

戈壁表面阻力系数的实验研究*

董治宝** 屈建军 刘小平 张伟民 王训明

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所风沙物理与沙漠环境实验室, 兰州 730000)

摘要 气流对戈壁表面的响应可定量地用阻力系数来表征。通过风洞模拟实验研究了风蚀戈壁表面阻力系数与砾石粒径、覆盖度的关系。结果表明, 当砾石覆盖度大于40%~50%时, 戈壁表面阻力系数趋于常数。据此, 结合野外调查结果认为, 我国干旱区的广大戈壁风蚀面大多在空气动力学上是稳定的, 至少不是现代风沙活动及沙尘暴的主要物质源地, 在戈壁地区风沙活动及沙尘暴防治重点应放在砾石覆盖度较小的“土戈壁”上。用回归方法建立了包含砾石粒径与覆盖度两个变量的阻力系数预测模型, 与风洞实验值吻合得比较好($R^2 = 0.94$)。通过阻力系数随砾石摩阻雷诺数的变化规律判定, 戈壁风蚀面摩阻效应随戈壁砾石粒径与覆盖度的增大而提高。

关键词 阻力系数 砾石盖度 摩阻效应

风蚀戈壁是我国干旱区广泛分布的风成地貌类型之一, 在地质时期曾是我国风沙活动和沙尘暴的主要源地之一^[1,2]。在戈壁风蚀面的发育过程中, 可蚀性物质(沙粒)因长期风蚀逐渐减少, 而不可蚀性物质(主要是砾石)相对富集, 形成对下伏物质具有保护作用的不可蚀砾石层——戈壁风蚀面^[3]。虽然戈壁风蚀面对风沙活动的抑制作用已为人所知, 但对其空气动力学行为的定量研究则很少^[4]。无量纲的阻力系数反映了气流中障碍物对气流的阻滞效应^[5], 戈壁表面的阻力系数可以反映戈壁地表风沙活动界面的潜在风沙活动和沙尘释放强度, 因而可用以评价戈壁风蚀面的空气动力学稳定性。特定地表条件的阻力系数要由野外观测或模拟实验来确定。但是, 野外条件比较复杂, 戈壁表面的阻力系数除与表面砾石层的几何特征有关外, 尚受地形起伏的影响, 很难找到不受地形起伏影响的理想观测场所, 因而从观测结果中难以确切分辨出砾石覆盖和地形起伏的影响。再者, 野外砾石的形态复杂、几何特征难以精确描述且不可调控, 这为确定阻力系数与砾石几何特征的定量关系带来困难。

有鉴于此, 本文试图通过风洞模拟实验确定戈壁表面阻力系数与砾石粒径及覆盖度的关系, 探讨戈壁风蚀面趋于稳定所需的临界砾石覆盖度, 建立戈壁风蚀面阻力系数的预测模型, 评价戈壁表面摩阻效应的发育程度, 为认识和减轻戈壁地区的风沙危害提供理论依据。

1 实验方法

2000-12-26 收稿, 2001-04-12 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40001005)和中国科学院“百人计划”资助项目

** E-mail: xunming@public.lz.gs.cn

实验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所风沙物理与沙漠环境实验室沙坡头野外风洞中进行¹⁾。构成实验戈壁床面的砾石为不同直径和高度，直径/高度比约为 1.5 的抛物线型水泥块(表 1)。实验时将砾石模型按菱形格局均匀布置于风洞实验段的底部，通过改变单位面积上砾石块的数量来调整砾石覆盖度。为了使边界层发育充分，实验床面自风洞实验段入口开始向下风向铺设 15 m。整个实验布置如图 1 所示。

表 1 实验砾石的几何特征

序号	直径 d / cm	高度 h / cm	d/h	表面积/ cm^2	底面积/ cm^2
GR01	1.9	1.2	1.58	2.83	10.19
GR02	2.9	1.9	1.53	6.60	24.54
GR03	3.8	2.4	1.58	11.34	40.76
GR04	4.7	3.1	1.52	17.34	64.86
GR05	5.7	3.7	1.54	25.50	94.00
GR06	6.5	4.3	1.51	33.17	124.39

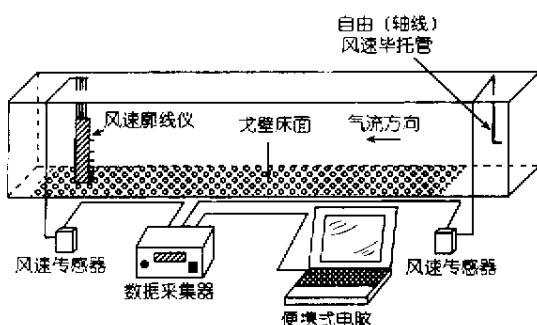


图 1 实验布置图

本实验主要测定不同粒级和不同覆盖度的戈壁床面在不同自由风速条件下的阻力系数。阻力系数由下式计算：

$$C_d = 2(U_*/U)^2, \quad (1)$$

式中 C_d 为阻力系数， U_* 为摩阻速度， U 为自由风速。所以，阻力系数确定的关键是(1)式中 U_* 与 U 的测定。

摩阻速度 U_* 通过对数风速廓线拟合确定，并用相关系数($R^2 > 0.97$)控制，以保证风速测量结果及所选取的高度在对数分布区域内¹⁾。风速廓线用风速廓线仪测定¹⁾。

2 结果与讨论

本实验对 6 种粒级的砾石分别测定 12 种覆盖度在自由风速为 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 m s^{-1} 时的阻力系数，实验结果见图 2。光滑床面的阻力系数为 0.0026~0.0033，平均 0.0028，与以往对光滑洞底的测定结果^[6,7]比较接近。

2.1 阻力系数随砾石粒径与覆盖度的变化

砾石覆盖使阻力系数增加 1.1~8 倍，增大的倍数取决于砾石粒径与覆盖度。戈壁表面的阻力系数随砾石粒径及覆盖度的增加而增大。对于不同粒径的砾石，阻力系数随砾石覆盖度的变化服从相似的规律(图 2)，即当覆盖度较小时，阻力系数随砾石盖度增加而增大的过程较为明显，其增大率随盖度的增加而趋缓。当砾石覆盖度大于 40%~50% 时，阻力系数基本不再随砾石覆盖度的增加而增大，说明戈壁床面对气流的反馈即阻滞作用趋于稳定，气/床界面达到相对平衡。

当气流经过戈壁表面时，其对气流的总阻力可以分解为砾石产生的阻力和砾石间裸露地表产生的阻力^[8]，所以阻力系数可以表示为

$$C_{dt} = C_{dg} + C_{db}, \quad (2)$$

1) Dong Z B, Wang X M, Zhao A G, et al. Aerodynamic roughness of fixed sandy beds. Journal of Geophysical Research, 2001(待发表)
1) 见 953 页脚注 1)

式中 C_{dt} 为总阻力系数, C_{dg} 为砾石所产生的阻力系数, C_{db} 为砾石间裸露地表所产生的阻力系数。当戈壁风蚀面发育充分时, 砾石间的裸露地表完全处于砾石的保护下, 其对气流不产生任何阻力^[9], (2)式可简化为

$$C_{dt} = C_{dg}. \quad (3)$$

(3)式可以理想地解释为: 当戈壁风蚀面的阻力系数趋于常数时, (3)式恒成立, 可以认为, 在业已稳定的戈壁风蚀面的砾石间再增加的砾石将全部处于已有砾石的保护下, 新增加的砾石所产生的阻力系数趋于零。所以, 阻力系数趋于常数(相当于最大阻力系数)可以作为戈壁风蚀面趋于空气动力学稳定的判据。对于所实验的各种砾石, 40%~50% 是戈壁风蚀面发育成熟、趋于稳定的临界覆盖度。

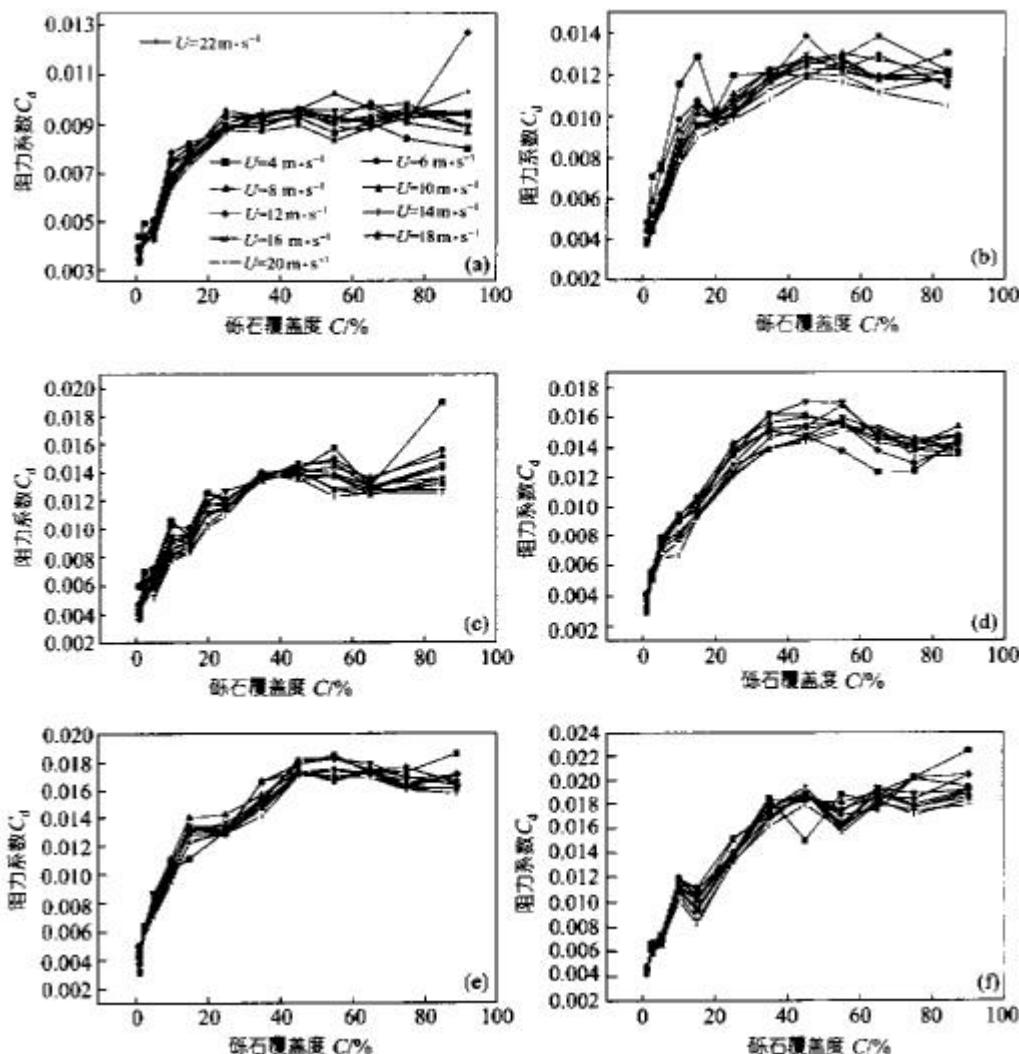


图 2 戈壁表面阻力系数的风洞模拟实验结果

(a) GR01, $h=1.2$ cm, $d=1.9$ cm, (b) GR02, $h=1.9$ cm, $d=2.9$ cm, (c) GR03, $h=2.4$ cm, $d=3.8$ cm, (d) GR04, $h=3.1$ cm, $d=4.7$ cm, (e) GR05, $h=3.7$ cm, $d=5.7$ cm, (f) GR06, $h=4.3$ cm, $d=6.5$ cm. 图例见(a)

上述结论首先表明, 戈壁风蚀面趋于稳定的临界覆盖度与砾石粒径无关。从空气动力学的角度来分析, 戈壁表面的砾石之所以能够增大阻力或阻力系数是因为其存在增加了地表的起伏度, 使气/床界面上气流与固体表面的接触面积增大了。砾质戈壁表面对砾石间裸露地表的保护程度取决于起伏度的大小。戈壁表面起伏度可用砾石的总表面积与基底(洞底)的总面积之比来表示。对各种实验砾石模型的几何特征分析表明, 戈壁表面起伏度仅与砾石覆盖度有关, 而与粒径无关。所以临界覆盖度亦与粒径无关。

野外调查表明, 我国西北风蚀戈壁表面的砾石覆盖度大多在 60% 以上, 有的甚至达 80%~90% 或更高^[9], 这说明所谓的戈壁风蚀面发育过程的多成因复杂性^[11]。在漫长的地质过程中, 戈壁风蚀面的形成除与风力作用有关外, 尚受冻融作用、盐分作用而导致的戈壁表面砾石的再移动与聚集的影响^[10,11], 从而使戈壁风蚀面砾石覆盖度大于趋于稳定的临界值。戈壁风蚀面趋于稳定的临界砾石覆盖度表明, 我国西北地区高砾石覆盖度的戈壁表面在空气动力学上是稳定的, 不是现代风沙活动及沙尘暴的物质源地。尽管砾石本身的风化以及局地性过境风沙流对砾石的磨蚀作用亦可提供可蚀性的细粒物质, 但其量远不足以形成明显的风沙活动。但是, 砾石覆盖度较小的“土戈壁”仍然是风沙活动和沙尘暴的源地。同时不可忽视的是各种机械扰动作用对稳定戈壁表面的破坏。戈壁地区大规模的工矿建设、道路建设不可避免地破坏戈壁风蚀面, 使砾石覆盖度减小, 被保护的下伏可蚀性细粒沙物质上翻, 风沙活动复活。

对各种粒级的砾石在不同自由风速条件下阻力系数与覆盖度的统计分析表明, 阻力系数与砾石覆盖度的关系可表达为

$$\ln C_d = a + b/C^{0.5}, \quad R^2 > 0.86, \quad (4)$$

式中 C 为砾石覆盖度, 即砾石底部总面积与洞底面积之比, a, b 为回归系数。实验结果表明, 回归系数 a 和 b 是砾石粒径的函数。因此, 戈壁表面的阻力系数是砾石粒径与覆盖度的函数。

为了建立阻力系数与砾石粒径及覆盖度之间的无量纲关系, 在此引入相对粒径(d/D)的概念, 其中 d 为砾石的粒径(单位为 cm), D 为假定的标准砾石的粒径, 2.5 cm。用统计相关分析可以建立戈壁风蚀面阻力系数与砾石相对粒径及覆盖度的关系, 并化简为:

$$1/\ln C_d = -0.1644 - 4.8785 \exp[-4.31(d/D)^{-0.14} - (DC)^{-0.5}(0.046 + 0.117d^{0.5})]R^2 = 0.94. \quad (5)$$

(5)式的相关系数表明, 其对阻力系数的预测结果与实验结果吻合得比较好(图 3)。

2.2 阻力系数随砾石摩阻雷诺数的变化

贴地层气流的湍流程度对地表沙粒起动及风沙活动具有重要的影响作用^[12]。前文中提出的临界砾石覆盖度只有在湍流发展充分时才会有实践推广意义, 因为这意味着实验符合自模拟条件, 基本满足动力相似的要求。阻力系数随湍流程度的提高而减小, 在覆盖度一定时, 其对风沙活动的抑制作用会因湍流程度的提高而减弱。戈壁风蚀面贴地层湍流度可用砾石的摩阻雷诺数来表征^[13], 发展程度可用阻力系数随戈壁表面摩阻雷诺数的变化来判断, 当阻力系数趋于不随摩阻雷诺数变化的常数时, 可以认为湍流已经充分发展。

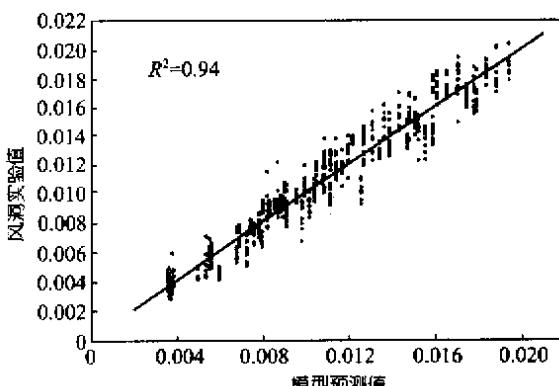


图 3 阻力系数的风洞实验值与模型预测值之比较

图 4 为阻力系数与摩阻雷诺数的关系。阻力系数随摩阻雷诺数的变化特征与砾石粒径及

覆盖度有关。在本实验的风速范围内, 砾石粒径和覆盖度愈大, 湍流发展愈充分。对于 $1.2\text{ cm} \times 1.9\text{ cm}$ 的砾石, 当覆盖度大于 15% 时阻力系数趋于常数, 湍流发展充分。 $1.9\text{ cm} \times 2.9\text{ cm}$ 和 $2.4\text{ cm} \times 3.8\text{ cm}$ 的砾石, 当覆盖度大于 10% 时, 阻力系数趋于常数, 湍流发展充分。 $3.1\text{ cm} \times 4.7\text{ cm}$ 和 $3.7\text{ cm} \times 5.7\text{ cm}$ 的砾石, 当覆盖度大于 1% 时, 阻力系数趋于常数, 湍流发展充分。而 $4.3\text{ cm} \times 6.5\text{ cm}$ 砾石在各种覆盖度时, 阻力系数均呈现为不随砾石摩阻雷诺数变化的常数。本实验的风速范围为 $4\sim 22\text{ m s}^{-1}$, 根据野外测定, 我国沙区沙粒的起动风速约为 6 m s^{-1} ^[1], 所以, 本文所提出的抑制戈壁表面风沙活动临界覆盖度都可保证湍流充分发育, 在实践中具有指导意义。

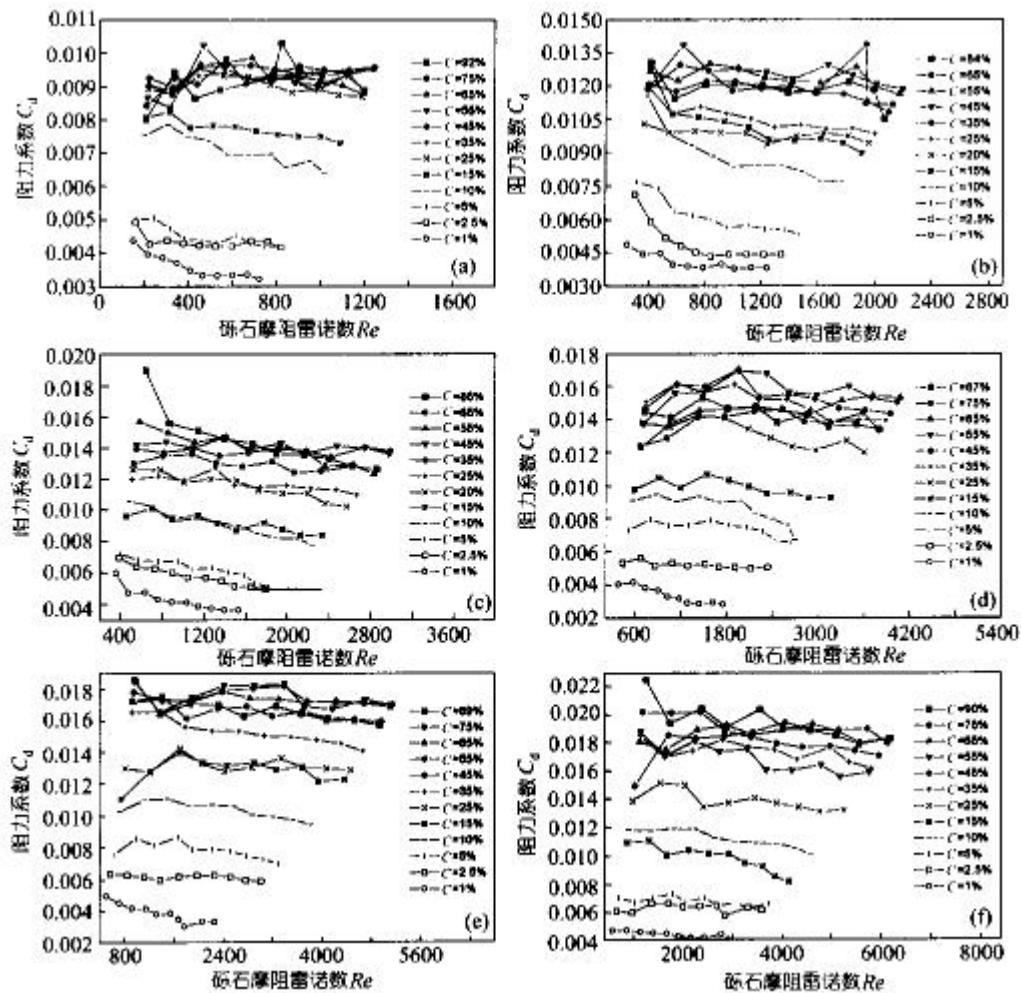


图 4 阻力系数随摩阻雷诺数的变化

(a) GR01, $h = 1.2\text{ cm}$, $d = 1.9\text{ cm}$, (b) GR02, $h = 1.9\text{ cm}$, $d = 2.9\text{ cm}$, (c) GR03, $h = 2.4\text{ cm}$, $d = 3.8\text{ cm}$, (d) GR04, $h = 3.1\text{ cm}$, $d = 4.7\text{ cm}$, (e) GR05, $h = 3.7\text{ cm}$, $d = 5.7\text{ cm}$, (f) GR06, $h = 4.3\text{ cm}$, $d = 6.5\text{ cm}$

3 结论

根据本文对戈壁风蚀面阻力系数的实验研究, 可以得出以下认识:

(i) 戈壁地表对风沙活动的抑制作用早为人所知, 本实验结果为这种认识提供了理论依

据。不论戈壁表面砾石粒径多大，当其覆盖度大于 40%~50%时戈壁风蚀面在空气动力学上趋于稳定，基本上没有产生风沙活动和沙尘暴的潜在威胁。我国西北地区广大戈壁面的砾石覆盖度大多大于 60%，因而不是现代风沙活动和沙尘暴的物质源地，在防治风沙活动时要特别注意保护戈壁表面，避免对其扰动引起的砾石覆盖度减少和风沙活动加剧。对于砾石覆盖度较小的所谓的“土戈壁”应当采取必要的防沙措施。

(ii) 本实验结果对防沙工程具有一定的指导意义。在防沙材料比较缺乏的荒漠地区，砾石压沙措施常被用于固定沙丘和防止风沙活动，通常将流沙表面全部用砾石覆盖。从空气动力学的角度，40%~50%的覆盖度足以有效地防治风沙活动，值得在防沙工程中借鉴，使防沙工程更为经济。

参 考 文 献

- 1 吴 正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. 37
- 2 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 4~6
- 3 Yong C C. On the gobi deflation plane, the gobi erosion plane. Bulletin of Geological Society of China, 1931, 11(2): 161~169
- 4 Nickling W G, Mckenna N C. Development of deflation lag surfaces. Sedimentology, 1995, 42: 403~414
- 5 Arya S P S. An Introduction to Micrometeorology. New York: Academic Press Inc, 1988. 152~153
- 6 Wolf S A, Nickling W G. Shear stress partition in sparsely vegetated desert canopies. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 607~619
- 7 董治宝, 高尚玉, Fryrear D W. 直立植物-砾石覆盖组合措施的防风蚀作用. 水土保持通报, 2000, 14(2): 7~11
- 8 Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution. Agricultural Meteorology, 8: 269~292
- 9 屈建军, 董治宝, 文子祥, 等. 敦煌莫高窟风沙危害与防治. 中国科学, D 辑, 1997, 27(1): 1~7
- 10 王贵勇, 董光荣, 李 森. 试论戈壁风蚀面及其指相意义. 中国沙漠, 1995, 15(2): 124~129
- 11 Goudie A S. Laboratory simulation of "The Wick Effect" in salt-weathering of rock. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11: 275~285
- 12 Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. New York: Methuen, 1941. 85~95
- 13 Douglas J F, Gasiorek J M, Swaffield J A. Fluid Mechanics. 3rd ed. 北京: 世界图书出版公司, 2000. 354~355