引文格式：赵鹏飞,赵峰. 上海市高程基准近五年变化分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(4): 117-120. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.04.028

上海市高程基准近五年变化分析

赵鹏飞[1]，赵　峰[1]
（1. 上海市测绘院，上海 200063）

摘　要：高程基准是一个地区经济社会发展的重要基础设施。上海市于2020—2022年开展了全市高程基准更新工作。通过对原有高程基准基础设施调查、高程控制网水准复测、高程基准分析三步工作完成了上海市的高程基准的更新并发布新一期的高程基准成果。为了掌握上海市高程基准在近5 a的变化情况，对上海市城市水准点的数量变化、区域分布及高程变化情况3个方面进行研究分析，得出了关于上海市城市水准点数量、分布及高程变化的有益结论。最后对上海市高程基准的维护更新提出了一些建议。

关键词：高程基准；水准复测；地表沉降；反距离权重法插值；InSAR
中图分类号：P205　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）04-0117-04

Change Analysis of Shanghai Vertical Datum in Recent Five Years

ZHAO Pengfei[1], ZHAO Feng[1]
(1. Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: Shanghai vertical datum was updated and the vertical datum results were released by three steps, which included the original vertical datum infrastructure investigation, vertical control network repetition survey and vertical datum analysis. In order to grasp the change of Shanghai vertical datum in recent five years, we studied the quantity change, regional distribution and elevation change of Shanghai urban leveling points, obtained some useful conclusions, and put forward some suggestions for the maintenance and update of vertical datum in Shanghai.

Key words: vertical datum, repetition leveling, surface subsidence, inverse distance weighted interpolation method, InSAR

测绘基准是确定地理空间信息几何与物理特征和时空分布的基础，是在数学空间里表示地理要素在真实世界的空间位置的参考基准，能保证地理空间信息在时间域和空间域上的整体性[1-3]。高程基准是测绘基准的骨干组成部分，也是最基础的测绘工作，对国民经济、社会发展、国家安全、城市建设及管理等起到基础性的支撑作用。

1　上海市新一期高程基准更新

上海市上一期的高程基准成果于2017年正式发布，5 a以来有效支撑了城市建设和城市管理工作。随着时间流逝，作为高程基准基础设施的城市水准点必然会发生不同程度的沉降并有可能遭到毁坏，高程基准的稳定性和可靠性也逐年下降。从2020年起，上海市着手实施高程基准更新，更新工作分三步开展，具体如下：

1）2020年，调查原有高程基准基础设施。在充分搜集和分析已有资料的基础上，对上海市城市水准点进行普查，摸清楚上海市城市水准点的现状，补充埋设部分城市水准点，对复测水准路线进行踏勘、设计。

2）2021—2022年，开展高程控制网水准复测。这部分工作是高程基准更新的主体工作。主要内容包括对上海市高程控制网进行优化设计，开展全面复测工作，并完成数据整理和平差计算。

3）2022年，进行高程基准分析。主要工作是对上海市高程基准成果进行整理及统计，研究高程变化趋势，最终正式发布新一期的高程基准成果。

上海市高程基准更新工作自2020—2022年历时3 a，整合统一了上海市高程基准基础设施和成果，有效提升了上海市高程控制网的精度和现势性，共完成施测一、二、三等水准路线5 400余km，其中一等水准路线314.9 km，二等水准路线1 275.8 km，三等水准路线2 855.1 km。项目还完成了多处长距离跨河水准、跨隧道水准测量及SHCORS高程属性测定等高难度测量工作，在上海地区首次得到与最新1985国家高程基

收稿日期：2022-10-30。
项目来源：上海市2021年度社会发展科技攻关资助项目（21DZ1204100）。
第一作者简介：赵鹏飞（1985—），硕士，高级工程师，主要研究方向为大地测量、精密工程测量及测量数据处理，E-mail：zpf_paper@163.com。

准统一的高程成果，首次以2种测量方法实现了崇明岛与上海陆域的高程基准精确统一，并在项目验收会上得到了李建成院士领衔专家组的一致肯定。最终发布最新一期2 773个城市水准点成果，顺利实现上海市高程基准的更新。

2 上海市城市水准点的数量变化

2020年开始对原有高程基准基础设施开展普查，主要对2017年发布的3 013个城市水准点进行了详细调查，发现共有675个城市水准点遭到破坏，整体破坏率达到22.4%，此时的城市水准点总数为2 338个。

通过分析，发现城市水准点的破坏主要与城市开发建设有关。基本上是由于道路施工、绿化施工等市政工程的影响，造成了城市水准点的破坏，如果破坏水准点呈现一定的聚集分布现象，则通常与道路施工有关。

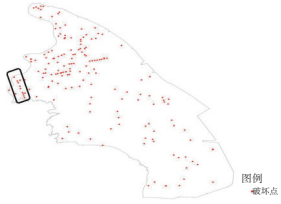


图1 浦东新区破坏城市水准点分布图

如图1所示，以浦东新区的破坏城市水准点分布为例。浦东新区西北部（黑框处）的破坏点呈线性聚集分布，通过调查发现，该地区实施了济阳路快速化改建，项目于2018年开始建设，2021年建成通车，故多个原来埋在路边的城市水准点被破坏。通过图2的两期影像对比更证明了这一推论。



a 2017年航空影像 b 2022年航空影像

图2 浦东新区济阳路区域航空影像

针对城市水准点破坏率较高的现状，为了更好地开展上海市高程控制网复测，对城市水准点进行了全面补充埋设。重点对水准路线节点、破坏水准点半径范围内无水准点（中心城区1 km，郊区4 km）的区域、重点建设区域进行了补埋。在2021年开展复测前共补埋城市水准点568点，此时城市水准点的总数达到2 906个。

2021—2022年在上海市高程控制网复测过程中发现又有100个水准点遭到破坏，另有若干点由于疫情防控等原因无法进入开展测量，所以最终施测2 773个城市水准点。

按照城市水准点的不同等级进行统计，表1为两期一等水准点、二等水准点、三等水准点的具体数量变化情况。

表1 两期上海市城市水准点数量变化表

水准点数量	一等水准点	二等水准点	三等水准点	总量
2017年	932	928	1 153	3 013
2022年	820	790	1 163	2 773
数量差	−112	−138	10	−240

从2017年上一期高程基准成果发布到2022年本次高程基准成果发布，上海市城市水准点数量整体上有所减少，其中一等水准点、二等水准点有所减少，三等水准点略有增加。

3 上海市城市水准点的分布

上海市城市水准点遍布上海陆域地区及崇明三岛，分布于黄浦区、徐汇区、长宁区、静安区、普陀区、虹口区、杨浦区、闵行区、宝山区、嘉定区、浦东新区、金山区、松江区、青浦区、奉贤区、崇明区16个区，详见图3。此外，为了保证上海市高程基准网的完整性以及与邻省高程基准的统一性，还有个别城市水准点位于省外，如上海市西北地区毗邻的昆山市和太仓市等。

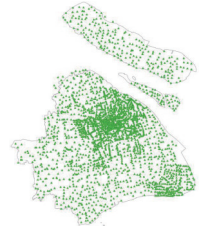


图3 上海市城市水准点分布图

按照行政区域统计城市水准点的分布情况，具体如图4。

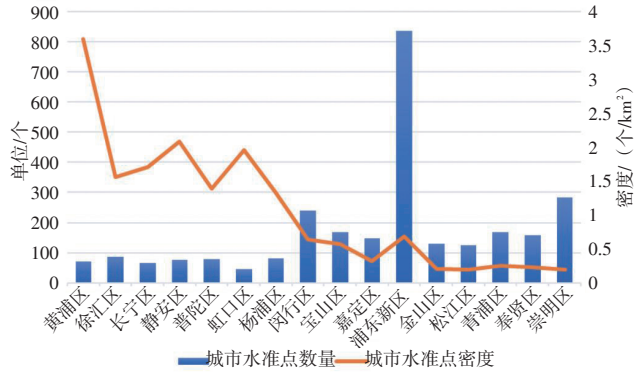


图4 上海市各区城市水准点数量及密度

上海市浦东新区的城市水准点数量最多，数量超过800点；其余郊区范围的闵行区、崇明区、宝山

区、嘉定区、金山区、松江区、青浦区、奉贤区的城市水准点较多，均超过100点；而市中心范围的黄浦区、徐汇区、长宁区、静安区、普陀区、虹口区、杨浦区的城市水准点较少，均不足100点。

由于上海市各区面积差异较大，进一步按照各区城市水准点的分布密度进行统计分析。在上海市范围内，黄浦区的城市水准点密度最高，超过3.5点/km^2，其余市中心六区（徐汇区、长宁区、静安区、普陀区、虹口区、杨浦区）水准点密度稍低，但也均超过1点/km^2。在郊区中，闵行区、宝山区、浦东新区点密度较高，均超过0.5点/km^2，其余嘉定区、金山区、松江区、青浦区、奉贤区及崇明区的点密度较低，均低于0.5点/km^2。通过以上数据可以看出上海市城市水准点的分布并不均匀，其密度基本与城市开发程度正相关，存在市区密度较高，郊区密度较低的现象。上海市城市水准点的平均密度达到0.44点/km^2，处于一个较高的水平，远高于规范[4-5]的相关要求，能够有效满足上海市城市建设、发展及管理的需求。

4　上海市城市水准点高程变化

通过2017年、2022年两期重合点[6]的高程变化研究上海市地表沉降情况，若同一水准点有2017年和2022年两期的高程，该水准点即为重合点。重合点的确定原则如下：

1）首先梳理2017、2022年两期高程基准的同名点，初步认为同名点即为重合点。

2）对同名点逐一进行人工梳理。通过分析点之记、对比两期水准点照片等方法内业剔除粗差点；内业无法判别的，则进一步通过外业实地踏勘的手段剔除粗差点。粗差点的情况主要包括：原点破坏重新埋设水准点、两期测量位置不一致等。必须经过严格分析处理，确保重合点是可靠的，是拥有两期高程的同一个水准点，这样才能真实反映重合点的高程变化情况，进一步反映上海市的地表高程变化情况。最终确认重合点共2 200个，然后对这2 200个重合点进行进一步研究分析。

重合点的两期高程变化量的计算公式如下：

$$\delta H = H_{2022} - H_{2017} \tag{1}$$

式中，H_{2022}为2022年重合点的高程；H_{2017}为2017年重合点的高程；δH为重合点的高程变化量。若高程变化量为正，则该点发生隆起，若高程变化量为负，则该点发生沉降。

经统计，重合点高程变化量为负（沉降）的点为1 177个，高程变化量为0（无变化）的点为82个，高程变化量为正（隆起）的点941个，说明发生沉降的城市水准点相对较多。对2 200个重合点的高程变化量进行统计，2017—2022年5 a以来城市水准点的最大高程变化量（隆起）为38 mm，最小高程变化量（沉降）为−165 mm，平均高程变化量为−4.9 mm。以上数据能够初步说明整个上海市地表是以沉降为主，但沉降比较稳定，沉降量较小。

按照5 a以来重合点高程变化量的分布区间进行统计，详见图5。

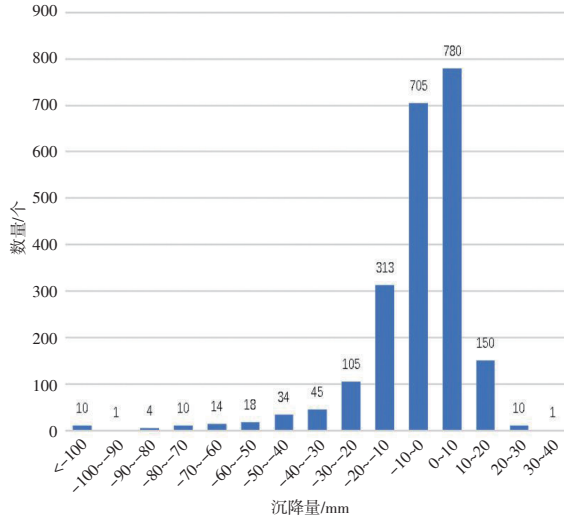


图5　重合点高程变化量（2017–2022年）分布图

通过图5，可以看出重合点的高程变化量分布完全符合正态分布规律。其中高程变化量处于−10 ~10 mm的重合点共有1 485个，占到重合点总数的近70%，而其他高程变化量较大的点数量相对较少，可以进一步证明前面得出的结论：即整个上海市的地表沉降情况比较稳定，沉降量较小。

按照重合点的高程变化量结合地理位置进行插拟合值。插值采用反距离权重法，反距离权重（inverse distance weighted，IDW）是一种确定性方法，用于已知散点集的多变量插值[7]。具体公式如下：

$$d_i = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2} \tag{2}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i}\right)} \tag{3}$$

$$Z(x_n, y_n) = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i, y_i) \tag{4}$$

式（2）~（4）中，（x_n, y_n）为待插值的未知点坐标；（x_i, y_i）为已知点坐标；d_i为已知点到未知点的距离；λ_i为插值点权重；$Z(x_n, y_n)$为未知点的插值高程，是关于坐标的函数。权重的大小与插值点到已知点的距离负相关，即距离较大处的已知点对插值点高程贡献较小，反之则对插值点的贡献较大。经插值得到上海市近5 a的地表沉降趋势图，详见图6。

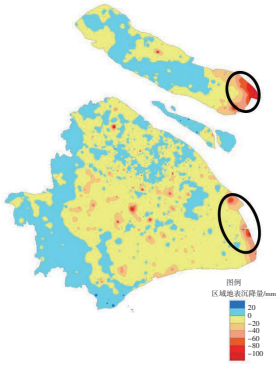


图6 上海地区地表沉降趋势图

通过地表沉降趋势分析，可以得到以下几个结论：

1）确认近5 a在上海市范围内发生沉降的区域面积较大，发生隆起的区域面积相对较小。

2）上海市的地表沉降存在不均匀分布现象，上海西部的青浦区、奉贤区、嘉定区西部、松江区西部，以及长兴岛西部、崇明岛中部、横沙岛处于地表隆起状态，上海市的其他区域大部分处于沉降状态。

3）整个上海市地表沉降量较小，绝大部分地区的地表沉降量（含沉降和隆起）都在±20 mm的范围之内，沉降趋于稳定。

4）此外，可以发现较为明显的2个沉降区，详见图6中黑框处。其中一处为崇明东滩区域，该区域所有水准点均处于沉降状态，尤其是东滩东部沿海的沉降量更大；另一处是浦东新区东南沿海区域，主要是祝桥镇到南汇新城镇沿海一线。该现象和崇明东滩、浦东新区沿海区域是沿海新成土地是相关的。

为了确定上海地区的地表沉降变化趋势，通过InSAR技术进一步验证。合成孔径雷达干涉测量技术（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）集合成孔径雷达技术与干涉测量技术于一体，可同时获取地物的反射强度信息和相位信息[8]，具有全天时、全天候、覆盖范围广等特点，能有效实现大面积实时地面沉降监测。

Sentinel-1卫星对上海地区的存档数据主要为Interferometric Wide swath（干涉宽幅）成像模式，该模式数据覆盖范围较大，可满足上海市域范围内地面沉降监测。以InSAR技术为基础，对时序接近的上海地区Sentinel-1数据进行处理和分析，获取上海地区沉降速率图（详见图7）。图6、7一致，即基于复测的地表沉降趋势与基于InSAR的地表沉降趋势是一致的。进一步证明了上文结论是可靠的：上海地区发生沉降面积相对较大；沉降存在不均匀分布现象；整体沉降量（速率）较小，沉降趋于稳定；崇明岛及浦东等地区沿海新成土地沉降较为明显。

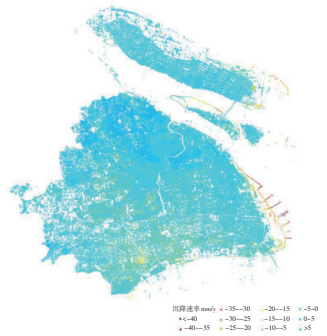


图7 基于InSAR的上海地区地表沉降速率图

5 结论与建议

上海市位于长三角冲积平原，多属软土地区且工程建设较多，保持5 a一次的高程基准更新是有效且必要的。通过对2017—2022年5 a以来上海市城市水准点相关变化情况研究，得出以下结论及建议：

1）上海市城市水准点的破坏率较高，应科学规划，及时补充埋设城市水准点，尽量避开工程在建及规划建设区域，同时加强对现存城市水准点的管理及保护。

2）上海市城市水准点的整体密度较高，但区域分布不均匀。可根据区域发展情况有重点的调整城市水准点密度。

3）通过城市水准点5 a高程变化分析，可知目前上海市地表整体处于较为稳定的状态，地表沉降量较小，但是地表沉降不均匀，尤其应该注意沿海新成土地及施工建设对地面沉降的影响。

参考文献

[1] 张鹏,武军郦,孙占义. 国家测绘基准体系基础设施建设[J]. 测绘通报,2015(10):9-11

[2] 陈俊勇,张全德,张鹏. 对中国高程控制网现代化工作的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(11):941-944

[3] 邓思胜,宋传峰,陈敬,等. 粤港澳大湾区大地基准和高程基准的统一[J].地理空间信息,2022,20(5):169-172

[4] 国家一、二等水准测量规范:GB/T12897-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006

[5] 国家三、四等水准测量规范:GB/T12898-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009

[6] 王文利,郭春喜,丁黎,等. 全国一等水准点高程近20年变化分析[J]. 测绘学报,2019,48(1):1-8

[7] 冯波,陈明涛,岳冬冬,等. 基于两种插值算法的三维地质建模对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2019,49(4):1 200-1 208

[8] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 717-1 733