

·学科进展与展望·

风沙运动中的若干力学问题研究

郑晓静*

(兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室,兰州 730000)

[摘要] 风沙运动机理研究是认识风沙灾害本质进而实现有效防治的基础,所涉及的诸如多尺度、多场耦合、随机性、非线性、尺度效应和复杂系统等科学问题也是科学前沿所关注的共性和热点课题。近年来兰州大学风沙环境力学研究组从力学和地学的学科交叉角度,通过风洞实验、理论建模和计算机模拟研究,揭示了风沙流中沙粒带电量和风沙电场的基本规律及其对风沙流和无线电通讯的影响,实现了对考虑多物理场耦合作用的风沙流发展过程的理论预测以及对风成沙波纹主要特征的计算机模拟,取得一些具有原创性的实质进展。

[关键词] 风沙流,风沙电场,输沙率,沙波纹,起跳初速度分布

目前我国遭受风蚀的土地面积已超过水蚀面积,达 $1.91 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。频发的沙尘暴严重影响交通、通讯、基础设施以及环境,如:2006年4月17日仅北京地区的降尘就达数十万吨。风沙灾害已经成为关系我国社会、经济可持续发展的重大环境问题之一。对与风沙灾害相关的风沙运动的研究始于20世纪40年代美国以及加拿大因农田大量开垦而导致的沙尘暴频发时期,并以实验与野外观测为主。60年代后,由于火星探测等需求,开始了对风沙运动的理论建模和定量预测。除地学工作者所开展的大量工作外,力学界对风沙运动的研究也很关注。然而,“在风沙运动研究中已有的风沙运动的定量理论模型还远未达到对输沙率进行可靠预测的程度;同时还缺乏能够用于规范数学模型的有关风场和输沙率特征的可靠的实时测量”^[1]。

我国政府对风沙灾害一直高度重视。研究荒漠化和沙漠化问题的学者针对我国风沙灾害的现状和趋势以及相关的机理和防治开展了大量工作,广大治沙工程技术人员和民众也进行了卓有成效的治理。然而,我国风沙环境问题仍然十分严峻,因而更需要对风沙运动机理展开深入研究。兰州大学风沙环境力学研究组在“国家杰出青年基金”(1997年)、“973”项目以及国家自然科学基金重点项目的资助

下,从学科交叉的角度,结合科学前沿问题,对风沙运动中的若干力学问题展开了研究,部分成果被“973”课题验收专家组评价为“提升了我国风沙运动研究的国际影响力”。

1 实验研究

国内外学者均观测到沙尘暴过境地带的强电场和电火花以及对无线电信号干扰的现象,但人们对风沙电现象的规律及其影响的认识仍然非常有限。为了系统地获得风沙流中沙粒所带的电荷量和风沙电场随高度、沙粒粒径以及来流风速等参数的变化规律,我们对风沙流中沙粒带电的荷质比、风沙电场强度以及输沙率和风速廓线等宏观物理量开展了风洞实验测量。结果发现:对于“均匀沙”,当运动沙粒的直径小于 $250 \mu\text{m}$ 时,沙粒带负电荷;而当粒径大于 $500 \mu\text{m}$ 时,带正电荷;沙粒的荷质比随沙粒粒径和风速的增大而减小,随高度的上升而增加;风沙流中的电场主要是由运动的带电沙粒形成,其电场强度方向垂直地面向上,与晴天大气电场的方向相反;在相同风速下,由小粒径沙粒形成的风沙流,其电场强度要大于大粒径沙粒情形的电场强度;在相同粒径范围内,电场强度随轴线来流风速和高度的增大而上升;混合沙的风沙电场要比“均匀沙”的电场大

* 1997年度国家杰出青年科学基金获得者。

本文于2006年6月28日收到。

得多,在 20 m/s 的风速情形下,前者的最大值要比后者高出 20 倍以上^[2]。

单宽输沙率是评价土壤风蚀程度的重要物理量。目前,针对不同沙质从不同角度提出的单宽输沙率公式多达 50 余种,且对同一问题的预测有时可相差 3 倍左右。为判别各理论预测公式的使用范围和有效性,并提高其实验测量值的精度,我们在风洞实验的基础上给出了单宽输沙率实验值的处理程序和拟合公式。通过对著名的 Bagnold 公式和 Kawamura 公式的检验得到:它们分别在摩阻风速 $u^* > 0.47$ m/s 和 $u^* < 0.35$ m/s 时与实验测量值有较好吻合;而在 0.35—0.47 m/s 之间时,它们与实验值均有较大差异^[3]。有关这一实验的方法和结果被国外同行认为“是一项引人关注且完整的研究。作者们完成了一系列给人深刻印象的实验,并积累了大量的数据。受本领域经典工作的启示,他们拟合得到了切实可行的公式。”

2 理论预测

针对风沙流中沙粒的散体性,我们用基于连续介质理论的充分发展的 N-S 方程描述来流风场、用质点运动方程描述单颗沙粒的运动、通过引入沙粒起跳初速度分布函数和考虑统计意义下的沙粒运动对风场的反作用,最终实现对风沙流整体行为的预测。在这种预测风沙流的统计耦合模式中,沙粒起跳初速度分布函数是实现从对单颗沙粒运动模拟向对风沙流模拟的“桥梁”。为此,我们得到了一种基于风沙流结构风洞实验测量结果,并结合多维约束优化的数值反演起跳沙粒速度分布函数的方法。其突出优点在于,采用传统输沙率等基本实验结果来获得目前还难以测量的近地层沙粒起跳初速度分布函数^[4]。除此之外,我们还提出一确定沙粒起跳初速度分布函数粒-床的随机碰撞模型。在获得沙粒起跳初速度解析表达式的基础上,运用多维随机变量函数概率分布计算,给出沙粒起跳初速度的分布函数,其中沙粒起跳的水平初速度分布函数和起跳的初始旋转角速度分布函数是首次给出的^[5]。研究表明:沙粒起跳的水平初速度分布函数呈单峰非对称分布,与呈负指数分布的起跳初速度的垂向速度分布函数不同;沙粒起跳时存在逆时针和顺时针的两种旋转;沙粒的初始旋转角速度约在(-1200—1100) r/s(转/秒)(逆时针为正)之间,其中小于 500 r/s 的角速度占主导地位。这一研究不仅弥补了现有实验测量的局限性,可以预测实验难以得到

的沙粒反弹数和溅射数之比,而且还为“磨蚀”现象的研究提供了理论依据。

基于风沙流统计耦合模式,我们在所预测的风沙流整体行为中定量反映了风场-沙粒运动(含旋转)-风沙电场-热扩散场间的相互耦合作用,并实现了对风沙电场、风沙流自平衡发展过程中的起沙率和输沙率等的理论预测:给出沙粒不同运动形式的风沙电场分布随高度、沙粒荷质比、风速等因素的变化规律^[6];给出由于沙粒带电所受到电场力和地表热扩散对风沙跃移运动的发展过程、起沙率、单宽输沙率、单位面积输沙率沿高度分布以及风速廓线的影响^[7]。这些定量预测结果不仅与相关实验结果和规律良好吻合,而且还有效揭示了相关因素,如:沙粒带电、热扩散和沙粒旋转等对风沙流的影响程度和影响规律。结果表明:沙粒带电对风沙流的影响是明显的;地表热扩散的影响在午后十分明显,这不仅与沙尘暴一般在午后发生的规律吻合,而且为进一步模拟沙尘暴奠定了基础。研究还表明:风沙流结构并非简单地服从负指数衰减规律,而是具有分层特征^[8]:输沙量在贴近沙床附近处随高度线性增加、达到极值进入饱和层、然后沿高度按负指数规律衰减。这为“沙割”现象的解释提供了理论依据。这些定量模拟结果被国际同行认为:“这一研究处理了一个极其重要的课题,是为数不多的给出沙粒电荷与临界风速和输沙率标准方程关系有力解释的研究之一。论文具有潜在重要的贡献。”“这一论文的确包含原创性的内容。新的结果主要是跃移粒子电荷的测量与电荷对粒子运动的影响。”“这一论文是相当有趣的,并且对于陆地与行星(如:火星)表面大气层里的尘土跃移计算将是有益的。”“文章大大改进了原有观点。它给出了一个关于跃移输沙率的全面的理论研究。在处理静电力影响方面,这一理论比已有工作更透彻。”

沙尘暴对无线电通讯的影响在国内均有报道。Haddad 等人采用 9.4 GHz 的电磁波在能见度为 10 m 的强沙尘暴中测得的散射衰减系数为 34 dB/km,远远高出采用传统散射理论给出的 1 dB/km 的理论值。在考虑沙粒带电因素后,我们给出单颗球形带电沙粒对电磁波散射的 Rayleigh 近似解和任意粒径的球形沙粒表面带电时的散射场的精确解^[9]。这一工作使得长期未能解决的无线电波衰减理论预测与实测结果相差约 30 多倍的问题得以圆满解决。研究发现:沙粒所带的电荷仅分布在沙粒表面的局部区域。由此可以推论:不同粒径的沙粒间的碰撞和

摩擦是导致沙粒带电的一个主要因素。基于沙粒带电对电磁波传播的影响,发现由于激光多普勒仪的测量原理中没有考虑颗粒带电因素,将会使对粒径测量的最大误差达75%左右。因此考虑颗粒带电因素有可能提高激光多普勒仪的测量精度。

3 计算机模拟

人们不仅对地球上的诸如沙波纹、沙丘和沙山等风成地貌感兴趣,而且也始终在关注其他星球的地貌^[10]。为此,一直在尝试实现对风成地貌的模拟以揭示其形成过程和形成条件。已有的计算机模拟方法,如元胞自动机方法等,尽管可以得到沙波纹乃至沙丘的一些特征和部分参数型的临界条件,但因为主要是基于若干经验规则,因而难以与实际的时空参数对应。我们采用离散动力学方法,结合随机统计方式,研究了混合粒-床碰撞问题,进而首次全面给出了包含粒径信息的随机碰撞击溅函数^[11]。在此基础上,通过考虑沙粒在风场中的动力学特性,特别是沙粒的蠕移运动,实现了对沙波纹形成过程的模拟,并分析了影响沙波纹物理特性的各种因素。通过对粒径为0.4 mm的沙床在摩擦风速为0.5 m/s时沙波纹形成过程的模拟得到:沙波纹迎风坡长为12.52 cm,沙波纹高度为0.7 cm;而当沙床的沙粒由粒径为0.4 mm,0.3 mm的混合沙时,沙波纹迎风坡长为12 cm,沙波纹高度为0.5 cm。这与我们测量得到的自然界实际沙波纹波长为7—14 cm,波高为0.5—1.0 cm较接近。通过对混合粒径情况的沙波纹的模拟发现;沙波纹具有分层结构(也称倒粒序迭片结构),即:粒径较大的沙粒分布于沙波纹顶端,而粒径较小的沙粒位于沙波纹的底部,这与实际沙波纹是一致的。计算机模拟得到的沙波纹形成过程为:在沙波纹形成的初始阶段,沙床上出现的小尺度的沙波纹是非饱和的;随着风沙流的不断作用,这些非饱和小尺度沙波纹发生合并形成较大的沙波纹后,保持饱和形态不变向前运动。沙波纹移动速度一般为 10^{-2} — 10^{-4} m/s且与风速成线性关系,即,随着摩擦风速增大,移动速度增大。但是,沙波纹的形成存在两个临界摩擦风速。只有当风速在这两个临界摩擦风速值(当沙粒粒径为0.4 mm时的这两个临界值分别为 $u_* = 0.4$ m/s和0.7 m/s)之间时,床面才有沙波纹形成。同时计算机模拟揭示:沙床沙粒的排列对沙波纹形态的影响不大,但沙床粗沙/细沙比和风沙流结构对沙波纹的几何尺寸有一定的影响。随着沙粒粒径的减小,沙波纹趋于对称,

沙波纹的几何尺寸相应减小。地表温度对沙波纹的几何尺寸也有一定的影响:随着地表温度的升高,沙波纹的几何尺寸减小,移动速度增大。

风沙运动系统是一种具有复杂性诸多特征的、受到多物理场耦合作用的复杂动力系统,其中所包含的诸如多尺度、多场耦合、随机性、非线性、尺度效应和复杂系统等科学问题也是科学前沿所关注的共性和热点课题,需要多学科科学家的联合攻关以揭示机理,认识规律。风沙运动中力学基本问题的研究,无论是从结合国家目标需求开展研究工作的角度,还是从结合本学科发展需求开展学术性研究的角度,都值得引起力学工作者的高度关注。

参 考 文 献

- [1] Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air. *Acta Mech*, 1991, (Supp) 1: 21—25.
- [2] Zheng X J, Huang N, Zhou Y H. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on and saltation movement. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D10): 4322.
- [3] Zhou Y H, Guo X, Zheng X J. Experimental measurement of wind-sand flux and sand transport for naturally mixed sands. *Physical Review E*, 2002, 66: 021305.
- [4] Huang N, Zheng X J, Zhou Y H. The simulation of wind-blown sand movement and probability density function of lift-off velocities of sand particles. *Journal of Geophysical Research*, 2006, (in press).
- [5] Zheng X J, Xie L, Zou X Y. Theoretical prediction of lift-off angular velocity distributions of sand particles in wind-blown sand flux. *Journal of Geophysical Research*, 2006, D11109, doi:10.1029/2005JD006164.
- [6] Zheng X J, He L, Zhou Y H. Theoretical model of the electric field produced by charged particles in windblown sand flux. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D15208.
- [7] Yue G, Zheng X J. Electric field in wind-blown sand flux with thermal diffusion. *Journal of Geophysical Research*, 2006, (in press).
- [8] Zheng X J, He L, Wu J J. Vertical profiles of mass flux for windblown sand movement at steady state. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B01106.
- [9] Zhou Y H, He Q S, Zheng X J. Attenuation of electromagnetic wave propagation in sandstorms incorporating charged sand particles. *European Physical Journal E-soft Matter*, 2005, 17: 181—187.
- [10] Lorenz R D, et al. The sand seas of Titan: Cassini RADAR Observations of longitudinal Dunes. *Science*, 2006, 312: 724—727.
- [11] Zhou Y H, Li W Q, Zheng X J. PDM simulations of stochastic collisions of sandy grain-bed with mixed size in aeolian sand saltation. *Journal of Geophysical Research*, 2006, (in press).

(下转 292 页)

参 考 文 献

- [1] 张孟军. 美国科技创新政策——国外科技创新政策(一). 科技日报, 2005-11-28.
- [2] 何屹. 英国科技创新政策——国外科技创新政策(二). 科技日报, 2005-11-30.
- [3] 王心见. 加拿大的创新政策——国外科技创新政策(三). 科技日报, 2005-12-02.
- [4] 薛澜, 胡钰. 我国科技发展的国际比较及政策建议. 科技日报, 2003-5-14.
- [5] 高瑞平. 工程与材料科学部基金项目绩效管理与成果分析. 中国科学基金, 2004, 2: 114—117.

SUGGESTION ON THE STRATEGY AND POLICY OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL CREATIVITY

Chen Kexin

(*Department of Engineering and Materials Sciences, NSFC, Beijing 100085*)

Abstract Scientific and technological creativity is known as a core competitive ability for modern countries. This paper briefly introduced the strategy and policy of some developed countries and discussed the trends of modern science and technology. By comparing the competitive ability of China and the developed countries, the author gave some suggestions on the strategy and policy of scientific and technological creativity for China.

Key words scientific and technological creativity, strategy, suggestion

(上接 287 页)

INVESTIGATIONS ON SEVERAL MECHANICAL PROBLEMS IN WINDBLOWN SAND MOVEMENT

Zheng Xiaojing

(*Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000*)

Abstract It is very necessary for investigation on mechanism of windblown sand movement to understand and find out effective measures of preventing and reducing windblown sands endanger, which also deals with some general characters and hot spots in the scientific forelands, such as multi-scale problems, interactions among multi-physical-fields, randomness and nonlinearity as well as complex systems. In recent years, a series of experiments in wind tunnels and theoretical modeling as well as computer simulation have been taken in the research group of environmental mechanics on windblown sand movement in Lanzhou University with the point of mechanical and geography intersecting view. Some original and essential progresses have been achieved, which included that the main regularities of charges on sand particles and the electric field in windblown sand flux and the effect of the electric field on the flux and the microwave propagation are revealed, and the evolution process of windblown sand flux under the mutual couple interactions among several physical fields are predicted as well as the main features of Aeolian sand ripples are simulated.

Key words windblown sand flux, windblown sand electric field, sand transport rate, Aeolian sand ripples, probability distribution of lift-off velocity