



蔡榕硕,陈幸荣.海洋的变化及其对中国气候的作用[J].中国人口·资源与环境,2020,30(9):9-20. [CAI Rongshuo, CHEN Xingrong. A changing ocean and its impact on climate change in China[J]. China population, resources and environment, 2020, 30(9): 9-20.]

海洋的变化及其对中国气候的作用

蔡榕硕¹ 陈幸荣²

(1. 自然资源部第三海洋研究所,福建 厦门 361005; 2. 国家海洋环境预报中心,北京 100081)

摘要 本文重点分析了气候变化背景下海洋的变化及其对中国气候的作用,评估了中国近海及相邻大洋对气候变化的响应、未来变化及其对中国气候的影响。结果表明:①1958—2018年,特别是1970年代末以来,全球和中国海洋明显变暖,且中国海洋升温高于同时段全球平均,主要归因于黑潮暖水入侵中国近海陆架的年代际增强;在不同气候情景下(温室气体从低到高排放的情景,RCP2.6, 4.5, 8.5)中国近海尤其是东中国海(渤海、黄海和东海)可能成为全球海洋升温最高的海区之一。1970年代中期以来,中国东海和南海海表盐度呈现下降趋势。1970年代末以来,中国近海环流变化显著,黑潮入侵东中国海陆架以及通过吕宋海峡入侵南海出现年代际增强,冬季黄海暖流以及南海上层环流年代际减弱。②20世纪以来,全球海平面上升速率约 1.5 ± 0.4 mm/a,主要贡献来自海水热膨胀和陆地冰川冰盖融化;2006年以来,全球海平面上升明显加速,上升速率达3.6 mm/a。1980年迄今,中国沿海海平面上升速率为3.4 mm/a,高于同时段全球平均;在不同气候情景下海平面将持续上升,当前沿海地区百年一遇极端水位的重现期将显著缩短。③1970年代之后,热带海洋的海温分布如厄尔尼诺信号出现年代际变化,厄尔尼诺显著增强,持续时间更持久;并且,1990年之后,中部型厄尔尼诺趋于频发,发展年夏季长江流域降水偏少、气温偏高,华南降水偏多,次年春季华南降水偏少,而东部型厄尔尼诺的影响则大致相反;未来厄尔尼诺对中国气候的影响预估有较大不确定性。印度洋海盆增暖明显加强,与此相关的是中国东部高温天气频发。1977年以来,全球超强台(飓)风和海洋热浪等极端事件趋频、趋强。④中国近海总体可能是大气CO₂的汇,每年从大气中吸收约10.8 TgC的CO₂。长江口和珠江口及附近海域有长期酸化和溶解氧降低的现象,但近海碳源汇格局及酸化的长期变化仍不够清楚。此外,未来中国近海盐度、环流、强台风和海洋热浪的变化,以及海洋的碳源汇、酸化和溶解氧的观测和研究亟须加强。

关键词 气候变化;海洋;极端事件;中国;碳源汇

中图分类号 P467 **文献标识码** A **文章编号** 1002-2104(2020)09-0009-12 **DOI**:10.12062/cpre.20200646

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)表明,海洋覆盖了大约地球表面的71%,吸收了约93%因温室效应产生的额外能量,在地球气候系统的自然变化中发挥着重要作用^[1]。相对于大气而言,海洋有缓变的特性,成为全球气候变化的主要“记忆体”,调节着全球的气候状况,海洋对中国气候变化有重要影响。近年来,随着海洋和大气观测资料的增加,研究方法的日新月异,我们对海洋在气候变化中的重要作用不断取得新的认识。2017年,中国政府启动了《第四次气候变化国家评估报告》(简称评估报告)的编制,开展了全球和中国海洋变化及其气候效应的评估,并取得了若干新进展及新认识。本文主要从海洋的温度、盐度、环流、海平面变化和海气相互作用的气候效应等物理海洋过程,以及海洋的碳源汇、酸

化和溶解氧变化等生物地球化学循环过程,分析并评估全球和中国海洋变化及其气候效应,以期为中国应对气候变化和参与气候变化国际谈判提供必要的科学支撑。

1 海洋物理性质的变化

1.1 海温、盐度和环流的变化

IPCC评估表明,自20世纪中叶以来,全球海洋上层2 000 m的热含量呈现出较为稳定的上升趋势,且归因于人类排放温室气体^[2-3]。观测显示,气候变暖背景下20世纪中叶以来全球陆地和海洋的表面升温明显^[4-6]。1958—2018年,中国近海区域(本文指渤海、黄海、东海和南海,图1a中黑色方框所示海域,0~40°N, 100~140°E)平均海表面温度(SST)的线性增量为 0.98 ± 0.19 °C(速率 $0.016 \pm$

收稿日期:2020-06-18 修回日期:2020-06-27

作者简介:蔡榕硕,博士,研究员,主要研究方向为气候变化与海洋环境。E-mail:cairongshuo@tio.org.cn。

基金项目:国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项资助项目“海岸带和沿海地区全球变化综合风险研究——海岸带和沿海地区对海平面变化、极端气候事件的响应及脆弱性研究”(批准号:2017YFA0604902)、“海岸带和沿海地区全球变化综合风险研究——气候变化背景下海平面变化和极端气候事件的危险性研究”(批准号:2017YFA0604901);科学技术部《第四次气候变化国家评估报告》编制工作专项。

0.003 1 °C/a) 高于全球海洋平均增温 (0.54 ± 0.04 °C) (见图 1b); 其中, 东中国海 (渤海、黄海和东海的简称) 的升温尤其显著, 达 1.41 ± 0.16 °C (速率 0.023 ± 0.003 °C/a), 远高于相邻的陆地或海区的升温 (高信度^①) [4-9], 这显著区别于地球表面的一般升温变暖规律, 即大陆变暖高于海洋, 中高纬地区高于低纬地区, 东中国海的升温速率约为中国大陆升温速率 (约 0.015 °C/a) 的 1.5 倍^[10]。分析表明, 东中国海升温主要归因于黑潮入侵陆架海域和副热带高压的年代际增强, 这又与东亚季风年代际的减弱密切相关^[5]。在不同气候情景下 (从温室气体低排放到高排放情景, RCP2.6, 4.5, 8.5, RCPs), 全球和中国海洋还将显著升温, 东中国海可能成为全球海洋升温幅度最大的海区之一 (证据量中等, 一致性高)^[11-15]。

IPCC AR5 指出, 自 1950 年代以来, 海洋表层盐度 (SSS) 的变化表现为蒸发强于降水的副热带海域海水变得更咸, 而降水强于蒸发的热带和极区海水变得更淡, 高盐度和低盐度区域的表层海水盐度差异增加是几乎确定

的^[1]。1970 年代中期到 2010 年代前期, 中国东海、南海 SSS 表现出下降的趋势 (证据量中等, 一致性中等)^[16-17], 但 2015 年以来, 南海 SSS 波动较大^[18]。在不同气候情景下 (RCPs), 未来东中国海 SSS 总体变化不大, 南海则有较明显下降, 且 RCP8.5 情景下 SSS 的变化比 RCP4.5 情景下显著 (证据量有限, 一致性中等)^[14-15]。

研究表明, 气候变暖背景下全球海洋环流发生了明显的变化。相对于 1850—1900 年, 大西洋经向翻转环流 (AMOC) 变弱, 且很可能继续减弱^[3], 而大洋西边界流区有增强趋势^[19]。20 世纪 90 年代以来, 全球大洋环流系统的流速似乎正在加快, 并以热带海洋最为突出, 这种加速现象超出了自然的变率, 主要归因于全球变暖 (证据量中等, 一致性高)^[20]。中国近海上层环流受季风影响较大 (高信度)。近几十年来, 中国近海区域上空的东亚季风出现年代际的减弱, 这导致黄海暖流减弱, 主轴位置西移, 且引起黑潮暖水入侵东中国海陆架以及通过吕宋海峡入侵南海出现年代际的增强 (高信度)^[5, 8, 21-26]。但是, 对中国近海环流预估的认知仍有限, 主要是由于该海域海洋环流的形成与变化机理复杂, 长时间序列和覆盖广泛的观测数据不足, 以及数值模拟的不确定性等原因。

1.2 海平面和极值水位的变化

观测表明, 1902—2010 年全球海平面上升速率为 1.5 ± 0.4 mm/a^[3, 27-28], 1901—1990 年、1993—2018 年期间上升速率分别为 1.38 ± 0.57 mm/a 和 3.15 ± 0.3 mm/a^[3, 29]; 期间, 2006—2015 年海平面明显加速上升, 达 3.58 (3.10 ~ 4.06) mm/a^[27-28]。20 世纪, 海平面上升的主要贡献来自海水热膨胀和陆地冰川冰盖融化; 2006 年以来, 陆地冰川和冰盖融化对海平面上升的贡献已超过海洋热膨胀的影响, 主要归因于人为强迫引起的气候变化 (高信度)^[27-28] (图 2)。1980—2019 年, 中国沿海海平面上升速率为 3.4 mm/a, 高于同时段全球平均水平; 并且, 2010—2019 年中国沿海平均海平面处于近 40 年来高位 (图 3)^[30]。预估显示, 21 世纪, 全球和中国海平面将继续上升, 并有显著的区域性特征 (证据量中等, 一致性中等)^[27-28, 31-33]; 到 21 世纪末, 东海海平面上升幅度将高于南海 (证据量充分, 一致性中等)^[31-33]。

在不同气候情景下 (RCPs), 未来海平面的变化将进一步引起沿海地区台 (飓) 风 - 风暴潮、潮汐特征和极值水位的明显变化^[27-28]。其中, 在 RCP2.6, 8.5 情景下, 到

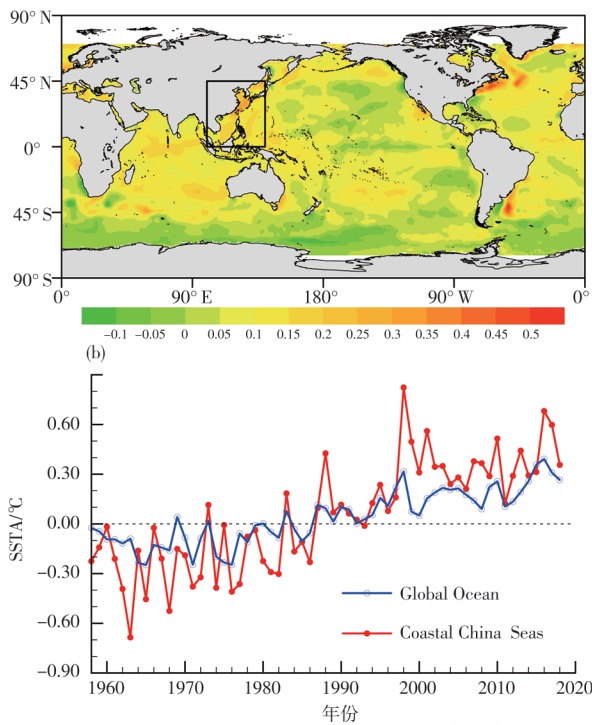


图 1 1958—2018 年全球和中国近海海面温度 (SST) 变化趋势的空间分布及距平时间序列

注: 引自 Cai et al^[5], 并采用 HadISST^② 数据更新至 2018 年^[5]。

① 本文借鉴 IPCC 第五次评估报告中有关不确定性的评估方法, 即根据基本证据和一致性 (证据的类型、数量、质量、内部相容性和一致程度) 的分析判定, 评估关键发现和主要结论或结果的不确定性, 采用“很低”“低”“中等”“高”和“很高”等专门术语表示其信度水平, 并应用“几乎确定, 99% ~ 100% 概率”“很可能, 90% ~ 100%”“可能, 66% ~ 100%”“或许可能, 33% ~ 66%”“不可能, 0 ~ 33%”“很不可能, 0 ~ 10%”“几乎不可能, 0 ~ 1%”等术语表述经评估的主要结论或结果的可能性; 信度水平和可能性等专门术语以斜体字表示。

② 英国气象局哈德莱中心全球海面温度数据集 (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set, HadISST)。

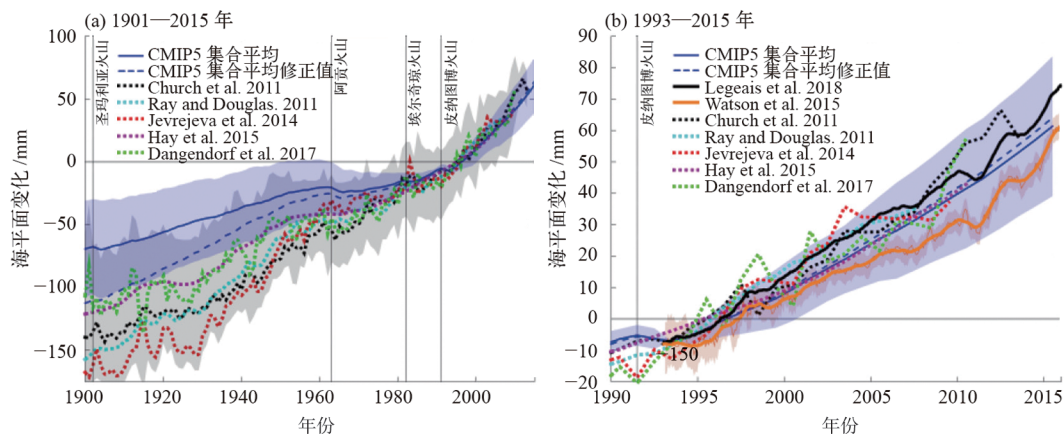


图2 观测和模拟的全球海平面变化 (a) 1901—2015 年, (b) 1993—2015 年

注:引自 Oppenheimer et al.^[27] 和蔡榕硕等^[28]。图中蓝色实、虚线为模拟值,其他颜色为验潮站观测值,黑色实线为卫星高度计观测值;图中阴影为不确定性范围。

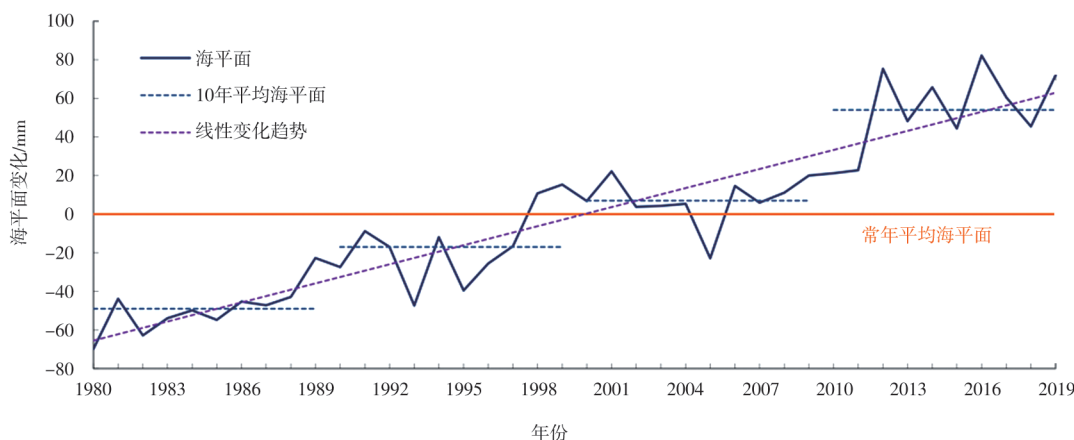


图3 1980—2019 年中国沿海海平面变化

注:引自自然资源部《2019 年中国海平面公报》^[30]。

21 世纪末,全球海平面相对于 1986—2005 年平均将分别上升约 0.43 m (0.29 ~ 0.59 m) 和 0.84 m (0.61 ~ 1.10 m) (中等信度),这将进一步抬升沿海发生极值水位的基础高度。在 RCP8.5 情景下,当前沿海地区较少发生的百年一遇极值水位事件将变为一年一遇或更频繁(高信度),以长江口吕泗和福建厦门海域验潮站为例,当前百年一遇的极值水位为 4.5 和 7.5 m,到 21 世纪末,将变为几年一遇和低于一年一遇(RCP8.5)^[27-28, 34]。

2 太平洋—印度洋海气相互作用及其气候效应

20 世纪 50 年代末以来,气候变暖改变了海洋的能量,全球海洋温度和海平面上升明显、海气相互作用加强^[1]。20 世纪 70 年代以来,热带中太平洋海温分布型态如厄尔尼诺年际信号发生年代际变化,中部型厄尔尼诺增多,中部型和传统型(东部型)厄尔尼诺型的海温异常对中国气

候产生了不同的影响^[35-37]。海洋的升温变暖还引起台(飓)风和海洋热浪的发生频次、强度和影响范围产生很大的变化^[1, 3, 27-28, 34]。

2.1 热带太平洋的厄尔尼诺—南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO)

ENSO 既是热带太平洋海域,也是全球热带海洋最强的年际变化信号,对全球及中国气候都有重要的影响。但是,在全球变暖背景下 ENSO 信号出现了显著的年代际变化。一是 ENSO 振幅增大。1970 年以来由于厄尔尼诺事件中赤道太平洋对流的东移加强,海洋层结强化,ENSO 振幅有所增大(中等信度)^[38],持续时间更长,中国东部地区的降水与 ENSO 之间的联系较之前变得更为紧密。不过,随着全球变暖的加剧,热带印度洋海温的显著上升使得热带印度洋—太平洋间的海温纬向梯度发生改变,大气环流的调整将可能抑制 ENSO 的振幅^[39],因此,未来 ENSO 振

幅的变化及对我国气候的影响仍存在较大的不确定性。二是厄尔尼诺类型发生年代际变化。1990 年以来,中部型厄尔尼诺事件的发生频率明显超过东部型厄尔尼诺事件(高信度),并对中国气候产生不同于传统东部型厄尔尼诺的影响(高信度)。例如,在中部型厄尔尼诺发展年,夏季的长江流域降水偏少、气温偏高,华南降水偏多^[40-41],秋季和冬季的中国大部分地区温度偏低^[42-43],西南冬季降水偏多^[44],次年春季华南降水偏少^[45];在东部型厄尔尼诺期间,上述情形不显著或大致相反(证据量充分,一致性中等),这也使得我国降水和气温随之发生了显著变化。当前气候模式对热带气候态和 ENSO 特征的模拟普遍存在偏差,对未来 ENSO 影响中国气候变化的预估存在不确定性^[46-47]。

2.2 热带印度洋的海盆模态(IOB)和偶极子模态(IOD)

气候变暖改变了海洋增暖的空间分布以及海气耦合模态的响应,也使得印度洋海温发生异常并对中国气候的影响出现了显著的变化。印度洋 SST 海盆模态(IOB)和偶极子模态(IOD)分别是 SST 年际变率的主导模态和第二模态。当前者为暖位相时,我国夏季华南气温偏高、东北气温偏低、长江流域降水偏多^[48],且晚夏江南区域容易出现极端高温灾害^[49];后者为正位相时,对我国秋季气候有显著影响。

IOB 的变化与 ENSO 密切相关。1958—2001 年,热带西南印度洋温跃层呈现变浅的趋势,厄尔尼诺激发的海洋波动更易引起该海域表层海水变暖,而低层大气环流响应有利于夏季北印度洋表层海水增暖,IOB 的年际变率随着 ENSO 年际变率的增加而增加^[50-52];同时,随着 1970 年代中期之后 ENSO 振幅的显著增强,其持续时间也更持久,IOB 的持续时间也随之变长,与中国气候异常的联系在 1976/77 之后变得更为紧密(证据充分,一致性高)^[36,53]。

极端 IOD 事件和夏季型 IOD 的出现可能使得 IOD 对中国东部气候的影响更为显著(证据量中等,一致性中等)。在全球气候变暖背景下,1950—2009 年,印度洋上空 Walker 环流存在减弱的长期变化趋势,出现更多的夏季型 IOD^[51]。IOD 的强度和发生频率在 20 世纪存在上升趋势^[54]和年代际变化特征^[55],甚至在 2019 年出现了四十年来最强的一次 IOD,超过了 1994 年和 1997 年的极端偶极子事件^[56]。

2.3 印度洋-中国近海-太平洋海气相互作用及气候效应

在北半球夏季,发展中的厄尔尼诺可以触发 IOD 正事件,但 IOD 也可以独立于 ENSO 存在,并反过来影响 ENSO^[57]。强的 IOD 正事件可引起西太平洋出现异常的风,从而促进厄尔尼诺的发展^[58-59]。厄尔尼诺激发的遥相关过程会诱发印度洋洋盆尺度的持续升温,这在厄尔

尼诺衰减年会对赤道和西北太平洋产生较强的反馈作用^[36,48,51,53](图 4)。由于西太平洋和印度洋之间存在跨洋盆的海气相互作用,因此,印度洋电容器效应被延伸为印度洋-太平洋海洋电容器效应(IPOC)^[53]。

预估显示,在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下,21 世纪极端厄尔尼诺的频率是 20 世纪的 20 倍(中等信度),且中部型和东部型的比例将进一步增加^[60-61]。同时,极端 IOD 事件的频率也会进一步增加(低信度)^[60-62]。

2.4 西北太平洋强台风和海洋热浪的变化及影响

气候变暖背景下,近四十年来全球强热带气旋(强飓风和台风)强度增加,且趋于频繁,对全球许多地区造成重大灾害^[63]。西北太平洋地区强台风的发生频率、登陆频次和位置的变化及伴随的台风-风暴雨、强降水和破坏性强风等致灾因子对沿海经济社会有严重的影响,而海洋热浪的频数、范围和强度变化对海洋生态系统、渔业和水产

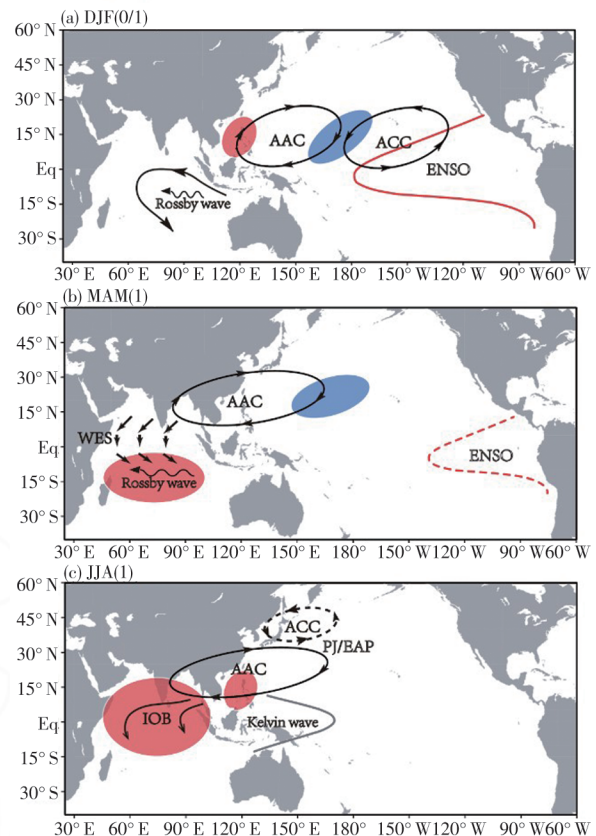


图 4 ENSO 事件诱发的印度洋-太平洋海洋电容器效应(IPOC)示意图

注:(a) ENSO 发展年的冬季,厄尔尼诺引起的大气环流异常在南印度洋激发了海洋下沉 Rossby 波;(b) 春季下沉的 Rossby 波造成南印度洋增温,诱发南北半球不对称的大气环流异常,并引起印度洋洋盆尺度增温;(c) 夏季印度洋增温在太平洋激发赤道 Kelvin 波以及西北太平洋 PJ 模态。引自 Xie et al.^[53]。

养殖等有重大影响。

1970 年以来,西北太平洋 140°E 以西形成的强热带气旋的比例增加了 16% ~ 20%, 频率几乎翻倍,最近二十年(1998—2015 年)东亚沿海地区强热带气旋的产生数量明显增加^[64]。1961 年以来,西北太平洋热带气旋生命期的最大强度年平均呈现增加趋势,1980 年以后尤其显著(中等信度);同时,强热带气旋的纬度极向扩展,西北太平洋热带气旋达到最大强度的位置向北移动^[64-65],导致强台风登陆日本、朝鲜半岛和中国东部地区和登陆热带气旋平均强度增加^[66],特别是 1977 年以来,登陆东亚和东南亚的台风强度增加了 12% ~ 15%,其中 4 ~ 5 级台风个数翻了一倍(中等信度)^[67](图 5)。海洋增暖对热带气旋活动的变化一直受到关注,未来强热带气旋的强度可能会增加,但其个数可能不变或更少(证据量中等,一致性低)^[27]。总的来说,西太平洋热带气旋频次、强度、路径和登陆台风频数发生了变化,但关于内部变率和气候变暖对热带气旋长期变化趋势的贡献还无定论,对登陆中国强台风的地点、强度及频率变化及其对中国气候的影响研究仍不足。

海洋热浪(MHW)指海洋表面长时间的异常高温现象,空间范围可达数百 km^[68],向下深处可延伸数百 m^[69],可持续几天到几个月^[70],能对自然生态系统造成毁灭性和持续性影响^[70-71]。自 1982 年以来,全球 MHW 的频率很可能翻了 1 倍,且持续时间更长,强度和范围也在增加^[60, 72]。最近几十年来,大部分地区上层海洋的增暖很可能与人类活动排放温室气体有关,这表明 MHW 频次的增加可归因于人类活动的影响(证据量中等,一致性高)。1982—2010 年,全球 38% 的沿岸地区极端高温热浪变得更为普遍^[73];2016 年 8 月中国近海出现破纪录的极端高海温,东中国海海域 SST 的 28.5 °C 和 30 °C 等值线伸到 36° N 和 32° N,为 1980 年以来的最北纬度^[74];并且,2017 年和 2018 年继续出现海洋热浪^[75]。

在未来全球变暖背景下,MHW 的频率和强度很可能会增加^[3, 60, 72, 76]。模拟表明,21 世纪末,全球升温 3.5 °C 的情景下,全球 MHW 出现的平均概率将达到工业化前水平的 41 倍(不同模式范围:36 ~ 45 倍),热浪的空间范围将增加 21 倍,持续时间将达 112 d,最大强度将增至 2.5 °C(高信度)^[72]。全球气候持续变暖影响使得 MHW 的频次、范围、强度和持续时间增加(证据量充分,一致性高),未来海洋热浪增加的可能性也较肯定,但增幅数值大小需要进一步研究。对中国近海地区海洋热 MHW 变化及其影响的研究较少,需要加强。

3 海洋碳循环、酸化和溶解氧的变化

工业革命以来,人类向大气中累积排放了约 665 PgC

的 CO₂ 等温室气体。一方面,海洋吸收了其中约四分之一(165 PgC)的 CO₂,海水酸性增加了 26%^[77-78],破坏了海水碳酸盐体系的动态平衡,改变了地球生物化学循环。另一方面,海洋吸收了约 93% 因温室效应产生的额外能量,海水升温变暖,层化加剧,阻碍了表层和深层之间的水交换,水温的升高降低了海水的氧溶解度,并影响海洋生物生产力^[1-3]。海洋的化学性质特别是碳循环、酸化和溶解氧含量的变化尤其突出^[1,3]。因此,本文对此加以评估,并分析了中国近海碳源汇格局的变化。

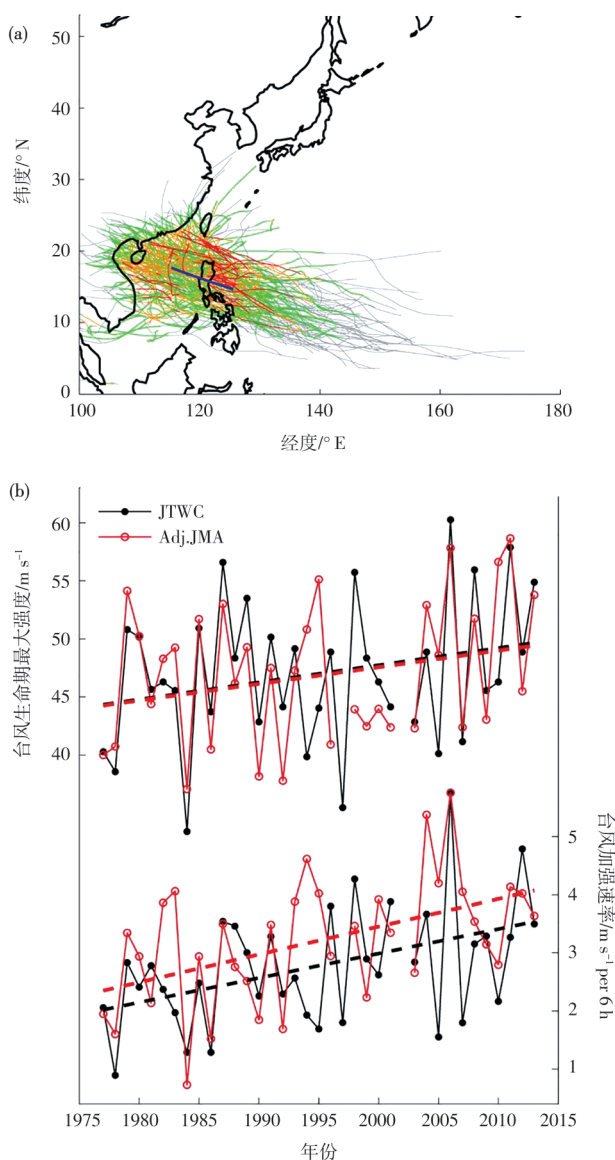


图 5 1977—2013 年西北太平洋台风路径和强度演变

注:(a)根据 JTWC 资料分析的台风路径。颜色表示强度:灰色为热带低压,绿色为热带风暴,橙色为 1 ~ 2 级台风,红色为 3 ~ 5 级台风;(b)根据 JTWC(黑色)和调整 JMA(红色)资料的年平均台风生命期最大强度和年平均台风加强速率,粗断线表示 1977—2013 年间的线性趋势。引自 Mei et al^[67]。

3.1 海洋碳循环与源汇格局的变化

大气 CO_2 溶于海水后,经过碳酸盐化学过程,形成溶解无机碳,海洋浮游植物通过光合作用吸收海水中溶解无机碳,形成有机碳。目前,全球海洋中的碳储量约是大气碳储量的 45 倍。最近 20 年来,海洋很可能吸收了人为排放 CO_2 总量的 20% ~ 30%,导致海洋 pH 值明显下降,海水持续酸化^[1]。观测表明,约占全球近海面积 12% 的中国近海不同季节和区域碳源汇的性质差异很大。其中,夏、秋季的渤海为大气 CO_2 源,冬、春季为大气 CO_2 汇(低信度)^[79-80],渤海全年是大气 CO_2 源(证据量有限,一致性中等)^[79-80]。冬、春季的黄海是大气 CO_2 汇,夏、秋季是大气 CO_2 源^[79],黄海全年可能是大气 CO_2 的弱汇或者海气 CO_2 交换基本平衡(证据量有限,一致性中等)^[79-80]。东海不同区域的碳源汇有较明显的季节和年代际变化,但观测值难以覆盖全海域,全年总体是碳汇(证据量中等,一致性高)^[81-83]。冬季的南海是大气 CO_2 汇,春、夏、秋季为大气 CO_2 源^[84],全年是碳源(证据量有限,一致性中等)^[84-87]。总体而言,全球近海总体是大气 CO_2 汇,每年吸收约 0.2 PgC^[88-89],中国近海可能是大气 CO_2 汇(证据量中等,一致性中等),每年从大气吸收约 10.8 TgC 的 CO_2 ^[84,87](见表 1)。然而,因上述观测资料涵盖的时间和空间有限,对于中国近海碳源汇格局和强度的估计有较大的不确定性。

预估显示,在 RCP 8.5 和 RCP 4.5 情景下,2012—2100 年,全球海洋对大气 CO_2 的累积吸收分别为 400(320 ~ 635)与 250(180 ~ 400) PgC^[91]。由于近海的碳源汇格局受到陆地、大气、大洋以及人类活动等多方面的影响,迄今仍难以可靠预估中国近海碳源汇格局的未来演变。

表 1 不同研究估计的中国近海碳源汇格局

TgC a⁻¹ (1 TgC = 10¹² g 碳)

海域	中国近海区域碳源汇 ^[84,80,87]		
渤海	-0.2 ± 0.1 (碳源) ^[87]	-0.2 ± 0.9 (源) ^[80]	“接近平衡” ^[90]
黄海	1.0 ± 0.3 (碳汇) ^[87]	1.2 ± 2.0 (汇) ^[80]	“接近平衡” ^[90]
东海	23.3 ± 13.5 (碳汇) ^[87]	6.9 ~ 23.3 (汇) ^[80]	约 10 (碳汇) ^[90]
南海	(-13.3 ± 18.8) ^[84] 或 (-33.6 ± 51.3) (碳源) ^[87]	-13.9 ~ (-33.6) (碳汇) ^[80]	约 -18 (碳源) ^[90]
中国	(10.8 ± 23.1) ^[84,87] (碳汇)	-6.0 ~ (-9.3)	
近海	或 -(9.5 ± 53) (碳源) ^[87]	(碳源) ^[80]	

注:正值代表海洋吸收大气 CO_2 (碳汇),负值代表海洋向大气释放 CO_2 (碳源)数。

3.2 海洋酸化

IPCC 评估表明,1980 年代末以来,全球海洋表层 pH 值每 10 年下降 0.017 ~ 0.027 pH 单位;并且,海洋酸化很可能从 20 世纪中叶就已出现,并影响了大约 95% 的大洋^[92-93]。观测表明,中国渤海不同海域呈现不同程度酸化的现象(证据量有限,一致性中等)^[94-98]。北黄海不同季节的海水文石饱和度(Ω_{arag})偏低^[99],而黄海冷水团区域可能是中国近海最先遭受海洋酸化影响的海区之一^[100]。东海沿岸表层海水存在一定程度的酸化趋势,在长江口和杭州湾海域酸化较明显;东海酸化受到多种因素的影响,有待进一步的归因分析^[101-103]。南海对大气中 CO_2 浓度的吸收效率比较低^[104-105],南海北部未呈现明显的酸化现象^[106],但近岸海域酸化速度较明显^[107-109]。总体而言,2000 年之前的十年尺度记录未发现显著的酸化,但百年尺度上有酸化的现象(证据量中等,一致性中等)^[110];中国海洋酸化的研究还缺乏长期、连续和覆盖面较广的观测,已有的观测仍存在许多的未知量和较大的不确定性。

预估还显示,在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下,相对于 2006—2015 年而言,到 2081—2100 年,全球海洋表层 pH 值将分别下降 0.036 ~ 0.042 和 0.287 ~ 0.291,高纬度海域更显著^[92-93]。在 RCP2.6,4.5 和 RCP8.5 情景下,到 21 世纪末,中国近海表层 pH 值将分别下降 0.05、0.14 和 0.32^[14-15],中国近海酸化将高于全球平均(证据量中等,一致性高)。迄今为止,中国尚未建立系统的海洋酸化观测体系、标准体系及评估体系,缺少长时间序列观测数据,在海洋酸化的评估和预估方面仍存在较大的不确定性。

3.3 海洋溶解氧的变化

溶解氧(DO)指通过大气交换或经过生物、化学反应后溶解于水体中的分子态氧。DO 含量下降会引起海洋生产力、生物多样性和生态系统发生重大变化。海洋变暖降低了海水中氧气的溶解度,沿岸水域富营养化增加生物的耗氧速率是导致海水缺氧的重要原因^[111-112]。

自 20 世纪中叶以来,全球海洋溶解氧含量下降了 2% 以上,缺氧海水体积扩大了 4 倍^[113]。目前已有 400 多个海域的 DO 含量低于 2 mg L⁻¹ 或 63 μmol kg⁻¹ 的水体,被称为“死亡区”,影响面积超过 24.5 万 km²^[114]。人类活动造成的环境污染是导致缺氧区形成的一个重要原因。1970—2010 年,海洋 0 ~ 1 000 m 的 DO 损失了 0.5% ~ 3.3%。海洋低氧区(OMZs)的面积扩大了 3% ~ 8%,且热带海域最明显^[92-93]。

观测表明,渤海不同时期不同海域出现 DO 下降或大范围底部 OMZs,DO 甚至低至 2.30 mg L⁻¹,并与酸化耦合^[115-116]。自 2008 年以来,黄海 DO 出现下降趋势^[117]。

过去的 50 年里,长江口与邻近海域低氧区面积从 1 900 km² 大到 13 700 ~ 20 000 km²,增长了近 10 倍^[118]。夏季长江口是缺氧频发区^[119-124]。此外,1981—2000 年,珠江口 DO 含量明显下降^[125-126]。总体而言,长江口和珠江口海域 DO 有显著的降低趋势,缺氧区面积呈逐年扩大,渤海近年来也发生了底层缺氧的现象,且与酸化现象耦合。中国河口和近海 DO 的降低与富营养化、赤潮、养殖业产生的生源颗粒在底层水体矿化分解以及水体层化等人类活动相关。

预估表明,在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下,相对于 2006—2015 年而言,到 2081—2100 年,全球表层海水 DO 分别下降 3.2% ~ 3.7% 和 1.6% ~ 2.0%^[92-93]。在 RCP 2.6,4.5 和 RCP8.5 情景下,到 21 世纪末,中国近海表层 DO 值下降将分别超过 3.43、5.70 和 9.85 $\mu\text{mol L}^{-1}$,下降幅度高于全球平均;并且,东中国海下降幅度还要高于南海,RCP8.5 情景下降的幅度比 RCP4.5 情景更显著(证据量中等,一致性高)^[14-15]。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文综合评估了气候变化背景下全球和中国海洋的变化、太平洋—中国近海—印度洋对气候变化的响应、未来的变化及其对中国气候的影响。主要结论如下:

(1)1958—2018 年,全球和中国海洋的温度、盐度分布型态变化显著,海洋升温变暖明显,且中国海洋升温高于全球平均(高信度);在不同的温室气体排放情景(RCP2.6, 4.5, 8.5)下中国近海尤其是东中国海(渤海、黄海和东海)可能成为全球海洋升温幅度最高的海区之一(证据量中等,一致性高)。最近几十年来,全球海洋特别是热带海域环流明显加速;1970 年代末以来,黑潮入侵中国海陆架增强,是东中国海升温的主要原因(高信度)。20 世纪以来,全球海平面持续上升,1990 年以来海平面上升明显加速,而 2006 年以来的上升加速更为显著,主要归因于人为引起的气候变暖(高信度)。未来全球和中国海平面很可能持续上升,并将引起当前沿海许多地区百年一遇极值水位的重现期明显缩短(高信度)。

(2)1970 年代之后,热带太平洋海温年际异常如厄尔尼诺信号出现年代际变化,强度显著增强、持续时间更长;并且,1990 年之后,中部型厄尔尼诺趋于频发。厄尔尼诺信号的年代际变化对中国气候的影响发生明显变化(高信度);未来厄尔尼诺对中国气候的影响预估存在较大不确定性。其次,印度洋海盆增暖加强,与此相关的是中国东部高温天气频发(中等信度)。1977 年以来,中国东部及邻近海域出现的超强台风和海洋热浪等极端事件趋频、趋

强(中等信度)。全球气候持续变暖影响使得海洋热浪的频次、范围、强度和持续时间增加(高信度),未来海洋热浪增加的可能性也较肯定,但增幅数值大小需要进一步研究。对中国近海地区海洋热浪变化及其影响的研究较少。

(3)中国渤海、黄海、东海和南海分别为 CO₂ 的源、弱汇、汇和源;总体而言,中国近海可能是 CO₂ 的汇(中等信度),每年从大气吸收 CO₂ 约 10.8 TgC。中国近海局部海域出现酸化和溶解氧降低现象(中等信度),特别是长江口和珠江口溶解氧含量有长期降低的趋势,但由于观测数据有限,有关中国海域碳源汇格局及酸化的长期变化仍不清楚。

4.2 讨论

自中国政府于 2015 年 9 月发布《第三次气候变化国家评估报告》以来,国内外发表了大量与气候变化和海洋相关的研究论文和评估报告,特别是 2018 年和 2019 年 IPCC 相继发布了《全球升温 1.5 °C 特别报告》《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》。为此,本文主要基于 2015—2020 年发表的最新学术论文和国内外权威评估报告,重点关注全球和中国海洋的变化及其中国气候效应。与上次国家评估报告不同的是,本文首次采用了 IPCC 第五次评估报告的不确定性处理方法^[127],评估阐释了全球和中国海洋升温及其归因、海洋环流和海平面及极值水位的变化,以及热带太平洋—中国近海—印度洋年际海温异常的年代际变化及其气候效应,涵盖了极端厄尔尼诺和 IOD 事件及未来预估,并评估了强台风和海洋热浪的变化,预估了未来中国海洋的温度、盐度、pH 值和溶解氧的变化。另外,评估还得到了中国近海为大气 CO₂ 源及汇格局的初步结果,但由于观测资料的时间和覆盖范围有限,因此,中国近海每年 CO₂ 的源汇评估结果的信度水平仍较低。

此外,本文评估揭示,有关中国近海盐度、环流、强台风和海洋热浪的变化,尤其是海洋的碳源汇、酸化和溶解氧的观测、预估和相关研究亟须加强。

致谢:本文参考了《第四次气候变化国家评估报告》第一卷第七章:“海洋与中国气候变化”初稿的部分内容,并借此机会感谢参与本章撰写或讨论的各位作者:曹龙、陈泽生、成里京、杜凌、杜岩、刘克修、谭红建、吴仁广、张锐、张守文、张晓爽、王东晓(按姓氏拼音为序)。

(编辑:刘呈庆)

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M/OL]// STOCKER, QIN D, PLATTNER G K, et al. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013-09-30 [2020-06-11]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- [2] CHENG L J, TRENBERTH K, FASULLO J, et al. Improved

- estimates of ocean heat content from 1960 – 2015 [J]. *Science advances*, 2017, 3(3):e1601545, 1 – 10.
- [3] IPCC. Summary for policymakers [R/OL]// IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019 – 09 – 24 [2020 – 06 – 11]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>.
- [4] CAI R, TAN H, QI Q. Impacts of and adaptation to inter-decadal marine climate change in coastal China seas [J]. *International journal of climatology*, 2016, 36(11):3770 – 3780.
- [5] CAI R, TAN H, KONTOYIANNIS H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the East Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales[J]. *Journal of climate*, 2017, 30(22):8987 – 9005
- [6] 蔡榕硕, 付迪. 全球变暖背景下中国东部气候变迁及其对物候的影响[J]. *大气科学*, 2018, 42(4):729 – 740.
- [7] LIU Q Y, ZHANG Q. Analysis on long-term change of sea surface temperature in the China Seas [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(2):295 – 300.
- [8] OEY L Y, CHANG M C, CHANG Y L, et al. Decadal warming of coastal China Seas and coupling with winter monsoon and currents [J]. *Geophysical research letters*, 2013, 40(23):6288 – 6292.
- [9] PEI Y, LIU X, HE H. Interpreting the sea surface temperature warming trend in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Science China earth sciences*, 2017, 60(8):1558 – 1568.
- [10] YAN, Z, DING Y, ZHAI P, et al. Re-assessing climatic warming in China since 1900 [J]. *Journal of meteorological research*, 2020, 34(2):243 – 251
- [11] 黄传江, 乔方利, 宋亚娟, 等. CMIP5 模式对南海 SST 的模拟和预估[J]. *海洋学报*, 2014, 36(1):38 – 47.
- [12] 宋春阳, 张守文, 姜华, 等. CMIP5 模式对中国海海表温度的模拟及预估[J]. *海洋学报*, 2016, 38(10):1 – 11.
- [13] 谭红建, 蔡榕硕, 颜秀花. 基于 IPCC-CMIP5 预估 21 世纪中国海海表温度变化 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(4):451 – 458.
- [14] 谭红建, 蔡榕硕, 颜秀花. 基于 CMIP5 预估 21 世纪中国近海海洋环境变化 [J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(2):152 – 160.
- [15] TAN H, CAI R, HUO Y, et al. Projections of changes in marine environment in coastal China seas over the 21st century based on CMIP5 models [J]. *Journal of oceanology and limnology*, 2020. DOI:10.1007/s00343-019-9134-5.
- [16] 陈海花, 李洪平, 何林洁, 等. 基于 SODA 数据集的南海海表面盐度分布特征与长期变化趋势分析 [J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(4):48 – 52
- [17] 苗庆生, 杨锦坤, 杨扬, 等. 东海 30m 断面冬季温盐分布及年际变化特征分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(6):1 – 7.
- [18] CHEN X, LIU Z, WANG H, et al. Significant salinity increase in subsurface waters of the South China Sea during 2016 – 2017 [J]. *Acta oceanologica sinica*, 2019, 38(11):51 – 61.
- [19] WU L, CAI W, ZHANG L, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents [J]. *Nature climate change*, 2012, 2(3):161 – 166.
- [20] HU S, SPRINTALL J, GUAN C, et al. Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades [J]. *Science advances*, 2020, 6(6):eaax7727, 1 – 8.
- [21] CHEN C, WANG G. Interannual variability of the eastward current in the western South China Sea associated with the summer Asian Monsoon [J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 2014, 119(9):5745 – 5754.
- [22] XUE H, CHAI F, PETTIGREW N, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea [J]. *Journal of geophysical research*, 2004, 109:C02017, 1 – 14.
- [23] XU F H, OEY L Y. State analysis using the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) and the three-layer circulation structure of the Luzon Strait and the South China Sea [J]. *Ocean dynamics*, 2014, 64(6):905 – 923.
- [24] YUAN D, HSUEH Y. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter [J]. *Deep-sea research II*, 2010, 57(19 – 20):1745 – 1761.
- [25] 蔡榕硕, 齐庆华, 张启龙. 北太平洋西边界流的低频变化特征 [J]. *海洋学报*, 2013, 35(1):9 – 14.
- [26] 邢传玺, 黄大吉. 冬季黄海暖流西片机理数值探讨 [J]. *海洋学报*, 2010, 32(6):1 – 10.
- [27] OPPENHEIMER M, GLAVOVIC B, HINKEL J, et al. Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities [R/OL]// IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019 – 09 – 24 [2020 – 06 – 11]. <https://www.ipcc.ch/srocc/home/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>.
- [28] 蔡榕硕, 谭红建. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2):163 – 171.
- [29] World Meteorological Organization (WMO). Statement on the state of the global climate in 2018 [R]. 2019
- [30] 自然资源部. 2019 年中国海平面公报 [R]. 北京: 自然资源部, 2020.
- [31] 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.
- [32] KULP S A, STRAUSS B H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding [J]. *Nature communications*, 2019, 10(1):4844, 1 – 12.
- [33] 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.
- [34] 许伟宏, 蔡榕硕. 海平面上升、强台风和风暴潮对厦门海域极值水位的影响及危险性预估 [J]. *海洋学报*. DOI:10.3969/j.issn.0253-4193.2021.01.003.
- [35] ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, et al. El Nino Modoki and its possible teleconnection [J]. *Journal of geophysical research*,

- 2007, 112(1):C11007,1-27.
- [36] HUANG G, HU K M, XIE S P. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970s: an atmospheric GCM study[J]. *Journal of climate*, 2010,23(19): 5294-5304.
- [37] YEH S W, KUG J S, DEWITTE B, et al. 2009. El Niño in a changing climate[J]. *Nature*, 2010, 461:511-570.
- [38] CAI W, BORLACE S, LENGAINNE M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming [J]. *Nature climate change*, 2014, 4(2):111-116.
- [39] KIM S T, CAI W J, JIN F F, et al. Response of El Niño sea surface temperature variability to greenhouse warming[J]. *Nature climate change*, 2014,4(9):786-790.
- [40] CHEN Z, WEN Z, WU R, et al. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: a numerical study[J]. *Climate dynamics*, 2014,43(1-2):469-481.
- [41] 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊. 厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究[J]. *气象学报*, 2017,75(3):371-383.
- [42] YUAN Y, YANG S. Impacts of different types of El Niño on the east asian climate: focus on ENSO cycles[J]. *Journal of climate*, 2012, 25(21):7702-7722.
- [43] 汪子琪, 张文君, 耿新. 两类 ENSO 对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响[J]. *气象学报*, 2017,75(4):564-580.
- [44] 陶威, 陈权亮. 两类 El Niño 事件对我国西南地区冬季降水的影响[J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(6):749-757.
- [45] FENG J, LI J. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China [J]. *Journal of geophysical research - atmosphere*, 2011, 116(1): D13102,1-10.
- [46] LI G, XIE S P. Tropical biases in CMIP5 multi-model ensemble: the excessive equatorial Pacific cold tongue and double ITCZ problems[J]. *Journal of climate*, 2014, 27(4):1765-1780.
- [47] LI G, XIE S P, DU Y, et al. Effects of excessive equatorial cold tongue bias on the projections of tropical Pacific climate change. Part I: The warming pattern in CMIP5 multi-model ensemble[J]. *Climate dynamics*, 2016,47(12):3817-3831.
- [48] HU K M, HUANG G, HUANG R H. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. *Journal of climate*, 2011, 24(20):5365-5377.
- [49] HU K M, HUANG G, QU X, et al. The impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern of Yangtze River valley in late summer[J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2012,29(1):91-100
- [50] WU R, KIRTMAN B P, KRISHNAMURTHY V. An asymmetric mode of tropical Indian Ocean rainfall variability in boreal spring [J]. *Journal of geophysical research - atmospheres*, 2008, 113(1):D05104,1-14.
- [51] DU Y, CAI W J, WU Y L. A new type of the Indian Ocean Dipole since the mid-1970s[J]. *Journal of climate*, 2013a,26(3):959-972
- [52] HU K M, HUANG G, ZHENG X T, et al. Interdecadal variations in ENSO influences on Northwest Pacific-East Asian early summertime climate simulated in CMIP5 models [J]. *Journal of climate*, 2014 27(15):5982-5998.
- [53] XIE S P, KOSAKA Y, DU Y, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review[J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2016,33(4):411-432.
- [54] ABRAM N J, GAGAN M K, COLE J E, et al. Recent intensification of tropical climate variability in the Indian Ocean [J]. *Nature geoscience*, 2008,1(12):849-853.
- [55] UMMENHOFER C C, BIASTOCH A, BONING C W. Multidecadal Indian Ocean variability linked to the Pacific and implications for preconditioning Indian Ocean Dipole events[J]. *Journal of climate*, 2017,30(5):1739-1751.
- [56] Nat Johnson. Meet ENSO's neighbor, the Indian Ocean Dipole. 2020. Feb. 27. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/meet-enso%E2%80%99s-neighbor-indian-ocean-dipole>.
- [57] IZUMO, VIALARD J, LENGAINNE M, et al. Influence of the state of the Indian Ocean Dipole on the following year's El Niño [J]. *Nature geoscience*, 2010, 3(3):168-172.
- [58] ANNAMALAI H, KIDA S, HAFNER J. Potential impact of the tropical Indian Ocean-Indonesian Seas on El Niño characteristics [J]. *Journal of climate*, 2010, 23(14):3933-3952.
- [59] LUO J J, ZHANG R, BEHERA S K, et al. Interaction between El Niño and extreme 550 Indian Ocean Dipole [J]. *Journal of climate*, 2010,23(3):726-742
- [60] COLLINS M, M SUTHERLAND, L BOUWER, et al. Extremes, abrupt changes and managing risk [R/OL]// IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019-09-24 [2020-06-11]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-6/>.
- [61] 余荣, 翟盘茂. 海洋和冰冻圈变化有关的极端事件、突变及其影响与风险[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2):194-202.
- [62] CAI W, SANTOSO A, WANG G, et al. Increased frequency of extreme Indian Ocean Dipole events due to greenhouse warming[J]. *Nature*, 2014,510(7504):254-258.
- [63] KOSSIN J, KENNETH R K, TIMOTHY L O, et al. Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2020, 117(22):11975-11980.
- [64] ZHAO J, ZHAN R, WANG Y. Global warming hiatus contributed to the increased occurrence of intense tropical cyclones in the coastal regions along East Asia[J]. *Scientific reports*, 2018,8(1):6023,1-9.
- [65] KOSSIN J, EMANUEL K, VECCHI G. The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity [J]. *Nature*, 2014,509(7500):349-352.



- [66] LIU K S, CHAN J C L. Inter-decadal variability of the location of maximum intensity of category 4 - 5 typhoons and its implication on landfall intensity in East Asia [J]. International journal of climatology, 2019, 39(4):1839 - 1852.
- [67] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s [J]. Nature geoscience, 2016, 9(10):753 - 757.
- [68] SCANNELL H A, PERSHING A J, ALEXANDER M A, et al. Frequency of marine heatwaves in the North Atlantic and North Pacific since 1950 [J]. Geophysical research letters, 2016, 43(5): 2069 - 2076.
- [69] BENTHUYSEN J A, OLIVER E C J, FENG M, et al. Extreme marine warming across tropical Australia during austral summer 2015 - 2016 [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2018, 123(2):1301 - 1326.
- [70] HOBDAI A J, ALEXANDER L V, PERKINS S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves [J]. Progress in oceanography, 2016, 141(1):227 - 238.
- [71] PEARCE A F, FENG M. The rise and fall of the 'marine heat wave' off Western Australia during the summer of 2010/2011 [J]. Journal of marine systems, 2013, 111 - 112:139 - 156.
- [72] FRÖLICHER T L, LAUFKÖTTER C. Emerging risks from marine heat waves [J]. Nature communications, 2018, 9(1):650, 1 - 4.
- [73] LIMA F P, WETHEY D S. Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming [J]. Nature communications, 2012, 3(1):704, 1 - 13.
- [74] TAN H, CAI R. What caused the record-breaking warming in East China Seas during August 2016? [J]. Atmospheric science letters, 2018, 19(10):e853, 1 - 8.
- [75] 李琰, 范文静, 骆敬新, 等. 2017 年中国近海海温和气温气候特征分析 [J]. 海洋学报, 2018, 37(3):296 - 302.
- [76] OLIVER E C J, DONAT M G, BURROWS M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century [J]. Nature communications, 2018, 9(1):1324, 1 - 12.
- [77] CALDEIRA K, WICKETT M E. Anthropogenic carbon and ocean pH [J]. Nature, 2003, 425(6956):365 - 365.
- [78] RAVEN J, CALDEIRA K, ELDERFIELD H, et al. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide [R]. London: The Royal Society, 2005.
- [79] 国家海洋局. 2012 年中国海洋环境质量公报 [R]. 北京: 国家海洋局, 2013:75 - 77.
- [80] JIAO N, LIANG Y, ZHANG Y, et al. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans [J]. Science China earth sciences, 2018, 61(11):1535 - 1563.
- [81] CHOU W C, GONG G C, SHEU D D, et al. Surface distributions of carbon chemistry parameters in the East China Sea in summer 2007 [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2009, 114(C7):C07026, 1 - 12.
- [82] TSENG C M, LIU K K, GONG G C, et al. CO₂ uptake in the East China Sea relying on Changjiang runoff is prone to change [J]. Geophysical research letters, 2011, 38(24): L24609, 1 - 6.
- [83] KIM D, CHOI S H, SHIM J H, et al. Revisiting the seasonal variations of sea-air CO₂ fluxes in the northern East China Sea [J]. Terrestrial, atmospheric & oceanic sciences, 2013, 24(3):409 - 419.
- [84] LI Q, GUO X, ZHAI W, et al. Partial pressure of CO₂ and air-sea CO₂ fluxes in the South China Sea: synthesis of an 18-year dataset [J]. Progress in oceanography, 2020, 182:102272.
- [85] CHEN C T A, WANG S L, CHOU W C, et al. Carbonate chemistry and projected future changes in pH and CaCO₃ saturation state of the South China Sea [J]. Marine chemistry, 2006, 101(3 - 4):277 - 305.
- [86] ZHAI W D, DAI M H, CHEN B S, et al. Seasonal variations of sea-air CO₂ fluxes in the largest tropical marginal sea (South China Sea) based on multiple-year underway measurements [J]. Biogeosciences, 2013, 10(11):7775 - 7791.
- [87] LIU Q, GUO X, YIN Z, et al. Carbon fluxes in the China Seas: an overview and perspective [J]. Science China earth sciences, 2018, 61(11):1564 - 1582.
- [88] LARUELLE G G, LAUERWALD R, PFEIL B, et al. Regionalized global budget of the CO₂ exchange at the air-water interface in continental shelf seas [J]. Global biogeochemical cycles, 2014, 28(11):1199 - 1214.
- [89] LARUELLE G G, CAI W J, HU X, et al. Continental shelves as a variable but increasing global sink for atmospheric carbon dioxide [J]. Nature communications, 2018, 9(1):454, 1 - 11.
- [90] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告 [M]. 科学出版社, 2015.
- [91] CIAIS P, SABINE C, G BALA, et al. Carbon and other biogeochemical cycles [M/OL]// IPCC. 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013 - 09 - 30 [2020 - 06 - 11]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- [92] BINDOFF N L, CHEUNG W W L, KAIRO J G, et al. Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities [R/OL]// IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019 - 09 - 24 [2020 - 06 - 11]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>.
- [93] 蔡榕硕, 韩志强, 杨正先. 海洋的变化及其对生态系统和人类社会的影响、风险及应对 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2):182 - 193.
- [94] ZHAI W, ZHAO H, ZHENG N, et al. Coastal acidification in summer bottom oxygen-depleted waters in northwestern-northern Bohai Sea from June to August in 2011 [J]. Chinese science bulletin, 2012, 57(9):1062 - 1068.
- [95] ZHANG J, GAO X. Nutrient distribution and structure affect the

- acidification of eutrophic ocean margins: a case study in southwestern coast of the Laizhou Bay, China[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 111(1-2): 295-304.
- [96] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴 2003[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [97] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴 2004[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [98] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴 2009[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [99] ZHAI W D, ZHENG N, HUO C, et al. Subsurface pH and carbonate saturation state of aragonite on the Chinese side of the North Yellow Sea: seasonal variations and controls [J]. Biogeosciences, 2014, 11(4): 1103-1123.
- [100] ZHAI W. Exploring seasonal acidification in the Yellow Sea[J]. Science China earth sciences, 2018, 61(6): 647-658.
- [101] 刘晓辉, 孙丹青, 黄备, 等. 东海沿岸海域表层海水酸化趋势及影响因素研究[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 398-405.
- [102] LUI H K, CHEN C T A, LEE J, et al. Acidifying intermediate water accelerates the acidification of seawater on shelves: an example of the East China Sea [J]. Continental shelf research, 2015, 111(b): 223-233.
- [103] WEI Q S, WANG B D, YU Z G, et al. Mechanisms leading to the frequent occurrences of hypoxia and a preliminary analysis of the associated acidification off the Changjiang estuary in summer[J]. Science China earth sciences, 2017, 60(2): 360-381.
- [104] CAI W J, DAI M. Comment on 'enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping' [J]. Science, 2004, 306(5701): 1477-1477.
- [105] CAI W J, DAI M, WANG Y. Air-sea exchange of carbon dioxide in ocean margins: a province-based synthesis [J]. Geophysical research letters, 2006, 33(12): L12603, 1-4.
- [106] 刘进文, 戴民汉. 呼吸作用对长江口底层水体缺氧和海洋酸化的影响[C]//第二届深海研究与地球系统科学学术研讨会. 上海: 同济大学, 2012: 169-170.
- [107] 杨顶田, 单秀娟, 刘素敏, 等. 三亚湾近 10 年 pH 的时空变化特征及对珊瑚礁石影响分析[J]. 南方水产科学, 2013, 9(1): 1-7.
- [108] YAN H, YU K, SHI Q, et al. Seasonal variations of seawater pCO₂ and sea-air CO₂ fluxes in a fringing coral reef, northern South China Sea [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2016, 121(1): 998-1008.
- [109] DONG X, HUANG H, ZHENG N, et al. Acidification mediated by a river plume and coastal upwelling on a fringing reef at the east coast of Hainan Island, Northern South China Sea [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2017, 122(9): 7521-7536.
- [110] LIU Y, PENG Z, ZHOU R, et al. Acceleration of modern acidification in the South China Sea driven by anthropogenic CO₂ [J]. Scientific reports, 2014, 4(1): 5148, 1-5.
- [111] BREWER P G, PELTZER E T. Depth perception: the need to report ocean biogeochemical rates as functions of temperature, not depth [J]. Philosophical transactions of the Royal Society A: mathematical, physical and engineering sciences, 2017, 375(2102): 20160319, 1-18.
- [112] BREITBURG D, LEVIN L A, OSCHLIES A, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters [J]. Science, 2018, 359(6371): eaam7240, 1-11.
- [113] SCHMIDTKO S, STRAMMA L, VISBECK M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades [J]. Nature, 2017, 542(7641): 335-339.
- [114] DIAZ R J, ROSENBERG R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems [J]. Science, 2008, 321(5891): 926-929.
- [115] 张华, 李艳芳, 唐城, 等. 渤海底层低氧区的空间特征与形成机制[J]. 科学通报, 2016, 61(14): 1612-1620.
- [116] 江涛, 徐勇, 刘传霞, 等. 渤海中部海域低氧区的发生记录 [J]. 渔业科学进展, 2016, 37(4): 1-6.
- [117] LI H M, ZHANG C S, HAN X R, et al. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980-2012: sources and seaward gradients [J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2015, 163(a): 44-55.
- [118] ZHU Z Y, ZHANG J, WU Y, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition [J]. Marine chemistry, 2011, 125(1-4): 108-116.
- [119] 石晓勇, 陆茸, 张传松, 等. 长江口邻近海域溶解氧分布特征及主要影响因素 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(2): 287-290.
- [120] 石晓勇, 王修林, 陆茸, 等. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨 [J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(5): 404-412.
- [121] WANG B, WEI Q, CHEN J, et al. Annual cycle of hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary [J]. Marine environmental research, 2012, 77: 1-5. DOI: 10.1016/j.marenvres.2011.12.007.
- [122] 韦钦胜, 王保栋, 陈建芳, 等. 长江口外缺氧区生消过程和机制的再认知 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 187-206.
- [123] 韦钦胜, 王保栋, 于志刚, 等. 夏季长江口外缺氧频发的机制及酸化问题初探 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(1): 114-134.
- [124] 池连宝, 宋秀贤, 袁涌铨, 等. 夏、冬季黄东海溶解氧的分布特征研究 [J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1337-1345.
- [125] YIN K, LIN Z, KE Z. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters [J]. Continental shelf research, 2004, 24(16): 1935-1948.
- [126] DAI M, GUO X, ZHAI W, et al. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River estuary during a winter drought [J].



Marine chemistry, 2006, 102(1-2):159-169.

- 07 [2020 - 06 - 12]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf.

[127] IPCC. Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties [R/OL]. 2010 - 07

A changing ocean and its impact on climate change in China

CAI Rong-shuo¹ CHEN Xing-rong²

(1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen Fujian 361005, China;

2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract This paper focuses on the analysis and assessment of ocean changes including the offshore area of China (hereafter, offshore China) and adjacent seas in the context of climate change and its impact on China's climate. The results show that: ① Over the period of 1958-2018, the global oceans and offshore seas in China have warmed significantly, especially since the late 1970s, and warming in offshore China is greater than the global average during the same period, which is mainly due to the interdecadal strengthening of Kuroshio warm water intrusion into offshore China shelf. Under different climate scenarios such as greenhouse gas emissions from low to high (RCP2.6, 4.5, 8.5), it is very likely that offshore China, especially the East China Sea (ECS) (including the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea), would become one of the most warming areas in the global oceans. Since the mid-1970s, the sea surface salinities in the ECS and the South China Sea have experienced a decreasing trend. The oceanic circulation in offshore China has changed greatly since the late 1970s, e.g., the interdecadal strengthening intrusion of Kuroshio into the eastern offshore China shelf and the South China Sea through the Luzon Strait, and the decadal weakening of Yellow Sea warm currents and the upper circulation of the South China Sea in winter. ② Over the past 20th century, the rate of global sea level rise has been about $1.5 \pm 0.4 \text{ mm yr}^{-1}$ [12], mainly due to the thermal expansion and the melting of terrestrial glacier ice sheets. Since 2006, the global sea level rise has accelerated significantly, reaching 3.6 mm yr^{-1} . The rate of sea level rise along coastal China is 3.4 mm yr^{-1} between 1980 to the present, which is greater than the global average in the same period. Under different RCP emission scenarios, sea level will continue to rise, and the current once per century extreme sea level events in coastal areas will occur more frequent. ③ The strong interannual air-sea interaction signal such as El Niño in the tropical Pacific has experienced an interdecadal shift since the 1970s, with a significant stronger and longer duration; particularly, the central El Niño pattern has become more frequent after 1990, with less precipitation and higher temperature in the Yangtze River area in the summer of its developing year, and less precipitation in southern China in the following spring, of which is generally contrary to the impact of the eastern El Niño pattern. The projection of the El Niño and its impact on China's climate in the future remain uncertain. The interdecadal warming of the Indian Ocean basin has been observed, which could induce the frequent high summer temperature in eastern China. Extreme ocean climate events such as super typhoon (hurricane) and Marine Heat Wave (MHW) around the global oceans have become more frequent and stronger since 1977. ④ The distribution patterns of carbon source and sinks, the long-term changes of ocean acidification in offshore China, are still unclear, although offshore China may be a source of atmospheric CO_2 , which releases about $6 \sim 9.5 \text{ TgC yr}^{-1}$. Additionally, the Yangtze River Estuary, the Pearl River Estuary, and their adjacent waters have been acidified over the past decades, with long-term reduction of dissolved oxygen concentration. This analysis indicates that sea salinity, oceanic circulation, strong typhoons and MHW as well as the distribution pattern of ocean carbon source and sinks, acidification and dissolved oxygen in offshore China need to be further observed and studied in the future.

Key words climate change; ocean; extreme event; China; source or sink of CO_2