

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.015.

普隽泽, 吕锡芝, 张秋芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 1-6.

PU Junze, LÜ Xizhi, ZHANG Qiufen, et al. Characteristics and Influencing Factors of Runoff and Sediment Yield of Typical Grassland in Loess Hilly and Gully Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 1-6.

黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素

普隽泽¹, 吕锡芝², 张秋芬², 王富强¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046;

2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003)

摘 要:退耕还林还草是黄土高原水土流失重要治理措施之一。为探讨自然降雨条件下,不同种类草被种植对坡面产流产沙特征的影响,采用定位观测方法,基于罗玉沟水土保持监测站 6 种不同草被(小冠花、红豆草、沙打旺、紫花苜蓿、红三叶、鹰咀紫云英)覆盖坡面的野外观测数据,分析了不同降雨条件下各草被覆盖径流小区的产流产沙规律。结果表明:(1) 各场次降雨中,小冠花覆盖下的坡面产流量及产沙量均较大,沙打旺和鹰咀紫云英覆盖坡面均较小;(2) 除沙打旺和鹰咀紫云英以外的草被覆盖小区产流产沙量均与降雨量和最大降雨强度呈显著或极显著关系;(3) 侵蚀性降水依据降雨量、降雨历时和最大降雨强度分为 3 种类型:Ⅰ雨型(降雨量大、降雨历时长、最大雨强大)、Ⅱ雨型(降雨量、降雨历时、最大雨强均居中)、Ⅲ雨型(降雨量较小、降雨历时短、最大雨强小)。6 种草被在不同雨型下产流产沙特性不同,沙打旺和鹰咀紫云英覆盖坡面在不同雨型下产流量及产沙量均较少,小冠花覆盖坡面在不同雨型下产流量及产沙量均较大。综上,不同草被覆盖下的坡面产流产沙规律不尽相同,对不同降雨特征的响应程度也存在差异,小冠花覆盖小区的抗侵蚀能力较差;沙打旺和鹰咀紫云英覆盖小区的抗侵蚀能力较好。

关键词:产流产沙特征;降雨特征;草被;丘陵沟壑区

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2023)02-0001-06

Characteristics and Influencing Factors of Runoff and Sediment Yield of Typical Grassland in Loess Hilly and Gully Region

PU Junze¹, LÜ Xizhi², ZHANG Qiufen², WANG Fuqiang¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration of Yellow River Basin, Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Returning farmland to forest and grassland is one of the important measures to control soil erosion in the Loess Plateau. In order to investigate the effects of planting different kinds of grass on the characteristics of sediment yield and discharge on the slope under natural rainfall conditions, the field observation data of six different grass covers (*Coronilla varia* L., *Onobrychis viciaefolia* Scop L., *Astragalus adsurgens* Pall L., *Medicago sativa* L., *Trifolium pratense* L. and *Astragalus cicer* L.) in Luoyugou soil and water conservation monitoring station were used. In order to provide theoretical support for soil and water loss control in hilly-gully region of loess plateau, the pattern of sediment yield and runoff in each grass-covered runoff district under different rainfall conditions was analyzed. The results showed as follows. (1) In different rainfall periods, the runoff and sediment yields on the slope covered by *Coronilla varia* L. were larger, while those on the slope covered by *Astragalus adsurgens* Pall L. and *Astragalus cicer* L. were smaller. (2) Sediment

yield was significantly correlated with rainfall and maximum rainfall intensity in different grassy areas except *Astragalus adsurgens* Pall L. and *Astragalus cicer* L. (3) According to rainfall, rainfall duration and maximum rainfall intensity, the erosive rainfall can be divided into three types: rain type I (large rainfall, long rainfall duration and the most heavy rain), rain type II (rainfall, rainfall duration and the most heavy rain intensity are all in the middle), rain type III (small rainfall, short rainfall duration and the most heavy rain intensity). Under various rain patterns, the sediment and runoff yields of the six grasses differed, the runoff and sediment output on the slopes covered with *Astragalus adsurgens* Pall L. and *Astragalus cicer* L. reduced, while the runoff and sediment yields on the slopes covered with *Coronilla varia* L. were higher under different rain patterns. In conclusion, the patterns of sediment productions and losses on the slope under different grass covers were not the same, the degrees of responses to different rainfall characteristics were also different, the anti-erosion ability of the *Coronilla varia* L. covered area was poor. The anti-erosion ability was better in the areas covered by *Astragalus adsurgens* Pall L. and *Astragalus cicer* L.

Keywords: characteristics of sediment and runoff yield; rainfall characteristics; grass; hilly and gully region

黄土丘陵沟壑区是黄土高原旱作农业的主要分布区,历史时期过度开垦、轮耕轮牧现象严重,种植模式单一落后,使得黄土高原地区植被不断退化、土壤质地干燥疏松,极易发生水土流失,生态环境恶化,很大程度上影响了该地区的生态环境稳定及社会发展。截至目前,黄土丘陵沟壑区的水土保持任务依然艰巨^[1]。植被恢复被认为是黄土高原地区控制土壤侵蚀的关键措施之一,林草植被能够有效削弱雨滴冲刷,保护土壤结构,同时,植被本身也会含蓄大量水分,进而减少径流泥沙的产量^[2-4]。退耕还林还草工程是黄土高原地区当前开展的一项重要的生态修复工程,随着黄土高原生态环境的不断修复,黄河径流泥沙量在逐年减少,但坡地水土流失仍十分严重,导致黄土高原地区生态环境修复成效缓慢。草地生态系统是黄土高原适应性最强、分布最广的生态系统,占黄土高原地区总面积的40%^[5],因此,开展野外长期观测试验,研究黄土高原地区坡面不同退耕草被措施对水土保持等主要生态功能的影响显得尤为重要。

水土流失往往与自然环境变化和人类活动有着密切联系,水土保持是治理水土流失最重要的举措,相较于其他措施,生物措施对生态环境的可持续发展意义更大,并且与其他生物相比,草被在保持水土方面具有生长迅速、见效快、生长密度大、植株稠密等优势^[6]。已有许多学者对草地措施下自然环境驱动因素,如降雨特征、坡度、植被覆盖度等对产流产沙特征影响进行了研究。降雨是土壤水分的主要补给来源,会显著影响土壤入渗性能。相关研究表明,苜蓿(*Medicago sativa* L.)、草木犀(*Melilotus officinalis* (Linn.) Pall.)等典型草被在不同生长年限和降雨特征下均可以减缓坡面径流,降低坡面产沙并提高土壤入渗量,有较好的减水减沙效益,其减水减沙效益与不同降雨条件具有

密切关系^[7-11]。坡度和坡长通过改变坡面承雨量来影响土壤入渗。各学者对不同坡度下撂荒地土壤入渗规律的研究,发现土壤入渗量等整体随坡度增大呈线性增加,但在坡度超过25°时,会随着坡度的增加而减小^[12-14]。同时,也有很多研究人员基于野外观测数据和人工模拟降雨试验结果,分析得出,随着草被盖度的增加,植被可有效截留降雨,保护土壤结构,增强入渗能力,径流小区的产流产沙量会明显减小^[15-20]。基于以上研究,可看到在水土流失严重的干旱瘠薄地区,草被生长繁茂,形成盖度和密度很大的植被,可起到良好的水土保持作用。

由于黄土高原丘陵沟壑区复杂的气候条件、土壤侵蚀环境和多样的种植模式,导致该地区的土壤侵蚀机理研究十分困难。目前,关于草被的产流产沙效应研究,多是基于人工模拟降雨进行分析,且鲜少对不同草被类型的产流产沙综合响应机制进行研究,需继续开展天然降雨下的坡面土壤侵蚀机理研究。故本文基于野外长期观测试验,研究不同次降雨下典型草被覆盖径流小区的产流产沙响应机制,并结合相关分析方法得出不同草被覆盖的径流小区产流产沙量对主要降雨特征因子的响应,为水土保持治理措施的选择提供更多可能。

1 研究区概况

罗玉沟流域(105°30′—105°45′E, 34°34′—34°40′N)属于黄土丘陵沟壑区第三副区,地处甘肃省天水市北郊,发源于天水市北道区的凤凰山南麓,地势西北高,东南低,在天水市东关城区注入藉河,是渭河支流藉河左岸的一级支沟。流域控制面积72.79 km²,主沟长21.81 km²,平均比降3.35%,主要为黄土梁状丘陵地貌,地面坡度较缓,沟壑密度为2~4 km/km²。

流域所在区域气候为温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 530 mm 左右,且年内分布不均,主要集中在 6—9 月,年均气温 10℃ 左右。流域地面组成物质主要为第四纪马兰黄土,成分以砂粉为主,富含碳酸盐,质地松散,抗蚀能力较差。流域植被主要以乔木、灌木、豆科等类型为主。

2 试验设计与数据处理

2.1 试验设计

本试验基于坡面尺度,采用定位观测方法,对自然降雨条件下的径流小区产流产沙量进行监测。径流场布设在距罗玉沟试验场约 100 m 的桥子东沟坡耕地上,包括 7 个长 16.68 m,宽 4 m,面积为 66.72 m² 的 15° 人工径流小区。为方便数据记录,对径流小区从 1—7 依次编号,其中 7 号对照小区为农地对照小区,选择常见农作物洋芋—小麦—荞麦—玉米轮种,还原黄土高原地区常见的轮耕坡耕地自然状态,1—6 号小区为人工牧草覆盖小区,模拟坡面退耕还草后的自然状态。径流小区土壤类型主要为灰褐土。牧草种类选用黄土高原常见的草种:小冠花(*Coronilla varia* L.)、红豆草(*Onobrychis viciaefolia* Scop L.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall L.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、红三叶(*Trifolium pratense* L.)、鹰咀紫云英(*Astragalus cicer* L.)。为保证各径流小区互不干扰,在小区周围设置护埂,三边护埂外设置宽为 2 m 的保护带,保护带内种植与小区相同的牧草,小区底部布设圆柱状铁皮集流桶用于收集坡面径流泥沙,底部设有一个排水孔,桶口面积为 0.25 m²。牧草于每年 8 月采用水平条播的方法开始播种,且施肥措施保持一致,除沙打旺每年收割 1 次以外,其余牧草均在相应的最佳收割期每年收割 2 次。

2.2 观测方法

本试验的次降雨起迄时间、降雨总量、最大雨强及最大雨强历时直接采用试验场雨量站观测值,平均降雨强度则通过次降雨降雨总量除以次降雨降雨历时计算

得出。径流小区只对次降雨产生的径流总量(浑水)和泥沙总量进行观测,不对径流的起止时间和径流过程进行记录。量水设备为集流桶,产流结束后,通过测量水深来计算产流量。泥沙总量则通过纯产流量乘以含沙量得出,在降雨结束,产流终止后应立即观测,在集流桶中将泥沙和水搅拌均匀,混合后从水中取出 500 cm³ 或 1 000 cm³ 水样进行统一标记、计算。

2.3 数据处理

本文将引起任一径流小区产流产沙的降雨定义为侵蚀性降雨^[21]。为明晰侵蚀性降雨主要特征因子与不同草被覆盖的水土保持效益关系,选用 12 场典型侵蚀性降雨的降雨量、降雨历时及最大降雨强度与 6 种不同类别的牧草覆盖小区的径流深及土壤流失量,运用 SPSS23 进行相关性分析。采用 K-means 聚类分析方法对各场次侵蚀性降雨归类,通过统计方法对不同雨型下 6 种不同种类草被覆盖径流小区的产流产沙量进行对比研究,并运用 Origin 2018 绘图。

3 结果与分析

3.1 不同草被措施下的次降雨产流产沙量

由图 1 可知,6 种不同草被措施下,产流量和产沙量随不同降雨场次的变化趋势基本一致。总的来看,小冠花覆盖小区的产流量和产沙量在不同场次降雨中均较大;沙打旺和鹰咀紫云英覆盖小区的产流量与产沙量在不同场次降雨中均较低,其余几种草被覆盖小区的产流量与产沙量在不同场次降雨中差距不大。这可能与小冠花在生长过程中,枝叶结构松散,茎秆柔软,减弱雨滴冲刷能力不强等因素有关。而沙打旺和鹰咀紫云英茎秆粗壮,植株枝叶覆盖范围大,能在雨水降落过程中有效减少雨滴冲刷,因此其产流量及产沙量较小。对比不同草被覆盖小区的产流量与产沙量随降雨场次的变化趋势可知,二者变化趋势有一定的相似性,即在相同场次降雨中,6 种不同草被覆盖小区随着产流量增加,其产沙量也相应增加,不同草被覆盖小区在不同场次降雨中产流量的差异较小,产沙量的差异较大。

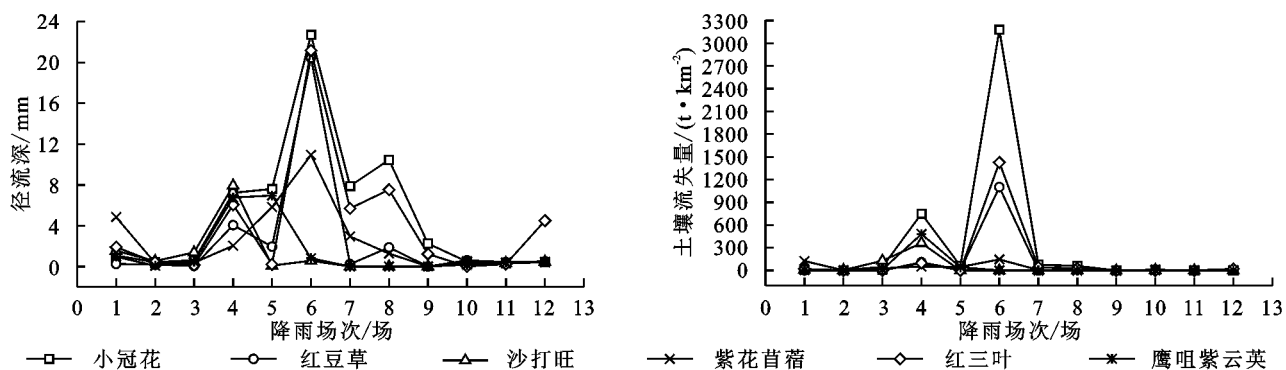


图 1 次降雨不同草被产流产沙量

3.2 不同雨型下不同草被措施的产流产沙特性

3.2.1 侵蚀性降雨分类 本研究以降雨历时、降雨量和最大雨强为主要指标依据,采用 K-means 聚类分析,将研究区域 12 场侵蚀性降雨分为 I 雨型、II 雨型和 III 雨型(表 1)。其中 I 雨型降雨历时中心值为 856.67 min,一次降雨量中心值为 52.77 mm,最大雨强中心值为 0.86 mm/h,属于长历时、多雨量、大雨强类型,共有 3 场;II 雨型降雨历时中心值为 446.20 min,一次降雨量中心值为 24.12 mm,最大雨强中心值为 0.50 mm/h,属于中历时、中雨量、中雨强类型,共有 5 场;III 雨型降雨历时中心值为 155 min,一次降雨量中心值为 14.83 mm,最大雨强中心值为 0.37 mm/h,属于短历时、少雨量、小雨强类型,共有 4 场。

表 1 侵蚀性降雨分类结果

雨型	频次/场	降雨历时 中心值/min	降雨量 中心值/mm	最大雨强中心值/ (mm·h ⁻¹)
I	3	856.67	52.77	0.86
II	5	446.20	24.12	0.50
III	4	155	14.83	0.37

3.2.2 不同草被措施产流产沙对降雨类型的响应

不同雨型下不同草被覆盖小区的产流产沙规律是存在差异的。如图 2 所示,随着降雨历时增长,降雨量增多、降雨强度增大,除沙打旺以外各草被覆盖小区的平均产流量及产沙量均增多;其中, I 雨型下,除沙打旺和鹰咀紫云英以外的 4 种草被覆盖小区的平均

产流量及产沙量最多; II 雨型与 III 雨型条件下各草被覆盖小区的平均产流量及产沙量相差不大。在 I 雨型条件下,小冠花覆盖小区平均产流量最多,为 10.85 mm;沙打旺覆盖小区最少为 0.23 mm。II 雨型条件下,红三叶覆盖小区平均产流量最多,为 2.623 mm,沙打旺覆盖小区最少,为 1.083 mm。III 雨型条件下小冠花覆盖小区平均产流量最多,为 4.86 mm,鹰咀紫云英覆盖小区最少,为 0.158 mm。在不同雨型条件下,6 种不同草被覆盖小区下的产沙量与产流量变化趋势基本相似,即随着降雨历时增长、降雨量增多,除沙打旺和鹰咀紫云英以外 4 种措施小区产沙量增加。在 I 雨型降雨条件下,小冠花覆盖小区的平均产沙量最多,达到 1 080 t/km²;沙打旺覆盖小区最少,为 0.31 t/km²。II 雨型条件下,小冠花覆盖小区平均产沙量最多,为 153.29 t/km²;红豆草覆盖小区最少,为 23.77 t/km²; III 雨型条件下,小冠花覆盖小区平均产沙量最多,为 62.13 t/km²;鹰咀紫云英覆盖小区最少,为 3.823 t/km²。综上所述,在 3 种不同的降雨类型下,除 II 雨型外,小冠花覆盖小区的平均产流量及平均产沙量最多。沙打旺覆盖小区在不同类型降雨条件下的平均产流量及平均产沙量均较小,说明在长历时、总量大的降雨条件下,沙打旺的水土保持效果最好。不同草被的结构特征存在差异,加之不同场次的降雨特征也不尽相同,导致了不同植被在不同雨型条件下的产流产沙过程及特征存在差异^[22]。

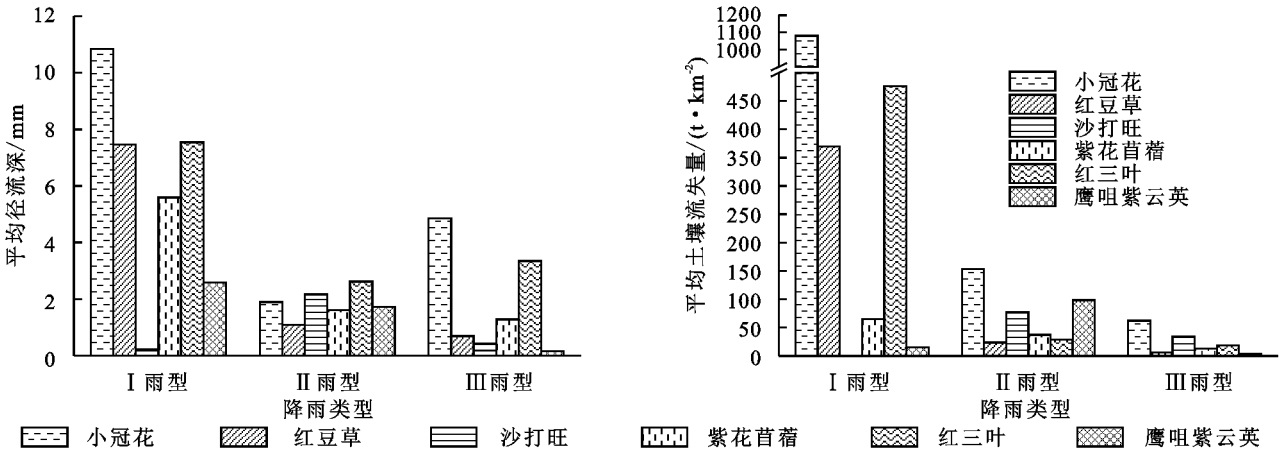


图 2 不同类型降雨条件下不同草被措施累积产流产沙效应

3.3 降雨特征参数对不同草被措施产流产沙的影响

对 12 场典型侵蚀性降雨的主要特征参数和对应的产流产沙量相关关系进行分析,结果见表 2。小冠花、红豆草、紫花苜蓿和红三叶 4 种草被覆盖小区的产流量和产沙量均与最大降雨强度及降雨量有相关关系,紫花苜蓿覆盖小区的产流量、红豆草覆盖小区的产流量和产沙量与降雨历时具有相关关系。对比不同草被覆盖小区可知,紫花苜蓿覆盖下的小区产流

量与降雨历时呈极显著相关($p<0.01$),相关系数为 0.783;红豆草覆盖下的小区产流量(产沙量)与降雨历时呈显著相关($p<0.05$),相关系数为 0.639(0.609),小冠花、红豆草、红三叶覆盖下的径流小区产流量(产沙量)均与降雨量呈极显著相关($p<0.01$),相关系数分别为 0.842(0.881),0.905(0.876),0.763(0.866),紫花苜蓿覆盖下的小区产流量与降雨量呈极显著相关($p<0.01$),相关系数为 0.923,产沙量与降雨量呈显

著相关($p<0.05$),相关系数为 0.730;小冠花、红豆草、红三叶覆盖下的径流小区产流量(产沙量)与最大降雨强度呈极显著相关($p<0.01$);相关系数分别为:0.713 (0.894),0.892 (0.868),0.768 (0.838),紫花苜蓿覆盖下的小区产流量(产沙量)与降雨量呈显著相关($p<0.05$),相关系数为 0.676 (0.623),而沙打旺和鹰咀紫云英覆盖小区的产流量与产沙量与这 3 个特征因子均无较明显关系,这很有可能与观测时间下该草被覆盖的径流小区出现了自然破坏损坏等情况。

表 2 主要降雨特征与不同草被措施产流产沙量的相关系数

项目	草被类型	降雨历时	降雨量	最大降雨强度
产流量	小冠花	0.467	0.842 **	0.713 **
	红豆草	0.639 *	0.905 **	0.892 **
	沙打旺	-0.1113	0.00	0.277
	紫花苜蓿	0.783 **	0.923 **	0.676 *
	红三叶	0.379	0.763 **	0.768 **
	鹰咀紫云英	0.422	0.317	0.201
产沙量	小冠花	0.521	0.881 **	0.894 **
	红豆草	0.609 *	0.876 **	0.868 **
	沙打旺	-0.230	-0.081	0.224
	紫花苜蓿	0.587	0.730 *	0.623 *
	红三叶	0.522	0.866 **	0.838 **
	鹰咀紫云英	0.007	0.076	0.316

注:**表示 $p<0.01$,极显著相关;*表示 $p<0.05$,显著相关。

4 讨论

本文以不同降雨特征下的侵蚀性降雨为基础,观测了不同草被覆盖小区的产流产沙量,分析了产流产沙量与主要降雨特征因子(降雨历时、降雨量和最大降雨强度)之间的相关关系,结果表明:小冠花覆盖小区的产流量和产沙量在不同场次降雨中均较大;沙打旺和鹰咀紫云英覆盖小区的产流量与产沙量在不同场次降雨中均较低,其余几种草被覆盖小区的产流量与产沙量在不同场次降雨中差距不大,小冠花、红豆草、紫花苜蓿和红三叶 4 种草被覆盖小区的产流产沙量均与降雨量和最大降雨强度有明显的正相关关系。这些结果与孙义秋^[23]、张琳卿^[24]、朱燕琴^[25]等的研究结果基本一致。不同的草被在其生长发育的过程中,由于根系生长、叶面积大小以及对水分的吸收利用等都存在差异,进而导致了不同草被对侵蚀性降雨的响应有所不同,同时产流产沙特征也不尽相同^[26]。小冠花因适应性强,覆盖度大,能迅速形成草层,可以起到良好的水土保持作用,但枝叶较为松散,不能有效削减雨水冲刷^[27],水土保持效果较其他 5 种草被差。紫花苜蓿、红豆草和红三叶枝繁叶茂,大面积栽种时能很快覆盖地面,持水量较大,可有效截留降水,

减少地表径流。同时,这 3 种草被根系发达,不仅有利于土壤团粒结构的形成,而且能改善土壤性质,提高土壤的持水能力,从而起到保持水土的作用^[28-29]。沙打旺和鹰咀紫云英相较于其余 4 种草被根系最发达,固结土壤能力最强,对水分吸收利用程度高,能有效降低降雨动能和降水对地表土壤的溅蚀,进而减少水土流失^[30-31]。降水作为造成水土流失的初始动力,降雨历时、降雨量和降雨强度等特征因子对水土流失有很大影响。随着降雨历时、降雨强度的增大,雨水的动能也会增大,进而导致落到地面时的最终速度变大,增大了对土壤的冲刷^[32];在相同降雨历时内,随着降雨强度的增大,短时间段内降雨量会激增,土壤含水以更快的速度达到饱和,最终导致地面产流产沙量增加^[33]。

黄土丘陵沟壑区大量研究表明,生长迅速的人工牧草,地下根茎发达,耗水量大,很多时候会消耗深层土壤水来满足生长需要,如果根系分布深度内的土壤水被消耗完,就会形成土壤干层,草被将不能存活^[34]。因此,在治理黄土丘陵沟壑区坡面水土流失时,不仅要重视不同草被类型的种植,还应考虑不同草被的土壤水分入渗规律,结合区域自然环境特征,从根本上缓解水土流失等环境问题。本文主要研究不同草被覆盖小区的产流产沙量及其与主要降雨特征因子的关系,没有对草被结构及其生境的一些主要特征,如覆盖度等和小区下垫面条件,如坡度、雨前土壤含水率等对坡面产流产沙的影响进行研究,在之后的研究过程中,有待进一步深入,使研究结果更完整,适用性更高。

5 结论

- (1) 不同场次降雨中,小冠花覆盖小区的产流量和产沙量在不同场次降雨中均较大;沙打旺和鹰咀紫云英覆盖小区的产流量与产沙量在不同场次降雨中均较低,其余几种草被覆盖小区的产流量与产沙量差距不大。
- (2) 6 种草被在不同雨型下产流产沙特征不同。Ⅰ雨型下,小冠花覆盖小区的产流量和产沙量均最多,沙打旺覆盖小区最少;Ⅱ雨型下,红三叶覆盖小区的产流量最多,小冠花覆盖小区的产沙量最多,沙打旺覆盖小区的产流量和产沙量均最少;Ⅲ雨型条件下,小冠花覆盖小区的产流量和产沙量均最多,沙打旺覆盖小区的产流量最少,红豆草覆盖小区的产沙量最少。
- (3) 小冠花、红豆草、紫花苜蓿和红三叶 4 种草被覆盖小区的产流量和产沙量与降雨量、最大降雨强度有明显的正相关关系,红豆草覆盖小区下的产流量

与产沙量、紫花苜蓿覆盖小区的产流量还与降雨历时具有显著的正相关性,而沙打旺和鹰咀紫云英覆盖小区的产流量和产沙量与这3个特征因子相关性不大。

参考文献:

- [1] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [2] Cao S, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in china's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration[J]. Earth Sci., 2011, 104:240-245.
- [3] García-Ruiz J M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review[J].Catena,2010,81(1):1-11.
- [4] 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[J]. Hydrol, 2007, 35: 247-258.
- [5] 黎雅楠.黄土高原地区土地利用动态变化研究[J].农业与技术,2021,41(21):117-120.
- [6] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [7] 杨帆,潘成忠.黄土丘陵沟壑区多年生草地的保水固土效益[J].水土保持通报,2016,36(2):300-306.
- [8] 冯浩,吴淑芳,吴普特,等.草地坡面径流调控放水试验研究[J].水土保持学报,2005,19(6):25-27,111.
- [9] 赵跃中,穆兴民,严宝文,等.黄土高原不同生长年限植被减水减沙效益整合分析[J].水土保持通报,2015,35(3):6-11.
- [10] 吴淑芳,吴普特,冯浩,等.标准坡面人工草地减流减沙效应及其坡面流体力学机理研究[J].北京林业大学学报,2007,29(3):99-104.
- [11] 李智勇,张梦杰,陈明玉,等.苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响[J].水土保持研究,2021,28(5):54-60.
- [12] 肖婧,王兵.黄土丘陵沟壑区坡面尺度撂荒草地入渗特征影响因素试验研究[J].水科学进展,2020,31(6):820-831.
- [13] 潘成忠,上官周平.不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J].水科学进展,2007,18(4):490-495.
- [14] 朱永杰,毕华兴,霍云梅,等.坡度与降雨强度对狗牙根草地产流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):20-25.
- [15] 张少博,李建贵,黄俊华,等.草地覆盖对伊犁河谷地表产流产沙的影响因素分析[J].江西农业大学学报,2016,38(5):995-1001.
- [16] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
- [17] 阳庆盛.紫色土区不同苜蓿盖度下的减流减沙效应[J].亚热带水土保持,2021,33(1):7-11,42.
- [18] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):133-138,144.
- [19] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):16-20,27.
- [20] 甘卓亭,叶佳,周旗,等.模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J].生态学报,2010,30(9):2387-2396.
- [21] 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[J].自然资源学报,2017,32(10):1755-1767.
- [22] 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[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.
- [23] 孙义秋,关颖慧,汪志荣,等.植被毯措施对黑土农田浅沟侵蚀的防护效果研究[J].水土保持研究,2022,29(1):8-13.
- [24] 张琳卿,覃莉,刘忠仙,等.黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J].水土保持通报,2021,41(3):15-21,30.
- [25] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.
- [26] 高磊,饶良懿,崔飞波,等.太行山土石山区典型植物措施水土保持效应[J].浙江农林大学学报,2017,34(6):1079-1086.
- [27] 蒋荣,张兴奇,张科利,等.喀斯特地区不同林草植被的减流减沙作用[J].水土保持通报,2013,33(1):18-22.
- [28] 陈飞,钱乾,高超,等.赣南红壤边坡护坡草本植物环境适应性研究[J].人民长江,2021,52(10):70-75.
- [29] 周栋昌.陇中黄土高原紫花苜蓿与红豆草混播草地生产性能和土壤理化性质研究[D].兰州:兰州大学,2019.
- [30] 陈宝书,温尚文.鹰咀紫云英:优良的牧草和水土保持植物[J].水土保持通报,1984(3):51-52.
- [31] 郝需婷,格日乐,张永亮,等.5种植物根系生物力学特性[J].东北林业大学学报,2021,49(8):18-23,30.
- [32] 卫伟,温智,陈利顶,等.半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应[J].环境科学,2012,33(11):3901-3904.
- [33] 宋月君,谢颂华,廖凯涛.基于不同降雨特征的空闲坡耕地产流产沙特征解析[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):16-22.
- [34] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.