

风蚀地貌形态与过程研究进展

王 帅^{1,2}, 哈 斯²

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 北京师范大学 中国沙漠研究中心

地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 辨析了雅丹、风蚀坑等主要风蚀地貌的概念, 雅丹是典型的风蚀正地貌形态, 通过回顾雅丹地貌形态与过程的研究历史与进展, 发现目前对其发育过程的认识尚不清楚, 并且只关注了对残存土墩的观测和分析, 没有充分重视凹槽的形态动力学过程, 风蚀坑是典型的风蚀负地貌形态, 特别是草原景观转变为沙地景观的临界阈现象, 目前已经对独立风蚀坑的形态、气流特征、沉积物粒度以及植被演替过程等方面进行了初步研究, 但由于风蚀坑形态是多因素共同作用的结果, 需要由单因素观测转向综合分析其形态动力学过程。认为对风蚀过程机理及其模拟的研究中, 在利用风洞模拟实验、野外观测等手段对风蚀过程微观尺度进行研究的同时, 也需要加强通过遥感和 GIS 手段从景观尺度对风蚀地貌发展变化过程进行分析。

关键词: 风蚀地貌; 地貌学; 发育过程; 综述

中图分类号: P931.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0100-06

Advances in the Study of Geomorphology and Process of Wind Erosion Landforms

WANG Shuai^{1,2}, HA Si²

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, Zhejiang, China; 2. School of

Resources Science and Technology, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and

Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract With global warming and drought enhancement, the geomorphic process of wind erosion landforms becomes one of the main surficial processes in arid and semi-arid areas. However, compared with wind accumulated landforms, less attention has been given to the wind erosion landforms. This paper reviews the processes of initiation, evolution, dynamics and geomorphology of yardangs and blowouts. Yardang and blow out are two main wind erosion landforms, one is positive and one is negative. The generation of yardangs results from complex interactions between internal factors and external factors, and they are also influenced by weathering process, fluvial erosion and mass movement. Aerodynamic system produces differential pressures giving rise to vorticity which is one of the most frequent and important wind movements responsible for the erosion. Blow out geomorphology, dynamics and evolution are also examined. Blowouts are the threshold of grasslands converting to shrublands in arid and semi-arid ecosystems. Throughout the review, the gaps in present understanding of dune processes and a range of ideas for new research possibilities are provided.

Key words: wind erosion landforms; geomorphology; developmental process; review

0 引言

风蚀地貌是指主要由风和风沙流的吹蚀和磨蚀作用塑造的地表形态, 广泛分布在干旱半干旱地

区, 有时也出现在海岸和冰缘地带。小型风蚀形态主要是风棱石(ventifact), 中大型风蚀形态有雅丹(yardang)和风蚀洼地(desert depression), 风蚀洼地又包括形成于沙质地表的风蚀坑(blowout)以及

收稿日期: 2008-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471013); 十一五国家科技支撑计划项目(2006BAD26B07)

作者简介: 王 帅(1982-), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 工程师, 农学硕士, 从事水土资源保护及荒漠化过程与防治研究, E-mail: shuaiwang@ires.cn

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

明显受流水作用影响的洼地 (pan) 和干荒盆地 (playa)^[1]。和风积地貌相比, 风蚀地貌没有受到更多重视, 研究程度相对较低^[2-3]。其研究历史可以追溯到 20 世纪初探险家们对亚洲和北非地区风蚀地貌形态的记载^[4-6], 到了 20 世纪 40 年代, 雅丹和风蚀坑等主要风蚀地貌形态逐渐被认识和定义^[4, 7], 但是当时对这些地貌过程的认识较浅, 在对风力作用的认识上存在一些争论^[8-9]; 进入 20 世纪 70 年代以后, 航片和卫星影像等遥感手段的应用使人们对地球和外星球的风蚀地貌有了宏观认识^[10], 加深了对风力是一种重要的地质营力的理解, 并且开始进行试验模拟, 试图解释雅丹和风棱石等形态的形成。近年来随着对沙丘等风积地貌形态-动力学研究程度的加深, 风蚀地貌也逐渐受到重视, 在对其形态和过程的研究方面取得了一些进展^[11-14]。笔者从形态和过程两方面评述了国内外对以雅丹为代表的正地形和以风蚀坑为代表的负地形两种风蚀地貌的研究进展, 以期为国内今后此类研究提供借鉴。

1 雅丹

雅丹是对发育在基岩或未固结的松散土状堆积物(如古代河湖相沉积物)中的风蚀土墩和风蚀凹地(沟槽)的泛称, 高起的土墩多为长条形, 并且排列方向与主方向平行^[15]。也有观点认为专指干燥地区古河湖相土状堆积物被风吹蚀、形态多姿的土丘^[16]。

1.1 形态及分布

雅丹地貌形态被很多学者描绘为“船”的形状, 在通常情况下, 雅丹顶部较平, 迎风面上部为盾形, 下部陡峭, 高度向后逐渐降低, 整体轮廓呈锥形, 长宽比率一般为 3:1~4:1 或更大, 随岩性、风力、风向和时间等因素的改变而不同。雅丹可以认为是大尺度的风棱石, 其规模不等, 从小于 1 m 到 200 m 高且绵延几千米长, 有时由于岩石成分和结构的差异, 常出现各种形状, 包括典型的长条形、蘑菇状、骆驼状和狮身人面像等, 但在特定地区形状一般较为一致^[2, 17]。雅丹地貌系统中的凹地为狭窄的“U”型槽, 随着被侵蚀变宽而底部逐渐变平, 有些地区槽内充满沙物质, 有些只有部分覆盖, 也有一些露出了难以被侵蚀的坚硬黏土层。

雅丹可以发育在石灰岩、砂岩、页岩、花岗岩等各种岩石和河湖相松散沉积物上^[18], 但是需要有

足够干旱和稳定风向的环境, 在地球上分布面积不是很大, 却遍及除澳洲以外的各大洲的沙漠中。通过对航片分析发现, 雅丹地貌在世界各地的主要分布区为: 北非的埃及、利比亚、乍得、尼格尔以及南非的毛里塔尼亚海岸; 亚洲塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地和伊朗的一些沙漠; 南美秘鲁海岸以及北美的莫哈韦沙漠^[19]。

1.2 发育过程

雅丹地貌产生在和主风向平行的沟壑或破碎地区, 在早期阶段, 风或间歇性的流水作用把凹槽内的物质侵蚀搬运走, 使得凹槽变宽加深, 雅丹地貌发育^[20]。由于雅丹发育在干旱荒漠地区, 当地有关的气象资料很少。1984 年 Ward 等^[19]在加利福尼亚的罗杰斯湖地区对雅丹区风况进行了观测, 他们测了雅丹顶部、侧面、凹槽底部和凹槽内 3 m 高度的风速; 较早的风洞模拟是 McCauley 等^[21]在 1977 年利用玉米粗粉等人工材料进行的, 不同的材料组合都得出吹蚀和磨蚀对雅丹发育一样重要的结论, 不过也存在争论, 后来的研究认为磨蚀只发生在跃移层范围内, 也就是不会超过 3 m; Ward 等^[19]的风洞实验把发育过程分为 4 个阶段: 迎风面底角侵蚀、迎风面坡面侵蚀、背风面底角和两翼的侵蚀、顶部侵蚀。和 Whitney^[20]观测一致的是, 都发现气流在尾部汇合, 产生反向流, 后 2 个阶段包括有反向流的侵蚀作用, 而且在盛行风向期间, 尾部的风蚀要比前端严重, 造成尾部比前端逐渐缩小。总之, 雅丹是磨蚀作用和吹蚀作用相结合的产物, 并被流水作用和块体运动所改造, 其中每一种过程的相对重要性随着区域岩性、构造和气候条件不同而变化。流水侵蚀冲沟可能促进雅丹发生发展, 磨蚀作用常把雅丹迎风端和侧翼坡面抛光或凹槽化, 吹蚀作用在胶结很差的湖积物中发育雅丹时起重要作用, 雅丹迎风端下部被掏空时常以块体崩塌方式改变形态^[2]。从宏观尺度来说, Embabi^[22]提出的风蚀地貌发育的 4 个阶段, 即青年期、中年期、老年期和末期, 和戴维斯地貌侵蚀循环理论类似; Brookes^[23]通过遥感手段对埃及中南部的利比亚沙漠地区风蚀地貌进行研究, 在景观尺度上对其进行了分析和验证, 阐述了雅丹地貌在较大时空尺度上的演变过程。在中国, 通过对罗布泊东阿奇克谷地雅丹地貌与库姆塔格沙漠的研究, 认为晚更新世末至全新世库姆塔格沙漠扩大, 向北埋没了羽毛状断裂谷(风蚀谷)和雅丹垄脊, 形成了世界上独特

的羽毛状沙丘^[24]。

1.3 存在问题

从以上分析可以看出,雅丹是吹蚀和磨蚀作用下的被动残留形态,它的形成是内部因素(岩性和结构)和外部因素(风力和沙粒来源等)共同作用形成的,同时又受风化过程、流水作用和块体运动的影响,情况比较复杂,认识程度较浅。夏训诚^[25]认为周围山地蒸发性的暴雨和洪水也是雅丹地貌形成的主要原因,并通过考察将罗布泊雅丹地貌的形成分成了 3 种类型:①以风的吹蚀作用为主的类型;②以流水的侵蚀作用为主的类型;③在流水作用的基础上再经风的吹蚀作用形成的类型。但各自的动力学过程还没有弄清,需要通过野外观测和实验形成对雅丹地貌形态与过程统一的认识。另外,目前对雅丹地貌的研究只关注了对残存土墩的观测和分析,没有充分重视对凹槽的形态变化和动力过程。

2 风蚀坑

风蚀坑是指在原有的沙质沉积物上由于风蚀而形成的碟形、杯形、槽形的凹地,风蚀所搬运的风成沙堆积于邻近地段,也属沙丘风蚀坑的一部分^[26]。风蚀坑是干旱区和海岸沙丘地区最常见的风蚀地貌类型,从热带地区到极地都有分布,尤其在有植被的固定和半固定沙丘地区更为普遍^[27]。在中国它广泛分布于诸如毛乌素、浑善达克、科尔沁、嫩江和呼伦贝尔等沙地^[15, 28]。

2.1 形态

由于各地环境条件的不同,风蚀坑形态各异。根据风蚀坑几何形状,最初将风蚀坑分为雪茄形、V形、勺形洞、锅形和廊道等几种类型。按其形态演变,Smith^[29]将其分为穴、扩展的槽口和宽大的盆或槽。Cooper^[30]将风蚀坑归结为两大类即碟形坑和槽形坑,虽然在风蚀环境中还存在许多的形态类型,但基本上可以归为这两类中的某一类。碟形坑一般呈现为半圆或碟形的浅盘状,进一步侵蚀可演化为杯形或碗状坑,而槽形坑则具有更深的侵蚀盆底和更加陡峭的侵蚀壁或坡角。呼伦贝尔沙地和浑善达克沙地风蚀坑的沙坑平面形态大致呈进风端略尖、出风端浑圆的卵圆形或扇形^[31]。呼伦贝尔沙质草原充分发育的现代风蚀坑最长可达 190 m,最宽 79 m,最深 12 m,最大面积 16 413 m²,在进风口和出风端相对硬度较大的地表土层侵蚀区经常

存在风蚀柱,并且常有风沙流运动留下的磨蚀痕迹,风蚀坑和坑后沙丘可根据形态特征、发展阶段、诱发原因进行分类^[13]。

尽管风蚀坑形态类型各异,但风蚀坑产生于植被覆盖、理化性质与下伏散沙有较大差异的地表土层发育的沙丘或沙地是不容置疑的,因而其共同的形态特征包括:①侵蚀(进风)口;②临近侵蚀口的陡峭侵蚀壁;③风蚀坑下风侧后端由缓变陡倾斜的沙坡和半圆形边缘组成的大型沉积扇,边缘几个由扇形向外发散的沉积角,表明它是抛物线沙丘形成过程中的过渡形式。野外调查中还发现有很多复合风蚀坑发育,即由多个风蚀坑连结而成或者在较早形成的风蚀坑上存在多个活化小坑,几何形态复杂,侵蚀与积沙在一个单元内重叠分布,不能明确划定侵蚀与沉积的区域范围^[32]。

2.2 发育过程

2.2.1 起始和发展

风蚀坑的产生与许多因素有关,根本原因就是风沙流侵蚀力的增强和地表抗侵蚀力的下降。所以往往在植被稀少或缓倾斜的迎风坡面上形成风蚀坑。Hesp^[26]将其归纳为 7 个方面的直接诱导因素:①水蚀;②在沙丘顶风的地形加速;③气候变化;④植被的时空演变;⑤沿沙丘向海面的波能侵蚀;⑥高风速侵蚀,沙流的掩埋;⑦人类活动。在特定环境中,很多学者认为植被变化是引起风蚀坑发育的主要原因^[8, 12]。张德平等^[13-14]认为,沙质草原风蚀坑的产生多为气候干旱化与人类大范围强度活动干扰土层相耦合的环境事件造成,但需要有松散无胶结的沙质沉积物的存在。地表植被和土层破坏,导致下伏散沙直接暴露于风力掏蚀侵蚀作用是风蚀坑发生的直接原因^[33]。当盛行西风时,风蚀坑主要发育于西南坡和南坡的上部和中部,由于翻耕、机动车道路、放牧等人类活动诱发,也形成于平坦的草地、北坡和东坡甚至低地^[34]。

关于风蚀坑的演化过程,由于受到很多因素的影响,各地区环境不同,观测结果也存在分歧。Gares 等^[35]将海岸沙丘风蚀坑的演化阶段分为:①植被覆盖稀少时初始槽口的发展;②槽口的加深和拓宽以及背风坡沉积角的形成;③侵蚀盆底和沙丘风蚀坑的形成;④槽口的封闭和沙丘风蚀坑的恢复。大部分观点认为风蚀坑发展最终会导致形成抛物线形沙丘^[36-37]。在较大尺度上,Gutierrez-Eloza 等^[38]对西班牙加那利群岛地区的风蚀坑发

育过程进行了总结,首先在历史上的非常干旱时期,沙物质被搬运沉积下来,然后在接下来的湿润时期,植被覆盖,阻止了风蚀过程,当再次遇到干旱气候,植被减少,风力作用就会导致沙丘和风蚀坑出现,后来通过重新造林,该地区风蚀得到控制,沙丘和风蚀坑最终被固定。张德平等^[33]发现翻耕造成土层面状破坏诱发大面积风蚀裸地和规模巨大的短轴型风蚀坑,道路切割土层诱发受道路延伸方向控制串状分布的长轴型风蚀坑。风蚀坑的发育过程主要有以下几个阶段:①由于植被破坏风蚀加剧形成风蚀裸地;②风沙流持续磨蚀作用或翻耕直接造成土层破口使下伏散沙出露;③风的淘蚀作用大规模发生造成活跃发展风蚀坑;④植被发生土层再次开始形成导致风蚀坑固定;⑤边坡变缓植被茂盛土层发育促使风蚀坑消亡^[37]。

史培军^[39]将缓起伏梁窝状固定沙丘上风蚀坑的演变过程概括为:风蚀穴—风蚀窝—风蚀碟—风蚀盘,平坦沙质草地上的风蚀坑发育模式为:浅风蚀坑—中风蚀坑—强风蚀坑。按照风蚀坑发育程度的不同,可以将风蚀坑分为沙斑、活跃发展坑、半固定坑和固定坑 4 类。王帅等^[32]将沙质草原风蚀坑分为平坦草地风蚀坑和沙丘风蚀坑。其中,平坦草地风蚀坑又可以根据发育阶段和形态将其分为沙斑、碟形坑和槽形坑等简单风蚀坑,此类风蚀坑是草原景观演化为沙地景观的初期阶段;沙丘风蚀坑坑后植被已经灌丛化,地表起伏较大,属于沙地景观。通过在野外对典型区域不同发育阶段风蚀坑表层至 30 cm 层的沙样采集,表明在沙质草原受风侵蚀由沙斑逐渐发展为活跃风蚀坑的过程中,侵蚀坑内沉积物由表层到 30 cm 层,细颗粒逐渐减少,粗化现象明显^[31];植被随着风蚀坑的固定和活化不断发生反复^[40]。根据在锡林郭勒和呼伦贝尔两个典型草原中分别对 100 个和 187 个风蚀坑的形态参数进行测量的数据分析,发现风蚀坑的形态参数间在风蚀坑演化过程中相互制约,相互影响,呈现一定的相关关系,特别是坑长与坑宽的高度线性关系($R^2 = 0.83$),随着风蚀坑长度的增加,宽度随之增加,长与宽以大约 5:2 的比例同步增加。侵蚀坑的加深更多受制于坑长的发展,说明在演化中风对坑底的侵蚀会随着侵蚀坑长度的增加而加强。另外,通过风蚀坑坑后积沙的增长与侵蚀坑的形态参数间的相互关系,说明风蚀坑演化过程中坑后积沙主要受风蚀坑长度的限制,它们之间的相关性系数达到 0.86,在演

化过程中风蚀坑长度与坑后积沙以 1:3 的比例增长^[32]。

2.2.2 动力学研究

风蚀坑形态主要由风沙流塑造,主要过程如图 1,沙地的演变实质上是大气侵蚀力(主要由风速、风向和频率决定)和沙地表面抗侵蚀力(主要由地表植被、土壤水分和沙物质性质决定)之间相互作用达到平衡的结果^[41],如果地表植被破坏,抗侵蚀力下降,或风速加快,侵蚀力增强,地表就会被侵蚀。当携沙气流进入风蚀坑系统,风蚀坑形态也会改造气流,使其垂直结构和水平格局发生变异,形成独特的气流场结构。这主要是近地表风速的空间差异造成不同部位剪切力的不同,从而导致输沙率的空间差异和不同部位蚀积速率的差异,最终使得风蚀坑形态发生变化。从中可以看出,影响风蚀坑形态最直接的动力因素是表面气流和输沙率以及地表土层与下伏散沙理化性质的差异^[34]。

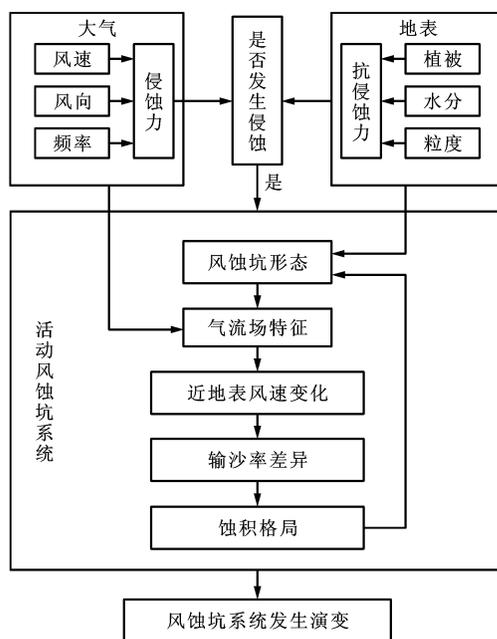


图 1 风蚀坑动力学过程概念模型

Fig. 1 Conceptual Model for Dynamic Process of Blowout

Hesp^[29]认为风蚀坑内气流相似于河口的水流。一些学者早在 1943 年就对风蚀坑气流进行了观测以及后来一系列的观测都发现了风蚀坑对气流的明显重新改造,即在一定位置气流加速,出现急流,而在另外一些位置由于气流分离,出现减速,同时也观测到了当气流由不同方向进入时,会出现涡流或螺旋流,但结果不尽一致^[42-44]。较为详细地观测是 Hesp^[45]在澳大利亚海岸对槽状坑内气流变

化进行的,结果显示,当风进入沙丘风蚀坑方向与坑口平行时,在侵蚀盆底和侵蚀壁出现急流,在沉积凸出角出现气流扩展和风速降低,急流在经过沉积凸角后则在角的背风坡分流且在侵蚀壁顶部形成螺旋流;当风与沙丘风蚀坑斜交时,气流变化的程度和复杂性由沙丘风蚀坑形态控制,并出现极度的急流和较大的螺旋流。

王帅等^[46]对呼伦贝尔沙质草原碟形坑表面气流的观测结果显示,气流进入风蚀坑后,在入风口扩散,风速开始降低至坑底达到最低;在坑后缘出风口汇集形成急流,风速剧增至坑后积沙顶部达到最高值。风蚀坑后缘在风沙流的磨蚀作用下后退,风蚀坑顺风向扩展,同时此处较大的剪切风速和输沙率使大量来自坑内的沙物质沉积到坑后草地上呈扇状蔓延。呼伦贝尔沙质草原风蚀坑是在来自西北、西和西南方向风的交替作用下,向东南、东和东北方向扩展而生成。随着风蚀坑深度和水平尺度的增加,最终可能沿强风能方向或合成输沙方向扩展成为大型的槽形坑。

近年来,一些学者则注重运用遥感影像分析风蚀坑植被的长期动态变化。风蚀坑是气候干旱后风沙活动的产物,其形成和发展也是沙质草地沙漠化的发生过程和表现形式^[47-49]。将风蚀坑的演变和植被动态结合起来研究沙质草原风沙活动是一个新的研究方向,同时运用风蚀坑的形态、尺度以及植被模式可以推测风蚀坑的形成年代^[50]。

2.3 存在问题

目前关于风蚀坑的研究主要集中在海岸沙丘地区,内陆沙质草原地区风蚀坑的研究程度较低;在动力学方面,还没有对风蚀坑各部位风沙流的输沙率和风沙流结构进行观测和分析;风蚀坑的形成也受流水作用和植被覆盖等多种因素的影响,需要综合分析这些因素对其发育过程的作用;大部分关于风蚀坑的研究只是通过野外观测手段,可以综合运用风洞试验和数值模拟等方法对其形态和过程进行研究,形成统一理论。

3 结语

风蚀地貌是在地表植被减少、抗侵蚀能力下降以及风力增大侵蚀力加强的情况下发育的地表形态。随着全球变暖和气候干旱化,其发育过程逐渐成为正在扩大的干旱半干旱地区主要的地表过程之一,导致固定沙丘和沙质草地活化并转变为沙地

景观。近年来草地退化为灌丛沙地在世界很多地区都非常严重并且受到了高度重视,而风蚀地貌形态就是这一过程最直观的表现形式,全面认识其形态与过程有助于理解和控制全球变化背景下的荒漠化过程。目前对风蚀地貌形态和过程的研究已经取得一些重要进展,但相对它的重要性来说,还远远不够,主要是对风沙流搬运和再堆积过程的认识还不够清晰,尤其是对形态和近地表气流场的反馈研究,即二次流的形成与发育规律及其在风沙地貌形成与演变中的作用研究程度不够。另外,相对于对风蚀地貌形态和过程的研究来说,较大时空尺度的研究更少,需要强化利用遥感影像等手段从景观尺度对风沙地貌进行的综合分析。

参考文献:

- [1] David S G T. Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands[M]. 2nd Edition. Chichester: Wiley, 1998.
- [2] Abrahams A D, Parsons A. Geomorphology of Desert Environments[M]. London: Chapman and Hall, 1994.
- [3] 鲁瑞洁, 哈 斯, 岳兴玲, 等. 第四纪风沙环境证据的研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 82-90.
- [4] Hedin S A, Bealby J T. Central Asia and Tibet Towards the Holy City of Lassa[M]. New York: Greenwood Press, 1970.
- [5] Stein M A. Exploration in Central Asia[J]. Geographical Journal, 1909, 34: 5-36.
- [6] Beadnell H J L. Lake Basins Created by Wind Erosion [J]. Journal of Geology, 1909, 3: 47-49.
- [7] Melton F A. A Tentative Classification of Sand Dunes; Its Application to Dune History in the Southern High Plain [J]. Journal of Geology, 1940, 48: 113-174.
- [8] Keyes C R. Rock Floor of Intermont Plains of the Arid Region[J]. Bulletin of the Geological Society of American, 1908, 19: 63-92.
- [9] Bryan K. Wind Erosion Near Lees Ferry, Arizona[J]. American Journal of Science, 1923, 5(6): 291-306.
- [10] McKee E D. 世界沙海的研究[M]. 赵兴梁, 译. 银川: 宁夏人民出版社, 1993.
- [11] Carter R W G, Hesp P A, Nordstrom K. Erosional Landforms in Coastal Dunes[C] // Nordstrom K, Psuty N, Carter B. Coastal Dunes: Form and Process. Chichester Sussex: Wiley, 1990: 217-252.
- [12] Hesp P A, Hyde R. Flow Dynamics and Geomorphology of a Trough Blowout [J]. Sedimentology, 1996, 43(3): 505-525.
- [13] 张德平, 王效科, 哈 斯, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(1)—形态、分类、研究意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 894-902.
- [14] Zhang A M, Feng Z W, Wang X K, et al. Sandy Grassland

- Blowouts in Hulunbuir, Northeast China: Geomorphology, Distribution, and Causes[J]. *Progress in Natural Science* 2007, 17(1): 68-73.
- [15] 吴 正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] 郑本兴, 张林源, 胡孝宏. 玉门关西雅丹地貌的分布和特征及形成时代问题[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 40-46.
- [17] Bosworth T O. *Geology and Palaeontology of Northwest Peru*[M]. London: Macmillan, 1922.
- [18] Grolier M J, Mccauley J F, Breed C S, et al. Yardangs of the Western Desert[J]. *Geographical Journal*, 1980, 146(1): 86-87.
- [19] Ward A W, Greeley R. Evolution of the Yardangs at Rogers Lake, California[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1984, 95(7): 829-837.
- [20] Whitney M I. The Role of Vorticity in Developing Lineation by Wind Erosion[J]. *Bulletin of the Geological Society of America* 1978, 89(1): 1-18.
- [21] McCauley J F, Ward A W, Breed C S, et al. The Yardangs at Rogers Dry Lake, California[J]. *Geological Society of America*, 1977, 9(7): 150-152.
- [22] Embabi N S. Playas of the Western Desert, Egypt [J]. *Ann Acad Sci Fenn Geol Geog*, 1999, 160: 5-47.
- [23] Brookes I A. Aeolian Erosional Lineations in the Libyan Desert, Dakhla Region, Egypt[J]. *Geomorphology*, 2001, 39(3): 189-209.
- [24] 屈建军, 郑本兴, 俞祁浩, 等. 罗布泊东阿奇克谷地雅丹地貌与库姆塔格沙漠形成的关系[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 294-300.
- [25] 夏训诚. 重返罗布泊[J]. *大自然探索*, 2003(4): 4-9.
- [26] Hesp P A. Foredunes and Blowouts: Initiation, Geomorphology and Dynamics[J]. *Geomorphology*, 2002, 48(1): 245-268.
- [27] Livingstone I, Warren A. *Aeolian Geomorphology: An Introduction*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [28] 朱震达, 吴 正, 刘 恕, 等. *中国沙漠概论*[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [29] Smith H T U. *Physiography and Photo Interpretation of Coastal Sand Dunes*[R]. Washington: Office of Naval Research, Geographical Branch, 1960.
- [30] Cooper W S. *Coastal Sand Dunes of California*[M]. Boulder: Geological Society of America, 1967.
- [31] 王 帅. 沙质草原风蚀坑表面气流与粒度响应[D]. 北京: 北京师范大学, 2007.
- [32] 王 帅, 哈 斯. 呼伦贝尔沙质草原区域风况与风蚀坑形态特征[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 74-76.
- [33] 张德平, 王效科, 孙宏伟, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(IV): 人类活动的影响[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 214-220.
- [34] 张德平, 王效科, 胡日乐, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(III): 微地貌和土层的影响[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 25-31.
- [35] Gans P A. *Eolian Sediment Transport and Dune Formation on Undeveloped and Developed Shorelines*[D]. New Brunswick: The State University of New Jersey, 1987.
- [36] Eriksson P G, Nixon N, Snyman C P, et al. Ellipsoidal Parabolic Dune Patches in the Southern Kalahari Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 1989, 16(2): 111-124.
- [37] 张德平, 孙宏伟, 王效科, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(II): 发育过程[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 20-24.
- [38] Gutierrez-Elorza M, Desir G, Gutierrez-Santolalla F, et al. Origin and Evolution of Playas and Blowouts in the Semiarid Zone of Tierra de Pinares(Duero Basin, Spain)[J]. *Geomorphology*, 2005, 72(1/4): 177-192.
- [39] 史培军. 试论科尔沁南部大青沟地区沙漠化土地的地表形态特征及其发育过程[J]. *内蒙古师范大学学报: 自然科学版*, 1986(1): 43-54.
- [40] 张 萍, 哈 斯, 王 帅, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑积沙区的植被分带性[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 237-244.
- [41] Thomas D S G, Knight M, Wiggs G F S. Remobilization of Southern African Desert Dune Systems by Twenty-first Century Global Warming[J]. *Nature*, 2005, 435: 1218-1221.
- [42] Jungerius P D, Witter J V, Vanboxel J H. The Effects of Changing Wind Regimes on the Development of Blowouts in the Coastal Dunes of the Netherlands[J]. *Landscape Ecology*, 1991, 6(1/2): 41-48.
- [43] Jungerius P D, Meulen F. The Development of Dune Blowouts as Measured with Erosion Pins and Sequential Air Photos[J]. *Catena*, 1989, 16(4/5): 369-376.
- [44] Lancaster N. Dynamics of Deflation Hollows in the Elands Bay Area, Cape Province, South Africa[J]. *Catena*, 1986, 13(1/2): 139-153.
- [45] Hesp P A. Flow Dynamics in a Trough Blowout[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 77(3/4): 305-330.
- [46] 王 帅, 哈 斯, 张 军, 等. 呼伦贝尔沙质草原碟形风蚀坑表面气流及其意义[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 745-749.
- [47] 任朝鑫, 杨达源. 西北干旱区近 50 年气候变化特征与趋势[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(1): 99-102.
- [48] Okin G S, Gillette D A, Herrick J E. Multi-scale Controls on and Consequences of Aeolian Processes in Landscape Change in Arid and Semi-arid Environments[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(2): 253-275.
- [49] Peters D P C, Havstad K M. Nonlinear Dynamics in Arid and Semi-arid Systems: Interactions Among Drivers and Processes Across Scales[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(2): 196-206.
- [50] 王 涛, 赵哈林. 中国沙漠科学五十年[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 145-165.