

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.005.

刘殿君, 于森森, 孟庆东, 等. 黄河流域鄂尔多斯十大孔兑淤地坝减沙效应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 42-49.

LIU Dianjun, YU Senmiao, MENG Qingdong, et al. Effect of Check Dams on Sediment Retention of the Ten Tributaries in the Ordos Basin of the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 42-49.

黄河流域鄂尔多斯十大孔兑淤地坝减沙效应

刘殿君¹, 于森森², 孟庆东³, 陈正新¹, 王百群⁴, 于洋⁵

(1.内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010051; 2.南水北调中线信息科技有限公司,

北京 100038; 3.鄂尔多斯市水利局, 内蒙古 鄂尔多斯 017200; 4.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; 5.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:为了定量评价十大孔兑地区淤地坝的减沙效益,基于历史资料整理与实地详查,统计了十大孔兑地区1986年以来现存淤地坝的数量和分布特征;采用淤积体概化法,确定了影响淤地坝减沙量的主要参数,并计算了研究区354座淤地坝的减沙量。结果表明:十大孔兑354座淤地坝累计减沙 $3.205\ 61\times 10^7\text{t}$,其中减沙量最大的孔兑为西柳沟,达 $1.239\ 76\times 10^7\text{t}$;通过分析不同时段淤地坝的减沙特征表明,1986—1999年、2000—2009年和2010—2018年3个时段的淤地坝减沙量分别为 $4.946\ 6\times 10^6\text{t}$ 、 $1.155\ 57\times 10^7\text{t}$ 、 $1.555\ 38\times 10^7\text{t}$ 。十大孔兑地区淤地坝具有显著的减沙作用,具有很高的减沙指标(达 $5\ 720.33\sim 58\ 141.81\text{t/座}$),2000年以后的两个时间段内,随着坡面林草措施的增加,淤地坝减沙量增加,表明在这一地区,淤地坝仍然是最有效的水土保持措施之一。

关键词:黄河流域; 十大孔兑; 淤地坝; 减沙量; 水土保持措施

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0042-08

Effect of Check Dams on Sediment Retention of the Ten Tributaries in the Ordos Basin of the Yellow River Basin

LIU Dianjun¹, YU Senmiao², MENG Qingdong³, CHEN Zhengxin¹, WANG Baiqun⁴, YU Yang⁵

(1.Inner Mongolia Hydraulic Research Institute, Hohhot 010051, China; 2.Information Technology Co., Ltd., of

South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China; 3.Ordos Water Conservancy Bureau,

Ordos, Inner Mongolia 017200, China; 4.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 5.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the sediment reduction benefits of the Yudi dams in the Ten Tributaries area, and according to the historical datasets collection and detailed field investigation, we counted the number and distribution characteristics of existing check dams in the Ten Tributaries since 1986, the generalization method was conducted to determine the main parameters affecting the sediment retention, a total of 354 check dams in the study area were surveyed. The results showed that the 354 check dams in the Ten Tributaries had trapped a total of 32.056 1 million tons of sediments; the largest amount of sediment reduction in the Xiliugou was observed, which reached up to 12.397 6 million tons; the results of the sediment reduction characteristics of the check dams in different periods showed that the amounts of sediment reduction were $4.946\ 6\times 10^6$ tons, $1.155\ 57\times 10^7$ tons, and $1.555\ 38\times 10^7$ tons in 1986—1999, 2000—2009, and 2010—2018, respectively. The check dams in the Ten Tributaries area had significant sediment reduction effects, which had high sediment reduction index ($5\ 720.33\sim 58\ 141.81$ tons per check dam). After 2000, the sediment reduction of the check dams still increased with the increase of forest and grass measures on the slope, suggesting that the check

收稿日期:2021-06-24

修回日期:2021-08-10

资助项目:内蒙古自治区水利科技重大专项(213-03-10-303002-NSK2017-M2);内蒙古自治区水利科技项目(NSK202109)

第一作者:刘殿君(1982—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,高级工程师,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:liudianjun-kabo@163.com

通信作者:于洋(1985—),男,河北承德人,博士,副教授,主要从事植被恢复与流域治理研究。E-mail:theodoreyy@gmail.com

<http://stbcj.paperonce.org>

dams is the one of the most effective soil and water conservation measures in the Ten Tributaries area.

Keywords: Yellow River Basin; Ten Tributaries; check dam; sediment retention; soil and water conservation measures

淤地坝是重要的水土保持工程措施之一,自 20 世纪 50 年代以来,我国进行了大量的建设,广泛分布于黄土高原地区的丘陵沟壑区,淤地坝在控制沟道侵蚀、拦蓄泥沙、淤地造田、促进水资源利用和改善生态环境等方面发挥了重要作用。淤地坝对泥沙的大量拦蓄显著影响所在流域的产沙量及输沙量,其拦沙能力、减沙效益是水土保持工程措施的重要生态系统服务功能,对于提高治理效率,科学地进行水土流失措施布局,为水行政主管部门科学规划、合理制定流域综合治理策略具有重要意义。

淤地坝具有较高的拦沙效益,研究表明,大理河流域 1970—2002 年水保措施年均减沙 1.860×10^7 t,减沙效益 36.6%,其中坝地减沙占比高达 63%,大理河流域 1960—2002 年淤地坝年均减沙 1.290×10^7 t^[1];在内蒙古,从 1983—2005 年,准格尔旗西黑岱小流域通过坝系建设,达到泥沙不出沟^[2];川掌沟流域自 1983 年以来,年均拦沙量达 $2.452 1 \times 10^6$ t,占年均流失量的 91%,而治沟骨干工程及淤地坝拦沙量就占年均拦沙量的 92.5%^[3],黄土高原淤地坝的拦沙作用非常显著,资料显示,截至 2000 年,在黄河中游黄土丘陵沟壑区 20 多万平方千米的土地上,已建淤地坝 10 万多座,淤地约 3.28×10^5 hm²,拦泥 70 多亿吨^[4];2000—2012 年黄河潼关以上淤地坝年均拦沙量为 3.75×10^8 t,淤地坝拦沙减蚀作用对 2000—2012 年黄河泥沙减少的贡献率为 34%^[5]。杨媛媛等^[6]的研究结果表明,1954—2011 年,大理河流域淤地坝逐年拦沙量呈波动式增加,多年平均拦沙量为 1.2×10^7 t,累积拦沙量为 7.17×10^8 t,1971—2011 年淤地坝拦沙量占人类活动减少输沙量的贡献率为 31.04%~47.42%。另外,淤地坝除拦蓄沟道产沙,还可拦蓄坡面 50% 以上的产沙^[7]。

有关淤地坝减沙效益的研究较多,多集中在黄土高原地区,研究区以黄河中游区间为主,研究尺度以黄河支流流域为主,例如泾河、洛河、渭河、无定河、延河、大理河、窟野河以及流域内的典型小流域;在流域淤地坝拦沙能力、淤地坝减沙效益、淤地坝泥沙特征及来源、流域淤地坝拦沙量计算等方面取得了较多的成果^[8-14]。但以十大孔兑整个区域为研究对象的相关论文和研究成果较少,十大孔兑地处黄河流域内蒙古段,淤地坝是该区域内典型的水土保持工程措施,通过定量计算十大孔兑淤地坝减沙量,对黄河内蒙古段“拦沙换水”、防洪、防凌调控决策制定以及水土保持措施优化布局等方面有重要的意义。

1 研究区概况

黄河流域鄂尔多斯十大孔兑位于内蒙古鄂尔多斯高原北部、黄河内蒙古段右岸,南部处于鄂尔多斯市东胜区,北部以黄河为界与包头市隔河相望(东经 $108^{\circ}48'37''$ — $110^{\circ}56'29''$,北纬 $39^{\circ}47'54''$ — $40^{\circ}33'18''$)土地总面积 $10\ 767$ km²,涉及鄂尔多斯市的杭锦旗、达拉特旗、东胜区、准格尔旗 4 个旗(区),总人口约 32.86 万人。十大孔兑是由南向北并行排列着的直接流入黄河的十条支流,发源于鄂尔多斯台地,从南向北依次流经砒砂岩出露的丘陵沟壑、库布齐沙漠、冲积平原 3 个侵蚀地貌类型区,最终汇入黄河。十大孔兑从西向东依次排列着:毛不拉孔兑、布日嘎斯太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈拉拉川、母花儿沟、东柳沟、呼斯太河,是内蒙古中西部 3 个暴雨洪水频发区之一,水土流失面积 $8\ 363.34$ km²(不含下游冲积平原区流失面积),年平均侵蚀模数 $1\ 500 \sim 8\ 800$ t/(km²·a),年均向黄河输送泥沙 2.7×10^7 t,占黄土高原地区每年入黄泥沙的 1/10。各孔兑流域形态相似,南北狭长,呈羽毛状,沟长 28.6~110.9 km,河槽宽浅,河道比降约为 1%,径流主要靠雨洪补给,多段区为季节性河流。暴雨洪水历时短,强度大,易形成洪峰尖瘦的暴涨暴落洪水,洪水凶猛、挟沙能力大、含沙量高,水资源利用难度大。

为控制水土流失,减少入黄泥沙,1986 年之后,国家和地方政府加大了该区域水土流失治理的力度,对罕台川、西柳沟、哈拉拉川、呼斯太河等重要孔兑先后实施了一系列水土保持生态建设工程及坝系工程,截至 2017 年底,区域各项水土保持措施累计治理面积 $3\ 271.61$ km²,水土流失治理程度达到 39.12%。这些治理措施与水利工程有效拦截了径流和泥沙,保持水土资源,减轻了山洪灾害,改善了生态环境和农牧业生产条件(图 1)。

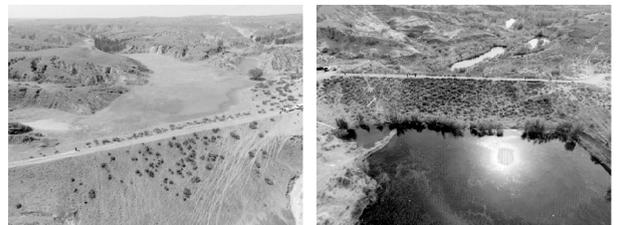


图 1 十大孔兑淤地坝景观

2 研究方法

2.1 数据来源

淤地坝基础统计数据资料、地形图等数据来源于

各淤地坝初步设计资料,由准格尔旗水利局、达拉特旗水利局、东胜区水利局和杭锦旗水利局提供。土壤侵蚀模数采用遥感解译与侵蚀类型及强度时空变化分析方法进行计算。

2.2 淤积体概化法

淤地坝减沙量计算方法采用水利部行业标准 [SL196—2015]《水文调查规范》当中淤积体规则概化测算方法(根据淤地坝淤积体的形状,将横断面概化为规则断面的锥体和拟台体),通过测量特征要素,计算淤积体体积。

$$V = N^2 \cdot L \cdot B \cdot d / (1 + N)(1 + 2N) \quad (1)$$

式中: V 为锥体体积(m^3); L 为坝前至淤积末端的水平距离(m); B 为坝前断面淤积表面宽(m); d 为坝前最大淤积深(m); N 为淤积体横断面形状指数,横断面分别为三角形、二次抛物线形、矩形和梯形时, N 相应取值为 1, 2, ∞ 和(1~ ∞ 的适当值)。

通过测量淤地坝的主要特征要素计算淤地坝的减沙量,坝前至淤积末端的水平距离,坝前断面淤积表面宽,坝前最大淤积深,均通过实测得到。

2.2.1 淤积体横断面形状指数的验证和确定 十大孔兑淤地坝淤积体横断面的形状指数(N 值)有所不同(表 1)。根据对淤地坝设计资料中原地貌的地形图的分析,小型和中型淤地坝沟道底宽较小,坝前沟道底部表面宽度较小,淤积体的横断面一般为二次抛物线形(或窄底梯形),骨干坝沟道底宽较大,坝前沟道底部表面宽度较大,淤积体的横断面为梯形以上(淤积体横断面的形状指数 >4),本次研究先假定小型坝和中型坝 N 值取 2,骨干坝 N 值取 7 再进行计算验证。

基于各孔兑的淤地坝设计/竣工资料和抽样调查,对骨干坝、中型坝和小型坝分别进行计算。

2.2.2 研究样本的选取 在十大孔兑东、中、西 3 个区域,以淤地坝主要分布的孔兑为代表性,主要考虑淤地坝历史监测资料以及设计/竣工资料(资料齐全的淤地坝数量较少),按照坝系工程的建成年限(1990—1999 年、2000—2009 年和 2010 年后)、工程类别(骨干坝、中型坝和小型坝)筛选出具有典型性和代表性的淤地坝,对典型淤地坝的地理位置、数量、建成时间、控制面积、淤积年限、总库容等进行逐项核实。重点对计算已淤库容需要的参数进行实地测量。共抽样调查淤地坝 22 座(表 2)。

2.2.3 淤积体测量和计算 利用全站仪,测量坝顶和坝前淤积体的高程,得出淤积高差,根据淤地坝设计资料,得到淤积厚度。以设计资料或重新构建的水位面积库容曲线为依据,查找淤积高度在曲线中对应的库容,即得出淤地坝当前的淤积量,具体方法如下^[15]:

(1) 从坝前到淤积末端,以控制淤积体平面变化为原则,取 3 个断面,测量断面间的间距。在每一断面选 3 个测量点(控制点),测量各淤积测点的高程和测点间的水平距离。

(2) 平均淤积高程的计算公式。

$$Z_i = \frac{1}{2B_i} \sum (Z_j + Z_{j+1}) \Delta B_j \quad (2)$$

式中: Z_i 为第 i 断面的平均淤积高程; Z_j 为第 i 断面、第 j 测点的淤积高程; ΔB_j 为同断面相邻测点间的水平距离; $B_i = \sum \Delta B_j$ 为第 i 断面淤积面的宽度;本次测量均设置 3 个断面,每个断面设 3 个测量点。

坝区淤积面的平均高程:

$$Z = \frac{1}{2L_i} \sum (Z_j + Z_{j+1}) \Delta L_j \quad (3)$$

式中: Z 为坝区淤积面的平均高程; ΔL_i 为相邻断面的间距; $L = \sum L_i$ (坝前到淤积末端的长度)。

(3) 淤地坝减沙量计算。根据水文计算表重新构建水位-库容-面积曲线图,由原始库容曲线查得与高程 Z 相应的库容,即为淤地坝累计泥沙淤积库容。

2.2.4 N 值结果 验证结果见表 3,计算结果表明,小型坝和中型坝 N 值取值一致,骨干坝的 N 值为 14。因此将骨干坝的取值调整为 14 进行计算。

2.3 淤地坝逐年淤积量计算方法

为分析不同时段淤地坝的减沙特征,需要计算淤地坝的逐年淤积量,利用杨吉山等^[16]的计算方法,首先对毛不拉孔兑、西柳沟和罕台川 3 个有水文站点孔兑的淤地坝逐年年减沙量进行计算,其余孔兑依据计算结果等比例推算。在淤地坝特定时段总减沙量已知的条件下,淤地坝某一年的减沙量可表示为:

$$S_i = S_t \times \frac{A_i}{A_t} \times \frac{E_i}{E_t} \times \frac{\xi_i}{\xi} \quad (4)$$

式中: S_i 为淤地坝第 i 年的减沙量(t); S_t 为淤地坝的总淤积量(t); A_i 为第 i 年淤地坝的集水面积(km^2); A_t 为计算时段内淤地坝逐年集水面积的累计值(km^2); E_t 为淤地坝控制流域全时段的年平均侵蚀强度(t/km^2); E_i 为第 i 年淤地坝控制流域面上的平均侵蚀强度(t/km^2); ξ_i 为第 i 年淤地坝平均减沙率; ξ 为全部淤地坝全时段平均减沙率。在淤地坝控制的流域与全流域平均侵蚀强度相同条件下,认为全流域侵蚀产沙量为当年输沙量与当年减沙量之和,则有:

$$S_i = \frac{n \times A_i \times S_t \times D_i \times \frac{\xi_i}{\xi}}{A_i \times (D_i + S_t) - n \times A_i \times S_t \times \frac{\xi_i}{\xi}} \quad (5)$$

式中: n 为计算年数; A_i 为流域面积(km^2); D_i 为第 i 年水文站输沙量(t/a); S_t 为减沙工程全时段减沙总量(t)。

表 1 淤地坝坝址横断面图基本情况

序号	工程名称	工程类别	所属旗区	所属流域	坝址横断面图形状	N 值
1	无名渠	小型坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	窄底梯形	3
2	二来虎渠	小型坝	东胜区	西柳沟	二次抛物线、U 型	2
3	茶店梁 1 [#]	小型坝	东胜区	黑赖沟	梯形、抛物线	2
4	李家塔	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	U 型、梯形	3
5	刘家圪圪	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	梯形	3
6	五当沟	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	窄底梯形	3
7	蛤蟆界沟掌	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	窄底梯形、近 V	2
8	可克兔沟	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	U 型、梯形	2
9	可利沟	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	窄底梯形	2
10	五梅沟	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	窄底梯形	2
11	小敖包沟	中型坝	准格尔旗	呼斯太河	窄底梯形、二次抛物线	2
12	茶店梁 4 [#]	中型坝	东胜区	黑赖沟	V 型	1
13	茶店梁 3 [#]	中型坝	东胜区	黑赖沟	二次抛物线	2
14	刘五沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	二次抛物线	2
15	侏子沟	中型坝	达拉特旗	西柳沟	梯形	3
16	黄濼沟	中型坝	达拉特旗	西柳沟	梯形	3
17	梁台渠	中型坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	二次抛物线、梯形	2
18	杜四旦渠	中型坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	二次抛物线、梯形	2
19	杨月渠	中型坝	达拉特旗	罕台川	二次抛物线	2
20	哈毛图	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	介于梯形与抛物线型	2
21	李家壕北沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	介于梯形与抛物线型	2
22	刘五沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	介于梯形与抛物线型	2
23	碾房渠	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	梯形	2
24	马家沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	二次抛物线	2
25	沙圪渠	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	介于梯形与抛物线型	2
26	王四沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	介于梯形与抛物线型	2
27	杨家沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	介于梯形与抛物线型	2
28	高家渠	骨干坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	U 型、梯形	3
29	张家湾	骨干坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	宽底梯形	4
30	壕口	骨干坝	准格尔旗	呼斯太河	梯形	>4
31	黑召赖 2 [#]	骨干坝	准格尔旗	呼斯太河	梯形	>4
32	黑塔沟 3 [#]	骨干坝	达拉特旗	西柳沟	梯形	>4
33	刀劳庆	骨干坝	达拉特旗	西柳沟	梯形	>4
34	园子地沟	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	梯形	>4
35	茶店梁 1 [#]	骨干坝	东胜区	黑赖沟	U 型、梯形	>4
36	补拉沟	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	宽底梯形	>4
37	耳子沟 2 [#]	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	宽底梯形	>4
38	坟湾沟 1 [#]	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	宽底梯形	>4
39	郭家沟	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	宽底 U 型	>4
40	纳林沟	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	宽底梯形	>4
41	园子地沟	骨干坝	达拉特旗	黑赖沟	宽底梯形	>4
42	大德和功	骨干坝	达拉特旗	罕台川	V 型	3
43	壕庆河主沟 1 [#]	骨干坝	达拉特旗	壕庆河	梯形	>4
44	李永珍门前渠	骨干坝	达拉特旗	壕庆河	梯形	>4
45	邱家渠南沟	骨干坝	达拉特旗	壕庆河	梯形	>4
46	王宽门东渠	骨干坝	达拉特旗	壕庆河	梯形	>4
47	王拴牛壕	骨干坝	达拉特旗	壕庆河	V 梯形	>4
48	油梁渠	骨干坝	达拉特旗	壕庆河	梯形	>4

表 2 抽样调查淤地坝基本情况

序号	工程名称	工程类别	所属旗区	所属流域	建成时间	控制面积/km ²	坝高/m	总库容/10 ⁴ m ³	淤积库容/10 ⁴ m ³	可淤地面积/hm ²
1	高家渠	骨干坝	东胜区	罕台川	1996	3.94	12.00	88.52	25.3	9.33
2	大补芦沟	骨干坝	东胜区	罕台川	1994	2.50	13.00	63.00	20.35	6.00
3	小色连沟	骨干坝	东胜区	罕台川	1997	3.00	13.40	67.40	19.20	6.80
4	大荫壕	骨干坝	东胜区	哈拉拉川	1996	2.50	13.50	65.23	22.44	6.20
5	茶店梁 1#	骨干坝	东胜区	黑赖沟	2007	3.02	11.00	53.90	24.61	6.76
6	大德和功	骨干坝	达拉特旗	罕台川	2005	7.76	19.30	212.12	112.60	22.80
7	黑塔沟	骨干坝	达拉特旗	西柳沟	2008	3.14	12.50	75.19	43.48	12.16
8	耳折沟	骨干坝	达拉特旗	哈拉拉川	1995	3.20	18.00	63.20	23.20	4.60
9	张家湾	骨干坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	2014	3.55	9.10	54.19	34.19	12.05
10	张关来渠	中型坝	东胜区	西柳沟	2009	1.09	9.00	14.48	7.27	2.74
11	严家渠	中型坝	东胜区	西柳沟	2009	1.04	9.10	13.82	6.93	2.96
12	茶店梁 4#	中型坝	东胜区	黑赖沟	2007	1.20	7.40	11.26	6.37	1.78
13	刘五沟	中型坝	达拉特旗	黑赖沟	2011	1.90	7.00	23.25	12.42	5.87
14	杨月渠	中型坝	达拉特旗	罕台川	2005	2.00	12.00	29.66	14.50	3.80
15	侏子沟	中型坝	达拉特旗	西柳沟	2010	1.39	13.40	18.80	9.62	3.48
16	黄濼沟	中型坝	达拉特旗	西柳沟	2007	2.40	10.60	32.46	16.62	5.40
17	杜四旦渠	中型坝	杭锦旗	毛不拉孔兑	2016	1.87	10.50	27.67	13.87	6.70
18	二来虎渠	小型坝	东胜区	西柳沟	2009	0.54	7.40	4.59	1.80	0.53
19	茶店梁 1#	小型坝	东胜区	黑赖沟	2007	0.48	6.00	3.12	0.98	0.53
20	打墾太沟	小型坝	准格尔旗	呼斯太河	1996	2.33	12.8	11.08	7.98	1.80
21	刘家圪墾	小型坝	准格尔旗	呼斯太河	1996	1.45	13.7	16.40	5.00	10.00
22	满家沟	小型坝	准格尔旗	呼斯太河	1996	0.45	10.4	5.09	1.54	0.55

表 3 N 值验证结果

序号	工程类别	假定 N 值	N 值取值结果
1	小型坝、中型坝	2	2
2	骨干坝	7	14

用 ψ_i 表示淤地坝第 i 年剩余可淤积库容率, ψ 表示计算时段内多年平均剩余可淤积库容率的平均值。减沙率与剩余库容率都受减沙量的影响, 二者是高度相关的, 因此由 ξ_i/ξ 组成的数列与由 ψ_i/ψ 构成的数列也高度正相关, 并且它们的值是接近的。即有:

$$\frac{\xi_i}{\xi} \approx \frac{\psi_i}{\psi} \quad (6)$$

因此, 可以用 ψ_i/ψ 代替 ξ_i/ξ 参与计算。 ψ 的理论值为:

$$\bar{\psi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{s_i}}{C_{k_i}} \times \frac{A_i \times E_i}{A_i \times E_i} \right) \quad (7)$$

式中: C_{k_i} 为第 i 年可淤积库容; C_{s_i} 为第 i 年剩余可淤积库容。

由于公式(7)中含有 E_i 不容易计算, 计算时可以将全部淤地坝按照建成的年份分为不同的系列计算然后求和, 对每一个系列来说:

$$\bar{\psi} = \frac{\Psi_1 + \Psi_n}{2} \quad (8)$$

式中: Ψ_1 为淤地坝建成第一年可淤积库容率; Ψ_n 为计算时段最后一年可淤积库容率。

计算时首先根据公式(5),(6),(8)计算出流域各年淤地坝总的减沙量, 根据全流域侵蚀产沙量 = 当年输沙量 + 当年减沙量的关系还原计算出流域逐年实际侵蚀强度, 然后根据公式(4)计算出淤地坝逐年的减沙量。

3 结果与分析

3.1 十大孔兑地区淤地坝保存现状与分布

十大孔兑区域内共实施淤地坝 382 座, 其中, 占用、改变用途和损毁共 28 座, 截至 2018 年底, 现状保存 354 座, 分布于毛不拉孔兑、西柳沟、罕台川、哈拉拉川、黑赖沟、壕庆河和呼斯太河 7 个孔兑, 布日嘎斯太沟、母花沟和东柳沟 3 个孔兑没有淤地坝分布。十大孔兑现状淤地坝的数量分布情况见图 2, 可知 72.6% 的淤地坝集中分布在毛不拉孔兑、西柳沟和罕台川 3 个孔兑, 其中毛不拉孔兑占 19.8%、西柳沟占 28.0%、罕台川占 24.9%。在 149 座骨干坝中, 22.1% 分布于毛不拉孔兑, 26.2% 分布于西柳沟, 24.2% 分布于罕台川; 在 120 座中型坝中, 20.0% 分布于毛不拉孔兑, 25.8% 分布于西柳沟, 25.8% 分布于罕台川; 在 85 座小型坝中, 15.3% 分布于毛不拉

孔兑,34.1%分布于西柳沟,24.7%分布于罕台川。

十大孔兑不同时期、不同类型淤地坝的建成数量见表 4,十大孔兑淤地坝建设时间主要集中在 1995—1998 年以及 2005—2012 年(图 3)。

十大孔兑骨干坝、中型坝、小型坝建成时间的分布趋势基本一致,集中在 1995—2000 年与 2005—2010 年、2011 年以后以骨干坝为主,中型坝、小型坝建设较少(图 4)。其中:骨干坝的 24%建成于 1995—2000 年,46.6%建成于 2005—2010 年;中型坝的 15.8%建成于 1995—2000 年,65%建成于 2005—2010 年;小型坝的 22%建成于 1995—2000 年,77.9%建成于 2005—2010 年。

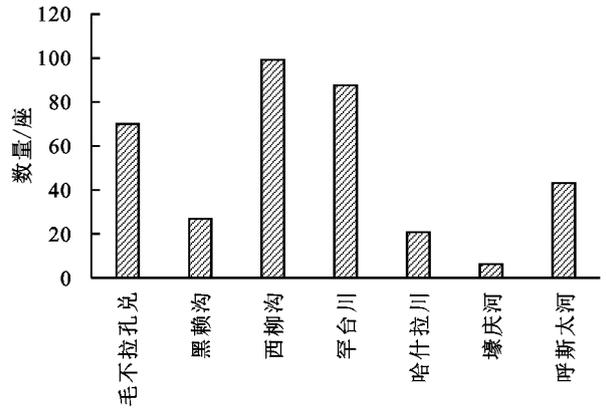


图 2 各孔兑淤地坝数量分布

表 4 十大孔兑流域不同时期淤地坝的建成数量

流域	1985—1989 年			1990—1999 年			2000—2009 年			2010 年之后			合计
	骨干坝	中型坝	小型坝	骨干坝	中型坝	小型坝	骨干坝	中型坝	小型坝	骨干坝	中型坝	小型坝	
毛不拉孔兑	0	0	0	0	0	0	21	16	13	12	8	0	70
黑赖沟	0	0	0	0	0	0	4	5	3	6	9	0	27
西柳沟	0	0	0	1	0	0	22	19	19	16	12	10	99
罕台川	2	0	0	16	0	0	10	19	21	8	12	0	88
壕庆河	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	6
哈拉什川	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	21
呼斯太河	0	0	0	3	18	19	1	2	0	0	0	0	43
合计	2	0	0	41	18	19	58	61	56	48	41	10	354

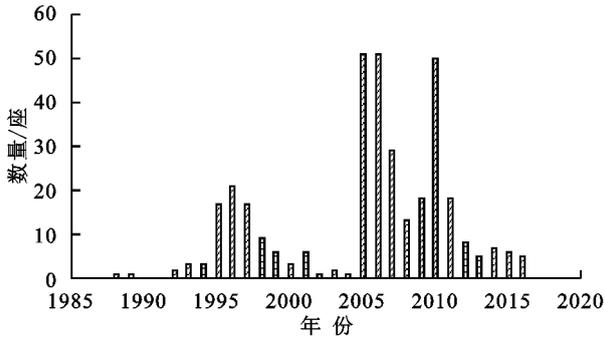


图 3 十大孔兑淤地坝建坝时间分析

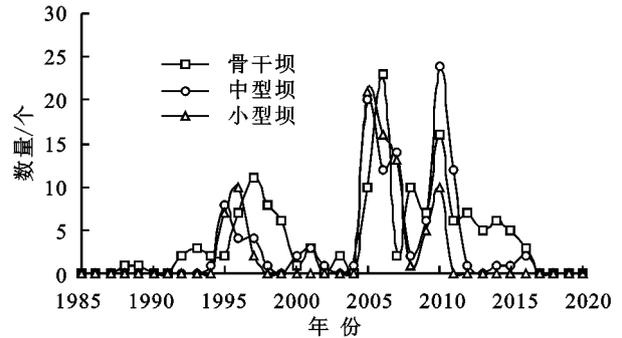


图 4 十大孔兑 1985—2018 年逐年建坝数量

3.2 淤地坝减沙量

十大孔兑淤地坝减沙量计算结果见表 5,十大孔兑地区 354 座淤地坝,坝控制总面积 888.65 km²,设计总库容 1.569 393×10⁸ m³,设计拦泥库容 7.665 29×10⁷ m³,设计滞洪库容 8.028 64×10⁷ m³,设计淤地面积 2 225.81 hm²,累计减沙量 2.374 53×10⁷ m³,3.205 61×10⁷ t。

其中,西柳沟减沙量最大,为 1.239 76×10⁷ t,壕

庆河减沙量最少,为 4.432×10⁵ t。罕台川、哈拉什川、毛不拉孔兑淤地坝的减沙量较大,黑赖沟、呼斯太河淤地坝的减沙量较小。总的来说,孔兑淤地坝减沙量大小与淤地坝分布数量多少有关,西柳沟淤地坝分布最多减沙量最大,壕庆河淤地坝最少,减沙量最小;由于骨干坝的规模较大,控制面积大,在一定程度上能代表整个孔兑的减沙能力。

表 5 十大孔兑淤地坝减沙总量

流域	骨干坝/座	中型坝/座	小型坝/座	控制面积/km ²	设计总库容/10 ⁴ m ³	设计拦泥库容/10 ⁴ m ³	设计滞洪库容/10 ⁴ m ³	设计淤地面积/hm ²	累计减沙量/10 ⁴ m ³	累计减沙量/10 ⁴ t
毛不拉孔兑	33	24	13	177.48	2685.70	1458.58	1227.12	468.25	252.57	340.97
黑赖沟	10	14	3	64.63	1060.81	570.88	489.93	191.47	116.80	157.68
西柳沟	39	31	29	248.66	4814.51	2401.94	2412.57	641.58	918.34	1239.76
罕台川	36	31	21	194.67	4182.45	1963.10	2219.35	582.01	613.28	827.93
壕庆河	6			23.98	416.65	284.59	132.06	53.95	32.83	44.32
哈拉什川	21			67.31	1541.22	615.43	925.79	150.16	282.24	381.02
呼斯太河	4	20	19	111.92	992.59	370.77	621.82	138.39	158.47	213.93
合计	149	120	85	888.65	15693.93	7665.29	8028.64	2225.81	2374.53	3205.61

3.3 不同时段淤地坝减沙特征

经计算,淤地坝的逐年减沙量计算结果见图5,1986—1999年、2000—2009年和2010—2018年3个时段减沙量分别为:4.946 6×10⁶ t,1.155 57×10⁷ t,1.555 38×10⁷ t(图6)。3个时段的减沙量有逐渐增加的趋势。

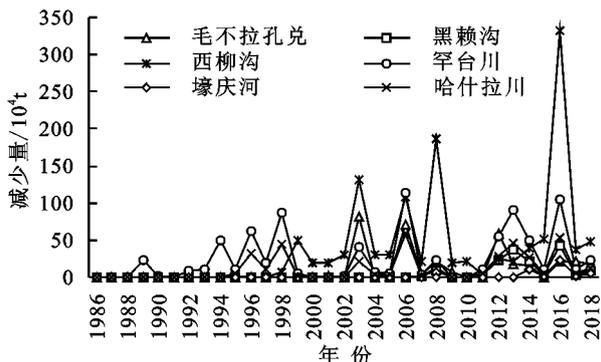


图5 淤地坝逐年减沙量

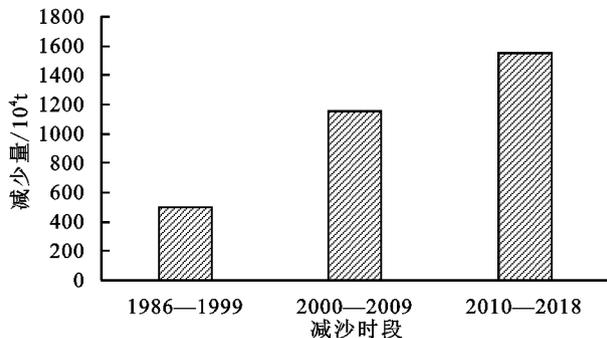


图6 十大孔兑不同时期淤地坝减沙量

4 讨论与结论

十大孔兑地区沟道中的水土保持工程措施主要包括淤地坝、谷坊和引洪淤地工程,淤地坝大规模修建始于1995—2000年,十大孔兑地区淤地坝主要由世行贷款项目和国家下达计划修建;2003年后,淤地坝被作为水利部“亮点工程”,出现了淤地坝修建高潮。调查和研究表明,淤地坝仍然是研究区沟道减沙效果最好的水土保持工程措施,发挥了较好的拦沙淤地功能。十大孔兑淤地坝的单位减沙指标平均为19 342.49 t/座,其中骨干坝8 700~19 800 t/座、中型淤地坝4 300~9 000 t/座、小型坝600~1 600 t/座。对比研究区其他沟道措施的单位减沙指标(谷坊450.89 t/座;引洪淤地为3 495.88~5 913.70 t/hm²),表明淤地坝的减沙效果远远高于其他措施。

影响淤地坝减沙量的因素很多,包括工程规模、自然条件以及人为因素等。就工程规模来说,淤地坝的规格越高,库容越大,拦沙能力越强,骨干坝的数量在一定程度上决定了流域的减沙能力,如研究

表明2011—2017年,无定河流域淤地坝年均拦沙4.134 23×10⁷ t,其中骨干坝拦沙量占51.32%^[17];就自然条件来说,淤地坝的减沙量受降雨和下垫面条件的影响较大,尤其是在一次暴雨之后,由于暴雨突破了坡面林草植被的防护极限,一定的雨量下,流域的产流产沙量迅速增加,这种情况下,淤地坝就能发挥出巨大的拦沙和防洪作用,例如2016年以前西柳沟流域淤地坝总拦沙量为2.657 3×10⁶ m³,而2016年“8·17”暴雨后的淤地坝拦沙量为2.929 2×10⁶ m³^[18],一场暴雨后的拦沙量,相当于淤地坝之前的总拦沙量,流域的下垫面条件,在一定程度上影响着产沙量的大小,植被覆盖度较高,坡面土壤流失量较少,一定的降雨强度下,进入沟道的泥沙量较少,反之亦然,在建坝早期,区域大面积治理措施实施之前,下垫面植被覆盖度不高,沟道工程(主要是淤地坝)减沙贡献率较大,而在研究时段后期,由于植被建设成效渐显,植被覆盖度提高,流域面上侵蚀产沙减少,沟道工程(主要是淤地坝)的减沙贡献率也在下降,证明了下垫面条件对淤地坝减沙量的间接影响。

水土保持综合治理是一项系统工程,合理、科学的措施配置对于有效减少入黄泥沙、改善生态环境十分重要。我们的研究表明,十大孔兑淤地坝工程建设比较薄弱,截至2018年底,十大孔兑保存的大中小淤地坝总计有354座,且有3个孔兑尚未建坝,淤地坝对十大孔兑减沙的贡献率不高,仅占20%左右,明显低于黄土高原淤地坝减沙30%左右的贡献率,对于天然植被自然修复能力相对较低的孔兑,淤地坝对于减少入黄泥沙起着更为重要的作用。因此,建议应当配置足够规模的淤地坝,并科学设置大中小淤地坝的坝系结构,量化优化水土保持措施配置体系,有效拦截洪水泥沙。在沟道治理方面应重点围绕淤地坝的建设、维护来进行,从各孔兑淤地坝的减沙指标来看,西柳沟最高,达58 141.81 t/座,黑赖沟和呼斯太河较低,分别为5 720.33 t/座、7 354.94 t/座。各孔兑应在对水土流失现状,坡面来沙量及坡面减沙效果等综合分析的基础上,合理布局水土保持措施,同时根据沟道现状,继续巩固加强淤地坝的建设,合理布设淤地坝坝系工程。现阶段,淤地坝的主要功能由之前的淤地转变为以拦沙防洪为主要功能,特别是在全球气候变化的背景下,区域极端天气频发,暴雨事件概率增加,淤地坝在抵御极端降雨洪涝灾害,减少孔兑入黄泥沙,保障防洪安全方面会发挥更大的作用。

十大孔兑区域内共实施淤地坝382座,其中,占用、

改变用途和损毁共 28 座,截至 2018 年底,现状实际保存有 354 座。其中,骨干坝 149 座,占 42.09%,中型坝 120 座,占 33.90%,小型坝 85 座,占 24.01%。72.6%的淤地坝集中分布在毛不拉孔兑、西柳沟和罕台川 3 个孔兑,其中毛不拉孔兑占 19.8%、西柳沟占 28.0%、罕台川占 24.9%。控制总面积 888.65 km²,设计总库容 1.569 393×10⁸ m³,设计拦泥库容 7.665 29×10⁷ m³,设计滞洪库容 8.028 64×10⁷ m³,设计淤地面积 2 225.81 hm²,累计减沙量 2.374 53×10⁷ m³,3.205 61×10⁷ t。1986—1999 年、2000—2009 年和 2010—2018 年 3 个时段减沙量分别为:4.946 6×10⁶ t,1.155 57×10⁷ t,1.555 38×10⁷ t。

参考文献:

- [1] 冉大川,李占斌,罗全华,等.黄河中游淤地坝工程可持续减沙途径分析[J].水土保持研究,2013,20(3):1-5.
- [2] 李勉,姚文艺,史学建.淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究[J].水土保持研究,2005,12(5):111-115.
- [3] 武志强,付福林,张锐.川掌沟流域治沟骨干工程建设的重大作用[J].中国水土保持,2000(6):15-19.
- [4] 曾茂林,朱小勇,康玲玲,等.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):127-134.
- [5] 李景宗,刘立斌.近期黄河潼关以上地区淤地坝拦沙量初步分析[J].人民黄河,2018,389(1):1-6.
- [6] 杨媛媛,李占斌,高海东,等.大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析[J].水土保持学报,2021,35(1):85-89.
- [7] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的减水减沙效益分析[J].干旱区资源与环境,2001,15(1):78-83.
- [8] 魏艳红,焦菊英,张世杰.黄土高原典型支流淤地坝减沙对输沙量减少的贡献[J].中国水土保持科学,2017,15(5):16-22.
- [9] 段菊卿.小流域淤地坝建设的水土保持效益浅析[J].水土保持研究,2012,19(1):144-147.
- [10] 韩向楠,谢世友,高云飞.近年无定河流域淤地坝拦沙作用研究[J].人民黄河,2018,40(11):5-8,37.
- [11] 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.
- [12] 李莉,史学建,杨吉山,等.次暴雨下小理河流域淤地坝拦沙能力分析[J].中国水土保持,2020(12)31-33.
- [13] 蒋凯鑫,于坤霞,李鹏,等.砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J].水土保持学报,2020,34(1):47-53.
- [14] 王永吉,杨明义,张加琼,等.水蚀风蚀交错带小流域淤地坝泥沙沉积特征[J].水土保持研究,2017,24(2):1-5.
- [15] 王雄世,鄢玉英,牛占.小水库库容及淤积体的数学模型与简单测算[J].人民黄河,2009,31(8):29-32.
- [16] 杨吉山,张晓华,宋天华,等.宁夏清水河流域淤地坝拦沙量分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):122-127.
- [17] 韩向楠,谢世友,高云飞.近年无定河流域淤地坝拦沙作用研究[J].人民黄河,2018,40(11):5-8,37.
- [18] 杨吉山,史学建,侯素珍,等.2016 年“8·17”暴雨西柳沟土壤侵蚀产沙量分析[J].人民黄河,2020,42(1):82-85,90.
- [9] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的减水减沙效益分析[J].干旱区资源与环境,2001,15(1):78-83.
- [10] 魏艳红,焦菊英,张世杰.黄土高原典型支流淤地坝减沙对输沙量减少的贡献[J].中国水土保持科学,2017,15(5):16-22.
- [11] 段菊卿.小流域淤地坝建设的水土保持效益浅析[J].水土保持研究,2012,19(1):144-147.
- [12] 韩向楠,谢世友,高云飞.近年无定河流域淤地坝拦沙作用研究[J].人民黄河,2018,40(11):5-8,37.
- [13] 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.
- [14] 李莉,史学建,杨吉山,等.次暴雨下小理河流域淤地坝拦沙能力分析[J].中国水土保持,2020(12)31-33.
- [15] 蒋凯鑫,于坤霞,李鹏,等.砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J].水土保持学报,2020,34(1):47-53.
- [16] 王永吉,杨明义,张加琼,等.水蚀风蚀交错带小流域淤地坝泥沙沉积特征[J].水土保持研究,2017,24(2):1-5.
- [17] 王雄世,鄢玉英,牛占.小水库库容及淤积体的数学模型与简单测算[J].人民黄河,2009,31(8):29-32.
- [18] 杨吉山,张晓华,宋天华,等.宁夏清水河流域淤地坝拦沙量分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):122-127.
- [19] 韩向楠,谢世友,高云飞.近年无定河流域淤地坝拦沙作用研究[J].人民黄河,2018,40(11):5-8,37.
- [20] 杨吉山,史学建,侯素珍,等.2016 年“8·17”暴雨西柳沟土壤侵蚀产沙量分析[J].人民黄河,2020,42(1):82-85,90.
- [21] 徐相忠,刘前进,张含玉.降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):56-62,71.
- [22] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.
- [23] 洪雨馨,姚蕊,孙鹏,等.降雨和前期含水量对大别山区不同作物坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):53-59.

(上接第 41 页)

- [8] 周梦玲,郭建斌,周金星,等.丹江口库区喀斯特坡地不同植被覆盖类型的产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2020,18(2):77-83.
- [9] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):17-20,26.
- [10] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [11] 董亮,吕刚,傅昕阳,等.辽西低山丘陵区褐土和棕壤坡耕

地溅蚀过程模拟[J].水土保持学报,2020,34(1):78-83.

- [12] 徐相忠,刘前进,张含玉.降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):56-62,71.
- [13] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.
- [14] 洪雨馨,姚蕊,孙鹏,等.降雨和前期含水量对大别山区不同作物坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):53-59.