

DOI: 10.20103/j.stxb.202403060459

郭子玥, 解云虎, 高亮, 姜洪涛, 余婷, 石慧东, 海春兴. 沙质草原区风蚀坑形态演变——以锡林郭勒盟大河口镇为例. 生态学报, 2024, 44(22): 10401-10410.

Guo Z Y, Xie Y H, Gao L, Jiang H T, Yu T, Shi H D, Hai C X. A study on the morphology evolution of blowouts in sandy grassland area: taking Dahekou town, Xilingol league as an example. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10401-10410.

## 沙质草原区风蚀坑形态演变 ——以锡林郭勒盟大河口镇为例

郭子玥<sup>1</sup>, 解云虎<sup>2,\*</sup>, 高亮<sup>2</sup>, 姜洪涛<sup>1</sup>, 余婷<sup>3</sup>, 石慧东<sup>4</sup>, 海春兴<sup>1</sup>

1 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010000

2 包头师范学院生态环境学院, 包头 014030

3 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司内蒙古自治区鄂尔多斯市分公司, 鄂尔多斯 017000

4 达拉特旗水利事业发展中心, 鄂尔多斯 014399

**摘要:** 草原区风蚀坑的出现, 加速了草地沙漠化进程, 对草原生态系统平衡产生严重威胁。已有关于沙质草原风蚀坑的研究主要集中在现状风蚀坑的形态、规模及机制研究, 缺乏区域尺度一个完整发育周期风蚀坑形态变化的研究。基于此, 以锡林郭勒沙质草原区大河口镇风蚀坑为研究对象, 以美国锁眼卫星数据和高分一号卫星数据为数据源, 采用 ENVI 5.6 影像数据处理软件和 ArcGIS 10.5 数据提取分析软件提取 1962—2023 年共六期风蚀坑形态数据, 并进行了区域尺度长时间序列风蚀坑形态变化分析。同时选取了锡林郭勒沙质草原发育典型的独立型和复合型风蚀坑, 采用景观格局指数法和椭圆几何参数定量描述法, 探讨了近 60 年风蚀坑的形态演变过程。研究发现, 1962—2023 年风蚀坑斑块面积变异系数、平均斑块形状指数和平均斑块分维数均显著增加, 研究区该时间段有大型风蚀坑发育; 风蚀坑总体发育规律为坑体向坑后边缘扩展, 积沙体沿盛行风向延伸, 形态从卵圆形到碟形再到槽形坑; 该区发育典型的独立型和复合型风蚀坑面积及长短轴长度随时间推移呈现波动变化趋势, 复合型风蚀坑 A 长轴和短轴长度分别增加 722.78% 和 150.43%, 演化过程经过裸地沙斑、活跃发展和固定消亡三个阶段, 该类型风蚀坑在以上三个阶段均有重新活化的可能性。通过对锡林郭勒沙质草原风蚀坑形态演变的研究, 其研究结果可以为草原风蚀坑治理和草地沙化防治、草地资源可持续利用提供理论依据和数据支持。

**关键词:** 沙质草原; 风蚀坑; 形态演变; 景观格局

## A study on the morphology evolution of blowouts in sandy grassland area: taking Dahekou town, Xilingol league as an example

GUO Ziyue<sup>1</sup>, XIE Yunhu<sup>2,\*</sup>, GAO Liang<sup>2</sup>, JIANG Hongtao<sup>1</sup>, YU Ting<sup>3</sup>, SHI Huidong<sup>4</sup>, HAI Chunxing<sup>1</sup>

1 College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010000, China

2 College of Ecology and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, China

3 Ningxia Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., LTD. Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region Branch, Ordos 017000, China

4 Dalate Banner Water Utilities Development Centre, Ordos 014399, China

**Abstract:** The emergence of blowouts in grassland areas has accelerated the process of desertification of grasslands and posed a serious threat to the balance of grassland ecosystems. The studies on blowouts in sandy grassland mainly focused on the morphology, scale and mechanism of the current blowouts, and there is a lack of studies focusing on the morphological

**基金项目:** 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0027); 内蒙古自治区自然科学基金青年基金项目(2024QN04020); 国家自然科学基金地区项目(42361001); 包头师范学院高层次人才科研启动基金项目(BTTCRCQD2020-011)

收稿日期: 2024-03-06; 网络出版日期: 2024-08-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xieyhsd@126.com

changes of blowouts in a complete development cycle at the regional scale. Based on this, this study took the blowout in Dahekou Town, Xilingol sandy grassland area as the research object, and used the U.S. Keyhole satellite data and China's Gaofen-1 satellite data as the data source. ENVI 5.6 image data processing software and ArcGIS 10.5 data extraction and analysis software were used to extract blowout morphology data for a total of six periods from 1962 to 2023, and regional scale long time series blowout morphology change analysis was carried out. At the same time, the stand-alone and composite blowouts, which are typical of the sandy grassland development in Xilingol, were selected, and the morphological evolution process of the blowouts in the past 60 years was explored by using the landscape pattern index method and the elliptical geometric parameter quantitative description method. It was found that the coefficient of variation of blowout patch area (AREA\_CV), mean patch shape index (SHAPE\_MN), and mean fractal dimension index (FRAC\_MN) increased significantly from 1962—2023, and large blowouts developed in the study area during this time period. The general development pattern of blowouts was that the pit body extended to the back edge of the pit, the sand deposition body extended along the prevailing wind direction, and the morphology ranged from ovoid to saucer-shaped to trough-shaped pits. The area and length of the long and short axes of the typical stand-alone and composite blowouts developed in this area showed fluctuating trends over time, and the length of the long and short axes of the composite blowout A increased by 722.78% and 150.43%, respectively, and the evolution process went through the three phases of bare ground sand patches, active development, and stationary demise, and this type of blowout had the possibility of reactivation in all of the three phases mentioned above. Through the research on the morphological evolution of blowouts in Xilingol sandy grassland, the results can provide a theoretical basis and data support for the management of grassland blowouts and the prevention and control of grassland sanding, and the sustainable use of grassland resources.

**Key Words:** sandy grassland; blowout; morphological evolution; landscape pattern

在气候条件和人类活动等多种因素影响下,干旱和半干旱地区土地退化不断加剧、植被覆盖度降低、生物量减少、土壤性质改变,导致生态环境受到严重威胁,荒漠化无疑成为该区域最严峻的生态环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。据全球土地退化综合评估结果显示,干旱半干旱地区土地退化区域占比约 20%<sup>[3]</sup>,而中国是世界上受土地荒漠化影响最严重的国家之一,尤其是中国北方干旱半干旱沙质草原区是荒漠化防治重点地区,沙质草原区风蚀坑的发育及治理也备受关注<sup>[4-5]</sup>。风蚀坑是指沙面在风蚀作用下出现凹陷形成的抛物线形沙丘<sup>[6]</sup>,风蚀坑的出现标志着草原沙化发展到了相当严重的程度,裸露地表长时间人为或自然干预导致土壤侵蚀作用加强,促使草原向荒漠化转变,植被覆盖度降低,土壤的固碳潜力减小<sup>[7]</sup>。为有效阻止沙质草原风蚀坑规模扩大,提出合理有效的风蚀坑治理措施,最根本是要了解风蚀坑发育过程中各个阶段的形态特征。

国内外学者针对风蚀坑形态演变已经做了大量基础研究。风蚀坑主要分布在沙地、沙质草地、海岸沙地等易风蚀区域,受气候变化及气流对风蚀坑坑体扰动影响,风蚀坑形状会发生改变。同时,受区域环境、最初诱发因素以及各变量之间的相互影响,风蚀坑形态呈现出多样性特点,但主要以槽形坑和碟形坑为主。浑善达克沙地按照规模和地表形态差异,风蚀坑可分为碟形、梯形、沟谷形、杯形和坡形五种类型<sup>[8]</sup>,也有学者以风蚀坑坑体和坑后积沙体形态作为划分依据,将风蚀坑划分为椭圆形和扇形风蚀坑<sup>[9]</sup>;还可以根据风蚀坑形态参数进行风蚀坑类型的划分,进入了风蚀坑形态定量描述阶段,以长宽比例 5:2 为标准,大于 5:2 为槽形坑,反之为碟形坑<sup>[10]</sup>。为了深入了解不同风力条件对风蚀坑内部形态的影响,更多的是通过野外测量和数值模拟方法<sup>[11-12]</sup>,对不同类型风蚀坑内部不同部位地表气流和沙粒运动规律进行分析,为风蚀坑形态研究提供了更具说服力的科学依据。此外,关于风蚀坑长时间尺度演变过程的研究,Luo 依据坑体形态及面积大小将青海共和盆地的风蚀坑形态演变分为胚胎期、幼年期、青年期和成熟期共 4 个发育阶段<sup>[13]</sup>;张德平通过对影响风蚀坑发育的多重因子的综合控制,将呼伦贝尔沙质草原风蚀坑演化发育分为五个阶段:风蚀裸地、土层破口、活跃发展、固定和消亡<sup>[14]</sup>,这为风蚀坑的有效治理提供了基础支撑。

锡林郭勒草原是中国四大草原之一内蒙古草原的主要天然草场,受气候条件及人类不合理开发利用草地资源的影响,锡林郭勒草原草地沙化现象凸显,尤其以浑善达克沙地沙化最为严重,风蚀坑面积占整体景观 6.1%,其形态主要以碟形、槽形和不规则形三种类型为主<sup>[7,15-18]</sup>。但受数据分辨率、数据可获取性等的限制,长时间大区域尺度锡林郭勒沙质草原风蚀坑形态演变的研究不足,这也使风蚀坑的有效治理受到限制。基于此,本研究以锡林郭勒沙质草原风蚀坑为研究对象,基于长时间序列高分辨率遥感影像数据分析近 60 年锡林郭勒沙质草原风蚀坑形态的整体变化,并对研究区内发育典型的独立型和复合型风蚀坑的面积、长短轴比和各演化阶段的特征作进一步研究,以期为风蚀坑的治理和草地沙漠化的防治提供科学依据和基础数据支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于锡林郭勒盟多伦县大河口镇(图 1),地理坐标为 42°33′94″—42°92′66″N, 116°44′63″—116°91′23″E,浑善达克沙地东南缘,平均海拔 1350m,区域面积 1090.84km<sup>2</sup>。属中温带半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候,冬季干冷多风,夏季湿热少风。年平均降水量 385mm,年均气温 1.6℃,极端最高气温 35.4℃,极端最低气温-39.8℃,年平均日照 3000h,无霜期约 100d。全年以偏西风、西北风为主,年均风速 3.6m/s。研究区土壤类型以暗栗钙土为主,土壤中速效钾的含量较高,氮含量中等,缺乏速效磷。植被类型主要有针茅(*Stipa capillata*)、羊草(*Leymus chinensis*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)等。

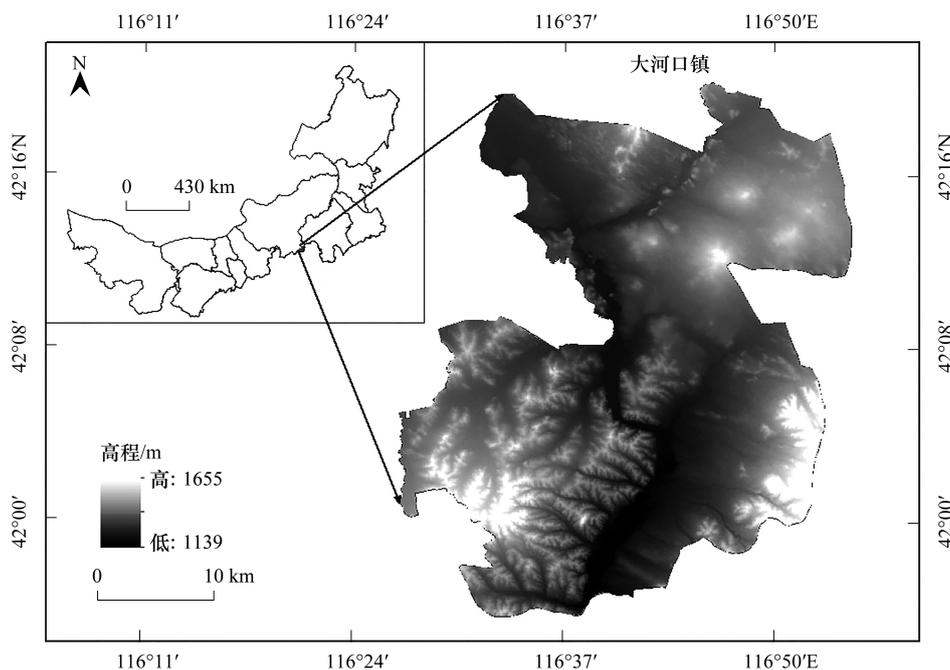


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文 1962 年、1972 年和 1982 年影像数据选择锁眼卫星数据,数据获取地址为美国地质勘探局官网 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>); 2013 年、2018 年和 2023 年影像数据选择高分一号卫星数据,数据获取地址为中国资源卫星应用中心 (<https://www.cresda.com/zgzywxyyzx/index.html>) 和中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>),所选择的影像数据时相为植被生长季,无积雪覆盖,云量低于 5%。卫星数据参数见表 1。

表 1 卫星数据参数

Table 1 Satellite data parameters

卫星 Satellite	卫星系统 Satellite system	相机 Camera	分辨率 Resolution	单景面积 Area of single view	多光谱波段 Multi-spectral bands	全色波段 Panchromatic band
高分一号卫星 Gaofen-1 satellite		PMS 相机	全色:2m 多光谱:8m	60km×60km	0.45—0.52μm 0.52—0.59μm 0.63—0.69μm 0.77—0.89μm	0.45—0.90μm
锁眼卫星 Keyhole satellite	1962:KH-4 1972:KH-4B 1982:KH-9	两个全景 摄像机	7.5m 1.8m 6m	41m×579m 13.8m×188m 160m×270m		

## 2.2 数据处理

### 2.2.1 影像数据处理

基于 ENVI 5.6 和 ArcGIS 10.5 数据处理软件对遥感影像数据进行预处理,将坐标统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N。具体预处理流程:(1)以美国陆地卫星 Landsat-8(OLI)数据为基准影像,选择研究区内标志性建筑物或者道路交叉点等易辨识且相对固定的点作为影像地理配准控制点,对锁眼卫星数据和高分一号卫星数据进行地理配准,保证数据空间参考的一致性;(2)依照大河口镇行政区划边界对两种影像进行图像镶嵌和按边界裁剪操作,确保数据范围的一致性;(3)使用图像融合工具将影像的高分辨率全色波段与低分辨率多光谱数据进行波段融合处理,保证两种数据源空间分辨率的一致性(2m)。

### 2.2.2 景观格局指数分析

为实现对研究区内风蚀坑形态的量化分析,使用 Fragstats4 景观格局分析软件,选取 6 个指标(三个基础指标:景观面积、斑块类型面积和斑块数量;三个形状指标:斑块面积变异系数、平均斑块形状指数和平均斑块分维数。)(表 2)。

表 2 景观指数描述

Table 2 Description of landscape indices

景观指数 Landscape index	简称 Acronym	单位 Unit	生态学含义 Ecological implications	计算公式 Formula
景观面积 Total area	TA	hm <sup>2</sup>	决定了景观的范围以及研究和 分析的最大尺度。	$TA = A$
斑块数量 Number of patches	NP	个	描述整个景观的异质性,与景观 破碎度有很好的正相关性。	$NP = n_i$
斑块类型面积 Class area	CA	hm <sup>2</sup>	度量景观的组分,是计算其他指 标的基础。	$CA = \sum_{j=1}^n a_n \times \left[ \frac{1}{10^4} \right]$
斑块面积变异系数 Coefficient of variation of patch area	AREA_CV	—	所有斑块面积的标准差与面积 平均值之比。	$AREA\_CV = \frac{\sqrt{N_i \times \sum_{j=1}^n \left( a_j - \frac{A_i}{N_i} \right)^2}}{A_i \times 10^6}$
平均斑块形状指数 Mean patch shape index	SHAPE_MN	—	值为 1 时,所有斑块为最简单的 方形,随着值增大,表明斑块形 状变复杂。	$SHAPE\_MN = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{0.25 P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right)}{N}$
平均斑块分维数 Mean fractal dimension index	FRAC_MN	—	当值为 1 时,表示嵌套结构为简 单的正方形斑块;当值等于 2 时,表示等面积下嵌套结构最为 复杂的多边形斑块,边界最不规 则;若值为 1.5,则表明该种斑块 处于布朗随机运动。	$FRAC\_MN = \frac{2}{\frac{\left[ n_i \sum_{j=1}^n (\ln P_{ij} - \ln a_{ij}) \right] - \left( \sum_{j=1}^n \ln P_{ij} \right)}{\left( n_i \sum_{j=1}^n \ln P_{ij}^2 \right) - \left( \sum_{j=1}^n \ln P_{ij} \right)}}$

### 2.2.3 风蚀坑形态数据提取

利用 ArcGIS 10.5 软件通过目视解译方法进行风蚀坑轮廓提取,获得风蚀坑矢量数据(图 2),根据风蚀坑形态特征,将风蚀坑分为坑体和坑后积沙体两部分,提取 1962—2023 年间发育完整的一类独立型风蚀坑和两类复合型风蚀坑。采用椭圆几何参数定量描述法(图 3),运用 ArcGIS 10.5 软件空间分析功能获得风蚀坑长轴长度、短轴长度和面积等风蚀坑形态数据,使用 SPSS 23.0 软件对风蚀坑形态数据进行统计分析,并通过 OriginPro 9.1 制图软件进行制图输出。

## 3 研究结果

### 3.1 风蚀坑形态变化

#### 3.1.1 景观格局指数分析

1962—1972 年风蚀坑斑块类型面积和数量变化明显,1962 年斑块类型面积为 2926.88hm<sup>2</sup>,到 1972 年增加至 4561.27hm<sup>2</sup>,增加了 55.84%;1972—2013 年斑块类型面积呈下降趋势,其中 1982—2013 年斑块面积减少 1627.74hm<sup>2</sup>,减少了 41.41%;2013—2023 年斑块的面积稳定增加(图 4)。近 60 年风蚀坑数量变化 1972 年相比 1962 年增加 630 个,约是 1962 年风蚀坑数量的 4.17 倍,1972—2023 年风蚀坑斑块数量变化趋于稳定,变幅不明显。1962—2013 年斑块面积距平均值偏离程度降低,波动性小,保持稳定;2013 年至 2023 年斑块面积标准偏差增加,风蚀坑面积稳定性降低。近 60 年间,偏度和峰度呈现增加-降低-增加的趋势,表明 2023 年发育有许多大型风蚀坑,且面积有再次扩张的风险(表 3)。

1962—1982 年斑块面积变异系数增加了 46.79%,1982 年增至最大;1982—2013 年斑块面积变异系数从 1.60 降低至 1.31,2013—2023 年斑块面积变化幅度趋于稳定。随着 1962—1972 年风蚀坑面积和数量的大幅增长,研究区内斑块不规则程度增加,平均斑块形状指数该期间增长率为 16.90%。2013—2018 年斑块面积不断增加的情况下,平均斑块形状指数和斑块数量分别减少了 0.04 和 9。相邻风蚀坑坑体扩大逐渐合并为一个风蚀坑,坑体边缘受风力吹蚀而圆滑,形状较规则,导致平均斑块形状指数降低。平均斑块分维数从整体内部自相似性深入的分析了斑块的复杂程度,1962—2023 年平均斑块分维数接近 1,风蚀坑的性状简单,分布规律性高,受人为干扰程度大。整体平均斑块分维数从 1.06 逐步上升后维持在 1.09 保持不变,说明 1962—

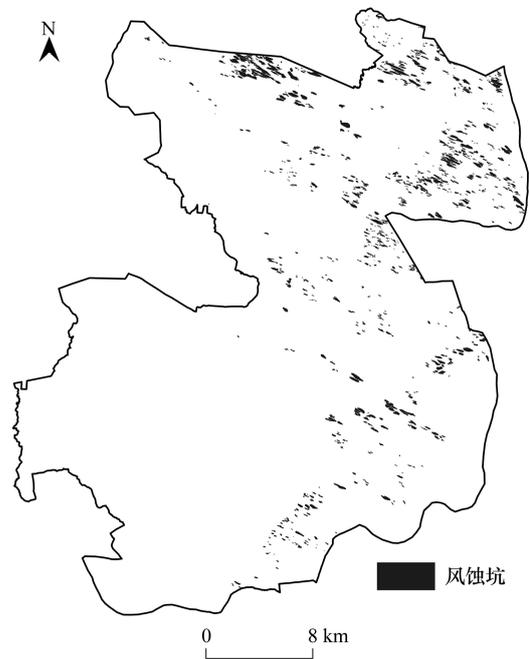


图 2 2023 年研究区风蚀坑分布图

Fig.2 Distribution of blowouts in the study area in 2023

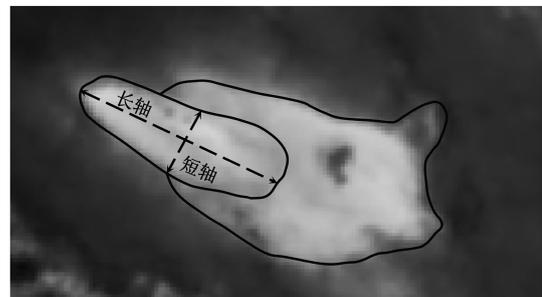


图 3 风蚀坑长短轴示意图

Fig.3 Schematic diagram of the long and short axes of the blowout

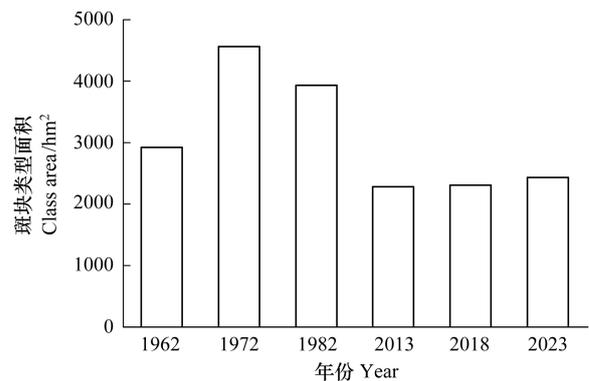


图 4 风蚀坑斑块类型面积变化

Fig.4 Changes in blowout class area

1982 年大河口镇风蚀坑内部复杂程度增加,风蚀坑的边界向不规则状态发展(图 5)。

表 3 风蚀坑面积描述性统计数据

Table 3 Descriptive statistics of blowout area

年份 Year	最小值/hm <sup>2</sup> Minimum value	最大值/hm <sup>2</sup> Maximum value	方差 Variance	标准偏差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
1962	1.65	134.80	444.82	21.09	2.63	8.85
1972	0.22	133.90	95.57	9.78	5.64	50.85
1982	0.09	93.15	67.89	8.24	4.31	27.27
2013	0.10	59.88	21.99	4.69	6.13	55.78
2018	0.09	58.18	24.00	4.90	6.25	56.71
2023	0.07	120.28	35.86	5.99	10.75	185.75

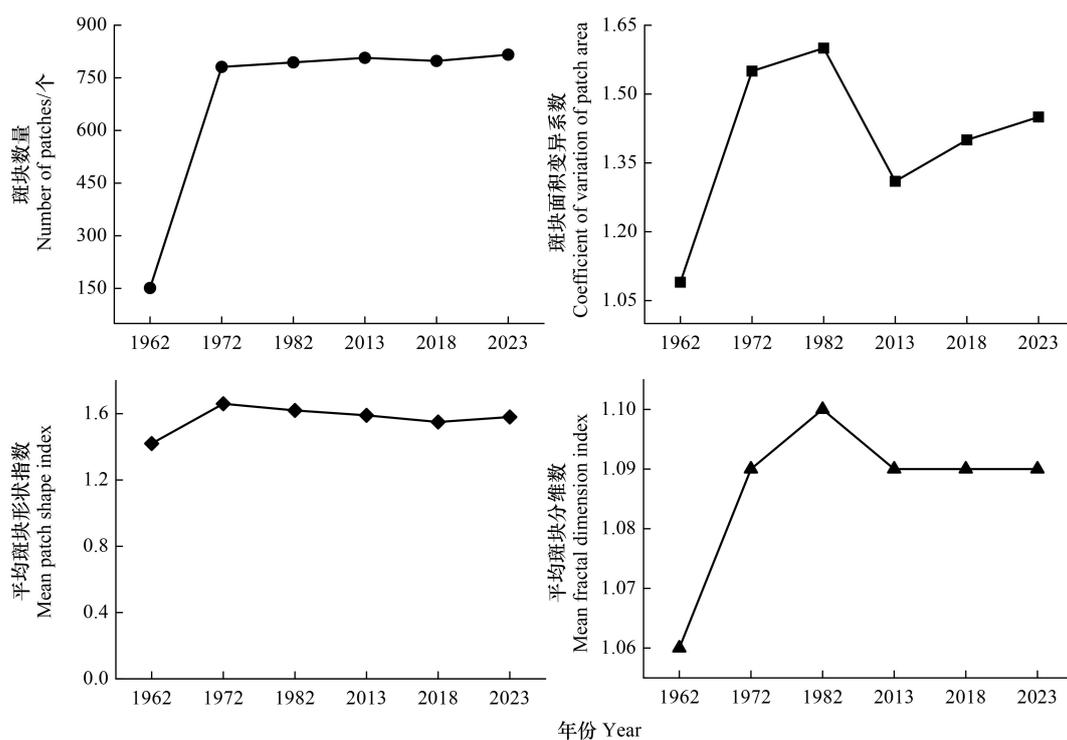


图 5 风蚀坑形态变化

Fig.5 Changes in blowout morphology

### 3.1.2 风蚀坑面积变化

依据研究区 1962—2023 年风蚀坑坑体的时空形态变化状况,结合锡林郭勒沙质草原风蚀坑演化的实际,该区域发育典型且具有代表性的风蚀坑类型为独立型风蚀坑和复合型风蚀坑。独立型风蚀坑有 3 种情况:①新生:1962 年未形成风蚀坑,逐渐由风蚀裸地发育为土层破口,出现风蚀坑,并继续生长;②消亡:1962 年已形成风蚀坑,由于人工治理及自然修复,风蚀坑逐渐消失,但该风蚀坑有重新活化的可能性;③扩展:1962 年已出现独立型风蚀坑,近六十年持续发育演化,风蚀坑面积不断扩大。复合型风蚀坑共两种情况:①坑体合并:1962 年独立型风蚀坑开始发育,几年后在该独立型风蚀坑的坑后积沙体上新生独立型风蚀坑,两个独立型风蚀坑坑体发生合并,组合成一个新的风蚀坑;②积沙体相连:1962 年邻近的两个侧向独立型风蚀坑同时发育,几年后这两个独立型风蚀坑坑体依然独立,而坑后积沙体面积扩大连接在一起。根据研究区风蚀坑类型的具体情况,选择发育典型的三种类型风蚀坑(扩展独立型风蚀坑、坑体合并复合型风蚀坑 A 和积沙体相连复合型风蚀坑 B)对其面积的变化作进一步分析(图 6)。

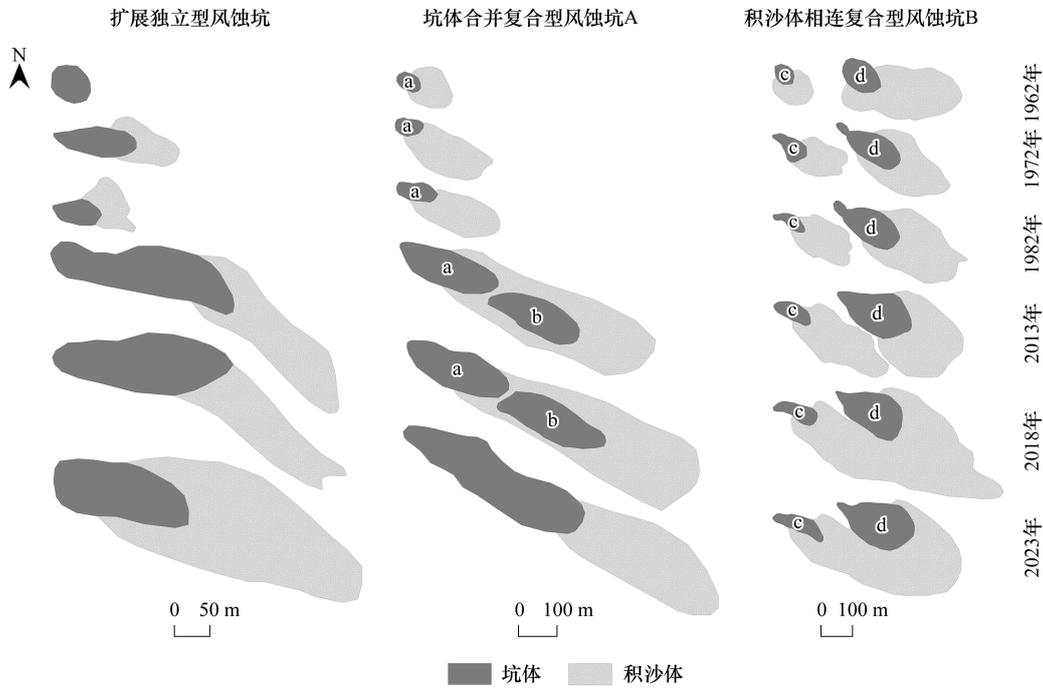


图 6 独立型风蚀坑和复合型风蚀坑 A、B 形态变化

Fig.6 Morphological changes of stand-alone blowout and composite blowouts A and B

风蚀坑 a 表示持续扩展的风蚀坑, 风蚀坑 b 表示在积沙体处新生的风蚀坑; 风蚀坑 c 和风蚀坑 d 表示复合型风蚀坑 B 的两个独立风蚀坑

1962—2023 年间,独立型风蚀坑坑体和积沙体的面积呈波动变化趋势,坑体和积沙体总面积到 2023 年达最大值(50784.50m<sup>2</sup>),相比 1962 年增加近 20 倍。1962 年仅有坑体发育,1972—2013 年,坑体沿坑后边缘向东扩张,积沙体向东南方向扩展;2013—2023 年风蚀坑坑体面积先增大后减小,积沙体沿东南方向向四周扩散,面积增加了 23921.10m<sup>2</sup>。复合型风蚀坑 A 发育后期表现为坑体合并(风蚀坑 a、b),结合表 4 可知,1962—2013 年坑体面积增加了 17738.82m<sup>2</sup>,2013 年在积沙体处受风蚀影响出现次一级风蚀坑 b;到 2023 年风蚀坑 a 和风蚀坑 b 坑体相连,形成复合型风蚀坑,坑体和坑后积沙体面积分别达到 52650.19m<sup>2</sup>和 60081.78m<sup>2</sup>。近 60 年复合型风蚀坑 B 中的两个风蚀坑(风蚀坑 c、d)面积扩大,发育后期积沙体相连。1962—2023 年坑体总面积呈增加-减小-增加的变化趋势,2018 年面积减小到 28912.83m<sup>2</sup>,到 2023 年面积增加了 18.73%;坑后积沙体的总面积 1962—1972 年和 2018—2023 年分别减少了 10572.22m<sup>2</sup>和 30209.52m<sup>2</sup>。

表 4 不同类型风蚀坑面积变化

Table 4 Variation in the area of different types of blowouts

年份 Year	扩展独立型风蚀坑 Extended stand-alone blowout		坑体合并复合型风蚀坑 A Pit consolidation composite blowout A			积沙体相连复合型风蚀坑 B Composite blowout B linked to sand deposition bodies			
	坑体 Pit/m <sup>2</sup>	积沙体 Sand deposition body/m <sup>2</sup>	坑体 a Pit a/m <sup>2</sup>	坑体 b Pit b/m <sup>2</sup>	积沙体 Sand deposition body/m <sup>2</sup>	坑体 c Pit c/m <sup>2</sup>	坑体 d Pit d/m <sup>2</sup>	积沙体 c Sand deposition body c/m <sup>2</sup>	积沙体 d Sand deposition body d/m <sup>2</sup>
1962	2405.10	0.00	2461.89		8451.82	3317.80	10150.67	9437.80	46030.74
1972	3707.01	3466.09	2761.68		19308.36	5762.36	14964.09	14290.09	30606.23
1982	1895.72	3105.60	4290.44		17320.02	3509.86	17975.56	20463.78	41386.44
2013	14591.15	14749.10	20200.71	17981.39	55937.21	5774.88	24972.57	36489.73	45016.10
2018	15933.75	13434.38	23031.90	22164.36	69743.40	6339.00	22573.83		115897.92
2023	13429.02	37355.48		52650.19	60081.78	7235.23	27091.79		85688.39

### 3.2 风蚀坑演变

风蚀坑坑体的长轴长度、短轴长度和长短轴之比是判断风蚀坑形状的重要指标,通过长短轴之比的变化速率,结合风蚀坑坑体面积变化可以判断风蚀坑当前所处的演化阶段。根据风蚀坑几何形态,采用椭圆几何参数定量描述法研究近 60 年风蚀坑演变规律。该区域发育的 5 种典型风蚀坑长轴和短轴均发生明显变化,但不同类型风蚀坑变化速度差异显著( $P<0.05$ ) (表 5)。

表 5 不同类型风蚀坑的形态参数

Table 5 Morphological parameters of different types of blowouts

年份 Year	扩展独立型风蚀坑 Extended stand-alone blowout			坑体合并复合型风蚀坑 A Pit consolidation composite blowout A						积沙体相连复合型风蚀坑 B Composite blowout B linked to sand deposition bodies					
	长轴/m Long axis	短轴/m Short axis	长短轴比 L/S ratio	风蚀坑 a Blowout a			风蚀坑 b Blowout b			风蚀坑 c Blowout c			风蚀坑 d Blowout d		
				长轴/m Long axis	短轴/m Short axis	长短轴比 L/S ratio	长轴/m Long axis	短轴/m Short axis	长短轴比 L/S ratio	长轴/m Long axis	短轴/m Short axis	长短轴比 L/S ratio	长轴/m Long axis	短轴/m Short axis	长短轴比 L/S ratio
1962	60.64	49.33	1.23	63.05	45.01	1.40				81.81	60.33	1.36	135.06	96.72	1.40
1972	117.88	38.70	3.05	72.55	44.05	1.65				129.23	52.01	2.48	193.29	93.02	2.08
1982	69.19	35.93	1.93	108.12	48.81	2.22				113.59	39.17	2.90	196.49	103.85	1.89
2013	264.58	67.47	3.92	271.26	95.19	2.85	246.53	91.89	2.68	130.83	55.63	2.35	264.96	132.34	2.00
2018	254.56	87.19	2.92	287.64	107.99	2.66	281.15	97.63	2.88	141.63	47.98	2.95	240.47	120.79	1.99
2023	202.16	78.01	2.59	518.76	112.72	4.60				167.76	50.89	3.30	257.38	144.37	1.78

表中风蚀坑 a、b、c 和 d 所代表的风蚀坑类型与图 6 一致

1962 年独立型风蚀坑呈卵圆状,处于风蚀坑发育最初阶段;风力不断侵蚀,到 1972 年坑体面积扩大 54.13%,长短轴比增大 1.82,发展为碟形坑;1982 年坑体面积和长短轴比变化幅度减小,进入固定消亡阶段;到 2013 年,独立型风蚀坑重新活化,由碟形转变为槽形坑,长短轴比增加 103.64%,进入固定消亡阶段。

复合型风蚀坑形状在风蚀坑发育早期(1962 年)均为卵圆状,风蚀坑 a 和风蚀坑 c 为裸地沙斑,风蚀坑 d 已进入活跃发展阶段。风蚀坑 a 从裸地沙斑逐渐活跃发展,2013 年积沙体处出现槽形风蚀坑 b。2023 年风蚀坑 a 与 b 复合后坑体面积达到 52650.19m<sup>2</sup>,约是 1962 年的 21 倍,长短轴比增加了 3.20;2013—2018 年风蚀坑 a 和 b 坑体面积增量小,长短轴比变化分别为 0.19 和 0.20,整体趋于稳定,向固定消亡阶段发展;到 2023 年两个坑体连接为一个风蚀坑,未来有重新活化的风险。复合型风蚀坑 B 中的风蚀坑 c 近六十年演化趋势与独立型风蚀坑保持一致,长轴增加、短轴减少。促使风蚀坑 c 形状从卵圆状发育为碟形再到槽形,演化从裸地沙斑经过活跃发展、固定消亡、重新活化后再次固定消亡,但坑体面积和长短轴比变化与独立型风蚀坑相比变化幅度小。风蚀坑 d 在 1962 年坑体面积为 10150.67m<sup>2</sup>,超过 10000m<sup>2</sup>已成为大型风蚀坑,1972 年以后风蚀坑 d 发育形态均为碟形,面积不断扩大,长短轴变化小。

### 4 讨论

景观格局指数各项指标可以从宏观角度分析风蚀坑整体变化情况,其中斑块面积变异系数、平均斑块形状指数和平均斑块分维数从生态意义角度具体分析风蚀坑形态变化特征<sup>[19-21]</sup>。本文选取三个基础指标和三个形状指标对锡林郭勒沙质草原风蚀坑形态演变进行分析发现,1962—1982 年处于经济发展的起步期,中国实行的经济发展政策和生态的修复功能降低使斑块面积和数量增长速度加快。1982 年斑块面积变异系数和平均斑块分维数最大,而平均斑块形状指数降低,说明此期间存在由独立型风蚀坑扩展,或两个斑块合并而成的复合型风蚀坑导致大型风蚀坑斑块出现。受地下水位、沙层中的粘土及细粉沙夹层影响所形成的侵蚀基准面限制,向下侵蚀减缓,风蚀坑有向四周扩展的趋势,并且出现坑体边缘光滑的复合型风蚀坑,这说明风力侵

蚀对风蚀坑形态的发展具有重要影响<sup>[14,22]</sup>。

大河口镇风蚀坑的形状变化开始是卵圆形,侵蚀面积扩大发展为碟形,向下和向后侵蚀越强、几何形态越扁形成小型槽形坑,侵蚀继续扩张最后演变为大型槽形坑。卵圆形风蚀坑坑体前端进风处略尖,后端出风口浑圆<sup>[7]</sup>;碟形坑的侵蚀深度浅、侵蚀盆地面积大,坡度平缓,为椭圆状,侵蚀内壁陡峭,迎风坡和背风坡形态特征不明显,积沙区整体平缓<sup>[23]</sup>;槽形坑整体呈狭长形,坑体向坑后边缘延伸,气流进入坑体后向下侵蚀加深,在坑底达到最大值,迎风坡坡度陡峭<sup>[24]</sup>。研究区内复合型风蚀坑 B 中的风蚀坑 d 形状变化与其他风蚀坑变化差异明显。风蚀坑 d 形状从卵圆形扩展为碟形,未发育形成槽形坑,但面积已超过 2 万 m<sup>2</sup>,发展为大型风蚀坑,这与沙漠化防治区的土地沙化治理政策的实施有直接关系。在沙化治理过程中采取机械防治技术和生物防治技术,对锡林郭勒沙质草原风蚀坑的坑底、坑面和坑后积沙体进行治理,人为干预阻碍坑体向坑后边缘扩张,向坑体四周薄弱处延伸,坑体形状发育受到影响,面积增大但仍保持碟形<sup>[25]</sup>。野外观测中发现在坑体侧壁处有塌陷的植被,表明侧壁处受到侵蚀。

在风蚀坑形态演化研究中,风蚀坑的面积、长轴长度、短轴长度和长短轴比及其之间的关系具有很好的解释风蚀坑形态的特性,这些参数往往会随着时间的变化而变化<sup>[26]</sup>。胡日娜对浑善达克东南缘风蚀坑形态的研究及李双权在呼伦贝尔草原碟形、槽形和复合型风蚀坑的形态特征研究中都涉及到了该研究方法<sup>[15,27]</sup>。独立型风蚀坑和复合型风蚀坑随着侵蚀规模和面积的扩展,两种坑型长短轴比不断增大,面积发生变化时,长短轴比会随之发生变化。由此从面积和长短轴的变化可以看出:研究区内的演化进程开始是风蚀裸地,形态参数之间相关性小,独立型风蚀坑坑后积沙体尚未发育,方向性尚不明显<sup>[28]</sup>;在风力掏蚀风沙堆积作用下开始活跃发展,长轴和短轴快速增大,风力到达坑后的侵蚀能力不足,减缓坑长的增加;受侵蚀基准面影响,经过人工的治理及环境的修复,植被开始生长,风蚀坑长短轴比和面积开始稳定,进入固定消亡阶段,面积仍有所增加<sup>[13,29]</sup>;活化的初始位置经常出现于风蚀坑的边缘地区(独立型风蚀坑和复合型风蚀坑 B)或在积沙体上(复合型风蚀坑 A)叠加新的风蚀坑,再次完成整个发育过程<sup>[30]</sup>。

## 5 结论

(1) 锡林郭勒沙质草原区近 60 年风蚀坑斑块类型面积、斑块数量、斑块面积变异系数和平均斑块形状指数均呈现先增大再减小后继续增大的趋势,平均斑块分维数接近 1.0。2023 年研究区内斑块面积变异系数为 1.45,平均斑块形状指数为 1.58,风蚀坑形态比较简单,有大型风蚀坑发育。

(2) 1962—2023 年,研究区独立型和复合型风蚀坑侵蚀方向沿主风向扩展,规模不断增大,横向扩展不明显。独立型风蚀坑坑体面积呈现先降低后增加的趋势,到 2023 年增大至 16392.46m<sup>2</sup>;复合型风蚀坑 A 和 B 的发育呈现不同发展方向,前者面积持续增加,后者在 2018 年面积减小,2023 年坑体面积增加到最大值 34327.02m<sup>2</sup>。独立型风蚀坑在发育后期积沙体迅速增大,约是发育中期的 1.78 倍;复合型风蚀坑 A 和 B 积沙体变化在整个发育过程中呈现波动变化趋势。

(3) 风蚀坑长轴和短轴发生变化,几何形态也做出相应改变。独立型和复合型风蚀坑在裸地沙斑阶段均为卵圆状,在活跃发展阶段发育为碟形和小型槽形坑,固定消亡阶段长短轴比变化幅度小,有中型和大型槽形坑发育,各发育阶段都有重新活化的风险。

## 参考文献(References):

- [1] Rengasamy P. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(5): 1017-1023.
- [2] 郑佳翔, 孙桂丽, 苏香玲, 冉亚军, 郑旭. 阿克苏地区荒漠化变化趋势及其驱动因素. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 278-285.
- [3] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, Ravi S, Runyan C W. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 326-344.
- [4] 潘昌祥, 欧阳茜如, 廖梦榆, 范裕, 郭群, 张志山, 吴戈男, 赵洋, 刘立超, 潘颜霞, 李新荣, 屈建军, 穆松林, 李胜功. 西北干旱区沙漠化土地生态修复技术及沙产业的适用范围. *中国沙漠*, 2023, 43(5): 155-165.

- [ 5 ] 解李娜, 吴祺琪, 王宇萌, 张明伟, 何鹏, 马成仓. 锦鸡儿属灌木阻止干旱草地沙漠化生态过程. 生态学报, 2024, 44(4): 1680-1691.
- [ 6 ] Melton F A. A tentative classification of sand dunes its application to dune history in the southern high Plains. The Journal of Geology, 1940, 48(2): 113-174.
- [ 7 ] 刘俊壕, 周海盛, 郭群. 中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响. 中国沙漠, 2023, 43(5): 204-213.
- [ 8 ] 闫德仁. 浑善达克沙地风蚀坑形态特征及其影响因素. 地理科学, 2016, 36(4): 637-642.
- [ 9 ] 张德平, 冯宗伟, 王效科, 孙宏伟, 赵家明, 胡日乐. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑的初步研究. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1341-1345.
- [ 10 ] 庄燕美. 沙质草原风蚀坑形态及其土壤与植被变化[D]. 北京: 北京师范大学, 2006.
- [ 11 ] 蔡东旭, 李生宇, 刘耀中, 俞祥祥, 王海峰, 雷加强, 武新成, 彭琴, 屈磊. 台特玛湖干涸湖盆区植物风影沙丘的形态特征. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1020-1028.
- [ 12 ] Liu B L, Qu J J, Zhang W M, Qian G Q. Numerical simulation of wind flow over transverse and pyramid dunes. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(8): 879-888.
- [ 13 ] Luo W Y, Wang Z Y, Lu J F, Yang L H, Qian G Q, Dong Z B, Bateman M D. Mega-blowouts in Qinghai-Tibet Plateau: Morphology, distribution and initiation. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(2): 449-458.
- [ 14 ] 张德平, 孙宏伟, 王效科, 冯宗伟. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究( II ): 发育过程. 中国沙漠, 2007, 27(1): 20-24, 170-171.
- [ 15 ] 胡日娜, 哈斯额尔敦, 浩毕斯哈拉图, 周炎广, 李红悦. 浑善达克沙地东南缘固定沙丘风蚀坑动态变化. 中国沙漠, 2019, 39(1): 34-43.
- [ 16 ] 胡尔查, 王晓江, 张文军, 刘永宏, 海龙, 张雷, 苏楞高娃. 基于 ALOS 数据的浑善达克沙质草地风蚀坑空间格局及特征分析. 中国沙漠, 2013, 33(3): 662-667.
- [ 17 ] 吴昕. 内蒙古锡林郭勒草原沙质荒漠化的沙源及其地质学成因分析——以吉尔嘎郎图凹陷小草原为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [ 18 ] 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 袁立敏. 固定沙丘风蚀坑不同部位风速特征. 内蒙古林业科技, 2017, 43(3): 10-13.
- [ 19 ] 刘敏, 厉悦, 杨晓杰, 郭彦萃, 王蕾. 近 54a 扎龙自然保护区景观斑块面积变化特征. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 313-317.
- [ 20 ] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. 生态学报, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [ 21 ] 郭兴月, 王添, 程圣东, 李占斌, 张皎, 李鹏. 基于分形理论的土地利用时空格局变化——以嘉陵江流域为例. 中国水土保持科学: 中英文, 2023, 21(5): 9-18.
- [ 22 ] 张惜伟. 典型沙质草原风蚀坑演化过程与发育机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [ 23 ] Hesp P A, Walker I J. Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. Aeolian Research, 2012, 3(4): 389-399.
- [ 24 ] Hesp P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. Geomorphology, 2002, 48(1/2/3): 245-268.
- [ 25 ] 王晓栋, 黄国安, 敖艳红, 张文军, 杨胜利. 呼伦贝尔草甸草原区沙化草地治理效果研究. 内蒙古草业, 2012, 24(2): 16-18.
- [ 26 ] Ewing R C, Kocurek G. Aeolian dune-field pattern boundary conditions. Geomorphology, 2010, 114(3): 175-187.
- [ 27 ] 李双权, 哈斯, 王玉凤, 社会石, 杨一. 沙质草地风蚀坑动态演变特征. 干旱区研究, 2014, 31(5): 955-960.
- [ 28 ] 阎旭, 张德平, 夏显东, 哈斯. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑形态发育模式分析. 中国沙漠, 2009, 29(2): 212-218.
- [ 29 ] 王帅, 哈斯. 呼伦贝尔沙质草原区域风况与风蚀坑形态特征. 水土保持研究, 2008, 15(3): 74-76, 80.
- [ 30 ] 张德平, 王效科, 孙宏伟, 冯宗伟. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究( IV ): 人类活动的影响. 中国沙漠, 2007, 27(2): 214-220.