

放牧干扰背景下藓结皮对毛乌素沙地 土壤水分与风蚀的影响

李新凯^{1,2}, 卜崇峰^{1,3}, 李宜坪⁴, 李炳垠³, 鞠孟辰³, 王清玄^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为掌握在放牧干扰背景下生物结皮对土壤水分与风蚀的影响,并探讨适度干扰改善土壤水分状况的可行性,在毛乌素沙地选定的典型样地建立监测小区,进行了土壤水分和风蚀的定位监测试验。结果表明:(1)藓结皮的存在能够提高沙蒿、沙柳和柠条0—80 cm的根土层土壤水分,但同时也使80—200 cm的深层土壤含水量下降;植被间无干扰的藓结皮同样能提高土壤含水量;重度干扰有利于提高0—80 cm的根土层和80—200 cm的深层土壤水分含量。(2)藓结皮的存在有利于减轻沙蒿、柠条和沙柳下方沙土风蚀,3种灌木投影下方藓结皮小区的风蚀量与植被下裸地相比分别减少了92.8%、11.3%和104.2%;藓结皮受到剧烈及以上强度的干扰会使土壤更易遭受风蚀。(3)在本研究中,重度干扰的藓结皮在不加剧风蚀的同时,有利于提高0—200 cm深度内的土壤水分,肯定了适度干扰的可行性。

关键词:藓结皮; 土壤水分; 风蚀; 毛乌素沙地

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0022-07

Influences of Moss Crusts on Soil Moisture and Wind Erosion Under Grazing Disturbance in Mu Us Sandy Land

LI Xinkai^{1,2}, BU Chongfeng^{1,3}, LI Yiping⁴, LI Bingyin³, JU Mengchen³, WANG Qingxuan^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil

and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of

Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This research has implemented a stationary monitoring experiment of soil moisture and wind erosion within the typical sampling plot in Mu Us Sandy Land, which is for the purpose of understanding the influences of biological soil crusts on soil moisture and wind erosion, and discusses the feasibility of moderate disturbance in improving the condition of soil moisture. The results indicated that: (1) for *Artemisia desertorum*, *Salix psammophila* and *Caragana korshinskii*, the moss crusts were able to improve the soil moisture of root layer of 0—80 cm but meanwhile reduced the soil moisture of deep layer of 80—200 cm; soil moisture also could be increased by the undisturbed moss crusts among plants; for root layer of 0—80 cm and deep layer of 80—200 cm, ‘severe disturbance’ was positive for the improving of soil moisture; (2) moss crusts were beneficial for reducing sediment by wind erosion under *Artemisia desertorum*, *Salix psammophila* and *Caragana korshinskii*, the quantity of wind erosion of moss crusts under *Artemisia desertorum*, *Salix psammophila* and *Caragana korshinskii* decreased by 92.8%, 11.3% and 104.2%, respectively, compared with the bare land under these three plants; it is more vulnerable for soil to be eroded by wind if the soil suffered ‘excessive disturbances’ or above; (3) in this research, the moss crusts with ‘severe disturbance’ was in favor of improving soil moisture in 0—200 cm if the wind erosion would not aggravate in this case, which

confirmed the feasibility of moderate disturbance.

Keywords: moss crusts; soil moisture; wind erosion; Mu Us Sandy Land

生物土壤结皮是由土壤颗粒与藻类、真菌、地衣、苔藓以不同的比例紧密结合而形成,是干旱、半干旱地区常见的地表覆盖物^[1-3]。苔藓、真菌和许多地衣的原丝体、菌丝和假根,以及许多藻类产生的丝状体能够固定土壤颗粒,与高等植物根系固定土壤颗粒的功能很相似^[4]。大量研究证实生物结皮能够增强土壤稳定性,提高土壤抵抗风蚀和水蚀的能力^[5-7]。沙漠地区的维管植物通常低矮稀疏,个体间出现较大的空地,枯落物量也比较少,在干旱、半干旱地区抵御土壤风蚀的作用有限,生物结皮对土壤稳定性的作用在这种情况下显得尤为重要^[8]。

在干旱、半干旱地区,水是限制植物生长主要的因素之一^[9]。生物结皮的存在会导致沙地生态系统土壤水分重分布^[10],生物结皮通过改变土壤理化性质和生物学特性影响局部水文循环的不同方面^[3,11]。而学者在腾格里沙漠和毛乌素沙地的研究表明,发育稳定且具有高盖度的生物结皮影响降水向深层土壤入渗,导致土壤水分浅层化,影响当地灌木生长^[12-13]。干扰影响生物结皮盖度、物种组成和生理功能^[14-15],生物结皮受到干扰后,土壤属性、微地形等环境条件发生改变,土壤水文过程也随之变化。因此,有学者提出了破坏生物结皮以增加干旱区植被生态用水、防治水土流失的构想,我国学者也在1991年提出对生物结皮进行适度干扰的生态管理理念^[16]。少量研究初步证实,适度的移除、踩踏等人为干扰能够在不显著增加侵蚀的情况下增加入渗,改善土壤水分状况^[17-19]。调查发现,苔藓主导的生物结皮在毛乌素沙地广泛分布,放牧干扰是毛乌素沙地生物结皮主导的干扰类型。截止目前,有关生物结皮土壤水文、风蚀等对放牧干扰响应的研究鲜有报道,生物结皮适度干扰的可行性尚有争议^[20]。基于以上原因,本研究在前期调查的基础上,在毛乌素沙地选定一处典型的藓结皮样地进行土壤水分和风蚀的长期定位观测,探讨在放牧干扰的背景下,生物结皮对毛乌素沙地土壤水分和风蚀的影响,并验证适度干扰的可行性,以期对毛乌素沙地生物结皮资源的保护和管理提供借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 研究地概况

研究样地位于陕西省榆林市榆阳区孟家湾乡,地理坐标109°36′14.07″—109°36′24.68″E,38°32′50.57″—38°32′54.60″N,海拔1148~1153 m。该地区属中温

带半干旱大陆性季风气候,年平均气温8.3℃,年均降水量405 mm,降水主要集中在6—9月^[21]。该样地处于毛乌素沙地东南缘,地貌类型以起伏的固定和半固定沙丘为主。主导的灌木为沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙柳(*Salix psammophila*)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*),在样地内多呈簇状均匀散布。草本植物主要为沙竹(*Psammochloa villosa*)和狗娃花(*Heteropappus hispidus*),在样地内零星分布。藓结皮在地势低洼的丘间地多成斑块状或连片分布,沙蒿、沙柳和柠条的冠层下方及植被间空地都存在藓结皮。通过对牲畜遗留的蹄印、粪便的分布情况的调查发现,放牧干扰多发生在植被间空地,分布于植被间的藓结皮更易受到干扰,而植被投影下方的藓结皮几乎无干扰发生。样地内的藓结皮大多已发育至稳定阶段,结皮形态多呈丘状起伏,具有较强的抗侵蚀能力^[3]。因受干扰的程度不同,结皮盖度在不同位置差异较大,盖度最高可达90%以上。

1.2 研究方法

1.2.1 小区布设 试验小区设置及立地背景见表1,试验小区实景见图1。植被投影下方小区由植被下藓结皮和植被下裸地小区组成,按植被类型分为3个对照组(以植被下裸地为对照),每个对照组选取大小和形态特征相似灌丛,在其投影下方建立小区。沙蒿、柠条和沙柳下藓结皮小区建立在盖度较高且发育良好的藓结皮斑块上,植被下裸地小区建立在植被下方无结皮的裸沙上。植被间空地小区由裸地和不同干扰程度的藓结皮小区组成。裸地小区建立在周围无植被的裸沙地块上。放牧干扰在藓结皮斑块施加的压力和剪力作用使完整的藓结皮趋于破碎化,藓结皮的盖度与干扰强度呈正相关^[14]。本研究中的放牧干扰为自然状态下的随机干扰,参考冯伟^[18]、叶菁^[19]等有关干扰强度的划定方法,我们将样地内植被间藓结皮的放牧干扰划分为5个干扰强度:无干扰(盖度>80%)、轻度干扰(60%<盖度<80%)、中度干扰(40%<盖度<60%)、重度干扰(20%<盖度<40%)和剧烈干扰(盖度<20%)。在样地内的植被间空地选定符合以上5个干扰强度的藓结皮斑块建立不同干扰强度下的藓结皮小区。试验小区呈边长为1 m的正方形,每个处理2个重复,重复小区留1 m左右间隔,在小区的4个顶点钉上木桩以确定边界。为防止小区在观测期内再次受到放牧的影响,小区划定完

成后,在周边设置铁丝网围栏加以保护。最后在每个小区的中心位置用专用土钻打孔,埋设 2 m 长的 TDR 水分测管,用于剖面土壤水分的测定;并在每个小区中部垂直插入 1 根 50 cm 长,直径 2 mm 的钢钎,所有钢钎起始时地上部分长 30 cm,埋深 20 cm,用于监测各小区风蚀量。



图 1 试验小区实景

表 1 试验小区设置及立地背景

小区 位置	处理 类型	处理 代号	结皮 盖度/%	结皮 厚度/mm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
植被投影下方	沙蒿下裸地	Ar	—	—	1.60±0.03
	柠条下裸地	Ca	—	—	1.60±0.03
	沙柳下裸地	Sa	—	—	1.60±0.03
	沙蒿下藓结皮	ArC	48.5±1.5	13.5±1.6	1.42±0.00
	柠条下藓结皮	CaC	44.5±4.5	10.8±0.2	1.42±0.00
	沙柳下藓结皮	SaC	23.5±3.5	8.7±0.6	1.42±0.00
植被间空地	裸地	BL	—	—	1.42±0.00
	无干扰藓结皮	UC	92.0±3.0	7.6±0.2	1.42±0.00
	轻度干扰藓结皮	LC	69.0±1.0	8.7±0.6	1.42±0.00
	中度干扰藓结皮	MC	47.5±1.5	9.7±0.1	1.42±0.00
	重度干扰藓结皮	SC	25.5±2.5	8.7±1.0	1.42±0.00
	剧烈干扰藓结皮	EC	17.5±2.5	8.9±0.6	1.42±0.00

$$W=100\rho_b\Delta h$$

式中:W 为风蚀量(t/hm²); Δh 为风蚀/风积厚度(前后两次测钎读数差值,风蚀为正,风积为负值)(cm); ρ_b 为土壤容重(g/cm³)。

1.3 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 2007 处理,用 GraphPad Prism 7 进行相关性分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 藓结皮对土壤水分的影响

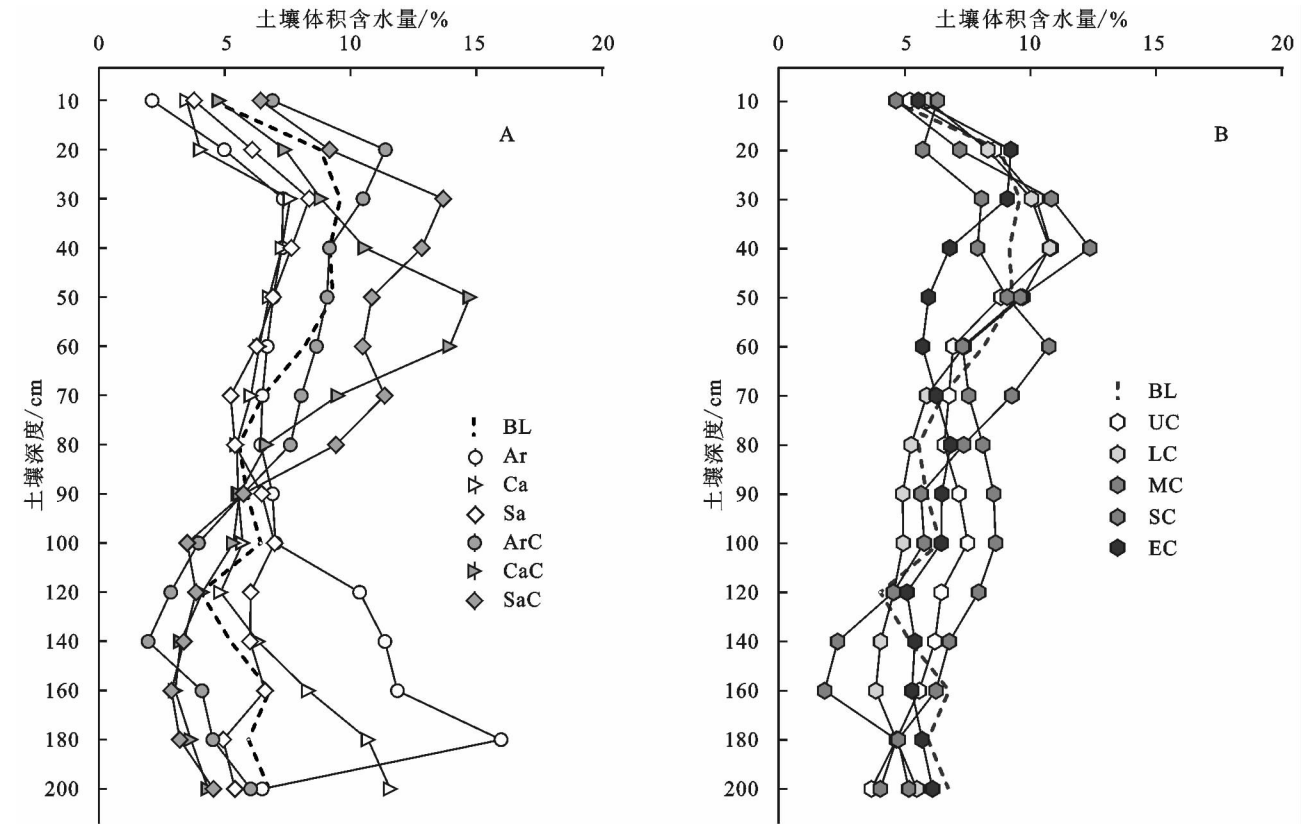
2.1.1 植被下土壤含水量 裸地小区土壤含水量在

1.2.2 测定项目与方法 观测试验开始前 1 周测定藓结皮盖度、厚度和土壤容重指标(表 1)。生物结皮盖度(%)用目估法测定,由 2 位不同的试验员分别进行估计,每个处理得到 2 个盖度估计值。生物结皮厚度(mm)用游标卡尺测定,在每个生物结皮小区随机选 2 小块剖面完整的藓结皮,用游标卡尺测定剖面厚度,每个小区获得 2 个厚度值。土壤容重用环刀在样地内随机选 3 个裸地和 3 个藓结皮地块取土样,用烘干法测定土壤容重。土壤体积含水量(%)用 TDR (TRIME-PICO-IPH/T3)测定,1 m 以内测定间隔 10 cm,1~2 m 测定间隔 20 cm,从 2017 年 7 月 24 日起每周测定 1 次。风蚀量(t/hm²)观测从 2016 年 9 月 3 日起,每隔 2 个月测定 1 次。用钢尺定期测定钢钎露出土壤表面的高度,得到前后两次高度差 Δh ,结合测得的不同斑块类型所对应的土壤容重 ρ_b ,由下述公式^[16]计算得到风蚀量。土壤含水率和风蚀量观测截止日期为 2017 年 9 月 23 日。

0—30 cm 深度内逐渐增大,30 cm 深度处达到峰值,在 30—120 cm 深度内波动下降,在 120—200 cm 深度内波动上升。沙地浅层土壤对降水响应迅速,受蒸散发影响强烈,地下水位呈波动下降趋势;深层土壤对降水的响应相对滞后,受蒸散发影响微弱,接受降雨入渗补给后,地下水位呈缓慢上升趋势^[22-23]。学者们在毛乌素沙地的研究表明,植被影响土壤含水量在土壤剖面的分布,植被的存在导致根系层土壤含水量的下降^[23-25]。沙蒿、沙柳和柠条根系垂直方向主要分布在 0—90 cm 土层^[24,26-30],从图 2A 可以看出,3 种植被下裸地小区的土壤含水量在 0—70 cm 深度范围内明显低于裸地,证实

了植被对土壤含水量的影响。在 0—80 cm 深度范围内,沙蒿、柠条和沙柳下藓结皮小区的土壤含水量与对应的植被下裸地小区相比,分别提高了 62.8%, 56.2%和 67.5%,说明藓结皮的存在能够提高植被根系层土壤水分。在 80—200 cm 深度范围内,植被下裸地和植被下藓结皮小区土壤含水量均低于对应的植被下裸地小区(表 2),植被下藓结皮小区在 120—200 cm 深度内土壤含水量的增幅也明显低于

对应的植被下裸地小区。藓结皮的存在使植被根系层下方 80—200 cm 深度内的土壤含水量下降,这可能与藓结皮限制降水入渗有关^[12-13]。灌丛下方的藓结皮在干燥情况下会吸收水分,结皮中微生物分泌的化学物质吸水膨胀后会阻塞土壤孔隙,影响水分入渗^[4]。因此,在毛乌素沙地,藓结皮的存在有助于提高沙蒿、沙柳和柠条 0—80 cm 的根系层土壤水分,同时会造成 80—200 cm 的深层土壤含水量下降。



注:BL 表示裸地;Ar 表示沙蒿下裸地;Ca 表示柠条下裸地;Sa 表示沙柳下裸地;ArC 表示沙蒿下藓结皮;CaC 表示柠条下藓结皮;SaC 表示沙柳下藓结皮;UC 表示无干扰藓结皮;LC 表示轻度干扰藓结皮;MC 表示中度干扰藓结皮;SC 表示重度干扰藓结皮;EC 表示剧烈干扰藓结皮。

图 2 土壤水分随深度的变化

表 2 土壤体积含水量提高率			
小区位置	对照类型 (V ₁ —V ₂)	土壤体积含水量提高率/%	
		0—80 cm	80—200 cm
植被投影 下方	ArC—Ar	62.8	—56.0
	CaC—Ca	56.2	—33.9
	SaC—Sa	67.5	—35.8
植被间空地	BL—UC	—4.0	—0.2
	LC—UC	—0.6	—20.9
	MC—UC	—2.7	—30.1
	SC—UC	3.5	16.3
	EC—UC	—10.8	—1.5

注:土壤体积含水量提高率=(V₁—V₂)×100%/V₂,V₁和V₂为该深度范围内土壤体积含水量的均值。

2.1.2 植被间土壤含水量 无干扰藓结皮在 0—40 cm 和 70—140 cm 深度范围内的土壤含水量高于裸

地(图 2B),与裸地对照相比,无干扰藓结皮小区 0—80 cm 和 80—200 cm 深度内的土壤含水量分别提高 4%和 0.2%(表 2)。说明植被间无干扰的藓结皮同样能提高土壤含水量。无干扰藓结皮小区在 80—200 cm 深度内的土壤含水量高于 3 种植被下藓结皮小区,但与裸地相比并未明显增加。0—200 cm 深度内,无干扰和干扰小区土壤含水量随深度增加呈现出先升高后波动下降的趋势。轻度、中度和重度干扰小区土壤含水量仅在几个深度处高于无干扰小区;重度干扰小区仅在 0—20 cm 深度内土壤含水量低于无干扰,20—200 cm 深度内土壤含水量均高于无干扰。从表 2 也可看出,与无干扰相比,轻度和中度干扰土壤水分含量在 0—80 cm 深度内略有下降,在 80—200 cm 深度范围内明显下降;重度干扰藓结皮在 0—80 cm 和 80—200

cm 深度范围内的平均土壤含水量分别提高 3.5% 和 16.3%; 剧烈干扰藓结皮小区的土壤含水量在 0—80 cm 深度内下降 10.8%, 在 80—200 cm 深度内略有下降。不同干扰强度对应的结皮盖度与 0—80 cm, 80—200 cm 深度内土壤含水量均值的 Person 相关系数 r 分别为 0.31 和 -0.29, 统计上不显著, 表明干扰强度与 0—80 cm, 80—200 cm 深度内的土壤含水量非线性相关, 土壤水分随干扰强度变化似乎无规律可循。但从土壤水分含量上看, 重度干扰藓结皮小区 0—80 cm 和 80—200 cm 深度内的土壤含水量与无干扰相比分别提高 3.5% 和 16.3%, 其余干扰强度的土壤水分含量仅在几个深度处高于无干扰小区。生物结皮对土壤蒸发有一定的抑制作用^[31], 干扰使完整的生物结皮破碎, 在促进入渗的同时也会影响蒸发。轻度和中度干扰对结皮盖度的影响并不能明显提高土壤含水量, 剧烈干扰对藓结皮造成过度破坏, 可能加剧土壤蒸发, 导致 0—80 cm 深度内的土壤含水量下降。相比之下重度干扰有利于提高 0—80 cm 的根系层和 80—200 cm 的深层土壤水分含量。

2.2 藓结皮对风蚀的影响

2.2.1 植被下土壤风蚀量 裸地小区 9—11 月发生轻微风蚀, 11—3 月风积量逐渐增大, 3—7 月风积逐渐减少, 5—7 月风蚀量达到最大, 7—9 月出现少量风积(图 3A)。植被下裸地和植被下藓结皮小区风蚀主要发生在 5—9 月, 5 月之前以风积为主。沙蒿下裸

地风蚀频率最高, 其余小区风蚀和风积频率相当(表 3)。植被下裸地小区观测期内的风蚀总量排序为沙蒿下裸地 > 沙柳下裸地 > 柠条下裸地。藓结皮的存在能够提高植被下方沙土的抗风蚀能力。与植被下裸地相比, 沙蒿、柠条和沙柳下藓结皮小区的风蚀量分别减少了 92.8%, 11.3% 和 104.2%。绝大多数研究都证实生物结皮具有减轻风蚀的作用^[8]。许多藓类植物的茎叶体和假根共同参与锚固土壤的过程, 呈分枝状的苔藓原丝体在整个结皮层中散布, 这些植物体结构与土壤颗粒紧密结合, 提高了表层土壤的稳定性^[2]。结皮中的蓝藻、真菌分泌的多糖和有机胶体能粘结土壤颗粒, 产生更大的土壤团聚体, 从而提高启动风速, 减轻土壤风蚀^[8]。我们的研究表明, 研究样地的风蚀主要发生在 5—9 月, 藓结皮等存在能够提高植被下方沙土的抗风蚀能力, 与植被下裸地相比, 沙蒿、柠条和沙柳下藓结皮小区的风蚀量分别减少了 92.8%, 11.3% 和 104.2%。不同植被类型下的小区 and 不同植被与藓结皮组合小区的风蚀量也都存在差异。董治宝等^[32]研究表明, 植物是通过改变气流对地表物质的作用效果来影响风蚀, 大约在植被高度以下, 风速变化明显受植被个体影响。沙蒿、柠条和沙柳这 3 种植被在冠层结构、植物体形态、茎叶疏密程度等方面的差异可能是引起地表风蚀差异的主要原因。藓结皮的盖度差异以及植被与藓结皮组合类型也可能影响风蚀量。

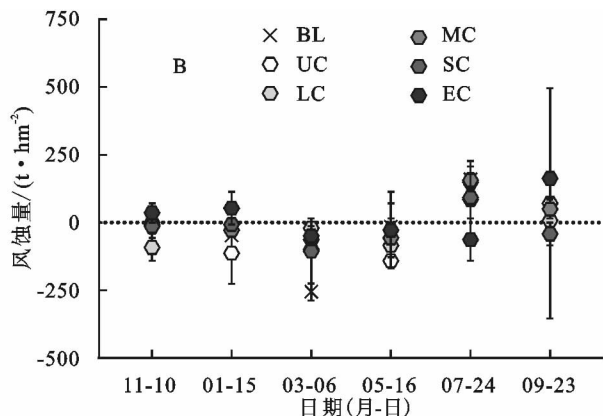
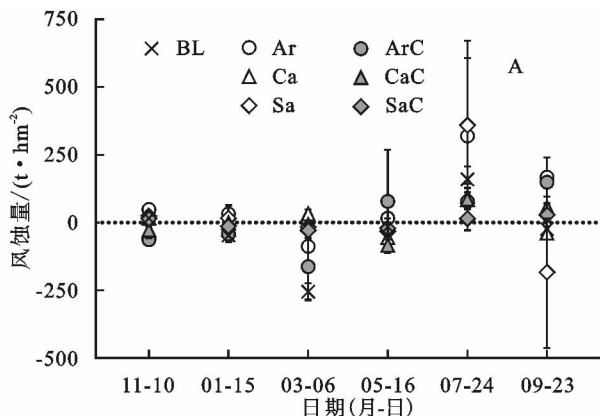


图 3 各小区风蚀量

2.2.2 植被间土壤风蚀量 观测期内, 植被间小区 5 月之前以风积为主, 剧烈干扰小区风蚀量极大值(162.9 t/hm²)出现在 7—9 月, 其余小区的风蚀量极大值集中出现在 5—7 月, 排序为裸地(159.7 t/hm²) > 中度干扰(155.9 t/hm²) > 轻度干扰(148.8 t/hm²) > 重度干扰(92.1 t/hm²) > 无干扰(85.0 t/hm²)。在 5—7 月, 裸地的风蚀量高出无干扰近 1 倍, 中度和轻度干扰风蚀量明显高于重度干扰和无干扰。裸地小区的风积频率

为风蚀频率的 2 倍, 风积总量大于风蚀总量, 最终产生风积(表 3)。无干扰藓结皮小区仅在 5—9 月出现风蚀, 整个观测期内的风蚀总量低于风积总量, 最终出现风积。说明在 5—9 月风蚀集中时期, 无干扰的藓结皮下层沙土并未发生风蚀, 出现的风蚀量是藓结皮表面风积沙土在风力作用下被重新搬运的结果。无干扰小区和裸地小区的风积总量基本相等。在风蚀较弱的部分时段(9—翌年 1 月, 3—5 月), 随着干

扰强度增大,风积量有减少趋势,风蚀量有增加趋势。但在风蚀集中的 5—9 月,这一趋势并不明显。不同干扰强度对应的结皮盖度与平均风蚀量之间的 Pearson 相关系数 r 为 -0.77 ,统计不显著,表明干扰强度与风蚀量同样无线性相关关系。轻度和重度干扰藓结皮小区发生风积,重度干扰的风积总量高于轻度干扰;中度和剧烈干扰藓结皮小区最终产生风蚀,剧烈干扰风蚀总量 (109.8 t/hm^2) 高于中度干扰 (14.2 t/hm^2)。从风蚀和风积频率来看,无干扰、轻度和中度干扰风积频率高于风蚀频率;重度干扰风蚀频率最低,风积频率最高;剧烈干扰风蚀频率最高,风积频率最低。放牧、踩踏等人类活动是干旱生态系统常见的干扰类型,小尺度、低强度的干扰有助于生物结皮和其他植物的生长,而超过环境承载力的强烈干扰必然会威胁生态系统稳定^[15],尤其是在生态环境脆弱地区,过度的人为干扰会破坏地表稳定性,影响生物结皮固碳、固氮等功能,加剧水土流失和养分损失^[33]。在研究地,风蚀集中的 5—7 月,轻度和中度干扰小区的风蚀量接近裸地,重度干扰风蚀量相对较低,剧烈干扰具有较高的风蚀频率和最高的风蚀总量,且出现了风蚀量极大值。因此,藓结皮受到剧烈及以上强度的干扰会使土壤更易遭受风蚀。重度干扰发生风蚀的频率最低,风蚀严重期风蚀量较小。

表 3 风蚀总量与风蚀、风积频率

小区位置	处理代号	风蚀总量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	风蚀 频率/%	风积 频率/%
植被 投影下方	Ar	495.1	83.3	16.7
	Ca	24.0	50.0	50.0
	Sa	167.7	50.0	50.0
	ArC	35.4	50.0	50.0
	CaC	21.3	33.3	50.0
	SaC	-7.1	50.0	50.0
植被间 空地	BL	-167.7	33.3	66.7
	UC	-162.9	33.3	50.0
	LC	-49.6	33.3	66.7
	MC	14.2	33.3	66.7
	SC	-106.3	16.7	83.3
	EC	109.8	50.0	50.0

注:风蚀总量正值表示风蚀,负值表示风积;风蚀或风积频率为风蚀或风积出现次数与观测总次数(6 次)的百分比。

综合上述土壤水分和风蚀的结果来看,重度干扰能够在不加剧侵蚀的情况下提高土壤水分含量,这证实了适度干扰的可行性。关于不同干扰类型对生物结皮风蚀的影响已有大量报道^[14-15],但目前尚缺乏有

关于干扰强度对生物结皮风蚀影响机理的研究。我们的试验结果也局限于小尺度地块,还需要在更多地区和更大尺度上加以验证。

3 结论

(1) 藓结皮的存在能够提高沙蒿、沙柳和柠条 0—80 cm 的根系层土壤水分,同时也使 80—200 cm 的深层土壤含水量下降。干扰强度与土壤水分含量非线性相关。植被间无干扰的藓结皮同样能提高土壤含水量。重度干扰有利于提高 0—80 cm 的根系层和 80—200 cm 的深层土壤水分含量。

(2) 观测期内,风蚀主要发生在 5—9 月。藓结皮的存在有利于减轻植被下方沙土风蚀,沙蒿、柠条和沙柳下藓结皮小区的风蚀量与植被下裸地相比分别减少了 92.8%,11.3%和 104.2%。干扰强度也与风蚀量非线性相关。藓结皮受到剧烈及以上强度的干扰会使土壤更易遭受风蚀,重度干扰风蚀发生频率最低,风蚀严重期的风蚀量也较小。

(3) 从植被间小区的土壤水分和风蚀量综合来看,重度干扰藓结皮小区在不加剧风蚀的情况下,有利于提高 0—200 cm 深度内的土壤水分,肯定了适度干扰的可行性。

参考文献:

[1] Belnap J, Büdel B, Lange O L. Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution[M] // Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Springer Berlin Heidelberg, 2001.

[2] Belnap J, Lange O L. Structure and Function of Biological Soil Crusts: A Synthesis[M] // Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Springer Berlin Heidelberg, 2001.

[3] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. Hydrological Processes, 2010,20(15):3159-3178.

[4] Warren S D. Synopsis: Influence of Biological Soil Crusts on Arid Land Hydrology and Soil Stability[M] // Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Springer Berlin Heidelberg, 2001.

[5] Eldridge D J. Biological Soil Crusts and Water Relations in Australian Deserts[M] // Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Springer Berlin Heidelberg, 2001.

[6] Chaudhary V B, Bowker M A, O'Dell T E, et al. Untangling the biological contributions to soil stability in semiarid shrublands[J]. Ecological Applications, 2009,

- 19(1):110-122.
- [7] Bu C, Zhao Y, Hill R L, et al. Wind erosion prevention characteristics and key influencing factors of bryophytic soil crusts[J]. *Plant & Soil*, 2015, 397(1/2):163-174.
- [8] Belnap J. Biological Soil Crusts and Wind Erosion[M]//Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [9] 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.
- [10] Yair A. Effects of Biological Soil Crusts on Water Redistribution in the Negev Desert, Israel: A Case Study in Longitudinal Dunes[M]//Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [11] Warren S D. Biological Soil Crusts and Hydrology in North American Deserts[M]//Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [12] Li X R, Wang X P, Li T, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(3):147-154.
- [13] Yang Y, Bu C, Mu X, et al. Interactive effects of moss-dominated crusts and *Artemisia ordosica* on wind erosion and soil moisture in Mu Us sandland, China [J]. *Scientific World Journal*, 2014, 2014(4):649816.
- [14] Belnap J, Eldridge D. Disturbance and Recovery of Biological Soil Crusts[M]//Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [15] Zaady E, Eldridge D J, Bowker M A. Effects of Local-Scale Disturbance on Biocrusts[M]//Weber B, Büdel B, Belnap J. *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands*. Springer International Publishing, 2016.
- [16] 杨永胜.毛乌素沙地生物结皮对土壤水分和风蚀的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [17] 杨永胜,邱永利,周小泉,等.毛乌素沙地人为干扰苔藓结皮的土壤水分和风蚀效应[J].*水土保持通报*, 2015, 35(1):20-24.
- [18] 冯伟,叶菁.踩踏干扰下生物结皮的水分入参与水土保持效应[J].*水土保持研究*, 2016, 23(1):34-43.
- [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.
- [20] 石亚芳,赵允格,李晨辉,等.踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[J].*应用生态学报*, 2017, 28(10):3227-3234.
- [21] 莫宏伟,任志远.近30年陕北榆阳区植被土壤保持效益动态[J].*生态学杂志*, 2009, 28(4):626-631.
- [22] 黄金廷,尹立河,董佳秋,等.毛乌素沙地地下水浅埋区沙柳蒸腾对降水的响应[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2013, 41(11):217-228.
- [23] 王强民.干旱半干旱区地下水与植被生态相互作用研究[D].西安:长安大学, 2016.
- [24] 赵岩,周文渊,孙保平,等.毛乌素沙地三种荒漠灌木根系分布特征与土壤水分研究[J].*水土保持研究*, 2010, 17(4):129-133.
- [25] 杨峰,王文科,刘立,等.毛乌素沙地沙柳根系与土壤水分特征的研究[J].*安徽农业科学*, 2011, 39(26):16050-16052.
- [26] 康博文,刘建军,孙建华,等.陕北毛乌素沙漠黑沙蒿根系分布特征研究[J].*水土保持研究*, 2010, 17(4):119-123.
- [27] 王辉,孙栋元,刘丽霞,等.干旱荒漠区沙蒿种群根系生态特征研究[J].*水土保持学报*, 2007, 21(1):99-102.
- [28] 柳琳秀.毛乌素沙地三种植物根系垂直分布研究[D].呼和浩特:内蒙古大学, 2015.
- [29] 张莉,吴斌,丁国栋,等.毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比[J].*干旱区资源与环境*, 2010, 24(3):158-161.
- [30] 刘龙,姚云峰,郭月峰,等.农牧交错带柠条锦鸡儿根系与土壤水分空间关系研究[J].*中国农业科技导报*, 2017, 19(7):101-107.
- [31] 李莉,黄土区生物结皮移除干扰的土壤水分效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- [32] 董治宝,陈渭南,李振山等.植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J].*水土保持学报*, 1996(2):1-8.
- [33] Belnap J. Surface disturbances: Their role in accelerating desertification[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 1995, 37(1/3):39-57.