

段晓勇, 印萍, 曹珂, 等. 中越合作共建红河三角洲地面沉降监测站(河内)正式投入运行[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(4): 93-96.

DUAN Xiaoyong, YIN Ping, CAO Ke, et al. Sino-Vietnamese Joint Construction of the Red River Delta Land Subsidence Monitoring Station (Hanoi) officially started operation[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(4): 93-96.

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2025.043

中越合作共建红河三角洲地面沉降监测站(河内) 正式投入运行

段晓勇^{1,2,3,4}, 印萍^{1,2,3,4}, 曹珂^{1,2,4}, 李梅娜^{1,2,4}, 陈彬^{1,2,4}, 吕胜华^{1,2,4}, 高飞^{1,2,4}, 陈小英^{1,2,4}, 仇建东^{1,2,4}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 2 中国地质调查局舟山海洋地质灾害野外科学观测研究站, 青岛 266237;

3 自然资源部海洋甲烷监测工程技术创新中心, 青岛 266237; 4 自然资源部浙江沿海城市地质安全野外科学

观测研究站, 杭州 310007)

0 引言

红河三角洲是越南北方人口与经济核心区, 其第四纪松散沉积层厚度达数十米, 具有高压缩性与易变形特征。随着城市化进程加速, 地下水超采、工程建设及海平面上升等因素叠加, 导致该区域年均沉降速率达 20~40 mm, 局部区域甚至 >50 mm。地面沉降不仅威胁基础设施安全, 还加剧了海水入侵与洪涝灾害风险, 而越南现有监测手段受限于技术瓶颈, 难以满足精细化防控需求。

在此背景下, 中、越两国依托长期合作基础, 联合建设了红河三角洲地面沉降监测站(河内)。该站融合基岩标、分层标组与光纤传感技术, 实现了多维度、高分辨率的地质环境监测。本文详细解析了监测站的建设背景、技术设计与运行成效, 并探讨其对中越科技合作与区域灾害防控的重要引领作用。

1 建设背景: 地质特征与监测挑战

1.1 地质环境与沉降动力学机制

红河三角洲由全新世冲积-海积作用形成, 沉积

收稿日期: 2025-02-25

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灾害合作研究”; 国家自然科学基金(42176091); 国家重点研发计划(2022YFE0209300); 中国地质调查局项目(DD20221775)

第一作者: 段晓勇(1987—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海岸带地质环境调查方面的研究工作。E-mail: duan-xy@qq.com

层具有显著垂向异质性。地表至 15 m 深度以现代填土与松散粉砂层为主, 孔隙比介于 0.8~1.2, 呈现高压缩特性; 15~35 m 深度发育高塑性黏土层, 液限指数 >0.5, 压缩系数达 0.5~1.2 MPa⁻¹, 成为主要压缩贡献层; 35 m 以下则为中密砂层与古土壤互层, 压缩性显著降低。数值模拟表明, 地下水超采导致含水层系统压密效应显著, 贡献率达 62%~78%。2016—2022 年的 InSAR 反演结果显示, 河内市中心外环、海防港区、南定省城区等 5 个沉降中心与地下水开采漏斗区空间高度吻合。预测模型表明, 若维持当前 3.2×10⁸ m³/a 的开采量, 至 2050 年累计沉降量将突破 1.5 m, 导致 20% 的沿海区域海拔低于海平面, 严重威胁防洪体系安全。

以河内市为例(图 1), 2017—2022 年沉降速率最大达 25 mm/a, 其中, 河东郡(Ha Dong)、怀德县(Hoai Duc)等城市化快速推进区域沉降面积分别达 18.11 和 16.53 km², 而农村地区(A3)因开采强度较低, 沉降速率 <5 mm/a。这一空间分异特征证实人类活动对沉降过程的主导作用。

1.2 越南现有监测体系局限性

越南对红河三角洲的地面沉降监测起步较晚, 主要依赖传统水准测量与离散 GPS 站点(表 1)。尽管这些方法可获取局部沉降数据, 但其局限性显著: 水准测量布设密度仅为每 5 km 一个测点, 且年际更新周期难以捕捉动态变化; GPS 监测平均覆盖密度为每 100 km² 1~2 个站点, 空间分辨率不足导致沉降空间异质性识别困难; InSAR 技术虽能实现面状监测, 但受大气延迟与河内城区高层建筑引起

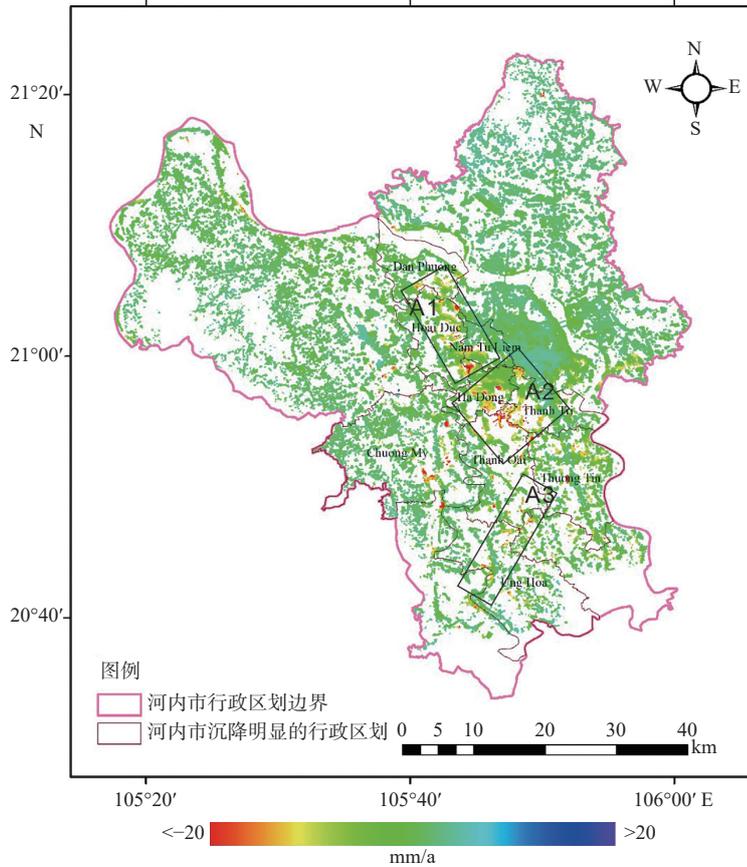


图1 河内市 2017 年 3 月—2022 年 9 月年均形变速率

Fig.1 Annual average deformation rate of Hanoi City (March 2017-September 2022)

表 1 越南现有监测技术对比

Table 1 Comparison of existing monitoring technologies in Vietnam

指标	水准测量	GPS监测	InSAR技术
空间分辨率	点状(5 km间隔)	点状(100 km ² /点)	面状(10 m×10 m)
时间分辨率	年际	连续	11~16 d
垂向分辨率	地表累计值	地表累计值	地表累计值
主要误差源	人为操作误差	多路径效应	大气延迟

的雷达信号失相干影响,数据可用性降低。此外,现有技术均无法获取土层分层压缩量,制约沉降机制的深入解析。

2 监测站建设成效:技术架构与运行效能

2.1 整体布局与工程量配置

监测站位于河内沉降核心区,共布设 10 个监测孔(图 2、3),采用模块化设计以支持网络扩展。

其中,基岩标 1 个,锚固于 80 m 深度基岩层,作为绝对沉降基准;分层监测标 5 个,分别布设于 15、25、35、50 和 65 m 深度,用于捕捉各土层压缩动态;高分辨率光纤监测井 1 个,采用布里渊光时域反射技术,实现垂向 1 m 分辨率的连续应变监测;地下水监测井 3 个,集成压力传感器与水质探头,实时获取含水层水位、温度及矿化度数据。

2.2 技术融合与数据精度验证

监测站通过三大技术创新提升了数据可靠性:①基岩标与分层标联合标定技术消除了基岩抬升引起的基准漂移误差,使沉降量测量精度提升至±0.1 mm/a;②光纤传感与机械式传感器协同校验机制,通过分布式光纤获取连续应变曲线,并在关键层位(如 25 m 黏土层)布设机械式传感器进行数据验证,误差控制在 3% 以内;③开发多源数据同化模型,融合 InSAR 地表形变数据与分层监测结果,反演各土层压缩贡献率。运行数据显示,地下水位变化与地面沉降具有较好耦合关系。



图 2 红河三角洲地面沉降监测站(河内)监测井布局效果图

Fig.2 Deployment of monitoring wells in the Red River Delta Land Subsidence Monitoring Station (Hanoi)

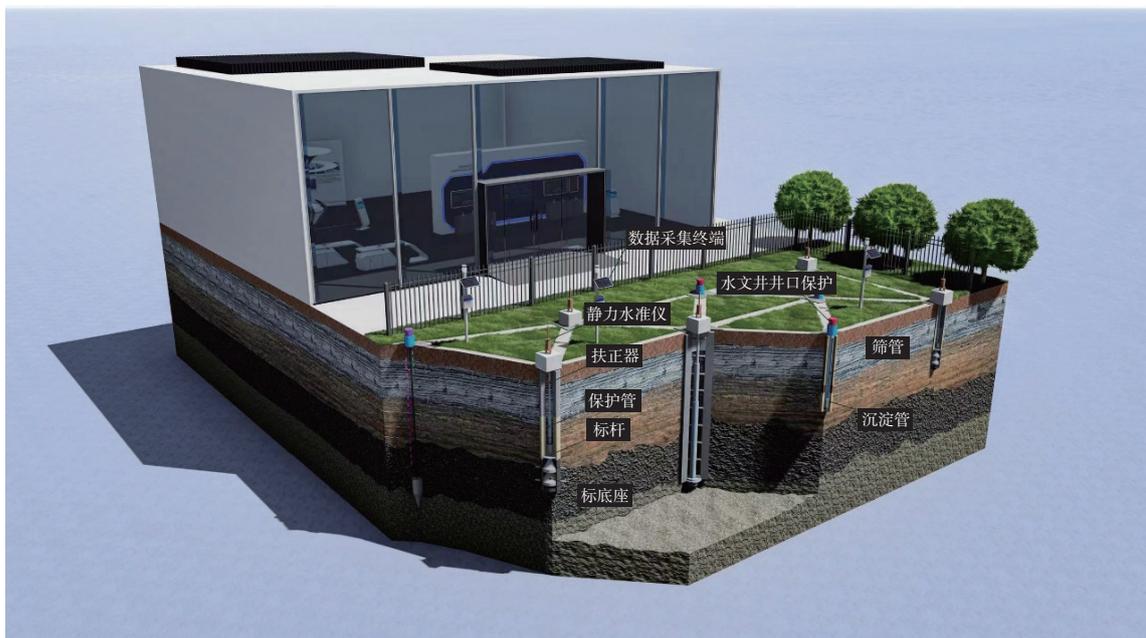


图 3 红河三角洲地面沉降监测站(河内)监测井剖面结构示意图

Fig.3 Stereogram of monitoring wells in the Red River Delta Land Subsidence Monitoring Station (Hanoi)

3 中越科技合作的意义与创新价值

3.1 技术转移与能力建设

红河三角洲地面沉降监测站(河内)是中越首个跨境地质环境联合监测平台,其建设实现了两大突破:①技术本土化:中方将分层标组设计、光纤传

感系统等核心技术引入越南,并通过联合培训提升越方技术人员的数据解析能力;②数据共享机制:双方约定定期共享监测数据,开展联合研究,为跨境沉降模型开发奠定基础。

3.2 区域灾害防控的示范效应

该监测站的运行标志着中越合作从学术交流向技术落地的转型。其创新性体现在:①多参数融

合,首次在东南亚地区实现基岩标、分层标与光纤监测的协同应用,可同步获取沉降量、土层压缩速率、地下水压力及温度等多维度数据。②政策支持,监测结果为越南区域发展规划提供了关键依据,助力河内市调整地下水开采配额与建筑荷载标准。

3.3 推动“一带一路”科技合作

作为中越海上低敏感领域合作框架下的标杆项目,该监测站的建设验证了跨境地质合作的可行性。其经验可推广至湄公河三角洲、伊洛瓦底江三角洲等海丝路沿线类似区域,为全球三角洲城市应

对地面沉降提供中国方案。

3.4 实现中越科技合作的创新价值

红河三角洲地面沉降监测站(河内)的建成,填补了越南高精度分层监测体系的空白,并成为中越科技合作的里程碑。通过技术转移、数据共享与联合研究,该项目不仅提升了越南的地质灾害防控能力,也为中国先进监测技术的国际化应用开辟了新路径。未来,双方计划将监测网络扩展至海防市等沉降高风险区,并联合开发人工智能驱动的沉降预测模型,进一步巩固区域地质安全合作的纽带。