

风沙流微观和宏观研究的进展、问题与展望¹

杜鹤强, 韩致文

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: 风沙流研究是风沙物理学的核心内容, 也是风沙地貌学、沙漠化与防沙工程的重要理论基础, 在风沙学科中占有重要地位。风沙流研究的方法分为微观和宏观研究两个方面, 微观上主要是对单一颗粒的运动状态进行研究, 利用单个颗粒的运动特征去解释风沙流的整体特性; 宏观研究偏重于风沙流整体结构和动力学过程, 主要包括风沙流结构特征和风沙流输沙能力。文章对风沙流微观和宏观研究成果, 回顾了风沙流研究历史, 评述其研究现状, 指出现存的问题, 并对风沙流研究的发展趋势提出展望, 以期对相关研究者掌握风沙流研究动态与方向、完善风沙流理论体系有所裨益。

关键词: 风沙流; 研究现状; 问题; 展望

Processes, Problems and Prospect in Aeolian Saltating Cloud Study

Heqiang Du, Zhiwen Han

Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

dilikexue119@163.com

Abstract: Aeolian saltating cloud is the kernel of the aeolian physics research, it is also an important theoretical basis of geomorphology of wind-drift sand, desertification and controlled engineering study of sand calamity. Aeolian saltating cloud study occupied an important position in wind-sand science research. The study method for aeolian saltating cloud has two ways: the microcosmic research and the macroscopic research. The microcosmic research mainly studies the kinestate of single sand particle, by using the motion characters of single sand particle to interpret the whole properties of the aeolian saltating cloud. The macroscopic research emphasizes the whole structure and the dynamic process of aeolian saltating cloud. It includes the structure of aeolian saltating cloud and its sand flux. This paper reviews the study history of aeolian saltating cloud, reviews the study status-quo, puts forward the problems in these researches, and looks into the future research trends. The authors hope this paper will give some benefits to the researchers who study the wind-sand science for grasping the trend of aeolian saltating cloud, and improve the system of wind-sand science.

Key words: Aeolian saltating cloud; Situation of study; Problems; Prospect

引言

风沙流是指含有沙粒的运动气流, 是一种沙粒的群体运动^[1]。风沙流研究是风沙物理学的核心内容, 也是风沙地貌、沙漠化和防沙工程的理论基础, 在整个风沙学科中占有重要的地位^[2]。兹那门斯基 1958 年在沙地风蚀过程研究中, 首次提出了风沙流 (wind-sand flow) 这一术语, 阐明了风沙两种物质相互作用的物理机制^[3]。自 20 世纪 30~40 年代 Bagnold^[4] 对北非沙漠风沙流通量进行观测和实验以来的 70 余年中, 国内外学者对风沙流进行了大量的野外观测和室内模拟, 取得了大量研究成果, 但距离建立完整的风沙流理论体系还有很长的距离。鉴于此, 本文在综述国内外风沙流微观和宏观研究成果的基础上, 分析了风沙流研究领域现存的问题, 展望风沙流研究的发展趋势, 以期对相关研究者掌握风沙流研究动态和完善风沙流理论体系有所裨益。

¹基金项目: 国家重点基础研究计划 (973 计划): “黄河上游沙漠宽谷段风沙水沙过程与调控机理” (2011CB403306)。



1 风沙流研究的历史

对于风沙流的系统研究始于上个世纪 30 年代。在 20 世纪 30 年代到 50 年代之间,英国工程师Bagnold经过多次利比亚考察^[5~7]和一系列风洞实验,在流体力学基础上发展了一套风沙物理学理论,并出版了第一部风沙物理学著作《风沙物理与荒漠沙丘物理学》,对风沙流的物理机制进行了充分研究,至今仍被视为风沙流研究的经典著作。在美国农业部的倡导下,美国土壤学家Chapin等人对农田进行了长期的野外观测,并利用各种不同大小和类型的风洞对风沙运动与土壤风蚀过程进行实验研究,建立了风蚀方程,增强了对风沙流的理解,丰富了风沙流理论^[8~11]。以兹纳门斯基^[3,12]和彼得洛夫^[13~16]为代表的前苏联学者,主要研究了各种粗糙表面的风沙流蚀积规律以及风沙防护措施,日本学者河村龙马^[17]、田中贞雄^[18]和池田茂^[19]等人也对风沙运动进行了研究,并得到了一系列重要成果。中国于 1967 年在原中国科学院兰州沙漠研究所建成国内第一个风沙环境风洞实验室,并全面开展了野外风沙运动和防沙工程的实验研究。

20 世纪 60-70 年代,各国学者主要采用风洞实验和高速摄影技术,结合沙粒起动假说对单一颗粒的运动特征进行了深入细致研究^[20~25],但却没有较为系统的风沙流著作出现。20 世纪 60 年代末期以来,以Owen^[26]为代表的一些学者开始致力于建立风沙运动的数学模型。

自 1985 年奥尔胡斯风沙物理国家会议之后,风沙物理学的研究重心从针对单个颗粒运动的微观研究逐渐转向对风沙流的整体特性进行研究,即从风沙流的微观理论来解释其宏观现象。特别需要提出的是,60 年代航空航天技术的进步促进了行星探测事业的发展,由解释行星地貌形成过程带动了风沙运动科学的研究热潮一直延续到 20 世纪 80 年代。在此期间由于计算机科学的飞速发展,一些年轻的学者尝试采用数值模拟的方法对风沙流中沙粒的运动进行研究,得到了重要的结论,丰富了风沙流的研究方法^[27]。

从 20 世纪 90 年代开始,对风沙流的研究开始由单纯的理论研究转向理论与实际应用相结合,即开始考虑了湿度、植被、坡度、粗糙度、粒径、大气层结稳定度等对风沙流的影响。在此期间我国学者刘贤万出版了《实验风沙物理与风沙工程学》^[28],标志着我国的风沙物理学走向成熟。

进入了 21 世纪,随着各个学科的大融合,对风沙流的研究逐渐和地表热扩散、风沙电场、计算机科学、流体力学以及边界层理论相互交融,即微观研究和宏观研究的相结合为特点。其观测手段也有了较大的发展,粒子图像测速系统(PIV)、激光粒子动态分析仪(PDA)、多路压力扫描阀和热线风速仪等观测仪器也广泛应用于风沙流实验研究中。至此,对风沙流的研究更加深入、细致。

2 研究现状

风沙流的形成依赖于空气与沙质地表两种不同密度的物理介质的相互作用。风吹经疏松的沙质地表时,由于风力作用使沙粒脱离地表进入气流中而被搬运,导致沙地风蚀,产生风沙运动,出现风沙流^[28]。对风沙流的研究大致可以分为微观研究和宏观研究。微观研究主要侧重于单一颗粒的运动状态,主要包括沙粒的受力起动、沙粒的起动风速、沙粒在气流中的运动特征等。宏观研究偏重与风沙流的整体结构和动力学过程,主要包括风沙流的结构特征和风沙流的输沙能力。

2.1 风沙流的微观研究现状

风沙流的微观研究主要是对单一颗粒的运动状态进行研究,利用单个颗粒的运动特征去解释风沙流的整体特性^[29]。

2.1.1 沙粒的受力起动

在研究风搬运沙粒的运动时,有关沙粒脱离地表的物理机制研究占有相当重要的地位^[1]。尽管人们很早就开始探讨沙粒脱离地面开始运动的瞬间受力机制,但由于这一问题的难度,至今仍没有统一的看法。概括起来大致形成了沙粒起动的压差起动说、风差起动说、冲击起动说、猝发起动说、斜面飞升和湍动起动说等假说^[30]。我国学者刘



贤万综合各种风沙起动学说, 将其大致分为两类。一类是以接触力为主的起动学说, 主要包括冲击起动学说、振动起动学说和斜面飞升学说; 另一类是以非接触力为主的学说: 风压起动学说、升力起动学说、压差起动学说、湍流起动学说猝发起动学说等^[31]。

近年来, 对沙粒受力的起动不断完善, 由单纯的考虑接触力和非接触力转向, 开始综合考虑风沙相互摩擦所产生的静电对沙粒起动的影响^[32-37]。Zheng等认为静电力对沙粒的起动和运动有着重要的作用, 各学者均认为电场强度随沙粒高度的增加而迅速衰减, 但是对近地面电场强度的大小却存在很大的争议^[36, 38]。Zheng等通过实验认为场强为 100 kVm^{-1} , Schmidt等的得到的结果则为 166 kVm^{-1} ^[36, 38]。所以, 虽然在沙粒起动过程中, 电场力确实存在, 但是在考虑其对沙粒起动产生的作用时还应通过反复验证。

在过去的几十年中, 学者们各抒己见, 相互补充, 相互反驳。但是应当认识到, 风沙起动的影响因素是复杂的, 其起动过程同时受多种力的作用, 只是这些力所起的作用各不相同^[39]。

2.1.2 沙粒的起动风速

沙粒从气流中获得能量而运动, 所以沙粒只能在一定风速条件下才能起动。当风力逐渐增大到某一临界值, 地表沙粒开始脱离静止状态而进入运动, 这个使沙粒开始运动的临界风速称之为起动风速。一切超过起动风速, 能使沙粒进入运动状态的风, 谓之起沙风^[40]。

目前, 对于起沙风的研究, 从平坦裸地表上单一粒径条件下的起沙风, 开始充分考虑土壤湿度、植被盖度、积雪和沙粒粒径等因素的影响。

由于土壤湿度会增加表面沙粒对起动和风蚀的抑制力, 土壤的风干效应也对导致沙粒起动风速的变化, 所以土壤湿度对起沙风的影响一直作为风沙物理学研究热点^[41-46]。尽管土壤湿度研究手段如模式计算、遥感反演、实地观测和数值模拟等已相对成熟, 但是土壤湿度对风沙起动的影响, 尤其是对起沙风的影响还只限于风洞实验和实地观测两种手段。

植被对起沙风的影响的研究大体可以分为两种。一种是从宏观尺度上研究植被盖度对起沙风的影响, 其主要手段是通过遥感数据获取大尺度上的植被盖度, 之后通过风洞实验研究在该植被盖度下的起沙风速。Kimura和Shinoda用遥感数据和风洞实验相结合的办法得到了整个东北亚地区的起沙风速^[47]。Kurosaki等用遥感数据、气象数据和风洞实验相结合的办法, 综合考虑积雪和植被盖度对起沙风的影响, 得到了蒙古戈壁地区不同季节下的起沙风速^[48-50]。另外一种是从微观尺度上讨论植被分布特征对起沙风的作用。Okin把地表植被作为不可蚀粗糙元, 提出了一个非平衡模型来计算植被间隙分布特征对起动剪切风速的影响^[51]。Brown等将地表植物简化为圆柱状粗糙元, 通过风洞实验研究了植被的空间排列形式对地表起沙风的影响^[52]。

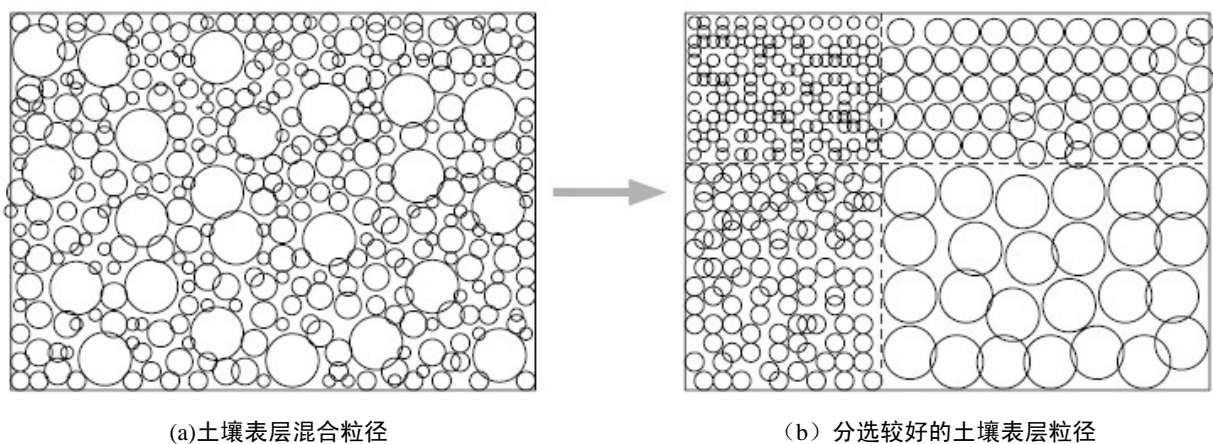


图 1 土壤表层粒径独立起动描述图

很早之前就有学者针对不同沙粒粒径对起沙风的影响展开了研究,但这些实验主要是针对单一粒径对起沙风的影响进行的,对混合粒径条件下起沙风的研究还很少。

慕青松、苗天德等突破了传统的均匀沙起动理论仅局限于研究满布沙子的沙床上颗粒的起动风速的界限,把均匀沙起动风速的研究扩展到研究沙粒以任意密度分布在一个光滑平面上时所对应的起动风速的领域^[53]。Shao提出独立起动的概念,把混合粒径分为几个粒径组,综合考虑混合粒径下,沙粒的起动风速(图 1)^[54]。尽管一些学者试图用理论模型来模拟计算沙粒的起动风速,但是就目前而言,依然没有令人满意的起动风速模型出现。所以,一般通过原装土的风洞实验来确定某一地区的起动风速。

2.1.3 沙粒在气流中的运动特征

当风速达到起动风速,地表沙粒开始移动,就产生了风沙流。沙粒在气流中的运动形式主要有三种:跃移、悬移和蠕移,但是沙粒的表层蠕移和跃移的差别是渐变的,它们之间很难划分出明显的分界线。

由于风沙流中的沙粒运动形式以跃移为主,所以这里将对沙粒跃移的研究现状进行讨论。目前,对风沙流中沙粒跃移运动的研究,主要侧重于跃移层内沙粒的速度分布、跃移轨迹、能量分布、起跳角和降落角的分布范围、起跳角和冲击角对跃移沙粒速度的影响^[55~61]。董治宝^[59]等通过风洞实验对跃移沙粒的起跳角和下落角进行了研究,发现起跳角在 $39^{\circ}\sim 94^{\circ}$ 之间,下落角在 $40^{\circ}\sim 78^{\circ}$ 之间,均大于前人研究所得到的起跳角和下落角分布范围。

以往对风沙流跃移沙粒进行模拟和研究时,往往忽略风沙流中跃移沙粒之间的相互碰撞。其主要原因是跃移层内沙粒的碰撞情况复杂,而且通过现有的观测手段难以获得详细的观测资料,不易于模拟和观测。Dong等根据风沙流中颗粒碰撞的几率对内跃移层中颗粒的碰撞进行模拟和计算,得到随着风速和输沙率的增大,沙粒的碰撞几率随之增大的结论^[62]。但是由于缺乏有效的观测手段,对于气流中沙粒碰撞的一系列反馈机制依然无法探明。

沙粒跃移的轨迹受风速、粒径等因素的影响,另外还受颗粒形状的影响。迄今为止,对单一颗粒跃移运动特征虽然已基本掌握,但是由于颗粒与床面碰撞过程有一定的随机性,颗粒各运动参数的分布范围较宽,规律性尚不明瞭,更没有得到满意的运动轨迹方程。

2.2 风沙流的宏观研究现状

宏观研究偏重与风沙流的整体结构和动力学过程,主要包括风沙流的结构特征和风沙流输沙能力。风沙流宏观研究可以为合理制定保护工矿、交通设施和居民点等不受沙埋方案提供理论依据,具有重要的实际意义。其主要研究方法是实地观测、风洞实验模拟和数理统计等方法相结合,进而得到风沙流结构特征模型和输沙率模型。

2.2.1 风沙流的结构特征

风沙流结构系指气流中所运移的沙粒在搬运层内随垂直高度的分布特征,它受下垫面性质的强烈影响^[56]。风沙流结构特征决定了沙质地表的吹蚀和堆积过程。

近年来,很多学者对沙漠、农田、戈壁等不同下垫面的风沙流结构进行了实地观测和室内风洞实验,发现风沙流中的含沙量随高度的增加大致呈指数规律递减^[63~66]。但是也有许多学者对此提出了异议,张克存等人对戈壁风沙流进行了实地观测和实验研究,发现戈壁风沙流结构并不是简单的服从指数形式,其含沙量的最大值不是出现在近地表,而是在距地面一定高度处,出现所谓的“象鼻效应”^[67,68]。哈斯在腾格里东南缘观测到,沙丘背风坡风沙流结构,以 8~12 cm 为界,含沙量下部呈指数函数形式递减,上部按幂函数规律递减^[69]。冯大军等通过对风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布的观测,得到非均匀风沙流中,粗粒径组沙粒输沙量垂向分布上部符合指数递减但近床面却偏离指数分布^[70]。董治宝等通过风洞实验发现,输沙量随高度的平方根呈指数形式衰减,而非传统学者所认为的输沙量随高度成指数形式递减^[71]。

风沙流中输沙量随高度的变化是以不同初速度起跃颗粒运动的宏观反映,与颗粒起跃初速度的分布概率之间应存在密切的关系^[72]。在没有颗粒浓度实测结果的时候,可以根据沙粒起跃速度的分布特征来估算风沙流的结构特征。

所以近年来很多学者都致力于沙粒跃移速度分布和风沙流中颗粒浓度变化的关系研究^[73~77]。

大量的研究表明, 在不受地形、植被、积雪等条件扰动下, 细沙地上所发育的风沙流内输沙量沿高度大致呈指数形式衰减; 在受到外界条件扰动下, 输沙量沿高度的分布函数会发生变异, 偏离指数形式。

风沙流的结构特征与风速和下垫面性质都有着密切的关系, 由于近年来观测手段的发展, 对近地层风沙流速度和浓度的测量误差不大, 但是贴底层风沙流的浓度会随风速的增大而减小, 很多学者对这一现象提出了不同的解释。由于近地表风速和沙粒的运动情况都不易观测, 所以对这一问题一直没有理想的解决办法。这将是今后风沙流研究中的重点与难点。

2.2.2 风沙流的输沙率

气流在单位时间内通过单位宽度(或单位面积)所搬运的沙量, 叫做风沙流的单宽输沙率(简称输沙率)。目前, 针对不同沙质和不同的研究方法提出的输沙率公式多达几十种, 其预测结果也有很大差异。李振山曾将输沙率模型概括为三大类: 理论分析模型、数值模拟模型和统计分析模型^[2]。在传统理论分析模型中, 以Bagnold^[4]、Owen^[26]、Lettau.K和Lettau.H^[78]以及Sørensen^[79]等人所建立的输沙率模型应用较为广泛。

近年来, 对影响输沙率的植被盖度、下垫面的坡度、地表湿润程度、大气稳定度等各种因素的考虑日渐全面。

李振山等从植被生长与风沙活动之间的相互作用机理出发, 建立了植被-风沙动力耦合模型, 并将其应用到我国北方半干旱地区^[80~82]。吕萍对不同大气稳定度条件下的输沙率进行了数值模拟, 建立了不同大气稳定度下的输沙率模型^[83]。沙丘坡脚处, 由于沙源不足, 往往发生不饱和风沙流, 而传统的理论分析模型对此无能为力。Sauermann等人开发出一个连续跃移模型, 并将其应用到新月形沙丘中轴线处的输沙率预测上, 取得了良好的效果^[84,85]。

随着空间技术的发展, 利用遥感技术对大范围地区的输沙率进行长时间序列的监测已经成为现实。Ahmedou等对Marritania新月形沙丘的迁移和输沙率进行了整年的观测, 发现沙丘顶部的输沙率比沙丘见粗沙地的输沙率高 3 倍左右, 且丘间地输沙率基本服从Sørensen定律^[86]。Vermeesch和Drake在Chad利用ASTER影像数据定量研究了新月形沙丘的输沙率和沙丘迁移速度的关系^[87]。

风力大小, 沙子粒径、形状以及密度, 地表性质和湿润程度, 植被盖度, 以及大气稳定程度等都对输沙率有着不容忽视的影响。理论分析模型和数值模拟模型很难将这些因素考虑全面, 所以计算结果和实测结果有着很大差距。统计分析模型是一种半经验性质的模型, 只是对特定地域的输沙率有着相对精确的预测, 应用不够广泛。因此, 有学者建议在实际应用中对输沙率进行实地观测^[88]。

3 风沙流研究中现存的问题

经过几十年的努力, 对于风沙流的研究在理论和实际应用中都取得了大量成果, 对防沙治沙工作提供了理论指导。但是, 在风沙流研究中还存在很多不足和亟待解决的问题。主要有:

(1) 风沙流的研究中, 微观与宏观研究结合不够。由于对风沙流微观研究方面特别是在联系微观与宏观研究的纽带——起跳沙粒运动状态方面的研究还很薄弱, 造成微观研究与宏观研究的严重脱节。

(2) 缺乏描述风沙流独特性质的数理概念。对风沙流的性质只是简单的直接借用气固两相流体概念, 对于描述风沙流碰撞过程、颗粒间摩擦、大气热力性质、风沙电场等各种独特因素没有给予充分的考虑。

(3) 对沙粒间的碰撞过程研究不够。对沙粒的碰撞, 主要从碰撞几率上进行研究, 缺乏对沙粒碰撞后其运动状态的细微研究。

(4) 风沙运动的三种形式中, 蠕移状态的输沙率研究还很薄弱, 由于测量技术上的困难, 对于蠕移输沙率只能进行粗略的估算和理论推算。

(5) 缺乏完备的测试数据。风沙流的观测多限于几个物理量, 如风速, 颗粒粒径, 起沙风, 输沙率等, 对于植被盖度, 微地貌, 气流稳定程度则很少考虑, 所以难以建立多种参数之间的关系。



(6) 观测技术手段落后。现有的先进技术手段（PIV、PDA、多路压力扫描阀和热线风速仪等）虽然已经应用到风洞实验室，但野外观测依然采用一些旧的观测仪器，造成的误差成为制约风沙流研究发展的瓶颈。

4 研究展望

经过 70 余年的艰难探索，国内外对风沙流的研究已经日渐成熟。本学科在今后的发展过程中，将有以下几个趋势：

- (1) 今后的研究中，将致力与微观研究与宏观研究的结合，使风沙物理学更好的为防沙治沙工程提供理论基础。
- (2) 湍流对风沙流的影响。近地面气流均为湍流，湍流的某些特性如猝发过程，对风沙运动有一定的影响。湍流理论的不成熟性也在一定程度上对风沙流研究有着限制作用。所以今后的风沙流研究中，湍流性质对风沙运动的影响将是一个研究热点。
- (3) 对风沙流基本物理过程的进一步研究，尤其是颗粒群的碰撞机制和风沙电场对风沙运动的影响。
- (4) 对风沙运动模型的进一步开发，建立更为准确的风沙运动模型将是今后风沙流研究中的一个重要趋势。
- (5) 随着计算机技术的飞速发展，风沙流的研究中数值模拟研究将会得到进一步发展。
- (6) 加强多学科交叉研究。风沙流研究涉及地貌学，流体力学，边界层物理学，土壤学，计算机科学等多种学科。多学科交叉研究无疑能够更快的促进风沙流研究的发展，也是一个新的发展趋势。
- (7) 注重科研仪器的开发和研制，野外风沙运动的专门测试仪器目前比较落后，测试精度不够，所以加强风沙仪器的研发迫在眉睫。

参考文献

- [1] Wu Zheng. Geomorphology of Wind-drift Sands and their Controlled Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] Zhenshan Li, Jinren Ni. Aeolian sand transport processes [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment. 1998, 12 (3): 89 -97.
- [3] Zinamenski. A. H. The Research of Aeolian Process and The Problems of Controlled Dune [M]. Beijing: Science Press. 2003.
- [4] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen & Co, 1941. 265.
- [5] Bagnold R A. Journeys in the Libyan Desert, 1929 and 1930[J]. Geographical Journal, 1931, 78: 13- 39, 524- 533.
- [6] Bagnold R A. A further journey in the Libyan Desert[J]. Geographical Journal, 1933, 82: 103- 139, 211- 235.
- [7] Bagnold R A. Libyan sands[M]. London: Hodder and Stoughton, 1935: 102-120.
- [8] Chepil W.S. Dynamics of wind Erosion – 3[J]. The Transport capacity of the wind. Soil Science, 1945, 60: 475-480.
- [9] Chepil W.S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil erosion by wind: II. water – stable structure[J]. Soil Science, 1953, 76: 389-399.
- [10] Chepil W.S. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. Proceedings of Soil Science Society of America, 1956, 20, 288-292.
- [11] Chepil W.S. Climatic factors for estimating wind erodibility of field[J]. Journal and Water Conservation, 1962, 17 (4): 162-165.
- [12] Zinamenski. A. H. The mechanism of barchan longitudinal dune [M]. Beijing: Science Press, 1962.
- [13] Petelovsk. M. The drift sand fixing [M]. Beijing: China Forestry Press, 1962.
- [14] Petelovsk. M. The desert origin and its research method [M] // The topography and mechanism of barchan dune in desert. Beijing: Science Press, 1962.
- [15] Petelovsk. M. The sand mineral component and its mechanism in Erdos, eastern Alxa and the stream valley of middle Yellow River [J]. Acta of Geographica Science. 1959, 25 (1): 1-20.
- [16] Petelovsk. M. The method principle of artificial sand-protection barriers and its using in control sand [J]. The Research of Word Desert, 1980, (4): 36-40.
- [17] Ryuichi Kawamura. The research of saltating sand [R]. The research report in science and engineering institute, 1951, 5: 95-112.



- [18] Tanaka Yuuma. Wind erosion and the sand saltating [J]. Agricultural and Meteorology, 1960, 16 (2). 35-41.
- [19] Ikeda. The wind velocity and sand flux in dunes [J]. 1962, 8 (2): 12-18.
- [20] Bisal F, J. Hsieh. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. Soil Science, 1966, 102: 143-146.
- [21] Azizov A. Influence of soil moisture on the resistance of soil to wind erosion[J]. Soviet Soil Science, 1977, 9: 105-108.
- [22] Kadib A.A. A function for sand movement by wind[J]. ASTTA, 1965, 91.
- [23] Wood C.D, Espenschade P.W. Mechanism of dust erosion[J]. Society of Automotive Engineers, 1965, 73: 515-523.
- [24] Woodruff N.P, Siddoway F.H. A wind erosion equation[J]. Proceeding of the Soil Society of America, 1965, 29: 602-608.
- [25] Daliang He, Youguang Gao. The research of high-speed photography to sand saltating [J]. Journal of Desert Research. 1988, 1: 18-29.
- [26] Owen P.R. Saltation of uniform grains in air[J]. J. Fluid Mech., 1964, 20: 225-242.
- [27] Anderson R.S. Erosion profiles due to particles entrained by wind: application of aeolian sediment-transport model[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 97: 1270-1278.
- [28] Liu Xianwan. Experimental Wind-sand Flow Physics and Sand Drift Control Engineering [M]. Beijing: Science Press, 1995, 4-12.
- [29] Chen Guangting. The Controlling of Sand Drift [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2004: 36,37,43.
- [30] Bao Yang, Xueyong Zou, Guangrong Dong. Advances and Problem s of Study on Saltation Particles in Wind-Sand Current [J]. Journal of Desert Research. 1999, 19 (2): 173-178.
- [31] Xianwan Liu. The Mathematical—Physical Analysis on Particle Movements [J]. Journal of Desert Research. 1993, 13 (2): 1-8.
- [32] Ning Huang, Xiaojing Zheng. Magnus Effect in Wind-blown Sand Saltation [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Science Edition), 2001, 37 (3): 9-25.
- [33] Guodong Ding. Status and Prospect of Study on Two Focuses in Aeolian Physics [J]. Journal of Desert Research. 2008,28 (3): 395-398.
- [34] Jianjun Wu, Guanghu Yan. The force analysis to sand saltating in three field of wind, sand and electric [J]. Science in China(Series G:Physics,Mechanics & Astronomy), 2008, 38 (8): 973-983.
- [35] Zheng X J, Huang N, Zhou Y H. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect of sand saltation movement[J]. Journal of Geophysical Research D, 2003, 108(10): 4322.
- [36] Zheng X J, He L H, Zhou Y H. Theoretical model of the electric field produced by charged particles in wind-blown sand flux[J]. Journal of Geophysical Research D, 2004, 109: 15208.
- [37] Ta W Q, Dong Z B. Simulation on sand grain/bed collision mechanism: Cascade collision and ejection(1)[J]. Geomorphology, 2007,89: 348-357.
- [38] Schmidt D. S., Schmidt R. A., Dent J.D.. Electrostatic force on saltating sand[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103, 8997-9001.
- [39] Zhibao Dong, Xiaojing Zheng. Research Achievements in Aeolian Physics in China for Last Five Decades (II) [J]. Journal of Desert Research. 2005, 25 (6): 795-815.
- [40] Zhibao Dong. The Entrainment Modes of Blown Sand Particles and the Corresponding Theoretical Hypotheses [J]. Arid Mereorology, 2005, 23 (2): 64-69.
- [41] Davidson-Arnott R.G.D, Dawson J.D. Moisture and fetch effects on rates of aeolian sediment transport, Skallingen, Denmark. Proceeding of the Canadian Coastal Conference[C]. CCSEA, 2001, 309-321.
- [42] Cornelis W. M, Gabriels D. The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models[J]. Sedimentology, 2003, 50: 771-790.
- [43] Wiggs G.F.S, Baird A.J, Atherton R.J. The dynamics effect of moisture on the entrainment and transport of sand by wind[J]. Geomorphology, 2004, 59: 15-30.
- [44] Vavi S, d'Odorico P, Over T.M. On the effect of air humidity soil susceptibility to wind erosion: the case of air-dry soils[J]. Geophysical



- Research Letters, 2004, 31: 489-501.
- [45] Dong Z, Liu X, Wang X. Wind initiation threshold of the moistened sands[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29: 251-258.
- [46] Han Q J, Qu J J, Zhang K C et al. Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China[J]. Geomorphology, 2009, 104: 230-237.
- [47] Kimura, R., Shinoda, M.. Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia. Geomorphology, 2010, 114, 319-325.
- [48] Kurosaki, Y., Mikami, M.. Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak. Geophysical Research Letters, 2004, 31, L03106. doi:10.1029/2003GL018632.
- [49] Kurosaki, Y., Mikami, M.. Regional difference in the characteristic of dust event in East Asia: relationship among dust outbreak, surface wind, and land surface condition. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2005, 83A, 1-18.
- [50] Kurosaki, Y., Mikami, M.. Threshold wind speed for dust emission in east Asia and its seasonal variations. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D17202. doi:10.1029/2006JD007988.
- [51] Okin, G. S.. A new model of wind erosion in the presence of vegetation. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, F02S10. doi: 10.1029/2007JF000758.
- [52] Brown, S., Nickling, W. G., Gillies, J. A.. A wind tunnel examination of shear stress partitioning for an assortment of surface roughness distributions. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, F02S06, doi: 10.1029/2007JF000790.
- [53] Qingsong Mu, Tiande, Miao, Chongwu Ma. Threshold wind-velocity for single size sand [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Science Edition), 2004, 40 (2): 21-25.
- [54] Shao, Y. Physical and Modeling of Wind Erosion [M]. Berlin of Germany, Springer Press, 2008, 172-174.
- [55] Zou X Y, Wang Z L, Hao Q Z et al. The distribution of velocity and energy of saltating sand grains in a wind tunnel[J]. Geomorphology, 2001, 36: 155-165
- [56] Zheng X J, Xie L, Zhou Y H. Exploration of probability of velocities of saltating sand particles based on the stochastic particle-bed collisions[J]. Physics letters, 2005, A341: 107-118.
- [57] Dong Z B, Wang H T, Liu X P et al. Velocity profile of a sand cloud blowing over a gravel surface[J]. Geomorphology, 2002, 45: 277-289.
- [58] Zhang W, Kang J H, Lee S.J. Tracking of saltating and trajectories over a flat surface embedded in an boundary layer[J]. Geomorphology, 2007, 86: 320-331.
- [59] Dong Z B, Liu X P, Li F. Impact-entrainment relationship in a saltating cloud[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27:641-658.
- [60] Hong Cheng, Xue-Yong Zou chunlai Zhang et al. Fall velocities of saltating sand grains in air and their distribution laws[J]. Powder Technology, 2009, 1: 1-6.
- [61] Mao Xing, Liejin Guo. The Trajectory Characteristics of Jumped Sand Particles in Turbulent Air Flow [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23 (6): 628-631.
- [62] Dong Z B, Huang N, Liu X P. Simulation of the probability of midair interparticle collisions in an aeolian saltating cloud[J]. Journal of Geophysical Research. 2005, 10: D006070.
- [63] Hua Zhang, Fengrui Li, Tonghui Zhang et al. Wind-Sand Flow Structure and Its Variation Under Different Surface Conditions in Korqin Sandy Land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (2): 20-28.
- [64] Dong Z B, Liu X P, Wang H T et al. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2003, 49: 219-230.
- [65] Liu X P, Dong Z B. Experimental investigation of the concentration profile of a blowing sand cloud. Geomorphology[J], 2004, 60:

371-381.

- [66] Yang P, Dong Z B, Qian G Q et al. Height profile of the mean velocity of an Aeolian saltating cloud: Wind tunnel measurements by Particle Image Velocimetry[J]. *Geomorphology*, 2007, 89: 320-334.
- [67] Kecun Zhang, Jianjun Qu, Ruiping Zu et al. Wind Tunnel Simulation about the Effects of the Different Underlying Surfaces on the Features of Drifting Sand Current [J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27 (3): 352-355.
- [68] Kecun Zhang, Jianjun Qu, Ruiping Zu et al. Research on the Characteristics of Structure of Drifting Sand Flux and Wind Velocity Profile over Gobi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (1): 54-56.
- [69] Hasi. The Preliminary Research of Sand Flux Structure of Reticulate Duns in the Southeastern Tegger Desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11): 1099-1104.
- [70] Dajun Feng, Jinren Ni, Zhenshan Li. Vertical Mass Flux Profiles of Different Grain Size Groups in Aeolian Sand Transport [J]. *Acta of Geographica Science*, 2007, 62 (11): 1194-1203.
- [71] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D16111.
- [72] Anderson R S , Haff P K. Simulation of aeolian saltation[J]. *Science*, 1988, 241 :820 - 823.
- [73] Dong Z B, Wang H T, Zhang X H et al. Height profile of particles concentration in an aeolian saltating cloud: a wind tunnel investigation by PIV MSD[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 12-15.
- [74] Zhang X H, Wang H T, Dong Z B et al. Experimental determination of the concentration probability density function for a saltating particle layer[J]. *C. R. Mecanique*, 2006, 334: 13-18.
- [75] Jianjun Wu, Xiaojing, Zheng, Lihong He. A study on the characteristics of the concentration profile in saltating layer [J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Science Edition)*, 2002, 38 (3): 15-21.
- [76] Xiaojing Zheng, Ping Wang. Numerical Simulation on Stochastic Movement of Sands in Wind-blown Sand [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26 (2): 184-188.
- [77] Liqiang Kang, Liejin Guo, Dayou Liu. The experimental research to the sand particle velocity distribution in aeolian saltating cloud [J]. *Science in China(Series G:Physics,Mechanics & Astronomy)*, 2008, 36 (6): 678-691.
- [78] Lettau.K, Lettau.H. Experimental and micrometeorological field studies of dune migration[M]. // Lettau.H.H, lettau.K. (Eds.), *Exploring the World's Driest Climate*. Center for Climatic Research. University of Madison-Wisconsin, 1978: 110-147.
- [79] Sørensen.M. An analytic model of wind-blown sand transport[J]. *Acta Mechanical*, Suppl. 1991, 1: 67-81.
- [80] Zhenshan Li, Yi Wang, Limin He. Vegetation-Erosion Process in Semiarid Region: I . Dynamical Models [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29 (1): 23-30.
- [81] Yi Wang, Zhenshan Li, You Chen. Vegetation-Erosion Process in Semiarid Region: II . Simulation [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29 (1): 31-39.
- [82] You Chen, Zhenshan Li, Yi Wang. Vegetation-Erosion Process in Semiarid Region: III. Application [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29 (1): 39-46.
- [83] Lv P, Dong Z B. The dependency of sand transport rate by wind on the atmospheric stability: A numerical simulation[J]. *Geomorphology*, 2008, 99: 296-301.
- [84] Sauermann.G, Kroy.K, Herrmann.H.J. A continuum saltation model for sand dunes[J]. *Phys. Rev.* 2001, E 64: 031305.
- [85] Sauermann G, Andrade J.S, Maia L.P, et al. Wind velocity and sand transport on a barchan dune[J]. *Geomorphology*, 2003, 54: 245-255.
- [86] Ahmedou, D.O., Mahfoudh, A.O., Dupont, P., Moctar, A.O., Valance, A., Rasmussen, K.R., Barchan dune mobility in Mauritania related to dune and interdune sand fluxes, *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, F02016, doi:10.1029/2006JF000500.



- [87] Vermeesch, P. and Drake, N.. Remotely sensed dune celerity and sand flux measurements of the world's fastest barchans (Bodélé, Chad), *Geophysical Research Letters*, 2008, 35, L24404, doi:10.1029/2008GL035921.
- [88] Nickling W C, McKenna N C. Recent investigations of airflow and sediment transport over desert dunes[M].// Goudie A S, Livingstone I, Stokes S, eds. *Aeolian Environments, Sediments and landforms*, Chichester: Wiley, 2000: 15-47.



【作者简介】

杜鹤强（1983-），男，汉族，在读博士，主要从事地表风水复合侵蚀与风沙科学。

2003 至 2007 年，就读于河北师范大学，获学士学位。

2007 至 2010 年，在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所攻读硕士研究生，师从于韩致文研究员，并获得硕士学位。

2010 年至今，在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所攻读博士研究生，师从于王涛研究员。

Emai : dilikexue119@163.com。