

基于时间序列 Sentinel-1 数据监测大型线状水利工程——以中国的南水北调工程为例

王楠¹, 董杰², 廖明生^{1,*}, 张路¹

¹ 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉大学, 武汉 430079, 中国

² 遥感信息工程学院, 武汉大学, 武汉 430079, 中国

大型人工线状水利工程是改善水资源配置能力和保障供水的有力方式, 具有距离长、跨度广、工程布局复杂以及功能建筑物类型繁多等特征。南水北调工程是为了减轻中国北方地区严重缺水局面, 优化水资源供给模式的一项规模宏大的战略性工程, 由东线、中线和西线三部分组成。其全长 3797km, 涉及到 15 个省份, 近 5 亿人口。为确保这种大型线状水利工程的安全平稳运行, 对其稳定性进行监测十分必要。然而, 传统的地面测量手段往往受限于传感器分布密度和监测仪器的动迁难度, 难以在较短时间内对这种大型线状工程进行全面监测, 且所需经费巨大。

干涉合成孔径雷达 (InSAR) 技术作为探测地表长期形变和土木工程中潜在安全问题的有效工具, 已经得到了充分的发展和應用。卫星 InSAR 技术具有大覆盖范围、高精度形变测量和低成本的优势, 近年来宽幅 SAR 影像的高频次覆盖使得该技术更适合于南水北调工程这种大型基础设施的安全监测。

在本研究中, 我们使用了一组覆盖 3 个 frame 的长时间序列 Sentinel-1 IW 模式数据集, 通过 PS-InSAR 技术对南水北调中线工程渠道边坡进行监测, 根据相干点目标对不稳定渠段进行识别, 并对一些重点渠段进行了详细分析。研究区及影像覆盖范围如图 1 所示。

获取到的河南境内长约 610km 的渠道沿线形变速率分布如图 2 所示。大范围不稳定渠段识别结果显示, 除部分渠段外, 中线工程渠堤整体较为稳定。其中部分渠段形变是由周围地表形变引起, 另有一部分则是渠道自身发生了形变。

通过对重点渠段进行详细分析, 发现禹州-长葛渠段经过了约为 2.5 km 的沉降区段, 最大沉降速率超过了 -20mm/yr, 如图 3 所示。沿渠线走向的沉降剖面图显示, 该段渠道发生了严重的不均匀形变。我们将 InSAR 测量结果与水准测量结果进行了对比, 二者吻合得较好。

此外，途径郑州区域的渠道经过了抬升和沉降交替变化的形变区域，呈现出较为复杂的形变模式，我们将这种形变分布特点与郑州市断层分布情况进行了讨论。通过将形变速率与水准测量结果进行对比，二者的一致性证明了 InSAR 结果的可靠和准确。

沙河渡槽是南水北调中线工程中技术性最为复杂的重要节点工程之一，我们对其形变分布特征进行了详细分析。InSAR 结果显示，除第一设计段和第五设计段有轻微形变以外，沙河渡槽整体较为稳定。第一设计段的渡槽入口处形变较为明显，而槽身主体较为稳定，这与槽身下部支撑结构和此处地质条件有关。第五设计段位于鲁山坡脚下弯道处的形变较为明显，而该段渡槽左侧由山坡挖方而成，右侧为高填方，需要引起关注。

时间序列 InSAR 技术具有高效、高精度的特点，是对南水北调工程进行长期安全监测的有力工具，可以大大降低监测成本。该技术不仅可以测量渠道边坡本身的变形，还可以监测渠道边坡周围区域的稳定性，这更有利于查明变形的根本原因，为后续渠道安全维护提供指导。InSAR 技术可以推广到南水北调工程其他线路或其他水利工程中，为其提供高效、动态的安全监测。

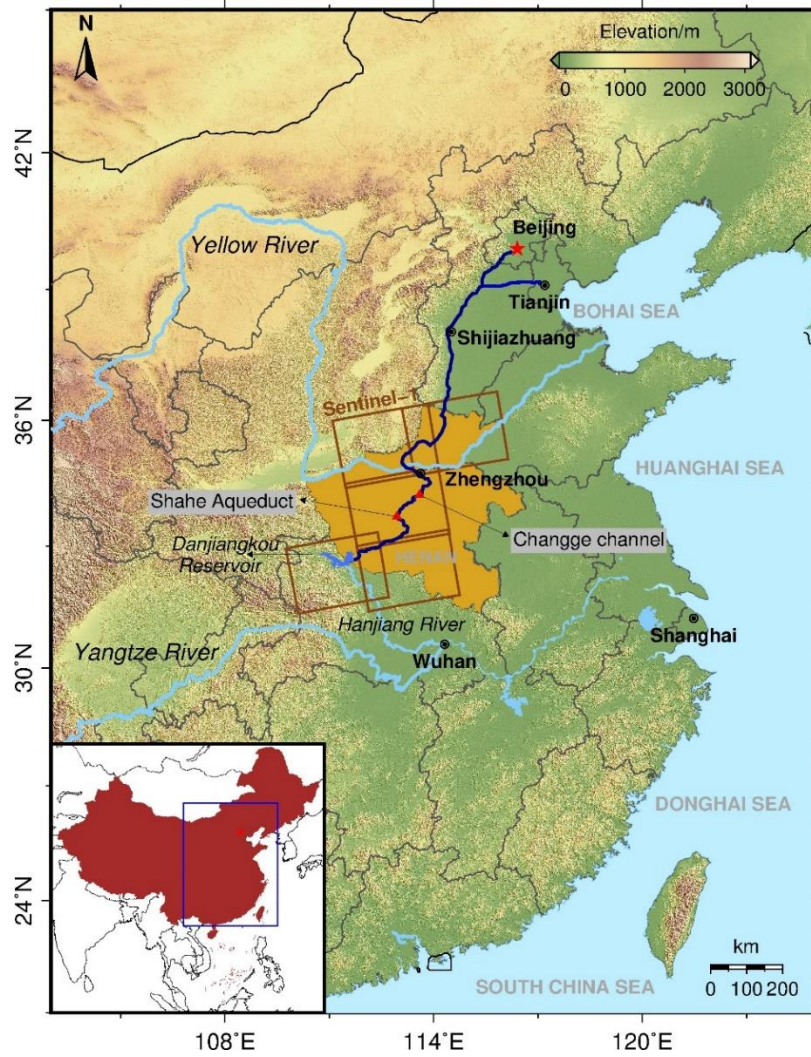


图 1 南水北调中线工程位置与影像覆盖范围

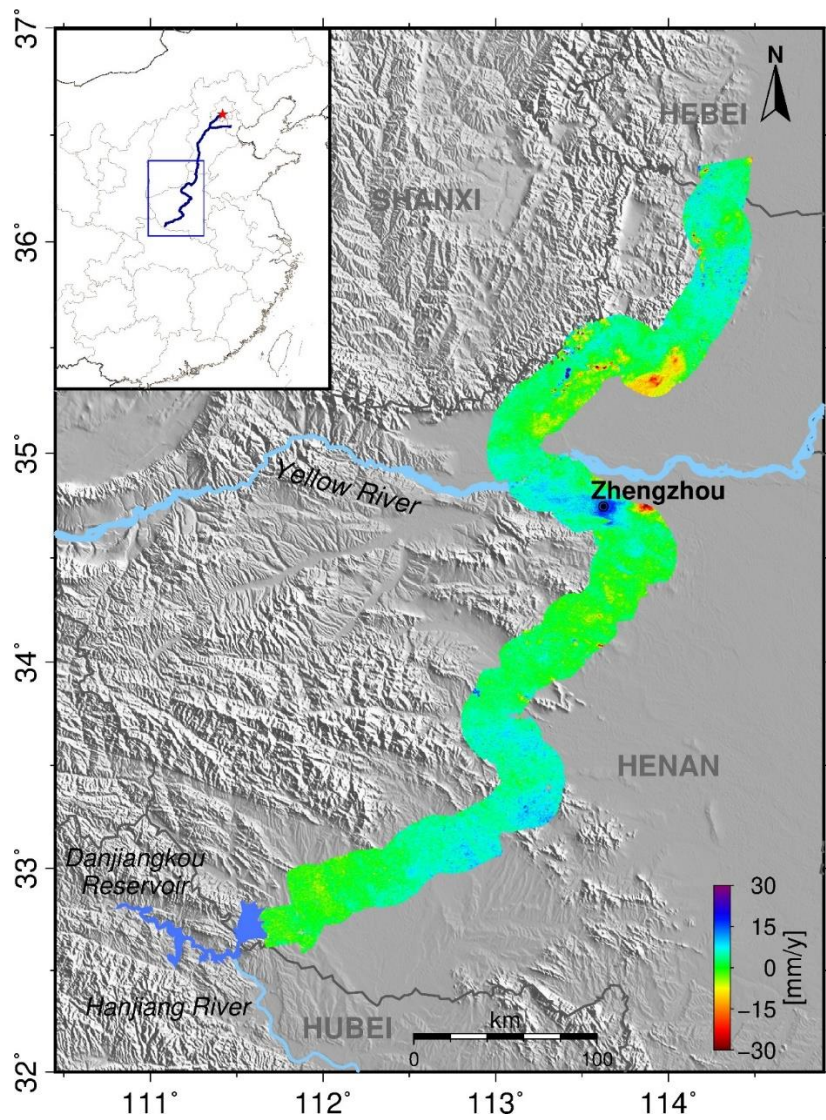


图 2 南水北调中线工程形变速率分布图

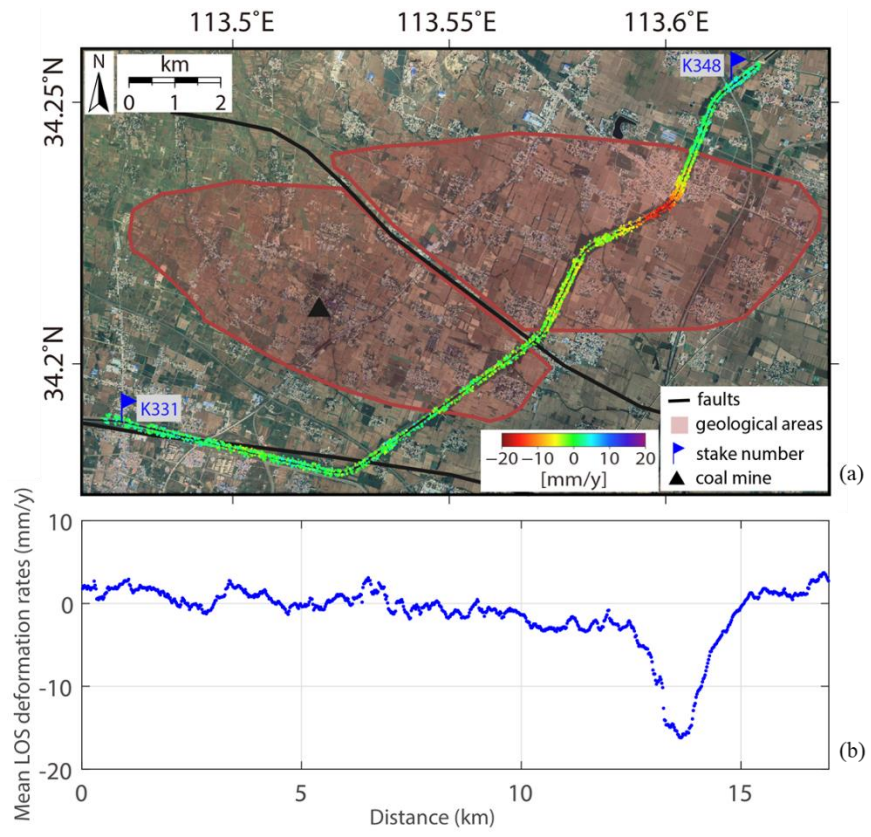


图3 禹州-长葛段形变速率分布图