

熵权法 – 正态云模型在云南省水生态承载力评价中的应用

蒋汝成, 顾世祥

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 为科学衡量水生态承载力评价过程中的随机性与模糊性, 将正态云模型引入水生态承载力评价, 建立熵权法 – 正态云模型对云南省 2006 – 2016 年和 2020 年水生态承载力进行评价。从水资源系统、水环境系统、经济系统和社会系统遴选 19 个指标构建水生态承载力评价指标体系和分级标准, 采用云模型正向发生器计算水生态承载力分级评价指标的隶属度, 利用熵权法求出各指标权重, 再根据隶属度矩阵和权重矩阵给出水生态承载力分级确定度并进行评价, 将评价结果与模糊综合评价法、投影寻踪法的评价结果进行比较。结果表明: 2006 – 2009 年云南省水生态承载力评价为基本可承载, 2010 – 2016 年评价为可承载, 2020 年评价为绝对可承载; 评价结果与模糊综合评价法、投影寻踪法的评价结果基本一致; 该模型兼具模糊性和随机性, 用于水生态承载力评价是可行的, 可作为一种新的水生态承载力评价模型。

关键词: 水生态承载力; 正态云模型; 指标体系; 熵权法; 云南省

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0118-06

Application of entropy weight – normal cloud model in carrying capacity evaluation of water ecological environment in Yunnan Province

JIANG Rucheng, GU Shixiang

(Yunnan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Kunming 650021, China)

Abstract: In order to scientifically measure the randomness and fuzziness of the evaluation process of water ecological capacity, the normal cloud model is introduced into the evaluation of water ecological carrying capacity, and entropy weight normal cloud model is established to evaluate the water ecological carrying capacity in Yunnan Province in 2006 – 2016 and 2020. 19 indicators were selected to construct the evaluation index system and classification standard of ecological carrying capacity of water from the aspects of water resources system, water environmental system, economic system and social system. The membership degree of water ecological carrying capacity grading evaluation indicators was calculated by the cloud model generator, by using entropy method the weight of each index was calculated, then according to the membership matrix and weight matrix, the degree of certainty for water ecological carrying capacity was acquired and evaluated. and the evaluation results were compared with the results of fuzzy comprehensive evaluation method and projection pursuit method. The results showed that 2006 – 2009 in Yunnan Province ecological carrying capacity was evaluated as basic bearing, from 2010 to 2016 as bearing, and in 2020 as absolute bearing. The evaluation results are basically consistent with the results of fuzzy comprehensive evaluation method and projection pursuit. The model has both fuzziness and randomness, which is feasible for evaluation of water ecological carrying capacity and can be used as a new water ecological carrying capacity evaluation model.

Key words: water ecological carrying capacity; normal cloud model; index system; entropy weight method

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-01-20

基金项目: 云南省应用基础研究重点基金项目(2017FA022); 院士工作站建设专项(2015IC013); 云南省创新团队建设专项(YKRF2017-07-26)

作者简介: 蒋汝成(1982-), 男, 云南宣威人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源开发利用、山洪灾害防治工作研究。

od; Yunnan Province

1 研究背景

水生态承载力是指一定时期及区域内,在满足生态需水、栖息地环境和水功能区水质目标的前提下,基于一定条件下的取、用、排水方式,区域水资源量和水环境所能承载的最大经济规模和人口数量^[1]。近年来,随着我国经济社会迅猛发展和工业化、城镇化进程不断加快的同时,水资源短缺、水污染加剧、水生态恶化等问题在一定程度上制约了我国经济社会的可持续发展,研究水生态承载力评价的模型及方法对于推进水生态文明建设、贯彻落实习总书记“绿水青山就是金山银山”这一科学论断具有重要意义。目前用于水生态承载力评价的方法有系统动力学法^[2]、模糊综合评价法^[3]、投影寻踪法^[4]、SD模型法^[5]以及生态足迹法^[6]等,均在水生态承载力评价中取得了积极成效。然而,水生态承载力是一个多元动态复杂巨系统,涉及水资源、水环境、经济、社会等系统,不但评价因子多,而且评价指标和分级标准同时具有模糊性和随机性,上述评价方法很难有效解决这一问题。针对自然界中存在的模糊性和随机性评价问题,李德毅院士提出了定性与定量相互转换模型,即云模型,其已在灾害风险评价^[7]、水质评价^[8]、膨胀土胀缩等级分类^[9]、水利现代化评价^[10]、水安全评价^[11]、河流健康评价^[12]等领域得到应用。但在云模型评价过程中,如何客观确定指标权重已成为制约云模型能否广泛应用的关键因素。当前,指标权重的确定分为主观赋权法和客观赋权法,主观赋权法包括层次分析法^[13]、Delphi法^[14]等;客观赋权法包括熵权法^[7-8]、投影寻踪法^[15]等。主观法由于受人为主观意愿的影响,使得评价结果存在偏离客观实际的现象。

鉴于此,本文通过建立水生态承载力评价指标体系和分级标准,将正态云模型引入水生态承载力评价。利用熵权法计算各指标权重,基于云模型正向发生器计算水生态承载力分级评价指标的隶属度,建立熵权法—正态云水生态承载力评价模型,以云南省2006—2016年水生态承载力评价为例进行实例研究,评价结果与模糊综合评价法、投影寻踪法进行对比,旨在验证熵权法—正态云模型用于水生态承载力评价的可行性和有效性。

2 评价指标体系构建

为能客观评价云南省近10年水生态承载力水

平,基于云南省区域自然条件、社会经济发展特点,遵循代表性、独立性、可操作性和可度量等原则,充分考虑水生态承载力各评价指标间的复杂关系,并借鉴国内相关研究成果^[4,16],从资源系统、水环境系统、经济系统和社会系统选取19个指标用于构建云南省水生态承载力评价指标体系,并将其分为目标层、准则层和指标层3个层次;为科学衡量云南省近10年水生态承载力水平,将水生态承载力分为“绝对可承载/Ⅰ级”、“可承载/Ⅱ级”、“基本可承载/Ⅲ级”和“不可承载/Ⅳ级”4个等级,并合理确定水生态承载力评价分级标准阈值及各指标上下限值。见表1。

3 熵权法—正态云评价模型

3.1 熵权法确定指标权重

按照信息论基本原理,熵是系统无序程度的一个度量,评价指标携带的信息熵越小,则该指标提供的信息量就越大,在评价中所起作用越大,权重就越大。本文根据水生态承载力评价中 n 个指标 m 年数据值,构建经归一化处理后的水生态承载力评价矩阵 $X = (x_{ij}) (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$,其中: x_{ij} 表示第 i 个指标第 j 年数据值^[7-8]。根据信息熵定义,第 i 个指标的熵值为:

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

式中: $K = -\ln n$,为标准化系数。

由于评价指标携带的信息熵越小,则该指标提供的信息量就越大,因此可以给出评价指标的权重表达式:

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

由此可以得出水生态承载力评价指标权重矩阵 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

3.2 云模型简介

云模型是基于正态分布与钟形隶属函数,用来实现客观世界中某个现象和事物的定性与定量相互发生不确定性转换的数学模型,能够有效解决水生态承载力评价过程中的模糊性、随机性和离散性问题,具有较广的普适性特征^[7,13]。云模型通过期望值 Ex (Ex 代表这个定性概念的中心值)、熵值 En (En 表示对定性概念模糊度的度量)和超熵值 He (He 是对 Ex 的不确定性度量,由熵的随机性和模糊性共同决定,反映云滴的离散程度)将水资源短缺风险评

价过程中的模糊性、随机性和离散性有机结合起来,实现不确定性语言和定量数量之间的转换^[13]。云模型计算过程如下:

(1) 采用云模型正向发生器生成正态随机数 $En_i = \text{norm}(En, He^2)$, 其中 En 和 He^2 分别表示期望和方差, $\text{norm}()$ 表示正态分布函数。

(2) 再次生成正态随机数 $x_i = \text{norm}(Ex, En'^2)$, 其中 Ex 和 En'^2 分别表示期望和方差。

(3) 计算 $\mu = e^{-(x-Ex)^2/(2En'^2)}$ 。

(4) 利用 (x_i, μ_i) 构成数域中任意一个云滴。

(5) 重复上述步骤, 产生设定的 n 个云滴为止。

表1 水生态承载力评价指标体系和分级标准

目标层准则层	指标层	类型	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	上下限值
水生态承载力评价	水资源开发利用率 $C_1 / \%$	-	<10	[10, 20)	[20, 40)	≥ 40	[5, 50]
	产水量模数 $C_2 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	≥ 60	[50, 60)	[40, 50)	<40	[30, 70]
	人均水资源量 C_3 / m^3	+	≥ 5000	[3000, 5000)	[1000, 3000)	<1000	[500, 6000]
	降水深 C_4 / mm	+	≥ 1200	[1000, 1200)	[800, 1200)	<800	[600, 1400]
	生态环境用水率 $C_5 / \%$	+	≥ 6.0	[4.0, 6.0)	[2.0, 4.0)	<2.0	[0, 8.0]
	水功能区达标率 $C_6 / \%$	+	≥ 90	[70, 90)	[50, 70)	<50	[30, 100]
	饮用水水源达标率 $C_7 / \%$	+	≥ 95	[80, 95)	[60, 80)	<60	[40, 100]
	人均 COD 环境容量 C_8 / kg	+	≥ 8.0	[6.0, 8.0)	[4.0, 6.0)	<4.0	[2.0, 10.0]
	工业用水重复利用率 $C_9 / \%$	+	≥ 90	[80, 90)	[70, 80)	<70	[50, 100]
	万元 GDP 用水量 C_{10} / m^3	-	<80	[80, 160)	[160, 240)	≥ 240	[60, 400]
	万元工业增加值用水量 C_{11} / m^3	-	<40	[40, 80)	[80, 120)	≥ 120	[30, 160]
	万元农业增加值用水量 C_{12} / m^3	-	<600	[600, 800)	[800, 1000)	≥ 1000	[400, 1800]
	人均 GDP $C_{13} / 10^4$ 元	+	≥ 3.0	[2.0, 3.0)	[1.0, 2.0)	<1.0	[0.5, 4.0]
	人口密度 $C_{14} / 10^4 (\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-	<100	[100, 120)	[120, 140)	≥ 40	[60, 200]
	蓄水工程供水率 $C_{15} / \%$	+	≥ 60	[50, 60)	[40, 50)	<40	[30, 70]
	社会 供水量模数 $C_{16} / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+	≥ 4.0	[3.0, 4.0)	[2.0, 3.0)	<2.0	[1.0, 5.0]
	系统 农田亩均灌溉用水量 C_{17} / m^3	-	<400	[400, 500)	[500, 600)	≥ 600	[300, 700]
	城镇人均生活用水量 $C_{18} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	+	≥ 120	[110, 120)	[100, 110)	<100	[80, 140]
	农村人均生活用水量 $C_{19} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	+	≥ 80	[70, 80)	[60, 70)	<60	[40, 100]

注:“+”表示正向指标,指标值越大,水生态承载力越大;“-”表示负向指标,指标值越小,水生态承载力越大。

3.3 评价实现步骤

(1) 评价指标权重的确定

Step1 基于表1,用公式(3)、(4)分别对正向、负向指标进行处理。

$$\hat{x}_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}(j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (3)$$

$$\hat{x}_{ij} = (x_{\max}(j) - x_{ij}) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (4)$$

式中: $\hat{x}_{ij}$ 为经过归一化处理的指标; x_{ij} 为原始指标; $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标序列的上下限值。

Step2 基于熵权法基本原理和公式(1)、(2),求出水生态承载力评价指标权重矩阵 $W = (w_1, w_2, \dots, w_{19})$ 。

(2) 隶属度矩阵的确定

Step1 云模型参数的计算。基于表1,云模型参数通过下式计算:

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

式中: x_{ij}^1 、 x_{ij}^2 分别表示某一等级标准区间 $[x_{ij}^1, x_{ij}^2]$ 。

在水生态承载力评价中,由于评价标准的边界具有一定模糊性,可以分属相邻等级,故隶属度应当相等,即:

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

得到云模型的熵值 En :

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

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

式中: k 为常数,根据经验取值,反映云模型的离散程度。

通过上述方法可以确定水生态承载力分级云模型的特征参数 (Ex, En, He) 。限于篇幅,仅给出水资源系统云模型特征参数 (Ex, En, He) , 见表2。根据

云模型特征参数信息,由云模型正向发生器在 matlab 程序上生成水资源开发利用率等 19 个评价指标的正态云图。

限于篇幅,仅给出水资源开发利用率、产水量模数和人均水资源量的正态云图,见图 1。程序计算时,设置生成 3000 个云滴,以平均值为最终的确定度值。

Step2 隶属度矩阵的确定。利用云模型的特征

参数 (Ex, En, He) 和 $\mu = e^{-(-x-Ex)^2/(2En^2)}$ 可计算出云南省 2006 – 2016 年各指标数据 x_i 隶属于某分级云的隶属度 U 。

(3)水生态承载力评价。

基于上述计算获得的各评价指标权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_{19})$ 和各年度隶属度 U ,利用 $V = W^T U$ 计算获得 $V = [V_1, V_2, \dots, V_4]$ 。结合最大确定度原则,获得水生态承载力评价分级。

表 2 水资源系统正态云模型特征参数

分级	$C_1 / \%$	$C_2 / 10^4 (m^3 \cdot km^{-2})$	C_3 / m^3	C_4 / mm
I 级/绝对可承载	(0.9444,0.0472,0.001)	(0.8750,0.1062,0.001)	(0.9091,0.0772,0.001)	(0.8750,0.1062,0.001)
II 级/可承载	(0.7778,0.0944,0.001)	(0.6250,0.1062,0.001)	(0.6364,0.1544,0.001)	(0.6250,0.1062,0.001)
III 级/基本可承载	(0.4444,0.1887,0.001)	(0.3750,0.1062,0.001)	(0.2727,0.1544,0.001)	(0.3750,0.1062,0.001)
IV 级/不可承载	(0.1111,0.0944,0.001)	(0.1250,0.1062,0.001)	(0.0455,0.0386,0.001)	(0.1250,0.1062,0.001)

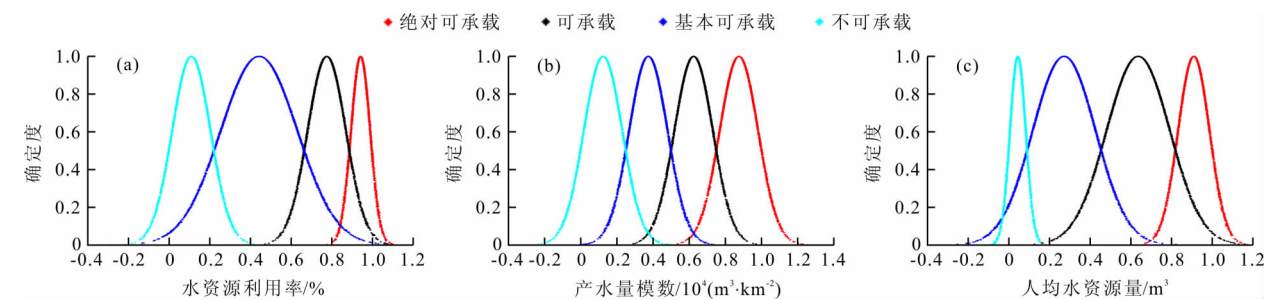


图 1 水生态承载力评价部分指标等级云图

4 应用实例

4.1 研究区概况与数据来源

云南省地处祖国西南边陲,辖 16 个州(市),国土面积 $39.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,分属长江、珠江、红河、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江 6 大水系,多年平均降水量 1 280 mm,水资源总量 $2\,222 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅次于西藏、四川两省区,居全国第三位。云南水资源总量虽然丰富,但由于地形地貌复杂、水资源开发利用难度大、成本高、边际效益低,加之降水时空分布极不均匀,使得云南省面临水资源短缺风险高,水环境污染日益加剧,水生态承载力挑战巨大等问题。研究水生态承载力评价模型及方法,并将之用于云南省 2006 – 2016 年水生态承载力评价,对于科学提出改善水生态承载力水平的应对措施,实现水生态承载力保障区域经济社会持续、健康发展具有重要意义。

本文研究数据来源于《2006 – 2016 年云南省水资源公报》、《2006 – 2016 年云南省统计年鉴》等;2020 年指数数据来源于《云南省水利发展规划(2016 – 2020 年)》和《云南省国民经济和社会发展第十三五规划》,水资源系统指标采用近 10 年均值。指标数据见表 3。

4.2 评价结果与分析

(1)指标权重计算。利用上述熵权法指标权重计算方法,经计算,水生态承载力评价各指标权重 $W = [0.0707, 0.0482, 0.0515, 0.0554, 0.0538, 0.0477, 0.0574, 0.0457, 0.0521, 0.0548, 0.0508, 0.0573, 0.0504, 0.0488, 0.0474, 0.0539, 0.0516, 0.0560, 0.0465]$ 。

(2)隶属度计算。以 2006 年为例,基于上述隶属度矩阵确定方法,经计算,2006 年隶属度矩阵确定如下:

$$U_{2006} = \begin{bmatrix} 0.9041 & 0.0000 & 0.0003 & 0.0623 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0017 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1389 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1483 & 0.0000 & 0.8406 & 0.0092 \\ 0.1382 & 0.0529 & 0.9726 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0184 & 0.9367 & 0.0002 & 0.4787 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0000 & 0.9071 & 0.0008 & 0.0151 & 0.9230 & 0.0910 & 0.0000 & 0.0350 \\ 0.0000 & 0.0738 & 0.0000 & 0.0000 & 0.951 & 0.1696 & 0.0002 & 0.6843 & 0.0022 & 0.8335 & 0.9185 & 0.6318 & 0.8740 & 0.7969 & 0.1934 & 0.0000 & 0.04190 & 0.0000 & 0.02569 \end{bmatrix}^T$$

表 3 云南省 2006 – 2016 年水生态承载力评价指标

年份	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
2006	6.55	44.7	3800	1099.8	0.600	56.0	85.2	5.969	67.4	361.0
2007	6.79	58.9	4996	1293.1	1.203	36.8	81.5	5.928	72.1	313.0
2008	6.93	60.4	5095	1333.8	2.380	54.8	77.8	5.890	75.8	269.0
2009	6.90	41.1	3450	963.3	2.670	59.0	88.5	5.854	77.8	247.0
2010	6.69	51.0	4224	1185.0	2.700	50.0	83.0	5.815	80.8	204.0
2011	6.65	39.0	3196	985.0	0.680	44.0	89.0	5.778	82.0	165.0
2012	6.88	44.0	3627	1090.0	0.660	46.0	79.0	5.744	83.1	144.0
2013	6.77	44.5	3642	1190.1	0.860	49.6	87.0	5.710	84.5	128.0
2014	6.76	45.1	3663	1143.4	1.350	56.1	91.7	5.677	89.9	117.0
2015	6.80	48.9	3948	1239.8	1.560	63.2	88.9	5.643	91.2	109.0
2016	7.10	54.5	4379	1295.9	1.900	67.6	90.6	5.588	92.1	102.0
2020	10.00	48.4	4000	1165.0	4.500	85.0	95.0	5.400	95.0	80.0
年份	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	
2006	133	1725.6	8929	113.75	42.7	3.67	543	135	64	
2007	115	1548.5	10609	114.54	43.3	3.81	524	131	68	
2008	107	1389.9	12570	115.28	42.3	3.88	505	117	70	
2009	100	1277.3	13539	115.99	42.0	3.87	492	125	70	
2010	98	1090.5	15752	116.76	40.0	3.76	448	119	68	
2011	77	897.9	19265	117.51	39.0	3.73	435	118	71	
2012	71	743.6	22195	118.22	39.0	3.86	440	120	72	
2013	67	626.4	25322	118.92	41.6	3.80	409	120	73	
2014	63	571.9	27264	119.61	51.8	3.79	397	127	71	
2015	66	548.6	28929	120.32	53.5	3.81	398	124	71	
2016	60	469.2	31397	124.49	55.7	3.92	360	128	74	
2020	40	400.0	40000	130.00	60.0	4.50	300	130	75	

同理,可计算 2007 – 2016 年及 2020 年隶属度矩阵。

(3) 分级评价。利用 $V = W^T U$ 计算获得 $V = [V_1, V_2, V_3, V_4]$, 并依据最大确定度原则, 确定水生态承载力评价分级, 并与模糊综合评价法、投影寻踪方法的评价结果进行对比(限于篇幅, 模糊综合评价法、投影寻踪法的评价过程从略。其中, 模糊综合评价法权重采用本文权重; 投影寻踪法采用布谷鸟搜索算法在最大迭代次数 $L = 1\ 000$, 鸟窝位置数 $n = 25$, 发现概率 $P_a = 0.25$, 搜索空间 $[0, 1]$ 的参数设置条件下优化最佳投影向量, 归一化后各指标权重 $W = [0.0000, 0.0021, 0.0000, 0.0261, 0.0200, 0.0466, 0.0590, 0.0000, 0.1017, 0.1050, 0.1032, 0.1076, 0.1087, 0.0000, 0.0802, 0.0573, 0.1009, 0.0000, 0.0815]$), 评价结果见表 4。

从表 4 可以得出以下结论:

(1) 本文方法评价结果与模糊综合评价法、投影寻踪法评价结果基本一致, 表明熵权法 – 正态云模型用于水生态承载力评价是可行的, 可作为一种

新的水生态承载力评价模型。其中, 与模糊综合评价法评价结果比较, 其仅在 2016 年存在 1 个等级的差异; 与投影寻踪法评价结果比较, 在 2006、2010 和 2011 年存在 1 个等级差异。由于采用布谷鸟搜索算法优化获得的各指标权重 (C_1 、 C_3 、 C_8 、 C_{14} 、 C_{18} 指标权重为 0) 与熵权法获得的各指标权重存在差异, 致使评价结果存在一定差异, 同时表明指标权重对评价结果具有重大影响。

(2) 采用熵权法 – 正态云模型评价云南省 2006 – 2016 年水生态承载力水平, 结果为: 2006 – 2009 年水生态承载力水平为基本可承载, 2010 – 2016 年为可承载, 2020 年为绝对可承载。从确定度来看, 2006 – 2009 年Ⅲ级和Ⅱ级确定度均随时间呈增大趋势; 2010 – 2016 年Ⅱ级和Ⅰ级确定度同样随时间呈增大趋势。表明云南省水生态承载力水平随时间呈提升趋势。至 2020 年水生态承载力达到较高水平, 即绝对可承载水平。

(3) 从表 4 评价结果来看, 云南省在 2006 – 2016 年间, 由于水资源系统各指标受气候因素的影

响,各指标值表现出较大的随机性和不确定性,对水生态承载力的影响也表现出较大的随机性;水环境指标中的生态环境用水率、水功能区达标率变化趋势不明显,城市饮用水水源地水质达标率略呈提升趋势。人均 COD 环境容量由于人口的增加而呈减小趋势,综合来看,水环境系统指标对云南省近 10 年水生态承载力水平的提升贡献不大。近 10 年来,由于云南省经济的快速发展,民生的持续改善,全省在用水效率和用水效益,供水实施和供水条件等方面得到的较大提升,经济系统和社会系统指标对云南省近 10 年水生态承载力水平的提升贡献最大。“十四五”期间,通过加大水环境治理投入,改善水环境质量;进一步加大工业、农业节水改造力度,提高用水效率和效益;兴建水源工程,提高供水保证率等措施,云南省水生态承载力还有进一步提升的空间,但受水资源条件和人口增长等因素的制约,水生态承载力水平提升空间有限。

表 4 熵权法 - 云模型水生态承载力评价结果及比较

年份	确定度				本文方法	模糊综合评价法	投影寻踪法
	I级	II级	III级	IV级			
2006	0.1297	0.2954	0.3201	0.2918	III级	III级	IV级
2007	0.2426	0.2390	0.2950	0.2739	III级	III级	III级
2008	0.2235	0.2747	0.3979	0.1628	III级	III级	III级
2009	0.1413	0.2980	0.4721	0.1441	III级	III级	III级
2010	0.1349	0.4114	0.4001	0.1213	II级	II级	III级
2011	0.1120	0.4573	0.3236	0.1880	II级	II级	III级
2012	0.1325	0.5582	0.2459	0.1428	II级	II级	II级
2013	0.1871	0.5773	0.2071	0.1106	II级	II级	II级
2014	0.2543	0.5231	0.2073	0.0733	II级	II级	II级
2015	0.3051	0.5007	0.1920	0.0575	II级	II级	II级
2016	0.3987	0.4612	0.1518	0.0438	II级	I级	II级
2020	0.5536	0.3158	0.1306	0.0000	I级	I级	I级

5 结 论

(1)本文构建了具有云南省区域特征的水生态承载力评价指标体系和分级标准,将正态云模型引入水生态承载力评价中,建立熵权法 - 正态云水生态承载力评价模型。通过熵权法求出各指标权重,由云模型正向发生器计算水生态承载力分级评价指标的隶属度,再根据权重矩阵和隶属度矩阵给出水生态承载力评价结果。评价结果与模糊综合评价法、投影寻踪法的评价结果进行比较,验证了熵权法 - 正态云模型用于水生态承载力评价的可行性和合理性。

(2)利用熵权法 - 正态云模型对云南省 2006 -

2016 年和 2020 年水生态承载力水平进行评价,结果为 2006 - 2009 年水生态承载力水平为基本可承载,2010 - 2016 年为可承载,2020 年为绝对可承载。该模型对解决评价指标和评价标准具有的随机性和模糊性问题具有较大优势,模型及方法同样适用于其他类型的综合评价。

参考文献:

[1] 王西琴,刘子刚,等.太湖流域水生态承载力研究[M].北京:中国环境出版社,2013.

[2] 王卫军,周孝德,周彬翀,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.

[3] 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.

[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] 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.

[6] 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.

[7] 石晓静,查小春,刘嘉慧,等.基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J].水利水电科技进展,2017,37(3):29 - 34 + 48.

[8] 付文艺.基于熵权 - 正态云模型的地下水水质综合评价[J].人民黄河,2016,38(5):68 - 71 + 76.

[9] 曾志雄,田海,黄珏皓.基于云模型的膨胀土胀缩等级分类[J].长江科学院院报,2016,33(2):80 - 85.

[10] 黄显峰,刘展志,方国华.基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J].水利水电科技进展,2017,37(6):54 - 61.

[11] 周云哲,粟晓玲.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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 左太安,刁承泰,施开放,等.基于物元分析的表层岩溶带“二元”水生态承载力评价[J].环境科学学报,2014,34(5):1316 - 1323.