

基于 MIKE 模型的不同淤地坝型组合情景对小流域侵蚀动力和输沙量的影响

袁水龙¹, 李占斌^{1,2}, 李鹏¹, 高海东¹, 陈兵¹, 王飞超¹, 王伟¹

(1.西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,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)

摘要:为科学认识黄土高原淤地坝建设对小流域侵蚀动力过程的影响,通过分布式水文模型 MIKE SHE 和一维水动力模型 MIKE 11 耦合模拟了王茂沟流域的洪水过程,并计算了流域主沟不同断面的侵蚀动力参数和不同坝型组合的减沙效益。结果表明:(1)淤地坝建设在不同程度上改变了小流域沟道的侵蚀动力分布,坝系建成后沟道的侵蚀动力参数减幅最大。(2)小流域径流侵蚀功率表现为上中游剧烈变化,下游趋于稳定,且下游径流侵蚀功率明显小于上游。(3)淤地坝建设可以有效减小流域的输沙量,其中单独建设骨干、中型、小型坝相比流域未建坝时,输沙模数分别减少 24.74%,47.11%,64.11%;流域坝系建成后减沙效益最明显,流域输沙量减少 83.92%。研究成果可为黄土高原淤地坝减沙效益评估提供科学参考。

关键词:土壤侵蚀;淤地坝;侵蚀动力;MIKE 模型;黄土高原

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0030-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2019.04.005

Effect of Different Check Dam Type Combined Scenarios on the Erosion Dynamics and Sediment Transport in Small Watershed Base on the MIKE Model

YUAN Shuilong¹, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng¹, GAO Haidong¹,

CHEN Bing¹, WANG Feichao¹, WANG Wei¹

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to scientifically understand the effect of the construction of check dam system on the erosion dynamic process in small watershed on the Loess Plateau, the storm flood process in the Wangmaogou small watershed was simulated by coupling the distributed hydrological model MIKE SHE with the one-dimensional hydrodynamic model MIKE 11, and the erosion dynamic parameters of the different sections of the main ditch as well as the sediment reduction benefits of different combination of dam types were calculated. The results showed that: (1) The erosion dynamic distribution of the gullies in the small watershed was changed by dam construction, and the erosion dynamic parameters of gullies decreased the most after the dam system was completed. (2) The runoff erosion power varied greatly in the upper and middle reaches, while tended to be stable in the lower reaches, and the runoff erosion power in the lower reaches was obviously lower than that in the upper reaches. (3) The construction of check dam could effectively reduce the sediment transport in the watershed. When the key, medium and small dams were built separately, the sediment transport modulus were reduced by 24.74%, 47.11% and 64.11%, respectively, compared with those without dams in the watershed. After the completion of the dam system, the benefit of sediment reduction was the most obvious, and the sediment transport modulus was reduced by 83.92%. The research results were intended to provide scientific reference for evaluating sand reduction benefits of check dam on the Loess Plateau.

Keywords: soil erosion; check dam; erosion dynamic; MIKE model; Loess Plateau

收稿日期:2018-12-24

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402404);国家自然科学基金重点项目(41330858)

第一作者:袁水龙(1990—),男,陕西扶风人,博士研究生,主要从事流域水文模拟与水土保持研究。E-mail:yuanshuilong@163.com

通信作者:李占斌(1962—),男,河南南阳人,博士,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zhanbinli@126.com

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一,黄河的泥沙主要来源于此^[1]。坡面和沟道共同构成黄土高原地区的沟坡系统,完成土壤侵蚀、输移、冲淤等各种复杂的物理过程,并最终将泥沙带到流域出口,而流域侵蚀动力是完成这一复杂过程的内在驱动力。黄土高原地区多以水力侵蚀为主,侵蚀动力主要包括降雨的击溅动能、坡面产汇流形成的坡面薄层水流的冲刷动能,以及沟道的径流侵蚀动能。降雨动能是水力侵蚀最直接的影响因素,也是研究最早的动力因子^[2-3]。李光录等^[4]提出了降雨动能的计算公式,并建立了植被覆盖对降雨动能影响的表达式。坡面流速的计算公式大多是参照明渠均匀流理论进行计算与分析,一般通过建立流速与流量、坡度之间的关系式来获取坡面流流速,认为坡面流流速与流量、坡度之间呈良好的正相关关系^[5]。径流剪切力也是目前大多数土壤侵蚀模型采用的动力参数,有学者^[6]通过试验水槽研究了土壤剥蚀率和径流剪切力的关系,证明地表径流是水土流失的主要驱动力;王晨洋等^[7]研究表明,当径流剪切力大于土壤的临界剪切应力时,土壤颗粒会被剥蚀。沟道径流对土壤的侵蚀过程是一个做功消耗能量的过程。孟震等^[8]提出水流功率的概念,即单位面积水体势能与动能随时间的变化率。国内外有许多学者^[9-13]先后对坡面径流功率量化方法进行了研究,并建立径流功率与土壤剥蚀率之间的回归方程。上述侵蚀动力参数研究多集中在坡面尺度,鲁克新等^[14]、于国强等^[15]、龚珺夫等^[16]从流域尺度上提出了径流侵蚀功率的概念,即径流侵蚀功率等于流域径流深和洪峰流量的乘积。该概念具有明确的物理意义,且具有较高的产沙预报精度。虽然目前国内外学者关于侵蚀动力参数进行了大量研究,但由于侵蚀动力参数实测困难,因此研究多集中于坡面平均侵蚀动力参数与土壤侵蚀之间的关系,对流域侵蚀动力过程的研究还鲜有报道。淤地坝作为黄土高原最主要的沟道治理措施,在黄土高原建设较多,截止 2011 年第 1 次水利普查,黄土高原仍有淤地坝 5.6 万座^[17]。淤地坝建设明显改变了小流域暴雨洪水过程^[18],进一步导致小流域侵蚀动力过程的改变。本文通过分布式水文模型 MIKE SHE 和一维水动力模型 MIKE 11 耦合,模拟了王茂沟小流域暴雨洪水过程,计算了小流域主沟不同断面的侵蚀动力参数,评估了不同坝型组合的减沙效益。研究成果可为黄土高原淤地坝减沙效益评估提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王茂沟流域地处陕西省榆林市绥德县境内,位于东经 110°20′26″—110°22′46″,北纬 37°34′13″—37°36′03″,

属于无定河流域右岸的二级支沟。流域面积 5.97 km²,主沟道长度 3.80 km,流域海拔 940~1 188 m,沟床平均比降 2.70%,沟壑密度 4.30 km/km²。气候为温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,温差较大。根据绥德水土保持试验站多年实测资料统计,流域多年平均气温 8℃,最高温度 39℃,最低温度 -27℃,多年平均无霜期 175 d;水面年蒸发量 1 519 mm,最大 1 600 mm;多年平均降水量 475.10 mm,年最大降水量 735.30 mm,年最小降水量 232 mm,年降水量极值比为 3.17;年际变化大且年内分布不均,每年 7—9 月降水量占全年降水量 65%左右。王茂沟流域从 20 世纪 50 年代开展水土保持工作,截至 2016 年底,王茂沟正常运行的淤地坝共有 23 座,其中骨干坝 2 座,中型坝 7 座,小型坝 14 座(图 1)。

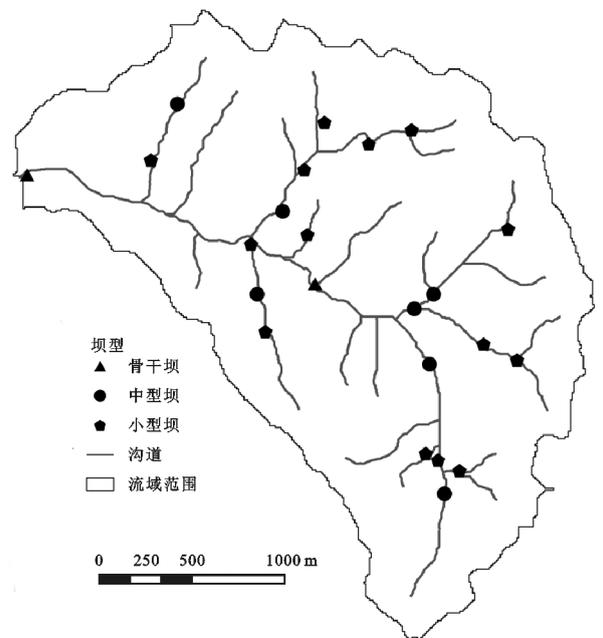


图 1 王茂沟流域淤地坝布置

1.2 数据来源

径流泥沙数据和气象数据均来源于黄河水土保持绥德治理监督局。绥德站在王茂沟流域设有气象站和把口站,流域把口站监测了王茂沟流域 1962—1966 年的径流泥沙数据,主要包括水位、流量、含沙量和输沙量。地形数据来源于国家测绘局,大地基准为 1980 西安坐标系,等高距为 5 m,纸质地图扫描后经空间配准、拼接、手动跟踪数字化生成 Shape 文件,然后使用 Hutchinson 法生成分辨率为 5 m 的 DEM。流域土地利用由 Quick Bird 影像目视解译而来,影像分辨率为 0.61 m,UTM 投影,云量覆盖为 0,并通过绥德站 60 年代土地利用资料进行校正,基本符合当时的土地利用实际。沟道断面数据利用 Arc GIS 10.1 中的 3D Analyst 工具从 5 m 分辨率 DEM 提取,并结合实地测量对提取的断面数据进行修正。淤

地坝的几何特征数据来源于实地测量,主要包括坝长、坝高、坝宽及泄水建筑物的几何尺寸。

1.3 沟道侵蚀动力参数

(1)流速(V)。流速是径流侵蚀动力和泥沙输移过程中最重要的水力学参数,由于实测流速具有很大的不确定性,所以本文通过求解圣维南方程得到断面流量,再除以实测断面面积,求得断面平均流速。

$$V=Q/A \quad (1)$$

式中: V 为断面流速(m/s); Q 为断面流量(m^3/s); A 为断面面积(m^2)。

(2)径流剪切力(τ)。径流剪切力是反映径流在流动时对土壤剥蚀力大小的参数,王瑄等^[19]提出径流剪切力公式为:

$$\tau=\gamma RJ \quad (2)$$

式中: τ 为径流剪切力(N/m^2); γ 为水流容重(kg/m^3); R 为水力半径(m); J 为水力能坡。

(3)径流功率表征作用于单位面积的水流所消耗的功率,反映剥蚀一定量土壤所需功率,其表达式为:

$$\omega=\gamma qs=\lambda h V J=\tau V \quad (3)$$

式中: ω 为径流功率($N/(m \cdot s)$); q 为单宽流量($m^3/(m \cdot s)$); h 为水深(m); V 为平均流速(m/s); J 为水力能坡; γ 为水流容重(kg/m^3)。

(4)径流侵蚀功率。径流深和洪峰流量是反映流域次暴雨洪水过程特征的 2 个重要参数,径流深和洪峰流量的乘积间接反映了降雨的时空分布特征和流域下垫面对径流汇流过程的影响,采用鲁克新等^[14]提出的次暴雨径流侵蚀功率的概念:

$$E=Q'_m H \quad (4)$$

式中: E 为次暴雨径流侵蚀功率($m^4/(s \cdot km^2)$); H 为次暴雨平均径流深(m); Q'_m 为洪峰流量模数($m^3/(s \cdot km^2)$),其大小等于次暴雨洪水洪峰流量与流域面积的比值。

1.4 基于 MIKE 模型的流域洪水模型构建

在 MIKE SHE 模型中定义流域的范围,研究区面积 5.97 km^2 ,以 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的网格对流域进行空间离散,共计 29 700 个网格。地形文件通过将 5 m 分辨率的 DEM 转化矢量点文件,并导入模型,采用三角形内插法进行插值。在次暴雨洪水过程中,流域的蒸散发量很小,因此忽略不计。利用 MIKE 软件自带工具将降水数据转化为 dfs0 文件并输入模型。根据研究区的土地利用和模型网格特点,将土地利用类型重新划分为耕地、草地、林地、园地、居民用地和交通用地 6 类。模型采用在降水数据中扣除土壤入渗量作为模型的降水输入,入渗量取值主要参考土壤类型(经验取值 $2 \sim 20 \text{ mm/h}$),并考虑植被影响^[20]。利用 Arc GIS 10.1 软件从栅格大小为 5 m 分辨率的

DEM 提取流域的河网矢量文件(*.shp),并将河网矢量文件导入 MIKE 11 模型,研究区共定义 6 条沟道,通过河网文件中的水工建筑物来表达沟道中的淤地坝。将建好的 MIKE 11 模型和 MIKE SHE 模型耦合,建立王茂沟小流域暴雨洪水模型。

1.5 模型率定与验证

采用试错法对王茂沟流域暴雨洪水模型进行率定。选择流域出口实测的径流过程作为率定参量,选取观测年限内(1961—1964 年)2 场典型暴雨洪水过程对模型进行率定,选择其他 2 场暴雨洪水资料进行验证。分布式水文模型在参数率定时应尽可能选取较少的参数,过多的参数不一定提高模型的精度,而且会导致参数率定过程变得极为复杂^[21-22]。因此本文选取较少的参数,采用人工试错法对模型参数进行率定,需要率定的参数有:滞蓄洪量、曼宁系数、渗漏系数和各地类土壤入渗率。以决定系数 R^2 (公式 5)、Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE(公式 6)判断模型模拟效果^[23-24]。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{o})(S_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{s})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{o})^2} \in (-\infty, 1] \quad (6)$$

式中: O_i 为径流实测值(m^3/s); S_i 为径流模拟值(m^3/s); \bar{o} 为径流实测值均值(m^3/s); \bar{s} 为径流模拟值均值(m^3/s)。

1.6 不同坝型淤地坝组合情景设计

淤地坝分为骨干坝、中型坝和小型坝 3 类,其中骨干坝由 3 大件构成,包括:坝体、溢洪道、放水建筑物;中型坝由 2 大件构成,包括:坝体、放水建筑物;小型坝由 1 大件构成,只包括坝体。为了探究不同类型淤地坝及其不同组合对小流域沟道侵蚀动力过程作用的大小,共设计 8 种不同坝型组合情景(表 1)。

为了分析沟道侵蚀动力参数沿程变化情况,将主沟道从上游到流域出口划分 12 个断面,其中王茂沟 2 号坝位于断面 7~8,关地沟 1 号坝位于断面 5~6,关地沟 4 号坝位于断面 2~3,关地沟 2 号坝位于断面 3~4(表 2)。

2 结果与分析

2.1 洪水模拟结果评价

本文选取的 4 场降雨是王茂沟小流域 1962—1966 年期间出现频率较高的雨型,具有较好的代表性。由表 3 可以看出,模型率定期的 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)均高于 0.8,决定系数分别为 0.90,

0.88,洪峰流量的相对误差仅为 1.72%,3.33%。验证期 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.60,0.71,决定系数均为 0.72,洪峰流量相对误差分别为 11.05%,

12.05%。模型验证期和率定期的 Nash-Sutcliffe 效率系数均高于 0.6,因此模型具有较高的精度,可以用来情景分析。

表 1 不同坝型组合的情景设计

坝型组合情景	编码	流域不同坝型组合	坝名
W	1	未建坝	—
G	2	只建骨干坝	王茂沟 1 号坝、王茂沟 2 号坝
Z	3	只建中型坝	黄柏沟 2 号坝、埝堰沟 1 号坝、康和沟 2 号坝、死地嘴 1 号坝、马地嘴坝、关地沟 1 号坝、关地沟 4 号坝
X	4	只建小型坝	黄柏沟 1 号坝、埝堰沟 2 号坝、埝堰沟 3 号坝、埝堰沟 4 号坝、康和沟 1 号坝、康和沟 3 号坝、死地嘴 2 号坝、王塔沟 1 号坝、王塔沟 2 号坝、关地沟 2 号坝
GZ	5	骨干和中型坝组合	—
GX	6	骨干和小型坝组合	—
ZX	7	中型和小型坝组合	—
GZX	8	骨干、中型和小型坝组合	—

表 2 不同断面里程及控制流域面积

断面	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	断面 6	断面 7	断面 8	断面 9	断面 10	断面 11	断面 12
里程/m	200	400	600	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600	3800
控制面积/km ²	0.05	0.34	0.39	0.61	1.06	2.25	2.64	3.07	4.46	5.26	5.45	5.58
淤地坝位置	关帝沟 4 号坝		关帝沟 2 号坝	关地沟 1 号坝	王茂沟 2 号坝							

表 3 王茂沟流域模型流量过程率定及验证结果

阶段	洪水编号	流量实测值/ (m ³ ·s ⁻¹)	流量模拟值/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	决定系数	Nash-Sutcliffe 效率系数
率定期	196303	0.58	0.59	1.72	0.90	0.80
	196404	0.90	0.87	3.33	0.88	0.85
验证期	196201	1.90	1.69	11.05	0.72	0.60
	196304	0.83	0.73	12.05	0.72	0.71

2.2 不同坝型组合情景下沟道侵蚀动力参数沿程分布

本文选取断面最大流速、最大径流剪切力和最大径流功率 3 个侵蚀动力参数进行分析。流速是径流侵蚀动力和泥沙输移过程中最基本的水力学参数,通过主沟道流速的沿程分布,可以揭示不同坝型组合对沟道侵蚀动力调控作用。由图 2(a)可以看出,从主沟道上游到下游,8 种情景的最大断面流速呈现沿程增大的趋势,部分断面之间呈减小趋势。这是由于水流沿沟道向下运动过程中,势能逐渐转换为动能,而且支沟的来水不断汇入主沟道,因此流速整体呈增大趋势。部分断面之间流速急剧减小,是因为这些断面之间建有淤地坝,淤地坝的修建明显减小了坝后流速。对比 8 种情景,情景 W(未建坝)沿程各断面的流速最大,情景 GZX(骨干坝、中型坝、小型坝)沿程各断面的流速最小,其他情景沿程的断面最大流速介于这 2 种情景之间。说明当坝系形成后对沟道流速的沿程分布影响最大,明显减小了沿程的流速,减少了径流对沟道的侵蚀。由图 2(b)可以看出,8 种情景的最大断面最大径流剪切力,沿程呈现先增大后减小趋势,断面 6 以下沟道的径流剪切力明显大于断

面 6 以上沟道。径流和沟床界面的径流剪切力能够克服土壤颗粒之间的黏接力,从而使土粒疏散分离,为径流输移泥沙提供物质来源。径流剪切力越大,作用在土壤上的有效剪切力就越多,剥离的土壤越多,侵蚀越严重。径流输沙率为径流剥离的土壤总量与泥沙输移过程中沉积量之差^[25],说明王茂沟流域主沟中下游的侵蚀强于上游。对比 8 种情景,情景 W(未建坝)沿程各断面的径流剪切力最大,情景 GZX(骨干坝、中型坝、小型坝)沿程各断面的径流剪切力最小,其他情景沿程的断面径流剪切力介于这 2 种情景之间,因此坝系建成后对沟道径流剪切力的分布影响最大,明显减小了沿程的径流剪切力。径流功率为径流剪切力和流速的乘积,径流功率的沿程分布与径流剪切力的沿程分布规律类似,因此不再赘述。总之,不同坝型组合在不同程度上改变了小流域主沟道的侵蚀动力分布,坝系建成后(GZW)对沟道的侵蚀动力参数减小最为明显,坝系建成后流域出口断面的最大流速、径流剪切力、径流功率分别减小 10.69%,31.08%和 46.42(表 4)。

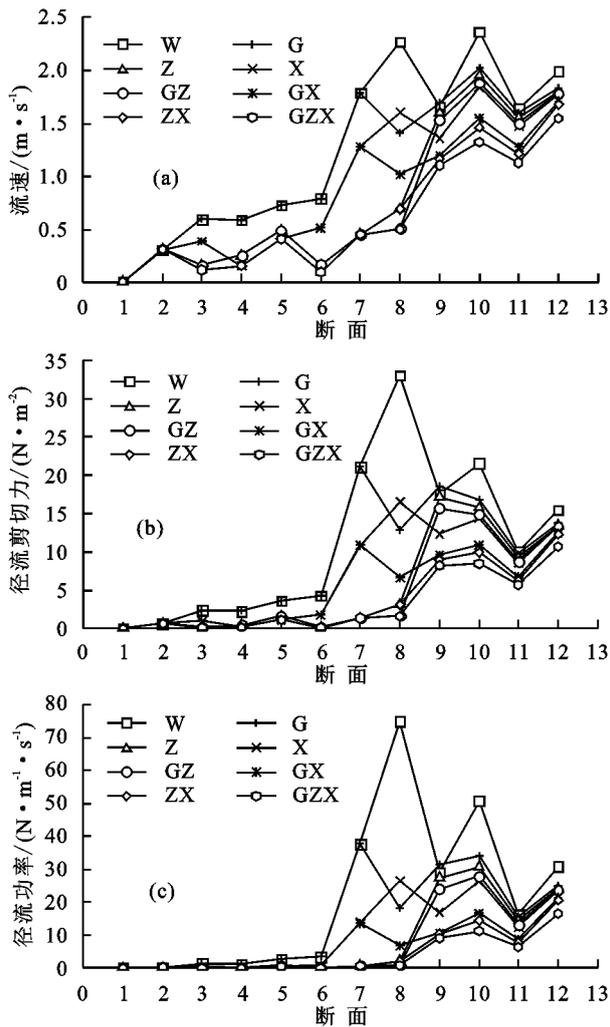


图 2 不同坝型组合情景下沟道侵蚀动力参数沿程分布

2.3 不同坝型组合情景下径流侵蚀功率沿程分布

流域产流产沙过程是一个极其复杂的物理过程，

表 4 不同坝型组合情景下流域出口断面侵蚀动力参数统计

坝型组合 情景	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速 减小/%	径流剪切力/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	径流剪切力 减小/%	径流功率/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	径流功率 减小/%
W	1.99	—	15.51	—	30.86	—
G	1.84	7.64	13.71	11.61	25.10	18.65
Z	1.80	9.70	13.45	13.31	24.11	21.89
X	1.78	10.65	13.31	14.20	23.62	23.46
GZ	1.79	10.30	13.36	13.89	23.79	22.93
GX	1.71	14.22	12.54	19.17	21.40	30.66
ZX	1.68	15.58	12.27	20.86	20.62	33.18
GZX	1.55	22.26	10.69	31.08	16.54	46.42

2.4 不同坝型组合对小流域输沙量的影响

径流侵蚀功率能够较好地反映流域的侵蚀产沙情况,以往很多学者^[26-27]通过大量的实测资料建立了径流侵蚀功率与输沙模数的回归方程,用于流域产沙预报。本文根据王茂沟小流域把口站 1961—1964 年实测的次降雨径流泥沙资料,分析统计得到在上述时段流域次洪的径流深、洪峰流量模数和输沙模数,并计算相应的径流侵蚀功率。将王茂沟小流域 1961—

它是降水和流域下垫面共同作用的结果。在次暴雨条件下,降雨和流域下垫面相互作用最终表现为流域出口的洪水特征,流域出口的洪水特征能间接反映降水和流域下垫面特性对流域侵蚀产沙的综合影响。径流深和洪峰流量是反映流域次暴雨洪水过程特征的 2 个重要参数,径流深代表次暴雨在流域上产生的洪水总量,反映降水量大小以及流域不同下垫面对降水的再分配作用;而洪峰流量则代表洪水的强度,反映降水的时空分布特征和流域下垫面对径流汇流过程的影响。径流深和洪峰流量分别反映流域次暴雨洪水的某些特性,但均不能反映次暴雨洪水的综合特性,特别是侵蚀产沙方面的特征,因此本文通过计算鲁克新等^[14]提出的径流侵蚀功率分析不同坝型组合对流域侵蚀产沙的影响。径流侵蚀功率作为流域次暴雨侵蚀产沙的侵蚀动力指标,反映了不同断面所控制流域范围内的侵蚀动力情况,通过公式(4)计算流域主沟道不同断面的径流侵蚀功率。由图 3 可以看出,对比 8 种情景,情景 W(未建坝)沿程各断面的径流侵蚀功率最大,情景 GZX(骨干坝、中型坝、小型坝)沿程各断面的径流侵蚀功率最小,其他情景沿程的断面径流侵蚀功率介于这 2 种情景之间,说明坝系建成后,流域的径流侵蚀功率减小幅度最大。由于淤地坝建设对坡面的侵蚀动力过程基本没有影响,因此淤地坝的建设主要是减小了沟道的侵蚀动力。8 种情景下流域上中游径流侵蚀功率起伏变化大,到了流域下游(断面 9 以下)径流侵蚀功率基本保持不变,说明随着流域面积的增大,流域侵蚀产沙过程趋于稳定。

1964 年所有场次洪水的径流侵蚀功率和流域输沙模数点绘在双对数坐标系中,并进行回归分析(图 4)。由图 4 可以看出,在研究时段内王茂沟流域的次暴雨输沙模数随着径流侵蚀功率增大而增大,次暴雨径流侵蚀功率与输沙模数之间具有良好相关关系。通过回归分析,建立了用于描述王茂沟流域研究时段内的次暴雨洪水径流侵蚀功率与输沙模数之间相关关系的回归方程:

$$M_s = 701157P^{0.889} \quad R^2 = 0.89, \quad n = 23 \quad (7)$$

式中: M_s 为次暴雨输沙模数 (t/km^2); P 为次暴雨径流侵蚀功率 ($m^4/(s \cdot km^2)$); n 为次暴雨洪水场次。

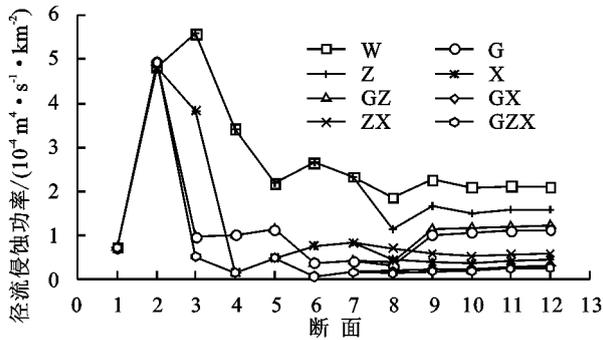


图3 不同坝型组合情景下径流侵蚀功率沿程分布

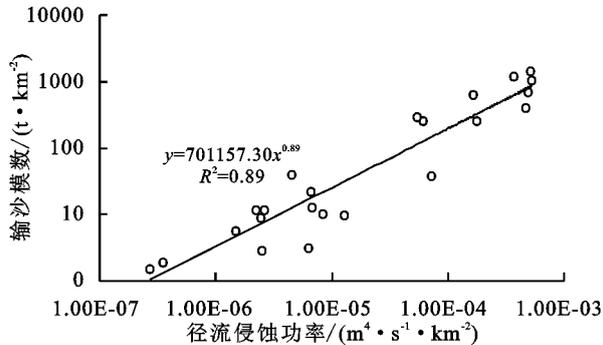


图4 王茂沟流域次暴雨径流侵蚀功率与输沙模数关系

经分析计算,公式(7)的 F 检验值为 45.50。取 $\alpha = 0.05$,由 F 分布表查得 $F_{0.95}(1,21) = 4.32$,而 $45.50 > 4.32$,因此,公式(7)通过了 $\alpha = 0.05$ 的检验,具有较高的置信度。根据公式(7)计算 8 种情景下,流域的输沙模数,计算结果见表 5。

表5 不同坝型组合的流域输沙模数估算

坝型组合 情景	洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	洪水 总量/ m^3	径流侵蚀功率/ ($m^4 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$)	输沙模数/ ($t \cdot km^{-2}$)	输沙模数 减少/%
W	1.26	4853.93	1.72E-04	314.99	-
G	0.92	4828.87	1.25E-04	237.07	24.74
Z	0.84	3556.61	8.38E-05	166.61	47.11
X	0.76	2541.04	5.42E-05	113.04	64.11
GZ	0.78	3532.24	7.73E-05	155.03	50.78
GX	0.51	2518.06	3.60E-05	78.65	75.03
ZX	0.50	1802.36	2.53E-05	57.41	81.78
GZX	0.44	1779.58	2.20E-05	50.66	83.92

情景 W(不建坝)时流域的输沙模数最大,达到 $314.99 t/km^2$,情景 GZX(坝系建成后)流域的输沙模数最小,为 $50.66 t/km^2$,其他情景的输沙模数介于两者之间(表 5),说明骨干坝、中型坝和小型坝合理配置时淤地坝系的减沙效益最为明显。相比流域不建坝时,坝系建成后输沙模数减小了 83.92%,说明坝系建设急剧减小了小流域的输沙模数,将大量的泥沙拦截在坝系内,有效减少了出沟泥沙。对比情景 W(不建坝)、情景 G(骨干坝)、情景 Z(中型坝)和情景 X

(小型坝)4 种情景,可以看出情景 G 使流域输沙模数减少 24.74%,情景 Z 使输沙模数减少 47.11%,情景 X 使输沙模数减少 64.11%,其中小型坝的减沙效益最为明显,这是由于流域中小型坝的数量最多,且没有放水建筑物,对区间的来水来沙全拦全蓄。

3 讨论

淤地坝系的拦沙减蚀作用主要体现在 3 个方面:淤地坝系直接拦截的泥沙、淤地坝系由于抬高侵蚀基准面减小了淤积面以下的沟蚀和重力侵蚀发生的概率,以及淤地坝系通过改变流域侵蚀动力而减沙^[28-32]。已有研究多集中在前 2 个方面,对侵蚀动力过程影响的研究还很少,本文通过 MIKE 模型模拟了淤地坝系对流域侵蚀动力过程的影响。本研究分析得出,不同坝型组合在不同程度上改变了沟道的侵蚀动力分布,坝系建成后(情景 GZX)减幅最大。流域侵蚀动力参数均是通过水动力参数计算,淤地坝系建设会影响流域的洪水过程^[18],水动力过程的改变必然导致侵蚀动力过程不同程度的改变。不同坝型组合下流域下游的径流侵蚀功率明显小于流域上游的径流侵蚀功。龚珺夫等^[16]在延河流域的研究成果表明,延河流域的径流侵蚀功率表现为上游大、下游小,与本文的研究成果一致。延河流域面积 $7\ 725 km^2$,王茂沟流域的面积仅为 $5.97 km^2$,2 个流域面积相差如此之大,但径流侵蚀功率均表现为上游大、下游小的分布特征,说明流域径流侵蚀功率的这种分布规律与流域面积等特征无关,而只取决于降雨径流的汇聚过程。径流侵蚀功率可以很好地表征流域整体的侵蚀动力情况,与流域出口断面的输沙模数有较好的相关关系^[33],本文建立了王茂沟流域径流侵蚀功率与输沙模数的回归模型,评估了不同坝型组合的减沙效益。流域分别建设骨干、中型、小型坝相比流域未建坝时,输沙模数分别减少 24.74%,47.11%,64.11%,其中小型坝减沙效益最为显著。这是由这 3 种坝型自身特点及数量决定的,小型坝没有放水建筑物,对上游来水来沙全拦全蓄,且数量最多,因此小型坝的减沙效益最为显著;中型坝一般设有竖井或者卧管等放水建筑物,数量少于小型坝,但多于骨干坝,因此减沙效益次之;骨干坝由于数量最少,且同时建有放水建筑物和溢洪道,因此减沙效益最小,但骨干坝作为小流域控制性工程,对整个坝系的安全稳定具有重要意义。

4 结论

(1)不同坝型组合在不同程度上改变了小流域主沟道的侵蚀动力分布,沟道的侵蚀动力参数减幅最大,流域出口断面的最大流速、最大径流剪切力和最大径流功率分别减小 10.69%,31.08%和 46.42%。

(2)不同坝型组合均不同程度减小了流域的径流侵蚀功率,坝系建成后径流侵蚀功率减幅最大;流域上中游径流侵蚀功率起伏变化很大,而流域下游径流侵蚀功率基本保持不变;随着流域面积的增大,流域侵蚀产沙过程趋于稳定。

(3)淤地坝建设可以有效减小流域的输沙量,其中建设骨干、中型、小型坝相比流域未建坝时,输沙模数分别减少 24.74%,47.11%,64.11%,其中小型坝的减幅最大;流域坝系建成后减沙效益最明显,流域输沙量减少 83.92%。

参考文献:

- [1] 信忠保,许炯心,马元旭.黄土高原面积—高程分析及其侵蚀地貌学意义[J].山地学报,2008,26(3):356-363.
- [2] 夏卫兵.土壤侵蚀降雨物理学简论[J].中国水土保持科学,2013,11(2):104-107.
- [3] Sanchez-Moreno J F, Mannaerts C M, Jetten V. Rainfall erosivity mapping for Santiago Island, Cape Verde [J].Geoderma,2014,217/218(3):74-82.
- [4] 李光录,吴发启,庞小明,等.泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J].水科学进展,2008,19(6):868-874.
- [5] 张永东,吴淑芳,冯浩,等.土壤侵蚀过程中坡面流体力学特性及侵蚀动力研究评述[J].土壤,2013,45(1):26-33.
- [6] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(3):713-719.
- [7] 王晨洋,马超,王玉杰,等.水力梯度影响下 WEPP 模型估计细沟侵蚀参数的可行性分析[J].农业工程学报,2017,33(8):126-133.
- [8] 孟震,陈槐,李丹勋,等.推移质平衡输沙率公式研究[J].水利学报,2015,46(9):1080-1088.
- [9] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.
- [10] 丁文峰.紫色土和红壤坡面径流分离速度与水流动力学参数关系研究[J].泥沙研究,2010(6):18-24.
- [11] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- [12] Gong J G, Jia Y W, Zhou Z H, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J].Geomorphology,2011,125(1):203-213.
- [13] Ali M, Seeger M, Sterk G, et al. A unit stream power based sediment transport function for overland flow [J].Catena,2013,101(3):197-204.
- [14] 鲁克新,李占斌,鞠花.径流侵蚀功率理论在不同尺度坡面侵蚀产沙中的应用[J].水资源与水工程学报,2009,20(4):70-73.
- [15] 于国强,李占斌,鲁克新,等.黄土高原小流域次降雨侵蚀产沙分段预报模型研究[J].土壤学报,2010,47(4):604-610.
- [16] 龚珺夫,李占斌,李鹏,等.基于 SWAT 模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J].农业工程学报,2017,33(13):120-126.
- [17] 刘晓燕,高云飞,王富贵.黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J].人民黄河,2017,39(4):1-5.
- [18] 袁水龙,李占斌,李鹏,等.MIKE 耦合模型模拟淤地坝对小流域暴雨洪水过程的影响[J].农业工程学报,2018,34(13):152-159.
- [19] 王瑄,李占斌,丁文峰,等.土壤剥蚀率与水流剪切力关系试验研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(增刊 1):592-594.
- [20] Van C S, Siegrist R L. Virus removal within a soil infiltration zone as affected by effluent composition, application rate, and soil type[J].Water Research,2007,41(3):699-709.
- [21] Cibin R, Sudheer K P, Chaubey I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model[J].Hydrological Processes,2010,24(9):1133-1148.
- [22] 王中根,夏军,刘昌明,等.分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J].自然资源学报,2007,22(4):649-655.
- [23] Henriksen H J, Troldborg L, Nyegaard P, et al. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark[J]. Journal of Hydrology,2003,280(1/4):52-71.
- [24] 吕乐婷,彭秋志,郭媛媛,等.基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J].自然资源学报,2014,29(10):1746-1757.
- [25] 郑良勇.黄土地区陡坡水蚀动力过程试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [26] 张乐涛,李占斌,王贺,等.流域系统径流侵蚀链内泥沙输移的空间尺度效应[J].农业工程学报,2016,32(13):87-94.
- [27] 孙倩,李占斌,于坤霞,等.变化环境下黄土丘陵沟壑区次暴雨输沙模型参数[J].中国水土保持科学,2016,14(6):1-9.
- [28] 冉大川,罗全华,刘斌,等.黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J].水利学报,2004,35(5):7-13.
- [29] 冉大川,姚文艺,李占斌,等.不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J].农业工程学报,2013,29(12):154-162.
- [30] 刘晓燕,高云飞,马三保,等.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报,2018,49(2):145-155.
- [31] 于国强,李占斌,张茂省,等.水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究[J].土壤学报,2012,49(4):646-654.
- [32] 袁水龙.淤地坝系对流域水沙动力过程调控作用与模拟研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [33] 李占斌,鲁克新,李鹏,等.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨产沙模型研究[C]//黄河水利科学研究院.第 6 届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.郑州:黄河水利出版社,2005:54-58.