

# Evaluation of Water Use Efficiency Based on Improved Grey Target Model

Dongmei Xu, Mengchen Xu, Wenchuan Wang\*, Junqing Ma, Dongfang Gao

School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan  
Email: \*wangwen1621@163.com, \*wangwenchuan@ncwu.edu.cn

Received: Jun. 25<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 15<sup>th</sup>, 2019; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Water efficiency is a key part of implementing the most stringent water management system, and objective evaluation of it is the prerequisite for water efficiency control. In this paper, the CRITIC weight is introduced into the traditional gray target model for objective weighting, which overcomes the shortcomings of the use of equal weight in the traditional model. An improved gray target model based on CRITIC weight is proposed. At the same time, the obstacle factor diagnosis model is used to analyze the main obstacles affecting water use efficiency. Taking the water efficiency evaluation of various districts in Zhengzhou in 2017 as an example, the evaluation results of the two methods are in good agreement compared with the TOPSIS method, indicating that the improved gray target model has certain application in the evaluation of water use efficiency. Through the analysis of the obstacle degree model, the ecological environment water use index is the main factor hindering the improvement of water use efficiency in Zhengzhou City.

## Keywords

Water Use Efficiency, CRITIC Method, Improved Gray Target Model, Obstacle Factor Diagnosis Model, Zhengzhou City

# 基于改进灰靶模型的水资源利用效率评价

徐冬梅, 徐梦臣, 王文川\*, 马俊清, 高东方

华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州

Email: \*wangwen1621@163.com, \*wangwenchuan@ncwu.edu.cn

收稿日期: 2019年6月25日; 录用日期: 2019年7月15日; 发布日期: 2019年7月26日

作者简介: 王文川(1976-), 男, 河南鹿邑人, 博士, 教授, 博导, 主要从事水文水资源系统分析、遥感信息处理等方面的研究。  
\*通讯作者。

文章引用: 徐冬梅, 徐梦臣, 王文川, 马俊清, 高东方. 基于改进灰靶模型的水资源利用效率评价[J]. 水资源研究, 2019, 8(4): 335-341. DOI: 10.12677/jwrr.2019.84039

## 摘要

用水效率是实施最严格的水资源管理制度的关键一环,对其进行客观评价是开展用水效率控制工作的前提。本文在传统灰靶模型中引入了CRITIC权进行客观赋权,克服了传统模型中使用等权的不足,提出了基于CRITIC权的改进灰靶模型,同时利用障碍因子诊断模型剖析了影响水资源利用效率的主要障碍因素。以2017年郑州市各地区用水效率评价为例,通过与TOPSIS法进行比较,两种方法的评价结果有很好的一致性,表明了改进灰靶模型在水资源利用效率评价中有一定的应用价值。通过障碍度模型分析,生态环境用水指标是阻碍郑州市水资源利用效率提高的主要因素。

## 关键词

水资源利用效率, CRITIC法, 改进灰靶模型, 障碍因子诊断模型, 郑州市

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

用水效率是我国实行最严格水资源管理制度的核心内容之一,我国现状水资源利用效率较发达国家相比仍有一定差距。因此,水资源利用效率的研究对划定用水效率红线、改善用水现状等具有重要的指导意义。

水资源利用效率评价是一个涉及多层次、多目标的问题。近年来的相关研究已经取得了一些进展,如李红新[1]、张旭腾等[2]、朱燕飞等[3]运用了数据包络分析(DEA)模型在水资源利用效率评价中;王晓琳等[4]基于物元可拓模型对江西省2011~2014年的用水效率进行了评价;孟令爽等[5]使用主成分分析法对上海市2008~2015年的用水效率做出评价;段长桂等[6]基于迭代思想的水资源利用效率评价模型分析了山东省2014年17个地区的用水效率并进行排序;余兴奎等[7]采用模糊层次分析法评价了云南省的水资源利用效率;朱兆珍等[8]通过突变级数法对我国31个省的水资源利用效率进行评估并对其进行聚类分析;李恩宽等[9]利用投影寻踪模型对黄河流域水资源利用效率进行评价;管新建等[10]搭建了CRITIC-TOPSIS-灰色关联评估模型对淮河流域2011~2016年的用水效率进行了评价。

灰靶模型在解决多层次、模糊的决策问题时,具有一定优势[11]。该模型自提出以来已被广泛应用于土地生态安全评价[12]、适宜性评价[13]、生态环境影响评价[14]等方面,但在水资源评价领域应用较少且传统灰靶模型存在等权问题需要加一改进。鉴于此,本文构建了涵盖综合、工业、农业、生活、生态环境这5大方面的水资源利用效率评价指标体系,引入了CRITIC客观赋权法,弥补了传统灰靶模型中等权的不足,建立了基于CRITIC权的改进灰靶模型。以郑州市为研究区进行水资源利用效率评价,同时利用障碍因子诊断模型来识别影响水资源利用效率的障碍因素,以期探索新方法在水资源利用效率方面的应用价值,为提升水资源利用效率提供科学依据。

## 2. 区域概况及评价指标体系

### 2.1. 研究区域概况

郑州市是河南省省会,位于黄河中下游,地处华北平原南部,跨黄河、淮河两大水系,介于东经112°42'~114°14'、

北纬 34°16'~34°58' 之间, 是我国中部地区重要的中心城市, 辖 4 市 1 县 3 区(不含巩义市), 总面积 6470.3 km<sup>2</sup>, 地势整体呈现东北低、西南高的趋势。郑州市多年平均降水量 640.5 mm, 全市降雨时程分配严重不均, 主要集中在 7、8、9 月。郑州市多年平均水资源总量 11.2578 亿 m<sup>3</sup> (2017 年郑州市水资源公报), 人均水资源占有量为 124.4 m<sup>3</sup>, 是水资源严重短缺的城市。

## 2.2. 评价指标体系及数据来源

杨丽英等[15]对水资源效率评价指标体系进行深入探讨发现, 与水资源利用效率相关联的指标众多, 在应用时不能进行全部罗列且数据可获得程度不同。故本文在进行遴选指标时遵循动态性、科学性、代表性的原则, 结合数据收集难易程度, 依据《郑州市水资源公报》中主要的用水指标, 构建了同时涵盖工业、农业、生活、生态环境、综合这 5 大方面 7 项指标的郑州市水资源利用效率评价指标体系, 见表 1。在当前情形下, 郑州市持续推进水生态文明城市建设, 成效显著, 故在指标体系构建时选取了生态环境用水比例和污径比作为生态环境用水指标。文中的数据来源于《郑州市水资源公报》(2017 年)。

**Table 1.** Zhengzhou City water resources utilization efficiency evaluation index system and index weight value  
**表 1.** 郑州市水资源利用效率评价指标体系及指标权重值

准则层	评价指标	指标性质	权重
综合用水指标	万元 GDP 用水量 $u_1/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	逆向型	0.206
农业用水指标	农田灌溉亩均用水量 $u_2/(m^3 \cdot 亩^{-1})$	逆向型	0.134
工业用水指标	万元工业增加值用水量 $u_3/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	逆向型	0.065
生活用水指标	农村人均综合用水量 $u_4/(L \cdot 人^{-1})$	逆向型	0.112
	城镇人均综合用水量 $u_5/(L \cdot 人^{-1})$	逆向型	0.070
生态环境用水指标	生态环境用水比例 $u_6/\%$	正向型	0.201
	污径比 $u_7/\%$	逆向型	0.212

## 3. 研究方法

### 3.1. 改进的 CRITIC 赋权法

CRITIC 赋权法由 Diakoulaki 提出的一种新型客观赋权方法, 以指标特征的对比强度和冲突性来综合反映指标的客观权重, 它不仅考虑指标内部的变异程度, 而且还考虑了指标之间的冲突性, 充分考虑了指标的内部和外部特性, 赋权结果更为客观、合理。传统的 CRITIC 赋权法存在下列两方面的不足: 第一, 带量纲的标准差无法反映出指标内部的对比强度大小; 第二, 出现负相关时, 用相关系数反映指标冲突性显然不合理, 参考王瑛等[16]的研究成果, 利用变异系数和带绝对值的 Pearson 相关系数对传统 CRITIC 赋权法进行改进, 则改进后的赋权公式为:

$$C_j = \delta_j \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|), j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

因此, 第  $j$  个指标的客观权重  $w_j$  表示为:

$$w_j = C_j / \sum_{i=1}^n C_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $C_j$  为信息量;  $\delta_j$  为第  $j$  个指标的变异系数, 用指标标准差与均值的比值表示;  $r_{ij}$  表示第  $i$  个评价指标与第  $j$  个评价指标的相关系数。

### 3.2. 改进的灰靶模型

灰靶模型的原理是在缺乏统一标准的基础上，构造一个灰靶，并在其中找到靶心将其设定为标准，然后通过比较待评方案与标准方案来计算靶心度，进而划分等级标准，详细步骤见文献[11]。由于传统灰靶模型采用等权重计算靶心度，与实际不符。本文将改进后的 CRITIC 客观赋权法引入到靶心度计算公式中，改进后的灰靶模型靶心度计算公式为：

$$\gamma[x_0(u_j), x_i(u_j)] = \frac{\min_i \min_j \Delta_{0i}(u_j) + \rho \max_i \max_j \Delta_{0i}(u_j)}{\Delta_{0i}(u_j) + \rho \max_i \max_j \Delta_{0i}(u_j)} = \frac{0.477}{\Delta_{0i}(u_j) + 0.477} \quad (3)$$

$$\varphi(x_0, x_i) = \sum_{j=1}^n w_j \gamma[x_0(u_j), x_i(u_j)] \quad (4)$$

式中： $\gamma[x_0(u_j), x_i(u_j)]$ 、 $\varphi(x_0, x_i)$  分别表示待评方案  $x_i$  相对于标准方案的靶心系数和靶心度值。通常情况下，分辨系数  $\rho = 0.5$ 。

### 3.3. 水资源利用效率障碍因子诊断模型

引入因子贡献度(即权重  $w_j$ )、指标偏度  $I_j$  (即各指标标准化后的实际值与最优值之间的差，可用灰差异信息空间值  $\Delta$  表示)及障碍度  $M_j$  ( $M_j$  值的大小表示各指标或准则层指标对区域水资源利用效率影响程度的高低) 3 个指标，对影响水资源利用效率的主要障碍因素进行分析与诊断。障碍度计算公式如下：

$$M_j = I_j \cdot w_j / \left( \sum_{j=1}^n I_j \cdot w_j \right) \quad (5)$$

## 4. 郑州市水资源利用效率评价

### 4.1. 郑州市水资源利用效率评价过程

以 2017 年郑州市的 8 个地区为待评方案  $X_1 \sim X_8$ ，将表中各指标通过式(1)~(2)计算得到各指标的权重值  $w_j$ 。在原始数据  $u_{ij}$  中找到靶心将其设定为标准，再利用灰靶变换公式得到灰靶变换值  $v_{ij}$ ，结果见表 2；构造灰关联差异信息空间矩阵  $\Delta v_{ij}$  并利用式(3)~(4)计算靶心系数  $\gamma_{ij}$  及靶心度，见表 3；依据上述求得靶心度  $\varphi_i$  的取值，采用自然断点法将其均匀划分为 5 个评价等级。因靶心度  $\varphi_i$  值大多在 0.4~0.6 之间，故等级标准划分结果见表 4。

Table 2. Actual value of indicator data and gray target transformation result

表 2. 指标数据实际值及灰靶变换结果

地区	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$
新密市	12.5	68	20.5	119	142	2.5%	1.856	0.544	0.368	0.439	0.319	0.831	0.084	0.203
新郑市	12.7	105	14.6	59	204	14.0%	1.659	0.535	0.238	0.616	0.644	0.578	0.462	0.227
荥阳市	19.3	89	18.7	38	118	3.3%	1.666	0.352	0.281	0.481	1.000	1.000	0.110	0.226
登封市	13.8	70	17.1	91	251	5.5%	1.183	0.493	0.357	0.526	0.418	0.470	0.182	0.318
中牟县	60.8	234	9	76	201	10.3%	0.376	0.112	0.107	1.000	0.500	0.587	0.339	1.000
郑州市区	6.8	122	19.1	89	291	30.3%	8.205	1.000	0.205	0.471	0.427	0.405	1.000	0.046
航空港区	11.5	102	15.4	119	256	19.7%	5.140	0.591	0.245	0.584	0.319	0.461	0.651	0.073
上街区	12.7	25	25.6	46	194	13.9%	7.021	0.535	1.000	0.352	0.826	0.608	0.457	0.054
标准方案	6.8	25	9	38	118	30.3%	0.376	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

**Table 3.** Grey relation difference information space and bull's-eye coefficient, bull's-eye value  
**表 3.** 灰关联差异信息空间及靶心系数、靶心度值

地区	$\Delta v_1$	$\Delta v_2$	$\Delta v_3$	$\Delta v_4$	$\Delta v_5$	$\Delta v_6$	$\Delta v_7$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	靶心度 $\varphi$
新密市	0.456	0.632	0.561	0.681	0.169	0.916	0.797	0.511	0.430	0.460	0.412	0.738	0.342	0.374	0.439
新郑市	0.465	0.762	0.384	0.356	0.422	0.538	0.773	0.507	0.385	0.554	0.573	0.531	0.470	0.382	0.469
荥阳市	0.648	0.719	0.519	0.000	0.000	0.890	0.774	0.424	0.399	0.479	1.000	1.000	0.349	0.381	0.505
登封市	0.507	0.643	0.474	0.582	0.530	0.818	0.682	0.485	0.426	0.502	0.450	0.474	0.368	0.412	0.434
中牟县	0.888	0.893	0.000	0.500	0.413	0.661	0.000	0.349	0.348	1.000	0.488	0.536	0.419	1.000	0.572
郑州市区	0.000	0.795	0.529	0.573	0.595	0.000	0.954	1.000	0.375	0.474	0.454	0.445	1.000	0.333	0.641
航空港区	0.409	0.755	0.416	0.681	0.539	0.349	0.927	0.539	0.387	0.534	0.412	0.470	0.577	0.340	0.465
上街区	0.465	0.000	0.648	0.174	0.392	0.543	0.946	0.507	1.000	0.424	0.733	0.549	0.468	0.335	0.552

**Table 4.** Results of classification criteria by natural breakpoint method  
**表 4.** 自然断点法划分等级标准结果

等级划分	靶心度 $\varphi$ 取值	含义
I 级	$\varphi > 0.61$	水资源利用效率很高
II 级	$0.54 < \varphi \leq 0.61$	水资源利用效率较高
III 级	$0.47 < \varphi \leq 0.54$	水资源利用效率中等
IV 级	$0.40 < \varphi \leq 0.47$	水资源利用效率较低
V 级	$\varphi \leq 0.40$	水资源利用效率很低

利用公式(5)计算得到郑州市水资源利用效率各指标的障碍度，由于指标众多且障碍度大小不一，仅筛选出障碍度值较大的指标作为影响郑州市水资源利用效率的主要障碍因素，各地区主要障碍因子及障碍度见图 1。

### 4.2. 评价结果

由表 3 数据可知，郑州市各地区水资源利用效率的高低排序及等级依次为：郑州市区 > I 级 > 中牟县 > 上街区 > II 级 > 荥阳市 > III 级 > 新郑市 > 航空港区 > 新密市 > 登封市 > IV 级。通过与 TOPSIS 法的进行比较，两种方法得到的结果具有较好的一致性，见表 5，表明将灰靶模型应用到郑州市水资源利用效率评价中是可行的。

通过对郑州市水资源利用效率的主要障碍因素及障碍度进行分析，识别出水资源利用效率的主要障碍因素是生态环境指标中生态环境用水比例，其次是污径比。

**Table 5.** Evaluation results of water resources utilization efficiency in Zhengzhou City  
**表 5.** 不同评价方法计算结果对比

地区	利用效率等级	改进灰靶模型	TOPSIS 法
新密市	IV	7	8
新郑市	IV	5	5
荥阳市	III	4	7
登封市	IV	8	6
中牟县	II	2	2
郑州市区	I	1	1
航空港区	IV	6	4
上街区	II	3	3

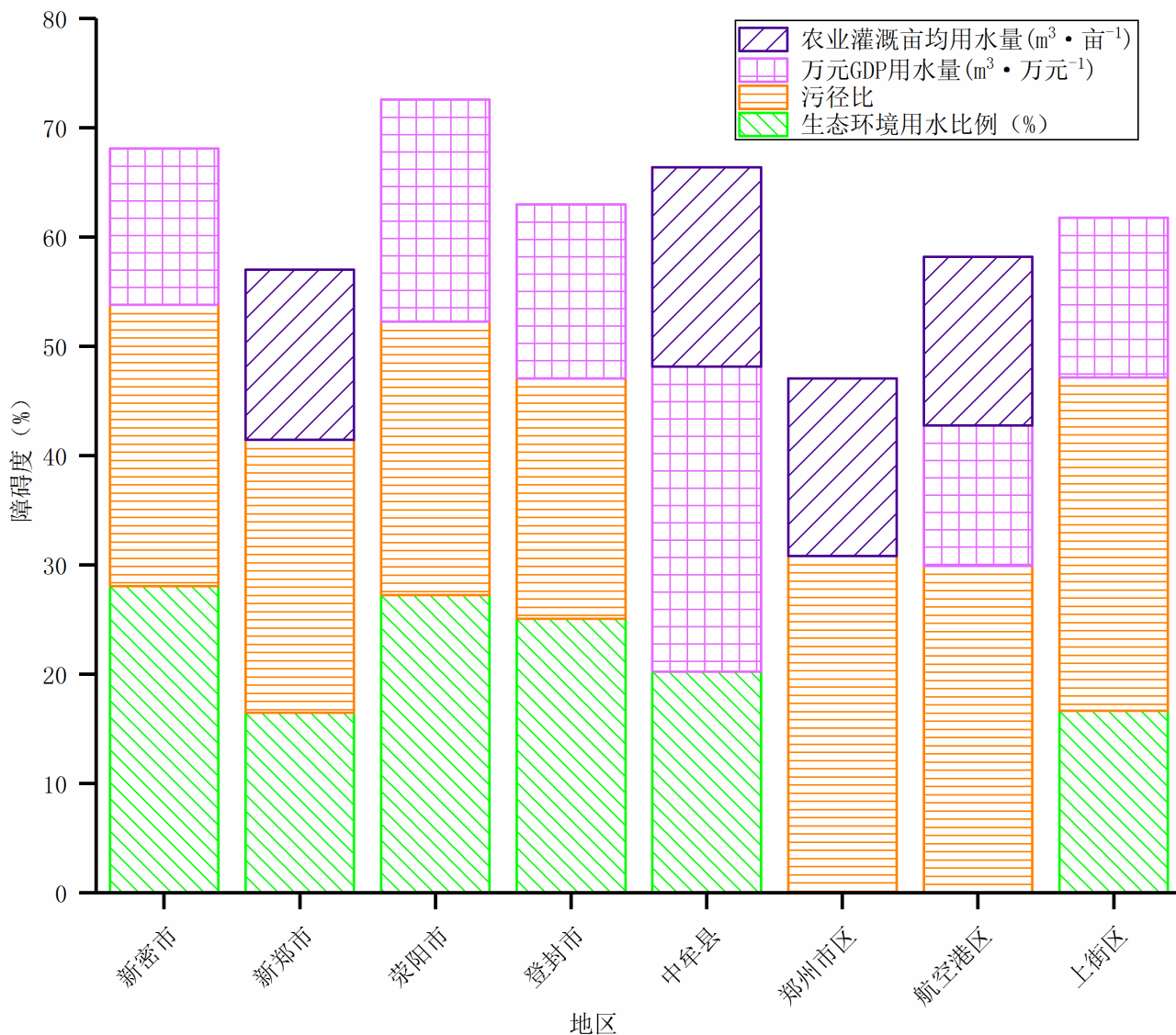


Figure 1. Main obstacle factors and obstacles of water resources utilization efficiency in Zhengzhou City

图 1. 郑州市水资源利用效率主要障碍因子及障碍度

## 5. 结论

将 CRITIC 客观赋权法引入到灰靶模型中, 克服了传统模型的不足, 构建了基于 CRITIC 权的改进灰靶模型, 通过采用不同方法对郑州市水资源利用效率评价结果比较, 两种方法得到的结果具有较好的一致性, 表明了改进灰靶模型在水资源评价中的应用价值, 利用障碍因子诊断模型识别了阻碍郑州市各地区水资源利用效率的主要障碍因子。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51509088, 51709108); 河南省高校科技创新团队(14IRTSTHN028); 河南省水环境模拟与治理重点实验室(2017016)。

## 参考文献

[1] 李红新. 辽宁省用水效率的时空变化分析及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.

- LI Hongxin. Analysis on spatial-temporal changes of water use efficiency and influencing factors in Liaoning Province. Master's Degree Thesis. Dalian: Liaoning Normal University, 2008. (in Chinese)
- [2] 张旭腾, 于静洁. 基于非期望输出 DEA 模型的各省用水效率评价[J]. 水资源研究, 2017, 6(2): 138-147.  
ZHANG Xuteng, YU Jingjie. Water use efficiency assessment of Chinese provinces based on a data envelopment analysis model with undesirable outputs. Journal of Water Resources Research, 2017, 6(2): 138-147. (in Chinese)
- [3] 朱燕飞, 陈智和, 金远征. 金华市水资源利用效率评价研究[J]. 人民长江, 2016, 47(21): 43-47.  
ZHU Yanfei, CHEN Zhihe and JIN Yuanzheng. Evaluation on utilization efficiency of water resources in Jinhua City. Yangtze River, 2016, 47(21): 43-47. (in Chinese)
- [4] 王晓琳, 吴凯, 许怡. 基于物元可拓模型的区域用水效率控制综合评价[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 30-34.  
WANG Xiaolin, WU Kai and XU Yi. Comprehensive evaluation of regional water use efficiency control based on Matter-element model. Water Resources and Power, 2017, 35(3): 30-34. (in Chinese)
- [5] 孟令爽, 唐德善, 史毅超. 基于主成分分析法的用水效率评价[J]. 人民长江, 2018, 49(5): 36-40.  
MENG Lingshuang, TANG Deshan and SHI Yichao. Evaluation on water use efficiency based on principal components analysis. Yangtze River, 2018, 49(5): 36-40. (in Chinese)
- [6] 段长桂, 董增川, 管西柯, 等. 基于迭代思想的山东省水资源利用效率评价[J]. 人民黄河, 2017, 39(12): 62-66.  
DUAN Changgui, DONG Zengchuan, GUAN Xike, et al. Evolution for water use efficiency of Shandong Province based on circulation correction model. Yellow River, 2017, 39(12): 62-66. (in Chinese)
- [7] 余兴奎, 何士华, 高飞. 云南省水资源利用效率评价[J]. 中国农村水利水电, 2012(3): 87-90.  
YU Xingkuai, HE Shihua and GAO Fei. Evaluation of water use efficiency in Yunnan Province. China Rural Water and Hydropower, 2012(3): 87-90. (in Chinese)
- [8] 朱兆珍, 梁中. 我国省域水资源利用效率评价研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2015, 17(3): 72-78+92.  
ZHU Zhaozhen, LIANG Zhong. Research into evaluation of efficiency of provincial water resource use in China. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2015, 17(3): 72-78+92. (in Chinese)
- [9] 李恩宽, 蔡大应, 赵焱, 等. 基于混合蛙跳算法投影寻踪模型的黄河流域用水效率评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(5): 88-91.  
LI Enkuan, CAI Daying, ZHAO Yan, et al. Evaluation of water use efficiency using the projection pursuit model based on the Shuffled Frog Leaping Algorithm in the Yellow River basin. China Rural Water and Hydropower, 2016(5): 88-91. (in Chinese)
- [10] 管新建, 秦海东, 孟钰. 基于 CRITIC-TOPSIS-灰色关联度的淮河流域水资源利用效率评估[J]. 节水灌溉, 2018, 279(11): 73-76+80.  
GUAN Xinjian, QIN Haidong and MENG Yu. Water use efficiency evaluation of Huai River basin based on CRITIC-TOPSIS-Gray relation degree. Water Saving Irrigation, 2018, 279(11): 73-76+80. (in Chinese)
- [11] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 171-201.  
DENG Julong. Foundation of Grey Theory. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 171-201. (in Chinese)
- [12] 侯玉乐, 李钢, 渠俊峰, 等. 基于改进灰靶模型的土地生态安全评价——以江苏省徐州市为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 285-290.  
HOU Yule, LI Gang, QU Junfeng, et al. Evaluation of land eco-security based on improved Grey Target Model—A case of Xuzhou City, Jiangsu Province. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 285-290. (in Chinese)
- [13] 文博, 刘友兆, 夏敏, 等. 基于灰靶模型的宜兴市农村居民点布局适宜性评价及分类调控研究[J]. 地域研究与开发, 2016, 35(5): 153-157+169.  
WEN Bo, LIU Youzhao, XIA Min, et al. Suitability evaluation and regulation of rural residential land in Yixing City based on the Grey Target Model. Areal Research and Development, 2016, 35(5): 153-157+169. (in Chinese)
- [14] 熊鸿斌, 周凌燕. 基于 PSR-灰靶模型的巢湖环湖防洪治理工程生态环境影响评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 1977-1987.  
XIONG Hongbin, ZHOU Lingyan. Using PSR-Grey Target Model to assess ecological and environmental impact of flood regulation project at riparian zone around Lake Chaohu. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 1977-1987. (in Chinese)
- [15] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 642-646.  
YANG Liying, XU Xinyi and JIA Xiangxiang. Water use efficiency evaluating index system. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(5): 642-646. (in Chinese)
- [16] 王瑛, 姜芸芸. 基于改进 CRITIC 赋权法和模糊优选法的大气质量评价[J]. 统计与决策, 2017(17): 83-87.  
WANG Ying, JIANG Yunyun. Air quality assessment based on improved CRITIC weighting method and fuzzy optimization method. Statistics & Decision, 2017(17): 83-87. (in Chinese)