

# 风沙物理学进展及其在沙漠化防治中的应用

刘世增, 徐先英, 詹科杰

甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 武威 733000

**摘要** 沙漠化因严重阻碍和威胁人类生存与社会可持续发展而受到世界各国高度重视。沙尘颗粒物受气流作用在地表和空中的运动是沙漠化过程发生、发展的主要表现形式,也是沙漠科学和治沙工程的核心研究内容之一,只有掌握了风、地表及沙尘颗粒物之间的互馈机制,才能科学分析土地沙漠化过程并建立有效的风沙灾害防治工程。本文回顾了风沙物理学研究的发展历程,综述了近30年以来风沙环境力学在风场结构、沙尘颗粒的起动机制、沙尘颗粒的碰撞机制、近地表风沙流的理论模型与实验观测、风成沙波纹与沙丘地貌研究以及风沙环境力学研究在沙漠化防治中的应用等方面取得的进展,并对未来研究方向提出了展望。

**关键词** 沙漠化;沙粒;风速;治沙工程

土地沙漠化是当今人类面临的一个重要生态环境问题,因严重影响和困扰人类的生存及社会可持续发展而受到世界各国的普遍重视。中国是人口众多、人均耕地面积较少又深受沙漠化危害的国家之一,土地沙漠化防治尤为重要。严峻的沙漠化形势及频发的风沙灾害引起了各国政府及相关领域研究学者的高度重视,并针对风沙灾害现状、形成机制、发展趋势、防治机理和工程实施开展了大量的工作,在沙漠与沙漠化土地分布现状及沙区资源勘查、沙漠化成因及防治对策、风沙环境力学机理、沙漠化防治中的生物学过程与植被动态演变驱动机理研究、沙漠化区域定位观测研究、沙漠化区域生物多样性保护及生态适应性研究、典型区域治沙技术与模式研究、沙区植物资源开发与沙区(生态)产业培育等

多个方面取得了重大进展<sup>[1-3]</sup>,本文将就风沙物理学机理研究的发展历程、近30年来的研究进展及其在沙漠化防治中的应用进行介绍,并针对未来发展方向提出展望。

## 1 风沙物理学研究历程

风沙流是风与其所携带的沙物质组成的气固两相流,是风沙环境力学的核心内容,也是风沙地貌、沙漠化、防沙工程研究的基础理论支撑之一。大气施力于地表而产生对沙粒的作用力是流体(空气)行为,由地表和运动沙粒对气流的反馈而引起的气流场特征的变化也是流体行为,就需要用流体力学的方法研究。在风沙物理学诞生初期,现代流体力学理论就已基本形成,而且发展快速,这为风沙物理学的发展创造了有利的条件。

对风沙流的系统研究始于20世纪30年代,其中最重要的代表人物为英国工程师Bagnold。Bagnold在20世纪30—50年代期间,吸收同时代流体力学研究的最新成果,在多次沙漠考察和一系列风洞实验的基础上出版了风沙运动研究中最重要著作《The physics of blown sand and desert dunes》,不仅从风沙颗粒力学行为的角度划分了风沙颗粒类型,将颗粒运动划分为蠕移、跃移和悬移3种形式,而且将Prantl和von Karman的边界层理论应用于沙质床面近地表气流的速度分布规律的研究中,通过对沙质床面空气动力学粗糙度的测定,在尼古拉兹工作的基础上提出了1/30定律,为



图1 被沙漠侵蚀的家园(图片来源:newsphoto)

Fig. 1 Desert eroded homes

收稿日期:2016-12-12;修回日期:2017-01-31

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAC07B00)

作者简介:刘世增,研究员,研究方向为荒漠化防治,电子信箱:shzliu@126.com;詹科杰(通信作者),副研究员,研究方向为风沙环境力学,电子信箱:ke-jiezhan@163.com

引用格式:刘世增,徐先英,詹科杰.风沙物理学进展及其在沙漠化防治中的应用[J].科技导报,2017,35(3):29-36. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.002

风沙运动规律研究工作的开展奠定了基础<sup>[4]</sup>。而在同一时期,美国著名土壤学家 Chepil 和 Milne、苏联的兹纳门斯基及日本的河村龙马也分别就土壤风蚀、风沙流蚀积规律等开展了较为全面的研究工作<sup>[5-6]</sup>。20 世纪 60—80 年代,基于风洞实验和数值模拟开展的不同大气环境下颗粒的起动、跃移及其与风成地貌的关系研究为风沙物理学研究的第二阶段,代表人物有 Owen、Ungar、Haff 等,期间的代表性成果就是基于单一形状轨道假定建立的风沙运动模型<sup>[7-8]</sup>。对于起跳沙粒的初速度分布函数的关注及基于微观研究与宏观研究的结合使风沙运动研究进入了第三阶段,此阶段是以 1985 年在丹麦 Aarhus 召开的第一届风沙物理学国际会议为标志<sup>[6]</sup>。

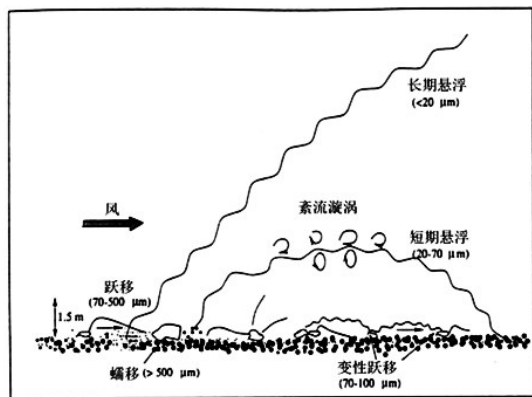


图 2 风沙运动的 3 种形式<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Three models of wind sand transport

国内针对沙漠科学的研究始于 20 世纪 50 年代末,至 20 世纪 60 年代中期为理论准备和野外观测积累阶段,自 20 世纪 80 年代开始同时向微观领域深入和向宏观领域扩展,并在风沙物理学相关领域取得大量的成果<sup>[10]</sup>。如刘贤万于 1995 年出版《实验风沙物理与风沙工程学》<sup>[11]</sup>,吴正于 2003 年出版的《风沙地貌与治沙工程学》<sup>[12]</sup>,王涛于 2011 年的专著《中国风沙防治工程》<sup>[13]</sup>等详细介绍了风沙物理学及其应用方面的进展,特别是中国学者的贡献;而力学工作者,如郑晓静 2009 年的专著《Mechanics of wind-blown sand movements》<sup>[14]</sup>,详细介绍了其研究团队所发现的新作用力、建立的新模型、提出的新方法、揭示的新规律以及给出的对固沙工程有指导意义的新方案<sup>[15]</sup>等,创建了风沙环境力学,开启了相对于原有风沙物理学研究更为准确的新体系。

## 2 风沙物理学及其在沙漠化防治中的应用进展

近年来,随着声光电传感技术(激光)、遥感和示踪等实验技术手段和计算机技术以及数值模拟方法的飞速发展,在风沙运动机理研究方面取得了一些新的进展和认识。

### 2.1 风场结构

风是散体沙尘颗粒运动的原动力,风沙运动事实上就是

风引起的沙粒质量迁移问题。针对于平坦床面的来流风场结构,Bagnold 认为起净风场风速廓线服从对数分布,即

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{y}{y_0} \right)$$

其中,粗糙度  $y_0 = D/30$ ;  $u_*$  为摩阻速度。

而含沙层一定高度以上的风速仍为对数分布,为

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{y}{y_i} \right) + u_i$$

其中,  $u_i, y_i$  为基本不随摩阻速度变化的量<sup>[4]</sup>。基于流体力学基本理论, Owen 简化了起沙后的风速剖面:  $u = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{y}{y_0} \right)$ ,  $y_0 =$

$Cu^2/2g$ , 称为 Owen 动力学粗糙度<sup>[16]</sup>。之后 Ungar 和 Anderson 等运用混合长度理论将 Navier-Stokes 方程简化为封闭形式,并通过数值模拟研究了跃移区内的风速分布,其研究证实了 Owen 的结论:在风沙跃移层内风速受沙粒的阻滞作用而远远偏离了对数分布,在跃移层以上风速仍然服从对数分布,跃移沙粒对风速的作用类似于定床表面粗糙度的影响<sup>[8,17]</sup>。

上述经典研究结论都将起沙前的风场看作是服从对数分布的稳定来流。然而,实际客观条件下并不是简单的稳定来流。近年来,学者开始关注非稳定来流对风沙流行为的影响。Spies 和 McEwan 在模型中采用了一维非定常风场,分析了输沙率对不同单一频率和强度的波动风响应行为<sup>[18]</sup>。Kok 和 Renno 提出的 COMSALT 模型将风速处理为在平均风速的基础上附加服从高斯分布的随机脉动值,得到了沙粒不平滑的跃移轨迹,但没有得到风速脉动对风沙运动宏观特征如输沙率的影响<sup>[19]</sup>。由于近地面气流通通常为湍流,湍流的某些特征,如湍流结构、隙向性局部速度突然增大(碎发过程)也对风沙传输会有一定影响。因此近 20 年来对风沙运动的研究开始转向探求野外自然环境下湍流不稳定风场中的风沙流运动特点。如 Stout 和 Zobeck 通过分析野外观测数据研究了风沙跃移运动的间歇性与脉动风速的关系<sup>[20]</sup>。

在野外,风场受诸多因素的作用,在起伏地表情形下具有剪切应力的线性响应,并且区分分层、中性层以及湍流区域。有研究人员通过实验测量给出了对于起伏地表剪切应力的线性响应,借助大涡模拟的方法得到地表剪切应力在光滑正弦曲线地表的响应。董治宝等<sup>[21]</sup>在风洞试验中对三角形坡面地表上的风场速度进行了测量,发现水平速度的加速不但与坡面地形的坡度及高度相关,同时也受来流速度的影响,垂直速度也随坡度及自由流速度的增大而增大。总之,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,需要对其中基本因素的耦合作用进行研究,如野外自然环境下大气边界层风场的脉动规律、湍流结构及其对风沙运动影响的规律,非稳定复杂湍流风场及复杂地表下的起沙产生、运移与沉积的动力机制、过程及其时空变化规律。

### 2.2 沙尘颗粒的起动机制与起动风速

沙尘颗粒的起动是近地表风沙运动、土壤风蚀及沙尘天



气发生的首要环节,也是近地表输沙率、土壤风蚀量预测与沙尘天气预报研究的重要内容。但由于颗粒起动的复杂性和研究手段的限制,关于沙粒起跳受力机制至今仍然没有达成统一的认识。学者们提出了多种不同的沙粒起动模式<sup>[22]</sup>,然而受制于对沙粒脱离地面瞬间连续观测的不足,目前对于沙粒起跳机制的推断大多在对沙粒运动瞬时观测基础上,结合力学相关理论提出,其中流体起动中的压差起动、负压起动、升力起动、振动起动及涡旋起动等受到了后续研究结果的质疑。Bagnold认为沙粒起跳以冲击作用为主,他指出占沙粒移动总量的95%以上的跃移沙和蠕移沙均由跃移质的冲击而起,而剩下的不足5%的沙粒只由流体起动。Bagnold的观点在很长一段时间内被众多学者所接受,而且现有风沙运动理论模型及数值模拟研究都建立在冲击起动基础上。但是,随着人们对近地表沙尘运动进一步的理解,部分学者对冲击起动说也提出了质疑。Kjelgaard等<sup>[23]</sup>通过分析野外观测数据后认为哥伦比亚高原地区跃移颗粒物冲击不可能是沙尘颗粒起跳的主要原因;Yang等<sup>[24]</sup>的风洞试验结果表明风沙流中颗粒物的冲击速度实际维持在一个较低的水平;黄宁等<sup>[25]</sup>研究发现由于贴近床面沙粒浓度较高,在冲击床面前,颗粒间发生空中碰撞的概率较大,从而使颗粒物动量分散,不足以冲击起更多床面上的沙粒。伊万诺夫和仙科维奇认为,沙粒可由负压作用而脱离地表进入气流。湍流起动说认为由于流体速度不稳定,会出现瞬时垂直运动的气流,而向上运动的气流会带动沙粒脱离地表进入气流中<sup>[10]</sup>。

沙粒的起动风速是表征风沙运动发生的关键因子,是风沙运动及土壤风蚀研究中倍受关注的基本物理量之一。Shao<sup>[4,26]</sup>考虑拖曳力、重力及颗粒间的黏性力,改进了以往研究中参数复杂的不足,而进一步的研究表明沙粒的起动摩擦风速与地表形态、沙粒含水量及静电力等诸多因素有关。董治宝<sup>[27]</sup>认为风沙颗粒起跳的判读标准不同,以及定量描述湍流特性等都是很多研究成果不一致的原因之一。Shao<sup>[4]</sup>认为起动风速是一个随机变量,与地表形态、沙尘颗粒的粒径等相关,应以概率分布形式呈现。

因此,尽管风沙起动形式是风沙运动研究中首先遇到的问题,而且近一个世纪以来许多学者都曾对该问题的研究做过不懈的努力,但由于问题本身的复杂性和研究手段的限制,流体起动与冲击起动在风沙流运动过程中所起的作用至今还未有定论。事实上,风沙起动过程同时受多种因素的作用,仅靠某一种学说或某一种力来解释风沙的起动是不够完善的。

近年来,有些学者开始关注近壁面湍流对颗粒起跳的影响。梅凡民<sup>[28]</sup>基于湍流相干结构理论和风沙互馈机制的假说,提出了风沙颗粒起跳机制的动态演化模式。林官明<sup>[29]</sup>应用象限分析环境风洞中的平坦近壁面湍流,探讨了近壁面湍流的间歇性结构与猝发现象,发现在颗粒物起动研究中对于可表征湍流在空间和时间上间歇性猝发特点的瞬时雷诺切应力是很重要的。王元等<sup>[30]</sup>进行了颗粒对湍流脉动响应的小

波包分析,通过小波包分析了两相流场的时域和频域特征,结果表明不同频率湍流结构对输沙过程的影响不同。

### 2.3 沙尘颗粒的碰撞机制

地表风沙流中的沙粒跃起并空中输运一段距离后,回到床面并溅起其他沙粒或再次反弹跃起称之为“击溅过程”,击溅过程被认为是沙尘颗粒离开地表进入气流而运动的主要机制,是风沙运动的关键物理过程之一,涉及颗粒与床面之间的碰撞研究。风沙流模拟中关键因素之一——沙粒起跳初速度分布函数,是连接单个沙粒微观运动与风沙流宏观运动的桥梁,而构筑这一桥梁的关键在于粒床碰撞过程。因此粒床碰撞过程及其力学建模是了解风沙流起动及其运动发展机理、建立连接沙粒微观运动与风沙流宏观运动之间联系纽带的核心研究工作。

粒床碰撞主要通过风洞实验及理论模型等方法进行研究。粒床碰撞过程的实验研究主要借助高速摄影仪、高速频闪仪等观测得到粒子撞击床面后,获得撞击粒子与床面粒子的起跳速度、起跳角度、起跳粒子数<sup>[31]</sup>。王元等<sup>[32]</sup>应用高速光学测试技术记录了跃移沙粒的运动过程,分析了跃移颗粒的运动特性及颗粒和床面的碰撞性质。对于粒床碰撞的理论研究,一般可分为两类。一类是建立简单的概念型的粒-床碰撞模型,主要是将沙粒简化为规则性状如圆盘或球,考虑粒床碰撞过程中颗粒间的作用(作用力或冲量),根据牛顿第二定律或动量定理、动量矩定理建立粒床碰撞模型,得到粒床碰撞后的沙粒的速度、起跳角度等。其模型大多可以分为硬球模型与软球模型。Oger等<sup>[33]</sup>考虑了沙粒碰撞位置的变化,并用接触角来表示这一概念,发现接触角对反弹角起着决定性作用,随着接触角的增大,反弹的可能性也会增大。Anderson等<sup>[16]</sup>利用软球模型得到了粒床击溅过程的能量传递、冲击速度、冲击角度、碰撞位置、沙粒起跳后的运动特性及溅起沙粒数的变化规律。而考虑到近床面湍流对冲击速度、冲击角度的影响,沙粒的不规则导致粒径的随机性、床面排列的复杂性、床面沙粒对被碰沙粒作用的多样性,天然沙粒的组成材料各不相同导致碰撞系数的不定性以及碰撞位置的复杂性等,郑晓静等将复杂的粒-床碰撞过程等效为3个圆盘之间的碰撞,建立了一个能较为客观描述沙粒碰撞起跳的随机模型<sup>[34]</sup>。这一随机模型的建立,不仅给出了风洞观测一致的沙粒的角速度,同时还可以给出实验难以确定的影响粒-床碰撞各随机变量的分布范围并给出了其分布密度等<sup>[35]</sup>,这也开启了将随机分析引入风沙研究中的先河。程宏与邹学勇<sup>[36]</sup>则通过优化模型研究了沙粒起跳速度分布,发现表面粗糙度所引起冲击摩擦矩与黏滞摩擦矩具有可比性,即颗粒表面粗糙度的力学效应。此外,球形颗粒与任意复杂表面碰撞的检测算法,改变了传统DEM只能用于简单几何体的现状<sup>[37]</sup>。

总之,粒床碰撞过程的力学建模作为连接沙粒个体微观运动与风沙流宏观运动特性之间的纽带,是了解风沙流起动及其运动发展力学机理的关键步骤和有效的途径,也是风沙

环境力学机理研究的基础性工作。颗粒与床面之间的连续碰撞过程也是风沙流区别于其他气固两相流的本质特征。过去的研究大多限于单一粒径颗粒的刚体碰撞,但对群体颗粒的碰撞缺乏研究,导致所建立的数理模型与实际状况差别较大。因此混合粒径颗粒群的三维碰撞机制是今后需要关注的问题,同时还需进一步完善粒床碰撞随机模型,给出简洁实用的混合沙粒的起跳初速度分布函数以及击溅函数。

除了下落沙粒与地表沙粒之间的碰撞之外,由于风沙流在靠近地表处的浓度较大,使得运动沙粒之间发生碰撞的概率增大,Sorensen 和 McEwan<sup>[38]</sup>认为跃移沙粒之间的空中碰撞对风沙运动有着重要的影响,并讨论了下降过程中跃移沙粒与床面垂直距离为 1 cm 时,与其他沙粒发生空中碰撞的概率。黄宁等<sup>[25]</sup>建立了计算风沙流中沙粒空中碰撞概率的理论模型,计算了跃移沙粒的空中碰撞概率,并在考虑了沙粒空中碰撞对风沙运动的影响的基础上,对多粒径复杂环境下沙粒空中碰撞对风沙运动的影响进行了定量评估,并发现在来流风速较大的情况下沙粒在空中发生碰撞几乎是不可避免的。此结果丰富并发展了传统风沙物理学有关沙粒冲击起动等方面的理论。

## 2.4 风沙电现象

基于所观测到的沙尘暴过境地带出现的强电场、电火花及其对无线电信号产生的干扰,国内外多名学者提出沙粒带电机制的假说,并对强风沙电场产生的原因进行了推测。其中黄宁和郑晓静<sup>[39]</sup>率先在风洞中对沙粒带电的荷质比、风沙电场强度以及输沙率和风速廓线等展开了实验测量,揭示了沙粒带电的尺度效应,指出风沙电场主要是由空中带电沙粒产生。在此基础上郑等人通过建立的风-粒-电相互作用的耦合模型<sup>[40]</sup>,其计算模拟结果不仅与邵<sup>[41]</sup>等的实验结果吻合,而且定量揭示出沙粒带电所产生的风沙电场对风沙流和输沙率形成发展过程的影响。这一先驱性的工作丰富了和沙尘输运这类自然现象的认识,并得到国际著名学者发表在《Nature》上的论文<sup>[42]</sup>的高度评价,认为是一项与现有研究不一样的“例外”性的且亟待需要的“精细”性的工作。同时还引发了国内外学者对风沙电现象的进一步研究,如 KOK<sup>[43]</sup>、鲁录义、危卫<sup>[44-45]</sup>等。其中鲁录义、危卫等<sup>[44-45]</sup>基于水的电离理论和颗粒动力学理论,提出了风沙运动颗粒碰撞的静电起电动力学模型,从动力学角度解释了风沙电场的物理机制,并依据耦合沙粒摩擦荷电模型和风沙运动气固两相流模型,提出了 CFD-DEM 结合的数值方法模拟了水平风沙流和尘卷风内的静电场及沙粒运动。兰州大学风沙环境力学研究小组还开展了对野外风沙电场的三维观测,首次指出实际风沙电场不仅在垂向与大气晴天电场相反,而且还存在沿来流流向的、强度比垂向风沙电场更高的水平电场,并指出这主要是由于风沙流的流向脉动所致。郑晓静等在风沙电即风沙电场定量规律方面的先驱性和系统性的研究,不仅十分有趣,而且极为重要,同时也丰富了人们对风沙运动和沙尘输运这类自然现象的认识,进一步完善了近地表风沙流的理论

模型与实验观测内容。

## 2.5 近地表风沙流的理论模型与实验观测

在近地层风沙流宏观量的实验研究中,主要通过风洞试验与野外观测研究单宽输沙率(sand transport rate)、单位面积输沙率沿高度分布(sand flux),沙粒相浓度沿高度分布,贴地层风速廓线等流体相及颗粒相的相关物理量。单宽输沙率为单位时间内通过垂直于风向的单位宽度的输沙量,从宏观上描述了输沙的强弱,是风沙物理学研究以及防沙治沙工程中的核心物理量之一。目前关于单宽输沙率的经验公式已达几十种之多,但彼此之间差异较大。周又和等<sup>[46]</sup>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,极大提高了计算结果的精度。此外,在已有的大量有关单位面积输沙率的实验结果中,既包括输沙量随高度的增加呈指数规律递减,又有输沙量随高度呈现先增加后减小的,实验结果之间的差异应该是源自研究区域下垫面状况、气流性质及测量方式不同。对于沙粒浓度随高度的分布采用经验拟合或数学建模进行,目前还没有适用性较好且普遍使用的公式。康立强和郭烈锦<sup>[47]</sup>采用湍流模型处理了二维湍流风场,并采用追踪一颗颗沙粒与沙床的具体碰撞过程和跃移过程的办法,得到了风沙流的输沙通量沿高度的分布和风沙流发展时间等结果,这种处理的优点在于可以得到风沙流中每个沙粒的运动信息,特别是沙粒和沙粒以及沙粒和床面之间的碰撞。郑晓静等<sup>[48]</sup>在风沙流统计耦合模式基础上在所预测的风沙流整体行为中首次反映了风场—沙粒运动(含旋转)—风沙电场—热扩散场间的相互耦合作用,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。王正师和黄宁<sup>[49]</sup>在风沙流研究的基础上,建立了考虑大气边界层风场的脉动、风沙流中随机因素和耦合因素对风沙运动的影响的风吹雪跃移运动随机模型,发展了对其进行定量模拟的方法,开展了湍流影响下的风吹雪过程数值模拟。首次再现了与自然现象一致的风雪流条带结构,并指出风雪流条带是空中运动颗粒在高速旋转的漩涡的吸入效应作用下形成的一种局部颗粒浓度汇集的自组织现象。

## 2.6 风成沙波纹与沙丘地貌

对沙波纹进行系统实验观测始于风沙物理学的奠基人 Bagnold 及其著作《The physics of blown sand and desert dunes》,通过风洞实验的观察,Bagnold 认为有以下几个基本因素影响沙波纹波长、波高和沙波纹形态,即:风场、跃移沙粒、地形的变化以及沙粒的运动状态,并观测到沙波纹的波长随摩阻风速的增加而增加,风速超过一定强度以后,沙波纹变平坦而消失不见等现象<sup>[4]</sup>。为了阐明控制沙波纹形态、尺度的因素,许多学者利用风洞和野外观测的手段测量并讨论了沙波纹的形态尺度与风速、粒径的定量关系。实验结果发现波长随风速和时间的增大均增大,其中波长与风速成线性关系,波长随时间的增长较之其随风速的增长不明显。Walker<sup>[50]</sup>的风洞实验在验证了 Seppala 和 Linde 在 1978 年关于临界风速的描述同时,还指出随风速增大波高逐渐减小而波



长逐渐增大,因此认为沙波纹指数随风速的增大而增大。Andreotti 等<sup>[51]</sup>给出的关于沙波纹的形成和发展过程的观测结果肯定了之前波长、波高与摩擦风速的线性关系,即沙波纹波长随时间线性增长,而波高随时间指数增长。

除了实验观测之外,力学工作者试图通过流体力学的手段对沙波纹的形成和发展过程进行建模,一方面旨在揭示沙波纹的形成原因,另一方面给出导致平坦床面不稳定性的解释。飞速发展的计算机技术为跟踪单颗沙粒运动从而模拟沙波纹形成和演化过程提供了强大的工具,由此产生了许多模拟风成沙波纹的离散数值模型。这些模型根据对物理过程作出的简化程度不同,大致可分为3类:第1类包含详细的跃移颗粒的粒-床碰撞信息或击溅函数,其中以 Anderson 和 Bounas 的元胞自动机模型最具代表性<sup>[52]</sup>;第2类把碰撞的结果用简单的算法表示;第3类并不考虑碰撞过程,而是简单地处理了跃移和蠕移两种运动形式,定义空间网格间沙量的交换规则,其中以 Nishimori 等<sup>[53]</sup>的耦合映射格子模型为代表。除了上述3类离散模型外,孙其诚和王光谦<sup>[54]</sup>提出的离散颗粒动力学模型是根据沙粒在沙粒运动不同过程的受力特点,将其分解为受冲力支配的瞬时碰撞过程和受拖曳力、重力控制的非瞬时漂移过程。郑晓静等<sup>[55]</sup>建立的离散粒子追踪模型成功地将沙波纹周围局部风场、风场与沙粒运动相互作用、粒床击溅过程、跃移和蠕移沙粒的运动有机结合到对沙波纹形成过程中沙粒的运动描述中,既反映了风沙运动系统的散体性和沙粒的粒床击溅,同时又考虑了风沙运动系统整体行为,因而近乎完美地定量和准确再现了沙波纹的形态、尺度、形成过程以及沙波纹 Y 形接头的形成和发展和自组织修复等,这一工作是模拟沙波纹形成和演化的终结性工作。吴锤结等<sup>[56]</sup>采用大涡模拟的方法模拟了三维湍流风沙跃移运动和三维沙波纹演化过程,得到了沙波纹迎风坡平缓,背风坡陡峭的自然形态,实现三维沙波纹的自我修复过程,并指出由于沙波纹地形使得湍流风场在法向产生强烈的能量交换,并且沙波纹与地表涡量有较强的对应关系。

对沙丘的动力学模拟研究已经进行了很长时间,基于早期 Jackson 和 Hunt 的解析方法,由 Howard 等建立起来的沙丘模型将地貌对输沙率的影响与沙丘流场的计算机模拟结合起来<sup>[57]</sup>。这类模拟方法主要是基于连续介质理论的观点,将来流风场和近地层风沙流分别处理为稳定不可压的边界层流动和类流体,然后进行相应微分方程的求解。Baas 和 Nield<sup>[58]</sup>指出连续沙丘模型难以推广到对整个沙丘场形成和发展过程的研究中,这主要是因为当沙丘场中有较多不同大小的沙丘时,相应的流场难以准确计算,并且计算量增大。为此,Nishimori 和 Werner 提出了沙丘场模拟的耦合映射格子方法和元胞自动机方法。Nishimori 等<sup>[59]</sup>应用耦合映射格子方法,研究了来流风向、沙源及植被对沙丘形态的影响。Werner<sup>[56]</sup>采用元胞自动机方法模拟出了与天然沙丘在形态上极为相似的沙丘。Anderson<sup>[57]</sup>应用该元胞自动机方法研究了风向变化范围(风向与主风向间夹角的变化范围)对沙丘场形

态的影响,提出在沙丘场中存在两类吸引子,即横向沙丘和纵向沙丘,前者对应风速变化范围较小的情况,后者则对应风速变化范围较大的情况。郑晓静等提出了一种令人耳目一新的“三级跳”跨尺度定量模拟方法<sup>[14,61]</sup>,通过对风沙流形成到对地表的侵蚀以及输运和沉积这些微观过程的统计分析,创建了地表的侵蚀概率、覆盖因子和风沙流的输运因子这3个新的物理统计量,进而实现了对数百平方公里沙丘场长达数十甚至百年演化过程的定量模拟,揭示出与野外观测一致的沙源厚度、沙粒粒径及风场等因素与沙丘形态、移动速度之间的定量规律,这项具有里程碑意义的工作不仅为理解和预测不同条件下的风成地貌及沙漠化扩展速度提供了一条有效途径,而且是解决多尺度耦合问题定量预测的一个成功范例。

## 2.7 风沙物理学在治沙工程中的应用

1977年“世界荒漠化大会(UNCD)”之后,国际上相继加强了对沙化土地防治技术的研究,在土壤侵蚀过程、风沙动力学、沙区铁路工程防护、沙化农田改造等方面取得较大进展。国内从20世纪50年代末开始,中国科学院治沙队揭开了沙漠科学考察及风沙灾害防治的序幕,经过几代科研工作者的共同努力在农田草场防风固沙及典型区域风沙灾害防治等方面开展了比较系统的研究,并取得了一系列重要进展,极大地推进了沙漠化的研究及学科发展,并使国内流沙固定原理与技术领域处于世界领先水平,在沙漠化土地防治方面处于世界先进水平<sup>[62]</sup>。在沙漠化治理精细化、准确化、标准化及高性价比的需求不断增长的背景下,风沙环境力学所涉及的内容及研究方法被更多、更广泛地应用于防风固沙工程的优化及评估中。王振亭和郑晓静<sup>[63]</sup>运用流体力学的分析方法给出草方格沙障出露草头高度与边长的优化比例关系。屈建军等<sup>[64]</sup>通过假设最高点处圆弧的弦切角等于干沙的休止角,得到草方格沙障的边长与沙障内最大风蚀深度之间近似的函数关系式。黄宁等<sup>[65]</sup>进行了沙粒在草方格沙障内弥散特征的大涡数值模拟,详细分析了沙粒在草方格沙障内的弥散特征及流场的变化情况;同时,通过沙粒在空间的分布图和运动矢量图,直观展现了沙粒在草方格沙障内的运动和分布情况,动态模拟出了草方格沙障阻沙固沙的整个过程。上述研究都得到了非常有意义的结果,有力推动了麦草方格沙障的优化研究。

针对现有塑料沙障的铺设方法大多基于经验,为了实现以最小的成本提供最好阻沙效果的目标,詹科杰、黄宁等对单个塑料格状沙障网格的防风固沙行为进行了模拟,在此基础上,还对塑料沙障的设置方式进行了优化,优化后的塑料沙障设置方式在节省33%的材料的同时发挥与1 m×1 m网格沙障相似的防风固沙效能。郑晓静和薄天利<sup>[15]</sup>将对沙丘场形成演化过程模拟的“三级跳”方法用于对沙漠边缘扩展速度的预测和草方格铺设方式的优化,提出在保持相同防治效果的前提下,将现有草方格“满铺型”改成特定距离的“相间型”铺设(也称为“斑马线”铺设,图3)。这一方法在国家科技支

撑计划的支持下,通过在甘肃民勤地区的试验和示范,证实固沙效果与原草方格铺设方案的相同,但由于铺设面积缩减近 2/3 以上进而铺设成本显著降低约 60% 以上。此方案颠覆了长期以来草方格铺设的传统模式,对防沙固沙工程设计具有革命性意义。

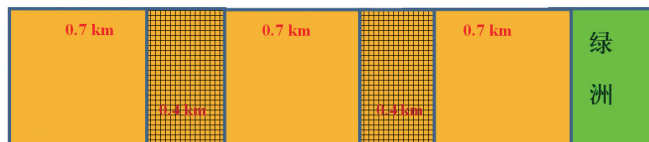


图3 斑马线防沙治沙工程的优化设计方案  
Fig. 3 Optimization design of sand control engineering zebra

### 3 结论与展望

沙漠化及其防治是一个关乎生态、地理、气候、人文等多因子的综合性过程,虽然近年来中沙漠化扩展趋势得到初步的遏制,但“局部治理、整体恶化”的严峻态势并未得到彻底扭转<sup>[66]</sup>,在国家西部大开发战略进一步深入实施和“丝绸之路经济带建设”时期,面对国家经济的高速发展和创新机制建立,以及在生态环境保护和生态文明建设等方面对沙漠化研究及其防治的需求,沙漠化防治任务仍然十分艰巨。

风沙灾害的发生、发展过程、危害方式和强度与近地层的沙尘颗粒物的起动、传输、沉降,流场结构、湍流强度等物理量的空间结构、时空演化及其相互作用紧密相关,而如何以此为基础针对典型沙化区域防沙治沙结构开展定量模拟与评估,建立防沙治沙工程的优化设计理论框架,更是一项具有诸多特征的、受到多物理场耦合作用的复杂动力系统,其中所包含诸如多尺度、多场耦合、随机性非线性尺度效应和复杂系统的科研任务,需要从事相关科研工作的人员进一步拓展和提升基础理论研究与实验方法设计,进而推动中国在沙漠化防治领域的发展。

#### 参考文献 (References)

- [1] 董治宝, 屈建军, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Dong Zhibao, Qu Jianjun, Qian Guangqiang, et al. Kumtag Desert aeolian landform[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] Ping L, Narteau C, Dong Z, et al. Emergence of oblique dunes in a landscape-scale experiment[J]. Science Foundation in China, 2015, 7(2): 31.
- [3] 王涛, 薛娴, 吴薇, 等. 中国北方沙漠化土地防治区划(纲要)[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 816-822.  
Wang Tao, Xue Xian, Wu Wei, et al. Regionalization of desertification lands in north of China: A program[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 816-822.
- [4] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. Berlin: Springer, 1941.
- [5] 李振山, 倪晋仁. 风沙流研究的历史、现状及其趋势[J]. 干旱区资源与

- 环境, 1998, 12(3): 89-97.
- Li Zhenshan, Ni Jinren. Aeolian sand transport processes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(3): 89-97.
- [6] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. 力学与实践, 2007, 29(4): 9-16.  
Huang Ning, Zheng Xiaojing. Research history, achievements and trend on mechanism of aeolian transport[J]. Mechanics in Engineering, 2007, 29(4): 9-16.
- [7] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 20(2): 225-242.
- [8] Ungar J E, Haff P K. Steady state saltation in air[J]. Sedimentology, 1987, 34(2): 289-299.
- [9] Shao Y. Physics and modelling of wind erosion[M]//Physics and Modelling of Wind Erosion. Dordrecht: KluwerAcademic Publishers.
- [10] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I)[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 293-305.  
Dong Zhibao. Research achievements in aeolian physics in China for the last five decades(I)[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 293-305.
- [11] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
Liu Xianwan. Experimental aeolian physics and aeolian engineering [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [12] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Wu Zheng. Aeolian landforms and sand control engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Wang Tao. Sandstorm control project in China[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [14] Zheng X. Mechanics of wind-blown sand movements[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [15] Bo T L, Zheng X J. Numerical simulation of the evolution and propagation of aeolian dune fields toward a desert-oasis zone[J]. Geomorphology, 2013, s180-181: 24-32.
- [16] Anderson R S, Sørensen M, Willetts B B. A review of recent progress in our understanding of aeolian sediment transport[M]//Aeolian Grain Transport 1. Berlin: Springer, 1991: 1-19.
- [17] Anderson R S, Haff P K. Simulation of eolian saltation[J]. Science, 1988, 241(4867): 820-823.
- [18] Spies P J, McEwan I K. Equilibration of saltation[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2000, 25(4): 437-453.
- [19] Kok J F, Renno N O. A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMSALT) [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(D17): 17204.
- [20] Stout J E, Zobeck T M. Intermittent saltation[J]. Sedimentology, 1997, 44(44): 959-970.
- [21] Dong Z B. Turbulence fields in the lee of two-dimensional transverse dunes simulated in a wind tunnel[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2009, 34(2): 204-216.
- [22] 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势[J]. 力学进展, 1995, 41(3): 368-391.  
Dong Fei, Liu Dayou, He Daliang. Advances and Tendency in understanding of wind-blown sand motion[J]. Advances in Mechanics, 1995, 41(3): 368-391.
- [23] Kjølgaard J F, Chandler D G, Saxton K E. Evidence for direct suspension of loessial soils on the Columbia Plateau[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2004, 29(2): 221-236.

- [24] Yang P, Dong Z, Qian G, et al. Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud: Wind tunnel measurements by Particle Image Velocimetry[J]. *Geomorphology*, 2007, 89(3-4): 320-334.
- [25] Huang N, Zhang Y, D'Adamo R. A model of the trajectories and midair collision probabilities of sand particles in a steady state saltation cloud[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D8): 271-283.
- [26] Huang N, Shi F, Pelt R S V. The effects of slope and slope position on local and upstream fluid threshold friction velocities[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2008, 33(12): 1814-1823.
- [27] 董治宝. 风沙起动的随机性及其判别[J]. *干旱气象*, 2006, 24(3): 1-4.  
Dong Zhibao. The stochastic nature and definition of particle entrainment by wind[J]. *Arid Meteorology*, 2006, 24(3): 1-4.
- [28] 梅凡民. 基于湍流结构的风沙颗粒起动动态演化的概念模式[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 379-385.  
Mei Fanmin. A concept model of dynamic evolution of aeolian sand particles entrainment in terms of turbulence structure[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 379-385.
- [29] 林官明. 近壁面猝发湍流对颗粒物起尘机理的探讨[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(7): 599-602.  
Lin Guanming. Investigation of the sand movement by turbulence burst in wall-bounded turbulent flow[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7): 599-602.
- [30] Liu J, Wang Y, Yang B. Wavelet packet analysis of particle response to turbulent fluctuation[J]. *Advanced Powder Technology*, 2012, 23(3): 305-314.
- [31] Rioual F, Valance A, Bideau D. Experimental study of the collision process of a grain on a two-dimensional granular bed[J]. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics*, 2000, 62(2 Pt B): 2450-2459.
- [32] Wang D, Wang Y, Yang B, et al. Statistical analysis of sand grain/bed collision process recorded by high-speed digital camera[J]. *Sedimentology*, 2008, 55(2): 461-470.
- [33] Oger L, Ammi M, Valance A, et al. Study of the collision of one rapid sphere on 3D packings: Experimental and numerical results[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2008, 55(2): 132-148.
- [34] Zheng X J. *Mechanics of wind-blown sand movements*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [35] Zheng X J, Xie L, Zou X Y. Theoretical prediction of liftoff angular velocity distributions of sand particles in windblown sand flux[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D11): 3029-3030.
- [36] Hong C, Zou X Y. Redevelopment of liftoff rates of saltating sand grains based on a simple optimization model[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 568-574.
- [37] Lu L, Gu Z, Lei K. An inter-particle contact area and time restoration for softening treatment in thermal discrete element modeling[J]. *EPL*, 2009, 87(4): 44004.
- [38] Sørensen M, McEwan I. On the effect of mid-air collisions on aeolian saltation[J]. *Sedimentology*, 2006, 43(1): 65-76.
- [39] 黄宁, 郑晓静. 风沙流中风沙带电现象的实验测试[J]. *科学通报*, 2000, 45(20): 2232-2235.  
Huang Ning, Zheng Xiaojing. An experimental study on the phenomenon of sand electrification in wind blown sand[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(20): 2232-2235.
- [40] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D10): 231-231.
- [41] Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, 98(D7): 12719-12726.
- [42] Shinbrot T, Hermann H J. Granular matter: Static in motion[J]. *Nature*, 2008, 451(7180): 773-774.
- [43] Kok J F, Renno N O. Electrostatics in wind-blown sand[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 100(1): 014501.
- [44] 鲁录义, 顾兆林, 罗昔联, 等. 一种风沙运动的颗粒动力学静电起电模型[J]. *物理学报*, 2008, 57(11): 6939-6945.  
Lu Luyi, Gu Zhaolin, Luo Xilian, et al. An electrostatic dynamic model for wind-blown sand systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 6939-6945.
- [45] 危卫, 鲁录义, 顾兆林. 风沙运动的电场. 流场耦合模型及气固两相流数值模拟[J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 158301-158301.  
Wei Wei, Lu Luyim, Gu Zhaolin. Modeling and simulation of electrification of wind-blown-sand two-phase flow[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 158301-158301.
- [46] Zhou Y H, Guo X, Zheng X J. Experimental measurement of wind-sand flux and sand transport for naturally mixed sands[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(2 Pt 1): 021305.
- [47] Kang L, Guo L. Eulerian - Lagrangian simulation of aeolian sand transport[J]. *Powder Technology*, 2006, 162(2): 111-120.
- [48] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud[J]. *The European Physical Journal E*, 2006, 19(2): 129-138.
- [49] Huang N, Wang Z S. The formation of snow streamers in the turbulent atmosphere boundary layer[J]. *Aeolian Research*, 2016, 23: 1-10.
- [50] Walker J D. *An Experimental Study of Wind Ripples*[J]. Master Thesis in Geology Mit, 1981.
- [51] Andreotti B, Claudin P, Pouliquen O. Measurements of the aeolian sand transport saturation length[J]. *Geomorphology*, 2008, 123(3-4): 343-348.
- [52] Anderson R S, Bunas K L. Grain size segregation and stratigraphy in aeolian ripples modelled with a cellular automaton[J]. *Nature International Weekly Journal of Science*, 1993, 365(6448): 740-743.
- [53] Hiraku Nishimori, Masato Yamasaki, Ken Haste Andersen. A Simple Model for the Various Pattern Dynamics of Dunes[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2012, 12(12): 257-272.
- [54] 孙其诚, 王光谦. 模拟风沙运动的离散颗粒动力学模型[J]. *泥沙研究*, 2001(4): 12-18.  
Sun Qicheng, Wang Guangqian. Discrete particle dynamics model for simulating sediment transport by wind[J]. *Journal OF Sediment Research*, 2001(4): 12-18.
- [55] Zheng X J, Bo T L, Zhu W. A scale-coupled method for simulation of the formation and evolution of aeolian dune field[J]. *International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation*, 2009, 10(3): 387-396.
- [56] 吴锺结, 王明, 王亮. 湍流风场中三维风成沙波纹形成过程的大涡模拟研究[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2008, 38(6): 637-652.  
Wu Chuijie, Wang Ming, Wang Liang. The turbulent wind field three-dimensional wind ripples formed large eddy simulation process[J]. *Scientia Sinica Physica; Mechanica & Astronomica*, 2008, 38(6): 637-652.



- [57] Schwämmle V, Herrmann H J. A model of Barchan dunes including lateral shear stress[J]. The European Physical Journal E, 2005, 16(1): 57–65.
- [58] Baas A C W, Nield J M. Modelling vegetated dune landscapes[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): L06405–[5pp].
- [59] Werner B T. Eolian dunes: Computer simulations and attractor interpretation[J]. Geology, 1995, 23(23): 1107.
- [60] Anderson R S. The attraction of sand dunes[J]. Nature, 1996, 379 (6560): 24–25.
- [61] Bo T L, Zheng X J. The formation and evolution of aeolian dune fields under unidirectional wind[J]. Geomorphology, 2011, 134(3–4): 408–416.
- [62] 王涛. 走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 1–3.  
Wang Tao. The research and practice of desertification control in China[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(1): 1–3.
- [63] 王振亭, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 229–232.  
Wang Zhenting, Zheng Xiaojing. A simple model for calculating measurements of straw checkerboard barriers[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 229–232.
- [64] 屈建军, 凌裕泉, 沮瑞平, 等. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 329–335.  
Qu Jianjun, Ling Yuquan, Zu Ruiping, et al. Study on Comprehensive Sand-protecting Efficiency of Semi-buried Checkerboard Sand-barriers[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 329–335.
- [65] Huang N, Xia X, Tong D. Numerical simulation of wind sand movement in straw checkerboard barriers[J]. The European Physical Journal E, 2013, 36(9): 1–7.
- [66] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——2. 沙漠化的研究内容[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 477–482.  
Wang Tao. Study on Sandy Desertification in China: 2. Contents of Desertification Research[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 477–482.

## Advancing in study of the blown sand physics and its application in desertification control

LIU Shizeng, XU Xianying, ZHAN Kejie

Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Wuwei 733000, China

**Abstract** Due to its serious obstacle and threat to human survival and society sustainable development, desertification has received much attention from the world. The movement of sand and dust particles on the land surface and in the air driven by air flow is the main form of desertification occurrence and development process, it is also one of the core contents of desert science and desertification control engineering. The interaction mechanism among wind, surface and dust particles is the key to analysing of land desertification process or the establishment of disaster prevention project. This paper presents the development course of the physics of wind-blown sand, and an extensive review of the structure of the wind-sand field, physics of aeolian dust emission, collision mechanism of the sand dust, electrification of wind-blown sand, modelling and experiment of the sand flow, formation and development of sand ripples and dunes, and the application of research work on mechanism of wind-blown sand to the desertification control. At last the direction for future study was put forward.

**Keywords** desertification; sand; wind velocity; engineering of desertification control

(责任编辑 刘志远)