

基于遥感影像的新月形沙丘动态监测

王嵩松

(太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619)

摘要:浑善达克沙地地处内蒙古锡林郭勒草原南端,是中国东部沙漠/沙地的重要组成部分。利用遥感影像对沙地内新月形沙丘进行动态监测,结合风况数据,对沙丘移动特征及形态变化进行分析。结果表明:2011—2020 年研究区新月形沙丘移动速率范围为 1.22~6.63 m/a,均值为 4.23 m/a;沙丘移动方向范围为 93°~122°,平均移动方向为 105°。风况为沙丘移动提供动力条件,沙丘移动方向与起沙风主导风向存在很好的一致性。地表粗糙度的变化造成了沙丘移动速率的差异,沙丘形态对移动速率的影响弱。沙丘形态演化具有复杂性,双风向引起的沙丘不对称,沙源供应状况以及植被覆盖对沙丘形态的改变是造成这种复杂性的主要原因。

关键词:新月形沙丘;沙丘移动;形态变化;浑善达克沙地

中图分类号:K903 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0187-05

新月形沙丘是形态最为简单和分布最为广泛的风沙地貌类型。沙丘形态不仅仅是新月形沙丘尺度的直观表现,而且反映了其演化过程^[1],是风沙地貌学研究的重要内容,对此相关学者做了大量研究工作。新月形沙丘高度和宽度呈正比例关系,比例约为 1:15^[2],也有研究得出比例关系为 1:10^[3],或 1:9^[4],总体介于 8~18,存在空间差异^[5]。Long 等^[6]根据新月形沙丘迎风坡长度和宽度的比值,将沙丘分为“胖的”(≥1)、“矮胖的”(0.75)、“正常的”(0.5)、“苗条的”(0.25)。Bourke^[7]按照两翼形态将沙丘两翼分为线性、扭结和串珠型。独立新月形沙丘在全球的分布很不均衡,Goudie^[8]将全球新月形沙丘分为 11 个区域,并分别阐释每个区域新月形沙丘的分布状况及形态特征。此外,沙丘移动尺度适中便于研究,其移动方向可以表示沉积物的输移方向,移动速率可以指示沙物质的输移量^[9],反映了沙丘的活化程度,可作为参考指标来指导防风固沙工程^[10],且长远来看对人类的危害最大,因此经常作为沙漠化问题的研究对象^[11]。

浑善达克沙地位于中国农业区和草原区的过渡地带,是距离北京最近的沙地,也是中国北方地区沙尘天气的主要源头之一。对浑善达克沙地的研究集中于沙地水文过程^[12-13]、水体化学组分^[14-15]、植被变化和其气候响应^[16-19],以及土地沙漠化过程^[20]。Google Earth 在当前风沙地貌研究

中获得广泛应用^[21-26],可对目标进行大范围、长时间、持续性观测,但因在部分区域缺乏一定时间段内的高精度空间分辨率影像,仍具有一定局限性。鉴于此,本文使用 Esri World Image 对浑善达克沙地内新月形沙丘卫星图像进行提取,结合同期气象数据,分析沙地内新月形沙丘的形态变化及移动速率,为丰富风沙地貌内容研究,提高沙丘形成与演化认识,指导区域可持续发展提供参考。

1 数据来源与处理方法

1.1 数据来源

1.1.1 遥感数据

在 Esri World Image 中获取遥感数据,具体操作方法为:在 ArcGIS 中添加基于 World Imagery Wayback 功能,随后即可在 Arcmap 中加载 Esri World Image 提供的 Spot 影像,地物清晰可见。同时 World Imagery Wayback 提供历史影像对比功能,可对新月形沙丘进行动态监测。选定范围为 42°57'50"N~42°59'27"N,114°19'12"E~114°22'9"E 区域内的新月形沙丘进行动态监测[图 1(b)],共有 21 座新月形沙丘,影像记录时间一致,为 2011 年 6 月至 2020 年 10 月。

1.1.2 风况数据

浑善达克沙地内未架设国家气象站,且本文选取的新月形沙丘均位于沙地西部,因此采用二连浩特和化德这两个国家气象站的数据[图 1(a)],

收稿日期:2023-01-13

基金项目:太原师范学院研究生教育创新项目(SYYJSYC-2113)。

作者简介:王嵩松(1996—),男,山西晋城人,太原师范学院地理科学学院,硕士研究生,研究方向为干旱区环境演变。

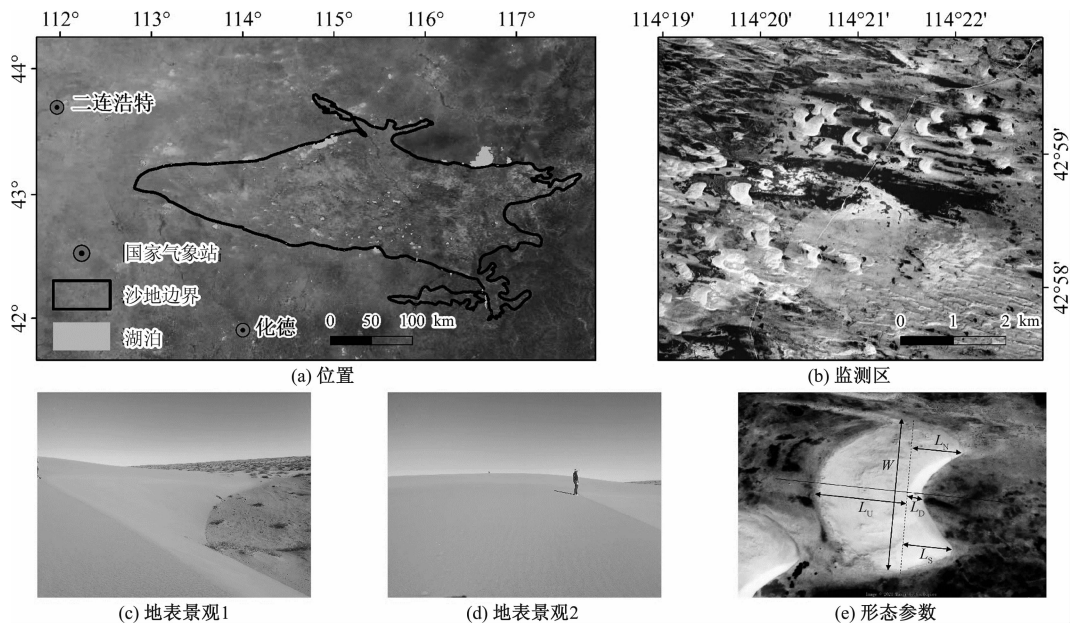


图 1 浑善达克沙地位置及地表景观、新月形沙丘动态监测区和新月形沙丘形态参数示意图

数据来源为 NCDC (National Climatic Data Center, 美国国家气候数据中心), 数据记录时间为 2011—2020 年, 时间精度为 3 h, 选取风向及风速数据。

1.2 数据处理

1.2.1 沙丘形态参数定义

参照任孝宗等^[2]的方法定义沙丘形态, 如图 1(e)所示, 包括高度(H)、宽度(W)、底面积(S)、迎风坡长度(L_U)、背风坡长度(L_D)、南翼长度(L_S)及北翼长度(L_N)。其中, 根据盛行风向将沙丘两翼分别定义为南翼和北翼, 沙丘底面积为沙丘基底包围区域, 沙丘高度不能直接测量, 由背风坡长度换算而来:

$$H = L_D \tan \theta \tag{1}$$

式中: θ 为背风坡坡度, 即沙源的最大休止角, $28^{\circ} \sim 34^{\circ}$, 取 30° 。

1.2.2 沙丘移动判定

在进行沙丘移动测量前, 选择影像中不随时间变化而改变的点作为参照点, 如灌丛、树木等, 对遥感影像进行配准, 并基于两期影像对参照点进行精度检验。检验结果表明, 所选取参照点两期影像内坐标一致, 避免了因影像错位而产生的测量误差, 确保了测量结果的准确性。

沙丘移动的判定使用五点平均法^[27], 即利用沙丘上 5 个特征点的移动距离及移动方向来表征沙丘移动。5 个特征点分别为迎风坡前端、沙丘顶点、背风坡底、南翼翼角和北翼翼角(图 2)。沙丘的移动

速率定义为

$$V = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5)/5t \tag{2}$$

式中: d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 分别为各特征点的移动距离; t 为两期影像的时间间隔。

沙丘的移动方向定义为

$$\theta = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)/5 \tag{3}$$

式中: θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 分别为各特征点的移动方向(正北为 0° , 顺时针方向)。

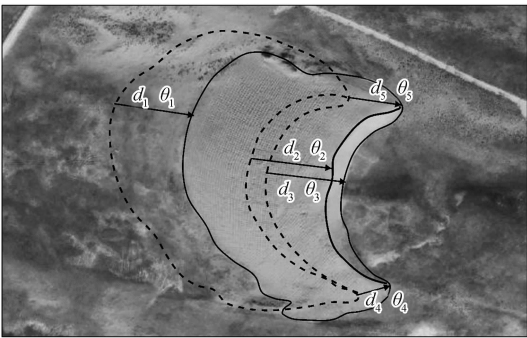


图 2 沙丘移动判定

1.2.3 风速转换

根据近地表层内风速的对数型分布规律, 将气象站点的风速转换为 10 m 高度的风速, 风向不作修订。风速转换公式为

$$V_n = V_1 \frac{\ln Z_n - \ln Z_0}{\ln Z_1 - \ln Z_0} \tag{4}$$

式中: V_n 为在 Z_n 高度的风速, m/s; V_1 为在已知高度 Z_1 高度的风速, m/s; Z_0 为地面粗糙度, m, 空旷平坦地面取 0.03。临界起沙风速率定义为 6 m/s(10 m

高度)。对式(4)中转化的风速进行分类,剔除异常数据后挑选出 $\geq 6\text{ m/s}$ 的风速,统计起沙风速在16个方位的分布频率,绘制起沙风玫瑰图。

2 结果

2.1 沙丘移动

2011—2020 年研究区新月形沙丘移动速率为 $1.22\sim 6.63\text{ m/a}$,均值为 4.23 m/a (表 1、图 3)。按照朱震达等^[28]对沙丘移动速率的分类,中等速度沙丘占优势,为 15 座,而剩余 6 座为快速移动类型。新月形沙丘不同部位表现出较为明显的移速差异,快慢关系为沙丘顶点 (5.21 m/a) > 背风坡底 (4.95 m/a) > 迎风坡前端 (3.69 m/a) > 北翼 (3.79 m/a) > 南翼 (3.52 m/a)。新月形沙丘移动方向范围为 $93^\circ\sim 122^\circ$,平均移动方向为 105° 。

表 1 新月形沙丘移动

项目	移动速率/($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)		移动方向/($^\circ$)	
	范围	均值	范围	均值
迎风坡底	0.51~9.99	3.69	92~109	99
沙丘顶点	1.80~7.14	5.21	81~134	113
背风坡底	1.58~8.67	4.95	82~133	110
沙丘南翼	0.07~8.59	3.52	87~143	102
沙丘北翼	0.87~6.98	3.79	82~143	102
沙丘整体	1.22~6.63	4.23	93~122	105

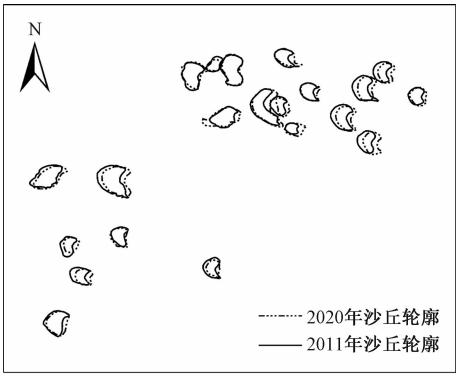


图 3 2011 年、2020 年沙丘移动示意图

2.2 沙丘形态变化

研究区新月形沙丘经历移动后,形态变化较为复杂。沙丘迎风坡和底面积呈增长趋势,迎风坡长度均值由 136.33 m 增长为 158.35 m ,底面积均值由 $30\,887\text{ m}^2$ 增长为 $33\,016\text{ m}^2$,而沙丘高度、宽度、背风坡及两翼均有不同程度的缩减,具体表现为高度由 9.31 m 降低为 7.49 m ,宽度均值由 233.71 m 缩窄为 210.31 m ,背风坡长度均值由 16.12 m 缩减为 12.97 m ,南翼长度均值由 71.45 m 缩减为 53.02 m ,北翼长度均值由 51.77 m 缩减为 32.87 m (表 2)。

表 2 2011 年、2020 年新月形沙丘形态参数变化

沙丘形态参数	2011 年		2020 年	
	范围	均值	范围	均值
H/m	3.44~18.32	9.31	2.37~16.49	7.49
W/m	122.25~368.19	223.71	131.62~343.97	210.31
L_U/m	82.23~205.95	136.33	98.57~218.20	158.35
L_S/m	19.59~212.03	71.45	9.78~201.81	53.02
L_N/m	19.68~94.43	51.77	9.31~62.64	32.87
L_D/m	5.97~31.73	16.12	4.11~28.57	12.97
S/m^2	10\,794~67\,562	30\,887	13\,461~63\,685	33\,016

2011 年,研究区新月形沙丘 a/c 均值为 0.68 ,其中“苗条的”沙丘 4 座,“正常的”沙丘 14 座,“矮胖的”沙丘 2 座,“胖的”沙丘 1 座,“正常的”沙丘占优势。经历移动后,2020 年 a/c 均值为 0.79 ,“正常的”沙丘 9 座,“矮胖的”沙丘 10 座,“胖的”沙丘 2 座,没有“苗条的”沙丘类型,沙丘明显变“胖”了,沙丘形态由新月形向饼状演化,出现逆向发展。

3 讨论

3.1 沙丘移动的影响因素

Livingstone 等^[29]将新月形沙丘的移动定义为沙粒从迎风坡越过脊线移动到背风坡并进行形态重塑的过程,风况在此过程中起重要作用,但并非所有的风都参与沙粒移动和形态塑造,只有大于临界起沙风速的风才是有效的。已知沙丘移动速率与输沙率成正比,而输沙率与起沙风的立方成正比,因此沙丘移动速率应与起沙风的立方即输沙势成正比,也就是说起沙风速越快,沙丘移动速率也就越快。对研究区 2011—2020 年起沙风进行统计发现,起沙风集中于 WNW、NW、W 和 SW 4 个方向(图 4),WNW 风向最强,占多年起沙风的 20.50% ,NW、W 和 SW 稍弱,分别占比为 13.20% 、 12.99% 和 11.09% ,其他风向起沙风不明显。在 WNW 主导风向影响下,沙丘移动方向与之平行,为 ESE 向,同时 NW 方向较强的风向促使沙源物质在沙丘北翼集聚致使北翼移动速率加快,明显快于南翼。

沙丘本身的形态学特征是影响沙丘移动速率的因素之一,可通过不同规模沙丘的沙源供应来可解释沙丘的移动速率差异:在沙源供给恒定的条件下,规模越大的沙丘需要更多的沙源来进行形态的调整,用于供给沙丘移动的沙源减少,移动速率也就越慢。不同于以往研究结果^[30],研究区主要沙丘形态参数(高度、宽度、底面积及迎风坡长度)与移动速率之间均不具备显著的相关性(表 3)。这说明研究区内影响新月形沙丘移动的因素较为复杂,而

沙丘的形态特征对沙丘移动所产生的作用很弱,几乎忽略不计。

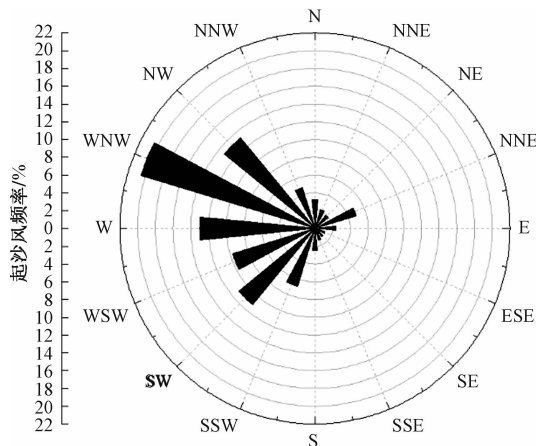


图 4 研究区起沙风玫瑰图

表 3 沙丘形态与移动速率相关性

项目	相关方程	相关系数 R^2
H 与 V	$H = -0.551V + 10.730$	0.053
S 与 V	$S = 1\,950.793V + 23\,696.684$	0.049
L_U 与 V	$L_U = 5.671V + 123.340$	0.089
W 与 V	$W = -2.509V + 227.622$	0.004

植被覆盖可截留部分沙源物质,甚至可以完全中止沙丘移动过程^[31],在抑制沙漠化发展的过程中起重要作用^[32]。研究区内新月形沙丘多处于潮湿的丘间地,地势较低的迎风坡前端及两翼易受植被影响,地表粗糙度增加起沙风速也随之加大,致使沙粒不易移动;沙丘顶部地势高,鲜有植被生长,更容易收到风力吹蚀。对新月形沙丘不同部位移动速率对比发现,沙丘迎风坡前端移动速率为 3.69 m/a,小于沙丘顶点的移动速率 5.21 m/a。沙粒在越过脊线后向背风坡及两翼分流,背风坡移动速率(4.95 m/a)亦小于沙丘顶部。

3.2 沙丘形态变化的影响因素

新月形沙丘通常分布于沙源供应不足,且无植被覆盖的单一风向地区^[33]。在经历移动后,研究区沙丘不对称现象更为凸显。Tsao^[34]建立了新月形沙丘不对称形态的模型,新月形沙丘的走向平行于区域的主风向,但会被另一个柔和的次风向修正,次风向下风向的一翼被拉长,以类似于纵向沙丘的发展方式延伸,较短的一翼被侵蚀。研究区起沙风主风向为 WNW,与沙丘走向基本一致,而 NW 作为柔和的次风向使沙丘北翼受到侵蚀,沙物质向南翼输移并沿下风向不断延长,造成沙丘不对称现象,尽管受制于其他因素,沙丘两翼均呈缩减趋势,

但沙丘南翼缩减程度(18.42 m)仍小于北翼(18.90 m)。这种现象在地球其他沙区和火星均有分布,了解其形成机制及内在机理对沙丘间形态演化以及沙丘间相互关系具有重要意义^[7]。

沙源供应状况是影响沙丘形态的另一个关键因素,当沙源供应充足时,独立新月形沙丘可与相邻沙丘合并发育成为新月形沙丘链,沙源供应条件的不同致使沙丘演化成为不同的形态。丘间地被覆盖可在沙丘移动过程中截留沙源,沙丘体积在此过程中亦有明显缩减^[35]。植被对沙丘移动起阻碍作用,在降低沙丘高度的同时,也显著改变沙丘形态。研究区新月形沙丘迎风坡前端及两翼地势较低,水分植被条件好,在沙丘移动过程中相对固定,而地势较高的丘顶不断前进,迎风坡在此过程中拉长,沙丘面积也随之增大。而沙源供应的减少致使宽度缩窄,沙丘形态也因此变“胖”。

4 结论

2011—2020 年研究区新月形沙丘移动速率范围为 1.22~6.63 m/a,均值为 4.23 m/a;沙丘移动方向范围为 93°~122°,平均移动方向为 105°,与沙地周边气象站点起沙风主导风向基本一致。风况和地表粗糙度的变化造成了沙丘移动的差异,而沙丘形态对移动速率的影响弱。沙丘形态变化具有复杂性,双向风引起的沙丘不对称,沙源供应程度及丘间地植被覆盖对沙丘形态的改变,是造成这种复杂性的主要原因。沙丘移动及形态演化是在多种因素影响下的复杂过程,各种因素相互作用相互制约造就了丰富的风沙地貌类型与空间差异。

参考文献

[1] 钱广强,杨转玲,董治宝,等. 基于多旋翼无人机倾斜摄影测量的沙丘三维形态研究[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 18-25.

[2] 任孝宗,刘陶,王振亭. 河西沙区新月形沙丘形态参数观测[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 163-166.

[3] HESP P A, HASTINGS K. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 193-204.

[4] ANDREOTTI B, CLAUDIN P, DOUADY S. Selection of dune shapes and velocities Part 1: dynamics of sand, wind and barchans [J]. The European Physical Journal B-condensed Matter and Complex Systems, 2002, 28(3): 321-339.

[5] SWEET M L, KOCUREK G. An empirical model of aeolian dune lee-face airflow [J]. Sedimentology, 1990, 37(6): 1023-1038.

[6] LONG J T, SHARP R P. Barchan-dune movement in im-

- perial valley, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1964, 75(2):149-156.
- [7] BOURKE M C. Barchan dune asymmetry: observations from Mars and Earth[J]. Icarus, 2010, 205(1):183-197.
- [8] GOUDIE A S. Global barchans: a distributional analysis [J]. Aeolian Research, 2020, 44:100591.
- [9] HUNTER R E, RICHMOND B M, RHO ALPHA T A U. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon coast [J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(12): 1450-1465.
- [10] 杨岩岩, 刘连友, 屈志强, 等. 新月形沙丘研究进展[J]. 地理科学, 2014, 34(1):76-83.
- [11] 黄鹏展, 阿布都热西提·阿布都外力, 赵建平. 沙丘移动的研究现状与未来研究思路[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(1):1-5.
- [12] 特日格勒, 冯伟, 杨文斌, 等. 浑善达克沙地土壤水分深层渗漏的动态特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 77-82.
- [13] 梁海荣, 王涛, 杨宇, 等. 毛乌素沙地与浑善达克沙地水分深层渗漏特征对比[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2):69-76.
- [14] 任孝宗, 刘陶, 王振亭. 河西沙区新月形沙丘形态参数观测[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1):163-166.
- [15] 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 浑善达克沙地南缘黄柳林地不同水体氢氧同位素特征[J]. 地球与环境, 2022, 50(5):630-638.
- [16] 韩瑞. 浑善达克沙地全新世气候变化研究[D]. 太原:山西大学, 2020.
- [17] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6):65-77.
- [18] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落主要类型与特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4):23-33.
- [19] 马永桃, 任孝宗, 胡慧芳, 等. 基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 195-204.
- [20] 赵媛媛, 武海岩, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5):101-111.
- [21] DOUADY S. Equilibrium versus disequilibrium of barchan dunes[J]. Geomorphology, 2011, 125(4):558-568.
- [22] 王静璞, 刘连友, 沈玲玲. 基于 Google Earth 的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6):1094-1100.
- [23] 杨军怀, 董治宝, 刘铮瑶, 等. 库鲁克沙漠风沙地貌与沙丘移动[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4):1-8.
- [24] 徐贵江, 董治宝, 王中原. 柴达木盆地新月形沙丘和线性沙丘共生现象[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3):407-413.
- [25] 王萌, 郜学敏, 屈欣, 等. 柴达木盆地西南缘山前沙丘区沙丘地貌形态特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5):166-174.
- [26] 石学刚, 刘世增, 常兆丰. 新月形沙丘的移动规律及其影响因素:以甘肃河西沙区为例[J]. 世界生态学, 2017, 6(2):93-102.
- [27] 杨军怀. 塔克拉玛干沙漠沙丘移动研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2019.
- [28] 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研究[J]. 地理学报, 1964(1):35-50.
- [29] LIVINGSTONE I, WARREN A. Aeolian Geomorphology: a new introduction [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.
- [30] 张云枫, 马义娟, 苏志珠, 等. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠连接带沙丘移动规律[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5):82-91.
- [31] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论(修订版)[M]. 北京:科学出版社, 1980.
- [32] 王涛. 中国北方沙漠化过程及防治研究进展[J]. 科技和产业, 2002, 22(2):52-56.
- [33] WASSON R J, HYDE R. Factors determining desert dune type[J]. Nature, 1983, 304:337-339.
- [34] TSOAR H. The formation of seif dunes from barchans-a discussion[J]. Zeitschrift fur Geomorphologie, 1984, 28(1):99-103.
- [35] 许明静, 吕萍, 肖南, 等. 毛乌素沙地西北部植被覆盖对沙丘移动的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4):71-80.

Dynamic Monitoring of Barchan Dunes Based on Remote Sensing Image

WANG Songsong

(School of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Located at southern end of the Xilin Gol Grassland in Inner Mongolia, Hunshandake Sandy Land is an important part of the desert/sandy land in eastern China. Using satellite images to dynamically monitor the barchan dunes, combined with wind data, the movement law and evolution process of the dunes were analyzed. The results showed that the migration rate of barchan dunes in research area ranged from 1.22 to 6.63 m/a from 2011 to 2020, with an average value of 4.23 m/a. The moving direction range was $93^{\circ}\sim 122^{\circ}$, average moving direction was 105° . Wind conditions provided dynamic conditions for the movement of dunes, and moving direction of the dunes was basically consistent with dominate wind direction. Changes in surface roughness caused differences in the migration rate of dunes, and influence of dune morphology on migration rate was weak. Dune morphological evolution was complex. The asymmetry of dune morphology caused by double wind directions, the supply of sand sources and the change of dune morphology by vegetation cover were main reasons for this complexity.

Keywords: barchan dune; dune movement; morphological evolution; Hunshandake Sandy Land