

# IPCC AR6 解读之海洋热浪的变化及其对海洋生态系统的影响与应对

王爱梅, 王慧, 骆敬新, 全梦媛

国家海洋信息中心 天津 300171

**摘要** IPCC 第六次评估报告 (AR6) 基于最新的科学研究成果、详实的证据和多元的方法全面更新了对海洋热浪事件过去以及未来变化的认知, 并基于观测、实验室研究等对其影响和适应进行了系统的评估。人类活动排放温室气体导致的全球变暖使海洋和海岸带生态系统暴露在数千年来前所未有的状况下, 海洋持续变暖, 2011—2020 年全球海洋表层温度相对于 1850—1900 年平均值升高 0.88℃。自 20 世纪 1980 年代以来, 海洋热浪频率翻了一倍, 强度更强, 持续时间更久。预估结果表明海洋热浪将更加频繁, 相对于 1995—2014 年, 2081—2100 年全球海洋热浪的频率在低排放情景 (SSP1-2.6) 下将增加 2~9 倍, 在高排放情景 (SSP5-8.5) 下将增加 4~18 倍, 变化最大的海域位于热带和北极。海洋热浪的强度、频率和持续时间的增加将加剧对海洋和沿海生态系统的影响, 在某些情况下, 会导致物种灭绝、栖息地崩溃或超过生态临界点。这些认识再次凸显了适应和应对海洋气候变化风险的紧迫性。

**关键词** IPCC AR6; 气候变化; 海表温度; 海洋热浪

**中图分类号** P736.22

在过去的几十年里, 人们对陆地热浪进行了深入的研究, 然而海洋热浪只是在最近几年才开始引起科学界和公众的关注。2011 年, 澳大利亚西海岸持续的海洋极端高温摧毁了那里丰富的海藻林, 给人们敲响了警钟。Pearce 等<sup>[1]</sup>将此次高温事件称为“海洋热浪 (marine heatwaves, MHWs)”, 此后海洋热浪作为最重要的极端海洋天气气候事件之一, 越来越受到人们的关注。2016 年 5 月 4 日, 澳大利亚气候委员会发布题为《澳大利亚珊瑚礁面临气候变化的威胁》(Australia's Coral Reefs Under Threat from Climate Change) 的报告指出, 气候变化导致海洋温度不断升高, 造成大堡礁珊瑚严重白化, 未来珊瑚白化事件会变得更加频繁和严重<sup>[2]</sup>。2019 年 9 月 25 日, 政府间

气候变化专门委员会 (IPCC) 发布《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》(SROCC), 阐述了观测到的全球海洋热浪事件的变化和影响以及预估的变化及风险<sup>[3]</sup>。2021 年 8 月 9 日, IPCC 第六次评估报告 (AR6) 第一工作组报告《气候变化 2021: 自然科学基础》及决策者摘要发布, 评估报告中详细讨论了海洋热浪事件的相关内容, 强化了极端海洋天气气候事件对人类的影响, 以及海洋在气候变化中的重要作用。

海洋热浪严重影响海洋生态系统, 会导致珊瑚白化、渔业减产和有害藻华等, 阻碍生态和社会经济的健康发展, 已成为海洋气候和海洋生态环境领域的一个重要前沿。AR6 报告对全球海洋热浪事件的背景、变化事实和预测、以及影响和适应等方面进行了较全

收稿日期: 2022-04-20

通信作者: 王慧, 研究员。电子邮箱: wh-cherry@126.com

面的论证<sup>[4-5]</sup>。以下对相关内容进行简要推介。

1 海洋热浪定义

海洋热浪是指发生在海洋中的极端高温事件，时间可持续数日至数月，面积可覆盖数平方千米至数千平方千米，可对海洋生态系统及其服务带来严重后果<sup>[6-8]</sup>。海洋热浪常用定义是海温超过季节阈值（90%分位数），且持续时间 $\geq 5$  d 的异常暖事件（允许异常暖期间海水温度短暂地低于阈值，但不能连续超过 2 d；海水温度超过阈值持续时间不到 5 d，称之为热

峰），通过强度、持续时间、发生频率等来描述海洋热浪的基本特征<sup>[9]</sup>（图 1 和表 1），统计计算可通过 Python 编程语言（<http://github.com/ecjo/liver/marine-HeatWaves>）、R 语言（<https://robwschlegel.github.io/heatwaveR/>）或 MATLAB 实现（[https://github.com/ZijieZhao/MMHW/m\\_mhw1.0](https://github.com/ZijieZhao/MMHW/m_mhw1.0)）。采用季节阈值可以有效避免季节变化的影响，冷季节的海洋热浪事件同样可对生态系统造成严重后果。至少持续 5 d 的极端高温定义为一次海洋热浪事件是因为 Hobday 等<sup>[9]</sup>通过敏感性分析发现，持续时间若短于 5 d 热带地区的海洋热浪频次将远远多于其他地区，而超过 5 d 全球大部分区域年

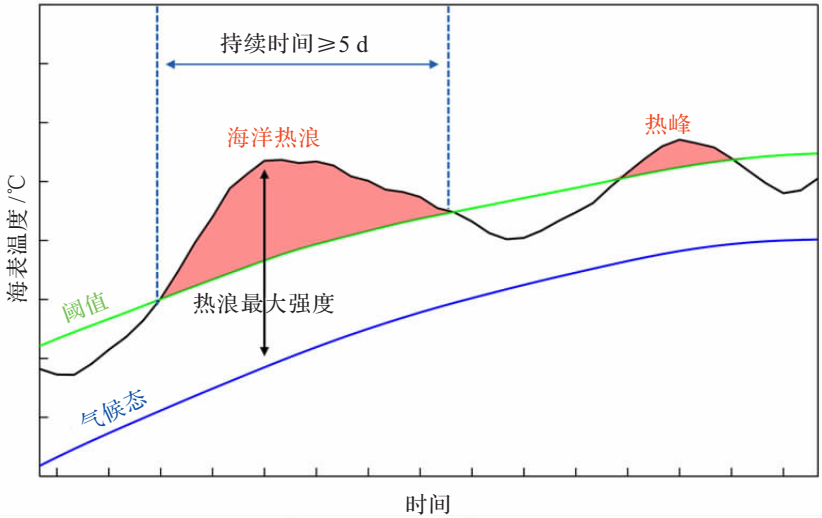


图 1 海洋热浪定义简图（引自王爱梅等<sup>[8]</sup>）

表 1 海洋热浪特征指标

指标	定义	单位
$T_s$	海洋热浪起始的时间	days
$T_e$	海洋热浪结束的时间	days
$D$	海洋热浪持续时间 $D=T_e-T_s$	days
$i_{\max}$	海洋热浪最大强度，即热浪期间温度异常的最大值	°C
$i_{\text{mean}}$	海洋热浪平均强度，即热浪期间温度异常的平均值	°C
$i_{\text{var}}$	海洋热浪强度标准差，即热浪期间海温的标准差	°C
$r_{\text{onset}}$	海洋热浪从起始到最大强度的温度变化率	°C/day
$r_{\text{decline}}$	海洋热浪从最大强度到结束的温度变化率	°C/day
$i_{\text{cum}}$	海洋热浪的累积强度	°C days
$A$	发生海洋热浪的海域面积	km <sup>2</sup>
$L$	发生海洋热浪的海岸线长度	km

均海洋热浪发生频次少于1次,可在当前气候条件下实现全球相对均匀的海洋热浪统计。

此外,有针对性的方法被用来描述威胁特定生态系统的海洋热浪,例如,应用超过典型夏季温度的累积热应激,即“周热度 (Degree Heating Weeks)”来估计珊瑚漂白的可能性<sup>[9]</sup>。

## 2 大气和海洋变暖

全球变暖导致大气圈和海洋圈发生了广泛而迅速的变化,气候系统许多层面近期的变化规模及当前状态是过去几个世纪甚至数千年来前所未有的。全球变暖持续下,气候系统平均状态变化加剧,海洋及大气均发生了持续的暖化。

IPCC AR6 评估结果表明,2011—2020年,全球平均表面温度较工业化前水平(1850—1900年平均)高 $1.09^{\circ}\text{C}$ ,其中陆地表面增温幅度高于海洋表面。过去4个10年全球表面温度梯度上升,且高于1850年以来的任何一个10年。近50年全球表面温度升温速率快于过去2000年里任何一个50年的升温速率。

与1850—1900年相比,在5种排放情景下(SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5),到

21世纪中叶全球表面温度将持续升高;除非在未来几十年内大幅减少温室气体排放,否则,到21世纪末全球变暖将超过 $1.5^{\circ}\text{C}$ ,甚至 $2^{\circ}\text{C}$ 。2081—2100年期间全球表面平均温度在低温室气体排放情景下(SSP1-1.9)极有可能会升高 $1.0^{\circ}\text{C}\sim 1.8^{\circ}\text{C}$ ,在高温温室气体排放情景下(SSP5-8.5)有可能会升高 $3.3^{\circ}\text{C}\sim 5.7^{\circ}\text{C}$ 。

气候系统大部分的额外能量被海洋吸收,导致海洋温度和热含量的变化。自1971年以来,全球海洋已经变暖<sup>[8]</sup>。2011—2020年,全球海洋表层温度相对于1850—1900年平均升高 $0.88$  ( $0.68\sim 1.01$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,其中 $0.60^{\circ}\text{C}$ 的增温发生在1980年之后。海表温度变化区域差异明显,不同地区的海温升温速率不同,有些地区略有降温。1950年以来,热带大洋增温速率高于其他海域,增温速率最快的区域位于热带印度洋和西边界流区。受海洋环流影响,南大洋、赤道太平洋、北大西洋和沿岸上升流系统区域升温速率较慢或海表温度在降低。

基于耦合气候模型预估,几乎可确定海洋将在21世纪持续增暖,增温速率在21世纪中期之后取决于排放情景。国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)模型预测的1995—2014年至2081—2100年期间的未来全球平均海温增量在SSP1-2.6下为

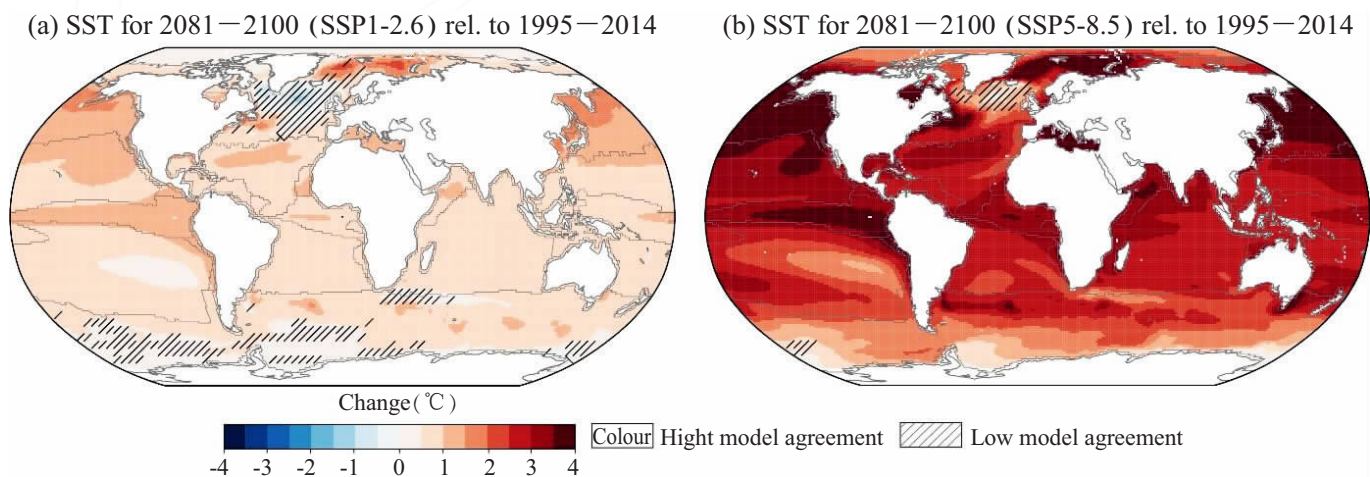


图2 不同社会经济情景下海表温度变化



0.86°C (0.43~1.47°C), SSP2-4.5 下为 1.51°C (1.02~2.19°C), SSP3-7.0 下为 2.19°C (1.56~3.30°C), 以及 2.89°C (2.01~4.07)。更强的海表增暖发生在热带部分海域、北太平洋和北冰洋, 在 SSP5-8.5 下到 2080—2099 年增温幅度达 4°C<sup>[11]</sup>。在所有 SSP 情景下, 21 世纪至少 83% 的海洋表层海温会升高。CMIP6 气候模型还预测了海底的海洋变暖, 预测的变化幅度小于海表, 但不确定性较大, 此处报告的 CMIP6 预测的世纪末变暖大于在 AR5 和 SROCC 中使用国际耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 模型对类似辐射强迫情景进行的评估<sup>[9]</sup>, 因为 CMIP6 模式集合中的气候敏感性大于 CMIP5<sup>[12-13]</sup>。

### 3 海洋热浪变化事实和预估

海洋和大气的暖化显著增加了极端天气和气候事件的发生频率和强度<sup>[14]</sup>。IPCC AR6 报告指出, 自 20 世纪 50 年代以来, 全球绝大部分地区极端高温事件的频率和强度在增加, 同时, 极端低温事件的频率和强度在下降。海洋中的极端事件会对海洋生态系统和依赖海洋生态系统的人类社区产生破坏性影响。海洋

热浪即为发生在海洋中的极端高温事件。

IPCC AR6 报告指出, 自 1980 年以来, 海洋热浪变得更频繁、更强和持续时间更长, 这很可能是人为造成的气候变化。基于卫星观测和再分析海表温度数据显示, 1982—2016 年海洋热浪强度每 10 年增加 0.04°C, 空间范围每 10 年增加 19%, 1987—2016 年海洋热浪发生天数较 1925—1954 年增加了 54%<sup>[15-16]</sup>。至少自 2006 年以来, 84%~90% 的海洋热浪很可能是由人为排放温室气体导致的全球变暖引起的<sup>[8]</sup>。由于人为气候变化, 过去 30 年中发生的最大和最具影响力的海洋热浪事件的发生概率 (以及持续时间和强度) 增加了 20 多倍<sup>[17]</sup>。

预测显示海洋热浪事件的频率、持续时间、空间范围和强度将进一步增加。预计到 2081—2100 年 (相对于 1995—2014 年), 海洋热浪的频率 (全球范围) 将增加 2~9 倍 (SSP1-2.6) 和 4~18 倍 (SSP5-8.5)。海洋热浪频率变化最大的海域位于热带大洋和北冰洋。温室气体排放情景 (SSP5-8.5) 下, 热带海洋、北极和南纬 45° 附近海域将出现永久性海洋热浪 (每年超过 360 d), 但在低温室气体排放情景下, 这种永久性海洋热浪很大程度上可以避免<sup>[15,18-19]</sup>。

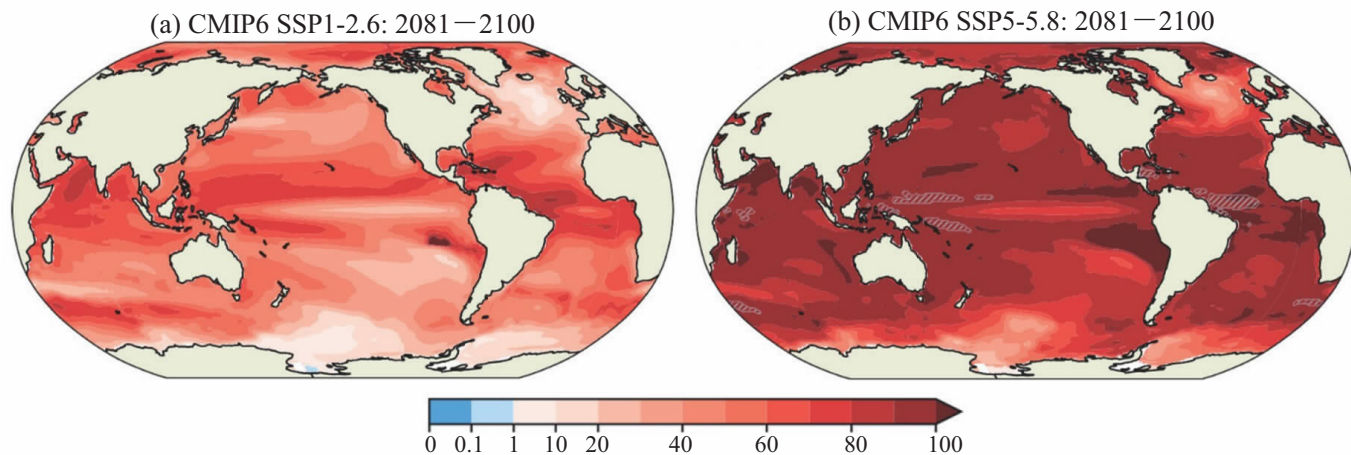


图3 两种不同的温室气体排放情景下至 21 世纪末的海洋热浪 (MHWs) 出现概率比

(注: 概率比是每年 MHW 天数相对于工业化前增加的比例。灰色对角线表示永久性 MHWs 区域 (每年海洋热浪天数大于 360 d))

## 4 海洋热浪对海洋生态系统的影响及应对措施

人类活动引起的气候变化使海洋和海岸带生态系统暴露在数千年来前所未有的状况下,极大影响了海洋生物的季节性活动、分布和丰度。海洋物种地理范围的变化受海洋变暖的速度和方向影响,自1950年以来海洋生物群落平均以每10年 $59.2 \pm 15.5$  km的速度向极移动,在不同种群和区域差异较大。浮游生物的季节性事件每10年提前 $4.3 \pm 1.8$  d至 $7.5 \pm 1.5$  d,鱼类的季节性事件平均每10年提前 $3 \pm 2.1$  d。变暖、酸化和脱氧正在改变生态群落,导致栖息地丧失、数量减少、物种灭绝风险增加以及海洋食物网重组。

与渐进式的气候变化相比,极端事件对海洋生态系统的影响更为显著。由于全球变暖,海洋热浪变得更加频繁和强烈。1981—2017年间,大型海洋热浪的发生概率增加了20多倍<sup>[8,17]</sup>,增加了生态系统突变的风险<sup>[20-22]</sup>。海洋热浪导致了包括珊瑚、海藻、海草、鱼类和海鸟等多种海洋物种的死亡,并对生态系统以及水产养殖和渔业等产业产生破坏性影响。已发生的严重海洋热浪事件比如北美西海岸海洋热浪(2013—2016年)和澳大利亚东海岸海洋热浪(2015—2016年、2016—2017年和2020年),导致了群落组成的突然转变,这种转变可能持续多年,伴随着相关的生物多样性丧失,区域渔业和水产养殖业的崩溃以及栖息地形成物种保护海岸线的能力下降。海洋热浪可以导致浅水底栖生物的广泛死亡,从而引发其分布的大范围收缩<sup>[23]</sup>;海洋热浪可以通过开放生态位和增加暖相关物种来促进生态系统范围的扩大<sup>[24-26]</sup>。海洋热浪还可以显著增加海洋 $\text{CH}_4$ 释放,正反馈于全球变暖<sup>[27]</sup>。

开阔海域和沿海生态系统,包括珊瑚礁、岩石海岸、海藻林、海草、红树林、北冰洋和半封闭海最近

都经历了海洋热浪带来的严峻挑战。海洋热浪的强度、重现率和持续时间的增加将加剧气候对海洋和沿海生态系统的影响,在某些情况下,会导致物种灭绝、栖息地崩溃或超过生态临界点。在低温室气体排放情景下(SSP1-2.6),海洋热浪的强度和频率也将不断增加,到21世纪中叶珊瑚礁面临着广泛衰退、结构完整性丧失和过渡到净侵蚀的风险。随着海洋热浪加剧,包括海藻林、红树林和海草在内的其他沿海生态系统容易出现向替代状态的相变。海藻林的损失预计在物种分布范围的低纬度温暖边缘最大。未来几十年,预计在所有排放情景下,海洋热浪很可能会变得更加频繁<sup>[8]</sup>,其强度和速率对于退化的基础物种、生境或生物多样性的恢复来说太高<sup>[21-22,28-30]</sup>。温度超过 $1.5^\circ\text{C}$ 的排放途径将增加珊瑚礁和其他脆弱生态系统剧烈和不可逆变化的风险。

生态系统为人类社会发展提供重要的服务功能,有效保护生态系统是缓解和适应海洋热浪、保障可持续发展的重要措施。生态系统的完整性受到人类直接影响(土地使用变化、污染、过度开发、碎片化和破坏)以及气候变化(包括海洋热浪)的威胁。提高生物多样性和生态系统服务对海洋热浪的适应能力包括尽量减少额外的压力或干扰,减少碎片化,增加自然生境的范围、连通性和异质性,保持分类(taxonomic)、系统发育(phylogenetic)和功能的多样性和冗余性;保护小规模避难所,在那里小气候环境条件可以让物种存活。在某些情况下,具体的管理干预(包括通过迁徙或干预局部小气候或水文状况)可能有助于减少海洋热浪对单个物种或生物群落的风险。适应还包括防止海洋热浪的影响或在海洋热浪之后帮助生态系统恢复的行动。在某些情况下,消除其他人类压力可以促进生态系统从海洋热浪中恢复。了解脆弱物种的特征有助于预警系统将负面影响降至最低,并为

管理干预提供信息。

基于生态系统的管理、气候智能型保护模式（即气候适应性渔业）和沿海生境恢复等基于自然的解决方案具有低成本高成效，能产生社会、经济和文化方面的共同效益，同时有助于保护海洋生物多样性。基于生态系统的适应和其他基于自然的解决方案，其本身容易受到气候变化的影响，不是大幅削减温室气体排放的替代方案，也不是推迟削减的理由。越来越多的证据表明，多级治理、与气候相关的海洋灾害预警系统、季节性的动态预测、沿海生境恢复、基于生态系统的管理、气候适应性管理和可持续捕获如果与雄心勃勃的减缓措施相结合，那么其适应性行动将会更成功。复合极端事件如海洋热浪与酸化低氧同时发生，对海洋生态系统将造成极端后果，目前并没有适当的适应方案，需开展跨学科合作。

## 5 对我国近海海洋热浪事件研究的启示

在全球变暖背景下，中国近海海表温度总体升温明显，极端高温的强度呈显著增加趋势<sup>[31]</sup>。1982—2018年，中国近海海洋热浪的平均年总天数、持续时间、发生频率和平均强度的增长速率分别为20~30 d/10 y、5~9 d/10 y、1~2/10 y和0.1~0.3℃/10 y ( $p < 0.01$ )<sup>[32]</sup>。海洋热浪在任何时间都有可能发生<sup>[10]</sup>。持续数周至数月的海洋热浪使物种和生态系统暴露在超出其耐受和适应极限的环境条件下。沿海水域的海洋热浪对浅水生态系统的危害可能比对深海大洋生态系统的危害更大。中国的边缘海具有丰富的渔业资源和重要的生态功能，近年来已发生多起影响深远的海洋热浪事件。2017年7月北黄海热浪事件持续时间达60 d，热浪最大强度为2.93℃，此热浪事件被认为是引发獐子岛扇贝大量死亡的一个重要因素<sup>[33]</sup>；2018年8

月渤海也发生海洋热浪事件，造成近岸大量养殖海参死亡<sup>[34]</sup>。2016—2018年东海和南黄海连续3年夏季发生海洋热浪事件，这在过去的40年中是前所未有的<sup>[35]</sup>。在东海和南黄海，有害藻华的频发往往与海洋热浪有关。2020年5月30日至7月31日雷州半岛西部至广西涠洲岛发生持续时间达63 d的海洋热浪事件，受此影响北部湾海域珊瑚礁发生严重白化<sup>[36]</sup>。

前人已就中国近海发生的典型海洋热浪事件讨论了其物理驱动因素和潜在的生态影响<sup>[35, 37-38]</sup>，Liu等揭示了南海海洋热浪多样性及其与ENSO位相的联系。研究发现，南海海洋热浪多样性在年际尺度上与ENSO存在显著的季节锁相特征，ENSO不同位相是进行南海海洋热浪季节预测时所必须考虑的因素<sup>[39]</sup>。但目前海洋热浪的认识主要集中在海洋表层的海洋热浪，而对次表层海洋以下的天气尺度极端温度变化认识不足<sup>[40]</sup>。同时，在海洋热浪对中国近海珊瑚、海草和海藻林等生态系统的物种和种群的生物影响、蓝碳储存的影响机理、渔业捕捞量的影响及应对研究方面严重不足，这限制了我们保护海洋资源免受未来极端气候事件影响的能力。此外，对于海洋热浪如何与其他压力源（缺氧、酸化、海洋污染等）相互作用从而影响海洋生物、种群和生态系统的理解仍然有限。

尽管国内学者对我国近海海洋热浪物理驱动因素和形成机制有了初步认识<sup>[35, 41-43]</sup>，但未对预测海洋热浪的能力进行全面的评估。海洋热浪带来的挑战将对气候变化下的海洋生物资源可持续管理造成“双重压力”。因此，更好地监测和预测中国近海海洋热浪对于生态系统更好地应对环境风险至关重要。目前迫切需要制定一整套适应和减缓措施，包括充分的观测、广泛深入的多学科交叉合作、改进的预测预报、积极的资源管理和增强生态系统复原力，以应对日益增强的海洋热浪事件。



## 参考文献

- [1] PEARCE A, LENANTON R, JACKSON G, et al. The "marine heat wave" off Western Australia during the summer of 2010/11 [R]. Fisheries Research Report No. 222, Department of Fisheries, Western Australia, 2011: 40.
- [2] HUGHES L, STEFFEN W, RICE M. Australia's Coral Reefs Under Threat from Climate Change. 2016. [2022-6-6]. <https://www.climatecouncil.org.au/resources/reefreport/>
- [3] IPCC. Summary for policymakers [M/OL] //IPCC. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019 [2022-6-6]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- [4] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M/OL]. 2021.[2022-3-16]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [5] IPCC. Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability [M/OL]. 2022. [2022-3-16]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [6] HOBDAI A, ALEXANDER L, PERKINS S, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. Progress in Oceanography, 2016(141): 227-238.
- [7] SMALE D, WERNBERG T, OLIVER E, et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(4): 306.
- [8] FOX-KEMPER B. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: 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: Cambridge University Press, 2021.
- [9] DONNER S. An evaluation of the effect of recent temperature variability on the prediction of coral bleaching events. Ecological Applications, 2011(21): 1718-1730.
- [10] 王爱梅, 王慧, 范文静, 等. 2019 年中国近海海洋热浪特征研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(6): 35-44.
- [11] KWIATKOWSKI L. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections[J]. Biogeosciences, 2020, 17(13): 3439-3470.
- [12] FORSTER P. Current and future global climate impacts resulting from COVID-19[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(10): 913-919.
- [13] LEE D, FAHEY D, SKOWRON A, et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018[J]. Atmos. Environ, 2021(244): 117834.
- [14] ROBINSON A, LEHMANN J, BARRIOPEDRO D, et al. Increasing heat and rainfall extremes now far outside the historical climate[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2021, 4(1): 45.
- [15] FRÖLICHER T, E FISCHER, N GRUBER. Marine heatwaves under global warming[J]. Nature, 2018, 560(7718): 360-364.
- [16] OLIVER E. Mean warming not variability drives marine heatwave trends[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(3): 1653-1659.
- [17] LAUFKÖTTER C, J ZSCHEISCHLER, T FRÖLICHER. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming[J]. Science, 2020, 369(6511): 1621-1625.
- [18] OLIVER E. Projected Marine Heatwaves in the 21st Century and the Potential for Ecological Impact[J]. Frontiers in Marine Science, 2019(6): 734.
- [19] PLECHA S, P SOARES. Global marine heatwave events using the new CMIP6 multi-model ensemble: from shortcomings in present climate to future projections[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(12): 124058.
- [20] VAN DER BOLT B. Climate reddening increases the chance of critical transitions[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 478-484.
- [21] GARRABOU J. Sliding Toward the Collapse of Mediterranean

- Coastal Marine Rocky Ecosystems. In: Ecosystem Collapse and Climate Change [M]. Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 291-324. ISBN 978-3-030-71330-0.
- [22] WERNBERG T. Marine Heatwave Drives Collapse of Kelp Forests in Western Australia. In: Ecosystem Collapse and Climate Change [Canadell, J. G. and R. B. Jackson (eds.)]. Springer International Publishing, Cham., 2021, 325-343.
- [23] SMALE D, T WERNBERG. Extreme climatic event drives range contraction of a habitat-forming species [J]. Biological Sciences, 2013, 280: 1754.
- [24] LERIORATO J, Y NAKAMURA. Unpredictable extreme cold events: a threat to range-shifting tropical reef fishes in temperate waters[J]. Marine Biology, 2019, 166(8): 110.
- [25] THOMSEN M. Local extinction of bull kelp (*Durvillaea* spp.) due to a marine heatwave [J]. Frontiers in Marine Science, 2019(6): 84.
- [26] MONACO C. Natural and anthropogenic climate variability shape assemblages of range-extending coral reef fishes [J]. Journal of Biogeography, 2021, 48(5): 1063-1075.
- [27] BORGES A V, et al. Response of marine methane dissolved concentrations and emissions in the Southern North Sea to the European 2018 heatwave [J]. Continental Shelf Research, 2019(190): 104004.
- [28] BABCOCK R. Severe continental-scale impacts of climate change are happening now: extreme climate events impact marine habitat forming communities along 45% of Australia's coast[J]. Frontiers in Marine Science, 2019(6): 411.
- [29] KLEIN S G, GERALDIN R, ANTON A, et al. Projecting coral responses to intensifying marine heatwaves under ocean acidification[J]. Global Change Biology, 2022, 28(5):1753-1765.
- [30] SERRANO O. Impact of Marine Heatwaves on Seagrass Ecosystems[M]. Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 345-364. ISBN 978-3-030-71330-0.
- [31] 齐庆华, 蔡榕硕. 中国近海海表温度变化的极端特性及其气候特征研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 36-51.
- [32] YAO Y, WANG J, YIN J, et al. Marine heatwaves in China's marginal seas and adjacent offshore waters: Past, Present, and Future[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125, e2019JC015801.
- [33] Li Y, Ren G, Wang Q, et al. More extreme marine heatwaves in the China Seas during the global warming hiatus[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(10): 104010.
- [34] 齐庆华, 蔡榕硕, 颜秀花. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨[J]. 海洋通报, 2019, 38(4): 361-367.
- [35] GAO G, MARIN M, FENG M, et al. Drivers of marine heatwaves in the East China Sea and the South Yellow Sea in three consecutive summers during 2016-2018[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(8): 1-19.
- [36] 国家海洋信息中心, 中国气候变化海洋蓝皮书 (2021)[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [37] TAN H, CAI R. What caused the record-breaking warming in East China Seas during August 2016[J]. Atmos. Sci. Lett., 2018, 19: e853.
- [38] YAN Y, CHAI F, XUE H, et al. Record-breaking sea surface temperatures in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125, e2019JC015883.
- [39] LIU K, XU K, ZHU C, et al. Diversity of Marine Heatwaves in the South China Sea Regulated by ENSO Phase[J]. Journal of Climate, 2022, 35(2): 877-893.
- [40] HU S, LI S, ZHANG Y, et al. Observed strong subsurface marine heatwaves in the tropical western Pacific Ocean[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(10): 104024.
- [41] TAN H, CAI R, WU R. Summer marine heatwaves in the South China Sea: Trend, variability and possible causes[J].



- Advances in Climate Change Research, 2022, 13(3): 323-332.
- [42] Yao Y, Wang C. Variations in Summer Marine Heatwaves in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(10), e2021JC017792
- [43] Li Y, Ren G, You Q, et al. The 2016 record-breaking marine heatwave in the Yellow Sea and associated atmospheric circulation anomalies[J]. Atmospheric Research, 2022, 268: 106011.

## The Changes of Marine Heatwaves and Impacts on Marine Ecosystems and Related Responses in IPCC AR6

WANG Aimei, WANG Hui, LUO Jingxin, QUAN Mengyuan

(National Marine data and Information Service, Tianjin 300171, China)

**Abstract** Based on the latest scientific research results, detailed evidence and diverse methods, the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) comprehensively updated the understanding of the past and future changes, the impacts and adaptations of marine heatwaves. The global warming caused by the emission of greenhouse gases by human activities has exposed the oceans and coastal ecosystems to conditions unprecedented in thousands of years. The oceans continue to warm. At the ocean surface, temperature has on average increased by 0.88°C from 1850—1900 to 2011—2020. Since the 1980s, marine heatwaves have approximately doubled in frequency, becoming more intense and longer. The projected results indicate that marine heatwaves will become more frequent. Compared with 1995—2014, the frequency of global marine heatwaves in 2081—2100 will increase by 4[2~9] times (SSP1-2.6) and 8[3~15] times (SSP5-8.5), with the largest changes occurring in tropical ocean and the Arctic. The increase in the intensity, frequency and duration of marine heatwaves will aggravate the impact on marine and coastal ecosystems, and in some cases will lead to species extinction, habitat collapse or exceeding ecological critical points. These findings again raise the necessity and urgency of adapt and address risk of marine climate change.

**Keywords** IPCC AR6; climate change; SST; marine heatwaves



王爱梅 女, (1987—), 博士, 毕业于中国科学院南海海洋研究所。主要从事海洋气候变化研究, 发表论文 20 余篇, 其中第一作者或通讯作者 6 篇。