

# 70年来中国风沙地貌学的发展

董治宝, 吕萍

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** 风是除流水之外塑造地球景观的第二大流体, 以其为外营力形成的风沙地貌在全球干旱区广泛分布, 超过40%的全球陆地面积受风沙地貌过程的影响, 与人类生存环境存在着密切的关系, 19世纪末以来受到国际学术界的持续关注。中国干旱半干旱地区广泛发育风沙地貌, 但风沙地貌研究比国际研究晚半个多世纪, 始于20世纪50年代后期。本文总结了新中国成立70年来中国风沙地貌学发展的3个阶段: 初创阶段(1949—1977年)、充实发展阶段(1978—1999年)和国际化研究阶段(2000年至今)。现在中国风沙地貌研究的水平整体与国际并行, 部分领先。中国具有重要国际影响力的风沙地貌研究工作包括沙丘移动规律、风沙地貌区域综合研究、中国独特风沙地貌发育演变过程、戈壁地貌学研究、沙丘二次流以及地外星球的探索研究。中国风沙地貌学研究有在未来领跑国际研究的潜势, 但风沙地貌学家必需有4个方面的战略思考, 即综合集成、地球系统科学引领、全球视野和深空时代的发展。

**关键词:** 风沙地貌; 中国沙漠; 研究进展

DOI: 10.11821/dlxb202003006

## 1 前言

风是除流水之外塑造地球景观的第二大流体, 以其为外营力形成的风沙地貌在全球干旱区广泛分布, 甚至在一些地外星球, 如火星、金星和土卫六也广泛发育<sup>[1]</sup>。就全球而言, 有沙丘发育的陆地面积超过2000万 km<sup>2</sup> [2], 在世界各大洲都有分布, 约20%的干旱区甚至许多沿海地区都有沙丘分布, 加上戈壁和风蚀地貌分布区, 面积则更大, 超过40%的陆地面积受风沙地貌过程的影响。因与人类生存环境存在着密切的关系, 且蕴含着现代地表过程和地球环境演化的丰富信息, 风沙地貌研究自19世纪末以来受到国际学术界的持续关注。作为部门地貌学的风沙地貌学是地貌学发展到一定阶段的产物, 总体上的发展总是落后于地貌学一步, 经历了19世纪晚期的地质学认知、20世纪初期的地理学探索、20世纪30年代的物理学实验和20世纪70年代以来的综合研究等几个阶段, 从学科体系、研究方法和研究群体等指标判断, 风沙地貌学现在已经成为一门独立的科学, 在4个方面显示出前所未有的重要科学意义: ①是地球系统科学不可或缺的部分; ②是全球变化影响与响应的信息载体; ③是地外行星探测的重要内容; ④对其他科学, 如物理学和力学等有重要推动作用。目前, 特别是观测数据自动采集技术、影像数据采集与分析技术以及数值模拟技术为风沙地貌的研究开辟了许多蹊径, 风沙地貌学将迎来复兴的机遇。

收稿日期: 2019-07-25; 修订日期: 2020-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871008, 41871011) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41871008, No.41871011]

作者简介: 董治宝(1966-), 男, 陕西人, 教授, 主要从事风沙物理研究。E-mail: zbdong@snnu.edu.cn

自19世纪后期,中国广大的干旱区就是地理探险家的胜地,是研究风沙地貌的天然实验室。中国风沙地貌过程的影响面积几乎占国土的半壁江山,形成世界最大的黄土高原,酿成以沙尘暴和沙漠化为代表的风沙危害。但中国风沙地貌研究始于20世纪50年代后期,比国际研究晚了半个多世纪。1949年新中国成立以来,风沙地貌研究者们开展了广泛的研究,取得了丰硕的成果,为风沙地貌学发展做出了重要贡献。本文总结新中国成立70年来中国风沙地貌学的发展,重点展示具有重要国际影响力的工作。

## 2 中国风沙地貌学的现状与历史

新中国70年,中国风沙地貌研究从无到有,研究队伍不断壮大,研究工作持续加强,研究水平逐步提高,研究领域不断拓展,国际影响力明显提升,是当前国际风沙地貌学研究的重要力量(表1)。其中,针对中国干旱区风沙地貌的研究成果丰富和发展了风沙地貌学理论(表2)。回顾70年,中国风沙地貌研究经历了3个阶段,即初创阶段(1949—1977年)、充实发展阶段(1978—1999年)和国际化研究阶段(2000年至今),这3个阶段在图1中表现得很明显:1953—1977年的24年,年均发表文章总量不到3篇,1978—1999年的21年,每年平均发表文章达到25篇,2000—2018年间,年均发表文章数量大大提高,超过70篇(图1)。

(1) 初创阶段(1949—1977年)。该阶段面对新中国百废待兴的局面,针对沙区资源利用的需要,研究工作全面借鉴前苏联研究框架,突出应用研究,曾出现了60年代的研究高潮,但之后受到文化大革命的影响,研究工作停滞不前。因此,这一阶段的研究

表1 中国风沙地貌学研究主要机构及其研究领域\*

Tab. 1 The main research institutions and fields on aeolian geomorphology in China

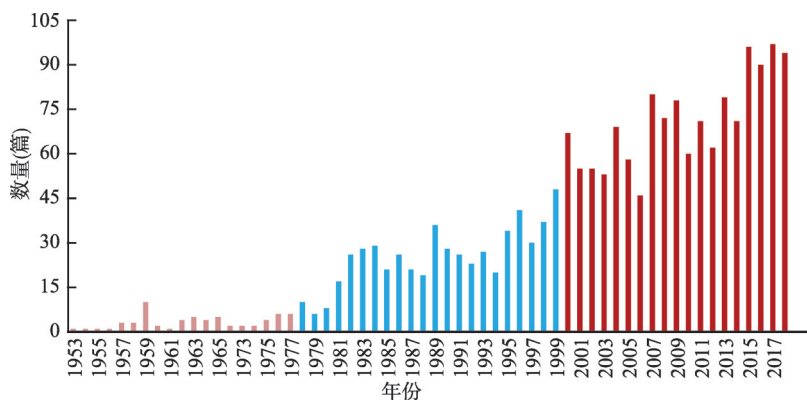
机构	研究起始时间	主要贡献
中国科学院西北生态环境资源研究院**	20世纪50年代末	野外调查与观测、模拟实验、沙漠环境演变与古风沙地貌,风沙地貌学高级人才培养,长期主导中国风沙地貌学研究。
甘肃省治沙研究所(原甘肃省民勤治沙综合试验站)	20世纪50年代末	风沙地貌野外观测。
中国科学院新疆生态与地理研究所(原中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所、中国科学院新疆地理研究所)	20世纪60年代	风沙地貌的野外调查与观测,特别是新疆风沙地貌研究。
内蒙古农业大学(原内蒙古林学院)	20世纪60年代	水土保持与荒漠化防治。
华南师范大学	20世纪80年代	海岸风沙地貌。
北京师范大学	20世纪90年代	野外调查与观测、模拟实验、数值模拟。
中国科学院地质与地球物理研究所	20世纪90年代	风沙地貌及其灾害防治。
兰州大学	20世纪90年代	野外调查、数值模拟。
中山大学	20世纪90年代	海岸风沙地貌。
福建师范大学	2005年	海岸风沙地貌。
陕西师范大学	2008年	野外调查与观测、模拟实验、数值模拟、行星风沙地貌。
南京大学	2010年	沙漠环境演变与风沙地貌。
中国林业科学院荒漠化研究所	2010年	沙丘移动与戈壁。
浙江大学	2015年	沙漠环境演变与风沙地貌。

注: \*大致以开展研究工作的先后顺序; \*\*前身为1959年成立的中国科学院治理沙漠科学考察队,2016年起为中国科学院西北生态环境资源研究院。

表2 中国风沙地貌学的标志性著作

Tab. 2 The key books on aeolian geomorphology in China

著作	作者	年份	主要贡献
《中国沙漠概论》	朱震达, 刘恕, 吴正, 等	1974, 1980	中国沙漠的分布以及各主要沙漠和沙地的沙丘基本特征。
《塔克拉玛干沙漠风沙地貌图》	中国科学院兰州沙漠研究所	1980, 1990	塔克拉玛干沙漠风沙地貌类型与分布规律。
《塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究》	朱震达, 陈治平, 吴正, 等	1981	塔克拉玛干沙漠的形成、沉积物来源、风沙地貌类型与分布、沙丘移动、危害及其防治的系统论述。关于沙丘移动形式与强度的论述以及根据沙丘类型揭示近地层风场特征是著作的突出亮点。
《风沙地貌学》	吴正	1986	风沙地貌学教科书, 简要介绍了风沙地貌学的主要研究内容和理论。
《巴丹吉林沙漠风沙地貌图》	朱震达, J. 霍弗曼, D. 杰克尔	1992	巴丹吉林沙漠的风沙地貌类型与分布规律, 突出了高大沙山与湖泊景观。
《华南海岸风沙地貌研究》	吴正 主编	1995	华南沿海风沙沉积和风沙地貌系统。
《巴丹吉林沙漠及其邻近地区地貌图》	陆锦华, D. 叶克尔	1998	巴丹吉林沙漠的风沙地貌类型与分布规律, 风沙地貌发育与周围环境, 特别是地质构造的关系。
《库姆塔格沙漠地貌图》	董治宝 主编	2009	库姆塔格沙漠风沙地貌类型与分布规律。
《风沙地貌与治沙工程学》	吴正	2010	1986年《风沙地貌学》的修订版, 全面介绍了风沙工程的分类、作用原理与设计原则, 及其防护效益和应用条件。
《库姆塔格沙漠风沙地貌》	董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等	2011	库姆塔格沙漠的形成、沉积物特征、风动力系统、风沙地貌类型与分布, 主要风沙地貌类型的发育过程、遗产价值、危害及其防治以及区划等系统论述; 对“羽毛状”沙丘的形成进行了深刻阐述。
《腾格里沙漠地貌图》	董治宝 主编	2014	腾格里沙漠的风沙地貌类型、分布规律与发育环境。
《青藏高原风沙地貌图集》	董治宝 主编	2017	青藏高原风沙地貌的类型和分布及与其他地区相比所表现出的突出特点。
《中国干旱半干旱区灌丛沙丘的形成演化及其对环境变化的响应》	王训明, 李晋昌, 郎丽丽	2017	中国不同区域灌丛沙丘的发育过程与环境变化的关系。



注: 检索关键词为风沙地貌、沙丘、风蚀地貌、雅丹、戈壁。

图1 中国学者发表风沙地貌学研究论文统计

Fig. 1 The publications on aeolian geomorphology by Chinese researchers

工作通常被现今研究者忽视,但必须肯定其对中国风沙地貌学发展的深远影响,乃至对世界风沙地貌学的重要贡献。其中以下5个方面的工作影响深远:①引进国外研究成果,如翻译出版了风沙物理学奠基人R. A.拜格诺《风沙和荒漠沙丘物理学》<sup>[3]</sup>、前苏联学者A. N. 兹纳门斯基《沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防治问题》<sup>[4]</sup>、雅库波夫《土壤风蚀及其防治》<sup>[5]</sup>等专著和一大批论文,其中《风沙和荒漠沙丘物理学》至今仍是风沙地貌学者必读的经典著作,在全球范围保持经久不衰的高引用率;②针对国民经济建设的需要,以摸清沙区环境特征与资源利用为目的,在广泛科考的基础上,研究中国风沙地貌的宏观规律,如各沙漠或沙地的风沙地貌特征<sup>[6]</sup>;③在不同沙区,如塔克拉玛干沙漠、民勤、沙坡头等地,开展了风沙地貌的野外观测研究<sup>[7-9]</sup>;④成立了专门研究机构:中国科学院治理沙漠科学考察队(1959年)、内蒙古林学院林学系沙漠治理专业(1960年,现内蒙古农业大学沙漠治理学院)、中国科学院生物土壤沙漠研究所(1961年,现中国科学院新疆生态与地理研究所)等,聚集了一批风沙地貌学者;⑤创建了研究平台,特别是1967年建成的风沙环境风洞开启了中国风沙地貌实验研究之先河。

(2) 充实发展阶段(1978—1999年)。随着中国科学春天的到来,中国学者开始越来越多地跟随欧美国家研究,重视理论领域的探索。其中有3个方面的因素助推了中国风沙地貌学的发展。

首先,意识到与国际研究的差距。20世纪70年代以来是以欧美为代表的国际风沙地貌研究快速发展时期,有4个方面的原因:①有良好的研究基础。欧洲国家,如英国和法国出于殖民的需要,在19世纪后期就开展了非洲的风沙地貌研究。荷兰学者针对海岸的防护,开展了海岸沙丘研究。美国学者自20世纪40年代针对美国西部大平原地区的黑风暴开展的土壤风蚀研究可直接为风沙地貌动力学研究所借鉴;②20世纪60年代开始,出于对石油和其他沉积矿产勘探的需要,对风成沉积物沉积过程与环境的探索使沉积学研究成为风沙地貌学的重要组成部分;③遥感影像提供了难以到达的偏远地区的沙漠及其腹地风沙地貌、甚至地外行星风沙地貌的丰富信息,激发了研究者的好奇心,风沙地貌研究得以更广泛地开展;④出于学科发展的需要,欧美国家一直重视风沙地貌学研究,截至目前,英国学者出版的风沙地貌学专著和教科书在数量和质量方面居世界首位。受国际研究的影响,中国风沙地貌学者针对单个沙丘,在动力学过程研究方面取得了重要进展,如风沙颗粒运动学、风沙流动力学、沙丘近地层气流场特征、沙丘表面蚀积规律与沉积学特征等,理论水平不断提高。发现风沙运动是一种贴近地表面的气流对沙粒的输运现象,建立了不同地表风沙流结构,新月形沙丘链与新月形沙丘具有相似的蚀积规律,迎风坡的坡脚和下部表现为风蚀,其上部直至脊线均为堆积区<sup>[10-19]</sup>。其次,防沙工程优化的需要。再次,风沙地貌被认为是沙漠化的重要指征,在20世纪80年代之后,沙漠化研究拓展了风沙地貌研究,如从以干旱区沙漠为重点的研究拓展至半干旱甚至半湿润地区的沙漠化土地研究。

(3) 国际化研究阶段(2000年至今)。在国际风沙地貌学发展和国家基础研究投入增加的背景下,风沙地貌研究快速发展。国际背景是地球系统科学和深空探测的发展,人们越来越意识到风沙地貌是地球系统中重要的乃至不可或缺的组成部分,风沙地貌系统通过风沙地貌过程以及各种风沙地貌构成的特殊下垫面影响其他系统乃至整个地球系统,如产生的沙尘影响地气相互作用系统和生物地球化学循环过程,风成沉积物的导热和导水特性影响地表辐射、水分循环和水文过程。研究发现,沙尘气溶胶通过散射和吸收太阳短波辐射及地气系统发出的长波辐射,对地气系统的能量收支平衡产生影响;通过作为云凝结核改变云微物理特性、云量和云的寿命,间接影响气候系统;还可吸收太

阳辐射改变大气辐射加热结构, 加速云滴蒸发减少云水含量。沙尘气溶胶长距离传输过程中物理、化学特性的改变, 被认为是全球生物和化学循环的重要途径<sup>[20-31]</sup>。在全球变化研究中, 风沙地貌被作为陆地生态系统响应的指征。深空探测结果表明, 风沙地貌过程在一些地外行星上很活跃, 甚至是主导的现代地貌过程, 所以, 风沙地貌被认为蕴含着现代行星表面过程及其环境演化历史的丰富信息<sup>[32-33]</sup>, 是深空探测的主要内容。

目前, 中国风沙地貌研究与国际研究差距不断缩小, 呈现新的趋势: ① 研究工作更广泛。近20年参与风沙地貌研究机构和学者明显增加, 遍布各地, 催生如数值模拟、海岸风沙地貌、地外星球风沙地貌等新增长点。② 国际交流使国际化研究水平明显提高。目前已有野外观测、物理模拟和数值模拟的完整支撑体系, 全面开展风沙地貌形态、过程与沉积物等内容研究, 研究工作直接与国际研究接轨并行。③ 将国际一流的研究技术应用于中国独特风沙地貌研究, 产出国际领先的研究成果。如关于塔克拉玛干沙漠复杂线形沙垄和巴丹吉林沙漠复合新月形沙山形成过程研究较之传统简单沙丘的研究是重要突破; 库姆塔格沙漠的特殊线形沙丘、敦煌雅丹国家地质公园和柴达木盆地雅丹地貌的研究完善了传统风沙地貌学理论; 基于野外现场试验的沙丘动力学研究、青藏高原高寒环境的风沙地貌研究、类火星以及地外星球风沙地貌研究成为国际瞩目的研究工作。风沙地貌学研究已拓展到地外星球, 中国风沙地貌学研究将在深入理解地球风沙地貌的基础上, 伴随中国的深空探测进入行星研究时代, 为认识地外星球的现代表面过程和演化历史提供重要信息。中国风沙地貌现在的研究水平是整体与国际并行, 部分领先。

### 3 具有国际影响力的风沙地貌研究

#### 3.1 沙丘移动规律

沙丘移动规律是中国风沙地貌研究的突出特色, 涉及中国不同沙区, 研究方法有两种, 即地形测量和遥感影像对比。中国科学院治沙队于1956年开始在宁夏沙坡头和甘肃民勤沙井子等地进行沙丘移动观测<sup>[7, 34]</sup>, 1962年在塔克拉玛干沙漠南部和西南部的民丰、于田、策勒、和田、墨玉、皮山、莎车和英吉沙等地建立定位观测点, 观测沙丘形态特征及其移动规律。采用的方法有等高线地形测量、测竿、集沙仪等<sup>[8-9]</sup>, 观测了饼状沙丘、盾状沙丘、锥形新月形沙丘等不同发育阶段沙丘表面不同部位的蚀积特征与规律、形态特征和演变以及移动规律。1989—1992年针对敦煌莫高窟顶的风沙危害, 对窟顶最大可能输沙量和沙丘移动速度进行了理论计算, 并通过实地测量和20世纪70年代中期与80年代中期的航片对比, 对鸣沙山前沿沙丘移动进行了动态监测, 初步揭示了窟顶沙山移动规律及其发展趋势<sup>[35]</sup>。1991—1993年配合塔里木沙漠石油公路防沙工程设计, 在沙漠北部的肖塘设立沙丘移动监测区, 通过三期详细的地形测量, 监测了沙丘移动方向、速率以及沙丘移动过程中的形态变化<sup>[36]</sup>。采用GPS-RTK技术, 选取沙丘脊线、陆侧坡脚线、沙丘横断面等反映沙丘动态特征的要素, 对河北昌黎黄金海岸于2004—2007年间的沙丘动态变化开展了监测, 确定了沙丘移动速率<sup>[37-40]</sup>。基于2004—2008年的沙丘移动监测资料和气象资料, 确定了青海湖周边地区沙区移动方向、速率及其高度变化<sup>[41]</sup>。以下3个方面的成果既指导了流沙治理的实践, 又在风沙地貌学发展方面具有重要的贡献。

(1) 沙丘移动规律的定量研究。建立了沙丘表面吹蚀量与迎风坡坡度的关系、沙丘高度增减与吹蚀量和堆积量的关系、新月形沙丘高度与宽度及顺风向长度等几何特征参数之间的关系、沙丘移动路径与风况的关系、沙丘移动速度与沙丘高度的关系以及沙丘移动过程中高度的变化规律。

(2) 中国沙丘移动的动力类型。在借鉴前苏联沙丘地貌分类的基础上,从防沙治沙实践需要出发,根据中国西北地区沙丘发育的动力条件,将沙丘移动分为四大动力类型:第一类是内蒙古型,包括河西走廊、阿拉善、鄂尔多斯和内蒙古中部地区,其特征为受西北季风和东南季风两个相反风向的作用,沙丘呈横向的新月形沙丘及沙丘链形态,而这种横向形态乃是由于气流振荡运动或振荡前进运动而成。第二类是塔里木型,以塔克拉玛干沙漠为代表,其特征为受两种不同方向风(东北风和西北风)的影响,但这两种方向的气流并不像内蒙古型气流那样作相反方向的振荡式前进运动,而是呈前进式的方式运动,因此沙丘都向且末、于田之间的昆仑山山前地带推进。第三类为准噶尔型,以准噶尔盆地的古尔班通古特沙漠为代表,其特征为受西风的影响,以西北风为主,同时受蒙古高压东北风的作用,沙丘大部分为沿着主风向或合成风方向延伸的沙垄。第四种为柴达木型,以柴达木盆地为代表,也是受西风的影响,以偏西风及西北风为主,但不像准噶尔型那样受蒙古高压东北风的作用,因而,此区的沙丘作前进式运动。

(3) 沙丘的活动性。以植被盖度大小,将沙丘活动程度划分为固定沙丘(植被盖度35%以上)、半固定沙丘(植被盖度介于15%~35%)及流动沙丘(植被盖度15%以下)<sup>[42]</sup>3种类型。

### 3.2 风沙地貌区域综合研究

风沙地貌的区域综合研究旨在基于地理学思想,通过风沙地貌的空间格局特征与规律揭示其形成过程与发育条件,是被风沙地貌学界忽视的领域,国际上的研究案例很少,代表性工作仅有美国地质调查局关于全球沙丘地貌特征与规律的宏观研究<sup>[43]</sup>、纳米布沙漠<sup>[44]</sup>及阿拉伯半岛沙漠的研究<sup>[45]</sup>。中国学者较早地开展了风沙地貌区域综合研究,首先,在全面考察的基础上,总结出中国不同沙漠或沙地风沙地貌的宏观规律。其次,关于塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠风沙地貌的深入研究是风沙地貌区域综合研究的经典案例,青藏高原也有初步的研究。

**3.2.1 中国风沙地貌宏观规律** 中国有风沙地貌发育的沙漠、戈壁和沙地约131万km<sup>2</sup>,是全球温带沙漠的主要分布区,基于20世纪50年代末期以来的沙漠科考,从全国尺度上认识风沙地貌的特征与规律既是推动中国风沙地貌研究的奠基性工作,也是对国际风沙地貌学的重要贡献,成果集中总结在《中国沙漠概论》专著中<sup>[6]</sup>。

(1) 中国风沙地貌的类型与分布规律。识别了中国沙漠主要沙丘的形态特征、形成发育条件和分布规律,如新月形沙丘、沙丘链、抛物线形沙丘、新月形沙垄、沙垄、格状沙丘、蜂窝状沙丘、复合新月形沙丘和沙丘链、复合型纵向沙垄、金字塔沙丘、鱼鳞状沙丘、穹状沙丘、羽毛状沙丘,虽然与目前沙丘地貌分类系统的科学性甚至沙丘类型名称等方面比较存在着不足,但是,这可以认为是世界上较早的沙丘分类系统,发展了前苏联地貌学家1967年提出的沙丘地貌分类系统<sup>[46]</sup>。以乌鞘岭—贺兰山为界,区分了西部沙漠和东部沙地,西部沙漠占全国沙漠总面积的90%,绝大部分以流动沙丘为主,占该区沙漠总面积的75%。东部沙地分布零散,面积较小,仅占全国沙漠面积的10%,绝大部分以固定、半固定沙丘为主,占该区沙地总面积的80%。

(2) 风沙地貌沉积物来源。认识到中国沙漠沉积物来源的复杂性和成因的多样性,甚至表现在同一沙漠的不同区域。根据各沙漠第四纪古地理环境的分析及沉积物特征的综合研究,将中国沙漠的沉积物来源概括为4种成因类型:① 河流冲积物,如塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、库布齐沙漠的大部、乌兰布和沙漠的北部、柴达木盆地东部以及西辽河科尔沁沙地等;② 冲积—湖积物,如巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地和浑善达克沙地的大部、乌兰布和沙漠西南部、罗布泊以西的库鲁克库姆以及河西

走廊的部分沙漠; ③ 洪积冲积物, 如塔里木盆地昆仑山和阿尔金山北麓、柴达木盆地昆仑山北麓、巴丹吉林沙漠的东南部等; ④ 基岩风化的残积坡积物, 如毛乌素沙地北部、塔克拉玛干沙漠马扎塔格山以北、腾格里沙漠的东北部及浑善达克沙地的西部等地区。

(3) 中国主要沙漠和沙地的风沙地貌特征。以区域地理思想全面论述了中国不同自然带主要沙漠和沙地的风沙地貌特征及其发育环境, 特别是极具特色的代表性风沙地貌类型, 如呼伦贝尔沙地的灌丛沙丘与风蚀坑、浑善达克沙地的抛物线形沙丘、腾格里沙漠的格状沙丘、巴丹吉林沙漠的高大复合沙山、塔克拉玛干沙漠的复杂线形沙丘、古尔班通古特沙漠及罗布泊和柴达木盆地的雅丹地貌等。

**3.2.2 塔克拉玛干沙漠** 中国第一代风沙地貌研究者于20世纪60年代就开始了塔克拉玛干沙漠风沙地貌的研究工作, 成果集中反映在《塔克拉玛干沙漠风沙地貌图》<sup>[47]</sup>和《塔克拉玛干风沙地貌研究》专著中<sup>[48]</sup>。该书是目前世界范围内内容最完整的区域风沙地貌研究著作。塔克拉玛干沙漠是位于亚洲中部的温带沙漠, 为中国第一大沙漠, 世界第二大流动沙漠, 被喻为风沙地貌的博物馆。《塔克拉玛干风沙地貌研究》从第四纪古地理基本轮廓、风沙地貌形成发育和形态特征、沙丘移动规律、风沙地貌区划以及风沙防治的若干地貌问题等方面进行了全面系统的研究, 其突出贡献可归纳为以下7个方面:

(1) 现在塔克拉玛干沙漠的规模是中更新世以后不断发展的结果。沙漠下伏地貌主要是干燥气候条件下河流的洪积冲积扇、干三角洲, 部分地区则为河湖相平原。

(2) 塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成发育是在干旱气候条件下风和沙相互作用, 并受地面形态、水分植被条件及沙源供应影响下的产物, 但沙漠边缘及绿洲中的沙丘形成和人类经济活动存在着密切的关系。

(3) 在全面分析沙丘类型与分布的基础上, 将塔克拉玛干沙漠的流动沙丘归纳为3种基本类型: 走向与起沙风方向垂直或成 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 交角的沙丘; 走向与合成起沙风向平行或成 $30^{\circ}$ 以下交角的沙丘; 多风向作用下的沙丘。

(4) 引入沙丘起伏度和疏密度两个矢量指标定量分析风沙地貌形态, 确定了不同类型沙丘高度与宽度及长度的定量关系。

(5) 关于沙丘移动规律研究仍然是截止目前最全面的研究。分别研究了横向沙丘和纵向沙丘的移动特征, 建立了横向沙丘移动速度与沙丘高度的定量关系。特别是在风沙地貌学界最早指出, 纵向沙丘既具有纵向延伸又具有横向移动的特点。将沙丘移动形式分为前进式和摆动前进式两种, 将前移速度分为慢速、中速和快速3种类型。根据沙丘移动特点与沙丘类型及其形态的配置关系建立了塔克拉玛干沙漠地表气流场及沙丘移动方向图, 被后来的气象观测资料所证实。

(6) 采用下伏地貌成因和沙丘形态两个指标将塔克拉玛干沙漠划分为9个大区, 21个小区。

(7) 基于风沙地貌的研究成果, 指出了不同地区的风沙危害问题。

**3.2.3 库姆塔格沙漠** 21世纪以来, 库姆塔格沙漠受到学界关注。2007年以来, 完成了两期综合科学考察, 风沙地貌的研究成果反映在《库姆塔格沙漠地貌图》<sup>[49]</sup>《库姆塔格沙漠风沙地貌》<sup>[50]</sup>《库姆塔格沙漠研究》<sup>[51]</sup>等专著中, 其中《库姆塔格沙漠风沙地貌》是继《塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究》之后, 中国风沙地貌区域综合研究的又一力作, 研究内容更全面, 涉及风沙地貌形成的古地理背景、沉积物基础、风动力系统、类型与分布、形成过程、区划、旅游资源开发及风沙危害防治, 有以下4个方面的突出贡献:

(1) 发现库姆塔格沙漠所谓的“羽毛状”沙丘是“伪羽毛状”沙丘, 以往基于航空相片和其他遥感影像认定的羽毛状沙丘实际上是由地表沉积物反照率差异所形成的图

案,并非真正意义上的羽毛状沙丘。该发现也解释了罗布泊卫星影像的“大耳朵”之谜,大耳朵是地表反照率对比形成的图案,并不代表湖岸堤(以往普遍解释为湖岸堤)。

(2)发现了耙状线形沙丘和沙砾碛两种在风沙地貌学中未曾报道的风沙地貌类型。提出耙状线形沙丘是在沙源供应不充分及锐角相交的双向风作用下,由新月形沙丘一翼转向、联结而成的形成机理。首次应用地貌格局分析法,指出耙状线形沙丘形成于末次盛冰期以来。将沙砾碛定义为砾石覆盖流沙的风蚀地貌,是沙漠中的古河道洪积物周围流沙被风蚀而成的蚀余地貌,其发育过程经历5个特征阶段,对应于5种沙砾碛类型。

(3)指出库姆塔格沙漠东北部的雅丹地质公园—世界最典型的雅丹地貌形成于全新世,与非洲撒哈拉沙漠的类似雅丹地貌同期,其发育过程分为幼年期、青年期、壮年期和消亡期4个阶段,目前大多处于壮年期和消亡期。据此提出,保护雅丹谷地的戈壁表面免受干扰,不致形成强风沙流侵蚀,延长雅丹地貌旅游服务期的建议。

(4)从独特的景观特征,美学价值,社会经济、文化和科学价值等方面论述了库姆塔格沙漠的遗产价值,提出雅丹地貌申请世界自然遗产的建议,助力旅游开发与保护,是关于风沙地貌遗产价值与旅游开发研究的成功案例。

**3.2.4 青藏高原** 将以北方沙漠和沙地为重点的研究拓展至青藏高原高寒地区,《青藏高原风沙地貌图集》<sup>[52]</sup>是代表性成果,为未来的深入研究奠定了基础。青藏高原作为地球上以高寒著称的独特地理单元,其构造地貌、冰川地貌、冻土地貌、重力地貌等极具代表性,《青藏高原风沙地貌图集》在获得广泛深入认识的背景下,提供了风沙地貌方面的重要科学认识,除了风沙地貌的总体特征与宏观规律外,有以下几个方面的新认识:

(1)类型简单。沙丘类型蕴含着其形成发育环境、过程和演化历史的丰富信息。尽管像其他沙漠一样,青藏高原发育了多种风沙地貌类型,但总体类型比较简单。风积地貌以简单沙丘为主,几乎没有复合和复杂沙丘出现。即使在简单沙丘中,类型也比较单一,以新月形沙丘占绝对优势,占90%以上,在风蚀地貌中,雅丹地貌占绝对优势。沙丘低矮,高度一般在30 m以下,85%在5~30 m之间。按流动性,沙丘可分为流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘等。除了柴达木盆地以流动沙丘为主,其他地区的风沙地貌以固定和半固定沙丘为主。由于风沙堆积厚度较小,青藏高原很少出现绵延起伏的沙海景观。

(2)形成时间晚。与中国北方沙漠相比,青藏高原风沙地貌的形成时间明显较晚。OSL年代学研究表明,流动性最强、规模最大的柴达木盆地的现代沙丘形成于3 ka BP,其他地区的沙丘形成时间可能更晚。在沙漠化严重的地区,如黄河源区和若尔盖湿地等地区,风沙地貌形成的时间仅数十年。青藏高原沙丘风成沙的粒度组成成熟度差,风沙颗粒形貌特征表现出磨圆度差,均反映出沙丘形成时间较晚。

(3)对气候变化敏感。青藏高原的风成沉积记录表明,在第四纪地质时期,风沙活动至少在中更新世就存在,晚冰期以来的风沙活动记录则更为广泛,而目前所见的沙丘几乎都是3 ka BP以来的。青藏高原风沙地貌的形成与发育对应于冷干气候,与气候变化相伴的冰川、冻土、湖泊水位和植被等因素均对风沙地貌的发育有着重要的影响,使较早时期形成的风沙地貌由于气候变化而引起的环境变化所改造,未被保存下来,现代风沙地貌仅是3 ka BP以来冷干气候的产物。尽管20世纪50年代以来,在部分地区,人为因素对风沙地貌的形成与发育具有明显的影响,以致形成沙漠化土地,但近年来沙漠化的发展趋势表明,人为因素对风沙地貌的影响程度并未超过气候变化的影响。

### 3.3 中国独特风沙地貌

中国干旱区是风沙地貌过程活跃的地区,包括西北干旱区和世界屋脊青藏高原部分地区,独特环境孕育了独特的风沙地貌,中国风沙地貌学研究关注这些独特的风沙地貌。



(1) 塔克拉玛干沙漠复杂线形沙丘。关于沙丘形成过程的传统研究主要针对简单沙丘, 几乎未涉及复合和复杂沙丘。塔克拉玛干沙漠以复杂线形沙丘著称, 颇具代表性<sup>[48]</sup>。研究发现, 该沙漠复杂线形沙丘的形成发育过程与区域风况特征密切相关, 特别是沙漠腹地久远的地质历史, 使沙丘发育经历了4个完整的过程: 首先形成线状排列的简单新月形沙丘群; 新月形沙丘不均衡前移, 形成并列的简单线形沙丘群; 简单线形沙丘群发生侧移和合并形成复合线形沙丘; 横向沙丘叠置在复合线形沙丘上, 形成复杂线形沙丘<sup>[53]</sup>。

(2) 巴丹吉林沙漠高大沙山。沙山 (mega-dune) 或巨型沙丘, 形成过程漫长, 支持其形成过程的直接证据难以获得, 因此对其形成过程长期基于推测, 多数研究者认为受下伏地形控制。巴丹吉林沙漠有世界最高大的沙山, 极具代表性。中国学者对这些高大沙山的形成进行了多方面的研究, 提出了下伏地形控制、地下水维持和风成控制等多种假说。最突出的研究是将地貌格局分析法引入沙丘地貌学研究, 提供了迄今为止关于高大沙山形成最直接、最有说服力的证据, 发现巴丹吉林沙漠高大沙山系统中各种尺度的沙山、沙丘乃至沙波纹显示一致的地貌学格局特征, 而且与世界其他沙漠的沙丘地貌学格局特征具有很好的一致性, 意味着巴丹吉林沙漠高大沙山的形成过程并未受其他特别因素的控制, 呈现出风力作用下, 沙丘地貌发育过程的典型的自组织行为, 亦即风是塑造高大沙山系统的动力, 该结论逐渐被其他研究所证实<sup>[54]</sup>。

(3) 腾格里沙漠的格状沙丘。格状沙丘 (dune networks) 在世界沙漠中分布比较广泛, 以中国的腾格里沙漠面积最大、最为典型和集中 (约1.8万 km<sup>2</sup>, 占该沙漠面积的38%), 但其在沙丘地貌学分类中的归属一直是一个令学界困惑的问题。基于沙丘形态与演变过程以及风况特征的长序列监测与试验资料, 发现构成所谓“格状沙丘”的主梁和副梁分别代表两组近乎垂直的横向沙丘和线形沙丘, 主梁为西北风和东南风作用下形成的反向横向沙丘, 副梁为成锐角相交的西北偏北风和西北偏西风作用下形成的线形沙丘, 二者构成“格状地貌格局”<sup>[55]</sup>, 形成于约1.3 ka BP以来, 其成熟度 (或典型性, 即主梁长度/副梁长度之比) 随时间推移变高<sup>[56]</sup>。

(4) 库姆塔格沙漠的“羽毛状”沙丘。库姆塔格沙漠一直被认为是以“羽毛状”沙丘著称。实际上, 所谓的“羽毛状”沙丘是“伪羽毛状”沙丘, 遥感影像上显示的“羽毛状”沙丘是由地表沉积物反照率差异形成的“羽毛状”图案。这里的“羽毛状”沙丘实际上代表另外一种沙丘类型, 即耙状线形沙丘, 被证明是在末次盛冰期以来, 沙源供应不充分条件下, 在成锐角相交的双向风作用下, 由新月形沙丘一翼转向、联结而成<sup>[50, 57]</sup>。

(5) 柴达木盆地类火星风沙地貌。青藏高原沙漠气温和大气压低、空气相对稀薄, 是地球上与火星环境最为接近的地区, 在柴达木盆地沙漠中发育了类火星风沙地貌 (terrestrial analogues of Martian aeolian landforms)。研究表明, 类火星风沙地貌产生于沙源丰富度的空间差异。传统风沙地貌学理论认为, 风、地表状况和沙源是影响风沙地貌的三大要素, 风况和地表障碍物对风沙地貌类型起决定作用。柴达木盆地的类火星风沙地貌表明, 沙源丰富度也是决定风沙地貌类型的重要因素。柴达木盆地沙漠与火星确实存在限制沙源供应的因素, 如盐分、干冰等物质的胶结作用。所以, 沙源供应不充分是影响火星沙丘地貌发育的重要因素, 导致火星沙丘地貌类型简单, 以简单线形沙丘为主。

(6) 雅丹地貌。中国雅丹地貌类型齐全, 在塔里木盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地均有大面积分布, 风沙地貌学中“雅丹”一词即源于罗布泊地区。虽然, 北魏郦道远的《水经注》就有关于龙城雅丹地貌的描述, 陈宗器与前苏联学者西尼村 B. M. 于20世纪30年代和50年代也曾报道罗布泊地区的雅丹地貌, 但科学研究直至20世纪80年代后才开展。罗布泊地区的雅丹被分为以风吹蚀作用为主和以流水侵蚀作用为主的发育类型<sup>[58]</sup>,

库姆塔格沙漠东北部雅丹地质公园的雅丹地貌形成于全新世,与非洲撒哈拉沙漠的类似雅丹地貌同期,其发育过程分为幼年期、青年期、壮年期和消亡期4个阶段,目前大多处于壮年期和消亡期。据此提出,保护雅丹谷地戈壁表面免受干扰,不致形成强风沙流侵蚀,延长雅丹地貌旅游服务期的建议<sup>[51]</sup>。柴达木盆地雅丹地貌的长与宽有很好的相关性,长/宽为3,雅丹体长轴走向与盛行风向基本一致,该区雅丹地貌的形成以风力作用为主,形成雅丹地貌的沉积物主要包括粉沙、极细沙、黏土和细沙,粒度分布曲线主要有呈不对称的双峰分布、近乎对称的双峰分布和单峰分布等4种类型<sup>[59-61]</sup>。

(7) 海岸沙丘。海岸沙丘是中国风沙地貌研究长期忽视的领域,在20世纪80年代前近属空白,而在国际上海岸沙丘是最早被关注的风沙地貌。在1980—1986年间进行的全国海岸带和海涂资源综合调查工作推动下,海岸风沙问题开始受到广泛的关注,之后得以持续发展<sup>[62-66]</sup>,取得了很多显著性成果<sup>[67-78]</sup>。研究发现,中国海岸沙丘分布范围广泛但规模较小且分布零散,多分布于河口地区,如河北滦河口以北昌黎海岸、福建闽江入海口以南的长乐海岸<sup>[67]</sup>,基本类型有雏形前丘、新月形前丘、横向前丘脊、草灌丛沙丘、抛物线沙丘、斜向沙脊、新月形沙丘、横向沙脊、纵向沙垄、爬坡沙丘、海岸沙席、风蚀残丘和风蚀洼槽<sup>[73-75]</sup>。海岸风沙地貌形成与发育的动力学过程主要受风况、沙源供应度以及干季与风季同步3个因素的控制<sup>[78]</sup>。不同地区海岸沙丘发育模式不同,中国南方华南海岸沙丘的发育模式是海滩沙在向岸风作用下,以岸前沙丘为跳板向内陆输沙的发育模式;中国北方渤海和黄海海岸沙丘的发育分为沙源丰富的开阔平原海岸、沙源丰富的开阔台地海岸和海湾小平原海岸、岬湾沙滩岸3种发育模式<sup>[75]</sup>。近年来的特色成果是从海岸沙丘形成于海、陆、气交互作用的动力环境这一根本特征出发,力图突破之前基本按照内陆风沙地貌范式研究海岸沙丘的状况,将其与大气、波浪、海滩联系起来进行综合研究<sup>[79-80]</sup>,开展了华南海岸沙丘的台风响应模式研究,分析了典型区域不同类型沙丘形态对台风的响应、不同类型沙丘表层沉积物对台风的响应、不同海岸沙丘对台风响应的差异性以及响应机理<sup>[81]</sup>。

目前,中国风沙地貌研究与国际研究差距不断缩小,在沙丘移动规律、风沙地貌区域综合研究、中国独特风沙地貌发育演变过程、戈壁地貌学研究以及地外星球的探索研究产出许多国际领先的研究成果。除了上述研究外,尚有其他方面的特色研究,如敦煌鸣沙山金字塔沙丘、沙坡头地区的爬坡沙丘、回涡沙丘、抛物线沙丘、风蚀坑等方面的研究<sup>[82-86]</sup>。

### 3.4 沙丘二次流

20世纪80—90年代,国际风沙地貌学界意识到沙丘形成及其动力学过程观测的重要性,特别关注气流—风沙输移—沙丘形态之间的互馈关系<sup>[87]</sup>,提出若干概念模型来描述沙丘形态影响下的气流场(二次流)<sup>[88-89]</sup>,但一直缺乏实验数据的支持。

中国风沙地貌学者将粒子图像测速系统(PIV)引入沙丘二次流的实验研究,准确地模拟了横向沙丘背风坡的流场结构<sup>[90]</sup>,为准确描述沙丘二次流特征做出了重要贡献。依据风速廓线特征将背风坡气流场划分为6个区,即外层气流区、上扬气流区、上尾流区、下尾流区、分离区和重附内边界层区,用重附点的距离,分离区的高度、面积和形状比率来表征二次流结构特征。发现沙丘迎风坡坡度对二次流具有重要的影响,特别是15°迎风坡坡度,在小于15°时,背风坡二次流结构的参数随迎风坡坡度增大,但在大于15°坡度时,这些参数不再变化。野外观察发现,发育成熟的横向沙丘,迎风坡的坡度大致在15°左右。二次流研究的重要目的之一是揭示气流、风沙输移和沙丘形态变化之间的动态平衡,从而阐明沙丘平衡态的形成过程,15°迎风坡度有可能是沙丘平衡形态的一个

重要指征, 依次可以进一步阐明沙丘平衡高度的形成。

利用风洞实验模拟了灌丛周围三维流场结果的特征<sup>[91]</sup>, 深化了对灌丛沙丘动力学过程的理解。发现灌丛影响下穿透流和偏转流的存在是导致复杂流场的原因, 二者的强弱对比随灌丛密度的变化而变化, 当灌丛密度小于5%~8%时, 灌丛流场为穿透气流所主导, 当灌丛密度增大时, 气流在水平和垂直两个方向上发生分离, 形成背风坡的回流区, 回涡区的位置和大小随灌丛密度而变化, 与风速无关。野外观察发现, 灌丛沙丘的堆积形成过程有多种形式, 即灌丛之后的丛后堆积、丛间堆积和丛前堆积, 取决于灌丛流场特征, 虽然5%~8%的灌丛密度在灌丛沙丘发育中的意义还有待于进一步证实, 但已有观察表明, 这个密度是沙地流动性的重要临界指标, 小于该密度, 表现为流动沙地, 大于该临界值时, 沙地表现为半流动性。所以, 灌丛沙丘的发育影响沙地流动性, 这是对灌丛沙丘进行深入研究的重要启示。

采用超声风速仪和粒子图像测速技术, 利用野外实测和风洞模拟方法, 研究了障碍物前的气流速度场<sup>[85]</sup>, 阐明回涡沙丘形成与气流场的关系。回涡沙丘多分布在沙漠边缘过境风沙流区, 其高度及与障碍物之间距离均和障碍物的高度呈线性关系; 沙丘表面物质粒度反映了局地沙源特征且经历了比同地区新月形沙丘更为强烈的风力分选过程。不透风障碍物前气流的平均速度、流线结构和湍流强度受控于迎风坡坡度, 基于定量分析提出气流发生分离并形成反向涡旋的临界迎风坡坡度为60°, 气流分离点和反向涡心的位置是迎风坡坡度的函数; 对疏透型障碍物而言, 疏透度< 10%时有利于回涡沙丘的形成。障碍物前流场存在5个不同气流分区, 其中气流剪切区控制风沙堆积, 气流分离区影响沙丘与障碍物之间距离, 高剪切力亚区影响回涡沙丘的均衡高度。因此, 回涡沙丘的形成过程缘于障碍物产生的次生流, 而其发育过程则为障碍物产生的次生流和沙丘自身产生的次生流叠加在一起的相互作用。

### 3.5 戈壁的地貌学研究

戈壁本是砾漠的一种<sup>[92-93]</sup>, 但在地理学上专指分布于中国北方和西北地区以及蒙古国南部, 地表多砾石覆盖且植被稀疏的景观类型。该区冬春季在蒙古高压的控制下大风和沙尘暴频发, 成为亚洲乃至全球的重要沙尘源区, 在地质历史时期曾是黄土源区, 对黄土高原的形成有重要贡献。然而, 戈壁的一直被忽视, 其不但被证明是特殊的地貌类型, 而且具有特殊的风沙危害形式, 如“飞沙走石”现象, 成为困扰风沙防治的难题。

近20年来, 戈壁研究在戈壁地表对气流的响应、砾石覆盖度的变化规律、戈壁风沙流的特征与形成、地质历史时期的形成演化以及戈壁风沙流的防治等方面获得了全面的认识。风洞模拟实验和野外现场试验表明, 戈壁表面的平衡盖度, 既不产生堆积又不产生风蚀的动态平衡时的砾石覆盖度, 其大小取决于风力的强弱, 随风速的增大呈指数增大, 而达到平衡所需要的时间则随风速增大呈指数减小<sup>[94]</sup>。现在中国西部的戈壁是沙砾质冲积洪积物经风力长期吹蚀的产物。根据西北戈壁地区风力作用的强度, 该区戈壁的平衡盖度约为50%<sup>[95]</sup>。依此平衡盖度, 中国西部的戈壁均处于平衡状态, 不是风沙流产沙源区, 澄清了西北戈壁是不是沙尘源区的争论。高度不饱和与过境性是戈壁风沙流的突出特征, 由于戈壁风沙流中跃移颗粒与砾石地表的强烈碰撞, 跃移颗粒运动至更高的高度, 从较高速度的气流中得以加速, 从而获得更大的能量。这一发现解决了长期困惑风沙防治工作的关于戈壁风沙流“飞沙走石”的问题, 依此理论改进了敦煌莫高窟戈壁风沙流防沙体系, 变阻挡戈壁风沙流为切断远方沙源, 获得了理想的效果。

戈壁的形成演化受到构造活动、气候变化和岩石性质等因素的控制。在大地构造部位上, 戈壁往往位于前陆盆地边缘或稳定地块上, 由于干旱气候和强烈的风化作用, 山

地风化剥蚀的大量物质堆积于山前平原,或者是稳定地块的地表岩石经过风化裂解而形成戈壁,其地表风蚀作用强烈。亚洲内陆的戈壁景观可能在始新世已经形成,经过了新近纪不断加强的过程。在第四纪初期至2.6 Ma前变干变冷的气候加剧了地表的风化和剥蚀,产生大量的碎屑物质,导致现代戈壁景观形成<sup>[96]</sup>。

### 3.6 地外行星风沙地貌

风沙地貌是行星科学研究的重要内容,其研究始于20世纪60年代以火星为主的深空探测,美国学者于1985年出版的《Wind as A Geological Process on Earth Mars Venus and Titan》是行星风沙地貌学的重要标志性成果。现已探明,火星,金星及土卫六有风沙地貌分布,但目前行星风沙地貌的研究主要关注火星。受柴达木盆地及其他地区类火星风沙地貌的启发,中国学者在近10年尝试开展火星风沙地貌研究,在国外学者已有的研究基础上,充分利用覆盖火星全球的高质量卫星影像,对火星风沙地貌类型特征和分布规律进行了全面的分析和总结,结合柴达木盆地类火星风沙地貌的研究结果,提出了火星风沙地貌的“沙源控制”猜想。

基于青藏高原类火星风沙地貌研究,将火星沙漠或风沙地貌归为沙源控制型,不同于地球上的气候控制型,解释了火星风沙地貌的3个突出特征:①分布规律与地球相反,主要在两极,特别是北极地区,罕见热带和温带沙漠;②尽管火星全球为极端干旱气候,沙地和风沙地貌却呈零星分布,没有浩瀚的沙海;③虽然火星极端干旱气候已历史悠久,但风沙地貌仍表现为类型简单、规模小、形成时间短,仅代表现代环境,这是由于火星上沙源不足。火星沙源不足的原因不同于青藏高原,长期缺水环境导致第四纪地表过程微弱,不足以形成像地球上巨厚的第四纪松散沉积物。该论断是对火星环境认识的重要贡献。

火星沙丘地貌类型与地球沙丘地貌相似,但仅以简单沙丘为主,罕见复合和复杂沙丘,沙丘形态参数累计概率曲线表现为简单一段式。火星沙丘以新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙丘等初级类型为主,占地球沙丘约50%的线形沙丘在火星上占不到10%。火星沙丘规模较地球沙丘小,与理论上应具有更大规模的沙丘相悖。火星沙丘地貌形态参数呈现出与地球沙丘相似的良好相关性,但相关关系不同,意味着他们具有相似的形成机理,但不同的形成条件,由此得到一个重要启示,在地球上研究类火星风沙地貌,如青藏高原的类火星风沙地貌,是认识火星风沙地貌及其发育环境的有效途径。

## 4 问题与展望

### 4.1 问题

风沙地貌学是被地球科学界相对忽视的一门学科,重要的原因就是世界范围的沙漠主要分布在不发达国家,如非洲和亚洲内陆。显然,中国的风沙地貌学的发展依然有若干薄弱环节,在以下几个方面尤为突出。

(1)理论升华不深入。区域性是包括风沙地貌学在内的地理学的重要性质,所以处理好规律的普遍性与特殊性的关系是风沙地貌学研究必须坚持的思想,已有的风沙地貌学理论均来自不同区域特殊风沙地貌的研究。中国风沙地貌研究的突出贡献在于针对中国风沙地貌特征的研究,关于跨不同自然地带的温带沙漠和沙地风沙地貌的区域特征及其独有风沙地貌类型形成、亚洲中部沙尘释放、青藏高原高寒环境及不同自然带海岸风沙地貌的研究方面取得了令国际同行颇感兴趣的研究成果,但尚未形成能够被广泛认可、显著深化风沙地貌学认识的理论进展。实际上,中国风沙地貌在若干方面的理论突

破呼之欲出,如关于沙源丰富度对沙丘地貌的控制作用、不同沙丘地貌之间的发生学联系和戈壁风沙流的动力学特征等的研究成果正在趋于形成系统的认识和理论,但需要深入思考、梳理和凝练升华,特别是在把握风沙地貌学及其相关学科理论的基础上,做好理论升华的顶层思考。

(2) 学科建设被忽视。科学的健康发展必须注重学科建设,但中国风沙地貌学学科建设是最被忽视的环节。欧美发达国家对风沙地貌学学科建设的重视和取得的成就很值得我们思考,特别是英国在教材建设和著作出版方面的严谨做法很令人敬佩,这个没有沙漠的国家,自1941年拜格诺的经典著作《The Physics of Blown Sand and Desert Dunes》出版以来,在风沙地貌乃至干旱区地貌教材建设和著作出版方面,始终处于领先地位,最可贵的是学科建设跟踪科学研究,不断地根据最新的研究成果修订,打造了世界最优秀的风沙地貌学教材和著作。中国的现状是,没有专门的风沙地貌学教材,只是作为普通地貌学教材中的专门章节,但几乎所有教材中关于风沙地貌学的内容都是介绍陈旧过时的知识,几乎未涵盖20世纪80年代以来风沙地貌学的主流知识。这和中国长期以来教学和科研分属不同单位的工作有关系,这种状况当前已呈现转机的趋势,希望通过科教融合密切风沙地貌学教学与科研的关系,推动学科建设。

(3) 协同研究不够。现代风沙地貌学研究倡导野外观测试验、分析实验、物理模拟和数值模拟四位一体,即多学科融合的研究。中国风沙地貌研究呈现一个好的势头是有越来越多的单位和学科参与,但仍然是彼此独立地开展工作,在优势互补、联合攻关方面亟需加强。多学科融合最有效的途径是开展协同研究,否则导致重复模仿研究多、研究成果不能充分共享、研究效率低、研究方向发展不平衡,难以形成研究成果之间互为支持印证的良性发展局面。理想的状况是:中国的风沙地貌学者联合起来,进行长远发展的顶层设计,制定不同学科领域的主攻方向,联合攻关,不断地总结和发现问题,坚持不懈地研究下去。

#### 4.2 展望

经过新中国70年的努力,中国形成了最大的风沙地貌研究群体,随着中国综合国力及科学技术的发展,中国风沙地貌学研究具有领跑世界的潜势。引领未来风沙地貌学研究,中国风沙地貌学家需要有以下4个方面的战略思考。

(1) 传统风沙地貌学理论的反思与集成。风沙地貌学的研究框架借鉴经典地貌学思想,围绕形态、过程及沉积物3个方面开展研究,其中过程是理论研究的核心,目前形成的比较公认的理论有气-床相互作用理论、风沙颗粒运动理论、风沙相互作用理论、形态动力学理论,这些理论或来自其他学科经典理论的演绎,或来自观察结果的归纳和总结,但经典理论的演绎居多,真正属于风沙地貌学自己的理论很少,成熟的理论则更少,以至于目前真正的风沙地貌学著作屈指可数。公认的风沙地貌学经典著作《The Physics of Blown Sand and Desert Dunes》就是创造性地将普朗特等创立的现代流体力学理论应用到风沙地貌学研究中,在气床相互作用、风沙相互作用、风沙颗粒运动形式方面的研究思想颇为经典,对床面变化引起的蚀积变化规律以及沙波纹与跃移颗粒运动轨迹的关系的理论探讨颇具启发意义,实际上,该著作的研究即止步于此,尚未针对风沙地貌的形成开展研究。

以费道洛维奇为代表的前苏联风沙地貌学家试图基于中亚沙漠风沙地貌的观察与分析,建立沙丘形态动力学理论,依据风况,提出沙丘分类系统,该研究思想被不断发展,美国地质调查局出版的《A Study of Global Sand Seas》基于全球不同典型地区的沙丘形态分析,提出了更全面的沙丘形态动力分类系统,将沙丘形态与风况联系起来,成

为目前理解沙丘形态—动力关系的理论框架。然而,这一理论框架正在受到挑战。

其他新理论、新方法在风沙地貌研究中显示出令人鼓舞的前景。例如自组织理论很好地解释风沙地貌格局,即有规律的排列问题<sup>[97]</sup>。中国现在有一支在不同机构具有不同专业背景的风沙地貌研究队伍,这是有利的一面,但研究工作不能有效集成是不利的一面。基于集成研究,产生理论突破是需要解决的问题。

(2) 地球系统科学框架下的风沙地貌学研究。风沙地貌与其他景观一起构成千姿百态的美丽地球,是对地球系统的过去、现在和未来均产生重要影响的组成部分,在现代地球系统科学中,强调这一点尤为重要<sup>[98]</sup>。

风沙地貌是以风力作用为外营力的地貌类型,出现在岩石圈(或土壤圈)和大气圈相互作用的界面上,同时受其他圈层的影响。气候变化通过作用于各种风沙地貌的影响因素而影响风沙地貌系统。风沙地貌系统通过风沙地貌过程以及各种风沙地貌构成的特殊下垫面影响其他系统乃至整个地球系统。所以,风沙地貌系统的影响因素及其产生的影响涉及地球各个圈层,风沙地貌是一种跨圈层的现象,需要在现代地球系统科学的思想指导下开展研究。

(3) 全球视野的风沙地貌学研究。沙漠在相当长时间被视为人类禁区,限制了人类的认识和研究工作的开展,是风沙地貌学进展缓慢的原因之一。近几十年来,随着现代科学技术,特别是观测技术和遥感技术的发展极大地拓展了风沙地貌研究的视野,越来越多的新发现使传统风沙地貌学理论受到越来越多的挑战。沙漠地区天空少云、地表缺乏植被、相对少变,所以遥感技术被证明是研究风沙地貌的有效手段,美国地质调查局于20世纪70年代利用当时的陆地资源卫星影像分析了不同地区沙漠的风沙地貌特征,对风沙地貌学产生了深远的影响。在其后的40多年,遥感技术发展迅速,遥感影像对沙漠地区的覆盖区域和周期及其分辨率和信息量大幅度提高,先进的地理信息处理技术获取信息的质量、数量和速度进一步提供了风沙地貌研究的捷径。现代无人观测与数据采集技术和各种数据库能够为风沙地貌研究提供关键数据,沙漠观测的遥测研究时代已经到来,而且可以到达沙漠的任何角落。

中国风沙地貌学研究要有全球视野,充分利用现代遥感技术和其他观测和数据获取技术,对全球风沙地貌进行系统研究,全面掌握全球风沙地貌的总体特征与规律及区域差异,总结、修正和完善已有的风沙地貌理论。这一点尚被风沙地貌学界忽视,中国风沙地貌学者要抓住这个机遇。

(4) 深空时代的风沙地貌学研究。包括风沙地貌在内的行星地学研究是地球科学未来发展的重要趋势之一。地球海底扩张与板块构造理论的提出,对月球和其他太阳系行星及其卫星的探测,被认为是20世纪60年代世界地学界发生的两件大事<sup>[99]</sup>。深空探测为地球科学家提供了大量的数据,激发了研究地外星球,特别是地球近邻的兴趣,并被证明在推动地球科学方面具有重要意义。著名地质学家Head在1999年曾断言,“在1960年代以前以地球为中心,尤其是以某一特定区域为中心的地质研究,就如同哥白尼之前有关太阳系的日心说一样狭隘。现在我们已拥有大量空间探测数据,可以对包括所有行星在内的太阳系星体进行地质研究,地球科学也只有放在太阳系这一大系统中去研究才是唯一正确的方法”<sup>[100]</sup>。随着国际上(包括中国)火星探测新热潮的掀起,火星风沙地貌正在成为国际风沙地貌学和比较行星地质学的前沿探索领域,参与的研究者和取得的研究成果愈来愈多,在国际顶级刊物上不断有新成果发表。

除美国、苏联和欧盟外,其他国家也纷纷加入到了太阳系的探测队伍中,中国正在逐步加入宇宙探测计划的行列,在成功实施嫦娥探月工程后,深空探测将成为未来的目

标, 火星被列入首先探测的对象。国家自然科学基金委员会曾于2003年将“地球空间环境与火星空间环境比较研究”列为重要资助领域。近年来, 中国地球科学研究将深空、深海、深地列为重要研究前沿, 基于深空探测的行星科学研究将从火星开始。随着研究工作的深入和中国火星探测计划的推进, 地球和火星环境的比较研究将延伸至近地层和地表。风沙地貌是火星上最广泛的地貌类型之一, 所以, 地球与火星风成环境的比较研究自然是重要的组成部分。作为前瞻性和探索性研究, 中国沙漠中的类火星风沙地貌研究将为地球和火星环境比较研究提供重要的基础积累。从长计议, 中国风沙地貌研究也将延伸至其他更多的地外星球。

### 参考文献(References)

- [1] Pye K, Tsaoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Heidelberg: Springer, 2009.
- [2] Thomas D S G, Wiggs G F S. Aeolian system responses to global change: Challenges of scale, process and temporal integration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33: 1396-1418.
- [3] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Beijing: Science Press, 1954. [拜格诺 R A. 风沙和荒漠沙丘物理学. 北京: 科学出版社, 1954.]
- [4] Zinamensji A N. *The Experimental Studies of Wind Erosion Progress of The Sand Tract and The Prevention of Sand Dome*. Beijing: Science Press, 1960. [兹纳门斯基 A N. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防治问题. 北京: 科学出版社, 1960.]
- [5] Уакпвоц Т Ф. *Soil Erosion by Wind and Its Control*. Beijing: Agricultural Press, 1956. [雅库波夫. 土壤风蚀及其防治. 北京: 农业出版社, 1956.]
- [6] Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu, et al. *An Introduction to the Deserts in China*. Beijing: Science Press, 1974. [朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 1974.]
- [7] Lou Tongmao. *Desert types and characteristics of sand movement//Sand Control Team, Chinese Academy of Sciences. Sand Control Research (No.4)*. Beijing: Science Press, 1962. [楼同茂. 沙漠成因类型及风沙移动特征//中国科学院治沙队. 治沙研究(第四号). 北京: 科学出版社, 1962.]
- [8] Zhu Zhenda, Guo Hengwen, Wu Gongcheng. Preliminary study on sand dune movement near oasis in southwest of Taklimakan Desert. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(1): 35-50. [朱震达, 郭恒文, 吴功成. 塔克拉玛干沙漠西南地区绿洲附近沙丘移动的初步研究. 地理学报, 1964, 30(1): 35-50.]
- [9] Zhu Zhenda. A preliminary study on the dune dynamics by wind//Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. *Collections of Geographical Papers (No. 5)*. Beijing: Science Press, 1963: 82-98. [朱震达. 风力作用下沙丘演变动态过程中若干问题初步研究//中国科学院地理研究所. 地理集刊(第5号). 北京: 科学出版社, 1963: 82-98.]
- [10] Ling Yuquan, Wu Zheng. Experimentation on the dynamic photography of the movement of sand-driving wind. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(2): 174-181. [凌裕泉, 吴正. 风沙运动的动态摄影实验. 地理学报, 1980, 35(2): 174-181.]
- [11] He Daliang, Gao Youguang. The study of sand saltation movement with high velocity cinecamera. *Journal of Desert Research*, 1988, 8(1): 18-29. [贺大良, 高有广. 沙粒跃移运动的高速摄影研究. 中国沙漠, 1988, 8(1): 18-29.]
- [12] He Daliang, Shen Jianyou, Liu Dayou. Three forms of movement of blowing sand and their measurement. *Journal of Desert Research*, 1990, 10(4): 9-17. [贺大良, 申建友, 刘大有. 风沙运动的三种形式及其测量. 中国沙漠, 1990, 10(4): 9-17.]
- [13] Zou Guixiang, Gao Hongzhi, Dong Guangrong. On measurement and computation of sand flux by wind within a desert area. *Journal of Desert Research*, 1986, 16(2): 8-15. [邹桂香, 高宏智, 董光荣. 流沙地区沙通量的计算与观测初议. 中国沙漠, 1986, 16(2): 8-15.]
- [14] Shen Jianyou, Dong Guangrong, Li Changzhi. Analysis and discussion of the sand-transport between the wind-tunnel modeling and field experiment. *Journal of Desert Research*, 1988, 8(3): 23-30. [申建友, 董光荣, 李长治. 风洞与野外输沙率的分析与讨论. 中国沙漠, 1988, 8(3): 23-30.]
- [15] He Daliang. Several problems on the relation between sand transport rate and wind velocity. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(2): 14-18. [贺大良. 输沙量与风速关系的几个问题. 中国沙漠, 1993, 13(2): 14-18.]
- [16] Han Zhiwen. Quantitative study on wind-sand flow structure in semihumid zone: Taking sandy land in northern Henan as an example. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(3): 25-31. [韩致文. 半湿润地区风沙流结构的定量研究. 中国沙

- 漠, 1993, 13(3): 25-31.]
- [17] Zou Xueyong, Zhu Jiujiang, Dong Guangrong, et al. Distribution function of vertical muzzle velocity of rising sand in wind-sand flow structure. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 42(23): 2175-2177. [邹学勇, 朱久江, 董光荣, 等. 风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数. *科学通报*, 1992, 42(23): 2175-2177.]
- [18] Zhao Jingfeng, Li Chongshun, Zhou Xingjia, et al. Study on the fluid and deflation characteristics on barchanic dune surface. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(3): 18-24. [赵景峰, 李崇顺, 周兴佳, 等. 新月形沙丘丘表流场与沙丘侵蚀特征. *中国沙漠*, 1993, 13(3): 18-24.]
- [19] Ling Yuquan, Wu Zheng, Liu Shaozhong. Simulated study on barchan dune forms. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(2): 88-93. [凌裕泉, 吴正, 刘绍中. 新月形沙丘形态的模拟实验研究. *地理科学*, 1997, 17(2): 88-93.]
- [20] Chen Li, Yin Yan, Yang Jun, et al. Effects of sand dust particles on cloud and precipitation: A numerical study. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2007, 30(5): 580-600. [陈丽, 银燕, 杨军, 等. 沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究. *南京气象学院学报*, 2007, 30(5): 590-600.]
- [21] Duan Jing, Mao Jietai. Influence of aerosols on regional precipitation in North China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(23): 2947-2955. [段婧, 毛节泰. 华北地区气溶胶对区域降水的影响. *科学通报*, 2008, 53(23): 2947-2955.]
- [22] Gao Huiwang, Qi Jianhua, Shi Jinhui, et al. Lang-range transport of Asian dust and its effects on ocean ecosystem. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(1): 1-7. [高会旺, 祁建华, 石金辉, 等. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 1-7.]
- [23] Yan Hao, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. Remote sensing study of tracks and source areas of eastern Asian dust. *Progress in Geography*, 2002, 21(1): 90-94. [延昊, 王长耀, 牛铮, 等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究. *地理科学进展*, 2002, 21(1): 90-94.]
- [24] Chen Guangshan, Liu Xiaodong, Chen Baode. Numerical simulations of spatial and temporal characteristics of airborne dust over Asia during springs of 2000 to 2002. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 1-8. [陈广善, 刘晓东, 陈葆德. 亚洲大陆2000—2002年春季大气沙尘时空特征的数值模拟. *环境科学*, 2006, 27(1): 1-8.]
- [25] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840. [石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应. *大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.]
- [26] Wang Chunming, Ye Jiadong, Wei Shaoyuan. A numerical experiment of aerosol concentration affecting warm rain process. *Journal of the Meteorological Sciences*, 1997, 17(4): 316-324. [王春明, 叶家东, 魏绍远. 气溶胶浓度影响暖雨过程的数值模拟试验. *气象科学*, 1997, 17(4): 316-324.]
- [27] Jin Tongjun, Qi Jianhua, Xi Ziyun, et al. Impact of a dust event on the size distribution of metal elements in atmospheric aerosols at a coastal region and over the ocean. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1562-1574. [金同俊, 祁建华, 郗梓延, 等. 一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响. *环境科学*, 2019, 40(4): 1562-1574.]
- [28] Shi Yingying, Zhang Lei, Tian Pengfei, et al. The optical and microphysical characteristics of dust aerosol over a typical semi-arid region in Loess Plateau. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 586-295. [史莹莹, 张磊, 田鹏飞, 等. 黄土高原半干旱区沙尘气溶胶光学和微物理特性. *高原气象*, 2018, 37(1): 286-295.]
- [29] Liu Xiuwei, Zhang Xiaoyu, Zhang Xiying. A review of the research on crop responses to the increase in aerial aerosol. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 1-7. [刘秀位, 张小雨, 张喜英. 大气气溶胶增加对作物的影响研究进展. *生态学报*, 2016, 36(7): 1-7.]
- [30] Li Juan. Characteristics, source, long-range transport of dust aerosol over the Central Asia and its potential effect on global change [D]. Shanghai: Fudan University, 2009. [李娟. 中亚地区沙尘气溶胶的理化特性、来源、长途传输及其对全球变化的可能影响[D]. 上海: 复旦大学, 2009.]
- [31] Liu Can, Gao Yanghua, Yi Jin, et al. An MODIS-based analysis of spatio-temporal variations of aerosol optical depth in southwest of China. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(5): 1-8. [刘灿, 高阳华, 易静, 等. 基于MODIS数据的西南地区气溶胶光学厚度时空变化特征分析. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(5): 1-8.]
- [32] Yang X, Liu T, Xiao H. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31, 000 years. *Quaternary International*, 2003, 104(1): 99-112.
- [33] Yang Xiaoping, Liang Peng, Zhang Deguo, et al. Holocene aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(8): 1293-1307. [杨小平, 梁鹏, 张德国, 等. 中国东部沙漠/沙地全新世地层序列及其古环境. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(8): 1293-1307.]



- [34] Shapotou Desert Research Station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences. Research on Drift Sand Control in Shapotou Area. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 1980. [中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1980.]
- [35] Qu Jianjun, Miao Tianbao, Zhang Weiming, et al. Preliminary study on dune movement at the top of Mogao Grottoes in Dunhuang. *Acta Geologica Gansu*, 1995, 4(2): 87-92. [屈建军, 苗天宝, 张伟民, 等. 敦煌莫高窟窟顶沙丘移动的初步研究. *甘肃地质学报*, 1995, 4(2): 87-92.]
- [36] Dong Z, Wang X, Chen G. Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 2000, 35(3/4): 219-231.
- [37] Li Jing, Gao Weiming, Liu Guojun. Dynamic change and cause analysis on coastal dune in Changli Gold Coast. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(2): 81-89. [李晶, 高伟明, 刘国君. 昌黎黄金海岸沙丘动态变化及成因解析. *海洋通报*, 2009, 28(2): 81-89.]
- [38] Huang Dequan, Dong Yuxiang, Ha Si, et al. The application of multi-station on RTKGPS in the measurement of coastal dune. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(4): 121-124. [黄德全, 董玉祥, 哈斯, 等. 多站差分RTKGPS技术在海岸风沙观测中的应用. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(4): 121-124.]
- [39] Huang Dequan, Dong Yuxiang, Ha Si, et al. Field measurements of movement and topographic change of coastal transverse ridge. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2229-2238. [黄德全, 董玉祥, 哈斯, 等. 海岸横向沙脊的移动与形态变化: 以河北昌黎黄金海岸横向沙脊为例. *地理研究*, 2011, 30(12): 2229-2238.]
- [40] Dong Yuxiang, Huang Dequan. Typical research on the movement and topographic change typical research on the movement and topographic change of coastal crescent dune. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(7): 863-869. [董玉祥, 黄德全. 海岸新月形沙丘移动与形态变化的典型研究. *地理科学*, 2014, 34(7): 863-869.]
- [41] Yan Yingcun, Gao Guisheng, Liu Baokang, et al. Monitoring of aeolian dunes movement in surrounding Qinghai Lake areas and climate-driven forces analysis. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(4): 617-622. [严应存, 高贵生, 刘宝康, 等. 青海湖周边地区沙丘移动监测及其气候驱动力分析. *中国沙漠*, 2009, 29(4): 617-622.]
- [42] Zhu Zhenda. Classification of dune geomorphology in arid and semiarid areas of Northwest China//Sand Control Team, Chinese Academy of Sciences. *Sand Control Research* (No.4). Beijing: Science Press, 1962: 31-47. [朱震达. 中国西北干旱及半干旱地区沙丘地貌分类问题//中国科学院治沙队. *治沙研究*(第四号). 北京: 科学出版社, 1962: 31-47]
- [43] McKee E D. *A Study of Global Sand Seas*. Hawaii: University Press of Pacific, 2004.
- [44] Lancaster N. *The Namib Sand Sea: Dune Forms, Processes and Sediment*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989.
- [45] Edgell H S. *Arabian Deserts: Nature, Origin and Evolution*. Dordrecht: Springer, 2006.
- [46] Fedorovich B A. Sand relief forms//Gorshkov G, Yakushova A. *Physical Geology*. Moscow: Mir Publishers, 1967: 93.
- [47] Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences. *Geomorphologic Map of Taklimakan Desert*. Beijing: China Map Press, 1990. [中国科学院兰州沙漠研究所. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌图. 北京: 中国地图出版社, 1990.]
- [48] Zhu Zhenda, Chen Zhiping, Wu Zheng, et al. Study on the Aeolian Geomorphology in the Taklimakan Desert. Beijing: Science Press, 1981. [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.]
- [49] Dong Zhibao. *Geomorphologic Map of the Kumtagh Desert*. Beijing: Science Press, 2009. [董治宝. 库姆塔格沙漠地貌图. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [50] Dong Zhibao, Su Zhizhu, Qian Guangqiang, et al. *Aeolian Geomorphology of the Kumtagh Desert*. Beijing: Science Press, 2011. [董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [51] Comprehensive Scientific Investigation Team of the Kumtagh Desert. *A Study of the Kumtagh Desert*. Beijing: Science Press, 2012. [库姆塔格沙漠综合科学考察队. 库姆塔格沙漠研究. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [52] Dong Zhibao. *Atlas of Aeolian Geomorphology of Qinghai-Tibet Plateau*. Xi'an: Xi'an Map Press, 2014. [董治宝. 青藏高原风沙地貌图集. 西安: 西安地图出版社, 2014.]
- [53] Wang X, Dong Z, Zhang J, et al. Formation of the complex linear dunes in the central Taklimakan sand sea. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(6): 677-686.
- [54] Dong Z, Qian G, Luo W, et al. Geomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for megadune evolution in the Badain Jaran Desert. *Geomorphology*, 2009, 106: 180-185.
- [55] Ha Si, Dong Guangrong, Wang Guiyong. Morphological and dynamic studies on lattice dunes in the southeastern margin of Tengger Desert. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, 20(5): 466-471. [哈斯, 董光荣, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘的形态—动力学研究. *中国科学D辑: 地球科学*, 1999, 20(5): 466-471.]
- [56] Wen Q, Dong Z. Geomorphologic patterns of dune networks in the Tengger Desert, China. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(5): 660-669.

- [57] Lü P, Narteau C, Dong Z, et al. Unravelling raked linear dunes to explain the coexistence of bedforms in complex dune fields. *Nature Communications*, 2017, 8: 14239. doi: 10.1038/ncomms14239.
- [58] Xia Xuncheng, Wang Fubao, Zhao Yuanjie. Lop Nur, China. Beijing: Science Press, 2007. [夏训诚, 王富葆, 赵元杰. 中国罗布泊. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [59] Li Jiyan, Dong Zhibao. Study on geomorphological parameters of Yardangs in southeastern Qaidam Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4): 122-125. [李继彦, 董治宝. 柴达木盆地东南部雅丹地貌形态参数研究. 水土保持通报, 2011, 31(4): 122-125.]
- [60] Li Jiyan, Dong Zhibao, Li Enju, et al. Grain-size characteristics of the deposits from Yardang landforms in the Charhan Salt Lake Area. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5): 1187-1192. [李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌沉积物粒度特征研究. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1187-1192.]
- [61] Li Jiyan, Dong Zhibao, Li Enju, et al. Wind regime of Yardang landform regions in the Qarhan Salt Lake. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1293-1298. [李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌区风况分析. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1293-1298.]
- [62] Short A D, Hesp P A. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Marine Geology*, 1982, 48 (3/4): 259-284.
- [63] Dong Yuxiang. Coastal aeolian research in China: Progress and prospect. *Progress in Geography*, 2006, 25(2): 26-35. [董玉祥. 中国的海岸风沙研究: 进展与展望. 地理科学进展, 2006, 25(2): 26-35.]
- [64] Wu Zheng. New progress on research of coastal aeolian geomorphology and deposits in China. *Advances in Earth Science*, 1993, 8(2): 59-61. [吴正. 中国海岸风沙地貌与沉积研究的新进展. 地球科学进展, 1993, 8(2): 59-61.]
- [65] Cai Aizhi, Cai Yue'e. A study of depositional causation and characteristics of coastal aeolian sand in coast areas in China. *Journal of Desert Research*, 1983, 3(3): 1-10. [蔡爱智, 蔡月娥. 中国海岸风沙沉积的成因与特征. 中国沙漠, 1983, 3(3): 1-10.]
- [66] Li Shanwei, Liu Minhou, Wang Yongji, et al. Wind-induced dunes along the coast of Shandong Peninsula. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Sea*, 1985, 3(3): 47-56. [李善为, 刘敏厚, 王永吉, 等. 山东半岛海岸的风成沙丘. 黄渤海海洋, 1985, 3(3): 47-56.]
- [67] Wu Zheng, Wu Kegang. Sedimentary structure and developing model of coastal dunes along the northeastern coast of Hainan Island, China. *Acta Geographica Sinica*, 1987, 42(2): 129-141. [吴正, 吴克刚. 海南岛东北部海岸沙丘的沉积构造特征及其发育模式. 地理学报, 1987, 42(2): 129-141.]
- [68] Li Congxian, Chen Gang, Wang Xiuqiang. Study on coastal sand sedimentation at the north bank of Luanhu River. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(2): 12-21. [李从先, 陈刚, 王秀强. 滦河以北海岸风成沙沉积的初步研究. 中国沙漠, 1987, 7(2): 12-21.]
- [69] Wang Ying, Zhu Dakui. An approach on the formation causes of coastal sand dunes. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(3): 30-40. [王颖, 朱大奎. 海岸沙丘成因的探讨. 中国沙漠, 1987, 7(3): 30-40.]
- [70] Zhang Wenkai, Li Zuguang. The formation, growth and regional distributional characteristic of coastal dunes in the Changle County, Fujian Province. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(1): 31-36. [张文开, 李祖光. 福建长乐海岸沙丘形成发育及其区域分布特征. 中国沙漠, 1995, 15(1): 31-36.]
- [71] Chen Fang, Cai Mingli, Li Zuguang, et al. A discussion on the regional divergence of aeolian sand along the coastal area of Changle. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 1995, 31(3): 487-494. [陈方, 蔡明理, 李祖光, 等. 长乐东部沿海海岸风沙区域分异探讨. 南京大学学报: 自然科学版, 1995, 31(3): 487-494.]
- [72] Wu Zheng, Wu Kegang, Huang Shan, et al. Research on the Holocene coastal dune in South China coast. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(2): 211-218. [吴正, 吴克刚, 黄山, 等. 华南沿海全新世海岸沙丘研究. 中国科学: B辑, 1995, 25(2): 211-218.]
- [73] Dong Yuxiang. Classification of coastal dunes in temperate zone in China. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 159-165. [董玉祥. 中国温带海岸沙丘分类系统初步探讨. 中国沙漠, 2000, 20(2): 159-165.]
- [74] Wu Zheng, Huang Shan, Hu Shouzheng, et al. Research on the Landforms of the Wind-Drift Sand in South China Coast. Beijing: Science Press, 1995. [吴正, 黄山, 胡守真, 等. 华南海岸风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [75] Fu Mingzuo, Xu Xiaoshi, Xu Xiaowei. The aeolian geomorphical types in the coastal areas of the Yellow Sea and Bohai Sea, and the distribution patterns and developing models. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 1997, 28(1): 56-65. [傅命佐, 徐孝诗, 徐小微. 黄、渤海海岸风沙地貌类型及其分布规律和发育模式. 海洋与湖沼, 1997, 28(1): 56-65.]
- [76] Dong Yuxiang. Characteristics of grain size parameters of modern coastal aeolian sands in temperate coastal region in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 656-662. [董玉祥. 海岸现代风成砂粒度参数特征的研究: 以中国温

- 带海岸为例. 沉积学报, 2002, 20(4): 656-662.]
- [77] Dong Yuxiang. The coastal aeolian geomorphic types and their distribution pattern in China. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 99-104. [董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 99-104.]
- [78] Li Congxian, Chen Gang, Yang Hongjun, et al. Discussion on some problems of late Quaternary in coastal zone of Fujian Province. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1987, 6(1): 40-45. [李从先, 陈刚, 杨红君, 等. 对福建海岸晚第四纪地质若干问题的商榷. 台湾海峡, 1987, 6(1): 40-45.]
- [79] Dong Yuxiang. Progress and prospect of research on the surf-zone-beach-dune interaction models. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(4): 796-800. [董玉祥. 波浪—海滩—沙丘相互作用模式研究述评. 中国沙漠, 2010, 30(4): 796-800.]
- [80] Dong Yuxiang, Du Jianhui. Review on the typhoon effect on coastal aeolian landform. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 634-638. [董玉祥, 杜建会. 海岸风沙地貌台风响应研究的现状与趋势. 中国沙漠, 2014, 34(3): 634-638.]
- [81] Yang Lin, Dong Yuxiang, Du Jianhui. Research progress of coastal dunes response to storm. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(7): 716-722. [杨林, 董玉祥, 杜建会. 海岸沙丘对风暴响应研究进展. 地球科学进展, 2017, 32(7): 716-722.]
- [82] Liu X, Li S, Shen J. Wind tunnel simulation experiment of mountain dunes. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42(1): 49-59.
- [83] Zhang W, Qu J, Dong Z, et al. The airflow field and dynamic processes of pyramid dunes. *Journal of arid Environments*, 2000, 45: 357-368.
- [84] Ma Qian, Wu Shengli, Liu Yongquan, et al. Grain size distribution of the parabolic dunes sediments in the Ebinur Lake Basin. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 650-657. [马倩, 武胜利, 刘永泉, 等. 艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征. 中国沙漠, 2014, 34(3): 650-657.]
- [85] Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanying, et al. Airflow patterns upwind of obstacles and their significance for echo dune formation: A field measurement of the effects of the windward slope angle. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(1): 34-41. [钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 不同坡度障碍物前气流场特征及其对回涡沙丘形成的影响. 中国科学, 2012, 42(1): 34-41.]
- [86] Sun Yu, Du Huishi, Liu Meiping, et al. A review on morphodynamic process of blowouts. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(5): 898-904. [孙禹, 杜会石, 刘美萍, 等. 风蚀坑形态—动力学研究进展. 地理科学, 2015, 35(5): 898-904.]
- [87] Livingstone I, Wiggs G F S, Weaver C M. Geomorphology of desert sand dunes: A review of recent progress. *Earth Science Reviews*, 2007, 80: 239-257.
- [88] Frank A, Kocurek G. Toward a model for airflow on the lee side of aeolian dunes. *Sedimentology*, 1996, 43: 451-458.
- [89] Walker I J, Nickling W G. Dynamics of secondary airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes. *Progress in Physical Geography*, 2002, 26: 47-75.
- [90] Dong Z, Qian G, Luo W, et al. A wind tunnel simulation of the effects of stoss slope on the lee airflow pattern over a two-dimensional transverse dune. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: F03019. Doi: 10.1029/2006JF000686.
- [91] Dong Z, Luo W, Qian G, et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns around shrubs. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, F02016. Doi: 10.1029/2007JF000880.
- [92] Scientific Investigation Team of Ecology Background in Black Gobi of China. *Research on the Black Gobi in China*. Beijing: Science Press, 2014. [中国黑戈壁地区生态本底科学考察队. 中国黑戈壁研究. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [93] Young C C. On the Gobi plane of deflation—the gobi erosion plane. *Bulletin the Geological Society of China*, 1931, 11(2): 161-169.
- [94] Wang W, Dong Z, Wang T. The equilibrium gravel coverage of the deflated Gobi on top of the Mogao Grottoes of Dunhuang, China. *Environmental Geology*, 2006, 50(7): 1077-1083.
- [95] Dong Zhibao, Qu Jianjun, Liu Xiaoping, et al. Experimental investigation of drag coefficients of Gobi surfaces. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 31(11): 953-958. [董治宝, 屈建军, 刘小平, 等. 戈壁表面阻力系数的实验研究. 中国科学: 地球科学, 2011, 31(11): 953-958.]
- [96] Lu H, Wang X, Wang X Y, et al. Formation and evolution of Gobi desert in central and eastern Asia. *Earth Science Reviews*, 2019, 194: 251-263.
- [97] Lü P, Dong Z, Olivier Rozier O. The combined effect of sediment availability and wind regime on the morphology of aeolian sand dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(11): 2878-2886.
- [98] Earth System Science Committee. *Earth System Science: A Closer View*. USA: National Academies, 1988.

- [99] Xiao Long, Greeley Ronald, Zeng Zuoxun, et al. Methodology, achievements and prospects of comparative planetary geology. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(3): 1-13. [肖龙, Greeley Ronald, 曾佐勋, 等. 比较行星地质学的研究方法、现状和展望. *地质科技情报*, 2008, 27(3): 1-13.]
- [100] Head J W. *Surface and Interiors of the Terrestrial Planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

## Development of aeolian geomorphology in China in the past 70 years

DONG Zhibao, LYU Ping

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Wind is the second largest fluid shaping the earth's landscape besides water. The aeolian landform formed by wind is widely distributed in the global arid regions, and more than 40% of the land area is affected by the aeolian process in the world. Owing to a close relationship with the human's living environment, aeolian geomorphology has received continuous attention from the international academia since the end of the 19th century. Although aeolian landforms are widely distributed in arid and semi-arid regions of China, the relevant study started in the late 1950s. This paper summarizes the development of aeolian geomorphology during the past 70 years in China, which has experienced three stages: the initial stage before reform and opening-up; the development stage between the reform and opening-up to the end of the 20th century; and international stage since the beginning of the 21st century, even partially beyond the international standard nowadays. There are many influential achievements in China, including dunes movement, regional comprehensive study on aeolian landforms, formation and evolution process of unique aeolian landforms, Gobi, the secondary flow around dunes and the exploration of extraterrestrial planets. Aeolian research in China has the potential to lead the international aeolian research in the future, but the aeolian geomorphologists must have following strategic thinking on meta-synthesis, the guidance of the earth system science, the global view and development of the outer space era.

**Keywords:** aeolian geomorphology; deserts of China; research development