

# 特大暴雨下残垣丘陵沟壑区水土流失与 梯田措施效益评价

赵妍<sup>1</sup>, 周珊珊<sup>1</sup>, 高云飞<sup>1</sup>, 王满<sup>2</sup>, 靳琪<sup>3</sup>, 刘珊珊<sup>4</sup>

(1.黄河上中游管理局, 陕西 西安 710021; 2.黄河水土保持天水治理监督局, 甘肃 天水 741000;

3.黄河水土保持西峰治理监督局, 甘肃 西峰 745000; 4.榆林市水旱灾害防御中心, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** [目的] 开展场次暴雨水土流失评估与措施效益评价, 分析暴雨造成的土壤侵蚀状况, 评价梯田措施效益, 为常规水土流失动态监测提供有效补充。[方法] 以甘肃“2022·7·15”特大暴雨发生地庆城县和暴雨中心湫沟小流域为研究区, 利用日降雨量数据与全国水土流失动态监测项目相关成果, 基于次暴雨降雨侵蚀力, 采用改进的CSLE模型计算土壤侵蚀模数, 分析暴雨降雨侵蚀力与多年均降雨条件下全年降雨侵蚀力的关系, 以及次暴雨条件下不同土地利用类型土壤侵蚀强度等级的空间分布, 探讨梯田对区域水土流失的影响。[结果] 庆城县该次暴雨产生的降雨侵蚀力达到多年均降雨条件下全年降雨侵蚀力的1.85倍, 暴雨中心降雨侵蚀力达到多年均降雨条件下全年降雨侵蚀力的4.88倍。暴雨造成的强烈级以上土壤侵蚀面积是2021年全年强烈级以上土壤侵蚀面积的3.46倍, 暴雨中心达6.93倍。场次特大暴雨造成的强烈以上等级土壤侵蚀主要分布在旱地、草地和灌木林地。庆城县现状梯田面积325 km<sup>2</sup>, 相较于无梯田措施情景, 县域土壤侵蚀量减幅达72.87%。[结论] 加强退耕还林还草、坡耕地综合整治、旱作梯田建设等水土保持工作, 是特大暴雨条件下水土流失灾害防治的有效手段。

**关键词:** 特大暴雨; 次降雨侵蚀力; 水土流失; 梯田; 效益评价

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)05-0092-08

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 赵妍, 周珊珊, 高云飞, 等. 特大暴雨下残垣丘陵沟壑区水土流失与梯田措施效益评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 92-99. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.011; Zhao Yan, Zhou Shanshan, Gao Yunfei, et al. Benefits evaluation of soil and water loss and terrace measures in hilly and gully areas of torrential rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 92-99.

## Benefits Evaluation of Soil and Water Loss and Terrace Measures in Hilly and Gully Areas of Torrential Rainfall

Zhao Yan<sup>1</sup>, Zhou Shanshan<sup>1</sup>, Gao Yunfei<sup>1</sup>, Wang Man<sup>2</sup>, Jin Qi<sup>3</sup>, Liu Shanshan<sup>4</sup>

(1.Upper and Middle Reaches of Yellow River Conservancy Commission,

Xi'an, Shaanxi 710021, China; 2.Tianshui Governance and Supervision

Bureau of Yellow River Soil and Water Conservation, Tianshui, Gansu 741000, China;

3.Xifeng Management Supervision of Soil and Water Conservation in the Yellow River, Xifeng,

Gansu 745000, China; 4.Drought and Water Disaster Defense Center of Yulin, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** [Objective] This study assessed of soil and water loss and evaluation of the benefits of measures caused by rainstorms. Soil erosion caused by rainstorms was analyzed, and the benefits of terrace measures were evaluated to provide an effective supplement for the dynamic monitoring of soil and water loss. [Methods] The Qingcheng County and Qiugou small watershed of the rainstorm (2022·7·15) center in Gansu Province were used as the research areas based on daily rainfall data and the results of the national dynamic monitoring of soil and water loss projects. An improved Chinese soil loss equation (CSLE) model was used to calculate the soil erosion modulus based on the rainfall erosivity of rainstorms. The relationship

收稿日期: 2024-03-27

修回日期: 2024-08-30

资助项目: 国家自然科学基金委黄河水科学研究联合基金项目“黄土高原水土保持措施潜力及其对河流泥沙的调控机制”(U2243211)

第一作者: 赵妍(1990—), 女(汉族), 山西省太原市人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水土流失动态监测数据分析与应用方面的研究。

Email: 447698395@qq.com.

between rainfall erosivity of the rainstorm and annual rainfall erosivity under the condition of multiannual average rainfall was analyzed. The spatial distribution of the soil erosion intensity grades of different land-use types under rainstorm conditions was further analyzed, and the influence of terraces on regional soil erosion was discussed. [Results] The rainfall erosivity generated by this rainstorm in Qingcheng County reached 1.85 times the annual rainfall erosivity under the condition of multiyear average rainfall, and the rainfall erosivity of the rainstorm center reached 4.88 times the annual rainfall erosivity under the condition of multiyear average rainfall. The area of soil erosion above the strong level caused by rainstorms was 3.46 times, and the rainstorm center was 6.93 times that of the soil erosion above the strong level in 2021. Strong soil erosion caused by heavy rainstorms was primarily distributed in dry lands, grasslands, and shrubs. The current terrace area of Qingcheng County is 325 km<sup>2</sup>. The amount of soil erosion in the county decreased by 72.87% compared to the situation without terrace measures. [Conclusion] Strengthening soil and water conservation work, such as returning farmland to forest and grassland, comprehensively improving sloped farmland, and constructing dry terraces, is an effective means of preventing and controlling soil and water loss disasters under heavy rainstorm conditions.

**Keywords:** torrential rainstorm; rainfall erosivity; soil and water loss; terraces; benefits evaluation

近年来,随着全球气候变化影响,极端降雨事件频发,特大暴雨引发洪水灾害<sup>[1]</sup>,造成严重水土流失,引起广泛关注<sup>[2-4]</sup>。开展场次暴雨水土流失评估与措施效益评价,科学评估水土流失危害和水土保持措施防灾减灾效果,支撑水土保持生态修复、灾后重建以及政府相关决策,为常规水土流失动态监测的有效补充,是当前水土保持监测工作亟须解决的问题。

目前,特大暴雨水土流失评价主要采取实地调查或模型计算法。李天毅等<sup>[5]</sup>“23·7”京津冀地区暴雨洪水与土壤侵蚀调查,通过实地调查切沟侵蚀、重力侵蚀、工程措施损毁等情况,对比分析了相邻小流域土壤侵蚀强度相对大小。山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持综合调查<sup>[6]</sup>,基于 CSLE 模型估算了多个调查小流域的土壤侵蚀模数,是其多年平均土壤侵蚀模数的 1.4~2.7 倍。刘沛好<sup>[7]</sup>基于郑州 2021 年“7·20”特大暴雨灾后水土保持调查,采用 CSLE 模型计算得出了有无水土保持措施情境下的区域的土壤侵蚀模数,对比分析发现梯田措施可降低耕地 89.75% 的土壤侵蚀模数。

2022 年 7 月 15 日 0:00—22:00,甘肃省庆阳市出现暴雨天气过程,最大 24 h 雨量在庆城县翟家河,达 284.9 mm,达到特大暴雨级别,最大累计降雨雨量达 373.1 mm,最大小时降水 84.9 mm。此次特大暴雨造成庆阳市境内泾河支流马莲河流量快速上涨,洪峰流量最高达 5 100 m<sup>3</sup>/s,为往年同期的 210 倍。根据 2022 年 7 月 16 日庆阳市水务局发布的《马莲河流域“7·15”暴雨洪水分析研判及对策建议》,蔡家庙和庆阳雨量站千年一遇日最大降水量为 332~338 mm,本次翟家河降水量为 373.1 mm,可以确定该次降水为超千年一遇特大暴雨,21 h 降雨量相当于庆城多

年平均降水量的 74.9%。为深入了解次暴雨土壤侵蚀和水土保持工程防灾减灾情况,水利部水土保持监测中心组织开展 2022 年甘肃庆城“7·15”特大暴雨水土保持调查工作。基于调查结果,本文对庆城县和暴雨中心小流域次暴雨土壤侵蚀进行了分析计算,探讨梯田对区域水土流失的影响,以期掌握和研究实时水土流失及灾害、水土保持措施成效<sup>[8]</sup>,为后续水土流失治理和灾后重建提供支撑。

## 1 研究区概况

甘肃省庆阳市庆城县地形主要由残塬、梁峁、山坡、沟谷、沟坡、川台组成,残塬陡坡,梁峁起伏,沟壑纵横,地形破碎,是国家级水土流失重点治理区。庆城县县域面积 2 673 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,根据 2021 年度全国水土流失动态监测<sup>[9]</sup>成果数据,庆城县水土流失面积 1 304.60 km<sup>2</sup>,占县域总面积的 48.81%。庆城县水土流失按侵蚀形态和发展顺序可分为面蚀和沟蚀两种形式。面蚀主要发生在坡耕地,其次是植被较差的荒坡地,降雨时地表被雨滴击溅、淋溶侵蚀后,进而发展成层状、鳞片状地表径流,冲刷形成细沟、浅沟侵蚀<sup>[10]</sup>。沟蚀是由面蚀发展而成,主要以沟头前进、沟底下切、沟岸扩张 3 种方式。调查范围属甘肃省庆城县,属马莲河流域。马莲河是泾河的一级支流,也是最大的支流。湫沟小流域位于庆城县翟家河乡,属黄土丘陵Ⅱ副区,处于黄土丘陵区向黄土高原残塬过渡区,面积 1.90 km<sup>2</sup>,距离庆城县城 30 km。选择湫沟小流域作为研究对象,主要原因是该小流域位于暴雨中心,梯田、淤地坝、生产道路、坡耕地等主要调查要素较为齐全。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

选取庆城县县域内的 41 个雨量站,暴雨期间逐站的日雨量数据,用于进行次降雨侵蚀力因子计算。土壤侵蚀模数计算使用中国土壤流失方程 CSLE 模型<sup>[11-12]</sup>,模型土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖与生物措施因子、工程措施因子值和耕作措施因子值与全国水土流失动态监测项目庆城县因子数据一致。

### 2.2 计算方法

基于日降雨量数据与全国水土流失动态监测项目庆城县因子数据,计算次暴雨条件下的县域土壤侵蚀模数与土壤侵蚀量;以本次暴雨中心所在的湫沟小流域为研究对象,提取小流域土壤侵蚀模数空间数据,计算小流域土壤侵蚀量,并分析县域和小流域不同土地利用类型的土壤侵蚀强度等级分布情况。土壤侵蚀量计算公式为:

$$M = \bar{A} \cdot S \quad (1)$$

式中: $M$  为土壤侵蚀量( $t$ ); $\bar{A}$  为土壤侵蚀模数均值( $t/km^2$ ); $S$  为区域面积( $km^2$ )。其中土壤侵蚀模数均值( $\bar{A}$ )计算公式为:

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_j \quad (2)$$

式中: $N$  表示栅格总数(无量纲); $A_j$  表示第  $j$  个栅格土壤侵蚀模数( $t/km^2$ )。

次暴雨条件下的土壤侵蚀模数采用场次暴雨中国土壤流失方程 CSLE 模型计算:

$$A = 100 \times R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (3)$$

式中: $A$  为土壤侵蚀模数( $t/km^2$ ); $R$  为次降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$ ;  $LS$  为坡长坡度因子,无量纲;  $B$  为植被覆盖与生物措施因子,无量纲;  $E$  为工程措施因子,无量纲;  $T$  为耕作措施因子,无量纲。各因子取值方法为:

(1) 降雨侵蚀力因子  $R$ 。基于 2022 年 7 月 14 日 08:00 至 7 月 16 日 8:00 日降雨量数据。计算方法采用章文波等<sup>[13]</sup>提出的基于日雨量估算降雨侵蚀力模型,具体计算公式为:

$$R = \alpha \sum_{i=1}^n (P_i)^\beta \quad (4)$$

式中: $R$  为次降雨的降雨侵蚀力 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$ ;  $P_i$  表示场次降雨第  $i$  天的侵蚀性日雨量( $mm$ ),要求日雨量大于等于 12  $mm$ ,否则以 0 计算,阈值 12  $mm$  与中国侵蚀性降雨标准一致,日降雨量的分界时间是当日 8:00 至次日 8:00;  $n$  表示次降雨过程的日

数;  $\alpha, \beta$  是模型参数。采用章文波等<sup>[13]</sup>的日雨量侵蚀力模型回归分析结果,庆城县  $\alpha, \beta$  分别取 0.334, 1.719。

庆城县的各站点降雨侵蚀力( $R$ )根据雨量站点(野狐沟站、三十里铺站、辛家沟站、北塬头站等 16 个雨量站)降水量数据计算,日降雨量数据时段为 7 月 14 日 08:00 至 7 月 16 日 08:00 共 2 日,再将站点降雨侵蚀力统计数据转为矢量文件,对降雨侵蚀力因子空间插值,生成庆城县降雨侵蚀力等值线图,利用 ArcGIS 重采样为 10 m 空间分辨率的次降雨侵蚀力因子栅格数据。空间插值采用普通克里金空间插值方法<sup>[14]</sup>,计算公式为:

$$Z = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (5)$$

式中: $Z$  为估算点的气象值;  $\lambda_i$  为参与插值的站点对估算点气象要素值的权重;  $X_i$  表示气象站点的位置。权重计算方程为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_j, x_0) & (j=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\gamma(x_i, x_j)$  是  $Z$  在采样点  $x_i$  和  $x_j$  之间的半方差;  $\gamma(x_j, x_0)$  是  $Z$  在采样点  $x_i$  和未知点  $x_0$  之间的半方差。

(2) 土壤可蚀性因子  $K$  值。表示标准小区上单位降雨侵蚀力所引起的土壤流失量。计算公式为:

$$K = A/R \quad (7)$$

式中: $A$  为坡长 22.13 m,坡度 9%(5°),清耕休闲径流小区观测的多年平均土壤侵蚀模数 $[t/(hm^2 \cdot a)]$ ;  $R$  为与小区土壤侵蚀观测对应的多年平均年降雨侵蚀力 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ 。本文直接采用第一次全国水利普查水土保持情况普查土壤可蚀性因子成果。

(3) 坡长因子  $L$ 。计算公式为:

$$L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) \times (22.13)^m} \quad (8)$$

式中: $\lambda_i, \lambda_{i-1}$  为第  $i$  个和第  $i-1$  个坡段的坡长( $m$ );  $m$  为坡长指数,随坡度而(无量纲)。  $m=0.2$ , 当  $\theta \leq 1^\circ$ ;  $m=0.3$ , 当  $1^\circ < \theta \leq 3^\circ$ ;  $m=0.4$ , 当  $3^\circ < \theta \leq 5^\circ$ ;  $m=0.5$ , 当  $\theta > 5^\circ$ 。  $\theta$  为坡度( $^\circ$ )。基于 1:5 万 DEM 数据计算得到坡长因子  $L$ 。生成的  $L$  栅格数据分辨率重采样为 10 m。

(4) 坡度因子  $S$ 。计算公式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $S$  为坡度因子(无量纲); $\theta$  为坡度( $^{\circ}$ )。基于 1:5 万 DEM 数据计算得到坡度因子  $S$ 。生成的  $S$  栅格数据分辨率重采样为 10 m。

(5) 植被覆盖与生物措施因子  $B$ 。利用 MODIS 归一化植被指数(NDVI)产品,采用参数修订方法,得到次暴雨发生时段对应的 2022 年 7 月上半月 30 m 空间分辨率的植被覆盖度,结合土地利用类型计算  $B$  因子。经重采样,生成 10 m 空间分辨率的  $B$  因子栅格数据。

(6) 水土保持工程措施因子  $E$ 。根据解译获取的土壤侵蚀地块的工程措施类型,查梯田水土保持工程措施因子赋值表获取水土保持工程措施因子值,水土保持工程措施因子赋值详见表 1。经重采样,生成 10 m 空间分辨率的  $E$  因子栅格数据。

表 1 梯田水土保持工程措施因子赋值

Table 1 Assignment of factor values for engineering measures of soil and water conservation on terraced fields

二级级类	工程措施名称	工程措施代码	$E$ 因子值
梯田	土坎水平梯田	20101	0.084
	石坎水平梯田	20102	0.121
	坡式梯田	20103	0.414
	隔坡梯田	20104	0.347

(7) 耕作措施因子  $T$ 。通过查找《中国耕作制度 70 年》<sup>[15]</sup>附录 3 中国耕作制度区划县(市)名录确定研究区所处二级区名称,对应《全国水土流失动态监

测指南》附录 5 耕作措施轮作措施赋值表,确定耕作措施因子  $T$ 。经重采样,生成 10 m 空间分辨率的  $T$  因子栅格数据。

上述各模型因子图层的空间分辨率统一为 10 m,投影与坐标系统一致,将庆城县 7 个因子栅格图层相乘后即为庆城县次暴雨条件下的土壤侵蚀模数栅格图层,单位为  $t/km^2$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 次暴雨降雨侵蚀力

3.1.1 庆城县次暴雨降雨侵蚀力 全国水土流失动态监测成果中,庆城县近 30 a 多年平均降雨侵蚀力区域平均值  $1\,331.11\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ ,县域多年平均降雨侵蚀力最大值和最小值分别为  $1\,517.82$  和  $1\,231.13\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ ,标准差为 57.21。

本次暴雨降雨侵蚀力区域平均值  $2\,456.27\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,是庆城县多年平均降雨侵蚀力的 1.85 倍,县域次暴雨侵蚀力最大值和最小值分别为  $8\,558.40$  和  $17.50\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,标准差为  $1\,832.92$ 。降雨侵蚀力空间分布特征呈现西北向东南逐渐降低趋势,与侵蚀性降雨量分布规律一致,最大值出现在野狐沟雨量站,次暴雨量达到  $367.00\,\text{mm}$ 。庆城县本次暴雨的次暴雨侵蚀力等值线空间分布如图 1 所示。

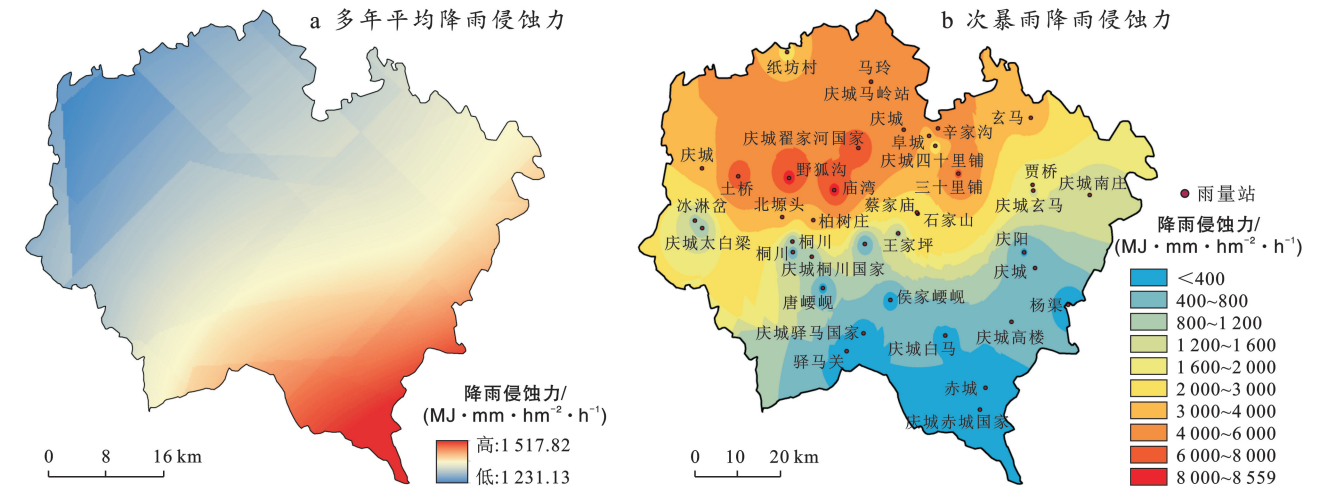


图 1 庆城县降雨侵蚀力等值线空间分布

Fig.1 Spatial distribution of rainfall erosivity contour in Qingcheng County

3.1.2 暴雨中心次暴雨降雨侵蚀力 暴雨中心湫沟小流域多年平均降雨侵蚀力区域平均值  $1\,291.28\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ ,多年平均降雨侵蚀力最大值和最小值分别为  $1\,302.49$  和  $1\,296.64\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。暴雨中心湫沟小流域次暴雨侵蚀力区

域平均值  $6\,301.45\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,达到该区域多年平均降雨侵蚀力的 4.88 倍。次暴雨侵蚀力在  $5\,990.43\sim6\,624.53\,(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 。

#### 3.2 次暴雨土壤侵蚀

3.2.1 庆城县次暴雨土壤侵蚀 庆城县面积



2 673 km<sup>2</sup>,本次暴雨产生的平均土壤侵蚀模数为 2 475.31 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量为 6.62×10<sup>6</sup> t。2021 年度全国水土流失动态监测成果中庆城县土壤侵蚀模数栅格数据显示,庆城县 2021 年度平均土壤侵蚀模数为 1 345.99 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量为 3.60×10<sup>6</sup> t。计算结果表明,本次暴雨造成的土壤侵蚀量高于 2021 年度土壤侵蚀量,为 2021 年度全年土壤侵蚀量的 1.85 倍。

本次暴雨造成庆城县水土流失面积 1 304.26 km<sup>2</sup>,占县域面积的 48.79%,与 2021 年全年水土流失面积 1 304.60 km<sup>2</sup> 相近。本次暴雨产生的土壤侵蚀强度分级<sup>[16]</sup>结果显示,强烈及以上侵蚀面积 439.43 km<sup>2</sup>,其中强烈侵蚀 191.46 km<sup>2</sup>,极强烈侵蚀 177.43 km<sup>2</sup>,剧烈侵蚀 70.54 km<sup>2</sup>,分别占县域面积的 7.16%,6.64%和 2.64%,均超过 2021 年相应等级侵蚀面积,是 2021 年强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积的 3.08,3.53 和 4.73 倍。强烈、极强烈、剧烈土壤侵蚀主要位于旱地、草地和灌木林地,分别占到了高强度侵蚀的 32.86%,26.76%,26.01%。庆城县次暴雨条件下的

土壤侵蚀强度分级详见表 2,不同地类侵蚀强度分布详见表 3。庆城县本次暴土壤侵蚀强度空间分布如图 2 所示。统计结果显示,微度侵蚀区域次暴雨降雨侵蚀力均值 782.97 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀区域次暴雨降雨侵蚀力均值分别为 1 839.60,2 462.53,2 754.12,3 046.82,3 074.55 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)。次暴雨土壤侵蚀空间分布与降雨侵蚀力空间分布呈现出趋势一致性。

表 2 庆城县土壤侵蚀强度分级

Table 2 Classification of soil erosion intensity in Qingcheng County

侵蚀等级	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> )	次暴雨土壤侵蚀强度		2021 年土壤侵蚀强度	
		面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
微度	<1 000	1368.75	51.21	1368.40	51.19
轻度	1 000~2 500	503.96	18.85	733.96	27.46
中度	2 500~5 000	360.87	13.50	443.47	16.59
强烈	5 000~8 000	191.46	7.16	62.06	2.32
极强烈	8 000~15 000	177.43	6.64	50.20	1.88
剧烈	>15 000	70.54	2.64	14.91	0.56
总计		2 673	100	2 673	100

表 3 庆城县次暴雨下不同地类侵蚀强度分布

Table 3 Erosion intensity distribution of different land types under rainstorm in Qingcheng County

km<sup>2</sup>

土地利用类型	微度	轻度	中度	强度	极强烈	剧烈
水浇地	0.52	0.08	0	0	0	0
旱地	356.89	148.16	93.27	46.64	45.50	52.27
有林地	200.17	77.37	52.32	25.71	26.88	3.03
灌木林地	312.83	139.95	104.04	58.24	50.10	5.99
其他草地	385.66	127.24	105.33	58.21	52.47	6.94
城镇建设用地	5.51	0.03	0.01	0	0	0
农村建设用地	57.71	6.74	2.69	0.95	0.59	0.36
人为扰动用地	5.03	1.83	1.73	0.93	1.12	0.98
其他建设用地	9.63	0.30	0.11	0.05	0.05	0.03
农村道路	0.82	0.35	0.29	0.18	0.21	0.49
其他交通用地	15.38	1.65	0.96	0.50	0.48	0.37
河湖库塘	18.20	0.19	0.11	0.05	0.04	0.01
裸土地	0.33	0.05	0.03	0.02	0.02	0.07

3.2.2 暴雨中心次暴雨土壤侵蚀 本次暴雨中心湫沟小流域平均土壤侵蚀模数为 8 146.71 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量 15 478.75 t。湫沟小流域次暴雨下的土壤侵蚀空间分布如图 3 所示。

2021 年度全国水土流失动态监测成果中湫沟小流域土壤侵蚀模数栅格数据显示,湫沟小流域 2021 年度平均土壤侵蚀模数为 1 669.70 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量为 3 172.43 t。计算结果表明,本次暴雨造成的土壤侵蚀量高于 2021 年度土壤侵蚀量,达到 2021 年度全年土壤侵蚀量的 4.88 倍。本次暴雨中心水土流失面积 1.47 km<sup>2</sup>,占县域面积的 77.37%,高于 2021 年

全年水土流失面积 1 km<sup>2</sup>。本次暴雨产生的土壤侵蚀强度分级结果显示,强烈级以上侵蚀面积 0.97 km<sup>2</sup>,其中强烈侵蚀 0.36 km<sup>2</sup>,极强烈侵蚀 0.39 km<sup>2</sup>,剧烈侵蚀 0.22 km<sup>2</sup>,分别占区域面积的 18.95%,20.53%和 11.58%,均超过 2021 年相应等级侵蚀面积,是 2021 年强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积的 6.0,6.5 和 11 倍。强烈、极强烈、剧烈土壤侵蚀主要位于灌木林地、旱地和其他草地,分别占到了高强度侵蚀的 50.65%,24.89%,21.49%。暴雨中心湫沟小流域次暴雨条件下的土壤侵蚀强度分级详见表 4,不同地类土壤侵蚀强度分布详见表 5。

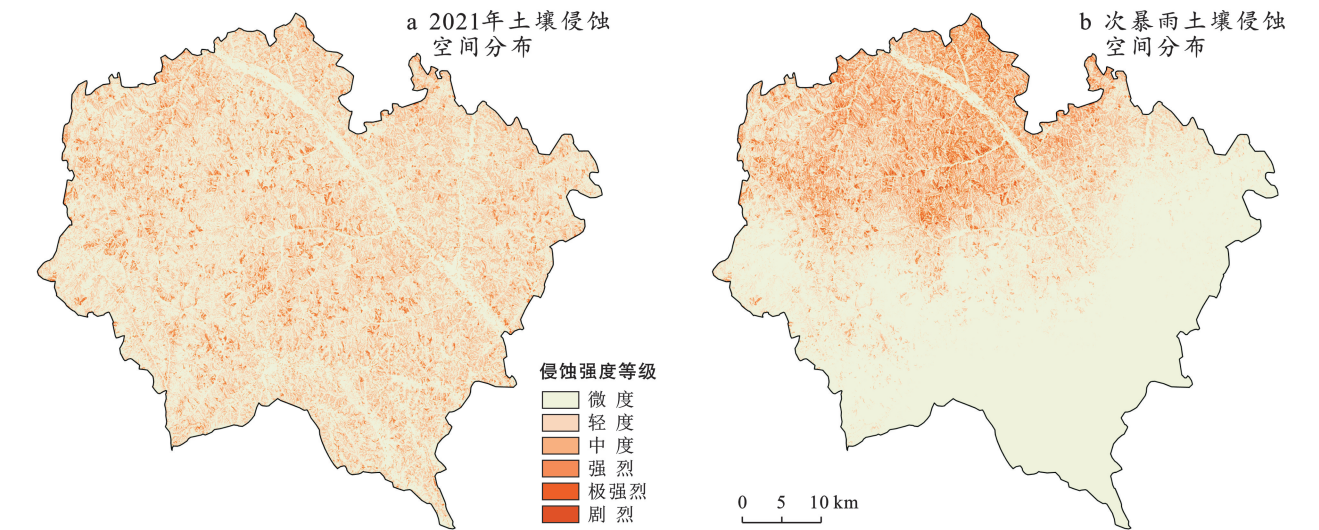


图 2 庆城县土壤侵蚀空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil erosion in Qingcheng County

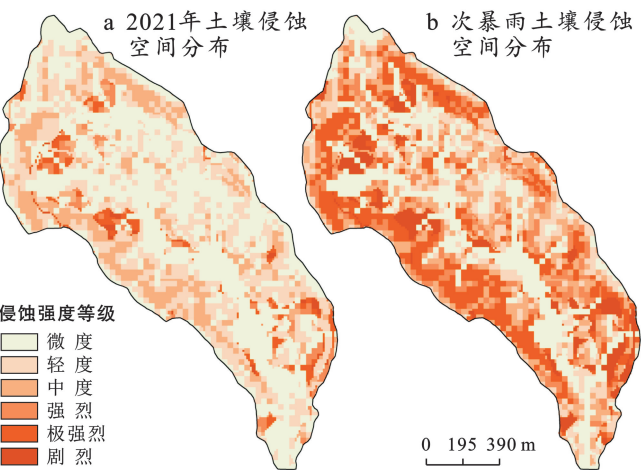


图 3 湫沟小流域次暴雨土壤侵蚀空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil erosion in Qiugou small watershed

表 4 湫沟小流域侵蚀强度分级

侵蚀等级	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> )		次暴雨土壤侵蚀强度		2021 年土壤侵蚀强度	
			面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
微度	<1 000		0.43	22.37	0.90	47.16
轻度	1 000~2 500		0.23	12.12	0.56	29.36
中度	2 500~5 000		0.27	14.27	0.30	16.04
强烈	5 000~8 000		0.36	19.00	0.06	3.25
极强烈	8 000~15 000		0.39	20.66	0.06	3.26
剧烈	>15 000		0.22	11.57	0.02	0.93
总计			1.90	100	1.90	100

3.3 措施效益评价

庆城县梯田面积 325 km<sup>2</sup>,以土坎水平梯田为主,根据梯田水土保持措施 E 因子赋值表取 0.084,无梯田措施条件下,庆城县本次暴雨产生的平均土

壤侵蚀模数为 4 593.66 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量为 1.23×10<sup>7</sup> t。本次暴雨梯田减蚀量达 5.66×10<sup>6</sup> t,减蚀量占本次庆城县土壤侵蚀量的 85.57%,梯田减蚀模数为 1.74×10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>。

表 5 湫沟小流域次暴雨不同地类侵蚀强度分布

Table 5 Distribution of erosion intensity of different land types in Qiugou small watershed

土地利用类型	微度	轻度	中度	强度	极强烈	剧烈
旱地	0.16	0.06	0.06	0.06	0.05	0.13
有林地	0.01	0	0	0.01	0.01	0
灌木林地	0.14	0.11	0.12	0.20	0.23	0.06
其他草地	0.10	0.05	0.07	0.09	0.10	0.02
农村建设用地	0.01	0.01	0.01	0	0	0

庆城县梯田区域内,本次暴雨产生的水土流失面积 163.88 km<sup>2</sup>,水土流失面积占梯田面积的 50.42%,从侵蚀强度等级分布来看,侵蚀面积随着侵蚀强度增加而减少。轻度侵蚀面积 91.11 km<sup>2</sup>,中度侵蚀面积 48.06 km<sup>2</sup>,强烈侵蚀面积 17.62 km<sup>2</sup>,极强烈 6.56 km<sup>2</sup>,剧烈 0.53 km<sup>2</sup>。考虑现有梯田区域无梯田措施的情景,本次暴雨产生水土流失面积将达 284.48 km<sup>2</sup>,水土流失面积占区域面积的 87.53%,水土流失面积较有梯田措施时增加 120.60 km<sup>2</sup>。从侵蚀强度等级分布来看,轻度及以上侵蚀面积随着侵蚀强度增加而增加。轻度侵蚀面积 22.93 km<sup>2</sup>,中度侵蚀面积 35.20 km<sup>2</sup>,强烈侵蚀面积 35.34 km<sup>2</sup>,极强烈 59.50 km<sup>2</sup>,剧烈 131.51 km<sup>2</sup>。庆城县湫沟小流域梯田面积为 88 hm<sup>2</sup>,主要分布在流域的沟沿线以上,占小流域面积的 46.32%。根据湫沟小流域野外调查结果,流域内梯田以土坎水平梯田为主,暴雨造成小流域内梯田损毁主要表现为田坎滑塌/崩塌和泥石流。近 80%的调查田

坎不同程度地受损,田坎平均受损率达到 22.54%,受损梯田范围内,梯田面积损失共计占梯田总面积的 0.42%。梯田损毁较为严重,与黄土的易蚀特性有关,也与当地坡度较陡、梯田田坎较高有关。梯田虽有损毁,但除新修梯田外田面基本无细沟,相比坡耕

地细沟侵蚀 13 917 t/km<sup>2</sup>,有效减少了侵蚀量。结果表明,梯田有效减少了水土流失面积,很大程度降低了土壤侵蚀强度。现有梯田措施与无梯田措施两种情景下的庆城县次暴雨土壤侵蚀强度分级详见表 6,梯田区域水土流失对比详见表 7。

表 6 庆城县次暴雨土壤侵蚀强度分级  
Table 6 Soil erosion intensity classification of rainstorm in Qingcheng County

侵蚀等级	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> )	考虑梯田措施		不考虑梯田措施		面积差/km <sup>2</sup>
		面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	
微 度	<1 000	1 368.75	51.21	1 248.14	46.69	120.61
轻 度	1 000~2 500	503.96	18.85	435.78	16.30	68.18
中 度	2 500~5 000	360.87	13.50	348.01	13.02	12.86
强 烈	5 000~8 000	191.46	7.16	209.18	7.83	-17.72
极强烈	8 000~15 000	177.43	6.64	230.37	8.62	-52.94
剧 烈	>15 000	70.54	2.64	201.53	7.54	-130.99
水土流失面积		1 304.26	48.79	1 424.88	53.31	-120.60
总 计		2673	100	2673	100	—

注:面积差=梯田措施面积-无梯田措施面积。下同。

表 7 庆城县梯田区域两种情景下水土流失面积对比  
Table 7 Comparison of soil and water loss area under two scenarios in terrace area of Qingcheng County km<sup>2</sup>

侵蚀强度级别	微 度	轻 度	中 度	强 烈	极强烈	剧 烈	水土流失面积
梯田措施	161.13	91.11	48.06	17.62	6.56	0.53	163.88
无梯田措施	40.52	22.93	35.20	35.34	59.50	131.51	284.48
面积差	120.61	68.18	12.86	-17.72	-52.94	-130.99	-120.60

4 结 论

(1) 基于次暴雨降雨侵蚀力的 CSLE 模型,通过优化 CSLE 中多年平均降雨侵蚀力,可实现精确计算次暴雨土壤侵蚀模数,量化特大暴雨水土流失情况。研究区庆城县次暴雨产生的降雨侵蚀力达到多年均降雨条件下全年降雨侵蚀力的 1.85 倍;暴雨中心湫沟小流域本次暴雨产生的降雨侵蚀力达到多年均降雨条件下全年降雨侵蚀力的 4.88 倍。

(2) 研究区庆城县本次特大暴雨造成的强烈以上等级土壤侵蚀主要分布在旱地、草地和灌木林地,暴雨造成的强烈级以上土壤侵蚀面积是 2021 年全年强烈级以上土壤侵蚀面积的 3.46 倍,暴雨中心达 6.93 倍。表明特大暴雨引起的水土流失问题不容忽视,应加强典型暴雨水土流失危害科学评估,以满足水土流失科学防治和流域治理管理等需要。

(3) 在灾后梯田措施的调查基础上,采用次暴雨降雨侵蚀力的 CSLE 模型,构建有无水土保持措施情景,计算不同情景下的土壤侵蚀量,对比分析发现,庆城县现状梯田面积 325 km<sup>2</sup>,该等级特大暴雨强度下,相较于无梯田措施情景,县域土壤侵蚀量减幅达

72.87%。加强坡耕地综合整治、旱作梯田建设等水土保持工作,是特大暴雨条件下水土流失灾害防治的有效手段。

参考文献 (References)

[1] 乔殿新,冯伟,王飞,等.台风“利奇马”暴雨引发的流域产流产沙特征:以山东省临朐县为例[J].水土保持研究,2022,29(2):31-35.  
Qiao Dianxin, Feng Wei, Wang Fei, et al. Characteristics of runoff and sediment yield of typhoon “Lekima” Rainstorm: A case in Linqu County, Shandong Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29 (2):31-35.

[2] 刘宝元,段淑怀,符素华,等.北京市“7·21”特大暴雨水土保持措施效益评价[J].北京水务,2012(5):8-13.  
Liu Baoyuan, Duan Shuhuai, Fu Suhua, et al. Benefit evaluation of soil and water conservation measures for “7·21” torrential rain in Beijing [J]. Beijing Water, 2012(5):8-13.

[3] 王楠,陈一先,白雷超,等.陕北子洲县“7·26”特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J].水土保持通报,2017,37 (4):338-344.  
Wang Nan, Chen Yixian, Bai Leichao, et al. Investiga-

- tion on soil erosion in small watersheds under “7·26” extreme rainstorm in Zizhou County, Northern Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 338-344.
- [4] 高健健, 党维勤, 周子渊, 等. 西吉县 2022 年“7·15”暴雨重力侵蚀调查与建议[J]. 人民黄河, 2024, 46(6): 109-112.
- Gao Jianjian, Dang Weiqin, Zhou Ziyuan, et al. Investigation and consideration on gravity erosion during July 15, 2022 rainstorm in Xiji County [J]. Yellow River, 2024, 46(6): 109-112.
- [5] 李天毅, 戴宁, 丛佩娟, 等. “23·7”京津冀地区暴雨洪水与土壤侵蚀调查: 以河北省邢台市临城县为例[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 155-166, 214.
- Li Tianyi, Dai Ning, Cong Peijuan, et al. “23·7” Storm flood and soil erosion survey in Beijing-Tianjin-Hebei region: A case study of Lincheng County, Xingtai City, Hebei Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 155-166, 214.
- [6] 林祚顶, 刘宝元, 丛佩娟, 等. 山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 149-153.
- Lin Zuoding, Liu Baoyuan, Cong Peijuan, et al. Soil and water conservation survey after a heavy storm on 10th August, 2019 in Linqu, Shandong Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 149-153.
- [7] 刘沛妤. 郑州“7·20”特大暴雨大坡小流域水土流失灾害调查与评价[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2023.
- Liu Peiyu. Investigation and evaluation of soil and water loss disaster in Zhengzhou “7·20” heavy rainstorm slope small watershed [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [8] 乔殿新, 柳庆斌, 党恬敏, 等. 场次暴雨水土保持调查探索与思考[J]. 中国水土保持, 2021(10): 13-15.
- Qiao Dianxin, Liu Qingbin, Dang Tianmin, et al. Exploration and consideration on soil and water conservation survey of rainstorm event [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(10): 13-15.
- [9] 乔殿新, 苏新宇. 新阶段全国水土流失动态监测工作探析[J]. 中国水土保持, 2022(4): 1-4.
- Qiao Dianxin, Su Xinyu. The national dynamic monitoring work of soil and water loss in the new stage [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(4): 1-4.
- [10] 张雪宁. 董志塬治理保护项目庆城县项目区水土流失典型调查及防治对策[J]. 甘肃农业, 2014(23): 123-125.
- Zhang Xuening. Typical investigation and control countermeasures of soil erosion in Qingcheng County project area of Dongzhiyuan treatment and protection project [J]. Gansu Agriculture, 2014(23): 123-125.
- [11] Baoyuan L, Keli Z, Yun X. An Empirical Soil Loss Equation [C]. Beijing: Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference, 2002.
- [12] 杨勤科, 李锐, 曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 849-856.
- Yang Qinke, Li Rui, Cao Mingming. Advances of quantitative assessment on regional soil erosion [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(8): 849-856.
- [13] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.
- [14] Matheron G. Principles of geostatistics [J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [15] 王宏广. 中国耕作制度 70 年[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- Wang Hongguang. 70 Years of China's Farming System [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [16] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL190-2007 Soil Erosion Classification and Grading Standard [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.

(上接第 91 页)

- [31] 寇青青, 运剑苇, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和导水率传递函数研究[J]. 土壤, 2020, 52(3): 611-617.
- Kou Qingqing, Yun Jianwei, Wang Mingxing, et al. Study on pedotransfer function of saturated hydraulic conductivity of purple soil in Northeast Chongqing [J]. Soils, 2020, 52(3): 611-617.
- [32] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 GIS 和随机森林算法的宁东土壤饱和导水率分布与预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 285-293.
- Xia Zishu, Bai Yiru, Wang Youqi, et al. Distribution and prediction of soil saturated hydraulic conductivity in ningdong based on GIS and random forest algorithm [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 285-293.
- [33] Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Wu Danhua, et al. Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(4): 902-916.