

海洋酸化的生态危害研究进展

陈清华, 彭海君

环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655

摘要 工业革命以来, 人类活动产生的巨量 CO_2 进入大气层, 不仅产生严重的温室效应, 也使得全球海洋出现酸化现象。海洋中氢离子浓度在最近 200 年里已经上升了 30%, 21 世纪内将再增加 3 倍, 到 22 世纪海洋将处于极端酸性环境。已有的报道显示, 酸化将对石灰化型生物造成非常严重的损害, 但海洋酸化对生态系统稳定和人类健康的影响需要长时间的观察和研究。本文总结了近年来有关海洋酸化研究的最新成果, 介绍了海洋中不同生态系统所受海洋酸化的影响方式和影响程度, 展望了未来研究的方向思路 and 对策。

关键词 海洋酸化; 生态系统; 钙化

中图分类号 X171.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0108-04

Ecological Impact of Ocean Acidification

CHEN Qinghua, PENG Haijun

South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China

Abstract Approximately one-half of the carbon dioxide (CO_2) produced by fossil fuel burning and cement production as a result of human activities during the past 200 years is being taken up by the oceans. This absorption process is chemically changing the oceans, in particular, increasing its acidity. It is reported that the uptake of CO_2 has led to a reduction of the pH value of surface seawater of 0.1 units, equivalent to a 30% increase in the concentration of hydrogen ions. If global emission of CO_2 from human activities continues to rise at the current rates, the average pH value of the oceans could fall by 0.5 units (equivalent to a three fold increase in the concentration of hydrogen ions) by the year 2100. This pH value would be lower than that has been experienced for hundreds of millennia and, critically, this rate of change is probably hundred times greater than at any time over this period. The evidence suggests that acidification of seawater would damage the calcifying organisms but it is unclear how that will affect stability of ecosystem and human health. The increasing fragility and sensitivity of marine

ecosystems need to be taken into consideration during the formulation of any policies about their conservation, sustainable use and exploitation, or the communities that depend on them. Actions need to be taken now to reduce global emissions of CO_2 to the atmosphere to avoid the risk of irreversible damage to the oceans. No option that can make a significant contribution should be ignored.

Keywords ocean acidification; ecosystem; calcification

0 引言

海洋占地球表面积的 2/3 以上, 它们在地球生物化学循环、维持生物多样性和保障数亿人口生存等方面扮演着重要角色。海洋源源不断地从空气中吸收 CO_2 , 导致其环境比以前更显酸性。在过去 200 年, 大量化石燃料燃烧和水泥生产过程中产生的 CO_2 中, 50% 被海洋吸收。根据已得到的测量结果及对海洋化学研究的认识, 海洋吸收的 CO_2 已经导致海洋表面的 pH 值下降了 0.12, 这相当于海水中氢离子 (H^+) 浓度上升了 30%^[1]。如果人类活动产生 CO_2 量依旧如此持续, 到 2100 年, 海洋平均 pH 值将会比现在再降低 0.5, 即从现在的 8.2 降到 7.7, 那时海水中 H^+ 浓度是现在的 3 倍。pH 值比数十亿年来都要低, 或者说将进入非常极端的海洋环境。而这种状况将持续数千年, 直到海水中的 CO_2 浓度开始降低。正如英国皇家协会最近所描述的, “海水 pH 值是海洋生态系统的关键因子, 即使细微变化都将对海洋化学产生深刻影响”^[2]。因此, 加强海洋酸化对生物群落和生态系统的影响研究, 显得非常

收稿日期: 2009-07-10

基金项目: 中央级公益性科研院所科研基金项目 (zx_200809_03)

作者简介: 陈清华, 工程师, 研究方向为近岸海域环境污染与控制, 电子信箱: chenqinghua@scies.org

重要而迫切,而中国至今仍未开展相关研究工作。本文总结了国外海洋酸化研究的最新成果,为海洋环境研究人员提供研究思路,并为相关管理部门提供管理对策,促进人与海洋环境的和谐发展。

1 背景资料

人类每年通过燃料燃烧、水泥生产、农业生产产生的 CO_2 量非常巨大,空气中的 CO_2 浓度从工业革命前的 $280 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到现在的 $380 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,并且其浓度将在 22 世纪甚至更长的时间里继续升高。据估算,到 2100 年,空气中的 CO_2 浓度将达到 $1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,此浓度大大超过数百万年来地球上的生物能够耐受的浓度水平。

人类现在一年中产生释放的碳量约为 71 亿 t,其中 25%~30%(约 20 亿 t)被海洋吸收,33 亿 t 在大气中积累。在过去 200 年里,海洋从大气中吸收的 CO_2 约有 5 250 亿 t。据预测,在接下来的一个千年中,全球海洋每年吸收的 CO_2 总量约为现在一年排放量的 90%^[2]。

有关海洋酸化对海洋生物和生态系统的影响等方面的研究工作开展得非常有限,但可以肯定的是,部分生物将会因其独特的生理特征而对海洋酸化产生比其他生物更敏感的反应(例如对环境的不适应甚至种群灭绝)。已有研究表明,海洋酸化将严重影响生物石灰化(calcification)过程,而石灰化是珊瑚和软体动物外壳形成的必要条件。因此,热带和亚热带地区的珊瑚将受到海洋酸化的严重影响,这也预示着暗礁(由珊瑚形成)的稳定性和寿命也将受到影响,以至于影响到栖息在这些环境的生物。

其他将受到影响的有石灰化过程的生物是浮游植物和浮游动物。这些生物是海洋中鱼类和其他动物的主要食物来源。由于是单细胞生物,浮游生物对外界环境变化极其敏感,部分海域的酸化(且这种酸化日趋严重而难以恢复)将不仅导致浮游生物群落结构、生物多样性产生重大变化,还将对海洋中其他生物群落甚至整个海域生态系统造成重大影响。

虽然 CO_2 在空气中显中性,但在海洋中却有一定的化学活性。 CO_2 溶于海水后,与水体中水分子形成弱酸—— H_2CO_3 。 H_2CO_3 向溶液中释放 H^+ 和 HCO_3^- ,有时还产生少量 CO_3^{2-} 。海水的酸性程度主要由氢离子浓度决定,而氢离子浓度则由 pH 值界定。氢离子浓度越高的溶液,其 pH 值越低^[3]。

2 海洋酸化的潜在影响

2.1 对石灰化过程的影响

海水中 CO_3^{2-} 的饱和度对海洋生物极为重要,因为 CO_3^{2-} 是通过石灰化形成石灰石并组成海洋生物的贝壳和骨架。这些有石灰化过程的海洋生物包括珊瑚虫、软体动物、棘皮动物、有孔虫类和含钙的藻类。外壳和骨架之所以不会溶解,是因为海洋表层水体有超饱和 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 。但是,当海水中因 CO_2 浓度升高而导致 pH 值下降时,碳酸盐浓度也会随之降低,并最终使得 CO_3^{2-} 处于不饱和状态,这种结果将严重影响石灰化

过程。

CaCO_3 在海洋生物的结构中以文石和方解石两种形式存在。海水中碳酸盐浓度降低时,文石比方解石更易于溶解,因此,那些以文石组成身体结构的生物对海洋酸化更敏感^[4]。

2.1.1 对珊瑚和珊瑚礁环境的影响

作为世界上多样性最丰富的生物群落,珊瑚礁占地球面积仅 0.17%,却为地球上 1/4 的生物提供了栖息环境。在太平洋地区,珊瑚礁是鱼类和其他海洋动物的主要栖息地,这些生物为太平洋岛屿国家提供了约 90% 的蛋白质来源,同时也为众多岛屿居民提供发展经济的主要机遇。据估计,珊瑚和珊瑚生态系统每年为人类创造的价值超过 3 750 亿美元,有超过 5 亿人依赖于健康珊瑚和珊瑚生态系统^[5]。珊瑚礁的大量减少将对环境和社会经济产生重大影响。世界银行的一份报告也指出,在珊瑚礁消失的地区,超过 50% 的水产资源将随之消失^[2]。

珊瑚被认为是受影响最大的类群。珊瑚体形成过程中需要文石型 CaCO_3 进行相关的物理、生理和化学过程,最后形成珊瑚礁。有过文献显示,在 HCO_3^- 开始离开超饱和状态时,珊瑚虫形成 CaCO_3 的速度也随之降低。海洋中 CO_2 浓度的上升导致海水 pH 值持续下降,最终将导致全球很多地方的珊瑚礁处于危险状态。

到 21 世纪中叶,海洋中碳酸盐浓度将下降至 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$,到那个时候,珊瑚礁被侵蚀的速度将超过珊瑚虫的石灰化速度,而这种状况会伴随大气和海水温度升高造成的负面影响同时出现,其后果是珊瑚和珊瑚礁生态系统遭受严重破坏和退化^[6]。到 21 世纪末,全球海洋中任何一个地方的珊瑚生长状况都难以保留现有状况。更严重的是,珊瑚虫的减少将导致一半或更多依赖珊瑚而生活/生存的动物群落的丰度降低甚至整个群落消亡。

2.1.2 对其他石灰化生物的潜在影响

尽管珊瑚是世界上海洋中最主要的石灰化生物,但它们的 CaCO_3 生成量只占海洋生物 CaCO_3 生成总量的 10%,70% 的 CaCO_3 主要由几个浮游生物类群产生,这些浮游生物包括球石藻、有孔虫类和翼足目生物,其中的很多种类都是海洋生态系统中极其重要的组成生物。

球石藻是单细胞浮游植物,主要存在于近岸水体和开放型海洋的表层。最近的研究结果显示,随着海洋 CO_2 吸收量的增加而导致的 pH 值下降,各种球石藻将处于危险境地^[2]。研究证明,如果海洋中 CO_2 的浓度达到现有水平的 2 倍,球石藻的表面将变成畸形;球石藻处于 3 倍现在 CO_2 浓度时,它们外表保护层将不复存在^[2]。同时,球石藻以其产生的特异有机材料沉积于水体底部,能为碳的矿化过程提供充足的材料。而海洋底部有机碳含量的下降将使海底生物的食物流降低^[1]。另外,生态系统中球石藻的减少可能导致控制硅藻的浮游植物群落的变动,而浮游植物又是各级营养水平的必要构成条件^[5]。可见,海洋酸化引起海水 pH 值下降导致的球石藻生理

及其群落结构的改变将对海洋生态系统造成非常大的破坏作用。

翼足目动物,又被称为海洋蝴蝶,它们是浮游型蜗牛类群。全世界共发现 32 种翼足目动物,其发育过程能产生文石。翼足目生物面临海洋酸化的威胁来自两个方面,第一是酸性条件下文石极易溶解,第二是在近极地海域中方解石的饱和度最低,导致文石浓度不断升高。当 CO_2 的释放量在现有增长速度下继续排放,2100 年时海洋表层的文石可能会达到饱和状态,导致海洋中翼足目生物的骨架不稳而难以生存。而翼足目群落稳定度下降将直接导致其竞争者取代其地位,引起生态系统结构和功能发生重大改变。

浮游动物有孔虫类属于单细胞的变形虫,部分物种的外壳是由碳酸钙质的方解石形成。对南半球海洋生物的研究显示,现存的有孔虫比几千年前的有孔虫类的外壳薄得多。大气中 CO_2 浓度若再增加一倍,将会使有孔虫类的石灰化速度下降 20%~40%。有孔虫类在分布和丰度上的改变将对全球碳循环产生重大影响。

棘皮动物是另一个受海洋酸化影响非常大的类群,它们是动物分类学上的一个门,包括海星、海胆和蛇尾类等三大类。棘皮动物特别容易受海洋酸化的影响,这是因为其身体中方解石结构中含有大量的镁元素,在 CO_2 浓度升高的情况下镁离子比文石更易溶解。研究表明,pH 值下降 0.3 达到 7.8 时,棘皮动物身体将受严重影响^[4]。

需要强调的是,5 500 万年前大量海洋石灰化生物的大灭绝或许就是由于海洋酸化和碳酸盐欠饱和有关^[17]。21 世纪的 CO_2 释放量将更趋严重,促使深海中碳酸盐加速分解,这会导致当今的海洋酸化更迅速而强烈。

2.2 对海洋生物的毒性效应

有关 CO_2 或酸化条件对海洋生物的潜在直接毒性效应,对海洋生物的石灰化过程的潜在影响,人们都知之甚少,但是有证据证明这些影响都将会发生。比如,一些鱼类会受到因为酸雨症导致的 pH 值下降的威胁,酸雨症使体液中碳酸增加而导致鱼类死亡。血碳酸过多症,即血液中 CO_2 过量,也是鱼类生存的威胁因素。研究表明,提高 CO_2 浓度,将导致日本琥珀鱼和褐牙鲷的死亡率上升^[9]。海洋 pH 值下降 0.5 或更多,海胆体内的酸基平衡将被干扰,这能导致海胆的死亡。头足类生物(如鱿鱼)特别容易受海洋中 CO_2 浓度上升的影响,因为它们的血液需要非常高浓度的氧气以补充游泳时消耗的能量。pH 值下降 0.25 的情况下氧容量将减少 50%,过低的 pH 值将降低这些物种的供氧能力。

3 未来研究需求和研究向政策的转化

越来越多的证据表明,海洋环境及生态遭受严重破坏的原因或许是因为人类活动释放的过量 CO_2 所引起海洋酸化所引起。但相关的研究工作还极其不够,这主要表现在缺乏提供长期试验的资金、缺乏为相关试验框架进行监测及现场模拟的资金。正如 Kurihara 等^[10]所言:“海洋酸化对生物和生

态系统影响的研究仍处于起步阶段”。

研究海洋酸化对生态系统的影响,关键的一点是扩大评估物种的范围。例如,尽管石灰化型浮游生物物种是海洋生态系统的基本组成部分,但迄今为止只有不到 2% 的物种被评估^[7]。现在需要优先考虑的是有壳翼足目生物和深海石珊瑚两类分泌文石的生物,进行相关试验评价海水在现有吸收 CO_2 速率条件下对过饱和 CaCO_3 的消溶影响。更宽的评价将有助于促进适时预防措施和潜在应对方法的开发和应用。

现阶段有关酸化研究中一个很大的限制条件是所有试验都是在实验室中进行的,这就涉及几个问题:第一,试验不能持续足够长时间评估物种遭受酸化条件威胁时是否能适应这种酸化环境,它们也不能采取物理调节或迁移等措施;第二,实验室的研究通常都只是集中于某个物种而非一个生物群落,所得结果不能用来评估酸敏感物种被更耐酸或对酸更迟钝的物种替代的可能性,而这种替代能够维持生态系统的完整性;第三,生态系统的缺失使评价酸化对营养的影响成为不可能,而营养功能是海洋生态系统中许多石灰化生物作为关键角色的构成条件。

相关试验必须评估气候变化导致的开放性水体温度升高与 CO_2 浓度升高之间对海洋生物的协同影响,其他潜在的协同因子(污染和捕捞等)也必须在研究加以考虑。

最后,酸化试验必须包括酸化对海洋石灰化型生物早期发育的潜在影响评估,这是因为,第一,生命的早期阶段通常对环境变化非常敏感;第二,大多数深海生物都有浮游的幼体阶段及此阶段的波动变化,以致对群落大小产生复杂影响。例如,桡足类动物的繁殖速率和幼体发育都对海水中 CO_2 浓度的增加非常敏感,而雌性个体在相应浓度条件下却不受影响。

证明海洋酸化对海洋生态系统其他方面造成的危害也有必要进行相关研究,这能为政策制定提供更详细且科学的资料。国际上已经有两个控制 CO_2 排放的基本框架:《联合国气候变化框架公约》和在其基础上签署的《京都议定书》。协议各方应为减排一揽子温室气体而承担相应义务^[2]。

如果 CO_2 引起的海洋酸化还会导致海洋生态系统产生额外更大风险的话,《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》的各协约方可以修正他们的目标,以集中精力减排 CO_2 。另一方面,各协约方应该制定自己的目标,也就是必须与气候变化做斗争,其他国际间的论坛或对话才会对此问题有更高的关注度。例如,联合国海洋公约法要求缔约国“阻止、降低并控制任何来源的海洋环境污染”,包括“通过陆地和/或空气排放有毒、有害物质尤其是持久性有毒有害物质”^[11]。很明显,人类活动释放的巨量 CO_2 进入海洋环境时已经成为了典型的有害物质。

4 结论

人类活动释放到空气中的 CO_2 被海洋吸收导致的海洋酸化,及其对环境、生态和经济发展的影响已经引起部分国

家和国际组织的重视,但相关工作才刚刚起步,还需要投入更多的人力、物力支持,各国政府也必须正视海洋酸化对海洋生态系统、对人类社会造成的潜在影响和危害,制定应对措施以及早预防,促进人类社会与海洋环境的和谐发展。

参考文献 (References)

- [1] Riebesell U. Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton [J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60: 719-729.
- [2] Burns W C G. Anthropogenic carbon dioxide emissions and ocean acidification: The potential impacts on ocean biodiversity [M]//Askins R A, *et al.* Saving Biological Diversity. Springer Science Business Media, 2008.
- [3] Doney S C. The dangers of ocean acidification [J]. *Scientific American*, 2006, 294(3): 58-65.
- [4] Miles H, Widdicombe S, Spicer J I, *et al.* Effects of anthropogenic seawater acidification on acid-base balance in the sea urchin *Psammechinus miliaris*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(1): 89-96.
- [5] Ingrid Z, Richard Z E, Björn R, *et al.* Decreasing marine biogenic calcification: A negative feedback on rising atmospheric pCO₂ [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15: 507-516.
- [6] Orr J C, Fabry V J, Aumont O, *et al.* Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms[J]. *Nature*, 2007, 437: 681-686.
- [7] Ruttimann J. Sick seas[J]. *Nature*, 2006, 442: 978-981.
- [8] Zachos J C, Röhl U, Schellenberg S A, *et al.* Rapid acidification of the ocean during the paleocene-eocene thermal maximum [J]. *Science*, 2005, 308: 1611-1615.
- [9] Ishimatsu A, Kikkawa T, Hayashi M, *et al.* Effects of CO₂ on marine fish: Larvae and adults[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60: 731-741.
- [10] Kurihara H, Kato S, Ishimatsu A. Effects of increased seawater pCO₂ on early development of the oyster *Crassostrea Gigas* [J]. *Aquatic Biology*, 2007, 1: 91-98.
- [11] United Nations. United Nations convention on the law of the sea[R]. Geneva: United Nations, 1982: 121.

(责任编辑 王芷)



2009建模、仿真与优化 国际学术会议

时间: 2009年12月26-27日
地点: 北京

主办单位
北京农业工程学会

协办单位
中国农业大学水利与土木工程学院
国际农业工程学会水土工程分会

电 话: 010-51528400
电子信箱: cmso2009@126.com