

林金鑫, 吴建中, 赵卿. 越南红河三角洲地面沉降防治对策研究[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(4): 27-36.

LIN Jinxin, WU Jianzhong, ZHAO Qing. Prevention and control of land subsidence in the Red River Delta of Vietnam[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(4): 27-36.

越南红河三角洲地面沉降防治对策研究

林金鑫^{1,2,3,4}, 吴建中^{1,2,3,4}, 赵卿⁵

(1 上海市自然资源调查利用研究院, 上海 200072; 2 自然资源部地面沉降监测与防治重点实验室, 上海 200072; 3 中国地质调查局地面沉降研究中心, 上海 200072; 4 上海地面沉降控制工程技术研究中心, 上海 200072; 5 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

摘要: 目前, 世界上大多数的城市化地区, 均不同程度地存在地面沉降现象, 影响着发育地区的地质安全及可持续发展, 在低海拔的河口三角洲地区, 其危害尤为严重。故以低海拔的越南红河三角洲为研究区, 利用 InSAR 技术获取了研究区 2016 年 4 月至 2021 年 9 月的地面沉降发育信息, 揭示其全域差异化发展、局部地区较为严重的地面沉降空间分布格局。结合收集的文献资料, 探讨了研究区地面沉降发育背景、诱因及危害。在越南红河三角洲与中国长江三角洲地面沉降对比研究成果的基础上, 应用长江三角洲地面沉降防治经验, 从加强地面沉降调查研究、建设地面沉降立体监测体系、综合防治地面沉降等方面, 提出了红河三角洲地面沉降防治对策建议, 可为研究区及相似河口三角洲地区的地面沉降防治提供指导。

关键词: 地面沉降; 地下水; 越南; 红河三角洲; InSAR

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2025.029

0 引言

越南北部的红河三角洲不仅是主要粮食产区之一, 也是越南城市网络最密集的区域^[1-2], 人口密集, 经济快速发展, 其城市化过程对三角洲地质环境产生着强烈影响, 并诱发了地面沉降等地质灾害。作为一种全球性地质灾害, 在过去的一个世纪, 至少有 34 个国家的 200 个地区发生了由于地下水开发利用诱发的地面沉降^[3]。沿海地区的地面沉降和绝对海平面上升的综合影响会导致相对海平面上升, 进而降低该地区的防汛防洪能力^[4]。地面沉降的危害在低海拔的河口三角洲地区尤其需要关注, 如中国的长江三角洲和越南的红河三角洲等。

红河三角洲地区较少开展地面沉降监测与防治工作, 目前能收集到的研究成果不多, 已有相关文献主要以河内市为研究区^[5-14], 未见覆盖整个三

角洲的地面沉降监测数据。河内市 1988—1995 年 36 个地面沉降监测点测量结果显示^[5]: 该时期平均年沉降速率约为 9.5 mm/a, 监测点中最大的年沉降速率达到了 44 mm/a。河内市 2003—2006 年 10 个地面沉降监测点测量结果显示^[6]: 该时间段内平均年沉降速率约为 18 mm/a, 监测点中最大的年沉降速率达到了 46 mm/a。2007 年以后, 越南本土学者常联合国际学者采用合成孔径雷达干涉测量 (synthetic aperture radar interferometry, InSAR) 等技术进行河内市地面沉降监测研究及诱因分析, 并提出部分防治建议, 但未见系统全面的防治对策研究成果。InSAR 监测结果显示: 2007—2011 年, 河内市最大沉降速率达到了 68 mm/a, 且沉降区主要分布在新城区^[7]; 2012—2015 年, 沉降速率 > 10 mm/a 的也主要分布在新城区^[11], 但有向郊区发展的趋势; 2016—2020 年, 沉降区继续由新城区向郊区发展, 最大沉降速率达到了 50 mm/a^[13]。目前, 河内市地面沉降发育区已出现了房屋倾斜、相对地面上抬等危害现象, 其沉降发育最主要的外因是地下水开发利用^[5-13], 特别是人口密集的城市地区, 巨量开采地下水, 导致地下水位下降显著, 地面沉降问题严重。由于开采地下水, 河内市计划建设的地铁 2 号线部

收稿日期: 2025-02-07

资助项目: 亚洲合作资金项目“长江三角洲与红河三角洲海洋地质环境与地质灾害对比研究”

第一作者: 林金鑫(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地面沉降方面的研究工作. E-mail: ljxsupper@126.com

分区段沿线地下水位 1994—2004 年下降超过了 5 m, 周边及邻近地区地面沉降监测点测量结果显示: 1994—2004 年最大累计沉降量 > 300 mm, 最大年均沉降速率 > 30 mm/a^[10]。人类工程活动是河内市地面沉降发育的另一重要外因^[14]。

红河三角洲地面沉降防治具有重要性和紧迫性, 但该地区防治水平不足, 需借鉴长江三角洲等地面沉降防治成效显著地区的经验与技术。本研究依托亚洲合作资金中越海上低敏感领域合作项目开展了中国长江三角洲与越南红河三角洲地面沉降对比研究工作^[15-16]。在对比研究成果基础上, 利用 InSAR 技术获取了 2016 年 4 月至 2021 年 9 月基本覆盖整个红河三角洲地区的地面沉降分布特征, 并借鉴长江三角洲地区成功的地面沉降综合防治经验, 提出了较为系统的越南红河三角洲地面沉降综合防治对策, 以期为红河三角洲地面沉降防治提供技术支持, 为其他河口三角洲地区的地面沉降防治研究提供参考案例。

1 研究区域

红河发源于中国云南省大理州, 呈 NW—SE 流向, 经北部湾进入中国南海, 在河口处形成红河三角洲, 全长约 1 200 km, 其中, 在中国云南省境内长约 695 km, 在越南境内长约 505 km, 一共有 8 条支流, 为中国云南省至越南跨境水系一条重要国际性

河流, 也是越南北部最大河流^[1-2]。

红河三角洲处于一个宽约 50~60 km、长约 150 km 的 NW—SE 向新近纪沉积盆地(图 1), 大部分地区海拔在 12 m 以下, 属于亚热带季风气候, 常年高温多雨, 地表水资源丰富^[17-18]。强台风、洪涝是该地区常见的自然灾害^[1-2]。台风会造成持久且大范围的降雨, 使河水上涨, 威胁人身和财产安全。地面沉降发育会加剧该地区台风、洪涝等带来的危害。

据越南政府发布的统计年鉴, 2020 年红河三角洲人口密度为 1 078 人/km², 是越南全国平均人口密度的 3.65 倍。红河三角洲有 2 个直辖市为河内市、海防市, 分别是越南的第 2 和第 3 大城市, 2020 年人口密度分别为 2 455 和 1 315 人/km²。红河三角洲地区通过铁路、公路、机场等基础设施的建设与运营, 形成了以首都河内市为中心的交通网^[2]。研究区的城市化进程会诱发和加剧地面沉降, 同时高密度的人口和大量的基础设施, 提高了地面沉降易损性, 使同等的地面沉降带来更大的安全风险。

2 地面沉降发育状况

2.1 InSAR 测量

目前, 地面沉降领域的监测技术方法主要有 InSAR 测量、人工精密水准测量、全球导航卫星系统定位(GNSS)等。其中, InSAR 作为一种新型的

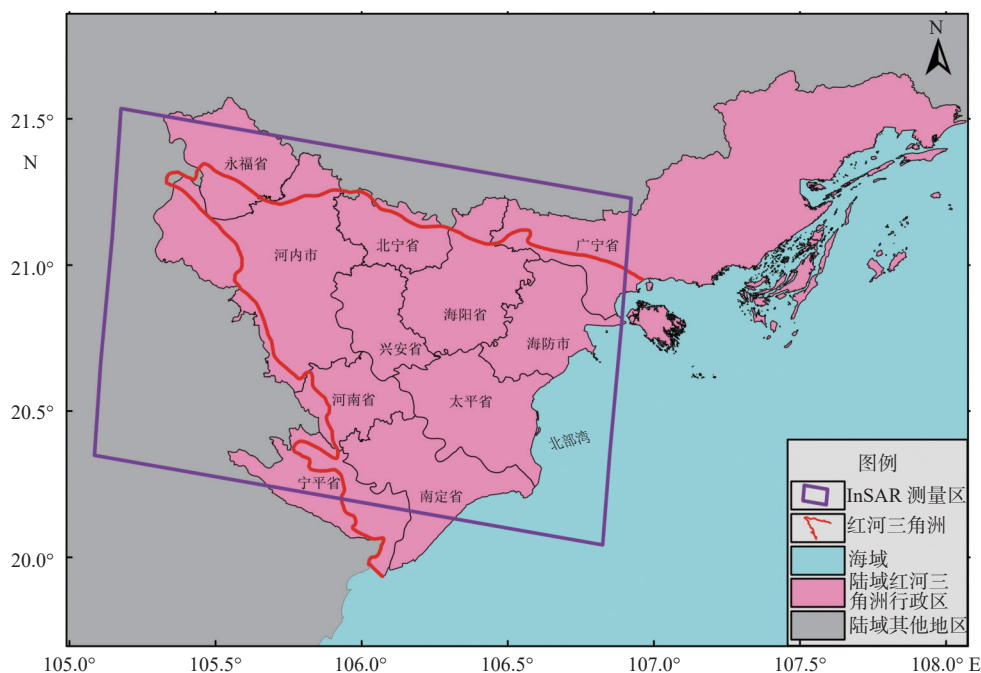


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

遥感探测手段,具有大范围、高密度、高效率等优势,理论精度可达毫米级,且不需要有地面监测设施,是沉降监测设施欠缺地区最适合的监测技术,但是该技术的可靠性常受到用户质疑,一般需要有其他技术监测结果进行验证;人工精密水准测量作为常规、经典的监测手段,需要依托水准监测网实施,且人力成本高、测量效率低,难以实现大范围高频次的监测,但是该技术具有高精度、高可靠性的优势,可用于验证 InSAR 测量结果的精度和实施重点地区的加密监测;GNSS 地面沉降测量精度比人工精密水准测量的精度低,且需要有地面设施,难以实现大范围高密度的监测,但其在长时间连续测量上有优势,可提供比较可靠的长期监测结果,与 InSAR 测量结果对比融合,可以提升这 2 种空中对地观测方法测量结果的可靠性。

小基线集方法(small baseline subset, SBAS)是由 BEARADINO 等^[19]于 2002 年提出的一种用于监测地面微小形变的时间序列分析方法,已成为合成孔径雷达干涉测量中常用的数据处理方法,在地面沉降监测领域有着广泛应用^[20-22]。该方法通过设置时空基线阈值,生成系列短基线 SAR 影像集合并建立影像对的连接关系;通过干涉处理,产生具有较高相干性的干涉图;通过对干涉图的多视处理、滤波处理和相位解缠处理,提取高相干点;最后利用奇异值分解方法,解算地表形变速率的最小范式

最小二乘解。

本文使用的 Sentinel-1A 数据由 Alaska Satellite Facility(ASF)网站(<https://search.asf.alaska.edu>)上免费下载。采用 SBAS 方法对收集的 73 景降轨 Sentinel-1A 数据进行处理,主要的处理流程及参数为:设置 100 d 的时间基线阈值和 100 m 的空间基线阈值,筛选出 206 个干涉相对,并进行方位向:距离向为 4:20 的多视处理抑制噪声;进一步应用 Delaunay MCF 算法对干涉纹图进行相干系数阈值为 0.20 的解缠,借助 30 m×30 m 的 ASTER GDEM 移除地形相位,并用 Goldstein 滤波滤除相位噪声,得到地表形变时序和年均形变速率;最终,将形变结果校正到 1 个形变量始终为 0 的稳点参考点。经过上述处理,获取了研究区 2016 年 4 月—2021 年 9 月的地面沉降发育信息(图 2)。

由于未收集到研究区 InSAR 测量时间段内的水准测量数据,故不能用水准测量结果验证 InSAR 精度,主要利用从文献资料中收集河内市 InSAR 测量结果、GNSS 数据(GPS 站监测结果)进行本文 InSAR 结果的精度评估与可靠性分析。LUYEN 等基于 Sentinel-1A 数据,用 SBAS 和 PSInSAR 分别进行了处理,获取了河内市 2016—2020 年的地面沉降信息^[13],2 种 InSAR 数据处理方法获取的结果一致性好,均揭示了河内市红河以南丹凤县与怀

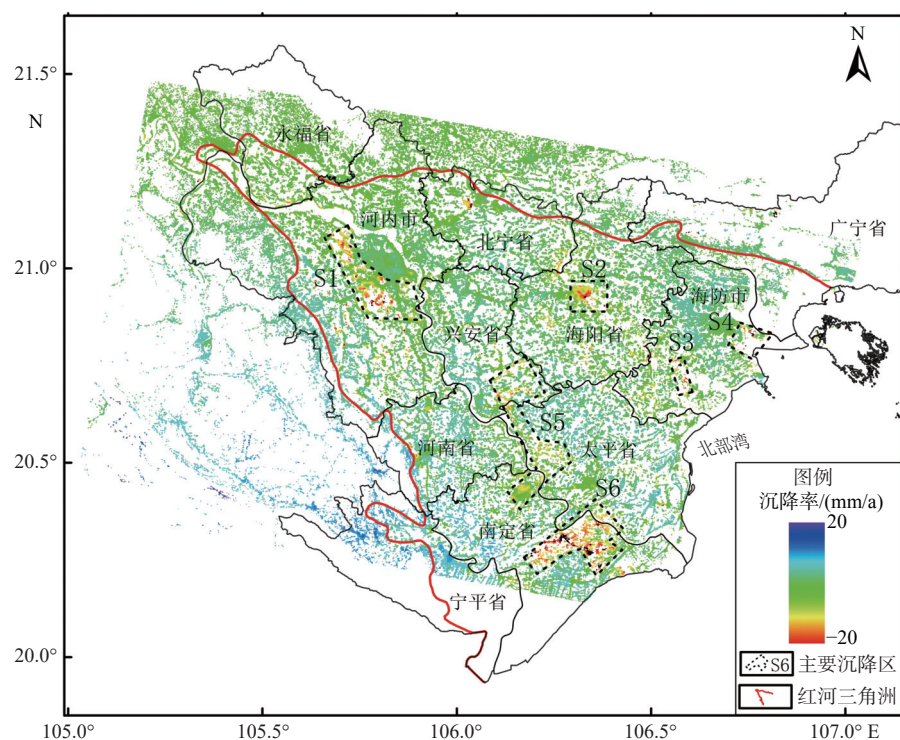


图 2 研究区 2016 年 4 月—2021 年 9 月地面沉降速率分布

Fig.2 Distribution of the land subsidence rate in the study area from April 2016 to September 2021

德县交汇处、河东郡与青池县交汇处等为沉降区, 本文 InSAR 结果亦在上述地区出现了沉降区(图 2 中 S1 位置)。研究区域内有一个可用的 GPS 站(21.005°N、105.844°E)^[13], 其测量时间为 2014 年 1 月 7 日—2018 年 4 月 9 日。选取 InSAR 与 GPS 重叠时间段(2016 年 4 月 15 日—2018 年 4 月 9 日)的沉降累积量进行验证(图 3), 计算的均方根误差(RMSE)为 1.27 mm。由对比结果可见, 本文采用 SBAS 方法获取的 InSAR 处理结果是可靠的。

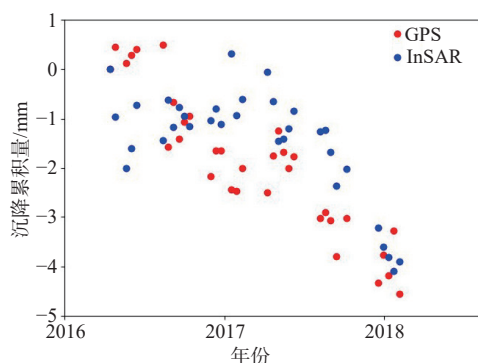


图 3 InSAR 和 GPS 监测结果对比

Fig.3 Comparison of monitoring results between InSAR and GPS

2.2 地面沉降发育地质背景分析

红河三角洲地面沉降发育内因主要是第四纪松散沉积物, 尤其是第四纪软土层和含水砂层的发育^[5,15]。红河三角洲第四纪地层自上而下主要包括全新世潜水含水层(Holocene unconfined aquifer, HUA)、全新世—更新世弱透水层(Holocene-Pleistocene aquitard, HPA)、更新世承压含水层(Pleistocene confined aquifer, PCA)。第四纪地层中部最厚, 向 NE 和 SW 向逐渐减薄。HUA 在红河三角洲广泛分布, 含水层的厚度为 0~60 m, 变化较大, 从三角洲西北到东南厚度逐渐增大, 但在三角洲中间有一区域厚度<30 m; 在三角洲北部及部分边缘区域, HUA 缺失。HPA 主要位于 HUA 下方, 但在三角洲北部边界出露。PCA 位于 HUA 和 HPA 之下, 几乎整个三角洲都有分布, 其埋藏深度和厚度沿着红河从 NE 到 SW 向逐渐增加^[23-24]。

层次分析法可以把定性和定量方法有机结合起来, 使复杂问题系统化、简单化^[25]。基于红河三角洲第四纪地质条件, 应用层次分析法开展的地面沉降易发程度研究结果表明^[26]: 越南红河三角洲地区为地面沉降易发区, 但易发程度不同。整体分布格局为由 NE 到 SW 向, 易发程度增加; 由三角洲两

翼向三角洲中间, 易发程度增加。高易发区主要分布在沿海的南定省、太平省, 较高易发区除沿海省(市)外, 还在河内市等内陆城市也有分布(图 4)。长江三角洲地区地面沉降发育内因也是第四纪松散沉积物, 且在厚度上要比红河三角洲地区厚, 土性更差, 易发程度更高。

2.3 地面沉降空间分布特征分析

对 InSAR 获取的地面沉降速率分布进行对比统计(表 1), 可知 InSAR 测量范围内约有 68.37% 的数据介于-5~5 mm/a, 考虑到 InSAR 的测量精度, 认为这些数据所在地区基本是稳定的, 在测量时间内应当没有发育地面沉降或只有微量变形; 约有 9.98% 的数据介于-15~-5 mm/a, 认为这些数据所在地区出现了地面沉降; 约有 1.05% 的数据<-15 mm/a, 认为这些数据所在地区的地面沉降较为严重。主要沉降区域在图 2 中分别标记为 S1—S6。下面结合地面沉降易发程度等对这 6 个主要沉降区做进一步分析。

(1) S1 位于河内市新城区与郊区边界, 易发程度属于中和较高易发区, 约有 46% 的测量点沉降速率>5 mm/a, 其沉降与地下水开发利用有关^[13], 同时该区域也是河内市大规模新建设地区。

(2) S2 位于海阳省的海阳市中心区域。S2 发育面积小, 约有 32% 的测量点沉降速率>5 mm/a, 大多数<15 mm/a, 与该地区的易发程度不高有关。

(3) S3 位于海防市的南部, 形态上呈长条型, 处于河流两岸, 沉降可能与河边居民用地不断地扩大以及地下水开发利用有关^[24]。S3 发育面积小, 约有 34% 的测量点沉降速率>5 mm/a, 与该地区的易发程度不高有关。

(4) S4 位于海防市的港口区域, 集中了大量的集装箱和仪器设备, 是越南重要的交通运输区域。S4 发育面积小, 仅有约 24% 的测量点沉降速率>5 mm/a, 与该地区的易发程度较低有关。

(5) S5 位于太平省、南定省、河南省、兴安省交汇的地区, 易发程度属于中和较高易发区, 约有 36% 的测量点沉降速率>5 mm/a。

(6) S6 位于南定省的中部, 超过 72% 的测量点沉降速率>5 mm/a, 且其中约有 20% 的测量点沉降速率>15 mm/a, 是本文测量结果中沉降最为严重的区域。从易发程度上看, 该区域是较高和高易发区, 且以高易发区为主, 该地区亦是地下水低水位区^[24]。

综合上面 6 个主要沉降区沉降特征及其影响

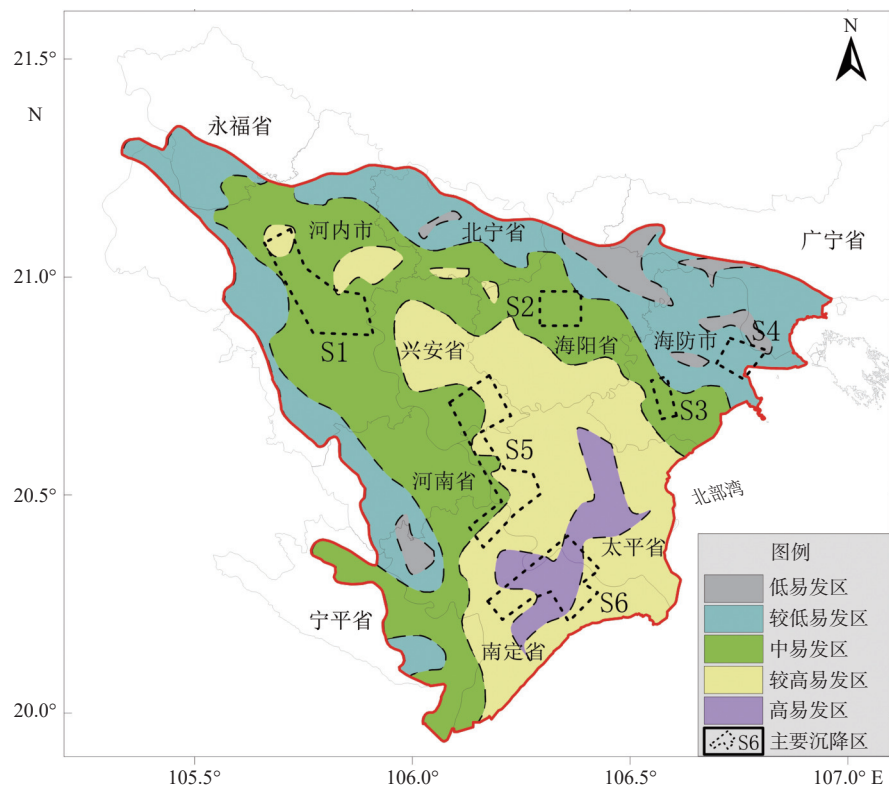


图 4 红河三角洲地面沉降易发程度分区^[26]

Fig.4 Zoning in the susceptibility of land subsidence in the Red River Delta^[26]

表 1 InSAR 测量结果统计及地面沉降易发程度对比

Table 1 Statistics of InSAR results and comparison in the susceptibility of land subsidence

区域	不同沉降速率区间的比例(沉降速率单位为 mm/a)/%				地面沉降易发程度
	$(-\infty,-15]$	$(-15,-5]$	$(-5,5]$	$(5,+\infty)$	
InSAR测量范围	1.05	9.98	68.37	20.60	低、较低、中、较高、高
主要沉降区S1	7.38	39.15	53.47	0.00	中、较高
主要沉降区S2	1.75	30.10	62.06	6.09	中
主要沉降区S3	9.46	24.37	63.18	2.99	中
主要沉降区S4	7.82	16.32	45.70	30.16	较低
主要沉降区S5	2.35	34.18	62.61	0.86	中、较高
主要沉降区S6	20.41	51.99	27.02	0.58	较高、高

因素特点的对比分析,认为地面沉降易发程度高的地区在外部因素的诱发下,容易产生更大面积、更高沉降速率的沉降区。

2.4 地面沉降诱因及危害探讨

由于收集到的资料有限,故仅结合长江三角洲等地区的地面沉降研究经验,探讨红河三角洲地区地面沉降诱因及其可能产生的危害。

地下水开发利用导致的地下水位降低,是红河三角洲地面沉降最主要的诱发因素,如河内市(S1)、海防市(S3、S4)、南定省(S6)都是红河三角洲地下水位低水位区^[24]。人类工程是诱发红河三角洲地

面沉降的另一诱因,如 S1、S4 沉降区。

在危害方面,地面沉降直接减少地表高程,会降低研究区防汛防洪能力;在沿海地区,叠加海平面上升,会加剧海岸侵蚀^[27],在台风等极端天气下更容易出现海水倒灌等危害;沉降的不均匀性会增加堤防体系失效概率。地面沉降可能会导致高速公路、市政管线、轨道交通等基础设施出现裂缝或断裂,增加维护和修复成本,降低桥梁净空高度影响航运,引起建筑物的倾斜和倒塌也会对居民生命财产安全构成威胁。红河三角洲作为重要的农业区和生态保护区,其生态功能可能受到地面沉降影响;红树林带因沉降可能导致植被淹水时间增加,

固滩能力下降;沉降导致的土地积水和盐碱化问题可能会影响农作物的生长,降低粮食产量,灌溉系统的破坏也可能加剧农业生产的困难。

3 地面沉降综合防治对策建议

中国长江三角洲与越南红河三角洲在三角洲形成、地貌类型、地质条件、地下水开发利用、经济社会发展、地面沉降发育特征等方面都有相似性^[15]。以上海为代表的长江三角洲地区是中国地面沉降

危害最为严重的地区之一,也是地面沉降防治成效最为显著的地区之一,其治理措施及成功经验都值得借鉴^[28]。红河三角洲地区不仅战略性的综合防治措施欠缺,基础性调查监测也不足。故基于长江三角洲地面沉降综合防治经验及红河三角洲地面沉降发育状况,从基础性调查监测角度提出了加强地面沉降调查研究、建设地面沉降立体监测体系的对策建议,从战略性防治角度提出了统筹规划、分区管控、多诱因针对性防治措施、信息系统建设、制度保障等对策建议,具体实施流程可参考图 5。

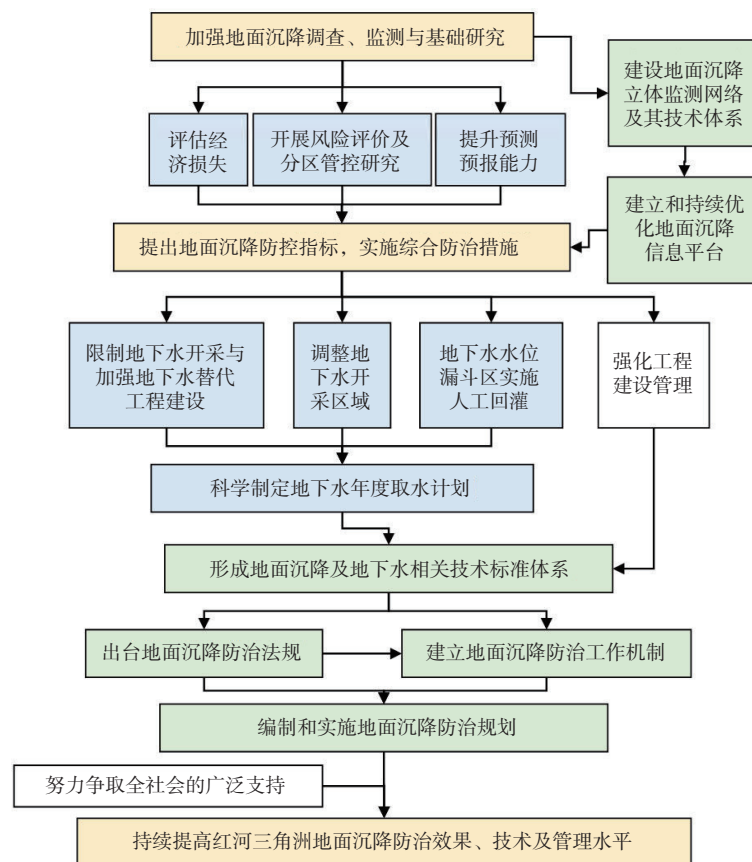


图 5 红河三角洲地面沉降综合防治流程

Fig.5 Workflow of comprehensive prevention and control of land subsidence in Red River Delta

3.1 地面沉降调查研究

自 20 世纪 60 年代起,中国的长江三角洲地区通过系统性地面沉降调查工作构建“三模、一专、一网”的地面沉降调查工作模式^[29],为地面沉降监测网络规划与建设、防治研究等提供了扎实的基础依据。该工作模式通过多方法调查与综合研究,形成基岩地质构造模型、第四纪沉积结构模型、地下水含水系统结构模型(三模),并开展地面沉降灾害专题调查(一专),统一规划设计地面沉降监测网络(一网)。越南红河三角洲地区可以采用该模式进

行地面沉降调查研究,并在形成上述模型后,开展地面沉降成因机理与模拟预测研究,而后研究建立红河三角洲地面沉降与地下水耦合模型,建设和持续提升地面沉降预测预报能力。

针对 S1—S6 等红河三角洲地面沉降主要发育地区(图 2),建议实施地面沉降灾害专项调查研究,详细调查建(构)筑物破坏、市政设施破坏、井口抬升、桥洞净空减小、地面开裂、海水倒灌、洪涝、港口码头或堤岸失效等地面沉降灾害现象,并调查承灾体状况、地面沉降诱发因素情况、防治情况等^[30]。通过调查与评估,获取地面沉降现状与历史灾害信

息, 查明防灾减灾能力, 并在调查基础上开展地面沉降导致的经济损失评估研究, 为监测网络建设、防治措施实施等的决策与经费投入提供依据。

3.2 地面沉降立体监测体系

地面沉降防治措施的制定需基于对沉降发展程度、变化趋势及演化规律的系统认知, 这些关键参数的获取依赖于多源调查监测数据的支撑。中国长江三角洲地区乃至京津冀等其他地面沉降发育地区的实践表明, 上海在中国率先建立的“空中-地面-地下”地面沉降立体监测体系具有很好的推广应用价值^[28], 可系统提升红河三角洲地区地面沉降监测能力。

“空中”主要是指 InSAR 测量。InSAR 技术可应用于地面沉降和大型人工建(构)筑物的形变监测, 并依其低成本、大面积、基本不需要地面监测设施的特点表现出良好的应用前景。故建议优先采用 InSAR 等空中对地观测技术按年度实施地面沉降监测, 在其成果基础上进行综合监测站、水准网的规划建设。

“地面”主要建议采用经典水准测量法构建精密监测网, 在 S1—S6 等主要发育地区建设一、二等水准网, 在铁路、高速公路、轨道交通等重大工程沿线布设水准测线。作为常规经典的人工测量及监测手段, 精密水准测量在地面沉降领域得到长期应用, 目前亦是上海等地面沉降发育地区的主要监测手段之一^[31]。水准网单点建设成本远小于综合监测站, 可以按需埋设一定量水准点。6 个沉降区的水准网建设顺序和综合监测站一样, 其中, S5、S6 的水准网应连成一张网。与空中监测手段相比, 水准测量人力成本高、测量时间长但精度高可靠性强, 相对适合进行低频次、小范围的监测。

“地下”主要建议建设基岩标、分层标组、地下水监测井等监测设施, 建议优先建设集多类设施于同一场地的地面沉降综合监测站。其中, 基岩标是监测基准, 分层标组监测地下不同深度土层变形, 地下水监测井则监测不同含水层地下水水位。基于同场地多类设施获取的综合监测数据支撑, 可开展地面沉降发育规律及机理研究。此类综合站还可兼具技术培训与公众科普功能。综合监测站要占用较大面积的土地, 建设成本高, 故建议按需分期建设, 先在 S1—S6 等主要沉降发育区分别建设 1 个监测站, 结合沉降发育面积及沉降速率分布情况、沉降易发程度和经济社会发展状况, 6 个监测

站的建设顺序建议为 S1→S6→S3→S5→S4→S2; 其后在太平省地面沉降高易发区建设 1 座监测站, 最后结合新的调查研究成果加密建设监测站。

3.3 地面沉降综合防治措施

地面沉降的综合防治需要技术与管理共同发力, 整合专业机构技术支撑、政府部门统筹协调及公众参与监督的多方力量。主要包括: 区域统筹规划、多诱因针对性防治、信息化平台建设、制度保障体系完善等。

(1) 统筹规划和分区管控红河三角洲地面沉降防治工作。建议采用“风险评估-分区管控-指标约束”的技术路线, 通过地面沉降风险评估及分区管控研究, 掌握红河三角洲地面沉降的易发程度及危险性、承载体的易损性、造成损失的可能性^[32-33], 分层次划分地面沉降重点控制区、次重点控制区、一般控制区及重点控制带^[34]。结合研究区经济社会发展需求, 制定地面沉降防治工作规划, 明确全域及不同控制区的地面沉降控制指标和防治任务。建议以控制年地面沉降量为主要约束指标, 进行规划编制。

(2) 地面沉降约束下的地下水资源保护与开发利用管理。地下水资源的开发利用是全球地面沉降发育的最主要诱发因素^[3], 也是红河三角洲地面沉降的主要诱发因素, 故应严格控制该地区地下水资源的开发利用。建议结合地面沉降控制指标, 针对地下水开采这一主控因素, 实施“总量控制-水位调控-分区治理”策略。研究建立红河三角洲全域及其各个行政区域内的地下水开发利用总量控制指标、地下水水位控制指标, 科学制定地下水年度取水计划。实施地下水水位漏斗区综合治理: 一是考虑利用红河三角洲丰富的地表水资源补给地下水和加强地下水替代工程建设; 二是可采取地下水人工回灌措施, 其操作流程建议为监测和分析研究地下水水位及其变幅情况, 在低水位区、水位降幅漏斗区和沉降发育区建设回灌井并按需进行回灌和及时监测水位恢复情况, 评估回灌效果, 回灌工艺可采用真空回灌或压力回灌; 三是调整地下水开采区域, 其操作流程建议以年地下水开采系数、年均地下水水位变化速率、地面沉降速率及累计沉降量等为主要衡量指标, 评价红河三角洲地下水开发利用情况, 并进行分区分级, 结合当地的地下水资源利用需求, 制定地下水开采区域调整方案, 尽量将地下水开采系数大、水位变化速率大、沉降风险

大的区域调整到开采系数小、水位变化速率小、沉降风险小的区域,同时应考虑用水便利,调整距离不宜过大。

(3)工程建设地面沉降危险性评估和重大工程建设运营地面沉降风险监测预警。工程建设活动是红河三角洲地面沉降的另一重要诱因,而地面沉降又会影 响工程建设与运营安全。故建议在红河三角洲地面沉降高、较高、中易发区内(图4),工程建设前进行地面沉降危险性评估并在施工时严格落实。针对机场、铁路、高速公路等重大工程,应建设地面沉降监测、预警和应急处置体系,以防控重大工程建设及运营期间的地面沉降灾害。

(4)红河三角洲地面沉降信息化平台建设。地面沉降数据库及信息系统建设,可为地面沉降各项工作的系统实施提供重要支撑。故建议通过建设和持续优化完善地面沉降监测数据库,整合地质背景、机理研究、监测数据及防治措施等信息;通过开发地面沉降信息系统,实现数据在线采集、实时传输、智能分析与可视化展示等,为政府与相关部门和技术支撑单位提供及时准确的地面沉降信息和快速便捷的管理平台^[35-36]。

(5)建立健全法律法规与技术标准体系。法律法规及技术标准体系是实现地面沉降有效防治的重要制度保障。完善法规体系,明确责任主体,规范防治流程;建设全域地面沉降统一部署协同实施、重点发育区多部门协同联动等类型的工作机制^[37];制定技术标准,统一调查、监测、评估与防治技术要求;加强队伍建设,培养专业人才,提升技术支撑能力。

(6)地面沉降防治是一个系统性、长期性工程,需要争取全社会的广泛支持和多方面的经费投入。调查、InSAR 测量、信息化平台建设与规划、法律法规、技术标准体系制定等的经济成本相对低,但可以发挥重要的支撑与保障功能,应当及时开展。监测体系建设、地下水人工回灌等需要大量的经费投入,且需要占用一定的土地资源,经费和用地需要当地政府持续支持,其中监测是防治的基础,必须要实施但可以分期,地下水人工回灌可以按经费情况实施和作为应急手段。地下水替代工程建设成本高,但其可以大幅度减少对地下水的需求且可以产生经济效益,可以由当地政府和相关企业共同投入经费。地下水开采区域调整后的新开采区会产生地面沉降,需要考虑当地社会的接受度。对于工程建设相关的沉降监测与防治费用可由工程建设方来承担。同时建议建设科普教育基地,培养专

业科普队伍;创新宣传方式,开展多样化科普活动,引导公众积极参与地面沉降灾害防治。

4 结论

(1)越南红河三角洲地面沉降发育,且呈现出全域差异化发展、局部地区较为严重等空间分布特征,主要发育区为人口密集的城市化地区,如河内市、海阳省海阳市、海防市、南定省中部等。在地下水开发利用等因素的诱发下,地面沉降易发程度高的地区产生地面沉降面积往往比易发程度低的地区更大、速率更高。

(2)结合中国长江三角洲地面沉降防治经验,针对红河三角洲地面沉降发育状况及其发育背景和诱发因素,从调查、监测、防治各方面提出了地面沉降综合防治对策建议,可为提升红河三角洲地面沉降防治能力提供指导,并可为其他河口三角洲地区的地面沉降防治提供参考。

(3)由于收集到的红河三角洲地面沉降相关资料及数据有限,地面沉降诱因分析、危害探讨等研究难以深入,防治建议的针对性和可操作性还可以进一步提升。未来的工作思路主要为先实施地面沉降调查、InSAR 长期监测,并利用分期建设的监测体系实施动态监测,积累数据与调查监测分析研究资料;而后开展红河三角洲地面沉降多因素综合对比分析研究,揭示研究区地面沉降灾害链并建立预测模型,研发地面沉降风险预警方法,进行地面沉降防治分区分级研究,设计综合防治体系,研究编制红河三角洲地面沉降防治工作规划。

参考文献:

- [1] 利国,徐绍丽,张训常.越南[M].北京:社会科学文献出版社,2015.
LI G, XU S L, ZHANG X C. Viet Nam[M]. Beijing: Social Sciences Academic Presss, 2015.
- [2] 余富兆.越南经济社会地理[M].广州:世界图书出版广东有限公司,2019.
YU F Z. Economic and Social Geography of Vietnam[M]. Guangzhou: World Publishing Co., Ltd, 2019.
- [3] GERARDO H G, PABLO E, ROBERTO T, et al. Mapping the global threat of land subsidence[J]. Science, 2021, 371(6524): 34-36.
- [4] 刘杜娟,叶银灿.长江三角洲地区的相对海平面上升与地面沉降[J].地质灾害与环境保护,2005,16(4):400-404.
LIU D J, YE Y C. Relative sea surface rise and land subsidence in Changjiang Delta area[J]. Journal of Geological Hazards and

- Environment Preservation, 2005, 16(4): 400-404.
- [5] TRAN V A, SHINJI M, VENKATESH R, et al. Spatial distribution of subsidence in Hanoi detected by JERS-1 SAR interferometry[J]. *Geoinformatics*, 2007, 18(1): 3-13.
- [6] AXEL R F, CATALIN S, KAY S, et al. Soil aquifer treatment as a tool for sustainable groundwater use in Hanoi/Vietnam[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2011, 2(7): 882-887.
- [7] DANG V K, DOUBRE C, WEBER C, et al. Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(3): 657-674.
- [8] THINH H P, LUDMILA A S. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam[J]. *Resource-Efficient Technologies*, 2015, 1(2): 80-89.
- [9] TUAN S L, CHUNGPAI C, XUAN T N, et al. TerraSAR-X data for high-precision land subsidence monitoring: a case study in the historical centre of Hanoi, Vietnam[J]. *Remote Sensing*, 2016, 338(8): 1-23.
- [10] GIAO P H, HUE V T, HAN N D, et al. Land subsidence prediction for a new urban mass rapid transit line in Hanoi[J]. *Underground Space*, 2018, 5(2): 93-104.
- [11] NGUYEN D A, TRAN Q C, TRAN V A, et al. Application TerraSAR-X data for studying land subsidence in Hanoi City[J]. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2019, 41(4): 339-357.
- [12] DINH X V. On the influence of the soil and groundwater to the subsidence of houses in Van Quan, Hanoi[J]. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 2020, 36(4): 42-51.
- [13] LUYEN K B, PHONG V V L, PHUONG D D, et al. Recent land deformation detected by Sentinel-1A InSAR data (2016-2020) over Hanoi, Vietnam, and the relationship with groundwater level change[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2021, 58(2): 161-179.
- [14] 杜平明. 河内市 Tran Hung Dao 站降水对地面沉降的影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- DU P M. Study on the influence of dewatering at Hanoi Tran Hung Dao station on land subsidence[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [15] 林金鑫. 中国上海与越南河内地面沉降发育背景对比研究[J]. *上海国土资源*, 2022, 43(2): 84-88.
- LIN J X. Comparative study on development background of land subsidence between Shanghai, China and Hanoi, Vietnam[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2022, 43(2): 84-88.
- [16] 陈斌, 徐刚, 周良勇, 等. 青岛海洋地质研究所海岸带地质工作进展与展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(3): 23-39.
- CHEN B, XU G, ZHOU L Y, et al. Progress and prospects of coastal geological work at Qingdao Institute of Marine Geology[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(3): 23-39.
- [17] 时培兵, 褚庆忠, 陈小哲, 等. 红河三角洲沉积相及其形成模式研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2016, 18(2): 18-21, 26.
- SHI P B, CHU Q Z, CHEN X Z, et al. Sedimentary facies and formation model of Honghe River Delta[J]. *Journal of Chongqing University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 18(2): 18-21, 26.
- [18] 杨宏达, 乔璐璐, 刘雪, 等. 近 30 年红河三角洲岸线演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 40(2): 48-57.
- YANG H D, QIAO L L, LIU X, et al. Shoreline evolution of the Red River Delta in the recent 30 years[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 40(2): 48-57.
- [19] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [20] 许军强, 马涛, 卢意恺, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的豫北平原地面沉降监测[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(4): 1182-1191.
- XU J Q, MA T, LU Y K, et al. Land subsidence monitoring in North Henan Plain based on SBAS-InSAR technology[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(4): 1182-1191.
- [21] 曹群, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于 SBAS 和 IPTA 技术的京津冀地区地面沉降监测[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, 55(3): 381-391.
- CAO Q, CHEN B B, GONG H L, et al. Monitoring of land subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei Urban by combination of SBAS and IPTA[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2019, 55(3): 381-391.
- [22] 冉培廉, 李少达, 戴可人, 等. 雄安新区 2017—2019 年地面沉降 SBAS-InSAR 监测与分析[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 66-73.
- RAN P L, LI S D, DAI K R, et al. SBAS-InSAR monitoring and analysis of land subsidence in Xiongan New Area from 2017 to 2019[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(3): 66-73.
- [23] DUONG D B, AKIRA K, THANH N T, et al. Identification of aquifer system in the whole Red River Delta, Vietnam[J]. *Geosciences Journal*, 2011, 15(3): 323-338.
- [24] DUONG D B, AKIRA K, THANH N T, et al. Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the Red River Delta, Vietnam[J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20: 1635-1650.
- [25] 闫华敏, 李磊, 李林涛, 等. 基于层次分析法和模糊评价法的中国近海盆地 CO₂ 封存适宜性评价[J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(1): 79-93.
- YAN H M, LI L, LI L T, et al. Suitability assessment on CO₂ storage in offshore basins of China based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(1): 79-93.
- [26] 林金鑫. 越南红河三角洲地面沉降易发程度研究[J]. *上海国土资源*, 2023, 44(1): 107-112.
- LIN J X. Study on the prone extent of land subsidence in the Red River Delta, Vietnam[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2023, 44(1): 107-112.

- [27] QUANG H N, SATOSHI T. Land subsidence and its effects on coastal erosion in the Nam Dinh Coast (Vietnam)[J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 207: 1-13.
- [28] 秦同春, 程国明, 王海刚. 国际地面沉降研究进展的启示 [J]. *地质通报*, 2018, 37(2/3): 503-509.
- QIN T C, CHEN G M, WANG H G. The latest progress of research on land subsidence abroad and its inspiration to China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(2/3): 503-509.
- [29] 殷跃平, 张作辰, 张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(2): 1-8.
- YIN Y P, ZHANG Z C, ZHANG K J. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 1-8.
- [30] 中国地质灾害防治与生态修复协会. 中国地质灾害防治指南 [M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- China Geological Disaster Prevention and Ecological Restoration Association. *Guideline for the Prevention and Control of Geological Hazards in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2023.
- [31] 熊福文. 上海地面沉降精准监测基准网构建关键技术研究 [J]. *上海国土资源*, 2022, 43(3): 117-123.
- XIONG F W. Study on key technologies of benchmark network construction for land subsidence precision monitoring in Shanghai[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2022, 43(3): 117-123.
- [32] 代如凤, 战庆. 地面沉降风险多向性评估体系建立与全量化应用 [J]. *上海国土资源*, 2023, 44(4): 21-25.
- DAI R F, ZHAN Q. Establishment and full quantitative application of multidirectional assessment system of land subsidence risk[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2023, 44(4): 21-25.
- [33] 王玢佳, 文宝萍, 李文鹏, 等. 地面沉降灾害风险评价研究进展与展望 [J]. *地质论评*, 2024, 70(5): 1949-1962.
- WANG B J, WEN B P, LI W P, et al. Review and prospective on land subsidence risk assessment[J]. *Geological Review*, 2024, 70(5): 1949-1962.
- [34] 杨天亮, 王寒梅, 焦珣. 上海地面沉降防治分区管控方法研究 [J]. *上海国土资源*, 2015, 35(4): 105-109.
- YANG T L, WANG H M, JIAO X. Land subsidence zoning control in Shanghai[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2015, 35(4): 105-109.
- [35] 刘映. 面向智慧城市的地质环境信息平台建设与应用研究 [J]. *上海国土资源*, 2024, 45(2): 58-63.
- LIU Y. Research on the construction and application of geological environment information platform for smart cities[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2024, 45(2): 58-63.
- [36] 苏国辉, 魏合龙, 孙记红, 等. 海洋地质信息化建设研究进展与展望 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(3): 71-81.
- SU G H, WEI H L, SUN J H, et al. Research progress and prospect of marine geological informatization construction[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(3): 71-81.
- [37] 严学新, 杨天亮. 新形势下上海地面沉降防治策略的思考与建议 [J]. *上海国土资源*, 2020, 41(3): 1-2.
- YAN X X, YANG T L. Suggestions for a strategy on land subsidence prevention and control in Shanghai under the new situation[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2020, 41(3): 1-2.

Prevention and control of land subsidence in the Red River Delta of Vietnam

LIN Jinxin^{1,2,3,4}, WU Jianzhong^{1,2,3,4}, ZHAO Qing⁵

(1 Shanghai Institute of Natural Resources Investigation and Utilization, Shanghai 200072, China; 2 Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200072, China; 3 Center for Land Subsidence of China Geological Survey, Shanghai 200072, China; 4 Shanghai Engineering Research Center of Land Subsidence, Shanghai 200072, China; 5 School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: At present, the vast majority of urbanized regions in the world have ground subsidence to varying degrees, which affects the geological safety and sustainable development of local areas, particularly in low-altitude river delta areas. The Red River delta in Vietnam was selected for this study, and InSAR technology was used to extract information of land subsidence from April 2016 to September 2021. The spatial distribution patterns of differentiated development in the whole study area especially heavily suffered areas were presented. By reviewing available information, the geological background of land subsidence, inducive factors, and damages in the study area were explored, and comprehensively compared with the Changjiang (Yangtze) River delta of China based. Based on our experiences, the prevention and control countermeasures were proposed for the Vietnamese case, including to strengthen the field investigation and build three-dimensional monitoring systems in a multi-disciplinary cooperation manner. This study provided a guidance for effective prevention and control of land subsidence in the study area and other similar deltaic areas.

Key words: land subsidence; groundwater; Vietnam; Red River Delta; InSAR