

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.040.

朱志卓, 李龙, 张鹏, 等. 水力侵蚀下砒砂岩区植被格局对微地形和侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 10-18, 26.

ZHU Zhizhuo, LI Long, ZHANG Peng, et al. Influence of Vegetation Pattern on Microtopography and Erosion Under Hydraulic Erosion in Feldspathic Sandstone Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 10-18, 26.

# 水力侵蚀下砒砂岩区植被格局对微地形和侵蚀的影响

朱志卓<sup>1</sup>, 李龙<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 张尚轩<sup>1</sup>, 梁艳君<sup>3</sup>, 支杰<sup>3</sup>, 陈燕<sup>4</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.国家林业局荒漠生态系统保护与修复重点实验室, 呼和浩特 010000; 3.乌兰察布市林业局, 内蒙古 乌兰察布 012000; 4.杭锦旗水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** [目的]研究植被格局下微地形与侵蚀的关系, 可为砒砂岩地区坡面侵蚀规律研究和水土流失防治提供理论参考。[方法]以砒砂岩区鲍家沟流域内的3种植被格局(均匀分布、聚集分布、随机分布)坡面为研究对象, 通过自然降雨条件下采用野外径流小区实测结合三维激光扫描技术, 分析了植被格局对微地形和侵蚀的影响。[结果]降雨后不同植被格局坡面的产流量、产沙量依次为裸坡坡面>聚集分布坡面>随机分布坡面>均匀分布坡面, 与裸坡相比, 均匀分布坡面的产流量、产沙量分别减少了64%、75%, 其径流泥沙的拟合函数为 $Y=0.3619x^{0.7309}$ ,  $R^2=0.9866$ ; 不同植被格局坡面侵蚀—沉积的空间分布存在一定差异, 与其他坡面相比, 均匀分布格局坡面的土壤侵蚀强度最弱, 侵蚀区面积最小, 为12.38 m<sup>2</sup>, 沉积区面积最大, 为3.44 m<sup>2</sup>。不同植被格局坡面地形因子均随降雨呈现增大的趋势, 且与裸坡坡面相比, 聚集分布坡面地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度、微坡度增幅最小, 分别为5%、2%、0.5%、9%。聚集分布坡面地表粗糙度与产流产沙的相关性最强( $p<0.01$ ), 分别为0.632、0.619, 相比较其他坡面, 裸坡坡面地形因子与产流产沙拟合效果最好, 产流拟合函数为 $X=0.993RA-1.07R+0.871$ ,  $R^2=0.996$ , 产沙拟合函数为 $Y=1.586RA-0.62R+2.65$ ,  $R^2=0.964$ 。[结论]均匀分布格局对水力侵蚀条件下砒砂岩坡面土壤侵蚀程度的抑制效果为最佳, 但拟合效果最差, 微地形因子与产流产沙的互动关系最为复杂。

**关键词:** 砒砂岩区; 植被格局; 微地形; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0010-09

## Influence of Vegetation Pattern on Microtopography and Erosion Under Hydraulic Erosion in Feldspathic Sandstone Region

ZHU Zhizhuo<sup>1</sup>, LI Long<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Shangxuan<sup>1</sup>,  
LIANG Yanjun<sup>3</sup>, ZHI Jie<sup>3</sup>, CHEN Yan<sup>4</sup>

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Desert Ecosystem Conservation and Restoration, Hohhot 010000, China; 3.Ulanqab Forestry Bureau, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China; 4.Hangjin Banner Water Conservancy Development Center, Erdos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the relationship between micro-topography and erosion under vegetation pattern can provide theoretical reference for the study of slope erosion law and soil and water loss control in feldspathic sandstone area. [Methods] Slopes with three planting patterns (uniform distribution, aggregation distribution, random distribution) in BaoJia watershed in feldspathic sandstone areas were selected as the research sites. Field measurements in runoff plots under the condition of natural rainfall and 3D laser scanning technology were jointly used, to analyze the influence of the vegetation pattern of microtopography and

收稿日期: 2022-03-08

修回日期: 2022-03-31

资助项目: 国家自然科学基金“砒砂岩坡面侵蚀时空变异与植被斑块格局演变互馈机制”(42267049); 高等教育改革发展项目—青年科技英才计划“西部之光项目—黄河多沙粗沙区坡面植被格局—土壤环境—产流产沙空间互馈机制研究”(NJYT22046); 内蒙古自治区科技计划项目“黄河十大孔兑流域生态修复空间精准识别与智慧水土保持技术”(2021GG0052)

第一作者: 朱志卓(1998—), 男, 吉林白城人, 在读硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1225801089@qq.com

通信作者: 李龙(1989—), 男, 吉林桦甸人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。E-mail: lilongdhr@126.com

<http://stbcjy.paperonce.org>

erosion. [Results] After rainfall, the order of discharge and sediment yield on different vegetation patterns was bare slope > aggregate slope > random slope > uniform slope. Compared with bare slope, discharge and sediment yield on uniform slope decreased by 64% and 75%, respectively. The fitting function of runoff and sediment is  $Y = 0.3619x^{0.7309}$ ,  $R^2 = 0.9866$ . There were some differences in the spatial distribution of erosion-deposition on slopes with different vegetation patterns. Compared with other slopes, the soil erosion intensity of homogeneous slope was the weakest, the erosion area was the smallest ( $12.38 \text{ m}^2$ ), and the sediment area was the largest ( $3.44 \text{ m}^2$ ). The slope topographic factors of different vegetation patterns showed the increasing trend with rainfall, and compared with bare slope, increments of the surface roughness, surface undulation, surface cleanness and micro-slope were the least, which were 5%, 2%, 0.5% and 9%, respectively. The correlations between surface roughness and runoff and sediment yield were 0.632 and 0.619, respectively. Compared with other slopes, the fitting effect of topographic factors on bare slope and sediment yield was the best. The fitting functions of runoff and sediment were expressed as  $X = 0.993RA - 1.07R + 0.871$ ,  $R^2 = 0.996$ ,  $Y = 1.586RA - 0.62R + 2.65$ ,  $R^2 = 0.964$ , respectively. [Conclusion] The uniform distribution pattern has the best inhibition effect on soil erosion on feldspathic sandstone slope under hydraulic erosion condition, but the fitting effect is the worst. The interaction between microtopographic factors and sediment production and drainage is the most complex.

**Keywords:** feldspathic sandstone; vegetation pattern; microtopography; runoff and sediment production

砒砂岩区位于晋陕蒙交界地带,是黄土高原土壤侵蚀最为严重地区之一<sup>[1]</sup>。坡面是流域/区域土壤侵蚀防治和研究工作的基本组成单位<sup>[2]</sup>,在坡面侵蚀过程中,坡面产流是发生在复杂下垫面的多因素耦合过程,而植被和微地形是决定坡面产流过程的主要因素<sup>[3]</sup>。少量研究指出,植被对产流过程的影响不仅与植被类型和数量有关,还与植被的空间分布格局有关<sup>[4]</sup>,目前,已有植被格局对坡面产流的影响研究,通常根据斑块形状、分布密度和均匀度进行定性描述,然后对比分析不同格局分布对应的产流差异<sup>[5]</sup>。张冠华等<sup>[6]</sup>通过人工降雨模拟试验表明,带状模式、棋盘模式和小斑块模式显著提高了坡面流阻,优于带状模式。杨坪坪等<sup>[7]</sup>通过室内径流试验研究了4种植被模式对坡面水流动力学的影响,并提出“品”字状模式对流速的控制效果最好。这些研究表明,植被格局对产流过程的影响主要体现在径流的弥散上。事实上,植被格局也与微地形密切相关<sup>[8]</sup>,植被格局分布通过对降雨的再分配改变了泥沙的沉积和迁移过程,造成了微地形的差异。微地形将直接改变产流路径和产流量,从而影响侵蚀类型和侵蚀结果的发展演变<sup>[9]</sup>。目前,国内外学者大多数是通过量化微地形因子来研究微地形与土壤侵蚀的关系。常见的微地形因子包括表面粗糙度、地形起伏度、表面切割程度和微坡度<sup>[10]</sup>。郑子成等<sup>[11]</sup>通过试验证实了微地形与坡面产流量和侵蚀产沙量存在显著的相关关系;Gascuel-Oudou等<sup>[12]</sup>以微地形为主要参数对径流的现象做出了判断;Gómez等<sup>[13]</sup>研究了原始坡面粗糙度对产流产沙的作用,发现地表粗糙度与产流产沙有明显的负相关关系<sup>[14]</sup>。

目前,虽然微地形因子、植被格局等单一因子与侵蚀产沙量之间的关系已经比较明确<sup>[15]</sup>,但对不同植被格局下微地形因子与侵蚀产沙的关系的研究还比较薄弱,成为提高侵蚀产沙预测和水土流失防治水平的重要瓶颈。鉴于此,本文通过自然降雨条件下采用野外径流小区实测结合三维激光扫描技术,以均匀分布格局、聚集分布格局、随机分布格局为研究对象,在概述植被格局、对微地形因子、侵蚀产沙影响的基础上,探讨砒砂岩区不同植被格局下微地形因子与侵蚀产沙的关系,为砒砂岩地区坡面侵蚀规律研究和水土流失防治提供理论依据<sup>[16]</sup>。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于鄂尔多斯市准格尔旗西部暖水乡鲍家沟流域(图1),地理坐标为东经  $110^{\circ}31'$ — $110^{\circ}35'$ ,北纬  $39^{\circ}46'$ — $39^{\circ}48'$ ,海拔  $1110 \sim 1300 \text{ m}$ ;盆地地势北高南低;属温带大陆性气候,冬季长期干旱,夏季短暂温热;年均气温  $7.0^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量为  $240 \sim 470.5 \text{ mm}$ ,年际变化大。土壤基岩为砒砂岩(表1),以栗钙土居多,腐殖质层厚度一般为  $20 \sim 30 \text{ cm}$ ,有机质含量较低,pH值为  $8 \sim 8.5$ ,质地通常为沙壤土,结构为小粒状。植被以人工植被居多,常见油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus rhamnoides*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Prunus armeniaca*)等;草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)。

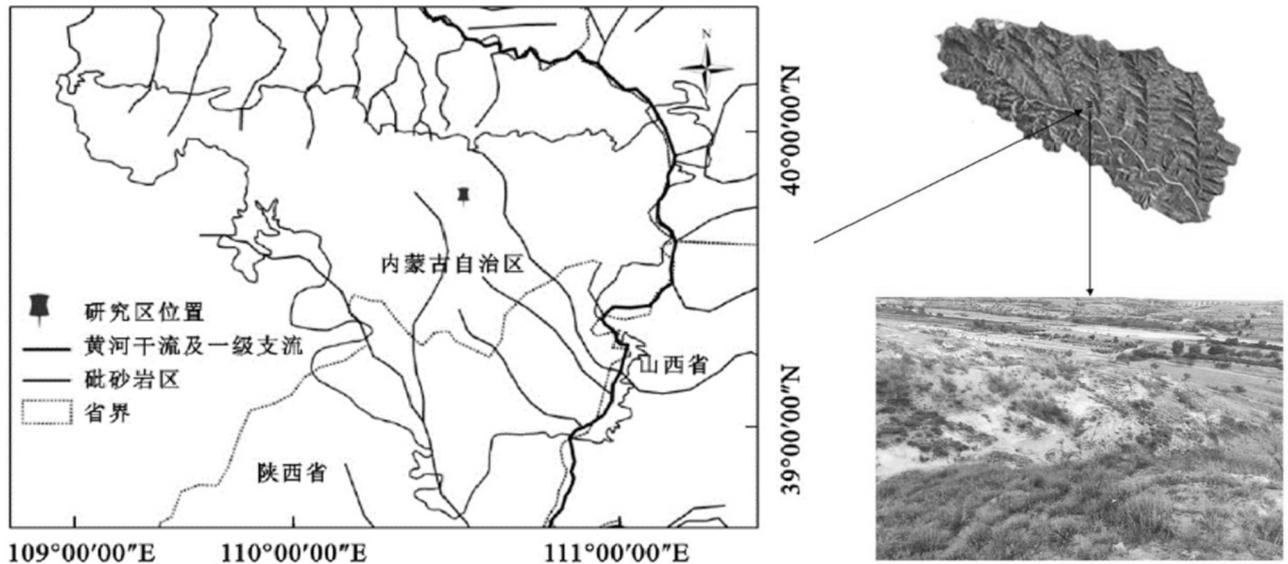


图 1 研究区位置

表 1 研究区土壤基本理化性质

土壤类型	土壤机械组成/%			土壤容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	交换性阳离子/ ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤入渗率/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
	黏粒	粉粒	砂粒					
栗钙土	5.22	51.3	43.48	1.64	0.41	1.19	8.26	0.6~1.2

## 1.2 小区的布设及测定方法

试验于 2021 年 6—9 月在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡境内圪秋沟流域进行。通过调查的流域自然植被基本分布状况,采用无人机对鲍家沟流域进行全面航拍,将样地划分成  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的栅格小样方,共 27 个样方并运用方差均值比率法与实地调查结果相互对照验证,最终确定砒砂岩坡面上分布的 3 种典型自然植被格局(表 2),即聚集分布格局( $S^2/M > 1$ )、均匀分布格局( $S^2/M < 1$ )、随机分布格局( $S^2/M = 1$ )作为研究对象。并设置研究样地,样地选取时要求保证 3 类样地的土壤结构一致,植被种类、盖度相近,坡度坡向相同,坡长大于 10 m 且无人为干扰。与此同时,选取自然条件与研究样地完全一致的坡面,将坡面植被完全清除作为对照样地(裸地 CK)。

方差均值比率法<sup>[17]</sup>:  $S^2/M < 1$ ,属于均匀分布; $S^2/M = 1$ ,属于随机分布; $S^2/M > 1$ ,属于聚集分布。计算公式如下:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{(N-1)}$$

式中: $N$  为基本样方的个数数量; $M_i$  为第  $i$  个样方内的个体数量。

在每一块样地上建立规格为 2 m(宽)  $\times$  10 m(长)的径流小区(图 2)与 2 mm 厚的不锈钢板拼接。钢板切入土层深度为 30 cm,外露表面高度为 15 cm。

小区的长边界垂直于等高线并在低端设有导流槽和出水口,配有收集桶收集泥沙,收集的径流和沉积物应立即称重,并在  $105^\circ\text{C}$  恒温烘箱中干燥,以称重沉积物的干重。收集到的径流和泥沙立即称量后采用烘箱  $105^\circ\text{C}$  恒温烘干,称量泥沙干重。径流小区旁设置固定的 HOBO 气象站,通过虹吸式自计数雨量计记录大气降水过程,并配备雨量计相互验证,确定降雨量、降雨强度、降雨历时等基础数据(表 3)。

表 2 方差均值比率法测定不同植被格局类型

样地	样方数 ( $N$ )	方差 ( $S^2$ )	均值 ( $M$ )	$S^2/M$	植被格局	植被盖度/%
1	27	0.15	0.81	$0.18 < 1$	均匀分布	32.6
2	27	0.64	0.56	$1.14 \approx 1$	随机分布	30.5
3	27	3.46	0.33	$2.6 > 1$	聚集分布	31.1



注:图中植被格局由左到右依次为均匀分布、随机分布、聚集分布。

图 2 不同植被格局小区

表3 自然降雨基本特征

降雨时间	降雨历时/h	降雨量/mm	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	小区类型	小区规格	坡度/(°)	径流量/L	泥沙量/kg
8月15日	4.217	22.600	5.395	聚集分布	10 m×2 m	35	9	2.8
				随机分布	10 m×2 m	35	5.6	1.5
				均匀分布	10 m×2 m	35	5.4	1.05
				裸坡对照	10 m×2 m	35	13	2.95
8月18日	4.950	23.600	4.768	聚集分布	10 m×2 m	35	10.62	3.75
				随机分布	10 m×2 m	35	5.76	1.85
				均匀分布	10 m×2 m	35	4.68	1.36
				裸坡对照	10 m×2 m	35	13.04	6.6
8月29日	3.450	16.500	4.783	聚集分布	10 m×2 m	35	5.4	1.63
				随机分布	10 m×2 m	35	4.68	1.45
				均匀分布	10 m×2 m	35	2.03	0.59
				裸坡对照	10 m×2 m	35	6.8	3.2

### 1.3 微地貌变化测定

本研究使用高精度三维激光扫描仪 RIEGL VZ-400 扫描降雨前后的各径流小区(图3),获取降雨前后坡面微地形点云数据,扫描精度为2 mm(100 m 距离),扫描距离:600 m(反射率:90%),扫描范围:100°(垂直)×360°(水平)。此外,该三维激光扫描仪还使用波形数字化和在线波形分析技术,每秒发射300 000束精细激光束,角度分辨率高达0.000 5°。

三维激光扫描仪设置在径流小区的底部,在每个待观测径流小区的底部、顶部、左侧和右侧各设置一个固定水泥桩作为扫描站,同时,每站扫描数据后,选择5~8个固定参考点作为拼接参考点,固定扫描位置和高度不变,每次降雨前扫描径流小区,获取降雨前坡面微地貌点云数据;降雨后15 min(等待坡面完全渗透,坡面达到稳定后扫描,以确保扫描精度),在同一位置再次扫描径流小区,获取雨后坡面微地貌点云数据采集并导出到配套的 RiSCAN PRO 软件中,使用 ArcGIS 软件对扫描后的三维数据构建精度为2 mm×2 mm 的 M-DEM 进行处理。

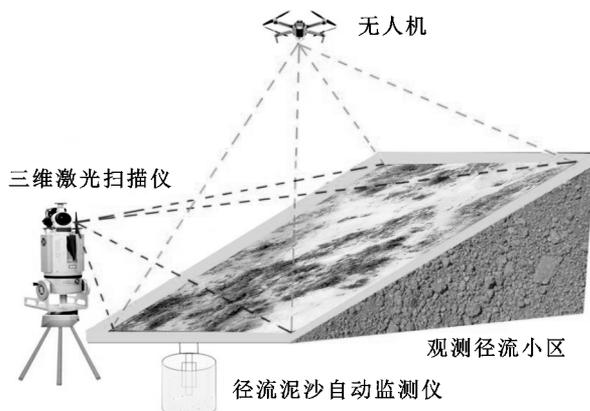


图3 微地貌数据获取示意图

### 1.4 数据处理与分析

以下公式均为计算侵蚀、沉积面积及微地形因子的经验公式:

(1) 侵蚀区面积(Total Erosion Area, TEA)和沉积区面积(Total Deposition Area, TDA)可计算为:

$$TEA = n \times A \quad (1)$$

$$TDA = m \times A \quad (2)$$

式中:  $A$  表示统计单元栅格的面积( $m^2$ );  $n$  和  $m$  分别代表侵蚀区和沉积区的栅格数量。

(2) 地面粗糙度( $R$ )是指以坡度为基础的特定区域内地球表面积与其投影面积的比值,可以通过地图代数计算出来,直接表示某一区域的地表起伏和侵蚀状况,公式如下:

$$R = 1 / \cos([\text{Slope of DEM}]) \times \pi / 180 \quad (3)$$

式中:  $R$  表示某一特定区域的地表粗糙度( $m$ );  $[\text{Slope of DEM}]$  指某一图层的 DEM 坡度( $^\circ$ );  $\pi$  一般取值 3.141 59。

(3) 地表起伏度( $RA$ )是指一定区域内最低海拔与最高海拔之间的高差,它可以直接反映土壤侵蚀过程中的地表起伏,是区域地形的宏观指标,公式如下:

$$RA_i = H_{\max} - H_{\min} \quad (4)$$

式中:  $RA_i$  表示一定区域范围内的地形起伏度( $m$ );  $H_{\max}$  表示该范围内最高点的高度值( $m$ );  $H_{\min}$  表示该范围内最低的高度值( $m$ );  $i$  表示某一特定区域范围的符号。

(4) 地表切割度( $SI$ )是指一个点附近的平均高程和最低高程之间的差值,可以直接显示表面的侵蚀和切割的状况,公式如下:

$$SI_i = H_{\text{mean}} - H_{\min} \quad (5)$$

式中:  $SI_i$  表示该区域范围内某一点的地表切割深度

(m);  $H_{\text{mean}}$  表示该范围内的平均高度值(m);  $H_{\text{min}}$  表示该范围内最低的高度值(m)。

(5) 微坡度(S)是指穿过该点的切平面与水平面之间的角度,这是高度变化的最大比率,代表该点处地面的倾斜。它是由 ArcGIS 中的斜率函数提取的。

使用 Excel, Origin 2019, SPSS 22 等软件绘制上述数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被格局坡面产流产沙特征

基于 2021 年雨季(6—9 月)径流小区所观测的 6 场降雨中发生流产沙的 3 场有效降雨数据,分析不同植被格局下砒砂岩坡面产流产沙特征。

由不同植被格局坡面产流产沙量(图 4)可以看

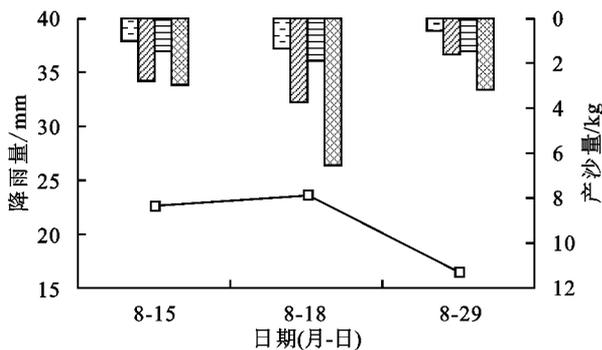


图 4 不同植被格局坡面产流产沙量

以裸地为基准,与裸地相比,径流泥沙量减少的部分与裸地径流泥沙量的比值为径流泥沙减少率,由图 5 可知,相对无植被的裸坡,聚集分布坡面、随机分布坡面、均匀分布坡面的产流量、产沙量均有不同程度的下降,不同植被格局坡面平均减流率按聚集分布(27%)<随机分布(45%)<均匀分布(64%)的规律排列,各不同

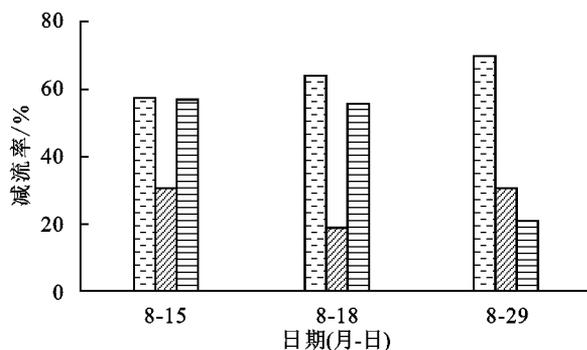
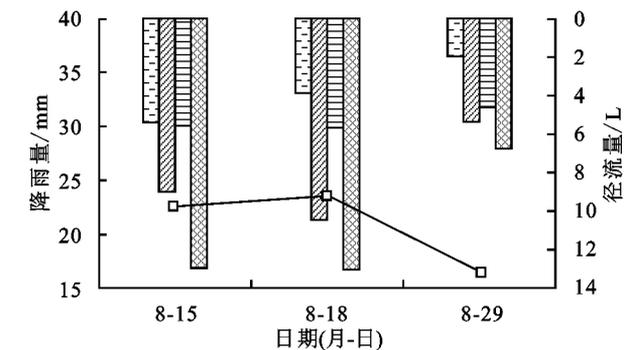


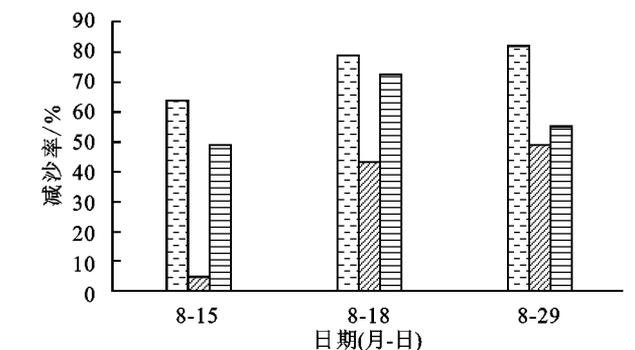
图 5 不同植被格局坡面减流减沙能力

对各植被格局类型坡面产流产沙量进行回归分析,以幂函数形式得到各植被格局类型的坡面产流产沙量之间的回归关系,结果见表 4。  $R^2$  的大小是表现拟合效果的指标,  $R^2$  越大,表明产流量与产沙量的拟合效果越好。从结果可以看出,产流与产沙的拟合决定系数大小为聚集分布坡面>均匀分布坡面>随机

分布坡面>裸坡坡面,聚集分布坡面产流与产沙的拟合决定系数最大,其  $R^2$  为 0.986 6,说明聚集分布坡面产流与产沙的拟合效果最好;裸坡坡面产流与产沙的拟合决定系数最小,其  $R^2$  仅为 0.503 1,可以看出裸坡坡面产流与产沙的拟合效果最差。以上分析可以清晰的看出聚集分布格局对坡面径流泥沙的作用



植被格局坡面平均减沙率与减流率的差异规律一致,减沙率从小到大依次为聚集分布(32%)、随机分布(59%)、均匀分布(75%)的规律排列。综合来看,以均匀分布格局的平均减流率和平均减沙率最高分别为 64% 和 75%,其余各植被格局的减流减沙能力由强到弱依次为随机分布格局、聚集分布格局。



分布坡面>裸坡坡面,聚集分布坡面产流与产沙的拟合决定系数最大,其  $R^2$  为 0.986 6,说明聚集分布坡面产流与产沙的拟合效果最好;裸坡坡面产流与产沙的拟合决定系数最小,其  $R^2$  仅为 0.503 1,可以看出裸坡坡面产流与产沙的拟合效果最差。以上分析可以清晰的看出聚集分布格局对坡面径流泥沙的作用

巨大,相比较其他坡面,产流量与产流量的关系更为明显。

表 4 不同植被格局小区产流产沙关系

植被格局	回归方程	决定系数 R <sup>2</sup>
均匀分布格局	$Y=0.3619x^{0.7309}$	0.8161
聚集分布格局	$Y=0.2158x^{1.191}$	0.9866
随机分布格局	$Y=0.4022x^{0.8221}$	0.5324
裸坡对照	$Y=0.2792x^{1.0758}$	0.5031

### 2.2 不同植被格局坡面侵蚀与沉积特征

降雨后不同植被格局坡面侵蚀深度和沉积深度各有不同(表 5)。均匀分布坡面、聚集分布坡面、随机分布坡面、裸坡坡面平均侵蚀深度分别为 0.010 46 m, 0.018 41 m, 0.012 90 m, 0.015 56 m, 平均沉积深度分别为 0.006 07 m, 0.005 25 m, 0.005 27 m, 0.003 40 m。平均侵蚀深度由深至浅排序分别为裸坡坡面>聚集分布>

随机分布>均匀分布,而平均沉积深度由高到低排序分别为均匀分布>随机分布>聚集分布>裸坡坡面,可以看出植被格局的分布能有效的阻挡泥沙下滑。

图 6 是不同植被格局坡面土壤侵蚀—沉积的空间分布图。根据土壤侵蚀深度<sup>[18]</sup>划分坡面土壤侵蚀强度,共分为 6 个等级(由低到高):沉积区、微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀和剧烈侵蚀。可以看出,不同植被格局坡面在侵蚀过后,侵蚀区面积均大于沉积区面积。均匀分布坡面主要以轻度侵蚀、微度侵蚀为主,占坡面的 63.74%,沉积区位于小区的西侧,面积占坡面的 24.36%。聚集分布坡面、随机分布坡面主要以中度侵蚀为主,面积分别占坡面的 46.54%, 43.26%, 强烈侵蚀区分布在坡面中部。裸坡坡面侵蚀区面积占据了整个坡面的 93.25%,沉积区面积仅占坡面的 6.75%,剧烈侵蚀区分布在小区最底端。

表 5 不同植被格局坡面侵蚀沉积特征

小区类型	侵蚀状态	深度/m				面积/m <sup>2</sup>	像元数/个
		最小值	最大值	平均值	标准差		
均匀分布	侵蚀区	0.000016	0.03569	0.01046	0.00645	12.3823	9283
	沉积区	0.000013	0.02940	0.00607	0.00475	3.4400	2579
聚集分布	侵蚀区	0.000029	0.06723	0.01841	0.01219	14.1206	11696
	沉积区	0.00005	0.01698	0.00525	0.00322	1.0708	976
随机分布	侵蚀区	0.000027	0.04544	0.01290	0.00844	13.3882	10741
	沉积区	0.000043	0.03449	0.00527	0.00563	1.5630	835
裸坡坡面	侵蚀区	0.00002	0.05124	0.01556	0.00920	14.9995	13129
	沉积区	0.000015	0.03280	0.00340	0.00719	1.0228	951

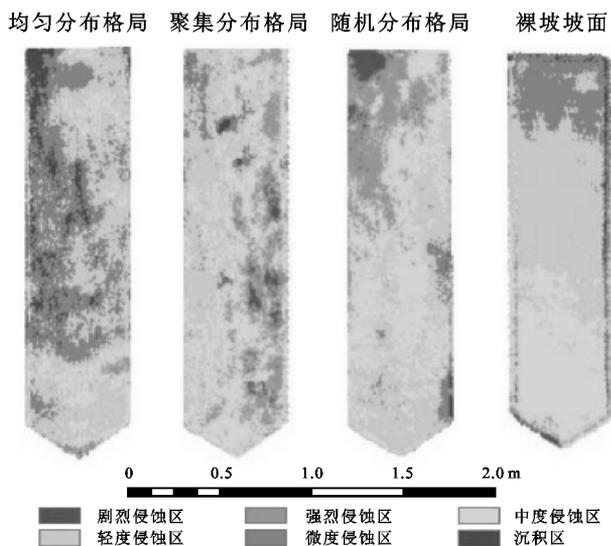


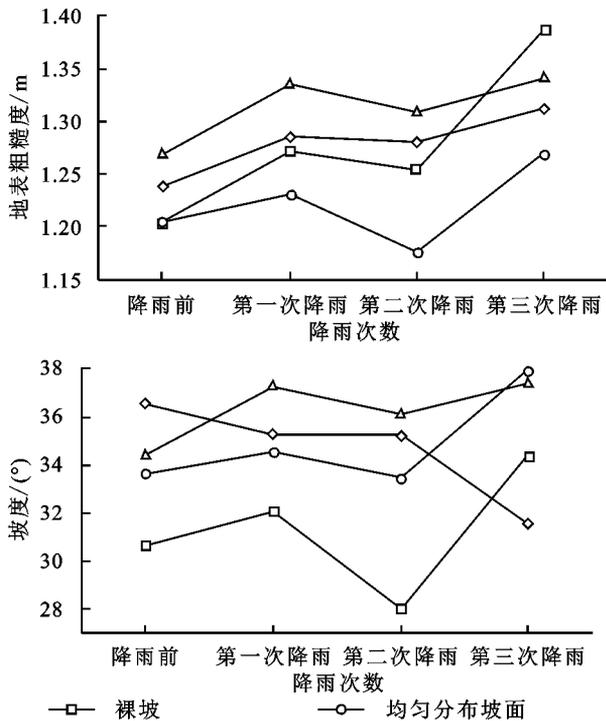
图 6 不同植被格局坡面侵蚀沉积

势,但在第二次降雨后,均匀分布坡面、聚集分布坡面、随机分布坡面、裸坡坡面地表粗糙度都出现下降,依次降低了 0.055 m, 0.026 7 m, 0.004 m, 0.019 2 m, 出现这一情况主要是由于在降雨初期,地表土粒比较疏松,在受到水滴冲击后,突出部分被溅出,塌陷部分被楔入土壤颗粒中,填充土壤孔隙,局部形成结壳,因此表面粗糙度也降低<sup>[19]</sup>。降雨结束后地表粗糙度值相比初始坡面增幅大小为裸坡坡面>均匀分布坡面>随机分布坡面>聚集分布坡面,且裸坡坡面、均匀分布坡面、随机分布坡面、聚集分布坡面对应的地表粗糙度值依次为 1.386 4 m, 1.268 7 m, 1.312 0 m, 1.340 4 m, 裸坡坡面增幅最大,为 15%,聚集分布坡面增幅最小,为 6%。此外,随着降雨频率的增加,不同植被格局坡面起伏、地表切割程度和坡面微坡度也有明显的增加趋势。且地表起伏度、地表切割度、微坡度变化幅度也均为裸坡坡面>均匀分布坡面>随机分布坡面>聚集分布坡面,当有植被存在时,聚集分布坡面微地形因子值变化最小,坡面地表起伏度、地表切割度、微坡度变化率分别为 2%, 0.5%, 9%, 均匀分布坡面微地形因子值变化最大,坡面地表粗糙

### 2.3 不同植被格局坡面微地形因子变化特征

由图 7 可以看出,降雨前裸坡坡面的地表粗糙度小于均匀分布坡面、聚集分布坡面、随机分布坡面,并且在聚集分布坡面取得最大。不同植被格局坡面粗糙度在降雨过程中既有上升又有下降。在三场降雨过后,不同植被格局坡面地表粗糙度都出现了上升趋势

度、地表起伏度、地表切割度、微坡度变化率分别为20%,27%,13%。不同植被格局坡面微地形的变化



具有明显的差异,植被格局的分布对降雨过程中微地形因子的变化具有不同的影响。

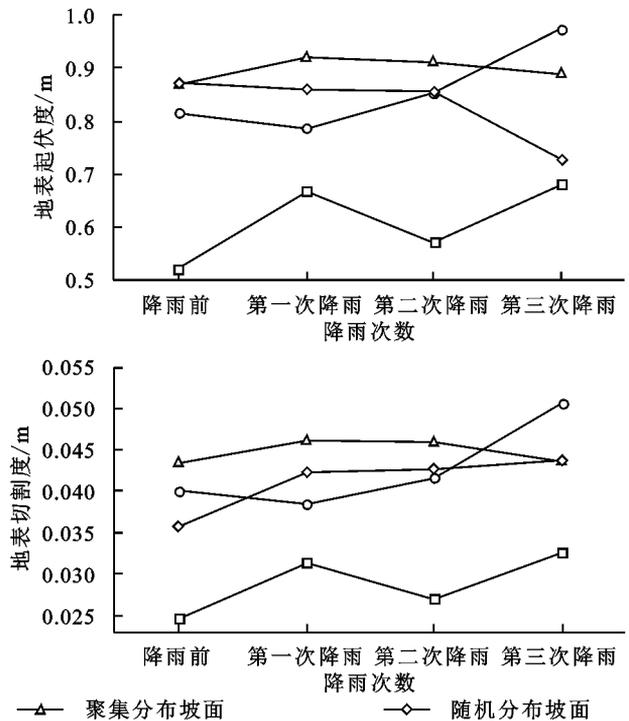


图7 不同植被格局坡面地形因子变化趋势

## 2.4 微地形与产流产沙的关系

为说明不同植被格局下微地形因子与产流产沙间的关系,对4个地形因子及产流量、产沙量作相关性分析,结果见表6。可以发现不同植被格局下地形因子与产流产沙间的相关性有明显的差异,均匀分布坡面的产流量与地表粗糙度、微坡度有显著的相关关系( $p < 0.05$ ),相关系数分别为 $-0.635$ , $0.592$ ,与其他的因子相关性不大,产沙量与地表粗糙度、地表起伏度有显著的相关关系( $p < 0.05$ ),相关系数分别为 $-0.647$ , $0.534$ ,聚集分布坡面的产流量与地表粗糙度、地表起伏度呈现出显著的相关关系( $p < 0.05$ ),分别为 $-0.632$ , $-0.523$ ,产沙量与地表粗糙度、地表切割度有显著的相关关系( $p < 0.05$ ),分别为 $-0.619$ , $0.544$ ;随机分布坡面的产流量与地表粗糙度、地表起伏度呈现出显著的相关关系( $p < 0.05$ ),分别为 $0.568$ , $0.544$ ,产沙量与地表粗糙度呈现出显著的正相关关系( $p < 0.05$ ),为 $0.581$ ;裸坡坡面的产流量、产沙量与地表粗糙度呈现出显著的相关关系( $p < 0.05$ ),分别为 $0.277$ , $0.351$ ,与地表起伏度呈现出极显著的相关关系( $p < 0.01$ ),分别为 $0.746$ , $0.653$ 。

由于不同植被格局坡面产流产沙机制的不同,因此分别研究其产流产沙与微地形因子的关系。根据三场降雨下不同植被格局坡面微地形因子和产流产沙量,建立回归方程。得到的标准化回归模型见表7。方程表

明,在均匀分布格局下,地表粗糙度对产流产沙量的响应最强,其次为地表起伏度。在聚集分布格局和随机分布格局下,地表粗糙度对产流产沙量的响应最强,其次为地表切割度。拟合决定系数 $R^2$ 为裸坡坡面 $>$ 聚集分布坡面 $>$ 随机分布坡面 $>$ 均匀分布坡面。由此可见裸坡坡面的拟合效果最好,均匀分布坡面的拟合效果最差,说明均匀分布坡面微地形变化与产流产沙的互动关系较为复杂。

表6 微地形因子与产流产沙的相关系数

植被格局	参数	地表粗糙度	地表起伏度	地表切割度	微坡度
均匀分布	产流量	$-0.635^{**}$	0.528	0.274	$0.592^*$
	产沙量	$-0.647^{**}$	$0.534^*$	$0.537^*$	0.158
聚集分布	产流量	$-0.632^*$	$-0.523^{**}$	0.172	0.162
	产沙量	$-0.619^*$	$-0.534^*$	$0.544^*$	$0.614^*$
随机分布	产流量	$0.568^*$	0.220	0.195	0.064
	产沙量	$0.581^*$	0.447	$-0.223$	0.059
裸坡坡面	产流量	$0.277^*$	$0.746^{**}$	0.310	0.415
	产沙量	$0.351^*$	$0.653^{**}$	$0.335$	0.402

## 3 讨论

### 3.1 植被格局对坡面微地形的影响

前人对侵蚀过程中坡面微地貌变化的探讨,多集中于黄土区,本文以砒砂岩区均匀分布( $S^2/M < 1$ )、随机分布( $S^2/M = 1$ )、聚集分布( $S^2/M > 1$ )及裸坡

坡面微地形的整体变化为研究对象,侧重于探讨植被格局对坡面微地形的影响。本研究发现降雨后坡面微地形因子均会表现出上升的趋势,这与唐辉<sup>[20]</sup>的研究结果相似,分析其原因是植被斑块的阻力导致水流沿斑块边缘汇聚,形成的羽流结构抑制了斑块上方的水土流失,但增加了斑块下方的水土流失量,导致原有均匀地形在不同范围内起伏。而对于植被格局对微地形的作用,相关研究表明坡面沉积物堆积的程度不同会给坡面微地形带来明显的差异性<sup>[21]</sup>。本研究通过对比 3 种植被格局对于微地形的影响,发现降雨后聚集分布坡面地形因子变化最小,均匀分布坡面微地形因子变化最大,且均匀分布的植被格局与随机

分布、聚集分布的植被格局相比,坡面更容易发生土壤沉积,但是不管在哪种植被格局下,一株、一丛或一个斑块植被的上坡向均会出现凸起的土坡对土壤产生截留,可因植物不同的空间分布格局,仍有土壤沉积的方式,从而导致坡面微地形变化大不相同。这与马欢等<sup>[22]</sup>对黄土区坡面微地形的变化结果一致。意味着均匀布局比聚集布局更不利于径流,因此在平衡栖息地区域的土壤方面发挥了作用,显著提高了因为土壤堆积所引起的地表高差变化,而聚集布局分布相对密集,廊道联通性较高,植被两侧很容易形成羽状物,以加速栖息地内的土壤运动,减少了堆积,使地表高程增加的不是很明显。

表 7 微地形因子与产流产沙的逐步回归分析

植被格局	产流回归方程	产沙回归方程
均匀分布格局	$X = 0.24RA - 1.238R + 1.448 (R^2 = 0.815)$	$Y = 0.32RA - 1.25R + 0.676 (R^2 = 0.796)$
聚集分布格局	$X = 0.667SI - 0.754R + 0.369 (R^2 = 0.843)$	$Y = 0.50SI - 0.625R + 0.365 (R^2 = 0.827)$
随机分布格局	$X = 1.007SI - 1.014R - 0.675 (R^2 = 0.892)$	$Y = 0.871SI - 0.991R + 1.11 (R^2 = 0.846)$
裸坡对照	$X = 0.993RA - 1.07R + 0.871 (R^2 = 0.996)$	$Y = 1.586RA - 0.62R + 2.65 (R^2 = 0.964)$

注:  $X$  为产流量( $m^3$ );  $Y$  为产沙量( $kg$ );  $R$  为地表粗糙度( $m$ );  $RA$  为地表起伏度( $m$ );  $SI$  为地表切割度( $m$ );  $S$  为微坡度( $^\circ$ )。

### 3.2 植被格局对坡面产流产沙的影响

裸露地表和植被斑块的格局分别是水沙过程中径流、泥沙和其他物质的“源”和“汇”景观,二者的分布模式影响着坡面产流产沙过程。已有基于坡面尺度区域的研究<sup>[23-24]</sup>表明,植被可以更有效的拦截地表径流,降低其流量,从而促进泥沙堆积在最大程度上降低并抵消降雨和径流侵蚀能力,降低侵蚀产生的机会。本研究结果表明,在相同降雨条件下,裸露坡地的产流产沙量显著高于其他坡地,这与前人研究结果完全一致。分析其主要原因是与裸坡相比,植被分布格局拦截降雨的作用增强,直接影响了产流区与非产流区的空间划分,从而影响了径流和泥沙运移方向的连通度,使径流过程变得不连续,减少了整个坡面产流产沙的可能。针对植被斑块形状、分布密度和均匀程度上的差异,已有关于植被格局对坡面产流影响的研究表明<sup>[25-26]</sup>,通过对比分析不同植被格局分布所对应的产流产沙量,也必然存在明显的差异。本研究表明,均匀分布坡面的径流量和泥沙量均明显少于其他两种植被分布格局,且对水力侵蚀条件下砒砂岩坡面土壤侵蚀程度的抑制效果最佳。这与王恒星等<sup>[27]</sup>对黄土区不同类型格局坡面产流产沙特征研究结论类似。说明均匀分布格局对砒砂岩坡面的减沙阻蚀能力最佳,分析其原因是植被覆盖情况及分布均衡度可以影响坡面的水文连通性情况,均匀分布格局的植被分布比较均匀,比聚集分布格局和随机分布格局更为

分散,但植被分布水文连通性最差,也就是说,均匀分布植被分布均匀,边坡会更加破碎,水流和沙粒也更容易被植被斑块堵塞导致侵蚀发生的过程中土壤入渗速率升高,产流产沙量大幅度减少<sup>[28]</sup>。而聚集分布的植被主要集中在一块,廊道联通性高,地表径流在漫流过程中通过廊道汇集更多的雨水,从而使冲刷能力增强,使得产流量、产沙量增大。

### 3.3 微地形对侵蚀的影响

不同植被格局坡面下地形因子和产流产沙量的变化解释了坡面微地形与产流产沙的相互作用。以往对微地形与侵蚀关系的研究主要集中在单一坡面上<sup>[29]</sup>,本研究重点讨论不同植被格局坡面下地形因子与坡面产流产沙量的关系。因为降雨后每一种植被格局下微地形因子的特征值和产流产沙是不同的,微地形因子必然和产流产沙存在某种关联,并且每一种植被格局下微地形因子和产流产沙的关系并不相同<sup>[30]</sup>。所以本讨论重点研究的内容就是在植被格局一定的情况下,通过比较不同植被格局坡面微地形因子与产流产沙的关系,分析哪一种植被格局下微地形因子与产流产沙的相关性更强。本研究的结果表明,不同植被格局坡面的地表粗糙度都与产流产沙有显著关系( $p < 0.05$ ),这与王鹏飞等<sup>[31]</sup>对紫色土坡耕地地表粗糙度与侵蚀产流产沙关系研究结果类似。说明在每一个植被格局坡面下,地表粗糙度与侵蚀产流产沙关系都存在明显关系,二者相互影响<sup>[32]</sup>。且在均匀分布格局下,地表

粗糙度与产流产沙的相关性最强( $p < 0.01$ ),这一结果也正与前面所研究的均匀分布坡面微地形因子增加最多,产流产沙量最少的结果对应上。分析其主要原因是均衡排列的植被布局和随意生长、聚集生长的植被布局相比,更容易发生土壤沉积,产流产沙随地表粗糙度增大而减小的趋势更为强烈。本文通过建立不同植被格局下地形因子与产流产沙的回归方程发现,均匀分布坡面的拟合效果最差,分析其原因是由于均匀分布格局植被在坡面所处位置比较分散,泥沙堆积使坡面形态多变,坍塌发生,导致坡面微地形变化与产流产沙的互动关系较为复杂。

## 4 结论

(1) 均匀分布格局对水力侵蚀条件下砒砂岩坡面土壤侵蚀程度的抑制效果为最佳,对坡面的减流减沙能力最强,与裸坡相比,产流量,产沙量分别减少了64%,75%,聚集分布坡面产流与产沙的拟合效果最好,拟合函数为 $Y = 0.2158x^{1.191}$ ,  $R^2 = 0.9866$ 。

(2) 不同植被格局坡面侵蚀—沉积的强弱分区较为明显,均匀分布坡面的侵蚀区面积最小,平均侵蚀深度最浅,分别为12.38 m<sup>2</sup>,0.010 46 m,土壤侵蚀程度主要以轻度侵蚀、微度侵蚀为主,占坡面的63.74%。

(3) 不同植被格局坡面地形因子均随降雨呈现增大的趋势,地表粗糙度整体增幅最小,为5%~15%,地表切割度整体增幅最大,为0.5%~27%;不同植被格局坡面微地形因子变化率由大到小依次为裸坡>均匀分布格局>随机分布格局>聚集分布格局。

(4) 坡面地表粗糙度与产流产沙有显著的相关关系( $p < 0.05$ ),多元逐步回归法分析表明,微地形因子对产流产沙的影响显著。均匀分布坡面的拟合效果最差,微地形因子与产流产沙的互动关系较为复杂。

### 参考文献:

- [1] 卫午毓,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面产流产沙过程试验[J].水土保持学报,2020,34(2):18-22.
- [2] 张攀,唐洪武,姚文艺,等.细沟形态演变对坡面水沙过程的影响[J].水科学进展,2016,27(4):535-541.
- [3] El Kateb H, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China [J]. Catena, 2013,105:1-10.
- [4] Zhao Q H, Zhang Y F, Xu S S, et al. Relationships between riparian vegetation pattern and the hydraulic characteristics of upslope runoff [J]. Sustainability, 2019, 11(10):2966.
- [5] 伍冰晨,齐实,郭郑曦,等.西南山区林地空间格局和微地形对坡面地表产流的影响[J].农业工程学报,2021,37(8):108-116.
- [6] 张冠华,刘国彬,易亮.植被格局对坡面流阻力影响的试验研究[J].水土保持学报,2014,28(4):55-59.
- [7] 杨坪坪,张会兰,王玉杰,等.刚性植被空间配置模式对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):90-95.
- [8] Ito H, Ito S, Matsuda A, et al. The effect of micro-topography on habitat segregation and tree species diversity in a warm temperate evergreen broadleaved secondary forest in southern Kyushu, Japan [J]. Vegetation Science, 2017,24(2):171-182.
- [9] 张青峰,王健,赵龙山,等.基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153.
- [10] 司梦可,曹建生,阳辉.微地形变化对地表水文过程影响的研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019, 27(10):1587-1595.
- [11] 郑子成,吴发启,何淑勤,等.片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J].土壤学报,2011,48(5):931-937.
- [12] Gascuel-Oudou C, Bruneau P, Curmi P. Runoff generation: Assessment of relevant factors by means of soil microtopography and micromorphology analysis [J]. Soil Technology, 1990,4(3):209-219.
- [13] J. A. Gómez, M. A. Nearing. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment [J]. Catena, 2005,59(3):253-266.
- [14] 赵龙山,梁心蓝,张青峰,等.裸地雨滴溅蚀对坡面微地形的影响与变化特征[J].农业工程学报,2012,28(19): 71-77.
- [15] 秦伟,曹文洪,左长清.植被与地形对侵蚀产沙耦合影响研究评述[J].泥沙研究,2015(3):74-80.
- [16] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [17] 杨宁,杨满元,刘慧娟,等.木质藤本植物黑老虎生活史特征与空间分布格局[J].安徽农业科学,2021,49(15): 134-137,141.
- [18] 刘晓林,刘超群,邝高明,等.不同空间尺度植被覆盖度土壤侵蚀强度判定适用性[J].人民长江,2021,52(9):65-70.
- [19] 郑子成.坡面水蚀过程中地表糙度的作用及变化特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [20] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24): 127-133.
- [21] 郑重.基于 3S 技术的微地形构建及其对典型草原植被格局的影响[D].呼和浩特:内蒙古大学,2014.

- sion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018,170:141-149.
- [23] Liu Y J, Wang T W, Cai C F, et al. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014,485(3):93-102.
- [24] 李智勇,张梦杰,陈明玉,等.苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响[J].*水土保持研究*,2021,28(5):54-60.
- [25] Zhang J H, Su Z A, Liu G C. Effects of terracing and agroforestry on soil and water loss in hilly areas of the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008,5(3):241-248.
- [26] Hammad A, Brresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006,87(1):39-47.
- [27] Shi Z H, Ai L, Fang N F, et al. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 483:156-167.
- [28] Peng T, Wang S. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. *Catena*, 2012,90: 53-62.
- [29] Xu Q, Wu P, Dai J, et al. The effects of rainfall regimes and terracing on runoff and erosion in the Three Gorges area, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25(10):9474-9484.
- [30] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].*农业机械学报*,2014, 45(2):169-175.
- [31] 樊登星.北京山区坡面土壤侵蚀响应特征及模型模拟研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [32] Liu J B, Gao G Y, Wang S A, et al. Combined effects of rainfall regime and plot length on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2018,109(3/4):397-406.
- [33] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the Loess Plateau in China[J]. *Environmental Management*, 2008,42(3):402-411.

~~~~~

(上接第18页)

- [22] 马欢.陕北黄土区微地形特征及其对土壤水分的影响[D].北京:北京林业大学,2018.
- [23] 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.
- [24] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].*水土保持通报*,2020,40 (1):9-16.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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*, 2021,29(1):100-104,112.
- [29] 李清溪,丁文峰,朱秀迪,等.雨强和地表糙度对坡面微地形及侵蚀的影响[J].*长江科学院院报*,2019,36(1): 41-47.
- [30] 钱秋颖,秦富仓,李龙,等.自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J].*水土保持学报*,2021,35 (3):46-52.
- [31] 王鹏飞,郑子成,张锡洲.玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J].*水土保持学报*, 2015,29(2):30-34.
- [32] 赵龙山,黄土坡地地表糙度特征及其对入渗、产流产沙的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.