



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 联合卫星测高和 GNSS 观测的天津沿海近 25 年相对海平面变化分析
作者: 周东旭, 冯义楷, 张化疑, 付延光, 唐秋华
DOI: 10.13203/j.whugis20210532
收稿日期: 2021-10-08
网络首发日期: 2022-06-21
引用格式: 周东旭, 冯义楷, 张化疑, 付延光, 唐秋华. 联合卫星测高和 GNSS 观测的天津沿海近 25 年相对海平面变化分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210532>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210532

引用格式：

周东旭, 冯义楷, 张化疑, 等. 联合卫星测高和GNSS观测的天津沿海近25年相对海平面变化分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210532 (ZHOU Dongxu, FENG Yikai, ZHANG Huayi, et al. Analysis of relative sea level change of the Tianjin coast in recent 25 years using satellite altimetry and GNSS observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210532)

联合卫星测高和 GNSS 观测的天津沿海近 25 年相对海平面变化分析

周东旭^{1,2} 冯义楷^{1,2} 张化疑^{1,2} 付延光^{1,2} 唐秋华^{1,2}

1 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛, 266061

2 自然资源部海洋测绘重点实验室, 山东 青岛, 266590

摘要：针对现有验潮公开数据因时间范围及潮位沉降修正等影响，难以真实反映天津沿海相对海平面变化的问题，本文基于 GNSS 与验潮并置观测，设计了联合卫星测高和 GNSS 观测的天津沿海相对海平面变化分析方法。分析结果显示，1993—2018 年期间，塘沽验潮站点的相对海平面上升速率约为 13.45 ± 0.45 mm/a；联合 4 个虚拟并置观测站，得到天津沿海不同区域的相对海平面上升速率在 $11.15 \sim 19.17$ mm/a，平均上升速率 15.09 ± 0.45 mm/a。沿海地面沉降是天津相对海平面上升速率偏高的主要因素（贡献率大于 70%），受地面沉降非均匀空间分布的影响，海平面上升速率存在区域差异，塘沽验潮站难以代表整个天津沿海的相对海平面变化。

关键词：天津沿海；相对海平面；地面沉降；并置观测；GNSS；卫星测高

中图分类号： P229

文献标志码： A

相对海平面 (relative sea level, RSL) 变化是指海平面相对于某一参考面 (陆地表面) 的上升或下降，可直接反映某一区域的海岸侵蚀、海水入侵等灾害信息。沿海地区地面沉降会导致相对海平面的加剧上升，如菲律宾马尼拉、泰国曼谷等地区受地面沉降的影响，相对海平面上升速率高达 $10 \sim 17$ mm/a^[1-4]，约为同时段全球平均速率的 3~6 倍。天津市是中国地面沉降最为严重的城市之一，历史最高沉降速率达到 150 mm/a^[5]，1986 年开展地面沉降控制之后，沉降速率有所减缓，但目前仍存在 $10 \sim 30$ mm/a 的区域沉降量^[6-8]。同时，天津又是中国北方重要的政治、经济、文化中心，在我国沿海海平

面持续上升背景下^[9]，监测和分析天津的相对海平面变化，对该区域的社会经济和生态环境安全具有重要的应用价值。

长期验潮资料是研究沿海相对海平面变化的主要数据源，国内学者利用塘沽验潮资料得到不同时期的海平面上升速率在 $1.1 \sim 5.3$ mm/a^[10-13]，在我国沿海海平面持续上升和天津地区厘米量级的年均地面沉降背景下，上述速率显然不能代表真实的相对海平面变化。文献[10]指出其主要原因是塘沽验潮记录经过了沉降改正，如抽取地下水等引发的地面下沉（海平面上升）数值已在记录中订正掉。文献[12]同时指出由于验潮站与基准水准点距离一般不超过几公里，对于几十公里甚至上百里范围内的地面垂直

收稿日期：2021-10-08

项目资助：国家自然科学基金(41706115, 41876111)；山东省自然科学基金 (ZR2020QD087)

第一作者：周东旭，博士，工程师，主要从事沿海 GNSS 应用和海平面变化研究。zhoudongxu@fio.org.cn

通讯作者：唐秋华，博士，研究员。tangqiuhoa@fio.org.cn

运动无法进行有效的订正。此外，塘沽验潮站多次迁址，一些历史沉降修正值已无从查考^[10]，进一步增加了利用验潮资料分析天津沿海相对海面变化的难度。为了解真实的相对海平面变化，文献[14-16]采用理论海平面上升速率和水准监测资料，推算了天津沿海不同时期的相对海平面上升速率（1956—1985：24.5 mm/a、1959—1996：72.5 mm/a、1985—1996：15.5 mm/a），由于采用的数据源和观测时段不同，推算的上升速率存在显著差异，且缺少天津控制地面沉降工作实施后的分析成果，难以为天津当前的相对海平面上升防治提供参考。

随着海洋卫星观测技术发展、全球 GNSS 与验潮并置观测网络构建及相关数据积累，国内外学者就三种数据在沿海地区的联合应用开展了大量研究。文献[17]联合长期验潮与临近 GNSS 观测数据，分析了欧洲西部和南部沿海 31 个验潮站的绝对海平面变化，与卫星测高反演结果的平均差异为 0.17mm/a；文献[18,19]则将卫星测高和长期验潮数据结合，分别计算了全球 107、155 个验潮站的地面沉降，与 GNSS 观测的平均差异为 -0.25 ± 1.47 mm/a 和 0.14 ± 1.22 mm/a；文献[20]利用卫星测高和验潮数据分析了中国吴淞验潮站的地面沉降，与水准、VLBI 的测量差异小于 0.60 mm/a。长期验潮、GNSS、卫星测高三种数据的不同组合及其分析结果的一致性，为研究沿海相对海平面变化提供了新的技术途径。

本文基于 GNSS 与验潮并置观测，将天津沿海的卫星测高与 GNSS 观测资料结合，通过计算并置验潮站的绝对海平面上升和地面沉降速率，分析天津沿海近 25 年的相对海平面变化，为天津地区应对海平面上升

提供数据参考。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

1.1.1 GNSS 数据及沉降资料

2009 年原国家海洋局在沿海 56 个长期验潮站增设了 GNSS 观测设施，构建了我国沿海 GNSS 与验潮并置观测站网。塘沽并置观测站是其中站点之一，位于天津港北疆港区东突堤（突堤建成于 1982 年，自身沉降已稳定），位置见图 1 五角星标注，实体见图 1 右上图片。本文采用该站 2009—2018 年的 GNSS 原始观测数据（采样间隔 30 秒），分析验潮站地面沉降（包含地表沉降和地壳垂直运动）对海平面监测的影响。同时，还收集了沙井子、保税区、滨海、汉沽 4 个沿海 GNSS 基准站 2006—2018 年期间的地面沉降监测成果（位置分布见图 1，站点信息见表 1）。

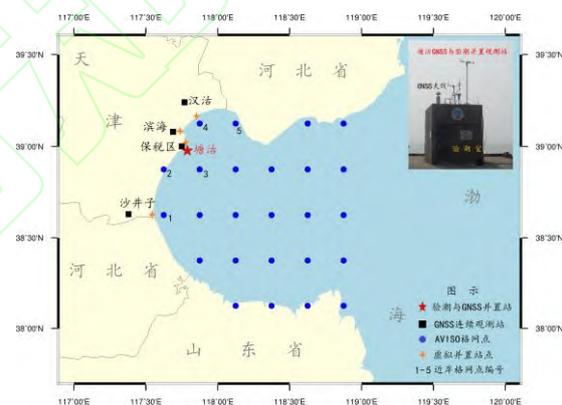


图 1 天津沿海 GNSS、验潮站及渤海湾区域 AVISO 格网点分布图

Fig.1 Distribution of GNSS, Tide Gauge and AVISO Grid Points in Bohai Bay

表 1 天津沿海 GNSS 基准站地面沉降监测结果统计

Tab.1 Vertical Land Motion of GNSS Stations Along the Tianjin Coast

站名	位置		观测时间	沉降速率 (mm/a)	站点 类型	距离海岸 (km)
	经度(°)	纬度(°)				
汉沽 ^a	117.77	39.24	2006.001-2011.999	-7.90±0.11	土层	9
滨海 ^b	117.69	39.08	2010.574-2018.456	-15.89±0.18	土层	5
保税区 ^a	117.75	39.00	2006.001-2017.456	-14.78±0.04	楼顶	1.5
沙井子 ^a	117.38	38.63	2006.001-2017.456	-9.71±0.03	土层	15

注：a 表示站点观测成果收集自参考文献[21]，b 表示站点成果收集自中国大陆构造环境监测网络 (<http://www.neiscn.org/>)。

1.1.2 卫星测高数据

卫星测高数据采用法国空间研究中心 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO) 提供的多卫星 (Jason-1、T/P、ENVISAT、GFO、ERS-1/2、GEOSAT) 融合的格网化海平面变化异常 (sea level anomaly, SLA) 月均数据 (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>)，数据空间分辨率 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ ，时间跨度为 1993 年 1 月至 2018 年 12 月。SLA 网格数据已经过必要的标准改正，如海潮改正、极潮改正、地球固体潮汐改正、逆气压改正和干湿对流层延迟、电离层延迟、海况偏差等。本文主要选用渤海湾 (天津沿海约 1° 范围) 的 SLA 格网数据进行分析 (格网点分布见图 1)。

1.2 数据处理方法

1.2.1 GNSS 原始数据处理

首先利用 PADAN 软件对塘沽站 GNSS 原始观测数据进行静态精密单点定位解算，具体解算策略如下：采用 IGS 精密星历和卫星钟差；采用双频消电离层组合非差观测模型，消除电离层一阶项影响；对流层天顶延迟采用经验模型改正，天顶湿延迟进行参数估计，映射函数采用 GMF 模型；接收机钟差进行参数估计；同时考虑接收机天线相位中心偏差、卫星天线相位中心偏差、相对论效应、地球自转改正、固体潮、海洋负荷等影响，进行相关模型改正。将解算的站点坐标统一至 ITRF2014 参考框架后，进行站心坐标转换，得到 U 方向的时间序列。

1.2.2 并置站 SLA 时序内插与修正

本文根据 GNSS 与验潮并置站 (包括虚拟站)、AVISO 格网点的空间分布特征，选用临近格网点插值法^[19]内插并置站点处的 SLA 时序，内插策略如下：①选用反距离加权平均进行内插，②SLA 格网点选取范围初设为并置站周边 $1/4^\circ$ ，如格网点数目少于 2，再进行选点范围扩展。

利用长期验潮获取的中国沿海相对海平面变化中通常包含逆气压影响，为此需要将 SLA 时序中的逆气压改正进行修回。鉴于逆气压改正的高频影响 (小于 20d) 在 SLA 数据月平均处理过程中已基本消除，本文主要利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)

的海面月均大气压值，进行逆气压改正的低频影响计算，公式如下：

$$IB = -9.948 \times (P_i - \bar{P}_i) \quad (1)$$

式中， P_i 为 i 月份的并置站海面月均大气压值，由站点周边 4 个 ECMWF 格网点的月均大气压值通过反距离加权平均内插得到； \bar{P}_i 为 i 月份的全球海面大气压平均值。

1.2.3 GNSS 和 SLA 时间序列分析

考虑地震、观测设备更换等因素对 GNSS 观测时序的影响，首先利用轨迹模型 (式 2) 修正时间序列中可能存在的阶跃项^[22-23]，并结合拉依达准则 (3σ 准则) 进行粗差剔除。

$$\zeta(t) = \zeta_0 + \Delta\zeta(t) + \sum_{i=1}^n [a_i \cos(\frac{2\pi}{T_i} t) - b_i \sin(\frac{2\pi}{T_i} t)] + \sum_{j=1}^N [g_j H(t - T_j)] + \varepsilon(t) \quad (2)$$

式中， $\zeta(t)$ 为 t 时刻的观测值； ζ_0 为截距； $\Delta\zeta$ 为线性变化速率； a_i 、 b_i 为待求系数； n 为周期个数； T_i 为各周期的时间值，取值 0.5a、1a 和 2a^[24-26]； g_j 为第 j 次阶跃； N 为阶跃次数； T_j 为阶跃时间； H 为海斯西特阶梯函数，阶跃前为 0，阶跃后为 1； $\varepsilon(t)$ 为随机误差。对预处理后的 GNSS 和 SLA 时间序列进行基于小波变换的低通滤波，滤除时序中的短周期变化项 ($\leq 90d$) 影响^[27]；然后再采用三角多项式模型和最小二乘法计算并置站的地面沉降和绝对海平面上升速率。

$$\zeta(t) = \zeta_0 + \Delta\zeta(t) + \sum_{i=1}^n [a_i \cos(\frac{2\pi}{T_i} t) - b_i \sin(\frac{2\pi}{T_i} t)] + \varepsilon(t) \quad (3)$$

式中各符号表述内容同式 (2)，在 GNSS 时序处理中 T_i 取值 0.5a、1a 和 2a，在 SLA 时序处理时 T_i 取值为 0.5a、1a、1.19a、3.57a、11.13a 和 18.61a^[28-29]。另外，卫星测高数据在近岸区域精度相对较差，目前对其系统误差和随机误差尚无确切结论^[12]。在绝对海平面上升速率计算时，本文参考文献^[12,30]将卫星测高在近岸的观测误差 $\varepsilon(t)$ 简化为无偏的随机误差，即认为在 25 年的长时间尺度内观测误差对海平面变化速率的影响是趋于 0 的可舍弃量。

1.2.4 相对海平面变化趋势计算

验潮站的相对海平面变化 V_{RSL} 、绝对海平面变化 V_{ASL} 和地面沉降 U 的相互关系通常描述如下^[30-33]:

$$V_{RSL} = V_{ASL} - U \quad (4)$$

文献[34]研究表明,在全球范围内冰川均衡调整(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)对海面高变化的平均影响量约为-0.30 mm/a,是影响当前海平面变化的因素之一。式(4)中,地面沉降 U 中包含有GIA引起的地壳垂直运动量(约为0.43 mm/a,由ICE-6G_D模型^[35]计算),但AVISO测高数据计算的 V_{ASL} 中未考虑其影响。根据文献[36]分析,GIA在中国及周边海域,对卫星测高反演的绝对海面高变化的影响约为-0.15 mm/a,约占该区域绝对海平面上升速率的4%。在分析天津相对海平面变化时,应考虑绝对海平面上升速率中的GIA影响量,因此公式(4)可进一步描述为:

$$V_{RSL} = V_{ASL} - V_{GIA} - U \quad (5)$$

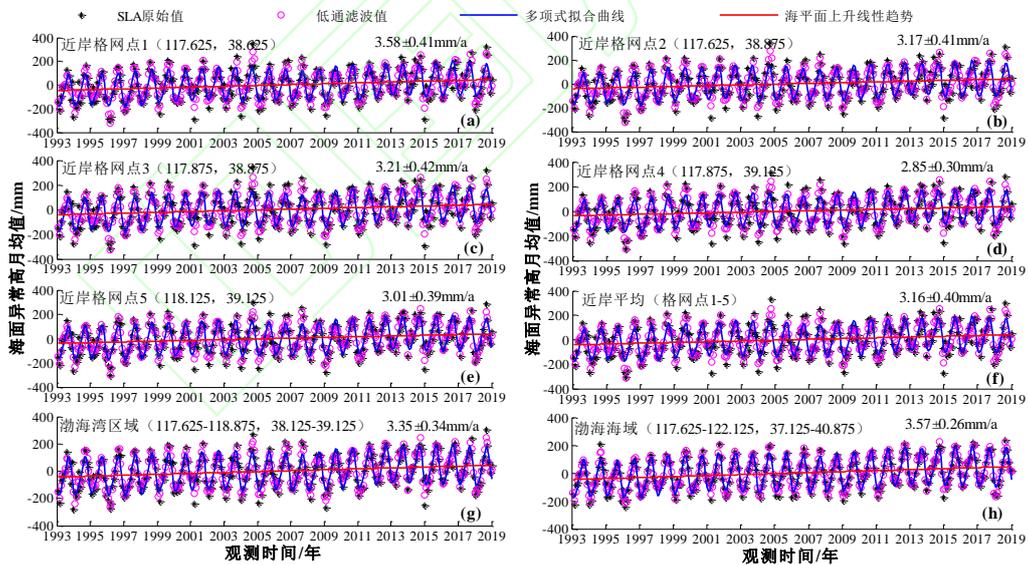


图2 天津近岸格网点及临近海域 SLA 时序与绝对海平面上升趋势

Fig.2 SLA Series and Absolute Sea Level Rise at the Coast of Tianjin and Neighboring Oceans

2.2 相对海平面变化

1993—2018年期间,逆气压效应对塘沽并置站海面高度变化的影响在-250~100mm之间(图3(a)),对海平面上升速率的影响为-0.17±0.12 mm/a。塘沽并置站同期的 SLA

式中 V_{GIA} 为 V_{ASL} 的GIA修正量,在天津近海参考文献[36]取值-0.15 mm/a。

2 天津沿海海平面变化分析

2.1 绝对海平面变化

天津近岸5个AVISO格网点1993—2018年的SLA时序变化如图2(a-e)所示,绝对海平面上升速率在2.85~3.58 mm/a之间,速率值之间差异较小,且呈现南高北低的空间分布特征。对5个近岸格网点的SLA数据取平均(图2(f)),得到天津沿海的平均上升速率为 $3.16±0.40$ mm/a。同时提取渤海湾和整个渤海区域的绝对海平面变化时序(图2(g-h)),二者平均上升速率分别为 $3.35±0.34$ mm/a和 $3.57±0.26$ mm/a。天津沿海的绝对海平面上升速率略低于渤海湾及整个渤海区域的平均速率,也低于同时段的中国沿海和全球平均上升速率(中国沿海3.90 mm/a^[9];全球平均3.35 mm/a, AVISO)。

时间序列(由近岸格网点2、3、4的SLA值内插)如图3(b)所示,绝对海平面上升速率为 $3.12±0.41$ mm/a,叠加逆气压改正后海面绝对上升速率为 $3.28±0.45$ mm/a。

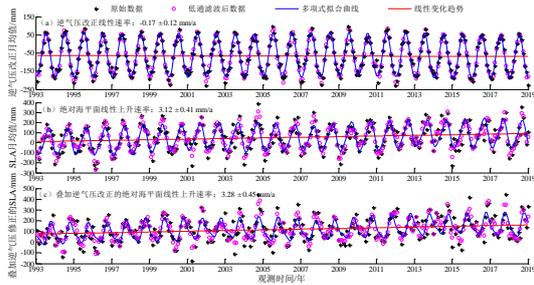


图3 塘沽并置站绝对海平面上升趋势

Fig.3 Absolute Sea Level Rise at Tanggu Station

GNSS 监测的塘沽并置站地面沉降如图 4 所示, 2009-2018 年的高程时间序列呈现显著下降趋势, 平均速率 -10.02 ± 0.04 mm/a, 略低于临近保税区和滨海 GNSS 基准站监测的沉降速率。由式 (5) 得到塘沽并置站近 25 年的相对海平面上升速率为 13.45 ± 0.45 mm/a。

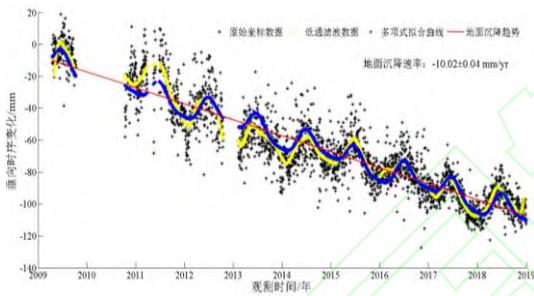


图4 塘沽并置站地面沉降趋势

Fig.4 Vertical Land Motion at Tanggu Station

天津海岸线长约 153km, 同时受地下水

表 2 天津沿海不同点位的相对海平面变化 (单位: mm/a)

Tab.2 Relative Sea Level Change of Different Stations Along the Tianjin Coast (Unit: mm/a)

沿岸站点	绝对海平面上升速率*	GIA 效应	地面沉降 (GNSS)	相对海平面上升速率	地面沉降贡献率	备注
塘沽	3.28 ± 0.45	-0.15	-10.02 ± 0.04	13.45 ± 0.45	74.50%	实际站
沙井子	3.71 ± 0.45	-0.15	-9.71 ± 0.03	13.57 ± 0.45	71.55%	虚拟站
保税区	3.20 ± 0.44	-0.15	-14.78 ± 0.04	18.13 ± 0.44	81.52%	虚拟站
滨海	3.13 ± 0.44	-0.15	-15.89 ± 0.18	19.17 ± 0.45	82.89%	虚拟站
汉沽	3.10 ± 0.43	-0.15	-7.90 ± 0.11	11.15 ± 0.44	70.85%	虚拟站
平均值	3.28 ± 0.44	-0.15	11.66 ± 0.10	15.09 ± 0.45	77.27%	

注: *号表示已叠加逆气压改正

3 讨论

文献[37]要求 GNSS 与验潮并置观测应满足二者并址或就近建设, 且位于同一地质块体。国内外学者开展并置观测研究时, 为

开采、城市建设等人为因素的影响, 沿海地面沉降存在区域空间分布的非均匀性^[21], 塘沽并置站的相对海平面上升难以代表整个天津沿海的变化情况。为此, 文章假设沙井子、保税区、滨海和汉沽 4 个 GNSS 基准站, 临近的海岸处各有 1 座验潮站 (图 1 橙色四角星标注, 最远距离 15km) 与之并置观测, 然后基于并置观测原理, 利用 GNSS 基准站沉降资料和 AVISO 格网点测高数据, 分析不同虚拟验潮站的相对海平面上升, 增加天津沿岸的相对海平面变化监测量。

表 2 统计结果显示, 4 个虚拟站点叠加逆气压改正后的绝对海平面上升速率在 3.10~3.71 mm/a, 站间速率差小于 0.61 mm/a; 地面沉降速率在 -15.89~-7.9 mm/a, 沉降趋势及非均匀性空间分布特征显著; 相对海平面上升速率在 11.15~19.17 mm/a, 最大差异为 8.02 mm/a, 各虚拟站与塘沽相对海平面上升速率的差异在 -2.30~5.72 mm/a。综合塘沽和 4 个虚拟并置站的分析结果, 天津沿海近 25 年的相对海平面上升平均速率为 15.09 ± 0.45 mm/a, 高于塘沽单站监测结果约 1.64 mm/a; 沿海地面沉降平均速率 11.66 ± 0.10 mm/a, 与文献[6-8]的水准测量结果量级一致, 地面沉降对相对海平面上升速率的贡献率在 70.85%~82.89%, 是推动当前天津沿海相对海平面快速上升的主要因素。

确保 GNSS 站与验潮站地面沉降的一致性, 站间距离设定通常不超过 50km^[19,24,38-43], 本文 4 个虚拟验潮站与其对应 GNSS 站的最远距离为 15km, 空间距离理论满足并置观测要求。另外, 参考郭良迁等人^[7]绘制的天津

地区构造单元略图(图略), 本文的虚拟验潮站与对应 GNSS 站均位于同一构造块体单元上, 二者具有相同的基底构造运动趋势(沉降速率约为 $2 \text{ mm/a}^{[44]}$)。但我们还应注意, 天津沿海广泛分布欠固结软土层, 软土层固结压缩产生的地表沉降远高于基底构造运动的沉降速率, 同时受地下水和地热水开采、基坑开挖疏干抽排浅层水等人为因素影响, 地表沉降还具有区域差异性^[8]。基于虚拟 GNSS 和验潮并置观测的方法, 能否有效分析天津沿岸的地面沉降和相对海平面变化, 本文开展了如下探讨。

长期验潮是分析相对海平面变化的最直观资料, 本文自历年的中国海平面公报^[9]中收集了天津沿海 2000—2018 年的海平面年均距平数据(以常年平均海面为参照, 潮位观测值取距平), 计算了近 20 年的海平面上升。常年平均海面统一后的天津沿海海平面年均距平时序如图 5 所示, 一元线性拟合得到天津沿海海平面上升速率约为 $8.90 \pm 0.97 \text{ mm/a}$, 比本文分析结果低约 6.31 mm/a , 二者差异较大。

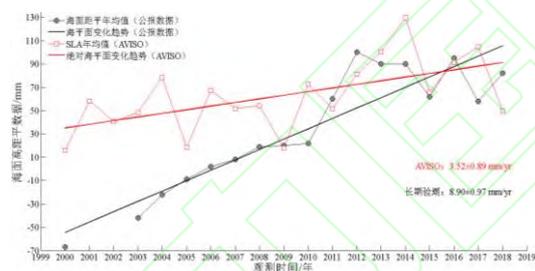


图 5 不同数据源的天津沿海海平面变化趋势比较 (2000—2018)

Fig.5 Comparison of Sea Level Rise from Different Data Sources in Tianjin Coast (2000-2018)

假定图 5 海面距平年均数据反映的是真实相对海平面上升, 结合卫星测高得到的同期绝对海平面上升速率 ($3.52 \pm 0.89 \text{ mm/a}$) 和 GIA 修正, 推算天津沿海近 20 年的地面沉降速率为 5.23 mm/a , 显著小于实际的区域地面沉降量, 即天津沿海海平面年均距平时序反映的并非真实相对海平面上升, 推测原因可能是距平数据中已加入地表沉降修正。虽然公报中的海面高年均距平数据无法为本文方法提供评估参考, 但分析结果表明开展天津沿海的相对海平面变化研究, 当前仍具有重要的现实意义。

此外, 本文还自历年的中国海平面公报^[9]中收集了 2009—2019 年期间滨海新区及原大港、塘沽和汉沽区域的水准监测年均沉降量(详见表 3), 多年数据取平均得到区域平均沉降速率分别为 20.33 mm/a 、 19.25 mm/a 、 16.13 mm/a 和 30.75 mm/a 。本文方法确定的地面沉降速率与之相比较(见图 6), 二者在塘沽区域基本一致, 差异为 2.14 mm/a ; 但在大港和汉沽区域差异较大, 分别为 10.25 mm/a 和 23.81 mm/a 。分析差异原因如下: ①塘沽为滨海新区中心区, 经济开发较为成熟, 而大港和汉沽区域近些年开发活动相对频繁, 受建筑深基坑疏干抽排浅层水、水产养殖开采地下水等影响^[45], 局部地面沉降严重, 造成区域平均沉降速率偏高; ②大港和汉沽区域的 GNSS 站点数量相比塘沽较为稀疏, 且选址于地质结构和观测环境相对稳定的区域, 监测的地面沉降速率小于区域水准测量结果。

表 3 天津滨海新区 2009—2019 年的年均地面沉降

Tab.3 Ground Deformations of Binhai Area (2009-2019)

区域	滨海新区	大港	塘沽	汉沽
2009-2011 年	23	--	--	--
2012 年	24	25	23	24
2013 年	22	17	22	37
2014 年	23	26	18	30
2015 年	23	21	18	40
2016 年	21	18	16	38
2017 年	16	14	14	27

年均沉降量(mm)

2018年	17	20	8	26
2019年	14	13	10	24
多年平均沉降速率 (mm/a)	20.82	19.25	16.13	30.75

注：2009年11月塘沽、汉沽和大港三区已合并成立滨海新区，文章为表述方便，仍沿用中国海平面公报中的塘沽、汉沽和大港三区描述方式。另外，文章仅收集到2009~2011年期间滨海新区3年的平均沉降量，未收集到三个区逐年的沉降量。

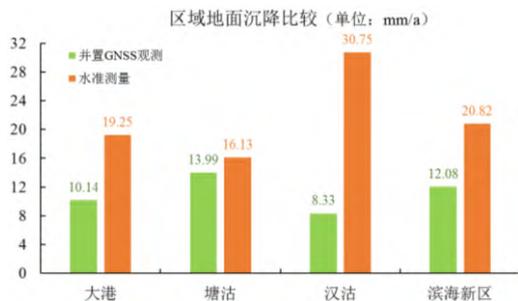


图6 天津沿海不同区域的地面沉降比较

Fig.6 Comparison of VLM in Different Coastal Areas of Tianjin

注：并置GNSS观测的区域沉降速率，由其区域内的站位沉降速率取平均获得。

GNSS基准站与验潮站选址建设与观测，均要求站点周边的地质构造和观测环境相对稳定，人为因素影响小。因此，本文认为在一定空间范围内GNSS基准站与验潮站具有更好的地面沉降一致性，由GNSS和卫星测高数据推算的相对海平面变化更接近于长期验潮站的实际观测的结果。

4 结语

本文利用1993—2018年的AVISO卫星测高数据产品和GNSS沉降监测资料，基于GNSS与验潮并置观测，推算了天津沿海近25年的相对海平面上升。

(1) 天津沿海不同区域的绝对海平面上升速率在2.93~3.55 mm/a，平均速率3.12 mm/a，略低于周边及全球同期的平均速率，即与其他区域相比较，与气候因素相关的海平面上升在天津沿海并无异常。

(2) 结合并置GNSS数据和卫星测高数据，推算塘沽验潮站近25年的真实相对海平面上升为13.45±0.45 mm/a。同时联合4个虚拟并置点，分析得到天津沿海的平均上升速率为15.09±0.45 mm/a。地面沉降是天津沿海相对海平面上升的主要推动因素，贡献率超过70%。

(3) GNSS连续观测可提供准确的站点沉降信息，建议塘沽验潮站采用并置GNSS开展地面沉降监测，保留和发布原始潮位资料，以便更好的服务于天津沿海海平面监测与研究。此外，天津沿海的地面沉降具有空间分布不均匀特性，塘沽验潮站难以准确监测整个沿海的海平面上升，建议根据地面沉降分布特性，加密沿海验潮观测监测设施。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2014
- [2] Trisirisatayawong I, Naeije M, Simons W, et al. Sea Level Change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected Tide Gauge Data and Multi-satellite Altimetry [J]. Global and Planetary Change, 2011, 76(3-4): 137-151
- [3] Raucoules D, Le Cozannet G, Wöppelmann G, et al. High Nonlinear Urban Ground Motion in Manila (Philippines) from 1993 to 2010 Observed by DInSAR: Implications for Sea-level Measurement [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 139(2013): 386-397
- [4] Zhou Dongxu, Zhou Xinghua, Lei Ning, et al. Studying the Characteristics of Relative Sea Level Change in Surrounding South China Sea and the Impact of 2004 Sumatra Earthquake [J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(1): 49-59 (周东旭, 周兴华, 雷宁等. 南海周边相对海平面变化特征及2004年苏门答腊地震影响分析[J]. 海洋学报, 2016, 38(1): 49-59)
- [5] Wang Jiabing. Sustainable Development of the Deep Ground-water Resource Under the Condition of Controlling Land Subsidence in

- Tianjin [D]. China University of Geosciences, Beijing, 2006 (王家兵. 天津深层地下水资源持续利用研究:控制地面沉降条件下[D]. 北京:中国地质大学, 2006)
- [6] Dong Kegang, Wang Wei, Yu Qiang, et al. History and Enlightenment of Land Subsidence Controlling in Tianjin City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 54-59 (董克刚, 王威, 于强等. 天津市地面沉降防治历史的调查研究及启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 54-59)
- [7] Guo Liangqian, Buo Wanju, Chen Yukun, et al. Vertical Deformation and Tectonic Activity in Tianjin Area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(5): 1-5 (郭良迁, 薄万举, 陈宇坤等. 天津地区的垂直形变与构造活动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5): 1-5)
- [8] Duan Xiaofeng, Xu Xuegong, Wang Ruobai. Land Subsidence and Its Influencing Factors in Tianjin Coastal Area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1071-1076 (段晓峰, 许学工, 王若柏. 天津沿海地区地面沉降及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 1071-1076)
- [9] China Sea Level Bulletin [C], 2003-2019: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgb/zg-hpmgb/> (中国海平面公报[C], 2003-2019. 自然资源部. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgb/zghpmgb/>)
- [10] Huang Liren, Hu Huimin, Yang Guohua. Sea Level Change Along the Western and Southern Coast of Bohai Sea and Recent Crustal Vertical Movement in Adjacent Area [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1991, 11(1): 1-9 (黄立人, 胡惠民, 杨国华. 渤海西、南岸的海面变化及邻近地区的现代地壳垂直运动[J]. 地壳形变与地震, 1991, 11(1): 1-9)
- [11] Zheng Wenzhen, Chen Zongyong. Establishment of Coastal Long-term Tidal (Sea Level Monitoring) Stations in China and Suggestions Thereof [J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(1): 13-19 (郑文振, 陈宗镛. 我国沿海长期验潮(海平面监测)站的建立和建议[J]. 海洋通报, 1998, 17(1): 13-19)
- [12] Wu Zhongding, Li Zhanqiao, Zhao Mingcai. The Process and Prediction of Sea Level Change of China Offshore Waters in 50 Years [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(2): 17-19 (吴中鼎, 李占桥, 赵明才. 中国近海近50年海平面变化速度及预测[J]. 海洋测绘, 2003, 23(2): 17-19)
- [13] Liu Shouhua, Chen Changlin, Liu Kexiu, et al. Vertical Motions of Tide Gauge Stations Near the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(11): 1737-1746 (刘首华, 陈长霖, 刘克修等. 渤海黄海边验潮站地面垂直运动速率计算[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11): 1737-1746)
- [14] Ren Mei-e. Relative Sea Level Rise in Huanghe, Changjiang and Zhujiang (Yellow, Yangtze and Pearl river) Delta Over the Last 30 Years and Predication for the Next 40 Years (2030) [J]. ACTA GEOGRAPHICA SINICA, 1993, 48(5): 385-393 (任美镠. 黄河长江珠江三角洲近30年海平面上升趋势及2030年上升量预测[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 385-393)
- [15] Hu Junjie, Meng Ai-jun. Relative Sea Level Rise and Land Subsidence in Tianjin Area [J]. Marine Information, 2005, 2:17-19 (胡俊杰, 蒙爱军. 天津地区的相对海平面上升与地面沉降[J]. 海洋信息, 2005, 2005(2): 17-19)
- [16] Yang Xi, Wang Zhongliang. Analysis of the Latest Development and Tendency of Relative Sea-level Change in Tianjin, China [J]. Earth and Environment, 2014, 42(2): 157-161 (杨曦, 王中良. 天津地区相对海平面变化最新进展及发展趋势分析[J]. 地球与环境, 2014, 42(2): 157-161)
- [17] Feng G, Jin S, Zhang T. Coastal Sea Level Changes in Europe from GPS, Tide Gauge, Satellite Altimetry and GRACE, 1993-2011 [J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 1019-1028
- [18] Wöppelmann G, Marcos M. Vertical Land Motion as A Key to Understanding Sea Level Change and Variability [J]. Reviews of Geophysics, 2016, 54(1): 64-92
- [19] Kleinherenbrink M, Riva R, Frederikse T. A

- Comparison of Methods to Estimate Vertical Land Motion Trends from GNSS and Altimetry at Tide Gauge Stations [J]. *Ocean Science*, 2018, 14(2): 187-204
- [20] Cui Shuhong, Xie Zhiren, Zhong Hexiang, et al. The Primary Researches That T/P Sea Height Data is Used Revised Ground Rise or Fall at the Tide Gauge Station [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6): 643-648 (崔树红, 谢志仁, 钟鹤翔等. 利用 T/P 海面高度数据校验验潮站地面升降的初步研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 643-648)
- [21] Zhan Wei. Study on Vertical Crustal Motion in Chinese Mainland and Typical Areas Based on Continuous GPS [D]. Wuhan University, Wuhan, 2017 (占伟. 基于 GPS 连续观测的中国大陆典型区域地壳垂直运动研究[D]. 武汉:武汉大学, 2017)
- [22] Bevis M, A Brown. Trajectory Models and Reference Frames for Crustal Motion Geodesy [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(3): 283-311
- [23] Jiang Weiping, Wang Kaihua, Li Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2018, 43(12): 2112-2123 (姜卫平, 王楷华, 李昭等. GNSS 坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(12): 2112-2123)
- [24] Fu Yang. Present-day Crustal Deformation in China and GPS-derived Coordinate Time Series Analysis [D]. Shanghai Observatory, Shanghai, 2002 (符养. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析[D]. 上海:中国科学院上海天文台, 2002)
- [25] Zhang Peng, Jiang Zhihao, Bei Jinzhong, et al. Data Processing and Time Series Analysis for GPS Fiducial Stations in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 251-254 (张鹏, 蒋志浩, 秘金钟等. 我国 GPS 跟踪站数据处理与时间序列特征分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(3): 251-254)
- [26] Zhou Dongxu, Zhou Xinghua, Zhang Huayi, et al. Analysis of the Vertical Deformation of China Coastal Tide Stations Based on GPS Continuous Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 516-522 (周东旭, 周兴华, 张化疑等. 利用 GPS 连续观测进行中国沿海验潮站地壳垂直形变分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(4): 516-522)
- [27] Pfeffer J, Allemand P. The Key Role of Vertical Land Motions in Coastal Sea Level Variations: A Global Synthesis of Multi-satellite Altimetry, Tide Gauge Data and GPS Measurements [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 439(1April 2016): 39-47
- [28] Woodworth PL. A Note on the Nodal Tide in Sea Level Records [J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(2): 316-323
- [29] Huang Zuke, Huang Lei. 2005. Tidal Theory and Calculation [M]. China Ocean University Press, P225-226 (黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 中国海洋大学出版社, 2005, P225-226)
- [30] Wöppelmann G, Marcos M. Coastal Sea Level Rise in Southern Europe and the Nonclimate Contribution of Vertical Land Motion [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(1): 1-14
- [31] Hu Jianguo. Use High Precision GPS Technique to Establish the Monitoring Network for Vertical Continent-ocean Movement in Our Country [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(4): 283-289 (胡建国. 利用高精度 GPS 定位技术建立我国陆海垂直运动监测网[J]. *测绘学报*, 1999, 28(4): 283-289)
- [32] Jiao Wenhai, Wei Ziqing, Guo Hairong et al. Determination of the Absolute Rate of Sea Level by Using GPS Reference Station and Tide Gauge Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(10): 901 -904 (焦文海, 魏子卿, 郭海荣等. 联合 GPS 基准站和验潮站数据确定海平面绝对变化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004, 29(10): 901-904).
- [33] Liu Genyou, Zhu Yaozhong, Xu Houze et al. Study on Height Changes of Chinese Tide Gauges by GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(12): 1044-1047

- (刘根友,朱耀仲,徐厚泽等.GPS 监测中国沿海验潮站垂直运动观测研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(12): 1044-1047).
- [34] Peltier W.R. Chapter 4 Global Glacial Isostatic Adjustment and Modern Instrumental Records of Relative Sea Level History. P65-95 in Sea Level Rise: History and Consequences. International Geophysics Series, vol.75. Academic Press, 2001
- [35] Peltier W.R, Argus D.F, Drummond R. Comment on “An Assessment of the ICE-6G_C(VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model” by Purcell et al [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(2): 2019-2028
- [36] Tamisiea M.E, J.X. Mitrovica. The Moving Boundaries of Sea Level Change: Understanding the Origins of Geographic Variability [J]. Oceanography, 2011, 24(2): 24-39
- [37] Ministry of Natural Resources. Specifications for Construction of Co-located GNSS Continuous Reference Station and Tide Gauge Station: HY/T 243-2018 [S]. Beijing: China Standard Press, 2018 (中华人民共和国自然资源部. 全球导航卫星系统(GNSS)连续运行基准站与验潮站并置建设规范: HY/T 243-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018)
- [38] Collilieux X, Wöppelmann G. Global Sea-level Rise and Its Relation to the Terrestrial Reference Frame [J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(1): 9-22
- [39] Santamaría-Gómez A, Gravelle M, Wöppelmann G. Long-term Vertical Land Motion from Double-differenced Tide Gauge and Satellite Altimetry Data [J]. Journal of Geodesy, 2014, 88(3): 207-222
- [40] Santamaría-Gómez A, Gravelle M, Dangendorf S, et al. Uncertainty of the 20th Century Sea-level Rise Due to Vertical Land Motion Errors [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 473(1 September 2017): 24-32
- [41] Snay R, Cline M, Dillinger W, et al. Using Global Positioning system-derived Crustal Velocities to Estimate Rates of Absolute Sea Level Change from North American Tide Gauge Records [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B4): 1-11
- [42] Tretyak K, Dosyn S. Study of Vertical Movements of the European Crust Using Tide Gauge and GNSS Observations [J]. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 2014, 97(1): 112-131
- [43] Wöppelmann G, Letretel C, Santamaría A, et al. Rates of Sea Level Change Over the Past Century in A Geocentric Reference Frame [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(12): L12607:1-L12607:6
- [44] Wang Ruobai, Zhou Wei, Li Fenglin, et al. Tectonic Subsidence and Prospect of Ground Subsidence Control in Tianjin Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(5): 12-17 (王若柏, 周伟, 李凤林等. 天津地区构造沉降及控沉远景问题[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 12-17)
- [45] Yi Changrong. The Latest Progress of Land Subsidence Control in Tianjin [J]. Haihe Water Resources, 2017, 42(3): 42-43,66 (易长荣. 天津市控制地面沉降工作最新进展[J]. 海河水利. 2017, 42(3): 42-43,66)

Analysis of relative sea level change of the Tianjin coast in recent 25 years using satellite altimetry and GNSS observations

ZHOU Dongxu^{1,2} *FENG Yikai*^{1,2} *ZHANG Huayi*^{1,2} *FU Yanguang*^{1,2} *TANG Qihua*^{1,2}

¹ The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

² Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266590, China

Abstract: Objectives: In recent 40 years, the risk of sea level rise in China's coastal areas is further increased with the acceleration of sea level rise, especially in serious land subsidence areas (e.g., Tianjin, Shanghai). However, it is difficult to know the real relative sea level (RSL) change at Tianjin coast due to time frame and subsidence

correction of the public tidal data. To solve this issue, we propose an analysis method of RSL change by using the data of Satellite Altimetry and Global Navigation Satellite System (GNSS). **Methods:** The method is executed based on the idea of the collocating observation of GNSS and tide gauge. Meanwhile, to obtain RSL in different areas of Tianjin coast, we simulated 4 GNSS and tide gauge co-stations. Firstly, the absolute sea level (ASL) change and vertical land motion (VLM) of tide gauge stations are determined by using the data of satellite altimetry and co-located GNSS observations, respectively. Then, the relative sea level rise of Tanggu and four virtual tide gauge stations is calculated. Finally, the feasibility of our method is discussed based on multi-year leveling data. **Results:** The results show that the RSL rate was 13.45 ± 0.45 mm/a at Tanggu tide station in the past 25 years, the RSL rate of four fictitious stations varied from 11.15 ± 0.44 mm/a to 19.17 ± 0.45 mm/a, and the mean rate along the Tianjin coast was 15.09 ± 0.45 mm/a. Vertical land motion and its non-uniform distribution were the main influencing factors of the RSL rise and its regional differences, with the contribution rate more than 70%. **Conclusions:** Our research provides a new and feasible method for analyzing the RSL rise of Tianjin coast, however, it is still necessary to encrypt the tide observation facilities along the coast and retain and release the original tidal data, which can better serve the monitoring and research of sea level in Tianjin coastal area.

Key words: Tianjin coast; Relative sea level; Land subsidence; Collocated observation; GNSS; Satellite altimetry

First author: ZHOU Dongxu, PhD, engineer, specializes in coastal GNSS and sea level change analysis. E-mail: zhoudongxu@fio.org.cn

Corresponding author: TANG Qiu Hua, PhD, professor. E-mail: tangqiu hua@fio.org.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41706115, 41876111), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2020QD087)

标题: 联合卫星测高和GNSS观测的天津沿海近25年相对海平面变化分析

作者: 周东旭, 冯义楷, 张化疑, 付延光, 唐秋华

DOI: 10.13203/j.whugis20210532

收稿日期: 2021-10-08

引用格式:

周东旭, 冯义楷, 张化疑, 等. 联合卫星测高和GNSS观测的天津沿海近25年相对海平面变化分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210532 (ZHOU Dongxu, FENG Yikai, ZHANG Huayi, et al. Analysis of relative sea level change of the Tianjin coast in recent 25 years using satellite altimetry and GNSS observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210532)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

相对海平面变化时段选择效应分析

刘聚, 暴景阳, 许军

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1): 79-87

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190019>