

研究论文

# 海平面上升对中国沿海地区极值水位 重现期的影响

庄 圆, 纪棋严\*, 左军成, 李直龙, 罗风云

(浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022)

**摘 要:** 基于中国沿海 10 个验潮站资料, 利用皮尔森 III 型(P-III)模型探讨了典型浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCP)情景下 21 世纪海平面上升对中国沿海地区极值水位重现期的影响。结果表明: 海平面上升将显著缩短极值水位的重现期。在 RCP8.5 情景下极值水位的重现期缩短最为显著。预估到 2050 年, 在 RCP8.5 情景下, 所研究的中国沿海地区潮位站的百年一遇极值水位将变为 9~43 a 一遇。到 2100 年, 在 RCP8.5 情景下, 百年一遇极值水位变为 1~18 a 一遇。当前极值水位的低概率事件将在 2100 年变得普遍, 在 RCP8.5 情景下, 到 2100 年千年一遇的几乎每两百年发生一次。由于极值水位的重现期会随着气候变化而缩短, 未来沿海地区将会面临更严峻的风险与挑战。

**关键词:** 重现期; 极值水位; 海平面上升; 中国沿海地区; 气候变化; 风险管理

**中图分类号:** P732

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2021)01-0020-10

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.003

**引用格式:** ZHUANG Y, ZUO J C, JI Q Y, et al. Effects of sea-level rise on the recurrence periods of extreme water levels in coastal areas of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(1): 20-29. 庄圆, 左军成, 纪棋严, 等. 海平面上升对中国沿海地区极值水位重现期的影响[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(1): 20-29.

极值水位是指若干年内才有可能出现的高水位或低水位<sup>[1]</sup>。极值水位在海岸工程、海上工程、防洪防潮工程中有着重要的作用, 是决定海洋工程能否满足安全需求的重要参考依据。在港口等海洋工程建设中, 需对正常条件(即作业条件)和极端条件(即恶劣环境条件)下的极值水位做出估计。观测资料的长短不同, 所采用的极值水位估计方法也不同<sup>[2-5]</sup>, 我国《港口与航道水文规范》<sup>[6]</sup>指出, 在拥有长期水位观测资料的情况下可采用极值分布法; 在拥有数年水位观测资料时可采用同步差比法; 当仅有短期水位资料时, 则需先求出设计水位再加减一个由附近验潮站长期资料得出的常数从而得出校核水位。但是这些方法需要验潮站本身或者临近的验潮站具有完整的长期观测资料, 该条件比较苛刻通常难以满足, 因此很难利用这些方法估计极值水位。为了解决观测资料时间不够长的困难, Pugh 和 Vassie<sup>[7]</sup>提出了用联合概率的方法计算极值水位, 仅用短期实测数据便能求出极值水位, 基于此, 我国的方国洪等<sup>[1]</sup>对联合概率法进行改进, 提出了条件分布联合概率法计算极值水位。但联合概率方法和条件分布联合概率方法在计算极值水位时都忽略了海平面长期变化对极值水位的影响。Marcos 和 Rohmer<sup>[8]</sup>研究表明, 随着海平面上升, 百年一遇的极值水位至少会缩短至 50 a 一遇。此外, 研究表明, 较长时间段内(比如 50 a 或者 100 a)平均水位的长期变化也会对该时间段内的极值水位有一定的贡献<sup>[9-11]</sup>。因此在估计 50 a 一遇或者 100 a 一遇的极值水位时应当考虑海平面的变化以及平均水位的长期变化。

**收稿日期:** 2019-07-14

**资助项目:** 国家重点研发计划项目“全球变化及应对”重点专项——海岸带和沿海地区全球变化综合风险研究(2017YFA0604902)

**作者简介:** 庄 圆(1993—), 男, 硕士, 主要从事气候变化和海平面方面研究. E-mail: boogie931211@outlook.com

\* **通信作者:** 纪棋严(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事近岸海洋数值模拟与资料同化方面研究. E-mail: jiqiyan@zjou.edu.cn

(王 燕 编辑)

由温室效应产生的全球气候变暖将引起海平面上升,对沿海国家和地区居民、财产及生态系统的安全造成巨大的威胁。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次气候评估报告中用典型浓度路径(Representative Concentration Pathway,RCP)来代表不同浓度的温室气体排放情景,按由低至高分别为RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5的四种情景,分别对不同情景下的海平面上升做出了预测<sup>[12-14]</sup>。

基于我国沿海 10 个验潮站资料,将利用皮尔森Ⅲ型(P-Ⅲ)模型探讨不同 RCP 情景下海平面上升对我国沿海地区极值水位重现期的影响,以期为我国沿海地区未来的海岸工程建设和防洪、防潮等海洋工程的建设提供参考,以更好地应对全球气候变化。

## 1 研究区域与数据来源

为了更准确地计算中国沿海的极值水位重现期的变化,本文选取了葫芦岛、秦皇岛、青岛、连云港、长涂、坎门、厦门、汕尾、北海及东方共 10 个验潮站的资料,各验潮站较为均匀地分布于我国渤海、黄海、东海和南海四个海区(图 1),各站点数据的时间间隔均为 1 h,但数据的时间范围及各验潮站所代表的潮汐类型各有不同(表 1)。本文选取的站点具有较好的代表性,如汕尾站是南海受陆架影响较大的代表站点,东方站则是南海开阔海区的代表站点,北海站是北部湾沿岸的代表站点,厦门站则是台湾海峡的代表站点。此外,Santamaria 和 Vafeidis<sup>[15]</sup>指出不同的潮汐类型会对极值水位产生不同的影响,因此各验潮站的潮汐类型也涵盖了规则半日潮、规则全日潮、不规则半日潮和混合全日四种类型。

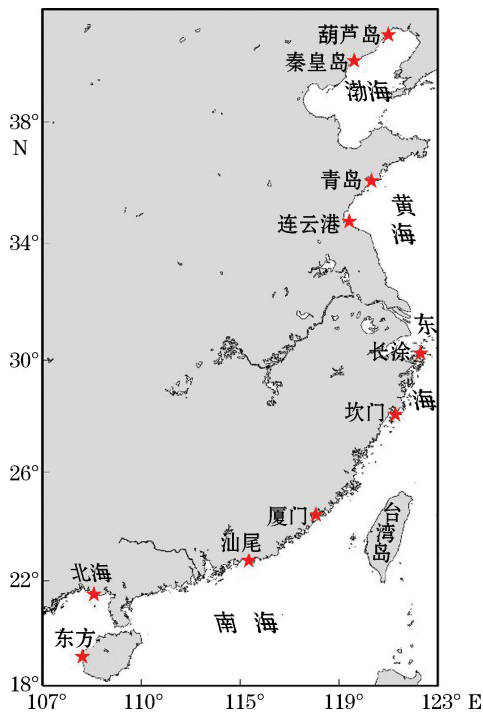


图 1 中国沿海地区 10 个验潮站的位置

Fig.1 Locations of the 10 tide gauge stations along the coast of China

表 1 10 个验潮站数据年份与潮汐类型

Table 1 Data period and tidal type of the 10 tidal stations

海 区	站 点	时间范围	潮汐类型
渤海	葫芦岛	1960—1986 年	不规则半日潮
	秦皇岛	1960—1981 年	混合全日潮
黄海	青岛	1950—1974 年	规则半日潮
	连云港	1975—1994 年	规则半日潮
东海	长涂	1960—1981 年	不规则半日潮
	坎门	1975—1994 年	规则半日潮
	厦门	1954—1994 年	规则半日潮
南海	汕尾	1975—1994 年	不规则全日潮
	北海	1975—1994 年	规则全日潮
	东方	1975—1994 年	混合全日潮

采用的海平面上升数据是基于 CMIP5 (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5)并结合温室气体排放得到的。4 种 RCP 情景(RCP2.6,RCP4.5,RCP6.0和RCP8.5)下 2050 年和 2100 年的未来海平面上升值如表 2 所示<sup>[12-14]</sup>。

表 2 不同 RCP 情景下海平面的上升值<sup>[12-14]</sup>  
Table 2 Sea level rise under different RCP scenarios

4 种情景	2050 年			2100 年		
	最低值	平均值	最高值	最低值	平均值	最高值
RCP2.6	17	24	32	26	40	55
RCP4.5	19	26	33	32	47	63
RCP6.0	18	25	32	33	48	63
RCP8.5	22	30	38	45	63	82

## 2 研究方法

为研究不同 RCP 情景下海平面上升对中国沿海地区极值水位重现期的影响,首先需要得到 RCP 情景下的极值水位,其次再利用皮尔森 III 型(P-III)模型对极值水位重现期进行预测。RCP 情景下的极值水位(Scenario Extreme Water Level, SEWL)被定义为未来海平面上升(Sea Level Rise, SLR)与当前极值水位(Current Extreme Water Level, CEWL)的结合。

### 2.1 天文高潮的计算方法

本文将潮汐采用调和分潮表示式:

$$x(t) = \sum f_i H_i \cos(\omega_i t + V_i + u_i - g_i), \quad (1)$$

式中,  $t$  为时间,  $f$  为交点因子,  $i$  代表分潮,  $H$  和  $g$  为调和常数即振幅和迟角,  $\omega$  为分潮角速度,  $V$  为分潮初相角,  $u$  为相角的交点订正。

验潮站的实际潮位由天文潮位和非天文潮水位两部分组成,非天文潮水位主要是风暴引起风暴增水。本文参考方国洪等<sup>[1]</sup>提出的天文潮位与非天文潮位分离方法将实际潮位分离得到天文潮和风暴增水两部分。首先对验潮站的资料逐年进行调和求出该验潮站各年的潮汐调和常数,再利用各年的潮汐调和常数对应后报各年的天文潮位,最后将后报的天文潮组成一个长时间序列并取最大值即为天文高潮,将验潮站的实际潮位减去天文潮位即可得风暴增水的值。例如,葫芦岛潮位数据的时间范围为 1960—1986 年,该潮位由天文潮和非天文潮位组成,要得到葫芦岛 1960—1986 年的天文潮的做法是:先对 1960 年的数据进行调和,得到 1960 年的潮汐调和常数,再后报出 1960 年的天文潮;依次类推,分别得到 1961 年和 1962 年直到 1986 年的每年的天文潮,最后将每年的天文潮按时间先后排列得到 1960—1986 年的天文潮。之所以用每年分析所得潮汐调和常数后报当年潮汐,而不用多年平均潮汐调和常数后报,是因为实际上各年分析所得潮汐调和常数有一定变化,用当年分析结果后报有利于更好消除潮汐部分的影响<sup>[1]</sup>。

### 2.2 风暴增水累积概率分布

从每个验潮站的观测时间序列数据中减去天文潮位便可得到风暴增水。每年的风暴增水年最大值构成一个风暴增水极值序列,利用该序列在 P-III 模型的基础上拟合概率分布函数,依次得到所有观测站的风暴增水极值曲线。

$f(x)$  是 P-III 的概率密度函数:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\alpha_0)}, \quad (2)$$

式中,  $\Gamma(\alpha)$  为 Gamma 函数;  $x$  为风暴增水值;  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\alpha_0$  为形状、尺度和位置参数,  $\alpha = \frac{4}{C_s^2}$ ,  $\beta = \frac{2}{\bar{x} C_v C_s}$ ,

$\alpha_0 = \bar{x} \left( 1 - \frac{2C_v}{C_s} \right)$ , 其中,  $\bar{x}$  为风暴增水的平均值,  $C_v$  和  $C_s$  分别为分散系数和偏态系数,  $C_v =$

$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{\bar{x}} - 1 \right)^2}$ ,  $C_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{\bar{x}} - 1 \right)^3}{(n-3) C_v^3}$ ,  $i$  为验潮站数据时间序列的长度;  $C_s / C_v$  的值在每个站都是恒定的。

极值水位发生的概率  $p$  的计算公式为

$$p = p(x \geq x_p) = F(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\alpha_0)}, \quad (3)$$

式中,  $x_p$  为在特定的  $p$  下的风暴增水极值,  $F(x)$  为风暴增水的累积概率分布函数。

### 2.3 CEWL 和 SEWL 的累积概率分布

当前极值水位(CEWL,  $g_p$ )指风暴增水极值与天文高潮相叠加的水位,计算方法为

$$g_p = x_p + t, \quad (4)$$

$$p = p(x \geq g_p) = F(g) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{g_p}^{\infty} (g - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(g-\alpha_0)}, \quad (5)$$

式中,  $t$  为天文高潮的高度,  $F(g)$  为 CEWL 的累积概率分布函数。

气候变化和海平面上升对风暴潮的强度和发生频率都可能产生影响,但是这种影响目前很难量化,因此在一些气候变化背景下的风暴潮相关研究中,通常假设风暴潮强度和发生频率在统计上是不变的<sup>[17-19]</sup>。本文采取类似的做法,我们认为在各 RCP 情景下,风暴潮的强度和发生的频率是不变的,即不考虑气候变化和海平面上升对风暴潮强度和发生频率的影响。因此,RCP 情景下的极值水位(SEWL,  $h_p$ )可以认为是当前极值水位和不同 RCP 情景海平面上升高度的线性叠加,即:

$$h_p = g_p + r = x_p + t + r, \quad (6)$$

$$p = p(x \geq h_p) = F(h) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{h_p}^{\infty} (h - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(h-\alpha_0)}, \quad (7)$$

式中,  $r$  为海平面上升的高度,  $F(h)$  为 SEWL 的累积概率分布函数。

### 2.4 极值水位重现期的计算方法

通常来说,极值水位的重现期是沿海风险评估与国防决策的重要指标。计算极值水位的重现期  $T$  公式为:  $T = 1/p$ 。

## 3 结 果

### 3.1 各验潮站的天文高潮

利用调和分析法对所搜集的验潮站资料进行处理,计算出本研究选取的 10 个验潮站的天文高潮值,如图 2 所示。结果表明:10 个站的天文高潮值为 94~326 cm,平均值为 232 cm。其中厦门站的天文高潮值最大,为 326 cm;秦皇岛站的天文高潮值最小,为 94 cm。不同验潮站所处海区的地形差异是引起天文潮高度差异的重要原因。



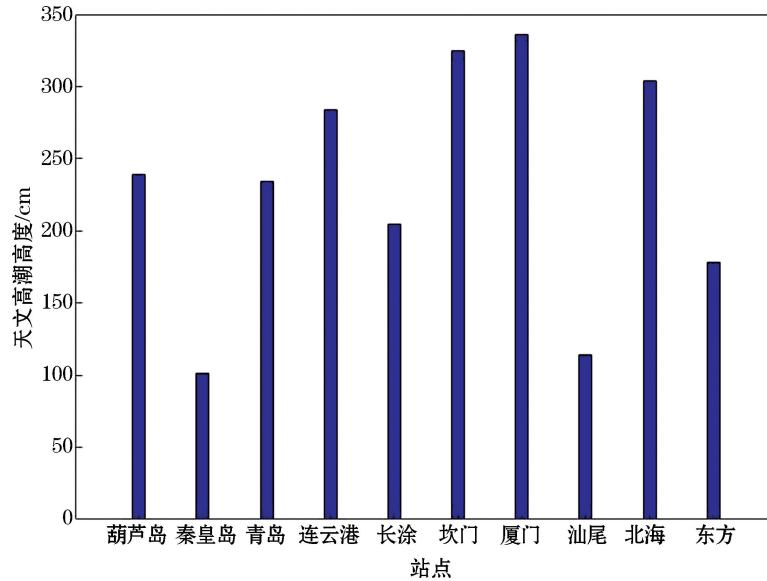


图 2 10 个验潮站的天文高潮高度

Fig.2 High tidal heights recorded at the 10 tide gauge stations

### 3.2 风暴增水的累计概率分布

将长期观测记录的水位数据减去调和分析得到的天文潮数据后得到的风暴增水数据拟合到 P-III 模型, 可得风暴增水的累计概率分布曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知, 当  $p=0.01\%$  时, 连云港站的风暴增水极值最大, 为 313 cm; 坎门站次之, 为 295 cm; 东方站最小, 为 192 cm。当  $p=99.9\%$  时, 连云港站的风暴增水极值最大, 为 90 cm; 厦门站次之, 为 79 cm; 东方站最小, 为 41 cm。这表明本研究中使用的站点之间的累积概率分布曲线存在明显差异。利用图 3 的数据, 我们可以求得极端风暴增水的重现期, 如表 3 所示。

Katherine 等<sup>[20]</sup>指出, 沿海水位

是由确定性(如天文潮)和随机性过程(如波浪、风暴潮和海平面异常)共同驱动产生的。每个过程对水位的贡献取决于气候和地质的区域差异, 以及海滩形态、海岸方向和大陆架水深的局部尺度变化。中国沿海海岸线较长, 所研究的 10 个验潮站的地理环境有差异, 受到不同的水文与气象环境因素影响, 故各个验潮站的风暴增水极值不同。由表 3 可以看出, 当风暴增水极值重现期为 100 a 时, 本研究中的风暴增水 116~202 cm, 其中连云港站百年一遇的风暴增水极值最大, 为 202 cm; 东方站的最小, 为 98 cm。

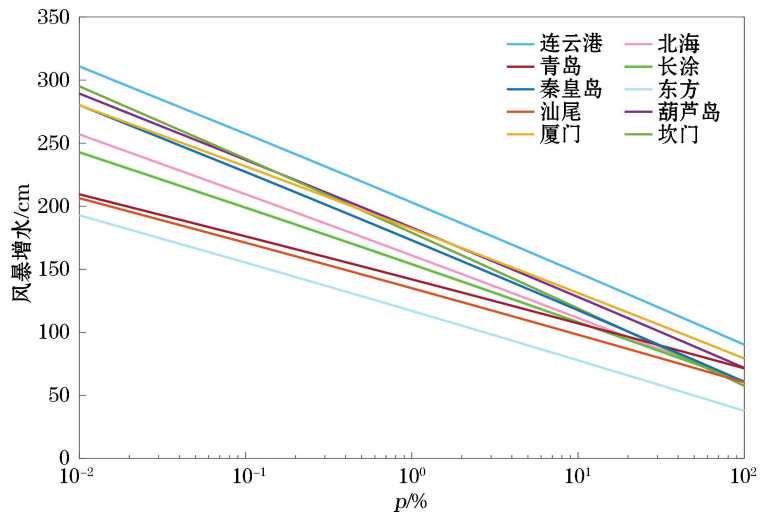


图 3 验潮站记录的风暴增水累积概率分布曲线

Fig.3 Cumulative probability distribution curves for the storm surges recorded at the 10 tide gauge stations

表 3 代表性重现期的风暴增水极值

Table 3 Storm surge extreme values corresponding to representative recurrence periods

站 点	1 000 a	100 a	30 a	20 a	10 a
葫芦岛	237	183	158	146	129
秦皇岛	227	172	147	134	118
青 岛	176	142	125	118	107
连云港	257	202	176	164	147
长 涂	198	153	132	121	108
坎 门	237	178	150	137	119
厦 门	230	181	157	146	131
汕 尾	171	135	117	109	98
北 海	209	160	137	126	112
东 方	255	116	98	89	78

### 3.3 研究站位的 CEWL 和 SEWL 累积概率分布

将每个验潮站的风暴增水的最大值分别与其天文高潮相结合,叠加的高度数据拟合到 P-III 模型,可以得到当前极值水位的累积概率分布曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,所有验潮站的当前极值水位累积概率分布曲线和风暴增水累积概率分布曲线相比均增加。当  $p=0.01\%$  时,坎门站的当前极值水位的极值最大,为 626 cm;厦门站次之,为 625 cm;汕尾站最小,为 324 cm。当  $p=99.9\%$  时,厦门站的当前极值水位的极值最大,为 425 cm;坎门站次之,为 383 cm;秦皇岛站最小,为 160 cm。

将不同 RCP 情景下的海平面上升高度值叠加到当前极值水位,叠加的高度数据拟合到 P-III 模型,可得到不同 RCP 情景下极值水位发生的概率。以

汕尾站和坎门站为例,分析 2 个站在 4 个 RCP 情景下(每个 RCP 中最低值、平均值和最高值三个级别)2050 年和 2100 年极值水位发生的概率以说明海平面上升对极值水位的影响,结果如图 5 所示。为了体现海平面上升对极值水位重现期的影响,当前极值水位累积频率概率曲线也包括在图 5 中。由图 5 可知:海平面上升导致相同概率下 RCP 情景下的极值水位显著高于当前极值水位;4 种 RCP 情景相比,相同概率下 RCP8.5 的极值水位最高, RCP4.5 和 RCP6.0 次之, RCP2.6 情景下的极值水位最低;相同概率下 2100 年的 RCP 情景下极值水位显著高于 2050 年的 RCP 情景下极值水位。

利用单一的 RCP 情景下极值水位发生的概率可以估算出其极值水位与其相应的重现期。以汕尾站为例: RCP4.5 情景下,2050 年的极值水位为 210~350 cm,到 2100 年极值水位增加为 240~390 cm。同样,在 RCP8.5 情景下,2050 年的极值水位为 220~360 cm,2100 年极值水位增加到 240~410 cm。

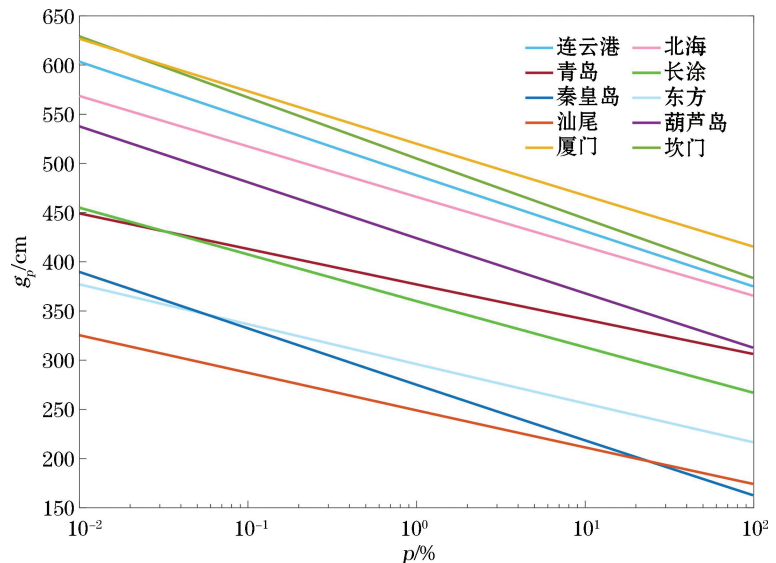


图 4 10 个潮汐站的 CEWL 累积概率分布曲线

Fig.4 Cumulative probability distribution curves for the CEWLs at the 10 tide gauge stations

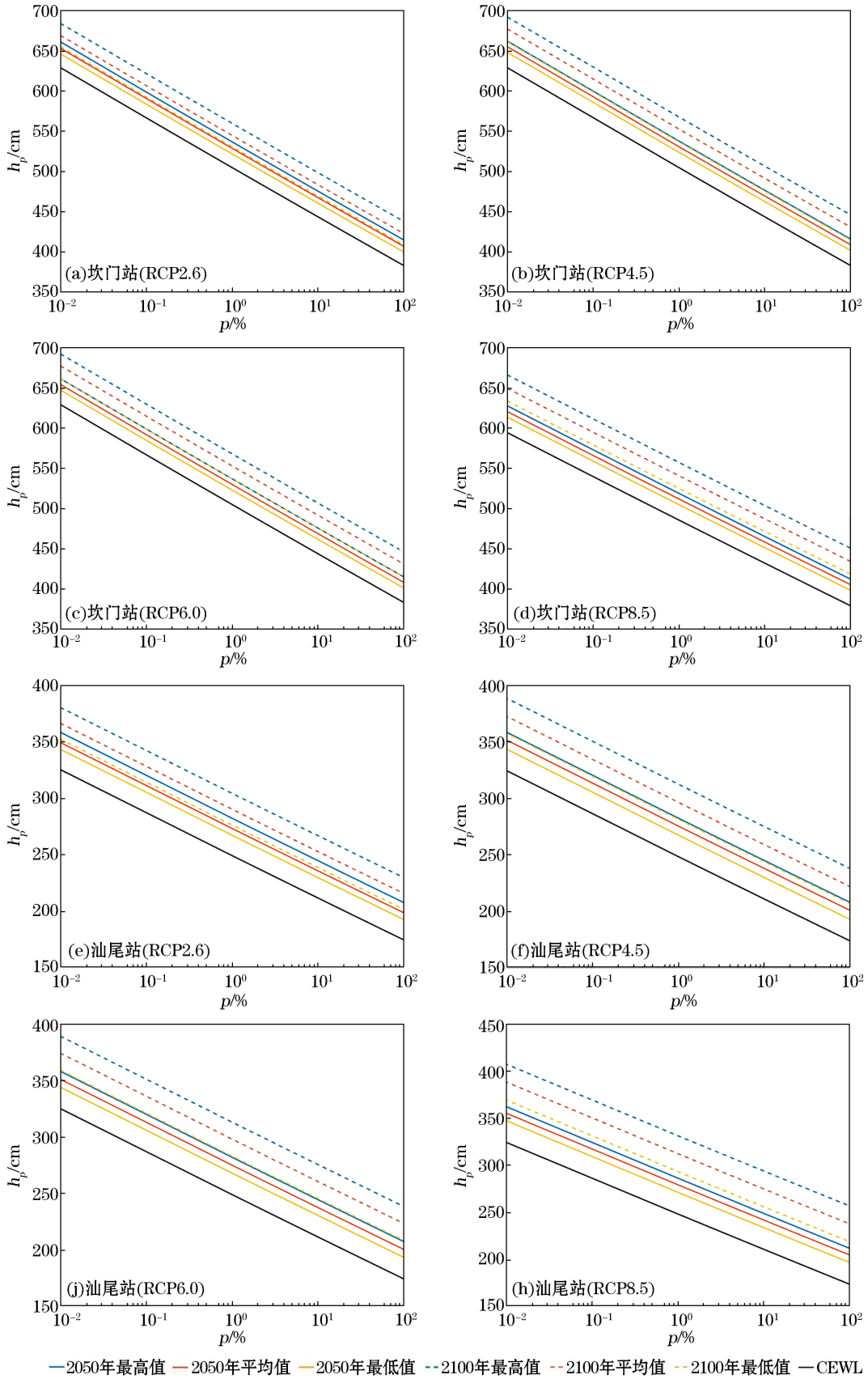


图 5 4 个 RCP 情景下的坎门站和汕尾站的 SEWL 频率曲线

Fig.5 SEWLs for Shanwei and Kanmen Stations under the four RCP scenarios

### 3.4 海平面变化下重现期的变化

不同程度的海平面上升对极值水位的重现期影响也不一样。本文计算了从当前极值水位到 RCP 情景下极值水位重现期的变化,并且对比了相同极值水位下当前极值水位重现期与 RCP 情景下极值水位的变化,如表 4 所示。由表 4 可以看出,随着海平面的上升,RCP 情景下极值水位的重现期相比于当前极值水位重现期会显著缩短,2100 年的下降趋势比 2050 年更为显著。在 RCP8.5(高水平)情景下,当前极值水位重现期为 50 a 的水位在 2050 年将变为 8 a 一次,到 2100 年将会变为 1 a 一次。同样,当前极值水位重现期为 100 a 的水位在 2050 年将变为 17 a 一次,到 2100 年将会变为 2 a 一次。对于当前极值水位重现期为 1 000 a 的水位在 2050 年将变为 172 a 一次,到 2100 年将会变为 25 a 一次。此外,其他 RCP 情景下的不同 3 个级别的重现期变化也将显著缩短,这意味着随着海平面的上升,重现期较长的极值水位将更加频繁地发生。

表 4 SEWL 的平均重现期

Table 4 Averaged recurrence periods of the SEWLs

年 份	CEWL 重现期/a	RCP2.6			RCP4.5			RCP6.0			RCP8.5		
		最低值	平均值	最高值	最低值	平均值	最高值	最低值	平均值	最高值	最低值	平均值	最高值
2050 年	1 000	466	328	224	399	298	217	428	312	224	361	250	172
	500	223	163	112	199	148	108	214	155	112	180	125	86
	200	89	65	44	79	59	43	85	62	44	72	50	34
	100	44	32	22	40	29	21	42	31	22	36	25	17
	50	22	16	11	20	15	11	21	15	11	18	12	8
2100 年	1 000	293	159	81	224	115	56	219	110	56	126	56	25
	500	146	79	40	112	57	28	109	55	28	63	28	12
	200	58	31	16	44	23	11	43	22	11	25	11	5
	100	29	16	8	22	11	5	22	11	5	12	5	2
	50	15	8	4	11	6	3	11	5	3	6	3	1

## 4 结 论

将未来的海平面上升高度与当前极值水位相结合,通过 P-III 模型重新计算极值水位,并计算其重现期,将当前极值水位的重现期与 RCP 情景下极值水位的重现期进行对比,分析海平面上升对极值水位重现期的影响。以中国沿海为例,研究结果表明:由于气候变化引起的海平面上升,极端水位的重现期明显缩短;具体来说,当前极值水位和 RCP 情景下极值水位在不同时间尺度的 RCP 情景和每个 RCP 情景中的水位之间的变化表明了海平面上升对极值水位的变化有显著的影响。重现期在 RCP8.5 情景下缩短最为显著;例如,对 RCP8.5 下的高水平的预测,即使是目前概率很低的当前极值水位千年一遇事件,在 RCP8.5(高水平)情景下 2050 年将会变成 172 a 一遇;这表明由海平面上升导致的极值水位重现期的显著缩短将会使沿海地区的风险将显著增加。

本文计算极值水位的方法仍有一些可以改进的地方,在计算 RCP 情景下极值水位时使用的海平面上升数据为全球海平面上升高度数据,由于海平面上升的全球分布在空间上是不均匀的,在研究特定区域的极值水位重现期受海平面上升的影响时,使用特定海域的海平面上升数据能够得到更为精确的结果。

## 参考文献 (References):

- [1] FANG G H, WANG J, JIA S D, et al. A method for estimating extreme sea levels based on tide-surge joint probability in ocean engineering[J]. *Studia Marina Sinica*, 1993: 4-33. 方国洪, 王骥, 贾绍德, 等. 海洋工程中极值水位估计的一种条件分布联合概率方法[J]. *海洋科学集刊*, 1993: 4-33.
- [2] YU Y F, YU Y X. The effect of long-term sea-level variation on calculating the extreme water levels of multiyear return periods[J]. *Haiyang Xuebao*, 2003(3): 1-7. 于宜法, 俞聿修. 海平面长期变化对推算多年一遇极值水位的影响[J]. *海洋学报*, 2003(3): 1-7.
- [3] YU Y F, LIU L, LI L. The influence of monthly mean-sea-level variation on design water level: recommending a kind of method for calculating design water level[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(9): 5-15. 于宜法, 刘兰, 李磊. 月平均海平面变化对设计水位的影响——推荐一种计算设计水位的方法[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(9): 5-15.
- [4] YU Y F, LIU L, GUO M K, 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. 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(自然科学版)*, 2010, 40(6): 27-35.
- [5] ZUO J C, YU Y F, BAO X W, et al. Effect of sea level variation on calculation of design water level[J]. *China Ocean Engineering*, 2001, 15(3): 383-394.
- [6] Water Transportation Bureau, Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. 交通运输部水运局. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [7] PUGH D T, VASSIE J M. Extreme sea levels from tide and surge probability[C]//16th International Conference on Coastal Engineering. Hamburg, New York, USA, 1978, 1: 911-930.
- [8] MARCOS M, ROHMER J, VOUSDOKAS M, et al. Increased extreme coastal water levels due to the combined action of storm surges and wind waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(8): 4356-4364.
- [9] KARIM M F, MIMURA N. Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh[J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(3): 1-500.
- [10] PIRAZZOLI P A, TOMASIN A. Estimation of return periods for extreme sea levels: a simplified empirical correction of the joint probabilities method with examples from the French Atlantic coast and three ports in the southwest of the UK[J]. *Ocean Dynamics*, 2007, 57(2): 91-107.
- [11] MENÉNDEZ, MELISA, WOODWORTH P L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C10): C10011-1-C10011-15. DOI: 10.1029/2009JC005997.
- [12] CUBASCH U, WUEBBLES D, CHEN D, et al. Climate change 2013: the physical science basis. contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change[J]. *Computational Geometry*, 2013, 18(2): 95-123.
- [13] ALLEN S K, PLATTNER G K, NAUELS A, et al. Climate change 2013: the physical science basis. an overview of the working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[J]. *Computational Geometry*, 2007, 18(2): 95-123.
- [14] QIN D H, THOMAS S, 259 AUTHORS, et al. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10(1): 1-6. 秦大河, Stocker Thomas, 259 名作者, 等. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 1-6.
- [15] SANTANARUA A S, VAFEIDIS A T. Are extreme skew surges independent of high water levels in a mixed semidiurnal tidal regime? [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(12): 8877-8886.
- [16] WU S, FENG A, GAO J, et al. Shortening the recurrence periods of extreme water levels under future sea-level rise[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(10): 2573-2584.
- [17] DANIEL A S, SUZANA J C, ADAM H S, et al. Characteristics of tropical cyclones in high-resolution models in the present climate[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 6(4): 1154-1172.
- [18] KOPP R E, HORTON R M, LITTLE C M, et al. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites[J]. *Earth's Future*, 2014, 2(8): 383-406.
- [19] LITTLE C M, HORTON R M, KOPP R E, et al. Joint projections of US East Coast sea level and storm surge[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(12): 1114-1120.
- [20] KATHERINE A S, PETER R, PATRICK L, et al. The influence of shelf bathymetry and beach topography on extreme total water



levels: Linking large-scale changes of the wave climate to local coastal hazards[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 150: 1-17.

## Effects of Sea-Level Rise on the Recurrence Periods of Extreme Water Levels in Coastal Areas of China

ZHUANG Yuan, JI Qi-yan, ZUO Jun-cheng, LI Zhi-long, LUO Feng-yun

(*Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China*)

**Abstract:** Based on the data of 10 tide-gauge stations along the coasts of China, the effects of sea-level rise on the recurrence of extreme water level of China's coastal areas in the 21st century under the Representative Concentration Pathway (RCP) scenario were explored with the Pearson III (P-III) model. The results show that sea level rise may significantly shorten the recurrence of extreme water level. Under the RCP8.5 scenario, the recurrence of extreme water level was shortened most significantly. The once-in-a-century extreme water level at the 10 tide stations are estimated to change to recurrence periods of 9–43 years by 2050 and 1–18 years by 2100. In generally, the current low probability events of extreme water level is expected to be common by 2100. Under the RCP8.5 scenario, the 1 000-year recurrence period will be shortened to almost 200 years by 2100.

**Key words:** recurrence period; extreme water level; sea level rise; coast of China; climate change; risk management

**Received:** July 14, 2019