

不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响

李林¹, 赵允格^{1b*}, 王一贺^{1b,2}, 王媛¹

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

摘要: 生物结皮是黄土高原地区坡面水土流失不可忽略的影响因素, 目前生物结皮对坡面产流特征的影响仍不明确。在陕北神木县六道沟小流域通过径流小区放水试验, 以裸地为对照, 研究了浅色藻结皮、深色藻结皮、混合结皮(藻+藓)以及藓结皮4种类型生物结皮对坡面产流特征的影响。结果表明: ① 浅色藻结皮、深色藻结皮和混合结皮较裸地显著降低了初始产流时间, 三者的初始产流时间较裸地分别减少89.0%、96.2%和96.0%; 而藓结皮则较裸地显著增加了初始产流时间。② 浅色藻结皮和混合结皮较裸地显著延长了退水持续时间, 其退水持续时间分别是裸地小区的2.28和2.13倍; 而深色藻结皮的退水持续时间与裸地差异不显著。③ 深色藻结皮和藓结皮的径流流速较裸地分别降低了29.1%和67.3%; 藓结皮的径流流速显著低于其他生物结皮小区; 各生物结皮小区的径流深与裸地均无显著差异; 浅色藻结皮的径流深显著高于深色藻结皮。④ 不同类型的生物结皮较裸地明显改变了坡面产流过程和径流量; 浅色藻结皮小区的径流系数显著高于裸地, 深色藻结皮和混合结皮小区的径流系数较裸地差异不显著; 浅色藻结皮小区的径流系数是深色藻结皮小区的2.44倍, 差异显著; 放水时段内, 藓结皮小区没有径流流出。以上结果表明, 生物结皮是坡面产流特征的重要影响因素, 影响程度与生物结皮的发育阶段和生物组成有关。

关键词: 生物土壤结皮; 产流特征; 径流流速; 径流深; 径流系数

中图分类号: S157.2; S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2015)06-1013-11

DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.06.012

坡面产流是在不同气候和下垫面条件下由降雨形成径流的过程^[1]。黄土高原地区降雨量偏少, 时空分布不均, 但降水强度大, 多以暴雨形式发生, 加之地表植被覆盖低, 坡面水分往往来不及下渗, 以超渗产流的方式形成坡面径流, 进而造成土壤侵蚀^[2-3]。另一方面, 黄土高原地区的坡面径流, 又是补充土壤水分、供植被生长的重要水源^[4]。因此, 黄土高原地区坡面产汇流一直是相关学科关注的重点, 围绕黄土高原坡面产流及其影响因素已开展大量研究工作, 取得了众多有价值的结果。纵观已有研究可见, 目前的研究主要集中在降雨特征^[5]、植被^[6]、坡长和坡度^[7-8]以及物理土壤结皮^[9]的影响等方面。

生物土壤结皮(简称生物结皮)是由隐花植物如蓝绿藻、地衣、苔藓类和土壤中微生物, 及其他生物体通过菌丝体、假根和分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的十分复杂的复合体^[10]。近年来, 随着大面积退耕还林草工程的实施, 生物结皮在黄土高原地区广

收稿日期: 2014-04-24; 修订日期: 2014-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金(41271298, 40971174)。

第一作者简介: 李林(1990-), 男, 河南洛阳人, 硕士, 研究方向为生物土壤结皮生态功能。E-mail: li_lin_jy@163.com

*通信作者简介: 赵允格(1971-), 女, 陕西咸阳人, 博士, 研究员, 主要从事生物土壤结皮及土壤水分、养分运移方面的研究工作。E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

泛发育,覆盖度可达60%~70%,甚至更高^[11],在土壤表层成为一种特殊的下垫面,显著影响土壤理化属性^[12-13]、表面糙度^[14]和表层土壤水分渗透性^[15-16]等,进而可能影响坡面产流。然而,有关生物结皮水文学效应的研究中,生物结皮对坡面产流的影响研究较少,李小军等^[17]在腾格里沙漠地区研究了生物结皮斑块和灌丛斑块镶嵌式分布对地表径流的影响,发现生物结皮斑块促进了地表径流的形成,与植被斑块之间存在资源再分配的源-汇关系。赵允格等^[18]在黄土丘陵区的研究表明,生物结皮能够增加坡面径流量。吴永胜等^[19]在毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮表面径流进行的实验观测表明,不同类型生物结皮对径流量的影响差异较大。这些研究主要侧重于生物结皮对坡面径流量的影响,并未从生物结皮对坡面产流特征的影响方面进行进一步研究,难以从机理上认识生物结皮对坡面“水”流失的影响。而且,目前已有坡面产流的影响因子研究鲜有涉及生物结皮。鉴于此,本研究在位于黄土高原北部典型水蚀风蚀交错区(该区以藻类和藓类植物为主要成分的生物结皮大面积发育)的陕西省神木县六道沟小流域采用放水试验,以裸地(没有生物结皮发育的土壤)为对照,研究了浅色藻结皮、深色藻结皮、混合结皮(藻+藓)以及藓结皮4种类型的生物结皮对产流时间、径流流速、径流深以及径流系数等的影响,以揭示不同类型的生物结皮对坡面产流特征的影响,为从坡面“水”流失的角度管理生物结皮提供科学依据。

1 试验内容与方法

1.1 研究区概况

试验在陕西省神木县以西的六道沟小流域(38°46'~38°51' N, 110°21'~110°23' E)进行。六道沟小流域既属于黄土高原向毛乌素沙漠过渡、森林草原向典型干旱草原过渡的地带,又属于流水作用的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带^[20],是黄土高原水土流失最为严重的区域,为典型的盖沙黄土丘陵区,土壤质地多为砂质壤土(国际分类制),属于中温带半干旱气候,年均降水量408.5 mm,其中6—9月降雨量占全年的80.9%,且多为暴雨^[21],是典型的水蚀风蚀脆弱生态区。该流域天然植被多已遭到严重破坏,现以人工植被和退耕荒坡地演替植被为主,主要为紫花苜蓿(*Medicago sativa* Linn)、短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb)等。该流域非耕作土壤上广泛分布着不同类型的生物结皮^[22],已成为该区生态系统中重要的组成部分。

1.2 径流小区设计

于2005年4月修建3个径流小区,坡度8°,面积5 m×3 m(长×宽)。于2005年8月对其中2个径流小区(编号为D和E)采用人工接种的方法加速生物结皮形成,1个小区(编号C)未接种;分别于2013年4月和7月在生物结皮培养小区近旁各修建一个裸地小区(编号为B和A),小区的土壤和立地条件等均与2005年4月修建的小区一致。2005年至今,定期在小区内除草,维护生物结皮发育。至试验前,A小区表面疏松,没有结皮,作为裸地处理;B小区表面形成了发育良好的浅色藻结皮,作为浅色藻结皮处理;C小区表面形成了发育良好的深色藻结皮,作为深色藻结皮处理;人工接种过的D和E小区经过近8 a的发育,表面藓结皮和藻结皮发育良好,其中,D小区藓结皮和藻结皮均发育良好,作为混合结皮处理;E小区藓结皮为主,藻结皮较少,作为藓结皮处理。各小区结皮特征见表1。

表1 不同类型生物结皮小区基本特征

Table 1 Characteristics of biocrusts in different plots

编号	结皮类型	颜色	厚度/mm	藻结皮盖度/%	藓结皮盖度/%	表面糙度系数	生物量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) ^a
A	裸地	—	—	—	—	10.56±0.86	—
B	浅色藻结皮	浅灰	0.88±0.08	100	0	5.51±0.38	9.85±0.63
C	深色藻结皮	深灰	1.78±0.15	100	0	6.08±0.43	12.89±1.08
D	混合结皮(深色藻+藓)	深灰和深绿	2.97±0.39	55	41	7.25±0.43	—
E	藓结皮	深绿	11.10±0.47	23	73	8.01±0.39	—

注: 藻结皮生物量以单位质量土中叶绿素a的含量表示。

放水试验于2013年9月至10月初进行。试验设5个处理: 裸地、浅色藻结皮、深色藻结皮、混合结皮(深色藻结皮+藓结皮)、藓结皮。于2013年5月从原5 m×3 m(长×宽)小区中隔出4个5 m×0.4 m(长×宽)的微区作为4个重复, 微区之间用铁皮隔开, 且微区之间保持25 cm左右的间隔。试验时每个微区单独进行放水, 且每个小区的4个重复连续进行试验。小区下方设置集流桶。

小区表面特征指标及测定:

1) 生物结皮的盖度: 采用25点样方法(25 cm×25 cm样方), 在小区中随机布设10个样方调查生物结皮的种类, 记录样方中藻、藓、枯落物、裸土出现的频次, 计算不同类型生物结皮的盖度。

2) 生物结皮的厚度: 用游标卡尺测定, 用小刀分离生物结皮与下层土壤, 用游标卡尺测量其4个方向的厚度, 取平均值。每种生物结皮重复4次。

3) 小区地表糙度: 链条法^[23], 原理是: 当给定长度(L_1 , mm)的链条置于地表时, 其水平长度(L_2 , mm)随着结皮表面糙度的增加而减小, 根据链条长度的减小值即可计算出表面糙度指数(C_r):

$$C_r = (1 - L_2/L_1) \times 100 \quad (1)$$

本研究中选用 L_1 为200 mm、链条直径0.91 mm、链节长1.12 mm的银质链条。

4) 藻结皮生物量^[24]: 以单位质量土中叶绿素a的含量表示, 具体方法为: 在暗处用研钵研磨结皮, 使藻体与土壤分离, 并使藻体分散。取(2±0.01) g样品装入具塞刻度试管中, 向试管中加入10 mL二甲基亚砷(DMSO), 置于65℃的恒温水浴锅中遮光萃取1 h, 之后用滤纸过滤, 取上清液于波长665和750 nm处测定吸光值, 然后加5滴1 mol·L⁻¹盐酸酸化, 10 min后置于波长665和750 nm处再测定吸光值。藻类叶绿素a含量的计算公式为:

$$Chla_{\text{DMSO}} = 26.7 - 3 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V/M \quad (2)$$

式中: $Chla_{\text{DMSO}}$ 为DMSO法测定的叶绿素a含量($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); E_{665} 和 E_{750} 分别为DMSO法萃取液酸化前于波长665和750 nm处的吸光值; A_{665} 和 A_{750} 分别为DMSO法萃取液酸化后于波长665和750 nm处的吸光值; V 为萃液体积(mL); M 为结皮土样质量(g)。

根据研究区同期平均土壤含水量, 小区前期土壤体积含水量控制在12%~14%之间, 整个实验周期中, 各小区放水间隔根据实际情况调整(对于含水量高的小区充分晾晒, 含水量低的小区用喷壶进行均匀洒水, 使放水前土壤含水量保持基本一致)。小区0~10 cm土层土壤的有机质含量为8.25 g·kg⁻¹, 小区土壤质地为砂质壤土, 土壤的粘粒、粉粒、砂粒体积含量分别为8.32%、30.75%和60.92%(土壤质地分类使用国际制)。

1.3 放水试验装置及过程

试验装置: 试验采用自制的放水装置。装置包括自制的马氏瓶, 控制阀门及箕型缓

冲槽。其中,缓冲槽用以保证水流均匀地、以薄层水流的形式向下流动。

放水流量:根据当地径流小区观测资料和当地地形条件,放水流量设置为2 L/min(相当于60 mm/h的雨强)。

试验过程:试验开始前,率定马氏瓶出水流量至设计放水流量(精度控制在目标流量的±5%之内),然后,开始放水并计时,记录水流流至出水口时间为初始产流时间。开始产流后,每隔1 min收集径流。产流后20 min开始测定坡面径流流速和水流深。产流后持续放水30 min停止放水,继续收集径流直至结束,记录停止产流时间,从停止放水到停止产流之间的时间为退水持续时间。通过试验停止放水之前收集的径流总量和放水总量之比计算小区径流系数(a),其公式为:

$$a = R/P \quad (3)$$

式中: R 为径流总量(mL), P 为试验放水总量(mL)。

观测指标及方法:①坡面径流流速采用高锰酸钾染色示踪法。具体操作为沿小区长度方向将坡面分成上下两个纵断面(分别为0.5~1.7 m、1.7~2.9 m),沿纵断面的中心线以近饱和的高锰酸钾溶液示踪,分别测定上下两个断面的径流流速,各重复3次,选取6次测定的平均值作为坡面的平均流速,并考虑到用染色法测定的径流流速为坡面优势流流速,实测流速乘以修正系数0.67作为水流断面平均流速^[25]。②水流深度利用自制标杆(直径2 mm,高10 cm,径流水深精确到1 mm)测定,测定位置选择在沿小区长度方向从上至下0.5、0.9、1.3、1.7、2.1、2.5、2.9、3.3 m处,每杆重复读数2次,选取16次测定的平均值作为小区水流深度。此外,假定水流沿坡面均匀分布,采用下式计算径流深(h , m):

$$h = q/U = Q/(U \cdot B \cdot t) \quad (4)$$

式中: q 为单宽流量[m³/(m·min)]; Q 为 t 时间内的径流量(m³); t 为径流取样时间间隔(min); U 为断面平均流速(m/min); B 为过水断面宽度(m)。

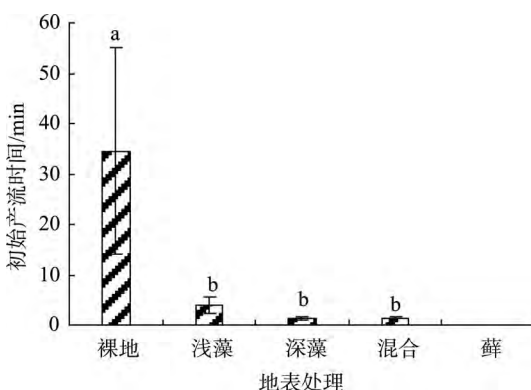
1.4 数据分析

采用Excel 2003和SPSS 18.0统计分析软件进行数据处理和统计分析。对不同处理径流小区的坡面产流时间、径流流速、径流水深及径流量所对应的数据进行单因素方差分析和LSD多重比较,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。用Excel软件绘制不同径流小区的径流量变化过程线。

2 结果

2.1 不同类型生物结皮对产流时间的影响

图1是不同处理坡面初始产流时间,可见,从水流流入小区开始至出水口有径流形成,裸地小区平均用时34.5 min,而浅色藻结皮、深色藻结皮及混合结皮小区平均用时分别为3.8、1.3和1.4 min,较裸地小



注:图中浅藻指浅色藻结皮,深藻指深色藻结皮,混合指混合结皮,藓指藓结皮,下同。藓结皮处理在试验放水时段(45±12 min)内没有径流流出,因此没有初始产流时间和持续产流时间;不同小写字母表示生物结皮类型间差异显著($P<0.05$),下同。

图1 不同地表处理的初始产流时间

Fig. 1 Time of runoff initiation under different soil surface treatments

区分别减少了89.0%、96.2%和96.0%。不同类型的生物结皮中, 浅色藻结皮、混合结皮、深色藻结皮小区无显著差异, 藓结皮小区在平均放水时间45 min内没有径流流出小区(小区表面湿润了 4.07 ± 0.24 m)。

生物结皮小区(藓结皮小区除外)较裸地增加了坡面退水持续时间(图2), 不同地表处理的退水持续时间存在较大差异: 浅色藻结皮和混合结皮小区的退水持续时间显著高于裸地, 分别是裸地小区的2.28和2.13倍; 深色藻结皮的退水持续时间较裸地差异不显著; 不同类型生物结皮的退水持续时间差异明显, 浅色藻结皮和混合结皮小区的退水持续时间分别是深色藻结皮的1.85和1.72倍, 差异显著。藓结皮小区由于未产流, 没有退水持续时间。

2.2 不同类型生物结皮对径流流速和径流深的影响

如图3所示, 不同类型生物结皮小区的径流流速均小于裸地小区, 其中深色藻结皮和藓结皮小区的径流流速较裸地分别减少了29.1%和67.3%, 差异显著。不同类型的生物结皮小区中, 除了混合结皮小区, 随着生物结皮的发育, 生物结皮处理小区的径流流速逐渐降低。藓结皮的流速显著低于其他生物结皮小区。

不同类型生物结皮对径流深的影响如图4(a)所示, 可见生物结皮小区径流深较裸地差异不显著。不同类型生物结皮中, 浅色藻结皮的径流深显著高于深色藻结皮, 藓结皮径流深为0。试验过程中观测了不同地表处理坡面水流的分布, 即坡面水流深, 如图4(b)所示。从图4(b)可以看出, 生物结皮小区坡面水流深度均小于裸地, 其中浅色藻结皮和藓结皮小区的水流深显著低于裸地, 分别减少了26.7%和33.3%。不同类型生物结皮之间,

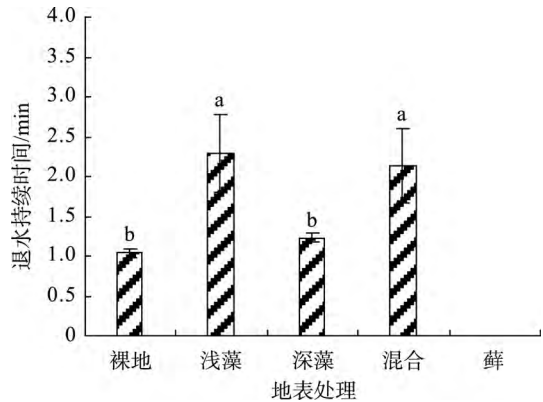


图2 不同地表处理的退水持续时间

Fig. 2 Time of runoff recession duration under different soil surface treatments

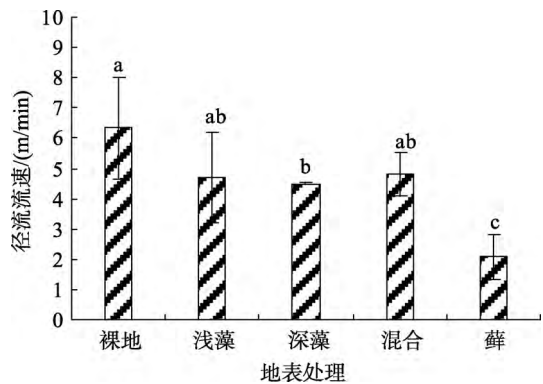


图3 不同地表处理的径流流速

Fig. 3 Runoff velocity under different soil surface treatments

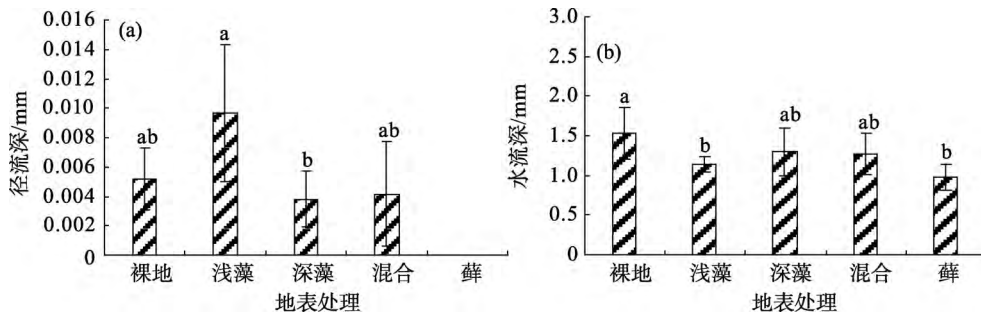


图4 不同地表处理的径流深(a)及坡面水流分布(b)

Fig. 4 Runoff depth (a) and water distribution on slope (b) under different soil surface treatments

除了浅色藻结皮, 坡面的水流深度大小表现为: 深色藻结皮>混合结皮>苔藓结皮。

2.3 不同类型生物结皮对产流过程和径流系数的影响

产流小区中不同地表处理坡面的瞬时径流量变化过程线如图5所示, 裸地小区产流后, 其瞬时径流量在稳定4 min左右之后, 保持平稳的增加; 浅色藻结皮产流后, 其瞬时径流量在8 min内迅速增加至600 mL左右, 随后保持稳定; 深色藻结皮和混合结皮的产流过程线波动较大, 产流历时6 min左右之后, 在相同的产流历时下, 二者的瞬时径流量均小于浅色藻结皮。

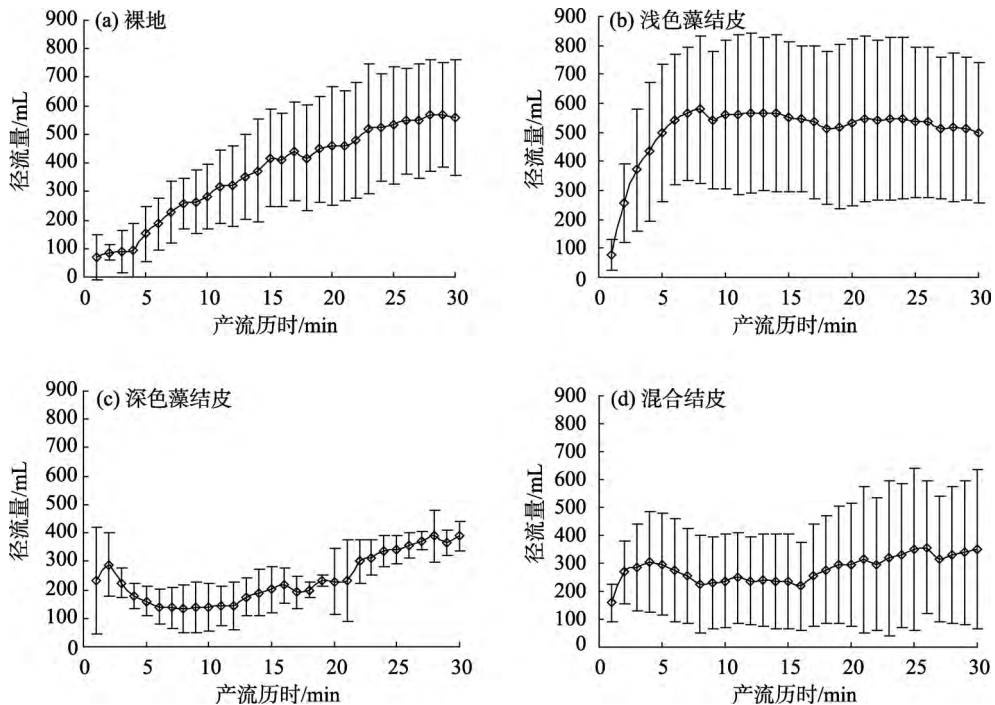


图5 不同地表处理的径流量变化过程

Fig. 5 Variation of the runoff volume under different soil surface treatments

不同地表处理小区径流系数如图6所示, 可见浅色藻结皮小区的径流系数显著高于裸地。深色藻结皮和混合结皮的径流系数均高于裸地, 但是差异不显著。生物结皮小区中: 浅色藻结皮小区的径流系数高于深色藻结皮和混合结皮小区, 分别是二者的2.44和1.68倍, 且浅色藻结皮和深色藻结皮的径流系数差异显著; 藓结皮小区径流系数为0。

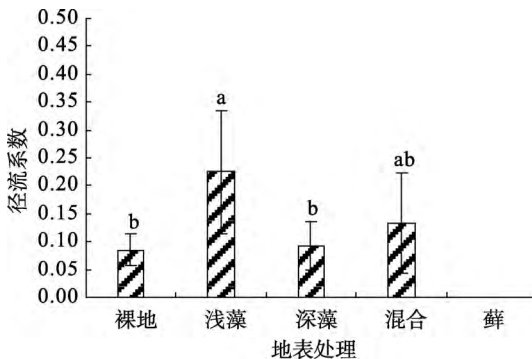


图6 不同地表处理的径流系数

Fig. 6 Runoff coefficient under different soil surface treatments

3 讨论

3.1 生物结皮对产流时间的影响

坡面产流时间反映了产流的快慢, 是描述坡面产流规律的重要指标^[26], 生物结皮的形成降低了土壤水分入渗^[27], 使土壤表面产

生斥水性^[28],进而可能会影响坡面的产流时间。本研究表明,浅色藻结皮、深色藻结皮和混合结皮小区较裸地小区均能够显著缩短初始产流时间,加快坡面径流的产生。这是因为裸地的表面糙度(糙度系数为 10.56 ± 0.86)在不同地表处理中最大,水流阻力大;而生物结皮不仅降低了水分渗透性^[11,27],同时显著降低了土壤表面粗糙度(表1),因此,加快坡面产流。但生物结皮小区中藓结皮小区没有产流,试验过程中,我们用手按压藓结皮,发现藓结皮像充满了水的海绵,表明藓结皮能够吸收、滞纳坡面径流,起到延迟坡面产流的效应。这与试验小区藓结皮的发育状态有关,本试验小区藓结皮的厚度为 11.10 ± 0.47 mm,其中藓类植物平均高度可达 8.03 ± 1.8 mm,地表密集丛生,表面糙度为 8.01 ± 0.39 ,显著大于其他类型的生物结皮(混合结皮小区中的藓结皮厚度为 4.62 ± 1.33 mm),因此,能将水分拦截在藓丛中,增加水分在藓结皮表面滞留的时间,提高其表面水分的入渗量。

退水持续时间反映了停止放水后,生物结皮持水性对坡面径流的贡献。产流小区中裸地小区的退水持续时间最小,即生物结皮的发育可以延长坡面退水持续时间。这与裸地小区产流后细沟(沟深可达1.9 cm)的形成有关;生物结皮小区中,深色藻结皮的退水持续时间显著低于混合结皮,因为混合结皮中藓结皮成分增加水流阻力,从而延长了该小区的退水持续时间;浅色藻结皮小区的退水持续时间显著大于深色藻结皮,可能是因为在放水结束时,浅色藻结皮的径流量大于深色藻结皮,同时浅色藻结皮较其他类型的生物结皮水平稳定性较低^[29],放水以后,浅色藻结皮遭到破坏,露出的裸土(未形成细沟)增加水流阻力的缘故。

3.2 生物结皮对径流流速和径流深的影响

径流流速和径流深是坡面流重要的水动力学特性^[30-31]。试验条件下,生物结皮小区的径流流速和水流深度均小于裸地小区,原因是径流流速和水流深均是在产流后20 min开始测定,此时裸地小区已形成细沟(尽管裸地产生细沟,该小区径流流速和水流深测定位置与生物结皮小区保持一致),而生物结皮小区均无细沟产生。藻-藓混合结皮小区的径流流速在不同类型的生物结皮中最大,是因为径流在流动过程中,避开藓结皮,而相对地汇集在深色藻结皮表面,导致其径流流速加快。藓结皮的径流流速和水流深在生物结皮小区中最小,试验过程中观察到,浅色藻结皮、深色藻结皮和混合结皮小区表面可见明显的薄层水流,而藓结皮表面水层厚度明显较小,这可能是藓结皮较大的厚度和糙度造成的。考虑野外暴雨持续时间,结合野外试验条件,藓结皮小区试验放水时间设为45 min,整个放水过程中藓结皮小区未产流,该小区试验所测得的径流流速和水流深与其他处理小区产流后所测会有所偏差,此时与其他处理小区的比较分析必然与真实情况存在偏差,但在一定程度上反映了该小区的真实情况。

3.3 生物结皮对产流过程及径流系数的影响

坡面产流过程受降雨、土壤及地形等因素的影响^[32]。在放水流量、土壤及地形等基本一致的情况下,不同的土壤表面特征是引起坡面产流过程差异的主要因素。研究结果显示不同处理间坡面瞬时径流量的变化过程差异较大。裸地小区产流4 min左右之后,产流量呈现平稳增加的趋势,这是因为其在产流后不久疏松分散的土壤表面便产生了细沟。不同类型生物结皮小区的瞬时径流量随放水历时的波动差异较大,表明坡面瞬时径流量的变化过程与生物结皮类型有关。浅色藻结皮瞬时径流量在产流后迅速增加,随后保持稳定,可能是因为浅色藻结皮较其他生物结皮处理斥水性最大^[28],且表面比较光

滑,未产生细沟。深色藻结皮瞬时径流量变化过程波动较大,是因为在放水开始后,深色藻斥水性比较大^[28],该小区很快产流,随后,随着生物结皮的湿润,其斥水性逐渐变小,入渗增加,瞬时径流量逐渐变小,入渗一段时间后,其入渗率逐渐变小,瞬时径流量又逐渐变大。混合结皮小区瞬时径流量随放水历时波动的的原因可能是,该小区藻结皮和藓结皮随机分布,水流在产流初期避开糙度较大的藓结皮而汇集在较光滑的藻结皮表面形成股流,所以瞬时径流量迅速增加,随后,藻结皮表面的水流逐渐向周围的藓结皮表面扩散、移动,线状水流向面状水流转变,从而增加了水分入渗,所以瞬时径流量逐渐下降,当小区表面全部湿润之后,藓结皮表面水分入渗率逐渐降低,小区瞬时径流量缓慢增加。考虑试验过程中的水流均为薄层水流,且不同处理重复之间存在微地形差异,因此不同处理重复之间的瞬时径流量变化过程差异较大,但仍能反映出不同处理之间的瞬时径流量变化过程规律。

径流系数是一个综合反映降雨特征、前期土壤含水量和地表特征的变量^[33],是反映产流状况的重要指标。研究结果显示,浅色藻结皮、深色藻结皮和混合结皮小区的径流系数均大于裸地,是因为裸地小区表面疏松,地表糙度大于各生物结皮小区。生物结皮处理中,浅色藻结皮的径流系数显著高于深色藻结皮,这可能与浅色藻结皮的斥水性比深色藻结皮大^[28],且表面较深色藻结皮光滑有关。藓结皮小区径流系数为0,是由于藓结皮厚度高,糙度大,而在试验所设2 L/min的水流流量和立地条件下,水流均为薄层水流,藓结皮能够将水分拦截于藓丛中,造成该小区未产流。

值得指出的是,试验中除裸地小区所收集的径流中含有少量泥沙外,其他生物结皮小区在试验中均无泥沙产生,因此试验未分析侵蚀产沙过程;此外,有关降雨条件下生物结皮对坡面产流的影响以及坡度和流量等因素对研究结果的影响尚需进一步试验研究。

4 结论

1) 生物结皮显著影响坡面初始产流时间和退水持续时间,影响程度与结皮类型有关。与裸地相比,浅色藻结皮、深色藻结皮及混合结皮使得坡面初始产流时间减少近10倍,但藓结皮却显著增加了初始产流时间。浅色藻结皮和混合结皮小区较裸地显著地延长了坡面退水持续时间,深色藻结皮与裸地的退水持续时间差异不显著。

2) 生物结皮显著影响坡面径流流速和径流深,影响程度与结皮类型有关。深色藻结皮和藓结皮较裸地显著地延缓径流流速,且藓结皮径流流速显著低于其他生物结皮处理;浅色藻结皮的径流深显著高于深色藻结皮,藓结皮径流深为0。

3) 生物结皮改变了坡面径流流失过程和径流系数,不同类型生物结皮径流流失过程和径流系数有较大差异。在产流时段内,裸地径流量保持平稳增加,浅色藻结皮小区的径流量在产流历时8 min左右后趋于稳定,深色藻结皮和混合结皮小区的径流量变化过程随产流历时波动较大;浅色藻结皮的径流系数显著高于裸地和深色藻结皮,深色藻结皮和混合结皮的径流系数较裸地差异不显著,藓结皮小区没有径流流出。

参考文献(References):

- [1] 芮孝芳. 产汇流理论研究的展望 [J]. 河海科技进展, 1991, 11(1): 60-65. [RUI Xiao-fang. Prospect of runoff yield and concentration study. *Advances in Science and Technology of Hohai University*, 1991, 11(1): 60-65.]
- [2] 高军侠, 刘作新, 党宏斌. 黄土高原坡面模拟降雨超渗径流特征分析 [J]. 土壤通报, 2004, 36(6): 780-784. [GAO Jun-

- xia, LIU Zuo-xin, DANG Hong-bin. Characteristic analysis of slope runoff over infiltration on simulative rainfall on Loess Plateau. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 36(6): 780-784.]
- [3] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 24-28. [WANG Zhan-li, JIN Xue-yan, MA Chun-yan, *et al.* Research on processes and responses of rainfall-runoff-sediment yield on Loess Hill slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 24-28.]
- [4] 何小武, 刘广全, 郭孟华. 黄土高原植被建设的水资源环境及对策 [J]. 水力学报, 2008, 39(7): 843-847. [HE Xiao-wu, LIU Guang-quan, GUO Meng-hua. On water resources environment for vegetation planning in the Loess Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(7): 843-847.]
- [5] 据彤军, 刘普灵, 徐学选, 等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究 [J]. 泥沙研究, 2007(4): 64-71. [JU Tong-jun, LIU Pu-ling, XU Xue-xuan, *et al.* Experimental study on runoff and sediment process in primary-lands in loess hilly regions under different rainfall conditions. *Journal of Sediment Research*, 2007(4): 64-71.]
- [6] 李毅, 邵明安. 草地覆盖坡面流体力学参数的室内降雨试验 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 1-5. [LI Yi, SHAO Ming-an. Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 1-5.]
- [7] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究 [J]. 地理研究, 2009, 28(3): 583-591. [FANG Hai-yan, CAI Qiang-guo, LI Qiu-yan. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influencing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 583-591.]
- [8] 张晓娜, 冯杰, 邵伟. 不同雨强下植被对坡地产汇流和溶质运移的影响 [J]. 河海大学学报, 2010, 38(3): 247-251. [ZHANG Xiao-na, FENG Jie, SHAO Wei. Influence of vegetation on overland runoff generation, flow concentration and solute transport under different rainfall intensities. *Journal of Hohai University*, 2010, 38(3): 247-251.]
- [9] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97-101. [WU Fa-qi, FAN Wen-bo. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 97-101.]
- [10] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24. [LI Xin-rong, ZHANG Yuan-ming, ZHAO Yun-ge. A study of biological soil crusts: Recent development, trend and prospect. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(1): 11-24.]
- [11] 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 Yun-ge, SHAO Ming-an. Effects of biological soil crust on saturated hydraulic conductivity in water-wind erosion crisscross region, North of Shaanxi Province, China. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(12): 35-40.]
- [12] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1316-1326. [GAO Li-qian, ZHAO Yun-ge, QIN Ning-qiang, *et al.* Impact of Biological Soil Crust on Soil Physical Properties in the Hilly Loess Plateau region, China. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1316-1326.]
- [13] 王蕊, 朱清科, 卜楠, 等. 黄土丘陵沟壑区生物土壤结皮理化性质 [J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 401-408. [WANG Rui, ZHU Qing-ke, BU Nan, *et al.* Study on physicochemical properties of biological soil crusts in the hilly-gully regions of the Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 401-408.]
- [14] 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 Yun-ge, YAO Chun-zhu, *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.]
- [15] 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 257-261. [LI Xin-rong, ZHANG Jing-guang, LIU Li-chao, *et al.* Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 257-261.]
- [16] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612-616. [LI Shou-zhong, XIAO Hong-lang, SONG Yao-xuan, *et al.* Impact of microbiotic soil crusts on rainfall interception in artificial vegetation area of Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(6): 612-616.]

- [17] 李小军, 汪君, 高永平. 荒漠化草原植被斑块分布对地表径流、侵蚀及养分流失的影响 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1112-1118. [LI Xiao-jun, WANG Jun, GAO Yong-ping. Effects of vegetation patchy distribution on runoff, erosion and nutrients loss in desertified steppe area. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1112-1118.]
- [18] 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 [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18: 387-393.
- [19] 吴永胜, 哈斯, 乌格特茉勒. 毛乌素沙地南缘沙丘表面径流特征 [J]. 科学通报, 2011, 56(34): 2917-2922. [WU Yong-sheng, Hasi E, Wugetemole. Characteristics of surface runoff in a sandy area in southern Mu Us sandy land. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(34): 2917-2922.]
- [20] 郑纪勇, 邵明安, 李世清, 等. 水蚀风蚀交错带土壤剖面水力学性质变异 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 64-66. [ZHENG Ji-yong, SHAO Ming-an, LI Shi-qing, et al. Variation of the hydraulic characteristics of soil profile in water-wind erosion crisscross region. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(11): 64-66.]
- [21] 贾恒义, 雍绍萍, 王富乾. 神木试区的土壤资源 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1993, 18: 36-46. [JIA Heng-yi, YONG Shao-ping, WANG Fu-qian. The soil resources of Shenmu experimental site. *Collected Papers of the Institute of Northwest Soil and Water Conservation, CAS*, 1993, 18: 36-46.]
- [22] 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理化性质的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4662-4670. [XIAO Bo, ZHAO Yun-ge, SHAO Ming-an. Effects of biological soil crust on soil physicochemical properties in water-wind erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4662-4670.]
- [23] Ali S. Soil roughness measurement: Chain method [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 48(6): 527-529.
- [24] 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 Ning-qiang, ZHAO Yun-ge. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2259-2264.]
- [25] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(6): 509-515.
- [26] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特, 等. 草地坡面径流调控放水试验研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 23-25. [FENG Hao, WU Shu-fang, WU Pu-te, et al. Study on scouring experiment of regulating runoff in grassland slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 23-25.]
- [27] 廖超英, 王翠萍, 孙长忠, 等. 黄土地表生物结皮对土壤贮水性能及水分入渗特征的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 54-59. [LIAO Chao-ying, WANG Cui-ping, SUN Chang-zhong, et al. Effects of biological soil crusts on soil water storage capability and permeability in loess area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 54-59.]
- [28] 张培培, 赵允格, 王媛, 等. 黄土高原丘陵区生物结皮土壤斥水性 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 657-663. [ZHANG Pei-pei, ZHAO Yun-ge, WANG Yuan, 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.]
- [29] 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 Yun-ge, MA Xin-xin. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 173-177.]
- [30] 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 坡面侵蚀动力学及其相关参数的探讨 [J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 16-19. [XIA Wei-sheng, LEI Ting-wu, ZHAO Jun. Discussion on the slope surface erosion dynamics and its parameters. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(4): 16-19.]
- [31] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 等. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 35-38. [FAN Hao-ming, WANG Tie-liang, ZHOU Li-li, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slopes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 35-38.]
- [32] 程琴娟, 蔡强国. 模拟降雨下黄土表土结皮的侵蚀响应 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 73-77. [CHENG Qin-juan, CAI Qiang-guo. Responses of soil surface crusts on soil erosion in loess under simulated rainfalls. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 73-77.]
- [33] Xu J X. Hyperconcentrated flows in the slope-channel systems in gullied areas on the Loess Plateau, China [J]. *Geografiska Annaler*, 2004, 86: 349-366.

Impact of Different Types of Biological Soil Crusts on Slope Runoff Generation

LI Lin¹, ZHAO Yun-ge^{1b}, WANG Yi-he^{1b,2}, WANG Yuan¹

(1. a.College of Resources and Environment, b. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Biological soil crusts (biocrusts) are non-ignorable influence factors of soil and water loss in the Loess Plateau region of China, however the impact of biocrusts on slope runoff generating is poorly understood so far. In Liudaogou small catchment that locates in Shenmu County, north of Shaanxi Province, the impact of four types of biocrusts and bare soil (no biocrusts) on runoff generating were studied in the runoff plots through simulated overland flow experiment. The four types of biocrusts were light cyanobacterial crust, dark cyanobacterial crust, cyanobacterial with moss crust (mixed crust hereafter) and moss dominated crust, which represent four different succession stages of biocrusts in the region. The results showed that: 1) compared with bare land, both light, dark cyanobacterial crusts and mixed crusts significantly reduced the time of runoff initiation by 89.0%, 96.2% and 96.0%; While the moss dominated crust markedly increased the time of runoff initiation. 2) The duration of runoff recession on light cyanobacterial crust and mixed crust were respectively 2.28 and 2.13 times higher than that on bare land; while that on dark cyanobacterial crust had no significant difference with that on bare land plot. 3) The runoff velocity was reduced by 29.1% by the dark cyanobacterial crust and 67.3% by the moss dominated crust compared with that on bare land; The runoff velocity on moss dominated crust was markedly slower than that on the other biocrust land. The runoff depth in biocrust plots did not show significant difference with that in bare land plot; The runoff depth on light cyanobacterial crust was significantly deeper than that on dark cyanobacterial crust. 4) The process and the amount of runoff in plots with different types of biocrusts showed obvious differences with that in bare land plots; The runoff coefficient in light cyanobacterial crust plot was significantly higher than that in bare land plots, while the runoff coefficient in dark cyanobacterial crust plots and mixed crust plots had no significant difference with that in bare land plot. The runoff coefficient in light cyanobacterial crust plot was 2.44 times higher than that in dark cyanobacterial crust plots; No runoff generated on moss dominated crust during the runoff period. The results suggested that biocrusts are important influence factors on runoff generation, and the extend of influence was related to the succession stages and the composition of the biocrusts.

Key words: biological soil crust; runoff characteristics; runoff velocity; runoff depth; runoff coefficient