

太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响

高磊^{1,2}, 饶良懿^{1,2}, 崔飞波³, 李志斌³, 杜柳红³, 刘利峰³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 山西省长治市水土保持试验站, 山西 长治 046000)

摘要: 通过对山西省长治市白马小流域的1个标准小区和4个植物措施小区近5 a(2006—2010年)的降雨和径流泥沙观测, 研究太行山土石山区的降雨特征以及不同类型降雨对典型植物措施小区径流泥沙的影响。结果表明: (1) 太行山土石山区侵蚀性降雨主要集中于5—8月份, 7—8月份侵蚀性降雨次数占侵蚀性降雨总次数的54.55%, 侵蚀性降雨量占侵蚀性降雨总量的61.19%, 故该时期是防治水土流失的关键时期; (2) 径流量 R 与降雨量 P 、最大30 min降雨强度 I_{30} 、降雨量和最大30 min降雨强度的乘积 PI_{30} 呈正相关且在0.01水平上显著; 侵蚀产沙量 E 与最大30 min降雨强度 I_{30} 、径流量 R 、降雨量和最大30 min降雨强度的乘积 PI_{30} 之间呈正相关且在0.01水平上显著; (3) 在不同类型降雨条件下, 4种典型植物措施的减流效益在17.18%—91.86%之间, 差异明显; 在B类型降雨条件下各措施的减流效益最低, 分别是乔木43.38%、灌木24.44%、人工种草26.59%、自然荒坡17.18%, 在E类型降雨条件下各措施的减流效益最大, 分别是乔木89.29%、灌木91.86%、人工种草75.56%、自然荒坡66.22%; (4) 在不同类型降雨条件下, 减沙效益: 乔木林>灌木林>人工种草>自然荒坡; 降雨量最大的A类型降雨和最大30 min降雨强度最大的B类型降雨对植物措施减沙效益影响显著。研究表明, 在该地区不同类型降雨条件下4种植物措施的减流减沙效益明显, 能够有效防治水土流失。

关键词: 典型植物措施; 减流减沙效益; 坡面; 北方土石山区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0005-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.002

Effect of Erosive Rainfall on Runoff and Sediment Yield of Typical Plant Measures in Rocky Mountain Areas of Taihang

GAO Lei^{1,2}, RAO Liangyi^{1,2}, CUI Feibo³, LI Zhibin³, DU Liuhong³, LIU lifeng³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Administration, Beijing 100083;

3. Experimental Station of Soil and Water Conservation of Changzhi City, Shanxi Province, Changzhi, Shanxi 046000)

Abstract: Rainfall characteristics and the effects of different types of rainfall on runoff and sediment of typical plant measures in rocky mountain areas of Taihang were studied based on the observation of rainfall, runoff and sediment of a standard runoff plots and four plant measures runoff plots nearly five years (2006—2010) in Baima small watershed Changzhi city, Shanxi Province. The results showed that: (1) Erosive rainfall mainly concentrated in May to August in rocky mountain areas of Taihang; The number of erosive rainfall accounted for 54.55% of the total number of erosive rainfall in July and August, the precipitation of erosive rainfall accounted for 61.19% of the total precipitation of erosive rainfall, so the period was the key to the prevention and control of soil and water loss; (2) Runoff (R) and precipitation (P), maximum 30 min rainfall intensity (I_{30}), the product of precipitation and maximum 30 min rainfall intensity (PI_{30}) had positive correlation and significant at the 0.01 level; Erosion (E) and maximum 30 min rainfall intensity (I_{30}), runoff (R), the product of precipitation and maximum 30 min rainfall intensity (PI_{30}) had positive correlation and significant at the 0.01 level. (3) Under the condition of different types of rainfall, the runoff reduction benefits of 4 kinds of typical plant measures between 17.18%—91.86%, difference was obvious; Under the condition of B type rainfall, the runoff reduction benefits of 4 kinds of typical plant measures was the lowest, arbor was 43.38%, shrubs was 24.44%, artificial grass was 26.59%, natural slope was 17.18%; Under the

收稿日期: 2016-08-18

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045)

第一作者: 高磊(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持、生态工程研究。E-mail: 530638343@qq.com

通信作者: 饶良懿(1976—), 女, 博士, 教授, 主要从事水土保持、生态工程研究。E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

condition of E type rainfall, the runoff reduction benefits of 4 kinds of typical plant measures was the largest, arbor was 89.29%, shrubs was 91.86%, artificial grass was 75.56%, natural slope was 66.22%; (4) Under the condition of different types of rainfall, the sediment reduction benefits were arbor > shrub > artificial grass > natural slope; The influence of the largest precipitation of A type rainfall and the biggest maximum 30 min rainfall intensity of B type rainfall on the sediment reduction benefits of plant measures was remarkable. In conclusion, under the condition of different types of rainfall, the runoff and sediment reduction benefits of 4 kinds of plant measures was obvious; Plant measures could effectively control soil and water loss in the region.

Keywords: typical plant measures; runoff and sediment reduction benefits; slope; rocky mountain areas of Taihang

北方土石山区是我国水土流失的重要类型区之一^[1-2],该区包括太行山、燕山、沂蒙山及胶东低山丘陵以及淮河以北的黄淮海平原地区,总面积约 80 万 km²^[3],水土流失以水力侵蚀为主,在低山丘陵区分布最广,总面积约 12.8 万 km²,其中太行山地区是典型的北方土石山区,是华北重要供水水源地,该区人口众多,生态环境脆弱,水土流失严重^[1]。植物措施是该地区防治水土流失的主要措施,该地区的水土流失防治对区域生态系统修复及生态环境改善至关重要。

水土流失是造成太行山土石山区土地退化及生态环境恶化的重要原因,对该区生态安全构成威胁。降雨是影响水土流失发生发展的直接动力^[4],其时间和空间尺度上的变化严重影响坡面径流和土壤侵蚀^[5-6];降雨量、降雨强度以及降雨历时等降雨特征对坡面产流产沙有重要影响^[7-8];除降雨以外,植被覆盖、土壤特性、坡度坡长、整地方式等^[9-11]也是影响坡面水土流失的重要因素。例如樊登星等^[12]就北京山区灌草坡面水土流失的影响因素进行了分析,认为径流量、植被覆盖、最大 30 min 降雨强度是影响侵蚀量的主要因子;刘霞等^[13]对鲁中山区不同水土保持措施对土壤侵蚀的影响进行了研究,结果发现防治土壤侵蚀作用最大的是残疏林补植,其他的依次为经济林退耕、荒坡造林和有林地封禁措施;李子君等^[14]分析了冀北土石山区坡面尺度植被覆盖情况、降雨因素、坡面地形以及水土保持工程措施等对产流的影响。由于各地区的地理环境和土地利用状况各异,自然降雨的特征也存在差异,因此不同地区水土流失规律不尽相同。目前关于北方土石山区坡面尺度土壤侵蚀规律的研究主要集中于北京、河北北部、山东等山地丘陵区,而在西南部区域的山西省太行山地区的研究成果较少,因此有必要对其进行专门的研究。

本研究采用山西省长治市白马小流域 2006—2010 年连续 5 a 的降雨及坡面径流小区观测资料,运用统计学方法,分析北方土石山区西部太行山土石山区的降雨特征因子与坡面产流、产沙的关系,并对 2006—2010 年近 5 a 间的 55 场侵蚀性降雨进行分类,分析不同类型降雨对典型植物措施的减流减沙效

益的影响,从而为太行山土石山区水土流失治理和区域生态安全建设提供科学依据。

1 研究区概况

白马小流域面积 4.47 km²,位于山西省平顺县青羊镇白马村,属于海河流域浊漳河水系,为典型北方土石山区,东北距平顺县城 7.0 km,地理位置为 113°20′30″—113°22′11″E, 36°07′19″—36°08′52″N,海拔 1 303.3~1 522.5 m,暖温带大陆性气候,土壤侵蚀类型以水蚀为主。多年平均气温 9.1 ℃,≥10 ℃的积温 3 177.5 ℃,无霜期 125 d,多年平均降水量 628.9 mm,主要集中在 6—9 月份,且年际、年内变化较大,分配不均匀,多年平均蒸发量 1 631.6 mm,气候干旱。土壤类型为石灰性褐土,是该地区最普遍的土壤类型,土层厚度 0—50 cm,抗蚀性差,水土流失严重。流域内植被主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、山杏(*Prunus armeniaca*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、铁杆蒿(*Heteropappus altaicus*)等。

2 试验设计与方法

2.1 试验设计

根据平顺县白马小流域水土流失综合观测站的地形条件和当地植被类型,在试验区内共设置 10 个坡面径流试验小区。工程建设于 2005 年,修建有 10 个长 20 m,宽 5 m,面积 100 m² 的统一规格的不同水土保持措施监测小区,其中包括 1 个标准小区,4 个植物措施和 5 个植物+工程措施小区,并于 2006 年实施观测。本研究选取标准小区和 4 个植物措施小区进行研究,各小区的坡度为 18°20′,坡向 210°,土壤类型主要是石灰性褐土,土层厚度 50 cm;5 个小区的土地利用情况分别是裸地(标准小区)、自然坡(白羊草、紫蒿、黄栌)、人工种草(白羊草)、灌木(黄刺梅)、乔木(山桃);自然坡是自然荒草地坡面;人工种草采用条播,行距是 0.5 m;灌木小区采用鱼鳞坑整地,植株密度为 2.5 株/m²;乔木小区采用鱼鳞坑整地,行距为 2.5 m×2.5 m,呈“品”字形排列,植株密度为

0.16 株/m²;所涉及的植被均为该地区常见物种,可代表该地区的水土保持植物措施情况,各小区覆盖度分别是 0,50%,40%,75%,40%。坡面小区在植被生长期每 15 d 进行一次乔灌木覆盖度调查,通过修枝、除草等措施控制乔木郁闭度和灌木盖度。径流小区外围砌有 10 cm 厚的水泥板,以防止外界径流流入,小区两侧各留有 0.3 m 宽的隔离带,上方设置排水沟,下方出口与分水箱连接,分水箱与集水箱连接,以收集降雨产生的径流和泥沙。

2.2 观测方法

降雨数据观测:采用虹吸式自记雨量计(记录纸分度范围为 0.1~10 mm;记录误差为±0.05 mm)观测降雨,每天 8:00 更换记录纸,根据降雨过程线分析降雨量、降雨历时和降雨强度;

径流量观测:每次自然降雨后,立即采用水位计(精度为≥±0.5%)测定分水箱中水深,计算地表径流总量、径流深及径流系数;

产沙量观测:充分搅匀分水箱中的泥水,分层取 2 000 ml 泥水混合样带回实验室,将样品过滤后烘干,用千分之一电子天平称其重量,以计算含沙量。

2.3 数据来源和数据处理

收集整理 2006—2010 年汛期(4—10 月)的降雨数据,对年际间降雨特征进行统计分析,本研究把能够引发坡面小区水土流失的降雨均视为侵蚀性降雨,并利用 K—均值分类法,根据典型降雨因子对其进行分类,同时进行方差分析判断差异是否显著;收集平顺县白马小流域综合观测站各坡面径流小区的产流产沙数据;运用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 统计软

件进行数据的整理以及统计分析,应用 Pearson 相关系数在 0.01 的显著水平上进行显著性检验,分析总结坡面土壤侵蚀产沙规律。

3 结果与分析

3.1 白马小流域侵蚀性降雨分布特征

白马小流域年内降雨主要发生于 4—10 月份,表 1 是该地区 2006—2010 年各月降雨情况统计,期间共有 55 场侵蚀性降雨,占降雨总场次的 17.74%,侵蚀性降雨总量为 1 519.6 mm,占全部降雨总量的 54.42%。由表 1 可知,白马小流域降雨在 4—8 月份的降雨量逐渐增加,9—10 月份降雨量逐渐减少,降雨主要集中于 5—8 月份,且 7、8 月份达到全年最高,其中 8 月份降雨量最大,7 月份的降雨次数最多,各月份降雨量差异明显。8 月份的月降雨量总和、月降雨量平均值、侵蚀性降雨总和、月侵蚀性降雨平均值分别是 884.3,176.86,610.6,122.12 mm,月侵蚀性降雨次数占月降雨次数比例为 31.25%,月侵蚀性降雨量占月降雨量的比例为 69.05%,均为全年最高;7 月份的情况次之。7—8 月份侵蚀性降雨次数达 30 次,占侵蚀性降雨总次数的 54.55%,侵蚀性降雨量为 929.9 mm,占侵蚀性降雨总量的 61.19%,由此可知,该地区 7—8 月份发生侵蚀性降雨的可能性极大,极易发生洪涝灾害,故该时期是防治水土流失的关键时期。相对而言,4 月和 10 月的降雨强度小,降雨量、降雨次数、侵蚀性降雨量、侵蚀性降雨次数均明显偏少,因此发生水土流失的可能性不大,但由于该时期的降雨较少,水分主要聚集于土壤表层,极易蒸发,所以该时期降雨对土壤含水量影响不大。

表 1 2006—2010 年 4—10 月份白马小流域降雨分布特征

月份 (月)	各月降雨量 总和/mm	月降雨 次数	月平均 降雨量/mm	月侵蚀性 降雨次数	月侵蚀性降雨次数占 月降雨次数比例/%	侵蚀性降雨量 总和/mm	月侵蚀性 降雨量/mm	侵蚀性降雨量占 月降雨量的比例/%
4	114.0	28	22.80	1	3.57	18.8	2.01	15.88
5	479.2	38	95.84	10	26.32	299.7	59.94	62.54
6	302.9	40	60.58	7	17.50	145.3	29.06	47.97
7	527.0	66	105.40	10	15.15	319.3	63.86	60.59
8	884.3	64	176.86	20	31.25	610.6	122.12	69.05
9	356.5	48	71.30	6	12.50	112.0	22.40	31.42
10	128.7	26	25.74	1	3.85	14.6	2.92	11.34

3.2 降雨因子与坡面产流产沙的相关性分析

降雨是导致坡面产流产沙的主要因素,研究发现侵蚀性降雨的降雨量、降雨历时、最大 30 min 降雨强度、平均降雨强度等对坡面径流泥沙的产生有重要影响^[4,12]。本文选取标准径流小区(裸地)的侵蚀性降雨(55 场)和坡面径流泥沙数据(2006—2010 年),对太行山土石山区的降雨因子(侵蚀性降雨量 P、降雨历时 t、最大 30 min 降雨强度 I₃₀、平均降雨强度 I_A)对坡面径流泥沙的影响进行相关性分析,结果见表 2。

由表 2 可知,降雨因子中,径流量 R 与降雨量 P、最大 30 min 降雨强度 I₃₀、降雨量和最大 30 min 降雨强度的乘积 PI₃₀呈正相关,相关性极显著,与降雨历时 t 的相关性不显著;平均降雨强度 I_A 与径流量 R 呈一定的正相关,但相关性不显著。这表明,在侵蚀性降雨的过程中,此地区坡面径流的产生主要与降雨量 P 和最大 30 min 降雨强度 I₃₀ 等因素有关,降雨量 P 的大小决定着坡面径流量的大小,而最大 30 min 降雨强度 I₃₀ 主要决定地表产流方式是超渗产流还是蓄满产流。

表 2 降雨因子与坡面产流产沙的相关性分析

降雨因子	P	t	I_{30}	I_A	PI_{30}	R
R	0.518**	-0.115	0.563**	0.233	0.632**	—
E	0.109	-0.173	0.464**	0.252	0.379**	0.396**

注:样本数 $n=55$; ** 表示在 0.01 水平上显著。

与坡面径流量 R 相对应,坡面产沙量 E 与最大 30 min 降雨强度 I_{30} 、径流量 R 、降雨量和最大 30 min 降雨强度的乘积 PI_{30} 之间呈正相关,相关性极显著,与降雨历时 t 的相关性不显著;降雨量 P 和平均降雨强度 I_A 与坡面侵蚀产沙量 E 之间呈一定的正相关,但相关性不显著。这表明,在此地区坡面侵蚀产沙量 E 主要与最大 30 min 降雨强度 I_{30} 、坡面产流量 R 等因素有关,这与樊登星等^[12]、左长清等^[15]的研究结果一致。降雨只有在使坡面形成有效的径流时,才能使坡面侵蚀产沙出现,降雨量直接影响径流量的多少,而与坡面侵蚀产生关系不大,这一结果与卫伟等^[4]的

表 3 侵蚀性降雨的 K -均值聚类分析结果

降雨类型	样本数	P 中心值/ mm	降雨量 变幅/mm	I_{30} 中心值/ (mm · h ⁻¹)	I_{30} 变幅/ (mm · h ⁻¹)	降雨量 总和/mm
A	2	88.95	73.7~104.2	23.15	15.33~31.02	177.9
B	2	62.65	44.3~81.0	40.00	48.05~70.05	125.3
C	18	36.56	27.0~52.7	13.59	4.13~30.22	658.1
D	3	34.13	29.5~38.9	42.46	38.65~47.20	102.4
E	30	15.19	5.7~25.7	9.49	1.50~24.86	455.9

表 4 为 5 种不同类型降雨的降雨量、最大 30 min 降雨强度的方差矩阵。由表 4 可知,5 种不同类型降雨的降雨量、最大 30 min 降雨强度的差异性在 0.05 的水平上显著。根据表 3 可知不同类型降雨特点:A 雨型是暴雨量、中雨强,降雨量在 73.7~104.2 mm 之间, I_{30} 在 15.33~31.02 mm/h 之间;B 雨型是大雨量、大雨强,降雨量在 44.3~81.0 mm 之间, I_{30} 在 48.05~70.05 mm/h 之间;C 雨型是大雨量、小雨强,降雨量在 27.0~52.7

研究一致,坡面径流量越大,坡面侵蚀产沙量越大;最大 30 min 降雨强度 I_{30} 决定降雨侵蚀力的大小,也是径流产生的主要因素, I_{30} 能够直接影响地表击溅过程从而影响坡面侵蚀的发生。因此,采取相应措施对降雨进行再分配减少雨滴对坡面的直接击溅,同时减小坡面径流量、增加入渗将对水土流失的防治起到关键性作用。

3.3 侵蚀性降雨类型的分类

根据上述相关性分析发现,在该地区降雨量 P 、最大 30 min 降雨强度 I_{30} 是影响坡面产流产沙的重要因素,但由于天然降雨的降雨量 P 、最大 30 min 降雨强度 I_{30} 等存在差异^[16-17],导致不同类型侵蚀性降雨的产流、产沙间的关系并不确定。本文将 55 场侵蚀性降雨为统计样本,以降雨量 P 、最大 30 min 降雨强度 I_{30} 为分类因子,进行 K -均值聚类分析,分为 A、B、C、D、E 5 类(表 3)。

mm 之间, I_{30} 在 4.13~30.22 mm/h 之间;D 雨型是中雨量、中雨强,降雨量在 29.5~38.9 mm 之间, I_{30} 在 38.62~47.20 mm/h 之间;E 雨型是小雨量、小雨强,降雨量在 5.7~25.7 mm 之间, I_{30} 在 1.50~24.86 mm/h 之间;2006—2010 年间在该地区 5 种类型降雨发生的概率分别是 3.64%,3.64%,32.73%,5.45%,54.54%,可以发现 E 雨型发生的频次最多,是该地区的主要降雨类型,且各类型降雨之间差异性显著。

表 4 5 种类型降雨的降雨量、最大 30 min 降雨强度方差矩阵

降雨类型	降雨量 P				最大 30 min 降雨强度 I_{30}			
	A	B	C	D	A	B	C	D
B	-26.30*				-26.85*			
C	-52.39*	36.09*			-9.56	-26.41*		
D	-54.82*	-28.52*	-2.43		-19.32*	-2.46	28.88*	
E	-73.75*	-47.45*	-21.36*	18.94*	-13.66*	-30.51*	-4.09	-32.98*

注: * 表示在 0.05 水平差异显著。

3.4 不同类型降雨下 4 种植物措施减流效应分析

水土保持植物措施通过减弱降雨强度,防止雨滴击溅地表,改变地表微地形,拦截坡面径流和降低流速,增加入渗,从而达到减少坡面径流的目的。由图 1 可知,在不同类型降雨下,4 种典型植物措施坡面径流量远远小于标准小区(裸地),减流效益明显,且乔木、灌木、人工种草、自然荒坡的减流效益在 17.18%~91.86% 之间,差异显著。在 A 类型降雨(暴雨量、中雨强)条件下,灌木、人工种草、自然荒坡

这 3 种植物措施的减流效益均较小分别是 46.23%,39.59%,24.47%;乔木(侧柏)措施的减流效益最高为 87.96%,可见降雨量较大的 A 类型降雨对灌木、人工种草、自然荒坡的减流效益影响明显;相比于 A 类型降雨,在 B 类型降雨(大雨量、大雨强)条件下,4 种植物措施的减流效益均有不同程度的减小,分别是乔木 43.38%、灌木 24.44%、人工种草 26.59%、自然荒坡 17.18%,与 A 类型降雨比较发现,B 类型降雨量较小,但最大 30 min 降雨强度较大,对坡面影响明显,从而 4 种植物

措施坡面产流增加,减流效益最低;B、C 类型的降雨量相近,但降雨强度差异明显。由图 1 可以发现,相比 B 类型降雨,在 C 类型降雨(大雨量、小雨强)条件下各措施的减流效益均有所增加,增加幅度分别是:乔木增加 98.36%,灌木增加 183.14%,人工种草增加 19.63%,自然荒坡增加 25.20%,可知在降雨量为大雨量时,最大 30 min 降雨强度 I_{30} 对人工种草和自然荒坡的减流效益影响不显著,而对乔木和灌木措施的减流效益影响明显;与 C 类型降雨相比,D 类型降雨(中雨量、中雨强)的降雨量偏小,但最大 30 min 降雨强度较大,总体来看,灌木措施的减流效益在 C、D 两种类型降雨条件下总体持平,变化不明显,乔木措施的减流效益有小幅降低,而自然荒坡和人工种草的减流效益有所增加;E 类型降雨(小雨量、小雨强)的降雨量和降雨强度明显小于 A、B、C、D 各类型降雨,4 种植物措施的减流效益达到最大值,分别是乔木 89.29%、灌木 91.86%、人工种草 75.56%、自然荒坡 66.22%。

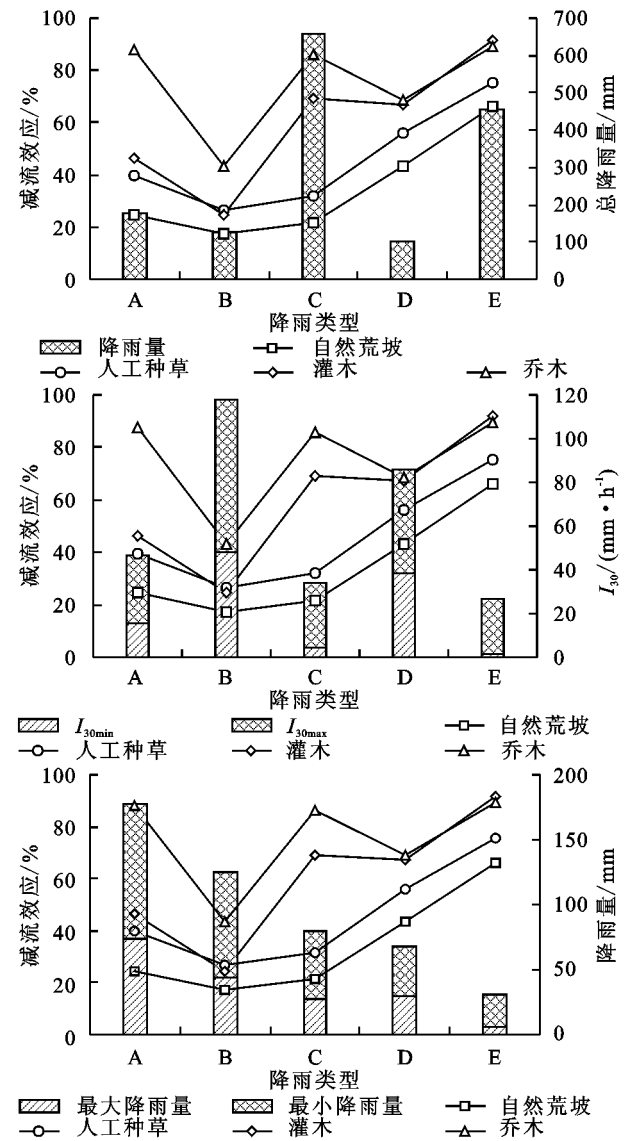


图 1 4 种典型植物措施减流效应随降雨类型的变化

总体来说,在不同类型降雨条件下,4 种植物措施坡面径流小区的减流效益明显,且波动较大;5 种植物措施对植物措施坡面径流影响明显,其中在 B 类型降雨(大雨量、大雨强)下 4 种植物措施的减流效益最低,分别是乔木 43.38%、灌木 24.44%、人工种草 26.59%、自然荒坡 17.18%;A 类型降雨(暴雨量、中雨强)次之,在 C(大雨量、小雨强)、D(中雨量、中雨强)类型降雨条件下减流效益增加明显,在 E(小雨量、小雨强)类型降雨条件下各措施的减流效益达到最大值,分别是乔木 89.29%、灌木 91.86%、人工种草 75.56%、自然荒坡 66.22%;在不同植物措施坡面,大雨量、最大 30 min 降雨强度较大的降雨是影响坡面径流的主要因素。

3.5 不同类型降雨下 4 种植物措施减沙效应分析

水土保持植物措施能够拦截降雨,减小雨滴动能,减弱雨滴溅蚀强度,同时增加入渗,减少径流,降低水流流速,从而能够减弱径流的挟沙能力,对坡面侵蚀产生影响,达到减沙的目的^[18-19]。

由图 2 可知,在不同降雨类型下,4 种典型植物措施坡面产沙量明显小于标准小区(裸地),减沙效益明显,且乔木、灌木、人工种草、自然荒坡的减沙效益在 8.57%~92.03%之间,差异显著。在降雨量最大的 A 类型降雨(73.7~104.2 mm)条件下,自然荒坡的减沙效益最低为 8.57%,人工种草和灌木的减沙效益次之分别为 24.24%,57.69%,乔木的减沙效益最大为 85.19%;可见,降雨量较大的 A 类型降雨对自然荒坡和人工草的减沙效益影响显著。在最大 30 min 降雨强度较大的 B 类型降雨(48.05~70.05 mm/h)条件下,自然荒坡和人工种草坡面的减沙效益有所增加,分别是 26.26%,34.53%,而灌木和乔木的减沙效益均有不同程度的降低,分别是 45.16%,69.80%,可见最大 30 min 降雨强度 I_{30} 对自然荒坡和人工种草坡面产沙影响不显著,而对灌木和乔木坡面的产沙影响显著。C、D、E 3 种类型的降雨量和最大 30 min 降雨强度均较小,降雨量:C(36.56 mm)>D(34.13 mm)>E(15.19 mm),最大 30 min 降雨强度 I_{30} :D(42.46 mm/h)>C(13.59 mm/h)>E(9.49 mm/h),灌木和乔木植物措施坡面的减沙效益在 C、D、E 3 种类型降雨类型下均有不同程度的增加,而自然荒坡和人工种草坡面径流小区在 C 类型(大雨量、小雨强)降雨条件下减沙效益最大,分别是 39.03%,43.68%,分析发现虽然 D、E 降雨类型在降雨量和降雨强度方面均较 C 类型较小,但 D、E 降雨类型多发生于 4—6 月份,而此时自然荒坡和人工种草坡面的植被处于萌发生长状态,减沙作用不能够充分发挥,导致减沙效益降低。

总之,在不同降雨类型条件下,4 种植物措施的减沙

效益明显,降雨量最大的 A 类型降雨和最大 30 min 降雨强度 I_{30} 最大的 B 类型降雨对坡面产沙量的影响最大;乔木林地的减沙效益最优,灌木林地次之,再次是人工种草和自然荒坡;草本植物措施在植物萌发生长阶段减沙效益不能够充分发挥,因此应将乔木、灌木与草本植被结合布设,以充分发挥保土保水效益。

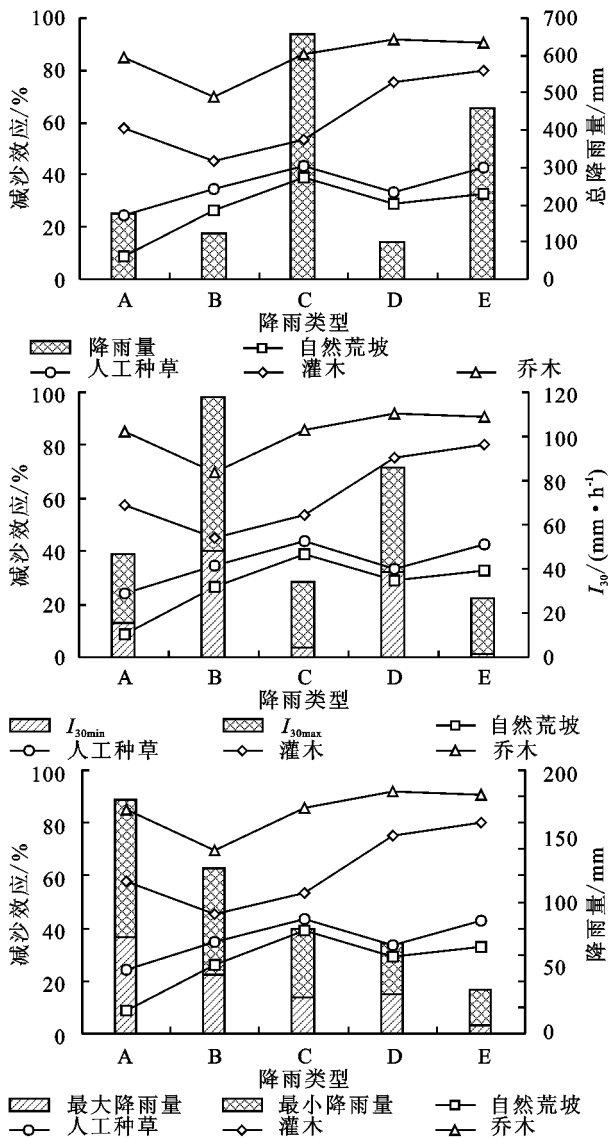


图 2 4 种典型植物措施减沙效应随降雨类型的变化

4 结论

(1)太行山土石山区降雨主要集中于 5—8 月份,7 月份的侵蚀性降雨次数最多,8 月份侵蚀性降雨量最大;7,8 月份侵蚀性降雨次数占侵蚀性降雨总次数的 54.55%,侵蚀性降雨量占侵蚀性降雨总量的 61.19%,7—8 月份极易发生侵蚀性降雨,引发洪涝灾害,故这一时期是防治水土流失的关键时期。

(2)径流量 R 与降雨量 P 、最大 30 min 降雨强度 I_{30} 、降雨量和最大 30 min 降雨强度的乘积 PI_{30} 呈正相关且在 0.01 水平上显著,平均降雨强度 I_A 与径流量 R 之间的相关性不显著;侵蚀产沙量 E 与最大 30

min 降雨强度 I_{30} 、径流量 R 、降雨量和最大 30 min 降雨强度的乘积 PI_{30} 之间呈正相关且在 0.01 水平上显著,降雨量 P 和平均降雨强度 I_A 与侵蚀产沙量 E 之间相关性不显著;降雨历时 t 与径流量 R 和侵蚀产沙量 E 的相关性不显著。

(3)太行山土石山区侵蚀性降雨可划分为 5 类, A 雨型(暴雨量、中雨强)、B 雨型(大雨量、大雨强)、C 雨型(大雨量、小雨强)、D 雨型(中雨量、中雨强)、E 雨型(小雨量、小雨强),E 雨型是该地区的主要侵蚀性降雨类型。

(4)在不同类型降雨条件下,4 种典型植物措施坡面的径流量远远小于标准小区(裸地);5 种类型降雨对植物措施坡面径流影响明显,其中在 B 类型降雨下 4 种植物措施的减流效益最低,A 类型降雨次之,在 C、D 类型降雨条件下减流效益增加明显,在 E 类型降雨条件下各措施的减流效益达到最大值;在植物措施坡面,大雨量、最大 30 min 降雨强度较大的降雨是影响坡面径流的主要因素。

(5)在不同类型降雨条件下,4 种典型植物措施坡面的产沙量明显小于标准小区(裸地),减沙效益明显,乔木林地的减沙效益最优,灌木林地次之,再次是人工种草和自然荒坡;降雨量最大的 A 类型降雨和最大 30 min 降雨强度最大的 B 类型降雨对植物措施减沙效益影响显著;草本植物措施在植物萌发生长阶段减沙效益不能够充分发挥,因此应将乔木、灌木与草本植被结合布设,以充分发挥保土保水效益。

综上,在不同类型降雨条件下,植物措施的减流减沙作用明显;不同植物措施和不同类型降雨对坡面产流产沙的影响显著。在雨季应注意防范大雨量、大雨强的降雨事件引发的水土流失;而且每年的 7,8 月份是水土保持工作的关键时期,要加强防范工作。

参考文献:

- [1] 李秀彬,马志尊,姚孝友,等.北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1): 9-15.
- [2] 王忠科,和继军,蔡强国.北方土石山区小流域综合治理措施及效应研究[J].水土保持通报,2008,28(4): 11-16.
- [3] 景可,王万忠,郑粉莉.中国土壤侵蚀与环境[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J].生态学报,2006,26(11): 3847-3853.
- [5] 李海防,卫伟,邓居礼,等.关川河流域 1995—2010 年降雨特征及其水土流失效应[J].水土保持学报,2013,33(6): 84-93.
- [6] 梁娟珠.不同植被措施下红壤坡面径流变化特征[J].水土保持通报,2015,35(6): 159-163.

- [7] Bi H X, Liu B, Wu J, et al. Effects of precipitation and land use on runoff during the past 50 years in a typical watershed in the loess plateau, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(3): 352-364.
- [8] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85-90.
- [9] 姜娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 36-41.
- [10] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 400-409.
- [11] 闫胜军, 郭青霞, 闫瑞, 等. 不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 45-49.
- [12] 樊登星, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 24-28.
- [13] 刘霞, 姚孝友, 袁利, 等. 鲁中山区不同水土保持生态修复措施对土壤侵蚀的影响[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(5): 27-31.
- [14] 李子君, 于兴修. 冀北土石山区坡面尺度径流特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 109-116.
- [15] 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.
- [16] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karts slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90(3): 53-62.
- [17] 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(12): 1-8.
- [18] Liu Z, Notaro M, Gallimore R. Indirect vegetation-soil moisture feedback with application to Holocene North Africa climate [J]. Global Change Biology, 2010, 16(6): 1733-1743.
- [19] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- (上接第4页)
- [4] Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion [J]. Catena, 2006, 67(1): 68-78.
- [5] 和继军, 蔡强国, 刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1263-1268.
- [6] 付兴涛, 张丽萍. 坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 474-483.
- [7] 于国强, 李占斌, 张霞, 等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 10-14.
- [8] 程圣东, 李鹏, 李聪, 等. 降雨-植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 230-241.
- [9] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 39-47.
- [10] Li Z B, Li P, Han J G, et al. Sediment flow behavior in agro-watersheds of the purple soil region in China under different storm types and spatial scales[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 285-291.
- [11] 何杨洋, 王晓燕, 段淑怀. 密云水库上游流域次降雨坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 134-141.
- [12] De Lima J L M P, Singh V P. Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2003, 28(6/7): 277-282.
- [13] 温磊磊, 郑粉莉, 杨青森, 等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1084-1091.
- [14] Ran Q H, Su D Y, Li P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion[J]. Journal of Hydrology, 2012, 424/425(6): 99-111.
- [15] Singh V P. Effect of the duration and direction of storm movement on infiltrating planar flow with full areal coverage[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(7): 1479-1511.
- [16] De Lima J L M P, Singh V P, De Lima M I P. The influence of storm movement on water erosion: storm direction and velocity effects[J]. Catena, 2003, 52(1): 39-56.
- [17] 冉启华, 梁宁, 钱群, 等. 移动降雨时空分布对坡面产流的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(5): 636-641.
- [18] Nunes J P, Lima J L M P D, Singh V P, et al. Numerical modeling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(3/4): 709-720.
- [19] 汤珊珊, 李占斌, 李聪, 等. 模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 139-146.