

淤地坝建设回顾及其物理比尺模型研究展望

肖培青^{1,2}, 姚文艺¹, 史学建¹

(1. 黄委会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 对淤地坝的建设成果进行了回顾, 概述了淤地坝坝系规划布设、坝系工程建设、淤地坝效益和坝系相对稳定理论探讨的研究进展, 提出了建设黄土高原坝系物理比尺模型的重要性, 并阐述了有待于进一步研究的问题。

关键词: 淤地坝; 水土保持; 研究进展; 物理模型

中图分类号: S 157.31 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003)04-0316-04

Recent Progress of Constructing Warping Dam and Prospects on Physically-based Scale Dam Model

XIAO Pei-qing^{1,2}, YAO Wen-yi¹, SHI Xue-jian¹

(1. Institute of Hydraulic Research, the Yellow River Conservation Commission, Zhengzhou 450003, Henan, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The outcomes of warping dams were reviewed and research progresses about layouts of warping dam system, constructions of warping dam projects, benefits of warping dam and relatively stabilization theory of warping dam were outlined. Furthermore, the importance of constructing physically-based scale dam model was put forward. And then, further research issues were presented.

Key words: warping dam; soil and water conservation; research progress; physically-based model

黄河中游多沙粗沙区地形破碎、坡陡沟深、土质疏松、植被稀少、暴雨集中, 洪水造成沟床下切、沟头延伸, 沟谷侵蚀产沙量占流域总产沙量的 50% ~ 70%。淤地坝是一种行之有效的既能拦截泥沙、保持水土, 又能淤地造田、增产粮食的水土保持工程措施。据调查统计^[1], 经过 50 多年的建设, 黄土高原地区现有淤地坝 11 万余座, 淤成坝地 30 万 hm², 可拦蓄泥沙 210 亿 m³。主要分布在陕西(36 816 座)、山西(37 820 座)、甘肃(6 630 座)、内蒙古(17 819 座)、宁夏(4 936 座)、青海(3 877 座)、河南(4 147 座)等七省(区), 其中陕、晋、蒙三省区共有淤地坝 9 万余座, 占总数的 82.5%。目前的研究在坝系规划布设、工程建设、拦沙减蚀效益以及小流域坝系相对稳定研究等方面作了大量的工作。淤地坝建设从单纯拦泥淤地向流域坝系综合高效利用, 从单坝控制向坝系综合控制方向发展。但是, 淤地坝建设与利用过程中仍存在种种问题, 主要表现在坝系规划布局不合理, 病险坝多; 设计标准偏低, 易造成坝体破坏或垮坝; 建坝施工质量差, 工程不配套; 坝体管理水平差, 维护粗放; 坝地利用率及经济效益偏

低; 坝系相对稳定理论滞后于生产实践的需要等方面。因而, 淤地坝坝系系统相对稳定理论和拦泥蓄水机理必须进一步探讨和深化研究。淤地坝建设的最终目标是建立黄土高原坝系物理比尺模型, 通过试验研究缩短野外工作的时间和空间尺度, 可使侵蚀过程抽象的现象具体化甚至量化。因此, 为了深化研究坝系稳定理论和建立坝系比尺模型, 本文对以往的成果进行了归纳和回顾, 提出了建设坝系比尺模型地重要性以及有待于进一步解决的问题。坝系建设是我国学者针对黄土高原水土流失的特殊性提出的特殊措施, 是一个具有中国特色的专用名词, 国外几乎没有相关报道。

1 淤地坝建设回顾

1.1 淤地坝坝系规划布设

坝系规划就是在防止全流域水土流失的前提下, 使坝系工程总投资最小。多年来, 水土保持工作者在此方面做了大量的调查研究工作。坝系布设形式主要有 8 种: 上拦下种, 淤种结合; 上坝生产, 下坝拦淤; 轮蓄轮种, 蓄种结合; 支沟滞

¹ 收稿日期: 2003-04-16
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50239080)资助。
作者简介: 肖培青(1972-), 女, 博士生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。

洪、干沟生产; 洪水分治, 漫淤结合; 以排为主, 漫淤滩地; 坝库相间, 清洪分治; 隔山凿洞, 邻沟分洪^[2]。李智录等将坝系规划的时空优化问题的求解转化成 0~1 整数规划和指派问题的联合求解, 并建立了相应的数学模型。实践证明, 转化方法思想正确, 转化后的数学模型求解简单, 节省时间^[3]。另外, 李智录等还针对小流域治沟骨干工程坝系规划问题, 应用系统工程的理论和方法, 建立了该规划问题的数学模型, 通过求解获得了小流域内最优建坝组合和分年度实施顺序, 所编写的程序是一个完整的通用坝系规划软件包, 可适应于各种地形的小流域治沟骨干工程坝系规划问题。各种优化参数都符合要求, 为小流域治沟骨干工程坝系进行系统科学的规划开辟了一条新路^[4]。段喜明、王治国针对小流域淤地坝坝系布设方案的优化问题, 从坝址、坝系密度、坝高、建坝顺序、建坝时间间隔等几个方面进行了比选, 为流域淤地坝坝系的合理布设, 提供了科学的理论依据与精确的定量方法^[5]。这些规划运用系统工程的理论方法, 借助于计算机进行的坝系优化规划研究, 其一般特点是将坝系规划问题分为两个阶段进行, 即先进行坝高的优化, 然后把坝高作为已知参数, 优化确定打坝顺序及间隔年限。这种方法在坝高的优化中, 只考虑了坝系淤满形成后的效益最优, 而没有考虑坝高的变化对坝系在形成期效益的影响, 有一定的理论局限性。基于此认识, 秦向阳提出了采用动态经济法, 一次解决坝系优化问题的数学模型, 考虑了坝高、打坝顺序及间隔时间的综合协调影响^[6]。武永昌提出了变区间线性优化方法也是对线性规划方法的改进, 将拦泥库容、滞洪库容、建坝时序进行了同步优化, 计算结果更为稳定、可靠。该方法为坝系优化提供了一个新的手段和可能性, 但尚需在实践中不断完善^[7]。

淤地坝系规划工作量大。为便于淤地坝规范设计的普及应用, 张汉雄等根据淤地坝的设计原理和计算方法, 用 BASIC 语言编制了通用软件^[8]。该软件由坝体(含放水洞)与溢洪道两个模块组成, 相互联接, 交互运行, 按设计程序逐步运行, 前级计算结果又可作为后级的计算参数, 联为一体。整个设计过程实际上是一个循序渐进、逐步寻优、不断反馈的过程系统。该软件为坝系设计提供了一个有效工具。

1.2 坝系工程建设

淤地坝体积的计算是规划和设计中经常遇到的工作, 虽然目前已有不少的计算方法和公式, 但有的公式很繁琐, 有的不适用坝坡变化和设有马道的坝体。武永昌介绍了一种较简单的方法, 他根据实测的沟道横断面, 以沟地最低点为坐标原点, 沟道一侧的岸壁曲线可用幂函数形式表示之。利用这种幂函数关系, 对于坝坡均一的坝体, 在设定坝顶宽、坝高和上下游边坡之后, 推导出沟道一侧坝体体积的计算公式, 沟道两侧的坝体体积即为坝体总体积。对于非均一坝坡、设有马道的坝和坝体加高的体积, 可将坝体横断面分为几个均一坝坡组成的坝体断面, 分别计算其体积^[9]。徐建华等在实测淤地坝资料的基础上, 分析了无定河流域坝地淤积形态及

其有关拦泥参数, 认为影响坝地淤积形态的因素复杂, 其中原沟底比降和坝前淤厚是两个重要因素; 实测结果表明, 坝地“翘尾巴”现象虽远不如水库明显, 但均为斜淤积, 直接拦泥效益比设计平库容要大, 不过数值不大, 平均斜淤积量占总淤积量的 12.1%; 同时, 分析计算出截止到 1989 年底每公顷坝地拦沙量为 58 500 t^[10]。

淤地坝是水土保持的重要工程措施, 在黄河中游多沙区应用得非常广泛。合理确定浸润线的位置对坝体稳定性分析, 断面设计及渗流计算都有着重要的意义。然而, 目前在生产上仍沿用土坝浸润线计算方法来确定, 计算结果与实测值相差甚远, 致使淤地坝设计得排水体太高, 资金浪费很大。为此, 郝月清根据淤地坝的特征, 参照苏联水工设计手册有关计算方法, 提出淤地坝浸润线的合理计算方法, 供生产设计参考之用^[11]。根据对淤地坝的结构特征及运用状态的分析, 认为确定淤地坝浸润线的合理模型应为透水地基上均质土坝在具有水平上游承压坡的渗流模型和具有垂直承压坡的渗流模型的叠加, 其解可按前苏联科学家涅里松—斯柯尔尼亚科夫的 2 种典型公式叠加计算。穆天亮通过分析计算, 提出以在同等设计条件下工程投资最小为目标的枢纽结构形式选择方法, 在分析溢洪道宽度与其工程量及坝体工程量, 推求溢洪道投资和坝体投资与溢洪道关系的基础上, 提出了相应的计算方法^[12]。

然而, 我们在国内刊物和文集上看到的关于淤地坝系优化规划的文章, 都是只考虑拦泥坝高的优化而回避了滞洪坝高的优化问题。这种处理方法虽然使淤地坝系的优化规划大为简化, 但也使优化结果在相当程度上失去了可信性。淤地坝的总坝高由下部的拦泥坝高与上部的滞洪坝高两部分叠加而成。因此, 最优的拦泥坝高不但应使自身的工程费用最小, 还应使滞洪部分的工程费用也最小。考虑到淤地坝的最优拦泥坝高与最优滞洪坝高之间存在着密切的关系, 武永昌等提出了在坝系优化规划中对两种坝高同时进行优化的思路及数学模型^[13]。在数学模型中避免了对经济、社会及生态效益的计算, 采用了能间接反映三种效益而又较为简单的目标函数及约束条件。

1.3 淤地坝的作用和效益

黄河泥沙主要来源于黄河中游黄土高原的千沟万壑。修建于各级沟道中的淤地坝, 不但能够抬高沟床, 降低侵蚀基准面, 稳定沟坡, 有效制止沟岸扩张、沟底下切和沟头前进, 减轻沟道侵蚀, 而且能够拦蓄坡面汇入沟道内的泥沙。根据黄河水利委员会黄河上中游管理局初步调查统计, 黄土高原区 11 万多座淤地坝可拦泥 280 亿 t, 对黄河安澜起到了极其重要的作用。同时, 淤地坝通过有效的滞洪, 将高含沙洪水一部分转化为地下水, 使水资源得到了合理利用。淤地坝将泥沙就地拦蓄, 使荒沟变成了人造小平原, 增加了耕地面积, 坝地主要是由小流域坡面上流失下来的表土层淤积而成, 土壤肥沃, 水分充足, 抗旱能力强, 成为高产稳产的基本农田。

布局合理的小流域坝系对暴雨洪水具有较强的抵御能

力。根据黄河流域水保基金研究成果统计, 1970~1989 年, 黄河中游 26 条支流淤地坝年均拦沙量约为 11 亿 t, 淤地坝拦沙量占各项水保措施总拦沙量的 60%。以无定河流域为例, 截止 1989 年, 该流域共有淤地坝 11 691 座, 有效控制面积 8 548 km², 总库容 2 487 亿 m³, 可淤地面积 251 万 hm², 已淤地面积 21 万 hm², 累计拦沙量 13 7 亿 m³。1970~1989 年, 无定河流域淤地坝平均每年拦沙 4 716 万 t, 淤地坝拦沙量占水保措施总拦沙量的 64%。调查研究表明^[14], 韭园沟流域从 1953 年开始坝系建设, 大致经过试验示范、发展、改建和充实提高 4 个阶段, 通过实测降雨、径流、输沙资料及不同流域对比分析表明, 流域沟道坝系拦泥作用十分显著, 流域输沙模数由治理前的 1.8 万 t/km² 降到目前的 2 060 t/km², 洪水泥沙基本得到控制, 坝系接近相对稳定。坝系已淤地 282.0 hm², 与流域面积之比为 1:25.1, 已拦泥 2 008.5 万 m³, 相当于流域治理前 21 年的产沙量。王茂沟流域从 1953 年到 1986 年, 淤地坝拦沙总量为 1 665 万 t, 年均拦沙 5 05 万 t。流域输沙模数由治理前的 18 000 t/km² 降低到治理后期的 504 t/km², 减少了 97%, 基本上实现了对泥沙的完全控制^[15]。1964 年 7 月 5 日, 王茂沟流域降雨量 1 318 mm, 降雨强度 62 mm/h, 流域内各坝均安全度汛, 洪水泥沙大部分被拦在坝系之内。坝系拦水量为 366 万 m³, 占流域产流量的 78%; 坝系拦沙量 135 万 t, 占流域产沙量的 72%。1977 年 8 月 5 日, 王茂沟流域降雨量 1 627 mm, 主沟各坝安全度汛, 支沟坝系中虽有少数坝拉开缺口, 但坝系泥沙冲失轻微, 支沟坝地冲失的泥沙又被主沟坝系拦截。坝系拦水量 405 万 m³, 占流域产流量的 69%; 坝系拦沙量 136 万 t, 占流域产沙量的 58%。

尹增斌等还研究了坝坡作为土地资源能否进行开发利用以及由此可能产生对坝体安全稳定的影响程度, 坝坡开发利用及其防护措施的模式建立等问题^[16]。通过试验示范和调研分析, 采取工程整地造林的方式, 建立坝坡林果园, 能收到良好的防护效益, 社会经济效益显著, 且技术上可行, 可以在淤地坝上推广。

1.4 淤地坝相对稳定理论的探讨

坝系相对稳定的最初提法是淤地坝相对平衡, 这一概念 60 年代初已经提出, 是从天然聚淤对洪水泥沙的全拦全蓄、不满不溢的现象中得到启发的。当淤地坝达到一定高度、坝地面积与集流面积的比例达到一定数值之后, 淤地坝对洪水泥沙将长期控制而不致于影响坝地作物生长, 即洪水泥沙在坝内被消化利用, 达到产水产沙与用水用沙的相对平衡。已有的研究对绥德王茂沟流域淤地坝系、王家沟流域坝地发展潜力以及西黑岱小流域坝系相对稳定布设模式进行了研究和分析, 表明在多沙粗沙区已初步形成坝系的沟道, 只要有旧坝加高的条件, 或有打新坝的条件, 都可向相对稳定方向发展。相对稳定坝系建设是保证黄土丘陵沟壑区淤地坝持续安全和高效利用的关键措施。在相对稳定坝系的不同形成时期, 坝系的发展方向和形成速度随着自然、社会和经济等外

部条件及坝系淤积、防洪、生产状况的变化而变化。通过合理安排和动态调控坝系中各单坝的布设过程及坡面措施配套步骤等, 使坝系内各单坝的淤积、防洪状况及生产条件等得以有效控制, 能够降低坝系形成过程中的水毁风险, 节约投资, 提高效益, 促进坝系相对稳定目标的快速实现。因此, 曾茂林认为坝系相对稳定的含义, 一是在一定暴雨洪水频率下, 能保证坝系工程的安全; 二是在另一暴雨洪水频率下能保证坝地农作物不受损失或少受损失; 三是沟道流域的水沙资源得到充分利用, 泥沙基本不出沟; 四是盐碱危害小、与水利建筑相适应; 五是年均淤积厚度较薄, 后期的坝体加高维修工程量小, 群众可以承担养护^[17]。坝系相对稳定并不是指每个单坝都有可能和必要全部达到相对稳定。坝系相对稳定的最大设计单元控制在面积 30~50 km² 的小流域内比较符合实际^[18]。

目前所采用的坝系相对稳定系数(淤地面积与坝控制面积之比)反映了流域坡面产流产沙与坝系滞洪拦沙之间的平衡关系、被用作衡量坝系所处平衡状态的量化指标。但由于它把一个三维坝系平衡问题简化为二维平面问题, 无法准确反映坝系流域地势高差并忽略了沟道坡度对坝系平衡的影响, 因而具有地貌学方面的局限性; 坝系相对平衡的实质在于坝系流域水沙产出通量、坝地水沙吸收储存与坝系工程拦蓄能力间的平衡关系, 而坝系相对平衡系数仅表达了这一关系中的部分内容, 在水文学方面具有局限性; 坝系流域的平衡以库坝工程体系的安全稳定为基础, 因而坝系相对平衡系数在工程学方面也存在一定的局限性。坝系流域的平衡或稳定, 是一个基于全流域空间之上的综合性稳定, 但有一定局限性, 应以此系数为中心建立一套能全面描述坝系相对稳定状态地指标体系, 即从结构性稳定和生物性稳定两方面考虑^[19]。近期, 朱小勇等^[20]采用网络控制方法, 能够明确表示出坝系内单坝组成、建设时间和坝间关系, 预先确定各坝的修建时差、关键坝库以及提前和推后建坝对后续坝修建及整个坝系建设的影响, 可作为坝系形成过程控制的依据。

2 淤地坝物理比尺模型展望

2.1 建立物理比尺模型的重要性

综上所述, 黄土高原地区坝系建设的一系列研究和实践, 为黄土高原地区坝系建设提供了科技支撑, 淤地坝的拦沙作用是非常显著的, 对 21 世纪黄河下游防洪减灾具有长远的重要作用。当前以水土保持为中心的西部生态环境建设步伐的加快, 为实施沟道坝系工程创造了有利的条件。但是从总体上看, 坝系建设无论在基础理论研究还是治理的科学水平方面, 使得工程不能充分发挥效益, 利用率低, 有些问题还没有得到圆满解决。关于坝系稳定理论和拦泥蓄水机理还需要进一步探讨和深化研究。只有解决了坝系建设的一系列理论问题, 并由此指导广大群众的实践活动, 才有可能大大提高其安全性, 避免农民群众自发建设的坝系工程被洪水冲毁的现象, 使其真正成为旱涝保收的基本农田, 同时又收

到拦蓄泥沙的良好效果,并最终实现遏制沟道重力道侵蚀的相对平衡目标,不同区域建立坝系相对平衡的条件是不一样的。但坐等天机的室外研究工作不可能在较短时间内获得大量试验数据。因此,通过坝系物理比尺模型试验研究,能够便捷和准确地为坝系建设提供科学依据。

基于以上考虑,可以分别就黄土高原多沙粗沙区的某一条小流域或其中的某一条支沟建立物理模型,首先对其侵蚀的机理进行分析模拟,找出其侵蚀的基本规律,然后将其治理的治沟骨干工程或淤地坝系摆进模型里,对各种可能的治理方案进行试验,将工程布局的规划及其减沙效益进行量化分析,大大提高治理规划的科技含量和对减沙效益预测的可信度。截至目前,国际上尚没有建立类似模拟黄土高原水土流失重力侵蚀现象的物理模型,现有的模型均是针对模拟面蚀、浅沟流失等现象的。因此,建立黄土高原的坝系物理比尺模型是一项开创性的工作。

2.2 亟需开展的研究工作

以建立模拟暴雨动力机制和侵蚀产沙过程的小流域动床物理模型为途径,研究多沙粗沙区小流域水力及重力侵蚀机理及基本规律,分析坝系拦泥蓄水机理及坝系相对平衡机制及条件,提出坝系优化理论及坝系建设的原理、原则和技术,为黄土高原多沙粗沙治理提供科学指导。目前的研究内容应从以下几方面着手:

(1)小流域动床物理模型相似条件及相似比尺研究。主要包括几何相似条件,降雨打击、径流冲刷、水流输沙等动力相似条件,土壤抗蚀相似条件及重力相似条件等等。在此研究基础上,进一步论证相似比尺的合理选择问题。

(2)模拟设施及测控系统的研制。为保证模拟能够满足相似理论要求,还需要具有相应的能够满足一定要求的量测设施及测控系统。现已研制的降雨系统、径流系统及测控系统都可能都难以直接应用,对此,应开展相应的研制工作,包括降雨模拟系统、径流模拟系统、产流产沙量测系统及相应的控制系统。

(3)坝系拦泥减蚀力学机理研究。通过模拟试验和理论探讨,着重研究坝系蓄水减沙的力学机理,坝系拦蓄量与坡沟产沙输沙的关系,进而研究坝系拦沙蓄水及减蚀能力。研究的内容包括坝系蓄水减沙的水力学和土力学机理;坝系拦蓄能力与流域坡沟侵蚀产沙过程的响应关系;坝系拦沙蓄水能力及减蚀机制。

(4)坝系相对平衡理论研究。研究降雨物理特征、流域地质地貌、流域治理措施、土壤特性、沟系特征等因素对坝系相对平衡的影响,探讨坝系“相对平衡”的力学机制,在此基础上,确定小流域建坝密度、淤地坝最佳拦沙库容和滞洪坝高等临界条件的优化理论。研究的内容包括坝系相对平衡理论研究;沟道坝系结构研究;小流域坝系结构和优化方案研究。

参考文献:

[1] 水利部水土保持司,等. 黄土高原区淤地坝专题调研报告[R]. 2002, 12.

[2] 梁小卫,陈谦. 陕西省淤地坝坝系布设的几种形式[J]. 中国水土保持, 2002(1): 12- 13.

[3] 李智录,党志良. 0—1 整数规划和指派问题在小流域治沟骨干工程坝系规划中的应用[J]. 水利学报, 1993(12): 44- 49.

[4] 李智录,万临生,严秉良,等. 小流域治沟骨干工程坝系优化的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 45- 52.

[5] 段喜明,王治国. 小流域淤地坝坝系分布设计方案的研究[J]. 山西农业大学学报, 1999(4): 326- 332.

[6] 秦向阳,郑新民. 小流域治沟骨干工程坝系优化规划模型研究[J]. 中国水土保持, 1994(1): 18- 23.

[7] 武永昌. 变区间线性优化方法及淤地坝系库容、建坝时间的同步优化[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 60- 66.

[8] 张汉雄,郭宝安. 淤地坝系规划设计通用软件及其应用[J]. 水土保持通报, 1997, 17(2): 46- 52.

[9] 武永昌. 淤地坝坝体体积的计算[J]. 中国水土保持, 1996(5): 23- 24.

[10] 徐建华,流九玉,林银萍,等. 无定河流域坝地淤积形态及其拦泥参数的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 41- 46.

[11] 郝月清. 淤地坝浸润线合理计算方法探讨[J]. 水土保持通报, 1998, 18(4): 20- 22.

[12] 穆天亮,郭文元. 淤地坝枢纽结构的选择和溢洪道最佳宽度的确定[J]. 水土保持学报, 1990, 4(2): 19- 25.

[13] 武永昌,崔云鹏,梁文辉. 淤地坝系拦泥、滞洪坝高的双优化[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 19- 26.

[14] 田永宏,郑宝明,王熠. 黄河中游韭园沟流域坝系发展过程及拦沙作用分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 24- 28.

[15] 方学敏,曾茂林,左仲国. 黄河中游沟道流域坝系拦沙作用分析[J]. 水土保持通报, 1993, 13(3): 24- 28.

[16] 尹曾斌,周玉珍. 淤地坝坝坡开发利用及其防护措施[J]. 水土保持通报, 1998, 18(3): 56- 61.

[17] 曾茂林,朱小勇,康玲玲. 水土流失区淤地坝的拦泥减蚀作用及发展前景[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 126- 133.

[18] 朱小勇,雷元静,刘立斌. 坝系相对稳定几个重要问题地认识[J]. 中国水土保持, 1997(7): 53- 56.

[19] 黎汝静. 关于坝系相对平衡系数(A 坝/ A 流)局限性的讨论[J]. 中国水土保持, 1996(3): 31- 33.

[20] 雷元静,朱小勇. 相对稳定坝系形成过程控制原理与方法[J]. 人民黄河, 2002(2): 23- 26.