

西部黄土丘陵区不同草地土壤侵蚀对侵蚀性降雨的响应

邵臻¹, 张富¹, 陈瑾², 张佰林²

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省定西市水土保持科学研究所, 甘肃 定西 743000)

摘要: [目的] 研究西部黄土丘陵区人工和天然草地对不同强度侵蚀性降雨的响应, 为该区植被建设和水土流失防治提供指导。[方法] 利用甘肃省定西市安家沟径流场 2007—2015 年的观测数据, 分析侵蚀性降雨因素对坡度为 20° 的人工草地和天然草地土壤侵蚀的影响。[结果] 西部黄土丘陵区的侵蚀性降雨分布在 5—9 月, 其中 7—8 月的侵蚀性雨量较大, 其侵蚀量占年均侵蚀的 70% 以上。两种不同类型的草地侵蚀量均与 PI_{10} 相关性最好。该区域侵蚀性降雨主要是中雨和大雨, 造成的草地侵蚀量占年均侵蚀的 86%。中、高雨强型降雨的侵蚀量分别占人工、天然草地总量的 90.8% 和 91.2%, 其侵蚀量与 PI_{10} , PI_{30} 呈较好的幂函数关系。大于 300 MJ·mm/(hm²·h) 的高侵蚀力型降雨引起的侵蚀量最大, 分别占人工、天然草地总侵蚀量的 32.3% 和 33.4%; 50~100 MJ·mm/(hm²·h) 的中侵蚀力型降雨次数最多, 而引起人工、天然草地的侵蚀占相应总量的 26.0% 和 29.1%。[结论] 人工草地 (盖度 75%~82%) 和天然草地 (盖度 > 80%) 的侵蚀性降雨量标准分别为 11.3 和 11.9 mm, 最大 I_{10} 标准分别为 10.4 和 11.7 mm/h。天然草地比人工草地具有更好的水土保持效果。

关键词: 西部黄土丘陵区; 草地; 侵蚀性降雨; 降雨侵蚀力; 侵蚀量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0009-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 邵臻, 张富, 陈瑾, 等. 西部黄土丘陵区不同草地土壤侵蚀对侵蚀性降雨的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 9-15. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.002; Shao Zhen, Zhang Fu, Chen Jin, et al. Response of soil erosion in different grasslands to erosive rainfall in western loess hilly region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 9-15. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.002

Response of Soil Erosion in Different Grasslands to Erosive Rainfall in Western Loess Hilly Region

SHAO Zhen¹, ZHANG Fu¹, CHEN Jin², ZHANG Bailin²

(1. College of Forestry in Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: [Objective] The responses of natural and artificial grassland to different types of erosive rainfall in loess hilly region of Western China were researched to provide guidance for vegetation construction and soil erosion control in this area. [Methods] Based on the data measured in 2007—2015 from runoff plots located in Anjiagou catchment, Dingxi City, we analyzed the influences of erosive rainfall on the erosions on 20° slopes of artificial grassland and natural grassland. [Results] In the study area, the erosive rainfall mainly occurs from May to September, and is greater in July and August, and correspondingly the amount of erosion caused by it is more than 70% of the annual erosion. Erosions observed on the two different types of grassland were both finely correlated with PI_{10} . The erosive rainfall mainly refers to moderate rain and heavy rain, the amount of erosion caused by the two intensity rainfalls accounts for about 86% of the annual erosion. The erosion amounts observed in artificial and natural grassland caused by moderate & high intensity rainfalls were 90.8% and 91.2% of total erosion amount, respectively. The amount of soil erosion can well expressed by power function with PI_{10} , PI_{30} as independent variables. Rainfall with 300 MJ·mm/(hm²·h)

收稿日期: 2017-03-12

修回日期: 2017-05-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“人类活动干扰下陇中黄土高原生态系统服务功能相互关系研究”(41571051)

第一作者: 邵臻(1991—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: shazhe11@163.com。

通讯作者: 张富(1961—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 研究员, 主要从事小流域水土保持防治措施对位配置研究。E-mail: fuzhang001@163.com。

or greater erosivity caused the largest proportional soil erosion, for artificial and natural grasslands, the proportion was 32.3% and 33.4%, respectively; rainfall with erosivity of 50~100 MJ·mm/(hm²·h) was most frequent, the erosion amount proportions were 26.0% and 29.1% of the total observed erosions, respectively. [Conclusion] The lower amount criteria of erosive rainfall for artificial grassland(coverage of 75%~82%) and natural grassland(coverage of more than 80%) were 11.3 mm and 11.9 mm, respectively; and the maximum I_{10} were 10.4 mm/h and 11.7 mm/h, respectively. The natural grassland has better effect of soil and water conservation than artificial grassland has.

Keywords: western loess hilly region; grassland; erosive rainfall; rainfall erosivity; erosion amount

中国是水土流失严重的国家之一,其中西部黄土高原尤为严重。水土流失不仅导致土壤肥力降低,土地退化,而且严重制约了当地经济发展和生态环境建设。降雨是土壤侵蚀的主要驱动因素,水土流失量随降雨分异发生变化,前人的研究表明,土壤侵蚀量与高强度、大雨量有密切的关系^[1-5]。能够导致土壤侵蚀的降雨被称为侵蚀性降雨,关于侵蚀性降雨特征的研究较多^[6-9]。朱明勇等^[9]研究表明,年侵蚀性降雨量和年降雨量变化显著一致,但侵蚀性降雨的变化幅度大于降雨量的变化幅度。侵蚀性降雨标准的确定是土壤侵蚀预报预防的重要工作。谢云等^[6]建立了黄土高原坡面的侵蚀性降雨量标准 12 mm,平均雨强标准 0.04 mm/min。王改玲等^[7]研究发现晋西北的侵蚀性降雨量标准为 8.47 mm。侵蚀性降雨标准的拟定与下垫面有很大关系,下垫面不同,其侵蚀性降雨标准也有差异。降雨引起土壤侵蚀的潜在能力称为降雨侵蚀力,马琨等^[10]在宁南黄土高原研究发现,降雨侵蚀力分布特征决定了该区域土壤侵蚀多发时期。中国学者在研究降雨侵蚀力指标时多采用 $E_n I_n$ 结构,在北方地区以 EI_{30} 和 EI_{10} 为主^[11]。西部黄土丘陵沟壑区干旱少雨,植被稀疏,生态环境脆弱,水土流失严重。自从该区域进行大面积的生态恢复以来,明显减轻了水土流失。尽管国内外有关侵蚀性降雨特征及对土壤侵蚀的研究较多,但多以模拟试验研究和针对裸地的观测为主,而侵蚀性降雨对不同草地侵蚀的影响报道相对较少。因此,本文利用西部黄土丘陵区典型小流域在 2007—2015 年的降雨径流泥沙观测资料,分析侵蚀性降雨特征及对人工草地和天然草地水土流失的影响,以期为该地区水土流失预报和生态环境建设提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于定西市安家沟流域内,属于半干旱黄土丘陵沟壑区。流域海拔 1 900~2 250 m,地形波状起伏,具有典型沟壑地貌特征。多年平均降雨量为 427 mm,60%~70%的降雨集中在 7—9 月,且多暴

雨。多年平均气温为 6.13 ℃,极端最高、最低气温为 34.3 和 -27.1 ℃,年日照时数 2 409 h,无霜期 141 d,蒸发量 1 510 mm。该区土壤类型主要是灰钙土,土壤母质为黄土,厚度大,质地以粉壤和粉砂壤为主,有机质含量 0.37%~1.34%,0—200 cm 平均土壤容重为 1.2 g/cm³,土质疏松,湿陷性强,极易发生土壤侵蚀。植被属于干草原区,天然植被有针茅(*Stipa capillata*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等草本;人工草地以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)为主。

1.2 径流小区的布设

径流小区布设在安家沟小流域阴坡中部,海拔 2 115 m,设置坡度为 20°的人工草地和天然草地 2 个小区。天然草地于 2005 年开始封禁,禁止人为干扰,主要是以冰草和铁杆蒿为主的杂草,2007 年时植被盖度达 80%以上,至 2015 年已达 92%;人工草地种植红豆草,植被盖度为 75%~82%,平均为 78%;于 5 月下旬和 10 月上旬各刈割 1 次。

1.3 测定项目与方法

(1) 观测时段。2007—2015 年。

(2) 降雨观测。利用流域内的自动气象站和虹吸式自计雨量计,记录每次降雨的雨量(P)、降雨时间(T)、时段雨强(I_{10} , I_{30})和平均雨强(I)。降雨间歇时间在 6 h 以内为 1 次降雨,否则算作两次降雨。

(3) 径流泥沙观测。每个小区配备集流池以进行径流产沙量观测。地表产流后,利用水尺读取各试验小区集流池水深,再乘以集流池底面积,计算出径流总量。将集流池中的水充分搅拌均匀,然后用取样瓶在不同区域取水样 3 个,体积均为 500 ml;将水样过滤后烘干称重,计算水样的泥沙含量,得到小区的产沙量,其产沙量与面积的比值即为土壤侵蚀量。

(4) 计算方法。侵蚀性降雨量按照径流小区发生侵蚀的实际降雨事件统计。80%经验频率法是目前较为成熟的确定侵蚀性降雨标准的方法^[7],故本文用此法来确定侵蚀性降雨量和雨强标准。由于该区域多历时较短,雨强较大的降雨,而土壤侵蚀主要取

决于峰值降雨强度,故采用章文波^[12]提出的简易降雨侵蚀力计算公式,其精度与常用的侵蚀力指标 EI_{30} 相当,计算公式为:

$$R=0.1773(P I_{10})$$

式中: R ——降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$;
 P ——次降雨量(mm); I_{10} ——对应的最大10 min 雨强(mm/h)。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性降雨动态变化及与土壤侵蚀的关系

2.1.1 降雨及侵蚀性降雨年际和月际分布特征 降雨是影响土壤侵蚀过程的最重要因素之一。研究时段年均降雨397.6 mm,人工草地和天然草地侵蚀性降雨为152.5,134.0 mm,占年均降雨的38.4%和33.7%。年降雨量和侵蚀性降雨量变异系数(C_v)分别为14.7%和30.9%,这说明侵蚀性降雨的变化程度较年降雨量大。从图1可以看出,侵蚀性降雨随年降雨量的变化而变化,总体变化与年降雨量的变化基本一致。从不同月份降雨分布来看(图2),降雨表现出明显的单峰分布,且主要集中在6—9月,降雨量占全年的51.2%~75.6%,平均占64.9%;最大降雨量出现在7—9月。总的来看,7—9月雨量大,雨强也大,降雨时间增加,暴雨多出现在此阶段,5和10月降雨量较小,多小雨。6月居中。

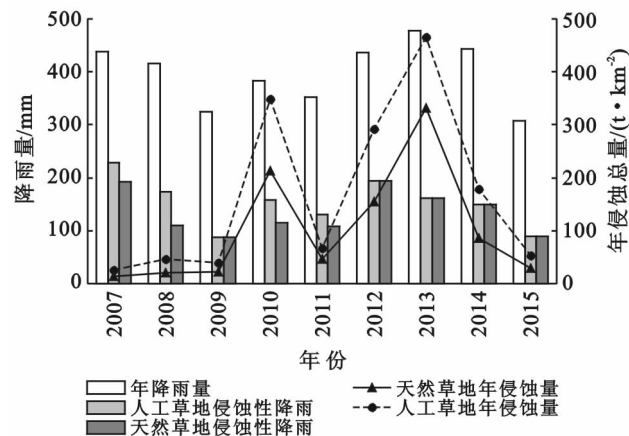


图1 侵蚀性降雨与土壤侵蚀量年际间变化

黄土高原地区侵蚀性降雨的发生频率7.0~13.4 d/a,侵蚀性次雨量介于19.17~25.38 mm,但变异性很大^[13]。如图2所示,侵蚀性降雨在各月间呈现单峰分布。在观测时段,侵蚀性降雨只出现在5—9月,其峰值出现在8月。在8月份,人工草地和天然草地的侵蚀性降雨分别为53.6和50.7 mm,占相应年均侵蚀降雨的35.1%和37.9%,是当月降雨量的70.3%和66.5%;其次是7月,人工草地和天然草地的侵蚀性降雨分别为30.0和28.2 mm,占相应

年均侵蚀降雨的19.6%和21.1%,是当月降雨的46.1%和43.5%。在降雨集中的7—9月,人工草地和天然草地各有114.9和103.9 mm的雨量为侵蚀性降雨,分别占期间降雨量的55.6%和50.3%。5月的侵蚀性雨量最少,为10.6 mm。从月均土壤侵蚀量来看,8月的侵蚀量最大,5月的侵蚀量最小,月侵蚀量与月侵蚀性降雨量变化基本一致。

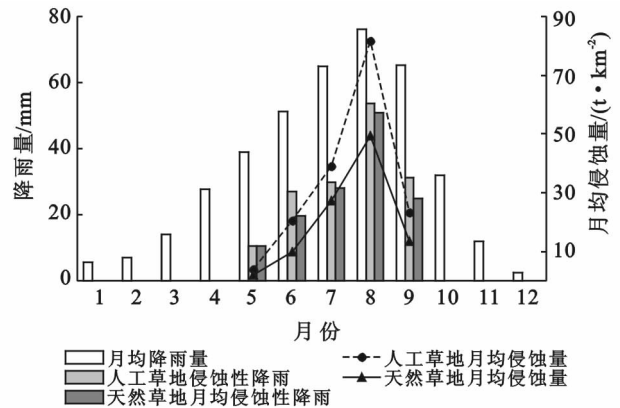


图2 侵蚀性降雨与土壤侵蚀量月际间变化

2.1.2 土壤侵蚀与降雨因子的关系 降雨是造成土壤侵蚀的原动力^[4],但由于降雨各因子间又存在着相互关系,为排除这种影响,所以采用偏相关分析来研究各降雨因子对径流侵蚀的影响。由表1知,在控制其他变量的条件下,两种草地的径流量均与 P 呈显著相关,而与其他单因子相关性较差。 P 和最大 I_{10} 的乘积(PI_{10})与人工草地的径流量呈极显著相关,而在天然草地这种相关性不明显。总体来看,径流量与 P 显著相关,与其他降雨单因子相关性较差,不同下垫面条件下,径流量与 P 和最大时段内雨强(I_n)的积(PI_n)相关性有所差异。而在控制相关因子的条件下,主要影响侵蚀量(M_s)的因子是 PI_{10} ,其次是 PI_{30} 。在与单因子的关系中,侵蚀量与最大 I_{10} 极显著相关,而与 P, T, I 相关性较差。因此,影响土壤侵蚀量的因子主要是降雨量和最大时段内雨强的积(PI_n),特别是 PI_{10} 。对 M_s 与 PI_{10} 进行线性回归分析,拟合公式为:人工草地 $M_s=0.058(PI_{10}), R^2=0.768$;天然草地 $M_s=0.036(PI_{10}), (R^2=0.716)$ 。

2.2 侵蚀性降雨标准

侵蚀性降雨标准的确定对土壤侵蚀研究和预测预报具有重要意义。在观测期内,人工草地和天然草地的年均侵蚀性降雨分别为7.2和6.2次。用80%经验法求得的人工草地(盖度75%~82%)和自然草地(盖度>80%)的侵蚀性降雨标准分别为11.3和11.9 mm。西北黄土高原20°无覆盖坡面雨量标准为

8.1 mm, 农耕地为 9.9 mm^[9]。本研究结果表明, 两种草地侵蚀性雨量标准较裸地分别提高了 39.51% 和 46.91%, 较坡耕地分别提高了 14.14% 和 20.20%。在降雨单因子, 最大 I_{10} 与土壤侵蚀量的相关性最好,

因此同样以 80% 经验法计算两种草地的最大 I_{10} 标准。计算结果表明, 人工草地和自然草地的侵蚀性降雨最大 I_{10} 标准分别为 10.4 和 11.7 mm/h (图 3—4)。

表 1 径流量、侵蚀量与各降雨因子偏相关系数

项目	草地类型	P	T	I	I_{10}	I_{30}	PI	PI_{10}	PI_{30}
径流量	人工	0.246*	0.227	0.074	0.355**	0.100	-0.093	0.413**	0.333**
	天然	0.361**	0.173	0.200	0.252	0.077	-0.161	0.067	0.094
侵蚀量	人工	0.120	0.082	0.238	0.503**	-0.142	0.482**	0.748**	0.711**
	天然	-0.034	0.171	0.269	0.484**	-0.140	0.466**	0.678**	0.671**

注: *, ** 分别表示两尾检验的结果在 0.05, 0.01 水平上显著相关。下同。

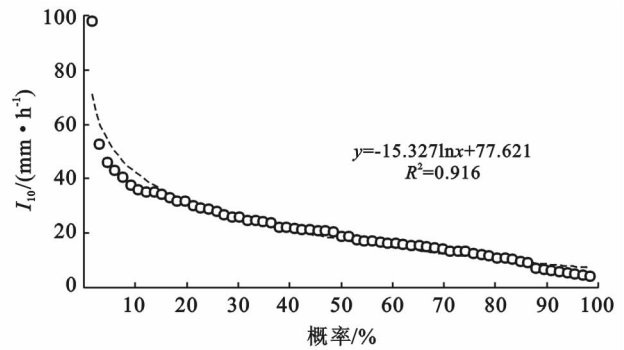
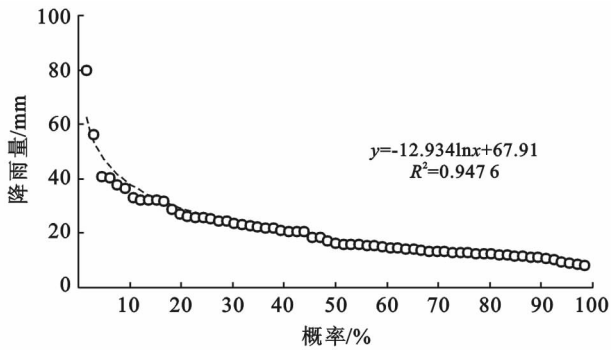


图 3 人工草地雨量和 I_{10} 与经验频率 P 曲线

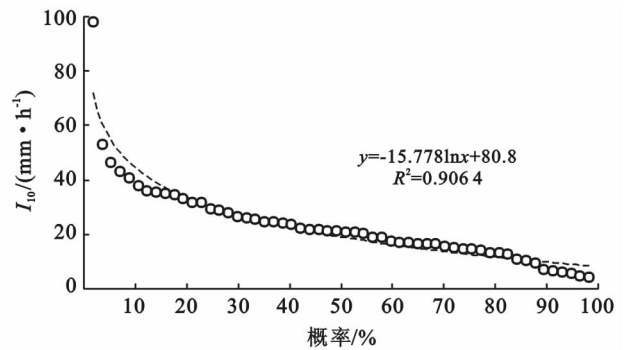
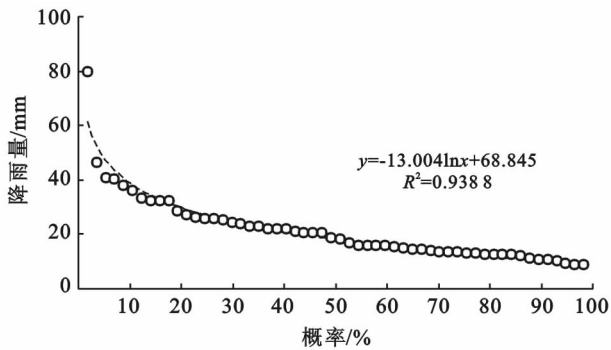


图 4 天然草地雨量和 I_{10} 与经验频率 P 曲线

以所有侵蚀性降雨为统计分析样本, 按 P 或最大 I_{10} 大小降序排列, 并将大于某一雨量或最大 I_{10} 产生的土壤侵蚀量逐个累加, 得到 N 个土壤侵蚀量 (Q) 和总侵蚀量 (q), 然后求出大于某一雨量或最大 I_{10} 的侵蚀累计百分比 (P_Q), 点绘 $P-P_Q$ 及 $I_{10}-P_Q$ 关系曲线 (表 2)。令 P 分别等于 11.3 和 11.9 mm 时, P_Q 分别为 81% 和 83%, 这说明雨量大于上述相应的侵蚀性雨量标准时产生的土壤侵蚀各占两种草地总侵蚀量的 82% 左右。令 I_{10} 分别等于 10.4 和 11.7 mm/h 时, P_Q 均大于 95%, 这说明 I_{10} 大于上述相应的侵蚀性雨强标准时产生的土壤侵蚀各占两种草地总侵蚀量的

95% 以上。因此, 以最大 I_{10} 作为草地的侵蚀性降雨标准能更好地预测土壤侵蚀。

表 2 两种草地 $P-P_Q$ 及 $I_{10}-P_Q$ 关系方程

草地类型	P 值	最大 I_{10}
人工	$P_Q = 100.13 - 1.72P$	$P_Q = 108.82 - 1.31I_{10}$
天然	$P_Q = 100.77 - 1.59P$	$P_Q = 110.60 - 1.26I_{10}$

2.3 侵蚀性降雨量等级对土壤侵蚀的影响

根据气象学上日降雨量的标准划分侵蚀性降雨等级, 即日降雨量 ≤ 10 mm 为小雨; 10~25 mm 为中雨; 25~50 mm 为大雨; ≥ 50 mm 为暴雨。从表 3 可

以看出,在观测期内,人工草地共有 65 场侵蚀性降雨,天然草地的侵蚀性降雨较前者少 9 场,两者的侵蚀性降雨量均在 9.1~79.9 mm。在人工草地的侵蚀性降雨中,小雨 4 次,中雨 47 次,大雨 13 次,暴雨 1 次,在天然草地的侵蚀性降雨中,小雨 3 次,中雨 40 次,大雨 12 次,暴雨 1 次。小雨占有所有降雨的 66.3%,但侵蚀性降雨很少,产生的水土流失量也小,人工草地的 4 次侵蚀性小雨共造成土壤流失量 34.12 t/km²,占其总侵蚀量的 2.3%;天然草地的 3 次侵蚀性小雨共产生土壤流失量 15.19 t/km²,占其总侵蚀量的 1.7%。小雨对草地产流产沙的影响主要表现为降雨的集中程度,在 2015 年 8 月 10 的次降雨中,

降雨量只有 9.1 mm,但降雨时间只有 19 min,雨强达 28.7 mm/h,最大 I_{10} 为 31.23 mm/h,造成人工草地土壤流失 23.67 t/km²,天然草地 13.37 t/km²。水土流失与暴雨有着密切联系^[13]。在本研究中,尽管暴雨在 9 a 间只有 1 次,却造成了人工草地和天然草地的侵蚀量分别为 172.72 和 103.70 t/km²。从侵蚀总量来看,中雨引起的人工草地和天然草地土壤侵蚀占相应总侵蚀量的 41.4% 和 44.3%,大雨引起的人工草地和天然草地土壤侵蚀占相应总侵蚀量的 41.7% 和 38.4%,两者均远大于小雨和暴雨,是小雨的 18~20 倍,暴雨的 4~5 倍,小雨产生的土壤侵蚀最小。

表 3 不同降雨级别下 2 种草地侵蚀性降雨及水土流失特征均值

降雨级别	草地类型	次数	次降雨量/ mm	次降雨雨强/ (mm·h ⁻¹)	次降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	径流量/ m ³	侵蚀量/ (t·km ⁻²)
小雨	人工	4	8.89	1.45	23.60	0.05	8.53
	天然	3	9.07	1.70	25.48	0.03	5.06
中雨	人工	47	18.21	1.84	57.96	0.07	14.46
	天然	40	18.65	1.96	62.38	0.06	11.17
大雨	人工	13	31.49	3.06	181.89	0.12	48.69
	天然	12	32.09	3.33	192.74	0.07	29.35
暴雨	人工	1	56.34	56.34	461.43	0.17	172.72
	天然	1	56.34	56.34	461.43	0.14	103.68

该区域侵蚀性降雨主要以中雨和大雨为主,对其按照 I_{30} 标准分为 3 种雨强类型^[3],即低雨强型降雨 $I_{30} \leq 10$ mm/h;中雨强型降雨 $10 < I_{30} \leq 30$ mm/h 和高雨强型降雨 $I_{30} > 30$ mm/h。在人工草地的 47 次侵蚀性中雨事件中,低、中、高雨强型降雨各 20,26,1 次,平均雨量 18.21 mm,共使得人工草地产生侵蚀量为 679.70 t/km²,年均 75.52 t/km²;而中、高雨强型降雨造成的侵蚀量分别为 548.96 和 30.83 t/km²,共占中雨总侵蚀量的 85.3%。40 次侵蚀性中雨对天然草地的侵蚀相对人工草地较轻,低雨强型降雨 13 次,中、高雨强型侵蚀性降雨场次与人工草地相同,平均雨量为 18.65 mm,共造成天然草地的侵蚀量为 446.80 t/km²,年均 49.64 t/km²;而中、高雨强型降雨产生的侵蚀量分别为 356.55 和 24.85 t/km²,共占中雨总侵蚀量的 85.4%。在人工草地 13 次侵蚀性大雨事件中,低、中、高雨强型降雨各 2,8,3 次,平均雨量 31.49 mm,共使得人工草地产生侵蚀量为 633.00 t/km²,年均 70.33 t/km²;其中,中、高雨强型降雨造成的侵蚀量分别为 259.63 和 368.49 t/km²,共占大雨总侵蚀量的 99.2%。在天然草地 12 次侵蚀性大雨事件中,低雨强型降雨 1 次,中、高雨强型侵蚀性降雨

场次与人工草地相同,平均雨量为 32.09 mm,共造成天然草地的侵蚀量为 352.16 t/km²,年均 39.13 t/km²;其中,中、高雨强型降雨造成的侵蚀量分别为 127.86 和 223.84 t/km²,共占大雨总侵蚀量的 99.8%。因此,在该区域,中雨及大雨是土壤侵蚀的主要动力因素,而中、高雨强型降雨对土壤侵蚀的作用尤为明显,造成了大量的水土流失。

根据以上分析,选取与侵蚀量(M_s)极显著相关的最大 I_{10} ,最大 I_{30} , PI_{10} 和 PI_{30} 作为参数,统一采用幂函数形式(表 4),建立相应的中、高雨强型降雨与土壤侵蚀的关系式。

表 4 次降雨特征与土壤侵蚀量回归关系

草地类型	方程	R^2	相关系数
人工	$M_s = I_{10}^{0.878}$	0.862	<0.01
	$M_s = I_{30}^{1.010}$	0.854	<0.01
	$M_s = (PI_{10})^{0.446}$	0.840	<0.01
	$M_s = (PI_{30})^{0.480}$	0.839	<0.01
天然	$M_s = I_{10}^{0.446}$	0.746	<0.01
	$M_s = I_{30}^{0.742}$	0.715	<0.01
	$M_s = (PI_{10})^{0.335}$	0.812	<0.01
	$M_s = (PI_{30})^{0.361}$	0.783	<0.01

2.4 降雨侵蚀力等级对土壤侵蚀的影响

降雨侵蚀力是一项客观评价由降雨引起土壤分离和搬运的动力指标^[7]。殷水清等^[14]认为,黄土高原的年降雨侵蚀力为 327~4 416 MJ·mm/(hm²·h),并从东南向西北递减。本研究发现,人工草地和天然草地的年侵蚀力分别为 611.02 和 577.88 MJ·mm/(hm²·h)。本研究将降雨侵蚀力分成 0~25, 25~50, 50~100, 100~300, >300 MJ·mm/(hm²·h) 共 5 等级^[3,7]。侵蚀力为 100~300 MJ·mm/(hm²·h), >300 MJ·mm/(hm²·h) 的降雨各发生 10 和 2 次,但次降雨侵蚀力分别占人工草地年侵蚀力的 31.3% 和 89.4%,占天然草地的 33.2% 和 94.5%。说明高侵蚀力降雨次数少,但易引起较大侵蚀。从不同级别侵蚀力降雨分布来看,中侵蚀力〔50~100 MJ·mm/(hm²·h)〕型降雨出现的次数最多,其次是中低侵蚀力 25~50 MJ·mm/(hm²·h),低侵蚀力 0~25 MJ·mm/(hm²·h) 和高侵蚀力 >300 MJ·mm/(hm²·h) 型降雨较少。中高型侵蚀力 50~100 MJ·mm/(hm²·h) 占总侵蚀力比例最大,这类侵蚀力主

要由中雨强型降雨形成。

由表 5 可知,随着降雨侵蚀力的增加,土壤侵蚀量也呈明显增加趋势,特别是大于 300 MJ·mm/(hm²·h) 时,次降雨引起的侵蚀量迅速增加,对草地造成的侵蚀量均远大于其他侵蚀力引起土壤侵蚀量的总和,分别是人工草地年均侵蚀量的 1.46 倍,是天然草地的 1.50 倍。从总侵蚀量来看,高侵蚀力型降雨引起的土壤侵蚀最大,共使得人工草地和天然草地侵蚀量达 492.21 和 306.54 t/km²,占相应总侵蚀量的 32.3% 和 33.4%,由此可见,无论是单次侵蚀量还是长时段总侵蚀量,由高侵蚀力型降雨引起的土壤侵蚀十分严重;其次是中侵蚀力引起的土壤侵蚀,人工草地和天然草地的侵蚀量分别为 394.94 和 265.93 t/km²,占相应总侵蚀量的 26.0% 和 29.1%;再次是中高侵蚀力引起的土壤侵蚀,侵蚀量分别为人工草地 359.41 t/km²,天然草地 188.24 t/km²,占相应总侵蚀量的 23.7% 和 20.5%。低侵蚀力造成的土壤侵蚀量较小。因此,高强度降雨形成的高侵蚀力是坡面水土流失的主要因素,应重点防治。

表 5 不同降雨侵蚀力级别下两种草地降雨及水土流失特征均值

侵蚀力等级/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	草地 类型	次数	次降雨量/ mm	I_{10} / (mm·h ⁻¹)	次降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	径流量/ m ³	侵蚀量/ (t·km ⁻²)
0~25	人工	9	13.73	7.70	14.21	0.04	5.66
	天然	7	14.73	7.33	13.90	0.03	3.04
25~50	人工	22	16.40	15.37	36.09	0.05	10.09
	天然	17	16.15	16.54	37.56	0.05	7.99
50~100	人工	22	19.41	23.72	71.27	0.07	17.95
	天然	20	19.57	23.99	72.18	0.06	13.30
100~300	人工	10	35.71	32.58	191.74	0.10	35.94
	天然	10	35.71	32.58	191.74	0.08	18.82
>300	人工	2	46.30	72.11	546.03	0.45	246.10
	天然	2	46.30	72.11	546.03	0.21	153.27

3 讨论

王伟等^[4]研究认为,在半干旱区, P 值直接影响径流量, PI_{30} 是影响侵蚀量的主要因子。本研究也发现,坡面侵蚀与 P 和时段雨强的乘积极显著相关,而要较为准确描述水土流失过程,就必须考虑土壤可蚀性、坡度、植被变化和水土保持措施等多种因素的影响^[15]。晏清洪等^[5]研究发现,在黄土区频次最少的大雨量,高雨强降雨事件的产流产沙量最大,这与本研究结果一致,高雨强降雨对草地的侵蚀十分明显。同时,该区域的 7—8 月土壤侵蚀量较大,因此,人工草地不适宜在此时期收割。王改玲等^[7]在晋西北研究发现,次降雨侵蚀力大于 200 MJ·mm/(hm²·h)

引起的土壤侵蚀量最大,而总侵蚀量则表现为 50~100 MJ·mm/(hm²·h) 的中侵蚀力降雨最高。但本研究发现,尽管高侵蚀力型降雨事件少,但无论是单次侵蚀量还是 9 a 间侵蚀的总量均最大,因此,必须首先考虑减轻高侵蚀力降雨引起的水土流失危害。周大渊等^[9]认为由于 P, I 资料易搜集,选择 PI 作为侵蚀性降雨标准更具实用性,但这可能较 I_{30}, I_{60} 标准精度低;而以最大 I_{30} 作为侵蚀性降雨的标准要优于降雨量和平均雨强^[6];汪邦稳等^[16]认为在稳定性高的水土保持措施下垫面,宜采用时段侵蚀性雨强标准,而稳定性低的水土保持措施下垫面,宜采用侵蚀性雨量标准。闫胜军等^[1]研究认为,在草地坡面,侵蚀产沙量与最大 I_{10} 拟合度较高。本研究也认为,采

用最大 I_{10} 作为草地的侵蚀性降雨标准能更好的预报土壤侵蚀。本文确定的侵蚀性降雨标准还有待于进一步验证,没有分析最大 I_{15} , I_{60} 对草地坡面侵蚀的影响,这些都需要在以后的工作中探讨。于国强等^[17] 研究认为,草地通过地表植被对水沙的调控作用,从而起到直接拦沙的水土保持功效。与裸地相比,草被坡面径流量减少 51.9%~99.1%,产沙量减少 93.6%~99.2%^[18]。通过以上分析可以得出,草地的水土保持效果明显,而天然草地比人工草地具有更好的水土保持效果。这主要是因为天然草地的植被盖度比人工草地高,高植被覆盖可以有效减少溅蚀及地表径流,再加之植被根系对土壤的固持作用,从而减小了土壤侵蚀量。另外由于人工草地时常有人为干扰,表层土壤质地较为疏松,易发生侵蚀,而天然草地由于没有人为干扰,其坡面上枯枝落叶层的出现、生物结皮发育等现象改变了近地表特征,从而使地表径流流速减小,有效减弱了坡面侵蚀^[19]。因此,天然草地的减流减沙效果更好。

4 结论

(1) 西部黄土丘陵区的侵蚀性降雨分布在 5—9 月,8 月的侵蚀性降雨最大。7—8 月的侵蚀量占年均侵蚀的 70% 以上。坡面产沙与 PI , PI_{10} , PI_{30} 呈极显著相关,而与 PI_{10} 的相关性最好,单因子中则与最大 I_{10} 相关性最好;坡面径流量与 P 显著相关。

(2) 在该区域,次暴雨造成的侵蚀量最大,约占年均侵蚀量的 11%;该区域侵蚀性降雨主要以中雨和大雨为主,造成的侵蚀量约占年均侵蚀量的 86%。而中、高雨强型降雨是草地坡面产沙的主要动力,引起的侵蚀量分别占人工、天然草地总侵蚀量的 90.8% 和 91.2%。中、高雨强型降雨的土壤侵蚀量与 PI_{10} , PI_{30} 呈较好的幂函数关系。

(3) 50~100 MJ·mm/(hm²·h) 的中侵蚀力型降雨出现的次数最多,引起的土壤侵蚀量分别占人工草地和天然草地总侵蚀量的 26.0%, 29.1%。大于 300 MJ·mm/(hm²·h) 的高侵蚀力型降雨造成的土壤侵蚀量最大,分别占人工、天然草地总侵蚀量的 32.3% 和 33.4%,具有高侵蚀力的降雨对草地坡面水土流失的影响最大。

(4) 人工草地(盖度 75%~82%)和天然草地(盖度 >80%)的侵蚀性降雨量标准分别为 11.3 和 11.9 mm,最大 I_{10} 标准分别为 10.4 和 11.7 mm/h,应以最大 I_{10} 为宜。天然草地比人工草地具有更好的水土保持效果。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 周子渊,王立,王小平,等.西部黄土丘陵区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2014,34(3):24-27.
- [3] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等.黔西高原侵蚀性降雨特征分析[J].水土保持研究,2016,23(2):39-43,48.
- [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] 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.
- [6] 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):6-11.
- [7] 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.
- [8] 朱明勇,谭淑端,张全发.近 60 年汉江流域侵蚀性降雨的时空变化特征[J].生态环境学报,2013,22(9):1544-1549.
- [9] 周大湖,熊明彪,林立金,等.坡度对紫色土坡耕地侵蚀性降雨值的影响[J].水土保持通报,2009,29(6):159-162,167.
- [10] 马琨,马斌,何宪平,等.宁南黄土高原坡面土壤侵蚀与影响因子研究[J].水土保持研究,2007,14(1):7-10.
- [11] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等.中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展[J].中国农学通报,2011,27(4):1-5.
- [12] 章文波,谢云,刘宝元.雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J].地理研究,2002,21(3):384-390.
- [13] 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(6):99-103.
- [14] 殷水清,谢云.黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J].水土保持通报,2005,25(4):29-33.
- [15] Feng Xiaoming, Wang Yafeng, Chen Liding, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2010,118(3):239-248.
- [16] 汪邦稳,方少文,宋月君,等.赣北第四纪红壤区侵蚀性降雨强度与雨量标准的确定[J].农业工程学报,2013,29(11):100-106.
- [17] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [18] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被减流减沙效应及其力学机制分析[J].中国水土保持科学,2010,8(2):15-19.
- [19] 易婷,张光辉,王兵,等.退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J].山地学报,2015,33(4):434-440.