

风沙土水分抗风蚀性研究*

董治宝 陈渭南 李振山 杨佐涛

(中国科学院兰州沙漠研究所·兰州市·730000)

摘要 以典型风沙土为实验材料,通过风洞模拟实验探讨了风沙土水分含量对临界风蚀风速及风蚀强度的影响。研究表明:风沙土临界风蚀风速随含水率的增加呈线性增大;风蚀率(风蚀强度)随含水率的增加呈二次幂函数减少。综合的风沙土水分抗风蚀模型可以表达为

$$E = A + B(V/M)^2$$

其中, E 为风蚀率; V 为实际作用风速; M 为土壤含水率。

关键词 土壤含水率 临界风蚀风速 风蚀率 土壤水分抗风蚀模型

On Resistance of Eolian Sandy Soil Moisture to Wind Erosion

Dong Zhibao Chen Weinan Li Zhenshan Yang Zuotao

(Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, 730000, Lanzhou Municipality)

Abstract Taking the typical eolian sandy soil from Liudaogou micro-river basin of Shenmu county, north Shaanxi, the influence of moisture on the resistance of studied soil to wind erosion is ascertained by means of wind tunnel experiment. The conclusions reached are as follows; the threshold wind erosion velocity of eolian sandy soil increases linearly with an increase of moisture content; the wind erosion rate(intensity) reduces with an increase of moisture content by the second power function. A comprehensive moisture-based model suggested for the resistance of eolian sandy soil to wind erosion has been obtained.

Keywords soil moisture content; threshold wind erosion velocity; wind erosion rate; comprehensive moisture-based model for soil resistance to wind erosion

风蚀和水蚀被认为是塑造地球景观和地表形态的两大基本地貌过程^[1]。土壤风蚀是干旱半干旱地区及部分半湿润地区土地沙漠化过程的首要环节,在我国乃至全球广泛地分布^[2]。与风蚀过程相伴而生的地表破坏、物质运移及再堆积均可对人类生存环境造成不同程度的危害,甚至灾难性的损害。我国历史文献中有关“雨土”、“雨沙”、“雨沙土”的记载,美国中西部、加拿大以及前苏联中亚地区本世纪 30 年代前后的灾难性“黑风暴”实质上都是土壤风蚀的产物^[3,4]。1993 年,与土壤风蚀密切联系的席卷我国西北大部分地区的“5·5”特大沙尘暴造成达 5.6×10^8 人民币元的直接经济损失^[5]。有鉴于此,风蚀问题愈来愈受到科学界及国际社会的广泛关注。土壤风蚀是风营力与土壤圈相互作用的产物,深受地理环境中各种自然和人文因素的

影响。因而各种风蚀因子对土壤风蚀的影响作用一直成为土壤风蚀科学研究的主要内容之一^[2-6,7]。当土壤中有水分存在的条件下,水分子与土壤颗粒之间的拉张力增加了颗粒间的内聚力^[8],其结果导致土壤抗风蚀力的增加。许多学者曾就土壤水分对其风蚀可蚀性(或抗风蚀性)的影响进行过一系列研究^[9-13],但以往的研究工作具有如下两方面的突出特色:(1)不同的研究者采用不同性质类型的土壤得出的结论不尽相同,无一可被广泛接受;(2)研究工作多为定性研究,定量的结果极少,给实践应用造成诸多不便。因此,这一领域的深入研究必须以针对不同性质的土壤进行尽可能的定量研究为生长点。

风沙土是广泛分布于干旱、半干旱地区的重要土壤类型。质地疏松,植被稀疏,因此,风蚀强弱主要受控于土壤水分之多寡。有鉴于此,本文选择风沙土为材料,试图通过风洞模拟实验,从临界风蚀风速和风蚀强度两个侧面定量地探讨风沙土土壤水分对风蚀的影响,以期对土壤风蚀防治提供科学的理论根据。

1 实验部分

实验在中国科学院兰州沙漠研究所沙风洞内进行。该风洞为直流闭口吹气式风洞,全长 37.78m,实验段 16.26m,截面积 $0.6\text{m} \times 1.2\text{m}$,风速由 $0.5 \sim 40\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 连续可调^[14]。供试风沙土样取自位于典型沙漠/黄土带并遭受严重风蚀的陕北神木县六道沟流域。其粒度组成见表 1。实验时,将供试土样装入体积为 $95\text{cm} \times 27\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的木质土壤槽中,然后将其置于风洞入口下风 12.60m 处。为了消除土壤团块与硬度及其变化对风蚀的影响,首先将野外采集的原状沙黄土样经自然风干后彻底粉碎,并用孔径为 0.25mm 的粒度筛筛分。

表 1 供试风沙土粒度组成特征

粒径 mm	>1.00	1.00~0.80	0.80~0.40	0.40~0.315	0.315~0.20	0.20~0.16	0.16~0.125	0.125~0.10
含量百分比	1.38	1.98	2.69	10.07	7.99	7.81	10.51	3.65
粒径 mm	0.10~0.08	0.08~0.063	0.063~0.05	0.05~0.02	0.02~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
含量百分比	23.87	2.42	11.43	8.43	2.70	1.33	2.24	1.43

1.1 样品制备

在每轮实验中,首先按照拟定的土壤水分含量向已粉碎、过筛的供试土样人工加水并搅拌均匀,然后用塑料布蒙盖放置 1~2h,以使土壤水分在土体中分布、渗透均匀。待样品开始风蚀实验时,取土样三小铝盒分别测定土样含水率,取其平均值作为供试样品的实际含水率 M (%)。

1.2 吹蚀

将已制备好的供试土样置于风洞实验段的土壤槽中,施以一系列不同强度的风力吹蚀,用毕托管监控实际作用风速。同时观察在风力作用下的各种风蚀现象。

1.3 临界风蚀风速及风蚀强度的测定

对各种含水率的供试土样在实验时,首先用毕托管测定临界风蚀风速 $V_c / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,取连续 3 次测定结果的平均值。然后对供试土样施以大于临界风蚀风速的风力吹蚀,测定不同风速下的风蚀强度。在本实验中,风蚀强度用风蚀率 $E / \text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示,即单位时间(1min)内供试土样的风蚀损失量/g,通过百分之一天平称量被蚀物质在整个实验风蚀时段内的风蚀总量计算得出。

2 结果与讨论

通过上述实验方法得到的实验结果见表 2。

表 2 不同含水率风沙土风蚀率的风洞实验结果

M (%)	V_c ($m \cdot s^{-1}$)	不同风速 $V / m \cdot s^{-1}$ 下的风蚀率 $E / g \cdot min^{-1}$					
		V	7.7	10.6	14.6	17.8	20.4
2.67	6.4	E	3.28	129.68	730.75	977.80	1717.95
		V	7.7	10.6	14.6	17.8	20.4
4.14	7.5	E	5.4	95.95	175.55	394.30	1225.00
		V	8.8	10.9	13.0	15.9	22.5
5.20	8.0	E	32.03	59.68	101.10	169.75	323.50
		V	10.9	12.3	13.3	16.8	22.8
5.69	8.9	E	31.08	79.90	115.30	206.20	234.35
		V	11.2	14.8	17.8	21.3	22.8
6.20	9.9	E	14.18	47.80	62.15	130.20	210.35
		V	12.6	14.5	17.5	20.9	23.8
7.13	10.7	E	10.40	41.00	44.50	74.55	124.05
		V	13.0	17.0	17.9	21.7	23.7
7.87	11.2	E	3.20	24.75	56.25	91.50	142.70
		V	13.1	17.8	20.5	22.0	26.1
8.18	12.8	E	16.38	41.75	57.55	116.40	
		V	16.0	19.8	22.7	26.3	
9.52	13.8	E	13.92	23.50	27.55	94.35	
		V	17.5	20.3	24.0	27.2	

2.1 临界风蚀风速与土壤含水率的关系

土壤风蚀直观地表现为土壤颗粒的运动。当气流作用于地表时,随着作用强度的增大,土壤颗粒便会摆脱静止而开始运动。作者将地表土壤颗粒产生运动所需要s的最小风速称为临界风蚀风速,实质上相当于风沙物理学中的起动风速。Bagnold R A 曾提出流体起动风速与冲击起动风速的概念^[15]。他指出,流体起动风速是受净风作用时的起动风速,而冲击起动风速则是受挟沙风作用时的起动风速。Fryrear D W 相应地将流体起动风速和冲击起动风速分别称之为静压起动风速和动力起动风速^[1]。本实验中的风均系净风,因而临界风蚀风速相当于流体起动风速或静压起动风速。

土壤颗粒起动风速之大小取决于众多因素^[9]。实验结果表明,土壤含水率愈大,临界风蚀风速,即土壤颗粒的起动风速愈大,土壤抵抗风蚀的能力因之而愈强。由数理统计分析得出的临界风蚀风速与风沙土含水率的定量关系可以表达为(1)式。即风沙土之临界风蚀风速随含水率的增加呈线性增大。这一结果与 Hotta 等的研究结论^[16]比较类似。但不同于 Bisal F 和 Hseih J 的实验结果。实际上,不同性质类型土壤之临界风蚀风速与含水率的定量关系可能是不同的。因为,同一含水率对不同性质,特别是不同质地之土壤颗粒间的内聚力具有不同的影响作用。

$$V_c = 2.53 + 1.18 \quad r = 0.983 \quad (1)$$

从另一方面来看,在不同的含水率范围内,临界风蚀风速与土壤含水率的关系亦可能是有所差异的。例如,Bisal F 和 Hesih J 的实验结果只揭示了沙壤土局部土壤含水率范围(5%~8%)的特征。而本文的结果则反映了风沙土在更宽含水率区间(约 2.5%~10.0%)的总体趋势。

2.2 风蚀率与土壤含水率的关系

表 2 的实验结果直观地表明,风沙土含水率愈大,风蚀率愈小。由于风洞调速系统的误差以及气流本身的波动性,对每种含水率的供试土样在风蚀实验过程中,风速难以控制在完全相同的水平上,从而妨碍了不同土壤含水率对风蚀率影响作用的精确比较及二者定量关系的获得。为研究之便,本文对原实验结果中各种含水率条件下风蚀率与风速的关系采用自然 3 次样条函数法插值,求出各种含水率之风沙土在 10,15,20 及 25m·s⁻¹ 风速条件下的风蚀率(表 3)。从而可以定量地比较风速一定的条件下风蚀率与土壤含水率的定量关系(表 4,图 1)。

表 3 不同风速下风蚀率与土壤含水率的关系

土壤含水率 <i>M</i> / %	不同风速 <i>V</i> / m·s ⁻¹ 条件下的风蚀率 <i>E</i> / g·min ⁻¹			
	10m·s ⁻¹	15m·s ⁻¹	20m·s ⁻¹	25m·s ⁻¹
2.67	73.04	761.96	1582.23	2480.00
4.14	66.19	210.86	881.32	1568.69
5.20	24.72	145.82	239.42	390.59
5.69	12.94	81.86	172.26	280.42
6.20	0.10	52.03	107.03	244.04
7.13	0.00	27.79	53.53	158.47
7.87	0.00	10.45	47.06	133.92
8.18	0.00	8.76	42.65	90.26
9.52	0.00	5.01	22.83	50.06

表 4 风蚀率与土壤含水率的相关关系

风速 <i>V</i> / m·s ⁻¹	相关关系	相关系数
10	$E_{10} = 1.6865 + 0.05824M^{-2}$	$r = 0.835$
15	$E_{15} = -83.53325 + 0.60763M^{-2}$	$r = 0.997$
20	$E_{20} = -157.25214 + 1.28587M^{-2}$	$r = 0.976$
25	$E_{25} = -190.69821 + 2.000441M^{-2}$	$r = 0.962$

由表 4 可知,在任何大于临界风蚀风速的风力条件下,风沙土之风蚀率与含水率的关系是相似的。即风蚀率随含水率的增加呈二次幂函数减少。函数的一般形式为

$$E = C + DM^{-2} \quad (2)$$

其中, *C*, *D* 分别为回归系数,可由数理统计分析得出。

从图 1 中可以看出,土壤风蚀率随含水率的变化过程具有缓变与陡变区间交替出现的动态超稳定平衡系统行为。各种风速下,土壤风蚀率随含水率的变化趋势十分相似。含水率小于 4.14% 和大于 5.20% 为缓变区间;4.14%~5.20% 为陡变区间。上述特征定性地表明,就风沙土而言,在土壤风蚀率随含水率变化的过程中,起初随含水率的增大,风蚀率缓慢地减少。当含水率增加到一定程度时,较小的土壤水分增量会引起土壤风蚀率较大的幅度的减少。而后,风蚀率随含水率增加而减小的过程又趋于平缓。其中的陡变区间对风蚀的防止具有重要的指导意义。因为,掌握陡变区间,适时控制土壤含水率对土壤风蚀强度的大幅度降低起到事半功倍

的效果。

进一步分析风沙土的上述陡变区间可以发现,4.14%和5.20%的含水率大致相当于该实验风沙土的最大吸湿水和凋萎湿度^[17,18]。本文的实验结果表明,当土壤水分由吸湿水向毛管水转化时,其抗风蚀力亦将发生突变。而由毛管水量决定不同意义的土壤水对土壤的抗风蚀性发挥不同的作用。因不同土壤的吸湿水量和凋萎湿度是不同的,不同性质的土壤之风蚀率随土壤含水率的变化过程亦有所差异。

由此说明,土壤水分对风蚀的影响作用除了取决于水分含量之多寡外,尚与存在形态密切相关。

2.3 综合水分抗风蚀模型

土壤水分抗风蚀性亦即由于水的存在引起的土壤对风力作用抵抗能力的改变。由临界风蚀风速的分析可知,能够产生风蚀的风力强度必须大于临界风蚀风速。这里将多于临界风蚀风速的那部分风力作用称为有效风。前人的研究^[15]表明,风蚀强度与临界风蚀风速的大小密切相关。为了探讨风蚀强度与有效风的关系,本文用实际作用风速 V 与临界风蚀风速 (V_c) 之比值 (V/V_c) 来衡量有效风的相对大小。

由表 2 可以计算出各风蚀率所对应的有效风力指数 (V/V_c)。初步的统计分析表明,风蚀率随有效风力指数的变化(图 2)过程具有如下特点。

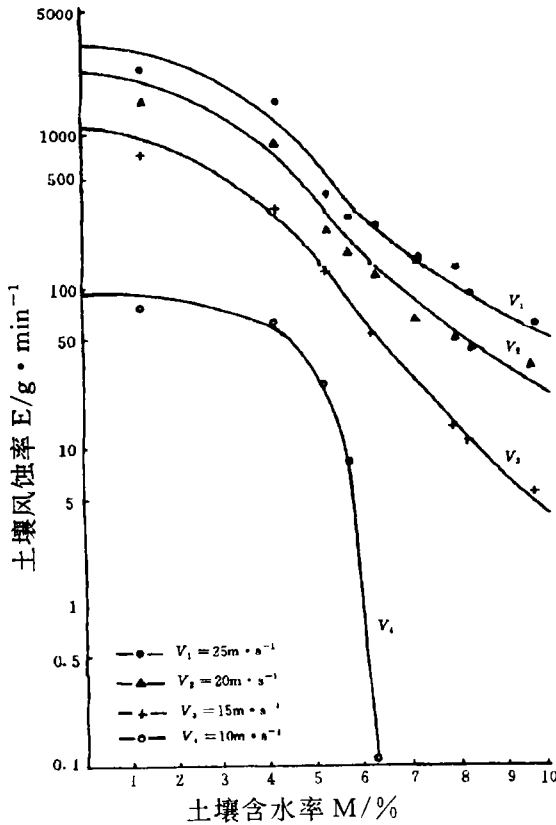


图 1 风蚀率与土壤含水率的关系

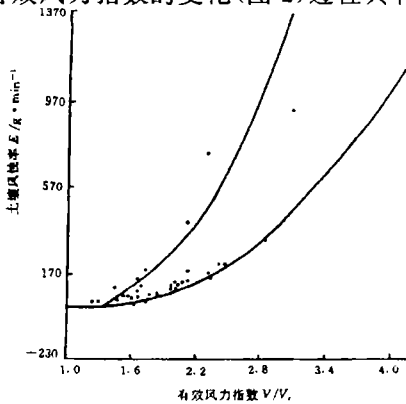


图 2 风蚀率 (E) 与有效风力指数 (V/V_c) 变化曲线

(1)起初,风蚀率随有效风力指数的增大缓慢增加。
 (2)当 V/V_c 增至 1.28 时, $E - V/V_c$ 曲线可分为 A, B 两支,其中一支土壤风蚀率随有效风力指数的变化较另一支明显为快。
 进一步分析表明,图 2 中曲线 A 与 B 的分支点所对应的有效风力指数基本上相当于 5.20% 含水率,即凋萎湿度。约以该土壤含水率为界,可将本实验得出的全部 43 个风蚀率值及其所对应的有效风力指数值的关系分为两组。其中曲线 A 所代表的 15 个值含水率均小于 5.20%;曲线 B 所代表的 28 个值含水率均大于 5.20%。据此,这里分别将曲线 A, B 称作低含水率与高含水率土壤之风蚀率随有效风力指数的变化曲线。值得特别注意的是,从土壤风蚀意义上划分出来的低含水率与高含水率的分界点恰相当于凋萎湿度,即植物有效水与无效水的分界。由此表明,当土壤水分形态由无效水变为有效水时,其对风蚀的影响作用亦出现较大差

异,见(3)式。这同时也表明,掌握凋萎湿度对防止土壤风蚀的积极意义。

$$\begin{cases} E_L = -316.04 + 161.80(V/V_t)^2 & r = 0.984 \\ E_H = -54.86 + 37.49(V/V_t)^2 & r = 0.970 \end{cases} \quad (3)$$

其中, E_L, E_H 分别代表低含水率和高含水率土壤的风蚀率。即,虽然低含水率和高含水率土壤风蚀率随含水率的变化过程有所差异,但遵循的总体变化规律是相似的。

由(1)式知, $V_t \propto M$, 由(2)式知 $E \propto (V/V_t)^2$ 。将(1)式代入(2)式可知,应当存在关系 $E \propto V/M$ 。这一推论被进一步的统计分析证明。对实验结果中所有的风蚀率及其所对应的风速与含水率之比值 (V/M) 的统计分析表明,二者的关系可用(4)式表示(图3)。

$$\begin{aligned} E &= -124.52 + 0.00157(V/M)^2 \\ r &= 0.957 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式即为土壤综合水分抗风蚀模型。即对一定含水量的风沙土,其风蚀强度与风速的平方成正比,而与其自身含水率的平方成反比。由此揭示了土壤风蚀过程中的一条原理:风蚀是气流与地面物质之间能量传递与转换的结果。土壤水的存在可消耗部分风蚀能,从而使作用于地面物质的实际风力作用相应减少,增加了土壤的抗风蚀力。

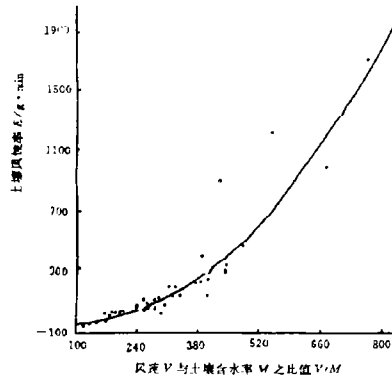


图3 风蚀率(E)与实际作用风速和含水率之比值(V/M)的关系

3 初步认识

由本文对风沙土水分抗风蚀性的初步研究结果可以得出如下有关土壤水分抗风蚀的认识:

(1)土壤水分抗风蚀的原理是分散风营力与土壤物质之间的能量传输与转换,从而使单位风蚀能产生较少的风蚀量,或单位土壤物质的风蚀量消耗较多的风蚀能。

(2)土壤水分的量(含水率)和质(水分形态)同时影响土壤风蚀。因此,在防止土壤风蚀的实践中,掌握各种形态水分的范围,有目的地控制土壤含水率对有效地防止土壤风蚀具有积极的指导意义。

(3)土壤风蚀率随含水率变化过程中陡变区间与缓变区间交替出现的特征表明,土壤水分对风蚀的影响过程与水蚀过程具有相似的行为,即 Schumm 在论述流水作用下的流水侵蚀时提出的“复杂响应”律^[19]。

本项研究得到中国科学院水利部水土保持研究所唐克丽研究员、王斌科副研究员、张平仓副研究员、侯庆春副研究员以及神木试区全体工作人员的帮助,特此致谢!

参 考 文 献

- 1 Fryrear D W, Stout J E, Hagen L J, Vories E D. Wind erosion; Field measurement and Analysis. Transactions of the ASAE. 1990, 34(1): 155~160
- 2 董光荣,李长治,全炯等. 关于土壤风蚀风洞实验的某些结果. 科学通报, 1987, 32(4): 297~301
- 3 陈渭南,董光荣,董治宝. 中国北方土壤风蚀问题的研究进展与趋势. 地球科学进展, 1994, 7(5): 6~12

