

风沙起动的随机性及其判别

董治宝

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:风沙颗粒起动的判别标准的不一致,是造成目前关于颗粒起动风速研究成果不一致的重要因素之一。由于颗粒起动过程中,气流瞬时速度或瞬时切应力、颗粒在床面上的相对位置以及非均匀沙在特定的某个点的粒径是随机变量,所以风沙颗粒的起动具有随机性。这种随机性导致在实验观察中,风沙起动判别标准的不一致。借鉴泥沙起动研究的理论与成果,将风沙颗粒起动可分为个别起动、少量起动和大量起动,并给出泥沙研究中的判别标准,供风沙研究者参考。

关键词:风沙起动;随机性;判别标准

中图分类号:P425.6

文献标识码:A

引言

地表颗粒在风力作用下脱离地表开始运动称为风沙颗粒的起动,是产生风沙运动和沙尘暴的首要环节。风沙起动规律和起动风速是风沙起动研究的关键问题。目前在颗粒起动风速的研究方面,虽然已经得出了比较经典的计算公式,但其应用是有条件限制的,特别是其中包含的经验系数,不同研究者得出不同的结果。造成目前研究结果不一致,除与实验材料与方法、实验条件与误差有关外,尚有比较重要的原因就是颗粒起动的判别问题,即依据什么样的标准来确定颗粒起动。在同样的条件下,由于颗粒起动的判别标准不同,会得出不同的起动风速值。我们在实验中也经常发现,在同样的条件下,不同的观察者会测量到不同的起动风速值,其主要原因就是颗粒起动的判别标准不同。颗粒起动的判别标准不同的根源是颗粒起动的随机性。所以,本文从风沙起动的随机性出发,借鉴泥沙起动的研究理论与成果^[1~2],论述了风沙起动的判别标准问题。

1 风沙起动的随机性

虽然地表沙粒在什么样的气流条件下才开始运动,在物理概念上是明确的,但由于风沙起动问题带有很大的随机性,故有人认为沙粒起动条件缺乏真实的意义。风沙起动的随机性表现在:在同样气流

条件和同样床沙组成时,哪一种以及其中哪一颗沙粒起动,固定时间间隔起动多少颗沙粒等都是随机的。产生这种随机性的主要原因是,气流瞬时速度或瞬时切应力和颗粒在床面上的相对位置是随机变量,对于非均匀沙,在特定的某个点,沙粒的粒径也是随机的。这3个变量造成了风沙起动的随机性。沙质地表一般是由无数不同的沙粒组成,沙粒的大小、形状、密度、方位以及相互之间所处位置的排列组合均存在差异,而且由于气流本身具有脉动性,在同一时刻,各处沙粒的受力状况不同,而且在同一点、不同时刻沙粒的受力状况亦不同。因此,即使对于均匀沙来说,也不是动则全动,不动则都不动。对于混合沙,情况就更为复杂,在一定的气流条件下,根本不存在某一明确的临界粒径,大于临界粒径的沙粒都静止不动,而小于临界粒径的沙粒则都会起动。我们在风洞模拟实验中经常观察到,在某一时刻,床面的某些区域有风沙在运动,而在其它一些区域则无风沙运动。在床面的某个区域,有时则无风沙运动,而有时却有一缕或一片床面上的沙粒突然运动。这些现象表明了风沙起动的随机性。

图1是 Gessler 根据水槽实验结果绘出的均匀沙粒起动拖曳力 τ_c 与床面平均拖曳力 $\bar{\tau}_0$ 的比值和沙粒保持静止状态的或然率 P_c 之间的关系^[3]。可以看出,当 $\bar{\tau}_0 < \tau_c$ 时沙粒仍然有起动,只是其几率较小而已。同样,当 $\bar{\tau}_0 > \tau_c$ 时,也不是所有沙粒都在运

收稿日期:2006-05-26;改回日期:2006-05-28

作者简介:董治宝(1966-),男,研究员,主要从事风沙物理研究. E-mail: zbdong@lzb.ac.cn

动,而总是有一小部分沙粒留在床面处于静止状态,说明沙粒起动的随机性。

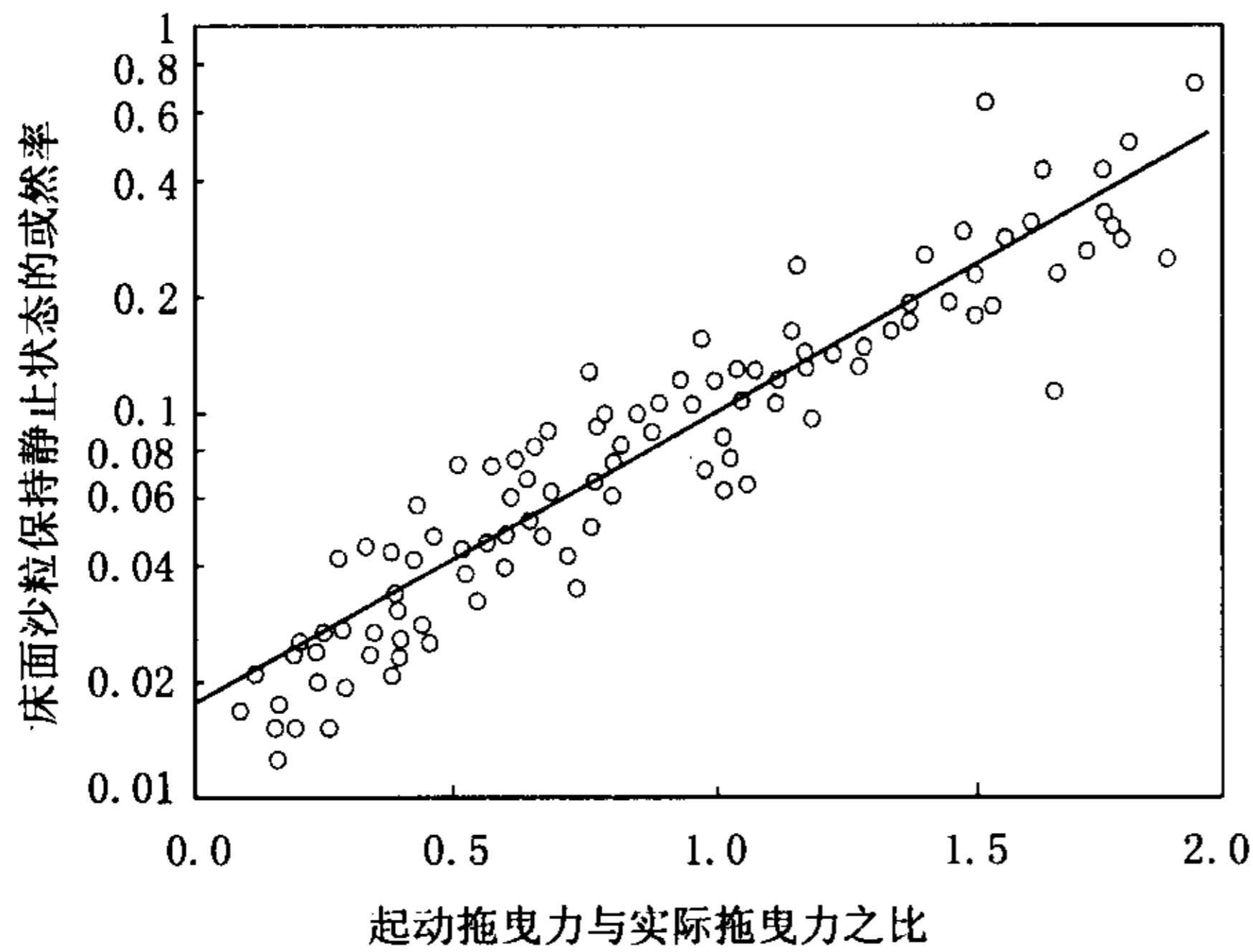


图1 在不同拖曳力作用下床面沙粒保持静止状态的机遇^[1]

Fig. 1 The probability of particles keeping static under different air drag

实际上,当气流条件达到一定强度时,床面总会有一些沙粒在运动,只是运动的几率不同,所以用概率方法来描述风沙起动会更符合实际情况。关于风沙起动的随机性及其规律方面的研究最早可以追溯到 Einstein 关于泥沙起动概率的研究^[4],他认为与起动有关的在时间 Δt 内床面不动沙粒的概率为负指数分布,其分布函数为:

$$P_{SN} = e^{-\beta_s \Delta t} \quad (1)$$

式中, P_{SN} 为床面上某特定沙粒不动的概率, β_s 为参数。当 $\Delta t = 0$ 时,风沙不动的概率 $P_{SN} = 1$,随着 Δt 的增加, P_{SN} 愈来愈小,并且当 $\Delta t \rightarrow \infty$ 时 $P_{SN} \rightarrow 0$ 。与不动概率相应,该颗沙粒的起动概率为:

$$P_s = 1 - e^{-\beta_s \Delta t} \quad (2)$$

式中, P_s 为在特定时间 Δt 内,该颗沙粒位置上(床面上)至少起动一次的概率,当然包括起动多于一次的概率。(2)式表明,随着时间的推移,起动的概率越来越大,不断趋近于1。后来的研究者认为,负指数分布难以描述复杂的起动现象,应取为 Γ 分布。但是,在风沙起动的具体条件下,从理论上导出 Γ 分布有困难。一些实际资料表明,只要参数 β_s 正确,不动概率的负指数分布是比较符合实际的。上述不动概率的分布通常被称为休止期的分布。因为 P_{SN} 既然表示在时间 Δt 内不起动的分布,也就是一颗沙粒在床面静止的时间,即休止期的分布。

Einstein 还引入了另一种起动概率,即:

$$P_s = P[P_L > G] \quad (3)$$

式中, P_L 为空气的升力, G 为沙粒在空气中的重量。

(3)式实际上是空气的升力 P_L 大于沙粒重力 G 的概率,认为沙粒的起动主要是由空气的升力决定的,当升力克服沙粒的重力时,沙粒即被起动。(2)式与(3)式中的起动概率是2个不同的概念,前者是在一固定时间内某颗沙粒起动的概率,后者是指空气升力大于沙粒重力的概率,与时间无关。

有关水流中,泥沙起动的随机性及统计规律已有大量的研究^[2],在风沙物理学领域这方面的研究则较少,而风沙起动是一个在风沙物理研究中很常见的概念,从风沙起动的随机性来认识起动过程是必要的,加强这方面的研究是十分有意义的。

2 风沙起动的判别

在研究风沙起动时,首要的任务是对风沙起动作出判别,即风沙运动达到什么样的程度才算起动,在实际的研究中,一般在通过观察对风力作用下,地表是否出现沙粒运动来确定风沙是否起动。但是,由于风沙起动具有随机性,对风沙起动判别亦有很大的任意性。风沙起动决定于2个具有一定统计分布的变量间的相互作用。

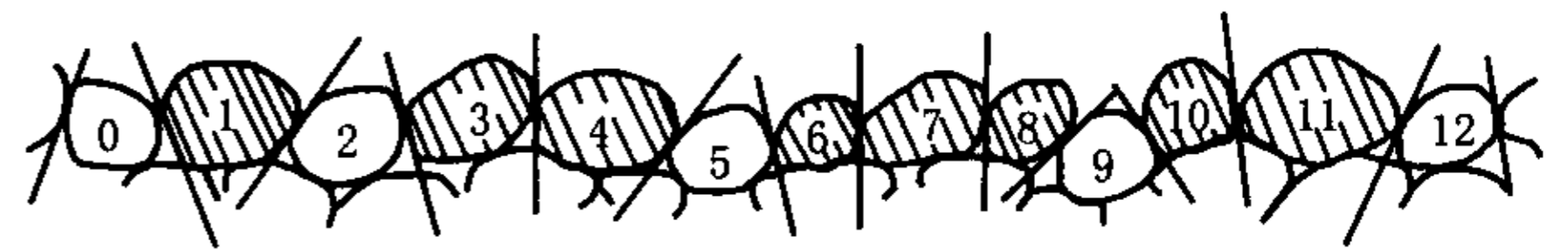


图2 床面沙粒处于不同位置时的起动条件^[1]

Fig. 2 The entrainment conditions of particles at different positions

床面上每一颗沙粒在一定的临界拖曳力 τ_c 下开始运动。即使对于均匀沙来说由于颗粒间所处的相对位置不同,它们所需要的起动拖曳力也不相同。在图2中,颗粒1、3、4、6、7、8、10及11比较容易起动,而颗粒0、2、5、9及12则在相邻的颗粒没有他移之前根本不会进入运动状态。如果考虑到颗粒的大小、形状、分选及方位不同,则床面不同部位颗粒的 τ_c 亦不同,具有一定的统计分布,这反映了床沙的初始运动特点。此外,床面附近的湍流使气流作用在床面上的拖曳力具有脉动性,从而造成了拖曳力分布的随机性,这反映了气流运动的特点。

假定床面附近的气流为层流,这时气流对床面的拖曳力为 τ_0 。沿着气流方向 τ_c 有一定的分布,如图3中的柱状图。对于不同的 τ_0 (图3a中的A-A、B-B及C-C各线),不同位置的沙粒将进入运动状态。最先运动的将是那些和周围的沙粒比较起来位置最为突出的沙粒。随着 τ_0 的增大,越来越多的

沙粒脱离床面开始进入运动状态,风沙运动的强度不断增大。

但是,床面附近不存在气流脉动的情况毕竟是

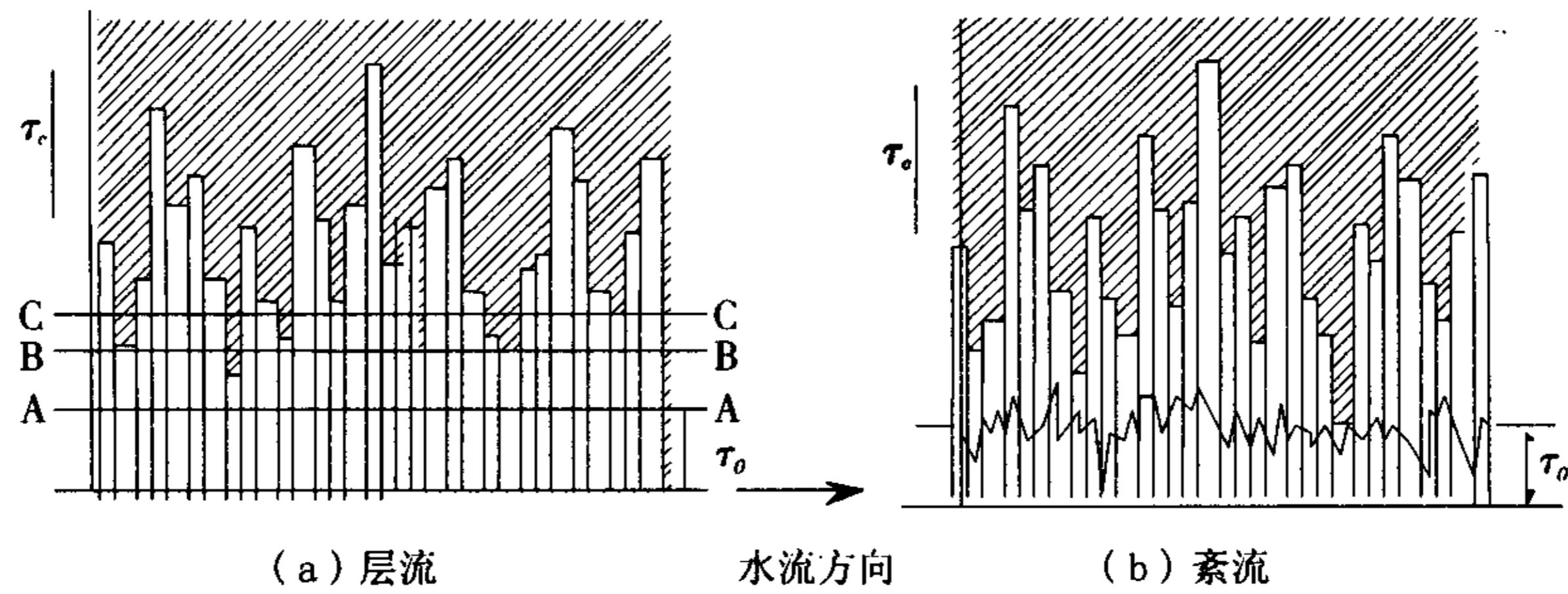


图3 研究流动方向起动剪切力(τ_c)和实际剪切力(τ_0)的分布^[1]

Fig. 3 The distribution of shear stress: (a) laminar flow; (b) turbulent flow

很少见的。即使当床面处于光滑区域、近壁层流层时,由于湍流的猝发性质,也将不断有动量较大的气团自主流区进入近壁层流区,引起后者的脉动。在存在气流脉动时, τ_0 和 τ_c 的对应关系如图3b。此时,何处的沙粒率先起动具有很大的随机性。位置突出的沙粒固然容易起动,但不一定是最先进入运动状态的。

图4绘出了 τ_c 的梯级频率分布及 τ_0 的分布曲线。当 $\tau_0 < \tau_c$ 时,这2条曲线相重部分阴影面积反映了能够起动的沙粒及其运动强度。在图4a中,很大的 τ_0 正好能使最容易起动的小部分沙粒起动,但因为强度很大的拖曳力和所处位置很容易被起动的沙粒出现的几率都很小,所以此时进入运动状态的沙粒是很少的。在图4b中,较强的 τ_0 使较大部分的沙粒都可能起动,但真正在运动的沙粒依然不多。在图4c中,气流运动的强度相对于沙粒的大小看,能使相当大一部分拖曳力对沙粒起动来说都是有效的,此时床面沙粒就会大量起动。在理论上可以选择某一个定常的阴影面积作为判别风沙起动的标准。

最理想的风沙起动判别问题应该按照图4的模式来处理,关键是如何确定床面拖曳力和起动拖曳力的频率问题,但目前关于床面拖曳力的脉动研究尚没有成熟的研究结果,甚至颇有争论。只要进行更多更为细致的测验,在这方面是可以取得一致认识的。更困难的是如何确定各种床面沙粒起动拖曳力的频率分布问题,对此目前实验成果很少。正因为上述缘故,目前在具体处理泥沙起动问题时,对水流的脉动在作出一定简化的前提下加以考虑,而对床沙的初始运动状态,则一般只考虑其平均状况,而完全忽略其随机分布。在风沙起动研究中,则既没有考虑气流拖曳力的脉动,也没有考虑床面沙粒的初始状

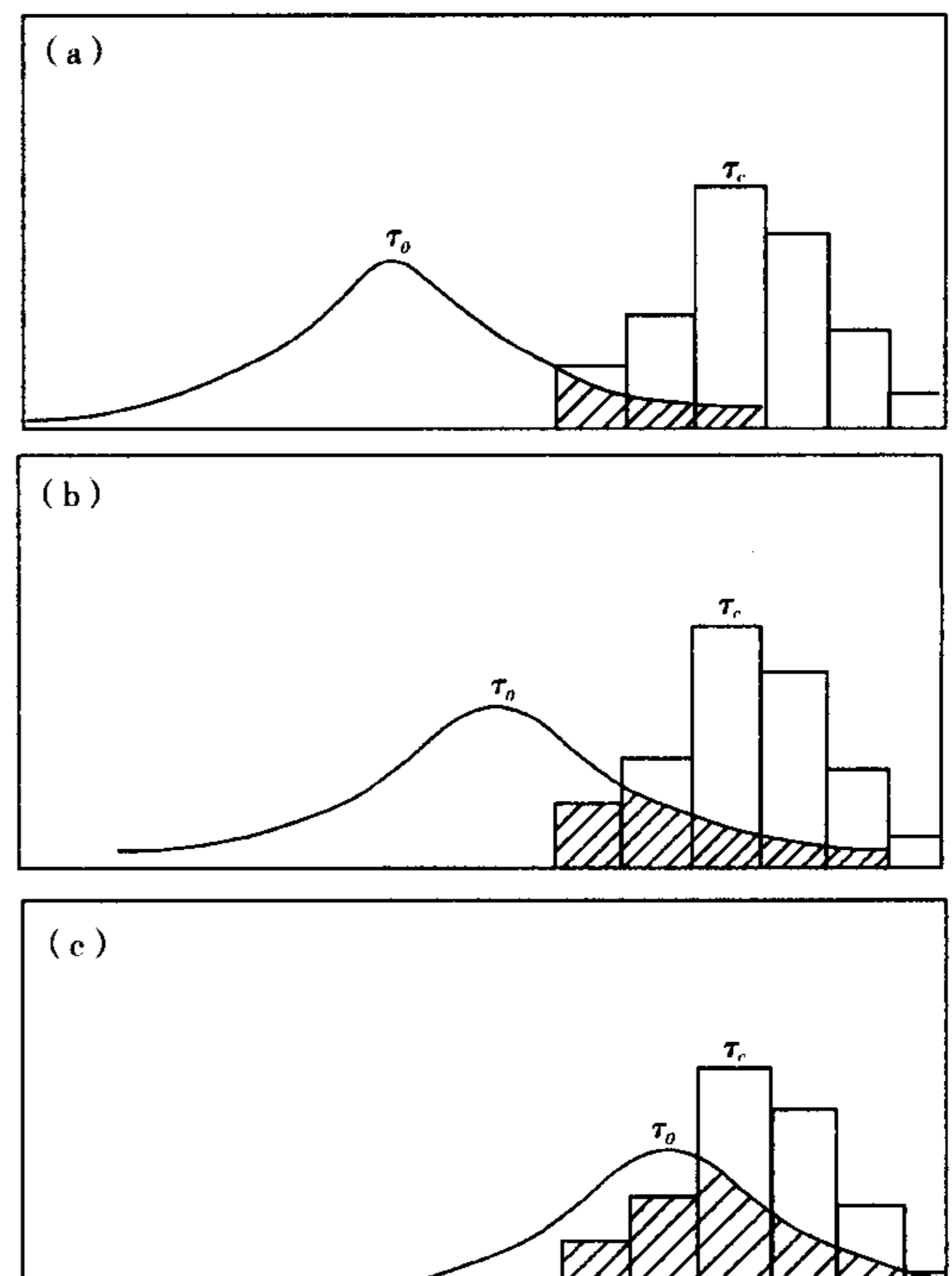


图4 作用在床面的拖曳力(τ_0)频率分布与床面沙粒起动拖曳力(τ_c)梯级频率分布以及相互间的关系
(据钱宁和万兆惠(2003)修改)

Fig. 4 The frequency distribution of τ_c and the step frequency of τ_0 and their correlation

态,这是有待深入研究的空白领域。

在泥沙运动研究中,为了寻求泥沙起动的判别标准,Kramer曾把推移质的运动分为4个阶段^[5]:

- (1) 无沙粒运动。床面沙粒全部处于静止状态。
- (2) 轻微的沙粒运动。在床面的某些区域极少的细沙粒开始运动。

(3) 中等强度的沙粒运动。在床面各处都有中等粒径以下的沙粒开始运动,其强度大到无法计数。

(4) 普遍的沙粒运动。各种粒径的沙粒均开始运动,引起床面形态的变化。

以上述不同运动状态作为沙粒起动的标准,所得到的结果会有很大差异。为了使沙粒的起动有定量的判别标准,Yalin 建议将(4)式作为沙粒起动的判别准则^[6]。

$$C_{ST} = \frac{m_s}{A \Delta t} \sqrt{\frac{\rho_s R_d^5}{\gamma_s - \gamma_l}} \quad (4)$$

式中, C_{ST} 为沙粒起动的判别指数, m_s 为在 Δt 时间内从床面面积 A 范围内外移的沙粒数, γ_s 和 γ_l 分别为床沙和流体的容重。对于不同粒径的沙粒,应该取一个定常的 C_{ST} ,即相当于某一种沙粒运动强度,作为统一的起动判别标准。当对2种密度相同、粒径相差10倍的沙粒进行起动实验时,为了使2组实验的 C_{ST} 保持相等,粒径较粗那一组的 $m_s/A \Delta t$ 必须较粒径较细的那一组小 $10^{5/2}$ 倍,也就是说,实验中需要注意的视野必须广得多,历时也必须长得多。

窦国仁在研究沙粒的起动时,以近底流速 u_0 作为沙粒起动的动力指标,在考虑水流的脉动,但忽略起动底流速 u_c 的概率分布时,提出了与克雷默运动状态所对应的起动概率 P_s ^[7]。

$$(1) \text{ 个别起动: } P_{S1} = P(u_0 > u_c = \bar{u}_c + 3\sigma_{u_0} = 2.11\bar{u}_c) = 0.00135$$

$$(2) \text{ 少量起动: } P_{S2} = P(u_0 > u_c = \bar{u}_c + 2\sigma_{u_0} = 1.74\bar{u}_c) = 0.0227$$

$$(3) \text{ 大量起动: } P_{S3} = P(u_0 > u_c = \bar{u}_c + \sigma_{u_0} = 1.37\bar{u}_c) = 0.159$$

式中, \bar{u}_c 为时均起动底流速, σ_{u_0} 为脉动底流速的均方根。在研究中,可以选取一个定常的概率作为判别沙粒起动的定量标准。

上述关于风沙起动的随机性和起动判别标准的讨论,主要是借助泥沙运动学的研究成果,在风沙运动研究领域,类似的研究几乎没有,但这些都是深入揭示风沙运动机理所必须的。通过以上的讨论可以看出,风沙起动是一个意义深远的科学问题,但在风沙运动研究中未给予足够重视,目前关于风沙起动研究仅限于一般的实验与观察,研究工作的薄弱与风沙运动学的发展水平和测试手段的限制有关,随着风沙运动学研究的深入和测试手段的提高,风沙起动的随机性和判别标准方面将会取得更新的认识,同时将会加深对风沙运动机理的认识。

参考文献:

- [1] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,2003. 687.
- [2] 韩其为,何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京:科学出版社,1999. 228.
- [3] Gessler J. Geschiebetrieb bei Mischungen untersucht an natuerlichen Abpflasterung serscheinungen in Kanalen. Mitteilungen der Versuchsanstalt fur Wasserbau und Erdbau Nr. 69, E. T. H. Zurich. 1966.
- [4] Einstein H A. Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeits Problem. Mitt. Veruchsanst. Fuer Wasserbau, an der Eidg. Techn. Hochschule in Zuri, Verlag Rascher & Co., Zurich. 1937.
- [5] Kramer H. Sand mixtures and sand movement in fluvial models[J]. Transactions of American Society of Civil Engineers, 1935, 100: 798 - 838.
- [6] Yalin M S. Mechanics of Sediment Transport [M]. [S. L.]: Pergamon Press, 1972. 74 - 110.
- [7] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报,1960, 44 - 60.

The Stochastic Nature and Definition of Particle Entrainment by Wind

DONG Zhi - bao

(Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Differences in the criteria for discriminating the initiation of particle movement is one of the factors leading to disparities in the results of threshold wind velocity. The particle entrainment process in response to wind action is stochastic due to the turbulent nature of wind, the stochastic positions of the particles and particle size. The stochastic nature of particle entrainment process results in differences in the criteria for discriminating the initiation of particle movement. Using the theories and conclusions in fluvial sedimentation studies, the initiation of particles by wind can be classified into individual initiation, small amount initiation and large amount initiation. The corresponding discrimination criteria are provided as references for aeolian researchers.

Key words: wind initiation of particles; stochastic nature; discrimination criteria