

基于灰色关联度的 TOPSIS 模型的 “丹治”工程生态效益评价

王国振^{1,3}, 卜崇峰^{1,2}, 冯伟³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100053)

摘要: [目的] 量化评价“丹治”工程(丹江口库区及上游水土保持工程)在“十二五”期间实现的总体生态效益, 为中国水土保持工程决策和生态效益评价提供新的思路。[方法] 基于灰色关联理论, 结合熵值法和层次分析法(AHP)确定评价指标的权重。构建了灰色关联度的 TOPSIS 评价模型, 并采用项目区“水土流失面积”对结果进行了验证。[结果] “丹治”工程初期, 水土保持措施尚未完善, 发挥的作用相对较小, 生态效益较低; 随着各项功能措施的逐步发挥, 水土保持生态效益大幅度提升, 与初期相比“十二五”末期的生态效益总体增长 3.48 倍。[结论] “丹治”工程项目区总体生态环境逐步向良性发展, 与项目区实际情况相吻合, 表明基于灰色关联度的 TOPSIS 模型对水土保持工程效益评价有较强适用性和可靠性。

关键词: “丹治”工程; 灰色关联度; TOPSIS 模型; 生态效益

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)05-0189-05

中图分类号: S157.2

文献参数: 王国振, 卜崇峰, 冯伟. 基于灰色关联度的 TOPSIS 模型的“丹治”工程生态效益评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5):189-193. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.026; Wang Guozhen, Bu Chongfeng, Feng Wei. Evaluating ecological benefits of “Danzhi” project based on TOPSIS model with grey correlation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):189-193.

Evaluating Ecological Benefits of “Danzhi” Project Based on TOPSIS Model with Grey Correlation

Wang Guozhen^{1,3}, Bu Chongfeng^{1,2}, Feng Wei³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: [Objective] The overall ecological benefits achieved by the Danjiangkou reservoir area and upstream water and soil conservation project (“Danzhi” project) in the second phase of the five-year project (2011—2015) was quantitatively evaluated, in order to provide a reference for decision-making within China’s soil and water conservation project and ecological benefit evaluation. [Methods] Based on the grey relational theory, this paper uses a combination of the entropy method and analytic hierarchy process (AHP) to determine the weight of the evaluation index. Based on this, an improved TOPSIS evaluation model was constructed, and the rationality of the results was verified by using “the soil erosion area” index in the project area. [Results] At the beginning of the “Danzhi” project, the various measures had not been perfected, the functions had been relatively lagging behind, and the ecological benefits were relatively low. With the gradual exertion of various functional measures, the ecological benefits of the soil and water conservation had been greatly improved, and the overall ecological benefits at the end of the fifth year have increased by 3.48 times compared with the initial period. [Conclusions] The overall ecological environment in the area of the

收稿日期: 2019-03-11

修回日期: 2019-04-12

资助项目: 国家重点研发计划“生态治理与生态文明建设生态技术筛选、配置与试验示范”(2016YFC0503705); 中国科学院野外站联盟课题“全国水土流失动态变化与防治成效”(KFJ-SW-YW029-05); 水利部财政专项“重点工程实施效果评估指标体系调查研究”(k4030217055)

第一作者: 王国振(1993—), 男(汉族), 山东省菏泽市人, 硕士研究生, 研究方向为环境监测与评价。E-mail: wangguozhen03@163.com.

通讯作者: 冯伟(1977—), 男(汉族), 浙江省嘉兴市人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事水土保持研究工作。E-mail: fengwei@mwr.gov.cn.

“Danzhi” project is gradually developing in a benign way, which is consistent with the actual situation in the project area. Based on the improved TOPSIS evaluation model, it has strong applicability and reliability for the benefit evaluation of soil and water conservation project.

Keywords: “Danzhi” project; grey correlation; TOPSIS model; ecological benefits; evaluation

“丹治”工程是中国南水北调中线工程水质保护的重要措施之一。实施“丹治”工程对保障南水北调中线工程水质安全,促进该区域经济社会可持续发展,实现全面建设小康社会目标具有重要意义。2012年,国务院批复了《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十二五”规划》(国函[2012]50号)。规划项目总投资为 1.18×10^{10} 元,其中水土保持项目投资 2.60×10^9 元,规划治理水土流失面积 $6\,295\text{ km}^2$ 。“十二五”期间完成水土流失治理面积逾 $6\,295\text{ km}^2$,总体来看,水土流失治理工作取得明显成效。但仍有必要用科学方法评价“十二五”期间工程实施的生态效益,给有关学者一个直观的效益变化反映。

TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)模型是有限方案多目标决策分析的一种常用方法,可用于效益评价、决策、管理等多个领域^[1],已广泛应用于多种方案评价。张霞等^[2]采用 TOPSIS 法对秦岭生态功能区水土保持治理效益进行了综合评价,并取得可靠的评价效果。陈威^[3]应用改进 TOPSIS 模型对中国北方某地区水土保持工程的评价表明:治理 8 a 后,采取的一系列水土保持工程措施已产生积极效益,生态效益增长 2.22 倍,生态环境逐步改善。

因此,本研究基于灰色关联度的 TOPSIS 模型对“丹治”工程生态效益进行评价,以期全面了解“丹治”工程“十二五”规划期间生态效益提供借鉴,为后续同类工程建设提供决策建议。

1 工程概况

为缓解北方地区水资源严重短缺情况,优化水资源配置,南水北调中线工程开建。规划治理水土流失面积 $6\,295\text{ km}^2$,年均则增加调蓄能力 $2.00 \times 10^8\text{ m}^3$ 以上。“丹治”工程项目区涵盖河南、湖北、陕西 3 省 8 个地(市)43 个县(市、区),处于秦巴土石山区腹地,地薄坡陡、水土流失严重。特别是汛期洪水携带大量泥沙和坡面物质进入汉江,给丹江口库区水源保护构成了潜在威胁。根据 2011 年全国第一次水利普查资料,并利用丹江口库区及上游水土保持“十二五”治理资料成果校核到 2015 年,平均年土壤侵蚀量 $6.90 \times 10^7\text{ t}$,平均侵蚀模数为 $3\,177\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。按行政区划统计,流域范围内陕西省水土流失面积 $6\,720.32\text{ km}^2$,湖北

省水土流失面积 $1\,170.64\text{ km}^2$,河南省水土流失面积 957.29 km^2 。“十二五”期间,项目区治理水土流失面积逾 $6\,295\text{ km}^2$,实施“坡改梯” 315 km^2 。

2 工程生态效益评价指标选取及其权重确定

2.1 指标选取

针对“丹治”工程“多拦沙、多输水、输好水”的目标,结合对已有学者对效益评价进展的系统分析,确定了“丹治”工程生态效益指标体系构建的 4 个原则,包括:①针对性,重点选取突出“丹治”工程保障水量和水质方面作用的指标;②全面性,涉及工程建设有利于或不利于生态环境的指标;③实用性,以服务“丹治”工程及同类项目的管理和决策为落脚点,注重宏观性;④可操作性,须选择可获取、易量化、且便于计算分析的指标^[4]。

指标初次筛选根据以往研究和“十二五”规划,综合考虑指标选取 4 个原则,采用文献频次等方法共选取 8 项指标。然后,根据水土保持效益评价指标选取原则及水土保持生态指标内涵,以及《水土保持综合治理效益计算方法》(GB/T15774-2008)^[5]中的评价指标,结合各领域专家及工作人员意见。在此基础上结合对丹江口库区及上游各流域的实地调查,同时考虑治理目标、评价目的、指标可获取性,最终选取 5 项评价指标(见表 1)。

2.2 权重确定

确定各指标权重值是进行目标评价与决策的前提,权重的赋权一般采用客观法或主观法确定。客观法主要为熵值法,优点:熵值法是根据各项指标值的变异程度来确定指标权数的,这是一种客观赋权法,避免了人为因素带来的偏差。缺点:忽略了指标本身重要程度,有时确定的指标权数会与预期的结果相差甚远,同时熵值法不能减少评价指标的维数^[6]。主观法主要为层次分析法(AHP)法,其基本原理是对 m 个评价指标关于某个评价目标的重要性程度做两两比较,获得判断矩阵 A ,再求的最大特征值 $\lambda_{\max}(A) = m$ 对应的特征向量,并将其归一化即得到评价指标的权重值。AHP 法将定性问题转化为定量问题,利用层次化方法将复杂问题简单化,以主观经验评价确定,但结果的主观随意性较强^[7]。因此,为达到评价

结果实际性与客观性,本文充分利用两种方法的优势,组合熵值法与 AHP 法,即采用组合赋权确定指

标权重,采用 MATLAB 软件(2014 年,美国 Math-Works 公司)进行数理统计分析。

表 1 “丹治”工程生态效益指标体系

指 标	获取方法	指标释义
调蓄水能力变化/(t·a ⁻¹)	水利部水土保持监测中心、地方水行政管理部门提供	指项目实施后在调水、蓄水方面获得的实际效果
保土能力变化/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	水利部水土保持监测中心、地方水行政管理部门提供	指项目实施后在保土方面获得的实际效果
林草覆盖率/%	遥感图像解译、地方水行政管理部门提供	指在项目实施区域内,符合一定标准的乔木林、灌木林和草本植物的土地面积占该区域土地总面积的比例
土壤侵蚀减蚀率/%	水利部水土保持监测中心、地方水行政管理部门提供	指项目实施区域内,治理前后土壤侵蚀模数的变化情况
减少土壤 N,P,K 的流失能力/(mg·L ⁻¹)	水利部水土保持监测中心、地方监测站断面监测数据	因土壤侵蚀模数下降而引起的 NPK 的流失的减少量

如表 1 所示,本研究数据来源于水利部水土保持监测中心、地方水土保持监测管理部门报送数据、丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划研究报告、水土保持重点建设工程项目管理系统卫

星地图在线提取等,获取的“丹治”工程近 5 a 指标数据详见表 2。指标获取来源详见表 1。借助 MATLAB 归一化后结果详见表 3。基于组合赋权确定指标权重详见表 4。

表 2 生态效益指标数据

年份	调蓄水能力/ (10 ¹⁰ t·a ⁻¹)	保土能力/ (10 ¹⁰ t·a ⁻¹)	林草覆盖率/ %	土壤侵蚀减蚀力/ %	减少土壤氮磷钾流失 能力/(mg·L ⁻¹)
2011	2.90	0(基准)	58.59	62.80	0.500
2012	2.92	6.43	71.23	57.08	0.980
2013	2.93	11.40	70.43	55.55	0.315
2014	2.95	16.07	74.44	57.85	1.095
2015	2.98	20.30	75.54	62.40	0.970

表 3 生态效益指标数据归一化结果

年份	调蓄水能力	保土能力	林草覆盖率	土壤侵蚀减蚀力	减少土壤氮磷钾流失能力
2011	0.445 5	0	0.372 7	0.474 3	0.269 2
2012	0.446 5	0.221 6	0.453 1	0.431 1	0.527 6
2013	0.447 3	0.393 0	0.448 0	0.419 6	0.169 6
2014	0.448 1	0.553 8	0.473 5	0.437 0	0.589 6
2015	0.448 7	0.699 8	0.480 5	0.471 3	0.522 3

表 4 组合赋权结果

指 标	调蓄水能力	保土能力	林草覆盖率	土壤侵蚀减蚀力	减少土壤氮磷钾流失能力
熵值法	0.200 4	0.200 1	0.200 0	0.199 8	0.199 7
AHP 法	0.145 2	0.197 8	0.170 1	0.238 4	0.248 6
综合权重	0.172 8	0.198 9	0.185 0	0.219 1	0.224 1

2.3 灰色关联度的 TOPSIS 模型

灰色关联是指系统因素与主行为及事物之间存在的模糊性关联,是灰色系统体系的基本要义^[8]。用以确定参考数列与各比较数列对应的几何曲线间的相似程度,几何形状相似度愈高,表明相关联度愈强。对于多指标方案的评价,当理想方案与样本方案间灰色关联度愈大时,样本方案愈贴近理想方案,可认为

该样本在指标上贴近理想方案^[9]。基于灰色关联度的 TOPSIS 模型采取构建相对接近度指标,全面考量各方案相对于最优、劣方案间欧式距离的大小,以实现方案优选评价^[10],计算步骤如下^[11-12]:

(1) 计算标准化加权矩阵。把归一化处理得到的指标样本矩阵与指标综合权重相乘可得标准化加权矩阵。

(2) 确定最优(劣)方案。在权重已确定的前提下,以正向指标的极大值(极小值)为最优(劣)方案(指标反向则优劣度相反)。

(3) 计算欧式距离。分别求解各方案与最优(劣)方案间的欧式距离。计算式如下:

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{\max j} - z_{ij})^2}; \tag{1}$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{\min j} - z_{ij})^2}$$

(4) 确定灰色关联度。分别计算最优、劣方案到样本的灰色关联度。最优方案与样本 *i* 对应于指标 *j* 的关联系数。样本 *i* 对应于最优方案的关联度 Y_i^+ 为:

$$\delta_{ij}^+ = \frac{i_{\min} j_{\min} \Delta z_{ij} + \rho i_{\max} j_{\max} \Delta z_{ij}}{\Delta z_{ij} + \rho i_{\max} j_{\max} \Delta z_{ij}} \tag{2}$$

$$Y_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{ij}^+ \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (3)$$

式中： ρ ——分辨系数，取值区间为 $[0,1]$ ； z_{ij} ——方案的极值， $z_{ij} = |z_{ij} - z_{\max j}|$ 。

同理，可得关于最劣方案的灰色关联度 Y_i^- 。

(5) 确定相对贴进度。将求得的灰色关联度 Y_i^+, Y_i^- 与欧式距离 L_i^+, L_i^- 分别除以其最大值，得到 y_i^+, y_i^- 与 L_i^+, L_i^- ，即进行无量纲化处理。

相对接近度 φ_i 可按式计算：

$$\varphi_i = \frac{\partial_1 L_i^- + \partial_2 y_i^+}{\partial_1 L_i^- + \partial_2 y_i^+ + \partial_1 L_i^+ + \partial_2 L_i^-} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

式中： ∂_1, ∂_2 ——评价者对形状与位置的偏好程度， $\partial_1 + \partial_2 = 1$ 。相对接近度的大小表明待测样本在态势变化上与最优(劣)方案的贴进程度。

3 工程生态效益评价及验证

3.1 工程生态效益评价

“丹治”工程治理目标是“多拦沙、多输水、输好水”，水质指标是侧重考虑指标，指标组合赋权结果基本符合实际情况，将组合赋权得到的权重值带入模型最后由 MATLAB 计算出最优(劣)关联度、欧氏距离及最优劣方案到各样本的相对贴进度(偏好系数 ρ 取 0.5)：

$$Y_i^+ = (0.7338 \quad 0.8250 \quad 0.7645 \quad 0.9211 \quad 0.9691)$$

$$Y_i^- = (0.9361 \quad 0.7884 \quad 0.8628 \quad 0.7255 \quad 0.7070)$$

$$L_i^+ = (3.6387 \quad 2.4830 \quad 1.5987 \quad 0.7379 \quad 0.4040)$$

$$L_i^- = (0.0000 \quad 1.1660 \quad 2.0686 \quad 2.9907 \quad 3.6610)$$

$$\varphi = (0.3150 \quad 0.5000 \quad 0.9700 \quad 0.9800 \quad 1.0950)$$

依据相对贴进度值，绘制出该地区 2011—2015 年水土保持工程生态效益评价图(见图 1)，2015 年生态效益值 1.0950 是 2011 年生态效益值 0.3150 的 3.48 倍，经过治理后效果显著，其中 2011—2012 年相对接近度曲线上升较慢，即水土保持工程生态效益不明显，主要原因为 2011 年是“丹治”工程“十二五”的规划的起始年，各项治理措施开始实施，但生态效益的发挥具有滞后性，因此效益不明显；2012 年至 2013 年，曲线上升较快，说明水土保持工程生态效益逐步显现，实施的各项水保措施发挥了作用；2013—2014 年相对接近度曲线有略微下降趋势，可能原因是河南省 2013 年项目资金较少，2012 年至 2015 年河南省中央投资分别为 1.30×10^7 元， 5.87×10^6 元， 1.60×10^7 元， 10.53×10^6 元(水利部水土保持监测中心)；2014—2015 年为项目区的验收年，同时经过 3 a 的治理各项水保措施趋于稳定状态，生态效益呈稳定上升趋势，生态环境逐步向良性发展。总体上该地区采取的一系列水土保持工程措施已产生积极效益。

3.2 工程生态效益评价的验证

水土流失面积可以反映一个地区的生态治理程度，生态治理程度高，水土流失程度也必然会低。为了验证模型计算的可信度，又收集了 2012—2015 年项目区水土流失面积，分别为 2 057.33, 2 660.46, 2 246.43, 1 884.03 km²(水利部水土保持监测中心)，详见图 2。2013 年水土流失面积较 2012 年有升高趋势，2013 年生态效益有略微下降趋势，2012—2015 年总体水土流失面积呈现下降趋势，生态效益相应呈现上升趋势，这与模型计算出的生态效益趋势一致(见图 1)。

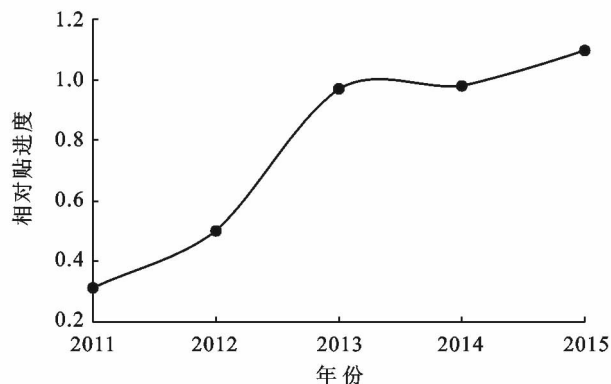


图 1 2011—2015 年“丹治”工程水土保持生态效益评价

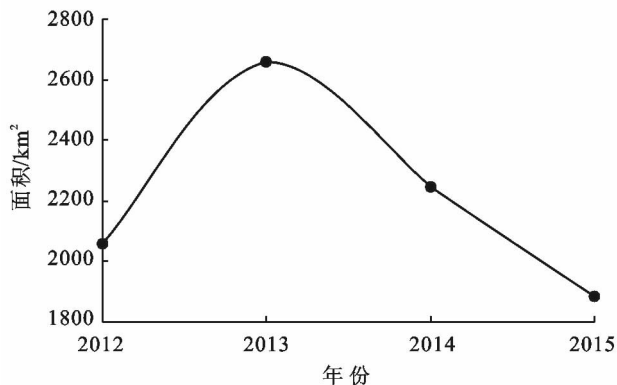


图 2 2012—2015 年“丹治”工程水土流失面积

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 至 2015 年，“丹治”工程项目区生态效益较 2011 年增长了 3.48 倍，其中 2011—2012 年相对贴进度曲线上升较慢；但从 2012 年始，曲线上升较快，表明水土保持工程生态效益逐步显现；2013—2014 年相对贴进度曲线有略微下降趋势，可能与 2013 年河南省投资有关；2014—2015 年为项目区的验收年，同时经过前 3 a 的治理各项水保措施趋于稳定状态，生

态效益稳步上升。因此可以看出,通过积极调整项目区土地利用结构,增加林草封育、梯田等水土保持措施实施面积,加强水土保持治理工程建设,增强丹江口库区及上游地区群众水土保持意识,能够有效改善区内水土流失现状,有利于项目区生态环境及其各项功能向良性发展。

(2) 基于灰色关联系统的 TOPSIS 模型对样本数据进行了深入挖掘,采用组合赋权方法可以有效避免主客观问题,组合赋权法评价结果能很好的反映出治理效益的动态变化情况,且与项目区“水土流失面积”的客观实际基本相符。因此,该模型能为同类水土保持工程效益评价提供新的思路。

4.2 建议

(1) 模型分析结果为今后“丹治”工程“十三五”规划及类似工程的建设有一定的指导作用。工程建设过程中加强监督检查和成果质量把关,措施配置完成后的最近一段时间要加强措施的维护与监管,使各项措施顺利度过“幼儿期”,以保障项目中后期如期发挥其功效。

(2) TOPSIS 模型分析方法目前在小流域应用较多,而在大尺度、大范围的工程效益评价中涉及较少,此外该模型与其他分析方法的组合使用也鲜有探讨,该方法的应用可为大范围、大尺度的水土保持工程效益评价提供一条新的思路。

(上接第 188 页)

(4) 全面推广水权改革要充分考虑区域性差异特点。应因地制宜地推行全国水权制度改革,无论水权确权登记还是水权交易,抑或是水权监督管理,都应当根据不同地区的水资源条件、社会经济条件、生态环境条件等要素,恰当选择适合本地区经济发展并且可实现的水权改革模式,以使水资源得到合理高效的利用,进而有助于发展中国的节水产业,建设节水型社会,并进一步推动中国经济社会的可持续发展。

[参 考 文 献]

[1] 张国良. 21 世纪中国水需求[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998:131-138.

[2] 段青春,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.

[3] 王壬,陈兴伟,陈莹. 区域水资源可持续利用评价方法对比研究[J]. 自然资源学报,2015,30(11):1943-1955.

[4] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3):14-16,129.

[参 考 文 献]

[1] 朱明润,乔明叶,梁士奎,等. 改进的 TOPSIS 模型在污水灌溉安全性评价中的应用[J]. 长江科学院院报,2010,27(8):25-28.

[2] 张霞,刘晓清,王亚萍,等. 秦岭生态功能区水土保持治理效益评价[J]. 水土保持研究,2012,19(2):86-90.

[3] 陈威. 改进 TOPSIS 模型在水土保持工程效益评估中的应用[J]. 吉林水利,2016(7):50-53.

[4] 李可,尚薇,卢斌,等. 论水土保持生态修复[J]. 水利规划与设计,2012(4):50-53.

[5] 水利部水土保持司. 水土保持综合治理效益计算方法[J]. 林业工作参考,2001(2):53-78.

[6] 魏志萍,彭彰普,刘金鹏. 甘肃省秦安县水土保持生态服务价值评价[J]. 水利规划与设计,2015(8):33-36,41.

[7] 肖淳,邵东国,杨丰顺. 基于改进 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. 武汉大学学报:工学版,2012,45(3):329-334.

[8] 董凤新. 开发建设项目主体工程水土保持分析与评价[J]. 水利技术监督,2015,23(5):41-43.

[9] 华荣祥,张富,田青,等. 甘肃省水土保持措施的综合效益分析[J]. 水土保持通报,2012,32(2):211-214.

[10] 余雁,梁樑. 多指标决策 TOPSIS 方法的进一步探讨[J]. 系统工程,2003,21(2):98-101.

[11] 曾雪婷,李永平,崔亮,等. 基于熵权 TOPSIS 法的水保项目管理评价[J]. 人民黄河,2015,37(5):80-83.

[12] 崔亮,李永平,曾雪婷,等. 基于熵权 TOPSIS 法的水保工程水补偿效益评价[J]. 人民黄河,2015,37(12):88-91.

[5] 赵强,李秀梅,高倩,等. 基于模糊综合评判的山东省水资源承载力评价[J]. 生态科学,2018,37(4):188-194.

[6] Hou Guanyu, Tang Deshan. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources capacity based on vague method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014,5:501-504.

[7] Jiang Xiandong, Nie Bingbing. Evaluation on water resource carrying capacity in Shandong Province during 2005—2014[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016,44(9):103-105,161.

[8] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(S1):119-122.

[9] 温利华,刘红耀,姚海娇,等. 北方八省市水资源承载力研究[J]. 水土保持研究,2013,20(6):168-172,176.

[10] 李松森. 市场经济体制下国家征税依据的深层次思考[J]. 财政研究,2008(10):69-71.

[11] 王晓洁,郭宁,杨梦,等. 水资源费改税试点:成效、问题及建议[J]. 税务研究,2017,8(1):43-47.

[12] 田贵良. 国家试点省(区)水权改革经验比较与推进对策[J]. 环境保护,2018,46(13):28-35.