

一种基于效益最大化分析的淤地坝建坝时序数学模型

何兴照^{1,2}, 史丹², 陈刚¹, 金上海¹

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 黄河水利委员会 黄河上中游管理局, 陕西 西安 710043)

摘 要: 针对淤地坝系建设中存在的建坝时序问题, 提出了淤地坝建坝时序的数学模型。该模型考虑的主要因素有: 拦泥效益以及坝地的生产效益。按照效益最大化的结果求出最佳的建坝顺序。与其它模型比较, 该模型的主要特点是考虑了三点实用的因素, 即贴现率, 保收率和建筑费。最后以虎山沟为例, 使用该模型得到了建坝时序和效益, 模型的合理性是通过计算的效益最大来证明的。

关键词: 淤地坝; 模型; 经济效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)06-0071-04

中图分类号: S157.31

Sequential Mathematical Model for Warping Dam Construction Based on Maximal Economic Benefit

HE Xing-zhao^{1,2}, SHI Dan², CHEN Gang¹, JIN Shang-hai¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Upper and Middle Reaches Bureau of YRCC, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: This article put forward a sequential mathematical model for warping dam construction in small watershed. The productive benefit and sediment holding capacity of the dam were considered as the main elements. The best construction sequence was based on the analysis of maximizing economic benefit. Comparing with other models, the model took three practical factors of discount rate, harvest insuring rate and constructive investment into account. Finally, the model was applied to Hushan small watershed to prove its rationality.

Keywords: warping dam; model; economic benefit

淤地坝是一项行之有效的水土保持工程措施,既能滞洪、拦泥,又能淤地造田、增产粮食。水利部提出将淤地坝建设列为 2003 年水利工作的“亮点工程”之一,计划到 2010 年,在黄土高原区建成 6×10^4 座淤地坝的目的^[1]。

一个完整的坝系由若干单坝组成,科学的规划方案可以保证坝系充分发挥拦截泥沙、蓄洪滞洪、增地增收的效益,有效促进农村生产条件和生态环境的改善,从根本上改变山区的贫困面貌。建淤地坝要突破三道难题:一是水文泥沙指标的选取;二是坝系布局方案的比选,特别是建坝个数和时序的问题,三是坝系运行机理的模拟。在淤地坝的修建过程中规划是十分重要的,其中淤地坝建坝时序的规划尤为重要,不同的建坝时序对淤地坝的效益以及规模都有一定的影响,对淤地坝的工程安全也有一定的影响^[2]。

目前,主要存在的模型有以下几种。(1)西北农林科技大学的武永昌先生提出的模型。该模型以实际淤积期计算为基础,采用动态经济的计算方法,解决了建坝顺序和打坝间隔年限^[3-4]。(2)西安理工大学的李智录和黄河中上游管理局万临生等提出的模型^[5]。该模型选择某坝址处建不建坝为决策变量,采用动态经济计算方法,建立了产投比目标函数,在假定每年修两座坝的前提下,求解得到了坝系工程的最优建设顺序和分年度实施顺序。(3)西北农林科技大学王鸣远、崔云鹏提出的模型。采用定性分析和定量研究相结合的方法,对坝系的规划布设、运营方式和防洪等问题进行探讨,定量地解决了黄丘区支毛沟淤地坝系的布坝密度问题,并提出了不同的沟道条件和坡面治理状况下的打坝顺序^[6]。在以上几种模型中,存在的主要问题是计算的建坝时间是很长的,

收稿日期:2007-08-16

修回日期:2007-10-25

作者简介:何兴照(1966—),男(汉族),陕西省户县人,主要从事水土保持工程设计和水土保持监测。E-mail:tecrafirst@163.com。

尚不能完全满足他们在理论上所追求的最大效益。本文主要针对以上模型存在的问题进行改进,通过对陕西省无定河流域阎庄沟小流域坝系、吴堡县弓家山小流域坝系、无定河流域韭园沟小流域坝系等大量淤地坝建设规划的分析总结^[7-9],主要考虑了对效益分析及经济评价等,坝系优化规划更加实用、更加简化。根据坝系的经济计算公式,主要从以下 3 个方面进行了改进和优化:(1) 贴现率的问题;(2) 保收率的问题;(3) 建筑费用的问题。

1 单坝模型的建立

1.1 工程费用

在坝址及坝的结构已经确定的情况下,淤地坝的工程费用主要与坝高呈幂函数的形式的关系。

$$F_1 = a(V + V')^b + C \quad (1)$$

式中: F_1 ——淤地坝工程费用(元); V ——拦泥库容(m^3); V' ——滞洪库容(由水文计算确定, m^3); C ——与工程规模关系不大的费用(如勘测设计费、施工预备费、安全超高部分的工程费等)之和(元); a, b ——系数及指数,可用回归分析的方法求得。

1.2 工程效益

1.2.1 拦泥效益^[11] 拦泥效益目前尚无准确的计算方法,一般按下游河道清除淤积泥沙所需的费用来计算。设下游河道清除 $1 m^3$ 泥沙所需的费用为 D 时,则经济计算期内的拦泥效益为:

$$F_2 = \frac{DKMA}{\gamma} \sum_{j=1}^t \frac{1}{(1+q)^j} \\ = \frac{DKMA}{\gamma q} \left[1 - \frac{1}{(1+q)^t} \right] \quad (2)$$

式中: t ——淤积期(a); K ——拦蓄系数,即淤积在库容内的泥沙与全部来沙量的比值; M ——控制面积上多年平均侵蚀模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]; A ——控制面积(km^2); γ ——淤积泥沙干容重(t/m^3); q ——贴现率。

1.2.2 蓄水效益 蓄水效益的计算目前还没有理想的方法,一般按灌溉用水的增产效益来计算,设 $1 \times 10^4 m^3$ 灌溉用水的净产值为 E ,则每年的蓄水效益为

$$F_3 = EV' \sum_{j=1}^t \frac{1}{(1+q)^j} \quad (3)$$

这种方法很不完善,它没有考虑灌溉系统的建设费用、滞洪库容蓄水和灌溉用水之间的数量和时间的差异等许多问题。以上的公式仅供参考。

1.2.3 防洪效益 如果淤地坝年防洪效益为 N (元/a),则在分析期内的总防洪效益 F_4 为:

$$F_4 = N \sum_{j=1}^t \frac{1}{(1+q)^j} \quad (4)$$

1.2.4 坝地生产效益 影响坝地生产效益的因素很多,主要有以下几个方面。

(1) 淤积期。从淤地坝建成到拦泥库容淤满所需的时间叫淤积期。如果上游无坝,淤积期的计算见公式 5。如果上游有未淤满的坝,淤积期则不能用以上的公式计算,这一问题在坝系规划中是比较常见的,也是很复杂的一个问题。

$$t = \frac{\gamma V}{KMA} \times 10^4 \quad (5)$$

(2) 坝地面积。根据库区测量资料,可建立坝地面积(指建坝后新增加的农业用地面积)与拦泥库容的回归方程如公式 6。用淤积在库内的泥沙体积取代上式中的拦泥库容,就可以得到拦泥库容未淤满时的坝地用地面积。不计施工期,建坝后第 j 年淤积的泥沙体积就是 $jKMA/\gamma$ 。第 j 年的坝地面积则为公式 7。

$$S = aV^\beta \quad (6)$$

$$S_j = a \left(\frac{jKMA}{\gamma \times 10^4} \right)^\beta = a \left(\frac{jV}{t} \right)^\beta = S \left(\frac{j}{t} \right)^\beta \quad (7)$$

$$(j \leq t)$$

式中: a, β ——回归方程的系数及指数; S_j ——第 j 年的坝地面积。

在淤积期满之后,如果采取了排沙措施,上式就不再适用了。为使问题简化,可近似地认为淤积期之后坝地面积稳定不变。

(3) 保收率。坝地上的农作物可能被洪水淹没而损失。正常收获的年份占总年份的百分数即为保收率。保收率与坝地面积、泄水建筑物的泄洪量、作物种类、洪水出现的时间等许多因素有关,目前只能做近似的简化运算。设坝地上的积水深度不超过 h (m)时作物可以保收,这时的洪水总量 W 是:

$$W = S h \quad (8)$$

式中: W ——作物保收所允许的最大洪水总量($10^4 m^3$)。

把拦泥库容淤满时的坝地面积代入上式,可求出淤满时的最大洪水总量,进而求出相应的洪水频率 p 。拦泥库容淤满时的保收率为 p :

$$p = 1 - p' \quad (9)$$

拦泥库容淤满后可近似地认为保收率不变化。在拦泥库容淤满之前,坝地面积较小,保收率也较低。为简化计算,假定保收率与坝地面积成正比,即:

$$\frac{p}{p_j} = \frac{S}{S_j} \quad (10)$$

式中: p_j ——第 j 年的保收率。

将(6),(7)代入(10)最后可得

$$p_j = p \left(\frac{j}{t}\right)^\beta \quad (j \leq t) \quad (11)$$

(4) 生产效益。建坝后的最初几年,保收率很低,不易进行种植业生产。坝地的使用年限可以经济计算期为准。原因是坝淤满后坝地形成,以后除非出现超标洪水,将整个坝地冲毁,否则坝地就会一直发挥经济效益。实用中可参照当地的经验确定。

在坝地利用期内,坝地面积、每年单位面积净产值、保收率三者之积就是当年的生产效益。将生产效益折算成基准年的现值后,在经济计算期内求和,得到生产效益的现值为:

$$F_5 = B \left[\sum_{j=i}^t \frac{p_j S_j}{(1+q)^j} + p S \sum_{j=i+1}^T \frac{1}{(1+q)^j} \right] \quad (12)$$

式中: F_5 ——坝地生产效益; B ——单位坝地面积净产值(元/10⁴ m²); i ——坝地开始利用年限(a); T ——经济计算期(a)。

1.2.5 淤地坝单坝效益计算模型 淤地坝的效益 F 可用拦泥效益及坝地生产效益以及蓄水效益、滞洪效益值之和减去工程费求得,即就是:

$$F = F_2 + F_3 + F_4 + F_5 - F_1 \quad (13)$$

2 坝系时序模型

2.1 目标函数

假设决策变量是各坝的建坝年 y_i 。将效益与工程费用之差作为目标函数。

2.1.1 工程费 如果第 i 号坝在基准年以后第 y_i 年修建,坝系工程费用的现值可用下式表示。

$$F_x = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i (V_i + V'_i) + C_i}{(1+q)^{y_i-1}} \quad (14)$$

式中: F_x ——坝系工程费用现值(元)。

2.1.2 工程效益 效益应为拦泥效益、蓄水效益、滞洪效益及种植效益 4 项之和。由于淤地坝建设的目的不是用来蓄水的(大部公只有土坝,没有放水设施和灌溉设施),所以蓄水效益可以忽略。其次,绝大部分淤地坝在规划时已经评估了其对下游的影响,一般都修建在人口稀少的地方,防洪效益只是出于社区安全考虑,不具备实质的防洪效益。对黄河干流洪水过程的影响也很难计算。这部分效益也只能做参考。所以在此,主要介绍种植与拦泥两项效益^[12]。

(1) 种植效益。理论上坝地种植效益按拦泥库容淤满以前和淤满以后 2 个时段计算,2 个时段逐年的坝地净产值折算成现值,在经济计算期内累加,既得一座坝的经济效益。拦泥库容淤满后的坝地面积可按公式(6)计算。淤满之前库内淤积的泥沙体积是

逐年变化的,这时式(6)中的 V 应看作实际拦泥体积。设每年平均拦蓄泥沙的体积是 V/t ,第 j 年的坝地面积可用公式(15)计算。

$$S_j = \alpha \left(\frac{jV}{t}\right)^\beta \quad (15)$$

式中: t ——实际淤积期(a),当 $j=t$ 时,上式就成为公式(6)。

在坝系施工顺序优化中,时间从基准年开始计算,所以上式应改为

$$S_{j+y} = \alpha \left(\frac{(j-y)V}{t}\right)^\beta \quad (16)$$

式中: y ——从基准年起算的建坝年。

考虑到坝地保收率,则经济计算期内一座坝的坝地种植业效益现值为:

$$F_d = BpS \left[\sum_{j=y+1}^{y+t} \frac{(j-y)^{2\beta}}{t^{2\beta}(1+q)^j} + \sum_{j=y+t+1}^T \frac{1}{(1+q)^j} \right] \quad (17)$$

式中: F_d ——单坝的坝地种植效益现值。

(2) 拦泥效益。坝的拦泥效益从建坝年开始计算到拦泥库容淤满为止。拦泥计算的现值可以参考式(2),但因单坝的基准年在建坝的当年,坝系的基准年在坝系中各坝开始施工的当年或更早,所以应对(2)式加以改动得式(18)。

$$F_n = \frac{DKMA}{\gamma} \sum_{j=y+1}^{y+t} \frac{1}{(1+q)^j} \quad (18)$$

坝系中各坝的工程费用与效益之差就构成了目标函数(19)

$$F = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\alpha_i (V_i + V'_i) + C_i}{(1+q)^{y_i-1}} - BpS_i \left[\sum_{j=y_i+1}^{y_i+t_i} \frac{(j-y_i)^{2\beta}}{t_i^{2\beta}(1+q)^j} + \sum_{j=y_i+t_i+1}^T \frac{1}{(1+q)^j} \right] - \frac{DKMA_{ij}}{\gamma} \sum_{j=y_i+1}^{y_i+t_i} \frac{1}{(1+q)^j} \right\} \quad (19)$$

F 达到最小值时,便可得到各坝的最佳施工时间,施工顺序及时间间隔即可随之确定。

2.2 模型的优化

根据坝系的经济计算公式,主要从以下 3 个方面考虑优化:(1) 贴现率的问题;(2) 保收率的问题;(3) 建筑费用的问题。据此我们得到一个比较实用的淤地坝坝系建设时序的函数模型。其形式如下:

$$F = \sum_{i=1}^n \left(BpS_i (T_i - t_i) \sum_{j=y_i+t_i+1}^{T_i} \frac{1}{(1+q)^j} + \sum_{j=y_i+1}^{t_i+y_i} \frac{DKMA_{ij}}{\gamma} \frac{1}{(1+q)^j} \right) \quad (20)$$

该模型的约束条件包括:(1) 非负约束,即以各坝的建筑时间必须大于或等于 0。(2) 淤满时间约束,坝

系全部建成并淤满拦泥库容之后才能发挥正常的经济效益,所以计算期选定之后坝的淤满时间都不得大于计算期终点时刻。(3)社会效益的约束,主要是考虑社会效益。(4)资金劳动力的约束。受资金、劳动力的限制不能同时修建多座坝时,可考虑这个约束条件。

2.3 模型的求解

该模型采用的数学模型是根据非线性规划问题的可变容差法改进的模型。可变容差法程序是用来求解非线性规划问题中约束条件下多变量函数的极小值的。本文对无约束条件下多变量函数的寻优采用了单纯形搜索法。

可变容差法的优点是,在许多有约束的非线性规划方法中,大部分计算时间都花在满足严格的可行性要求上。而可变容差法在求解过程中容许误差是变化的(逐渐减小的),即对等式和(或)不等式约束,在搜索的初期阶段只是松散的满足,当搜索逐渐接近问题的解时,才逐渐要求较紧密的满足,故该法中,最优化所需的全部时间大大缩短。实际上,可变容差法是由可行点和被称为近乎可行点的某些不可行点提供的数据来改进目标函数值的。

3 举例

前面已经讲到,由于在计算中要考虑实际淤积期的问题,实际淤积期是计算这个问题的关键。由于涉及的是流域,所以不同的流域就有不同的形式,不同的建坝顺序决定了不同的实际淤积期。在这里我们先研究比较简单的情况,只考虑一条主沟上建立淤地坝的问题。将一条主沟考虑清楚了,其它的情况可以根据它的结论进行相应的推导。

虎山沟流域位于甘肃省平凉市泾河北岸,属黄土高原沟壑区Ⅱ副区的半山半塬区。海拔 1 400~1 700 m,相对高差 300 m,流域面积 23.29 km²(图 1)。

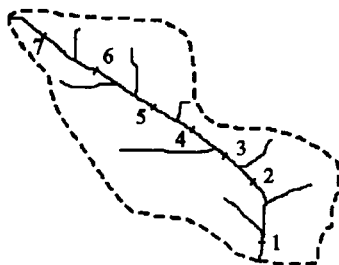


图 1 虎山沟坝址分布示意图

流域主沟道长 9.1 km,沟壑面积 7.35 km²,占总面积的 31.2%,沟壑区密度 2.67 km/km²,年降雨量 450 mm 左右,土壤以黄绵土为主,侵蚀模数为 10 000 t/(km²·a),水土流失以水力侵蚀和重力侵蚀为主。经过计算可得优化的结果如表 1 所示。

表 1 虎山沟优化计算的结果

骨干坝序号	建坝顺序号	实际淤积期/ a	经济效益/ 10 ⁴ 元
1	1	12.20	420 896.90
2	2	14.50	124 790.70
3	3	12.11	84 277.80
4	5	13.67	76 896.80
5	4	14.89	75 231.64
6	6	10.95	56 349.54
7	7	6.84	43 698.76
Σ	—	—	882 142.14

4 结论

本文总结并推导了单坝经济效益计算公式及坝系经济效益计算的公式。给出了一个比较方便且实用的求解坝系最佳建坝顺序的数学模型,采用非线性规划解法。通过实例证明了该模型具有较为可靠的实用价值。利用模型计算结果,可以总结以下规律:(1)建坝顺序大体与单坝的效益顺序一致;(2)库容较小的坝可以插在单坝效益及库容都更大的坝的前面修建;(3)不存在自上游到下游或自下游到上游的固定建坝顺序。

[参 考 文 献]

- [1] 黄土高原区淤地坝专题调研报告[R]. 中国水利科技网. <http://www.cws.net.cn/cwsnet/ztbdshow.asp?id=539>. 2007,10,12.
- [2] 建淤地坝要破三道难题. 中国水文化网. <http://www.chinawater.com.cn/ztgz/xwzt/2003ydb/1/200503/t20050325149091.htm>. 10,12.
- [3] 武永昌. 淤地坝拦泥库容的动态经济分析及最佳值计算[J]. 水土保持学报,1992,6(4):49—53.
- [4] 武永昌,范钦武. 淤地坝系的最佳建筑顺序及间隔时间计算[J]. 水土保持学报,1992,6(1):84—95.
- [5] 李智录,等. 小流域治沟骨干工程坝系优化规划的研究[J]. 水土保持学报,1991,5(4):37—40.
- [6] 王鸣远,崔云鹏. 黄土丘支毛沟淤地坝坝系规划布设与防洪[J]. 山西水土保持科技,1985(1):24—26.
- [7] 榆林市水利水电勘测设计院. 陕西省沿黄流域吴堡县弓家山小流域沟道坝系建设项目可行性研究报告[R]. 2003.
- [8] 榆林市水利水电勘测设计院. 陕西省黄甫川流域戏楼沟小流域、三格架沟小流域坝系建设可行性研究报告[R]. 2003.
- [9] 榆林市水利水电勘测设计院. 陕西省无定河流域阎庄沟小流域坝系建设可行性研究报告[R]. 2003.
- [10] 黄委会绥德水土保持科学实验站. 黄河水土保持生态工程韭园沟示范区初步设计[R]. 2001.

(部分参考文献略)