

# 基于水文单元划分的SBAS-InSAR湿地水位监测方法—以美国路易斯安那州为例

赵金奇<sup>1</sup>, 沈昶旭<sup>1</sup>, 司锦钊<sup>2</sup>, 王子璇<sup>1</sup>, 周正培<sup>3</sup>, 牛玉芬<sup>3</sup>, 路中<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054;

3. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038

**摘要:** 作为湿地最重要的生态指标之一, 水位直接反映了湿地的水文过程与生态格局, 对其进行高效、准确的监测是湿地保护与恢复的关键。合成孔径雷达干涉测量InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 凭借其大范围、全天候和高精度的优势, 已被成功应用于湿地水位监测。然而, 湿地内部水文连通性存在显著差异, 导致传统InSAR技术在大范围水位解算时面临跨水文单元解算误差以及水位基准不统一等问题。针对上述问题, 本文提出了一种基于水文单元划分的短基线集干涉测量SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) 湿地绝对水位变化监测方法。首先, 利用多期Sentinel-1 SAR影像和全球土地覆盖数据, 综合分析研究区水文连通性, 将其划分为多个独立的水文单元。进一步, 在各水文单元内, 构建短基线干涉网络获取相对水位变化时间序列, 并结合水文站点数据进行校准。最后, 采用最小二乘法获取绝对水位变化的时空分布。以美国路易斯安那州洪泛平原为试验区验证本文方法的有效性, 实验结果表明: (1) 水文单元划分能够显著提高时序解算的可靠性, 总体均方根误差由13.20 cm降至4.03 cm; (2) 堤坝与城市等阻隔物显著地改变了湿地水位的空间连续性; (3) C波段在湿地的相干性具有显著季节性差异, 深冬—早春最高, 夏末—初秋最低, 主要受植被物候与淹没状态影响。本文基于水文单元划分的SBAS-InSAR技术可实现大范围、厘米级的湿地水位变化监测, 为湿地水资源管理与生态保护提供一定的技术支撑。

**关键词:** 湿地, 水文单元, SBAS-InSAR, 多参考点校正, 绝对水位

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 赵金奇, 沈昶旭, 司锦钊, 王子璇, 周正培, 牛玉芬, 路中. 2026. 基于水文单元划分的SBAS-InSAR湿地水位监测方法—以美国路易斯安那州为例. 遥感学报, 30(4): 1009-1024

Zhao J Q, Shen C X, Si J Z, Wang Z X, Zhou Z P, Niu Y F and Lu Z. 2026. Wetland water level monitoring based on hydrological unit division using SBAS-InSAR: A case study of Louisiana, the USA. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1009-1024 [DOI: 10.11834/jrs.20265369]

## 1 引言

湿地由水陆相互作用形成, 占据6%的地球陆地面积, 与森林、海洋并列为世界三大生态系统。其水文过程在湿地的形成、发育、演替直至消亡的全过程中都发挥着重要的作用 (章光新等, 2018)。近年来, 受人类活动与气候变化的影响, 湿地正面临不同程度的退化甚至消失 (孙伟伟等, 2025; Zhao等, 2025)。水位是表征湿地水文情势的重要

指标, 其动态变化直接影响湿地生态功能 (Mitsch和Gosselink, 2015)。因此, 开展大范围、连续且高精度的水位监测对湿地保护与修复具有重要意义 (刘丹等, 2020)。

传统利用水文站点的湿地水位监测方法拥有较高的观测精度和时间分辨率。但受限于站点的分布数量和密度, 有限水文站监测难以全面准确地刻画大范围复杂湿地内非均质水位变化格局 (Belhadj-aissa等, 2024)。合成孔径雷达干涉测量InSAR

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2026-03-01

基金项目: 河北省自然科学基金(编号:D2023402033); 国家自然科学基金(编号:42307255, 41901286); 中国博士后科学基金(编号:2025M770250); 中央高校基本科研业务费(编号:2025-KJJC-A03)

第一作者简介: 赵金奇, 研究方向为SAR/InSAR数据处理与智能解译。E-mail: masurq@cumt.edu.cn

通信作者简介: 牛玉芬, 研究方向为InSAR/UAV-LiDAR地质灾害监测解译。E-mail: niuyufen@hebeu.edu.cn

(Interferometric Synthetic Aperture Radar) 通过卫星两次过境的相位差来获取地表变化信息, 所获结果的精度高度依赖干涉相干性 (Lu 和 Dzurisin, 2014)。在湿地环境中, 雷达信号与地物的相互作用过程极为复杂, 在开阔水域、平静水面的散射特性多为表面散射, 在 SAR 卫星影像中表现为弱散射体, 在 InSAR 处理中被认为是低相干区域, 难以准确解算水位变化信息 (Kim 等, 2014)。受植被类型及水位变化的影响, 在水淹植被区域, 树干 (或茎秆) 与水面形成的二面角散射, 使其对水位升降产生敏感的高质量相位响应, 为湿地厘米级精度的水位变化监测提供了条件 (Lee 等, 2020)。现阶段已有多项研究验证了 InSAR 技术在湿地水位监测中的应用潜力。Alsdorf 等 (2007) 利用获取的亚马逊盆地 L 波段雷达数据, 实现了对森林沼泽水面变化的厘米级测量。Lu 和 Kwoun (2008) 通过 C 波段雷达干涉相位观测路易斯安那州森林沼泽的水位变化, 证明 C 波段雷达亦可测量中低等冠层覆盖度的森林沼泽的水位变化。Liao 等 (2020a) 通过 Sentinel-1 卫星获取了南佛罗里达大沼泽地的长时序水位变化时间序列, 证明了 Sentinel-1 在湿地长时序水位变化监测方面的潜力。

然而, 面向大范围复杂湿地的 InSAR 水位监测仍面临诸多挑战: (1) 受社会发展的影响 (如城市扩张、水利设施建设和农业开垦等), 湿地被分割为若干水文连通性差异显著的单元, 导致干涉条纹在单元边界处空间不连续; (2) 在缺乏外部基准约束的情况下, InSAR 仅能获得相对参考点的相对水位变化, 而单一参考点难以在空间上相互隔离的水文单元提供统一的参考基准, 从而无法准确获取各水文单元内的绝对水位变化 (Aminjafari 等, 2024); (3) 湿地地表覆盖的季节性变化显著影响 C 波段相干性, 尤其在夏末—初秋植被冠层密度较高阶段, 时间失相干导致解算精度受限, 传统永久散射体 PS (Persistent Scatterer) 技术对自然湿地目标的适用性不足 (Xie 等, 2015)。

随着遥感平台的不断发展, 基于多源异构数据的协同处理取得了显著进展 (孙习东 等, 2025; 邓力维 等, 2025), 为解决上述挑战提供了可能。基于此, 本研究提出一种基于水文单元划分与多参考点校正的短基线集 SBAS-InSAR (Small Baseline Subset-InSAR) 湿地绝对水位监测方法。该方法以

InSAR 时序水位解算为主线, 综合利用土地覆盖、DEM 与工程边界等先验信息及站点水位过程一致性检验, 对水文单元进行空间约束; 最终结合水文站数据完成多参考点校正, 获得大范围湿地绝对水位变化的时空分布, 为大范围湿地水文过程监测提供新的技术思路与实践依据。

## 2 研究区与数据集

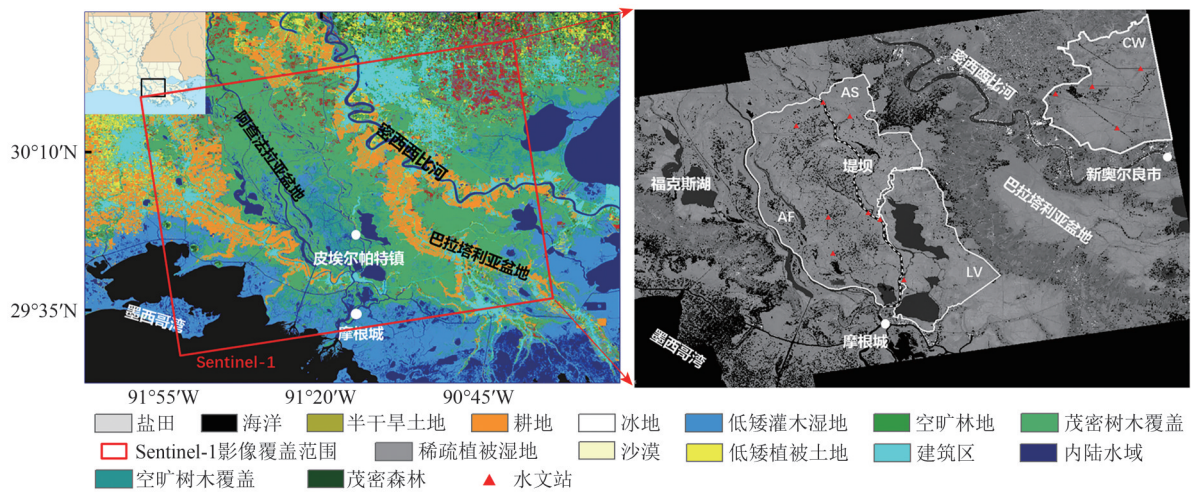
### 2.1 研究区概况

研究区位于美国路易斯安那州东南部的密西西比河下游洪泛平原 (如图 1 (a) 所示), 主要包括阿查法拉亚河盆地、巴拉塔利亚盆地及密西西比河北部沿海湿地。其中, 阿查法拉亚河是密西西比河的重要分汊河道, 约有 30% 的河水经此分流, 并将水源引入南部湾区广阔的森林与沼泽湿地 (Ford 和 Nyman, 2011)。研究区整体地势平缓, 海拔一般在 10—20 m 之间, 属于典型的亚热带湿润季风气候, 夏季炎热多雨、冬季温和湿润, 年降水量丰富。

研究区不仅具有典型的三角洲洪泛平原湿地景观, 并且季节性水位涨落过程显著: 每年 5—9 月为丰水期, 河流和湖泊水位显著升高, 大面积低洼湿地被淹没, 形成典型水淹环境; 10 月至次年 4 月为枯水期, 水位回落, 且植被进入落叶季, 冠层结构趋于稀疏。周期性的水位涨落不仅塑造了湿地独特的物候节律, 也决定了不同区域的植被格局与生态类型, 图 1 (b) 展示了该地区湿地植被的覆盖状况。在植被分布上, 巴拉塔利亚盆地与密西西比河北部沿海湿地以森林沼泽为主, 而阿查法拉亚盆地则由林地与灌木湿地交错分布 (Xu, 2006)。此外, 研究区内分布有较为丰富的水文观测站点, 如图 1 (a) 所示, 能够提供连续、精确的日均水位观测数据, 为大范围 InSAR 水位反演结果的校正与精度验证提供了关键数据支撑。

### 2.2 数据来源

本研究主要基于两种数据类型, 分别为 Sentinel-1 影像数据与地面水文站点实测水位数据。其中, SAR 数据主要用于获取湿地高分辨率的相对水位变化结果, 而水文站实测数据则用于 InSAR 结果的校准与精度验证。此外, 本研究还利用土地覆盖数据进行研究区的划分以及利用 DEM 数据进行地形相位的去除。



(a) 研究区土地覆盖类型与各水文单元内站点分布图

(a) Land cover types and the distribution of stations within hydrological units in the study area



(b) 研究区植被覆盖概况与二面角散射示意图

(b) Overview of vegetation cover in the study area and a schematic diagram of double-bounce scattering

图1 研究区域位置概况

Fig.1 Overview map of the study area

Sentinel-1 卫星是欧洲航天局 ESA (European Space Agency) 的地球观测卫星, 搭载 C 波段 SAR 传感器。已有研究表明, 在湿地和洪泛区, VV 极化相较 VH 极化更能保持较高的信噪比和相干性 (Hong 和 Wdowinski, 2011)。考虑到 C 波段雷达信号对植被冠层穿透能力有限, 在植被生长旺盛的夏季, 雷达回波主要由冠层体散射主导; 由于植被含水量与结构快速变化, 散射体在两次观测间的统计特性发生显著改变, 从而导致失相干。为保证水位变化监测的可靠性, 本研究最终选取了 VV 极化 IW 模式下覆盖研究区植被落叶季 (2022 年 8 月—2023 年 4 月) 的共计 21 景 Sentinel-1 SLC (Single Look Complex) 影像。该时段数据不仅能维持较高的干涉相干性, 且涵盖了丰水期向枯水期转换的完整水文动态过程。此外, 为修正卫星轨道误差, 本研究还获取了与影像采集时间对应的 ESA 精密轨道星历数据。本文使用的水位数据为阿查法拉亚河洪泛平原水文站的实测水位数据, 该数据可提

供湿地内部水位的日均观测值, 来源于美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey)。研究区内共收集了洪泛平原范围内 16 个水文站点的观测记录, 时间覆盖 2022 年 8 月—2023 年 4 月, 能够较好反映研究区内主要水文过程, 各水文站点的空间分布如图 1 (a) 所示。此外, 本研究还通过 2019 年土地覆盖数据集 GLCD 2019 (Global land cover and land use 2019) (Hansen 等, 2022) 分析复杂湿地内部的水文连通性, 并利用美国国家航空航天局 30 m 分辨率的 SRTM DEM 来去除 InSAR 相位中的地形相位。各类数据详细参数见表 1。

### 3 研究方法

鉴于堤坝、道路及城镇建设等人类工程对湿地自然水流的阻隔, 本文综合利用土地覆盖数据及工程边界信息判定湿地内部的水文连通性, 并将研究区划分为若干相对独立的水文单元。在此基础

上, 基于SBAS-InSAR技术, 联合星载SAR影像和地面水文站点数据, 获取大范围复杂湿地的绝对水位变化的时空分布。其中, SAR数据主要用于获取湿地高分辨率的相对水位变化图, 而水文站实测数据则用于InSAR结果的校准与精度验证, 从而获取绝对水位变化时空分布。具体而言, 首先综合土地覆盖与工程边界等多源先验信息分析区域水文连通性, 并结合站点相关性分析对划分结果进行验证, 将湿地划分为多个独立的水文单元; 其次根

据各水文单元在干涉图中的相干性优劣, 对短基线干涉对依据相干性进行干涉对筛选, 构建适用于不同水文单元的时空基线网络; 然后, 针对不同的水文单元, 分别选取不同参考点进行相位解缠, 通过时间序列解算得到各水文单元的相对水位变化; 最后, 联合研究区内各水文单元内的水文站实测数据, 对InSAR水位时序结果进行整体校正, 最终获取大范围复杂湿地的绝对水位变化时间序列。详细技术路线如图2所示。

表1 本研究所用数据集

Table 1 Summary of datasets used in this study

| 数据类型       | 路径  | 极化方式 | 轨道 | 方位角/(°) | 观测时间段                 | 入射角/(°) | 总数 | 分辨率    |
|------------|-----|------|----|---------|-----------------------|---------|----|--------|
| Sentinel-1 | 63  | VV   | 升轨 | -12.6   | 2022-08-05—2023-04-26 | 41.6    | 21 | 5*22 m |
| Sentinel-2 | 126 | —    | —  | —       | 2022-12-26            | —       | 2  | 10 m   |
| USGS水文站    | —   | —    | —  | —       | 2022-08-01—2023-04-30 | —       | 16 | —      |
| GLCD 2019  | —   | —    | —  | —       | 2019-04—2019-10       | —       | 2  | 10 m   |
| SRTM DEM   | —   | —    | —  | —       | 2000-02-11—2000-02-22 | —       | 6  | 30 m   |

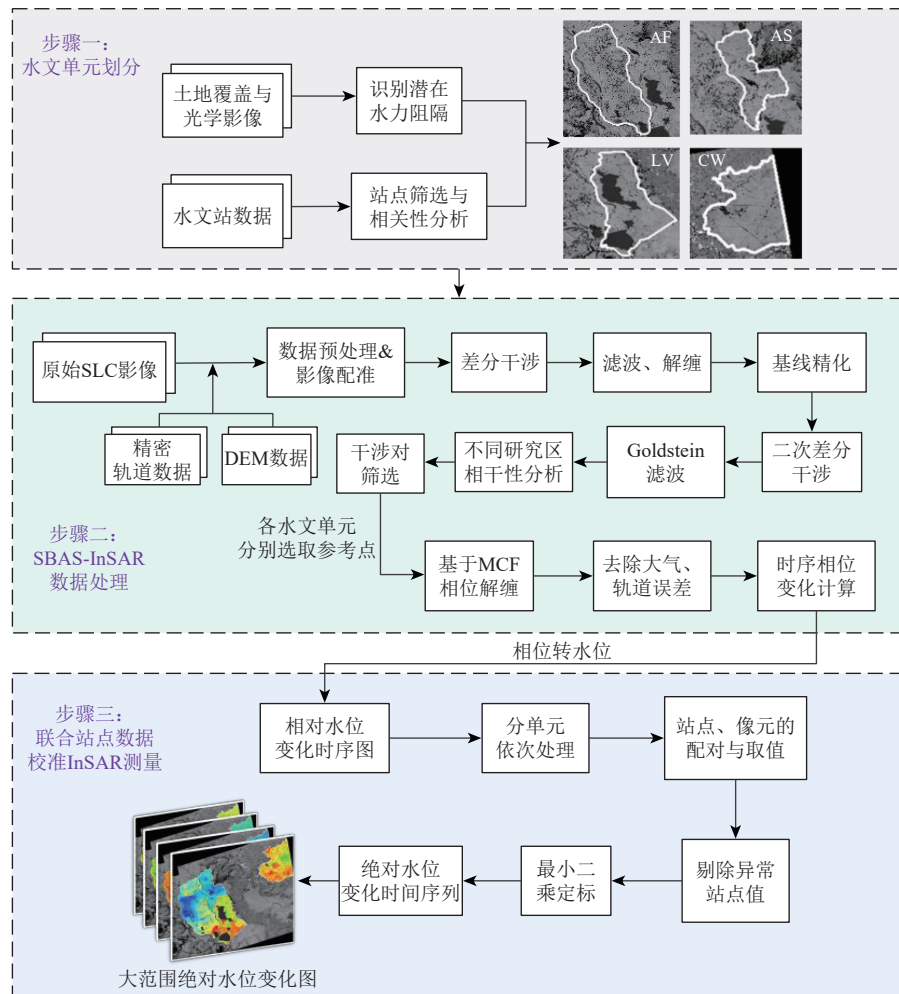


图2 整体技术流程图

Fig.2 Overall technical flowchart

### 3.1 InSAR 湿地水位监测原理

InSAR 水位监测主要依赖于水体与植被茎秆形成的二面角散射 (Chen 等, 2020a)。该散射模式在淹没背景下通常能够保持较高相干性, 从而使干涉相位对水位变化具有较好的响应能力 (Yuan 等,

2015)。基于该路径特征, 本文将两次 SAR 观测间的水位变化视为引起雷达视线 LOS (Line of Sight) 方向传播路径变化的主要信号来源之一, 并利用干涉相位对该路径变化的响应关系反演水位变化。图 3 展示了湿地散射场景下水位变化与雷达几何关系。

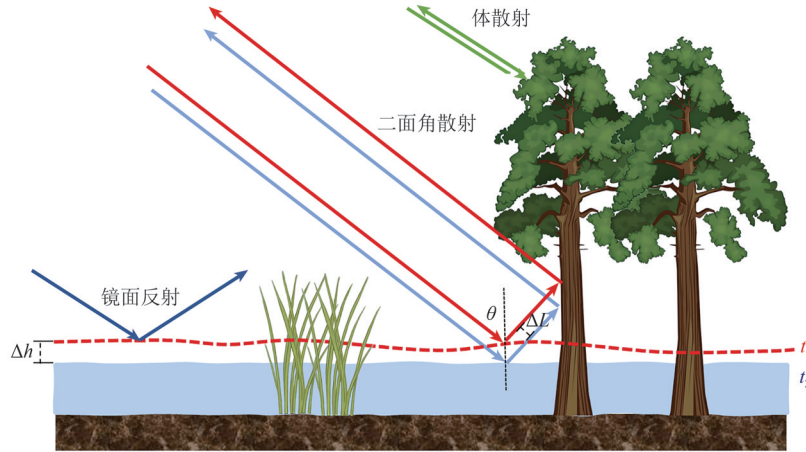


图3 雷达信号与湿地作物的散射关系及水位变化几何关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of radar signal scattering in wetlands and the geometry of water level changes

根据图 3 所示几何关系, 地面水位的垂直变化  $\Delta h$  会引起卫星与地面间 LOS 向路径长度变化  $\Delta L$ , 并且该变化量与入射角  $\theta$  相关。因此, 水位变化  $\Delta h$  与 LOS 向路径长度变化  $\Delta L$  间的关系如下式所示:

$$\Delta h = \Delta L / \cos \theta \quad (1)$$

InSAR 所测的 LOS 向水位变化与相位变化  $\Delta \phi$  和雷达传感器波长  $\lambda$  间的函数表示如下:

$$\Delta L = \frac{\Delta \phi}{4\pi} \lambda \quad (2)$$

通过结合式 (1) 与式 (2), 水面高度变化  $\Delta h$  可由 InSAR 所测相位表示 (Liao 等, 2020b):

$$\Delta h = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{\Delta \phi}{4\pi} \lambda \quad (3)$$

由式 (3) 所示, 干涉相位能够定量反映水位变化。通过对相位分量进行分离与校正, 即可利用干涉相位实现湿地内部水位变化的解算。

### 3.2 水文单元划分

考虑到不同水文连通区域对湿地水位变化提取的影响, 为实现对各区域水位过程的精准监测, 本文综合多源先验信息与站点水位过程一致性对研究区进行水文单元划分。具体而言, 首先利用土地覆盖数据及河道—湖泊水系矢量, 识别潜在的自然汇水格局与主要水流通道路; 其次, 利用 Sentinel-2 光学遥感影像中堤坝、道路以及城镇建成区等工程信息, 确定研究区内可能造成水力阻隔的线性

边界, 从而形成若干候选水文单元边界; 在此基础上, 为验证物理边界的有效性并确立明确的划分标准, 本文利用研究区内 USGS 水文站点的日均水位时间序列, 引入皮尔逊相关系数 (Pearson Correlation Coefficient) 作为定量指标, 检验候选单元内部及单元之间的水位过程一致性。

在进行相关性分析前, 为确保验证数据的空间代表性与反演适用性, 本文首先对收集到的 16 个站点进行了筛选: 考虑到研究对象为湿地漫滩水位, 且 InSAR 在开阔深水河道区域易失相干, 位于福克斯湖附近的 4 个站点因处于主河道内, 不具备湿地水文代表性, 也不处于 InSAR 有效反演范围, 因此予以剔除, 剔除后共保留 12 个站点用于水文单元划分的水位相关性检验。

针对剩余的有效验证站点, 为消除不同站点水位基准面差异对水位变化趋势的影响, 首先将各站点水位序列转换为相对水位序列, 即以该站点的首个有效观测值作为参考基准, 得到相对变化序列  $\Delta h(t)$ 。随后, 对任意两站点  $i$  与  $j$ , 仅在二者同时具有有效观测的日期集合  $\Omega_{ij}$  上计算相关性, 以避免由数据缺失导致的误差, 其相关系数定义为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{t \in \Omega_{ij}} (\Delta h_i(t) - \overline{\Delta h_i}) (\Delta h_j(t) - \overline{\Delta h_j})}{\sqrt{\sum_{t \in \Omega_{ij}} (\Delta h_i(t) - \overline{\Delta h_i})^2} \sqrt{\sum_{t \in \Omega_{ij}} (\Delta h_j(t) - \overline{\Delta h_j})^2}} \quad (4)$$

式中,  $r_{ij}$  为站点  $i$  与站点  $j$  之间的相关系数;  $\Omega_{ij}$  为两站点同时具有有效观测的时间集合;  $\overline{\Delta h_i}$  与  $\overline{\Delta h_j}$  为对应时间集合  $\Omega_{ij}$  内的水位均值。基于研究区典型站点的长时序数据分析以及水位相关性的统计分布特征, 为有效区分自然连通与物理阻隔两种水文状态, 本文设定相关系数阈值  $r_0 = 0.90$  作为水文单元划分判据: 当候选单元内部站点间的平均相关系数大于该阈值时, 认为水位过程一致、具有水文连通性; 当候选边界两侧站点的平均相关系数低于该阈值时, 认为该边界对应有效的水力阻隔, 应作为不同水文单元的分界。依据上述流程, 研究区最终划分为阿查法拉亚洪泛平原 (AF)、阿卡迪亚沼泽 (AS)、维雷特湖 (LV) 与密西西比河北部沿海湿地 (CW) 四个相对独立的水文单元, 各单元空间范围见图 1 (a)。

### 3.3 时序水位变化提取

本研究采用 SBAS-InSAR 技术对 Sentinel-1 SLC 影像进行处理, 以解算湿地时序水位变化。具体步骤如下: 首先, 利用精密轨道数据以及 SRTM DEM 数据进行预处理与地形相位去除, 并完成影像配准; 然后, 根据设定的时空间基线阈值进行差分干涉, 并依据相干性分布差异, 分别对各水文单元进行干涉对筛选与网络重构; 进一步, 利用 Goldstein 自适应频谱滤波器对差分干涉图进行滤波; 在利用相干性掩膜剔除低相干不可靠像元后, 采用最小费用流 (MCF) 算法进行相位解缠; 随后, 对解缠干涉对, 引入 GACOS 提供的对流层延迟产品 (Yu 等, 2018) 以削弱大气延迟对水位相位的影响; 最后, 针对各水文单元内的局部失相干区域进行空间插值, 采用最小二乘估计时序相位, 并根据 3.1 描述的相位-水位转换关系, 将时序相位观测值转换为时序水位变化。

(1) 不同水文单元干涉对筛选。考虑到研究区内阿查法拉亚盆地与密西西比河北部沿海湿地在水文条件和植被类型上的差异, 同一影像在不同水文单元内的相干性表现不一致, 从而会导致可用于 SBAS 反演的干涉对组合与基线网络存在差别。为减少低相干干涉对引起的解缠误差在时间序列中的传播, 本研究在各水文单元范围内对原始短基线集干涉对进行了相干性筛选, 并分别重构各目标水文单元的时空基线网络。具体地, 针对每个

干涉对计算其相干系数分布, 并采用阈值法筛选出相干性较好的影像对, 计算公式如下:

$$P = \frac{N_{\gamma > 0.2}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $N_{\gamma > 0.2}$  为相干系数大于 0.2 的像元数,  $N_{\text{total}}$  为像元总数。本研究将  $P$  的筛选阈值设为 50%, 即当干涉图中高相干像元 (相干系数 > 0.2) 占比超过 50% 时, 判定该干涉对为有效观测并予以保留。

在湿地环境中, 短时间基线通常有助于保持较高的干涉相干性, 但相干性不仅取决于时间间隔, 还受季节性植被生长与水文状况影响。为保证解算可靠性并兼顾数据利用率, 本文参考已有研究并结合研究区的相干性统计结果, 将时间基线限制在 24 d 以内。以 CW 和 AF 单元为例, 在 CW 单元, 较多干涉对能够在更长时间内保持较高相干性, 最终筛选出 22 个符合条件的干涉对 (图 4 (a)); 而在 AF 单元, 能维持较高相干性的干涉对数量较少, 最终保留了 11 个用于时间序列解算的干涉对 (图 4 (b))。

(2) 不同水文单元时序水位变化解算。对于相干性阈值掩膜所导致的相位解缠结果不完整的区域, 进一步采用自适应加权插值对空缺部分进行填补, 以获得水文单元内连续的水位分布。通过在待插值像元周围构建搜索窗口, 依据有效样本与中心像元的空间距离分配权重, 计算加权平均值以填充空洞 (Lu 和 Wong, 2008)。与简单线性插值相比, 该方法通过距离加权与邻域自适应选择更强调局部约束, 从而更有利于保持局部一致性。最后, 在构建完整观测矩阵的基础上, 基于最小二乘法对时间序列进行解算, 从而获取研究区各单元的相对水位变化过程 (Hong 等, 2010)。

### 3.4 InSAR 与水文站点数据联合校准的绝对水位计算

为将 InSAR 所测得的相位变化转化为绝对水位变化, 需要对 InSAR 所测得的水位变化结果进行校准 (Kim 等, 2009; Yuan 等, 2017)。鉴于堤坝、城市建成区等造成的水力分割, 不同水文单元间水面高度变化并不连续, 各单元间的水位变化通常不具备空间连续性 (刘丹等, 2020), 需对各水文单元的偏移参数进行独立校准。为此, 对前期划分的不同水文单元进行独立分析, 分别联合其内部的站点数据作为参考点进行 InSAR 观测数据的校准。

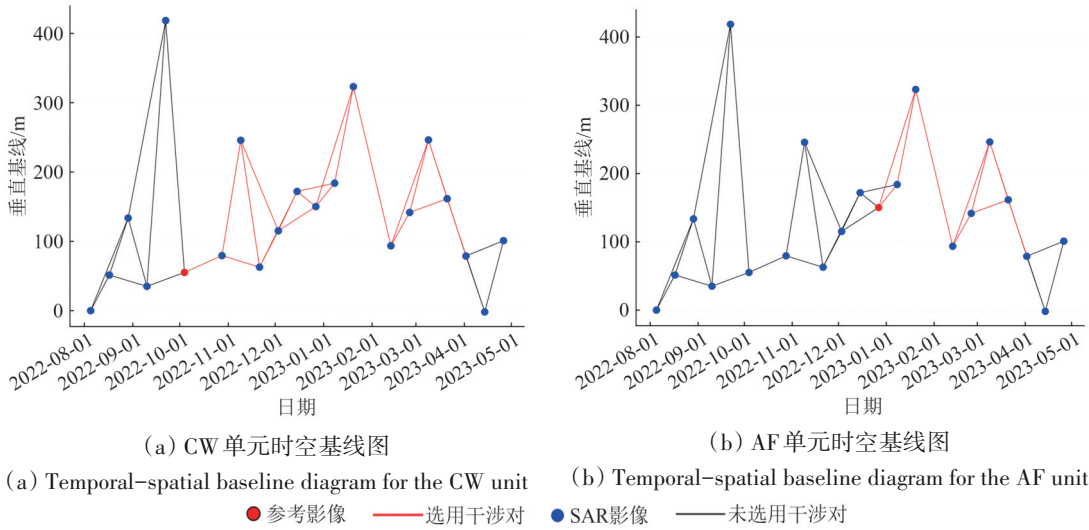


图4 相干性筛选后的CW与AF水文单元的时空基线图

Fig.4 Temporal-spatial baseline plots for the CW and AF units after coherence-based screening

联合站点数据以校准解缠后的InSAR相位具体分为两步：(1) 将沿LOS向的解缠相位变化值投影至垂向；(2) 利用站点测量数据校准InSAR解算的水位变化。首先，利用式(3)可将解缠后干涉图中像元的LOS向相位变化转换为相应的地表水位变化。随后，在各水文站位置处提取InSAR解算结果，并采用以站点像元为中心的3\*3像元窗口均值作为该站点的InSAR水位变化值 $\Delta h_{\text{InSAR}}$ ；相应的水文站实测水位变化值则取InSAR影像观测时间间隔 $(t_1, t_2)$ 内的日均水位差值 $\Delta h_{\text{gauge}}$ 。考虑到水文单元内包含多个水位站点数据，利用最小二乘线性拟合计算相位变化偏移参数 $d_{\text{offset}}$ ，如下式所示：

$$d_{\text{offset}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h_{\text{gauge},i} - \Delta h_{\text{InSAR},i})}{n} \quad (6)$$

式中， $i = 1, 2, \dots, n$ 表示水文单元内的不同校准站点， $n$ 为水文单元内用于校准的站点数量。

通过将所得偏移参数 $d_{\text{offset}}$ 融合到InSAR测量水位解算结果中，可获取各水文单元校准后的绝对水位变化：

$$\Delta h_{\text{absolute}} = \Delta h_{\text{InSAR}} + d_{\text{offset}} \quad (7)$$

在校准过程中，为避免异常站点影响偏移参数的计算，本文对异常站点处的InSAR测量值进行了筛选：(1) 利用相干性阈值筛选的方法，去除在站点位置处干涉相干性较低的InSAR观测值；(2) 对于不同水文单元，位于水力阻碍物外的点不能用作参考点，需排除研究区外的所有站点；(3) 对于一些水利设施处的水文站点，其往往反映的是航

道内的水位变化，无法反映湿地内的实际水位变化，也将此类站点数据剔除。

本文将所划分的AF、AS、LV以及CW这4个水文单元分别进行偏移参数的计算与绝对水位变化的校准，以获取不同水文单元的绝对水位变化时间序列，并通过将各个水文单元的水位变化结果进行整合，获得洪泛大平原整体绝对水位变化图。

### 3.5 精度评估

为了验证本文方法的有效性，本文利用均方根估计RMSE (Root Mean Square Error) 评估校准后所获得的InSAR水位观测值与站点实测数据的准确性。RMSE是衡量观测值与真实值偏差的常用指标，其计算公式如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{\text{InSAR},i} - H_{\text{Gauge},i})^2} \quad (8)$$

式中， $N$ 为参与验证的样本总数； $H_{\text{InSAR},i}$ 为第 $i$ 个时刻InSAR反演的绝对水位； $H_{\text{Gauge},i}$ 为同期水文站实测的日均水位值。

## 4 结果与分析

### 4.1 干涉相位对湿地水位变化的响应特征

为分析干涉相位对湿地水位变化的响应特征，本文选取了两幅具有代表性的Sentinel-1干涉图，分别对应12 d基线(图5(a))和24 d基线(图5(b))，用于揭示路易斯安那州洪泛平原各水文单元(AF、AS、LV与CW)的水位变化模式及其空间分布规律。

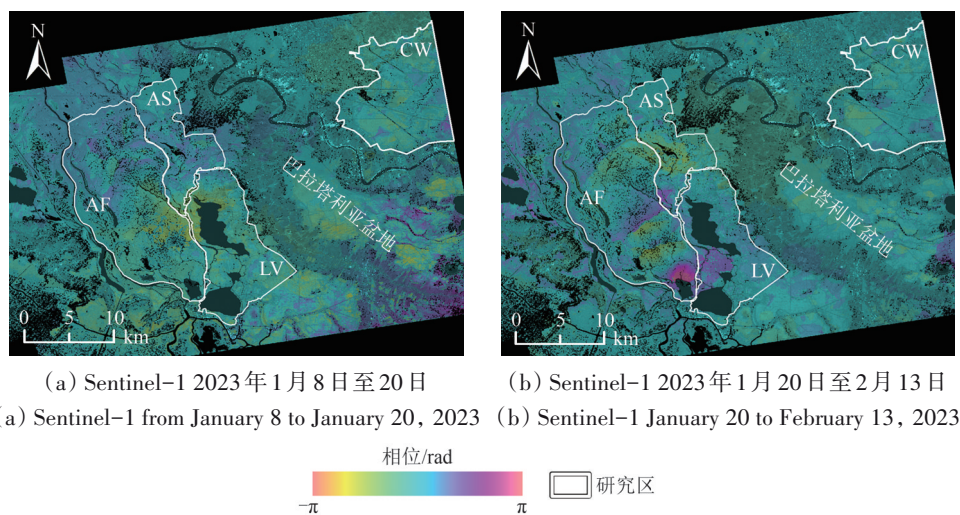


图5 研究区解缠的干涉影像

Fig.5 Wrapped interferograms over the study area

如图5 (a) 所示, CW单元的干涉条纹具有沿河道向两岸发散的空间分布特征, 表明该区域的水位变化主要受河道水位涨落驱动。由于该区域河流与森林沼泽相互连通, 干涉相位对树下水位变化的响应较为显著, 能够反映湿地内部不均质的水位变化。而对于水文条件更为复杂的阿查法拉亚河盆地, 其在图5 (b) 中有更为明显的条纹变化, 具体表现为AF区域出现较为规则的南北向的干涉条纹, 并在AF边界处的堤坝位置被截断, 条纹变化方向与阿查法拉亚河的流向近乎垂直, 反映出该区域水位变化受上、下游水位差异影响显著。

对于被障碍物分隔的AS与LV地区, 其内部又各自出现不同的水位变化模式, 分别为AS单元的水位变化呈由中心向外围辐射式分布, 而LV单元则表现沿维雷特湖周围水系分布变化。两单元的条纹在道路/堤埂处被截断, 进一步表明水位变化的空间连续性受人类工程边界约束。至于LV南部沼泽与巴拉塔利亚盆地, 虽也可见明显的干涉相位条纹, 但由于缺乏有效的站点数据支撑, 未被纳入本文的研究范围。

#### 4.2 联合站点数据校准 InSAR 相对水位测量值

为展示由于干涉图相位变化计算水位变化的具体过程及其精度评估方法, 本文以2023年1月8日—2023年1月20日干涉对为例进行说明(图6 (a))。首先, 依据划分的水文单元, 在各水文单元内依次选取参考点进行相位解缠。参考点的选取遵循以下

原则: 若水文站所在像元的相干性较高, 则直接选取该像元作为参考点; 若相干性不足, 则选择研究区内相干性较高的位置作为替代参考点。并根据式(3), 将由InSAR测得的LOS向水位变化值转换为垂直水位变化值。

本文在对各水文单元的偏移参数进行独立校准时, 若研究区内仅有一个参考站, 则以该站作为参考高程点; 当存在两个及以上参考站时, 依据式(6)计算InSAR观测与站点观测之间的偏移参数。并按照3.4节的站点筛选标准, 剔除了不能反映真实湿地水位变化的像元/站点, 且对应数据不参与精度评估。为了直观展示筛选过程及异常站点的偏差特征, 图6 (b) — (d) 中同时标注了有效站点与异常站点。其中, 蓝色圆点代表通过筛选的有效湿地站点, 而红色空心三角形则代表因位于深水航道或受人工设施干扰而被剔除的异常站点。其中, 图中所示的偏移参数拟合线及RMSE精度指标均仅基于有效点(蓝点)计算, 异常点仅作为背景展示, 不参与定量误差统计。以CW与AF两个内部有多个水文站点分布的水文单元为例, 如图6 (b) 与图6 (c) 所示, InSAR测量与站点观测之间的偏移参数分别为14.81 cm与-34.78 cm。

实验结果表明该干涉对的整体RMSE为3.66 cm(图6 (d)), 表明InSAR监测与水文站观测在厘米级精度上具有良好一致性, 该精度水平与已有湿地水位InSAR监测研究结果相符, 验证了本文方法在复杂湿地环境中的适用性与可靠性。

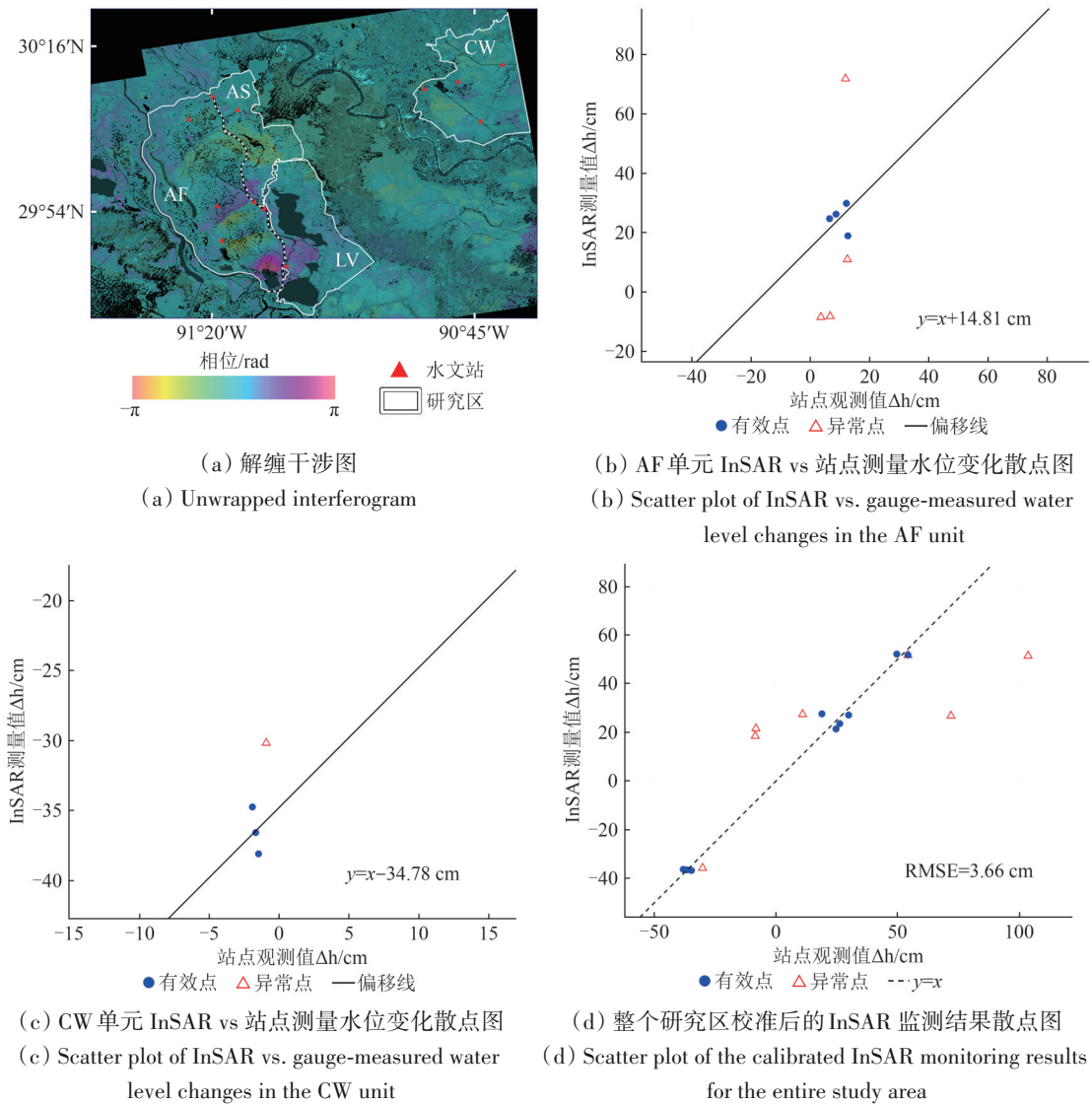


图6 示例解缠干涉图、偏移参数校准过程及误差分析散点图  
Fig.6 Example unwrapped interferogram, offset calibration process, and error analysis scatter plots

### 4.3 时序水位观测结果及精度分析

经校准的 InSAR 观测结果表明，在高相干区域，湿地水位变化能够得到较为连续、稳定的时序解算结果。由于湿地植被覆盖、水体分布及季节性相干性差异，部分区域在某些时间间隔内出现低相干或空值。基于水位在同一水文单元空间连续的特性，本文通过自适应加权插值算法，利用邻域内高相干像元，对低相干区域的相位空缺进行填补。

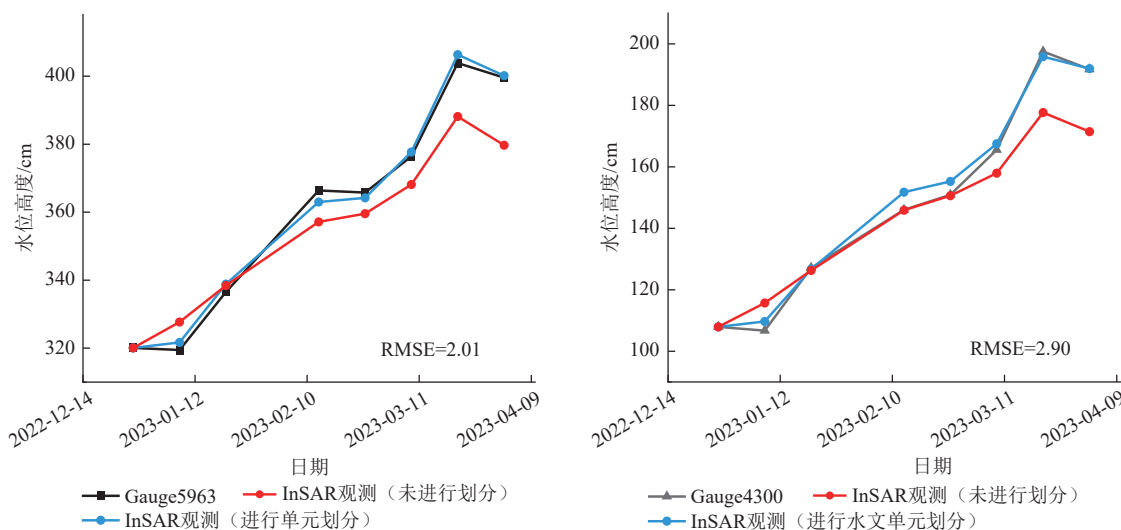
在AF区域，本文获取了2022年12月—2023年4月间共8个时相InSAR时序水位观测结果。相较之下，CW区域的干涉对在更长的时间中保持较高的相干性，因此获得了CW区域2022年10月—2023年4月共计14个时相InSAR水位观测结果。

图7为两区域是否进行水文单元划分的对比结果，其中蓝色折线表示在进行水文单元划分后的InSAR水位观测结果，红色折线则对应未划分的InSAR水位观测结果。利用各区域内部的站点数据对观测值进行校正后，分别计算了两区域各站点在进行水文单元划分后的水位时间序列的RMSE。对于AF区域所选的两个水文站，在进行水文单元划分条件下所得的RMSE分别为2.01 cm与2.90 cm，表明该区域整体能保持较高的解算精度。此外，在CW区域选取的两个水文站，RMSE则分别为2.46 cm与5.02 cm，其精度略低于AF区域。

造成这种差异的主要原因包括：(1) AF区域水文站点密度较高，提供了更充分的校准约束，从而有效降低了RMSE；(2) CW区域观测时间跨度

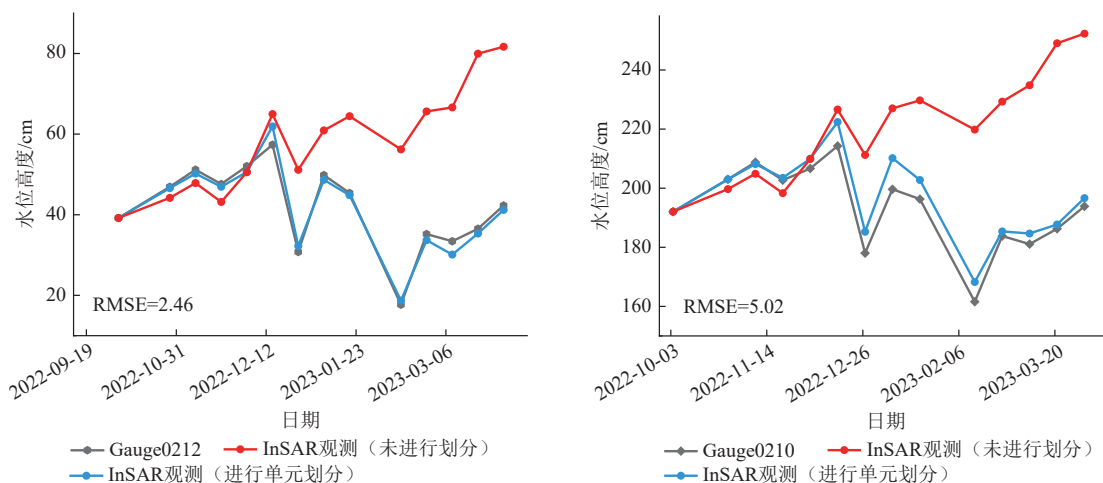
更长,且内部存在更多复杂的水力阻隔。在“未划分”模式下研究区被视为整体,当参考点位于某一水文单元内,其基准相位在跨越水力阻隔传播时,易引入解缠误差。且随着时间跨度增加,在后续时序反演中该误差将逐步传递积累,极有可能造

成后期偏差扩大,如图7红色折线所示。因此,引入水文单元划分并在单元内建立相对独立的参考基准,有助于降低跨阻隔解缠带来的不确定性,从而提升时序水位解算的稳定性与精度。



(a) AF单元两个站点的水位时间序列

(a) Water level time series of two gauges in the AF unit



(b) CW单元两个站点的水位时间序列

(b) Water level time series of two gauges in the CW unit

图7 InSAR水位时间序列与站点观测结果比较(划分与未划分对比)

Fig.7 Comparison of InSAR-derived water level time series with gauge observations (With and without hydrological unit division)

#### 4.4 复杂湿地的大范围绝对水位变化特征

进一步基于水文单元划分方法,研究获取了阿查法拉亚洪泛平原的大范围绝对水位变化结果。结合阿查法拉亚盆地及密西西比河北部沿海湿地内4个研究单元的InSAR观测数据,共获得7期覆盖洪泛平原的绝对水位变化图,为便于分析,选取具有代表性的4幅结果(图8(a)—(d))进行讨论。

整体上,研究区在不同时间段均表现出显著的空间差异:阿查法拉亚盆地南部及东南部区域普遍表现为水位上涨(幅度约20—31 cm),而盆地北部与西部部分区域则多为下降态势(幅度约10—38 cm)。相比之下,北部沿海湿地受潮汐和局部径流汇集的共同作用,呈现周期性的水位升降,空间上相对均衡。

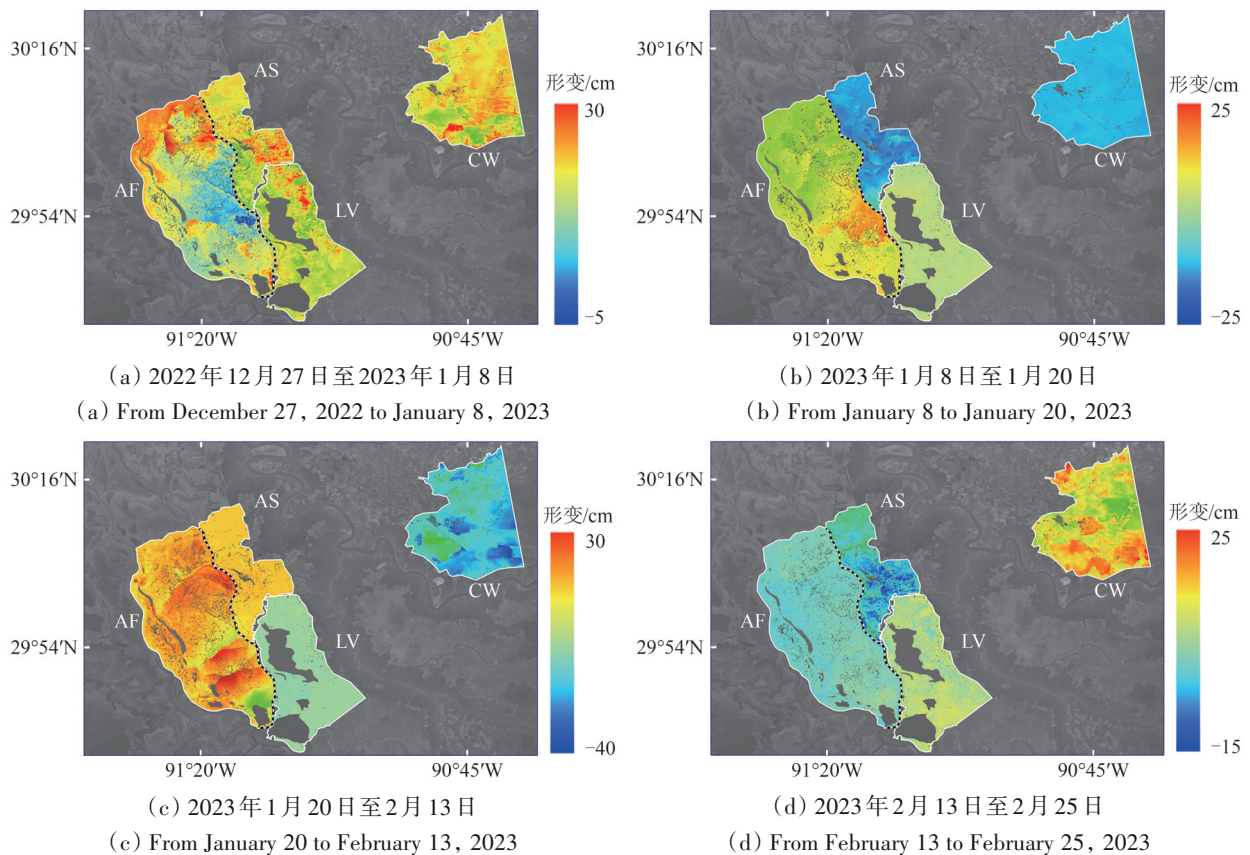


图8 联合 Sentinel-1 影像与 USGS 站点数据计算的湿地绝对水位变化图

Fig.8 Maps of wetland absolute water level changes derived from Sentinel-1 imagery and USGS gauge data

进一步对比各水文单元发现,不同单元的水位演化模式存在明显差别。例如,在2023年1月20日—2月13日的观测结果(图8(c))中,AF单元整体呈现由南向北的阶梯式上升态势;受堤坝分隔影响,AS单元则表现为由中心向外辐射式升高;而LV单元在同期则表现出整体下降趋势。这些特征表明,堤坝与城市建成区等水力阻隔物显著改变了洪泛区的自然连通性,导致各水文单元的水位变化相对独立,但单元间的差异在时间维度上呈现出一致的规律。

## 5 讨论

### 5.1 不同季节湿地相干性分析

湿地植被在不同季节呈现显著的物候变化,其冠层结构、水位淹没状况及地表状态差异均会影响C波段InSAR的相干性,进而影响水位变化解算的精度(Chen等,2020b)。为分析其季节性特征差异,根据植被生长状态将研究期划分为夏末—初秋(8—9月)、秋末—初冬(10—12月)、深冬—早春(1—3月)及春中期(4月)4个阶段,在各阶

段内选取时间间隔为12d的干涉对开展相干性分析,计算干涉相干系数,探讨其时空分布特征。

如图9所示,研究区各阶段相干性差异显著。夏末—初秋阶段(图9(a))图像整体相干性最低,研究区内的像元平均干涉相干系数仅约0.15。这主要是由于C波段对植被冠层结构敏感且穿透能力有限,夏末—初秋植被仍处于生长旺盛期,茂密冠层和高含水量叶片增强了体散射效应,导致时间失相干现象较为严重。进入秋末—初冬(图9(b)),植被开始落叶、冠层逐渐稀疏,电磁波更容易穿透冠层到达地面,散射特性相对稳定,使得相干性提升,平均值约为0.2。深冬—早春阶段(图9(c)),湿地植被旧叶基本脱落,新叶还未长出,此时研究区相干性达到峰值,平均值约为0.34。至春中期(图9(d)),随着植被快速生长,干涉对的相干性明显下降,到4月末,研究区内的平均相干性已降至0.18。这一变化趋势与以往在温带湿地的C波段InSAR观测结果一致(付波霖等,2021),但在本研究的亚热带湿地中,相干性峰值出现在深冬—早春而非初冬季,可能与该区域初冬气温较高、部分植物仍保留部分叶片有关。

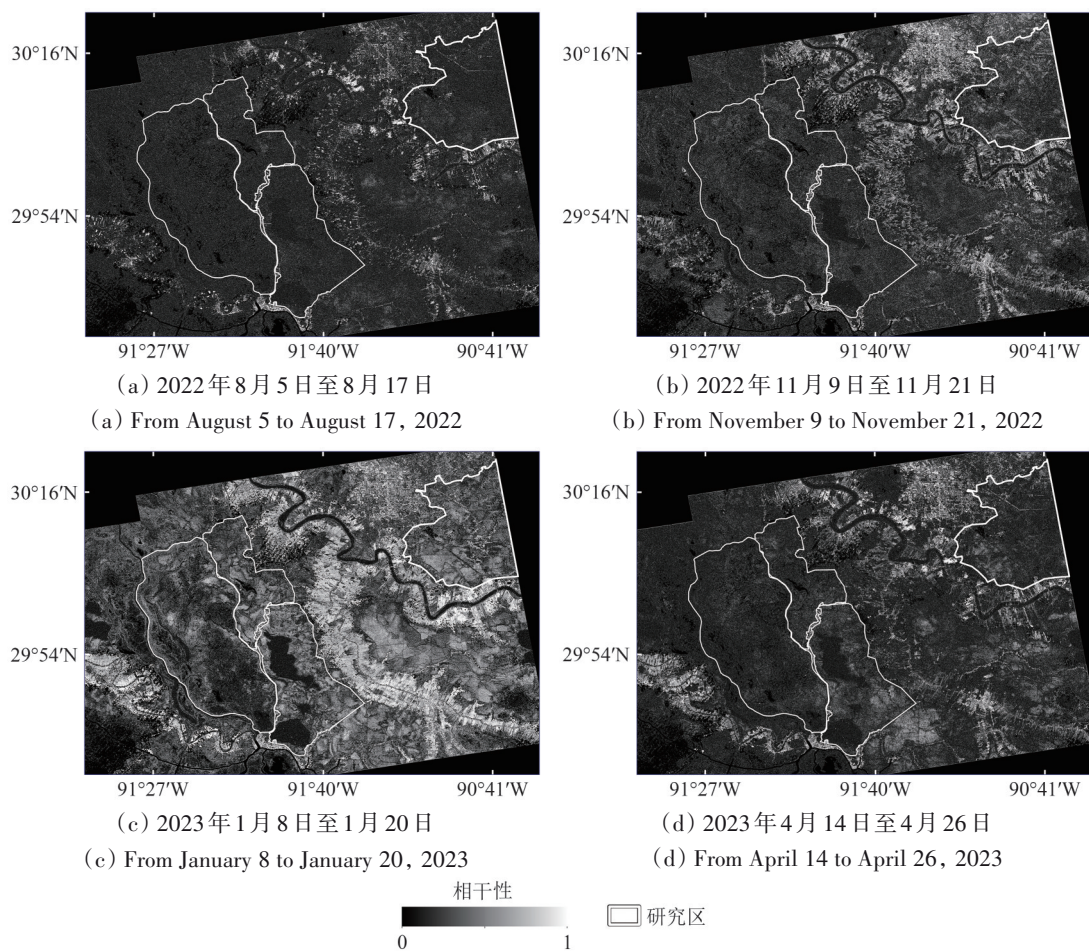


图9 不同阶段的研究区干涉相干系数图

Fig.9 Maps of interferometric coherence in the study area at different temporal stages

## 5.2 水文单元划分对监测结果的影响

为获得洪泛平原水位InSAR测量的总体精度估计, 本文对各研究区的所有有效InSAR观测值进行了统计, 并将其与同期站点观测值合并到一个散点图中。结果显示, 在阿查法拉亚河洪泛平原, 进行水文单元连通性划分的InSAR水位解算方法的总体RMSE为4.03 cm (图10 (a)); 而在未进行水文单元连通性划分时, 总体RMSE高达13.20 cm (图10 (b))。这表明, 在湿地水位变化监测中引入水文单元连通性划分能够显著提升InSAR水位解算的精度。结果表明, 对于水系高度分割的洪泛平原湿地, InSAR水位解算不仅依赖于影像的相干性, 还受制于水文连通性结构。

为了进一步探究水位反演误差的空间特征, 本文对用于精度验证的各站点的RMSE进行了空间可视化分析 (图11)。从整体来看, 如图11 (a) 所示, 大多数站点RMSE保持在较低水平 (绿色/黄色标识), 仅少数站点出现显著偏高的误差 (红色标识)。以编号1588站点为例, 其位于水体—植被交

错的过渡带附近, 站点邻域以水淹植被与浅水湿地为主, 易形成较稳定的二面角散射, 从而支撑更可靠的相位观测与水位反演。而RMSE较大 (>8 cm, 红色标识) 的3个站点 (编号1450、1452、1454), 如图11 (b) 所示, 均位于主要航道内部。一方面, 航道水体与周边湿地在水动力过程上存在差异, 可能导致站点观测与基于湿地像元反演的水位过程一致性下降; 另一方面, 航道区域常为平静开阔的水面, 镜面反射效应显著, 易引起干涉相干性降低, 从而削弱水位反演稳定性。因此, 在航道/开阔水面区域, InSAR水位反演的不确定性往往更高, 反演精度可能受限。

上述结果表明, 本方法的主要误差来源更受局部地物覆盖类型及相干性条件的影响, 而非由水文单元划分本身引起。对于研究区内广泛分布的植被覆盖沼泽湿地区域, 即使缺少站点观测, 在地物与相干性条件相似时, 本方法反演结果总体具有较高可信度; 但对于开阔水面、航道区域, 水位反演不确定性增加。

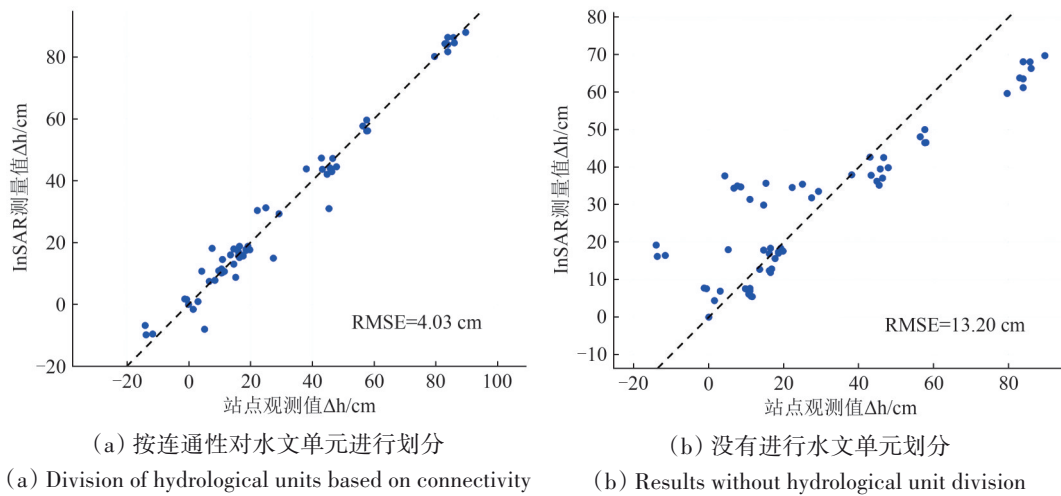


图10 洪泛平原InSAR水位长时序测量精度估计图

Fig.10 Accuracy assessment of long-term InSAR water level measurements in the floodplain

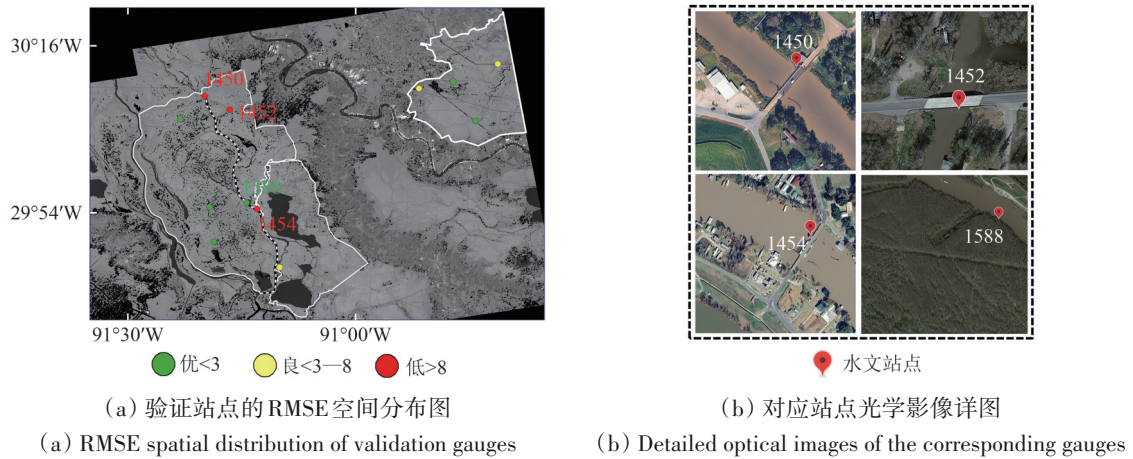


图11 水位反演误差的空间分布特征与高误差站点地物分析

Fig.11 Spatial pattern of water-level inversion errors and land-cover context of high-error gauges

### 5.3 方法的局限性与未来展望

尽管本文结合SBAS-InSAR技术与水文单元划分方法，在复杂湿地环境下实现了厘米级水位变化监测，但仍存在一定局限性。首先，InSAR水位解算精度易受大气延迟残余、相位解缠误差和时空失相干的影响。本文通过引入GACOS产品以削弱对流层延迟，但GACOS是依赖ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 再分析数据的低空间分辨率大气改正产品，其对具有空间高频特征的湍流效应改善能力有限。为定量评估GACOS的大气校正效果，本文通过计算相位—高程的回归斜率，分析了大气校正前后两者相关性的变化 (图12)。结果表明，GACOS有效修正了干涉中与地形相关的分层大气延迟。鉴于研究区除分层大气外还存在以湍流为主的随机大气扰

动，仅依靠GACOS尚不足以完全消除所有误差，本文随后通过SBAS时空滤波与分单元校准进一步滤除残留湍流大气误差的影响，以获得最优的水位反演结果。

其次，InSAR只能获取相对水位变化，需要依赖于外部基准 (如水文站或外部高程数据) 来实现绝对水位的获取，在缺乏外部基准的区域应用受限。最后，由于湿地环境在长时间间隔下难以维持较高相干性，本文主要获取了月—季节尺度的水位变化，对年际乃至更长期的湿地水位动态监测仍有不足。尤其在夏末—初秋植被旺盛、相干性显著降低阶段，即便采用较短基线也难以保证足够的干涉对数量，从而限制了水位监测的时空连续性。

针对上述季节性失相干现象，L波段SAR数据凭借其更长的波长，具有更强的植被穿透能力，理

论上能显著改善夏秋季湿地植被覆盖区的相干性(Liao等, 2020a)。然而, 湿地水位受降雨和上游调控影响, 表现为高动态变化的特征, 现有的L波段卫星数据受限于常规重访周期长且获取数据不连续, 难以捕捉湿地水位动态变化。因此, 为了权衡数据获取的连续性与时间分辨率, C波段 Sentinel-1 提供稳定且免费的12 d重访观测数据, 更有利于构建高密度时间序列观测, 仍为现阶段湿地水位监测的最为适合且稳定的数据源。未来, 随着新一代星载长波长 SAR 卫星(如NISAR)数据的持续获取与开放共享, 有望在保持较高观测频次的同时提升植被覆盖湿地的相干性与可监测时段, 从而进一步拓展湿地水位长期连续监测与跨季节对比分析的能力。

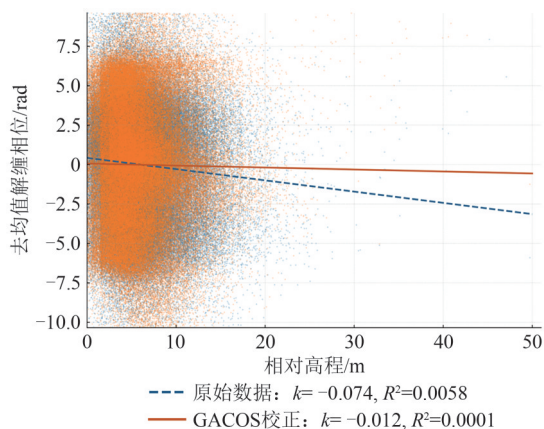


图12 高程—解缠相位相关性检验(示例干涉对: 2023-02-13—2023-03-09, 蓝色为校正前相位, 橙色为GACOS校正后相位;虚线/实线为线性拟合结果)  
Fig.12 Elevation-phase correlation test (Example interferogram: 2023-02-13—2023-03-09, Blue: original phase; Orange: GACOS-corrected phase; dashed/solid lines: linear fits)

## 6 结论

本文针对大范围复杂湿地内部水文连通性差异导致InSAR水位监测不准确的问题, 提出了基于水文单元划分的SBAS-InSAR湿地水位监测方法。以美国路易斯安那州洪泛平原为例, 利用C波段 Sentinel-1 影像与USGS水文站实测数据, 实现大范围高可靠性的绝对水位变化监测。研究得到主要结论如下:

(1) 引入水文单元连通性划分并进行单元内独立校准, 可显著抑制长时序累计误差传播, 提高时序稳定性。以本文实验为例, 整体RMSE由未划分

时的13.20 cm降至划分后的4.03 cm。该结果表明, 在存在堤坝、城市建成区等水力阻隔的区域, 基于水文单元划分处理是实现高可靠性大范围绝对水位变化监测的关键。

(2) 研究区水位变化表现出明显分区性: 各单元内部模式稳定、单元间差异显著, 且在堤坝、城市等阻隔位置出现空间不连续现象。这反映了洪泛平原内水文过程受人工与自然边界共同影响, 水位变化难以跨越连通边界自由传播。

(3) C波段InSAR相干性呈现清晰的季节性变化特征: 深冬—早春相干性相对较高, 夏末—初秋相干性相对较低。该特征源于湿地植被物候与淹没状态变化, 这对解算结果的可靠性与可用像元比例具有重要影响。在未来, 可以优先考虑选用较高相干性季节的数据, 或在低相干季节缩短时间基线、引入更长波段数据, 以降低水位变化解算过程的不确定性。

本研究提出的基于水文单元划分的SBAS-InSAR大范围湿地水位监测方法, 能够在复杂湿地环境中实现厘米级精度的水位监测, 为洪泛平原湿地的水文过程分析、生态保护与水资源精细化管理提供了可靠的数据支撑与技术参考。

**志 谢** 本文所使用的 Sentinel-1 SAR 数据及其精密轨道文件由欧洲航天局提供, 并通过美国阿拉斯加卫星数据中心下载。研究所水文站点数据来源于美国地质调查局, 并从其官方网站 (<https://www.usgs.gov/>) 获取。大气校正所需的 GACOS 数据来源于李振洪教授团队, 并通过 GACOS 官网 (<http://www.gacos.net/>) 下载。地形校正所需的 NASA SRTM 30 m 分辨率 DEM 数据通过 NASA EarthData 平台 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) 下载。

## 参考文献(References)

- Alsdorf D, Bates P, Melack J, Wilson M and Dunne T. 2007. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. *Geophysical Research Letters*, 34(8): L08402 [DOI: 10.1029/2007GL029447]
- Aminjafari S, Brown I, Mayamey F V and Jaramillo F. 2024. Tracking centimeter-scale water level changes in Swedish lakes using D-InSAR. *Water Resources Research*, 60(2): e2022WR034290 [DOI: 10.1029/2022WR034290]
- Belhadj-aissa S, Simard M, Jones C E, Oliver-Cabrera T and Chris-

- tensen A. 2024. Separation of water level change from atmospheric artifacts through application of independent component analysis to InSAR time series. *Earth and Space Science*, 11(7): e2024EA003540 [DOI: 10.1029/2024EA003540]
- Chen Y Q, Qiao S J, Zhang G X, Xu Y J, Chen L W and Wu L L. 2020a. Investigating the potential use of Sentinel-1 data for monitoring wetland water level changes in China's Momoge National Nature Reserve. *PeerJ*, 8: e8616 [DOI: 10.7717/peerj.8616]
- Chen Z H, White L, Banks S, Behnamian A, Montpetit B, Pasher J, Duffe J and Bernard D. 2020b. Characterizing marsh wetlands in the Great Lakes Basin with C-band InSAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 242: 111750 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111750]
- Deng L W, Zhang H Y and Fu B L. 2025. Fine 3D mapping and vegetation spatial differentiation study based on UAV LiDAR point cloud in karst wetland. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(11): 3202-3216 (邓力维, 张洪艳, 付波霖. 2025. 岩溶湿地无人机LiDAR点云精细3D制图及植被空间分异研究. *遥感学报*, 29(11): 3202-3216) [DOI: 10.11834/jrs.20254522]
- Ford M and Nyman J A. 2011. Preface: an overview of the Atchafalaya River. *Hydrobiologia*, 658(1): 1-5 [DOI: 10.1007/s10750-010-0469-3]
- Fu B L, Lan F W, Deng T F, Li Y, He H C, Fan D L, Gao E T and Yang G. 2021. Monitoring of relative variation of water level of marshes in Honghe national nature reserve using DInSAR technique. *Wetland Science*, 19(1): 27-39 (付波霖, 蓝斐芜, 邓腾芳, 李颖, 何宏昌, 范冬林, 高二涛, 杨高. 2021. 基于DInSAR的洪河国家级自然保护区沼泽水位相对变化量监测研究. *湿地科学*, 19(1): 27-39) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2021.01.003]
- Hansen M C, Potapov P V, Pickens A H, Tyukavina A, Hernandez-Serna A, Zalles V, Turubanova S, Kommareddy I, Stehman S V, Song X P and Kommareddy A. 2022. Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 17(3): 034050 [DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec]
- Hong S H and Wdowinski S. 2011. Evaluation of the quad-polarimetric Radarsat-2 observations for the wetland InSAR application. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(5): 484-492 [DOI: 10.5589/m11-058]
- Hong S H, Wdowinski S, Kim S W and Won J S. 2010. Multi-temporal monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using interferometric synthetic aperture radar (InSAR). *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2436-2447 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.019]
- Kim J W, Lu Z, Jones J W, Shum C K, Lee H and Jia Y Y. 2014. Monitoring Everglades freshwater marsh water level using L-band synthetic aperture radar backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 150: 66-81 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.031]
- Kim J W, Lu Z, Lee H, Shum C K, Swarzenski C M, Doyle T W and Baek S H. 2009. Integrated analysis of PALSAR/Radarsat-1 InSAR and ENVISAT altimeter data for mapping of absolute water level changes in Louisiana wetlands. *Remote Sensing of Environment*, 113(11): 2356-2365 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.06.014]
- Lee H, Yuan T, Yu H W and Jung H C. 2020. Interferometric SAR for wetland hydrology: an overview of methods, challenges, and trends. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1): 120-135 [DOI: 10.1109/MGRS.2019.2958653]
- Liao H M, Wdowinski S and Li S S. 2020a. Regional-scale hydrological monitoring of wetlands with Sentinel-1 InSAR observations: case study of the South Florida Everglades. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112051 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112051]
- Liao T H, Simard M, Denbina M and Lamb M P. 2020b. Monitoring water level change and seasonal vegetation change in the coastal wetlands of Louisiana using L-band time-series. *Remote Sensing*, 12(15): 2351 [DOI: 10.3390/rs12152351]
- Liu D, Wang X, Zhang Y L, Yan S J, Yang W and Cui B S. 2020. Visualizing potential hydraulic barriers in Baiyangdian wetland using InSAR. *Journal of Hydroecology*, 41(5): 70-76 (刘丹, 王烜, 张云龙, 闫胜军, 杨薇, 崔保山. 2020. 基于InSAR的白洋淀湿地潜在水力阻碍物分布格局. *水生态学杂志*, 41(5): 70-76) [DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.009]
- Liu Q, Liu J L, Liu H F, Liang L Q, Cai Y P, Wang X and Li C H. 2020. Vegetation dynamics under water-level fluctuations: implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 581: 124418 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124418]
- Lu G Y and Wong D W. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers and Geosciences*, 34(9): 1044-1055 [DOI: 10.1016/j.cageo.2007.07.010]
- Lu Z and Dzurisin D. 2014. InSAR imaging of Aleutian Volcanoes//Lu Z and Dzurisin D, eds. *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes: Monitoring A Volcanic Arc from Space*. Berlin, Heidelberg: Springer: 87-345 [DOI: 10.1007/978-3-642-00348-6\_6]
- Lu Z and Kwoun O I. 2008. Radarsat-1 and ERS InSAR analysis over southeastern coastal Louisiana: implications for mapping water-level changes beneath swamp forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(8): 2167-2184 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.917271]
- Mitsch W J and Gosselink J G. 2015. *Wetlands*. 5th ed. Hoboken: John Wiley and Sons
- Sun W W, Chen C, Fu B L, Meng X C, He S Y, Li D, Hu Y B, Hou X Y, Ren G B and Yang G. 2025. Review of coastal zone remote sensing research: development, opportunities and challenges. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(11): 3136-3161 (孙伟伟, 陈超, 付波霖, 孟祥超, 贺双颜, 李东, 胡亚斌, 侯西勇, 任广波, 杨刚. 2025. 海岸带遥感研究综述: 进展、机遇和挑战. *遥感学报*, 29(11): 3136-3161) [DOI: 10.11834/jrs.20254151]
- Sun X D, Fu B L, Li H J, Jia M M, Sun W W, Wu Y and Song Y J. 2025. Combination of CMIFM module and super-resolution network for cross-platform hyperspectral image reconstruction and spectral quantitative assessment—A case study of karst wetland. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(9): 2788-2809 (孙习东, 付波霖, 李华剑, 贾明明, 孙伟伟, 武炎, 宋奕基. 2025. 基于CMIFM的跨平台超分辨率高光谱影像重建及光谱定量评估——以岩溶湿地为例. *遥感学报*, 29(9): 2788-2809) [DOI: 10.11834/jrs.20243431]

- Xie C, Xu J, Shao Y, Cui B S, Goel K, Zhang Y J and Yuan M H. 2015. Long term detection of water depth changes of coastal wetlands in the Yellow River Delta based on distributed scatterer interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 164: 238-253 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.010]
- Xu Y J. 2006. Organic nitrogen retention in the Atchafalaya River Swamp. *Hydrobiologia*, 560(1): 133-143 [DOI: 10.1007/s10750-005-1171-8]
- Yu C, Li Z H, Penna N T and Crippa P. 2018. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 9202-9222 [DOI: 10.1029/2017JB015305]
- Yuan T, Lee H and Jung H C. 2015. Toward estimating wetland water level changes based on hydrological sensitivity analysis of PAL-SAR backscattering coefficients over different vegetation fields. *Remote Sensing*, 7(3): 3153-3183 [DOI: 10.3390/rs70303153]
- Yuan T, Lee H, Jung H C, Aierken A, Beighley E, Alsdorf D E, Tshimanga R M and Kim D. 2017. Absolute water storages in the Congo River floodplains from integration of InSAR and satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 201: 57-72 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.003]
- Zhang G X, Wu Y, Wu Y F and Liu X M. 2018. A review of research on wetland ecohydrology. *Advances in Water Science*, 29(5): 737-749 (章光新, 武瑶, 吴燕锋, 刘雪梅. 2018. 湿地生态水文学研究综述. *水科学进展*, 29(5): 737-749) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.014]
- Zhao J Q, Wang Z X, Zhang Q J, Niu Y F, Lu Z and Zhao Z. 2025. A novel feature selection criterion for wetland mapping using GF-3 and Sentinel-2 Data. *Ecological Indicators*, 171: 113146 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113146]

## Wetland water level monitoring based on hydrological unit division using SBAS-InSAR: A case study of Louisiana, the USA

ZHAO Jinq<sup>1</sup>, SHEN Changxu<sup>1</sup>, SI Jinzhao<sup>2</sup>, WANG Zixuan<sup>1</sup>,  
ZHOU Zhengpei<sup>3</sup>, NIU Yufen<sup>3</sup>, LU Zhong<sup>1</sup>

1. China University of Mining and Technology, School of Environment and Spatial Information, Xuzhou 221116, China;

2. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Hebei University of Engineering, School of Mining and Geomatics Engineering, Handan 056038, China

**Abstract:** As one of the most important ecological indicators of wetlands, water levels directly reflect hydrological processes and ecological patterns. Therefore, their efficient and accurate monitoring is critical for wetland conservation and restoration. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), with its advantages of wide coverage, all-day/all-weather imaging capability, and high precision, has been successfully applied in monitoring wetland water levels. However, considerable variations in internal hydrological connectivity within wetlands lead to challenges, particularly cross-hydrological-unit phase unwrapping errors and inconsistent water level reference baselines, for conventional InSAR techniques during large-scale water level retrieval. We propose a hydrological-unit-based small baseline subset InSAR (SBAS-InSAR) method for monitoring absolute wetland water level changes to address the above issue. First, multitemporal Sentinel-1 SAR imagery and global land cover data are used to analyze hydrological connectivity comprehensively and divide the study area into multiple independent hydrological units. Then, within each unit, a short baseline interferometric network is constructed to retrieve time-series relative water level changes, which are calibrated by using in situ observations of water levels from hydrological stations. Finally, least-squares estimation is applied to obtain the spatiotemporal distribution of absolute water level changes. The results obtained by taking the floodplain of Louisiana, the USA, as the subject of this case study demonstrate that (1) hydrological unit division significantly improves the reliability of time-series inversion, reducing the overall root mean square error from 13.20 cm to 4.03 cm. (2) Hydraulic barriers, such as levees and urban areas, significantly alter the spatial continuity of variations in wetland water levels. (3) C-band coherence in wetlands exhibits pronounced seasonal differences, being highest in late winter to early spring and lowest in late summer to early autumn, and is mainly affected by vegetation phenology and inundation. Overall, our proposed method enables the centimeter-level, large-scale monitoring of changes in wetland water levels, providing technical support for wetland water resource management and ecological protection.

**Key words:** wetlands, hydrological unit, SBAS-InSAR, multi-reference point calibration, absolute water level

**Supported by** Hebei Natural Science Foundation (No. D2023402033); National Natural Science Foundation of China (No. 42307255, 41901286); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2025M770250)