

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.039.

祁菁. 基于组合赋权 TOPSIS 模型的建设项目水土保持绩效评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 458-467.

QI Jing. Performance Evaluation of Soil and Water Conservation and Diagnosis of Obstacle Factors in Construction Projects Based on Combined Weighting TOPSIS Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 458-467.

基于组合赋权 TOPSIS 模型的建设项目 水土保持绩效评价及障碍因子诊断

祁 菁

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 西安 710001)

摘 要: [目的] 综合量化评估建设项目的水土保持障碍因子, 提升建设项目的水土保持效益, 为促进建设项目水土保持综合绩效提升和系统性优化调整水保方案提供技术思路。 [方法] 综合考虑水土流失防治成效、水土流失影响因子控制、水保经济投资控制、水保生态建设成效 4 个子系统及其下属的 15 个指标因子, 建立了水土保持综合评价指标体系, 而后基于层次分析法(AHP), 采用专家打分法和熵权法并结合博弈论理论构建了组合权重 TOPSIS 模型的建设项目水土保持综合绩效评价技术体系和障碍因子诊断方法, 实证研究评价并诊断了陕西省 3 个建设项目的水土保持综合效益及障碍因子。 [结果] P_1 、 P_2 和 P_3 的水土保持工程综合绩效贴近度分别为 0.764 4、0.692 8、0.274 5, P_1 水土保持绩效为优秀, P_3 为较差; P_1 的主要指标层障碍因子为林草措施投资比和临时措施投资比, P_2 的为扰动土地整治率、单位面积弃渣量、临时措施投资比和林草植被恢复率, P_3 的为扰动土地整治率、水土流失治理度和林草植被恢复率; P_1 需要优化水保措施投资结构, 适当增加对林草措施和临时措施的投入, P_2 需要适当增加临时措施投资, 提升水保措施的有效性和全面性, P_3 需要提高资金投入并增加临时措施和林草措施。 [结论] 提出的水土保持绩效评价及障碍因子诊断技术方法能够针对不同的建设项目进行综合绩效量化评价, 且可根据项目的具体情况, 相对应地量化诊断其子系统和指标因子对综合绩效的影响程度, 快速检测影响综合绩效评价提升的主要因素, 可根据评价和诊断分析结果进行项目水保方案优化调整。

关键词: 水土保持; 组合赋权; 绩效评价; 障碍度

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0458-10

Performance Evaluation of Soil and Water Conservation and Diagnosis of Obstacle Factors in Construction Projects Based on Combined Weighting TOPSIS Model

Qi Jing

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to comprehensively evaluate the soil and water conservation of construction projects, diagnose their obstacle factors, and to improve the comprehensive performance of soil and water conservation. [Methods] A comprehensive evaluation index system for soil and water conservation was established using four subsystems, including the effectiveness of soil and water loss prevention and control, the control of soil and water loss impact factors, the control of soil and water conservation economic investment, and the effectiveness of soil and water conservation ecological construction, as well as 15 indicator factors under them. Based on analytic hierarchy process(AHP), expert scoring method and entropy weight method combined with game theory were used to construct a comprehensive performance

收稿日期: 2022-05-31

修回日期: 2022-09-28

资助项目: 陕西省水利厅科技项目“水土保持植物——钙果在煤矿矿渣复垦地的种植技术研究”(2022slkj-15)

第一作者: 祁菁(1972—), 女, 山西闻喜县人, 高级工程师, 主要从事小流域治理和水土保持研究。E-mail: 1515734325@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

evaluation technology system and obstacle factor diagnosis method for soil and water conservation of construction projects with combined weight TOPSIS model. Empirical research was carried out to evaluate and diagnose 3 construction projects in Shaanxi Province comprehensive benefits and obstacle factors of soil and water conservation of the project. [Results] The comprehensive performance closeness of soil and water conservation projects for P_1 , P_2 and P_3 are 0.764 4, 0.692 8 and 0.274 5, respectively. The soil and water conservation performance of P_1 is excellent, while that of P_3 is poor. The main indicator layer obstacle factors of P_1 are the investment ratio of forest and grass measures and the investment ratio of temporary measures. P_2 represents the disturbance land remediation rate, unit area waste, temporary measure investment ratio, and forest and grass vegetation restoration rate. P_3 represents the disturbance land remediation rate, soil erosion control degree, and forest and grass vegetation restoration rate. P_1 needs to optimize the investment structure of water and soil conservation measures, increase investment in forest and grass measures and temporary measures appropriately. P_2 needs to increase investment in temporary measures appropriately, improve the effectiveness and comprehensiveness of water and soil conservation measures. P_3 needs to increase capital investment and increase temporary measures and forest and grass measures. [Conclusion] By using the combined weighted TOPSIS model, the soil and water conservation obstacle factors of construction projects can be accurately diagnosed and the soil and water conservation benefits of construction projects can be improved. The ideas and methods of this study can provide technical ideas for promoting the comprehensive performance improvement of soil and water conservation in construction projects and systematically optimizing and adjusting soil and water conservation plans.

Keywords: soil and water conservation; combined weighting; performance evaluation; obstacle degree

改革开放以来,随着我国经济稳定快速发展、现代化进程加速推进以及“十三五”期间城镇化水平不断提高,基础交通(铁路、公路)^[1-2]、能源化工(水利、电力、油气开发、冶金化工)^[3-6]、城镇开发等生产建设活动日趋频繁,导致水土流失、土壤侵蚀、生态退化等问题日益严重,这对地区的生态安全、人居环境、经济发展等方面构成了严重威胁。且建设项目对土地扰动强烈,水土流失强度大,造成水土资源流失,堵塞地下排水管网,淤积河道,极易影响行洪,引起泥石流、崩塌等灾害,极大威胁着广大百姓的生命财产安全和生态环境安全,制约经济社会的可持续发展^[7]。现如今,随着人们生态环保意识的增强和国家法律制度体系的不断完善以及经济社会的发展,建设项目水土流失治理问题越来越引起人们的重视。水土保持方案作为项目建设过程中水土流失治理的综合方案,方案的系统性、科学性、经济性、合理性^[8]是项目建设和运行过程中水土流失治理成效、生态环境保护、经济投资控制的重要保证。因此,研究建设项目水土保持综合评价方法并对其中影响水土保持综合效益提升的障碍因子进行诊断,有助于全面把握建设项目水土保持的整体成效和不足之处,有利于为建设项目水土保持方案优选和优化提供技术评价识别体系,为各级水行政主管部门优化审批房地产建设项目水保方案提供技术参考。

现阶段,国内外众多学者对此开展了许多研究。水土保持评价由最初的单因素定性分析发展为现阶段的多因素、多目标的定量综合评价,新技术和新方法层出不穷并被不断运用于水土保持评价中,极大地促进了水土保持方案设计的优化完善发展,为工程效益的科学评价和优化提升提供了重要的理论方案。在指标体系构建上,王梅等^[3]从技术、经济、社会3个方面研究了水土保持项目综合评价指标体系并给出了计算方法;姜德文^[4]以科学发展观为指导,从土地资源消耗和占用、水资源消耗和占用、生态环境状况、水土保持功能、对周边和下游水土流失的影响以及社会效益方面建立了水土保持损益分析指标体系;刘菲^[2]从社会、经济和生态3个方面构建了评价指标体系并对北票市白石厂治理区进行了科学评价;李怡凤等^[5]从水土流失产生的动因及多目标需求、经济社会系统耦合与水土保持实施多目标性协同的本质出发,构建了水土保持技术属性、水土流失治理过程、治理效果相互耦合为主线的指标体系,该体系能够较为完整地表征对水土保持评价的全过程,但其存在操作复杂,定性指标与定量指标夹杂难以操作等问题。在确定评价指标权重系数上,主要有德尔菲法、二元比较法、层次分析法等主观定权法和方差倒数为权、变异系数为权、负相关系数的倒数为权、诱导有序加权平

均、熵权等客观定权法^[6]。然而,主观定权法依据个人经验和理论认知对各评价指标进行赋权,该方法受个人认知和主观判断差异的作用影响其评价结果,可能会造成极端偏离真实结果情况的出现;客观定权法通常会忽略不同评价指标的重要性程度的差异,造成重要信息的丢失^[6]。近年来,在充分遵从和利用了主、客观赋权法的基本属性和优点的基础上,弱化其不足之处对方案评审结果误导偏离的综合赋权法和组合赋权法在许多方面得到应用并表现出良好的效果^[7-8]。在评价模型构建上,主要有基于经验的综合评价方法,例如专家打分法^[9]、德尔菲法等^[10],该类方法具有直观简单、适用面广等优点,但却受人为因素的干扰;基于数值和统计的方法,例如加权平均法、TOPSIS法^[11]、费用效益分析法^[12]、主成分分析法等^[13]以及基于决策和智能的综合评价方法,例如层次分析法、模糊综合评价法、人工神经网络法等^[14],这两类方法具有理论基础牢固、可很大程度上排除人为因素的干扰等优点,但其存在约束条件太多,操作复杂等缺点^[6]。

基于此,本研究在结合前人研究成果的基础上从建设项目水土流失防治成效、水土流失影响因子控制、水保经济投资控制和水保生态建设成效入手综合

考虑,进行建设项目水土保持综合绩效水平评价研究,并立足于上述4个子系统,构建建设项目水土保持综合评价的指标体系,基于陕西省3个建设项目(P_1, P_2, P_3)水土保持相关数据,以基于组合赋权TOPSIS模型及障碍度识别模型为理论依据,对其水土保持综合绩效进行评价,对影响水保绩效的关键因素进行识别并提供相关优化意见和建议,以期为建设项目的方案优选提供技术评价体系,为提升建设项目水土保持综合绩效提供借鉴参考。

1 建设项目水土保持综合评价指标体系

1.1 指标选取依据

在遵循系统性、科学性、可获取性、合理性和客观性的原则下^[8],结合前人研究成果和专家意见建议,综合考虑建设项目水土流失的特点及水保治理多目标原则,本文从水土流失防治成效、水土流失影响因子控制、水保经济投资控制及水保生态建设成效4个方面选择了水土流失治理度、土壤流失控制比、扰动土地面积、单位面积弃渣量、单位面积水保投资额、林草植被覆盖度等15个指标,按照相应原则构建了包含目标层、准则层和指标层3级阶梯框架水土保持综合评价体系(表1)。

表1 建设项目水土保持综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system for soil and water conservation of construction projects

一级指标	二级指标	含义
水土流失成效	扰动土地整治率	建设项目水保措施治理的扰动土地面积占总扰动土地面积的百分比
	水土流失治理度	项目水土流失防治范围内水土流失治理达标面积占水土流失总面积的百分比
	渣土防护率	项目水土流失防治责任范围内采取水保措施实际挡护的永久弃渣、临时堆土数量占永久弃渣和临时堆土总量的百分比
	土壤流失控制比	项目水土流失防治责任范围内容土壤流失量与治理后每平方千米年平均土壤流失量之比
水土流失影响因子控制	表土保护率	项目水土流失防治责任范围内保护的表土数量占可剥离表土总量的百分比
	扰动土地面积	在水土流失防治范围内施工开挖、填筑和临时占用土地的面积和
	单位面积土石方填挖量	项目水土流失防治责任范围内土石方填挖量与扰动面积之比
	单位面积弃渣量	项目水土流失防治责任范围内总弃渣量与扰动地表面积之比
水保经济投资控制	影响时间	项目从开工到完工所经历的时间跨度
	单位面积水保投资额	水土保持所投入的总金额与建设项目水保措施防治总面积的比值
	工程措施投资比	水保项目工程措施资金投入占水保总资金投入之比
	林草措施投资比	项目林草措施资金投入占水保总资金投入之比
水保生态建设成效	临时措施投资比	水保临时措施资金投入占水保总资金投入之比
	林草覆盖率	项目水土流失防治责任范围内林草类植被面积与占总面积的百分比
	林草植被恢复率	项目水土流失防治责任范围内林草类植被面积占可恢复林草植被面积的百分比

2 建设项目水土保持综合评价方法与模型

2.1 建设项目水土保持评价指标权重确定方法

为了在充分尊重专家经验的基础上突出不同评

价指标之间重要性程度的差异,同时避免因个人认知和主观判断差异而影响模型的评价结果,造成可能出现极端偏离真实结果情况的出现,本研究采用组合赋权进行指标权重计算,在充分遵从和利用主、客观赋权法的基本属性和优点的基础上,及时弱化了主、客

观赋权的缺点对评价结果的影响。

2.1.1 基于五标度层次分析法的主观权重计算 在水土保持综合评价体系的基础上,本文采用层层递进的五标度法构造基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的判断矩阵,用判断矩阵来计算评价指标的权重,五标度法的取值和含义见表 2。具体构造步骤如下所示^[8]:

(1) 首先,按照目标层 X 、准则层 X_i 、指标层 X_{ij} 的构造顺序建立水土保持综合评价体系(表 1)。

(2) 邀请 s 名专家比较各层级的 n 个指标,根据专家给出的结果给出同一层次各元素之间重要程度的直接比较矩阵 A :

$$A=[a_{ij}]_{n\times n} \tag{1}$$

式中: a_{ij} 为指标 i 相对于指标 j 的重要程度。其中, $a_{ij}>0$,当 $i=j$ 时, $a_{ij}=1$,且 a_{ij} 和 a_{ji} 互为倒数。

(3) 进行一致性检验。对构造出的判断矩阵作一致性检验,计算一致性检验指标 CR,当 $CR<0.1$ 时,判断矩阵的一致性满足要求,否则需要进行修正判断矩阵。一致性检验见公式(2)–(3):

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{2}$$

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{3}$$

式中:CI 为一致性指标; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为矩阵的阶数;CR 为一致性指标;RI 为平均随机一致性指标。

(4) 计算指标权重(ω_i):

$$\omega_i=\frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad (i=1,2,\cdots) \tag{4}$$

表 2 五标度法的取值及其含义

Table 2 Five scale method values and their meanings

标度值	含义
1	指标 i 和指标 j 同等重要
3	指标 i 比指标 j 较为重要
5	指标 i 比指标 j 极为重要
2,4	介于上述两相邻判断之间
倒数	指标 i 和指标 j 的比较结果和指标 j 和指标 i 的比较结果互为倒数

2.1.2 基于熵值法的客观权重计算 熵值法(entropy weight method, EWM)^[15]具有不受评价者主观意愿影响,能够清楚有效地反映指标数据变化与指标权重之间的关系的优点,是客观赋权方法之一,在多因素指标权重计算当中已经得到较好应用。基于熵值法计算水土保持综合评价指标权重计算步骤如下:

(1) 首先建立包含 n 个项目和 m 个指标初始值

的决策矩阵 X 。

$$X=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \tag{5}$$

(2) 通过下式归范化处理判断矩阵 X 。

$$z_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

式中: x_{ij} 为建设项目水土保持综合评价指标 C_j 第 i 个项目中的指标初始指标值; z_{ij} 为 x_{ij} 的规范化指标值,归范化后得到矩阵 $Z=\{z_{ij}\}_{n\times m}$ 。

(3) 求指标的信息熵 E_j 。

$$E_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^n z_{ij}\ln z_{ij} \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{7}$$

(4) 计算各指标的效用价值 h_j 。

$$h_j=1-E_j \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{8}$$

(5) 最后计算指标的权重值 ω_j 。

$$\omega_j=\frac{h_j}{\sum_{j=1}^m h_j} \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{9}$$

2.1.3 基于博弈论理论的综合权重确定 如何将每个指标的主、客观权重进行融合构成综合权重以最真实地体现该指标在体系中的重要程度是该评价体系能否得到合理评价结果的关键,前人提出了乘法合成归一化方法^[16]、基于云雾化的因素权重融合方法^[17]、组合赋权法等^[18]确定最终权重,其中乘法合成归一化方法计算简便但操作的说服力不够,基于云雾化的因素权重融合方法能够检验权重的合理性但操作复杂,组合赋权法基于人工设定偏好系数存在个人主观影响。为此,本文采用基于博弈论理论的综合权重确定方法^[19],将通过五标度层次分析法确定的主观权重 ω_1 和熵值法确定的客观权重 ω_2 进行互相博弈,搜寻使双方博弈达到平衡的最优综合权重 ω^* ,步骤如下所示:

(1) 首先,利用线性组合系数 α_1, α_2 将 ω_1 和 ω_2 进行线性组合,构造公式(10)。

$$\omega=\alpha_1\omega_1+\alpha_2\omega_2 \tag{10}$$

(2) 基于博弈论理论,寻找最优组合权重,求取最优组合系数 α^* ,使 ω^* 与 ω_1 和 ω_2 的离差总和最小。为此,构造公式(11)。

$$\begin{aligned} \min(&\|\omega^*-\omega_1\|_2+\|\omega^*-\omega_2\|_2)= \\ \min(&\|\alpha_1^*\omega_1+\alpha_2^*\omega_2-\omega_1\|_2+\|\alpha_1^*\omega_1+\alpha_2^*\omega_2-\omega_2\|_2) \end{aligned} \tag{11}$$

其中, $\alpha_1^*, \alpha_2^*>0$ 且 $\alpha_1^*+\alpha_2^*=1$ 。

(3) 根据微分性质,将公式(10)–(11)进行最优一阶求导,见公式(12)。

$$\begin{cases} \alpha_1 \omega_1 (\omega_1)^T + \alpha_2 \omega_1 (\omega_2)^T = \omega_1 (\omega_1)^T \\ \alpha_1 \omega_2 (\omega_1)^T + \alpha_2 \omega_2 (\omega_2)^T = \omega_2 (\omega_2)^T \end{cases} \quad (12)$$

(4) 根据公式(12)求取 α_1, α_2 并归一化得到 α_1^* 和 α_2^* 。最后将 α_1^* 和 α_2^* 代入公式(10)求得最优综合权重,如公式(13)所示,最后得到最优综合权重矩阵 $W = [\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_m^*]$ 。

$$\omega^* = \alpha_1^* \omega_1 + \alpha_2^* \omega_2 \quad (13)$$

2.2 建设项目水土保持综合评价模型——组合赋权 TOPSIS 模型

TOPSIS 模型是一种在实际中得到广泛应用的基于多目标的评价方法^[19],其借助测度被评价对象的指标评价值向量与综合评价问题的理想解和负理想解的相对距离进行排序,适用于根据多指标对多个方案进行比较选择^[21]。但是,传统的 TOPSIS 法在权重确定上主要依赖于专家的主观判断,这存在使结果偏离实际的风险^[22]。为此,本文通过组合权重对评价指标和指标正、负理想解的评价值进行修正,构建组合赋权 TOPSIS 模型,并借助该模型评价建设项目水土保持绩效。具体计算步骤如下:

(1) 利用极值法对矩阵 Z 进行标准化,其中采用公式(14)对正向指标标准化,对负向指标采用公式(15)进行标准化,最终得到标准化矩阵 $P = [p_{ij}]_{n \times m}$ 。

$$p_{ij} = \frac{z_{ij} - \min\{z_{ij}\}}{\max\{z_{ij}\} - \min\{z_{ij}\}} \quad (14)$$

$$p_{ij} = \frac{\max\{z_{ij}\} - z_{ij}}{\max\{z_{ij}\} - \min\{z_{ij}\}} \quad (15)$$

(2) 采用式(16),将指标权重向量 W 和标准化矩阵 P 相乘,得到加权规范化矩阵 V 。

$$V = P \times W = [v_{ij}]_{n \times m} \quad (16)$$

(3) 确定该模型指标加权规范化后的正负理想解 V^+ 和 V^- 。其中,正理想解方案 V^+ 是每一列中最大正效应指标和最小负效应指标集合;同理,负理想解方案 V^- 是每一列中最小的正效应指标和最大的负效应指标的集合。

$$\begin{cases} V^+ = \{\max v_{ij} | j \in j^+, \min v_{ij} | j \in j^-\} & (j=1, 2, \dots, m) \\ V^- = \{\min v_{ij} | j \in j^+, \max v_{ij} | j \in j^-\} & (j=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (17)$$

(4) 计算各方案与正理想解方案 V^+ 和负理想解方案 V^- 之间的距离 L_i^+ 和 L_i^- , 公式如下:

$$\begin{cases} L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

(5) 利用公式(19)计算各项目与最优方案的贴近

度 S_i , 其取值范围为 $[0, 1]$, 其值越大, 表示该项目的水土保持综合效益指数越高, 项目方案越优。参考国内相似研究成果^[20, 23], 将 S_i 进行 4 个等级划分, 进行定性表征建设项目的水土保持综合效益的优劣, 见表 3。

$$S_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

表 3 项目的水土保持综合效益评价标准

Table 3 Comprehensive benefit evaluation standards for soil and water conservation of the project

贴近度	评价效应等级
$>0.8 \sim 1.0$	优秀
$>0.6 \sim 0.8$	良好
$>0.3 \sim 0.6$	中等
$0 \sim 0.3$	较差

2.3 建设项目水土保持综合效益障碍因子诊断模型

对影响建设项目水土保持综合效益的主要障碍因子进行分析诊断,可针对性地制定和优化调整建设项目水土保持方案和实施措施^[24]。具体操作如下:首先,引入因子贡献度 F_j 、指标偏离度 I_j 和指标障碍度 O_j 这 3 个基本变量。其中,因子贡献度 F_j 代表单一评价指标 C_j 对总目标(建设项目水土保持综合效益指数)的贡献度大小,可直接用各项指标权重 ω_j 表示;指标偏离度 I_j 为单项指标评估值与最优目标值的差距,可用 1 与标准化指标值 z_{ij} 之差表示;障碍度 O_j 为单要素对或子系统对建设项目水土保持综合效益影响程度的高低,通过公式(20)计算。

$$O_j = \frac{I_j \times \omega_j}{\sum_{j=1}^m I_j \times \omega_j} \quad (20)$$

式中: $I_j = 1 - z_{ij}$ 。

3 案例分析

基于陕西省建设项目水土保持工程有关数据,以组合赋权 TOPSIS 模型和障碍度模型为理论研究方法,实证研究评价并诊断 3 个建设项目水土保持综合效益及障碍因子,为建设项目水土保持综合评价及障碍因子诊断识别、进一步优化提升建设项目水土保持综合效益提供理论技术思路。

3.1 项目概况

该案例分析涉及陕西省内 3 个建设项目,涵盖 2 个为房地产项目水土保持工程和 1 个水库项目水土保持工程。作为改善民生、提高人居幸福度和完善基础设施保障区域水安全的重要保障工程,是现发展阶段的典型的建设项目。房地产项目 P_1 位于陕西省渭南市高新区,属渭河冲洪积平原区地貌,项目区地处暖温带半湿润半干旱季风气候区,多年平均气温 13.6°C , 多年平均

地面温度 5.5℃,多年平均降水量 555.8 mm,多年平均蒸发量 1 341.30 mm,降雨多集中于 7 月、8 月、9 月份,春夏季易发生干旱,夏季降雨多、强度大、水土流失严重,项目区侵蚀模数背景值平均为 200 t/(km² · a)。房地产项目 P₂ 位于陕西省西咸新区沣东新城,属渭河冲洪积平原区地貌,地处暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温 13.2℃,多年平均降水量 560.70 mm,雨季为 7—9 月,水土流失类型以微度水力侵蚀为主,背景侵蚀模数为 200 t/(km² · a)。水库项目 P₃ 位于陕西省延安市富县、洛川县和黄陵县境内,属陕北黄土高原沟壑地貌,项目区气候属暖温带大陆性季风气候,四季分明,多年平均气温 9.3~9.6℃,年降雨量 614~631 mm,降雨多集中在 7—9 月份,项目区的土壤允许流失量为 1 000 t/(km² · a)。项目的水土保持工程相关数据汇总见表 4。

3.2 组合赋权

针对本研究案例,邀请 5 位专家对不同层级的评价指标打分,根据专家打分表分别构造准则层和指标层初始矩阵,对准则层和指标层的初始矩阵计算得到 CR 分别为 0.093 3,0.070 9,0.056 06,0.093 6,0.045 4,0.035 2,0.018 8,0.032 0,0.032 4,0.011 5,均小于 0.1,表明判断矩阵满足一致性的前提条件。然后按照公式(4)分别计算其指标权重,基于专家在专业经

验上的熟悉程度分别赋予 0.2,0.4,0.2,0.1,0.1 的专家权重值,最后加权计算得到基于专家打分的主观权重值。同理,基于本案例中 3 个建设项目水保指标初始值,按照熵值法的步骤,计算各级评价指标的客观权重。建设项目水土保持综合效益影响因素权重见表 5。

表 4 建设项目水土保持工程数据汇总统计

Table 4 Summary statistics of soil and water conservation works data of construction projects				
指标	P ₁	P ₂	P ₃	
扰动土地整治率/%	98.07	98.11	98.00	
水土流失治理度/%	98.07	98.11	97.00	
渣土防护率/%	100.00	99.00	99.00	
土壤流失控制比/%	100.00	100.00	100.00	
表土保护率/%	100.00	99.09	95.00	
扰动土地面积/hm ²	6.23	14.82	1194.12	
单位面积土石方填挖量/(万 m ³ · hm ⁻²)	14.64	56.24	0.71	
单位面积弃渣量/(万 m ³ · hm ⁻²)	3.18	15.00	0.23	
影响时间/月	48	36	48	
单位面积水保投资额/(万 m ³ · hm ⁻²)	46.9759	40.6835	8.4014	
工程措施投资比/%	33.99	44.91	66.61	
林草措施投资比/%	6.01	6.67	12.54	
临时措施投资比/%	31.88	12.41	5.86	
林草覆盖率/%	34.99	35.02	24.82	
林草植被恢复率/%	99.54	99.42	98.00	

表 5 建设项目水土保持综合效益影响因素权重

Table 5 Construction project soil and water conservation comprehensive benefit influence factor weights						
目标层	准则层	主观权重	客观权重	指标层	主观权重 ω ₁	客观权重 ω ₂
建设项目水土保持综合绩效 C	水土流失防治成效 C ₁	0.2258	0.1871	扰动土地整治率 C ₁₁	0.0908	0.0621
				水土流失治理度 C ₁₂	0.0649	0.0621
				渣土防护率 C ₁₃	0.0565	0.0621
				土壤流失控制比 C ₁₄	0.0580	0.0621
				表土保护率 C ₁₅	0.0565	0.0621
	水土流失影响因素控制 C ₂	0.1757	0.2149	扰动土地面积 C ₂₁	0.0443	0.1007
				单位面积土石方填挖量 C ₂₂	0.0759	0.0687
				单位面积弃渣量 C ₂₃	0.0848	0.0681
				影响时间 C ₂₄	0.0997	0.0624
				单位面积水保投资额 C ₃₁	0.0553	0.0687
	水保经济投资控制 C ₃	0.2171	0.4090	工程措施投资比 C ₃₂	0.0503	0.0636
				林草措施投资比 C ₃₃	0.0532	0.0643
				临时措施投资比 C ₃₄	0.0929	0.0683
				林草覆盖率 C ₄₁	0.0496	0.0626
	水保生态建设成效 C ₄	0.3824	0.1890	林草植被恢复率 C ₄₂	0.0674	0.0621

由公式(12)分别求出准则层和指标层的最优组合系数分别为 0.449 957,0.550 043,0.708 268,0.291 731 2,最终得出准则层和指标层的综合权重分别为 ω_i^{*} = (0.204 528,0.197 280,0.322 624,0.276 017) 和 ω_{ij}^{*} = (0.082 423,0.064 070,0.058 134,0.059 185,0.058 127 6,

0.060 760,0.073 793,0.079 954,0.088 801,0.059 233,0.054 202,0.056 427,0.085 718,0.053 351,0.065 822)。

3.3 建设项目水土保持综合绩效评价

3.3.1 规范化矩阵构建与正负理想解确定 基于建设项目 P₁,P₂,P₃ 的水土保持有关数据,采用公式

(14—15)和公式(16)构造建设项目水土保持综合效益评价指标加权决策矩阵,并根据公式(17)确定指标的正、负理想解,结果见表6。

表6 决策规范化矩阵及指标正、负理想解

Table 6 Decision normalization matrix and indicator positive and negative ideal solutions

指标	P ₁	P ₂	P ₃	正理想解	负理想解
C ₁₁	0.0277	0.0277	0.0277	0.0277	0.0277
C ₁₂	0.0216	0.0216	0.0213	0.0216	0.0213
C ₁₃	0.0197	0.0195	0.0195	0.0197	0.0195
C ₁₄	0.0199	0.0199	0.0199	0.0199	0.0199
C ₁₅	0.0199	0.0197	0.0189	0.0199	0.0189
C ₂₁	0.0608	0.0603	0.0000	0.0000	0.0608
C ₂₂	0.0483	0.0324	0.0664	0.0324	0.0664
C ₂₃	0.0566	0.0332	0.0696	0.0332	0.0696
C ₂₄	0.0562	0.0645	0.0562	0.0562	0.0645
C ₃₁	0.0299	0.0339	0.0542	0.0299	0.0542
C ₃₂	0.0127	0.0168	0.0251	0.0251	0.0127
C ₃₃	0.0135	0.0150	0.0284	0.0284	0.0135
C ₃₄	0.0267	0.0101	0.0495	0.0495	0.0101
C ₄₁	0.0199	0.0199	0.0140	0.0199	0.0140
C ₄₂	0.0221	0.0220	0.0222	0.0222	0.0220

3.3.2 建设项目水土保持综合评价结果 根据表6数据,利用公式(18)—(19)计算得到建设项目水土保持子系统及项目总体的贴近度,计算结果见表7。

表7 建设项目水土保持综合绩效评价结果

Table 7 Construction project soil and water conservation comprehensive performance evaluation results

项目	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C
P ₁	0.9864	0.4565	0.4959	0.9823	0.7644
P ₂	0.7609	0.8578	0.3285	0.9782	0.6928
P ₃	0.0000	0.4377	0.6434	0.0218	0.2745

根据表7计算结果并结合表3的研判标准可知:从总体看,P₁的水土保持工程综合绩效贴近度最大,为0.7644,对应的评价效应等级为良好;从准则层来看,P₁中水土流失防治成效C₁,水土流失影响因子控制C₂,水保经济投资控制C₃和水保生态建设成效C₄的绩效贴近度分别为0.9864,0.4565,0.4959,0.9823,对应的评价绩效等级分别为优秀、中等、中等和优秀,这表明P₁的水土保持工程总体表现良好,且在水土流失防治成效、水保生态建设成效上表现优秀,但在水土流失影响因子控制和水保经济投资控制上还存在提升空间。P₂的水土保持工程综合绩效贴近度为0.6928,绩效评价也为良好,且准则层中C₁,C₂,C₃,C₄的绩效贴近度对应的评价等级分别为良

好、优秀、中等和优秀,这表明P₂的水土保持工程总体表现良好,且在水保生态建设成效上表现优秀,在水土流失防治上表现良好,但在水土流失防治成效和水保经济投资控制上表现中等,还有待提升和优化,建议加强扰动土地整治和增加临时措施以降低项目区雨季的水力侵蚀。P₃的水土保持工程绩效贴近度仅为0.2745,绩效评价为较差,且准则层中C₁,C₂,C₃,C₄的绩效贴近度对应的评价等级分别较差、中等、良好和较差,这表明P₃的水土保持总体表现较差,在水土流失防治成效和水保生态建设成效上表现较差,亟待扰动土地整治、水土流失治理以及林草植被恢复和覆盖度上予以重视改善。

3.4 建设项目水土保持综合绩效障碍度诊断

为了探明对建设项目水土保持综合绩效造成障碍的准则层子系统和指标层因子,基于现有数据并利用公式(20)计算建设项目各准则层子系统障碍度和各项指标的障碍度,基于障碍度数据开展项目水土保持综合绩效深度诊断分析。

3.4.1 准则层障碍因子 准则层中C₁,C₂,C₃,C₄对P₁,P₂,P₃的水土保持综合绩效的障碍度见表8。从表可知:在P₁和P₂水土保持中,C₂和C₃的障碍度较高,这表明水土流失影响因子控制和水保经济投资控制是制约P₁和P₂水土保持综合绩效提升的主要准则层子系统,这和表7中对应的评价结果一致。由此可见,提高P₁和P₂水土保持综合绩效应当重点关注水土流失因子控制和水保经济投资控制,进一步统筹协调施工组织方案,提升对水土流失因子控制的能力,同时协调优化水保经济投资,探索采用节约化、集约化和高效化的施工组织方案和经济投资控制模式,综合施工组织方案优化和经济投资结构优化,从整体上提升P₁,P₂水土保持综合绩效。在P₃水土保持工程中,C₁和C₄的障碍度较高,这表明水土流失防治成效和水保生态建设是制约P₃水土保持综合绩效提升的主要准则层子系统,和表7所得这两子系统评价等级为中等的结论一致。由此可见,提高P₃水土保持综合绩效应当着眼于提升水土流失防治效果和水保生态效益,适当提高水保经济投资,统筹优化水土保持技术和生态建设方案,进一步探索和采用高效集约化水土生态技术方案体系,协调优化提升水土流失防治和项目生态建设,系统性促进P₃的水体保持综合效益整体性提升。

3.4.2 指标层障碍因子 图1为建设项目P₁,P₂和P₃的水土保持指标因子障碍度图。由图1可知:在建设项目P₁水土保持指标中C₁₁,C₃₃,C₃₄和C₄₂的障碍度位居前4,且水保经济投资控制子系统的指标

占据一半,这说明扰动土地整治率和林草植被恢复率且以水保经济投资控制子系统下的林草措施投资比和临时措施投资比为主的因子是制约建设项目 P_1 水土保持综合绩效的主要指标层障碍因子。为此,提升 P_1 水土保持绩效的要点在于优化水保措施投资结构,具体而言就是适当增加对林草措施和临时措施的投入,进一步提升林草植被恢复率和扰动土地的整治率,这对于水土流失严重的 P_1 项目区尤为重要。 P_2 水土保持指标中 C_{11} , C_{23} , C_{34} 和 C_{42} 的障碍度位居前 4,这表明扰动土地整治率、单位面积弃渣量、临时措施投资比和林草植被恢复率是 P_2 水土保持综合绩效的主要指标层障碍因子。为此,提升 P_2 水土保持绩效可从统筹协调施工组织方案,适当增加临时措施投资,综合施工组织方案优化和经济投资结构优化,提升水保措施的有效性和全面性。在 P_3 中, C_{11} , C_{12} , C_{21} 和 C_{42} 是阻碍其水土保持综合绩效提升的前 4 项

主要指标层因子,且其中水土流失防治成效准则层子系统指标占据一半,这表明以水土流失防治成效子系统下的扰动土地整治率和水土流失治理度以及扰动土地面积、林草植被恢复率是制约 P_3 水土保持综合绩效提升的主要指标层障碍因子,为此,提升建设项目 P_3 水土保持综合绩效可从优化治理措施,协调治理方案合理开展入手,适当提高资金投入并增加临时措施和林草措施,加强对扰动土地的整治和水土流失的治理,增加林草植被的种植等。

表 8 建设项目水土保持综合绩效准则层障碍度

Table 8 Construction project soil and water conservation integrated performance guideline layer barrier degree

项目	C_1	C_2	C_3	C_4
P_1	0.0000	0.3580	0.5094	0.1326
P_2	0.1045	0.3825	0.4353	0.0777
P_3	0.3223	0.1376	0.1136	0.4265

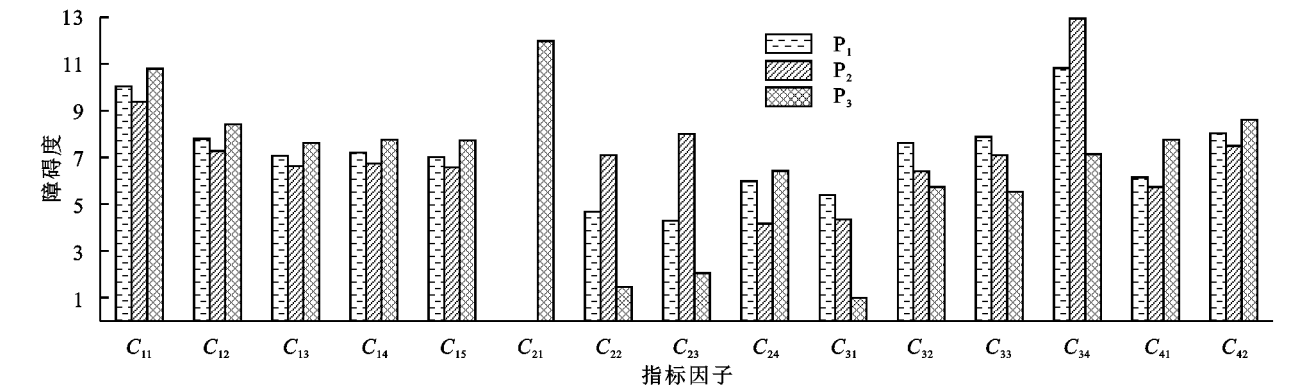


图 1 项目指标因子障碍度

Fig. 1 Project indicator factor barrier degree

4 讨论与结论

建设项目促进了区域基础设施、人居环境和社会经济的发展,但是不可避免地加剧了土地扰动,极易造成水土流失引起生态环境恶化,特别是在自然生态环境脆弱的西北地区该现象尤为明显。在项目建设的同时进行水土保持以尽可能地缓解人为扰动对当地生态环境影响是项目环保的关键举措之一。如何协调水保经济投资、防治成效、生态建设和关键因素控制是水土保持的重点和难点,进行水土保持绩效评价和障碍因子诊断是优化提升水土保持项目综合效益的关键。

为此,本文基于 AHP,采用专家打分法和熵权法并结合博弈论理论构建组合权重 TOPSIS 模型的建设项目水土保持综合绩效评价技术体系和障碍因子诊断方法。在指标选取上,综合考虑水保经济投资、防治成效、生态建设和关键因素控制的需求,构造 3 级阶梯框架水土保持综合评价体系,完善综合评价指

标体系;在指标权重确定中,在充分尊重专家经验的基础上结合客观权重,既避免了个人主观因素对评判的误导,又将专家经验知识融入其中^[9-10],并基于博弈论将主客观权重融合构建组合权重;在评价体系上,综合考虑水土保持的多目标优化原则,采用多目标决策的 TOPSIS 法,最后基于评价体系构建障碍因子诊断模型。

基于该方法,本文实证评估了陕西省 3 个建设项目 P_1 , P_2 , P_3 的水土保持综合绩效并进行了障碍因子诊断。结果表明,总体上, P_1 , P_2 和 P_3 的水土保持评价等级分别为良好、良好和较差,且 P_1 好于 P_2 。 P_1 在水土流失防治成效、水保生态建设成效上表现优秀,但在水土流失影响因子控制和水保经济投资控制子系统表现较差,阻碍了综合评价的提升,且扰动土地整治率、林草措施投资比、临时措施投资比和林草植被恢复率是影响 P_1 水土保持综合绩效提高的主要障碍因子; P_2 在水保经济投资控制表现中等,其和水土流失影响因子控制子系统阻碍综合评价的提升,且

土地整治率、单位面积弃渣量、临时措施投资比和林草植被恢复率是影响 P_2 水土保持综合绩效提高的主要障碍因子; P_3 在水土流失防治成效和水保生态建设成效表现较差,其也是阻碍综合评价提升的主要子系统,且扰动土地整治率和水土流失治理度以及扰动土地面积、林草植被恢复率是影响 P_3 水土保持综合绩效提高的主要障碍因子。

本研究将有助于建设项目水土保持综合绩效评价和水土保持方案的系统性优化调整,为建设项目水土保持方案优选提供技术评价体系,为提升建设项目水土保持综合绩效提供借鉴参考。

参考文献:

- [1] 张茨林,谢颂华,曾建玲.江西省人为水土流失现状调查与防治研究[J].农业工程学报,2008,24(8):54-57.
Zhang X L, Xie S H, Zeng J L. Investigation on the state and prevention of artificial soil erosion in Jiangxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(8):54-57.
- [2] 刘菲.基于综合效益的北票市白石厂小流域水土保持评价[J].黑龙江水利科技,2020,48(3):212-215.
Liu F. Evaluation of soil and water conservation in Baishichang small watershed in Beipiao City based on comprehensive benefits[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,2020(3):212-215.
- [3] 王梅,周之豪.水土保持项目综合评价指标体系[J].中国水土保持,1996(1):40-42,58.
Wang M, Zhou Z H. Comprehensive evaluation index system for soil and water conservation projects[J]. Soil and Water Conservation in China, 1996(1):40-42.
- [4] 姜德文.以科学发展观建立开发建设项目水土保持损益评价体系[J].中国水土保持,2005(6):5-7.
Jiang D W. Establishing a system for evaluating the profit and loss of soil and water conservation in development and construction projects with a scientific view of development[J]. Soil and Water Conservation in China, 2005(6):5-7.
- [5] 李怡凤,王继军,连坡,等.“进则全胜”下的水土保持评价指标体系构建[J].水土保持研究,2021,28(2):390-393.
Li Y F, Wang J J, Lian P, et al. Construction of evaluation index system of soil and water conservation under the condition of ‘progress towards victory’[J]. Research of Soil and Water Conservation,2021,28(2):390-393.
- [6] 李刚,秦红玲.综合评价方法及探讨[J].节能,2004(10):12-15.
Li G, Qin H L. Introduce and discussion of comprehensive evaluation methods[J]. Energy Conservation,2004(10):12-15.
- [7] 孙震.基于综合集成赋权法优选城市河道护坡方案[J].水土保持应用技术,2018(4):42-44.
Sun Z. Preferred urban river slope protection scheme based on comprehensive integrated empowerment method [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2018(4):42-44.
- [8] 周雪,左忠义,程伟.基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J].中国安全科学学报,2020,30(S1):158-164.
Zhou X, Zuo Z Y, Cheng W. Safety evaluation of railway passenger transportation based on combined weighting cloud model [J]. China Safety Science Journal, 2020,30(S1):158-164.
- [9] 赵麦换,张翼,杨帆,等.水土保持产业化评价指标体系研究[J].水土保持学报,2003,17(1):5-9.
Zhao M H, Zhang Y, Yang F, et al. Study on evaluation index system of water and soil conservation industrialization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(1):5-9.
- [10] 赵力仪,马国力,祁永新,等.水土保持社会效益的监测与评价[J].人民黄河,2000,22(6):23-25.
Zhao L Y, Ma G L, Qi Y X, et al. Monitoring and evaluation of soil benefit of water and soil conservation [J]. Yellow River,2000,22(6):23-25.
- [11] 尤立,刘平,张俊龙,等.基于熵权的改进 TOPSIS 方法对黄河水土保持生态工程综合效益评估[J].安徽农业科学,2017,45(5):232-235.
You L, Liu P, Zhang J L, et al. Evaluation of social and economic benefits of soil and water conservation project of Yellow River through entropy-weight TOPSIS method[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2017,45(5):232-135.
- [12] 党志良,林启才,史淑娟.水土保持综合治理效益分析与评价:以丹凤县陈家沟小流域为例[J].西北大学学报:自然科学版,2010,40(3):535-539.
Dang Z L, Lin Q C, Shi S J. Benefit analysis and evaluation for water-soil conservation treatment: A case study on Chenjiagou watershed[J]. Journal of Northwest University: Natural Science,2010,40(3):535-539.
- [13] Luo H, Hu X, Xie Y, et al. Constructions of an evaluation framework for soil and water conservation techniques[J]. Catena,2020,186:104378.
- [14] 桂凌,张征,闫国振,等.基于遗传神经网络的鄂尔多斯沙棘水土保持功能评价[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):136-140.
Gui L, Zhang Z, Yan G Z, et al. Evaluation on soil and water conservation function of seabuckthorn forest in ordos with genetic algorithms artificial neural networks[J]. Journal of Arid and Resources and Environment,2012,26(7):136-140.
- [15] 周科平,林允,邓红卫,等.熵权-云模型对岩爆等级的预测[J].中国有色金属学报,2016,26(7):1995-2002.
Zhou K P, Lin Y, Deng H W, et al. Prediction of rock burst classification using cloud model with entropy

- weight[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7):1995-2002.
- [16] 李明亮, 李克钢, 刘月东, 等. 基于变异系数与序关分析法-多维正态云模型的岩爆预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2):3395-3402.
- Li M L, Li K G, Liu Y D, et al. Rock burst prediction based on coefficient of variation and sequence analysis-multidimensional normal cloud model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2):3395-3402.
- [17] 李绍红, 王少阳, 朱建东, 等. 基于权重融合和云模型的岩爆倾向性预测研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6):1075-1083.
- Li S H, Wang S Y, Zhu J D, et al. Prediction of rock burst tendency based on weighted fusion and improved cloud model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6):1075-1083.
- [18] 闫超, 张娜娜, 赵言文. 江苏省输变电类生产建设项目水土保持综合评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2):120-123.
- Yan C, Zhang N N, Zhao Y W. Comprehensive evaluation of soil and water conservation in power transmission engineering projects of Jiangsu Province[J]. Bulletin of Soil Water Conservation, 2014, 34(2):120-123.
- [19] 李海文, 鲍学英. 川藏铁路高原脆弱区沿线受损生态空间修复状况综合评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9):2412-2422.
- Li H W, Bao X Y. Comprehensive evaluation of the restoration status of damaged ecological space along the fragile area of the Sichuan-Tibet Railway Plateau[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9):2412-2422.
- [20] 雷勋平, Robin Qiu, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13):243-253.
- Lei X P, Qiu R, Liu Y. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13):243-253.
- [21] 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.
- Zeng X T, Li Y P, Cui L, et al. Evaluation of operation and management on soil and water conservation project based on entropy TOPSIS method[J]. Yellow River, 2015, 37(5):80-83.
- [22] 梁昌勇, 戚筱雯, 丁勇, 等. 一种基于 TOPSIS 的混合型多属性群决策方法[J]. 中国管理科学, 2012, 20(4):109-117.
- Liang C Y, Qi X W, Ding Y, et al. A hybrid multi-criteria group decision making with TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(4):109-117.
- [23] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):238-249.
- Xin G X, Yang C X, Yang Q Y, et al. Post-evaluation of well-facilitated capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1):238-249.
- [24] 袁磊, 陈国平, 罗宇. 中国西南典型山区县级耕地地力评价与分级[J]. 国土资源科技管理, 2017, 34(6):82-93.
- Yuan L, Chen G P, Luo Y. Evaluation and classification of cultivated land fertility in inaccessible mountainous areas of Southwest China [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2017, 34(6):82-93.

(上接第 457 页)

- [17] 苏江霖, 徐红丹. 关于渠南灌区现代化建设与发展的思考[J]. 中国水利, 2015(3):41-42, 55.
- Su J L, Xu H D. Thoughts on the modernization construction and development of Qunan Irrigation area [J]. China Water Resources, 2015(3):41-42, 55.
- [18] 胡锦辉, 孙勇. 江苏高邮灌区: 打造“用水早知道”品牌, 服务灌区“农事早安排”[J]. 中国水利, 2019(24):144-147.
- Hu J H, Sun Y. Gaoyou Irrigation District, Jiangsu: Build the brand of “water early know”, and serve the irrigation area “agricultural early arrangement” [J]. China Water Resources, 2019(24):144-147.
- [19] 及茹, 张弦, 李国胜. 粮食主产区水土资源匹配、承载力及影响因素分析[J]. 人民长江, 2021, 52(8):105-112.
- Ji R, Zhang X, Li G S. Analysis of soil and water resources matching, carrying capacity and influencing factors in major grain producing areas[J]. Yangtze River, 2019, 52(8):105-112.
- [20] 李怡. 基于生态足迹法的延边州水土资源承载力时空变化及耦合协调分析[D]. 吉林省延边朝鲜族自治州: 延边大学, 2021.
- Li Y. Spatial and Temporal Variation and Coupling Coordination Analysis of Soil And Water Resource Carrying Capacity in Yanbian Prefecture Based on Ecological Footprint Method [D]. Yanbian Korean Autonomous Prefecture, Jilin: Yanbian University, 2021.