

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.022

马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土高原沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):89-96,104.

MA X Y, MU X M, WANG S Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltration and runoff in the Gully Regions on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 89-96, 104.

黄土高原沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响

马雪燕¹, 穆兴民^{2,3}, 王双银⁴, 白云岗¹, 牛芳鹏¹

(1.新疆水利水电科学研究院,乌鲁木齐 830049;2.西北农林科技大学土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究植被恢复对降雨入渗及产流的影响,对流域水资源合理利用和生态环境建设具有重要理论意义和应用价值。[方法] 以黄土高原沟壑区南小河沟流域为研究区域,采用双环入渗试验和坡面模拟降雨试验方法,分析探究植被恢复对坡面水分入渗产流过程及特征的影响。[结果] (1) 植被恢复显著提高土壤入渗特征值与入渗能力,具体表现为人工林地>自然草地>玉米农田。(2) 草地较裸地增加降雨量向土壤蓄量的转化,减少地表径流,出现多层壤中流。(3) 草地较裸地土壤含水量变化更迅速,径流成分更丰富,产流量更少。(4) 裸地降雨强度远大于土地下渗能力时,快速形成地表径流,下渗量较小,自然恢复草地则存在浅层相对不透水层,上下土层入渗能力差异大,形成壤中流。[结论] 植被恢复通过改变土壤水物理性质而使坡面产流机制发生变化,从多是超渗地表径流转变为超渗地表径流和壤中流同时出现。

关键词: 植被恢复; 土壤入渗; 降雨产流; 黄土高原

中图分类号: TV11 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0089-08

Effects of Vegetation Restoration on Soil Infiltration and Runoff in the Gully Regions on the Loess Plateau

MA Xueyan¹, MU Xingmin^{2,3}, WANG Shuangyin⁴, BAI Yungang¹, NIU Fangpeng¹

(1. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830049, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of vegetation restoration on rainfall infiltration and runoff is of great theoretical and practical value for rational utilization of watershed water resources and ecological construction. [Methods] Taking the Nanxiaohogou Watershed in the Gully Region on the Loess Plateau as the research area, the double-ring infiltration experiments and slope surface simulated rainfall experiments were conducted to analyze the effects of vegetation restoration on infiltration and runoff processes and characteristics on slopes. [Results] (1) Vegetation restoration significantly increased the values of soil infiltration characteristics and capacity, with the order of artificial forest > natural grassland > corn farmland. (2) Compared to bare ground, grassland increased the transformation of rainfall into soil storage, reduced surface runoff, and led to the appearance of multiple layers of interflow. (3) Compared to bare ground, grassland showed more rapid changes in soil moisture content, richer runoff components, and less runoff volume. (4) When the intensity of rainfall on bare ground was much greater than the infiltration capacity of the land, surface runoff would be formed rapidly, and the amount of infiltration would be small,

收稿日期:2024-07-01 修回日期:2024-08-11 录用日期:2024-08-19 网络首发日期(www.cnki.net):2024-09-18

资助项目:国家自然科学基金项目(42077075, U214320036)

第一作者:马雪燕(1998—),女,硕士,工程师,主要从事水文与水资源、水旱灾害防御技术研究。E-mail: maxueyan0208@163.com

通信作者:穆兴民(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土保持、生态水文研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

and there was a shallow and relatively impermeable layer in naturally restored grassland, and there was a big difference between the infiltration capacity of the upper and lower soil layers, so as to form a loamy mid-stream. [Conclusion] Vegetation restoration alters the hydrological properties of the soil, changing the runoff mechanism on slopes from predominantly overland flow to a combination of overland flow and interflow.

Keywords: vegetation restoration; soil infiltration; rainfall runoff; the Loess Plateau

Received: 2024-07-01

Revised: 2024-08-11

Accepted: 2024-08-19

Online(www.cnki.net): 2024-09-18

黄土塬是黄土高原特有地貌类型,由黄土堆积在倾斜平缓的古盆地山前地带或山间盆地内等古地形面上逐渐形成。受极端暴雨和不合理的垦殖活动作用,剧烈土壤侵蚀导致黄土塬面破碎、沟壑密度增加、塬面面积锐减,严重制约区域经济社会的高质量发展^[1]。恢复植被作为一种自然与人为干预相结合的生态治理手段,被广泛认为是治理黄土高原水土流失的关键途径^[2]。随着以小流域为单元的综合治理模式的推进,黄土高原植被覆盖率得到显著提升^[3],地表裸露减少,土壤稳定性增强^[4-6],土壤侵蚀强度显著减弱^[1,7],河流含沙量及输沙量显著降低^[8-10],使得该区域的生态状况有明显好转。

随着黄土高原植被覆盖度增加,植被的生态水文功能也得到显著提升。植被通过冠层截留遮阴^[11]、植被阻缓地表径流和根系优化土壤结构等的共同作用下,土壤水文物理性质得以改善,表现在水分渗透与保持能力增强,促进雨水更多地渗入至土壤深层,进而影响到水分的渗透、存储与流动^[12-15],对理解流域尺度上的水文对植被的响应机制至关重要^[16-17]。因此,深入研究植被恢复对流域产汇流过程的影响具有重要的理论和实践意义。

本研究聚焦于具有 60 余年水土流失治理历史的黄土高塬沟壑区南小河沟流域,通过采用双环入渗试验和坡面模拟降雨试验等科学方法,定量定性分析植被变化对土壤水分入渗及产流特征的影响,揭示植被覆盖下土壤水文物理性质的演变规律,以及其对产流机制的潜在调节作用,以期为地表水文循环与流域径流过程科学研究提供参考价值,为水资源的合理利用和生态环境建设提供科学依据与实践指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区为甘肃省庆阳市西峰区后官寨乡的南小河沟流域的 2 条支流流域——董庄沟和杨家沟,是高塬沟壑区水土保持典型代表,长期对比治理试验为探索植被恢复的水文效应提供理想的天然实验室^[18]。南小河沟(35°40′50″—35°43′36″N,107°30′40″—107°36′34″E)是泾河支流蒲河左岸的一条支沟,属典型黄土高塬沟壑

区(图 1)。流域年平均气温 9.3 ℃,年平均年降水量 513.2 mm,年最大降水量 676.6 mm,年最小降水量 252.8 mm,降雨主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 73.4%,流域蒸发量 1 474.6 mm。

董庄沟和杨家沟是南小河沟中部的 2 条毗邻支沟,地形基本相似,流域面积分别为 1.15,0.87 km²。1954 年黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站在南小河沟试验场支流杨家沟和董家沟进行小流域综合治理模式研究,将 2 个小流域作对比试验,杨家沟采用以生物措施为主结合工程措施的治理方法人工干预治理,林地与林下草地覆盖率达到 85%以上;董庄沟未进行人工干预治理,起初仍处于群众利用的自然状态,后禁止放牧羊畜,任由自然恢复形成草地,覆盖度达到 85%~90%。

1.2 试验设计

1.2.1 土壤入渗试验 土壤入渗测定采用双环入渗法。2022 年 7 月在研究区 2 个对比小流域的阳坡、阴坡、塬面各选取 3 处海拔接近、坡位及坡度相似的试验样点,每个样点重复 2 次入渗试验,样点基本情况见表 1,共计完成入渗试验 30 次。双环入渗仪内环直径 20 cm,外环直径 35 cm,高度 10 cm。试验前将双环入渗仪垂直插入土壤 2 cm 深,快速向仪器内外环同时加水,水位快速准确到达预设水位 6 cm 的时刻开始计时,用自制的可自由控制出水和自计出水量的出水装置向环内加水,实时记录内环耗水量,外环一同加水,保持试验全程内外环水位维持在 6 cm 不变,直至内环耗水量多个相同时间间隔耗水量相同,停止试验。

1.2.2 坡面模拟降雨径流试验 采用人工模拟降雨方法进行坡面降雨径流试验(图 2)。由于人工模拟降雨试验无法更好地模拟林地植被冠层截留效果,本次进行坡面降雨径流试验仅于 2022 年 7 月在董庄沟的自然恢复草地与现成人造裸地 2 种土地利用类型下,选择同向坡面进行径流试验,径流小区长 1.5 m、宽 0.8 m,草地试验小区植被覆盖为 100%,裸地试验小区植被覆盖为 0,坡面坡度 41°~44°。

模拟降雨装置采用针头式降雨器。较其他人工降雨装置,针头式降雨器具有出水形状接近雨滴、均匀度高、不受水电限制、方便拆卸移动、应用原理简单

等优点^[19]。模拟降雨器由供水装置、可调控恒定水头出水装置、可调节支架 3 部分组成。供水箱储存模拟降雨需水,再利用进水管向出水装置进行补水;可调控恒定水头出水装置通过底部排列为 5 cm 间隔正

方形方阵的针头实现均匀出水,由更换针头型号(出水孔径不同)和溢流口(水位不同)实现可调控恒定水头出水;可调节支架腿可伸缩,适用于野外不同坡度的坡面,实现出水底板水平均匀出水。

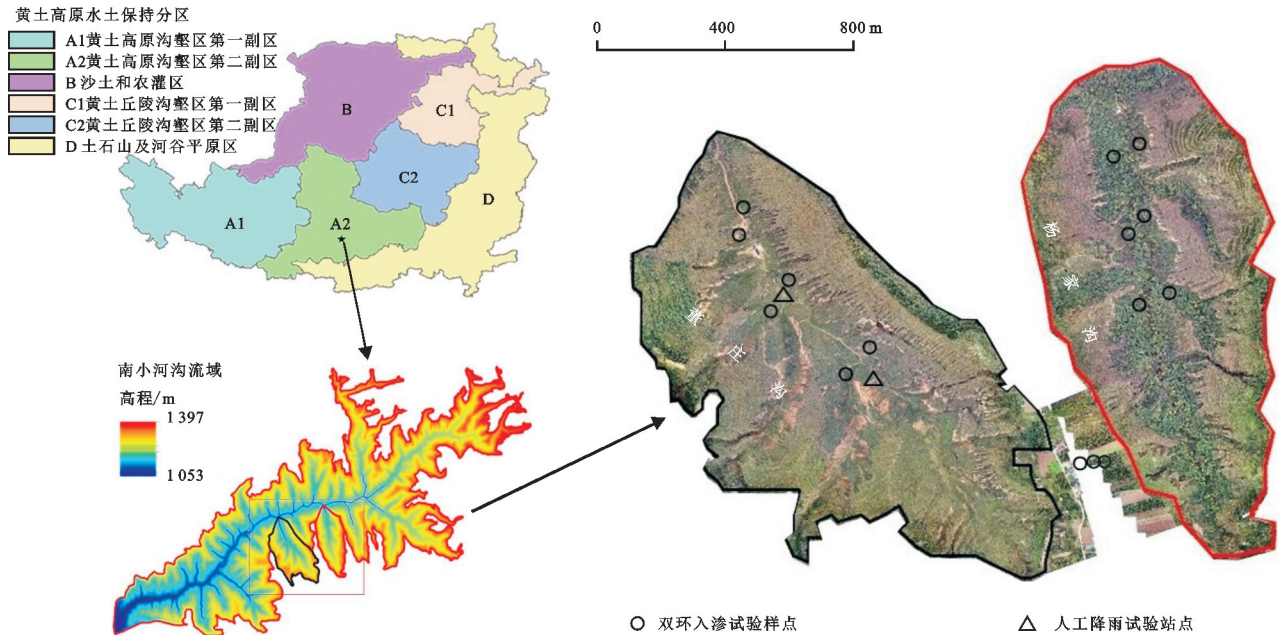


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

表 1 双环入渗试验样点基本情况

Table 1 Basic information of the double-ring infiltration test sample points

样地	坡面	纬度(E)	经度(N)	海拔/m	坡度/(°)
杨家沟 (林地)		35°42'08"	35°33'17"	1 133	34
	阳坡	35°42'06"	35°33'16"	1 123	37
		35°41'59"	35°33'18"	1 144	38
	阴坡	35°42'04"	35°33'17"	1 131	39
		35°41'58"	35°33'17"	1 146	36
		35°41'55"	35°33'17"	1 141	35
董庄沟 (草地)		35°41'57"	35°32'38"	1 125	36
	阳坡	35°41'53"	35°32'41"	1 142	34
		35°41'50"	35°32'44"	1 125	44
	阴坡	35°41'56"	35°32'39"	1 124	38
塬面 (玉米农田)		35°41'53"	35°32'39"	1 133	41
		35°41'50"	35°32'43"	1 126	35
		35°41'42"	35°33'08"	1 294	2
		35°41'43"	35°33'10"	1 294	2
		35°41'43"	35°33'11"	1 294	2

对 2 种针头型号(5 #、8 #)和 5 种溢流口高度(5,10,15,20,25 cm)两两交叉(2×5)进行雨强及均匀性测定试验。除 5 #×5 cm 未出流外,其他组合模拟降雨强度、降雨均匀度及误差结果见表 2。结合董庄沟流域近 70 年的平均降雨强度和最大降雨强度,最后决定选择 4.12,6.14,7.62 mm/h 3 种降雨强度的降雨进行坡面模拟降雨径流试验,均匀度均达到

95%以上,满足试验要求。同时对不同降雨历时情况下的不同降雨强度做 3 次重复对比试验。

为研究降雨径流试验过程中不同径流成分的产流过程及土壤水分变化过程,沿小区出流面,进行土壤剖面分层产流量测量与分层土壤湿度自动监测(精讯畅通,RS485,通过预试验校正后精度达 92.5%),随降雨时间记录变化过程。利用集流板在土壤剖面上对产流过程分 6 层测量(每层 10 cm),以降雨初始时刻开始计时,记录每层产流的初始时刻及之后每个相同时间间隔的出流量,直到多层出流稳定或深层土壤持续不出流(超过 90 min)停止试验,土壤含水量分利用三针式传感器对五层土壤进行监测(每层 10 cm),搭载手持式平台终端(精讯畅通),同时对 5 个水分传感器监测数据实时保存,每 30 s 读数 1 次,记录土壤水分的全程变化。

2 结果与分析

2.1 植被恢复对土壤入渗能力的影响

2.1.1 土壤入渗特征值与入渗过程 植被恢复(人造耕地向自然草地及人工林地转变)能显著提高土壤入渗的初始、稳定入渗速率,并整体呈人工林地>自然草地>玉米农田的规律(表 3)($p<0.05$)。人工林地与自然草地的初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率及累积入渗量 4 种土壤入渗特征均显著大于农田,尤以初始入渗率差异最显著。



图 2 坡面人工模拟降雨径流试验示意

Fig.2 Artificially simulated rainfall runoff test on slope surface

表 2 不同组合下的模拟降雨强度率定

Table 2 Simulated rainfall intensity rate determination results under different combinations

组合	雨强/ (mm · h ⁻¹)	均匀度/%	误差/%
5# × 10 cm	1.22	87.8	2.3
5# × 15 cm	1.82	87.9	2.2
5# × 20 cm	2.54	89.5	1.6
5# × 25 cm	3.48	88.1	4.0
8# × 5 cm	4.12	95.8	3.5
8# × 10 cm	4.80	93.1	3.1
8# × 15 cm	6.14	95.7	2.9
8# × 20 cm	7.25	94.5	2.2
8# × 25 cm	7.62	96.1	2.5

人工林地与自然草地的土壤初始入渗率分别为 37.58, 31.63 mm/min, 为农田的 3~4 倍; 土壤稳定入渗率也从 2.62 mm/min 分别提高到 7.67, 6.32 mm/min, 平均入渗率从 3.53 mm/min 提高到 11.89, 9.99 mm/min, 从而使人工林地与自然草地的土壤累积入

渗量较农田高 2.0~2.5 倍。

按照入渗速率大小, 土壤入渗过程可分为 3 个阶段。不同土地利用类型下的土壤入渗过程均可划为渗润阶段(0~1.5 min)、渗漏阶段(1.5~12 min)和渗透阶段(12 min 后)。由图 3 可知, 人工林地与自然恢复草地的土壤在 3 个人渗阶段均与玉米农田具有显著差异($p < 0.05$), 植被恢复能显著提升土壤入渗能力。在渗润阶段, 3 种土地利用类型的土壤入渗速率随时间快速减小, 同时差异也逐渐减小, 从入渗记录第 1 时刻(15 s)入渗速率分别为 64.97, 48.41, 18.40 mm/min 逐渐(1.5 min)降低到 21.34, 19.43, 4.25 mm/min。在渗漏阶段, 3 种土地利用类型下土壤入渗速率起初随时间减小速度大幅减缓, 后期存在小范围的波动情况。在渗透阶段, 3 种土地利用类型的土壤入渗速率基本达到稳定, 分别稳定在 7.67, 6.32, 2.62 mm/min 左右, 此时存在显著差异。由于土壤入渗过程及入渗量的差异, 3 种土地利用类型下的土壤累积入渗量差异随时间变化极其显著。

表 3 不同土地利用类型下土壤入渗特征

Table 3 Characteristics of soil infiltration under different land use types

土地利用类型	初始入渗率/ (mm · min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm · min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm · min ⁻¹)	累积入渗量/mm
人工林地	37.58 ± 3.85a	7.67 ± 1.83a	11.89 ± 1.64a	214.01 ± 29.58a
自然草地	31.63 ± 3.37a	6.32 ± 1.22a	9.99 ± 0.73a	179.78 ± 13.20a
玉米农田	8.96 ± 3.34b	2.62 ± 0.04b	3.53 ± 0.51b	63.52 ± 9.26b
Sig. of ANOVA	<0.001	0.008	<0.001	<0.001

注: 表中数据为平均值 ± 标准差; 同列不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著($p < 0.05$)。

2.1.2 土壤入渗过程模拟及模型评价 针对饱和和恒定水头土壤水入渗条件的限制^[15], 本文采用 Kostikov 方程、Horton 方程、Philip 方程和蒋定生方程对 3 种土地利用类型下土壤的入渗过程进行拟合。由图 4 可知, Horton 模型拟合效果最优, 其次是 Kostikov 模型

优, 蒋定生模型与 Philip 模型次之。逐阶段依次对 4 种模型的模拟结果对比观测发现, Horton 模型的入渗拟合过程线 3 种土地利用类型下土壤入渗过程中拟合效果均较好, 仅对初始时刻的入渗速率拟合效果略有偏差, 这是 Horton 模型公式导致的固有缺陷, 但在入

渗透率稳定期拟合效果极其优秀;Kostiakov 模型在湿润阶段与渗漏阶段土壤入渗过程拟合效果较好,但在渗透期间入渗拟合过程线所显示的入渗速率仍在下降,不符合现实入渗规律,同样也是模拟公式带来的必

然缺陷;Philip 模型与蒋定生模型的入渗拟合过程线在农田土壤中拟合效果较优,但是人工林地与自然草地土壤的入渗过程的渗透阶段与渗透阶段拟合效果略有欠缺,很难实现对入渗速率变化拐点的辨别。

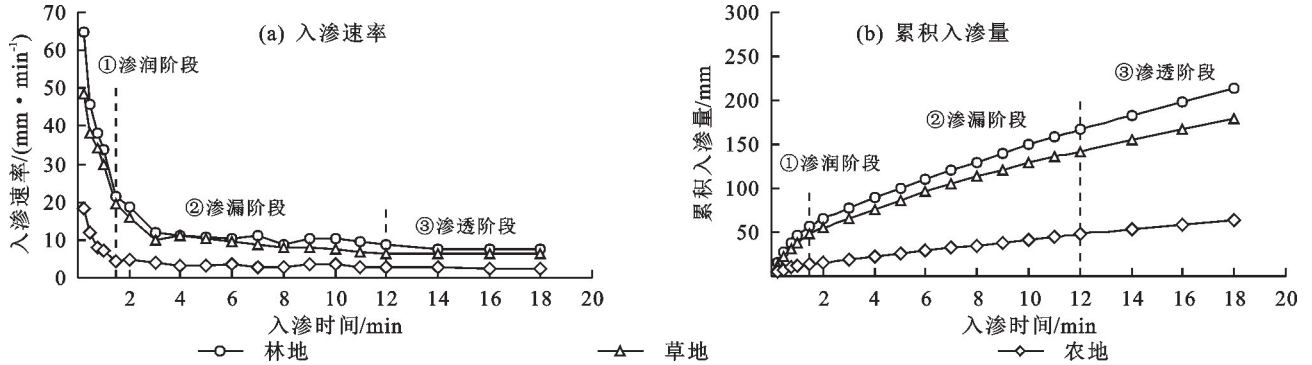


图 3 不同土地利用类型下土壤入渗过程
Fig.3 Soil infiltration process under different land use types

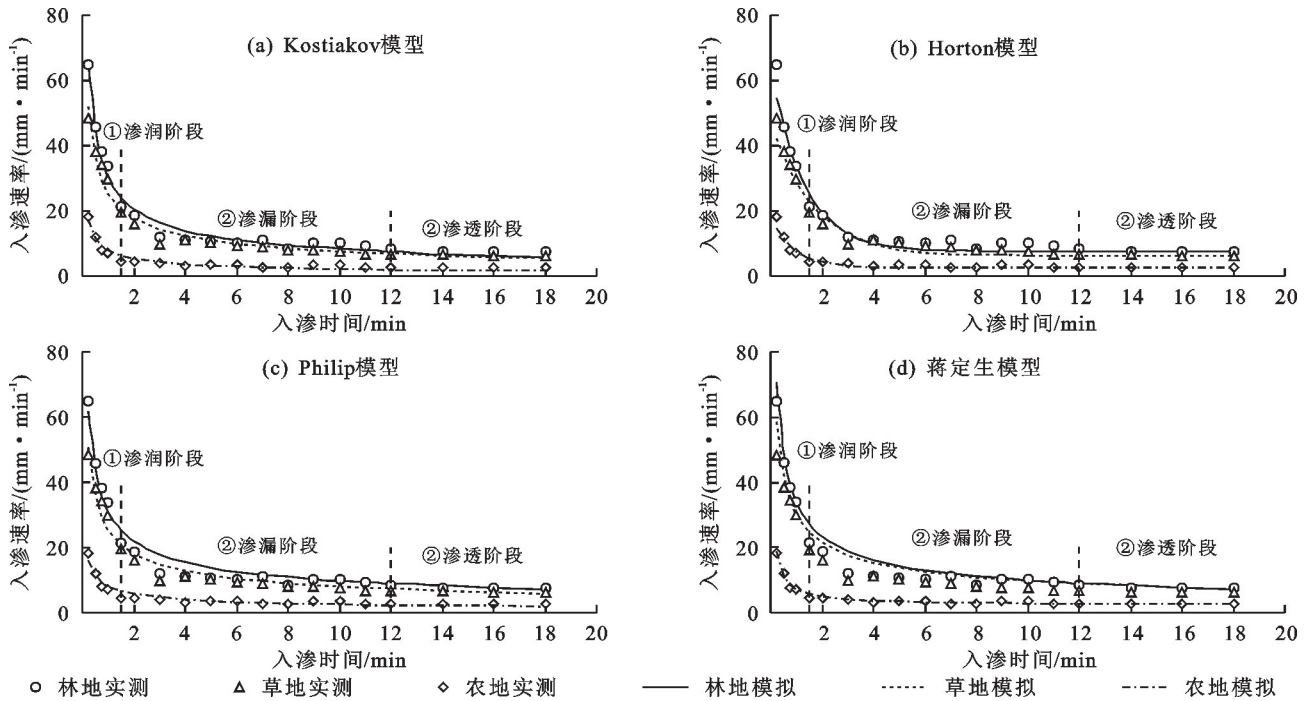


图 4 不同土地利用类型下土壤入渗过程模拟

Fig.4 Simulation of soil infiltration processes under different land use types

为更准确地评价 4 种模型对 3 种土地利用类型下土壤的入渗过程拟合优度,选取决定系数(R^2)与均方根误差(RMSE)2 种评价指标评价模型方程总体拟合度与模型精密度(表 4)。综合来看,4 种模型的拟合优度均较高, R^2 均 > 0.89 ,RMSE 均 < 4.30 。对比 3 种土地利用类型,人工林地的拟合优度最高, R^2 为 $0.958 \sim 0.983$;自然草地与玉米农田的拟合优度也较好,玉米农田由于整体入渗速率较小, RMSE 指标较低,控制在 $0.540 \sim 1.152$ 。对比 4 种模型, Horton 模型与 Kostiakov 模型在 3 种土地利用类型下均表现拟合优度极好, R^2 和 RMSE 指标比其他 2 种模型更好一些; Philip 模型与蒋定生模型的拟合优度也

不错,但这 2 种模型的公式中包含具有入渗特征意义的参数,在增加拟合公式中初始和稳定入渗速率不得小于 0 的限制条件后,拟合优度有所下降,故 Philip 模型与蒋定生模型在本次模拟过程中存在偏离实际情况的小缺陷,不作推荐。

2.1.3 土壤入渗能力评价 通过对 3 种土地利用类型下土壤入渗过程与特征的数据主成分分析,得到入渗能力选取 1 个主成分可以对入渗能力完成总方差的解释(贡献率 93.41%)。初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率 3 个指标共同决定的土壤入渗能力,负荷量分别为 $0.953, 0.947, 0.999$,三者之间没有显著差异,其中平均入渗率影响最高。

表 4 不同土地利用类型下土壤入渗模拟

Table 4 Simulation of soil infiltration under different land use types

土地利用类型	模型	方程	R^2	RMSE
人工林地	Kostiakov 模型	$f(t) = 30.33t^{-0.56}$	0.983	2.106
	Horton 模型	$f(t) = 7.67 + (64.97 - 7.67)e^{-0.79t}$	0.965	2.680
	Philip 模型	$f(t) = 0 + 30.98t^{-0.5}$	0.973	2.648
	蒋定生模型	$f(t) = 0 + (33.75 - 0)/t^{-0.53}$	0.958	3.287
自然草地	Kostiakov 模型	$f(t) = 25.28t^{-0.52}$	0.967	2.309
	Horton 模型	$f(t) = 6.32 + (48.41 - 6.32)e^{-0.63t}$	0.970	2.224
	Philip 模型	$f(t) = 0 + 25.44t^{-0.5}$	0.968	2.289
	蒋定生模型	$f(t) = 0 + (29.94 - 0)/t^{-0.49}$	0.891	4.216
玉米农田	Kostiakov 模型	$f(t) = 7.92t^{-0.56}$	0.936	1.019
	Horton 模型	$f(t) = 2.62 + (18.40 - 2.62)e^{-1.13t}$	0.918	1.152
	Philip 模型	$f(t) = 0 + 8.08t^{-0.5}$	0.930	1.066
	蒋定生模型	$f(t) = 2.20 + (7.08 - 2.20)/t^{-0.88}$	0.982	0.540

依据入渗能力主成分分析结果,计算 3 种土地利用类型下土壤入渗能力,综合入渗能力分别得分 0.623, 0.080, -1.900 分,整体呈人工林地 > 自然草地 > 玉米农田的规律,3 种土地利用类型的土壤入渗能力差异极显著 ($p < 0.001$)。

2.2 植被恢复对坡面产流的影响

在自然恢复的草地坡面上和人造裸地坡面上,进行多种降雨强度和多种历时组合下的重复试验,共计 18 场,其中小雨强和短历时的降雨在草地坡面和裸地坡面的试验结果差异不显著,本文仅分析讨论最大降雨强度 7.62 mm/min 情况下降雨历时 110 min 的野外模拟降雨试验结果。

2.2.1 坡面土壤含水量动态变化 对比分析 2 种土地利用类型下不同土层深度土壤含水量随着模拟降雨进行的时间变化过程。由图 5 可知,土壤含水量随着模拟降雨的持续,浅层土层含水量先快速增加,逐渐达到稳定后,更深层次的土壤含水量再增加,再逐渐达到稳定,并且表层含水量稳定值更高于更深层次的土壤含水量。自然恢复的董庄沟草地坡面 0—10 cm 土层土

壤初始含水量为 20.3%。降雨开始后,土壤含水量仅 1 min 快速增加到 24.3%,随后稳步提升,在 26 min 左右达到稳定,后持续稳定在 36.6%~38.0%,10 cm 以下的 4 层土壤初始含水量和表层(0—10 cm)土壤相比显著较低,为 15.0%~16.4%,随着降雨的持续,土壤含水量总体的变化趋势非常相似,土壤深度越浅含水量开始增加的时点依次越早一些,最终达到稳定的含水量(除 10—20 cm 较高些)也相差不大,为 24.5%~26.5%。裸地坡面整体上变化规律和自然恢复的草地坡面比较相似,区别主要在表层土壤含水量提高速度较慢及深层土壤开始变化的时点更晚,相互之间的差距也更小,0—10 cm 土层土壤初始含水量稍稍低于自然草地,随降雨持续,经历约 50 min,逐步缓慢地增加到 36.12%,后续稳定为 36.12%~37.42%,10 cm 以下的 4 层土壤,降雨前期一直没有变化,直到 64 min 后,依次逐步提高,对比自然草地,延后 43~109 min,尤其是 60—80 cm 土层土壤在 110 min 的降雨期间还没有来得及发生明显变化。植被恢复提前不同土层深度土壤入渗的初始时刻,提高入渗速率,增加降雨量向土壤蓄量的转化。

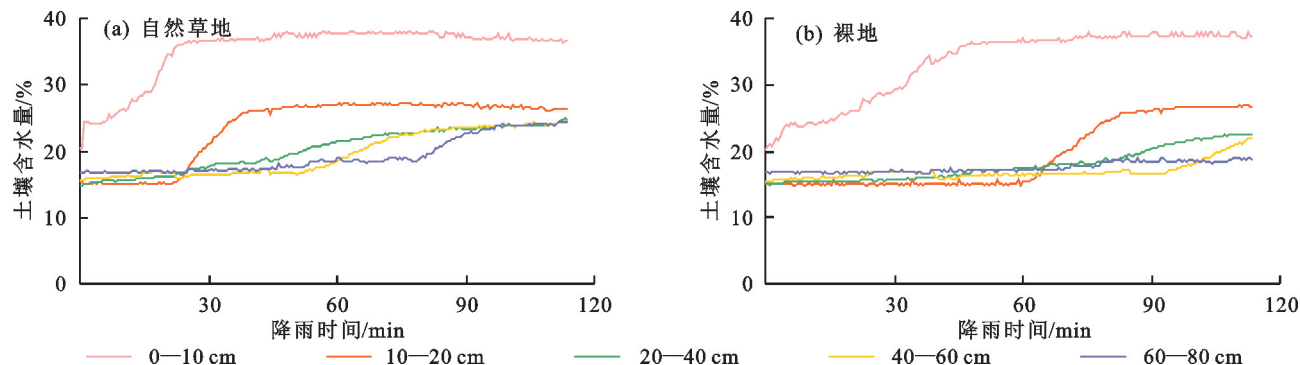


图 5 自然草地和裸地坡面模拟降雨期间土壤含水量变化过程

Fig.5 Processes of soil water content change during simulated rainfall on natural grassland and bare ground slopes

2.2.2 坡面产流过程 由图 6 可知,自然恢复的董庄沟草地坡面在 110 min 的产流过程中形成 2 种径流组

分,除超渗地面径流外,还在 0—10, 10—20 cm 土层中出现壤中流,但裸地仅产生超渗地面径流,并且二者稳定

产流量具有显著差异。在自然草地坡面上,降雨初始时刻未产流,5 min 后开始产流,在产流速度变化极快,5~20 min 产流率从 0 提高到 0.07 mm/min,随后产流速率在 0.07~0.08 mm/min,在 61 min,地表产流速率稍稍减小,并且在 0—10 cm 土层中开始产流,壤中产流速率逐渐增加但增加速度逐渐减小,最终稳定在 0.015~0.017 mm/min,与地表径流相比,速率在 1/5 左右,10—

20 cm 土层在 76 min 时开始有产流迹象,但是产流量非常微量,产流量仅为 0.000 8 mm/min。在人造裸地坡面上,降雨开始,便产生地表径流,全程没有其他径流成分出现,并且产流速率在极短的时间内,增加到 0.11 mm/min 左右,后续 8~30 min 产流速率在 0.10~0.12 mm/min,30 min 后逐渐稳定在 0.08~0.10 mm/min,较自然草地坡面地表产流速率,大约是草地的 1.4 倍。

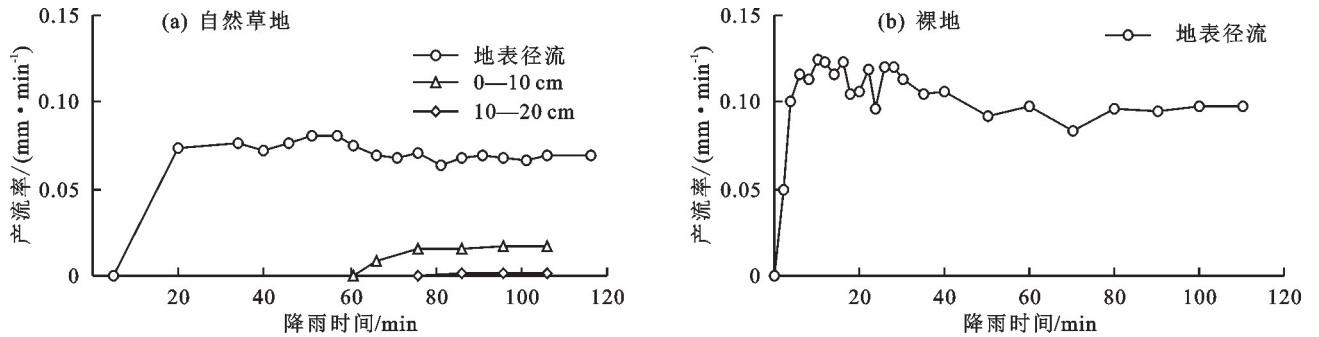


图 6 自然草地和裸地坡面产流过程

Fig.6 Runoff production processes on natural grassland and bare ground slopes

2.2.3 坡面产流入渗对植被恢复的综合响应 通过野外模拟降雨试验,实时监测裸土坡面和自然恢复草地坡面在降雨过程中的土壤含水量变化、土壤含水量稳定的时间及程度、不同土层产生径流的初始时刻、产流成分、产流过程,是为了更加明晰地揭示降雨落在地面上之后的去向全过程。

快速形成地表径流(R_s),下渗量较小(图 7a)。

裸地坡面可以近似代为植被恢复前的土地利用及土壤水文物理状况,根据对研究区域土壤水文物理性质的研究^[14]及本研究对入渗性能的研究,可以确定,在植被恢复前,土壤质量密度较大,孔隙度较小,饱和导水率较小,稳定入渗率小,土壤结构决定地面的下渗能力和下渗容量较小,降雨强度(i)远大于土地下渗能力(f_p),

由图 7b 可知,自然恢复草地坡面即草地自然恢复后,除植物截留作用外,草地植被恢复很大程度上改变土壤的水文物理性质,比如减小土壤质量密度、增加孔隙度含量、提高饱和导水率等,土壤结构的巨大变化,使得表层 10 cm 左右的土层入渗能力大大提高,对 10—20 cm 土层影响也比较大,但是更深层次的土壤可能影响程度并不大,于是表层土壤与深层土壤结构的差异化形成一个比较明显的相对不透水层,界面以上入渗能力较大,但是由于土层厚度不厚下渗容量有限,界面以下入渗能力相较更小,所以在降雨持续下,界面很容易形成壤中流(R_{int})。

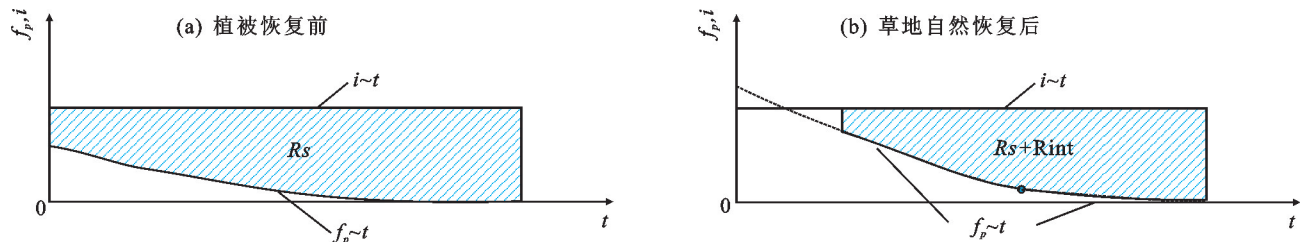


图 7 草地和裸地坡面入渗产流机制

Fig.7 Mechanisms of infiltration and runoff production on grassland and bare ground slopes

3 讨论

在野外模拟降雨入渗产流试验的土壤含水量变化过程中,比较特殊的点是,表层 0—10, 10—20 cm 土层的土壤含水量在基本稳定期间,100 min 后有一个微弱的降低的现象,分别从 37.8% 和 26.9% 逐步降低到 36.6% 和 26.5%,与此同时 20—40, 40—60, 60—80 cm 土层土壤含水量有相应的提高,是因为在多层土壤水分达到相对饱和时,土壤大孔隙打通,形成“通道”,表层土壤所含水分加快向下入渗,土壤含

水量较高时更容易出现土壤优先流的发生^[13]。

由于坡面模拟降雨入渗径流试验受到仪器的限制,未进行林地的坡面试验,根据植被恢复草地变化的原理结合 3 种土地利用类型下的土壤水文物理性质的差异,可以推断出在林地人工恢复后,首先植被冠层消耗大量雨量,其次土壤表层和深层的结构有更大的差异,相对不透水层的存在使界面的壤中流更快地出现,并且上层入渗能力较大,浅层土壤很大可能形成暂时饱和带,从而在地面形成饱和地面径流。综合来说,林

地人工恢复后,径流量大大减少,径流成分有地面径流和壤中流(R_{int}),其中地面径流包括前期的超渗地面径流(R_s)和后期的饱和地面径流(R_{sat})(图 8)。

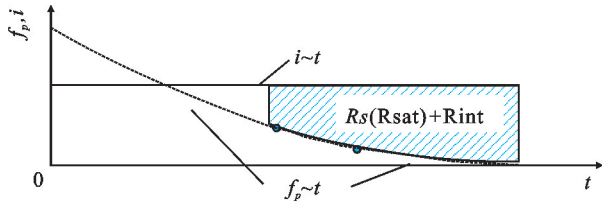


图 8 林地坡面入渗产流机制

Fig.8 Mechanisms of infiltration and runoff production on woodland slopes

4 结论

(1) 植被恢复显著提高土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量($p < 0.05$)。林地和草地的土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率达到农地的 3~4 倍。不同土地利用类型土壤入渗特征值和入渗能力表现为人工林地 > 自然草地 > 玉米农田;

(2) 土壤入渗过程均经历“渗润—渗漏—渗透”3 个阶段,且玉米农田从“渗润”到“渗漏”阶段的时间略短于人工林地和自然草地。4 种入渗模型对 3 种土地类型下的入渗过程拟合效果均较好($R^2 > 0.89$, $RMSE < 4.30$),效果排序为 Horton 模型 > Kostikov 模型 > Philip 模型 > 蒋定生模型;

(3) 植被恢复增加降雨量向土壤蓄量的转化,减少地表径流的产生,甚至出现不同层的壤中流。草地不同深度土层含水量变化较裸地更早更快,产生径流初始时间更晚,产流成分更丰富,产流量更少,稳定产流速率降低 0.02 mm/min 左右。

参考文献:

- [1] 穆兴民,杜敏,邵祎婷,等.黄土高原沟壑区土壤侵蚀特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(6):96-102.
MU X M, DU M, SHAO Y T, et al. Analysis of soil erosion characteristics on the tableland of Loess Plateau[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 96-102.
- [2] 王艳芬,陈怡平,王厚杰,等.黄河流域生态系统变化及其生态水文效应[J].中国科学基金,2021,35(4):520-528.
WANG Y F, CHEN Y P, WANG H J, et al. Ecosystem change and its ecohydrological effect in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 520-528.
- [3] 高健健,穆兴民,孙文义.1981—2012 年黄土高原植被覆

盖度时空变化特征[J].中国水土保持,2016(7):52-56.

- GAO J J, MU X M, SUN W Y. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in Loess Plateau from 1981 to 2012[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(7): 52-56.
- [4] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
TAN X J, MU X M, GAO P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 713-722.
- [5] 顾朝军.黄土区土壤水文物理特性及流域产汇流机制变化对植被恢复的响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
GU C J. Response of soil hydrological and physical characteristics and watershed runoff generation and concentration mechanism changes to vegetation restoration in loess area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [6] 刘卓昕,高鹏,穆兴民,等.黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J].水土保持研究,2023,30(6):206-213.
LIU Z X, GAO P, MU X M, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 206-213.
- [7] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016 年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].人民黄河,2022,44(9):36-45.
MU X M, LI P F, LIU B T, et al. Spatial-temporal development and driving mechanisms of erosion on the Chinese Loess Plateau between 1901 and 2016[J]. Yellow River, 2022, 44(9): 36-45.
- [8] 冯绍杰,穆兴民,高鹏,等.泾河水沙变化特征及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):151-157.
FENG S J, MU X M, GAO P, et al. Trends of runoff and sediment loads in the Jinghe River Basin and influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 151-157.
- [9] 邱德勋,穆兴民,赵广举,等.渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响[J].水土保持研究,2022,29(6):65-72.
QIU D X, MU X M, ZHAO G J, et al. Effects of precipitation extremes change on streamflow and sediment load in Weihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 65-72.
- [10] ZHAO G J, MU X M, JIAO J Y, et al. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(2): 579-590.

(下转第 104 页)

- 弹性模量影响研究[J].中国水运,2022,22(8):49-51.
- LI J, LI C, LIU C L. Study on the influence of Duncan-Chang model parameter calculation method on tangent elastic modulus[J]. Kunming: China Water Transport, 2022,22(8):49-51.
- [23] 贺登芳. 干湿循环红土的 CD 剪切特性及邓肯—张模型参数研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2022.
- HE D F. Research on CD shear characteristics and Duncan Zhang model parameters of dry wet cyclic red soil [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2022.
- [24] MAHANNOPKUL K, JOTISANKASA A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil [J]. Soils and Foundations, 2019,59(2):500-516.
- [25] 尹洪强,洪文彬,张树仁.基于三轴试验的全风化砂岩邓肯—张模型参数研究[J].山西建筑,2022,48(20):105-107.
- YIN H Q, HONG W B, ZHANG S R. Parameters of Duncan-Chang model for fully weathered sandstone based on triaxial test [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(20):105-107.
- [26] 罗崇亮,余云燕,包得祥,等.基于三轴试验红层泥岩的邓肯—张模型参数研究[J].地震工程学报,2019,41(2):436-444.
- LUO C L, YU Y Y, BAO D X, et al. Duncan—Chang model parameters of red mudstone based on triaxial tests [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2):436-444.
- [27] 张雁,何钢华,余朋里.纤维煤矸石改良膨胀土强度特性及邓肯—张模型参数[J].科学技术与工程,2022,22(21):9260-9267.
- ZHANG Y, HE G H, YU P L. Strength characteristics and Duncan-Chang model parameters of expansive soil improved by fiber coal gangue [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21):9260-9267.
- (上接第 96 页)
- [11] 张娜娜.黄土高原典型草地近地表特征对坡面土壤侵蚀的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- ZHANG N N. Influence of near-surface characteristics of typical grassland on slope soil erosion in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [12] GU C J, MU X M, GAO P, et al. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2):716-728.
- [13] QIU D X, GAO P, MU X M, et al. Vertical variations and transport mechanism of soil moisture in response to vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(10):e14397.
- [14] 马雪燕.植被恢复对黄土高原沟壑区产流模式的驱动效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
- MA X Y. Driving effect of vegetation restoration on runoff production pattern in Gully Region of Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土丘陵区不同植被恢复对土壤入渗影响及适宜模型研究[J].水土保持学报,2023,37(2):67-75.
- MA X Y, MU X M, WANG S Y, et al. Study on the effects of different vegetation restoration on soil infiltration and suitable models in the Loess Hilly Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):67-75.
- [16] 穆兴民,顾朝军,孙文义,等.植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J].人民黄河,2019,41(10):31-39.
- MU X M, GU C J, SUN W Y, et al. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau [J]. Yellow River, 2019, 41(10):31-39.
- [17] 胡彩虹,冉广,荐圣淇.佳芦河流域林草覆被变化对产流机制的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):36-42.
- HU C H, RAN G, JIAN S Q. Effect of forest and grass cover change on runoff mechanism in Jialu River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2):36-42.
- [18] 穆兴民,王文龙,徐学选.黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J].水利学报,1999,30(2):71-75.
- MU X M, WANG W L, XU X X. The influence of the soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(2):71-75.
- [19] 袁建平,蒋定生,文妙霞.坡地土壤降雨入渗试验装置研究[J].水土保持通报,1999,19(1):24-27.
- YUAN J P, JIANG D S, WEN M X. Study on experimental device of soil rainfall infiltration on sloping land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(1):24-27.