

# 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应

谢申琦<sup>1,2</sup> 高丽倩<sup>1,2</sup> 赵允格<sup>2,3\*</sup> 郭玥微<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资环学院, 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)

**摘要** 生物结皮是黄土丘陵区退耕地广泛存在的地被物.本研究通过人工模拟降雨试验分析了雨强对生物结皮坡面产流产沙的影响.结果表明:生物结皮坡面产流产沙随降雨历时的延长先增加、10~18 min 趋于平稳.相对于裸土坡面,生物结皮显著延长了坡面初始产流时间,抑制了坡面产流产沙,可降低21%~78%的坡面径流量和77%~95%的产沙量.雨强主要通过影响生物结皮坡面径流而影响其产沙.随着雨强的增加,生物结皮坡面产流产沙与雨强的相关性出现了由不显著相关向显著相关的转折,雨强 $>1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,生物结皮坡面的减流减沙作用随着雨强的增加而降低.本研究结果为降雨条件下生物结皮坡面产流产沙过程的模型模拟奠定了基础.

**关键词** 生物结皮; 雨强; 初始产流时间; 径流模数; 土壤侵蚀模数

**Responses of runoff and soil loss from biological soil crustal slope to rainfall intensity under simulated rainfall.** XIE Shen-qi<sup>1,2</sup>, GAO Li-qian<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun-ge<sup>2,3\*</sup>, GUO Yue-wei<sup>1,2</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 Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** Biological soil crust (biocrust) is a common surface cover on the rehabilitated slope land in Hill Loess Plateau. We investigated the responses of runoff and soil loss from biological soil crustal slope to rainfall intensity by using simulated rainfall trial. The results showed that the runoff and soil loss from biocrust slopes increased sharply at the beginning stage of rainfall and then became stable during 10 to 18 min. Compared to bare soil slope, the initial runoff generation time of biological soil crustal slope was significantly increased. The presence of biocrust could significantly decrease runoff and sediment by 21%–78% and 77%–95%, respectively. Rainfall intensities affected soil erosion of biocrust slopes mainly via affecting runoff. The transition from insignificant to significant correlation between runoff and soil loss from biological soil crustal slopes and rainfall intensities was observed with the increases of rainfall intensities. Once the rainfall intensity was higher than  $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , there was a significant decrease in the function of biocrust to decrease runoff and soil loss with the increases of rainfall intensities. Our results laid the foundation for the model simulation of runoff and soil loss from biocrust slopes under rainfall conditions.

**Key words:** biological soil crust; rainfall intensity; initial runoff generation time; runoff modulus; soil erosion modulus.

退耕还林(草)工程实施以来,生物土壤结皮(简称生物结皮)在黄土丘陵区退耕地上广泛发育,平均盖度可达 60%~70%<sup>[1]</sup>,具有改善土壤质地、增加土壤碳氮等养分含量、改善土壤团聚体数量及稳定性、影响水分入渗和蒸发<sup>[2-4]</sup>、增强土壤抗侵蚀性<sup>[5-7]</sup>等多项重要的生态功能。

增强土壤抗侵蚀性是生物结皮重要的生态功能之一,受到国内外相关研究的广泛关注并展开了大量研究.目前,有关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<sup>[6]</sup>.在黄土丘陵区,有关生物结皮对坡面产流的影响仍存争议,有研究认为生物结皮抑制了坡面产流<sup>[7-10]</sup>,如肖波等<sup>[6]</sup>采用室内培育的生物结皮在坡度 5°、雨强 46.8 mm·h<sup>-1</sup>、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,该研究认为生物结皮主要是通过延长坡面的初始产流时间而降低坡面产流量.也有研究认为生物结皮促进了坡面产流<sup>[11]</sup>,如倪含斌等<sup>[12]</sup>研究发现,神东矿区生物结皮覆盖度越大,其径流量越大,其中,60%覆盖度的生物结皮区径流量比无生物结皮区增加 130%;Zhao 等<sup>[5]</sup>采用放水试验研究了藻结皮和藓结皮对坡面产流的影响,也发现生物结皮较无结皮坡面增加了 10%~15%的径流<sup>[13]</sup>.已有研究主要从生物结皮组成、盖度及发育程度等不同角度,以单一、固定的雨强研究了生物结皮对坡面产流产沙的影响。

降雨是坡面产流产沙的驱动因子,其强度显著影响坡面产流产沙量,坡面产流产沙对雨强的响应是降雨侵蚀重要的研究内容.但目前有关雨强对坡面产流产沙的影响均针对无生物结皮的坡面展开,研究表明坡面产流产沙均与雨强密切相关.通常,坡面初始产流时间随雨强的增加而减小,径流速率随降雨时间先减小后增大,而后趋于稳定<sup>[14]</sup>.在黄土区,雨强对裸土坡面径流量的影响远大于坡长和坡度因子<sup>[15]</sup>.黄土丘陵区 7—9 月的短时间暴雨事件多发频发,具有较强的土壤侵蚀性,并且雨强大小具有较强的随机性,生物结皮作为其普遍存在的地被物,一方面显著增加了坡面土壤抗侵蚀性,同时显著

改变了土壤表面的糙度、浸润性及渗透性等特性<sup>[13,16]</sup>,使其显著不同于裸土,导致坡面产流产沙过程及其对雨强的响应可能不同于裸土.然而,目前鲜有研究关注生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应,可能是生物结皮对坡面径流影响认识产生分歧的主要原因,妨碍了人们对生物结皮在黄土丘陵区退耕地抗侵蚀作用的科学认识。

本研究以人工填充土槽上自然演替 9 年的生物结皮坡面为研究对象,采用室内模拟降雨试验,以除去生物结皮的裸土为对照,研究了 0.83、1.17、1.50、2.00 和 2.50 mm·min<sup>-1</sup> 5 个雨强对生物结皮坡面产流产沙的影响,分析生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应,以期进一步明确生物结皮对坡面水土流失的影响及机理。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验于 2017 年 7 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侧喷区进行.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%.试验雨强条件下,雨滴大小处于 0.36~3.11 mm,降落到地面的雨滴均已达到雨滴终点速度<sup>[17]</sup>。

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 0~20 cm 的表层黄绵土[钙质干润锥形土,土壤质地为砂质壤土(国际标准)]为基质土壤,分层填装.每层厚度 10 cm,边装边压实,保证土壤容重在 1.2 g·cm<sup>-3</sup>左右,在填装下一土层之前将表土打毛,以消除不同层次之间的垂直层理.土槽填土结束后,将表土面整平使之与槽底平行,以保证试验条件的一致性.填土总高度 40 cm.填装结束后,生物结皮在土表自然发育,至本研究开展时,生物结皮已发育 9 年.土槽藓结皮以扭口藓属(*Barbula* spp.)和对齿藓属(*Didymodon* spp.)为主<sup>[18]</sup>,藻以微藻形成的浅色藻为主,藓、藻结皮镶嵌式分布.供试土槽土壤的基本理化属性见表 1,生物结皮盖度及发育特征见表 2。

表 1 供试土壤的理化性质  
Table 1 Chemical and physical properties of test soil

有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> )	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
4.75	0.49	0.45	8.56	9.7	3.3	15.4	37.6	34.0

表 2 供试土壤生物结皮的盖度、类型和糙度  
Table 2 Characteristics of biocrusts coverage, composition and roughness (mean±SE)

雨强 Rainfall intensity (mm·min <sup>-1</sup> )	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 (%)
0.83	75.9±5.7	54.8±3.7	21.1±6.0	4.3±0.3
1.17	81.7±3.9	42.2±23.7	39.5±27.6	5.1±0.8
1.50	84.0±11.1	38.4±24.1	45.6±35.2	4.6±0.7
2.00	69.2±11.1	37.3±24.2	31.9±33.4	3.1±0.6
2.50	80.0±8.6	64.3±3.8	15.7±4.9	4.0±0.6

1.2 试验设计

试验设 0.83、1.17、1.50、2.00 和 2.50 mm·min<sup>-1</sup> (为研究中的实测雨强) 5 个雨强. 以除去生物结皮的裸土土槽为对照, 每个雨强以 3 个生物结皮土槽作为 3 次重复. 试验开始前率定雨强至与设定雨强误差小于 5%. 根据黄土丘陵区雨季野外土壤含水量, 试验用土槽土壤初始含水量设为 (0.13±0.01) cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>, 采用时域反射法 (time domain reflectometry, TDR) 监测土槽土壤含水量, 土壤含水量不足或超过 (0.13±0.01) cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup> 时, 采用喷水或晾晒的方法调整至目标含水量. 降雨历时为 30 min, 试验过程中, 每 2 min 接一次径流泥沙样. 降雨试验结束后, 量取径流体积, 分离泥沙并烘干 (105 ℃) 称量.

1.3 观测指标与方法

1.3.1 供试土槽生物结皮盖度及组成 于降雨试验前后用 25 点样方法 (样方 25 cm×25 cm) 调查供试土槽生物结皮盖度并取两者均值 (生物结皮盖度 = 藻盖度 + 藓盖度, 生物结皮盖度 + 裸土盖度 = 100%). 将每个土槽平均分为 10 个矩形格 (40 cm×50 cm), 沿坡长方向左右各 5 个, 每个矩形格随机调查 1 个样方. 取每个雨强下 3 个土槽的生物结皮盖度的均值作为该雨强条件下生物结皮的盖度值 (表 2).

1.3.2 供试土槽表面糙度 于降雨试验前后采用链条法测定生物结皮坡面糙度值<sup>[16]</sup>, 并取两者均值. 将土槽沿坡长方向平均分为 9 个矩形格 (33.3 cm×66.7 cm), 每格各测 1 次糙度值. 然后于土槽坡面中间位置测一次垂直坡向的糙度值. 取每个雨强 3 个土槽的生物结皮坡面表面糙度均值作为该雨强条件下生物结皮的糙度值 (表 2).

1.3.3 初始产流时间 以土槽出水口开始有径流流出的时间为初始产流时间.

1.3.4 径流模数 采用径流总量与坡面面积之比计算径流模数 ( $r$ )<sup>[19]</sup>, 计算公式如下:

$$r = R / (s \times t)$$

式中:  $r$  为径流模数 (L·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>);  $R$  为径流总量 (L);  $s$  为坡面面积 (m<sup>2</sup>);  $t$  为降雨历时 (min).

1.3.5 土壤侵蚀模数 通过泥沙总量与坡面面积之比计算土壤侵蚀模数 ( $e$ )<sup>[19]</sup>, 计算公式如下:

$$e = m / (s \times t)$$

式中:  $e$  为土壤侵蚀模数 (g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>);  $m$  为泥沙总量 (g);  $s$  为坡面面积 (m<sup>2</sup>);  $t$  为降雨历时 (min).

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 对生物结皮与裸土坡面的初始产流时间、径流模数、土壤侵蚀模数分别进行方差分析 (ANOVA), 显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ . 对径流模数、土壤侵蚀模数分别与雨强、初始产流时间、生物结皮盖度、藻结皮盖度、藓结皮该、糙度, 土壤侵蚀模数与径流模数进行 Pearson 单尾相关性分析, 显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ . 对生物结皮坡面产流产沙的影响因素进行多元回归分析, 显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ . 用 Origin 7.5 软件绘制相关图件.

2 结果与分析

2.1 雨强对生物结皮坡面初始产流时间的影响

雨强是坡面产流的驱动因子, 显著影响坡面初始产流时间. 由图 1 可见, 0.83、1.17、1.50、2.00 和 2.50 mm·min<sup>-1</sup> 雨强下, 生物结皮坡面初始产流时间均显著高于裸土, 分别是裸土的 7.39、2.73、1.97、1.51、1.20 倍. 表明生物结皮较裸土显著延长了坡面初始产流时间. 但是随着雨强的增加, 生物结皮坡面初始产流延长效应显著降低.

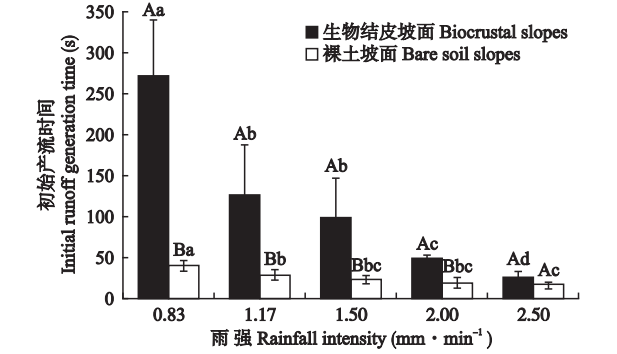


图 1 不同雨强条件下生物结皮对坡面初始产流时间的影响  
Fig.1 Initial runoff generation time upon biocrustal slopes under different rainfall intensities.  
不同大写字母代表相同雨强不同坡面之间差异显著, 不同小写字母代表相同坡面不同雨强之间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters indicated significant difference among different slopes under the same rainfall intensity at 0.05 level, different small letters indicated significant difference among different rainfall intensities under the same slope at 0.05 level. 下同 The same below.

2.2 雨强对生物结皮坡面产流产沙过程的影响

雨强显著影响生物结皮坡面产流过程.由图 2 可见,随着雨强的增大,稳定产流时间延长,随降雨时间增加,10~18 min 趋于稳定,稳定后的径流模数随雨强的增大而增大.在 0.83 和1.17 mm·min<sup>-1</sup>雨强下,随降雨历时延长,径流模数相近.表明雨强对生物结皮坡面稳定产流时间、稳定产流时的径流模数有重要影响.

雨强显著影响生物结皮坡面产沙过程(图 2),初始土壤侵蚀模数随着雨强增大而增大,特别是 2.00和 2.50 mm·min<sup>-1</sup>雨强下初始土壤侵蚀模数远大于 0.83、1.17、1.5 mm·min<sup>-1</sup>雨强下的初始土壤侵蚀模数.在 0.83 和 1.17 mm·min<sup>-1</sup>雨强下,生物结皮坡面产沙量缓慢增加;1.50 mm·min<sup>-1</sup>雨强下,生物结皮坡面产沙量在 18 min 以前增加较快,之后趋于稳定;2.00 和 2.50 mm·min<sup>-1</sup>雨强下,生物结皮坡面产沙过程显著不同于其他雨强,在降雨历时低于 4 min 时,产沙量急剧增加,之后趋于稳定.表明雨强对生物结皮坡面初始土壤侵蚀模数、稳定产沙时间及稳定产沙时的土壤侵蚀模数有重要影响.

2.3 雨强对生物结皮坡面径流模数和土壤侵蚀模数的影响

由图3可见,雨强显著影响生物结皮坡面径流

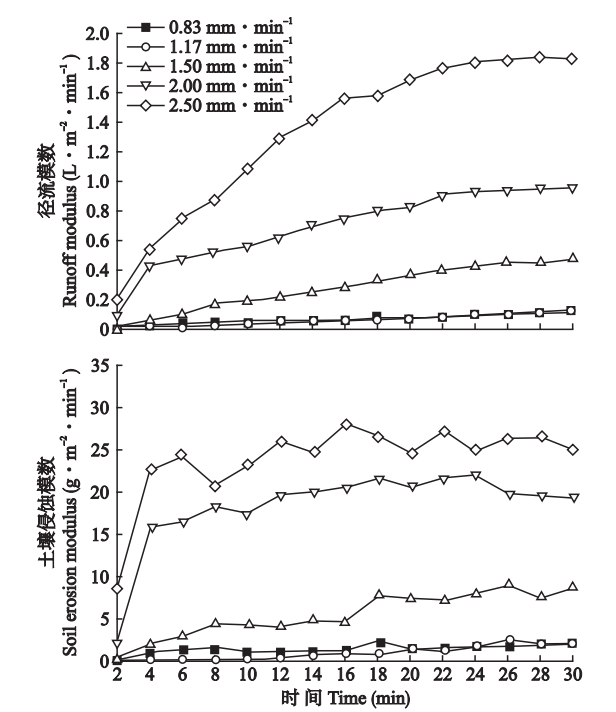


图 2 不同雨强下生物结皮坡面径流模数和土壤侵蚀模数随降雨时间的变化

Fig.2 Changes of runoff modulus and soil erosion modulus with rainfall time on biocrustal slopes under different intensities.

模数,0.83、1.17、1.50、2.00 和 2.50 mm·min<sup>-1</sup>雨强条件下,生物结皮坡面径流模数相对于裸土坡面分别减少了 78.4%、69.0%、66.8%、49.9%、20.7%,生物结皮坡面径流模数在小雨强(≤1.50 mm·min<sup>-1</sup>)下差异显著,但随雨强变化缓慢;在大雨强(>1.50 mm·min<sup>-1</sup>)下差异显著.在雨强≥1.50 mm·min<sup>-1</sup>时,随着雨强的增加,坡面产流增加量相近于雨强增加引起的降雨增加量.表明生物结皮较裸土坡面可以显著减少坡面产流量,但这种减流作用随着雨强的增加而降低.

生物结皮坡面土壤侵蚀模数随雨强的增加有增加趋势,0.83、1.17、1.50、2.00 和 2.50 mm·min<sup>-1</sup>雨强条件下,生物结皮坡面土壤侵蚀模数相对于裸土坡面分别减少了 90.0%、95.2%、94.9%、77.1%、77.0%.表明在不同雨强下,相对于裸土生物结皮皆可显著减少坡面产沙量,生物结皮降低坡面产沙的能力随雨强的增加有降低趋势.在雨强≤1.50 mm·min<sup>-1</sup>时,生物结皮坡面土壤侵蚀模数无显著差异且产沙量远小于雨强>1.50 mm·min<sup>-1</sup>时.表明雨强显著影响生物结皮坡面土壤侵蚀模数,生物结皮在小雨强(≤1.50 mm·min<sup>-1</sup>)的抑制产沙作用显著强于大雨强条件下(>1.50 mm·min<sup>-1</sup>).

2.4 生物结皮坡面产流产沙的影响因素

为了解析雨强及生物结皮对坡面产流产沙的影

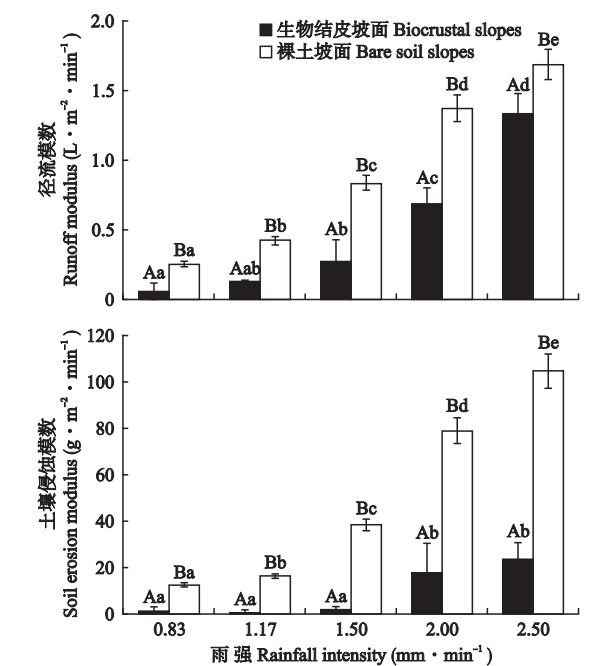


图 3 雨强对生物结皮坡面径流模数和土壤侵蚀模数的影响

Fig.3 Effects of rainfall intensity on runoff modulus and soil erosion modulus on biocrust slopes.



表 3 不同雨强下坡面径流模数和土壤侵蚀模数与雨强和生物结皮盖度特征的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients between runoff modulus, soil erosion modulus and rainfall intensities, biocrust characteristics under different rainfall intensities

	雨强 Rainfall intensity	结皮盖度 Biocrust coverage	藻盖度 Cyanobacteria coverage	藓盖度 Moss coverage	糙度 Roughness	径流模数 Runoff modulus
径流模数 Runoff modulus	0.948 **	-0.083	0.267	-0.243	-0.438	
土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	0.825 **	-0.509 *	0.354	-0.471 *	-0.367	0.863 **

\*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ .

响,对影响坡面产流产沙的影响因素进行相关分析.由表 3 可得,生物结皮坡面径流模数与雨强显著相关,与生物结皮盖度、藻结皮、藓结皮、糙度的相关性不显著;生物结皮坡面土壤侵蚀模数与雨强、生物结皮盖度、藓盖度显著相关,与藻结皮、粗糙度的相关性不显著.表明雨强对生物结皮坡面产流和产沙有显著影响,生物结皮盖度和类型对土壤侵蚀模数影响显著,对径流模数影响不显著.生物结皮坡面土壤侵蚀模数与径流模数的相关性大于其与雨强的相关性.

对生物结皮坡面土壤侵蚀模数的影响因素在全部雨强( $0.83\sim2.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )下进行多元回归分析( $R^2=0.952,P<0.01$ ,表 4),结果表明,径流模数标准化系数远大于雨强,即对坡面产沙的影响权重大于雨强,雨强对坡面产沙的作用主要通过径流影响.

表 4 生物结皮坡面土壤侵蚀模数的影响因素的多元回归分析  
Table 4 Multiple regression analysis of the factors affecting soil erosion modulus under different rainfall intensities

变量 Variable	标准化系数 Standardized coefficient
雨强 Rainfall intensity	-0.01
结皮盖度 Biocrusts coverage	-0.49
藻盖度 Cyanobacteria coverage	-0.07
糙度 Roughness	0.13
径流模数 Runoff modulus	0.91

3 讨 论

生物结皮可以削弱雨滴对土壤的溅蚀,提高土壤表面抗剪切力,改善土壤理化性质<sup>[20-24]</sup>,如土壤的稳定性、孔隙性、水分入渗能力以及微地貌等,进而影响坡面产流和侵蚀过程<sup>[4]</sup>,显著降低土壤侵蚀量<sup>[2,7]</sup>.雨强是坡面产流产沙的主要影响因素之一,但迄今鲜有研究关注雨强对生物结皮坡面产流产沙的影响.

本研究结果表明,不同雨强条件下,相对于裸土坡面,生物结皮可显著延长坡面初始产流时间,这可

能与生物结皮的表面粗糙度高于裸土坡面,且其坡面不易被雨滴打击进而堵塞孔隙形成物理结皮及其相对较高的吸水性有关.生物结皮坡面产流产沙随降雨历时先迅速增加,后趋于平稳.降雨期间,随着降雨历时的延长,由于表层土壤含水量增大以及土壤颗粒对土壤孔隙的堵塞,导致土壤入渗能力降低,坡面开始产流,在降雨持续到  $10\sim18\text{ min}$  以后,土壤含水量及土壤表面孔隙状况的变化减小,土壤入渗率趋于稳定,径流变化趋于缓和<sup>[25]</sup>.在此阶段,水分入渗进入稳渗阶段,产流量处于稳定阶段(图 2),雨滴打击能力、坡面势能和动能侵蚀比较稳定,土壤侵蚀模数也趋于稳定.相对于裸土,生物结皮抑制坡面产流产沙的作用随着雨强增大具有降低趋势,可能与土壤、微地形、生物结皮的盖度和组成以及降雨特点等有关<sup>[26-30]</sup>.本研究中土壤质地为砂壤土,生物结皮坡面粗糙度显著高于裸土坡面,具有相对较高的持水性,同时可有效降低雨滴动能<sup>[22]</sup>,减弱薄层水流速率<sup>[11]</sup>,进而减少颗粒的剥离和搬运.因此,生物结皮显著降低了坡面径流模数和土壤侵蚀模数(图 3).随雨强的增加,坡面径流量增加,动能增强,生物结皮抗雨滴溅蚀的能力和抗径流剪切力逐渐小于雨滴动能能力和径流剪切力,因此其减沙作用降低.周佩华等<sup>[31]</sup>和王万忠<sup>[32]</sup>研究表明,在黄土高原地区, $\leq1.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,生物结皮可减少土壤侵蚀至容许土壤流失量范围以内,将黄土高原  $30\text{ min}$  模拟侵蚀性暴雨标准从  $0.59\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  提高至  $1.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

雨强对坡面产沙的影响主要通过影响坡面产流所致.这是因为:1)一定时间内,不同雨强之间的降雨量与雨强呈正比,雨强越大,雨量越大,促进产流的降雨量越多,径流侵蚀力越大;2)生物结皮基本可以消除不同雨强下的雨滴打击<sup>[23]</sup>.本研究采用的生物结皮土槽坡长为  $2\text{ m}$ ,在坡长大于  $2\text{ m}$  的较大尺度上,径流对产沙的影响仍需进一步研究.生物结皮坡面产流产沙与雨强的相关性在雨强  $1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  左右出现了由不显著相关向显著相关的

转折.在小雨强( $\leq 1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )下,雨滴打击能力较小,坡面产流较少,生物结皮可有效拦截降雨,以苔藓结皮的拦截能力最强,显著高于藻结皮和裸土<sup>[33]</sup>.在大雨强( $>1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )下,生物结皮坡面更易受到雨滴打击,增加土壤颗粒分散和跃迁,形成溅蚀,破坏土壤结构,堵塞表层土壤孔隙,降低入渗,随着降雨历时增加,土壤表层雨水开始汇集形成径流,导致薄层水流侵蚀,增加径流搬运能力,促进产沙.所以,雨强 $>1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随着雨强的增加,降雨增加量小于径流增加量,生物结皮坡面的减流减沙作用降低.坡面产流产沙主要受到雨强和生物结皮的作用,二者对产流产沙的影响表现出“此长彼消”的现象,原因在于:1)雨强 $>1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,生物结皮坡面水分入参与产流能力发生显著变化,发生超渗产流,径流模数增加(图3),导致坡面径流位能与径流动能等增加;2)雨强 $>1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随着雨滴动能和径流侵蚀力的增加,部分生物结皮的抗雨滴打击能力和抗剪切力开始分别小于雨滴动能和径流侵蚀力.所以,随着雨强的增加,生物结皮坡面产流产沙与雨强的相关性出现了由不显著相关向显著相关的转折.

但是,随雨强增大,生物结皮相对于裸土坡面可显著减少坡面大部分产沙的作用没有发生变化(图3),降雨后不同雨强下的生物结皮坡面并没有形成显著的跌水现象,径流随雨强增大而增大,即在雨强 $0.83\sim 2.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 范围内生物结皮拦截降雨量的作用小于雨强的作用.

4 结 论

降雨是坡面产流产沙的驱动因子,其强度显著影响坡面产流产沙量,本研究分析了生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应,主要结论如下:1)雨强对生物结皮坡面产流产沙的影响不同于裸土坡面;2)雨强显著影响生物结皮坡面初始产流时间,相对于裸土坡面,生物结皮显著延长了坡面初始产流时间,但这种延迟效应随雨强的增加而降低;3)雨强显著影响生物结皮坡面产流产沙量,雨强对坡面产沙的影响主要通过影响坡面产流所致.生物结皮坡面产流产沙与雨强的相关性在雨强 $1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右出现了由不显著相关向显著相关的转折.雨强 $>1.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,生物结皮坡面的减流减沙作用降低.

参考文献

[1] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Wang Q-J

(王全九), *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* (自然资源学报), 2006, **21**(3): 441-448 (in Chinese)

[2] Xiao B, Wang QH, Zhao YG, *et al.* Artificial culture of biological soil crusts and its effects on overland flow and infiltration under simulated rainfall. *Applied Soil Ecology*, 2011, **48**: 11-17

[3] Lichner L, Holko L, Zhukova N, *et al.* Plants and biological soil crust influence the hydrophysical parameters and water flow in an aeolian sandy soil. *Journal of Hydrology Hydromechanics*, 2012, **60**: 309-318

[4] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 2006, **20**: 3159-3178

[5] Zhao YG, Xu MX. 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**: 387-393

[6] Xiao B (肖 波), Zhao Y-G (赵允格), Shao M-A (邵明安). Artificial cultivation of biological soil crust and its effects on soil and water conservation in water-wind erosion crisscross region of Loess Plateau, China. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2008, **16**(1): 28-33 (in Chinese)

[7] Belnap J, Wilcox BP, Van Scoyoc MV, *et al.* Successional stage of biological soil crusts: An accurate indicator of ecohydrological condition. *Ecohydrology*, 2013, **6**: 474-482

[8] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, *et al.* Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semi-arid ecosystems. *Ecosystems*, 2012, **15**: 148-161

[9] Shi Y-F (石亚芳), Zhao Y-G (赵允格), Li C-H (李晨辉), *et al.* Effects of trampling disturbance on infiltration of biological soil crustal soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(10): 3227-3234 (in Chinese)

[10] Li L (李 林), Zhao Y-G (赵允格), Wang Y-H (王一贺), *et al.* Impact of different types of biological soil crusts on slope runoff generation. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2015, **30**(6): 1013-1023 (in Chinese)

[11] Wu YS, Hasi E, Wu X. Characteristics of surface runoff in a sandy area in southern Mu Us sandy land, China. *Science Bulletin*, 2012, **57**: 270-275

[12] Ni H-B (倪含斌), Zhang L-P (张丽萍), Cai F-K (蔡甫款). Experimental study on impact of soil micro-biotic crust on soil erosion in Shendong mine region. *Bulletin of Science and Technology* (科技通报), 2012, **11**(28): 216-219 (in Chinese)

[13] Zhang P-P (张培培), Zhao Y-G (赵允格), Wang Y (王 媛), *et al.* Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(3): 657-663 (in Chinese)

[14] Xue M-J (薛孟君), Ma L (马 岚), Zhang D (张 栋), *et al.* Experimental study of runoff processes on bare loess hillslope. *Journal of Soil Land Water Conservation* (水土保持学报), 2017, **31**(4): 11–17 (in Chinese)

[15] Wang Z-L (王占礼), Huang X-H (黄新会), Zhang Z-G (张振国), *et al.* Experimental study of runoff processes on bare loess hillslope. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2005, **25**(4): 1–4 (in Chinese)

[16] Wang Y (王 媛), Zhao Y-G (赵允格), Yao C-Z (姚春竹), *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* (应用生态学报), 2014, **25**(3): 647–653 (in Chinese)

[17] Liu J-E (刘俊娥), Wang Z-L (王占礼), Gao S-J (高素娟), *et al.* Experimental study on hydrodynamic mechanism of sheet erosion processes on loess hillslope. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(7): 144–149 (in Chinese)

[18] Yang X-W (杨雪伟), Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥). Variation of morphological structure of dominant species in moss crusts in hilly Loess Plateau region. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2016, **35**(2): 370–377 (in Chinese)

[19] Zheng F-L (郑粉莉), Tang K-L (唐克丽), Wang W-L (王文龙), *et al.* Study of soil erosion properties in the forest lands and reclaimed lands. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 1993(1): 29–36 (in Chinese)

[20] Belnap J, Rosentreter R, Leonard S, *et al.* Biological Soil Crusts: Ecology and Management. Denver, CO, USA: Department of the Interior Bureau of Land Management, United States, 2001

[21] Yang X-Q (杨雪芹), Xu M-X (许明祥), Zhao Y-G (赵允格), *et al.* Effects of trampling disturbance on soil organic carbon fractions and mineralization potential of biological soil crusts in the Loess Plateau Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(4): 1283–1294 (in Chinese)

[22] Gao LQ, Bowker MA, Xu MX, *et al.* Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, **105**: 49–58

[23] Qin N-Q (秦宁强), Zhao Y-G (赵允格). Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(9): 2259–2264 (in Chinese)

[24] Wang B, Zhang GH, Zhang XC, *et al.* Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, **78**: 589–597

[25] Yang K (杨 凯), Zhao Y-G (赵允格), Ma X-X (马昕昕). Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(1): 173–177 (in Chinese)

[26] Chamizo S, Cantón Y, Rodríguez-Caballero E, *et al.* Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. *Journal of Hydrology*, 2012, **130**: 452–453

[27] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Chamizo S, *et al.* Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. *Geomorphology*, 2012, **81**: 145–146

[28] Mayor ÁG, Bautista S, Bellot J. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. *Earth Surface Processes and Land Forms*, 2009, **34**: 1702–1711

[29] Kidron GJ, Monger HC, Vonshak A, *et al.* Contrasting effects of microbiotic crusts on runoff in desert surfaces. *Geomorphology*, 2012, **139**: 484–94

[30] Cantón Y, Domingo F, Solé-Benet A, *et al.* Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 2012, **252**: 65–84

[31] Zhou P-H (周佩华), Wang Z-L (王占礼). Soil erosion rainfall standard in the Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 1987, **7**(1): 38–44 (in Chinese)

[32] Wang W-Z (王万忠). Study on the relations between rainfall characteristics and loss of soil in Loess Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 1984, **4**(2): 58–63 (in Chinese)

[33] Wei W (卫 伟), Wen Z (温 智), Chen L-D (陈利顶), *et al.* Effects of soil crusts on surface hydrology in the semiarid Loess Hilly Area. *Environmental Science* (环境科学), 2012, **33**(11): 3901–3904 (in Chinese)

作者简介 谢申琦,男,1992 年生,硕士研究生.主要从事生物结皮的抗侵蚀功能研究.E-mail: biocrusts@163.com

责任编辑 杨 弘