

·水土资源与环境·

文章编号: 1672-3317(2023)11-0098-08

# 基于降水特征的次降水侵蚀力估算模型

——以黄土丘陵沟壑区典型小流域为例

朱燕琴<sup>1</sup>, 赵志斌<sup>2</sup>, 齐广平<sup>1</sup>, 赵霞<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070; 2.甘肃省水利厅 水土保持局, 兰州 730030)

**摘要:**【目的】在分析侵蚀性降水特征的基础上, 构建基于降水特征的次降水侵蚀力估算模型, 研究结果可为区域水土流失定量监测和水土保持效益评价提供参考。【方法】利用甘肃黄土丘陵沟壑区安家沟小流域和龙滩小流域 2 个典型径流场 5 a 的侵蚀性降水过程资料, 构建雨量 ( $P$ )  $\times$ 雨强 ( $I$ ) 结构与  $E \times I_{30}$  的转换关系。【结果】大于 50 MJ mm/(hm<sup>2</sup> h) 的次降水侵蚀力占侵蚀力总量的比例高达 75%, 是该地区降水侵蚀力的主要贡献来源。降水量  $P$  和降水动能  $E$  之间呈线性函数关系。降水单因子  $I_{30}$  (30 min 降水强度)、 $I_{60}$  (60 min 降水强度)、 $E$  (降水动能) 对土壤流失量 ( $S$ ) 产生显著影响 ( $P < 0.01$ )。降水双因子  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  与  $S$  之间的相关系数  $r > 0.616$  ( $P < 0.01$ ),  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  是影响坡面土壤流失量  $S$  的主要降水复合因子。 $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  与  $E \times I_{30}$  符合幂函数关系, 模型方程决定系数  $R^2$  达到 0.984 0、0.960 9。2 个模型的有效系数分别为 98.9%、98.1%, 偏差系数分别为 2.0%、3.2%。当 10 mm  $< P < 50$  mm 时, 2 个模型的预测值相对误差均不超过 16%, 对于  $> 50$  MJ mm/(hm<sup>2</sup> h) 的次降水侵蚀力预测值相对误差  $< 10\%$ 。


【结论】模型预测效果良好, 指标因子  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  可作为该区域 10 mm  $< P < 50$  mm 次降水侵蚀力指标因子。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 安家沟小流域; 水土流失; 降水侵蚀力; 侵蚀性降水

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022669

OSID: 

朱燕琴, 赵志斌, 齐广平, 等. 基于降水特征的次降水侵蚀力估算模型: 以黄土丘陵沟壑区典型小流域为例[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 98-105.

ZHU Yanqin, ZHAO Zhibin, QI Guangping, et al. A Proposed Model for Estimating Individual Rainfall Erosivity Based on Rainfall Characteristics: A Case Study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 98-105.

## 0 引言

【研究意义】黄土高原是我国乃至全世界土壤侵蚀最为严重的地区之一, 根据 2018 年中国水土流失动态监测公报, 中国水土流失面积 273.69 万 km<sup>2</sup>, 占全国国土面积的 28.6%<sup>[1]</sup>。降水是坡面产流产沙的主要驱动力。降水变化对土壤侵蚀直接的影响作用通过降水量<sup>[2-3]</sup>和降水强度<sup>[4]</sup>引起。降水量会增加土壤水分, 使土壤饱和或导致表层土壤结皮, 降低土壤渗透能力, 从而增大径流量和土壤侵蚀量<sup>[5-6]</sup>。较高的降水量与更多的径流量和土壤流失量有关<sup>[7-8]</sup>。一些学者认为, 降水强度的作用更重要, 降水强度大降水侵蚀力强, 对地表侵蚀产沙的影响增大<sup>[9-11]</sup>。章文波等<sup>[12]</sup>认为任何一个单因子在刻画降水特性影响土壤侵蚀的潜在能力方面都存在不足, 降水复合因子与土壤侵蚀的相

关程度更高。

【研究进展】在通用土壤流失方程式 (USLE) 中,  $E$  (降水动能)  $\times I_{30}$  (最大 30 min 降水强度) 目前仍是国内外适用的降水侵蚀力经典算法<sup>[13-14]</sup>。然而, 这种计算方法需要收集详细的降水过程记录, 且降水动能  $E$  的计算烦琐、耗时。因此, 研究一种简单、准确的降水侵蚀力计算方法已成为土壤侵蚀研究与评价中的一个重要问题。目前, 降水侵蚀力计算模型从结构上主要采用 3 种类型: 雨量雨强结构、动能雨强结构、雨量结构。由于雨量数据相对易得, 雨量模型也得到了广泛重视, 国内外学者先后提出了基于年降水<sup>[15]</sup>、月降水<sup>[16-17]</sup>、日降水<sup>[18-19]</sup>等不同数据的降水侵蚀力简易算法。但由于年和月降水量数据相对粗略, 因此在估算降水侵蚀力时, 精度有限<sup>[16,20]</sup>。Richardson 等<sup>[21]</sup>发现,  $E \times I_{30}$  和降水量  $P$  之间存在幂函数关系, 即  $E \times I_{30} = aP^b$ , 其中  $P$  是日降水量,  $a$  和  $b$  是经验参数。参数  $b$  被认为是一个常数 (1.81), 而  $a$  在不同的地区和季节变化很大, 在实际应用中降水侵蚀力的年分布与降水量的年分布不一致时, 可能会造成较大的偏差<sup>[22]</sup>。

收稿日期: 2022-11-27 修回日期: 2023-05-05 网络出版日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52069001); 兰州市人才创新创业项目 (2020-RC-38); 甘肃农业大学青年教师科技创新基金项目 (SLXY-QN2021-07)

作者简介: 朱燕琴 (1979-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事农业水利工程及水土保持方面的研究。E-mail: zhuyq@gsau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

【切入点】区域降水的时空分布存在较大的差异，目前各类模型区域性较强且稳定性不够<sup>[14]</sup>。在小尺度范围内，不同的地区降水分布也存在一定的差异，针对特定的区域应制定相应的拟合模型。综合指标提取了更多的降水信息，具有更高的准确度。【拟解决的关键问题】安家沟小流域和龙滩小流域属黄土丘陵沟壑区第V副区，是黄土丘陵沟壑区第V副区的典型代表，区域水土流失严重，土壤侵蚀主要受降水强度的影响<sup>[23-25]</sup>，表现为超渗产流。为了建立简单准确的降水侵蚀力计算方法，在降水量数据资料的基础上突出降水强度的作用<sup>[25-26]</sup>，以提高模型的拟合精度。本研究收集了5 a（2014—2017年，2019年）安家沟小流域和龙滩小流域2个典型径流场48次侵蚀性降水过程资料，分析了侵蚀性降水分布特征，分析并筛选出与土壤流失量关联度高的降水因子，在此基础上采用经典方法计算降水侵蚀力值，并将该计算结果作为参考值，构建雨量×雨强结构的降水侵蚀力简单计算模型。研究结果可为区域水土流失定量监测和水土保持效益评价提供参考。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区，分别为凤翔镇的安家沟小流域和岷口镇的龙滩小流域。安家沟小流域是黄河流域祖厉河水系的一条支沟，紧邻定西市区，海拔高度1 900~2 250 m，面积8.56 km<sup>2</sup>。流域年均气温6.3℃，多年平均降水量427 mm，汛期（5—10月）降水量385.4 mm。总的特点是降水总量少，且时空分布不均，年内变化大。降水冬春季少、夏秋季多，且多以暴雨形式出现。年日照时间2 409 h，无霜期141 d，蒸发量1 510 mm，干燥度1.15，属于中温带半干旱气候。龙滩小流域是黄河流域祖厉河水系三级支流，海拔1 800~2 200 m，流域总面积15.22 km<sup>2</sup>，区域年平均气温6.8℃，年均降水量386.3 mm，降水主要集中在7—9月，年均日照时间为2 052.7 h，平均无霜期152 d。

安家沟小流域和龙滩小流域水土保持区划属黄土丘陵沟壑区第V副区，属于典型的半干旱黄土丘陵沟壑区。本研究收集了安家沟小流域和龙滩小流域2个典型径流场（安家沟径流场和龙滩径流场）累积5 a（2014—2017年，2019年）的侵蚀性降水过程资料，以构建降水侵蚀力模型。安家沟径流场和龙滩径流场均为国家标准径流场，是全国水土流失动态监测与公告项目，区域水土流失严重。2个径流场的地理位置如图1所示，径流场的基本信息见表1。

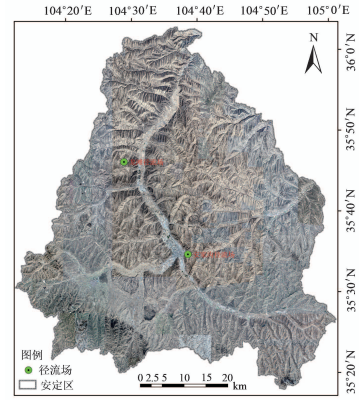


图1 安家沟径流场和龙滩径流场的地理位置

Fig. 1 Geographic locations of the Anjiagou and Longtan runoff fields in Gansu Province, China

表1 径流场基本信息

Table 1 Basic information of two runoff fields

径流场	经度	纬度	建立年份	数据测定年份	侵蚀性降水次数
安家沟径流场	104°38'45"	35°34'35"	1985	2014—2016, 2019	28
龙滩径流场	104°29'	35°46'	2007	2015—2017, 2019	20

### 1.2 数据来源

侵蚀性降水资料来自自然降水事件，2014—2019（2018年缺失）年收集到2个径流场的48次侵蚀性降水事件，次降水量（ $P$ ）介于7.7~41.1 mm，平均降水强度（ $I_a$ ）介于0.5~51.3 mm/h，最大30 min降水强度（ $I_{30}$ ）介于1.3~49.1 mm/h。

侵蚀产沙数据源自监测历史更久、数据资料更丰富的安家沟径流场。径流场内分别设计了不同坡度、坡长、水土保持措施等标准小区。本研究选定研究小区为撂荒地，小区长度20 m，宽度5 m，水平投影面积100 m<sup>2</sup>，位于坡中位，坡度5~10°，径流小区下部设有集流槽和集流池。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 降水侵蚀力的计算

降水侵蚀力 $R_o$ 的计算采用经典的Wischmeier方法（即 $E \times I_{30}$ ），并将其作为参考值。降水动能 $E$ 计算方法如下：

$$E = \sum_{r=0}^n e_r \cdot p_r, \quad (1)$$

$$e_r = 0.29 (1 - 0.72e^{-0.082ir}), \quad (2)$$

式中： $E$ 为1次降水的总动能（MJ/hm<sup>2</sup>）； $r=1, 2, \dots, n$ 表示1次降水过程按雨强分为 $n$ 个时段； $P_r$ 为第 $r$ 时段雨量（mm）； $e_r$ 为每一时段的单位降水动能（MJ/（hm<sup>2</sup> mm））； $i_r$ 为第 $r$ 时段雨强（mm/h）。

降水场次划分<sup>[27]</sup>：以自记降水曲线上连续4 h降水量≤2.5 mm，划分为2次降水过程。

#### 1.3.2 产沙量的测定

径流小区径流量（m<sup>3</sup>）的测定在每次径流产生后，利用水尺读取每个小区集流池水深（m），根据池底

面积 ( $\text{m}^2$ ) 和水深的乘积可得径流总量 ( $\text{m}^3$ )。含沙量 ( $\text{g/L}$ ) 的测定采用比重瓶法, 先将池内的水和泥沙充分搅拌均匀, 用 1 000 mL 取样瓶在不同区域取 3 个水样, 将水样沉淀、排清、烘干后称质量, 计算水样的泥沙量, 取 3 次结果的平均值。

$$\text{土壤流失量} (\text{t}/\text{hm}^2) = [\text{径流量} (\text{m}^3) \times \text{含沙量} (\text{g/L}) / 1000] / [\text{小区面积} (\text{m}^2) / 10000]$$

### 1.3.3 降水侵蚀力模型的构建与验证

采用 80% 的侵蚀性降水数据 (40 次) 用于模型的构建, 20% 的数据 (8 次) 用于模型的验证。利用侵蚀性降水资料构建降水侵蚀力模型。分析降水复合因子 (降水量  $P \times$  降水强度  $I$ ) 与指标  $E \times I_{30}$  之间的相关性, 以确定与  $E \times I_{30}$  高度相关的降水复合因子。利用回归统计分析的方法建立降水侵蚀力模型方程。模型的有效系数  $M$  和偏差系数  $E_r$  可用于评价所建模型的效果。 $M$  和  $E_r$  的计算式为:

$$M = 1 - \frac{\sum (R_{oi} - R_{cali})^2}{\sum (R_{oi} - \bar{R}_o)^2}, \quad (3)$$

$$E_r = \frac{|\sum_{i=1}^n R_{oi} - \sum_{i=1}^n R_{cali}|}{\sum_{i=1}^n R_{oi}}, \quad (4)$$

式中:  $R_o$  为参考降水侵蚀力值;  $R_{cal}$  为模型计算值;  $\bar{R}_o$  为  $R_o$  的平均值;  $i$  为编号。

用绝对误差  $A_e$  和相对误差  $R_e$  验证模型的预测精度:

$$A_e = |R_{oi} - R_{cali}|, \quad (5)$$

$$R_e = \frac{|R_{oi} - R_{cali}|}{R_{oi}}. \quad (6)$$

### 1.4 数据处理与分析

使用 SPSS 25.0 软件包进行数据处理, 使用 Excel 2016 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 侵蚀性降水特征

根据气象学上的雨量分级标准, 可将侵蚀性降水分为小雨、中雨和大雨 3 种类型, 对应的雨量等级分别为  $<10 \text{ mm}$ 、 $10 \sim 25 \text{ mm}$ 、 $>25 \text{ mm}$ 。根据本地区平均降水强度特征可划分为  $0 \sim 2$ 、 $2 \sim 5$ 、 $5 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $>20 \text{ mm/h}$ , 5 个强度等级。由图 2、图 3 可知, 48 场次侵蚀性降水中仅有 2 次小雨 (降水量  $<10 \text{ mm}$ ) 发生了土壤侵蚀, 属于低概率事件, 2 次降水的平均降水强度分别高达  $28.7$ 、 $51.3 \text{ mm/h}$ 。中等雨量的侵蚀性降水发生的频次最高, 共计 34 次, 占总场次的 71%, 次平均降水强度均  $<10 \text{ mm/h}$ , 其中又以小强度降水 ( $0 \sim 2 \text{ mm/h}$ ) 为主, 共计 24 次, 侵蚀力累积值  $225 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$ 。中雨量等级次降水强度最大值  $5.13 \text{ mm/h}$  ( $5 \sim 10 \text{ mm/h}$ ), 本次降水侵蚀力仅为  $65 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$ 。大雨总共发生 12 次, 但是侵蚀力总量达到了  $1656 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$ , 占降水侵蚀力

总量的 69.5%。其中侵蚀力  $>100 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的降水共 6 次, 累积侵蚀力占侵蚀力总量的 57%。48 场降水中次降水侵蚀力最大值为  $546 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$ , 次降水强度达到  $17.0 \text{ mm/h}$ , 发生于 2019 年的 7 月。综上分析可知, 黄土丘陵沟壑区典型小流域的降水侵蚀力主要由几次高侵蚀性降水所致, 其具有雨量大、雨强大的特征。大雨、中雨和小雨对侵蚀力的贡献分别为 69.5%、27% 和 3.5%。在降水侵蚀力中大雨占据主导作用, 中雨发生的频率最高, 但其贡献相对较小, 小雨在短历时、高强度下可引发侵蚀。

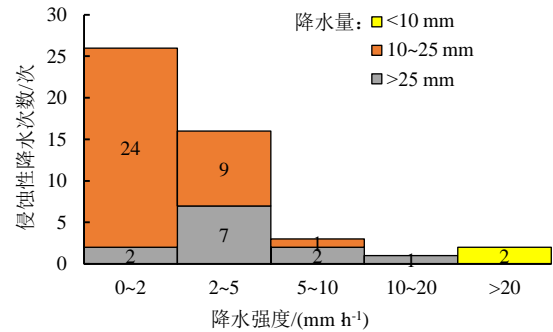


图2 不同等级降水的侵蚀性降水次数

Fig.2 Frequency of erosive rainfall at different grade rain

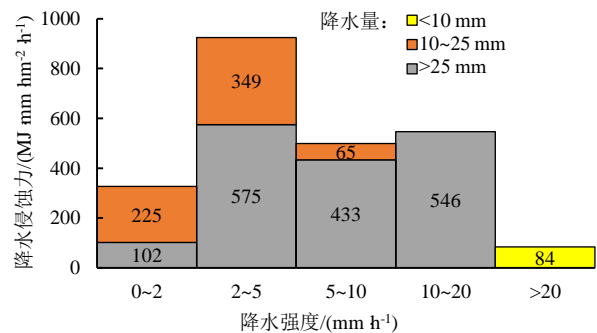


图3 不同等级降水的降水侵蚀力分布

Fig.3 Distribution of rainfall erosivity at different grade rain

将 48 次降水的侵蚀力  $E \times I_{30}$  分成以下等级 (图 4):  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 30$ 、 $30 \sim 40$ 、 $40 \sim 50$ 、 $50 \sim 100$ 、 $>100 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$ , 各级别降水侵蚀力发生频次分别为: 15、10、5、4、2、6、6, 表现为两头大中间小的分布状况,  $<20 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  和  $>50 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的降水发生的频次相对较高。各等级降水侵蚀力占累计总量的百分比分别为 3%、6%、6%、6%、4%、18%、57%,  $<20 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的侵蚀性降水发生的频次最高, 但侵蚀力总量的占比仅为 9%,  $>50 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的降水侵蚀力占总量的比例高达 75%, 因此, 在该地区  $>50 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的降水是侵蚀力的主要贡献来源。

### 2.2 次降水动能与降水量的关系

为了确定降水量和降水动能之间的关系, 对 48 场侵蚀性降水的降水量与降水动能进行 Pearson 相关性分析 (图 5), 结果表明二者间相关程度达到显著

性水平 ( $P<0.01$ ), 相关系数为 0.874。降水量与降水动能之间呈较强的线性函数关系, 回归方程表达式为  $E=0.2057P-1.0671$  ( $R^2=0.763$ ), 回归方程的  $F$  检验在 0.01 水平显著, 降水动能的变异中有 76% 可通过降水量解释, 方程估计标准误差  $\lambda=0.48$ , 线性回归方程代表性很好。

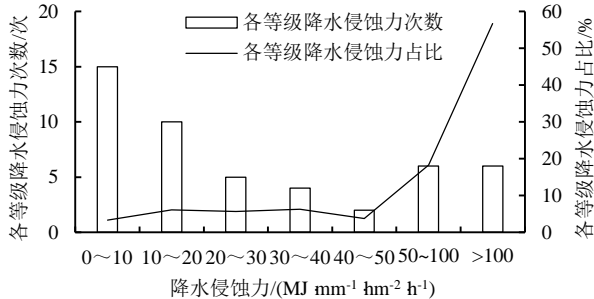


图4 降水侵蚀力分布状况

Fig.4 Distribution of rainfall erosivity

### 2.3 降水因子与土壤流失量的关系

在 (USLE) 中降水侵蚀力是预测水土流失量的重要指标, 对降水单因子和双因子与土壤流失量的 Pearson 相关性进行分析, 单因子指标包含: 降水动能 ( $E$ )、降水量 ( $P$ )、平均降水强度 ( $I_a$ )、最大 30 min 降水强度 ( $I_{30}$ )、最大 60 min 降水强度 ( $I_{60}$ ), 降水复合因子可确定为  $P \times I_a$ 、 $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$ 。由结果可知 (表 2), 土壤流失量  $S$  与单因子指标降水量  $P$  和平均降水强度  $I_a$  之间相关性不显著 ( $P>0.05$ ), 与时段

表 2 土壤流失量与降水因子间的 Pearson 相关系数 ( $r$ )Table 2 Pearson correlation coefficient ( $r$ ) between soil loss and rainfall factors

径流小区	$S$ 与 $P$	$S$ 与 $I_a$	$S$ 与 $I_{30}$	$S$ 与 $I_{60}$	$S$ 与 $E$	$S$ 与 $P \times I_a$	$S$ 与 $P \times I_{30}$	$S$ 与 $P \times I_{60}$	$S$ 与 $E \times I_{30}$
①	0.284	0.154	0.797**	0.771**	0.646**	0.609**	0.766**	0.736**	0.838**
②	0.286	0.083	0.676**	0.632**	0.605**	0.489**	0.624**	0.616**	0.716**

注 径流小区①的坡度为 5°, 径流小区②的坡度为 10°。小区植被盖度 < 30%, 样本数  $n=27$ 。

### 2.4 次降水侵蚀力模型的构建与验证

将初筛的 2 组指标  $P \times I_{30}$  和  $P \times I_{60}$  作为降水侵蚀力因子, 利用 40 组侵蚀性降水数据进行模型的构建, 图 6 和图 7 绘出了  $E \times I_{30}$  与  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  的散点图以及拟合曲线, 由图可以看出,  $E \times I_{30}$  与  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  之间均呈现良好的幂函数关系: 模型 (I)  $E \times I_{30} = 0.0451 (P \times I_{30})^{1.2312}$ ,  $R^2 = 0.984$ ; 模型 (II)  $E \times I_{30} = 0.0753 (P \times I_{60})^{1.1926}$ ,  $R^2 = 0.961$ 。模型 (I) 模型 (II) 的  $F$  检验均在 0.01 水平显著, 结合 2 个模型的相关系数  $r$  (0.992, 0.980) 和决定系数  $R^2$  (0.984, 0.961), 初步认为  $P \times I_{30}$  和  $P \times I_{60}$  作为该区域降水侵蚀力指标是可行的。

利用模型的有效系数  $M$  和偏差系数  $E_r$  来评价模型 (I) 模型 (II) 的预测效果。如表 3 所示, 模型 (I) 有效系数  $M=98.9\%$ , 偏差系数  $E_r=2.0\%$ , 模型 (II) 有效系数  $M=98.1\%$ , 偏差系数  $E_r=3.2\%$ 。模型 (I) 和模型 (II) 均具有良好的预测效果。进一步

降水强度  $I_{30}$ 、 $I_{60}$  和降水动能  $E$  在 0.01 水平显著相关 ( $P<0.01$ ), 相关系数值  $r_{(S \text{ 与 } I_{30})} > r_{(S \text{ 与 } I_{60})} > r_{(S \text{ 与 } E)}$ , 单因子指标中  $I_{30}$  与土壤流失量  $S$  的相关程度最高。降水双因子  $P \times I_a$ 、 $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$ 、 $E \times I_{30}$  与土壤流失量  $S$  均在 0.01 水平呈现显著相关性,  $S$  与  $E \times I_{30}$  的相关系数值最高 ( $R>0.716$ ), 经典计算方法  $E \times I_{30}$  可用作该区域降水侵蚀力的计算方法。基于单因子  $I_{30}$  与土壤流失量  $S$  的高度相关性, 在雨量  $\times$  雨强复合因子中,  $S$  与  $P \times I_{30}$  的相关程度最高 ( $R>0.624$ ), 与  $P \times I_{60}$  的相关程度次之 ( $R>0.616$ ),  $I_a$  与土壤流失量关系不显著 ( $P>0.05$ ),  $P \times I_a$  与土壤流失量  $S$  的相关程度最低 ( $P>0.489$ )。综上,  $P \times I_{30}$  和  $P \times I_{60}$  可作为该地区降水侵蚀力指标。

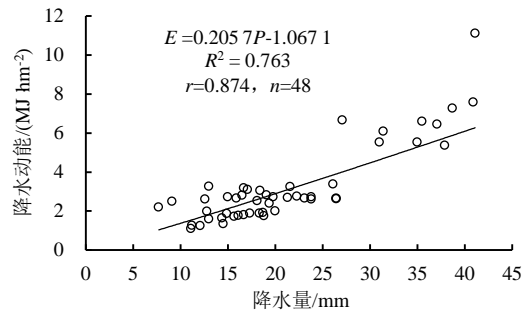


图5 降水量和降水动能的散点图及其拟合曲线

Fig.5 Scatter diagram and its fitting curve

between rainfall  $P$  and rainfall kinetic energy  $E$ 

对随机抽取的 8 组个案进行检验, 结果表明 2 个方程计算值的误差均不大, 只有在次降水侵蚀力为 46.9  $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{h})$  时, 2 个模型的相对误差达到了 46.1% 和 48.2%, 这场降水的雨量为 9.1 mm, 历时仅 19 min, 平均降水强度高达 28.7 mm/h, 属于偶发事件, 与该地区主要的侵蚀性降水分布规律具有一定差异, 因此模型 (I) 模型 (II) 不适用于雨量 < 10 mm、历时 < 30 min 短阵雨的侵蚀力预测。对比其余 7 次降水的预测结果, 可以看出总体上 2 个模型的预测效果均较好, 模型 (I) 的预测效果略优于模型 (II), 模型 (I) 的绝对误差都 < 10  $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{h})$ , 仅在次降水侵蚀力为 23.3  $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{h})$  时, 模型 (II) 的绝对误差和相对误差低于模型 (I), 其余各次模型 (I) 的预测精度均略高于模型 (II)。模型 (I) 模型 (II) 对于 < 10  $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{h})$  和 > 50  $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{h})$  的降水侵蚀力均具有好的预测精度, 相对误差 < 10%。在 10~50  $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{h})$  之间的次

降水侵蚀力相对误差不超过 16%，预测效果基本良好。

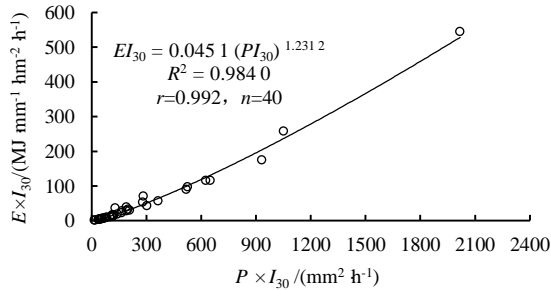


图 6  $E \times I_{30}$  和  $P \times I_{30}$  的散点图及其拟合曲线

Fig.6 Scatter diagram and its fitting curve between  $E \times I_{30}$  and  $P \times I_{30}$

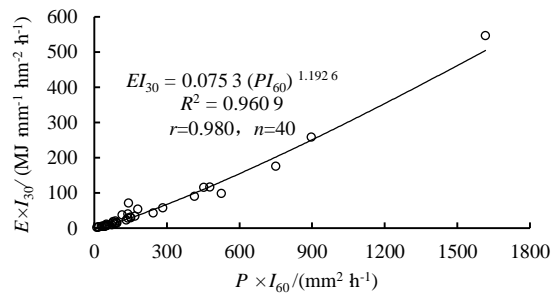


图 7  $E \times I_{30}$  和  $P \times I_{60}$  的散点图及其拟合曲线

Fig.7 Scatter diagram and its fitting curve between  $E \times I_{30}$  and  $P \times I_{60}$

表 3 模型预测值的检验结果

Table 3 Test results of model predictive values MJ mm/(hm<sup>2</sup> h)

次降水侵蚀力基准值	模型I预测值	模型II预测值	绝对误差		相对误差/%	
			模型 I	模型II	模型I	模型II
2.6	2.7	2.8	0.1	0.2	3.8	7.7
7.1	7.2	7.3	0.1	0.2	1.4	2.8
14.2	15.6	12.4	1.4	1.8	9.9	12.7
23.3	19.7	24.3	3.6	1.0	15.5	4.3
38.9	33.4	32.8	5.5	6.1	14.1	15.7
46.9	25.3	24.3	21.6	22.6	46.1	48.2
65.4	63.6	60.8	1.8	4.6	2.8	7.0
138.2	147.6	125.1	9.4	13.1	6.8	9.5

注 模型 (I) 的有效系数  $M$  和偏差系数  $E_r$  分别为 98.9% 和 2.0%；模型 (II) 的有效系数  $M$  和偏差系数  $E_r$  分别为 98.1% 和 3.2%。

### 3 讨论

#### 3.1 降水特征对降水侵蚀力的影响

目前绝大多数的研究集中于利用常规降水资料估算降水侵蚀力值<sup>[17-19]</sup>，基于次降水水平的预测模型相对较少。本研究主要分析次降水侵蚀力模型的构建，构建模型 (I)  $E \times I_{30} = 0.0451 (P \times I_{30})^{1.2312}$ ， $R^2 = 0.9840$ ；模型 (II)  $E \times I_{30} = 0.0753 (P \times I_{60})^{1.1926}$ ， $R^2 = 0.9609$ 。从结构上来看模型 (I) 和模型 (II) 与 Richardson 所建模型结构类似，均为幂函数关系。Richardson 表达式为  $E \times I_{30} = aP^b$ ，在小尺度范围区域降水分布存在差异，在不同地区参数  $a$  存在较大的变异， $a$  值应根据当地的实际情况确定<sup>[21]</sup>。本研究所建模型指标包含降水双因子 (降水量  $P$  和降水强度  $I$ )，这与地区

侵蚀性降水的特征有一定的关系，在黄土丘陵沟壑区的土壤侵蚀主要受降水强度的影响，表现为超渗产流，时段强度高的降水更容易引起地表的冲刷侵蚀，短历时高强度降水极易诱发严重的水土流失<sup>[23-25,28]</sup>。本研究中时段降水强度指标  $I_{30}$ 、 $I_{60}$  均与土壤流失量显著相关 ( $P < 0.01$ )，48 场降水中 45 次降水的降水历时  $> 200$  min，在整个降水过程中侵蚀降水的能量主要集中在 1 h 以内，其余时段的降水为间歇性，对水土流失量的影响较小，因此在降水侵蚀力指标的筛选中采用  $I_{30}$ 、 $I_{60}$  是可行的。有关侵蚀性降水标准的研究表明临界值一般出现介于 5~10 mm<sup>[14]</sup>，本研究中发生了土壤侵蚀的 2 场小雨，雨量分别仅为 7.7、9.1 mm，平均降水强度达到了 51.5、28.7 mm/h，因此小雨量降水在短历时 ( $< 30$  min)、高强度的条件下可发生土壤侵蚀，但其降水侵蚀力并不大，降水侵蚀力特征分布也不同于中长历时降水。时段雨量的集中分布在一定程度上决定了降水侵蚀力的大小，但是降水侵蚀力指标中降水动能  $E$  是时段雨量和时段动能乘积之和，雨量大的降水动能也较大。从侵蚀性降水分布来看，在该地区  $> 50$  MJ mm/(hm<sup>2</sup> h) 的降水是降水侵蚀力的主要贡献来源，侵蚀力高的降水雨量和降水强度均较大。

表 2 显示： $r(S$  与  $I_{30}) > r(S$  与  $PI_{30})$ 、 $r(S$  与  $I_{60}) > r(S$  与  $PI_{60})$ ，单因子指标  $I_{30}$ 、 $I_{60}$  与土壤流失量 ( $S$ ) 的相关程度略高于复合因子  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$ ，这是因为在黄土丘陵沟壑区的土壤流失主要由几次短历时、高强度和时段雨量较为集中的强降水所致。样本容量中有部分长历时降水雨量虽增大但降水强度却减弱，时段雨强是水土流失的主控因子。因此，在进行统计学分析时降水双因子与水土流失的正向相关性略微减弱。基于大区域和全国范围降水特征的差异，为了便于区域间比较，降水侵蚀力应以  $E \times I_{30}$  为基准，其替代指标宜选取复合因子，能够提取更多的信息。复合因子降水量 ( $P$ )  $\times$  降水强度 ( $I$ ) 考虑了降水量和降水强度的综合作用，同时考虑了降水特征和土壤入渗性能。研究区  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  均对土壤流失量产生显著影响 ( $P < 0.01$ )。章文波研究表明<sup>[12]</sup>，在全国范围内  $E \times I_{30}$ 、 $E \times I_{10}$ 、 $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{10}$  与土壤流失量的相关程度最高，可作为全国降水侵蚀力指标因子。在陕西绥德土壤流失量  $S$  与  $P \times I_{60}$  相关系数  $> 0.852$ <sup>[12]</sup>，在黄土丘陵沟壑第一副区的岔巴沟流域  $E \times I_{30}$  和  $E \times I_{60}$  与土壤侵蚀模数的线性相关系数达到 0.801、0.765<sup>[29]</sup>。在与土壤流失量的相关性分析中，降水量降水强度复合因子一般比动能雨强结构的决定系数略偏小一些， $P \times I_{30}$  比  $P \times I_{60}$  的相关系数略大些。然而，在降水历时长、降水过程相对平缓的南方地区  $P \times I_{60}$  则是较适宜的指标因子<sup>[16]</sup>。基于降水分布的时空

变异，植被建设对降水量的增多起到积极的作用，近年来研究区降水量有增加的趋势<sup>[30]</sup>，侵蚀性降水以非短阵型降水为主要类型，降水复合因子  $P \times I_{30}$ 、 $P \times I_{60}$  可作为该区域降水侵蚀力指标。

### 3.2 降水侵蚀力模型

降水侵蚀力模型既要考虑计算过程的简化，又要考虑得到数据的难易程度以及模型的预测效果。本研究中指标  $E \times I_{30}$  与土壤流失量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ )，相关系数  $r > 0.716$ ，经典指标  $E \times I_{30}$  在该区域具有较好的适用性。式中降水动能  $E$  需要收集详细的降水过程资料，且计算步骤烦琐耗时，国内外学者进行了大量的研究旨在确定  $E$  的替代指标<sup>[21,28,31-33]</sup>。很多的研究表明，降水动能与降水量之间是高度相关的，本研究也得到了相同的结果<sup>[16,31]</sup>。根据 48 场侵蚀性降水的降水量和降水动能的散点图，能够看出降水量和降水动能之间呈现良好的线性函数关系，这与许多的研究结果相一致，本研所得斜率值为 0.205 7，Bagarello<sup>[31]</sup>在地中海所得斜率值 (0.19)，黄土区的研究表明斜率为 0.20~0.22<sup>[28]</sup>，各个地区所得结果较为接近。因此，在降水侵蚀力  $E \times I_{30}$  中可采用降水量  $P$  替代降水动能  $E$  作为简化计算指标。

本研所得降水侵蚀力模型 (I)  $E \times I_{30} = 0.045 1 (P \times I_{30})^{1.231 2}$ ， $R^2 = 0.984 0$ ；模型 (II)  $E \times I_{30} = 0.075 3 (P \times I_{60})^{1.192 6}$ ， $R^2 = 0.960 9$ 。模型有效系数分别为 98.9%，98.1%，偏差系数分别为 2.0% 和 3.2%。2 个模型对于高频率出现的  $< 10 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  和  $> 50 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  降水的侵蚀力预测值相对误差均  $< 10\%$ ，最大误差不超过 16%，2 个模型的预测效果均较好。相对而言，模型 (I) 的预测效果略好于模型 (II)，这是因为模型 (I) 中的时段降水强度采用了经典计算方法中的指标  $I_{30}$ 。目前在气象站已具有整编的日降水  $I_{60}$  资料，日降水和次降水模型结构类似<sup>[12]</sup>，只是划分降水的时间段有所不同，因此，在  $I_{30}$  资料缺乏的情况下采用模型 (II) 也可得到较好的预测效果。针对雨量  $P < 10 \text{ mm}$ 、降水历时  $t < 30 \text{ min}$  的短阵型降水，降水历时短，降水强度在整个降水过程中变化不大，各时段降水动能取平均值，利用平均降水强度  $I_a$  可计算得出，即各时段降水动能平均值  $\bar{e}_r = 0.29 (1 - 0.72e^{-0.082I_a})$ ，降水动能  $E = P \times \bar{e}_r$ ，参考式 (1)、式 (2)。采用该方法估算 2 次小降水量侵蚀性降水的侵蚀力值，2 次计算结果的相对误差分别仅为 1.6% 和 5.2%，估算精度良好。

模型 (I) 和模型 (II) 都用降水量  $P$  替代了降水动能  $E$ ，对于经典方法中资料摘读的工作量大大减轻，利用地区降水资料通过模型 (I) 和模型 (II) 可得次降水侵蚀力值，模型简单实用，对于月和年降

水侵蚀力可通过累计求和的方法计算得出，可用于年内和年际间的比较。鉴于降水量  $P$  对降水动能  $E$  的可替代性，指标因子  $P \times I_{30}$  可作为黄土丘陵沟壑区降水侵蚀力指标因子，在国内外许多地区的研究中也有相关报道<sup>[32-34]</sup>。基于地区降水分布特征的时空变异，在以非短阵雨为主导降水类型的情况下，指标  $P \times I_{60}$  也可作为  $E \times I_{30}$  的替代指标<sup>[34]</sup>，其具有资料数据更容易获取的优点。

## 4 结论

1) 在黄土丘陵沟壑区典型小流域大雨、中雨、小雨对降水侵蚀力总量的贡献分别为 69.5%、27%、3.5%。大雨是该地区降水侵蚀力的主要类型，其具有雨量大、雨强大的特征。次降水侵蚀力  $> 50 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的累计侵蚀力占侵蚀力总量的比例高达 75%， $> 50 \text{ MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h})$  的降水侵蚀力是该地区的主要贡献来源。

2) 降水动能  $E$  和降水量  $P$  之间高度线性相关，二者间线性转换关系为  $E = 0.205 7P - 1.067 1$  ( $R^2 = 0.763$ ， $n = 48$ )。降水侵蚀力估算模型可确定为：模型 (I)  $E \times I_{30} = 0.045 1 (P \times I_{30})^{1.231 2}$ ， $R^2 = 0.984 0$ ；模型 (II)  $E \times I_{30} = 0.075 3 (P \times I_{60})^{1.192 6}$ ， $R^2 = 0.960 9$ 。2 个模型适用雨型为中雨和大雨，即  $50 \text{ mm} > P > 10 \text{ mm}$  的条件。

3) 在黄土丘陵沟壑区  $I_{30}$  资料缺乏的区域，可结合当地气象站整编的小时降水强度 ( $I_{60}$ )，建立  $P \times I_{60}$  与降水侵蚀力 ( $E \times I_{30}$ ) 的转换关系，预测降水侵蚀力值。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

### 参考文献：

- [1] 陈发虎, 吴绍洪, 崔鹏, 等. 1949—2019 年中国自然地理学与生存环境应用研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1 799-1 830. CHEN Fahu, WU Shaohong, CUI Peng, et al. Progress of applied research of physical geography and living environment in China from 1949 to 2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1 799-1 830.
- [2] ZHAO Jianlin, WANG Zhengang, DONG Yifan, et al. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: 149 665.
- [3] NEARING M A, PRUSKI F F, O'NEAL M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59: 43-50.
- [4] BOURAOUI F, GRIZZETTI B, GRANLUND K, et al. Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish Catchment[J]. Climatic Change, 2004, 66(1/2): 109-126.
- [5] 乔宇, 徐先英. 干旱荒漠区物理结皮的土壤水文效应[J]. 中国农学通报, 2015, 31(7): 206-211. QIAO Yu, XU Xianying. Soil-hydrological effects of physical crusts in arid desert region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(7): 206-211.
- [6] YAIR A, ALMOG R, VESTE M. Differential hydrological response of biological topsoil crusts along a rainfall gradient in a sandy arid area:

- Northern Negev Desert, Israel[J]. *Catena*, 2011, 87(3): 326-333.
- [7] ZABALETA A, MEAURIO M, RUIZ E, et al. Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, Northern Spain[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 235-245.
- [8] 顾礼彬, 张兴奇, 杨光敏, 等. 黔西高原坡面次降雨产流产沙特征[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1): 23-28.  
GU Libin, ZHANG Xingqi, YANG Guangxi, et al. Characteristics of slope runoff and sediment production under rainfall events in the plateau area of Western Guizhou[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 23-28.
- [9] MOHAMADI M A, KAVIAN A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.
- [10] 刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2 886-2 894.  
LIU Ran, YU Xinxiao, CAI Qianguo, et al. Erosion process of loess slope and influencing factors in the loess hilly-gully region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2 886-2 894.
- [11] WEN Leilei, ZHENG Fenli L, SHEN Haiou, et al. Rainfall intensity and inflow rate effects on hillslope soil erosion in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(1): 381-395.
- [12] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. *地理研究*, 2002, 21(3): 384-390.  
ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyuan. Estimation of rainfall erosivity using rainfall amount and rainfall intensity[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(3): 384-390.
- [13] LIU Xiaoyan, DANG Suzhen, LIU Changming, et al. Effects of rainfall intensity on the sediment concentration in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(3): 455-467.
- [14] 杨轩, 李丹丹, 吕玮玮, 等. 降雨侵蚀力模型研究进展[J]. *现代农业科技*, 2019(14): 199-202, 206.  
YANG Xuan, LI Dandan, LYU Weiwei, et al. Research progress on rainfall erosivity model[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(14): 199-202, 206.
- [15] LEE J H, HEO J H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2): 30-48.
- [16] 孙泉忠, 王朝军, 赵佳, 等. 中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(4): 1-5.  
SUN Quanzhong, WANG Chaojun, ZHAO Jia, et al. Research evolution of rainfall erosivity (R) in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(4): 1-5.
- [17] BALLABIO C, BORRELLI P, SPINONI J, et al. Mapping monthly rainfall erosivity in Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1 298-1 315.
- [18] BEGUER ÍA S, SERRANO-NOTIVOLI R, TOMAS-BURGUERA M. Computation of rainfall erosivity from daily precipitation amounts[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 359-373.
- [19] ANEES M T, ABDULLAH K, NAWAWI M N M, et al. Development of daily rainfall erosivity model for Kelantan state, Peninsular Malaysia[J]. *Hydrology Research*, 2018, 49(5): 1 434-1 451.
- [20] YU B, HASHIM G M, EUSOF Z. Estimating the R-factor with limited rainfall data: A case study from peninsular Malaysia[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2001, 56(2): 101-105.
- [21] RICHARDSON C W, FOSTER G R, WRIGHT D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(1): 153-156.
- [22] RUTEBUKA J, DE TAEYE S, KAGABO D, et al. Calibration and validation of rainfall erosivity estimators for application in Rwanda[J]. *Catena*, 2020, 190: 104 538.
- [23] LIU Huiying, ZHANG Guanhua, ZHANG Pingcang, et al. Spatial distribution and temporal trends of rainfall erosivity in Three Gorges Reservoir Area of China[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 5 302 679.
- [24] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平, 等. 黄土丘陵区坡面产流产沙的影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(8): 173-178.  
ZHU Yanqin, ZHAO Zhibin, QI Guangping, et al. Analysis of factors influencing runoff and sediment yield on slopes of loess hilly and gully region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(8): 173-178.
- [25] ZHAO Xining, HUANG Jun, GAO Xiaodong, et al. Runoff features of pasture and crop slopes at different rainfall intensities, antecedent moisture contents and gradients on the Chinese Loess Plateau: A solution of rainfall simulation experiments[J]. *Catena*, 2014, 119: 90-96.
- [26] 杨轩, 梁音, 方继青, 等. 基于日降雨信息的月降雨侵蚀力模型[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 216-222.  
YANG Xuan, LIANG Yin, FANG Jiqing, et al. Constitution of monthly rainfall erosivity models based on information of daily rainfall[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 216-222.
- [27] 胡续礼, 姜小三, 杨树江, 等. 降雨侵蚀力新算法在豫西山区应用的初步研究[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 633-636.  
HU Xuli, JIANG Xiaosan, YANG Shujiang, et al. Application of a new algorithm to assessment of rainfall erosiveness in mountainous regions in West Henan[J]. *Soils*, 2007, 39(4): 633-636.
- [28] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I)[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(4): 5-18.  
WANG Wanzhong, JIAO Juying, HAO Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4): 5-18.
- [29] 陈晓安, 蔡强国, 郑明国, 等. 黄土丘陵沟壑区的岔巴沟流域次降雨侵蚀力的研究[J]. *泥沙研究*, 2010(1): 5-10.  
CHEN Xiaolan, CAI Qianguo, ZHENG Mingguo, et al. Study on rainfall erosivity of Chabagou watershed in a hilly loess region on the Loess Plateau[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(1): 5-10.
- [30] 安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 近 60 a 黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1 333-1 344.  
AN Bin, XIAO Weiwei, ZHU Ni, et al. Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(5): 1 333-1 344.
- [31] BAGARELLO V, D'ASARO F. Estimating single storm erosion index[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(3): 785-791.
- [32] 崔璨, 王小燕, 孙宁婷, 等. 三峡库区典型农业小流域次降雨产沙过程及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 17-23.  
CUI Can, WANG Xiaoyan, SUN Ningting, et al. Sediment yield process and its influencing factors under sub-rainfall in typical agricultural small watershed, Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 17-23.
- [33] 胡续礼, 姜小三, 杨树江, 等. 豫西山区次降雨侵蚀力简化模型的建立[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1): 137-140.  
HU Xuli, JIANG Xiaosan, YANG Shujiang, et al. Symbolized model for simulating rainfall erosion ability in the West-mountainous area of Henan Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 137-140.
- [34] 顾璟冉, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 黔西高原地区降雨侵蚀力的简易算法[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 204-208.  
GU Jingran, ZHANG Xingqi, GU Libin, et al. Simple algorithm of rainfall erosivity in West Guizhou Plateau area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 204-208.

## A Proposed Model for Estimating Individual Rainfall Erosivity Based on Rainfall Characteristics: A Case Study

ZHU Yanqin<sup>1</sup>, ZHAO Zhibin<sup>2</sup>, QI Guangping<sup>1</sup>, ZHAO Xia<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Soil and Water Conservation Bureau, Gansu Provincial Water Resources Department, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** 【Objective】 Rainfall is the main cause of erosion of loess soil in the arid regions in northwestern China. Understanding the relationship between soil erosion and rainfall characteristics is hence important to ameliorate soil erosion. In this paper, we analyzed individual erosive rainfall and proposed a model to predict rainfall erosivity.

【Method】 The analysis is based on erosive rainfall data measured in five years from two typical runoff fields, one is a hilly small waterhead located in Anjiagou and the other one is a small gully waterhead in Longtan, both in Gansu province. The relationship between soil erosion structure of rainfall ( $P$ )  $\times$  rain intensity ( $I$ ) and  $E \times I_{30}$  was established.

【Result】 Rainfall erosivity above 50 MJ mm/(hm<sup>2</sup> h) was the main cause of rainfall erosivity, accounting for 75% of the total erosivity. Rainfall  $P$  and rainfall kinetic energy  $E$  was linearly correlated in that  $E=0.2057P-1.0671$  ( $R^2=0.763$ ,  $n=48$ ). Rainfall single factors  $I_{30}$  (30-minute rainfall intensity),  $I_{60}$  (60-minute rainfall intensity) and  $E$  significantly impacted soil loss ( $S$ ) ( $P<0.01$ ). The correlation coefficients ( $r$ ) between  $P \times I_{30}$ ,  $P \times I_{60}$  and  $S$  were  $>0.616$  ( $P<0.01$ ), and  $P \times I_{30}$  and  $P \times I_{60}$  were hence the main rainfall factors affecting soil loss ( $S$ ) on the slope. The relationship between  $P \times I_{30}$ ,  $P \times I_{60}$  and  $E \times I_{30}$  followed power-law functions, with the determination coefficient  $R^2$  being 0.984 and 0.9609, respectively. The effective coefficient of the two models was 98.9% and 98.1%, respectively, while the associated deviation coefficient was 2.0% and 3.2%, respectively. The rainfall was 50 mm  $> P > 10$  mm. Compared with measurements, the relative error of the predicted results of the two models was less than 16%. The rainfall erosivity was above 50 MJ mm/(hm<sup>2</sup> h), and the relative error of the predicted rainfall erosivity was less than 10%. 【Conclusion】 Both models predicted rainfall erosivity well, and  $P \times I_{30}$ ,  $P \times I_{60}$  can be used as index factors to estimate individual rainfall erosivity under 50 mm  $> P > 10$  mm in the studied regions.

**Key words:** loess hilly and gully region; Anjiagou small watershed; water and soil loss; rainfall erosivity; erosive rainfall

责任编辑：赵宇龙