

# 生物结皮分布格局对坡面流水动力特征的影响

吉静怡<sup>1,2</sup> 赵允格<sup>2,3\*</sup> 杨凯<sup>1,2</sup> 张万涛<sup>2,4</sup> 高丽倩<sup>2</sup> 明姣<sup>3</sup> 王闪闪<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>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, 陕西杨凌 712100; <sup>4</sup>西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 生物结皮的分布格局是影响坡面产流产沙的因素之一,但其格局对侵蚀动力的影响机理尚不明确,妨碍了进一步解析生物结皮影响坡面产流产沙的机制。本研究通过室内模拟降雨试验,采用景观生态学方法,对带状、棋盘和随机3种分布格局下生物结皮坡面景观指数和水力学参数的变化规律与裸土坡面进行对比研究。结果表明:生物结皮显著影响坡面侵蚀动力,其分布格局是影响坡面侵蚀动力的因素之一。与裸土相比,生物结皮显著降低了坡面流速(54.6%)和弗劳德数(67.0%),显著增加了径流深(86.2%)和阻力系数(10.68倍),但对雷诺数和径流功率的影响较小;除径流深外,3种格局的生物结皮坡面的各水力学参数均存在显著差异,其中,随机格局对坡面侵蚀动力的影响最大。基于因子分析和聚类分析,筛选出斑块占景观面积比例、斑块密度、景观形状指数、斑块连结度和分离度5个指标作为描述生物结皮斑块分布特征的指标。其中,生物结皮斑块间的斑块连结度和分离度是影响坡面侵蚀动力的主要格局因子。随着生物结皮斑块间斑块连结度减小、分离度增大,坡面流速增加,阻力减小,坡面侵蚀加剧。

**关键词** 生物土壤结皮; 径流; 景观指数; 破碎度; 连通性

**Effects of the distribution of biological soil crust on the hydrodynamic characteristics of surface runoff.** JI Jing-yi<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun-ge<sup>2,3\*</sup>, YANG Kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Wan-tao<sup>2,4</sup>, GAO Li-qian<sup>2</sup>, MING Jiao<sup>3</sup>, WANG Shan-shan<sup>3</sup> (<sup>1</sup>College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>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 Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>4</sup>College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** The distribution pattern of biological soil crusts (biocrusts) is one of the main factors affecting runoff and sediment yield. The relationship between runoff and sediment yield and biocrusts' distribution pattern is not clear, which hinders understanding the mechanism underlying the effects of biocrusts on runoff and sediment from slopes. To fill the knowledge gap, we investigated the relationship between the landscape indices of three biocrusts' distribution patterns, *i.e.* zonation, chessboard and random, and the hydraulic parameters, using of simulated rainfall experiments and landscape ecology methods. The results showed that biocrust significantly affected the erosion force of slopes and that its distribution pattern could affect slope erosion dynamics. Compared to bare soil, the presence of biocrusts significantly reduced the runoff velocity (54.6%) and Froude number (67.0%), increased the runoff depth (86.2%) and Darcy-Weisbach resistance coefficient (10.68 times), but did not affect the Reynolds number and runoff power. Expect for the runoff depth, there

本文由国家自然科学基金重点项目(41830758)和中国科学院“西部之光”交叉团队-重点实验室合作研究专项(2019年入选)资助 This work was supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (41830758) and the Interdisciplinary Key Laboratory Cooperation Research Project of “West Light” of the Chinese Academy of Sciences (Funded in 2019).

2020-10-22 Received, 2020-12-27 Accepted.

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

were significant differences in the hydraulic parameters of the three biocrusts' distribution patterns, with the random pattern having the strongest impacts on the dynamics of slope erosion. Based on factor analysis and cluster analysis, five indices of percentage of patch to landscape area, patch density, landscape shape index, patch cohesion and splitting could be used as the indicators for the distribution characteristics of biocrust patches. The patch cohesion and splitting of biocrust patches were the main distribution pattern indices of the hydrodynamics of surface runoff. As the patches patch cohesion decreased, the splitting increased, which caused the surface runoff velocity increase, the resistance decrease, and the slope erosion became more severe.

**Key words:** biological soil crust; surface runoff; landscape index; degree of fragmentation; connectivity.

坡面流指在降雨强度或流量超过地面入渗能力的情况下,水流沿坡面顺坡方向上在重力作用下扣除下渗、填洼等水分损失后的浅层明流<sup>[1]</sup>,是土壤侵蚀的主要驱动力<sup>[2]</sup>。国内外学者常选用径流流型流态、水流功率和能量等作为主要的水动力学参数<sup>[3-4]</sup>,通过这些参数的变化明确坡面流发生的临界条件、坡面流随流量和坡度的变化规律等<sup>[5-7]</sup>。这对于明确坡面土壤侵蚀机理具有重要的科学意义。

生物土壤结皮(简称生物结皮)是干旱、半干旱区普遍存在的地被物<sup>[8-9]</sup>,显著影响土壤水分入渗<sup>[8]</sup>、改变地表粗糙度<sup>[10]</sup>、改善土壤团聚体和稳定性、增强土壤抗侵蚀能力<sup>[11]</sup>,在降低土壤水蚀方面扮演着重要角色。有研究发现,生物结皮可显著影响坡面流速和径流深,进而影响坡面侵蚀动力,影响程度与生物结皮类型密切相关<sup>[12]</sup>。同时,随着生物结皮形成、发育及盖度的增加,在减缓径流流速、削弱径流功率的同时<sup>[13]</sup>,增强了坡面抗侵蚀能力<sup>[14]</sup>,影响程度与其盖度、类型有关。在自然情况下,生物结皮不仅有盖度的差异,通常受气候、干扰等外因造成其分布格局的差异。常见的如因放牧、人为挖掘及与植被镶嵌分布等导致生物结皮在坡面上形成网状、格子状或条带状分布格局,进而影响坡面径流和侵蚀过程。近期,吉静怡等<sup>[15]</sup>研究证实,生物结皮对坡面产流的影响与其分布格局有关,不同格局的生物结皮坡面产流、产沙差异显著,即生物结皮的分布格局也是影响坡面侵蚀的重要因子之一。但已有研究主要关注了生物结皮类型和盖度,对生物结皮分布格局对坡面侵蚀动力的影响研究较少,个别已有研究亦多以定性描述为主。如张元明等<sup>[16]</sup>和卜崇峰等<sup>[17]</sup>分别通过遥感影像和地面调查得出不同区域生物结皮盖度的空间特征及其影响因子。但该研究缺乏生物结皮分布格局的定量表征,对土壤侵蚀的动力学机制与生物结皮格局的关系分析不足。

为揭示生物结皮分布格局对坡面产流产沙影响的动力学机制,本研究以带状、棋盘、随机 3 种分布格局的生物结皮坡面为对象,通过因子分析和聚类分析,筛选出描述生物结皮斑块分布特征的景观指数。在此基础上,明确了生物结皮斑块的景观格局指数与水力学参数的关系,为揭示生物结皮侵蚀动力机理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件

试验于 2019 年 10 月采用填装土槽在中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行,采用侧喷式人工降雨装置,降雨高度 16 m,降雨均匀度大于 80%,使模拟降雨可以成功代替自然降雨的雨滴直径和分布。土槽规格为:长×宽×高=2.0 m×1.0 m×0.5 m,填装土壤采集于陕西安塞县(36°30'45"—37°19'31" N,108°51'44"—109°26'18" E)坡耕地表层(0~20 cm)。填装时每 10 cm 为 1 层分层填装,控制土壤容重 1.25 g·m<sup>-3</sup>左右,保持土壤结构的均匀性和连续性。初始填装为 2008 年,表面有自然发育的生物结皮,土槽藻结皮以微藻为主,藓结皮以扭口藓属(*Barbula*)和对齿藓属(*Didymodon*)为主。

### 1.2 试验设计

试验开始前剪除槽子内植物地上部并清除枯落物,分别布设 3 种黄土区常见的分布格局:带状格局(横向生物结皮:裸土宽度=12 cm:8 cm)、棋盘状格局(生物结皮和裸土斑块长、宽均为 20 cm)、随机分布格局。各处理控制生物结皮盖度约 60%,将去除生物结皮的裸土区域填装土样并压实。试验雨强为 90 mm·h<sup>-1</sup>,降雨历时 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。在试验前,采用时域反射仪(time domain reflectometry, TDR)监测土槽 20 cm 的土壤含水量,采用喷水或晾晒的方法调整土槽土壤含水量至(0.16±0.01)

$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。土槽坡度选取黄土高原常见的退耕地坡度  $15^\circ$ 。降雨产流后每隔 3 min 用高锰酸钾示踪法测定并记录水流通过土槽中段 (0.5~1.5 m) 的时间, 每个时间段分别于坡面左、中、右共测 3 次, 测量过程从坡面产流稳定开始直至降雨结束。供试土壤基本理化性质为: 有机质  $3.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 8.96, 黏粒含量 9.7%, 粉粒含量 18.7%, 砂粒含量 71.6%。土槽生物结皮分布状况见表 1。

### 1.3 研究方法

试验前于距地面 2 m 处垂直供试土槽拍照 (分辨率  $6000 \times 4000$ ), 用 ArcGIS 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 软件计算生物结皮斑块景观指数, 包括斑块水平的 14 个景观指数: 斑块占景观面积比例 (PLA)、斑块数量 (NP)、斑块密度 (PD)、最大斑块指数 (LPI)、总边缘长度 (TE)、边缘密度 (ED)、景观形状指数 (LSI)、丛生度 (CLU)、相似近邻比例 (PLA)、景观分裂指数 (DIV)、斑块连结点 (COH)、有效粒度面积 (MES)、分离度 (SPL)、聚集度 (AI), 其计算公式与生态学意义见文献 [18-19]。前期研究发现, 生物结皮类型 (藻、藓) 的分布特征与产流产沙无显著相关 [15], 因此, 本研究主要关注生物结皮整体的分布特征。

用流速 ( $V$ )、径流深 ( $h$ )、雷诺数 ( $Re$ )、弗劳德数 ( $Fr$ )、Darcy-Weisbach 阻力系数 ( $f$ )、径流功率 ( $\omega$ ) 表示坡面径流水力学参数 [4]。计算公式如下:

$$V = kV_m \quad (1)$$

$$Re = Vh/\gamma \quad (2)$$

$$h = q/V = Q/VBt \quad (3)$$

$$Fr = V/\sqrt{gh} \quad (4)$$

$$f = 8gRJ/V^2 \quad (5)$$

$$\omega = p \cdot g \cdot J \cdot h \cdot V \quad (6)$$

表 1 不同分布格局生物结皮坡面的基本特征  
Table 1 Characteristics of biocrust slope with different distribution patterns

类型 Type	生物结皮盖度 Biocrusts coverage (%)	藻结皮盖度 Cyanobacteria crust coverage (%)	藓结皮盖度 Moss crust coverage (%)	土壤表面糙度 Roughness of soil surface (%)
I	-	-	-	0.5±0.1
II	56.6±3.4	23.1±4.5	33.5±3.3	2.2±0.0
III	57.7±1.0	2.9±1.1	54.8±1.3	3.1±0.3
IV	58.8±3.7	30.5±1.7	28.3±2.1	4.3±0.4

I: 裸土 Bare soil; II: 带状 Zonation; III: 棋盘 Chessboard; IV: 随机 Random. 不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

式中:  $V$  为平均流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $V_m$  为实测流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $k$  为校正系数;  $h$  为径流深 (m);  $\gamma$  为水流的运动粘滞系数 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $q$  为单宽流量 ( $\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ );  $t$  为径流取样间隔时间 (min);  $Q$  为研究时段的径流总量 ( $\text{m}^3$ );  $B$  为过水断面宽度 (m);  $g$  为重力加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $J$  为坡度的正切值。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件进行正态分布检验和 ANOVA 方差分析、LSD 多重比较 ( $\alpha = 0.05$ )、因子分析、聚类分析、多元逐步线性回归分析, 采用 R 语言进行 Pearson 单尾相关性分析 ( $\alpha = 0.05$ )。采用 Origin 和 R 语言绘制图形, 图表中数据均为平均值 ± 标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同分布格局的生物结皮坡面水力学参数变化特征

2.1.1 流速 由图 1 可以看出, 研究区裸土坡面的平均流速为  $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 显著高于生物结皮坡面, 随降雨时间呈波动增长 (图 2)。带状、棋盘和随机格局平均流速分别为  $0.05$ 、 $0.04$ 、 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 较裸土坡面流速分别减少 44.0%、55.6% 和 66.7%。随降雨时间延长, 3 种格局的生物结皮坡面流速均有增长趋势, 但整个降雨过程中随机格局流速均小于带状和棋盘格局, 带状格局流速始终最大 (图 2)。

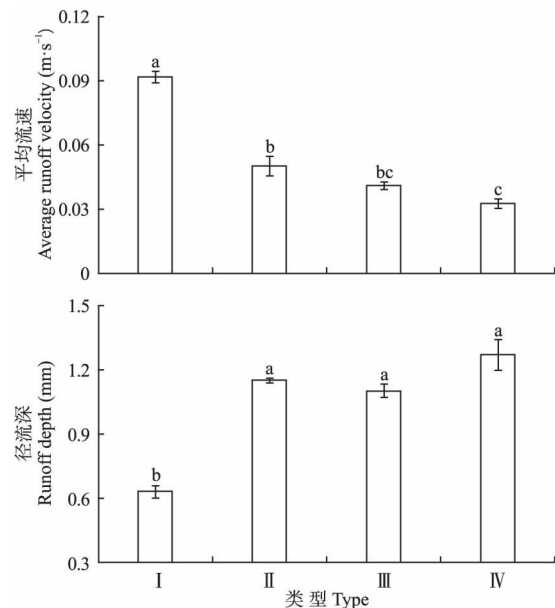


图 1 不同生物结皮分布格局坡面平均径流流速和径流深  
Fig.1 Average runoff velocity and depth under different biocrusts' distribution patterns.

I: 裸土 Bare soil; II: 带状 Zonation; III: 棋盘 Chessboard; IV: 随机 Random. 下同 The same below. 不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters meant significant difference at 0.05 level.

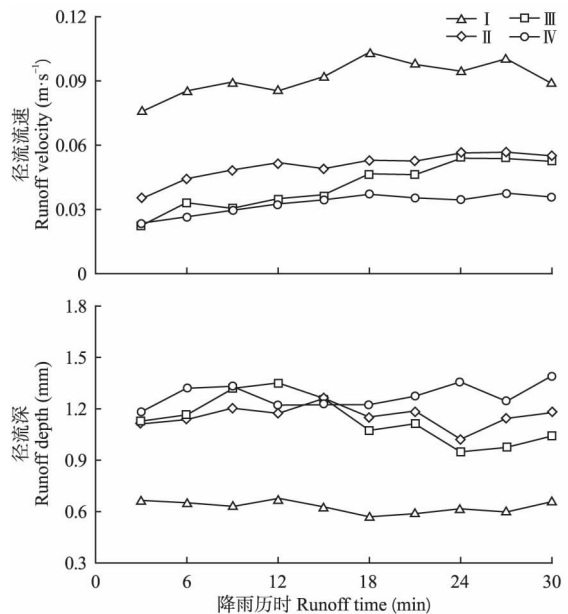


图2 不同生物结皮分布格局坡面径流流速和径流深随降雨历时的变化

Fig.2 Dynamics of runoff velocity and depth under different biocrusts' distribution patterns.

**2.1.2 径流深** 研究区裸土坡面径流深平均值为0.63 mm,显著低于有生物结皮覆盖的坡面。带状、棋盘和随机格局较裸土坡面径流深分别增加1.82、1.74和2.0倍,但3种格局间无显著差异(图1)。带状、随机格局和裸土坡面径流深随降雨时间延长呈波浪状变化,增加和减小趋势不显著,但棋盘状格局有减小趋势(图2)。

**2.1.3 雷诺数、弗劳德数、阻力系数和径流功率** 雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)、Darcy-Weisbach 阻力系数( $f$ )及径流功率( $\omega$ )是反映水流流型流态、阻力特征的主要指标。由表2可以看出,不同坡面Re值表现为:带状>裸土>棋盘>随机,各坡面Re值均<500,属于层流。裸土坡面Fr值显著高于生物结皮坡面,且生物结皮坡面Fr<1,属于缓流,裸土坡面Fr>1,属于急流。除带状格局外,棋盘和随机格局的生物结皮坡面阻力系数显著高于裸土坡面,带状、棋

表2 不同生物结皮分布格局坡面水力学参数特征  
Table 2 Characteristics of hydraulic parameters on slopes with different biocrusts' distribution patterns

类型 Type	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	阻力系数 $f$	径流功率 $\omega$
I	44.56±1.07b	1.18±0.07a	1.53±0.16c	0.15±0.00a
II	48.77±1.26a	0.48±0.07b	10.06±2.39bc	0.15±0.01a
III	38.52±0.71c	0.40±0.02bc	13.48±1.48b	0.14±0.00a
IV	34.22±0.74d	0.29±0.03c	25.48±4.87a	0.10±0.00b

盘和随机格局阻力系数分别是裸土坡面的6.57、8.81和16.65倍。随机格局的径流功率显著低于带状、棋盘格局和裸土坡面,但带状、棋盘格局与裸土间无显著差异。

## 2.2 生物结皮坡面景观指数筛选及分类

由于描述景观格局有大量指数可供选择,因此本研究采用因子分析和聚类分析对生物结皮斑块景观指数进行分类及筛选。斑块占景观面积比例(PLA)、斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、丛生度(CLU)、相似近邻比例(PLA)、斑块连结度(COH)、聚集度(AI)属于低变异水平;最大斑块指数(LPI)、总边缘长度(TE)、边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)、景观分裂指数(DIV)、分离度(SPL)属于中等变异水平;有效粒度面积(MES)属于高变异水平(表3)。将14个指数进行因子分析,因子载荷矩阵反映了公因子对景观指数的解释程度(表4)。前2个公因子的特征根均达到1以上,且累计贡献率达90.4%,表明这2个公因子能够阐释原始数据大部分内容。通过分析因子载荷大小,第一公因子在LPI、TE、ED、LSI、CLU、COH、DIV、MES、SPL、AI上有较大载荷。这一类因子主要描述生物结皮斑块形状及破碎状况。第二公因子在PLA、NP和PD上有较大载荷。这一类因子主要是描述生物结皮斑块盖度和数量。

表3 生物结皮景观指数数据概况

Table 3 Characteristics of biocrust landscape index ( $n=9$ )

景观指数 Landscape index	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
PLA	49.80	66.00	57.69	4.56	0.08
NP	8.00	12.00	10.11	1.05	0.10
PD	4.00	6.00	5.06	0.53	0.10
LPI	6.18	58.30	27.38	21.72	0.79
TE	183.73	823.49	374.13	268.94	0.72
ED	91.86	411.75	187.06	134.48	0.72
LSI	5.32	18.84	9.19	5.68	0.62
CLU	0.95	0.99	0.98	0.02	0.02
PLA	98.39	99.52	99.19	0.47	0.00
COH	99.77	99.99	99.87	0.09	0.00
DIV	0.53	0.97	0.81	0.21	0.26
MES	6.43	93.48	38.78	41.02	1.06
SPL	2.14	31.09	14.51	11.76	0.81
AI	98.47	99.61	99.28	0.47	0.00

PLA: 斑块占景观面积比例 Percentage of patch to landscape area; NP: 斑块数量 Number of patch; PD: 斑块密度 Patch density; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; TE: 总边缘长度 Total edge length; ED: 边缘密度 Edge density; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; CLU: 丛生度 Clumpiness; PLA: 相似近邻比例 Proportion of like adjacency; COH: 斑块连结度 Patch COH; DIV: 景观分裂指数 Landscape DIV index; MES: 有效粒度面积 Effective MES size; SPL: 分离度 Splitting; AI: 聚集度 Aggregation index. 下同 The same below.

表 4 生物结皮景观指数因子分析结果

Table 4 Factor analysis results of biocrust landscape index

项目 Item	旋转后的因子载荷矩阵 Factor loading matrix after rotation	
	F1	F2
特征根 Eigenvalue	10.700	1.961
贡献率 Contribution rate (%)	76.4	13.9
累计贡献率 Accumulative contribution rate (%)	76.4	90.4
PLA	0.257	0.647
NP	-0.466	0.849
PD	-0.466	0.849
LPI	0.969	0.083
TE	0.979	0.074
ED	0.979	0.074
LSI	0.978	0.092
CLU	-0.982	-0.088
PLA	-0.975	-0.094
COH	0.944	0.042
DIV	-0.990	0.070
MES	0.990	-0.070
SPL	-0.819	-0.168
AI	-0.976	-0.093

聚类分析发现,14 个景观指数可分为 5 类: 第 1 类为 PLA,反映斑块的盖度;第 2 类有 LPI、MES、COH,反映斑块的连通度;第 3 类有 TE、ED、LSI,主要反映斑块的形状和长度;第 4 类有 NP 和 PD,反映斑块的数目;第 5 类有 PLA、AI、CLU、DIV、SPL,主要反映斑块的破碎度(图 3)。结合指数生态学意义,选取 PLA、PD、LSI、COH 和 SPL 描述坡面生物结皮斑块分布特征(表 5)。

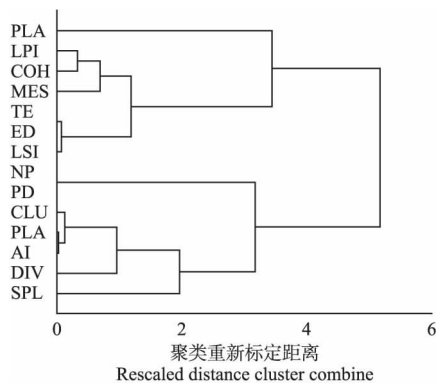


图 3 生物结皮景观指数聚类树状图

Fig.3 Cluster dendrogram of biocrust landscape indices.

PLA: 斑块占景观面积比例 Percentage of patch to landscape area; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; COH: 斑块连通度 Patch COH; MES: 有效粒度面积 Effective MES size; TE: 总边缘长度 Total edge length; ED: 边缘密度 Edge density; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; NP: 斑块数量 Number of patch; PD: 斑块密度 Patch density; CLU: 丛生度 Clumpiness; PLA: 相似近邻比例 Proportion of like adjacency; AI: 聚集度 Aggregation index; DIV: 景观分裂指数 Landscape DIV index; SPL: 分离度 Splting. 下同 The same below.

表 5 不同格局生物结皮坡面的景观格局指数

Table 5 Landscape pattern index of different biocrusts' distribution patterns

类型 Type	PLA	PD	LSI	COH	SPL
II	56.60±3.40a	5.00±0.00a	5.83±0.15b	99.79±0.00c	28.92±1.98a
III	57.68±0.98a	5.50±0.58a	5.36±-0.05b	99.85±0.01b	12.46±1.45b
IV	58.79±3.75a	4.67±0.50a	16.39±3.51a	99.99±0.00a	2.15±0.00c

2.3 生物结皮景观指数与水力学参数的关系

2.3.1 生物结皮景观指数与水力学参数的相关性

相关分析结果表明,径流深与各景观指数均无显著相关;流速与斑块连通度呈显著负相关关系,与分离度呈显著正相关关系;雷诺数、弗劳德数、径流功率与景观形状指数和斑块连通度呈负相关关系,与分离度呈正相关关系;阻力系数与景观形状指数和斑块连通度呈正相关关系,与分离度呈负相关关系(图 4)。

2.3.2 水力学参数与景观指数的量化关系 选取筛选出的 5 个景观指数作为自变量,分别与流速、雷诺数、弗劳德数、阻力系数和径流功率进行多元逐步线性回归。由表 6 可以看出,流速、弗劳德数、阻力系

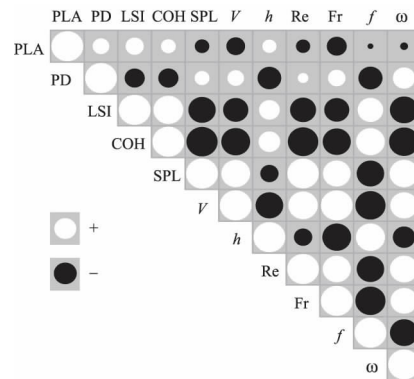


图 4 生物结皮景观指数与坡面水力学参数的相关分析

Fig.4 Correlation analysis of biocrust landscape index and hydraulic parameters.

+: 正相关 Positive correlation; -: 负相关 Negative correlation. 圆圈大小代表相关程度 The size of the circle represented the degree of correlation.

表 6 坡面水力学参数与生物结皮景观指数的回归方程

Table 6 Regression equations of hydraulic parameters and biocrust landscape index

水力学参数 Hydraulic parameter	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level
流速 $V$	$Y_v = 8.123 - 0.081COH$	0.663	0.01
雷诺数 $Re$	$Y_{Re} = 40.503 + 6.491SPL$	0.961	0.01
弗劳德数 $Fr$	$Y_{Fr} = 0.389 - 0.079COH$	0.586	0.05
阻力系数 $f$	$Y_f = 16.338 + 6.879COH$	0.649	0.01
径流功率 $\omega$	$Y_\omega = 0.129 - 0.020COH$	0.789	0.01

数和径流功率的主要影响因子为斑块连结度,  $R^2$  分别为 0.663、0.586、0.649 和 0.789; 影响雷诺数的主要因子是生物结皮斑块的分离度,  $R^2$  为 0.961。

### 3 讨 论

坡面水力侵蚀的发生取决于坡面降雨及径流侵蚀力与地表土壤自身抵抗能力之间的关系<sup>[20]</sup>。有研究表明,生物结皮的覆盖作用会增强土壤的抗侵蚀性<sup>[21]</sup>,影响侵蚀动力<sup>[12]</sup>。但坡面侵蚀动力不仅受生物结皮盖度和类型的影响<sup>[12-14]</sup>,同时与其分布格局也密切相关<sup>[15]</sup>。本研究结果表明,与裸土坡面相比,生物结皮显著降低流速,增加了径流深;生物结皮分布格局显著影响坡面流速,相同盖度下,不同格局间生物结皮的坡面流速差异显著,但径流深差异不显著。这可能与径流深是采用公式  $h = q/V$ <sup>[13]</sup> 计算的衍生变量有关。

本研究结果表明,供试坡面的雷诺数(Re) 主要分布在 34~49 之间,均处于层流范畴。生物结皮坡面的弗劳德数(Fr) 小于裸土坡面。根据河流动力学原理,Fr 反映径流的流态,其值越大,径流挟沙能力越强<sup>[22]</sup>。这表明生物结皮显著降低了径流流态,与杨凯等<sup>[23]</sup>得到的结论一致。Darcy-Weisbach 阻力系数( $f$ ) 反映了径流在流动过程中所受阻力的大小,其值越大,说明水流克服坡面阻力所消耗的能量越多,用于坡面侵蚀和泥沙输送的能量就越小<sup>[22]</sup>。本研究中,除带状格局外,棋盘和随机格局生物结皮坡面的  $f$  均显著高于裸土坡面,随机格局的径流功率( $\omega$ ) 显著低于其他坡面。可能是因为带状格局的生物结皮和裸土斑块完全分离,使坡面对径流、泥沙的拦截作用较弱;棋盘格局中生物结皮和裸土斑块交错分布,且生物结皮斑块边长(20 cm) 大于带状格局(12 cm),拦截作用强于带状格局;随机格局生物结皮斑块分布无规律,对径流、泥沙的拦截作用最强。不同格局的生物结皮坡面对水力学参数的影响程度不同。这与对植被不同组合配置的研究结果相同<sup>[24-25]</sup>。进一步通过多元逐步线性回归分析发现,生物结皮斑块连结度(COH) 和分离度(SPL) 是方程中的主要因子。这可能与景观指数的共线性有关<sup>[19]</sup>,但更重要的原因可能在于 COH 和 SPL 贡献度大于其他指数。结合景观指数的生态学意义,COH 和 SPL 同为描述斑块破碎度的指数,且 COH 越大,SPL 越小,斑块破碎度越小。而径流动力参数如 Re、Fr、 $\omega$  越小, $f$  越大(图 6)。生物结皮斑块破碎度会改变水流的连通路程和水沙的传输阻力,从

而影响坡面的水文连通性和水沙输移过程<sup>[22,25]</sup>。综上所述,生物结皮的分布格局主要通过其斑块破碎度影响径流流速,进而影响其他水力学参数。

地表径流是造成水土流失的主导因子。揭示坡面流体力学特性的变化规律是阐明坡面侵蚀产沙过程,建立坡面产汇流、土壤流失模型的基础。生物结皮作为黄土高原退耕地常见的地被物,是该区退耕后水土流失不可忽略的影响因子。有研究表明,生物结皮的盖度和分布格局是影响退耕地坡面径流及土壤侵蚀的关键因素<sup>[14-15]</sup>。目前,关于其盖度、类型等对调节地表水文过程已有不少研究,而有关其分布格局对水文、侵蚀影响的研究还未被广泛重视,生物结皮分布格局对水土流失的影响和机理研究薄弱。本研究结果表明,生物结皮的分布格局主要通过其破碎度影响坡面侵蚀动力。而破碎度是生物结皮分布格局影响坡面侵蚀产沙的关键因子。以上结果为进一步解析黄土高原退耕还林(草)工程的水土保持效益奠定了科学基础,可为考虑生物结皮的坡面产汇流及土壤流失模型提供科学依据。

### 4 结 论

生物结皮是影响坡面侵蚀动力的地被物之一。与裸土相比,生物结皮显著降低了坡面流速(54.6%) 和弗劳德数(67.0%),显著增加了径流深(86.2%) 和阻力系数(10.68 倍),而对雷诺数和径流功率影响较小。格局是影响生物结皮坡面侵蚀动力的因素之一,带状、棋盘和随机格局的生物结皮坡面在除径流深外的其他水力学参数上均有显著差异。3 种格局中,随机格局对坡面侵蚀动力的影响最大。基于因子分析和聚类分析,筛选出斑块占景观面积比例、斑块密度、景观形状指数、斑块连结度和分离度 5 个指标,可较全面地描述生物结皮斑块分布特征。其中,斑块连结度和分离度是影响坡面侵蚀动力的主要格局因子。斑块连结度越小(分离度越大),生物结皮斑块破碎度越大,坡面径流流速越快,阻力越小,坡面侵蚀越剧烈。

### 参考文献

- [1] Horton RE, Htrata T. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1955, **37**: 257-262
- [2] Morgan RPC. Soil erosion and conservation. *Earth Science Reviews*, 1995, **24**: 68-69
- [3] Foster GR, Meyer LD, Onstad CA. An erosion equation

- derived from basic erosion principles. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 1977, **20**: 678-682
- [4] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究. 泥沙研究, 1999(1): 3-5 [Zhang K-L. Hydrodynamic characteristics of rill flow on loess slopes. *Journal of Sediment Research*, 1999(1): 3-5]
- [5] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究. 泥沙研究, 1996(1): 74-82 [Yao W-Y. Experiment study on hydraulic resistance laws of overland sheet flow. *Journal of Sediment Research*, 1996(1): 74-82]
- [6] 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究. 地理学报, 1999, **54**(4): 3-5 [Hu S-X, Jin C-X. Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion. *Acta Geographica Sinica*, 1999, **54**(4): 3-5]
- [7] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, **37**(1): 9-15 [Zhang K-L, Tang K-L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(1): 9-15]
- [8] 张培培, 赵允格, 王媛, 等. 黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 657-663 [Zhang P-P, Zhao Y-G, Wang Y, et al. Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(3): 657-663]
- [9] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 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 [Zhao Y-G, Xu M-X, Wang Q-J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2006, **21**(3): 441-448]
- [10] 王媛, 赵允格, 姚春竹, 等. 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 [Wang Y, Zhao Y-G, Yao C-Z, et al. Surface roughness characteristics of biological soil crusts and its influencing factors in the hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(3): 647-656]
- [11] 杨凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳性. 应用生态学报, 2012, **23**(1): 173-177 [Yang K, Zhao Y-G, Ma X-X. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(1): 173-177]
- [12] 李林, 赵允格, 王一贺, 等. 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 [Li L, Zhao Y-G, Wang Y-H, et al. Impact of different types of biological soil crusts on slope runoff generation. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(6): 1013-1023]
- [13] 秦宁强, 赵允格. 生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用. 应用生态学报, 2011, **22**(9): 2259-2264 [Qin N-Q, Zhao Y-G. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(9): 2259-2264]
- [14] 冉茂勇, 赵允格, 刘玉兰. 黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究. 中国水土保持, 2011(12): 43-45 [Ran M-Y, Zhao Y-G, Liu Y-L. Soil anti-scour ability of biological soil crust with different coverage in Loess Hilly Region. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(12): 43-45]
- [15] 吉静怡, 赵允格, 杨凯, 等. 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): 1-10 [Ji J-Y, Zhao Y-G, Yang K, et al. 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): 1-10]
- [16] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征. 地理学报, 2005, **60**(1): 53-60 [Zhang Y-M, Chen J, Wang X-Q, et al. The distribution patterns of biological soil crust in Gurbantunggut Desert. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60**(1): 53-60]
- [17] 卜崇峰, 张朋, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的空间特征及其影响因子. 自然资源学报, 2014, **29**(3): 490-499 [Bu C-F, Zhang P, Ye J, et al. Spatial characteristics of moss-dominated soil crust and its impact factors in small watershed in Wind-Water Erosion Crisscross Region, Northern Shaanxi Province, China. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(3): 490-499]
- [18] 郎建国. 景观生态学-格局、过程、尺度与等级(第2版). 北京: 高等教育出版社, 2007 [Wu J-G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy* (2nd edition). Beijing: Higher Education Press, 2007]
- [19] 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 [Liu Y, Lyu Y-H, Fu B-J. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(1): 267-275]
- [20] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展. 地理科学, 2003, **23**(2): 230-235 [Zheng F-L, Gao X-T. Research progresses in hillslope soil erosion processes. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, **23**(2): 230-235]
- [21] 高丽倩. 黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究. 博士论文. 北京: 中国科学院大学, 2017 [Gao L-Q. Effects and the Mechanism of Biological Soil Crusts on Water Erosion Prevention on the Loess Plateau. PhD Thesis. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2017]
- [22] 赵明, 杨晓楠, 陈攀宇, 等. 灌木斑块格局对产流及

- 产沙过程的影响. *应用生态学报*, 2020, **31**(3): 735-743 [Zhao M, Yang X-N, Chen P-Y, *et al.* Effect of shrub patch pattern on runoff and sediment yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 735-743]
- [23] 杨凯, 赵军, 赵允格, 等. 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 [Yang K, Zhao J, Zhao Y-G, *et al.* Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(23): 135-141]
- [24] 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 [Zhang G-H, Liu G-B, Yi L. Effects of vegetation patterns on overland flow resistance. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(4): 55-59]
- [25] 马勇勇, 李占斌, 任宗萍, 等. 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响. *农业工程学报*, 2018, **34**(8): 170-176 [Ma Y-Y, Li Z-B, Ren Z-P, *et al.* Effect of different positions of grass strips on hydrological connectivity in slope-gully system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(8): 170-176]

---

**作者简介** 吉静怡, 女, 1996年生, 硕士研究生。主要从事生物结皮的生态功能研究。E-mail: Jjingyi123@163.com

**责任编辑** 杨弘

---

---

吉静怡, 赵允格, 杨凯, 等. 生物结皮分布格局对坡面流水动力特征的影响. *应用生态学报*, 2021, **32**(3): 1015-1022  
Ji J-Y, Zhao Y-G, Yang K, *et al.* Effects of the distribution of biological soil crust on the hydrodynamic characteristics of surface runoff. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(3): 1015-1022