

风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势

黄宁 郑晓静

(兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室,
兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000)

摘 要 土壤风蚀是土地沙漠化的主要标志, 沙粒受气流作用在地表和空中的运动是土壤风蚀、沙尘暴起动与发展的主要动因。对风沙运动的力学机理研究是沙漠科学和防沙治沙工程关注的主要课题之一。自 1941 年 Bagnold 的《风沙和荒漠沙丘物理学》专著发表以来, 风沙物理学在运动沙粒与地表互馈机制、风沙流结构、能量与沙粒粒度分布、风沙流对各种材料的打磨作用等方面取得了不少的进展。研究与实践表明: 只有在风沙运动的力学机理研究方面获得突破, 才可能从本质上弄清风与地表的互馈(地表风蚀和沙漠化过程)机制、沙尘物质搬运和分选沉积过程, 建立风沙防治工程设计原理。本文首先回顾了风沙运动力学机理研究历史, 然后阐述了我国在风沙运动力学机理研究方面所取得的最新进展, 最后提出了目前存在的问题和今后发展的趋势。

1 引言

沙漠化与沙尘暴是中国北方地区的主要环境灾害, 对我国北方地区的社会与经济可持续发展造成了极大的威胁, 引起了全社会各界和中国政府的高度重视。为了了解并有效控制风沙灾害, 对风沙运动过程及其影响因素的研究是十分必要的。沙粒受气流作用在地表和空中的运动是沙漠化过程的主要表现形式、也是沙尘暴起动与发展的主要动因。因此, 对风沙运动机理(通常被称为风沙物理学)的研究一直是沙漠科学和防沙治沙工程关注的主要课题之一。虽然从 19 世纪末人们就开始有目的认真考察研究风沙运动与沙漠化, 但首次把风沙和荒漠沙丘的研究从

定性描述改变为定量的动力过程研究,则出现在英国工程师和物理学家拜格诺(R. A. Bagnold)创造性地应用与他同时代的学者冯卡门(von Karman)、普朗特(L. Prandtl)等建立的现代流体力学理论,结合他多年在利比亚沙漠中的野外观测和一系列风洞试验后撰写并于1941出版的巨著《风沙和荒漠沙丘物理学》中。在该书中拜格诺将风沙运动分为跃移、蠕移与悬移三种相互关联的运动形式^[2]。其中跃移是指沙尘颗粒在近地层做跳跃式的运动,蠕移是指颗粒在地表的滚动和滑动,而悬移是指沙尘颗粒悬浮于空气中保持一段时间而不与地面接触的运动形式。当风力很强,沙尘颗粒被输送到几百甚至几千公里时沙尘颗粒的悬移运动即为沙尘暴。不同大小的众多沙粒在风力作用下发生的碰撞以及在地表的蠕移运动、在近地表的跃移运动和一定高度上方的悬移运动,构成一种典型的力学系统。对风沙流研究涉及地貌学、流体力学、边界层气象学等多种学科,多学科的联合攻关显然是发展趋势。过去国内风沙流研究多由地学工作者独立进行,直至上世纪90年代包括本文作者在内的个别力学人员才开始进入风沙物理学研究领域,并取得了一些成果^[3]。但力学工作者全面介入并与地学工作者联合进行风沙运动与沙漠化研究则开始于本文作者之一郑晓静教授2000年主持的国家重点基础研究发展规划项目(973项目)第二课题“风沙运动的力学机理与土壤风蚀的定量评价”。课题高质量超额完成了预定计划,在执行期间独立发表SCI论文35篇,特别是在地学国际著名学术期刊《J. Geophysical Researches》上发表的9篇文章,被国际风蚀研究权威学者《J. Geophysical Researches》主编、RS Anderson引用并被国外同行评价为“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。”“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。”该课题研究工作被验收专家肯定为“提升了我国风沙运动研究的国际影响力”。本文将首先简要介绍风沙运动机理研究主要发展阶段,然后着重介绍自2000年以来对风沙运动机理研究的最新进展,并针对

风沙运动力学机理研究中的现状，提出今后研究的发展趋势。

2 简要历史回顾

对风沙流的系统研究始于上世纪30年代。在30到50年代期间，英国工程师拜格诺(R. A. Bagnold)吸收同时代流体力学研究的最新成果，经过多次利比亚荒漠考察，和一系列风洞实验，最后出版了至今是风沙运动研究中最重要著作—《风沙物理及荒漠沙丘物理学》。几乎在同一时间，受当时美国大平原和加拿大西部频繁发生沙尘暴的影响，美国土壤学家切皮尔(W. S. Chapin)领导的研究小组对土壤风蚀做了系统研究并提出了风蚀预报方程，他的研究既增强了对风沙运动的理解，也为风沙应用研究树立了典范；前苏联学者的风沙流研究可以兹纳门斯基为代表，主要研究各种粗糙表面的风沙流蚀积规律；日本学者河村龙马等也对风沙运动进行了研究^[3]。我国由于风洞建成较晚(1963年正式投入使用)，风沙流研究工作多在野外。

风沙物理学研究发展的第二阶段是在上世纪60年代至80年代。由于航天领域对火星、金星等行星表面的地貌特征及其演化过程的兴趣，使得人们进行了大量的风洞实验和数值计算，以探讨不同大气环境下颗粒的起动和跃移过程及其与风成地貌的关系。各国学者竞相利用高速摄影技术，结合理论分析与计算对单一颗粒的运动特征进行了深入细致的研究，但却没有能够将这些微观研究成果应用于定量描述风沙流整体行为的论著出现。Owen^[4]、Ungar and Haff^[6]首先通过简单的单一形状轨道的假定，建立了风沙运动模型，揭示了边界层中沙粒运动的一些基本特性。如Owen求得沙粒的跃移高度正比于摩阻风速的平方，并以此来度量风沙边界层的厚度；Ungar and Haff通过数值模拟得出了风—沙粒相互耦合时风沙层里的风速廓线，以及与Bagnold)的实验结果定性相同的起沙后风速沿高度分布曲线中的Bagnold‘焦点’。这些基础研究成果，使人们认识到风沙边界层中沙粒对风速的反作用在风沙运动分析中是不能忽视的，亦即，在风沙流分析中必须采用风与沙粒的双向耦合模型。Owen、Ungar and Haff在模型中采用了沙粒运动的单一轨道的

假定（每个沙粒都沿铅直方向起跳，且起跳速度都相同），显然这一假定与实际不完全相符，从而得到的输沙率沿高度分布也和实际情况有较大的差别。为了既能克服这个缺点，同时又能考虑沙粒的群体特性与风沙的关系，人们开始将注意力集中到了起跳沙粒的初速度分布函数上。由此风沙运动研究进入了注重微观研究与宏观研究相结合的第三阶段，此阶段是1985年在丹麦Aarhus召开的第一届风沙物理学国际会议为标志的。此次会议对自拜格诺以来的风沙物理学研究进行了全面而系统的总结，在此基础上，开始将理论研究的注意力转向如何利用单颗沙粒的微观运动特性去解释和模拟风沙运动宏观现象与规律，此次会议被风沙物理学及风沙地貌学研究历史上被认为是自上世纪四十年代以来拜格诺以来最为重要的一次会议。对这一阶段研究有重要推动作用的是美国学者Anderson，他于1988年在著名期刊《Science》发表了题为“Simulation of Eolian Saltation”的论文^[6]，文中从单颗沙粒起跳开始，在空中吸收风能后撞击沙面，由击溅函数得到反弹沙粒和被溅起沙粒数及其速度，通过考虑沙粒对风场的反作用力，模拟了风沙跃移运动从起始阶段至风沙流达到自平衡状态的整个过程，他们的这些结果与实验结果能够在定性上相吻合，但在定量上相差较大。第二届风沙物理学国际会议主题为“风沙过程与风蚀环境”，于1990年在丹麦Sandbjerg召开，以纪念风沙物理学的奠基人Bagnold (1896-1990)和另一位风沙物理学大师Owen (1920-1990)。1991年，国际著名力学期刊为此次会议《Acta Mechanica》出版了题为“风沙迁移”的专辑，其中首篇即为Anderson的综述性文章“风沙运动研究的进展”，他在该文中详细介绍了风沙运动研究的进展与存在的问题，并指出“风沙运动研究中已有的定量化理论模型还远未达到能够对输沙率进行可靠预测的程度”^[7]。其后直到2002年在美国Lubeck召开的第五届风沙物理学国际会议，在风沙运动的基础理论，包括风沙运动数值模型和理论预测以及沙丘地貌的动力学过程等方面，没有出现突破性进展，尚停留于上世纪80~90年代的研究水平^[8]。

3 若干新的进展

兰州大学风沙环境力学研究小组自本世纪初开始国家重点基础研究发展规划项目(973项目)第二课题“风沙运动的力学机理与土壤风蚀的定量评价”研究以来,围绕国家目标与需求,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。本节将主要介绍本研究小组在近五年来取得的进展情况。

3.1 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并提出了很多沙粒带电机制的假说,但没有验证哪种假说占主导地位;同时人们对于风沙流中产生强烈风沙电场的原因进行了推测,但这种推测不能够对实验观测结果给出合理的解释。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微米时,沙粒带负电荷;而当粒径大于500微米时,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”的电场大得多,在20米/秒的风速情形,前者的最大值要比后者高出20倍以上^[9]。这些实验结果验证了Lathem关于沙粒带电是由不同粒径沙粒发生摩擦而产生的沙粒带电假说,同时给出了风沙电场主要是由空中带电沙粒产生的观点,由此圆满地解释了Schmidt关于风沙电场形成假说与实验观测结果产生矛盾的原因。

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，有效地提高了实验值的精度。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 $u^* > 0.47 \text{ m/s}$ 和 $u^* < 0.35 \text{ m/s}$ 时与实验测量值有较好吻合；而在 $0.35 \sim 0.47 \text{ m/s}$ 之间时，它们与实验值均有较大差异^[10]。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，并积累了大量好的数据。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。”

3.2 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，我们提出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^[11]。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^[12]。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 $-1200 \sim 1100 \text{ rev/s}$ （转/秒）（逆时针为正）之间，其中小于 500 rev/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^[13]；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^[14]。这些定量预测结果与 Anderson 等人的理论预测结果相比，不仅在定性上与相关实验结果良好吻合，而且在定量上与实验结果也很吻合；同时，这些研究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^[15]：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外均有报道。Haddad 等人采用 9.4GHz 的电磁波在能见度为 10m 的强沙尘暴中测得的散射衰减系数为 34 分贝/千米，远远高出采用传统散射理论给出的 1 分贝/千米的理论值。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^[16]。研究发现：沙粒所带的电荷仅分布在沙粒表面的局部区域（见图7）。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。由此可以推论：不同粒径的沙粒间的碰撞和磨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。

3.3 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它星球的地貌^[17]。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，但因为有些模拟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。有些方法对沙纹的模拟仅限于单一粒径床面上沙纹形成的初始阶段，实际上颗粒的溅移过程不仅仅依赖于碰撞颗粒的速度和角度，床面颗粒的级配分布起着重要的作用，颗粒大小在碰撞过程中的重新分布以及床面沙纹形态都直接影响着溅移过程，而完整的颗粒流强度和风速轮廓线的形态必须计算每一级大小颗粒的飞行的全过程；同时过去较少考虑空气动力直接驱使床面颗粒运动的情况，往往忽略空气动力对沙纹波高的影响；也很少考虑跃移颗粒受风力作用时对风速场的反馈影响。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^[18]。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0.4mm的沙床在摩阻风速为0.5m/s时沙波纹形成过程的模拟得到：沙波纹迎风坡长为12.52cm，沙波纹高度为0.7cm；而当沙床的沙粒由粒径为0.4mm、0.3mm的混合沙时，沙波纹迎风坡长为12cm，沙波纹高度为0.5cm。这与我们测量得到的自然界实际沙波纹波长为7-14cm，波高为0.5-1.0cm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且与风速成线形关系，即，随着摩阻风速增大，移动速度增大。但是，沙波纹的形成存在两个临界摩阻风速。只有当风速在这两个临界摩阻风速值（当沙粒粒径为0.4mm时的这两个临界值分别为 $u_* = 0.4$ m/s和 $u_* = 0.7$ 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^[19]。

4 研究趋势

国外近几年风沙运动的研究有增热趋势，这与全球荒漠化问题日益突出的大环境有密切的关系。在研究手段方面，风洞实验、数值模拟和野外实测齐头并进。研究内容将会集中在以下几点：

(1) 风沙运动基本物理过程的进一步研究，重点包括颗粒群的三维碰撞机制，颗粒群运动与气流的相互作用。

(2) 目前用于描述风沙运动的理论模型只能运用于模拟风洞中给定控制条件的理想情况下的风沙流，尚缺乏更为接近野外客观实际情况的、能够描述复杂环境下风沙跃移运动的随机模型。为了实现对风沙运动尽可能客观和接近实际情况的描述和预测，需要对其中的基本问题，如：湿度、植被盖度、表面粗糙度、起伏不平的地形、野外自然条件下风沙流中沙粒带电和风沙电场的规律等客观实际因素对风沙运动的影

响进行研究;

(3) 气流湍流性质对风沙流的影响。近地面风均为发达湍流, 湍流的某些特征, 如隙向性局部速度突然增大(猝发过程)对风沙传输会有一定影响。这也许与沙粒的蚀积规律有很大关系, 事实上很多国外学者认为风洞中的风沙运动与野外是完全不同的, 因为风洞中不能完全再现野外环境的风场与复杂地形条件。因此, 国外对近地层风沙跃移运动的研究开始转向探求野外自然环境下其运动特点方面, 这可以从近期在非洲与西亚、欧洲, 以及美国召开的土壤风蚀和风沙物理学会议上反映出来。

(4) 各种环境条件下风沙运动的时空变化, 包括沙丘地、农田、草场、海滨地区等。

(5) 加强野外实测工作, 获取各种风成地表的风沙运动参数特征, 建立风沙运动与蚀积地貌间关系。这一研究在国内有很大地域优势, 是风沙运动研究可望取得突破进展的重要方向。

(6) 将风沙运动力学机理研究与沙漠化、土壤风蚀、防沙工程研究相结合, 建立各种环境条件下的起沙风、输沙率以及蚀积模式数据, 并由此提出对防沙工程和结构设计的科学依据和评判方法, 以适应实际需要。

(7) 加强多学科交叉研究。风沙流研究涉及地貌学、流体力学、边界层气象学、土壤学等多种学科。多学科的联合攻关显然是发展趋势。

(8) 引进和研制各种观测和实验仪器。国外虽然有精密先进的科研仪器, 但专门测试风沙环境的并不多, 测试精度也不是很高。因此引进仪器的同时, 还必须注重仪器自行研制、改装。

5 结束语

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, 需要多学科科学者的联合攻关以揭示机理, 认识规律。对风沙运

动中的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, 还是从结合学科发展需求开展学术性研究的角度, 都值得引起科学工作者的高度关注。

参考文献

- [1] 王涛, 陈广庭, 钱正安, 杨根生, 屈建军, 李栋梁. 中国北方沙尘暴及对策. 中国沙漠, 2001, 21 (4): 322~327.
- [2] Bagnold, R. A. (1941). The physics of blown sand and desert dune. Methuen, London.
- [3] 李振山, 倪晋仁. 风沙流研究的历史、现状及其趋势干旱区资源与环境. 1998, 12 (3): 89~97
- [4] Owen, P. R. (1964). Saltation of uniform grains in air. J. Fluid Mech., 20: 225-242.
- [5] Ungar, J, and Haff, P. K. (1987). Steady state saltation in air. Sedimentology, 34: 289-299.
- [6] Anderson, R. S. and Haff, P. K. (1988). Simulation of eolian saltation. Science. 241: 820-823.
- [7] Anderson, R S., Sorensen, M, and Willetts, B. B. (1991). A review of recent progress in our understanding of Aeolian sediment transport. Acta Mech., suppl., 1: 1-19.
- [8] 严平, 董治宝. 从2005年第五届风沙国际会议看沙漠科学研究的发展趋势. 干旱区地理, 2004, 27 (3): 451~454.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Huang N., X. J. Zheng, Y. H. Zhou, and R. S. Van Pelt. 2006. The

simulation of wind-blown sand movement and probability density function of liftoff velocities of sand particles, *Journal of Geophysical Research*, 111, D20201, doi:10.1029/2005JD006559.

[12] Zheng X J, Xie L, Zou X Y. Theoretical prediction of liftoff angular velocity distributions of sand particles in wind-blown sand flux. *Journal of Geophysical Research*, 2006, D11109, doi:10.1029/2005JD006164

[13] Xiaojing Zheng, Ning Huang, YouHe Zhou .2006. The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud, *The European Physical Journal E*, vol. 19: 129–138.

[14] Yue G, Zheng X J. Electric field in wind-blown sand flux with thermal diffusion. *Journal of Geophysical Research*, 111, doi:10.1029/2005JD006972.

[15] 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, Vol. 109, B01106.

[16] 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

[17] Lorenz R D, et al. The sand seas of Titan: Cassini RADAR Observations of longitudinal Dunes. 2006, *SCIENCE*, 312:724–727

[18] 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, 111, D15108, doi: 10.1029/2005JD006604

[19] Bo Tianli, Li Xie, and Xiaojing Zheng. Numerical approach to wind ripple in desert. *International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation*, 2006, 7(4)