

土壤结皮面积与结皮分布对风蚀影响的风洞模拟研究

毛旭芮^{1,2}, 杨建军^{1,2}, 曹月娥³, 汤东^{1,2}, 丁肇龙^{1,2}

(1.新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046;2.教育部绿洲生态重点实验室,
乌鲁木齐 830046;3.上海师范大学环境与地理科学学院,上海 200234)

摘要: 土壤结皮在干旱半干旱地区广泛分布,是影响风蚀的重要因素。以准噶尔盆地东部矿区周边表层土壤为对象,通过控制土壤结皮率和结皮分布,利用风洞试验结合土壤风蚀传感器,对不同土壤结皮和风速条件下土壤风蚀量、风沙流结构、土壤颗粒释放的变化特征进行研究。结果表明:(1)风蚀量随风速增加显著上升,随土壤结皮率增加显著下降。均匀分布的结皮风蚀量整体低于集中分布的结皮;(2)跃移高度随风速增加而增加,高度在0~3 cm的收集物占总收集量的80%左右。14 m/s的风速能够使土壤发生跃移,而土壤结皮率达到50%能够有效抑制土壤颗粒跃移现象;(3)颗粒碰撞的数量与能量随风速的增加而增加,随结皮率增加而减少;首次出现颗粒碰撞时的风速随结皮率的增加而增加;颗粒碰撞的数量和能量在风速持续增加的时间段内增加至最大值,在风速稳定后开始下降,120 s左右降低至稳定值,随后不再发生明显起伏,在风速下降时间段内不发生颗粒碰撞。

关键词: 土壤结皮; 风蚀; 颗粒碰撞; 风洞试验

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.001

Wind Tunnel Study of Soil Crust Area and Distribution Affecting on Wind Erosion

MAO Xurui^{1,2}, YANG Jianjun^{1,2}, CAO Yue'e³, TANG Dong^{1,2}, DING Zhaolong^{1,2}

(1.College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046;

2.Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046;

3.School of Environmental and Geographical Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234)

Abstract: Soil crust, which is an important factor affecting wind erosion, is widely distributed in arid and semi-arid regions. In this paper, taking the surface soils around the eastern mining area of the Junggar Basin as the object, wind tunnel test combined with soil wind erosion sensor were used to study the changes of soil wind erosion, sand flow structure and soil particle release under different soil crust and wind speed conditions by controlling soil crust cover rate and crust distribution. The results showed that: (1) Wind erosion increased significantly with the increase of wind speed and decreased significantly with the increase of soil crust cover rates. The wind erosion amount of uniform distribution was lower than that of centralized distribution. (2) The height of wind-sand flow increased with the increase of wind speed, and the collection at the height of 0~3 cm accounted for about 80% of the total. The wind speed of 14 m/s could make the soil saltation occur, and the soil skinning rate of 50% could effectively inhibit the saltation phenomenon of soil particles. (3) The number and energy of particle collision increased with the increase of wind speed and decreased with the increase of crust cover rates. The wind speed of the first particle collision increased with the increase of the crust cover rates; the number and energy of particle collision increased to the maximum value in the period when the wind speed continued to increase, and began to decrease after the wind speed was stable. It dropped to the stable value around 120 s, and then no obvious fluctuation occurred, and no particle collision occurred during the period when the wind speed was decreasing.

Keywords: soil crust; wind erosion; particle collision; wind tunnel experience

收稿日期: 2019-11-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601572, 41661057, 41461056)

第一作者: 毛旭芮(1995—), 女, 新疆奎屯人, 硕士研究生, 主要从事土壤风蚀研究。E-mail: 1519489590@qq.com

通信作者: 杨建军(1978—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 主要从事干旱区水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: yjjdfly@sina.com

土壤结皮是一种具有致密性结构的表层土壤,其容重大,孔隙度小,导水率差^[1-2]。土壤结皮主要分为生物土壤结皮和物理土壤结皮,生物土壤结皮是由细菌、真菌、地衣、藻类和苔藓等生物与土壤颗粒混合形成的复合层;物理结皮是由雨滴冲溅和土壤黏粒理化分散作用、土表孔隙被堵塞、挟沙水流流经土表时细小颗粒沉积而形成的一层很薄的土表硬壳^[3-4]。近年来,对于土壤结皮的研究侧重于生物土壤结皮方面,在土壤的入渗和溅蚀、土壤侵蚀过程和生态效应等多个方面都已做过系统的研究^[5-7]。而对于物理结皮的研究较少,主要集中在结皮的水文效应和土壤侵蚀方面^[8-10]。土壤结皮的形成能够增加表层土壤的容重、紧实度、厚度以及受力时的相对稳定性,这在很大程度上影响了土壤侵蚀状况。众多研究^[11-13]表明,土壤结皮会降低渗透率,阻碍水分入渗,增加径流,部分学者^[14-15]认为土壤结皮引发的地表径流会增加土壤流失的风险,也有研究^[16-17]认为土壤结皮能够增加土壤抗剪能力,从而抑制土壤侵蚀。目前,多数研究^[18]认为结皮在增强土壤抗侵蚀方面具有积极作用,但结皮的形成对土壤可蚀性的影响取决于土壤渗透率和盖度之间的平衡。在北方干旱半干旱地区,降水量较少,几乎无法形成径流,且在土壤侵蚀形式以风蚀为主的条件下,土壤结皮的盖度对土壤侵蚀的影响远远大于地表径流。

土壤风蚀主要发生在干旱半干旱地区,被认为是近几十年来干旱半干旱地区土壤退化的主要原因之一^[19],由于植被覆盖率小,不足以保护土壤受风力的侵扰,导致土壤侵蚀敏感性高^[20]。结皮的形成能够使土壤孔隙空间被更致密、更稳定的细颗粒堵塞,聚集土壤表层的松散土壤颗粒,形成坚硬的外壳,这种外壳可以保护下面的未固结土壤,从而降低土壤在暴露时受侵蚀的敏感性^[21]。目前,关于结皮对土壤侵蚀的影响研究多集中于生物土壤结皮方面。由降水形成的物理结皮对土壤侵蚀的影响研究多集中于水力侵蚀,对风蚀方面鲜有报道。基于以上原因,本试验通过控制土壤结皮率和结皮分布,利用风洞试验结合土壤风蚀传感器,系统地分析不同土壤结皮和风速条件下土壤风蚀量、风沙流结构、土壤颗粒释放的变化特征,量化描述土壤结皮率和结皮分布对土壤风蚀的影响,以期干旱半干旱区水土保持和土壤风蚀的防治提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

准噶尔东部地区(以下简称准东地区)位于 88°10′—

91°10′E,43°30′—45°00′N,平均海拔 600 m 左右,属于典型的干旱大陆性气候,日照充足,年日照时间为 2 700 h; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 3 450 $^{\circ}\text{C}$,1 月平均气温为 -15.6°C ,7 月平均气温为 24.5°C ;年平均降水量为 183.50 mm。研究区常年多风,以西北风为主,风力一般 4~5 级,经常有 7~8 级大风,最大可达 10 级以上。研究区土壤以风沙土、棕钙土以及漠境盐土为主,还有少量栗钙土以及碱土。土壤干旱贫瘠肥力较低,植被稀少,多为荒漠植被,覆盖度约为 3%~5%。土壤表面结皮覆盖度高,结皮类型包括生物结皮和物理结皮,多为降雨形成的物理结皮。

1.2 试验设计

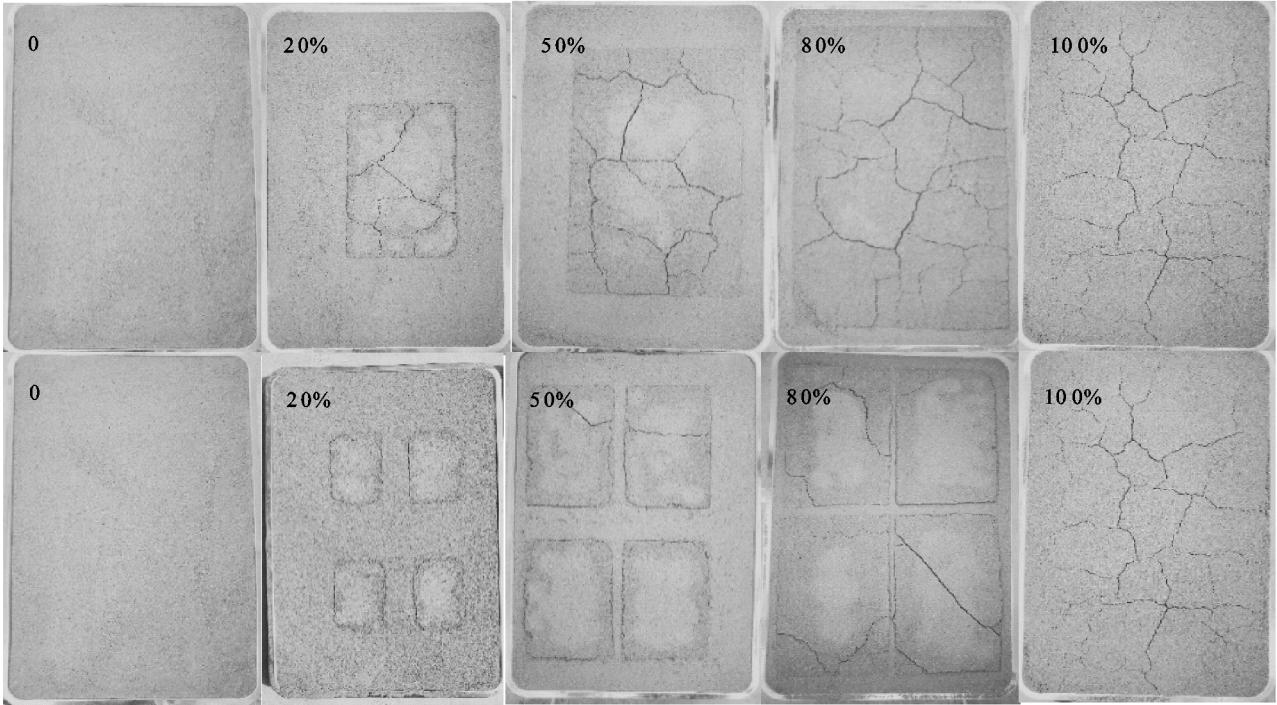
土壤样品于 2019 年 5 月在新疆准东地区(90°20′E,44°30′N;海拔 710 m)采集,选取上风向采集土样。试验设置 5 组结皮率梯度,即结皮面积占沙盘表面积的比例,分别为 0,20%,50%,80%,100%。由于研究区地表结皮多是由降水形成的物理结皮,故此试验采用喷水法制备土壤结皮。结皮控制方法为:自然风干的土样过 2 mm 筛后放入长 57 cm、宽 37 cm、高 5 cm 的沙盘中,上层用木板刮平,作为结皮率 0 的试验组。按照上述方法制作其他试验组的沙盘,然后均匀喷洒相应水量以形成结皮。喷水之前计算沙盘上表面面积,取若干塑料纸,在塑料纸上画出沙盘轮廓,在轮廓中分别裁剪下与沙盘形状相同,但大小是沙盘面积的 20%,50%,80%的相应部分,裁剪时确保裁剪区域在沙盘正中间。将塑料纸平铺在沙盘上并对准沙盘轮廓,根据结皮面积喷对应水量,20%的结皮喷 30 g 水,50%的结皮喷 75 g 水,80%的结皮喷 120 g 水,100%的结皮喷 150 g 水。静置过夜晾干。该组试验分为 2 小组:一组试验沙盘上的结皮分 4 块(塑料纸的裁剪区域平均分为 4 块);另一组试验的结皮为 1 块。沙盘制作结果见图 1。由喷水法制备的土壤结皮厚度与自然形成的结皮相近,且稳定性较高,具有良好的代表性。

风洞试验于 2019 年 6 月在新疆莫索湾治沙站多功能环境风洞实验室进行。风洞全长 16.2 m,试验段长 8 m,截面宽 1.3 m,高 1 m,采用侧壁扩散式结构,每侧壁扩散角 2° 。试验风速 0~25 m/s 可调。试验区年平均风速 2~3 m/s,10 min 平均最大风速达到 27 m/s,其他大风风速多数分布在 8~14 m/s,因此试验设置风速梯度为 8,10,12,14 m/s。每个结皮变量制作 8 个土盘,分别用 8,10,12,14 m/s 的风速吹蚀,每个风速分别吹蚀 30,20,10,7 min。试验重复 1 次。

在沙盘下风向 5 cm 处平行架设 2 个垂直点阵式

集沙仪,用于测量风沙流高度。1 个美国 Sensit H14—LIN 型号风蚀传感器,传感器直径约 3 cm,高度约 2 cm,用于测量沙尘颗粒撞击数量和撞击动能,每秒记录 1 次。1 个美国 Met One 公司生产的 014A 风

速传感器,用于记录实时风速。具体架设位置见图 2。每个沙盘试验前后用精度为 1 g 的电子秤称重测量风蚀量。试验数据运用 Excel 2010 和 Origin 软件进行处理。



注:图中数值为结皮覆盖率。

图 1 不同结皮率和结皮分布沙盘

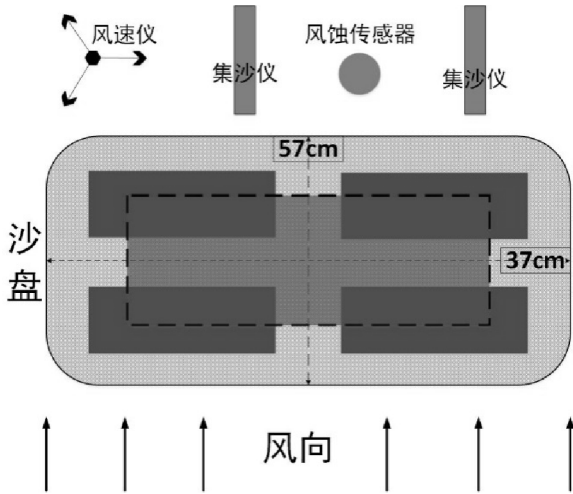


图 2 风洞内试验仪器架设位置示意

2 结果与分析

2.1 结皮与风速对风蚀量的影响

2.1.1 风速对风蚀量的影响 将各组试验单位时间风蚀量与吹蚀风速进行拟合,得到不同结皮率土样风速和风蚀量之间的关系曲线见图 3,拟合参数与 R^2 见表 1。结果显示,风蚀量与风速的拟合效果较好,风速对风蚀量的影响效果十分显著,风蚀量随风速的增加而急剧上升。8 m/s 的风速几乎无法产生风蚀,各组试验单位时间风蚀量均小于 0.5 g/min;

10 m/s 的风速下风蚀量有所上升,单位时间风蚀量处于 1~10 g/min(结皮率 100% 的试验组除外);风速为 12 m/s 时,各组试验风蚀量显著上升,最高达到 80 g/min;当风速达到 14 m/s 时,各组试验风蚀量由于结皮率不同出现明显差异,无结皮的试验组风蚀量最高达到 283 g/min,结皮完整的试验组风蚀量最低,为 0.5 g/min。

2.1.2 结皮对风蚀量的影响 土壤结皮率和结皮分布状况均会对土壤风蚀量产生一定影响,其中土壤结皮率对风蚀量的影响效果更显著。通过对各试验组的结皮率与风蚀量进行拟合,得到结皮率与风蚀量的关系曲线见图 4,拟合参数和 R^2 见表 2。从图 4 可以看出,风速越大,结皮率对风蚀量的影响也越来越明显。拥有完整结皮的试验组可蚀性最小,在任何一组风速下,其吹蚀量几乎都为 0。随着风速增加,试验结果并没有完美遵循结皮越完整吹蚀量越小的规律。结皮分布不同的 2 组试验中,0,20%,80%,100% 结皮率所表现出的吹蚀量相对大小关系一致,当风速为 8,10,14 m/s 时,吹蚀量大小表现为 $0 > 20\% > 80\% > 100\%$,当风速为 12 m/s 时,2 组试验均表现为 20% 结皮率的吹蚀量最多,原因可能是结皮面积较小,吹蚀过程中容易破碎和流失,导致吹蚀量增加。从结皮数量来看,结皮分布的均匀性对试验结果同样有一定

影响,相同风速下,4 块结皮产生的风蚀量明显低于 1 块结皮的风蚀量,尤其是当结皮率为 50%时,任何风速下,1 块结皮的吹蚀量均大于 4 块结皮的吹蚀量,

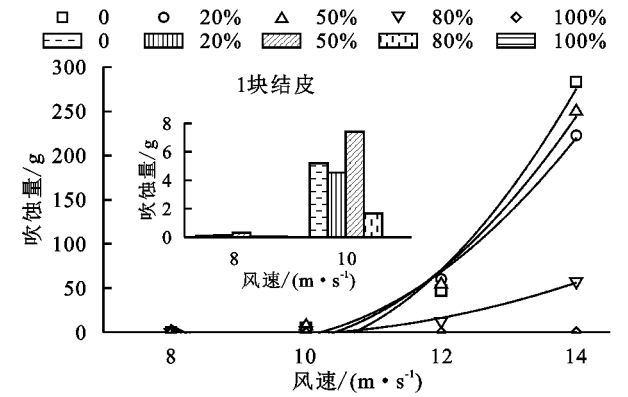


图 3 不同结皮率条件下吹蚀量与风速的关系

表 1 不同结皮条件下吹蚀量与风速的拟合结果

结皮率/ %	结皮 数量/块	函数方程 $y=ax^2+bx+c$			
		相关参数			R^2
		a	b	c	
0	1	14.457	-273.471	1270.542	0.93
	4	14.457	-273.471	1270.542	0.93
20	1	9.895	-181.494	821.616	0.99
	4	9.556	-171.297	759.747	0.99
50	1	11.776	-219.300	1006.513	0.96
	4	5.086	-95.196	438.546	0.96
80	1	2.706	-50.394	231.236	0.96
	4	2.471	-45.616	207.809	0.97
100	1	0.023	-0.429	2.025	0.97
	4	0.023	-0.429	2.025	0.97

注: x 为风速(m/s); y 为吹蚀量(g)。

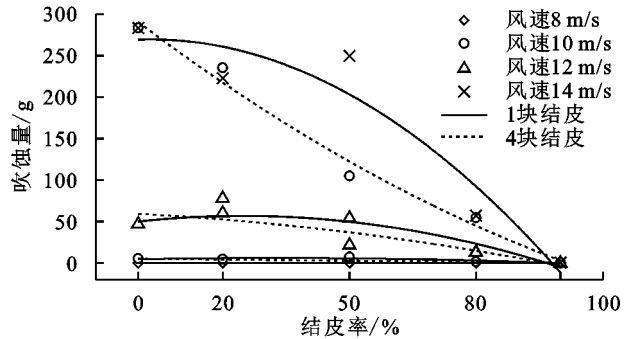
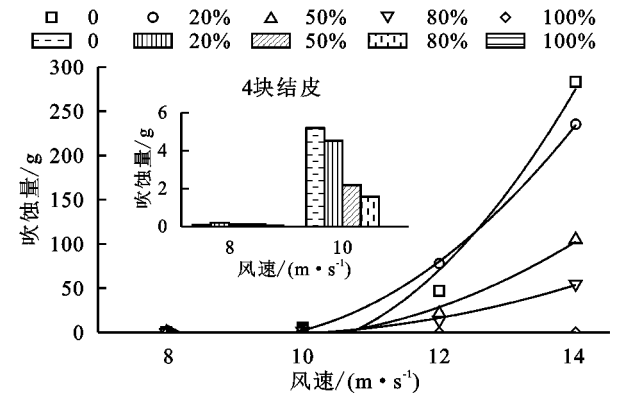


图 4 不同风速条件下吹蚀量与结皮的关系

2.2 结皮与风速对风沙流结构的影响

在风洞内沙盘下风向 10 cm 处平行架设 2 台孔径为 1 cm×1 cm、高度为 20 cm 的集沙仪,每组沙盘吹蚀完毕后将集沙仪取出,收集每个高度的风蚀物并称重,得到各结皮条件下的集沙仪收集总量与风沙流分布结构(图 5)。当风速为 12,14 m/s 时,风沙流结构呈现出较明显的规律,收集量一方面随着高度增加逐渐减少,另一方面随着结皮面积增加而减少。跃移高度基本在 8~10 cm 以内,结皮率越高跃移高度越低,风蚀物多累积在 3 cm 高度以内,占收集总量的

这说明均匀分布的结皮能够有效减少风蚀。其次,结皮数量为 4 块时,结皮率与风蚀量的拟合效果更好(4 块结皮的 R^2 均大于 1 块结皮的 R^2)。



80%左右。当风速达到 14 m/s 时,集沙仪第 2 层的收集量大于第 1 层,这种现象在风速为 12 m/s 时并没有发生,原因是当风速增大到某一临界值之后,土壤颗粒受到更强的推力和上升力而加速前进,且颗粒之间相互碰撞使土壤颗粒获得很大的冲量,导致土壤颗粒发生跃移。这种跃移运动在风沙运动的形式中十分重要,土壤表层的蠕移质直接从跃移质取得动量向前移动,沉积在地表的悬移质被跃移质的冲击力驱逐出地面以后,很容易被风力扬起,因此减少跃移运动是防止风蚀的有效途径。此外,14 m/s 的风速对研究区地表风沙流运动是一个临界值,达到该风速会使当地风沙流结构产生显著变化,从而导致风蚀效应加剧。结皮数量不同时,集沙仪收集的风蚀物重量也有所不同,差距最显著的是结皮率为 20%和 50%的试验组,结皮为 1 块的试验组收集量明显大于结皮为 4 块的试验组,其可能原因是均匀分布的结皮能够增加阻碍土粒移动的面积,从而有效地减少土壤流失,这一结果再次证明均匀分布的结皮能够有效减少风蚀。

表 2 不同风速条件下吹蚀量与结皮率的拟合结果

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	结皮 数量/块	函数方程 $y=ax^2+bx+c$			
		相关参数			R^2
		a	b	c	
8	1	-0.00006	0.006	0.090	0.53
	4	-0.0002	0.002	0.124	0.54
10	1	-0.001	0.093	4.662	0.80
	4	3.366	-0.055	5.296	0.94
12	1	-0.011	0.543	50.002	0.72
	4	-0.004	-0.267	59.332	0.93
14	1	-0.030	0.167	269.330	0.92
	4	0.010	-3.855	290.699	0.97

注: x 为结皮率(%); y 为吹蚀量(g)。

2.3 结皮与风速对土壤颗粒碰撞的影响

2.3.1 结皮与风速对颗粒碰撞数量和能量的影响
在风洞内沙盘下风向 5 cm 处,2 台集沙仪中间架设

风蚀传感器。风蚀传感器直径约 3 cm,高度约 2 cm,每秒记录 1 次颗粒碰撞数量,1 次颗粒碰撞能量。各组试验吹蚀时间内所产生的颗粒碰撞总数量和颗粒碰撞总能量见图 6。风速和结皮率的变化对颗粒碰撞的影响同样十分显著,结皮分布状况也会对颗粒碰撞产生影响。当结皮率为 20%,50%,80%时,1 块结皮的颗粒碰撞能量和数量均显著高于 4 块结

皮,这一结果与风蚀量、风沙流结构的表现规律相符,再次印证了结皮的分布会对土壤表面风蚀产生影响。颗粒碰撞变化规律与风蚀量相似,随风速的增加而增加,随结皮率的增加而减少。风速为 8 m/s 的试验组和结皮率为 100% 的试验组由于风力作用较小且土壤颗粒的释放量较少,因此产生的颗粒碰撞量极少。

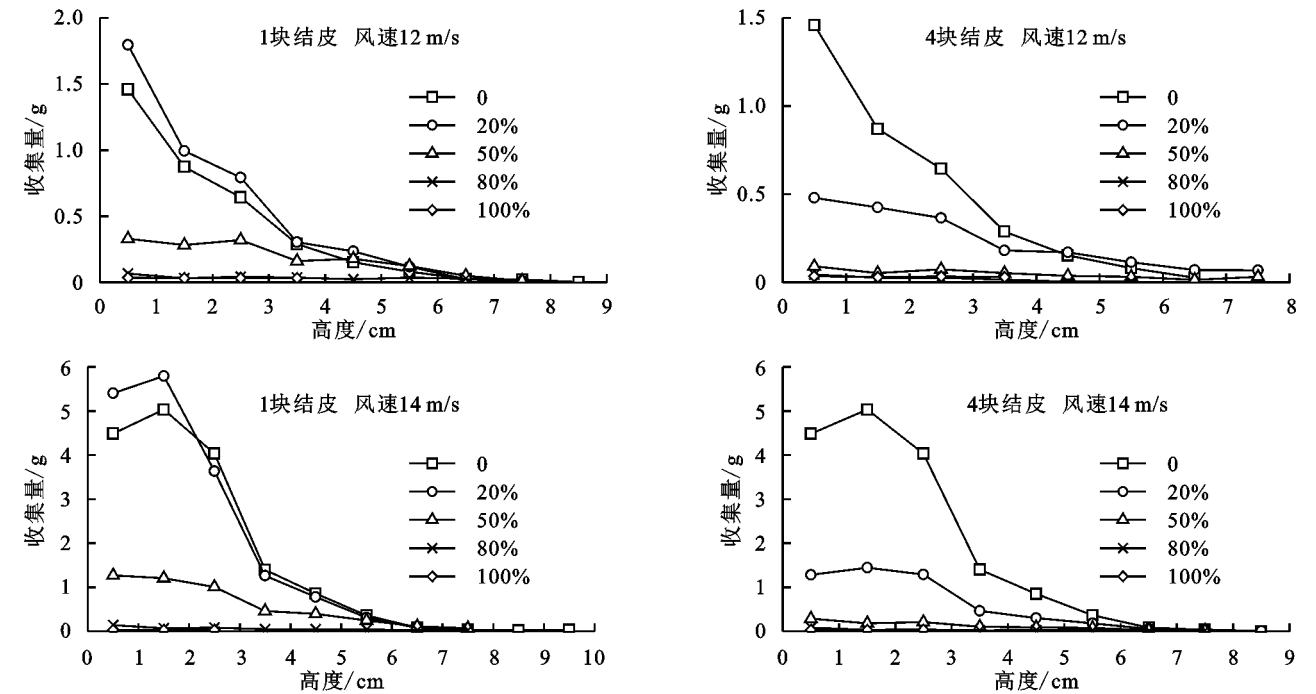


图 5 结皮与风速对风沙流结构的影响

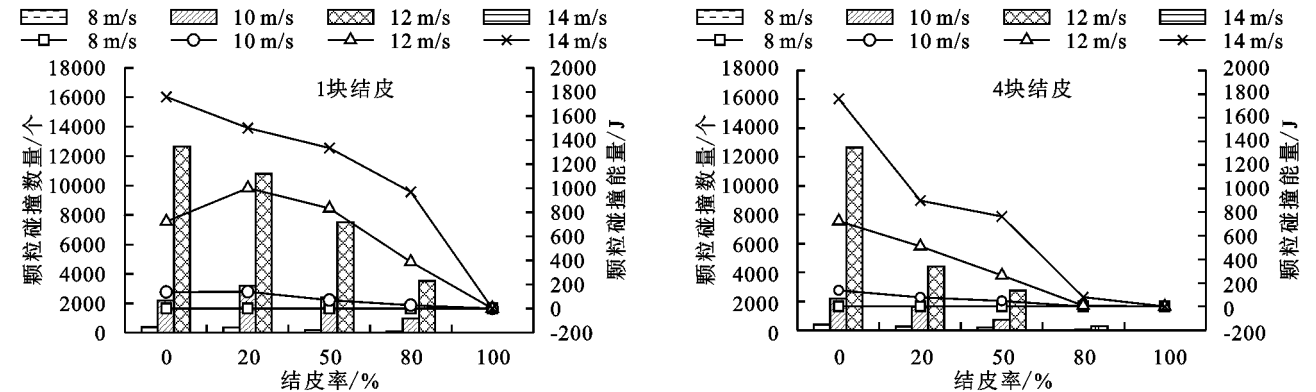


图 6 结皮与风速对土壤颗粒碰撞的影响

2.3.2 颗粒碰撞数量和能量随吹蚀时间的变化规律

吹蚀过程中,风蚀传感器每秒记录 1 个数据,土壤颗粒释放随着时间和风速的变化呈现出一定的规律。由于 14 m/s 风速下风蚀效果最显著,且颗粒碰撞能量、数量最多,因此选择风速 14 m/s、1 块结皮的各组试验分析颗粒碰撞随时间的变化特征(图 7)。从图 7 可以看出,所有试验中土壤颗粒碰撞随时间变化都遵循同样规律,即在风洞启动的前 30 s,也就是风速从 0 增加至 14 m/s 的时间段内,颗粒碰撞数量和能量迅速增加至最大值,当风速平稳在 14 m/s 后,颗粒碰撞数量和能量开始下降,在 120 s 左右达到稳定,不

再有明显的起伏,在风速开始下降的最后 30 s 内,颗粒碰撞数量和能量均为 0。随着土壤结皮面积增加,颗粒碰撞每秒能够达到的最大数量和能量越来越小,在结皮完整覆盖的情况下,颗粒碰撞数量最大为 2 个,碰撞能量为 0 J。在风速上升的过程中,不同试验组首次出现颗粒碰撞时的风速有所差异(图 8),沙盘表面无结皮时,当风速达到 8.45 m/s 第 1 次出现颗粒碰撞,之后随着结皮面积增加,首次出现颗粒碰撞数据的风速也逐渐增加,当沙盘表面结皮完整时,土壤颗粒首次释放所需风速为 11.3 m/s,这说明土壤结皮面积越大,土壤颗粒释放所需要风速越大。

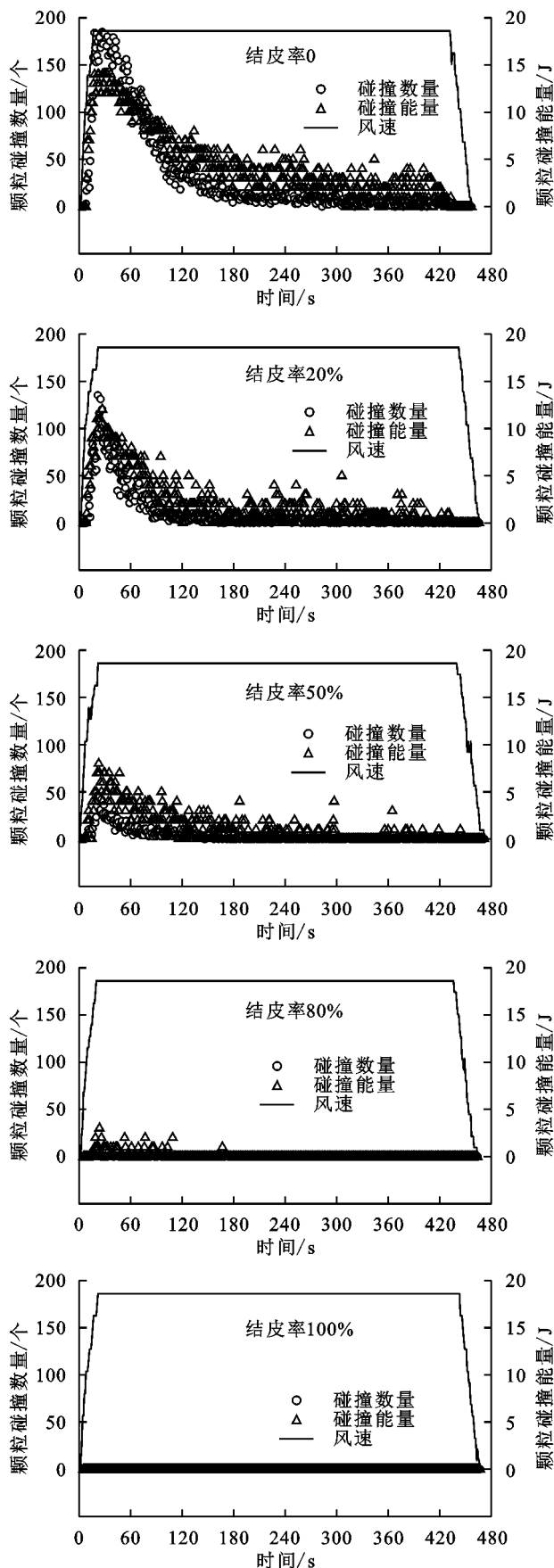


图 7 14 m/s 风速下颗粒碰撞随时间变化特征

3 讨论

有研究^[22]结果表明,当地表存在结皮时,其起动风速的大小与地表结皮率有关,结皮面积越大,起动

风速越大。这一结果与本次研究结果相似,即随着结皮率的增加,风蚀传感器首次出现数据时的风速也会逐渐增加。但本研究中首次出现颗粒碰撞的风速并不能被认为是传统意义上的起动风速。原因是风蚀传感器能够感应到的土壤颗粒大小具有一定范围,粒径较小的土壤颗粒只有在具有足够大动能时才能被感应(试验证明土壤粒径 >0.25 mm 容易被感应, <0.25 mm 不容易被感应),而在风速逐渐增加的过程中,土壤小颗粒获得的动能较小,即使能够被风吹蚀并与风蚀传感器产生碰撞,也不足以被感应,只有较大的土壤颗粒能够被感应。因此无法判断在风蚀传感器首次出现数据之前,是否有小颗粒土壤已经脱离静止状态进入运动状态。其次,土壤颗粒从开始运动到与风蚀传感器发生碰撞之间存在时间差,同时风速也在发生变化。总体来说,风蚀传感器首次出现数据时的风速应大于试验土壤的实际起沙风速。但即便两者有所差异,笔者认为风蚀传感器首次出现数据时的风速仍然可以说明土壤结皮率与起动风速之间的相关性,如起动风速随结皮率变化的变化趋势等。从另一方面来说,风蚀传感器首次出现数据时的风速与起动风速之间同样存在某种相关关系,具体是哪一种相关关系仍需要进一步探究。

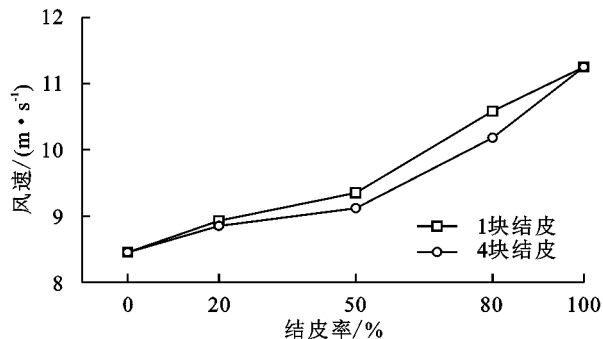


图 8 不同结皮率条件下首次出现颗粒碰撞的风速

试验过程中,颗粒碰撞与沙盘风蚀过程的吹蚀时间、风速条件是完全一致的,在理想状态下,颗粒碰撞的数量、能量与风蚀量应为极显著的线性相关关系,利用颗粒碰撞的数量或能量能够准确的计算出某一时段或某一风速下的风蚀量。但试验结果表明,颗粒碰撞的数量、能量与风蚀量并不是简单的线性相关。造成这一结果的主要原因是风蚀传感器的局限性。如上文所述,风蚀传感器无法感应粒径较小的土壤颗粒,但粒径较小的颗粒更容易被吹蚀,这造成碰撞数量和能量的部分缺失。其次,颗粒碰撞能量的最小单位是 1 J,每秒碰撞产生的总量若小于 1 J 则被忽略不计,因此实际碰撞能量应大于仪器记录的碰撞能量,这也导致颗粒碰撞能量与风蚀量的拟合效果较低。此外,风蚀传感器感应部分的高度为 2 cm,根据

沙盘吹蚀时的风沙流特征来看,高于 2 cm 的收集量占总收集量的 35%左右,因此风蚀传感器只能记录大部分土壤颗粒的碰撞情况。基于以上原因,利用颗粒碰撞来估算土壤风蚀量既要考虑土壤的粒径分布比例,同时要考虑风沙流结构以及仪器本身的误差,其可行性仍需进一步评价和探讨。

4 结 论

(1)土壤风蚀量受风速和结皮的影响显著,风速增加,风蚀量显著上升,土壤结皮率增加,风蚀量显著下降;在相同的风速条件下,结皮均匀分布的试验组单位时间吹蚀量整体小于整块结皮的试验组,颗粒碰撞数量、能量均有显著下降。据此认为,在地表结皮率不变的情况下,均匀分布的结皮比集中分布的结皮更能够有效的降低土壤风蚀。

(2)结皮与风速对风沙流结构也会产生一定影响,风沙流高度随风速增加而增加,吹蚀物主要集中在 0~3 cm,占收集量的 80%左右。14 m/s 的风速能够使土壤发生跃移从而加剧土壤风蚀,而土壤结皮率达到 50%能够有效减少土壤吹蚀量,降低风沙流高度,抑制土壤颗粒跃移现象。

(3)颗粒碰撞的数量与能量随风速的增加而增加,随结皮率增加而减少;首次出现颗粒碰撞时的风速随结皮率的增加而增加;颗粒碰撞的数量和能量随吹蚀时间的推移具有规律性的变化,在风速持续增加的时间段内,碰撞数量与能量迅速增加至最大值,在风速稳定的前 120 s 左右,碰撞数量与能量逐渐降低至最小值,随后的时间段内不再发生明显起伏,在风速降低至 0 的时间段内,不发生颗粒碰撞。

参考文献:

[1] 路培,王林华,吴发启.不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(8):141-146.

[2] 李浩宏,王占礼,申楠,等.土壤结皮研究进展[J].人民黄河,2015,37(10):92-98.

[3] 咎国盛.毛乌素沙地生物土壤结皮与沙化土地的关系研究[J].水土保持通报,2012,32(4):27-31.

[4] 都军,李宜轩,杨晓霞,等.腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响[J].中国沙漠,2018,38(1):111-116.

[5] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征与影响因素[J].生态学杂志,2019,38(10):3050-3056.

[6] 李新凯,卜崇峰,李宜坪,等.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[J].水土保持研究,2018,25(6):22-28.

[7] 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.

[8] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2):303-311.

[9] 乔宇,徐先英.干旱荒漠区物理结皮的土壤水文效应[J].中国农学通报,2015,31(7):206-211.

[10] Bu C F, Wu S F, Yang K B. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J].International Journal of Sediment Research,2014,29(4):491-501.

[11] Bu C F, Gale W J, Cai Q G, et al. Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils[J].Pedosphere,2013,23(3):321-332.

[12] Stavi I, Lavee H, Ungar E D, et al. Ecogeomorphic feedbacks in semiarid rangelands: A Review[J].Pedosphere,2009,19(2):219-229.

[13] Sun Z Q, Kang Y H, Jiang S F. Effect of sprinkler and border irrigation on topsoil structure in winter wheat field[J].Pedosphere,2010,20(4):419-426.

[14] Issa O M, Valentin C, Rajot J L, et al. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils[J].Geoderma,2011,167/168(1):22-29.

[15] Zhang Z S, Chen Y L, Xu B X, et al. Topographic differentiations of biological soil crusts and hydraulic properties in fixed sand dunes, Tengger Desert [J]. Journal of Arid Land,2015,7(2):205-215.

[16] 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.

[17] 李莉,孟杰,杨建振,等.不同植被下生物结皮的水分入渗与水土保持效应[J].水土保持学报,2010,24(5):105-109.

[18] 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.

[19] 王旭洋,郭中领,常春平,等.中国北方农牧交错带土壤风蚀时空分布[J].中国沙漠,2020,40(1):12-22.

[20] 刘艳萍,刘铁军,蒙仲举.草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J].中国沙漠,2013,33(3):668-672.

[21] Chen X, Duan Z. Impacts of soil crusts on soil physico-chemical characteristics in different rainfall zones of the arid and semi-arid desert regions of northern China[J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(7):3335-3347.

[22] 杨会民,王静爱,邹学勇,等.风水复合侵蚀研究进展与展望[J].中国沙漠,2016,36(4):962-971.