

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.021.

马郡粒, 杨振奇, 郭建英, 等. 砒砂岩区坡面产流产沙对土地利用方式的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 136-143.

Ma Junli, Yang Zhenqi, Guo Jianying, et al. Response of Slope Runoff and Sediment Yield to Land Use in the Pisha Sandstone Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 136-143.

砒砂岩区坡面产流产沙对土地利用方式的响应

马郡粒¹, 杨振奇², 郭建英², 张铁钢², 王普³, 马培渊¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010010;

2. 中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站,

呼和浩特 010010; 3. 鄂尔多斯达拉特旗水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 研究坡面产流产沙过程对不同土地利用方式的响应于砒砂岩区生态保护与高质量发展具有重要意义。[方法] 以十大孔兑罕台川流域的合同沟小流域为研究区, 选取该区 2016—2021 年降雨产流产沙监测数据, 应用聚类分析、双因素方差分析等, 开展连续性动态监测研究, 进而揭示砒砂岩区坡面产流产沙与不同土地利用方式的时空动态变化关系。[结果] (1) 次降雨按历时、雨强和雨量可分为 3 类, 包括 A 类(历时短、雨量集中、高强度), B 类(雨量较多、历时较短、中强度), C 类(历时长、小雨强、雨量分散), C 类导致水土流失能力最弱; (2) A、B 类降雨产流产沙, 排列顺序为乔木林地 < 灌草地 < 人工草地 < 天然草地 < 农作物地 < 裸地; C 类降雨产流, 排列顺序为乔木林地 < 天然草地 < 灌草地 < 人工草地 < 农作物地 < 裸地, 产沙, 排列顺序为人工草地 < 乔木林地 < 天然草地 < 灌草地 < 农作物地 < 裸地, 且相同土地利用方式径流深和土壤流失量排序为 C < B < A; (3) 不同土地利用方式的径流深或土壤流失量对雨型响应的坡度效应略有差异, 主要存在于裸地、农作物地与其他土地利用方式。[结论] 砒砂岩区坡面水土流失的治理和生态恢复, 应考虑雨型和坡度对不同土地利用方式产生的复合作用。

关键词: 砒砂岩区; 坡面产流产沙; 土地利用方式

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0136-08

Response of Slope Runoff and Sediment Yield to Land Use in the Pisha Sandstone Area

Ma Junli¹, Yang Zhenqi², Guo Jianying², Zhang Tiegang², Wang Pu³, Ma Peiyuan¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological

System, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010010, China;

3. Ordos in Dalate Banner water development center, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] The study of slope runoff and sediment yield processes in response to different land use type is of great significance for the ecological protection and high-quality development of Pisha sandstone areas. [Methods] The Hantaichuan watershed of the sub-watershed of the ten largest Kongtuei was taken as the study area. The rainfall-produced flow and sediment production monitoring data from 2016—2021 in the area were selected. Cluster analysis and two-factor analysis of variance were applied to carry out a continuity and dynamic monitoring study, which in turn revealed the relationship between the temporal and spatial dynamics of the slope runoff and sediment yield in the Pisha sandstone area and different land use types.

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-02-15

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2021BS04009); 内蒙古自治区科技兴蒙行动重点专项(KJXM-EEDS-2020005); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0052); 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0008)

第一作者: 马郡粒(1997—), 女, 内蒙古包头市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: 723225698@qq.com

通信作者: 郭建英(1979—), 男, 内蒙古清水河县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事半干旱区水土流失与植物生态的研究。E-mail: guojianying1980@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

[Results] (1) The rainfall could be divided into three categories according to the duration, intensity and rainfall, including category A (short duration, concentrated rainfall and high intensity), category B (heavy rainfall, short duration, medium intensity), and category C (long duration, light rainfall intensity, scattered rainfall). Category C resulted in the weakest ability of soil erosion. (2) Type A and type B rainfall induced sediment, the order was tree forest<shrub land<artificial grassland<natural grassland<crop land<bare land. The order of type C rainfall-runoff production was tree forest<natural grassland<shrub land<artificial grassland<crop land<bare land, and the order of sediment production was artificial grassland<tree forest<natural grassland<shrub land<crop land<bare land, and the order of runoff depth and soil loss amount of the same land use mode (only bare land and crop land) was C<B<A. (3) The slope effect of runoff depth or soil loss amount on the response of rainfall pattern was slightly different among different land use types, which mainly existed among bare land, crop land and other land use type. [Conclusion] The management and ecological restoration of slope erosion in Pisha sandstone area should take into account the compounding effect of rainfall patterns and slope gradients have on different land use types.

Keywords: Pisha sandstone area; slope runoff and sediment yield; land use type

砒砂岩区生态环境脆弱,丘陵沟壑纵横,水土流失严重,年均土壤侵蚀模数约 4 万 $t/(km^2 \cdot a)$,是黄河泥沙的主要策源地,大量的入黄泥沙威胁着黄河中下游的生态环境安全。自 20 世纪 90 年代起,该区先后实施了退耕还林(草)、小流域综合治理等生态政策和水土流失治理工程,水土流失趋势得到有效控制^[1-2],但该区不同土地利用方式的侵蚀产沙机理尚不明确。已有研究表明干旱、半干旱地区坡面的侵蚀产沙过程主要受到降雨、植被、地形和土地利用方式的影响^[3-4]。降雨对水蚀过程的影响具有较大的时空异质性,与降雨量、降雨强度、降雨历时等特征因素有关。植被和地形具有较强的地域特征,植被是干旱半干旱地区对水蚀过程影响最活跃的因子,具有增加地表覆盖、削减洪峰、固持土壤等作用,影响着土壤侵蚀的发生与发展^[5]。坡度则是导致水土流失的关键因素,与坡面产流产沙过程具有复杂的关系,它可以增加雨水向下的自重分力,从而增大径流流速,减少累积入渗量,增大径流泥沙量^[6],而土地利用方式对水土流失具有明显的分异效应,受人为活动的影响较大,对于侵蚀有着不同程度的影响。

纵观国内外关于坡面产流产沙与土地利用方式响应的分析,地点多集中于黄土区、黑土区以及红壤土区等地带,数据资料多采用单次或短期模拟试验数据,研究内容主要涉及降雨或地形等影响因子单方面的作用;而具有独特岩石结构和性质的砒砂岩区罕见报道,尤其是针对多年连续性野外监测数据复合因素的水沙分析^[7-10]。雨型是次降雨过程中不同降雨特征的组合形式,坡度是影响坡面土壤侵蚀的主要地形因子^[11],这些因素复合作用于坡面产流产沙,增加影响机制的复杂性,促使土壤水蚀规律的不确定性增

加,而以往关于不同土地利用方式对雨型响应的坡度效应报道却寥寥无几^[12]。因此,本文以砒砂岩区典型小流域不同土地利用方式的标准径流场为观测对象,根据该区 2016—2021 年降雨及径流泥沙数据,探究不同土地利用方式的侵蚀产沙变化特征,以期对砒砂岩区水土流失的治理和生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河中上游一级支流罕台川的合同沟小流域,流域面积约 1.27 km^2 ,地理坐标为 39°59′58″—40°13′18″N,109°53′36″—110°06′03″E,隶属于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗,是典型的砒砂岩丘陵区,土壤类型以栗钙土为主,质地为砂质土,小流域平均坡度 5~15°,地形地貌支离破碎,沟壑纵横,属半干旱温带大陆性气候,年均气温为 6~8℃,年均降雨量为 310.3 mm,集中于 7—9 月份,占 71.2%,多为短历时大雨,水土流失严重。区域内主要建群种有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、羊草(*Leymus chinensis*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等,主要造林树种有柠条(*Caragana Korshinskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)等。

1.2 试验设计

本研究区位于全国水土保持监测网络站点—达拉特旗合同沟水土保持监测站点附近(编号:DA1520737110),该站点始建于 2005 年,建有标准径流小区 18 座(20 m×5 m)。小区安装自动水沙监测设备(北京天航佳德),并同步配备了自动气象监测站和智墒云智能土壤温度水分观测仪(北京东方润泽)获取相关数据。径流场土地利用基本概况见表 1。

表 1 径流场土地利用基本概况

Table 1 Basic overview of runoff site land use

配置模式	天然草地	人工草地	灌草地	乔木林地	农作物地
主要植被	—	紫花苜蓿	柠条	油松	荞麦
播种方式	—	撒播	穴播	穴播	条播
株行距/(m×m)	—	—	0.10×0.15	1.00×2.00	—
植被覆盖度/%	61.79±9.10	58.48±9.56	60.10±8.91	49.00±12.78	42.62±7.81

1.3 测定内容与方

(1) 土壤含水率测定。采用智墒云智能土壤温度水分观测仪(北京东方润泽),每 30 min 观测一次,观测深度 0—100 cm 平均分为 5 层。每次降雨后,通过 TDR 法加测 0—10 cm 深度的土壤体积含水率,并烘干法校核。

(2) 降雨特征观测。通过自动气象监测站记录次降雨过程,每 5 min 观测一次,降雨量精确至 0.1

mm,降雨强度单位 mm/min。同时参考黄土高原区降雨强度划分标准的基础上^[13-15],结合本区天然降雨条件下坡面产流产沙特点。

针对各场次降雨,选取年降雨量(P)、年降雨历时(T)、最大 $I_{30\min}$ 雨强($I_{30\max}$)、平均雨强(I_{AVG})等指标,运用系统聚类方法对研究区内的降雨类型进行划分。研究区 2016—2021 年降雨基本概况见表 2。

表 2 研究区 2016—2021 年降雨基本概况

Table 2 Basic profile of rainfall in the study area 2016—2021

年份	P/mm	T/h	P_{\max}/mm	$I_{30\max}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$R_{\max}/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$(A+B)/\%$
2016	638.5	770.0	156.0	43.5	1608.2	62.5
2017	281.8	920.0	29.8	25.2	123.9	71.4
2018	443.6	281.0	48.6	61.2	547.3	90.0
2019	298.0	786.0	34.8	41.6	274.0	57.1
2020	380.2	406.0	47.6	56.6	499.5	81.8
2021	343.6	87.0	39.2	43.2	460.7	50.0

注: P 表示年降雨量; T 表示年降雨历时; P_{\max} 表示最大次降雨量; $I_{30\max}$ 表示最大 I_{30} , R_{\max} 表示最大降雨侵蚀力; $(A+B)$ 表示 A 和 B 类降雨次数总占比。

(3) 径流泥沙量观测。利用自动水沙监测设备(北京天航佳德),每分钟记录一次,产流体积精确至 0.001 L;产沙量精确至 0.001 kg/m³,同时辅以全剖面采样器人工实地取样。

径流深(mm)=径流体积(L)/小区面积(m²)

径流系数(%)=径流深(mm)/降雨量(mm)

土壤流失量(t/hm²)=泥沙总量(t)/小区面积(hm²)

(4) 植被观测。采用照相法、目估法 4—10 月,每 15 d/次。小区产流后加测乔木郁闭度、灌草作物覆盖度与地面盖度。

试验数据通过 Excel 进行整理统计和 Origin 2018 进行绘图,运用 SPASS 26.0 进行双因素方差分析、聚类分析和相关性分析,研究不同土地利用方式下的水沙关系。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

砭砂岩地区,地形地貌支离破碎,沟壑纵横,降雨量稀少,年内降雨多集中在夏末秋初,降雨引发的水

力侵蚀是该区最为主要的侵蚀形式。研究区 2016—2021 年共观测降雨 47 场,其中侵蚀性降雨 36 场,根据气象学中降雨类型的划分(24 h 以内),研究区 5 a 间共有小雨 3 场、中雨 29 场、大雨 14 场、大暴雨 1 场。通过聚类分析降雨特征对降雨类型进一步划分(见表 3),结果表明:观测降雨可划分为 3 类,A 类降雨研究区发生频率最高(40.4%),其特点是历时短,雨量集中,高强度的暴雨;B 类降雨为雨量较多,历时较短,中强度的降雨;C 类降雨研究区发生频率最低(27.6%),其特点是历时长,小雨强,雨量分散的连续性降雨。其中 2017 年 P 最小,为 281.8 mm, T 最大 $I_{30\max}$ 最小;2018 年 T 明显小于 2017 年,同时 P 和 $I_{30\max}$ 高于 2017 年,表明降雨量主要受到降雨强度的影响。2018 年、2020 年径流泥沙量较大(见图 1),同年 A、B 类降雨次数所占比例明显高于其他年份,表明 A、B 类多为侵蚀性降雨,是该区域坡面水土流失的主要贡献者。此外,分析同类型降雨发现径流量逐年递减,究其原因因为植被的生长,使得冠层截流再分配的同时改良了土壤理化性质,促渗减流。

表 3 不同降雨类型特征

Table 3 Characteristics of different rainfall type

降雨类型	P/mm		T/h		$I_{30\max}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$		$I_{\text{AVG}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$		频数
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
A 类	22.96	12.75	2.56	1.49	29.81	14.22	23.02	11.90	19
B 类	22.01	9.29	7.75	1.30	14.66	6.03	9.79	3.32	15
C 类	15.33	5.16	14.21	1.78	6.94	3.27	4.40	2.66	13

注: P 表示次降雨量; T 表示次降雨历时; $I_{30\max}$ 表示最大 I_{30} ; I_{AVG} 表示平均雨强。

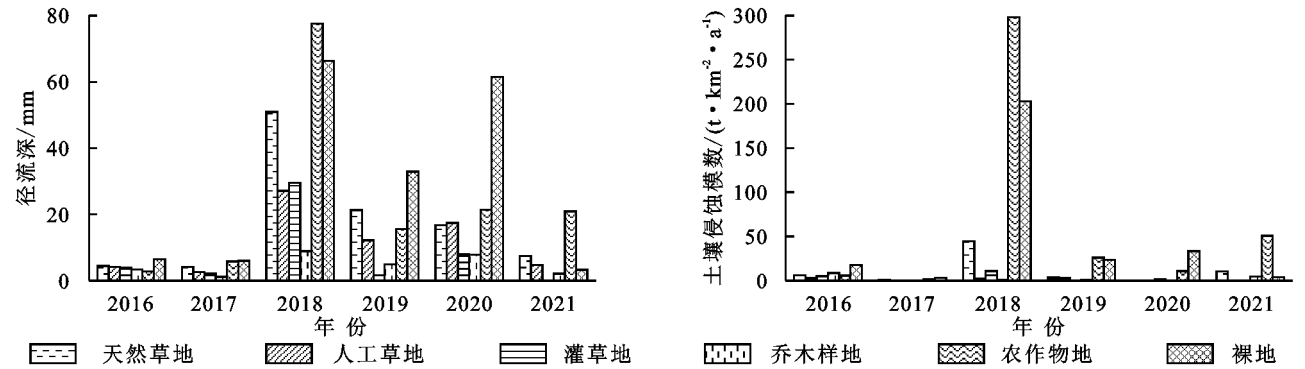


图 1 不同土地利用方式年际间产流产沙变化

Fig. 1 Inter-annual variability in runoff and sediment yield between land use type

2.2 不同土地利用方式产流产沙对雨型的响应

通过相关性分析次降雨过程,降雨历时 $T(\text{min})$ 、降雨量 $P(\text{mm})$ 、平均降雨强度 $I_{\text{avg}}(\text{mm/h})$, 30 min 最大雨强 $I_{30\max}(\text{mm/h})$ 与不同土地利用方式径流深 $H(\text{mm})$ 、径流系数 $R(\%)$ 、产沙量 $C(\text{g/L})$ 、土壤流失量 $M_s(\text{t}/\text{hm}^2)$ 以及坡度 $G_d(^{\circ})$ 的相关关系(见表 4);不同土地利用方式径流深 $H(\text{mm})$ 、径流系数 $R(\%)$ 和产沙量 $C(\text{g/L})$ 、土壤流失量 $M_s(\text{t}/\text{hm}^2)$ 的相关关系(见表 5)。其中, P 与径流泥沙情况在除人工草地和农作物地外,均呈正相关关系,且与 C 和 M_s 呈极显著($p<0.01$)正相关关系; T 与 I_{30} 对径流泥沙的影响在不同土地利用方式下均呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)的正相关关系; I_{AVG} 对径流泥沙的影响在裸地较突出,表现为呈极显著($p<0.01$)正相关关系。坡度对径流泥沙的影响在人工草地、乔木林地、农作物地和裸地较突出,主要表现为 G_d 与 C 呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)正相关关系。上述表明,降雨特征与水土流失的发生息息相关,且受土地利用方式的影响,具有明显的分异效应,坡度是导致水土流失的关键因素,与坡面产流产沙过程具有复杂的关系。

不同土地利用方式下,次降雨的径流与泥沙情况均具有 $p<0.01$ 的正相关关系,降雨产生的坡面流具有冲刷、剥离及搬运土壤的作用,加剧坡面土壤侵蚀。进一步分析可知,不同土地利用方式各雨型情况下的径流泥沙响应不尽相同(见图 2)。A、B 类降雨径流深和土壤流

失量的排序,均呈乔木林地<灌草地<人工草地<天然草地<农作物地<裸地,受雨强影响,冠层雨水截留再分配的效果明显;C 类降雨情况与之不同,天然草地减流减沙效果优于灌草地(15.80%,12.01%),由于天然草地表层腐殖质积累丰富,土壤结构良好,对降雨的渗漏和通透性优于灌草地,水土保持效果提高,而人工草地地被层较厚,且密度大,对土壤形成了保护效果使得减沙效果高于天然草地。此外,不同雨型情况下各土地利用方式的径流泥沙响应则基本一致,径流深和土壤流失量的排序,均呈 $C<B<A$,其中 A、B 类降雨 P 相近,主要区别体现在 $I_{30\max}$,表明雨强相较于雨量对引起坡面土壤侵蚀的作用更大。

2.3 不同土地利用方式产流产沙对雨型响应的坡度效应

坡度不仅影响径流的渗透量、径流量和冲刷能力还影响坡地的侵蚀方式和强度,与坡面产流产沙过程存在复杂性和随机性。采用双因素方差分析坡度对不同土地利用方式产流产沙在各雨型条件下的影响(表 6),结果显示: A 类降雨土地利用方式和坡度对土壤流失量($p<0.05$, $p<0.01$),土地利用方式对径流深($p<0.01$),分别具有显著或极显著的影响,两者交互作用的影响仅对土壤流失量显著($p<0.01$); B、C 类降雨土地利用方式对径流深($p<0.05$, $p<0.01$)和土壤流失量($p<0.01$)具有显著或极显著的影响。

不同雨型条件下,各土地利用方式径流深或土壤流失量对坡度的响应表现略有差异,并不单纯随着降

雨特征的增加和坡度的增大而增大,差异主要存在于裸地、农作物地与其他土地利用方式(图 3)。其中 5°裸地的径流深显著大于除农作物地外其他土地利用方式(A,B),土壤流失量显著大于不包括或包括农作物地外其他土地利用方式(B,C);10°裸地的径流深仅显著大于天然草地(A,B),土壤流失量则与其他所有土地利用方式无显著差异(A,B 和 C);15°裸地的径流深显著大于不包括或包括农作物地外其他土地

利用方式(A,B)和天然草地或灌草地(C),土壤流失量显著大于其他所有土地利用方式(A,C)。A 类降雨情况下,不同坡度间也存在一定程度的差异,天然草地和乔木林地的土壤流失量 10°显著大于其他坡度;裸地的土壤流失量 15°显著大于其他坡度。上述可知,C 型降雨土壤侵蚀力弱,导致各坡度土地利用方式的产流产沙表现基本一致,15°坡度较大直接影响径流的冲刷能力,加剧各土地利用方式的水土保持效果差异。

表 4 不同土地利用方式产流产沙的影响因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis of factors affecting runoff and sediment yield by different land use type

土地利用类型	参数	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>I</i> _{30max}	<i>I</i> _{AVG}	<i>G_d</i>
天然草地	<i>H</i>	0.201 *	0.237 *	0.496 **	0.134	0.075
	<i>R</i>	0.219 *	0.337 *	0.407 **	0.160	0.109
	<i>C</i>	0.451 **	0.249 **	0.204 *	0.101	0.064
	<i>M_s</i>	0.304 **	0.048 **	0.356 **	0.103	0.039
人工草地	<i>H</i>	0.137	0.289 **	0.658 **	0.203 *	0.098
	<i>R</i>	0.127	0.491 **	0.406 **	0.191 *	0.133
	<i>C</i>	0.139	0.115 **	0.463 **	0.178	0.370 **
	<i>M_s</i>	0.141	0.144 **	0.504 **	0.152	0.246 *
灌草地	<i>H</i>	0.302 **	0.198 *	0.672 **	0.127	0.089
	<i>R</i>	0.335 *	0.294 **	0.530 **	0.033	0.131
	<i>C</i>	0.300 **	0.125 **	0.371 **	0.627 **	0.055
	<i>M_s</i>	0.516 **	0.084 **	0.480 **	0.469 **	0.116
乔木林地	<i>H</i>	0.260 **	0.271 **	0.712 **	0.18	0.158
	<i>R</i>	0.236 *	0.388 **	0.513 **	0.11	0.201 *
	<i>C</i>	0.379 **	0.012 *	0.237 *	0.586 **	0.215 *
	<i>M_s</i>	0.597 **	0.026 *	0.429 **	0.482 **	0.230 *
农作物地	<i>H</i>	0.118	0.188 *	0.585 **	0.116	0.056
	<i>R</i>	0.166	0.326 *	0.426 **	0.105	0.023
	<i>C</i>	0.096	0.186 *	0.488 **	0.139	0.262 **
	<i>M_s</i>	0.117	0.137 **	0.423 **	0.094	0.082
裸地	<i>H</i>	0.235 *	0.257 *	0.641 **	0.342 **	0.232 *
	<i>R</i>	0.218 *	0.359 **	0.499 **	0.391 **	0.234 *
	<i>C</i>	0.461 **	0.200 *	0.224 *	0.524 **	0.226 *
	<i>M_s</i>	0.802 **	0.224 *	0.213 *	0.524 **	0.106

注:*G_d*表示坡度;*H*表示径流深;*R*表示径流系数;*C*表示产沙量;*M_s*表示土壤流失量。

表 5 不同土地利用方式的径流泥沙相关性分析

Table 5 Runoff sediment yield analyses for different land use type

参数	天然草地		人工草地		灌草地		乔木林地		农作物地		裸地	
	<i>H</i>	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>R</i>
<i>C</i>	0.406 **	0.287 **	0.402 **	0.449 **	0.434 **	0.415 **	0.411 **	0.304 **	0.501 **	0.449 **	0.506 **	0.442 **
<i>M_s</i>	0.540 **	0.596 **	0.653 **	0.556 **	0.517 **	0.469 **	0.453 **	0.472 **	0.653 **	0.556 **	0.696 **	0.570 **

注:**表示不同土地利用方式与降雨因子极显著相关($p<0.01$);*表示不同土地利用方式与降雨因子显著相关($p<0.05$)。

3 讨论

砒砂岩区地处干旱、半干旱地区,全年降水分布不均且雨量集中,侵蚀性降雨严重影响着该区坡面侵蚀产沙过程,是导致其剧烈侵蚀的主要动力^[16]。砒砂岩地形切割支离破碎,加之基岩具有发育不充分,胶结力弱等性质,极易受风力和水力作用风化溃散。研究表明该区 A,B 类(历时偏短、雨强偏大、雨量偏多)降雨发生频率较高,且多为侵蚀性降雨,是造成该区域坡面水土流失的主要贡献者,C 类(历时长、小雨强、雨量分散)降雨土壤侵蚀能力最弱,对研究区地下水的补给作用最佳,与王万忠等^[17]研究结果相同。分析 2016—2021 年降雨情况,2018 年降雨强度最高,同年产流产沙量也最大,其中 $I_{30\max}$ 与 P 对径流泥沙的影响,具有 $p<0.05$ 或 $p<0.01$ 正相关关系,故降雨强度与侵蚀强度关系最为密切其次是降雨量,该结果与江森华等^[18]的研究结果基本一致。降雨类型(雨量、雨强或历时等)与水土流失的发生息息相关,且受土地利用方式的影响,具有明显的分异效应,A,B 类降雨强度大,冠层对雨水的层层截留再分配作用,促使乔灌木的水土保持效果优于草地;C 类降雨侵蚀力弱,天然草地由于长期的封禁,地表腐殖质积累丰富,土壤结构良好,对降雨的渗漏和通透性提高,减流减沙效果由于灌草地,该结果与黄凯等^[19]的研究一致。农作物地的水土流失情况仅次于裸地,原因是季节性翻耕,土壤表层松散,在降雨击溅和径流冲刷下,坡面迅速形成细沟,伴随着细沟的溯源发育和不断扩展,土壤水蚀急剧增加,因此陡坡耕地退耕还林还草是恢复良性生态环境的必由之路,该结果与琚彤军等^[20]的研究一致。坡度是导致水土流失的关键因素,与坡面侵蚀关系的复杂性和不确定性,一定

程度上限制了坡面水土保持措施的实施效果。研究表明,坡度对产沙量的影响大于产流量,主要表现为 G_d 与 C 呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)正相关关系(人工草地、乔木林地、农作物地和裸地)。坡度直接作用于径流的冲刷能力,水土流失情况随着坡度的增加而加剧,直至雨滴对水面的打击作用弱于坡面流的保护作用,该结果与曹美晨等^[21]的研究结果一致。坡度对不同降雨类型,土地利用方式的水土保持效果差异性有影响,低度坡面裸地与其他土地利用方式的蓄水能力在小雨强无显著性差异,当坡度升至 15° 时,裸地径流深显著大于天然草地和灌草地,天然草地的渗透力好,灌草地则经培养管理已形成灌丛堆效应,固土促渗,从而减少坡面流的产生。研究区平均坡度 10° ,天然草地在大雨强情况下的水土保持效果显著高于其他土地利用方式,因此天然草地对径流泥沙的拦截作用适用于低度坡面,灌草地则对较高的坡面具有良好蓄水保土效益,该研究结果于幸艳等^[22]基本一致。

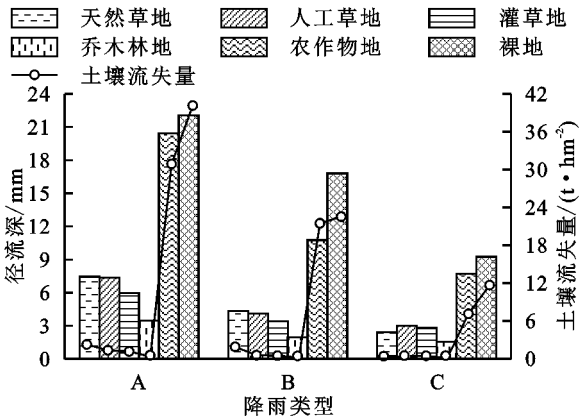


图 2 不同土地利用方式产流产沙对雨型的响应
Fig. 2 Response of runoff and sediment yield to rainfall patterns in different land use type

表 6 不同土地利用方式与坡度下的径流深和土壤流失量方差分析

Table 6 ANOVA table for runoff depth and soil loss amount under different land use type and slopes

参数 变异源	降雨 类型	SS		df		M_s		F		p	
		径流深	土壤 流失量	径流深	土壤 流失量	径流深	土壤 流失量	径流深	土壤 流失量	径流深	土壤 流失量
坡度	A	30.68	1196.94	2	2	15.34	598.47	0.56	3.73	$p>0.05$	$p<0.05$
	B	12.94	430.85	2	2	6.47	215.42	0.66	2.26	$p>0.05$	$p>0.05$
	C	0.731	68.27	2	2	0.36	34.13	0.07	2.73	$p>0.05$	$p>0.05$
土地利用 方式	A	1491.87	7503.18	5	5	298.37	1500.64	10.98	9.36	$p<0.01$	$p<0.01$
	B	491.65	1809.00	5	5	98.33	361.80	10.00	3.80	$p<0.01$	$p<0.01$
	C	84.66	292.96	5	5	16.93	58.59	3.06	4.69	$p<0.05$	$p<0.01$
坡度×土地 利用方式	A	332.26	4187.67	10	10	33.23	418.77	1.22	2.61	$p>0.05$	$p<0.01$
	B	63.37	877.88	10	10	6.34	87.79	0.64	0.92	$p>0.05$	$p>0.05$
	C	12.97	102.06	10	10	1.30	10.21	0.23	0.82	$p>0.05$	$p>0.05$

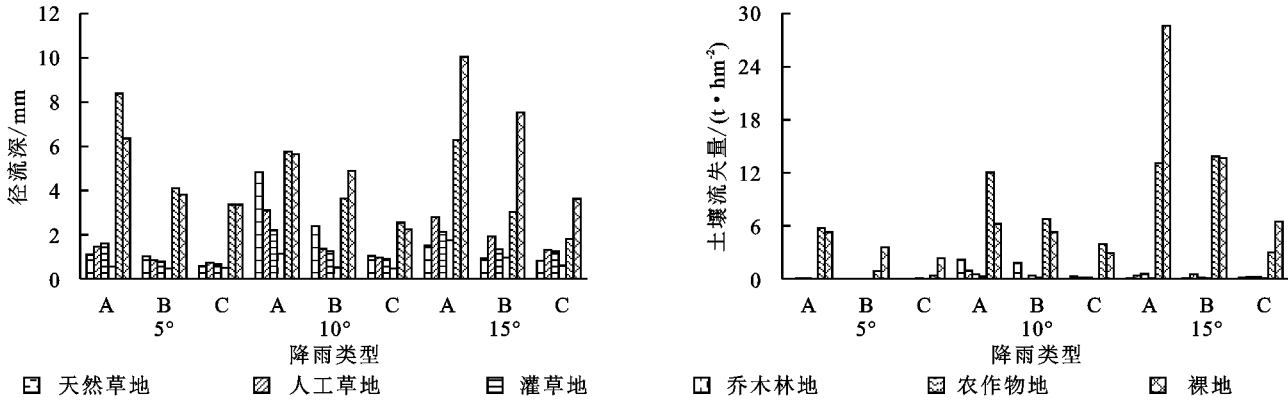


图 3 不同土地利用方式产流产沙对雨型响应的坡度效应

Fig. 3 Slope effects on the response of runoff and sediment yield to rainfall patterns in different land use type

4 结论

(1) 研究区降雨类型主要可分为 3 类,A 类历时短、雨量集中、高强度;B 类雨量较多、历时较短、中强度;C 类历时长、小雨强、雨量分散,C 类雨型导致水土流失能力最弱。

(2) P 与 H, R, C 和 M_s (除人工草地和农作物地外)均呈正相关关系,且与 C 和 M_s 呈极显著 ($p < 0.01$) 正相关关系; T 和 I_{30max} 与 H, R, C 和 M_s 均呈正相关关系, I_{AVG} 与 H, R, C 和 M_s 在裸地呈极显著正相关关系, G_d 与 C 在人工草地、乔木林地、农作物地和裸地呈显著 ($p < 0.05$) 或极显著 ($p < 0.01$) 正相关关系。

(3) 次降雨的 H 和 R 与 C 和 M_s 均具有极显著 ($p < 0.01$) 的正相关关系,A, B 类降雨产流产沙,排列顺序为乔木林地 < 灌草地 < 人工草地 < 天然草地 < 农作物地 < 裸地;C 类降雨产流,排列顺序为乔木林地 < 天然草地 < 灌草地 < 人工草地 < 农作物地 < 裸地,产沙,排列顺序为人工草地 < 乔木林地 < 天然草地 < 灌草地 < 农作物地 < 裸地。相同土地利用方式径流深和土壤流失量排序为 $C < B < A$ 。

(4) 不同雨型各土地利用方式的径流深或土壤流失量对坡度的响应表现略有差异主要存在于裸地、农作物地与其他土地利用方式。C 型降雨土壤侵蚀力弱,导致各坡度土地利用方式的产流产沙表现基本一致,同时 15° 坡度较大直接影响径流的冲刷能力,加剧各土地利用方式的水土保持效果差异。

参考文献:

[1] 张强,达古拉,侯琳.鄂尔多斯水土保持建设实践与探索[J].中国水利,2022,73(10):35-37.
Zhang Q, Da G L, Hou L. Practice and exploration of soil and water conservation construction in Ordos[J]. China Water Resources, 2022,73(10):35-37.
[2] 李向东,林东升.退牧还草工程将全面推开[N].中国畜牧报,2004/09/12(1).

Li X D, Lin D S. The project of returning pasture to grassland will be pushed forward[N]. China Animal Husbandry News, 2004/09/12(1).
[3] 张兴刚,王春红,程甜甜,等.山东省药乡小流域侵蚀性降雨分布特征[J].中国水土保持科学,2017,15(1):128-133.
Zhang X G, Wang C H, Chen T T, et al. Characteristics of erosive rainfall distribution in a small watershed in Yaxiang, Shandong Province [J]. China Soil and Water Conservation Science, 2017,15(1):128-133.
[4] 付智勇,李朝霞,蔡崇法,等.不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J].水利学报,2011,42(8):899-907.
Fu Z Y, Li Z X, Cai C F, et al. Moisture and loam flow response of a thin purple soil on a slope under different starting conditions [J]. Journal of Water Resources, 2011,42(8):899-907.
[5] 李耀军,魏霞,李勋贵,等.淤地坝坝控流域土地利用类型空间优化配置研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2016,52(3):307-312.
Li Y J, Wei X, Li X G, et al. Research on spatial optimal allocation of land use types in silt dam dam-controlled watershed [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition, 2016,52(3):307-312.
[6] 李菲,查同刚,尹婧,等.暴雨下川东黄壤区不同径流路径调控措施对坡面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):138-144.
Li F, Cha T G, Yin J, et al. Effects of different runoff path regulation measures on slope erosion characteristics in the yellow loam area of east Sichuan under heavy rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):138-144.
[7] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.
Lin Q M, Ding W F, Zhang C W, et al. Hydrodynamic characteristics of sand production by erosion on red soil slopes under simulated rainfall conditions [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2019,39(2):16-21.

- [8] 陈戎欣,吕锡芝,倪用鑫,等.人工降雨下草被对黄土丘陵沟壑区坡面径流的调控及临界阈值[J].生态环境学报,2020,29(1):122-128.
- Chen R X, Lu X Z, Ni Y X, et al. Regulation of slope runoff from loess hills and gullies by grass cover under artificial rainfall and critical threshold[J]. Journal of Ecological Environment, 2020,29(1):122-128.
- [9] 刘晓燕,李晓宇,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降雨阈值变化[J].水利学报,2019,50(10):1177-1188.
- Liu X Y, Li X Y, Gao Y F, et al. Changes in rainfall thresholds for sand production in typical watersheds in loess hill and gully areas [J]. Journal of Water Resources, 2019,50(10):1177-1188.
- [10] 沈海鸥,刘健,王宇,等.降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):123-126.
- Shen H O, Liu J, Wang Y, et al. Influence of rainfall intensity and slope on the erosion characteristics of soil road pavement in black soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):123-126.
- [11] 郭铃莉,王云琦,王晨沣,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):157-164.
- Wu L L, Wang Y Q, Wang C F, et al. Effects of rainfall type on soil erosion on slopes in northern soil and rocky mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017,33(24):157-164.
- [12] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- Yu X X, Zhang X M, Wu S H, et al. Effects of forest and grass vegetation and precipitation on slope runoff and sand production by erosion in loess areas [J]. Mountain Journal, 2006,24(1):19-26.
- [13] 张汉雄.黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J].地理学报,1983,50(4):416-425.
- Zhang H X. Characteristics of rainstorms and their distribution patterns on the Loess Plateau[J]. Journal of Geography, 1983,50(4):416-425.
- [14] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- Xie Y, Liu B Y, Zhang Wen B. Research on erosive rainfall criteria[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000,14(4):6-11.
- [15] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- Wang W Z, Jiao J Y. Quantitative evaluation of soil erosion factors in China[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 1996,16(5):1-20.
- [16] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.天然降雨条件下裸露砒砂岩区人工植被的减流减沙效应[J].水土保持研究,2022,29(1):100-104,112.
- Yang Z Q, Guo J Y, Qin F C, et al. Effects of artificial vegetation on flow and sand reduction in exposed arsenic sandstone areas under natural rainfall conditions[J]. Soil and Water Conservation Research, 2022,29(1):100-104,112.
- [17] 王万忠,焦菊英.黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J].水土保持通报,1996,16(5):21-28.
- Wang W Z, Jiao J Y. Statistical analysis of rainfall and sand production on the slopes of the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 1996,16(5):21-28.
- [18] 江森华,谢锦升,王维明,等.闽北不同土地利用方式与不同降雨强度对水土流失的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(4):84-89.
- Jiang M H, Xie J S, Wang W M, et al. Effects of different land use modes and different rainfall intensities on soil erosion in northern Fujian[J]. China Soil and Water Conservation Science, 2012,10(4):84-89.
- [19] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.
- Huang K, Li R, Li Y, et al. Response of biological measures to slope flow and sand production under different erosive rainfall patterns in Qiannan District, Guizhou Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(6):14-21.
- [20] 据彤军,刘普灵,徐学选,等.不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J].泥沙研究,2007,51(4):65-71.
- Ju T J, Liu P L, Xu X X, et al. Influence of different subrainfall conditions on water-sediment dynamics of major land types in loess areas and its mechanism[J]. Sedimentation Research, 2007,51(4):65-71.
- [21] 曹美晨,辛艳,任正龔,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同土地利用坡面的降雨侵蚀特征[J].泥沙研究,2022,47(6):43-50.
- Cao M C, Xin Y, Ren Z Y, et al. Characteristics of rainfall erosion on different land use slopes in semi-arid loess hills and gullies [J]. Sedimentation Research, 2022,47(6):43-50.
- [22] 王友胜,杨志,刘冰,等.宁夏黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力特征分析[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):34-41.
- Wang Y S, Yang Z, Liu B, et al. Characterisation of rainfall erosive power in loess hills and gullies in Ningxia[J]. China Soil and Water Conservation Science (in English), 2022,20(4):34-41.