

中国近海潮汐变化对外海海平面上升的响应

章卫胜^{1,2}, 张金善^{1,2}, 林瑞栋³, 宗虎城^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029;
3. 宁波港镇海港埠公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 针对外海海平面上升对中国沿海潮波系统和潮汐水位可能带来的影响, 通过西北太平洋潮波数学模型对边界海平面上升后潮波变化进行了数值模拟。研究发现边界海平面上升后, 在无潮点附近东侧迟角增加, 西侧迟角减小; 无潮点北侧振幅增加, 南侧振幅减小; 辽东湾、渤海湾顶、辽东半岛东海域、海州湾至鲁南沿海、苏北沿海、台湾海峡至浙东沿海和南海平均潮差增加, 海平面上升 0.90 m 后潮差最大增幅达 0.40 m; 长江口、杭州湾至对马海峡、朝鲜西海岸和莱州湾海域潮差减小。随着海平面上升量值的增加, 渤海、台湾海峡潮差变化速率相对稳定, 黄海、东海和南海站位变化速率有所变动; 平均高水位的变化趋势与潮差一致; 潮差增加的区域, 高水位抬升幅度超过边界海平面上升幅度。海平面上升引起的高水位超幅变化, 增加了沿海地区对风暴潮和其他灾害防护的风险。

关键词: 潮汐; 海平面上升; 水位变化; 海洋灾害; 中国近海

中图分类号: P731.23 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2013)02-0243-08

地球温室效应、极地冰川融化导致全球海平面上升已经引起了各国研究者的注意。海平面上升会加剧陆地淹没、盐水入侵、海岸侵蚀和风暴潮等灾害, 对海岸自然环境、生态系统和人类活动产生深远影响。针对该问题, 一些模型被研究者用来评价气候变化、海平面上升和风暴潮灾害对沿海国家或城市带来的风险^[1-3], 其中关键因素是海水水位上涨和海水入侵。Mohammed 和 Nobuo^[4]采用数学模型模拟发现, 海平面抬升 0.3 m 后孟加拉湾风暴洪水淹没面积将增加 15.3%。仇天宇等^[5]通过数值研究发现, 渤海湾地区洪水淹没对海平面上升具有很强敏感性。事实上海平面上升除了导致直接水位抬升之外, 还可能导致局部海域潮差加大、高水位抬升, 即引起潮波的非线性变化。Scott 等^[6]在研究海平面上升对沿海湿地生态影响时, 也提到湿地的平均高、低水位与海平面上升存在着非线性响应关系。针对海平面上升对潮汐的影响, 张锦文、杜碧兰^[7]较早地指出全球海平面上升引起的陆架浅水区域海底和侧向摩擦作用改变和减小, 导致入射波、反射波和折射波的传播发生变化和潮汐驻波位置(无潮点)的移动, 由此造成潮差显著变化, 涨、落潮时出现提前或滞后的变化, 定性分析了海平面上升对潮波的影响。于宜法等^[8-11]分别采用理论分析和数值模拟手段系统地研究了海平面上升引起东中国海潮波系统包括振幅、迟角和无潮点位置等特征的变化。然而从研究成果中发现, 其数值模拟结果与理论分析结论不一致: 模拟结果是海平面上升后的同潮时线相对于现有的同位相线发生逆时针方向偏转^[10]; 而理论分析认为海平面上升以后在无潮点左侧(相对于潮波传播方向而言), 分潮迟角减小; 无潮点右侧分潮迟角增加^[8]。这可能与数值模拟的误差、尤其是开边界的位置有关。事实上, 王伟等^[12]模拟的结果也与其不一致。且没有涉及到海平面上升对实际潮差、高水位和潮时的影响, 而这对于海岸防护工程设计和相关研究具有直接意义。

中国沿海地区是经济发达、人口密度最大的地区, 对海洋灾害和海岸防护研究一直是海洋科学研究的热点。为此, 本文建立西北太平洋潮波数学模型, 开边界远离实际关心的研究区域; 通过给定 23 个分潮振动水位的边界条件, 对区域内潮波运动进行模拟并进行了验证; 在此基础上通过设定边界海平面的上升, 研究

收稿日期: 2012-02-20; 网络出版时间: 2012-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20121217.2024.005.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(200901061; 200801001)

作者简介: 章卫胜(1979-), 男, 安徽青阳人, 工程师, 博士研究生, 主要从事海岸动力数值模拟方面研究。

边界海平面上升后潮波系统、潮汐水位、平均潮差、潮时以及平均高水位的变化，从潮波系统、平均潮差、潮时和平均高水位的角度分析海平面上升对近岸潮汐带来的影响，为海岸工程和相关方面研究提供参考。

1 西北太平洋潮波数学模型的建立

1.1 模型基本方程

模型采用球面坐标下的二维潮波传播方程，不考虑盐度、温度和其他物质浓度变化的影响(即 Boussinesq 近似)；并采用 Boussinesq 假定、静压假定和刚盖假定；考虑地球曲率和科氏加速度随纬度的变化。模型方程如下：

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (UD) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (VD \cos \varphi) \right] + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{a \cos \varphi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial U}{\partial \varphi} - \frac{UV}{a} \text{tg} \varphi = fV - \frac{g}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\zeta - \bar{\zeta}) + \frac{A_H}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right] - \frac{k_b}{D} \sqrt{U^2 + V^2} U \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{a \cos \varphi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{U^2}{a} \text{tg} \varphi = -fU - \frac{g}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\zeta - \bar{\zeta}) + \frac{A_H}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \right] - \frac{k_b}{D} \sqrt{U^2 + V^2} V \tag{3}$$

式中 t 为时间； λ 为东经； φ 为北纬； U 、 V 分别为沿水深平均的潮流速在 λ 、 φ 方向上的分量； D 为总水深， $D = h + \zeta$ ， h 为静水深， ζ 为相对于静海面的波动值； f 为科氏力分量， $f = 2\omega \sin \varphi$ ， ω 为地球自转角速度； a 为地球平均半径； g 为重力加速度； A_H 为水平涡粘系数，可视为常量； k_b 为底部运动阻力系数， $k_b = g/C^2$ ， $C = D^{1/6} n$ ， C 为谢才系数， n 为曼宁系数； $\bar{\zeta}$ 为因引潮力引起的海面变化值，即平衡潮潮高。

1.2 模型范围和边界条件

模型范围包括西北太平洋边缘的东中国海、南中国海、菲律宾海、日本海、苏禄海以及靠近的太平洋海域。模型西边界在 $90^{\circ}00'E$ 位置，东边界在 $161^{\circ}10'E$ 位置，南边界在北纬 $00^{\circ}00'N$ ，北边界在北纬 $61^{\circ}00'N$ 位置；模型网格为 $2' \times 2'$ ，见图 1。模型水深资料由 GEBCO 提供(被订正到平均海平面)。

模型采用 DSI^[13] 方法离散，时间步长 450 s。水平涡粘系数 A_H 取为 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。底部摩阻通过曼宁系数确定，曼宁系数为 0.015 ~ 0.025。

模型初始条件，给定恒定潮位场，流速为 0。

闭边界满足流体不可入条件，即

$$\vec{U}_H \cdot \vec{n} = 0 \tag{4}$$

式中 $\vec{U}_H = (\vec{U}_\lambda, \vec{U}_\varphi)$ 为水平流速矢量， \vec{n} 为边界法向。

开边界给定潮位过程线。潮位过程线由潮汐调和常数按以下形式给定：

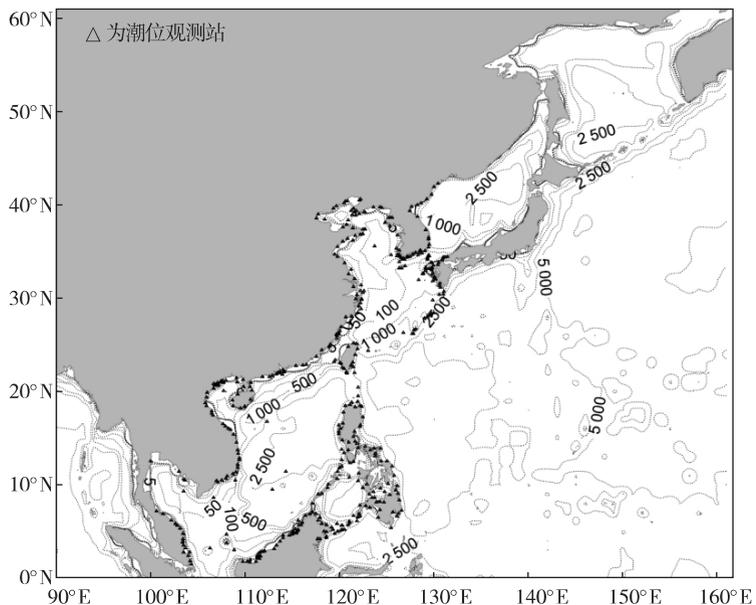


图 1 西北太平洋潮波模型计算范围

Fig. 1. Domain of the Northwest Pacific Ocean tidal wave model

$$\zeta = \sum H_i \cos(\sigma_i t - \theta_i) \quad (5)$$

式中 H_i 、 σ_i 和 θ_i 分别为分潮的振幅、角频率和迟角。

潮位过程线由全球潮波模型 NAO99^[14] 提供, 该模型网格为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 预报潮位包含 16 个短周期分潮 (M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 Q_1 、 M_1 、 J_1 、 OO_1 、 $2N_2$ 、 Mu_2 、 Nu_2 、 L_2 、 T_2) 和 7 个长周期分潮 (M_{lm} 、 M_f 、 M_{sf} 、 M_m 、 M_{Sm} 、 S_{sa} 、 S_a)。

1.3 模型验证

模型对《英国潮汐表》435 个潮位站 4 个主要分潮 (M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1) 以及若干潮流观测点准调和常数和潮流预报值进行了对比验证(潮位站的站位见图 1)。由于本文不涉及到潮流计算结果, 只对潮位验证结果进行说明。表 1 为各站计算结果与实测值之间的绝对值平均偏差。图 2 为 4 个主要分潮的调和常数计算结果与实测结果比较。可以看出计算 4 个主要分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 振幅绝对值平均偏差分别为 8.3 cm、4.9 cm、5.1 cm 和 5.2 cm; 迟角的绝对值平均偏差分别为 12.5° 、 14.8° 、 10.7° 和 10.2° 。验证表明模型能够较好地模拟中国近海的潮波系统。

表 1 主要分潮调和常数绝对值平均误差

Table 1 average error of absolute values for the harmonic constants main tidal constituent

分潮	振幅/cm	迟角/(°)
M_2	8.3	12.5
S_2	4.9	14.8
K_1	5.1	10.7
O_1	5.2	10.2

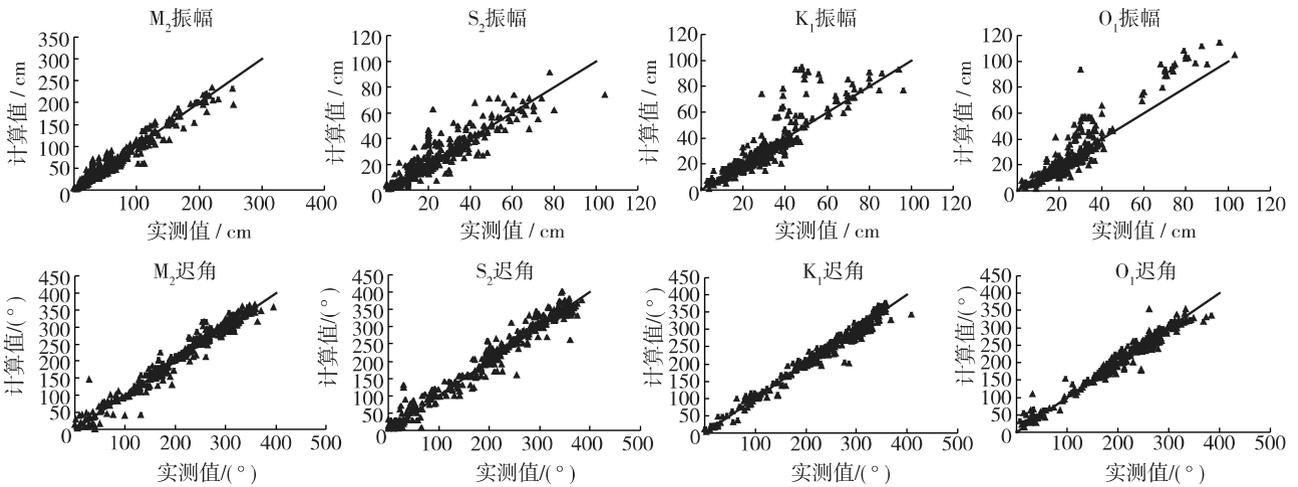


图 2 计算调和常数与实测结果比较

Fig. 2 Comparison of harmonic constants between calculation and measurement

2 海平面上升和潮波系统变化

2.1 外边界海平面上升的假定

根据权威的 IPCC 报告, 20 世纪 90 年代预测, 到 2100 年全球海平面上升的最佳估计值为 0.66 m, 高估计值为 1.10 m^[15]; 2007 年, 该预测值为 0.18 ~ 0.59 m^[16]。从海平面上升对潮汐影响区分度考虑, 本次研究以外海开边界海平面上升 0.90 m 为例(相当于未来 100 ~ 150 年外海海平面上升的量值)。假定外海边界海平面上升是均匀的, 且忽略平均海面变化引起的外边界潮波变化。

图 3 为海平面上升以后, 中国近海平均海平面分布图。可以看出, 近海海平面上升总体上与外海边界较为一致, 局部海域如台湾海峡、浙江沿海至长江口和朝鲜西海岸上升值较外海边界稍大, 与潮波变化有关。总体而言, 海平面上升结果与国家海洋局公报的渤海、黄海、东海和南海相对海平面上升趋势较为一致, 即各海域海平面上升量幅度总体较为一致, 黄海和东海上升幅度稍大

2.2 海平面上升后潮波系统变化

通过对海平面上升前后的分潮同潮图变化可以分析海平面上升对潮波系统的影响。本文以最主要的半日分潮 M_2 和全日分潮 K_1 为例分析反映海平面上升对潮波系统主要影响。

图4为海平面上升0.90 m前后 M_2 潮汐同潮图的对比。可以看出,对于 M_2 分潮,海平面上升以后,在潮波的传播方向上,从西北太平洋到东海杭州湾—长江口以及台湾岛和吕宋岛之间的吕宋海峡一带分潮振幅减小,杭州湾以南至台湾海峡、广东沿海、黄海西海岸、渤海大部分海区分潮振幅增加。从变化幅度来看,台湾海峡、杭州湾、长江口海区变化幅度相对较大,最大增幅为0.12~0.20 m。从分潮的等潮时线分布来看,在琉球群岛—台湾海峡岛链以东,海平面上升后等潮时线偏向潮波传播相反的方向,即相位提前,而在岛链以西变化趋势相对复杂。从局部放大图中可以看出,海平面上升以后 M_2 分潮无潮点东侧小范围迟角增加(偏向顺时针方向),而西侧迟角减小(偏向逆时针方向);无潮点附近北侧振幅增加(等振幅线靠近无潮点),而南侧振幅减小(等振幅线远离无潮点)。这种趋势与文献[9]中理论分析结果较为吻合,虽然等潮时线变化界限稍有差异,与黄海岸线曲折变化和宽度因素对潮波传播结果的影响有关。

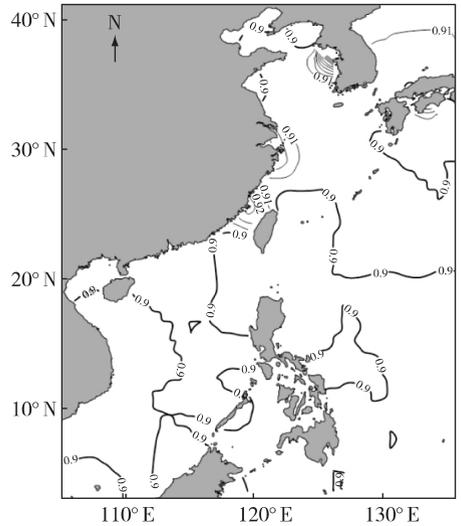
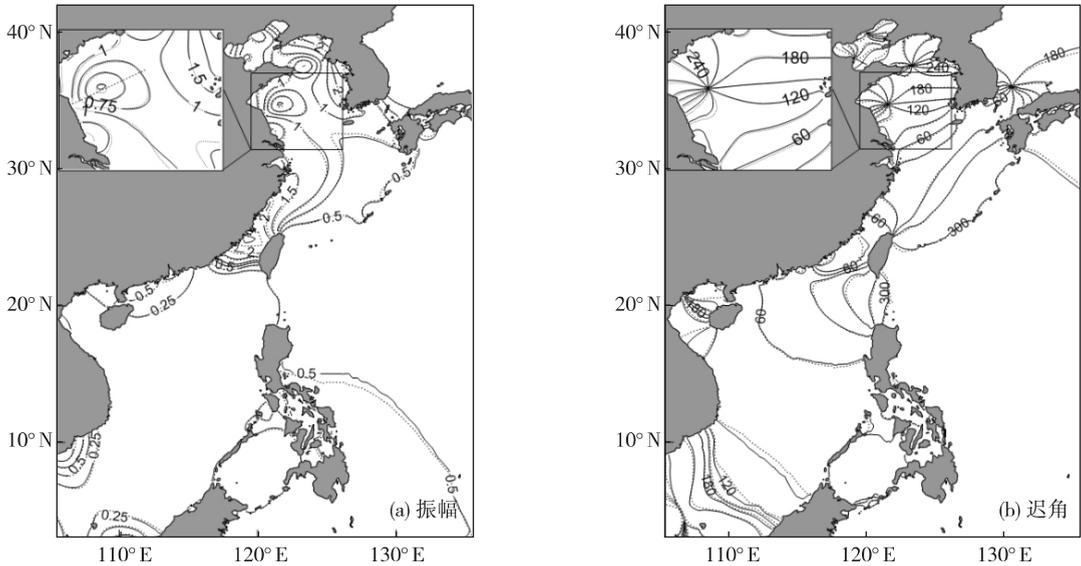


图3 外海边界上升0.90 m后海平面分布(m)
Fig.3 MSL in marginal seas of China with 0.90 m increment of MSL in open boundary



实线为原海平面结果,细虚线为海平面上升后模拟结果

图4 海平面上升0.90 m后 M_2 分潮同潮图变化

Fig.4 Comparison of co-chart of M_2 with 0.90 m increment of MSL

图5为 K_1 分潮海平面上升后振幅和迟角的变化。可以看出,黄海中央无潮点附近 NNW-SSE 一线以东迟角增加,以西迟角减小; WSW-ENE 一线以北振幅增加,以南振幅减小。渤海海峡口无潮点附近潮波系统变化趋势也一致。由于波长较长,岸线变化对 K_1 分潮影响比 M_2 分潮要小,模拟的结果与理论分析结果更加一致。

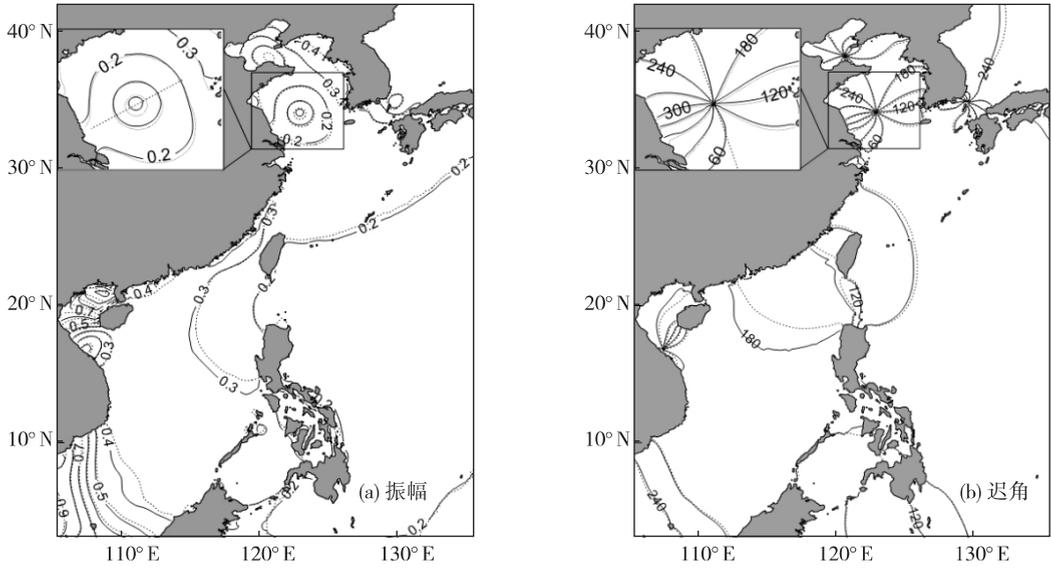


图 5 海平面上升 0.90 m 后 K_1 分潮同潮图变化

Fig. 5 Change of M_2 and K_1 after MSL rise in the Yellow Sea and Bohai Sea

3 海平面上升后中国近海潮差和潮时变化

3.1 空间分布

实际的潮差和潮时会随着潮波系统的改变而改变, 但由于自然潮汐是由多种分潮线相互叠加形成, 所以最终潮汐的变化相对复杂。利用计算模拟 3 个月的潮汐过程来分析海平面上升前后平均潮差和潮时的变化。

图 6 (a) 和图 6 (b) 为海平面上升以后平均潮差和潮汐相位的变化。边界海平面上升 0.90 m 以后, 辽东湾、渤海湾顶、辽东半岛东海域、海州湾至鲁南沿海、苏北沿海、台湾海峡至浙东沿海以及整个南海平均潮

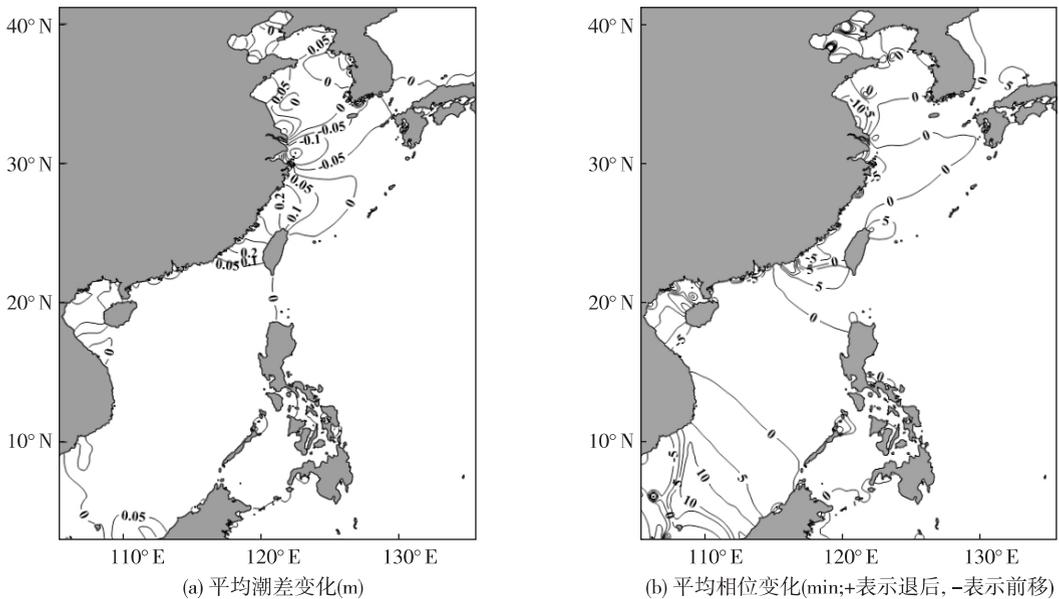


图 6 海平面上升 0.90 m 后平均潮差和平均相位变化

Fig. 6 Change of average tidal range and tidal phase after MSL rise

差有所抬升；其中台湾海峡至浙东沿海潮差变化幅度最大，最大增幅达 0.40 m 左右，其次为苏北辐射沙洲海域最大增幅在 0.20 m 左右，海州湾、辽东湾增幅在 0.10 m 左右，南海海域潮差增幅在 0.02 m 左右。潮差减小的区域主要是长江口、杭州湾至对马海峡、朝鲜西海岸和莱州湾海域，其中长江口外潮差减幅最明显，最大减幅在 0.20 m 左右。计算结果与文献 [18] 较为一致。相对而言，海平面上升后潮差较小海域平均潮差有减小趋势，而潮差较大的波腹区潮差则有所增加。

边界海平面上升后，渤海和黄海除无潮点附近以外海域和长江口至台湾海峡以及南海大部海域相位均前移，其中渤海莱州湾、苏北辐射沙洲、杭州湾和北部湾海域相位变化幅度明显，最大约前移 20 ~ 30 min，东海和南海大部分海域相位变化为 2 ~ 5 min。渤、黄海无潮点附近、长江口至济州岛、台湾岛东海岸、汕头至吕宋海峡海域相位后移，其中汕头附近潮汐相位变化幅度最明显，最大后移幅度 20 min 左右。

图 7 为边界海平面上升后中国沿海部分站点平均潮差和潮时变化。

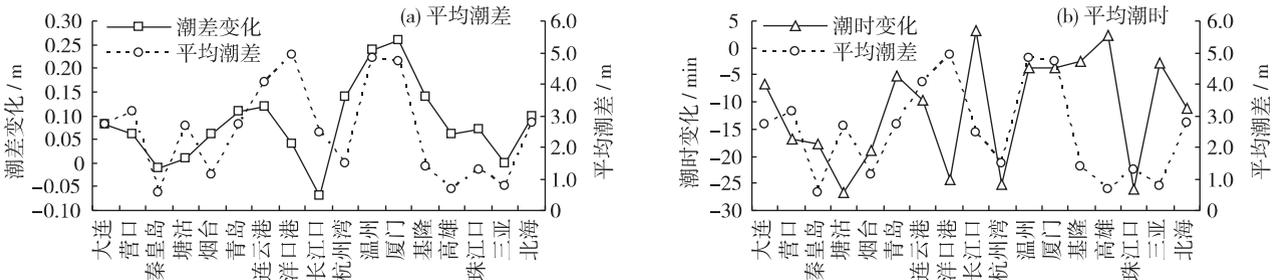


图 7 边界海平面上升 0.90 m 后部分站点平均潮差和潮时变化

Fig. 7 Change of average tidal range and tidal hour of some stations after MSL rise

3.2 变化趋势

表 2 为边界海平面上升不同量值中国沿海部分站点平均高水位的变化。可以看出，平均高水位的变化与潮差变化相对一致。潮差增加的站点高水位抬升幅度超过平均海面的上升幅度，如连云港，温州，厦门等；潮差减小的站点，高水位抬升值稍小于海平面上升值，如长江口。同时，渤海、台湾海峡站点潮差随海平面上升到变化速率相对稳定，黄海、东海和南海站点随海平面上升变化速率稍有变动，其中大部分站点变化速率随海平面上升而减小。

表 2 边界海平面上升后中国沿海部分站点平均高水位变化

Table 2 Change of average high level after MSL rise in coasts of China

站点	平均高水位/m	平均高水位变化/m						增减速率/(m·m ⁻¹)					
		0.15	0.30	0.45	0.60	0.90	1.50	0.15	0.30	0.45	0.60	0.90	1.50
大连	1.34	0.16	0.31	0.47	0.62	0.93	1.56	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
营口	1.57	0.16	0.32	0.48	0.63	0.93	1.54	1.07	1.06	1.06	1.05	1.04	1.03
秦皇岛	0.31	0.15	0.29	0.44	0.59	0.88	1.47	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
塘沽	1.30	0.15	0.30	0.44	0.59	0.88	1.46	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97
烟台	0.54	0.15	0.31	0.46	0.61	0.92	1.53	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
青岛	1.33	0.16	0.32	0.47	0.63	0.95	1.61	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07
连云港	2.08	0.16	0.32	0.48	0.64	0.97	1.64	1.06	1.06	1.06	1.07	1.08	1.09
洋口港	2.72	0.15	0.30	0.44	0.58	0.86	1.43	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96
长江口	1.28	0.14	0.26	0.39	0.53	0.83	1.35	0.92	0.85	0.86	0.88	0.92	0.90
杭州湾	0.90	0.15	0.31	0.46	0.61	0.91	1.50	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	1.00
温州	2.43	0.18	0.36	0.53	0.71	1.04	1.71	1.21	1.18	1.18	1.18	1.16	1.14
厦门	2.35	0.17	0.34	0.51	0.68	1.02	1.71	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.14
基隆	0.69	0.16	0.32	0.48	0.65	0.97	1.62	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
高雄	0.34	0.15	0.31	0.46	0.62	0.93	1.55	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
珠江口	0.68	0.16	0.32	0.47	0.62	0.93	1.53	1.06	1.06	1.05	1.03	1.03	1.02
三亚	0.39	0.15	0.30	0.45	0.60	0.90	1.51	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01
北海	1.43	0.16	0.32	0.48	0.64	0.96	1.60	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.12

4 结 论

(1) 海平面上升以后,在无潮点附近东侧迟角增加,西侧迟角减小, K_1 分潮分界线与潮波传播方向基本一致; M_2 分潮由于岸线边界影响,西侧范围明显缩小。无潮点北侧,振幅有所增加,南侧振幅相应减小。

(2) 外海海平面上升以后,辽东湾、渤海湾顶、辽东半岛东海域、海州湾至鲁南沿海、苏北沿海、台湾海峡至浙东沿海以及整个南海海平面上升以后平均潮差增加;其中台湾海峡至浙东沿海潮差变化幅度最大,边界海平面上升0.90 m时,最大增幅达0.40 m,南海海域潮差增幅较小。长江口、杭州湾至对马海峡、朝鲜西海岸和莱州湾海域的潮差减小,其中长江口外潮差减幅最明显,边界海平面上升0.90 m时,最大减幅0.20 m左右。渤海和黄海除无潮点局部外、长江口至台湾海峡以及南海大部海域相位均前移。渤、黄海无潮点附近小海域、东海长江口的济州岛、台湾岛东海岸、汕头至吕宋海峡海域相位后移。

(3) 渤海、台湾海峡站位潮差随海平面上升到变化速率相对稳定,黄海、东海和南海站位随海平面上升变化速率稍有变动;平均高水位的变化趋势与潮差基本一致;潮差增加的区域,高水位抬升幅度超过边界海平面上升幅度。海平面变化引起高水位的超幅变化,会加剧风暴潮灾害,需引起海岸工程设计者的注意。

参考文献:

- [1] CHU-AGOR M L, MUÑOZ-CARPENA R, KIKER G, et al. Exploring vulnerability of coastal habitats to sea level rises through global sensitivity and uncertainty analyses [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2011, 26: 593-604.
- [2] HALLEGATTE S, RANGER N, MESTRE O, et al. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen [J]. *Climatic Change*, 2011, 104(1): 113-137.
- [3] DASGUPTA S, LAPLANTE B, MURRAY S, et al. Exposure of developing countries to sea-level rise and storm surges [J]. *Climatic Change*, 2011, 106(4): 567-579.
- [4] MOHAMMED F K, NOBUO M. Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh [J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18: 490-500.
- [5] 仇天宇, 于福江, 董剑希, 等. 海平面上升对河北黄骅台风风暴潮漫滩影响的数值研究 [J]. *海洋通报* 2010, 29(5): 409-503. (ZHANG Tianyu, YU Fujiang, DONG Jianxi, et al. Numerical research on effects of mean sea level on storm surge inundation in Huanghua [J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(5): 409-503. (in Chinese))
- [6] SCOTT C H, JAMES T M, PETER B, et al. Sea-level rise impact on a salt marsh system of the lower St John's River [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2012, 7: 1-27.
- [7] 张锦文, 杜碧兰. 未来中国黄海沿岸潮差的显著增大趋势 [J]. *海洋通报* 2000, 19(1): 1-9. (ZHANG Jinwen, DU Bilan. The trend of tidal range enlarging along the coast of Yellow Sea of China [J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(1): 1-9. (in Chinese))
- [8] 于宜法, 郭明克, 刘兰, 等. 海平面上升导致潮波系统变化的机理: I: 基于理论模型的研究 [J]. *中国海洋大学学报* 2008, 38(4): 517-526. (YU Yifa, GUO Mingke, LIU Lan, et al. Mechanism of the change of tidal amphidromic system due to Mean-Sea-Level rise: I: Study based on the theoretical model [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(4): 517-526. (in Chinese))
- [9] 于宜法, 刘兰, 郭明克, 等. 海平面上升导致潮波系统变化的机理: II: 基于数值模拟的研究 [J]. *中国海洋大学学报* 2008, 38(6): 875-882. (YU Yifa, LIU Lan, GUO Mingke, et al. Mechanism of the change of tidal amphidromic system due to the rise of Mean-Sea-Level: II: Investigation based on numerical modeling [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(6): 875-882. (in Chinese))
- [10] 于宜法, 刘兰, 郭明克. 海平面上升导致渤、黄、东海潮波变化的数值研究: II: 海平面上升后渤、黄、东海潮波的数值模拟 [J]. *中国海洋大学学报* 2007, 37(1): 7-14. (YU Yifa, LIU Lan, GUO Mingke. Numerical research on tidal waves changes due to Mean-Sea-Level rise in the Bohai Sea, The Huanghai Sea and the East China Sea: II: Numerical modeling of tidal waves after Mean-Sea-Level rise in the areas [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(1): 7-14. (in Chinese))

- [11] YU Yifa , YU Yuxiu , ZUO Juncheng , et al. Effect of sea level variation on tidal characteristic values for the East China Sea [J]. *China Ocean Engineering* , 2003 , 17: 369-382.
- [12] 王伟 , 宋志尧 , 陆卫国 , 等. 海平面上升对海岸潮差影响的理论解析[J]. *海洋工程* 2008 6(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 , 6(3) : 94-97. (in Chinese))
- [13] JPY M. An efficient horizontal two-dimensional hydrodynamic model [J]. *Coastal Engineering* , 1990 , 14: 1-18.
- [14] MATUMOTO K , TAKANEZAWA Y , OOE M. Ocean tide models developed by assimilation TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydro-dynamical model: A global model and a regional model around Japan [J]. *Journal of Oceanography* , 2000 , 56: 567-581.
- [15] IPCC , Response Strategies Working Group. Strategies for adaptation to sea level rise [R]. Cambridge: Cambridge University Press , 1990: 143.
- [16] 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 [R]. Cambridge: Cambridge University Press , 2007: 996.
- [17] 中华人民共和国国家海洋局. 2010 年中国海平面公报 [M]. 北京: 国家海洋局 , 2011. (State Oceanic Administration People's Republic of China. Bulletin of China's sea level of China for the year of 2010 [M]. Beijing: State Oceanic Administration People's Republic of China , 2011. (in Chinese))
- [18] 杜凌. 全球海平面变化规律及中国海特定海域潮波研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学 2005: 134-140. (DU Ling. Global sea level variation and tidal wave in special region of China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China , 2005: 134-140. (in Chinese))

Tidal response of sea level rise in marginal seas near China*

ZHANG Weisheng^{1,2} , ZHANG Jinshan^{1,2} , LIN Ruidong³ , ZONG Hucheng^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China;*

2. *Research Center for Climate Change , Ministry of Water Resources , Nanjing 210029 , China;*

3. *Zhenhai Harbor Handling Branch of Ningbo Port Co Ltd , Ningbo 315000 , China)*

Abstract: A numerical model of the Northwest Pacific is developed to study tidal system and tidal level changes due to mean-sea-level rise in marginal seas near China. The results show that after mean-sea-level rise , phase lags are increased to the east and decreased to the west of amphidromic point. The amplitude is enhanced to the north and diminished to the south of amphidromic point. Due to mean-sea-level rises , the mean tidal range is enlarged in the Liaodong Bay , the upper reaches of Bohai Bay , seas east of Liaodong Peninsula , coast of Haizhou Bay to the south of Shandong province , the north coast of Jiangsu province , the Taiwan Strait to the east of Zhejiang province , and the South China Sea. The maximum range is 0.40 m after mean-sea-level rise 0.90m. The mean tidal range is reduced in estuary of Yangtze River , Hangzhou Bay to Tsushima Strait , the west coast of Korea , and Laizhou Bay. With the increase of sea level rise , tidal range varies with relatively stable rate in the Bohai Sea , Taiwan Strait , and it with fluctuation in the Yellow Sea , East China Sea and South China Sea. Variation of mean high water level is in accord with tidal range. It uplifts more over than the mean-sea-level in areas where tidal range raises. That means the risk would increase of coastal areas to protect storm surge and other marine disasters.

Key words: tide; mean-sea-level rise; sea level change; marine disasters; marginal seas near China