

黄河源区退化草地水土流失规律

李国荣^{1,2}, 李希来³, 陈文婷^{1,2}, 朱海丽^{1,2}, 李进芳¹, 祁军¹, 王洪维¹

(1. 青海大学地质工程系, 西宁 810016; 2. 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 西宁 810016; 3. 青海大学农牧学院, 西宁 810016)

摘要: 为了阐明高寒草甸退化草地水土流失的规律, 以黄河源区河南县退化草地为研究对象, 采用野外现场原位人工模拟降雨试验方法, 对不同降雨条件下土壤径流量、冲刷量随坡度、退化程度、降雨历时和降雨强度的变化规律进行了试验和分析。结果表明: 天然退化草甸的含水量及密度均随坡度和退化程度呈递减趋势($P < 0.05$); 同等条件下径流量与植被覆盖度呈幂函数负相关关系($y = 140.69x^{-0.4667}$, $R^2 = 0.9882$), 与降雨强度呈指数函数正相关关系($y = 40.35e^{0.0252x}$, $R^2 = 0.9708$); 泥沙量与植被覆盖度呈指数函数的负相关关系($y = 4294.3e^{-0.0418x}$, $R^2 = 0.9907$), 与降雨强度呈指数函数正相关关系($y = 62.657e^{0.0201x}$, $R^2 = 0.9688$); 坡度为 30° 的小区径流量较 10° 和 20° 的坡度小区分别增加了3.6倍和1.7倍, 泥沙量分别增加了16倍和1.4倍, 表明径流量、泥沙量随坡度的增加而急剧增大; 植被覆盖度40%以下的区域其径流和泥沙含量变化幅度较大; 降雨开始30 min内的地表径流量相对稳定, 降雨时间30 min后地表径流量开始缓慢上升, 坡面泥沙流失量主要集中在降雨后的5~15 min内, 而降雨55~60 min后泥沙量急剧降低, 因此试验认为降雨历时1 h为土壤颗粒流失的敏感期; 天然边坡径流产生后坡面出现汇流冲蚀现象, 是退化草地水土流失加剧的重要原因。

关键词: 黄河源区; 退化草地; 水土流失; 人工模拟降雨; 冲刷量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0051-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.009

Experimental Study on Soil Erosion Rule of Degraded Grassland in Source Area of the Yellow River

LI Guorong^{1,2}, LI Xilai³, CHEN Wenting^{1,2}, ZHU Haili^{1,2}, LI Jinfang¹, QI Jun¹, WANG Hongwei¹

(1. Geological Engineering Department of Qinghai University, Xining 810016;

2. Key Lab of Cenozoic Resource & Env. in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016;

3. College of Agriculture and Animal Husbandry of Qinghai University, Xining 810016)

Abstract: In order to clarify soil erosion of degraded alpine meadow, the degraded grassland of Henan County in source area of the Yellow River was chosen as research object. Field rainfall simulation experiment in situ was adopted to analyzed the changes of soil runoff and erosion quantity with soil slope, degradation degree, rainfall duration and rainfall intensity under different rainfall conditions. The results showed that: Natural water content and density of degraded meadow soil declined with the slope and the degradation degree($P < 0.05$). Under the same conditions, the runoff and sediment yields had negative correlations with vegetation coverage, showing power($y = 140.69x^{-0.4667}$, $R^2 = 0.9882$) and exponential functions ($y = 4294.3e^{-0.0418x}$, $R^2 = 0.9907$) respectively. Both runoff and sediment yields had positive correlations with rainfall intensity, the correlation functions were $y = 40.35e^{0.0252x}$ ($R^2 = 0.9708$) and $y = 62.657e^{0.0201x}$ ($R^2 = 0.9688$) respectively. The plot runoff of 30° slope increased by 3.6 times and 1.7 times respectively than 10° and 20° slope, and sediments also increased by 16 times and 1.4 times respectively. These showed that the runoff and sediment yields increased sharply with the increase of slope. The variations of runoff and sediment concentrations were large under the vegetation coverage of less than 40%. Surface slope runoff began to rise slowly after 30 min of rainfall, and the slope sediment loss mainly concentrated in 5 ~ 15 min after rainfall, and the sediment yield was sharply reduced after 55 ~ 60 min of rainfall. Thus, it could be concluded that rainfall duration of

收稿日期: 2017-03-28

资助项目: 青海省科技厅项目(2016-ZJ-728); 国家自然科学基金项目(41662023, 41762023); 国家国际科技合作专项项目(2015DFG31870); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R62); 青海大学中青年科研基金项目(2015-QGY-10)

第一作者: 李国荣(1980—), 男, 青海贵德人, 博士研究生, 副教授, 主要从事生态环境保护及地质灾害防治教学与研究。E-mail: qdliguorong@163.com

通信作者: 李希来(1964—), 男, 河南孟津人, 博士生导师, 教授, 主要从事高原生态修复与环境模拟研究。E-mail: xilai-li@163.com

one hour was the sensitive period of soil particle erosion. The confluence scouring of hillslope after natural slope runoff was the important reason of aggravate soil erosion in degraded grassland.

Keywords: source area of the Yellow River; degraded grassland; water and soil erosion; artificial rainfall simulation; erosion quantity

黄河源区地处青藏高原腹地,是我国重要的水源涵养区^[1]。该地区广泛分布着占据青藏高原绝大部分面积的高寒草甸,是黄河源地区最重要的覆被类型,约占源区面积的 80% 左右^[2],其环境的变化影响到整个流域的生态安全和社会经济的可持续发展^[3]。由于该区域独特的地理位置及生态环境特点,在全球气候变化和人类活动的综合影响下,黄河源区的高寒草地发生了不同程度的退化^[4-5],中度以上的退化草地面积占可利用草地面积的 50%~60%,并有逐年加快退化的趋势,现已是青藏高原生态系统最为特殊和脆弱的地区之一^[6]。诸多研究学者认为,草地退化后土壤侵蚀是该地区水土流失加剧、草地进一步恶化的一个重要因素^[7-8],修复草地资源、保护生态环境已成为该地区亟待解决的问题之一^[9]。

有关降雨侵蚀规律方面的研究,已有资料表明约 60% 的降雨径流和 90% 的土壤流失均发生在降雨集中期^[10],不同植被类型的边坡降雨产流产沙特征也不同,且植被对坡面径流的减少主要体现在冠层和根系^[11]。诸多学者认为降雨径流量的变化会改变产沙过程以及坡面侵蚀量的空间分布^[12],降雨产沙量与植被覆盖度和坡度有关^[13],即坡度越大时产生地表径流和土壤流失量越高^[14-16],而李洪丽等^[17]则认为随着坡度的增加,坡面侵蚀产沙量变化复杂,12°~15°存在试验条件下的临界坡度。也有诸多学者认为降雨径流量、泥沙量的变化与降雨时间和降雨强度的变化有关,如张军等^[18]研究认为坡面产流产沙时间随着降雨强度的增加而提前,且降雨强度越大、降雨历时越短,产流产沙曲线越陡峭。李小华等^[19]也认为降雨强度和产流量、产沙量之间的相关性极显著,并指出短降雨历时的产流量变化较长降雨历时的小,降雨历时和产流量、产沙量之间呈正相关。目前诸多学者开展的相关研究主要在黄土区或其他区域^[20-21],而有关高寒地区退化草地在降雨条件下水土流失特征方面的原位试验及其颗粒运移规律等需要进一步深入研究。本研究以黄河源区高寒草甸退化草地为研究对象,量化分析雨水冲刷对不同坡度退化草地的侵蚀作用,为黄河源区高寒草甸退化草地的植被恢复和区域生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省黄南州河南县,属黄河源高

寒草甸区,地理位置为东经 101°47′、北纬 34°44′,区内海拔约 3 600 m。年均气温在(-1.3)~1.6℃,年降水量 597.1~615.5 mm^[22]。该地区每年 11 月至次年 4 月为寒冷、干燥、多大风天气,最大风速达到 23.7 m/s。该地区地势复杂,气候恶劣,在鼠害、水蚀、风蚀等因素影响下原生草甸出现植被退化现象,尤其是每年的 6—9 月降雨比较集中,从而加剧了退化草地的水土流失现象,给区域生态环境和畜牧业发展带来重要影响^[22]。

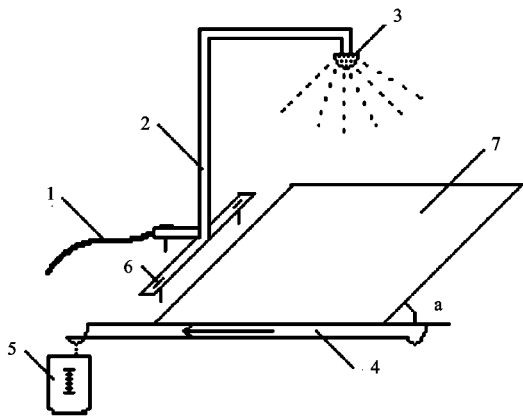
1.2 试验设计与方法

在研究区选择相同植被覆盖度、不同坡度的退化草地样方,样方规格设定为 2 m×2 m,其中退化草地的坡度设为 10°,20°,30°共 3 种坡度类型(坡度用地质罗盘测定)。经调查,因野外草场不存在完全没有植被的区域,而未退化区很难产生水土流失,因此在试验设计中每种坡度的覆盖度范围控制在 10%~90%,即每增加 10% 视为不同的测试处理。由于野外草地很少有完全对应的覆盖度,故在控制不同的覆盖度时在研究区范围内经过多次查找和坡度、覆盖度的测量,使其尽量接近测试处理的要求。样地的选择主要考虑自然退化状态下没有鼠洞或明显秃斑且坡面相对平整的区域。

测试时间设定在 2016 年 7—8 月降雨比较集中的时期,每次试验的 3 种坡度、3 种退化类型草地各重复 3 次;根据当地年集中降雨量、降雨强度等实际情况,试验中的降雨强度设定为 10~60 mm/h(降雨强度每变化 10 mm/h 作为不同的处理),降雨历时均设为 1 h。因降雨试验中的开挖、取样等对草地的破坏较大,且试验小区划分较多,完成所有对比试验的工作量巨大,为了说明退化草地在不同条件下的变化规律,有关径流量和泥沙量随降雨时间、降雨强度变化规律试验等只在降雨强度 30 mm/h 或覆盖度 50%、坡度 20°的小区进行。

为了避免取样对模拟降雨数据的影响,每种处理均选择覆盖度大致相同的 2 块样方,第 1 块样方主要用于制取降雨前的原位环刀样和铝盒样(重复 5 次),第 2 块样方主要用于模拟降雨试验及降雨结束后的原状样制取。降雨前后的环刀样和铝盒样均在小区内随机制取,样品经密封后带回实验室进行测试和分析。试验开始前首先按植被覆盖度和坡度选定试验小区,并在开展降雨试验的样方左右和上边缘分别插入 PVC 挡板进行封

堵,避免样方内的泥沙外流或外围的雨水倒灌,PVC 板的总高度为 20 cm,其插入地下深度为 10 cm。其次,样方下边缘开挖出 20 cm 深的垂直剖面,然后将“U”形导水槽的其中一边切入剖面的上边缘(确保不漏水),为确保水槽中的水体只流向一端,设置“U”形水槽时使其略倾斜,较低的一端下面放置烧杯,便于收集径流和泥沙。为避免雨滴直接落入导水槽而影响径流量的测试结果,降雨前用塑料布沿小区下边缘遮住“U”形导水槽。待布设完径流泥沙收集装置后及时开展模拟降雨试验。野外原位模拟降雨试验采用自行研发的人工模拟降雨装置,该装置主要由实心伞形喷头、抽水泵、降雨强度调节器、导水槽、烧杯等组成,其特征是喷头为直径 3 cm 的半球形喷头,球面均匀分布间距 3 mm、孔径 1 mm 的出水小孔,喷头与小区中心的垂直距离为 2 m,向下喷水时降水有效直径为 2.5 m,模拟降雨精度为±0.5 mm/min,调节器可控制降雨强度 0~60 mm/h,径流和被冲刷运移的泥沙通过导水槽和烧杯收集。上述试验装置的工作原理为:将抽水泵、输水管和降雨装置连接好,将抽水泵的入水管伸入河流水面以下,并在进水口罩上过滤网(防止河流泥沙进入抽水管),然后启动抽水泵,使抽水泵抽取的水通过喷头向地面均匀喷水,从水落到地面开始计时,收集径流泥沙量。试验前先将降雨装置的支架固定在试验小区外围,待调节好降雨强度并达到稳定后,将喷头延伸到小区上方开始试验。野外降雨试验装置及测试原理如图 1 所示。



1 为输水管;2 为支撑管;3 为喷头;4 为导流槽;5 为烧杯;6 为地锚;7 为试验小区;a 为坡度。

图 1 野外降雨试验装置及测试原理示意

考虑到草地退化区域在降雨初期的冲刷量较大,故在降雨开始的前 5 min 内,每分钟收集并测试地表径流量(含泥沙),5 min 后每隔 5 min 收集径流泥沙 1 次,将其装入容器瓶中,贴标签带回实验室,并采用离心机将单位时间内被冲刷的泥沙进行分离,统计分析不同坡度、不同退化区在单位时间和单位面积内的径流量与泥沙量。

2 结果与分析

2.1 降雨对退化草地根—土复合体含水量及密度的影响

由表 1 可知,同一时期的同等气候条件下,天然退化草甸的含水量及密度均随坡度和植被覆盖度呈递减趋势($P<0.05$)。土层中的根系密度随植被覆盖度的减小而急剧降低,表层土壤抗侵蚀能力降低,降雨时坡面极易产生径流,这也是退化草地边坡产生水土流失现象的重要因素之一。

表 1 降雨前后退化草地土壤平均含水量及密度

坡度/ (°)	覆盖度/ %	含水量/%		密度/(g·cm ⁻³)	
		雨前	雨后	雨前	雨后
10	20±1.43	26.60±1.36	29.80±4.73	1.487±0.48	1.721±0.55
	50±2.76	29.25±2.27	41.95±4.27	1.541±0.35	1.756±0.26
	80±3.36	29.73±2.34	44.60±3.83	1.922±0.23	1.880±0.34
20	20±2.28	20.95±1.54	27.90±4.68	1.557±0.31	1.786±0.97
	50±2.54	23.65±2.16	35.92±4.75	1.589±0.43	1.855±0.84
	80±3.16	28.60±2.08	38.90±3.62	1.849±0.52	1.879±0.62
30	20±2.78	20.20±1.23	24.50±4.74	1.499±0.25	1.377±0.73
	50±2.96	20.40±1.62	26.85±4.69	1.532±0.36	1.609±0.65
	80±3.27	23.05±2.25	39.65±3.38	1.703±0.22	1.684±0.58

2.2 径流量、冲刷量与退化程度的关系

为了说明单位时间、单位面积内退化草地降雨径流量、冲刷量与草地退化程度的关系,试验中以降雨强度 30 mm/h 为条件,分析了坡度为 20°的不同植被覆盖度草地中降雨侵蚀特征。结果表明,降雨开始 5 min 后开始产生径流和泥沙运移现象,径流量、泥沙冲刷量均随植被覆盖度的增加而降低,且径流量与植被覆盖度之间呈幂函数关系($y=140.69x^{-0.4667}$, $R^2=0.9882$),土壤侵蚀泥沙量随植被覆盖度呈指数函数关系($y=4294.3e^{-0.0418x}$, $R^2=0.9907$)。由图 2、图 3 可知,植被覆盖在 40% 以下时,地表径流量和泥沙量均随覆盖度的增加而递减,且其递减幅度较大,而覆盖度大于 40% 时径流量和泥沙量的变化幅度相对缓慢,出现这一现象的主要原因是植被叶面对雨滴起截留缓冲作用以及根系的固土护坡作用,使降雨和径流的侵蚀强度削弱,进而减少草地土壤的流失,起到保护土壤表层的作用^[23-24]。

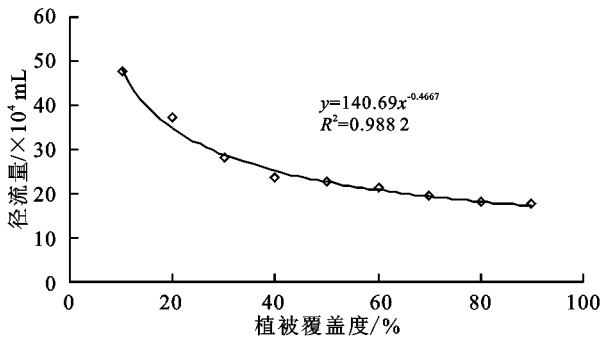


图 2 研究区植被覆盖度与径流量的关系

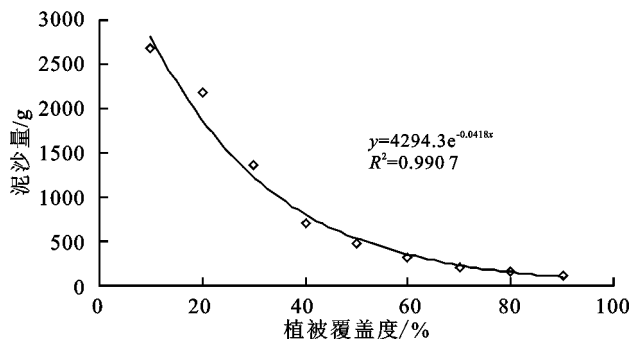


图 3 研究区植被覆盖度与泥沙量的关系

2.3 径流量、冲刷量与坡度的关系

为了对比分析相同覆盖度、不同坡度间径流量与冲刷量差异,将降雨强度 30 mm/h、植被覆盖度为 50% 作为试验条件进行了降雨侵蚀试验。由图 4、图 5 可知,径流量随坡度变化呈正相关,即坡度越大,径流量和泥沙含量也越大;30°边坡径流量分别较 10°和 20°边坡增加了 3.6 倍和 1.7 倍,被冲刷的泥沙量分别增加了 16 倍和 1.4 倍。这一方面表明坡度越大,水力坡降越大,降到地面的雨水顺坡流动较快,入渗较慢,地表径流更明显;另一方面反映了径流的快速流动增强了对坡面土壤的冲刷和切割强度,迫使土壤颗粒脱离根—土层而随径流迅速向下流动,从而加剧了水土流失现象^[25]。

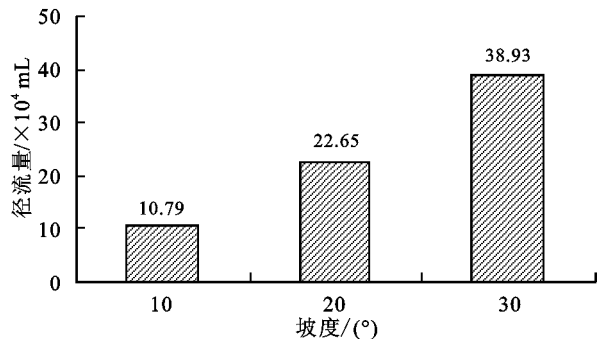


图 4 研究区径流量与坡度间的关系

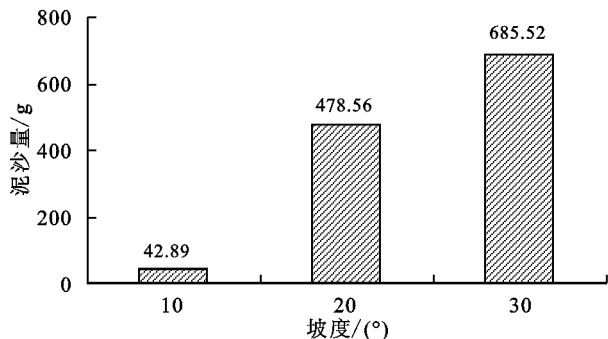


图 5 研究区泥沙量与坡度间的关系

2.4 径流量、冲刷量与降雨时间的关系

由图 6 可知,以降雨强度 30 mm/h、坡度为 20°、覆盖度 50% 为条件开展原位降雨冲刷试验后得出,径流量随着降雨时间的增加呈缓慢上升趋势。高寒草甸覆盖度为 20% 的区域,大部分坡面处于裸露状

态,因此从降雨开始 5 min 后产生了地表径流,降雨开始至 30 min 内,地表径流量相对稳定,这既体现出植物对雨水的截流缓冲作用,也说明雨水不断渗入土壤层中,从而抑制径流量的增加;降雨时间 30 min 后,地表径流量开始缓慢上升。分析认为,在植被有限的茎叶截留作用下,随着土壤层中雨水的不断入渗,使表层土壤逐渐达到饱和状态,雨水入渗速度明显降低,导致大量水分顺坡面流动,从而持续增加了地表径流量。

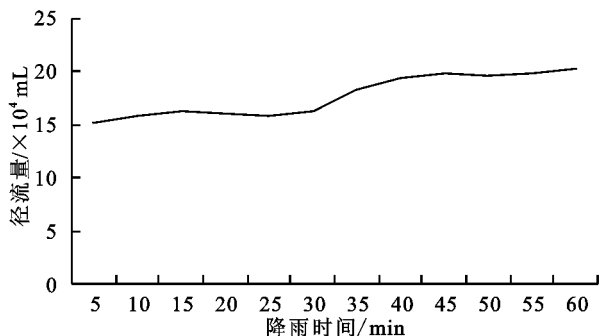


图 6 径流量随降雨时间的变化曲线

由图 7 可知,泥沙量随着降雨时间的增加而不断减少,土壤颗粒的运移伴随着径流同时产生,且在坡面径流一开始时雨水冲刷产生的泥沙量最大。从图中可以看出,降雨时间在 5~15 min 内,坡面被冲刷运移的泥沙量较大,且随降雨时间急剧减小,主要原因是受风蚀、冻融或生物等其他因素的影响,降雨初期土壤坡面土层较为松散,土壤抗冲刷能力较弱,土壤颗粒就随径流迅速流失^[26]。降雨持续至 15 min 后泥沙量趋于稳定,降雨持续至 55~60 min 后泥沙量急剧降低。根据地表侵蚀和植物根—土相互作用特征,径流对地面的切割力影响局部泥沙的运移,而径流持续到一定时间时,坡面体现出根系的固土作用,根土层具有抑制土壤的侵蚀作用^[27-28],因此泥沙量急剧减小。

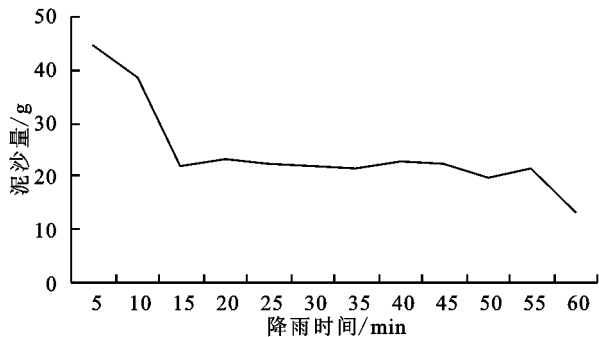


图 7 泥沙量随降雨时间的变化曲线

2.5 径流量、冲刷量与降雨强度的关系

为了说明径流量、冲刷量与降雨强度的关系,试验中选择坡度为 20°、覆盖度 50% 的 6 个重复样地,分别将降雨强度设定为 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm/h,降雨历时均

设为 60 min,重点分析了土壤流失量随降雨强度的变化规律。由图 8、图 9 可知,径流量、泥沙量与降雨强度均呈指数函数的正相关关系,其中径流量与降雨强度的相关关系为 $y=40.35e^{0.0252x}$, $R^2=0.9708$,泥沙量与降雨强度的相关关系为 $y=62.657e^{0.0201x}$, $R^2=0.9688$,即随着降雨强度增加,径流量和土壤冲刷量也不断增加。现场试验发现,降雨强度越大,表层松散颗粒流失的速度越快;野外坡面并非十分平整,因此随着径流量的增加,坡面局部范围内有径流汇集和冲蚀现象,坡面出现侵蚀细沟,土层破坏较严重,这也是降雨强度增加后土壤流失量急剧增加的主要原因。

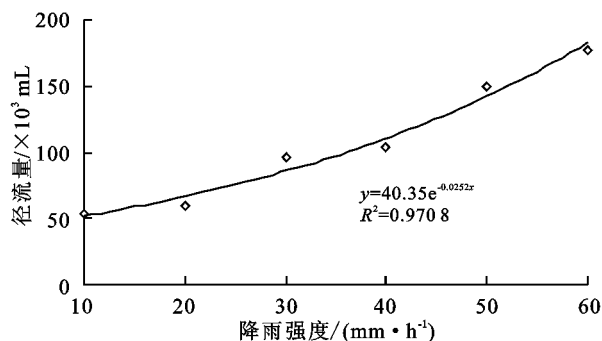


图 8 径流量与降雨强度间的关系

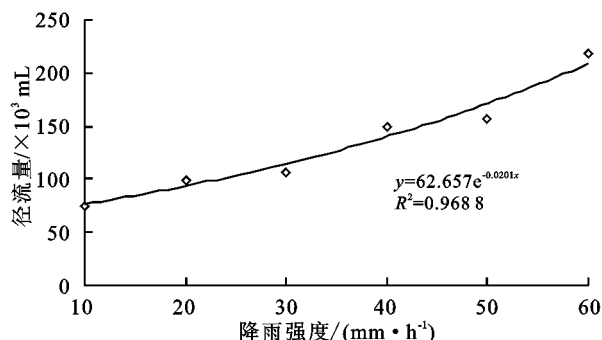


图 9 泥沙量与降雨强度间的关系

3 结论

(1)天然退化草甸的含水量及密度均随坡度和覆盖度的增加呈递减趋势;同等降雨和坡度条件下降雨开始 5 min 后均产生径流和泥沙运移现象,径流量、泥沙量随植被覆盖度分别呈幂函数和指数函数的反比例关系,且植被覆盖度在 40% 以下时径流和泥沙含量的变化幅度较大。

(2)径流量与坡度成正相关,且同等覆盖度和降雨强度下,坡度为 30° 的小区径流量较 10° 和 20° 的分别增加了 3.6 倍和 1.7 倍,泥沙量分别增加了 16 倍和 1.4 倍,反映出随着坡度的增加,水土流失灾害进一步加剧。

(3)降雨开始 30 min 内的地表径流量相对稳定,而降雨历时 30 min 后,地表径流量开始缓慢上升;坡面泥沙最大侵蚀量主要集中在降雨开始后的 5~15 min 内,降雨 55~60 min 后泥沙量急剧降低,因此可

将降雨历时 1 h 作为土壤颗粒流失的敏感期。

(4)径流量、冲刷量与降雨强度均呈指数函数的正相关关系,且随着径流量的增加,坡面局部范围内出现径流汇集和冲蚀现象,坡面出现侵蚀细沟,土层遭到集中冲刷破坏,这是土壤流失加剧的重要原因。

参考文献:

- [1] 胡光印,董治宝,逯军峰,等. 黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1079-1086.
- [2] 张德铨,刘林山,摆万奇,等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14.
- [3] 魏强,王芳,陈文业,等. 黄河上游玛曲不同退化程度高寒草地土壤物理特性研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 16-21.
- [4] 易湘生,李国胜,尹衍雨. 黄河源区草地退化对土壤持水性影响的初步研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1708-1719.
- [5] Brierly G, Li X L. Editorial: Geomorphology and environmental management of the Yellow River source zone[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4): 628-631.
- [6] 赵新全,周华坤. 三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(6): 471-476.
- [7] Adugna A, Abegaz A, Cerdà A. Soil erosion assessment and control in Northeast Wollega, Ethiopia[J]. Solid Earth Discussions, 2015, 7(4): 3511-3540.
- [8] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,等. 中国生态退化的主要类型、特征及分布[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 14-20.
- [9] 张瑞强,高天明,刘铁军. 希拉穆仁修复退化草地水土流失水平观测研究[J]. 草业科学, 2010, 27(3): 21-25.
- [10] Villatoro M, Bissonnais Y L, Moussa R, et al. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523(4): 409-426.
- [11] 柳逸月,彭焕华,孟文平,等. 不同放牧情景下黑河上游亚高山草甸人工降雨截留特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 801-806.
- [12] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 775-796.
- [13] Chau N L, Chu L M. Fern cover and the importance of plant traits in reducing erosion on steep soil slopes[J]. Catena, 2017, 151(4): 98-106.
- [14] Kateb H, Zhang H, Mosandl R. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shanxi Province, China[J]. Catena, 2013, 105(5): 1-10.
- [15] 刘小平,任树梅,杨培岭. 不同盖度草地水土流失分析[J]. 草原与草坪, 2013, 33(5): 27-32.