



華夏英才基金學術文庫

倪晋仁 李振山 著

风沙两相流理论 及其应用



科学出版社

www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

风沙两相流理论及其应用

倪晋仁 李振山 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于风沙两相流基本理论及其应用研究的专著。书中论述了沙粒在风力作用下的运动规律,包括沙粒的运动和输移特性,沙纹和沙丘的形成发育及其分布规律,探讨了预测和模拟地表形态变化的方法,提出了量化沙漠化过程与人类活动之间关系的途径。本书不仅通过国内外大量文献系统地介绍了本领域的最新研究进展,而且通过对风沙两相流运动机理的深入分析有效地展示了理论与应用结合的前景。本书内容新颖,资料丰富,概念清晰,叙述简明。尤其是附录中给出的一整套精密测量资料对同行今后开展相关研究提供了很大的方便,在一定程度上可以帮助克服理论验证方面经常遇到的困难。

本书可供从事地理、农林、水利、资源和环境科学类专业的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

风沙两相流理论及其应用 / 倪晋仁等著. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-015673-0

I. 风… II. 倪… III. 风沙地貌-二相流动-研究 IV. P931.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 060589 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:刘彦妮
责任印制:吕春珉 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2006年1月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1—2 500 字数:257 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

有关荒漠化或沙漠化的话题早已不再陌生。然而,造成这类全球关注的生态环境问题的根源是什么?荒漠化问题与风沙过程及人类活动之间有什么关系?如何科学地描述风沙运动机理?如何精确地获得关于自然或人为要素的量化信息?这些都是当前重要的科学问题。

风沙两相流运动的研究具有重要意义。风沙两相流的研究方法通常有野外观测、风洞模拟和数值模拟等。虽然从 19 世纪中叶就已开始对风力作用规律有所认识,但是风沙两相流研究的真正进展始于 20 世纪 30 年代 Bagnold 的系统研究。此后,随着多相流理论的发展和先进测量手段的出现,风沙两相流理论取得了迅速发展,并已成为整个风沙学科研究的重要基础。另一方面,风沙两相流研究在精密测量方面仍然存在困难,即使是已取得的实验结果,往往也因测量仪器的规范性差或实验条件存在差异,各家实验资料由于缺乏可比性而难以为风沙运动理论的建立提供足够的量化信息,两相流理论研究也因缺乏精确实验资料的验证而受到限制。

注意到近年来国内外相邻学科在多相流理论研究方面取得的最新进展,同时注意到目前在风沙两相流实验研究的不足之处,作者在国家杰出青年基金(批准号:49625101)等的支持下拟定了系统开展风沙两相流风洞实验研究的计划,并于 1998 年在中国科学院沙坡头沙漠科学试验研究站野外风洞进行了系列实验,获得了丰富的实验资料。在实验和广泛收集国内外学者实测资料的基础上,作者利用多年来从事多相流理论研究的优势,结合风沙运动特点从理论上对风沙两相流基本问题进行了较为深入的研究。这方面的研究历时 8 年,先后有 20 余人参加,其间为了获得精密的资料和等待对理论的严格验证,多次放弃了“快出成果”的机会。作者感谢国家自然科学基金委员会和科学出版社相关同志和专家的耐心和宽容,因为我们深知在社会经济发展迅速的今天,能够静心等待别人的“慢工细活”是多么不易。令作者欣慰的是书中的一些颇为厚实的重要成果在国际杂志上发表以后深受同行的肯定,我们也在实际上并不漫长的过程中得到了磨练。

在风洞实验过程中得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所刘贤万研究员、王国昌工程师、杨太运研究员、李芳副研究员的热情帮助,在高速摄影实验中得到了中国科学院西安光机所王建华高工、李国佑高工、陈良益研究员和中国科技大学周绍祥教授的技术帮助,在研究过程中还得到了北京大学马蔼乃教授和徐海鹏

教授的热情鼓励和支持,吴世亮和罗昊同学分别参加了风洞实验和理论分析部分的工作,在此一并感谢。

由于水平有限,书中欠妥之处在所难免。作者愿在前辈和同行的批评和讨论中不断取得学术进步。

目 录

前言

绪论	1
0.1 风沙两相流研究的重要意义	1
0.2 风沙两相流研究的发展简史	2
0.3 风沙两相流研究的主要方法	3
0.4 风沙两相流研究的基本问题	4
参考文献	5

第一章 沙粒运动的基本特性

8

1.1 沙粒的主要运动形式	8
1.2 沙粒的临界起动特征	10
1.2.1 沙粒的流体临界起动	10
1.2.2 沙粒的冲击临界起动	11
1.3 沙粒的主要运动特性	11
1.3.1 沙粒的受力分析	11
1.3.2 各力对沙粒运动的影响	14
1.3.3 沙粒运动的轨迹	19
1.3.4 跃移沙粒速度和加速度	22
1.3.5 影响沙粒运动的主要因素	24
1.4 沙粒运动的统计特征	27
1.4.1 沙粒与床面的碰撞	28
1.4.2 相对跃高和跃长的分布	30
1.4.3 起跃角、降落角及起跃速度的分布	31
1.4.4 沙粒粒径的分布	34
1.4.5 沙粒的速度分布函数	35

参考文献	40
------------	----

第二章 风沙两相流的运动特性

42

2.1 沙粒运动对脉动风速的影响	42
2.1.1 脉动风速与时均风速的关系	44
2.1.2 沙粒运动对相对脉动风速的影响	44
2.1.3 沙粒运动对脉动速度分布的影响	45

2.2 沙粒运动对平均风速的影响	46
2.2.1 沙粒运动对风速大小的影响	46
2.2.2 沙粒运动对风速廓线的影响	47
2.3 风沙两相流运动的边壁效应	51
2.3.1 风洞内风速垂线分布的分区	52
2.3.2 风洞边壁对流速分布的影响	53
2.3.3 风洞边壁对气流摩阻速度的影响	55
参考文献	57
第三章 风沙两相流的输移特性	59
3.1 输沙通量的垂线分布	59
3.1.1 集沙效率分析	60
3.1.2 气流速度和沙粒粒径的影响	69
3.1.3 输沙通量分布函数	70
3.2 输沙通量的水平分布	71
3.2.1 实测输沙通量水平分布	72
3.2.2 输沙通量的水平分布函数	74
3.3 输沙率的计算方法	75
3.3.1 现有输沙率公式反映的输沙关系	77
3.3.2 实测资料反映的输沙关系	79
3.3.3 输沙率公式的统一形式	80
3.3.4 统一公式中参数变化规律	83
参考文献	86
第四章 风沙动力与地貌形态	89
4.1 沙纹形态特征与形成机理	89
4.1.1 沙纹形态特征	89
4.1.2 沙纹发育过程	90
4.1.3 沙纹形成假说	94
4.1.4 沙纹形成机理	96
4.2 沙丘形态特征与形成机制	107
4.2.1 沙丘研究的几个重要阶段	107
4.2.2 沙丘形态特征	108
4.2.3 沙丘沉积特征	112
4.2.4 沙丘形成机制	117
4.2.5 沙丘移动速度	123
参考文献	124
第五章 沙漠化过程模拟预测	129
5.1 沙纹过程的模拟预测	129

5.1.1	沙纹模拟方法	129
5.1.2	沙纹模拟模型	132
5.1.3	沙纹过程特征	139
5.2	沙丘过程的模拟预测	152
5.2.1	单一沙丘模拟	152
5.2.2	沙丘地的模拟	153
5.3	沙漠化过程的动态评估	155
5.3.1	沙漠化土地的动态评估方法	156
5.3.2	评估方法的应用	158
5.3.3	评估方法的可行性	161
	参考文献	162
附录	风沙运动风洞实验资料	165
1	实验概况	165
1.1	实验目的	165
1.2	实验设施	165
1.3	实验材料	167
1.4	观测项目	168
1.5	观测仪器和方法	168
2	风速廓线测量资料	169
2.1	A 沙风速测量结果	169
2.2	B 沙风速测量结果	170
3	输沙量测量资料	170
3.1	垂直集沙数据	170
3.2	水平集沙数据	171
4	集沙沙样粒度分析资料	172
4.1	沙样编号	172
4.2	I 号风沙样分析结果	173
4.3	II 号风沙样分析结果	174
4.4	III 号风沙样分析结果	174
4.5	IV 号风沙样分析结果	175
4.6	V 号风沙样分析结果	176
5	风沙流沿程变化的测量资料	176
5.1	风速变化	176
5.2	集沙结果	177
6	地表蚀积变化测量资料	177
6.1	实验布置	177
6.2	纵向蚀积	178

6.3	横向蚀积	179
7	两风向沙纹实验测量资料	180
7.1	床面布置	180
7.2	实验结果	181
7.3	沙纹对集沙量的影响	190
7.4	2号断面风速	191
8	风速脉动测量资料	191
8.1	净风速度脉动测量	191
8.2	挟沙风速度脉动测量	197
9	沙丘形态能耗测量资料	202
9.1	床面布置	202
9.2	测风布置	202
9.3	气流测量	203
10	风洞边壁效应测量资料	203

绪 论

风沙两相流是研究风力作用下沙粒运动规律的科学。沙粒在气流的作用下滚动、滑移和跳跃,形成了风沙流;伴随着风沙流的运动过程,可能在地表形成沙纹和沙丘。因此,风沙流与沙纹及沙丘密不可分,也是风沙两相流研究的主要对象。

风沙问题涉及多个方面:沙粒在气流作用下的运动规律,粉尘的起动、输送和沉降规律,沙纹和沙丘的形成发育及其分布规律,沙漠的形成及其演化规律,土壤特性对风蚀的影响机理,风沙运动与人类活动以及与全球变化的关系,风沙环境影响评价,风沙灾害治理原理和技术,沙区气候水土资源特征,沙区保护、开发与可持续发展等。对风沙运动规律的深入认识是解决风沙问题的基础。

0.1 风沙两相流研究的重要意义

风力是塑造地表形态的主要动力之一。全球 1/3 的陆地为风沙作用强烈的干旱和半干旱地区,其中沙漠面积占 20%。在地质历史时期植被尚未出现之前,风沙过程远比现在强烈。在 18 000 年前,强烈的风沙活动曾导致大气中的粉尘含量比现在高 40 倍以上。在火星、金星等其他星球上,风沙作用也是重要的地表外营力。

风力对地表的侵蚀会留下大片的戈壁,风沙过程产生大量的沙粒沉积物时便形成沙漠。风沙过程产生的粉尘会输送到上千公里的高空,并可能在全球范围内有不同程度的降落。据估计,仅粒径小于 $20\mu\text{m}$ 的颗粒之全球年输移量就超过 $0.5 \times 10^8 \text{t}^{[1]}$ 。粉尘是土壤形成的重要物质,是黄土形成的物源,也是深海沉积物、冰川沉积物、河流悬移物的主要组成部分。风沙活动受气候变化影响显著,因而从风成沉积或形态可以解释气候变迁、大气环流变化和风向变化,从风成沉积单元的变化可以了解气候变迁、海平面变化和沙物质供应之间的关系^[2]。风成沉积和形态已被看作是蕴藏古气候信息的有效载体。风成沙岩具有较好的渗透性质,它是贮存碳氢化合物的良好介质。源于沙漠地区的气溶胶对生物生产力和大气透明度及全球变化都有直接影响。

以风沙过程为主要标志的沙漠化已成为全球最突出的生态环境问题之一。世界上有 100 多个国家和地区存在沙漠化问题,全球约 1/6 的人口生活在沙漠化地区。我国土地沙漠化面积 $37.96 \times 10^4 \text{km}^2$,受风沙危害地区的面积达 $191 \times 10^4 \text{km}^2$,60% 以上的贫困县生活在风沙地区。风沙对农业、牧业、交通、水利等造成了极大危害,已有 1000 多万公顷农田、1 亿多公顷草场遭受风沙危害,沙害造成的直接经济损失已愈数百亿元人民币。沙尘暴已成为严重的自然灾害之一。20 世纪 30 年代

美国西部大平原的黑风暴曾造成数百万公顷农田废弃,250 万人口外迁;30 年代以来加拿大的沙尘暴已造成经济损失 500 多亿元;50 年代以来的中亚里海-咸海的沙(盐)尘暴不但具有沙尘暴普通危害,而且由于尘暴中含有大量的有毒化学物质造成了土地和空气污染,导致了当地居民身体的严重畸变;60 年代末 70 年代初非洲撒哈拉连续干旱造成沙尘暴频繁发生,自然环境恶化曾造就了 600 万生态难民;90 年代澳大利亚沙尘暴引起严重恶果,近 20% 的哮喘病因沙尘暴引发;近 10 余年来,我国的沙尘暴造成的损失触目惊心,仅 1993 年 5 月 5 日的沙尘暴就造成直接经济损失 4 亿多元。中亚、北美、中非和大洋洲是全球四大沙尘暴多发区,从沙尘暴发生的频率和强度来看,目前还没有减少或变缓的趋势。

风沙两相流研究是认识自然规律的迫切要求,是开展荒漠化和沙漠化治理的重要基础,同时也是改善人地关系和促进区域可持续发展的科学依据,因此风沙两相流运动的研究具有重要的理论和实践意义。

0.2 风沙两相流研究的发展简史

早在 19 世纪中叶,Ehrenberg^[3]就认识到风力作用在塑造地表形态的重要性,并描述了从非洲输送到欧洲的粉尘特征;19 世纪末,Sokolov^[4]区分了沙粒滑移和跳跃两种运动形式,与后来提出的蠕移和跃移概念相一致,同时还通过实验验证了临界起沙风速。Cornish^[5,6]对沙纹形态进行了测量,力图探讨沙纹的高度与长度之间的关系,并在 20 世纪初提出了沙纹是沙丘早期发育形态的假说。

20 世纪 30 年代,风沙两相流研究有了重要的发展。Bagnold 在 1929 年和 1930 年考察了西利比亚沙漠(Western Desert),意识到了了解沙粒运动规律是阐明各种风沙运动现象和过程的基础,随后在 1935~1939 年间借助室内风洞实验获得了一些重要的研究结论,并于 1938 年在埃及利比亚沙漠对风洞实验结果进行了野外验证^[7~10]。1941 年,Bagnold 在其出版的 *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*^[11]一书中,论述了风沙物理学的基本理论,深入讨论了沙粒分布、沙纹、沙丘类型、沙丘沉积物的内部构造以及鸣沙等伴随风沙运动的现象和过程特点,提出了临界起动风速公式、起沙后风速分布模式与输沙率计算公式等,这些研究成果被后人反复证实和广泛引用。对于这部首次系统论述流体与沙粒间相互作用的动力地貌学专著,Tsoar^[12]曾给予了详尽的评述。

20 世纪 40~50 年代,风沙两相流的研究得到了进一步的深化。Chepil^[13]发表了 100 余篇有关土壤风蚀方面的文章,其中涉及到许多与风沙两相流运动相关的内容。与 Bagnold 相比,Chepil 更注重土壤或地表特性对沙粒输移的影响,这些特性包括土壤抗风蚀性、田间长度、土垄糙度、植被因子等,探讨的问题比 Bagnold 的更为复杂。这期间,河村龙马^[14]在将床面受力分解为气流剪应力和颗粒剪应力前提下提出了包含临界摩阻速度在内的输沙率公式;Zingg^[15]进行了五组近乎单一

粒径沙粒的输沙实验,兹纳门斯基^[16]提出了风沙流结构和饱和路径长度概念等。20 世纪 60 和 70 年代,在沙粒运动理论研究方面取得了一定进展。Owen^[17]基于风沙流发育的自平衡思想分析了沙粒输移规律,并将沙粒跃移层视为有效粗糙度,提出了具有较大影响的输沙率公式和跃移层外的风速垂线分布公式。Horikawa 和 Shen^[18]对集沙仪集沙效率的研究使人们认识到测量精度的重要性;Belly^[19]研究了土壤水分对输沙率的影响,Kadib^[20]尝试将 Einstein 的泥沙运动理论应用到风沙运动中,Williams^[21]讨论了沙粒形状对沙粒运动及输沙的影响,并分析了不同高度的沙粒粒径分布特征。Cooke 与 Warren^[22]对 20 世纪 70 年代之前的风沙运动成果进行了总结。

20 世纪 80~90 年代,风沙两相流研究得到了广泛关注。一系列国际风沙学术会议的举行推动了风沙问题研究的全面展开,出版了许多重要的学术论文、专著和论文集^[23,32]。钱宁和万兆惠^[33],Pye 和 Tsor^[34],Cook 等^[35],Lancaster^[36],Livingstone 和 Warren^[37],Shao^[38]等都对风沙两相流研究做出了贡献。与此同时,在研究方法上更趋多样化,包括野外观测、数值模拟、风洞实验结合高速摄影、理论分析等。跨入 21 世纪后,风沙两相流研究异常活跃,在研究内容方面更趋系统化^[39,41]。风沙两相流已成为整个风沙学科研究的重要基础,在沙尘暴、沙漠和沙漠化、治沙工程研究中都有重要的应用^[41,42]。

0.3 风沙两相流研究的主要方法

风沙两相流研究与其所关注对象的性质及相关科学技术的发展密切相关。风沙两相流的研究方法通常有野外观测、风洞模拟和数值模拟等。前两种方法是对风沙运动特征和规律的直接研究,后一种方法则是对风沙动力的间接模拟,所得结果需由前两种方法获得的资料进行验证。

野外观测是风沙两相流研究的基本方法之一。常见的观测方法如采用风速仪、集沙仪等对风沙运动及输沙量进行测量及通过示踪技术观测沙粒运动过程等。集沙仪分为垂直集沙仪和水平集沙仪两类,分别测量沙粒水平输移量和沙粒垂直降落量,二者都可以获得输沙率的信息。如果集沙仪的内部结构分层,则称为垂直点阵集沙仪和水平点阵集沙仪,分别测量输沙量垂直线分布和沙粒降落量分布。集沙仪还可以呈旋转形以测量不同风向的输沙量。将集沙仪固定在同一位置可以获得该测点的输沙量大小及其随时间变化的规律。将多个集沙仪放置在不同位置,同时进行多点测量便可获得相应空间的输沙量变化规律。示踪技术是通过将沙粒着色、荧光或辐射物后对其运动过程进行观测的方法,实际上就是给沙粒“贴上标签”,以便在沙粒运动过程中加以辨认。实验时可将有色沙粒放于沙地的某一位置,然后在下风向的不同位置进行采样,分析样品中有色沙粒的浓度变化与运动距离的关

系^[43],进而可以推算输沙率的大小^[44]。也可以将不同粒级的沙粒染上不同的颜色进行研究。具有荧光的沙粒在紫外光下即可辨认。沙粒着色或荧光不会改变沙粒的动力特性^[45]。通过¹⁹⁸Au 辐射可以跟踪单一沙粒的详细运动过程。¹⁹⁸Au 具有 2.7 天的半衰期,根据它释放出的 λ 射线很容易确定沙粒的位置^[46]。示踪技术也可以在风洞实验中使用。另外,与沙丘形态和沙丘沉积的观察^[47]及室内沙样粒度分析^[48]相结合也有助于对风沙运动规律的深入认识。

风洞模拟实验是研究沙粒运动规律的最有效的方法之一。专门用于研究风沙问题的风洞称为沙风洞,分为吹气式和吸气式两类。比较而言,吹气式风洞结构简单,但气流品质稍差;吸气式风洞结构较复杂,但气流品质较好。风洞还可区分出室内风洞和野外风洞两类。许多风沙问题都可以进行风洞模拟实验,这些问题包括风沙运动、风蚀机理、沙纹和沙丘的形成过程、粉尘的吹扬和沉积以及防沙工程原理。目前所了解的沙粒运动规律几乎都来自于风洞实验研究。

风洞模拟实验的设计往往依据相似性原理。风洞实验中使用的仪器设备包括毕托管、热线风速仪、小型集沙仪和高速摄影仪等。其中通过高速摄影仪可以对沙粒运动的微细过程进行分析。

数值模拟方法近年来在风沙运动研究中的作用越来越重要。根据野外观测以及风洞实验研究结果,采用数值计算方法开展的研究涉及风沙两相流研究的各个方面。数值模拟方法便于对风沙两相流运动进行定量模拟、预测和机理分析,可以灵活地进行方案变化,相关参数易于控制,而且可以节省资金投入,因此从 20 世纪 70 年代以来取得了快速进展。

0.4 风沙两相流研究的基本问题

风沙两相流的基本问题包括单一颗粒的起动和运动、颗粒群的输移、沙粒运动对气流速度的影响、风沙地表形态的形成机理及其模拟预测等。

(1) 沙粒运动的基本特性。

沙粒运动可分为沙粒起动和沙粒飞行两个阶段。沙粒起动是沙粒由静止向运动转变过程中的临界状态。沙粒的起动过程、起动机理、临界起沙风速等是沙粒起动研究的基本问题。

沙粒的起动一般关注沙粒整体位置发生移动的运动形式,而不指沙粒在原地来回运动的类型。沙粒起动可由流体直接驱动产生,也可以由上风向运动的沙粒冲击而引起。前者称为流体起动,后者称为冲击起动。流体起动通常指滚动起动,可通过沙粒受力平衡来分析其临界特征,冲击起动特征多由实验确定。

沙粒一旦起动,随即就进入运动状态。沙粒可能会沿地表或在气流中以不同的方式运动。沙粒在气流中的运动状态和形式、沙粒与床面的相互作用、沙粒的受力

状况、沙粒运动轨迹和统计特征是沙粒运动研究的主要问题。

(2) 风沙两相流的运动特性。

在风沙两相流中,沙粒一方面在气流的作用下运动,另一方面沙粒运动反过来对气流产生影响。运动的沙粒对气流的脉动风速和平均风速都会产生影响。风沙流中风速脉动特性和速度垂线分布特性是风沙两相流研究中的两个主要问题。另外,风洞作为研究风沙流的主要工具之一,它的边壁对风沙流特性的影响程度直接关系到实验结果的可靠性。

(3) 风沙两相流的输移特性。

沙粒在气流作用下运动的直接结果是使地表沙粒出现输移现象。输移的强度通常用输沙率来衡量。因此,建立风速、沙粒特性与输沙率的关系是风沙两相流输移特性研究的核心问题。气流中沙粒浓度和速度随高度的变化形式决定了输沙通量随高度的分布规律,也影响了沙粒降落量的水平分布特征,这两方面的分布规律与输沙率有很大关系,是沙粒输移特性的重要表现,也是风沙两相流输移特性研究的重要内容。

(4) 风沙动力与地表形态。

风沙两相流与地表沙粒之间的相互作用使得在松散的地表形成一些典型的形态,且其形态特征在风沙两相流的作用下发生相应变化。其中,最常见的地表形态是沙纹和沙丘,因此沙纹与沙丘形态特征、发育过程、沉积结构、移动速度及其形成机理便成为风沙两相流与地表形态过程相互作用研究的关键问题。

(5) 沙漠化过程预测模拟。

定量模拟的方法有助于揭示风沙地表形态变化特征与形成机理。风沙运动、沙纹和沙丘形成和变化特征是模拟的重要对象。模拟方法的选择、模拟模型的建立、模拟过程的实现和模拟结果的分析等便成为重要的问题。由于单一沙丘和沙丘地的复杂程度差别较大,模拟中经常区别对待,所采用的模拟方法和模型也有所不同。

沙漠化是一种复杂的风沙过程,不仅包含了基本的风沙两相流过程和风沙地形成动力过程,而且还涉及到人类活动过程。在模拟或评估中反映有关人类活动的影响十分困难,是沙漠化过程预测和评估的重要任务。

参 考 文 献

- [1] Peterson S T, Junge C E. Sources of particulate matter in the atmosphere. In: W H Matthews, W W Kellogg, G D Robinson, Editors. *Man's Impact on the Climate*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1971, 310—320
- [2] Crabaugh M, Kocurek G. Entrada Sandstone: an example of a wet aeolian system. In: Pye K ed. *The Dynamic and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems*. London: The Geological Society. 1993, 103—126

- [3] Ehrenberg C G. The Sirocco dust that fell at Genoa on the 16th May 1846. *Quarterly Journal of Geological Society London*, 1947, 3: 25—26
- [4] Sokolov N A. Dunes; development, formation and inner structures. St Petersburg, 1884, 286
- [5] Cornish V. On the formation of sand-dunes. *The Geographic Journal*, 1897, IX: 278—309
- [6] Cornish, V. Waves of sand and snow and the eddies which make them, T. Fisher Unwin, London, 1914, 383
- [7] Bagnold R A. The Movement of desert sand. *Geographical Journal*, 1935, 85: 342—369
- [8] Bagnold R A. The Movement of desert sand. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1936, 157 (892): 597—620
- [9] Bagnold R A. The transport of sand by wind. *Geographical Journal*, 1937, 89: 409—438
- [10] Bagnold R A. The measurement of sand storms. *Prceedings of the Royal Society of London A*, 1938, 169(929): 282—291
- [11] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London; Methuen. 1941
- [12] Tsoar H. Classics in physical geography revisited-Bagnold A R. 1941. The physics of blown sand and desert dunes. *Progress in Physical Geography*. 1994, 18 (1): 91—96
- [13] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy*, 1963, 15: 211—302
- [14] 河村龙马. 飞砂的研究. 东京大学理工学研究所报告, 1951, 5: 3—4
- [15] Zingg A W. Wind-tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Peceedings of the Fifth Hydraulics Conference*, 1953, 34: 111—135
- [16] 兹纳门斯基 A И 著. 杨郁华译, 朱震达校. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题. 北京: 科学出版社, 1960
- [17] Owen P R. Saltation of uniform grains in air. *J. Fluid Mech.* 1964, 20: 225—242
- [18] Horikawa K, Shen H W. Sand movement by wind action (on the characteristics of sand traps). *US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. , Memo*, 119, 1960, 51
- [19] Belly P Y. Sand movement by wind (with Addendum II by A A Kadib). *U. S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Tech. Memo. No. 1*, 1964, 79
- [20] Kadib A-L. A function of sand transport by wind, *Technical Report, HE-2-8, Hydraulics Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, CA*, 1965, 38
- [21] Williams G. Some aspects of the eolian saltation load. *Sedimentology*, 1964, 3: 357—287
- [22] Cook R U, Warren A. *Geomorpholgy in Desert*. London; Batsford, 1973
- [23] 朱震达, 陈治平, 吴正等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1981
- [24] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. London; Academic Press, 1987
- [25] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995
- [26] El-Baz F, Hassan M H A. *Physics of Desertification*. Martinus Nijhoff, 1986
- [27] Nickling W G, ed. *Aeolian Geomorphology*. Boston; Allen & Unwin, 1986
- [28] El-Bas F, El-Tayeb I A, Hassan M H A. *Sand Transport and Desertification in Arid Lands*. 1990
- [29] Barndorff-Nielsen O E, Moller J T, Willetts B B (eds.) *Proceedings of International Workshop on the Physics of Blown Sand*. Department of Theoretical Statistics University of Aarhus, 1985
- [30] Goudie A S, Livingstone I, Stokes S. *Aoelian environments, Sediments and Landforms*. Chichester: John Wille & Sons LTD, 1998
- [31] Lee J A, Zubeck T M. *Proceedings of the ICAR5/GCTE-SEN Joint Meeting*. Luchbock, Texas, 2002
- [32] Livingstone I, Nickling W G. *Aeolian research. Geomorphology*, 2004, 59: 1—2

- [33] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [34] Pye K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Deposits. London: Unwin Hyman, 1990
- [35] Cooke R, Warren A, Goudie A. Desert Geomorphology. London: UCL Press, 1993
- [36] Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes. London: Routledge, 1995
- [37] Livingstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology: An Introduction. Harlow: Addison Wesley Longman, 1996
- [38] Shao Y P. Physics and Modelling of Wind Erosion. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000
- [39] Ni J R, Li Z S, Mendoza C. Blown-sand transport rate. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29: 1—14
- [40] Li Z S, Ni J R. Sampling efficiency of vertical array aeolian sand traps. Geomorphology, 2003, 52: 243—253
- [41] 吴正 编著. 风沙地貌与治沙工程学. 北京: 科学出版社, 2003
- [42] 王涛 主编. 中国沙漠与沙漠化. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003
- [43] Inglis, D R. Particle sorting and stone migration by freezing and thawing. Science 1965, 148 1616—1617
- [44] Berg N H. Field evaluation of some sand transport models. Earth Surface Processes and Landforms, 1983, 8: 101—114
- [45] Tsoar H, Yallon D H. Deflection of sand movement on a sinuous longitudinal (seif) dune; use of fluorescent dye as tracer. Sedimentary Geology, 1983, 36: 25—39
- [46] Barndorff-Nielsen O E, Jensen J L, Nielsen H L, Rasmussen K R, Sorensen M. Wind tunnel tracer studies of grain progress. In: Barndorff-Nielsen O E, Moller J T, Willetts B B, Proceedings of International Workshop on The Physics of Blown Sand. University of Aarhus, Denmark, Memoirs No. 8, 1985. 243—252
- [47] Bristow C S, Bailey, Lancaster N. The sedimentary structure of linear sand dunes. Nature, 2000, 406: 56—59
- [48] 吴世亮, 倪晋仁, 李振山. 颗粒分析中筛分析法与粒径计法之比较. 泥沙研究, 2002, 1: 60—65

第一章 沙粒运动的基本特性

1.1 沙粒的主要运动形式

沙粒运动是风沙两相流和风沙地貌研究中的重要组成部分。沙粒运动有滚动、滑动和跳跃以及在气流中悬浮等多种形式。1941年, Bagnold^[1]发现跳跃的沙粒对床面撞击会促使床表面沙粒缓慢向前移动, 并建议用“跃移”一词来表达沙粒的跳跃运动, 而将床面沙粒的缓慢向前移动称为表面蠕移, 同时也描述了颗粒的悬移运动特点。不少学者^[2~5]通过高速摄影技术对跃移沙粒与床面的碰撞过程进行了研究, 发现跃移沙粒与床面碰撞后会溅起一些跃移高度非常低的沙粒, 这种沙粒的运动形式后来被 Anderson 与 Haff^[6]称之为蹦移^①。跃移沙粒还可区分出不受气流湍流脉动影响的完全跃移和受气流湍流脉动影响的变形跃移两种类型。悬移还可分为长悬移和短悬移。沙粒的主要运动形式及其划分方法具体介绍如下(图 1.1)。

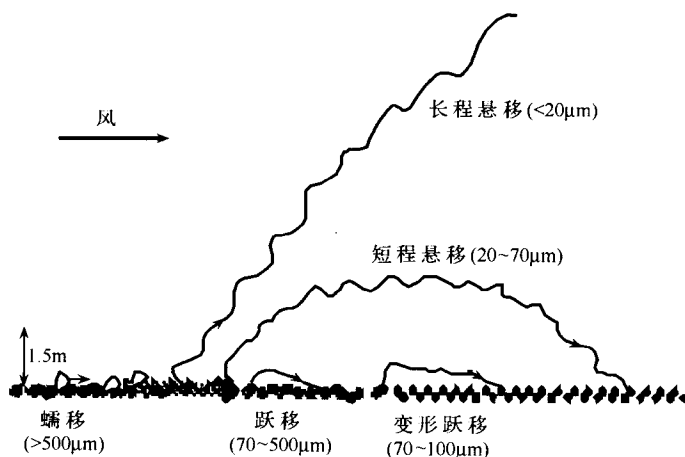


图 1.1 沙粒的运动形式示意图

(1) 蠕移(creep)。

沙粒沿地表滑动或滚动称为蠕移运动。Bagnold 认为蠕移沙粒不受气流直接作用, 其动力来源于跃移沙粒的碰撞作用。这一观点已被人们普遍接受。

对蠕移沙粒运动速度研究较少。Willettts 和 Rice^[7]在特定条件下对蠕移沙粒

^①关于“reptation”一词, 国内有些文献译为溅移。“溅移”一词中的“溅”字与蠕移、跃移和悬移中“蠕”、“跃”和“悬”字不对仗, 而且蠕移沙粒也属于被“溅”之列, 因此本书暂时将 reptation 译为蹦移。