

工程建设效果后评价博弈论集对分析模型的建立与应用

郭燕红¹, 邵东国^{1*}, 刘玉龙², 陈 述¹

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2.辽宁省水利水电勘测设计研究院, 沈阳 110006)

摘 要: 针对工程建设效果后评价中具有很多确定性和不确定性因素, 且评价因子与等级标准间存在着复杂的非线性关系这一大难题, 该文将集对分析理论和博弈论相结合, 提出基于博弈论的集对分析模型。该模型运用博弈论确定指标权重, 然后将指标实际值和等级标准值构成一个集对, 根据集对分析方法计算其综合联系度, 据此判断评价对象的等级及其在等级间的转化趋势。之后引入集对的同势、反势、均势分析系统内部各子系统之间的协调程度进而解释转化趋势的内在原因。最后将模型运用于湖南省农村饮水安全工程建设效果后评价中, 并与突变评价法相比较。结果显示: 湖南省14个市(州)中有3个地区(衡阳、郴州、永州)农村饮水安全级别为“优”, 3个地区(常德、益阳、娄底)农村饮水安全级别为“一般”, 其他地区农村饮水安全均“良好”; 长沙和怀化农村饮水安全系统协调性很强, 工程可持续发展水平高; 娄底农村饮水安全系统协调性一般, 工程可持续发展水平不高; 株洲农村饮水安全系统极不协调, 工程可持续发展状况不容乐观; 衡阳和郴州农村饮水安全系统基本不协调, 工程可持续发展状况较差; 其他市农村饮水安全系统基本协调, 工程后续效益较为稳定。方法对比表明该文方法的研究结果可靠度更高, 反映出的信息更全面、合理。该研究可为类似或后续工程管理提供决策参考。

关键词: 博弈论; 水资源; 协调性分析; 后评价; 集对分析; 集对势

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.002

中图分类号: S273; F224.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0005-08

郭燕红, 邵东国, 刘玉龙, 等. 工程建设效果后评价博弈论集对分析模型的建立与应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 5-12.

Guo Yanhong, Shao Dongguo, Liu Yulong, et al. Establishment and application of set pair analysis model based on game theory for post-assessment of project construction effectiveness[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 5-12. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

工程建设效果后评价能客观地分析工程项目目标的实现程度、效益发挥程度、工程对周围环境的影响程度及可持续发展水平, 可为后续工程管理的改进、各个层次的管理决策水平的提高、相关政策的制定提供理论依据, 并能指导同类在建和拟建工程或配套工程, 以促进工程项目更好的发挥效益^[1]。目前工程项目后评价常用的方法可概括为单因子评价方法和综合评价法 2 大类, 其中综合评价法主要有层次分析法、数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)、TOPSIS 法(technique for order preference by similarity to solution)、突变评价法、模糊综合评价法等^[2-5], 每种方法都有各自的优点与不足^[6], 许多学者针对各评价方法的不足做了相应修正, 取得了众多成果^[7-11]。但是, 目前的大多数研究主要侧重于确定性和模糊性研究, 较少将确定性和不确定性结合研究,

且尚未涉及到分析评价对象在各等级之间的转化趋势及其内在动因。

工程建设效果后评价本身是一个多元的复杂体系, 具有很多确定性和不确定性因素; 此外, 只有全面客观地了解工程建设效果的制约因子, 并对未来的发展趋势做出合理的判断, 才能有效地制定相关政策措施, 维护工程的可持续发展。因此, 综合确定性和不确定性因素对工程建设效果进行后评价, 以及进行工程建设效果等级的转化趋势研究显得十分必要。

本文将博弈论^[12]与集对分析理论^[13-14]相结合, 提出了博弈论集对分析模型。运用博弈论确定指标权重, 借助集对理论的确定性和不确定性分析方法, 将指标实际值和等级标准值作为一个集对, 计算综合联系度并判断评价对象的等级及其在等级标准之间的转化趋势; 进一步基于集对的同势、反势、均势理论评价工程建设效果内部子系统的协调程度, 分析评价对象在等级之间转化的内在动因。旨在了解工程建设效果的实现程度及其未来发展趋势, 为后续工程管理提供决策参考。

1 博弈论集对分析模型

1.1 基于博弈论的指标综合集成赋权

对于由多因子构成的系统, 指标权重的确定对评价结果的客观合理性起着至关重要的作用^[15]。本文综合客观赋权法和主观赋权法的优点, 运用博弈论对指标进行

收稿日期: 2015-02-04 修订日期: 2015-03-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B05-3); 国家自然科学基金面上项目(51379150); 国家自然科学基金重点项目(51439006)
作者简介: 郭燕红, 女, 湖北黄石人, 主要从事水资源高效利用与环境保护研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。

Email: gyh105422@163.com

*通信作者: 邵东国, 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 主要从事水资源高效利用及生态环境效应研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。Email: dgshao@whu.edu.cn

综合集成赋权, 具体方法如下。

使用 L 种方法对评价指标进行赋权, 构造一个基本的权重集 $\omega_k = \{\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}\}$, $k=1, 2, \dots, L$ 。 L 个向量的任意线性组合记为:

$$\omega = \sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T \quad (\beta_k > 0) \quad (1)$$

式中: ω 为基于基本权重集的一种可能的权重向量, 为了在可能的权重向量集 $\{\omega | \omega = \sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T\}$ 中选择一个最满意的权重 ω^* 。本文采用博弈论的方法来获得 ω^* 。根据博弈论的妥协思想, 极小化可能权重向量 ω 和各个基本权重向量之间的偏差。因此, 需要对式(1)中 L 个线性组合系数 β_k 进行优化, 优化目标是使 ω 与各个 ω_k 的离差最小^[16], 即:

$$\min_g \left\| \sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T - \omega_g \right\|_2, \quad (g=1, 2, \dots, L) \quad (2)$$

式中: ω_g 为第 g 种方法得到的指标权重向量。

根据矩阵的微分性质, 式(2)最优化的一阶导数条件为 $\sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k \omega_k^T = \omega_g \omega_g^T$, 可转化为下面的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T & \dots & \omega_1 \omega_L^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T & \dots & \omega_2 \omega_L^T \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \omega_L \omega_1^T & \omega_L \omega_2^T & \dots & \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \\ \vdots \\ \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

求得 $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$, 然后归一化处理 $\beta_k^* = \beta_k / \sum \beta_k$, 并代入式(1)即可得到综合权重向量 ω^* 。

1.2 集对分析理论与模型构建

集对分析理论自 20 世纪 80 年代赵克勤提出后, 已广泛应用于交通事故、过程系统控制研究等领域^[13]。该理论能有效处理确定不确定系统问题, 其基本思路是^[14]: 根据具体的问题, 对所论的 2 个集合 A 和 B 具有的 N 个特性展开分析, 其中 2 个集合所共有的特性有 S 个, 对立的特性有 P 个, $F=N-S-P$ 个特性关系不确定, 于是得到 2 个集合的联系度:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N} i_\mu + \frac{P}{N} j_\mu = a + b i_\mu + c j_\mu \quad (4)$$

式中: μ 为联系度; $a=S/N$ 为集合 A 与集合 B 的同一度, $b=F/N$ 为集合 A 与集合 B 的差异度, $c=P/N$ 为集合 A 与集合 B 的对立度, 且 $a+b+c=1$; i_μ 为差异度系数, 在 $[-1, 1]$ 区间视不同情况取值, i_μ 也可仅起标记作用; j_μ 为对立度系数, 其值为 -1 , j_μ 也可仅起标记作用。

目前有关集对分析应用的研究在计算联系度时, 将评价对象的所有指标作为一个整体, 根据事先制定的原则直接计算联系度 μ 表达式中的 a 、 b 、 c 值, 然后根据 a 、 b 、 c 的大小关系对评价对象进行综合评价。该计算方法没有突出差异度系数 i_μ 的作用; 也未能考虑各指标的的实现程度, 因而无法体现影响系统改善或恶化的关键因子; 在等级判定上具有一定的主观性, 且只能做整体性分析, 不能对工程的未来发展趋势做出合理的判断。

本文在已有研究的基础上, 充分利用差异度系数 i_μ 和对立度系数 j_μ 的双重身份, 即数值和标记作

用。其中在等级评价中对 i_μ 和 j_μ 进行取值, 并分等级区间计算联系度; 协调性分析中, i_μ 和 j_μ 起标记作用。全方位评价工程的综合效益、限制因子和发展趋势, 以期为后续工程管理和相关政策制定提供理论依据。

将工程建设效果后评价的指标标准分为优 (I)、良 (II)、一般 (III)、差 (IV) 4 个等级。对于越大越优型指标, 其联系度的计算方法为:

假设指标 t 处于 I 级时,

$$\mu_{st1} = \begin{cases} 1 & x_{st} \geq S_{1t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{1t})}{S_{1t} - S_{2t}} & S_{2t} \leq x_{st} < S_{1t} \\ -1 & x_{st} < S_{2t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: μ_{st1} 为评价对象 s 的指标 t 对于等级 I 的联系度; x_{st} 为评价对象 s 的指标 t 的实际值; S_{1t} 、 S_{2t} 分别为指标 t 的等级 I 和等级 II 的区间下限值。

假设指标 t 处于 II 级时,

$$\mu_{st2} = \begin{cases} 1 & S_{2t} \leq x_{st} < S_{1t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{1t})}{S_{1t} - S_{0t}} & x_{st} > S_{1t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{2t})}{S_{2t} - S_{3t}} & S_{3t} \leq x_{st} < S_{2t} \\ -1 & x_{st} < S_{3t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ_{st2} 为评价对象 s 的指标 t 对于等级 II 的联系度; S_{0t} 为越大越优型指标 t 的 I 级的区间上限值; S_{3t} 为指标 t 的等级 III 的区间下限值。

假设指标 t 处于 III 级时,

$$\mu_{st3} = \begin{cases} 1 & S_{3t} \leq x_{st} \leq S_{2t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{2t})}{S_{2t} - S_{1t}} & S_{2t} < x_{st} \leq S_{1t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{3t})}{S_{3t} - S_{4t}} & S_{4t} \leq x_{st} < S_{3t} \\ -1 & x_{st} > S_{1t} \cup x_{st} < S_{4t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ_{st3} 为评价对象 s 的指标 t 对于等级 III 的联系度; S_{4t} 分别为指标 t 的等级 IV 的区间下限值。

假设指标 t 处于 IV 级时,

$$\mu_{st4} = \begin{cases} 1 & S_{4t} \leq x_{st} \leq S_{3t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{3t})}{S_{3t} - S_{2t}} & S_{3t} < x_{st} \leq S_{2t} \\ -1 & x_{st} > S_{2t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_{st4} 为对象 s 的指标 t 对于等级 IV 的联系度。

对于越小越优型指标, 其联系度的计算方法为:

假设指标 t 处于 I 级时,

$$\mu_{st1} = \begin{cases} 1 & x_{st} \leq S_{1t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{1t})}{S_{1t} - S_{2t}} & S_{1t} < x_{st} \leq S_{2t} \\ -1 & x_{st} > S_{2t} \end{cases} \quad (9)$$

假设指标 t 处于 II 级时,

$$\mu_{st2} = \begin{cases} 1 & S_{1t} \leq x_{st} \leq S_{2t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{1t})}{S_{1t}} & x_{st} < S_{1t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{2t})}{S_{2t} - S_{1t}} & S_{2t} \leq x_{st} < S_{3t} \\ -1 & x_{st} \geq S_{3t} \end{cases} \quad (10)$$

假设指标 t 处于III级时,

$$\mu_{st3} = \begin{cases} 1 & S_{2t} \leq x_{st} \leq S_{3t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{2t})}{S_{2t} - S_{1t}} & S_{1t} < x_{st} < S_{2t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{3t})}{S_{3t} - S_{4t}} & S_{3t} \leq x_{st} < S_{4t} \\ -1 & x_{st} \leq S_{1t} \cup x_{st} \geq S_{4t} \end{cases} \quad (11)$$

假设指标 t 处于IV级时,

$$\mu_{st4} = \begin{cases} 1 & S_{3t} \leq x_{st} \leq S_{4t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{3t})}{S_{3t} - S_{2t}} & S_{2t} \leq x_{st} < S_{3t} \\ 1 + \frac{2(x_{st} - S_{4t})}{S_{4t} - S_{40t}} & x_{st} > S_{4t} \\ -1 & x_{st} < S_{2t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: S_{40t} 为越小越优型指标 t 的IV级的上限值; 其他字母含义同上。

根据上文博弈论综合赋权法得到的指标权重 $W=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$, 构造基于博弈论的集对分析模型:

$$\mu_{si} = \sum_{t=1}^n (\omega_t \cdot \mu_{sti}) \quad (13)$$

式中: μ_{si} 评价对象 s 对于等级 i 的综合联系度, n 为评价指标的个数。

评价等级的确定准则: 若评价对象 s (或评价指标 t) 属于等级 i , 那么对象 s (或指标 t) 对于等级 i 的联系度 μ_{si} (或 μ_{sti}) 必然大于对其他等级的联系度, 即 μ_{si} (或 μ_{sti}) = $\max\{\mu_{sj}\}$ (或 $\mu_{sti} = \max\{\mu_{stj}\}$), ($i, j=1, 2, 3, 4$), 则评价结果判为 i 级。

评价等级确定后, 从集对的同势、反势和均势的角度, 分析系统内部各子系统的协调程度进而分析等级之间转化的内在动因。

1.3 协调性分析

由若干相互制约或相互矛盾的子系统或多个有利益冲突的独立个体或有不同评价标准的因素组成的系统, 需分析系统的协调性, 以评判系统的可持续发展水平^[17]。集对的同势、反势和均势反映了系统或系统要素之间的联系程度及发展方向^[13], 因而可以利用集对势分析系统的协调性和可持续发展水平。其方法步骤如下。

1) 根据博弈论集对分析模型得到的等级评价结果, 计算各子系统的联系度式 (4) 中 a 、 b 、 c 的值: 当评价对象的评价等级为 i 时, 若某个子系统有 N 个指标, 符合 i 级标准的指标数目 N_i 为集对中 2 个集合共同具有的特征数, 即 $a=N_i/N$; 而凡高于 i 级标准的指标数目为集对的 2 个集合既不对立, 也不共有的特征数目, 即

$b=(N_1+N_2+\dots+N_{i-1})/N$; 凡低于 i 级标准的指标数目为集对中 2 个集合相互对立的特征数目, 即 $c=(N_{i+1}+N_{i+2}+\dots+N_j)/N$ (j 为等级标准数)。

2) 根据联系度的计算法则(参考文献[13]的 98-102 页)计算评价对象的加权联系度 μ_s , 即:

$$\mu_s = \omega_{ss1}\mu_{ss1} + \omega_{ss2}\mu_{ss2} + \dots + \omega_{ssm}\mu_{ssm} = a_s + b_s i_\mu + c_s j_\mu \quad (14)$$

式中: μ_s 为评价对象 s 的加权联系度; μ_{ssk} ($k=1, 2, \dots, m$) 分别为各子系统的联系度; ω_{ssk} ($k=1, 2, \dots, m$) 分别为各子系统的权重系数; m 为子系统的个数。

3) 由表达式 μ_s 中 a_s 、 b_s 、 c_s 的大小关系 (表 1), 确定系统所属的集对势, 分析系统内部子系统的协调发展程度及其在等级标准之间转化的内在原因。

表 1 集对势

Table1 Set pair situation

a 、 b 、 c 大小关系 Relationship of size among a , b and c	集对势名称 Name of set pair situation	含义 Connotation
$a > c$	$b < c, b \neq 0$	强同势 子系统以同一趋势为主, 协调性很强, 系统改善的趋势很强
	$b = 0$	准同势 子系统有确定的同一趋势, 协调性强, 系统改善的趋势较强
	$a > b > c$	弱同势 子系统同一的趋势比较弱, 系统改善的趋势比较弱
	$b > a$	微同势 子系统同一的趋势很微弱, 系统改善的趋势非常弱
$a = c$	$b = 0$	准均势 子系统的同一和对立趋势均力敌, 系统很稳定
	$0 < b < a$	强均势 子系统的同一和对立趋势明显相等, 系统比较稳定
	$b \geq a$	弱均势 同一和对立趋势虽相等, 但有不稳定特征, 系统稳定性较弱
	$b > c$	微反势 不确定性较大, 对立趋势不稳定, 系统不协调, 系统恶化的趋势很微弱
$a < c$	$a < b < c$	弱反势 子系统对立的趋势较弱, 系统不协调, 系统恶化的趋势很弱
	$b = 0$	准反势 子系统对立的趋势确定, 系统不协调, 系统恶化的趋势较强
	$0 < b \leq a$	强反势 子系统以对立趋势为主, 系统不协调, 系统恶化的趋势很强

注: 表中 11 种情况是在 $a \neq 0, c \neq 0$ 条件下形成的集对势; a 、 b 和 c 分别为同一度、差异度和对立度。

Note: Set pair situation is under condition of $a \neq 0$ and $c \neq 0$; a , b and c is identical degree, different degree and opposite degree.

2 实例应用

2.1 研究区概况

实例为评价湖南省 13 个省辖市和 1 个自治州的农村饮水安全工程建设效果。

湖南省是一个拥有 2 426 个乡镇、40 095 个行政村的农业大省, 农村人口 5 712.04 万人, 占全省总人口的 79.92%。因此, 农业及农村经济发展在全省有着举足轻重的地位。农村饮水安全是全省广大农村居民最关心、最直接、最现实的民生问题, 省政府及相关部门高度重视这一“德政工程”建设。自 2005 年, 湖南省全面推进农村饮水安全工作, 建设、管理和维护齐头并进。工程建设方面, 累计投资 43.76 亿元, 建成各类农村饮水安全工程 19 841 处, 解决 963.46 万农村居民饮水不安全问题; 管理及维护方面, 投资 744.1 万元, 建成 121 个县级农村

供水专管机构，35 个县（市、区）设立县级维修基金，并在 23 个县（市、区）成立了县级水质检测中心。由于该省自然地理条件复杂，且降水时空不均匀，农村经济水平不高，仍普遍存在农村饮水安全问题。因此，开展农村饮水安全工程建设效果后评价工作具有重要意义。

2.2 等级评价计算及结果分析

2.2.1 等级评价计算

通过分析湖南省各市（州）农村经济社会、农村饮水工

程的发展情况，构建湖南省农村饮水工程建设效果后评价指标体系。指标体系主要考虑 3 个子系统下的共 13 个指标（表 2），其中数据来源于湖南及其各市（州）统计年鉴、湖南省水资源公报、中国农村统计年鉴和文献[6]。参考有关国内外研究成果^[18-19]，结合湖南省农村饮水安全现状，根据《生活饮用水卫生标准》和其他国家和地区对各指标的分级标准，将农村饮水安全工程建设效果划分为优秀（Ⅰ级）、良好（Ⅱ级）、一般（Ⅲ级）、差（Ⅳ级）4 个等级（见表 2）。

表 2 农村饮水安全工程建设效果后评价指标及等级标准
Table 2 Evaluation indexes for rural drinking water safety projects post-assessment and grade standard of indexes

子系统 Subsystem	指标层 Index layer	指标涵义 Connotation of index	指标性质 Index property	权重 Weight	各指标等级标准 Grade standard of indicator				长沙市实际 达到值 Actual value for index of Changsha
					Ⅰ级 Level I	Ⅱ级 Level II	Ⅲ级 Level III	Ⅳ级 Level IV	
工程管理 Project management	投资完成率 $C_1/\%$	实际投资额/计划投资额	正向	0.0451	[95,100]	[90,95]	[85,90]	(0,85)	100
	工程完成率 $C_2/\%$	实际完成工程量/计划工程量	正向	0.0651	[95,100]	[90,95]	[85,90]	(0,85)	98.6
	完成工程达标率 $C_3/\%$	完成并达标工程数量/完成工程总数量	正向	0.1006	[95,100]	[90,95]	[85,90]	(0,85)	96.7
	水源地保护条例健全程度 C_4	根据水源地保护措施完善情况评定	正向	0.0281	[0.95,1]	[0.9,0.95]	[0.85,0.9]	(0,0.85)	1
	饮水安全预案健全程度 C_5	根据饮水预警方案和设备完善情况评定	正向	0.0185	[0.95,1]	[0.9,0.95]	[0.85,0.9]	(0,0.85)	0.94
社会经济 Socioeco- nomic performa- nce	水费收益情况 $C_6/\%$	(2010 年水价-2006 年水价)/200 年水价	正向	0.0813	[40,100]	[30,40]	[20,30]	(0,20)	37.23
	解决饮水困难人口完成率 $C_7/\%$	实际解决的饮水安全困难人数/计划解决的人数	正向	0.2016	[95,100]	[90,95]	[85,90]	(0,85)	93.9
	农村自来水受益率 $C_8/\%$	农村自来水受益村数/总村数	正向	0.1292	[85,100]	[70,85]	[55,70]	(0,55)	32.4
	农村就业增加率 $C_9/\%$	(2010 年农村就业率-2005 年农村就业率)/2005 年农村就业率	正向	0.0331	[40,100]	[30,40]	[20,30]	(0,20)	23.66
生态环境 Ecologic environment response	用水不方便程度 $C_{10}/\%$	用水不方便人口/总人口	逆向	0.0480	[0,0.5]	(0.5,1.5]	(1.5,3]	(3,100)	1.5
	水质保证改善情况 C_{11}	5 年水质排序，改善率高者指数大，一直为 100%的指数 1	正向	0.0768	1	[0.8,1]	[0.5,0.8]	(0,0.5)	0.61
	水源地水功能区达标率 $C_{12}/\%$	水功能区达标数量/水功能区总数量	正向	0.1302	[95,100]	[90,95]	[85,90]	(0,85)	94.9
	农村生活垃圾处理率 $C_{13}/\%$	农村生活垃圾处理质量/农村产生生活垃圾总量	正向	0.0425	[30,100]	[20,30]	[10,20]	(0,10)	0.1

注：限于篇幅长度，本文只给出了长沙市的实际数据，其他市联系度的计算过程同长沙市。
Note: Limited to space, only an example of Changsha is given, and calculation of connection degrees for other cities is same with that of Changsha.

本文采用熵值法和层次分析法计算指标的客观权重和主观权重（计算过程见文献[20]和[21]），组成可能的权重集，然后运用 1.1 中博弈论方法得到最优的权重向量。

将 13 个指标与其等级标准构成一个集对，根据式（5）～式（12）计算各指标属于各等级标准的联系度。以长沙市指标 C_1 、 C_2 、 C_6 为例： $\mu_{1,C_1}=1$ ， $\mu_{2,C_1}=-1$ ， $\mu_{3,C_1}=-1$ ， $\mu_{4,C_1}=-1$ ； $\mu_{1,C_2}=1$ ， $\mu_{2,C_2}=1+2\times(0.986-0.95)/(0.95-1)=-0.44$ ， $\mu_{3,C_2}=-1$ ， $\mu_{4,C_2}=-1$ ； $\mu_{1,C_6}=1+2\times(0.3723-0.4)/(0.4-0.3)=0.447$ ， $\mu_{2,C_6}=1$ ， $\mu_{3,C_6}=1+2\times(0.3723-0.3)/(0.3-0.4)=-0.447$ ， $\mu_{4,C_6}=-1$ 。可以判定长沙市指标 C_1 和 C_2 均属于等级Ⅰ，指标 C_6 属于等级Ⅱ。同理求得长沙市其他指标的联系度（表 3）。

将上文博弈论综合赋权法得到的指标权重和各项指标对应各等级的联系度量值（表 3）输入式（13）计算综合联系度，并根据 1.2 中评价等级的确定准则，判定评价对象的等级。

表 3 长沙市农村饮水安全指标联系度及其等级
Table 3 Connection degree for index and its evaluation degree of Changsha rural drinking water safety

指标 Index	Ⅰ级 Level I	Ⅱ级 Level II	Ⅲ级 Level III	Ⅳ级 Level IV	评价等级 Evaluation degree
C_1	1	-1	-1	-1	Ⅰ
C_2	1	-0.44	-1	-1	Ⅰ
C_3	1	0.32	-1	-1	Ⅰ
C_4	1	-1	-1	-1	Ⅰ
C_5	0.6	1	-0.6	-1	Ⅱ
C_6	0.447	1.000	-0.447	-1	Ⅱ
C_7	0.56	1	-0.560	-1	Ⅱ
C_8	-1	-1	0.178	1	Ⅳ
C_9	-1	-0.269	1	0.269	Ⅲ
C_{10}	-0.905	1	0.905	-1	Ⅱ
C_{11}	-1	-0.267	1	0.267	Ⅲ
C_{12}	0.96	1	-0.96	-1	Ⅱ
C_{13}	-1	-1	1	1	Ⅲ

2.2.2 结果与分析

博弈论综合集成赋权的结果见表 2，表 4 为湖南省各市（州）农村饮水安全工程建设效果后评价指标的等级评价结果（其计算过程同上文长沙市），表 5 为各市（州）的综合评价结果。

由表 2 指标权重大小可知，工程完成率（ C_2 ）、工

程完成达标率（ C_3 ）、水费收益情况（ C_6 ）、解决饮水困难人口完成率（ C_7 ）、农村自来水受益率（ C_8 ）、水质保证改善情况（ C_{11} ）和水源地水功能区达标率（ C_{12} ）是农村饮水安全工程效益发挥的主要影响因子，与湖南省农村饮水安全工程的实际情况相符，体现了博弈论综合集成赋权法的合理性。

表 4 湖南省各市（州）农村饮水安全工程建设效果后评价指标评价等级
Table 4 Index evaluation degree of Hunan rural drinking water safety projects post-assessment

地区 District	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}
长沙 Changsha	I	I	I	I	II	II	II	IV	III	II	III	II	III
株洲 Zhuzhou	I	I	II	I	III	IV	II	IV	II	II	IV	IV	IV
湘潭 Xiangtan	I	I	I	I	I	III	II	IV	III	IV	III	II	IV
衡阳 Hengyang	I	I	I	I	I	I	I	IV	III	III	IV	III	IV
邵阳 Shaoyang	I	I	II	I	I	IV	II	IV	III	II	I	IV	IV
岳阳 Yueyang	I	I	II	I	I	IV	II	IV	IV	IV	I	III	IV
常德 Changde	I	II	II	III	IV	IV	III	IV	IV	III	IV	I	III
张家界 Zhangjiajie	I	I	I	I	I	IV	I	IV	II	II	I	II	IV
益阳 Yiyang	I	II	II	III	I	IV	II	IV	IV	III	IV	I	III
郴州 Chenzhou	I	I	I	I	I	IV	I	IV	III	IV	I	II	III
永州 Yongzhou	I	I	I	I	I	IV	I	IV	III	IV	I	I	IV
怀化 Huaihua	I	I	II	I	I	IV	II	IV	IV	II	II	II	IV
娄底 Loudi	I	II	II	I	III	III	II	III	III	III	IV	IV	IV
湘西州 Xiangxizhou	I	I	II	II	III	IV	I	IV	III	IV	III	II	IV

表 5 各市（州）综合评价结果
Table 5 Comprehensive evaluation result of Hunan

地区 District	I 级 Level I	II 级 Level II	III 级 Level III	IV 级 Level IV	评价等级 Evaluation degree
长沙 Changsha	0.199	0.209	-0.305	-0.517	II 级
株洲 Zhuzhou	-0.18	-0.056	-0.097	-0.073	靠近 II 级
湘潭 Xiangtan	-0.228	0.057	0.019	-0.23	II 级
衡阳 Hengyang	0.08	0.063	-0.22	-0.428	I 级
邵阳 Shaoyang	-0.173	0.003	-0.033	-0.177	II 级
岳阳 Yueyang	-0.227	0.101	-0.006	-0.274	II 级
常德 Changde	-0.364	-0.038	0.127	-0.209	III 级
张家界 Zhangjiajie	0.072	0.218	-0.149	-0.494	II 级
益阳 Yiyang	-0.374	-0.017	0.137	-0.23	III 级
郴州 Chenzhou	0.108	0.078	-0.23	-0.337	I 级
永州 Yongzhou	0.332	0.005	-0.531	-0.433	I 级
怀化 Huaihua	0.231	0.252	-0.35	-0.428	II 级
娄底 Loudi	-0.508	0.133	0.282	-0.225	III 级
湘西州 Xiangxizhou	-0.041	0.123	-0.123	-0.643	II 级

从指标层（表 4）来看，湖南省各市的农村饮水安全的限制因子虽不完全一致，但主要集中在水费收益、农村自来水受益率、水质改善情况、水源地水功能区保护情况。湖南省工业不发达，对水源污染不严重，但生活垃圾造成的水功能区污染问题比较突出，存在饮水水质问题；由于农民对农业水费的支付意愿很低，导致水费

收取困难。可知，评价结果能够体现湖南省农村饮水安全的实际情况。

从子系统层（表 4）来看，各市（州）工程管理子系统的 5 个指标基本属于 I 级和 II 级，说明湖南省近年来高度重视民生工程的管理工作；但社会效益和生态环境响应子系统的指标等级普遍不高，说明该省农村饮水安全工程的效益未得到充分发挥，农村生态环境方面保护力度不够。

从目标层（表 5）来看，衡阳、郴州和永州的农村饮水安全工程建设效果为“优”（I 级），长沙、湘潭、邵阳、岳阳、张家界、怀化和湘西州的农村饮水安全全工程建设效果为“良”（II 级），常德、益阳和娄底的农村饮水安全工程建设效果为“一般”（III 级），株洲得分为负值，其农村饮水安全工程建设效果等级向“良”靠近。湖南省农村饮水安全水平存在地区差异性，这与该省复杂的地形条件、各市（州）社会经济水平、农村建设投资情况的不同等紧密相关。

等级转化趋势分析。由表 4 工程建设效果的限制因子和表 5 各市（州）最高级和次高级综合联系度 μ 之间的距离可知：长沙市农村饮水安全的主要限制因子为 C_8 和 C_{11} ，怀化市农村饮水安全的主要限制因子为 C_6 和 C_8 ，由于这 2 市的最高 μ 值和次高 μ 值之间距离很小，可见提高农村自来水普及率、加强农村饮水水质监督及水费改革可以有效改善其农村饮水安全状况，具有较大的提升潜力；娄底市农村饮水安全的限制因子为 C_6 、 C_8 、 C_{11} 和 C_{12} ，在水源地水功能区污染情况短时间内较难有明显改善的情况下，该市农村饮水安全水平在短期内不会有明显的提高；株洲农村饮水安全的限制因子为 C_6 、 C_8 、 C_{11} 和 C_{12} ，衡阳农村饮水安全的限制因子为 C_8 、 C_{11} 和

C_{12} , 目前该 2 市的这些限制因子的现状不太乐观, 改善需很大投入, 在短期内难以实现, 因此导致这 2 市农村饮水安全水平有恶化的趋势; 郴州的限制因子为 C_6 和 C_8 , 由于目前郴州水费收益情况和农村自来水普及情况不太理想, 若不加大改善力度, 将导致其农村饮水安全等级下降; 其他市农村饮水安全的最高 μ 值和次高 μ 值之间的距离较远, 将在各自的等级上短期内稳定不变。

2.3 协调性分析

根据表 5 各地区的评价等级与 2 中子系统联系度 μ 表达式中 a 、 b 、 c 值的确定方法, 可计算出各地区工程管理、社会经济效益、生态环境响应 3 个子系统联系度表达式中的 a 、 b 、 c 值。由式 (16) 计算 3 个子系统的加权联系度表达式, 然后根据表 1 确定系统所处的集对势, 结果见表 6。

表 6 a 、 b 、 c 值与协调评级结果

Table 6 Value of a , b , c and evaluation results of coordinate analysis

地区 District	工程管理指标 Project management subsystem			社会经济指标 Socioeconomic performance subsystem			生态环境指标 Ecologic environment response subsystem			加权联系度 Weighted connection degree			系统集 对势 System set pair situation
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
长沙 Changsha	0.2	0.8	0	0.6	0	0.4	0.333	0	0.667	0.412	0.252	0.335	强同势
株洲 Zhuzhou	0.2	0.6	0.2	0.6	0	0.4	0	0	1	0.335	0.189	0.476	强反势
湘潭 Xiangtan	0	1	0	0.2	0	0.8	0.333	0	0.667	0.168	0.315	0.517	弱反势
衡阳 Hengyang	1	0	0	0.4	0	0.6	0	0	1	0.497	0	0.503	准反势
邵阳 Shaoyang	0.2	0.8	0	0.4	0	0.6	0	0.333	0.667	0.244	0.329	0.426	弱反势
岳阳 Yueyang	0.2	0.8	0	0.2	0	0.8	0	0.333	0.667	0.154	0.329	0.517	弱反势
常德 Changde	0.2	0.8	0	0.2	0.2	0.6	0.333	0.333	0.333	0.231	0.420	0.349	微反势
张家界 Zhangjiajie	0	1	0	0.4	0.2	0.4	0.333	0.333	0.333	0.258	0.483	0.258	弱均势
益阳 Yiyang	0.2	0.8	0	0.2	0.2	0.6	0.333	0.333	0.333	0.231	0.420	0.349	微反势
郴州 Chenzhou	1	0	0	0.2	0	0.8	0.333	0	0.667	0.483	0.000	0.517	准反势
永州 Yongzhou	1	0	0	0.2	0	0.8	0.667	0	0.333	0.560	0	0.440	准同势
怀化 Huaihua	0.2	0.8	0	0.4	0	0.6	0.667	0	0.333	0.399	0.252	0.349	强同势
娄底 Loudi	0.2	0.8	0	0.8	0.2	0	0	0	1	0.426	0.343	0.231	弱同势
湘西州 Xiangxizhou	0.2	0.6	0.2	0	0.2	0.8	0.333	0	0.667	0.140	0.280	0.580	弱反势

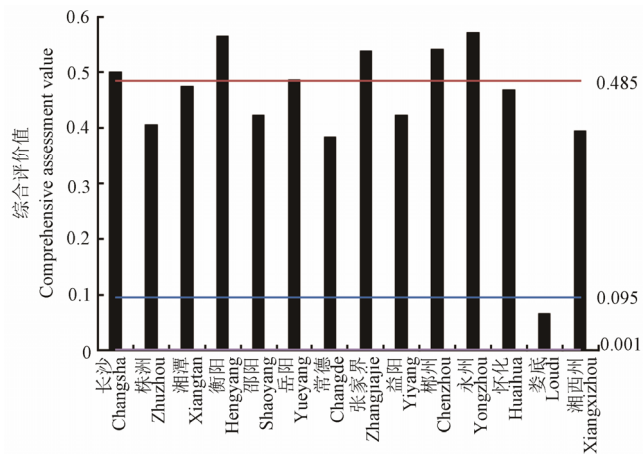
注: 工程管理、社会经济效益和生态环境响应子系统的权重系数为 0.3154、0.4534、0.2311。

Note: Weight of project management, socioeconomic performance and ecologic environment response subsystem are 0.3154, 0.4534, and 0.2311, respectively.

由表 6 知, 长沙市和怀化市农村饮水安全系统具有强同势, 说明该 2 市的农村饮水安全系统的 3 个子系统处于高度协调关系, 具有很强的同相驱动力, 因而工程的可持续发展水平较高, 其效益有较高的上升潜力; 永州市农村饮水安全系统具有准同势, 系统协调性较好, 由于该市目前所属等级为 I 级, 所以该市农村饮水安全等级在短期内将稳定在 I 级; 娄底市农村饮水安全系统处于弱同势, 说明 3 个子系统的协调性较弱, 同相驱动力不强, 因而工程的可持续发展水平不高, 其效益改善的趋势较小; 株洲市农村饮水安全系统具有强反势, 说明其 3 个子系统处于高度不协调关系, 子系统之间的内在驱动力不一致, 导致该市的农村饮水工程效益状况有较强的恶化趋势; 衡阳市和郴州市农村饮水安全系统具有准反势, 说明该 2 市农村饮水工程可持续发展状况较差, 工程效益状况有可能恶化; 其他市的农村饮水安全系统具有的集对势比较弱, 子系统处于基本协调状态, 系统比较稳定, 故在短期内将稳定在各自的评价等级上。可见, 协调性评价结果很好的解释了等级转化趋势的内在原因。

2.4 模型验证

为验证博弈论集对分析模型的合理性, 本文还与文献[6]的突变评价法得出的评价结果进行比较, 突变评价法的结果见图 1。湖南省 14 个市(州)农村饮水安全为“优”(I 级)的地区有永州、衡阳、张家界、郴州和长沙, 为“良”(II 级)的地区有株洲、湘潭、邵阳、岳阳、常德、益阳、怀化和湘西, 为“一般”(III 级)的地区只有娄底。



注: 0.485、0.095、0.001 分别为 I、II、III 级的下限值。

Note: 0.485, 0.095, 0.001 are lower limits of level I, II and III, respectively.

图 1 湖南农村饮水安全突变评价法综合评价结果

Fig.1 Assessment results of Hunan rural drinking water safety by sudden change evaluation method

通过 2 个模型的对比分析, 博弈论集对分析模型得到的湖南省各市(州)农村饮水安全工程建设效果级别从优到劣的次序和评价等级与突变评价法得到的评价结果基本一致。但仍有一定的差异: 评价等级不同的地区有长沙、常德、张家界和益阳, 且较突变评价法低: 原因一是指标权重的影响, 突变评价法是通过归一化公式的内在机制考虑各指标的重要性, 只考虑了数据自身的

统计特征,属于客观方法,而博弈论方法集成了主观和客观信息,既利用了数据自身的统计信息,也体现了指标本身的重要性;原因二是2种评价方法的侧重点不同,突变评价法强调对综合水平的分析,而博弈论集对分析模型更强调“追踪溯源”式分析,即实现由指标层到子系统层再到目标层的层层分析;原因三是突变评价法计算综合评价隶属度值时对底层指标隶属度值与突变评价值进行了曲线拟合,因此存在拟合误差。相对于突变评价法,本文模型的优势在于其单一指标的隶属度值大小可以反映系统每个指标的的实现程度,综合隶属度值的大小可以反映消除某些限制因子带来的农村饮水安全水平的转化效果,便于调整政策和实行措施。

博弈论综合集成赋权法既充分利用了数据的统计特征,也体现了指标本身的重要性;集对分析方法同时考虑了系统的确定性和不确定性因素,博弈论集对分析模型融合了两者的优势,有效克服了由不知道引起的不确定性或事物模糊性带来的不确定性和研究者信息掌握的片面性或过于依赖数据的统计信息等问题,其结果可靠度高,反映出的信息更加全面。因此,该方法具有可复制性,可应用于风险分析、水质评价、心理分析等方面。但在运用集对分析的同异反态势函数时,若出现同一度 a 或对立度 c 为零的情况,系统处于不确定状态,将不能判断系统的发展趋势;由于笔者知识水平有限,等级界限的划分可能存在一定的偏差。这方面的工作有待后续研究的进一步完善。

3 结 论

工程建设效果后评价存在很多确定和不确定性因素,而且评价因子与等级标准间存在着复杂的非线性关系。本文结合集对分析理论在确定性分析和不确定性分析方面的优势与博弈论在指标权重确定中能综合客观赋权法和主观赋权法的优点,构造基于博弈论的工程建设效果后评价集对分析模型。实例应用结果表明:湖南省14个市(州)中有3个地区(衡阳、郴州、永州)农村饮水安全级别为“优”,3个地区(常德、益阳、娄底)农村饮水安全级别为“一般”,其他地区农村饮水安全均“良好”;长沙和怀化农村饮水安全工程可持续发展水平较高,其评价等级由目前的Ⅱ级升到Ⅰ级的趋势很强;娄底农村饮水安全工程可持续发展水平不高,其评价等级由Ⅲ级升到Ⅱ级的趋势不强;株洲农村饮水安全工程的可持续发展状况不容乐观,其评价等级有从Ⅱ级降到Ⅳ级的趋势;衡阳和郴州市农村饮水安全工程可持续发展状况较差,其评价等级从Ⅰ级降到Ⅱ级的可能性较强;其他市农村饮水安全工程建设效果评价等级在短期内将稳定在目前的水平。

本文方法不仅能够客观、合理地确定研究对象的评价等级及制约因子,还能判断其在等级间的转化趋势,并且能够从系统集对势的角度解释系统在各等级之间转化的内在原因,分析工程的可持续发展水平,从而可为后续工程管理的改进、各个层次的管理决策水平的提高、相关政策的制定提供理论依据,并能指导同类在建和拟建工程或配套工程的规划设计,以促进工程项目更好地发挥效益。

[参 考 文 献]

- [1] 孙越. 水利建设项目后评价研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2009.
Sun Yue. The Study on Post-evaluation of Water Conservancy Construction Project[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [2] 戴林, 李子奈. 农村能源综合建设项目社会经济效益及可推广性评价方法探讨[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 115—118.
Dai Lin, Li Zinai. Methodology of socioeconomic effectiveness and extension of “Integrated Rural Energy Development Project”[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(2): 115—118. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴松娟. 基于DEA的水利建设项目后评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
Wu Songjuan. Study on Water Conservancy Construction Project Post-evaluation with DEA[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [4] Wang M J J, Sharit J, Drury C G. Fuzzy Set Evaluation of Inspection Performance[J]. International Journal of Man-machine Studies, 1991, 35(4): 587—596.
- [5] 王璠玲, 赵庚星, 李占军. 土地整理效益项目后综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 58—61.
Wang Ailing, Zhao Gengxing, Li Zhanjun. Integrated evaluation method for project post-evaluation of land consolidation benefits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(4): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈岩. 基于可持续发展观的水利建设项目后评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
Chen Yan. Research on Post Evaluation of Water Conservancy Construction Project based on the Sustainable Development[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘玉龙, 邵东国, 杨丰顺, 等. 湖南省农村饮水安全工程建设效果后评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 99—102.
Liu Yulong, Shao Dongguo, Yang Fengshun, et al. Post-assessment Methods for Rural Drinking Water Safety Projects in Hunan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 99—102. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王翠红. 基于熵权模糊综合评价法的建设项目后评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
Wang Cuihong. Construction Post-project Evaluation based on Entropy Weight Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [9] 黄辉玲, 吴次芳, 张守忠. 黑龙江省土地整治规划效益分析与评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 240—246.
Huang Huiling, Wu Cifang, Zhang Shouzhong. Benefits analysis and evaluation on land consolidation planning in Heilongjiang province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 240—246. (in Chinese with English abstract)
- [10] Eilat H, Golany B, Shtub A. R&D project evaluation: An integrated DEA and balanced scorecard approach[J]. Omega, 2008, 36(5): 895—912.
- [11] Wang T C, Lee H D. Developing a fuzzy Topsis approach based on subjective weights and objective weights[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(5): 8980—8985.
- [12] Von Neumann J, Morgenstern O. Theory of Games and Economic Behavior (60th Anniversary Commemorative Edition)[M]. New Jersey: Princeton university press, 2007.
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.

- [14] 赵克勤. 基于集对分析的方案评价决策矩阵与应用[J]. 系统工程, 1994, 12(4): 67—72.
Zhao Keqin. An applications of the scheme-appraisal decision matrix based on set pair analysis[J]. Systems Engineering, 1994, 12(4): 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [15] Seckler D, Sampath R K, Raheja S K. An index for measuring the performance of irrigation management systems with an application[J]. Water Resources Bulletin, 1998, 24(4): 855—860.
- [16] 李慧玲, 王修贵, 崔远来, 等. 灌区运行状况综合评价的方法研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(14): 543—548.
Li Huiling, Wang Xiugui, Cui Yuanlai, et al. Comprehensive evaluation methods for irrigation district[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(14): 543—548. (in Chinese with English abstract)
- [17] Li Qiufeng, Dang Yaoguo, Wang Zhengxin. Analysis of the regional coordination development systems based on GRA and GM (1, N)[J]. Journal of Grey System, 2012, 24(1): 95—100.
- [18] 陈守煜, 李庆国. 多指标半结构性模糊评价法在水利工程后评价中的应用[J]. 水利学报, 2004(4): 27—32.
Chen Shouyu, Li Qingguo. Multi-objective Seme- structural evaluation method and its application to post evaluation of water projects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(4): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [19] Kusre B C, Patra S C, Dutta B. Ex post performance evaluation studies of Kaldiya Medium Irrigation Project in Assam, India[J]. Irrigation and Drainage, 2013, 62(5): 666—678.
- [20] 汪明武, 陈光怡, 金菊良. 基于熵权的土地整理方案集对分析模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 322—325.
Wang Mingwu, Chen Guangyi, Jin Juliang. Entropy-based of set pair analysis model for optimization of land consolidation plans[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 322—325. (in Chinese with English abstract)
- [21] 代丽, 朱爱华, 赵匀. 应用层次分析法计算分插机构优化目标的权重[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 60—65.
Dai Li, Zhu Aihua, Zhao Yun. Using AHP to calculate optimization objective weights of transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 26(2): 60—65. (in Chinese with English abstract)

Establishment and application of set pair analysis model based on game theory for post-assessment of project construction effectiveness

Guo Yanhong¹, Shao Dongguo^{1*}, Liu Yulong², Chen Shu¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower Liaoning Province, Shenyang 110006, China)

Abstract: Scientific and reasonable evaluation of project construction effectiveness plays an important role in the follow-up project management. However, the post-assessment of project construction effectiveness is a multi-complex system involved in many certain and uncertain factors, with complicated nonlinear relationship between evaluation indicators and grade standards, which should be considered in post-assessment. In this study, a set pair analysis model based on game theory was developed. In the model, the weights of evaluation indicators were obtained by game theory, and then the connection degree of the single index was calculated in the support of certain and uncertain analysis method of set pair theory. Then, the comprehensive connection degree of the object was obtained based on the model. So the evaluation grades and the transformation trend between grades of objects were confirmed. Based on the above analysis, the set pair situation was introduced to analyze the coordination among the subsystems, clarify the underlying causes of transformation trend and evaluate the sustainable development level of the project. The model was applied to the post-assessment of the rural drinking water safety project construction effectiveness of Hunan Province, and the results were compared with that from sudden change evaluation method. The results showed: 1) Project completion rate, qualification rate of project, water fee profit, completion rate of resolving rural drinking water difficulty, rural tap-water benefit rate, water quality and water environment protection of water functional zone were the main factors affecting rural drinking water safety in Hunan; Among these factors, water fee profit, rural tap-water benefit rate, water quality and water environment protection of water functional zone were key limiting factors of the project benefits; 2) Three areas (Hengyang, Chenzhou and Yongzhou) had “excellent” rural drinking water safety level, while Changde, Yiyang and Loudi had “general level”, and the others in “well” level; 3) The five indexes in project management subsystem were at level I or level II in all the areas, indicating that the governors of Hunan Province have paid much attention to the management of the people's livelihood project in recent years; However, the level of the indicators in socioeconomic performance subsystem and ecologic environment response subsystem were generally poor and the protection of ecological environment haven't been done well; 4) The three subsystems of the rural drinking water safety system in Changsha and Huaihua were in strong coordination state, so the project was in a high sustainable development level; The coordination level of the three subsystems in Loudi was general, thus the sustainable development level was not high; The three subsystems in Zhuzhou was out of coordination, indicating worrying sustainable development; The coordination degree of the subsystems in Hengyang and Chenzhou was almost uncoordinated, making the project sustainable development condition poor; The subsystems were in harmony in other cities, so the follow-up benefit of the projects were relatively stable. The results above illustrated that the proposed method are reliable, can reflect more comprehensive information than the sudden change evaluation method. Therefore, the study can provide a reliable method for the decision-making and management of the similar projects or follow-up projects.

Key words: game theory; water resources; coordination; post-assessment; set pair analysis; set pair situation