

王慧, 全梦媛, 徐卫青, 等. 中国沿海和近海海平面上升预测[J]. 海洋学报, 2023, 45(8): 1–10, doi:10.12284/hyxb2023096

Wang Hui, Quan Mengyuan, Xu Weiqing, et al. Sea level rise projection in China's coastal and offshore areas[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(8): 1–10, doi:10.12284/hyxb2023096

中国沿海和近海海平面上升预测

王慧¹, 全梦媛¹, 徐卫青², 相文玺^{1*}, 李文善¹, 江羽西¹

(1. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 2. 上海交通大学 密歇根学院, 上海 200240)

摘要: 本文利用验潮站观测和卫星高度计数据, 以及基于筛选的 CMIP6 的 10 个模拟性能较好的地球系统模式结果, 对中国海平面的长期变化趋势, 以及未来上升幅度进行了分析和预测。结果显示: (1) 1960–2021 年, 中国沿海海平面呈加速上升趋势, 上升速率为 2.5 mm/a, 加速度为 0.06 mm/a²; 1993–2021 年上升速率为 4.0 mm/a, 高于全球同期 3.3 mm/a 的上升值。(2) 1980–2021 年, 渤、黄海, 东海和南海沿海海平面上升速率分别为 3.5 mm/a、3.3 mm/a 和 3.6 mm/a, 渤、黄海和南海沿海海平面上升速率较快, 东海偏慢; 渤、黄海沿海海平面在 20 世纪 60–70 年代上升较慢, 80 年代之后上升加快。(3) 在中等情景 (SSP2-4.5) 和高情景 (SSP5-8.5) 下, 2050 年中国近海海平面将上升 0.22 m (0.19~0.28 m) 和 0.24 m (0.21~0.33 m); 到 2100 年, 中国近海海平面将上升 0.59 m (0.47~0.80 m) 和 0.83 m (0.64~1.09 m)。(4) 2021–2040 年, 统计预测的海平面上升中值略接近数值模式低、中和高情景预测值。2041–2060 年, 数值模式低、中和高情景预测值均介于统计预测的中值和高值之间。2081–2100 年, 统计预测的海平面上升高值与数值模式中情景预测值接近, 绝对偏差为 0.017 m, 相对偏差为 3.4%。(5) 高情景下, 2100 年现有 100 年一遇的极端高海面将变为不足 10 年一遇, 其中超过 50% 的站点将变为不足两年一遇, 沿海防护工程等基础设施的防御能力降低, 复合型滨海城市洪涝等灾害事件的风险增加。

关键词: 气候变化; 海平面; 上升趋势; 预测

中图分类号: P714⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)08-0001-10

1 引言

从全球气候变化来看, 自 1750 年以来, 由人类活动造成的温室气体浓度增加导致大气、海洋和冰冻圈均发生了广泛而迅速的变化。近 50 年, 海水增温膨胀, 陆源冰川和极地冰盖加速融化, 全球平均海平面加速上升^[1-2]。全球几乎所有冰川均在退缩, 1993–2019 年, 全球冰川质量损失了 6 200 Gt, 相当于为全球平均海平面上升贡献了 17.1 mm 的量^[3]。1901–2018 年冰川冰盖质量损失对全球海平面上升的贡献总计约 70%^[1]。南北极冰盖对海平面上升的贡献呈现逐渐

增加的趋势, 1971–2018 年的贡献为 23.8%, 2006–2018 年变为 27.5%^[1]。自 20 世纪 80 年代以来, 海洋热膨胀对海平面上升贡献总体呈现降低的趋势, 1971–2018 年的贡献约为 50%, 2006–2018 年变为 38.6%, 其中大部分贡献来自于 700 m 以上的上层海洋^[4-5]。19 世纪中叶以来, 全球海平面上升速率远高于过去 2 000 年的平均上升速率, 且在 20 世纪以来呈加速上升趋势^[6-7]。自 1900 年以来, 海平面上升速率超过 3 000 年内的任何一个世纪^[1]。1901–2010 年全球平均海平面上升 19 cm, 上升速率为 1.7 mm/a^[6], 1970–2015 年全球平均海平面上升速率为 2.1 mm/a^[8]。全球海平面上升

收稿日期: 2022-11-28; 修订日期: 2023-03-30。

基金项目: 国家重点研发计划课题。

作者简介: 王慧 (1972—), 女, 山东省临沂市人, 研究员, 研究方向为潮汐、海平面与气候变化。E-mail: wh_cherry@126.com

* 通信作者: 相文玺, 研究员, 研究方向为海洋管理、海洋信息技术等。E-mail: xwx@nmdis.org.cn

存在区域差异,热带西太平洋海平面上升速率较快,热带东太平洋海平面存在微弱下降趋势,区域差异可达全球平均的 $\pm 30\%$,主要来自于陆地冰损失、海洋热膨胀、环流变化以及陆地垂直运动等的影响^[8-12]。

未来海平面的变化与人类社会的发展路径密切相关,至 21 世纪末,由于海洋持续变暖和冰川冰盖加速融化,海平面将持续上升,并且在百年至千年时间尺度上不可逆转^[13-14]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告显示,在中排放情景和高排放情景下,与 1995-2014 年相比,2100 年全球平均海平面分别上升 0.44~0.76 m 和 0.63~1.01 m;考虑到冰盖过程的不确定性,高排放情景下,2100 年和 2150 年全球海平面上升幅度甚至可能达到 2 m 和 5 m。全球平均海平面上升将导致大多数地区的极端海面事件发生频率增加,到 2100 年,超过 50% 的验潮站百年一遇极端海面事件将变为一年一遇甚至更为频繁^[8]。如果全球平均海平面相对于 2020 年上升 0.15 m,预估可能遭受百年一遇的沿海洪水的人口将增加约 20%;海平面上升 0.75 m 时,该暴露群体会翻 1 倍,在上升 1.4 m 时翻 3 倍,沿海居民和沿海生态系统面临着不断升级的海平面上升风险^[15]。受区域海洋大气动力过程、地面沉降和淡水通量等因素的影响,海平面变化存在区域差异。我国近海位于海平面上升速率相对较高的西北太平洋区域,面临的海平面上升影响风险更大。

近年来,众多学者利用区域海洋模式或者 CMIP5 模式结果预测了中国海海平面变化。陈长霖^[16]将动力与比容海平面高度相叠加,得到总的海平面,结果表明,与 2000-2009 年平均海平面相比,到 21 世纪末,东海海平面将上升 12~20 cm;渤海海平面上升幅度较大,达 17 cm;黄、东海东部朝鲜半岛沿岸上升 16 cm 以上,南黄海和东海的中国沿岸上升约 13 cm。罗风云^[17]指出与 2010-2020 年平均值相比,2090-2100 年东海区域平均海平面在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下将分别上升 344 mm(178~520 mm)、433 mm(238~648 mm)和 630 mm(358~949 mm)。张吉等^[18]研究发现,与 1990-2000 年相比,RCP4.5 情景下 2090-2100 年南海平均海平面上升了 15~39 cm;如果加上格陵兰和南极等陆地冰川消融的影响,21 世纪南海海平面上升值将可能达到 35~75 cm。Huang 和 Qiao^[19]仅考虑了动力和比容海平面高度对南海未来海平面变化的贡献,发现与 1986-2005 年相比,在低、中和高排放情景下,2081-2100 年南海海平面分别上升 40.9 cm、48.6 cm 和 64.1 cm。王慧等^[20]综合考虑了动力高度、比容高度以及海水质量的贡献

后,得到有关中国近海未来海平面变化的预估结果:与 1986-2005 年相比,RCP8.5 情景下 2100 年中国近海平均海平面将上升 0.52~1.09 m,渤、黄海平均海平面将上升 0.41~1.14 m,东海平均海平面将上升 0.47~1.22 m,南海平均海平面将上升 0.49~1.09 m。刘睿等^[21]研究发现,21 世纪东海和南海海平面高度都呈现连续上升趋势,东海和南海地区上升幅度略小于全球平均,南海上升幅度略大于东海。

目前,这些研究多基于第五次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)提供的模式实验结果,很少有学者研究新的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)下中国近海海平面的变化,且关于中国沿海海平面未来变化预测的结论也较少。IPCC 第六次评估报告提供了新情景下全球海平面变化的数据,也提供了有关全球不同区域的海平面变化结果,但没有针对中国海海平面的变化进行详细的研究。因此,本文利用卫星高度计和验潮站观测数据,以及 CMIP6 地球系统模式结果,对中国近海和沿海海平面的长期变化趋势,以及未来不同尺度下的海平面上升幅度进行分析和预测,相关结论可为科学应对气候变化及海平面上升影响,减轻海岸带灾害风险,提升韧性应对能力提供参考。

2 数据和方法

2.1 数据

本文使用了国家海洋观测网 36 个长期海洋站潮位观测数据,这些站点均匀分布于中国沿海,其中渤、黄海沿海分布 15 个验潮站,东海分布 10 个站,南海分布 11 个站。资料时段为 1960 年 1 月至 2021 年 12 月,各站的潮位资料均经过质控、插补和均一性订正处理^[22]。网格化海平面高度数据来源于法国国家空间中心(National Centre for Space Studies, CNES) AVISO 数据中心提供的融合多颗卫星高度计的海平面异常月平均产品,该产品融合了 1993 年以来的 Topex/Poseidon、ERS、Envisat、Jason、HY 等系列卫星的测高资料,产品的空间分辨率为 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$,时间间隔为 1 个月。本文所用数据的时间跨度为 1993 年 1 月至 2021 年 12 月,空间范围覆盖中国近海($0^\circ \sim 50^\circ\text{N}$, $100^\circ \sim 150^\circ\text{E}$)。另外,从 36 个长期海洋站中选取了 15 个代表性较好的站点潮位观测数据,用于计算极端海面重现期。

动力海平面(zos)和比容海平面(zostoga)高度数据来源于第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)的 15 组地球系统模式,这些模式来自全球 9 个机构,数据集时段为

1986–2100年。本文中用于研究格陵兰冰盖、南极冰盖、陆地冰川融化以及陆地水等海水质量变化对中国海平面变化贡献的数据来源于政府间气候变化专门委员会第五次和第六次评估报告(IPCC-AR5、IPCC-AR6),数据可以从德国汉堡大学综合气候中心网站和美国国家航空航天局下载得到,整合以后数据长度为1986–2100年。

在IPCC第六次评估周期中,综合考虑社会经济发展与温室气体排放的关系,以及组合情景的代表性,主要采用了SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5共5种情景。本文主要分析研究了SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5 3种情景下,中国沿海和近海海平面至21世纪末的上升幅度。

2.2 方法

2.2.1 比容海平面计算方法

全球平均海平面变化是海洋密度变化(比容海平面变化)以及冰冻圈或陆地水储量变化(质量贡献海平面变化)导致的海洋体积变化总和^[23]。比容海平面高度反映的是由于海水温度和盐度变化引起海水体积变化,主要由热比容海平面变化和盐比容海平面变化组成,比容海平面的计算公式为

$$\Delta h_s = \int_{-H}^{\eta} \frac{\rho(T_c, S_c, p) - \rho(T, S, p)}{\rho(T_c, S_c, p)} dz, \quad (1)$$

式中, η 为自由表面高度; H 为水深; T 、 S 、 p 分别为温度、盐度和气压; T_c 、 S_c 是模式历史实验中温度和盐度的气候态平均值^[19,21,24]。

2.2.2 集合预测

本文多模式集合预测采用等权重的算术平均进行计算,公式为

$$MME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i, \quad (2)$$

式中, F_i 为第*i*个模式的预测值; N 为参与集合的模式总数^[25]。

2.2.3 统计预测方法

本文基于历史观测数据,考虑到海平面变化的线性趋势项和显著周期项,采用调和函数外推方法,建立中国沿海海平面上升分析预测的模型,表达式为

$$Y(t) = A_0 + Bt + \sum_{i=1}^k C_i \cos(\sigma_i t - \phi_{i0}) + \varepsilon_i, \quad (3)$$

式中, A_0 为初始年份的海平面; t 为时间; B 为海平面线性变化速率; σ_i 、 C_i 、 ϕ_{i0} 为第*i*周期的角速率、振幅与初相角; ε_i 为随机部分^[26–27]。

3 海平面变化

3.1 中国近海海平面变化

卫星高度计资料分析显示,1993–2021年,南半球海平面上升速率总体高于北半球,太平洋西部海平面上升速率总体高于东部。赤道太平洋西部、北太平洋北部(30°~50°N)、南太平洋中高纬度(30°~50°S)大部、南大西洋南部(30°~50°S)海域海平面上升速率较高,达4~8 mm/a。中国近海总体位于海平面上升较快的西北太平洋区域。其中,中国西沙群岛周边海域海平面上升速率较高,为6~7 mm/a,南沙群岛周边海域海平面上升速率为3~4 mm/a;北部湾、台湾海峡海平面上升速率相对较低,为2~3 mm/a(图1)。

1993–2021年,中国近海海平面上升速率为

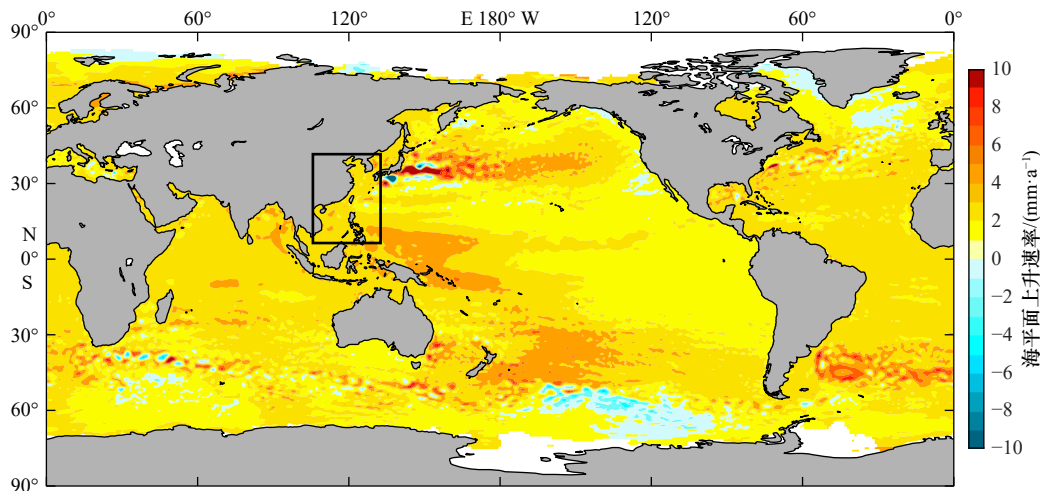


图1 1993–2021年全球(80°S~80°N)卫星高度计海平面上升趋势空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of global (80°S–80°N) satellite altimetry sea level rise trend from 1993 to 2021

图中黑色框形为本研究选取的中国近海区域

Black box is the China offshore region

3.8 mm/a, 高于同期全球 3.3 mm/a 的平均水平, 但低于中国沿海 4.0 mm/a 的上升速率。中国近海海平面年代际变化明显, 伴随着 2~7 年的显著周期振荡, 1993–1999 年、2004–2008 年和 2015–2020 年上升较快,

升幅分别约为 87 mm、78 mm 和 73 mm。2001–2002 年和 2013–2015 年下降明显, 降幅分别为 41 mm 和 60 mm。2021 年, 中国近海海平面达卫星观测记录以来最高, 较 1993–2011 年平均值高 96 mm(图 2)。

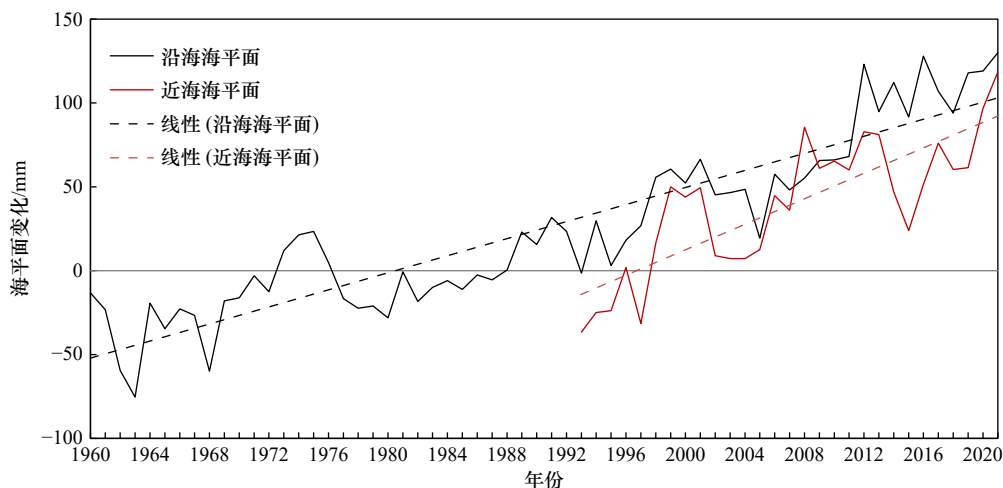


图 2 1960–2021 年中国沿海和近海海平面长期变化

Fig. 2 Long term changes of China's coastal and offshore areas sea level during 1960–2021

3.2 中国沿海海平面变化

沿海长期验潮站观测结果分析显示, 中国沿海海平面变化具有明显的趋势性和波动性特征, 总体呈上升趋势。1960–2021 年中国沿海海平面上升速率为 2.5 mm/a, 1970–2021 年中国沿海海平面上升速率为 2.7 mm/a, 1963 年海平面处于近 60 年来最低位, 1980–2021 年中国沿海海平面上升速率为 3.4 mm/a, 1993–2021 年中国沿海海平面的上升速率为 4.0 mm/a, 呈现出明显的加速, 1960–2021 年加速度为 0.06 mm/a^2 。由于选取的资料长度和区域的不同, 海平面的周期性变化特点存在差异, 中国沿海海平面变化伴随着 2~3 年、4~7 年、准 9 年和准 19 年的显著周期振荡, 沿海海平面在 1975 年和 2001 年前后出现过两次小高峰, 2012 年起, 海平面抬升明显, 2012 年海平面较 2011 年海平面高 54 mm, 2012–2021 年, 海平面一直处于高位波动, 其中 2021 年海平面为 1970 年以来的最高(图 2)。

1960–2021 年, 渤海、黄海, 东海和南海沿海海平面均呈上升趋势。由于沿海地面沉降以及区域水动力过程等因素影响, 各海区沿海海平面上升速率存在差异。1960–2021 年, 渤海、黄海, 东海和南海海平面上升速率分别为 2.1 mm/a、2.5 mm/a 和 2.8 mm/a, 南海沿海海平面上升速率最快, 渤海、黄海最慢; 1970–2021 年, 渤海、黄海, 东海和南海海平面上升速率分别为 3.5 mm/a、3.3 mm/a 和 3.6 mm/a, 渤海、黄海和南海沿海海平面上升速率均较快, 东海最慢; 1993–2021 年,

渤海、黄海, 东海和南海海平面上升速率分别为 4.1 mm/a、4.4 mm/a 和 3.7 mm/a。渤海、黄海沿海海平面在 20 世纪 60–70 年代上升较慢, 80 年代之后上升加快, 南海沿海海平面在 20 世纪 90 年代之后上升速率慢于渤海、黄海和东海沿海(图 3)。

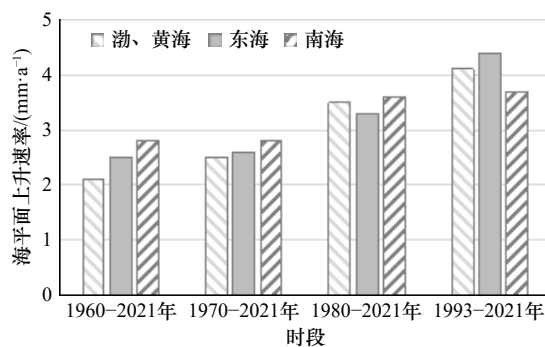


图 3 渤海、黄海, 东海和南海沿海不同时期海平面长期变化趋势

Fig. 3 Long term change trend of sea level in the Bohai Sea and Yellow Sea, East China Sea and South China Sea in different periods

4 海平面变化预测

4.1 中国近海海平面上升预测

综合考虑海平面的动力高度、比容高度以及海水质量变化贡献, 分别计算得到各模式中国近海 ($0^\circ \sim 42^\circ \text{N}$, $100^\circ \sim 135^\circ \text{E}$) 未来海平面变化预估结果。为了检验这些预估结果的可靠性, 首先使用验潮

站观测数据和卫星高度计数据对1993–2021年的历史模拟数据进行准确性验证。以广西涠洲海域为例,欧洲地球系统模式联盟(EC-Earth3)模式模拟的海平面变化与卫星、验潮站观测数据在趋势性、波动性方面均具有良好的一致性。1993–2021年,模式模拟的海平面上升速率与卫星观测结果一致,均为4.4 mm/a,

略高于验潮站观测结果。同时,2006年、2012年和2017年中国沿海海平面异常偏高,模式模拟结果较为合理地反映了这些异常波动。在广东大万山沿海,1993–2021年模式模拟的海平面上升速率为4.5 mm/a,介于验潮站、卫星观测的海平面上升速率之间,偏差为±0.5 mm/a(相对偏差小于15%)(图4)。

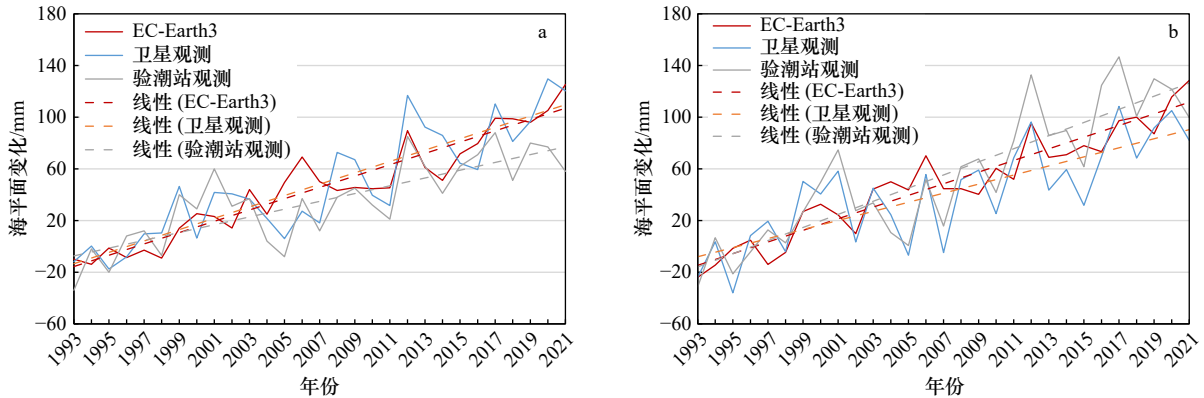


图4 1993–2021年,EC-Earth3模式在涠洲(a)和大万山(b)海域历史海平面模拟结果与观测数据对比
Fig. 4 Comparison of historical sea level simulation results of EC-Earth3 model and observation data in Weizhou (a) and Dawanshan (b) sea areas from 1993 to 2021

从准确性检验评估结果来看,有10组模式模拟结果与实测数据的相关性较好,相关系数均高于0.6,其中来自欧盟(EC-Earth3)、法国(CNRM-CM6、CNRM-ESM2)等3组模式相关系数均在0.67以上。另外7组模式相关系数在0.62~0.67之间,也通过了99.9%的显著性检验,说明这些模式对中国近海历史海平面的回报结果合理性较高。其余5组模式(NorESM2-MM、ACCESS-ESM1-5、MIROC6、MPI-ESM1-2-LR、NorESM2-LM)的模拟结果与实测值相关系数在0.38~0.56之间,在中国近海模拟性能偏差(表1),这与模式的分辨率有一定关系。

采用多模式集合平均的方法对10组最优模式的海平面预估结果进行计算,预测未来不同情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)中国近海(0°~42°N, 100°~135°E)海平面上升幅度。并将中国近海区域划分为渤、黄海(32°~42°N, 117°~128°E),东海(23°~32°N, 116°~135°E)和南海(0°~23°N, 100°~121°E)3个海区,进而针对不同海区展开研究。其中,模式集合预测值的中值、17%~83%的可能范围的下限和上限分别作为未来海平面上升预测的中值、低值和高值。

预测结果显示,中国近海海平面在21世纪呈加速上升趋势,SSP5-8.5情景下,相对于1995–2014年的平均值,2100年中国近海平均海平面将上升0.64~1.09 m,渤、黄海平均海平面将上升0.67~1.08 m,东

海平均海平面将上升0.69~1.13 m,南海平均海平面将上升0.64~1.07 m(表2,图5)。SSP1-2.6情景下,海洋比容加动力因子对中国近海海平面高度的贡献

表1 可应用于中国近海集合预测的CMIP6模型

Table 1 CMIP6 model that can be applied to China offshore collective forecasting

序号	模式	机构	国家/组织	相关系数
1	EC-Earth3	EC-EARTH-Cons	欧盟	0.77
2	EC-Earth3-Veg-LR	EC-EARTH-Cons	欧盟	0.67
3	CNRM-CM6	CNRM	法国	0.70
4	CNRM-ESM2	CNRM	法国	0.69
5	ACCESS-CM2	CSIRO-BOM	澳大利亚	0.67
6	CanESM5	CCCMA	加拿大	0.67
7	IPSL-CM6A-LR	IPSL	法国	0.63
8	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M	德国	0.62
9	CMCC-CM2-SR5	CMCC	意大利	0.66
10	CMCC-ESM2	CMCC	意大利	0.62
11	NorESM2-MM	NCC	挪威	0.55
12	ACCESS-ESM1-5	CSIRO-BOM	澳大利亚	0.56
13	MIROC6	MIROC	日本	0.53
14	MPI-ESM1-2-LR	MPI-M	德国	0.39
15	NorESM2-LM	NCC	挪威	0.38

为 38%，冰川冰盖消融等海水质量部分的贡献为 62%；SSP2-4.5 情景下，二者对中国近海海平面高度的贡献分别为 39% 和 61%；SSP5-8.5 情景下，二者对中国近海海平面高度的贡献分别为 40% 和 60% (表 3)。

4.2 中国沿海海平面上升预测

受到局地地面沉降、近海水动力过程以及入海径

表 2 中国和各海区海平面上升预测值 (单位: m)

时间	2050年			2100年			
	情景	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
渤、黄海	低	0.16	0.17	0.20	0.30	0.47	0.67
	中	0.20	0.21	0.24	0.46	0.56	0.82
	高	0.26	0.27	0.33	0.63	0.76	1.08
东海	低	0.18	0.19	0.21	0.32	0.49	0.69
	中	0.23	0.22	0.25	0.49	0.61	0.86
	高	0.29	0.28	0.32	0.67	0.81	1.13
南海	低	0.15	0.18	0.20	0.32	0.48	0.64
	中	0.20	0.21	0.24	0.48	0.59	0.81
	高	0.22	0.27	0.32	0.65	0.80	1.07
中国近海	低	0.16	0.19	0.21	0.31	0.47	0.64
	中	0.21	0.22	0.24	0.47	0.59	0.83
	高	0.26	0.28	0.33	0.64	0.80	1.09

注: 相对于 1995–2014 年平均海平面。

流等共同作用, 中国沿海海平面未来上升幅度存在明显的空间差异^[20]。基于中国沿海近 60 年海平面变化的周期性、趋势性等规律, 采用调和模型进行外推预测。使用实测数据对历史回报结果进行准确性检验, 均方根误差为 0.018 m, 相关系数为 0.94。以省级行政区为预测单元, 对 2030 年、2050 年、2060 年和 2100 年的沿海海平面上升值进行预测。

预测结果显示, 中国沿海海平面在 21 世纪呈持续上升趋势, 与 1995–2014 年的平均海平面高度相比, 中国沿海 2030 年、2050 年、2060 年和 2100 年海平面上升值分别为 0.10 m (0.06~0.18 m)、0.17 m (0.10~0.29 m)、0.20 m (0.12~0.34 m)、0.34 m (0.22~0.55 m)。天津、海南、山东、江苏、上海和浙江沿海海平面上升预测值最高, 2050 年海平面上升中值在 0.17~0.26 m 之间, 2100 年为 0.37~0.47 m; 辽宁、河北、广东沿海次之, 2050 年各省海平面上升中值在 0.16~0.17 m 之间, 2100 年在 0.30~0.32 m 之间; 广西和福建沿海上升偏缓, 2050 年海平面上升中值在 0.10~0.12 m 之间, 2100 年在 0.22~0.27 m 之间 (表 4)。

对统计预测和集合预测的中国未来海平面预估结果进行比较。比较中, 数值模式结果使用了 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 3 种情景, 统计预测结果使用了中值和高值。从统计预测中值曲线 (浅灰色虚线) 可以看出, 2021–2040 年 (近期), 统计预测的海平面上升中值略接近数值模式低 (SSP1-2.6)、中 (SSP2-4.5) 和高 (SSP5-8.5) 情景预测值。2041–2060 年 (中

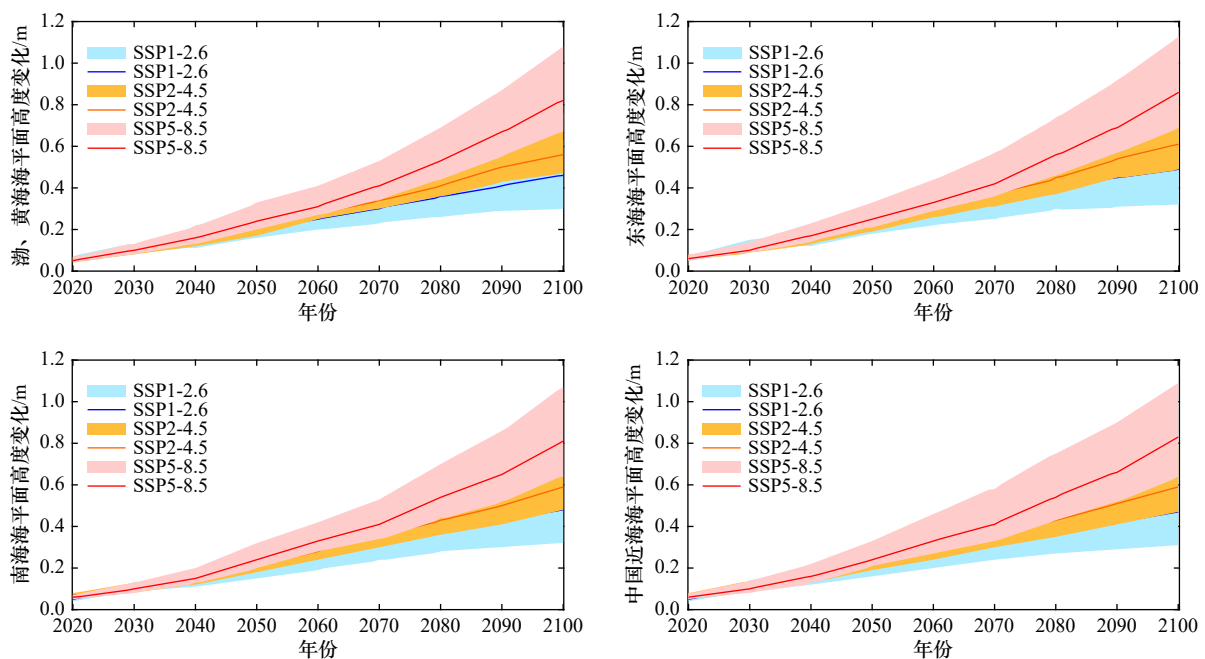


图 5 中国近海及各海区海平面上升预测 (相对于 1995–2014 年)

Fig. 5 Prediction of sea level rise in China's offshore and various sea areas (relative to 1995–2014)

表3 3种SSPs情景下2100年中国近海海平面预测(相对于1995–2014年,单位:m)

Table 3 Predictions of China's offshore sea level in 2100 under three SSP scenarios (relative to 1995–2014, unit: m)

	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
比容加动力(贡献)	0.18(38%)	0.23(39%)	0.33(40%)
质量贡献(贡献)	0.29(62%)	0.36(61%)	0.50(60%)
总计	0.47	0.59	0.83

表4 中国沿海各省(自治区、直辖市)未来海平面变化预测(单位:m)

Table 4 Predictions of future sea level change in China's coastal provinces (autonomous regions and municipalities) (unit: m)

行政区	2030年	2050年	2060年	2100年
辽宁	0.11	0.17	0.18	0.30
河北	0.12	0.17	0.19	0.32
天津	0.18	0.26	0.27	0.47
山东	0.11	0.18	0.22	0.37
江苏	0.10	0.17	0.20	0.37
上海	0.11	0.18	0.22	0.37
浙江	0.11	0.18	0.21	0.37
福建	0.08	0.12	0.15	0.27
广东	0.10	0.16	0.19	0.32
广西	0.06	0.10	0.12	0.22
海南	0.12	0.20	0.21	0.38
全海域(低)	0.06	0.10	0.12	0.22
全海域(中)	0.10	0.17	0.20	0.34
全海域(高)	0.18	0.29	0.34	0.55

注:相对于1995–2014年平均海平面。

期),数值模式低、中和高情景预测值均介于统计预测的中值和高值之间。2081–2100年(远期),统计预测的海平面上升高值与数值模式中情景预测值接近,绝对偏差为0.017 m,相对偏差为3.4%(图6)。

5 极端海面重现期变化

高海平面抬升风暴潮增水的基础水位,顶托下泄洪水,放大海洋灾害的致灾效应,加剧致灾程度。海平面的加速度上升导致局地百年一遇事件发生频次将增多^[4]。

从中国沿海15个代表站极端高海面重现期变化分析结果看,在SSP2-4.5情景下,2100年现有100年

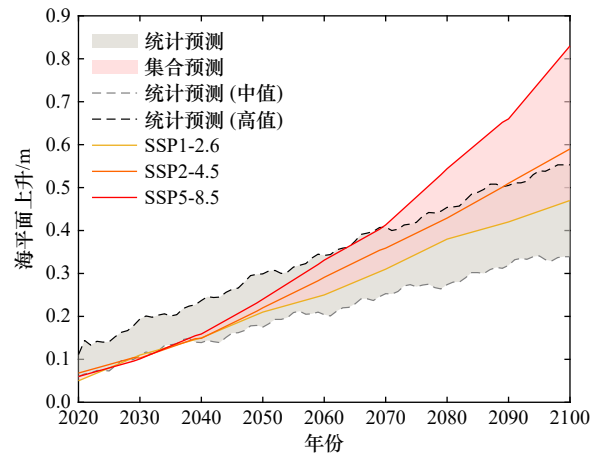


图6 2020–2100年统计预测和集合预测结果比较

Fig. 6 Comparison of statistical prediction and numerical prediction results from 2020 to 2100

一遇的极端高海面均变为不足20年一遇,其中73.3%的站点变为不足10年一遇。在SSP5-8.5情景下,2100年现有100年一遇的极端高海面将变为不足10年一遇,其中超过50%的站点将变为不足两年一遇。对于沿海潮差较小的区域,极端海面重现期的变化对于海平面上升情景响应较强,如辽东湾西部葫芦岛和秦皇岛沿海,在SSP2-4.5情景下,原有100年一遇的极端高海面将变为不足10年一遇,SSP5-8.5情景下将变为不足两年一遇;对于沿海潮差较大区域,极端海面重现期的变化对海平面上升情景响应偏弱,如浙江镇海和坎门沿海,在SSP2-4.5情景下,原有100年一遇的极端高海面将变为不足20年一遇,SSP5-8.5情景下将变为不足10年一遇(表5)。极端高海面重现期缩短将导致沿海防护工程、港口码头和防洪排涝等基础设施的防御能力降低,沿海面临的复合型滨海城市洪涝等灾害事件的风险增加。

6 结论

海平面上升是气候变暖的关键指标,也是全球海岸带地区面临的重大风险之一,IPCC第六次评估的特别报告和第一工作组报告中给出了海平面至21世纪末将继续上升,并且将持续百年甚至千年的结论。准确把握不同时间尺度下海平面的变化规律和上升幅度,对于科学应对、防范化解风险具有积极的参考意义。本文基于验潮站观测和卫星高度计数据,分析了近几十年来中国沿海和近海海平面的长期变化趋势,利用统计预测和基于多模式的集合预测方法给出了未来不同时间尺度下中国沿海和近海海平面上升幅度,主要结论如下:

表 5 不同情景和重现期水平下的极端高海面 (单位: m)

Table 5 Extreme high sea level under different scenarios and return periods (unit: m)

序号	验潮站	现代情景			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		100年一遇	20年一遇	10年一遇	100年一遇	20年一遇	10年一遇	100年一遇	10年一遇	2年一遇
1	葫芦岛	2.81	2.66	2.60	3.38	3.23	3.17	3.65	3.44	3.27
2	秦皇岛	1.72	1.52	1.43	2.29	2.09	2.00	2.56	2.27	2.04
3	龙口	2.37	2.03	1.88	2.94	2.60	2.45	3.21	2.72	2.33
4	烟台	2.46	2.18	2.06	3.03	2.75	2.63	3.30	2.90	2.58
5	日照	3.13	2.92	2.82	3.70	3.49	3.39	3.97	3.66	3.41
6	吕四	4.85	4.37	4.15	5.46	4.98	4.76	5.73	5.03	4.47
7	大戢山	3.49	3.22	3.11	4.10	3.83	3.72	4.37	3.99	3.68
8	镇海	3.40	2.93	2.73	4.01	3.54	3.34	4.28	3.61	3.08
9	坎门	5.09	4.50	4.24	5.70	5.11	4.85	5.97	5.12	4.45
10	三沙	4.36	4.00	3.85	4.97	4.61	4.46	5.24	4.73	4.32
11	厦门	4.16	3.88	3.75	4.77	4.49	4.36	5.04	4.63	4.30
12	汕尾	2.23	1.93	1.80	2.82	2.52	2.39	3.04	2.61	2.26
13	闸坡	2.88	2.55	2.41	3.47	3.14	3.00	3.69	3.22	2.85
14	海口	2.69	2.20	1.99	3.28	2.79	2.58	3.50	2.80	2.24
15	北海	3.41	3.17	3.06	4.00	3.76	3.65	4.22	3.87	3.60

(1) 中国沿海和近海海平面呈加速上升趋势,且高于同期全球平均水平。1970–2021年,中国沿海海平面上升速率为 2.7 mm/a, 1971–2018年,全球海平面上升速率为 2.3 mm/a; 1993–2021年中国近海海平面的上升速率为 3.8 mm/a, 同期全球平均海平面上升速率为 3.3 mm/a。

(2) SSP5-8.5 情景下, 2100年中国近海海平面将上升 0.64~1.09 m, 其中渤、黄海, 东海和南海海平面将分别上升 0.67~1.08 m、0.69~1.13 m 和 0.64~1.07 m (相对于 1995–2014年的平均值); 动力加比容海平面对中国近海海平面高度的贡献总和为 40%, 海水质量部分对中国近海海平面高度的贡献为 60%。

(3) 在近期(2021–2040年), 中国近海及沿海海平面上升统计预测和数值预测结果基本一致; 在中期(2041–2060年), 数值模式低、中和高情景预测值均介于统计预测的中值和高值之间; 在远期(2081–2100年), 海平面上升幅度受情景影响较大, 统计预测的高值接近中情景下的数值预测值。

(4) 高海平面抬升风暴潮增水的基础水位, 导致极端海面重现期缩短, SSP2-4.5 情景下, 2100年中国沿海代表站现有 100年一遇的极端高海面均变为不足 20年一遇; SSP5-8.5 情景下, 2100年有超过 50%的站点将变为不足两年一遇, 该响应在潮差较小的区域尤为显著。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021: 2391.
- [2] Dangendorf S, Hay C, Calafat F M, et al. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(9): 705–710.
- [3] World Meteorological Organization. State of the global climate 2021[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2022.
- [4] IPCC. Sea level change[M]//Stocker T, Qin D, Plattner G, 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. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1137–1216.
- [5] Oppenheimer M, Glavovic B C, Hinkel J, et al. Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities[M]//Pörtner

- H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019: 321–445.
- [6] IPCC. Summary for policymakers[M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, 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. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 3–29.
- [7] Church J A, White N J. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century[J]. *Surveys in Geophysics*, 2011, 32(4): 585–602.
- [8] IPCC. Summary for policymakers[M]//Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [9] 自然资源部. 2021年中国海平面公报[R]. 北京: 自然资源部, 2022.
Ministry of Natural Resources. 2021 China sea level bulletin[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2022.
- [10] Merrifield M A, Thompson P R, Lander M. Multidecadal sea level anomalies and trends in the western tropical Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(13): L13602.
- [11] Zhang Xuebin, Church J A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(21): L21701.
- [12] Stammer D, Cazenave A, Ponte R M, et al. Causes for contemporary regional sea level changes[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 21–46.
- [13] Gregory J M, Andrews T, Ceppi P, et al. How accurately can the climate sensitivity to CO₂ be estimated from historical climate change?[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(1): 129–157.
- [14] Van Breedam J, Goelzer H, Huybrechts P. Semi-equilibrated global sea-level change projections for the next 10 000 years[J]. *Earth System Dynamics*, 2020, 11(4): 953–976.
- [15] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022: 3056.
- [16] 陈长霖. 全球海平面长期趋势变化及气候情景预测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Chen Changlin. Long term trends in global sea level analyses and predictions[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [17] 罗风云. 21世纪东中国海海平面变化预测研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
Luo Fengyun. Study on sea level changes of the East China Sea for the 21st century[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [18] 张吉, 左军成, 李娟, 等. RCP4.5情景下预测21世纪南海海平面变化[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 21–29.
Zhang Ji, Zuo Juncheng, Li Juan, et al. Sea level variations in the South China Sea during the 21st Century under RCP4.5[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(11): 21–29.
- [19] Huang Chuanjiang, Qiao Fangli. Sea level rise projection in the South China Sea from CMIP5 models[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(3): 31–41.
- [20] 王慧, 刘秋林, 李欢, 等. 海平面变化研究进展[J]. *海洋信息*, 2018, 33(3): 19–25, 54.
Wang Hui, Liu Qiulin, Li Huan, et al. Latest research and progress on sea level change[J]. *Marine Information*, 2018, 33(3): 19–25, 54.
- [21] 刘睿, 刘晓东, 刘恒. 基于CMIP5多模式集合预估东海和南海21世纪海平面高度变化[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(4): 412–428.
Liu Rui, Liu Xiaodong, Liu Heng. Projection of the 21st century sea level change in East China Sea and South China Sea based on CMIP5 model results[J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(4): 412–428.
- [22] 王慧, 刘克修, 范文静. 渤海西部海平面资料均一性订正及变化特征[J]. *海洋通报*, 2013, 32(3): 256–264.
Wang Hui, Liu Kexiu, Fan Wenjing. Data uniformity revision and variations of the sea level of the western Bohai Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(3): 256–264.
- [23] WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993-present[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(3): 1551–1590.
- [24] 李薇, 张学洪, 金向泽. 海洋环流模式中不同近似假设下的海表高度[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(2): 132–141.
Li Wei, Zhang Xuehong, Jin Xiangze. Sea level height on different approximations assumptions in ocean circulation models[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(2): 132–141.
- [25] 黄禄丰, 朱再春, 黄萌田, 等. 基于CMIP6模式优化集合平均预估21世纪全球陆地生态系统总初级生产力变化[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(5): 514–524.
Huang Lufeng, Zhu Zaichun, Huang Mengtian, et al. Projection of gross primary productivity change of global terrestrial ecosystem in the 21st century based on optimal ensemble averaging of CMIP6 models[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(5): 514–524.
- [26] 左军成, 陈宗镛, 周天华. 中国沿岸海平面变化的一种本征分析和随机动态联合模型[J]. *海洋学报*, 1996, 18(2): 7–14.
Zuo Juncheng, Chen Zongyong, Zhou Tianhua. A combined model of intrinsic analysis and stochastic dynamics for sea level changes along the coast of China[J]. *Haiyang Xuebao*, 1996, 18(2): 7–14.
- [27] 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.
Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. Analysis and Prediction of Tides and Tidal Currents[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.

Sea level rise projection in China's coastal and offshore areas

Wang Hui¹, Quan Mengyuan¹, Xu Weiqing², Xiang Wenxi¹, Li Wenshan¹, Jiang Yuxi¹

(1. *National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China*; 2. *University of Michigan Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: Using tide gauge observation, satellite altimeter data, and the result of 10 CMIP6 Earth System Models with good simulation performance, the long-term trend of sea level change in China, and predicts the range of sea level rise in the future are analyzed in this study. The results show that: (1) from 1960 to 2021, the sea level in China's coastal areas showed an accelerated rising trend, with a rise rate of 2.5 mm/a and an acceleration of 0.06 mm/a². From 1993 to 2021, the rise rate was 4.0 mm/a, higher than the global rate of 3.3 mm/a in the same period. (2) From 1980 to 2021, the sea level rise rates of the Bohai Sea and the Yellow Sea, the East China Sea and the South China Sea were 3.5 mm/a, 3.3 mm/a and 3.6 mm/a, respectively. The sea level rise rates of the Bohai Sea and the Yellow Sea, the South China Sea were relatively fast, while the sea level rise rates of East China Sea was slow. The coastal sea level rose slowly from 1960s to 1970s, and accelerated after 1980s in the Bohai Sea and the Yellow Sea. (3) Under the medium (SSP2-4.5) and high (SSP5-8.5) scenarios, China's offshore sea level will rise by 0.22 m (0.19–0.28 m) and 0.24 m (0.21–0.33 m) respectively in 2050, and will rise by 0.59 m (0.47–0.80 m) and 0.83 m (0.64–1.09 m) respectively in 2100. (4) During 2021–2040, the median value of sea level rise predicted by statistics is close to the predicted value under the low, medium and high scenarios of the numerical model. During 2041–2060, the predicted values of the low, medium and high scenarios of the numerical model are between the middle and high values of the statistical prediction. During 2081–2100, the high value of sea level rise predicted by statistics is close to that predicted by the medium scenario of the numerical model, the absolute deviation is 0.017 m, and the relative deviation is 3.4%. (5) Under the high scenario, the existing once-in-a-century extreme high sea level in 2100 will become less than 10 year return period, in which more than 50% of the stations will become less than 2 year return period, the defense capacity of coastal protection works and other infrastructure will be reduced, and the risk of flood and other disaster events in complex coastal cities will increase.

Key words: climate change; sea level; rise trend; prediction