

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.009; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.009.

王悦, 赵广举, 金秋, 等. 天津市蓟州区典型暴雨水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 129-135, 144.

Wang Yue, Zhao Guangju, Jin Qiu, et al. Characteristics of soil erosion under typical rainstorms in Jizhou District, Tianjin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 129-135, 144.

## 天津市蓟州区典型暴雨水土流失特征

王悦, 赵广举, 金秋, 田鹏, 毕博, 宋卓远, 张荣耀

(南京水利科学研究院, 南京 210029)

**摘要:** [目的] 分析极端暴雨条件下小流域水土保持措施的减蚀拦沙效益, 为流域水土流失评价和水土保持措施优化配置提供科技支撑。[方法] 针对2024年天津市蓟州区“8·9”特大暴雨, 选取2个典型小流域西大峪与庄果峪, 采用中国土壤流失方程(CSLE模型), 计算典型暴雨土壤侵蚀模数, 分析其空间分布特征, 对比分析两个小流域水土流失差异及其驱动因素。[结果] 庄果峪小流域的平均土壤侵蚀模数达1 626.64 t/km<sup>2</sup>, 是西大峪小流域(466.09 t/km<sup>2</sup>)的3.5倍, 其严重流失区域占比达57%(西大峪23%); 两流域水土流失主要发生在林地与耕地, 但庄果峪坡耕地侵蚀更显著; 西大峪通过“梯田+谷坊+林地”组合措施减少42%的水土流失, 而庄果峪主要以梯田为主, 减蚀量仅为17%。[结论] 措施综合配置比单一措施水土保持效益提升2倍以上。鉴于极端暴雨引起严重的水土流失危害, 建议构建小流域防洪减灾技术体系, 提升小流域蓄排协调能力。

**关键词:** 极端暴雨; CSLE模型; 水土保持措施; 土壤侵蚀; 蓟州区

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0129-07

## Characteristics of soil erosion under typical rainstorms in Jizhou District, Tianjin

Wang Yue, Zhao Guangju, Jin Qiu, Tian Peng, Bi Bo, Song Zhuoyuan, Zhang Rongyao

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** [Objective] This study analyzes the erosion control and sediment retention benefits of soil and water conservation measures in small watersheds under extreme rainstorm conditions, aiming to provide scientific support for soil erosion evaluation and optimization of soil and water conservation measures. [Methods] Focusing on the “8·9” extreme rainstorm in 2024 in Jizhou District, Tianjin, two typical small watersheds-Xidayu and Zhuangguoyu-were selected. The Chinese Soil Loss Equation (CSLE) model was used to calculate the soil erosion modulus under the typical rainstorms, analyze its spatial distribution characteristics, and compare the differences in soil erosion between the two watersheds and their driving factors. [Results] The average soil erosion modulus in Zhuangguoyu reached 1 626.64 t/km<sup>2</sup>, 3.5 times higher than that in Xidayu (466.09 t/km<sup>2</sup>), with severe erosion areas accounting for 57% (compared to 23% in Xidayu). Soil erosion in both watersheds primarily occurred on forestland and cropland, but slope cropland erosion was more severe in Zhuangguoyu. In Xidayu, a combination of “terrace+check dam+forestland” reduced soil erosion by 42%, while in Zhuangguoyu, where terraces were the main measure, the reduction was only 17%. [Conclusion] The combined implementation of measures enhances soil and water conservation benefits by more than twofold compared to single measures. Given the severe erosion hazards caused by extreme rainstorms, it is recommended to establish a flood control and disaster mitigation technical system for small watersheds to improve their storage and discharge coordination capacity.

**Keywords:** extreme rainstorm; CSLE model; soil and water conservation measures; soil erosion; Jizhou District

收稿日期: 2025-04-07

修回日期: 2025-04-17

接受日期: 2025-05-03

资助项目: 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Rc923003, Y924003); 南京水利科学研究院研究生学位论文项目(Yy925006)

第一作者: 王悦(2000—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程。E-mail: 2226312362@qq.com

通信作者: 赵广举(1980—), 男, 辽宁葫芦岛人, 博士, 研究员, 主要从事流域水文过程与土壤侵蚀模拟。E-mail: gjzhao@nhri.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

近几十年来,全球气候变化导致极端降雨事件频发,由此引发的洪水灾害对生态环境和社会经济造成了严重威胁<sup>[1]</sup>。作为土壤侵蚀的主要气象驱动力,降雨,尤其是被定义为在24 h内降水量达到或超过其所在地区月平均降水量的极端降雨事件,对水土流失过程具有显著影响。这些极端降雨由于其特性极易引发洪涝灾害,并携带大量泥沙,给流域下游地区带来严重的危害。因此,开展极端暴雨条件下的水土流失调查与评估,分析水土保持措施的效益,对于应对极端气候事件,合理配置水土保持措施具有重要意义。

现有水土保持措施在极端暴雨事件中的防蚀效果存在明显差异,2017年黄河无定河流域“7·26”特大暴雨事件显示,尽管淤地坝在拦截泥沙方面表现出了显著的效果,但整体上水利和水土保持措施在减轻洪水和泥沙方面的成效有限<sup>[2]</sup>;2019年台风“利奇马”影响下的山东临朐县极端暴雨案例进一步揭示,林草地、撂荒地基本能维持无侵蚀状态,而缺乏防护措施的坡耕地、梯田和道路侵蚀严重<sup>[3]</sup>,这些研究表明,现有水土保持措施虽能在一定程度上减少暴雨引发的土壤侵蚀量,但难以抵御特大暴雨造成的侵蚀灾害,不同区域在极端暴雨下的土壤侵蚀异同仍缺乏深入对比。此外,土壤侵蚀模型的开发代表了该领域研究的前沿方向,刘宝元等在2002年提出适应中国区域特点的土壤侵蚀模型,已在全国多个区域验证其适用性<sup>[4-6]</sup>,但国内研究多聚焦于年际尺度侵蚀评估<sup>[7-10]</sup>。针对次暴雨事件的土壤侵蚀研究相对匮乏,且模型在极端暴雨情景下的适用性验证仍显不足,其复杂性和不确定性亟待进一步研究。

为此,本研究采用CSLE模型对2024年典型暴雨事件进行土壤侵蚀定量分析,选取天津市蓟州区西大峪(以水土流失综合治理为主)和庄果峪(以水平阶为主)为研究对象,明确极端降雨条件下土壤侵蚀的空间分布特征,为蓟州区水土流失治理提供精准的防治范围,评估不同土地利用类型和地形条件下的土壤侵蚀响应特征,为蓟州区实施水土流失的综合治理与生态保护策略提供坚实的科学支持和理论基础。

## 1 研究区概况

蓟州区地处天津市最北部,是全市唯一的山地丘陵区,地貌单元具有显著区域分异特征:北部为燕山山脉延伸段,以中低山地貌为主;南部逐渐过渡至冲积平原。区域总面积1 590.22 km<sup>2</sup>,气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温11.5℃,年均

降水量676.4 mm,降水时空分布不均特征显著,7—9月地表径流量占全年总量的83.8%。土壤类型以淋溶褐土、棕壤土和潮土为主。

本研究选取水土保持措施差异显著的庄果峪与西大峪小流域开展对比研究。庄果峪小流域(117°10′30″—117°13′30″E,40°0′10″—40°4′N)位于白涧镇北部山区,面积1 397.45 hm<sup>2</sup>。该流域水土保持措施以造林为主,缓坡区建设梯田,以玉米、核桃复合种植为主,沟道内建有少量谷坊,水土流失整体治理水平相对薄弱。

西大峪小流域(117°23′—117°25′40″E,40°11′10″—40°13′20″N)位于下营镇,面积706.99 hm<sup>2</sup>。该流域自1982年起实施水土保持综合治理工程,形成生物与工程措施协同防护体系;到2005年底累计建设谷坊坝5 000余座、蓄水设施22座,栽植150多万株、人工种植乔木10多万株<sup>[11]</sup>,经过多年的持续治理,西大峪小流域治理程度达较高水平。

## 2 资料与方法

### 2.1 数据收集与整理

研究区小流域土壤侵蚀模数计算涉及的基础数据包括:典型场次降雨过程、土壤类型及分布、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、植被覆盖度数据(MODIS)、土地利用数据。本研究总计选取天津市蓟州区71个气象站点,以气象站点2024年8月9日至8月10日的逐小时降雨数据计算次降雨侵蚀力后使用反距离权重法进行插值,采用小流域边界裁剪获取2个小流域的降雨侵蚀力;蓟州区的数字高程模型(DEM)数据来源于ALOS(Advanced Land Observing Satellite)卫星产品,空间分辨率为12.5 m。土壤类型数据采用国家地球系统科学数据中心发布的中国土壤数据集,用于计算土壤可蚀性;土地利用数据源自武汉大学发布的1985—2023年中国30 m分辨率逐年土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD)<sup>[12]</sup>;植被覆盖度数据来源于美国地球观测系统(Earth Observing System, EOS)的Terra和Aqua卫星,通过NASA官网下载的MODIS数据,用于计算植被覆盖与生物措施因子。

### 2.2 研究方法

中国土壤流失方程CSLE模型是刘宝元等<sup>[13]</sup>参考USLE和RUSLE模型,结合中国本土的地形条件及水土保持措施修改后提出的,对我国的水蚀区具有较高的适应性<sup>[14-15]</sup>,模型的基本形式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: $A$ 为单位面积土壤侵蚀模数(t/hm<sup>2</sup>); $R$ 为降雨径

流侵蚀力因子( $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ); $K$ 为土壤可蚀性因子( $\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$ ); $L$ 为坡长因子,无量纲; $S$ 为坡度因子,无量纲; $B$ 为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。

其中  $R$  因子基于流域内雨量站降雨数据,采用刘宝元编制的《中国土壤流失方程》中次降雨径流侵蚀方程计算方法获得,公式为:

$$R_{\text{次}} = E \cdot I_{30} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{次}}$ 为次降雨径流侵蚀力因子 [ $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ]; $I_{30}$ 是一次降雨的最大 30 min 雨强( $\text{mm}/\text{h}$ ); $E$ 是一次降雨总动能( $\text{MJ}/\text{hm}^2$ );计算公式<sup>[16]</sup>为

$$E = \sum_{r=1}^q (e_r \cdot P_r) \quad (3)$$

式中: $E$ 是一次降雨总动能( $\text{MJ}/\text{hm}^2$ ); $r=1,2,3,\dots,q$ ,表示一次降雨过程按雨强分为  $q$  段;每一段内的雨强相同,段间雨强不同; $P_r$ 是每一段的雨量( $\text{mm}$ ); $e_r$ 是每一段的单位降雨动能 [ $\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ]。

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082i_r)] \quad (4)$$

式中: $i_r$ 是断点雨强或数字化雨量计的等间隔雨强( $\text{mm}/\text{h}$ )。获得蓟州区的降雨侵蚀力分布,然后使用西大峪和庄果峪小流域的边界裁剪获取两个小流域的降雨侵蚀力数据。

$K$  因子采用 Williams 等<sup>[17]</sup>在 EPIC 模型中计算求得; $LS$  基于地形数据,采用符素华等<sup>[18]</sup>开发的坡度坡长因子计算工具获得; $B$  基于土地利用和植被覆盖计算获得<sup>[19]</sup>; $E$  为根据水土保持措施赋值获得; $T$  为根据轮作措施赋值表查找获得<sup>[20]</sup>。

### 2.3 暴雨特征

根据降雨资料选取 8 月 9 日 15:00 至 10 日 2:00 作为统计时段,该次降雨历时 12 h,全市平均降雨量 67.8 mm,空间分布呈显著异质性。蓟州区作为暴雨中心,平均降水量达 127.0 mm。基于泰森多边形的降雨空间插值显示<sup>[21]</sup>,区域累计雨量介于 36.2~220.1 mm,极端降水梯度特征显著。其中,官庄镇双安小流域最大 12 h 降雨量 220.1 mm,桑梓镇最大 6 h 雨量 193.1 mm,侯家营镇出现短时强降雨峰值 108.9 mm/h。空间统计分析表明,全区 71 个气象站点中,48 站累计雨量超 100 mm (占 67.6%),27 站超 150 mm,官庄镇与桑梓镇两站突破 200 mm。

此次暴雨过程具有强集中性与高致灾性特征:约 82% 的降水量集中发生于 9 日 23:00 至 10 日 2:00 的 3 h 内,山区平均雨量 136.0 mm,局地小时雨强突破历史极值。典型小流域对比显示,庄果峪小流域最大小时雨强 93.2 mm 本次暴雨降雨侵蚀力平均值为 4 253( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,庄果峪次暴雨侵蚀力

最大值和最小值分别为 4 595.22, 3 223.23 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,标准差为 321.10,表面侵蚀力空间分布离散性显著。西大峪小流域小时最大降雨量达 63.4 mm,其暴雨侵蚀力均值为 2 328.50 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,显著低于庄果峪,次暴雨侵蚀力最大值和最小值分别为 2 580.32, 2 058.38 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ,“8·9”特大暴雨小时雨量如图 1 所示。

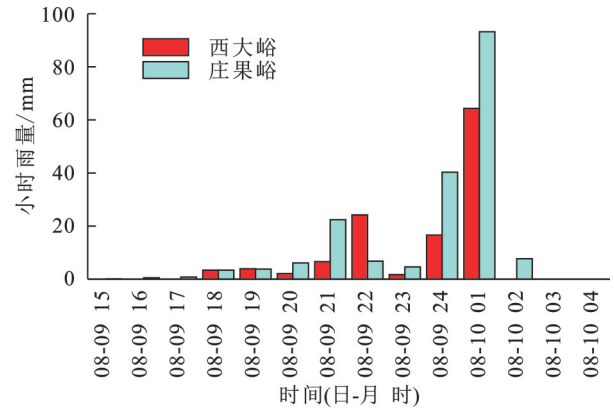


图 1 “8·9”特大暴雨小时雨量  
Fig. 1 Hourly rainfall during “8·9” extreme rainstorm

## 3 结果与分析

### 3.1 次暴雨土壤侵蚀特征

利用 ArcGIS 软件,基于 CSLE 模型将土壤侵蚀因子进行叠加计算,统计栅格像元的土壤侵蚀情况,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)对栅格单元侵蚀模数进行等级划分,最终生成西大峪和庄果峪地区土壤侵蚀强度的空间分布图(图 2),研究流域土壤侵蚀强度分级统计表(表 1)。西大峪小流域平均土壤侵蚀模数为 466.09  $\text{t}/\text{km}^2$ ,庄果峪小流域为 1 626.64  $\text{t}/\text{km}^2$ 。

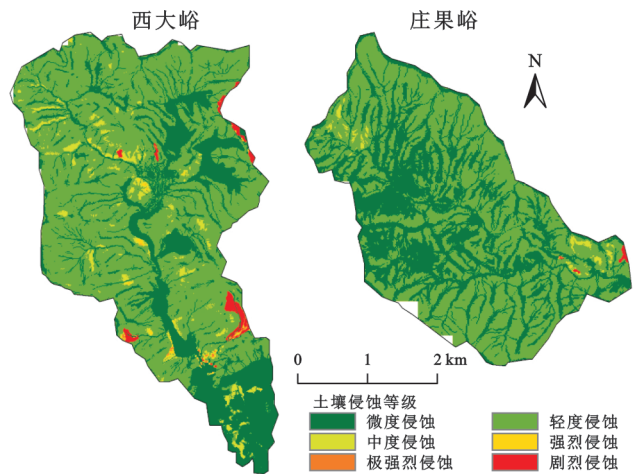


图 2 土壤侵蚀强度等级  
Fig. 2 Soil erosion intensity levels

从土壤侵蚀量来看,西大峪小流域土壤侵蚀总量为 3 277.39 t,其中:中度以下侵蚀量所占比例最大,为 70.7%,其次为剧烈侵蚀,占 23.03%。庄果峪

小流域土壤侵蚀总量为 22 678.74 t,其中:强烈侵蚀所占比例最大,为 56.86%,其次为中度以下侵蚀,

占 33.94%。庄果峪小流域的剧烈侵蚀占比显著高于西大峪小流域,表明其土壤侵蚀强度更高。

表 1 土壤侵蚀强度分级统计  
Table 1 Classification statistics of soil erosion intensity

土壤侵蚀强度分级	侵蚀模数/ ( $t \cdot km^{-2}$ )	西大峪土壤 侵蚀面积/ $hm^2$	西大峪土壤 侵蚀量/t	庄果峪土壤 侵蚀面积/ $hm^2$	庄果峪土壤 侵蚀量/t
微度	<200	274.61	273.53	384.72	232.08
轻度	200~2500	420.83	2043.59	939.63	7465.28
中度	2500~5000	6.49	195.27	47.15	1509.27
强烈	5000~8000	0.02	1.43	4.66	285.62
极强烈	8000~15000	0.07	8.85	2.63	291.41
剧烈	>15000	1.14	754.71	15.42	12895.08

从侵蚀面积来看,西大峪和庄果峪小流域土壤侵蚀以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,均占流域侵蚀面积的 90% 以上,强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积所占比例极小,约为 5%。虽然这些高强度侵蚀区的面积较小,但其对土壤侵蚀总量的贡献显著高于其面积比例。西大峪的土壤侵蚀空间分布呈现四周高、中间低的格局,而庄果峪则表现为由北向南逐渐递减的趋势,这种分布特征与水土保持措施的空间配置密切相关。

### 3.2 不同用地类型的土壤侵蚀

利用 CLCD 数据集对研究区小流域的土地利用现状进行解析,结果表明,该区域土地利用以耕地、林地、草地、水域和建设用地区为主,其中林地占比最高,达 60% 以上。庄果峪水土流失主要分布于林地、耕地和草地,三者贡献 90% 以上的流失面积,其中林地流失面积( $813.42 \text{ hm}^2$ )占比最大,达到 59.94%;耕地次之,面积为  $347.76 \text{ hm}^2$ ,占比为 25.63%;草地的水土流失面积为  $148.5 \text{ hm}^2$ ,占比为 10.94%;建筑用地的水土流失面积较小,水域用地无水土流失发生。西大峪的水土流失主要分布于林地,其水土流失面积为  $582.57 \text{ hm}^2$ ,占流域总水土流失面积的 82.98%;其次为耕地,水土流失面积为  $81.99 \text{ hm}^2$ ,占比为 11.68%;草地和建设用地的水土流失面积较小,二者合计占比约为 5%,如图 3 所示。

根据对庄果峪和西大峪不同侵蚀强度在各类土地利用类型中的分布研究显示:在庄果峪区域,微度侵蚀主要发生在耕地、林地及建筑用地,该类土地利用类型面积分别占微度侵蚀总面积的 53.01%, 30.34% 和 10.79%。轻度侵蚀则更常见于林地、耕地与草地,这些土地利用类型分别占轻度侵蚀总面积的 70.51%, 16.50% 和 11.63%。中度侵蚀的主要发生地为林地和耕地,其次为草地,它们各自占中度侵蚀总面积的比例为 43.73%, 41.40% 和 13.80%。强烈侵蚀以林地、耕地和草地为主,其面积占比分别为 47.12%, 25.96% 和

25%。极强烈侵蚀主要分布在耕地、林地和草地上,这些土地利用类型的面积占比分别为 43.28%, 28.36% 和 20.90%。剧烈侵蚀同样多见于耕地、林地和草地,分别占据剧烈侵蚀总面积的 36.62%, 29.30% 和 26.11%。

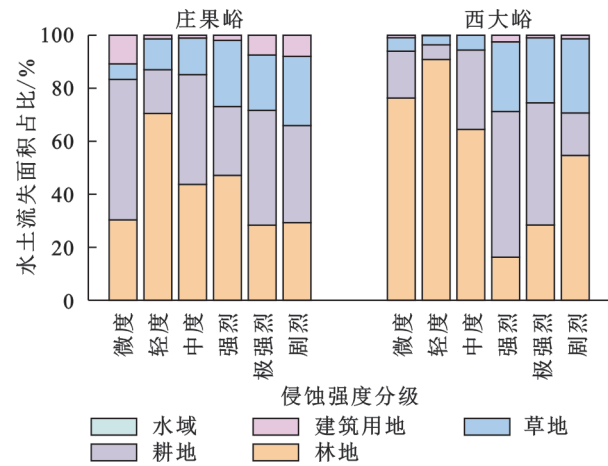


图 3 不同土地利用类型水土流失面积占比  
Fig. 3 Proportion of soil erosion area by different land use types

西大峪地区,微度侵蚀面积主要集中在林地和耕地上,这两类土地利用类型的面积分别占微度侵蚀总面积的 76.33% 和 17.68%。轻度侵蚀高度集中于林地,该土地利用类型占轻度侵蚀总面积的 90.86%。中度侵蚀情况下,林地和耕地占据较大的比例,分别为 64.49% 和 29.91%。强烈侵蚀方面,耕地和草地是主要发生地,其面积占比分别为 55% 和 26.25%。极强烈侵蚀在耕地、林地及草地上表现明显,这些土地利用类型的面积占比分别为 46.08%, 28.43% 和 24.51%。至于剧烈侵蚀,则主要发生在林地和草地上,占剧烈侵蚀总面积的 54.67% 和 28%<sup>[22]</sup>。

整体上,庄果峪小流域的轻度、中度和强烈侵蚀等级的水土流失主要发生在林地,而微度、极强烈和剧烈侵蚀等级的水土流失则主要集中于耕地;西大峪小流域的微度、轻度、中度和剧烈侵蚀等级的水土流失主要分布于林地,而强烈和极强烈侵蚀等级的水土

流失则主要发生在耕地。这表明耕地和林地是研究区小流域水土流失的主要发生区域,其中坡耕地因其特殊的地形条件和耕作方式,成为耕地水土流失的主要策源地之一。因此,未来流域水土流失治理应重点关注耕地和林地,尤其是坡耕地的水土保持措施,以有效控制侵蚀强度并改善流域生态环境。

### 3.3 水土保持措施效益评价

西大峪、庄果峪两条小流域水土保持措施均以工程措施为主,坡面主要修建干砌石或土坎梯田和水平阶,沟道多修建谷坊坝系进行拦沙淤地。西大峪小流域水土保持措施为水平阶、谷坊和梯田,总面积 42.07 hm<sup>2</sup>,其中水平阶分布面积最大;庄果峪小流域水土保持措施为梯田、谷坊和水平阶,总面积 251.67 hm<sup>2</sup>,其中梯田布设面积最大,整体而言,西大峪水土流失治理程度高于庄果峪。

考虑研究区小流域无工程措施的情景,将工程措施因子  $E$  设为 1.0 构建,同时保持其他因子 ( $R, K, L, S, B, T$ ) 不变。西大峪本次暴雨产生的平均土壤侵蚀模数为 808.15 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量 5 682.73 t,庄果峪本

次暴雨产生的平均土壤侵蚀模数为 1 963.97 t/km<sup>2</sup>,土壤侵蚀量 27 367.35 t。本次暴雨工程措施在西大峪和庄果峪的减蚀量分别为 2 405.34 t 和 4 688.61 t。从水土保持措施的分布特征来看,西大峪的水土保持措施主要集中分布于流域中心区域,而庄果峪的水土保持措施在流域内呈现相对均匀的空间分布。在无工程措施的情况下,西大峪的水土流失强度在水土保持措施集中分布的区域表现出更为显著的增长趋势,而庄果峪的水土流失强度增幅相对较小。从侵蚀强度等级分布来看,强烈及以上侵蚀面积在西大峪和庄果峪分别减少了 21.06 hm<sup>2</sup> 和 20.37 hm<sup>2</sup>,其中剧烈侵蚀面积减少最为显著(西大峪减少 5.81 hm<sup>2</sup>,庄果峪减少 11.30 hm<sup>2</sup>)。这表明水土保持措施对高强度侵蚀的抑制作用尤为突出。西大峪通过水平阶、谷坊和梯田的综合治理,将平均土壤侵蚀模数从 808.15 t/km<sup>2</sup> 降至 466.09 t/km<sup>2</sup>,减蚀率达 42.3%;而庄果峪主要依赖梯田措施,平均侵蚀模数从 1 963.97 t/km<sup>2</sup> 降至 1 626.64 t/km<sup>2</sup>,减蚀率仅为 17.2%,见表 2,无水保措施土壤侵蚀模数分布图如图 4 所示。

表 2 有无水土保持措施土壤侵蚀强度面积变化

Table 2 Variations in soil erosion intensity area with and without soil and water conservation measures

土壤侵蚀强度等级	西大峪无水保措施面积/hm <sup>2</sup>	西大峪无水保措施面积比例/%	西大峪有水保措施面积比例/%	变化/%	庄果峪无水保措施面积/hm <sup>2</sup>	庄果峪无水保措施面积比例/%	庄果峪有水保措施面积比例/%	变化/%
微度	271.65	38.63	39.05	-0.42	291.72	20.93	27.59	-6.66
轻度	399.22	56.77	59.85	-3.07	1009.57	72.45	67.4	5.05
中度	10.02	1.42	0.92	0.5	49.1	3.52	3.38	0.14
强烈	5.65	0.8	0	0.8	10.07	0.72	0.33	0.39
极强烈	9.69	1.38	0.01	1.37	6.29	0.45	0.19	0.26
剧烈	6.95	0.99	0.16	0.83	26.72	1.92	1.11	0.81

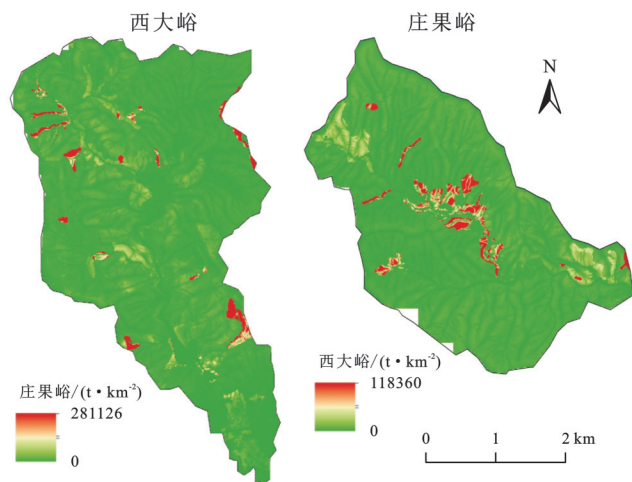


图 4 无水保措施土壤侵蚀模数分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil erosion modulus without soil and water conservation measures

两流域的差异主要体现在治理措施的完整性、空间布局及植被覆盖率上:西大峪的水平阶和谷坊系统

形成了完整的防护体系,有效分散径流,降低坡面侵蚀风险,同时其水保林覆盖率较高,进一步增强水土保持效果;而庄果峪的工程措施面积虽大,但以梯田为主,措施类型较为单一,且植被覆盖率低于西大峪,导致其在陡坡和沟道区域的侵蚀控制效果有限。因此,在暴雨条件下,西大峪由于工程措施布局合理、植被剪盖率高,水土流失程度显著低于庄果峪。这一结果表明,治理措施的多样性、空间布局合理性以及植被剪盖率是影响流域水土流失控制效果的关键因素。

## 4 讨论

本研究采用 CSLE 模型对天津市蓟州区“8·9”极端暴雨事件下的土壤侵蚀进行定量评估,结果表明,模型能够较好地反映不同水土保持措施下的侵蚀差异。例如,综合治理的西大峪小流域平均土壤侵蚀模数(466.09 t/km<sup>2</sup>)显著低于单一措施为主的庄

果峪小流域( $1\ 626.64\ \text{t}/\text{km}^2$ ),这与实际调查中工程措施布局合理性与植被覆盖率的差异相符。

然而,尽管CSLE模型在一般条件下表现出良好的适用性,但在模拟极端暴雨条件下的复杂侵蚀过程时仍显示出一定的局限性。野外调查显示,研究区部分陡坡区域在暴雨后出现谷坊损毁现象(图5—6),这说明局部工程失效对侵蚀过程有显著影响<sup>[23-24]</sup>,而这些因素难以通过现有模型参数体系准确捕捉,可能导致侵蚀量估算出现系统性偏差。特别是CSLE模型中的参数体系具有静态化特征,工程措施因子( $E$ )采用固定赋值方式,无法动态响应暴雨条件下水土保持工



图5 西大峪谷坊损毁

Fig. 5 Damage to check dams in Xidayu

因此,为提高模型对未来极端天气事件的预测能力,需要优化现有的CSLE模型参数体系,使其能够更好地适应动态暴雨过程同时结合更全面的环境和社会经济因素进行综合分析,以提升模型的精确性和实用性。

## 5 结论

(1) 在2024年“8·9”特大暴雨事件中,西大峪小流域的平均土壤侵蚀模数为 $466.09\ \text{t}/\text{km}^2$ ,以轻度侵蚀为主,主要侵蚀来源为草地和林地;而庄果峪小流域的平均土壤侵蚀模数高达 $1\ 626.64\ \text{t}/\text{km}^2$ ,剧烈侵蚀占比显著增加,侵蚀主要集中于林地和坡耕地。两流域的侵蚀差异与土地利用结构及水土保持措施布局密切相关。

(2) 西大峪小流域通过综合治理措施(水平阶、谷坊、梯田等)显著降低土壤侵蚀模数,减蚀率达42.3%,而庄果峪小流域主要依赖梯田措施,减蚀率仅为17.2%。综合治理措施在分散径流、降低坡面侵蚀风险方面表现出显著优势,特别是在高强度降雨条件下,能够有效减少剧烈侵蚀面积。然而,现有水土保持措施在应对极端降雨时仍存在局限性,未来

程的功能衰减或结构破坏。吴淑芳等<sup>[25]</sup>的研究利用FLUS和CSLE模型预测2025年黄土高原典型流域在自然发展、经济增长和生态保护3种不同土地利用变化情景下的土壤侵蚀状况,虽然最终模拟的结果具有较高的精度,但忽略了生态保护红线等其他经济因素对土地利用变化的影响,并未充分考虑未来气候变化下降雨情况对土壤侵蚀的实际影响。这进一步凸显了CSLE模型在应对动态暴雨过程时的适应性局限,尤其是在处理快速变化的环境条件下,如暴雨导致的工程措施功能衰减或结构破坏方面,模型的静态参数设置显得尤为不足。



图6 庄果峪谷坊损毁

Fig. 6 Damage to check dams in Zhuangguoyu

需加强陡坡区域治理,以进一步提升水土保持措施抵御暴雨灾害能力。

### 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):31-35,42.  
Qiao D X, Feng W, Wang F, 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):31-35,42.
- [2] 徐建华,金双彦,高亚军,等.水保措施对“7·26”暴雨洪水减水减沙的作用[J].人民黄河,2017,39(12):22-26.  
Xu J H, Jin S Y, Gao Y J, et al. Analysis of the effect of water and soil conservation measures on storm water and sediment reduction of the flood on July 26, 2017 [J]. Yellow River, 2017,39(12):22-26.
- [3] 从辰宇,韩剑桥,焦菊英,等.台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究:以山东省临朐县为例[J].水土保持通报,2019,39(5):337-344,349.  
Cong C Y, Han J Q, Jiao J Y, et al. Investigation on soil erosion from typhoon lekima rainstorm: a case study in Linqu County, Shandong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):337-344,349.

- [4] 顾治家,谢云,李鹭,等.利用CSLE模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J].农业工程学报,2020,36(11):49-56.  
Gu Z J, Xie Y, Li A, et al. Assessment of soil erosion in rolling hilly region of Northeast China using Chinese Soil Loss Equation (CSLE) model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (11):49-56.
- [5] 李子轩,赵辉,邹海天,等.基于CSLE模型和抽样单元法的县域土壤侵蚀估算方法对比[J].农业工程学报,2019,35(14):141-148.  
Li Z X, Zhao H, Zou H T, et al. Comparison of soil erosion estimation methods at county scale based on CSLE Model and sampling unit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(14):141-148.
- [6] 马亚亚,王杰,张超,等.基于CSLE模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价[J].水土保持通报,2018,38(6):95-102.  
Ma Y Y, Wang J, Zhang C, et al. Evaluation of soil erosion based on CSLE model in Zhifanggou watershed of northern Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):95-102.
- [7] 韩子琳,李正则,张蕾,等.2000—2020年海门市土壤侵蚀时空变化分析[J].国土与自然资源研究,2023(5):24-30.  
Han Z L, Li Z Z, Zhang L, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion in Hailun City from 2000 to 2020 [J]. Territory & Natural Resources Study, 2023 (5) : 24-30.
- [8] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].人民黄河,2022,44(9):36-45.  
Mu X M, Li P F, Liu B T, et al. Spatial-temporal development and driving mechanisms of erosion on the Chinese Loess Plateau between 1901 and 2016 [J]. Yellow River, 2022,44(9):36-45.
- [9] 宋月君,张金生.1975—2008年塘背河小流域土壤侵蚀时空变化特征分析[J].中国农村水利水电,2017(12):121-126.  
Song Y J, Zhang J S. An analysis of temporal and spatial variation characteristics of soil erosion in Tangbei River small watershed from 1975 to 2008 [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(12):121-126.
- [10] 张宇洁,张晓萍,孙伟楠,等.1970—2020年北洛河流域产水、保土、固碳生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系[J].水土保持学报,2025,39(2):365-377.  
Zhang Y J, Zhang X P, Sun W N, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and trade-offs/synergies of water yield, soil conservation, and carbon storage ecosystem services in the Beiluo River Basin from 1970 to 2020 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2):365-377.
- [11] 曹波.基于RS和GIS的小流域综合治理效益评价:以天津蓟县西大峪与黄土梁子小流域为例[D].北京:北京林业大学,2011.  
Cao B. Benefit evaluation of small watershed comprehensive management based on RS and GIS: a case study of xidayu and loess liangzi watershed in Jixian County, Tianjin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [12] Yang J, Huang X. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data Discussions, 2021, 2021:1-29.
- [13] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C] // Proceedings Of the 12 Th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China, 2002, 26:21-25.
- [14] 曹月娥,吴芳芳,张婷婷,等.基于风蚀模型的准东地区土壤风蚀研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):94-99.  
Cao Y E, Wu F F, Zhang T T, et al. Research and application of wind erosion model in Zhundong area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(3):94-99.
- [15] 李智广,刘宪春,刘建祥,等.第一次全国水利普查水土保持普查方案[J].水土保持通报,2010,30(3):87-91.  
Li Z G, Liu X C, Liu J X, et al. Plan of soil and water conservation survey in national census for water resources [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010,30(3):87-91.
- [16] 殷水清,薛筱婵,岳天雨,等.中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J].农业工程学报,2019,35(9):105-113.  
Yin S Q, Xue X C, Yue T Y, et al. Spatiotemporal distribution and return period of rainfall erosivity in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(9):105-113.
- [17] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history [J]. Philosophical Transactions: Biological Sciences, 1990, 329:421-428.
- [18] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.  
Fu S H, Liu B Y, Zhou G Y, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):105-110.
- [19] 周桢,邵东国,顾文权,等.青藏高原农耕地土地利用变化对土壤侵蚀的影响[J].中国农村水利水电,2022(3):120-126.  
Zhou C, Shao D G, Gu W Q, et al. The impact of land-use changes on soil erosion in cultivated lands of Qinghai-Tibet Plateau based on CSLE model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3):120-126.
- [20] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J].生态学报,2014,34(16):4461-4472.  
Feng Q, Zhao W W. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(16):4461-4472.