

踩踏干扰下生物结皮的水分入渗与水土保持效应

冯伟¹, 叶菁²

(1. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100055; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为改善生物结皮对土壤水分的负面影响,通过野外定位观测试验,从入渗、产流产沙两方面探讨了黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮在 3 种踩踏强度下的水土保持效应。结果表明:(1) 相比裸土,未被踩踏的生物结皮对水分入渗、地表径流的表现形式并非单一的增加或降低,在雨季初期增渗减流,初期过后减渗增流;(2) 不同踩踏强度对水分入渗、地表径流的影响存在明显差异。同裸地对照相比,轻度踩踏结皮增渗 12%,减流 23.2%,中度踩踏结皮减渗 3.6%,减流 5.3%,重度踩踏结皮减渗 25.5%,增流 21.3%;(3) 不论是否被踩踏,生物结皮产生的泥沙量都显著低于裸土。同裸土产生的泥沙量相比,轻度踩踏减少 56.3%,中度踩踏减少 43.5%,重度踩踏减少 37.9%,但中度、重度踩踏结皮改变了原先土壤侵蚀格局,增加了泥沙含量。综合考虑入渗和土壤侵蚀认为:轻度踩踏生物结皮可在不增加土壤侵蚀的前提下,促进入渗,减少径流,改善土壤水分状况。

关键词:生物结皮; 踩踏; 入渗; 径流泥沙

中图分类号:S157.1; S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0034-04

Effects of Biological Soil Crusts on Infiltration and Soil and Water Conservation Under Trample Disturbance

FENG Wei¹, YE Jing²

(1. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to improve soil moisture condition, we examined the effect of soil and water conservation of biological soil crusts (BSCs) under 3 trampling intensities widespread in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau through two aspects which were rainfall infiltration-runoff and sediment based on the field observation. The results are as follows: (1) The performance of infiltration-runoff of BSCs without trampling did not only increase or reduce compared with the control. BSCs increased infiltration and reduced runoff in the initial period of rainy season, but conversely in the later period. (2) The effects of trampling intensities on infiltration-runoff had significant differences. Compared to the control, mild trampling BSCs increased infiltration by 12% and reduced runoff by 23.2%, moderate trampling BSCs reduced runoff by 5.3% and infiltration by 3.6%, severe trampling BSCs reduced infiltration by 25.5% and increased runoff by 21.3%. (3) Whether being trampled or not, BSCs significantly decreased sediment content compared with bare soil. The mild decreased by 56.3%, the moderate decreased by 43.5% and the severe decreased by 37.9%, but the latter two were significant higher than untrampled BSCs. Considering the infiltration and soil erosion, BSCs with mild trampling could promote infiltration, reduce runoff and improve soil moisture conditions in the premise of causing insignificant soil erosion.

Keywords: biological soil crusts; trample; infiltration; runoff and sediment

生物结皮(biological soil crusts, BSCs)指由细菌、真菌、藻类、地衣、苔藓等生物组份及其代谢产物与土壤颗粒物胶结而成的复合体^[1],是干旱、半干旱地区普遍存

在的地被物。生物结皮菌丝和微生物分泌物具有粘结和固定土壤作用^[2],对提高土壤的稳定性^[3]、积累土壤养分^[4-5]和降低土壤侵蚀^[6-7]都有重要作用。

收稿日期:2015-01-07

修回日期:2015-03-09

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41071192, 40701096);西北农林科技大学科研专项(2014YQ006)

第一作者:冯伟(1977—),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,研究方向为水土保持管理。E-mail:fengwei@mwr.gov.cn

通信作者:叶菁(1989—),女,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为生物土壤结皮。E-mail:yejing3306@163.com

陕北黄土区是水蚀风蚀交错区的中心,是黄土高原比较独特的自然地带,该区气候变化剧烈,地形和产沙地层复杂^[8],水土流失严重,长期以来一直是生态环境建设的重点和难点。“退耕还林还草”工程实施以来,该区生物结皮广泛发育,成为脆弱生态环境中水文效应及土壤侵蚀的重要影响因素之一。目前,黄土区生物结皮的研究尚处于起步阶段,有关生物结皮对下伏土壤理化性质的影响、生物结皮的土壤贮水性能及水分入渗特征、生物结皮的抗冲性、生物结皮的分布及其影响因素等均有报道^[4]。李莉等^[9-12]在陕北开展了生物结皮对水分入渗、土壤侵蚀、土壤酶活性的影响研究,以及人工培育条件下生物结皮的养分积累及水土保持效应。我们发现,黄土区苔藓结皮土壤水分存在浅层化现象,长期以往不利于植被正向演替,而有关如何改善此现象的研究还鲜有报道。鉴于此,本文在该区开展苔藓结皮干扰试验,试图通过扰动生物结皮,以常见干扰方式“踩踏”作为干扰方式,分析不同强度的踩踏对水分入渗及产流产沙的影响,寻找增渗减流的最适干扰强度,这对科学管理生物结皮资源具有重要的实践价值。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北神木县境内六道沟小流域,地理坐标为 110°21′—110°23′E,38°46′—38°51′N,海拔 1 094.0~1 273.9 m^[8],地理位置上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过渡地带,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,年侵蚀模数达 10 000 t/km²^[13],是黄土高原北部水土流失最为严重的区域。冬春季干旱少雨多风沙,夏秋多雨且暴雨频繁,多年平均降雨量为 408.5 mm,主要集中在 6—9 月。流域内的主要植被有柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)和茼蒿(*Artemisia giraldii*)等。流域内生物结皮主要为发育较为稳定的苔藓结皮,主要分布水分条件较好的梁峁坡或梁梁峁顶上,据调查,结皮盖度大多介于 60%~70%。

1.2 研究方法

1.2.1 小区布设 选择典型坡面于 2014 年 4 月修建 15 个坡面径流小区,移植非耕作性黄土地表发育稳定的生物结皮原状土层(6 cm)到 12 个小区,生物结皮主要组成是苔藓结皮。每个小区长×宽为 2 m×1 m,坡向北偏西,坡度为 15°,中部位置安装 2 m 长的 TDR 测管,用于测定土壤剖面水分含量;底部出口处安装小型集流桶,收集次降雨产生的径流和泥沙。待生物结皮生长恢复到正常生长状态,于 2014 年 6 月 25 日对生物结皮进行踩踏处理,以人(45 kg)穿上木制羊蹄鞋行走于结皮小区模拟放牧羊群踩踏,羊蹄底面积为 30 cm²,轻度踩踏为踩踏 30%结皮小区面积(0.6 m²),中度踩踏为踩踏 60%结皮小区面积(1.2 m²),重度踩踏为踩踏 90%结皮小区面积(1.8 m²)。每个处理 3 个重复,上中下 3 排。表 1 为试验小区 0—10 cm 结皮表层基本情况。

表 1 试验小区基本情况

处理	处理 编号	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤饱和导水率/ (10 ⁻³ cm·s ⁻¹)	土壤饱和 含水量/%	生物结皮 盖度/%	生物结皮 厚度/mm	苔藓植株 高度/mm	抗剪强度/ (kg·cm ⁻²)
无结皮	I	1.38±0.04	4.9±0.4	35.2±0.3	0	0	0	2.4±0.9
无踩踏	II	1.36±0.07	4.8±0.3	36.3±0.5	86±5	10.3±1.5	4.0±0.3	3.4±0.9
轻度踩踏	III	1.38±0.07	4.6±0.5	36.6±0.4	77±4	9.7±1.5	2.8±0.4	3.9±0.7
中度踩踏	IV	1.42±0.08	4.3±0.9	37.0±0.8	75±3	10.3±1.5	2.8±0.1	4.0±0.9
重度踩踏	V	1.45±0.11	4.2±0.8	36.8±1.1	80±5	10.0±1.4	2.4±0.2	4.3±0.9

注:(1) 结皮厚度、苔藓株高用游标卡尺测定,为平均值±标准差($n=12,60$);(2) 抗剪强度由袖珍剪力测量仪在地表干燥状态下测定,为平均值±标准差($n=18$);(3) 其余指标于实施干扰后的一个星期(2014 年 6 月 29 日)利用常规方法测定,为平均值±标准差($n=3$),利用目估法结合利用 Image J 1.48 v 进行处理结皮小区照片获得结皮盖度。下文直接用处理编号代指处理水平。

1.2.2 测定项目与方法 试验监测选择在 2014 年 7—10 月(雨季)进行,使用 TDR(TRIME-IPH)测定小区中部 180 cm 剖面水分,测定间距为 10 cm,监测频次为每 10 天测定 1 次土壤水分。在预报有降雨情况下,在降雨前、后的 24 h 内加测土壤含水量,用次降雨前、后土壤储水量的差值表示入渗量(mm)。在每场降雨结束后,降雨量采用标准雨量计观测获取。

用量筒测定径流桶中的径流体积,利用称重法计算径流中泥沙含量,计算公式参考文献^[14]。降雨量和雨强数据来自于中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站。

1.3 数据处理

试验数据运用 Microsoft Excel 2010 处理和 SPSS 16.0 进行单因素 ANOVA 分析。

2 结果与分析

2.1 踩踏强度对水分入渗的影响

通过监测整个观测期 12 次产流降雨前后土壤剖面水分含量,计算出各次降雨的水分入渗量,结果见表 2。不难看出,处理Ⅱ与对照处理Ⅰ水分入渗量在雨季有 9 次降雨差异不显著,在前 3 次产流降雨,处理Ⅱ水分入渗量高于处理Ⅰ,而在之后水分入渗低于处理Ⅰ,表明生物结皮并非单一的促进或是抑制土壤水分入渗,这与李莉等^[9]的研究结果一致。可能是由于降雨时间间隔、降雨特征及蒸发等野外复杂条件导致土壤表层水分含量存在差异,从而影响水分入渗。但就入渗量总和而言,生物结皮相比对照减少水分入渗 1.2%,即可推断出发育较成熟稳定的生物结皮在自然条件或长期禁牧条件下阻碍水分入渗。有研究表明围栏禁牧 15 a 生物结皮降低了水分的入渗速率和下渗深度^[15],这可能与生物结皮本身致密结构和吸水特性有关。

不同强度踩踏下生物结皮的水分入渗量存在差

异(表 2)。处理Ⅲ水分入渗量在雨季有 4 次降雨显著高于对照处理Ⅰ,6 次差异不显著,但入渗量总和显著高于无结皮对照,增渗 12%,意味着轻度踩踏生物结皮总体上有利于促进水分入渗,主要是由于踩踏强度小,被压实的土壤面积小,踩踏导致周围结皮层破碎利于雨水下渗,最后表现为促进水分入渗。处理Ⅳ水分入渗量在雨季有 8 次降雨与对照处理Ⅰ差异不显著,且有 3 次显著低于对照,入渗量总和稍低于对照,减渗 3.6%,但两者差异不显著,说明此强度下的踩踏结皮对水分入渗贡献作用不大。处理Ⅴ水分入渗量在雨季有 5 次降雨显著低于对照,其余 7 次相比对照没有显著性差异,整个观测期入渗总量显著低于无结皮对照,减渗 25.5%。分析原因,一方面是重度踩踏直接压实表层土壤,使土壤孔隙度和导水性能下降,通气透水性变差,降水多集中在土壤表层不能够向下渗透;另一方面高强度的踩踏结皮,影响具有一定高度的苔藓植株生长,降雨在地表的停留时间降低,导致水分入渗量减少。

表 2 不同处理下的入渗量及入渗总量

处理	土壤水分入渗量												总入渗量 mm
	07-09	07-11	07-14	07-16	07-29	08-04	08-27	09-01	09-11	09-16	09-23	10-01	
Ⅰ	4.4±0.2a	1.0±0.1bc	2.1±0.1bc	2.1±0.1ab	10.1±0.5b	3.8±0.2b	11.0±0.6ab	4.1±0.2b	6.7±0.4ab	3.3±0.2a	0.9±0.1b	3.6±0.2a	53.0±2.8b
Ⅱ	4.8±0.2a	2.2±0.1a	2.8±0.1ab	1.6±0.1bc	9.2±0.5c	3.5±0.2bc	10.6±0.5b	4.0±0.2ab	5.7±0.3c	3.3±0.2a	1.0±0.1b	3.5±0.2a	52.5±2.8b
Ⅲ	4.4±0.3a	1.8±0.2ab	3.2±0.2a	1.1±0.1c	11.8±0.9a	5.4±0.4a	11.3±0.9a	5.0±0.4a	6.9±0.5a	2.4±0.2b	1.7±0.1ab	4.0±0.3a	59.4±4.5a
Ⅳ	3.4±0.3b	1.1±0.1bc	2.8±0.2ab	2.8±0.2a	8.8±0.8c	3.3±0.3b	9.7±0.8c	4.3±0.4ab	6.1±0.5bc	3.4±0.3a	2.0±0.2a	3.5±0.3a	51.1±4.4b
Ⅴ	2.7±0.3b	0.5±0.1c	1.6±0.2c	2.4±0.2ab	6.4±0.6d	3.1±0.3b	9.0±0.95c	3.5±0.3b	4.8±0.5d	1.2±0.1c	1.0±0.1b	3.3±0.3a	39.5±3.8c

注:表中每列不同小写字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著($p<0.05$)。

2.2 踩踏强度对地表径流的影响

整个观测期(2014 年 7—10 月)共计产流 12 次,产流降雨共计 208.0 mm,占整个观测期总降雨量的 66.45%。从表 3 可以看出,处理Ⅱ在雨季初期(7 月份)地表径流量小于对照,之后显著高于对照或处理间差异不显著。通过计算径流总量,发现处理Ⅱ(27.0 mm)几乎与裸地对照(26.9 mm)一致,可推测出生物结皮在野外长期自然条件下不利于减少径流,无疑造成水分的无效损失和植物缺水;结合试验期间降雨情况,影响生物结皮地表径流量的主要原因可能是降雨强度和降雨量。在降雨初期由于雨强或雨量较小,生物结皮延长雨水在地表的停留时间缓慢入渗,减少径流。由于前期降雨入渗、生物结皮的持水性和导水性,在雨强较大时生物结皮来不及入渗,均使土壤表层含水量较高,从而使得入渗产流时间提前,径流增多^[16]。

由表 3 可知,处理Ⅲ在试验期内有 7 次降雨地表径流显著低于对照,其余 5 次统计未达显著水平,12 次

径流量之和是处理Ⅰ的 0.768 倍,即减少径流 23.2%,表明轻度踩踏生物结皮可明显减少地表径流,促进水分入渗。处理Ⅳ在 7 月份有 2 次降雨地表径流量显著低于对照,其余 10 次为差异不显著,因此 12 次地表径流量之和低于对照,但差异不显著。即中度踩踏对生物结皮地表径流的调控作用小。处理Ⅴ地表径流量在试验期内有一半显著高于对照,总径流量是处理Ⅰ的 1.21 倍,说明重度踩踏生物结皮造成地表径流增加 21.3%。分析踩踏处理间地表径流差异显著的原因,主要是由踩踏强度导致土壤的物理结构和生物结皮本身生长状况的改变引起的。轻度踩踏对生物结皮及表土破坏程度小,可起到打破原先生物结皮致密结构和增加土壤通气透水性的作用,从而减少地表径流。相反,重度的踩踏对生物结皮及表土破坏程度大,大面积结皮表土被压实,土壤容重变大,渗透性降低,加上大面积的生物结皮被踩踏,表面更加平整,促进地表径流的产生。中度踩踏小区与无踩踏结皮

小区地表径流量相近, 可认为中度是区分径流正负效应的临界强度, 小于中度的踩踏强度对地表径流具有

正效应, 表现为减少径流, 大于中度的踩踏强度对地表径流则具有负效应, 表现为增加径流。

表 3 不同处理下的地表径流量

降雨日期	雨量/ mm	雨强/ (mm · h ⁻¹)	径流深度/mm				
			处理 I	处理 II	处理 III	处理 IV	处理 V
07-09	19.0	0.9	0.6±0.1a	0.2±0.1b	0c	0.2±0.1b	0.3±0.1b
07-11	5.4	1.0	0.9±0.1b	0.3±0.1b	0.2±0.1b	0.6±0.1b	2.1±0.1a
07-14	7.4	5.4	1.0±0.1a	0.2±0.1b	0.2±0.1b	0.3±0.1b	0.9±0.1a
07-16	14.2	16.3	3.7±0.2ab	3.6±0.3ab	2.9±0.5b	3.1±0.6b	4.3±0.2a
07-29	30.8	15.4	5.2±0.3b	5.3±0.5b	4.7±0.8b	5.9±1.1ab	6.9±0.3a
08-04	15.4	12.7	4.8±0.3a	5.1±0.5a	3.5±0.6b	4.8±0.9a	5.6±0.3a
08-27	49.4	10.5	8.0±0.2b	8.9±0.8a	7.7±1.4b	8.3±1.6ab	9.1±0.5a
09-01	10.8	1.5	1.5±0.1abc	2.0±0.2a	0.9±0.2c	1.2±0.2bc	1.7±0.1ab
09-11	18.6	9.5	0.2±0.0b	0.2±0.1b	0c	0.2±0.1b	0.5±0.1a
09-16	12.2	7.6	0.11±0.1b	0.1±0.1b	0c	0.2±0.1ab	0.2±0.1a
09-23	8.4	11.5	0.4±0.1a	0.3±0.1a	0.2±0.1b	0.4±0.1a	0.4±0.1a
10-01	16.4	5.4	0.6±0.1b	0.9±0.1a	0.5±0.1b	0.5±0.1b	0.8±0.1a
总值	208.0	—	26.9±1.4b	27.0±2.5b	20.7±3.7c	25.6±4.9b	32.7±1.6a

注: 表中每行不同小写字母表示差异显著, 相同字母表示差异不显著 ($p<0.05$), 下表同。

2.3 踩踏强度对产沙量的影响

产沙量与地表径流量密切相关, 通过计算上述 12 次产流降雨产沙量, 由表 4 可知, 在试验期内处理 II 产生的泥沙量有 9 次显著低于无结皮对照, 泥沙总量相比裸土减少 54.9%, 原因主要是生物结皮能有效地抵御降雨过程中雨滴的击打和冲刷, 减少土壤表层沉积的损失^[17]。相比裸土对照, 处理 III 12 次产沙量之和减少 56.3%, 与处理 II 没有显著性差异, 表明轻度踩踏降低土壤侵蚀的效益非常明显。处理 IV 和

处理 V 两个处理总产沙量都显著低于对照, 比裸土分别减少 43.5% 和 37.9%。原因主要是踩踏干扰并未明显降低生物结皮的盖度, 生物结皮仍可发挥减少土壤表层沉积损失的巨大作用。但相比无踩踏处理, 中度、重度踩踏增加土壤侵蚀中的泥沙含量, 这与踩踏破坏表层土壤结构有直接关系。综合考虑入渗和土壤侵蚀认为: 轻度踩踏能在不加剧土壤侵蚀的前提下增加入渗, 减少地表径流, 改善土壤水分状况, 进而带来加速生态系统正向演替的积极意义。

表 4 不同处理下的产沙量及产沙总量

降雨日期	雨量/ mm	产沙量/ (g · m ⁻²)	径流深度/mm				
			处理 I	处理 II	处理 III	处理 IV	处理 V
07-09	19.0	0.9	16.6±0.9a	5.8±0.6b	0c	6.2±0.6b	5.0±0.3b
07-11	5.4	1.0	20.0±1.1a	7.1±0.8d	10.2±1.8c	14.8±1.5b	15.8±1.0b
07-14	7.4	5.4	20.7±1.1a	1.9±0.2c	2.9±0.5c	3.7±0.4c	8.5±0.6b
07-16	14.2	16.3	47.6±2.5a	23.6±2.6c	22.5±3.9c	24.4±2.5c	35.6±2.3b
07-29	30.8	15.4	44.3±2.3a	21.2±2.3c	18.1±3.1c	20.6±2.1c	27.2±1.8b
08-04	15.4	12.7	63.3±3.3a	21.8±2.3d	22.5±3.9d	40.6±4.1b	30.2±2.0c
08-27	49.4	10.5	152.1±8.0a	85.1±9.2d	88.2±15.3cd	98.4±9.9bc	104.3±6.7b
09-01	10.8	1.5	7.4±0.4a	1.4±0.2c	1.0±0.2c	1.2±0.1c	4.3±0.3b
09-11	18.6	9.5	2.3±0.1a	1.7±0.2a	0b	1.7±0.2a	1.9±0.1a
09-16	12.2	7.6	1.6±0.1a	0.8±0.1a	0b	1.3±0.1a	1.1±0.1a
09-23	8.4	11.5	2.2±0.1a	0.8±0.1a	0.8±0.1a	1.1±0.1a	1.7±0.1a
10-01	16.4	5.4	4.4±0.2a	1.6±0.2b	1.0±0.2b	2.2±0.2b	2.2±0.1b
总值	208.0	—	382.6±20.1a	172.6±18.6d	167.3±29.0d	216.1±21.8c	237.7±15.3b

3 结论

(1) 相比裸地对照, 轻度踩踏生物结皮促进水分入渗, 降低土壤侵蚀; 重度踩踏生物结皮降低水分入渗和产沙量, 增加地表径流; 中度踩踏生物结皮减少

产沙量, 入渗和地表径流无明显变化。

(2) 轻度踩踏能在不加剧土壤侵蚀的前提下增加水分入渗, 减少地表径流, 改善土壤水分状况。轻度踩踏是最适干扰强度。

- and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2): 115-125.
- [10] Romic D, Romic M, Borosic J, et al. Mulching decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 87-97.
- [11] Tiwari K N, Singh A, Mal P K. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) under mulch and non-mulch conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(1): 19-28.
- [12] Carter D C, Miller S. Three years experience with an on-farm macro-catchment water harvesting system in Botswana[J]. Agricultural Water Management, 1991, 19(3): 191-203.
- [13] 王琦, 张恩和, 李凤民, 等. 半干旱地区沟垄微型集雨种植马铃薯最优沟垄比的确定[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 38-41.
- [14] 寇江涛, 师尚礼. 旱地垄沟集雨种植紫花苜蓿最佳沟垄宽比的确定[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 247-252.
- [15] 李永平, 贾志宽, 刘世新, 等. 宁南山区旱地苜蓿垄沟集水种植生物群体生长特征及其水分利用效率[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 199-201, 204.
- [16] 丁瑞霞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区沟垄微型集雨种植谷子最优沟垄宽度的确定[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 12-16.
- [17] 杨封科. 旱作春小麦垄膜沟种微集水种植技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 47-49.
- [18] 王晓凌, 董普辉. 密度对垄沟覆膜集雨冬小麦产量的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 222-226.
- [19] 强生才, 张恒嘉, 莫非, 等. 微集雨模式与降雨变律对燕麦大田水生态过程的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2365-2373.
- [20] 王俊鹏, 韩清芳, 王龙昌, 等. 宁南半干旱区农田微集水种植技术效果研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(4): 16-20.
- [21] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243-254.
- [22] 李小雁, 张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 45-48, 52.
- [23] 曹玉琴, 刘彦明, 王梅春, 等. 旱作农田沟垄覆盖集水栽培技术的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 74-78.
- [24] 樊廷录. 旱地农田微集水种植的水分生产潜力增进机理研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 98-100.

(上接第 37 页)

参考文献:

- [1] 李金峰, 孟杰, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 67-79.
- [2] 李聪会, 朱首军, 陈云明, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 6-10.
- [3] Bowker M A, Miller M E, Belnap J, et al. Prioritizing conservation effort through the use of biological soil crusts as ecosystem function indicators in an arid region[J]. Conservation Biology, 2008, 22(6): 1533-1543.
- [4] 孟杰, 卜崇峰, 赵玉娇, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1864-1874.
- [5] 肖波, 赵允格, 许明祥, 等. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1019-1026.
- [6] 赵建成, 张丙昌, 张元明. 新疆古尔班通古特沙漠生物结皮绿藻研究[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 189-194.
- [7] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
- [8] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000, 224(11): 11-12.
- [9] 李莉, 孟杰, 杨建振, 等. 不同植被下生物结皮的水分入参与水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 105-109.
- [10] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 808-812.
- [11] 孟杰. 黄土高原水蚀交错区生物结皮的时空发育特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [12] 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.
- [13] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 321-327.
- [14] 路炳军, 袁爱萍, 章文波. 径流小区集流桶(池)泥沙含量快速测定方法探讨[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 15-17.
- [15] 熊好琴, 段金跃, 王妍, 等. 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 82-87.
- [16] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 5-10.
- [17] 秦宁强. 黄土丘陵区生物土壤结皮对降雨侵蚀力的响应及影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.