

基于正态云模型的人水和谐度评价

杨丹, 唐德善, 周祎

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为综合评价区域人水和谐度,从水系统健康、人文系统发展、人水系统相互协调3个方面选取16项指标构建区域人水和谐度评价体系,确定评价指标分级标准,建立基于正态云的人水和谐度评价模型;模型采用博弈论法确定指标综合权重,利用正向云发生器确定指标隶属度,通过最大隶属度原则判断和谐度等级。采用该模型评价宿迁市2013-2017年人水和谐度,评价结果显示宿迁市历年人水和谐度总体呈上升趋势,部分不和谐指标存在较大的提升空间,与实际情况相符,表明所建立的评价模型合理可行。评价结果及相关建议有助于进一步协调宿迁市人水关系。

关键词: 人水和谐; 正态云模型; 博弈论; 熵权; 宿迁市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0053-06

Human – water harmony evaluation based on normal cloud model

YANG Dan, TANG Deshan, ZHOU Yi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the state of regional human – water harmony, 16 indicators are selected from three aspects, which are human system development, water system health and human – water system coordination, to construct an evaluation system. Then a series of evaluation index grading criteria are determined to establish a human – water harmony evaluation model based on normal cloud. This model uses game theory to determine the individual comprehensive weight of each indicator, and normal cloud generator to determine the indicator membership, based on which the harmony level of the indicator is decided according to the principle of maximum membership. We adopted this model to evaluate the human – water harmony in Suqian City from 2013 to 2017. The evaluation results show that the overall human – water harmony in Suqian City is on the rise, and some disharmonious indicators have great potentials for improvement. These findings are consistent with the actual situation, indicating that the proposed evaluation model is applicable. At the same time, the evaluation results and related suggestions can help Suqian City further coordinate the relationship between human and water.

Key words: human – water harmony; normal cloud model; game theory; entropy weight; Suqian City

1 研究背景

随着社会经济的迅猛发展,用水需求不断增加,水资源在开发利用过程中被严重破坏,水环境、水生态问题不断凸显,水危机开始制约人类社会的可持续发展。面对这些问题,人类开始积极主动地寻求人水关系的改善,强调水资源的可持续利用,走人水和谐道路。十八大以来,党中央、国务院对长江生态的保护非常重视,强调推动长江经济带发展必须走生态优

先、绿色发展之路。近几年全国各地都在进行黑臭水体整治,并使用信息平台实时公示整治进度。这一系列的活动都是支撑社会可持续发展的重要保障。这种情况下,研究区域人水关系和谐度,分析其制约因素,形成一套完善的量化评价体系十分重要。

人水和谐度评价涉及诸多影响因子,是一个随机性和模糊性较强的多目标问题。目前,评价人水和谐度的常用方法主要有主成分分析法、模糊物元综合评价法等。张金鑫等^[1]利用云模型理论计算指标权重,

收稿日期:2019-11-15; 修回日期:2020-02-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405805-04)

作者简介:杨丹(1995-),女,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为水利水电系统规划与工程经济。

评价人水和谐度;戴会超等^[2]从人水主观感受度、人水和谐发展度、人水和谐协调度3个方面研究南京的人水和谐程度,研究结果表明南京人水和谐度逐年提高;孟令爽等^[3]采用基于 Spass 软件的主成分分析法构建了城市人水和谐度评价模型,对2011-2016年北京市人水和谐度做出客观评价;毛翠翠^[4]从人文系统、水系统、人水系统相互作用3方面分析人水关系,提出一套人水关系评估模型评估2000-2009年河南省人水关系;沈金阳^[5]构建了基于系统-区域-部门和谐的人水和谐量度评价模型,对南宁市现状人水和谐度进行评价与分析。本文在已有的研究基础上,深入分析人水和谐内涵,通过正态云模型计算指标隶属度,结合博弈组合法确定权重,建立主客观相结合的人水和谐度评价模型,定量计算人水和谐度,从而为人水和谐度评价提供一条可行的新途径。

2 区域人水和谐度评价指标体系

2.1 人水和谐内涵

人类在从水环境汲取生存资源、与水环境互动过程中形成了人水系统,当人水系统间达到相互协调的良性循环状态^[6-7],即为人水和谐。人水和谐包括两个方面:(1)人文系统和水系统全面发展,即人类社会高度发展,水系统不断提高自我维持及更

新能力;(2)人水系统协调发展,即水资源能够永久保障人类社会的可持续发展,人类能采取措施促进水系统持续发展。

2.2 评价指标选取及分级标准

人水和谐度评价指标应本着科学、合理、客观、全面的宗旨进行选取。王梅等^[8]从区域人水发展、区域人水协调、区域人水和谐主观感受3个维度出发选取评价指标;莫崇勋等^[9]从水系统健康程度、人文系统发展程度和人水系统协调程度3方面出发,选取评价指标。本文参考已有的评价指标体系,在实地调查、专家咨询、文献查阅等基础上,基于人水和谐的概念及内涵,从人文系统发展、水系统健康、人水系统相互协调3方面对其系统结构进行分析,针对人水相互作用状态制定一套区域人水和谐度评价指标体系^[10-12]。该指标体系包含13项定量指标和3项定性指标,其中定量指标均通过统计年鉴、水资源公报等公开数据资料确定,定性指标采用问卷调查等方法确定。本文在充分收集研究区域实际资料的前提下,将人水和谐度评价标准划分为5个等级,各等级标准均参照《中华人民共和国水污染防治法》《污水综合排放标准》(DB12/356-2008)等有关国家、地区、行业标准,或类似研究区域的研究成果^[13-14]。具体指标和分级标准见表1。

表1 区域人水和谐度评价指标体系及分级标准

维度层	指标层	评价等级				
		I	II	III	IV	V
水系统 健康度	生态环境用水率 $C_1 / \%$	12~7	3~7	2~3	1~2	<1
	单位面积水资源量 $C_2 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	50~200	30~50	20~30	10~20	<10
	全覆盖水功能区全年期达标率 $C_3 / \%$	>45	40~45	35~40	30~35	20~30
A ₁	建成区绿化覆盖率 $C_4 / \%$	>50	40~50	30~40	20~30	<20
	河岸亲水景观舒适度 C_5	>80	70~80	50~70	40~50	<40
人文系统 发展度	人均 GDP $C_6 / 10^4$ 元	5~20	4~5	3~4	1~3	<1
	人口密度 $C_7 / (\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	>1000	800~1000	600~800	300~600	<300
	恩格尔系数 C_8	25~35	35~40	40~45	45~50	>50
	A ₂ 城镇化率 $C_9 / \%$	60~90	50~60	40~50	30~40	20~30
	工业用水重复率 $C_{10} / \%$	>90	80~90	75~80	70~75	50~70
人水系统 协调度	万元工业增加值用水量 C_{11} / m^3	<20	20~40	40~60	60~80	80~100
	化学需氧量排放量 $C_{12} / 10^4 \text{t}$	<6	6~9	9~10	10~12	12~30
	污水处理率 $C_{13} / \%$	>90	80~90	70~80	60~70	50~60
	A ₃ 水资源管理水平 C_{14}	>90	70~90	50~70	40~50	30~40
	用水普及率 $C_{15} / \%$	>95	90~95	80~90	60~80	40~60
	公众节水意识 C_{16}	>90	80~90	70~80	50~70	30~50

3 区域人水和谐度评价模型

基于正态云模型的人水和谐度评价模型的计算步骤为:(1)利用博弈论组合赋权法确定评价指标权重;(2)按照已知的数字特征,利用正向云发生器对各个指标进行云滴生成,得到对应 5 级标准的隶属云图;(3)将评价指标实际值输入 X 条件云发生器,得到各指标隶属度集合,多次运用得到综合隶属度,结合各指标权重,即可确定人水和谐度评价的综合结果。

3.1 指标权重确定

由于赋权方法大致分为主观和客观赋权法两种,各有优缺点。本文考虑将主观赋权法与客观赋权法相结合,利用博弈论确定评价指标组合权重,以此减少指标权重对评价结果准确性的影响。博弈论是分析决策主体行为相互影响时的理性行为及其决策均衡的问题,是研究具有竞争性事物的理论和方法。利用 l 种方法计算 n 项指标的初始权重,得 l 组权重集合: $W_k = (\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn})$, 其中 $k = 1, 2, \dots, l$, l 组权重的线性组合为 $W = \sum_{k=1}^l a_k W_k^T$, 其中 W 为组合权重, a_k 为线性组合系数^[15-16]。

基于博弈论思想,最小化组合权重与初始权重间的偏差,最优化模型 $\min \|\sum_{k=1}^l a_k W_k^T - W_p\|$, 即得到组合权重的最优解,其中 $p = 1, 2, \dots, l$ 。通过求解模型一阶导数条件求得最优化线性组合系数 a_k , 并对其归一化处理得到 a_k' , 最终得到 l 组的组合权重 $W' = \sum_{k=1}^l a_k' W_k^T$ 。

主观赋权法采用 AHP(层次分析法),客观赋权法采用熵权法。其中 AHP(层次分析法)是通过构造重要性判断矩阵,计算判断矩阵的最大特征值以及对应的正交化特征向量来确定权重和方案的优劣性^[17];熵权法的权重仅取决于实际数据的离散性,若数据离散程度较大,则该指标所占权重越大。具体计算步骤如下^[18]:

(1) m 个评价样本的 n 个评价指标构成评价矩阵,对矩阵进行归一化处理;

(2) 确定各项指标的熵值,其中 $g = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$:

$$e_i = \frac{-\sum_{g=1}^m p_{gi} \ln p_{gi}}{\ln m} \quad (1)$$

(3) 确定各项指标的权重:

$$\omega_i = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{i=1}^n \omega_i = 1) \quad (2)$$

3.2 云模型计算隶属度

3.2.1 云模型基本理论 云模型通过 3 个数字特征即期望 E_x 、熵值 E_n 和超熵 H_e 来反映定性概念的整体特征,每生成一个云滴,就随机实现了一次定性到定量的映射,生成次数越多,云特征就越显著。其中隶属云呈正态或半正态分布的正态云模型具有普遍适用性^[19-20]。

云发生器主要分为正向云发生器、逆向云发生器、X 条件云发生器、Y 条件云发生器 4 种^[21],其中正向云发生器是已知云模型数字特征形成云滴的过程;X 条件云发生器是已知数字特征和 1 个云滴数值 X_0 ,求得该条件下云滴隶属度 μ_0 的过程,算法步骤如下:

(1) 利用计算机生成随机数算法,按正态分布特征 (E_n, H_e) 生成正态随机数 E_n^* 。

(2) 根据隶属度公式(3)得到隶属度 $\mu(x)$:

$$\mu(x) = \exp\left\{-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n^*)^2}\right\} \quad (3)$$

(3) 重复以上步骤,直到产生 N 个云滴。

3.2.2 数字特征确定 对于云模型的数字特征可以采用边界约束法来进行计算,设指标 i 的某一等级区间为 $[B_{\min}, B_{\max}]$,云模型的特征值可利用公式(4)计算^[22-23]:

$$\begin{cases} E_x = (B_{\max} + B_{\min})/2 \\ E_n = |B_{\max} - B_{\min}| / 2.355 \\ H_e = 0.1 E_n \end{cases} \quad (4)$$

若超熵计算值过小,可直接取经验值 0.01 或 0.05。

3.2.3 隶属云及隶属度确定 根据已经得到的数字特征,利用 MATLAB 软件编写正向云发生器代码,生成 N 个云滴的模拟数据,可得到对应指标各评价等级的隶属云图。根据隶属度公式(公式(3)),运行 X 条件云发生器,计算得到第 i 个指标对应的第 j 个等级的隶属度 μ_{ij} ,为了提高评价结果的可靠性,可运行 N 次云发生器,得到平均隶属度 $\bar{\mu}_{ij}$,利用权重集合 W 和平均隶属度矩阵得到各维度层综合隶属度矩阵 Z ,最后根据最大隶属度原则判断评价对象的和谐度等级。

4 实例研究

宿迁市地处江苏省西北部,淮河、沂沭泗中下游流域,南与淮安毗邻,东与连云港接壤,北与徐州市相连,西与安徽省交界,下辖沭阳、泗阳、泗洪3个县和宿城区、宿豫区。境内河湖水系众多,南临洪泽湖,北接骆马湖,拥有古黄河等10条流域性河道和39座小水库,容纳上游约 $210 \times 10^4 \text{ km}^2$ 面积的洪水,素有“洪水走廊”之称。宿迁市多年平均水资源总量约 $23.189 \times 10^8 \text{ m}^3$,但人均占有量仅 424.5 m^3 ,过境水量丰富却无法调蓄,属于缺水型城市。近些年宿迁市各行各业迅速发展,

经济实力显著提升,生活生产等方面对水资源的需求量越来越大,水质型缺水日益加剧,水资源供需平衡较差,需水满意度较低。因此人水和谐度研究十分必要。根据表1的评价指标体系,查阅宿迁市2018年统计年鉴以及2017水资源公报等数据资料,宿迁市2014-2017年人水和谐度评价指标实际值见表2。

4.1 评价模型应用

利用信息熵法按照公式(1)、(2)计算各评价指标的客观权重。在主、客观权重的基础上按照博弈论原理进行最优化计算,得出综合权重 W ,具体结果见表3。

表2 2013-2017年宿迁市人水和谐度各评价指标实际值

年份	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
2017	2.51	32.41	49.5	42.4	84	5.33	693.0	34.4	58.53	90.30	49	9.20	90.42	86	99.47	95
2016	2.31	36.83	38.2	42.2	79	4.83	694.0	35.1	57.53	89.00	53	9.47	89.01	82	99.62	91
2015	4.38	26.63	41.6	42.0	76	4.39	688.0	35.3	55.53	88.70	58	9.73	88.44	79	99.58	88
2014	2.46	37.45	41.6	41.5	71	4.00	681.3	36.3	53.74	88.42	64	9.96	88.17	73	99.51	82
2013	1.09	12.33	40.0	41.1	68	3.55	671.2	36.6	52.37	80.00	68	10.28	85.89	69	99.16	80

表3 宿迁市人水和谐度各评价指标权重

权重	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
ω_1	0.0431	0.0448	0.0656	0.0332	0.0449	0.0371	0.0286	0.0731	0.0439	0.0842	0.0566	0.0449	0.1225	0.1332	0.0391	0.1053
ω_2	0.0533	0.0587	0.0659	0.0626	0.0644	0.0613	0.0773	0.0687	0.0677	0.055	0.0663	0.0594	0.0507	0.0636	0.0547	0.0703
W	0.0479	0.0513	0.0657	0.0470	0.0540	0.0484	0.0514	0.0710	0.0550	0.0705	0.0611	0.0517	0.0889	0.1006	0.0464	0.0889

按照公式(4)计算各指标5个等级对应的云模型特征数字。以指标 C_1 为例,其5级标准的数字特征 $E_x = (9.50, 5.00, 2.50, 1.50, 0.50)$, $E_n = (2.1231, 1.6985, 0.4246, 0.4246, 0.4246)$, $H_e = (0.2123, 0.1699, 0.0425, 0.0425, 0.0425)$, 利用MATLAB编写正态云发生器得到对应5级标准的生态环境用水率隶属云图,如图1所示。

以2017年为例,根据隶属度公式(3)及指标实测值,运行X条件云发生器 $N=2000$ 次,得到指标平均隶属度(见表4)。再结合组合权重得到人水和谐度综合评价。2013-2017年宿迁市人水和谐度评价结果见表5。

4.2 评价结果分析

根据表5可直观看出,宿迁市2013-2017年人水和谐度总体呈稳定上升趋势,其中2017年为人水和谐度的峰值年份,参考各年份指标的实际数值,2017年的全覆盖水功能区全年期达标率、建成区绿化覆盖率、河岸亲水景观舒适度、人均GDP等指标

均为5年内的最大值,表明宿迁市坚持依法管水,全面落实最严格水资源管理制度,扎实推进河长制工作取得良好成效。2013-2017年人水和谐度与各评价指标均同为上升趋势,证明了评价结果是可靠的,也表明该人水和谐度评价模型是合理可行的。

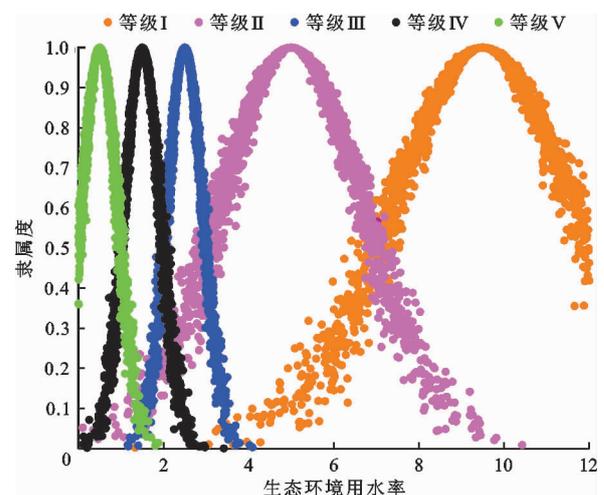


图1 5个评价等级的生态环境用水率(C_1)隶属云图

在上述实例研究中可以通过最大隶属度原则判断 2017 年各评价指标等级,具体判断结果见表 6。

表 4 2017 年宿迁市人水和谐度各评价指标不同评价等级的平均隶属度

等级	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
I	0.0062	0.1368	0.6134	0.3057	0.7752	0.5269	0.4133	0.578	0.433	0.5354	0.0001	0.0548	0.5512	0.1091	0.6451	1
II	0.3381	0.6617	0.0061	0.8270	0.1095	0.1538	0.056	0.3408	0.7016	0.4557	0.0848	0.4058	0.4366	0.7744	0.0063	0.0652
III	0.9997	0.2199	0	0.2188	0.0221	0.0003	0.9965	0.0013	0.0087	0	0.9929	0.774	0.0023	0.0122	0.0045	0.0001
IV	0.0640	0.0005	0	0.0005	0	0.0009	0.1632	0	0	0	0.0502	0.1099	0	0	0.0037	0.0005
V	0.0001	0	0.0295	0.0013	0.0015	0	0.0003	0.1623	0	0.0029	0	0.3020	0	0	0	0

表 5 2013 - 2017 年宿迁市人水和谐度评价结果

年份	I	II	III	IV	V	等级
2017	0.4348	0.3495	0.2248	0.0205	0.0294	I
2016	0.3156	0.5125	0.2888	0.0378	0.0419	II
2015	0.2561	0.6453	0.2325	0.0515	0.0383	II
2014	0.2110	0.5965	0.2773	0.0923	0.0413	II
2013	0.1566	0.4100	0.3509	0.1941	0.0811	II

表 6 基于最大隶属度确定的 2017 年宿迁市人水和谐度各指标层评价等级

指标层	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
评价等级	III	II	I	II	I	I	III	I	II	I	III	III	I	II	I	I

由表 6 可知,虽然 2017 年宿迁市整体人水和谐度评价等级为 I 级,但分项指标仍存在不和谐情况,如生态环境用水率、人口密度、万元工业增加值用水量、化学需氧量排放量 4 项指标的和谐度等级为 III 级,单位面积水资源量、建成区绿化覆盖率、城镇化率和水资源管理水平 4 项指标的和谐度等级为 II 级,还有较大的提升空间。故宿迁市应紧抓薄弱环节,针对短板着重治理,为此提出以下几点建议:

(1)宿迁市多年平均水资源总量为 $23.189 \times 10^8 \text{ m}^3$,相对较丰富,多年平均年降水量为 915.3 mm,过境水资源量较大,但单位面积水资源量及人均水资源量较少,应完善涉水规划体系,严格取水管理,强化地下水水量与水位双控管理,积极做好水资源费的增收作用,实行阶梯水价,全面落实最严格水资源制度,确保水资源总量。

(2)宿迁市水体化学需氧量较省内其他城市有一定差距,说明水质污染情况有待改善,需要加强河道保护,启动生态河道建设,对淤积严重、水质恶化的河道展开集中整治,通过河道清淤、打通阻水坝、铺设生态护坡等手段,改善河道水环境,同时加强饮用水水源保护,严格入河排污口监督管理,实施污水干管和提升泵站工程,对市内污水处理厂进行

提升改造,加快建设城镇及农村污水处理设施,从源头把控水质。

(3)宿迁市 2017 年万元工业增加值用水量为 49 m^3 ,低于国内平均值 58.3 m^3 ,明显高于同期的江苏省平均值 36.7 m^3 ,与国际低于 15 m^3 的顶尖水平差距较大。宿迁市应优化工业用水资源,应调整产业结构,根据政府相关政策及企业生产情况,关、停、并、转一些高耗水、高污染的中小型企业,创建节水型工业。

5 结 论

(1)本文将云模型、博弈论组合权重与区域人水和谐度评价相结合,建立了基于正态云的人水和谐度评价模型。该模型通过正向云发生器计算隶属度,对人水和谐进行定量评价,信息熵法可根据研究区域的数据离散程度客观确定指标权重,AHP 可根据专家重要性判断得出主观权重,博弈论可均衡优化权重,云模型可将定性转化为定量,并充分考虑人水系统的模糊性及其随机性,从而为人水和谐度评价提供一条科学合理的新路径。

(2)利用模型对宿迁市 2013 - 2017 年人水和谐度评价指标实际值进行计算分析,判断各年份人水

和谐度等级,分析得出评价结果贴近研究区域实际情况,表明该评价模型合理可行,可适用于其他区域人水和谐度评价。

(3)根据评价模型中单一指标的和谐度等级可以清晰看出被评价区域在人水和谐方面的不足之处,并以此为导向,针对制约因素提出对应整改措施,这对于研究区域进行下一步水利工作,推动人水关系进一步和谐化具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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+127.
- [2] 戴会超,唐德善,张范平.城市人水和谐度研究[J].水利学报,2013,44(8):973-978+986.
- [3] 孟令爽,唐德善,史毅超.基于主成分分析法的城市人水和谐度评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):93-98.
- [4] 毛翠翠.人水关系的作用机制及量化方法研究[D].郑州:郑州大学,2013.
- [5] 沈金阳.南宁市人水关系和谐评价及调控对策[D].南宁:广西大学,2018.
- [6] 左其亭,张云,林平.人水和谐评价指标及量化方法研究[J].水利学报,2008,39(4):440-447.
- [7] 蔡其华.论人水和谐[J].人民长江,2006,37(5):1-3.
- [8] 王梅,唐德善,孟珍珠,等.基于模糊物元的综合评价模型在区域人水和谐评价中的应用[J].水电能源科学,2015,33(2):160-163+134.
- [9] 莫崇勋,莫桂燕,阮俞理,等.基于变权法的南宁市人水和谐度评价[J].水电能源科学,2018,36(3):30-33.
- [10] 钱程.城市化进程中人水和谐程度分析[J].绿色科技,2017(8):70-73.
- [11] 康艳,蔡焕杰,宋松柏.宝鸡市人水和谐评价研究[J].

自然资源学报,2014,29(1):156-165.

- [12] 陆赛,唐德善,孟令爽.基于GRA-IECD协调发展模型的人水和谐评价[J].人民黄河,2019,41(3):84-88.
- [13] 王大洋,黄凯,莫崇勋,等.基于综合权重SMI-P法的广西人水和谐度量化评价[J].节水灌溉,2018(7):107-112.
- [14] 左其亭.人水和谐论及其应用研究总结与展望[J].水利学报,2019,50(1):135-144.
- [15] 李天宏,薛晶,夏炜,等.组合赋权法-木桶综合指数法在长江生态航道评价中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(1):36-49.
- [16] 鲁佳慧,唐德善.基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价[J].水利水运工程学报,2018(6):105-111.
- [17] 刘菁,唐德善,郝建浩.基于复合云模型的太湖流域水环境质量风险评价[J].长江科学院院报,2018,35(6):24-29.
- [18] 杨丹,唐彦,唐德善.基于熵权的模糊物元法在农业用水效率评价中的应用[J].节水灌溉,2018(10):64-67.
- [19] 张杨,严金明,江平,等.基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J].农业工程学报,2013,29(22):252-258.
- [20] 方娜,游清徽,刘玲玲,等.基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价[J].生态学报,2019,39(17):6314-6321.
- [21] 高玉琴,赖丽娟,姚敏,等.基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):1-7.
- [22] 唐新玥,唐德善,常文倩,等.基于云模型的区域河长制考核评价模型[J].水资源保护,2019,35(1):41-46.
- [23] 龚艳冰.基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):169-174.

(上接第52页)

- [16] ZHANG Pengpeng, ZHANG Lixiao, CHANG Yuan, et al. Food - energy - water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142: 215 - 224.
- [17] LI Guijun, HUANG Daohan, SUN Chengshuang, et al. Developing interpretive structural modeling based on factor analysis for the water - energy - food nexus conundrum [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 309 - 322.
- [18] 王浩,杨贵羽,杨朝晖.水土资源约束下保障粮食安全的战略思考[J].中国科学院院刊,2013,28(3):329-336+321.
- [19] 姚成胜,滕毅,黄琳.中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析[J].农业工程学报,2015,31(4):1-10.
- [20] 惠调艳,郭筱.西部地区经济-资源-环境协调发展水平测度[J].统计与决策,2019,35(11):124-128.
- [21] 张宁宁,粟晓玲,周云哲,等.黄河流域水资源承载力评价[J].自然资源学报,2019,34(8):1759-1770.
- [22] 刘佳骏,董锁成,李宇.产业结构对区域能源效率贡献的空间分析——以中国大陆31省(市、自治区)为例[J].自然资源学报,2011,26(12):1999-2011.
- [23] 白雪,宋玉祥,浩飞龙.东北地区“五化”协调发展的格局演变及影响机制[J].地理研究,2018,37(1):67-80.