

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.020

宋民欣, 吕希恒, 韩陈, 等. 三峡库区降雨特征和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 82-90, 100.

SONG Minxin, LÜ Xiheng, HAN Chen, et al. Impacts of rainfall characteristics and vegetation cover patterns on slope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 82-90, 100.

三峡库区降雨特征和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响

宋民欣¹, 吕希恒¹, 韩陈¹, 韦杰¹, 唐强², 贺秀斌³

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331;

2. 西南大学地理科学学院, 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715;

3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610299)

摘要: [目的] 为探析三峡库区降雨特征和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响, 适应人地矛盾突出和乡村特色产业发展对林下土地资源优化利用提出的新需求。[方法] 以三峡库区典型退耕林地为研究对象, 设置林下全坡草本覆盖格局(QF)、上坡裸地+下坡草本覆盖格局(XF)、等高横坡草本条带覆盖格局(TF)、全坡无草本覆盖格局(WF)4 种林草覆被的径流小区, 开展 24 场侵蚀性降雨事件的坡面产流产沙野外观测, 辨识降雨特征和林草覆被格局对坡面产水产沙的影响。[结果] (1) 24 场侵蚀性降雨分为 A 雨型(雨量少、强度较大、历时短)、B 雨型(雨量大、强度大、历时短)和 C 雨型(雨量少、强度小、历时长)3 类。A 雨型发生频率最高, 为 45.83%, B 雨型累积降雨量最大, 占总降雨量的 63.44%。(2) 4 种林草覆被格局的累积径流深和累积侵蚀量总体呈现 $QF < XF < TF < WF$; 径流深和侵蚀量峰值均发生于 B 雨型, 其产流量相比于 A 雨型增加 337.74%~410.32%, 产沙量增加 283.47%~504.58%。(3) WF 径流深和侵蚀量占比为 75.75% 和 98.51%, XF、TF 分别占 12.20% 和 1.08%, 7.28% 和 0.34%。与 WF 相比, XF 和 TF 的径流减少 84.18% 和 75.85%, 产沙减少 96.99% 和 93.30%。[结论] 对比不同林草覆被格局的坡面水沙产出, 上坡耕种+下坡草本覆盖、条带耕种+等高植物篱的林下适度利用可兼顾林地调水保土和林下生态种植的功能, 为三峡库区生态修复与林下土地资源优化利用提供理论依据。

关键词: 水土流失; 侵蚀性降雨; 林草覆被格局; 生态修复; 三峡库区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0082-09

Impacts of Rainfall Characteristics and Vegetation Cover Patterns on Slope Runoff and Sediment Yields in the Three Gorges Reservoir Area

SONG Minxin¹, LÜ Xiheng¹, HAN Chen¹, WEI Jie¹, TANG Qiang², HE Xiubin³

(1. Chongqing Observation and Research Station of Earth Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed to explore the impacts of rainfall characteristics and vegetation cover patterns on slope hillslope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area, and to adapt to the new needs of the prominent contradiction between man and land and the development of rural industries for the optimal utilization of underforest land resources. [Methods] Taking a typical fallow forest in the Three Gorges Reservoir area as the research object, four runoff plots with full-slope herbaceous cover (QF), upper-slope bare ground + lower-slope herbaceous cover (XF), equidistant herbaceous strip cover (TF), and full-slope herbless coverage (WF), were set up to carry out field observation of slope runoff and

收稿日期: 2023-11-05

修回日期: 2023-12-21

录用日期: 2024-01-31

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-11

资助项目: 重庆市杰出青年科学基金项目 (cstc2021jcyj-jqX0026); 西南大学先导计划青年团队项目 (SWU-XDJH202306); 重庆师范大学研究生科研创新项目 (YKC23029)

第一作者: 宋民欣 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: smx_769@163.com

通信作者: 唐强 (1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: qiangtang@swu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

sand production in 24 erosive rainfall events and to identify the effects of erosive rainfall and vegetation cover patterns on hillslope runoff and sediment yields. [Results] (1) The 24 erosive rainfall events were classified into three categories, including A-type (small rainfall, heavy rainfall intensity, and short duration), B-type (large rainfall, heavy rainfall intensity, and short duration), and C-type (small rainfall, light rainfall intensity, and long duration). A-type was the rain type with the highest occurrence frequency at 45.83%. The cumulative rainfall of B-type was the largest, accounting for 63.44% of the total rainfall. (2) The cumulative runoff depth and cumulative erosion volume of the four vegetation cover patterns generally showed $QF < XF < TF < WF$; The peak value of runoff depth and erosion volume all occurred in B-type rainfall, which led to an increase in runoff depth of 337.74%~410.32% and an increase in erosion volume of 283.47%~504.58% compared to A-type rainfall. (3) The proportion of runoff depth and erosion amount produced by the WF was 75.75% and 98.51%, while XF and TF accounted for only 12.20% and 1.08%, 7.28% and 0.34%, respectively. Compared with WF, the runoff interception and reduction of XF and TF were 84.18% and 75.85%, and the sediment interception and reduction were 96.99% and 93.30%, respectively. [Conclusion] By comparing the runoff and sediment yields of runoff plots under different vegetation cover patterns, it was found that the modes of upper-slope tillage + lower-slope l herbaceous coverage, strip tillage + contour hedgerow can take into account the functions of water regulation and soil conservation of forest land and ecological planting of understory, which can provide a theoretical basis for ecological restoration and the optimal utilization of understory land resources in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: soil erosion; erosive rainfall; vegetation cover pattern; ecological restoration; Three Gorges Reservoir area

Received: 2023-11-05

Revised: 2023-12-21

Accepted: 2024-01-31

Online(www.cnki.net): 2024-04-11

土壤侵蚀指土壤及其附属物质在侵蚀营力作用下发生分离、搬运、沉积和再运移过程,是当今全球面临的重大生态环境问题之一,威胁土壤健康和农业可持续发展^[1],其发生发展与多种因素密切相关。以土壤水蚀为例,降雨及其形成的地表径流是驱动土壤剥离、搬运的外营力^[2],降雨量、降雨强度、降雨历时等参数直接影响土壤侵蚀强度^[3]。基于土壤理化性质形成的抗侵蚀性能决定土壤抵抗外力侵蚀的能力,是影响土壤侵蚀强度的内在因素^[4]。地形地貌、土地利用、地表覆被、汇水网络等构建的地表下垫面格局是调节侵蚀产沙过程、影响侵蚀产沙强度的重要因素,是当前土壤侵蚀研究的重点^[5]。地表覆被的空间配置、聚集程度、斑块形状通过改变坡面水文和泥沙输移路径影响水文—泥沙连通度,从而影响产汇流过程和侵蚀产沙速率^[6-7]。相同覆被类型下,坡下草被配置的减流减沙效果优于坡上部和中部草被配置^[8];增加草带宽度对径流泥沙产出也有明显影响^[9]。此外,草被块状镶嵌和横坡条带覆盖相较于顺坡覆盖具有更好的水土保持效果,且随着植被破碎化程度增加,蓄水减沙效益越好^[10]。目前,针对坡面不同覆被状况对产流产沙的影响研究主要基于人工模拟降雨实现,而缺乏围绕天然次降雨事件的原位观测。林地坡

面水土流失和下垫面状况更为复杂,定量评价不同林草覆被格局对坡面水土流失的影响具有重要意义。

三峡库区是长江上游重要生态屏障和国家级水土流失重点治理区。近30年来,相继实施退耕还林还草、天然林资源保护、长江流域防护林体系建设、石漠化综合治理等重点林草生态工程,植被建设成效显著^[11]。然而,缺乏广泛的针对恢复植被调水保土效益的野外原位观测定量研究。此外,三峡工程建设、水库蓄水、移民搬迁、基础设施迁建、城镇化等人为活动加剧库区人地矛盾,乡村特色生态产业发展对林下空间和土地资源利用提出新需求。依托林地资源和林下生境发展林下复合种植(如“林药间作”“林茶间作”“林菌种植”等)是兼顾生态和经济效益重要途径^[12-13]。发展高效稳定的林下种植不仅能提高土地资源利用率,提供高质量的生态农产品,还可增加农户收入,改善农民生计^[14]。目前,关于林下土地利用的研究多关注其社会经济影响,鲜有从水土流失防治角度探究林下土地利用对林地水土保持功能的潜在影响。

综上,针对三峡库区人地矛盾突出、土地垦殖强度大、侵蚀性降雨集中、土壤抗侵蚀性能低、水土流失问题突出的现状^[15],从驱动侵蚀产沙的外营力因素

(降雨特征)和调节坡面水沙过程的重要因素(林草覆被格局)出发,以典型退耕林地为研究对象,通过设置林下全坡草本覆盖、上坡裸地+下坡草本覆盖、等高横坡草本条带覆盖、全坡无草本覆盖 4 种林草覆被格局的径流小区,模拟不同林下土地利用模式和强度,开展基于天然降雨事件的径流小区野外原位观测,对比分析侵蚀性降雨类型和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响,以期为三峡库区坡面植被配置优化和林下土地资源高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区中游重庆市忠县(108°03′—108°14′E, 30°03′—30°35′N),以低山丘陵地形为主,海拔为 117~1 680 m^[16]。气候以亚热带湿润季风气候为主,多年平均降水量为 1 172 mm,降水集中在 4—10 月,年平均气温 19.2℃,无霜期 340 天。土壤以发育于侏罗纪沙溪庙砂页岩的紫色土为主,结构水稳性差,遇水极易分散、崩解,为易蚀性土壤^[17]。区域内耕地、园地等农业生产用地分布广泛,农业生产方式以传统耕作方式为主,主要种植作物包括红薯(*Ipomoea batatas*)、玉米(*Zea mays* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)和柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)等^[18]。自然植被类型有常绿与落叶阔叶混交林、落叶阔叶与常绿针叶混交林、针叶林等。

1.2 试验设置

野外试验选择长江防护林体系建设的香樟(*Cinnamomum bodinieri* Lévl.)和银杏(*Ginkgo biloba* L.)混合人工林为研究对象,树龄约 16~20 年,林间有少量灌木,主要草本为毛蕨(*Cyclosorus interruptus* (Willd.) H. Ito),伴有求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、火炭母(*Polygonum chinense*)等,土壤厚度 40—50 cm。林下布设 4 个 10 m×3 m、坡度为 15°的径流小区,径流小区为原位布设,自 2010 年建成后未经扰动,土壤植被保存完好;2021 年 7 月在径流小区中设置林下全坡草本覆盖(QF)、上坡裸地+下坡草本覆盖(XF)、等高横坡草本条带覆盖(TF)和全坡无草本覆盖(WF)4 种林草覆被格局(图 1),模拟不同林下土地利用模式和强度,即 QF 为保持林下草被原状,无农业种植;WF 为全坡去除草本和枯枝落叶,模拟林下全坡面农业利用扰动;XF 为上坡面去除草本和枯枝落叶的裸地,下坡面保持草本覆盖,模拟林下上坡农业种植;TF 为坡面等距设置 3 条宽 1 m 的横坡草带,草带间为去除草本和枯枝落叶的裸地,模拟林下条带农业种植与等高植物篱的利用方式。径流小区出口分别设置长、宽、高为 1.2 m 的集流池。

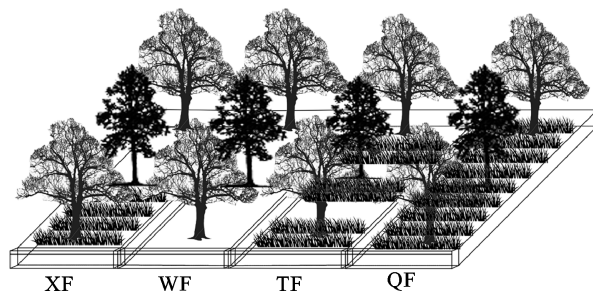


图 1 4 种林草覆被格局的径流小区设置

Fig. 1 Runoff plot setting of four vegetation cover patterns

1.3 野外观测

野外观测于 2021 年 7 月至 2022 年 10 月进行,主要开展降雨量、穿透雨量、径流量、泥沙量的原位观测。为保持小区地表覆被状况的一致性,在地表干燥情况下定期对裸露部分枯枝落叶进行清理并贴地剪除地上生物量,采样及清理过程尽量避免扰动径流小区地表。判断侵蚀性降雨标准为径流小区是否有含沙水流出,监测周期内共收集 24 场侵蚀性降雨的坡面产流产沙数据。径流小区邻近自动气象站记录降雨量(P , mm)和降雨历时(h),据此计算次降雨事件的平均降雨强度(I , mm/h)和最大 60 min 降雨强度(I_{60} , mm/h);穿透雨量通过林下均匀设置的 12 个雨量桶收集得到,每次降雨结束后,测量每个雨量桶内集水量并转化为穿透雨量;次降雨产流结束后,利用卷尺测定集流池水深,计算径流深(mm),将含沙水流充分搅拌均匀后,用 500 mL 取样瓶采集 3 个含沙水样,带回实验室经沉淀、过滤、烘干和称重,得到平均含沙量(g/L)。根据所测定的径流体积乘以对应含沙量再除以径流小区面积,计算得到次降雨侵蚀量(kg/hm^2)。

1.4 数据分析

采用 K 均值聚类法分析降雨量(P , mm)、降雨历时(h)、平均降雨强度 $[I, (\text{mm}/\text{h})]$ 和最大 60 min 雨强 $[I_{60}, (\text{mm}/\text{h})]$,将 24 场侵蚀性降雨分为 3 类,分别是 A 雨型、B 雨型和 C 雨型。利用 IBM SPSS 22 和 Excel 2019 软件进行数据统计分析,制图采用 Origin 2021 软件。采用 Pearson 相关性检验进行相关性分析。

$$\text{穿透雨量: } TF = \sum T_i / \sum A_i \quad (1)$$

$$\text{减流效益: } R_w = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{减沙效益: } R_s = \frac{(S_0 - S_1)}{S_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: TF 为林内穿透雨量(mm); T_i 为收集到的林内降雨量体积(mm^3); A_i 为雨量桶受雨面积

(mm²); R_w 为减流效益(%); W_0 为无草本覆盖径流小区的径流深(mm); W_1 为其余有植被覆盖径流小区的径流深(mm); R_s 为减沙效益(%); S_0 为无草本覆盖径流小区的侵蚀量(kg/hm²); S_1 为其余有植被覆盖径流小区的侵蚀量(kg/hm²)。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性降雨与穿透雨特征

野外观测周期内研究区降雨量共 1 406.86 mm,主要集中在 5—9 月,期间采集的 24 场侵蚀性降雨总量为 838 mm,占总降雨量的 59.57%(表 1)。主要分为 3 类,以历时短、雨量少、雨强较大的 A 雨型为主,发生频率为 45.83%,降雨量占比为 22.91%(表 2);雨量大、降雨强度大、历时较短的 B 雨型发生频率为 37.5%,降雨量占比为 63.44%;雨量少、强度小、历时长的 C 雨型发生频率和降雨量占比分别为 16.67%和 13.65%。总体而言,研究区侵蚀性降雨主要发生在雨季,降雨频次少、降雨强度大的 B 雨型对降雨量贡献最大。

表 1 研究区降雨情况统计						
Table 1 Statistics of rainfall in the study area						
年份	月份	天然降雨		侵蚀性降雨		降雨次数
		降雨量/ mm	占降雨 总量/%	降雨量/ mm	占侵蚀性 降雨总量/%	
2021	7	132.40	8.60	8.20	—	—
	8	306.20	19.89	284.20	33.91	5
	9	59.80	3.88	40.00	4.77	2
	10	131.60	8.55	82.20	9.81	2
	11	66.80	4.34	—	—	—
	12	24.40	1.59	—	—	—
2022	1	27.40	1.78	—	—	—
	2	14.60	0.95	—	—	—
	3	52.20	3.39	—	—	—
	4	152.60	9.91	53.20	6.35	2
	5	93.79	6.09	83.70	9.99	3
	6	168.12	10.92	98.70	11.78	2
	7	114.45	7.44	59.80	7.14	2
	8	41.61	2.70	15.60	1.86	1
	9	102.76	6.68	70.80	8.45	3
	10	50.53	3.28	41.60	4.96	1

表 2 不同侵蚀性降雨类型特征值统计

Table 2 Characteristic value statistics of different erosive rainfall types							
雨型	发生频次	累计降雨量/mm	特征指标	平均值	最大值	最小值	标准偏差
A	11	192.00	P/mm	17.45	35.80	8.00	8.46
			$I/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	2.11	4.20	0.70	1.09
			$I_{60}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	3.65	7.20	1.60	1.75
			降雨历时/h	9.92	18.15	1.67	5.05
			P/mm	59.07	97.20	41.00	18.63
B	9	531.60	$I/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	3.99	7.50	1.80	2.12
			$I_{60}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	12.97	25.00	6.00	6.52
			降雨历时/h	18.18	36.27	6.04	9.46
			P/mm	28.60	41.60	22.20	8.81
C	4	114.40	$I/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	0.65	0.70	0.60	0.06
			$I_{60}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	2.03	2.50	1.60	0.38
			降雨历时/h	44.52	69.33	31.71	17.30

单次穿透雨量为 4.99~84.74 mm,穿透雨率为 62.33%~87.18%(图 2),穿透雨率平均值为 75.65%。不同雨型的穿透雨量和穿透雨率存在明显差异,A、B、C 雨型的平均穿透雨率分别为 71.84%,80.33%,75.55%,B 雨型因其降雨量最大,穿透雨率也随之增大。穿透雨量与降雨量呈线性相关,穿透雨量随降雨量增加而增加;穿透雨率与降雨量呈对数函数关系,穿透雨率随降雨量增加到一定界限之后趋于平缓,随着降雨时间延长,穿透雨率趋于稳定。

2.2 径流小区产流产沙特征

综合分析 24 场侵蚀性降雨,不同林草覆被格局的径流小区产流量、产沙量总体表现为 $QF < XF < TF < WF$ 。以 QF 为对照,WF、XF、TF 的产流产沙

量与 QF 相比差别明显(图 3)。具体来看,XF、TF、WF 的累积径流深分别为 23.97,40.16,249.27 mm,分别为 QF 的 1.52,2.56,15.9 倍,累积侵蚀量分别为 106.29,333.71,30 383.38 kg/hm²,分别为 QF 的 5.49,17.25,1 570.21 倍,其中,WF 的产流产沙量最为突出。WF、XF、TF、QF 的径流深占比分别为 75.75%,12.20%,7.28%,4.76%,侵蚀量占比分别为 98.51%,1.08%,0.34%,0.06%(图 4)。

林下坡面水土流失与降雨特征有明显的相关性,24 场侵蚀性降雨共导致 329.08 mm 的径流量,其中,A、B、C 雨型的产流量分别为 55.33,264.34,9.41 mm;导致 30 842.73 kg/hm² 的侵蚀量,A、B、C 雨型分别产出 5 417.38,25 355.33,70.02 kg/hm²。可见

水土流失主要发生在雨量大、降雨强度大、历时较短的 B 雨型中。不同林草覆被格局对降雨特征的响应也存在差异(图 3、图 4)。A 雨型中,WF、TF、XF、QF 的平均径流深分别为 3.80,0.64,0.33,0.23 mm,平均侵蚀量分别为 486.46,4.33,1.34,0.36 kg/hm²;B 雨型中,WF、TF、XF、QF 的平均径流深分别为 22.46,3.42,

2.08,1.41 mm,平均侵蚀量分别为 2 774.99,30.70,9.90,1.66 kg/hm²;C 雨型中,WF、TF、XF、QF 的平均径流深分别为 1.24,0.59,0.40,0.12 mm,平均侵蚀量分别为 14.34,2.44,0.60,0.50 kg/hm²。A 雨型和 B 雨型中的径流深和侵蚀量与整体占比较为相似,C 雨型中 XF 的径流深和侵蚀量分别提升至 25%和 14%。

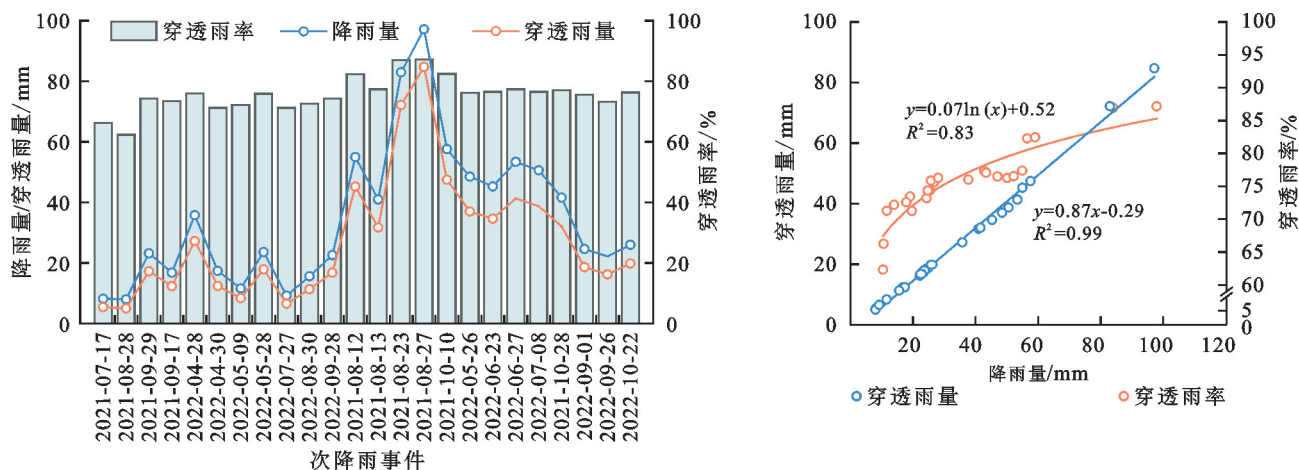


图 2 次降雨事件的降雨量、穿透雨量与穿透雨率

Fig. 2 Precipitation, throughfall and throughfall rate of sub-rainfall events

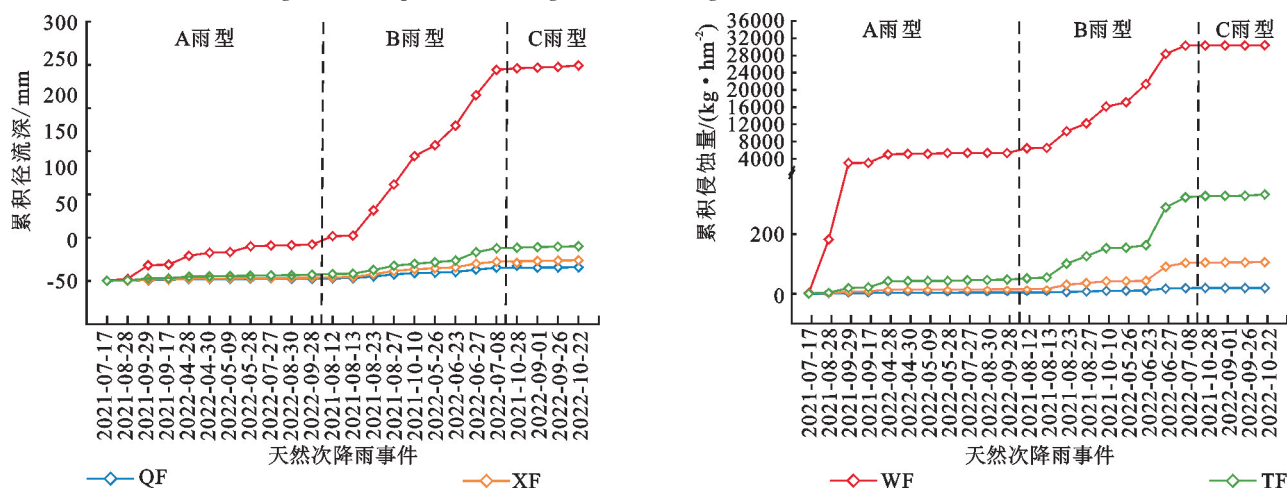


图 3 不同林草覆被格局的累积径流深与累积土壤侵蚀量

Fig. 3 Cumulative runoff depth and soil erosion for the different vegetation cover patterns

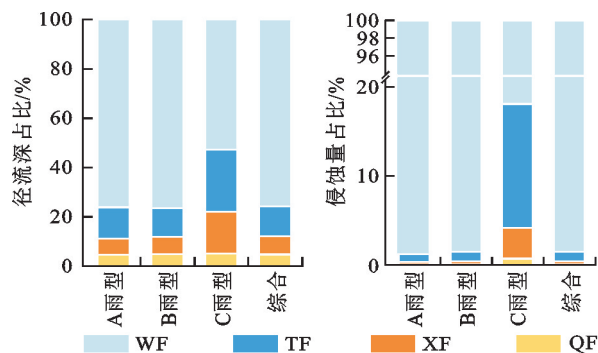


图 4 不同林草覆被格局径流深和侵蚀量占比

Fig. 4 Percentage of runoff depth and erosion amount for the different vegetation cover patterns

2.3 不同林草覆被格局的减流减沙特征

适度利用的 XF、TF 与 WF 及相比具有明显的

减流减沙效益,XF、TF 在监测周期内总减流减沙效益分别为 84.18%和 96.99%,75.85%和 93.30%(图 5)。但不同草被覆盖格局小区的减流减沙效益对降雨类型的响应不同,与 WF 对比发现,在 A 雨型中,XF、TF 的减流效益分别为 91.77%,86.38%,减沙效益分别为 96.01%,91.48%;B 雨型中,两者的减流效益分别为 88.40%,81.08%,减沙效益分别为 99.67%,98.73%;C 雨型下,XF、TF 的减流效益分别为 69.99%,51.89%,减沙效益分别为 89.84%,79.8%;各利用模式的减流减沙效益排序为 QF>XF>TF。总体而言,各覆被格局的减沙效果要大于减流效果,尤其是在发生率高的 A 雨型和 B 雨型中,减沙效益均达到 90%以上。

2.4 降雨特征因子与坡面侵蚀产沙的相关性

不同林草覆被格局坡面的径流深与降雨量、最大 60 min 雨强均呈极显著正相关($p<0.01$),而平均降雨强度和降雨历时与径流深相关性不显著。不同林草覆被格局的侵蚀量与降雨量都呈显著正相关($p<0.05$),其中,WF 和 TF 的相关性更显著($p<0.01$)(表 3)。总

体来看,侵蚀量与降雨特征因子的相关性大小表现为降雨量>最大 60 min 雨强>平均降雨强度>降雨历时,说明降雨量和最大 60 min 雨强在反映降雨特征和坡面产流产沙的影响方面具有更好的代表性,而其他指标的解释性相对较弱,穿透雨量与径流深相关性大于与侵蚀量的相关性。

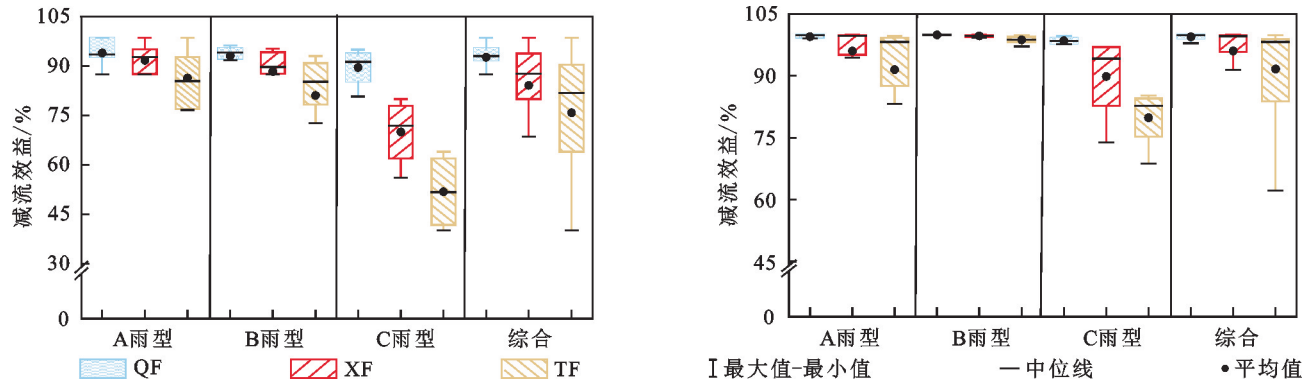


图 5 不同林草覆被格局的减流减沙效益

Fig. 5 Runoff and sediment reduction benefits for the different vegetation cover patterns

表 3 不同林草覆被格局的径流深、侵蚀量与穿透雨量及降雨因子的相关性

Table 3 Correlation between runoff depth, erosion, penetration rainfall, and rainfall characterization factors in different vegetation cover patterns										
林草覆被格局	径流深					侵蚀量				
	<i>P</i>	穿透雨量	<i>I</i>	<i>I</i> ₆₀	历时	<i>P</i>	穿透雨量	<i>I</i>	<i>I</i> ₆₀	历时
WF	0.76**	0.78**	0.48*	0.61**	0.01	0.62**	0.56**	0.60**	0.60**	0.15
TF	0.66**	0.64**	0.30	0.43*	0.08	0.55**	0.47*	0.32	0.41*	0.01
XF	0.81**	0.81**	0.40	0.53**	0.09	0.41*	0.41*	0.15	0.23	0.03
QF	0.80**	0.79**	0.38	0.55**	0.07	0.49*	0.44*	0.26	0.28	0.01

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

通过回归分析分别建立降雨量与径流深之间的回归方程及拟合曲线表明,WF、XF、QF 径流深与降雨量之间为线性相关关系,而 TF 的径流深与降雨量的幂函数是最优拟合模型,降雨量与各林草覆被格局的侵蚀量均呈幂函数关系,坡面侵蚀量随着降雨量增大而增大。4 种林草覆被格局下的径流深与降雨量的拟合优度较高,决定系数均 >0.60 ,而侵蚀量与降雨量的拟合优度较低,决定系数均 <0.50 ,说明降雨量对径流量的影响大于对坡面侵蚀产沙的影响。

3 讨论

3.1 降雨类型对坡面水土流失的影响

降雨特征是影响坡面产流和土壤侵蚀的主要因素。其中,降雨强度和降雨量是影响坡面径流量和侵蚀量的 2 个较为重要的因素。本研究中,A 雨型是研究区最常见的降雨类型,B 雨型导致的土壤水土流失量最大,占整个监测周期的 75% 以上。可能是因为 B 雨型较大的降雨量和雨强导致较高的林内穿透雨量和穿透雨率,降雨量越大,地表土壤含水率越高,土壤稳定性随之降低,结构易遭受到破坏,加剧土壤侵蚀^[19]。

当降雨量相似,但雨强较大时,大雨滴击溅地表使地表产生物理结皮,降低土壤的水分入渗率,地表形成超渗产流,可使坡面径流快速产生,加强对地表的冲刷力度,并携带大量泥沙顺坡面流失,进而造成严重的土壤侵蚀^[20]。分析降雨量与侵蚀量和径流量的关系(图 6)发现,降雨量对径流量的影响大于对坡面侵蚀产沙的影响。可能是因为随着降雨量或降雨历时的增加,土壤水分逐渐饱和,水分下渗减少,地表径流量逐渐增加。但地表径流首先冲刷带走地表松散颗粒物,当大部分松散颗粒物被剥蚀完后,其侵蚀量逐渐趋于稳定。根据研究区气候特点和主要降雨类型分析,研究区主要需要防治雨量大、雨强大、历时短的降雨,避免造成大面积的坡面水土流失,威胁库区水道行洪安全。

3.2 不同林草覆被格局对水沙产出的影响

在本研究中,有植被覆盖的径流小区产流产沙量远低于无草本覆盖的小区,已有研究^[21]表明,林下植被覆盖度增加可提升地表粗糙度,降低地表侵蚀力,且植被根系能改善土壤孔隙的连通性,提高土壤的抗冲性和入渗能力,同时可延长入渗的时间及减少产流

量。在垂直方向上,林下植被可减小雨滴动能从而减少溅蚀泥沙量。此外,植被覆盖度、植被形态及根茎粗细也是影响坡面产流产沙的重要因素。本研究中,有植被覆盖的径流小区的减沙效益均大于减流效益,可能有两点原因,一是因为径流小区中林下草被植物

的冠幅较小,直接拦沙的功效更明显,而对减少雨滴动能和增加水分入渗的作用稍弱^[22];二是三峡库区侵蚀性降雨集中,降雨量大、雨强大的特点易导致地面超渗产流,降雨量远超地表下渗率,从而导致大量降水形成地表径流,形成较大的地表径流量。

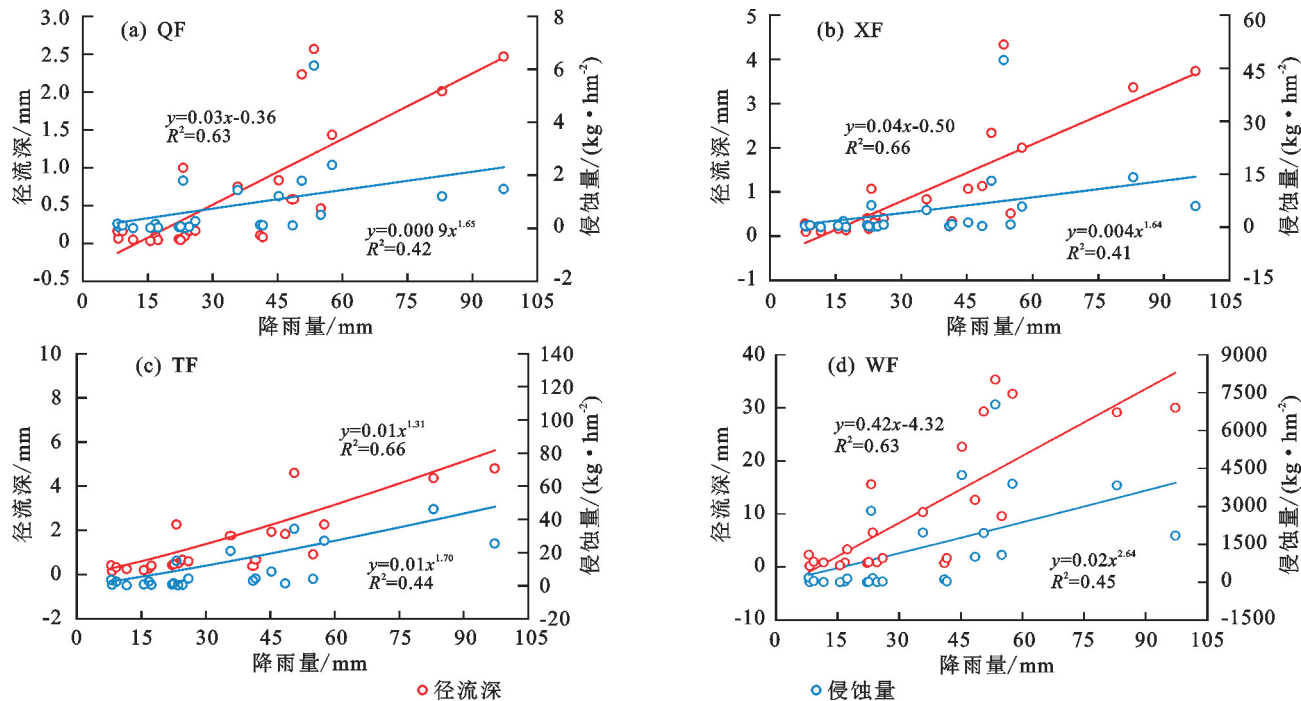


图 6 不同林草覆被格局降雨量与侵蚀量、径流量的关系

Fig. 6 Relationships between rainfall and erosion and runoff in different vegetation cover patterns

不同林草覆被格局直接影响产流产沙区和非产流产沙区的空间分布,改变径流和泥沙运移路径和连通性,使径流过程变得不连续^[23]。在本研究所有侵蚀性降雨场次中,坡面产流产沙量在不同林草覆被格局中均为 $QF < XF < TF < WF$ 。与 QF 比较发现,WF 的产流产沙量增加较多,而草本等高覆盖条带或草被位于下半坡的 TF 和 XF 的产流产沙量增加不明显(图 5),是因为当降雨开始后,上坡为裸地时侵蚀模数较高,为土壤侵蚀的“源”,植被位于下坡位时起到“汇”的功能^[24],雨滴汇集在坡地表面形成薄层水流,将地表分散的土壤颗粒带走,最先发展为细沟侵蚀,坡面上的土壤颗粒在水流的带动下向下坡移动,遇到植被斑块时流速降低,发生泥沙的沉积,从而导致径流泥沙含量大幅减少,土壤侵蚀量也随之减少。所以,当中下坡位植被更多时,具有较好的缓流拦沙和滞留消能效果^[25];此外,坡面上等高设置的草带能将上坡径流的泥沙进行过滤,水流变得清澈,通过草带后的径流的挟沙能力提升,与穿透雨汇集增强对草带下方裸露地块的剥蚀率^[9],是 TF 的产沙量略高于 XF 的原因,但两者的产沙量仍远低于 WF,与

之相比具有明显的减沙效益。土壤孔隙度较大,降雨入渗较快,随着雨滴溅蚀土壤颗粒堵塞土壤孔隙,土壤入渗逐渐缓慢,QF 植被覆盖率高,根系层的存在能改善土壤内在性质,稳定土壤结构,增加土壤孔隙度,从而增加入渗,减缓产流的发生^[10,26]。XF 中植被覆盖下半坡也起到同样作用,其减流效益略优于 TF,但仍远高于 WF。因此,在设置植物篱时,应优先考虑布设在坡面中下部,或适当增加坡中下部分的植物篱宽度,以增强草被的减流减沙效益。

坡面产流产沙量受到降雨和林草覆被格局的综合作用,4 种林草覆被格局在 A 雨型中的减流效益最好,但在 B 雨型中的减沙效益最好。相比之下,C 雨型中各覆被格局的减流减沙效益较低。可能是因为 A 雨型雨量少,且降雨历时较短,降雨到达地面后大部分被植被拦蓄入渗,而 B 雨型的雨强和雨量较大,超渗产流的发生增加坡面产流量,其减流效益相对较低。但值得注意的是,A 雨型是研究区发生频次最多的降雨类型,若发生连续性、雨量少但历时长降雨,土壤达到蓄满产流状态后可导致 0—20 cm 土层内壤中流的产生,将土壤中起胶结作用的物质破坏并带出,也是紫色土丘陵区耕层土壤退化的主要原因^[27],

需注意其带来的林下水土流失风险。实际上,由B雨型导致的平均侵蚀量仍远高于A、C雨型,导致最多的水土流失量,在B雨型中,QF的减流减沙效益分别为99.14%和99.93%,XF的减流和减沙效益与QF相比分别降低4.74%和0.26%,TF的减流和减沙效益与QF相比分别降低12.06%和1.20%,3种草被覆盖方式都是防治此类大雨强、大雨量的侵蚀性降雨的有效方式。

综上,合理的林草覆被格局不仅能增加林下有效利用空间,还可调节径流,增强拦蓄入渗,同时也可通过根系固结土体,改善土壤结构,从而遏制水土流失。三峡库区降水集中在雨季,降雨量大且频次较高,其中雨量大、强度大、历时短的降雨对区域内坡面产流产沙影响很大,需加强此类雨型下的水土流失监测和治理。XF和TF既兼顾林下土地利用需求,又具有良好的调水保土效应和土地资源优化利用的作用,两者都有利于三峡库区林下土地可持续利用,其中,XF略优于TF,此结果可为三峡库区生态修复与林下土地资源可持续利用提供理论支撑。

4 结论

(1)研究区侵蚀性降雨以A雨型(雨量少、强度较大、历时短)和B雨型(雨量大、强度大、历时较短)为主,降雨量占比分别为22.91%,63.44%。3类降雨发生频率分别为45.83%,37.50%,16.67%,发生频率较低的B雨型贡献绝大部分的降雨量。

(2)观测时段内,4种林草覆被格局的径流小区累积径流深和累积产沙量总体呈全坡草本覆盖格局<上坡裸地+下坡草本覆盖格局<等高草本条带覆盖格局<全坡无草本覆盖格局;B雨型是导致最大水土流失量的雨型,其产流量相比于A雨型增加337.74%~410.32%,产沙量增加283.47%~504.58%。

(3)林下全坡无草本覆盖格局在监测期内产生的径流深和侵蚀量占比分别为75.75%,98.51%,上坡裸地+下坡草本覆盖格局、等高草本条带覆盖格局仅分别占12.20%和7.28%,1.08%和0.34%。与之相比,上坡裸地+下坡草本覆盖格局和等高草本条带覆盖格局的减流效益分别为84.18%和75.85%;减沙效益分别高达96.99%和93.30%,是兼具林下空间有效利用和调水保土效应的林草覆被格局。

参考文献:

- [1] 刘宇.土壤侵蚀研究中的景观连通度:概念、作用及定量[J].地理研究,2016,35(1):195-202.
- LIU Y. Landscape connectivity in soil erosion research: Concepts, implication and quantification[J]. Geograph-

ical Research,2016,35(1):195-202.

- [2] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- LIU W C, LIU J Y, KUANG W H. Spatiotemporal patterns of soil protection effect of the Grain for Green Project in northern Shaanxi[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1835-1852.
- [3] 郑江坤,杨帆,王文武,等.不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):38-45.
- ZHENG J K, YANG F, WANG W W, et al. Effects of tillage measures on runoff and sediment yield of farmland under different rainfall levels[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(1):38-45.
- [4] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
- PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4):618-623.
- [5] LUDWIG J A, BARTLEY R, HAWDON A A, et al. Patch configuration non-linearly affects sediment loss across scales in a grazed catchment in north-east Australia[J]. Ecosystems, 2007,10(5):839-845.
- [6] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- SHI Z H, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1117-1127.
- [7] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.
- QIN W, CAO W H, GUO Q K, et al. Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14):4905-4912.
- [8] 任柯蒙,卫伟,赵西宁,等.黄土丘陵区坡面植被盖度及其配置格局的水蚀效应模拟[J].生态学报,2018,38(22):8031-8039.
- REN K M, WEI W, ZHAO X N, et al. Simulation of the effect of slope vegetation cover and allocation pattern on water erosion in the Loess Hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(22):8031-8039.
- [9] 甘凤玲,苟俊菲,刘春红,等.草带宽度对紫色土坡面细沟形态及水土流失特征的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):25-32.
- GAN F L, GOU J F, LIU C H, et al. Effect of grass

- strip width on rill erosion morphology, soil and water loss characteristics on purple soil slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 25-32.
- [10] 王恒星, 张建军, 孙若修, 等. 晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(3): 85-95.
- WANG H X, ZHANG J J, SUN R X, et al. Effects of different vegetation slope patterns on infiltration and characteristics of runoff and sediment production in the loess area of western Shanxi Province, northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(3): 85-95.
- [11] HAN C, SONG M X, TANG Q, et al. Post-farming land restoration schemes exhibit higher soil aggregate stability and organic carbon: Evidence in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Catena*, 2023, 227: e107099.
- [12] 陈幸良. 林下经济学的缘起、发展与展望[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 105-114.
- CHEN X L. The origin, development and prospect of Non-timber forest-based economics[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(6): 105-114.
- [13] 李文华. 林下经济与农业复合生态系统管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
- LI W H. Management of forest economy and agro-ecosystem complexes[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2021.
- [14] 吴娟, 陈建成. 林下经济与农业高质量发展: 耦合逻辑与实现路径[J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2022, 22(4): 153-160.
- WU J, CHEN J C. Study on the mechanism of under-forest economy on agricultural high-quality development [J]. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2022, 22(4): 153-160.
- [15] CHEN S Q, ZHANG G H, LUO Y F, et al. Soil erodibility indicators as affected by water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Catena*, 2021, 207: e105692.
- [16] WEI J, SHI B L, LI J L, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Catena*, 2018, 166: 124-133.
- [17] 牛俊, 张平仓, 邢明星. 长江上游紫色土坡耕地水土流失特征及其防治对策[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(6): 64-68.
- NIU J, ZHANG P C, XING M X. Characteristics of soil and water loss on purple slope farmland and its control in upper reaches of the Yangtze River [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(6): 64-68.
- [18] 肖新成, 谢德体, 倪九派. 面源污染减排增汇措施下的农业生态经济系统耦合状态分析: 以三峡库区忠县为例 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(1): 111-119.
- XIAO X C, XIE D T, NI J P. Coupling state of agricultural eco-economic system under emission mitigation and sink enhancement of non-point source pollution: A case study of Zhong county in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(1): 111-119.
- [19] LIU Z Q, YU X X, JIA G D. Water uptake by coniferous and broad-leaved forest in a rocky mountainous area of Northern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 381-389.
- [20] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2004, (4): 632-635.
- TANG Z J, LEI T W, ZHANG Q W, et al. Quantitative determination of the impacts of raindrop splash and crust on soil erosion with ree experimental data [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 632-635.
- [21] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- GAO G Y, FU B J, LÜ Y H, et al. The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 12-22.
- [22] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J]. *中国水土保持*, 2017(3): 27-30.
- LI K, YAO W Y, XIAO P Q, et al. Research progress on the influence of vegetation on soil infiltration and surface runoff process [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2017(3): 27-30.
- [23] 丁琳, 许海超, 秦伟, 等. 不同坡面草被格局下的侵蚀产沙量及其连通性指数表征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 119-128.
- DING L, XU H C, QIN W, et al. Erosion and sediment yield under different grass cover patterns and its characterization of connectivity index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(9): 119-128.

(下转第 100 页)

- mokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, selawik river, Alaska[J]. Remote Sensing, 2013, 5(6): 2813-2837.
- [12] ALEXIOU S, DELIGIANNAKIS G, PALLIKARAKIS A, et al. Comparing high accuracy t-LiDAR and UAV-SfM derived point clouds for geomorphological change detection[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(6): e367.
- [13] 董亚维, 曹雪峰. 皇甫川流域水土保持率变化状况及阈值预测[J]. 人民黄河, 2022, 44(9): 131-134.
DONG Y W, CAO X F. Variation of soil and water conservation rate and threshold prediction in huangfuchuan watershed[J]. Yellow River, 2022, 44(9): 131-134.
- [14] 李景宗, 张永永, 赵帮元, 等. 皇甫川特拉沟小流域近期泥沙减少成因分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 1-4, 36.
LI J Z, ZHANG Y Y, ZHAO B Y, et al. Cause analysis of recent sediment reduction in Telagou small watershed of Huangfuchuan basin[J]. Yellow River, 2018, 40(4): 1-4, 36.
- [15] 葛海明, 张维, 王小龙, 等. 基于 SfM 的城市电缆隧道三维重建方法优化研究[J]. 图学学报, 2023, 44(3): 540-550.
GE H M, ZHANG W, WANG X L, et al. Optimization of 3D reconstruction method for urban cable tunnel based on SfM method[J]. Journal of Graphics, 2023, 44(3): 540-550.
- [16] WANG F, ZHAO Z J. A survey of iterative closest point algorithm[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China. IEEE, 2017: 4395-4399.
- [17] LI L, NEARING M A, NICHOLS M H, et al. Using terrestrial LiDAR to measure water erosion on stony plots under simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(2): 484-495.
- (上接第 90 页)
- [24] 陈利顶, 贾福岩, 汪亚峰. 黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究[J]. 地理科学, 2015, 35(9): 1176-1182.
CHEN L D, JIA F Y, WANG Y F. The effects of slope configuration and vegetation pattern on soil erosion in the loess hilly area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(9): 1176-1182.
- [25] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 122-128.
ZHANG X, LI P, LI Z B, et al. Prevention and control of grass strips distribution on soil and water loss and its optimal configuration of slope-gully system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-
- [18] ZHANG W M, QI J B, WAN P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): e501.
- [19] SHIMIZU K, NISHIZONO T, KITAHARA F, et al. Integrating terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry to estimate individual tree attributes in managed coniferous forests in Japan[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 106: e102658.
- [20] 孟永东, 袁昌伟, 田斌, 等. 滑坡表面位移的无人机航测点云比对监测方法[J]. 测绘通报, 2023(5): 1-8.
MENG Y D, YUAN C W, TIAN B, et al. The method of landslide surface displacement monitoring based on UAV aerial survey point cloud comparison[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(5): 1-8.
- [21] LU L J, ZHOU Y, WALKER R T. Using historical aerial photographs to measure earthquake deformation: Testing the effects of scan resolution[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 252: e112118.
- [22] MILAN D J, HERITAGE G L, LARGE A R G, et al. Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation[J]. Geomorphology, 2011, 125(1): 160-171.
- [23] HERITAGE G L, MILAN D J, LARGE A R G, et al. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality[J]. Geomorphology, 2009, 112(3/4): 334-344.
- [24] WILLIAMS J G, ANDERS K, WINIWARTER L, et al. Multi-directional change detection between point clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 172: 95-113.
- [26] 张颖, 牛健植, 谢宝元, 等. 森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5084-5094.
ZHANG Y, NIU J Z, XIE B Y, et al. Dynamics mechanism of the effect of forest vegetation on hill slope water erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5084-5094.
- [27] 丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6480-6493.
DING W B, JIANG G Y, SHI D M, et al. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6480-6493.