DOI: 10.20103/j.stxb.202306141267
王婧,李龙,张鹏,张尚轩,朱志卓,弥宏卓.植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响.生态学报,2024,44(9):3934-3947.
Wang J, Li L, Zhang P, Zhang S X, Zhu Z Z, Mi H Z.Effects of vegetation pattern on rainfall erosion on Pisha sandstone slope land.Acta Ecologica Sinica, 2024,44(9):3934-3947.

植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响

王　婧[1],李　龙[1,2,*],张　鹏[1],张尚轩[1],朱志卓[1],弥宏卓[3]
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 内蒙古自治区林业和草原监测规划院,呼和浩特　010020

摘要:为进一步研究砒砂岩区不同雨型下植被格局对坡面土壤侵蚀特征的影响,基于野外径流小区原位观测试验与景观生态学相结合的方法,通过对比分析不同坡面的植被斑块格局指数与产流产沙之间的相关关系,阐明植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响。结果表明:(1)该地区降雨可划分为 3 类,根据各植被坡面产流产沙能力,得出降雨侵蚀力表现为:雨型 II(长历时、大雨量、大雨强)>雨型 III(短历时、小雨量、中雨强)>雨型 I(中历时、中雨量、小雨强)。降雨量和最大 30min 雨强与产流产沙量呈显著或极显著关系,相关系数 0.695 以上,是预测该区域水土流失的主要降雨因子。(2)各坡面水土保持能力与降雨类型有关,不同雨型下 3 种植被坡面减流减沙率分别达 0.42%、20.8%以上,不同植被格局坡面减沙效益优于减流效益,3 种植被坡面的减流能力为:雨型 I>雨型 III>雨型 II。(3)3 种植被坡面的径流泥沙模数由小到大依次为:均匀分布<聚集分布<随机分布,对比区域多年平均径流泥沙模数,3 种植被坡面能够减少侵蚀达 21.33%以上。(4)景观形状指数和分离度指数是影响坡面产流产沙的主要格局因子,相关系数分别达 0.884 和 0.825 以上。产流、产沙量与坡面植被斑块分离度呈显著正相关,与景观形状指数呈显著负相关。坡面产流量(Y_1)与斑块分离度(SPLIT)和景观形状指数(LSI)的关系式为 $Y_1 = 8.247SPLIT - 6.605LSI + 38.928$,$R^2 = 0.905$。以上结果表明植被斑块间的分离度越小,形状越复杂,坡面阻力增大,抗侵蚀能力越强。研究成果可为生态恢复过程中植被斑块格局的优化提供理论依据和数据支撑。

关键词:砒砂岩区;植被斑块;格局指数;产流产沙

Effects of vegetation pattern on rainfall erosion on Pisha sandstone slope land

WANG Jing[1], LI Long[1,2,*], ZHANG Peng[1], ZHANG Shangxuan[1], ZHU Zhizhuo[1], MI Hongzhuo[3]
1 *College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018,*China*
2 *Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration, State Forestry Administration, Hohhot* 010000,*China*
3 *Inner Mongolia Autonomous Region Forestry and Grassland Monitoring and Planning Institute, Hohhot* 010020,*China*

Abstract: In order to study the influence of vegetation pattern on slope soil erosion characteristics under different rainfall patterns in Pisha sandstone area, the erosion and sediment yield processes of uniform distribution, random distribution, aggregation distribution, and bare slope were studied by field runoff plot in-situ observation experiment. Combined with landscape ecology method, the pattern index of different vegetation patches was calculated, and the relationship between vegetation patch pattern and slope runoff and sediment yield was clarified. The results show that: (1) The rainfall in this area could be divided into three categories. According to the runoff and sediment yield capacity of each vegetation slope, the rainfall erosivity was as follows: rain type II (long duration, heavy rainfall, heavy rainfall intensity) > rain type III (short duration, small rainfall, medium rainfall intensity) > rain type I (medium duration, medium rainfall, small rainfall

基金项目:国家自然科学基金项目(42267049);高校基本科研业务费项目(BR220109);内蒙古黄河流域多沙粗沙区林草植被恢复技术体系研究采购项目(ZB2023021185)
收稿日期:2023-06-14;　　**网络出版日期**:2024-02-01
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lilongdhr@126.com

intensity). There was significant or extremely significant relationship between rainfall and the maximum 30 min rainfall intensity and runoff and sediment yield, and the correlation coefficient was more than 0.695, which was the main rainfall factor to predict soil and water loss in this area. (2) The soil and water conservation capacity of each slope was related to the type of rainfall. Under different rainfall patterns, the runoff and sediment reduction rates of the three vegetation slopes were more than 0.42% and 20.8%, respectively, and the sediment reduction benefits of different vegetation patterns were better than the runoff reduction benefits. The flow reduction capacity of the three vegetation slopes was: rain type I > rain type III > rain type II. (3) The runoff and sediment modulus of the three vegetation slopes from small to large was: uniform distribution<aggregation distribution<random distribution. Compared with the average runoff and sediment modulus of the region for many years, the three vegetation slopes could reduce erosion by more than 21.33%. (4) The landscape shape index and the separation index were the main pattern factors affecting the runoff and sediment yield on the slope, and the correlation coefficients were above 0.884 and 0.825, respectively. The runoff and sediment yield were significantly positively correlated with the separation degree of vegetation patches on the slope, and negatively correlated with the landscape shape index. The relationship between slope runoff yield (Y_1) and patch separation index (SPLIT) and landscape shape index (LSI) was $Y_1 = 8.247SPLIT - 6.605LSI + 38.928$, R^2: 0.905. The above results show that the smaller the separation between vegetation patches, the more complex the shape, the greater the slope resistance, and the stronger the erosion resistance. The research results can provide theoretical basis and data support for the optimization of vegetation patch pattern in the process of ecological restoration.

Key Words: Pisha sandstone area; vegetation patches; pattern index; runoff sand production

土壤侵蚀已成为全球最重要的生态环境问题之一,严重的土壤侵蚀不仅会导致生态环境的恶化,而且还会限制地方经济的发展[1]。特别是位于晋陕蒙三省交界的砒砂岩地区,是黄土高原土壤侵蚀最严重的区域[2]。由于砒砂岩地区具有成岩程度低、结构强度弱、抗侵蚀能力差的特点,在外营力的作用下极易发生土壤侵蚀,导致该区域土壤侵蚀模数高达 3—4 万 t km^{-2} a^{-1}[3],是黄河流域中粗泥沙的主要来源区,被称为“世界水土流失之最”[4]。坡面是侵蚀基本构成单元,植被则是调控坡面土壤侵蚀的重要因素。在坡面尺度上,植被能对地表径流进行有效的拦截并降低其流速,很大程度上能够削弱降雨和径流对土壤的侵蚀能力,降低土壤侵蚀发生的几率[5]。然而在环境条件较差的砒砂岩地区,坡面上的植被很难形成理想情况中全部覆盖的状态,更常见的是在坡面上形成点状、块状、簇状的离散分布特征,多在坡面上形成裸地与植被斑块镶嵌的坡面植被格局[6]。植被斑块的镶嵌结构和连通方式对坡面径流和泥沙的输移过程都有着直接的影响,不同植被格局对坡面侵蚀的影响又各不相同[7]。所以开展砒砂岩地区不同植被格局对坡面侵蚀机理的研究,对于防治该地区的水土流失和改善生态环境具有重要的意义。

随着景观生态学的发展,景观生态学逐渐与水土保持学之间的关系日益密切,景观格局指数也开始与土壤侵蚀相结合来阐明植被格局对土壤侵蚀的作用机理[8]。已有不少学者将景观指数应用于土壤侵蚀过程中并对此进行了深入的研究。Ludwig[9]提出方向性渗透指数(DLI) 用来描述景观植被格局阻滞水土的能力;陈利顶[10]针对黄土高原地区的土壤侵蚀,建立了多尺度景观格局评价指数;刘晓君[11]以黄河流域的 2 个典型小流域为研究对象,结果表明径流与香农多样性指数(SHDI)和辛普森多样性指数(SIDI)呈正相关,泥沙与蔓延度指数(CONTAG)和斑块连结度(COHESION)指数呈负相关。但国内外学者的研究多以景观格局指数在小流域等中大尺度上应用为主[12],然而在坡面尺度上利用景观格局指数来解释土壤侵蚀时会发生矛盾,由于缺乏对土壤侵蚀过程机理的考虑而导致景观格局指数的变化对土壤侵蚀意义并不明确。因此,本研究以砒砂岩区不同植被斑块格局坡面为研究对象,采用景观生态学方法,研究不同降雨条件下植被格局对坡面产流产沙的影响,明析植被格局与坡面产流产沙的关系。以期为砒砂岩区坡面景观格局优化和水土保持管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

砒砂岩区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗鲍家沟流域内,其地理坐标为 110°31′—110°35′E,39°46′—39°48′N,平均海拔为 1200m;属于温带大陆性气候,冬季漫长干燥,夏季短暂温热,多年平均气温 7.2℃,年平均降雨量为 400mm,降雨主要集中在夏季(6—8 月),夏季年平均降雨量 256.4mm,占全年总降雨量 64.1%;该地区日照时间充足,年光照时间在 3100—3200h 之间,年光照率在 70%以上,年均无霜期 135d。该地主要的土壤类型为栗钙土,土壤基本理化性质见表 1。自然植被稀疏,主要以人工植被为主,植被类型多以灌木和多年生草本为主,常见乔木有新疆杨(*Populus alba var*)、樟子松(*Pinus sylvestris var*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)常见灌木有沙柳(*Salix cheilophila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)常见草本有羊草(*Leymus chinensis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

表 1 研究区土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the study area

土壤类型 Soil type	土壤机械组成 Soil composition/%			土壤容重 Bulk density/ (g/cm³)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	交换性阳离子 Cation exchange capacity/ (cmol/kg)	土壤入渗率 Soil permeability/ (mm/min)
	粘粒 Clay	粉粒 Slit	砂粒 Sand					
栗钙土 Kastanozem	5.22	51.3	43.48	1.64	0.41	1.19	8.26	0.6—1.2

1.2 试验设计

1.2.1 样地选取

试验于 2022 年在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡的圪秋沟内开展。以研究区坡面天然植被的分布情况为基础,利用无人机对鲍家沟流域进行全方位航拍,将样地划分成 1m×1m 的栅格小样方,共 20 个。运用方差均值比率法[13]与砒砂岩区坡面实地调查结果相互对照验证,最终确定了 3 种典型自然植被格局,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($S^2/M=1$)(表 2)。方差均值比率法[13]计算公式为:

$$M = \sum_{i}^{N} M_i/N$$

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

式中,N 代表样方的个数,M_i代表第 i 个样方内的植株个体数,M 代表均值,S^2代表方差。

表 2 方差均值比率法测定不同植被格局类型

Table 2 Measurement of different vegetation pattern types using the variance mean ratio method

样地 Sample plot	N	S^2	M	S^2/M	植被类型 Vegetation type
1	20	0.15	0.81	0.18	均匀分布
2	20	0.64	0.56	1.14	随机分布
3	20	3.46	0.33	2.6	聚集分布

N:样方个数 Number of samples;S^2:方差 Variance;M:均值 Mean value

样地选取时保证 3 种样地的植被种类相似、植被覆盖度相近、坡度坡向相同且无人为干扰。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(裸坡),样地基本信息见表 3。

1.2.2 小区建立

在每块样地上建立规格为 2m(宽)×10m(长)的径流小区(图 1),径流小区由 2mm 厚的不锈钢板拼接而

成,钢板进入土壤的深度 30cm,钢板露在地表的高度为 15cm。径流小区的长边界垂直于等高线,在小区底部分别设置了引流槽和出水口,并在出水口底部设置了集流桶,用来收集径流和泥沙样品。径流小区的旁边设置固定的 HOBO 气象站,来测量每次降雨量、降雨历时、降雨强度等基本数据,并配有雨量桶相互校正。

表 3　样地基本信息

Table 3　Basic information of the sample plot

样地类型 Plot type	土壤类型 Soil type	坡度 Slope/(°)	植被盖度 Vegetation coverage/%	植被种类 Vegetation type
均匀 Uniform	栗钙土	35	32.6	草木犀(*Melilotus officinalis*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)、铁杆蒿(*Tripolium vulgare*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、蒙古莸(*Caryopteris mongholica*)
随机 Random	栗钙土	35	30.5	铁杆蒿(*Tripolium vulgare*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii Pamp.*)、蒙古莸(*Caryopteris mongholica*)
聚集 Aggregated	栗钙土	35	31.1	华北米蒿(*Artemisia giraldii*)、猪毛菜(*Salsola collina.*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、蒙古莸(*Caryopteris mongholica*)、铁杆蒿(*Tripolium vulgare*)、草木犀(*Melilotus officinalis*)

1.2.3　测算指标

(1)减流率(R_L)表示有植被的坡面相对于裸坡侵蚀的减流效益的重要指标,其计算公式[14]为:

$$R_L=(X_0-X_1)/X_0\times100\%$$

式中,R_L代表减流率(%);X_0代表裸坡的径流量(m^3);X_1代表有植被坡面的径流量(m^3)

(2)减沙率(R_s)表示有植被的坡面相对于裸坡侵蚀的减沙效益的重要指标,其计算公式[15]为:

$$R_S=(W_0-W_1)/W_0\times100\%$$

式中,R_S代表减沙率(%);W_0代表裸坡的产沙量(t);W_1代表有植被坡面的产沙量(t)

(3)土壤侵蚀量是量化土壤侵蚀程度的重要指标,其计算公式[16]为:

$$S_E=(1000\times W\times L)/S$$

式中,S_E代表土壤侵蚀量(t/km^2);W 代表次降雨条件下径流的平均含沙量(kg/m^3);L 代表次降雨后的径流量(m^3);S 代表径流小区的面积(m^2)

图 1　植被分布格局

Fig.1　Vegetation distribution pattern

(从左到右依次为均匀分布、随机分布、聚集分布)

(4)植被格局指数:坡面侵蚀前采用三维激光扫描仪结合无人机航拍技术,获取坡面植被分布信息,利用 ArcGIS 10.2 软件进行目视解译分类,将不同格局植被斑块空间分布矢量化。矢量化后保存为 Tiff 格式导入 Fragstats 3.3 软件来计算植被格局指数。本文选取斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、Simpson 多样性指数(SIDI)、斑块连结度(COHESION)、斑块分离度(SPLIT)6 个指数进行计算(表 4),分别从斑块的数量、形状、多样性和聚散性方面描述植被斑块的分布特征。

1.3　数据处理

采用 SPSS 26.0 软件对不同格局植被斑块坡面和裸坡的产流量、产沙量和土壤侵蚀量分别进行 ANOVA 方差分析和 LSD 多重比较,将产流产沙量和各景观指数进行多元线性回归分析。用 Oringin 2022 将产流、产沙量和土壤侵蚀量分别与斑块密度、最大斑块指数、景观形状指数、斑块连结度、斑块分离度、多样性指数进行 Pearson 双尾相关分析,并进行图件的绘制,图表中所表示的数据为平均值±标准差。

表 4 景观指数描述

Table 4 Landscape index description

景观指数 Landscape index	缩写 Abbreviation	计算公式 Formulations	生态学意义 Ecological significance
斑块密度 Patch density	PD	$PD=\frac{N}{A}$ N 为某一类型斑块的数量,A 为景观的总面积(m^2)	PD 表现某种斑块在景观中的密度,可反映出景观整体的异质性与破碎度
最大斑块指数 Largest patch index	LPI	$LPI=\frac{a_{max}}{A}\times 100$ a_{max} 为某一斑块类型中最大斑块的面积(m^2)	LPI 表现最大斑块占据整个景观的面积比例,有助于判断景观的优势类型
景观形状指数 Landscape shape index	LSI	$LSI=0.25\frac{E}{\sqrt{A}}$ E 为基于像元计算的景观边缘总长度	LSI 代表斑块形状的规则程度,数值越高边缘形状越复杂,反之越简单
Simpson 多样性指数 Simpson's Diversity Index	SIDI	$SIDI = 1-\sum_{j=1}^{m} p_j^2$ m 为景观类型数,p_j 为景观类型 j 占景观的比例	SIDI 用来衡量斑块结构组成复杂程度的指数,数值越大,多样性程度越高
斑块连结度 Patch cohesion index	COHESION	$COHESION = \left(1-\frac{\sum_{j=1}^{m} p_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} p_{ij}\sqrt{a_{ij}}}\right)\left(1-\frac{1}{\sqrt{A}}\right)^{-1}$ p_{ij} 为 ij 斑块的周长,a_{ij} 为 ij 斑块的面积	COHESION 代表某一种斑块类型和周围相邻斑块类型的空间连接程度。
斑块分离度 Splitting Index	SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{j=1}^{n} a_j^2}$ a_j 为斑块 j 在该景观类型中的面积,A 为景观的总面积(m^2)	SPLIT 表示某一景观类型中的个体分布的分离程度,数值越大,表明该景观类型在空间分布越分散。

2 结果与分析

2.1 自然降雨特征

通过对 2022 年圪秋沟流域内降雨进行观测,其中产流产沙的有效降雨共有 12 场(表 5)。研究区的年降水量分布不均匀,降雨大多集中在 6—9 月,其中 8 月份的降雨量占比最大,约占全年总降雨量的 74.86%。年内降雨总历时为 36.55h,降雨总量为 274.9mm。观测期间第六场降雨的动能和最大 30min 雨强最大,为 3.67MJ/hm^2和 31.6mm/h。8 月的降雨多以大暴雨的形式为主,因此 8 月的降雨侵蚀力达到年内最高,为 489.87MJ mm hm^{-2} h^{-1} a^{-1},占年降雨侵蚀力的 80.05%。

根据降雨量、降雨历时、最大 30min 降雨强度和 K-均值聚类法将研究区 12 场降雨划分为典型 3 种降雨类型(图 2),分别记作雨型 I、雨型 II、雨型 III。雨型 I 的特征为中历时(平均降雨历时为 235.6min)、中雨量(次降雨量平均值为 22.36mm)、小雨强(I_{30}平均值为 14.08mm/h),频率为 42%。雨型 II 发生次数最少,频率为 17%,其特征为长历时(平均降雨历时为 418min)、大雨量(次降雨量平均值为 52.5mm)、大雨强(I_{30}平均值为 21.8mm/h)。雨型 III 的特征为短历时(平均降雨历时为 35.8min)、小雨量(次降雨量平均值为 11.62mm)、中雨强(I_{30}平均值为 15.68mm/h),频率为 42%。由此可见,雨型 I 和雨型 III 是该地区主要的降雨类型。

2.2 植被坡面下景观指数特征

不同植被格局下景观指数特征见表 6,可以看出斑块密度 PD、最大斑块指数 LPI、景观形状指数 LSI、Simpson 多样性指数 SIDI、斑块连结度 COHESION、斑块分离度 SPLIT 指标均有差异。三种植被格局下斑块连

表 5　自然降雨特征

Table 5　Natural rainfall characteristics

编号 Number	降雨时间 Rainfall time	降雨历时 Rainfall duration/min	降雨量 Rainfall/mm	I_{30}/(mm/h)	E/(MJ/hm^2)	R/(MJ mm hm^{-2} h^{-1})	降雨强度 Rainfall intensity/(mm/h)
1	2022-06-29	16	5.8	0.8	0.84	0.67	21.75
2	2022-07-04	390	8.4	21.6	3.15	68.06	1.29
3	2022-07-05	15	10.5	1.2	0.99	1.19	42
4	2022-07-11	313	17	6.8	1.98	13.50	3.26
5	2022-07-26	247	15	12.4	2.52	31.29	3.64
6	2022-08-06	93	18.6	31.6	3.67	115.95	12
7	2022-08-12	41	15.8	30.4	3.61	109.83	23.12
8	2022-08-13	14	7.4	14.4	2.68	38.58	31.71
9	2022-08-14	164	36.6	30.0	3.59	107.81	13.39
10	2022-08-18	446	96.6	22.0	3.17	69.84	13
11	2022-08-21	258	30.8	16.8	2.85	47.88	3.98
12	2022-09-03	196	12.4	4.4	1.67	7.34	3.8

I_{30}:最大 30min 雨强 Maximum 30 minute rainfall intensity;E:降雨动能 Rainfall energy;R:降雨侵蚀力 Rainfall erosivity

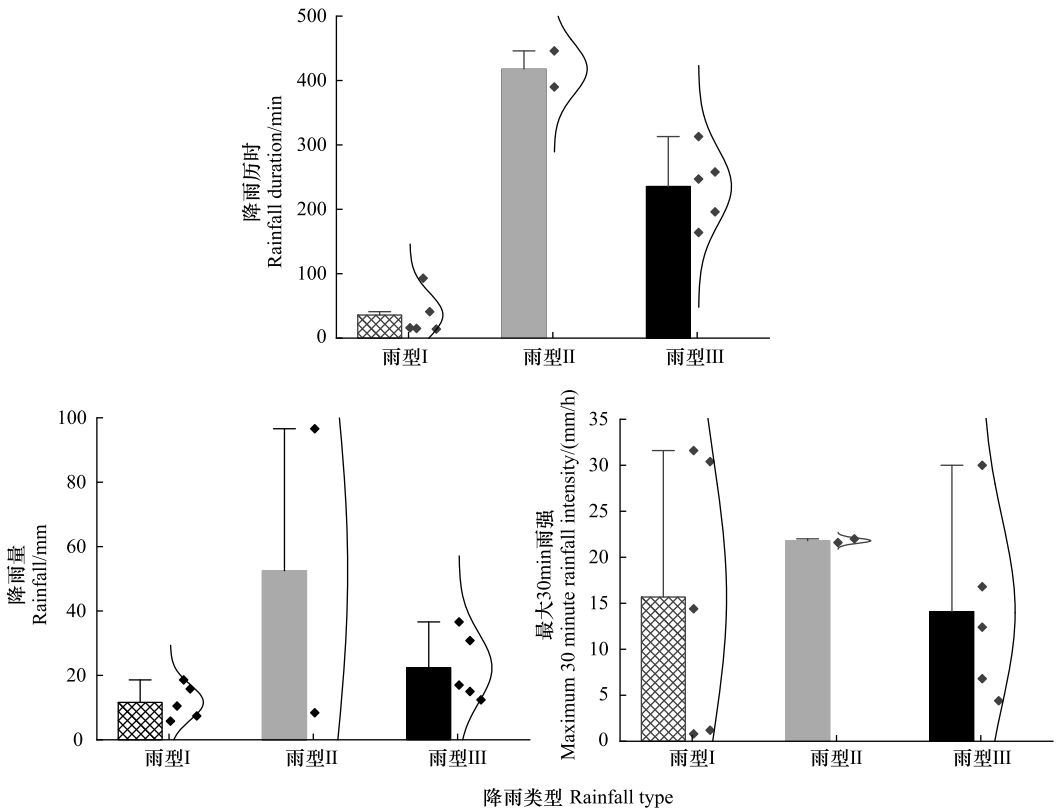

图 2　不同降雨类型下降雨历时、降雨量和最大 30min 雨强特征

Fig.2　Characteristics of rainfall duration, rainfall, and maximum 30min rainfall intensity for different rainfall types

雨型 I:中历时、中雨量、小雨强;雨型 II:长历时、大雨量、大雨强;雨型 III:短历时、小雨量、中雨强

结度 COHESION 无显著差异。均匀分布的景观形状指数 LSI 显著高于随机分布和聚集分布,随机分布和聚集分布间无显著差异,均匀分布的景观形状指数 LSI 分别是随机分布和聚集分布的 1.21 倍和 1.23 倍。三种植被格局下最大斑块指数 LPI 和多样性指数 SIDI 变化规律一致,均表现为聚集分布>随机分布>均匀分布。聚

集分布和随机分布的最大斑块指数 LPI 分别是均匀分布的 1.51 倍和 1.13 倍。聚集分布的多样性指数 SIDI 是随机分布的 1.28 倍,是均匀分布的 2.75 倍,随机分布是均匀分布的 2.15 倍。随机分布的斑块密度显著高于均匀分布,聚集分布位于二者之间。斑块分离度 SPLIT 表现为随机分布>聚集分布>均匀分布,随机分布的斑块分离度 SPLIT 分别是聚集分布和均匀分布的 1.27 倍和 2.22 倍。

表 6 不同植被斑块格局指数特征

Table 6 Characteristics of different vegetation patch pattern index

类型 Type	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	景观形状指数 LSI	多样性指数 SIDI	斑块连结度 COHESION	斑块分离度 SPLIT
均匀 Uniform	15.13±0.82c	66.30±0.04c	4.88±0.01a	0.20±0.07c	100.00±0.33a	1.00±0.29c
随机 Random	132.15±0.08a	75.17±0.82b	3.98±0.08b	0.43±0.09b	99.54±0.11a	2.22±0.01a
聚集 Aggregated	79.90±0.82b	99.90±0.08a	4.04±0.10b	0.55±0.08a	99.70±0.16a	1.75±0.04b

2.3 降雨条件下坡面产流产沙特征分析

通过对各径流小区产流产沙特征分析,表明雨季是该区域产流产沙的主要阶段。本文选取 2022 年 12 场有效降雨及各径流小区产流产沙数据(表 7)。总体来看,不同坡面的产流产沙量随雨强 I_{30}的增大表现出增大的趋势,这表明雨强 I_{30}是影响产流产沙的主要降雨特征指标[17]。相同降雨条件下各径流小区产流、产沙量存在差异,有植被覆盖的径流小区产流产沙量明显小于裸坡,表明植被能够显著的减少坡面径流和土壤的流失[18]。综合 12 次降雨的产流产沙量来看,裸坡的平均产流量最高、为 52.76L,平均产沙量为 21.64kg,其余各植被格局的平均产流量为 28.28L,平均产沙量为 12.17kg,分别占裸坡的 53.60%和 56.24%。

表 7 典型侵蚀性降雨下的产流产沙

Table 7 Runoff and sediment production under typical erosive rainfall

日期 Date	降雨特征 Rainfall characteristics		均匀 Uniform		随机 Random		聚集 Aggregated		裸坡 Bare slope	
	降雨量 Rainfall/mm	I_{30}/(mm/h)	产流量 Runoff volume/L	产沙量 Sediment yield/kg	产流量 Runoff volume/L	产沙量 Sediment yield/kg	产流量 Runoff volume/L	产沙量 Sediment yield/kg	产流量 Runoff volume/L	产沙量 Sediment yield/kg
2022-06-29	5.8	0.8	0.72	0.05	1.80	0.12	1.36	0.20	4.52	2.10
2022-07-04	8.4	21.6	5.40	0.08	0.10	0.15	0.11	0.15	0.10	0.32
2022-07-05	10.5	1.2	8.32	2.35	16.92	6.70	16.20	4.60	27.20	8.45
2022-07-11	17	6.8	9.00	6.09	0.52	0.16	1.80	1.03	3.60	2.45
2022-07-26	15	12.4	5.76	0.15	3.60	1.20	3.24	0.31	9.00	1.30
2022-08-06	18.6	31.6	10.28	2.85	19.08	5.25	19.8	3.40	22.68	6.20
2022-08-12	15.8	30.4	22.30	8.82	42.48	12.08	39.24	10.68	52.96	14.63
2022-08-13	7.4	14.4	15.08	3.51	28.08	8.29	23.76	4.15	26.36	6.74
2022-08-14	36.6	30.0	174.6	55.48	198	74.98	172.8	56.88	273.6	122.26
2022-08-18	96.6	22.0	172.80	44.39	176.4	55.44	169.20	54.34	174.60	88.31
2022-08-21	30.8	16.8	18.00	1.16	48.60	3.46	13.68	1.26	24.48	4.20
2022-09-03	12.4	4.4	21.24	1.53	19.08	4.27	11.16	2.65	14.04	2.76

研究区观测期内的年均侵蚀性降雨量为 313.5mm(表 8),4 种植被坡面径流输沙模数由大到小依次为裸坡、随机分布、聚集分布、均匀分布。裸坡的径流输沙模数分别为 31652$m^3km^{-2}a^{-1}$和 12985.50t $km^{-2}a^{-1}$,均匀分布的径流输沙模数分别为 23175$m^3km^{-2}a^{-1}$和 6322.50t $km^{-2}a^{-1}$。均匀、随机、聚集分布相比于区域多年平均径流模数分别降低 23.38%、8.41%和 21.93%。平均输沙模数分别降低 42.19%、21.33%和 36.16%,这说明该区域有植被的坡面拦截泥沙作用更强,其中均匀分布格局效果最佳。

表 8　观测期与区域多年平均径流、输沙模数对比

Table 8　Comparison of annual average runoff and sediment transport modulus between observation period and region

年份 Year	降雨量 Rainfall/mm	场次 Session	类型 Type	径流模数 Runoff modulus/ (m^3 km^{-2} a^{-1})	输沙模数 Sediment modulus/ (t km^{-2} a^{-1})
2021	313.50	18	均匀	23175	6322.50
			随机	27702	8604.00
			聚集	23612	6982.00
			裸坡	31652	12985.50
区域多年平均 Regional multi-year average	375.97	—	—	30245	10937.50

雨型 I 下,均匀分布的径流量和泥沙量均最小(图 3),相比于聚集分布、随机分布和裸坡,均匀分布的径流量分别减少了 45.49%、49.52%、60.73%,泥沙量分别减少了 23.64%、45.76%、53.81%。与聚集分布、随机分布和裸坡相比,雨型 II 下均匀分布的产沙量分别降低了 11.64%、19.46%、49.48%,径流量却达到了最高,可能因为随着降雨时间的延长,坡面土壤水分逐渐达到饱和状态,坡面产生大量的地表径流,由于该格局破碎程度较高,均匀分布下的植被斑块间形成多股流道从而加剧了细沟侵蚀的机会。雨型 III 条件下,聚集分布的径流量和泥沙量最小。对于随机分布、均匀分布、裸坡来说,聚集分布的径流量分别减少了 24.73%、11.33%、37.57%,泥沙量分别减少了 26.12%、3.57%、52.21%。由此可见,不同植被格局下的水土流失对降雨类型的响应存在着一定的差异。

从雨型 I 到雨型 II 是一个降雨强度不断增加的过程,聚集分布、随机分布、均匀分布和裸坡 4 种坡面的径流量分别增加 3.21、3.07、7.14、2.13 倍,泥沙量分别增加 4.49、3.28、5.36、4.81 倍。可能是由于在降雨强度较小的情况下,雨滴的溅蚀能力较弱,径流对坡面的冲刷作用较小,水流中的泥沙多数是降雨打击到坡面上而产生的土粒。随着降雨强度增大,雨滴不断打击坡面,径流紊动性增强,甚至发生崩塌从而产生大量泥沙,使得径流量和泥沙量呈现出强烈波动[19]。

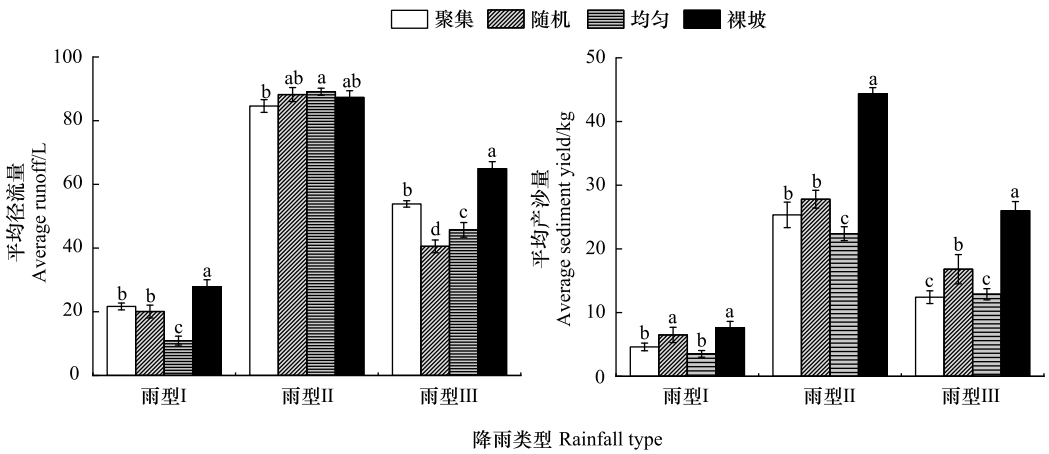

图 3　不同降雨条件下坡面产流产沙特征

Fig.3　Characteristics of runoff and sediment production on slope under different rainfall conditions

不同小写字母代表不同格局间差异显著($P<0.05$)

不同雨型下各植被坡面减流率、减沙率、土壤侵蚀量见图 4 。雨型 II 导致严重的土壤侵蚀,雨型 II 导致径流量(84.6—89.1L)、泥沙量(22.39—44.32kg)、土壤侵蚀量(1012—2216t/km^2)最大。雨型 I 导致径流量(10.94—27.86L)、泥沙量(3.52—7.62kg)、土壤侵蚀量(176—381t/km^2)最小。雨型 II 导致土壤侵蚀量占总侵蚀量的 55.75%,其中聚集分布、随机分布和均匀分布下的土壤侵蚀量分别高达 1012、1390、1112t/km^2,表明

该地区雨型 II 导致的土壤侵蚀最为严重。不同植被格局坡面均表现出良好的减流减沙效益,使平均径流量相对于裸坡降低(0.42%—61.84%),平均产沙量降低(20.80%—68.38%)。整体上看,植被格局下坡面减沙效益优于减流效益。

雨型 I 条件下均匀分布和裸坡的径流量分别为 10.94L 和 27.86L,相比于裸坡,均匀分布的减流效应极其显著($P<0.01$),减流率为 60.73%。裸坡产沙量最大,为 7.62kg,聚集分布和均匀分布产沙量分别为 4.61kg 和 3.52kg,与裸坡相比,聚集分布和均匀分布减沙率分别为 39.50%和 53.81%,减沙效益显著($P<0.05$),可见雨型 I 下均匀分布具有更佳的减流减沙效益。这是因为该格局下植物根系均匀分布在整个坡面上,植物根系在固持土壤上所起到的作用更强,所以在减流减沙效益上更佳。然而在雨型 III 条件下,聚集分布的减流减沙率均大于均匀分布,一方面聚集分布比均匀分布具有更佳的减流减沙效益,另一方面可能是由于聚集分布坡下部分植被密度较大。有研究表明[20],坡下植被的减沙效果比坡上和坡中植被的减沙效果好。坡下部分的植被不仅可以利用自身机械作用来阻挡泥沙流失, 还可以利用泥沙沉积改变坡面地貌形态, 降低坡度进而减少水土流失。本实验中两种植被格局盖度相差不大,但受自然因素影响,聚集分布的坡下植被密度大于均匀分布,因此聚集分布拦截径流泥沙的效果更佳。

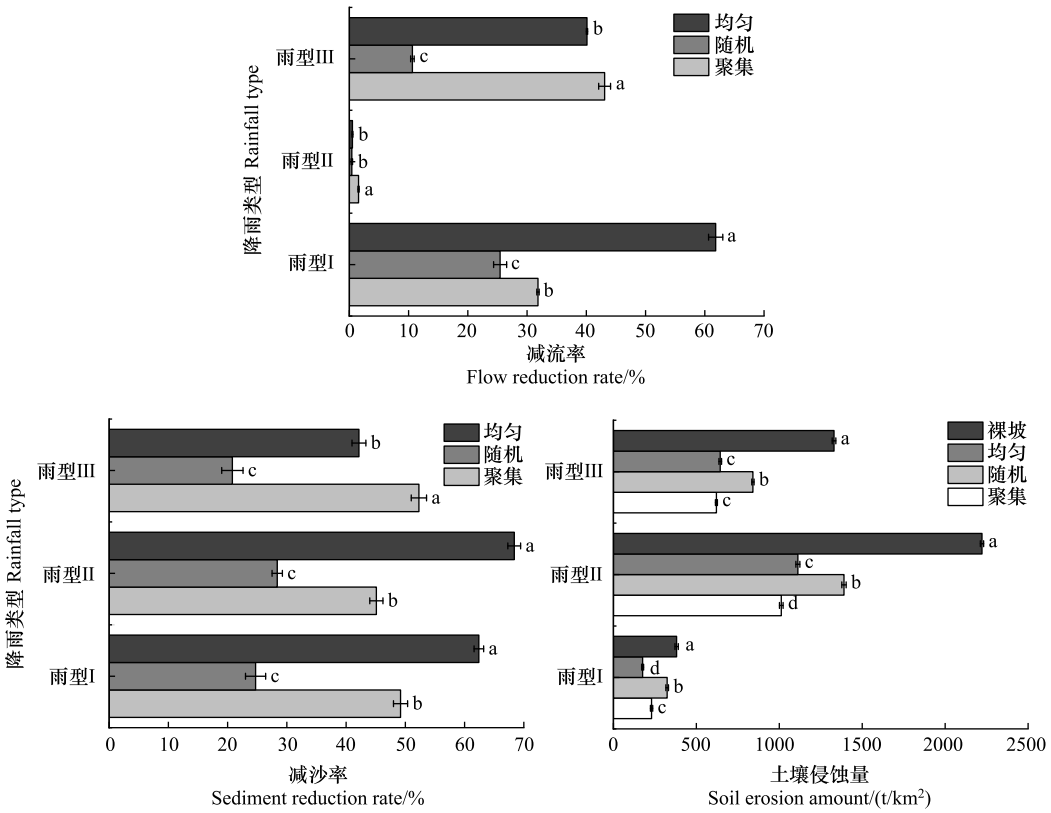

图 4 不同降雨条件下坡面减流率、减沙率和土壤侵蚀量特征

Fig.4 Characteristics of slope flow reduction, sediment reduction, and soil erosion under different rainfall conditions

不同小写字母代表不同格局间差异显著($P<0.05$)

2.4 景观格局指数与土壤侵蚀的关系

将坡面产流量、产沙量和土壤侵蚀量与 6 个景观指数进行相关分析。结果表明(图 5)雨型 I 条件下:产沙量和土壤侵蚀量与最大斑块指数无显著相关性。产流量和产沙量与斑块连结度呈极显著负相关($P<0.01$);与斑块分离度、斑块密度呈极显著正相关($P<0.01$);与多样性指数呈显著正相关。土壤侵蚀量与斑块密度和斑块分离度呈极显著正相关($P<0.01$);与斑块连结度呈极显著负相关($P<0.01$);与多样性指数呈显著

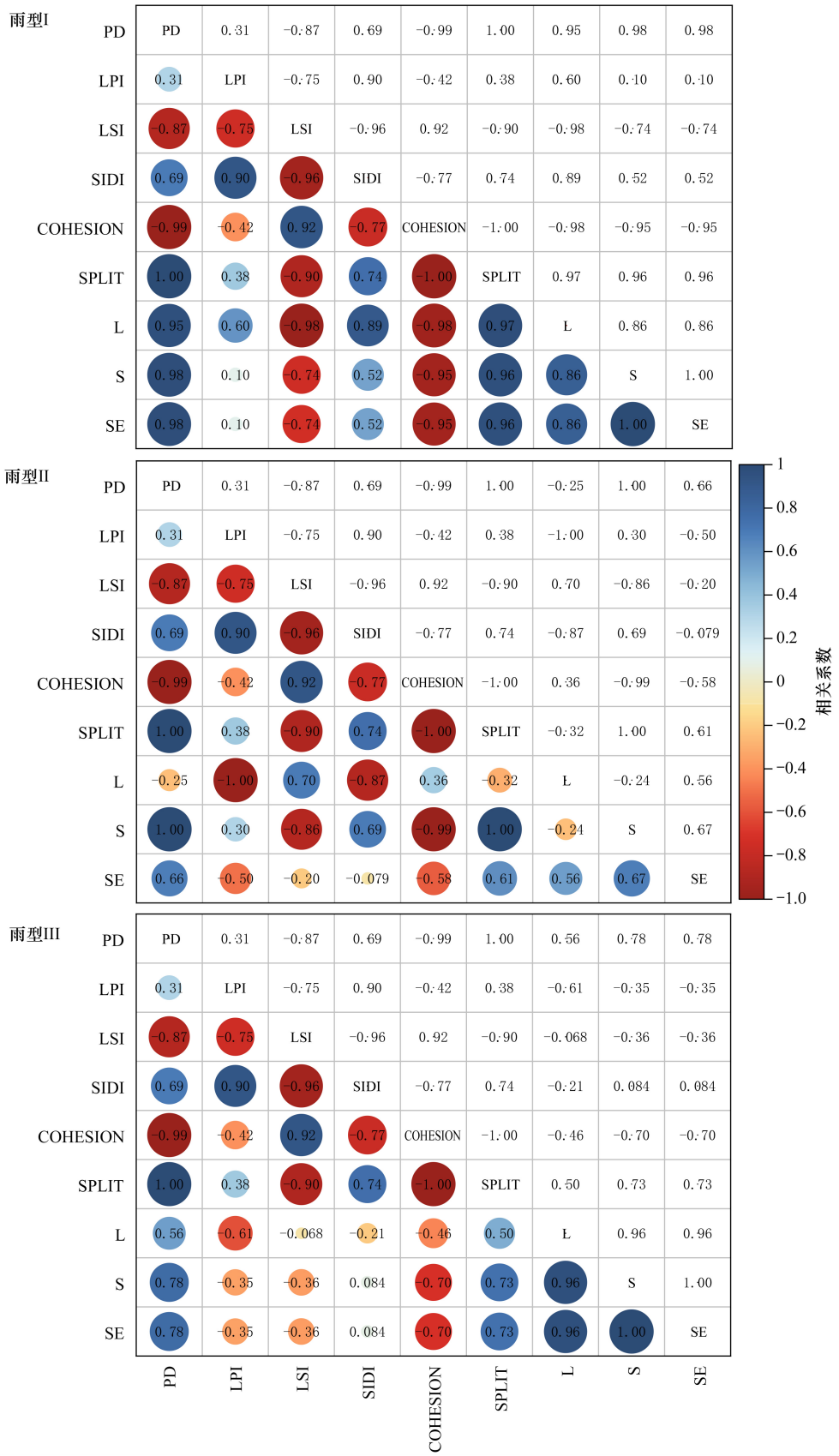

图 5　植被斑块类型格局指数与产流量、产沙量和土壤侵蚀量相关性分析

Fig.5　Correlation analysis of vegetation patch type pattern index with runoff, sediment yield, and soil erosion

PD:斑块密度;LPI:最大斑块指数;LSI:景观形状指数;SIDI:多样性指数;COHESION:斑块连结度;SPLIT:斑块分离度;*L*:产流量;*S*:产沙量;*SE*:土壤侵蚀量

正相关;与景观形状指数呈显著负相关。雨型 II 条件下,产流量与最大斑块指数呈极显著负相关($P<0.01$);与多样性指数呈显著负相关;与景观形状指数呈显著正相关。产沙量与斑块密度和斑块分离度呈极显著正相关($P<0.01$);与斑块连结度呈极显著负相关($P<0.01$);与多样性指数呈显著正相关。土壤侵蚀量与斑块密度和斑块分离度呈显著正相关;与最大斑块指数和斑块连结度呈显著负相关;与景观形状指数和多样性指数无显著相关性。雨型 III 条件下,产流量与景观形状指数和多样性指数无明显的相关关系;与斑块密度和斑块分离度呈显著正相关;与最大斑块指数和斑块分离度呈显著负相关。产沙量、土壤侵蚀量与斑块密度和斑块分离度呈显著正相关;与斑块连结度呈显著负相关;与最大斑块指数和景观形状指数呈显著负相关。

经过多元回归分析可知,景观形状指数(LSI)、斑块分离度(SPLIT)能够较好的拟合坡面径流泥沙过程。其中,斑块分离度与径流量和泥沙量始终存在显著的正相关关系,而景观形状指数与产流量和产沙量始终存在显著的负相关关系。这说明,坡面尺度上植被斑块的分离程度越高,则侵蚀程度越强,反之植被斑块的形状越复杂,水土流失的可能性越小。利用多元回归,建立坡面产流量、产沙量与 LSI、SPLIT 的回归方程(表 9)。回归系数代表了自变量对因变量的影响程度。由表可知,雨型 I 下分离度指数相比于景观形状指数对产流产沙影响大。在雨型 II、III 下,景观形状指数影响相比分离度指数对产流影响大,景观形状指数影响相对比分离度指数对产沙影响较小。雨型 III 下景观形状指数和分离度指数系数相差不大,这说明景观形状指数、分离度指数共同影响着坡面植被斑块的产流产沙过程。从决定系数上来看,3 类雨型整体上模拟产流的效果要优于产沙,这说明坡面侵蚀产沙的过程相对更加复杂。

表 9 不同降雨类型下景观指数与产流、产沙的回归方程

Table 9 Regression equations of landscape index and runoff and sediment yield under different rainfall types

类型 Type	指标 Index	回归方程 Regression equation	R^2	P
I	产流量	$Y_1=8.247X_1-6.605X_2+38.928$	0.905	$P<0.01$
	产沙量	$Y_2=3.755X_1+1.918X_2-9.596$	0.894	$P<0.01$
II	产流量	$Y_3=6.346X_1+10.288X_2+32.546$	0.886	$P<0.01$
	产沙量	$Y_4=5.109X_1+0.980X_2+12.500$	0.825	$P<0.01$
III	产流量	$Y_5=25.951X_1+26.548X_2-108.787$	0.884	$P<0.01$
	产沙量	$Y_6=8.383X_1+7.497X_2-32.090$	0.826	$P<0.01$

X_1:斑块分离度 SPLIT;X_2:景观形状指数 LSI

3 讨论

降雨是地表径流的主要来源,也是水力侵蚀中首要控制因素。坡面水土流失是降雨因子、地形地貌、植被格局和土壤性质等多种因素共同作用的结果[21]。其他条件相同时,要探究植被格局对坡面产流产沙的影响,必须将降雨因素考虑进来。已有研究表明,坡面产流产沙是雨强、降雨量、降雨历时等降雨因素综合影响的过程[22],研究中更要注重其共同作用。但以往的研究大多以单个因素对降雨类型进行划分,不能体现出降雨指标间的综合作用[23],本研究根据降雨历时、降雨量、I_{30}为特征指标将研究区侵蚀性降雨分为 3 类。不同降雨指标(降雨历时、降雨量、最大 30min 雨强、降雨动能、降雨侵蚀力、降雨强度)与坡面产流产沙量进行相关分析(表 10)。结果表明在降雨因子中,降雨量和 I_{30}对坡面土壤侵蚀能够产生显著影响,且 I_{30}的影响较大,与产流量和产沙量呈极显著正相关关系($P<0.01$),这也进一步证明 I_{30}和降雨量是主导该地区土壤侵蚀的降雨因子。由此可知,雨型 II 是导致砒砂岩地区发生水土流失最主要的降雨类型,需要重点强化对雨型 II 的应对之策。有研究[24]发现,降雨动能与最大 30min 雨强的乘积 EI_{30}与土壤流失量存在着显著的相关性关系,这是因为降雨量和降雨强度会对开始产流时间及之后入渗过程产生影响。黄凯[25]在坡面侵蚀研究中发现,降雨量、降雨历时和雨强的乘积与产流量有着很强的相关性。杜映妮[16]在研究丹江口库区植被措施控制土壤侵蚀效果中发现,径流系数和含沙量受到 I_{30}的影响,而土壤侵蚀力主要受降雨量和 I_{30}的共同作用。由此可知,不同

地区由于土壤和植被存在差异,所以影响区域土壤侵蚀的主要降雨因子也不相同。

表 10　降雨因子与产流、产沙之间的相关性

Table 10　Correlation between rainfall factors and runoff and sediment yield

相关系数 Correlation coefficient	降雨历时 Rainfall duration	降雨量 Rainfall	最大 30min 雨强 Maximum 30 minute rainfall intensity	降雨动能 Rainfall energy	降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	降雨强度 Rainfall intensity	产流量 Runoff volume	产沙量 Sediment yield
降雨历时 Rainfall duration	1.000	0.584*	0.149	0.289	0.072	−0.741**	0.275	0.214
降雨量 Rainfall		1.000	0.343	0.371	0.313	−0.151	0.806**	0.695*
最大 30min 雨强 Maximum 30 minute rainfall intensity			1.000	0.492	0.496	−0.187	0.970**	0.992**
降雨动能 Rainfall energy				1.000	0.933**	−0.311	0.459	0.443
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity					1.000	−0.128	0.498	0.503
降雨强度 Rainfall intensity						1.000	0.048	0.043
产流量 Runoff volume							1.000	0.982**
产沙量 Sediment yield								1.000

植被是影响坡面侵蚀的关键因子,直接影响地表产流产沙的形成和发展,在坡面抗蚀减沙和生态修复中发挥着重要作用。砒砂岩地处干旱半干旱地区,坡面植被多以斑块的离散形式存在,植被斑块间的组合方式对区域产流产沙的贡献尚不明确。对植被斑块间的空间分布和配置方式与产流产沙关系进行研究,可为黄土高原人工植被的布局方式和生态恢复工作提供重要的参考依据。目前,大多研究集中在不同坡长[26—27]、植被类型[28—30]、植被覆盖度[31—32]对产流产沙过程的响应,而结合降雨因素和坡面植被格局对土壤侵蚀的影响研究较少。根据本研究试验设计,从景观格局角度出发探究不同雨型下均匀分布、随机分布、聚集分布对坡面产流产沙的影响。结果表明,雨型 I 下不同植被斑块格局均可以显著降低坡面土壤侵蚀量,但不同格局对其降低的幅度也不同,具体表现为均匀分布效果最好,这与张鹏[5]对植被斑块格局影响产流产沙研究结果具有一致性。均匀分布格局较裸土坡面可显著降低产流产沙量,这主要是由于植被斑块均匀分布在坡面上,斑块连通度更好而分离度较其他植被覆盖坡面更小,对径流和泥沙的拦截作用更强。这与刘宇[33]阐明土壤侵蚀过程中产流产沙量会随着斑块分离度的增加而增大的结论一致。加之雨型 I 中景观分离度(SPLIT)系数大于景观形状指数(LSI)(表 9),说明分离度指标对产流产沙的影响更大,同时也验证了从景观格局角度定性分析的结果。雨型 II 中,减沙效益表现为均匀分布>聚集分布>随机分布,但三种植被格局的减流率并不明显(图 4),这说明当降雨超过一定范围时,坡面汇流较快,一旦超出植被斑块的拦蓄上限,就会造成比面蚀更严重的侵蚀,也侧面表明雨型 II 下,植被斑块分布格局对减流效果并不显著。雨型 III 中,从减轻径流泥沙的作用来看,表现为聚集分布>均匀分布>随机分布,这是因为雨型 III 的产流产沙量与景观形状指数(LSI)呈负相关关系,并且分离度指数(SPLIT)和景观形状指数(LSI)的系数差距不大,表明 SPLIT、LSI 共同影响着坡面的产流产沙过程,在今后的植被配置中要更加注重斑块形状的多样化和复杂化。然而,也有研究认为块状斑块镶嵌格局的阻蚀减沙效果要优于点状均匀格局[34],这是因为在研究侵蚀产沙过程中没有考虑划分具体降雨类型,加之砒砂岩地区相较于其他地区更易发生水土流失,土壤性质与入渗过程相比于黄土都有明显差异[35]。

本文着重探索了不同植被格局下分离度指数(SPLIT)和景观形状指数(LSI)与坡面产流产沙量的定量关系,并考虑了降雨因素的影响。坡面水力侵蚀过程除了降雨因素外仍受到其他不确定因素的影响,其他因素

的共同作用对坡面产流产沙过程可作为今后研究的重点方向之一。

4 结论

(1)砒砂岩区侵蚀性降雨发生在6—9月,降雨主要分为3种类型:雨型I(中历时、中雨量、小雨强)、雨型II(长历时、大雨量、大雨强)、雨型III(短历时、小雨量、中雨强),其中雨型II是导致该地区发生水土流失最主要的降雨类型。降雨量、I_{30}显著影响产流量和产沙量,相关系数达0.695以上,是预测该区域水土流失的主要降雨因子。

(2)不同植被格局的土壤侵蚀对降雨类型的响应存在差异。雨型I下,均匀分布的减流减沙效果最好,其减流减沙率分别为61.84%,62.41%;雨型II下,3种植被格局在减流减沙方面无明显差异($P>0.05$);雨型III下,聚集分布的减流减沙作用最优,减流减沙率分别为43.09%,52.29%。3种植物均能有效地减少径流量和泥沙量,且减沙作用强于减流作用。

(3)年际尺度上,不同植被格局的水土保持效应从大到小依次为均匀分布、聚集分布、随机分布,且在雨型I中效果最好,雨型III中效果最差。均匀分布格局更适用于防治降雨量<18.6mm导致的水土流失,而聚集分布更适用于18.6mm<降雨量<36.6mm导致的土壤侵蚀。

(4)不同植被格局坡面产流、产沙量和斑块分离度(SPLIT)呈显著的正相关,而景观形状指数(LSI)与产流、产沙量呈显著的负相关,相关系数为0.905。这说明,坡面尺度上植被斑块间的分离度越小,形状越复杂,坡面阻力增大,抗侵蚀能力越强。

参考文献(References):

[1] 孙若修. 晋西黄土区典型坡面草本植被格局对侵蚀产沙的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.

[2] 李学峰, 饶良懿, 徐也钦. 砒砂岩不同类型区土壤氮磷养分特征. 农业工程学报, 2022, 38(5): 139-147.

[3] 肖培青, 姚文艺, 刘慧. 砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径. 人民黄河, 2014, 36(10): 92-94, 109.

[4] 徐建华, 吴成基, 林银平, 高亚军, 左仲国, 喻权刚. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究. 水土保持学报, 2006, 20(1): 6-9, 14.

[5] 张鹏, 李龙, 李艳, 张尚轩, 朱志卓, 宋秀敏, 王立宇. 植被斑块格局对砒砂岩坡面土壤侵蚀强度的影响. 水土保持学报, 2022, 36(5): 58-65.

[6] Pajouhesh M, Gharahi N, Iranmanesh M, Cornelis W M. Effects of vegetation pattern and of biochar and powdery soil amendments on soil loss by wind in a semi-arid region. Soil Use and Management, 2020, 36(4): 704-713.

[7] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 刘静, 张铁钢, 张欣. 裸露砒砂岩区小流域植被景观空间格局与地形关系. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 133-139.

[8] 查轩, 张萍. 基于GIS的重要水源地东圳库区土壤侵蚀与景观格局分析. 水土保持学报, 2007, 21(3): 43-47.

[9] Ludwig J A, Bastin G N, Chewings V H, Eager R W, Liedloff A C. Leakiness: A new index for monitoring the health of arid and semiarid landscapes using remotely sensed vegetation cover and elevation data. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 442-454.

[10] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于"源-汇"生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.

[11] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 张铁钢, 徐国策, 高海东. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究. 生态学报, 2016, 36(18): 5691-5700.

[12] 罗佳茹, 李斌斌, 张风宝, 丛佩娟, 王海燕, 杨明义. 黄丘区特色治理开发小流域土壤侵蚀变化对景观格局演变的响应. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4165-4176.

[13] 吴志毅, 王明玖, 李志强, 陈海军. 2种方法在荒漠草原植物种群分布格局中的适用性比较. 草业科学, 2008, 25(4): 145-147.

[14] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 周正朝, 上官周平. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程. 生态学报, 2010, 30(9): 2387-2396.

[15] 苏涛, 张兴昌, 王仁君, 唐美珍. 植被覆盖对砒砂岩地区边坡侵蚀的减流减沙效益. 水土保持学报, 2015, 29(3): 98-101, 255.

[16] 杜映妮, 周怡雯, 李朝霞, 姜海, 郭忠录. 丹江口库区不同降雨类型下典型植被措施的水土保持效应. 水土保持学报, 2023, 37(2): 51-57, 66.

[17] 王玲莉, 张富, 胡彦婷, 赵秀兰, 包炳琛, 张佰林. 侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响. 人民黄河, 2021, 43(10): 109-113.

[18] 朱志卓, 李龙, 张鹏, 张尚轩, 梁艳君, 支杰, 陈燕. 水力侵蚀下砒砂岩区植被格局对微地形和侵蚀的影响. 水土保持研究, 2023, 30

(3): 10-18, 26.

[19] 励其其, 刘鸿涛, 孟岩, 韩宇, 陈建, 邱流潮. 不同降雨强度和下垫面条件对黑土区坡面产流产沙的影响. 水利水电技术, 2020, 51(5): 91-98.

[20] 边熇, 朱冰冰, 黎珩, 闫帅旗. 不同植被空间配置下的坡面产沙及泥沙连通性变化特征. 水土保持学报, 2023, 37(2): 45-50.

[21] 李龙, 秦富仓, 钱秋颖, 董晓宇, 张若曦, 张鹏. 砒砂岩区水力侵蚀下坡面微地貌变化特征及过程研究. 土壤, 2022, 54(1): 198-205.

[22] Ran Q H, Su D Y, Li P, He Z G. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. Journal of Hydrology, 2012, 424/425: 99-111.

[23] Na F. Effects of topographic factors on the plant species richness and distribution pattern of alpine meadow in source region of Lancang River, Southwest China. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11):2767-2774.

[24] Nearing M A, Yin S Q, Borrelli P, Polyakov V O. Rainfall erosivity: An historical review. Catena, 2017, 157: 357-362.

[25] 黄凯, 刘瑞禄, 覃莉, 宋涛, 刘忠仙, 李瑞. 不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响. 应用生态学报, 2021, 32(1): 271-280.

[26] 王照润. 坡度和坡长对坡面降雨径流侵蚀不平衡输沙的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

[27] 李玉亭婷, 高照良, 李永红,齐星圆,张翔.. 坡长对黄土区工程堆积体产流产沙影响的模拟试验研究. 水土保持通报, 2019, 39(4): 102-106.

[28] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河,刘宇,王帅,周继.. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, 2013, 33 (1): 12-22.

[29] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤,于洋,殷哲.. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述. 生态学报, 2017, 37 (14): 4905-4912.

[30] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟,段兴武.. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究. 生态学报, 2021, 41 (4): 1373-1380.

[31] 杨晓楠. 黄土高原多尺度景观格局对径流及输沙过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

[32] 张旭昇, 薛天柱, 马灿,魏国孝,闫业庆,胡雅杰.. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响. 干旱区资源与环境, 2012, 26 (6): 66-70.

[33] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.

[34] 王恒星, 张建军, 孙若修, 张佳楠. 晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 85-95.

[35] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓,田秀民,刘艳萍. 天然降雨条件下裸露砒砂岩区人工植被的减流减沙效应. 水土保持研究, 2022, 29 (1): 100-104,112.