

山东省沿海高程/深度基准转换模型及其精度评估

冯义楷, 杨 龙, 付延光*, 周东旭

(自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 为实现陆海协同、时空一体的地理空间数据体系建设, 需将陆海基础地理信息在统一基准中表达。通过构建陆海高程/深度基准转换模型, 实现了山东沿海高程基准与深度基准之间的相互转换。本研究联合利用验潮站数据、卫星测高数据等多源数据, 借助潮汐数值模拟、调和分析及模型优化等方法, 通过区域潮汐模型、平均海面高模型和海面地形模型等模型构建, 完成了山东沿海空间分辨率 $1.2' \times 1.2'$ 的深度基准面 1985 国家高程基准模型构建, 并利用验潮站实测结果分析了该转换模型精度, 结果表明, 中误差 < 15 cm, 这为中国海域甚至全球海域垂直基准统一和转换提供了切实可行的技术方法和理论基础。

关键词: 深度基准; 高程基准; 垂直基准; 基准转换; 潮汐模型

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2023)03-0488-10

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220505002

引用格式: 冯义楷, 杨龙, 付延光, 等. 山东省沿海高程/深度基准转换模型及其精度评估[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(3): 488-497. FENG Y K, YANG L, FU Y G, et al. Accuracy evaluation of the coastal vertical datum transformation model in Shandong Province[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(3): 488-497.

随着全球气候变化引起的广泛关注, 实现局部乃至全球统一的陆海高程/深度基准转换对海平面变化、海岸线变迁和风暴潮等研究具有重要意义^[1]。陆海高程/深度基准转换模型的构建, 为陆地高程与海洋深度在统一基准下相互转换提供了途径, 是实现陆海空间基础地理信息统一表达的基础。目前, 我国陆海高程/深度基准之间转换关系的缺失, 严重影响了相关成果的推广应用及陆海统筹战略的实施^[2]。

长期验潮站数据、卫星测高数据和潮汐模型是确定海洋深度基准面的基础数据^[3]。我国历史上采用的海洋深度基准面类型多样, 在 1956 年定义为理论最低潮面, 并在 1999 年对其确定算法进行了改进^[4-5]。理论最低潮面的定义为: 对于特定地点在一定时域内, 海面达到的理论上最低的位置, 由分潮调和常数计算并通过与当地多年平均海平面之间的距离表示, 具有显著的地域差异。我国传统深度基准值由长期验潮站获取的潮位观测数据确定, 存在分布离散、确定时间尺度不一致和计算算法不统一等问题, 使得相邻的长期验潮站在控制范围的毗邻海域的深度基准数据存在缝隙、不连续过渡^[6]。现代化海洋深度基准面模型的构建是以潮汐模型为基础, 通过高分辨率网格实现近连续的数字表达, 其精度主要取决于潮汐模型的精度。随着验潮站和多源卫星测高数据的不断积累, 以及 GNSS 验潮等新型潮位观测方式的出现, 大量学者围绕卫星测高数据精细化处理、分潮调和常数

收稿日期: 2022-04-26

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2023Q05); 国家自然科学基金项目(42104035); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QD087)

作者简介: 冯义楷(1979—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋测绘理论、技术及应用方面研究。

E-mail: ykfeng@fio.org.cn

*通信作者: 付延光(1990—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事陆海垂直基准构建方面研究。

E-mail: ygf@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

精确提取、海洋潮汐数值模拟等开展了深入研究。近年来,潮汐模型在构建方式^[7-8]、空间分辨率和分潮数量等方面具有较大程度的改善^[9],使得潮汐模型在近海海域精度不断提高^[10]。

高程基准和深度基准统称为垂直基准。国际上,很多沿海国家开展了陆海垂直基准转换模型构建的工程建设。美国研制的VDatum工具实现了由最初28个发展到36个不同的陆海垂直基准面之间的相互转换,可覆盖距离海岸线25 nmile的海域,并不断优化逐步扩大至75 nmile^[11-12]。英国海道测量局联合伦敦大学开展了英国周边12 nmile海域的VORF(Vertical Offshore Reference Frames)工程,实现了17种垂直基准面之间的相互转换,并持续扩展到相邻海域^[13-14]。

我国陆域地形测量基准采用1985国家高程基准,海域水深测量采用理论最低潮面。山东所邻的渤海与北黄海是世界潮汐变化复杂的典型海域,并且在北隍城附近存在日潮无潮点,在成山头与日照东侧存在半日潮无潮点,潮汐类型与潮差在空间上呈现较复杂的变化。山东沿海深度基准值南北差异 $>2\text{ m}$,且在空间上呈现明显的非线性变化^[15],导致山东沿海海域整体成图存在困难。因此,山东省开展了沿海最低潮意义一致、空间分布连续的高分辨率高精度的深度基准面模型、深度基准面1985国家高程基准模型(深度基准面85高程模型)的构建,以实现区域内整个水深成果以及水深成果与陆地地形成果间的无缝拼接与相互转换^[16]。本文对该高程/深度基准转换模型构建过程中采用的数据和主要技术方法进行介绍,并利用长期验潮站数据对基准转换模型的精度进行评估分析,以期为我国陆海垂直基准体系构建提供技术和资料参考。

1 数据

1.1 潮位数据

共收集山东及周边地区26个长期验潮站(图1)潮位数据,每站的实测潮位数据时间跨度都 $>1\text{ a}$ 。各长期验潮站潮位数据的时间分辨率为10或60 min,时间尺度为1975—2015年^[16],其中,桩西106、潍坊站实际有效潮位数据的时长 $>300\text{ d}$,其他各站的潮位数据时长均 $>1\text{ a}$ 。

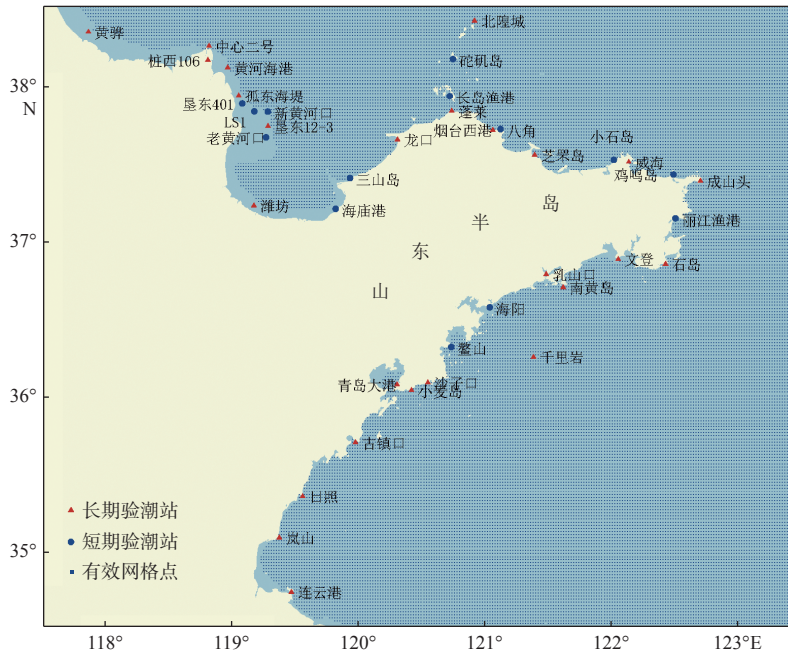


图1 验潮站布设概略位置及深度基准面有效网格点分布

Fig. 1 Distribution of tide gauge stations and validated grid point of chart data model used in this study

在保证相邻验潮站潮汐类型相似、测区潮位有效控制的基本要求下，自然资源部第一海洋研究所共布设 14 个短期验潮站(图 1)开展了潮位观测，其中在黄河口等无潮点海域适当增加了短期验潮站点。各短期验潮站的实测潮位数据时长，除鳌山站只有 17 d 外，其他各站均超过了 30 d。布设的验潮站基本保证了山东省管辖区域沿岸 50 km 内存在验潮站点，且在沿岸潮汐变化较复杂的烟台与黄河口周边，验潮站密度较大。

1.2 卫星测高数据

本研究区域为山东邻近海域(117°30'~123°30'E, 34°30'~38°30'N)。长周期 Sa 分潮的沿迹调和常数为主要参数，为获取该参数，采用的卫星测高数据为法国空间数据中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)发布的 TOPEX/Poseidon 原始轨道地球物理数据集，时间跨度由 1992 年 9 月 25 日至 2002 年 8 月 11 日。

为了改善卫星测高数据在近海海域的精度，首先进行去除陆地、海冰标识以及粗差较大的数据等数据编辑处理，在此基础上，利用雷达高度计数据库系统(Radar Altimeter Database System, <http://rads.tudelft.nl/rads/>)提供的各项地球物理参数改正模型(表 1)进行海面高时间序列的提取。

表 1 卫星测高数据改正采用的参数改正模型

Table 1 Geophysical parameter correction model used in satellite altimetry data correction

地球物理参数	采用的改正模型
干对流层改正	ECMWF dry tropospheric correction
湿对流层改正	Radiometer wet tropospheric correction
电离层改正	Smoothed dual-frequency ionospheric correction
逆气压改正	MOG2D dynamic atmospheric (ERA Interim forcing)
固体潮改正	tide potential model
负荷潮改正	FES2014a load tide
海况改正	CLS non-parametric sea state bias

2 深度基准值计算及订正

2.1 理论最低潮面值的计算

根据《海道测量规范》(GB 12327—2022)关于理论最低潮面值的计算规范，目前理论最低潮面值一律采用 13 分潮模型^[17]计算，方法如下：

$$L = -\min[(fH)_{K_1} \cos \phi_{K_1} + (fH)_{K_2} \cos(2\phi_{K_1} + a_4) - R_1 - R_2 - R_3 + (fH)_{M_4} \cos \phi_{M_4} + (fH)_{MS_4} \cos \phi_{MS_4} + (fH)_{M_6} \cos \phi_{M_6} + H_{S_a} \cos \phi_{S_a} + H_{S_{Sa}} \cos \phi_{S_{Sa}}], \quad (1)$$

式中： L 为相对平均海面的深度基准垂直偏差，负号使求得的 L 表达为正值； $\min[]$ 表示求极小值； f 为分潮交点因子； H 为分潮振幅； $\phi \in [0, 360]$ ，为各分潮相角；其余各参数表达式为：

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{((fH)_{M_2})^2 + ((fH)_{O_1})^2 + 2(fH)_{M_2}(fH)_{O_1} \cos(\phi_{K_1} + a_1)} \\ R_2 = \sqrt{((fH)_{S_2})^2 + ((fH)_{P_1})^2 + 2(fH)_{S_2}(fH)_{P_1} \cos(\phi_{K_1} + a_2)} \\ R_3 = \sqrt{((fH)_{N_2})^2 + ((fH)_{Q_1})^2 + 2(fH)_{N_2}(fH)_{Q_1} \cos(\phi_{K_1} + a_3)} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_1 = g_{K_1} + g_{O_1} - g_{M_2} \\ a_2 = g_{K_1} + g_{P_1} - g_{S_2} \\ a_3 = g_{K_1} + g_{Q_1} - g_{N_2} \\ a_4 = 2g_{K_1} - 180 - g_{K_2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: g 为 Q_1 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、 S_2 、 K_2 、 M_4 、 MS_4 、 M_6 、 Sa 和 Ssa 十三个分潮的迟角, 具体计算过程可参考文献 [17]。

2.2 深度基准值订正

根据潮波系统的传播特点, 以沿岸验潮站 L 值成果对 L 值模型的订正, 实现 L 值模型与验潮站 L 值的量值及最低潮意义的一致, 将验潮站处基准值差异传递至各深度基准面模型网格点。以某一网格点为例, 设在以其为中心、 R 为半径的圆周内的验潮站个数为 n , 验潮站基准值差异为 ΔL_i , 验潮站类型分配的权为 p_i , 与网格点的距离为 S_i , 则该网格点的基准值订正值 ΔL 为:

$$\Delta L = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i p_i / S_i}{\sum_{i=1}^n p_i / S_i}. \quad (4)$$

订正步骤为: ① 设验潮站的订正范围为 R , 即验潮站只订正 R 为半径圆周内的网格点, 或网格点只采用 R 为半径的圆周内的验潮站进行订正; ② 分配长期验潮站与短期验潮站不同的权, 两者的比为 10 : 7; ③ 同时以距离倒数定权。

3 沿海高程/深度基准转换模型构建

3.1 深度基准面模型构建和订正

采用 POM 海洋模式结合“blending”同化法^[18-19], 建立山东邻近海域(117°30'~123°30'E, 34°30'~38°30'N)空间分辨率为 1.2'×1.2'的区域潮汐模型。建立的潮汐模型由 12 个分潮组成: Sa 、 Q_1 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、 S_2 、 K_2 、 M_4 、 MS_4 与 M_6 。其中, 因 Sa 分潮为气象分潮, 同时空间尺度非常大, 故 Sa 分潮的模型可由卫星测高数据沿轨调和结果和沿岸验潮站结果利用 Kriging 法通过分别内插正弦分量和余弦分量的方法得到。

区域深度基准面模型的构建主要分 2 步: ① 由区域精密潮汐模型各网格点的调和常数, 按深度基准值的定义算法计算生成网格形式的深度基准面模型, 作为基础模型; ② 由长期与短期验潮站的基准值对深度基准面模型实施订正, 使模型在验潮站处与验潮站基准值保持一致的同时, 使模型的基准系统归化于验潮站基准值系统中, 生成最终的区域深度基准面模型。

由于山东沿岸长期站的基准面现采用值大多采用 8 个分潮计算的理论最低潮面, 因此, 由区域潮汐模型计算深度基准面模型时采用 8 个分潮算法, 鉴于长周期分潮的不稳定性, 长周期分潮改正项采用年周期分潮 Sa 的振幅。基准值的等值线分布如图 2 所示。

由图 2 可知, 区域基准值等值线分布呈现明显的规律性, 主要受半日潮波影响, 与区域半日潮的分布基本一致。由深度基准面模型内插出各站的基准值(称为模型值), 与各站的基准值进行比较, 结果列于表 2。

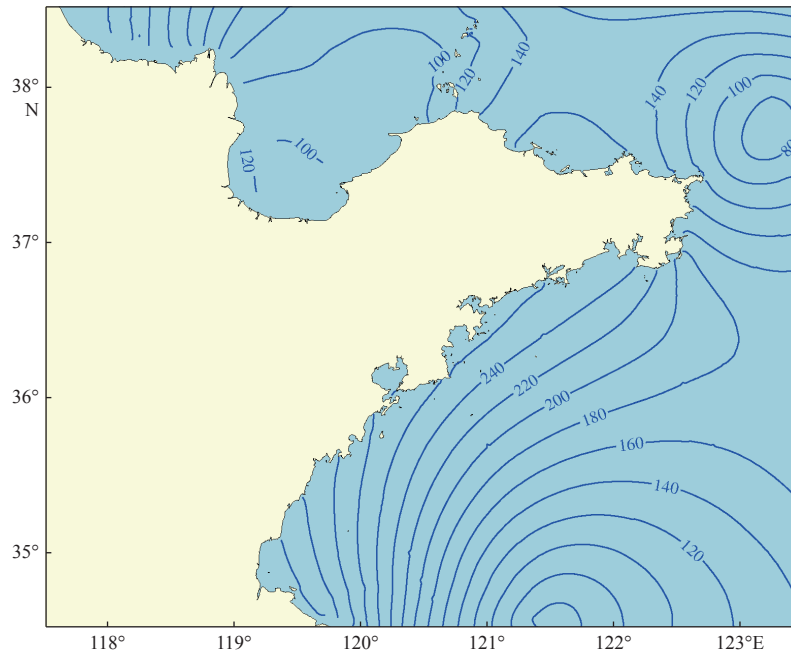


图 2 区域深度基准面等值线分布(cm)

Fig. 2 The distribution of the lowest normal low water depth contours in the study area (cm)

表 2 深度基准面模型与验潮站基准值的比较结果(m)

Table 2 The differences between chart datum model and tide gauge results (m)

验潮站	基准值	模型值	差异	验潮站	基准值	模型值	差异
黄骅	2.400	2.425	0.025	千里岩	1.830	2.120	0.290
中心二号	1.292	1.324	0.032	沙子口	2.260	2.463	0.203
桩西 106	0.983	1.352	0.369	小麦岛	2.410	2.523	0.113
黄河海港	0.986	0.955	-0.031	青岛大港	2.390	2.658	0.268
孤东海堤	0.831	0.812	-0.019	古镇口	2.460	2.703	0.243
垦东 12-3	0.655	0.793	0.138	日照	2.700	3.019	0.319
潍坊	1.250	1.066	-0.184	岚山	3.100	3.213	0.113
龙口	0.700	0.680	-0.020	连云港	2.900	3.251	0.351
蓬莱	0.950	1.013	0.063	海庙港	1.037	1.011	-0.026
北隍城	1.000	1.049	0.049	三山岛	0.786	0.780	-0.006
烟台西港	1.280	1.324	0.044	砣矶岛	0.917	0.965	0.048
芝罘岛	1.470	1.512	0.042	长岛渔港	0.966	0.974	0.008
威海	1.300	1.329	0.029	八角	1.293	1.352	0.059
成山头	0.940	1.046	0.106	小石岛	1.401	1.472	0.071
石岛	1.660	1.876	0.216	鸡鸣岛	1.199	1.187	-0.012
文登	2.390	2.289	-0.101	丽江渔港	1.140	1.388	0.248
乳山口	2.200	2.422	0.222	海阳	2.428	2.510	0.082
南黄岛	2.470	2.375	-0.095	鳌山	2.422	2.517	0.095

由表 2 可知, 深度基准面模型在大部分沿海区域的量值都偏大, 在大部分验潮站, 差异与短期验潮站的深度基准值的计算误差处于同一量级。

按 2.2 节的订正方案, 由验潮站处基准值的差异对深度基准值模型进行订正, 验潮站的订正范围设定为 $60'$ 。以 $(119^{\circ}42'E, 34^{\circ}30'N)$ 、 $(123^{\circ}24'E, 36^{\circ}48'N)$ 、 $(123^{\circ}24'E, 37^{\circ}48'N)$ 、 $(122^{\circ}00'E, 38^{\circ}30'N)$ 、 $(118^{\circ}00'E, 38^{\circ}30'N)$ 、 $(118^{\circ}00'E, 34^{\circ}30'N)$ 六个点连线为界, 删除连线外侧部分。将基准值订正量叠加至由潮汐模型直接计算的深度基准面模型上, 即为深度基准面成果模型。

3.2 深度基准面 85 高程模型构建

深度基准面 85 高程模型的构建依赖于深度基准面模型、平均海面高模型和大地水准面模型。陆海高程/深度基准转换模型构建项目利用多源多代卫星在海域形成的密集测高海面高数据, 在 TOPEX/Poseidon 卫星数据的约束和控制下纳入统一 CGCS2000 大地坐标系, 形成高分辨率厘米级平均海面高模型。通过沿迹海面高差分, 求得平均海面高方向导数, 进而求得所有轨迹交叉点处的测高垂线偏差。由垂线偏差计算大地水准面, 求得大地水准面与平均海面的差异构成初步的海面地形网格值, 做进一步的数据平滑, 得到最终的海面地形模型^[20-22]。

设网格点的深度基准值为 L , 海面地形值为 ξ , 则深度基准面的 1985 国家高程值 $L_{85} = \xi - L$, 由深度基准面成果模型与海面地形模型叠加, 可以得到深度基准面 1985 高程模型, 等值线分布见图 3。

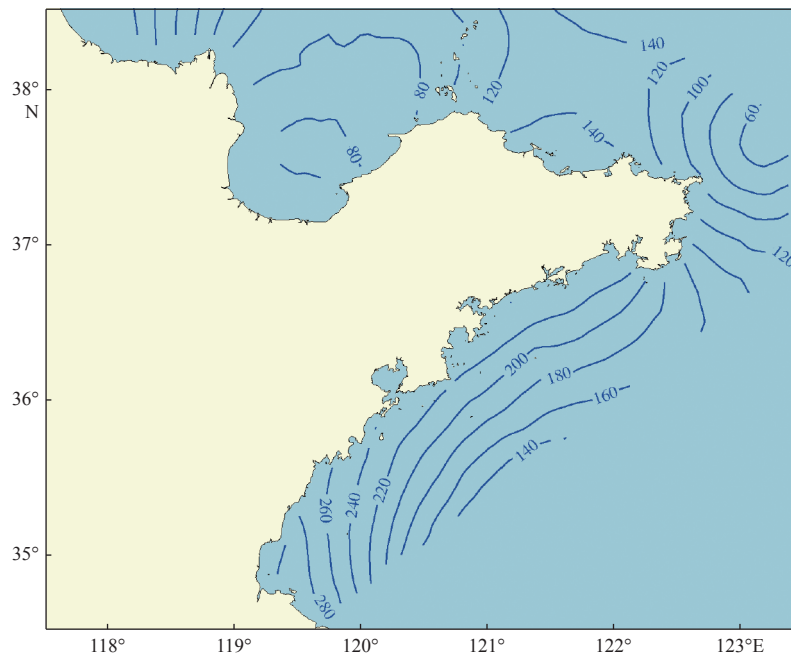


图 3 深度基准面 85 高程模型等值线分布 (cm)

Fig. 3 The distribution of the chart datum under the 1985 national elevation datum (cm)

3.3 模型精度评估与结果

山东海域海面地形变化平缓、量值约为 0, 因此, 高程/深度基准转换模型的精度主要取决于深度基准面模型的精度。利用山东附近海域潮汐表 (<https://www.nmdis.org.cn/>) 中 18 个站点的深度基准值以及国际海图软件 C-MAP 包含的山东省管辖海域的 15 个站点的深度基准值, 通过模型提取的验潮站位置的基准值与潮汐表及海图上提供的深度基准值进行比较, 评价模型精度。

根据站点位置,利用形成的转换模型计算该位置的深度基准面值,将已有深度基准值与模型计算的深度基准值进行比较,互差见表3和表4,共计33个站点。与模型使用的长短期验潮站位置(图1)相比,潮汐表中南长山岛、女岛港、黄岛三站点为外符合精度检核,其他为内符合精度检核;C-MAP站点中,2、3、9三点位为外符合精度检核,其他为内符合精度检核;女岛港与9号点为重合点。

表3 潮汐表站点深度基准值比较

Table 3 The differences between the chart datum model and the tidal table stations

点号	站名	位置	深度基准值/cm		差值/cm	精度检核类型
			潮汐表	模型		
1	东营港	(119°01'59.88"E, 38°07'59.88"N)	100	91	9	内符合
2	潍坊港	(119°10'59.88"E, 37°13'59.88"N)	120	118	2	内符合
3	龙口	(120°19'00.12"E, 37°39'00.00"N)	70	69	1	内符合
4	蓬莱	(120°43'59.88"E, 37°49'00.12"N)	95	96	-1	内符合
5	南长山岛	(120°42'00.00"E, 37°55'00.12"N)	92	93	-1	外符合
6	砣矶岛	(120°45'00.00"E, 38°10'00.12"N)	89	91	-2	内符合
7	北隍城岛	(120°55'00.12"E, 38°24'00.00"N)	100	100	0	内符合
8	烟台	(121°22'59.88"E, 37°33'00.00"N)	147	147	0	内符合
9	威海	(122°07'59.88"E, 37°31'00.12"N)	130	129	1	内符合
10	成山角	(122°40'59.88"E, 37°22'59.88"N)	94	94	0	内符合
11	石岛	(122°25'00.12"E, 36°52'00.12"N)	166	167	-1	内符合
12	乳山口	(121°28'59.88"E, 36°48'00.00"N)	220	231	-11	内符合
13	千里岩	(121°22'59.88"E, 36°16'00.12"N)	183	185	-1	内符合
14	女岛港	(120°52'00.12"E, 36°22'00.12"N)	220	234	-14	外符合
15	黄岛	(120°19'00.12"E, 36°04'59.88"N)	231	241	-10	外符合
16	日照港	(119°33'00.00"E, 35°22'00.12"N)	270	273	-3	内符合
17	岚山港	(119°22'00.12"E, 35°04'59.88"N)	310	309	1	内符合
18	连云港	(119°28'59.88"E, 34°45'00.00"N)	290	291	0	内符合

在33个验潮站点中,内符合点的差值最大差为9 cm、最小为-11 cm、平均为-0.75 cm、标准差为4.10 cm;除重合点外,外符合点总共5点,差值最大差为13 cm、最小为-14 cm、平均为-1 cm、标准方差为11.29 cm。

模型值与潮汐表和C-MAP等资料结果之间差值>10 cm的站点共计5个:潮汐表上2点为乳山和女岛港,C-MAP站点中3点分别位于荣成、女岛港及潍坊港,其中女岛港为重合点。对上述4点进行分析,乳山和潍坊港两点潮汐表和C-MAP上沿用传统的8分潮计算结果。但是上述2点已经布设了长期验潮站,模型中收集到了2点长期验潮站数据,利用的是13分潮计算的结果,所以产生了差异。分析荣成、女岛港数据可知,它们周边都有长期验潮站分布,但潮汐表上数值较为孤立。根据潮汐变化规律,模型精度更可靠一些,模型计算时考虑了周边长期验潮站分布及数值。

表4 C-MAP 站点深度基准值比较
Table 4 The differences between the chart datum model and the c-map stations

点号	位置	深度基准值/cm		差值/cm	精度检核类型
		C-MAP	模型		
1	(122°40'08.40"E, 37°22'58.84"N)	100	100	0	内符合
2	(122°39'03.96"E, 37°24'54.36"N)	110	103	7	外符合
3	(122°33'00.36"E, 37°16'04.44"N)	120	107	13	外符合
4	(122°29'04.92"E, 37°26'53.88"N)	120	118	2	内符合
5	(122°25'09.12"E, 36°52'55.20"N)	166	165	1	内符合
6	(122°10'10.20"E, 37°30'01.44"N)	120	129	-9	内符合
7	(121°23'04.92"E, 37°32'51.72"N)	147	147	0	内符合
8	(120°53'19.92"E, 38°20'53.16"N)	100	103	-2	内符合
9	(120°49'54.48"E, 36°23'01.32"N)	220	236	-16	外符合
10	(120°40'59.52"E, 37°58'55.20"N)	90	88	2	内符合
11	(120°32'04.20"E, 36°05'58.20"N)	230	227	3	内符合
12	(120°18'52.20"E, 36°05'06.00"N)	239	241	-2	内符合
13	(119°47'50.28"E, 37°18'55.44"N)	100	102	-2	内符合
14	(119°27'08.64"E, 34°45'05.76"N)	290	292	-2	内符合
15	(119°02'53.52"E, 37°20'03.84"N)	100	111	-11	内符合

4 结 语

高程基准与深度基准之间相互转换是实现陆海地理信息统一表达的基础,而构建两者之间的转换模型是实现基准转换的有效途径之一,对转换模型开展精度评估是对其可应用性的保证。本文介绍了陆海高程/深度基准转换模型构建技术方法,对山东省沿海基准转换模型构建采用综合利用潮汐模型、深度基准面模型、平均海面高模型和海面地形模型的方式,完成了1.2'×1.2'空间分辨率的深度基准面1985国家高程基准模型的构建,外符合精度达到15 cm以内,实现了山东省领海海域的深度基准面向1985国家高程基准的转换。随着潮汐模型构建方式、空间分辨率和短周期分潮精度的不断改善,短期潮位站的不断积累,深度基准面模型精度逐渐取决于多源数据的融合处理、长周期分潮精确提取和深度基准历元归算等问题。

参考文献 (References):

- [1] 暴景阳,许军,于彩霞.海洋空间信息基准技术进展与发展方向[J].测绘学报,2017,4(10):1778-1785. BAO J Y, XU J, YU C X. Technical progress and development directions of oceanic spatial information datum[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 4(10): 1778-1785.
- [2] 暴景阳,翟国君,许军.海洋垂直基准及转换的技术途径分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2016,41(1):52-57. BAO J Y, ZHAI G J, XU J. Vertical datums and their transformation approaches for hydrography[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(1): 52-57.

- [3] 周兴华, 付延光, 许军. 海洋垂直基准研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 4(10): 1770-1777. ZHOU X H, FU Y G, XU J. Progress and prospects in developing marine vertical datum[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 4(10): 1770-1777.
- [4] 暴景阳, 黄辰虎, 刘雁春, 等. 海图深度基准面的算法研究[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 8-12. BAO J Y, HUANG C H, LIU Y C, et al. Research on the algorithm for chart datum[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(1): 8-12.
- [5] 暴景阳, 张明亮, 唐岩, 等. 理论最低潮面定义和算法的应用问题分析[J]. 海洋测绘, 2009, 29(4): 1-4. BAO J Y, ZHANG M L, TANG Y, et al. The analysis of the application of definition and algorithms of lowest normal low water (LNLW)[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(4): 1-4.
- [6] 付延光. 南海海域垂直基准构建研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019. FU Y G. Research on the construction of seamless vertical datum in the South China Sea[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [7] FLORENT H L, DAMIEN J A, MATHILDE C, et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance[J]. *Ocean Science*, 2021, 17(3): 615-649.
- [8] FOK H S. Ocean tides modeling using satellite altimetry[D]. Columbus: The Ohio State University, 2012.
- [9] HART-DAVIS M G, PICCIONI G, DETTMERING D, et al. EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry[J]. *Ocean Science*, 2021. DOI: org/10.5194/essd-2021-97.
- [10] STAMMER D, RAY R D, ANDER O B, et al. Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 243-282.
- [11] PARKER B, MILBERT D, HESS K, et al. National VDatum—the implementation of a national vertical datum transformation database[J]. *Sea Technology*, 2003, 44(9): 10-15.
- [12] YANG Z, MYERS E, WHITE S. VDatum for Eastern Louisiana and Mississippi coastal waters: tidal datums, marine grids, and sea surface topography[R]. NOAA Technical Memorandum, 2010.
- [13] ADAMS R. Seamless digital data and vertical datums[R]. Patis: FIG Working Week, 2003.
- [14] ILIFFE J C, ZIEBART M K, TURNER J F, et al. Accuracy of vertical datum surfaces in coastal and off shore zones[J]. *Survey Review*, 2013, 45(331): 254-262.
- [15] 孙维康, 周兴华, 冯义楷, 等. 山东沿海潮汐的时空特征分析[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(4): 68-75. SUN W K, ZHOU X H, FENG Y K, et al. The analysis of the tidal spatio-temporal characteristics in Shandong coastal areas[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2018, 37(4): 68-75.
- [16] 丁仕军, 陈建忠. 山东省陆海无缝垂直基准的初步实现及其应用[J]. 测绘通报, 2019(增刊2): 293-297. DING S J, CHEN J Z. Preliminary building and application of seamless vertical datum of land and sea in Shandong Province[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(Suppl.2): 293-297.
- [17] 中国人民解放军海军参谋部. 海道测量规范: GB12327—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. People's Liberation Army Navy Staff Department. Specifications for hydrographic survey: GB12327—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [18] 许军, 暴景阳, 刘艳春, 等. 基于POM模式与blending同化法建立中国近海潮汐模型[J]. 海洋测绘, 2008, 28(6): 15-17. XU J, BAO J Y, LIU Y C, et al. A regional tide model around China developed by POM and blending assimilation method[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(6): 15-17.
- [19] MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56(5): 567-581.
- [20] 党亚民, 章传银, 陈俊勇, 等. 现代大地测量基准[M]. 北京: 测绘出版社, 2015. DANG Y M, ZHANG C Y, CHEN J Y, et al. Modern geodetic datum[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2015.
- [21] 杨元喜, 张菊清, 张亮. 基于方差分量估计的拟合推估及其在GIS误差纠正的应用[J]. 测绘学报, 2008, 37(2): 152-157. YANG Y X, ZHANG J Q, ZHANG L. Variance component estimation based collection and its application in GIS error fitting[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(2): 152-157.

- [22] 蒋光伟, 郭春喜, 田晓静, 等. 基于多种方法构建似大地水准面模型推估特性分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 51-56. JIANG G W, GUO C X, TIAN X J, et al. The analysis of extrapolated capability of quasi-geoid based on multi-methods[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 51-56.

Accuracy Evaluation of the Coastal Vertical Datum Transformation Model in Shandong Province

FENG Yikai, YANG Long, FU Yanguang, ZHOU Dongxu

(*First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: In order to realize the construction of geospatial data system integrating land and sea, it is necessary to express geographic information in unified datum. Shandong Province carried out the construction of vertical datum conversion model between land and ocean vertical data. This study made use of tide station data, satellite altimetry data and other multi-source data, combining with tidal numerical simulation, harmonic analysis and model optimization and other technical means, to establish tidal models, mean sea surface height models and sea surface topography models, etc. This study constructed 85-height depth datum model with spatial resolution of $1.2' \times 1.2'$ and the error of within 15 cm, and consequently realized the conversion between height data and depth data in Shandong coastal area, which provides a method and theoretical basis for the unification and transformation of vertical data in China's sea area and even in the global ocean.

Key words: chart datum; height datum; vertical datum; datum transformation; tide model

Received: April 26, 2022