

基于熵组合权重的河道整治工程影响模糊综合评价

姜志成

(江苏省水利工程管理处,江苏 南京 210001)

摘要:针对河道整治工程影响评价的特点,采用定性和定量相结合的模糊综合评判法构建河道整治工程影响的评价模型,从对经济发展影响、社会发展影响、社会环境影响、合理利用自然资源的影响 4 个方面建立评价指标体系,利用熵组合赋权法确定各指标的权重。以黄河濮阳段河道整治工程为研究对象,分析计算该工程的影响程度,评价结果表明工程实施影响为 II 级(较好)。

关键词:河道整治工程;影响评价;指标体系;熵组合赋权法;模糊综合评判法

中图分类号:TV85 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-9511(2017)01-0017-04

我国是世界上河流最多的国家之一,历史上长江、黄河、淮河等大河频发洪灾,给两岸人民的生命财产造成了巨大的损失,数量众多、分布广泛的中小河流造成的洪涝灾害也不在少数^[1]。河道整治是河流防洪治理中的一种,除具有显著的防洪作用外,还可以改善长期以来由于河流破坏带来的诸多问题,能有效减少冲滩塌岸现象,有利于稳定滩涂、改善滩区的生产生活条件,提高滩区的土地利用价值,因而能产生巨大的社会效益^[2-3]。对河道整治工程的影响进行评价,可以论证其实施的成效和存在的不足,因而具有重要的理论与实践意义。

目前,关于河道整治影响评价的相关研究甚少,评价指标体系也很不完善^[4-7]。笔者将熵组合赋权法与模糊综合评判法相结合建立评价模型,从对经济发展影响、社会发展影响、社会环境影响以及对合理利用自然资源的影响 4 个方面建立评价指标体系,并将此模型用于黄河濮阳段河道整治工程的影响评价。

1 模糊综合评判模型原理与方法

模糊综合评判法是运用模糊数学方法,根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价,使得模糊现象清晰化^[8],既能充分体现评价过程的模糊性,又能尽量减少主观判断带来的弊端^[9]。

权重系数是指在评价过程中,对评价指标在重要程度上进行的定量分配。有关权重的确定方法有数十种,根据权重计算原始数据的来源不同,可分为主观赋权法和客观赋权法。运用主观赋权法确定各指标间权重系数反映了决策者的意向,但决策或评价结果具有很大的主观随意性;运用客观赋权法确定各指标间权重系数,决策或评价结果虽具有较强的数学理论依据,但未考虑决策者的意向。为了改善和提高权值的精确性,弥补单一用主观和客观权重不足,笔者以相对最小信息熵为工具,将主客观权重结合起来形成组合权重,最终确定各评价指标的权重。

1.1 建立因素集

本文因素集分主因素层评价指标与子因素层评价指标 2 个层级。根据选取的影响评价指标,确定主因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$,其中 m 为主因素层指标的个数;子因素指标集 $u_s = \{u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{sn}\}$ ($s = 1, 2, \dots, m$),其中 n 为主因素指标中子因素指标的个数。

1.2 建立因素评价集

确定因素评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_j\}$,其中 v_k ($k = 1, 2, \dots, j$) 表示影响事物评价值的第 k 个等级。河道整治工程影响评价等级分为 I, II, III, IV, V 五个等级,用“好、较好、一般、较差、差”分别进行描述,并对各等级因子赋予相应分值 $\{1.0, 0.8, 0.6, 0.4,$

0.2}。

1.3 等级评价矩阵的确定

各主因素指标的等级评价矩阵 R_s 可表示为

$$R_s = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{n5} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $s=1, 2, \dots, m$; 矩阵中的元素表示子因素层指标对各级评语的隶属度。由于黄河濮阳段河道整治工程影响综合评价的各项指标情况复杂,难以量化,笔者通过德尔菲法确定指标隶属度。指标隶属函数的构造采用降半梯形法,设 v_k 和 v_{k+1} 为相邻的两级标准,显然有 $v_k > v_{k+1}$,各因素评价指标对 v_k 的隶属函数为

$$r(x) = \begin{cases} 0 & \bar{X} < v_{k+1}, \bar{X} > v_k \\ \frac{\bar{X} - v_{k+1}}{v_k - v_{k+1}} & v_{k+1} \leq \bar{X} \leq v_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r(x)$ 为隶属度函数; \bar{X} 为参与评分专家对指标评分的平均值。

对 v_{k+1} 的隶属度函数为

$$r(x) = \begin{cases} 0 & \bar{X} < v_{k+1}, \bar{X} > v_k \\ \frac{v_k - \bar{X}}{v_k - v_{k+1}} & v_{k+1} \leq \bar{X} \leq v_k \end{cases} \quad (3)$$

1.4 权重的确定

根据最小相对信息熵原理将主观权重与客观权重进行组合来确定各评价指标的权重,这里仅介绍子因素指标权重的确定方法,主因素指标的权重计算与之完全类似,不作赘述,权重计算步骤如下。

1.4.1 主观权重计算

对各子因素指标在对应主因素指标下的重要性进行两两比较,建立模糊互补判断矩阵 $P = \{p_{ij}\}$,其中 $0 \leq p_{ij} \leq 1, p_{ij} + p_{ji} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n), p_{ij}$ 表示指标 i 优于指标 j 的程度: $p_{ij} > 0.5$ 时,表示指标 i 比指标 j 重要, p_{ij} 越大表示指标 i 比指标 j 越重要,反之亦然。子因素指标主观权重计算公式为

$$\omega_{1_t} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

1.4.2 主观权重的合理性判断

设 $W_1 = (\omega_{1_1}, \omega_{1_2}, \dots, \omega_{1_n})$ 为子因素指标模糊互补判断矩阵 P 的权重向量,其中

$$\sum_{t=1}^n \omega_{1_t} = 1 \quad \omega_{1_t} \geq 0, t = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

通过检验 P 和其特征矩阵 P^* 的一致性来判断主观权重的合理性,即相容性指标 I :

$$I = (P, P^*) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \omega_{1_{ij}} + \omega_{1_{ij}^*} - 1 \right| \quad (6)$$

一般认为,当 $I < 0.1$ 时,即可认为评价指标权重合理。

1.4.3 客观权重计算

黄河濮阳段河道整治工程影响综合评价指标客观权重采用等权法计算,即认为各评价指标的权重相等:

$$\omega_{2_t} = \frac{1}{n} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

1.4.4 组合权重计算

综合各指标的主观权重 ω_1 和客观权重 ω_2 , 可得到各指标的组合权重 ω , 显然 $\{\omega_t\}$ 与 $\{\omega_{1_t}\}$ 、 $\{\omega_{2_t}\}$ 都应尽可能接近,根据最小相对信息熵原理有

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{t=1}^n \omega_t [\ln \omega_t - \ln \omega_{1_t}] + \\ &\sum_{t=1}^n \omega_t [\ln \omega_t - \ln \omega_{2_t}] \quad (8) \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{t=1}^n \omega_t = 1, \omega_t > 0 \end{aligned}$$

通过计算可得到各子因素指标的组合权重 ω_t 。

1.5 单因素评判

根据各子因素指标在所对应主因素指标下的权重 $W_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in})$ 以及 R_s , 得出各主因素指标对于各评价等级的隶属度:

$$\begin{aligned} B_i &= W_i \delta R_s = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}) \cdot \\ \delta \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{n5} \end{bmatrix} &= (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}) \quad (9) \end{aligned}$$

式中: ω_{ij} 为第 i 个主因素指标中第 j 个指标的权重; δ 为模糊合成算子,表示模糊评价矩阵的模糊运算,本文采用加权平均型模糊合成算子。

1.6 综合评判

由 B_i 可以得到主因素层模糊评判矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{m5} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据各主因素指标的权重 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$, 得出最终评语向量 C :

$$\begin{aligned} C &= W \delta B = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \cdot \\ \delta \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{m5} \end{bmatrix} &= (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5) \quad (11) \end{aligned}$$

根据最大隶属度原则 $c_k = \max \{c_i\} (1 \leq i \leq m)$,

可判断评价等级为第 k 级。

2 评价指标体系的建立

河道整治工程的影响评价,主要是对工程与社会的相互适应性、工程已实现的社会效益及影响、工程对土地资源利用和对社会经济发展带来的影响、工程对改善社会环境和生态环境等方面进行全面的、独立的、科学的分析和评判。

在参考有关学者所著论文的基础上^[10-15],根据河道整治工程的特点和区域社会、经济环境特征,提出对经济发展的影响、对社会发展的影响、对社会环境的影响、对合理利用自然资源的影响 4 个主因素指标集,并分别将每个主因素指标分解为若干子因素指标,在专家的指导下,遴选出 12 个子因素指标,建立河道整治工程影响评价层次结构指标体系,见表 1。

表 1 河道整治工程影响评价层次结构指标体系

指标	主因素评价指标	子因素评价指标
社会影响评价 U	对经济发展的影响 U_1	减少社会经济损失 U_{11}
		促进地区经济的发展 U_{12}
		对周边土地增值的影响 U_{13}
	对社会发展的影响 U_2	改善基础设施 U_{21}
增加社会满意度 U_{22}		
增加就业机会 U_{23}		
对社会环境的影响 U_3	增加防洪能力 U_{31}	
	对生产生活环境影响 U_{32}	
	项目区公众参与程度 U_{33}	
对合理利用自然资源的影响 U_4	水资源综合利用 U_{41}	
	节约耕地 U_{42}	
	土地资源开发利用 U_{43}	

3 实例研究

黄河濮阳段位于河南省黄河最下游,自濮阳县王窑至台前县张庄,流经濮阳县、范县、台前 3 个县,全长 167.5 km,为 1855 年铜瓦厢决口而形成的河道,迄今已有 156 年的历史。河道上宽下窄,属于游荡型河段向弯曲型河段过渡的过渡型河段,素有“豆腐腰”河段之称,历史上灾害频繁。据史料记载,从 1855—1946 年的 91 年间,该河段发生大的黄河水害 80 多次,决口达 108 处,给沿岸人民造成了深重的灾难。1949 年中华人民共和国成立后,各级政府十分重视黄河治理的研究,先后采用过多种河道整治方案。近年来,黄河濮阳段河道整治采用微弯型河道整治方案,取得了很大的成效,对两岸防洪安全、工农业与生活用水、滩区群众安全与生产、交通运输等都产生了积极的作用和深远的影响,笔者采用熵组合赋权法与模糊综合评判法对其实施影响进行评价。

3.1 等级评价矩阵计算

在黄河濮阳段河道整治方案影响评价中,为确定各指标对各评价等级的隶属度,邀请 20 位专家采用德尔菲法对各指标进行单因素评价,专家组来自政府部门、水利高校、科研机构、工程协会,将黄河濮阳段河道整治工程实施前后的河段经济、社会、资源利用的运行相关资料及影响评价打分表发给每位专家,汇总各考核专家的评分结果,由式(2)和式(3)计算得到各评价指标的隶属度,见表 2。

表 2 各评价指标的隶属度

指标	主因素评价指标	子因素评价指标	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
U_1		U_{11}	0.8	0.2	0	0	0
		U_{12}	0.7	0.3	0	0	0
		U_{13}	0	0.6	0.4	0	0
U_2		U_{21}	0.7	0.3	0	0	0
		U_{22}	0	0.5	0.5	0	0
		U_{23}	0	0	0	0.5	0.5
U_3		U_{31}	0	0.9	0.1	0	0
		U_{32}	0	0	0.5	0.5	0
		U_{33}	0	0	0.2	0.8	0
U_4		U_{41}	0.3	0.7	0	0	0
		U_{42}	0	0.6	0.4	0	0
		U_{43}	0.1	0.9	0	0	0

由表 2 可得到各主因素指标的等级评价矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 指标权重计算

对各级评价指标两两进行重要性比较,建立模糊互补判断矩阵。主因素层指标模糊互补判断矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.7 \\ 0.6 & 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.6 & 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

子因素层指标模糊互补判断矩阵分别为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix} \quad P_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 \\ 0.2 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \quad P_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由式(6)可得到主因素指标评价系统的相容性指标 I 为 0.0274, 小于 0.1; 4 个子因素指标评价系统的相容性指标 I 分别为 0.0321, 0.0283, 0.04524, 0.0263, 均小于 0.1, 可知得到的各层次评价指标的主观权重合理。

由式(4)和式(7)分别计算出各级评价指标的主观权重及客观权重, 由式(8)根据最小相对信息熵原理可得到组合权重值: $W = (0.211, 0.368, 0.342, 0.079)$, $W_1 = (0.458, 0.424, 0.118)$, $W_2 = (0.425, 0.418, 0.157)$, $W_3 = (0.523, 0.319, 0.158)$, $W_4 = (0.482, 0.304, 0.214)$ 。

3.3 单因素评判

由式(9)及计算得到的各主因素指标的等级评价矩阵及各子因素指标的权重可以求得单因素对于各评价等级的隶属度如下:

$$B_1 = W_1 \delta R_1 = (0.458, 0.424, 0.118) \cdot \delta \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.663, 0.290, 0.047, 0, 0)$$

$$B_2 = W_2 \delta R_2 = (0.425, 0.418, 0.157) \cdot \delta \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} = (0.298, 0.337, 0.209, 0.078, 0.078)$$

$$B_3 = W_3 \delta R_3 = (0.523, 0.319, 0.158) \cdot \delta \begin{bmatrix} 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} = (0, 0.471, 0.243, 0.286, 0)$$

$$B_4 = W_4 \delta R_4 = (0.482, 0.304, 0.214) \cdot \delta \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.166, 0.712, 0.122, 0, 0)$$

3.4 综合评判

由式(11)可得最终评语向量 C :

$$C = W \delta B = (0.211, 0.368, 0.342, 0.079) \cdot \delta \begin{bmatrix} 0.663 & 0.290 & 0.047 & 0 & 0 \\ 0.298 & 0.337 & 0.209 & 0.078 & 0.078 \\ 0 & 0.471 & 0.243 & 0.286 & 0 \\ 0.166 & 0.712 & 0.122 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.263, 0.402, 0.179, 0.127, 0.029)$$

由 $c_2 = \max\{c_i\} (1 \leq i \leq 5) = 0.402$, 根据最大隶属度原则, 可判定黄河濮阳段河道整治工程的影响为 II 级(较好)。

4 结 语

a. 综合应用熵组合权赋权法和模糊综合评判法, 建立了河道整治工程影响的评价模型, 并构建了河道整治工程影响评价层次结构指标体系, 在参考大量文献的基础上经专家指导遴选出评价指标, 评价指标体系具有一定的科学性, 该模型计算方法相对简单, 模型分析结果与工程建设特点和所处环境特征基本吻合, 表明该评价方法具有较好的科学性和实用性。

b. 将所建模型用于评价黄河濮阳段河道整治工程, 评价结果表明其实施影响较好, 论证了该河道整治工程的合理性, 从计算结果可以看出该整治工程对社会环境的影响和对合理利用自然资源的影响 2 个主因素相较其他 2 个因素要差一些, 在今后该河段实施河道整治应充分考虑这 2 个因素。

c. 由于河道整治工程影响评价涉及的评价指标较多, 在指标的选择方面尚不能全部纳入考虑范围, 指标体系需要进一步完善, 这有待于后续工作的进一步开展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 鲍桂婷, 崔为海, 赵焕雪. 沂河临沂市市区段河道治理工程社会环境效益分析[J]. 治淮, 2013(6): 58-59.
- [3] 张根. 河道整治工程陆生生态环境影响评价研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
- [4] 杨建. 中小河流治理工程后评价模型及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [5] 韩勇. 水利建设项目后评价中的社会评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [6] 钟姗姗. 水利工程社会评价模型研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
- [7] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [8] 罗曙霞, 王化麟, 苗永春. AHP-模糊综合评判法在项目后评价中的应用[J]. 现代商业, 2011(14): 158-159.
- [9] 马丽丽, 田淑芳, 王娜. 基于层次分析与模糊数学综合评判法的矿区生态环境评价[J]. 国土资源遥感, 2013(3): 165-170.
- [10] 曾超. 佛山汾江河综合整治工程后评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [11] 李文英. 渭河宝鸡市区段治理工程综合效益分析与评价[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.

(下转第 25 页)

系统的耦合协调水平仍然较低,但是近 10 年的发展过程中,两系统通过内部指标间一系列内在的、相互依存和相互制约的关系互相影响,不断磨合,共同发展。用水结构的优化产生更大的经济效益;经济结构的变化影响不同部门的用水比例;经济发展过程中所排放的各类污染物,有可能污染水体造成可利用水资源量的减少,从而降低水资源利用效率^[9]。未来若能保证提高用水效率与经济发展并举,则有望使两系统的发展进入极度协调耦合阶段。

3 结论与建议

a. 南京市用水效率与经济发展水平在研究期均有大幅度增长,2011 年以前用水效率水平高于经济发展水平,对经济发展有良好的促进作用。2011 年以后,经济高速发展,并超过用水效率水平,经济发展推动水资源的高效利用。

b. 用水效率系统与经济发展系统的耦合度在 0.3~0.5 之间,处于拮抗阶段,并逐步接近磨合阶段,表明用水效率与经济发展处于共同发展状态。用水效率系统与经济发展系统的耦合协调度在波动中逐步增大,由低度协调耦合逐步过渡到高度协调耦合阶段,未来有望进入极度协调耦合阶段。

c. 只有保持用水效率与经济的协调发展才能最终实现社会经济的可持续发展。南京市未来发展应继续重视在经济发展的同时提高用水效率。经济方面,主要通过加大科技创新投入,积极进行创新平台建设,提高企业自主创新能力等增强经济活力,并积极更新产业结构,加快经济转型。用水效率方面,用水结构必须得到实时优化,加速低耗水产业发展,限制高耗水工业项目建设和高耗水服务业发展;针对农业用水效率低下,生活、生态用水效率堪忧问题,应当继续关注农业用水效率的提高问题,遏制农业粗放用水,高度重视生活、生态用水管理工作,加强节水设施基础建设;同时应该注意维护水资源环境,防治工业污染,保障水资源良性循环,提高水资源可持续利用性。

参考文献:

[1] HOWEC W. Water resources and regional economic growth in the United States (1950—1960) [J]. Southern Economic Journal, 1968, 34 (4) : 477-489.

[2] MEINZEN-DICK R, PAUL P, APPASAMY P. Urbanization and inter-sectoral competition for water [M] // Woodrow Wilson International Center for Scholars Environmental Change and Security Project. Finding the Source: The

Linkages Between Population and Water. Washington DC: The Woodrow Wilson Institute, 2002: 27-51.

[3] THAWALE P, GHOSH T, SINGH S, et al. Agro-economic evaluation of water resource project—a modeling approach [J]. Environmonit Assess, 2012, 184 : 2575-2591.

[4] 孙爱军,董增川,张小艳. 中国城市经济与用水技术效率耦合协调度研究 [J]. 资源科学, 2008 (3) : 446-453.

[5] 盖美,王宇飞,马国栋,等. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价 [J]. 自然资源学报, 2013 (12) : 2081-2094.

[6] 李婷,岳金桂. 基于向量自回归模型的江苏省水资源利用与经济增长关系 [J]. 水利经济, 2015, 33 (4) : 29-34.

[7] 周校培,陈建明. 南京市水资源与社会经济耦合协调发展研究 [J]. 水利经济, 2016, 34 (4) : 26-30.

[8] 汤溟,王腊春. 基于熵权法的南京市水资源可持续利用评价 [J]. 四川环境, 2010 (1) : 75-79.

[9] 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 (Z1) : 642-646.

[10] 韩瑞玲,佟连军,佟伟铭,等. 沈阳经济区经济与环境系统动态耦合协调演化 [J]. 应用生态学报, 2011 (10) : 2673-2680.

[11] 沈乐,龚来存. 南京市溧水区用水效率控制方案研究 [J]. 人民长江, 2016 (1) : 31-35.

(收稿日期:2016-06-15 编辑:胡新宇)

(上接第 21 页)

[12] 马丽. 牟汶河莱芜城区段综合治理工程影响后评价研究 [D]. 泰安:山东农业大学, 2011.

[13] 翁月娇,唐德善,王银银. 基于 F-AHP 法的水利加固改造工程效果后评价 [J]. 水电能源科学, 2009 (5) : 145-148.

[14] 阳大兵. 水利工程对生态环境影响后评价研究 [D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2012.

[15] 李鑫. 水利工程环境影响后评价方法及应用研究 [D]. 长春:中国科学院研究生院 (东北地理与农业生态研究所), 2013.

(收稿日期:2016-07-29 编辑:方宇彤)

