风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数*

邹学勇
(中国科学院沙漠研究所,兰州 730000)
朱久江
(兰州大学力学系,兰州 730000)
董光荣　刘玉璋　吴丹
(中国科学院沙漠研究所,兰州 730000)

关键词　风沙流结构、$f(v_z)$函数、高速频闪摄影、沙粒跃移

一、风沙流结构研究中存在的问题

风沙流是地表沙(尘)颗粒被运动气流(风)挟带而发生空间位移的气固两相流. 按其运动形式可分为蠕移、跃移和悬移三种,其中跃移物质在风沙流中占绝对优势[1]. 由于它是因地表风蚀而产生的风力搬运(或沉积)[2],对人类生产和生活造成严重影响. 因此,在风沙地貌和风沙危害的防治研究中,成为人们长期倾心研究的最基本的理论问题. 风沙流结构就是风沙流研究的一个重要内容,它指单位面积单位时间输沙量随高度的变化,标志着对风沙流研究的深入和具体化. 人们对风沙流的研究已有半个多世纪的历史,在 R. A. 拜格诺时代,他做了许多奠基性的工作,作出了划时代的贡献. 他通过风的"动量损失率"和对"颗粒的平均冲击速度可能受V'_*的控制"假设,得出风沙流的输沙率应与 $V_*'^3\left(V'_*=\sqrt{\frac{\tau'}{\rho}}\right.$,其中 ρ 为空气密度,τ' 为泥沙运动所产生的阻力$\left.\right)$ 成正比关系的结论[1]. 并近似地推导了输沙率的计算公式 $q=1.1\frac{\rho}{g}V_*'^3$(其中 ρ、g 分别为空气密度和重力加速度). 时至今日,仍一直沿用这一结论. 这里暂且不提他在推导过程中因多次近似而产生的不严密,在实际计算中也不十分理想. 就对风沙流结构的研究而言,仅仅给出一条平滑的曲线. 近年来,吴正等很多学者[3-7],通过大量的野外观测和环境沙风洞实验,确证了风沙流结构呈对数分布,并不因风速和下垫面改变而发生变化. 这是风沙流结构研究的一个突破. 尤其是河村龙马[5],通过与拜格诺基本相同的假定,把风沙运动看作沙粒的集团运动,作了统计理论的处理,获得风沙流结构的计算公式. 但这些成果都存在着计算参数测量困难或计算较烦琐等不足. 笔者经过野外的反复观测和多次环境沙风洞实验,给出跃移沙粒垂直初速度分布函数,进而对风沙流结构这一理论研究取得初步进

1992-04-13 收稿,1992-07-06 收修改稿
* 国家自然科学基金和沙坡头开放实验站资助项目

展。

二、风沙流结构研究的初步结果

如前所述，由于跃移在风沙流结构中占绝对优势，所以，这里仅对跃移沙粒进行讨论。在(X,Y,Z)三维空间中，当风沙流处于稳定状态时，可以认为风作用于沙粒的力在垂直于风向方向上为零，水平方向上为常数(原因是风速远大于沙粒的运动速度)。就单个跃移沙粒来说，它的运动方程如下：

$$\begin{cases} m\ddot{X} = F, \\ m\ddot{Y} = 0, \\ m\ddot{Z} = -mg. \end{cases}$$

对于起跃的粒子来说，它处于 $Z + \mathrm{d}Z$ 与 Z 内的几率等于：$P = \dfrac{2\mathrm{d}t}{T}$，

其中 $T = 2v_z/g$，v_z 为沙粒垂直分速度，T 为从起跃到降落的总时间。

$\dfrac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t} = |v_z - gt|$，由 $Z = v_z t - \dfrac{1}{2}gt^2$ 得出 $gt = v_z \pm \sqrt{v_z^2 - 2gZ}$，$\dfrac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t} = \sqrt{v_z^2 - 2gZ}$，

故

$$P = \begin{cases} \dfrac{g\mathrm{d}Z}{v_z\sqrt{v_z^2 - 2gZ}} & (\text{当 } v_z^2 > 2gZ), \\ 0 & (\text{当 } v_z^2 < 2gZ). \end{cases}$$

设在起跃面内，起跃沙粒按 v_z 的分布为

$$f(v_z) = Av_z^2 \mathrm{e}^{-Bv_z^2},$$

$f(v_z)$ 称为起跃沙粒垂初直速度分布函数。则在Z到 $Z + \mathrm{d}Z$ 之间在 XY 平面内单位面元组成的体积内找到的沙粒个数 (n)：

$$n\mathrm{d}Z = \int_{\sqrt{2gZ}}^{+\infty} \frac{f(v_z)g\mathrm{d}Z\mathrm{d}v_z}{v_z\sqrt{v_z^2 - 2gZ}}.$$

为简化起见，令 $s = \sqrt{v_z^2 - 2gZ}$，则有

$$\frac{\mathrm{d}v_z}{v_z s} = \frac{\mathrm{d}s}{s^2 + 2gZ},$$

$$n\mathrm{d}Z = g\mathrm{d}Z \int_0^{+\infty} \frac{f(\sqrt{s^2 + 2gZ})\mathrm{d}s}{s^2 + 2gZ},$$

其中 $f(v_z) = f(\sqrt{s^2 + 2gZ})$，$n = g\int_0^{+\infty} \dfrac{f(\sqrt{s^2 + 2gZ})\mathrm{d}s}{s^2 + 2gZ}$。

将 $f(v_z)$ 代入上式，则

$$n = Ag\mathrm{e}^{-2gBZ} \int_0^{+\infty} \mathrm{e}^{-Bs^2}\mathrm{d}s = \frac{1}{2}Ag\sqrt{\frac{\pi}{B}}\,\mathrm{e}^{-2BgZ},$$

两边取对数，有

$$Z = \frac{\ln\left(\dfrac{Ag}{2}\sqrt{\dfrac{\pi}{B}}\right)}{2Bg} - \frac{1}{2Bg}\ln n.$$

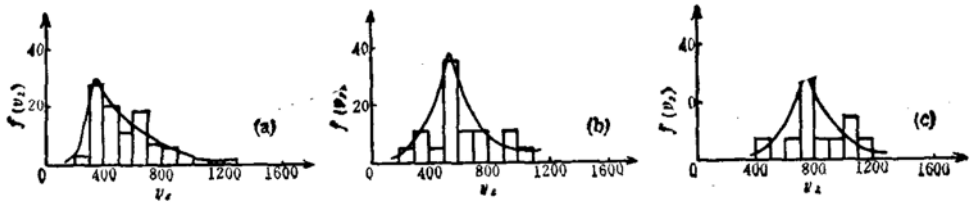


图 1　$f(v_x)$ 验证图

(a) 粒径为 0.2－0.3mm 流沙，测定风速：8.2m/s；(b) 细戈壁起沙，测定风速：10.57m/s；
(c) 混合粒径流沙，测定风速：7.13m/s

上式清晰地描述了风沙流结构的特征(其中 A 和 B 为待定系数).

现在的关键问题是检验假设的 $f(v_x)$ 的正确性. 检验工作在风洞内进行，使用日本产 MS-230 型频闪光源，对三种不同下垫面不同风速条件下的稳定风沙流施行高速频闪拍照. 通过对所获得照片的解析，统计出数百颗沙粒 v_x 的分布频率(图 1). 图 1 清楚地显示，与上述设定的 $f(v_x)$ 型式(图 2)完全一致，并不因风速和下垫面的不同而变化，从而证明了 $f(v_x)$ 的正确性，而且具有普遍的适用性.

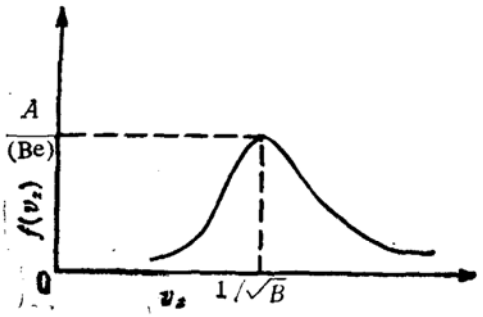


图 2　$f(v_x)$普适图

三、意　义

1. 本文从理论推导到对 $f(v_x)$ 函数的实验检验，用随机概率的观点，从新的角度解决了风沙流结构呈对数分布这一理论问题，为深入研究风沙流结构提供了一定的理论基础.

2. $f(v_x)$ 函数的确定，对研究风沙流宏观规律性具有重要意义. 要深入研究风沙流运动规律，必须找出沙粒的微观运动机理. 然而，对于错综复杂的界面(地表与气流)，单个沙粒的运动必定具有很大的随机性，只有从沙粒的微观运动中找出统计规律，才是解决问题的唯一途径. 其中的一个重要方面就是确定 $f(v_x)$ 函数.

3. 在实际应用中，若通过风洞实验，对不同沙粒粒径进行一组风速测定，即可找出 $f(v_x)$ 中待定系数 A 和 B 分别对应于风速的函数关系，进而精确地计算风沙流结构和输沙率，比 R. A. 拜格诺理论和计算结果严密和精确的多.

致谢　本项研究得到朱震达研究员的大力支持，中国科学技术大学周绍祥副教授在高速频闪摄影实验中给予大力协助，文中插图由王建华工程师清绘，特此致谢.

参　考　文　献

[1] R. A. 拜格诺，风沙和荒漠沙丘物理学(钱宁、林秉南译)，科学出版社，1959，60—66.
[2] 董光荣等，科学通报，**32**(1987)，4：297—301.
[3] 朱震达、吴正等，塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究，科学出版社，1981，56—59.
[4] 吴正，风沙地貌学，科学出版社，1987，59－68.
[5] 河村龙马，东北理工研究所报告，**5**(1951)，3－4：95—112.
[6] 马世威，中国沙漠，**8**(1988)，3：8—22.
[7] 尹永顺，中国沙漠，**9**(1989)，4：27－36.