

彰武水库水环境安全评估

李中原¹, 王国重², 张继宇³, 程焕玲⁴, 赵蓓蓓⁵, 李永丽¹

(1. 河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003; 2. 黄河水文水资源科学研究院, 河南 郑州 450004;
3. 黄河养护集团有限公司, 河南 郑州 450003; 4. 河南省水土保持监督监测总站, 河南 郑州 450008;
5. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450008)

摘要: 彰武水库是河南省境内海河流域的主要水库, 由于自然和人为因素影响, 库内水体水质较差。为了强化水库水环境安全工作、确保水库水质, 以该水库作为研究对象, 通过 DPSIR 模型建立了该水库水环境安全评估指标体系, 根据熵值法计算了各指标的权重, 尝试用云模型对其 2015 年的水环境安全状况予以评估。结果表明: 该水库水环境为较安全级别, 但存在安全隐患; 由于周边较多废弃的工矿企业, 其工业废水和农业化肥农药, 随降雨和灌溉退水而排入水库, 再加上传统的网箱养殖方式, 使其 TN、TP 的浓度严重超标, 水库水质全年为劣 V 类, 需引起水库管理部门的重视。云模型能减少评估过程中的不确定性, 其评估结果与实际相符, 可用于水体环境的安全评估。

关键词: 水环境安全; 驱动力—压力—状态—影响—响应模型(DPSIR)模型; 云模型; 熵值法; 彰武水库

中图分类号: X524; X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0089-06

Water environmental safety assessment of Zhangwu Reservoir

LI Zhongyuan¹, WANG Guozhong², ZHANG Jiyu³, CHENG Huanling⁴, ZHAO Beibei⁵, LI Yongli¹

(1. Hydrology and Water Resources Bureau in Henan Province, Zhengzhou 450003, China;

2. Hydrology and Water Resources of Yellow River Scientific Research Institute, Zhengzhou

450004, China; 3. Yellow River Conservation Group Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

4. Soil and Water Conservation Supervision and Inspection Station in Henan Province, Zhengzhou 450008, China;

5. Henan Water and Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450008, China)

Abstract: As a main reservoir of Haihe River Basin in Henan Province, the water quality of Zhangwu Reservoir is poor in recent years due to natural and human factors. To strengthen the reservoirs' water environmental safety and to ensure the water quality, the Zhangwu Reservoir was taken as research object, the indexes system of its' water environmental safety were established using the DPSIR model, the weight of each index was determined by the entropy value method and the rank of water environmental safety in 2015 was evaluated with cloud model. The results showed that the rank of water environment of the reservoir was relative safe, but there were potential safety hazards. There were many abandoned industrial and mining enterprises around the reservoir, and the industrial waste water and agricultural chemical fertilizer and pesticides were discharged into the reservoir with rainfall and irrigation withdrawal water, coupled with the traditional cage farming mode, which made the concentration of TN and TP severely exceed the standard, and the water quality of the reservoir was V kind throughout the year, which the reservoir management department needs to pay more attention. We conclude that the cloud model can reduce the uncertainty during evaluation process and its evaluation results were consistent with the reality, which can be used to evaluate water environmental safety.

Key words: water environment safety; DPSIRD (Driving forces - Pressures - State - Impacts - Responses) model; cloud model; entropy value method; Zhangwu Reservoir

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-03-11

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(GG201604)

作者简介: 李中原(1964-), 男, 河南郑州人, 硕士, 教授级高级工程师, 从事水土保持方面的工作。

1 研究背景

彰武水库位于洹河大峡谷出口处,控制流域面积 120 km²,总库容 7 063 × 10⁴ m³,兴利库容 1 703 × 10⁴ m³,其主要作用是保障安钢、电厂用水及农业引蓄灌溉,兼营发电、养殖。水库设计灌溉面积 3.3 × 10⁴ hm²,可养殖水面 200 hm²[1]。

作为重要的工农业用水和地下水补给源,该水库水环境的安全与否,对安阳市经济社会的可持续发展意义重大[2-3]。2011年苗利芳等[4]首次对“十一五”以来安阳市地表水水质进行评估,认为彰武水库处于轻度富营养化状态。2017年李世华等[5]进一步指出安阳市“十二五”期间地表水水质总体污染程度为重度污染。2017年唐敏等[6]根据安阳市环境保护监测中心 2006-2015年的实测数据,对彰武水库的营养化状况进行了深入研究,认为十年间,水库营养状态已由中营养发展为轻度富营养,还有进一步恶化的趋势。

水库水环境安全与否直接关系到流域的供水和饮用水安全[7],水库水环境安全评估是保障饮水安全和水库可持续利用、实现人与自然和谐的基础,对于水环境安全进行评估的基本思路是:首先构建评估指标体系,然后选用评估方法、确定各指标的权重进行评估,最后分析评估结果的合理性[8]。构建评估指标体系国际上常用的模型主要有国际经济合作与发展组织提出的“压力-状态-响应(PSR)”模型、联合国可持续发展委员会推荐的“驱动力-状态-响应(DSR)”模型、欧洲环境署建议的“驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)”模式[9]。其中,PSR模式所构建的指标体系结构简单、符合逻辑,常常被人们选用[10];DSR模型中驱动力指标与状态指标之间的逻辑关系模糊,应用相对较少[11];DPSIR模式是对PSR体系的改进,添加了“驱动力”和“影响”两类指标,使指标体系在逻辑上更为完善[12]。常用的评估方法主要有层次分析法、主成分分析法、综合指数法等[13]。王国重等[14]采用PSR模型构建了河南省大型水库生态安全评估指标体系,以熵值法计算了各指标的权重,通过综合指数法对水库 2005、2015年的生态安全状况进行了评估;喻立等[15]通过DPSIR模型建立了沙湖湿地健康评价指标体系,根据层次分析法确定指标权重,并用模糊综合评价方法对该湿地进行了评估;李永丽[16]基于DPSIR模型创建了陆浑水库水环境安全评估指标体系,根据综合营养状态指数认为该水库长期处

于中营养状态。

上述评估方法都存在着不同程度的缺陷:层次分析法确定权重的方式过于主观,会造成极大的偏差;主成分分析法能够计算指标的权重,但会导致信息的缺失;综合评估方法难以克服评估过程中的随机性和模糊性问题[17]。上述评估方法的共性就是没有克服评估过程中主客观因素的影响,如对同一个评估指标而言,不同方法设置界限的方式或者所设定的界限不尽相同[18]。云模型是1995年李德毅教授在研究概率论和模糊数学的基础上提出来的,能够建立起定性概念与定量表示之间的转换关系,可有效处理评估过程中的不确定性[19-20]。本文以彰武水库为典型,以DPSIR模型来建立水库环境安全的评估指标体系,尝试采用云模型对该水库的环境安全状况进行评估。

2 基于 DPSIR 模型的彰武水库环境安全评估指标体系

2.1 DPSIR 指标体系

借鉴环境安全和生态安全指标体系[21-22],根据水库水环境安全概念和水库功能,确定了彰武水库环境安全评估指标体系:驱动力(降雨量)、压力(污染物入库量)、状态(污染物浓度)、影响(水质状况)、响应(透明度、溶解氧),共11项指标,分属5个方案层,各层间的关系为:污染物(TN、TP、高锰酸盐指数)随降雨产生的地表径流进入水库,增加了入库污染物数量和浓度,影响水体水质,使得指标透明度和溶解氧发生相应的变化。水库的指标体系详见图1。

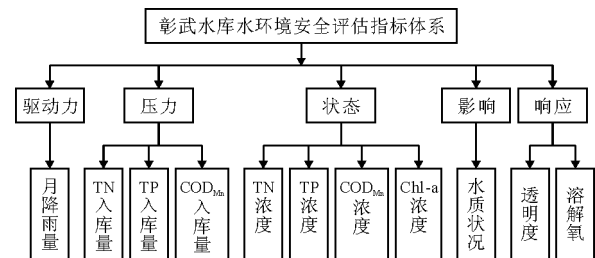


图1 彰武水库水环境安全评估指标体系

根据彰武水库2015年水质监测数据,对其水环境安全状况进行评估。其中雨量数据来自库区雨量站的监测值;污染物的入库量则通过入库河流的流量、入库排污口监测数据和水库水质监测数据计算得到;水质状态指标 TN、TP、Chl-a、COD_{Mn} 和响应指标透明度、溶解氧的数值由河南省环境监测中心提供;依据《地表水环境质量标准(GB3838-

2002)》中规定的 II 类水水质目标,判断各月水质是 否达标。2015 年各月水质指标的监测值详见表 1。

表 1 2015 年彰武水库水质监测数据

月份	降水量/ mm	污染物入库量/t			浓度/(mg · L ⁻¹)				水质 状况	透明度/ cm	溶解氧/ (mg · L ⁻¹)
		TN	TP	COD _{Mn}	TN	TP	COD _{Mn}	Chl - a			
1	10.2	43.745	0.895	28.627	4.89	0.10	3.20	0.042	劣 V	110.0	7.3
2	6.4	37.319	0.854	22.203	4.37	0.10	2.60	0.052	劣 V	120.0	10.5
3	47.8	36.865	0.396	23.784	3.72	0.04	2.40	0.035	劣 V	100.0	7.4
4	79.6	60.574	1.259	47.200	3.85	0.08	3.00	0.028	劣 V	110.0	6.4
5	83.8	51.156	0.287	25.817	5.35	0.03	2.70	0.011	劣 V	100.0	7.8
6	132.9	57.912	5.424	48.989	3.31	0.31	2.80	0.012	劣 V	100.0	7.2
7	64.5	28.431	3.929	27.914	2.75	0.38	2.70	0.013	劣 V	120.0	6.2
8	121.5	26.309	0.410	23.768	3.21	0.05	2.90	0.016	劣 V	120.0	6.9
9	94.0	33.491	0.459	33.950	3.65	0.05	3.70	0.010	劣 V	80.0	7.2
10	64.6	35.429	0.261	31.337	4.07	0.03	3.60	0.019	劣 V	80.0	6.3
11	56.2	47.552	0.884	34.471	5.38	0.10	3.90	0.011	劣 V	100.0	6.8
12	1.1	35.998	0.514	26.570	4.20	0.06	3.10	0.011	劣 V	90.0	7.9
平均	63.6	41.232	1.298	31.219	4.06	0.11	3.05	0.022	超标	102.5	7.3

2.2 指标权重的确定

设 n 个评估指标 P_1, P_2, \dots, P_n , 其中的 m 个样本为 S_1, S_2, \dots, S_m , Q_{ij} 为样本 S_i 在指标 P_j 时的实测值, 这样就产生了 m 个样本 n 个指标的矩阵 $(Q_{ij})_{m \times n}$ 。该矩阵中各指标的数量级、量纲等差异很大, 需要对该矩阵中的数据进行规范化处理, 处理公式见公式(1)、(2)所示^[23]。

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{Q_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} Q_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} Q_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} Q_{ij}}, & P_j \text{ 为正向指标时} \\ \frac{\max_{1 \leq i \leq m} Q_{ij} - Q_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} Q_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} Q_{ij}}, & P_j \text{ 为负向指标时} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{令 } x_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (2)$$

式中: Q_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个指标的实测值; y_{ij} 为经过标准化处理后的第 i 个样本中第 j 个指标的值; $\max Q_{ij}$ 和 $\min Q_{ij}$ 分别为实测值 Q_{ij} 的最大值和最小值。

熵值法因为受主观因素影响较小, 常被研究者用于确定指标的权重^[24-26]。这里也采用熵值法, 第 j 项指标的熵值 E_j 可由斯蒂林公式得到, 详见公式(3)。而某项指标的效用价值则取决于该指标的熵值 E_j 与 1 的差值。

$$E_j = -k \cdot \sum_{i=1}^m (x_{ij} \cdot \ln x_{ij}) \quad (3)$$

式中: 常数 $k = (\ln m)^{-1}$ 。

$$h_j = 1 - E_j \quad (4)$$

则第 j 项指标的权重为:

$$w_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (5)$$

各指标经规范化处理后, 再由公式(3) ~ (5) 计算得到各个指标的权重, 见表 2 所示。

表 2 模型的评价指标及其权重

目标层	准则层(权重)	评价指标层	权重
水环境安全状况	驱动力(0.10199)	降雨量/mm	0.10199
		TN 月入库量/t	0.09576
	压力(0.23296)	TP 月入库量/t	0.05596
		COD _{Mn} 月入库量/t	0.08124
		TN 浓度/(mg · L ⁻¹)	0.11692
	状态(0.33893)	TP 浓度/(mg · L ⁻¹)	0.06205
		COD _{Mn} /(mg · L ⁻¹)	0.08995
		Chl - a/(mg · L ⁻¹)	0.07001
	影响(0.01173)	水质达标率/%	0.01173
	响应(0.31439)	透明度/cm	0.12025
	溶解氧/(mg · L ⁻¹)	0.19414	

3 云模型水库水环境安全综合评估

3.1 云模型的生成

云模型可构建水库环境安全评估中定性概念与定量之间的映射。设 U 为用精确数值表示的定量论域, C 为 U 上水库水环境安全的一个定性概念, 当 $x \in U$ 且 x 为定性概念 C 的一次随机实现, 则 x 在 U 上的分布显示为云, 每个 x 称为一个云滴, 多个云滴形成一朵云, 可表征定性概念与数域空间之间的映射关系^[27]。云模型以数字特征值 Ex 、 En 、 He 和云滴数目 N 作为输入, 以 N 个云滴数的定量值及每个云滴的隶属度作为输出。生成水库水环境安全评估的云模型具体步骤如下^[28]:

(1) 用求得的期望 Ex 、标准差 He 作为参数, 由

MATLAB 得到一个正态随机数 E'_n ;

(2) 用 E'_n 的绝对值为标准差和期望 Ex 、通过 MATLAB 得到一个正态随机数 x ;

(3) 设云滴 x 为定性概念的一次具体量化值, 计算其确定度 μ ;

$$\mu = \exp\left(\frac{-(x - Ex)^2}{2(E'_n)^2}\right) \quad (6)$$

(4) 重复步骤(1) ~ (3), 直到产生 N 个云滴。

3.2 水库水环境安全的云模型评估

采用云模型建立水库水环境安全评估模型的步骤如下:

(1) 按照《地表水环境质量标准 (GB3838 - 2002)》, 结合水库功能, 确定了各水质指标的分级标准, 如表 3 所示。

表 3 水库水质评价指标分级标准

准则层	评估指标层	不安全	较不安全	较安全	安全
驱动力	降雨量/mm	>90	60 ~ 90	30 ~ 60	<30
	TN 月入库量/t	>15.52	10.35 ~ 15.52	5.17 ~ 10.35	<5.17
压力	TP 月入库量/t	>1.03	0.52 ~ 1.03	0.26 ~ 0.52	<0.26
	COD _{Mn} 月入库量/t	>103.49	62.09 ~ 103.49	41.39 ~ 62.09	<41.39
状态	TN 浓度/(mg · L ⁻¹)	>1.5	1.0 ~ 1.5	0.5 ~ 1.0	<0.5
	TP 浓度/(mg · L ⁻¹)	>0.1	0.05 ~ 0.1	0.025 ~ 0.05	<0.025
	COD _{Mn} /(mg · L ⁻¹)	>10	6 ~ 10	4 ~ 6	<4
影响	Chl - a/(mg · L ⁻¹)	>0.064	0.026 ~ 0.064	0.01 ~ 0.026	0.002 ~ 0.01
	水质达标率/%	<60	60 ~ 70	70 ~ 80	>80
响应	透明度/cm	<30	30 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 300
	溶解氧/(mg · L ⁻¹)	<3	3 ~ 5	5 ~ 7.5	>7.5

(2) 按照各水质指标不同安全等级所在的阈值范围, 确定各级别云模型相应的各数字特征 Ex 、 En 、 He 。

云模型数字特征的计算公式如下^[29]:

$$\begin{cases} Ex = \frac{u_{\min} + u_{\max}}{2} \\ En = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{6} \\ He = k \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{\max} 、 u_{\min} 分别表示变量的最大和最小边界; k 为常数, 令 $k = 0.1$ 。若评估指标的评估等级区间为: I (0, a)、II (a , b)、III (b , c)、IV (c , $+\infty$), 则各等级云模型数字特征的计算如表 4 所示, 参数 a 、 b 、 c 的取值是根据表 3 中设置的各评估指标的分级标准而定, 具体详见表 5。

表 4 云模型数字特征的计算规则

评估等级	期望 Ex	熵 En	超熵 He
I	$Ex_1 = (a + 0)/2$	$En_1 = (a - 0)/6$	0.1
II	$Ex_2 = (a + b)/2$	$En_2 = (b - a)/6$	0.1
III	$Ex_3 = (b + c)/2$	$En_3 = (c - b)/6$	0.1
IV	$Ex_4 = c$	$En_4 = En_3$	0.1

根据表 4, 当评估因子的取值范围为有界区域时, 可通过正态云发生器生成正态云模型; 当评估因子的取值无限制范围时, 可通过正态云、半升云、半降云发生器形成组合云。

(3) 计算各指标不同评估等级的确定度, 并乘以相应的指标权重, 再将各指标同等级别的确定度与其权重的乘积相加, 所在级别中的最大值就是水库水环境对应的安全等级。

4 评估结果与分析

根据确定的评估指标和安全等级,分别计算了相应的 3 个数字特征值,生成各指标在不同等级下的云模型。

结合 2015 年彰武水库水质实测平均数据,得到了不同等级下各指标的确定度,再根据指标权重,加权求和得到了不同安全等级的综合确定度,其最大值即为水库 2015 年所处的安全等级。

彰武水库各评估指标相应的云模型评估等级下的确定度如表 6 所示,2015 年不同安全等级的综合确定度详见表 7。

表 5 各评估指标中参数 a 、 b 、 c 的取值

评估指标	a	b	c
降雨量/mm	30	60	90
TN 月入库量/t	29.35	58.70	88.06
TP 月入库量/t	1.47	2.94	5.87
COD _{Mn} 月入库量/t	234.81	352.22	587.04
TN 浓度/(mg·L ⁻¹)	0.5	1.0	1.5
TP 浓度/(mg·L ⁻¹)	0.025	0.05	0.1
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	4	6	10
Chl-a/(mg·L ⁻¹)	0.01	0.026	0.064
水质达标率/%	60	70	80
透明度/cm	30	50	100
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	3	5	7.5

表 6 各评估指标相应等级下的确定度

指标	安全等级				云模型 评估等级
	不安全	较不安全	较安全	安全	
降雨量	1.54×10^{-7}	0.00838	0.00013	1.91×10^{-21}	较不安全
TN 入库量	3.51×10^{-21}	6.62×10^{-11}	0.08162	5.39×10^{-8}	较安全
TP 入库量	4.15×10^{-17}	5.47×10^{-9}	0.00088	0.01180	安全
COD _{Mn} 入库量	0	0	0	0.00725	安全
TN 浓度	1.39×10^{-58}	0	0	0	不安全
TP 浓度	0.04146	0.00083	4.46×10^{-25}	0	不安全
COD _{Mn} 浓度	0	2.05×10^{-12}	2.23×10^{-8}	0.02987	安全
Chl-a 浓度	0.00020	0.01201	0	0.02982	安全
水质达标率	0.00194	0	0	0	不安全
透明度	0	0.00073	0.00064	0.00174	安全
溶解氧	0	3.34×10^{-17}	2.91×10^{-12}	4.39×10^{-7}	安全

表 7 不同安全等级的综合确定度

安全等级				云模型 评估等级
不安全	较不安全	较安全	安全	
0.04360	0.02195	0.08327	0.08048	较安全

由表 6、7 可知:2015 年彰武水库水环境安全评估等级为较安全,但有 3 个指标为不安全级别,分别为 TN 浓度、TP 浓度、水质达标率,降雨量指标处于较不安全级别,这正是其水质为劣 V 类的原因所在。彰武水库周边废弃的煤矿矿山较多,属于计划经济时代的历史遗留问题,这些工业废水、废渣沿着沟道排放、堆积,再加上农业化肥和农药在降雨和灌溉退水作用下排入水体,使水中 N、P 含量增加^[30];水产养殖尤其是大量的网箱养殖^[31],加大了水体中自源性污染,养殖饲料、鱼类排泄物及人为无序开发,增加了水体中 TN 含量,使藻类等浮游生物大量

繁殖,溶解氧含量降低。上述原因导致彰武水库水质难以达标。

5 结论与建议

通过 DPSIR 模型建立了彰武水库水环境安全评估的指标体系,采用熵值法确定了各个指标的权重,应用云模型对其 2015 年的水环境安全进行了评估,主要结论如下:

(1) 该水库水环境处于较安全等级,但存在安全隐患;由于废弃的工矿企业较多,其工业废水和周边农田中化肥农药在降雨径流和灌溉退水作用下进入水体,再加上传统的水产养殖模式,造成水库 N、P 浓度增加,水质全年为劣 V 类,水库管理部门应引起重视。

(2) 云模型能够揭示事物的随机性与模糊性,对评估指标进行分级,利用熵值法确定各指标的权

重,根据各指标不同等级的综合确定度,实现了定性概念与定量数值表达之间的转换,在一定程度上克服了评估过程中的不确定性。

针对水库周边废弃的工矿企业,一方面需对其治理整顿、拍卖或者租售,使其能发挥效益,对其废污水实施总量控制、达标排放,另一方面采取水土保持措施治理水土流失和面源污染,同时倡导生态健康养殖,取缔网箱养殖,确保水库水质安全。

参考文献:

- [1] 任勇军. 彰武水库除险加固后大坝渗流核算与观测资料分析[J]. 河南水利与南水北调, 2013(21): 43-44.
- [2] 付艳林, 王伟娟, 任松林. 彰武水库大坝防渗处理分析[J]. 大坝与安全, 2010(2): 60-63.
- [3] 焦士兴, 王腊春, 李静, 等. 基于生态位及其熵值模型的用水结构研究——以河南省安阳市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2248-2254.
- [4] 苗利芳, 张青艳, 王国涛. 安阳市水环境污染现状及保护措施[J]. 治淮, 2011(12): 80-81.
- [5] 李世华, 谢永霞, 门雪燕. 安阳市地表水环境质量变化趋势及污染防治对策[J]. 安阳工学院学报, 2017, 16(4): 51-53.
- [6] 唐敏, 赵海丽, 丁志安, 等. 彰武水库水体营养化状态及发展趋势分析[J]. 安阳工学院学报, 2017, 16(6): 57-59.
- [7] 温美丽, 张虹鸥, 周霞, 等. 新丰江水库供水特征及供水安全分析——以2003-2012年供河源市饮用水为例[J]. 热带地理, 2014, 34(4): 518-526.
- [8] 张颖, 刘凌, 燕文明. 区域水环境安全评价指标体系与评价方法[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 54-57.
- [9] 孙菲菲. 基于DPSIR模型的低碳旅游评价体系的构建及应用[J]. 内蒙古财经学院学报, 2013(6): 96-103.
- [10] 刘若宇. 基于PSR模型的生态城市评价指标体系的构建研究[J]. 能源环境保护, 2015, 29(5): 61-64.
- [11] 马云瑞, 刘大海, 仲崇峻, 等. 无居民生态岛建设评价体系初步构建——以大洲岛为例[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(3): 8-14.
- [12] 黄冉冉, 陈勇, 唐荣彬, 等. 基于DPSIR的矿业城市生态安全多层次模糊综合云评价[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(3): 50-55.
- [13] 弓宪文. 城市化与物流业协调发展模型及实证研究——以重庆为例[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(2): 152-160.
- [14] 王国重, 李中原, 张继宇, 等. 基于压力-状态-响应模型的河南省水库生态安全评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 12-17.
- [15] 喻立, 王建力, 李昌晓, 等. 基于DPSIR与AHP的宁夏沙湖湿地健康评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 124-130.
- [16] 李永丽. 陆浑水库水质趋势分析及水环境安全状况评价[J]. 人民黄河, 2017, 39(9): 60-63+69.
- [17] 罗赞骞, 夏靖波, 陈天平. 基于云模型和熵权的网络性能综合评估模型[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2009, 21(6): 771-775.
- [18] 谢平, 陈海健, 李彬彬, 等. 湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(12): 1321-1328.
- [19] 张宇卓, 殷国鹏. 基于云模型和熵权理论的服务外包示范城市承接优势评估[J]. 系统工程, 2013, 31(5): 111-116.
- [20] 许少华, 陈妍, 许辰, 等. 一种基于正向云变换的混合计算神经网络及其应用[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(12): 2284-2288.
- [21] 吕川, 阳桂前. 基于DPSIR模型的农业生态安全评价指标体系的构建——以辽河源头流域为例[J]. 安全与环境学报, 2011, 27(6): 122-125.
- [22] 杨志, 赵冬至, 林元烧. 基于PSR模型的河口生态安全评价指标体系研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 139-142.
- [23] 王艺博, 蔡国伟, 郑存龙, 等. 考虑合理弃风的风电消纳方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 45-50.
- [24] 郑德凤, 李晓研, 王希庆. 基于熵权的密切值法在大连市地下水水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(2): 113-115.
- [25] 蔡洁, 李世平. 基于熵权可拓模型的高标准基本农田建设项目社会效应评价[J]. 中国土地科学, 2014, 28(10): 40-47.
- [26] 郭秀英. 区间数指标权重确定的熵值法改进[J]. 统计与决策, 2012(17): 32-34.
- [27] 何显鹏, 王文刚. 基于云模型的机载电子对抗系统效能评估[J]. 电子信息, 2015, 2(2): 53-54+90.
- [28] 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.
- [29] 冯学慧. 基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 57-60.
- [30] 白明哲, 韩君健. 安林地区岩溶水源地环境污染现状评价及防治建议[J]. 安阳工学院学报, 2010, 9(4): 37-39.
- [31] 曹碧波, 戴乙, 朱龙基, 等. 网箱养鱼对河流型水库水质影响的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 75-81.