

# 沙土含水率对起沙临界风速影响

包为民

(河海大学水资源水文系南京 210024)

**摘 要** 根据重力、凝聚力与拖曳力的力矩平衡关系,推导出起沙临界风速与粒径和沙土含水率的关系,并分析了含水率对起沙临界风速的定量作用。

**关键词** 沙土含水率 起沙临界风速

## 1 起沙临界风速关系推导

通常推导起沙临界风速关系时,关于沙面沙粒受力常只考虑拖曳力与重力,而沙粒间的凝聚力作用常被忽略,导致关系应用出现较大的误差。特别当沙土含水率的改变幅度大时,其影响甚至超过沙粒粒径的影响。

拜格诺据作用在沙粒上的拖曳力和重力力矩平衡(忽略含水率改变导致凝聚力的时变影响),导出了起沙临界风速与沙粒粒径关系如下(吴正,1987):

$$U_c = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \quad (1)$$

式中  $U_c$  为起沙临界风速,  $\rho_s$  和  $\rho$  分别为沙粒和空气密度,  $g$  为加速度,  $d$  为沙粒粒径。

沙土含水率不同,会改变沙粒的粘滞性和团聚作用。一般含水率越大,其作用引起的凝聚力越大。设沙粒粒径为  $d$ ,沙粒间接触表面积为  $\pi d^2$ ,则凝聚力  $F_\mu$  可表示为:

$$F_\mu = k a \pi d^2 \quad (2)$$

式中  $k$  为单位面积凝聚力,是沙土含水量的函数,可表示为:

$$k = k_0 e^{k_1 \theta / \theta_{\max}} \quad (3)$$

式中  $k_0$  为沙土含水率为零时的单位面积凝聚力,  $\theta_{\max}$  为沙土饱和含水率,  $\theta$  为实际含水率,  $k_1$  为常数,根据吴正(1987)研究,把沙粒重力  $F_w$  和拖曳力  $F_\tau$  分别表示为:

$$F_w = (\rho_s - \rho) \frac{\pi}{6} d^3 g \quad (4)$$

$$F_\tau = \frac{\pi}{8} \rho u^2 d^2 C_D \quad (5)$$

式中  $u$  为气流与沙粒的相对速度,在沙粒起动时刻,即为起沙临界风速,  $C_D$  为阻力系数。根据三力的力矩平衡等式,可得考虑凝聚力、重力和拖曳力的起沙临界风速关系式:

$$U_c = \sqrt{C_d \cdot + C_0 \cdot e^{k_1 \theta / \theta_{\max}}} \quad (6)$$

其中:

$$C_d = \frac{4\rho_s - \rho}{3C_D \rho} g$$

$$C_0 = \frac{k_0 a d}{C_D \rho}$$

## 2 临界风速关系确定与比较

有了沙粒粒径、沙土含水率和起沙临界风速的试验观测资料,就可确定式(1)和式(6)的参数。表1是不同沙粒粒径和沙土含水率条件下测得的起沙临界风速,根据误差平方和最小的原则,参数值分别为:

$$A \sqrt{\frac{p_s - p_g}{p}} = 10\ 362$$

$$C_d = 60\ 818$$

$$C_0 = 8\ 554$$

$$k_1 = 3\ 7$$

则起沙临界风速公式分别为:

$$U_c = 10\ 362 \sqrt{d} \quad (7)$$

$$U_{c1} = \sqrt{60\ 818d + 8\ 554e^{0.740}} \quad (8)$$

用式(7)和式(8)模拟表1试验资料的结果见表2。表中 $U_{c1}$ 和 $U_{c6}$ 分别为式(7)和式(8)计算的结果的相对误差。

表1 粒径、含水率对起沙临界风速的影响(据根扎尔)

沙粒粒径(mm)	不同含水率下起沙临界风速(m/s)				
	干燥状态	1%	2%	3%	4%
2.0~1.0	9.0	10.8	12.0	—	—
1.0~0.5	6.0	7.0	9.5	12.0	—
0.5~0.25	4.8	5.8	7.5	12.0	—
0.25~0.175	3.8	4.6	6.0	10.5	12.0

表2 模拟结果

$U_c$ (m/s)	$U_{c1}$ (m/s)	$\delta_1$ (%)	$U_{c6}$ (m/s)	$\delta_6$ (%)
9.0	12.7	-41.1	10.0	-11.1
6.0	9.0	-50.0	7.4	-23.3
4.8	6.3	-31.2	5.6	-16.7
3.8	4.8	-26.3	4.6	-21.0
10.8	12.7	-17.6	10.4	3.7
7.0	9.0	-28.6	8.0	-14.3
5.8	6.3	-8.6	6.4	-10.3
4.6	4.8	-4.3	5.6	-21.7
12.0	12.7	-5.8	11.3	5.8
9.5	9.0	5.3	9.1	4.2
7.5	6.3	16.0	7.8	-4.0
6.0	4.8	20.0	7.1	-18.3
12.0	9.0	25.0	11.2	6.7
12.0	6.3	47.5	10.1	15.8
10.5	60.8	53.3	-906.8	8612.0

由表2结果看,式(8)远比式(7)计算结果精度高而稳定,前者最大相对误差只有23.3%,其模拟有效性系数为:

$$D_{c0} = 1 - \frac{\sum (U_c - \overline{U_{c6}})^2}{\sum (U_c - U_c)^2} = 0.884$$

相关系数为

$$r = \frac{\sum (U_c - \overline{U_c})(U_{c6} - \overline{U_{c6}})^2}{\sqrt{\sum (U_c - \overline{U_c})^2 \sum (U_{c6} - \overline{U_{c6}})^2}} = 0.884$$

而后者最大相对误差达 60%，且有 56.2% 的模拟相对误差超过 25%，其模拟有效性系数为：

$$D_c = 1 - \frac{\sum (U_c - \overline{U_{c1}})^2}{\sum (U_c - U_c)^2} = 0.226$$

相关系数  $r = 0.407$ 。在起沙临界风速关系中，考虑沙土含水率改变导致凝聚力对起沙临界风速的影响是十分重要的，关系式中增加该因子使模拟有效性系数提高：

$$D = 1 - \frac{1 - D_{c1}}{1 - D_c} \times 100\% = 90.5\%$$

### 3 起沙临界风速关系灵敏度分析

式(8)表示的关系，可分别由如下的偏导数来分析各因子影响起沙临界风速的灵敏度。

$$\frac{\partial U_c}{\partial d} = \frac{30.409}{\sqrt{60.818d + 8.55e^{0.740}}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial U_c}{\partial \theta} = \frac{\partial U_c}{\partial \theta} = \frac{30.16498e^{0.740}}{\sqrt{60.818d + 8.55e^{0.740}}} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可知，粒径和含水率对起沙临界风速的影响相对大小，取决于沙土含水率，当  $3.16498e^{0.740} = 30.409$  时，即  $\theta = 3.058\%$  时，两因素的影响作用相等，当  $\theta < 3.058\%$  时，含水率的影响作用小于沙粒粒径，而当  $\theta > 3.058\%$  时，含水率的影响作用大于其粒径。极端情况的相对大小为：

$$\left. \frac{\partial U_c}{\partial d} \right|_{\theta=0} \left| \frac{\partial U_c}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = 9.608$$

$$\left. \frac{\partial U_c}{\partial \theta} \right|_{\theta=0_{\max}} \left| \frac{\partial U_c}{\partial d} \right|_{\theta=0_{\max}} = 4.21$$

从这些分析可知，沙土含水率对起沙临界风速的影响与沙粒粒径是同一数量级的，缺一不可。

### 4 结语

沙土含水率对起沙临界风速的影响是很大的，理论关系式中考虑该因素，不仅提高了估计精度，而且也使应用范围更广。

风蚀和水蚀，是两种不同的机制，取决于气候条件的改变，常发生在同一流域中。当气候干燥、含水率小时，遇起沙风会引起风蚀；当气候湿润、含水率大时，不易引起风蚀，如遇降雨产流，却会引起水蚀。对于一个流域，风蚀和水蚀不能截然分开的，应该统一起来研究，其研究的关键是含水率因子状态。例如，一个地区或一个流域的沙漠化发展过程中，风蚀和水蚀是交替发生的，其整体规律研究，应考虑水、沙、风向的耦合关系。

### 参 考 文 献

## ANALYSIS OF THE EFFECTS OF SAND MOISTURE ON THE THRESHOLD WIND VELOCITY

Bao Weimin

(Dept. of Hydrology, Hainan University, Nanning, 210024)

**Abstract** Bagnold developed the formula of threshold wind velocity by neglecting the action of cohesive force. This usually caused a large error since there exists a big difference from its real conditions. This paper develops a relation of the threshold wind velocity to grain diameter and sand moisture volume percentage on the basis of the momentary balance of force of gravity, cohesion and drag force, and analyzes quantitatively the effects of sand moisture volume percentage on the threshold wind velocity.

**Key words** Sand moisture volume percentage Threshold wind velocity Quantitative analysis

### 作 者 简 介

包为民, 副教授, 1956年8月生, 理学博士。从事流域水流、泥沙和环境领域的研究。