

doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.03.005

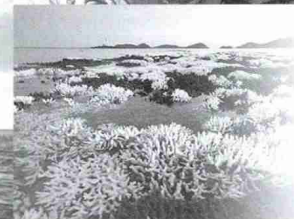
蔡榕硕, 齐庆华. 气候变化与全球海洋: 影响、适应和脆弱性评估之解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10 (3): 185-190

## 气候变化与全球海洋: 影响、适应和脆弱性评估之解读

蔡榕硕<sup>1,2</sup>, 齐庆华<sup>1,2</sup>

1 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005;

2 国家海洋局海洋大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005



**摘要:** 本文主要简介 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 第二工作组 (WGII) 报告海洋区域与气候变化相关的影响、适应和脆弱性的主要评估结论。本次评估报告首次将全球海洋视为地球上的一个区域, 并根据全球海洋生态系统的结构和功能及海洋学特征, 进一步将全球海洋 (不包括极地海域) 划分为 7 个亚区域。评估结果表明, 自 20 世纪初以来, 海洋大部分亚区域的平均海表温度有显著上升, 对 CO<sub>2</sub> 的吸收使得海洋发生酸化, 过去 60 年来全球海洋的物理和化学性质直至生态发生了明显变化, 并呈现出若干与气候变化相关的风险和脆弱性, 如海洋生物物种地理分布的迁移, 生物多样性和渔业资源丰富度的减少, 渔业捕获量随不同区域的变化, 以及珊瑚礁生态保护作用的减弱等; 同时, 评估报告还针对气候变化的影响与风险, 提出了有关适应性措施。此外, 本文还探讨了气候变化对海洋影响评估存在的不足和难点, 以及中国今后需要加强的相关工作。

**关键词:** 海洋区域; 影响; 气候变化; WGII; AR5

### 引言

地球表面约 71% 为海洋。海洋除了在地球气候系统的自然变化中发挥着重要的作用之外, 还吸收了约 93% 因温室效应产生的额外能量和约 30% 由人类活动排放到大气中的 CO<sub>2</sub>, 这对人类活动引起的气候变暖有显著减缓作用。IPCC 第五次评估报告 (AR5) 第二工作组 (WGII) 报告中“海洋区域” (The Ocean, 第 30 章), 首次将全球海洋视为地球上的一个区域, 并较完整地评估了气候变化和海洋酸化对全球海洋区域的环境和生态的影响, 以及海洋区域对气候变化的适应和脆弱性<sup>[1]</sup>, 这与 AR5 中也是首

次增加的“海洋系统” (Ocean Systems, 第 6 章) 主要关注海洋生物生理、生态过程与系统的变化不同。本文主要阐述并解读“海洋区域”的若干主要结论<sup>[1]</sup>。

### 1 全球海洋的 7 个亚区域

为了便于评估气候变化对全球海洋区域环境与生态的影响, 并分析海洋区域对气候变化的适应和脆弱性, AR5 基于全球海洋生态系统的结构和功能以及海洋学特征, 创造性地将全球海洋 (不包括极地海域) 进一步划分为 7 个亚区域, 分别是高纬度春季藻华系统 (High Latitude Spring Bloom Systems)

收稿日期: 2014-02-21; 修回日期: 2014-04-16

资助项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAC20B05); 公益性海洋行业科研专项资助项目 (GYHY20100519)

作者简介: 蔡榕硕, 男, 研究员, 从事海洋环境和气候变化研究, 近年重点关注海气相互作用与全球变化及与海洋生态变化的关系, rscail@163.com

赤道上升流系统(Equatorial Upwelling Systems)、半封闭海(Semi-Enclosed Seas)、近岸与近海系统(Coastal Boundary Systems)、大洋东边界上升流生态系统(Eastern Boundary Upwelling Ecosystems)、副热带涡旋(Sub-Tropical Gyres)和深海(Deep Sea, >1000 m)等7个亚区域,如图1所示<sup>[1]</sup>。极地海域及其他涉海的部分分别由“极地区域”(第28章)、“海岸带系统与低洼地区”(第5章)和“小岛屿”(第29章)等专门研究和评估。在此不另赘述。

## 2 影响与风险

AR5中评估了气候变化对全球海洋区域环境和生态的影响与风险。结果表明,1950—2009年,印度洋、大西洋和太平洋平均海表温度分别上升了0.65、0.41和0.31 (很可能)<sup>[1]</sup>。过去100多年来,

洋盆尺度的海表温度变化与人类源温室气体强迫背景下海-气耦合模式模拟的温度变化趋势一致(高信度);同时,海洋对CO<sub>2</sub>的吸收降低了海水的pH值(约0.10个单位,即海洋发生酸化),酸化速度是过去6500万年来前所未有的(高信度),并从根本上改变了海洋的生态,特别是高纬度海区海洋碳酸盐的化学过程(高信度)。

受海洋变暖、酸化、含氧量和碳酸盐等物理化学性质的变化对海洋生物生态的影响,渔业捕捞、海水养殖以及数以百万计以此为生的人们面临着气候变化影响的风险(高信度),并且,海洋大部分区域还将持续变暖和酸化,其变率和影响随不同区域变化(高信度)。除了全球变暖将导致更频繁的极端事件外,海洋生态系统及与此相关的人类社会将面临更多更严重的风险和脆弱性。以下概述了气候变化对7个海洋亚区域的若干影响和风险。

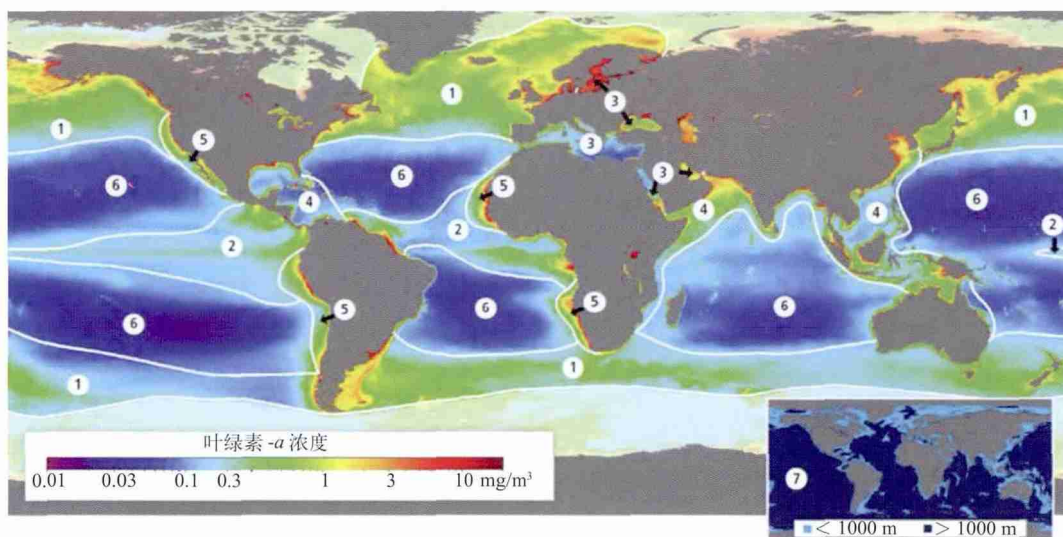


图1 根据海洋生态系统的结构和功能以及海洋学特征,将全球海洋划分为7个亚区域<sup>[1]</sup>

(图中的叶绿素-a浓度分布是1997年9月4日—2010年11月30日NASA的SeaWiFS遥感资料的平均结果,用以指代海洋初级生产力水平。图中的数字代表7个亚区域:1=高纬度春季藻华系统;2=赤道上升流系统;3=半封闭海;4=近岸与近海系统;5=大洋东边界上升流生态系统;6=副热带涡旋;7=深海,由右下角的插图表示)

Fig. 1 Separation of the world's non-polar oceans into seven major sub-regions<sup>[1]</sup>. The chlorophyll-*a* signal measured by SeaWiFS and averaged over the period from Sep 4, 1997 to 30 Nov 2010 (NASA) provides a proxy for differences in marine productivity. Ecosystem structure and functioning, as well as key oceanographic features provide the basis for separating the Ocean into the sub-regions shown. The map insert shows the distribution of Deep Sea habitat (>1000 m; Bathypelagic and Abyssopelagic habitats combined). Numbers refer to: 1 = High Latitude Spring Bloom Systems; 2 = Equatorial Upwelling Systems; 3 = Semi-Enclosed Seas; 4 = Coastal Boundary Systems; 5 = Eastern Boundary Upwelling Ecosystems; 6 = Sub-Tropical Gyres and 7 = Deep Sea (>1000 m)

在气候变化背景下,高生产力的高纬度春季藻华系统、大洋东边界上升流生态系统和赤道上升流系统等亚区域的风场和海水混合的变化可能已影响到从微生物过程直至较高营养阶层的能量传递。在某些海区,有更多的有机碳向深海的转移可能会刺激微生物的耗氧水平(中等信度),而由于海温升高、海水层化和环流变化的影响,热带太平洋、大西洋和印度洋(特别是赤道上升流系统)的溶解氧浓度正在下降。在高纬度春季藻华系统的东北大西洋海区对海洋变暖有明显的响应(中等证据,一致性高),其中,最大的变化为1970年代末以来该海区浮游生物的物候特征、地理分布和丰度以及鱼类种群的变化(高信度),特别是这个亚区域的鱼类和浮游动物的迁移速度最快。在1950—2009年期间,赤道上升流系统特别是非洲和南美洲近岸的赤道上升流系统已经变暖(太平洋和大西洋的赤道上升流系统表层温度分别上升了0.54和0.43,很可能)。

随着全球气候的变暖,海洋生态系统、生物种群和渔业对于上升流变化引起的风险具有显著的不确定性。对于海洋变暖和酸化的影响而言,由于上升流水体有高CO<sub>2</sub>浓度和低pH值的特点,大洋东边界上升流生态系统和赤道上升流系统也因此具有潜在的脆弱性(中等信度);并且,由于含氧量的减少和文石饱和度的降低还会增加大洋东边界上升流生态系统近岸生态系统和渔业的风险。在1950—2009年期间,大洋东边界上升流生态系统中的加利福尼亚和加拉利上升流的表层海温分别升高了0.73和0.53,而本格拉和洪堡上升流的表层海温变化则不明显。上升流强度的变化与气候变暖的趋势基本一致,然而我们目前对于赤道上升流系统和大洋东边界上升流生态系统变化的认识还很不足,特别是在厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和其他自然变率型态与气候变化交互作用下的影响,尚待进一步研究。

大部分的近岸与近海系统和半封闭海分别自1950年和1982年以来有显著的升温现象。其中,地中海的变暖导致来自大西洋和印度洋热带物种的入侵加剧;而某些海区的变暖还增强了海水层化的风险,阻碍海气的O<sub>2</sub>交换,并形成低氧区域,尤其是

在波罗的海和黑海(中等信度)。在近岸与近海系统的某些海区如东印度洋至西太平洋的部分水域表层海温于1950—2009年间上升了约0.80,其中,东中国海和墨西哥湾等近海有显著升温,且局地的污染对低氧区的扩大也有影响,从而可能影响这些海区的生态系统以及渔业和旅游业等相关产业。在气候变化、局地污染和过度开发等综合影响下,近岸与近海系统、半封闭海和副热带涡旋区域内的珊瑚礁有迅速衰退的现象(高信度)。其中,海温的升高对珊瑚礁的白化和死亡的影响尤为显著(很高信度)。

1998—2010年,北太平洋、印度洋和北大西洋的副热带涡旋等海区的叶绿素浓度分别下降了9%、12%和11%,这高于其内在的季节和年际变率(高信度)。其间,海水的显著变暖导致了海水层化的加强、混合层深度的减少以及可利用的营养盐及生产力的降低等现象。1957—2010年,随着700~2000 m层海水的变暖,深海这个具有最丰富但也最难以评估的生境,其发生的变化可能已包含了人类影响的信号。表层初级生产力的下降可能减少了深海的生态系统对有机碳的利用,如副热带涡旋区的深海。气候变化和海洋酸化对深海有重要的影响,但目前的认识仍很有限。

海洋区域与气候变化相关的较突出的若干关键风险有:鱼类和无脊椎动物等海洋生物地理分布的迁移,低纬度海域及近岸与近海区域渔业捕获量的减少,珊瑚白化和死亡率的增加导致的海洋生物多样性、渔业资源丰富度的减少和珊瑚礁生态保护作用的减弱,海平面上升、极端事件、降水变化和生态恢复能力的降低等引起的沿岸洪涝与海洋生境丧失,以及海洋酸化对甲壳类动物和造礁珊瑚等海洋生物生长发育的影响。

### 3 适应和脆弱性

AR5进一步明确了自20世纪以来全球海洋的物理、化学环境和生物生态普遍发生的变化,尤其是海洋的变暖和酸化具有很高信度。海洋对于自然系统的海气交换、营养物质循环、碳储存、气候变化

调节和生物生境的多样性等方面有重要的作用；并且，对于人类社会的食物和原材料的供应以及文化休闲等服务也具有重要的贡献。其中，近岸和陆架海域为人类所提供的生态系统服务功能尤为重要。许多观测事实表明，海洋的生态服务功能特别是在满足人类需求方面的快速变化值得人们高度关注。本次报告中适应和脆弱性的评估分析主要针对与海洋直接相关的海洋环境和生态、经济和海洋产业等，包括自然生态系统、渔业捕捞和水产养殖、旅游航运、石油天然气、人类健康、海事安全和再生能源等。然而，作为主要驱动因子，气候变化与许多其他因子，包括陆源污染、过度捕捞、物种入侵、生境改变和商业航运等的交叉作用和累积影响，给我们较系统和全面地管理海洋带来了极大挑战，但也为我们通过采取改善海洋生态系统的措施来减缓气候变化的影响提供了机遇。

自然生态系统的适应性可以自发地产生，如海洋物种组分和分布的改变；也可以通过人为的干预形成，如维护良好的水质、加强渔业管理、设立海洋保护区等。后者的作用尤显重要，例如，通过采取更有效的海洋管理和调控政策、市场经济机制以及合理的生态服务评估等措施将有利于进一步提高海洋生态系统的适应性。以“蓝碳计划”为例，即根据滨海湿地生态系统服务功能制定的海洋有机碳捕获计划既可提供适应和减缓气候变化的机遇，还可防范海岸带侵蚀和风暴潮的破坏，并可为渔业物种提供生境。目前，这些适应性对策措施正朝着系统的生态系统管理方向发展。

上述快速变化的海洋物理、化学环境以及其他因子的影响导致了海洋生境的损失、物种的迁徙、疾病的扩散与增加，以及物种入侵和初级生产力的变化等。多种海洋产业也因此面临新的挑战。根据世界粮农组织的数据<sup>[2]</sup>，全球渔业（捕捞和养殖业）为数以亿计的人们提供了丰富的食物蛋白，而上述变化将改变海洋渔业的自然状态和对人类食物蛋白的供应，海洋渔业也因此面临气候变化影响的风险。预估到21世纪中期，高纬度海区的渔业产量将增加，而低纬度海区的产量将减少<sup>[3]</sup>。海水养殖业中尤其是甲壳类动物的生长发育对pH值和钙离子浓度的

下降将更为敏感和脆弱，海洋酸化加剧将可能进一步影响海水养殖业，并使之减产；此外，大部分海水养殖物种对海温有很高的敏感性，对风暴潮和洪水等极端事件也表现得极为脆弱。因此，受气候变化的影响，以渔业为主体的国家的经济具有很高的脆弱性。

降低海洋渔业对气候变化的脆弱性和增强海水养殖业的适应性有多种途径。例如，针对海洋物种地理分布和渔业捕获量变化的预估，调整商业渔业生产活动的范围；通过提高科技和管理的水平，提升饲养效率和调整市场经济机制；建立早期预警和辅助决策系统，增强企业的多样化等，以及开展海洋生态和社会经济系统的脆弱性评估用于帮助沿海地区的企业、社区和家庭减少气候变化带来的风险。此外，减少有关海洋生物生态脆弱性的措施包括增强渔业资源的恢复力，发展可持续的海水养殖业并开发其他可供选择的生计，增强红树林、珊瑚礁和海草等生态系统的防护功能。

旅游休闲业是世界最大的产业之一，气候变化对海洋的影响从多个方面直接影响海洋旅游产业。例如，海洋旅游产业对珊瑚白化等生态服务功能的变化，以及频发的强风暴、极端降水等极端天气气候事件具有很高的脆弱性。随着海平面和海温的升高，以及海岸侵蚀、海水倒灌、风暴潮对海岸基础设施的破坏和珊瑚的白化与死亡等影响的加剧，旅游产业的脆弱性将愈发凸显。其适应性策略包括气候风险的识别、防护设施的建设、滨海生态的保护和预报预警系统的设置，以及灾害应急预案的建立等。

海洋航运业在频发的极端天气气候事件影响下更显脆弱。例如，港口作业和运输路线的中断，设施的损坏及人员伤亡等。海洋资源的开发利用也受到气候变化的潜在影响。其中，海洋石油天然气作业平台的脆弱性尤其显著。采取早期预警计划等措施可减小极端天气气候事件的影响。海温的异常和海洋赤潮等生态灾害的暴发与多种疾病的传播和分布密切相关。此外，海洋环境的变化也会增加维护海洋安全、打击违法活动、开展灾害救援以及航运方面的压力。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

综上所述, 诸多的观测证据显示, 过去 60 年来海洋物理和化学环境的快速变化(如海水的变暖、层化、混合和酸化等)影响了海洋生物和生态系统, 海洋物种和生态系统对气候变化产生了明显的响应(高信度)。这种变化很可能对依赖于海洋生态系统提供食物和服务的人类社会产生负面的影响。在气候变暖的背景下, 海洋生物正在向高纬度海区迁移(高信度), 鱼类和浮游动物的迁移速度最快, 尤其是在高纬度春季藻华系统。海洋变暖改变了海洋生物的物候特征和生命过程的关键节点, 如浮游植物的藻华、鱼类和无脊椎动物的迁徙模式和产卵等(中等信度), 这将可能对海洋渔业捕捞、海水养殖和其他海洋产业造成重大的影响和风险(中到高的一致性)。诸如珊瑚礁等海洋生态系统的快速退化(高信度)相关的风险和脆弱性将随海洋变暖和持续酸化而加剧。但由于海洋的自然变率(太平洋年代际振荡、多年代际大西洋振荡和 ENSO 的多年代际波动)与其他因子的相互作用等原因, 我们对海洋气候变化影响的检测与归因分析仍有较大难度。

在气候变化影响下, 自然生态系统、渔业捕捞和水产养殖、旅游航运、人类健康、食物供应和海事安全、能源和资源的利用等表现出较高的脆弱性, 为降低脆弱性和气候变化影响的风险, 需采取相应的适应性措施。如基于海洋的气候变化减缓措施, 其中, 全球合作决策与管理框架的形成将愈显重要, 并将有利于形成“整体海洋”的观念和策略, 可更有效地应对气候变化带来的风险和挑战。除了分析多种适应性对策措施之外, AR5 还指出了相关评估工作中的不足, 特别是有关海洋对气候变化和酸化的响应等评估工作明显落后于陆地和大气领域。

### 4.2 讨论

IPCC WGII AR5 “海洋区域”一章首次从全球区域的角度开展了气候变化和海洋酸化对全球海洋区域环境与生态的影响评估工作, 并将全球海洋(不包括极地海域)创造性地划分为 7 个亚区域, 但不

同, 亚区域可供引用的调查与研究文献参差不齐, 其中, 印度洋特别是东非近岸海域的文献较少。其次, 近岸与近海系统具有很高的生产力, 约占全球海洋 10.60% 的初级生产力和 28.00% 的渔业产量, 对于海洋经济的可持续发展具有重大意义。然而, 可供应用的海洋环境和生物生态的长期观测数据偏少, 尤其是从气候变化的角度研究中国近岸与近海环境和生态的工作也偏少, 这使得可为气候变化的影响评估提供的信息量有限。再次, 由于人类排放温室气体引起的气候变化、自然气候变率与人类活动的交叉作用及累积效应的复杂性, 在气候变化和海洋酸化对海洋区域的影响评估中仍存在相当多的难点。

此外, “海洋区域”一章中国作者(含港澳台)文献偏少(仅占约 3%), 主要关注中国近海及邻近海域, 有关人类活动与气候变化对海洋综合影响的研究文献偏少。这既反映了中国过去在海洋领域的相关观测和调查研究的不足, 也反映了海洋领域在应对气候变化方面的工作有待加强。特别是中国近岸与近海环境和生态不但受到大洋和东亚季风等气候变化因子的严重影响<sup>[4-6]</sup>, 而且受到人类活动如排污、过度捕捞以及海洋酸化等因素的影响。■

致谢: 感谢国家海洋局第三海洋研究所唐森铭和林茂研究员为本文作者提出的有益建议。

### 参考文献

- [1] Hoegh-Guldberg O, Cai R S, Brewer P G, *et al.* Chapter 30: the ocean [M]// IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, in press, 2014 [2014-03-31]. [http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-Chap30\\_FGDall.pdf](http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-Chap30_FGDall.pdf)
- [2] FAO. State of the world fisheries and aquaculture 2012 [R]. Rome: Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012
- [3] Cheung W W L, Lam V W Y, Sarmiento J L, *et al.* Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change [J]. *Global Change Biol*, 2010, 16 (1): 24-35
- [4] 蔡榕硕, 陈际龙, 谭红建. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16 (1): 94-104
- [5] 蔡榕硕, 齐庆华, 张启龙. 北太平洋西边界的低频变化特征 [J]. *海洋学报*, 2013, 35 (1): 9-14
- [6] Tan H J, Cai R S. A possible impact of El Niño Modoki on sea surface temperature of China's offshore and its adjacent regions [J]. *J Trop Meteor*, 2014, 20 (1): 1-7

## Key Points on Impact Assessment of Climate Change on the Ocean and Related Adaptation from the IPCC Working Group II Fifth Assessment Report

Cai Rongshuo<sup>1,2</sup>, Qi Qinghua<sup>1,2</sup>

*1 Key Lab of Global Change and Marine-Atmosphere Chemistry, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China;*

*2 Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*

**Abstract:** The key conclusions on the effects of climate change and the adaptability evaluation from the chapter 30 (The Ocean) in the Fifth Assessment Report by Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC WGII AR5) were briefly presented in this article. The world's non-polar ocean as a whole region was considered for the first time in this report, and it was separated into seven major sub-regions based on marine ecosystem structure and functioning as well as key oceanographic features. Assessment results indicated that, the global average sea surface temperatures have increased since the beginning of the 20th century, and uptake of CO<sub>2</sub> has decreased ocean pH in all ocean sub-regions, particularly at high latitudes, fundamentally changing the ocean physical and chemical properties, marine ecological systems in the past 60 years and posing a number of key risks to ocean and coastal issues from climate change, such as, distributional shift in marine species, changes to fisheries capture potential with region variations, reduced biodiversity and fisheries abundance and coastal protection by coral reef, etc. Meanwhile, the related adaptive issues and prospects were put forward. In addition, the deficiencies and difficulties in the assessment report were also discussed, as well as outlined, the related research work needed to be further explored in China.

**Key words:** ocean region; impact; climate change; WGII; AR5