

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.005

西安市水资源可持续利用预警分级

徐绪堪^{1,2}, 赵毅¹, 成春阳³

(1. 河海大学企业管理学院, 江苏 常州 213022; 2. 南京大学信息管理学院, 江苏 南京 210039;
3. 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要:选取西安市人均占有水量、人均供水量、水资源开发利用等10项定量指标,结合云模型理论构建水资源可持续利用预警分级指标体系,借助熵权法确定各个指标的权重。结果表明,与模糊物元法和模糊层次分析法相比较,基于熵权的分级预警云模型结果更为合理,西安市的水资源利用处于一个较为正常的阶段,根据综合云隶属度进行水资源可持续利用预警从高到低排名依次为:临潼区、西安全市、长安区、鄠邑区、主城区、周至县、高陵区、蓝田县。

关键词:水资源可持续利用;云模型;熵权;预警分级;西安市

中图分类号:TV213 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2017)05-0025-06

Early-warning grading of sustainable utilization of water resources in Xi'an City

XU Xukan^{1,2}, ZHAO Yi¹, CHENG Chunyang³

(1. School of Enterprise Management, Hohai University, Changzhou 213022, China;
2. School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210039, China;
3. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Combined with the cloud model theory, 10 quantitative indexes such as per capita water, per capita water supply, water resource utilization and development rate, etc. are selected to set up early-warning grading index system of sustainable water resources utilization in Xi'an City. The weight of each index is determined with the entropy weight method. The results show that compared with fuzzy matter-element method and fuzzy analytic hierarchy process method, the results of grading warning cloud model based on entropy weight are more reasonable and the utilization of water resources in Xi'an is in a relatively normal stage. Judging from the comprehensive cloud membership degree, the early warning of water resources sustainable utilization is ranked in proper order from high to low: Lintong District, Xi'an City, Changan District, The Hu Yi District, downtown area, Zhouzhi County, Gaoling District and Lantian County.

Key words: sustainable utilization of water resources; cloud model; entropy weight; early-warning grading; Xi'an City

伴随着城镇化的快速进程,自然资源的消耗量急剧增长,水资源是其中的典型代表。在我国水资源总量多,人均占有量少的特殊状况下,尤其是干旱区,水资源的可持续利用已然成为影响区域经济可持续发展的重要因素之一。西安市是典型西北干旱城市,依据相关水文资料记载,西安市水资源总量 105.2 亿 m^3 ,人均占有水量 316 m^3 ,仅相当于全国平均水平的 15% ^[1],远远低于国际公认的人均年水资源量 500 m^3 的绝对缺水水平,是全国最缺水的地区之一。而其地表水开发利用程度低,仅为 27.01% ,距离国际公认的干旱半干旱地区地表水开发利用程度不应超过径流总量 40% 的限值还有较大的潜力;同时,地下水过度开采,开发量已为合理开发量的 112.6% ;再生水回用率低,回用水量仅占污水处理总量的 11% 。数据表明,西安市水资源短缺问题尖锐,由于过去几十年经济的高速增长,人类活动的干预,导致水资源开发利用程度低、供需失衡等诸多问题涌现。对西安市的水资源开发状况进行科学的预测,对水资源利用问题的严重程度做出科学合理的量化预警,有助于相关管理部门做出更加可行和有效的决策。

1 相关研究述评

干旱区水资源的可持续利用预警分级很早已经引起了国内外学者的广泛关注,20世纪90年代初召开的国际水和环境大会,水资源在环境和发展中重要的地位和作用第一次被明确指出,水资源系统理论及可持续发展问题也被一一阐明^[2]。Sun等^[3]建立了由经济、人口、水资源供需、水污染和管理5个子系统构成的动态系统模型,发现保护水资源的根本方式是合理科学供水。Ren等^[4]提出了区域水资源代谢理论,建立区域水资源系统、社会经济系统、生态系统三大系统构成的指标体系。戴明宏等^[5]从系统论的角度出发,构建了由供需子系统、生态子系统、社会经济子系统构成的水资源系统评价指标体系,并以广西壮族自治区为研究对象进行空间水资源承载力分异研究。刘雅玲等^[6]基于压力-状态-响应框架,利用构建的19个评价指标对福州市水资源承载力状况进行了研究。学者们除了对水资源承载力系统评价指标如何构建进行研究,还利用一些定量方法进行水资源可持续利用分级预警,包括模糊综合评价法^[7],随机森林法^[8],投影寻踪法^[9]等。戴天晟等^[9]充分考虑环境因素对水资源可持续利用的影响,在专家法确定权重的基础上结合模糊层次法和投影寻踪方法,建立FAHH—PP

模型对上海市水资源利用情况进行了评价。Chen等^[10]构建了基于水资源区域状况、水资源与社会发展联系、水资源与经济发展联系、水资源与环境联系的指标系统,借助突变理论,对大连市水资源利用情况进行了评价。贾琦等^[11]考虑水资源条件、社会经济条件等因素建立指标体系,采用层次分析法确定指标权重,基于正态云模型理论,对黄河流域水资源的可再生能力进行研究,发现提高产业用水效率是提高水资源再生能力的有效方法之一。魏光辉等^[12]以自然系统、社会系统、经济系统作为指标体系的构成因素,采用层次分析方法确定指标权重,借助云模型理论对浙江省2006—2009年的水资源承载力情况进行评价。马海良等^[13]等从城镇化发展的视角出发,采用组合赋权法和升半 Γ 型分布函数对江苏省连续10年的水资源承载力进行了预警分级。韩美等^[14]借助“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型进行指标体系构建,利用变异系数法确定指标权重,在对黄河三角洲连续13年的水资源可持续利用综合评价基础上,利用灰色模型对未来水资源利用潜力进行预测。屈小娥^[15]构建了涵盖水资源、经济、社会的水资源承载力综合评价系统系统,利用TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution)方法从区域、城市、总体不同角度对陕西省的水资源承载力情况进行了详细的研究。

国内外学者研究大多集中于通过建立数学模型来表达预警等级和预警指标因子之间的复杂非线性关系,但由于预警因子多且具有随机性,在预警分级过程中难以让所有因子同时符合某一等级标准,而且预警指标的权重大多人为设置,主观性较强,从而导致预警结果不准确,无法满足评价对象的不确定性特点。云模型能够很好地解释随机不确定性和模糊性的内在关联问题,解决不确定性知识的形式化表示问题^[16],熵权法可以通过严密的数学计算过程确定权重,客观性更强,有较少学者同时借助云模型理论和熵权法对区域水资源可持续利用预警进行研究。李德毅等^[17]对于正态云模型应用条件和普适性给出了翔实的证明过程,区域水资源可持续利用预警满足正态云模型应用条件。鉴于此,本文借助不确定性人工智能的理论基础^[18],将正态云模型应用到区域水资源可持续利用预警中,采用熵权法确定各预警指标的权重,借鉴国内的干旱区域水资源可持续利用预警实例,判断模型的可行性和有效性,以期为干旱区域水资源可持续利用预警提供新的思路。

2 研究方法

2.1 云模型理论

云模型是李德毅等^[19]在随机和模糊数学基础理论之上提出的不确定性问题的定性定量相互转换的模型,已被广泛应用。云和云滴是云模型理论中最基本的单元。假设 U 为一个精确定量数值的论域(可以是一维或者多维), C 是 U 上与之相对应的定性概念,对于论域中任意的元素 x ,都存在一个随机数 $y=f(x)$,且 y 的取值范围介于 $0 \sim 1$ 之间,将 x 的一次随机实现 y 叫作 x 对于对应概念 C 的确定程度, x 的分布称为云模型^[20]。

云模型借助期望 E_x 、熵 E_n 以及超熵 H_e 来表征一个总体的概念,其中,期望 E_x 可以理解为最能代表云的重心位置; E_n 表示定性概念 C 的不确定性; H_e 是对熵不确定程度的表征。依据云模型计算规则,对于给定的某一等级的标准的云数字特征按照下式进行计算:

$$E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \quad (1)$$

针对处于边界区域的值是自一种级别向另一种级别的过渡值,应该同时隶属于两种等级,是一种模糊的存在^[21],所以:

$$\exp\left(-\frac{C_{\max} - C_{\min}}{9E_n^2}\right) \approx 0.5$$

$$\text{即: } E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2.355} \quad (2)$$

式中, C_{\max} 、 C_{\min} 分别为对应等级标准的最大、最小边界值。

采用正向云发生器实现水资源可持续利用预警指标定性到定量的映射,生成正态分布的随机数 $E_n \sim N(E_n, H_e^2)$, H_e 为常数,依照经验选取。根据特定输入值 x 和期望值 E_x ,计算隶属度:

$$f(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n^2}} \quad (3)$$

式中, $f(x)$ 为隶属度。

2.2 熵权法确定权重

假设有 m 个预分级对象和 n 个分级指标,其中第 i 个对象的第 j 个指标取值记为 a_{ij} ,原始评价指标矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 。将指标进行标准化,对于正向指标有:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (4)$$

对于负向指标有:

$$b_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (5)$$

信息熵的计算公式为

$$E_j = -\ln(m^{-1}) \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

其中, $p_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}}$,若 $p_{ij} = 0$,则定义 $\ln p_{ij} = 0$ 。

式中, E_j 为信息熵。

权重的计算公式为

$$W_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (7)$$

式中, W_j 为权重。

2.3 水资源可持续利用预警分级步骤

基于熵权的干旱区水资源可持续利用预警分级步骤如下:

步骤 1:选择合适的预警指标,将预警指标分为 X 个等级;

步骤 2:结合当地实际情况,为每一个预警指标 Y 设定科学的范围;

步骤 3:计算每个预警指标的正态云模型的 3 个数字特征 (E_x, E_n, H_e),并借助正向云发生器生成预警指标隶属于某预警级别的综合云模型;

步骤 4:依据实测数据,基于熵权法计算每个预警指标的权重值,产生权重矩阵 W ;

步骤 5:将实测数据输入到建立好的标准云模型中,计算预警指标隶属于不同预警等级的隶属度,并与预警指标权重矩阵 W 相乘,得到综合隶属度;

步骤 6:根据最大隶属度原则,选择综合隶属度中最大的值所对应的预警等级,作为该区域水资源可持续利用预警等级。

3 西安市水资源可持续利用预警分级

结合西安市水资源实际利用情况,借鉴西安市历年《水资源公报》设定的预警标准,建立西安市水资源可持续利用预警指标体系^[22](表 1),表 2 为西安市水资源可持续利用预警指标标准^[23]。选取西安市 8 个代表性的区域:西安全市、主城区、长安区、鄠邑区、周至县、高陵区、临潼区、蓝田县,其预警指标数据见表 3^[23]。

表 1 西安市水资源可持续利用预警指标

预警指标	指标含义	类型
人均占有水量(U_1)/ m^3	反映水资源人均拥有量	负
人均供水量(U_2)/ m^3	反映水资源人均使用情况	负
水资源开发利用率(U_3)/%	反映水资源开发利用程度	正
灌溉率(U_4)/%	反映水资源灌溉利用状况	正
地表水控制率(U_5)/%	反映地表水资源利用状况	正
水资源重复利用率(U_6)/%	反映水资源重复使用情况	正
平均灌溉水利用系数(U_7)/%	反映灌溉水工程质量状况	正
客水利用率(U_8)/%	反映对客水利用状况	正
供水量模数(U_9)/($万 m^3 \cdot km^{-2}$)	反映水资源供水能力	正
水利工程投资所占比例(U_{10})/%	反映用于水资源开发投资状况	正

表2 西安市水资源可持续利用预警指标标准

预警警度	U_1/m^3	U_2/m^3	$U_3/\%$	$U_4/\%$	$U_5/\%$	$U_6/\%$	$U_7/\%$	$U_8/\%$	$U_9/$ ($万 m^3 \cdot km^{-2}$)	$U_{10}/\%$
正常	(0, 270)	(0, 225)	[94.5, 82.5)	[67, 55)	[63.5, 27.5)	[112, 88)	[1, 0.8)	[2.25, 1.1)	[39.5, 17.5)	[2.75, 1.75)
轻度预警	[270, 322.5)	[225, 300)	[82.5, 62.5)	[55, 32.5)	[27.5, 15)	[88, 65)	[0.8, 0.64)	[1.1, 0.6)	[17.5, 12.5)	[1.75, 0.8)
中度预警	[322.5, 389.5)	[300, 389.5)	[62.5, 45)	[32.5, 13.5)	[15, 4.5)	[65, 45)	[0.64, 0.5)	[0.6, 0.18)	[12.5, 9)	[0.8, 0.09)
重度预警	[389.5, 1200.5]	[389.5, 660.5]	[45, 0)	[13.5, 0)	[4.5, 0)	[45, 0)	[0.5, 0)	[0.18, 0)	[9, 0)	[0.09, 0)

表3 西安市各区域水资源预警指标值

区域	U_1/m^3	U_2/m^3	$U_3/\%$	$U_4/\%$	$U_5/\%$	$U_6/\%$	$U_7/\%$	$U_8/\%$	$U_9/$ ($万 m^3 \cdot km^{-2}$)	$U_{10}/\%$
西安市	411.29	264.42	64.29	23.52	7.30	44.4	0.54	2.02	17.17	0.48
主城区	145.84	123.38	84.60	44.75	11.56	58.3	0.60	1.98	34.52	0.45
长安区	520.80	248.88	47.79	24.07	6.42	48.6	0.55	2.05	13.65	1.82
鄠邑区	640.18	412.83	68.33	30.08	1.41	52.7	0.52	2.05	19.21	0.17
周至县	783.43	405.85	51.80	13.10	1.83	35.4	0.54	2.01	8.25	0.12
高陵区	1169.40	457.98	39.16	65.14	0.10	37.1	0.5	2.08	35.52	0.17
临潼区	390.00	267.34	68.55	43.72	52.21	38.2	0.54	2.00	18.93	1.32
蓝田县	753.59	628.00	83.33	7.89	5.25	40.5	0.55	0.10	19.22	0.01

根据前文介绍的方法,建立的西安市水资源可持续利用预警分级指标的云模型,以人均供水量和水资源开发利用率为例建立正态云模型见图1。

由图1可以依据指标的实测数据很直观地判断其所属于某一预警等级的确定程度,例如,西安市水资源开发利用率为64.29,经过正向云发生器得到该预警因子隶属于正常、轻度预警、中度预警、重度预警的隶属度分别为0.0912、0.03752、0.6122、0,在忽略权重的前提下,上述值在现实中的意义就是当西安市水资源开发利用率为64.29时,该水资源开发利用程度下隶属于中度预警的程度较大,隶属于正常状态也有一定可能,也有可能处于轻度预警状态,不可能属于重度预警,与实际状况吻合。将表3中的预警指标数据代入公式计算在不同隶属度

情况下的平均综合隶属度,结果见表4。依据最大隶属度原则,选择综合隶属度最大值所对应的等级作为该区域的水资源可持续利用预警分级结果,并将结果与荆平选用的模糊物元法^[23]和潘峰等选用的模糊层次分析法^[24]研究结果进行对比见表5。

从云模型与模糊物元法的预警分级结果进行比较,两者结果存在显著差异,模糊物元法产生的预警结果普遍偏高,仅有长安区、鄠邑区、临潼区的预警结果与云模型所产生的结果一致,其余地区的预警均高于云模型产生的预警结果。而云模型分级与模糊层次分析法进行比较,发现两种方法产生的预警结果较为吻合。

从预警结果分析,西安市的水资源可持续利用处于一个较为正常的阶段,各区域根据综合隶属度

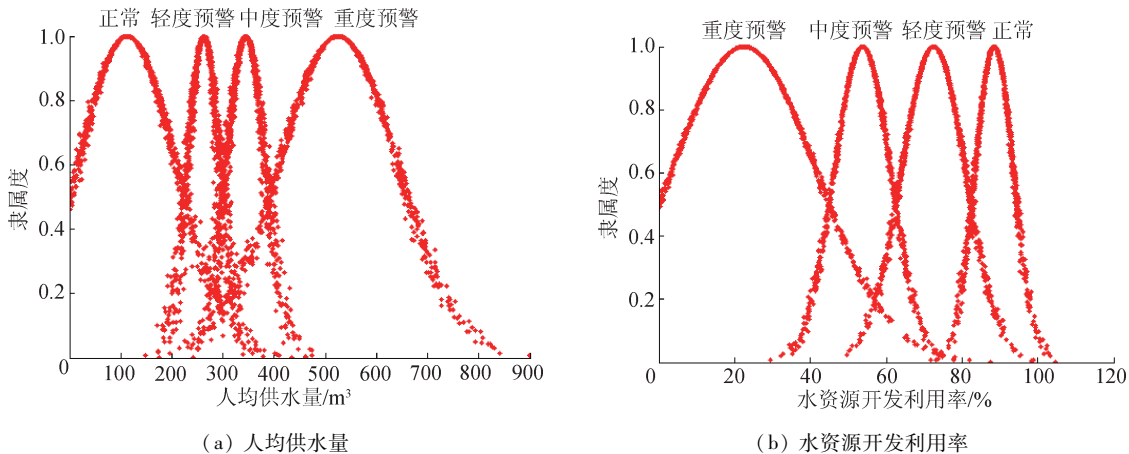


图1 正态云模型

表 4 各指标云模型平均综合隶属度

预警警度	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}
正常	0.0568	0.2584	0.0912	0.0168	0.0791	0.6307	0.3907	0	0	0
轻度预警	0	0.9974	0.3752	0.9978	0.8505	0	0.7938	0	0	0.9931
中度预警	0.2213	0.1073	0.6122	0.1194	0.0260	0	0.0512	0	0.6015	0.1348
重度预警	0.5368	0.1068	0	0	0.0462	0	0	0.78	0.4833	0

表 5 西安市各区域水资源可持续利用预警分级结果

区域	综合隶属度				预警等级		
	正常	轻度预警	中度预警	重度预警	模糊物元法	模糊层次分析法	云模型
西安全市	0.1499	0.5973	0.1510	0.1328	中度预警	轻度预警	轻度预警
主城区	0.2188	0.5214	0.2030	0.1809	中度预警	中度预警	轻度预警
长安区	0.1492	0.5526	0.1575	0.2163	轻度预警	轻度预警	轻度预警
鄠邑区	0.2665	0.3649	0.1421	0.2146	轻度预警	轻度预警	轻度预警
周至县	0.4883	0.3505	0.0433	0.1733	轻度预警	正常	正常
高陵区	0.3209	0.1678	0.0192	0.2756	轻度预警	轻度预警	正常
临潼区	0.1426	0.1830	0.4007	0.3377	中度预警	中度预警	中度预警
蓝田县	0.3599	0.3015	0.0620	0.2467	轻度预警	正常	正常

进行排名依次为：临潼区、西安全市、长安区、鄠邑区、主城区、周至县、高陵区、蓝田县。处于中度预警状态的临潼市是预警等级最高的区域，其原因可能是在水资源利用过程中存在灌溉水利用系数小、供水模数小、重复利用率低等问题。依照预警结果来看，临潼市需要大力投资水利项目，提高工厂污水处理能力，进行节约用水宣传，提高市民节水意识，提高水资源重复利用率。

4 结 语

将云模型理论引入到西安市水资源可持续利用预警分级过程中，利用熵权法确定预警指标权重，对西安市 8 个典型区域进行水资源可持续利用预警分级，结果表明构建模型效果较好，西安市大多地区处于轻度预警状态，只有临潼区处于中度预警状态，应及时对临潼区的水资源利用采取针对性措施，保证水资源的可持续利用。

参考文献：

[1] 樊春贤. 西安市水资源可持续利用的探讨[J]. 地下水, 2007, 29 (1): 17-19. (FAN Chunxian. Discussion on sustainable utilization of water resources in Xi'an [J]. Groundwater, 2007, 29 (1): 17-19. (in Chinese))

[2] 舒媛媛, 周维博, 刘雷, 等. 基于模糊四元联系数的延安市水资源可持续利用评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24 (4): 66-70. (SHU Yuanyuan, ZHOU Weibo, LIU Lei, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Yan'an based on fuzzy quaternary connection number [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24 (4): 66-70. (in Chinese))

[3] SUN Yuhuan, LIU Ningning, SHANG Jiaxia, et al. Sustainable utilization of water resources in China: a system dynamics model [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142 (2): 613-625.

[4] REN Chongfeng, GUO Ping, LI Mo, et al. An innovative method for water resources carrying capacity research: metabolic theory of regional water resources [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 167 (1), 139-146.

[5] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究 [J]. 水土保持研究, 2016, 23 (1): 193-199. (DAI Minghong, WANG Lachun, WEI Xingping. Study on spatial differentiation of water resources carrying capacity in Guangxi based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Research on Soil and Water Conservation, 2016, 23 (1): 193-199. (in Chinese))

[6] 刘雅玲, 罗雅谦, 张文静, 等. 基于压力-状态-响应模型的城市水资源承载力评价指标体系构建研究 [J]. 环境污染与防治, 2016, 38 (5): 100-104. (LIU Yaling, LUO Yaqian, ZHANG Wenjing, et al. Research on construction of evaluation index system of urban water resources carrying capacity based on pressure-state-response model [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2016, 38 (5): 100-104. (in Chinese))

[7] 王睿, 周立华, 陈勇, 等. 基于模糊综合评判的杭锦旗水资源承载力评价 [J]. 水土保持研究, 2017, 24 (2): 320-324. (WANG Rui, ZHOU Lihua, CHEN Yong, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Hangjinqi based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Research on Soil and Water Conservation, 2017, 24 (2): 320-324. (in Chinese))

[8] 康有, 陈元芳, 顾圣华, 等. 基于随机森林的区域水资源

- 可持续利用评价[J]. 水电能源科学,2014,32(3):34-38. (KANG You, CHEN Yuanfang, GU Shenghua, et al. Evaluation of regional water resources sustainable utilization based on random forest [J]. Hydropower and Energy Science,2014,32(3):34-38. (in Chinese))
- [9] 戴天晟,孙绍荣,赵文会,等. 区域水资源可持续利用评价的FAHP-PP模型[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(5):421-426. (DAI Tiansheng, SUN Shaorong, ZHAO Wenhui, et al. FAHP-PP model for evaluation of regional water resources sustainable utilization [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2009, 18(5): 421-426. (in Chinese))
- [10] CHEN Yu, ZHANG Shushen, ZHANG Yun, et al. Comprehensive assessment and hierarchical management of the sustainable utilization of urban water resources based on catastrophe theory [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2016,19(60):430-437.
- [11] 贾琦,段春青,陈晓楠. 黄河流域水资源可再生能力评价的云模型[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(9):48-52. (JIA Qi, DUAN Chunqing, CHEN Xiaonan. A cloud model for evaluating water resources renewability in the Yellow River Basin [J]. China Population, Resources and Environment,2010,20(9):48-52. (in Chinese))
- [12] 魏光辉,马亮. 基于正态云模型的区域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉,2015(1):68-71. (WEI Guanghui, MA Liang. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on normal cloud model [J]. Water Saving Irrigation,2015(1):68-71. (in Chinese))
- [13] 马海良,施陈玲,王蕾. 城镇化进程中的江苏水资源承载力研究:基于组合赋权和升半 Γ 型分布函数[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(11),1698-1703. (MA Hailiang, SHI Chenling, WANG Lei. Study on carrying capacity of water resources in Jiangsu Province with urbanization process: based on combination weight and semi Γ distribution function [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin,2016,25(11), 1698-1703. (in Chinese))
- [14] 韩美,杜焕,张翠,等. 黄河三角洲水资源可持续利用评价与预测[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(7):154-160. (HAN Mei, DU Huan, ZHANG Cui, et al. Evaluation and forecast of water resources sustainable utilization in the Yellow River [J]. China Population, Resources and Environment,2015,25(7):154-160. (in Chinese))
- [15] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):91-97. (QU Xiaoe. Study on comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi Province [J]. Resources and Environment of Arid Land,2017,31(2):91-97. (in Chinese))
- [16] 徐绪堪,房道伟,蒋勋,等. 知识组织中知识粒度化表示和规范化研究[J]. 图书情报知识,2014(6):101-106. (XU Xukan, FANG Daowei, JIANG Xun, et al. Research on knowledge granularity representation and standardization during knowledge organization [J]. Documentation, Information and Knowledge,2014(6):101-106. (in Chinese))
- [17] 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. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Sciences,2004,6(8):28-34. (in Chinese))
- [18] 李德毅,杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [19] 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,1995,32(6):15-20. (LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Subordinate cloud and subordinate cloud generator [J]. Computer Research and Development,1995,32(6):15-20. (in Chinese))
- [20] 李健,汪明武,徐鹏,等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):84-86. (LI Jian, WANG Mingwu, XU Peng, et al. Classification of surrounding rock stability based on cloud model [J]. Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(1):84-86. (in Chinese))
- [21] 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):169-173. (GONG Yanbin. Comprehensive evaluation of urban ecological risk of Hexi Corridor based on normal cloud model and entropy [J]. Arid Land Resources and Environment,2012,26(5):169-173. (in Chinese))
- [22] 贾嵘,薛小杰,薛惠锋. 区域水资源开发利用程度综合评价[J]. 中国农村水利水电,1999(11):22-24. (JIA Rong, XUE Xiaojie, XUE Huifeng. Comprehensive evaluation of regional water resources development and utilization [J]. China Rural Water and Hydropower,1999(11):22-24. (in Chinese))
- [23] 荆平. 区域水资源可持续发展的模糊物元预警分析[J]. 中国农村水利水电,2005(8):22-24. (JING Ping. Fuzzy matter-element warning analysis of regional water resources sustainable development [J]. China Rural Water and Hydropower,2005(8):22-24. (in Chinese))
- [24] 潘峰,梁川,王志良,等. 模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用[J]. 水科学进展,2003,14(3):271-275. (PAN Feng, LIANG Chuan, WANG Zhiliang, et al. Application of fuzzy matter-element model in comprehensive evaluation of regional water resources sustainable utilization [J]. Advances in Water Science,2003,14(3):271-275. (in Chinese))

(收稿日期:2017-03-28 编辑:王芳)