

中国科学院綜合考察委員会資料

編 号: 05761-17

密 級:

地面粗糙度在风沙形成中的作用

耿 寬 宏

提 要

本文根據近地面气层，中性层結条件下的风速廓綫分析，查明流沙面上粗糙度的变化，进而探討这种变化对起沙风和风沙流結構特征的影响。並由分析結果和試驗观测資料，推导出粗糙度和风沙流結構特征值之間經驗关系式，它能定性地具体闡明不同地面上风沙流活动的实际規律性。为沙漠地区防治风沙危害，提供理論根据。

一 流沙表面的粗糙度及其特征

在近地气层为中性层結时，一切自然表面上的粗糙度 (z_0)，都可以下列方程式表示：

$$z_0 = \exp\left(\frac{A \ln z_1 - \ln z_2}{A - 1}\right) \quad (1)$$

或

$$z_0 = \exp\left(\ln z_2 - \frac{u_2 \ln \frac{z_2}{z_1}}{\Delta u}\right) \quad (2)$$

其中 $A = \frac{u_2}{u_1}$ ， $\Delta u = u_2 - u_1$ ， u_1, u_2 —高度 z_2 及 z_1 处测定的风速。式(1)或(2)都可由工作(1)推导出來，其中(1)式和工作(2)所得相同。它們都是由风速隨高度分布的对数規律得出。严格地說，这只有气层在中性层結时，才是准确的。但是也有人认为，在离地面幾米范围以內，不論气层的稳定性如何，都可用对数規律。前述风速廓綫⁽⁴⁾对我们所討論的气层，主要是在1米以下高度来研，这个意見还可考虑。但是为了較可靠地确定沙面粗糙度，表1中所列入的資料，都还是在接近於中性稳定时观测的，並且採用了多次平均的值。这些資料由民勤流沙上的观测(1960年)得到。观测高度为0.5和2米以及0.2和1米。为了考虑层結的影响，同时还观测了同高度处的气温。^{*}

^{*}刘学栋同志参加了观测工作。

表1指出，沙面粗糙度無論是否起沙都有相当大的变化。其中起沙时，粗糙度有显著增长。和风洞試驗对照〔3〕，在这里未起沙时，沙面上的粗糙度並非常数，其值也不是沙粒徑的 $1/30$ 。以平均值为 0.0102 厘米而論，相当於該地沙面主要組成沙粒徑（ 0.025 厘米）的 $1/30$ 。即此試驗所得大 1.2 倍（粒徑相同）。

这是由於測風条件不同所致，其中特別是在自然条件下；构成沙面微起伏沙紋的存在，是风洞試驗中所沒有的。看来，在自然条件下的沙面粗糙度，不仅取決於沙粒的大小，而且还更多地受到沙紋的相对高度和密度的影响。这只要把沙紋具有变动性的事实，和沙面粗糙度的多变现象联系起来，就不难理解。可惜，關於沙紋与粗糙度的关系，尚未找到可靠資料加以說明。

令人注目的起沙时，沙面粗糙度的显著增大，在沙坡头也同样观察到。按平均而論，当起沙时，沙面粗糙度要比未起沙时增大 7 倍以上。

这种现象，主要是在貼近沙面的气层中。飞沙进入空中，对气流产生阻力所引起的。由於风沙流活动主要集中於很貼近^(沙)面的气层中，故在这一层中气流的受阻远大於其上面的气层，从而破坏了原来的气流结构，並导致风速梯度的增大。这种增大在(1)、(2)式中显然表明，粗糙度必然会相应增大。

这种现象，还可从数理上加以解析。

設空气中某高度上的含沙量 Q_z 是高度 z ，切向应力 τ ，和重力加速 g 的函数，即

$$Q_z = f(\tau, g, z) \quad (3)$$

如 Q_z 只按单位体积沙的质量計算(M/V)，由於 $\tau = \rho V_*^2$ （其中 ρ —空气密度， V_* —摩阻流速）由因次分析可得。

表1 流沙面上的风和粗糙度(厘米)(1963民勤)

编号	未起沙时				已起沙时			
	u_2 (米/秒)	Δu (米/秒)	A (厘米)	z_0 (厘米)	u_2 (米/秒)	Δu (米/秒)	A (厘米)	z_0 (厘米)
1	3.4	0.4	1.13	0.001	7.8	1.4	1.22	0.0918
2	2.6	0.3	1.13	0.001	5.8	0.8	1.16	0.0086
3	4.1	0.3	1.08	0.151 $\times 10^{-3}$	8.6	1.6	1.23	0.1210
4	2.5	0.4	1.19	0.036 $\times 10^{-3}$	10.5	2.2	1.25	0.1958
5	0.7	0.1	1.17	0.014	8.0	1.6	1.25	0.1958
6	3.3	0.3	1.10	0.436 $\times 10^{-4}$	5.3	1.3	1.32	0.660?
7	3.9	0.6	1.18	0.0224	7.4	0.8	1.12	0.0006
8	1.3	0.2	1.18	" "	12.4	1.6	1.15	0.0049
9	1.5	0.1	1.07	0.122 $\times 10^{-5}$	6.4	0.8	1.15	0.0049
10	2.0	0.4	1.15	0.0049	5.3	0.9	1.20	0.0489
平均	2.53	0.31	1.14	0.0102	7.75	1.30	1.20	(0.0747)
*沙坡头流沙上平均				0.0047	0.0931			

註：()—有“?”者未加入平均

*根据沙漠室地貌—气候组观测资料(1963)

$$Q_z = a \frac{\rho}{g z} V_*^2 \quad (4)$$

(4)式显然和工作(6)中的(7)式相同,因此以上所设条件是存在的。並且可知,系数 $a = \frac{A'}{a_1}$ (A' 工作(6)(7)式的系数)。

拜格諾由試驗指出〔3〕，当沙面起时，无论 V_{*} 多么大，总有一固定风速 V_t ，出現於固定高度上。在半对数图中，各风速廓綫都和冲击起沙时的风速廓綫交於一固定点上（見工作〔3〕图中18）。設冲击起沙值 V_{*0} 时，粗糙度为 z_{00} ， V_{*1} 表示任一起沙时的值；並且假定 V_t 出現的高度 h 很低（按拜格諾仅0.3厘米），即风速廓綫仍能保持对数規律。則有

$$V_t = \frac{V_{*0}}{K} \ln \frac{h}{z_{00}} = \frac{V_{*1}}{K} \ln \frac{h}{z_{01}} \quad (15)$$

式中 K — 卡門常数， z_{01} — V_{*1} 下的粗糙度。由(15)式可得

$$\ln \frac{h}{z_{01}} = \frac{V_{*0}}{V_{*1}} \ln \frac{h}{z_{00}} \quad (16)$$

利用(4)式，对同一高度而言，显然有

$$\frac{V_{*0}}{V_{*1}} = \left(\frac{Q_0}{Q'} \right)^{1/2}$$

Q_0 — 冲击起沙时高度 h 上的含沙量^沙，因此，(16)式可写成

$$z_{01} = h^{1 - \left(\frac{Q_0}{Q'} \right)^{1/2}} z_{00}^{-\left(\frac{Q_0}{Q'} \right)^{1/2}} \quad (17)$$

式中 h ， Q_0 及 z_{00} 都是常数，故 z_{01} 只取決於 Q 的变化，並与之成正比。

由於 $Q > Q_0$ ，故 $z_{01} > z_{00}$ 。因此，当含沙量增加时，粗糙度必然相应增加。这一方面說明了表1中起沙时粗糙度的增加是合理的，同时也表明，风沙时的沙面粗糙度已不只是表征沙面特征的数，而且还和风沙流联系起来了。

三、粗糙度对起沙风的影响

工作〔7〕指出，在我国沙漠地区，大部分地区流沙上的起沙风都是在风速5米/秒以上（2米高度）。但在有植被复盖的沙面上，起沙风临界值都比流沙上大。这种差异是由沙表特征不同所引起的。其动力原因可由风速梯度的变化来阐明。在中性条件下：

$$V_* = K u_z / \ln \frac{z}{z_0} \quad (8)$$

式中 u_z — z 高度处风速。根据上述起沙风临界值及相应高度 z ，並取 $z_0 = 0.0102$ 厘米， $K = 0.4$ ，可确定民勤流沙地区的起沙临界流速 $V_* = 21.8$ 厘米/秒；如取 $z_0 = 0.0074$ 厘米，则可确定沙坡头流沙上的起沙临界值 $V_* = 19$ 厘米/秒。它们和风洞中所得到的流体起沙值（22）及冲击起沙值（19.2）〔3〕都很接近。並同样符合於临界流速和沙粒半径的 $\frac{1}{2}$ 次方成正比的规律。

上述计算表明，起沙临界值（ V_* ）与粗糙度（ z_0 ）成正比关系。拜格诺指出，当气流由一种粗糙面进入另一种粗糙面后，由於粗糙度不同而引起的底层风速的变化，将藉助于垂直湍动而逐渐影响上层气流，並使所影响到的气层中（即附面层内），流速梯度保持进入前的情况（即 $V_* = \text{常数}$ ）。在这种条件下，受影响气层（附面层）各高度上的风速将有增强或减弱的变化（工作〔3〕图16）。因此，当气流进入粗糙度較大的地面后，如 V_* 值不变，则风速必将削弱。即适用于流沙上的起沙风临界值 u_{kp} ，在这种地面上就嫌得不足了。这时需要有大於 u_{kp} 的某一风速值才能起沙。

这种情况已被实测所查明，例如在半固定沙地上，起沙风临界值是在6米/秒以上，而固定沙地則要在8米/秒以上〔7〕。这种现象还可作用在沙粒上的起沙临界值 u_{kpo} 来说明。

令 z 为沙粒粒径高度（ $d = 0.025$ 厘米），其风速为 u_{kpo} ，

$z_0 = 0.0102$ 厘米，当 $V_* = 21.8$ 厘米/秒时，由(8)式可求得 $u_{kpo} = 10.9$ 厘米/秒。對於2米高度上的起沙风指标来讲，由(1)式可知

$$u_{(2)} = u_{kpo} \left(\frac{\ln \frac{2}{z_0}}{\ln \frac{d}{z_0}} \right) \quad (9)$$

($u_{(2)}$ —2米高度上的风速) 这說明对由同样沙粒組成的沙面来讲，由於 d 及 u_{kpo} 为常数，則粗糙度愈大，起沙风指标便愈高。

当前在我国沙漠地区，广泛用於固定流沙的机械沙障，正是以增大沙面粗糙度，提高起沙风的指标来实现的。

但应指出，在流沙上設置机械沙障，並不能全部截留流沙。这除了由於粗糙度增大所提高的起沙风指标有限而外，还由於当粗糙度增加时，沙障內的气流垂直渦流可能会相应加强。这种渦动提供了沙粒在空中飄浮的支持力量。如以 K_M 表示渦动强度，在中性条件下

$$K_M = k V_* z \quad (10)$$

将(8)式中代入，則有

$$K_M = k^2 u_z z / \ln \frac{z}{z_0} \quad (11)$$

这样，当风沙流由流沙面进入粗糙度較大的沙障內时，除了在边界附近下层大部沙粒因流速銳减而沉积外，上层（高於沙障高度）的沙粒則受到渦动动量的支持。在空中以非堆积搬运方式通过沙障地带。由此可見，在沙障內的风沙流随高度分布的廓綫将不同於流沙面。其相对輸沙量（%）底层减少而上层增加，並且分布不均匀而受渦动漲落的影响。不过，和流沙上比較，其绝对輸沙量显然减少。

三 风速廓綫与风沙流結構特征值的关系

工作(3)由試驗指出，在不起沙的沙面上，流速达到流体起沙值的

V_* ，当这种沙面一开始起沙，便降低到冲击起沙值 V_{*0} ，这种变化对某沙粒分布所及的高度来讲，风速显然会因起沙而减弱。这在上节讨论中已经阐明。也可由工作〔5〕的试验得到。因此，起沙后的风速不仅取决于原风速 u_z ，同时也取决于起沙的含沙量 Q_z 。这样，可令

$$u_z = u f(Q_z), \text{ 由於 } u_z = u_z' + \delta u, \quad \text{則}$$

$$\delta u = u_z [1 - f(Q_z)] \quad (12)$$

δu ——因起沙而减弱的风速。(12) 式应有下列边界条件：

$$Q_z = 0 \text{ 時 } f(0) = 1$$

$$Q_z = Q_{00} \text{ 時 } f(Q_z) = 0 \quad (13)$$

Q_{00} 一组成沙面的单位体积沙量 ≈ 1.5 克/厘米³。在式 (13) 的两种情况下，(12) 便分别得到 $\delta u = 0$ 和 $\delta u = u_z$ ，在物理上这是合理的。因此，

$$0 \leq f(Q_z) \leq 1。$$

並由因次分析可推导出 $f(Q_z)$ 的表达式为

$$f(Q_z) = 1 - \frac{Q_z}{Q_{00}} \quad (14)$$

並且比例系数为 1。这种形式显然满足 (12) 和 (13)。因此

$$\frac{Q_z}{Q_{00}} = \frac{\delta u}{u_z}$$

或

$$\frac{Q_z}{Q_{00}} = \frac{\delta u}{u_z + \delta u} \quad (15)$$

如果知道 u_z 和 u_z' ，便可得出 Q_z 值。但要在同一个沙面上先后得到

u_z 和 u_z' 只有在风洞试验的条件下才有可能。

根據茲那明斯基關於风沙流粘性的定义：^{〔5〕}

$$S = \frac{Q_m}{Q}$$

式中 $Q_m, \bar{Q} = 0-1$ 和 $0-10$ 厘米气层中的含沙量和平均含沙量。

如取 $u_m, \bar{u} = 1$ 厘米和 $1-10$ 厘米的平均风速与之对应，利用

(15) 式立刻有

$$S = \frac{\delta u_m}{\delta \bar{u}} \frac{\bar{u}}{u_m} = \beta' \frac{\bar{u}}{u_m}.$$

显然，在很贴近沙面的气层中 ($0-10$ 厘米) 起沙前后风速廓线仍可看作是对数分布形式 (参见工作 [3] 17 图)，因此 $\beta' = \frac{\delta u_m}{\delta \bar{u}} \approx$ 常数，如今 $\beta' = \frac{\beta}{\sqrt[3]{S}}$ ，上式可改写为

$$\sqrt[3]{S} = \beta \frac{\bar{u}}{u_m}, \quad (16)$$

这样，便和工作 [3] [6] 中所指出的，输沙量与风速的 3 次方成正比的概念相一致。当 β 值由实验资料确定后，风沙流结构的特征，便可由风沙时风速梯度的测定来确定。

表 2 和表 3 中引出了利用风洞试验和野外观测资料，计算的 β 值。后者由于仪器和观测关系， β 值变动较大 $0.65 \sim 1.04$ (高沙窝农田上)， $1.07-1.37$ (沙坡头)。但表 2 中的 β 值则较为稳定，并且和表 3 中的平均值相近。因此，粗略地取 $\beta = 1$ ，以便定性地分析风沙流结构的平均特征。

表 2 风洞试验条件下的 β 值 (按工作 [5] 表 8、9 中的资料计算)

细粒沙表面 ($d=0.015$ 厘米)					粗粒沙表面 ($d=0.1$ 厘米)			註
	平均					平均		
$\bar{h}_{1-10}$	21.0	25.0	24.0	23.3	24.3	24.6	24.5	$h = \frac{u^2}{2g}$
$\frac{(\bar{h})^{1/4}}{h_m}$	1.32	1.39	1.41	1.37	1.42	1.33	1.38	微压计高度
$\sqrt[3]{S}$	1.34	1.41	1.59	1.45	1.37	1.52*	1.45	米试验中出
β 值	1.01	1.01	1.13	1.05	0.97	1.15	1.06	现积沙现象

表3 流沙表面观测下的 值 (根据沙漠室风沙组观测资料计算)

高沙窝 (盐池 1961年) (农田地面观测资料)

平均

u_{10}	5.5	5.2	4.6	4.4	6.0	3.9	3.0	3.2	3.2	4.33
米/秒										
u_m	1.25	1.29	1.63	1.68	1.46	1.52	1.79	1.88	1.42	1.55
$\sqrt[3]{S}$	1.31	1.17	1.04	1.56	1.28	1.30	1.26	1.31	1.42	1.30
β 值	1.05	0.91	0.65	0.93	0.88	0.86	0.70	0.70	1.00	0.85

沙坡头 (中 1963年)

$\bar{u}$	1.98	3.21	4.17	4.11	6.20	5.74				4.24
u_m	1.60	1.41	1.22	1.37	1.16	1.32				1.35
$\sqrt[3]{S}$	1.71	1.69	1.65	1.60	1.60	1.55				1.63
β 值	1.07	1.20	1.36	1.17	1.37	1.18				1.23

四 粗糙度与风沙流结构特征值的相关

由于风速 $\bar{u}$ 系 1—10 厘米高度上气层中的平均值, 如风速按 1 厘米高度间隔测定, 则

$$\bar{u} = \frac{1}{10} \int_{z_0}^{10} du \quad (17)$$

并且可按风速廓线对数规律求出

$$\bar{u} = u_m \left(1 - \frac{0.556}{\log z_0} \right) \quad (18)$$

将 (18) 代入式 (16), 并取 $\beta = 1$ 则

$$\sqrt[3]{S} = 1 - \frac{0.556}{\log z_0}$$

或

$$z_0 = \exp \left(\frac{0.556}{1 - \sqrt[3]{S}} \right) \quad \sim 9 \sim \quad (20)$$

(20) 式指出, S 必須大於 1, 否則就失掉意义。因为当 $S \leq 1$ 时, (16) 式中出現 $\bar{u} \leq u_m$ 的情况, 这在近地气层中和风速随高度的实际分布不符。故 $S = 1$ 可看作风沙流結構特征的理論下限。对所討論的流沙地來讲, 实际下限是在 $z_0 = 0.0102$ 或 0.0074 厘米时, 这时 $S = 2.1$ 或 2.0 。这正是茲那明斯基所指出的常見非堆积搬运风沙流結構特征值。

式 (19) 和 (20) 所表示的粗糙度与风沙流結構特征值的正比关系, 由图 1 所示。图中指出, 粗糙度随风沙流特征 S 值的增长是有限的。当 $S \rightarrow \infty$ 时, $z_0 \rightarrow 1$ 厘米。事实上 試驗指出, 当 $S = 3.84$ 时, 风沙流已处于飽和状态 (5)。此时, 沙面只有蝕积交替过程。如果 z_0 进一步增大风沙流可能会处于飽和状态, 並变为堆积搬运結構。因此, 在 z_0 开始增大处 (两种粗糙度地面交界附近) 可能有积沙出現, 故 $S = 3.84$ 时的相应粗糙度 $z_0 = 0.104$ 厘米, 可称为积沙临界粗糙度 (z_{0kp}) 它比表中所引的平均 z_0 值都大一些。显然这是由於观测是在迎风坡上进行所致。可以予料, 如果在出現积沙的丘頂观测, 会得到临界的粗糙度值。

粗糙度与风沙流特征值的相互变化, 很具体地說明了风沙流在沙丘迎风坡上, 由丘脚到丘頂从非堆积搬运到堆积搬运結構的轉变过程。同时也清楚指出, 当风沙流“扫过”不同自然表面时在障碍物附近积沙, 平滑处吹蝕的不同規律。

因此, 它为我们防治风沙提供了理論根据。由临界粗糙度和所論流沙地沙面粗糙度的比較, 可以肯定在所論地区, 当进行固定流沙时, 所設的沙障至少应使粗糙度增大 10 倍以上; 当防止流沙对交通綫, 渠道进行沙埋时, 則要使其附近地段粗糙度降低至临界粗糙度以下。后一种要求, 正是茲那明斯基提出的, 防止积沙 (沙堆) 措施的基本原理。

五 結 論

1. 自然条件下的沙面粗糙度 z_0 ，主要取決於沙紋狀況及其变动。当起沙后，粗糙度的增大，系因起沙对气流的阻碍所引起，並随輸沙量的增加而增大。故这时的粗糙度不仅表征沙表状况，同时也和风沙流特征有密切联系。

2. 粗糙度对风沙形成的影响，体现於作用在沙粒上的风速的改变。在同样的 u_{kp0} 下，粗糙度大的地面所需要的起沙风指标，显著提高。这是沙障固沙的原因之一。

3. 在风沙流运动过程中，不同粗糙度地面对^z有不同影响。在大粗糙度的地面上造成下层积沙，上层非堆搬运过境，在小粗糙度的地面上則非堆积搬运或吹蚀过程加强。前者，风沙流廓綫不規則並取決於垂直湍动气流的漲落。

4. 风沙流結構特征，可由风速廓綫所作定。並且具有較简单的表达形式。

$$\sqrt[3]{S} = \beta \frac{\bar{u}}{u_m}.$$

5. 粗糙度与风沙流結構特征互相制約，並由下烈普遍經驗关系式

$$z_0 = \exp \left(\frac{\sum \ln z_i}{\beta - \sqrt[3]{S}} \right)$$

表达。式中 $\sum \ln z_i$ ——各測风高度的对数和。它恰当地具体說明了风沙流結構的变化过程及不同地面对风沙流影响的規律。

6. 在防治风沙斗争中，充分考虑地面粗糙度，並妥善地加以改造和利用，對於控制风沙流活动，如防止风蚀，固定流沙，防止沙埋等，都具有现实意义。

致謝：謹向对本文編写提供資料並提出修改意見的沙漠室地貌—气候組的同志表示感謝。

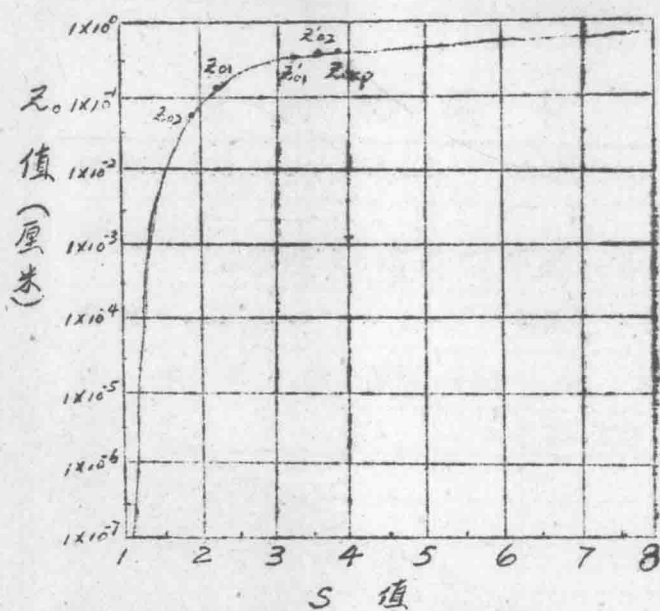
1963.11.13 四次修改

於北京

参 考 文 献

1. А. Л. Лайхтман Физика пограничного слоя атмосферы
(pp 56-68) Гидрометер Изд. Ленинград 1961.
2. Т. А. Огнева Некоторые особенности теплового
баланса деятельной поверхности.
Ленинград 1955.
3. R. A. Bagnold 风沙和荒漠沙丘物理学 钱宁、林秉南
译 科学出版社 1959年
4. М. И. Бугыко 自然条件下的蒸发 (55—63页)
徐淑英、曹琳译 科学出版社 1958年。
5. А. И. Значинский 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止
问题 杨郁华 科学出版社 1960年
6. 刘振兴 在风力作用的传输和沙丘移动 科学记录 新辑第3
卷 第9期 1959年
7. 耿宽宏 中国沙漠地区的气候 (摘要) 1960年全国地理
学术会议 论文选集 (自然地理) 科学出版社 (内部出版) 1962年。
8. 耿宽宏 起沙风和疏沙 地理学报 25卷1期 1959年。

圖 z_0 与 S 值间的相关性



$$z_{01} = 0.0102 \text{ 厘米} \quad z'_{01} = 0.0747 \text{ 厘米 民 勘}$$

$$z_{02} = 0.0074 \text{ 厘米} \quad z'_{02} = 0.0931 \text{ 厘米 波 波 头}$$