

# 黄土高原小流域坝系规划评价方法研究

许国平<sup>1</sup>, 党维静<sup>2</sup>

(1. 山西省水土保持科学研究所, 山西 太原 030013; 2. 黄河工程咨询监理有限责任公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 根据坝系规划评价的原则和层次分析法, 选取了 3 个层次、9 个指标的坝系规划评价指标体系。通过分析研究得出坝系规划评价指标体系各指标的计算方法, 并确定了各指标的权重值, 最终计算出小流域坝系规划综合指数。计算结果显示, 小流域坝系规划综合指数越大, 经济、社会、生态 3 大效益也越大, 因此在小流域坝系多方案规划中选择综合指数最大的作为优化方案。该方法值得推广使用。

**关键词:** 黄土高原; 坝系规划; 评价方法; 指标体系; 层次分析法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)01-0257-05

中图分类号: S157.3

## Evaluation Method for Dam System Planning in Small Watershed on Loess Plateau

XU Guo-ping<sup>1</sup>, DANG Wei-jing<sup>2</sup>

(1. Shanxi Institute of Soil and Water Conservation, Taiyuan, Shanxi 030013, China;

2. The Yellow River Construction Supervision Consulting Limited Liability Company, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

**Abstract:** According to the evaluation principle of dam system planning and the analytical hierarchy process (AHP), three hierarchies and nine indicators are selected as an evaluation system of dam system planning. Calculation method for each index in the evaluation system of dam system planning is obtained by analyses, weighted value of each index is determined, and finally a comprehensive index of dam system in small watershed is calculated. The computational results show that the greater the comprehensive index in small watershed, the better the economic, social and ecological benefits are. Therefore, the greatest comprehensive index may be selected as the best solution in the schemes for dam system planning in small watershed. The approach can be recommended for practical uses.

**Keywords:** Loess Plateau; dam system planning; evaluation method; index system; analytical hierarchy process (AHP)

针对黄土高原的水土流失问题开展了许多详实深入的研究, 取得了很多重要的成果<sup>[1-5]</sup>。黄土高原是我国水土流失最为严重的地区, 众多国内外学者为解决这一问题进行了大量的实地调查和模型模拟, 研究总结出了许多切实可行的防治水土流失的方案<sup>[6-8]</sup>。随着对这一地区研究的深入, 以小流域为单元, 科学地进行小流域水土流失防治越来越受到人们的重视<sup>[9-11]</sup>。目前对小流域土地利用、植被覆盖或水文状况的研究比较多<sup>[12-16]</sup>, 但对小流域坝系规划, 及其规划评价方法的定量研究相对较少。

本研究拟采用层次分析法, 同时结合小流域社会、经济、生态环境等方面的具体情况, 从诸多规划方案中选出优化方案, 为小流域坝系工程规划评价提供

科学的量化依据, 为黄土高原小流域坝系工程的科学规划和建设提供技术支持。

## 1 黄土高原小流域坝系规划评价

### 1.1 评价方法与指标的选取

影响和反映小流域坝系规划方案评价指标的直接和间接因素很多, 一般不可能将所有因素都考虑在内, 因此就要对众多的指标因素进行选取。选取指标时既要考虑所选指标具有一定代表性和可操作性, 又要保证所选指标能全面、客观、准确地反映小流域坝系的各个方面, 同时尽量多选取直接指标, 少选取间接指标, 多选取定量指标, 少选用定性指标。层次分析法(AHP)主要是先把复杂问题分解成若干个组成

要素,并将这些要素按支配关系进行分组以形成有序的递阶层次结构,然后通过两两对比判断的方式确定每一层次中各要素的相对重要性程度,最后在递阶层次结构内进行合成得到决策因素相对于目标层的重要性程度的总排序。黄土高原地区地质地形条件特殊,在规划建设坝系时,要考虑的影响因素较一般地区更多,坝系规划也更复杂。基于各个成分要素相互对比递阶合成,继而得到更高层次的决策影响要素的层次分析法(AHP)比较适合该地区的坝系规划评价。

小流域坝系规划方案评价指标包括生态、经济和社会多个方面,其中经济方面主要是坝系投资及坝系产生效益等,社会方面主要有淤地面积、保收能力等,生态环境方面主要指泥沙、洪水控制等。结合本研究现有观测和试验数据的实际情况,选取净现值、效益费用比、内部回收率作为经济方面的指标;选取坝系淤地面积、保收率、水资源利用率等作为社会方面的指标;选取坝系中骨干坝面积控制率、骨干坝滞洪库容、泥沙拦截率等作为生态环境方面的指标。盐沟流域坝系规划优选层次分析模型如图 1 所示。

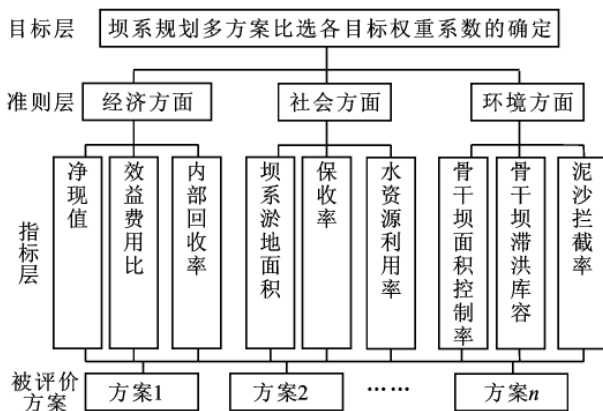


图 1 坝系规划优选层次分析模型

## 1.2 评价指标数据的获取方法

### 1.2.1 经济方面指标

(1) 净现值(NPV)。用所选贴现率将计算期内各年净效益折算到基准年的现值之和表示。净现值其大于零时,说明项目经济可行。其计算公式为:

$$NPV = \sum_{j=0}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} \quad (1)$$

式中:NPV——净现值;CF<sub>j</sub>——第j年的现金流量,现金流入为正值,现金流出为负值;i——基准收益率。

(2) 效益费用比。指在选定贴现率时,项目效益与项目成本的现值之比。当其比值大于1时,说明该项目是经济可行的。

(3) 内部回收率。以项目计算期内各年净效益现值累计等于零时的折现率表示。内部收益率大于或等于社会贴现率且其数值越高时,说明项目经济可行性越好。内部收益率常采用插值法进行计算。其插值法的计算公式为:

$$i_0 = i_1 + \frac{|NPV_1|(i_2 - i_1)}{|NPV_1| + |NPV_2|} \quad (2)$$

式中:i<sub>0</sub>——插值后得到的内部收益率;i<sub>1</sub>,i<sub>2</sub>——两个收益率,它们之间的差值应小于等于5%;NPV<sub>1</sub>,NPV<sub>2</sub>——i<sub>1</sub>和i<sub>2</sub>所对应的净现值,且NPV<sub>1</sub>和NPV<sub>2</sub>必须为一正一负。

### 1.2.2 社会方面指标

(1) 坝系淤地面积。规划水平年年末流域内最大新增地面积A(hm<sup>2</sup>),可采用下式计算:

$$A = \eta \frac{\sum K_i}{\omega} \quad (3)$$

式中:A——坝系新增坝地面积(hm<sup>2</sup>);η——淤地折算系数,为已建淤地坝实地统计的淤地模数与设计淤地模数之比,当调查资料来源于研究流域或来源于地形条件十分相似的流域时,可取为1;ω——设计淤地模数,即设计单位淤地面积所需要的拦泥量(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>);∑K<sub>i</sub>——规划年限内坝系工程量累计新增拦沙量(m<sup>3</sup>)。

(2) 坝地保收率。通过计算次暴雨洪水(10年一遇设计洪水)条件下,一次暴雨洪水形成的淹水深度小于0.7m,次暴雨淹水历时小于3~5d,且坝地泥沙淤积厚度小于0.3m时,认为该生产坝保收,否则就不保收。坝地保收率是计算了所有骨干坝在计算期的30a内其保收面积与总面积之比的平均值。

(3) 水资源利用率。仅对骨干坝和作为蓄水用的淤地坝的水资源利用情况进行分析。对没有溢洪道的骨干坝,当泥沙淤积量达到设计淤积库容时,就认为不具备蓄水能力。分别计算、分析各坝每个时段末的水资源利用情况,计算期30a,划分为6个时段,分析坝系在开始建设后的第5,第10,第15,第20,第25和第30a末坝系的水资源利用率。取其平均值就是本次计算中所用指标值。

### 1.2.3 生态环境方面指标

(1) 骨干坝面积控制率。坝系控制面积是坝系规模的一个重要指标,是坝系经济评价,防洪保收分析及相对稳定布局评价的基础。骨干坝面积控制率为坝系控制面积与小流域面积的比值,反映了坝系对小流域洪水泥沙的控制程度,体现了坝地生产运行及防洪保收的能力,是衡量坝系相对稳定的主要指标。

(2) 骨干坝总滞洪库容。骨干坝总滞洪库容是

各个骨干坝的滞洪库容之和。根据骨干坝在流域坝系运行中的作用确定工程枢纽;根据工程的枢纽组成分别计算骨干坝的滞洪库容。

对由坝体、涵卧管放水建筑物组成的“两大件”工程,滞洪库容按一次校核洪水总量确定。对由坝体和溢洪道组成的“两大件”或由坝体、放水建筑物和溢洪道组成的“三大件”工程,应该通过调洪演算确定滞洪库容。

(3) 坝系在淤积年限内总拦沙量(泥沙拦截率)。指到规划水平年年末总新增拦沙能力  $W$ ,可采用下式计算:

$$W = nM_0(F - F_0) \quad (4)$$

式中: $W$ ——坝系总新增拦沙量(t); $M_0$ ——流域平均侵蚀模数[t/(km<sup>2</sup>·a)]; $F$ ——流域坝系工程规划控制面积(km<sup>2</sup>); $F_0$ ——流域坝系工程已控制面积(km<sup>2</sup>); $n$ ——规划年限,一般取 20~30 a。

泥沙拦截率是指坝系总新增拦沙量与小流域在淤积年限内的产沙量之比。

### 1.3 评价指标权重的确定

为比较准确地确定每个评价指标在整个评价指标体系中所占权重,避免人为确定权重的片面性,在指标的确定过程中,我们邀请了对黄土高原淤地坝坝系工程规划建设富有实践经验的 30 多位专家、学者和工程技术人员,参加了坝系工程规划评价系统研究专家答卷工作,由专家评议出每个指标的相对重要性,在此基础上为每个评价指标赋分,最后利用层次分析法对评价结果进行处理,以得到一个合理的权重结果。应用层次分析法确定的各项坝系规划评价指标的权重值见表 1。

表 1 各评价指标的加权值

评价准则	加权值	评价指标	加权值
经济方面	0.414	净现值	0.436
		效益费用比	0.424
		内部回收率	0.140
社会方面	0.182	坝系淤地面积	0.108
		坝地保收率	0.633
		水资源利用率	0.259
生态方面	0.404	骨干坝面积控制率	0.202
		骨干坝滞洪库容	0.081
		泥沙拦截率	0.717

### 1.4 评价指数模型的构建

为使坝系规划综合指数能够比较全面地反映经济、社会、生态方面的效益,首先分别构建经济、社会和生态环境等单项指数模型,再采用加权值乘法计算综合指数。

$$\text{经济指数模型的构建: } N_1 = \sum_{i=1}^3 W_{1i} R_{1i} \quad (5)$$

$$\text{社会指数模型的构建: } N_2 = \sum_{j=1}^3 W_{2j} R_{2j} \quad (6)$$

$$\text{生态环境指数模型的构建: } N_3 = \sum_{k=1}^3 W_{3k} R_{3k} \quad (7)$$

综合指数模型的构建:

$$N = N_1^{W_{b1}} \cdot N_2^{W_{b2}} \cdot N_3^{W_{b3}} \quad (8)$$

式中: $N$ ——小流域坝系规划综合指数; $W_{b1}, W_{b2}, W_{b3}$ ——准则层 3 种效益的加权值; $N_1, N_2, N_3$ ——小流域坝系规划方案中的“经济方面”、“社会方面”和“生态方面”综合数量评价; $R_{1i}, W_{1i}$ ——“经济方面”的各指标评价标准化的数量及加权值; $R_{2j}, W_{2j}$ ——“社会方面”的各指标评价标准化的数量及加权值; $R_{3k}, W_{3k}$ ——“生态方面”的各指标评价标准化的数量及加权值。

多方案评价时,计算得出的小流域坝系规划综合指数越大,经济、社会、生态 3 大效益也越大,因此选择多方案中  $N$  值最大的作为优化方案。

## 2 盐沟流域坝系布局方案及其效果评价

### 2.1 盐沟流域概况

盐沟流域位于陕西省佳县北部,属黄河一级支流秃尾河流域下游右岸的一级支沟,流域总面积 135.74 km<sup>2</sup>,涉及高寨、刘国具 2 个乡,25 个自然村,总人口约 7 114 人。气候类型属温带大陆性气候,多年平均气温 10℃,大于 10℃ 的年积温 3 713.4℃;多年平均日照时数 2 741.7 h,平均蒸发量约为 1 200 mm,年平均相对湿度 54%。该流域多年平均降水量 428.9 mm,且多以暴雨形式出现,历时短,强度大,灾害性强,6—9 月降水量占全年降水量的 60% 以上。

流域多年平均径流量  $1.23 \times 10^5$  m<sup>3</sup>,海拔 899~1 239.7 m,地貌类型属黄土峁状丘陵沟壑区。地表土质地疏松,抗蚀性差,在外营力侵蚀作用下,形成了以梁峁为主,沟谷深切,基岩裸露的地貌景观,整个流域范围内地面坡度起伏较大(表 2),水土流失较为严重,土壤侵蚀模数平均值为  $1.5 \times 10^4$  t/(km<sup>2</sup>·a),是秃尾河泥沙的主要源区之一,也是黄河中游粗泥沙集中来源区<sup>[17]</sup>。

### 2.2 坝系布局方案及其效果评价

通过对盐沟流域进行实地调查,根据其坝系的单元属性、控制面积、拦泥、滞洪、库容及淤地面积等方面的情况,在众多规划方案中选取相对较为合理的 2 种典型的规划坝系体系进行对比研究。该流域具体坝系工程数量规模见表 3。

表 2 盐沟流域地面坡度分布

坡度	<5°	5°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
面积/km <sup>2</sup>	5.02	14.80	38.69	44.79	32.44
比例/%	3.70	10.90	28.50	33.00	23.90

表 3 盐沟流域坝系工程数量规模

沟道分类	骨干坝/座				中型坝/座				小型坝/座			合计/座
	现状	新建	加固	小计	现状	新建	加固	小计	现状	新建	小计	
坝系单元												
直控支沟单元	1	4	1	6	1	1	1	3	0	4	4	13
串联支沟单元	—	7	3	10	—	2(3)	1	3(4)	—	7	7	20(21)
串联主沟单元	—	3(1)	1	4(2)	—	7	—	7	—	7	7	18(16)
合计	1	14(12)	5	20(18)	1	10(11)	2	13(14)	0	18	18	51(50)
沟道分级分布												
I 级沟道	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9	9	9
II 级沟道	—	2	1	3	—	8(7)	2	10(9)	—	9	9	22(21)
III 级沟道	1	8	3	12	1	4	—	5	—	—	—	17
IV 级沟道	—	2	1	3	—	—	—	—	—	—	—	3
V 级沟道	2(0)	—	2(0)	—	—	—	—	—	—	—	2(0)	—
合计	1	14(12)	5	20(18)	1	12(11)	2	15(14)	—	18	18	53(50)

注:表中数据表示方案 1 的坝系工程规模数据,括号内数值代表方案 2 对应的坝系工程规模数据,其他数据与方案 1 相同。

根据近 3 a 盐沟流域各乡镇的统计年鉴数据<sup>[17-18]</sup>,求出各方案指标层的各个具体评价指标值,并将结果标准化(表 4)。

按照构建的评价指数模型(式 4),代入标准化后

各方案的指标值和表 1 所列的权重值,再结合本研究建立的坝系规划评价方案比选的指标体系,对两种典型规划方案进行对比选优,经过计算得出该流域的定量评价结果如表 5 所示。

表 4 小流域坝系规划指标值及标准化

项目	指标	方案 1		方案 2	
		指标值	标准化值	指标值	标准化值
经济方面	净现值/万元	1 553.00	0.85	1 818.00	1
	效益费用比	1.42	0.89	1.59	1
	内部回收率/%	7.10	0.80	8.86	1
社会方面	坝系淤地面积/hm <sup>2</sup>	246.90	1.00	207.90	0.84
	坝地保收率/%	23.25	0.90	25.82	1
	水资源利用率/%	75.60	1.00	64.20	0.85
环境方面	骨干坝面积控制率/%	94.80	1.00	77.80	0.82
	骨干坝滞洪库容/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	1 298.30	1.00	1 102.10	0.85
	泥沙拦截率/%	94.80	1.00	77.80	0.82

表 5 盐沟流域坝系规划多方案比选评价结果

方案	经济指数(N <sub>1</sub> )	社会指数(N <sub>2</sub> )	环境指数(N <sub>3</sub> )	综合指数(N)
方案 1	0.860	0.937	1.000	0.928
方案 2	1.000	0.944	0.822	0.878

上述评价结果反映了盐沟流域坝系规划的经济、社会、环境 3 个子系统的总体协调程度,方案 1 优于方案 2,因此推荐选择方案 1 作为该流域的优化坝系规划方案。

### 3 结论

根据综合性、主导性、实用性原则,应用层次分析

法,选取反映小流域坝系规划布局和可持续发展的经济、社会、生态环境 3 个方面的 9 项评价指标,确定了各指标的计算方法,采取咨询专家答卷的形式确定了各指标的权重值,在此基础上构建了经济、社会和生态环境的单项指数模型及综合指数模型。运用综合指数评价法,得出盐沟流域坝系优化建设的优化规划方案。该评价方法适宜小流域坝系工程科学规划及合理评价,可为黄土高原地区小流域坝系工程规划和建设提供强有力的技术支撑,应用前景广阔。

#### [参考文献]

- [1] 李锐. 中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 1-6.

- [2] Fu Bojie, Liu Yu, Lü Yihe, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8 (4):284-293.
- [3] Liu L, Liu X H. Sensitivity analysis of soil erosion in the Northern Loess Plateau [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2:134-148.
- [4] Fen-Li ZHENG. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau [J]. *Pedosphere*, 2006, 16 (4):420-427.
- [5] Wei Jie, Zhou Jie, Tian Junliang, et al. Decoupling soil erosion and human activities on the Chinese Loess Plateau in the 20th Century [J]. *CATENA*, 2006, 68(1):10-15.
- [6] 黄自强. 黄河流域的水土流失及其防治对策[J]. *中国水利*, 2000(5):30-31.
- [7] 范兰, 张光辉. 黄河流域典型支流水土流失对全球气候变化的响应[J]. *水文*, 2010, 30(5):25-31.
- [8] Feng Xiaoming, Wang Yafeng, Chen Liding, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4):239-248.
- [9] 魏霞, 李占斌, 沈冰, 等. 陕北子洲县典型淤积过程和降雨关系的研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9):80-84.
- [10] Yang Mingyi, Tian Junliang, Liu Puling. Investigating the spatial distribution of soil erosion and deposition in a small catchment on the Loess Plateau of China, using  $^{137}\text{Cs}$  [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(2):186-193.
- [11] 刘利年. 黄土高原小流域水土流失综合治理研究[D]. 西安:长安大学, 2004.
- [12] 李海光, 余新晓, 傅恒, 等. 黄土高原第Ⅲ副区小流域降水空间异质性分析[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5):235-241.
- [13] 邱海军, 曹明明. 黄土高原沟壑区土地利用变化分析:以陕西省洛川县为例[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5):207-212.
- [14] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原土地利用动态变化及其生态效应[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2):48-53.
- [15] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198 (1/2):263-268.
- [16] 焦彩霞, 郑光辉, 孙东敏. 陕北黄土高原土地利用时空趋势变化分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3):185-188.
- [17] 佳县地方志编纂委员会. 佳县志[M]. 西安:陕西旅游出版社, 2008:97-205.
- [18] 佳县统计局编. 佳县统计年鉴. 北京:中国统计出版社, 2008-2010.

(上接第 252 页)

- [7] 刘敏, 周国富, 赵翠薇. 土地利用总体规划环境影响评价研究:以贵州省为例[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2009, 34(2):89-96.
- [8] 张强, 薛惠锋, 张明军, 等. 基于可拓分析的区域生态安全预警模型及应用[J]. *生态学报*, 2010, 30(16):4277-4286.
- [9] 谢花林, 李秀彬, 陈瑜琦, 等. 土地利用规划环境影响的生态安全评价方法初探[J]. *资源科学*, 2010, 32(1):57-63.
- [10] 潘竟虎, 石培基, 吕立刚, 等. 基于多源空间数据的土地生态适宜性评价与管制分区[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1):193-198.
- [11] 潘竟虎, 石培基, 赵锐锋. 基于 LP-MCDM-CA 模型的土地利用结构优化研究[J]. *山地学报*, 2010, 28(4):407-414.
- [12] 张国平, 张增祥, 刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(2):146-158.
- [13] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning [M]. *Agriculture Handbook*. Washington D C: USDA, 1978, 537:1-58.
- [14] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5):1-20.
- [15] 潘竟虎, 董晓峰. 基于 GIS 的黑河流域生态环境敏感性评价与分区[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(2):267-273.
- [16] 赵源, 彭馥艳. 县级土地利用规划的环境影响评价设计[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(8):964-969.