

风沙运动的力学机理研究

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土壤风蚀、沙尘天气(甚至沙尘暴)以及风沙灾害本质,进而实现有效防治的基础。其中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当今科学前沿所关注的共性和热点课题。本文在简要回顾与风沙运动力学机理研究相关的已有工作的基础上,重点介绍了兰州大学风沙环境力学研究组针对风沙流中的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、风沙流发展过程的理论预测、固沙结构有效尺寸的分析、风成地貌主要特征的计算机模拟等方面所开展的研究工作。

[关键词] 风沙流;风沙电场;风成地貌;理论预测;风洞实验

[中图分类号] P425.55

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)14-0022-06

On Mechanism of Wind-blown Sand Movement

ZHENG Xiaojing

Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The mechanism of wind-blown sand movement serves a basis in understanding wind erosion, dust weather (including dust storm) and blown sand disaster, and also a basis in effectively preventing the sand related disasters. It is closely related to many scientific problems such as the multi-scale problem, the coupling of multi fields, randomness, non-linearity, the effect of scale as well as complex system. These problems are also among hotspots in scientific frontline. This paper briefly reviews the research work on mechanism of wind-blown sand movement, and focuses on recent studies of the research group of environmental mechanics on wind blown sand movement in Lanzhou University. They include the basic laws governing the particle charge and electric field in the blown sand flux, the effects of sand electrification on telecommunication, theoretical simulation of the evolution process of windblown sand flux, theoretical analysis on the effective size of blown sand fixing structures, and the main features of Aeolian sand ripples.

Key Words: wind blown sand flux; electric field in blown sand flux; Aeolian physiognomy; theoretical prediction; wind tunnel experiment

CLC Number: P425.55

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)14-0022-06

0 引言

风蚀是我国北方干旱区最活跃的一种陆表过程。随着全球变化和人类活动的加剧,发生在我国绿洲-荒漠过渡带的风蚀过程成为导致土地(农田)退化、地表覆盖度降低和风沙灾害等一系列生态环境问题的关键过程。目前我国遭受风蚀的土地面积已超过水蚀面积,达 191 万 km^2 ,而且风蚀程度相比 10 年前也在加重^[1]。如位于腾格里和巴丹吉林沙漠之间的楔形绿洲——甘肃民勤地区,近年来由于严重的土壤风蚀,绿洲面积迅

速减小,地下水位急剧降低,两大沙漠呈现在此汇交的趋势(见图 1)。与此同时,频发的沙尘天气(包括沙尘暴)不仅影响空气质量,还严重影响交通、通讯、基础设施以及环境(见图 2)。例如,2007 年 2 月 28 日乌鲁木齐至阿克苏的 5807 次旅客列车因沙尘暴袭击发生脱轨翻车;2006 年 4 月 17 日北京地区一夜间降尘达数十万吨等。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。

无论是土壤风蚀还是沙尘天气(包括沙尘暴),均

收稿日期:2007-05-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(10532040),科技部国际科技合作项目(2006DFA03640)

作者简介:郑晓静,兰州市天水南路 222 号兰州大学土木工程与力学学院工程力学研究所,教授,研究方向为非线性和多场耦合问题的理论建模和模拟、风沙环境力学;E-mail: xjzheng@lzu.edu.cn



图 1 甘肃民勤县遭受沙化的农田

Fig. 1 Farmland exposed to sand of Minqin, Gansu



图 2 2007 年 4 月 2-3 日上海遭遇沙尘暴袭击

Fig. 2 Shanghai got a huge dust storm in April 2-3, 2007

是地表物质在风力作用下的剥蚀、分选和搬运的一种自然现象,其发生和发展的物理过程直接涉及风沙运动的力学机理(也称之为风沙物理学),而风沙灾害工程防治措施的原理和有效性分析更是一种典型的流固耦合力学问题。因此,风沙运动的力学机理研究应该是力学学科中值得关注的一个重要研究课题。

虽然 19 世纪末就有人开始考察并描述风沙运动现象,但真正量化地研究风沙运动的动力过程则始于英国学者拜格诺。当时正值美国和加拿大因农田大量开垦而导致的沙尘暴频发时期,这位物理学家兼工程师就将他多年在利比亚沙漠中的野外观测和一系列风洞试验,结合与他同时代的力学家普朗特等建立的现代流体力学理论,于 1941 出版了一本奠基性的著作——《风沙和荒漠沙丘物理学》。然而,20 世纪 40 年代的有关风沙运动的研究还只是以实验与野外观测为主。60 年代后,由于火星探测等需求,有些学者开始运用微分方程对风沙运动进行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给予了极大关注。如著名国际力学期刊 *Acta Mechanica* 在 1991 年出版了题为“风沙迁移”的专辑。

列入这一专辑的首篇文章“风沙运动研究的进展”,在总结了相关研究工作之后指出“在风沙运动研究中已有的风沙运动的定量化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”^[2]。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仍没有出现突破性进展,尚停留于 20 世纪 90 年代的研究水平^[3]。

我国政府对风沙灾害一直高度重视,如温家宝总理近年来仅针对甘肃民勤地区的风蚀和风沙灾害问题就先后做了 12 次批示,其中“不能让民勤成为第二个罗布泊”和“要让我们这一代人看到民勤的变化”正成为当地政府和民众的共同决心。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,我国的力学工作者也进行了许多理论研究工作^[4],还进行了卓有成效的风沙治理。除此之外,以著名大气物理学家曾庆存院士为首的一批从事气象、遥感、地理和环境研究的科技工作者,在国家项目的支持下,充分发挥多学科联合攻关的优势,在沙尘暴研究方面取得了多方面的创新性研究成果^[5]。

在对风沙运动力学机理的研究方面,兰州大学风沙环境力学研究组在“国家杰出青年基金”(1997)、“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”。最近的一个实验段为 20.0 m(长)×1.3 m(宽)×1.45 m(高)的、主要用于风沙运动和风沙防治工程措施研究的多功能风洞正在该校的“西部灾害与环境力学教育部重点实验室”投入使用并正式对外开放。本文在简要回顾与风沙运动力学机理研究相关的已有工作的基础上,重点介绍近年来兰州大学风沙环境力学研究组在风沙运动力学机理方面取得的新进展。

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^[6]。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,兰州大学风沙环境力学研究组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 μm 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的,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,电场强度随风洞轴线来流风速和高度的增大而上升;混合沙的风沙电场比“均匀沙”的电场大得多,在 $20\ \text{m/s}$ 的风速时,前者的最大值高出后者 20 倍以上^[7]。

单宽输沙率是评价土壤风蚀程度的重要物理量。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,笔者等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 $u^* > 0.47\ \text{m/s}$ 和 $u^* < 0.35\ \text{m/s}$ 时与实验测量值有较好的吻合;而在 $0.35 \sim 0.47\ \text{m/s}$ 时,它们与实验值均有较大差异^[8]。有关这一实验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。”

为了尽可能准确地认识、进而预测并科学地防治土壤风蚀及其所导致的风沙灾害,需要对近地表层风沙流的特点和规律进行全方位的监测。尽管位于民勤地区的甘肃治沙所已经进行了长期的观测,积累了大量数据并建成了“甘肃民勤荒漠生态国家野外生态站”,但是仍缺乏对不同性质的近地表(离地表 $1\ \text{m}$ 以下)土壤风蚀相关指标的实时和全方位的观测。兰州大学风沙环境力学研究组在与美国农业部土壤风蚀与水土保持研究所大斯普林土壤风蚀野外观测站全面合作的基础上,在科技部国际科技合作计划和美国农业部的共同支持下,充分发挥中方有关风沙电现象和风沙流发展过程理论研究的优势,集成美方已有的较为先进的测量仪器和技术,利用正在研制并将进一步完善的同步多点动态测量和实时数据采集系统,对民勤地区不同地表、植被和土质情况的野外自然环境下的风沙流,包括非定常风速和风向、风场的湍流结构、风沙流结构、单宽输沙率、风沙电场分布、荷质比、地表热扩散和对流等可测物理量进行了全方位监测。

2 理论预测

针对风沙流中沙粒的散体性,笔者等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,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^[9]。除此之外,还提出一个确定沙粒起跳初速度分布函数-床随机碰撞模型。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,给出了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^[10]。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为 $-1\ 200 \sim 1\ 100\ \text{r/s}$ (逆时针为正),其中小于 $500\ \text{r/s}$ 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”现象研究提供了理论依据。在此基础上,利用高速电影摄影仪对风洞中风沙流的沙粒运动进行了拍摄,分析证实:风沙流中的沙粒除了可能会在沿地表高度方向与风速方向构成的二维平面内发生顺时针和逆时针旋转外,还有可能在与该面垂直的面内发生旋转;面内旋转的角速度均服从偏态分布。理论模拟发现:当风沙流中沙粒旋转的角速度大于 $375\ \text{r/s}$ 时,沙粒旋转对沙粒轨迹高度的影响将超过 15%,同时将引发沙粒从二维的运动轨道偏转到三维上^[11]。

基于风沙流统计耦合模式,笔者等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,给出了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^[12];给出了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的分布以及风速廓线的影响^[13]。这些定量预测结果不仅能与相关实验结果和规律良好吻合,而且还能有效揭示相关因素,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^[14],即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。”笔者等还通过考虑局部地表受太阳辐射等因素产生的高温进而引起近地层空气的强对流,建立了尘卷形成的流场运动方程;采用大涡模拟方法,成功地模拟了强热对流引起的尘卷现象及其发展过程,同时还实现了对沙粒在尘卷中的运动及其尘卷电场的形成过程。

针对目前在对风沙流的预测中均没有考虑沙粒在跃移过程中的相互碰撞及其对输沙率和起沙率的影响,实验又难以确定这种碰撞概率的问题,提出了一个理论模型。计算结果发现:风沙流中的沙粒碰撞概率随着跃移沙粒起跳速度及来流风速的增加而增大;当轴线风速和起跳初速度足够大时,跃移沙粒在空中发生碰撞几乎是必然的,因此,跃移沙粒在空中发生的碰撞不应被忽略。在此基础上提出:除了风场与运动沙粒间的相互影响是形成稳态风沙流的主要机制外,运动沙粒与床面以及运动沙粒间在空中的碰撞也是形成稳态风沙流的原因之一。这是由于随着沙粒在空中发生碰撞的概率变大,跃移沙粒能量的消耗增加,使得跃移沙粒与床面的碰撞概率减小,进而达到稳态。这一工作^[15]被国外著名期刊 *Journal of Geophysical Research* 的审稿人认为:“空中碰撞的问题在解释或者模拟跃移(从而输运)过程时通常都被忽略或假定可以不考虑。作者给出的概率模型是原创性的,相当于朝着量化这一过程迈出了重要的一步”;“这项工作对一个高度复杂的问题给出了一个有用但又简单的分析”;“其结果意味着沙粒的空中碰撞在稳态风沙流中对输沙率起着重要的控制作用。”

沙尘暴对无线电通讯的影响在国内外均有报道。Haddad 等采用 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,笔者等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散射场的精确解^[16]。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 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。此外,兰州大学风沙环境力学研究组还开展了主要工程固沙结构(草方格、栅栏和地表结皮)的力学性能研究。针对草方格沙障防护区域内流场的特点,提出一个单排涡列模型,用以模拟实际风沙流场,进而给出与目前由长期工程实际经验摸索给出的尺寸比较吻合的草方格边长与出露草头高度的对应关系^[17],为其合理设计提供了理论依据。

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^[18]。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。笔者等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^[19]。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 的沙床在摩阻风速为 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;而当沙床的沙粒为粒径 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),这也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是: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,保持饱和和形态不变向前运动。沙波纹移动速度一般为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ m/s 且与风速呈线性关系,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。只有风速在这两个临界摩阻风速值(当沙粒粒径为 0.4 mm 时二临界值分别为 $u^*=0.4$ 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^[20]。

由于沙丘发展过程的空间和时间尺度比较大,用实验和野外观测的方法来研究其形成过程比较困难。在现有的对沙丘形成的理论模型预测和计算机模拟研究中,基于物理过程的模型研究只适用于单个沙丘的形状,而采用二维离散动力学模拟虽然可以模拟出由多个沙丘组成的沙丘群中的沙丘生长和移动,但由于对风沙运动的主要环节难以考虑充分,使得模拟结果很难在时间和空间上与实际情况对应。在笔者等所提出的模拟方法中,考虑了沙丘迎风坡的风速特点以及侵蚀沙量随风速的变化,考虑了有效沙源及沙粒的粒径影响等。该模拟方法不仅解决了模拟结果与时间和空间的对应问题,而且所得到的沙丘尺度和移动速度与已有测量结果吻合良好。如文献[21]观测到的摩洛哥撒哈拉沙漠地区高度为 22 m 的沙丘移动速度为 14 m/a,而笔者等模拟的结果约为 12 m/a;与文献[22-23]给出的观测结果的比较见图 3 和图 4。同时,还能模拟出沙丘群的发展过程,沙丘间的碰撞行为,风速加速和沙粒粒径对沙丘尺度的影响,沙丘碰撞过程中存在的孤波

行为、吞噬行为和发育行为等。

4 结论与展望

目前,对于包括风沙流发展过程在内的实验和理论模拟研究还主要是二维的,风场也主要是风洞中给定控制条件的理想条件下的。事实上,风洞中的风沙流与野外可能是完全不同的,野外自然环境中也还需要考虑复杂地形条件、湿度、植被盖度、地表物质结构等客观实际因素对风沙流的影响。气流的某些湍流特征,如隙向性局部速度突然增大(猝发过程)对风沙传输应该会有重要影响。为了建立更为准确的理论模型,还需加强野外实测工作,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的关系。这又需要对现有的各种观测和实验仪器进行改进和研制。另外,如何为准确的沙尘天气预报提供有效的起沙机制并同化和模块化,如何建立适合我国具体情况的土壤风蚀预报方程,如何给出有效的综合防治措施的科学设计原理和依据,等等,还值得深入研究。风沙运动系统是一种具有诸多特征的、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,还需要多学科科学家的联合攻关,以揭示机理、认识规律。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国水利部. 2004 中国水土保持公报[R]. 2005-12-26.
- [2] ANDERSON R S, SORENSEN M, WILLETTTS B B. A review of recent progress in our understanding of Aeolian sediment transport[J]. Acta Mech, 1991, 1(Supp): 1-19.
- [3] 严平, 董治宝. 从 2002 年第五届风沙国际会议看沙漠科学研究的发展趋势[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 451-454.
YAN Ping, DONG Zhibao. Trend of aeolian research viewed from ICAR-5, 2002 [J]. Arid Land Geography, 2004, 27(3): 451-454.
- [4] 郑晓静, 周又和. 风沙运动研究中的若干关键力学问题[J]. 力学与实践, 2003, 25(2): 1-6.
ZHENG Xiaojing, ZHOU Youhe. Some key problems in the research of wind-blown sands[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(2): 1-6.
- [5] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 千里黄云——东亚沙尘暴研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZENG Qingcun, DONG Chaohua, PENG Gongbing. Gigantic yellow cloud: Dust storms in East Asia [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [6] 郑晓静, 黄宁, 周又和. 风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1): 77-86.
ZHENG Xiaojing, HUANG Ning, ZHOU Youhe. Advances in investigation on electrification of wind-blown sands

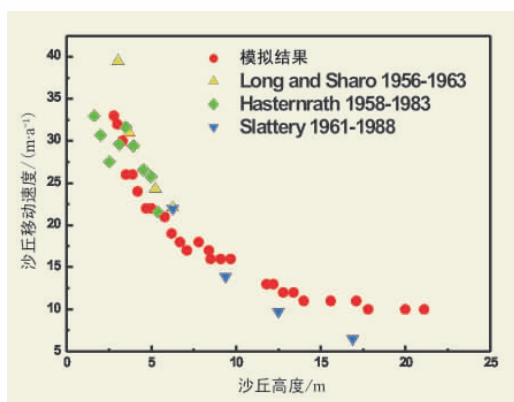


图 3 沙丘移动速度随高度的变化

Fig. 3 Dune velocity varied with dune height

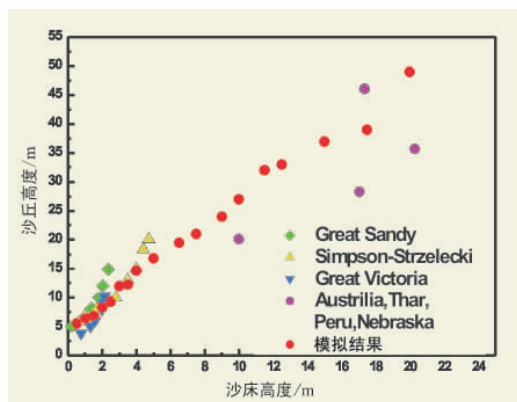


图 4 沙丘高度随沙床高度的变化

Fig. 4 Relationship between dune height and sand thickness