

# 黄土高原典型淤地坝淤积机理研究

魏霞<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 鲁克新<sup>1</sup>, 李勋贵<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 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. 长安大学 环境工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 在调查典型淤地坝挖取剖面采集土样的基础上, 利用库容曲线和实测淤积厚度求得每层淤积泥沙量。根据大水对大沙的原则, 反演淤积层所对应的次侵蚀性降雨。通过层淤积量与其相应次侵蚀性降雨的最大 30 min 降雨强度  $I_{30}$ , 降雨量  $P$ , 降雨侵蚀力  $R$ , 平均降雨强度  $I$  等 4 个指标的相关分析, 结果表明, 对于无泄洪设施的淤地坝坝地每层淤积量与次侵蚀性降雨的  $I_{30}$ ,  $P$ ,  $R$  关系密切, 并建立了淤积量与  $I_{30}$ ,  $P$ ,  $R$  的三元回归方程, 计算值与实测值拟合较好, 从而为淤地坝水毁问题的研究提供了理论基础。

**关键词:** 淤地坝; 坝地淤积物; 层淤积量; 次侵蚀性降雨; 淤积过程; 回归分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)06-0010-04

中图分类号: S157.3<sup>+</sup>1

## Study on Depositing Process of Check Dam on the Loess Plateau

WEI Xia<sup>1</sup>, LI Zhan-bin<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, LU Ke-xin<sup>1</sup>, LI Xun-gui<sup>3</sup>

(1. School of Water Resources and Hydrorlectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Environment Science and Engineering College, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The deposited volume of each check dam layer was determined by investigating the status of check dams on the loess plateau, digging typical check dams, carrying out the sectional analysis, utilizing reservoir storage and measuring deposited thickness of a layer. Single erosive rainfall was ascertained according to the principle of "more rain, more sediment yield". Correlation analyses of deposited volume with the maximum rainfall intensity in thirty minutes ( $I_{30}$ ), rainfall amount ( $P$ ), rainfall erosivity ( $R$ ) and average rainfall intensity ( $I$ ) were made, the result of which indicated close relationships among them. Relationships between deposited volume and the three indexes were then established. A good fitting plot between calculated result and observed data was found. The research offers a theory basis for the study of water-induced damage.

**Keywords:** check dam; deposited sediment; deposited volume of each layer; erosive rainfall; depositing process; regression analysis

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区,治理水土流失的措施一般有生物措施、耕作措施和工程措施,其中淤地坝措施是一种行之有效的工程措施,它与耕作措施和生物措施相比,既能有效防止水土流失,又能形成坝地,充分利用水土资源,具有十分重要的作用<sup>[1-4]</sup>。随着国家西部生态环境治理的逐步实施和开展,淤地坝成为了水利部三大亮点工程之一。然而,到目前为止,有关淤地坝的研究主要集中在坝系优化布局、坝系相对稳定性以及坝地的生产效益等方面,对于淤地坝水毁问题发生的机理却缺乏研究<sup>[5-7]</sup>。淤地坝发生水毁的主要原因是由于淤地坝

的规划设计还未走上正轨,尤其是缺少必要的泄洪设施。随着库内泥沙量的不断增多,有效的拦泥库容随之减少,在遭遇暴雨尤其是特大暴雨时容易发生水毁。坝系相对稳定理论的提出,在一定程度上为水毁问题的研究提供了参考<sup>[8-9]</sup>,但它未从根本上解决淤地坝的水毁问题,解决该问题关键是要弄清淤地坝的淤积过程和机理,但目前对于该淤积过程机理研究甚少。针对这种情况,本文以陕北子洲县小河沟流域的石畔峁坝和花梁坝为研究对象,采用典型坝的勘察观测取样分析与室内实验计算分析相结合的研究方法,运用数理统计理论,对淤地坝的淤积过程机理进

收稿日期: 2005-11-20

修稿日期: 2006-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目“坡面径流侵蚀输沙动力过程试验研究”(40371075); 黄河水利委员会“十五”重大治黄科技项目“大理河流域水土保持生态工程建设的减沙作用研究”(2002SZ08); 西安理工大学优秀博士学位论文研究基金资助(106-210622)

作者简介: 魏霞(1980—),女(汉族),陕西扶风人,在读博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文及水资源等方面的研究。E-mail: wx800322@163.com。

行了深入的研究,并且取得了一定的研究成果,从而为淤地坝的水毁问题的研究提供了理论基础,同时,对无水文资料地区水沙资料的反演具有重要的意义。

## 1 研究区概况

本次研究主要以陕北子洲县小河口流域为研究区。小河口流域位于陕西省榆林市子洲县南部,距县城约 12 km,地理坐标介于东经 109°47'42"—109°55'61",北纬 37°36'17"—37°43'34",属于无定河一级支流大理河的一级支流,流域面积 63.5 km<sup>2</sup>,沟壑密度 5.3 km/km<sup>2</sup>,为黄土丘陵沟壑区第二副区。流域多年平均降水量为 421 mm,多年平均侵蚀模数为 15 000 t/(km<sup>2</sup>·a),年均输沙量 9.23 × 10<sup>5</sup> t。

## 2 研究方法

### 2.1 典型坝选取与淤积层划分

根据本次研究的目的,典型坝的选取要保证坝地淤积物来源于降雨径流冲刷该坝控面积上的坡耕地、牧荒坡及沟谷陡崖等不同土地利用类型表层土壤及其更深层的土壤侵蚀量,各典型坝均是沟头的“闷葫芦”坝,且有一定的淤积年限。

本次调研选取的剖面都是紧邻淤地坝的,属于淤地坝坝体与坝地的交接处。由于落淤在坝地下游的淤积物主要以黄土、胶泥、沙土为多,在一场暴雨洪水中淤积物有泥也有沙,因此,在挖取剖面分层量取淤积层厚度以及采取土样时把相邻的泥和沙划为一层,

而且每一层应该遵循淤泥在上,沙在下的原则。对于只有一层淤泥而沙层有好几层的情况,将泥层和紧挨该泥层的那层沙认为是同一层。这时的沙和沙之间的区别不是太明显,可以通过淤泥与沙的颜色和纹理来区分。例如,靖边县张山坝的淤积层中有的沙颜色偏褐色,有的颜色偏黄色,这时就认为是两场相邻降雨,在第一场降雨所形成的淤积物还未完全形成,淤积物表面还未形成固结的淤积层,坝控面积上的各种土地利用类型表面上的次侵蚀创面尚未得到修复时,接着又有了另一场降雨,在上一次降雨的基础上,更容易产生侵蚀,淤积沙量也比较大,但就是缺少径流从坡面上冲刷下来的细土层,只是单纯的沙。

### 2.2 样品采集

本次样品的采集采用地形剖面法,土样为各分层土样,即按照以上选坝原则与淤积层的划分标准,把坝体的水毁残留断面挖成之字形台阶状,台阶高 1 m 左右,留取一个 1 m 见方的平台以便于取土样和测量层高。当遇到某些淤积厚度大于 1 m 的淤积层时,就以该层淤积厚度为台阶高度,接着在各台阶修整剖面准备取样。在采样时,考虑到沙粒沉积的先后顺序,在每个淤积层上用小刀从上至下按照宽度均匀取土样,尽量使每一土层高度范围内的土都能取到;根据淤积厚度的大小,对每一土层采集土样 1~2 布袋(每层采样大约 2 kg),并逐一进行标号,以便研究淤地坝坝地淤积物的物理特性,取样总深度为淤积年限内的所有淤积物的总厚度。图 1 为取样现场拍摄图。

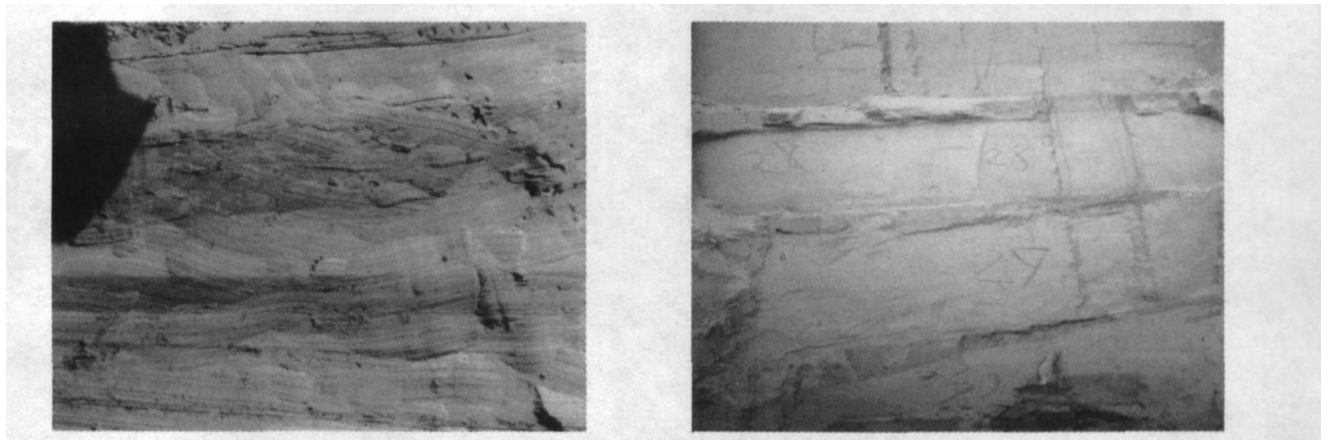


图 1 淤地坝现场淤积层拍摄图

### 2.3 淤积量的分析计算

根据收集到的资料,将 1:10 000 的典型坝的地形图进行扫描,在 AUTOCAD 将各等高线矢量化,并对其等高线进行标注。

根据自动生成面域命令将各组等高线在图上矢量化时让其闭合,然后使用 LIST 命令或者 AREA 命令,自动求出各等高线所包围的面积(等高线在坝址

断面处被截断,用来求面积的那部分等高线应该是被截断的等高线在流域控制面积内的那部分),将每两根等高线之间的形状简化为圆台状,对其体积进行求解,建立库容曲线。

利用库容曲线与实测的淤积层厚度,求得每个淤积层泥沙的淤积量,从而为淤地坝淤积机理的分析提供了依据。

### 3 淤地坝的淤积过程机理研究

受树木年轮水文学基本原理与交叉定年的启示<sup>[10]</sup>,淤地坝坝地每一层淤积泥沙量是与一次侵蚀性降雨相对应的。对于黄土高原地区,流域的产沙量绝大多数是由年内几场大暴雨形成的<sup>[11-13]</sup>,而且一般都是洪峰和沙峰同步,较大的流量对应较大的沙量,因此在淤地坝中反映的是降雨量较大的次降雨对应的淤积泥沙量也大。这样就可以根据坝地层淤积量与相应年相应站的降雨资料来反演其淤积过程,分析其淤积过程机理。

在将汇总的相应水文站降雨资料(建坝年至水毁年)与典型坝的逐场淤积量进行对应时,为了保证降雨时间序列和淤积层时间序列的一致性,应根据大雨对大沙的原则,先将淤积量大的淤积层作为控制性淤积层,将该淤积层和侵蚀性降雨指标(最大 30 min 降雨强度  $I_{30}$ , 降雨侵蚀力  $R$ <sup>[14-15]</sup>, 次降雨量  $P$ , 次平均降雨强度  $I$  等各项指标)均较大的控制性降雨场次相对应,如果这 2 个控制淤积层之间的淤积层个数较少,则在其对应的这 2 个次控制性降雨之间,按侵蚀性降雨的 4 个指标从大至小筛选出和控制性淤积层间所夹的淤积层个数相等的降雨次数,并且将所选的降雨场次和所夹的淤积层按时间先后顺序一一对应。如果 2 个控制性淤积层之间还包含有较多的淤积层,则再在这 2 个控制淤积沙层之间寻找淤积量较大的淤积层,将其作为次控制性淤积层,将该次控制性淤积层所对应的大指标的次侵蚀性场降雨作为次控制性降雨,将这一段剖面分为两段进行对应,每一段内分别按照第一种情况一一进行对应。依此类推,用同样的方法将整个淤积剖面上所有淤积层与次侵蚀性降雨进行一一对应,其对应结果可以用调研已知的淤积年限进行校核。对应过程示意图如图 1 所示。先在淤积系列中找出泥沙淤积量较大的淤积层 A, B, C 作为控制性淤积层,以其所对应的较大次降雨 A, B, C 作为控制性降雨,再在 AB 之间寻找和 3 层淤积量对应的较大的 3 场降雨,则 A, B 段之间的对应完成;而 AC 之间由于淤积层相对较多;为了保证对应的准确性,选取淤积量较多的 D 层作为次控制性淤积层,与其对应的次降雨 D 作为次控制性降雨,在 AD 和 CD 之间分别按照 AB 段方法进行依次对应<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 石畔峁坝淤积机理研究

根据以上提出的淤地坝淤积过程机理,对石畔峁坝的层淤积量与其降雨资料进行逐一对应。运用数理统计理论对每个淤积层的泥沙淤积量和其相应的

次降雨特性指标( $I_{30}$ ,  $R$ ,  $P$ ,  $I$  等各项降雨指标)进行回归分析,结果表明,泥沙淤积量和 4 个指标中  $I_{30}$ ,  $P$  和  $R$  有显著的相关性,而且依次相关性减小,复相关性系数见表 1。

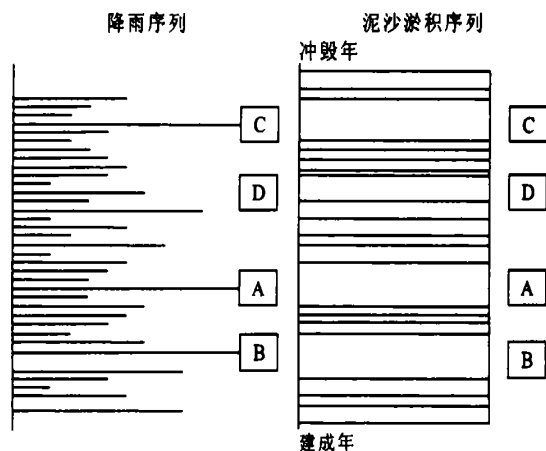


图 2 泥沙淤积量与降雨对应示意图

注:图中左侧线段的长短代表侵蚀性降雨综合性指标的大小,右侧矩形面积的大小代表淤积泥沙量的大小。

表 1 石畔峁坝层泥沙淤积量与各指标回归统计结果

回归统计	$I_{30} P$	$I_{30} I$	$I_{30} R$	$IR$	$IP$	$PR$
$R$	0.806	0.718	0.803	0.546	0.405	0.757

注:自变量个数为 2, 样本容量为 21,  $\alpha = 0.05$ ,  $R_{0.05}(21) = 0.53$ <sup>[17]</sup>。

从表 1 中可以看出,泥沙淤积量主要和  $I_{30}$ ,  $R$  和  $P$  有显著的相关性,即  $I_{30}$ ,  $R$  和  $P$  是影响产沙量的主要因素。为此,将坝地泥沙淤积量和这三个因子进行具体分析,其具体分析结果详见下表 2—4。建立的多元线性回归方程计算所得泥沙量与实测的泥沙对比分析结果如图 3 所示。

表 2 石畔峁坝层泥沙淤积量与  $I_{30}$ ,  $R$  和  $P$  的回归统计结果

回归统计项目	统计值
复相关系数 $R$	0.819
$R^2$	0.670
决定系数 $R^2$	0.612
标准误差	0.013
观测值	21

表 3 石畔峁层泥沙淤积量与  $I_{30}$ ,  $R$  和  $P$  的方差分析结果

项目	$df$	$SS$	$MS$	$F$	Sign. $F$
回归分析	3	525 871.8	175 290.6	10.543	0.000 375
残差	17	282 635.1	16 625.59	—	—
总计	20	808 507	—	—	—

注:  $df$  为自由度;  $ss$ ,  $ms$  为残差。下同。

表 4 回归曲线系数及置信度区间

项目	系数	标准误差	t 检验	P 值	下限 95 %	上限 95 %
截距	- 286.814	203.532	- 1.410	0.177	- 716.229	142.601
$I_{30}$	969.097	501.423	1.933	0.070	- 88.813	2027.007
$P$	2.080	3.812	0.546	0.592	- 5.962	10.123
$PI_{30}$	2.100	9.547	0.220	0.829	- 18.043	22.242

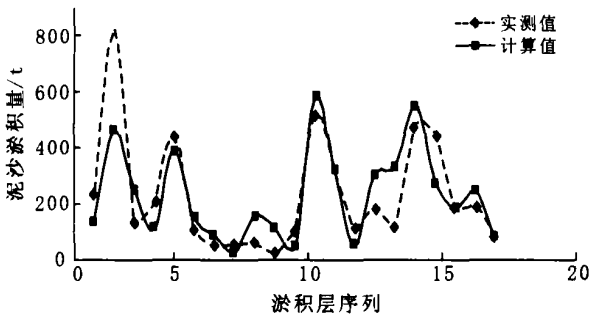


图 3 石畔坝泥沙淤积实测值和预测值的比较图

### 3.2 花梁坝淤积机理研究

同理,根据以上提出的淤地坝淤积过程机理,对花梁坝的层淤积量与其降雨资料进行逐一对应。运用数理统计理论对每个淤积层的泥沙淤积量和其相应的次降雨特性指标 ( $I_{30}$ ,  $R$ ,  $P$ ,  $I$  等各项降雨指标) 进行回归分析,结果表明:泥沙淤积量和 4 个指标中  $R$ ,  $P$  和  $I_{30}$  有显著的相关性,而且依次相关性减小,复相关性系数见表 5。

从表 5 中可以看出,泥沙淤积量主要和  $R$ ,  $P$  和  $I_{30}$  有显著的相关性,即  $R$ ,  $P$  和  $I_{30}$  是影响产沙量的主要因素。为此,将坝地泥沙淤积量和这 3 个因子进行

具体分析,其具体分析结果详见下表 6—8。建立的多元线性回归方程计算所得泥沙量与实测的泥沙对比分析结果如图 2—3 所示。

表 5 花梁坝层淤积量各指标的回归统计

回归统计	$I_{30} P$	$I_{30} I$	$I_{30} R$	$IR$	$IP$	$PR$
复相关系数 $R$	0.893	0.802	0.975	0.971	0.628	0.989

注:自变量个数为 2,样本容量为 25,  $\alpha = 0.05$ ,  $R_{0.05}(25) = 0.49$ 。

表 6 花梁坝层淤积量与  $R$ ,  $P$  和  $I_{30}$  回归统计结果

回归统计项目	统计值
复相关系数 $R$	0.993
$R^2$	0.985
决定系数 $R^2$	0.983
标准误差	0.176
观测值	25

表 7 花梁坝层淤积量与  $R$ ,  $P$  和  $I_{30}$  方差分析表

项目	df	SS	MS	F	Sign. F
回归分析	3	43.314	14.4378	468.5725	2.17721E-19
残差	21	0.647	0.0308	—	—
总计	24	43.961	—	—	—

表 8 花梁坝层淤积量与  $R$ ,  $P$  和  $I_{30}$  的回归曲线系数及置信度区间

项目	系数	标准误差	t 检验	P 值	下限 95 %	上限 95 %
截距	0.5842	0.18967	3.080	0.005677	0.190	0.979
$P$	- 1.4830	0.44933	- 3.300	0.003414	- 2.417	- 0.548
$I_{30}$	- 0.0230	0.00317	- 7.121	5.05E-07	- 0.029	- 0.016
$PI_{30}$	0.1095	0.00669	16.370	1.97E-13	0.096	0.123

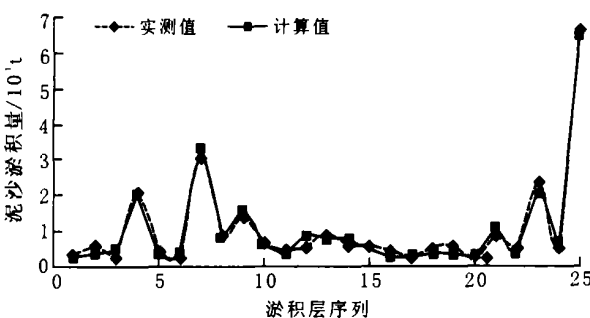


图 4 花梁坝泥沙淤积实测值和预测值比较

本文主要通过选取典型坝,挖取剖面,进行剖面分析,获取坝地淤积物的层淤积量,将其与收集到的淤积年限内相应站的降雨资料进行综合分析,来研究淤地坝的淤积过程机理。结果表明,淤地坝的层泥沙淤积量与其对应的次侵蚀性降雨的  $I_{30}$ ,  $P$ ,  $R$  这 3 个因素关系较为密切,并建立坝控流域每层泥沙淤积量与侵蚀性降雨的关系。其计算值和实测值拟合结果较好。该研究成果为黄土高原地区淤地坝的水毁研究提供了一定的理论基础。

(下转第 31 页)

开始利用坡面土地。这样可以兼顾生态效益、经济效益和社会效益。但坡面土地利用程度应受到一定的限制,除了坡下部保留一定面积的原始植被外,也要保证坡上部较陡部分土地不被利用,保留原有植被。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 崔启武,边履刚,史继德,等.林冠对降水的截流作用[J].林业科学,1980,16(2):141—146.
- [2] Mass man W J. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest[J]. Agric Meteorol,1983,28:261—286.
- [3] 王佑民.我国林冠降水再分配研究综述( ) [J].西北林学院学报,2000,15(3):1—7.
- [4] 郭景唐.华北油松人工林树枝特征函数对干流量影响的研究[A].见:周晓峰主编.中国森林生态系统定位研究[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1994.400—412.
- [5] 游珍,李占斌,蒋庆丰.植被对降雨的再分配分析[J].中国水土保持科学,2003,1(3):102—105.
- [6] 李勇,张建辉,杨俊诚,等.陕北黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀变异的空间格局[J].水土保持学报,2000,14(4):18—21.
- [7] 王文龙,雷阿林,李占斌,等.黄土区不同地貌部位径流泥沙空间分布试验研究[J].农业工程学报,2003,19(4):40—43.
- [8] 张华嵩.植被恢复过程与防止水土流失效果的研究[J].林业科学,1989,25(1):40—50.
- [9] 王晗生,刘国彬,王青宁.流域植被整体防蚀作用及景观结构剖析[J].水土保持学报,2000,14(5):73—77.
- [10] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetation cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queenlands coalmines[J]. Aust J Soil Res, 2002,38:313—327.
- [11] Hofmann L, Ries R E, Gilly J E. Relationship of runoff and soil loss to ground covers of native and reclaimed grazing land[J]. Agronomy Journal, 1983,75:599—602.
- [12] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104—110.
- [13] 胡良军,邵明安.论水土流失研究中的植被覆盖度量指标[J].西北林学院学报,2001,16(1):40—43.
- [14] 郭忠升.水土保持林有效覆盖率及其确定方法的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):67—72.
- [15] 王占礼,邵明安,常庆瑞.黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J].西北农业大学学报,1998,26(4):101—105.
- [16] 唐克丽.黄土高原水土流失与土壤退化的研究[J].水土保持通报,1987,7(6):12—18.
- [17] 王万忠,焦菊英,郝小品.黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系[J].水科学进展,1999,10(2):165—169.

(上接第13页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J].农业工程学报,2003,19(6):302—306.
- [2] 方学敏,万兆惠,匡尚富.黄河中游淤地坝拦沙机理及作用[J].水利学报,1998(10):49—53.
- [3] 胡建军,牛萍,曹炜.浅谈黄河上中游地区水土保持淤地坝工程的作用[J].西北水资源与水工程,2002,13(2):28—31.
- [4] 李敏.淤地坝在黄河中游水土流失防治中的作用[J].人民黄河,2003,25(12):25—27.
- [5] 陕西省水保局陕北淤地坝调查组.1994年陕北地区淤地坝水毁情况调查[J].人民黄河,1995(1):15—18.
- [6] 王允升,王英顺.黄河中游地区1994年暴雨洪水淤地坝水毁情况和拦淤作用调查[J].中国水土保持,1995(8):23—28.
- [7] 黎汝静,刘思忆.关于淤地坝水毁研究的几个问题[J].中国水土保持,1995(12):43—44.
- [8] 方学敏,曾茂林.黄河中游淤地坝坝系相对稳定研究[J].泥沙研究,1996(3):12—20.
- [9] 曾茂林,康玲玲,朱小勇.黄河中游淤地坝坝系相对稳定研究[J].人民黄河,1997(2):29—33.
- [10] 李江风,袁玉江,由希尧.树木年轮水文学研究与应用[M].北京:科学出版社,2000.
- [11] 李占斌.黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究[J].西安理工大学学报,1996,12(3):177—183.
- [12] 李占斌,符素华,靳顶.流域降雨侵蚀产沙过程水沙传递关系研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):44—49.
- [13] 李占斌,符素华,鲁克新.秃尾河流域暴雨洪水产沙特性的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):88—91.
- [14] 张超,杨秉根.计量地理学基础(第2版)[M].北京:高等教育出版社,1993.145—153.
- [15] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6—11.
- [16] 魏霞,李占斌,沈冰,等.陕北子洲县典型淤地坝淤积过程和降雨关系的研究[J].农业工程学报,2006,22(9):80—84.
- [17] 黄振平.水文统计[M].天津:河海大学出版社,2003.