

# 开发建设项目生态修复环境效益评价

于坤霞<sup>1</sup>, 刘 昱<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 王岩博<sup>1</sup>, 张晓明<sup>3</sup>, 解 刚<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘 要:** [目的] 近年来煤炭等开发建设项目引起的环境问题日渐成为全社会关注的焦点, 评价生产建设项目生态修复效益, 量化生产建设项目水土保持生态工程的效果, 旨在为今后开发建设项目评价提供可参考的技术与经验。[方法] 以陕西省子长县永兴煤矿资源整合项目为例, 建立开发建设项目水土保持生态修复效益评价体系, 计算了各评价指标在不同建设时期的隶属度值, 分别采用主成分分析法和层次分析法计算指标权重, 并根据拉格朗日乘法对指标权重进行了综合, 最后采用生态效益指数对开发建设项目生态修复环境效益进行综合评价。[结果] 考虑了主客观信息在内的拉格朗日乘法计算得到的综合权重能够反映出开发建设项目各建设时期不同指标的特点; 基于综合权重计算得到的生态效益指数显示该项目在建设前期生态效益指数最高, 而试运行期的生态效益指数 0.392 高于施工期 0.318, 表明生态修复工程在试运行期开始发挥了水土保持效益。[结论] 提出的生态修复效益评价体系及方法可行, 可以为其他生产建设类项目生态效益评价提供一定的参考。

**关键词:** 开发建设项目; 生态修复; 评价指标; 评价模型; 生态效益指数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)04-0155-07

中图分类号: S157.2

**文献参数:** 于坤霞, 刘昱, 李鹏, 等. 开发建设项目生态修复环境效益评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4):155-161. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.026. Yu Kunxia, Liu Yu, Li Peng, et al. Environmental benefits evaluation of ecological restoration in construction projects[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4):155-161.

## Environmental Benefits Evaluation of Ecological Restoration in Construction Projects

YU Kunxia<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>,  
WANG Yanbo<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>3</sup>, XIE Gang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. State Key Laboratory of

Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,

CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of

Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** [Objective] In recent years, environmental problems caused by coal and other construction projects have become the focus of the whole society, while evaluating the benefit of ecological restoration in construction projects and quantifying the effect of soil and water conservation in the construction projects can provide reference for the construction project evaluation in the future. [Methods] Taking resource integration project at Yongxing coal mine in Zichang County, Shaanxi Province as an example, the benefit evaluation system of soil and water conservation and ecological restoration for construction projects has been established, the

收稿日期: 2018-06-21

修回日期: 2018-07-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄河流域水沙变化趋势集合评估”(2016YFC0402407); 水利部公益性行业科研专项经费“生产建设项目水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045); 国家自然科学基金项目(51779204)

第一作者: 于坤霞(1989—), 女(汉族), 河南省新乡市人, 博士, 讲师, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: yukunxia@126.com。

通讯作者: 李鹏(1974—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: lipeng74@163.com。

values of different evaluation indexes in different construction periods have been scaled, the weights of the indexes which are calculated by the principal component analysis and the analytic hierarchy process method have been synthesized according to the Lagrange multiplier method, and the benefit index is finally used to make a comprehensive analysis of the environmental benefits of ecological restoration. [Results] The comprehensive weight calculated by the Lagrange multiplier method, which considers the subjective and objective information, can reflect the characteristics of the different indexes in the construction projects during each construction period. The ecological benefit index based on the comprehensive weight calculation shows that the ecological benefits index of this project in the early stage is the highest, while the ecological benefit index of the trial operation period is 0.392, which is higher than the construction period 0.318. The ecological restoration project began to play the role of soil and water conservation in the trial operation period. [Conclusion] The evaluation system and evaluation method of ecological restoration benefit proposed in this paper are feasible, which can provide a certain reference for other production and construction projects.

**Keywords: construction projects; ecological restoration; evaluation index; evaluation model; soil and water conservation**

在人类社会经济快速发展的同时,需要的资源量也日渐增加,煤炭等资源的大量开发所引起的环境问题也越来越突出,生态环境问题也渐渐成为全社会关注的焦点。陕北地区自然资源丰富,蕴藏着丰富的煤炭、天然气等能源资源,但在煤炭资源的开采过程中会直接破坏土地资源、减少耕地面积、破坏当地景观环境,从而产生了大量的煤渣废弃地,难以实现土地可持续性利用<sup>[1]</sup>,引发一系列生态环境问题。

生态修复工程的植被措施和工程措施可有效减少工程建设项目区的水土流失,项目建成后,可有效发挥防风固沙、改善小气候、保持水土、减轻水旱灾害、保护野生生物等作用<sup>[2]</sup>。对开发建设项目的生态修复效益工程进行科学合理的评价,国内外许多学者从不同方面提出了许多关于水土保持生态效益评价的思路<sup>[3]</sup>,我国对于开发建设项目生态修复的研究开始于 20 世纪 50 年代,此后潘叶等<sup>[4]</sup>对南京幕府山矿山废弃地建立生态修复效益评价指标体系,再逐层用 TOPSIS 法综合、定量评价了各生态修复区的生态修复效益;刘瑞禄等<sup>[5]</sup>坚持客观性和系统性原则,采用定量方法,对赤水市水土保持生态修复工程的修复效益评价方法进行了探索;陈梓玄等<sup>[6]</sup>采用层次分析法,以府谷县新田煤矿为例,建立了开发建设项目生态修复效益时间、空间的动态评价模型,并对该煤矿的生态修复效益进行了评价;金一鸣<sup>[7]</sup>对太行山山脉北端黄院采石场采用主成分分析法和聚类分析法,进行了矿山废弃地工程绿化技术模式生态修复效益研究。

总结前人的研究发现,对于建设项目的生态效益评价主要采用的方法为层次分析法、主成分分析法

等,且大多数研究对于评价指标权重的计算仅采用其中一种研究方法,这样使用单一的指标来评价复杂的系统,会使分析结果带有一定的片面因素,例如层析分析法的主观性较大,指标重要程度难以界定;主成分分析法能够很好地进行多指标综合分析但分析结果没有明确的范围,只能反映强弱关系<sup>[8]</sup>等。拉格朗日乘子法能够很好地解决主客观权重组合的问题<sup>[10]</sup>。因此,本研究采用拉格朗日乘子法将主成分分析法和层次分析法计算的生产建设项目生态效益指标权重进行优化处理,将得到的最优权重应用于所建立的生态效益动态评价模型中,对项目的水土保持动态效益进行分析。本研究旨在评价生产建设项目水土保持监测效益,量化生产建设项目水土保持生态工程的效果,为今后类似的建设项目提供可参考的技术与经验。

## 1 项目区概况

### 1.1 项目概况

陕西省子长县永兴煤矿位于子长县余家坪乡余家沟村,属煤炭资源整合类项目,由陕西省子长县永兴煤矿有限公司投资建设,项目区地理位置介于东经 109°36'17"—109°38'46",北纬 37°04'26"—37°05'23"。永兴煤矿资源储藏量 20.420 Mt,设计可采储量 9.951 Mt,生产能力为 0.60 Mt/a,服务年限 13 a,建设总工期为 15 个月(2014 年 1 至 2015 年 3 月)。项目区隶属陕北黄土高原中部,属典型的黄土梁峁地貌景观,地势总体呈西北高,而往东南逐渐降低,海拔 1 150~1 315 m,相对高差 165 m。项目区内土壤类型主要为黑垆土,成土母质为黄绵土,整合区属大陆性暖温带半干旱气候,植被属典型的干旱草原型植

被,由于本区气候寒冷、干旱、多风沙,现有植被以乔木林、灌木林和草本植物为主。

### 1.2 水土流失概况及措施

子长县属于陕西省黄土丘陵沟壑拦沙保土区,参考“陕西省重点防治区划分结果”,该项目区属于陕北丘陵重点治理区,主要由矿井工业场地、风井工业场地、炸药库、排矸场、场外道路、供电与通信工程线路、供水管线 7 部分组成。因此将水土流失成因类型分为施工开挖型、渣土堆置型、转运抛洒型、粉尘污染型 4 种类型。本项目对水土流失的影响主要表现为在矿产资源开发中对地表土壤结皮和植被的不断破坏,项目施工期水土流失的主要特点为:①人为影响占主导性;②侵蚀物质具有多样性;③流失过程具有动态性;④流失时间具有持续性。

项目水土保持方案设计工程措施主要为截排水沟、沉砂池、土地整治、拦矸坝、急流槽、渗水盲沟、消力池、挡土埂等内容;植被绿化措施主要包括工业场地的绿化美化、水保各个分区的植物措施防护以及临时用地的植被恢复;项目水土保持方案设计的水土保持临时措施有临时拦挡、临时防尘网苫盖以及临时排水。

## 2 研究数据及方法

### 2.1 研究数据

本文研究数据来自于陕西省子长县永兴煤矿、天顺煤矿、永明煤矿、新田煤矿、麦地掌煤矿的实时监测数据,包括资源整合工程的特性、水土保持措施实施情况以及工程实施各阶段水沙流失防治等项目数据。

### 2.2 生态修复效益评价指标体系标准化处理

本文结合开发建设项目特点以及陕北地区水沙、植被、经济等特点<sup>[11]</sup>,基于现有的大量统计数据 and 数据分析,最终选取具有一定层次结构、不同量纲的多个评价因子来建立效益综合评价体系。水保生态修复效益评价体系采用层次分析法建立,通过分析效益评价所包含因子的相互关系,将待评价因子分解为目标层(A)、准则层(B)、变量层(C)3个层次的要素,构成递阶层次结构。本项研究中共选取了 14 个变量指标,既反映了生态恢复的绝对量和相对数量效应,又反映了生态建设恢复后生态环境的逐步恢复情况。依据所建立的生产建设项目水土保持生态效益指标评价体系,对各项评价指标进行量化<sup>[12]</sup>,各定量指标隶属的效益评价指标类型如图 1 所示。

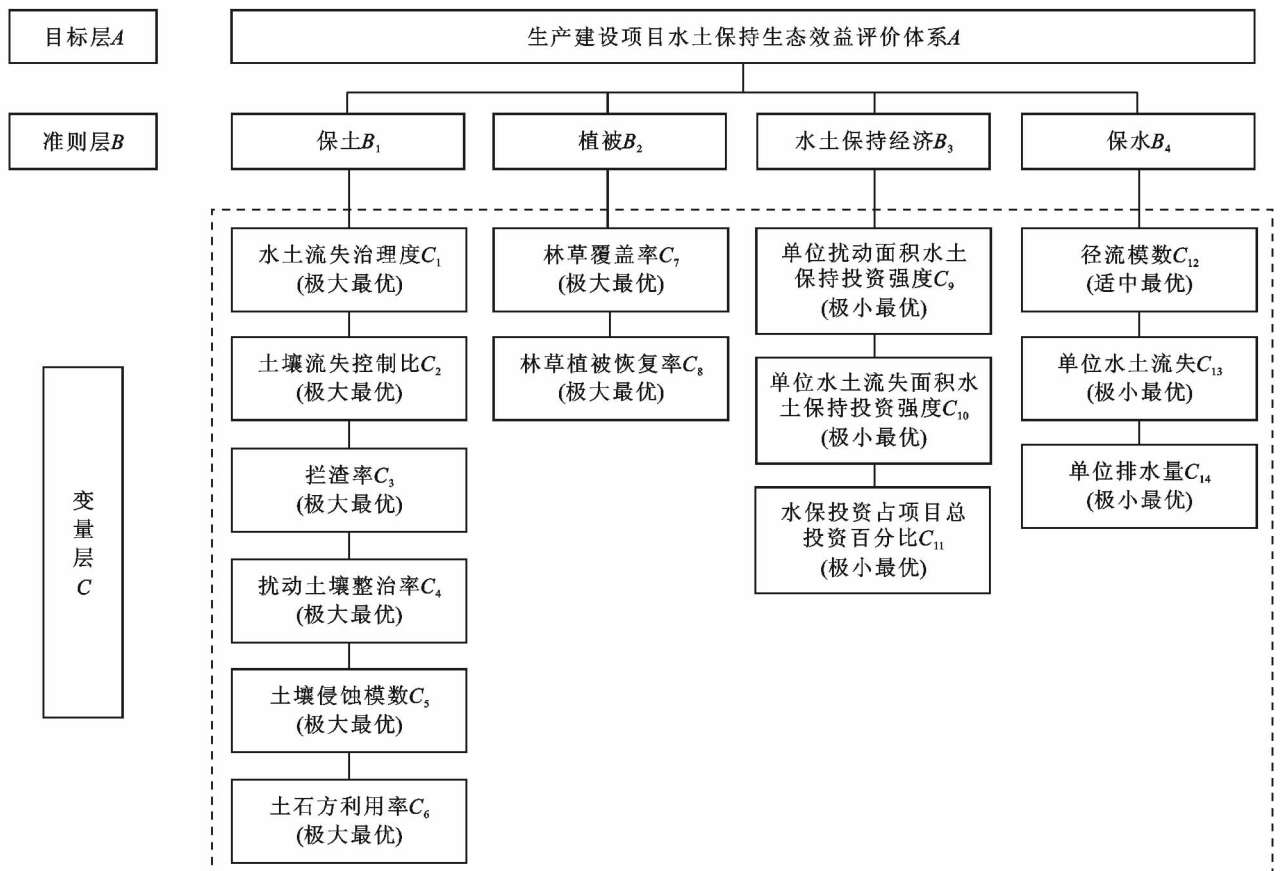


图 1 生产建设项目水土保持生态效益评价指标体系

各指标隶属度类型计算公式为:

$$\text{极小最优型: } x_i' = |x_i - x_{\max}| / x_{\max} - x_{\min} \quad (1)$$

$$\text{极大最优型: } x_i' = |x_i - x_{\min}| / x_{\max} - x_{\min} \quad (2)$$

$$\text{适中最优型: } x_i' = |x_i - \bar{x}| / x_{\max} - x_{\min} \quad (3)$$

### 2.3 生态修复效益综合评价数学模型

前人的研究多采用生态效益指数来评价生产建设项目水土保持生态修复所带来的效益<sup>[13]</sup>。生态效益指数为无量纲数,是根据各个指标的综合得分对生产建设项目水土保持生态修复进行效益评价,是经济、社会和生态效益的统一,计算模型为:

$$N = \sum_{i=1}^n W_i \cdot R_i \quad (4)$$

式中: $N$ ——生态效益指数; $W_i$ ——第 $i$ 项指标权重; $R_i$ ——第 $i$ 项指标隶属度值。

其中各项指标的隶属度采用指数法进行计算。对于指标权重的计算,层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)是一种将定性分析与定量分析相结合的研究方法,是研究者对较为复杂系统的决策方式进行简化的过程。该方法将复杂问题分解为几个层次和多个因素,通过分析各指标之间的关系、建立对比矩阵,进行因素之间的比较和相应计算,便可得出不同指标的权重大小<sup>[14-15]</sup>,其存在较大的主观性。而主成分分析法<sup>[16]</sup>则是从客观的角度对个指标的权重进行计算,主要运用降维的思想,将原有多个相关性较强的指标进行重新组合,生成少数几个彼此不相关的指标,并使这些较少的综合指标尽可能多地反映

原来指标的信息,而且彼此之间互不相关,避免了指标选取过程中的主观性。

对于同一个评价体系而言,应使得主客观权重信息均考虑在内,且主客观权重尽可能接近,因此需要计算考虑主客观信息在内的综合权重。最小鉴别信息原理<sup>[9]</sup>可以用来解决约束条件下的最优化问题,根据最小鉴别信息原理可以建立起综合权重、主观权重及客观权重三者之间的目标函数 $F$ 为:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^n W_i \left\{ \frac{\ln(W(i))}{W_1(i)} \right\} + \sum_{i=1}^n W(i) \left\{ \frac{\ln W(i)}{W_2(i)} \right\} \quad (5)$$

式中: $W_i$ ——拉格朗日乘子法计算的第 $i$ 项权重; $W_1(i)$ ——层次分析法计算的第 $i$ 项权重; $W_2(i)$ ——主成分分析法计算的第 $i$ 项权重。下同。

在求解 $F_{\min}$ 时引入拉格朗日乘子法进行计算可以得到方程的最优解,以此对两种方法下的主客观权重进行优化处理,得出最符合需要的各指标权重,拉格朗日乘子法求解公式为<sup>[10]</sup>:

$$W_i = \frac{[W_1(i)W_2(i)]^{0.5}}{\sum_{i=1}^m [W_1(i)W_2(i)]^{0.5}} \quad (6)$$

## 3 生态修复效益评价指标权重分析

### 3.1 主成分指标权重分析

3.1.1 主成分提取 应用 IBM SPSS 21.0 分析软件,采用主成分分析法对施工前、施工期和试运行期 3 个时期的动态生态效益评价指标进行主成分提取,计算结果详见表 1。

表 1 项目各时期评价指标主成分提取

时期	主成分	特征值	方差/%	累积/%	主成分载荷
施工前期	1	2.595	86.510	86.510	$Z_1 = 0.594 * C_5 + 0.012 * C_{12} + 0.605 * C_{13}$
	2	2.436	60.895	60.895	$Z_1 = 0.587 * C_5 + 0.108 * C_{12} + 0.542 * C_{13}$
施工期	1	1.413	35.334	96.230	$Z_2 = 0.774 * C_{14}$
	2	5.124	36.598	36.598	$Z_1 = 0.390 * C_3 + 0.364 * C_6 + 0.436 * C_7 + 0.429 * C_8$
运行期	1	4.833	34.523	71.121	$Z_2 = 0.359 * C_4 + 0.407 * C_5 + 0.337 * C_9 + 0.342 * C_{10} + 0.352 * C_{11} - 0.319 * C_{12} + 0.370 * C_{13}$
	2	2.530	18.068	89.189	$Z_3 = 0.424 * C_1 + 0.514 * C_{14}$

注: $Z_1, Z_2, Z_3$  分别表示各工程阶段监测指标的第 1, 2, 3 主成分。

在施工前期由于建设项目未开工,因此所监测的指标只有土壤侵蚀模数、径流模数、水土流失量 3 个指标。从表 1 可知,第 1 个指标对应的特征根大于 1,提取一个指标的累积方差贡献率为 86.510%,超过 80%。因此,第一个指标可以反映全部指标的信息,可以代替原来的 3 个指标。根据主成份对原来指标的荷载数,可知 3 个指标均为重要指标。在施工期对建设项目区生态修复监测的指标为土壤侵蚀模数、径流模数、水土流失量、排水量 4 个。前 2 个指标对应

的特征根大于 1,提取前 2 个指标的累积方差贡献率达到 96.230%,超过 80%,因此前 2 个指标基本可以反映全部指标的信息,可以用来代替原来的 4 个指标。

由表 1 计算的主成分矩阵可将土壤侵蚀模数、径流模数、水土流失量 4 个指标归为第一指标,即为最主要指标;排水量为第 2 指标,即为次主要指标。在试运行期,项目监测指标为全部 14 个指标,前 4 个指标对应的特征根大于 1,前 3 个指标的累积方差贡

献率达到 89.189%, 超过 80%。因此, 提取前 3 个指标基本可以反映全部指标的信息, 可以代替原来的 14 个指标。由表 1 可知, 第 1—3 指标与第 4 指标对原来指标的荷载数, 将拦渣率、林草覆盖率、林草植被恢复率、土石方利用率归为第 1 主成分, 即为最重要指标; 扰动土地整治率、土壤侵蚀模数、单位扰动面积水土保持投资强度、单位水土流失面积水土保持投资强度、水保投资占项目总投资百分比、径流模数、单位水土流失量为第 2 主成分, 即为次重要指标; 水土流失治理度、排水量为第 3 主成分, 即为若重要指标; 土壤流失控制比为第 4 主成分, 即为最弱重要指标。

3.1.2 主成分指标权重计算 根据以上主成分分析

表 2 项目各阶段指标权重计算

项目阶段	内容	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$
施工前期	综合得分	—	—	—	—	0.594	—	—	—	—	—	—	0.012	0.605	—
	指标权重	—	—	—	—	0.490	—	—	—	—	—	—	0.01	0.500	—
施工期	综合得分	—	—	—	—	0.483	—	—	—	—	—	—	0.211	0.489	0.429
	指标权重	—	—	—	—	0.300	—	—	—	—	—	—	0.131	0.303	0.266
试运行期	综合得分	0.138	0.170	0.170	0.070	0.225	0.231	0.184	0.192	0.257	0.219	0.055	0.039	0.253	0.009
	指标权重	0.063	0.077	0.077	0.031	0.102	0.104	0.083	0.087	0.116	0.099	0.025	0.018	0.114	0.004

注:“—”表示无结果。下同。

### 3.2 层次分析法指标权重计算

根据专家打分结构构造判断矩阵, 计算不同时期生态修复各指标的权重。计算确定准则层的  $B_1, B_2, B_3, B_4$  的权重分别为 0.27, 0.42, 0.20 和 0.11, 在各层次单排序均满足一致性检验的基础上, 对得出的权重进行归一化处理, 最终结果详见表 3。由表中计算可知, 层次总排序的一致性比率  $CR=0.021 < 0.1$ , 则

的方差贡献率与线性组合系数的加权平均得到施工前期, 施工期, 试运行期 3 个不同时段各评价指标的综合得分, 根据综合得分确定各指标权重, 其计算结果详见表 2。指标的综合得分越高, 权重越大, 对生态修复效益评价的影响越大。表 2 中表明, 在施工前期单位水土流失量与土壤侵蚀模数对生态修复效益评价影响最明显, 径流模数次之; 在施工期水土流失量、排水量、土壤侵蚀模数 3 个指标对生态修复效益评价的影响基本一致, 对效益评价较为重要, 径流模数次之; 在试运行期, 单位水土流失量、单位扰动面积水土保持投资强度及土石方利用率等对效益评价较为重要, 其他指标次之, 单位排水量的影响最弱。

认为层次总排序的计算结果具有满意的一致性。对比表 2 和表 3 发现, 在施工前期及施工期, 对应指标对于生态修复效益评价的影响权重在重要程度上表现一致; 在试运行期, 土壤侵蚀模数、土石方利用率、单位扰动面积水土保持投资强度及单位水土流失量的权重降低, 林草覆盖率及林草植被恢复率的权重升高, 并成为对效益评价最为重要的指标。

表 3 层次分析法权重计算

项目阶段	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$
施工前期	—	—	—	—	0.507	—	—	—	—	—	—	0.021	0.478	—
施工期	—	—	—	—	0.262	—	—	—	—	—	—	0.189	0.304	0.245
试运行期	0.045	0.05	0.05	0.044	0.04	0.04	0.209	0.209	0.066	0.084	0.053	0.067	0.037	0.02

注:层次总排序一致性:  $CI=0, RI=1.022, CR=0.021 < 0.1$ 。

### 3.3 拉格朗日乘法权重优化处理

以上主成分分析和层次分析法计算的权重均带有一定的片面因素, 因此利用拉格朗日乘法对各权重进行优化处理, 以得出最符合需要的各阶段指标权重, 根据公式(6)计算结果详见表 4。

## 4 生产建设项目动态生态修复效益评价

### 4.1 水土保持生态效益指标隶属度计算

将生产建设项目水土保持生态效益评价的各

指标进行标准化处理, 按定量指标隶属的效益评价类型(图 1), 对照与永兴煤矿较为类似的其他 4 个煤矿(天顺煤矿、永明煤矿、新田煤矿、麦地掌煤矿), 将不同功能区的隶属度值进行累加, 对应公式(1)—(3)计算各指标在施工前期, 施工期, 试运行期 3 个阶段的隶属度。由于项目的推进, 建设开发区的水土保持环境不断变化, 各项指标受工程进展影响表现出在不同施工时期的隶属度值各不相同, 具体结果详见表 5。

表 4 拉格朗日乘子法权重优化处理

项目阶段	权重	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$
施工前期	$W_1(i)$	—	—	—	—	0.507	—	—	—	—	—	—	0.015	0.478	—
	$W_2(i)$	—	—	—	—	0.490	—	—	—	—	—	—	0.010	0.500	—
	$W$	—	—	—	—	0.499	—	—	—	—	—	—	0.012	0.489	—
施工期	$W_1(i)$	—	—	—	—	0.262	—	—	—	—	—	—	0.189	0.304	0.245
	$W_2(i)$	—	—	—	—	0.300	—	—	—	—	—	—	0.131	0.303	0.276
	$W$	—	—	—	—	0.280	—	—	—	—	—	—	0.157	0.303	0.260
试运行期	$W_1(i)$	0.045	0.050	0.050	0.044	0.040	0.040	0.209	0.209	0.066	0.084	0.053	0.067	0.037	0.020
	$W_2(i)$	0.063	0.077	0.077	0.031	0.102	0.104	0.083	0.087	0.116	0.099	0.025	0.018	0.114	0.004
	$W$	0.057	0.067	0.067	0.040	0.068	0.069	0.141	0.145	0.094	0.098	0.039	0.037	0.070	0.010

注: $W_1(i)$ 为层次分析法权重; $W_2(i)$ 为主成分分析法权重; $W$ 为拉格朗日乘子法权重。

表 5 不同时期各指标的隶属度

项目阶段	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$
施工前期	—	—	—	—	0.688	—	—	—	—	—	—	0.326	0.440	—
施工期	—	—	—	—	0.211	—	—	—	—	—	—	0.326	0.467	0.255
试运行期	0.198	0.675	0.133	0.197	0.710	0.097	0.065	0.127	0.740	0.644	0.566	0.326	0.869	0.956

## 4.2 生产建设项目动态生态修复效益评价

综合以上计算结果,利用开发建设项目生态修复效益综合评价数学模型,由公式(4)计算永兴煤矿资源整合生态修复动态效益指数  $N$ ,并与层次分析法及主成分分析法的计算结果进行比较。计算结果详见表 6。由表 6 可知,3 种方法下所得的项目阶段性效益指标差别不大,均表现为施工前期最大,施工后运行期的生态效益指数大于施工期,虽然土壤侵蚀模数、径流模数和单位水土流失量指标在试运行期得到了很好的控制,但是相比施工前期,试运行期对土地有较大的扰动,因此试运行期生态效益指数仍然低于施工前期。

表 6 不同权重分析方法下项目各阶段生态效益指数计算

方法	施工前期	施工期	试运行期
层次分析法	0.564	0.321	0.336
主成分分析法	0.560	0.318	0.452
拉格朗日权重法	0.562	0.318	0.393

层次分析法在施工前期及施工期内所得项目生态效益指数最高,在试运行期最低;主成分分析法在施工前期及施工期内生态效益指数最低,在试运行期最高;拉格朗日权重法计算结果位于前两者之间,主要在试运行期避免了层次分析法的过低值及主成分分析法的过高值。通过考虑主观客观两种方法,对权重进行优化组合计算得到的各阶段综合生态效益指数分别为 0.562,0.318,0.392。试运行期生态效益指数高于施工期,生态效益指数增长的主要原因是植被措施,工程措施等工程相继建设完成并开始发挥其水土保持效益,计算表明水土保持等措施对建设项目进

行生态修复是有效的。永兴煤矿资源整合建设项目区内的水土保持设施运行良好,已实施的水土保持措施防治范围能够满足防治水土流失的需要,各项指标的整治结果如下:扰动土地整治率 97%、水土流失总治理度 92%、拦渣率 98%、土壤流失控制比 0.53、林草植被恢复率 98%、林草覆盖率 30.89%,基本达到或超过了目标值。根据计算,试运行期土壤流失总量与施工期相比有较大的下降,表明各项水土保持措施正在发挥作用。试运行期各主要扰动区域内土壤流失量均有较大幅度减少,也表明了各类水土流失防治措施产生了相应的水土保持效益。评价结果与工程实际情况相吻合,具有一定的区域适应性。

该项目实施后,虽然所带来的修复效益水平不是很高,但总体上是朝着生态修复的目标进行的。生态恢复工程需要进行长期动态监测和分析,其特点具有渐进性、缓慢性,而该生态恢复工程的监测时间较短,因此试运行期的生态效益指数可能低估了该项目的社会效益。影响修复区域的社会和经济效益的因素很多,而社会和经济效益是综合评价生态修复效益成果的主要影响因素,同时综合评价需要大量的数据和合理健全的评价指标体系,为了使本研究的评价体系、评价精度更加精准,以便更好地评价生态修复工程的社会效益和经济效益,生态修复各指标的需要进行长期监测,在今后的工作中有待进一步提高。

## 5 结论

本研究对陕西省子长县境内永兴煤矿的资源整合项目,以生态效益指数为综合评价指标,建立了建设开发区域不同建设时期下水土保持生态修复效益

指数动态变化的评价体系,并基于该评价体系对项目生态修复效益进行评价,其中使用拉格朗日乘子法对主成分和层次分析法所计算的权重进行优化处理,很好地将主客观计算的权重进行结合使生态修复效益指数值更加准确。

(1) 本研究建立了由1个目标层,4个准则层,14个指标组成的开发建设项目生态修复效益研究指标体系,该体系包括保水效益、保土效益、植被效益及水土保持经济效益4个方面,体系内评价指标和变量均具有相对可靠的来源,且大多可量化、可测度,为研究分析提供了可行性依据。

(2) 根据拉格朗日乘子法下计算所得的指标权重认为,在施工前期,土壤侵蚀模数及单位水土流失量的权重最大,表现出对该项目阶段的影响较大,是因为施工前期因工程开挖等地面破坏工程的进行,使得地表水土流失较大;在施工期内,4个指标的权重差别不大,径流模数的权重明显增加,表现出因工程施工的进行,项目区产流量的增加;在试运行期,林草覆盖率及林草植被恢复率的权重高于其他指标,对项目该阶段的影响最大,究其原因认为是生态修复措施开始发挥效益所致。

(3) 结合开发建设活动的实践,计算出该项目生态恢复效益在施工前期,施工期,试运行期三个阶段的生态效益指数分别为0.562,0.318和0.392,其中试运行期的效益指数是施工期的1.23倍,数据表明在施工期遭到破坏的生态环境由于生态修复工程相继建设完成开始发挥其水土保持效益,生态修复工程使得建设项目区生态环境得到了改善。

#### [参 考 文 献]

[1] 王伟. 矿山生态环境保护与恢复治理评价指标体系的研究[D]. 广东 广州: 中山大学, 2014.  
[2] 张龙, 汤崇军, 喻荣岗. 生态修复工程效益监测与评价研究[J]. 绿色科技, 2013(09): 23-24.

[3] 郭晨晓, 范舒欣, 李晓鹏, 等. 基于 AHP 的城市园林植物群落生态效益评价方法[J]. 山东农林大学学报, 2015, 46(6): 941-946.  
[4] 潘叶, 张燕. 矿山废弃地生态修复效益评价研究: 以南京幕府山为例[J]. 中国水土保持, 2016(5): 61-65.  
[5] 刘瑞禄, 周国富, 龙成昌. 赤水市水土保持生态修复工程生态效益评价研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 82-86.  
[6] 陈梓玄, 李占斌, 李鹏. 陕北府谷新田煤矿开发建设项目生态修复效益动态评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 21-25.  
[7] 金一鸣. 矿山废弃地工程绿化技术模式生态修复效益研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.  
[8] 李春平, 杨益民, 葛莹玉. 主成分分析法和层次分析法在对综合指标进行定量评价中的比较[J]. 南京财经大学学报, 2005(6): 54-57.  
[9] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
[10] 刘冀, 王本德. 基于组合权重的模糊可变模型及在防洪风险评价中应用[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(2): 272-275.  
[11] 魏焕成. 陕北地区煤炭开发生态环境问题研究[J]. 中国煤炭, 2007, 33(1): 24-25.  
[12] 郭静. 开发建设项目水土保持监测与评价研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2008(2): 88.  
[13] 沈慧, 姜凤岐. 水土保持林效益评价研究综述[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 492-496.  
[14] 向欣, 罗煜, 程红胜, 等. 基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 205-212.  
[15] Safari M, Ataei M, Khalokakaie R, et al. Mineral processing plant location using the analytic hierarchy process—a case study: The Sangan iron ore mine(phase 1)[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(5): 691-695.  
[16] 孙健, 魏丽英. 基于均值化主成分分析的交通安全评价方法研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(1): 90-93.

2017, 24(1): 285-290.

[22] 王鹏, 况福民, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 168-172.  
[23] 王磊, 郭灿, 李慧明. 基于 PSR-TOPSIS 模型的宁夏回族自治区土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 154-159.  
[24] 张杨, 严金明, 江平, 等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 252-258.  
[25] 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.  
[26] 吴冠岑, 牛星. 土地生态安全协同演变的机理分析及动态评价: 以淮安市为例[J]. 生态经济, 2012(2): 157-160.  
[27] Su Shiliang, Li Dan, Yu Xiang, et al. Assessing land ecological security in Shanghai(China) based on catastrophe theory[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(6): 737-746.  
[28] 王振山, 张绍良, 陈浮, 等. 城市土地集约利用与生态利用灰色关联分析[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(4): 121-124.