

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.014

海平面与调和常数波动下的海图深度基准面误差分析

俞亮亮¹,王琪²,周阳¹,宋泽坤¹

(1. 国家海洋局第二海洋研究所,浙江 杭州 310012; 2. 浙江省海洋监测预报中心,浙江 杭州 310007)

摘要: 为提高海图的精确度,需要定量分析海平面及调和常数波动下的海图深度基准面误差范围。以浙江乍浦、定海和健跳3个站为例,对多年观测资料进行了逐年调和分析,结果显示,3个站年平均海平面均呈波动性上升趋势,年际间最大偏差分别为21 cm、16 cm、16 cm。主要分潮振幅的年际变化不尽相同,相对变化幅度表现为年周期分潮大于半日分潮大于日分潮,Sa、M2、S2、K1和O1分潮振幅最大偏差分别为13 cm、20 cm、10 cm、3 cm、3 cm。由于海平面和调和常数的不稳定性,3个测站的海图深度基准面最大误差分别为33 cm、26 cm和31 cm,即使都采用弗拉基米斯基十三分潮算法,最大偏差仍然可达28 cm、22 cm和28 cm。相比而言,理论深度基准面的历时露滩累计频率在1%以下,且普适性较高。

关键词: 海平面;调和常数;海图深度基准面;误差分析

中图分类号:P731.23

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2016)06-0558-07

Error analysis of chart datum under variations of mean sea level and harmonic constants

YU Liangliang¹, WANG Qi², ZHOU Yang¹, SONG Zekun¹

(1. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

2. Marine Monitoring and Forecasting Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Quantitative analysis of the error of the chart datum under the variations of mean sea level and harmonic constants can improve the accuracy of sea charts. Year-to-year harmonic analyses were carried out using multiyear monitoring data from the Zhapu, Dinghai, and Jiantiao stations in Zhejiang Province. The mean annual sea level of the three stations shows an increasing tendency with fluctuation, and the maximum interannual errors are 21 cm, 16 cm, and 16 cm. The interannual variations of the amplitudes of the main tidal constituents are not all the same; the relative change of annual constituents is larger than that of semidiurnal constituents, which in turn is larger than that of diurnal constituents. The maximum errors of the amplitudes of the Sa, M2, S2, K1, and O1 components are 13 cm, 20 cm, 10 cm, 3 cm, and 3 cm, respectively. As a result of the instability of the mean sea level and harmonic constants, the maximum errors of the chart datum of the Zhapu, Dinghai, and Jiantiao stations are 33 cm, 26 cm, and 31 cm, respectively, and even if Vladimir J Ki's thirteen subtidal algorithm is used, the maximum errors can reach 28 cm, 22 cm, and 28 cm. In contrast, the cumulative frequency of shoals using the theoretical depth datum is below 1%, indicating wide applicability.

Key words: mean sea level; harmonic constant; chart datum; error analysis

近年来,海上渔业、贸易和军事活动的兴盛促进了航道事业的迅速发展,为保障通航安全,需要精确可靠的海图为依据。海图深度基准面作为水深起算面,是海洋测绘、海道测量、海洋工程设计施工等生产活动的基础,也是航海保证部门编制海图的重要依据。世界各国所采用的海图深度基准面很不一致,即使同一国家出版的海图,也不尽相同,我国过去亦是如此。然而无论采用何种深度基准面算法,其准确度主要取决于调

收稿日期:2016-05-07

基金项目:国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(SZ1414)

作者简介:俞亮亮(1988—),男,浙江绍兴人,工程师,主要从事海岸工程水文观测分析及数值模拟研究。E-mail:yuliangliang_nju@126.com

和常数的精度^[1-3]。于玲等^[4]对我国近海 14 个验潮站长期资料调和与分析结果对比表明,用 19 a 分析所得的调和常数代替传统 1 a 的假定值,能够提高潮汐分析与预报的精度;于宜法等^[5]对石臼所、连云港和砍门 23 a 的观测资料进行分析,发现利用不同年份调和与分析结果推算的天文潮最大值误差可达 17~22 cm;还有诸多学者从理论和数学模型角度开展研究,认为平均海平面及调和常数本身存在周期性和随机性波动,从而引起水位推算的误差不容小觑^[6-9]。

1 基础资料与分析方法

挑选了浙江中北部沿海 3 个长期站的逐时水位资料,测站位置和资料的年限见图 1 和表 1。羊天柱等^[10]、尤爱菊等^[11]对各测站历史沿革和水准基面进行了考证,将其统一至 1985 国家高程基准之下,并利用月平均海平面的离均差对原始数据进行了检验和矫正。本文对调整后水位资料进行逐年调和与分析,得到年平均海平面及各分潮振幅与迟角。其中调和与分析中的分潮先选取了 306 个进行计算,经自动优化后,去掉小于 0.3 cm 的分潮,形成最佳分潮系列,再按优化后的分潮系列求出最后调和常数,从而提高了分析和预报的精度并减少了计算量^[12]。

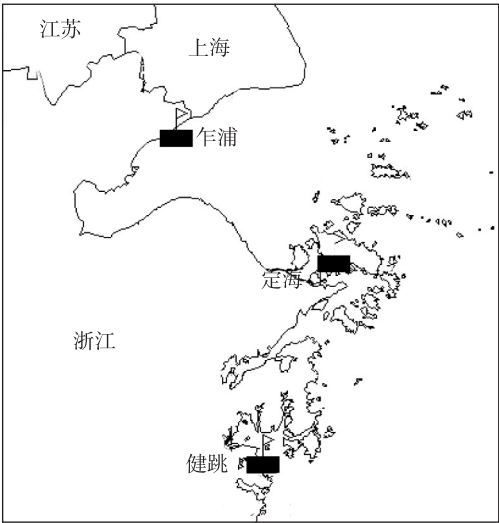


图 1 测站位置分布示意图
Fig. 1 Location of stations

表 1 测站资料概况
Table 1 General conditions at stations

站名	经度	纬度	时间	1985 国家高程基准面下深度/cm
乍浦站	121°06. 47'E	30°36. 61'N	1971—2006	188. 7
定海站	122°03. 32'E	30°00. 37'N	1984—2012	753. 0
健跳站	121°38. 11'E	30°02. 09'N	1990—2012	195. 0

2 海平面及调和常数变化

利用 3 个站逐年调和与分析结果,绘制了年平均海平面和 5 个主要分潮(Sa, M2, S2, K1 和 O1)振幅的逐年变化曲线(图 2)。由图 2 可见,3 个站年平均海平面相关性较好,均呈波动性上升趋势,这种趋势可能不仅仅与全球变化冰川消融有关,还可能源自海水从太平洋“倒灌”进入大陆架^[13]。在 1995 年和 2005 年各存在一个低谷,1989 年、1998 年和 2002 年各存在一个峰值,左军成等^[14]认为东中国海海平面的年际间变化很大程度上与 ENSO 相关;Sa 相对波动幅度较大,但维持在均线上下,无明显的升降趋势;半日潮的 M2 和 S2 振幅波动较为平缓,乍浦站呈增大趋势,健跳站呈减小趋势,而定海站 1990—1991 年发生骤变,经核实是由该测站 1990 年 11 月迁址所造成,从迁址后趋势来看表现为增大;日潮的 K1 和 O1 振幅,波动较半日潮大,乍浦站呈减小趋势,而定海和健跳站升降趋势并不显著。从表 2 各测站海平面和主要分潮特征值统计结果来看,其中的相对偏差为最大偏差除以平均值,年平均海平面最大偏差乍浦站位为 21 cm,定海和健跳站均为 16 cm;Sa 偏差值差别不大,乍浦和定海站均为 13 cm,健跳站位 12 cm,但相对偏差可达 70%~80%;半日潮 M2 和 S2 最大偏差值均出现在乍浦站,分别为 20 cm 和 10 cm,相对偏差最大值则为定海站;日潮 K1 和 O1 较为稳定,最大偏差仅为 1~3 cm。

3 海图深度基准面分析

3.1 计算方法

1956 年以前我国所采用海图深度基准面并不统一,曾使用最低低潮面、平均大潮低潮面、可能最低低潮面、特大潮低潮面等十几种海图深度基准面^[15],后因保证率不足,自 1956 年起,我国统一采用理论深度基准面,即采用弗拉基米尔斯基算法计算的理论最低潮位面作为深度基准面,其算法是采用 8 个分潮(M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1)组合的理论最低潮面,对于浅水效应显著的地区,应加上 3 个浅水分潮(M4、MS4、

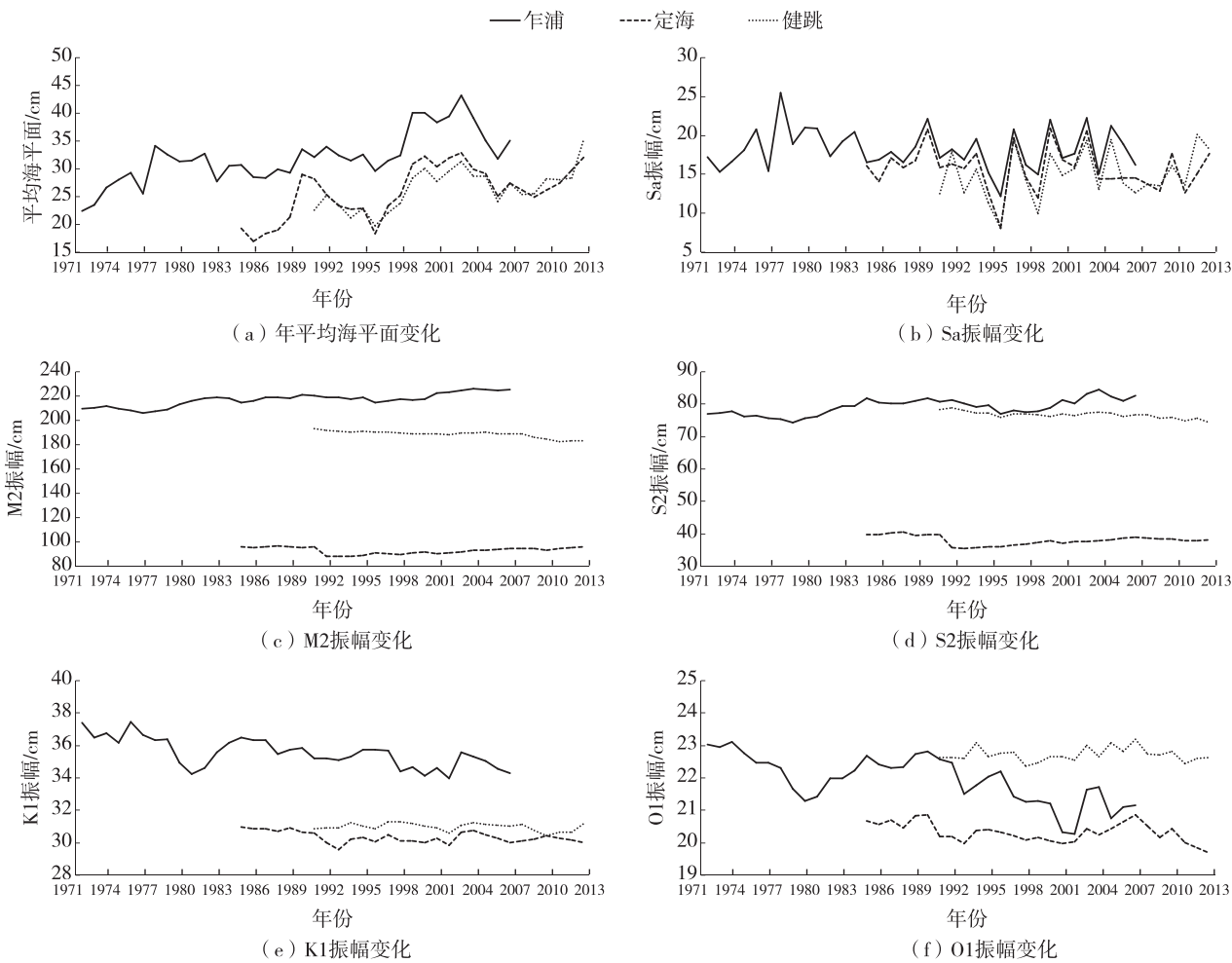


图2 测站海平面及分潮振幅变化

Fig. 2 Variation of mean sea level and amplitude of main tidal constituents

表2 测站主要分潮特征值统计

Table 2 Eigenvalue statistics of main tidal constituents

海平面及分潮	测站	分潮特征值					
		最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	最大偏差/cm	相对偏差/%	标准差
海平面	乍浦	43	22	32	21	64.66	4.58
	定海	33	17	26	16	61.51	4.60
	健跳	35	20	26	16	59.11	3.59
Sa	乍浦	25	12	18	13	72.55	2.63
	定海	21	8	16	13	80.73	2.75
	健跳	20	8	15	12	80.36	3.14
M2	乍浦	226	206	217	20	9.06	5.31
	定海	97	88	93	9	9.52	2.77
	健跳	193	183	188	10	5.56	2.75
S2	乍浦	84	74	79	10	12.57	2.43
	定海	41	36	38	5	13.25	1.42
	健跳	79	74	77	5	5.95	1.02
K1	乍浦	37	34	36	3	9.76	0.89
	定海	31	30	30	1	4.51	0.34
	健跳	31	30	31	1	2.81	0.23
O1	乍浦	23	20	22	3	12.95	0.73
	定海	21	20	20	1	5.81	0.30
	健跳	23	22	23	1	3.70	0.21

M6)的修正,对于海平面季节变化较大的海区,还需 2 个长周期分潮(S_a 和 S_{sa})进一步修正^[16]。综合诸多成果^[17-19],笔者挑选了其中 7 种常用算法的 9 种结果进行比较,计算公式及使用国家和地区见表 3,其中 A_0 表示某一基准下的平均海平面高度, H 表示该分潮的振幅,下角标表示相应分潮。

表 3 海图深度基准面计算方法
Table 3 Computation methods of chart datum

海图深度基准面	计算方法	使用国家和地区
平均大潮低潮面	$A_0-(H_{M2}+H_{S2})$	意大利、丹麦、阿根廷、德国等
可能最低潮位面	$A_0-1.2(H_{M2}+H_{S2}+H_{K2})$	法国、西班牙、葡萄牙、巴西等
平均低潮面	A_0-H_{M2}	美国大西洋沿岸、瑞典北海、荷兰等
平均低低潮面	$A_0-[H_{M2}+(H_{K2}+H_{O1})]\cos45^\circ$	美国太平洋沿岸、菲律宾等
略最低低潮面	$A_0-(H_{M2}+H_{S2}+H_{K1}+H_{O1})$	印度洋沿岸、日本等
英国海军部	$A_0-1.1(H_{M2}+H_{S2})$	英国海军部测量的世界部分海图
弗拉基斯基	八分潮、十一分潮、十三分潮	1956 年后的中国

3.2 误差分析

从表 4 和图 3 可见,乍浦站海图深度基准面在 1977 年和 1998 年出现峰值,1982 年和 2005 年出现谷底,各算法年际间最大绝对偏差可达 33 cm,最小也有 17 cm,最大相对偏差为 10.42%。定海站峰值出现在 1991 年和 2001 年,1987 年、1995 年和 2008 年出现谷底,最大绝对误差可达 26 cm,最小 20 cm,最大相对偏差 29.53%。健跳站峰值出现在 1999 年和 2012 年,1995 年和 2005 年出现谷底,最大绝对误差 31 cm,最小 23 cm,最大相对偏差为 14.22%。依据《海道测量规范》中八分潮、十一分潮和十三分潮计算,定海站 3 种算法结果较为接近,误差在 5 cm 以内,健跳站最大误差为 8 cm,乍浦站误差最大可达 18 cm,可见乍浦站浅水效应和季节性变化显著。值得注意的是,即使采用十三分潮算法,3 个测站的理论深度基准面年际间最大偏差仍然可达 28 cm,22 cm 和 28 cm。此外,尽管不同算法下的海图深度基准面不尽相同,但因其受主要分潮振幅年际变化控制,在逐年变化趋势上仍表现一致,从图 3 不难看出海图深度基准面的上升趋势由低到高依次为健跳站、定海站、乍浦站。

表 4 海图深度基准面特征值统计
Table 4 Statistics of eigenvalue of chart datum

特征值	乍浦					定海					健跳				
	最小值/ cm	最大值/ cm	平均值/ cm	绝对 偏差/ cm	相对 偏差/ %	最小值/ cm	最大值/ cm	平均值/ cm	绝对 偏差/ cm	相对 偏差/ %	最小值/ cm	最大值/ cm	平均值/ cm	绝对 偏差/ cm	相对 偏差/ %
平均大潮低潮面	-273	-248	-264	25	9.45	-119	-96	-105	22	21.03	-249	-222	-239	27	11.22
可能最低潮位面	-362	-329	-349	33	9.42	-159	-135	-144	24	16.91	-329	-297	-317	31	9.85
平均低潮面	-192	-173	-185	19	10.42	-79	-59	-67	20	29.53	-171	-148	-162	23	14.22
平均低低潮面	-232	-215	-225	17	7.70	-115	-94	-103	21	20.32	-209	-186	-200	23	11.45
略最低低潮面	-329	-307	-321	22	6.97	-170	-146	-156	24	15.19	-302	-276	-292	26	9.05
英国海军部	-304	-277	-293	27	9.27	-132	-109	-118	23	19.39	-276	-248	-265	28	10.63
八分潮	-339	-310	-327	29	8.94	-174	-148	-158	26	16.35	-331	-303	-320	29	9.00
十一分潮	-348	-322	-336	25	7.49	-173	-148	-158	25	16.03	-327	-297	-315	31	9.79
十三分潮	-356	-328	-345	28	8.11	-175	-153	-162	22	13.39	-332	-305	-320	28	8.59

由此可见,对于同一测站而言,不同计算方法下的海图深度基准面相差较大,即使同一测站同一公式的计算结果,由于年际间海平面及调和常数的不稳定性,也存在一定差异,波动幅度受控于计算采用的分潮振幅的变化。即使采用十三分潮算法,最大误差仍然高达 20~30 cm,这对于工程设计而言不容忽视^[20]。

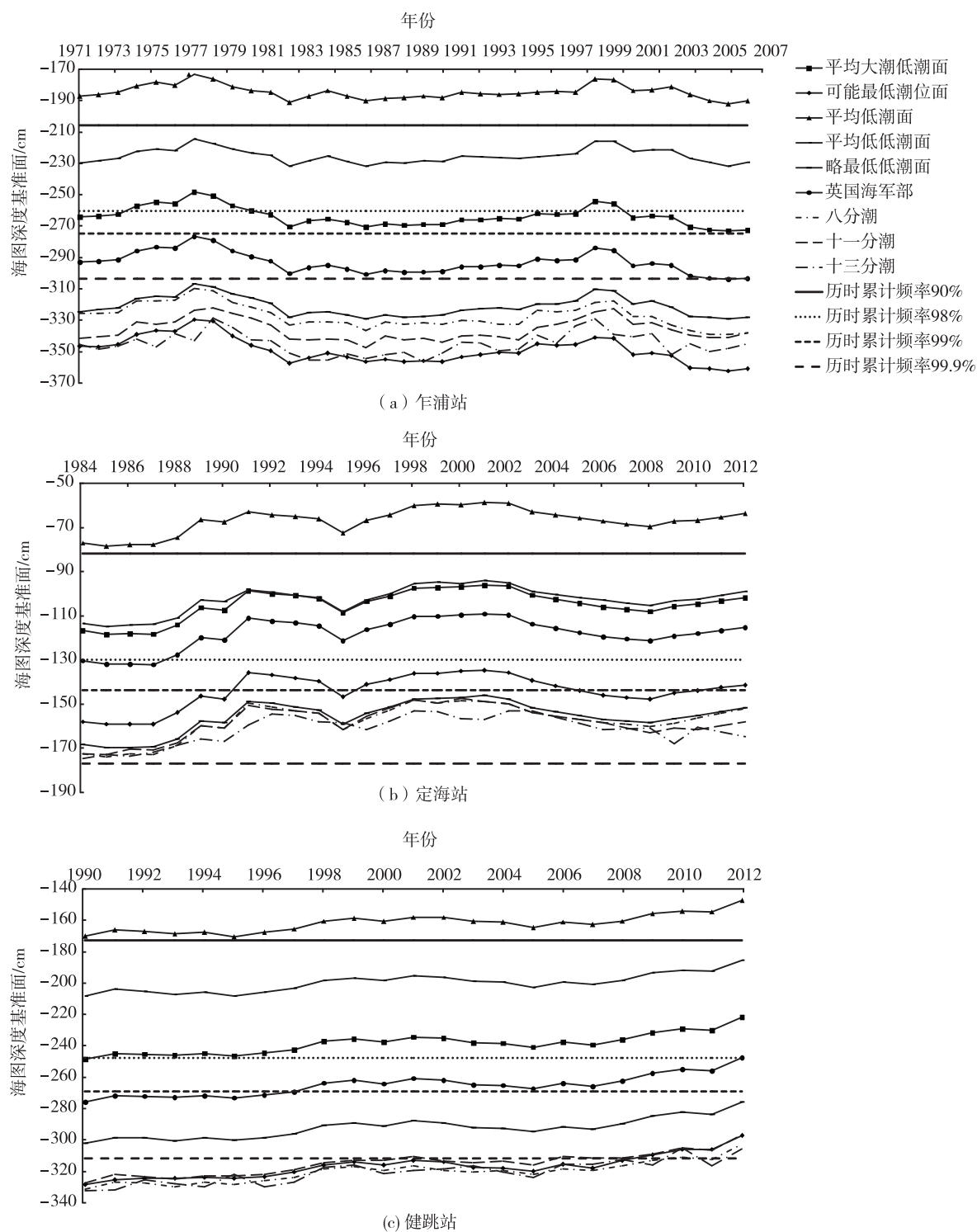


图3 海图深度基准面逐年变化情况

Fig. 3 Year-to-year variation of chart datum

3.3 保证率

航行海图水深是基于理论最低潮面给出的,以保障低潮期间航行的安全。合理的海图深度基准面既要保证船舶航行的安全,同时又要尽量提高航道的利用率,因此要求这个面在绝大部分时间内都应在水内,但又不是表示最小深度的面。了解海图深度基准面的露滩频率,是保障通航安全的重要依据^[21]。

由图3可见,3个测站的历时累计频率中,平均低潮面最低,均不到90%,而略最低低潮面、可能最低潮位面和弗拉基斯基八分潮、十一分潮及十三分潮这5种算法的历时累计频率较高,基本在99%以上,即露

滩概率不到1%。从普适性角度来看,略最低低潮面和可能最低潮位面较弗拉基米斯基计算结果差,例如可能最低潮位面在乍浦站历时累计频率在99.9%以上,与十三分潮算法接近,但在定海站仅98%~99%,比八分潮算法的计算结果还要高15~20 cm。此外值得注意的是,健跳站自2007年后海图深度基准面上升较为显著,从而引起历时累计频率显著降低,在一些重大工程(例如核电等)设计中应引起重视。图4显示不同算法的多年平均露滩频率,露滩频率由低到高依次为乍浦、健跳、定海,弗拉基米斯基算法露滩频率较低且稳定。

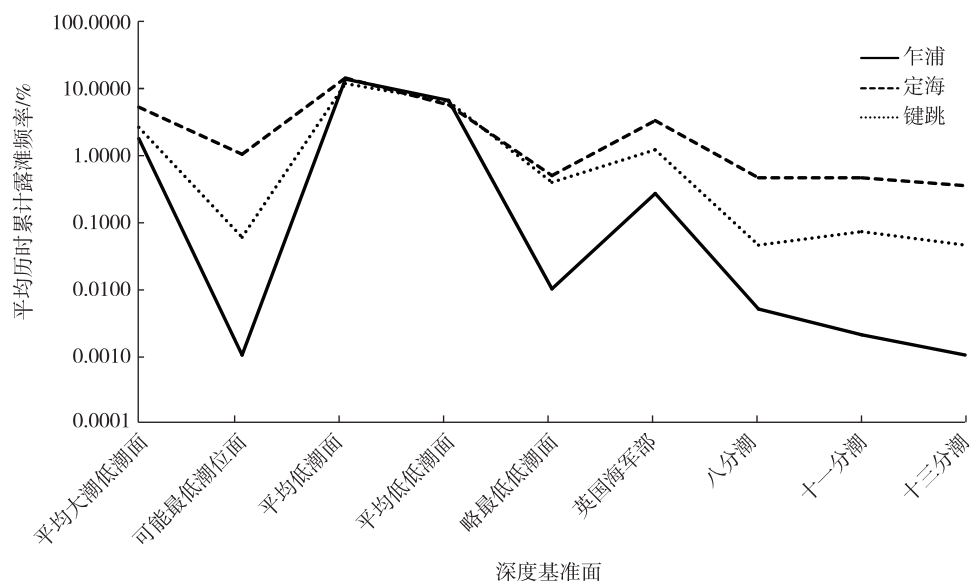


图4 不同海图深度基准面平均历时累计频率分布

Fig. 4 Average cumulative frequency of different chart datums

4 结 论

根据乍浦、定海和健跳3个站的多年逐时水位资料,分析了平均海平面和主要分潮振幅年际间变化,并以此为基础,对不同算法下海图深度基准面的误差做了定量分析和探讨。认为在航海、测量和工程设计中,海平面和调和常数的不稳定性所引起的误差不可小觑。

a. 乍浦、定海和健跳3个测站年平均海平面相关性较好,呈波动上升趋势,年际间最大偏差分别为21 cm、16 cm、16 cm。主要分潮振幅的年际间变化较为复杂, Sa 相对波动幅度较大但无明显的升降趋势;半日潮 M2 和 S2 振幅相对波动较为平缓,乍浦站呈增大趋势,健跳站呈减小趋势,定海站剔除迁址影响为增大趋势;日潮 K1 和 O1 振幅波动较半日潮大,乍浦站呈减小趋势,定海和健跳站升降趋势不显著。5 个分潮振幅年际间最大偏差分别为 13 cm、20 cm、10 cm、3 cm、3 cm。

b. 对于同一测站而言,不同计算方法下的海图深度基准面相差较大,乍浦、定海和健跳站各算法下的海图深度基准面年际间最大误差为 33 cm、26 cm 和 31 cm。即使同一测站同一算法,由于年际间海平面及调和常数的不稳定性,也存在一定差异。即使采用弗拉基米斯基十三分潮算法,3 个测站的理论深度基准面年际间最大偏差仍然可达 28 cm、22 cm 和 28 cm。

c. 相对于其他算法,弗拉基米斯基算法平均历时累计露滩频率均在1%以下,且普适性较好。

参考文献:

- [1] 方国洪,郑文振,陈宗镛,等.潮汐和潮流的分析和预报[M].北京:海洋出版社,1986:283-296.
- [2] 吕忠琨.潮汐日不等显著区域深度基准面的确定研究[J].海洋测绘,2014,34(6):46-48.(LYU Zhongkun. Research on determining depth datum in salient regions of diurnal inequality[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014,34(6):46-48. (in Chinese))
- [3] 梁子亮,岳建平,吉渊明,等.利用全球海潮模型确定海图深度基准面[J].测绘与空间地理信息,2015,38(2):185-188. (LIANG Ziliang, YUE Jianping, JI Yuanming, et al. The determination of chart datum by using global ocean tide models[J].

- Geomatics and Spatial Information Technology, 2015,38(2): 185-188. (in Chinese))
- [4] 于玲, 方国洪. 中国近海验潮站长期观测资料的潮汐调和与分析[J]. 海洋科学进展, 2010,28(2): 133-141. (YU Ling, FANG Guohong. Tidal Harmonic analysis for long-term sea level data of tidal gauge stations in seas adjacent to China[J]. Advances In Marine Science, 2010,28(2): 133-141. (in Chinese))
- [5] 于宜法, 刘兰, 郭明克, 等. 海平面变化和调和常数不稳定性对一些工程设计参数的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(6): 27-35. (YU Yifa, LIU Lan, GUO Mingke, et al. Influence of the mean-sea-level variation and harmonics instability on some design parameters of engineering[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010,40(6): 27-35. (in Chinese))
- [6] 黄镇国, 张伟强, 陈奇礼, 等. 海平面上升对广东沿海工程设计参数的影响[J]. 地理科学, 2003,23(1): 39-41. (HUANG Zhenguo, ZHANG Weiqiang, CHEN Qili, et al. Impacts of sea level rise on design parameters of coastal engineering in Guangdong province[J]. Scientia Geographic Sinica, 2003,23(1): 39-41. (in Chinese))
- [7] 张锦文, 王骥. 莱州湾海平面上升和潮差增大对工程设计标准的影响[J]. 海洋通报, 1999,18(5): 1-9. (ZHANG Jinwen, WANG Ji. Combined impacts of MSL rise and the enlarged tidal range on the engineering design standard in the areas around the Huanghe river mouth[J]. Marine Science Bulletin, 1999,18(5): 1-9. (in Chinese))
- [8] 吴德安, 严以新, 李瑞杰. 江苏省辐射沙洲海域理论最低低潮面的计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006,34(5): 572-577. (WU Dean, YAN Yixin, LI Ruijie. Calculation of theoretical depth datum of radial sand ridge sea area in Jiangsu province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006,34(5): 572-577. (in Chinese))
- [9] 王伟, 宋志尧, 陆卫国, 等. 海平面上升对海岸潮差响应的理论解析[J]. 海洋工程, 2008,26(3): 94-97. (WANG Wei, SONG Zhiyao, LU Weiguo, et al. A theoretical analysis of the responses of coast tidal range to sea level rise[J]. The Ocean Engineering, 2008,26(3): 94-97. (in Chinese))
- [10] 羊天柱, 应仁方, 张俊彪, 等. 浙江沿海岸海平面研究与变化预测[J]. 东海海洋, 1999,17(4): 1-11. (YANG Tianzhu, YING Renfang, ZHANG Junbiao, et al. The research and prediction of the sea level along the coast of Zhejiang province[J]. Donghai Marine Science, 1999,17(4): 1-11. (in Chinese))
- [11] 尤爱菊, 俞婷婷. 澈浦站年最高潮位序列变异点判别[J]. 浙江水利科技, 2004(1): 5-7. (YOU Aiju, YU Tingting. Variation identification of high tide level in Hangzhou bay[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2004(1): 5-7. (in Chinese))
- [12] 龚政, 张东生, 张君伦. 河口海岸水文信息处理系统[J]. 水利学报, 2003,34(1): 83-87. (GONG Zheng, ZHANG Dongsheng, Zhang Junlun. A processing system for hydrological field data in estuaries and coasts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(1): 83-87. (in Chinese))
- [13] CHEN Changlin, ZUO Juncheng, CHEN Meixiang, et al. Sea level change under IPCC-A2 scenario in Bohai, Yellow, and East China Seas[J]. Water Science and Engineering, 2014,7(4): 446-456.
- [14] ZUO Juncheng, HE Qianqian, CHEN Changlin, et al. Sea level variability in East China Sea and its response to ENSO [J]. Water Science and Engineering, 2012, 5(2): 164-174.
- [15] 汪家君. 近代历史海图与港口航道工程[J]. 海洋通报, 1995,14(3): 11-18. (WANG Jiajun. Modern historic chart and port and waterway engineering[J]. Marine Science Bulletin, 1995,14(3): 11-18. (in Chinese))
- [16] 中国人民解放军海军司令部. GB 12327—1998 海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [17] 吴德安, 严以新, 童朝锋. 江苏海岸港口特征潮位计算与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007,35(4): 471-476. (WU Dean, YAN Yixin, TONG Chaofeng. Calculation and analysis of characteristic tidal levels for main harbors along Jiangsu coast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007,35(4): 471-476. (in Chinese))
- [18] 林唐宇, 朱建荣. 长江河口理论最高和最低潮面计算与应用[J]. 海洋工程, 2013,31(2): 82-87. (LIN Tangyu, ZHU Jianrong. Calculation and application of the theoretically lowest and highest tidal levels in the Changjiang Estuary[J]. The Ocean Engineering, 2013,31(2): 82-87. (in Chinese))
- [19] 杨同军, 王义刚, 黄惠明. 基于平均低潮位推算理论最低潮面的简便方法[J]. 水道港口, 2012,33(5): 440-446. (YANG Tongjun, WANG Yigang, HUANG Huiming. A simple and convenient method for calculation of the lowest normal low water based on mean low water level[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012,33(5): 440-446. (in Chinese))
- [20] 林敏. 浅析百年一遇设计高潮位与参证站实测高潮位的关系[J]. 电力勘测设计, 2005(2): 43-45. (LIN Min. Simple analyzing the relations of the high level between the designing of a-hundred-year return period and the surveying in the reference station[J]. Electric Power Survey, 2005(2): 43-45. (in Chinese))
- [21] 宋向群, 张培培, 唐国磊, 等. 正规半日潮的潮型数及平均潮差对港口航道通过能力的影响[J]. 中国水运, 2011,11(7): 70-72. (SONG Xiangqun, ZHANG Peipei, TANG Guolei, et al. The impacts of tidal number and average tidal range of regular semidiurnal tide to the navigation capacity[J]. China Water Transport, 2011,11(7): 70-72. (in Chinese))