

海洋酸化及其与海洋生物及生态系统的关系

唐启升^{①②}, 陈镇东^③, 余克服^④, 戴民汉^①, 赵美训^⑤, 柯才焕^①, 黄天福^⑥, 柴扉^⑦, 韦刚健^⑧, 周力平^⑨, 陈立奇^⑩, 宋佳坤^⑪, BARRY James^⑫, 吴亚平^①, 高坤山^{①*}

- ① 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005;
 ② 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071;
 ③ 台湾中山大学, 高雄 804;
 ④ 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
 ⑤ 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100;
 ⑥ 台湾研究院环境变化研究中心, 台北 115;
 ⑦ School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME 04401, USA;
 ⑧ 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;
 ⑨ 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;
 ⑩ 国家海洋局第三海洋研究所海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005;
 ⑪ 上海海洋大学海洋生物系统和神经科学研究所, 上海 201306;
 ⑫ Monterey Bay Aquarium Research Institute, Moss Landing, CA 95039, USA
 * 联系人, E-mail: ksgao@xmu.edu.cn

2012-11-06 收稿, 2012-12-10 接受, 2013-04-26 网络版发表
中国科学院“百人计划”(2006-067)和国家自然科学基金(40872168)资助

摘要 海洋酸化是 CO₂ 排放引起的另一重大环境问题. 工业革命以来, 海洋吸收了人类排放 CO₂ 总量的三分之一. 目前, 海洋每年吸收的量约为人类排放量的四分之一(即约每小时吸收 100 万吨以上的 CO₂), 对缓解全球变暖起着重要的作用. 然而, 随着海洋吸收 CO₂ 量的增加, 表层海水的碱性下降, 引起海洋酸化. 海洋酸化会引起海洋系统内一系列化学变化, 从而影响到大多数海洋生物的生理、生长、繁殖、代谢与生存, 可能最终导致海洋生态系统发生不可逆转的变化, 影响海洋生态系统的平衡及对人类的服务功能. 地球历史上曾多次发生过海洋酸化事件, 伴随着生物种类的灭绝, 其内在联系虽然不甚明确, 却也可能暗示未来海洋酸化可能对海洋生态系统产生重大的影响.

关键词

CO₂
海洋酸化
海洋化学与
物理过程
全球变化
生态效应

化石燃料的使用等人类活动导致大气中 CO₂ 浓度不断升高, 可能已经导致了全球变暖和气候异常等^[1]. 海洋是地球表面最大的碳库, 不断从大气中吸收 CO₂, 其吸收速率每天可达 2500 多万吨(平均每小时 100 万吨以上)^[2]. 海洋仅此一种“隐形”的生态服务功能, 给全球提供了价值约 860 亿美元的环保补贴^[3], 对缓解全球变暖起着重要的作用. 然而, 随着大气中 CO₂ 浓度持续增高, 海洋吸收 CO₂(酸性气体)的量不断增加, 使得表层海水的碱性下降, 引起海洋酸化.

海洋酸化已被广泛确认为是 CO₂ 上升导致的另一重大环境问题^[4].

自工业革命以来, 海洋大量吸收人类排放的 CO₂, 已导致上层海洋 H⁺浓度增加了 30%, pH 下降了 0.1^[5]. 根据 IPCC 预测模型(A1F1)的推测, 至 2100 年大气 CO₂ 浓度会升高至 800~1000 μL L⁻¹ (ppmv), 表层海洋 pH 将下降 0.3~0.4, 这意味着海水中 H⁺浓度将增加 100%~150%. 这种酸化速度在过去 3 亿年间的任何一个时期都未曾有过^[6]. 海洋酸化引起了海水化学

引用格式: 唐启升, 陈镇东, 余克服, 等. 海洋酸化及其与海洋生物及生态系统的关系. 科学通报, 2013, 58: 1307-1314

Tang Q S, Chen Z D, Yu K F, et al. The effects of ocean acidification on marine organisms and ecosystem (in Chinese). Chin Sci Bull(Chin Ver), 2013, 58: 1307-1314, doi: 10.1360/972012-1596

(碳酸盐系统及物质形态)、物理(声波吸收)及生物过程的变化^[7-9]。虽然科学界已粗略地意识到海洋酸化的危害性,却尚无法准确预测将给人类和地球系统所带来的后果。但可以肯定的是,海洋酸化引起的海洋化学变化,正在改变海洋生物赖以生存的化学环境,海洋生物的代谢过程会受到影响、海洋生态的稳定性会发生变化^[9]。总之,海洋酸化、以及气候变化导致的多重压力,将对海洋生态系统产生深远的影响。

为此,本文拟从海洋酸化的历史记录及现状,酸化与化学物理过程的耦合作用及酸化对海洋生物乃至生态系统的影响三方面,综述有关海洋酸化的研究进展,并展望海洋酸化研究的发展趋势。

1 海洋酸化记录与现状

地质时期的海洋酸化事件可以通过钙质生物的数量、形态和组成变化等古生物指标来识别,或者通过一些元素和同位素地球化学指标定量重建过去表层海水的 pH 来判断^[6]。所识别的古生代以来 8 种钙质生物显著减少的事件中,多数是由大气 CO₂ 含量升高导致的酸化(表层海水 pH 降低达 0.35)引起的^[6]。

有孔虫、珊瑚等钙质生物的硼同位素组成($\delta^{11}\text{B}$)和硼钙比值(B/Ca)初步研究显示,其与海水 pH 之间存在很好的对应关系^[10,11]。然而, $\delta^{11}\text{B}$ 和 B/Ca 在古 pH 定量重建方面的广泛应用仍在探索之中,一方面因为它们与现代乃至古海水 pH 的量化关系仍待进一步建立,另一方面,高精度硼同位素组成的分析非常困难,也在一定程度上束缚了该方法的推广应用^[10,11]。利用珊瑚 ¹¹B 重建的工业革命以来澳大利亚大堡礁海水 pH 变化结果显示,过去 300 年以来海水 pH 并非随着大气 CO₂ 含量升高而线性下降,而是呈现~50、~22 和~11 a 的周期性波动变化,仅仅在最近 60 年以来才出现明显的趋势变化^[12,13]。这意味着至少在珊瑚礁生态系统,大气 CO₂ 含量升高并非是控制该系统海水 pH 变化的唯一因素。

珊瑚礁生态系统中的生物活动对海水 pH 变化产生较大影响。对西沙永兴岛珊瑚礁的观测结果显示,海水 pH 存在大幅度的周日变化,白天 pH 显著升高而晚上显著降低,礁区内光合作用/呼吸作用是控制 pH 变化的重要因素^[14]。这样的控制因素对海水 pH 的影响程度在年际、年代际甚至更长时间尺度里会有差异,很可能是导致珊瑚礁区海水 pH 周期性波动的原因之一。在地质历史时期,海水 pH 处于不断变化

之中,大气 CO₂ 含量在多数时期比现在高得多,但地质记录的大规模海洋酸化事件并不完全发生在大气 CO₂ 最高的时期,说明大气 CO₂ 含量并不是海洋酸化的唯一控制因素^[6]。

通过分析近 50 年来全球海洋 CO₂ 分压($p\text{CO}_2$)的变化规律,比较全球几大代表性海域的 CO₂ 分压的年际变动情况,发现全球表层海洋 $p\text{CO}_2$ 总体上呈现升高的趋势,然而不同纬度、不同海区的上升程度有所差异,有些海域酸化速率较快^[15-17]。

随着大气 CO₂ 含量的升高,澳大利亚大堡礁珊瑚的钙化率自 1990 年以来下降了 14.2%,这是过去 400 年以来的最大降幅^[18];然而,在我国南海虽然发现珊瑚礁急剧退化,活珊瑚覆盖度在过去几十年中下降达 80%以上^[19],但珊瑚钙化率在过去 200 多年来则呈波动变化,近几十年来的下降趋势并不明显,而且与大气 CO₂ 含量的变化并不一致^[20]。这些观测结果似乎显示,海洋酸化现象及其后果在现阶段具有明显的区域差异。利用硼同位素重建的过去海水 pH 结果显示,自古生代以来表层海水 pH 就不断呈现大幅度波动的特征,而且这些波动与气候变化密切相关^[21]。地球历史上发生过的多次海水酸化事件中,其 pH 比现在的要低^[22]。然而,不能因为地质历史时期存在过海洋酸化,或者海水 pH 在地质历史时期随着气候变化而自然波动的事实,而忽视当今人类活动导致的海洋酸化,因为从速率上来看,当前的酸化是迄今 3 亿年间最快的^[6]。同时由于古海洋 pH 记录的时间尺度太长,时间分辨率相对较低,难以评估当前短时间尺度大气 CO₂ 升高导致的酸化程度与后果,迫切需要开展近代及现代短时间尺度、高分辨率的海水 pH 变化过程研究。

古海洋酸化事件,伴随着生物灭绝,但其酸化程度与过程如何,尚存在相当大的不确定性。了解海洋酸化的历史及其相关的生态变化过程,对认知当前与未来海洋酸化的影响具有重要科学意义。研究过去的海洋酸化历史,需要重视以下几个方面:(1) 需要不断完善研究方法,建立指示古海水 pH 的指标,提高重建古海水 pH 的精度和可信度;(2) 更多地重建不同海域、不同时间尺度的海水 pH 序列,便于了解古海水 pH 的时-空特征;(3) 结合气候环境演变过程,深入了解海水 pH 变化的控制机制和生态后果。需要再次重申的是,虽然地质时期海水 pH 存在着大幅度的自然变化过程,酸化事件也曾多次发生,但这

并不否认今天海洋酸化的危害性,特别是与人类活动的关系;相反,通过了解过去海洋酸化的历史和生态影响,如海洋钙质生物的灭绝等,对正确认识现代海洋酸化的进展与后果具有非常重要的借鉴意义。

2 化学与物理过程及其与酸化的耦合作用

海洋酸化正在改变着海水总无机碳浓度与不同形态无机碳(CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-})浓度的比例,并影响海水的 CaCO_3 饱和度,即

$$\Omega = [\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}] / K_c,$$

其中, K_c 为 CaCO_3 溶液达到饱和时 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 的溶度积,与 CaCO_3 的晶体类型(如方解石、文石)有关。

目前,开阔大洋海水中的 HCO_3^- 占总溶解无机碳(DIC)的90%以上, CO_3^{2-} 浓度占9%左右, CO_2 占1%以下。大气 CO_2 浓度的升高会使溶解 CO_2 , HCO_3^- 和 H^+ 浓度增加,而 CO_3^{2-} 浓度和 CaCO_3 饱和度下降。在大气 CO_2 浓度加倍的情况下,表层海水的 $p\text{CO}_2$ 将增加近100%, HCO_3^- 增加11%, DIC 增加9%,而 CO_3^{2-} 浓度下降约45%,碳酸钙饱和度也相应下降。在太平洋时间序列站 ALOHA, 1988~2007 年观测结果显示,表层海水 pH 以 $0.0019 \pm 0.0002 \text{ a}^{-1}$ 的速率下降^[23]; 在东南亚时间序列站 SEATS, 1998~2009 年 12 年间, pH 以 0.0022 a^{-1} 的速率下降^[24]; 均与全球不断升高的大气 CO_2 浓度的变化趋势一致^[25]。开阔大洋表层海水的酸化主要是由于人为 CO_2 的增加。而近岸海域海水的 pH 受陆源输入、物理过程和生物活动的影响,呈现较大的变化幅度;为此,近岸海域表层水的酸化则不能简单视之。有研究推测,受呼吸作用、低氧及大气 CO_2 升高的复合影响,近岸海域的酸化将比大洋海域的酸化速度快^[26]。

在南海东北部近海水域, pH 的周日变化达 ~ 0.3 ^[27]。对比位于北太平洋的东海岸(俄勒冈-加利福尼亚沿岸)和西海岸(南海北部陆架) 2 个沿岸上升流区,加利福尼亚沿岸首次发现了上升流导致的表层文石的不饱和状态^[25];南海北部陆架区尽管也受上升流影响,目前观测到的文石饱和度仍处于过饱和状态^[28]。对分别受密西西比河和长江冲淡水影响的墨西哥湾和东海 2 个富营养化陆架海域的研究发现,除吸收大气 CO_2 水体 pH 会降低外,水体的富营养化所引起的底层水体缺氧和酸化是 pH 下降的另一个重要原因^[26,29]。

珠江口上游常年存在水柱缺氧,缺氧水体呈现

高 $p\text{CO}_2$ 、低 pH 和低的文石饱和度的特征^[30],同时表现出高的硝化速率和氧气消耗速率^[31]。在类似的许多河口上游发现水柱缺氧特征,主要是由微生物的有氧呼吸和硝化作用所致^[32]。

当前大气 CO_2 浓度升高导致了海洋酸化,然而海水 pH 的变化并不一定与大气 CO_2 浓度变化同步,这主要受到海洋热力学平衡的调控。从南海和台湾南湾海域的 pH 记录可以看出,海洋的次表层 pH 下降幅度最大。通过将原位观测数据校准到相同温度时发现,南海的 pH 也在逐步下降,速率与全球平均数值相近,表明我国海域也已经开始发生酸化^[33]。然而,目前对于不同 pH 标度的使用上还存在很多问题,导致大量的数据没有可比性,这在一定程度上妨碍了对海洋酸化现象的正确认识,因此需要探索如何将 pH_{25} (标准化到 25°C 的 pH) 应用于自然海域、如何建立原位 pH 与实验室标准化测量数值的关系等。

对于近海系统的 pH 监测,由于周日变化与月变化幅度大于年变化,因此需要提高 pH 的监测频率,以甄别不同时间尺度上的变化规律,便于对未来海洋 pH 的变化趋势作出正确的评估。同时,由于温度是影响海洋酸化评估的重要参数之一,海水温度上升 1°C ,将会增加海水 $p\text{CO}_2$ $16 \mu\text{L L}^{-1}$ 左右,因此全球变暖本身将会对海洋碳循环产生影响,如降低海水吸收 CO_2 的量、缓解海洋酸化,甚至导致部分海区从 CO_2 的汇变成源。然而,与大气中 CO_2 的累积量与速率相比,海洋增温对海洋酸化的拮抗作用甚微。

由于近海海洋生态系统与人类关系最为密切,因此在我国海域开展海洋酸化研究,既要重视海洋酸化对生态系统的效应,还需要考虑到酸化对我国近海水产经济的影响及养殖业对生态系统的反馈作用^[34]。虽然海洋 pH 一直处在波动之中,然而全球范围内 pH 下降的大趋势已不容置疑。对于全球海洋酸化与我国海域海洋酸化的关系,因为监测数据在时-空上分布不均,以及过去积累的 pH 数据与现在的观测结果大多难以直接对比,所以还不能作出正确的评估。

3 海洋酸化与海洋生物

海洋酸化究竟在多大程度上影响海洋生物,特别是海洋钙质生物,是目前科学界亟待解决的难题。海水中 $p\text{CO}_2$ 、溶解无机碳、pH、 CaCO_3 饱和度及其相互之间的关联,都可能会影响钙质生物的钙化作

用。然而,究竟哪个参数对生物钙化的生理过程起着决定性的影响尚属未知。受控培养实验表明,在 CO_2 浓度升高引起的海水酸化条件下,珊瑚藻类、珊瑚与贝类的钙化量下降^[35,36], 颗石藻的钙化速率降低、细胞表面的颗石片脱落^[37], 对钙化海洋无脊椎动物幼体的不利影响尤为显著^[38]。

海洋酸化对非钙化光合生物与非钙化动物也会产生影响,如促进藻类^[39,40]与浮游动物^[41]的呼吸作用,影响藻类的无机碳获取机制^[42], 动物受精过程^[43]及鱼类嗅觉系统^[44]等。海洋酸化对鱼类的多种感觉器官,如嗅觉、化学感觉和听觉等均会产生不同程度的影响。实验结果展示,酸化环境中长大的鱼比正常条件下长大的同类较易被敌害捕食^[44]。另外,鱼类的生物电场与电(磁)感受能力也可能会受水中 H^+ 浓度增高的影响,为此,海洋酸化可能会影响鱼类利用电场的生理及行为,如洄游、摄食和繁殖等行为^[45-47]。

海洋酸化究竟如何影响海洋光合作用及其驱动的海洋碳泵,关系到海洋吸收 CO_2 的量及未来全球变暖趋势。表面上看, CO_2 浓度升高增加了海水中光合作用的底物浓度,但浮游植物细胞内的 CO_2 浓度不一定升高,也许还会下降,这是因为酸化引起的海水化学变化会对细胞产生胁迫^[48]。为此,海洋酸化对光合生物的影响是正面还是负面,将取决于外界的其他环境条件^[49]。在全球变化背景下,越来越多的研究开始侧重于多因子的交互作用,阳光辐射的强度是影响光合生物对海洋酸化响应的重要因子。走航原位实验和实验室研究结果均显示,在高光强下,浮游植物固碳量或生长受 CO_2 或酸性增加的影响而降低,低光下则受到促进;在不同深度或白天的不同时间,酸化对浮游植物的影响随阳光辐射的变化而变化。同时,海洋酸化与阳光 UV 辐射产生耦合作用,协同降低珊瑚藻类与钙化浮游植物的钙化量^[50,51]。另外,海洋酸化会直接或间接地影响浮游动物的生理代谢,直接影响是影响它们体内或细胞内的酸碱平衡^[52], 间接影响是影响浮游植物的多少或其饵料价值^[53]。在直接影响方面,酸化影响某些桡足类的行为,使得其呼吸与摄食率均增加、排便量也增加^[41]。从生态系统水平看,海洋酸化可能会通过食物链,将初级效应传递到上级营养层,进而影响物种间的相互作用及生态系统的稳定性^[54]。

海洋酸化的这些影响将逐步传递到生态系统,

进而使得生态系统的社会、经济服务功能发生改变^[55,56]。在有外界压力的情况下,如暴露于酸化的海水中,生物将耗费更多的能量去抵御酸化胁迫,或导致代谢失常,从而使得其生理行为或耐受其他环境变化的能力发生改变,如生长下降、繁殖率降低等,并有一系列随之而来的生态效应^[4]。目前有些研究已经显示,海洋酸化将会降低生物的多样性,导致某些物种的消亡,为此,会导致食物链中的关键种类灭绝,会对人类赖以生存的海洋生态系统产生巨大影响^[55]。另外,酸化可能增加有害藻华的毒性^[57,58]。

有关海洋酸化的研究,即使在国际上也才刚刚起步,许多重大科学问题尚在解决之中。迄今的研究结果已经显示了海洋酸化对多数海洋生物种类的影响,然而对这种影响的认识,还局限在酸化单一因子的水平上。在自然界或多重环境变化压力下,海洋生态系统本身的演变与控制机制非常复杂。各种海洋生物如何响应多重压力下的环境变化,是亟需探讨的重大科学问题。从整个生态水平上来看,有些生物种类可能增加了竞争力,有些则失去现在他们所拥有的种群优势^[59]。另外,对海洋酸化的研究应该划分为近海与远洋两大区域,主要因为两者酸化的过程与机制有较大差异。近海海洋生态系统,生物生产力高、受人为干扰因素大, pH 变化幅度虽然较大,但由于低氧和生物呼吸与海洋酸化的耦合作用,酸化速度将比大洋海域快^[26]。大洋海域,生物量密度低、人类干扰少,其酸化趋势主要受控于大气 CO_2 浓度的变化,但不同的海域物理化学过程不同,为此酸化的速率也会有差异。与陆地生态系统的 CO_2 加富实验(FACE)相比,海洋 CO_2 加富酸化实验^[60], 由于海洋环境的特殊性,有相当大的难度。因此,急需开展相关的科学研究,克服技术困难,从生物、物理化学及古海洋领域等不同层面揭示海洋酸化的效应,并需长期监测我国海域海洋酸化的趋势。

我国是世界上最大的水产养殖国,2010年产量达3673万吨,占全球水产养殖的61.4%^[61],其中主要是贝类养殖,产量为1108万吨,占海水养殖的74.8%^[62]。海水养殖在影响近海海水化学性质的同时,也受到海洋酸化及其他全球变化因素的影响。虽然海洋酸化作用于贝类的机制还不是很清楚,但是已有很多科学证据证实了海洋酸化对贝类的负面影响,这将影响全球及区域贝类产量,最终可能造成重大经济损失^[63,64]。我国近海 pH 调控机制比较复杂,

鉴于此, 需要建立长期的观测系统, 以揭示我国养殖生态系统及关键海域的 pH 变动规律, 在此基础上建立起一个评估海洋酸化可能对我国水产养殖带来的经济损失的模型。

4 未来海洋酸化研究

海洋生态系统正处于多重环境压力之下, 对其运转、变迁与调控机制的认识尚存在相当大的不确定性。但可以肯定的是, 近海生态系统、养殖生态系统中的 pH 变化规律与日趋恶化的海洋酸化之间必有一定的关联; 海洋酸化、海洋升温等正在危及海洋生态系统的稳定性; 海洋酸化会对海洋生物及生态系统造成广泛而深远的影响。然而, 不同生物对酸化响应机制的差异, 不同生物的适应性差异及海洋酸化本身的时空差异等, 使得正确评估、预测海洋酸化及其生态效应面临着巨大的挑战。根据迄今的研究进展, 该综述提出以下海洋酸化的研究重点。

(i) 建立一系列科学规范的检测和监测方法,

对海水化学、物理和生物等参数进行长时间监测, 揭示近岸与外海海域在全球变暖、海洋酸化过程中的变动态势。

(ii) 高精度和高分辨率地重建地质历史时期, 特别是与现代环境密切相关的全新世时期(~10000年), 海水 pH 的变化过程和古生态响应规律, 阐明古海洋酸化事件与生物灭绝、演替的关联。

(iii) 建立不同时-空尺度的物理、化学和生态模型, 模拟和预测海洋酸化趋势及生态系统的响应特征。

(iv) 建立中型水量(又称“中宇宙”、“中尺度”)(mesocosm)海洋酸化生态效应研究设施与海洋酸化研究示范区, 综合考虑多重压力因素, 在生态系统水平上研究海洋酸化对海洋生态系统服务功能与产出的影响。

(v) 研究不同生物、不同生理过程及不同生态过程对海洋酸化的响应。

(vi) 评估海洋酸化可能对水产养殖、海洋生态系统带来的灾害, 及其预防措施。

致谢

本文是在综合第 419 次香山会议(海洋酸化: 越来越酸的海洋、灾害与效应预测)讨论意见的基础上, 增补最新进展, 撰写而成。参加香山会议的除该文作者外, 还有(按照姓氏字母顺序): 白雁(国家海洋局第二海洋研究所), 蔡卫君(美国乔治亚大学), 方建光(黄海水产研究所), 高树基(厦门大学), 高众勇(国家海洋局第三海洋研究所), 黄晖(中国科学院南海海洋研究所), 黄良民(中国科学院南海海洋研究所), 蒋增杰(黄海水产研究所), 刘传联(同济大学), 刘光兴(中国海洋大学), 刘红斌(香港科技大学), 刘素美(中国海洋大学), 毛玉泽(黄海水产研究所), 米华玲(中国科学院植物生理研究所), 任建国(国家自然科学基金委员会), 王东晓(中国科学院南海海洋研究所), 王克坚(厦门大学), 魏皓(天津科技大学), 杨海军(北京大学), 俞志明(中国科学院海洋研究所), 袁东亮(中国科学院海洋研究所), 张远辉(国家海洋局第三海洋研究所), 徐军田(厦门大学)等。感谢香山会议办公室及与会科学家的支持。

参考文献

- 1 Solomon S, Plattner G K, Knutti R, et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 1704
- 2 Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 2004, 305: 367–371
- 3 Laffoley D d'A, Baxter J M. Ocean acidification: The knowledge base 2012 updating what we know about ocean acidification and key global challenges. In: European Project on Ocean Acidification (EPOCA) UOARP, (UKOA), Biological Impacts of Ocean Acidification (BIOACID) and Mediterranean Sea Acidification in a Changing Climate (MedSeA), Luxembourg, 2012
- 4 Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annu Rev Mar Sci*, 2009, 1: 169–192
- 5 Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 2005, 437: 681–686
- 6 Hönisch B, Ridgwell A, Schmidt D N, et al. The geological record of ocean acidification. *Science*, 2012, 335: 1058–1063
- 7 Hester K C, Peltzer E T, Kirkwood W J, et al. Unanticipated consequences of ocean acidification: A noisier ocean at lower pH. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19601, doi: 19610.11029/12008GL034913
- 8 Feely R A, Orr J, Fabry V J, et al. Present and future changes in seawater chemistry due to ocean acidification. *Geophys Monogr*, 2009, 183: 175–188

- 9 Riebesell U. Climate change—Acid test for marine biodiversity. *Nature*, 2008, 454: 46–47
- 10 Hönisch B, Hemming N G. Ground-truthing the boron isotope-paleo-pH proxy in planktonic foraminifera shells: Partial dissolution and shell size effects. *Paleoceanography*, 2004, 19: PA4010, doi: 4010.1029/2004PA001026
- 11 Sanyal A, Bijma J, Spero H, et al. Empirical relationship between pH and the boron isotopic composition of *Globigerinoides sacculifer*: Implications for the boron isotope paleo-pH proxy. *Paleoceanography*, 2001, 16: 515–519
- 12 Yu J M, Elderfield H, Hönisch B. B/Ca in planktonic foraminifera as a proxy for surface seawater pH. *Paleoceanography*, 2007, 22: PA2202, doi: 2210.1029/2006PA001347
- 13 Wei G J, McCulloch M T, Mortimer G, et al. Evidence for ocean acidification in the Great Barrier Reef of Australia. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 2332–2346
- 14 Dai M H, Lu Z M, Zhai W D, et al. Diurnal variations of surface seawater $p\text{CO}_2$ in contrasting coastal environments. *Limnol Oceanogr*, 2009, 54: 735–745
- 15 Fujii M, Chai F, Shi L, et al. Seasonal and interannual variability of oceanic carbon cycling in the western and central tropical-subtropical Pacific: A physical-biogeochemical modeling study. *J Oceanogr*, 2009, 65: 689–701
- 16 Jiang M S, Chai F. Physical control on the seasonal cycle of surface $p\text{CO}_2$ in the equatorial Pacific. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L23608, doi: 23610.21029/22006GL027195
- 17 Hauri C, Gruber N, Plattner G K, et al. Ocean acidification in the California current system. *Oceanogr*, 2009, 22: 60–71
- 18 Déath G, Lough J M, Fabricius K E. Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 2009, 323: 116–119
- 19 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 1160–1172
- 20 施祺, 余克服, 陈天然, 等. 南海南部美济礁 200 余年滨珊瑚骨骼钙化率变化及其与大气 CO_2 和海水温度的响应关系. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 71–82
- 21 Ridgwell A. A Mid Mesozoic revolution in the regulation of ocean chemistry. *Mar Geol*, 2005, 217: 339–357
- 22 Pearson P N, Palmer M R. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, 2000, 406: 695–699
- 23 Dore J E, Lukas R, Sadler D W, et al. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 12235–12240
- 24 Chen C T A, Wang S L, Chou W C, et al. Carbonate chemistry and projected future changes in pH and CaCO_3 saturation state of the South China Sea. *Mar Chem*, 2006, 101: 277–305
- 25 Feely R A, Sabine C L, Hernandez-Ayon J M, et al. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 2008, 320: 1490–1492
- 26 Cai W J, Hu X P, Huang W J, et al. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. *Nat Geosci*, 2011, 4: 766–770
- 27 Jiang Z P, Huang J C, Dai M H, et al. Short-term dynamics of oxygen and carbon in productive nearshore shallow seawater systems off Taiwan: Observations and modeling. *Limnol Oceanogr*, 2011, 56: 1832–1849
- 28 Cao Z M, Dai M H, Zheng N, et al. Dynamics of the carbonate system in a large continental shelf system under the influence of both a river plume and coastal upwelling. *J Geophys Res*, 2011, 116: G02010, doi: 02010.01029/02010JG001596
- 29 Cai W J. Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO_2 sinks or sites of terrestrial carbon incineration? *Annu Rev Mar Sci*, 2011, 3: 123–145
- 30 Guo X H, Dai M H, Zhai W D, et al. CO_2 flux and seasonal variability in a large subtropical estuarine system, the Pearl River Estuary, China. *J Geophys Res*, 2009, 114: G03013, doi: 03010.01029/02008JG000905
- 31 Dai M, Wang L, Guo X, et al. Nitrification and inorganic nitrogen distribution in a large perturbed river/estuarine system: The Pearl River Estuary, China. *Biogeosciences*, 2008, 5: 1227–1244
- 32 Dai M H, Guo X G, Zhai W D, et al. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River estuary during a winter drought. *Mar Chem*, 2006, 102: 159–169
- 33 雷汉杰, 陈镇东. Warming accelerates and explains inconsistencies in ocean acidification rates. *海洋科学年会会议摘要集*, 2012
- 34 唐启升, 苏纪兰. 海洋生态系统动力学研究与海洋生物资源可持续利用. *地球科学进展*, 2001, 16: 5–11
- 35 Gao K, Aruga Y, Asada K, et al. Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated CO_2 concentration. *Mar Biol*, 1993, 117: 129–132
- 36 王鑫, 王东晓, 高荣珍, 等. 南海珊瑚灰度记录中反映人类引起的气候变化信息. *科学通报*, 2010, 55: 45–51
- 37 Riebesell U, Zondervan I, Rost B, et al. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO_2 . *Nature*, 2000, 407: 364–367
- 38 Kurihara H. Effects of CO_2 -driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Mar Ecol-Prog Ser*, 2008, 373: 275–284

- 39 Zou D, Gao K, Xia J. Dark respiration in the light and in darkness of three marine macroalgal species grown under ambient and elevated CO₂ concentrations. *Acta Oceanol Sin*, 2011, 30: 106–112
- 40 Wu Y, Gao K, Riebesell U. CO₂-induced seawater acidification affects physiological performance of the marine diatom *Phaeodactylum tricorutum*. *Biogeoscience*, 2010, 7: 2915–2923
- 41 Li W, Gao K. A marine secondary producer respire and feeds more in a high CO₂ ocean. *Mar Pollut Bull*, 2012, 64: 699–703
- 42 陈雄文, 高坤山. CO₂浓度对中肋骨条藻的光合无机碳吸收和胞外碳酸酐酶活性的影响. *科学通报*, 2003, 48: 2275–2279
- 43 Havenhand J N, Buttler F R, Thorndyke M C, et al. Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin. *Curr Biol*, 2008, 18: R651–R652
- 44 Munday P L, Dixson D L, Donelson J M, et al. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 1848–1852
- 45 张旭光, 宋佳坤, 张国胜, 等. 食蚊鱼的生物电场特征. *水生生物学报*, 2011, 35: 823–828
- 46 Zhang X G, Herzog H, Song J K, et al. Response properties of the electrosensory neurons in hindbrain of the white sturgeon, *Acipenser transmontanus*. *Neurosci Bull*, 2011, 27: 422–429
- 47 Zhang X G, Song J K, Fan C X, et al. Use of electrosense in the feeding behavior of sturgeons. *Integr Zool*, 2012, 7: 74–82
- 48 高坤山. 海洋酸化正负效应: 藻类的生理学响应. *厦门大学学报*, 2011, 50: 411–417
- 49 Gao K, Xu J, Gao G, et al. Rising CO₂ and increased light exposure synergistically reduce marine primary productivity. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 519–523
- 50 Gao K, Zheng Y. Combined effects of ocean acidification and solar UV radiation on photosynthesis, growth, pigmentation and calcification of the coralline alga *Corallina sessilis* (Rhodophyta). *Global Change Biol*, 2010, 16: 2388–2398, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02113.x
- 51 Gao K, Ruan Z, Villafañe V E, et al. Ocean acidification exacerbates the effect of UV radiation on the calcifying phytoplankter *Emiliania huxleyi*. *Limnol Oceanogr*, 2009, 54: 1855–1862
- 52 Pörtner H O, Finke E, Lee P G. Metabolic and energy correlates of intracellular pH in progressive fatigue of squid (*L. brevis*) mantle muscle. *Am J Physiol-Reg I*, 1996, 271: R1403–R1414
- 53 Ishimatsu A, Hayashi M, Kikkawa T. Fishes in high CO₂, acidified oceans. *Mar Ecol-Prog Ser*, 2008, 373: 295–302
- 54 Rossoll D, Bermudez R, Hauss H, et al. Ocean acidification-induced food quality deterioration constrains trophic transfer. *PLoS One*, 2012, 7: e34737, doi: 34710.31371/journal.pone.0034737
- 55 Fabry V J, Seibel B A, Feely R A, et al. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES J Mar Sci*, 2008, 65: 414–432
- 56 Hall-Spencer J M, Rodolfo-Metalpa R, Martin S, et al. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 2008, 454: 96–99
- 57 Tatters A O, Fu F X, Hutchins D A. High CO₂ and silicate limitation synergistically increase the toxicity of *Pseudo-nitzschia fraudulenta*. *PLoS One*, 2012, 7: e32116
- 58 Sun J, Hutchins D A, Feng Y, et al. Effects of changing pCO₂ and phosphate availability on domoic acid production and physiology of the marine harmful bloom diatom *Pseudo-nitzschia multiseries*. *Limnol Oceanogr*, 2011, 56: 829–840
- 59 van de Waal D B, Verspagen J M H, Finke J F, et al. Reversal in competitive dominance of a toxic versus non-toxic cyanobacterium in response to rising CO₂. *ISME J*, 2011, 5: 1438–1450
- 60 Corbyn Z, Brewer P. Underwater aquarium. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 482–483
- 61 FAO. 世界渔业和水产养殖状况. 2012
- 62 国农业部渔业局. 2010年全国渔业经济统计公报. 2011
- 63 Kroeker K J, Kordas R L, Crim R N, et al. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecol Lett*, 2010, 13: 1419–1434
- 64 Narita D, Rehdanz K, Tol R S J. Economic costs of ocean acidification: A look into the impacts on global shellfish production. *Clim Change*, 2012, 113: 1049–1063

The effects of ocean acidification on marine organisms and ecosystem

TANG QiSheng^{1,2}, CHEN Chen-Tung Arthur³, YU KeFu⁴, DAI MinHan¹, ZHAO MeiXun⁵,
KE CaiHuan¹, Wong George T F⁶, CHAI Fei⁷, WEI GangJian⁸, ZHOU LiPing⁹, CHEN LiQi¹⁰,
SONG JiaKun¹¹, BARRY James¹², WU YaPing¹ & GAO KunShan¹

¹ State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

² Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

³ Taiwan Sun Yat-sen University, Kaohsiung 804, China;

⁴ South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

⁵ College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

⁶ Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica, Taipei 115, China;

⁷ School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME 04401, USA;

⁸ State Key Laboratory of Isotope Geochemistry Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China;

⁹ College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

¹⁰ Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China;

¹¹ Institute for Marine Biosystem and Neurosciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

¹² Monterey Bay Aquarium Research Institute, Moss Landing, CA 95039, USA

Ocean acidification is known as another global change problem caused by increasing atmospheric CO₂. Since the industrial revolution, the oceans have absorbed more than one third of the anthropogenic CO₂ released to the atmosphere, currently, at a rate of over 1 million tons per hour, totaling to about one quarter of all anthropogenic CO₂ emissions annually. Uptake of CO₂ by the ocean has played an important role in stabilizing climate by mitigating global warming. However, rising ocean carbon levels caused by the uptake of anthropogenic CO₂ (acidic gas) leads to increased ocean acidity (reduced pH) and related changes in ocean carbonate chemistry, or “ocean acidification”. Recent research has shown that ocean acidification affects the physiology, growth, survival, and reproduction of many, if not most marine organisms. Ultimately, future ocean acidification may lead to significant changes in many marine ecosystems, with consequential impact on ecosystem services to societies. Several ocean acidification events are known to have occurred during Earth’s history, each coinciding with high rates of species’ extinctions. Although the mechanisms involved in past massive species extinction associated with ocean acidification events, they certainly hint potential disastrous impacts on ecosystem functions in short future.

climate change, CO₂, ecological effects, marine chemical and physical processes, ocean acidification

doi: 10.1360/972012-1596