

典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析

孙从建^{1,2}, 侯慧新¹, 陈伟¹, 杨伟¹, 郑振婧¹

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 基于黄土高原典型黄土塬区 2014-2016 年的自然降雨数据及 5 种植被措施(乔木、灌木、撂荒、人工种草、耕地)下的坡面产流、产沙情况的观测数据, 系统分析了不同植被覆盖措施下的黄土坡地水土流失对不同侵蚀性降雨的响应机制, 结果表明: (1) 降水集中于 4-10 月份, 其中引发水土流失的侵蚀性降雨集中于 7 月、8 月。(2) 根据最大 30 分钟降雨强度 I_{30} 及降雨总量可将侵蚀性降雨分为 5 种类型, 其中小雨量、小雨强类型的降雨是当地发生频率最多的侵蚀性降雨类型; 降雨强度最大的 V 雨型降雨侵蚀力最大, 降雨量最大的 I 雨型降雨侵蚀力次之, 而 II 雨型降雨侵蚀力最低; V 雨型在观测期内产流产沙量最大。(3) 5 种植被措施在不同降雨类型下均有明显的水土保持效应, 在不同类型降雨下不同植物措施减沙率和减流率变化规律不同。研究结果对于黄土高原地区水土保持及资源可持续利用具有重要的指导意义。

关键词: 黄土塬区; 植物措施; 减沙减流率; 水土保持效应

黄土高原作为我国地貌单元中的重要组成部分, 是中国文明发祥地及主要旱作农业生产区^[1]。近年来, 由于降雨集中、植被覆盖度降低、特殊的土壤性质以及人类不合理的利用导致黄土高原水土流失日益严重, 水土流失面积达 39 万 km^2 , 占全国水土流失面积的 85%^[2], 已成为国内水土流失最严重的区域^[3]。水土资源的流失和短缺严重制约了黄土高原区的经济发展, 限制黄土区生态恢复和土地生产力提高^[4-5]。位于晋西的黄土残塬区沟壑发育, 表层土体疏松易蚀, 水土流失更加严重^[6], 严重抑制了当地社会经济的发展, 引起了国内外学者的广泛关注^[7]。

水土流失一直以来都是一个世界性课题^[8], 是造成土壤肥力下降、生态环境恶化的主要原因之一, 且具有恶性循环的特点, 并引起生态学、地理学等相关学者的深入研究。研究发现侵蚀性降雨的特征与植物分布格局对黄土高原水土流失具有重要影响^[9], 侵蚀性降雨通过在下落过程击溅地表或形成径流后剥离土体造成水土流失^[10-11], 而植物的分布格局通过植物种类、植被盖度、植物种植方式等影响水土流失过程^[12-14]。因此开展侵蚀性降水规律及植物措施的水土保持效应评价对于区域水土流失防治具有重要意义。一些学者就紫色土区^[15]、太行山土石山区^[16]、南方红壤区^[17]、北京北部褐土区^[18]、伊犁河谷区^[19]、鄱阳湖区^[20]等区域的不同植被措施对侵蚀性降雨的响应机制开展了研究, 研究结果亦为当地的水土流失防治提供了科学依据。在黄土高原地区, 研究者采用人工冲刷试验对不同植被覆盖下的土壤侵蚀进行对比分析, 发现随着植被覆盖度增加土壤侵蚀量呈降低趋

收稿日期: 2018-11-15; 修订日期: 2019-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601317)

作者简介: 孙从建 (1986-), 男, 河北沧州人, 博士后, 副教授, 主要从事气候变化与水循环研究。

E-mail: suncongjian@sina.com

通讯作者: 陈伟 (1987-) 女, 辽宁铁岭人, 博士研究生, 副教授, 主要从事土壤学研究。

E-mail: wan_xin_chen@126.com

势^[21-22]。一些研究者^[23-24]通过GIS技术利用通用土壤流失方程(RUSLE)对植被措施的水土保持效应进行了评价,结果表明调整植被措施结构、提高植被覆盖度,是降低土壤侵蚀量的主要途径。张建军等^[25]采用EnviroSMART土壤水分定位监测系统对晋西水土流失区的研究发现,与当地土壤相适应的次生林是当地水土保持的主要途径。上述研究多基于短期观测的单一植被措施的水土流失评价,而基于多年试验观测数据的多种植被措施在不同类型降雨条件下的水土保持效应研究相对匮乏。在当前黄土高原水土流失严重、黄土塬面日益萎缩的严峻情势下,迫切需要开展针对黄土塬区的自然降雨事件以及不同植物措施的响应机制研究。

研究选取水土流失严重的晋西南黄土塬区的冯家沟小流域作为典型研究区,利用2014-2016年的实测自然降雨数据、实测侵蚀性降雨下的产流产沙量数据,对黄土塬区自然侵蚀性降雨下的不同植物措施减流减沙效应及其响应机制进行探讨,以期对典型黄土塬区的水土保持工作有一定的指导作用。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

冯家沟小流域属黄河一级支流鄂河一级支沟,是典型的黄土塬区,流域总面积约0.86 km²。地理位置介于110°47′~110°4′E、35°58′~36°58′N之间(图1);地势西北高东南低,冲沟发育,地貌单元主要为剥蚀中低山区和山间冲刷沟谷;流域气候属于暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为9.9℃,极端最高气温为36℃,最低气温-18℃,全年平均日照时数为2588小时,无霜期为160~200天;流域内最大年降水量为732.7 mm,最小年降水量为312 mm,多年平均降水量为514 mm,年内分布极不均匀;土壤为以褐土为主;天然植被包括芦草(*Agropyron mongolicum*)、苍耳(*Xanthium sibiricum* Patr. ex Widde)、狗尾(*Setaria Beauv*)、苋菜(*Amaranthus tricolor*)、蒿草(*Heteropappus altaicus*)等;人工植被乔木林主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、杨树(*Populus daviana*)及零星分布的榆树(*Ulmus pumila*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等,灌木林主要有野丁香(*Leptodermis potanini*)、野刺玫(*Rosa sweginzowii*)、荆条(*Vites nrgundo*)、山桃(*Amygdalus dacidiana*)等;土壤侵蚀类型主要包括水力侵蚀和重力侵蚀。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

试验在冯家沟水土保持监测点内进行,观测场于2013年6月建成,包括9个坡度为15°、长20 m、宽5 m、实际面积为100 m²的标准径流小区(图1),各小区之间建厚度为50 cm水泥围埂,以保证径流互不干扰,在距离小区顶部围埂外50 cm处安装虹吸式自记雨量计,用于降雨数据的观测。在标准径流小区下设二级分流桶及集流桶量水设施(桶体用特制厚铁皮卷制而成,圆柱形结构,桶体内外涂以防锈涂料进行防锈处理,直径500 mm,高600 mm用于收集坡面小区产生的径流和泥沙)。径流小区从1到9依次进行编号,1号小区为乔木林,种植15株侧柏,7年树龄,平均高度1.5 m,植被覆盖度65%;2号小区为连翘及野丁香为优势种的灌木林,共50株,平均高度0.3 m,植被覆盖度25%;3~6号小区为当地农作物(西瓜、谷子、大豆、玉米),其中研究选取玉米代表农作物与其他植被进行对比,共种植50株,平均高度0.7 m,植被覆盖度25%;7号小区

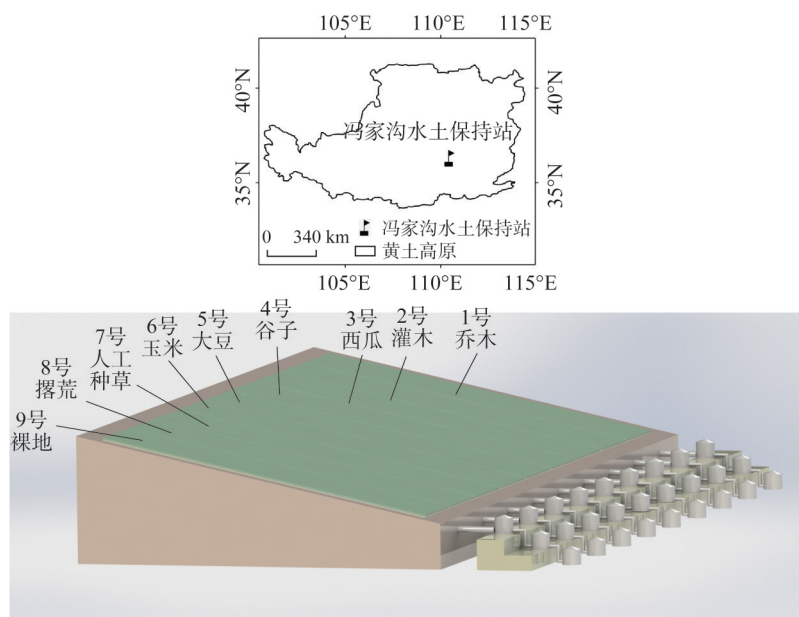


图1 研究区位置与试验设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study region and design of experiment

为人工种草,播种方式为人工整地后撒播,平均高度0.2 m,植被覆盖度25%;8号小区为撂荒,2013年小区建成后对地表没有进行过任何扰动;9号小区为对照小区(裸地),植被盖度为0。

1.2.2 监测方法

主要观测指标有年度降水、不同小区径流量、泥沙量等影响水土流失的因子。

监测方法为:

年度降水指标:通过虹吸式自记雨量计进行降水观测计算降水指标。径流量:通过小区分(集)流桶水位,计算次降雨径流量,统计年降雨径流总量;含沙量:通过将分(集)流桶浑水充分搅匀,并将所采样品统一进行记号、量积,沉淀24小时后,将沉淀物分离,沉积物在105°干燥箱内8小时干燥,称重,计算小区次降雨泥沙流失量,并汇总计算小区年降雨泥沙流失量,得出该小区土壤侵蚀模数并计算出土壤流失量。

1.3 数据处理

根据产流产沙情况确定侵蚀性降雨,将任一径流小区集流桶中产生径流或泥沙的场降雨称为侵蚀性降雨^[26],并收集整理侵蚀性降雨发生后各径流小区的产流量、产沙量。

整理2014-2016年研究区内的降雨数据总结该流域的降雨特征,对2014-2016年产生水土流失的29场侵蚀性降雨运用SPSS 19.0根据降雨量和最大30分钟降雨强度即 I_{30} 进行K-均值聚类分析,分类结果在方差分析上具有显著性差异($P<0.05$)可认为分类合理并确定该流域降雨类型^[27]。对于雨型的分类方法与Peng等^[28]、Fang等^[29]、Huang等^[30]的研究方法一致。最后采用经典统计分析典型植被措施产流产沙特性并运用Origin 8.0作图,其中,不同植被径流小区的减沙率、减流率分别为植被措施下的径流小区相对于裸地径流小区即(对照小区)的泥沙、径流减少量占裸地产沙、产流量的百分比。

2 结果分析

2.1 降雨特征及侵蚀性降雨分类

2.1.1 降雨特征分析

该流域降雨主要集中于4-10月份（表1），月降雨总量在4-7月逐月增加，9-10月份降雨总量开始下降。其侵蚀性降雨事件主要发生在6-9月份，其中7月份发生侵蚀性降雨11次，占月降雨事件的57%，侵蚀性降雨发生频率最高；8月份的侵蚀性降雨总量为134.77 mm，占月降雨总量的72%，侵蚀性降雨总量最高。由此可见7月、8月是水土流失产生及防治的高发月份。观测时段内，2014年降水总量为482.3 mm，侵蚀性降水集中于8月份，共发生侵蚀性降水7次；2015年降水总量为217.1 mm，侵蚀性降水发生在7月、8月，其中，7月份侵蚀性降水发生次数最多为5次；2016年降水总量440.4 mm，侵蚀性降水在6-9月份均有产生，其中7-8月份各产生侵蚀性降水5次。

表1 2014-2016年冯家沟小流域降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics of the small watershed in Fengjiagou from 2014 to 2016

月份/月	降雨总量/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	68.5	9	22.83	0	0	0	0	0
5	156.6	20	52.20	0	0	0	0	0
6	164.6	20	54.87	8	40	73.80	24.95	46
7	232.8	19	77.60	11	57	121.50	40.5	52
8	186.2	16	62.07	6	37	134.77	44.92	72
9	206.9	22	68.97	4	18	15.80	5.26	8
10	75.4	12	25.13	0	0	0	0	0

该流域降雨集中于4-10月份，且侵蚀性降雨发生在6-9月份，符合典型黄土塬区干旱的季风气候特征，与黄土塬区夏季降雨集中、多暴雨的气候背景一致。因此，本研究区降雨分析结果对黄土高原残垣区具有代表性，这一结果与魏天兴^[10]、余卫东等^[31]对于黄土区降雨特征研究结果一致。

2.1.2 侵蚀性降雨分类

侵蚀性降雨是黄土塬区发生剧烈土壤水蚀的原动力^[32-33]。对侵蚀性降雨进行分类，可以探究不同类型的侵蚀性降雨条件下径流小区产流、产沙特征，为进一步研究不同类型降雨条件下不同植被覆盖的水土保持效应提供基础。利用K-均值聚类分析方法，流域侵蚀性降雨被分为5类（表2），即Ⅰ雨型、Ⅱ雨型、Ⅲ雨型、Ⅳ雨型及Ⅴ雨型。分类结果

表2 冯家沟小流域侵蚀性降雨K-均值分类结果

Table 2 K-means classification results of erosive rainfall in Fengjiagou watershed

降雨类型	所占比例/%	降雨量中心值/mm	降雨量范围/mm	I ₃₀ 中心值/(mm·h ⁻¹)	I ₃₀ 范围/(mm·h ⁻¹)
I	10.3	60.55	55.74~65.1	15.09	14.77~15.6
II	44.8	14.32	5.7~19.6	7.45	2.4~11.74
III	27.6	12.58	8.7~22.1	18.3	14.34~25.59
IV	10.3	30.27	26.2~35.5	7.81	4.85~9.39
V	7.0	36.00	34.9~37.1	33.89	32.9~34.87

的降雨量中心值显示: I 雨型降雨量中心值为 60.55 mm, 为大雨量; IV 雨型与 V 雨型降雨量中心值分别为 30.27 mm、36 mm, 为中雨量; II 雨型中心值 14.32 mm 与 III 雨型中心值 12.58 mm 为小雨量。 I_{30} 中心值显示: V 雨型为 $33.89 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 为大雨强; I 雨型与 III 雨型次之, 分别为 $15.09 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $18.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 为中雨强; II 雨型与 IV 雨型分别为 $7.45 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $7.81 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 为小雨强。据此, 流域侵蚀性降雨不同类型呈以下特征: I 雨型为大雨量、中雨强, II 雨型为小雨量、小雨强, III 雨型为小雨量、中雨强, IV 雨型为中雨量、小雨强, V 雨型为中雨量、大雨强。分析发现, 侵蚀性降雨中 II 雨型所占比例为 44.8%, 发生频率最高; III 雨型发生频率次之, 发生频率为 27.6%; I 雨型与 IV 雨型所占比例相同, 为 10.3%; V 雨型仅占 7%, 发生频率最低。

2.2 不同类型降雨条件下的产流产沙特性分析

不同雨型的降雨侵蚀力分析结果显示 (表 3): V 雨型降雨侵蚀力最大, 为 $209.5 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; I 雨型降雨侵蚀力次之, 为 $179.7 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, III 雨型降雨侵蚀力为 $55.44 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; IV 与 II 雨型降雨侵蚀力分别为 $29.1 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $23.43 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分析可知: 降雨强度最大的 V 雨型降雨侵蚀力最大, 降雨量最大的 I 雨型降雨侵蚀力次之, 降雨强度较大的 V 雨型、降雨量最大的 I 雨型降雨侵蚀力明显高于其他雨型, 而发生频率最高的以小雨量、小雨强为主要特征的 II 雨型降雨侵蚀力最低。

对不同类型降雨的产流产沙特性的分析结果显示 (表 3): 雨强最大的 V 雨型平均产流产沙量最大, 其平均产流量为 12.47 mm, 平均产沙量为 $509.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 降雨量最大的 I 雨型次之, 平均产流量为 9.23 mm, 平均产沙量为 $424.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 降雨量、降雨强度均小的 II 雨型平均产沙量为 $78.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均产流量为 2.05 mm; 雨强小雨量居中的 III 雨型平均产流量为 5.57 mm, 平均产沙量为 $175.53 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 雨强居中雨量较小的 IV 雨型平均产流量为 3.23 mm, 平均产沙量为 $83.07 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。产流产沙总量显示: V 雨型最大, 产流总量为 49.88 mm, 产沙总量为 $2036 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; III 雨型次之, 产流总量为 44.56 mm, 产沙总量为 $1400 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; IV 雨型最少, 产流总量为 6.46 mm, 产沙总量为 $166.14 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 3 2014-2016 年冯家沟小流域不同降雨类型产流产沙特征

Table 3 Characteristics of runoff and sediment yield in different types of rainfall in Fengjiagou Basin

降雨类型	平均降雨侵蚀力 $/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	平均产流量/mm	产流总量/mm	平均产沙量 $/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	产沙总量 $/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
I	179.7	9.23	27.69	424.1	1272
II	23.43	2.05	24.6	78.0	936
III	55.44	5.57	44.56	175.53	1400
IV	29.1	3.23	6.46	83.07	166.14
V	209.5	12.47	49.88	509.0	2036

2.3 典型植被措施在不同类型降雨下的水土保持效应分析

2.3.1 典型植被措施在不同类型降雨下的减沙效应分析

5 种不同的植物措施相对于裸地都有减沙作用 (图 2), 其中林地措施下的径流小区在不同类型降雨条件下均有明显的减沙效应: 在 III 雨型 (小雨量、中雨强) 控制下的减沙率最高, 相比裸地可提高 100%, 几乎无泥沙产生; 在 I 雨型 (大雨量, 中雨强) 条件下的减沙率 (84.76%) 最小, 但在同种类型降雨条件下减沙率在典型植被措施中最高。

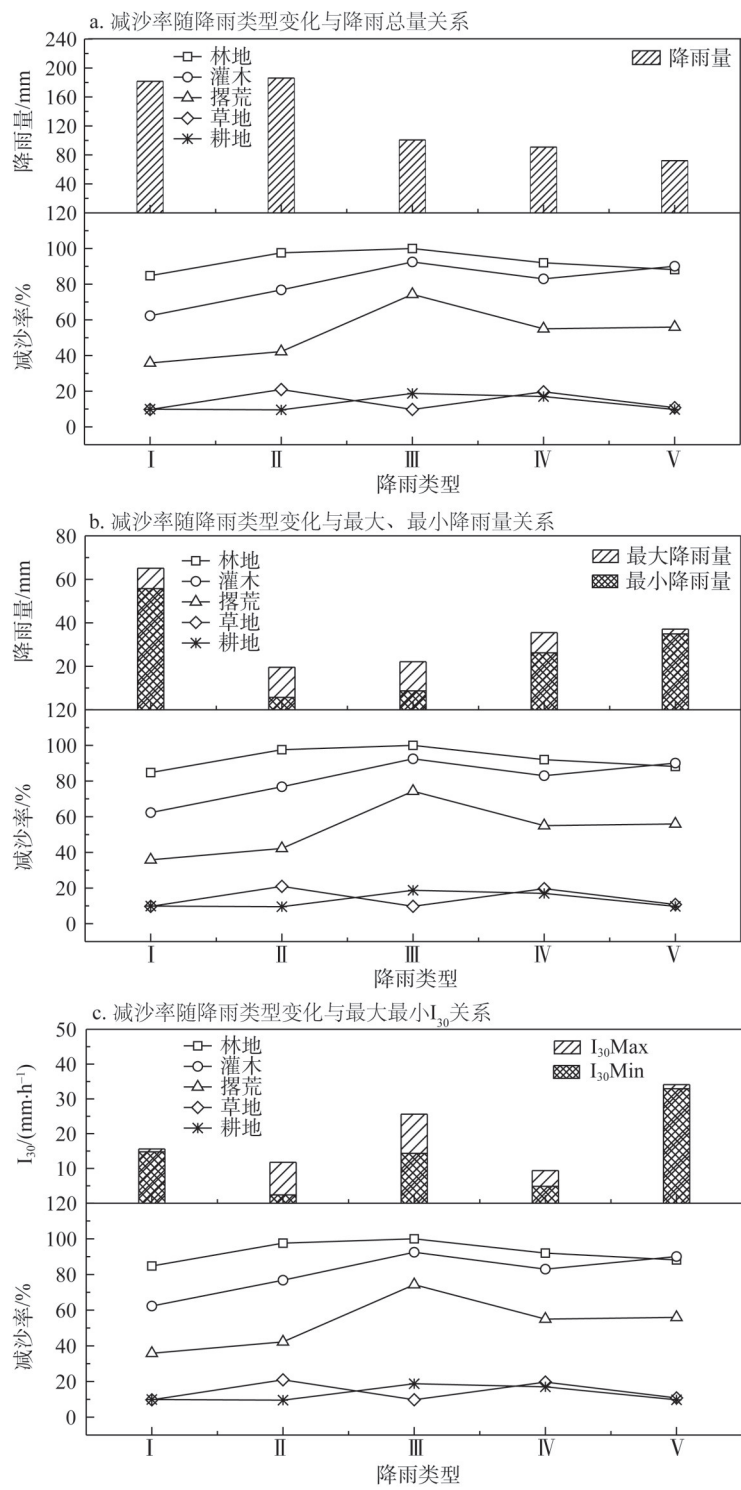


图2 典型植被措施不同降雨类型条件下的减沙率

Fig. 2 Sediment reduction rate of typical vegetation measures under different rainfall types

灌木林地Ⅲ雨型下的减沙率最高, 为92.45%; 在Ⅰ雨型下的减沙率最低, 为62.32%; 在Ⅴ雨型(中雨量, 大雨强)下减沙率为90.07%。撂荒措施下的径流小区减沙率在Ⅲ雨型条件下最高, 为76.31%; 在Ⅰ雨型条件下的减沙率最小, 为35.82%。人工种草与农地措施下的径流小区相对于裸地的减沙率在不同降雨类型差异不大, 在Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ型降雨条件下的减沙率大小为: 人工种草措施>农地措施, 在Ⅲ、Ⅰ型降雨条件下的减沙率为: 农地措施>人工种草措施, 可见人工种草措施相比农地措施更适合于雨强较小的降雨。比较不同年份: 2014年林地措施下的径流小区的减沙率最高, 耕地措施减沙率最低; 2015年林地措施减沙率最高, 人工种草措施最差; 2016年林地措施的减沙率最高, 人工种草措施减沙率最低。

综上, 林地措施在5种植被类型降雨条件下减沙效应最佳; 灌木措施更适合于大雨量、中雨强类型降雨条件下的减沙措施; 撂荒措施的减沙率在5种不同雨型下次于林地措施和灌木措施但高于人工种草措施和农地措施; 人工种草措施和农地措施的减沙效应应在5种植被措施中最低。

2.3.2 典型植被措施在不同降雨类型下的减流效应分析

植被措施可以通过增加植被覆盖度增加植物截流能力, 积累枯枝落叶层厚度涵养水分以及根系增加土壤下渗能力从而减少地表径流达到减流效应。分析可知: 林地措施在不同类型降雨条件下的减流率最大(图3), 减流率均在85%以上: 在Ⅰ雨型(大雨量, 中雨强)降雨条件下减流率为88.2%, 在Ⅱ雨型(小雨量、小雨强)下减流率为99%, Ⅲ雨型(小雨量、中雨强)下为97%, Ⅳ雨型(中雨量、小雨强)下为86%, Ⅴ雨型(中雨量、大雨强)下为100%, 在Ⅳ雨型降雨条件下减流率最低。灌木措施的减流率在48.99%~83.08%之间, 其中在Ⅱ雨型降雨条件下灌木措施减流率(83.08%)最大。撂荒措施下的减流率总体低于林地措施和灌木措施而高于农地措施和人工种草措施, 且在Ⅴ雨型条件下的减流率最低(17.39%), 在Ⅰ雨型降雨条件下减流率最高(35.82%), 表明撂荒措施更适合用于雨量较大的减流措施。农地措施与人工种草措施的减流率相近, 且减流率在5种措施中最低, 均低于25%, 其中, 在Ⅲ雨型降雨条件下人工种草措施的减流率(22.28%)大于农地措施(9.06%), 表明人工种草措施比农地措施更适用于降雨量中等、雨强较小的降雨条件下的减流。在2014-2016年观测期间, 林地措施在5种植被措施下年产量最低, 即减流效果最佳, 2014年人工种草措施产流量最高, 2015年与2016年耕地措施在5种植被措施中产流量最高, 减流效果最差。

整体而言, 5种植被措施在5种不同类型降雨条件下均有一定的减流效应, 其中, 乔木林地措施的减流效应最明显, 能有效减少地表径流的产生, 且最适应于Ⅴ雨型条件下的减流工作; 灌木措施下的径流小区更适宜于小雨量小雨强降雨条件下的减流工程; 撂荒措施随雨型变化差异不明显, 更适用于雨量较小的降雨条件下的减流措施; 人工种草措施和农地措施的减流效应最低, 且人工种草措施的减流效应略高于农地措施。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 黄土塬区冯家沟小流域降雨集中在4-10月份, 7-8月份是黄土塬区水土流失产生及防治的高发月份。根据最大30分钟降雨强度 I_{30} 、降雨总量可分为5种类型: Ⅰ雨型

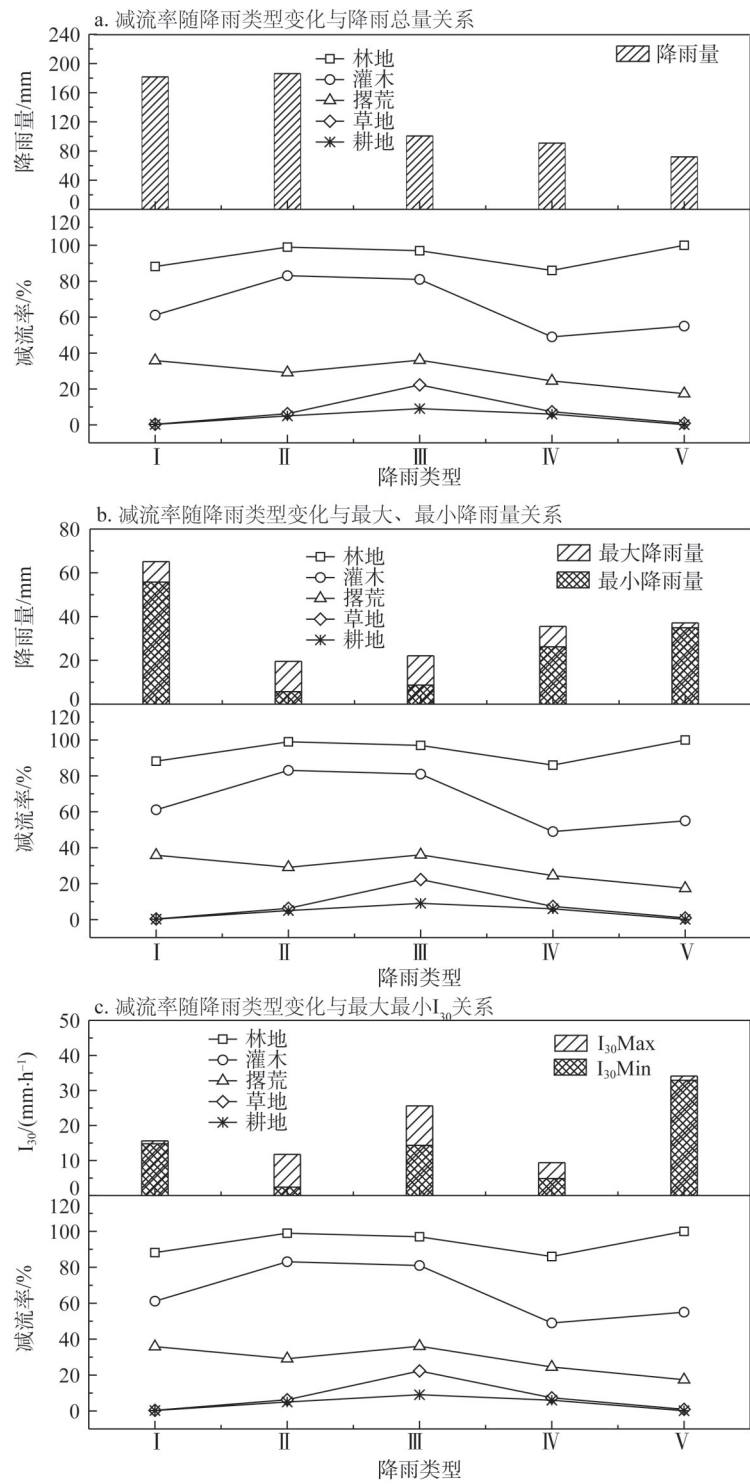


图3 不同植被措施在不同降雨类型下减流率

Fig 3 Flow reduction effect of typical vegetation measures under different rainfall types

(大雨量、中雨强)、Ⅱ雨型(小雨量、小雨强)Ⅲ雨型(小雨量、中雨强)、Ⅳ雨型(中雨量、小雨强)、Ⅴ雨型(中雨量、大雨强);其中,Ⅱ雨型所占比例最大,Ⅴ雨型所占比例最小,小雨量、小雨强的侵蚀性降雨在黄土高原区发生频率最大,雨强最大的Ⅴ雨型平均产流产沙量及产沙产流总量最大。

(2) 5种典型植被措施在不同降雨类型下均有减沙效应,且在不同降雨类型条件下林地措施>灌草措施>撂荒措施>人工种草及农地措施;人工种草措施与农地措施减沙效应差异不大;灌草措施更适宜于Ⅴ雨型降雨条件下的减沙措施;人工种草措施相比农地措施更适合于雨强较小的降雨,林地措施、撂荒措施在Ⅲ雨型下减沙效应达到最高。

(3) 5种典型植物措施在不同降雨类型下均具有减流效应;林地措施在同等条件下更适用于Ⅴ雨型的减流措施,灌木措施在同等条件下更适用于Ⅱ雨型下的减流措施;撂荒措施的减流效应随雨型变化差异不明显,人工种草措施在5种降雨类型下略大于农地措施。

综上,植物措施是黄土塬区水土保持的有效措施,且在不同降雨类型下不同的植物措施会发挥不同的减流减沙作用。根据本研究:坡度为15°的黄土坡地乔灌组合措施对黄土塬区水土保持效应最佳,但水土流失还受到地形、土壤特性等诸多地理因素影响,所以针对地形复杂的黄土塬区需要根据坡度等实际情况进行调整。

3.2 讨论

黄土塬区水土流失受降雨强度、降雨量等影响。观测结果显示:发生频率较高的Ⅱ雨型产流产沙量并不是最高的,而雨强最大的Ⅴ雨型产流产沙量最高,雨量最大的Ⅰ雨型的产流产沙量次之。因此在水土保持工作中应加强Ⅴ雨型的应对措施,这一研究结果与晏清洪等^[34]肖登攀等^[35]的研究结果一致。

在2014-2016年观测期间5种植被类型均有明显的减沙减流效应。2014年降雨总量最高,雨量较大但雨强中等的Ⅳ雨型略多,产流量为3年中最大,产沙量居中。2015年降雨总量最少,Ⅱ雨型居多,产流量最低,其中林地措施未产流产沙即水土保持效应最佳,人工种草措施产流量最多,耕地措施产沙量最多,水土保持效应较差。2016年,Ⅱ雨型降水发生频率最高,Ⅴ雨型发生次数在3年中最多。林地措施产流产沙量在2016年最少,水土保持效果最好;耕地措施产流产沙量最少即水土保持效应最差。不同植被措施的减流减沙效应与降雨类型密切相关,但随着年份增加,不同植被措施植被覆盖度会发生变化,同时枯枝落叶层的厚度也会有所差异,对水土保持效应的比较研究有所影响,需要在以后的研究工作中进一步讨论验证。

对5种植物不同降雨类型条件下水土保持效应的分析结果表明:相对于裸地5种植物措施在不同类型降雨条件下均有一定的水土保持效应,能有效减少泥沙量和径流量,这与高磊等^[16]的研究结果一致。林地措施由于树龄大,有枯枝落叶层覆盖,且树冠能有效减少雨滴对土壤表面的直接打击,所以在不同降雨类型下减沙效应和减流效应都最明显,这一结果与徐佳等^[36]的一致。灌木措施植被密度大,植被覆盖度较高,所以水土保持效应仅次于乔木林地措施;灌木林更适合用于雨量中等、雨强较大降雨条件下的减沙工作,但减流效应在Ⅳ雨型显著减少,这可能由于灌木丛覆盖密度较大,能够减小雨强较大的降雨直接冲刷土体表面,减少土壤侵蚀,但截流效果一般。撂荒措施在建成以来没有人有扰动,土壤结皮完整,天然植被恢复较快,荒草生长旺盛,植被覆盖度达67%,所以减沙及减流效应在不同雨型条件下均处于第三位。人工种草措施和耕地措施水土保持效应较小,这可能由于耕作措施破坏土壤结构,使土壤易被冲刷侵蚀,且人工

种草措施相对于其他措施的植株矮小,根系不够发达,截流作用弱有关^[37]。

研究期内春季干旱,土壤含水率低,人工种草措施出苗率仅为20%,从而影响了人工草地的正常观测,均为裸露地表,造成含沙量较高,但这也符合黄土高原的气候特征,所以对研究结果影响甚微,而农地措施在观测期间的2016年多暴雨,农作物苗木小,且由于径流小坡度较大(15°),受到暴雨冲刷,产沙量增加,也对研究结果有所影响,需要进一步改进。

参考文献(References):

- [1] 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.农业工程学报,2011,27(6): 36-41. [JIANG N, SHAO M A. Characteristics of soil and water loss of different slope land uses in small watershed on the Loess Plateau. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 36-41.]
- [2] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究.地理学报,2015,70(9): 1503-1515. [GAO H D, LI Z B, LI P, et al. Capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1503-1515.]
- [3] 赵珩航,曹斌挺,焦菊英.黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征.中国水土保持科学,2017,15(3): 105-113. [ZHAO H K, CAO B T, JIAO J Y. Characteristics of soil erosion of different plant communities converted from slope cropland in the hilly-gully region of the Loess Plateau. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(3): 105-113.]
- [4] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素.自然资源学报,2005,30(4): 483-492. [HUANG Y L, CHEN L D, FU B J, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the Loess Plateau, China. Journal of Natural Resources, 2005, 30(4): 483-492.]
- [5] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析.自然资源学报,2017,32(3): 449-460. [ZHAO A Z, ZHANG A B, LIU H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 449-460.]
- [6] 吕锡芝,康玲玲,左仲国,等.黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征.生态环境学报,2015,24(7): 1113-1117. [LYU X Z, K L L, ZUO Z G, et al. Characteristics of slope runoff under different vegetation conditions in Lvergou watershed of the Loess Plateau. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1113-1117.]
- [7] 刘国彬,王兵,王伟,等.黄土高原水土流失综合治理技术及示范.生态学报,2016,36(22): 7074-7077. [LIU G B, WANG B, WEI W, et al. Technique and demonstration of water and soil loss comprehensive harness on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7074-7077.]
- [8] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展.生态学报,2006,26(9): 3137-3143. [XU X L, MA K M, FU B J, et al. Research review of the relationship between vegetation and soil loss. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3137-3143.]
- [9] ZHOU J, FU B, GAO G, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. Catena, 2016, 137(137): 1-11.
- [10] 魏天兴.黄土残塬沟壑区降雨侵蚀分析.水土保持学报,2001,15(4): 47-50. [WEI T X. Study on rainfall and erosion in Loess Gullied- Hilly area. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4): 47-50.]
- [11] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等.中国降雨侵蚀力R指标研究进展.中国农学通报,2011,27(4): 1-5. [SUN Q Z, WANG C J, ZHAO J, et al. Research evolution of rainfall erosivity (R) in China. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 1-5.]
- [12] 李锡泉,田育新,袁正科,等.湘西山地不同植被类型的水土保持效益研究.水土保持研究,2003,10(2): 123-125. [LI X Q, TIAN Y X, YUAN Z K, et al. Effects of different vegetative types on soil and water conservation at erosion areas. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(2): 123-125.]
- [13] WEI W, CHEN L, FU B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. Journal of Hydrology, 2007, 335(3): 247-258.
- [14] ZHAO X L, LIANG X L, WU F Q, et al. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 400-409.
- [15] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征.水土保持学报,2017,31(2): 17-21. [MA X,

- ZHENG J K, WANG W W, et al. Characteristics of the runoff and sediment yield of sloping farmland in the purple soil area under different rainfall patterns. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 17-21.]
- [16] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 等. 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. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 5-11. [GAO L, RAO L Y, CUI F B, et al. Effect of erosive rainfall on runoff and sediment yield of typical plant measures in rocky mountain areas of Taihang. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 5-11.]
- [17] 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. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 6-11. [WANG X B, ZHU Y Q, WU Y J, et al. Effects of rainfall regimes on soil erosion on red soil slopes under different vegetation types. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 6-11.]
- [18] 王葆, 程金花, 王文凯, 等. 北京北部褐土区2种典型植物措施减流减沙效应. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 56-61. [WANG B, CHENG J H, WANG W K, et al. Effects of two typical plant measures on runoff and sediment reduction in a cinnamon soil region in Northern Beijing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 56-61.]
- [19] 李晓原, 张文太, 李建贵, 等. 伊犁河谷5种土壤管理措施减流减沙效果分析. *中国水土保持科学*, 2017, 15(3): 51-57. [LI X Y, ZHANG W T, LI J G, et al. Effects of five soil management measures on runoff and sediment reduction in Ili Valley of Xinjiang. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(3): 51-57.]
- [20] 赵海东, 赵小敏, 方少文, 等. 鄱阳湖区坡耕地水土流失对土壤养分的影响. *江西农业大学学报*, 2014, (1): 225-229. [ZHAO H D, ZHAO X M, FANG S W, et al. Effect of soil and water erosion on soil nutrients on the slope farmland in Poyang Lake region. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, (1): 225-229.]
- [21] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 23-27. [WANG S, WANG Q J, DONG W C, et al. Runoff and sediment generations and nutrient losses under different vegetation coverage in loess slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 23-27.]
- [22] 李元寿, 王根绪, 沈永平, 等. 长江源区不同植被覆盖度下产流产沙效应初步研究. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 869-875. [LI Y S, WANG G X, SHEN Y P, et al. Impacts of land coverage on runoff production and sediment yield in the Headwaters of the Yangtze River, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 869-875.]
- [23] FU B, YU L, LYU Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [24] 齐清, 王天明, 寇晓军, 等. 基于GIS的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 1-5. [QI Q, WANG T M, KOU X J, et al. Quantitative assessment of soil erosion in small watershed in Loess Plateau based on GIS. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3): 1-5.]
- [25] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响. *生态学报*, 2011, 31(23): 7056-7066. [ZHANG J J, LI H M, XU J J. Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7056-7066.]
- [26] 顾朝军, 穆兴民, 孙文义, 等. 极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1755-1767. [GU C J, MU X M, SUN W Y, et al. Comparative analysis of the responses of rainstorm flood and sediment yield to vegetation rehabilitation in the Yanhe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1755-1767.]
- [27] WEI W, CHEN L, FU B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3): 247-258.
- [28] PENG T, WANG S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in Southwest China. *Catena*, 2012, 90(1): 53-62.
- [29] 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. *Catena*, 2012, 99(4): 1-8.
- [30] HUANG Z G, OUYANG Z Y, LI F R. Response of runoff and soil loss to reforestation and rainfall type in red soil region of Southern China. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(11): 1765-1773.
- [31] 余卫东, 闵庆文, 李湘阁. 黄土高原地区降水资源特征及其对植被分布的可能影响. *资源科学*, 2002, 24(6): 55-60. [YU W D, MIN Q W, LI X G. The features of precipitation in the Loess Plateau and its possible impacts on vegetation distribution. *Resources Science*, 2002, 24(6): 55-60.]
- [32] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 III: 关于侵蚀性降雨的标准问题. *水土保持通报*, 1984, (2): 58-63. [WANG W Z. Study on the relations between rainfall characteristics and loss of soil in loess region. *Bulletin of Soil*

- and Water Conservation, 1984, (2): 58-63.]
- [33] 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. 生态学报, 2006, 26(11): 3847-3853. [WEI W, CHEN L D, FU B J, et al. Mechanism of soil and water loss under rainfall and earth surface characteristics in a semiarid loess hilly area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3847-3853.]
- [34] 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. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169-175. [YAN Q H, YUAN C P, LEI T W, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau. *Transactions of the CSAM*, 2014, 45(2): 169-175.]
- [35] 肖登攀, 韩淑敏, 杨艳敏, 等. 太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究. 水土保持研究, 2009, 16(5): 35-39. [XIAO D P, HAN S M, YANG Y M, et al. Study on rainfall-infiltration-runoff under typical ground surfaces conditions in the hilly regions of Taihang Mountain. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(5): 35-39.]
- [36] 徐佳, 刘普灵, 邓瑞芬, 等. 黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究. 地理科学, 2012, 32(11): 1391-1396. [XU J, LIU P L, DENG R F, et al. Runoff and sediment reductions in the different stages of vegetation restoration on a loess slope. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(11): 1391-1396.]
- [37] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征. 自然资源学报, 2015, 30(3): 459-469. [YIN Q L, JIAO J Y, KOU M. The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(3): 459-469.]

Effects of different plant measures on soil and water conservation in typical tableland zones on the Loess Plateau

SUN Cong-jian^{1,2}, HOU Hui-xin¹, CHEN Wei¹, YANG Wei¹, ZHENG Zhen-jing¹

(1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China)

Abstract: This article, based on the observations of the measured (2014-2016) rainfall data from typical loess tableland zones and slope runoff and sediment yield with five vegetation measures (arbor, shrub, woodland, artificial grass and cultivated field), systematically analyzes the effects of different types of erosive rainfall on the soil and water conservation on loess sloping land under different vegetation coverages. The results are shown as follows. (1) Most of the rainfall in the research area occurred in the period April to October, in which the erosive rainfall induced from soil erosion was concentrated in July and August. (2) Erosive rainfall can be achieved based on the maximum 30-minute rainfall intensity and total rainfall. It is divided into five types, among which the event with small rainfall and low intensity is the most frequent type, and the erosive force of the 5th pattern is the largest, followed by the 1st pattern with the largest rainfall, and the erosive force of the 2nd pattern is the lowest. (3) Five types of vegetation measures show obvious soil and water conservation effect under different types of rainfall. And the changing rules of the rate of sediment reduction and the rate of reduction of flow under different rainfall conditions are different.

Keywords: Loess Plateau; vegetation measures; sand and water reduction; soil and water conservation