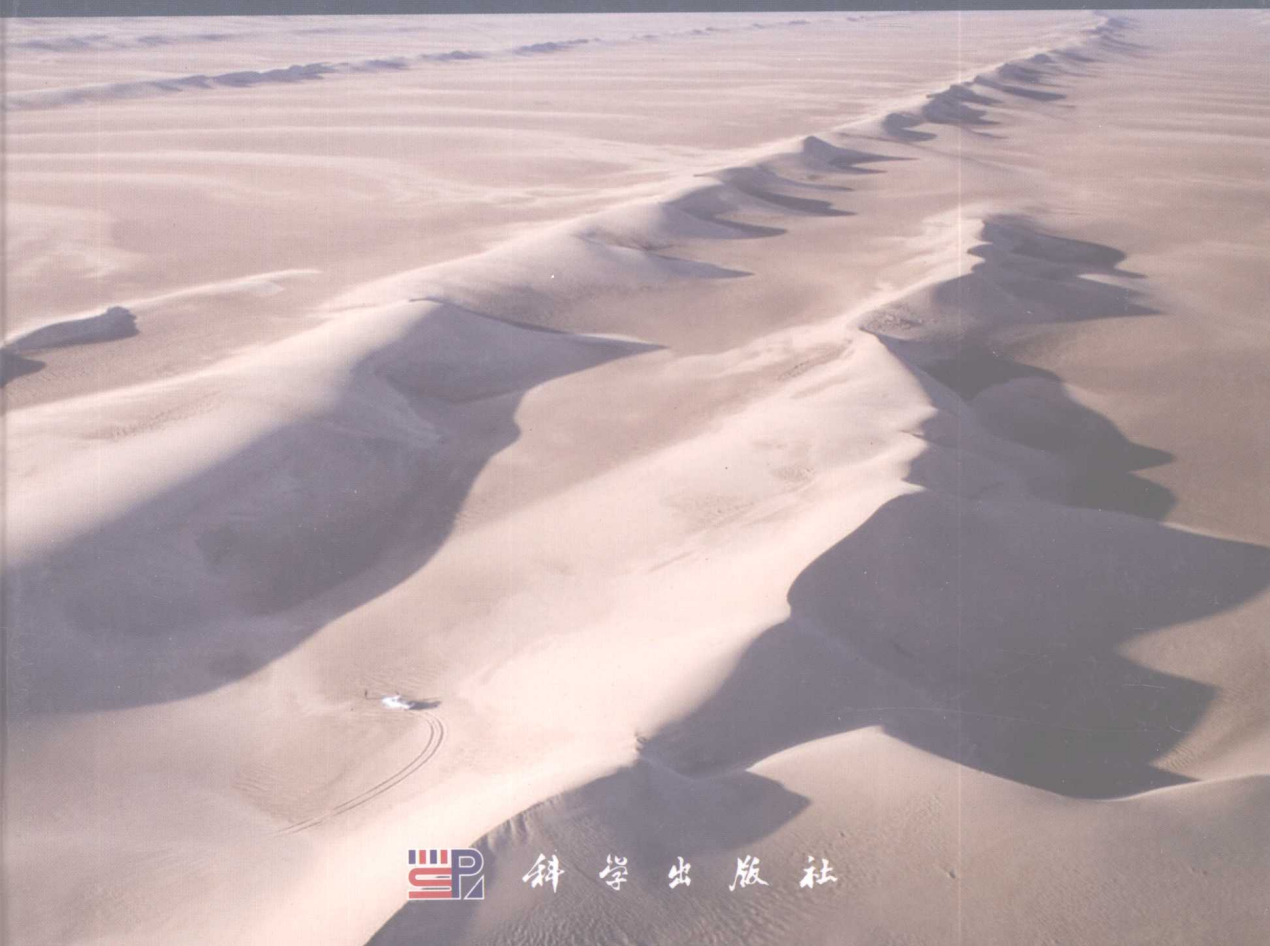


库姆塔格沙漠风沙地貌

董治宝 苏志珠 钱广强 著
罗万银 张正偲 吴晋峰



科学出版社

库姆塔格沙漠风沙地貌

董治宝 苏志珠 钱广强 著
罗万银 张正偲 吴晋峰

科技部国家科技基础性工作专项“库姆塔格沙漠综合科学考察”
教育部“长江学者奖励计划”陕西师范大学长江学者特聘教授项目 资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是作者近5年来关于库姆塔格沙漠风沙地貌研究成果的总结。全书共12章,系统论述了库姆塔格沙漠风沙地貌形成的古地理背景、沉积物特征、风动力系统、风沙地貌类型与分布、风沙地貌的形成、羽毛状沙丘、库姆塔格沙漠特有的风沙地貌、风沙地貌图编制、风沙地貌区划、风沙地貌遗产与旅游开发以及风沙危害与防治等问题。

本书可供地理、地质、环境、防沙治沙和国土规划等部门的科研人员使用,也可作为地理、荒漠化防治等相关专业大学生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

库姆塔格沙漠风沙地貌/董治宝等著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-032413-9

I. ①库… II. ①董… III. ①沙漠-风沙地貌-研究-西北地区
IV. ①P942.450.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第195520号

责任编辑:彭胜潮/责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年10月第 一 版 开本: B5(787×1092)

2011年10月第一次印刷 印张: 31 1/4

印数: 1—1 000 字数: 716 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

《库姆塔格沙漠风沙地貌》一书是继朱震达等老一辈沙漠学家所著《塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究》之后，中国区域风沙地貌研究的又一力作。

我与董治宝都是中国沙漠科学的开拓者和奠基人——朱震达先生的研究生，在读研究生期间的研究方向都是沙漠化与风沙地貌，我侧重于沙漠化过程与防治研究，董治宝侧重于风沙地貌和风沙物理研究。在先生的多年教导下，我们都希望在不同研究方向为中国的沙漠科学做出贡献。可喜的是，以董治宝研究员为主的研究团队经过多年的不懈努力，现在已成为国内最具影响力的风沙地貌与风沙物理研究团队，也是国际风沙地貌和风沙物理研究的一支重要力量。

库姆塔格沙漠是中国第四大流动沙漠，以其独特的羽毛状沙丘著称，朱震达先生生前曾十分关注该沙漠的研究工作，特别关注羽毛状沙丘的形成和演变，多次鼓励我们开展研究。但由于自然条件严酷，研究工作直至21世纪初才成为可能，留下了导师的遗憾。所以，《库姆塔格沙漠风沙地貌》一书从某种意义上讲，是完成了导师未竟事业于万一。

董治宝等自2005年以来多次深入库姆塔格沙漠腹地，特别是在负责国家科技基础性研究专项“库姆塔格沙漠综合科学考察”中地貌组的工作过程中，在沙漠中进行了广泛的考察、观测和取样工作，获得了大量的第一手资料，并结合遥感技术，全面研究了库姆塔格沙漠风沙地貌形成的古地理背景、沉积物基础、风动力系统、风沙地貌类型与分布、风沙地貌的形成、独特风沙地貌、关于羽毛状沙丘的讨论、风沙地貌图编制、风沙地貌区划、风沙地貌遗产与旅游开发以及风沙危害与防治等问题。

中国沙漠、戈壁和沙漠化土地面积约170万 km^2 ，横跨干旱区、半干旱区和半湿润区等不同自然地带，东部沿海还有海岸沙地，风沙地貌类型复杂多样。目前我们对大多数区域的风沙地貌研究还很不够深入。《库姆塔格沙漠风沙地貌》一书图文并茂，内容丰富，资料翔实，它的出版一方面有助于人们对库姆塔格沙漠的深入认识，促进沙漠科学研究的发展；另一方面对深入研究其他地区沙漠的风沙地貌也有重要的借鉴价值。希望研究者继续努力，不断进取，在风沙地貌研究中取得更加丰硕的成果。

中国地理学会沙漠分会理事长
国际沙漠协会(IDRA)主席

2010年12月于兰州

前 言

库姆塔格沙漠素为人类禁区,虽然周边地区是探险家的胜地。有关库姆塔格沙漠的文字记载最早可溯及先秦时期的《山海经》,汉代之后,沙漠北缘渐有“丝绸之路”兴起。13世纪,意大利旅行家马可·波罗曾取道西北距库姆塔格沙漠约80 km的地方通过。19世纪中叶以来,多位世界著名探险家接踵而至,在库姆塔格沙漠边缘留下足迹。20世纪50年代以来,中国学者对北方沙漠和沙地开展了全面的科学考察,但留下了库姆塔格沙漠这个死角。所以,库姆塔格沙漠腹地的神秘一直保留至21世纪初。

与大多数沙漠科学工作者一样,我们对库姆塔格沙漠的兴趣源于对其中羽毛状沙丘的好奇。2000年,陪同美国《国家地理》杂志摄影师 George Stemeitz 先生拍摄三垄沙雅丹地貌,虽然羽毛状沙丘近在咫尺,但还是未能窥其究竟。2005年国庆长假之后,终于下决心租用敦煌鸣沙山旅游景区的沙漠车进入库姆塔格沙漠羽毛状沙丘区。然而,实地观察到的羽毛状沙丘与我们已有的概念相去甚远,于是,在反复查阅国内外关于羽毛状沙丘的文献,和通过 Google Earth 遍览世界各地沙漠的羽毛状沙丘之后,产生了彻底搞清库姆塔格沙漠羽毛状沙丘的冲动。2006年4月,库姆塔格沙漠的天气乍暖还寒,我们再度深入羽毛状沙丘区,开展详细的沙丘测量与取样工作。事实证明,所谓的羽毛状沙丘并非偶然孤立地存在,它与周围其他风沙地貌类型有密切联系,我们必须从普遍规律中把握特殊规律。2007年,最幸运的机遇终于来了,国家科技基础性工作专项“库姆塔格沙漠综合科学考察”(项目编号:2006FY110800)正式启动,下设地质、地貌、土壤、气候、植被、动物、测绘和综合等9个专题组,地貌组的工作由我们负责。9月10日,一支浩浩荡荡的科考队挺进库姆塔格沙漠,第一个大本营就扎在羽毛状沙丘上。吃住在羽毛状沙丘上,我们与之有了最亲密的接触。本次科考东西方向的横穿和南北方向的纵穿使我们对整个沙漠的风沙地貌获得了全面的认识。更重要的是,通过在沙漠东西南北不同方位架设6个气象站和测风站,获得了解释风沙地貌形成的宝贵风况资料,通过地表沉积物的系列采样和分析,获得了判断沙漠沉积物来源和形成过程的关键资料。高分辨率卫星影像与实地沙丘形态测量的对比研究,使我们有把握借助遥感技术全面快速研究库姆塔格沙漠风沙地貌。2009年编制出版了《库姆塔格沙漠地貌图》(1:35万),为全面研究库姆塔格沙漠风沙地貌奠定了基础。2008年,本书第一作者董治宝受聘教育部陕西师范大学旅游与环境学院“长江学者”特聘教授,为拓展风沙地貌研究提供了难得的机遇,我们尝试将风沙地貌学与旅游地理学融合,在中国开创风沙地貌遗产和旅游开发研究之先河;而让我们感到欣慰的是,上述尝试被证明是十分成功的。

本书是我们近5年关于库姆塔格沙漠风沙地貌研究工作的总结,属于区域风沙地貌研究。在区域风沙地貌研究方面,中国老一辈风沙地貌学家自20世纪60年代以来,

关于塔克拉玛干沙漠的研究和出版的《塔克拉玛干风沙地貌研究》专著为我们竖起了很高的标杆。所以,我们现在的这本著作虽然在区域上填补了中国区域风沙地貌研究的空白,但丝毫不敢妄称对老一辈风沙地貌学家的工作有所超越。即使有点进步,也是因为我们有更多前人的研究成果可借鉴,有更优越的工作条件和更先进的研究手段。所以,本书的出版并不意味着关于库姆塔格沙漠风沙地貌科学问题的解决,相反,我们的目的是,以我们粗浅的见解求正方家,希望能够引起更多学者对库姆塔格沙漠的关注,开展更深入的研究,以弥补我们的疏漏和纠正我们的谬误,使风沙地貌学健康发展。

本书章节按照库姆塔格沙漠风沙地貌形成与发育环境、风沙地貌特征以及风沙地貌产生的问题和潜在开发利用价值的思路来组织编写。由董治宝统稿。各章编写分工如下:

- 第1章 绪论 董治宝执笔
- 第2章 古地理背景 苏志珠执笔
- 第3章 沉积物基础 钱广强、罗万银执笔
- 第4章 风动力系统 张正偲执笔
- 第5章 风沙地貌类型与分布 董治宝执笔
- 第6章 风沙地貌的形成 董治宝执笔
- 第7章 关于羽毛状沙丘的讨论 董治宝执笔
- 第8章 独特风沙地貌 董治宝执笔
- 第9章 风沙地貌图编制 董治宝执笔
- 第10章 风沙地貌区划 董治宝执笔
- 第11章 风沙地貌遗产与旅游开发 吴晋峰、董治宝执笔
- 第12章 风沙危害与防治 董治宝执笔

本书作者特别感谢中国林业科学研究院荒漠化研究所卢琦研究员提供多次深入库姆塔格沙漠考察的机会,感谢中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室屈建军研究员多年来真诚激烈的讨论,经常撞击出学术的火花和灵感,使我们获益良多。另外,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所张伟民研究员提供莫高窟戈壁风沙流防治方面的材料;北京师范大学严平教授提供库姆塔格沙漠水系变迁方面的资料;兰州大学张明泉教授提供敦煌绿洲生态环境问题方面的材料;兰州大学王晓云博士提供敦煌文物古迹沙漠化环境方面的材料;甘肃省地质调查院贾贵义研究员提供月牙泉地质环境方面的材料;甘肃省林业科学研究院戚登臣研究员提供敦煌西湖湿地生态退化方面的材料,特此致谢。《中国沙漠》编辑部的金炯编审、郝美玲副编审为本书的出版在编辑、排版和图件制作方面付出了辛勤的劳动,特此表示衷心感谢!

目 录

序

前言

| | |
|-------------------|-------|
| 第 1 章 绪论 | (1) |
| 1.1 现代风沙地貌学的起源与发展 | (2) |
| 1.2 区域风沙地貌学的发展 | (7) |
| 1.3 库姆塔格沙漠风沙地貌研究 | (12) |
| 1.4 本书的指导思想与结构 | (16) |
| 参考文献 | (18) |
| 第 2 章 古地理背景 | (20) |
| 2.1 地质构造基础 | (20) |
| 2.2 地层与沉积相 | (28) |
| 2.3 地貌演化过程及其特征 | (51) |
| 2.4 小结 | (63) |
| 参考文献 | (64) |
| 第 3 章 沉积物基础 | (67) |
| 3.1 粒度组成 | (67) |
| 3.2 矿物与地球化学元素组成 | (97) |
| 参考文献 | (124) |
| 第 4 章 风动力系统 | (129) |
| 4.1 环流与天气系统 | (129) |
| 4.2 地面风场的观测 | (134) |
| 4.3 地面风场 | (139) |
| 4.4 输沙势 | (165) |
| 4.5 小结 | (175) |
| 参考文献 | (175) |
| 第 5 章 风沙地貌类型与分布 | (177) |

| | | |
|---------------|--------------------------|--------------|
| 5.1 | 风积地貌 | (178) |
| 5.2 | 风蚀地貌 | (222) |
| | 参考文献 | (235) |
| 第 6 章 | 风沙地貌的形成 | (237) |
| 6.1 | 风沙地貌宏观格局的控制因素 | (237) |
| 6.2 | 沙丘的形成 | (245) |
| 6.3 | 风蚀地貌的形成 | (287) |
| | 参考文献 | (309) |
| 第 7 章 | 关于羽毛状沙丘的讨论 | (315) |
| 7.1 | 羽毛状沙丘辨识 | (315) |
| 7.2 | 库姆塔格沙漠羽毛状风沙地貌的讨论 | (327) |
| | 参考文献 | (337) |
| 第 8 章 | 独特风沙地貌 | (339) |
| 8.1 | 耙状线形沙丘 | (339) |
| 8.2 | 沙砾磧 | (350) |
| 8.3 | 线形沙丘独特的地貌格局 | (354) |
| | 参考文献 | (368) |
| 第 9 章 | 风沙地貌图编制 | (370) |
| 9.1 | 编图原则与要求 | (370) |
| 9.2 | 地貌图设计 | (372) |
| 9.3 | 编图资料的使用 | (375) |
| 9.4 | 编图过程和技术方法 | (377) |
| | 参考文献 | (383) |
| 第 10 章 | 风沙地貌区划 | (384) |
| 10.1 | 区划的理论基础 | (386) |
| 10.2 | 区划方法 | (388) |
| 10.3 | 区划方案 | (390) |
| | 参考文献 | (398) |
| 第 11 章 | 风沙地貌遗产与旅游开发 | (400) |
| 11.1 | 风沙地貌的遗产价值 | (401) |

| | |
|-----------------------------|--------------|
| 11.2 旅游开发····· | (417) |
| 11.3 雅丹地貌申请世界自然遗产的建议····· | (424) |
| 参考文献····· | (431) |
| 第 12 章 风沙危害与防治 ····· | (433) |
| 12.1 风沙危害类型与形式····· | (433) |
| 12.2 戈壁风沙流防治的风沙物理学基础····· | (441) |
| 12.3 戈壁风沙流防治的成功实践····· | (470) |
| 参考文献····· | (476) |
| 英文摘要 ····· | (479) |

Contents

Preface

Foreword

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| Chapter 1 Introduction | (1) |
| 1.1 Origin and Development of Modern Aeolian Geomorphology | (2) |
| 1.2 Development of Regional Aeolian Geomorphology | (7) |
| 1.3 Study on Aeolian Geomorphology in the Kumtagh Desert | (12) |
| 1.4 Organization Framework and Thought Train of the Book | (16) |
| References | (18) |
| Chapter 2 Paleo-Geographic Outlines | (20) |
| 2.1 Geological Structures | (20) |
| 2.2 Stratum and Sedimentary Facies | (28) |
| 2.3 Geomorphological Evolution Processes and Their Characteristics | (51) |
| 2.4 Conclusions | (63) |
| References | (64) |
| Chapter 3 Aeolian Sediments | (67) |
| 3.1 Grain Size Characteristics | (67) |
| 3.2 Characteristics of Mineral and Geochemical Elements | (97) |
| References | (124) |
| Chapter 4 Wind System | (129) |
| 4.1 Circulation and Synoptic Systems | (129) |
| 4.2 Observation of Near-surface Wind Flow | (134) |
| 4.3 Near-surface Wind Flow | (139) |
| 4.4 Sand Drift Potential | (165) |
| 4.5 Summary | (175) |
| References | (175) |
| Chapter 5 Types and Distribution of Aeolian Landforms | (177) |
| 5.1 Landforms Formed by Sand Accumulation | (178) |

| | | |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 5.2 | Wind-eroded Landforms | (222) |
| | References | (235) |
| Chapter 6 | Formation of Aeolian Landforms | (237) |
| 6.1 | Control Factors of Macro Patterns of Aeolian Geomorphology | (237) |
| 6.2 | Dune Formation | (245) |
| 6.3 | Formation of Wind-eroded Landforms | (287) |
| | References | (309) |
| Chapter 7 | A Discussion of Feathery Dunes | (315) |
| 7.1 | Identification of Feathery Dunes | (315) |
| 7.2 | Discussion on Feathery Appearances in the Kumtagh Desert | (327) |
| | References | (337) |
| Chapter 8 | Unique Aeolian Landforms | (339) |
| 8.1 | Rake Linear Dunes | (339) |
| 8.2 | Gravel Bodies | (350) |
| 8.3 | Geomorphological Patterns of Linear Dunes | (354) |
| | References | (368) |
| Chapter 9 | Compilation of The Geomorphic Map | (370) |
| 9.1 | Principles and Requirements | (370) |
| 9.2 | Map Design | (372) |
| 9.3 | Use of Map Compilation Information | (375) |
| 9.4 | Procedures and Techniques for Map Compilation | (377) |
| | References | (383) |
| Chapter 10 | Aeolian Geomorphic Regionalization | (384) |
| 10.1 | Theoretical Basis for Regionalization | (386) |
| 10.2 | Methodology for Regionalization | (388) |
| 10.3 | Regionalization Scheme | (390) |
| | References | (398) |
| Chapter 11 | Aeolian Geomorphological Heritages and Tourism Development ... | (400) |
| 11.1 | Values of the Aeolian Geomorphology as a Geomorphosite | (401) |
| 11.2 | Tourism Development | (417) |
| 11.3 | Suggestions for Application of China's Yardang Landforms as a World Nature Heritage | (424) |

• X •

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| References | (431) |
| Chapter 12 Aeolian Sand Hazards and Their Control | (433) |
| 12.1 Types of Aeolian Sand Hazards | (433) |
| 12.2 Basics for Controlling Aeolian Sand Hazards in Gobi Desert | (441) |
| 12.3 Successful Practices for Controlling Aeolian Sand Hazards in Gobi Desert | (470) |
| References | (476) |
| Summary | (479) |

第 1 章 绪 论

本章是全书的开篇，旨在向读者陈述库姆塔格沙漠风沙地貌研究的意义。首先将本书所研究的内容定位于区域风沙地貌学，而风沙地貌学是地貌学的重要组成部分。基于风沙地貌学发展历史中几个标志性阶段的回顾，我们发现，随着现代科学技术的发展，沙漠科学从整体上取得了长足进展，然而区域风沙地貌学研究则因沙漠野外工作环境严酷、基础性太强，或被认为国家需求不突出而愈来愈受冷落。所以，我们强调，区域风沙地貌研究是沙漠学和地貌学健康发展不可缺少的部分，应予以加强。在区域风沙地貌学的理论框架下，阐述了本书的写作与组织思路。

库姆塔格沙漠是亚洲中部沙漠的重要组成部分，其风沙地貌特征既具有全球沙漠的共性，也有其独特性。所以，对库姆塔格沙漠风沙地貌的认识需要将其置于全球沙丘系统中。从全球范围来看，各种各样的风沙地貌，大到数百米壮观的高大沙山和雅丹地貌，小至细微的沙波纹、磨蚀斑和磨蚀坑，是沙漠最引人注意的特征。在全球 4 800 万 km^2 的干旱，半干旱区中，有约 600 万 km^2 为风成沙所覆盖，发育各种风沙地貌。在人类与风沙长期斗争的过程中，风沙地貌学逐渐形成和发展，成为一门有独特研究对象、内容、方法和理论体系的科学。

风沙地貌学是研究风力作用下物质运动形成的地表形态特征、空间组合规律及其形成演变的科学，是地貌学中以风为外营力形成的地貌为对象的分支学科。风沙地貌形态与组合特征、组成物质和形成过程是风沙地貌学研究的 3 大核心内容 (Lancaster, 1995)。虽然关于风沙地貌现象的朴素描述与记载可以追溯至较早的古代，但一般认为，风沙地貌学主要是从 19 世纪末叶以后才逐渐发展起来的 (Livingstone, 1996)，稍晚于地貌学的发展 (杨景春等, 2001)。风沙地貌学最早是介于自然地理学与地质学之间的一门边缘科学，经历了一个多世纪的丰富和完善，目前发展成为有特定研究对象、理论体系和研究方法的现代风沙地貌学。根据风沙地貌学的研究方法和技术手段的发展，以 20 世纪 70 年代为界，将风沙地貌学分为传统风沙地貌学和现代风沙地貌学。而地貌学中一般将始于 20 世纪 50 年代以小流域地貌研究为代表的“计量革命”视为现代地貌学诞生的标志。所以，与流水地貌中小流域研究相比，风沙地貌学的计量革命则较晚，以单个沙丘的观测研究为标志。现代风沙地貌学通常将其追溯至 Bagnold (1941) 的研究工作，但必须注意到，Bagnold 的研究工作主要集中在风沙颗粒运动学方面，他关于风沙地貌，如沙丘的研究则纯属描述和推测，直至 20 世纪 70 年代之后才相继出现验证工作。

1.1 现代风沙地貌学的起源与发展

1.1.1 传统风沙地貌学

传统风沙地貌学以局部地区个别风沙地貌现象的描述为主，其发展经历了地质学、地理学和物理学研究 3 个发展阶段。

1. 地质学阶段

由于风沙地貌学最早是由介于自然地理学与地质学之间的一门边缘科学发展而来的，所以早期的风沙地貌学研究具有明显的地质学特色。沙漠以气候干旱多风、地表疏松、植被贫乏为主要特点，因而风沙活动是沙漠地区主要自然过程之一。虽然目前的沙漠科学研究工作已涉及许多不同的学科领域，如地球科学、生命科学、农业科学、技术科学以及经济学等，最早引起科学界注意的沙漠科学问题是沙漠中的风力作用。因为地质学家在地壳中发现了广泛分布的砂岩和黄土，从而将风力作用视为一种地质过程来认识。目前科学界公认，风力作用是除了流水之外，塑造地球景观的第二大外营力。如 Ehrenberg (1847; 据 Pye et al., 1990) 最先描述了由风自非洲吹向欧洲的飘尘，Blake (1855; 据 Pye et al., 1990) 最早认识到沙漠中广泛发育的风蚀地貌，Von Richthofen (1882; 据 Pye et al., 1990) 认为，中国北方大面积的黄土堆积主要是风成的。尽管如此，直到 19 世纪末，大多数地质学家仍然认为，风对沉积物的搬运作用较流水和冰川作用要微弱得多。例如，Udden (1894; 据 Pye et al., 1990) 认为，风蚀仅在个别区域具有地质意义，有利于风蚀的条件为干旱的气候和明显突出的地形。但是，Udden 同时也意识到研究风沙过程的重要性。他指出，以往的研究对风力作用未给予足够的重视，所以，他于 20 世纪初率先开展了风沙和风尘沉积学特征的详细研究。Udden 综合了他在风沙和风尘沉积学方面和以往在其他沉积学方面的研究成果，总结出沉积物颗粒粒径分级系统 (Udden, 1914; Pye et al., 1990)，后经 Wentworth (1922; 据 Shao, 2000) 完善，形成了在沉积学上普遍采用的 Udden-Wentworth 沉积物颗粒分级系统 (Pye, 1987; Shao, 2000)。Udden 和 Wentworth 首次将 $2 \sim 2048 \mu\text{m}$ 的颗粒以 2 为因数分为 20 个连续的粒级。随着粒度分析水平的提高，人们可以获得分辨率远高于 Udden-Wentworth 颗粒分级系统粒级划分。例如，McTainsh 等 (1997) 应用 Coulter Multi-Sizer 粒度分析仪能够分辨出 256 个粒级。借助先进的分析技术，粒度分析目前已可以在小于 $\Phi/4$ 间隔粒度分级系统中进行。但是，现行的各种粒度分级标准大都是在 Udden-Wentworth 粒度分级系统的基础上修改和完善而来的。

可见，由地质学家 Udden 等对风沙和风尘所进行的沉积学研究在地质学、后来兴起的沙漠科学以及其他相关学科研究领域产生颇为积极的影响，所以 20 世纪初或更早时期，地质学家对风沙问题的关注和研究可以称之为地质沙漠学。严格来说，此

时对风沙问题的研究远不能称为沙漠学，因为研究工作只是零星地涉及了个别问题。但这毕竟表明了科学界对风沙乃至沙漠问题的关注。

2. 地理学阶段

沙漠最直观的景观特征就是沙丘，从而引起了探险地貌学家的兴趣。在 20 世纪初兴起了对沙漠的科学考察与探险。最有代表性的工作是法国和英国的地理学家对非洲北部沙漠的考察和俄国地理学家对中亚地区沙漠的探险。

20 世纪初，法国逐渐控制了北非和撒哈拉地区，所以法国科学家在 19 世纪末特别是 20 世纪初，最早对撒哈拉沙漠的沙丘进行了研究。最早企图认识撒哈拉沙漠沙丘的法国地理学者可以追溯到 1881 年（据 Goudie et al., 1999），早期的考察与探险者多以游记的形式描述沙丘地貌特征和推测其成因。例如，Rolland（1890；据 Goudie et al., 1999）曾断言沙漠中的沙丘全部是由风力作用造成的。Flammand（1899；据 Goudie et al., 1999）在横穿西方大沙漠之后，粗略地描述了那里的沙丘特征。Foureau（1905；据 Goudie et al., 1999）较为全面地描述了东方大沙漠的沙丘和其他风沙现象。Chudeau（1909；据 Goudie et al., 1999）研究了撒哈拉沙漠南部的沙丘，特别地关注了乍得湖（Lake Chad）和达喀尔（Dakar）之间的古沙丘。Chudeau 于 1920 年全面地记述了撒哈拉沙漠的沙丘，并讨论了沙丘沙的性质、沙源、沙丘分布特征以及沙丘形态类型（纵向、横向、新月形、灌丛沙丘等）。这是关于沙丘地貌学最早的系统研究。在两次世界大战之间，法国地理学家对撒哈拉沙漠的沙丘地貌学研究已达到了相当高的水平，最突出的是 Aufrere 于 1928~1934 年间的研究工作。Aufrere 利用当时可以收集到的气象资料，试图建立沙丘形态、走向与风况的关系。尽管他的模型存在许多问题，但其研究工作在风沙地貌学上是很重要的思想突破。此外，他将 Davis 的地貌循环理论应用于沙丘地貌研究中，区分了青年期的沙漠（丘间地狭窄、流沙富积）和老年期的沙漠（丘间地宽阔且无流沙覆盖）。Aufrere 还最早将航空像片用于编制风沙地貌图和分析沙丘形态。

英国学者的工作主要在撒哈拉沙漠的东部，因为 19 世纪末和 20 世纪初埃及处于英国的控制下。第一位在撒哈拉沙漠考察与研究的重要英国学者是 Beadnell。他于 1910 年在野外实地观测了新月形沙丘的移动方向与速度。他的观测结果表明，小新月形沙丘较大新月形沙丘移动快，该地新月形沙丘的平均年移动速率为 15~16 m。他同时也观测了沙丘移动的临界风速（约为 $5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和新月形沙丘背风坡的坡度（约相当于干沙的休止角）。King（1916；据 Goudie et al., 1999）指出，沙波纹与沙丘形态尽管在外表上十分相似，但其成因是截然不同的。King（1918；据 Goudie et al., 1999）也是第一个用烟流显示技术来研究沙丘周围气流场特征的学者。Ball（1927；据 Goudie et al., 1999）曾根据沙丘前移速率来估计风沙侵袭危害。显然，截至 20 世纪 20 年代，Ball, Beadnell 和 King 等已在沙丘形态、移动和过程等方面做了很有意义的工作。

19 世纪末至 20 世纪初，俄国学者对中亚地区的沙漠进行了探险，但是他们的探险与考察活动大多是以掠夺沙漠中的宝藏为目的。他们关于沙漠方面的科学内容都只是一般性的旅行记载（朱震达等，1981）。

3. 物理学研究

风沙地貌学的物理学研究以 Bagnold (1941) 创立的风沙物理学为标志，虽然以风沙颗粒运动学为主，但为现代风沙地貌学的发展奠定了基础。尽管 20 世纪 30 年代前，风力作用和风沙活动作为比较重要的地质过程引起地质学家的重视，干旱沙漠中特殊的风沙地貌现象，如沙暴、沙波纹、沙丘乃至沙海引起了地貌学家的广泛兴趣，地质学家和地貌学家们也只能作一些定性的描述性研究，尚未从空气动力学的角度来研究风与沙的相互作用问题。缺乏对风与沙相互作用的动力过程的深入认识成为这一时代沙漠科学向前发展的瓶颈。因为不知道风与沙相互作用的性质，就不能确切地通过风沙沉积结构来解释其沉积环境；地貌学家也只有在明白沙粒为什么会聚积成沙丘并且维持其特殊的形态的基础上，才能较好地研究沙丘形态和移动问题。英国科学家 Bagnold 于 20 世纪 30 年代的研究工作为摆脱沙漠科学的上述瓶颈，推动沙漠科学的发展作出了巨大贡献。

1929~1930 年 Bagnold 在利比亚沙漠中进行了人类最早的汽车沙漠考察，并着迷于广袤沙海中沙丘有规律的组织现象。他以开阔的科学视野，摆脱了传统地学科学家的学科偏见。他认为，将风沙运动视为物理学问题比地貌学问题更为确切，欲在风沙运动的认识方面取得进展，首先必须从气流中单个沙粒的运动特征着手。

It seems to me, however, that the subject of sand movement lies far more in the realm of physics than of geomorphology; and if any advance were to be made in our knowledge of it, it must in the first instance be approached via the study of the behavior of a single grain in a stream of wind (Bagnold, 1941, X VII ~ X VIII).

Bagnold 认为，解决有关沙丘方面的基本问题要依赖于风洞实验。他于 1935 年在英国剑桥大学建立了第一个用于风沙研究的风洞，以风洞实验方法研究了风沙现象和风沙问题的基本物理学原理，在 Bagnold 开展风沙物理学的同时，现代流体力学的奠基人 Prantl、Von Karman 以及 Shields 等提出的边界层理论亦趋于成熟。Bagnold 创造性地应用和推广了流体力学原理，建立了风沙物理学，标志着沙漠科学进入了物理学研究阶段。Bagnold 的工作是截至目前关于风沙物理学的最广泛和最系统的研究。他的研究工作几乎涉及风沙物理学的各个方面，如固定沙床和活动沙床上的风速廓线、风沙起动过程的受力特征与临界条件、风沙运动的基本形式与输沙量、小型风沙地貌（沙波纹和沙脊）和大风沙地貌（沙丘）形成的物理原理以及鸣沙的物理机制等。Bagnold 的研究工作集中反映在其著作《风沙和荒漠沙丘物理学》(The Physics

of Blown Sand and Desert Dunes, 1941) 一书中。

20 世纪初, 美国中西部的土壤风蚀问题引起人们极大关注。从 40 年代开始, 以 W. S. Chepil 等为主的美国科学家为了评价土壤风蚀强度和有效地防止土壤风蚀, 将风沙物理学与土壤学和农业工程学等融合, 开展了土壤风蚀及其防治研究。美国科学家的主要研究特色表现在: 他们较为系统地研究了各种因素对风沙运动乃至风沙活动的影响, 其成果集中反映在风蚀方程 (Wind Erosion Equation, WEQ) 中。在 Bagnold 创立的风沙物理学基础上, Chepil 等考虑到土壤特征、地表覆盖、农田管理措施等更为复杂的条件, 在实践中发展了风沙物理学的理论, 将风沙工程学纳入风沙物理学研究中, 使风沙物理学的体系更为完善。

1.1.2 现代风沙地貌学

20 世纪 70 年代以来的现代风沙地貌学研究有 4 个方面的突出特点: ①关于单个沙丘形成过程的研究比较广泛深入; ②遥感技术的发展使在行星尺度上研究沙丘及其空间组合规律成为可能; ③实验和观测数据采集、存储及传输技术的发展使风沙地貌形成机制的研究更为深入细致; ④计算机技术的发展使风沙地貌的数值模拟研究成为很活跃的研究领域。

1. 单个沙丘研究

风沙地貌学中的计量革命首先体现在单个沙丘的研究, 这是因为单个沙丘的气流场特征与蚀积规律既可以在野外观测, 也可以进行模拟实验。所以, 20 世纪 70 年代以来, 众多风沙地貌学家研究了单个沙丘的形成过程。研究方法由最早的野外观测逐渐发展为物理模拟和数值模拟研究。野外观测主要集中在沙丘周围的气流场特征和风沙运动 (蚀积) 特征等方面。最初的研究方法采用简单的测风 (如传统的杯状风速仪) 和测沙仪器 (集沙仪) 等。80 年代末和 90 年代以来, 随着计算机技术和数据采集及存储技术的发展, 更先进的技术应用于风沙观测和实验研究。如在测风方面, 先后发展了热线风速仪、激光多普勒测速仪、超声波风速仪和粒子图像测速系统。在测沙方面, 先后应用了跃移颗粒感应器 (Saltiphone, Spaan et al., 1991) 和压电石英晶体传感器 (Sensit, Stockton et al., 1990) 来记录跃移颗粒的数量。为了通过多点测量获得风速廓线, 进而计算摩阻风速及气流的剪切力, 多点测量技术不仅应用于物理模拟实验, 而且被应用于野外观测。

单个沙丘的定量研究主要集中在横向沙丘和线性沙丘的研究方面, 因为这两种沙丘分布最广, 而且形成过程相对较为简单, 尤其是关于横向沙丘的研究最为成熟, 以至于发展到目前很活跃的数值模拟研究。突破性认识表现在 4 个方面:

(1) 20 世纪 80 年代以来逐渐认识到, 沙丘的形成过程不仅是床面对风况的简单响应, 而且是沙丘形态与气流复杂相互作用的结果, 由此引发了二次流研究。