

# 粗糙元覆盖对土壤风蚀的控制作用\*

慕青松<sup>1</sup> 廖江海<sup>1</sup> 马崇武<sup>2</sup> 苗天德<sup>1</sup>

(1 兰州大学土木工程与力学学院 兰州 730000)

(2 东莞理工学院机电建筑工程系 广东东莞 523808)

**摘要** 应用湍流边界层中粗糙壁面的阻力分解规律研究土壤风蚀中的临界侵蚀风速、输沙率和风蚀率, 建立了一个揭示地表粗糙元对土壤风蚀控制作用的理论模型。该模型给出了临界侵蚀风速与盖度之间的指数关系, 临界侵蚀风速与农田茬高之间的指数关系, 以及反映输沙率(或风蚀率)与盖度(或茬高)、风速之间依赖关系的理论公式。然后应用天然地表风蚀和农田风蚀的多家实验数据, 对这些理论公式进行了广泛地检验和评价, 发现具有很好的普适性。

**关键词** 粗糙元; 临界侵蚀风速; 临界侵蚀盖度; 输沙率; 风蚀率

中图分类号 S157 文献标识码 A

天然地表的植被、砾石和粗沙等, 以及农田残茬, 称为粗糙元, 能够减弱风对地表的作用力, 抑制风蚀。Bagnold<sup>[1]</sup>研究发现, 地表细石越密, 沙土越不易风蚀。相关研究<sup>[2-5]</sup>还发现, 不可蚀粗粒对可蚀细粒有相似保护作用。其他研究<sup>[4-12]</sup>发现植被也有与细石相似的防风蚀能力。国内的相关工作有: 董治宝等<sup>[13]</sup>、张春来等<sup>[14]</sup>和郭雨华等<sup>[15]</sup>的植被抑制风蚀实验, 刘连友等<sup>[16]</sup>的砾石防治风蚀实验, 周建忠等<sup>[17]</sup>和刘汉涛等<sup>[18]</sup>的农田留茬防治风蚀实验。科学家通过大量实验认识到了风速、盖度(或茬高)等因素与临界侵蚀风速、输沙率、风蚀率的关系, 但未形成统一的理论体系。不同学者应用不同函数形式回归分析各自的实验数据, 不便于相互比较并获得深刻理解。常被引用的 Wasson 的工作<sup>[7]</sup>, 只是对 Bagnold 裸露沙面输沙率公式中的风速乘以一个随盖度指数衰减的系数来考虑植被对风力的削弱。

对粗糙壁面阻力的研究, 最早可追溯到 Nikuradse<sup>[19]</sup>的人工粗糙管实验和 Moody<sup>[20]</sup>的工业粗糙管实验。Nikuradse 研究了雷诺数和管壁沙粒的相对高度对阻力系数的影响, 但缺少对沙粒分布密度与阻力关系的研究。后来许多学者<sup>[21-27]</sup>在风洞中布置粗糙元(圆柱、半球、椎体和方体等), 研究总阻力的两个组成部分(粗糙元的阻力和粗糙元间裸露壁面的阻力)的比例问题, 认识到了阻力分解的

基本规律。董治宝等<sup>[28-29]</sup>和慕青松等<sup>[30-32]</sup>进一步应用实验方法和理论分析研究阻力分解, 获得了一些实验和理论结果。

当地表有粗糙元时, 风力被分解为两个部分, 从总阻力中扣除粗糙元阻力后的剩余部分, 才能直接作用到粗糙元间的可蚀面积上, 从而激发和维持风蚀。慕青松等<sup>[31]</sup>曾尝试应用阻力分解规律, 研究光滑地表上按某一密度分布的均匀沙的起动风速。本研究应用阻力分解规律分析土壤风蚀与粗糙元覆盖之间的关系, 初步建立了统一的理论框架, 得出了临界侵蚀风速、临界侵蚀盖度(或茬高)、输沙率和风蚀率的理论公式, 并应用多家实验数据检验了公式的合理性。

## 1 基本理论

### 1.1 粗糙壁面的阻力规律

设壁面上分布着形状统计相似的同一种粗糙元(如细石、粗沙、蒿子、牧草、骆驼刺、灌木、小麦茬、玉米茬等), 分布密度为  $n$ (单位面积上的个数), 盖度为  $\lambda$ (对地表的面积覆盖率), 地表裸度为  $\eta$ ( $\eta = 1 - \lambda$ ); 侧影盖度为  $\phi$ (单位面积上所有粗糙元的迎流面积总和)。若单个粗糙元的平均竖向投影面积为  $S_1$ 、平均迎流侧影面积为  $S_2$ , 则  $\lambda = nS_1$  和  $\phi = nS_2$ , 于是有  $\phi = S_2 \lambda / S_1$ 。

\* 国家自然科学基金青年基金(编号: 10402012)和兰州大学骨干教师学科配套基金资助

作者简介: 慕青松(1971~), 男, 甘肃静宁人, 副教授, 博士, 从事风沙物理学、流体力学、岩土力学和矿山力学的研究

收稿日期: 2007-07-13; 收到修改稿日期: 2007-12-30

用  $\delta$  表示边界层厚度, 设  $\delta$  处风速为  $U$ , 则单个粗糙元的阻力可写为:

$$F = 0.5C_r S_2 \rho_a U^2 \quad (1)$$

式中,  $C_r$  为阻力系数,  $\rho_a$  为大气密度。单位面积上粗糙元的总阻力为:

$$\tau_r = nF \quad (2)$$

再设粗糙元间裸露地面对风的摩擦切应力为  $\tau_s$ , 可表示为:

$$\tau_s = 0.5C_s \rho_a U^2 \quad (3)$$

式中,  $C_s$  为裸露地面阻力系数。于是地面对风的总摩擦切应力  $\tau$  可写为:

$$\tau = \rho_a u_*^2 = \tau_r + \eta \tau_s \quad (4)$$

式中,  $u_*$  为摩阻流速。令  $Re = \rho_a U h / \mu$ , 称为粗糙元雷诺数, 其中  $h$  为粗糙元平均高度,  $\mu$  为空气动力学黏性系数。根据量纲分析和相似原理, 可将  $C_r$ 、 $C_s$  表示成  $Re$  和  $\phi$  的函数

$$C_r = C_r(Re, \phi), C_s = C_s(Re, \phi) \quad (5)$$

根据文献 [21~32] 可定性得出, 在  $n$  一定 ( $\phi$  不变) 时, 随着  $U$  增大 ( $Re$  增大),  $C_r$ 、 $C_s$  将渐减降低并在  $Re$  较大时趋于常数。当  $U$  ( $Re$  不变) 一定时, 随着  $n$  增大 ( $\phi$  增大), 相邻粗糙元间的干扰越来越强烈, 导致单个粗糙元的阻力下降, 表现为  $C_r$  的降低, 同时, 粗糙元对粗糙元间裸露地面的屏蔽作用也越来越强, 引起阻力系数  $C_s$  的降低。慕青松等<sup>[30-31]</sup> 曾给出  $C_r$ 、 $C_s$  与侧影盖度  $\phi$  之间的一个唯象关系如下式:

$$C_r = C_{r0} e^{-\gamma_r \phi}, C_s = C_{s0} e^{-\gamma_s \phi} \quad (6)$$

式中,  $C_{r0}$  为稀疏状态下孤立粗糙元阻力系数, 只是雷诺数  $Re$  的函数。  $C_{s0}$  为全裸地面的定床阻力系数, 只是雷诺数  $Re_* = \rho_a u_* \bar{d} / \mu$  ( $\bar{d}$  为地面沙土平均粒径,  $u_*$  为定床摩阻流速) 的函数。因  $Re$  与  $Re_*$  间为单调函数关系, 所以也可将  $C_{s0}$  看作  $Re$  的函数。一般地,  $C_{r0}$  和  $C_{s0}$  均随  $Re$  增大而减小, 当  $Re$  较大时趋于常数 (即趋于平方阻力区, 也称完全水力粗糙区)。由式 (6) 可见,  $C_r$  和  $C_s$  均随粗糙元分布密度增大指数衰减, 这与很多实验符合<sup>[21-32]</sup>。

## 1.2 理论公式的推导

### 1.2.1 临界侵蚀风速与盖度的关系

用摩阻速度表示裸露地面的临界侵蚀风速, 当地面土质、密实度、颗粒级配和含水量一定时, 其为一定值, 记为  $\tilde{u}_*$ ,  $\tilde{u}_*$  对应的地表切应力为  $\tau_{*1} = \rho_a \tilde{u}_*^2$ , 称  $\tau_{*1}$  为临界侵蚀切应力。当存在粗糙元时, 总切应力  $\tau$  由  $\eta \tau_s$  和  $\tau_r$  组成。地面颗粒要达到起动状态, 未被粗糙元覆盖的裸露地面上的风切力  $\tau_s$  需满足  $\tau_s \geq$

$\tau_{*1}$ , 即  $\tau_s \geq \rho_a \tilde{u}_*^2$ 。

用  $U_1$  表示分布着粗糙元的地表在  $\delta$  高处的临界侵蚀风速, 定义为粗糙元间裸露地面的风切力  $\tau_s$  等于  $\tau_{*1}$  时, 与之对应的  $\delta$  处的风速 (风洞实验可取轴线高度)。用  $\tilde{U}_1$  表示全裸地面  $\delta$  处的临界侵蚀风速, 根据式 (3) 和式 (6) 得出  $\tau_{*1} = \rho_a \tilde{u}_*^2 = 0.5C_{s0} \rho_a \tilde{U}_1^2$ 。

对一给定的盖度  $\lambda$  让风速  $U$  增大至地表颗粒开始起动时需要的风速  $U_b$ , 就是该盖度对应的临界侵蚀风速。在大于  $\tilde{U}_1$  的风速  $U$  的作用下, 盖度为零的地表将发生风蚀, 盖度从零开始增大 (粗糙元个数增多) 至某值时, 地面风蚀恰好中止, 此时的盖度称为  $U$  的临界侵蚀盖度, 记为  $\lambda_c$ 。

先分析临界侵蚀风速与盖度的关系。考虑到  $\tau_{*1} = \rho_a \tilde{u}_*^2 = 0.5C_{s0} \rho_a \tilde{U}_1^2$ , 由式 (3) 和式 (6) 可得  $U_1$  的计算公式:

$$U_1 = \alpha \exp(\beta \lambda) \tilde{u}_* = \exp(\beta \lambda) \tilde{U}_1 \quad (7)$$

式中,  $\alpha = \sqrt{2C_{s0}^{-1}}$ ,  $\beta = 0.5\gamma_s S_2 S_1^{-1}$ 。当地表颗粒达到临界起动状态时, 粗糙元雷诺数  $Re$  和裸露地表雷诺数  $Re_*$  较大, 所以可认为粗糙元间裸露地面对风的阻力满足平方阻力规律 (完全水力粗糙区), 则  $C_{s0}$  即可看成与  $U_1$  无关。  $\beta$  决定于粗糙元的形态和分布。可见  $U_1$  与  $\lambda$  为指数关系, 与 Wasson 和 Nanninga<sup>[7]</sup> 的研究一致。

再分析临界侵蚀盖度与风速的关系, 由式 (7) 的反函数关系可得计算每一风速的临界侵蚀盖度的公式:

$$\lambda_c = \eta_1 \ln(U / \tilde{U}_1) \quad (8)$$

式中,  $\eta_1 = \beta^{-1}$ 。可见  $\lambda_c$  与  $U$  为对数关系。

### 1.2.2 临界侵蚀风速与茬高的关系

对农田, 主要关心茬高与风蚀的关系。先分析临界侵蚀风速与茬高的关系。用  $h$  和  $d$  分别表示残茬的高度和截面直径, 则单茬的平均竖向投影面积  $S_1 = 0.25\pi d^2$ , 平均迎流侧影面积  $S_2 = hd$ , 代入式 (7) 得:

$$U_1 = \exp(\beta_1 h) \tilde{U}_1 \quad (9)$$

式中,  $\beta_1 = 2\pi^{-1} \gamma_s \lambda d^{-1}$ 。式 (9) 给出临界侵蚀风速  $U_1$  与茬高  $h$  呈指数关系。

再分析临界侵蚀茬高与风速的关系, 由式 (9) 的反函数关系得:

$$h_c = \beta_1^{-1} \ln(U / \tilde{U}_1) \quad (10)$$

可见临界侵蚀茬高与风速为对数关系。

### 1.2.3 输沙率和风蚀率的理论公式

输沙率  $Q$

定义为地面附近垂直于风向单位宽度上单位时间内通过的沙土质量。风蚀率  $R$  定义为单位面积上单位时间内被风吹走的沙土质量。假定来流为净风, 地块风蚀从迎风端开始, 在下游端结束。风洞实验也是在实验段布置风蚀地块。在野外观测和风洞实验中, 可用地块下游端的输沙率和整个地块的平均风蚀率评价土壤风蚀。

当地表覆盖一定密度的粗糙元时, 影响  $Q$  和  $R$  的两个关键因素为: 地表裸度  $\eta$  和粗糙元间裸露地面的风切力  $\tau_0$ 。一定盖度的粗糙元, 可减少地表暴露面积, 并使单位过沙宽度上的实际过沙宽度减少, 还会使粗糙元间裸露地面的风力  $\tau_s$  减小, 所以输沙率和风蚀率将随盖度增大(裸度减小)而显著减小。

对一固结状态、含水量、粗糙元形状及其物理性质和分布方式等一定的地块, 可将下游端输沙率  $Q$  和地块风蚀率  $R$  表示为:

$$Q = f_1(\rho_s, \rho_a, g, u_{*s}, \tilde{u}_{*s}, p(D), \eta) \quad (11)$$

$$R = f_2(\rho_s, \rho_a, g, u_{*s}, \tilde{u}_{*s}, p(D), \eta) \quad (12)$$

$\rho_s$  为沙土颗粒的密度,  $g$  为重力加速度,  $p(D)$  为颗粒级配函数,  $u_{*s}$  为裸露地面的摩阻流速 ( $\tau_s = \rho_a u_{*s}^2$ ),  $\tilde{u}_{*s}$  为地表起动摩阻流速,  $\eta$  为垂直风向的过沙面积上扣除粗糙元割影后剩余的无遮挡面积分数。当  $\delta$  处风速  $U$  一定时, 粗糙元的形状、尺寸、物理性质和分布方式决定了  $\tau_s$  (即决定了  $u_{*s}$ )。

因为当  $u_{*s} < \tilde{u}_{*s}$  时, 无风蚀, 据此假定输沙率  $Q$  和风蚀率  $R$  对  $u_{*s}$  和  $\tilde{u}_{*s}$  的依赖关系统一体现为对  $u_{*s} - \tilde{u}_{*s}$  的依赖关系。于是当颗粒级配  $P(D)$  一定时式 (11) 和式 (12) 成为:

$$Q = f_1(\rho_s, \rho_a, g, u_{*s} - \tilde{u}_{*s}, \eta) \quad (13)$$

$$R = f_2(\rho_s, \rho_a, g, u_{*s} - \tilde{u}_{*s}, \eta) \quad (14)$$

设垂直于风向粗糙元间无遮挡的单位宽度上的输沙率为  $Q_0$  和粗糙元间单位面积裸露地表的风蚀率为  $R_0$ , 于是式 (13) 和式 (14) 可写为:

$$Q = \eta Q_0 = \eta f_{10}(\rho_s, \rho_a, g, u_{*s} - \tilde{u}_{*s}) \quad (15)$$

$$R = \eta R_0 = \eta f_{20}(\rho_s, \rho_a, g, u_{*s} - \tilde{u}_{*s}) \quad (16)$$

取  $\rho_a, g$  和  $\tilde{u}_{*s}$  将两式无量纲化, 则

$$Q = \eta f_{10}(\rho_s \rho_a^{-1}, u_{*s} \tilde{u}_{*s}^{-1} - 1) \rho_a g^{-1} \tilde{u}_{*s}^3 \quad (17)$$

$$R = \eta f_{20}(\rho_s \rho_a^{-1}, u_{*s} \tilde{u}_{*s}^{-1} - 1) \sqrt{\rho_s \rho_a} \tilde{u}_{*s}^2 \quad (18)$$

假定  $\rho_a$  和  $\rho_s$  为常数, 则得:

$$Q = \eta f_{10}(u_{*s} \tilde{u}_{*s}^{-1} - 1) \rho_a g^{-1} \tilde{u}_{*s}^3 \quad (19)$$

$$R = \eta f_{20}(u_{*s} \tilde{u}_{*s}^{-1} - 1) \sqrt{\rho_s \rho_a} \tilde{u}_{*s}^2 \quad (20)$$

变形式 (19) 和式 (20) 为:

$$Q = \eta f_{10}(e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1) (0.5C_{s0})^{1.5} \rho_a g^{-1} \tilde{U}_t^3$$

$$= \eta f_{10}(e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1) (0.5C_{s0})^{1.5} \rho_a g^{-1} \tilde{U}_t^3 \quad (21)$$

$$R = \eta f_{20}(e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1) \sqrt{0.5C_{s0} \rho_s \rho_a} \tilde{U}_t^2$$

$$= \eta f_{20}(e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1) \sqrt{0.5C_{s0} \rho_s \rho_a} \tilde{U}_t^2 \quad (22)$$

函数形式  $f_{10}$  和  $f_{20}$  的选择很关键。下面给出一个关于  $f_{10}$  和  $f_{20}$  的指数表达式。分别令

$$\hat{Q} = Q / (\eta (0.5C_{s0})^{1.5} \rho_a g^{-1} \tilde{U}_t^3) \quad (23)$$

$$\hat{R} = R / (\eta \sqrt{0.5C_{s0} \rho_s \rho_a} \tilde{U}_t^2) \quad (24)$$

将它们分别称为单位裸露宽度上的无量纲输沙率和单位裸露面积上的无量纲风蚀率。再令  $e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1 = e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1 = \Delta^*$ , 称为无量纲有效风力。则有:

$$\hat{Q} = f_{10}(\Delta^*) \quad (25)$$

$$\hat{R} = f_{20}(\Delta^*) \quad (26)$$

一般地, 风力  $\Delta^*$  越大, 输沙率  $\hat{Q}$  和风蚀率  $\hat{R}$  就越大, 跃移云中的颗粒就越多。当风力有增量  $d\Delta^*$  时, 原平衡状态被打破, 跃移云中的颗粒将从增强的风场中获得更多能量去碰撞地面, 激发起更多的颗粒加入到跃移运动, 从而增大输沙率  $\hat{Q}$  和风蚀率  $\hat{R}$ 。风力增强前  $\hat{Q}$  和  $\hat{R}$  越大, 就有越多的跃移颗粒从风力增强中获得能量去撞击地面, 从而使输沙率和风蚀率获得更大增量。故可近似假定如下:

$$d\hat{Q}/d\Delta^* = c_1 \hat{Q} \quad (27)$$

$$d\hat{R}/d\Delta^* = c_2 \hat{R} \quad (28)$$

式中,  $c_1$  和  $c_2$  为比例常数。积分求解得:

$$\hat{Q} = \hat{Q}_0 \exp(c_1 \Delta^*) \quad (29)$$

$$\hat{R} = \hat{R}_0 \exp(c_2 \Delta^*) \quad (30)$$

分别称积分常数  $\hat{Q}_0$  和  $\hat{R}_0$  为全裸地表的无量纲起动判据输沙率和无量纲起动判据风蚀率。于是可得:

$$Q = \eta Q_{0t} \exp(c_1 (e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1))$$

$$= \eta Q_{0t} \exp(c_1 (e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1)) \quad (31)$$

$$R = \eta R_{0t} \exp(c_2 (e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1))$$

$$= \eta R_{0t} \exp(c_2 (e^{-\beta \lambda} U \tilde{U}_t^{-1} - 1)) \quad (32)$$

式 (31) 与式 (32) 中,  $Q_{0t} = \hat{Q}_0 (0.5C_{s0})^{1.5} \rho_a g^{-1} \tilde{U}_t^3$ ,  $R_{0t} = \hat{R}_0 \sqrt{0.5C_{s0} \rho_s \rho_a} \tilde{U}_t^2$ , 分别命名为全裸地表起动判据输沙率和起动判据风蚀率。

## 2 实验数据的验证

### 2.1 临界侵蚀风速与盖度

张春来等<sup>[14]</sup>采集青海共和盆地半干旱草原的表层原状栗钙土, 植被高约 1 cm, 在中国科学院寒旱所风洞中测量了 5 种盖度 (0.1、0.2、0.3、0.4、0.45) 的临界侵蚀风速。将式 (7) 取对数得  $\ln U_t = \beta \lambda + h \tilde{U}_t$ , 应用实验数据<sup>[14]</sup> 回归分析得  $\beta = 0.98$ ,  $h \tilde{U}_t = 1.93$  相关系数  $R^2 = 0.99$ , 于是得  $\tilde{U}_t = 6.88 \text{ m/s}$  和  $U_t = 6.88 e^{0.98 \lambda} (\text{m s}^{-1})$ , 对应得到  $\lambda_c = 1.03 \ln(U/6.88)$  (无量纲)。如图 1(a) 曲线所示, 试验数据与理论曲线很符合。张春来等<sup>[14]</sup> 对同一性质的地块还测定了 4 种风速的临界侵蚀盖度 (风速  $15 \text{ m s}^{-1}$ 、 $13 \text{ m s}^{-1}$ 、 $10 \text{ m s}^{-1}$  和  $8 \text{ m s}^{-1}$  分别对应的临界侵蚀盖度实验值为 0.67、0.58、0.38 和 0.15)。用公式  $\lambda_c = 1.03 \ln U/6.88$  得到的临界侵蚀盖度理论值为 0.799、0.652、0.383 和 0.154, 第一个理论值偏大, 第二个理论值稍许偏大, 后两个理论值准确。

郭雨华等<sup>[15]</sup>对河北丰宁县小坝子乡喇嘛口沙区的红柳灌丛沙地, 测量得到  $U_t = 3.81 e^{1.34 \lambda} (\text{m s}^{-1})$ ,  $R^2 = 0.99$  对应得  $\lambda_c = 0.75 \ln(U/3.81)$  (无量纲)。实验未测定全裸地面临界侵蚀风速, 但从回归公式中可得  $\tilde{U}_t = 3.81 \text{ m s}^{-1}$ 。如图 1(b) 曲线所示, 实测数据与理论曲线很符合。

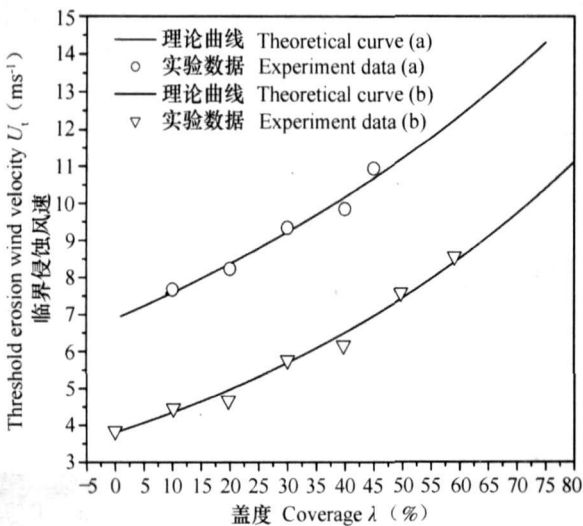


图 1 临界侵蚀风速与盖度的关系<sup>[14, 15]</sup>

Fig. 1 Relationship between threshold wind velocity and coverage in soil erosion<sup>[14, 15]</sup>

### 2.2 临界侵蚀风速与农田茬高

刘汉涛等<sup>[18]</sup>在内蒙古武川县对 2004 年的小麦留茬地 (三种茬高: 0.1 m、0.2 m、0.3 m) 和作为对照的秋翻地 (零茬高), 在 2005 年 4 月开播前进行野外风洞实验, 风速测量高度 0.6 m, 试验结果为: 0.1 m 茬, 临界侵蚀风速  $8.6 \text{ m s}^{-1}$ ; 0.2 m 茬,  $8.84 \text{ m s}^{-1}$ ; 0.3 m 茬,  $9.78 \text{ m s}^{-1}$ ; 秋翻地  $5.65 \text{ m s}^{-1}$ 。将式 (9) 变为  $\ln U_t = \beta_1 h + h \tilde{U}_t$ , 回归得  $\beta_1 = 0.64$ ,  $h \tilde{U}_t = 2.08$ ,  $R^2 = 0.95$ , 于是得到未受秋翻破坏的零茬高麦地的临界侵蚀风速  $\tilde{U}_t = 7.97 \text{ m s}^{-1}$ , 大于秋翻地开播前的临界侵蚀风速测量值 ( $5.65 \text{ m s}^{-1}$ )。最后得  $U_t = 7.97 e^{0.64 h} (\text{m s}^{-1})$ 。对应得到  $h_c = 1.56 \ln(U/7.97)$  (m)。如图 2 所示, 实测数据与理论曲线较符合。

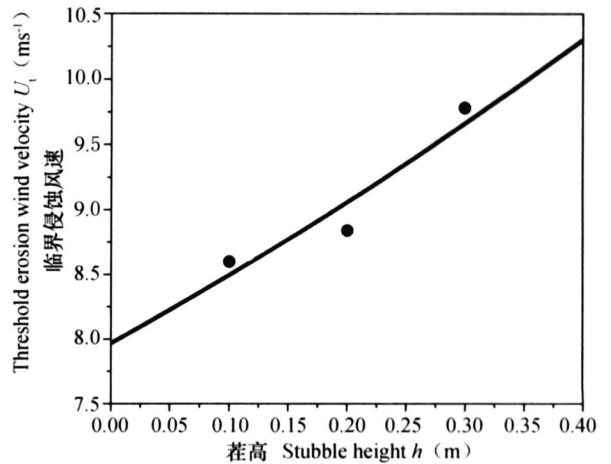


图 2 临界侵蚀风速与农田茬高的关系<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Relationship between threshold wind velocity and stubble height in soil erosion<sup>[18]</sup>

### 2.3 输沙率和风蚀率

郭雨华等<sup>[15]</sup>的灌木丛野外实验测量了盖度对下风向输沙率的影响。本研究分析其实验认为, 由于灌木个体大, 在集沙仪横向尺度内, 很难包含多个粗糙元, 估计他们测量的输沙率只具有局部意义, 且只给出了风速  $8.77 \text{ m s}^{-1}$  下 5 个盖度 1 m 内集沙仪收集的沙土质量, 所以其实验得出的输沙率不是通常的单宽输沙率。

若用  $q_s$  表示其输沙率, 并设集沙仪宽度为  $L$ , 则可将  $q_s L$  看作  $Q_s$ , 于是由式 (31) 得  $q_s = a_0 e^{c_1(e^{-\beta \lambda} \tilde{U} U_t^{-1} - 1)}$ ,  $a_0 = L Q_0$ , 取对数得  $\ln q_s = \ln a_0 + c_1 (e^{-\beta \lambda} \tilde{U} U_t^{-1} - 1)$ 。根据郭雨华等的实验数据给出  $U_t = 3.81 e^{1.34 \lambda}$ , 所以  $\tilde{U}_t = 3.81 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\beta = 1.34$  于是有

$hq_s = hc_0 + c_1 (e^{-1.34\lambda} U/3.81 - 1)$ , 采用他们在风速  $8.77 \text{ m s}^{-1}$  下测量的 5 种盖度输沙率, 回归得  $hc_0 = -8.55 (c_0 = 1.93 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1})$ ,  $c_1 = 2.35 \text{ kg s}^{-1}$ ,  $R^2 = 0.99$  于是得到  $q_s = 1.93 \times 10^{-4} e^{2.35(e^{-1.34\lambda} U/3.81 - 1)}$ 。由图 3 可见, 实验数据与理论数据较符合。虽然这是根据单一风速实验得到的公式, 但仍可被用于预测其他风速的输沙率。

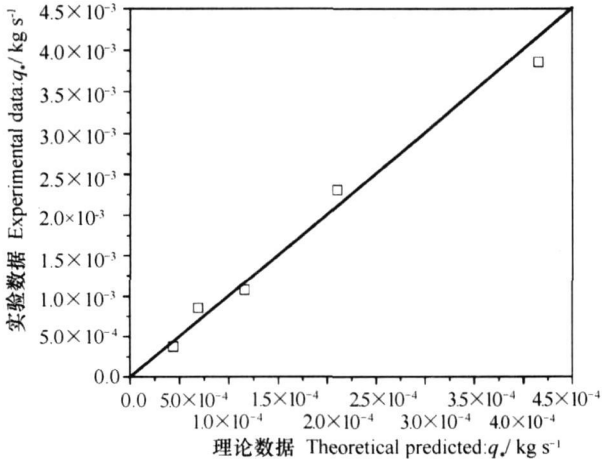


图 3 理论数据与实验数据 [15] 的比较

Fig 3 Comparison between theoretical data and experiment data [15]

根据周建忠和路明 [17] 关于秸秆残茬覆盖度与田地风蚀率的实验数据, 用式 (32) 可以得到  $R = (1 - \lambda) R_{0t} e^{c_2(e^{-\beta\lambda U \tilde{U}_t^{-1}} - 1)}$ , 对文献 [17] 的实验取  $\eta = 1 - \lambda$  实验中未给  $\tilde{U}_t$  与  $\lambda$  的实验数据, 所以不能事先得到  $\tilde{U}_t$  和  $\beta$ 。将上式简化为  $R = (1 - \lambda) b_0 e^{b_1 e^{-\beta\lambda U}}$ , 这里  $b_0 = R_{0t} e^{-c_2}$ ,  $b_1 = c_1 \tilde{U}_t^{-1}$ , 取对数得  $\ln(R/(1 - \lambda)) = \ln b_0 + b_1 e^{-\beta\lambda U}$ 。文献 [17] 报道了 5 种盖度、10 种风速下的风蚀率, 用这些试验数据进行回归分析得  $\ln b_0 = -14.61 (b_0 = 4.52 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ ,  $b_1 = 0.27$ ,  $\beta = 0.99$  相关系数  $R^2 = 0.97$ 。于是得到  $R = 4.52 \times 10^{-7} (1 - \lambda) \exp(0.27 e^{-0.99\lambda} U)$ 。从图 4 可见实验数据与理论数据较符合。刘连友等 [16] 在风洞中铺设甘肃古浪县旱作农田中的砂壤质灰钙土, 用直径 1~4 cm 砾石覆盖, 土样经 6 周风干后进行吹蚀试验, 铺压方式包括随机、簇状和带状, 吹蚀面积为  $0.685 \times 0.250 \text{ m}^2$ , 试验结果给出了随机铺压下 5 种盖度和 5 种风速的风蚀率数据。数据显示一定盖度下风速增大, 风蚀率将显著增大, 而一定风速下盖度增大, 风蚀率将迅速降低。当盖度增大至 1 时, 地表被砾石完全覆盖, 风蚀率虽

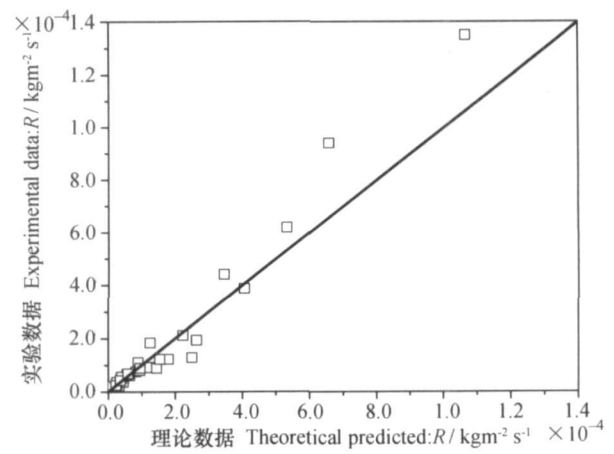


图 4 理论数据与实验数据 [17] 的比较

Fig. 4 Comparison between theoretical data and experiment data [17]

然很小, 但不能彻底降为零。本研究分析可能因为砾石间的缝隙仍可微弱感受风力的缘故, 说明文献 [16] 报道的试验未考虑砾石间的缝隙, 导致盖度测量值偏大。为此本研究引入因子  $\varepsilon$  得  $\eta = 1 - (1 - \varepsilon) \lambda$  予以校正, 于是式 (32) 变化为  $R = (1 - (1 - \varepsilon) \lambda) R_{0t} e^{c_2(e^{-\beta\lambda U \tilde{U}_t^{-1}} - 1)}$ , 4 个待定参数为  $R_{0t}$ ,  $\varepsilon$ ,  $c_2$  和  $\beta$ 。根据刘连友 [16] 的实验, 已测出  $\tilde{U}_t = 6.1 \text{ m s}^{-1}$ 。当  $\lambda = 0$  时有  $R = R_{0t} e^{c_2(U \tilde{U}_t^{-1} - 1)}$ , 两边取对数得  $\ln R = \ln R_{0t} + c_2 (U \tilde{U}_t^{-1} - 1)$ , 用  $\lambda = 0$  实验数据回归分析 ( $R^2 = 0.996$ ) 得  $c_2 = 2.19$  和  $\ln R_{0t} = -11.30$ ,  $R_{0t} = 1.23 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

当  $\lambda = 1$  时, 有  $R = \varepsilon R_{0t} e^{c_2(e^{-\beta U \tilde{U}_t^{-1}} - 1)}$ , 取对数得  $\ln R = (\ln \varepsilon + \ln R_{0t} - c_2) + c_2 e^{-\beta} U \tilde{U}_t^{-1}$ , 用  $\lambda = 1$  的实验数据回归分析得  $\ln \varepsilon + \ln R_{0t} - c_2 = -14.55$ ,  $c_2 e^{-\beta} = 1.77$ , 相关系数为  $R^2 = 0.997$  于是可以得到  $\beta = 0.21$ ,  $\varepsilon = 0.35$  最后得到公式  $R = 1.23 \times 10^{-5} (1 - 0.65\lambda) e^{2.19(e^{-0.21\lambda \frac{U}{6.1}} - 1)}$ 。

由图 5 可见是理论数据与实验数据较符合。公式  $R = 1.23 \times 10^{-5} (1 - 0.65\lambda) e^{2.19(e^{-0.21\lambda \frac{U}{6.1}} - 1)}$  的优点在于, 仅根据  $\lambda = 0$  和  $\lambda = 1$  的实验数据确定 4 个参数, 用公式  $R = 1.23 \times 10^{-5} (1 - 0.65\lambda) e^{2.19(e^{-0.21\lambda \frac{U}{6.1}} - 1)}$  预测的  $\lambda = 0.25$ ,  $\lambda = 0.5$  和  $\lambda = 0.75$  的理论数据与实测数据间也符合良好。公式  $R = 1.23 \times 10^{-5} (1 - 0.65\lambda) e^{2.19(e^{-0.21\lambda \frac{U}{6.1}} - 1)}$  的优点还在于, 能够清晰地解释两个关键因素, 即粗糙元覆盖地表减少暴露面积和削弱暴露面积上的风阻力对降低风蚀率的贡献。文献 [16] 报道, 应用  $R =$

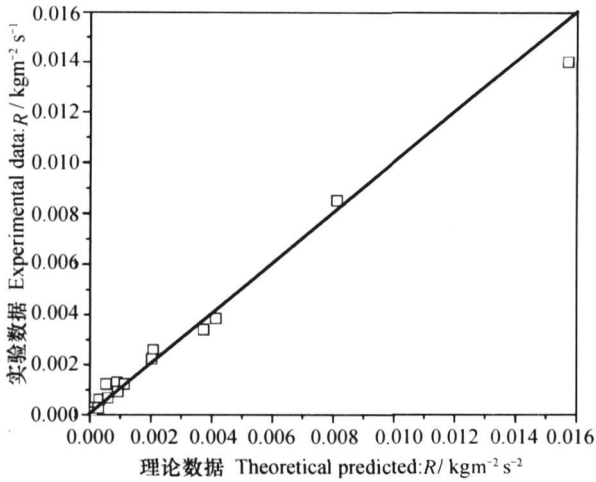


图 5 理论数据与实验数据<sup>[16]</sup>的比较

Fig 5 Comparison between theoretical data and experiment data<sup>[16]</sup>

$\mu_1 10^{1/2U}$ 的函数分别回归 5 种盖度的实验数据, 发现  $\mu_1$  和  $\mu_2$  均随盖度  $\lambda$  增大而减小的变化特征, 根据理论公式可解释为: 粗糙元间暴露面积的减小引起了  $\mu_1$  的减小, 而裸露面积上承载的风阻力的减小引起了  $\mu_2$  的减小。

应用刘汉涛等<sup>[18]</sup>的实验数据, 由式 (31) 得  $Q = \eta_b Q_{0t} e^{c_1(e^{-\beta_1 h U \tilde{U}_i^{-1}})}$ , 本研究中已根据文献 [18] 关于三种茬高的临界侵蚀风速回归分析得到了  $\beta_1 = 0.64$  和  $\tilde{U}_i = 7.97 \text{ m s}^{-1}$ 。若令  $E_0 = \eta_b Q_{0t}$ , 则实验中  $E_0$  为常数, 遂得  $Q = E_0 \exp(c_1(e^{-0.65h} U / 7.97 - 1))$ , 取对数得  $\ln Q = \ln E_0 + c_1(e^{-0.65h} U / 7.97 - 1)$ , 回归得  $\ln E_0 = -10.97 (E_0 = 1.73 \times 10^{-5} \text{ kgm}^{-1} \text{ s}^{-1})$ ,  $c_1 = 2.99 R^2 = 0.95$  根据刘汉涛等<sup>[18]</sup>的实验可得输沙

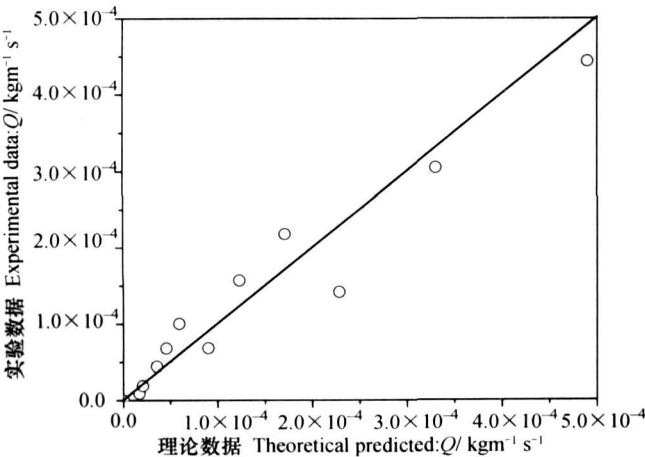


图 6 理论数据与实验数据<sup>[18]</sup>的比较

Fig 6 Comparison between theoretical data and experiment data<sup>[18]</sup>

率与风速、茬高的关系为  $Q = 1.73 \times 10^{-5} e^{2.99(e^{-0.64h} U / 7.97 - 1)}$ 。由图 6 可见理论数据与实验数据符合良好。

周建忠等<sup>[17]</sup>选内蒙古正蓝旗哈比日嘎镇麦地的八种茬高: 10 15 20 25 30 35 40 和 45 cm, 实验地块面积为长 600cm 和宽 80cm, 野外风洞实验共 10 个风速: 5 7 9 11 13 15 17 19 21 和 23  $\text{m s}^{-1}$ , 每次实验吹蚀时间 1 m in。但文献 [17] 未测定零茬高麦田的临界侵蚀风速, 所以不能得到  $\tilde{U}_i$  和  $\beta_1$ 。若令式 (32) 中的  $(1 - \lambda)R_{0t} = E_1$ , 期望文献 [17] 报道的实验中  $E_1$  能保持为常数, 于是有  $R = E_1 e^{c_2(e^{-\beta_1 h U \tilde{U}_i^{-1}})}$ , 再令  $E_2 = E_1 e^{-c_2}$ ,  $c_3 = c_2 \tilde{U}_i^{-1}$ , 则得  $R = E_2 e^{c_3 e^{-\beta_1 h U}}$ , 取对数得  $\ln R = \ln E_2 + c_3 U e^{-\beta_1 h}$ , 回归得  $\beta_1 = 2.15$ ,  $\ln E_2 = -15.22 (E_2 = 2.45 \times 10^{-7} \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1})$ ,  $c_3 = 0.34 R^2 = 0.94$  因此根据文献 [17] 的试验数据得  $R = 2.45 \times 10^{-7} \exp(0.34 U e^{-2.15h})$ 。由图 7 可见理论数据与实验数据比较符合。

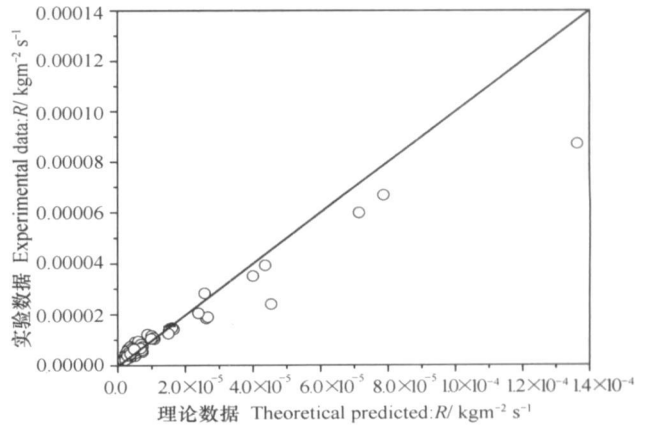


图 7 理论数据与实验数据<sup>[17]</sup>的比较

Fig 7 Comparison between theoretical data and experiment data<sup>[17]</sup>

### 3 结论

本研究成功地借鉴并引入了近年来研究湍流边界层粗糙壁面阻力分解规律获得的一些基本认识, 建立了一个具有清晰力学意义的较完备的概念体系和理论框架, 将土壤风蚀的一些关键性评价指标, 包括临界侵蚀风速、临界侵蚀盖度 (茬高)、输沙率和风蚀率, 统一纳入到这个概念体系和理论框架之中, 使这些关键性评价指标获得了整体性的解释和说明。然后在一定假说的基础上, 得到了临界侵蚀风速的理论公式 (7) 和式 (9)、临界侵蚀盖度 (茬

高)的理论公式(8)和式(10)、输沙率的理论公式(31)和风蚀率的理论公式(32),指出了临界侵蚀速度与临界侵蚀盖度(茬高)是同一个问题的正反两个方面,是同一个问题的不同提法。

应用关于天然地表风蚀和农田风蚀的多家实验数据,对这些理论公式进行了较广泛的检验和评价,发现理论公式结构合理,定量准确,能够与多家实验数据很好地符合。他们既可以用于研究天然地表的低矮植被如骆驼刺、灌木丛、草原牧草、戈壁砾石、粗沙颗粒等的分布状况与土壤风蚀程度之间的关系,也可以用于研究农田留茬高度与土壤风蚀程度之间的关系。所得理论对指导未来土壤风蚀问题的实验方案设计和实验数据整理具有参考意义和应用价值。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes London Methuen, 1941. 265
- [ 2 ] Sildoway F H, Chepil W S, Amburst D V. Effect of kind, amount and placement of residue on wind erosion control. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 1965, 8(3): 327~331
- [ 3 ] Gillette D A, Stockton P H. The effect of nonerodible particles on wind erosion at erodible surfaces. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(D10): 12885~12893
- [ 4 ] Chepil W S, Woodruff N P, Sildoway F H, *et al.* Vegetative and nonvegetative materials to control wind and water erosion. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(1): 86~89
- [ 5 ] Lyles L, Schrandt R L, Schmidler N F. How aerodynamic roughness elements control sand movement. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 1974, 17: 134~139
- [ 6 ] Lyles L, Allison B E. Wind erosion: The protective role of simulated standing stubble. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 1976, 19(1): 61~64
- [ 7 ] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport sand on vegetated surface. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(5): 505~514
- [ 8 ] Buckley R. The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind. Nature, 1987, 325: 426~428
- [ 9 ] Van den ven T A M, Fryrear D W, Spaan W S V. Vegetation characteristics and soil loss by wind. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(4): 347~349
- [ 10 ] Stockton P H, Gillette D A. Field measurement of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces. Land Degradation and Rehabilitation, 1990, 2(2): 77~85
- [ 11 ] Musick H B, Gillette D A. Field evaluation of relationships between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion. Land Degradation and Rehabilitation, 2006, 2(2): 87~94
- [ 12 ] Stephen A W, William G N. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. Progress in Physical Geography, 1993, 17(1): 50~68
- [ 13 ] 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. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 1~8. Dong Z B, Chen W N, Li Z S, *et al.* Experiment study on influences of vegetation on soil wind erosion (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 2(2): 1~8
- [ 14 ] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 31~33. Zhang C L, Zou X Y, Dong G R, *et al.* Wind tunnel studies on influences of vegetation on soil wind erosion (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 31~33
- [ 15 ] 郭雨华, 赵廷宁, 丁国栋, 等. 灌木林盖度对风沙土风蚀作用的影响. 水土保持研究, 2006, 13(5): 245~247, 251. Guo Y H, Zhao T N, Ding G D, *et al.* Influence of shrub coverage on the wind erosion of sandy soil (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5): 245~247, 251
- [ 16 ] 刘连友, 刘玉璋, 李小雁, 等. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应. 中国沙漠, 1999, 19(1): 60~62. Liu L Y, Liu Y Z, Li X Y, *et al.* Effect of gravel mulch restraining soil deflation by wind tunnel simulation (In Chinese). Journal of Desert Research, 1999, 19(1): 60~62
- [ 17 ] 周建忠, 路明. 保护性耕作残茬覆盖防治农田土壤风蚀的试验研究. 吉林农业大学学报, 2004, 26(2): 170~173, 178. Zhou J Z, Lu M. Experiment study on preventing soil wind erosion by conservative crop stubble coverage (In Chinese). Journal of Jilin Agricultural University, 2004, 26(2): 170~173, 178
- [ 18 ] 刘汉涛, 麻硕士, 窦卫国, 等. 土壤风蚀量随残茬高度的变化规律研究. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 182~185. Liu H T, Ma S S, Dou W G, *et al.* The study on the changing laws of wind-blown mass affected by stubble height (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(4): 182~185
- [ 19 ] Nikuradse J.  $\beta$ igkeiten der turbulenten strömung in glatten röhren. Forschungshft 356, Ausgabe B, Band 3, VDI Verlag Berlin, 1932
- [ 20 ] Moody L F. Friction factors for pipe flow. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1944, 66(8): 671~684
- [ 21 ] Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density. Agricultural Meteorology, 1971, 8: 269~292
- [ 22 ] Thom A S. Momentum absorption by vegetation. Journal of the Royal Meteorological Society, 1971, 97: 414~428
- [ 23 ] Wooding R A, Bradley E F, Marshall J K. Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. Boundary-Layer Meteorology, 1973, 5(3): 285~308
- [ 24 ] Lee B E, Soliman B F. An investigation of the forces on three dimensional bluff bodies in rough wall turbulent boundary layers. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(3): 503~510
- [ 25 ] Raupach M R, Thom A S, Edwards I A W. A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces. Boundary-Layer Meteorology, 1980, 18(4): 373~397

- [ 26 ] Jackson P S. On the displacement height in the logarithmic velocity profile. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 111: 15~ 25
- [ 27 ] Hatfield J L. Aerodynamic properties of partial canopies. *Forest Meteorology*, 1989, 46( 1-2): 15~ 22
- [ 28 ] Dong Z B, Fryrear D W, Gao S Y. Modeling the roughness properties of artificial soil beds. *Soil Science*, 1999, 164( 12): 930~ 935
- [ 29 ] 刘小平, 董治宝. 直立植物粗糙度和阻力分解的风洞实验研究. *中国沙漠*, 2002, 22( 1): 82~ 87. Liu X P, Dong Z B. Wind tunnel tests of the roughness and drag partition on vegetated surfaces( In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2002, 22( 1): 82~ 87
- [ 30 ] 慕青松, 王建成, 苗天德. 粗糙度动力学特性的初步研究. *力学学报*, 2003, 35( 2): 129~ 134. Mu Q S, Wang J C, Miao T D. On the dynamical characteristic of the roughness in the turbulent layer( In Chinese). *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2003, 35( 2): 129~ 134
- [ 31 ] 慕青松, 苗天德, 马崇武. 对均匀沙流体起动风速的研究. *兰州大学学报*, 2004, 40( 1): 21~ 24. Mu Q S, Miao T D, Ma C W. Threshold wind velocity for single size sand ( In Chinese). *Journal of Lanzhou University*, 2004, 40( 1): 21~ 24
- [ 32 ] 慕青松, 苗天德, 马崇武. 不均匀沙起动理论及戈壁风蚀层形成动力学. *中国沙漠*, 2004, 24( 3): 279~ 286. Mu Q S, Miao T D, Ma C W. Threshold velocity for mix sized sand and formation dynamics of gravel surface ( In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2004, 24( 3): 279~ 286

## EFFECT OF ROUGH ELEMENTS ON SOIL EROSION

Mu Qingsong<sup>1</sup> Liao Jianghai<sup>1</sup> Ma Chongwu<sup>2</sup> Miao Tiande<sup>1</sup>

( 1 Department of Mechanics, School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China )

( 2 Department of Mechanical & Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China )

**Abstract** Based on the rule of wind friction decomposition on the rough wall in the turbulent boundary layer, threshold velocity of soil erosion, sand transport rate and wind erosion rate were studied to explore effect of roughness elements on soil wind erosion, and thus a soil erosion theory was derived, from which some theoretical results were developed that the exponential relation between threshold velocity and coverage, the exponential relation between threshold velocity and stubble height for farm lands after harvesting, and the theoretical formulas of the effect of wind velocity and coverage ( or stubble height ) on sand transport rate and wind erosion rate. They were applied to and verified in a series of experiments on wind erosion of natural land and farmland, and found to be extensively applicable.

**Key words** Rough elements; Threshold velocity of soil erosion; Threshold coverage of soil erosion; Sand transport rate; Wind erosion rate