

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.030.

衣强, 李越梅, 闫俊飞, 等. 不同土地利用类型对豫西黄土丘陵区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 67-74, 85.

Yi Qiang, Li Yuemei, Yan Junfei, et al. Effects of Different Land Uses on Runoff and Sediment on Sloping Land in Loess Hilly Area of Western Henan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 67-74, 85.

不同土地利用类型对豫西黄土丘陵区 坡面产流产沙的影响

衣强¹, 李越梅², 闫俊飞³, 顾治家², 张红峰³, 李泮营¹, 黄淑萍²

(1.河南省水土保持监测总站, 郑州 450008; 2.信阳师范大学 地理科学学院/

河南省水土环境污染协同防治重点实验室, 河南 信阳 464000; 3.河南省嵩县水土保持科学研究所, 河南 嵩县 471400)

摘要: [目的] 分析豫西黄土丘陵区不同土地利用类型及不同坡度条件下土壤侵蚀产流产沙规律, 为土壤侵蚀定量评价、水土流失综合防治提供科学依据。[方法] 基于河南省嵩县胡沟小流域水土保持监测点 2011—2020 年 12 个坡面径流小区观测数据, 揭示了不同土地利用类型下产流产沙规律, 采用相关分析研究了降雨特征、坡度、土地利用与产流产沙的关系。[结果] (1) 与裸地小区相比, 草地小区的减流减沙效益最大。草地的多年平均减流效益变化为 78.6%~85.9%, 减沙效益最高可达 100%。林地的减流效益为 32.9%~51.3%, 减沙效益为 55.3%~78.9%。(2) 各径流小区产流产沙次数、大小与坡度关系密切, 10°与 15°的产流产沙差别不大, 25°的坡度上产流产沙明显增加。此外, 随着坡度的增加, 林草地的水土保持效益也在降低。(3) 径流小区径流深与最大 30 min 雨强(I_{30})、土壤流失量与降雨侵蚀力相关性最为显著。[结论] 在豫西黄土丘陵区缺少径流泥沙定位观测的区域, 一定的坡度和植被状况下, 可用降雨过程资料来估测坡面径流量和土壤流失量。

关键词: 产流产沙; 径流小区; 土地利用; 豫西黄土丘陵区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0067-08

Effects of Different Land Uses on Runoff and Sediment on Sloping Land in Loess Hilly Area of Western Henan

Yi Qiang¹, Li Yuemei², Yan Junfei³, Gu Zhijia², Zhang Hongfeng³, Li Panying¹, Huang Shuping²

(1. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Henan Province, Zhengzhou 450008,

China; 2. College of Geographic Sciences/Henan Key Laboratory for Synergistic Prevention of

Water and Soil Environmental Pollution, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000,

China 3. Songxian Soil and Water Conservation Institute of Henan, Songxian, Henan 471400, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the runoff and sediment under different land use types and slopes in the loess hilly area of western Henan, and to provide scientific basis for quantitative evaluation of soil erosion and comprehensive prevention of soil erosion. [Methods] Based on the observation data of 12 runoff plots from 2011 to 2020 at the monitoring site of soil and water conservation in Hugou small watershed, Songxian County, Henan Province, the pattern of runoff and sediment under different land use was revealed. Correlation analysis was used to detect the relationship between rainfall characteristics, slope, land use, runoff and sediment yield. [Results] (1) Compared with bare land plot, grassland plot had the greatest effect on runoff and sediment reduction. The average annual runoff reduction effect of grassland was

收稿日期: 2023-07-10

修回日期: 2023-12-10

资助项目: 信阳师范大学“南湖学者奖励计划”青年项目(2019046); 信阳师范大学博士科研启动项目(19034); 国家自然科学基金(U2002209); 河南省自然科学基金(232300420444)

第一作者: 衣强(1972—), 男, 河南郑州人, 学士, 高级工程师, 主要从事水土保持监测与研究。E-mail: hnyi2004@126.com

通信作者: 顾治家(1987—), 男, 河南洛阳人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: gu.ya.nan@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

78.6%~85.9%, and the maximum sediment reduction effect was 100%. The runoff reduction effect of forestland was 32.9%~51.3%, and the sediment reduction effect was 55.3%~78.9%. (2) Runoff and sediment in each runoff plot and the slope were closely related. There was no significant difference between the runoff and sediment on the slopes of 10° and 15°, however, it increased significantly on the slope of 25°. In addition, with the increase of slope gradient, the soil and water conservation effect of forestland and grassland also reduced. (3) The correlation between runoff depth and maximum 30-minute rainfall intensity (I_{30}) and soil loss and rainfall erosivity were the most significant. [Conclusion] In areas where runoff and sediment localization observation is lacking in the loess hilly region of western Henan Province, rainfall process information can be used to estimate the runoff and soil loss under certain slope and vegetation conditions.

Keywords: runoff and sediment yield; runoff plot; land use; loess hilly area of western Henan

豫西黄土丘陵区地形破碎、坡度大、土壤抗侵蚀能力较差,是河南省水土流失最严重的地区之一^[1]。径流小区法作为水土流失定量观测常用的技术方法,最早由德国科学家 Ewald Wollny 修建用来开展土壤侵蚀研究^[2],因此,他也被称为“水土保持研究的先驱者”。1917年美国密苏里大学土壤系主任 Miller 等,创设了一批坡地土壤侵蚀试验小区,由此开启了土壤侵蚀定量化综合性研究工作。地处豫西黄土丘陵区胡沟小流域的地理位置、地形地貌、水文气象、土壤类型、植被类型与土地利用等具有典型的区域代表性。胡沟小流域水土保持监测点是河南省伏牛山地生态区伊洛河流域唯一的水土流失监测站,数据监测的自动化、网络化和标准化程度较高,有效地推进了该区坡地产流产沙规律与水土保持效益评估等基础研究。中国多地的实测资料表明,不同土地利用类型下径流量和土壤流失量差异显著,优化土地利用方式可有效地减轻水土流失^[3-7]。豫西黄土丘陵区位于黄土高原的东南边缘,属黄土丘陵沟壑区,是河南省水土流失最严重的地区之一。黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区(为典型的黄土丘陵区地形地貌)的研究表明,无论降雨强度如何变化,径流小区的产流产沙表现为灌木林地<荒草地<裸地^[8]。第5副区的监测结果显示产流产沙表现为灌木林地<自然草地<乔木林地<坡耕地^[9]。宁南陇东丘陵沟壑区的监测表明,林草地可以很好地减流减沙,减沙效益要大于减流效益^[6]。胡健等^[10]基于已有的研究总结出黄土丘陵沟壑区的植被恢复首选自然草地、灌丛和林地。尽管已有的相近区域不同土地利用类型对水土流失的影响成果较多,但针对豫西黄土丘陵区的相关研究相对薄弱,再加上土地利用的差异,气候、植被和土壤等因素的多变,其降雨过程、坡面产流产沙规律和林草地的水土保持效益等有别于临近其他区域,其他区域的研究结果在该区域未必有普适性。鉴于此,本文基于胡沟小流域水土保持监测点 2011—2020 年的实测资料,研究豫西黄土

丘陵区坡地产流产沙及其与降雨特征、土地利用类型等之间的关系,以期为该区水土流失防治、水土保持措施布设和土地利用优化布局等提供科学依据。

1 研究区概况

河南省嵩县胡沟小流域水土保持监测点位于洛阳市嵩县闫庄镇(东经 112°07'20",北纬 34°14'01"),主要承担着伏牛山中条山国家级水土流失重点治理区水土保持生态环境监测任务(图 1)。小流域属于黄河流域伊河水系,地处伏牛山北麓及其支脉外方山和熊耳山之间,流域面积 13.34 km²。该流域的土地利用类型以耕地、林地和草地为主,分别占流域总面积 56%,21%,12%。土壤类型以褐土、红黏土和风沙土为主,岩石类型以紫红色砂质黏土岩类、粉砂岩类和石灰岩类为主。该区属于中纬度半湿润易旱气候类型区,地跨暖温带向亚热带过渡地带。四季分明,光照充足,雨量适中。降雨多集中在夏季,年均降雨量为 689.9 mm,年平均蒸发量 1 385 mm。年平均气温 14℃,无霜期 209 d,全年日照平均时长约为 2 280 h。流域内植物类型多为耐寒木本植物,现存植被多为天然次生林和人工林。现存的植被为连香树(*Cercidiphyllum japonicum* Siebold & Zucc.)、黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)、杨树(*Populus* L.)、刺槐(*Robinia pseud-acacia* L.)、柏树(*Cupressus funebris* Endl.)等乔木类,杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)、六道木(*Abelia biflora* Turcz.)、黄栌(*Cotinus coggygria* Scop.)等灌木类,黄背草(*Themeda triandra* Forssk.)、苔草(*Carex* spp.)、竹叶草〔*Oplismenus compositus* (L.) P. Beauv.〕、蒿类等草本类。

2 材料与方法

2.1 径流小区设置

胡沟小流域坡面径流场共设有 3 组(每组 4 个) 12 个标准径流小区、36 个集流池,其中 10°,15°,25°

标准径流小区各 4 个;每个标准小区水平投影面积为 100 m²(水平长 20 m、宽 5 m)。其中裸地对照小区 3 个(10°,15°,25°各一个),措施小区 9 个。径流小区四周使用浆砌石围埂,围埂深入岩石层且高出地面 30 cm,防止外部径流汇入,可以最大程度保证观察的准确性。径流小区采用二级分流,设有集流桶。一级分流池分流高度为 0.6 m,二级分流池高度为 0.8 m,且一级分流池为 11 孔目,二级分流池为 25 孔目。径流小区编号及其基本信息见表 1。



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

表 1 胡沟小流域坡面径流小区基本信息

Table 1 Basic information about the plot of slope runoff field in Hugou watershed

小区 编号	土地 利用	植被覆盖度 (10 a 的平均值)/%	植被生长 年限/a	措施
A ₁₀	裸地	4.1	0	裸地小区,按照当地种植 条件及时除草,控制植被 覆盖度长期≤5%
A ₁₅				
A ₂₅				
B ₁₀	旱地	64.6	12	花生 (<i>Arachis hypogaea</i> L.)、黄豆 [<i>Glycine max</i> (L.) Merr.]等,穴播
B ₁₅				
B ₂₅				
C ₁₀	草地	86.3	12	人工种草,白草,羊胡子草
C ₁₅				
C ₂₅				
D ₁₀	林地	57.6	12	杏林
D ₁₅				
D ₂₅				

注:A₁₀,A₁₅,A₂₅为裸地坡度为 10°,15°,25°的小区。B₁₀,B₁₅,B₂₅为旱地坡度为 10°,15°,25°的小区。C₁₀,C₁₅,C₂₅为草地坡度为 10°,15°,25°的小区。D₁₀,D₁₅,D₂₅为林地坡度为 10°,15°,25°的小区。下同。

2.2 径流与泥沙观测

径流小区的产流状况和产沙状况在降雨之后及时进行观测。降雨量的观测通常采取自计雨量和人工雨量筒配合使用,降雨指标主要包括次降雨量、降雨时长和降雨强度等。降雨侵蚀力(R)采用 Wischmeier 等^[11]提出的以降雨总动能(E)和降雨时段内最大 30 min 降雨强度(I₃₀)的乘积来计算获取。

观测期内每年每次侵蚀性降雨(为裸地小区产流时的降雨)的次降雨侵蚀力之和为年降雨侵蚀力。次降雨侵蚀力计算公式为:

$$R_{次}=E \cdot I_{30}$$
(1)

$$E=\sum_{r=1}^n(e_r \cdot P_r)$$
(2)

$$e_r=0.29[1-0.72\exp(-0.082i_r)]$$
(3)

式中:R_次为次降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h)];I₃₀为一次降雨过程中最大 30 min 雨强(mm/h);E 为一次降雨的总动能(MJ/hm²);r=1,2,⋯,n 表示一次降雨过程按断点雨强分为 n 个时段;P_r为第 r 时段雨量(mm);e_r为每一时段的单位降雨动能[MJ·mm/(hm²·h)];i_r为第 r 时段断点雨强(mm/h)。

径流小区观测的径流量是指每次降雨产生径流以后流出小区的数量,分别用体积和径流深(单位面积产生的径流体积)表示。观测的产沙量是指每次降雨产生径流以后,由径流携带的泥沙流出小区的量,分别用重量和侵蚀模数(单位面积流失土壤的重量)表示,又称为径流小区的土壤流失量。径流泥沙采用人工采样与泥沙自动监测 v3.0 系统(北京天航佳德公司)相结合的方法来获取,用烘干法来获取泥沙的重量。

2.3 数据分析

本文利用相关分析法研究不同径流小区降雨特征、植被盖度与径流深、土壤流失量的相关性,Pearson 相关性分析用 SPSS 软件来完成。当显著性水平 p<0.05 时,表示显著相关;当显著性水平 p<0.01 时,表示极显著相关。用回归分析法建立不同径流小区径流深、土壤流失量与其关键影响因子间的线性拟合关系。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

2011—2020 年胡沟小流域内径流场多年平均降雨时间为 61.5 d,年均降雨量为 553.7 mm,其中降雨量最多的为 2017 年(707.5 mm),其次为 2011 年(647.0 mm),降雨量最少的为 2012 年(336.5 mm),其次为 2013 年(346.0 mm)(表 2)。侵蚀性降雨量(为裸地小区产流的降雨量)为 262.1 mm,年均降雨侵蚀力为 1 418.8 MJ·mm/(hm²·h)(6 a 平均)。2011—2020 年共发生侵蚀性降雨 173 次(年均 17 次),2011 年的侵蚀性降雨量最大,为 430 mm,2020 年的侵蚀性降雨量最小,为 148 mm,且全年无暴雨发生。研究区位于豫西黄土丘陵区,属温带季风气候,暴雨多发生于夏季但次数较少,2011—2020 年共有 9 次暴雨,其中 2013 年暴雨量最大,为 100.5 mm,2011 年最小,为 54 mm。

表 2 胡沟小流域坡面径流场降雨特征

Table 2 Rainfall characteristics in the slope runoff field of Hugou watershed

年份	降雨量/ mm	降雨 时间/d	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	侵蚀性 降雨场次	侵蚀性 降雨量/mm	暴雨量/ mm
2011	647.0	48	—	20	430	54.0
2012	336.5	35	—	4	232	—
2013	346.0	35	—	28	294	100.5
2014	557.5	45	565.16	22	264	56.0
2015	526.5	58	1587.0	14	256	59.0
2016	598.5	75	2742.1	20	316	59.0
2017	707.5	76	—	15	249	70.5
2018	646.0	73	1550.0	21	255	52.5
2019	584.0	75	1257.5	13	177	76.5
2020	587.5	95	811.1	16	148	—
平均	553.7	61.5	1418.8	17.3	262.1	52.8

注：“—”代表未发现，下表同。

通过对观测时段内 173 次侵蚀性降雨特征进行分析(图 2),结果表明次降雨的平均值为 22.4mm,发生产流的时间大概需要 591.5 min,平均降雨强度为 5.2 mm/h, I_{30} 为 11.1 mm/h。降雨侵蚀力的平均值为 296.63 MJ·mm/(hm²·h),降雨侵蚀力的波动最大,极差达 1 205.4 MJ·mm/(hm²·h),变差系数为 1.944。

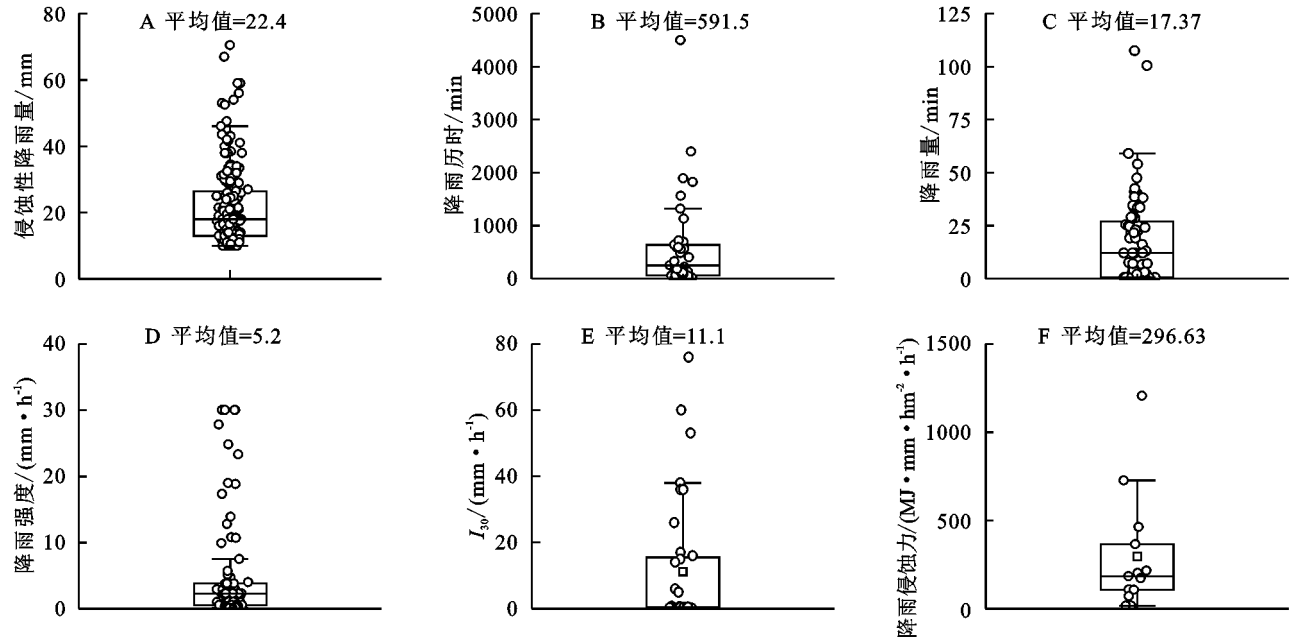


图 2 胡沟小流域侵蚀性降雨特征

Fig. 2 Erosive rainfall characteristics of Hugou watershed

3.2 产流产沙特征

不同土地利用类型的径流小区产流产沙差异显著(表 3)。裸地小区的产流次数为 33~34 次,旱地为 29~32 次,草地为 25~26 次,林地 为 25~27 次。相较之下,草地的产流次数最少,裸地小区产流次数最多。产流次数受坡度大小的影响,10°与 15°的产流次数差别不大,25°的坡度上产流次数有所增加。不同土地利用类型的径流深也有很大差别,裸地>林

地>旱地>草地,裸地的径流深是草地的 5.5 倍。25°的径流深最大,其次为 10°,最小的为 15°的小区,可见径流深与坡度的关系更为复杂。不同土地利用类型的土壤流失量差异显著,草地的土壤流失量最少,且 10°和 15°小区上都没有土壤流失量的发生,仅 25°小区有较少的土壤流失。在 25°小区上,产沙量最大的为旱地,与裸地的产沙量较为接近,其次为林地。各径流小区场次径流深最大值介于 16~187 mm, C_v

值介于 0.74~1.15;场次土壤流失量最大值介于 0~101.43 t/hm²。C_v值介于 0.61~1.27,场次径流泥沙波动较为强烈。在年内分布上,各径流小区的径流深和土壤流失量主要集中在夏季和秋季,这是因为径流小区受到气候条件的影响,降雨主要集中于 6—10 月份,春季和冬季降水较少,不易产流产沙。

表 3 不同径流小区产流和产沙统计
Table 3 Statistics of runoff and sediment in different runoff plots

小区编号	产流次数	径流深/mm			土壤流失量/(t·hm ⁻²)		
		场次平均值	场次最大值	C _v	场次平均值	场次最大值	C _v
A ₁₀	34	22.57	152.0	1.05	7.80	81.64	1.17
A ₁₅	33	18.76	126.0	1.05	5.08	65.67	1.21
A ₂₅	34	33.55	187.0	0.98	13.84	91.94	1.04
B ₁₀	29	7.25	23.4	0.74	7.10	38.53	0.97
B ₁₅	30	7.04	26.7	0.82	8.56	63.71	1.08
B ₂₅	32	7.73	28.8	0.82	15.87	101.43	1.03
C ₁₀	25	3.70	36.0	1.15	0	0	—
C ₁₅	26	2.64	16.0	1.01	0	0	—
C ₂₅	26	7.19	48.0	1.05	0	0.01	0.61
D ₁₀	25	15.14	107.0	1.06	2.61	47.08	1.27
D ₁₅	25	9.13	69.0	1.08	1.07	15.34	1.23
D ₂₅	27	16.93	147.0	1.12	6.19	83.40	1.22

3.3 水土保持措施效益对比

退耕还林还草是豫西黄土丘陵区重要的水土保持举措。在 10°的坡面上,草地的减流效益最好,为 83.6%,林地减流效益为 32.9%。草地减沙效益高达 100%,而林地和旱地的减沙效益较小,分别为 66.5%,8.9%。在 15°的坡面上,草地的减流减沙效益最好,分别为 85.9%,100%。在 15°和 25°的坡面上,旱地的土壤流失量甚至要高于裸地。在 25°的坡面上所有的土地利用类型下的产流产沙量最大,草地的减流效益高于林地,为 78.6%(表 4)。相比之下,林地的减流效益也要低于旱地。通过对比可知,林草植被的减沙效益较好,林草植被根系能够固结地表、削弱雨水侵蚀,这类植被的产流机制主要是缓冲降雨对地表的冲刷,对于减轻水土流失具有积极影响。旱地不仅受降雨等自然因素的影响,还受人为耕作等农事活动的影响,水土保持能力相对较差,水土流失状况较为严重。

径流小区的产流产沙与降雨关系密切,研究时段内可明显分为两个时间段:2011—2016 年、2017—2020 年(图 3)。不同土地利用类型的小区产流产沙差异很大,特别是草地的减流减沙效益明显,2017 年之后几乎不产流产沙。林地小区从 2018 年之后也几乎不产流产沙,而裸地和旱地小区由于每年都会受到人类活动(翻耕、除草等)的影响,只要有侵蚀性降雨产生,就会发生坡面径流和土壤流失。

表 4 不同土地利用径流小区的减流减沙效益

Table 4 Effects of different land use on the runoff and sediment reduction on the slope runoff plots

小区编号	平均次 减流/mm	减流 效益/%	平均次减沙/ (t·hm ⁻²)	减沙 效益/%
A ₁₀	—	—	—	—
A ₁₅	—	—	—	—
A ₂₅	—	—	—	—
B ₁₀	15.32	67.9	0.70	8.9
B ₁₅	11.72	62.5	—3.48	—68.5
B ₂₅	25.82	76.9	—2.03	—14.7
C ₁₀	18.87	83.6	7.80	100
C ₁₅	16.12	85.9	5.08	100
C ₂₅	26.36	78.6	13.83	99.9
D ₁₀	7.43	32.9	5.19	66.5
D ₁₅	9.63	51.3	4.01	78.9
D ₂₅	16.62	49.5	7.65	55.3

注:减流减沙效益=(裸地小区产流产沙量—其他小区产流产沙量)/裸地小区产流产沙量×100%。

3.4 产流产沙驱动因子分析

有研究表明降雨量和降雨侵蚀力是导致坡面产流产沙的主要驱动因子^[6]。降雨量和雨强对径流量和产沙量的影响显著^[8,12]。有研究表明,径流深与最大 30 min 雨强有显著相关性,降雨量与产沙量有极显著的相关关系^[13]。因此,降雨量、降雨历时、降雨强度和降雨侵蚀力等降雨指标都会影响产流产沙。将各径流小区径流深与降雨相关指标进行相关分析,结果表明径流深与 I₃₀相关性较为显著,且有 6 个径

流小区的径流深与 I_{30} 相关系数在降水指标中排第一(表 5),最大 30 min 雨强是小区产流的主要驱动因子。裸地小区和林地小区与降雨历时、降雨量呈负相关,由此可知并不是降雨量越大、降雨时间越长产流

就越多,还应考虑雨强尤其是最大 30 min 雨强的影响。植被覆盖度与径流深的相关性较小,甚至出现负相关的情况(旱地和林地小区),这与植被盖度受人为干扰严重、样本量较小有关。

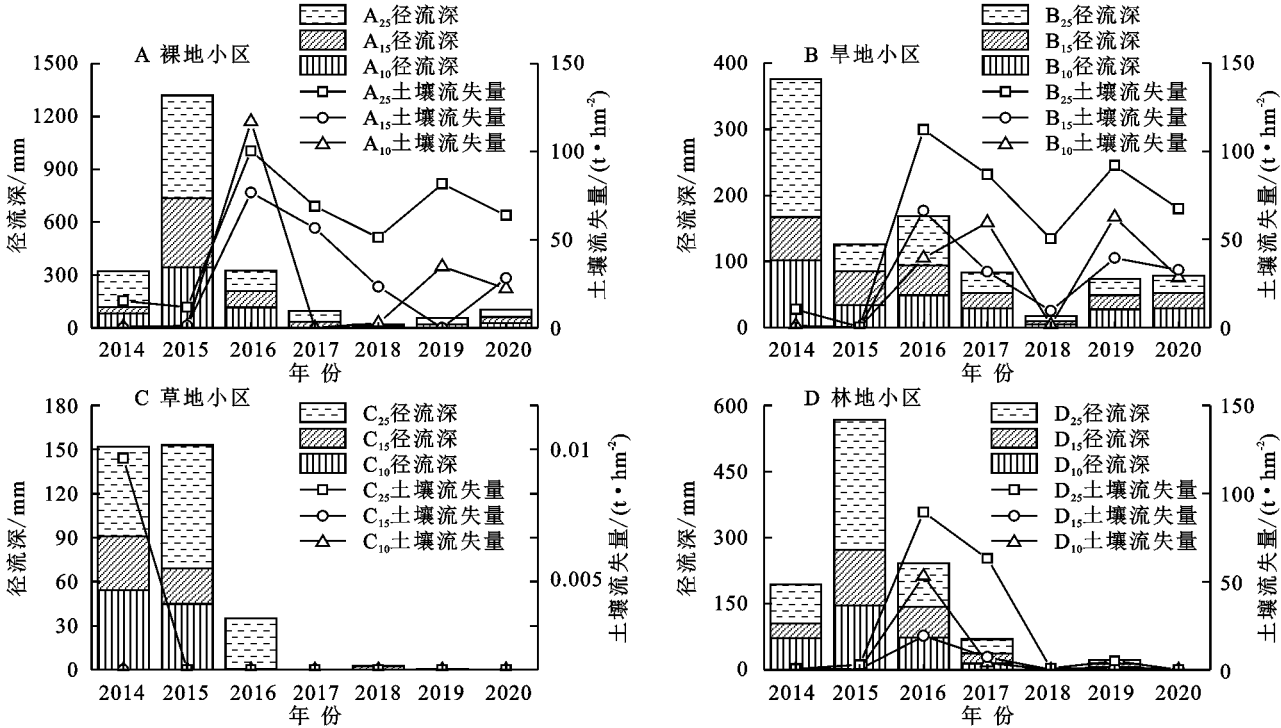


图 3 不同径流小区产流产沙年际变化

Fig. 3 Annual variation of runoff and sediment on different slope runoff plots

表 5 不同径流小区径流深与植被覆盖度、降雨特征的相关性

Table 5 Correlation between runoff depth and vegetation coverage and rainfall on the slope runoff plots

	植被覆盖度	降雨历时	降雨量	降雨强度	I_{30}	降雨侵蚀力
A ₁₀	—	−0.223	−0.065	0.110	<u>0.246</u>	0.156
A ₁₅	—	−0.274	−0.133	0.120	<u>0.211</u>	0.126
A ₂₅	—	−0.213	−0.076	0.089	0.202	0.135
B ₁₀	−0.228	0.248	0.358	0.087	<u>0.831**</u>	0.829**
B ₁₅	−0.03	0.037	0.374	0.113	<u>0.798**</u>	<u>0.827**</u>
B ₂₅	−0.025	0.081	0.297	0.176	<u>0.839**</u>	0.835**
C ₁₀	0.13	<u>0.433*</u>	−0.132	−0.176	−0.220	−0.227
C ₁₅	0.224	<u>0.458*</u>	−0.138	−0.238	−0.258	−0.267
C ₂₅	0.237	−0.026	−0.134	<u>0.184</u>	0.042	−0.066
D ₁₀	−0.263	−0.359	−0.062	0.114	<u>0.393</u>	0.235
D ₁₅	−0.363	−0.346	−0.028	0.155	<u>0.449*</u>	0.327
D ₂₅	−0.352	<u>−0.353</u>	−0.067	0.111	0.346	0.220

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 在 0.01 水平上显著相关,带下划线表示相关系数最大,下表同。

不同径流小区土壤流失量与降雨特征的相关性表明,多数小区降雨侵蚀力与土壤流失呈显著的正相关,相关系数也最大(表 6),降雨侵蚀力是小区产沙的主要驱动因子。 I_{30} 仅次于降雨侵蚀力与土壤流失量也呈显著的相关性。平均降雨强度和降雨历时与土壤流失量的相关性较低。受制于样本量以及人为因素的干扰,植被盖度与土壤流失量的关系不显著,甚至出现负相关的情形。

从表 7 可以看出,拟合各径流小区径流深和 I_{30} ,土壤流失量和降雨侵蚀力线性关系,除草地小区外,可以建立起拟合程度较高的线性关系,且土壤流失量与降雨侵蚀力的拟合度更高。对于缺少径流泥沙实测资料的豫西黄土丘陵区, I_{30} 和降雨侵蚀力可用来评估径流深和土壤流失量。10°和 15°坡面的径流小区产沙量差别不大,但 25°的坡面产沙明显增多。

表 6 不同径流小区土壤流失量与植被覆盖度、降雨特征的相关性

Table 6 Correlation between soil loss and vegetation coverage and rainfall on the slope runoff plots

小区编号	植被覆盖度	降雨历时	降雨量	降雨强度	I_{30}	降雨侵蚀力
A ₁₀	—	−0.019	0.379 *	0.162	0.749 **	0.844 **
A ₁₅	—	0.161	0.260	−0.048	0.592 **	0.623 **
A ₂₅	—	0.012	0.196	0.131	0.602 **	0.648 **
B ₁₀	−0.15	0.103	0.242	0.326	0.644 **	0.701 **
B ₁₅	0.01	0.110	0.345	0.069	0.689 **	0.805 **
B ₂₅	−0.03	0.081	0.187	0.117	0.651 **	0.685 **
C ₁₀	—	—	—	—	—	—
C ₁₅	—	—	—	—	—	—
C ₂₅	0.32	0.476 *	−0.072	−0.192	−0.264	−0.168
D ₁₀	−0.09	−0.081	0.320	0.004	0.612 **	0.741 **
D ₁₅	−0.09	−0.084	0.348	0.025	0.670 **	0.801 **
D ₂₅	−0.22	0.008	0.366	−0.051	0.688 **	0.795 **

表 7 不同径流小区 I_{30} 和径流深、土壤流失量和降雨侵蚀力线性关系

Table 7 Linear relationship between I_{30} and runoff depth as well as soil loss and rainfall erosivity

小区编号	径流深			土壤流失量		
	线性方程	R^2	p	线性方程	R^2	p
A ₁₀	$y=0.28I_{30}+3.73$	0.22	0.009	$y=0.05R-6.67$	0.711	<0.001
A ₁₅	$y=0.31I_{30}-0.96$	0.32	0.002	$y=0.04R-5.69$	0.63	<0.001
A ₂₅	$y=0.26I_{30}+12.78$	0.07	0.160	$y=0.06R-2.27$	0.43	<0.001
B ₁₀	$y=0.38I_{30}-5.76$	0.69	<0.001	$y=0.03R-2.49$	0.49	<0.001
B ₁₅	$y=0.37I_{30}-4.6$	0.64	<0.001	$y=0.05R-5.98$	0.65	<0.001
B ₂₅	$y=0.42I_{30}-5.96$	0.70	<0.001	$y=0.07R-4.25$	0.47	<0.001
C ₁₀	$y=-0.01I_{30}+3.22$	0.002	0.850	—	—	—
C ₁₅	$y=-0.06I_{30}+4.45$	0.07	0.230	—	—	—
C ₂₅	$y=0.03I_{30}+7.01$	0.002	0.840	—	—	—
D ₁₀	$y=0.54I_{30}-1.99$	0.15	0.057	$y=0.006R-0.73$	0.62	<0.001
D ₁₅	$y=0.42I_{30}-4.21$	0.20	0.028	$y=0.004R-0.52$	0.55	<0.001
D ₂₅	$y=0.63I_{30}-3.17$	0.12	0.083	$y=0.06R-9.89$	0.63	<0.001

注： I_{30} 为最大 30 min 雨强(mm/h)； R 为降雨侵蚀力[$\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$]。

4 讨论与结论

通过对建立在豫西黄土丘陵区的径流小区实测资料分析,结果表明不同土地利用类型条件下的产流产沙有显著区别。与裸地小区相比,草地小区的减流减沙效益最大。草地的平均减流效益变化为 78.6%~85.9%,林地的减流效益为 32.9%~51.3%,旱地的减流效益介于二者之间,变化为 62.5%~76.9%。草地和林地的减沙效益都普遍高于减流效益,草地最高可达 100%,林地为 55.3%~78.9%。旱地径流小区种植的是花生,观测结果表明其减沙效益低于林草地小区,但减流作用优于林地。花生为一年生草本植物,在形态和功能上类似于草本植物,因此其减流作用接近于草地。张真真等^[14]的研究也表明,花生地在小雨量和大雨强、小雨量和小雨强以及中雨量和小雨强等类型的降雨条件下具有很高的减流率。此外,由于花生地受到人为耕作的扰动,减沙效应则较低。有研究表明,花生的水土保

持效益优于玉米和黄豆等农作物,并建议多种植花生来缓解农作区的水土流失情况^[3]。但农作物是季节性的,主要生长期是 4—9 月,且植被盖度变化很大,并不能长期有效减流减沙。林地小区减流减沙效益低于草地小区可能是因单一林种所致,对于林地来说,除郁闭度之外,林下盖度也影响着水土流失^[15]。因此,要想提升林地的水土保持功能,不仅要优化林分结构,也要增大林下盖度,减少水土流失^[16-17]。研究区的观测结果表明,草地植被盖度与径流深和土壤流失量呈负相关。黄土高原已有的研究表明,产流产沙量随着植被盖度的增加而逐渐减少,但减流减沙效益先增加后减少。可见,要想发挥最大的水土保持效益,植被盖度存在一个临界值,黄土高原的临界值是 70%~80%^[18]。本研究草地小区的植被盖度变化为 71%~92%,平均植被盖度为 86.3%,植被覆盖度较高,观测结果显示在该盖度下具有很好的减流减沙效益。要想明确该区域植被盖度的临界值,还需要开展深入研究。

各径流小区产流产沙次数、大小与坡度关系密切,10°与15°的产流产沙差别不大,这与已有的研究结果类似^[9],25°的坡度上产流产沙明显增加。随着坡度的增加林草地的减流减沙效益也在降低,因此更应关注大坡度范围的水土流失的防治。

径流小区的产流产沙与降雨特征的相关性分析表明,径流小区径流深与最大 30 min 雨强(I_{30})相关性最为显著,土壤流失量与降雨侵蚀力相关性最为显著。在豫西黄土丘陵区缺少定位观测的区域,一定坡度和植被状况下,可用降雨过程资料来估测坡面径流和土壤流失量。

参考文献(References):

- [1] 衣强,张岩,张红峰,等.豫西黄土丘陵区侵蚀沟空间分布特征研究[J].人民黄河,2016,38(11):85-88.
Yi Q, Zhang Y, Zhang H F, et al. Study on the spatial distribution characteristics of the eroded gully in gullied rolling loess area of West Henan Province[J]. Yellow River, 2016,38(11):85-88.
- [2] Baver L D. Ewald wollny: A pioneer in soil and water conservation research[J]. Soil Science Society of America Journal, 1939,3:330-333.
- [3] 张树斌.文斗河小流域不同土地利用方式产流产沙分析[J].中国水土保持,2020(12):37-39.
Zhang S B. Runoff and sediment yield of different land use patterns in Wendouhe small watershed[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(12):37-39.
- [4] 顾朝军,朱永清,黄立文,等.不同土地利用对江西红壤坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):10-18.
Gu C J, Zhu Y Q, Huang L W, et al. Effects of different land uses on the runoff and sediment yield in red soil slope, Jiangxi[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(4):10-18.
- [5] 张彩云,蒋勇军,马丽娜,等.岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J].水土保持通报,2021,41(1):49-55.
Zhang C Y, Jiang Y J, Ma L N, et al. Characteristics of runoff and sediment on slope land with different land use in karst trough valley area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):49-55.
- [6] 陈炳,王苗,姚会恩,等.汤峪河流域径流小区水土保持监测点 2017—2019 年监测结果分析[J].中国水土保持,2021(5):55-57.
Chen B, Wang M, Yao H E, et al. Monitoring results of soil and water conservation monitoring sites in runoff plots of Tangyu River watershed from 2017 to 2019[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(5):55-57.
- [7] 胡沁梅,谢炎敏.长汀县水土保持措施下径流小区的产流产沙及其对降水量和植被覆盖度的响应[J].亚热带水土保持,2020,32(3):15-19.
Hu Q M, Xie Y M. Runoff and sediment yield and responses to rainfall and vegetation cover in runoff plots with different soil and water conservation measures in the Changting County [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2020,32(3):15-19.
- [8] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
Liu D, Liu P L, Deng R F, et al. Erosion characteristics of plots with various underlying surfaces in single rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(2):99-102.
- [9] 陈鹏飞,陈丽华,王宇,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流、产沙的影响[J].生态与农村环境学报,2010,26(3):199-204.
Chen P F, Chen L H, Wang Y, et al. Effect of land use pattern on runoff and sediment yield on slopelands in Loess Hilly Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010,26(3):199-204.
- [10] 胡健,胡金娇,吕一河.基于黄土高原关键带类型的土地利用与年径流产沙关系空间分异研究[J].生态学报,2021,41(16):6417-6429.
Hu J, Hu J J, Lü Y H. Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(16):6417-6429.
- [11] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of American Geophysical Union, 1958, 39(3): 285-291.
- [12] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30,35.
Ai N, Wei T X, Zhu Q K. The effect of rainfall for runoff-erosion-sediment yield under the different vegetation types in Loess Plateau of northern Shaanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2):26-30,35.
- [13] 侯慧新.黄土高原典型丘陵沟壑区不同坡度、植被条件下的水土保持效应研究[D].山西临汾:山西师范大学,2020.
Hou H X. Assessment on the Soil and Water Conservation Effect of Hilly-Gully Areas on the Loess Plateau Under Different Gradient and Vegetation Conditions[D]. Linfen, Shanxi: Shanxi Normal University, 2020.
- [14] 张真真,单延功,吴明洲,等.南京市丘陵区不同农耕措施水土保持效益[J].水土保持研究,2021,28(1):80-84,92.
Zhang Z Z, Shan Y G, Wu M Z, et al. Soil and water conservation effects of different agricultural measures in mountains and hills of Nanjing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):80-84,92.

- (1):1-14.
- Liu D S, Zhang Z H. Loess in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1962,42(1):1-14.
- [22] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].*水土保持研究*,2014,21(3):20-24.
- Sun Y Z, Zheng F L, Zhang J. Analysis of gully erosion development based on LIDAR and GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(3):20-24.
- [23] Cavalli M, Goldin B, Comiti F, et al. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models[J]. *Geomorphology*, 2017,291:4-16.
- [24] Winiwarter L, Anders K, Höfle B. M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021,178:240-258.
- [25] Mukupa W, Roberts G W, Hancock C M, et al. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures[J]. *Survey review*, 2017,49(353):99-116.
- [26] Wang N, Yao Z H, Liu W Q, et al. Spatial variabilities of runoff erosion and different underlying surfaces in the Xihe River Basin[J]. *Water*, 2019,11(2):352.
- [27] 李朋飞,张晓晨,党旭,等.基于三维激光扫描的坡沟系统侵蚀产沙过程研究[J].*水土保持研究*,2023,30(2):13-21.
- Li P F, Zhang X C, Dang X, et al. Investigation of erosion processes on the slope-gully system using 3D laser scanning[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):13-21.

~~~~~

(上接第 66 页)

- [26] 马瑞,张富,周波,等.甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评估价模型[J].*水土保持通报*,2021,41(4):139-144.
- Ma R, Zhang F, Zhou B, et al. Risk assessment model for dam break in Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(4):139-144.
- [27] 罗鹏飞,董燕君.超高土石坝变形监测新技术探讨[J].*人民黄河*,2022,44(S2):275-277.
- Luo P F, Dong Y J. Discussion on new deformation monitoring technology of ultra-high earth-rock dam[J]. *Yellow River*, 2022,44(S2):275-277.
- [28] 万智勇,黄耀英,赵新瑞,等.三维激光扫描技术在面板堆石坝挤压边墙变形监测中的应用[J].*长江科学院院报*,2017,34(6):56-61.
- Wan Z Y, Huang Y Y, Zhao X R, et al. Application of three-dimensional laser scanning technique in deformation monitoring of extrusion sidewall of concrete-faced rockfill dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017,34(6):56-61.
- [29] 马松增,徐建昭,何明月,等.河南省淤地坝安全自动化监测系统设计与应用[J].*水土保持通报*,2020,40(5):112-117.
- Ma S Z, Xu J Z, He M Y, et al. Design and application of automatic safety monitoring system for soil-saving dams in Henan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(5):112-117.
- [30] 于沐,李颖哲,姚雪飞,等.淤地坝系风险预警防控平台研究与应用[J].*水土保持通报*,2023,43(1):84-91.
- Yu S, Li Y Z, Yao X F, et al. Research and application of risk warning prevention and control platform for check dam systems[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):84-91.

~~~~~

(上接第 74 页)

- [15] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]// *Proceedings 12th international soil conservation organization conference*. Beijing: Tsinghua University Press. 2002.
- [16] 赖承义,左舒翟,任引.不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J].*生态学报*,2021,41(12):4913-4922.
- Lai C Y, Zuo S D, Ren Y. Impacts of different ecological restoration measures and environmental factors on water and soil conservation of the slope in the pure coniferous forest of the subtropical red soil area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(12):4913-4922.
- [17] 汤崇军,刘宇,徐爱珍,等.红壤径流小区覆被格局的水土保持效应评价[J].*中国水土保持科学*,2020,18(2):36-42.
- Tang C J, Liu Y, Xu A Z, et al. Effect assessment of land cover pattern on soil and water loss on red soil plots[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020,18(2):36-42.
- [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.
- Wu L, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation coverage on runoff and sediment yield in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(6):133-138,144.