

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.004.

晁增祖, 梁耿, 刘世生, 等. 典型泥石流小流域降雨和土地利用对坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 19-26.

CHAO Zengzu, LIANG Geng, LIU Shisheng, et al. Effects of Rainfall and Land Use on Slope Erosion in Typical Debris Flow Small Watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 19-26.

# 典型泥石流小流域降雨和土地利用对坡面侵蚀的影响

晁增祖<sup>1</sup>, 梁耿<sup>1</sup>, 刘世生<sup>2</sup>, 党广善<sup>2</sup>, 周妍妍<sup>1</sup>, 岳东霞<sup>1</sup>

(1.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2.陇南市水土保持生态环境监测分站, 甘肃 陇南 746000)

**摘要:** [目的]揭示泥石流小流域降雨和土地利用对流域内坡面侵蚀的影响和作用,为泥石流的生态治理提供科学依据。[方法]以白龙江流域一级支沟——甘家沟泥石流小流域为研究区,基于该流域已建的5个径流小区(裸地、坡耕地、草地、土坎梯田、经济林地)连续5年的观测资料,利用K-均值聚类法,选择降雨量( $P$ )、降雨历时( $D$ )和最大30 min降雨强度( $I_{30}$ )3个降雨指标,将该流域46次侵蚀性降雨事件划分为3类雨型(I型、II型、III型),以平均径流系数和平均土壤流失量为主要指标,定量化分析了不同降雨雨型和土地利用类型对坡面产流产沙的影响和作用。[结果]径流和土壤流失对降雨的响应存在差异,平均径流系数为I型降雨最高,其次为III型和II型降雨;土壤流失量为II型降雨>I型降雨>III型降雨。最大30 min降雨强度与5种土地利用类型的径流系数和土壤流失量的正相关性最高,其次为降雨量、降雨历时。5种土地利用类型的平均径流系数为裸地>经济林地>坡耕地>草地>土坎梯田,土壤流失量为裸地>坡耕地>经济林地>草地>土坎梯田。降雨和土地利用相互作用下,径流和土壤流失因雨型和土地利用方式不同而存在差异性,且认为在控制土壤侵蚀和减少泥石流坡面物源方面应避免大规模种植油橄榄。[结论]最大30 min降雨强度是影响该流域降雨侵蚀力的关键降雨指标,土坎梯田可较好控制坡面侵蚀,草地的减流减沙效果显著,研究结果可为坡面水土流失和泥石流防治提供科学依据。

**关键词:** 坡面侵蚀; 降雨雨型; 土地利用类型; 泥石流小流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0019-08

## Effects of Rainfall and Land Use on Slope Erosion in Typical Debris Flow Small Watershed

CHAO Zengzu<sup>1</sup>, LIANG Geng<sup>1</sup>, LIU Shisheng<sup>2</sup>, DANG Guangshan<sup>2</sup>, ZHOU Yanyan<sup>1</sup>, YUE Dongxia<sup>1</sup>

(1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2.Longnan Water and Soil Conservation Ecological Environment Monitoring Sub Station, Longnan, Gansu 746000, China)

**Abstract:** [Objective] The influence and effect of rainfall and land use on the slope erosion in the debris flow small watershed was revealed to provide scientific basis for ecological control of debris flow. [Methods] The first-level tributary of the Bailong River Basin—the debris flow small watershed of Ganjiagou was taken as the research area, and based on five consecutive years of observation data of the five runoff plots (bare land, sloping farmland, grassland, ridge terraces, economic forest land) that have been built in this watershed, K-means clustering method was used to divided the 46 erosive rainfall events in the basin into three rainfall regimes (type I, type II, type III) by selecting three rainfall indicators, such as rainfall ( $P$ ), rainfall duration ( $D$ ) and maximum 30 min rainfall intensity ( $I_{30}$ ). The influence and effect of rainfall regimes and land use types on slope runoff and sediment production were quantitatively analyzed based on selecting the average runoff coefficient and average soil loss as the main indicators. [Results] There were differences in the

收稿日期: 2021-09-01

修回日期: 2022-04-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077230, 42130709); 甘肃省重点人才项目(2022RCXM033)

第一作者: 晁增祖(1998—), 男, 青海海东人, 硕士研究生, 主要从事泥石流生态防治研究。E-mail: chaozz20@lzu.edu.cn

通信作者: 岳东霞(1969—), 女, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害遥感监测与风险评估研究。E-mail: dxyue@lzu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

response of runoff and soil loss to rainfall, the average runoff coefficient is the highest for type I rainfall, followed by type III and type II rainfall. The soil loss decreased in the order: type II rainfall > type I rainfall > type III rainfall. The maximum 30 min rainfall intensity had the highest positive correlation with the runoff coefficient and soil losses of the five land use types, followed by rainfall and rainfall duration. The average runoff coefficients of the five land use types decreased in the order: bare land > economic forest land > sloping farmland > grassland > ridge terraces, and the soil loss decreased in the order: bare land > sloping farmland > economic forest land > grassland > ridge terraces. Under the interaction of rainfall and land use, there were differences in runoff and soil loss due to different rainfall regimes and land use methods, and it was believed that large-scale planting of olive oil should be avoided in terms of controlling soil erosion and reducing the source of debris flow on slopes. [Conclusion] The maximum 30 min rainfall intensity is the key rainfall index affecting the rainfall erosivity in the basin, the slope erosion can be better controlled by the terraced soil, and the effect of reducing the runoff and sediment of the grassland is remarkable. This research results can provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion and debris flow on slopes.

**Keywords:** slope erosion; rainfall regime; land use; debris flow small watershed

坡面土壤侵蚀会造成许多严重的生态环境问题,如土地退化、土壤肥力减弱、河流淤积等<sup>[1-4]</sup>。特别是在泥石流高发区,坡面土壤侵蚀是泥石流形成的重要物质来源<sup>[5]</sup>,而降雨和流域下垫面的相互作用决定着小流域的侵蚀产沙过程<sup>[6]</sup>,对泥石流的形成具有重要贡献。

降雨不仅是水力侵蚀发生的前提,而且是泥石流激发的决定因素。不同的降雨量、降雨历时、雨强等特征参数,其对坡面土壤侵蚀的影响不同<sup>[7]</sup>,对泥石流的物源补给也会出现差异。很多学者基于自然降雨下的实测数据,通过将自然降雨划分为若干雨型来探讨降雨特征与土壤侵蚀的关系<sup>[8]</sup>。Fang等<sup>[9]</sup>和Wei等<sup>[10]</sup>利用K均值分类法把黄土高原的次降雨事件分为3类,并指出高强度、短历时的降雨是造成当地土壤流失的主要雨型;张志旭等<sup>[11]</sup>对黄土高原沟壑区不同降雨雨型下的产流产沙特征进行分析,结果表明虽然中历时、小雨量、频次高的雨型是该流域主要降雨类型,但其对该地区产流产沙的贡献小于长历时、大雨量、频次低的雨型。

此外,土地利用会通过改变植被类型、地表覆盖度、土壤性质、径流速率等影响土壤侵蚀的发生和发展<sup>[12]</sup>。因此,区域土壤侵蚀变化和土地利用/覆被变化高度相关<sup>[13]</sup>,不同土地利用类型的土壤理化性质不同,其抗侵蚀能力亦不同,为泥石流提供的固体松散物质亦有差异。庄建琦等<sup>[14]</sup>通过泥石流多发区蒋家沟流域径流小区的土壤含水量观测资料分析发现,坡积层土壤中实施生态修复后,石榴+横坡耕作与林草地减小了坡面径流,从而有效地减缓了坡面土壤侵蚀。崔鹏等<sup>[15]</sup>对中国科学院东川泥石流观测研究站不同土地利用类型人工径流场的观测数据表明,林草

地截流拦沙效果显著,裸地和坡耕地水土流失严重。Fusun等<sup>[16]</sup>的研究也表明,相比灌木和森林,高覆盖率的草更能有效的防止径流和土壤流失。因此对土地利用类型进行适当的调整,以优化其空间格局,可在一定程度上改善土壤性状,从而减少土壤流失<sup>[17]</sup>。

综述所述,已有研究多集中于我国黄土高原土壤侵蚀严重区,而对泥石流流域的研究多侧重于不同土地利用类型的影响方面,对降雨雨型和土地利用方式协同作用对坡面侵蚀的影响尚不明确,因此,开展深入研究,进一步揭示降雨和土地利用对泥石流小流域坡面侵蚀的影响和作用对选取合适的泥石流生态防治措施具有重要的指导意义。近年来,白龙江流域甘肃省陇南市武都段泥石流频发,危害极为严重,其中甘家沟泥石流小流域在地质构造和土地利用方式的共同影响下,滑坡、崩塌分布广,坡面松散物质较丰富,在侵蚀性降雨情况下坡面土壤流失情况严重,为沟道提供了大量的固体松散物质,具有一定的代表性。因此,本研究以甘家沟泥石流小流域为例,开展不同降雨雨型和土地利用类型对于坡面侵蚀的影响和作用研究,可为该流域泥石流的综合防治提供重要的科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本研究的试验均在甘家沟流域(33°22′01″N, 105°00′46″E)开展,该流域属于长江流域嘉陵江水系白龙江中游左岸一级支流,流域总面积41.19 km<sup>2</sup>(图1)。气候属北亚热带湿润向暖温半湿润气候过渡带,同时,因白龙江中游地形高差大,形成了干热河谷型局地气候,受此影响,甘家沟小流域多年平均气

温 14.6℃,多年平均降雨量 487.2 mm,降雨主要分布在 5—9 月份,每年无霜期 228 d。

流域内土壤类型为褐土,流域土地总面积 41.19

km<sup>2</sup>,其中:农地 16.378 km<sup>2</sup>,占总面积 40%,林地 15.11 km<sup>2</sup>,占总面积 36.69%,草地 2.13 km<sup>2</sup>,占总面积 5.2%,荒地 5.858 km<sup>2</sup>,占总面积 14.22%。

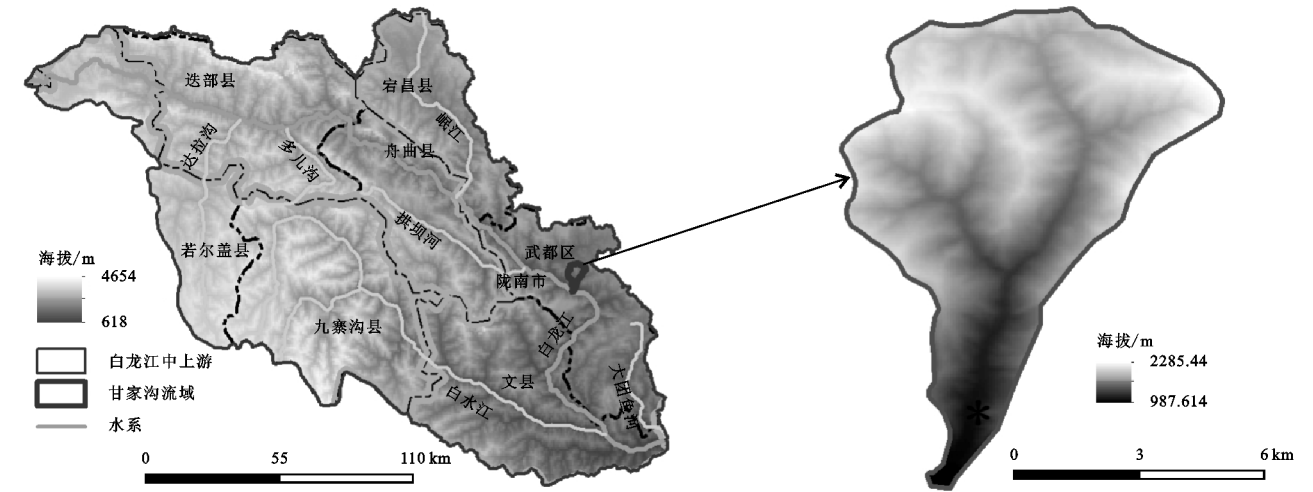


图 1 研究区概况

1.2 野外试验

本试验共建径流小区 5 个,为观测、分析不同土地利用类型对坡面侵蚀的影响(表 1)。按照水利部水土保持试验规程,5 个径流小区采用同等大小,面积为 100m<sup>2</sup>,水平投影长 20 m、宽 5 m,所有小区均建

在同一坡度上,其坡度为 15°。径流小区 1 为裸地(对照坡地),小区 2 为坡耕地,小区 3 为草地,小区 4 为土坎梯田,小区 5 为经济林(图 2)。以上小区的作物种植及田间管理均与当地农民相似,在试验期间将所有田间操作记录在册。

表 1 甘家沟流域径流小区基本情况

编号	土地利用类型	植物名	坡长/m	坡宽/m	坡度	坡位	土壤类型	基岩种类
1	裸地	无	20	5	15°	坡脚	黄土性褐土	千枚岩、黄土
2	坡耕地	玉米	20	5	15°	坡脚	黄土性褐土	千枚岩、黄土
3	草地	苜蓿	20	5	15°	坡脚	黄土性褐土	千枚岩、黄土
4	土坎梯田	洋芋	20	5	15°	坡脚	黄土性褐土	千枚岩、黄土
5	经济林	油橄榄	20	5	15°	坡脚	黄土性褐土	千枚岩、黄土

为消除外部来水对观测结果的影响,每个小区四周用水泥石块围住(埋深 20 cm,高于地面 30 cm)。在小区底部设置有集流槽,通过 PVC 管将集流槽中的径流泥沙引入蓄水池中,蓄水池侧壁装有水位标尺。为保证小规模径流、泥沙的计算采样准确,在每个蓄水池中安装了 10 mm 塑料板制成的长方形集流桶。降水要素的观测主要采用安装在径流小区旁的全自动气象观测仪进行,主要测定降雨量(mm)、风速(m/s)、风向(度)、土壤温度(℃)、大气温度(℃)等要素。对每一次降雨的各要素及各个径流小区的径流泥沙进行采集记录,2016—2020 年共记录侵蚀性降雨 46 次。

1.3 统计分析

本研究对 2016—2020 年甘家沟流域的坡面径流量和泥沙流失量进行了连续 5 a 的观测,采用径流系数(ROC)和土壤流失量(SLA)来表征该流域的坡面侵蚀特征,公式如下<sup>[18]</sup>:

ROC=RD/PD

式中:RD 是径流深(mm);PD 是降雨深(mm)。

SLA=SL/PA

式中:SL 是泥沙流失量(t);PA 是径流小区面积(hm<sup>2</sup>)。

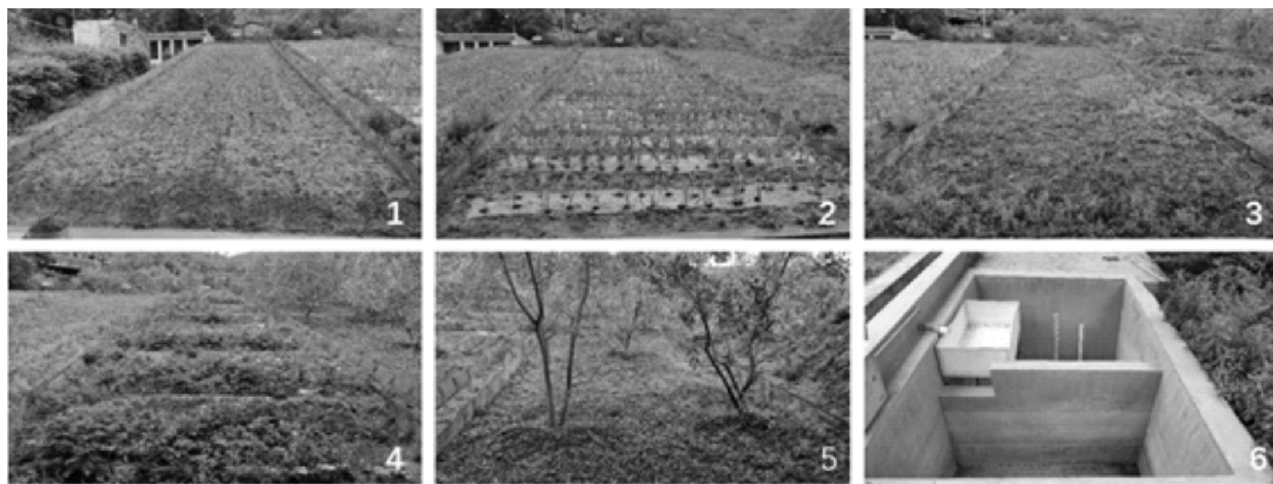
采用 SPSS 25.0 软件中的分类(K-均值聚类分析)划分降雨雨型,本研究所用到图形均采用 Origin 2018 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 降雨雨型划分

该流域在 2016—2020 年期间共发生产生径流和土壤流失的侵蚀性降雨事件 46 次。基于降雨量(P)、降雨历时(D)、最大 30 min 降雨强度(I<sub>30</sub>)和 K 均值聚类分析法,将 46 次侵蚀性降雨事件划分为 3 类,记为 I 型降雨、II 型降雨和 III 型降雨(表 2)。





注:裸地小区(1),坡耕地小区(2),草地小区(3),土坎梯田小区(4),经济林地小区(5),蓄水池(6)。

图2 5个径流小区和蓄水池

Ⅲ型降雨的降雨量和降雨历时均为最高,其次为Ⅱ型降雨和Ⅰ型降雨,最大30 min降雨强度为Ⅰ型降雨>Ⅱ型降雨>Ⅲ型降雨。由此可以得出以下判断:相比较而言,Ⅰ型降雨为小雨量、短历时和高雨强的降雨事件,Ⅱ型降雨为中雨量、中等历时和中雨强的降雨事件,Ⅲ型降雨为大雨量、长历时和低雨强的降雨事件。

在2016—2020年的46次侵蚀性降雨事件中,Ⅱ型降雨出现了22次,次数最多,占侵蚀性降雨事件的48%,其次是Ⅰ型降雨,出现了20次,占侵蚀性降雨事件的43%,Ⅲ型降雨仅出现了4次,占侵蚀性降雨事件的9%。

表2 降雨雨型情况统计

降雨雨型	特征值	最大值	最小值	平均值	总和	频次/次
Ⅰ	$P(\text{mm})$	32.4	6.8	15.64	312.8	20
	$D(\text{min})$	380	30	201.5	1030	
	$I_{30}(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	62	3.2	17.59	351.7	
Ⅱ	$P(\text{mm})$	75.4	10	24.77	545	22
	$D(\text{min})$	980	440	629.55	13850	
	$I_{30}(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	54.4	3.5	11.96	263.2	
Ⅲ	$P(\text{mm})$	54.8	18.4	39.8	147.4	4
	$D(\text{min})$	1430	1220	1482.5	5500	
	$I_{30}(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	15.4	5.6	10.55	41.8	

注:(1)降雨量( $P$ )、降雨历时( $D$ )、最大30 min降雨强度( $I_{30}$ );(2)Ⅰ型降雨为小雨量,短历时和高雨强的降雨事件;(3)Ⅱ型降雨为中雨量,中等历时中雨强的降雨事件;(4)Ⅲ型降雨为大雨量,长历时和低雨强的降雨事件。

2016—2020年期间,3种降雨雨型的降雨量、降雨历时、最大30 min降雨强度的年平均值和出现频次呈不同的变化特征。其中,Ⅰ型降雨的降雨量、降雨历时和最大30 min降雨强度均呈现先增加后减小

的趋势。Ⅱ型降雨的降雨量未发生明显变化,降雨历时在2016—2018年期间逐渐减少,2019年未出现,2020年出现回升,最大30 min降雨强度的变化与降雨历时相反(图3)。Ⅲ型降雨在2016年、2019年均未出现,2017年Ⅲ型降雨的降雨量、降雨历时和最大30 min降雨强度均为最低。3种降雨雨型在2019年出现次数最少,Ⅰ型降雨在2018年出现次数最多(7次),Ⅱ型在2017年、2020年出现次数最多(7次),Ⅲ型降雨5 a期间仅出现了4次,2017年出现次数最多,总体而言3种雨型在2017年、2018年、2020年出现的次数明显高于其他两年(图3)。

## 2.2 降雨雨型对坡面侵蚀的影响

不同降雨雨型条件下的平均径流系数和平均土壤流失量见图4,Ⅰ型降雨的平均径流系数最高为0.069,其次为Ⅲ型降雨(0.042)和Ⅱ型降雨(0.035)。Ⅱ型降雨的平均土壤流失量最高,达到1.101 t/hm<sup>2</sup>,Ⅰ型降雨次之,为0.766 t/hm<sup>2</sup>,Ⅲ型降雨几乎未造成土壤侵蚀。

从以上分析可以发现,就降雨雨型对泥石流启动的水动力条件和物源条件的贡献而言,Ⅱ型降雨对泥石流的物源补给能力强于Ⅰ型和Ⅲ型降雨,Ⅰ型降雨为泥石流的启动提供了最多的水动力条件,而对物源补给的贡献居于中等水平。这主要是因为降雨初期径流小区土体为非饱和土,在Ⅰ型降雨(小雨量、短历时、高雨强)情况下,土体的入渗速率可能小于降雨强度,这时土体的入渗量由入渗率所决定,土体的产流方式为超渗产流,只有一小部分降雨用于入渗,而其余降雨则产生径流<sup>[19]</sup>。随着降雨入渗,在Ⅲ型降雨(大雨量、长历时、低雨强)情况下,土体含水率逐渐升高达到饱和,土体产流方式也转化为蓄满产流,随着降雨历时的持续,降雨量全部用于产流<sup>[19-20]</sup>。而Ⅱ型

降雨由于雨强仅次于Ⅰ型降雨,使得土体很难在短时间内达到饱和,但由于Ⅰ型和Ⅱ型降雨的降雨强度大

于Ⅲ型降雨,雨滴打击和冲刷地表能力强<sup>[21]</sup>,造成其物源补给量大。

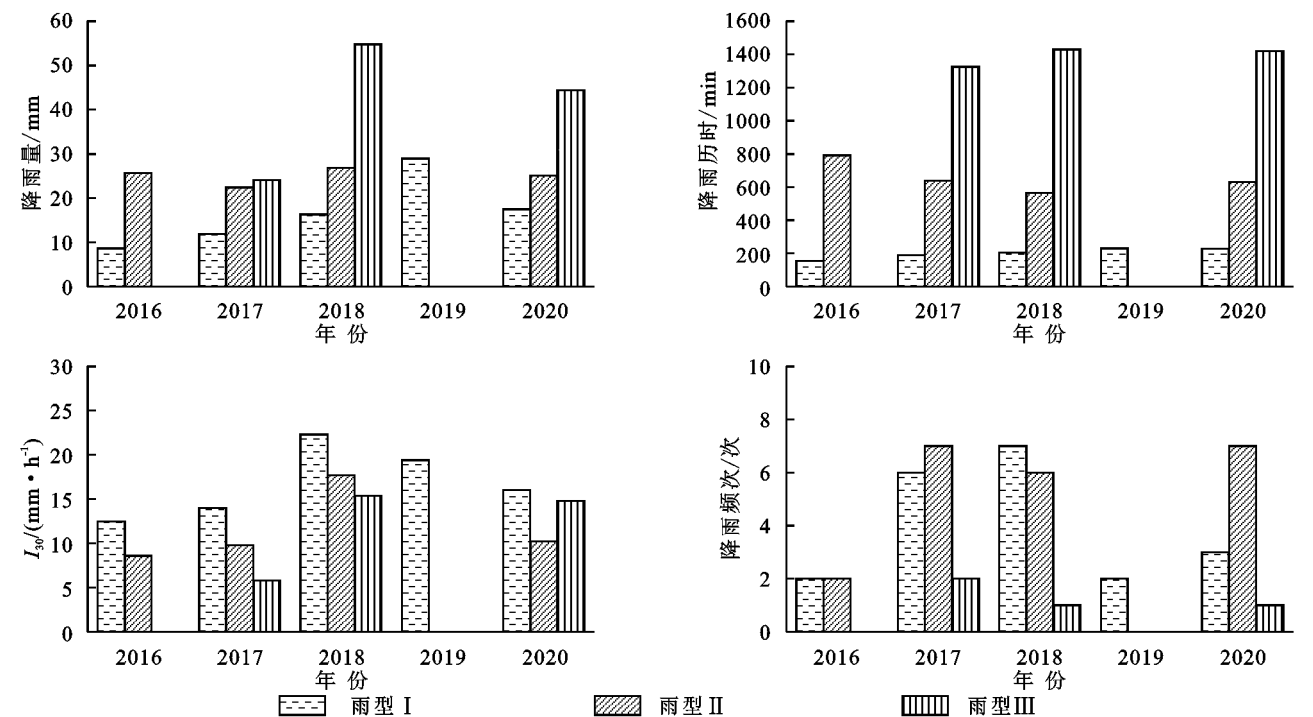


图 3 3 种降雨雨型的年际变化特征

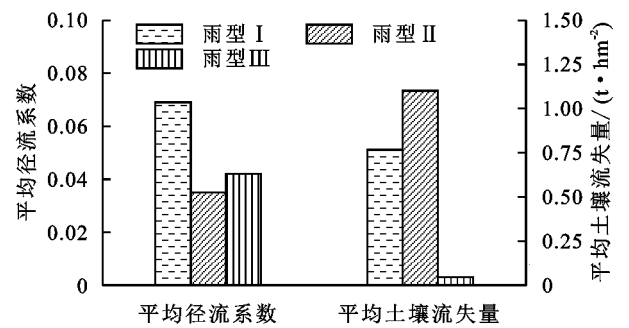


图 4 不同降雨雨型的平均径流系数和平均土壤流失量

2.3 土地利用类型对坡面侵蚀的影响

不同土地利用类型在 5 a 期间的平均径流系数和平均土壤流失量见图 5。5 个径流小区的平均径流系数和平均土壤流失量之间存在差异。平均径流系数最大的是裸地,达到 0.115,其次为经济林地,坡耕地和草地,土坎梯田的平均径流系数最低,为 0.013;裸地的平均土壤流失量为 2.418 t/hm<sup>2</sup>,其次为坡耕地(0.33 t/hm<sup>2</sup>)、经济林地(0.188 t/hm<sup>2</sup>)、草地(0.064 t/hm<sup>2</sup>)和土坎梯田(0.009 t/hm<sup>2</sup>)。因此,土坎梯田和草地对控制该流域的坡面土壤侵蚀具有重要的作用。

以上分析可以发现,经济林地的平均径流系数仅次于裸地,大于坡耕地和草地,平均土壤流失量次于坡耕地,大于草地,这可能与经济林地的植被类型和种植模式有关。横向 3 m,纵向 8 m 间距的油橄榄种植模式虽保证了较大的经济效益,但造成坡面凋落物层覆盖较薄,而研究发现凋落物层能够减弱雨滴的动

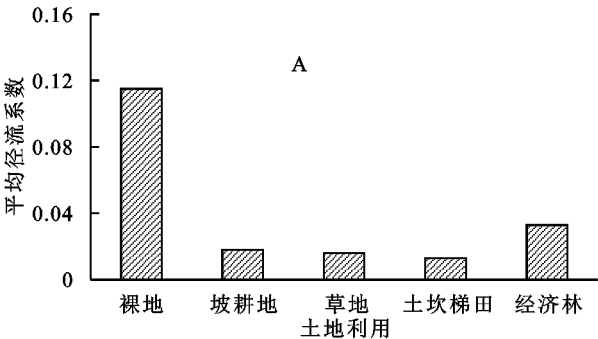
能,起到保护表层土壤免受飞溅侵蚀和增加入渗减少径流的作用<sup>[22]</sup>。其次,本试验中油橄榄树龄已有七年,其根系固结土壤能力增强,使得平均土壤流失量低于坡耕地。相比经济林地,发现草地的平均径流系数和平均土壤流失量仅次于土坎梯田,对于这一现象研究发现相比于灌木和森林,高覆盖率的草更能有效的防止土壤流失<sup>[16]</sup>。草的活根通过在表层土壤中形成土壤一根基质来增强土壤强度,提高土壤的抗蚀性,降低泥沙流失<sup>[23]</sup>。且本研究草地植物为苜蓿,苜蓿覆盖可以显著减缓坡面径流,降低坡面产沙并提高土壤水分入渗量<sup>[24]</sup>。

土坎梯田在 5 种土地利用类型下的平均径流系数和平均土壤流失量最低,控制坡面土壤流失的效果明显。梯田将长坡分为短坡,改变地形,降低坡度,从而减少土壤侵蚀和径流量<sup>[25]</sup>。Abu Hammad 等<sup>[26]</sup>指出,梯田保护系统减少了强降雨的负效应,使得径流量和土壤流失量低于非梯田系统。试验中还在梯田进行耕作活动,种植洋芋,使得降雨入渗量增加,土壤流失受到限制。Shi 等<sup>[27]</sup>研究发现梯田结合沟垄耕作可以减少约 17%~32%的土壤流失量。

2.4 降雨雨型和土地利用类型对坡面侵蚀的影响

不同降雨雨型下 5 个径流小区的平均径流系数和平均土壤流失量存在差异(表 3)。对土坎梯田而言,Ⅰ型降雨产生了最高的平均径流系数和平均土壤流失量,Ⅱ型降雨次之,Ⅲ型降雨未产生侵蚀。Ⅰ型

降雨为泥石流的启动提供的水动力条件和固体物质均高于Ⅱ型和Ⅲ型降雨。就裸地、坡耕地、草地和经济林地而言,Ⅰ型降雨产生的平均径流系数高于Ⅲ型降雨和Ⅱ型降雨,而Ⅱ型降雨使得4种土地利用类型的平均土壤流失量明显高于Ⅰ型降雨和Ⅲ型降雨,尤其是在坡耕地和经济林地上,Ⅱ型造成的平均土壤流失量达到0.437 t/hm<sup>2</sup>和0.234 t/hm<sup>2</sup>,显著高于草地(0.114 t/hm<sup>2</sup>)和土坎梯田(0.003 t/hm<sup>2</sup>)的平均土壤流失量。就裸地、坡耕地、草地和经济林地对泥石



流启动的水动力条件而言,Ⅰ型降雨的贡献大,对固体物质的补给而言,Ⅱ型降雨的贡献大于其他两种雨型。基于以上分析,发现降雨雨型对土壤侵蚀的影响受土地利用的影响<sup>[9]</sup>。且特别要注意的是除土坎梯田外,其余土地利用类型的平均土壤流失量主要是由最大30 min降雨强度适中的Ⅱ型降雨引起的,这与Peng和Wang<sup>[28]</sup>的研究不一致,主要是因为本研究中最大30 min降雨雨强高的雨型的降雨量和降雨历时均显著低于其他两种雨型<sup>[29]</sup>。

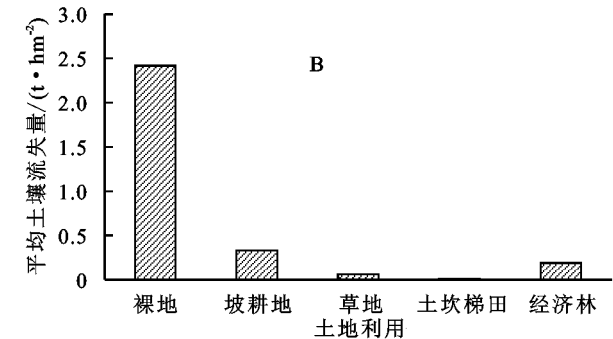


图5 不同土地利用的平均径流系数和平均土壤流失量

在同种降雨雨型下,对比分析5种不同土地利用类型的平均径流系数和平均土壤流失量。发现除对照地裸地外,在Ⅰ型降雨下土坎梯田对泥石流的水动力条件补给贡献大,而在Ⅱ型和Ⅲ型降雨雨型下经济林地对泥石流的水动力条件补给贡献大。在Ⅲ型降雨下经济林地对泥石流的固体物源补给贡献大,而在Ⅰ型和Ⅱ型降雨下坡耕地对泥石流的固体物源补给贡献大。

表3 3种雨型下不同土地利用类型的平均径流系数和平均土壤流失量

类型	平均径流系数				
	裸地	坡耕地	草地	土坎梯田	经济林
雨型Ⅰ	0.152	0.021	0.027	0.048	0.039
雨型Ⅱ	0.079	0.011	0.008	0.003	0.028
雨型Ⅲ	0.119	0.017	0.008	0.001	0.033
平均土壤流失量(t·hm <sup>-2</sup> )					
雨型Ⅰ	2.082	0.294	0.026	0.03	0.172
雨型Ⅱ	3.239	0.437	0.114	0.003	0.234
雨型Ⅲ	0.161	0.003	0.003	0	0.015

2.5 降雨参数与不同土地利用类型径流系数和土壤流失量的关系

通过构建降雨参数与不同土地利用类型径流系

数和土壤流失量的 Pearson 相关矩阵,可以发现裸地、坡耕地和经济林地的径流系数和土壤流失量与降雨量的相关性显著。草地的径流系数与最大30 min降雨强度和降雨量成正相关,土壤流失量与以上两个参数的正相关性显著。土坎梯田的径流系数和土壤流失量与最大30 min降雨强度呈正相关(表4),这也就解释了土坎梯田在Ⅰ型降雨下的平均径流系数和平均土壤流失量均高于Ⅱ型和Ⅲ型降雨的情况。就3个降雨参数而言,最大30 min降雨强度与5种土地利用类型的径流系数和土壤流失量的正相关性最高,其次是降雨量和降雨历时。这与晏清洪等<sup>[30]</sup>在黄土丘陵区的研究结果具有一致性。且研究发现最大30 min降雨强度是影响降雨侵蚀力的关键性因素,直接影响径流过程及侵蚀特性<sup>[31]</sup>,相较于其他降雨参数,径流和土壤流失量在最大30 min雨强较高的情况下要高的多<sup>[32]</sup>,对于不同植被的减流减沙研究中,Liu<sup>[33]</sup>发现植被对径流和土壤流失的控制能力受降雨雨强的影响。由此可以推断最大30 min降雨强度对该流域的坡面侵蚀影响最为显著。

表4 降雨参数与5种土地利用类型的径流系数和土壤流失量的相关性

降雨参数	$R_1$	$M_1$	$R_2$	$M_2$	$R_3$	$M_3$	$R_4$	$M_4$	$R_5$	$M_5$
$P(\text{mm})$	0.364 *	0.372 *	0.516 **	0.518 **	0.017	0.394 **	-0.108	-0.008	0.510 **	0.501 **
$D(\text{min})$	-0.12	-0.162	0.003	0.005	-0.064	0.082	-0.107	-0.096	0.034	-0.002
$I_{30}(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	0.750 **	0.787 **	0.793 **	0.745 **	0.149	0.324 *	0.024	0.158	0.765 **	0.712 **

注:(1) \* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著;(2) \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著;(3)  $R$  和  $M$  分别代表平均径流系数和土壤流失量,数字 1,2,3,4,5 分别代表裸地、坡耕地、草地、土坎梯田、经济林。



### 3 结论

(1) 就降雨雨型对泥石流启动的水动力条件和物源条件的贡献而言,Ⅱ型降雨对泥石流的物源补给能力强于Ⅰ型和Ⅲ型降雨,Ⅰ型降雨为泥石流的启动提供了最多的水动力条件,而对物源补给的贡献较小。

(2) 坡面侵蚀对土地利用类型的响应不同。平均径流系数为裸地>经济林地>坡耕地>草地>土坎梯田,土壤流失量为裸地>坡耕地>经济林地>草地>土坎梯田。相较于草地和土坎梯田,经济林地和坡耕地分别为泥石流的启动提供了最多的水动力条件和物源条件,土坎梯田可较好控制该流域的坡面侵蚀,草地减缓坡面侵蚀的效果显著。

(3) 降雨雨型对土壤侵蚀的影响受土地利用的控制,土坎梯田的平均径流系数和土壤流失量均为Ⅰ型降雨>Ⅱ型降雨>Ⅲ型降雨,裸地、坡耕地、草地和经济林地的平均径流系数为Ⅰ型降雨>Ⅲ型降雨>Ⅱ型降雨,土壤流失量为Ⅱ型降雨>Ⅰ型降雨>Ⅲ型降雨。

(4) 5种土地利用类型的径流系数和土壤流失量与最大30 min降雨强度的相关性最为显著,其次为降雨量、降雨历时。最大30 min降雨强度是影响该流域降雨侵蚀力的关键降雨指标。

#### 参考文献:

- [1] 黄凯旋,刘扬,董晓健,等.基于土地利用变化的三峡库区(湖北段)土壤侵蚀消长研究[J].水土保持研究,2020,27(1):1-6,20.
- [2] 游翔,张闻多,张素,等.攀枝花干热河谷区坡面产流产沙研究[J].中国水土保持,2020(6):28-30.
- [3] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究[J].水土保持研究,2020,27(2):99-103,111.
- [4] 李跃军,孙虎.浙江省生态旅游区的水土保持问题[J].水土保持通报,2007,27(5):179-182.
- [5] 毛佳睿,李铁锋,田运涛,等.基于物源特征的白龙江流域泥石流易发性评价[J].科学技术与工程,2020,20(28):11479-11490.
- [6] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
- [7] 杨任翔,邱凡,王坚桦,等.雨型和甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):65-70,78.
- [8] 王小博,朱永清,吴宜进,等.不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):6-11.
- [9] Fang N F, Shi Z H, Li L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. Catena, 2012,99(4):1-8.
- [10] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.
- [11] 张志旭,宋孝玉,李蓝君,等.黄土高原沟壑区典型草地小流域水沙特征对不同雨型的响应[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):108-115.
- [12] 李成志,连晋姣,陈洪松,等.喀斯特地区县域土壤侵蚀估算及其对土地利用变化的响应[J].中国水土保持科学,2017,15(5):39-47.
- [13] 冯精金,史明昌,姜群鸥.潮白河流域土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):121-132.
- [14] 庄建琦,葛永刚,王道杰,等.干热河谷生态恢复区土壤水分变化研究[J].水土保持研究,2009,16(6):35-39.
- [15] 崔鹏,王道杰,韦方强.干热河谷生态修复模式及其效应:以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J].中国水土保持科学,2005,3(3):60-64.
- [16] Fusun S, Jinniu W, Tao L, et al. Effects of different types of vegetation recovery on runoff and soil erosion on a Wenchuan earthquake-triggered landslide, China [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2013,68(2):138-145.
- [17] Chen L D, Messing I, Zhang S R, et al. Land use evaluation and scenario analysis towards sustainable planning on the Loess Plateau in China-case study in a small catchment[J]. Catena, 2003,54(1):303-316.
- [18] Duan J, Liu Y J, Yang J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China[J]. Journal of Hydrology, 2019,582(1/2):124290.
- [19] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
- [20] Fox D M, Le Bissonnais Y, Quélin P. The implications of spatial variability in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression microtopography[J]. Catena, 1998,32(2):101-114.
- [21] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.
- [22] Chen H, Zhang X P, Abia M T, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil ero-

- sion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018,170:141-149.
- [23] Liu Y J, Wang T W, Cai C F, et al. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Science of the Total Environment, 2014,485(3):93-102.
- [24] 李智勇,张梦杰,陈明玉,等.苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响[J].水土保持研究,2021,28(5):54-60.
- [25] Zhang J H, Su Z A, Liu G C. Effects of terracing and agroforestry on soil and water loss in hilly areas of the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008,5(3):241-248.
- [26] Hammad A, Brresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean[J]. Soil and Tillage Research, 2006,87(1):39-47.
- [27] Shi Z H, Ai L, Fang N F, et al. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 483:156-167.
- [28] Peng T, Wang S. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012,90: 53-62.
- [29] Xu Q, Wu P, Dai J, et al. The effects of rainfall regimes and terracing on runoff and erosion in the Three Gorges area, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(10):9474-9484.
- [30] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].农业机械学报,2014, 45(2):169-175.
- [31] 樊登星.北京山区坡面土壤侵蚀响应特征及模型模拟研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [32] Liu J B, Gao G Y, Wang S A, et al. Combined effects of rainfall regime and plot length on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2018,109(3/4):397-406.
- [33] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the Loess Plateau in China[J]. Environmental Management, 2008,42(3):402-411.

~~~~~

(上接第18页)

- [22] 马欢.陕北黄土区微地形特征及其对土壤水分的影响[D].北京:北京林业大学,2018.
- [23] 陈利顶,贾福岩,汪亚峰.黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究[J].地理科学,2015,35(9): 1176-1182.
- [24] 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.
- [25] 任柯蒙,卫伟,赵西宁,等.黄土丘陵区坡面植被盖度及其配置格局的水蚀效应模拟[J].生态学报,2018,38 (22):8031-8039.
- [26] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.
- [27] 王恒星,张建军,孙若修,等.晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J].北京林业大学学报,2021,43 (3):85-95.
- [28] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.天然降雨条件下裸露砒砂岩区人工植被的减流减沙效应[J].水土保持研究, 2021,29(1):100-104,112.
- [29] 李清溪,丁文峰,朱秀迪,等.雨强和地表糙度对坡面微地形及侵蚀的影响[J].长江科学院院报,2019,36(1): 41-47.
- [30] 钱秋颖,秦富仓,李龙,等.自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J].水土保持学报,2021,35 (3):46-52.
- [31] 王鹏飞,郑子成,张锡洲.玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J].水土保持学报, 2015,29(2):30-34.
- [32] 赵龙山.黄土坡地地表糙度特征及其对入渗、产流产沙的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.