



中国香港验潮站1962—2017年水位相对变化分析

刘聚¹ 暴景阳² 许军³ 周唯⁴

1 海军大连舰艇学院作战软件与仿真研究所,辽宁 大连,116018

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系,辽宁 大连,116018

4 91550部队,辽宁 大连,116023

摘要:利用1962—2017年验潮站水位观测数据,对中国香港的海平面、潮汐调和常数等水位变化特征量进行了确定与统计分析。结果显示,香港海域验潮站海平面相对变化速率差异明显。1962—2017年间,鲗鱼涌站长周期分潮逐年调和结果稳定性差,除数据质量的因素外,厄尔尼诺显现对长周期分潮的变化有影响作用;全日潮与半日潮分潮调和常数较稳定,但在2004—2008年间 M_2 、 O_1 、 K_1 分潮振幅小于往年,分析表明与潮差变化一致;理论最低潮面与最低天文潮面均呈上升的变化趋势,变化速率分别为0.18 mm/a、0.27 mm/a,香港目前使用的海图基准较理论最低潮面和最低天文潮面相对保守。

关键词:海平面变化;调和常数;深度基准;水位相对变化;香港验潮站

中图分类号:P229

文献标志码:A

验潮站水位观测资料是海洋测绘中必要的基础观测信息,同时为海洋活动提供数据支持。尤其长期的观测资料对当地平均海面的监测、潮汐变化特征的研究、海洋垂直基准的建立及维持等科学研究及国防、工程建设具有重大意义^[1]。虽然卫星测高技术为全球海平面观测提供了新途径,但验潮站仍是目前记录水位变化精度较高的一种方式^[2]。

平均海面、潮汐调和常数、深度基准、余水位均是描述水位变化的重要特征量,也是海洋测绘常用的重要参数。由于全球气候变暖,海平面的变化引起了全世界范围的广泛关注,截至20世纪末,全球海平面的上升速率为1.8 mm/a^[3-4],中国海平面变化量约为2.1 mm/a^[5]。2007年,政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)利用1993年以来的卫星测高数据确定的全球海面上升速度已达到约3.1 mm/a(2.4~3.8 mm/a)^[6-8]。全球各国及地区的海平面变化速率各异^[9-13],预计到2070年全球海洋水位上升20~70 cm^[14],至2100年全球海洋水位将上升60~100 cm^[7]。

通过对中国香港海面变化的细致研究,Ding^[6]确定香港1954—1999年间海平面相对变

化速率为 (1.9 ± 0.4) mm/a,同时分析了海面变化与其他物理海洋参数的联系,为香港海面变化现象做出了科学解释,揭示了由温室效应导致的全球气候变暖对海平面变化的影响,对研究香港地区气象、海洋变化情况具有现实意义。

除海平面的变化外,潮汐调和常数等水位特征量的变化情况近年来也受到了国内学者们的关注。随着多年验潮站资料的积累,中国已具备了潮汐研究分析的信息支撑,对更多潮汐相关变量的分析实现了可能。如暴景阳和许军^[15]利用中国沿岸若干验潮站分析了潮汐主要分潮调和常数及深度基准面的变化趋势,提出了使用潮汐调和常数时添加历元等相关建议;孟云等^[16]结合渤海区域十年内岸线地形和调和常数的变化,揭示了潮波系统受地理环境变化的影响情况。

中国香港地区由于地理环境的因素易受海面变化的影响,验潮站布设密集,潮汐观测资料完备,对于进行当地水位变化分析的条件理想,并可对中国其他地区水位变化的研究提供借鉴和参考。虽然之前有香港海平面变化趋势的相关研究^[6-7],但使用的数据已是20世纪的观测资料,自21世纪以来,香港验潮站潮汐观测已接近一个潮汐变化周期,利用此段时期的观测数据可

分析香港海域水位特征量新的变化情况。本文选用香港1962—2017年水位资料,对海平面、潮汐调和常数等水位特征量进行确定,并分析它们具体的变化情况。

1 数据描述及预处理

本文使用的验潮站位置分布如图1所示,水位数据下载自美国夏威夷大学的海平面中心(University of Hawaii sea level center, UHSLC)、英国普劳德曼海洋实验室提供的海平面永久服务(permanent service for mean sea level, PSMSL)、联合国教科文组织的政府间海洋学委员会(Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC),其中PSMSL仅提供每月海平面数据,另两个机构可提供逐时水位观测。表1统计了验潮站海平面数据的观测时段及完整度等基本信息,数据完整度定义为合理数据的个数与数据总量的比。其中乐安排站的观测时长为13 a,其余站观测时长均达到18.6 a,能够较好地反映海平面长周期变化;芝麻湾站与横澜岛站的数据完整度较低,在使用前还需对数据进行预处理。另外北角与鰂鱼涌验潮站具有月平均海面及逐时水位两种

数据类型,而且鰂鱼涌是由北角站迁移而至,两站距离仅为1.7 km,潮汐性质及基准一致,可认为北角站与鰂鱼涌站是相同的站点,下文除特殊说明外,对两者不作区分,因此鰂鱼涌月平均海面数据的观测时段为1962—2017年。可利用两站逐时数据进行长潮汐调和常数、余水位等其他水位变化特征量分析。此外,利用卫星测高资料与验潮站观测确定的海面变化速率进行对比,卫星测高观测位置位于(22.250°N, 114.250°E),卫星测高数据来自美国科罗拉多大学(Colorado University, CU)。

为避免缺测数据对分析结果的影响,对每月海平面观测数据进行预处理,采用平均海面同步改正法^[17]实现验潮站间平均海面的传递。具体操作为:分别以各时刻存在缺测数据的验潮站为待定站,以同时刻进行了观测的验潮站为基准站,根据同步改正法确定各月待定站的平均海面,若同时存在多个基准站,各传递结果按距离加权取平均值。对于逐时水位数据的预处理采用基于余水位的误差探测与修复方法^[18-19],利用各年的水位观测资料进行调和与分析获得潮汐调和常数,进而确定余水位,根据余水位的时空连续性,对缺测水位以及观测误差进行修补与改正。

表1 验潮站与卫星测高点的数据信息及各站海平面变化速率

Tab.1 Data Information and Sea Level Trends of Tidal Gauges and Satellite Observing Point

验潮站	观测时段	经度 /(°)	纬度 /(°)	来源	完整度 /%	速率 /(mm·a ⁻¹)	M_n /cm	S_a /cm	S_{Sa} /cm
北角	1962-01—1985-12	114.200	22.300	PSMSL	98.3	2.33±0.17	2.2	11.1	5.4
	1962-01—1985-12			UHSLC	97.4				
	1986-01—2017-12			PSMSL	100				
鰂鱼涌	1986-01—2014-12	114.213	22.291	UHSLC	99.2	4.02±0.74	3.5	12.4	5.7
	2015-01—2017-12			IOC	96.0				
横澜岛	1987-01—2017-12	114.303	22.183	PSMSL	72.8	4.02±0.74	3.5	12.4	5.7
芝麻湾	1962-01—1997-12	114.000	22.233	PSMSL	63.4	-3.85±0.61	1.1	10.4	5.0
大庙湾	1997-01—2017-12	114.289	22.270	PSMSL	92.5	2.37±1.20	2.4	10.6	5.4
大埔溜	1963-01—2017-12	114.184	22.443	PSMSL	94.4	3.08±0.19	2.5	11.0	6.3
尖鼻咀	1974-03—2017-12	114.014	22.487	PSMSL	82.3	0.62±0.31	1.3	8.2	3.7
乐安排	1986-01—1999-06	114.000	22.367	PSMSL	85.8	2.15±2.29	1.2	9.4	4.3
石壁	1998-01—2017-12	113.894	22.220	PSMSL	97.2	-0.92±0.97	2.4	11.0	4.9
卫星点	1993-01—2017-12	114.250	22.250	CU	100	4.20±0.65	1.2	11.7	2.8

2 研究理论与方法

潮汐水位中长周期分潮成分包括18.61 a周期的交点潮 M_n 、9.31年的半交点潮、8.85年的近点潮、430 d左右的极潮以及年周期分潮 S_a 、半年周期分潮 S_{Sa} 等,这些长周期分潮引起了海平面的长周期变化,另外海平面的长期变化还与地极移

动、太阳黑子活动和极地海冰与陆冰的长期变化有关^[20]。根据验潮站逐月海平面数据可计算当地海平面的变化趋势,海平面可表示为平均海面、线性变化及周期变化3部分的组合^[6,11,21],即

$$SL(t) = MSL + \zeta(t - t_0) + \sum_{i=1}^m A_i \cos[2\pi(t - t_0)/P_i + \varphi_i] \quad (1)$$

式中, $SL(t)$ 表示海平面数据的时间序列; MSL 表示平均海面的常数项; 线性项中 ζ 表示海平面的相对变化速率; t_0 表示初始时刻; A 、 P 、 φ 分别表示各周期项的振幅、周期和初相位。对于周期变化部分, 令

$$\begin{cases} X_i = A_i \cos \varphi_i \\ Y_i = A_i \sin \varphi_i \end{cases} \quad (2)$$

则 $A_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$, $\varphi_i = \tan^{-1}(Y_i/X_i)$, 式(1)可改写为:

$$SL(t) = MSL + \zeta(t - t_0) + \sum_{i=1}^m [X_i \cos \frac{2\pi}{P_i}(t - t_0) - Y_i \sin \frac{2\pi}{P_i}(t - t_0)] \quad (3)$$

式中, 时间和各周期项的周期为已知量, 可根据最小二乘原理确定海平面相对变化速率等未知量。

利用验潮站逐时水位数据可计算获得潮汐

$$\begin{bmatrix} n & [a_1] & [a_2] & \cdots & [a_m] & [b_1] & [b_2] & \cdots & [b_m] \\ [a_1] & [a_1 a_1] & [a_1 a_2] & \cdots & [a_1 a_m] & [a_1 b_1] & [a_1 b_2] & \cdots & [a_1 b_m] \\ [a_2] & [a_2 a_1] & [a_2 a_2] & \cdots & [a_2 a_m] & [a_2 b_1] & [a_2 b_2] & \cdots & [a_2 b_m] \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ [a_m] & [a_m a_1] & [a_m a_2] & \cdots & [a_m a_m] & [a_m b_1] & [a_m b_2] & \cdots & [a_m b_m] \\ [b_1] & [b_1 a_1] & [b_1 a_2] & \cdots & [b_1 a_m] & [b_1 b_1] & [b_1 b_2] & \cdots & [b_1 b_m] \\ [b_2] & [b_2 a_1] & [b_2 a_2] & & [b_2 a_m] & [b_2 b_1] & [b_2 b_2] & & [b_2 b_m] \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ [b_m] & [b_m a_1] & [b_m a_2] & \cdots & [b_m a_m] & [b_m b_1] & [b_m b_2] & \cdots & [b_m b_m] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} MSL \\ \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_m \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [h] \\ [a_1 h] \\ [a_2 h] \\ \vdots \\ [a_m h] \\ [b_1 h] \\ [b_2 h] \\ \vdots \\ [b_m h] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H_i = \sqrt{\xi_i^2 + \eta_i^2}, g_i = \tan^{-1}(\eta_i/\xi_i) \quad (7)$$

式(6)中, 矩阵 $[\]$ 表示各时刻系数值的求和, 例如

$$[a_m a_1] = \sum_{t=t_1}^{t_n} a_m(t) a_1(t). \text{ 由式(6)可解出分潮振}$$

幅和迟角的组合值, 再根据式(7)可确定各年的潮汐调和常数。利用调和分析确定的调和常数可用于确定深度基准面及其他潮汐相关量值。

中国深度基准面定义为理论最低潮面, 本文理论最低潮面采用暴景阳等^[20,22]提出的改进计算公式:

$$\begin{cases} L = L_8 + \Delta L_{\text{shallow}} + \Delta L_{\text{long}} \\ L_8 = -\min[(fH)_{K_1} \cos \varphi_{K_1} + \\ (fH)_{K_2} \cos(2\varphi_{K_1} + a_4) - R_1 - R_2 - R_3] \end{cases} \quad (8)$$

式中, L_8 是由 O_1 、 K_1 、 Q_1 、 P_1 、 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 分潮确定的 8 分潮理论最低潮面; a_4 、 R_1 、 R_2 、 R_3 是由各分潮调和常数构成的表达式, 其确定公式参考文献^[23]。在 L_8 取极小值时, K_1 分潮的相角记为 $\varphi_{K_1}^L$, 式(8)中 $\Delta L_{\text{shallow}}$ 表示由 M_4 、 MS_4 、 M_6 分潮确定的浅水分潮改正, 取 φ_{K_1} 在 $\varphi_{K_1}^L \pm 45^\circ$ 范围内 3 个浅水

调和常数, 假设水位是由若干分潮叠加而成, 则验潮站观测水位可表达为^[18,21]:

$$h(t) = MSL + \sum_{i=1}^m f_i H_i \cos(\sigma_i t + v_{0i} + u_i - g_i) \quad (4)$$

式中, $h(t)$ 表示水位观测序列; MSL 表示平均海面高; f 、 u 表示交点因子与交点订正角; v_0 表示初始天文相角; m 表示分潮个数。令 $a_i(t) = [f \cos(\sigma t + v_0 + u)]_i$, $\xi_i = H_i \cos g_i$, $\eta_i = H_i \sin g_i$, $b_i(t) = [f \sin(\sigma t + v_0 + u)]_i$, 代入式(4), 可得:

$$h(t) = MSL + \sum_{i=1}^m [a_i(t) \xi_i + b_i(t) \eta_i] \quad (5)$$

根据最小二乘准则, 当

$$\sum_{t=t_1}^{t_n} \left\{ h(t) - MSL - \sum_{i=1}^m [a_i(t) \xi_i + b_i(t) \eta_i] \right\}^2 = \min$$

时, 式(5)的法方程可写成如下矩阵形式:

分潮组合潮高的极值, ΔL_{long} 表示长周期改正, 直接取作年周期分潮 S_a 的振幅。

3 实验结果分析

3.1 海平面相对变化分析

确定海平面相对变化的实验中, 式(1)中周期变化部分选择 3 个振幅较大的分潮, 即交点潮 M_n 、年周期分潮 S_a 和半年周期分潮 S_{sa} 。利用各验潮站观测时段内全部的月平均海面数据确定当地海平面相对变化, 结果统计于表 1, 其中, “速率”对于验潮站表示海平面相对变化速率, 但对于卫星观测点表示海平面绝对变化速率, M_n 、 S_a 、 S_{sa} 分别对应分潮的振幅。验潮站乐安排海平面相对变化结果为 (2.15 ± 2.29) mm/a, 由于该站观测时段仅有 162 个月, 未达到交点潮的分辨周期 (18.6 a, 约 224 个月), 因此其确定的参数误差较大。另外, 大庙湾、石壁站海平面相对变化分别为 (2.37 ± 1.20) mm/a、 (-0.92 ± 0.97) mm/a, 其中两站海平面相对变化的中误差分别为 1.20、0.97 mm/a, 大庙湾、石壁两个验潮站观测时长分别为 252 个

月、240个月,多余观测量相对少于其他验潮站,因而海面相对变化速率的误差也相对大于其他观测长度足够长的验潮站。

为分析各验潮站地理位置与海平面变化的差异,将海平面相对变化速率值结合验潮站地理位置信息绘于图1,其中,验潮站上的线段长度表示海平面相对变化速率大小,箭头方向表示海平面呈现上升或下降的变化趋势。如图1所示,香港海域各验潮站之间海平面变化的趋势及快慢存在较大差异,西南部验潮站(石壁、芝麻湾)与其余验潮站海面变化趋势相反,呈现下降趋势,其中芝麻湾站下降速率最大,可达 (-3.85 ± 0.61) mm/a,西北部验潮站(乐安排、尖鼻咀)海面变化相对缓慢,其中尖鼻咀站海平面变化速率仅为 (0.62 ± 0.31) mm/a,整个东部验潮站(大埔滘、鲗鱼涌、大庙湾、横澜岛)海面变化呈上升趋势,上升速率最大的验潮站为横澜岛站,可达 (4.02 ± 0.74) mm/a。为更直接地体现卫星测高与验潮站观测结果的差异,将卫星测高观测的位

置及相对海面变化速率标注于图1上,绿色点即为卫星测高观测点位,卫星测高点的海平面绝对变化速率为4.2 mm/a。卫星测高数据确定的海面变化速率属海面的绝对变化,与验潮站观测数据的海平面相对变化速率不同。文献[24]中GPS基准站坐标时间序列分析结果可知验潮站垂向运动速度较小,可基本排除地面形变对速率确定结果的影响。香港验潮站数据的观测时段、完整度各不同,导致了各验潮站海平面变化速率存在较大差异,甚至石壁、芝麻湾站变化趋势与其他站相反。仅利用一个潮汐周期(18.6 a)左右长度、不同时段的数据计算的结果互差往往较大,而预想达到稳定的变化速率,一般需要至少两个潮汐变化周期的连续观测资料。因此,石壁、芝麻湾站海平面相对变化速率含义不同,具体地反映了当段观测时间内海平面的变化情况。

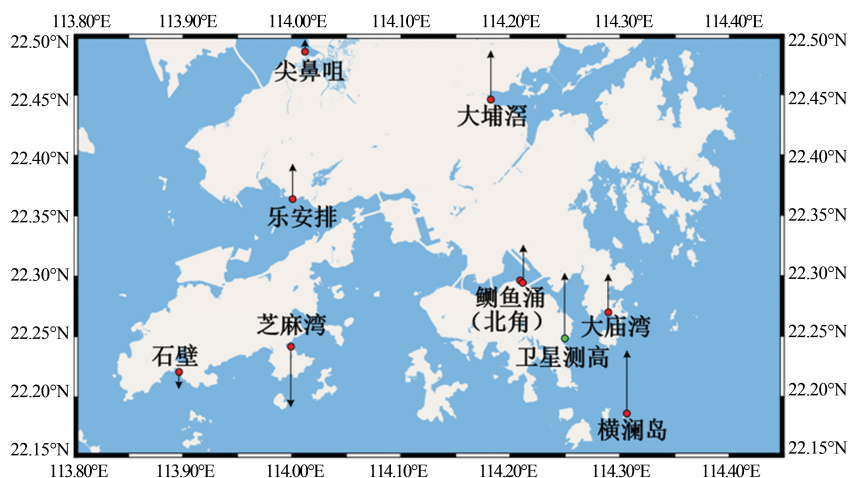


图1 中国香港验潮站的位置分布及海域海平面变化速率

Fig.1 Spatial Distribution and Relative Sea Level Changes of Tidal Gauges Surrounding Hong Kong, China

3.2 调和常数确定与变化特征分析

利用鲗鱼涌站1962—2017年每年的逐时水位数据,根据式(4)至式(6)进行调和分析,获取分潮调和常数的时间序列,调和分析模型分潮个数取122个。其中13个主要分潮的调和常数各年确定结果如图2所示,表2为各分潮变化情况的统计结果,“精度”表示调和常数时间序列的内符合精度。

年周期分潮 S_a 实质上是气象引起的,主要是周期性的风和气压的变化。由表2与图2可知,年周期分潮与半年周期分潮的调和常数结果年度差异较大,两个长周期分潮调和常数的中误差与变幅均明显大于其余分潮,一般利用一整年的水位观测资料确定长周期分潮 S_a 、 S_{sa} 的调和常数时,调和常数常出现结果不稳定的现象。 S_a 分潮振

幅与迟角年度确定结果的中误差分别为2.87 cm、 14.97° , S_{sa} 分潮振幅与迟角年度确定结果的中误差分别为2.45 cm、 30.90° ,年周期分潮与半年周期分潮振幅变化规律较一致,但半年周期分潮的迟角结果更不稳定。 S_{sa} 分潮的迟角在1968年、1997年、2001年、2006年出现负值,在这4年内水位观测数据完整度较高,各年缺测数据分别仅为31、47、0、77个,在利用一年的观测数据进行调和分析时,可认为对结果几乎无影响。两个长周期分潮的调和常数结果变化差异较大的主要原因还是因为利用一年长度资料进行调和分析,仅刚好达到了 S_a 、 S_{sa} 分潮的会合周期,当利用更长的资料进行调和分析时,调和常数结果则呈现较好的稳定性。

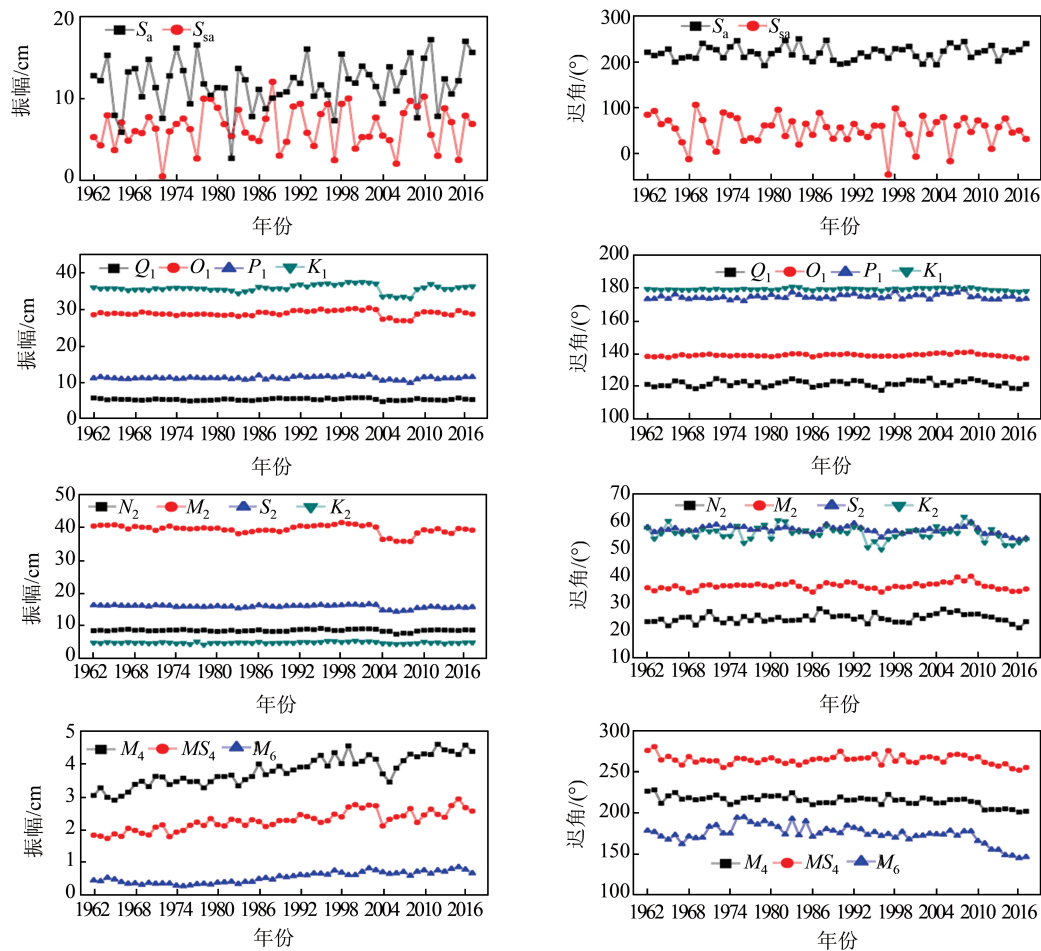


图2 鲗鱼涌站主要分潮调和常数年度变化曲线

Fig.2 Annual Change Curves of Main Constituents at Quarry Bay

表 2 鲗鱼涌主要分潮调和常数长期变化趋势

Tab.2 Changing Trends in Harmonic Constants of Main Constituents at Quarry Bay

分潮	振幅			迟角		
	均值 /cm	趋势 /(mm·a ⁻¹)	精度 /cm	均值 /(°)	趋势 /(°·a ⁻¹)	精度 /(°)
S_a	11.6	0.29	2.9	218.4	0.83	15.0
S_{sa}	6.5	0.15	2.5	51.2	-2.20	30.9
Q_1	5.5	0.01	0.2	108.7	0.08	1.7
O_1	29.0	0.03	0.8	125.3	0.09	0.8
P_1	11.4	3×10^{-3}	0.4	159.7	0.20	1.5
K_1	35.9	0.04	1.0	164.4	2×10^{-3}	0.6
N_2	8.3	-0.01	0.3	-3.8	0.17	1.5
M_2	39.1	-0.31	1.4	7.3	0.15	1.2
S_2	15.6	-0.13	0.5	26.9	-0.34	1.3
K_2	4.6	0.01	0.2	25.6	-0.34	2.5
M_4	3.7	0.24	0.4	157.6	-2.45	6.0
MS_4	2.2	0.15	0.3	206.0	-0.77	5.6
M_6	0.5	0.09	0.2	88.6	-3.59	11.3

另外,长周期分潮的调和常数变化还与厄尔尼诺现象及拉尼娜现象有关。气象学上,常用南方涛动指数(southern oscillation index, SOI)来反映厄尔尼诺、拉尼娜现象的活跃程度,当 SOI 持续为负值时,该年有厄尔尼诺现象,当 SOI 持续为正值时,该年有拉尼娜现象;将 1962—2017 年的 SOI 年平均值与长周期分潮的振幅偏差进行比较,振幅偏差取为各年振幅值与多年平均值的差,比较结果如图 3 所示。图 3 中 SOI 与 S_a 、 S_{sa} 两个长周期分潮的振幅偏差存在较好的一致性,厄尔尼诺现象使长周期分潮振幅降低,拉尼娜现象使长周期分潮振幅增大。虽然由于利用一年观测资料确定长周期分潮的调和常数易受各种因素影响且变化过程相对复杂,如 1990—1995 年间振幅偏差与 SOI 变化并不一致,但是 56 年内 SOI 与 S_a 、 S_{sa} 振幅偏差的相关系数分别可达 0.88 与 0.86,足以说明厄尔尼诺或拉尼娜现象对长周期分潮具有影响作用。全日分潮与半日分潮的调和常数较稳定,调和常数的长期变化趋势很微小,在 2004—2008 年内 K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 分潮的振幅

低于其他年份的结果,但同年的迟角却与其他年份的结果相当,检查该5年内的水位观测值并未发现异常,且无相关资料表明该5年验潮站发生迁移等变化,而且水尺的变化主要影响平均海面的观测,对周期性的振动项无影响,因此可排除验潮站水尺变化的影响。2004—2008年水位观测数据的完整度较高,仅2006年存在77个缺测数据(远小于观测量8 760,对于一年的调和与分析不构成影响),其余年份均无缺测现象,因此可以排除是数据质量导致的分潮振幅异常变化。

鲗鱼涌验潮站年平均潮差与深度基准面变化如图4所示。图4(a)统计了1962—2017年鲗鱼涌验潮站的平均潮差,可以看出年平均潮差的变化存在一定规律的周期变化,在2004—2008年间的平均潮差低于其他年份,最终导致在该段时间内主要分潮的振幅亦低于其他年份的异常变化。由于目前可获得的公开数据信息局限,年平均潮差异常变化的原因尚不能得出。图2中,浅水分潮相比于其他分潮虽然振幅较小,但调和常数的长期变化趋势相对明显, M_4 、 MS_4 、 M_6 分潮振幅变化趋势分别为4.3、2.7、1.6 mm/a,而3个浅水分潮的迟角呈现下降趋势,变化趋势与长周期分潮、全日分潮、半日分潮相比更明显。海道测量作业中,潮汐分析往往利用观测一年的资料确定潮汐调和常数,而不同年份资料的调和与分析结果存在较大变化,特别是长周期分潮的调和常数变化复杂。在使用某年调和常数代替其他年份调和常数时,需要考虑潮汐调和常数的确定偏差。

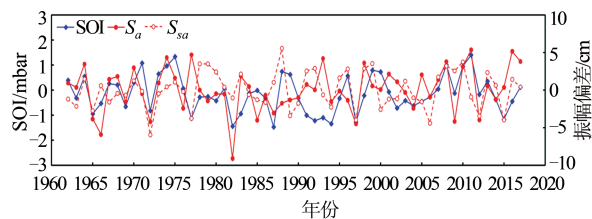


图3 南方涛动数据与长周期分潮振幅的关系

Fig.3 Relationship of SOI and Amplitudes of S_a and S_{sa} on Tide Gauge

3.3 深度基准面确定与分析

香港的海图基准面定义为香港主基准面以下0.146 m,即位于“平均海面”之下约1.38 m^[25]。中国《海道测量规范》^[26]规定以理论最低潮面定义深度基准,而国际上IHO组织推荐使用最低天文潮面确定深度基准^[27]。本文对此3种深度基准的确定结果进行了比较,分析1962—2017年内各类深度基准值的变化情况,其中理论最低潮面利

用各年主要分潮的调和常数根据式(8)分别计算,最低天文潮面利用各年122个分潮的调和常数分别计算,计算结果如图4(b)所示。

图4(b)中理论最低潮面与最低天文潮面的变化趋势较一致,均在2004—2008年出现较低值,与 M_2 、 K_1 、 O_1 分潮的变化一致,但最低天文潮面变化幅度较大。理论最低潮面的年变化率为 -0.18 mm/a,最低天文潮面的变化率为 -0.27 mm/a,由于深度基准值表示深度基准面与平均海面的距离,因此理论最低潮面与最低天文潮面均呈现上升趋势,变化率分别为 0.18 mm/a、 0.27 mm/a。在实验的年份内,理论最低潮面均在香港地区现使用的海图基准以上,而最低天文潮面分别在1963年、1978年、1999年、2000年、2003年、2017年低于香港海图基准,对3种基准面各年的保障率进行统计,均达到95%以上。

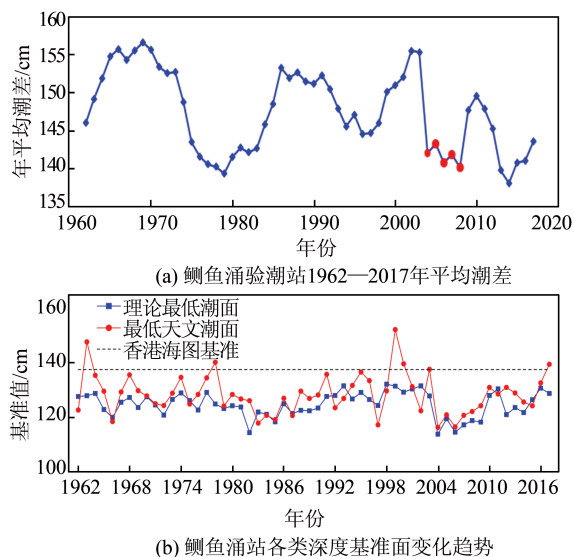


图4 鲗鱼涌验潮站年平均潮差与深度基准面变化

Fig.4 Variations of Annual Mean Tidal Range and Chart Datums on Quarry Bay

4 结 语

本文利用中国香港长期验潮站水位观测数据,对1962—2017年间的水位变化特征进行了研究,通过对实验结果的分析,得到结论如下。

1) 1962—2017年间,香港海域各验潮站不同时段海平面观测资料确定的海平面相对变化速率差异较大,其中芝麻湾(1962—1997年)海平面呈下降趋势,速率为 (-3.85 ± 0.61) mm/a,石壁(1998—2017年)海平面相对变化速率为 (-0.92 ± 0.97) mm/a,观测时段最长的鲗鱼涌验潮站(1962—2017年)相对变化速率为 (2.33 ± 0.17) mm/a,海平面上升最快的

横澜岛(1993—2017年)速率为 (4.02 ± 0.74) mm/a,尖鼻咀(1974—2017年)速率为 (0.62 ± 0.31) mm/a,海平面相对变化最为缓慢。

2) 鲗鱼涌站1962—2017年长周期分潮的逐年调和结果各年之间存在差异;浅水分潮调和常数的变化趋势相对明显,且迟角均呈减小趋势;全日潮与半日潮分潮调和常数最为稳定,振幅与迟角内符合精度分别小于1.5 cm、 2.6° ,但 M_2 、 O_1 、 K_1 分潮在2004—2008年间的振幅小于其他年份。

3) 鲗鱼涌站理论最低潮面与最低天文潮面均呈增大的变化趋势,变化速率分别为0.18 mm/a、0.27 mm/a;目前香港使用的海图基准相对于理论最低潮面与最低天文潮面更为保守。

参 考 文 献

- [1] Zhai Guojun, Huang Motao. The Review of Development of Marine Surveying Technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10): 1 752-1 759(翟国君,黄漠涛. 海洋测量技术研究进展与展望[J]. 测绘学报,2017,46(10):1752-1 759)
- [2] Bao Jingyang, Xu Jun. Tide Analysis from Altimeter Data and the Establishment and Application of Tide Model [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013(暴景阳,许军. 卫星测高数据的潮汐提取与建模应用[M]. 北京:测绘出版社,2013)
- [3] Douglas B C. Global Sea Level Rise [J]. *J Geophys Res*, 1991, 96 (C4): 6 981-6 992
- [4] Douglas B C. Global Sea Level Rise: A Redetermination [J]. *Surveys in Geophysics*, 1997, 18: 279-292
- [5] Zheng Wenzhen. Distribution of Annual Rates of Sea Level and Variations of Long-Period Constituents in China [J]. *Marine Science Bulletin*, 1999, 18 (4): 1-10(郑文振. 中国海平均海面速度的分布和长周期分潮变化[J]. 海洋通报,1999,18(4):1-10)
- [6] Ding X. Sea Level Change in Hong Kong from Tide Gauge Measurements of 1954-1999 [J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 74: 683-689
- [7] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge Univ Press, 2007
- [8] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones [J]. *Science*, 2010, 328: 1 517-1 520
- [9] Zhang Y Z, Xie J Z, Liu L. Investigating Sea-Level Change and Its Impact on Hong Kong's Coastal Environment [J]. *Annals of GIS*, 2011, 17(2): 105-112
- [10] Ke Hao, Li Fei, Zhang Shengkai, et al. The Determination of Absolute Sea Level Changes of the Antarctic Cost Tidal Gauges from 1994 to 2014 and Its Analysis [J]. *Chinese J Geophys*, 2016, 59(9): 3 202-3 210(柯灏,李斐,张胜凯,等. 1994—2014年南极沿岸验潮站海平面绝对变化确定与分析[J]. 地球物理学报,2016,59(9):3 202-3 210)
- [11] Jiao Wenhai, Wei Ziqing, Guo Hairong. Determination of the Absolute Rate 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. 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)
- [12] Van Chinh D, Li Jiancheng, Bui Thi Kien Trinh. Analysis on Sea Level Variability Along the Coast of Haiphong Vietnam [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 552-557(团文征,李建成,裴氏坚贞. 越南海防市近岸海洋水位变化特征分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2015, 40(4): 552-557)
- [13] Din A H M. Sea Level Change in the Malaysian Seas from Multi-Satellite Altimeter Data [J]. *International Journal of Physical Science*, 2012, 7(10): 1 694-1 712
- [14] Warrick R, Le Provost C, Merier M M, et al. Changes in Sea Level [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [15] Bao Jingyang, Xu Jun. The Accuracy Evaluation of Harmonic Constants for Long Term Tidal Stations Along the Coast of China [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(1): 1-4(暴景阳,许军. 中国沿岸验潮站潮汐调和常数的精度评估[J]. 海洋测绘,2013, 33(1): 1-4)
- [16] Meng Yun, Lou Angang, Liu Yafei, et al. Impact of Coastline and Topography Changes on Tidal Wave System and Tidal Current Character in the Bohai Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(12): 1-7(孟云,娄安刚,刘亚飞,等. 渤海岸线地形变化对潮波系统和潮流性质的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(12):1-7)
- [17] Zhao Jianhu, Ke Hao, Zhang Hongmei. Comprehensive Detection and Repair Method for Long-Period Tidal Gauge Observation Errors [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 490-1 494(赵建虎,柯灏,张红梅. 长期验潮站潮位观测误差的综合探测及修复方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(12):1 490-1 494)
- [18] Xu Jun. Research on the Effects of Water Level Correction on Underwater Topographic Survey [D]. Dalian: Dalian Naval Academy, 2009(许军. 水下地形测量的水位改正效应研究[D]. 大连:海军大连舰

- 艇学院,2009)
- [19] Liu Yanchun. Space Structure and Data Processing in Marine Sounding [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2002(刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理[M]. 北京:测绘出版社,2002)
- [20] Bao Jingyang, Xu Jun, Feng Lei, et al. The Comparison of Chart Datum Transfer Algorithms and Synthetical Determination for Tidal Station Network Datum [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(5): 1-6(暴景阳,许军,冯雷,等. 深度基准传递方法的比较与验潮站网基准的综合确定[J]. 海洋测绘,2013,33(5):1-6)
- [21] Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. Analysis and Prediction of Tide and Tidal Current [M]. Beijing: Ocean Press, 1986(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)
- [22] Bao Jingyang, Zhai Guojun, Xu Jun. Vertical Datums and Their Transformation Approaches for Hydrography [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 52-57(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)
- [23] Computational Techniques for Tidal Datum Handbook [S]. NOAA Special Publication, 2003
- [24] Yuan Linguo, Ding Xiaoli, Chen Wu, et al. Characteristics of Daily Position Time Series from the Hong Kong GPS Fiducial Network [J]. *Chinese J Geophys*, 2008, 51(5):1 372-1 384(袁林果,丁晓利,陈武,等. 香港GPS基准站坐标序列特征分析[J]. 地球物理学报,2008,51(5):1 372-1 384)
- [25] Explanatory Notes on Geodetic Datums in Hong Kong [R]. Survey&MappingOfficeLandsDepartment, 1995
- [26] GB 12327-1998 Specifications for Hydrographic Survey [S]. Beijing: China Standard Press, 1999 (GB 12327-1988海道测量规范[S]. 北京:中国标准出版社,1999)
- [27] 6th IHO Tidal Committee Meeting Final Report [R]. 6th IHO Tidal Committee Meeting, Lisbon, Portugal, 2004

Analysis of Relative Water Level Variations in Hong Kong, China from 1962 to 2017

LIU Ju¹ BAO Jingyang² XU Jun³ ZHOU Wei⁴

1 Operational Software and Simulation Research Institute, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

4 91550 Troops, Dalian 116023, China

Abstract: Utilizing the data of water level, observed by tide gauges in Hong Kong, China from 1962–2017, the variation of sea level, tidal harmonic constants and other character values of water level in the sea area are determined and analyzed in this paper. The results show that the average changing rate of mean sea level is 1.06mm/a, however, both the trend and scale of each tide gauge's mean sea level changing rate are different. For example, the rate of Chi Ma Wan is (-3.85 ± 0.61) mm/a, while the rate of Waglan Island is (4.12 ± 0.76) mm/a and the the rate of Tsim Bei Tsui is (0.32 ± 0.32) mm/a. From 1962 to 2017, S_a and S_{sa} of Quarry Bay, calculated annually, have poor stability, and the changing trends of harmonic constants of shallow water constituents are obvious relatively. Diurnal and semidiurnal constituents are nearly stable, but in 2004–2008 the amplitudes of M_2 , O_1 and K_1 vary from other years. The level of lowest normal low water and lowest astronomical tide increase in the rate of 0.18 mm/a and 0.27 mm/a respectively.

Key words: sea level change; harmonic constants; chart datum; relative change of water level; tidal gauges of Hong Kong

First author: LIU Ju, PhD candidate, specializes in the theory and applications of water level control in hydrographic survey and marine environment simulation. E-mail: liuju9752@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41074002,41501500).

引文格式: LIU Ju, BAO Jingyang, XU Jun, et al. Analysis of Relative Water Level Variations in Hong Kong, China from 1962 to 2017[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7):1065–1072. DOI:10.13203/j.whugis20180325(刘聚,暴景阳,许军,等. 中国香港验潮站1962—2017年水位相对变化分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(7):1065–1072. DOI:10.13203/j.whugis20180325)