

生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征

杨凯^{1,2}, 赵军², 赵允格^{2,4*}, 张子辉¹, 孙会³,
谷康民¹, 郭雅丽¹, 王闪闪⁴

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学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; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 黄土高原退耕还林(草)工程实施后, 生物结皮广泛发育, 显著影响坡面产流。已有大量研究探索了生物结皮对径流的影响, 但相关结论存在较大分歧。该研究以黄土高原典型生物结皮坡面为研究对象, 通过人工模拟降雨试验, 研究了生物结皮坡面产流过程。结果表明: 生物结皮坡面较裸土坡面显著降低了初始产流时间, 裸土初始产流时间是生物结皮坡面的 1.59~3.04 倍。生物结皮盖度与初始产流时间之间呈显著的负相关关系; 降雨 15 min 时与 60 min 时生物结皮对坡面径流的影响发生逆转, 90 mm/h 的雨强下, 当降雨历时为 15 min 时, 生物结皮坡面较裸土增加 75.42% 的径流; 当降雨历时为 60 min 时, 生物结皮坡面径流量较裸土降低 52.42%; 生物结皮影响了土壤水分入渗速率, 导致生物结皮坡面与裸土坡面随降雨历时变化的产流特征出现差异, 裸土坡面降雨 60 min 时的入渗率较 15 min 时降低了 34.30%, 高盖度生物结皮坡面降低了 6.38%; 生物结皮对坡面入渗产流的影响与降雨历时有极大的关系, 降雨历时不同, 很可能得到截然相反的结论, 考虑生物结皮因素的野外降雨试验, 降雨历时不应少于 45 min。研究结果为解释生物结皮影响坡面入渗产流方面存在的分歧提供了科学依据, 进一步明确了干旱半干旱地区生物结皮的水文效应。

关键词: 径流; 水动力学; 生物土壤结皮; 初始产流时间; 径流系数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.017

中图分类号: S157.1; S181

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0135-07

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[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 135—141. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.017 <http://www.tcsae.org>
Yang Kai, Zhao Jun, Zhao Yunge, Zhang Zihui, Sun Hui, Gu Kangmin, Guo Yali, Wang Shanshan. Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 135—141. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.017 <http://www.tcsae.org>

0 引言

生物土壤结皮(生物结皮)是由生长于土壤表层和近地表数毫米内的蓝绿藻、苔藓、地衣、真菌, 以及许多景观中常见的其它非维管束植物成分与土壤复合而形成的具有生命活性的复杂复合体, 是干旱半干旱地区普遍存在的生物地被物, 对土壤水分、养分、理化属性及抗侵蚀性等具有重要的影响^[1]。生物结皮由于微生物分泌物粘结、假根系/菌丝体的捆绑束缚作用, 会形成水平方向极其稳定的层状结构^[2-3]。同时, 生物结皮的发育显著改变了土壤表面特性, 如粗糙度、持水性、斥水性等^[4-5]。表层土壤在水分循环中起着重要的作用, 如降水入渗、地表径流等过程都是以表层土壤为介质发生和转化的, 因此生物结皮的发育影响了土壤水分的入渗和产流。就此, 国内已进行了大量的研究, 但目前所得结论存在较

大分歧。一些研究认为生物结皮延长了水分在地表的停滞时间^[6], 从而促进了入渗。Galun 等^[7]在以色列沙漠地区的研究发现, 蓝藻地衣几分钟内即可吸收其本身干重或体积的 3~13 倍的水分, 进而降低产流。澳大利亚的研究认为生物结皮改善了下层土壤结构, 增加了水分入渗, 降低了坡面产流^[8-9]。肖波等^[10]使用砂质壤土的装填土槽, 接种生物结皮后通过 1 h 的人工降雨试验发现, 生物结皮坡面较无生物结皮坡面减少了 49%~64% 的径流量。

另有研究认为生物结皮堵塞了地表土壤孔隙, 导致入渗降低和径流增加^[11]。Rodríguez-Caballero^[12]在西班牙南部研究了自然降雨下坡面尺度生物结皮对径流的影响, 结果表明生物结皮的存在增加了坡面径流量。李新荣等^[13]在沙坡头人工植被固沙区比较了自然降水后生物结皮的湿润峰, 结果表明, 生物结皮降低了水分入渗率。Zhao 等^[14]在黄土高原地区采用 15 min 放水试验研究藻结皮和藓结皮对坡面产流的影响, 发现生物结皮较无生物结皮坡面增加了 10%~15% 的径流量。

除此, 还有研究认为生物结皮对入渗无明显作用。Booth^[15]使用高强度耐压水管喷洒藻结皮和无藻结皮的样方, 试验结果表明, 2 类样方上的入渗率无明显差异。Eldridge 等^[16]认为在生物结皮发育良好的地区, 下层土壤的大孔隙对水分入渗的影响占绝对优势, 生物结皮的影

收稿日期: 2019-07-12 修订日期: 2019-11-12

基金项目: 自然科学基金重点项目(41830758); 国家自然科学基金面上项目(41571268)

作者简介: 杨凯, 男, 山西太原人, 博士研究生, 主要从事生物结皮抗侵蚀方面的研究。Email: yangkai0409@163.com。

*通信作者: 赵允格, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物结皮生态功能及土壤系统中水、溶质运移研究。Email: zyunge@ms.iswc.ac.cn

响微不足道。而在生物结皮缺失的地区,地表土壤缺乏大孔隙,水分入渗率本来就低。因此,生物结皮对入渗的影响应归因于土壤物理性质、水分进入土壤通道的不同以及地表侵蚀史的差异,而非生物结皮。综上所述,国内外专家学者关于生物结皮对水分入渗及径流的影响已经取得不少成果,但结论仍存在较大分歧。因此,有关生物结皮对坡面产流的影响,仍需要进一步研究。

黄土高原是中国乃至全球土壤侵蚀最为严重的区域之一。在 20 世纪末,由于退耕还林(草)工程的实施,生物结皮在退耕坡地上广泛发育,平均盖度达到 60%~70%,甚至更高^[17],是退耕坡地表面比例最大的覆盖因子^[18],显著影响该区坡面的水土流失。已有的研究证实,生物结皮显著影响坡面入渗及产流过程^[19-20]。在黄土丘陵区,暴雨多集中在 6—9 月,且降雨历时不固定,亦有可能影响到生物结皮坡面的产流特征。因此,本文借助野外人工模拟降雨手段,研究了生物结皮坡面随降雨历时的入渗产流特征,以揭示降雨历时的差异对生物结皮坡面入渗产流的影响,为黄土高原的生物结皮坡面水文过程研究及水土保持工作提供理论依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2018 年 8 月在陕西省榆林市定边县杨井镇的退耕撂荒地地进行。该区属于陕北黄土高原北部与毛乌素沙漠南缘的过渡地带,属温带半干旱内陆性气候,多年平均气温为 8.7℃,多年平均降水量 316.9 mm,年蒸发量 2 490 mm,地形属于黄土高原的丘陵沟壑区,土壤以石灰性黄绵土为主。试验样地主要植被为达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)、早熟禾(*Poa annua*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、赖草(*Leymus secalinus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。样地生物结皮平均盖度 79.2%,主要由藓结皮、藻结皮及二者混合构成。其中,藓结皮优势种主要有短叶对齿藓(*Didymodon tectorum*)、土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)及银叶真藓(*Bryum argenteum*)等。

1.2 试验设计

样地选取及小区处理:选取藓结皮及藓藻混合结皮为主的撂荒坡地作为研究样地,样地基本情况见表 1。

表 1 样地概况
Table 1 Overview of experiment plot

处理 Treatment	裸土 Bare soil	低盖度生物 结皮 Low coverage biocrust	高盖度生物 结皮 High coverage biocrust
生物结皮盖度 Biocrust coverage/%	0	43.6	79.2
粗糙度 Roughness	0.98	1.46	1.41
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	8.22	9.45	8.05
粘粒含量 Clay content/%	15.19	12.95	13.52
粉粒含量 Silt content/%	15.72	14.22	14.36
砂粒含量 Sand content/%	69.09	72.83	72.12

样地面积约为 80 m×20 m,坡度 15°左右。用薄钢板在该样地圈建 10 m×2.1 m 的试验小区,用剪刀去除小区

内的高等植物冠层。根据生物结皮总盖度差异设置 2 个坡面处理,将无干扰的结皮坡面作为高盖度生物结皮组(平均盖度 79.2%),用铲子移除一部分结皮后的结皮坡面作为低盖度生物结皮组(平均盖度 43.6%),同时以翻耕平整过的裸土坡面作为对照,每个试验处理设 3 个重复,共计 9 个径流小区。

模拟降雨试验:采用槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨系统(EL-RS3/5,北京易科立德生态环境科技有限责任公司)。降雨强度设为 90 mm/h,降雨历时 1 h。

1.3 试验步骤

降雨开始前率定雨强,保证降雨的均匀性与精确度^[21]。降雨开始后,当坡面整体开始产流,且出水口形成连续水流时,记下此时的产流时间并接取第一个泥沙径流样,此后每隔 3 min 收集径流泥沙样。降雨过程中采用高锰酸钾测取径流流过 1 m 坡段的时间,计算流速。泥沙测定采用烘干法。

1.4 数据分析

产流率、入渗速率、径流系数、佛汝德数(*Fr* 值)及水深计算公式如下

$$R = \frac{\sum R_i}{A \times t} \quad (1)$$

$$i = I \times \cos \theta - \frac{\sum R_i}{A \times t} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{R_i}{I \times t \times A \times \cos \theta} \quad (3)$$

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

$$h = \frac{q}{V} \quad (5)$$

式中 *R* 为产流率, mm/min; *R_j* 为第 *j* 次取样的产流量, L; *i* 为入渗速率, mm/min; *I* 为降雨强度, mm/min; *α* 为径流系数; *t* 为产流时间, min; *A* 为坡面面积, m²; *θ* 为坡度, (°); *Fr* 为佛汝德数; *V* 为坡面平均流速, m/s; *g* 为重力加速度, m/s²; *h* 为水深, m; *q* 为单宽流量, m³/(m·min)。

在小区上中下部各选取 5 个点布设 25 cm×25 cm 样方,记录样方中藻、藓、裸土、植物根基、枯落物出现的频次,以各类物种占调查总点数的百分数作为生物结皮盖度:用针状糙度计测定粗糙度。糙度计由 52 根金属针组成,针随测定地面的凹凸状况而自由升降,针上部各点相对与参照基准面的高度变化反映地面的起伏程度。用数码相机将针的起伏状况拍摄下,用 Profile meter 程序处理照片,计算每根针相对于参照基准面的高度。粗糙度用各测点高度的标准差表示^[22]。每个试验小区分别测定平行于等高线和垂直于等高线方向的地面粗糙度各 9 次,取平均值。有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;颗粒组成采用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪进行测定。

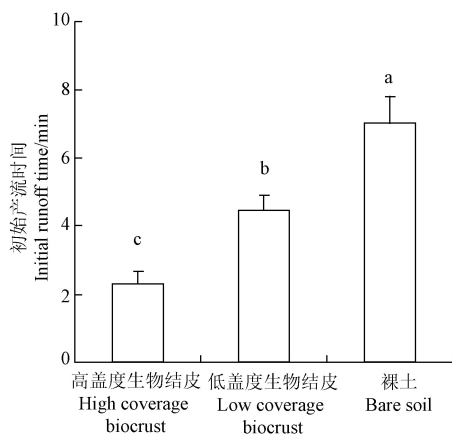
本文数据采用 excel2010 和 spss19.0 进行处理分析,分析前对数据进行正态分布检测和方差齐性检验,对初始产流时间、产流率、入渗速率进行单因素方差分析、

LSD 多重比较。对初始产流时间、产流率、以及生物结皮盖度、粗糙度进行 Pearson 双尾相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对坡面初始产流时间的影响

图 1 为 90 mm/h 降雨条件下 3 个处理坡面产流量的时间动态。随着生物结皮盖度的降低，初始产流时间增加，平均初始产流时间由大到小依次为裸土 7.0 min、低盖度生物结皮 4.4 min、高盖度生物结皮 2.3 min，3 种处理之间差异显著 ($P<0.05$)。裸土坡面初始产流时间是生物结皮坡面的 1.59~3.04 倍。初始产流时间与生物结皮盖度间的 Pearson 双尾相关分析表明，初始产流时间与生物结皮盖度之间存在极显著的负相关关系 ($R=-0.925$, $P<0.01$)。



注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。
Note: Different small letters mean significant difference ($P<0.05$), the same below.

图 1 不同处理坡面初始产流时间
Fig.1 Initial runoff time under different treatments

2.2 坡面产流随降雨历时变化过程

不同处理坡面的瞬时产流量随降雨历时变化过程如图 2 所示。可见裸土坡面初始产流时间高于不同盖度生物结皮坡面，产流后径流量快速增加。高盖度生物结皮坡面产流早于裸土和低盖度生物结皮坡面，降雨 15 min 后趋于平稳。低盖度生物结皮坡面径流变化处于二者之间，降雨 45 min 后趋于稳定。

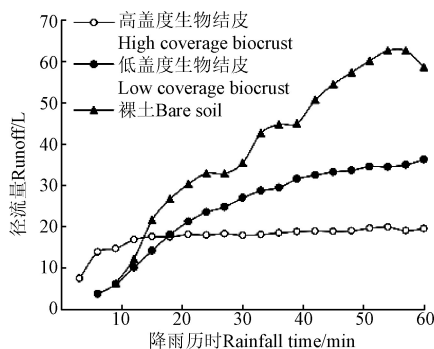


图 2 不同处理坡面产流量随降雨历时的变化
Fig.2 Variation of runoff with time under different treatments

各处理坡面不同降雨历时的产流率如图 3 所示。各

处理坡面降雨历时 15 min 时产流率由高至低依次为高盖度生物结皮 0.20 mm/min、裸土 0.13 mm/min、低盖度生物结皮 0.10 mm/min，高盖度生物结皮坡面产流率显著高于低盖度生物结皮 ($P<0.05$)。降雨历时 30 min 时各处理坡面产流率差异不显著 ($P>0.05$)。降雨历时为 45 min 时裸土坡面产流率显著高于高盖度生物结皮 ($P<0.05$)。降雨历时 60 min 时裸土坡面产流率达到最大，为 0.56 mm/min，显著高于高盖度生物结皮坡面 (0.28 mm/min)。生物结皮坡面与裸土坡面在不同降雨时段的产流量有逆转表现，当降雨历时为 15 min 时，高盖度生物结皮坡面较裸土增加 75.42% 的径流；当降雨历时为 60 min 时，高盖度生物结皮坡面径流较裸土降低 52.42%。

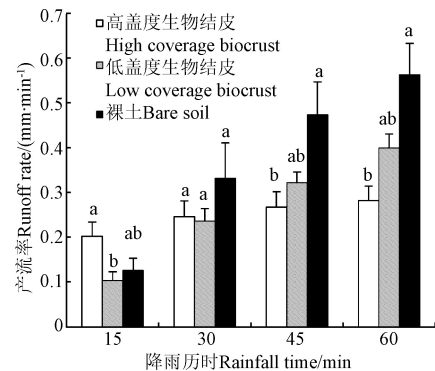


图 3 不同降雨历时各坡面产流率
Fig.3 Variation of runoff rate in different rainfall time under different treatments

为解析降雨历时的影响，对 15、30、45、60 min 时的产流率与生物结皮盖度、容重及粗糙度进行了 Pearson 双尾相关分析 (表 2)。结果表明，15、30 min 产流率与粗糙度、容重及生物结皮盖度均无相关关系；而随着降雨时间的增加，45min 产流率与这 3 项指标显著相关，60 min 降雨率与容重显著相关，与粗糙度、生物结皮盖度极显著相关。相关系数绝对值随着降雨历时的增加而变大。

表 2 不同降雨历时产流率与影响因素相关性

Table 2 Correlation between runoff rate and influencing factors in different rainfall time

降雨历时 Rainfall time/min	粗糙度 Roughness	容重 Bulk density	生物结皮盖度 Biocrust coverage
15	0.329	-0.214	0.498
30	-0.592	0.516	-0.421
45	-0.797*	0.797*	-0.770*
60	-0.866**	0.773*	-0.862**

注：*和**分别表示在 0.05 水平和 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。
Note: * and ** indicated significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ (two-tail), respectively.

2.3 径流系数及入渗速率随降雨历时的变化特征

图 4 为不同处理坡面径流系数随降雨历时的变化过程。各处理坡面在产流初始时的径流系数由大到小依次为高盖度生物结皮 0.08，裸土 0.07，低盖度生物结皮 0.04。生物结皮坡面径流系数随降雨历时的变化趋势均为先增加，最终趋于稳定。裸土坡面径流系数变化趋势表现为

先增加,在降雨历时为 60 min 时有下降趋势。高盖度生物结皮坡面径流系数随降雨历时变化幅度最小;裸土坡面的径流系数在产流后随降雨历时增加迅速增大,在后续的降雨过程中始终高于结皮坡面;低盖度结皮坡面径流系数介于在二者之间。

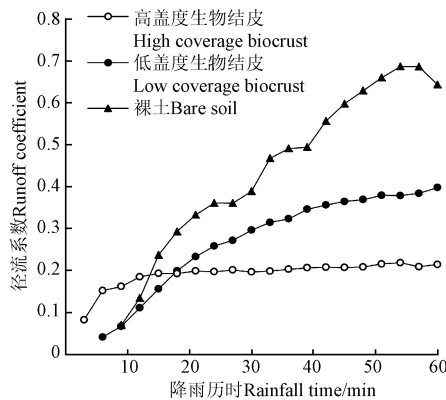


图 4 不同处理坡面径流系数随降雨历时的变化

Fig.4 Variation of runoff coefficient with time under different treatments

图 5 为各处理坡面不同降雨历时的入渗速率。裸土坡面的入渗速率在前 30 min 时与生物结皮坡面差异不显著。45 min 时的入渗速率由大到小依次为高盖度生物结皮 1.18 mm/min、低盖度生物结皮 1.13 mm/min、裸土 0.98 mm/min,高盖度生物结皮坡面入渗速率显著大于裸土坡面 ($P<0.05$)。裸土坡面入渗速率在 60 min 时降低至 0.89 mm/min,显著低于高盖度生物结皮坡面 (1.17 mm/min, $P<0.05$)。

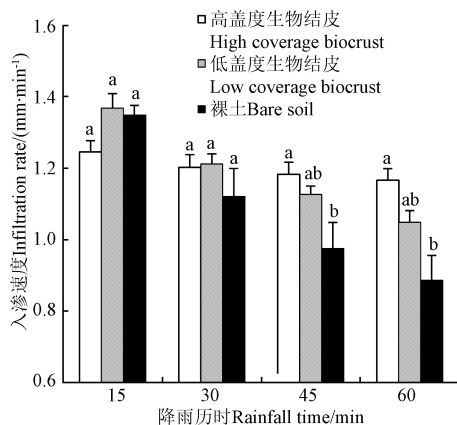


图 5 不同降雨历时各处理坡面入渗速率变化

Fig.5 Variation of infiltration rate in different rainfall time under different treatments

2.4 坡面流速与流态随降雨历时的变化特征

不同处理降雨过程中流速的时间动态见图 6a。其中裸土坡面的平均流速为 0.23 m/s,显著高于有结皮覆盖的坡面 ($P<0.05$),随着时间的增加呈波浪状增长趋势,在降雨末期 (50 min 后) 有下降趋势。高盖度生物结皮覆盖的坡面平均流速最低,为 0.05 m/s,没有明显的变化趋势。低盖度生物结皮坡面流速为 0.06 m/s,略大于高盖度生物结皮坡面,在降雨中期流速波动幅度较大。

佛汝德数 (Fr 值) 是流体内惯性力与重力的比值,

是判别水流状态的重要参数。研究表明当 Fr 值 >1 时,水流为急流, Fr 值 <1 时,水流为缓流^[23]。由图 6b 可见,3 种坡面处理的流态变化特征与流速相似。裸土坡面的 Fr 值显著高于生物结皮坡面,最大值达到了 5.09,平均值为 3.41,是生物结皮坡面的 6.8~7.6 倍。表明生物结皮在坡面上的覆盖改变了降雨过程中坡面径流的流态。

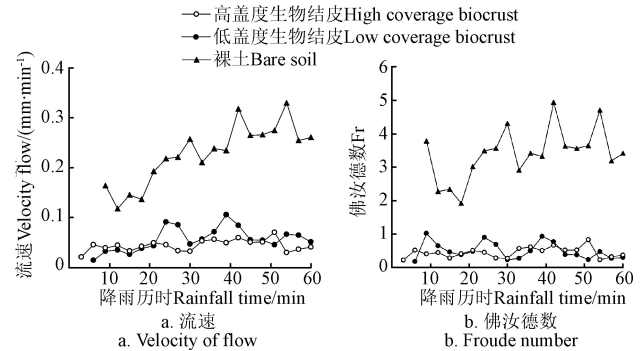


图 6 不同处理坡面流速与佛汝德数随降雨历时的变化特征

Fig.6 Variation of runoff velocity and Froude number with time under different treatments

3 讨论

不同降雨历时的产流率及生物结皮盖度 Pearson 相关分析结果表明,产流率在降雨前 30 min 的与生物结皮盖度无显著关系,随着降雨历时的增加,45、60 min 的产流率与生物结皮盖度显著相关,且相关系数绝对值随降雨历时增加而变大。表明随着降雨历时的增加,生物结皮对坡面产流的影响也随之增大。这可能是由于裸土坡面和生物结皮坡面的结构随降雨历时变化的差异造成的。裸土坡面土壤结构未破坏时孔隙度较大,水分入渗在降雨前期为大孔隙流,而生物结皮的饱和和导水率低于无结皮土壤^[24],此时裸土坡面产流量低于结皮坡面。随着降雨历时的增加,裸土坡面的土壤结构容易被雨滴击溅破坏,溅蚀产生的细土粒堵塞土壤孔隙,形成大面积的物理结皮,其致密的表层结构会显著降低表层土壤的入渗速率,导致坡面的产流量迅速增大^[25]。已有研究表明,生物结皮的存在可以削减雨滴动能,减少雨滴对下层土壤结构的破坏,增加土壤水稳定性^[3,26]。因此,生物结皮坡面的表层土壤在降雨过程中较裸土坡面更加稳定,水分入渗率随降雨历时变化不大。基于以上原因,生物结皮坡面的产流率随降雨历时变化平稳,裸土坡面由于表层土壤结构的不稳定性导致产流随降雨历时增加而迅速增大。

本研究团队在该地区采用线源入流入渗法测定了高盖度生物结皮小区与裸土小区的水分入渗时间动态。分析发现,裸土小区前 6 min 的初始入渗速率高于高盖度生物结皮小区,随着入渗时间的增加,裸土小区的入渗速率迅速下降,在 7~20 min 时段低于高盖度生物结皮小区,随后缓慢下降至稳定数值。高盖度结皮小区初始入渗率较稳定,8 min 后开始缓慢下降,最后下降至稳定的入渗速率。该结果证明了生物结皮影响了水分入渗的过程,从入渗的角度解释了裸土坡面与生物结皮坡面在

不同降雨历时表现出产流特征差异的原因。

生物结皮的覆盖显著地降低了暴雨降雨条件下坡面的流速(图 6a), 从而改变了坡面径流的佛汝德数(Fr 值), 裸土坡面的 Fr 值显著高于结皮坡面, 平均值是生物结皮坡面的 6.8~7.6 倍。Savat 和 Ploey^[28]的试验表明, 当坡面径流的佛汝德数为 2~3 时, 细沟发育的概率很大。张科利等^[29]认为佛汝德数 $Fr \geq 1$ 是细沟发生的水动力临界值。这意味着生物结皮的存在能够将坡面水流的流态从急流变为缓流, 减少侵蚀发生的可能性。本试验中裸土坡面的 Fr 值随降雨历时增加呈波浪式上升的趋势, 而生物结皮坡面的变化趋势则相对平稳, 这表明裸土坡面表层土壤状态在降雨过程中一直不断变化, 物理结皮发育经历形成-破坏-再形成的过程^[30], 因此, 裸土坡面的流态变化趋势起伏较大, 而生物结皮坡面由于结皮的结构稳定, 径流的流态变化相对较平缓。该结果也表明, 生物结皮改变了暴雨条件下坡面径流的流态, 裸土坡面径流流态随降雨历时变化剧烈, 而生物结皮坡面流态随降雨历时变化平缓, 生物结皮减少了径流侵蚀力, 避免坡面出现沟蚀, 这也是降雨中后期生物结皮坡面较裸土坡面产流更少的原因之一。

在本次试验中, 降雨历时不同, 生物结皮对产流的影响截然不同, 裸土坡面在降雨前 30 min 的产流率与生物结皮坡面并无显著差异, 降雨 45 min 后显著高于高盖度结皮坡面。试验结果表明, 考虑生物结皮因素的野外降雨试验, 降雨历时不少于 45 min 得到的结果是比较可靠的。除降雨历时外, 坡面产流还受降雨类型、土壤性质、结皮类型等多种因素的影响^[31-33], 当以上影响因素发生改变时, 本试验揭示的产流规律是否仍然适用, 是下一步亟待解决的问题, 还需要做更多的试验研究。

4 结 论

1) 生物结皮坡面较裸土坡面显著降低了初始产流时间, 裸土初始产流时间是生物结皮坡面的 1.59~3.04 倍。生物结皮盖度与初始产流时间之间呈显著的负相关关系。

2) 降雨 15 min 时与 60 min 时生物结皮对坡面径流的影响发生逆转, 90 mm/h 的雨强下, 当降雨历时为 15 min 时, 生物结皮坡面较裸土增加 75.42% 的径流; 当降雨历时为 60 min 时, 生物结皮坡面径流较裸土降低 52.42%。

3) 生物结皮影响了土壤水分入渗速率, 导致生物结皮坡面与裸土坡面随降雨历时变化的产流特征出现差异, 裸土坡面 60 min 时的入渗率较 15 min 时降低了 34.30%, 高盖度生物结皮坡面只降低了 6.38%。

4) 生物结皮对坡面入渗产流的影响与降雨历时有很大的关系, 降雨历时不同, 很可能得到截然相反的结论, 因此考虑生物结皮因素的野外降雨试验, 降雨历时不应少于 45 min。这为解释生物结皮影响坡面入渗产流方面存在的分歧提供了数据参考。

【参 考 文 献】

[1] Belnap J. Biological soil crusts in deserts: A short review of

their role in soil fertility, stabilization, and water relations[J]. Archiv Fur Hydrobiologie Algological Studies, 2003, 148(4): 113—126.

- [2] 张元明. 荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J]. 科学通报, 2005, 50(1): 42—47.
- [3] 杨凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 173—177.
Yang Kai, Zhao Yunge, Ma Xinxin. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 173—177. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 657—663.
Zhang Peipei, Zhao Yunge, Wang Yuan, et al. Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 657—663. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 647—656.
Wang Yuan, Zhao Yunge, Yao Chunzhu, et al. Surface roughness characteristics of biological soil crusts and its influencing factors in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 647—656. (in Chinese with English abstract)
- [6] Loope W L, Gifford G F. Influence of a soil microfloral crust on select properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1972, 27(4): 164—167.
- [7] Galun M, Bubrick P, Garty J. Structural and metabolic diversity of two desert lichen populations[J]. Journal- Hattori Botanical Laboratory, 1982, 53: 321—324.
- [8] Greene R, Chartres C J, Hodgkinson K C. The effects of fire on the soil in a degraded semiarid woodland. I. Cryptogam cover and physical and micromorphological properties[J]. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28(5): 755—777.
- [9] Eldridge D J. Cryptogams, vascular plants, and soil hydrological relations: some preliminary results from the semiarid woodlands of eastern Australia[J]. Great Basin Naturalist, 1993, 53(1): 48—58.
- [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 [J]. 草地学报, 2008, 16(1): 28—33.
Xiao Bo, Zhao Yunge, Shao Mingan. Artificial cultivation of biological soil crust and its effects on soil and water conservation in water-wind erosion crisscross region of Loess Plateau, China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(1): 28—33. (in Chinese with English abstract)
- [11] Al-Qinna M I, Abu-Awwad A M. Infiltration rate measurements in arid soils with surface crust[J]. Irrigation Science, 1998, 18(2): 83—89.
- [12] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Jetten V. Biological soil crust effects must be included to accurately model infiltration and erosion in drylands: An example from Tabernas

- Badlands[J]. *Geomorphology*, 2015, 241: 331—342.
- [13] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 217—222.
Li Xinrong, Ma Fengyun, Long Liqun, et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in Shapotou area[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(3): 217—222. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhao Yunge, Xu Mingxiang. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly Loess Plateau region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(4): 387—393.
- [15] Booth W E. Algae pioneers in plant succession and their importance in erosion control[J]. *Ecology*, 1941, 22(1): 38—46.
- [16] Eldridge D J, Tozer M E, Slangen S. Soil hydrology is independent of microphytic crust cover: Further evidence from a wooded semiarid Australian rangeland[J]. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 1997, 11(2): 113—126.
- [17] Chamizo S, Cantón Y, Rodríguez-Caballero E, et al. Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(7): 1208—1221.
- [18] 王一贺, 赵允格, 李林, 等. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局 [J]. *生态学报*, 2016, 36(2): 377—386.
Wang Yihe, Zhao Yunge, Li Lin, et al. Distribution patterns and spatial variability of vegetation and biocrusts in revegetated lands in different rainfall zones of the Loess Plateau region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 377—386. (in Chinese with English abstract)
- [19] 叶菁, 卜崇峰, 杨永胜, 等. 翻耙干扰下生物结皮对水分入渗及土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 22—26.
Ye Jing, Bu Chongfeng, Yang Yongsheng, et al. Influences of biological soil crusts on water infiltration and soil erosion under harrowing disturbance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [20] 谢申琦, 高丽倩, 赵允格, 等. 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 35—41.
Xie Shenqi, Gao Liqian, Zhao Yunge, et al. Responses of runoff and soil loss from biological soil crustal slope to rainfall intensity under simulated rainfall[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 35—41. (in Chinese with English abstract)
- [21] 谢云, 林小鹏, 刘英娜, 等. 槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 1—6.
Xie Yun, Lin Xiaojuan, Liu Yingna, et al. Calibration of simulated rainfall intensity and its spatial distribution for trough rainfall simulator[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [22] 许明祥, 刘国彬, 温仲明, 等. 黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J]. *水土保持通报*, 2000, 20(1): 20—23.
Xu Mingxiang, Liu Guobin, Wen Zhongming, et al. Temporal and spatial variation of soil characters in small catchment of Loess Hilly areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(1): 20—23. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 825—834.
Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 825—834. (in Chinese with English abstract)
- [24] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤饱和导水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 35—40.
Xiao Bo, Zhao Yunge, Shao Mingan. Effects of biological soil crust on saturated hydraulic conductivity in water-wind erosion crisscross region, North of Shaanxi Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(12): 35—40. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟. 黄土坡面片蚀过程试验研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 35—39.
Liu June, Wang Zhanli, Gao Sujuan. Experimental study of sheet erosion processes on Loess Hill slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2259—2264.
Qin Ningqiang, Zhao Yunge. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2259—2264. (in Chinese with English abstract)
- [27] Savat J, Ploey J D. Sheetwash and rill development by surface flow[C]//*Badland Geomorphology and Piping*, Norwich: Geobooks, 1998: 113—126.
- [28] 张科利, 钟德钰. 黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究[J]. *泥沙研究*, 1998(3): 76—82.
Zhang Keli, Zhong Deyu. The study of gully erosion mechanism of the hydrodynamic experimental on loess slope surface[J]. *Journal of Sediment Research*, 1998(3): 76—82. (in Chinese with English abstract)
- [29] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1996(4): 363—370.
Cai Qiangguo, Lu Zhaoxiong. Experimental study of surface crusts process and microfabric analysis on loess soil[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1996(4): 363—370. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭铃莉, 王云琦, 王晨洋, 等. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 157—164.
Wu Lingli, Wang Yunqi, Wang Chenfeng, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 157—164. (in Chinese with English abstract)

- [31] 吴秋菊, 吴发启, 王林华. 土壤结皮坡面流水动力学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 73—80.
Wu Qiuju, Wu Faqi, Wang Linhua. Hydrodynamic characteristics of overland flow under soil crusts condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 73—80. (in Chinese with English abstract)
- [32] 彭浩, 李忠武, 刘春, 等. 湘中低山丘陵区坡面产流输沙

对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 60—67.

Peng Hao, Li Zhongwu, Liu Chun, et al. Comprehensive response characteristics of runoff and sediment yield on rainfall, soil type and water conservation measures in hilly area of central Hunan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 60—67. (in Chinese with English abstract)

Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations

Yang Kai^{1,2}, Zhao Jun², Zhao Yunge^{2*}, Zhang Zihui¹, Sun Hui³, Gu Kangmin¹, Guo Yali¹, Wang Shanshan⁴

(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, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Loess Plateau in China is one of the most severely eroded regions of the world. Since the implementation of “Grain for Green” ecological restoration project, biological soil crusts (biocrusts) were widely distributed in this region, which significantly affected surface runoff. Numerous studies have explored the effect of biocrusts on runoff. However, the conclusions were still widely different. In the Loess Plateau region, rainfall is mostly concentrated in June to September, and the rainfall duration is not fixed, which may affect the runoff characteristics of biocrustal slopes. This study investigated characteristics of runoff from biocrustal slope in different rainfall durations in the Loess Plateau region by using artificial simulated rainfall experiment. The experiment was conducted in the revegetated grassland of northern Shaanxi Province, China. The experiment site was about 80 m×20 m, and the slope gradient was approximately 15°. The biocrust types were mainly moss crust and moss cyanobacteria mixed crust in this site and their average coverage was 79.2%. The dimensions of the experimental plots were 10 m×2.1 m (length×width). Canopy of higher plants in the plots was removed with scissors. According to the range of local biocrust coverage, two treatments were set: 1) slopes with undisturbed biocrust as a high coverage biocrust (the average biocrust coverage were 79.2%); 2) the slopes with removal of a part of the biocrusts by shovels, which simulated the low biocrust cover situation (the average biocrust coverage were 43.6%). Meanwhile, ploughing plots were set as the control group. The rainfall intensity was set as 90mm/h and the duration was 1 hour. The results showed that the initial runoff time of biocrust slope was significantly reduced compared to the bare soil slope. The initial runoff yield time of bare soil was 1.59-3.04 times that of the biocrust slopes. There was a significant negative correlation between biocrust coverage and initial runoff generation time; Conclusion of the influence of biocrusts on runoff yield was contradictory during the first 15 min and 60 min. For 90 mm/h rainfall intensity, runoff from biocrust slope increased by 75.42% compared to bare soil when the rainfall duration was the 15 min. While, runoff from biocrust slope was decreased by 52.42% compared to the bare soil when the rainfall lasted to 60 min; the infiltration rate of soil moisture was affected by biocrusts. The infiltration rate of bare soil slope with 60 min rainfall was 34.30% lower than that with 15 min. The infiltration rate of high coverage biocrust slope with 60 min rainfall was only 6.38% lower than that with 15 min, which may cause the difference of runoff yield between bare soil slope and biocrust slope; the effect of biocrust on slope infiltration and runoff is closely related to rainfall duration. Different periods of rainfall are likely to lead to inconsistent conclusions. Therefore, the duration of rainfall experiment considering the factors of biocrust should be no less than 45 min. The study provides scientific evidences for explaining the differences in the effect of biocrusts on infiltration and runoff, and further clarifies the hydrological effect of biocrusts in arid and semi-arid areas.

Keywords: runoff; hydrodynamics; biological soil crust; initial runoff time; runoff coefficient