,本文结合现有研究成果和区域水资源实际状况,构建较为系统、科学的承载力分级标准和评价指标体系,然后对区域水生态承载力运用正态云模型进行评价。评价指标的隶属度及其权重指标,运用云模型正向发生器和熵权法进行计算,并利用熵权法-正态云模型对辽宁省 2008—2018 年水生态承载力进行实例分析。为进一步验证该模型的有效性与可行性,对比分析了投影寻踪法、模糊综合法和熵权法-正态云模型评价结果。

1 熵权法-正态云评价模型

1.1 构建评价指标体系

为科学衡量辽宁省 2008—2018 年水生态承载力水平,根据辽宁省社会经济发展和自然条件特点,考虑各评价指标之间的复杂关系,在遵循可度量性、可操作性、独立性和代表性等原则的基础上,从社会、经济、水环境和水资源子系统中选择 19 个典型指标,构建了包含因素层、准则层、目标层的评判体系。然后结合国内相关研究成果^[17],将水生态承载力评价等级分为 I ~ IV 级,所对应的评价标准为绝对可承载、可承载、基本可承载和不可承载,合理确定各指标上下限值和承载力分级标准阈值,见表 1。

1.2 熵权法计算权重

熵是描述系统无序化程度的重要参数,在水生态承载力评价中信息熵的大小代表了指标中包含有效信息量的多少。根据信息论基本原理,指标包含的有效信息量和信息熵的大小呈正相关,信息熵越大则相对其他参数而言各评估对象间的差异性就越大,对评价结果的贡献率就越大,所赋予的权重值就越高;若指标存在较小的信息熵则对于该指标而言各评估对象之间存在较小的差异性,在评价过程中指标的影响程度就越小,所赋予的权重值就越小。熵权法能够有效避免人为因素的干扰,更能反映评价对象的实际状况。设水生态承载力评价指标数为 n ,参评年数为 m ,经归一化处理构建标准矩阵 $X = (x_{ij})$,其中 $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$;第 j 年指标 i 的数值为 x_{ij} ,结合熵的具体内涵计算评价体系中指标 i 的熵值,其表达式为

$$e_i = -K \sum_{j=1}^n (x_{ij} \ln x_{ij}) \quad (1)$$

式中: K 为标准化系数,即 $K = -\ln n$ 。

在评价过程中指标提供的信息量越大则携带的信息熵越大,根据此原则确定指标权重,其计算式为

表1 水生态承载力分级标准和指标体系

目标层	准则层	因素层	内涵	属性	水生态承载力分级标准				上下限值
					Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级	
水生态 承载力 评价 A	水资源 系统 B ₁	C ₁ /%	水资源开发利用	-	≥40	[20 ,40)	[10 ,20)	<10	[5 ,50]
		C ₂ /(万 m ³ /km ²)	产水量模型	+	<40	[40 ,50)	[50 ,60)	≥60	[30 ,70]
		C ₃ /10 ³ m ³	人均水资源量	+	<1.0	[1.0 ,3.0)	[3.0 ,5.0)	≥5.0	[0.5 ,6.0]
		C ₄ /10 ³ mm	降水深	+	<0.8	[0.8 ,1.0)	[1.0 ,1.2)	≥1.2	[0.6 ,1.4]
	水环境 系统 B ₂	C ₅ /%	生态环境用水率	+	<2.0	[2.0 ,4.0)	[4.0 ,6.0)	≥6.0	[0 ,8.0]
		C ₆ /%	水功能区达标率	+	<50	[50 ,70)	[70 ,90)	≥90	[30 ,100]
		C ₇ /%	饮用水水源达标率	+	<60	[60 ,80)	[80 ,95)	≥95	[40 ,100]
		C ₈ /kg	人均 COD 容量	+	<4	[4 ,6)	[6 ,8)	≥8	[2 ,10]
		C ₉ /%	工业重复用水率	+	<70	[70 ,80)	[80 ,90)	≥90	[50 ,100]
	经济系统 B ₃	C ₁₀ /m ³	万元 GDP 用水量	-	≥240	[160 ,240)	[80 ,160)	<80	[60 ,400]
		C ₁₁ /m ³	工业增加用水	-	≥120	[120 ,80)	[40 ,80)	<40	[30 ,160]
		C ₁₂ /m ³	农业增加用水	-	≥1000	[800 ,1000)	[600 ,800)	<600	[400 ,1800]
		C ₁₃ /万元	人均 GDP	+	<1.0	[1.0 ,2.0)	[2.0 ,3.0)	≥3.0	[0.5 ,4.0]
		C ₁₄ /(万人 /km ²)	人口密度	-	≥500	[300 ,500)	[100 ,300)	<100	[50 ,600]
	社会系统 B ₄	C ₁₅ /%	蓄水工程供水率	+	<40	[40 ,50)	[50 ,60)	≥60	[30 ,70]
		C ₁₆ /(万 m ³ /km ²)	供水量模数	+	<2	[2 ,3)	[3 ,4)	≥4	[1 ,5]
		C ₁₇ /m ³	亩均灌溉用水量	-	≥600	[500 ,600)	[400 ,500)	<400	[300 ,700]
		C ₁₈ /(L/d)	城镇人均用水	+	<100	[100 ,110)	[110 ,120)	≥120	[80 ,140]
		C ₁₉ /(L/d)	农村人均用水	+	<60	[60 ,70)	[70 ,80)	≥80	[40 ,100]

$$w_i = - \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^m e_i} \tag{2}$$

对水生态承载力各指标权重运用以上方法进行计算,由此可得到权重矩阵为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 且符合 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 条件。

1.3 云模型简介

云模型是以概率统计学与模糊数学为理论依据,根据精确数值与不确定性语言之间的随机性、模糊性变化特征,构建定量与定性互换模型,在定性描述和定量分析互换处理方面具有较强的实用性。云模型通过期望值 Ex 、熵 En 、超熵 He 反映水环境承载力的随机性、离散型和模糊性特征,其中期望值 Ex 为云滴群的云重心,能够定性描述指标隶属度、权重和水生态承载力评价等级的中心值,此定性概念在论域空间中代表一个点,即以典型样本描述定性概念;在数域中定性语言可被接受的区间依据熵 En 反映,它体现了指标隶属

度、权重和水生态承载力评价等级的可能取值范围,主要与模糊性、随机性定性概念相关,一般条件下 En 值越大则云滴随机性与模糊性越大; He 表征了水生态承载力评价的不确定性程度,主要用于描述承载力等级偏离中心值,一般条件下 He 值越小则云滴凝聚程度越好,系统的离散性也就越大。根据以下过程利用云模型对水生态承载力进行评价:

- a. 引入 He^2 、 En 为方差和所确定的期望值,对随机数利用云模型正态云发生器和 Matlab 软件求解,即 $En_i = norm(En, He^2)$, 其中 $norm()$ 为正态分布函数。
- b. 利用生成的随机数和平台软件再次生成方差为 En^2 、期望值为 Ex 的正态随机数 x_i , 即 $x_i = norm(Ex, En^2)$ 。
- c. 依据上述过程求解的 x_i 、 Ex 结果,利用 $\mu = e^{-[(x_i - Ex)^2 / (2En^2)]}$ 计算确定度 μ 。
- d. 通过以上运算在某评价等级边界内形成一个云滴 (x_i, μ_i) , 重复上述计算步骤直至达到设定的预期

要求,在水生态承载力评价过程中设定生成 3000 个云滴数作为停止运算条件。

1.4 评价步骤

1.4.1 确定指标权重

a. 对评价体系中的正向、负向指标分别选用下式进行归一化处理,即

$$\bar{x}_{ij} = \frac{[x_{ij} - x_{\min}(j)]}{[x_{\max}(j) - x_{\min}(j)]} \quad (3)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{[x_{\max}(j) - x_{ij}]}{[x_{\max}(j) - x_{\min}(j)]} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 、 \bar{x}_{ij} 分别为评价指标初始值和经归一化处理的标准化值; $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为指标 j 序列的上、下限值。

b. 将水生态承载力评价指标权重利用熵权法基本原理和式(1)、式(2)进行求解,从而构造权重矩阵 $W = (w_1, w_2, \dots, w_{19})$ 。

1.4.2 确定隶属度矩阵

a. 根据下式计算确定云模型参数:

$$Ex = x_{ij}^1 + \frac{x_{ij}^2}{2} \quad (5)$$

式中: x_{ij}^1 、 x_{ij}^2 为结合水生态承载力分级标准和区域水资源

源状况确定的某一等级标准区间 $[x_{ij}^1, x_{ij}^2]$ 。

由于水生态承载力评价的标准边界存在一定的随机性、模糊性,对于分属相邻等级的指标隶属度可按下式计算确定,即

$$\exp\left[\frac{-(x_{ij}^1 - x_{ij}^2)}{8En^2}\right] = 0.5 \quad (6)$$

根据区域水资源实际情况确定指标实测值,然后对云模型熵值 En 、超熵 He 运用下式计算,即

$$En = \frac{(x_{ij}^1 - x_{ij}^2)}{2.355} \quad (7)$$

$$He = k \quad (8)$$

式中: k 为反映云模型离散程度的常数,一般按经验取值。

根据云模型确定水生态承载力分级,其特征参数 Ex 、 En 、 He 依据上述方法进行计算,受文章篇幅限制仅给出了水资源系统的特征参数 Ex 、 En 、 He ,见表 2。然后依据云模型正向发生器及其特征参数值,在 Matlab 程序上形成水生态承载力各评价指标的正态云图。限于文章篇幅,仅给出了人均水资源量、产水模数和水资源开发利用率的正态云图,见图 1。

表 2 水资源正态云模型特征参数

分 级 标 准	绝对可承载 / I 级	可承载 / II 级	基本可承载 / III 级	不可承载 / IV 级
$C_1 / \%$	(0.9442 0.0471 0.001)	(0.7776 0.0945 0.001)	(0.4445 0.1886 0.0001)	(0.1112 0.0945 0.001)
$C_2 / (万 m^3 / km^2)$	(0.8750 0.1065 0.001)	(0.6250 0.1065 0.001)	(0.3750 0.1065 0.001)	(0.1250 0.1065 0.001)
$C_3 / 10^3 m^3$	(0.9092 0.0775 0.001)	(0.6362 0.1546 0.001)	(0.2728 0.1546 0.001)	(0.0450 0.0385 0.001)
$C_4 / 10^3 mm$	(0.8750 0.1065 0.001)	(0.6250 0.1065 0.001)	(0.3750 0.1065 0.001)	(0.1250 0.1065 0.001)

水生态承载力确定度值为计算平均值,在评价过程中设定生成 3000 个云滴数作为运算终止条件。

b. 确定隶属度矩阵。2008—2018 年辽宁省水生态承载力各指标数据隶属于某一级云云的隶属度 U ,根据公式 $\mu = e^{-[(x_i - Ex)^2 / (2En^2)]}$ 和云模型特征参数 Ex 、 En 、 He 计算。

1.4.3 评价结果分析

根据各年度隶属度 U 和构造的评价指标权重矩阵 $W = (w_1, w_2, \dots, w_{19})$,采用计算公式 $V = W^T U$,确定 $V = [V_1, V_2, V_3, V_4]$,然后依据最大隶属度原则确定水生态承载力评价等级。

2 实例分析

2.1 区域概况

辽宁省地处我国东北地区的南部,下辖 14 个地级市和 2 个省管县,总面积 14.8 万 km^2 ,主要有老哈河、少冷河、浑河、西拉木伦河、太子河、秀水河、饶阳河、柴河、大凌河等,各支流纵横交错、蜿蜒曲折。境内为大陆性季风气候,水资源补给以降水入参与地表径流为主,年降水量在 600 ~ 1100mm 之间,气候特征四季分明、雨热同季、春秋季节短、冬长夏暖、日照丰富,年均气温 7 ~ 11℃。境内的地形地貌有“六山一水三分田”之

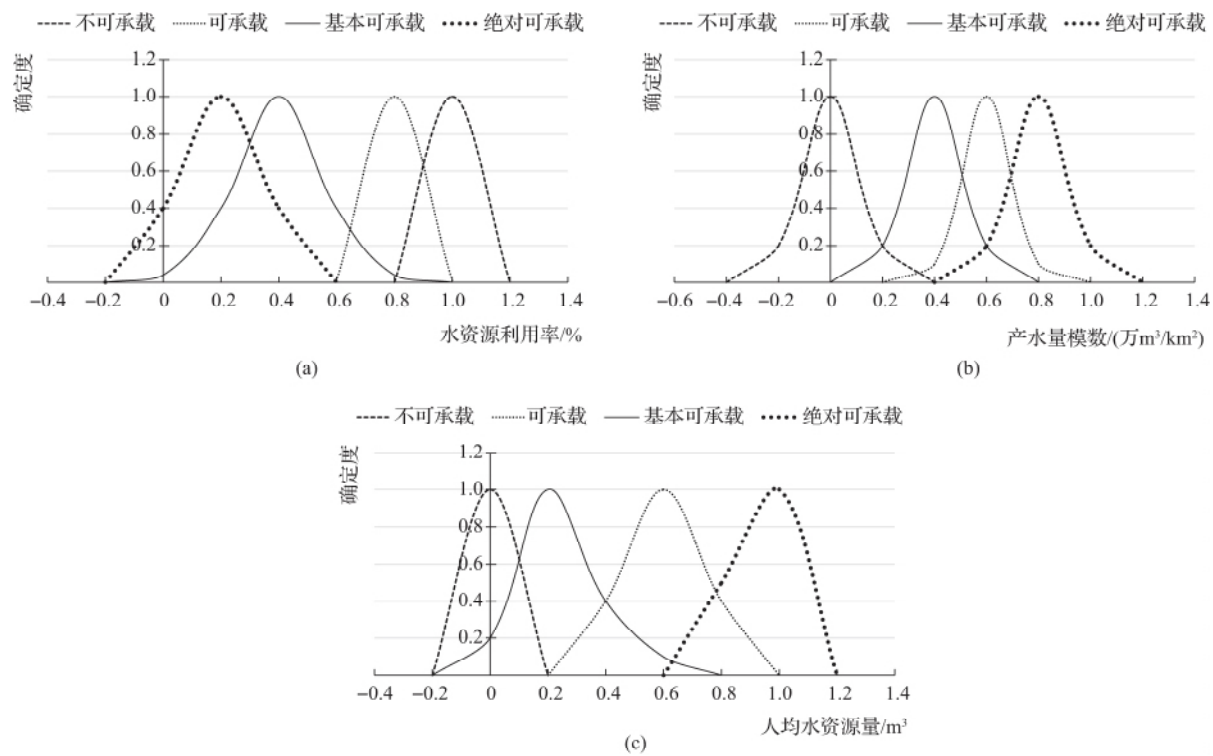


图1 水资源系统部分指标的等级云图

称,地势大致为自东西两侧向中部、自北向南倾斜的变化特征。受季风气候和地势条件影响,降水量在空间分布上呈自平原向山区、自西南向东北递减的特征,60%以上降水集中在汛期。虽然辽宁省河流水系发达、水资源总量丰富、径流量大,但由于复杂的地形地貌和独特的气候环境,水资源存在可开发利用量少、边界效益低、开发难度大和开采成本高等特点,加之用水效率低和水环境保护意识薄弱,使得境内水资源功能和承载力水平持续下降,水环境污染和水资源短缺问题十分突出^[13-16]。为协调好经济社会发展与水资源利

用之间的关系,本文结合可持续发展理论和辽宁省水资源状况,运用熵权法-正态云模型科学评价了2008—2018年水生态承载力水平,以期改善水生态环境和促进区域协调可持续发展提供一定参考。

2.2 数据来源

2008—2018年相关数据来源于《辽宁省统计年鉴》《辽宁省水资源公报》等资料,2025年研究数据来源于《辽宁省国民经济和社会发展规划》《辽宁省水利发展规划》等资料,采用近10年均值作为水资源系统指标数据,水生态承载力各指标数据见表3。

表3 辽宁省2008—2018年水生态承载力各项参数值

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2025
C_1	6.52	6.80	6.91	6.95	6.90	6.71	6.66	6.87	6.72	6.75	7.11	10.02
C_2	44.8	58.6	60.5	41.2	51.4	39.1	44.5	44.2	45.6	48.7	54.6	48.5
C_3	3.80	4.95	5.08	3.45	4.22	3.19	3.63	3.64	3.66	3.91	4.38	4.01
C_4	1.10	1.29	1.33	0.95	1.18	0.97	1.09	1.18	1.14	1.24	1.29	1.16
C_5	0.60	1.21	2.37	2.68	2.71	0.67	0.66	0.85	1.37	1.52	1.91	4.50
C_6	56.1	36.7	55.2	59.1	50.0	45.0	46.1	49.8	45.2	63.3	67.5	85.0
C_7	85.6	81.2	78.4	88.6	83.2	89.1	79.4	87.5	91.6	88.2	90.5	95.1
C_8	5.97	5.93	5.88	5.85	5.82	5.77	5.76	5.71	5.67	5.62	5.57	5.40
C_9	67.5	72.2	75.7	77.8	80.6	82.1	83.4	84.6	89.7	91.3	92.5	95.0
C_{10}	362	312	270	248	205	166	145	127	118	108	103	80

续表

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2025
C_{11}	132	116	108	101	98	78	72	68	62	65	60	41
C_{12}	1726	1549	1388	1275	1091	892	745	626	571	546	570	400
C_{13}	0.593	1.061	1.256	1.354	1.575	1.926	2.218	2.533	2.726	2.891	3.142	4.000
C_{14}	226	235	247	258	253	248	245	237	242	241	243	240
C_{15}	42.6	43.1	42.5	42.0	40.0	39.0	39.0	41.7	51.6	53.7	55.8	60.0
C_{16}	3.66	3.80	3.85	3.87	3.77	3.72	3.85	3.81	3.80	3.82	3.91	4.53
C_{17}	542	526	506	491	447	433	441	410	396	395	360	300
C_{18}	136	132	118	124	120	118	121	121	126	125	128	130
C_{19}	65	67	71	71	68	72	73	74	72	72	75	76

2.3 结果分析

a. 确定指标权重。将水生态承载力各指标权重利用上述熵权法计算公式进行求解,结果为

$W = [0.0708, 0.0481, 0.0518, 0.0552, 0.0537, 0.0478, 0.0570, 0.0456, 0.0522, 0.0547, 0.0510,$

$$U_{2008} = \begin{bmatrix} 0.904 & 0 & 0.002 & 0.062 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0.137 & 0 & 0 & 0.147 & 0 & 0.841 & 0.009 \\ 0.137 & 0.053 & 0.971 & 1.000 & 0 & 0.185 & 0.937 & 0.002 & 0.477 & 0 & 0.002 & 0 & 0.905 & 0.007 & 0.015 & 0.924 & 0.091 & 0 & 0.035 \\ 0.000 & 0.074 & 0 & 0 & 0.952 & 0.168 & 0.003 & 0.674 & 0.002 & 0.833 & 0.918 & 0.632 & 0.872 & 0.797 & 0.194 & 0 & 0.042 & 0 & 0.254 \end{bmatrix}$$

同理,计算确定辽宁省2009—2018年、2025年水生态承载力隶属度矩阵。

c. 分级评价。根据公式 $V = W^T U$ 确定 $V = [V_1, V_2, V_3, V_4]$, 对水生态承载力分级按照最大确定度原则计算。为进一步验证该方法的有效性,将评价结果与投影寻踪法、模糊综合法进行对比分析。采用布谷鸟搜索法进行投影寻踪模型的计算,其发现概率 $P_a = 0.25$, 设定鸟窝位置 n 和最大迭代次数 L 分别为25、

0.0572, 0.0505, 0.0487, 0.0472, 0.0540, 0.0517, 0.0562, 0.0496]。

b. 计算隶属度。为详细说明隶属度计算方法,根据文中所述隶属度矩阵确定方法,计算2008年水生态承载力隶属度矩阵如下:

1000, 最佳投影向量的优化条件为搜索空间 $[0, 1]$ 的参数经归一化处理得到权重向量为

$W = [0, 0.0022, 0, 0.0262, 0.0201, 0.0468, 0.0591, 0, 0.1018, 0.1052, 0.1034, 0.1075, 0.1086, 0, 0.0801, 0.0572, 0.1008, 0, 0.0810]$

以文中计算权重作为模糊综合法权重,基于不同方法的辽宁省水生态承载力评价结果见表4。从表4可以看出:

表4 辽宁省水生态承载力评价结果

确定度	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2025年
I级	0.1295	0.2428	0.2236	0.1415	0.1350	0.1121	0.1326	0.1875	0.2544	0.3052	0.3885	0.5532
II级	0.2952	0.2391	0.2745	0.2981	0.4116	0.4572	0.5581	0.5770	0.5234	0.5008	0.4510	0.3166
III级	0.3204	0.2951	0.3980	0.4722	0.4002	0.3235	0.2460	0.2070	0.2075	0.1921	0.1517	0.1302
IV级	0.2549	0.2230	0.1039	0.0882	0.0532	0.1072	0.0633	0.0285	0.0147	0.0019	0.0088	0
熵权法-正态云模型	III级	III级	III级	III级	II级	II级	II级	II级	II级	II级	II级	I级
模糊综合法	III级	III级	III级	III级	II级	II级	II级	II级	II级	II级	I级	I级
投影寻踪法	IV级	III级	III级	III级	III级	III级	II级	II级	II级	II级	II级	I级

a. 基于投影寻踪法、模糊综合法和熵权法-正态云模型的水生态承载力评价结果基本一致,可见本文所构建的评价模型具有较高的准确性与可靠性,可为区

域水生态评价提供一种新的方法。其中,投影寻踪法和熵权法-正态云模型评价结果存在差异的年份仅有2008年、2012年、2013年;模糊综合法和熵权法-正态

云模型相比,仅有2018年1个等级差异。基于熵权法和布谷鸟搜索算法确定的指标权重存在一定差异,这是引起评价结果差异的关键因素。其次,水生态承载力评价结果受指标权重的影响较为显著。

b. 利用熵权法-正态云模型对辽宁省2008—2018年水生态承载力进行评价,结果显示水生态承载力在2008—2011年、2012—2018年期间为基本可承载和可承载水平,在2025年为绝对可承载状态。根据确定度计算结果,随着时间的推移,2008—2011年的Ⅲ级、Ⅱ级承载力确定度呈现不断增大的趋势;2012—2018年的Ⅱ级、Ⅰ级确定度也表现出增大的趋势,由此可见,该区域水生态环境整体呈不断转好趋势;水生态承载力在2025年达到最佳的绝对可承载状态。

c. 由表4可知:由于气候因素的影响,辽宁省2008—2018年水资源系统各指标值具有一定的不确定性和随机性,这也是导致评价结果存在随机性的关键因素;水环境系统中的水功能区达标率、生态环境用水率的波动幅度不显著,随时间的变化,城市饮用水水质达标率呈增大趋势;由于人口的增加,人均COD环境容量呈减少趋势。总体而言,辽宁省近10年水生态承载力的提升受水环境系统指标的影响较低,对辽宁省水生态承载力提升贡献较大的因素有供水条件、供水设施、用水效益、用水效率等方面的提升,民生的持续改善等。

d. 为进一步提升辽宁省水生态承载力水平,可采取兴建水源工程,加大农业、工业节水改造力度,加大水环境治理投入等措施,从而提高供水保证率、用水效率和效益,改善当地水环境质量。但是,受人口增长和水资源条件的限制,其提升空间有限。

3 结 语

本文结合辽宁省水资源现状和相关资料,构建水生态承载力分级标准和评价体系,利用熵权法-正态云模型对当地水生态承载力进行了科学评价。其中,分级评价指标的隶属度及其权重的计算主要依据云模型正向发生器、熵权法,利用隶属度矩阵和权重计算结果综合评价了区域水生态承载力水平。为进一步验证水生态承载力评价中熵权法-正态云模型的合理性、可行

性,将其评价结果与投影寻踪法、模糊综合法进行了对比分析。

评价结果说明基于模糊性和随机性特征构建的分级标准和评价指标体系,在水生态承载力评价中具有明显的优势,对于其他相似问题的解决处理,该模型同样具有实用性。◆

参考文献

- [1] 蒋汝成,顾世祥.熵权法-正态云模型在云南省水生态承载力评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):118-123.
- [2] 刘子刚,郑瑜.基于生态足迹法的区域水生态承载力研究——以浙江省湖州市为例[J].资源科学,2011,33(6):1083-1088.
- [3] 王西琴,高伟,曾勇.基于SD模型的水生态承载力模拟优化与例证[J].系统工程理论与实践,2014,34(5):1352-1360.
- [4] 张盛,王铁宇,张红,等.多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例[J].生态学报,2017,37(12):4159-4168.
- [5] 张万顺,齐迪,幸娅,等.区域水生态承载力的量化研究与应用[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(5):560-564.
- [6] 王卫军,周孝德,周彬,等.河流水生态承载力系统动力学模型软件开发[J].中国水利水电科学研究院学报,2011,9(2):151-154,160.
- [7] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995(6):15-20.
- [8] 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.
- [9] 周云哲,栗晓玲.基于指标规范化的正态云模型的水安全评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(4):18-24,66.
- [10] 任飞鹏,侯炳江,余学成.正态云模型在地下水水质综合评价中的应用[J].人民长江,2016,47(21):15-19,24.
- [11] 万昔超,殷伟量,孙鹏,等.基于云模型的暴雨洪涝灾害风险分区评价[J].自然灾害学报,2017,26(4):77-83.
- [12] 陈杰,孟锦根.岩爆烈度分级预测的云模型法及其应用[J].人民长江,2016,47(15):82-86.
- [13] 才庆欣.节水型社会体制与机制建设初探[J].水资源开发与管理,2017(2):57-59.
- [14] 于明.建立全面科学的流域水系水资源数字管理应用模型[J].水利建设与管理,2006,26(4):81-82.
- [15] 孙道成,武术,孙丹.辽宁省水能资源开发管理问题的探讨[J].中国水能及电气化,2008(12):8-12.
- [16] 王海刚.辽宁省地下水污染脆弱性分析与评价[J].水土保持应用技术,2016(1):16-18.