

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.01.006

张哲, 方政, 董智, 等. 鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 46(1): 69-76.

# 鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究

张哲<sup>1,2</sup>, 方政<sup>1,2</sup>, 董智<sup>2</sup>, 吴其聪<sup>2</sup>,  
潘嘉琛<sup>2</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 安淳淳<sup>2</sup>1. 山东省泰安市水文中心, 山东 泰安 271000;  
2. 山东农业大学 林学院/泰山森林生态系统国家定位观测研究站, 山东 泰安 271018

**摘要:** 为研究降雨量、降雨历时、降雨强度等降雨因素及典型作物对坡面产流产沙的影响, 基于 K-均值聚类分析法对山东省泰安市东周小流域 2014—2020 年 77 次侵蚀性降雨进行分类, 并进一步分析不同降雨类型下不同作物产流产沙特征及对各降雨指标的响应。结果表明: ① 研究区侵蚀性降雨可以分为 I 型(小雨量、短历时、大雨强)、II 型(大雨量、长历时、小雨强)、III 型(中雨量、中历时、小雨强)3 类。各降雨频率为 67.53%, 3.9%, 28.57%, 占研究期内总降雨量的 44.2%, 14.02%, 41.78%。② 各径流小区产流和土壤流失量从大到小依次为大豆、裸地、地瓜、花生, 花生和地瓜对径流和泥沙的削减效果相对较好。在 II 型条件下, 各小区产流产沙量最大, III 型次之, I 型最小; 但当 I 型和 III 型雨频率较高时, 产流产沙量也较大。③ 对坡面产流产沙影响最大的因素为降雨量, 当作物种类不同时, 影响次之的因素有所差别。径流对降雨因素的响应程度高于土壤流失量, 控制产流发生可在一定程度上有效降低土壤流失量。

**关键词:** 侵蚀性降雨; 典型作物; 产流; 产沙; 鲁中南山区

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)01-0069-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Erosive Rainfall and Typical Crops on Slope Runoff and Sediment Yield in Mountainous Area of Central-South of Shandong Province

ZHANG Zhe<sup>1,2</sup>, FANG Zheng<sup>1,2</sup>, DONG Zhi<sup>2</sup>,  
WU Qicong<sup>2</sup>, PAN Jiachen<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, AN Chunchun<sup>2</sup>

1. Hydrology Center in Tai'an City, Tai'an Shandong 271000, China;

2. College of Forestry, Shandong Agricultural University/Mountain Tai Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Tai'an Shandong 271018, China

收稿日期: 2022-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879155); 徂徕山水土保持综合观测站项目(380937)。

作者简介: 张哲, 高级工程师, 主要从事水文与水资源评价研究。

通信作者: 安淳淳, 博士, 讲师。

**Abstract:** In order to investigate the impact of rainfall factors and crop types on runoff and sediment yield, 77 erosive rainfall events in Dongzhou small watershed of Tai'an City, Shandong Province from 2014 to 2020 were classified based on the K-means clustering analysis method, and the characteristics of runoff and sediment yield were further analyzed. The results showed that: ① The erosive rainfall in the study area could be divided into three categories: type I (small rainfall, short duration, heavy rain intensity), type II (heavy rainfall, long duration, light rain intensity) and type III (medium rainfall, medium duration, light rain intensity). The occurrence frequency was 67.53%, 3.9% and 28.57%, and accounting for 44.2%, 14.02% and 41.78% of the total rainfall during the study period, respectively. ② The order of runoff and soil loss in each runoff plot was soybean>bare land>sweet potato>peanut. The peanut and sweet potato had better reduction effect on runoff and sediment. The runoff and sediment yield under II rainfall type were the largest, followed by type III and type I. The runoff and sediment yield would be larger under type III and type I when frequency was higher. ③ Precipitation was the most important factor affecting runoff and sediment yield on slope. Affected by different crop types, the second important factor was different. The response of runoff to rainfall factors was higher than that of soil loss. Controlling the occurrence of runoff can effectively reduce soil loss to a certain extent.

**Key words:** erosive rainfall; typical crops; runoff yield; sediment yield; mountainous area of central-south of Shandong Province

水土流失引起的土地退化、河湖泥沙淤积等问题严重制约着区域社会经济的可持续发展及资源的可持续利用<sup>[1]</sup>。降雨是导致区域水土流失的重要因素,降雨击溅及产生的地表径流冲刷是引发区域尤其是水蚀区土壤侵蚀的主要自然驱动力,直接影响水土流失的过程和程度<sup>[2-3]</sup>。植被可减弱雨滴和径流对地表的击溅和冲刷,能够在一定程度上控制土壤侵蚀、减少水土流失。由于植被结构、形态、覆盖等的差异,对降雨、径流及土壤流失的调控机制比较复杂,蓄水保土能力存在较大差异,一直是学者们研究的主要内容<sup>[4-6]</sup>。许多学者对不同地区的土地利用方式及水土保持措施开展了大量研究<sup>[4-5,7-15]</sup>,然而这些研究大都集中于短期降雨及单一植被的水土流失评价,忽视了降雨特征及坡面植物类型对水土流失的干扰,针对侵蚀性降雨分类及植物类型对产流产沙影响方面的研究相对较少<sup>[4,16-17]</sup>。即使基于人工模拟降雨试验方法开展了相关研究,能够获取产流产沙相关过程的数据,但是又缺少野外原位坡耕地条件下相关数据的支持,难以准确地反映自然降雨状态下的水土流失过程<sup>[18-19]</sup>。坡耕地作为北方土石山区土地利用的主要形式之一,存在严重的水土流失现象<sup>[20-21]</sup>,因此探明土石山区如何减少由于降雨带来的坡耕地水土流失是一个值得关注的问题。鉴于此,本研究基于山东省泰安市东周小流域水土保持监测站 2014—2017 年的径流小区监测数据,分析不同雨型及作物类型下坡耕地产流产沙特征及对降雨的响应机制,以期为北方土石山区坡面水土流失治理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省泰安市东周坡面径流场(东经 117°49'30", 北纬 35°53'45"),属于黄河流域大汶河水系大汶河南支东周小流域,其侵蚀分区属于鲁中南中低山极强度水蚀区,为国家级水土流失重点治理区。区域为暖温带大陆性湿润、半湿润季风气候,雨热同期。多年平均降水量为 713 mm,主要集中在 6—9 月,降水量时空分布不均匀,年际变化大;多年平均蒸发量为 1 029 mm;多年平均气温 13.2℃;有霜期在 159~179 d 之间。区域内土壤主要以山地棕壤为主,周边植被乔木主要树种有刺槐、杨、柳、泡桐等,另有柿子、苹果、桃树等果树;灌木主要是酸枣、黄荆等;主要草本为臭草、白草、长芒棒头草、画眉草、狗尾草等。

东周坡面径流场自 2010 年 9 月开始建设,根据实际情况及地形建设了 4 个自然坡度的径流小区。小区坡度均为 5°,垂直投影长为 20 m、宽 5 m,投影面积 100 m<sup>2</sup>。小区上部及两侧设置有预制板围埂阻止外径

流流入小区, 下部设集水槽、引水槽及径流池收集降雨后产生的径流和泥沙, 池壁、池底均进行防渗处理, 池底设排水孔. 径流小区配置水土保持措施, 主要考虑农作物对水土流失的影响. 径流小区基本情况如表 1 所示.

表 1 径流小区基本情况

土地利用	植被种类	坡度/ $^{\circ}$	坡长/m	坡宽/m	坡向/ $^{\circ}$	坡位	土壤类型
坡耕地	大豆	5	20	5	225	坡中	棕壤
坡耕地	地瓜						
坡耕地	花生						
裸地	荒草						

## 1.2 观测内容与与方法

径流小区的观测内容主要包括降雨、产流及产沙等项目.

1) 降雨监测采用翻斗式自记雨量计进行观测, 并记录降雨过程. 每 5 min 记录一次降雨量, 雨量计分辨率为 0.5 mm. 每次降雨产流结束后, 及时进行径流和泥沙的观测和取样工作.

2) 径流量观测: 每次降雨后, 采用钢尺测定集(分)流池内的水位并记录, 然后根据集(分)流池面积计算出各小区次降雨径流量. 径流深等于总径流量除以小区面积, 单位为 mm.

3) 泥沙流失量的测定: 每次降雨后, 将集(分)流池内的水搅拌均匀, 用 1 L 取样瓶采集混匀水样, 各取 3 个重复样; 当桶内泥沙过多时采用分层采样方法处理, 重复 3 次. 样品带回实验室, 烘干测定所取水样中的泥沙含量. 含沙量等于烘干泥沙质量除以采样体积, 单位为 g/L. 土壤流失量等于泥沙总量除以小区面积, 单位为  $t/hm^2$ .

## 1.3 数据处理及分析

选取 2014—2020 年连续 7 年的降雨及径流小区观测数据, 利用 Excel、SPSS 软件进行数据整理, 并统计分析侵蚀性降雨量  $P$ 、降雨时长  $T$ 、平均雨强  $I$ 、最大 30 min 雨强  $I_{30}$  等降雨特征值与各小区径流深、土壤流失量间的关系, 分析不同雨型和植物类型坡面的产流产沙特征.

# 2 结果与分析

## 2.1 降雨特征分析

### 2.1.1 不同等级降雨特征分析

前人研究对侵蚀性降雨的定义, 即侵蚀性降雨是指能够引发坡面径流小区产流并且产沙的降雨<sup>[22-24]</sup>. 2014—2020 年间共观测到侵蚀性降雨 77 次, 平均为 11 次/年. 参考气象学《降水量等级》(GB/28592-2012) 标准, 以降雨量为指标, 将降雨分为小雨( $P < 10$  mm)、中雨( $10 \leq P < 25$  mm)、大雨( $25 \leq P < 50$  mm)、暴雨( $50 \leq P < 100$  mm)、大暴雨( $P \geq 100$  mm)共 5 级. 如图 1 所示, 其中小雨 2 场, 占总降雨次数的 2.6%; 中雨 31 场, 占总降雨次数的 40.26%; 大雨 24 场, 占总降雨次数的 31.17%; 暴雨 12 场, 占总降雨次数的 15.58%; 大暴雨 8 场, 占总降雨次数的 10.39%.

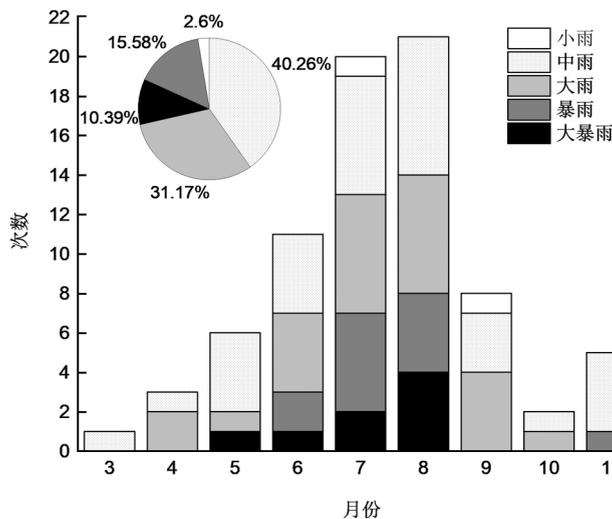


图 1 不同降雨等级年内分布特征

各等级降雨均在夏季发生次数最多, 共 52 次, 占总量的 67.53%; 秋季次之, 共 15 次, 占总量的 19.48%; 春季 10 次, 占总量的 12.99%; 冬季未观测到侵蚀性降雨. 中雨在各月均有分布, 发生次数最多

在 8 月, 共 7 次, 占总量的 9.09%; 3—10 月均有大雨出现, 总体呈现正偏态分布, 以 7, 8 月最多, 各为 6 次, 各占总量的 7.79%; 暴雨和大暴雨分别出现在 6—8 月及 11 月, 频次相对较少。

### 2.1.2 不同类型降雨特征分析

雨型是指降雨过程中降雨历时、降雨强度等特征的组合方式, 也是影响土壤侵蚀的主要降雨变量。在降雨量相同的条件下, 降雨历时和降雨强度等降雨特征差异会导致不同的径流量和侵蚀产沙量结果。基于降雨特征进行不同降雨类型区分, 是全面分析坡耕地水土流失特征的基础。为了更准确地研究不同类型降雨的侵蚀能力, 根据降雨量、降雨历时和平均雨强指标, 采用 K-均值聚类分析法<sup>[25-26]</sup>对观测到的 77 次侵蚀性降雨进行分类。

结果表明, 依据降雨量、降雨历时和降雨强度 3 个指标可以将 77 场侵蚀性降雨分为 3 类(表 2), 聚类变量对聚类过程作用显著( $p < 0.01$ ), 且 3 种降雨类型的降雨量、历时和平均强度差异具有统计学意义( $p < 0.01$ ), 聚类效果较好。I 型降雨为小雨量(28.38 mm)、短历时(339.52 min)、大雨强(9.12 mm/h)型降雨; II 型降雨可以概括为大雨量(156 mm)、长历时(3 123.33 min)、小雨强(3.13 mm/h)型降雨; III 型降雨为中雨量(63.41 mm)、中历时(1 440.45 min)、小雨强(2.69 mm/h)型降雨。

在 77 场降雨中, I, II, III 型降雨分别为 52 场、3 场、22 场, 占总观测记录降雨样本数的 67.53%, 3.9%, 28.57%。从降雨频率来看, I 型雨是研究区最主要的降雨类型。I, II, III 型降雨总量分别为 1 475.6 mm, 468 mm, 1 395 mm, 分别占总降雨量的 44.2%, 14.02%, 41.78%。从累积降雨量角度来讲, 研究区降雨主要被 I 型和 III 型降雨综合占据。

表 2 不同降雨类型特征指标

降雨类型	降雨场次/次	降雨总量/mm	雨量 $P$ /mm	历时 $T$ /min	平均雨强 $I$ /(mm·h <sup>-1</sup> )
I	52	1 475.6	28.38	339.52	9.12
II	3	468	156	3 123.33	3.13
III	22	1 395	63.41	1 440.45	2.69

## 2.2 产流产沙特征分析

### 2.2.1 不同作物产流产沙特征分析

对相同降雨条件下 4 个径流小区产流产沙特征进行分析, 如表 3 所示。4 个径流小区径流深从大到小依次为大豆、裸地、地瓜、花生。种植大豆的径流小区平均径流深为 6.95 mm, 径流深总和为 535.32 mm; 种植花生的径流小区平均径流深为 1.66 mm, 径流深总和为 127.84 mm。土壤流失量大小顺序同径流深大小顺序一致, 表现为大豆、裸地、地瓜、花生。种植大豆的径流小区平均土壤流失量为 0.89 t/hm<sup>2</sup>, 土壤流失量总和为 68.44 t/hm<sup>2</sup>; 种植花生的径流小区平均土壤流失量为 0.1 t/hm<sup>2</sup>, 土壤流失量总和为 7.39 t/hm<sup>2</sup>。由此可知, 在相同降雨条件下, 种植花生的径流小区径流和泥沙量最小, 其减流减沙效果最好。

表 3 不同作物产流产沙特征分析

小区	径流深/mm		土壤流失量/(t·hm <sup>-2</sup> )	
	平均值	总和	平均值	总和
大豆	6.95	535.32	0.89	68.44
地瓜	3.80	292.96	0.44	34.07
花生	1.66	127.84	0.10	7.39
裸地	6.09	469.30	0.55	42.23

### 2.2.2 不同类型降雨产流产沙特征分析

不同侵蚀性降雨及作物种类条件下径流、土壤流失量间存在一定的差异, 其统计特征见表 4。总体来看, I 型雨条件下各径流小区平均径流深和土壤流失量最小, 总量居中。II 型雨条件下各径流小区平均产流产沙量远高于其他两种降雨类型, 但其总量最小。III 型雨条件下各径流小区平均产流产沙量居中, 总量最高。进一步对比可以看出, 在 I 型雨条件下大豆径流深是花生的 2.83 倍, 土壤流失量是花生的 7.67 倍;

在 II 型雨条件下, 裸地径流深是花生的 3.35 倍, 土壤流失量是花生的 7.46 倍; 在 III 型雨条件下, 大豆径流深是花生的 8.46 倍, 土壤流失量是花生的 12.69 倍. 总体来看, 花生对不同侵蚀性降雨类型均有较好的减流减沙作用, 但其对径流和泥沙的调控作用随雨型不同表现出一定的差异.

表 4 不同降雨类型下作物产流产沙特征分析

降雨类型	小区	径流深/mm		土壤流失量/(t·hm <sup>-2</sup> )	
		平均值	总和	平均值	总和
I	大豆	3.60	187.24	0.46	23.74
	地瓜	1.38	71.92	0.13	6.93
	花生	1.27	66.14	0.06	2.94
	裸地	2.90	150.67	0.13	6.50
II	大豆	32.84	98.52	2.81	8.44
	地瓜	24.84	74.52	1.87	5.61
	花生	10.72	32.15	0.56	1.67
	裸地	35.95	107.84	4.18	12.55
III	大豆	11.34	249.56	1.65	36.25
	地瓜	6.66	146.52	0.98	21.52
	花生	1.34	29.54	0.13	2.77
	裸地	9.58	210.79	1.05	23.18

### 2.3 产流产沙对降雨的响应关系

为理解各因素与水土流失量的关联程度, 对 77 次侵蚀性降雨特征指标与各小区径流深和土壤流失量进行相关分析. 结果表明(表 5), 径流深与降雨量、降雨历时呈极显著正相关, 土壤流失量与降雨历时呈极显著正相关. 不同径流小区坡面径流泥沙对降雨因子的响应情况存在一定的差异. 大豆、地瓜、裸地径流深和土壤流失量与降雨历时、降雨量、最大 30 min 雨强均呈极显著正相关, 与降雨量相关性最大. 种植花生的径流小区径流深与降雨历时和降雨量呈极显著正相关, 土壤流失量仅与降雨历时显著相关. 各径流小区径流深与降雨指标的相关性大于土壤流失量与降雨指标的相关性.

各小区坡面土壤流失量和径流深均表现为极显著相关, 裸地相关性最高, 相关系数为 0.902, 地瓜最低, 相关系数为 0.639, 具体相关性从大到小依次为裸地、花生、大豆、地瓜. 鲁中南低山丘陵区以水力侵蚀为主, 坡面径流是坡耕地发生水土流失的主要动力之一. 因此, 在防止水土流失的过程中控制产流发生, 可在一定程度上有效地降低土壤流失量.

表 5 不同作物产流产沙与降雨相关分析

小区	产流/产沙	历时	雨量	平均雨强	I <sub>30</sub>	径流深	土壤流失量
大豆	径流深	0.419**	0.770**	0.020	0.525**	1	0.756**
	土壤流失量	0.327**	0.633**	0.016	0.426**	0.756**	1
地瓜	径流深	0.481**	0.569**	0.069	0.425**	1	0.639**
	土壤流失量	0.343**	0.413**	0.056	0.297**	0.639**	1
花生	径流深	0.410**	0.332**	0.026	0.130	1	0.780**
	土壤流失量	0.287*	0.171	0.038	0.046	0.780**	1
裸地	径流深	0.450**	0.800**	0.049	0.525**	1	0.902**
	土壤流失量	0.445**	0.714**	0.022	0.436**	0.902**	1

构建径流深和土壤流失量与降雨因子间的回归模型, 量化各降雨因子对径流和土壤流失的贡献度. 从表 6 可知, 各回归方程拟合度较好, 且  $F$  统计量对应的  $p$  均远  $< 0.01$ , 说明模型整体较稳定. 将标准化系数与变量贡献度进行比较, 在径流量的拟合中大豆和裸地表现为  $P > I_{30}$ , 地瓜和花生表现为  $P > T$ , 说明种植大豆和不种植作物的裸地对其产流影响最大的是降雨量, 其次是最大 30 min 雨强; 在种植地瓜和花生条件下, 对产流量影响最大的也是雨量, 其次是降雨历时. 由此可知, 雨量对坡面产流影响最大, 因下垫面植物种类不同, 次影响因素有所差异.

在土壤流失量的拟合中, 大豆和裸地表现为  $P > I_{30}$ , 说明种植大豆和不种植作物的裸地, 对其产沙量影响最大的是降雨量, 其次是最大 30 min 雨强; 种植地瓜的小区表现为  $P > T$ , 雨量对其产沙影响最大, 降雨历时次之. 种植花生小区土壤流失量与降雨因子回归模型显示, 仅降雨历时对其产沙量具有一定的影响, 雨量、雨强回归拟合效果较弱.

综合各径流小区径流、土壤流失量与降雨因子的拟合回归结果可以看出, 各小区产流量回归模型调整后的  $R^2$  均大于土壤流失量回归模型调整后的  $R^2$ , 且降雨因子对径流量的贡献度大于对土壤流失量的贡献度, 说明降雨因子与产流量的拟合效果优于产沙量, 降雨对产流的影响明显大于其对土壤流失量的影响.

表 6 不同作物产流产沙拟合回归方程模型

小区	产流/产沙	回归模型	调整后 $R^2$
大豆	径流深	$Y_1 = -5.847 + 0.234P + 0.100I_{30}$	0.616**
	土壤流失量	$Y_2 = -0.715 + 0.030P + 0.011I_{30}$	0.409**
地瓜	径流深	$Y_1 = -2.292 + 0.093P + 0.003T$	0.336**
	土壤流失量	$Y_2 = -0.246 + 0.011P + 0.003T$	0.185**
花生	径流深	$Y_1 = 0.313 + 0.009P + 0.001T$	0.179**
	土壤流失量	$Y_2 = 0.006 + 0.0001T$	0.083**
裸地	径流深	$Y_1 = -6.209 + 0.236P + 0.075I_{30}$	0.649**
	土壤流失量	$Y_2 = -0.824 + 0.030P + 0.0001T$	0.511**

注:  $Y_1$  为径流深,  $Y_2$  为土壤流失量, \*\* 表示在  $p < 0.01$  级别(双尾)差异具有统计学意义.

### 3 讨论

在本研究中选择降雨量、降雨历时及降雨强度作为雨型划分依据, 将研究区侵蚀性降雨划分为 I, II, III 3 种雨型, 在传统降雨分类基础上考虑降雨历时及降雨强度引起的不一致性, 更加符合实际情况. 通过雨型分析可以看出, I 型雨是研究区最为常见的侵蚀性降雨类型, 出现频率高达 67.53%, 占总降雨量的 44.2%, 径流和泥沙总量较大, 但由于雨量最小、历时最短, 对土壤的破坏分离能力有限, 平均产流产沙量最小; II 型雨出现频次最低, 径流和泥沙总量最小, 但由于雨量大、历时长, 对土壤具有较大的侵蚀力, 其平均产流产沙量远高于其他两种降雨类型. III 型雨(中雨量、中历时、小雨强)平均产流产沙量居中, 但由于其累积雨量较大、累积降雨时间较长, 径流和泥沙总量最高. 各降雨因子在研究区坡面产流产沙过程中都起到了不同程度的作用. 因此, II 型和 III 型虽然出现频次较 I 型低, 但由于其侵蚀力较强, 持续时间较长, 同样容易导致坡面水土流失产生, 也应对其进行关注<sup>[27-28]</sup>.

植物对径流泥沙具有一定的削减作用, 不同植物在降雨过程中对径流和泥沙的调控作用表现出一定的差异. 研究期内, 种植花生的径流小区径流深仅为大豆的 23.88%, 土壤流失量仅为大豆的 11.24%, 种植地瓜的径流小区产流产沙量也相对较少, 笔者考虑主要是由于其较高的郁闭度和植被盖度有效截留了降水, 减少了雨滴对表层土壤的击溅作用, 从而减缓了地表径流, 减少了土壤流失量<sup>[29-31]</sup>. 由此可以认为, 花生和地瓜减流减沙效果较好, 能够更好地防止侵蚀产生, 是该地区改善土壤侵蚀状况、有效发挥水土保持

作用的措施植物类型.

降雨量、降雨历时、降雨强度等是影响区域水土流失的主要降雨特征指标. 在本研究中, 降雨量同产流产沙的关系较降雨历时和降雨强度密切, 说明在野外自然降雨过程中次降雨量对径流、泥沙的影响较降雨历时和降雨强度更大. 各降雨因素对不同植物的影响程度不同, 最大 30 min 降雨强度对大豆、裸地的影响明显大于对花生的影响, 说明降雨强度变化对花生产流产沙影响较小, 花生对高强度短时降雨拦截效果较好. 在野外降雨条件下, 坡面产流产沙过程极为复杂, 一方面受雨量、雨强等降雨因素的影响, 同时也受植物本身类型、结构等的影响<sup>[9,32-33]</sup>. 因此, 在水土流失治理工作中应充分考虑当地的降雨雨型情况, 选择合适的植物实现最大的水土保持效益.

## 4 结论

本文研究了鲁中南山区降雨类型及不同植物类型下径流小区的水土流失特征, 结果表明:

1) 基于降雨量、降雨历时和降雨强度, 研究区侵蚀性降雨可以分为 3 种类型, I 型(小雨量、短历时、大雨强); II 型(大雨量、长历时、小雨强); III 型(中雨量、中历时、小雨强). I 型雨是区域内发生频率最高的类型, I 型和 III 型是降雨量较高的主要降雨类型.

2) 研究期间, 径流小区产流和土壤流失总量从大到小依次为大豆、裸地、地瓜、花生, 花生和地瓜减流减沙效果相对较好. 各小区不同侵蚀性降雨类型的产流产沙量从大到小依次为 II 型、III 型、I 型, 当发生较多场次的 I 型雨和 III 型雨时, 产流产沙量较大.

3) 降雨量对坡面产流产沙影响最大, 随植物种类变化, 次影响因素存在一定的差异. 降雨对径流小区产流的影响程度大于其对土壤流失量的影响程度. 坡面土壤流失量和径流深均表现为极显著相关, 因此控制产流发生可在一定程度上有效地降低土壤流失量.

## 参考文献:

- [1] 刘亭亭. 清水河流域典型土地利用方式水土流失特征分析 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [2] DE ALMEIDA W S, SEITZ S, DE OLIVEIRA L F C, et al. Duration and Intensity of Rainfall Events with the Same Erosivity Change Sediment Yield and Runoff Rates [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(1): 69-75.
- [3] 龙训建, 翁薛柔, 叶琰, 等. 近 10 年重庆市降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 171-184.
- [4] 江雯, 胡玉乾, 汪军红, 等. 安徽大别山区天然降雨对典型植被水土流失影响研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 265-273.
- [5] 孙从建, 侯慧新, 陈伟, 等. 典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1405-1416.
- [6] LUO J A, ZHENG Z C, LI T X, et al. Temporal Variations in Runoff and Sediment Yield Associated with Soil Surface Roughness under Different Rainfall Patterns [J]. Geomorphology, 2020, 349: 106915.
- [7] ZHANG X X, SONG J X, WANG Y R, et al. Effects of Land Use on Slope Runoff and Soil Loss in the Loess Plateau of China: a Meta-Analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142418.
- [8] 杨坪坪, 李勇, 宋涛, 等. 典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 53-62.
- [9] 李瑞, 陈康, 刘瑞禄, 等. 基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产流产沙特征 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 139-147.
- [10] 刘靖, 黄宜, 王海洋, 等. 山地城市地表径流及其与用地类型的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 8-15.
- [11] 张彩云, 蒋勇军, 马丽娜, 等. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律 [J]. 水土保持通报, 2021,

41(1): 49-55.

- [12] 费晓. 密云板栗林地水土流失治理措施及其效果研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [13] 任伟征, 田宇, 任泉静, 等. 中国农田防护林对作物产量影响的整合分析 [J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(4): 705-712.
- [14] 杜国明, 向悦维, 王璟. 黑土区典型县域侵蚀沟时空分布特征和影响因素研究——以拜泉县为例 [J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(6): 77-78.
- [15] 孙磊, 原琳, 符强, 等. 降雨量对不同质地土壤外源  $\text{Cl}^-$  淋洗效率及其空间分布影响 [J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(10): 27-39.
- [16] 王玲莉, 张富, 胡彦婷, 等. 侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响 [J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 109-113.
- [17] LI Z W, XU X L, ZHU J X, et al. Can Precipitation Extremes Explain Variability in Runoff and Sediment Yield across Heterogeneous Karst Watersheds? [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 125698.
- [18] 贺云锋, 沈海鸥, 张月, 等. 黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 89-94.
- [19] 宋媛媛, 邱利平, 赵本淑, 等. 人工土壤中氮磷氯元素降雨侵蚀试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 132-138.
- [20] 高磊. 北方土石山区坡面—小流域尺度水土保持生态效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [21] 黎庆贵. 黔西北坡耕地覆盖措施的水土失调控制效应 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- [22] 黄凯, 刘瑞禄, 覃莉, 等. 不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 271-280.
- [23] 周晗, 严俊霞, 李洪建, 等. 晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对侵蚀性降雨的响应 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 7-12.
- [24] 黄选华, 高华端, 罗金, 等. 黔北沅水侵蚀性次降雨对地表径流产沙的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(2): 122-127.
- [25] 杨青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9-16.
- [26] 常松果, 胡雪琴, 史东梅, 等. 不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 34-40.
- [27] 程分生, 尤龙辉, 叶功富, 等. 红壤区典型茶园模式对侵蚀性降雨的减流减沙效应 [J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 149-155.
- [28] 赵娅君, 吴发启, 徐宁, 等. 不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 23-28, 35.
- [29] 彭浩. 湘中低山丘陵区侵蚀性降雨及其对径流输沙的影响特征 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [30] 徐大红, 茅海祥, 胡萍, 等. 黔东北地区可利用降雨资源的变化及关联因子分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 184-193.
- [31] 王诗星, 吕锡芝, 魏义长, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被坡面产流产沙效应研究 [J]. 中国水土保持, 2021(3): 31-33, 9.
- [32] 张嘉懿, 汪军红, 程先富, 等. 降雨对江子河小流域不同农作物措施坡面产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 8-14.
- [33] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平, 等. 陇中黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复模式下次降雨产流产沙特征 [J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 920-927.