

引文格式: 谢春逸, 王琪洁, 张亚, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的洞庭湖洲滩地表面形变监测 [J]. 测绘科学, 2024, 49(4): 80-91. (XIE Chunyi, WANG Qijie, ZHANG Ya, et al. Surface deformation monitoring of Dongting Lake beach based on SBAS-InSAR technology [J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(4): 80-91.) DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2024.04.008.

基于 SBAS-InSAR 技术的洞庭湖洲滩地表面形变监测

谢春逸, 王琪洁, 张亚, 晏东, 李佳晨

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 针对洞庭湖区水位波动范围较大, 导致基于 InSAR 技术形变监测在湖泊洲滩区域会出现严重的失相干问题, 该文利用 2017 年 3 月—2022 年 12 月间枯水期的 Sentinel-1A 卫星数据, 采用小基线子集干涉合成孔径雷达方法, 获得洞庭湖洲滩地表面形变监测结果, 揭示其时空变化; 研究湖区冲淤变化、降水以及人类活动等因素对洲滩地表面形变的影响。结果表明: ①洞庭湖洲滩地区的地表面形变时空分布不均, 且大部分地区的形变速率在 -6 mm/月 ~ 6 mm/月 之间; ②枯水期洞庭湖洲滩地表面形变与降水事件呈负相关; ③洲滩地表面形变主要是由湖内泥沙冲淤引起的, 这与降水变化和湖区水体覆盖动态变化密切相关。

关键词: SBAS-InSAR; 洞庭湖洲滩; 形变监测

【中图分类号】 P236.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-2307(2024)04-0080-12

Surface deformation monitoring of Dongting Lake beach based on SBAS-InSAR technology

XIE Chunyi, WANG Qijie, ZHANG Ya, YAN Dong, LI Jiachen

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In response to the large fluctuation range of water level in the Dongting Lake area, which leads to serious incoherence issues in deformation monitoring based on InSAR technology in lake and beach areas, this article uses Sentinel-1A satellite data during the dry season from March 2017 to December 2022, and uses a small baseline subset interferometric synthetic aperture radar method to obtain surface deformation monitoring results of Dongting Lake and beach areas, revealing their spatiotemporal changes; Study the effects of factors such as erosion and sedimentation changes, precipitation, and human activities in the lake and beach areas on the surface deformation of the shoals. The results indicate that ① the spatiotemporal distribution of surface deformation in the Dongting Huzhou Beach area is uneven, and the deformation rate in most areas ranges from -6 mm/month to 6 mm/month ; ② — There is a negative correlation between surface deformation and precipitation events in Dongting Lake during the dry season; ③ The surface deformation of beach areas is mainly caused by the erosion and deposition of sediment in the lake, which is closely related to changes in precipitation and dynamic changes in water cover in the lake area.

Keywords: SBAS-InSAR; Dongting Lake beach; deformation monitoring

作者简介: 谢春逸(1999—), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为 InSAR 地表形变。

E-mail: xcy123@csu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-06

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(21A0006); 长沙市自然科学基金项目(kq2208262); 湖南省研究生科研创新项目(CX20220102); 中南大学研究生创新项目(2022ZZTS0011)

通信作者: 王琪洁 教授 E-mail: qjwang@csu.edu.cn

0 引言

洞庭湖作为我国第二大淡水湖,包括东洞庭湖、南洞庭湖、目平湖等多个湖泊,是长江流域重要调蓄湖泊。湖泊洲滩是湖泊中水深时淹没、水浅时露出的处于动态变化的滩地,且洞庭湖主要由水体与洲滩组成。近年来,大量泥沙淤积在洞庭湖区,致使洲滩发育扩张,湖区库容量较少,削弱了湖区蓄洪防洪能力,给该地区的水利设施建设与人民生命财产带来了巨大的安全隐患^[1-3]。泥沙引起湖区形变主要包含流水侵蚀导致的地表沉降与泥沙沉积导致的地表抬升两个过程。因此,开展大范围、长时序、高精度的洞庭湖洲滩地表形变监测,了解洞庭湖洲滩的侵蚀、淤积变化过程,可以定性、定量地反映泥沙侵蚀、淤积的面积、范围、分布及其动态变化,能够全面揭示洞庭湖洲滩的时空演化规律,同时也能够为洞庭湖洲滩的科学管理以及湖区的洪水灾害预防提供可靠的科学依据。

传统形变监测手段,如地面水准测量和 GPS 测量等具有较高的观测精度和较好的时间连续性,但其有限的监测范围,难以满足对大范围地表进行形变监测的需求^[4-5]。此外,洞庭湖洲滩作为湖水消落区,并不利于野外监测活动的开展^[6]。相比之下,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术具有全天时、全天候以及监测范围广等特点,且不依赖于监测环境,为湖泊洲滩形变监测提供了新的发展契机。自上世纪末以来,基于 InSAR 技术发展得到的差分合成孔径雷达干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术逐渐应用于大范围地表形变监测。尽管如此,由于技术原理的限制,D-InSAR 存在显著的局限性,包括难以提供长时间序列的地表形变信息以及容易受到时空失相干和大气延迟误差等因素的影响。为了克服这些局限,以永久散射体(persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)技术及小基线集(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术等为代表的时序 InSAR 技术逐渐发展,其在理论上具有毫米级的形变反演精度,并且已广泛应用于地震、滑坡、冻土等领域^[7-13]。近年来,InSAR 技术也被逐渐应用于洞庭湖区形变监测。文献[14]首次在洞庭湖盆地沉降研究中引入 D-InSAR 的概念,并从理论层面上探讨了 D-InSAR 监测洞庭湖盆地非均匀沉降的可行性。文献[15]基于 D-InSAR 技术使用 6 个月 Sentinel-1

数据开展洞庭湖堤坝的形变监测,获取堤坝时序形变信息。文献[16-17]基于 PS-InSAR 技术对东洞庭湖周围基础设施分布密集的区域开展 16 个月的形变监测,监测结果与现存资料具有较好的一致性。文献[18]利用 Sentinel-1 数据和 SBAS-InSAR 技术监测了 2017 年—2019 年东洞庭湖地表形变,并揭示了水土流失、人类活动与地表形变的关系。文献[19]通过 SBAS-InSAR 技术监测了 2018 年—2021 年洞庭湖流域形变监测。当前针对洞庭湖的 InSAR 形变监测,监测周期普遍较短,且多集中于东洞庭湖以及湖区基础设施,缺少针对整个洞庭湖洲滩的大范围、长时序的形变监测研究。

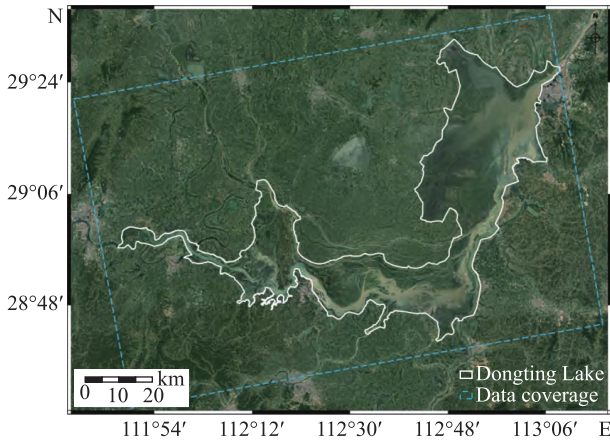
由于洞庭湖具有“水落露滩、水涨成湖”的特点,旱涝交替过程导致失相干现象,使得常规时序 InSAR 技术,包括 PS-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术,在获取准确的洲滩地表形变信息方面面临挑战^[20]。具体而言,PS-InSAR 技术的准确性在很大程度上取决于 PS 点的质量和数量。然而,在洞庭湖洲滩区域,由于植被相对较多,稳定的地物点相对较少,这严重制约了 PS-InSAR 技术的应用。与之相比,SBAS-InSAR 技术无需依赖于研究区内的稳定点,且对数据量要求较低,因此更适用于洲滩地区的地表形变监测。基于此,本文选择了洞庭湖地区 2018 年—2022 年枯水期的干涉对,基于 SBAS-InSAR 技术获取不同年份枯水期洲滩形变结果,以揭示洞庭湖洲滩地表形变的时空变化,并研究湖区冲淤变化、降水以及人类活动等因素对洲滩地表形变的影响,为洞庭湖区安全管理提供科学的参考意见,为区域的地表监测和安全预警提供数据支持。

1 研究区和数据集

1.1 研究区域概况

洞庭湖位于湖南省东北部(111.6°E~113.3°E, 28.5°N~29.6°N)(图 1),是我国第二大淡水湖,也是长江流域重要的分洪沉沙调蓄湖泊。整个湖区总面积约 4 400 km²,湖泊面积约 2 690 km²。洞庭湖区域地势总体上呈现出从西南向东北递减的走势,西南部分为山地和丘陵地带,其海拔相对较高,而东北部分则为河湖水系所占主导地区,其海拔较低。4 条重要汇流水系湘江、资水、沅江、澧水以及汨罗江等小支流沿此地势流向汇入洞庭湖,最终由岳阳市城陵矶注入长江。受亚热带季风性湿润气候影响,研究区年均气温 16.15℃,

年均降水量在 1 250~1 450 mm 之间,无霜期为 258~274 d。



注:蓝色虚线表示本文 Sentinel-1 SAR 数据覆盖范围,
白色实线表示洞庭湖边界,底图是光学影像图

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of Study Area

洞庭湖是典型的季节变化型湖泊,其季节性水域面积占总面积的 48.74%。**水位变化表现出明显的季节性规律**:4 月水位开始上升,并于 6—8 月达到最高水位,期间称为丰水期;此后,水位开始下降,并在 12 月至次年 3 月形成枯水期。丰水期平均水位高达 34 m 以上,而枯水期平均水位不足 22 m。这种季节性的水位变化形成了大面积的水陆生态区域^[21]。

1.2 数据集

本文选用 2017 年 3 月—2022 年 12 月枯水期的 Sentinel-1A 单视复数影像作为实验数据,其极化方式为 VV,所处波段为 C 波段,重访周期为 12 d。此外,利用 Sentinel-1 SAR 数据的 GRD 产品提取洞庭湖水体信息、采用覆盖研究区 30 m 分辨率的 SRTM DEM 数据进行地形相位的去除。

2 方法

2.1 SBAS-InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术在 D-InSAR 技术的基础上,根据时空基线阈值组成差分干涉对。以满足阈值条件的干涉图作为初始量,基于最小二乘 (least square, LS) 法或奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 法求得形变时间序列^[8]。该技术的基本原理如下:

对于覆盖同一区域的 $N+1$ 景 SAR 影像,以其中一幅 SAR 影像为主影像,将其余影像与其进

行配准,然后通过设置时间和空间基线阈值,对这 $N+1$ 景 SAR 影像进行小基线组合,生成 M 对干涉对, M 与 N 的关系满足式(1)。

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2} \quad (1)$$

利用外部 DEM 数据,对生成的 M 对干涉对进行差分处理,即可得到对应的 M 幅差分干涉图。第 i ($i=1, \dots, M$) 幅差分干涉相位图中,位于 (x, r) 处的某个高相干点目标的相位值可表示为式(2):

$$\Delta\varphi_i(x, r) = \varphi(t_A, x, r) - \varphi(t_B, x, r) \approx [\varphi_d(t_A, x, r) - \varphi_d(t_B, x, r)] + \Delta\varphi_{i, \text{topo}}(x, r) + \Delta\varphi_{i, \text{atm}}(x, r) + \Delta\varphi_{i, \text{noise}}(x, r) \quad (2)$$

式中: t_A 和 t_B 分别表示组成第 i 个干涉对的主辅 SAR 影像的获取时间; $\Delta\varphi_{i, \text{topo}}(x, r)$ 表示地形残差相位; $\Delta\varphi_{i, \text{atm}}(x, r)$ 表示大气延迟相位; $\Delta\varphi_{i, \text{noise}}(x, r)$ 表示噪声相位; $\varphi_d(t_A, x, r)$ 和 $\varphi_d(t_B, x, r)$ 分别为像元在时刻 t_A 和时刻 t_B 相对参考时间 t_0 沿雷达视线向的累积形变相位值,形变量与对应相位值之间的关系如式(3)所示:

$$\varphi_d(t_i, x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} d(t_i, x, r) \quad (3)$$

以某像元在所有 SAR 影像中的相位组成的向量为待求参数,表示为式(4)。

$$\boldsymbol{\varphi} = [\varphi(t_1), \dots, \varphi(t_N)]^T \quad (4)$$

以该像元在所有解缠后的差分干涉图中的相位组成的向量为观测量,表示为式(5)。

$$\Delta\boldsymbol{\varphi} = [\Delta\varphi(t_1), \dots, \Delta\varphi(t_M)]^T \quad (5)$$

将待求参数向量和观测向量用矩阵形式表示为式(6)。

$$\Delta\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varphi} \quad (6)$$

式中: \mathbf{A} 为 $M \times N$ 阶系数矩阵。若 $M \geq N$, 可根据最小二乘算法进行求解,计算可得式(7)。

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta\boldsymbol{\varphi} \quad (7)$$

若 $M < N$, 此时矩阵 \mathbf{A} 秩亏,式(6)有不正一个解。这种情况下,需要借助奇异值分解法进行求解。对矩阵 \mathbf{A} 进行奇异值分解可得式(8)。

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{W}^T \quad (8)$$

式中: \mathbf{U} 为 $M \times M$ 阶正交矩阵; \mathbf{S} 是对角元素等于奇异值 σ_i ($i=1, \dots, N$) 的矩阵, $\mathbf{S}^{-1} = \text{diag}(1/\sigma_1, \dots, 1/\sigma_{N-L+1}, 0, 0)$; \mathbf{W} 为 $N \times M$ 阶正交矩阵。

将式(8)代入式(6)进行求解可得式(9)。

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{W}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^T \Delta\boldsymbol{\varphi} \quad (9)$$

然而,利用奇异值分解法求解相位,解算结果在时间序列上容易出现较大的相位跳跃,这与

真实的物理规律不符。为了解决这一问题,可以将相位的求解问题转化为相位变化速率的求解问题,从而获取符合物理意义的解,此时待求参数向量转化为式(10)。

$$\mathbf{v}^T = \left[v_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{t_1 - t_0}, \dots, v_n = \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (10)$$

将式(10)带入式(9),式(6)可转化为式(11)。

$$\Delta\varphi = \mathbf{B}\mathbf{v} \quad (11)$$

对上式中的 $M \times N$ 阶系数矩阵 \mathbf{B} 进行奇异值分解,可获取各时间段内的相位变化速率 \mathbf{v} ,在此基础上,计算并恢复相位时间序列,可获取形变时间序列。

2.2 数据处理

洞庭湖在枯水期和丰水期的交替过程中,失相干现象严重,导致 SBAS-InSAR 方法难以获取丰水期洲滩的形变监测结果。因此,本文仅将 SBAS-InSAR 方法应用于枯水期的洲滩形变监测,而非整个监测时期。

本文使用 GAMMA 软件,利用 SBAS 技术对获取到的覆盖洞庭湖洲滩区域的 Sentinel-1 SAR 数据进行处理,首先以 2019 年 12 月 3 日的影像作为主影像,将其余影像与其配准;为保证监测结果的可靠性,将时、空基线阈值分别设置为 60 d 和 150 m;同时,利用 30 m 的 SRTM 数据作为外

部 DEM 产品,进行地形相位去除;然后用最小费用流法进行相位解缠;根据相位解缠的质量对干涉对进行进一步筛选,同时挑选出枯水期的干涉对,时空基线分布如图 2 所示。为了减小差分干涉图中低相干性引起的误差,SBAS-InSAR 只计算高相干点。本研究采用相干性系数平均阈值法和最小阈值法选取高相干点。

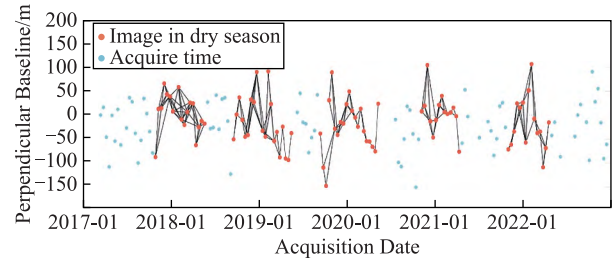


图 2 时空基线图

Fig. 2 Temporal and Perpendicular Baselines

3 结果

3.1 枯水期洲滩地表形变结果

采用 SBAS-InSAR 数据处理方法,对 2017 年—2022 年间洞庭湖洲滩 5 a 枯水期 SAR 数据进行处理(各枯水期的 SAR 影像数量分别为 17、20、21、14、15),获取枯水期的地表形变速率,其中形变速率的正负值分别表示地面的抬升和沉降情况。地表形变速率图(图 3)表明,洞庭湖洲滩地区的

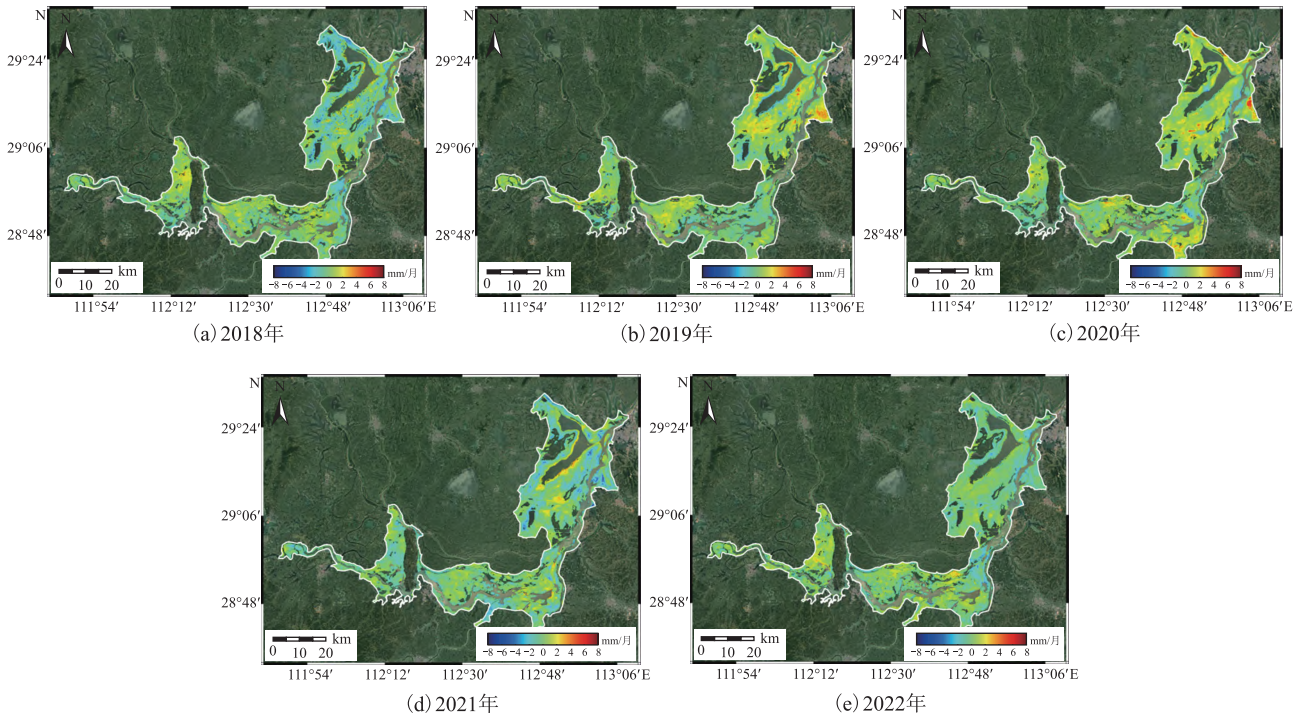


图 3 2018—2022 年枯水期洞庭湖月均形变速率

Fig. 3 The Monthly Average Deformation Rate Across Dongting Lake in the Dry Seasons from 2018 to 2022

形变空间分布不均匀,在局部区域发现几处明显的抬升或下沉现象,主要位于汇集河流沿岸以及水位频繁变化的区域,且大部分地区的形变速率在 $-6\text{ mm/月}\sim 6\text{ mm/月}$ 之间。具体而言,2018年、2021年和2022年,整体地表形变呈现出沉降趋势,但在局部区域存在抬升现象,抬升区域主要位于湖泊集水区沿岸、东洞庭中部漂尾洲以及目平湖松澧三角洲。然而,在2019年和2020年,整体地表形变趋势相反,表现出抬升趋势,但仍伴随着局部区域的沉降现象,沉降区域主要位于湖泊内部河道沿岸以及目平湖沅江三角洲。由于缺乏相应的同期水准观测数据,我们将获得的监测结果与已发表的相关文献进行了对比^[17-18]。比较结果显示,形变区域的分布、走向和形变量级均与已有研究基本一致。

为进一步了解洞庭湖洲滩的地表形变分布情况,本文将月均形变速率分为6个等级,分别是

重度沉降区($<-4\text{ mm/月}$)、中度沉降区($-4\sim -2\text{ mm/月}$)、轻微沉降区($-2\sim -0.5\text{ mm/月}$)、稳定区($-0.5\sim 0.5\text{ mm/月}$)、轻微抬升区($0.5\sim 2\text{ mm/月}$)、重度抬升区($>2\text{ mm/月}$),并统计每一级别的百分比(表1)^[17]。

表 1 枯水期地表形变强度统计表

Tab. 1 Surface Deformation Intensity Statistics in the Dry Seasons %

形变强度等级	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
重度沉降区	2.52	0.62	0.78	0.88	1.36
中度沉降区	13.74	5.24	5.24	10.19	7.48
轻微沉降区	27.43	20.20	19.51	33.79	29.76
稳定区	25.52	35.31	29.07	31.56	34.69
轻微抬升区	22.51	29.73	35.53	20.75	21.44
重度抬升区	8.27	8.91	9.89	2.83	5.28

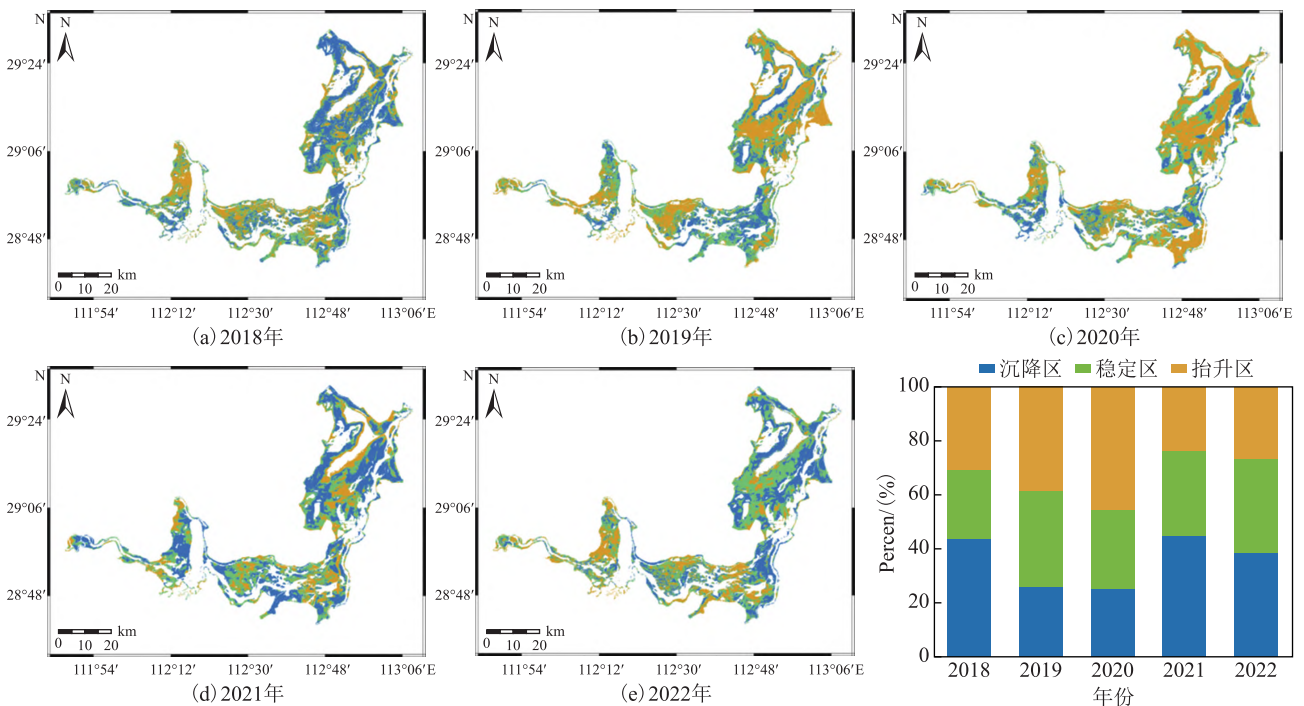


图 4 2018—2022 年枯水期洞庭湖洲滩形变趋势空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of Deformation Trend of Dongting Lake Beach in the Dry Seasons from 2018 to 2022

由图4可以看出,在枯水期,洞庭湖洲滩地表形变的空间分布呈现复杂的动态特征。具体而言,抬升区域面积在监测时期内经历了逐渐扩大、达到最大值后再减小、再次扩大的变化趋势,而沉降区域面积变化趋势与之相反。在湖泊内部河道以及集水区周围,因河水冲蚀作用,存在沉降或抬升现象。在2018年、2021年和2022年,洲滩表现出整体沉降,但局部区域有抬升现

象,抬升区域面积比例都低于30%;而在2019年和2020年则呈现相反的趋势,即整体抬升但存在局部沉降现象,沉降区域面积比例都低于26%。

3.2 重点沉降区域分析

为深入研究洞庭湖洲滩的形变分布特征,分别在东洞庭湖、南洞庭湖和目平湖3个区域选取形变速率相对较大的区域开展局部分析。

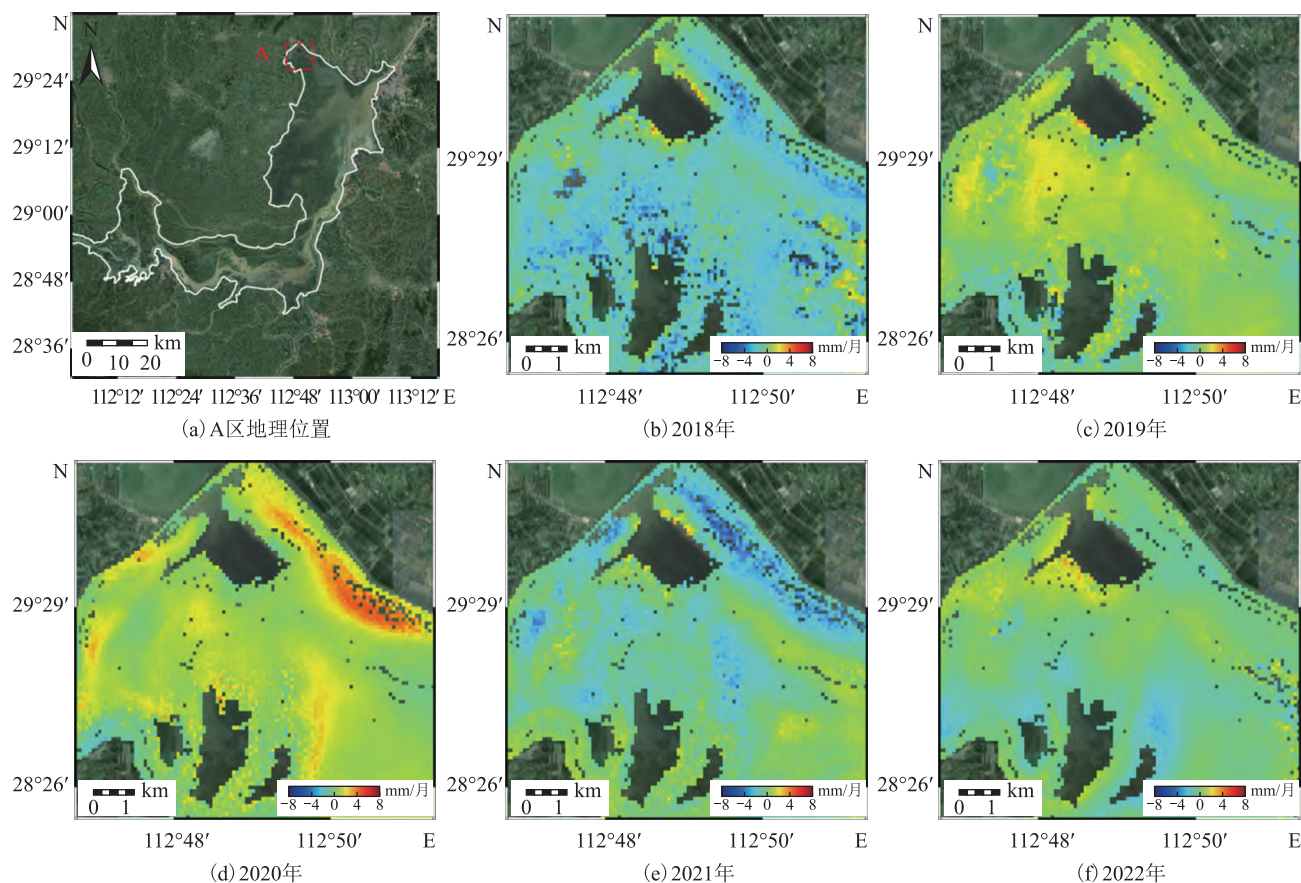


图5 A区2018—2022年枯水期月均形变速率

Fig. 5 The Monthly Average Deformation Rate in Region A in the Dry Seasons from 2018 to 2022

图5A区位于东洞庭湖的西北角, 这里设有一个小型蓄洪区。该蓄洪区在东洞庭湖水位过高时起调蓄作用, 缓解对其他区域的威胁, 并在枯水期向外排水。观察发现, 2018年和2021年在该区域出现了明显的沉降现象, 其沉降速率约为 -5 mm/月。据了解, 2017年、2020年夏季该区域曾发生严重的洪涝灾害, 导致整个湖区, 尤其是蓄洪区淤泥增加^[22-23]。因此, 当进入下一个枯水期, 水库进行排水时, 水流冲刷、侵蚀河岸, 进而引起严重的洲滩地表沉降现象。而2019年和2020年出现较为明显的抬升主要是由于在丰水期时泥沙落淤, 且查询资料可知, 该区域在构造上呈现抬升趋势。

图6B区位于东洞庭湖东部的新墙河入口与湖河道交汇处, 河道曲折, 河道两岸沉降显著。在丰水期, 泥沙沉淤在此, 直到枯水期来临时, 河道流水会直接冲刷这个区域, 进一步促进河道两岸的沉降。然而, 2019年、2020年的形变较其余3年较弱, 这归因于枯水期前的丰水期降水量相对较少, 从而导致新墙河以及该支流水流平缓。

同时, 该区域水体淹没频率在2021年高于其余年份, 泥沙更易在此处落淤, 受沉积作用以及河水冲刷的双重作用, 该区域表现出较为显著沉降现象。

图7C区位于南洞庭湖湘江入口处, 主要为湘江河漫滩沉积区。该河漫滩沉积呈现出明显的吞吐流特征, 即在丰水期, 洪水在滩面上漫溢, 导致悬运的泥质、粉砂等细小的颗粒物质在滩面沉积, 形成河漫滩沉积。随着水位逐步上升至一定高程, 洪水溢出河床, 水流速度急剧减小, 在河岸边形成天然堤。近年来, 该河漫滩形态无明显变化。可以发现2021年该区域发生明显沉降, 约为 -4 mm/月。在2020年丰水期, 湖区降雨量高、且降水强度大, 该区域会沉淤湘江来水以及湖区内部的泥沙。在进入枯水期时, 该区域水位波动频繁, 冲淤现象显著, 进而导致区域沉降现象显著。然而在2020年, 该区域发生明显的抬升现象, 约为 3 mm/月, 主要是因为湖泊内部河流由此汇入东洞庭湖时, 水流速度缓慢, 泥沙沉淀淤积, 从而导致较为显著的抬升现象。

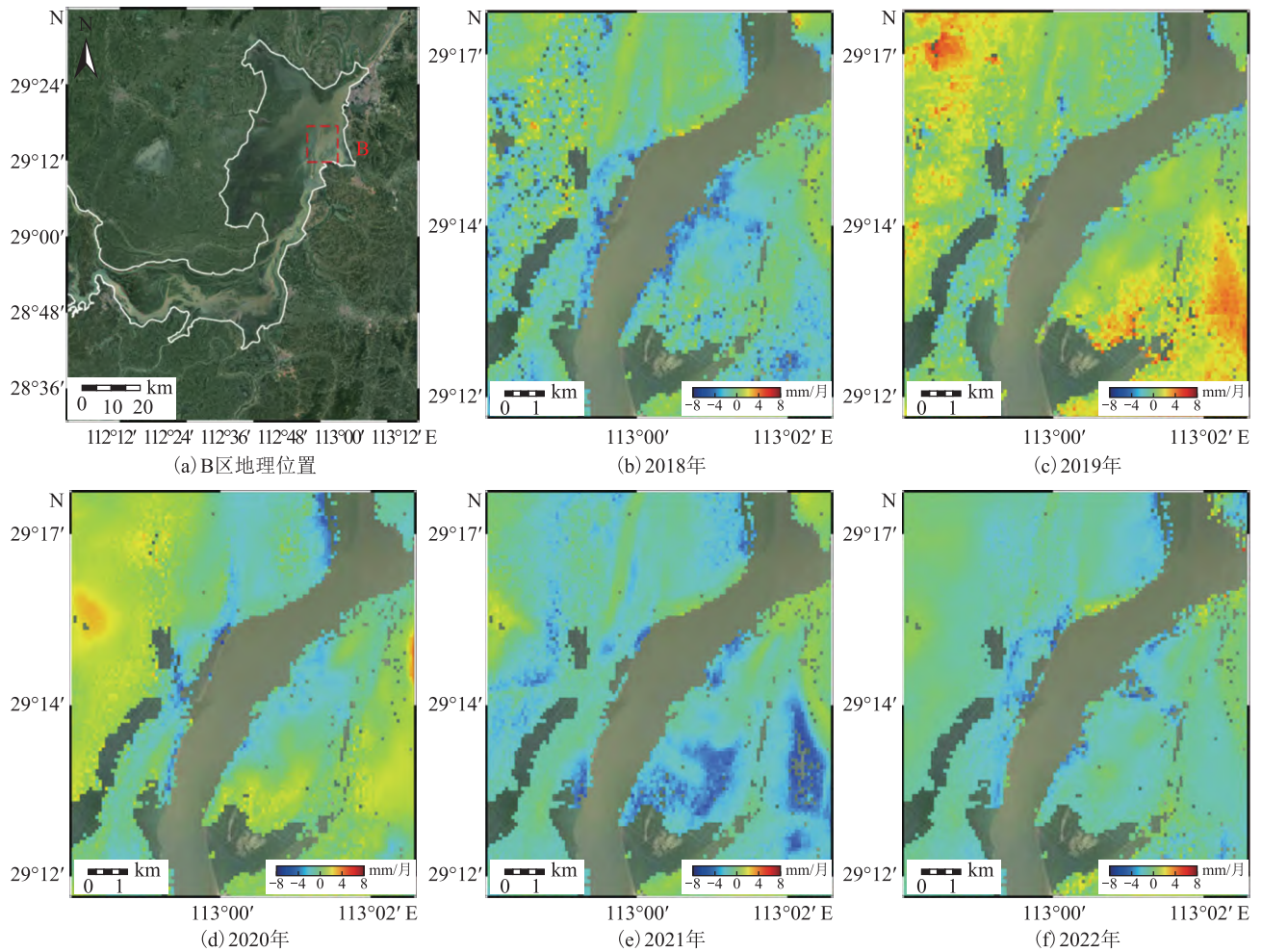


图 6 B 区 2018—2022 年枯水期月均形变速率

Fig. 6 The Monthly Average Deformation Rate in Region B in the Dry Seasons from 2018 to 2022

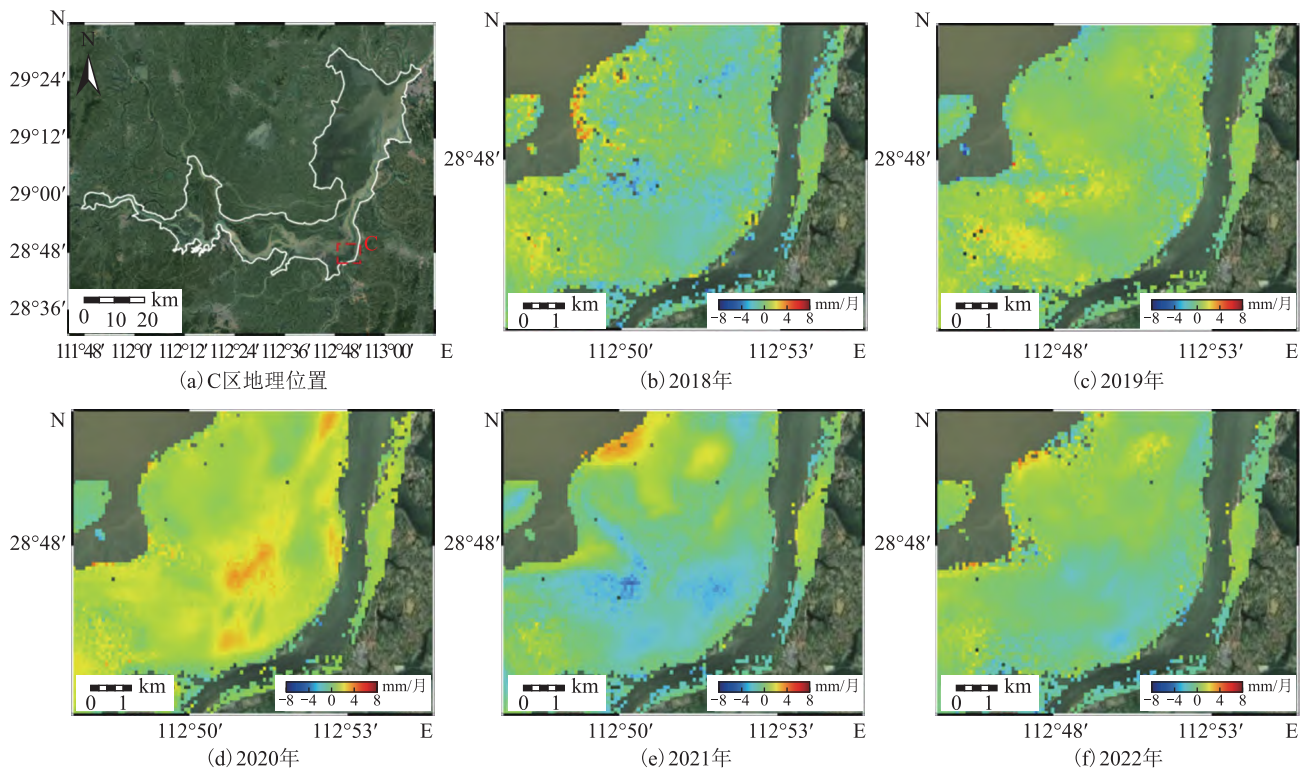


图 7 C 区 2018—2022 年枯水期月均形变速率

Fig. 7 The Monthly Average Deformation Rate in Region C in the Dry Seasons from 2018 to 2022

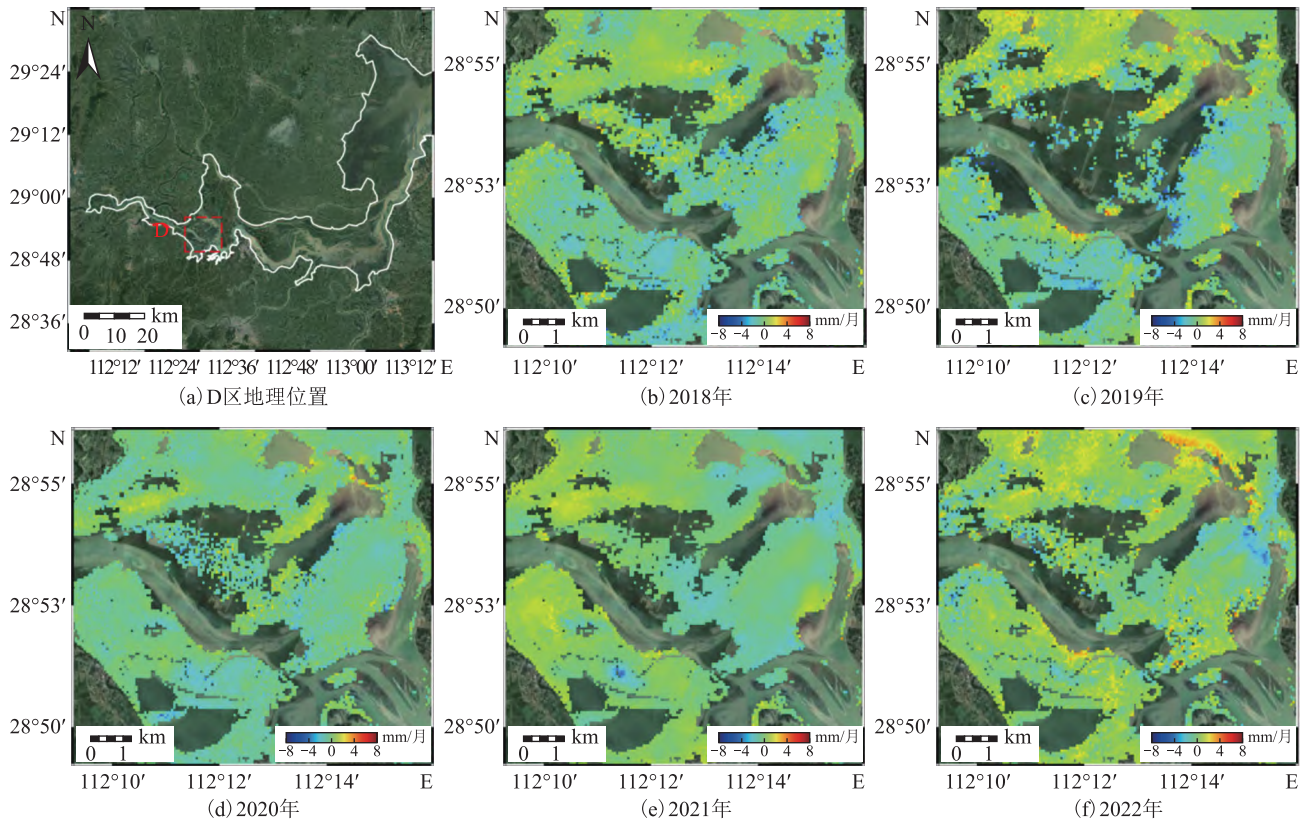


图8 D区2018—2022年枯水期月均形变速率

Fig. 8 The Monthly Average Deformation Rate in Region D in the Dry Seasons from 2018 to 2022

图8D处位于目平湖的沅江入口处的沅江三角洲。该区域西部的沅江流入目平湖后,过流断面突然开阔,导致水流速度急剧减小,泥沙大量沉淀,形成沅江三角洲。同时,由于目平湖北部洲滩的淤高超过了北部松滋河和澧水的高程,所以该区域主要的来水为沅江。在枯水期,该区域基本干枯,且均表现为不同程度的沉降,通过查阅资料发现属于沅江凹陷区域^[14]。其中,2019年该区域沉降现象最为显著,约为 -2 mm/月 。由于该区域在上一丰水期降雨量少,导致泥沙淤积较少,因此该区域构造沉降作用强于泥沙淤积作用。

4 讨论

4.1 降水对形变的影响

前人研究指出,少量降水会增加土壤粘度,从而起到抑制土壤侵蚀的作用^[24]。即枯水期降水越少,洲滩地表沉降越明显。如图9所示,2018年、2021年和2022年,洞庭湖地区枯水期的降水量与其他年份相比呈现出较低的降水量,这几年洲滩在枯水期均表现出明显的沉降趋势。此外,2017年和2020年的丰水期湖区降雨量相对较高,导致湖泊水位抬升、湖区内泥沙大量沉积,进一步加剧了洞庭湖地区洲滩地表沉降的情况。由表2可以看出,地表沉降与枯水期降水量呈负相关(相关性系

数为 -0.77),即降水量减少伴随着更显著的地表沉降趋势。相反,地表沉降与丰水期降水量呈正相关(相关性系数为 0.96),即较高的丰水期降水通常伴随着更明显的地表沉降。

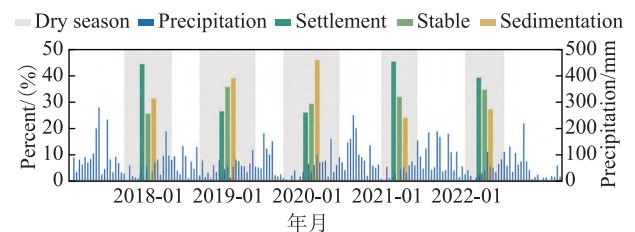


图9 降雨量及枯水期地表形变强度

Fig. 9 Precipitation and Surface Deformation Intensity in the Dry Seasons

表2 区域地表形变与枯水期、丰水期降水关系

Tab. 2 Relationship Between Regional Surface Deformation and Precipitation in the Dry and Flood Seasons

年份	沉降区/ (%)	稳定区/ (%)	抬升区/ (%)	枯水期降水/ mm	丰水期降水/ mm
2017					1 589.36
2018	43.70	25.52	30.78	837.86	634.00
2019	26.06	35.31	38.63	977.66	695.40
2020	25.52	29.07	45.41	905.41	1 421.13
2021	44.86	31.56	23.58	547.41	1 450.92
2022	38.59	34.69	26.72	629.49	

4.2 水体覆盖动态变化频次对形变的影响

对 GRD 模式的 Sentinel-1 数据进行预处理, 包括轨道校正、辐射定标、几何校正、滤波、裁剪以及后向散射系数转换。

然后基于 Sentinel-1 的 VV、VH 极化数据, 构造 Sentinel-1 双极化水体指数 (sentinel-1 dual-polarized water index, SDWI)^[26]。为了扩大水体与非水体的类间差异, 利用 OTSU 算法进行二值化阈值分割, 并通过目视解译去除船舶光斑的影响, 提取洞庭湖水体^[26]。在此基础上, 获取研究期间洞庭湖水体淹没频率, 结果如图 10 所示, 其主要特征为由湖体和河道中心向两侧递减。

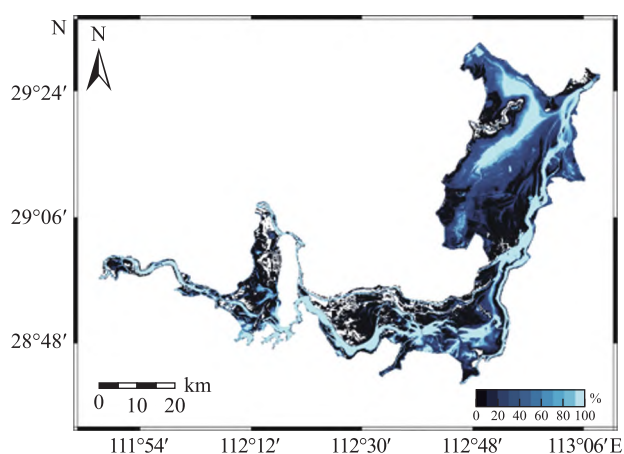


图 10 2017 年—2022 年洞庭湖淹没频率

Fig. 10 The Inundation Frequency of Dongting Lake from 2017 to 2022

水体覆盖动态变化频次, 即水体与非水体相互转换的次数^[27]。根据洞庭湖水体提取结果, 进行逐点的水体覆盖动态变化频次分析, 得到整个洞庭湖区的水体覆盖动态变化频次的空间分布图, 如图 11。假设某一像元在提取的 10 个时相中存在 5 次相邻像元的地表覆盖类型 (假设湖区的地表覆盖类型为水体和非水体) 不同, 则其水体覆盖动态变化频次为 5 次。

图 12 展示了地表形变与水体覆盖动态变化之间的相关性关系。在图中, 红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 颜色深浅反映了相关性的强度。观察图中发现, 水体覆盖动态变化频次较高的区域与地表形变呈负相关关系。这表明, 水体覆盖动态变化频次越高的区域, 地表沉降现象越显著, 这是由于这些区域易受到流水冲刷作用的影响。具体而言, 这些区域主要包括位于东洞庭湖西部的藕池河东支河口三角洲、中部的漂尾洲以

及东部的新墙河三角洲, 同时还包括南洞庭湖东部的湘江河漫滩沉积区以及目平湖的沅江三角洲。

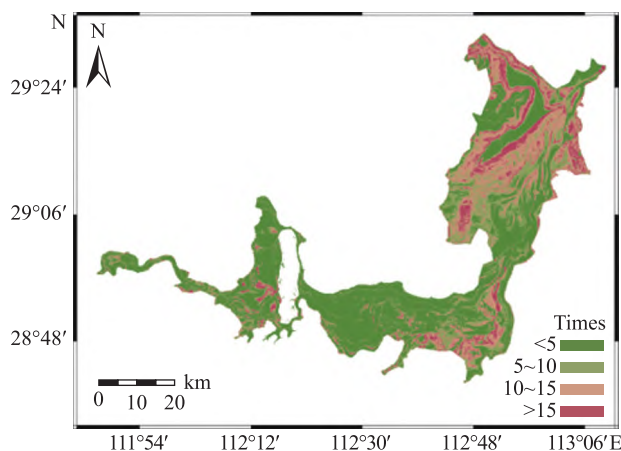


图 11 水体覆盖动态变化频次

Fig. 11 Water Cover Dynamic Change Frequency

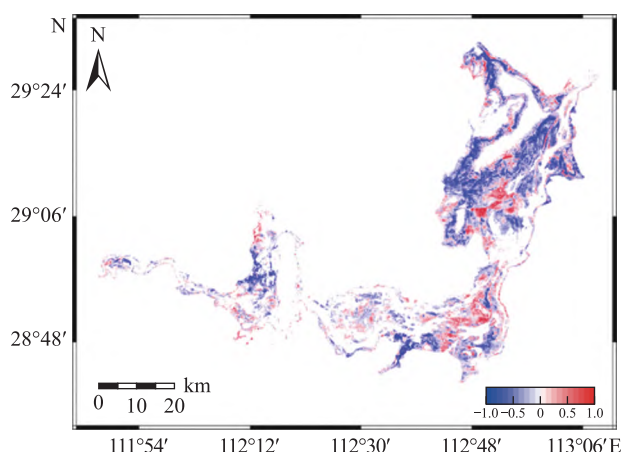


图 12 地表形变与水体覆盖动态变化之间的相关性关系

Fig. 12 The Correlation between Surface Deformation and Dynamic Changes in Water Cover

4.3 区域地表形变原因

4.3.1 土壤侵蚀

土壤侵蚀作为一种持续存在于地球表面的地貌过程, 是目前全球最严重的环境问题之一, 对农业、土壤养分和地表完整性构成了严重威胁^[28]。洞庭湖平原湿地作为湖南省水土流失重点预防带, 承接湖南省主要河流泥沙, 流域土壤侵蚀模数约 $3\,970\text{ t/km}^2$ ^[29]。土壤侵蚀的主要类型是水蚀, 包括地表侵蚀和沟道侵蚀。局部地区还有少量崩塌、滑坡等土壤侵蚀。丰水期是洞庭湖的关键淤积期, 淤积泥沙超过年平均泥沙淤积量。但在枯水期, 侵蚀作用大于淤积作用, 丰水期淤积量的

10%被冲刷出洞庭湖^[30]。本研究所监测的地表形变与土壤侵蚀特征吻合较好。由此我们可以推测,水土流失和泥沙淤积是洞庭湖地表变形的主要原因。

丰水期湖水含有大量泥沙,进入枯水期,湖泊水位随之下降,河漫滩上残存的泥沙就会随流水流入集水区,并可能侵蚀流经区。特别是在漫滩与集水区交界处,在外来流水和集水区水循环的双重作用下,冲刷效应更加明显。洞庭湖区的聚落主要集中在东洞庭湖集水区的南部和西部,说明这些地区的侵蚀十分显著。这两个集水区是旱季水流的主要来源。另一个聚落区域在内部河道沿岸。枯水期流水过弯时,流水压力增大,河水对河岸的冲刷力更大,冲刷作用更明显。通过监测研究发现,水体覆盖动态变化频次高的区域易发生土壤侵蚀现象,且这些区域同时表现出地表沉降的显著特征。

4.3.2 人类活动

人类活动会影响湖泊的水文条件,且农业开垦会造成更易受侵蚀的垦区土壤破坏,导致河流中的沉积物增加。

洞庭湖平原圩区众多,是国家商品粮基地之一。农业种植过程中的人类活动和灌溉用水抽取也会引起部分地区地表变形,如位于东洞庭湖西南部的漉湖芦苇场区域在各枯水期均表现出沉降趋势。

4.3.3 洲滩侵占退化

洞庭湖被自然岸线和防洪大堤所围,由水面和洲滩两种地物类型构成,它们的边界呈现出犬牙状的交错,湖泊内洲滩与水面随着水位的升降呈现出此消彼长的互补特性。洞庭湖周边的河流不断向湖泊输入泥沙,使水系洪涝变化和泥沙淤积呈现出复杂性,湖区的湿地系统和环境在不同区域受到了不同程度的侵占和破坏。湿地在各生态群落、水质保障以及农作产业等方面发挥着重要的价值^[31]。

洞庭湖区域的欧美黑杨种植问题是湿地和洲滩环境破坏的另一重要因素。欧美黑杨的生态入侵导致生态平衡失控,引发水土成分变化和环境破坏。洲滩环境破坏表现为植被类型和地貌的转变,生态失衡以及水土营养流失。通过监测研究,我们发现部分洲滩区域不仅呈现出不均匀抬升的趋势,而且受到流域水系对泥沙的冲刷作用的影

响,引发了地表形变和洲滩的冲淤现象。随着淤积的增加,苔草、芦苇等植被入侵,且这些植物特性促进了其快速蔓延生长,导致区域湿地侵占退化和洲滩环境破坏。

5 结束语

本文利用 2017 年—2022 年间 Sentinel-1A SAR 数据对洞庭湖洲滩地表形变进行监测,获取了该区域形变速率。因洞庭湖具有独特的湖泊形态,即“水落露滩、水涨成湖”,对其相干性影响较大。如果将 SBAS-InSAR 方法应用于多年的数据集,将会在后续的变形结果估计中造成严重的误差。因此,选取枯水期的 Sentinel-1A 数据,估算洲滩地表形变。主要的结论如下:

1)洞庭湖洲滩地区的形变时空分布不均,且大部分地区的形变速率在 $-6\text{ mm/月}\sim 6\text{ mm/月}$ 之间。其中 2019 年、2020 年表现出整体抬升、局部沉降,而其余几年与之相反,地表变形区域主要分布在汇集河流沿岸以及水位频繁波动的区域。

2)枯水期洞庭湖洲滩地表形变与降水事件呈负相关,2018 年和 2021 年枯水期洲滩主要表现为沉降趋势,且这两年枯水期降水量以及降水次数较其余几年有所减少。

3)水体覆盖动态变化频次较高(变化频次高于 10 次)的区域形变也较为明显,主要位于东洞庭湖西部的藕池河东支河口三角洲、中部的漂尾洲、东部的新墙河三角洲,南洞庭湖东部的湘江河漫滩沉积区以及目平湖的沅江三角洲。

4)洞庭湖洲滩形变受到构造运动、泥沙淤积和人类活动的综合影响,通过对形变特征、降水以及湖区水体覆盖动态变化分析认为洲滩地表形变基本是因湖内泥沙冲淤引起的。

参考文献

- [1] 来红州,莫多闻,苏成. 洞庭湖演变趋势探讨[J]. 地理研究,2004(1):78-86. (LAI Hongzhou, MO Duowen, SU Cheng. Discussion on the evolutionary trend of Lake Dongting[J]. Geographical Research, 2004, 23(1):78-86.)
- [2] LI Jingbao, YIN Hui, CHANG Jiang, et al. Sedimentation effects of the Dongting Lake area[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(3):287-298.

- [3] RAHMAN M R, SHI Z H, CAI C F. Soil erosion hazard evaluation—an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(13): 1724-1734.
- [4] TEATINI P, FERRONATO M, GAMBOLATI G, et al. A century of land subsidence in Ravenna, Italy [J]. *International Journal of Geosciences: Environmental Geology*, 2005, 47(6): 831-846.
- [5] MA Fuxun, XI Ruijie, XU Nan. Analysis of railway subgrade frost heave deformation based on GPS [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7(2): 143-147.
- [6] 杨俊凯, 颜惠庆. 无人机机载 LiDAR 在长江下游洲滩地形测量中的应用 [J]. *中国港湾建设*, 2021, 41(9): 42-45. (YANG Junkai, YAN Huiqing. Application of UAV airborne LiDAR in topographic surveying of marshland on lower reaches of the Yangtze River [J]. *China Harbour Engineering*, 2021, 41(9): 42-45.)
- [7] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
- [8] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [9] HOOPER A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): L16302.
- [10] 燕翱翔, 蒋亚楠, 廖露, 等. 2017 年伊朗 Mw7.4 地震三维同震形变场及滑动分布 [J]. *测绘科学*, 2022, 47(10): 132-141, 160. (YAN Aoxiang, JIANG Yanan, LIAO Lu, et al. Three-dimensional isoseismic deformation field and sliding distribution of the 2017 Mw7.4 earthquake in Iran [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(10): 132-141, 160.)
- [11] 朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR 滑坡监测研究进展 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2001-2019. (ZHU Jianjun, HU Jun, LI Zhiwei, et al. Recent progress in landside monitoring with InSAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2001-2019.)
- [12] 武志刚, 陈恒祎, 赵超英, 等. 联合升降轨 PS-InSAR 技术的滑坡二维形变监测 [J]. *测绘科学*, 2023, 48(5): 183-190. (WU Zhigang, CHEN Hengyi, ZHAO Chaoying, et al. Monitoring two-dimensional deformation of landslides by combining ascending and descending PS-InSAR technique [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(5): 183-190.)
- [13] YANG Honglei, QIAO Jiang, HAN Jianfeng, et al. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on Fenghuoshan Mountains section, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2021, 32(6): 1284-1303.
- [14] 徐斌. 基于 DEM 的洞庭湖盆地非均匀沉降研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2011. (XU Bin. Research about differential subsidence of Dongting Lake Basin based on DEM [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2011.)
- [15] 袁会林, 谭三清, 李建辉, 等. 基于 SAR 的洞庭湖堤坝形变监测方法研究 [J]. *科技资讯*, 2019, 17(2): 92-95. (YUAN Huilin, TAN Sanqing, LI Jianhui, et al. Research on deformation monitoring method of Dongting Lake dams based on SAR [J]. *Science & Technology Information*, 2019, 17(2): 92-95.)
- [16] BAO Liang, XING Xuemin, CHEN Lifu, et al. Time series deformation monitoring over large infrastructures around Dongting Lake using X-band PSI with a combined thermal expansion and seasonal model [J]. *Journal of Sensors*, 2021: 6664933.
- [17] 朱珺, 朱凌杰, 邢学敏, 等. 洞庭湖软土区域时序 InSAR 形变与环境物理参数联合估计方法 [J]. *测绘学报*, 2023, 52(12): 2127-2140. (ZHU Jun, ZHU Lingjie, XING Xuemin, et al. Joint estimation method of time-series InSAR deformation and environmental physical parameters for soft clay area over Dongting Lake [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(12): 2127-2140.)
- [18] ZHANG Heng, SUN Qian, HU Jun. Analysis of surface deformation in East Dongting Lake based on 2016-2019 Sentinel-1A dataset [J]. *Journal of Sensors*, 2021: 5524057.
- [19] 卢锋. 基于 InSAR 技术与 Offset-tracking 方法的洞庭湖区域地表形变监测与分析 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022. (LU Feng. Monitoring and analysis of surface deformation in Dongting Lake area based on InSAR technology and offset-tracking method [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.)
- [20] 余德清, 皮建高. 洞庭湖区洲土变化特征与地壳沉降遥感研究 [J]. *湖南地质*, 2002, 21(1): 46-50, 76. (YU Deqing, PI Jianguo. Study on changes in shoal soil and remote sensing of crustal subsidence in Dongting Lake Area [J]. *Hunan Geology*, 2002, 21(1): 46-50, 76.)
- [21] 张晓斌, 周俊杰, 陈熙, 等. 2013~2018 年东洞庭湖水

- 域面积变化遥感监测与分析[J]. 人民长江,2022,53(S1):21-24. (ZHANG Xiaobin,ZHOU Junjie,CHEN Xi,et al. Remote sensing monitoring and analysis of water area change in East Dongting Lake from 2013 to 2018[J]. Yangtze River,2022,53(S1):21-24.)
- [22] 尹志杰,王容,李磊,等. 长江流域“2017·07”暴雨洪水分析[J]. 水文,2019,39(2):86-91. (YIN Zhijie,WANG Rong,LI Lei,et al. Analysis of storm flood occurred in the Yangtze River basin in July,2017[J]. Journal of China Hydrology,2019,39(2):86-91.)
- [23] 黄治勇,王婧羽,周文. 2020年7月4—8日长江中游极端暴雨特征分析[J]. 暴雨灾害,2021,40(4):333-341. (HUANG Zhiyong,WANG Jingyu,ZHOU Wen. Characteristics analysis of an extreme heavy rain event in the middle reaches of the Yangtze River from July 4 to 8 in 2020[J]. Torrential Rain and Disasters,2021,40(4):333-341.)
- [24] KATEB H E,ZHANG H,ZHANG P,et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province,China[J]. Catena,2013,105:1-10.
- [25] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江,2019,50(2):213-217. (JIA Shichao,XUE Dongjian,LI Chengrao,et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel-1 data[J]. Yangtze River,2019,50(2):213-217.)
- [26] OTSU N. A threshold selection method from gray level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,1979,9(1):62-66.
- [27] 余姝辰. 基于历史地图和多源遥感数据的近百年来洞庭湖区江湖格局演化[D]. 武汉:中国地质大学,2021. (YU Shuchen. Evolution of the river-lake pattern in the Dongting Lake region in the past 100 years based on historical maps and multi-source remote sensing data[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.)
- [28] WANG Lihui, HUANG Jinliang, DU Yun, et al. Dynamic assessment of soil erosion risk using Landsat TM and HJ satellite data in Danjiangkou Reservoir area, China [J]. Remote Sensing, 2013, 5 (8): 3826-3848.
- [29] 张生,朱诚. 长江流域水土流失及其对洪灾的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(6):9-13. (ZHANG Sheng,ZHU Cheng. Soil loss and its effect on flooding catastrophe in Yangtze Drainage Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(6):9-13.)
- [30] GAO Junfeng, ZHANG Chen, JIANG Jiahu, et al. Analysis of deposition and erosion of Dongting Lake by GIS[J]. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11 (4):402-410.
- [31] 庄大昌. 洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 经济地理,2004,24(3):391-394,432. (ZHUANG Dachang. The evaluation of the ecosystem services value in Dongting Lake wetland [J]. Economic Geography,2004,24(3):391-394,432.)