

# 黔西高原侵蚀性降雨特征分析

顾璟冉<sup>1</sup>, 张兴奇<sup>1</sup>, 顾礼彬<sup>1</sup>, 居祥<sup>1</sup>, 杨光徽<sup>2</sup>, 顾再柯<sup>2</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002)

**摘要:**侵蚀性降雨的特征与土壤侵蚀的研究密切相关。利用径流小区观测法以及黔西高原地区典型小流域的降雨、径流与泥沙资料,对黔西高原地区侵蚀性降雨的特征进行了分析,结果表明:(1)降雨总动能( $E$ )和最大 60 分钟雨强( $I_{60}$ )的乘积是研究区降雨侵蚀力( $R$ )的计算指标;(2)中雨以上降雨事件的产沙量约占总产沙量的 99.5%,6 次暴雨事件的产沙量占总产沙量的 79.4%。对大雨以上等级降雨事件的土壤侵蚀模数与降雨特征拟合分析得到: $M=1.319EI_{60}$  以及  $M=0.328PI_{60}$ ; (3)降雨侵蚀力大于  $500 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$  等级的降雨事件的产沙量占总产沙量的 73.6%,对降雨侵蚀力大于  $100 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$  等级的降雨事件的土壤侵蚀模数与降雨特征拟合分析得到: $M=1.269EI_{60}$  以及  $M=0.324PI_{60}$ ; (4)降雨集中时间在 1~6 h 的降雨发生概率大,且泥沙侵蚀量大。6 月、7 月份降雨事件的产沙量占总产沙量的 78%左右,汛期(尤其是 6 月、7 月份)的水土保持工作尤为重要。6 月、7 月份降雨事件的土壤侵蚀模数与降雨特征拟合分析得到: $M=1.378EI_{60}$  以及  $M=0.346PI_{60}$ 。

**关键词:**侵蚀性降雨; 降雨特征; 土壤侵蚀模数; 黔西高原地区

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0039-05

## Characteristics of Erosive Rainfall Events in West Guizhou Plateau Area

GU Gingran<sup>1</sup>, ZHANG Xingqi<sup>1</sup>, GU Libin<sup>1</sup>, JU Xiang<sup>1</sup>, YANG Guangxi<sup>2</sup>, GU Zaike<sup>2</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Characteristics of erosive rainfall are closely related to studies on soil erosion. Based on field observations of rainfall data, runoff and sediment generation on runoff plots, the characteristics of erosive rainfall in west Guizhou plateau are analysed. The results showed that: (1) rainfall erosivity values( $R$ ) is the product of rainfall kinetic energy ( $E$ ) and the maximum 60 minute rainfall intensity ( $I_{60}$ ); (2) sediment yield by rainfall of which amount was greater than the moderate event, accounted for 99.5% of the total sediment, furthermore, 79.4% of the total sediment resulted from six heavy rainfall events, soil erosion modulus generated by heavy rainfall events are quantitatively expressed as  $M=1.319EI_{60}$  and  $M=0.328PI_{60}$ ; (3) rainfall events of which erosivity was greater than  $500 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$  produced 73.6% of the total sediment, soil erosion modulus resulted from rainfall events of which erosivity was greater than  $100 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{hm}^2)$ , are quantitatively expressed as  $M=1.269EI_{60}$  and  $M=0.324PI_{60}$ ; (4) rainfall events of which duration ranged from 1 to 6 hours occurred frequently, and produced most of sediment, sediment generated from June to July accounted for 78% of the total sediment, soil and water conservation is important in the flooding period (especially from June to July), soil erosion modulus resulted from rainfall events occurred in June and July are quantitatively expressed as  $M=1.378EI_{60}$  and  $M=0.346PI_{60}$ .

**Keywords:** erosive rainfall; characteristics of rainfall; soil erosion modulus; west Guizhou plateau area

侵蚀性降雨是能引起土壤水蚀的降雨事件<sup>[1]</sup>, 雨侵蚀力因子( $R$ )、土壤可蚀性因子、地形因子、地表  
Wschmeier 等<sup>[2]</sup>提出与土壤侵蚀量相关的因子有:降 覆盖因子和管理因子以及水土保持措施因子。侵蚀

收稿日期:2015-03-16

修回日期:2015-04-17

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41371045;KT201007);贵州省水利厅重点科研项目(KJZD200801;2006200);江苏高校优势学科建设  
工程项目

第一作者:顾璟冉(1989—),女,江苏无锡人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:15996375091@139.com

通信作者:张兴奇(1964—),男,贵州仁怀人,博士,副教授,主要从事水资源与水土保持研究。E-mail:zxqrh@nju.edu.cn

性降雨的特征直接影响降雨侵蚀力因子,与其它土壤侵蚀因子相互作用。已有学者对容易发生水蚀地区的侵蚀性降雨特点做了分析<sup>[3-6]</sup>。贵州喀斯特地貌发育,成土速度慢,土层浅薄,山高坡陡,是中国水蚀严重的地区之一<sup>[7]</sup>,严重的水土流失导致石漠化现象的产生,不仅在当地产生区域环境影响,而且对长江和珠江流域中下游地区产生跨区域的生态与环境影响。研究黔西高原的侵蚀性降雨对该地的水土流失研究具有重要作用。对该地侵蚀性降雨的研究有多种角度,包括侵蚀性降雨的标准的研究,坡面产沙量与侵蚀性降雨特征的定量关系研究,与坡面产沙量关系最密切的侵蚀性降雨特征值的比较研究等。顾礼彬等<sup>[8]</sup>发现坡面产沙量与降雨量( $P$ )存在指数关系;李瑞等<sup>[9]</sup>得到黔南州龙里县羊鸡冲小流域五种种植模式下,降雨量是研究侵蚀性降雨与土壤侵蚀关系的最重要的特征因子;黄玲玲等<sup>[10]</sup>通过 2006—2008 年的降雨资料等得出了西南岩溶地区极端暴雨对水土流失具有显著的作用,即极端暴雨的降雨特征是研究重点;戴海伦等<sup>[11]</sup>通过分析 1956—2000 年的降雨资料得出侵蚀性降雨的侵蚀力变化的时间特点,即湿季降雨事件的多年平均降雨侵蚀力占 57%。蒋荣等<sup>[12]</sup>研究了坡度、坡长因子变化下降雨特征因子的特点以及对坡面产流产沙的影响。本文基于野外径流小区观测试验,探讨侵蚀性降雨特征和不同侵蚀性降雨特征分类下降雨特征因子与坡面产沙量的定量关系,以期对黔西高原地区水土流失影响因子的研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贵州省毕节市鸭池镇石桥小流域位于滇东高原向黔中山区丘陵过渡的倾斜地带,为山区地形。属亚热带湿润季风气候,降水多集中于夏季,平均降水量在 1 100 mm 左右<sup>[13]</sup>。野外径流小区布设在石桥小流域,小流域内平均裸岩率达 30%,植被覆盖率低,是贵州省境内具有代表性的喀斯特石漠化地区。石桥小流域面积 8.19 km<sup>2</sup>,海拔 1 400~1 740 m,相对高差 340 m,碳酸盐类石灰岩广泛分布,流域内分布有大量坡耕地,坡面土壤厚度 0.2~0.5 m。

### 1.2 研究方法和数据来源

(1)小区设置。分别设置了坡度、坡长、农作物、水土保持措施和标准等类型小区,其中有两个标准小区布设为:裸土,坡度为 5°,投影坡长为 20 m,宽 5 m,水平面积为 100 m<sup>2</sup>,坡位为中坡,土壤类型为黄壤,土层厚度为 0.35 m,基岩为石灰岩。小区底部设置水泥制集流槽,并设有集流池和一级分流池,集流池采用九孔分流与一级分流池连接。本文的径流、泥沙数

据来自两个标准小区。

(2)数据来源。次降雨产流产沙结果来源于实地观测取样,通过试验获得数据,并计算得到径流深和产沙量。2012—2014 年的降雨过程由自记雨量计记录,由于采集设备故障等原因在对土壤侵蚀模数的定量计算时剔除 2014 年的 3 次次降雨。摘录整理了有径流、泥沙记录的 53 次次降雨过程中的降雨量( $P$ )、时段雨强( $I_5, I_{10}, I_{15}, I_{30}, I_{60}$ )。分析坡面产沙量与降雨特征的关系,利用 EXCEL 2007 和 SPSS 17.0 软件进行计算与回归分析。

降雨总动能( $E$ )和最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )由下式计算得到<sup>[2]</sup>:

$$E = \sum_{k=1}^n E_k \cdot P_k \quad (1)$$

$$E_k = 0.119 + 0.873 \lg I_k \quad (2)$$

式中: $E$ ——降雨总动能(MJ/hm<sup>2</sup>); $E_k$ —— $k$ 时段单位降雨动能[MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>)],令  $k=60$  min; $P_k$ —— $k$ 时段降雨量(mm); $I_k$ —— $k$ 时段降雨强度(mm/h)。

本文通过 SPSS 拟合分析确定不同侵蚀性降雨特征分类下的侵蚀性降雨特征值与土壤侵蚀量的定量关系,通过模型决定系数以及模型效率系数来检验拟合模型的准确度,其中模型决定系数由回归分析得到,Nash 和 Sutcliffe 提出的模型效率系数通过下式得到<sup>[14]</sup>:

$$E(\text{模型效率系数}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中: $\bar{O}$ ——观测值均值; $n$ ——观测事件数; $S_i$ ,  $O_i$ ——模拟值和观测值。 $E$ 值越接近 1 说明该模型的拟合程度越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 侵蚀性降雨特征

2.1.1 坡面产流产沙与降雨量和降雨强度的关系 产沙量与降雨量( $P$ )的相关系数为 0.684(表 1),坡面产沙量和降雨量的相关性达到了显著相关水平,而产沙量与径流深的相关系数为 0.726,径流深与降雨量的相关系数为 0.692(表 1)。除击溅侵蚀,片蚀和面蚀是坡面侵蚀的主要形式,降雨通过形成径流直接影响研究区坡面产沙,降雨量是影响研究区坡面产流的重要因子。

比较坡面产流量、产沙量与降雨量( $P$ )和各时段雨强(即  $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )复合因子的相关系数(表 2),表明坡面产流、产沙与  $PI_{60}$  呈显著相关关系,其相关系数最大,分别为 0.773 和 0.873,在分析土壤侵

蚀量与侵蚀性降雨特征的关系时,可采用该复合因子。

2.1.2 坡面产流产沙与降雨强度和降雨动能的关系  
径流深、产沙量与时段雨强(即  $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )的相关系数随着时段的延长而增大,但增幅微弱;坡面产流、产沙与  $I_{30}, I_{60}$  的相关系数相对较大,即  $I_{30}, I_{60}$  对坡面产流、产沙的影响较大,其中与  $I_{60}$  的相关性最明显,相关系数分别为 0.683 和 0.763。

研究区坡面产流、产沙与次降雨总动能( $E$ )以及最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )的相关系数(表 1)表明,

表 1 产流产沙与降雨特征的相关系数

参数	$P$	$I_5$	$I_{10}$	$I_{15}$	$I_{30}$	$I_{60}$	$E$	$E_{60}$
径流深	0.692**	0.475**	0.458**	0.5546**	0.627**	0.683**	0.504**	0.690**
产沙量	0.684**	0.568**	0.571**	0.590**	0.696**	0.763**	0.541**	0.778**

注:\*\*表示所有数据的两尾检验的结果相关性在 0.01 的水平上显著相关,下同。

表 2 产流产沙与降雨特征的相关系数 II

参数	$PI_5$	$PI_{10}$	$PI_{15}$	$PI_{30}$	$PI_{60}$	$EI_5$	$EI_{10}$	$EI_{15}$	$EI_{30}$	$EI_{60}$	$E_{60}I_5$	$E_{60}I_{10}$	$E_{60}I_{15}$	$E_{60}I_{30}$	$E_{60}I_{60}$
径流深	0.651**	0.647**	0.721**	0.749**	0.773**	0.622**	0.618**	0.682**	0.708**	0.733**	0.544**	0.547**	0.611**	0.639**	0.675**
产沙量	0.782**	0.788**	0.805**	0.859**	0.873**	0.784**	0.787**	0.789**	0.843**	0.858**	0.754**	0.762**	0.764**	0.827**	0.854**

2.2 降雨量分类下侵蚀性降雨特点

2.2.1 不同降雨量等级的降雨事件 53 次降雨事件的降雨量在 4.8~87 mm。按照气象学上的雨量标准进行分级(表 3),得出小雨( $\leq 10$  mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)和暴雨(50~100 mm)分别占 38%,30%,21%和 11%。

小雨占有降雨事件次数的 1/3,小雨事件产生的泥沙量约占泥沙总量的 0.5%,小雨事件平均雨量为 7.8 mm,其  $I_{60}$  的平均值为 4.9 mm/h,平均径流深为 0.8 mm。研究表明小雨事件下坡面泥沙的产生与时段雨量的集中程度有关,20 次小雨事件中 12 次是集中在 60 min 内,12 次中的 7 次事件的约 50%及以上的降雨量集中于 5 min,这 7 次降雨事件的产沙量占了小雨部分总产沙量的 48%。

中雨以上降雨事件按照  $I_{30}$  标准<sup>[12]</sup>,分为 3 种雨强类型,即低雨强型降雨( $I_{30} \leq 10$  mm/h)、中雨强型降雨( $10 < I_{30} < 30$  mm/h)和高雨强型降雨( $I_{30} \geq 30$

mm/h)。16 次中雨事件中 8 次(占 50%)是中雨强型降雨,剩下的 3 次是高雨强型降雨,5 次是小雨强型降雨,平均降雨量是 16.9 mm;11 次大雨事件中 5 次(占 45%)是高雨强型降雨,2 次是中雨强型降雨,4 次是低雨强型降雨,平均降雨量是 34.6 mm;6 次暴雨事件中 3 次(占 50%)是高雨强型降雨,剩下 3 次是中雨强型降雨( $I_{30}$  接近 30 mm/h),平均降雨量是 62.7 mm。

比较坡面产流量、产沙量与最大 60 min 降雨动能( $E_{60}$ )、降雨总动能( $E$ )分别和各时段雨强(即  $I_t, t=5, 10, 15, 30, 60$ )的复合因子的相关系数(表 2),表明坡面产流、产沙与  $EI_{60}, E_{60}I_{60}$  呈显著相关关系,其中坡面产沙与  $EI_{60}$  的相关系数最大,为 0.858。故本文以  $EI_{60}$  作为该研究区的降雨侵蚀力( $R$ )计算指标。

mm/h)。16 次中雨事件中 8 次(占 50%)是中雨强型降雨,剩下的 3 次是高雨强型降雨,5 次是小雨强型降雨,平均降雨量是 16.9 mm;11 次大雨事件中 5 次(占 45%)是高雨强型降雨,2 次是中雨强型降雨,4 次是低雨强型降雨,平均降雨量是 34.6 mm;6 次暴雨事件中 3 次(占 50%)是高雨强型降雨,剩下 3 次是中雨强型降雨( $I_{30}$  接近 30 mm/h),平均降雨量是 62.7 mm。

中雨以上降雨事件产生的泥沙量约是泥沙总量的 99.5%,黄土高原地区的降雨相关研究表明水土流失与该地区的暴雨降雨事件的发生密切相关<sup>[4]</sup>,本研究区 6 次暴雨事件产生的泥沙占了总的 79.4%,中高雨强型降雨是该部分泥沙产生的动力来源。暴雨事件的平均  $I_{60}$ 、平均降雨侵蚀力、平均径流深都是大雨事件的 2 倍左右。与其它等级降雨事件比较,其降雨量、平均  $I_{60}$ 、平均降雨侵蚀力、平均径流深以及平均产沙模数都明显较高。

表 3 不同降雨等级降雨特征及产流产沙特征

降雨量 级别/mm	次数	平均降 雨量/mm	$I_{60}/$ (mm · h <sup>-1</sup> )	$EI_{60}$ 平均降雨侵蚀力/ (MJ · mm · h <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )	平均径 流深/mm	平均产沙模数/ (t · km <sup>-2</sup> )	产沙量占总泥 沙量的比例/%
<10	20	7.8	4.9	8.43	0.8	1	0.5
10~25	16	16.9	10.2	57.31	2.1	17	4.7
25~50	11	34.6	20.1	190.50	6.2	79	15.4
50~100	6	62.7	31.3	455.01	13.7	743	79.4

2.2.2 不同降雨量等级降雨事件的土壤侵蚀模数 本文选取对坡面产沙影响较大等级的降雨事件进行土壤侵蚀模数计算,即降雨等级在 25~100 mm 的降雨事件。分析土壤侵蚀模数与  $EI_{60}, PI_{60}$  的拟合线性关

系,其拟合公式为:

$$M=1.319EI_{60} \quad R^2=0.794 \tag{4}$$

$$M=0.328PI_{60} \quad R^2=0.788 \tag{5}$$

式中: $M$ ——产沙模数(t/km<sup>2</sup>); $E$ ——降雨总动能

(MJ/hm<sup>2</sup>);  $P$ ——降雨量(mm);  $I_{60}$ ——最大 60min 雨强(mm/h)。

经过计算得到两个拟合方程的  $E$ (模型有效性系数)分别为 0.610, 0.607, 两个模型都能够在一定程度上定量表述研究区的土壤侵蚀。

2.3 降雨侵蚀力分类下侵蚀性降雨特点

2.3.1 不同降雨降雨侵蚀力等级的降雨事件 降雨侵蚀力是反映雨滴击溅和地表径流对土壤侵蚀的综合效应, 本文以 0~25, 25~50, 50~100, 100~500 和大于 500 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>) 5 个等级对研究区 53 次降雨事件对应的降雨侵蚀力值进行分类分析, 分析不同降雨侵蚀力等级下, 侵蚀性降雨的特征等(表 4)。

53 次侵蚀性降雨主要由低降雨侵蚀力型降雨构

成, 降雨侵蚀力小于 50 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>) 的次降雨次数占总降雨次数的 64.2%, 平均降雨侵蚀力为 13.6 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>), 平均产沙模数为 3 t/km<sup>2</sup>, 其泥沙量占总泥沙产量的 1.5%; 剩下 3 个等级的降雨事件的各降雨特征因子的数值逐级增长, 且增幅明显, 其中降雨侵蚀力大于 500 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>) 的等级增长最明显。按照  $I_{30}$  标准, 这 3 个等级的降雨事件多是中高雨强型降雨; 降雨侵蚀力在 50~500 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>) 的降雨事件的泥沙产量占总泥沙量的 24.9%; 降雨侵蚀力大于 500 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>) 的高降雨侵蚀力降雨事件有 4 次, 其平均  $I_{30}$ ,  $I_{60}$  都明显最高, 都是高雨强型降雨, 其泥沙产量占总泥沙量的 73.6%。以上分析表明, 高降雨侵蚀力的降雨事件是导致坡面产流产沙的主要驱动力。

表 4 不同降雨侵蚀力等级降雨特征及坡面产流产沙特征

侵蚀力等级/ (MJ·mm·h <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	次数	平均侵蚀力( $EI_{60}$ )/ (MJ·mm·h <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	降雨 量/mm	$I_{30}$ / (mm·h <sup>-1</sup> )	$I_{60}$ / (mm·h <sup>-1</sup> )	平均坡面产沙模数/ (t·km <sup>-2</sup> )	径流 深/mm	产沙量占总泥 沙量的比例/%
0~25	27	8.04	11.14	7.70	4.62	2	0.87	1
25~50	7	35.01	19.70	15.20	9.60	4	1.84	0.5
50~100	5	80.09	18.70	31.06	16.62	6	3.03	0.6
100~500	10	217.47	39.62	31.87	21.08	132	5.68	24.3
>500	4	718.48	63.6	45.98	48.34	999	17.91	73.6

2.3.2 不同降雨侵蚀性力等级降雨事件的土壤侵蚀模数 本文选取对坡面产沙影响较大等级的降雨事件进行土壤侵蚀模数计算, 即侵蚀力等级大于 100 MJ·mm/(h·hm<sup>2</sup>) 的降雨事件, 选取  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$  对土壤侵蚀模数进行数据拟合, 得到:

$M=1.269EI_{60} \quad R^2=0.765 \quad (6)$

$M=0.324PI_{60} \quad R^2=0.784 \quad (7)$

式中:  $M$ ——产沙模数(t/km<sup>2</sup>);  $E$ ——降雨总动能(MJ/hm<sup>2</sup>);  $P$ ——降雨量(mm);  $I_{60}$ ——最大 60 min 雨强(mm/h)。

经过计算得到两个拟合方程的  $E$ (模型有效性系数)分别为 0.568 和 0.573, 两个模型都能够在一定程度上定量表述研究区降雨事件的土壤侵蚀。

2.4 时间特征分类下侵蚀性降雨特征

2.4.1 降雨事件的降雨集中时间 由于产沙量与降雨历时相关性不高, 所以分析土壤侵蚀与降雨集中时间的关系(表 5)。按照降雨集中时间将降雨分成四个量级<sup>[15]</sup>, 从表 5 得到降雨集中时间大于 3 h 的降雨事件产生的泥沙量较多, 是总的泥沙的 88.5%, 降雨集中时间越长, 土壤发生侵蚀的概率越大。平均降雨量、 $I_{60}$  和平均降雨侵蚀力等都是随着降雨集中时间的增加而增大; 降雨集中时间小于 3 h 的降雨产生的泥沙量约占总泥沙总量的 11.5%; 60% 的降雨事件的降雨集中时间在 1~6 h, 其产沙量占总产沙量的 43%。降雨集中时间在 1~6 h 的降雨发生概率大, 泥沙侵蚀量大。雨量大、雨强大且降雨较集中的降雨事件对坡面产流、产沙有重要贡献。

表 5 降雨集中时间分类下的降雨特征及坡面产流产沙特征

降雨集中 时间/min	次数	平均次降 雨量/mm	平均 $I_{60}$ / (mm·h <sup>-1</sup> )	$EI_{60}$ 平均降雨侵蚀力/ (MJ·mm·h <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	平均径 流深/mm	平均产沙模数/ (Mt·km <sup>-2</sup> )	产沙量占总泥 沙量的比例/%
≤60	11	11.3	9.7	34.0	0.8	4	0.8
60~180	18	15.1	8.6	42.9	2.8	34	10.7
180~360	14	25.7	15.3	171.0	4.6	139	32.1
≥360	10	42.7	19.3	237.1	6.6	352	56.4

2.4.2 降雨事件的月变化特征 贵州地区汛期雨量集中在 5—8 月<sup>[13]</sup>, 53 次侵蚀性降雨集中在 4—9 月, 对月降雨特征及其土壤侵蚀特征做统计分析(表 6), 得到研究区 5—8 月的降雨次数占了总降雨事件的 86.8%, 平均降雨侵蚀力为 126 MJ·mm/(h·

hm<sup>2</sup>), 平均侵蚀模数为 130 t/km<sup>2</sup>, 平均径流深为 4.1 mm, 土壤侵蚀量占总侵蚀量的 99.3%, 与戴海伦等得出的湿季降雨侵蚀力较大结论相一致。

3 月、4 月份降雨次数少, 两个月份的平均降雨量为 14.2 mm, 按照平均降雨历时划分, 3 月、4 月份的

降雨属于中短类型,  $I_{60}$ 、径流深和降雨侵蚀力都较小,该时段属于旱季,降水少,土壤含水量低,土壤粘度不高,导致坡面产流产沙量较小;自 5 月进入汛期后,降雨逐渐增多。6 月份的降雨侵蚀力是所有月份中最大的,坡面侵蚀量受降雨侵蚀力和径流的泥沙搬运能力决定,从上文分析可以看到研究区的降雨侵蚀力比径流量对土壤侵蚀量的影响大。6 月份的降雨侵蚀力比较大,所以 6 月份的土壤侵蚀量比 5 月以及 8 月明显增多,占 31.5%。由于在 7 月份降雨事件的

侵蚀性降雨次数、平均降雨量和平均径流深达到最大值,平均降雨侵蚀力也仅稍低于 6 月,所以该月土壤侵蚀量最大,大约占总土壤侵蚀量的一半,但是由于存在部分侵蚀量小的降雨事件,所以其平均产沙模数并不是最大的;6 月、7 月份的土壤侵蚀量占总侵蚀量的 78%左右;8 月、9 月降雨次数逐渐减少、降雨强度和降雨侵蚀力等减弱,相应的坡面产流量和坡面产沙量也下降。以上分析表明,汛期(尤其是 6 月、7 月份)的水土保持工作尤为重要。

表 6 月降雨特征及产流产沙特征

月份	次数	平均次降雨量/mm	平均 $I_{60}$ /(mm · h <sup>-1</sup> )	/EI <sub>60</sub> 平均降雨侵蚀力/(MJ · mm · h <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )	平均径流深/mm	平均产沙模数/(t · km <sup>-2</sup> )	产沙量占总泥沙量的比例/%
3	2	12.6	5.5	7.4	0.4	4	0.2
4	3	15.2	3.2	3.0	0.6	2	0.1
5	12	20.8	8.0	76.5	0.4	33	7.0
6	8	23.5	19.6	176.5	1.6	221	31.5
7	15	28.6	15.8	167.9	7.3	201	46.5
8	11	18.5	12.9	87.3	5.5	73	14.3
9	2	20.9	8.8	39.8	1.2	12	0.4

2.4.3 月降雨特征分类下的土壤侵蚀模数 本文选取对坡面产沙影响较大月份的降雨事件进行土壤侵蚀模数计算,即 6—7 月份的降雨事件,选取  $EI_{60}$ ,  $PI_{60}$ 对土壤侵蚀模数进行数据拟合:

$$M=1.378EI_{60} \quad R^2=0.813 \tag{8}$$

$$M=0.346PI_{60} \quad R^2=0.809 \tag{9}$$

式中:  $M$ ——产沙模数(t/km<sup>2</sup>);  $E$ ——降雨总动能(MJ/hm<sup>2</sup>);  $P$ ——降雨量(mm);  $I_{60}$ ——最大 60 min 雨强(mm/h)。

经过计算得到两个拟合方程的  $E$ (模型有效性系数)分别为 0.756,0.753,两个模型都能够在一定程度上定量表述发生在 6—7 月的降雨事件的土壤侵蚀。

经过以上三种不同降雨特征分类得到的产沙模数与侵蚀性降雨特征关系的六个统计模型具有可比性,其相同参数的模型的系数相差很小,  $M$  与  $EI_{60}$ 之间的线性关系的系数大约是 1.3,  $M$  与  $PI_{60}$ 之间的线性关系的系数大约是 0.3。以不同降雨特征的分类计算土壤侵蚀模数,多面地表述了土壤侵蚀与侵蚀性降雨特征的关系。

3 结论

(1) 黔西高原地区坡面产沙与雨强(主要是  $I_{30}$ ,  $I_{60}$ )相关性强,与降雨量的相关性次之,  $E_{60}$ 单因子是影响研究区坡面产流、产沙的主要因子,坡面产流、产沙与  $EI_{60}$ ,  $E_{60}$   $I_{60}$ 呈显著相关关系,其中坡面产沙与  $EI_{60}$ 的相关系数最大,可用  $EI_{60}$ 作为降雨侵蚀力计算指标。

(2) 中雨以上降雨事件产生的泥沙量约是泥沙

总量的 99.5%,中高雨强型降雨是该部分泥沙产生的驱动力,暴雨事件的平均降雨侵蚀力、平均径流深以及平均产沙模数都明显较高,6 次暴雨事件产生的泥沙量占总泥沙量的 79.4%。对大雨等级以上降雨事件的土壤侵蚀模数与降雨特征进行定量分析,得到:  $M=1.319EI_{60}$ 以及  $M=0.328PI_{60}$ 。

(3) 降雨侵蚀力为 50~500 MJ · mm/(h · hm<sup>2</sup>)的降雨事件的土壤侵蚀量占总侵蚀量的 24.9%;降雨侵蚀力大于 500 MJ · mm/(h · hm<sup>2</sup>)的高降雨侵蚀力降雨事件仅有 4 次,都是高雨强型降雨,土壤侵蚀量占总侵蚀量的 73.6%,具有高降雨侵蚀力的降雨事件对坡面水土流失的贡献最大。降雨侵蚀力大于 100 MJ · mm/(h · hm<sup>2</sup>)等级的降雨事件的土壤侵蚀模数与降雨特征拟合分析得到:  $M=1.269EI_{60}$ 以及  $M=0.324PI_{60}$ 。

(4) 雨量大、雨强大且降雨时间集中的降雨事件对坡面产流、产沙有重要作用,降雨集中时间在 1~6 h 的降雨发生概率大,且土壤侵蚀量大。6 月、7 月份的土壤侵蚀量占总侵蚀量的 78%左右,汛期(尤其是 6、7 月份)的水土保持工作尤为重要。对 6 月、7 月份降雨事件的土壤侵蚀模数与降雨特征拟合分析得到:  $M=1.378EI_{60}$ 以及  $M=0.346PI_{60}$ 。

$M$  与  $EI_{60}$ 和  $PI_{60}$ 之间的线性关系的系数分别是 1.3 和 0.3 左右。基于不同降雨特征分类的土壤侵蚀模数计算,可以多角度地表述土壤侵蚀与侵蚀性降雨特征的关系。

管孔隙度分别较 CK 样地高 14.1% 和 2.4%, 因此, 两种复垦地土壤饱和贮水量和非毛管贮水量明显低于普通农地, 但毛管贮水量却高于普通农地。

(3) 复垦林地(SL)和复垦草地(GL)1 m 土层土壤平均含水量和总贮水量较普通林草地(CK)分别高 7.8%, 12.3% 和 23.5%, 34.9%, 但在不同土层其差异有所不同, 两种复垦地与普通林草地土壤含水量和贮水量在 60—100 cm 土层差异最大。

#### 参考文献:

- [1] 韦朝阳, 张立城, 何书金, 等. 我国煤矿区生态环境现状及综合对策[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 300-307.
- [2] 苏光全, 何书金, 郭焕成. 矿区废弃土地资源适宜性评价[J]. 地理科学进展, 1998, 17(4): 39-46.
- [3] 王孝本, 林玉利. 煤矿矸石山生态系统的演替[J]. 国土与自然资源研究, 2000(1): 44-45.
- [4] 胡振琪, 张光灿, 魏忠义, 等. 煤矸石山的植物种群生长及其对土壤理化特性的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 492-499.
- [5] 高宝山, 高国雄, 朱首军. 煤矸山沙障小气候效应调查研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 1999, 27(S1): 159-163.
- [6] 胡振琪. 半干旱地区煤矸石山绿化技术研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 322-327.
- [7] 彭少麟. 恢复生态学与植被重建[J]. 生态科学, 1996, 15(2): 26-31.
- [8] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. 中国土地科学, 2000, 14(1): 6-11.
- [9] 郭小娟, 贾萍, 刘霞. 煤矸石山环境问题及其治理的研究[J]. 山西农业大学学报, 1998, 18(2): 139-141.
- [10] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 37(1): 8-12.
- [11] 武冬梅, 张建红, 吕珊兰, 等. 山西矿区矸石山复垦种植施肥措施[J]. 自然资源学报, 1998, 13(4): 333-336.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62-126.
- [13] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 等. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080-2087.
- [14] 鲁向晖, 隋艳艳, 王飞, 等. 秸秆覆盖对旱地玉米休闲田土壤水分状况影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 156-159.
- [15] 刘贤赵, 宋孝玉. 陕西渭北旱源苹果种植分区土壤水分特征研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 320-326.
- [16] 焦晓燕, 王立革, 卢朝东, 等. 采煤塌陷地复垦方式对土壤理化特性影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 123-125.

(上接第 43 页)

#### 参考文献:

- [1] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 7-11.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rain-fall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [R]. USDA Agricultural Handbook, 1965.
- [3] 马良, 左长清, 邱国玉. 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 74-79.
- [4] 张岩, 朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(11): 99-103.
- [5] 王改玲, 王青梓, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 1-5.
- [6] 左长清, 马良. 天然降雨对红壤坡地侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 1-4.
- [7] 周赟, 胡顺, 毕节市喀斯特石漠化的成因及防治措施[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2007, 24(4): 421-425.
- [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(1): 23-28.
- [9] 李瑞, 李勇, 刘云芳. 贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 7-11.
- [10] 黄玲玲, 陈喜, 张志才. 西南岩溶地区小流域坡地土壤侵蚀影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 132-134.
- [11] 戴海伦, 苑爽, 张科利, 等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 37-41.
- [12] 蒋荣. 地形因子对贵州喀斯特地区坡面土壤侵蚀的影响[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [13] 罗宁, 许炳南, 文继芬, 等. 贵州大气降水的时空分布规律研究[J]. 贵州气象, 2006, 30(4): 3-7.
- [14] 周淑梅. 黄土高原丘陵沟壑区不同尺度小流域次降雨水文过程模型研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996.