

DOI: 10.5846/stxb202003290738

吉静怡, 赵允格, 杨凯, 张万涛, 王闪闪. 黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联. 生态学报, 2021, 41(4): 1381-1390.

Ji J Y, Zhao Y G, Yang K, Zhang W T, Wang S S. Correlation between runoff and sediment yield from biological soil crustal slope and its distribution patterns in the Hilly Loess Plateau Region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1381-1390.

黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联

吉静怡^{1,2}, 赵允格^{2,*}, 杨凯¹, 张万涛³, 王闪闪²

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

摘要:生物结皮在黄土丘陵区退耕地广泛发育,并在干扰等因素下形成不同分布格局。为明确生物结皮分布格局对坡面产流产沙的影响,采用模拟降雨试验研究了生物结皮条带状、棋盘状和随机 3 种分布格局对坡面产流产沙的影响,借助景观生态学方法,计算了生物结皮斑块的分布格局指数,解析了生物结皮分布格局与坡面产流产沙的关联。结果表明,(1)生物结皮分布格局显著影响坡面初始产流时间、径流率和土壤侵蚀速率。相同盖度条件下,生物结皮坡面的随机分布格局较带状和棋盘式分布格局显著降低了坡面径流量和产沙量,其径流率与土壤侵蚀速率分别是带状格局的 71.7%、12.9%,是棋盘格局的 89.6%、31.8%。(2)坡面径流率与生物结皮斑块最大斑块指数、斑块连结度呈极显著负相关,与分离度呈极显著正相关,与景观分裂指数呈显著正相关。(3)土壤侵蚀速率与生物结皮斑块最大斑块指数、斑块连结度呈显著负相关,与景观分裂指数、分离度呈显著正相关。(4)坡面径流率(Y_1)和土壤侵蚀速率(Y_2)与分离度(SPLIT, Splitting Index)的关系式为: $Y_1 = 1.116 + 0.017 \text{SPLIT}$, $R^2: 0.957$; $Y_2 = 22.767 + 17.936 \text{SPLIT}$, $R^2: 0.801$ 。(5)以上结果表明分布格局主要是通过影响生物结皮在坡面的分离度进而影响坡面产流产沙,随着生物结皮斑块分离度增大,生物结皮斑块破碎度增大,坡面产流产沙增多。从分布格局的角度解析了生物结皮对产流、产沙的影响,量化了生物结皮坡面径流率与侵蚀率与格局指数之间的关系,为量化认识生物结皮的水土保持功能提供了科学依据。

关键词:生物土壤结皮;景观指数;径流率;土壤侵蚀速率;破碎度

Correlation between runoff and sediment yield from biological soil crustal slope and its distribution patterns in the Hilly Loess Plateau Region

Ji Jingyi^{1,2}, ZHAO Yunge^{2,*}, YANG Kai¹, ZHANG Wantao³, WANG Shanshan²

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Biological soil crusts (biocrusts), which are widely distributed in the revegetated grasslands and forms various distribution patterns due to the disturbance, are a major influence factor on runoff and sediment yield in the Hilly Loess Plateau Region, China. In order to clarify the effect of biocrusts distribution patterns on the runoff and sediment yield from the slope surface, the runoff and sediments yield from three distribution patterns of biocrusts (zonation, chessboard, and random) were investigated by using the simulated rainfall experiments. In addition, the pattern index of the biocrusts patch

基金项目:国家自然科学基金项目(41830758);中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项

收稿日期:2020-03-29; **网络出版日期:**2020-12-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

was calculated by means the landscape ecology method. The association between the biocrusts distribution pattern and runoff and sediment yield on the slope was analyzed. The results showed that (1) biocrusts distribution pattern significantly affected the initial runoff time, runoff rate and soil erosion rate from the slope. Under the same coverage conditions, the random distribution of biocrusts significantly reduced the runoff and sediment yield of the slope compared to the zonal and checkerboard pattern. The runoff rate and soil erosion rate of random distribution pattern was 71.7% and 12.9% of the zonation pattern, 89.6% and 31.8% of the chessboard pattern. (2) The runoff rate on the slope surface was extremely significantly negatively correlated with the Largest Patch Index (LPI) and Patch Cohesion Index (COHESION) of biocrusts patch. It was extremely significantly positively correlated to the Splitting Index (SPLIT) and significantly positively correlated with the Landscape Division Index (DIVISION). (3) soil erosion rate was negatively correlated with the LPI and COHESION of biocrusts patch. It was positively correlated with the DIVISION and SPLIT. (4) The relationship between runoff rate (Y_1) and soil erosion rate (Y_2) and SPLIT was: $Y_1 = 1.116 + 0.017 \text{SPLIT}$, $R^2: 0.967$; $Y_2 = 22.767 + 17.936 \text{SPLIT}$, $R^2: 0.801$. (5) The results of the study showed that the distribution pattern mainly affected the separation of biocrusts on the slope surface and then affected the runoff and sediment yield. The biocrusts patch fragmentation degree and the runoff and sediment yield increased along with the increase of the biocrusts patch SPLIT. This study analyzes the effects of biocrusts on runoff and sediment yield from the perspective of the distribution pattern, quantifies the relationship between runoff rate and erosion rate and pattern index of biocrusts slopes, which provides a scientific basis for quantifying the function of biocrusts on soil and water conservation.

Key Words: biological soil crust; landscape index; runoff rate; soil erosion rate; degree of fragmentation

生物土壤结皮(简称生物结皮)自退耕还林(草)工程实施以来在黄土丘陵区广泛发育,盖度可达60%—70%,甚至更高^[1-2],具有增加土壤C、N含量^[3-6],改善土壤团聚体数量和稳定性,影响水分入渗^[7-9],增强土壤抗侵蚀性^[10-12]等重要生态功能,进而影响坡面的产流产沙。

国内外有关生物结皮对坡面产流产沙的影响做了大量研究。就坡面产流而言,部分研究认为生物结皮主要通过延长坡面初始产流时间来抑制坡面产流^[10,13-14],如肖波等^[10]采用室内培育的生物结皮在坡度5°、雨强46.8 mm/h、历时1 h的模拟降雨试验研究表明,生物结皮可减少49%—64%的径流。另一部分研究认为生物结皮促进了坡面产流^[15]。赵允格等^[12]在黄土丘陵区的研究表明,生物结皮能够增加坡面径流量。杨凯等^[16]研究发现降雨历时也是影响生物结皮坡面产流状况的因素之一,降雨历时的差异可能导致生物结皮对坡面产流的影响表现出截然相反的结果。可见,生物结皮对产流的影响与很多因素有关,目前仍存分歧。国内外关于生物结皮对土壤侵蚀的影响已取得基本一致的结论,即生物结皮能够显著增强土壤抗侵蚀性,降低坡面产沙量^[10,17]。已有研究主要从生物结皮组成、盖度及发育程度等角度研究了生物结皮对坡面产流产沙的影响^[9-11,13,17]。

干扰是自然界普遍存在的现象。研究发现,干扰会显著降低生物结皮的盖度,特别是降低苔藓、地衣类等高级演替阶段的盖度^[18-19]。自然状况下,生物结皮因干扰改变的不仅只有盖度和组成,也会影响其分布格局^[20]。已有研究表明,高等植被的分布格局会影响坡面产流产沙^[21-22],而生物结皮与高等植被在形态上存在较大差异,生物结皮的分布格局是否会影响坡面产流产沙迄今鲜见研究。且有关生物结皮的分布格局主要以定性描述为主,缺乏定量表征,导致各类侵蚀产沙模型中通常缺少反映生物结皮及生物结皮格局影响的量化参数,未能深入揭示导致变化的作用机制。在景观生态学中,景观格局指数常用于定量描述景观格局与生态过程^[23-24]。如刘宇^[25]利用景观指数有效评价了景观格局与土壤侵蚀的有效性。Da Silva^[26]使用格局指数分析了坡面小区尺度土壤侵蚀过程,然而可否定量描述生物结皮斑块的分布特征仍是一个有待解决的问题。

为此,本文以人工填装土槽上自然演替的生物结皮坡面为对象,通过人为调整模拟自然条件下生物结皮的常见的分布格局,借用景观生态学方法,计算其景观格局指数,通过室内模拟降雨试验,研究了生物结皮分布格局对坡面产流产沙的影响,进而利用景观生态学数量方法解析生物结皮分布格局与坡面产流产沙的关

系,以期进一步深化生物结皮水土保持机理研究,为干旱半干旱地区生物结皮影响下的水土资源调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验于 2019 年 10 月在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行,该区喷头位置距地面 14.5 m,水喷出后向上喷高 1.5 m,随后向地面降落,实际降雨高度为 16 m,降雨均匀度大于 80%。模拟降雨雨滴的分布、大小及终点速度接近天然降雨。

在 2008 年自制移动变坡式土槽 12 个,尺寸规格为:长×宽×高=2.0 m×1.0 m×0.5 m,以陕西省安塞县坡耕地表层(0—20 cm)土壤填装土槽,控制土壤容重约 1.25 g/cm³,分层填装,每层厚度 10 cm,边装边压实,在填装下一土层前将表土打毛以消除不同层次间的垂直层理,土槽填土完成后,将表土整平使其与槽底平行,保证试验条件的一致性。填土总高度为 40 cm。填装完成后放置,使生物结皮自然发育演替。土槽生物结皮以藻、藓结皮混合存在,呈镶嵌式分布。供试土槽土壤基本理化属性见表 1。

表 1 供试土槽基本理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of test soil

有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	pH	土壤颗粒组成 Soil particles composition/%				
				<0.002 mm	0.002— 0.005 mm	0.005— 0.02 mm	0.02— 0.05 mm	> 0.05 mm
3.51	0.49	0.45	8.96	9.7	3.3	15.4	37.6	34.0

1.2 试验设计

试验开始前剪除土槽内植物地上部并扫除枯落物。将生物结皮坡面分布格局设置为带状格局(生物结皮宽度:裸土宽度=12:8 cm)、棋盘状格局(生物结皮、裸土长宽均为 20 cm)、随机分布格局,控制生物结皮盖度 60% 左右(图 1),将裸土区域去除表层生物结皮后重新填装土样并压实。试验设雨强 90 mm/h,降雨历时

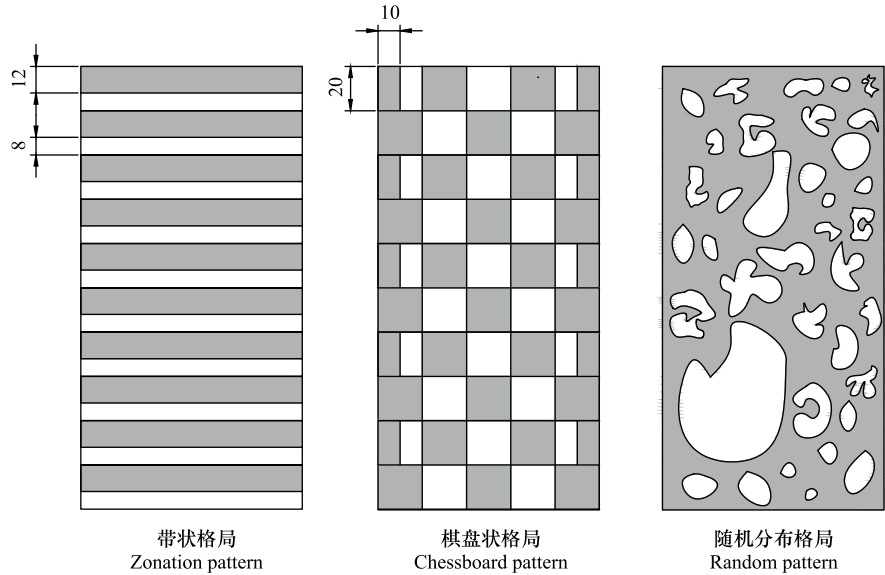


图 1 生物结皮分布格局图

Fig. 1 Distribution pattern of biocrusts

灰色部分为生物结皮,白色部分为裸土

30 min,以去除生物结皮的裸土土槽作对照,每个处理重复3次。试验开始前率定雨强与设定雨强误差小于 $\pm 5\%$ 。在试验前,我们采用时域反射法(TDR,time domain reflectometry)监测土槽土壤含水量,土壤含水量不足或超过 $(0.16 \pm 0.01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,采用喷水或晾晒的方法调整土槽含水量保持一致。土槽坡度选取黄土高原常见的退耕坡度 15° ,生物结皮盖度及组成见表2。

表2 不同格局生物结皮小区基本特征

Table 2 Characteristics of biocrusts in different patterns

格局 Pattern	生物结皮盖度 Biocrusts coverage/%	藻结皮盖度 Cyanobacteria coverage/%	藓结皮盖度 Moss coverage/%	土壤表面糙度 Roughness of soil surface/%
裸土 Bare soil	—	—	—	0.5 ± 0.1
带状 Zonation	56.6 ± 3.4	23.1 ± 4.5	33.5 ± 3.3	2.2 ± 0.0
棋盘 Chessboard	57.7 ± 1.0	2.9 ± 1.1	54.8 ± 1.3	3.1 ± 0.3
随机 Random	58.8 ± 3.7	30.5 ± 1.7	28.3 ± 2.1	4.3 ± 0.4

1.3 观测指标及方法

1) 供试土槽生物结皮盖度及组成

于降雨试验前用25点样方法(样方 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$)调查供试土槽生物结皮盖度(生物结皮盖度=藻盖度+藓盖度,生物结皮盖度+裸土盖度=100%)。均匀测定土槽上中下部分的生物结皮盖度,取同一处理下3个土槽的生物结皮盖度均值作为该处理条件下生物结皮的盖度值。

2) 供试土槽表面粗糙度:降雨试验前采用链条法^[27]测定坡面糙度值(表2)。

3) 初始产流时间:自模拟降雨开始时计时,记录土槽出水口有径流流出的时间。

4) 径流率和土壤侵蚀速率

坡面产流后每隔3 min收集1次水样。降雨结束后,用量筒测定径流量,并把底层泥沙冲入铝盒,放置在 105°C 烘箱烘24 h后称重,径流率和土壤侵蚀速率^[28]计算公式分别为:

$$R = r \cdot s^{-1} \cdot t^{-1} \quad (1)$$

$$E = m \cdot s^{-1} \cdot t^{-1} \quad (2)$$

式中, R 为径流率(mm/min); E 为土壤侵蚀速率($\text{g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); r 为接样时间 t 内收集的径流量(L); m 为接样时间 t 内产沙量(g),由径流泥沙样烘干后称重确定; s 为小区面积(m^2); t 为接样时间(min)。

5) 生物结皮坡面格局指数

用相机在距地面2 m处平行于土槽拍照。在ArcGIS 10.2软件平台进行目视解译分类,将生物结皮斑块空间分布矢量化。利用Fragstats 4.2进行格局指数计算(本研究主要计算生物结皮斑块及藻、藓结皮斑块格局指数,指数计算公式及意义见表3),在类型水平上选取斑块密度(PD,Patch Density)、最大斑块指数(LPI,Landscape Patch Index)、景观形状指数(LSI,Landscape Shape Index)、斑块连结度(COHESION,Patch Cohesion Index)、景观破碎度(DIVISION,Landscape Division Index)、分离度(SPLIT,Splitting Index)从斑块的数量、形状、大小和破碎度方面反映格局特征变化。

1.4 数据处理

采用SPSS 18.0对不同格局的生物结皮坡面与裸土坡面的初始产流时间、径流率、土壤侵蚀速率分别进行正态分布检验和ANOVA方差分析、LSD多重比较($\alpha=0.05$),用R语言对径流率、土壤侵蚀速率分别与生物结皮斑块及藻、藓结皮斑块密度、最大斑块指数、景观形状指数、斑块连结度、景观分裂指数、分离度指数进行Pearson双尾相关分析($\alpha=0.05,0.01$)、多元线性回归分析。用Origin 8.1进行图形绘制,图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

表 3 景观指数描述
Table 3 Landscape index description

景观类型格局指数 Landscape type pattern index	计算公式 Calculation formula	公式描述及生态学意义 Formula description and Ecological significance
斑块密度 PD	$PD = \frac{N}{A}$	N 表示某一类型的斑块总数, A 表示类型总面积。 PD 经常被用来描述整个景观的异质性
最大斑块指数 LPI	$LPI = \frac{\text{Max}(a_1, \cdots a_n)}{A} \cdot 100$	某一斑块类型中最大斑块占据整个景观面积的比例。其值的大小有助于确定景观的优势类型,决定着景观中的优势种、内部种的丰度等生态特征
景观形状指数 LSI	$LSI = 0.25 \frac{E}{\sqrt{A}}$	$LSI \geq 1$, E 表示基于像元计算的景观边缘总长度, LSI 值越大,说明景观的边界长度越大,景观形状越不规则。斑块的形状对生物的扩散及物质能量的迁移具有重要影响
斑块连结度 COHESION	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{i=1}^n p_j \sqrt{a_i}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1}$	p_i 为斑块 j 在该类型的周长, a_j 指景观斑块 j 的面积。 $COHESION$ 反映同一景观类型在空间上的结构联系特征,它与同类斑块之间的距离、廊道存在与否有关。
景观分裂指数 DIVISION	$DIVISION = 1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j}{A} \right)^2$	A 表示类型总面积, a_j 指景观斑块 j 的面积, n 为该类型的斑块总数。其值的大小反映景观类型的分散程度,可以在一定程度上表征人类活动的干扰强度
分离度指数 SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{j=1}^n a_j^2}$	$SPLIT$ 取值越大,说明景观斑块破碎化越严重,景观越复杂

PD: Patch Density; LPI: Landscape Patch Index; LSI: Landscape Shape Index; COHESION: Patch Cohesion Index; DIVISION: Landscape Division Index; SPLIT: Splitting Index

2 结果与分析

2.1 生物结皮坡面分布格局景观特征分析

不同格局下生物结皮斑块及藻、藓结皮斑块格局指数见表 4、5。由表 4 可以看出,不同格局下生物结皮斑块在最大斑块指数、景观形状指数、斑块连结度、景观分裂指数及分离度等指标上均有差异。3 种格局下的生物结皮斑块密度无显著差异。随机格局生物结皮最大斑块指数显著高于棋盘和带状格局,棋盘格局生物结皮最大斑块指数显著高于带状格局,斑块连结度变化趋势与之相似。随机格局生物结皮斑块景观形状指数显著高于带状和棋盘状格局,带状和棋盘格局间无显著差异,随机格局的生物结皮斑块景观形状指数分别是带状和棋盘格局的 2.81 倍和 3.06 倍。生物结皮斑块景观分裂指数与分离度变化规律相同,均表现为带状>棋盘>随机。带状和棋盘格局的生物结皮斑块景观分裂指数是随机格局的 1.83 倍和 1.74 倍。带状格局的生物结皮斑块分离度是棋盘格局的 2.32 倍,是随机格局的 13.45 倍;棋盘格局是随机格局的 5.80 倍。

考虑到不同类型的生物结皮水土保持功能存在差异,为此进一步将生物结皮斑块划分为藻、藓结皮斑块。不同格局下藻、藓结皮斑块在斑块密度、最大斑块指数、景观形状指数、斑块连结度、景观分裂指数和分离度上均有差异(表 5)。随机格局藻结皮斑块密度显著高于棋盘格局,带状格局在二者之间。随机格局藻结皮最大斑块指数显著高于带状和棋盘格局,分别是它们的 10.40 倍和 181.27 倍,带状和棋盘格局间无显著差异。藻结皮斑块景观形状指数表现为:随机>带状>棋盘。斑块连结度表现为:随机>棋盘>带状。景观分裂指数和分离度表现趋势相同,均为带状和棋盘格局显著高于随机格局,且带状和棋盘间无显著差异。

带状格局藓结皮斑块密度显著高于棋盘格局,随机格局位于二者之间。棋盘格局藓结皮最大斑块指数显著高于带状和随机格局,分别是它们的 6.29 倍和 3.55 倍。带状和随机格局藓结皮斑块景观形状指数显著高于棋盘格局,分别是棋盘格局的 1.52 倍和 1.65 倍,但二者间无显著差异,景观分裂指数变化趋势与之相似。

棋盘格局斑块连结度显著高于带状格局,随机格局位于二者之间。3 种格局下藓结皮斑块分离度无显著差异。

表 4 不同格局生物结皮斑块格局指数

Table 4 Pattern index of biocrusts in different patterns

格局 Pattern	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	景观形状指数 LSI	斑块连结度 COHESION	景观分裂指数 DIVISION	分离度 SPLIT
带状 Zonation	5.00±0.00a	6.32±0.08c	5.83±0.09b	99.78±0.00c	0.97±0.00a	28.92±1.14a
棋盘 Chessboard	5.50±0.29a	20.88±1.41b	5.36±0.03b	99.85±0.00b	0.92±0.01b	12.46±0.84b
随机 Random	4.67±0.33a	58.26±0.07a	16.39±2.02a	99.99±0.00a	0.53±0.00c	2.15±0.00c

不同小写字母代表不同格局间差异显著 ($P < 0.05$)

表 5 不同格局藻、藓结皮斑块格局指数

Table 5 Pattern index of cyanobacteria and moss crusts in different patterns

格局 Pattern	结皮类型 Crust type	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	景观形状指数 LSI	斑块连结度 COHESION	景观分裂指数 DIVISION	分离度 SPLIT
带状 Zonation	藻	28.76±6.06AB	4.53±0.81B	13.89±1.51B	99.58±0.08C	0.99±0.00A	10.08±2.15A
	藓	27.67±5.45a	2.98±0.73b	9.59±0.70a	99.16±0.16b	1.00±0.00a	20.89±4.82a
棋盘 Chessboard	藻	8.33±1.09B	0.26±0.08B	5.64±0.35C	97.99±0.16B	1.00±0.00A	14.55±1.41A
	藓	7.67±0.60b	18.73±1.53a	6.31±0.09b	99.84±0.01a	0.93±0.01b	11.32±0.18a
随机 Random	藻	45.33±14.89A	47.13±5.65A	22.50±1.66A	99.95±0.01A	0.77±0.05B	2.19±0.27B
	藓	25.67±7.37ab	5.27±2.31b	10.46±1.06a	99.27±0.29ab	0.99±0.00a	22.07±10.9a

不同大写字母代表不同格局间藻结皮差异显著 ($P < 0.05$);不同小写字母代表不同格局间藓结皮差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 生物结皮分布格局对坡面初始产流时间的影响

坡面初始产流时间是影响降雨径流过程及大小的主要因素^[29],生物结皮分布格局对坡面初始产流时间的影响见图 2。由图 2 可以看出,不同格局下的生物结皮坡面初始产流时间存在差异。随机、带状格局下,生物结皮坡面初始产流时间均显著高于裸土坡面,分别是裸土坡面的 2.46 倍和 1.78 倍。棋盘格局与裸土坡面相比,初始产流时间无显著差异。随机格局生物结皮坡面初始产流时间显著高于带状格局和棋盘格局,分别是带状和棋盘格局的 1.38 倍和 1.55 倍,带状和棋盘格局间无显著差异。

2.3 生物结皮分布格局对坡面径流率、土壤侵蚀速率的影响

不同格局生物结皮坡面的径流率和土壤侵蚀速率变化见图 3。格局显著影响生物结皮坡面径流率。棋盘、随机格局坡面较裸土坡面分别降低 21.0% 和 30.0% 的径流率,差异显著 ($P < 0.05$)。带状格局坡面径流率与裸土坡面无显著差异,且带状格局径流率显著高于棋盘和随机格局,分别是它们的 1.25 倍和 1.39 倍。棋盘格局径流率显著高于随机格局,是它的 1.12 倍。

从整体来看,3 种格局的生物结皮坡面较裸土坡面均显著降低土壤侵蚀速率,分别降低了 37.7%、74.8% 和 92.0%。带状格局的生物结皮坡面土壤侵蚀速率显著高于棋盘、随机格局,分别是它们的 2.47 倍和 7.76 倍。棋盘格局与随机格局间无显著差异。

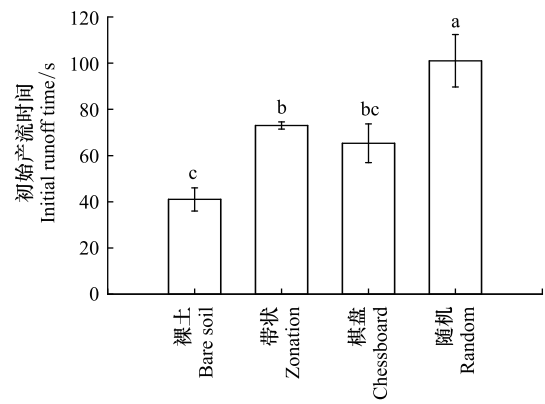


图 2 生物结皮分布格局对坡面初始产流时间的影响

Fig. 2 Effect biocrusts distribution patterns on the initial runoff time

不同小写字母代表不同格局间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 生物结皮斑块类型格局指数对坡面径流率、土壤侵蚀速率的影响

通过 Fragstats 计算得出不同格局下生物结皮斑块及藻、藓斑块格局指数(表4、5)。选取与生物结皮坡面格局相关的6个指数与坡面径流率、土壤侵蚀速率进行相关分析(图4)可以发现:径流率、土壤侵蚀速率与生物结皮斑块密度、景观形状指数无显著相关性;与斑块连结度呈极显著负相关($P<0.01$);与景观分裂指数呈显著正相关;与分离度呈极显著正相关($P<0.01$)。最大斑块指数与径流率呈极显著负相关($P<0.01$),与土壤侵蚀速率呈显著负相关。径流率、土壤侵蚀速率与藻、藓结皮斑块格局指数间均无显著相关性(图4)。

对以上生物结皮斑块的6个格局指数分别与径流率(Y_1)和土壤侵蚀速率(Y_2)进行多元逐步回归。结果均仅剩分离度一个因子,其模型的相关系数 R 和决定系数 R^2 分别为0.978、0.957和0.895、0.801,剩余因子

分别为 $e = \sqrt{1 - R^2} = 0.2073$, $e = \sqrt{1 - R^2} = 0.4461$ 。径流率的剩余因子值较小,表明分离度对径流率的作用影响较大。土壤侵蚀速率的剩余因子值较大,表明分离度对土壤侵蚀速率的作用有限,仍有其他因子在影响土壤侵蚀速率。通过回归分析可得线性回归方程为:

$$Y_1 = 1.116 + 0.017 \text{SPLIT} \quad (R^2 = 0.957, P < 0.01)$$

$$Y_2 = 22.767 + 17.936 \text{SPLIT} \quad (R^2 = 0.801, P < 0.01)$$

3 讨论

生物结皮是干旱半干旱地区广泛发育的地被物,显著影响土壤侵蚀及水文过程^[17,30]。同时,位于地表的生物结皮,对放牧、翻耕、人为踩踏及火烧等干扰极为敏感^[31-32]。干扰不仅导致生物结皮盖度的降低^[18-19],也会导致生物结皮在坡面形成不同的分布格局,如在我国西北地区,常见的有放牧踩踏后留下的羊道(带状)、人工造林形成的鱼鳞状分布(斑块状),以及许多不明原因干扰形成的无规律随机分布等不同分布格局。研究表明植被分布格局是坡面产流产沙的重要影响因素^[33-34],因此,格局可能是除盖度外生物结皮对坡面产流产沙的重要影响因素。迄今,鲜有研究关注生物结皮的分布格局与其水土保持功能之间的关系。为此,我们采用填装土槽上自然发育的生物结皮,通过人为调整将生物结皮设为带状、棋盘状和随机分布格局,通过模拟降雨试验研究生物结皮的分布格局对坡面产流产沙的影响。结果表明,不同格局的生物结皮坡面均可显著降低坡面土壤侵蚀速率,但不同格局的降低幅度不同,具体表现为带状>棋盘>随机,这与沈中原^[35]和李强等^[36]对高等植被格局影响产流产沙的研究结果具有一致性。不同格局之间,除带状格局外,棋盘、随机格局较裸土坡面均可显著降低径流率,这主要是由于带状格局的生物结皮斑块和裸土斑块完全分隔开,斑块破碎度大,对径流和泥沙的拦截作用较弱。即生物结皮会降低坡面产流产沙量,且格局是影响生物结皮坡面产流产沙的因素之一。不同格局的生物结皮坡面对初始产流时间、径流率、土壤侵蚀速率的影响主要与生物结皮斑块破碎度和连通度有关(图4)。3种格局主要是通过增加径流路径长度,增加入渗,减缓流速来减少径流和增强生物结皮对坡面的减沙作用。

生物结皮类型的分布格局也是生物结皮格局的重要部分之一,但在本研究中藻、藓结皮斑块格局指数与径流率、土壤侵蚀速率均无显著相关性(图4),说明生物结皮类型(藻、藓)的景观格局特征可能不是影响本研究中径流和土壤侵蚀的主要因素。其原因可能是因为本研究的雨强为90 mm/h,该雨强条件下,藻、藓结皮

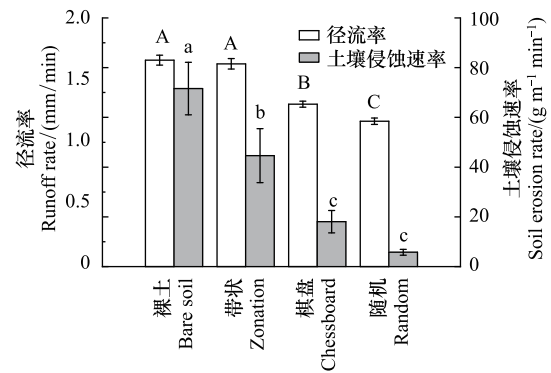


图3 不同生物结皮分布格局对坡面径流率、土壤侵蚀速率的影响

Fig. 3 Effects of different biocrusts distribution patterns on slope runoff rate and soil erosion rate

不同大写字母表示不同格局下坡面径流率差异显著($P < 0.05$);小写字母则是不同格局间土壤侵蚀速率差异显著($P < 0.05$)

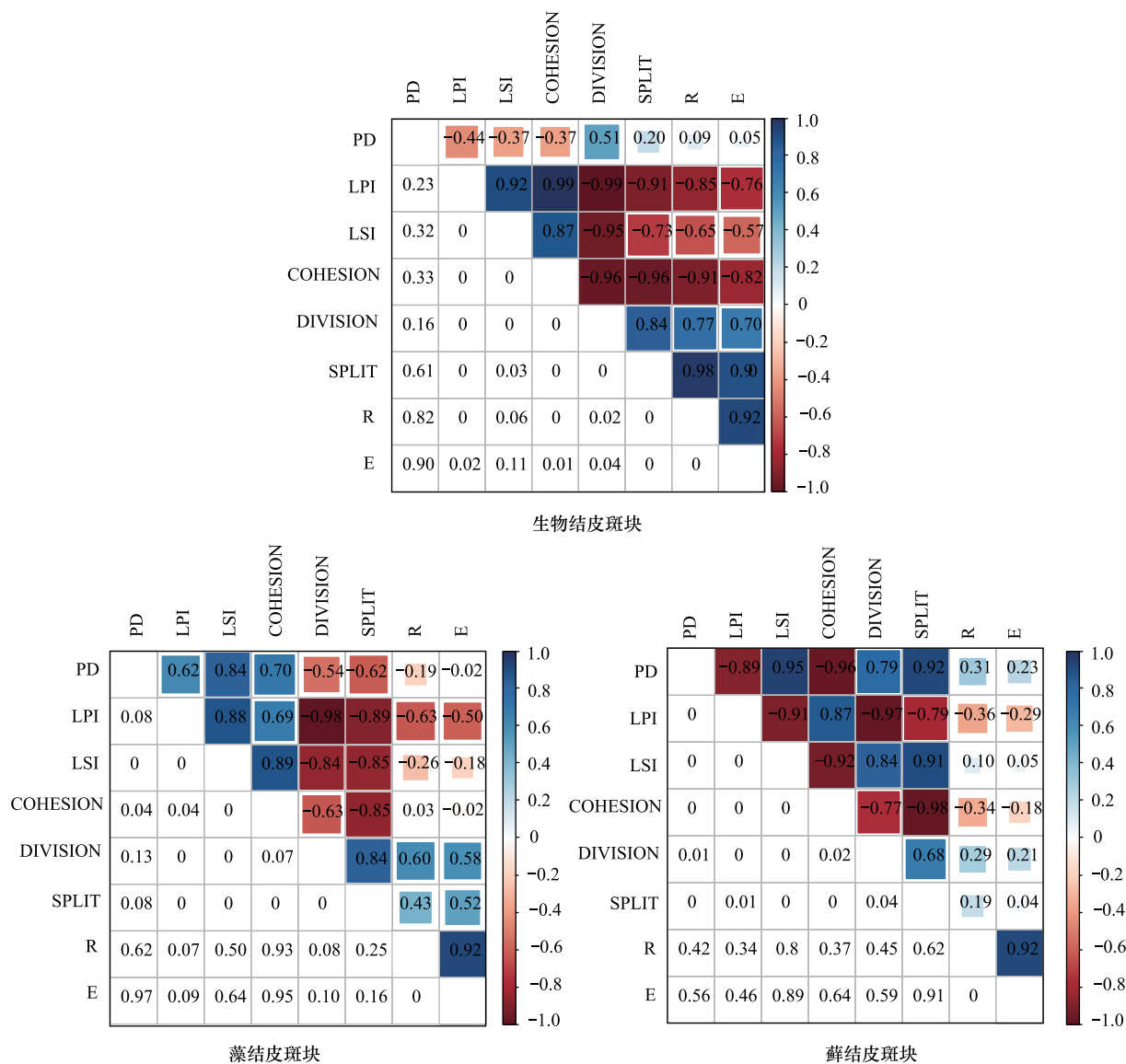


图4 生物结皮斑块类型格局指数与径流量、土壤侵蚀速率相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of pattern index of biocrusts patch types with runoff rate and soil erosion rate

PD: 斑块密度; LPI: 最大斑块指数; LSI: 景观形状指数; COHESION: 斑块连结度; DIVISION: 景观分裂指数; SPLIT: 分离度; R: 径流量; E: 土壤侵蚀速率; 图中左下部分为 P 值, 右上部分为相关系数

的格局对产流产沙的影响不显著^[37], 是否如此, 仍有待进一步研究。

通过景观格局指数量化生物结皮斑块的分布格局研究其与径流量、土壤侵蚀速率的关系发现, 径流量、土壤侵蚀速率与生物结皮斑块最大斑块指数、斑块连结度、景观分裂指数、分离度有显著相关性(图4)。但经过多元逐步回归分析后, 径流量和土壤侵蚀速率都仅剩分离度一个因子。原因可能是景观格局指数间存在冗余现象^[38-39], 经逐步回归后留下了贡献率最高的因子。分离度对径流量和土壤侵蚀速率的回归方程 R^2 分别为 0.957 和 0.801, 说明分离度对径流的解释度较高, 对泥沙的解释度较低。由于各指标间的互相作用和共线性导致对解析格局对坡面产流产沙的影响存在限制, 想要明确其影响方式及程度仍需大量研究。尽管本研究中选取的部分景观指数间存在共线性, 但分析发现斑块连结度、分离度、景观分裂指数主要是描述斑块破碎状况的指数, 表明生物结皮的破碎状况是生物结皮分布格局对坡面产流产沙的主要影响因素。值得指出的是, 目前在应用景观指数描述景观结构、对景观过程进行生态学解释时, 许多景观指数只是单纯的数理统计或拓扑

计算公式^[40],结合本文的研究对象发现生物结皮作为景观生态系统的一部分,格局是景观的结构,由于生物结皮斑块破碎度的变化,可能导致坡面水流路径和泥沙通道发生了改变,进而影响了生物结皮的水土保持功能。斑块连结度越大,生物结皮的连接度越好,对径流和泥沙的抵抗能力越强;景观分裂指数、分离度越大,生物结皮斑块破碎度越大,对径流和泥沙的抵抗能力越弱,即生物结皮斑块破碎程度越大,坡面径流泥沙越多(图4)。这与刘宇等^[40]总结土壤侵蚀过程的特征变量(产流、产沙)会随植被斑块的破碎化而增大结论一致。

本文从分布格局角度解析了坡面尺度生物结皮水土保持功能,明确了生物结皮的分布格局对坡面尺度水土保持效应影响,确定了坡面产流产沙与其相关的景观指数间的量化关系,为构建有生物结皮的土壤侵蚀预报模型提供了数据参考,有关流域乃至区域尺度生物结皮的空间分布格局对其水土保持功能的影响仍有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 赵允格,许明祥,王全九,邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.
- [2] 王一贺,赵允格,李林,高丽倩,胡忠旭. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局. 生态学报, 2016, 36(2): 377-386.
- [3] 吴楠,张元明,王红玲,张静,陈荣毅,聂华丽. 古尔班通古特沙漠生物结皮固氮活性. 生态学报, 2007, 27(9): 3785-3793.
- [4] 高丽倩,赵允格,许明祥,孙会,杨巧云. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2018, 38(2): 678-688.
- [5] Zhao Y, Xu M, Belnap J. Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1186-1191.
- [6] 李云飞,都军,张雪,谢婷,李小军. 腾格里沙漠东南缘不同类型生物土壤结皮对土壤有机碳矿化的影响. 生态学报, 2020, 40(5): 1580-1589.
- [7] Xiao B, Wang Q H, Zhao Y G, Shao M A. Artificial culture of biological soil crusts and its effects on overland flow and infiltration under simulated rainfall. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(1): 11-17.
- [8] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3159-3178.
- [9] 刘翔,周宏飞,刘昊,朱海. 不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟. 生态学报, 2016, 36(18): 5820-5826.
- [10] 肖波,赵允格,邵明安. 黄土高原侵蚀区生物结皮的人工培育及其水土保持效应. 草地学报, 2008, 16(1): 28-33.
- [11] Belnap J, Wilcox B P, Van Scoyoc M W, Phillips S L. Successional stage of biological soil crusts: an accurate indicator of ecohydrological condition. *Ecohydrology*, 2013, 6(3): 474-482.
- [12] Zhao Y G, Xu M X. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the Hilly Loess Plateau Region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(4): 387-393.
- [13] 李林,赵允格,王一贺,王媛. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [14] 石亚芳,赵允格,李晨辉,王闪闪,杨巧云,谢申琦. 踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3227-3234.
- [15] Wu Y S, Hasi E, Wugtemole, Wu X. Characteristics of surface runoff in a sandy area in southern Mu Us sandy land. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(2): 272-277.
- [16] 杨凯,赵军,赵允格,张子辉,孙会,谷康民,郭雅丽,王闪闪. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征. 农业工程学报, 2019, 35(23): 135-141.
- [17] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Román J R, Cantón Y. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. *CATENA*, 2017, 148: 117-125.
- [18] Belnap J, Eldridge D J. Disturbance and recovery of biological soil crusts // Belnap J, Lange OL, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer, 2003: 363-383.
- [19] 梁少民,吴楠,王红玲,聂华丽,张元明. 干扰对生物土壤结皮及其理化性质的影响. 干旱区地理, 2005, 28(6): 818-823.
- [20] 张朋. 陕北小流域坡面尺度生物结皮空间分布特征及其影响因子与建模[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [21] 李强,李占斌,尤洋,穆军,游珍. 植被格局对坡面产流产沙影响的试验研究. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 31-34.
- [22] 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. 水土保持学报, 2014, 28(4): 55-59, 109-109.
- [23] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42-52.
- [24] 傅伯杰,徐延达,吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681.
- [25] 刘宇. 景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性. 生态学报, 2017, 37(15): 4923-4935.
- [26] Da Silva A M, Huang C H, Francesconi W, Saintil T, Villegas J. Using landscape metrics to analyze micro-scale soil erosion processes. *Ecological*

- Indicators, 2015, 56: 184-193.
- [27] 王媛, 赵允格, 姚春竹, 张培培. 黄土丘陵区生物土壤结皮表面糙度特征及影响因素. 应用生态学报, 2014, 25(3): 647-656.
- [28] 王占礼, 黄新会, 张振国, 牛振华, 田风霞. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究. 水土保持通报, 2005, 25(4): 1-4.
- [29] 余长洪, 李就好, 陈凯, 姜俊红, 黄志豪. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究. 水土保持学报, 2015, 29(2): 7-10, 54-54.
- [30] Liu F, Zhang G H, Sun L, Wang H. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(7): 875-883.
- [31] Lalley J S, Viles H A. Do vehicle track disturbances affect the productivity of soil-growing lichens in a fog desert? Functional Ecology, 2006, 20(3): 548-556.
- [32] Cortina J, Martín N, Maestre F T, Bautista S. Disturbance of the biological soil crusts and performance of *Stipa tenacissima* in a semi-arid Mediterranean steppe. Plant and Soil, 2010, 334(1/2): 311-322.
- [33] 丁文峰, 李勉. 不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的实验. 地理研究, 2010, 29(10): 1870-1878.
- [34] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响. 水土保持通报, 2006, 26(6): 28-31.
- [35] 沈中原. 坡面植被格局对水土流失影响的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [36] 李强, 李占斌, 鲁克新, 游珍. 黄土丘陵区不同植被格局产流产沙试验研究. 中国农村水利水电, 2008, (4): 100-102, 104-104.
- [37] 谢申琦, 高丽倩, 赵允格, 郭玥微. 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应. 应用生态学报, 2019, 30(2): 391-397.
- [38] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 问青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应. 生态学报, 2004, 24(1): 123-134.
- [39] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红仕. 景观指数之间的相关分析. 生态学报, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [40] 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.