

若干特殊地表风蚀的风洞实验研究*

邹学勇 刘玉璋 吴丹 董光荣

(中国科学院兰州沙漠研究所)

提 要: 经风洞模拟实验, 本文对四种特殊地表在净风和挟沙风情况下的风蚀特性, 进行了定量的研究。揭示了原始地表结构受人为破坏后, 其抗风蚀能力急剧降低的特点。探讨了风成沙粒配、戈壁风蚀平衡与风蚀有关的几个问题。

主题词: 地表风蚀 风洞模拟实验 净风 挟沙风 戈壁风蚀平衡

分 类: (中图法) P931.92 (科图法) 57.152

地表风蚀研究已有约半个世纪的历史, 众多科学家为此付出了大量的劳动, 并取得了丰硕的成果^[1-6]。但这些研究都集中在土壤风蚀问题上, 对其它地表类型风蚀的研究尚不多见。本文选取四种特殊的地表类型, 经风洞模拟实验, 定量地研究了各种条件下的风蚀特性, 并探讨了与风蚀有关的几个问题。实验在本所的室内沙风洞中进行^[7], 样品分别采自甘肃玛曲县城附近的流沙^[1]、江西南昌附近的“硬梁地”^[8]、西藏阿里地区狮泉河镇附近的粗戈壁和细戈壁^[9]。这四种地表的物理特性, 在相应的文献中都作了详细的阐述。

1 净风风蚀

净风是指由纯净气流产生的风。净风风蚀实验的目的, 是为了与下文将要讨论的挟沙风风蚀结果相对照, 以便揭示风沙流(挟沙气流)在风蚀过程中的重要作用。由于流沙地表不存在结构破坏问题, 所以, 各项实验均侧重于后三种地表类型。流沙地表的风蚀实验结果, 主要是为与其它三种地表风蚀结果对比之用。

1.1 原始地表净风风蚀

“硬梁地”在23.8m/s风速下, 持续15分钟仍无风蚀发生。表明单纯的气流作用并不能

本文1993年3月9日收到, 1993年11月23日收到修改稿。

* 本研究得到朱震达研究员的大力支持, 特此致谢。

1) 邹学勇, 中国若干特殊地区风沙活动对比研究: [博士论文]. 1992.

就地起沙，形成风沙流，对原始地面基本没有破坏能力。玛曲流沙则相反，在风速为 5.4 m/s 时就产生风沙流，并随着风速的增大，风蚀能力急剧增强。细戈壁在 9.4m/s 风速以下均不能形成风沙流，当风速达到 11m/s 时，才有弱风沙流生成。而粗戈壁更难产生风蚀，当风速达到 15m/s 时，才开始形成微弱的风沙流，用集沙仪测量还有一定的困难。实验的详细结果和条件如表 1。

表 1 原始土样的净风风蚀
Pure wind erodibility of original sample

	风 速 (m/s)	风蚀模数 (kg/m ² · hr)	观 察 结 果	拟 合 结 果	备 注
硬 梁 地	8.2	0	地表浮土开始滚动		土 样 标 准 0.74 × 0.30 × 0.18 (m ³)，实验开始时土样含水量 2.42%
	23.8	0	地表浮土被吹蚀殆尽，地表 裸露于气流之下。		
玛 曲 沙 流	8.0	22.107	风速为 5.4m/s 时，沙粒开 始起动	$M=3.175V^2-19.661V$ $R=0.992$	流沙铺设面积 1.45 × 1.00 (m ²)。 集沙仪距流沙下风向边缘 0.5m
	10.0	110.243			
	12.0	231.931			
	14.0	403.448			
	16.0	510.000			
细 戈 壁	9.4	0	砾间沙粒开始蠕动，不能形 成风沙流。	$M=0.071e^{0.236V}$ $R=0.991$	细戈壁铺设面积 1.55 × 1.00 (m ²)。集沙仪距流沙下风向边缘 0.5m
	11.0	0.112	开始形成弱风沙流。		
	13.0	0.154			
	14.0	0.198			
	15.0	0.213			
	16.0	0.265			
粗 戈 壁	15.0	0.058	开始形成弱风沙流。		同“细戈壁”

2.2 地表受人为破坏后的净风风蚀

“硬梁地”受人为破坏的形式，主要是模拟因种植作物需要进行的翻耕。土块大小不一，直径一般约 6cm，与耙后的实验情况大体相当。由于缺乏细小的沙物质暴露于地表；加之土块较大且坚实，众多突起的土块增加了地表粗糙度，保护了土块下的微少细粒物质。所以，尽管原始地表受到人为破坏，也很难发生风蚀。野外实际观测也是如此。细戈壁和粗戈壁的破坏，主要是模拟人工挖沙取石，因为这种破坏是该地最主要的方式。实验结果表明，在人为翻动地表后，破坏了戈壁地面已达到的自然平衡，使地表再度出现易于风蚀的松散沙物质，风

蚀模数比原始地表高几倍，甚至十多倍（表 2）。

表 2 土样受人为破坏情况下的净风风蚀
Pure wind erodibility of destroyed samples

项目 样品	风 速 (m/s)	风蚀模数 (kg/m ² ·hr)	观 察 结 果	拟 合 结 果	备 注
硬梁地	8.0	0	开始有小的土壤团聚体蠕动。		(1) 土样标准为 0.74×0.30×0.18 (m ³) (2) 用小铁铲将土样翻动，并适当破碎土块，使之尽量接近于自然翻耕。土壤含水量 2.42%。
	20.0	0	表面少数浮土滚动，仍不能形成风沙流。		
细戈壁	7.0	0.044	开始形成微弱风沙流。起沙风速为 5.65m/s。	$M=0.017e^{0.292V}$ $R=0.950$	(1) 细戈壁铺设面积 1.55×1.00 (m ²)。集沙仪距细戈壁下风边缘 0.5m。 (2) 风速为 5.65m/s 时，砾间少量较细的颗粒开始蠕动，故该风速可视为起沙风速。
	8.0	0.314			
	10.0	0.497			
	11.0	0.542			
	12.0	0.612			
	13.0	0.848			
	14.0	1.192			
	15.0	1.272			
粗戈壁	16.0	1.246		$M=0.00265e^{0.367V}$ $R=0.983$	(1) 同“细戈壁”(1)。 (2) 风速为 6.2m/s 时，地表细粒物质开始蠕动，风速为 7.0m/s 时，形成极弱风沙流，不便观测。
	8.0	0.027	开始形成弱风沙流。起沙风速为 6.2m/s。		
	9.0	0.085			
	10.0	0.132			
	12.0	0.321			
	13.0	0.383			
	16.0	1.782			

2 挟沙风风蚀

为了使风洞中的气流含有饱和沙量，在样品的上风向铺设一定规格的流沙样品。然后调动风速，分别对“硬梁地”、细戈壁和粗戈壁的原始地表和人为破坏情况下的风蚀状况进行定量测定。

2.1 原始地表挟风风蚀

“硬梁地”因质地坚硬，经过分别为 16 分钟的 10m/s 和 12 分钟的 12m/s 模拟风速的挟沙

表 3 原始样品的挟沙风风蚀
Sand-carried wind erodibility of original samples

项目 样品	风 速 (m/s)	风蚀模数 (kg/m ² ·hr)	观 察 结 果	拟 合 结 果	备 注
硬 梁 地	6.0	0	上风向流沙不能起动。无风蚀。	M=24.559+3.399V R=0.973	(1)土样标准 0.74×0.30×0.18(m ³),含水量 2.42%。 (2)流沙采自赣江下游地区,铺设面积 1.60×1.00(m ²) (3)流沙下风向边缘距土样前端 0.55m,集沙仪距土样下端 0.12m。 (4)风蚀量计算采用式 M=0.0099V×△n _y +0.749×10 ⁻⁴ ×△n _m ,其中△n _y 为升力读数差,△n _m 为力矩读数差。
	8.0	0	流沙开始蠕动、滚动。偶有微少沙粒作小距离跃移。无风蚀。		
	10.0	-4.331	因原始地表有微弱起伏面发生风积。无风蚀。		
	12.0	-4.002	土样沿裂隙隙处有微弱的破坏现象,但完整的地表无风蚀。总的看来,仍以风积为主。		
	14.0	2.699	整个地表破坏较严重,出现风蚀浅坑。		
	20.0	28.630	遭风蚀的地表面积约占整个地表的一半。		
	7.0	-4.165	砾间有风积现象。无风蚀。		
细 戈 壁	8.0	1.394	原先砾间沉积的沙开始风蚀。	风蚀(积)强度与相对 较低风速段的 风 积 (蚀)密切相关,难以 用数学形式描述。	(1)样品规格 1.55×1.00(m ²) (2)流沙采自森格藏布河谷盆地,铺设面积 2.40×1.00(m ²)。 (3)流沙与细戈壁相连接,集沙仪距细戈壁下风向边缘 0.5m。
	9.0	12.542	风蚀速率明显加大。		
	10.0	3.871	风蚀继续进行,但随着原先沉积沙量的减少,风蚀强度开始衰弱		
	11.0	5.535			
	12.0	1.394	原先砾间沉积的沙已风蚀殆尽。		
	13.0	-1.548	原先砾间沉积的沙被完全风蚀后,重新开始堆积。		
	14.0	-24.232			
粗 戈 壁	15.0	-49.781	自风速为 13.0m/s 以来,风积不断加剧。	同“细戈壁”	同“细戈壁”
	7.0	-5.276	砾间有风积现象。无风蚀。		
	8.0	-2.415	砾间继续有沙沉积,但强度有所减弱。		
	9.0	3.368	原先风蚀沉积沙开始风蚀。		
	10.0	6.766			
	11.0	2.342	原先的砾间沉积沙已风蚀殆尽。		
	12.0	1.394	重新开始砾间沉积沙。		

风作用，非但没有发生风蚀，反而因地表的微小起伏而发生风积。在 14m/s 挟沙风作用 6 分钟后，地表才开始微弱的风蚀。观察发现，地表一旦被撕开缺口，风蚀就沿着缺口不断地进行。风蚀面积迅速扩大，深度急剧加深，形成长形风蚀沟槽（图 1），其地貌表现与野外的风蚀沟槽完全一致^[8]。两种戈壁地表的观测结果非常特殊。细戈壁在 8m/s 以下风速的挟沙风作用下发生沉积；随着风速的增大，到 9m/s 时风蚀模数最大，随后又渐趋微弱。当风速为 12m/s 时，细戈壁表现基本处于蚀积平衡。再度增大风速，地表的风积作用将逐渐加强。粗戈壁的情况与细戈壁基本一致，只是这三个风速段的阈值不同，它们分别是小于 9m/s 和大于 11m/s（表 3）。

2.2 地表受人为破坏后的挟沙风风蚀

考虑到各地的实际情况，这项实验只进行了“硬梁地”一个样品。主要是因为区域风沙活动中，两种戈壁地表的地位不及“硬梁地”那样重要。经人为破坏后的“硬梁地”，其实验条件与以上所述的净风风蚀相同，目的是模拟耕作条件下的挟沙风风蚀。从整个风蚀过程来看，当风速小于或等于 10m/s 时，由于众多突起的土块的阻挡而发生堆积。风速自 13m/s 开始，样品产生强烈风蚀，并随风速的增大风蚀量急剧增加（表 4）。同时，突起的土块因剥蚀而逐渐变小，地表的起伏程度迅速减缓，形成与野外实际观察到的完全一样的风沙化土地。

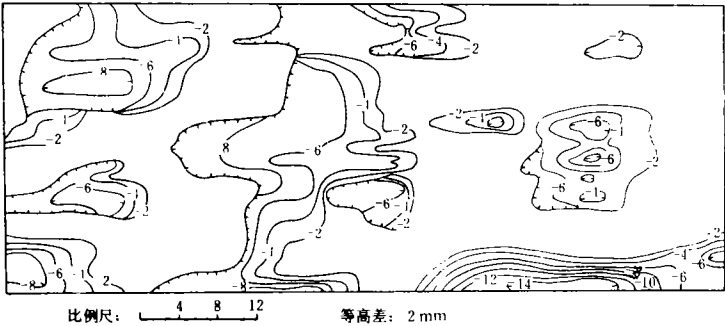


图 1 原始“硬梁地”经挟沙风风蚀后的地表形态
The ground features of original yinliangdi sample
after sand-carried wind erosion.

表 4 土样受人为破坏情况下的挟沙风风蚀

Sand-carried wind erodibility of destroyed sample

项目 样品	风 速 (m/s)	风蚀模数 (kg/m ² ·hr)	观 察 结 果	拟 合 结 果	备 注
硬 梁 地	10.0	-4.044	土块间有沙沉积，风积量大于风蚀量。	M = -79.488 + 8.080V R = 0.984	(1) 土样规格为： 0.74×0.30×0.18 (m ³)； (2) 用小铁铲翻动土样，并适当破碎土块，使之尽量接近于自然翻耕； (3) 沙流采自当地，铺设面积为 1.60×1.00 (m ²)。
	13.0	29.177	风蚀迅速，小的土壤团聚体被吹蚀。		
	16.0	57.965			
	18.0	63.699			
	20.0	77.923	自风速为 13.0m/s 以上，随着风速加大风蚀强度剧增。		

3 与风蚀有关的几个问题

3.1 流沙样品与被吹蚀（风成）沙的粒度关系

样品以玛曲流沙为代表，通过风洞实验，分别采集经 8m/s、10m/s、12m/s 和 14m/s 风速风蚀后的沙样，进行机械组成分析（表 5），表中的各粒径起动概率显示：

表 5 流沙及不同风速下扬沙粒配

Eolian sand grain-size contribution of different wind grades									
项目 粒级 (mm)	8 (m/s)		10 (m/s)		12 (m/s)		14 (m/s)		原沙样
	百分含量	起动概率	百分含量	起动概率	百分含量	起动概率	百分含量	起动概率	百分含量
>0.5	0.34	89.47	0.14	36.84	0.10	26.32	0.26	65.00	0.38
0.5—0.315	19.32	81.24	19.48	81.92	19.79	83.10	22.83	96.10	23.78
0.315—0.3	3.34	23.98	13.03	93.54	5.63	40.42	13.07	93.83	13.93
0.3—0.25	11.77	100.00	1.97	100.00	1.69	100.00	2.48	100.00	0.95
0.25—0.2	28.38	100.00	26.30	100.00	29.08	100.00	24.90	100.00	24.73
0.2—0.15	10.76	100.00	7.78	97.74	10.83	100.00	9.76	100.00	7.96
0.15—0.125	18.33	99.73	21.04	100.00	22.67	100.00	18.39	100.00	18.38
0.125—0.1	2.94	100.00	3.14	100.00	3.21	100.00	2.48	85.81	2.89
<0.1	4.82	68.76	7.08	100.00	7.02	100.00	5.80	82.74	7.01
备 注	吹沙 7 分钟后取样		吹沙 3 分钟后取样		吹沙 1 分钟后取样				

- (1) 从总体上看，粒径小于 0.3mm 的沙粒起动概率最高，大部分达到 100%。说明在 8—14m/s 风速范围内，小于 0.3mm 的沙粒最易被风蚀，这与我国沙漠（地）沙均以细沙为主的情况相一致。
- (2) 风速为 8m/s 时，0.3—0.1mm 粒径的沙起动概率为 100%，而小于 0.1mm 粒径的沙起动概率只有 68.76%，其主要原因可能是受到相对较大的颗粒（大于 0.1mm）的保护，暂时不易被风蚀。当风速为 10m/s 和 12m/s 时，小于 0.3mm 粒径沙的起动概率皆为 100%。而风速达到 14m/s 时，0.3—0.125mm 的沙粒起动概率只有 80%左右。但实际上仍是 100%。造成这种假象的原因在于，经过前几次风蚀之后，沙面表层的细沙（小于 0.125mm）物质大量被吹蚀，相对含量已小于原样沙，这种情况下即使百分之百地吹蚀，按表中计算方法得出的起动概率也小于 100%。
- (3) 大于 0.3mm 粒径的沙，起动概率虽有变化，但总的趋势是增加的，即随着风速的增大，起动概率也不断地增加。

3.2 戈壁风蚀平衡

样品是狮泉河镇附近的细戈壁和粗戈壁，实验分两组进行。这里的戈壁风蚀平衡是指当风速为一定值时，戈壁地表的风蚀与风积达到动态平衡，或者因地表细粒成份被风蚀殆尽后，残留砾石覆盖于地表而不能发生风蚀。这样平衡是相对的和暂时的。本实验的结果如下：

- (1) 通过人为翻动破坏了原始地表结构，然后用净风吹蚀，观测其变化过程。随着风

速的增大,风沙流强度逐渐加强,细戈壁在 17m/s 风速时,输沙率可达 $24.51\text{g}/\text{cm}\cdot\text{hr}$;而粗戈壁形成的风沙流一直微弱,风速到 17m/s 时,输沙率仅 $14.76\text{g}/\text{cm}\cdot\text{hr}$ 。这两个值均远小于相同风速下的流沙输沙率 ($534.6\text{g}/\text{cm}\cdot\text{hr}$)。根据气象站统计结果,狮泉河盆地几乎没有大于 17m/s 的风速。就风沙流的相对饱和度来说,在经过 17m/s 净风作用后,可认为戈壁已处于风蚀平衡状态。

(2) 挟沙风的风蚀平衡。指挟沙饱和气流经过达到自然平衡的戈壁时,蚀积处于平衡状态,即仍以饱和风沙流前进。实验研究发现,每种戈壁有两个风速阈值,细戈壁接近 8m/s 和略大于 12m/s,粗戈壁为 8.5m/s 和略大于 11m/s。

4 结果与讨论

(1) 除流沙地表外,其他各种原始地表在净风作用下,风蚀强度微弱,甚至很难发生风蚀。当气流挟带沙子时,由于沙粒持续而猛烈地冲击地面,对地表的物质结构具有很大的破坏力,风蚀强度会急剧增大,与净风风蚀相比,可成倍甚至几十倍地增加。在整个风蚀实验过程中,人为破坏原始地表结构后产生的风蚀最为剧烈。在相同的风蚀因素作用下,地表结构受人为破坏后的风蚀强度,可比原始地表的风蚀强度大好几倍。对本文所讨论的几种特殊地表风蚀,无论在何种条件下,当风速相同时,流沙地表的风蚀强度都远大于其他三种地表的风蚀强度。其主要原因在于:一是其他三种地表(无论是原始地表还是破坏后的地表)的粗糙度比流沙地表大;二是地表的紧实程度也比流沙地表大。这两点都是阻碍风蚀的重要因素。上述实验结果说明,在防治风沙危害的工程设计中,以下五个方面是至关重要的:第一,应对治理区域内及其周边地区的原始地表加以保护,防止破坏地表结构有利于风蚀的行为发生;第二,增加地表粗糙度是防止风蚀的重要措施,其中包括生物措施和工程措施。第三,增强地表的紧实度,其中化学固沙、沙质地表中掺入粘土等措施均属此类;第四,切断风沙流来源,使气流中不挟带或尽量少挟带沙粒,避免或减轻由挟沙风产生的强烈的风蚀作用;第五,削弱防护区的风力。随着风力的加强,风蚀和气流挟沙能力急剧增加,因此,诸如营造防护林等旨在削弱风力的生物措施是行之有效的方法。

(2) 戈壁风蚀平衡现象的存在,其根本原因在于,当风速较小时,沙粒弹跳高度低、速度小,很多沙粒进入砾石缝隙后,就不可能再发生运动,成为“死沙”。而风速增大到一定阈值后,风沙流底部沙量急剧增加。相反,其运动速度受底部风能的限制而减慢,沙粒进入砾石缝隙或砾石之间的深陷部位时,也不再发生跃移。只有风速适中时,挟沙气流才能在本身能量损失较小的情况下,同时激发戈壁地表的那部分沙粒发生运动,由此产生风蚀。戈壁风蚀平衡就是介于风积和风蚀之间的一种动态的、有条件的平衡。

表 1 和表 2 显示,在净风情况下,戈壁的风蚀模数仅为流沙地表的几百分之一。这给我们以深刻的启示,即在防止铁路、公路路基风蚀时,可采用砾石铺盖的方法;在防止小范围的流沙蔓延或风沙流侵袭时,也可用砾石压沙的措施。总而言之在防止风蚀问题上,采用砾石铺盖的方法可收到很好的效果。

(3) 风对沙物质具有较强的分选作用。表 5 清楚地表明,不论哪种风速下,扬沙的分

选性都比原样沙高。但由于原样沙本身的分选性差,也影响到各风速下的扬沙分选性,使得扬沙的分选性仍然表现为分选性较差的特点。因此,在研究沙漠沙的分选性时,不仅要考虑其下伏(基础)物质的机械组成特点,同时还应查清区域内的风况,因为在风速相对稳定条件下形成的风成沙的分选性,会比风速不稳定情况下形成的风成沙的分选性好。这两方面的原因将迫使人们改变这样一种观点,即分选性好的沙漠沙一定比分选性相对较差的沙漠沙形成年代老。

参 考 文 献

- [1] W S Chepil etc. Wind erodibility of farm fields. J. Soil and Water Conserv, 1959, 14 (5).
- [2] W S Chepil etc. Climatic factor for estimating Wind erodibility of farm fields. J. Soil and Water Conserv, 1962, 17 (4).
- [3] G W Cole etc. Some Wind erosion process measures. Tran. of the ASAE, 1985, 28 (4).
- [4] 董光荣等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果. 科学通报, 1987, (4).
- [5] L J Hagen etc. Wind erosion abrasion; Effects of aggregate moisture. Tran. of the ASAE, 1988, 31 (3).
- [6] 胡孟春等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究. 中国沙漠, 1991, 11 (1).
- [7] 贺大良等. 风沙现象研究的重要设备——沙风洞. 中国沙漠, 1981, 1 (1).
- [8] 邹学勇. 中国亚热带湿润地区风沙地貌的研究. 中国沙漠, 1990, 10 (2).
- [9] 邹学勇. 森格藏布河谷盆地第四纪地貌发育和环境演变. 干旱区资源与环境, 1992, 5 (1).

A STUDY ON SOME SPECIAL GROUND WIND EROSION IN THE TUNNEL

Zou Xueyong Liu Yuzhang Wu Dan Dong Guangrong

(Institute of desert research, Chinese Academy, Lanzhou)

Subject terms: ground wind erosion, imitation experiment in tunnel, pure wind, sand-carrying wind, the balance of gobi wind erosion

Abstract

The wind erosion features of the four typical ground are studied in the tunnel, in this paper, the imitated equations between wind erosion ratio ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$) and wind grade are expressed for some specific conditions. In the process of the experiments, pure wind erodibility and sand-carrying wind erodibility are considered in original and destroyed ground wind erosions. The results of experiments indicate that the wind erosion ratio can be rapidly increased by sand-carrying wind or on the destroyed ground. Two significant phenomena are discovered, One is the existence of the process of gobi ground wind erosion balance, and another one is that eolian sand grain-size is related not only to the wind blowing time but also to the source of sands and the change of wind grade. The experimental results provide important scientific basis for prevention and amelioration of wind erosion.