Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.01.001

# 中国沿海验潮站及其邻近地区陆地 垂直运动分析

金波文<sup>1</sup>,王慧<sup>1</sup>,李经纬<sup>2</sup>,李文善<sup>1</sup>,李欢<sup>1</sup>,徐浩<sup>1</sup> (1.国家海洋信息中心,天津 300171; 2.中国地震局第一监测中心,天津 300180)

摘 要:利用中国沿岸验潮站 GNSS 和邻近地区陆态网络 GNSS 基准站观测数据,结合卫星高度计和验潮站海平面观测数据 分析了中国沿海验潮站及其邻近地区陆地垂直运动特征。中国沿海海平面观测以及验潮站和陆态网 GNSS 基准站观测结果显 示,中国沿海省区市及沿海验潮站陆地垂直运动总体表现为:辽宁至江苏沿海上升、上海至福建泉州沿海沉降、福建厦门至 广西沿海升降交替的格局,局部滨海平原地区如华北平原天津南部、河北平原的沧县则表现出显著的沉降特征。验潮站陆地 的抬升与沉降是沿海相对海平面变化的重要组成部分,准确掌握验潮站及其邻近区域的陆地垂直运动特征,可为沿海相对海 平面变化分析、海平面变化影响评估以及未来海平面上升预测提供依据。 关键词:验潮站;GNSS;卫星高度计;陆地垂直运动

中图分类号: P717; P228 文献标识码: A 文章编号:1001-6932(2022)01-0001-08

# Land vertical movement analysis of China coastal tidal stations and adjacent areas

JIN Bowen<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, LI Jingwei<sup>2</sup>, LI Wenshan<sup>1</sup>, LI Huan<sup>1</sup>, XU Hao<sup>1</sup>

(1. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China; 2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** The paper analyzes the characteristics of the vertical movement of the land in the coastal areas of China and its neighboring areas by using the GNSS observation data of the tide gauge at coastal stations of China and the land -based network GNSS reference stations in the neighboring areas, combined with the satellite altimeter and the sea-level observation data of the stations. The results show that the vertical movement of the land in China's coastal provinces and municipalities and coastal tide gauge stations is generally ascending from Liaoning to Jiangsu Province and subsiding from Shanghai to Quanzhou, Xiamen to Guangxi Autonomous Region coastal alternate pattern of elevation, local coastal plain areas such as southern Tianjin in the North China Plain, and Cang County in the Hebei Plain show significant subsidence characteristics. The uplift and subsidence of land at tide gauge stations is an important part of the relative sea level changes along the coast. The accurate characteristics of the vertical movement of land at tide gauge stations and its adjacent areas provides basis for analysis of relative sea level changes along the coast, assessment of sea level change impact and future sea level rise forecast. **Keywords:** tide station; GNSS; satellite altimeter; vertical movement

在全球气候变暖背景下,海平面上升已成为全 球性重大环境问题。由于温度升高和南北极冰川、 冰盖融化等环境因素的影响,在过去 100a 内全球 海平面上升了 10~25 cm<sup>[1]</sup>。20 世纪以来,全球海平 面呈现加速上升趋势,我国沿海海平面上升速率高 于全球同期平均水平,面临的海平面上升影响风险 更大<sup>[2-3]</sup>。目前,中国沿海海平面监测的主要方法是 通过验潮站潮位观测,其观测得到的是基于各站

基金项目:国家自然科学基金(41976025)

作者简介:金波文(1990—),硕士,工程师,主要从事验潮站基准变化及 GNSS 地壳形变研究。电子邮箱: jbwnmdis@126.com

http://hytb.nmdis.org.cn

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-08-17

水尺零点的相对海平面变化,除了受绝对海平面变 化影响外,还与局部地区陆地垂直运动有关,后者 在很多地区的重要性甚至超过了前者,并且陆地沉 降会加剧相对海平面上升<sup>[4-5]</sup>。此外,由于验潮站相 对海平面变化包含了其本身的陆地垂直运动因素在 内,在对近岸融合卫星高度计绝对海平面资料进行 综合研究分析时,陆地垂直运动是一个不可忽视的 因素。因此,准确地监测中国沿海验潮站及其邻近 地区的陆地垂直运动规律不仅对于验潮水尺零点的 维护具有重要意义,而且对联合卫星高度计数据的 沿海绝对海平面变化研究分析至关重要。

沿海地区陆地垂直运动主要包含大尺度范围的 地壳垂直运动和局部地面垂直运动。大尺度范围内 的地壳垂直运动主要包括地壳板块运动和冰川均衡 调整(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)等<sup>[6-7]</sup>,如 北欧斯堪的纳维亚半岛附近由于其陆上冰川融化陆 地抬升的 GIA 效应引起了海平面下降<sup>18]</sup>。局地地面 垂直运动主要由大河三角洲沉积压实效应、人类 活动开采地下水和超高超密建筑物修建等因素引 起<sup>[9-10]</sup>。监测陆地垂直运动的传统方法是定期精密 水准测量,黄立人等利用精密水准复测资料对中国 东部沿海地区的近代地壳垂直运动分析得出:东部 沿海广大平原地区以下降为主, 辽西山地、胶东半 岛以及闽、粤、贵山地和丘陵则以缓慢的块体上 升为主[11-13]。随着现代大地测量 GNSS 技术的发展, 基于连续 GNSS 观测提供精确地面沉降结果的方法 得到了快速的发展和应用。为剥离验潮站地面垂直 运动因素影响, Bevies 等利用 GNSS 连续观测数据 对西北太平洋、黑海等沿岸的验潮站陆地垂直运 动信息进行了研究[14-17],国内焦文海等利用验潮站 附近的 GNSS 研究了验潮站地面垂直运动后的绝对 海平面变化,但在中国沿海地区直接利用 GNSS 观 测数据,整体分析全国验潮站及其附近区域地面 垂直运动的研究仍较少[18-20]。1993年以来,随着 卫星高度计的发射,许多学者利用验潮站和附近的 卫星高度计观测数据就如何推算验潮站附近的陆地 升降开展了研究,该方法最早由 Cazenave 等提出, Kuo 等分别在该方法的基础上进行了改进,并对地 中海和大西洋东部等地区验潮站的地面垂直运动进 行了研究[21-22]。董鸿闻等利用类似方法分别推算了 青岛验潮站和黄河三角洲的地面垂直运动, 刘首华 等利用该方法推算了渤黄海周边验潮站地面垂直运

http://hytb.nmdis.org.cn

动速率,谢书谊等利用全球 191 个和中国沿海 29 个验潮站资料联合卫星高度计资料推算了沿岸陆地 垂直运动速率<sup>[2-25]</sup>。

我国于 2009 年开始陆续在全国沿海 50 余个验 潮站增加了 GNSS 连续观测业务, GNSS 连续观测 为提取验潮站的地面垂直运动信息提供了重要的数 据来源。本文利用 2009—2018 年间的验潮站 GNSS 观测资料,联合验潮站周边的中国地壳运动 观测网络(以下简称陆态网络)GNSS 基准站资 料,对全国沿海验潮站的地面垂直运动进行了分 析。同时,利用沿海卫星高度计资料和验潮站海平 面观测资料推算验潮站的地面垂直运动,与GNSS 获取的垂直运动进行了对比分析,并将分析结果与 冰川均衡调整模型的预测结果进行了对比研究。最 后给出中国沿海验潮站及其邻近区域最新的陆地垂 直运动情况,可为我国沿海相对海平面变化研究、 影响评估和预测提供支撑。

## 1 数据来源和处理方法

#### 1.1 数据来源

本文研究数据主要包括验潮站观测数据、GNSS 观测数据和卫星高度计海平面异常月均值数据。

验潮站实测数据来源于中国沿海海洋观测网, 通过实测数据得到的月均海平面数据集已通过全国 海洋站基准潮位核定,对因站址变迁、环境改变、 仪器更换、水尺变动和观测手段改变等引起的水尺 零点变动和资料均一性问题进行了订正。

卫星高度计资料来源于哥白尼环境监测中心 (www.psmsl.org)提供的多卫星融合订正后的海平面 异常月均值数据(MSLA, Mean Sea Level Anomalies),参考框架为1993—2012年平均海平面,数 据已进行仪器误差和相应的地球物理影响因素的 订正。

GNSS 连续观测数据来源于海洋站 GNSS 连续 观测 网以及陆态 网络 GNSS 基准站 网。海洋站 GNSS 资料来源于海洋站 GNSS 实时观测数据。陆 态网络 GNSS 基准站资料来源于中国地震局东部形 变数据分中心(www.eqdsc.com)提供的时间序列 数据,采用 ITRF2014 坐标框架。陆态网络在华北 地区站点数较多,距离验潮站较近的站点也比较 多,东部和南部沿海地区站点分布较少。

#### 1.2 验潮站和卫星高度计数据处理

为了匹配各 GNSS 观测资料的时间跨度,同时 考虑海平面季节变化带来的影响,本文对各验潮站 月均值数据和卫星高度计数据的时段进行了截取, 各站数据时段均为起始年的1月到结束年的12月, 总体时段为 2009—2018 年。在选取沿海卫星高度 计资料时,一种是把临近海域的高度计观测数据进 行整体月平均,从而避免高度计在某一格点观测时 间的不连续性带来的较大误差[22]。另一种是选取与 验潮站时间序列相关系数最高的格点数据作为验潮 站绝对海平面时间序列<sup>[26]</sup>。考虑到卫星高度计在沿 岸地区的精度不如宽阔海域,因此本文搜索各验潮 站 1.5°半径内的高度计格点数据,并按反距离加权 获得平均值作为该站卫星高度计绝对海平面资料序 列,并对各验潮站海平面序列与提取的对应站点卫 星高度计海平面序列进行了相关性分析,各站相关 系数如表1所示[24]。除日照、连云港、北海和防城 港4站验潮站序列与卫星高度计序列相关系数小于 0.6 外,其余站点相关性均较高(相关系数大于 0.8 的站点占68%),能较好地代表验潮站区域的海平

面变化,图1为三亚站验潮站与卫星高度计海平面 观测序列。

站名	相关 系数	站名	相关 系数	站名	相关 系数
东港 BDGG	0.79	吕泗 DLSI	0.66	遮浪 NZLG	0.92
小长山 BXCS	0.88	大戢山 DDJS	0.77	汕头 NSTO	0.91
老虎滩 BLHT	0.89	岱山 DDSH	0.81	惠州 NHZH	0.88
鲅鱼圈 BBYQ	0.86	朱家尖 DZJJ	0.82	深圳 NSZN	0.91
葫芦岛 BHLD	0.88	镇海 DZHI	0.77	珠海 NZUH	0.81
芷锚湾 BZMW	0.89	石浦 DSPU	0.76	大万山 NDWS	0.88
秦皇岛 BQHD	0.90	大陈 DDCN	0.82	闸坡 NZPO	0.88
塘沽 BTGU	0.73	坎门 DKMN	0.81	硇洲 NNZU	0.87
龙口 BLKO	0.88	温州 DWZH	0.84	涠洲 NWZU	0.73
蓬莱 BPLI	0.89	北茭 DBJO	0.78	北海 NBHI	0.59
芝罘岛 BZFD	0.87	长门 DCHM	0.71	防城港 NFCN	0.48
成山头 BCST	0.86	平潭 DPTN	0.86	海口 NHKO	0.79
石岛 BSDO	0.85	崇武 DCWU	0.88	东方 NDFG	0.87
小麦岛 BXMD	0.75	厦门 DXMN	0.86	三亚 NSYA	0.93
日照 BRZH	0.58	东山 DDSN	0.92	清澜 NQLN	0.90
连云港 DLYG	0.53	云澳 NYWO	0.91	西沙 NXSA	0.88



计算验潮站和卫星高度计海平面变化速率时, 首先去除月均值序列的季节性信号,进而获取各站 点的年均值海平面序列,最后利用最小二乘法对时 间序列进行线性回归求得海平面变化速率<sup>[25]</sup>,本文 在海平面变化趋势提取中使用的模型为:

$$MSL_t = a_0 + b_0 t - n_t \tag{1}$$

式中:  $MSL_i$  为验潮站时间为 t 的年平均海平面观测 值;  $a_0$  为该时段内的平均海平面值;  $b_0$  为平均海平 面线性变化速率;  $n_i$  为拟合误差。

#### 1.3 GNSS 数据处理

为了比较中国沿海和大陆的相对运动,并将海 洋站 GNSS 观测结果统一至全球参考框架下,本文 将所有海洋站 GNSS 观测数据与中国周边 IGS (International GNSS Service)跟踪站观测数据联合 解算。采用 GAMIT/GLOBK (10.7)软件进行基线 处理和平差解算。基线处理时轨道选用 IGS 发布的 精密轨道星历,卫星高度角设为 10°,大气延迟改 正采用 SAASTAMOINEN 模型,映射函数选用维也 纳映射模型,并进行了海洋潮汐、固体潮汐和极移等改正。平差解算时利用 GLOBK 对所有时段单天解进行整体平差,得到各站基于 ITRF2014 框架的坐标时间序列,时间序列质量控制采用相邻两个观测值之差和可视化人工判读方法对各站时间序列粗差逐个进行剔除,得到最后的时间序列<sup>[27]</sup>。

#### 1.4 陆地垂直运动速率计算

1.4.1 直接法(GNSS 垂直运动速率) 国内外 众多学者对 GNSS 高程分量进行过研究,普遍认为 全球许多连续站单天解算坐标分量的时间序列周期 主要有年周期和半年周期两项,因此本文使用与 Li等相同的高程时间序列模型对单站进行建模, 并利用最小二乘法求得各站垂直运动速率<sup>[28-31]</sup>。

1.4.2 间接法(绝对海平面变化速率减去相对海平 面变化速率: A-TG) 通过式(1)模型分别计 算各验潮站相对海平面变化速率和卫星高度计绝对 海平面变化速率,再利用各站对应的绝对海平面变 化速率减去相对海平面变化速率,得到的差值即为 陆地垂直运动速率。陆地垂直运动速率与验潮站和 卫星高度计观测的海平面变化速率之间的关系可用 下式表示:

 $V_h = V_a - V_{TG}$ 

(2)

式中, *V*<sub>a</sub> 为卫星高度计观测的绝对海平面变化速率, *V*<sub>m</sub> 为验潮站观测的相对海平面变化速率, *V*<sub>h</sub> 为陆地垂直运动速率。

### 2 中国沿海陆地垂直运动分析

中国大陆构造环境监测网络(以下简称"陆态 网") 在全国范围内建设了 260 个 GNSS 连续观测 基准站,本文选取中国沿海地区 43 个陆态网基准 站资料并利用直接法分析了地面运动速率,结果如 图 2 所示,并与选取卫星高度计和验潮站资料采用 间接法得到的陆地垂直运动趋势进行了对比分析。

#### 2.1 沿海地区陆态网基准站陆地垂直运动

中国沿海地区陆态网基准站观测结果显示,中国沿海省区市陆地总体以上升为主,局部区域陆地呈下降趋势。其中,辽宁省5个基准站均呈上升趋势,平均上升速率为1.46±0.11 mm/a,沈阳站上升速率最大(3.04±0.07 mm/a),丹东站上升速率最小(0.25±0.04 mm/a)。河北省沧县站位于华北平原沉降区,沉降速率为-29.71±0.07 mm/a,

承德和唐山站均呈上升趋势。天津市北部山区的 蓟县站和宝坻站呈上升趋势,上升速率较小,分 别为 0.94 ± 0.01 mm/a 和 0.41 ± 0.04 mm/a, 位于华 北平原地区的武清和滨海站沉降较快,沉降速率 分别为-44.72 ± 0.07 mm/a 和-16.91 ± 0.04 mm/a。 山东省8个基准站均呈上升趋势,平均上升速率为 0.91 ± 0.11 mm/a, 临沂站上升速率最大(1.75 ± 0.04 mm/a),烟台站上升速率最小(0.43 ± 0.04 mm/a)。 江苏省连云港站较为稳定,沉降速率为-0.03 ± 0.04 mm/a, 盐城和南通站沉降速率分别为-1.59 ± 0.06 mm/a 和-0.95 ± 0.04 mm/a, 溧水站呈缓慢上 升趋势,上升速率为0.41±0.04 mm/a。上海基准站 沉降速率为-2.35 ± 0.02 mm/a。浙江省 3 个基准站 均呈沉降趋势,平均沉降速率为-0.69±0.07 mm/a。 福建省除厦门站以 1.59 ± 0.02 mm/a 速率上升外,其 余3个基准站均呈沉降趋势,平潭和霞浦站沉降速 率分别为-0.83 ± 0.04 mm/a 和-0.55 ± 0.04 mm/a。 广东省除湛江站以-0.70 ± 0.04 mm/a 速率沉降外, 其余3个基准站均呈上升趋势。广西除梧州站以 -1.15 ± 0.05 mm/a 速率沉降外,其余 2 个基准站均 呈上升趋势。海南海口和三亚站沉降速率分别为 -3.82 ± 0.07 mm/a 和-0.01 ± 0.06 mm/a, 琼中和 永兴岛站均呈上升趋势,上升速率分别为 0.67 ± 0.02 mm/a 和 3.34 ± 0.07 mm/a。

#### 2.2 沿海验潮站陆地垂直运动

大部分验潮站 GNSS 与附近的陆态网络 GNSS 基准站的垂直运动方向和速率基本一致(图 2), 与顾国华等利用陆态网 GNSS 基准站获取的垂直运 动规律也基本一致,个别验潮站 GNSS 由于位于码 头,与附近位于基岩的陆态网基准站得出的陆地垂 直运动规律具有一定的差异<sup>[32-34]</sup>。中国沿海验潮站 及其邻近地区陆地垂直运动总体分布特征如下:

(1) 辽宁沿海验潮站及其邻近区域陆地垂直 运动基本特点是西部上升明显、东部缓慢上升而局 部呈下降趋势。沿海验潮站,除东港验潮站沉降 速率为-1.98±0.08 mm/a、鲅鱼圈验潮站沉降速率 为-0.19±0.09mm/a外,其余地区均呈现不同程度 的上升趋势。辽宁沿海验潮站平均上升速率约为 0.15±0.16mm/a。陆态网葫芦岛基准站(1.53± 0.04 mm/a)与葫芦岛验潮站(1.60±0.06 mm/a) 距离较近(约11 km),陆地均呈上升趋势,速率 相差 0.07 mm/a。





(2) 河北沿海的芷锚湾和秦皇岛验潮站均呈上 升趋势,上升速率分别为 1.87 ± 0.07 mm/a 和 0.73 ± 0.22 mm/a,这与华北平原北侧天津宝坻、天津蓟 州、河北唐山、河北承德等几个山地丘陵地区的陆 态网一致,均呈现上升趋势。天津沿海的塘沽验潮 站以-8.26 ± 0.10 mm/a 的速率沉降,其位于华北平 原滨海地区,与陆态网滨海站相距约 14 km,均具 有较大的沉降速率。华北平原是海河、黄河、淮河 等水系在第三纪以来长期下降背景下共同堆积而成 的,位于该平原沉降漏斗区的天津武清、滨海和河 北沧县附近站点(图 2 中黑色方框内的站点)区域 沉降最为显著,主要是由过量开采地下水并叠加构 造活动引起。

(3)山东和江苏沿海验潮站除威海石岛站以 -3.06±0.05 mm/a的速率沉降外,其余站点陆地均 表现为上升趋势。从验潮站和陆态网基准站可以看 出,山东半岛整体处于上升趋势。

(4)上海和浙江沿海验潮站除朱家尖和小衢山验潮站缓慢上升外,其余验潮站均呈下降趋势。其中,上海芦潮港验潮站沉降速率为-3.10±0.05 mm/a,

与陆态网上海站沉降速率相差 0.75 mm/a;浙江沿海验潮站总体以下降为主,与陆态网基准站趋势 一致。

(5) 福建宁德至泉州沿海验潮站以沉降为主, 福建厦门至漳州、广东和广西沿海验潮站均呈现上 升与沉降交替出现现象。其中,闸坡验潮站沉降速 率最大,为-3.19±0.09 mm/a,云澳验潮站上升速 率最大,为1.47±0.20 mm/a。

(6)海南岛沿海北部秀英验潮站和南部三亚验 潮站呈下降趋势,东部清澜验潮站、西部东方验潮 站则呈现缓慢上升趋势。西沙验潮站上升速率为 2.18 ± 0.81 mm/a,与距离约 1 km 的陆态网络永兴 岛基准站(3.34±0.07 mm/a)上升趋势一致。

此外,利用间接法得到验潮站附近的陆地垂直运动情况并与 GNSS 速率进行对比,结果如表 2 所示。两种方法得出的陆地垂直运动速率大小和趋势方向存在一定差异,其中有 31 站的两种结果运动方向一致,其余测站运动方向相反。有 51%的站点采用直接法和间接法获得的陆地垂直运动速率差值在-2~2 mm/a 之间。两种方法结果产生差异性较大的因素较为复杂,验潮站周边高度计数据选取方式、高度计在沿岸精度本身受限以及海平面和陆地垂直运动季节性差异等因素均会对最终的结果产生影响。

表 2	沿海地区	GNSS 直接法和	A-TG 间接法计算	<b>算陆地垂直运动对比情况</b>
-----	------	-----------	------------	--------------------

单位: mm/a

序号	验潮站	直接法 (GNSS)	间接法 (A-TG)	差值	序号	验潮站	直接法 (GNSS)	间接法 (A-TG)	差值
1	东港	-2.0	0.7	-2.7	27	坎门	-2.0	-0.6	-1.4
2	小长山	0.4	2.2	-1.8	28	温州	-1.5	0.7	-2.2
3	老虎滩	1.0	-0.1	1.1	29	三沙	-2.1	1.3	-3.4
4	鲅鱼圈	-0.2	4.2	-4.4	30	北茭	-1.2	-2.7	1.5
5	葫芦岛	1.6	1.6	0.0	31	长门	-1.9	-1.7	-0.2
6	芷锚湾	1.9	-1.3	3.2	32	平潭	-0.9	3.0	-3.9
7	秦皇岛	0.7	-0.7	1.4	33	崇武	-1.7	6.0	-7.7
8	塘沽	-8.3	10.9	-19.2	34	厦门	-0.4	4.7	-5.1
9	龙口	1.5	-4.5	6.0	35	东山	0.3	3.8	-3.6
10	蓬莱	0.1	5.9	-5.8	36	云澳	1.5	2.3	-0.8
11	芝罘岛	2.0	5.0	-3.0	37	遮浪	-1.6	-2.0	0.4
12	成山头	1.0	6.4	-5.4	38	汕头	-1.5	-0.2	-1.3
13	石岛	-3.1	5.3	-8.4	39	惠州	-1.6	1.2	-2.8
14	小麦岛	1.2	8.8	-7.7	40	深圳	-2.1	-3.0	0.9
15	日照	0.7	15.3	-14.6	41	珠海	-0.8	-1.5	0.7
16	连云港	0.5	11.1	-10.6	42	大万山	-1.0	-2.5	1.5
17	吕泗	0.4	1.7	-1.3	43	闸坡	-3.2	-3.4	0.2
18	芦潮港	-3.1	-	-	44	砲洲	0.2	-1.9	2.1
19	大戢山	-2.6	-2.1	-0.5	45	涠洲	-0.9	-3.8	2.9
20	小衢山	0.3	-	-	46	北海	-0.2	0.4	-0.6
21	岱山	-0.4	-1.3	0.9	47	防城港	0.3	-1.5	1.8
22	朱家尖	1.1	1.0	0.1	48	海口	-1.1	-2.3	1.2
23	镇海	-1.1	-6.0	4.9	49	东方	0.0	-0.7	0.7
24	石浦	-0.5	-4.9	4.4	50	三亚	-2.5	-0.9	-1.6
25	大陈	-1.1	-3.9	2.9	51	清澜	0.6	1.6	-1.0
26	南麂	-1.6	-	-	52	西沙	2.2	5.4	-3.2

本文使用的验潮站和 GNSS 站点有 33 站是并 址运行的,因此 GNSS 垂直运动即可认为是验潮站 陆地垂直运动,分析得出有 42%的并址站点采用 直接法和间接法获得的陆地垂直运动速率差值在 -2~2 mm/a 之间。

# 4 结论与讨论

沿海陆地垂直运动对于沿海海平面变化分析、海平面变化影响评估以及未来海平面上升预测等具

http://hytb.nmdis.org.cn

有重要意义,利用 GNSS 连续观测获取陆地垂直形 变量的技术已较为成熟,随着多卫星导航系统的联 合应用, GNSS 连续观测精度也将进一步提高。通 过与验潮站并址的 GNSS 连续观测获取陆地垂直形 变可直接为沿海海平面变化分析提供准确的形变速 率。验潮站 GNSS 与陆态网络 GNSS 基准站获取的 沿海地区陆地垂直形变速率及方向具有较好的一致 性。中国沿海省区市及沿海验潮站陆地垂直运动总 体表现为辽宁至江苏沿海上升、上海至福建泉州沿 海沉降、福建厦门至广西沿海升降交替格局,局部 滨海平原地区如华北平原天津南部、河北平原的沧 县则表现为显著的沉降特征:上海至福建泉州沿海 除个别站点上升外,总体呈下降趋势;福建厦门至 广西沿海、海南岛则呈现出上升与沉降交替出现的 特征; 涠洲岛站附近表现为沉降, 西沙站区域呈现 出上升趋势。当然,本文获得的结果仅为验潮站及 其附近的陆地垂直运动情况,由于有些验潮站本身 建设在港口码头等局部地面不稳定的区域,并不能 完全代表东部沿海地壳的垂直运动情况。全面掌握 中国东部沿海地壳垂直运动特征仍需进一步利用稳 定的 GNSS 基准站和沿海地区的水准监测成果进行 综合分析。

谢书谊等认为对一个验潮站附近有多个 GNSS 站位和多个高度计网格点的情形,分析结果对 GNSS 和高度计数据的选择和处理会非常敏感,甚 至会导致陆地沉降的趋势性改变<sup>[25]</sup>。本文选用的与 验潮站并址的 33 个站点中直接法和间接法得出的 结果差异性也较大,这与 GNSS 资料本身的质量以 及卫星高度计在沿岸地区的精度受限等有关。随着 多种卫星导航系统的联合应用,GNSS 连续观测获 取陆地垂直形变量的精度和相关技术已相对成熟, 而卫星高度计本身在沿岸地区的精度尚未得到很好 的改善,在 GNSS 结果与 A-TG 结果存在较大差异 时,哪种方法更优仍有待在远离大陆的卫星高度计 精度较高的验潮站点区域开展进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 任美鄂.海平面研究的最新进展[J].南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(3):269-279.
- [2] 王慧,刘秋林,李欢,等.海平面变化研究进展[J].海洋信息,2018, 33(3):19-25.
- [3] 自然资源部. 2018年中国海平面公报[R]. 北京:自然资源部, 2018.
- [4] PELTIER W R, TUSHINGHAM A M. Global sea level rise and the

greenhouse effect:might they be connected[J]. Science, 1989, 244 (4906):806-810.

- [5] BAKER T F. Absolute sea level measurements, climate change and vertical crustal movements[J]. Global & Planetary Change, 1993, 8 (3):149–159.
- [6] PELTIER W R. Global sea level rise and glacial isostatic adjustment[J]. Global & Planetary Change, 1999, 20(2/3):93–123.
- [7] PELTIER W R. Closure of the budget of global sea level rise over the GRACE era: the importance and magnitudes of the required corrections for global glacial isostatic adjustment[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(17):1658–1674.
- [8] JOHANSSON J M, DAVIS J L, SCHERNECK H G, et al. Continues GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandial, Geodetic results[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2002, 107(B8): 1–27.
- [9] 张阿根,杨天亮. 国际地面沉降研究最近进展综述[J]. 上海地质, 2010,31(4):57-63.
- [10] 国土资源部地质环境司.关于贯彻落实<全国地面沉降防治规 划(2011-2020年)》的通知[EB/OL]. 2012-07-03,2012.
- [11] 黄立人,马青,王若柏.中国大陆部分地区的地壳垂直运动[J].大 地测量与地球动力学,2004,24(4):7-12.
- [12] 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.
- [13] 胡惠民,黄立人,杨国华.中国东部沿海地区的近代地壳垂直运动[J].地质科学,1993,28(3):270-278.
- [14] BEVIES M, SCHERER W, MERRIFTELD M. Technical issues and recommendations related to the installation of continues GPS stations at tide gauges[J].Marine Geodesy, 2002, 25:87–99.
- [15] NEVIN B. AVSAR, SHUANGGEN JIN, HAKAN KUTOGLU, et al. Sea level change along the Black Sea coast from satellite altimetry, tide gauge and GPS observations[J]. Geodesy and Geodynamics1, 2016,7(1):50–55.
- [16] J-P MONTILLET, T I MELBOURNE, W M SZELIGA. GPS vertical land motion corrections to sea level rise estimates in the Pacific northwest[J]. Journal of Geophysical Research: Ocean, 2018, 123(2) 1196–1212.
- [17] 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.
- [18] 周东旭,周兴华,张化毅,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.
- [19] 金波文,王慧,刘玉龙,等.中国沿海海洋站 GNSS 坐标时间序列
  噪声模型的建立与分析[J].大地测量与地球动力学,2020,40(5):
  476-481.
- [20] COLLILIEUX X, DAM T V, RAY J, et al. Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parametres[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(1): 1–14.
- [21] CAZENAVE A, DOMINH K, PONCHAUT F, et al. Sea level changes from TOPEX-POSEIDON altimetry and tide gauges, and ver-

tical crustal motions from DORIS[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26:2077–2080.

- [22] KUO C Y, SHUM C K, BRAUN A, et al. Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31:L01608.
- [23] 董鸿闻.利用平均海面推定青岛水准原点地区的地壳垂直运动[J]. 黄渤海海洋,2000(2):25-28.
- [24] 刘首华,陈长霖,刘克修,等. 渤黄海周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.
- [25] 谢书谊,陈美香,张建立,等.陆地垂向运动对沿海相对海平面 变化的影响[J].海洋科学进展,2019,37(2):187-198.
- [26] SANLI D U, BLEWITT G. Geocentric sea level trend using GPS and >100-year tide gauge record on a postglacial rebound nodal line[J]. Journal of Geophysical Reaserch Solid Earth, 2001, 106(B1):713– 719.
- [27] 黄立人,马青,王若柏.中国大陆部分地区的地壳垂直运动[J].大 地测量与地球动力学,2004,24(4):7-12.
- [28] TIAN Y F, SHEN Z K. Progress on reduction no-nettonic noise in GPS position time series [J]. Acta Seismologe Sinica, 2009, 31(1):

68-80.

- [29] 金波文,王慧,张建立,等.北极新奥尔松地区海平面变化和陆 地垂直运动分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2021,46(4): 503-509.
- [30] JIANG W P,ZHOU X H. Effect of the span of Australian GPS coordinate time series in establishing an optimal noise model[J].Science China(Earth Sciences), 2015, 4:523–539.
- [31] LI J W,ZHAN W,GUO B F, et al. Combination of the Levenberg– Marquardt and differential evolution algorithms for the fitting of postseismic GPS time series[J]. Acta Geophys, 2021, 69:405–414. https://doi.org/10.1007/s11600–021–00556–y.
- [32] 顾国华. GPS 观测得到的中国大陆地壳垂直运动[J].地震,2005, 3:1-8.
- [33] 吕健,杨超. 华北地区大范围精密水准和 GPS 垂直运动分析[J]. 华北地震科学,2015,33(3):22-25.

(本文编辑:王少朋)