

# 甘肃省庆城县极端暴雨下水保措施 抵御暴洪灾害的能力

陈素娥<sup>1</sup>, 马瑞<sup>1</sup>, 张富<sup>1</sup>, 王玲莉<sup>2</sup>, 蒋承洋<sup>3</sup>

(1.甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃林业职业技术学院

林业工程学院, 甘肃 天水 741000; 3.甘肃智富瑞达生态环境工程有限公司 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 最大洪峰流量是导致暴洪灾害的决定性因素。研究小流域降水频率、治理程度与洪峰流量、暴洪灾害损失的关联性,为水土保持减灾防灾工作提供科学依据。[方法] 采用回归分析、对比分析等方法,对甘肃省庆阳市庆城县蔡家庙、野狐沟两条相邻流域 1981—2022 年水保措施的调水效益以及降水因子、水保措施对洪峰流量的影响进行分析。[结果] ①小流域水保措施调水效益随治理程度的提高而增加,随降水频率的提高而减少。②年最大日降水量对洪峰流量变化具有极显著的正向影响( $p < 0.01$ ),贡献率系数为 0.707;治理程度对洪峰流量呈负影响,贡献率系数为 -0.237。③30 a 一遇洪峰流量(频率为 3%)与 50 a 一遇洪峰流量(频率为 2%)灾害损失强度分别达到  $1.74 \times 10^5$ ,  $3.13 \times 10^6$  元/km<sup>2</sup>,后者比前者增长了 16.95 倍。[结论] 影响洪峰流量变化的主要因素是年最大日降水量。水保措施对削减洪峰流量具有显著的影响。流域治理程度越高,削减洪峰流量的效果越明显,减少暴洪灾害经济损失的能力越大。

**关键词:** 水土保持; 暴洪灾害; 洪峰流量; 灾害损失; 调水效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0026-10

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 陈素娥, 马瑞, 张富, 等. 甘肃省庆城县极端暴雨下水保措施抵御暴洪灾害的能力[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 26-35. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.004; Chen Sue, Ma Rui, Zhang Fu, et al. Ability of soil and water conservation measures to resist flash flood disaster under extreme rainstorm conditions in Qingcheng County of Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 26-35.

## Ability of Soil and Water Conservation Measures to Resist Flash Flood Disaster Under Extreme Rainstorm Conditions in Qingcheng County of Gansu Province

Chen Sue<sup>1</sup>, Ma Rui<sup>1</sup>, Zhang Fu<sup>1</sup>, Wang Lingli<sup>2</sup>, Jiang Chengyang<sup>3</sup>

(1. Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Forestry Engineering College of Gansu Forestry Vocational and Technical College, Tianshui, Gansu

741000, China; 3. Gansu Zhifu Ruida Ecological Environment Engineering Co., Ltd. Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] Maximum flood peak flow is the decisive factor leading to flood disaster. The correlation between precipitation frequency, management level, and flood peak flow and flood disaster loss in a small watershed was studied to provide a scientific basis for soil and water conservation, disaster reduction, and prevention. [Methods] The water transfer benefits of soil and water conservation measures in two adjacent basins of Caijiamiao and Yehugou from 1981 to 2022 were analyzed by using both regression analysis and comparative analysis, as well as the effects of precipitation factors and soil and water conservation measures on flood peak flow. [Results] ① The benefit of water conservation measures in a small watershed increased with increasing management level, and decreased with increasing precipitation frequency. ② Annual maximum daily precipitation had a highly significant positive effect on the change of flood peak flow ( $p < 0.01$ ), and the contribution rate coefficient was 0.707. Management level had a negative impact on the flood peak flow, and the contribution rate coefficient was -0.237. ③ The disaster loss intensity of 30-year flood peak flow (frequency of 3%) and 50-year flood peak flow (frequency of 2%) reached  $1.74 \times 10^5$

收稿日期: 2023-09-14

修回日期: 2023-12-29

资助项目: 甘肃省水利科技项目“甘肃省淤地坝水沙利用与风险管控研究”(甘水建管发[2021]71号)

第一作者: 陈素娥(1996—), 女(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士研究生, 研究方向为水土流失及其危害。Email: cse021928@163.com。

通信作者: 张富(1961—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 研究员, 研究方向为水土流失规律及水土保持措施研究。Email: fuzhang001@163.com。

yuan/km<sup>2</sup> and  $3.13 \times 10^6$  yuan/km<sup>2</sup>, respectively, with the latter value being 16.95 times greater than the former value. [Conclusion] The main factor affecting the change of flood peak flow was the annual maximum daily precipitation. Soil and water conservation measures had a significant impact on the reduction of flood peak flow. The higher the degree of watershed management, the more obvious the effect of reducing flood peak flow, and the greater the ability to reduce the economic loss of flood disasters.

**Keywords:** soil and water conservation; flood disaster; flood peak flow; disaster loss; water transfer benefit

在全球气候变暖的背景下,洪涝灾害日益频繁、损失日益加剧。突发性暴雨破坏了土壤圈、地圈、生物圈、水圈和大气圈的原有状态,破坏着圈与圈之间的平衡关系,导致自然界生态失衡,人类生存环境恶化,地区性的贫困和灾难加剧<sup>[1-6]</sup>。水保措施是控制水土流失、改善生态环境的根本性措施。20 世纪 80 年代以来,中国形成的以小流域为单元的水土流失防御体系成为了暴雨洪灾防治的根本措施,其防灾减灾的主要成效之一是削减了洪峰和洪量<sup>[7]</sup>。黄土高原地区虽然降水量少,但降水集中,洪涝灾害对基础设施、农林牧各产业、自然通道等造成巨大破坏,对社会经济和人民财产安全造成直接或间接的危害及损失,是中国水土流失危害最为严重的区域之一<sup>[8]</sup>。面对日益加剧的洪涝灾害,世界各国采取了包括水保措施在内的各种防洪工程来减轻洪涝灾害造成的损失<sup>[9]</sup>。

目前,对水保措施与产流、产沙关系的研究较为成熟。罗利芳等<sup>[10]</sup>对黄土高原延安安塞试验站不同水土保持生物措施蓄水保土效益的动态分析表明,随汛期产流降雨的增加,年产沙量与年产流量将呈 S 型增长趋势;王光谦等<sup>[11]</sup>研究晋陕蒙多沙粗沙区植被覆盖与其蓄水保土效益关系时发现,植被覆盖度变化对流域水沙产生一定的影响;柳荣先等<sup>[12]</sup>对昕水河流域 1970 年前后的径流量、洪水量、输沙量系列数据的分析表明,水保措施对昕水河流域的减流、减沙效益分别为 32.0%,43.7%;白璐璐等<sup>[13]</sup>研究了梯田和淤地坝措施对水沙过程的协同调控效应,结果表明修建梯田和淤地坝均可引起坡沟区域坡长缩短,从而有效调控坡沟系统的产流产沙过程;王飞等<sup>[14]</sup>、丁琳霞等<sup>[15]</sup>用小流域平行对比法研究了水保措施对小流域地表径流量时间变化的影响,结果表明在极端降雨事件中,水保措施可以有效减少降雨引发的土壤侵蚀量和地表径流量;冉大川等<sup>[16]</sup>的研究表明泾河流域的水保措施可年均综合减水  $6.54 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,综合减沙  $4.75 \times 10^6$  t。

近年来,随着暴雨洪灾加剧,科研人员对水保措施影响暴雨发生、发展的关注度有所增加。张富等<sup>[7]</sup>、阎文哲等<sup>[17]</sup>、陈渠昌等<sup>[18]</sup>将削减最大洪峰流量(削峰率)以及径流延缓效果作为衡量水土保持措施减灾防灾效果的重要指标;张丽娟<sup>[19]</sup>的研究表明,水保措施可使黄土丘陵沟壑区小流域洪水起涨点时间

推迟、洪峰流量相应减少、洪水持续时间延长;刘宏志<sup>[20]</sup>通过地表径流和土壤流失监测试验研究了植被和降雨类型对土壤侵蚀的影响,其结果表明在所有植被类型下,强度高、持续时间短的降雨事件造成了更多的地表径流和土壤损失;宋子龙<sup>[21]</sup>分析了广州市增城区“5·22”和“6·8”两场特大暴雨(全区所有点的降雨量均超过 100 mm,最大 3 h 降雨量 297 mm)的特点、成因以及防治对策,建议采取工程措施和非工程措施相结合的办法,减轻特大暴雨洪涝成灾产生的消极影响;马吉刚等<sup>[22]</sup>研究山东省中南地区 100 a 一遇的特大暴雨洪灾,结果显示治理程度(流域内水保措施治理达标面积占水土流失面积的百分比)达到 100% 的小流域削减洪峰效率为 58.6%、拦沙效益为 90%,而治理程度为 20% 时削减洪峰效率仅为 9%、拦沙效益仅为 5%;翟婷婷等<sup>[23]</sup>的研究表明实施水保措施可将 200 a 一遇的特大洪水事件降低为风险更低的 50 a 一遇水平。

上述研究为我们认识水保措施的减灾防灾功能及作用机理起到了重要作用。然而,已有研究多集中于水保措施降低暴雨洪灾发生频率,削减洪峰、洪量等方面,而对水保措施影响暴雨关键发灾因素及与灾害直接经济损失关系的研究成果鲜见报道。本文基于甘肃省庆阳市庆城县典型小流域 42 a 相关资料,结合 2022 年 7 月 15 日庆城县暴雨洪灾损失调查数据,探讨水保措施削减洪峰流量与抵御极端暴雨洪灾损失的关联性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

庆城县地理位置介于东经  $107^{\circ}16'32''$ — $108^{\circ}05'49''$ ,北纬  $35^{\circ}42'29''$ — $36^{\circ}17'22''$  之间,地貌类型属陇东黄土高原沟壑区,海拔高度 1 000~1 600 m,气候属温带半干旱半湿润区,年平均气温 7.8—9.6 ℃,年日照时数平均 2 444.80 h,多年平均无霜期 169 d,多年平均降水量 537.5 mm。境内主要河流有黄河流域泾河水系的马莲河、大黑河、小黑河、柔远河、环江河等 5 条支流。研究区位于马莲河庆城县段右岸,由蔡家庙和野狐沟 2 个相邻流域组成。蔡家庙流域主要由铜川镇、蔡家庙乡组成(详见图 1),流域面积为 270 km<sup>2</sup>,截

至 2022 年年底水保措施面积达到  $1.88 \times 10^4 \text{ hm}^2$  (其中梯坝地面积  $7\,264.78 \text{ hm}^2$ , 水保林  $6\,515.83 \text{ hm}^2$ , 人工种草  $5\,033.02 \text{ hm}^2$ ), 治理程度由 1981 年的 9.11% 增长为 2022 年的 69.68%, 年治理率 1.48%; 野狐沟流域主要由土桥乡、马岭镇、三十里铺镇、翟家河乡组成, 流域面积为  $154 \text{ km}^2$ , 截至 2022 年年底水保措施面积达到  $1.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$  (其中梯田面积  $5\,038.22 \text{ hm}^2$ , 水保林  $3\,417.45 \text{ hm}^2$ , 人工种草  $2\,608.98 \text{ hm}^2$ ), 治理程度由 1981 年的 9.84% 增长为 2022 年的 71.85%, 年治理率 1.51%。研究区有蔡家庙站、庙湾站、北塬头站、唐岷岷站、桐川站、柏树庄站、王家坪站、三十里铺站、马岭站、野狐沟站、侯家岷岷站、石家山站, 共 12 个降水观测点 (详见图 2)。2022 年 7 月 15 日庆城县发生特大暴雨, 暴雨覆盖面积  $2\,214 \text{ km}^2$ 。暴雨造成庆城县 12 个乡 (镇) 基础设施、房屋、农田受损严重, 电力、通讯中断, 31 776 人受灾, 紧急转移安置 1 072 人, 造成直接经济损失  $1.44 \times 10^9$  元。

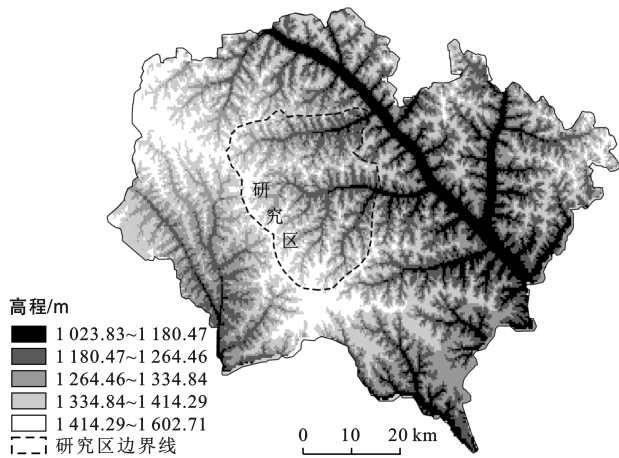


图 1 甘肃省庆城县地形及研究区位置

Fig.1 Topography of Qingcheng County in Gansu Province and location of study area

## 1.2 数据来源及处理

(1) 降水量、径流量、洪峰流量数据。降水量、径流量、洪峰流量数据来源于甘肃省庆阳水文站。降水量数据来源于研究区 12 个雨量站 1981—2022 年的降水观测数据, 采用泰森多边形法<sup>[24-25]</sup>, 结合站点数据和节点多边形的面积计算得到平均降水量。径流量与洪峰流量数据来自蔡家庙水文观测站 1981—2022 年的逐月观测资料。

(2) 暴雨、洪峰频率数据。暴雨、洪峰频率数据来源于庆阳市水务局、庆阳市水利勘测规划设计院、甘肃省庆阳水文站联合完成的 (以下简称庆阳水务局)《马莲河流域“7·15”暴雨洪水分析研判及对策建议》和《庆阳市“20220715”暴雨洪水调查报告》(2022 年 7 月)。该报告根据蔡家庙水文观测站 1981—2022 年降雨、径流观测资料及调查资料, 采用皮尔逊 III (P-III) 型曲线的概率密度函数方法, 分析确定了研究区的不同暴雨、洪峰频率数据。

(3) 直接灾害损失相关数据。研究区直接灾害损失数据来源于庆城县应急管理局提供的《“7·15”庆城县暴洪灾害损失评估报告》(2022 年 8 月)。

(4) 水保措施数量。水保措施各年度统计序列数据来源于甘肃省水土保持年报 (1981—2021 年)、庆城县水土保持年报 (1981—2021 年) 及《甘肃省水土保持综合治理措施效益研究》(1981—2012 年) 等<sup>[7]</sup> 科研成果数据; 水保措施实有数据采用庆城县土地详查三调数据、庆城县水保措施调查数据等节点数据, 利用庆城县水保措施保存率校正系数, 计算得到本研究区历年水保措施实际数量。

## 1.3 水保措施调水效益计算

水保措施调水效益指流域实施水保措施治理前后径流量的变化。某水保措施的调水效益为该水保措施的调水模数与其措施布设面积的乘积。由于汛期不同降水频率对地表产流具有显著的影响<sup>[13]</sup>, 调水模数常用两种计算方法计算。一种是按某区域 (或地块) 治理前后多年平均径流模数差值确定 (平均调水效益<sup>[26]</sup>), 另一种是根据治理前后某区域 (或地块) 不同汛期降水频率下径流模数的差值 (频率调水效益<sup>[27]</sup>)。

(1) 平均调水效益计算<sup>[26]</sup>。

$$\Delta w = (1 - K) \sum_{i=1}^n M \eta_i f_i \quad (1)$$

式中:  $\Delta w$  为水保措施调水效益 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $K$  为地下径流补给系数, 研究区位于半干旱的黄土高原沟壑区, 无地下径流补给, 故  $K = 0$ ;  $M$  为流域天然状况下的地表径流模数 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ );  $\eta_i$  为某单项措施  $i$  相

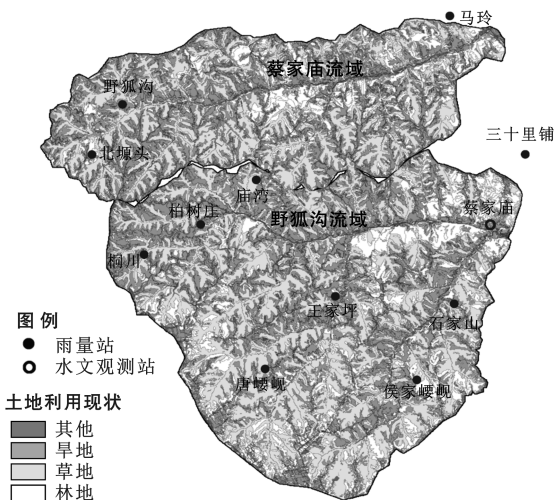


图 2 研究区雨量、水文站位置及土地利用现状

Fig.2 Location of precipitation, hydrological stations and land use status of study area



对减水指标(%);  $f_i$  为某单项措施  $i$  保存面积 ( $\text{hm}^2$ ),  $i$  为措施数量,  $i=1, 2 \dots n$ 。

因调水模数  $N_i = M\eta_i$  ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ), 故(1)式可简化为:

$$\Delta w = \sum_{i=1}^n N_i f_i \quad (2)$$

(2) 频率调水效益计算<sup>[27]</sup>。

$$\Delta \tau w = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ij} f_i \quad (3)$$

式中:  $N_{ij}$  为某汛期降水频率  $j$  条件下, 某单项治理措施  $i$  调水模数 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ );  $j$  为不同汛期降水频率序号,  $j=1, 2 \dots m$ , 分别代表 5%, 10%, 20%...90%; 其他符号意义同前。

本研究采用泾河流域水保措施平均调水模数、不同频率坡面调水模数研究结果<sup>[26-27]</sup>进行水保措施调水效益分析。

#### 1.4 数据分析

利用 SPSS 20.0 软件, 通过线性回归及曲线估计方法, 分析降水量、治理程度与洪峰流量的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水量及暴雨频率分析

根据蔡家庙流域和野狐沟流域 1981—2022 年 12 个站点的雨量观测资料, 对年降水量、汛期降水量、年最大日降水量变化进行分析。

(1) 年降水量变化。蔡家庙流域年均降水量为 514.2 mm, 其中最大年降水量 844.8 mm (2003 年), 最小年降水量 314.7 mm (1986 年), 最大值与最小值两者差值为 530.1 mm, 变异系数为 23.8%; 野狐沟流域年均降水量为 501.4 mm, 最大年降水量 780.3 mm (2003 年), 最小年降水量 309 mm (1997 年), 最大值与最小值两者差值为 471.3 mm, 相差 2.53 倍, 变异系数为 21.9%。

(2) 汛期降水量变化。蔡家庙流域汛期降水量均值为 397.6 mm, 其中最大汛期降水量 770.8 mm (2013 年), 最小汛期降水量 213.6 mm (1997 年), 最大值与最小值两者差值为 557.2 mm, 变异系数为 28.5%; 野狐沟流域汛期降水量均值为 391.1 mm, 最大汛期降水量 707 mm (2013 年), 最小汛期降水量 205.8 mm (1997 年), 最大值与最小值两者差值为 501.2 mm, 变异系数为 26.8%。

(3) 最大日降水量变化。蔡家庙流域最大日降水量 217.5 mm (2003 年), 最小日降水量 38.8 mm (1989 年), 最大值与最小值两者差值为 178.7 mm,

变异系数为 46.5%; 野狐沟流域最大日降水量 377.7 mm (2022 年), 最小日降水量 27.5 mm (2008 年), 最大值与最小值两者差值为 350.2 mm, 变异系数为 79.8%。

综上所述, 由于两条流域相邻, 年降水量、汛期降水量具有相近的变化规律, 但最大日降水量的差异较大。两流域年降水量、汛期降水量、最大日降水量变化趋势见图 3, 图 4。

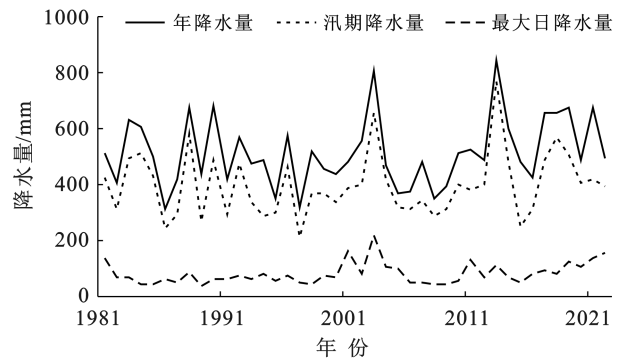


图 3 1981—2021 年蔡家庙流域降水逐年变化趋势  
Fig.3 Annual precipitation trend in Caijiamiao watershed from 1981 to 2021

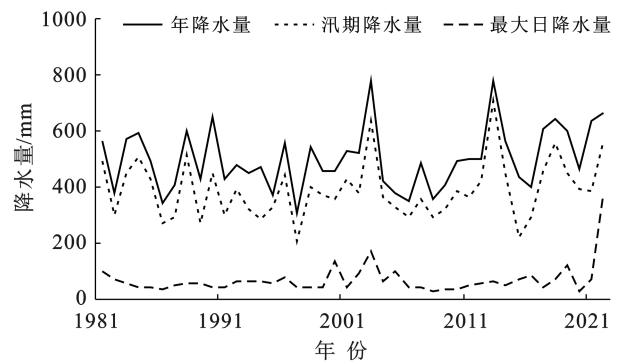


图 4 1981—2021 年野狐沟流域降水逐年变化趋势  
Fig.4 Annual precipitation trend in Yehugou watershed from 1981 to 2021

(4) 蔡家庙流域暴雨频率分析。根据庆阳水务局提供的分析资料, 蔡家庙水文观测站 1981—2022 年 42 a 以来年最大日降水量资料, 均值为 58 mm,  $C_v$  (离差系数) = 0.73,  $C_s/C_v$  (偏态系数/离差系数) = 3.5, 从蔡家庙 P-III 型暴雨频率曲线(图 5)可以看出, 年最大日降水频率 99% 时最大日降水量为 30 mm, 50% 时最大日降水量为 45 mm, 33% 时最大日降水量为 65 mm, 20% 时最大日降水量为 80 mm, 10% 时最大日降水量为 110 mm, 5% 时年最大日降水量为 145 mm, 2% 时年最大日降水量为 187 mm, 1% 时年最大日降水量为 222 mm, 0.2% 时年最大日降水量为 302 mm, 0.1% 时年最大日降水量为 338 mm。

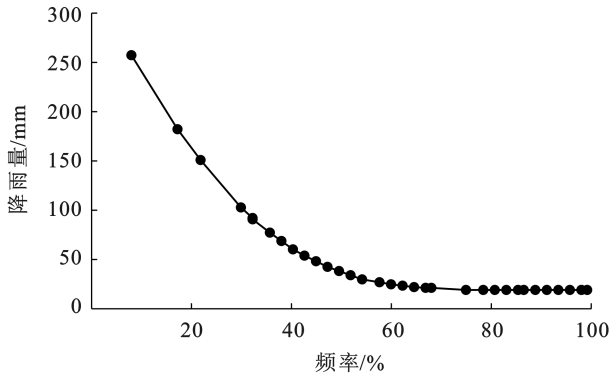


图5 蔡家庙流域年最大日降水频率曲线

Fig.5 Annual maximum daily precipitation frequency curve of Caijiamiao hydrological station

## 2.2 径流量、洪峰流量变化及洪峰频率分析

根据蔡家庙水文观测站 1981—2022 年 42 a 水文站观测资料,对径流量、洪峰流量、洪峰频率进行了分析。径流量、洪峰流量变化曲线见图 6。

(1) 径流量变化。研究期年均径流量为  $567.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,最大年径流量  $2.09 \times 10^7 \text{ m}^3$  (2003 年),最小年径流量  $2.23 \times 10^6 \text{ m}^3$  (1989 年),年径流量波动起伏较大,最大值与最小值两者差值为  $1.87 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,变异系数为 66.71%。

(2) 洪峰流量变化。研究期平均洪峰流量  $168 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最大洪峰流量  $2\ 080 \text{ m}^3/\text{s}$  (2003 年),最小洪峰流量  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  (2020 年),两者差值为  $2\ 074 \text{ m}^3/\text{s}$ ,变异系数为 205.39%。

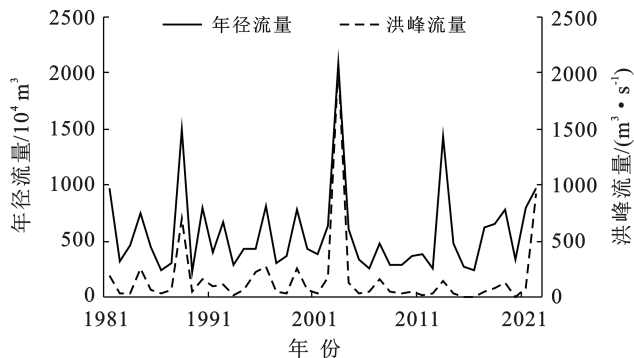


图6 蔡家庙水文站径流量、洪峰流量逐年变化趋势

Fig.6 Annual change trend in runoff and flood peak flow of Caijiamiao hydrological station

(3) 洪峰频率分析。洪水频率分析值采用庆阳水务局提供的资料,蔡家庙水文站实测资料系列 40 a,历史调查洪水资料加入了 1933 年的调查值,洪水调查期为 150 a,洪峰流量均值  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ,采用 P-III 型配线,选用离差系数  $C_v = 2.19$ ,偏态系数  $C_s = 2.5 C_v$ 。洪峰流量频率分析(图 7)显示:洪峰流量频率 99% 时洪峰流量为  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ,50% 时洪峰流量为  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ,33% 时洪峰流量为  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ,20% 时洪峰流

量为  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ,10% 时洪峰流量为  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,5% 时洪峰流量为  $570 \text{ m}^3/\text{s}$ ,3.33% 时洪峰流量为  $989 \text{ m}^3/\text{s}$ ,2% 时洪峰流量为  $1\ 310 \text{ m}^3/\text{s}$ ,1% 时洪峰流量为  $1\ 800 \text{ m}^3/\text{s}$ ,0.2% 时洪峰流量为  $3\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

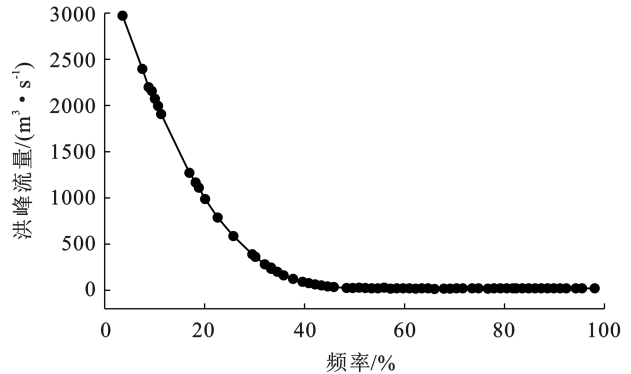


图7 蔡家庙水文站洪峰流量频率曲线

Fig.7 Flood peak flow frequency curve of Caijiamiao hydrological station

## 2.3 水保措施调水效益分析

水土流失地在治理前不同土地利用方式具有不同的径流模数,同一水保措施具有基本相同的径流模数,因此同一水保措施调水模数因治理前土地利用方式的不同,其调水模数不同。平均调水效益反映了多年平均状态下某地类治理前后水土流失数量的变化,频率调水效益反映了汛期不同降水频率状态下某地类治理前后水土流失数量的变化。

2.3.1 平均调水效益 泾河流域水保三大措施多年平均调水模数梯田为  $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,造林为  $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,草地为  $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  [26]。依据(2)式计算了蔡家庙流域和野狐沟流域的调水效益。

随治理程度的增加,蔡家庙流域 1981—2022 年调水模数增加  $1.24 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,调水效益增加  $3.34 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,42 a 累计总调水效益为  $8.11 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,调水模数为  $3.00 \times 10^5 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。1981 年调水效益中梯田的调水效益占 71.18%,水保林占 12.63%,人工种草占 16.19%;2022 年梯田的调水效益占 55.71%,水保林占 24.99%,人工种草占 19.30%。

随治理程度的增加,野狐沟流域 1981—2022 年调水模数增加  $1.33 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,调水效益增加  $2.05 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,42 a 累计总调水效益为  $5.12 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,调水模数为  $3.33 \times 10^5 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。1981 年调水效益中梯田的调水效益占 76.70%,水保林占 10.28%,人工种草占 13.05%;2022 年梯田的调水效益占 62.58%,水保林占 21.22%,人工种草占 16.20% (详见表 1,图 8)。

上述分析表明,流域内随水保措施面积、治理程度的提高,调水模数及效益成正比例增加。

表 1 研究区不同时段各水保措施的拦蓄能力

Table 1 Storage capacity of soil and water conservation measures in different time periods at study area

流域名称	年份	梯田/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	梯田 比例/%	水保林/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	水保林 比例/%	人工种草/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	人工草地 比例/%	年调水量/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	调水模数/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ·a)	治理 程度/%
蔡家庙	1981	40.76	71.18	7.23	12.63	9.27	16.19	57.26	0.21	9.11
	1991	63.17	60.52	16.80	16.10	24.41	23.39	104.38	0.39	17.97
	2001	121.05	68.01	24.78	13.92	32.17	18.07	178.00	0.66	29.01
	2011	173.32	69.97	32.00	12.92	42.39	17.11	247.72	0.92	39.77
	2022	217.94	55.71	97.74	24.99	75.50	19.30	391.18	1.45	69.68
	合计	5 208.67	64.24	1270.20	15.67	1 628.83	20.09	8 107.70	30.03	—
野狐沟	1981	28.28	76.70	3.79	10.28	4.81	13.05	36.87	0.24	9.84
	1991	43.82	67.12	8.81	13.49	12.66	19.39	65.29	0.42	18.78
	2001	83.97	73.89	12.99	11.43	16.68	14.68	113.64	0.74	31.02
	2011	120.23	75.62	16.78	10.55	21.98	13.82	158.99	1.03	42.80
	2022	151.15	62.58	51.26	21.22	39.13	16.20	241.54	1.57	71.85
	合计	3 613.14	70.52	666.20	13.00	844.34	16.48	5 123.68	33.27	—

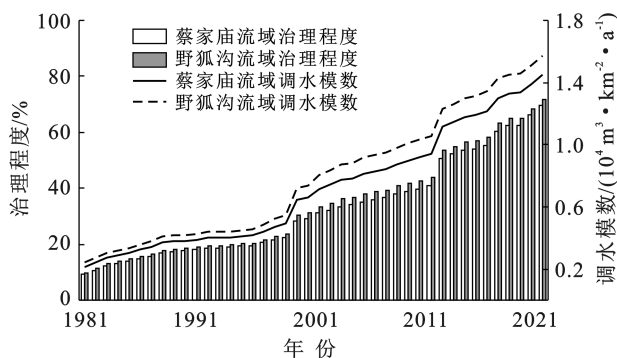


图 8 研究区治理程度与调水模数曲线

Fig.8 Research area degree of treatment and water transfer modulus curve at study area

2.3.2 频率调水效益 降水是水土流失的主要动力, 汛期不同频率的降水量对水保措施调水模数大小具有直接的影响。不同频率调水模数采用冉大川等<sup>[27]</sup>黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应研究结果(详见表 2)。

依据(3)式、表 2 数据<sup>[27]</sup>计算 1981—2022 年蔡家庙、野狐沟流域的调水效益。结果表明:蔡家庙流域调水效益总计  $8.09 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 年均  $1.93 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 调水模数  $7.10 \times 10^3 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; 野狐沟流域调水效益总计  $5.05 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 年均  $1.20 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 调水模数  $7.80 \times 10^3 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

蔡家庙流域降水频率 5% 增加到 70%, 年平均调水效益减少了  $4.59 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; 野狐沟流域降水频率 5% 增加到 70%, 年平均调水效益减少了  $2.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。结果表明, 随降水频率的增加(汛期降水量降低), 年平均调水效益减少。

上述计算结果表明, 平均调水效益与频率调水效益计算结果具有高度的一致性。其中蔡家庙流域 1981—2022 年平均调水效益为  $8.11 \times 10^7 \text{ m}^3$  [调水模数  $30.03 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ], 频率调水效益为  $8.09$

$\times 10^7 \text{ m}^3$  [调水模数  $29.95 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ], 两种方法计算结果误差 0.24%; 野狐沟流域 1981—2022 年平均调水效益为  $5.12 \times 10^7 \text{ m}^3$  [调水模数  $33.27 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ], 频率调水效益为  $5.05 \times 10^7 \text{ m}^3$  [调水模数  $32.79 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ], 两种方法计算结果误差 1.42%。也说明水土保持措施具有良好的调水功能与效益。

表 2 不同降水频率条件下水保措施调水模数

Table 2 Water diversion modulus of soil and water conservation measures under different precipitation frequencies

频率/ %	汛期降雨量/ mm	调水模数/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )		
		梯田	人工林	人工草
5	696.1	520	307	180
10	513.5	439	360	148
20	413.1	340	286	143
30	329.1	258	191	132
40	294.7	197	143	116
50	257.6	143	116	106
60	225.1	111	90	85
70	195.3	74	69	64
80	166.3	48	48	48
90	135.6	16	16	21
系列平均	322.6	215	162	104

## 2.4 洪峰流量与相关因子分析

2.4.1 降水因子与洪峰流量相关分析 年降水量、年最大日降水量、汛期降水量与洪峰流量回归分析表明, 年降水量, 汛期降水量, 最大日降水量与洪峰流量存在共线性, 故仅进行了单因子相关性分析。结果表明各模型均具有极显著的线性相关 ( $p < 0.01$ )。其中最大日降水量与洪峰流量模型拟合相关性最高,  $R^2$  为 0.380; 汛期降水量与洪峰流量的相关性次之,  $R^2$  为 0.200; 年降水量与洪峰流量相关性第三,  $R^2$  为 0.181 (详见表 4)。因此, 采用年最大日降水量预测洪峰流量与水保措施面积相关模型时具有更高的可信度。

表 3 1981—2022 年各流域不同降水频率调水效益

Table 3 Benefits of water transfer with different precipitation frequencies of different watershed during 1981—2022

流域名称	降水频率/%	汛期降水量/mm	不同降水频率调水量/ $10^4 \text{ m}^3$					调水模数/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )		包含年份
			梯田	水保林	人工种草	调水量		小计	年平均	
						小计	年平均			
蔡家庙	5	770.84	329.99	85.01	82.64	497.64	497.64	1.84	1.84	2013
	10	580.18	170.05	71.56	35.97	1 110.23	277.58	4.11	1.03	2003,1988,2018,1984
	20	462.09	135.42	62.00	38.58	2 596.05	236.00	9.61	0.87	2019, 1983, 2017, 1990, 2014, 1992,1996,1985,1981,2004,2021
	30	376.19	122.95	44.63	36.49	2 448.80	204.07	9.07	0.76	2020, 2002, 2012, 2010, 2022, 2001, 2011, 1999, 1998, 2007, 1993,2000
	40	309.58	79.40	23.93	27.41	915.16	130.74	3.39	0.48	2005, 1982, 2009, 2016, 2006, 1995,1991
	50	284.33	41.38	15.19	18.66	300.91	75.23	1.11	0.28	1987,1994,2008,1989
	60	245.14	47.66	17.81	25.04	181.04	90.52	0.67	0.34	2015,1986
	70	213.63	17.81	8.03	12.52	38.35	38.35	0.14	0.14	1997
	合计	—	—	—	—	8 088.28	192.60	29.95	0.71	—
野狐沟	5	706.95	228.91	44.59	42.84	316.34	316.34	2.05	2.05	2013
	10	585.86	192.79	77.94	31.86	907.77	302.59	5.89	1.96	2003,2018,2022
	20	457.52	85.02	26.60	17.21	1 546.05	128.84	10.04	0.84	1988, 1984, 1981, 2017, 1983, 2019, 1990, 2014, 1996, 1985, 2001,2012
	30	372.62	80.99	21.87	18.42	1455.23	121.27	9.45	0.79	1998, 2020, 1992, 2010, 2021, 2002, 1999, 2011, 2004, 2007, 2000,1995
	40	311.18	41.34	9.83	10.38	369.33	61.55	2.40	0.40	2005,2009,1993,1991,1982,1987
	50	284.27	38.69	10.23	13.14	372.35	62.06	2.42	0.40	2016,2008,2006,1994,1986,1989
	70	214.33	23.53	7.41	11.07	84.04	42.02	0.55	0.27	2015,1986
	合计	—	—	—	—	5 051.09	120.3	32.79	0.78	—

表 4 蔡家庙流域降水量因子与洪峰流量模型

Table 4 Caijiamiao watershed precipitation factor and flood peak flow model

相关关系	相关方程	$n$	$R$	$R^2$	$F$	$p$
洪峰流量( $y$ )—年降水量( $x_1$ )	$y = 1.195x_1 - 446.764$	42	0.425	0.181	8.815	0.005
洪峰流量( $y$ )—最大日降水量( $x_2$ )	$y = 5.565x_2 - 288.445$	42	0.616	0.380	24.511	0.000
洪峰流量( $y$ )—汛期降水量( $x_3$ )	$y = 1.358x_3 - 372.353$	42	0.447	0.200	9.981	0.003

注:式中  $y$  为洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $x_1$  为年降水量( $\text{mm}$ ),  $x_2$  为最大日降水量( $\text{mm}$ ),  $x_3$  为汛期降水量( $\text{mm}$ );  $R$  为相关系数,  $R^2$  为贡献系数;  $F$  为方差检验值;  $p$  为显著性检验值;  $n$  为样本数。

2.4.2 治理程度与洪峰流量相关分析 经过对水保措施调水效益的深入分析发现,随着水保措施的逐渐加强增加和治理程度的逐步提高,治理流域的调水效

益呈现出显著的增长趋势。但治理程度与洪峰流量相关性分析表明(详见表 5),其相关性未通过显著性检验( $p > 0.01$ )。

表 5 蔡家庙流域治理程度与洪峰流量模型

Table 5 Caijiamiao watershed management degree and flood peak flow model

相关关系	方程	$n$	$R$	$R^2$	$F$	$p$
洪峰流量( $y$ )—治理程度( $x$ )	$y = 0.629x + 147.276$	42	0.031	0.001	0.039	0.843

注:式中  $y$ —洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $x$ —治理程度(%);  $R$  为相关系数;  $R^2$  为贡献系数;  $F$  为方差检验值;  $P$  为显著性检验值;  $n$  为样本数。

2.4.3 年最大日降水量、治理程度对洪峰流量的影响 为提高洪峰流量相关分析的全面性、准确性,采用年最大日降水量与治理程度建立线性回归模型。

$$y = -201.366 + 6.379x_1 - 4.752x_2 \quad (4)$$

( $R^2 = 0.428$ ;  $p = 0.000$ )

式中:  $y$  为洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $x_1$  为年最大日降水量( $\text{mm}$ );  $x_2$  为治理程度(%); 样本数  $n$  为 42;  $R^2$  为贡献系数;  $p$  为显著性检验值,  $p < 0.01$  为极显著。

对线性回归模型的系数作标准化处理,处理后的系数见表 6。标准化系数的大小反映了自变量对因变



量的贡献大小,取值为-1~1。本研究中,标准化系数为正时,表示被考察因子与洪峰流量呈正相关关系,反之则为负相关关系;系数绝对值越大,表明被考察因子对洪峰流量贡献率越大。由表6可知,年最大日降水量的标准化系数为0.707,说明当年最大日降水量增加时,洪峰流量亦增加,且贡献度较大。同理,当治理程度增大时,洪峰流量减小,但其对缓解洪峰流量的贡献相对较小,标准化系数的绝对值仅为0.237。

表6 年最大日降水量、治理程度与洪峰流量回归模型的相关系数

Table 6 Correlation coefficient of annual maximum daily precipitation, degree of treatment and flood peak flow regression model

项目	未标准化系数(B)	标准化系数(Beta)	显著性(p)
(常量)	-201.366	—	0.074
最大日降水量	6.379	0.707	0.000
治理程度	-4.752	-0.237	0.078

## 2.5 不同暴雨与洪峰频率下的灾害损失分析

依据《“7·15”庆城县暴雨洪水灾害损失评估报告》资

料,为消除两个流域面积大小不同、自然及社会经济条件给分析带来的差异,采用灾害损失强度指标(直接经济损失,10<sup>4</sup>元/km<sup>2</sup>)对蔡家庙、野狐沟流域进行了分析。7月15日蔡家庙水文站年最大日降水量159 mm(频率2%),最大小时降水量58.5 mm,流域面积270 km<sup>2</sup>,洪峰流量920 m<sup>3</sup>/s〔洪峰模数3.41 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·s)〕;野狐沟流域年最大日降水量377.7 mm(频率0.1%),最大小时降水量84.9 mm,流域面积154 km<sup>2</sup>,洪峰流量为1 050 m<sup>3</sup>/s〔洪峰模数6.82 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·s)〕。在“7·15”暴雨洪灾中,两条流域治理程度相近的情况下,蔡家庙流域发生50 a一遇暴雨(频率2%),30 a一遇洪峰流量(频率为3%),灾害损失强度达到1.74×10<sup>5</sup>元/km<sup>2</sup>;野狐沟流域发生1 000 a一遇的暴雨(频率0.1%),50 a一遇洪峰流量(频率为2%),灾害损失强度达到3.13×10<sup>6</sup>元/km<sup>2</sup>。在最大日降水量增加1.37倍的情况下,洪峰模数由3.41 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·s)增加到6.82 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·s),增加了1倍,造成的灾害经济损失增长了16.95倍,说明洪峰及洪峰模数的大小是造成经济损失的直接原因(详见表7)。

表7 “7·15”野狐沟、蔡家庙流域暴雨洪水灾害直接损失统计

Table 7 “7·15” Statistics of damages caused by flood disasters in Yehugou and Caijiamiao watersheds

项目	指标名称	计量单位	小计	野狐沟流域	蔡家庙流域
雨洪参数	最大小时降水量	mm	—	84.9	58.5
	年最大日降水量	mm	—	377.7	159
	暴雨频率	%	—	0.1	2
	洪峰流量	m <sup>3</sup> /s	—	1 050	920
	洪峰频率	%	—	2	3
	洪峰模数	m <sup>3</sup> /(km <sup>2</sup> ·s)	—	6.82	3.41
居民财产损失	农村居民住宅用房	10 <sup>4</sup> 元	7 459.76	7 187.90	271.85
	非住宅用房	10 <sup>4</sup> 元	2 126.06	1 677.77	448.28
	居民家庭财产	10 <sup>4</sup> 元	3 236.82	3 218.32	18.49
产业损失	农林牧渔业(第一产业)	10 <sup>4</sup> 元	3 776.85	3 190.96	585.88
	工业(第二产业)	10 <sup>4</sup> 元	8 531.28	8 514.69	16.59
	服务业(第三产业)	10 <sup>4</sup> 元	247.95	247.95	0.00
基础设施损失	交通运输	10 <sup>4</sup> 元	11 318.64	9 302.55	2 016.09
	通信	10 <sup>4</sup> 元	924.97	848.34	76.63
	能源	10 <sup>4</sup> 元	823.35	773.68	49.67
	水利	10 <sup>4</sup> 元	2 342.53	2 114.99	227.54
	农村地区生活设施	10 <sup>4</sup> 元	10 710.58	10 056.93	653.65
公共服务损失	教育系统	10 <sup>4</sup> 元	1 048.67	719.65	329.02
	医疗卫生系统	10 <sup>4</sup> 元	0.79	0.79	0.00
	文化系统	10 <sup>4</sup> 元	132.43	120.05	12.39
	社会保障与社会服务系统	10 <sup>4</sup> 元	36.39	32.30	4.09
	社会管理系统	10 <sup>4</sup> 元	242.20	242.20	0.00
合计		10 <sup>4</sup> 元	52 959.27	48 249.08	4 710.19
灾害损失强度		10 <sup>4</sup> 元/km <sup>2</sup>	124.90	313.31	17.45

注:数据来源:《“7·15”庆城县暴雨洪水灾害损失评估报告》(庆城县应急管理局,甘肃省中和生态环境咨询中心,2022年8月)。



### 3 结论

(1) 水保措施发挥着持续、稳定的调水效益,治理程度越高,削减洪峰流量效果越明显。

(2) 年降水量、汛期降水量、年最大日降水量对洪峰流量产生显著的正向影响。年最大日降水量对洪峰流量的贡献率系数为0.707,治理程度对洪峰流量的贡献率系数为-0.237。年最大日降水量是影响洪峰流量变化的主要因素,其他则为次要因素。

(3) “7·15”特大暴雨中,两个相邻流域治理程度在近70%的情况下,蔡家庙流域50 a一遇(频率为2%)降雨产生的洪峰流量为30 a一遇(频率为3%),灾害损失强度达到 $1.74 \times 10^5$ 元/km<sup>2</sup>;野狐沟流域1 000 a一遇(频率为0.1%)降雨产生的洪峰流量为50 a一遇(频率为2%),灾害损失强度达到 $3.13 \times 10^6$ 元/km<sup>2</sup>。50 a一遇洪峰流量灾害损失强度是30 a一遇洪峰流量灾害损失强度的16.95倍。对比分析表明,基本治理的小流域可将1 000 a一遇暴雨产生的50 a一遇洪峰流量降低到30 a一遇洪峰流量,可有效降低暴洪灾害损失。

### 参考文献(References)

- [1] 史德明.土壤侵蚀与人类生存环境恶化[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1995,9(1):26-33.  
Shi Deming. Soil erosion and deterioration of human living environment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995,9(1):26-33.
- [2] 李大鸣,陈海舟,范玉.国内外防洪减灾发展与现状[J].中国农村水利水电,2005(9):33-37.  
Li Daming, Chen Haizhou, Fan Yu. Present situation and development of flood control and mitigation in China and abroad [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(9):33-37.
- [3] 邱黎,刘焕彬,万程程,等.1984—2019年山东省暴雨洪涝灾害时空变化特征及其成因分析[J].灾害学,2022,37(4):57-63.  
Qiu Can, Liu Huanbin, Wan Chengcheng, et al. Temporal-spatial variation and cause analysis of rainstorms and related flood disasters in Shandong from 1984 to 2019 [J]. Journal of Catastrophology, 2022,37(4):57-63.
- [4] 张辉,许新宜,张磊,等.2000—2010年我国洪涝灾害损失综合评估及其成因分析[J].水利经济,2011,29(5):5-9.  
Zhang Hui, Xu Xinyi, Zhang Lei, et al. Comprehensive assessment of loss of flood and waterlogging disasters from 2000 to 2010 and analysis of their causes [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011,29(5):5-9.
- [5] 张葆蔚,王金红.2003—2012年我国洪涝灾情评估与成因分析[J].中国水利,2013(11):35-37.

Zhang Baowei, Wan Jinhong. Assessment and analysis of flood and water logging of China from 2003 to 2012 [J]. China Water Resources, 2013(11):35-37.

- [6] 世行新报告称自然灾害 每年造成经济损失达5200亿美元[J].国际融资,2017(1):72.  
New World Bank analysis finds: Natural disasters cost \$520bn in losses every year [J]. International Financing, 2017(1):72.
- [7] 张富,姚进忠,雷升文,等.甘肃省水土保持综合治理效益研究[M].河南 郑州:黄河水利出版社,2014:218-220.  
Zhang Fu, Yao Jinzhong, Lei Shengwen, et al. Study on the benefits of comprehensive management measures for soil and water conservation in Gansu Province [M]. Zhengzhou, Henan: Yellow River Water Conservancy Press, 2014:218-220.
- [8] 杨文治.黄河中上游水土流失灾害问题的浅析[J].水土保持通报,1986,6(4):9-12.  
Yang Wenzhi. Analysis of soil erosion disaster in the middle and upper reaches of the Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1986,6(4):9-12.
- [9] 史德明.中国水土流失及其对旱涝灾害的影响[J].自然灾害学报,1996,5(2):40-50.  
Shi Deming. Soil erosion in China and its influence on drought and flood disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 1996,5(2):40-50.
- [10] 罗利芳,李双才,叶芝菡,等.黄土高原生物措施减水减沙效益动态分析[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):78-81.  
Luo Lifang, Li Shuangcai, Ye Zhihan, et al. Analysis of runoff and sediment reduction from biological measurements in the Loess Plateau [J]. Geography and Geo-Information Science, 2004,20(3):78-81.
- [11] 王光谦,张长春,刘家宏,等.黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J].泥沙研究,2006(2):10-16.  
Wang Guangqian, Zhang Changchun, Liu Jiahong, et al. Analyses on the variation of vegetation coverage and water/sediment reduction in the rich and coarse sediment area of the Yellow River basin [J]. Journal of Sediment Research, 2006(2):10-16.
- [12] 柳荣先,马勇,杨国礼.论水土保持综合治理作用及防治措施:以昕水河流域的水沙变化为例[J].水土保持学报,1995,9(4):43-48.  
Liu Rongxian, Ma Yong, Yang Guoli. Discussion on the effect of comprehensive harnessing and prevention measures of soil and water loss: According to the analysis of runoff and sediment variations in Xishui River watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995,9(4):43-48.

- [13] 白璐璐,时鹏,李占斌,等.黄土高原梯田和淤地坝坡沟治理措施对产流产沙的协同效应[J].农业工程学报,2023,39(13):96-104.  
Bai Lulu, Shi Peng, Li Zhanbin, et al. Synergistic effects of terraces and check dams on runoff and sediment yields in a slope-gully system in Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(13):96-104.
- [14] 王飞,穆兴民,张晓萍,等.水土保持对偏关河径流和泥沙的影响分析[J].中国水土保持科学,2005,3(2):10-14.  
Wang Fei, Mu Xingmin, Zhang Xiaoping, et al. Effect of soil and water conservation on runoff and sediment in Pianguan River [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005,3(2):10-14.
- [15] 丁琳霞,穆兴民.水土保持对小流域地表径流时间特征变化的影响[J].干旱区资源与环境,2004,18(3):103-106.  
Ding Linxia, Mu Xingmin. The effects of soil and water conservation on temporal change of the surface runoff in watersheds [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004,18(3):103-106.
- [16] 冉大川,刘斌,罗全华,等.泾河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J].人民黄河,2001,23(2):6-8.  
Ran Dachuan, Liu Bin, Luo Quanhua, et al. Analysis of water and sediment reduction effects by soil and water conservation treatments in Jing River basin [J]. Yellow River, 2001,23(2):6-8.
- [17] 阎文哲,赵光耀,马国力.黄河流域水土保持综合效益分析[J].人民黄河,1996,18(5):7-11,39.  
Yan Wenzhe, Zhao Guangyao, Ma Guoli. Comprehensive benefit analysis of soil and water conservation in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 1996,18(5):7-11,39.
- [18] 陈渠昌,张如生.水土保持综合效益定量分析方法及指标体系研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,5(2):95-104.  
Chen Quchang, Zhang Rusheng. Study on approaches and index system for quantitatively analyzing comprehensive benefits of soil and water conservation [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007,5(2):95-104.
- [19] 张丽娟.水土保持措施对黄土丘陵沟壑区小流域产汇流过程影响研究[D].山西太原:太原理工大学,2020.  
Zhang Lijuan. Effect of soil and water conservation measures on runoff production and confluence in small watershed loess hilly-gully region [D]. Taiyuan, Shanxi: Taiyuan University Technology, 2020.
- [20] 刘宏志.植被和降雨类型对地表径流和土壤侵蚀的影响研究[J].陕西水利,2023(10):112-114.  
Liu Hongzhi. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion [J]. Shaanxi Water Resources, 2023(10):112-114.
- [21] 宋子龙.暴雨洪水成因分析及其防治对策:以广州市增城区“5·22”、“6·8”两场特大暴雨为例[J].珠江水运,2021(19):75-76.  
Song Zilong. Cause analysis of rainstorm and flood disaster and its prevention countermeasures: Taking “5·22” and “6·8” two torrential rains in Zengcheng District of Guangzhou as examples [J]. Pearl River Water Transport, 2021(19):75-76.
- [22] 马吉刚,王玉俭.小流域综合治理对减轻洪涝灾害的调查分析[J].水土保持通报,1991,11(6):35-39.  
Ma Jigang, Wang Yujian. Surveys and analysis of effects of small watershed controlling upon lessening flood and water logging disasters [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991,11(6):35-39.
- [23] 翟婷婷,赵广举,穆兴民,等.黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化[J].泥沙研究,2021,46(1):57-63.  
Zhai Tingting, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Processes of water and sediment in the representative catchments of the middle Yellow River under extreme rainfalls [J]. Journal of Sediment Research, 2021,46(1):57-63.
- [24] 邓国卫,王敏.都江堰特大暴雨过程中GIS的多种雨量计算方法对比[J].高原山地气象研究,2018,38(1):81-86.  
Deng Guowei, Wang Min. Comparison of multi surface rainfall calculation methods for GIS during the heavy rain process in Dujiangyan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2018,38(1):81-86.
- [25] 祁春阳,戴欢,赵晓燕,等.基于虚拟力和泰森多边形的分布式覆盖算法[J].计算机工程与设计,2018,39(3):606-611.  
Qi Chunyang, Dai Huan, Zhao Xiaoyan, et al. Distributed coverage algorithm based on virtual force and Voronoi [J]. Computer Engineering and Design, 2018,39(3):606-611.
- [26] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究(第一卷)[M].河南郑州:黄河水利出版社,2002:832.  
Wang Gang, Fan Zhao. Research on water and sediment changes in the Yellow River (Vol. 1) [M]. Zhengzhou, Henan: Yellow River Water Conservancy Press, 2002.
- [27] 冉大川,左仲国,吴永红,等.黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应[M].北京:科学出版社,2012:124.  
Ran Dachuan, Zuo Zhongguo, Wu Yonghong, et al. Response of recent water and sediment changes to human activities in the middle reaches of the Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 2012.