

Landsat 5 TM 沙丘迁移场的误差消除与时序反演： 以毛乌素沙地西北部沙丘为例

杨定江¹, 冯光财¹, 冯志雄¹, 李国帅^{2,3}, 张洁⁴

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院 雷达遥感实验室, 长沙 410083;

2. 中国科学院青藏高原研究所 环境变化与地表过程重点实验室&国家青藏高原科学数据中心, 北京 100101;

3. 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统科学国家重点实验室, 北京 100101;

4. 青海省基础测绘院, 西宁 810001

摘要: 通过 COSI-Corr 软件处理 Landsat 5 TM 可以较好地量化沙丘的迁移模式和速度大小, 为防沙治沙工程的实施提供具体的指导和建议。目前关于 Landsat 5 TM 迁移场误差源分析和时序反演研究仍然较少。本文以毛乌素沙地西北部为研究区域获取了 1991 年—2000 年的沙丘迁移时间序列和年平均速度场, 发现 Landsat 5 TM 迁移场的主要误差为轨道误差、姿态角误差和失相关噪声, 这些误差消除后, 精度相继提升 23%—34%、4%—20%、2%—5%, 再利用最小二乘法反演后可提升 13%—14%。监测结果表明, 1991 年—2000 年毛乌素沙地西北部沙丘向东南方向持续推进, 最大速度可超过 6 m/a, 但受到西北—东南向的风力作用下, 沿西北—东南向存在周期性往返运动; 研究区域速度为 0—1 m/a 的占 63.9%, 大于 3 m/a 的则只有 4.2%。Landsat 5 TM 的误差消除和时序反演能有效地提高迁移场精度, 进而获取更加准确可靠的时间序列。与以往研究不同的是, 沙丘迁移场的误差消除和时序反演后可以更细致地反映出沙丘地表的实际风能环境。

关键词: Landsat 5 TM, COSI-Corr, 误差分析, 沙丘迁移, 毛乌素沙地

中图分类号: P237/P2

引用格式: 杨定江, 冯光财, 冯志雄, 李国帅, 张洁. 2023. Landsat 5 TM 沙丘迁移场的误差消除与时序反演: 以毛乌素沙地西北部沙丘为例. 遥感学报, 27(11): 2552–2564

Yang D J, Feng G C, Feng Z X, Li G S and Zhang J. 2023. Error elimination and time sequence inversion of Landsat 5 TM dune migration field: Taking sand dunes in northwestern of Mu Us Sandy as example. National Remote Sensing Bulletin, 27(11): 2552–2564 [DOI: 10.11834/jrs.20211085]

1 引言

沙丘迁移是在风力作用下, 迎风坡的沙粒不断被吹蚀, 背风坡不断堆积的方式来实现的 (Ding 等, 2020b; Wang 等, 2008)。沙丘迁移使得沙漠向外扩张, 可能会导致掩埋耕地、污染水源、形成沙尘暴甚至破坏基础设施等社会经济与生态环境问题 (Bruno 等, 2018)。量化沙丘的迁移模式以有效地服务于防沙治沙工程是非常必要的。从技术发展上看, 量化沙丘迁移的手段基本上可以分为 4 类: (1) 使用传统仪器进行野外调查监测 (Dong 等,

2000; Ould Ahmedou 等, 2007); (2) 通过数字摄影测量和 InSAR 等技术获取时序 DEM 变化 (Brown 和 Arbogast, 1999; Hugenholtz 和 Barchyn, 2010; Dabboor 等, 2013; 郭华东, 1986; 金亚秋, 1997); (3) 使用 ArcGIS 等软件对高分辨率的影像进行目视解译获取沙丘的脊线移动和范围变化 (Tsoar 和 Blumberg, 2002; Yao 等, 2007); (4) 通过光学影像匹配技术获取主从影像之间的沙丘迁移场 (Bridges 等, 2012; 邵梅 等, 2020)。由于传统的调查监测费时费力、时序 DEM 对数据质量要求高、目视解译矢量化内业繁重, 而光学影像匹配技术有着精

收稿日期: 2021-02-20; 预印本: 2021-10-07

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (编号: 41901377); 中南大学研究生自主探索创新项目 (编号: 2021zzts0839); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者简介: 杨定江, 研究方向为光学影像匹配与沙丘迁移监测。E-mail: 1552128516@qq.com

通信作者简介: 冯光财, 研究方向为影像大地测量与地球物理参数反演。E-mail: fredgps@csu.edu.cn

度高、自动化、大范围等特点已成为沙丘迁移的时序监测的优先选择 (Ding 等, 2020a; Ali 等, 2020)。

COSI-Corr (Co-Registration of Optically Sensed Images and Correlation) 是常用的一款光学影像匹配与互相关计算软件包 (Leprince 等, 2007a, 2007b)。2008 年, 首次应用到非洲乍得 Bodélé 沙丘的监测后 (Vermeesch 和 Drake, 2008), 就广泛地应用于地球 (Ding 等, 2020a, 2020b; 邵梅 等, 2020; Ali 等, 2020) 和火星 (Bridges 等, 2012, 2017; Ayoub 等, 2014; Silvestro 等, 2016) 的沙丘活动监测。Necsoiu 等 (2009) 以亚北极大科伯克沙丘 (Great Kobuk Sand Dunes) 为例, 测试出 ASTER 与 SPOT 波段匹配的最佳线性组合。Bridges 等 (2012) 利用 COSI-Corr 处理高分辨率的 HiRISE 影像, 获取了火星的沙丘迁移场, 结果表明火星沙丘的移动规律与地球沙丘相似, 但风成活动不如地球剧烈, 沙丘移动也比较缓慢, 这和火星的大气稀薄有关。Ding 等 (2016, 2020a, 2020b, 2021) 对 Landsat 8 与 Sentinel-2 迁移场误差进行分析和讨论后, 提出了“短时空基线和辐射基线”构网的时序反演方法来提升精度, 并对敦煌和民勤等地进行了监测和风沙灾害评估。Landsat 5 TM 数据集有着覆盖范围广、存档时间长、质量稳定、可免费获取等特点, 且 L1TP 级数据可满足 COSI-Corr 软件自动化处理要求 (Baird 等, 2019), 有利于进行沙丘的长时间序列的定量监测, 但目前关于 Landsat 5 TM 获取沙丘迁移场的误差源分析和时序反演研究仍然较少。

这里, 本文获取了 1991 年—2000 年覆盖毛乌素沙地西北部的 37 景 Landsat 5 TM 影像。首先, 我们对影像进行了时空构网并设计实验探讨了 Landsat 5 TM 迁移场中存在的误差类型和可能的产生原因。然后, 根据误差分布特点, 叙述了常用的相应误差消除方法和时序反演方法, 并对改正前后的结果进行精度评估。最后, 通过矢量场和时间序列分析了毛乌素沙地西北部沙丘迁移场的时空特征, 并与以往的研究做比较, 展望了光学影像匹配技术在沙丘迁移监测中的应用前景。

2 研究区域与实验设计

2.1 研究区域与 Landsat 5 数据介绍

毛乌素沙地位处中国的鄂尔多斯高原与黄土

高原过渡区, 范围约在 $37^{\circ}27.5'N$ — $39^{\circ}22.5'N$ 和 $107^{\circ}20'E$ — $110^{\circ}30'E$ 之间, 面积约 42200 km^2 。如图 1 所示, 毛乌素沙地高程从西北 (1400 — 1500 m) 至东南 (950 — 1100 m) 逐渐降低, 个别区域高程达 1600 m 。年均气温为 6.0°C — 8.5°C ; 年降雨在 250 — 440 mm 之间, 自东南至西北递减, 主要集中在 7 — 9 月。冬春季节盛行西北风, 夏秋季节盛行东南风 (庞营军 等, 2019), 年均风速 3 m/s 。起沙风集中在冬末春季, 其中西北方向的起沙风占 54.5% , 频率最高为 3 月份; 东南方向的起沙风占 28.9% , 频率最高为 5 月 (哈斯 等, 2006)。从沉积物来看, 毛乌素沙地早在第四纪时期就已存在, 几经变迁、扩张、固定和缩小才发育成现在的样子, 其变迁演化和鄂尔多斯高原古地理环境的变化息息相关, 而从人类时期又开始受到人为活动的剧烈影响 (董光荣 等, 1983)。由于人为活动频繁, 加上生态环境脆弱, 20 世纪以来该地沙漠化十分严重, 风沙灾害频发, 给周边居民造成了极大的生命威胁和财产损失。为此, 它被列为 1978 年中国“三北防护林计划”的重点治理区域之一, 经过几十年的治理保护, 近年来我们终于见证了“人进沙退”的治理过程。目前作为中国第一个将要成功治理的沙漠, 量化其沙丘迁移的时空规律, 对于其他沙漠的治理工作有着重要的参考价值和指导意义。

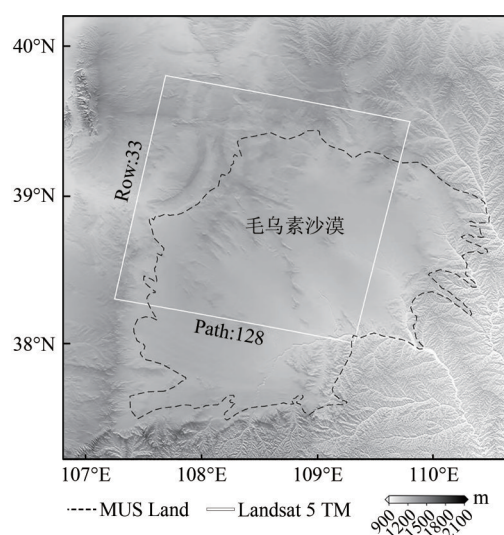


图1 毛乌素沙地的地理空间分布

Fig. 1 Geographical and spatial distribution of Mu Us Sandy Land

Landsat 5 卫星是美国航空航天局 1984-03-01 发射的 Landsat 系列卫星之一, 卫星轨道高度为

705 km, 倾斜角度为 98.2° , 重复周期为16 d。它配有 Multispectral Scanner (MSS) 传感器和 Thematic Mapper (TM) 传感器。MSS 传感器有四个光谱波段, 地面采样间隔 $57\times 79\text{ m}$; TM 传感器有7个光谱波段, 波段中心分别为: $0.485\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.56\text{ }\mu\text{m}$ 、

$0.66\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.83\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.60\text{ }\mu\text{m}$ 、 $11.45\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.215\text{ }\mu\text{m}$; 反射波段1—5、7的空间分辨率为30 m, 热波段6的为120 m。研究区域的 Landsat 5 基本信息如表1所示, 共获取了1991年—2000年的37景 Landsat 5 TM Band 3 影像。

表1 研究区域 Landsat 5 TM 的基本信息
Table 1 Basic information of Landsat 5 TM in the study area

卫星	基本参数		获取时间
Landsat 5	Path	128	1991-04-01, 1991-07-06, 1991-08-23, 1991-11-11, 1992-02-15,
	Row	33	1992-03-18, 1992-05-21, 1992-08-25, 1992-09-26, 1992-11-29,
	倾角/ $^{\circ}$	98.2	1993-09-29, 1993-10-15, 1993-12-18, 1994-01-03, 1994-03-24,
	轨道高度/km	705	1994-05-27, 1994-10-02, 1994-12-05, 1995-03-11, 1995-12-24,
	重访周期/d	16	1996-02-10, 1996-02-26, 1996-09-21, 1996-10-23, 1996-11-24,
	Band 3 分辨率/m	30×30	1997-02-28, 1997-04-17, 1997-05-03, 1997-08-23, 1997-10-10,
	覆盖范围/km	184×185.2	1997-10-26, 1998-09-27, 1998-11-14, 1998-11-30, 1999-07-28,
	产品等级	L1TP	1999-11-17, 2000-05-27

2.2 影像时空构网

获取沙丘的时序迁移首先需要进行影像配对。最为简单的配对策略是相邻时间影像的两两配对, 能以最少观测数构建适用于沙丘监测的时间序列。但该方法由于没有多余观测, 因此受异常值影响较大。假设有 $N+1$ 景影像, 时间顺序为 $[t_0, t_1, \cdots, t_N]$, 则主从影像之间的配对数最大为 $N(N+1)/2$, 若全部使用这些可能的影像对组合, 对误差处理和时序反演来说是一个巨大的挑战, 不排除粗差值和异常值对结果精度可能会有较大的影响。为提高时序反演精度, 我们提出了一种新的影像时空构网策略, 以此平衡时序反演精度和计算效率。

光学影像匹配技术是通过检索主从影像间的纹理差异来获取地表的水平迁移场, 而 Landsat 5 主从影像之间的太阳高度角差值 SED (Sun Elevation Difference)、太阳方位角差值 SAD (Sun Azimuth Difference)、时间基线 TB (Temporal Baseline) 等变量会影响配准后的迁移场精度 (Ding 等, 2020a, 2020b; Ali 等, 2020), 所以, 为了削弱系统误差的大小和提高时序反演精度, 需要对主从影像的这3个变量进行约束, 获取一个稳健的主从影像构网。本文提出的构网策略如下:

- (1) 假设有 $N+1$ 景影像, 将其按时间顺序排列为 $[t_0, t_1, \cdots, t_N]$; 影像序号为 $i(i=0, 1, \cdots, N)$;
- (2) 对于第 i 景影像, 和后面所有影像配对,

- 计算影像对的 TB、SED 和 SAD;
 - (3) 设置影像对 TB 为32—832天、SED 小于 15° 、SAD 小于 15° , 搜索所有的满足条件的影像对;
 - (4) 在步骤(3)获得的所有满足条件的影像对中, 通过设置每个主影像最多与时间最接近的3个从影像做相关性计算的方式进一步提高计算效率;
 - (5) 重复步骤(2)—(4), 直到 $i=N$, 结束配对。绘制时空构网图。
- 研究区域构网的情况和参数见图2、表2和表3, 共构建了88对影像对。我们提出的影像对构网策略以3个变量约束迁移场中的系统误差, 并将影像对数量限制在影像数量的3倍以下, 平衡了系统误差和计算效率 (以影像对数量为代用指标)。

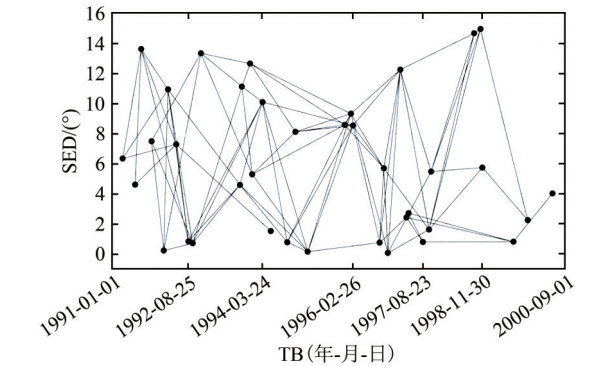


图2 影像对的时空构网示意图
Fig. 2 Schematic diagram of spatio-temporal network of image pairs

表 2 影像对的 TB、SED 和 SAD
Table 2 TB、SED and SAD of image pair

影像对	TB/d	SED/(°)	SAD/(°)	影像对	TB/d	SED/(°)	SAD/(°)
1991-04-01—1991-08-23	144	6.34	5.73	1994-10-02—1996-02-10	496	13.99	2.17
1991-04-01—1992-03-18	352	4.60	3.44	1994-10-02—1996-02-26	512	8.99	5.08
1991-04-01—1992-05-21	416	13.62	14.11	1994-12-05—1995-12-24	384	3.04	4.01
1991-07-06—1991-08-23	48	7.50	14.59	1994-12-05—1996-02-10	432	3.21	11.40
1991-07-06—1992-05-21	320	0.21	6.22	1994-12-05—1996-02-26	448	8.21	14.31
1991-08-23—1992-03-18	208	10.93	9.17	1995-03-11—1996-02-10	336	10.13	4.62
1991-08-23—1992-05-21	272	7.28	8.38	1995-03-11—1996-02-26	352	5.13	1.72
1991-08-23—1992-08-25	368	0.83	0.76	1995-03-11—1996-09-21	560	7.30	3.77
1991-11-11—1992-02-15	96	0.70	9.69	1995-12-24—1996-02-10	48	6.25	7.40
1991-11-11—1992-09-26	320	13.35	11.22	1995-12-24—1996-02-26	64	11.25	10.30
1991-11-11—1992-11-29	384	4.59	0.03	1995-12-24—1996-10-23	304	14.17	1.95
1992-02-15—1992-03-18	32	11.13	6.00	1996-02-10—1996-10-23	256	7.92	9.34
1992-02-15—1992-09-26	224	12.65	1.53	1996-02-10—1996-11-24	288	0.51	13.35
1992-02-15—1992-11-29	288	5.29	9.72	1996-02-10—1997-02-28	384	8.46	1.44
1992-03-18—1992-08-25	160	10.10	8.41	1996-02-26—1996-09-21	208	12.43	2.05
1992-03-18—1992-09-26	192	1.52	4.46	1996-02-26—1996-10-23	240	2.92	12.25
1992-03-18—1993-09-29	560	0.78	5.61	1996-02-26—1997-02-28	368	3.46	4.34
1992-05-21—1992-08-25	96	8.12	9.14	1996-09-21—1996-10-23	32	9.51	10.19
1992-05-21—1994-05-27	736	0.14	2.93	1996-09-21—1997-02-28	160	8.97	2.29
1992-08-25—1992-09-26	32	8.58	12.87	1996-09-21—1997-04-17	208	8.51	7.36
1992-08-25—1993-09-29	400	9.33	14.02	1996-10-23—1996-11-24	32	8.43	4.00
1992-08-25—1994-03-24	576	8.53	6.28	1996-10-23—1997-02-28	128	0.54	7.90
1992-09-26—1993-09-29	368	0.74	1.15	1996-10-23—1997-10-10	352	5.48	0.47
1992-09-26—1993-10-15	384	5.69	6.01	1996-11-24—1997-02-28	96	8.97	11.91
1992-09-26—1994-03-24	544	0.05	6.60	1996-11-24—1997-10-10	320	13.91	3.53
1992-11-29—1993-10-15	320	12.25	5.25	1996-11-24—1997-10-26	336	8.89	0.27
1992-11-29—1993-12-18	384	2.42	0.92	1997-02-28—1997-10-10	224	4.94	8.38
1992-11-29—1994-01-03	400	2.71	2.95	1997-02-28—1997-10-26	240	0.08	12.18
1993-09-29—1994-03-24	176	0.79	7.74	1997-02-28—1998-09-27	576	9.72	5.95
1993-09-29—1994-10-02	368	1.61	0.91	1997-04-17—1997-08-23	128	0.99	0.58
1993-09-29—1995-03-11	528	5.48	7.71	1997-04-17—1999-07-28	832	7.03	8.96
1993-10-15—1993-12-18	64	14.67	4.33	1997-05-03—1997-08-23	112	3.58	3.91
1993-10-15—1994-01-03	80	14.96	2.29	1997-05-03—1999-07-28	816	2.46	4.47
1993-10-15—1994-03-24	160	5.74	12.60	1997-08-23—1999-07-28	704	6.03	8.38
1993-12-18—1994-12-05	352	0.80	0.87	1997-10-10—1998-09-27	352	4.78	2.43
1993-12-18—1995-12-24	736	2.24	4.88	1997-10-10—1998-11-14	400	9.99	7.45
1993-12-18—1996-02-10	784	4.01	12.27	1997-10-10—1998-11-30	416	13.56	7.71
1994-01-03—1994-12-05	336	1.09	1.17	1997-10-26—1998-09-27	336	9.80	6.23
1994-01-03—1995-03-11	432	14.43	14.86	1997-10-26—1998-11-14	384	4.96	3.65
1994-01-03—1995-12-24	720	1.95	2.84	1997-10-26—1998-11-30	400	8.53	3.91
1994-03-24—1994-10-02	192	2.40	6.83	1998-09-27—1998-11-14	48	14.76	9.88
1994-03-24—1995-03-11	352	6.27	0.04	1998-11-14—1999-11-17	368	0.98	0.74
1994-03-24—1996-02-26	704	11.40	1.76	1998-11-30—1999-11-17	352	2.59	1.00
1994-10-02—1995-03-11	160	3.87	6.80	1999-07-28—2000-05-27	304	2.87	0.60

表3 最终影像对构网的特征参数

Table 3 Characteristic parameters of final image pair network

条带号	影像数	配对数	TB/d	SED/(°)	SAD/(°)
P128R33	37	88	32-832	15	15

2.3 参数配置与数据处理

因为COSI-Corr软件包对推扫式和摆扫式卫星数据的适用性较强,且已经广泛地应用于行星表面的沙丘监测研究(Ding等,2020a,2020b; Bridges等,2012,2017),其配准精度达到1/20—1/50像素(Leprince等,2007a,2007b),又可以批量处理,所以本文将COSI-Corr软件包作为数据处理平台。但不同卫星由于成像模式和影像空间分辨率差异导致配准和互相关的参数配置也不同(Ayoub等,2009),如Ding等(2020b)对Landsat 8和Sentinel-2参数配置(最初窗口、最终窗口、移动步长、迭代次数和信噪比SNR(Signal to Noise Ratio)阈值)测试后发现,处理窗口与信噪比阈值会影响匹配精度,移动步长和迭代次数则对处理时长影响较大。由于后续的时序反演需求,本文对影像进行时空构网,获取的影像对数量仍然比较大,所以设置参数时需要平衡匹配精度和计算效率。这里,我们使用的是COSI-Corr软件包的频率域互相关算法,经过测试获得的Landsat 5影像对的最优参数配置如下:X和Y方向的最初搜索窗口为128像素,最终窗口为64像素,两方向的处理步长为3像素,稳健性迭代次数为2,信噪比阈值为0.9。此外,同一影像的不同波段对匹配结果也存在影响,一般

会优先选择高空间分辨率的波段,比如Landsat 8 Pan波段(全色波段)。若不同波段的空间分辨率一样时就需要测试最优的匹配波段,比如贺礼家等(2019)对Sentinel-2的4个10 m波段试验后发现Band 8的匹配结果标准差最小,是提取大量级地震同震形变场的最佳波段。Landsat 5波段进行测试后发现,Band 3(0.63—0.69 μm)可以有效记录沙丘表层的纹理信息,使得匹配结果稳健精确,所以本文选择Landsat 5 TM Band 3来获取沙丘迁移场。

本文的数据处理分为预处理、影像匹配、误差分析与处理、时序反演4个模块,处理流程如图3所示。第1个模块是预处理,将研究区域所有影像裁剪至同一范围,然后据2.2节策略进行影像时空构网设计,并输出主从影像列表和参数配置列表。第2个模块是影像匹配,通过COSI-Corr软件批量处理,输出每一影像对的东西向迁移场、南北向迁移场和信噪比(SNR)文件。第3个模块是误差分析与处理,分析沙丘迁移场的误差分布和大小,确定误差消除顺序和消除方法。第4是时序反演,将选取稳定区域计算权阵,通过最小二乘法反演沙丘迁移的时间序列,进而拟合得到年平均速度场。

3 误差消除与时序反演

本文通过Landsat 5 TM影像对的东西向和南北向的迁移场的分析统计发现,迁移场主要存在失相关噪声、轨道误差和姿态角误差,如图4所示。这些误差遮掩着真正的沙丘迁移,时序反演之前应该进行消除或削弱。

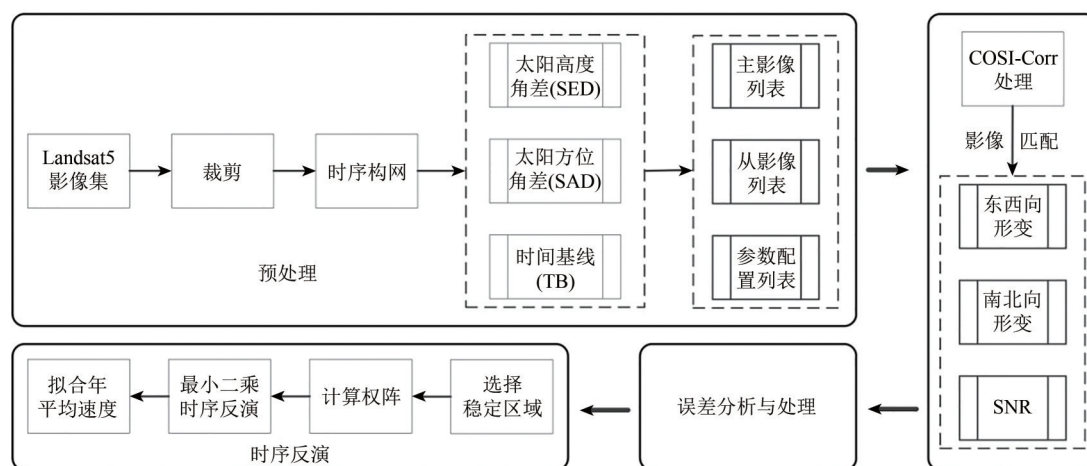


图3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow

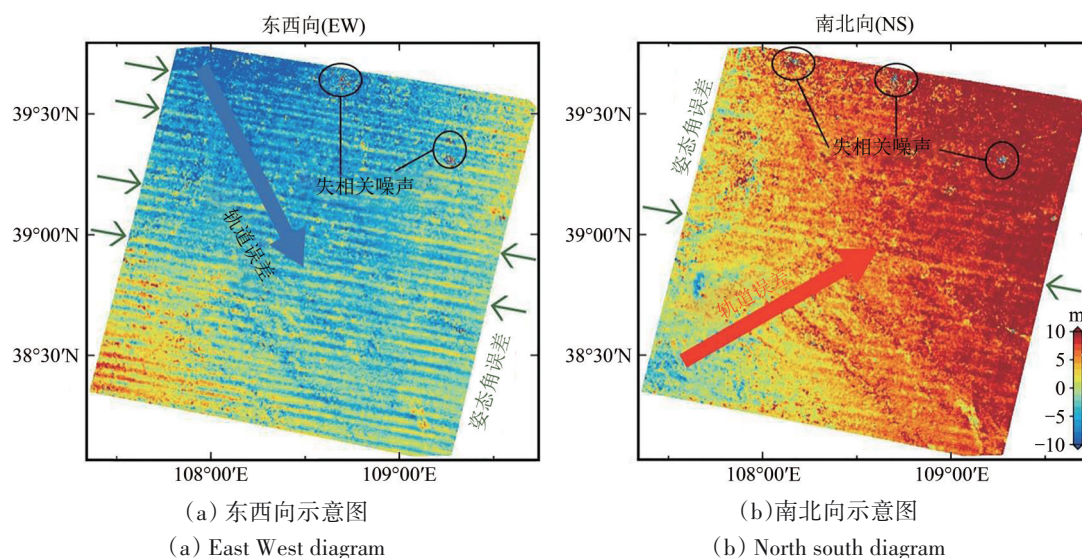


图4 Landsat 5 TM 初始迁移场的误差示意图(以 1991-07-06—1991-08-23 影像对为例;本文中所有迁移场向东和向北数值为正)
Fig. 4 Error diagram of Landsat 5 TM initial migration field(Take 1991-07-06—1991-08-23 image pair as an example; In this paper, the values of all migration fields eastward and northward are positive)

3.1 失相关噪声

失相关噪声与地物类型和地表辐射量相关。当地物变化过大或地表辐射属性异常,如辐射量过高、过低或者强烈的变化都会导致主从影像纹理不明显或缺失,在 COSI-Corr 软件进行互相关匹配时无法得到最优结果或者出现匹配错误,产生失相关噪声。失相关噪声在 SNR 文件中表现为 SNR 值过低,在东西向和南北向的迁移场中表现为异常值,对于局部区域结果的可靠性和精确性影响较大。所以可以对其进行掩膜,掩膜区域有:(1) SNR 文件中低于 0.9 的区域和 NAN 值区域,SNR 文件和东西向南北向的迁移场是逐像元一一对应的,所以可以根据 SNR 文件剔除迁移场中低 SNR 值区域;(2) 异常值区域,对于东西向和南北向的迁移场,分别求其均值和中误差,超过均值 ± 3 倍中误差的区域进行掩膜。

3.2 轨道误差

从美国地质勘探局 USGS (United States Geological Survey) 网站上下载的 Landsat 5 TM 影像只做过简单的校正,再经过 COSI-Corr 软件处理后迁移场中会存在一个系统性的偏移,这就是轨道误差。由于轨道误差量级较大,在后处理中,必须经过严格的几何模型进行消除。轨道误差为迁移场的主要误差源,本文用多项式拟合消除 (Ding 等, 2016)。多项式拟合去除轨道误差在 D-InSAR 处理中也极

为常用,它是先对形变区域进行掩膜,接着使用多项式进行拟合得到误差场,然后再从原始迁移场中减去误差场进行消除。对于不同的卫星数据得到的迁移场的轨道误差大小和分布也有区别, Ding 等 (2016, 2020b) 用一次多项式消除 Landsat 8 和 Sentinel-2 的迁移场的轨道误差,但对于 Landsat 5 TM 影像的迁移场,一次多项式一般是不能完全消除轨道误差的,有时需要用到二次或者三次才行,这可能是因为 Landsat 5 的影像质量不如 Landsat 8 和 Sentinel-2 造成的,毕竟 Landsat 5 的服役时间最长,电子元件老化较为严重。

3.3 姿态角误差

宇宙环境并不稳定,太阳光压、温度变化和万有引力等或使卫星平台出现微小的抖动,导致卫星的姿态变化(俯仰、侧倾和偏航),这些不被记录的姿态变化再加上卫星影像不精确的稀疏采样,导致迁移场中沿卫星飞行方向分布着周期性的误差条纹,这就是卫星姿态角误差 (Leprince 等, 2007a, 2007b)。与 Landsat 8 相比, Landsat 5 TM 不存在条带误差,但姿态角误差十分严重 (Ding 等, 2016, 2020b),对结果精度影响较大,必须进行消除。消除卫星姿态角误差常用的是传统的“均值消去法” (Scherler 等, 2008; Ding 等, 2016),即根据这些误差条纹的分布特点,沿卫星飞行方向的垂直向求取稳定区域的均值,然后用原始迁

移场减去即可消除。但贺礼家等(2019)发现, Sentinel-2影像对获取的地震形变场的卫星姿态角误差与传感器的12个电荷耦合元件CCD(Charge-coupled Device)线阵列的排列有关, 据此他们提出了改进的“均值消去法”消除姿态角误差, 比之传统方法效果更好, 因此本文也使用该方法。

3.4 时序反演

时序反演可以通过冗余观测数提高迁移场的精度和鲁棒性, 并获取沙丘的累积迁移序列。本文在此使用的是较为常用的最小二乘法(Ali等, 2020)。

假设有 $N+1$ 景影像, 时间顺序为 $[t_0, t_1, \dots, t_N]$, 经过构网和COSI-Corr软件包匹配后获取了 M 对迁移场($(N+1)/2 \leq M \leq N(N+1)/2$), 记相邻时间的平均速度为 $V^T = [v_1, v_2, \dots, v_N]$, 则每一影像对的迁移场 $\Delta d_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 的函数模型可以表示为

$$\sum_{j=t_m}^{t_s} (t_{j+1} - t_j) \cdot v_j = \Delta d_i \quad (1)$$

式中, $t_m (m = 0, 1, \dots, N-1)$ 和 $t_s (s = 1, 2, \dots, N)$ 为迁移场 Δd_i 的主从影像时刻; v_j 为 t_j 和 t_{j+1} 两时刻之间的平均速度。式(1)可以写为矩阵形式:

$$TV = \Delta d \quad (2)$$

平差的随机模型为

$$D = \sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (3)$$

式中, D 为 Δd 的方差矩阵; σ_0^2 为单位权方差, 在此定为1; P 为每一迁移场中稳定区域计算的权阵, 在此我们使用的是方差—协方差函数定权(冯光财等, 2015)。当 $M > N$ 时, 即可通过最小二乘法平差解算:

$$V = (B^T P B)^{-1} B^T P \Delta d \quad (4)$$

表4 各处理步骤的精度评估

Table 4 Accuracy evaluation of each processing step

精度指标	标准差/m					均值/m/				
处理流程	T0	T1	T2	T3	T4	T0	T1	T2	T3	T4
东西向	3.575	3.500	2.311	1.860	1.618	-3.189	-3.185	-0.202	-0.087	-0.062
南北向	2.540	2.401	1.848	1.766	1.518	10.107	10.101	0.133	0.127	0.075

通过表4和图6, 能发现东西向的T0—T4标准差明显大于南北向, 南北向的T0和T1均值的绝对值又远大于东西向, 说明南北向误差量级较大但较为集中, 东西向误差较小但分布较为稀疏。东西

式中, B 为设计矩阵, $B(j, i) = t_i - t_{i-1} (t_m + 1 \leq t_{i-1}, t_i \leq t_s; j = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N+1)$, 其他位置元素为0。有时设计矩阵 B 会出现秩亏的情况, 导致无法平差, 这时需要引入奇异值分解(Ding等, 2020b)。但在本文的2.2节的基线构网方法获取的影像对时间上是有重叠冗余的, 不存在秩亏情况, 用最小二乘法即可解算。

获取了相邻时间的平均速度后, 设第一个时间形变量为0, 进而获取累积形变序列 L , 最后可用最小二乘法拟合序列的年平均速度:

$$V_{\text{year}} = (W^T W)^{-1} W^T L \quad (5)$$

式中, $W = [t_1 - t_0, \dots, t_N - t_{N-1}]$ 为相邻影像的时间间隔。

4 精度与结果分析

4.1 精度分析

根据Landsat 5 TM影像对的误差特点和分布, 我们确定了迁移场的精度改善流程和方法。如图5所示, 原始迁移场的精度提升共分为4步: 去失相关噪声(T1)、去轨道误差(T2)、去姿态角误差(T3)和时序反演(T4)。

表4和图6为图5的各步骤精度评估区域的结果统计情况。本文以标准差和均值作为误差消除和时序反演精度指标, 结果如表4所示。对于东西向迁移场来说, 经过T1—T3处理后标准差相继降低2%、34%、20%, 说明东西向的轨道误差>姿态角误差>失相关噪声。南北向迁移场经过T1—T3处理后标准差相继降低5%、23%、4%, 说明南北向的轨道误差>失相关噪声>姿态角误差。而通过时序反演后, 标准差又降低了13%和14%, 表明时序反演能进一步提高迁移场精度。

向经过各步骤处理后, 均值逐渐趋于0, 分布也更陡峭, 其中轨道误差的消除最为明显。南北向各步骤后分布形状并无太大变化, 但标准差逐渐减小, 其中对均值改变最为明显的是轨道误差消除。

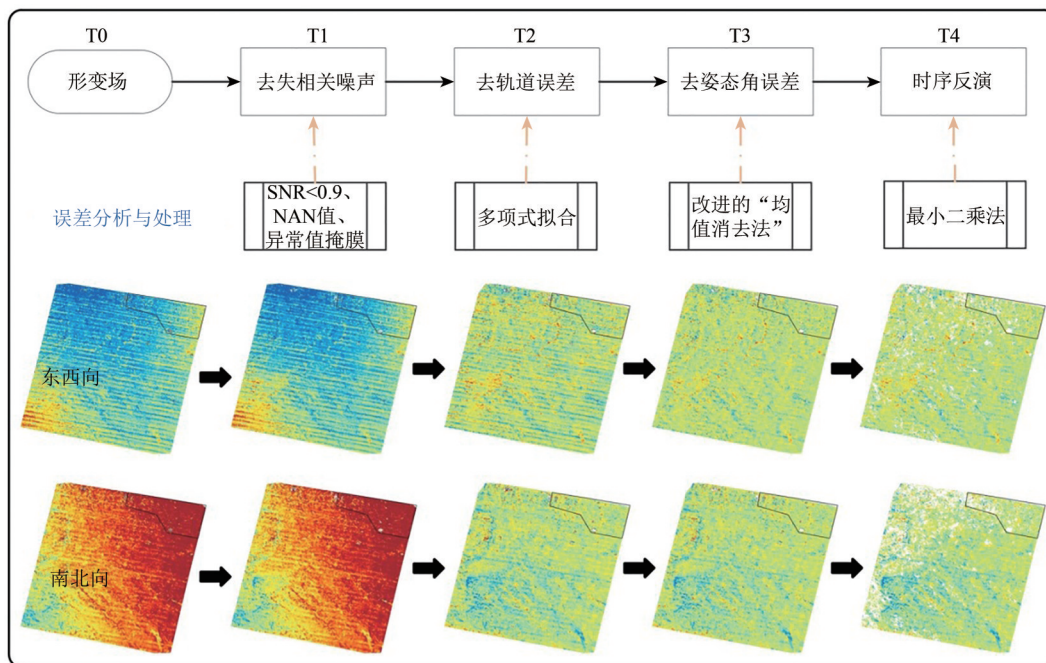


图5 精度提升步骤与方法(以1991-07-06—1991-08-23结果为例,黑色多边形为精度评定区域)

Fig. 5 Steps and methods of improving accuracy(aking the results of 1991-07-06—1991-08-23 as an example, the black polygon is the accuracy evaluation area)

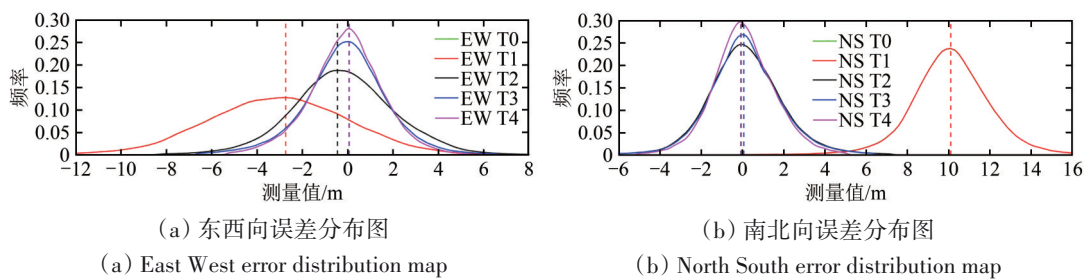


图6 测量值概率分布(T0和T1结果差异不大,所以T0被T1结果遮掩了)

Fig. 6 Probability distribution of measured values(There is little difference between T0 and T1 results, so T0 is masked by T1 results)

4.2 沙丘迁移的空间特征分析

结合研究区域的東西向和南北向的年平均速度可以得到沙丘迁移矢量,而沙丘迁移的玫瑰图则能显示沙丘迁移的空间特征。结果显示(图7),研究区域沙丘迁移和主风向(西北—东南向)基本一致,沙丘的主要移动方向为SE(约 140°),次为WNN(约 340°)。在研究区域中,63.9%的沙丘迁移速度为0—1 m/a, 15.6%的迁移速度为1—1.5 m/a, 8.2%的迁移速度为1.5—2 m/a, 8.1%的迁移速度为2—3 m/a, 4.2%的迁移速度则 ≥ 3 m/a。

1991年—2000年,毛乌素沙地西北部的沙丘迁移速度显示出该研究区域沙丘的主要移动方向为SE,最大迁移速度超过6 m/a,移动方向与冬春盛行风向—西北风一致(图8);虽然毛乌素沙地

为双风向的主导区域,但是从图8不能推断出另一盛行风向—东南风。结合图7和图9,这可能是由于西北风远强于东南风(庞营军等,2019),长时间作用下向东南移动的沙丘运动掩盖了向西北移动的沙丘运动导致的。

4.3 沙丘迁移的时间特征分析

沙丘迁移的时间序列可以反映作用于沙丘表面的风力强度的时间变化。图9显示A点的东西向年平均速度为6.4 m/a,方向为正东;其南北向年平均速度为-5.2 m/a,方向为正南;合成速度方向为东南向,随时间变化的迁移量呈现出较为明显的线性关系。由于双风向的作用,该研究区域的沙丘会沿西北—东南向往返运动,存在一个周期性波动,这样就会导致毛乌素沙地西北部沙丘横断面

多是西北—东南向。5—6月和10—11月为西北风和东南风的交替月份，于是沙丘脊线会在西北—东南向摆动，迎风坡和背风坡也会相互转换（哈

斯等，2006）。在6月和11月左右沙丘迁移的方向会发生变化，但长时间尺度下沙丘整体上仍然向东南方向移动。

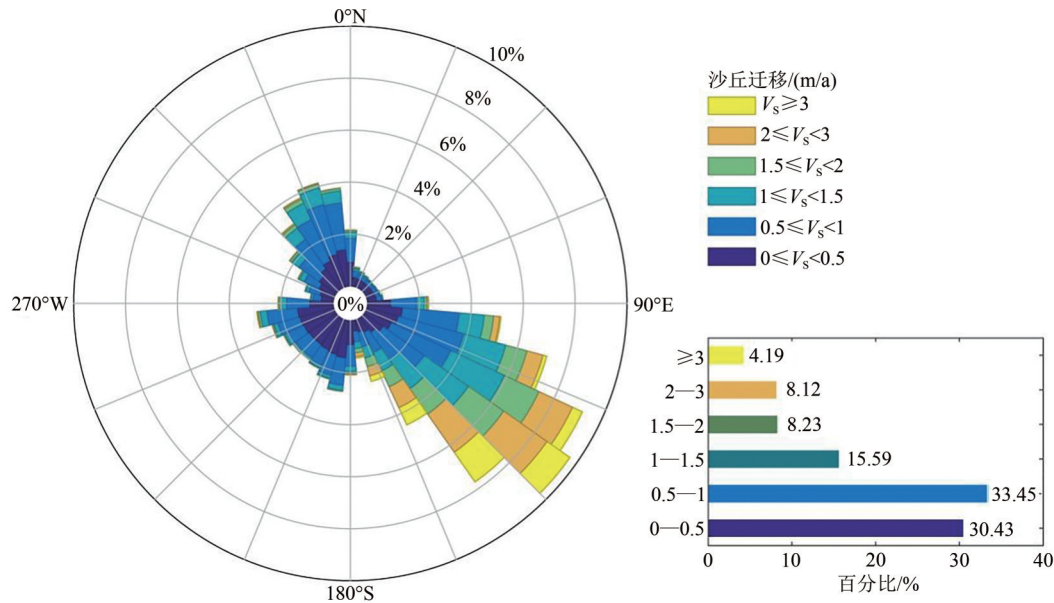


图7 沙丘迁移的年平均速度玫瑰图(玫瑰手臂指向沙丘迁移的方向)

Fig. 7 Rose chart of annual average velocity of sand dune migration (Rose's arm points in the direction of sand dune migration)

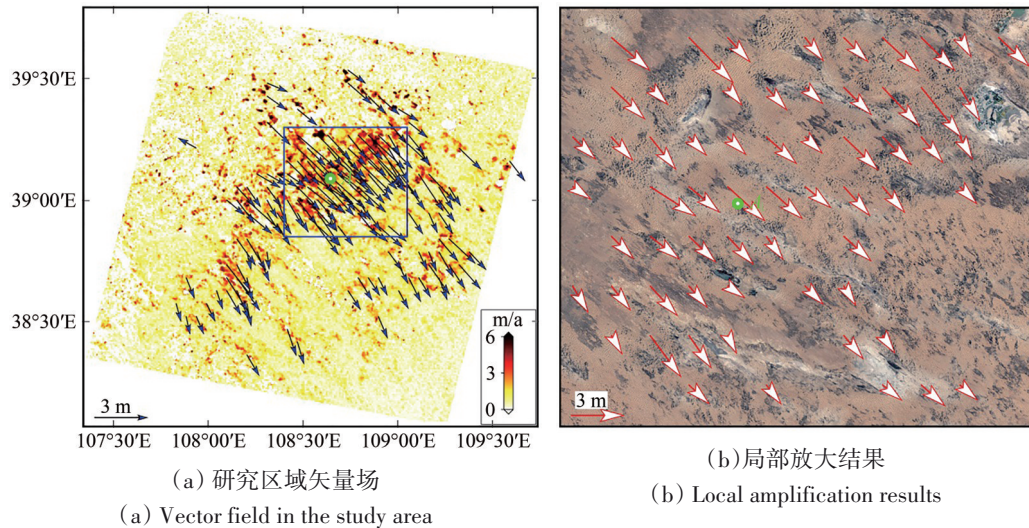


图8 欧氏公式计算的年平均速度((a)的底图为东西向与南北向合成速度大小,绿色圆点为图9中A点位置。
(b)为(a)中蓝色边框的放大图)

Fig. 8 Annual average velocity calculated by European formula(The (a) bottom map of is the composite velocity of East-West and North-South directions , and the green dot is the position of point A in Fig.9. The (b) is an enlarged view of the blue border in (a))

5 讨论

5.1 沙丘迁移的基本条件

强劲的风力和丰富的沙源物质是沙丘迁移的基本条件。沙丘的形成和发育本质上是沙粒在空

间上的搬运，而只有达到有效风速 ($>5\text{ m/s}$) 才能形成风沙流使得沙粒脱离地表（朱震达等，1981）。所以沙丘的迁移模式由该区域的常年风况决定，而沙丘的形成和发育又依赖于有无充足的沙源补充。研究表明，毛乌素沙地在6月和11月左右西北风和东南风会相互转变（哈斯等，2006），沙

丘迁移方向也随之变化,所以该研究区域的沙丘会沿西北—东南方向往返运动(哈斯等,2006;王静璞等,2013),沙丘的常年排列方向也沿西北—东南方向排列。但西北向的起沙风频率和强度均大于东南向(庞营军等,2019),所以该地沙丘向东南方向持续推进。风成沙乃是下伏沉积物经风力加工改造而成(朱震达等,1981),而Liu和Yang

(2018)的研究显示,毛乌素沙地西北部风成沙主要源于下伏砂岩和湖相沉积物,中沙和细沙含量较高,十分适合移动沙丘发育(哈斯等,2006;李智佩等,2006)。所以,毛乌素沙地西北部复杂的风况条件和丰富的沉积物分布,以及干旱少雨的气候、稀疏的植被和不合理的人类活动等因素决定了该区域常年普遍存在沙丘迁移的现象。

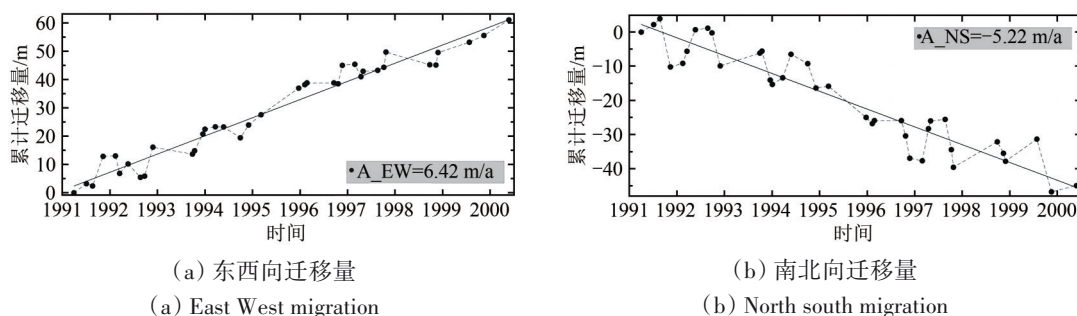


图9 图8中A点的迁移量时间序列((a)中正值代表向东,负值代表向西;(b)中正值代表向北,负值代表向南)

Fig. 9 Time series of migration amount of point A in Fig. 8(positive value represents East and negative value represents west in Fig. a; positive value represents north and negative value represents South in Fig. b)

5.2 研究对比与新发现

本文获取的沙丘迁移结果大体上与其他研究的结果基本一致,但广阔的监测范围和精确的时序结果可以更详细的揭示风沙迁移特征,这是其他研究还不能做到的。图7和图8结果显示该研究区域普遍存在沙丘迁移活动,但占63.9%的区域迁移速度为0—1 m/a, ≥ 3 m/a的区域只有4.2%,主要向东南向(约 140°)移动,这说明该区域的风能为低能环境—输沙势在200 VU以下(Fryberger, 1979),且风况较为稳定。庞营军等(2019)根据毛乌素腹地2008年—2011年风况数据计算的年输沙势为66.75 VU,合成输沙势方向为 146° ,与本文结果较为一致。但许明静等(2020)监测毛乌素沙地西北部典型沙丘的平均沙丘迁移方向(122.5°)与我们的存在一定差异,这可能是由于该研究只矢量化了一部分沙丘造成的。而且本文所用技术的监测范围达几十公里至几百公里,时长可至几十年,结果连续且更为可靠,精度也完全满足监测需求,可以为防沙治沙工程的长期建设提供指导。

我们对结果进行分析发现:(1)毛乌素西北部区域的西北至东南方向沙丘速率呈降低趋势(图8);(2)毛乌素的東西方向风力和南北方向风力在各地的分布并不均匀(图9),图7的玫瑰图也表明

该地沙丘主要迁移方向在 110° — 150° ,而不是完全向 145° 方向迁移;(3)两方向的迁移量结果(图9)表明,东南季风无法改变沙丘迁移的趋势,但减缓了沙丘向东南方向侵蚀。因此,在防沙治沙时,需要从东南方向往西北方向推进,先治理东南部的小沙、慢沙,后治理西北部的大沙、快沙;固沙时草方格排列方向也需要根据沙丘迁移方向(一般为当地风向)做细致的调整,不能严格按西北至东南方向放置;在夏秋季节盛行东南季风时,沙丘需要时间改造形态向反方向迁移,可以趁这时向东南方向的沙丘速率减缓而又未向西北方向迁移时进行草方格固沙,等待雨季来临时种植耐旱植被,提升固沙防沙的治理效果。而且当地相关部门可以根据本文的沙丘迁移矢量图规划农田防护林和防风林的种植范围和种植顺序,依据各地沙丘迁移速率和降雨、风速、土壤情况等使用不同的治沙手段和种植相应品种的植被,以达到提升治沙效率、减少植被死亡和节约治沙成本等效果。

所以,与许明静等(2020)和王静璞等(2013)通过Google Earth历史影像矢量化典型沙丘的迁移运动相比,本文获取的各像素点的沙丘迁移时间序列(图9)量化了沙粒随沙丘表面风流运动的时空特征,且监测范围更大,监测时间更长,可以为防沙治沙工程实施等提供有力的技术支持和

有益建议。

6 结 论

综上所述,本文以1991年—2000年毛乌素沙地西北部37景Landsat 5 TM影像为基础,使用COSI-Corr软件包获取了沙丘迁移的时间序列和对应的年平均速度,并分析了研究区域沙丘迁移的时空特征。为了限制初始迁移场的系统误差,我们提出了一种新的Landsat 5 TM影像时空构网策略,即对影像对的SED、SAD和TB等3个变量进行约束得到了一个稳健的主从影像构网,提高了计算效率和精度。通过研究分析,本文得出的主要结论为:(1) Landsat 5 TM沙丘迁移场的误差源主要有轨道误差、姿态角误差和失相关噪声,消除后精度相继提升23%—34%、4%—20%、2%—5%,再利用最小二乘法反演后可提升13%—14%。(2) 沙丘迁移的时间序列和年平均速度场可以较好的量化沙丘的迁移特征。(3) 风况条件、沉积物分布及其他因素决定了毛乌素沙地西北部的沙丘迁移模式。(4) 本文的监测结果大体上和其他研究基本一致,但本文的时序结果更加详细地揭示出沙粒随沙丘表面风流结构运动的时空特征,监测范围也更广阔,可以为防沙治沙工程、沙漠化评估和风沙灾害的定量监测等提供可靠的技术支持。

此外,我们提出的影像对构网策略、设计的误差处理步骤和使用的时序反演方法除稳健精确的量化沙丘迁移场外,也同样适用于冰川流速提取、滑坡监测等大范围、大量级、长时序的地表形变监测。

志 谢 本文所用Landsat 5 TM数据源于USGS (glovis.usgs.gov/),文中各种图件主要由GMT5.3.1绘制,数据处理平台为采用美国加州理工学院开发的软件包COSI-Corr (<http://www.tectonics.caltech.edu/>)。十分感谢几位审稿人和编辑提出的宝贵意见,这让我们许多没有思考到的地方得到补充,对文章的细节部分和逻辑结构上得到进一步的处理,使得该篇文章的学术水平和我们的写作水平得到提高;在此,我们表示由衷的感谢。

参考文献(References)

Ali E, Xu W B and Ding X L. 2020. Improved optical image matching

time series inversion approach for monitoring dune migration in North Sinai Sand Sea: Algorithm procedure, application, and validation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164: 106-124 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.004]

Ayoub F, Avouac J P, Newman C E, Richardson M I, Lucas A, Lep-
rince S and Bridges N T. 2014. Threshold for sand mobility on mars calibrated from seasonal variations of sand flux. *Nature Commu-
nications*, 5(1): 5096 [DOI: 10.1038/ncomms6096]

Ayoub F, Lep-
rince S and Keene L. 2009. User's Guide to COSI-CORR
Co-Registration of Optically Sensed Images and Correlation. Cali-
fornia Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 1-38.

Baird T, Bristow C S and Vermeesch P. 2019. Measuring sand dune mi-
gration rates with COSI-Corr and landsat: opportunities and chal-
lenges. *Remote Sensing*, 11(20): 2423 [DOI: 10.3390/rs11202423]

Bridges N T, Ayoub F, Avouac J P, Lep-
rince S, Lucas A and Mattson S.
2012. Earth-like sand fluxes on mars. *Nature*, 485(7398): 339-342
[DOI: 10.1038/nature11022]

Bridges N T, Sullivan R, Newman C E, Navarro S, Van Beek J, Ewing
R C, Ayoub F, Silvestro S, Gasnault O, Le Mouélic S, Lapotre M
G A and Rapin W. 2017. Martian aeolian activity at the Bagnold
Dunes, Gale Crater: the view from the surface and orbit. *Journal
of Geophysical Research: Planets*, 122(10): 2077-2110 [DOI: 10.
1002/2017JE005263]

Brown D G and Arbogast A F. 1999. Digital photogrammetric change
analysis as applied to active coastal dunes in Michigan. *Photo-
grammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(4): 467-474

Bruno L, Horvat M and Raffaele L. 2018. Windblown sand along rail-
way infrastructures: a review of challenges and mitigation mea-
sures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,
177: 340-365 [DOI: 10.1016/j.jweia.2018.04.021]

Dabboor M D, Braun A and Kneen M A. 2013. Tracking sand dune mi-
gration in the Rub Al-Khali with ICESat laser altimetry. *Interna-
tional Journal of Remote Sensing*, 34(11): 3832-3847 [DOI: 10.
1080/01431161.2012.762483]

Ding C, Feng G C, Li Z W, Shan X J, Du Y N and Wang H Q. 2016.
Spatio-temporal error sources analysis and accuracy improvement
in landsat 8 image ground displacement measurements. *Remote
Sensing*, 8(11): 937 [DOI: 10.3390/rs8110937]

Ding C, Feng G C, Liao M S, Tao P J, Zhang L and Xu Q. 2021. Dis-
placement history and potential triggering factors of Baige land-
slides, China revealed by optical imagery time series. *Remote
Sensing of Environment*, 254: 112253 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.
112253]

Ding C, Feng G C, Liao M S and Zhang L. 2020a. Change detection,
risk assessment and mass balance of mobile dune fields near Dun-
huang Oasis with optical imagery and global terrain datasets. *Int-
ernational Journal of Digital Earth*, 13(12): 1604-1623 [DOI: 10.
1080/17538947.2020.1767222]

Ding C, Zhang L, Liao M S, Feng G C, Dong J, Ao M and Yu Y H.
2020b. Quantifying the spatio-temporal patterns of dune migra-
tion near Minqin Oasis in northwestern China with time series
of Landsat-8 and Sentinel-2 observations. *Remote Sensing of*

- Environment, 236: 111498 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111498]
- Dong G R, Li B S, Gao S Y, Wu Z and Shao Y J. 1983. Discovery of quaternary Paleocolian sand on the Ordos Plateau and its significance. Chinese Science Bulletin, 28(16): 998-1001 (董光荣, 李保生, 高尚玉, 吴正, 邵亚军. 1983. 鄂尔多斯高原第四纪古风成沙的发现及其意义. 科学通报, 28(16): 998-1001)
- Dong Z B, Wang X M and Chen G T. 2000. Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert. Geomorphology, 35(3/4): 219-231 [DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00039-8]
- Feng G C, Xu B, Shan X J, Li Z W and Zhang G H. 2015. Coseismic deformation and source parameters of the 24 September 2013 Awaran, Pakistan M_w 7.7 Earthquake derived from optical Landsat 8 satellite images. Chinese Journal of Geophysics, 58(5): 1634-1644 (冯光财, 许兵, 单新建, 李志伟, 张国宏. 2015. 基于 Landsat 8 光学影像的巴基斯坦 Awaran M_w 7.7 地震形变监测及参数反演研究. 地球物理学报, 58(5): 1634-1644) [DOI: 10.6038/cjg20150515]
- Fryberger S G. 1979. Dune forms and wind regimes//McKee E D, ed. A Study of Global Sand Seas. Reston: United States Geological Survey: 137-140
- Guo H D. 1986. Space shuttle radar response from sand dunes and sub-surface rocks of alashan Plateau. Remote Sensing of Environment, 1(1): 34-43 (郭华东. 1986. 航天飞机雷达对阿拉善高原沙漠及次地表岩石的回波响应. 环境遥感, 1(1): 34-43)
- Ha S, Zhuang Y M, Wang L and Wang Z. 2006. Grain-size variation on a transverse dune and response to wind direction changes on southern edge of Mu us desert. Progress in Geography, 25(6): 42-51 (哈斯, 庄燕美, 王蕾, 王志. 2006. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应. 地理科学进展, 25(6): 42-51) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-6301.2006.06.005]
- He L J, Feng G C, Feng Z X and Gao H. 2019. Coseismic deformations of 2016 M_w 7.8 Kaikoura, New Zealand earthquake, using sentinel-2 optical images. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 48(3): 339-351 (贺礼家, 冯光财, 冯志雄, 高华. 2019. 哨兵-2 号光学影像地表形变监测: 以 2016 年 M_w 7.8 新西兰凯库拉地震为例. 测绘学报, 48(3): 339-351) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20170671]
- Hugenholtz C H and Barchyn T E. 2010. Spatial analysis of sand dunes with a new global topographic dataset: new approaches and opportunities. Earth Surface Processes and Landforms, 35(8): 986-992 [DOI: 10.1002/esp.2013]
- Jin Y Q. 1997. Analysis of SSM/I data over the desert areas of China. Journal of Remote Sensing, 1(3): 192-197 (金亚秋. 1997. 星载微波 SSM/I 对中国西北沙漠地区遥感数据的辐射特征分析. 遥感学报, 1(3): 192-197)
- Leprince S, Ayoub F, Klinger Y and Avouac J P. 2007a. Co-registration of optically sensed images and correlation (COSI-Corr): an operational methodology for ground deformation measurements//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 1943-1946 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423207]
- Leprince S, Barbot S, Ayoub F and Avouac J P. 2007b. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(6): 1529-1558 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.888937]
- Li Z P, Yue L P, Xue X X, Wang M, Yang L R, Nie H G and Chen Chao. 2006. Grain size distribution characteristics of different geo-genetic types of sandy desertification and their geological significance in southeast Mo Us desert. Acta Sedimentologica Sinica, 24(2): 267-275 (李智佩, 岳乐平, 薛祥煦, 王岷, 杨利荣, 聂浩刚, 陈超. 2006. 毛乌素沙地东南部边缘不同地质成因类型土地沙漠化粒度特征及其地质意义. 沉积学报, 24(2): 267-275) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0550.2006.02.015]
- Liu Q Q and Yang X P. 2018. Geochemical composition and provenance of aeolian sands in the Ordos Deserts, northern China. Geomorphology, 318: 354-374 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.06.017]
- Necsoiu M, Leprince S, Hooper D M, Dinwiddie C L, McGinnis R N and Walter G R. 2009. Monitoring migration rates of an active subarctic dune field using optical imagery. Remote Sensing of Environment, 113(11): 2441-2447 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.004]
- Ould Ahmedou D, Ould Mahfoudh A, Dupont P, Ould El Mocrar A, Valance A and Rasmussen K R. 2007. Barchan dune mobility in Mauritania related to dune and interdune sand fluxes. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 112(F2): F02016 [DOI: 10.1029/2006JF000500]
- Pang Y J, Wu B, Jia X H, Shi L, Gaodabuxilatu and Li S Z. 2019. Characteristics of wind regime and drift potential in Mu Us sandy land. Journal of Desert Research, 39(1): 62-67 (庞营军, 吴波, 贾晓红, 石麟, 高达布希拉图, 李世忠. 2019. 毛乌素沙地风况及输沙势特征. 中国沙漠, 39(1): 62-67) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2018.00024]
- Scherler D, Leprince S and Strecker M R. 2008. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery—Accuracy improvement and quality assessment. Remote Sensing of Environment, 112(10): 3806-3819 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.018]
- Shao M, Luo W Y and Che X H. 2020. Preliminary application and accuracy assessment of COSI-Corr in the study of Aeolian geomorphology. Journal of Desert Research, 40(3): 151-158 (邵梅, 罗万银, 车雪华. 2020. COSI-Corr 技术在风沙地貌研究中的初步应用及精度检验. 中国沙漠, 40(3): 151-158) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00018]
- Silvestro S, Vaz D A, Yizhaq H and Esposito F. 2016. Dune-like dynamic of Martian Aeolian large ripples. Geophysical Research Letters, 43(16): 8384-8389 [DOI: 10.1002/2016GL070014]
- Tsoar H and Blumberg D G. 2002. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. Earth Surface Processes and Landforms, 27(11): 1147-1161 [DOI: 10.1002/esp.417]
- Vermeesch P and Drake N. 2008. Remotely sensed dune celerity and sand flux measurements of the world's fastest barchans (Bodélé, Chad). Geophysical Research Letters, 35(24): L24404 [DOI: 10.1029/2008GL035921]
- Wang J P, Liu L Y and Shen L L. 2013. Research of the Barchan dunes movement in the Mu Us sandy land on google earth software.

- Remote Sensing Technology and Application, 28(6): 1094-1100 (王静璞, 刘连友, 沈玲玲. 2013. 基于 Google Earth 的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律研究. 遥感技术与应用, 28(6): 1094-1100)
- Wang X M, Chen F H, Hasi E and Li J C. 2008. Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*, 88(3/4): 188-206 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.02.001]
- Xu M J, Lü P, Xiao N, Yang J H, Liu Z Y, Feng M Y and Liang Z. 2020. Effect of vegetation cover on dune migration in northwest Mu Us sandy land. *Journal of Desert Research*, 40(4): 71-80 (许明静, 吕萍, 肖南, 杨军怀, 刘铮瑶, 冯森彦, 梁准. 2020. 毛乌素沙地西北部植被覆盖对沙丘移动的影响. 中国沙漠, 40(4): 71-80) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00020]
- Yao Z Y, Wang T, Han Z W, Zhang W M and Zhao A G. 2007. Migration of sand dunes on the northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 70(1): 80-93 [DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.12.012]
- Zhu Z D, Chen Z P, Wu Z, Li J Z, Li B Y and Wu G C. 1981. *Aeolian Landform Research of Taklimakan Desert*. Beijing: Science Press (朱震达, 陈治平, 吴正, 李钜章, 李炳元, 吴功成. 1981. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社)

Error elimination and time sequence inversion of Landsat 5 TM dune migration field: Taking sand dunes in northwestern of Mu Us Sandy as example

YANG Dingjiang¹, FENG Guangcai¹, FENG Zhixiong¹, LI Guoshuai^{2,3}, ZHANG Jie⁴

1. Radar Remote Sensing Laboratory, School of Earth Sciences and Information Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences & National Qinghai-Tibet Plateau Science Data Center, Beijing 100101, China;

3. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System Science (LATPES), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. Basic Surveying and Mapping Institute of Qinghai Province, Xining 810001, China

Abstract: Processing Landsat 5 TM through COSI-Corr software can better quantify the migration mode and speed of sand dunes. This way can also provide specific guidance and suggestions for the implementation of sand prevention and control projects. At present, few studies on the error source analysis and timing inversion of Landsat 5 TM migration field are available. This work takes the northwestern part of the Mu Us Sand Land as the study area to obtain the dune migration time series and annual average velocity field from 1991 to 2000. Results show that the main errors of the Landsat 5 TM migration field are the orbit error, the attitude angle error, and the miscorrelated noise. After the error is eliminated, the accuracy has been increased by 23%—34%, 4%—20%, and 2%—5% successively, and it can be increased by 13%—14% after inversion by the least square method. The monitoring results show that the sand dunes in the northwest of the Mu Us Sandy Land continued to advance to the southeast from 1991 to 2000, and the maximum speed could exceed 6 m/yr. However, under the action of the northwest-southeast wind, periodic back-and-forth movement occurred along the northwest-southeast direction. The study area has a velocity of 0—1 m/year accounting for 63.9%, and the velocity of more than 3 m/a is only 4.2%. The error elimination and time sequence inversion of Landsat 5 TM can effectively improve the accuracy of the migration field, which results in a more accurate and reliable time sequence. Different from previous studies, the error elimination and time sequence inversion of the dune migration field can reflect the actual wind energy environment on the dune surface in more detail.

Key words: Landsat 5 TM, COSI-Corr, error analysis, dune migration, Mu Us sandy

Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Project (No. 41901377) ; Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University (No. 2021zzts0839)